NUMO
原子力発電環境整備機構

地層処分事業の安全確保 2010

～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～

レビュー版
(Draft for Review)

2010 年 11 月

原子力発電環境整備機構

NUMO
原子力発電環境整備機構

地層処分事業の安全確保 2010

～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～

レビュー版
(Draft for Review)

2010 年 11 月

原子力発電環境整備機構

2010 年 11 月

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は，下記へお問い合わせください。

〒108-0014　東京都港区芝 4 丁目 1 番地 23 号　三田 NN ビル 2 階
原子力発電環境整備機構　技術部
電話 03-6371-4004（技術部）FAX03-6371-4102

©原子力発電環境整備機構
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2010

要約

原子力発電環境整備機構（以下，NUMO という）は，2000 年 10 月，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下，最終処分法という）に基づき，高レベル放射性廃棄物の地層処分を行う実施主体として設立された。その後，2007 年の同法改正に伴い，長半減期低発熱放射性廃棄物（以下，TRU 廃棄物という）の一部も地層処分の対象（以下，地層処分低レベル放射性廃棄物という）とされたことを受け，NUMO はこれを事業の対象に加えた。

また，最終処分法の改正を受け「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下，炉規法という）が併せて 2007 年に改正され，その後，2008 年には関係省令が制定されるなど，地層処分に関する国による安全規制の枠組みが整備された。

NUMO は，2000 年の設立以降，事業の安全な実施に向けて技術の整備に努めるとともに，今日までさまざまな立地・広報活動を展開してきたが，市町村からの応募を受け文献調査を開始する状況には至っていない。現在，NUMO は国や関係機関と連携して，総力を挙げて，文献調査開始に向けて国民への理解活動などに取り組んでいるところであるが，地層処分事業の安全性にかかわる問題への理解は必ずしも十分とはいえないと認識している。

このような状況を鑑みて，今後の立地・広報活動における地層処分の安全性に関する説明の技術的な拠り所として，NUMO では，2000 年の設立から 10 年の節目を迎えることを契機に，事業を推進するに当たって基本としてきた「安全確保構想」（安全確保に向けた取り組み方針）と「安全な地層処分を支える技術」について，国内外の関係する研究開発機関などの研究開発成果も取り込んで技術報告書として取りまとめ，「地層処分事業の安全確保 2010～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～」として公表することとした。以下に，本報告書の概要を示す。

Ⅰ．事業編の要約：安全確保構想

安全確保の目標

地層処分の究極的な目標は，処分場閉鎖後の遠い将来にわたって廃棄物が人間とその生活環境に有意な影響を及ぼさないようにすること（閉鎖後長期の安全確保）であるが，サイト調査から事業廃止までの事業期間中の地域住民や作業従事者の安全確保（事業期間中の安全確保）を図ることも重要であることから，以下の二つを地層処分事業で達成すべき安全性にかかわる目標として設定した。

- 閉鎖後長期の安全確保
- 事業期間中の安全確保

閉鎖後長期の安全確保という目標を達成するためには，放射性廃棄物を地下深くに閉じ込め，人間の生活環境から隔離することを基本とした。そのために，放射性廃棄物を安定な地下深部に埋設し，人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによって安全性を確保する。

このような閉じ込めと隔離を実現するためには，下記の三つの安全確保策を確実に実施する必要がある。

- 地層処分にとって適切な地質環境を選定し，建設段階以降はサイト選定時における評価の妥当性を確認する（適切なサイト選定と確認）

- 選定された地質環境に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する（処分場の設計・施工などの適切な工学的対策）
- 構築された地層処分システムの安全性を評価する（地層処分システムの長期安全性の評価）

事業期間中の安全確保のためには，サイト選定から事業廃止までの事業中の各段階において，地域住民や作業従事者の放射線安全および一般労働安全の確保を行う必要がある。

これらの安全対策については，一般の土木工事や原子力施設の建設・操業などで実績を有する安全対策を有効に活用すると同時に，地層処分の特殊性も考慮して，必要な技術開発を行う。なお，事業期間中の安全確保のために講じるさまざまな対策が，閉鎖後長期の安全確保に有意な影響を及ぼさないよう配慮する必要がある。また，地層処分事業においては，周辺環境へ十分な配慮をすることも必要であるため，事業期間中に実施するさまざまな活動が周辺環境に及ぼす影響を評価し，必要に応じて環境保全策を講じる。

安全確保の目標を達成するための方針とその実施方策

地層処分の長期的安全性は，上記の三つの安全確保策を確実に実施することにより確保できると考えられているが，100 年にわたる事業期間の中でこれらの安全確保策をどのように実施し，安全な地層処分システムを作り上げていくかが，事業者の視点として重要である。NUMO はこの点を考慮して，下記の三つの方針を提示した。

方針１：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進

方針２：信頼性の高い技術を用いた事業推進

方針３：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み

以下に，これらの安全確保の目標を達成するための方針とその実施方策を概説する。

(1) 方針１：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進

地層処分事業は，サイト選定の開始から処分場の建設・操業を経て最終的に処分場を閉鎖し，閉鎖後長期の安全性が担保された処分場を完成させるまでに約 100 年を要する長期にわたる事業である。しかし，長期間に起こりうる社会情勢の変化や，技術開発の進展などを，事業の初期段階から正確に見通すことは困難である。そこで，段階的に事業を推進することにより，地層処分システムの安全性を繰り返し確認しつつ，必要に応じて計画を修正し，将来の地層処分を取り巻く環境や条件の変化に柔軟に対応していく。

NUMO は，長期にわたる事業期間全体を俯瞰して，安全確保ロードマップを作成し，計画的に地層処分の安全性を確保し，社会情勢の変化にも柔軟に対応して合理的に事業を進める。安全確保に向けた取り組みの結果は，段階ごとに一連の文書群（セーフティケース）として取りまとめて公表し，処分場を受け入れていただく地元関係者や国民の理解を得ながら進める。

閉鎖後長期の安全性は，事業の進展に伴い段階的に拡充・詳細化される地質環境の情報や技術開発などにより得られた最新の知見に基づいて，信頼性を向上させていく必要がある。例えば，サイト選定段階においては，文献調査，地表からの調査を主体とした概要調査，地下の調査施設を利用した精密調査と進むに従い，段階的に地質環境に関する情報が質・量ともに充実し理解が深まる。これらの情報に基づき，不確実性の大きさなどを十分考慮した上で，処分場の設計と安全性の評価を繰り返し実施し，得られた結果を次段階の調査計画に反映することにより，地層処分の安全にか

かわる信頼性を段階的に高める。

地層処分では数万年以上の長期にわたる安全性を担保する必要があり，また地下を活用するため，一定の不確実性が存在することは避けられない。従って，最新の科学技術的知見を適切に活用するとともに，不確実性の残る部分についてはそれらを適切に考慮した上で安全性が確保されていることを示す。

一方，事業期間中の安全確保に関しては，事業段階ごとの安全対策と環境保全策の計画を策定し実行するとともに，各段階の実施途中において現場から得られる情報や最新の技術を活用することにより計画を適宜見直すことで，確実に安全を確保し、周辺環境への影響を回避・低減する。

これらの点を考慮し，以下の三つを方針１の実施方策とした。

- 事業全体を俯瞰した計画の策定
- 閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認
- 事業期間中の安全対策と環境保全

(2) 方針２：信頼性の高い技術を用いた事業推進

地層処分の安全性を確保するためには信頼性の高い技術を用いることが重要である。中でも地層処分に特有な技術（例えば，人工バリア搬送・定置技術など）については，その技術が必要となる時期までに，計画的に技術開発を進め，要素技術の開発とその統合化，研究施設（オフサイト）や精密調査の段階の地下調査施設（オンサイト）での実証試験を通じて，技術の実用化を進めることが重要である。一方，汎用的な技術（例えば，ボーリング調査技術など）については，他分野で実績のある技術も採用するが，その際には，必要に応じて適用性を確認した上で事業に用いる。

地層処分事業の実施に必要な技術は多岐にわたっており，また必要となる時期やその要求される到達レベルがそれぞれ異なる。そのため，事業の各段階で技術開発課題を体系的に整理し，技術開発ロードマップとして展開することにより，計画的かつ合理的に必要な技術の整備を行っていく。この技術の整備は，わが国の技術開発の枠組みに基づき，NUMO と基盤研究開発機関が適切に役割を分担し効率的に実施する。

地層処分の安全性を確保するためには，技術を整備することに加えて，整備された技術をいかに事業の中で用いるかという仕組みをつくり，それに従い運営を徹底することが重要である。NUMO は，ISO などの国際的な基準を参考にして，わが国の地層処分事業に適した品質保証体制を構築し運営していく取り組みを進めている。また，科学技術的な品質を保証するために，NUMO の委員会や学会などでのレビューを通して専門家の客観的評価を受け，情報の品質確保に努める。

以上の取り組みに加え，技術を実際に利用する NUMO の組織体制の整備と人材確保・育成や国内外の関係機関との技術協力を進めている。

これらの点を考慮し，以下の三つを方針２の実施方策とした。

- 計画的な技術の整備
- 技術に関する品質保証の的確な実施
- NUMO の組織および国内外協力体制の整備

(3) 方針３：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み

地層処分事業は，安全上考慮すべき期間が極めて長期にわたることなどから，世代間倫理の問題なども絡んだ，社会的にこれまで経験したことのない事業である。このため，事業を実施するに当

たっては，サイト選定から処分場閉鎖後の事業廃止に至るまでを段階に分け，それぞれの段階の節目ごとに国民や地域住民の理解を得ながら，着実に進めていくこととしている。このような活動を通した関係者の合意形成に基づく段階的意思決定を円滑に進めていくためには，それぞれの段階の意思決定に必要な情報を関係者に的確に提示し，その内容理解に向けて丁寧に説明していく必要がある。このような対応は，制度的側面，倫理的側面，技術的側面などの多岐にわたるものとなるが，ここでは技術面からの対応方策について基本的な考え方を示した。

地層処分の安全性や事業の実現性への信頼感醸成を図るためには，各段階の節目における意思決定の機会だけでなく，日ごろから，事業が安全に進められている事に関する情報に加え，地層処分の技術的信頼性に関するわかりやすい情報を関係者に提供し，さまざまな対話の機会を設けて，不安や疑問に誠実に対応していく必要がある。また，技術情報の公開は，信頼感醸成を図る上で継続的に取り組んでいくべき課題であり，実証試験やモニタリングデータの公開などについて積極的に進めていくことが重要である。

地層処分事業は，その事業期間中に技術の進展が期待できる一方，事業を取り巻く社会環境の変化が起こりうる。従って，例えば処分場閉鎖のあり方などを，現世代が今の時点で固定的に決めてしまうのではなく，将来世代がその時点における諸条件の中で意思決定するための選択肢を残しておく配慮も大切である。そのために，事業期間中に得られる記録を確実に保存し，参照できるようにしておくことで将来世代が適切な判断を行えるような環境整備を計画的に進めておく必要がある。

これらの点を考慮し，以下の三つを方針３に関する実施方策とした。

- 事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供
- 安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動
- 将来世代が適切な判断を行うための環境整備

また，これらの実施方策を段階的な事業推進の中でどのように展開していくかを信頼感醸成ロードマップとして提示した。

Ⅱ．技術編の要約：安全な地層処分を支える技術

安全な地層処分を支える技術については，事業の各段階で，その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いることが重要であり，必要な時期までに必要なレベルで準備が整うよう，NUMO は 2000 年の設立以降，基盤研究開発機関との役割分担のもと，計画的に技術開発を進めている。

NUMO は地層処分の安全な実施と経済性および効率性の向上などを目的とした技術開発を進め，基盤研究開発機関は深地層の研究施設などを活用して，深地層の科学的研究や，地層処分技術の信頼性向上，安全評価手法の高度化などの基盤的研究を実施している。

本報告書では，「第 5 章　地質環境の調査・評価技術」，「第 6 章　処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術」，「第 7 章　地層処分システムの長期安全性評価技術」において，2000 年以降の技術の進展について，具体的に示した。さらに第 8 章では，第 5 章，第 6 章，第 7 章で述べた各専門分野の技術がどのように連携して作業を進め，どのように情報を統合化して処分場概念を構築するかを，精密調査地区選定段階を事例として示した。

技術の整備状況を取りまとめる際には，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進･資金管理センター，産業技術総合研究所，電力中央研究所，放射線医学総合研究所，電気事業連合会，日本原燃株式会社などの関係機関の協力を得て，最新の技術開発成果を取り入れた。

1. 地質環境の調査・評価技術の進展

第２次取りまとめ[1]においては，地層処分概念の成立に必要な条件を満たす地層がわが国に広く存在し，特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発されたことが示された。NUMOは，2000 年以降，概要調査地区選定ならびに精密調査地区選定に向けて，サイトの地質環境の調査・評価手法の体系的な整備を進めた。一方，これと並行して，NUMOおよび基盤研究開発機関が中心となり，地質環境にかかわる情報の整備や，調査・評価体系を構成するさまざまな手法の改良・高度化を進め，調査・評価技術の信頼性を向上させた。さらに，概要調査の調査・評価業務を円滑に進めるために，支援技術の整備を行った。以下に，主要な技術の進展について概説する。

(1) 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術の進展

わが国は変動帯に位置するため，処分施設建設地として選定されるサイトに対しては，将来にわたり火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食などの自然現象による著しい影響を回避できる場所であることが求められる。第２次取りまとめなどでは，将来 10 万年程度の自然現象の将来予測が可能であることを論じた。これに対し，NUMO では，さらに長期の安全評価の可能性も考慮し，自然現象の将来予測の考え方を整理した。さらに，これを踏まえて，2000 年以降の研究の進展を取り込んだ調査・評価の進め方を示した。

自然現象の将来予測については，事象ごとおよび地域ごとに異なる情報の量・精度，そして，地質構造の発達過程を考慮し，予測に用いる仮定を明らかにした上で，10 万年程度あるいはそれ以上の適切な期間について外挿などの方法により行う。

火山・火成活動の調査・評価技術については，ホットフィンガーモデルに代表される火山分布の規則性・偏在性にかかわる新知見がもたらされ，また，地震波トモグラフィなどの深部のマグマを捉える地球物理学的な手法が発達した。さらに，非火山性の熱水の熱源の解明・評価が進展した。これらにより，火山・火成活動の著しい影響を回避するための技術の信頼性が向上した。

地震・断層運動については，既存の活断層に関する情報と近年実際に起こった地震の位置・規模の乖離が見られたことを背景に，地形学，地質学，測地学，地球物理学の各分野で，活断層の検出にかかわる手法の開発あるいは既存手法の高度化が行われた。さらに，これらの技術を組み合わせた総合的な調査・評価手法の開発が進められている。これらにより，変位地形が不明瞭な活断層や伏在活断層を検出する技術などが向上した。

隆起・沈降運動の評価では，長期の将来予測に向けて，隆起・沈降運動を面的に捉えることが重要である。このため，内陸部の隆起運動を捉える手法とそれを支える地質年代測定にかかわる技術の高度化が進められ，隆起量評価の信頼性が向上した。一方，侵食の評価については，シミュレーション技術を取り入れた地形変化モデルの開発，地質年代測定を応用した原位置の侵食速度測定技術の開発が進められた。

NUMO は，立地地点の地質環境の条件に応じて，既存の技術にこれらの進展した技術を適切に組み合わせ，的確な調査・評価を実施することができるようになった。

---

1 わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－（核燃料サイクル開発機構，1999）

(2) 地質環境特性にかかわる調査・評価技術の進展

自然現象による著しい影響を回避できることを確認した上で，地質・地質構造，地下水の流動特性や化学特性，岩盤特性などの地質環境特性を把握するとともにそれらの長期変遷を評価し，処分場の設計・施工などの適切な工学的対策および地層処分システムの閉鎖後長期安全性の評価に必要な情報を提供する。そのために，地質環境特性に関する情報を取得し，地質環境モデルを構築する。NUMO は，そのための調査・評価の体系を整備した。

地質環境特性に関する調査･評価技術の開発は，第２次取りまとめで示された基本的な技術を，わが国の多様な地質環境に対応させることを目標に進められてきた。国の基盤研究開発を中心に，JAEA の瑞浪および幌延の深地層の研究施設建設にかかわる調査研究において，結晶質岩および堆積岩を対象とした調査・評価技術の適用性の確認が進められており，NUMO の調査・評価に反映可能な多くの知見が得られた。また，2007 年度からは，沿岸域を対象とした調査技術の開発が実施されており，沿岸域特有の調査･評価手法についての知見が蓄積されつつある。NUMO は，これらの先行的な研究成果を集約するとともに，ボーリング調査を主体とした実証的な研究などを通じて，一連の調査・評価技術の適用性の確認を行い，多様な地質環境を対象として，調査･評価を実施するための準備を進めている。

(3) 地質環境の調査・評価業務を円滑に進めるための支援技術の整備

文献調査・概要調査を効率的かつ的確に実施するために，着手前に計画の基本的な考え方や進め方を関係者の間で十分に共有すること，そして調査実施中に工程などを的確に管理することが重要である。このため，NUMO は，「文献調査マニュアル」，「概要調査計画立案マニュアル」，「概要調査施工管理マニュアル」を整備した。さらに，サイト調査・評価結果の追跡性・透明性を確保するための支援ツールとして，NUMO 地理情報システム，地質環境データ管理システム，文献調査システムフローなどを整備した。

以上のように，実際のサイトを対象として適切な文献調査および概要調査を行うために，わが国の多様な地質環境に対応できる体系的な調査・評価技術を整備した。また，個々の新しい知見や調査・評価手法を取り込むことにより，調査・評価技術の信頼性が向上している。

2. 処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術の進展

第２次取りまとめや第２次TRUレポート[2]などでは，わが国における幅広い地質環境における高レベル放射性廃棄物処分と地層処分低レベル放射性廃棄物処分について，処分施設や人工バリアの機能や設計要件，設計や建設・操業・閉鎖の基本的な考え方や手順が示された。NUMOは，2000 年以降，それらを踏まえ事業者の立場で，事業を進めるために必要となる工学的対策の検討を深めている。以下に，主要な技術の進展について概説する。

(1) 地層処分の安全機能と技術要件の整備

2000 年以降の国際基準の整備や技術の進展に基づいて，閉鎖後長期の安全確保に向けた工学的対

[2] TRU 廃棄物処分技術検討書－第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－（電気事業連合会･核燃料サイクル開発機構，2005）

策上の要件を更新した。閉鎖後長期の安全確保のために必要な技術要件については,「閉鎖後閉じ込め」,「隔離」といった安全確保の基本概念に基づいて，基本的な安全機能と処分場構成要素との関連付けを行った上で，構成要素ごとに安全機能を満足するように技術要件を体系的に整備した。これにより地質環境の調査・評価の進展に応じて，個々の地点に対する技術要件を明確化して設計に反映していく準備を整えている。

(2) 候補母岩の評価の考え方と処分場の設計

処分場の設計について，地質環境の調査・評価からの情報を受けて，まず取り組むのが，処分場に適した候補母岩の選定である。この検討は，サイト選定の初期の段階における事業者としての重要な意思決定事項であるとの認識に立ち，NUMO は，地質・地質構造，地質の長期安定性，地下水流動，地下水化学，空洞の力学的安定性や廃棄体発熱特性などを考慮した候補母岩の評価の考え方を示し，その基本的な評価技術を体系的に整備した。

(3) 建設・操業・閉鎖の安全性と工程計画の実現性の向上の取り組み

処分場の建設・操業・閉鎖に適用する基本的な技術や手順は，第２次取りまとめなどで示されている。これに対して，NUMO は事業者として，ガラス固化体 4 万本の処分場規模に対し，建設工程（建設開始から操業開始まで 10 年）や操業工程（年間 1,000 体のガラス固化体を処分）を実現するための課題の分析を行い，最も重要な工程における問題を解消するための手順や方法の検討を行ってきた。処分孔掘削やずり出しといった建設技術の効率化に関する検討，あるいは人工バリアの品質の信頼性向上と地下での操業作業を軽減するための検討を実施した。それらの検討の中で，人工バリア要素を予め地上施設で一体型のモジュールに組み上げた上で搬送・定置する PEM（Prefabricated Engineered barrier system Module）方式を従来の原位置での施工・定置方式に加え，有力な工学的対策として位置付け，その実現性に関する検討などを進めている。また，事業期間中の安全確保のうち，操業安全については，安全対策の多重化を基本とした検討を行うとともに，事業期間中の安全確保のために必要な工学的対策については，閉鎖後長期の安全性に影響を及ぼさないように，材料などに関する検討を行っている。

(4) 多様な地質環境に対応した工学技術の整備

NUMO は，サイトの地質環境を特定せず多様な地質環境を想定し，処分場の設計，建設・操業・閉鎖に関する技術の整備を進めてきた。また，サイト選定の初期の段階における設計を効率的に実施することを目的として，わが国の多様な地質環境へ対応できる設計手法の確立を目指した検討を行ってきた。特に，周囲を海に囲まれたわが国の地理的条件も踏まえ，沿岸域における地質環境を地下水流動場や地下水化学環境などの観点から設計上の特徴や留意点を整理し，サイトに適した処分場の設計を行う準備を整えている。

また，多様な地質環境に対応できるよう廃棄体の定置方式や適用する操業技術のオプションを整備してきた。例えば，処分孔竪置き定置方式，処分坑道横置き定置方式について，作業性や現状技術の到達レベルなどの観点から特徴や課題を整理するとともに，現実の地下環境において想定される条件（湧水，高湿度環境，岩盤強度の局所的な脆弱性など）を考慮し，特に操業環境の維持の観点から，より現実的な検討を行い，廃棄体の定置方式や適用する操業技術のオプションの高度化を図っている。

(5) 基盤研究開発による工学技術の整備

工学技術については, 2000 年以降, 国の基盤研究開発機関と連携して技術開発が進められており, 技術の信頼性や安全性に関する知見が着実に向上している。人工バリアの仕様を設定する上では, 選定されたサイトの地球化学特性や人工バリア間の相互作用を考慮することが重要であり, オーバーパックの腐食形態や放射線影響, 塩水環境における緩衝材の特性, 緩衝材とセメントや鉄との相互作用などについての理解が進展している。建設・操業・閉鎖にかかわる技術開発としては, オーバーパックの遠隔溶接や検査技術, 人工バリアの製作・搬送・定置技術の実証に向けた要素試験が進められている。

以上のように, 多様な地質環境に対応した処分施設のより現実的な設計手法を整備しており, PEM 方式などの有望な技術オプションの整備や技術開発の進展により, 建設や操業の効率化が可能となっている。また, 人工バリアの長期挙動や相互作用に関する理解が進展し, 人工バリアの設計技術の信頼性が向上している。

3. 地層処分システムの長期安全性の評価に関する技術の進展

第２次取りまとめや第 2 次 TRU レポートにおいては, 具体的な地質環境を特定せず, わが国の一般的な地質環境条件を想定して, 高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物を対象として, 処分システムの安全性を保守的かつ総合的に評価した。NUMO は, 設立以降, セーフティケースの作成や地質環境の調査・評価および工学的対策との連携といった事業者の観点から, 長期安全性を評価するための考え方の整備を進めてきた。また, 基盤研究開発機関においては, 具体的な地質環境を対象として長期安全性を評価するための技術基盤の整備を進めてきた。以下に, 主要な技術の進展について概説する。

(1) シナリオ構築手法の整備

事業段階の長期安全性評価においては, 地質環境の多様性を想定しておくことに加え, サイトが有する地質環境の長期変遷を適切に取り込むことが必要である。例えば, 沿岸域においては, 内陸部に比べ, 海水の影響や塩淡境界の分布の時間的な変遷を, 海水準変動および隆起・侵食と関係付けながら考慮する必要がある。これらの影響をより現実的に取り扱い, 安全評価のためのシナリオを構築するための手法を開発した。

また, 地層処分事業は長期にわたることから, 関連する種々の科学的な知見が段階的に拡充されることが想定される。このため, 事業者としては, それらの知見を整理するとともに, それらを適切に安全評価に取り込めるようにしておく必要がある。そこで, 安全機能に基づくトップダウン的なシステムの理解に着目し, ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオを構築するための手法を開発した。

(2) 核種移行解析モデルの整備

上述した沿岸域における特徴を踏まえ, 水理および地下水の水質の変遷に着目した天然バリアの核種移行および生物圏を評価するためのモデル化技術を整備した。

また, 処分場の設計においては, 廃棄体の定置方式やプラグの設置などのさまざまなオプション

が想定される。このため，安全評価においては，これらの特徴が長期安全性に与える影響をより現実的に評価できるようにするため，三次元の核種移行解析モデルを開発した。

(3) 核種移行パラメータ設定技術の整備

長期安全性評価の信頼性を確保するためには，地質環境の多様性や長期変遷を考慮した上で，核種移行パラメータを適切に設定することが重要である。2000 年以降，基盤研究開発機関は，さまざまなデータベース（熱力学データベース，収着データベース，拡散データベース，ガラスの溶解に関するデータベース，環境移行データベースなど）の開発・更新を行った。さらには，整備されたデータベースを用いたパラメータの設定手法についても検討が進められ, NUMO が核種移行解析を行う際に必要となる基盤的情報が強化された。

以上のように，地質環境の多様性や長期変遷，およびさまざまな設計オプションを考慮したより現実的な安全評価技術を整備した。また，核種移行データ設定にかかわる情報整備が強化されるなど，地層処分事業における長期安全性評価技術の信頼性が一段と向上している。

4. 処分場概念の構築における安全確保策の連携

NUMOでは，段階的に事業を進める中で，第 5 章から第 7 章で述べた，地質環境の調査・評価技術，処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術，地層処分システムの長期安全性の評価技術の三つの分野を連携して各々の分野で得られた情報を統合し，安全性はもとより，経済性などの事業を進める観点も加えて，処分場概念[3]を構築する必要がある。このため，以下に示すように，サイト選定段階における処分場概念の構築における三つの分野の連携の考え方とその支援システムを開発するなど，精密調査地区選定段階における連携の進め方を体系的に整備した。

(1) 安全確保策の連携と統合化による処分場概念の構築への取り組み

NUMO は，長期間にわたり段階的に進められる地層処分事業において，質的，量的に進展する地質環境の情報を反映して，処分場の設計や安全評価を体系的かつ柔軟に行い，サイトの地質環境に適合した処分場概念を構築するための基本的な進め方と具体的な方法論の開発を進めてきた。例えば, 技術開発成果の実用化, 高度化の試みとして, 処分場概念オプションの整備に力を入れてきた。今後，文献調査が始まれば，地質環境の調査・評価技術，処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術，地層処分システムの長期安全性の評価に関する技術の三つの分野が連携して得られた情報を統合し，技術の実証による適用性の確認などを進め，さらに経済性の観点からの評価も踏まえて，その結果を統合化し，処分場概念を構築する。

(2) 安全確保策の連携のポイント

三つの分野の連携のポイントは, 連携する分野間での情報共有とその枠組みの整備が挙げられる。例えば，設計や安全評価に必要な地質環境特性の調査項目を，調査計画の策定に反映することによ

[3] 地層処分施設とその立地点におけるサイト環境条件を合わせた，処分場についての包括的な概念。地層処分施設の設計仕様やレイアウト，建設・操業・閉鎖やモニタリングの方法，事業期間中の安全対策および閉鎖後の長期安全性，品質保証，環境影響や社会経済的側面などに関する概念を含む。

り，サイト調査を効率よく実施できると考えている。また，処分場概念構築の支援システムとして，処分場概念構築システムや要件管理システムを開発している。

(3) 精密調査地区選定段階の実施項目における連携の試行的な検討

処分場概念構築における連携の考え方の例として，精密調査地区選定段階の概要調査計画の策定，地質環境モデルの構築，候補母岩の評価について，検討事例を交えながら示した。例えば，母岩の評価は，天然バリアとしての母岩の特性と処分環境としての場の理解と，人工バリアなどの具体的な工学的対策とを併せて考えるべきことを述べた。最終的には，安全評価，工程・経済性の評価を加えた総合評価により母岩の適性を評価する考え方を示した。

以上のように，文献調査および概要調査の開始に向け，処分場概念の構築のための基本的な考え方と関連する技術を整備した。

結　論

地層処分に関する国による安全規制の枠組みが整備され，事業を安全に推進していく仕組みが確立されている。NUMO は，国の安全規制のもとで，安全確保構想に基づき，地層処分事業全体を俯瞰した上で，事業を安全に実施する。

安全な地層処分を支える技術は，NUMO が設立された 2000 年以降，以下の点で着実な進展を見せている。

① 実際に調査を行いサイト選定するための技術が体系的に整備された
② 調査・設計・評価において多様な地質環境に対応が可能となった
③ より現実的な調査・設計・評価を行うなど技術の信頼性が向上した

その結果，当面の概要調査地区選定段階とその次の段階である精密調査地区選定段階の実施事項を支える具体的な技術の準備が整うとともに，処分場の閉鎖までに必要となる技術について実現可能な見通しが得られた。

これらのことから，わが国において安全な地層処分実現に向けて事業を着実に進めるための準備は十分整っており，その方法は確立しているといえる。

今後は，サイト固有の課題や，処分施設建設地選定段階以降に必要となる技術を中心に，一層の信頼性の向上を目指し，基盤研究開発機関と緊密に連携し技術開発に取り組んでいく。

目 次

第1章 はじめに 1-1

第2章 わが国における地層処分事業の背景 2-1
2.1 原子力の利用と特定放射性廃棄物の発生 2-1
2.1.1 わが国の原子力発電と核燃料サイクルの概要 2-2
2.1.2 放射性廃棄物 2-3
2.2 地層処分の概要 2-7
2.2.1 地層処分の選択と固有の課題 2-7
2.2.2 地層処分に関する放射線防護原則 2-7
2.2.3 わが国における地層処分事業の進展 2-10
2.2.4 わが国の地層処分事業の特徴 2-15
2.3 諸外国の取り組み状況 2-20

第3章 安全確保構想 3-1
3.1 安全確保の目標 3-2
3.1.1 安全確保の考え方と目標設定 3-2
3.1.2 閉鎖後長期の安全確保 3-3
3.1.3 事業期間中の安全確保 3-10
3.1.4 事業期間中と閉鎖後長期の安全確保の両立 3-11
3.2 安全確保に向けたNUMOの方針 3-12
3.2.1 目標を達成するための方針策定 3-12
3.2.2 方針１「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」 3-13
3.2.3 方針２「信頼性の高い技術を用いた事業推進」 3-24
3.2.4 方針３「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み」 3-36
3.3 地層処分事業にかかわる個別課題に対するNUMOの考え方 3-43
3.3.1 地層処分事業におけるリスクマネジメント 3-43
3.3.2 モニタリング 3-44
3.3.3 可逆性と回収可能性 3-46
3.3.4 処分場の閉鎖 3-49

第4章 地層処分事業の段階的な推進 4-1
4.1 方針の具体的展開（ロードマップ） 4-1
4.1.1 基本的考え方 4-1
4.1.2 方針１の具体的展開（安全確保ロードマップ） 4-7
4.1.3 方針２の具体的展開（技術開発ロードマップ） 4-17
4.1.4 方針３の具体的展開 4-26
4.2 事業中の各段階における実施事項 4-28
4.2.1 サイト選定および安全審査の段階 4-28

4.2.2 建設～事業廃止までの段階 4-40

第5章 地質環境の調査・評価技術 5-1
5.1 わが国の地質環境の特徴と評価に対する考え方 5-1
5.1.1 自然現象の影響と将来予測 5-1
5.1.2 わが国の地質環境特性と多様な地質環境への対応 5-11
5.2 調査・評価の技術体系 5-16
5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方 5-16
5.2.2 自然現象の影響にかかわる調査・評価 5-23
5.2.3 地質環境特性にかかわる調査・評価 5-45
5.2.4 調査・評価業務を支援する技術 5-56
5.3 調査・評価技術の整備 5-67
5.3.1 調査・評価技術の進展 5-67
5.3.2 調査・評価技術の確認 5-106
5.3.3 課題と今後の技術開発 5-111
5.4 まとめ 5-117

第6章 処分場の設計と建設・操業・閉鎖 6-1
6.1 地層処分事業における設計の基本方針 6-6
6.1.1 段階的な設計の進め方と技術・知識の進展と成果の反映 6-1
6.1.2 不確実性への対処 6-3
6.1.3 品質保証の考え方 6-4
6.2 処分場の安全機能と技術要件 6-6
6.2.1 安全機能と技術要件の体系的な整備の枠組み 6-6
6.2.2 閉鎖後長期の安全確保の要件 6-7
6.2.3 事業期間中の安全確保の要件 6-21
6.2.4 事業の進展に伴う安全機能と技術要件の更新 6-28
6.3 処分場の設計 6-29
6.3.1 基本的な設計の流れ 6-29
6.3.2 人工バリアの設計 6-32
6.3.3 地下施設の設計 6-35
6.3.4 地上施設の設計 6-46
6.3.5 高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合の留意点 6-48
6.4 処分場の建設・操業・閉鎖 6-51
6.4.1 処分場の建設 6-51
6.4.2 処分場の操業 6-56
6.4.3 処分場の閉鎖 6-62
6.4.4 事業期間中の安全確保 6-64
6.4.5 閉鎖後長期と事業期間中の安全性両立の観点からの分析 6-69

6.5 多様な地質環境への対応 6-72
6.5.1 沿岸域への対応 6-72
6.5.2 想定される地質環境特性へ対応するための処分概念・技術オプション 6-79
6.6 工学的対策を支える技術の整備 6-99
6.6.1 工学的対策を支える技術の概要 6-99
6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況 6-101
6.6.3 地層処分施設の耐震性評価 6-119
6.6.4 建設・操業・閉鎖技術 6-122
6.6.5 工学的対策を支える技術に対する今後の課題 6-138
6.7 まとめ 6-140

第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術 7-1
7.1 基本的考え方 7-2
7.1.1 セーフティケースへの反映 7-2
7.1.2 地質環境の調査・評価および処分場の設計との連携 7-4
7.1.3 不確実性への対応 7-8
7.2 安全評価の進め方 7-12
7.2.1 基本的手順 7-12
7.2.2 シナリオ構築のアプローチ 7-14
7.2.3 モデル開発とデータセットの整備 7-21
7.3 安全評価を支える技術の整備 7-34
7.3.1 安全評価に関する技術開発 7-34
7.3.2 シナリオ開発に関する取り組み 7-39
7.3.3 核種移行解析モデル開発に関する取り組み 7-72
7.3.4 核種移行パラメータ設定に関する取り組み 7-92
7.3.5 今後の課題 7-94
7.4 まとめ 7-95

第8章 処分場概念の構築における安全確保策の連携 8-1
8.1 処分場概念の構築における安全確保策の連携と統合化の基本的考え方 8-1
8.1.1 段階的な処分場概念の構築の進め方 8-1
8.1.2 三つの安全確保策の連携と統合化の進め方 8-3
8.1.3 処分場概念構築の支援システムの開発 8-5
8.2 精密調査地区選定段階における安全確保策の連携の進め方 8-8
8.2.1 閉鎖後の長期安全性確保の考え方と概要調査計画の策定 8-9
8.2.2 地質環境モデルの構築と更新 8-11
8.2.3 候補母岩の評価・選定 8-13
8.2.4 工学的対策の検討と安全評価の連携 8-21
8.2.5 安全評価の役割 8-24
8.2.6 処分場概念の構築 8-25

8.2.7 精密調査計画の策定 8-26
8.3 まとめ 8-26

第9章 おわりに 9-1

用語集 用語集-1

図目次

図 2.1-1　発電電力量の構成（2009 年度） 2-1
図 2.1.1-1 わが国の原子力発電所 2-2
図 2.1.1-2 核燃料サイクル 2-3
図 2.1.2-1 放射性廃棄物の処分方法の概念図 2-6
図 2.1.2-2 第一種特定放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物）および第二種特定放射性廃棄物（地層処分低レベル放射性廃棄物）のイメージ（形態） 2-6
図 2.2.3-1 TRU 廃棄物のグループ分類と特徴 2-13
図 2.2.4-1 三段階のサイト選定過程 2-16
図 2.2.4-2 地層処分場の地下施設の例 2-19
図 2.2.4-3 高レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成 2-20
図 2.2.4-4 地層処分低レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成 2-20
図 3.1.1-1 安全確保構想の全体構成 3-2
図 3.1.4-1 閉鎖後長期の安全性確保と事業期間中の安全確保の要件両立の考え方 3-12
図 3.2.2-1 要件管理システム 3-16
図 3.2.2-2 知識マネジメントシステムの概念 3-17
図 3.2.2-3 知識マネジメントシステムの構成 3-17
図 3.2.2-4 サイト選定段階で提示するセーフティケースにかかわる文書のイメージ 3-20
図 3.2.2-5 三段階の調査と平行した環境配慮の取り組みの手順 3-23
図 3.2.3-1 技術開発スケジュールと基盤研究開発との関連 3-25
図 3.2.3-2 技術開発課題の体系的整理 3-26
図 3.2.3-3 NUMO の技術開発と基盤研究機関における相互補完的な分担 3-27
図 3.2.3-4 基盤研究開発機関と緊密に連携した技術開発の取り組み 3-28
図 3.2.3-5 QMS 文書の階層構造および基準，要領書および標準様式集の構成 3-32
図 3.2.3-6 事業期間中の技術要員見通し 3-34
図 3.2.3-7 地層処分事業の国際的な協力 3-36
図 3.2.4-1 高レベル放射性廃棄物についての不安（一般の方，回答者数約 1,400 名） 3-40
図 3.2.4-2 学習の場の設計と周辺技術整備 3-42
図 3.3.1-1 ISO31000 におけるリスクマネジメントの原則，枠組み，プロセスの関係 3-44
図 3.3.3-1 処分場の建設，操業，閉鎖措置の区分概念図 3-48
図 3.3.3-2 回収可能性に関する NUMO の基本的考え方 3-49
図 3.3.4-1 処分場の閉鎖に向けた技術的な情報の集約 3-50
図 4.1.1-1 地層処分事業の段階的な展開 4-1
図 4.1.1-2 三つの専門分野間の連携・統合 4-2
図 4.1.1-3 安全確保の三つの方針と事業全体の意思決定の枠組み 4-3
図 4.1.1-4 ロードマップの関係図 4-4
図 4.1.1-5 事業各段階における専門分野間の連携 4-5
図 4.1.1-6 精密調査地区選定に至る意思決定の枠組み例 4-6
図 4.1.1-7 各段階での意思決定と段階間の各分野の連携 4-7

図 4.1.3-1 技術開発ロードマップの構成 4-18
図 4.1.3-2 技術開発ロードマップ（概要版） 4-19
図 4.1.3-3 技術開発ロードマップ（適切なサイト選定と確認：関連技術の開発） 4-23
図 4.1.3-4 技術開発ロードマップ（適切な工学的対策：関連要素技術の開発） 4-24
図 4.1.3-5 技術開発ロードマップ（地層処分システムの安全性評価：閉鎖後長期の安全性と事業期間中の安全性） 4-25
図 4.1.4-1 安全性への信頼感醸成のロードマップ 4-27
図 4.2.1-1 概要調査地区選定段階における実施フロー図 4-30
図 4.2.1-2 精密調査地区選定段階における実施フロー図 4-34
図 4.2.1-3 処分施設建設地選定段階（地上からの調査）における実施フロー図 4-37
図 4.2.1-4 処分施設建設地選定段階（地下施設での調査）における実施フロー図 4-39
図 5.1.1-1 自然現象と地質環境への影響の関係 5-2
図 5.1.1-2 自然現象の変動様式 5-4
図 5.1.1-3 過去から現在までの変動の解明の基本的な流れ（隆起運動の例） 5-6
図 5.1.2-1 日本列島の地質分布 5-12
図 5.1.2-2 わが国の地質環境の基本的な分類 5-13
図 5.1.2-3 深地層の研究施設（JAEA の施設）の計画 5-14
図 5.1.2-4 沿岸域におけるサイト調査と特徴的な現象 5-14
図 5.2.1-1 文献調査および概要調査の流れ，調査や情報の連携・共有化 5-17
図 5.2.1-2 統合化データフローダイアグラム 5-18
図 5.2.1-3 概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ 5-20
図 5.2.1-4 概要調査における段階的なアプローチのイメージ（2 フェーズの例） 5-21
図 5.2.2-1 火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れ（検討例） 5-26
図 5.2.2-2 火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れ（検討例） 5-30
図 5.2.2-3 地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ（検討例） 5-36
図 5.2.2-4 隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ（検討例） 5-42
図 5.2.3-1 地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ（検討例） 5-49
図 5.2.3-2 物理探査測線設定の検討例 5-50
図 5.2.3-3 地質環境モデル構築領域として複数の空間スケールが設定された例 5-52
図 5.2.3-4 地質環境モデル構築の流れ（イメージ） 5-54
図 5.2.4-1 概要調査地区の選定までの基本的な流れ 5-56
図 5.2.4-2 概要調査における計画立案手順 5-56
図 5.2.4-3 概要調査施工管理フロー 5-56
図 5.2.4-4 文献調査のための地質環境データ管理システムと支援ツールの概要 5-56
図 5.2.4-5 文献調査システムフロー（地震・断層活動の評価） 5-56
図 5.2.4-6 ESL を用いた検討事例 5-56
図 5.2.4-7 MAA の重み付けによる相対比較（検討例） 5-56
図 5.2.4-8 MAA による複数地点の相対比較の結果（検討例） 5-56
図 5.3.1-1 新規火山の発生可能性に関する検討例 5-71
図 5.3.1-2 地球物理学的手法を用いたマグマの存在に関する検討例 5-72

図 5.3.1-3 模型実験による褶曲・断層モデルと地質断面図の比較の例 5-80
図 5.3.1-4 河成段丘を用いた内陸部の隆起量の調査・評価事例 5-85
図 5.3.1-5 水理試験の概念 5-93
図 5.3.1-6 試験結果の例 5-93
図 5.3.1-7 GEO MASS システムによる水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析の事例 5-94
図 5.3.1-8 岩盤分類評価要素からの粘着力の評価図 5-97
図 5.3.1-9 瑞浪超深地層研究所計画第1段階（地表からの調査段階）の成果の例 5-100
図 5.3.1-10 幌延深地層研究計画第1段階（地表からの調査段階）の成果の例 5-102
図 5.3.1-11 沿岸域プロジェクトの実施内容および成果の例 5-105
図 5.3.2-1 実証研究の全体フロー 5-107
図 5.3.2-2 電中研・横須賀地区における共同研究の実施状況 5-107
図 5.3.2-3 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査手順 5-110
図 6.1.1-1 段階的な設計の進め方 6-3
図 6.1.1-2 段階的な処分場設計の詳細化イメージ 6-3
図 6.1.2-1 廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ 6-4
図 6.2.1-1 安全確保の基本概念と事業段階の関係 6-7
図 6.2.2-1 隔離と閉鎖後閉じ込めの概念図 6-8
図 6.2.2-2 閉鎖後長期の安全確保に関する要件の体系化の枠組み 6-9
図 6.2.2-3 高レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能と基本構成要素 6-13
図 6.2.2-4 ガラス固化体廃棄体特性 6-14
図 6.2.2-5 地層処分低レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能と基本構成要素 6-20
図 6.2.3-1 地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係 6-23
図 6.3.1-1 主な設計対象部位 6-29
図 6.3.1-2 処分場の設計手順 6-31
図 6.3.2-1 オーバーパック厚さ検討の手順例 6-32
図 6.3.2-2 炭素鋼製オーバーパックの設計仕様例 6-33
図 6.3.2-3 緩衝材の設計フロー 6-34
図 6.3.2-4 ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の確認 6-34
図 6.3.2-5 廃棄体パッケージの概要と設計手順 6-35
図 6.3.3-1 坑道径と深度の関係 6-37
図 6.3.3-2 粒跡線解析のイメージ 6-38
図 6.3.3-3 処分坑道断面の仕様例 6-40
図 6.3.3-4 坑道の力学安定性評価（局所安全率の分布） 6-41
図 6.3.3-5 廃棄体1本あたりの専有面積 6-42
図 6.3.3-6 地下施設レイアウト例（高レベル放射性廃棄物処分場） 6-43
図 6.3.3-7 主応力方向と坑道軸方向の関係 6-44
図 6.3.3-8 地下水流動方向と処分場の方向 6-44
図 6.3.3-9 地下施設レイアウト例（地層処分低レベル放射性廃棄物処分場） 6-45
図 6.3.3-10 閉鎖システムの評価で考慮したプラグ，埋め戻し材の配置関係，および処分パネル規

模の解析で考慮した前提・境界条件の設定 6-46
図 6.3.4-1 地上施設イメージ図（高レベル放射性廃棄物，地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を併置する場合） 6-47
図 6.3.4-2 地上施設のゾーニングと作業動線（併置処分） 6-48
図 6.3.5-1 併置処分地下施設レイアウト例 6-49
図 6.3.5-2 相互影響因子の影響範囲の時間的変化 6-50
図 6.4.1-1 トンネルボーリングマシンの外観例と掘削イメージ 6-51
図 6.4.1-2 ショートステップ工法による立坑の掘削 6-52
図 6.4.1-3 空気カプセルによる鉛直ずり出し技術 6-53
図 6.4.1-4 スウェーデン，エスポ地下研究所で実施された処分孔掘削 6-53
図 6.4.1-5 2 軸回転機構を有する処分孔掘削機 6-54
図 6.4.1-6 円形処分坑道の掘削イメージ（左；発破掘削，右；機械掘削） 6-55
図 6.4.1-7 大空洞の建設時の様子 6-55
図 6.4.1-8 底部緩衝材施工 6-55
図 6.4.2-1 返還ガラス固化体の輸送に使用されている輸送車両 6-57
図 6.4.2-2 遠隔操作による廃棄体製作工程の概念図（炭素鋼単体オーバーパックの場合） .. 6-57
図 6.4.2-3 廃棄体の搬送と定置の流れ 6-58
図 6.4.2-4 緩衝材および廃棄体定置手順（竪置き定置方式の場合） 6-59
図 6.4.2-5 PEM 方式 6-60
図 6.4.2-6 高レベル放射性廃棄物処分場における廃棄体の搬送・定置タイムチャートの例（処分孔竪置き方式） 6-61
図 6.4.2-7 廃棄体の定置（地層処分低レベル放射性廃棄物） 6-62
図 6.4.3-1 閉鎖措置計画申請時の処分場イメージ 6-63
図 6.4.3-2 アクセス坑道の閉鎖作業イメージ 6-63
図 6.4.4-1 斜坑の安全設計例 6-67
図 6.4.4-2 オーバーパックの衝突解析例（搬送車両逸走，廃棄体水平） 6-68
図 6.4.4-3 排水坑道，排水槽，ポンプ室の模式図 6-69
図 6.4.5-1 閉鎖後長期安全性に影響を与える因子 6-71
図 6.5.1-1 沿岸域における長期的な海水準変動と塩淡境界の移動 6-73
図 6.5.1-2 沿岸部におけるサイト環境の特徴（地形が急峻な場合） 6-74
図 6.5.1-3 沿岸部におけるサイト環境の特徴（地形が緩やかな場合） 6-74
図 6.5.1-4 粒跡線解析による海水準変動による流出点移動のイメージ 6-75
図 6.5.1-5 海水条件での有効粘土密度とペクレ数の関係 6-76
図 6.5.1-6 海水条件での自己シール性と有効粘土密度，緩衝材厚さの関係 6-76
図 6.5.1-7 離岸距離が大きい場合のアクセス坑道を含む処分場レイアウト例 6-78
図 6.5.2-1 処分孔竪置き定置方式 6-80
図 6.5.2-2 処分坑道横置き定置方式 6-80
図 6.5.2-3 搬送定置技術オプション 6-81
図 6.5.2-4 処分孔竪置き定置方式の基本形態 6-82
図 6.5.2-5 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）の基本形態 6-82

図 6.5.2-6 処分坑道横置き定置方式（PEM 方式）の基本形態 6-83
図 6.5.2-7 高温多湿環境下での緩衝材ブロックの挙動..... 6-86
図 6.5.2-8 水滴落下試験 6-86
図 6.5.2-9 処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性と現実に想定される地下環境条件への適応性 6-88
図 6.5.2-10 処分孔の力学安定性確保策 6-89
図 6.5.2-11 想定される地下環境条件を考慮した技術オプション適用事例..... 6-90
図 6.5.2-12 作業性を考慮した処分坑道横置き定置方式（原位置施工） 6-91
図 6.5.2-13 処分坑道横置き定置方式定置手順 6-92
図 6.5.2-14 処分坑道横置き定置方式地下施設レイアウト..... 6-92
図 6.5.2-15 処分坑道レイアウト（短処分坑道版） 6-93
図 6.5.2-16 処分坑道断面の拡幅による作業性向上を目的とした PEM の搬送概念..... 6-94
図 6.5.2-17 処分坑道断面の拡幅の PEM 概念－処分坑道断面形状例..... 6-94
図 6.5.2-18 処分坑道断面の拡幅の PEM 概念－把持・搬送・定置工程 6-95
図 6.5.2-19 設計因子に基づく処分概念・技術オプションの特徴整理..... 6-98
図 6.6.2-1 地下水中心としたニアフィールド要素の相互作用図..... 6-103
図 6.6.2-2 ガラス表面での物質移行過程を考慮した長期溶解モデル..... 6-104
図 6.6.2-3 鉄遺物などのナチュラルアナログの腐食量評価..... 6-107
図 6.6.2-4 緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件..... 6-107
図 6.6.2-5 種々の環境における鉄鋼材料（非合金）の平均腐食深さと孔食係数の関係..... 6-108
図 6.6.2-6 酸化性雰囲気における炭素鋼溶接部の平均腐食深さに対する最大腐食深さ..... 6-111
図 6.6.2-7 還元性雰囲気における炭素鋼母材，溶接部の平均腐食速度の経時変化..... 6-111
図 6.6.2-8 体積膨潤比と膨潤応力の有効粘土密度に対する依存性..... 6-113
図 6.6.2-9 有効粘土密度と透水係数の関係 6-113
図 6.6.2-10 セメントからの浸出液の pH の経時変化..... 6-114
図 6.6.2-11 地球化学解析による人工バリアの鉱物相の空間分布の変化..... 6-115
図 6.6.3-1 中越沖地震の地震動が大きかった要因分析..... 6-120
図 6.6.3-2 深部地下構造モデル 6-120
図 6.6.3-3 検討用地震動の時刻歴波形と地盤モデルの弾性波速度の深度分布..... 6-121
図 6.6.3-4 坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみ（高レベル放射性廃棄物処分坑道） 6-122
図 6.6.4-1 HFSC 吹付コンクリートの模擬施工状況 6-123
図 6.6.4-2 オーバーパック蓋構造の概念図 6-124
図 6.6.4-3 落とし蓋構造，平蓋構造での TIG 溶接試験状況..... 6-125
図 6.6.4-4 落とし蓋構造への MAG 溶接適用例 6-125
図 6.6.4-5 超音波探傷法を用いた溶接部の検査方法の概念..... 6-126
図 6.6.4-6 炭素鋼オーバーパックの製作状況 6-127
図 6.6.4-7 製作された炭素鋼オーバーパック 6-127
図 6.6.4-8 プレス機による緩衝材ブロック製作状況..... 6-128
図 6.6.4-9 実規模緩衝材展示状況と緩衝材ブロックの密度分布..... 6-129
図 6.6.4-10 ブロック真空把持装置のうち真空把持部..... 6-129

図 6.6.4-11 実規模ブロック真空把持実証状況 6-130
図 6.6.4-12 原位置締固め緩衝材の施工試験 6-130
図 6.6.4-13 PEM 方式工程概念..... 6-131
図 6.6.4-14 PEM 方式試験例..... 6-131
図 6.6.4-15 ペレット充填方式の施工試験 6-132
図 6.6.4-16 吹付施工試験 6-132
図 6.6.4-17 レーザー計測による処分孔形状と壁面状態の把握状況..... 6-133
図 6.6.4-18 メッシュ型無線 LAN システムによる遠隔定置装置制御概念..... 6-133
図 6.6.4-19 ②処分孔上部埋め戻し材など除去装置の例..... 6-135
図 6.6.4-20 ③廃棄体周囲の緩衝材の拘束除去装置の例..... 6-135
図 6.6.4-21 ④廃棄体の回収，⑤遮へい容器への収納例..... 6-135
図 6.6.4-22 処分坑道埋め戻し後の状況および強度プラグ除去状況の例..... 6-136
図 6.6.4-23 廃棄体周囲のオーバーコアリングおよび廃棄体の抜き出しと遮へい容器への収納例
..... 6-137
図 6.6.4-24 横置き定置方式を模擬した緩衝材除去実験の状況..... 6-137
図 7.1.1-1 セーフティケースへの反映に向けた安全評価の進め方..... 7-3
図 7.1.2-1 地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携した安全評価の主要な実施項目（自然
過程シナリオを対象とした例） 7-5
図 7.2.2-1 シナリオ分類（検討例） 7-17
図 7.2.2-2 期待する安全機能の時間的な変遷（第２次取りまとめに基づく例） 7-17
図 7.2.2-3 ストーリボードの例（高レベル放射性廃棄物を対象） 7-18
図 7.2.2-4 蓋然性の区分に関する考え方 7-20
図 7.2.3-1 システム評価モデルと現象解析モデルとの関係..... 7-22
図 7.2.3-2 地下水中での核種移行に関するシステム性能評価モデルおよびデータセットの構成
..... 7-23
図 7.2.3-3 ソースタームモデルにおける核種量の時間変化のイメージ..... 7-24
図 7.2.3-4 人工バリア中核種移行モデルにおける核種量の時間変化のイメージ..... 7-25
図 7.2.3-5 天然バリア中核種移行モデル（多孔質媒体モデル）の核種量の時間変化のイメージ
..... 7-26
図 7.2.3-6 天然バリア中核種移行モデル（二重間隙モデル）の核種量の時間変化のイメージ 7-27
図 7.2.3-7 安全評価のための解析モデルフローチャート（精密調査地区選定段階（概要調査の段
階)） 7-30
図 7.3.2-1 沿岸域を対象としたシナリオ構築の手順..... 7-39
図 7.3.2-2 代表点における標高の時間変化 7-40
図 7.3.2-3 侵食速度が隆起速度と等しい場合（ケース a）の地形勾配の時間変化 7-41
図 7.3.2-4 将来の汀線の移動挙動の侵食速度依存性..... 7-41
図 7.3.2-5 沿岸域における環境変遷の類型化の概念..... 7-43
図 7.3.2-6 ストーリボードのための時間・空間区分..... 7-45
図 7.3.2-7 地層処分システムの機能的変遷に対応する特徴の変化..... 7-52
図 7.3.2-8 断層活動の影響に関するシナリオの概念..... 7-67

図 7.3.2-9 断層新生の影響に関する予察的解析結果のまとめ..... 7-70
図 7.3.2-10 シナリオBにおいて破壊されていない廃棄体の人工バリア内側を還元性と仮定した場合の解析結果 7-71
図 7.3.3-1 沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順..... 7-72
図 7.3.3-2 沿岸域の環境変遷に対応して核種移行率を算出するイメージ..... 7-74
図 7.3.3-3 統計的に発生させた亀裂の透水量係数[m/s]の対数の度数分布と理論値の比較... 7-78
図 7.3.3-4 検証用データ（左）およびPartridgeを用いて作成した亀裂ネットワークのシュミットネット投影図（右） 7-78
図 7.3.3-5 不均質連続体における移流・分散問題についての検証結果の例..... 7-79
図 7.3.3-6 各岩種について作成した不均質透水係数場の例..... 7-81
図 7.3.3-7 各岩種に対応した不均質透水係数場におけるダルシー流速分布(領域中央の坑道近傍の水平断面） 7-84
図 7.3.3-8 各岩種に対応した少数の粒子軌跡（各ガラス固化体でパルス入力：10万年後） . 7-84
図 7.3.3-9 Cs-135移行率（ガラス固化体1体当たりの平均）の時間変化 7-86
図 7.3.3-10 ニアフィールド内のCs-135の軌跡（硬岩タイプ1） 7-87
図 7.3.3-11 竪置きおよび横置きの核種移行率の比較 7-88
図 7.3.3-12 各領域に存在する核種の割合とその時間変化（瞬時放出モード） 7-88
図 7.3.3-13 Np-237移行率最大値（パルス入力に対する）の廃棄体依存性（硬岩タイプ2） . 7-89
図 7.3.3-14 硬岩タイプ3において割れ目帯および地下水主流動方向と坑道が直交する場合の不均質透水係数場（左）および粒子軌跡（右）（坑道を通る水平断面） 7-90
図 7.3.3-15 最上流側（左）と最下流側（右）からの核種移行率計算結果の比較..... 7-90
図 7.3.3-16 最下流側坑道における各廃棄体からのNp-237最大移行率の比較（硬岩タイプ3：割れ目帯および地下水主流動方向と坑道が直交する場合） 7-91
図 7.3.3-17 I-129に対する工学的対策の効果についての感度解析結果の例 7-92
図 8.1.1-1 段階的な処分場概念の構築の進め方 8-2
図 8.1.2-1 安全確保策の連携と統合化による処分場概念の構築..... 8-4
図 8.1.2-2 サイト調査・評価，工学的対策と連携した安全評価の実施事項..... 8-5
図 8.1.3-1 要件管理システム 8-6
図 8.1.3-2 処分場概念構築支援システム 8-7
図 8.2-1　精密調査地区選定段階の主要な実施事項とその流れ..... 8-9
図 8.2.1-1 地層処分システムの安全機能の概念図（高レベル放射性廃棄物） 8-10
図 8.2.1-2 概要調査における段階的なアプローチのイメージ..... 8-11
図 8.2.2-1 地質環境モデル構築の流れ（イメージ図） 8-13
図 8.2.3-1 候補母岩の評価において考慮する地質環境の概念図..... 8-15
図 8.2.3-2 候補母岩の評価・選定の手順の例 8-16
図 8.2.3-3 処分深度と緩衝材最高温度の関係の例示..... 8-17
図 8.2.3-4 深度と坑道の安定性（局所安全率）の関係の例示..... 8-18
図 8.2.3-5 流跡線解析の評価点と流跡線のイメージ図..... 8-19
図 8.2.3-6 粒跡線解析結果（移行経路）の例 8-19
図 8.2.3-7 粒跡線解析結果（移行時間）の例 8-20

図 8.2.4-1 候補母岩の広がりや形状に対応した処分パネルレイアウトのオプション..... 8-21
図 8.2.4-2 廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ 8-22
図 8.2.4-3 破砕帯への対策工（ベントナイトプラグ）の効果の予察的検討..... 8-23
図 8.2.4-4 廃棄体定置方式（竪置き，横置き）による核種移行率の比較..... 8-24
図 8.2.6-1 統合化による処分場概念の構築のイメージ..... 8-25

表目次

表 1-1　「地層処分事業の安全確保 2010」の構成 1-2
表 1-2　地層処分に関係する機関，法律および報告書の略称一覧 1-3
表 2.3-1　諸外国の状況 2-21
表 3.1.2-1 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と基本的な安全機能 3-3
表 3.2.3-1 NUMO が実施する実証プログラムの分類とその特徴 3-29
表 3.2.4-1 原子力の専門家が主張する「安全」や「問題意識」と一般の国民が意識する「安心感」や「問題意識」との比較 3-39
表 3.3.2-1 モニタリングの分類とその概要 3-45
表 4.1.2-1 安全確保ロードマップ（概要版） 4-9
表 4.1.2-2 安全確保ロードマップ（詳細版）概要調査地区選定段階（文献調査の段階） 4-10
表 4.1.2-3 安全確保ロードマップ（詳細版）精密調査地区選定段階（概要調査の段階） 4-11
表 4.1.2-4 安全確保ロードマップ(詳細版)処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち，地上からの調査段階） 4-12
表 4.1.2-5 安全確保ロードマップ（詳細版）処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち，地下調査施設での調査段階） 4-13
表 4.1.2-6 安全確保ロードマップ（詳細版）建設段階のロードマップの詳細化と必要技術の抽出例 4-14
表 4.1.2-7 安全確保ロードマップ（詳細版）操業段階（操業期間中） 4-15
表 4.1.2-8 安全確保ロードマップ（詳細版）閉鎖段階 4-16
表 4.2.1-1 概要調査地区選定上の考慮事項 4-32
表 5.1.1-1 わが国で考慮すべき自然現象と地層処分システムに及ぼす影響とその取り扱い 5-3
表 5.1.1-2 サイト調査・評価からみた自然現象の将来予測期間の区分の考え方の整理 5-10
表 5.1.2-1 わが国の多様な地質環境の調査・評価に向けた研究開発 5-13
表 5.2.1-1 文献調査で収集する情報の項目と調査範囲の目安（検討例） 5-19
表 5.2.2-1 火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる主な調査手法 5-27
表 5.2.2-2 火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる主な調査手法 5-31
表 5.2.2-3 地震・断層活動にかかわる主な調査手法（1.：陸域） 5-37
表 5.2.2-4 地震・断層活動にかかわる主な調査手法（2.：海域） 5-38
表 5.2.2-5 隆起・沈降にかかわる主な調査手法 5-43
表 5.2.2-6 侵食にかかわる主な調査手法 5-44
表 5.3.1-1 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術（1） 5-68
表 5.3.1-2 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術（2） 5-69
表 5.3.1-3 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術（1） 5-75
表 5.3.1-4 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術の整備状況（2） 5-76
表 5.3.1-5 隆起・侵食（気候・海水準変動含む）にかかわる調査・評価技術 5-83
表 5.3.1-6 地質環境特性にかかわる調査・評価技術（1） 5-89
表 5.3.1-7 地質環境特性にかかわる調査・評価技術（2） 5-90
表 5.3.1-8 地質環境特性にかかわる調査・評価技術の現状一覧表(3) 5-91

表 5.3.2-1 段階別の取得・更新データ，モデルの確実度および信頼度の対比（地質構造モデルの例）
. 5-109
表 5.3.2-2 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査内容. 5-110
表 5.3.2-3 ボーリング調査におけるリスク評価結果の例. 5-111
表 5.3.3-1 調査・評価手法のまとめ（1） 5-114
表 5.3.3-2 調査・評価手法のまとめ（2） 5-115
表 5.3.3-3 調査・評価手法のまとめ（3） 5-116
表 6.2.2-1 技術要件の設定の考え方 6-9
表 6.2.2-2 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能. 6-10
表 6.2.2-3 高レベル放射性廃棄物の閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係. . . . 6-12
表 6.2.2-4 母岩の好ましい特性 6-14
表 6.2.2-5 ガラス固化体の特性 6-15
表 6.2.2-6 オーバーパックの閉鎖後長期の安全確保のための技術要件. 6-16
表 6.2.2-7 緩衝材の技術要件 6-17
表 6.2.2-8 地層処分低レベル放射性廃棄物の閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係
. 6-19
表 6.2.3-1 放射線防護に関する基本的な安全対策 6-22
表 6.2.3-2 一般労働安全に対する安全対策の考え方. 6-24
表 6.2.3-3 環境保全対策の考え方 6-25
表 6.2.3-4 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係. 6-26
表 6.3.3-1 候補母岩選定のための評価項目例 6-36
表 6.4.4-1 操業中に想定される異常事象と安全対策. 6-66
表 6.5.1-1 緩衝材および埋め戻し材の設計の例示 6-76
表 6.5.2-1 処分概念・技術オプションの絞り込みの視点. 6-96
表 6.6.1-1 工学的対策における技術開発項目と本節での記載項目. 6-101
表 6.6.2-1 母材と溶接部の腐食挙動理解に関する科学的な知見の整備状況の要約. 6-106
表 6.6.2-2 放射線照射が炭素鋼の腐食に及ぼす影響. 6-109
表 6.6.2-3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況の要約6-112
表 6.6.2-4 セメントとベントナイト相互作用に関する現象の整理. 6-115
表 6.6.2-5 ベントナイトの変質と試験条件 6-117
表 6.6.4-1 地層処分低レベル放射性廃棄物処分概念の回収維持期間と作業工程. 6-138
表 6.6.5-1 工学的対策を支える技術に対する今後の課題. 6-139
表 7.1.1-1 地層処分の信頼性に関する重要な論点 7-4
表 7.2.3-1 現象解析モデルの概要と目的について整理した例. 7-29
表 7.3.1-1 2000 年以降の安全評価に関する技術の進展（1／3） 7-36
表 7.3.1-2 2000 年以降の安全評価に関する技術の進展（2／3） 7-37
表 7.3.1-3 2000 年以降の安全評価に関する技術の進展（3／3） 7-38
表 7.3.2-1 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関して想定する例. 7-40
表 7.3.2-2 ニアフィールドの境界条件として着目すべき処分場領域周辺の環境条件および気候・海水準変動や隆起・侵食による環境変遷における影響因子. 7-45

表 7.3.2-3 気候・海水準変動及び隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケース a：パターン 3）(1/4) 7-46
表 7.3.2-4 気候・海水準変動及び隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケース a：パターン 3）(2/4) 7-47
表 7.3.2-5 気候・海水準変動及び隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケース a：パターン 3）(3/4) 7-48
表 7.3.2-6 気候・海水準変動及び隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケース a：パターン 3）(4/4) 7-49
表 7.3.2-7 システム理解に関連する FEP の整理例（第２次取りまとめリファレンスケース）(1/2) 7-55
表 7.3.2-8 システム理解に関連する FEP の整理例（第２次取りまとめリファレンスケース）(2/2) 7-56
表 7.3.2-9 ニアフィールド環境変遷ストーリボード 7-57
表 7.3.2-10 各期間におけるシステムの変遷（1/3） 7-58
表 7.3.2-11 各期間におけるシステムの変遷（2/3） 7-59
表 7.3.2-12 各期間におけるシステムの変遷（3/3） 7-60
表 7.3.2-13 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド環境条件の様相区分の例 7-62
表 7.3.2-14 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるベースシナリオの例（ニアフィールド） 7-64
表 7.3.2-15 断層の各部位における透水係数に関する情報のまとめ 7-66
表 7.3.2-16 処分場を横断する新たな断層が生じた場合のストーリボード 7-68
表 7.3.2-17 断層活動に関する予察的影響解析の条件 7-69
表 7.3.3-1 算出した線量換算係数の例 7-76
表 7.3.3-2 試行で想定した不均質透水係数場の例 7-82
表 7.3.5-1 安全評価技術の課題 7-94
表 8.2.3-1 候補母岩選定のための評価項目例 8-14

第１章
はじめに

第１章　目次

第１章 はじめに 1-1

第1章　はじめに

原子力発電環境整備機構（以下，NUMO という）は，2000 年 10 月，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下，最終処分法という）に基づき，高レベル放射性廃棄物の地層処分を行う実施主体として設立された。その後，2007 年の同法改正に伴い，長半減期低発熱放射性廃棄物（以下，TRU 廃棄物という）の一部も地層処分の対象（以下，地層処分低レベル放射性廃棄物という）とされたことを受け，NUMO はこれを事業の対象に加えた。

また，最終処分法の改正を受け「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下，炉規制法という）が併せて 2007 年に改正され，その後，2008 年には関係省令が制定されるなど，地層処分に関する国による安全規制の枠組みが整備された。

NUMO の業務は，地層処分を事業として安全に行うことであり，その最初の取り組みは，国民の理解を得て，適切な処分施設の建設地を選定することである。この選定については，最終処分法により，文献調査から開始し，三段階の選定過程，すなわち①概要調査地区選定，②精密調査地区選定，③処分施設建設地選定を経て行うこととされている。

NUMO は，2000 年の設立以降，事業の安全な実施に向けて技術の整備に努めるとともに，今日までさまざまな立地・広報活動を展開してきたが，市町村からの応募を受け文献調査を開始する状況には至っていない。現在，NUMO は国や関係機関と連携して，総力を挙げて，文献調査開始に向けて国民への理解活動などに取り組んでいるところであるが，地層処分事業の安全性にかかわる問題への理解は必ずしも十分とはいえないと認識している。

このような状況を鑑みて，今後の立地・広報活動における地層処分の安全性に関する説明の技術的な拠り所として，NUMO では，2000 年の設立から 10 年の節目を迎えることを契機に，事業を推進するに当たって基本としてきた「安全確保構想」（安全確保に向けた取り組み方針）と「安全な地層処分を支える技術」について，国内外の関係する研究開発機関などの研究開発成果も取り込んで技術報告書として取りまとめ，「地層処分事業の安全確保 2010～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～」として公表することとした。

一方，原子力委員会政策評価部会（2008）において，「NUMO は（中略）2000 年に研究開発機関によって公表された地層処分の技術的信頼性に関する報告書の作成時点以降に得られた地質学，放射化学，地球科学，原子力工学等の科学技術の知見を踏まえ，安全な処分の実施に係る技術的信頼性に関する報告を，学会等，第三者的で独立性の高い学術的な機関の評価を得て取りまとめ，これが常に最新の知見を踏まえているものであるように，定期的に改定していくようにすることが必要」とされている。これを踏まえ，NUMO では，本報告書について，今後，日本原子力学会や海外の専門家などから評価（レビュー）をいただく予定である。

本報告書は，安全確保構想（安全確保に向けた取り組み方針）を示した「事業編」と，安全な地層処分を支える技術の整備状況を示した「技術編」で構成している（表 1-1）。

「事業編」は，第 2 章「わが国における地層処分事業の背景」，第 3 章「安全確保構想」，第 4 章「地層処分事業の段階的な推進」で構成している。

第 2 章では，核燃料サイクルや地層処分のこれまでの経緯と現状など，わが国の地層処分事業の背景について解説した。

第 3 章では，第 2 章で示した地層処分事業の背景を踏まえて，地層処分の安全確保の目標である「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」についてその基本的な考え方を述べた。さ

らに，段階的に事業を実施することで，100 年にわたる事業のリスクや不確実性に対処することを基本方針として，実施主体としての安全確保のための事業方針とその実施方策を示した。

第 4 章では，第 3 章で示した実施方策の 100 年にわたる事業全体における具体的な展開として，安全確保ロードマップ，技術開発ロードマップおよび信頼感醸成ロードマップを示した。

「技術編」では，事業編に示した閉鎖後長期と事業期間中の安全確保を進めていくために必要な地層処分の技術が，計画的に整備されていることを具体的な事例とともに示した。

ここでは，安全な地層処分を支える技術を，「地質環境の調査・評価技術」（第 5 章），「処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術」（第 6 章），「地層処分システムの長期安全性評価技術」（第 7 章）に分類した。そして，それぞれの分野について，概要調査地区選定段階（文献調査の段階）および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）において必要となる技術を中心に概説するとともに，技術開発ロードマップに示した技術の整備状況を示した。さらに第 8 章では，「処分場概念の構築における安全確保策の連携」として，第 5 章，第 6 章，第 7 章で述べた各専門分野の技術がどのように連携して作業を進め，どのように情報を統合化して処分場概念を構築するかを，精密調査地区選定段階を事例として提示した。

なお，「技術編」では，高レベル放射性廃棄物を主な対象として技術の整備状況を取りまとめている。地層処分低レベル放射性廃棄物については，本報告書と同時期に技術報告書を公表する予定であるため，同廃棄物に特有な技術については，本報告書では主要な技術の記述にとどめ，詳細については当該技術報告書に譲ることとした。

表 1-1 「地層処分事業の安全確保 2010」の構成

<table>
<tr><th></th><th>章</th><th>タイトル</th><th>主な内容</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td>要約</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>1</td><td>はじめに</td><td>報告書の背景と目的，全体構成</td></tr>
<tr><td rowspan="3">事業編</td><td>2</td><td>わが国における地層処分事業の背景</td><td rowspan="3">安全確保のための目標設定と達成のための方針・方策
方針１：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進
方針２：信頼性の高い技術を用いた事業推進
方針３：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み</td></tr>
<tr><td>3</td><td>安全確保構想</td></tr>
<tr><td>4</td><td>地層処分事業の段階的な推進</td></tr>
<tr><td rowspan="4">技術編</td><td>5</td><td>地質環境の調査・評価技術</td><td>地質環境の調査・評価に必要な技術の整備状況</td></tr>
<tr><td>6</td><td>処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術</td><td>適切な工学的対策として必要な技術の整備状況</td></tr>
<tr><td>7</td><td>地層処分システムの長期安全性評価技術</td><td>長期安全性の評価に必要な技術の整備状況</td></tr>
<tr><td>8</td><td>処分場概念の構築における安全確保策の連携</td><td>段階的な処分場概念の構築における安全確保策の連携に関する取り組み</td></tr>
<tr><td></td><td>9</td><td>おわりに</td><td>全体総括</td></tr>
</table>

本報告書で用いる地層処分に関係する主な機関，法律および報告書の略称一覧を表 1-2に記す。

表 1-2 地層処分に関係する機関，法律および報告書の略称一覧

	正式名称	本書での略称
機関など	原子力発電環境整備機構	NUMO
	独立行政法人 日本原子力研究開発機構 （特殊法人 核燃料サイクル開発機構） （特殊法人 動力炉・核燃料開発事業団）	JAEA （JNC） （PNC）
	公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター	原環センター
	財団法人 電力中央研究所	電中研
	独立行政法人 産業技術総合研究所	産総研
	独立行政法人 放射線医学総合研究所	放医研
	日本原燃株式会社	原燃
	独立行政法人 原子力安全基盤機構	JNES
	電気事業連合会	電事連
	基盤研究開発調整会議	調整会議
法律など	特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律	最終処分法
	核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律	炉規法
	特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針	最終処分基本方針
	特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画	最終処分計画
	原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画	原子力長計
報告書	高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 －平成３年度－	第１次取りまとめ
	わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－	第２次取りまとめ
	高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－	平成 17 年取りまとめ
	TRU 廃棄物処分技術検討書	第１次 TRU レポート
	TRU 廃棄物処分技術検討書－第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－	第２次 TRU レポート

参考文献

原子力委員会政策評価部会（2008）：原子力政策大綱に示している放射性廃棄物の処理・処分に関する取組の基本的考え方に関する評価について，原子力委員会政策評価部会報告書，2008 年.

第２章
わが国における
地層処分事業の背景

第２章　目次

第 2 章 わが国における地層処分事業の背景 2-1
2.1 原子力の利用と特定放射性廃棄物の発生 2-1
2.1.1 わが国の原子力発電と核燃料サイクルの概要 2-2
2.1.2 放射性廃棄物 2-3
2.2 地層処分の概要 2-7
2.2.1 地層処分の選択と固有の課題 2-7
2.2.2 地層処分に関する放射線防護原則 2-7
2.2.3 わが国における地層処分事業の進展 2-10
2.2.4 わが国の地層処分事業の特徴 2-15
2.3 諸外国の取り組み状況 2-20

第2章　わが国における地層処分事業の背景

本章は，地層処分の必要性や NUMO が行う地層処分事業について理解を深めていただくため，報告書の前提となる原子力発電・核燃料サイクル・放射性廃棄物の基本知識，NUMO が行う地層処分事業に関する法律と安全規制の整備，研究開発の経緯や現状，地層処分事業の仕組み，さらに国や関係機関の取り組み，諸外国の状況について記述する。

2.1　原子力の利用と特定放射性廃棄物の発生

現在，わが国の総発電電力量の約3分の1（図 2.1-1）は，原子力発電により供給されている。

また，原子力発電は，以下の理由から長期にわたってエネルギー安定供給と地球温暖化対策に貢献する有力な手段として期待できるとされている（原子力委員会，2005）。

- ウラン資源が政情の安定した国々に分散して賦存すること。
- 二酸化炭素排出については，発電過程では排出せず，原子力発電所建設から廃止までのライフサイクル全体で見ても太陽光発電や風力発電と同レベルであり，二酸化炭素排出が石油・石炭よりも少ない天然ガスによる火力発電と比べても 1 桁小さいこと。
- 放射性廃棄物は人間の生活環境への影響を有意なものとすることなく処分できること。
- 原子力発電を行うことで発生した使用済燃料からウランとプルトニウムを抽出（以下，再処理という）し，核燃料として再利用することを基本とする核燃料サイクル技術は，供給安定性を一層改善できること。
- 高速増殖炉サイクルが実用化すれば資源の利用効率を飛躍的に向上できること。

このような原子力発電の恩恵を受けてきた現世代は，原子力発電に伴って発生する放射性廃棄物を安全に処分し，次世代へ負担を先送りしない責務を有しており，今後とも，放射性廃棄物対策を着実に進めていく必要がある。

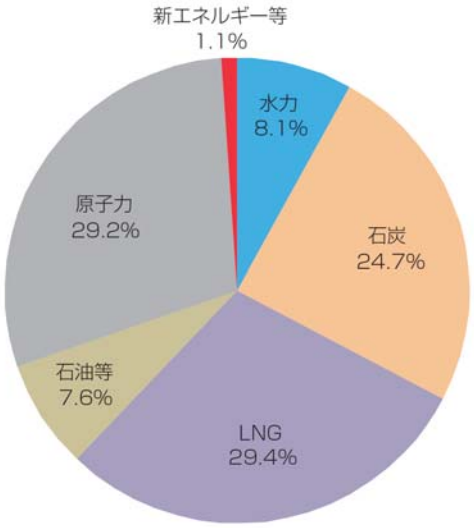


図 2.1-1 発電電力量の構成（2009 年度）
（出典：経済産業省，2010a）

2.1.1　わが国の原子力発電と核燃料サイクルの概要

わが国では，1966年に最初の商業用原子力発電所の営業運転が開始されて以来今日に至るまで，エネルギー供給のベストミックスを達成すべく原子力発電の導入を積極的に進めてきた。その結果，2010年3月末時点では，54基，4884.7万kWの商業用原子力発電所が運転されている（図 2.1.1-1）。

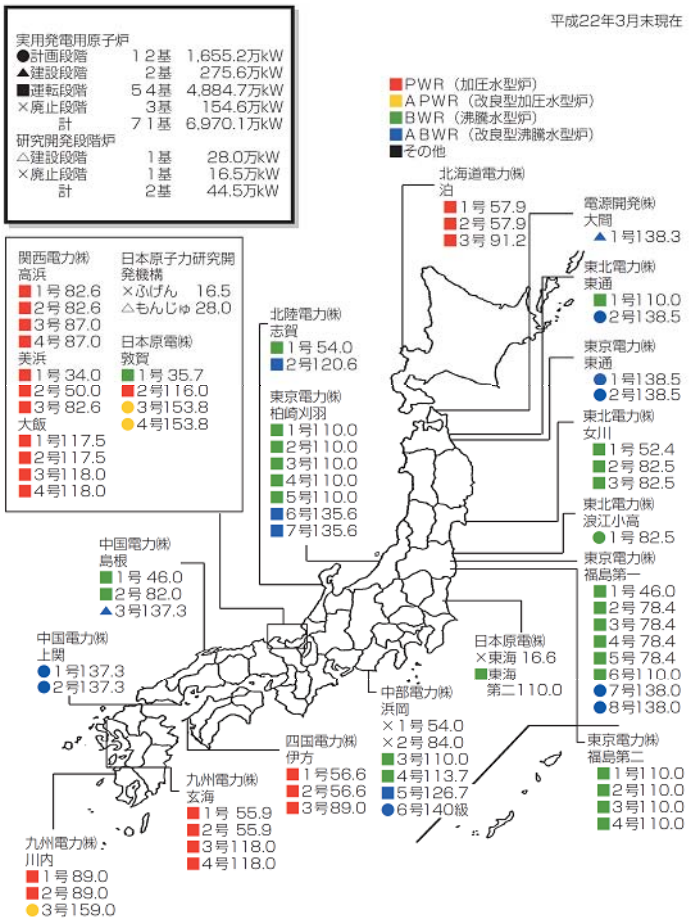


図 2.1.1-1 わが国の原子力発電所
（出典：経済産業省，2010a）

また，わが国では原子力発電の利用に当たり，長期的なエネルギーの安定確保や放射性廃棄物の適切な処理の観点から，原子力発電所から発生した使用済燃料を再処理し，回収したウランやプルトニウムを再び燃料に加工して利用する「核燃料サイクル」（図 2.1.1-2）を原子力政策の基本としている。核燃料サイクル技術は，原子力発電の経済性，供給安定性および環境適合性という特性を一層改善し，原子力発電を人類がより長く利用できるようにする可能性を有する。

現在，使用済燃料は，一定の期間原子力発電所の貯蔵プールなどで冷却しながら安全に貯蔵された後，再処理されている。これまで再処理は主として英仏の再処理事業者に委託されてきたが，核燃料サイクルの自主性を確実なものにするなどの観点から，今後，国内で行うことを原則としており，日本原燃株式会社（以下，原燃という）六ヶ所再処理施設が2012年の操業開始に向け，試運転を実施している（原燃，2010）。

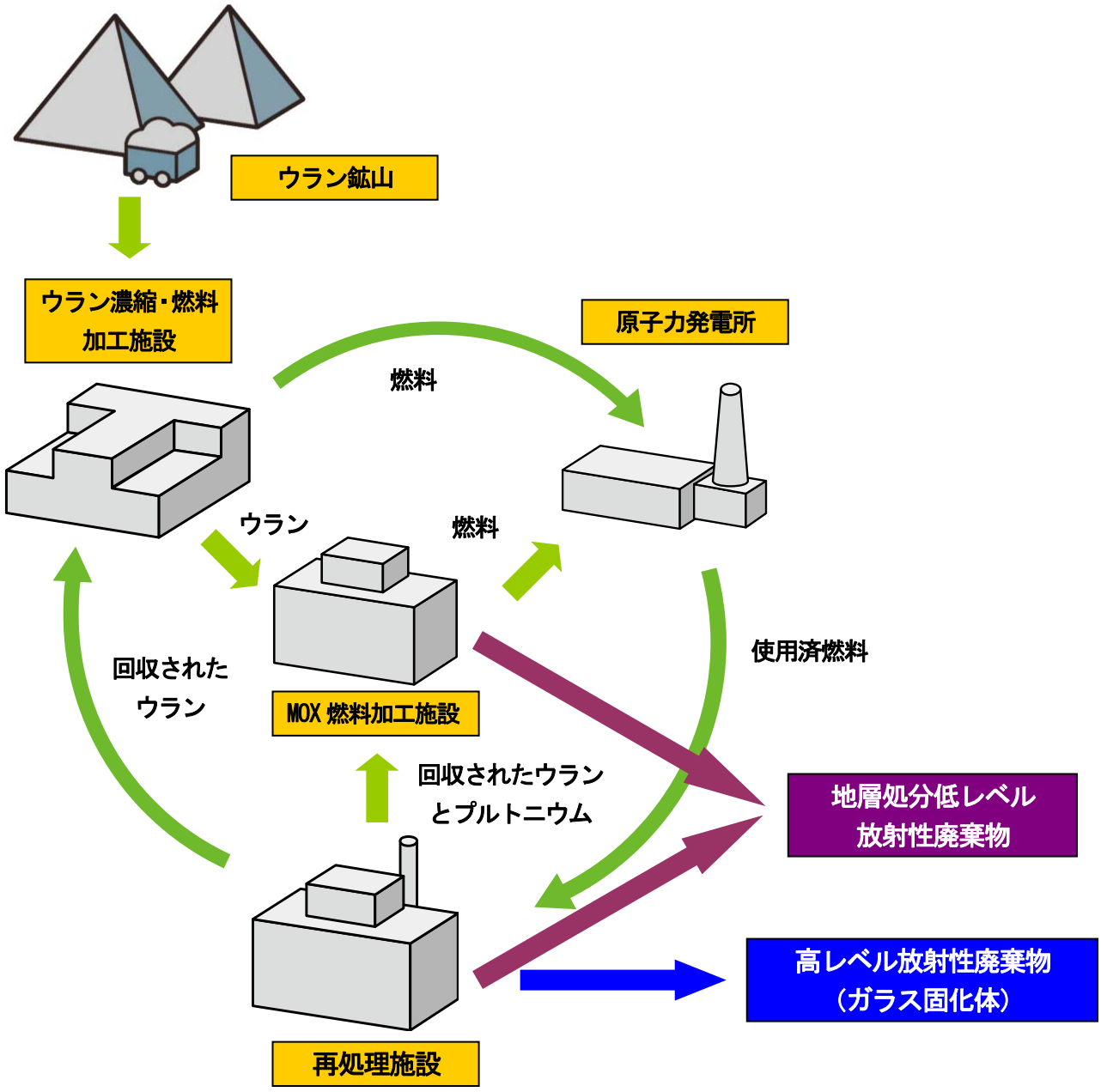


図 2.1.1-2 核燃料サイクル
（NUMO, 2009）

2.1.2 放射性廃棄物

原子力の研究，開発および利用を行うことにより廃棄物が発生する。この廃棄物には放射性物質を含むものがあり，放射性廃棄物と呼ばれる。放射性廃棄物は，原子力発電所や核燃料サイクル施設から発生するものが大部分を占めるが，放射性同位元素（以下，RI という）を使用する大学，研究所等における原子力の研究開発利用に関する活動に伴っても発生する（放射線審議会，2009）。

2.1.2.1　放射性廃棄物の種類

原子力の研究，開発および利用に伴って発生する放射性廃棄物のうち，原子力発電所から発生する使用済燃料の再処理に伴い発生するものを高レベル放射性廃棄物といい，これ以外の放射性廃棄物は，総じて低レベル放射性廃棄物と呼ばれている。こうした放射性廃棄物を安全に処理・処分することは，原子力の便益を享受した現世代の責務である（総合資源エネルギー調査会，2008）。

(1)　高レベル放射性廃棄物

使用済燃料の再処理工程で硝酸に溶解された後，有機溶媒（リン酸トリブチル：TBP）によってウランとプルトニウムが抽出される工程から，核分裂生成物や超ウラン核種を含む放射性物質濃度の高い廃液が排出される。

その廃液を取り扱いやすく安定した形態にするため，ガラス原料に混ぜ合わせて高温で融かし，ステンレス製容器に入れて固めたものが「ガラス固化体」である。ガラスは，その網目構造の中に放射性物質を取り込み長期間安定な状態を保つことが可能である。わが国では，このガラス固化体を高レベル放射性廃棄物という。諸外国の中には使用済燃料を再処理しない方針の国もあり，その場合には使用済燃料自体が高レベル放射性廃棄物となる。以下では特に断らない限り，高レベル放射性廃棄物はガラス固化体の意味で用いる。

高レベル放射性廃棄物の発熱量は固化直後で約 2,300W／本（50 年後で約 350W／本）程度である（放射線審議会，2009）。

(2)　低レベル放射性廃棄物

発電所廃棄物，TRU 廃棄物，ウラン廃棄物，RI・研究所廃棄物は，低レベル放射性廃棄物に区分されている。

①　TRU 廃棄物

再処理施設や MOX（ウラン－プルトニウム混合酸化物）燃料加工施設の操業・解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物。TRU 廃棄物のうち，ハルやエンドピースの圧縮体は発熱量が比較的大きく，発生時点で約 60W／本（25 年後で約 4.5W／本）程度。また，TRU 廃棄物にはハル・エンドピース以外に，ベータ線核種である I-129 の濃度が比較的高い廃銀吸着材，硝酸塩を含む濃縮廃液等を固化したもの，不燃性廃棄物等がある（放射線審議会，2009）。

②　ウラン廃棄物

ウランの濃縮，転換，成型加工等に伴って発生するウランを含んだ放射性廃棄物。半減期が極めて長いウラン及びその子孫核種（ウランの壊変により生成した核種）を含んでいること，放射性物質濃度が極めて低い廃棄物が大部分を占めること等の特徴を有している（放射線審議会，2009）。

③　RI・研究所等廃棄物

RI 廃棄物とは，RI（Radioisotope）を使用した施設，医療機関や医療検査機関などから発生する放射性同位元素を含む廃棄物。研究所等廃棄物とは，炉規法による規制のもとで，試験研究炉などを設置した事業所並びに核燃料物質などの使用施設などを設置した事業所から発生する放射性廃棄物。試験研究炉の運転に伴い発生する放射性廃棄物は，原子力発電所から発生する液体や固

体の廃棄物と同様なものである。その他は，核燃料物質などを用いた研究活動に伴って発生する雑固体廃棄物が主なものである。また，試験研究炉の運転，核燃料物質などの使用などを行っている研究所などにおいては，あわせてRIが使用されることも多く，炉規法および放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（以下，放射線障害防止法という）の双方の規制を受ける廃棄物も発生している（放射線審議会，2009）。

2.1.2.2　放射性廃棄物の埋設処分の方法

わが国における放射性廃棄物の埋設処分の方法は，深さや放射性物質の漏出を抑制するためのバリア（天然バリアと人工バリアから構成され，「天然バリア」は，「人工構築物または埋設された廃棄物の周囲に存在し，埋設された廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制などが期待できる岩石・土壌など」，「人工バリア」は，「埋設された廃棄物から生活環境への放射性物質の漏出の防止及び低減を期待して設けられるコンクリートピットなどの人工構築物，廃棄体の固型化材料及び処分容器」とされている（原子力安全委員会，2004））の違いにより，地層処分，余裕深度処分，浅地中処分（トレンチ処分，ピット処分）に分類される。埋設処分の方法の具体的内容は，次のとおりである。なお，浅地中処分，余裕深度処分は管理処分とされている（放射線審議会，2009）。本報告書で主に取り扱う放射性廃棄物の種類ごとの埋設処分の方法を図 2.1.2-1に示す。

(1) 地層処分

人間の生活環境から十分離れた安定な地層中（地下 300mより深い地層）に，適切な人工バリアを構築することにより処分の長期的な安全性を確保する処分方法。「地層処分」という用語の「地層」には，地質学上の堆積岩を指す「地層」と，地質学上は「地層」とみなされない「岩体」が含まれている。2007 年に最終処分法施行令の改正により，高レベル放射性廃棄物が第一種特定放射性廃棄物となり，これに加え，TRU廃棄物の一部について，地層処分を行う第二種特定放射性廃棄物（NUMOでは，地層処分低レベル放射性廃棄物と呼ぶ）が規定されたことから，対象廃棄物は，高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物（図 2.1.2-2）である（放射線審議会，2009）。

(2) 管理型処分

放射性核種の濃度が比較的低い低レベル放射性廃棄物は，比較的短い時間の経過とともに放射性核種が減衰する。放射線防護上の管理も放射性核種の減衰に伴って軽減化することができ，有意な期間内（例えば 300 年～400 年程度）に放射線防護上の管理を必要としない段階に至る。このように段階的に管理を軽減し，最終的には管理を必要としない段階まで管理する処分の方法を管理型処分という。管理型処分の方式には，浅地中処分，余裕深度処分がある（放射線審議会，2009）。

① 余裕深度処分

一般的な地下利用に対して十分余裕を持った深度（例：50～100m）への処分。対象廃棄物としては，原子炉施設の炉内構造物，使用済樹脂など（放射線審議会，2009）。

② 浅地中処分

低レベル放射性廃棄物を地表付近に埋設する処分方法。トレンチ処分やピット処分が該当する（放射線審議会，2009）。

a) トレンチ処分

原子炉施設の解体などから発生する極めて放射能レベルの低いコンクリートなどの放射性廃棄物について，コンクリートピットなどの人工構築物を必要としない浅地中処分の方法。トレンチ（Trench）とは「溝（堀，壕）を掘る」，または「溝，堀」の意味。対象廃棄物としては，原子炉施設のコンクリート廃材など。

b) ピット処分

放射性廃棄物を浅地中処分する一つの形態で，地表を掘削したのち，コンクリートピットなどの人工構築物を設置してその中に廃棄体を定置し，充填材で固めて一体化したあと，覆土する処分方法。対象廃棄物としては，原子炉施設の廃液固化体，充填固化体など。

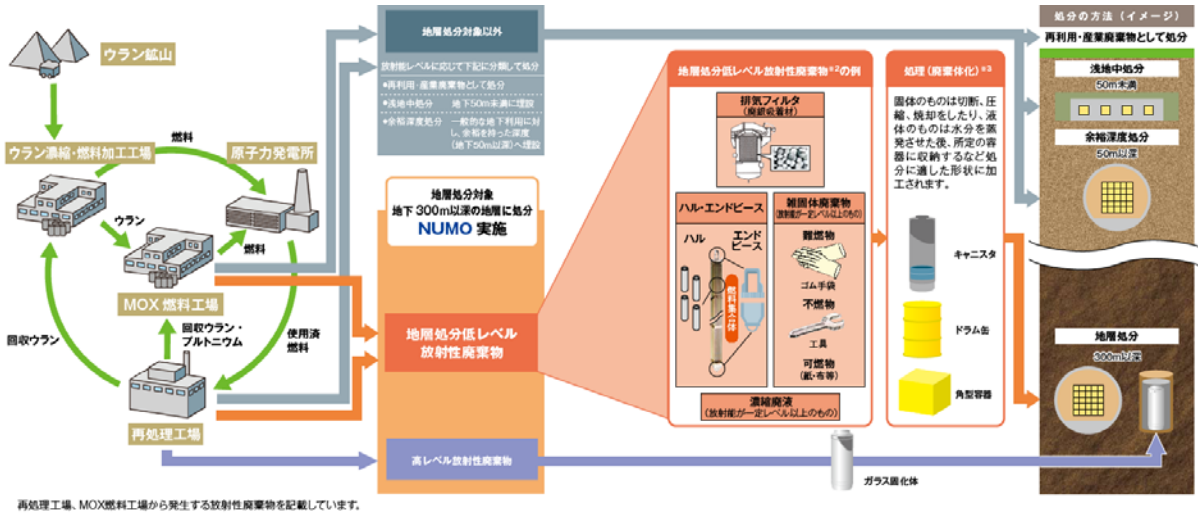


図 2.1.2-1 放射性廃棄物の処分方法の概念図

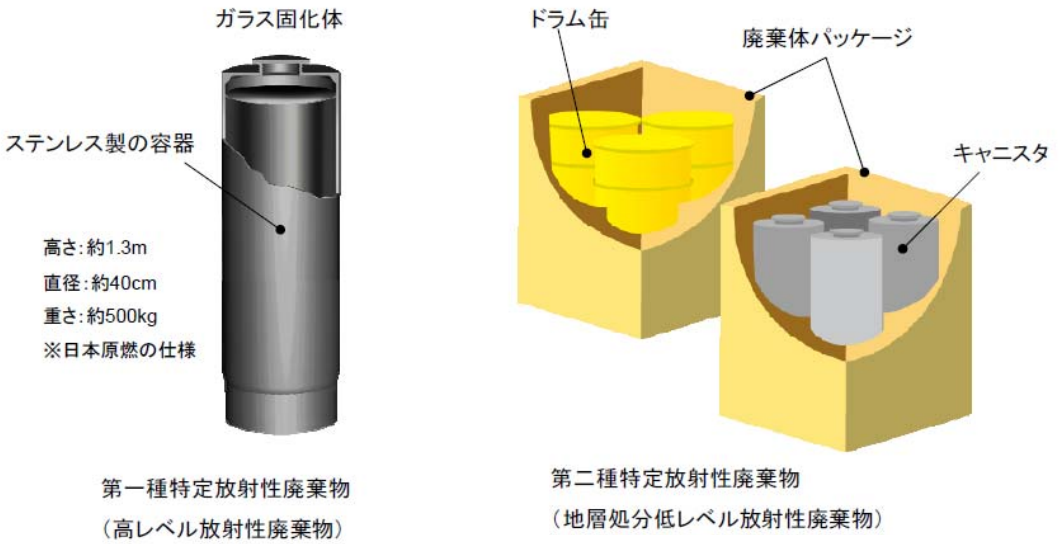


図 2.1.2-2 第一種特定放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物）および第二種特定放射性廃棄物（地層処分低レベル放射性廃棄物）のイメージ（形態）

2.2　地層処分の概要

2.2.1　地層処分の選択と固有の課題

高レベル放射性廃棄物などの地層処分対象廃棄物は，放射能レベルが高いものや半減期が極めて長い放射性物質を多く含むため，長期間にわたって人間とその生活環境に有意な影響を及ぼす潜在的な危険性を有している。そのような危険性の顕在化を回避するためには，廃棄体を生物圏から半永久的に隔離する処分方法が最も有効であるという考え方が議論され，国際的にも定着している（経済協力開発機構・原子力機関（以下，OECD/NEAという）(OECD/NEA，1995)。これまでに，宇宙空間，海洋底下，極地の氷床，深部の地層などに処分する概念が検討されてきたが，現在では，深部の地層を利用する地層処分が最も安全で有効な方法と考えられている。その理由は，地層処分の以下のような好ましい特性による（OECD/NEA，1984)。

- 人間の継続的な関与なしに長期的に隔離することで安全が確保できること（受動的安全性)。
- 長期にわたる安全性を評価できる見通しがあること。
- 自国の領土内において実現可能であること。
- 処分の実施に際して既存の技術や知見が利用できること。
- いったん処分された廃棄物の回収が何らかの理由で必要となった場合，技術的に対応が可能であること。

このように，地層処分は高レベル放射性廃棄物などを隔離し，受動的安全性を確保するために適した特性を有するが，固有の課題も存在する。具体的には，地層処分ではこれまで実施されてきた大規模な土木事業や原子力事業などとは異なる以下のような課題が挙げられる。

- 安全性の評価を極めて長い時間スケールに対して行わなければならない。
- 天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とする必要がある。
- 事業が長期にわたるため事業を取り巻く環境が変化する可能性がある。
- 世界中で地層処分を実現した国はない。

地層処分の安全性を十分に確保するためには，これらの特性を考慮し，地層処分固有の課題を十分に認識した上で，事業を合理的に推進していくことが必要である。

2.2.2　地層処分に関する放射線防護原則

放射性廃棄物の処分の安全確保に関しては，一般論として「濃縮（固化）・閉じ込め」と「希釈・分散」という二つの基本的な考え方がある（OECD/NEA，1977)。いずれの考え方においても環境への放射性核種の早期放出または時間が経過した後の放出が生ずるであろうことから，国際原子力機関（以下，IAEA という）により策定された放射性廃棄物管理の基本原則 4「将来世代の防護：放射性廃棄物は，将来世代の健康に対して予想される影響が，現在受け入れられている影響のレベルよりも大きくならないような方法で管理されなければならない。」（IAEA，1995）で言及されているように放出をゼロとすることが目標とされている訳ではない。大気中や水中への早期放出のように環境における「希釈・分散」によって安全に処分することが期待できない放射性廃棄物に関しては，適切な形態に固化され前者の「濃縮（固化）・閉じ込め」の考え方によって処分する方法が採られる。閉じ込めには，放射性核種の放出を防ぐことに加え，長期的には，放射性核種の放出を最小限に抑えるといった考え方へ移行すると考えられる。この考え方による処分方法に移行しても人間や環境に有意な影響を与えないようにすることが重要である。地層処分施設はこのような固体廃棄物を対象とし，その放射能レベルや形態に応じてサイト選定や施設の設計が行われる。

一般に上記の様な安全確保を考えるべき期間として，操業前，操業中および閉鎖後という大きく三つの期間に分けられる。地層処分事業において，放射線の防護を考えなければならないのは，一般公衆と作業員に対する操業中の期間および一般公衆に対する閉鎖後の期間となる。

以下に放射線被ばくの考え方についての国際的にどのような議論がされているかについて述べるが，NUMO の考える安全確保の考え方については，第 3 章で記述することとする。

2.2.2.1　操業中の期間

操業期間には，廃棄物の埋設施設への搬入・定置，施設の閉鎖のための準備が行われる。操業期間中の作業は密封線源である固体放射性廃棄物の取り扱いであり，放射線による外部被ばくに対する防護が主要な課題となる。この間，線源となる廃棄物は管理され，影響については検証することができることから，国際的な指針や国内法に沿って通常の原子力施設などと同様の方法により，放射線の防護を実施することが可能である。

操業期間中の防護目標および基準に関する基本的な考え方については，次に示す通常の原子力施設に対し IAEA によって示されているもの（IAEA，1996a）が適用可能である。

・　防護目標

処分施設の操業による職業人や公衆の放射線被ばくは，社会的，経済的要因を考慮して合理的に達成し得る限り低いものとしなければならない，また，個人の被ばくは適用される線量限度および線量拘束値を超えないように維持されなければならない。

・ 基準（実効線量）

－ 職業人の被ばく限度：連続した 5 年間の平均年実効線量限度 20mSv；年間の実効線量限度 50mSv

－ 不特定多数の公衆で構成される決定グループに対する平均推定線量の限度：年実効線量 1mSv

また，国際放射線防護委員会（以下，ICRP という）によれば，公衆に対する被ばくについては種々の線源の重畳を考慮し，施設や操業による線量が線量拘束値 0.3mSv/年を超えないように設計されなければならないとされている（ICRP，1997，2000a）。

2.2.2.2 処分場閉鎖後

放射性廃棄物処分に対する主要な関心事は，処分場を閉鎖し制度的管理を止めた後，人間の健康と環境を長期的にどのような考え方で防護すべきかという点である。処分場が閉鎖された後，放射性核種が非常に長い時間を経て環境に移行し，遠い将来，その結果として人間の被ばくを引き起こす可能性が想定される。このような地層処分特有の問題に対し，ICRP26 によって示されていた防護体系の考え方（ICRP，1977）の適用性について検討が行われた（OECD/NEA，1984；ICRP，1985）。

これらの検討では，地層処分による長期的な影響については，確率は低いながらも線量限度を超える潜在的な線量をもたらすようなシナリオが考えられ，個人が一定の予測される線量を受ける確率が 1 か 1 に近いと考えられる条件に対して規定される線量限度のみからなる基準によって制限することはできないとした上で，確率を考慮に入れたすべてのシナリオに起因する放射線被ばくによる個人のリスク限度を確立することが適切とされた。また，日常生活で通常受け入れられているリスクのレベルと比較することによって，およそ 10^{-5}/年というリスクが線量に換算して年間約 1mSv に相当することが示されている。

ICRP は，その後の科学的知見の進展などに基づき，原則としてすべての放射線源を対象とした放

射線防護体系を ICRP60（ICRP，1991）において示し，これを廃棄物処分に適用するための勧告として，放射性廃棄物全般にわたる処分方策に関する ICRP77（ICRP，1997），長寿命の固体放射性廃棄物の処分方策に特化した ICRP81（ICRP，2000a）をまとめている。

ICRP60 では防護の最適化のために線量拘束値の概念が示された。また「潜在被ばく」の概念（「被ばくが起こる可能性はあるが，起こることは確実ではない」ような被ばくをいう）が導入され，「通常被ばく」（多少の不確実性はあるものの将来ほぼ発生することが確からしいと考えられる被ばく）と対となるものとして定義された。潜在被ばくについては，ICRP64（ICRP，1993）でより具体的に基本概念や勧告の適用に関する説明が行われている。

これを受け ICRP77 では，廃棄物処分の放射線学的影響に対する防護について，線量拘束値約 0.3mSv/年を超えないように最適化を行うことが適切であろうと勧告している。また将来世代の防護の観点から用いる指標として，通常被ばくに対しては決定グループの構成員に対する年間の個人線量，潜在被ばくに対しては決定グループ構成員に対する年間の個人リスクを勧告している。

長寿命放射性廃棄物の処分を対象とした ICRP81 では，線量拘束値とリスク拘束値の適用に関し，遠い将来における個人の線量は推定されるのみであり，これらの推定値の信頼性は先になればなるほど低下してくるということに留意する必要があるとしている。特に，一定レベルの放射性核種が存在している環境下で放射線量の推定値を決定することになる人間の将来の行動様式を予測するのは困難であり，一般的な想定に基づく以外，これを設定することは不可能である。従って，地層処分の影響を表す線量あるいはリスクというのは，およそ数百年を超えるような将来にわたる健康への影響を確実に予測するための尺度ではなく，地層処分システムに関する現在の理解に基づいて処分場が受け入れられるかどうかを判断する上で，適切な基準と比較するために推定されるものであるとしている。

ICRP81 では，地層処分において考慮すべき被ばくの状況には，自然過程と人間侵入の二つのカテゴリーに分けられる。自然過程に対する放射線防護基準には，線量拘束値またはリスク拘束値を適用することが適切。一方，人間侵入の意味合いを考える時は，拘束値を地層処分に適用することは適切でない。さらに自然過程シナリオでは，起こりそうか，あるいは代表的なシナリオとその他のあまり起こりそうにないシナリオを区別して評価することができるとしている。よって想定される被ばくの状況について，大きく二つのカテゴリーを考えている。これらは，自然に進む劣化や少しずつ変化するプロセス及び自然の突発的事象（disruptive scenario）により生じる被ばく（自然過程（natural process））と意図的でない人間侵入により生じる被ばくである。

すべての自然過程（火山活動，断層活動などによる突発的事象も含む）に対し，通常の自然過程の事象の被ばく状況について線量拘束値 0.3mSv/年を上限として適用することを勧告している。これは，10^{-5}/年のオーダーのリスク拘束値に相当するとし，この適用を容認することで潜在被ばくに対する拘束値を与えている。

処分場は，このカテゴリーに含まれるプロセスと事象には十分な抵抗性を持つように設計されている。また，定量的な評価に関して，その信頼性に合理的な見通しが得られるように科学的基礎を準備することが可能である。従って，このような評価に基づく線量とリスクの計算結果は，それぞれの拘束値と比較すべきであるとしている。

人間侵入については，自然過程を表すシナリオのように拘束値を適用することは適切ではないとしている。拘束値の代わりに，人間侵入の重要性を判断するための線量レベルを考える上で，それ以下であれば介入する必要はなさそうだという現存年線量 10mSv 程度と，それ以上であれば常に介

入を考慮すべきという現存年線量 100mSv 程度とを参考とすることができるであろうとの示唆を与えている。

人間侵入に対して拘束値が適用できない理由として，ICRP81 では，人間侵入が防護の最適化のプロセスを経て構築された地層処分システムによって設けられているバリアを通り抜けてしまうこと，将来の人間活動の予測に関しては確かな科学的根拠が乏しいか全くないことを挙げている。一方，人間侵入の可能性を完全に排除することはできないことから，一つまたはそれ以上のもっともらしい人間侵入シナリオを検討し，その結果に基づいて人間侵入に対する防護の重要性を判断することが求められる。その判断のための目安として，上述したとおり，拘束値の代わりに現行の基準における介入レベルの線量を用いることが示唆されている。この考えに従えば，人間侵入の影響について評価した結果，サイト周辺の住民の線量が介入レベルの線量となる可能性がある場合には，人間侵入の発生確率を減らすため，あるいはその影響を制限するために必要な措置（例えば，侵入をより困難とする深部への地下施設の設置，頑健（robust）な設計の採用，立入り制限や核種放出の可能性に対するモニタリングなど能動的な制度的管理，土地利用制限など受動的な制度的管理など）を，処分場の操業から閉鎖に至る（必要に応じて閉鎖後の制度的管理が行われる場合にはこれも含め）事業の種々の段階において採ることとなる。

ICRP81 における議論でも強調されているように，安全評価によって推定される遠い将来（ICRP81 では「およそ数百年を超える」とされている）における線量あるいはリスクは，人間の健康への影響を正確に予測するための直接的な指標ではなく，地層処分システムの性能の評価に当たり適切な基準と比較して，その安全性が受け入れられるものかどうかを判断するために用いられる尺度である点に留意することが重要である。このことは，OECD/NEA の長期安全性の評価に関する集約意見（OECD/NEA，1991a），IAEA の BIOMASS プロジェクト（IAEA，2003a）においても指摘されている。また，OECD/NEA の First RWMC-RF Workshop Tokyo 2009 では，「放射線被ばくの予測の信頼性が極めて遠い将来に関しては，技術的に最善の手段（BAT：Best Available Technique）の概念が有効性を増すかもしれない」との報告もある。

このような観点から，線量拘束値やリスク拘束値を満たしているかどうかの判断においては，遠い将来になればなるほど，こうした基準を参考値と考えるべきであり，単に数値が守られているだけで，あるいは拘束値を上回っているということだけで，安全性を議論すべきではないという ICRP の指摘は重要である（ICRP，2000a）。セーフティケースを総合的に検討した上で判断がなされることが肝要である。判断は際限のないものであってはならず，自然過程に対して適切な拘束値が満足されており，偶然の人間侵入の可能性を低減するために合理的な措置が採られ，また工学的，技術的および管理上の原則が健全に働いていれば，放射線防護の要件は満たされていると考えることができるという見解が示されている。

2.2.3　わが国における地層処分事業の進展

2.2.3.1　基盤的研究開発の段階

わが国の高レベル放射性廃棄物対策については，1976 年に原子力委員会により地層処分に重点を置く旨の目標と所要の研究開発方針（原子力委員会，1976）が示され，これに沿って研究開発が進められた。

その後，核燃料サイクル開発機構（現 JAEA，以下，JNC という）は，関係機関の協力のもとに「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りま

とめー」（JNC，1999a～e；以下，第２次取りまとめという）を作成した。

結論として，これまでの研究開発により，以下の技術基盤が整備された。

- 地層処分概念の成立に必要な条件を満たす地質環境がわが国に広く存在し，特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発されたこと
- 幅広い地質環境条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術が開発されたこと
- 地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発され，それを用いて安全性が確認されたこと

これにより，「わが国においても地層処分を事業化の段階に進めるための，信頼性のある技術的基盤が整備された」と総括した（JNC，1999a）。

第２次取りまとめは，原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会によってレビューを受け，「バックエンド対策専門部会報告書に示された技術的重点課題等が適切に達成され，その技術的信頼性が示されている」と評価されている（原子力委員会，2000c）。

このように，地層処分計画の初期の段階における基盤的な研究開発は，以降の段階の基礎を築くという観点から極めて重要な役割を果たしたといえる。

2.2.3.2　最終処分法の制定と実施主体の設立

2000 年 6 月に最終処分法が公布された。最終処分法は，原子力発電所の運転に伴って生じた使用済燃料を再処理することによって発生する高レベル放射性廃棄物の最終処分を，計画的かつ確実に実施することを目的として制定され，実施主体の設立，最終処分費用の確保・拠出制度の確立，三段階の処分地選定プロセスなどをその内容としている。また，高レベル放射性廃棄物は地下 300m 以上の深さの安定な地層中に処分することが定められている。最終処分法に基づき，実施主体として NUMO が 2000 年 10 月 18 日に設立された。

国においては，最終処分法の公布を受け，原子力委員会，原子力安全委員会の意見をもとに，経済産業大臣が特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画（以下，最終処分計画という）を策定している。ここには，原子力発電によって過去（平成11年まで）および将来（約20年程度まで）に発生することが予想される高レベル放射性廃棄物の発生量，処分場の選定や地層処分を行う時期，最終処分施設の規模，年間の処分施設の能力，実施の方法について定められた（通商産業省，2000a）。

また，同様に策定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（以下，最終処分基本方針という）には，実施主体は安全の確保を旨として計画を進め，適切な情報公開により計画の透明性を確保するとともに，概要調査地区などの選定において地域住民の理解と協力を得るよう努めることとされている。また，最終処分を金属製の容器などの人工バリアと岩盤などの天然バリアによる多重バリアシステムによって実施すること，原子力委員会の意見に基づく技術開発の進め方などが示されている（通商産業省，2000b）。

発電用原子炉設置者は，経済産業大臣が決定した拠出金額を，実施主体である NUMO に対して拠出し，実施主体は拠出金に見合った高レベル放射性廃棄物の処分を行うこととなっている。なお，納付された拠出金の管理などの透明性を確保する観点から，別途，経済産業大臣が指定した公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下，原環センターという）が拠出金を運用・管理することになっており，実施主体は必要な時にそれを取り戻すこととなっている。

サイト選定は，まず文献調査を基に概要調査地区が選定され，選定された概要調査地区において

ボーリング調査などによる地表からの調査が実施された後，その調査結果をもとに概要調査地区の中から精密調査地区が選定される。選定された精密調査地区において地下の測定および試験を行う施設を利用したさらに詳細な調査が実施され，その調査結果をもとに処分施設建設地が選定されることになっている。これら概要調査地区などの選定に当っては，経済産業大臣が都道府県知事，市町村長の意見を聴き，十分に尊重して行うこととなっている。

2.2.3.3　事業実施の段階

NUMO は，2002 年に「特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」を全国の市町村から公募し，応募獲得に向けてさまざまな取り組みを行っている。その後，2007 年の最終処分法の改正では，第一種特定放射性廃棄物として高レベル放射性廃棄物を定義し，新たに第二種特定放射性廃棄物（地層処分低レベル放射性廃棄物）として，使用済燃料の再処理などに伴って発生し，長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがある（2007 年に政令で定められたもの，後述），半減期の長い核種を一定量以上含む低レベル放射性廃棄物を定義した。この地層処分低レベル放射性廃棄物も高レベル放射性廃棄物と同様に最終処分することが追加された。

これを受け，NUMO はこれを事業の対象に加えた。

なお，地層処分低レベル放射性廃棄物は，最終処分法の第二条の 9 で指定された物であり，政令である最終処分法施行令の第三条によって定められるものとして以下に定義されている。

> 第三条　法第第二条の 9 の政令で定めるものは，次に掲げる物とする。
>
> 一　次に掲げる物を固型化し，又は容器に封入した物
>
> イ　発電用原子炉の炉心に装てんされ，発電の用に供された金属であって，使用済燃料の再処理に伴って使用済燃料とともにせん断されたもの
>
> ロ　イに掲げる金属を収納した容器に充てんされた水及び当該水のろ過に用いられたろ過材
>
> ハ　使用済燃料の再処理に用いられたリン酸トリブチル溶液（よう素及びその化合物の除去が行われていないものに限る。）の精製に用いられた炭酸ナトリウム溶液
>
> ニ　使用済燃料の再処理に伴って再処理施設から排出される空気に含まれるよう素及びその化合物の吸着に用いられた金属

二　前号に掲げる物のほか，使用済燃料の再処理等に伴い使用済燃料，分離有用物質又は残存物によって汚染された物を固型化し，又は容器に封入した物であって，次の表の上欄（ここでは左）に掲げる放射性物質についての放射能濃度がそれぞれ同表の下欄（ここでは右）に掲げる放射能濃度を超えるもの

対象核種	放射能濃度（Bq/t）
C-14	8.7×1013
Cl-36	9.6×1010
Tc-99	1.1×1012
I-129	6.7×109
全α	8.3×109

TRU 廃棄物は, TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ(以下, 第 2 次 TRU レポートという)（電気事業連合会・JNC，2005）の評価において，その特性に応じたグループ分けが行われ，廃銀吸着材を主要な廃棄物とするグループ 1，ハル・エンドピースを主要な廃棄物とするグループ 2，硝酸塩を含む廃棄物をまとめたグループ 3，その他の廃棄物をまとめたグループ 4 の 4 つのグループに分類された。図 2.2.3-1 に，TRU 廃棄物のグループ分類とそれぞれのグループに振り分けた TRU 廃棄物の特徴などを示す。ここで，第 2 次 TRU レポートにおいてグループ 3 とグループ 4 に分類された廃棄物は，上記の最終処分法施行令に基づき，第二種特定放射性廃棄物として地層処分の対象となるものと，対象とならないものに分けられた。

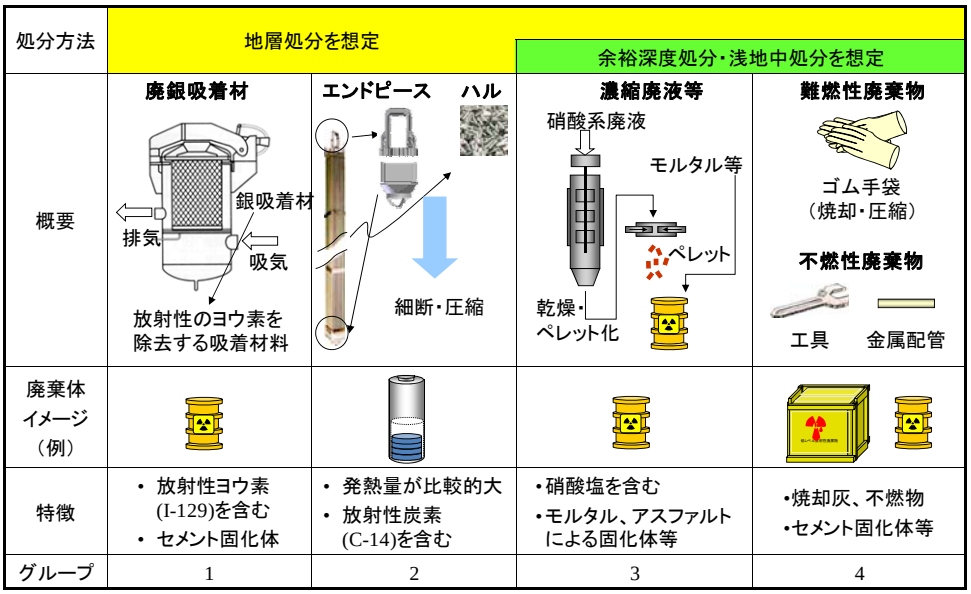


図 2.2.3-1 TRU 廃棄物のグループ分類と特徴

（総合資源エネルギー調査会，2006 を編集）

また，最終処分計画は，最終処分法の改正を受け，2008 年に閣議決定により見直しされている。

これには，特定放射性廃棄物の発生量も見直されている。使用済燃料は原子力発電量に応じて発生することから，ガラス固化体の発生量も原子力発電量に応じたものとなる。例えば，100 万 kW

の原子力発電所を 1 年間運転するとガラス固化体が 30 本程度発生する。電力消費の側からみると，標準的な家庭 10 万世帯が 1 年間に使用する電力を原子力発電で賄った場合，およそ 1 本のガラス固化体が発生することになる。また，家庭や工場などで利用するすべての電力の半分を原子力発電で賄うとした場合，日本人 1 人が一生（80 年）の間に発生するガラス固化体の体積は，ゴルフボール約 3 個分に相当する（NUMO，2004）。

このような前提を踏まえ，第一種特定放射性廃棄物の発生量は，2000 年までに約 13,300 本相当，2006 年までに約 7,100 本相当が発生していること，2021 年頃までに約 40,000 本に達する見込みであること（2007 年までの貯蔵量は 1,551 本），第二種特定放射性廃棄物の発生量は，再処理などにより 2007 年までに約 4,100m^3 相当が発生していること，再処理施設などの操業計画から，総量約 18,100m^3 が見込まれること（2007 年までの貯蔵量は約 3,231m^3）が示された。また，地層処分施設の規模および能力については，第一種特定放射性廃棄物が 4 万本以上／施設，処分能力 1 千本／年であること，第二種特定放射性廃棄物が 19,000m^3 以上／施設であることが示された時期については，概要調査地区の選定を平成 20 年代中頃，地層処分施設建設地の選定を平成 40 年前後，地層処分の開始は平成 40 年代後半とされた（経済産業省，2008a，2008b）。なお，廃棄物発生量の算定では，発電電力量に換算係数を乗じて算定している（電力会社における算定では，加圧水式原子力発電所用の使用済燃料の場合，燃焼度 45,000kw，原子炉から取り出し後 4 年後に再処理し，50 年間の貯蔵後に地層処分する設定である）。

安全規制の考え方については，原子力安全委員会によって基本的考え方が示されている（原子力安全委員会，2000b；以下，第 1 次報告という）。この中で，安全確保の原則として，長期的に安全な地質環境を選定するなど，常に長期的な観点から安全性に影響が及ぶおそれのある因子に配慮しつつ，安全確保のための対策（サイト選定，工学的対策）を講ずる必要があること，また，処分場の設計・処分に係る事業許可申請以降，事業の各段階において安全確保対策の妥当性の確認が必要であり，これらの安全確認のうち最も早い段階で行われる事業許可申請時の安全確認は安全評価によって行うことが挙げられている。

このため，実施主体による処分施設建設地の選定に続いて，処分場の設計・処分に係る事業許可申請以降，事業廃止に至るまで，各段階に対応した安全確保方策を講ずる必要があり，原子力安全委員会は，安全基準・指針などの策定を行うとともに，各段階において適切に関与することが重要であるとされている。具体的には，実施主体による精密調査地区選定開始時期までに，処分場の設計要件，安全評価に係る安全指標，基準値，安全評価シナリオなどを定めた「安全審査基本指針」を策定，また新しい知見を適宜取り入れ，安全審査開始前までに「安全審査指針」および「処分場の技術基準（建設～事業廃止）」を策定することとなっている。

安全確保のための対策については，多重バリアシステムが長期にわたって所期の性能を発揮できるよう，地質環境などにおいて適切な環境要件を満たす処分地が選定されることが重要であるとされている。

処分場の設計・処分に係る事業許可申請時における安全評価については，地層処分の安全性に影響を及ぼすと思われる種々の現象を考慮した解析を行い，一般公衆に対する評価線量が基準値を超えていないことなどを確認することが基本であるとし，今後国際動向を踏まえた指標および基準値が設定されることとなっている。

安全評価の結果が確実に担保されるように建設，操業，閉鎖，管理および事業廃止の各段階において「安全確認」を行うことが重要であり，各段階に応じたモニタリングや巡視・点検などを実施

することが必要であるとしている。特に，処分場の閉鎖に際しては，建設・操業段階に得られたデータを追加して安全評価の結果が妥当であることの確認を行うこととし，妥当性を確認するまでの期間は，廃棄物の回収の可能性を維持することが重要であるとしている。

前記第1次報告で示された安全確保のためにサイトに要求される環境要件の在り方に基づき，原子力安全委員会特定放射性廃棄物処分安全調査会は,「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階で考慮すべき環境要件について」を取りまとめている（原子力安全委員会，2002）。これは，概要調査地区を選定する際に，文献調査によって明らかにサイトとして不適切であると考えられる要件を示したものである。なお，概要調査あるいはそれ以降の調査結果をもとに判断することが適当と考えられる事項や，処分施設の設計・施工との関連において検討すべき事項については環境要件とはしないとの考え方が採られている。環境要件をあらかじめ提示し，概要調査地区選定に際しての判断の根拠を示すことは，選定プロセスの透明性を高めるとともに，必要な安全確保に関する検討を着実に進める上でも重要であるとしている。

これらの環境要件は，概要調査地区の選定に当たって NUMO が作成した公募関係資料「概要調査地区選定上の考慮事項」（NUMO，2002b）に反映されている。

実施の段階においては，段階的に選定されていく特定のサイトの環境条件に関する情報に基づいて，そのサイトの適切性や処分場のデザインの検討，安全評価などが実施され，セーフティケースが繰り返し作成される。このための科学技術的基盤や実行可能な技術を継続的に整える上で研究開発の枠組みを確保しておくことが必要である。このような研究開発の必要性を考慮し，原子力委員会は国や国際機関，実施主体の役割に関する方針を示している（原子力委員会，2005）。これによれば，地層処分事業の安全な実施，経済性および効率性の向上などを目的とする技術開発は実施主体（NUMO）が担当，国および JAEA などの関係機関は最終処分の安全規制，安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究などの基盤的な研究開発および地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発などを進めていくものとしている。

2.2.4　わが国の地層処分事業の特徴

2002 年 12 月に NUMO が公募を開始して以降，最終処分法および炉規法の改正や安全規制に関する議論の進展など，地層処分事業を取り巻く環境にはさまざまな変化があった。そこで，本項では，わが国の地層処分事業の特徴を整理する。

2.2.4.1　わが国の地質環境の特徴

わが国は，変動帯に位置し，安定大陸に比べてプレート運動に起因する断層活動，火成活動，隆起・侵食などの自然現象が活発である。わが国の地層処分における長期的な安全性を確保するためには，まず，将来にわたりこれらの自然現象の著しい影響が見込まれる場所を回避する必要がある。

また，山がちで海に囲まれた地形・地理条件，変動帯に特有な複雑な地質構造や多種多様な岩種，豊富な地下水や高い地下水位などの地質環境の特性を把握し，それらの長期的な変遷を考慮して，地層処分にとってより好ましい条件を有する場所を選定することが重要である。

これらの要件に対して，自然現象は過去数十万年程度の地質学的記録をもとに，将来 10 万年程度の予測が可能であることや，変動帯に位置するわが国においても，地層処分に必要な条件を満たす地質環境が広く存在することが示された（JNC，1999b）。また，概要調査地区選定に関する基本的考え方，サイト選定におけるさまざまな条件も具体的に示されている（土木学会原子力委員会地下

環境部会，2001)。これらを踏まえて，NUMO は概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO，2002b）および技術的背景（NUMO，2004）を公表している。

2.2.4.2　三段階のサイト選定と公募

サイト選定のプロセスは最終処分法において規定されており，「概要調査地区の選定」，「精密調査地区の選定」，「処分施設建設地の選定」の三段階の選定過程を経て，処分施設建設地が決定される（図 2.2.4-1)。サイト選定においては，各段階において「法定要件」（最終処分法および同施行規則に示された各段階の調査地区の選定要件）が定められ，それら要件への適合が求められる。

最初の段階である概要調査地区の選定に当たっては，あらかじめ文献調査を行うことが求められており，NUMO は，「特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」を全国の市町村から公募し，応募獲得に向けてさまざまな取り組みを行っている（NUMO，2009)。

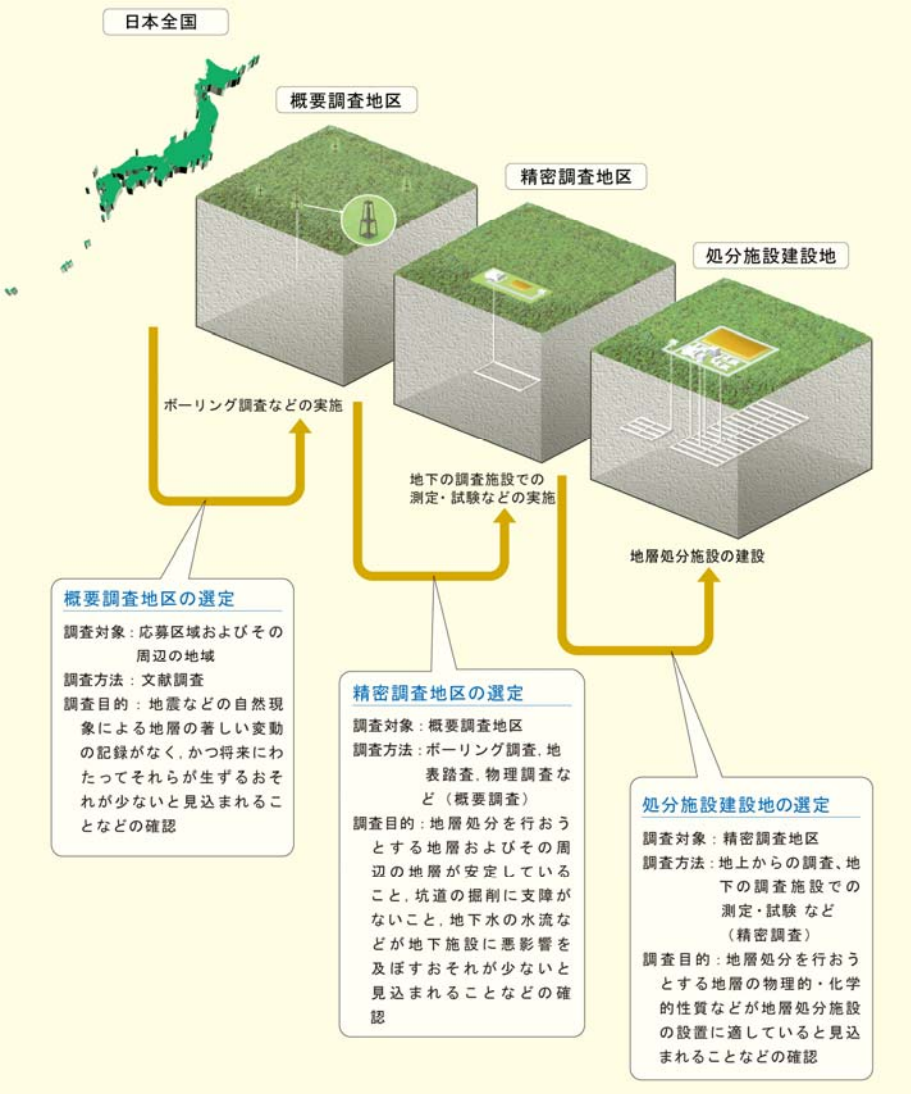


図 2.2.4-1 三段階のサイト選定過程

なお，NUMO の事業に地層処分低レベル放射性廃棄物が加わったことにより，2008 年から高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両者を対象とした公募を進めている（NUMO,

2009)。また，高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物については，併置による処分も可能である。

これまで事業に関心を示し応募の検討が報道された地域は，10 数箇所である。高知県東洋町においては，2006 年 8 月以降，町などが主催する説明会が開催され，国や NUMO も参画し，事業の概要，安全性などについて説明を行った。

2007 年 1 月に，東洋町から全国で初めて文献調査への応募がなされ，国は同年 3 月に認可した。しかしながら，4 月に行われた町長選挙において，文献調査への反対を表明していた候補が当選し，応募書が取り下げられたことから，東洋町での文献調査は取り止められた。

このような経緯を踏まえ，2007 年 11 月に公表された「放射性廃棄物小委員会報告書 中間とりまとめ」（総合資源エネルギー調査会，2007）受け，国が市町村に対して文献調査の実施を申し入れる方式も併用されることとなった。

2.2.4.3　長期にわたる事業

地層処分事業は，サイト選定，安全審査，処分場の建設，操業，閉鎖および閉鎖後の管理を経て事業廃止に至る段階に分けられる。各段階に必要な期間は，サイト選定で 20 年程度，処分場の建設と操業を併せて 60 年程度，処分場の閉鎖で 10 年程度が見込まれ，事業全体では 100 年に及ぶ長期プロジェクトとなる（NUMO，2009）。このため，あらかじめ事業全体を俯瞰し，各段階での目標とそれを達成するための実施事項を明確にし，必要な技術開発を計画的かつ段階的に進めていくことが重要となる。

2.2.4.4　段階的に整備される安全規制

安全規制については，第 1 次報告において，安全規制に関する基準・指針などは，サイト選定の進捗，サイト固有の状況，科学技術の進歩に応じて，段階的により詳細なものとなっていくことが重要である，との考え方が示されている。

また，原子力安全委員会は，2004 年 6 月に，「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」（原子力安全委員会，2004）をまとめ，極めて長期にわたる期間の安全評価にはそれに付随する不確実性は避けられず，これを踏まえた評価としてリスク論的考え方の適用が有効であることを示すとともに，判断に用いる基準は国際放射線防護委員会の勧告も参考にすることなど，放射線防護基準など今後の検討の方向性を示した。

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会のもとに設置された廃棄物安全小委員会が，2006 年 9 月に取りまとめた「放射性廃棄物の地層処分にかかわる安全規制制度のあり方について」（総合資源エネルギー調査会，2006）においては，サイト選定段階における規制機関の役割や基本設計から建設，操業，閉鎖，事業廃止までの各段階における安全規制の法的枠組みが検討されるとともに，閉鎖に関しては，最終的に閉鎖を判断するまでは，不測の事態への適切な対応などのために廃棄体の回収可能性を維持することが重要であると指摘されている。この報告書を技術的背景とした 2007 年 6 月の炉規法の改正では，事業の実施にかかわる許可，設計および工事の方法の認可，使用前検査，定期検査，保安のための措置義務，埋設の確認，閉鎖措置（坑道埋め戻し）計画の認可，閉鎖の確認，事業の廃止，核物質防護など，事業の段階的進展を踏まえた安全規制の法的枠組みが整備された。

また，同小委員会において，改正された炉規法の施行に必要な埋設規則の策定に資することを目

的として，2008 年 1 月「高レベル放射性廃棄物等の地層処分にかかわる安全規制について」（廃棄物安全小委員会，2008）がまとめられた。これに基づき，「第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」が新たに制定され，事業許可後 20 年を超えない期間ごとに廃棄物埋設施設の定期的な評価（以下，安全レビューという）を行うことなど，安全規制に求められる基本的な要件が規定された。

NUMO は，事業を進めていく上で，これら安全規制から示される要件への適合性について確認していくとともに，安全確保をより確かなものとするために，自主的な基準（以下，自主基準という）を策定する。自主基準は，事業を安全に進めるための重要な要素（主に技術的な観点）に関して，NUMO が意思決定を行うための考え方，判断指標などをまとめるものであり，現段階では「概要調査地区選定上の考慮事項」（NUMO，2002b）がその例である。

2.2.4.5　役割分担による技術開発

NUMO が設立された 2000 年以降の地層処分に関する技術開発の進め方については，原子力長期計画（原子力委員会，2000a）および原子力政策大綱（原子力委員会，2005）で規定されている。例えば原子力政策大綱では「NUMO には，高レベル放射性廃棄物の最終処分事業の安全な実施，経済性および効率性の向上などを目的とする技術開発を計画的に実施していくことを期待する。また，JAEA を中心とした研究開発機関は，深地層の研究施設などを活用して，深地層の科学的研究，地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化などに向けた基盤的な研究開発，安全規制のための研究開発を引き続き着実に進めるべきである。」と述べられている。

また，JAEA の地層処分基盤研究施設（ENTRY，茨城県東海村）や地層処分放射化学研究施設（QUALITY，茨城県東海村），さらに瑞浪超深地層研究所（岐阜県瑞浪市）や幌延深地層研究センター（北海道幌延町）における研究開発が着実に進展している。

この役割分担に沿って，NUMO は，安全に事業を進めていく上で必要な実務的な技術の整備を進めるとともに，経済性や効率性の向上を目指した技術開発を進めている。一方，国や研究開発機関が進める基盤研究開発については，資源エネルギー庁と JAEA が中心となって全体計画を策定し，原環センター，電中研，産総研，放医研などの基盤研究開発機関と基盤研究開発調整会議（以下，調整会議という）を組織して，事業を支える基盤技術の強化を効率的に進めるよう努めている（経済産業省・JAEA, 2006）。NUMO は，これら基盤研究開発の成果が事業に効果的に活用できるよう，技術開発ニーズを明示する（NUMO，2010）とともに，得られた成果の評価を行い事業に活用していく。

2.2.4.6　処分場の規模

高レベル放射性廃棄物処分場の規模としては, 2020 年前後までの原子力発電によって発生すると見込まれるガラス固化体 4 万本を処分する規模を想定している。ガラス固化体の発熱は時間の経過とともに減衰していくが，特に初期の段階の高い発熱による地層処分システムへの影響が有意なものとならないように，ガラス固化体に適切な離隔を確保して処分する。処分場のおおよその広がりとしては，5～6km^2（約 3.5km×約 1.5km）を想定している（サイトによっては，これよりも広い範囲を必要とする場合もある）。

また，地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の規模としては，使用済燃料の再処理などの操業・廃止措置計画を勘案して見込まれる地層処分低レベル放射性廃棄物として約 19,000m^3 相当を処分する規模を想定している。地層処分低レベル放射性廃棄物には高レベル放射性廃棄物と比べると多

様な廃棄物がある。発熱性が低い廃棄体が多く含まれており，比較的大断面の処分坑道に廃棄体を効率的に集積して処分する方針である。処分場のおおよその広がりとしては，約 0.25km^2（約 0.5km×約 0.5km）を想定している。

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物を沿岸地域の同一サイトに併置して処分した場合の地下施設のイメージを図 2.2.4-2に示す。

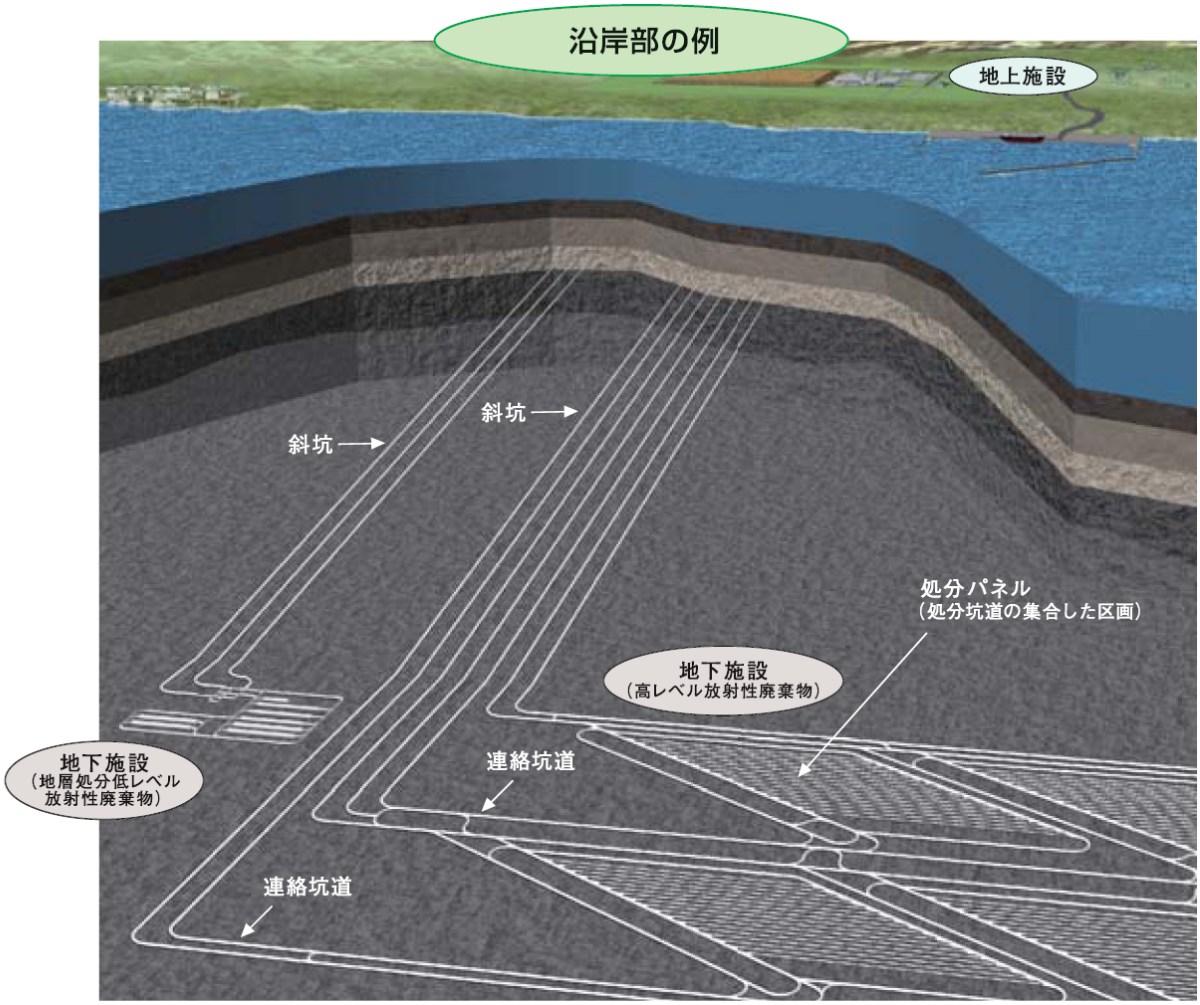


図 2.2.4-2 地層処分場の地下施設の例（NUMO，2009）

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設内の基本的な人工バリア構成を図 2.2.4-3と図 2.2.4-4に示す。高レベル放射性廃棄物処分では，ガラス固化体をオーバーパック（金属製の容器）の容器に封入し，その周りに天然のベントナイトを主成分とした緩衝材を施す。地層処分低レベル放射性廃棄物は，2.1.2.2 で説明したとおり廃棄物の特性によって四つのグループに分け，それぞれにサイトに応じた適切な人工バリアを適用する。代表的な人工バリアは，グループ 1・2 では，廃棄体，緩衝材，埋め戻し材，グループ 3・4 では，廃棄体，充填材である。

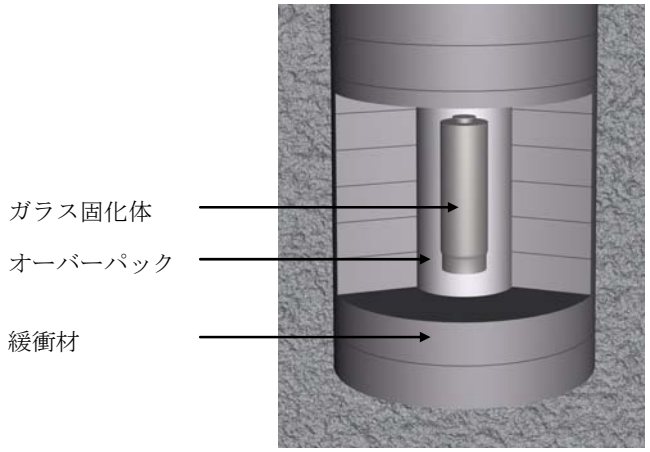
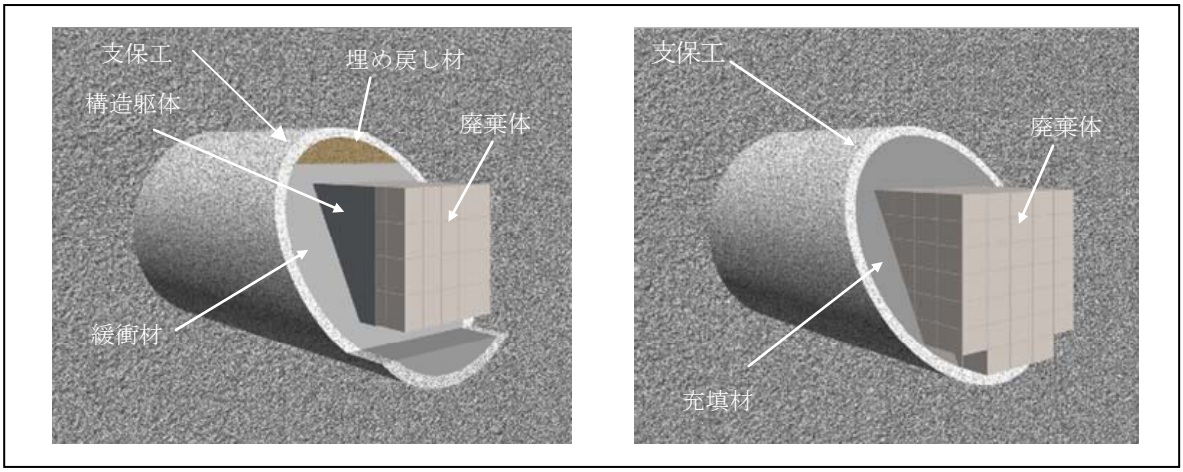


図 2.2.4-3 高レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成



(a) グループ 1・2　　(b) グループ 3・4

図 2.2.4-4 地層処分低レベル放射性廃棄物処分の基本的なバリア構成

2.3 諸外国の取り組み状況

原子力発電を進める諸外国においても,地層処分事業が進められており,さまざまな段階にある。

地層処分場のサイトが正式決定しているのはフィンランドとアメリカであり，スウェーデンでも実質的に決定している。しかし，米国では 2009 年 1 月に発足した民主党のオバマ政権がすでに安全審査段階にあるユッカマウンテンの処分場計画を中止する方針を打ち出し，先行きは不透明になっている。一方，フィンランドとスウェーデンでは建設許可申請に向けての準備が着々と進められている。フランスでは,処分場の候補地が地下研究所があるビュール近傍の 30 km^2 圏に絞られている。このほか，スイス，イギリス，カナダで初期段階のサイト選定手続きが進みだしている。

これらの国のほとんどが，地下研究施設や調査施設を有しており，実証を中心とした研究開発や処分場の建設許可の申請に必要なデータの取得などが行われている（経済産業省，2010b)。

主要諸国における取り組みの概況を，表 2.3-1 に示した。

表 2.3-1 諸外国の状況(2010 年 9 月時点)（経済産業省，2010b に基づき作成）

国　名	状　　況
アメリカ	2002 年にネバダ州ユッカマウンテンが処分サイトとして決定され，2008 年 9 月より処分場の建設認可に関する安全審査が行われている。しかし，2009 年 1 月に発足したオバマ政権は，ユッカマウンテンでの処分計画を中止する方針を打ち出し，2010 年 3 月に許認可申請の取下げ申請を行った。こうした計画変更に伴い，上級有識者委員会（ブルーリボン・コミッション）を設け，使用済燃料管理のあり方の再検討を進めている。
フィンランド	2001 年にオルキルオトを最終処分地にすることが決定された。2004 年 6 月よりオルキルオトで地下特性調査施設（ONKALO）の建設が進められており，地質環境調査も行われている。2012 年に建設許可申請の予定。
スウェーデン	実施主体 SKB は，1995 年から 6 自治体でフィージビリティ調査を行い，2000 年に 3 自治体を次段階のサイト調査候補地に選定。その後，オスカーシャムとエストハンマルの 2 自治体がサイト調査受け入れを議決したことを受けて，2002 年から両自治体におけるサイト調査と環境影響評価を実施。これらの評価を踏まえて SKB は，2009 年 6 月に処分場建設予定地として，エストハンマル自治体のフォルスマルクを選定した。2011 年 3 月に処分場の立地・建設許可申請が行われる予定。
ドイツ	ゴアレーベンで進められていたサイト特性調査は 2000 年以降凍結されていたが，2009 年 10 月に発足した第 2 次メルケル政権は凍結を解除し，調査活動を再開する方針を示した。また，今後調査の再開に向けた具体的な手続きが進められる予定。
スイス	2008 年に策定された特別計画「地層処分場」に基づき，同年 10 月に 3 ヶ所の処分場候補サイト地域が実施主体 NAGRA により提案された。特別計画で規定された 3 段階の選定手続きにより 2018 年を目途にサイト選定を進める。
フランス	2000 年から実施主体 ANDRA がビュールに地下研究施設建設，地下坑道で各種調査・試験を実施。2006 年放射性廃棄物等管理計画法に基づき，可逆性のある地層処分場について，2015 年に設置許可申請，2025 年に操業に開始を目標にビュールを含む 250km^2 圏の追加調査を実施。その結果に基づき ANDRA が，2009 年末に 250 km^2 圏から 30 km^2 の処分場候補サイトを絞り込み。2013 年予定の公開討論会を経てサイトが決定されれば，2014 年に設置許可申請の予定
カナダ	連邦政府は，2007 年 6 月に，最終的には地層処分を行うものの，当面はサイト貯蔵，集中貯蔵を実施するという「適応性のある段階的管理（APM）」を進めることを決定。これを受けて実施主体 NWMO は，2010 年 5 月に 9 段階からなる処分場サイト選定計画を公表し，第 1 段階の処分計画とサイト選定計画に関する情報提供手続きを開始した。2010 年 9 月までに 4 つの地域が NWMO からの情報提供への関心表明に関する議決を行った。
イギリス	政府は 2008 年 6 月に放射性廃棄物管理に関する白書を公表し，将来の処分場受入れに関心を持つ自治体の公募を開始。2009 年 1 月までに 2 市 1 州が関心表明を行い，現在処分地としての適合可能性についての初期スクリーニング中。
スペイン	サイト選定活動が 1998 年に中断され，最終管理方策の決定は先送りされているが，地層処分を有力なオプションとして位置付けている。
ベルギー	地層処分の安全評価および実現可能性の中間報告書が公開され，研究開発の最終段階に入った。建設許可申請は 2020 年以降の予定。

参考文献

土木学会（2001）：概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方，2001 年 8 月

電事連（電気事業連合会），JNC（核燃料サイクル開発機構）（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－

原子力安全委員会（1998）：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（平成 10 年 11 月 2 日原子力安全委員会指示）

原子力安全委員会（2002）：高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について

原子力安全委員会（2004）：放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について，平成 16 年 3 月 10 日

原子力安全委員会（2010）：原子力安全白書　平成 21 年版

原子力委員会（1976）：放射性廃棄物対策について，昭和 51 年 10 月 8 日

原子力委員会（2000a）：原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画（平成 12 年）

原子力委員会（2000b）：超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方

原子力委員会（2000c）：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価原子力バックエンド対策専門部会，平成 12 年 10 月 11 日

原子力委員会（2005）：原子力政策大綱，平成 17 年 10 月 11 日原子力委員会決定

経済産業省（2008a）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針，平成 20 年 3 月 14 日　閣議決定

経済産業省（2008b）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画，平成 20 年 3 月 14 日　閣議決定

経済産業省（2008c）：資源エネルギー庁における「放射性廃棄物の処理・処分」への取組について

経済産業省（2010a）：「平成 21 年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書 2010）

経済産業省（2010b）：諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について，2010 年 2 月

経済産業省・JAEA（日本原子力研究開発機構）（2006）：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画

原子力安全委員会（1998）：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（平成 10 年 11 月 2 日原子力安全委員会指示）

原子力安全委員会（2002）：高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について

原子力安全委員会（2004）：放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について，平成 16 年 3 月 10 日

原子力安全委員会（2010）：原子力安全白書　平成 21 年版

原子力委員会（1976）：放射性廃棄物対策について，昭和 51 年 10 月 8 日

原子力委員会（2000a）：原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画（平成 12 年）

原子力委員会（2000b）：超ウラン核種を含む放射性廃棄物処理処分の基本的考え方

原子力委員会（2000c）：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価原子力バックエンド対策専門部会，平成 12 年 10 月 11 日

原子力委員会（2005）：原子力政策大綱，平成 17 年 10 月 11 日原子力委員会決定

放射線審議会（2009）：日本における放射性廃棄物の埋設処分の概要について，平成 21 年 1 月 13 日

IAEA（1995）: The Principles of Radioactive Waste Management, International Atomic Energy Agency, Safety Series No. 111-F, Vienna, Austria.

IAEA（1996a）: International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, International Atomic Energy Agency, Safety Series No. 115, Vienna, Austria.

IAEA（1997）: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, INFCIRC/546, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

IAEA（2003a）: “Reference Biospheres” for Solid Radioactive Waste Disposal, Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOsphere Modelling and ASSessment （BIOMASS） Programme, Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment, International Atomic Energy Agency, IAEA-BIOMASS-6, Vienna, Austria.

ICRP（1977）: Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 26, Pergamon Press, Oxford and New York.

ICRP（1985）: Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 46, Pergamon Press, Oxford and New York.

ICRP（1991）: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection , International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 60, Pergamon Press, Oxford and New York.

ICRP（1993）: Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 64, Pergamon Press, Oxford and New York.

ICRP（1997）: Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 77, Pergamon Press, Oxford and New York.

ICRP（2000a）: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long lived Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 81, Pergamon Press, Oxford and New York.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999a）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－，総論レポート，JNC TN1400 99-020

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999b）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－，分冊 1 わが国の地質環境，JNC TN1400 99-021

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999c）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－，分冊 2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999d）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－，分冊 3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999e）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－，別冊 地層処分の背景，JNC TN1400 99-024

原燃（日本原燃株式会社）（2010）：再処理事業所再処理施設の工事計画変更届出

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2002a）：公募関係資料（2002 年）

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2002b）：概要調査地区選定上の考慮事項（2002 年）

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，2004 年 5 月）

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2009）：公募関係資料（2009 年）

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2010）：地層処分技術開発ニーズの整理，2010 年

OECD/NEA（1977）：Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes, Report by an NEA group of Experts, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA （1984）：Long-term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA（1995）:The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA（1977）：Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes, Report by an NEA group of Experts, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA （1984）：Long-term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA（1991a）：Can Long-term Safety be Evaluated? A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency, and the International Radioactive Waste Committee, IAEA endorsed by the Experts for the Community Plan of Action in the Field of Radioactive Waste Management, CEC, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France.

総合資源エネルギー調査会（2006）：放射性廃棄物小委員会報告書

総合資源エネルギー調査会（2007）：放射性廃棄物小委員会報告書 中間とりまとめ（平成 19 年 11 月 1 日）

総合資源エネルギー調査会（2008）：高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について，平成 20 年 1 月 18 日

通商産業省（2000a）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針，平成 12 年 9 月 29 日　閣議決定

通商産業省（2000b）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画，平成 12 年 9 月 29 日　閣議決定

第３章

安全確保構想

第３章　目次

第 3 章 安全確保構想 3-1
3.1 安全確保の目標 3-2
3.1.1 安全確保の考え方と目標設定 3-2
3.1.2 閉鎖後長期の安全確保 3-3
3.1.3 事業期間中の安全確保 3-10
3.1.4 事業期間中と閉鎖後長期の安全確保の両立 3-11
3.2 安全確保に向けたNUMOの方針 3-12
3.2.1 目標を達成するための方針策定 3-12
3.2.2 方針１「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」 3-13
3.2.3 方針２「信頼性の高い技術を用いた事業推進」 3-24
3.2.4 方針３「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み」 3-36
3.3 地層処分事業に関わる個別課題に対するNUMOの考え方 3-43
3.3.1 地層処分事業におけるリスクマネジメント 3-43
3.3.2 モニタリング 3-44
3.3.3 可逆性と回収可能性 3-46
3.3.4 処分場の閉鎖 3-49

第3章　安全確保構想

本章では，安全な地層処分を実現するためにNUMOが設定した安全確保に関わる方針・方策について記述する（図 3.1.1-1参照）。

NUMO は地層処分の安全性とは，以下の二つを確保することであると考え，これらを安全確保の目標として設定した。

- 閉鎖後長期の安全確保
- 事業期間中の安全確保

閉鎖後長期の安全性は，以下の三つの安全確保策を確実に実施することで確保する。

- 適切なサイト選定と確認
- 処分場の設計・施工などの適切な工学的対策
- 地層処分システムの長期安全性の評価

また，事業期間中の安全確保は，既存の原子力施設の建設・運転，一般建設工事，鉱山事業などで得られている知見を活用して必要な安全対策と環境保全策の計画を策定し，実行することにより実現する。

これらの目標を 100 年にわたる長期の事業期間の中で確実に実現するために NUMO は安全確保に向けた三つの方針を提示した。

- 方針１：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進
- 方針２：信頼性の高い技術を用いた事業推進
- 方針３：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み

また，以下に示す課題に対して地層処分の特性を考慮して，現時点における NUMO の考え方を提示した。

- リスクマネジメント
- モニタリング
- 可逆性と回収可能性
- 処分場の閉鎖

本章では，3.1 で安全確保の目標を提示し，3.2 では安全な地層処分を実現するための方針・方策について記述した。また，3.3 では地層処分の安全確保上の重要課題に対して NUMO の考え方を提示した。

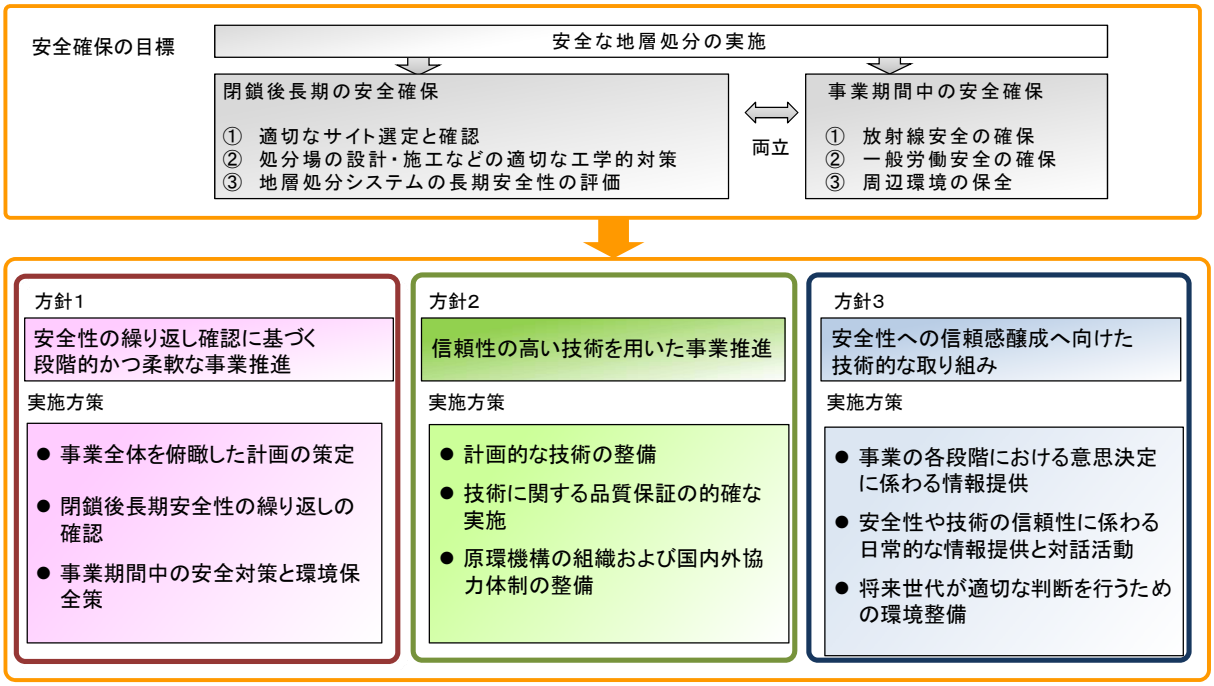


図 3.1.1-1 安全確保構想の全体構成

3.1 安全確保の目標

3.1.1 安全確保の考え方と目標設定

地層処分の安全確保の目標は，放射性廃棄物が処分場閉鎖後の遠い将来にわたって人間とその生活環境に有意な影響を及ぼさないようにすることであり，同時に閉鎖完了までの事業期間中において地域住民や作業従事者の安全を確保することである。すなわち，NUMO が進める地層処分事業における安全確保とは，「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の二つの目標を達成することである。

また，NUMO は，国の最終処分計画などの方策に基づき，安全上の法令や規制の要件に従って，サイト選定と評価，設計，建設，操業，閉鎖および廃止措置を実施していくこと，そして，地層処分システムの安全性が最大限に確保され，処分施設の閉鎖後に必要な人為的活動が最小になるように，段階的に事業を進めていくことを目標達成のための行動とする。

閉鎖後の安全が多重の安全機能によって確保されるように，段階的な調査を通じて適切な地質環境を有する処分施設建設地を選定し，処分施設の人工バリア設計し，建設，操業，閉鎖および廃止措置を実施する。処分施設は，放射性核種を閉じ込めるためおよびそれらを接近可能な生物圏から隔離しなければならない。これらの機能を人工的に設けられる障壁（人工バリア）と天然の地層（天然バリア）を組み合わせた多重バリアシステムにより担保する。また，安全評価手法を用いて構築した地層処分システムの妥当性を評価し，あらかじめ定められた放射線防護上の要件を満足することを持って確認する。あわせて，評価の不確実性の低減策を講じることにより，安全の信頼性を高めていく。

一方，調査から閉鎖完了までの期間においては，放射性廃棄物からの放射線や建設・操業時の事故などにより地域住民や作業従事者の安全が損なわれることがないように対策を講じる。

なお，事業期間中の安全確保のために講じるさまざまな対策（例えば，建設段階での止水対策な

ど）は，長期的な安全確保策との両立性をはかることが必要である。すなわち，事業期間中の安全確保のために講じる対策により，閉鎖後長期の安全機能を有意に損なうことがないように十分配慮する（NUMO，2004c）。

3.1.2　閉鎖後長期の安全確保

放射性廃棄物が処分場閉鎖後の将来にわたって人間とその生活環境に有意な影響を及ぼさないようにするという地層処分事業の目標を達成するために，廃棄物を閉じ込め，人間の生活環境から隔離することを基本概念とし，対象廃棄物を安定な地下深部に埋設し，人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによってその機能を担保する。閉じ込め機能は，放射性核種の放出を防ぐか，あるいは最小限に抑えるための機能で，主として人工バリアなどの工学的対策で担保される。隔離は放射性廃棄物とそれに関連する危険性を人間環境から遠ざけておくことを意味し，安定な母岩内の適切な深度に処分場を設置することによって担保される。このように閉じ込めと隔離を組み合わせることにより，人間の生活圏への放射性核種の移行は放射線学的に容認できる量に制限される。表 3.1.2-1に閉鎖後長期の安全確保の基本概念と基本的な安全機能を示す。

表 3.1.2-1 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と基本的な安全機能

基本概念	多重バリアシステムの安全機能	安全機能の説明
隔離	地質の長期的な変動からの防護	生活環境から十分離された安定な地下深部に廃棄物を埋設し，侵食のような地形変動から防護すること
	人の接近の抑制	偶発的な人の接近の可能性を低減するため，人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難であること
閉鎖後閉じ込め	核種の浸出抑制	廃棄体からの核種の浸出を抑制し，核種放出率を低下させるとともに，核種を廃棄体近傍に保持することで放射能を減衰させること
	核種移行の抑制	浸出した核種の移行を抑制することにより，核種移行率を低下させるとともに，遅延により放射能を減衰させること
	アクセス坑道などの卓越した移行経路の形成抑制	処分場の建設に伴う，アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路とならないこと

処分場閉鎖後の潜在的な危険性としては，以下の事象が考えられる。

(a) マグマや活断層の処分場への直撃や隆起・侵食による廃棄体の地表への露出などの自然現象の著しい影響に起因する被ばく

(b) 地下水の移行を介した放射性核種の移行による被ばく

(c) 処分場に侵入する偶発的な人間活動による廃棄体と人との接触による被ばく

地層処分の安全性を長期にわたって確保するためには，以下の点に留意する必要がある。

(a) に対しては，適切なサイトを選定（深さも含む）することにより，地層処分システムが破壊されたり，地表へ露出するなど，地層処分システムの性能を著しく低下させるような自然事象に対し，その影響を排除できる場所を選定することで安全性を確保する。このような安定したサイトを適切に選定することを目的としてサイト選定段階の調査を実施し，不確実性を低減していく。

(b) に対しては，選定したサイト固有の条件や安全を確保するために施される工学的対策などを踏まえ，人に健康影響を及ぼす可能性のある現象を考慮した適切なシナリオを設定して安全評価手法により被ばく解析を行う。算出された結果をあらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないことを確認する。また，各バリアが個々に期待する機能を発揮するように対策を講じることで，特定のバリアへの依存を回避し，安全の裕度を持たせることで安全性を確保する。

(c) に対しては，人間侵入が起こる可能性の低いサイトの選定や設計（深さも含む）を行うとともに，記録保存や掘削制限などの制度的管理によって安全性を確保する。

このような閉鎖後長期の安全確保は，下記の三つの安全確保策により達成できることが第２次取りまとめで示されており，その妥当性が原子力委員会の評価（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会，2000）によって確認されている。この考え方は原子力安全委員会が示した安全確保原則（原子力安全委員会，2000）とも整合している。

1) 地層処分にとって適切な地質環境を選定し，建設段階以降はサイト選定時における評価の妥当性を確認する（適切なサイト選定と確認）。
2) 選定された地質環境に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する（処分場の設計・施工などの適切な工学的対策）。
3) 構築された地層処分システムの安全性を評価する（地層処分システムの長期安全性の評価）。

これらの安全確保策を施し，様々な証拠や論拠に基づいて，地層処分システムが長期にわたって安全性を確保することができることを示すものが，近年国際的に幅広く受け入れられているセーフティケース[1]の概念である。セーフティケースに関しては 3.2.2.3(2)セーフティケースで詳述する。

3.1.2.1 閉鎖後の安全の妥当性の確認

地層処分システムの目指すものは，合理的に達成可能な限り人間の生活圏への放射性核種の移行を放射線学的に容認できる量に制限することである。しかし，処分施設が放射性廃棄物の完全な閉じ込めや隔離を永久に実現することを目指しているわけではない。

安全評価においては，解析を行い，その一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても，あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないことなどを確認することがその基本である。（原子力安全委員会，2000）

なお，地層処分システムは，多重バリアシステムによって人間の生活環境から合理的に達成可能な限り閉じ込め・隔離するものであるため，一般公衆に対する評価線量が最大となるまでには，極

[1] OECD/NEA では，セーフティケースは，「A safety case is the synthesis of evidence, analyses and arguments that quantify and substantiate a claim that the repository will be safe after closure and beyond the time when active control of the facility can be relied on.（セーフティケースは閉鎖された後の制度的な管理の維持が保証できないような時間枠においても，処分場が安全であり続けるとする主張を定量化し立証するための証拠，解析さらには論拠の統合体である）」と定義されている（OECD/NEA, 2004）。なお，セーフティケースは，操業期間中の作業者の安全など，事業各段階の安全性についても含まれる場合がある（IAEA, SSR-5）。

めて長い期間（例えば10万年以上）を要することが想定される。このような時間スケールにおいては，線量の推定に伴う不確実性が大きくなりすぎ，そのような基準は意思決定の合理的な基盤として役割を果たさなくなる。（IAEA，SSR-5，ICRP81ほか）しかしながら，確からしい期間を超えてもなお，評価線量が上昇している時間領域に対しては，地質環境や処分概念の条件などを議論し，線量にかわる安全指標により，安全評価を補完することも考えられる。（例えば，IAEA-TECDOC-1372，2003）

(1) 適切なサイト選定と確認

多重バリアシステムが長期にわたって，所期の性能を発揮できるように適切な環境要件を満たす安定性のある処分地を選定することが重要となっている。

わが国は変動帯に位置していることから，地層処分システムを成立させるための前提条件として，将来にわたり断層活動，火成活動，隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避すると同時に，地層処分システムの場となる地質環境の特性を把握し，その長期的な変遷を理解することにより，下記の二つの安全確保策（処分場の設計・施工などの適切な工学的対策および地層処分システムの長期の安全性の評価）を講ずる上で好ましい条件を有する場所を処分施設建設地として選定する。

- 坑道掘削や人工バリアの構築など，工学的対策にとって好ましい条件（力学的安定性，施設を通過する地下水流量が小さいなど）。
- 人工バリアや天然バリアの核種の移行抑制など，地層処分システムの長期安全性にとって好ましい条件（還元性，地下水流速が遅い，移行距離が長いなど）。

また，将来の人間活動による偶発的な処分場への侵入を回避する観点から，経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないことも必要である。

このようなサイト選定における基本的考え方は，すでに公募関係資料（NUMO，2009）や概要調査地区選定上の考慮事項の技術的背景（NUMO，2004b）などで述べており，従来からの変更はない。さらに，建設段階以降も，閉鎖後長期の安全確保の観点から重要と考えられる地質環境特性について調査し，データの取得を行いその時点で得られる最新の知見に基づいて適宜安全性を確認していく。

将来予測については，次のことに留意する。

- 将来の地質環境の変遷や自然事象の予測は現在の知見を用いて，特定の土地や自然事象項目ごとに検討を行い，不確実性の低減に努める。
- 将来における地層処分システムの状態は，プレート運動に起因する事象，気候変動に起因する事象，生活圏状態の変化などを踏まえ，それぞれ異なる時間的・空間的依存性を持って相互に密接に関連しつつ変化する。長期にわたる安全評価における地質環境に関連する評価モデルおよびパラメータは，将来の地質環境の変遷を予測して使用するものを決める。従って，サイト調査段階で安定的な地質であることが過去のデータから示すことができ，超長期を予測することが可能であれば，安全評価の不確実性の低減が可能である。また，選定したサイトの地質環境特性が安定していることにより，工学的対策の予測の不確実性を低減することができる。
- 将来10万年程度であれば過去の自然現象の変動の傾向から自然現象による著しい影響が生ずるおそれがある場所を予測することは可能と考えられる。また，将来10万年を超える隆起運動などの自然現象の予測については，地域ごとに異なる地質構造発達過程を考慮して評価

することが重要と考えられている。一連の地質構造発達過程（褶曲運動，傾動運動など）の継続性と精度は地域ごと異なる。従って，確からしい予測期間は地域によって異なるため，地域を限定した際に，将来の変遷の予測に対する適切な期間を検討する。

(2) 処分場の設計・施工などの適切な工学的対策

選定されるサイトの地質環境の条件や廃棄物の特性に応じて，人工バリアおよび処分施設などの工学的対策を適切に講じることにより，閉鎖後長期の安全性を確保する。

具体的には，バリアを構成する要素のそれぞれに，廃棄体と地下水との接触抑制，核種の溶出制限や移行抑制など安全確保にかかわる重要な安全機能を割り当て，それらに十分な安全裕度を持たせることにより，頑健な地層処分システムを設計する。この際，頑健性確保の観点から，一つのバリア要素の安全機能に過度に期待することがないように留意し，一つのバリア要素の安全機能が期待されたとおり有効に働かない場合でも，ほかのバリア要素の安全機能により相互に補完されることで十分な安全裕度が保てるように設計する。なお，ここで述べた安全機能は地層処分システムの長期安全性の評価においても，重要な視点となる。

人工バリアの構成と各構成要素に持たせるべき安全機能の設定は，サイトの地質環境特性や対象廃棄体の特性を十分に考慮するとともに，調査の進展とともに情報の詳細さが増す地質環境特性に応じて，バリア全体の安全機能が有効に発揮されるように人工バリアと処分施設の設計を行うことが重要である。

2.2.1 で述べたように，高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の処分施設を併置することも選択肢としているが，その場合は，施設全体の安全機能が単独の処分の場合に比べて有意な影響を受けることのないように，個々の施設の設計および全体の設計を適切に行う必要がある。

地層処分低レベル放射性廃棄物は，高レベル放射性廃棄物に比べて，放射能レベルや発熱量が十分低く危険性が低いことから，基本的には高レベル放射性廃棄物処分の技術を応用することで安全な処分は可能と考えられる。ただし，対象となる廃棄物の種類が多様であるため，廃棄物に含まれる物質などの影響を詳細に検討し，安全性を確保する必要がある。

また，国の「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」（資源エネルギー庁・JAEA，2006）において，より幅広い地質環境に柔軟に対応するための代替技術が示されており，今後のサイト選定段階で得られる地質環境条件によっては，それら代替技術を適用することも視野に入れた検討により，処分場の頑健性の向上を図る。なお，具体的なサイトが特定できるまでの段階では，想定しうる多様な地質環境に対しても，単独の処分システムおよび併置の場合の全体システムの頑健性が確保されるような処分概念を構築・整備することとする。さらに，人工バリアの製作・搬送・定置および処分施設の施工などについては，必要な安全機能が確実に発揮されるよう，十分な信頼性を有する技術を用いる。

(3) 地層処分システムの長期安全性の評価

2000 年にまとめられた原子力安全委員会報告（第 1 次報告）には，長期安全性の評価においては，地層処分の安全性に影響を及ぼす可能性のある種々の現象を考慮したシナリオに対して，適切なモデルとパラメータによる解析を行い，その一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても，あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないことなどを確認することがその基本であるとされている。（原子力安全委員会，2000）

一方，IAEA などの国際機関では，以下のような認識が示されている。

- 地層処分システムは，多重バリアシステムによって長期にわたり放射性核種を閉じ込め・隔離するため，一般公衆に対する評価線量が最大となるまでには，極めて長い期間（例えば 10 万年以上）を要することが想定される。このような時間スケールにおいては，線量の推定に伴う不確実性が大きくなりすぎ，そのような基準は意思決定の合理的な基盤として役割を果たさなくなる。（IAEA，SSR-5，ICRP81 ほか）
- 評価期間が長くなれば将来における不確実性が増大し，線量の予測に対する信頼性は低下することから，遠い将来に対しては線量を補完するその他の指標がより有意義であるという考え方もある。（IAEA-TECDOC-1372，2003）

地層処分においては，その影響が顕在化する可能性を考慮しなければならないのは，処分場が閉鎖されてから非常に長い時間を経た遠い将来であり，その影響の程度を事業期間中に検証することができない。従って，予測的な手法に基づく安全評価によって長期的な影響の程度を確認する必要があり，この点がほかの原子力施設の安全評価と大きく異なる。予測的な手法に基づく安全評価とは，具体的には，まず地層処分システムを科学的な知見を用いて理解し，これをもとに将来の地層処分システムがどのように変遷していくかを描いたシナリオを構築し，そのシナリオを表現する数学モデルやデータを用いて，放射性廃棄物に含まれる放射性物質が環境に移行していく様子を解析により分析し，その結果を人の被ばく線量に置き換え基準値と比較することによって，閉鎖後の安全性が長期にわたって確保できることを確認することである。

なお，安全評価には地質環境が不均質であることや安全性の評価期間が長期であることなどに起因するさまざまな不確実性が含まれているが，このような不確実性は，サイトの地質環境情報を段階を経て詳細に把握し，これを処分場の設計に適切に反映することで低減することができる。

しかし，このような不確実性を完全には取り除くことはできないため，地層処分の安全評価においては安全性にかかわるシステムの不確実性を認識し，ある程度の不確実性が残ったとしてもそれを適切に考慮した上で安全性を示す必要がある。このような安全評価による安全性の確認は，安全性を包括的に論証するセーフティケース（3.2.2.3(2)に詳述）において，処分場の長期の安全性を示す主要な論拠となるが，単に評価線量の基準値との比較だけでなく，補完的安全指標の適用や自然界や考古学分野における類似事例（ナチュラルアナログ事例）との比較など，多面的な論拠に基づいてセーフティケースを補強することにより，安全性に対する信頼性をより一層向上させていくことにしている（例えば，NUMO，2004a）。

原子力安全委員会においては，上述のような避けることができない不確実性を考慮して安全評価を行うためには，シナリオの発生の可能性とその影響を組み合わせたリスク論的考え方の適用が有効としている。また，評価期間の設定に関連して，比較的信頼性の高い評価が可能な期間を相対的に重視し，その期間における実体的防護機能をできるだけ高めておくことによりそれ以降の長期的な防護性能の頑健性を確保するという，いわば技術的に最善の手段（Best Available Technique）を講ずるとの考え方の有効性の検討も提案されている（原子力安全委員会，2004）。

また放射線審議会は，放射性廃棄物処分に係る潜在被ばくについては，自然過程における通常の被ばく状況と偶然の人間侵入における被ばく状況に分けて，それぞれの放射線防護上の基準として，前者に対しては線量拘束値を適用し，後者については ICRP の考え方を参考に 20mSv／年を上限とする値を適用することが妥当との考え方を示している（ICRP81, 1999；放射線審議会基本部会, 2010）。

以上のような背景を踏まえ, NUMO としては以下の考え方で長期の安全評価を行うことにしている。

（i） 安全評価の考え方

原子力安全委員会が策定した「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会，2010）によれば，その解説に「第二種廃棄物埋設の事業は，段階的な管理を経た後, 最終的には, 管理を必要としないような状況へ移行可能か否かについてあらかじめ審査を行い，このことについて見通しを得ておく必要がある」としている。この際の管理を必要としないとは，事業者あるいは国の管理は一切見込まないということであり，基本的には事業者が管理期間において安全確保策を確実に実施することで，結果として管理期間終了後の安全も確保できるという考え方に基づいている。

一方，地層処分においては，対象とする廃棄物に長寿命の放射性物質が有意に含まれるため，放射能の減衰に応じた数百年程度の段階的な管理を行うことで安全が確保できるわけではない。すなわち，地層処分の概念は前述の第二種廃棄物埋設のように人間の管理によって一義的に安全を確保するという概念とは異なっており，数万年以上の長期にわたり何らかの管理が必要となるため，その管理を地層にゆだねること，具体的には地質学的に安定な地層深くに廃棄物を隔離し，放射性物質を確実に閉じ込めることによって人間の積極的な関与を期待することなく安全を確保しようというものである。これにより，安全評価の結果である評価線量の最大値が，技術的に信頼性のある将来予測が可能な期間を超えたところで示されるという場合も想定される。また，地層による天然のバリアによる安全確保に加えて，補完的に国による記録の保存や事業者からの申請に応じて国による保護区域の設定が可能な制度となっていることも考慮する必要がある。

地層処分の安全評価の方法を検討するに当たっては，以上のような第二種廃棄物埋設の事業との違いを念頭において検討していくことが重要である。

地層処分の安全審査における安全評価シナリオ等の具体化については，今後，原子力安全委員会等において検討されることになるが，本報告書では，当面の考え方として，原子力安全委員会報告（原子力安全委員会，2004）および放射線審議会基本部会報告（放射線審議会，2010）の考え方に沿って以下のように自然過程を介するシナリオと人為過程を介するシナリオに区分して検討を進める。

(a) 自然過程を介するシナリオ（自然過程における通常の被ばく状況を評価するシナリオ）

本シナリオを設定する際に重要となるのは，将来の地質環境の変遷や，火山活動，断層運動，隆起・侵食といった自然事象の変遷を，どのように, 評価シナリオに取り込むのかということである。

自然事象の将来予測については，外挿法を中心として，これまで種々の検討がなされており，わが国では，「過去数10万年程度の地質学的記録を基に，将来10万年程度の推論は可能である」との合意がある（土木学会原子力土木委員会地下環境部会，2006）。しかし，地層処分の本来の目的である，閉じ込めと隔離を基本としたシステムでは，安全評価において最大線量が現れる時期が，10万年を大きく超える場合もあり, より長期の将来予測をどのように行うべきか検討する必要がある。また，10万年を越える将来の地質環境の変遷や自然事象の発生に係る予測の精度については，事象ごと，地域ごとに異なると考えられる。

一方，この問題に対処するため，1999年にJNCが取りまとめた第２次取りまとめでは，超長期の

将来の地質環境の変遷や自然事象の発生予測については，厳密に行うのではなく，種々の不確実性を取り込んだ様式化されたモデルを設定している。

このような背景を踏まえ，NUMOにおいては将来の地質環境の変遷や自然事象の予測期間を下記のように区分した。

期間Ａ：過去～現在のデータが充分にあり，外挿法などによる将来予測が可能な期間
（予測期間に対して十分長い地形地質情報に基づき将来を予測。過去の変動傾向について，複数の仮説があったとしても，その差が小さいと判断できる期間のこと）

期間Ｂ：一般的に外挿が許される範囲を逸脱するが，ある種の仮説の援用などで外挿法などによる将来予測が可能な期間
（予想期間に対して十分長い期間の地形地質情報はないものの，外挿を否定する積極的なデータがないことを前提に，これまでの地質情報に基づき将来を予測。過去～現在のデータが少ない，あるいはバラツキがあることなどから，過去の変動傾向について複数の仮説が考えられ，それらの間の差を考慮する期間のこと。）

期間Ｃ：外挿法などによる将来予測が難しい期間
（過去～現在のデータからでは変化傾向が得られないか，または過去～現在の変化傾向が継続するか評価することができない期間のこと）

安全評価においては，一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても基準値を超えていないことを確認することが基本であるが，地質環境や生活環境などの不確実性が増大する超長期の放射線防護基準については，天然の放射能濃度との相対的比較などの補完的指標を考慮することも考えられる。（原子力安全委員会，2000）。

これらを踏まえ，閉鎖後長期の安全評価においては，最大の線量が出現する時期まで評価することを基本とするが，上記のように将来予測の信頼性が期間により異なることから下記のようなシナリオ設定を行う。

期間Ａ＋期間Ｂの期間内で，地質環境の変遷や自然事象の予測を行うとともに，さまざまな不確実さの影響を線量評価シナリオに反映し，そのシナリオによって計算された線量と基準とを比較することを持って地層処分システムが閉鎖後長期間にわたって安全に構築されていることを確認する。

また，期間Ａにおいては予測の不確実性は比較的小さいことから，最新の知見に照らして科学的に確からしいと予見される標準的なシナリオを策定することが可能と考えられる。このため，このようなシナリオを用いて線量評価することによって，安全性に対する余裕の程度を事業者が自主的に確認することが可能となり，評価された被ばく線量が基準値を下回る場合でも，防護の一層の最適化の観点から，当該被ばく線量が合理的に達成できる限り低くなるよう努力していることを示すことが可能になる。

期間Ｃにおける影響評価は不確実性が大きすぎ，必ずしも将来の人間環境における放射線レベルへの影響を評価するための論拠とはならないことから，線量評価の結果を基準値と比較しても意味がない。従って，考慮する地質環境の変遷や自然事象を様式化して評価モデルに取り込み，天然の放射能濃度との相対的な比較を行うなどの補完的な評価方法について検討を行う。

(b)　人為過程を介するシナリオ（偶然の人間侵入における被ばく状況を評価するシナリオ）

地層処分では，人間の侵入をより難しくする地下深部へ処分施設を設置すること，さらに，国に

よる処分の記録の永久保存や保護区域の設定による土地利用制限，有用な鉱物資源の存在記録がない場所を処分場として選定するなどの措置を行うことにより，処分施設と人間との接触の可能性を小さくすることが可能となっている。人為過程を介するシナリオについては，これらの安全確保上の措置が講じられていることを考慮して設定する。

意図的な行為については，国際的にも安全評価の対象とはしていないことから，処分施設を認知しない偶発的な行為のみが評価の対象になると考える。

3.1.3　事業期間中の安全確保

NUMO は，サイト選定から事業廃止までの事業の各段階において，地域住民や作業従事者に対して放射線安全および一般労働安全の確保を徹底する。これらの安全対策については，一般の土木工事や原子力施設の建設・運転などで実績を有する安全対策を有効に活用することができる。それらの対策をより適切に実施するためには，事業期間中におけるさまざまなリスクを分析し，それらを施設設計や調査･工事計画さらには保安規定などに反映し，適切な対策を講じることが重要である。

地層処分事業においては，坑道の掘削，掘削残土の仮置きなど，大規模な土木工事を伴うため，周辺環境へのさまざまな影響を回避・低減することも重要である。

以上のことを考慮して，事業の各段階における安全確保策について，基本的な対策を述べる。

(1)　放射線安全の確保

放射線安全の確保については，基本的には通常の原子力施設における従来の考え方と同様であり（NUMO，2004a），炉規法などの関連する法律などを遵守し，地層処分施設に起因する放射線被ばくから一般公衆および作業従事者などを防護するため，十分な対策を講じる。この際，ALARA の考え方のもとに，放射線影響の低減に努める。

施設の設計では，地層処分施設に起因する一般公衆が受ける線量および作業従事者が受ける線量を合理的に達成可能な範囲で低くする方針であり，遮へい設備，放射線管理設備など必要な設備を設ける。また，管理区域や周辺監視区域などの区域管理を適正に行う。

施設の操業においても，原子力関連施設における安全確保策をもとに対策を講じる。例えば，ガラス固化体の受入，検査，封入のプロセスにおいては，中間貯蔵施設における遠隔操作などの技術を適用することができる。また，火災や地震などの事象に対しては，二次的な事象として設備の破損などによる放射性物質の漏えいの可能性が考えられるが，火災に関しては発生防止策や影響緩和策，地震に関しては耐震設計の検討などを行う。

(2)　一般労働安全の確保

現地で地質調査などを開始する精密調査地区選定段階から事業の廃止に至るまでの期間が一般労働安全を確保する対象となる。

一般労働安全に関しては，建設工事における従来の考え方を適用し，土木工事（トンネル工事など）や鉱山の操業などの安全対策の事例をもとに対策を検討して安全を確保する（NUMO, 2004a）。

例えば，坑道内の落盤，水没などの事象については，トンネル工事における対策などが有効である。また，敷地外においても，資材搬入車両による交通災害などの防止を徹底する。なお，地下施設における火災や爆発などの事象に関しても，坑道が長大であることなどに留意して既設の長大トンネルや鉱山の例を参考に適切な対策を講じる。

(3) 周辺環境の保全

わが国では，1997 年に制定された「環境影響評価法」により，地層処分事業における環境への影響の評価について法的枠組みが整備されている。環境影響評価法は，環境基本法に基づき，持続可能な開発を基本理念として制定されたものであるが，この理念は，NUMO が地層処分事業という長期にわたる事業を進めるために取り組む地域共生方策の一つである「地域の持続的発展につながっていく事業を行う」という考えと一致する。

地層処分事業は環境影響評価法で定める対象事業種に該当していないが,「今後の環境影響評価制度の在り方について（2010 年（平成 22 年）2 月 22 日，中央環境審議会)」では,「将来的に実施が見込まれる事業のうち，規模が大きく環境影響の程度が著しいと考えられる事業」として放射性廃棄物処分場の建設事業が挙げられ,「国の関与のもとに，何らかの形で環境影響評価を行う仕組みの検討が必要である」と述べられている。

NUMO は，地層処分事業の環境影響評価法の対象事業種への指定の有無にかかわらず，事業の進展に際しては，上記の考え方で地層処分事業を進めるとともに，将来，環境影響評価法での地層処分事業の位置付けが明らかになれば，それに則った適切な手続きを実施する。また，事前の環境影響評価結果と並んで，事業の進展後に事後評価を実施し，事後評価の結果が事前の予測と大きく異なる場合は，必要に応じて追加の保全措置などを検討・実施する。

3.1.4 事業期間中と閉鎖後長期の安全確保の両立

地層処分の安全確保の目標は，放射性廃棄物が処分場閉鎖後の遠い将来にわたって人間とその生活環境に有意な影響を及ぼさないようにすることであるが，同時に，閉鎖完了までの事業期間中において地域住民や作業員の安全を確保することも重要である。すなわち，NUMO が進める地層処分事業における安全確保とは,「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の二つの目標を達成することであり，もしこれらの間で対立する要件が存在する場合には，さまざまな施策を導入すことによりこれらを両立させる必要がある。

「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」のそれぞれの要件に基づいて処分場建設の計画・設計を行った場合，特別な措置なしでは各要件が両立しない場合もある。典型的な例としては，処分場を建設・操業するために設置・使用する機材などの残置物が処分場の閉鎖後にも残るために，処分場の閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼす可能性があるというケースや，操業中に地下空洞を空けた状態で長期間にわたって換気や排水を行うことにより母岩が影響を受け，母岩の安全機能が低下するといったケースがある。このようなケースに対しては，科学的な対処と工学的な対処の二種類のアプローチにより要件の両立をはかる。図 3.1.4-1に，閉鎖後長期の安全確保の要件と安全かつ効率的な処分場の操業からの要件の対立という問題を，科学的および工学的な対処を施すことにより要件を両立させる考え方を示す。

「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の要件を両立させるための方策の一つ目として科学的なアプローチにより，残置物の及ぼす影響や操業期間中に地下環境が受ける擾乱の度合いを評価し，過度に保守的な評価にならないよう設計に反映するというという方法がある。この例としては，操業中に設置された支保工（コンクリート，鋼材，有機系材料）が，人工バリアの変質による水理学的特性の変化や，人工バリア・天然バリアによる核種の遅延効果などに及ぼす影響を各種試験やシミュレーションなどにより科学的に評価するという方法が考えられる。

工学的な対処としては，残置物の影響や操業中の擾乱を無くしたり，あるいは低減するというアプローチがある。例えば，残置物を処分場の閉鎖前に全部あるいは部分的に撤去することにより閉鎖後長期への影響を緩和する方法がある。あるいは，問題となる残置物の材料を異なった材料に変更することにより影響を回避するという方法もある。この例としては，コンクリートに由来する高pH 地下水が緩衝材や母岩に及ぼす影響を低減するために，低 pH コンクリートを開発するといったアプローチがある。また，操業期間中の地下坑道の換気や排水が母岩に及ぼす影響を低減することを目的として，坑道の掘削から廃棄物の定置・坑道の埋め戻しまでの時間を短くするという方法も考えられる。スイスの Nagra は高レベル放射性廃棄物の処分のためにオパリナス粘土層を母岩として検討を進めているが（Nagra，2002），空洞を空けておく期間をできるだけ少なくするために，トンネルの掘削と廃棄体の定置を並行して実施するという方法を検討しており，これは建設・操業中の影響を緩和するための工学的な対処の一例である。

現状では対象とする母岩や処分概念が確定していないため，具体的な解決策の検討を絞り込んで実施できる段階にはない。従って，現時点ではさまざまなケースを想定し，上記のアプローチにより要件が両立するよう，科学的知見を拡充すると同時に工学的な対処法に関する検討も進めておくことが重要である。

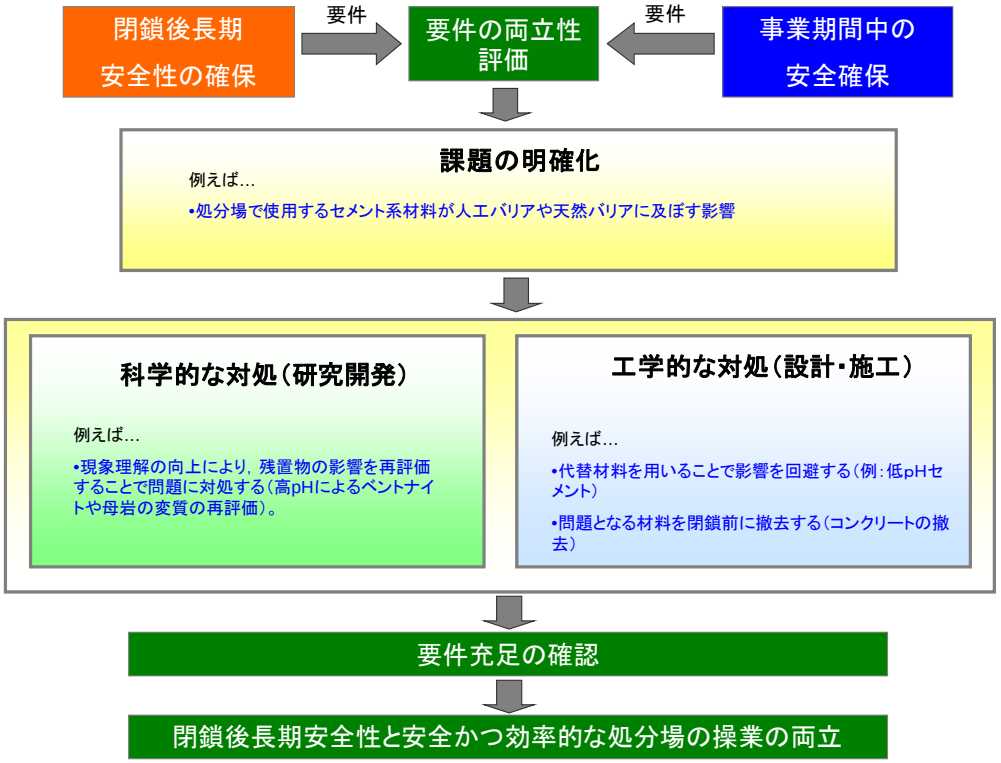


図 3.1.4-1 閉鎖後長期の安全性確保と事業期間中の安全確保の要件両立の考え方

3.2 安全確保に向けたNUMOの方針

3.2.1 目標を達成するための方針策定

前節で述べた安全確保の二つの目標を達成するためには，地層処分が有する課題やわが国固有の前提条件を十分に考慮して事業を進める必要がある。

地層処分の閉鎖後長期の安全性については，考慮すべき時間が長く，不均質な地下環境を活用す

るため，避けがたい不確実性を伴う。そのため，念入りな調査や評価を行い，不確実性をできるだけ低減しながら安全性に関する信頼性を向上させていく必要がある。また，ほかの原子力施設のように安全を直接実証して見せることができないので，社会的合意形成をはかるためにも，不確実性の管理に重点を置くことが重要であり，安全性にかかわるさまざまな論拠に基づき，安全性とその信頼性に関する情報を総合的に取りまとめるセーフティケースをベースに対話活動を行うことが有効である。

また，地層処分は，サイトの選定から処分場閉鎖に至るまでの間に 100 年間近くの長い時間を要するため，この間に事業を取り巻く社会環境条件が変化することもありうる。このように複雑で長期的な事業を着実に遂行するためには，全体を俯瞰しつつ，事業を段階的，かつ柔軟に進めることが肝要である。これにより，安全性にかかわる論拠を段階的に拡充することができるとともに，社会環境の変化にも適切に対応でき，事業への信頼性を段階的に高めていくことができる。特に安全性に関しては，事業の各段階ごとに，それぞれの段階で得られる情報に基づいて安全評価を繰り返し実施し，結果を公表していくことで，国民や地域住民の理解を段階的に深めていくことが求められる。以上により，NUMO は，

「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」

を安全確保に向けた事業方針とする。

また，上述のように数万年以上にわたる閉鎖後長期の安全性については，従来の実証的な手法で確認できないため，科学技術などの知見を集約してモデリングをはかり，現実的なデータに基づく予測的手法を採用して評価を実施することになる。このため，その評価の前提となるサイト調査や工学的対策においては，信頼性の高い技術を用いることが重要である。また，安全評価の手法やそのもととなる科学技術などについては，それぞれの時点において可能な限り信頼性の高い手法を用いることが必要である。そのための努力は，遠い将来の世代の健康と環境を守るために現世代が果たすべき責務といえる。以上により，NUMO は，

「信頼性の高い技術を用いた事業推進」

を安全確保に向けた事業方針とする。

地層処分事業においては，技術的な検討により示された安全性をいかに国民や地域住民の安心感につなげ，事業を受け入れてもらえるかということが，事業を実現させるための重要な要件である。そのため，信頼感醸成は地層処分事業においては欠くことのできない重要な活動であり，信頼感醸成のためには様々な関係者を対象とした広範な理解活動・対話活動を実施していく必要があり，技術面においても計画的な取り組みを実施していく必要がある。以上により，NUMO は，

「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」

を安全確保に向けた事業方針とする。

3.2.2　方針１「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」

3.2.2.1　方針１に関する基本的考え方

地層処分事業では，地下の地質環境を利用して放射性廃棄物を生物圏から隔離し，処分場閉鎖後の長期間にわたり安全性を確保することが求められる。地層処分システムの長期安全性の評価においては，評価期間の長期性や地質環境の不均質性に起因する時間的，空間的な不確実性に適切に対

処していく必要がある。そのためには，三段階のサイト選定プロセスを通して，段階的にサイトの地質環境に関する情報を蓄積・詳細化するとともに，地下における施設の建設や操業時においても同様に地質環境の情報を更新し，上記の不確実性を徐々に低減していくことが有効である。さらに，科学技術の最新知見を適切に取り込みつつ段階ごとに更新，拡充される地質環境の情報に基づき，処分場設計の最適化と安全評価を繰り返し実施することで，地層処分システムの長期安全性と技術的信頼性を向上・強化していくことが可能となる（安全性の繰り返し確認）。

各段階の節目や途中で安全性の確認を繰り返すことにより，安全確保の目標を達成しているかどうか，その時点で優先的に取り組むべき課題が何かを抽出する。これにより，次段階以降の適切な技術開発計画の策定などにもその結果を反映することが可能となる。ただし，地層処分の安全性は数万年以上の長期間を対象とした評価を行う必要があり，実証して見せることができない。従って，安全性に関するさまざまな論拠の集合体であるセーフティケースを構築することにより各事業段階で安全性を示すことが地層処分の安全確保のために有効であると考えられている。なお，セーフティケースは各事業段階で得られている情報に基づいて構築されることになるため，段階的に更新されていくものである（段階的な事業推進）。

また，長い事業期間の中では，2.2.5 に述べたように社会的な環境が変化するなど，事業を取り巻く環境・条件などが変化することも予想され，事業開始時点で策定した計画を，安全性を確保しつつ柔軟に変更していくことも重要である。このため，あらかじめ事業全体を俯瞰した計画を策定して着手し，事業の進展とともに各段階で得られる情報を活用して変化に柔軟に対応するとともに，その都度安全性の確認を行い信頼性を高めていく必要がある。また，国民や地域住民の理解を得ながら段階的に事業を進めていくことが必須である（柔軟な事業推進）。

以上より，事業の安全確保のための一連の検討に当たっては，2.3.1 に述べた三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認，処分場の設計・施工などの適切な工学的対策，地層処分システムの長期安全性の評価）の連携の仕組みを整えるとともに，事業全体を俯瞰した安全確保の目標を達成するための事業推進計画を策定し，2.3 で述べた閉鎖後長期の安全確保および事業各段階の安全確保をこの計画に従って実現する。具体的な進め方においては，以下の三つの実施方策により事業を推進することで安全性を確保する。

1) 事業全体を俯瞰した計画の策定
2) 閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認
3) 事業期間中の安全対策と環境保全策

以下に，上記の実施方策について具体的に記述する。

3.2.2.2 方策１：事業全体を俯瞰した計画の策定

長期間にわたる事業を円滑に推進し，安全を確保していくためには，あらかじめ事業全体を俯瞰して計画を策定した上で，段階的かつ柔軟に進めることが肝要である。それにより，安全性を段階的に強化することができるとともに，社会環境の変化にも適切に対応でき，事業への信頼性を段階的に高めていくことができる。

NUMO は，事業全体を俯瞰した計画を策定するために，「安全確保ロードマップ」を作成した。安全確保ロードマップは，文献調査の開始から事業の廃止に至るまでを１０の段階に分け，各段階における事業目標，安全確保にかかわる目標，目標達成にかかわる要件，実施事項（安全確保のた

めの実施事項）を各段階について記述したものであり，具体的には第 4 章で紹介する。安全確保ロードマップは，事業の進展とともに，それまでの技術の進展や新たな状況変化を反映しつつ詳細な内容に改訂していく。なお，後述する方策２，方策３に関するロードマップもそれぞれ技術開発ロードマップ，信頼感醸成ロードマップとして作成しており，これらも第 4 章で紹介する。

100 年程度にわたる長期の事業期間においては，社会的，制度的，技術的な変化が起こり得ることから，そうした変化に柔軟に対応していくためには，さまざまな事態を想定し，必要な技術オプションを検討，準備しておくことが大切である。また，想定外の事態にも柔軟に対応できる体制や仕組みも用意しておく必要がある。さらに，技術的に安全性を担保することが困難な状況が生じた場合には，事業の推進を止めたり，あるいは逆戻りさせる場合もあり得るため，組織としての意思決定に柔軟性を持たせておくことも必要である。このような重大な意思決定を行う場合には，NUMO 単独ではなく，地元関係者，規制関係機関，国，廃棄物発生者などと十分協議の上で意思決定する必要性も生じうる。

このような柔軟な対応を可能とするため，技術の開発・整備においては必要に応じ複数のオプションを用意することに努める。また，事業を遂行する上でのさまざまなリスクや不確実性への対応（リスクマネジメント）については，現状での基本的考え方を 3.3.1 に示す。

大きな外的状況の変化に迅速かつ的確に対応するためには，過去の意思決定や技術判断の経緯や根拠に立ち返る必要が生じることもあることから，こうした情報を体系的に記録・管理し，必要時に速やかに利用できる準備を進めておくことも重要である。NUMOでは，事業の推進に当たって考慮すべき広範な要件とそれらを前提とした意思決定を一括管理する「要件管理システム」の開発を進めてきた（NUMO，2009d）。このシステムは，地層処分事業にかかわる要件（法的要件，技術的要件，社会的要件など），意思決定項目やその付帯情報をデータベース化することにより，さまざまな意思決定を支援し，それらの結果を体系的に記録し，検索することができる（図 3.2.2-1）。

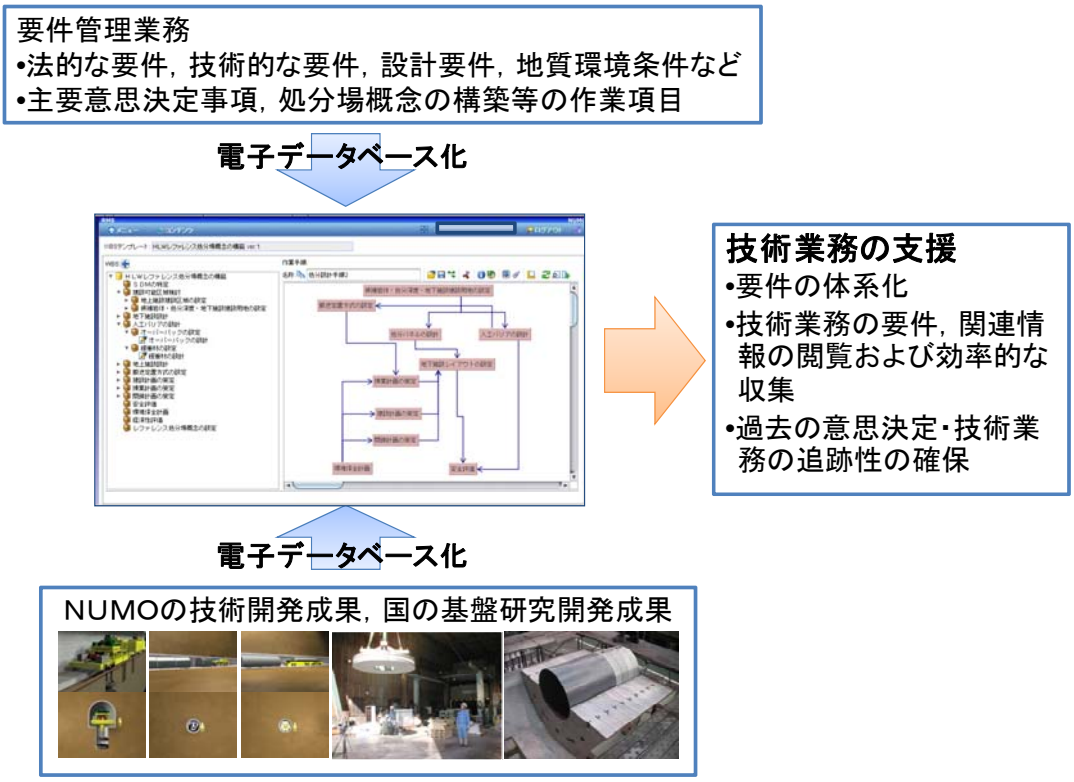


図 3.2.2-1 要件管理システム

一方，基盤研究開発機関でも地層処分事業の計画・管理を実施するための基盤的技術の整備が進められてきており，これらも NUMO が事業の全体を俯瞰しつつ柔軟な運営を進める上での支援ツールとして役立つ。

その一例は，JAEAが開発・整備を進めている知識マネジメントシステム（KMS）である。KMSは，100 年近くにわたる事業の長期性と安全確保の超長期性という地層処分固有の特徴を踏まえ，時間とともに累積的に増加する膨大な情報を有機的な知識として利用することを支援するシステムで，研究開発成果や関連する国内外の知見を体系化して管理，伝承していくための知識ベースとその知識の活用を支援する知識マネジメントからなる（JAEA，2010：図 3.2.2-2）。KMSは，全体統合機能を中心として，知識表現機能モジュール，推論機能モジュール，情報収集・整理機能モジュール，意思決定・最適化支援モジュールおよび利用環境機能が関連性を有した構成となっており，各モジュールには，地質環境調査計画，地質環境モデル（SDM），地質環境知識ベース，性能評価知識ベース，処分場設計知識ベース，ルールベース，事例ベースが格納されている。（JAEA，2010：図 3.2.2-5）

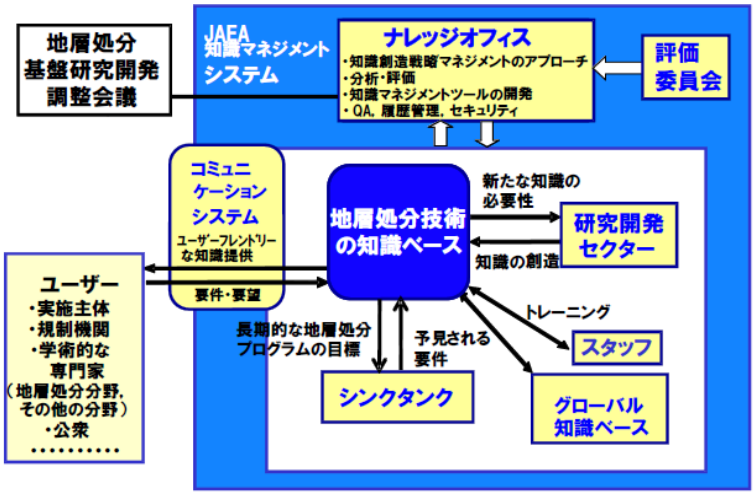


図 3.2.2-2 知識マネジメントシステムの概念（出典：JAEA，2010）

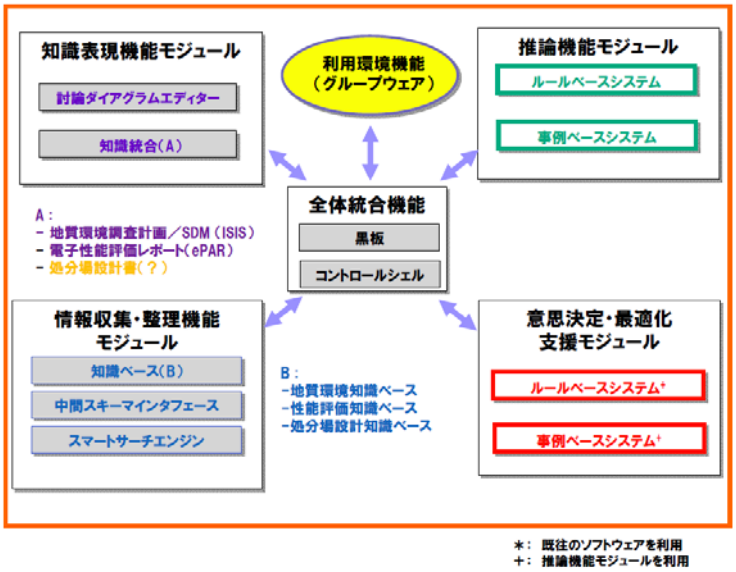


図 3.2.2-3 知識マネジメントシステムの構成（出典：JAEA，2010）

3.2.2.3　方策２：閉鎖後長期の安全性の繰り返し確認

(1)　安全性の繰り返し確認

NUMO は，閉鎖後長期の安全性を確保するために三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認，処分場の設計・施工などの適切な工学的対策，地層処分システムの長期的安全性の評価）を緊密に連携させ，得られた情報を逐次統合しながら，地層処分システムの安全性を各段階の節目や途中で繰り返し確認することにより，その信頼性を継続的に向上させていく。

安全評価の信頼性とは，地層処分の安全性にかかわる課題が十分に保守的に扱われていることについての信頼性といえる。すなわち，不確実性の大きさに対して十分に保守的なモデルやデータセットを用いる場合には，証拠がある程度不足していても保守的な上限としての信頼性が高いのに対して，現実的なモデルやデータセットを用いる場合には，信頼性を確保するために，それらが不確実性の影響を過小評価するものではないことを論証することのできる十分な証拠が求められることとなる。他方，過度に保守的なモデルやデータセットの採用は，有望なサイトの排除や極端に保守

的な設計に陥る可能性があり，事業を合理的に進めるという観点で好ましいことではない。このため，安全評価に用いるモデルやデータセットの選択に際しては，関連する知識に含まれる不確実性の大きさ，安全評価に用いるモデルやデータセットの保守性の程度，モデルやデータセットの妥当性を支持する情報や証拠の充実度という三者の間のバランスを適切なものとすることが重要である。ここで重要な点は，事業の進捗とともにサイト調査や研究開発による現象理解などによって知見が拡充され，より定量的な検討が可能となるため，安全性に対する信頼性を向上しつつ，同時に安全評価モデルやデータセットについての過度の保守性を削減することが可能であるという地層処分事業の特徴にある。また，安全評価は，サイト調査や処分場設計などの工学的対策と連携しつつ，全体として，保守性の削減と安全評価の信頼性向上とを両立させることのできるように，適切に不確実性の低減および情報や証拠の充実を行い得るように進めることが肝要である。つまり，概要調査地区選定（文献調査），精密調査地区選定（概要調査），処分施設建設地選定（精密調査）段階に対応して徐々に詳細化される地質環境に関する情報を反映しながら繰り返し安全性の確認を行うことにより，以下の項目を同時に目指す。

- サイトの地質環境の理解の深化と不確実性の低減
- サイトの地質環境に応じた処分場概念の具体化
- 安全評価の精度と信頼性の向上

このために，まず，前段階に行った安全解析結果に基づき，重要な不確実性要因とその感度の情報を踏まえて，安全確保戦略の策定（見直し）を行う。また，この戦略のもとに，前段階までに得られた情報や知識に基づき，処分場概念の構築とこれに対応したシステムの理解とを相互に緊密な連携を取りつつ行い，サイト調査・評価および処分場設計などにおいて得られた情報および当該時点までに基盤研究開発などによって得られたデータや知見に基づき，安全機能とシステムの特性や挙動との間の現象論的な関係を整理することにより，システムの理解を深化させることが重要である。また，引き続いて，安全評価シナリオの構築（見直し），モデル・データセットの作成（更新）を経て安全解析を行うこととなるが，ここで，特に，現実的かつ詳細なモデルを用いて行う現象解析の結果に基づき，サイト調査・評価に対しては，安全確保の信頼性向上のために次段階で行うべき調査ターゲットを具体化するための情報を提供し，また，処分場設計や建設・操業・閉鎖計画立案に対しては，不確実性要因に対する地層処分システムの頑健性の向上や過度の冗長性についての合理化を行うための情報あるいはシステムの最適化のための設計オプション間の定量的比較の結果などを適宜提供することが重要となる。

(2) セーフティケース

地層処分では安全性を担保する期間が非常に長く，他の原子力施設のようにその安全性を実証により示すことができない。そのため，予測的な手法に基づく方法によって長期的な安全性を提示することになり，さまざまな観点から地層処分システムの安全性を確認することを通じて，「十分な確信を得る」という方法が取られる。近年ではこのような地層処分システムの安全性を提示する考え方として，安全性を幅広い観点から論ずるセーフティケースの中で捉えられるようになってきている。これは，地層処分の安全性に関する信頼性構築が安全評価の結果によってのみ行われるのではなく，むしろ，サイト選定や処分場の設計などのより幅広い要因によって多様な側面から論じられ

るべきであるという国際的な認識に基づくものである。

NUMO は，長期的安全性についての信頼性向上をはかるために，処分場概念の具体化および長期的安全性に関連する多様な知見に含まれる不確実性の低減に応じて，各段階において反復的に安全評価を行い，その結果を取りまとめてセーフティケースを構築することを基本的な考え方としている。

上述したように，セーフティケースは，地層処分の長期的安全性を支持するようなさまざまな論証を，処分事業の各段階における知見に基づき取りまとめたものであり，また，地層処分において安全性がどのように確保されているか，あるいは，科学的知識の限界がもたらす不確実性にどのように対処しているかなどを，多様なステークホルダーにとって理解しやすい形で説明するために，以下に示す多様な要素を含むものである。

- 安全評価の内容や結果
- 類似した天然系や考古学的事例における観察結果（ナチュラルアナログ）に基づく，地層処分システムの安全性に関係する現象の妥当性確認
- 既往の安全評価事例との比較および差異の分析を通じた整合性や妥当性の明示
- 各バリア内の放射性核種の存在量の時間変化などによる安全機能の相対的重要性の明確化
- What If 解析を用いた地層処分システムの頑健性の提示
- 代替的な安全指標（放射性核種のフラックスや濃度など）を用いた評価結果
- 安全解析によって算出された被ばく線量などの影響とほかのリスクとの比較

NUMO は，2.2.4 で示した事業の流れや経済性を考慮しながら，段階的な事業の展開に従って三つの安全確保策（適切なサイト選定，適切な工学的対策，信頼できる安全評価）を繰り返し実施し，安全性に関する証拠や論拠を逐次統合化していくことによりセーフティケースを構築し，それを段階的に精緻化していく。サイト選定段階においては，法令で定められた報告書と，それらに付随する処分場設計や安全評価に関する文書は，それぞれのセーフティケースを構成する中核的文書となる。セーフティケースを構成する文書中の主要な記述内容は，以下のものであり，これらを裏付ける幅広い論拠を提示することにより安全性を示す。

- 適切なサイトが選定されていること。
- 処分場が適切に設計され適切な工学的対策が採られていること。
- 信頼できる安全評価が実施されていること。
- これら三つを統合し，その段階で求められる安全性と信頼性が確保されていること。
- 課題の特定とそれに対する次段階以降の計画が妥当であること。

図 3.2.2-4にサイト選定の段階ごとに提示するセーフティケースにかかわる文書のイメージを示した。事業許可以降の建設から閉鎖に至る各段階においても新たに得られる情報に基づきセーフティケースを更新していく。

なお，国の地層処分にかかわる安全規制制度の在り方に関する報告書（廃棄物安全小委員会，2006）の中でも，安全についてさまざまな論拠などを収集した総合安全説明書（セーフティケースに相当）を事業の各段階で策定することを事業者に期待しており，NUMO としてもこれらの文書を提示して国の要求に応えていく。

以下に，閉鎖後長期の安全確保策に関する NUMO の基本的考え方を述べる。

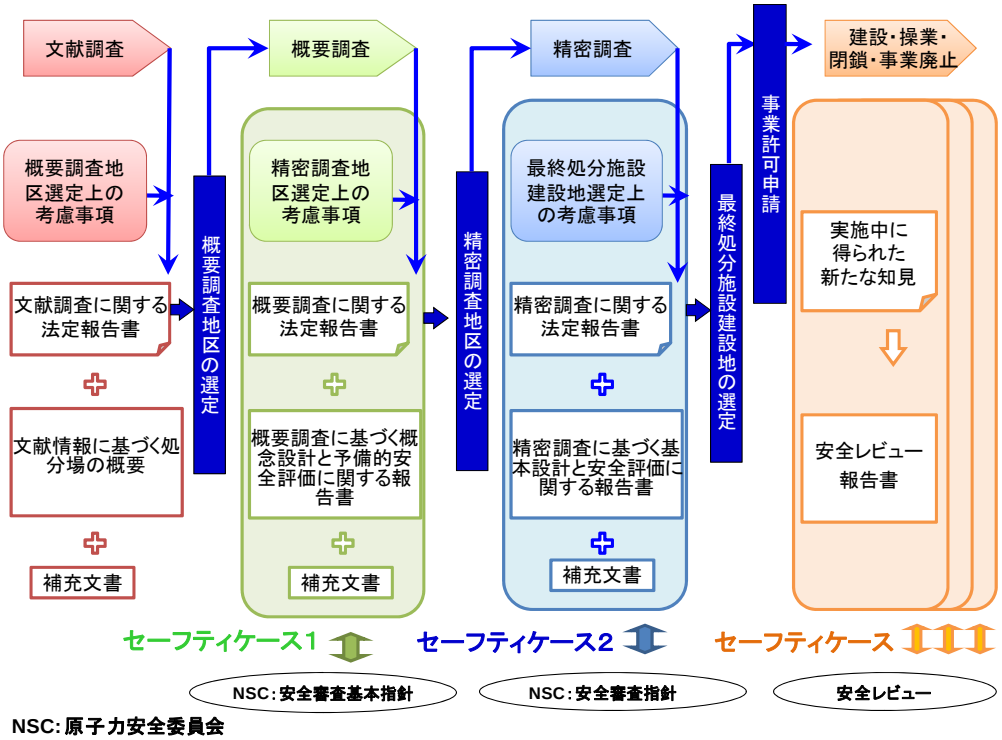


図 3.2.2-4 サイト選定段階で提示するセーフティケースにかかわる文書のイメージ

3.2.2.4 方策３：事業期間中の安全対策と環境保全策

(1) 事業期間中の安全対策

事業期間中には，一般労働安全と放射線安全を確保することを目的として適切な対策を施すが，それらの対策が地層処分システムのバリア機能に与える影響を常に評価し，事業期間中の安全と閉鎖後長期安全の両者が確実に確保できるように適切な対策を講じていく。

サイト選定段階と建設段階では，放射性廃棄物の持ち込みはなく，主として一般労働安全を確保するための対策を実施する。そのために必要な情報は，文献調査，概要調査，精密調査の地質環境特性に係る調査，および処分施設建設時に行われる調査により提供される。この段階の安全対策としては，一般の地下土木工事などの安全対策を適用できるが，事例の少ない地下深部での大規模な工事であることから，その時点で利用可能な信頼性の高い技術を用いる。地下深部に大規模構造物を建設するという経験は，国内外の地下研究所の建設，地下発電所の建設，先行している諸外国における処分施設の建設（例えば米国の WIPP など）において経験が蓄積されてきており，NUMO としてはこれらの経験を事業に反映し，最新の IT 技術による情報化施工なども活用しつつ安全の確保をはかる。

地下での坑道掘削時には切羽の不安定現象，山はね対策，湧水対策，ガス対策などの適切な安全対策を施しながら作業を進める。その場合の安全対策として，岩盤中に鋼材を挿入することで坑道の力学安定性をはかったり，セメント系材料を注入して湧水を抑えたりするなどの対策が考えられる。これらの安全対策で必要となる部材や材料を閉鎖後も岩盤中などに残置する場合には，閉鎖後長期の安全機能を有意に損なう恐れがないことを確認した上でそれらの材料を採用する。

ガス対策の対象としては，岩盤中に残存するガスのほかに，内燃機関などを使用する場合に発生する有毒ガス，発破を用いる場合に発生する後ガスなどが考えられる。これらに対して坑内環境を

適切にモニタリングし，換気による除去または希釈を行い，坑内作業従事者に新鮮な空気を供給する。さらに，使用する建設機械も電動式あるいは今後開発が進むと思われる燃料電池方式の積極的な導入をはかる。

また，地下施設において緊急事態が発生した場合を想定して，作業従事者の安全を確保するための緊急退避所や緊急避難経路を確保しておく。特に処分場の地下施設は多数の坑道群が建設され，場所を移動しながらの作業が長期間にわたって行われることから，常に避難経路が確保された状態のもとで作業を行うことができるよう，計画段階から十分な検討を行い，安全確保を最優先とする地下施設全体の作業計画を立てておく。

操業段階から閉鎖段階では，放射性廃棄物が持ち込まれるため，上記対策に加えて，放射線安全を確保するための対策を実施する。この対策は，ほかの原子力施設の安全対策と基本的に同様であるが，これまでに例のない地下深部の環境下において放射性物質取り扱う作業を伴うため，その特殊性を考慮して，その段階で利用可能な信頼性の高い技術で設備の設計，建設を行うとともに，必要な技術開発を進め，安全操業に万全を尽くす。例えば，遠隔操作技術を用いて廃棄体を搬送，定置する技術に関しては，再処理施設やガラス固化体貯蔵施設の操業で蓄積された知見を活用するが，高温，高湿度，湧水など地下環境特有の条件に対する課題に対しては技術開発を計画的に実施していく。

NUMO は，サイトの地質環境特性なども勘案し，地上施設および地下施設の設計段階において安全対策に関する詳細検討を行い，各設備の安全設計や運転・保守マニュアルなどに反映する。操業中においては設備等の定期点検を実施して，損傷などの早期発見，性能確認などを行う。点検頻度については，対象に応じて日常点検，月例点検，年次点検などを適切に設定する。

一般に原子力施設においては，事故発生の防止と事故時の影響緩和の観点から，安全上重要な設備・機器については安全機能の多重化が求められ，この考え方は地層処分事業における地上施設と地下施設にも適用される。多重化の程度は，事故の影響の重大性に応じて検討されるべきである。例えば，廃棄体を立坑のエレベータを用いて搬入する場合，エレベータのロープは十分な安全率を有して設計されるが，万一に備えて落下防止用把持装置を装備し，さらに立坑下部に緩衝装置を設けて衝突力を低減するという対策が考えられる。

実際の地下施設は分割された複数の埋設区域からなり，それらの地下坑道の建設は，一区域ずつ順次進め，それに従い廃棄体の埋設作業も完成した区域から順次進める。このため，操業段階では，完成した区域における廃棄体の搬送・定置作業と，次の区域の坑道建設作業を並行的に進めることなるが，この段階では放射線管理を要する作業区域と，それを要しない作業区域を極力分離できるような計画とし，適切な管理を行う必要がある。こうした管理を確実に行うため，最新の IT 技術を用いて坑内の状況（環境，人，機械，廃棄体などの状態，異常発生など）をリアルタイムで一元管理するシステムや坑内に入坑している人との効率的な連絡通信絡システムの構築も行う。

また，わが国において自然災害の代表例として「地震」と「台風」が挙げられる。「地震」に対しては「安全上の重要性に応じて想定すべき地震力に対して，適切な期間，安全上要求される機能を失わないように，十分な耐震力を持たせる」（適切な耐震設計）ことが基本的な考え方である。沿岸部では，地震とともに発生する「津波」に対しては地上施設用地の高さを津波による水面上昇量より高くするなど，津波の遡上により地下施設が冠水しないよう配慮した設計を行う。また，台風による被害は，風による施設の倒壊，雨による施設の冠水や土砂崩れ，波浪による港湾施設の破損が

想定されるが，それぞれ，実績のある耐風設計法，雨水排水設計法，耐波浪設計法が準備されており，サイトの地質環境の条件に応じて適切に設計することが可能と考えられる。

(2) 環境保全策

NUMO はこれまで，「放射性廃棄物の地層処分事業について（公募関係資料）（NUMO，2009)」や「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性（NUMO，2004)」において，環境への影響や保全に関し，以下の考えや姿勢を示してきた。

〔放射性廃棄物の地層処分事業について（公募関係資料)〕

- 分冊-2 概要調査地区選定上の考慮事項 : 処分施設建設地の選定過程や建設・操業の各段階においては，自然環境の保護や開発行為にかかわる規制など，最終処分法以外の関連法令も遵守
- 分冊-3 地域共生への取り組み : 共生への取り組み方策について，“特に留意すべき重要事項”の三点目に「環境保全などへの配慮」を列挙

〔高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性（NUMO，2004)〕

- 法定の環境影響評価の適用の有無にかかわらず，事業の各段階を通じて処分場を建設する地域の環境に十分配慮
- 事業の各段階で生じる環境への影響について，それぞれの段階の前段階で調査，予測および評価を行い，環境に与える影響をできる限り回避，低減するとともに，必要に応じて代償措置（復元，創出）を採ることを含めた適切な保全措置を講ずることができるようあらかじめ準備
- 各段階において実際にモニタリングなどを行ってその効果を確認し，必要があれば保全措置の改善もしくは追加の措置を講ずるといった計画的かつ柔軟な対応

以上の事項を，事業の各段階において計画的かつ着実に実施することが，「周辺環境の保全」を達成することにつながる。

地層処分の長期性という特性に鑑み，NUMO は，持続可能な社会形成の観点および地域共生の観点から，地域の環境を保全し，将来世代に対して良好な環境を引き継いでいくために，必要な環境影響評価を実施し，長期的な視点に立って，環境保全の取り組みを進めていく。この環境保全に際しては，事業に伴う環境負荷の回避・低減をはかるだけでなく，地域にとって環境の観点から価値を高める（付加価値を創出できる）構想を地域とともに協力しながら構築していくことも重要と考えている。このような NUMO が自ら取り組む行為を，ここでは「環境配慮」と総称する。

環境配慮の検討は，地域とのコミュニケーションを踏まえて進めることが重要であり，文献調査や概要調査などの結果を地域の皆様へ説明する機会にあわせ，環境への影響や保全に関する考え方を示し，地域の皆様の意見を求めながら検討を進めていく予定である。

(i) 早期段階からの環境配慮の取り組み

NUMO は，より効果的に環境配慮を行う観点から，事業の初期段階，すなわち文献調査の段階から環境配慮の取り組みを進めていく。これは「戦略的環境アセスメント」（SEA : Strategic Environmental Assessment）の趣旨に合致するものといえる。

SEAとは，政策（policy）・計画（plan）・プログラム（program）を対象とする環境影響評価の手続きであり，事業の初期計画段階において，政策・計画・プログラムの立案に環境配慮を組み込むこ

とにより，環境配慮をより効果的に進めることができるという特徴を有する。近年，国内外においてSEAの取り組みが進められており，国内では国のガイドラインの制定（戦略的環境アセスメント総合研究会，2007；国土交通省，2008）や地方自治体におけるSEA制度導入が挙げられる。一方海外では，米国，カナダ，EU諸国[2]，中国，韓国など，先進国を中心にSEA制度が導入されており（戦略的環境アセスメント総合研究会，2007），地層処分事業においては，スイスや英国においてSEAを実施することが計画されている（BFE，2008；Defra et al.，2008；NDA，2009）。

（ii） 取り組みの手順

NUMO は，三段階のサイト選定に応じて環境への影響に配慮しつつ事業を適切に管理していく方法について検討を進めており，サイト選定の初期の段階における環境配慮の考え方を整理した（高橋ほか，2006）。

NUMOはサイト選定の各段階において，次の段階以降における環境配慮を適切に行うために，必要な調査・予測・評価を行い，関連する法規制や条例なども踏まえ，適切な環境保全措置を検討する。文献調査段階においては，文献情報を用いて地域の環境面の特性を概略把握し，次段階以降の事業において必要とされる環境保全措置を検討する。概要調査および精密調査の段階では，「事業特性・地域特性の把握→評価項目および手法の選定→現況の把握（調査）→環境影響の予測・評価→環境保全措置の立案・実施→環境保全措置の効果確認（モニタリング）→環境保全措置の改善」という基本的な流れで取り組みを進めていく（図 3.2.2-5）。

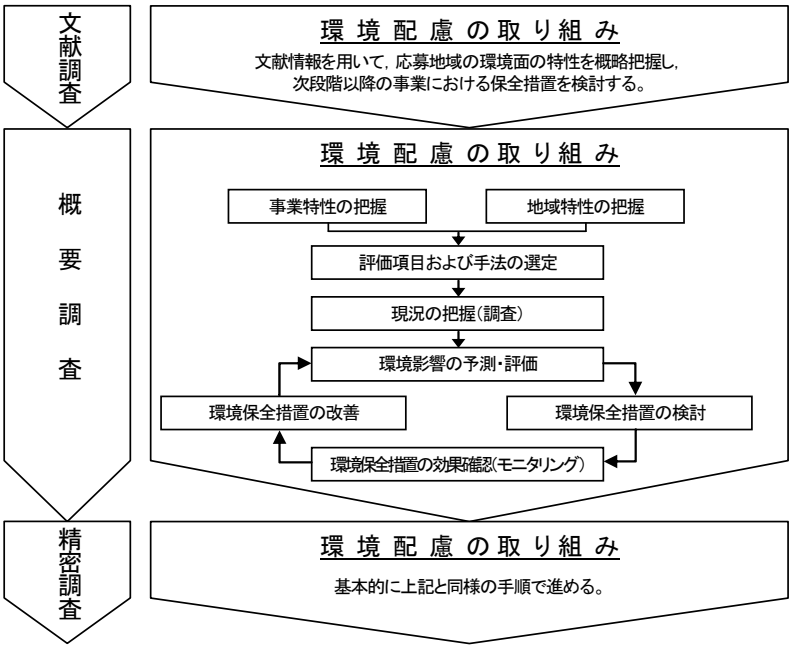


図 3.2.2-5 三段階の調査と平行した環境配慮の取り組みの手順

三段階の調査の進展に伴い，次段階以降の調査内容や処分施設の建設・操業に関する事業計画の

[2] EU の SEA 指令（2001/32/EC）に基づき，2007 年 1 月時点で 27 か国中 25 か国で SEA 制度が導入されている（戦略的環境アセスメント総合研究会，2007）。

詳細度が高まっていくが，これに応じて，環境への影響に関する予測の精度を高め，それに伴い環境保全措置を見直していくこととする。

3.2.3　方針２「信頼性の高い技術を用いた事業推進」

3.2.3.1　方針２に関する基本的考え方

NUMOは，十分な信頼度を持って安全確保策を実施していくために，最新の知見を踏まえ，その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いて事業を推進する。信頼性の高い技術[3]については，他分野での既往の使用実績や事業を効率的に進める観点での経済性を満足した上で，適切なレベルで品質を保証できるものであることが重要である。

地層処分事業で用いる技術の多くは，一般産業分野や原子力分野で使用実績があるものを用いるが，地層処分事業に固有の技術もあり，そうした技術は必要となる時期までに計画的に整備し，適用性を確認しておく必要がある。100 年にわたる事業で必要となる技術をすべて現時点で整備する必要はなく，段階的に進展していく事業の必要なタイミングまでに必要な技術を整備するという方針で進める。NUMO では 2002 年末までに概要調査地区選定段階（文献調査の段階）で必要な技術の準備を整え，全国の市町村から「特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域（応募区域）」の公募を開始した。

現在地層処分に関する技術開発は2.2.4.5で述べたようにJAEAなどの基盤研究開発機関とNUMOが役割分担しつつ実施されているが，技術の整備を効率的に進めるためには，両者間で密接な連携を取りつつ技術開発を進める必要がある。基盤研究開発機関は，NUMO の事業や実務的な技術開発に先行して先導的な研究開発を行うことにより，次段階以降で NUMO が必要とする技術や知識の基盤を提供する。基盤研究開発機関によって開発された技術は，必要に応じ，NUMO が，効率化，最適化，合理化，実用化，体系化などの観点からのさらなる整備を行い事業に活用する。

JAEA では，深地層の研究施設の建設と研究開発が進められているが，地下深部における地層処分固有の課題に関する経験は限られており，予期せぬトラブル経験も含め事前に地下研究施設でさまざまな経験を積むことは，今後の NUMO の事業を安全かつ効率的に実施していく上で極めて重要である。

また，NUMO は，組織・体制作りや人材育成に努め，国内外の協力体制を整備することで，信頼性の高い事業全体を推進できる環境を構築する必要がある。

以上のように，「信頼性の高い技術を用いた事業推進」を実現するための実施方策として以下の三つに取り組んでいる。

1）**技術に関する品質保証の的確な実施**
2）**計画的な技術の整備**
3）**NUMO の組織および国内外協力体制の整備**

以下に，それぞれの方策の背景や考え方について述べる。

[3] ここでいう技術とは，技術的な知見（知識）や使用する技術を含む。

3.2.3.2　方策１：計画的な技術の整備

原子力政策大綱（2005 年（平成 17 年）10 月 14 日：閣議決定）においては，NUMO は地層処分の安全な実施と経済性および効率性の向上を目的とした技術開発を進め，一方で，基盤研究開発機関は深地層の研究施設などを活用して，深地層の科学的研究や，地層処分技術の信頼性向上，安全評価手法の高度化などの基盤的研究を実施することとされており，NUMO では，この方針に基づいて技術開発を実施してきた。また，基盤研究開発機関が実施主体と規制機関の必要とする技術を把握し基盤研究開発に適切に反映されるよう，地層処分基盤研究開発調整会議（以下，調整会議という）という枠組みが国により構築されている（資源エネルギー庁・JAEA，2009a，2009b）。NUMO は，調整会議のメンバーとしてこの枠組みに積極的に参加し，基盤研究開発の成果が有効に地層処分事業に役立つよう，ニーズ提示と成果の評価・確認を実施してきた（NUMO，2010）。

(1)　技術開発の基本方針

図 3.2.3-1は，地層処分事業における主要なマイルストーンと，それらに向けた技術の開発・整備や必要な基盤研究開発について関係を示したものである。NUMOは，「事業の各段階で安全確保のために必要な技術は何か」，「技術の目標到達レベルは何か」，「現時点において得られている技術のレベルはどの程度か」などを明確にした上で，どの時点で技術開発を開始する必要があるかを考慮して，必要なタイミングで必要な技術が使えるよう計画的に技術の整備を行う。

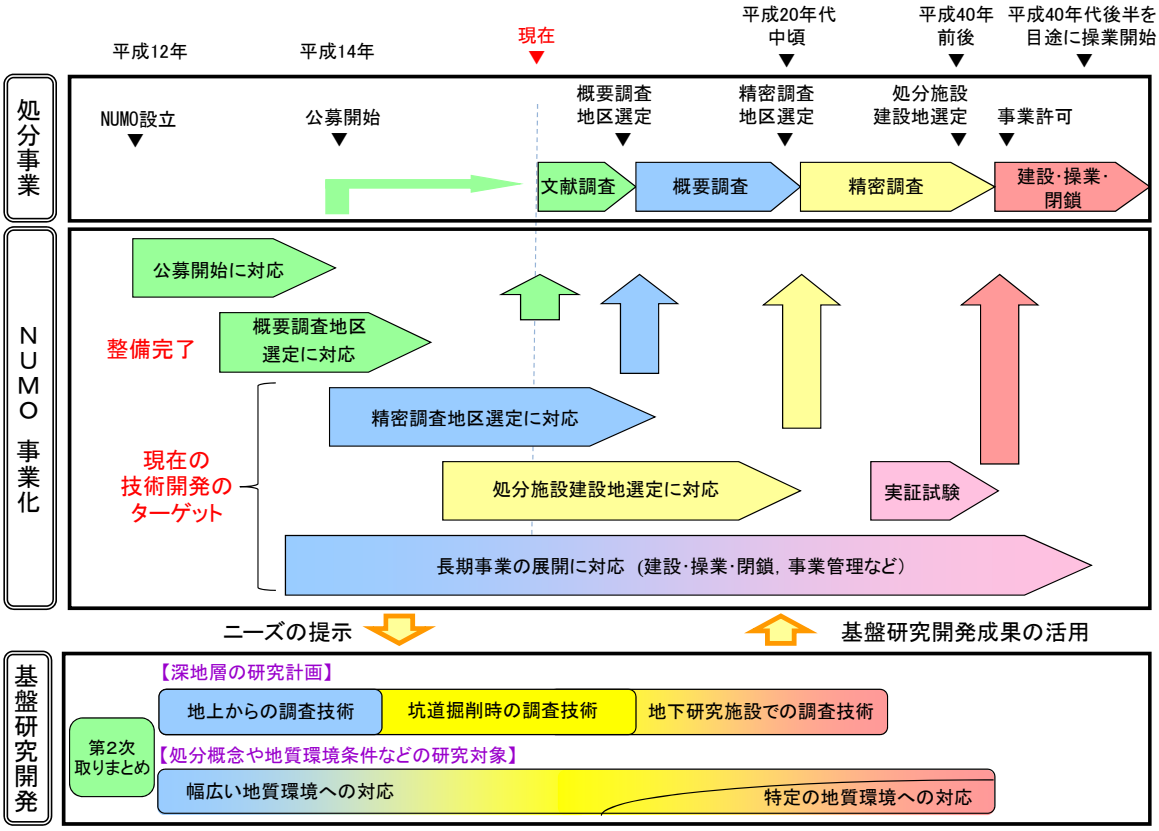


図 3.2.3-1 技術開発スケジュールと基盤研究開発との関連

また，整備された技術の信頼性を示すためには，技術の実証[4]による確認が重要である。特に，廃棄体の遠隔定置技術などの地層処分に特有な技術については，実証試験によりその適用性・信頼性を確認するとともに，適宜改良を加え，技術を向上させる。また，ボーリング調査技術や搬送技術のような汎用的な技術であっても，地層処分事業に特有な制約条件を考慮して，実証試験などにより経験的にその適用性を確認することが重要である。

なお，閉鎖後長期の安全性の評価に関する技術については，実証試験によって対象とする時間スケール全体にわたってその妥当性や信頼性を確認することができないため，評価に用いるシナリオやモデル，解析コード，データなどについて，評価期間の一部を対象とした実証的検証に加え，比較解析やナチュラルアナログ事例との比較，専門家のレビューなどのさまざまな方法を組み合わせることにより，その信頼性を高める必要がある。

NUMO は上記の点を考慮し，地層処分に必要な技術開発を事業期間全体を通してどのように実施していくのかを取りまとめた技術ロードマップを作成し，本報告書で提示した。事業期間全体を通した技術開発への取り組みを提示した（4.1.3.2 参照）。

(2) 技術開発課題の体系的な整理

2000 年以降，NUMOでは，第２次取りまとめおよび高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術（CRIEPI・電気事業連合会，1999）で得られた知見や情報を出発点として，基盤研究開発機関と協力しながら技術開発を進めてきた。技術開発テーマを策定する際には，図 3.2.3-2に示す手順によって技術開発課題を明らかにし，見出された開発課題は基盤研究開発機関で実施するものとNUMOが自ら実施するものに分類して取り組んでいる。図 3.2.3-3にはNUMOが実施する技術開発と国の基盤研究機関が実施する研究開発の相互補完的な関係を示す。

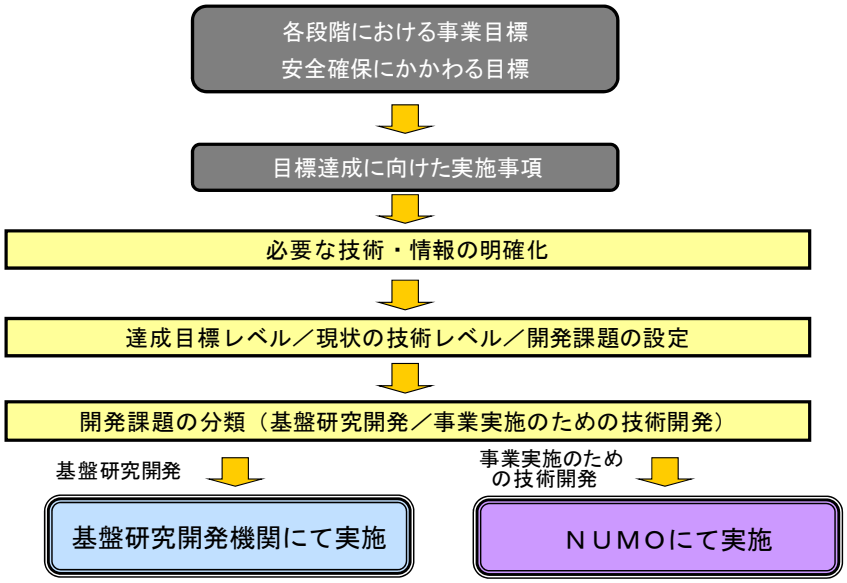


図 3.2.3-2 技術開発課題の体系的整理

[4] ここでいう技術の実証とは，対象とする技術の全部あるいは一部を，実際の条件を模擬して試行することにより，その技術の妥当性や適用性を検証することである。また，その検証を通じて対象技術の問題点を解決し，技術の適用性や信頼性を向上させることも含むほか，技術を実演することで信頼性を提示することも含む。

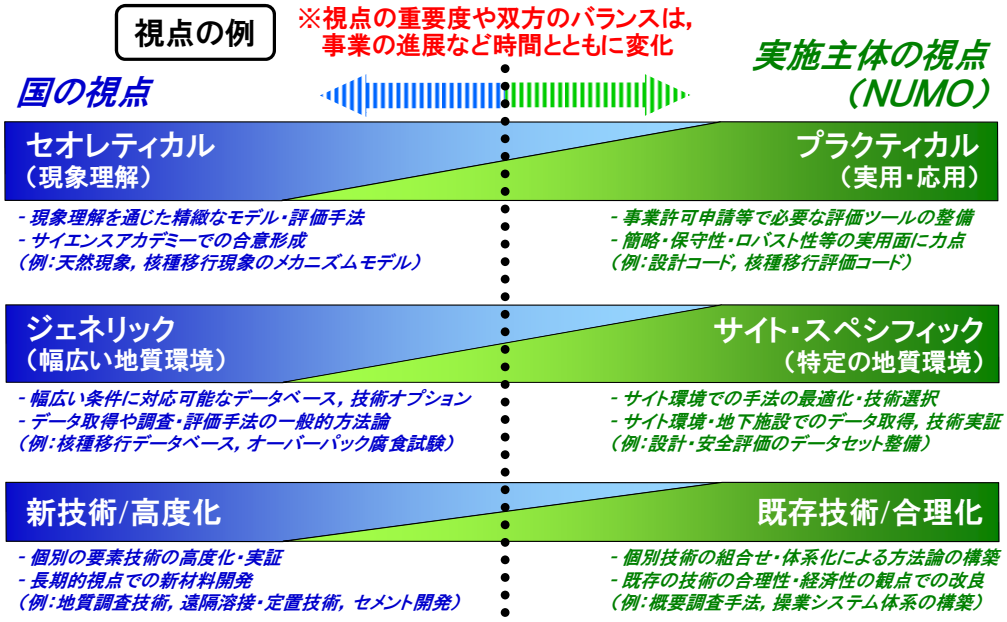


図 3.2.3-3 NUMO の技術開発と基盤研究機関における相互補完的な分担
（出典：経済産業省資源エネルギー庁・JAEA，2007）

図 3.2.3-2の技術開発課題の体系的整理に当たっては，事業全体を俯瞰した安全確保ロードマップの中で各段階における事業目標と安全確　保にかかわる目標を定め，目標達成に向けた実施事項を明らかにした上で，これらの実施事項を遂行するに当たって必要な技術や情報を明確化し，達成目標レベル，現状の技術レベルの検討を行う。設定した達成目標レベルに対して現状の技術レベルが十分ではない場合には，技術開発などによって技術レベルの向上を行うことが必要となるため，達成目標をクリアするために必要な開発課題を設定する。これらの開発課題を，基盤研究機関が基盤研究開発として実施すべきものと，NUMOが事業実施のための技術開発として取り組むべきものに分類する。

抽出された技術開発課題のうち，NUMOが実施する技術開発課題については，自ら開発計画を策定し計画的に技術開発を進めるが，基盤研究開発として実施する課題については，調整会議の場を活用して，NUMOが事業の立場からの技術開発ニーズを提示している（図 3.2.3-4）。これらの技術開発は，それぞれの機関で分担し，計画的に実施されるが，定期的に開発成果について情報交換を行い，必要に応じて技術開発目標や開発計画の見直しを行うなどして，効率的に技術開発を進めてきている。NUMOは「地層処分技術開発ニーズの整理―精密調査地区選定に向けて―」（NUMO，2010）で精密調査地区選定段階で必要とする技術を提示しており，これらの技術ニーズは資源エネルギー庁と基盤研究開発機関が策定した「地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁・JAEA，2009a，2009b）に反映されている。

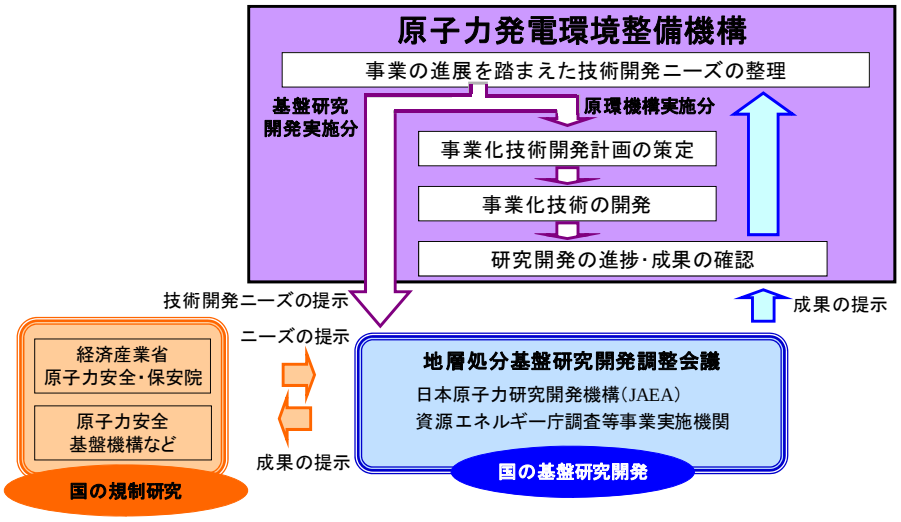


図 3.2.3-4 基盤研究開発機関と緊密に連携した技術開発の取り組み

(3) 技術の実証

すでに述べたように，NUMOは，地層処分事業の実施に必要な技術を，必要となる段階までに確実に整備し，重要な技術についてはその信頼性や適用性などを実証によって確認する。実証は，①実サイトでの適用に先立ち国内外の地下研究施設や地上施設などを利用して実施するもの（オフサイトで実施する実証）と，②実サイトの実際の地質環境下において当該技術の適用性や信頼性を確認するもの（実サイトで実施する実証）という二つを段階的に行うことを基本とする（表 3.2.3-1）。

基盤研究開発機関が実施する研究開発活動は，対象となる地質環境が確定していない段階において，多様な地質環境や幅広い処分場概念を想定して進められる。また，実サイトでの地質環境調査などが開始された後でも，基盤的な技術の実証などが，必要に応じて基盤研究機関が有する施設で行われる。これらの実サイト以外で実施する実証をオフサイトで実施する実証と呼ぶこととする。

一方，NUMO は実サイトが確定した段階において，そのサイト固有の地質環境や処分場概念などに基づき，より絞り込んだ技術の実証を行う。これらは，事業目標の達成に向けて，実際のサイトで使用する技術の適用性を確認すること，各事業段階で行う技術的な判断の妥当性や信頼性について確認すること，事業の品質保証の一つの方策とすることなどを目的として実施する。これらを実サイトで実施するものを実証と呼ぶ。

表 3.2.3-1 NUMO が実施する実証プログラムの分類とその特徴

分類	オフサイトで実施する実証	実サイトで実施する実証
目的	・ 整備された技術を体系化し，実サイトでの適用前に,その実用性を確認する。 ・ 各事業段階を的確に進めるために用いる技術そのものに関する知見や技術的な判断にかかわるノウハウを得る。	・ 実際のサイトにおいて,使用する技術の適用性確認を行う。 ・ 各事業段階で行う技術的な判断の妥当性や信頼性について確認する。 ・ 事業の品質保証の一つの方策とする。
実施場所	・ 既存の地下空間 ・ 国内外の地下研究所 ・ 地上の研究施設など	・ 実際のサイトの地表･地下空間,地上施設,地下施設
備考	・ 電中研横須賀地区やローレンスバークレー国立研究所にてサイト調査技術の実証を実施中	―

電中研横須賀地区で実施している「概要調査の実証」は，NUMO が事業の中で最初に用いる地表からのサイト調査技術の実証である（三和ほか，2009）。この実証ではサイトの地質環境などの与条件を考慮して，すでに整備された多数の技術の中から最適な概要調査技術を選定・適用していくための「技術的な知見」や，概要調査を推進する上で必要となる「技術的な判断にかかわるノウハウ」を蓄積することも目的としている。また，今後は，精密調査段階にて実施を予定する実証プログラムを的確に計画・推進するための技術的な知見（知識）などの蓄積を目的として，基盤研究開発機関が進める実証試験や,諸外国の地下研究所などで行われる原位置試験に参画していく予定である。

精密調査地区選定段階（概要調査の段階）および処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の前半（地上からの調査段階）では，サイト特性の調査・評価技術に着目した実証を展開する。これらの段階での実証の主な目的は，信頼性の高い地質環境モデルの構築を指向したものであり，処分場概念の構築や安全評価に提供する情報として，地質環境をどこまで理解できているかを段階的に確認していくことである。そのための実証としては，信頼性の高いサイト調査技術と，得られた結果を解釈し,さまざまなデータを統合化して地質環境モデルとしてまとめていく知見が必要であり，これらを実サイトでの作業に先立って実証しておく必要がある。選定されるサイトの地質環境は空間的な不均質性を有しており，それはサイト固有であることから，評価の空間スケールや時間軸を設定した上で，それらを適切に考慮するためになされるさまざまな「技術的な判断」の信頼性についても，あわせて確認していくことが重要である。

処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の後半（地下施設での調査）では，地下調査施設の建設を通して，処分場地下施設の施工にかかわる実証を展開する。また，完成した地下調査施設では，人工バリアの搬送・定置などの工学技術の実証を行い，模擬廃棄体を用いた再取り出しの技術実証などについても，必要に応じて実施する。これらの工学技術実証の主な目的は，設計要件を満足する設備が十分な品質を持って構築でき，機能しうることの確認であり，また実用上の問題点を洗い出し，それを実機の設計や運用方法の改良に反映することである。これら工学技術の実証の成果は，許認可申請に用いる技術情報の信頼性強化にも役立てることができる。

人工バリアの搬送・定置技術のデモンストレーションは，事業許可以降，操業段階の開始前まで

適宜繰り返し実施し，技術の改善に反映するとともに，運転員の訓練にも役立てる。また，閉鎖段階の開始前までに地下施設の埋め戻し技術の実証を適宜，実施し，その信頼性高める。

廃棄体定置後に人工バリアとその周辺で生じる各種現象が，安全評価や設計で想定した範囲になる見込みがあることを確認することは，地層処分システムの長期安全性にかかわる論拠を拡充する一つの重要な取り組みと考えられる。しかしながら，実際の人工バリアとその周辺の環境変化を計測する行為自体が，人工バリアやその近傍の岩盤の長期的なバリア機能を脅かす可能性がある。そのため，地下調査施設など，実際の処分パネルから隔離した場所を利用して，模擬廃棄体を用いた人工バリアとその周辺で実証的なモニタリング（温度や水圧など）を行うことが現実的と考えられる。こうして得られるモニタリングデータは，閉鎖措置計画の申請や閉鎖措置の確認のための基礎情報としても重要である。この種のモニタリングについては，今後事業の進展とともにその内容を具体化していく。

廃棄体の定置などの工学技術の実証や人工バリア周辺のモニタリング技術の実証は，諸外国の地下研究施設にて研究開発が進められており（例えば，ENRESA，2006），今後わが国でも JAEA の深地層の研究施設を利用したして実施されることが計画されている（資源エネルギー庁・JAEA, 2009a, 2009b）。現時点では，上記の実証により，評価の期間や範囲を限定した上で，人工バリアやその周辺で生じる各種現象が，安全評価や設計にて想定した状態に確実に近づいていることを，計測したデータにて確認することを予定している。また，実証プログラムで得られたデータは，安全レビューに反映し，閉鎖措置計画の申請や閉鎖措置の確認のための基礎情報とする。

（4） 技術開発ロードマップ

3.2.2.2 で述べた安全確保ロードマップで規定した各段階の目標達成に必要とされる技術のうち，既存の技術レベルを分析し，「技術の開発や実証」が今後求められる項目を対象に，必要とされる段階までにどのように準備していくかについてを「技術開発ロードマップ」として取りまとめ第 4 章に示した。技術開発ロードマップは，開発が必要とされる技術分野を，①サイト調査・評価技術，②工学的対策技術，③閉鎖後長期の安全性評価技術，④事業期間中の安全確保技術，の四分野に分けて示しており，さらにそれら全体をまとめたものを「技術開発ロードマップ概要版」として示している。

3.2.3.3 方策２：技術に関する品質保証の的確な実施

（1） 地層処分における品質保証の考え方

品質保証は幅広い分野で実施されているおりその定義は必ずしも統一的ではないが，品質に関するマネジメント規格として一般的なJIS Q 9000:2006（ISO9000:2005）においては次のように定義されている。品質保証（quality assurance）とは「品質要求事項が満たされるという確信を与えることに焦点を合わせた品質マネジメントの一部」，品質管理（quality control）とは，「品質要求事項を満たすことに焦点を合わせた品質マネジメントの一部」，さらに品質マネジメントとは，「品質に関して組織を指揮し，管理するための調整された活動」とされ，その注記において，品質に関する指揮および管理には，通常，品質方針，品質目標，品質計画，品質管理，品質保証および品質改善が含まれる。

この定義では，品質保証とは，顧客の持っているニーズや期待に応え，顧客に信頼感を与える製

品およびサービスを提供していくための一連の活動，つまり『品質保証は，顧客のニーズ･期待が組織の製品・サービスに確実に反映されているようにするための活動』といえる。

原子力施設に関連する品質保証の規定には，IAEA GS-R-3（安全要件），JEAC4111-2009（民間規格）などがある。また，最近，放射性廃棄物の処分に関する品質マネジメントシステムの指針として，IAEA より GS-G-3.4（安全指針）（IAEA，2008）が発行されているが，いずれも ISO9000 シリーズとの関係を明確にしている。

地層処分事業における IAEA の安全基準では，品質マネジメントへの要求事項として，大きく次のような事項が記載されている。

■実施主体に事業の各段階でのセーフティケースを構築することを要求している

（例）各段階でのセーフティケースには，次のようなものが求められる

①サイト特性と処分概念固有の安全性の確認

②サイト特性を考慮した処分場オプションの選定

③サイトの適格性判断への支援

④許認可申請への透明性・追跡性の確保

■処分場を要求された品質で構築するだけでなく，閉塞後の長期の安全性も考慮した品質の確保を要求している（安全と品質を統合したマネジメント）

■個々の作業の特徴と相互の関連を考慮すること

■モデルやデータベースを検証したり，確証するプロセスを含めること

■サイト調査の追跡性の確保と性能評価，安全評価など作業プロセスにおいて認識できるように不確実性を文書化すること

地層処分事業の品質マネジメントに関する法的な事項は,「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」の第 46 条から第 52 条に品質保証への要求事項が規定されている。この要求事項を満たす民間規格として, 社団法人日本電気協会の技術規程「原子力発電所における安全のための品質保証規程（JEAC4111-2009）」がある。JEAC4111 は，日本国内の原子力分野における最も知られている品質マネジメントの民間規格であり，原子力安全・保安院は，この規格が「実用炉則」第 7 条の 3 から第 7 条の 3 の 7 および「研究開発段階炉則」第 26 条の 2 から第 26 条の 2 の 7 にそれぞれに規定する要求事項（品質保証計画・組織を定め，計画，実施，評価，改善を継続して行うこと）を満たす規格であることを明確にしている。また，第二種廃棄物埋設事業に係る品質保証に対しても，JEAC4111 に基づく品質マネジメントシステムを事業所の実態に即して構築し，これを定めた品質保証計画を保安規程の一部として記載することを求めている。この JEAC4111 は，ISO9001 を基本として原子力発電所での使いやすさを考慮して修正したものであり，IAEA の改訂版 GS-R-3 との比較も行っており，その類似性も示されている。

地層処分事業の品質保証に関しては, 許認可申請後の建設･操業の段階適用されることになるが, サイト選定の段階から JEAC4111 を準用することが適切と考える。

(2) 品質保証への取り組み

NUMO では ISO9001:2000 に準じて，初期の段階の主要業務である技術文書の作成（文献調査結果の取りまとめや各種技術報告書の作成）に対して品質マネジメントシステムを構築し運用している。この品質マネジメントは，各種意思決定に必要な情報などの情報が，統一的な考え方に基づき同一の品質レベルを満足して作成・維持されることを管理することに重点を置いている。

現時点では，事業実施に向けた技術開発が主体であるため ISO9001 に準じた品質マネジメントシステムとしているが，事業の実施段階ではほかの原子力施設で使用実績が豊富な JEAC4111 に準拠したシステムに移行し，運用していく予定である。

現在のNUMOの品質保証システムでは，技術文書の管理に関して，文書の種類と重要度に応じたランクを三分類に分け，管理すべき文書等を明確にしている。特に重要な技術文書に対しては，主に次の内容が記載された「品質計画書」を作成し，完成までのプロセスを管理する。（図 3.2.3-5）

- 成果品の品質目標，要求事項
- 業務の実施体制
- 実施手順，実施工程
- レビュー者，レビュー方法および時期
- 外部レビューの必要性
- 不具合発生時の対応方法

NUMO では，科学的知見の最新性や技術的な判断の客観性を確保するために，外部専門家によるレビューを重視している。現在，NUMO が設置しているレビューの組織として，国内外の専門家による委員会（国内技術アドバイザリー委員会，国際技術アドバイザリー委員会など）があり，年数回実施し，技術業務のレビューを受けるとともに，重要な技術資料についても審査を受けている。このほかにも，対象とするテーマに応じてアドホックな専門レビューチームを構成してレビューを受けている。また，各種学会への論文投稿，技術報告会や国際専門家会議等の開催，国内外関係機関との技術協力，国際共同研究への参画などを通じた情報収集・発信活動や国内外の専門家との意見交換などにより，知識や判断の客観性を高めるよう努めている（Chapman,et al.，2009b）。

IAEA 安全指針 GS-G-3.4 においても，地層処分のように長期にわたる事業期間中に技術開発による知識の拡充が行われ，それが順次事業に反映されていくような活動における品質マネジメントでは専門家によるレビュー（ピアレビュー）が有効な方法であることが示されている。

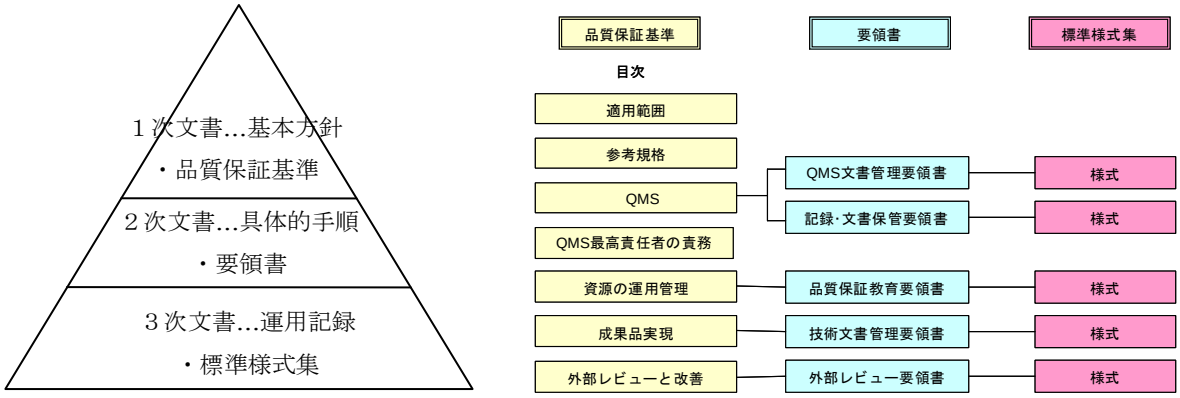


図 3.2.3-5 QMS 文書の階層構造および基準，要領書および標準様式集の構成

NUMO は，文献調査の実施に当たっては，以下の点に留意して品質マネジメントを行う。

- 文献調査の開始前に調査計画書を策定し，公開する。
- 概要調査地区選定の判断は，信頼性の観点から十分に品質が確保された文献情報に基づいて行う。
- 文献情報の品質を判断する基準を規定する。
- 品質マネジメントを支援するツールを整備する。

品質マネジメントを支援するツールの例としては，文献情報の整理を目的としたデータベースである地質環境データ管理システムや，文献情報から判断に用いる情報を整理する際の情報の追跡性を確保するためのシステムである文献調査システムフローが挙げられる。また，要件管理システムにより，法定要件への適格性の判断や付加的考慮事項に基づく総合評価結果をもとに行う概要調査地区を選定にかかわる意思決定の記録と追跡性を確保する。

NUMO の掲げる段階的かつ柔軟な事業推進の考え方に基づいて，品質マネジメントにかかわるシステムも，技術の進展や法定要件，社会環境などの変化に応じて，業務体制を含めて段階的に改善を図りつつ，整備拡充を進めていく。当面精密調査地区の選定段階（概要調査の段階）に向けては，JEAC4111 の準用を意識したシステムの構築を進める。こうしたシステム作りにおいては，

- 安全評価に用いるモデルやのデータの検証にかかわる品質保証
- サイト調査・施設設計・安全評価の統合化における作業の連携に関する品質保証
- 他機関の研究開発成果の取り込みに関する品質保証

などに特に留意して整備作業を進める。

今後，段階的に整備拡充していく品質マネジメントの適切な運用をはかるためには，個々の技術者を育成するとともに，業務体制を整えることが不可欠である。とりわけ内部監査やレビューなどは，第三者の視点を確保することが重要であり，実施部門から独立性を有する部門で実施できる体制を整えていく予定である。

3.2.3.4　方策３：NUMOの組織および国内外協力体制の整備

NUMO は，わが国の地層処分事業を安全かつ着実に遂行していくために必要とする技術要員を計画的に確保・育成する。NUMO が実施主体として社会的信頼を獲得していく上では，技術的にも高い信用度を得ることが肝要であり，モラルの高い技術集団を形成していく必要がある。

また，地層処分事業は広い分野の専門知識を必要とする事業であり，JAEA などの基盤研究開発機関とは技術移転も含め，緊密に連携しながら事業を推進していく。海外の研究機関や実施主体との協力も重要であり，協力協定などを通じて必要な技術情報の交換や共同研究などを通じて技術レベルの向上に努める。

以下に NUMO 自体の組織や人材の確保・育成に加え，国内外の関係機関との協力体制について述べる。

（1）　人材の確保・育成・技術継承

地層処分事業は約 100 年にわたる長期事業であり，その組織の整備においては，長期的な視点から事業を支える人材を確保・育成していく必要がある。事業の最盛期には 100 名を越える技術者が必要と見込まれ，地質学，土木工学，原子力工学など広範な専門分野の知識が必要であるが，事業各段階の業務の内容や量，必要とする技術的専門性など見積もり，将来の技術業務の実施体制および組織構成を検討している。

NUMOは，2000 年に設立されて以来，地層処分事業の分野や発電所の建設などの大型プロジェクトの経験を有する出向社員を中心に業務を実施してきたが，事業の継続性を考慮して 2007 年から職員の中途採用を開始した。また，2010 年からは新卒採用も開始し，事業の進展に伴い順次プロパー職員の割合を増加させていく計画である（図 3.2.3-6）。なお，中途採用者は，一般企業や研究機関において地層処分に関連する知見や業務経験を有し，即戦力となる人材である。

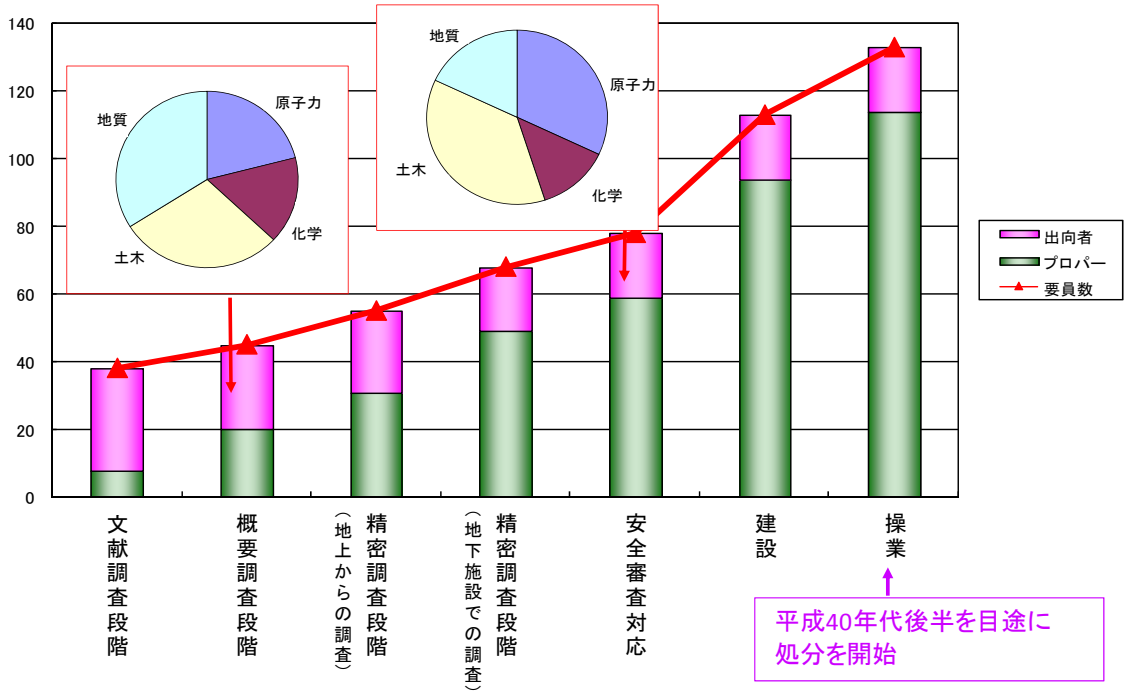


図 3.2.3-6 事業期間中の技術要員見通し

人材の育成に関しては，新卒採用されたプロパー職員は，地層処分の専門技術者として，それぞれの専攻・専門分野に関連が深い専門知識・技能の修得をはかることが求められる。また，専門分野以外の技術分野についても知識を修得する機会を積極的に設け，広範な知識を持たせるようにし，あわせて，事業の推進に必要なプロジェクト管理技術の修得やコミュニケーション能力にも重点を置き育成する。このため，講義形式の座学のみならず，設計･性能評価演習や地質巡検，基盤研究開発機関などへの出向により専門知識・技能の向上をはかることも計画している。地層処分事業では国際的な協力関係も重要であることから，ITC などの海外の研修機関において研修を実施しているほか，海外実施主体への派遣や共同研究などを通じた人材交流も計画しており，国際的にも活躍できる人材としての育成にも努める。

100 年といった長期間の事業を実施する間には，数回の世代交代があると見込まれるため，世代間での技術継承について検討が必要である。そこで，人から人への技術継承を円滑に行うために，組織の年代構成の適正化にも配慮するとともに，技術継承に有効な支援ツールの整備にも取り組んでいる。支援ツールとして，将来世代が過去の重要な技術・情報や意思決定の経緯などの情報を追跡できるような機能を，要件管理システムに搭載しているほか，設計図書などの技術情報のデータベース化と管理システムの導入も検討している。

(2) 国内外の関係機関との協力体制の整備と技術移転

地層処分の実施には，多岐にわたる科学技術分野の知見が必要とされるため，NUMO がすべての知見を独自で保有するのではなく，国内の関係機関と協力して，適切な役割分担のもとに協力して事業を進めることとしている。具体的には，3.2,3,2 に述べたように，地層処分の技術開発では，NUMO が技術開発ニーズを提示し，国内の関係機関と連携して効率的に技術開発を進めている。また，技

術開発以外にも，処分事業全般に関する情報交換や共同研究を実施するために，JAEA および電中研とは個別に技術協力協定を締結している。このほか，多くの大学から技術指導支援を受けており，一部の大学とは協力協定を締結している。

これらの技術協力協定の枠組みの整備だけでなく，基盤的な技術開発が終了したものについては，基盤研究開発機関などから NUMO に速やかに技術移転をはかり，事業に反映する。例えば，技術情報については，技術報告書や学術論文などの文献，さまざまな材料特性データベース，解析コードなどの譲渡などが挙げられる。最近は，JAEA を始めとする基盤研究開発機関が協力して，これまでの基盤研究開発の成果やデータベースを統合化するためのプラットフォームとして，知識マネジメントシステムの開発が進められている（梅木，2006）。このような取り組みは，技術移転の円滑な促進に資するものと期待できる。

文書やデータベースなどの有形の技術情報に関しては，技術者の長年の経験などに裏付けられた技術ノウハウについては，完全な文書化は容易ではなく，このような無形の技術的ノウハウをいかに移転するかも課題とされている。その一部については，知識マネジメントシステムなどに採録されると期待されるが，同時に NUMO としては，技術は人を介して組織に蓄積されていくとの基本的考えに立ち，基盤研究開発機関において性能評価や地質環境調査評価技術などの開発や計画管理に携わってきた研究者や技術者などの NUMO への長期出向や転籍により人材確保に努めている。また，先述のように，NUMO の技術者を基盤研究機関などに派遣することで技術移転を促進することも計画している。

また，実務的な分野において多くの経験を有している民間企業の有する知見も有効に活用することを考えており，民間企業が地層処分の分野における固有のノウハウを蓄積・維持できるよう協力体制を構築していくことが重要である。そのためには，民間企業がそれぞれの得意分野での知見を維持し，長期にわたる事業期間中にわたって事業を支えていける環境を構築していくことも重要である。

例えば，スイスの実施主体 Nagra，スウェーデンの実施主体 SKB，フィンランドの実施主体 POSIVA などでは，事業に必要な知見を有する企業を地下研究施設における活動や，サイト調査などを通して戦略的に育成してきており，事業の実施主体の技術力を支える柱として機能している。NUMO においても，技術的なサポートを提供する民間企業が専門分野を強化していける環境を作り出すことが重要であり，委託の発注方法について，具体的な方策を国や電気事業者と調整しながら検討していく必要があると考える。

放射性廃棄物の処分は，国際的に連携して取り組むべき課題でもあることから，海外の実施主体との協力体制の構築も重要である。NUMOは，11 カ国・12 機関から構成されるEDRAM（International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials，放射性物質環境安全処分国際協会）に加盟し，処分事業に関する情報交換を行ってきているほか，これまで，各国の実施主体であるPOSIVA（フィンランド），Nagra（スイス），SKB（スウェーデン），U.S.DOE（アメリカ），ANDRA（フランス），NDA（イギリス）と，技術協力協定を締結している（図 3.2.3-7）。U.S.DOE，Nagra，SKB，POSIVAとは，すでに個別の地質調査や工学技術の分野で共同研究を実施しているが，今後，処分施設建設地選定段階に実証試験を実施することなどを見据えて，SKBのエスポ岩盤研究所を活用した国際共同研究プロジェクトにも参画する予定である。またNUMOの運営方針に則って，IAEAやOECD/NEAといった国際機関の活動にも積極的に参加してきている。

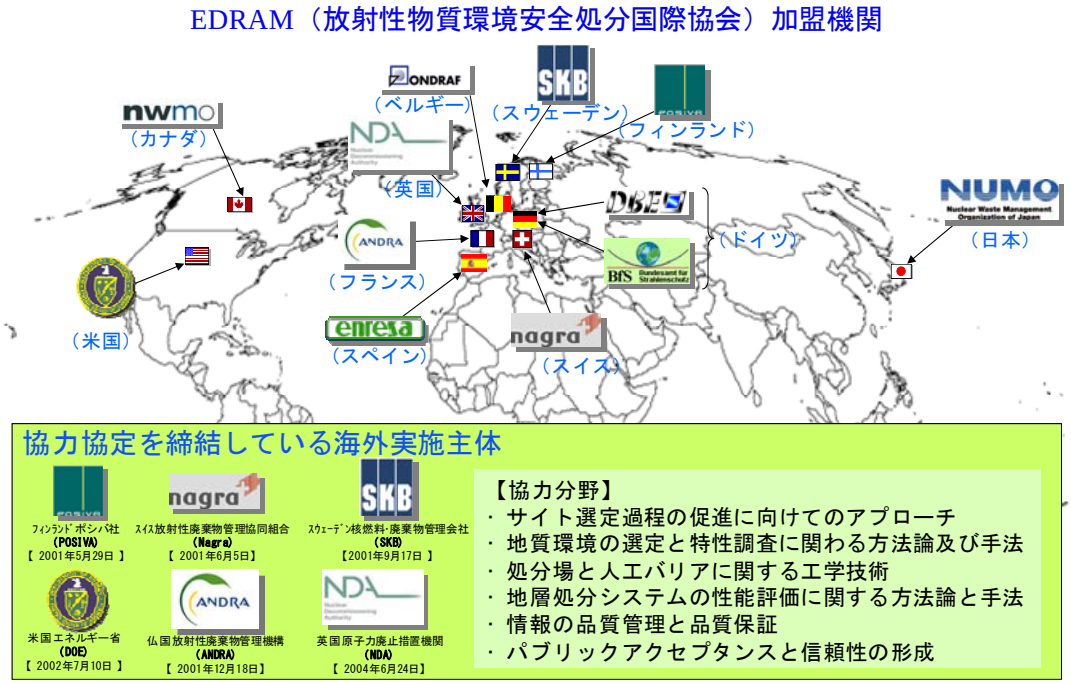


図 3.2.3-7 地層処分事業の国際的な協力

これらの共同研究を通じて，海外の地質調査や地下研究施設などで培われた技術などを修得するだけでなく，職員自身も海外の処分事業の進め方，事業を取り巻く環境の相違，処分施設建設地選定までの経緯などを海外の技術者などから直接学ぶことにより，国内業務では得られない経験と知識を得ることが期待できる。

また，原子力をすでに導入していたり，現在原子力の導入を検討・予定しているが，まだ十分に放射性廃棄物の処理・処分について検討を実施していない国々に対して技術支援を実施することも検討していく。このような活動により，海外でわが国の原子力関連技術の幅広さを認知してもらうとともに，このような海外での技術支援活動が，わが国の地層処分技術の信頼性を国内で向上させることにもつながると考える。

以上のように，国内外の機関との協力体制を最大限に生かして，事業の推進や技術移転，職員の育成に役立てると同時に，わが国で蓄積された技術を用いて後進各国の原子力事業にも貢献していくことを検討する。

3.2.4　方針３「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み」

3.2.4.1　方針３に関する基本的な考え方

地層処分事業は，安全上考慮すべき期間が極めて長期にわたることなどから，世代間倫理の問題なども絡んだ，社会的にこれまで経験したことのない事業である。このため，事業を実施するに当たっては，サイト選定から処分場閉鎖後の事業廃止に至るまでを段階に分け，それぞれの段階の節目ごとに国民や地域住民の理解を得ながら，一歩ずつ前に進めていくこととしている。このような活動を通した関係者の合意形成に基づく段階的意思決定を円滑に進めていくためには，それぞれの段階の意思決定に必要な情報を関係者に的確に提示し，その内容理解に向けて丁寧に説明していく必要がある。

各段階における円滑な意思決定の成否は，地層処分の安全性や事業の実現性に関し，関係者，特に関係する自治体や地域住民の信頼がどこまで得られるかにかかっている。事業者は地層処分の安全性をさまざまな方法で示す責務を負っているが，その妥当性は，安全審査の段階における厳格な審査を経て最終的に確認されるものである。一方，NUMO が各段階で提示する安全性に対する国による確認は，国民や地域住民にとっても安全性への信頼感を醸成する上で重要な要素となり得る。こうした観点から，サイト選定段階においても，事業者がそれぞれの段階での安全確保上重要な情報を国に提示し，一定の見解を得ることは，信頼感を醸成していく上で有効と考えられる。

地層処分の安全性や事業の実現性への信頼感醸成をはかるためには，各段階の節目における意思決定の機会だけでなく，日ごろから，事業が安全に進められている事に関する情報に加え，地層処分の技術的信頼性に関するわかりやすい情報を関係者に提供し，さまざまな対話の機会を設けて，不安や疑問には誠実に対応していく必要がある。また，技術情報の公開は，信頼感醸成をはかる上で継続的に取り組んでいくべき課題であり，実証試験やモニタリングデータの公開などについて積極的に進めていくことが重要である。

地層処分事業は，その事業期間中に技術の進展が期待できる一方，事業を取り巻く社会環境の変化が起こり得る。従って，例えば処分場閉鎖のあり方などを，現世代が今の時点で固定的に決めてしまうのではなく，将来世代がその時点における諸条件の中で意思決定するための選択肢を残しておく配慮も大切である。そのために，将来世代が適切な判断をするために必要とする情報や技術などの整備を事業期間中に計画的に進めておく必要がある。

以上述べたことを受け，以下の三つを方針３に関する実施方策とする。

1) 事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供

2) 安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動

3) 将来世代が適切な判断を行うための環境整備

以下に，それぞれの方策の背景や今後の取り組み方について述べる。

これら三つの方策について，概略的ではあるがロードマップを作成し第 4 章に示した。

地層処分の安全性や技術に対する信頼感醸成を行うためにはさまざまな活動を実施していく必要があるが，本報告書では技術的な視点から，どのような取り組みを行い，どのような情報を提示するかについて記述した。

3.2.4.2 方策１：事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供

地層処分事業においては，サイト選定段階から事業の廃止に至る間に，いくつもの重要な意思決定の機会がある。こうした意思決定を円滑に進めていくためには，それぞれの段階の意思決定に必要な情報を関係者に的確に提示し，理解を求めていく必要がある。

サイト選定段階においては，最終処分法で求められる「法定報告書」を縦覧し，説明会を開催する。報告書に対しての住民からなどの意見については，これを意見書として受け，関係都道府県知事や市町村長に対し，意見の概要およびその意見についての NUMO の見解を送付する。また，国は関係都道府県知事や市町村長の意見を聴取し，これを十分に尊重して地層処分事業を進めていくことになっており，その仕組みはすでに最終処分法上で制度化されている。

このように，サイト選定段階における意思決定に，関係する自治体や地域住民の意見が反映される仕組みになっているが，こうした意思決定を円滑に進めるためには，そのための判断材料となる

情報を的確に関係者に提供していく必要がある。NUMO は 2002 年の公募開始時と 2007 年の最終処分法改正後に，地層処分事業の概要紹介や文献調査への応募手続きなどを周知するための「公募関係資料」を全国の市町村および都道府県に送付した。文献調査に基づく概要調査地区選定のための基準としては，最終処分法で規定されている条件のほか，原子力安全委員会から「概要調査地区選定時に考慮すべき環境要件」がすでに示されている。NUMO は，これらに事業者としての視点を加えた自主基準として「概要調査地区選定上の考慮事項」を作成し「公募関係資料」の一部として公表しており，さらにその技術的根拠を取りまとめた技術報告書も公表している（NUMO，2004b）。このような事業者としての自主基準は，その後の段階の調査に関しても，調査開始に先立って順次公表していく。

サイト選定段階における意思決定においても，地層処分の技術的信頼性に関する情報は，大きな影響因子である。公募開始に当たって NUMO は，「処分場の概要」を「公募関係資料」の一部として提示し，その背景となる情報を詳述した技術報告書も公表した（NUMO，2004a）。NUNO は，上述した法定報告書の作成の際には，その段階で得られた情報に基づく処分場の設計や安全評価に関する情報をまとめ，それらを安全規制当局に提示し，一定の見解を得ていくとともに，関係する自治体や地域住民にもできるだけ分かりやすい形で提示し，理解を求めていく。

3.2.4.3　方策２：安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動

地層処分の安全性や技術の信頼性について関係者の理解を深めることは，3.2.4.2 で述べた意思決定を円滑に進める上で不可欠であり，そのためには特に関係する自治体や地域住民に対し，日ごろから，的確でわかりやすい情報の提供と対話活動を進めていく。そのためには，事業期間中に実施する技術的な必要性から実施する事項から得られる情報を日常的に提供し，対話活動などを通して，地層処分事業に対する理解を促進する必要がある。一方，地層処分の安全性への国民や地域住民の不安や疑問については，心配要因の調査・分析を行い，心配要因を反映した信頼感醸成活動を続けていくことが重要である。また，そのような活動を実施した結果は社会科学的な手法を活用して分析し，信頼感醸成活動にフィードバックしていく仕組み作りが必要である。

（1）　技術情報の提供

NUMO は地層処分の安全確保に向けてサイト調査，工学対策，安全評価などの安全確保策を段階的に実施していくが，その過程で得られる技術情報は国民や地元関係者にタイムリーに提供していく。例えば，概要調査地区選定段階（文献調査の段階）では文献リストや調査結果などを公表する。精密調査地区選定段階（概要調査の段階）では物理探査やボーリング調査などの実施状況を地元をはじめとする関係者に公開するとともに，現場で得られた情報をホームページや地元説明会などを通して適宜紹介していく。処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）の後半では，地下調査施設を建設し，処分対象の母岩の中で地質環境の調査や実証試験などを実施していくが，これらの実施状況や得られた成果を公開することで，地層処分事業に関する理解増進に役立てる。また，事業許可取得後，処分施設の建設段階や操業段階では，安全や工程管理上で問題にならない範囲で，現場を公開し，得られた情報は適宜ホームページなどを用いて公開していく。

これらの日常的な情報提供活動には NUMO の技術系職員が直接携わることも重要であり，そのために日ごろから技術的な内容を一般の方々に説明する訓練やコミュニケーション能力の向上に努める必要がある。また，一般の方々と直接対話を行うことは，技術者にとっても，一般の方々が地

層処分の何に対して心配しているのかを知るよい機会になる。

(2) 地層処分の安全性への理解醸成支援策

すでに述べたように一般市民にとって地層処分の安全性を理解することは容易でないという基本的な課題があり，そうした中で信頼感醸成活動を進めるためには，さまざまな工夫を必要とする。ここでは，信頼感醸成を助けるいくつかの方策の代表例を紹介する。

(i) 安全性に関する心配要因の分析

原子力の専門家が主張する「安全」と，一般市民が感じる「安心」には隔たりがあるといわれている。NUMOが一般市民を対象に実施したアンケート調査においても，安全に関する意識については，一般市民と専門家との間で表 3.2.4-1に示すような隔たりがあることが認められており，例えば，専門家は科学的データにもとづく確率によりリスクの大きさを判断するが，一般市民は自らの経験や被害の大きさによりリスクの大きさを判断する傾向があることなどが明らかになっている。

地層処分に関する一般市民の認識を分析するため，NUMOは，これまで説明会などの参加者から，高レベル放射性廃棄物に対して不安を感じる項目と，不安の程度についてアンケート調査を行ってきた。その結果を図 3.2.4-1に示すが，不安の程度が大きい項目として「誰が責任を持つのか」，「埋めた土地の管理」など，地層処分の管理面に関するものが挙がっている。このことは，単に技術的な安全性を訴えるだけでは不十分であり，管理体系や制度面で地域が安心できる要件がどこまで整っているかも丁寧に説明していく必要があることを示唆している。

NUMO は今後も，地層処分にかかわる一般市民の関心事項，不安・懸念事項，理解の進展度合いなどについて，社会技術的な手法も取り入れた調査・分析を適宜行い，学際的な知識や経験を活用して信頼感醸成に有効な技術的取り組みとしてどのようなことをなすべきかについて検討を進めていく予定である。

表 3.2.4-1 原子力の専門家が主張する「安全」や「問題意識」と一般の国民が意識する「安心感」や「問題意識」 との比較

原子力の専門家	項目	一般市民
多い	知識量，情報量	少ない
広い視野	問題を捉える視点	身近で，ローカルな視点
確率で考える	安全性	被害の大きさで考える
重要問題という認識	問題の認識	自己の問題だという意識が低い
理論的に考える	思考パターン	経験的に考える
科学的に判断する	判断パターン	イメージで判断する
専門用語を使用する	専門用語	専門用語はわかりにくい
問題の細部まで知っている	問題の認知	問題の表面しか知らない
ー	情報	メディアを通した情報が多い

延べ約 400 人の地層処分の受講者のアンケート調査より

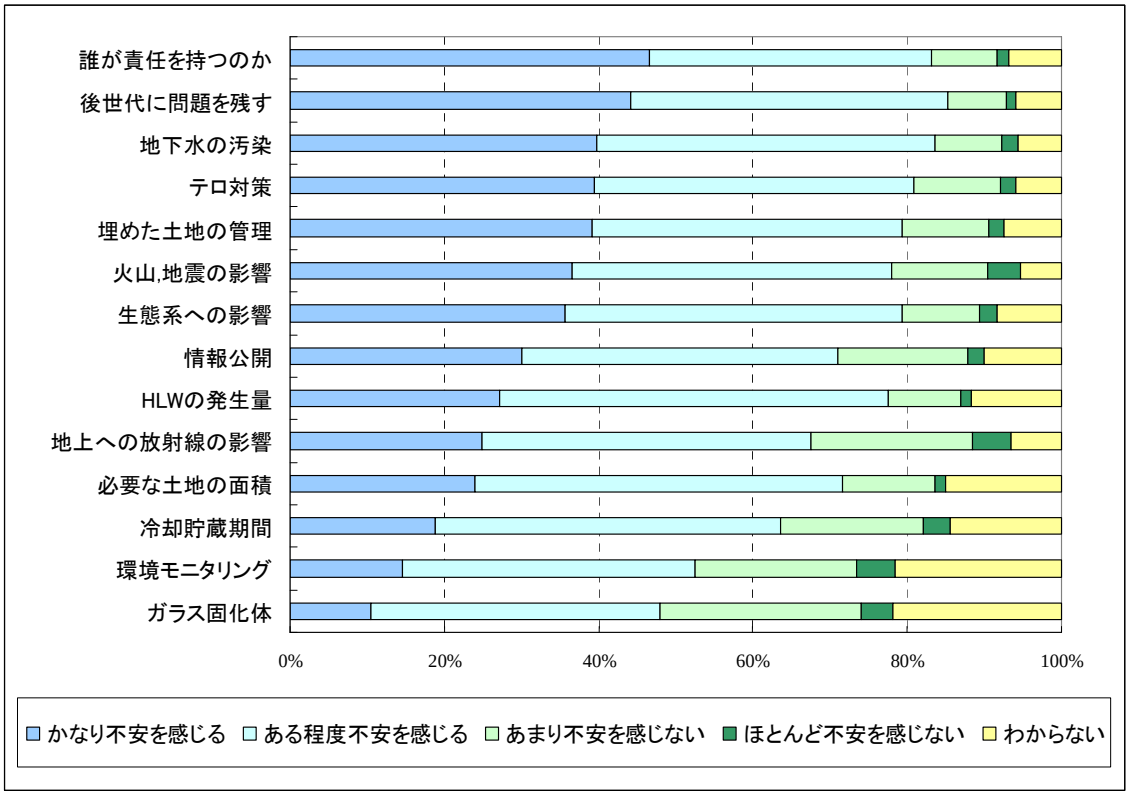


図 3.2.4-1 高レベル放射性廃棄物についての不安（一般の方，回答者数約 1,400 名）

（ii） ナチュラルアナログの活用

地層処分で想定される現象と類似した自然または考古学的な事象，すなわちナチュラルアナログの活用は，地層処分にかかわる種々の現象の理解を助ける手段として有効である。そもそも科学技術は，人類初の飛行が鳥の飛翔に学んで実現したように，自然から多くを学び，さまざまな自然現象のプロセス解明により技術的な問題に対する解決策を見出すことによって発展してきた。地層処分もまた，放射性廃棄物を長期的に閉じ込め隔離する方法として人類が自然から学んだ解決策の一つということができる。

地球上には，例えば，アフリカのガボン共和国オクロ鉱床やカナダのシガーレイクウラン鉱床など，地層が 10 数億年もの長い間，放射性元素を閉じ込めてきた例が存在する（Miller et al.，2000）。また日本にも，東濃鉱山ウラン鉱床（岐阜県土岐市）や，約 100 万年前に堆積した泥質岩層の中に埋まった火山噴出物に含まれた「火山ガラス」（PNC，1998）など，地層処分で想定する数十万年もの長期間大きな変化が生じなかった事例が存在する。これらの例に共通しているのは，母岩を中心とした地質や地質構造が長期的に安定で，地下深部の地下水の流れが遅く，還元的な環境が安定的に維持されてきた場所であるということである。こうした環境であれば，物質は極めて長期にわたり，安定的に保持されるという実例を自然界が示しているわけである。

地層処分では広大で不均質な地下空間を利用するので，地下環境条件のすべてを正確に把握することはできない。このような不確実性に由来する弱点を補い，信頼性を高めるため設置される人工バリアシステムも，1900 年以上前の古代ローマ時代の釘や，弥生時代に作られたと考えられる吉野ヶ里遺跡で発見されたガラスの管玉などがそのままの姿で出土したことを倣ったものである。

こうしたナチュラルアナログは，地層処分で期待する各バリアの安全機能の長期成立性を説明する強力な論拠として利用でき，NUMO でも，国民向けに刊行した冊子で，いくつかのナチュラルアナログの事例を紹介してきた。長期的に安定した地層を選び，天然に存在する安定した材料で工学的なバリアを構築する地層処分とは，端的にいえばナチュラルアナログと同じ状況を作ろうとするものであることということができる。

また，ナチュラルアナログの活用の仕方についても，それを単に漠然とした安全性の例証として利用するだけでなく，そこで観察される現象の条件や範囲を明確にした上で，安全機能に関連する現象と科学的に結びつけた説明を行っていくことが重要である。

いったんサイト調査への応募があった場合，調査対応となる地域の地質環境が処分施設建設地として適するのかどうかという点に関心の中心が移る。その地域の代表的な地形や地質，出土品などに関して観察される事象の中には，長期の地質安定性や物質保持能力の直観的な理解に役立つものがある可能性があるので，調査地区周辺を対象にしたナチュラルアナログや考古学的事例の収集，整理に取り組むことも大切である。

（iii） 実証試験など

処分技術を体感できるような実証試験や疑似体験設備の公開は，地層処分技術への信頼感醸成上，大変有益と考えられる。

こうした観点から，国や JAEA を中心に，「実規模設備」（経済産業省，2009a）や「バーチャル処分場」（経済産業省，2009a）など，国民が地層処分事業の概念や安全性を体感できるような設備や IT 技術を駆使したシステムの整備が進められている。NUMO は，国や JAEA などと協力し，こうした設備やシステムを利用した相互理解活動を推進していく。そのほかに，NUMO や基盤研究機関が地上施設で各種工学実証試験などを行う場合にも，それらを適宜公開し，信頼感醸成に役立てる。

地下研究施設やそこで行われる調査・研究の公開は，地層処分事業への体感的理解を深め，信頼感を醸成する上で極めて重要であり，先行する諸外国の実施主体からもその効果が大きいことが報告されている。わが国では JAEA が岐阜県の瑞浪と北海道の幌延で深地層の研究施設の建設を進めており，一般にも公開している。NUMO は JAEA と協力し，メディアや地層処分に関心を持つ NPO その他関係者を対象に，これら地下施設の見学会を催し，地層処分事業への理解拡大に努める。幌延の深地層の研究施設では，今後 JAEA との共同研究として工学技術の原位置試験などを行うことも検討中であり，それらが実現すれば，実施状況や成果を広く公開していく予定である。

精密調査段階ではNUMO自身が地下調査施設の建設を行うことになるが，その際には工事計画や安全管理上の問題がない範囲で地下施設やそこでの調査状況を公開する。また，地下調査施設完成後は，その一部を活用した模擬廃棄体を用いた搬送・定置などの実証試験が行われることになるが，それらの状況なども一般の見学者に公開し，多重バリアシステム等の理解促進に活用することを検討している。図 3.2.4-2にそのような活動のイメージ図を示す。

長期安全性の理解のための一方策として，地層処分のバリアシステムの各バリアに期待する安全機能が目で確認できるような実験や，人工バリアの変質や核種の移行の予測結果を示す動画の公開などを地上 PR 施設などにおいて行うことも検討していく。

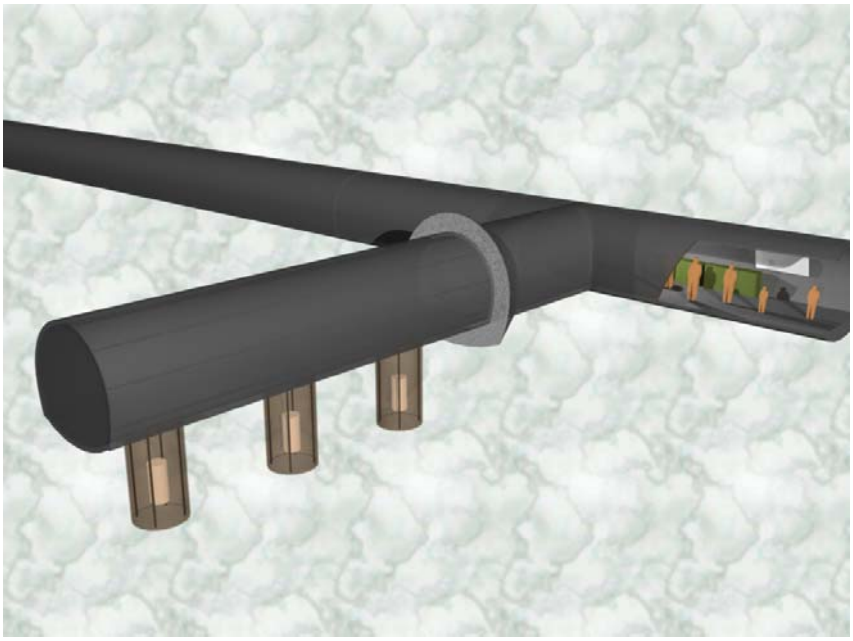


図 3.2.4-2 学習の場の設計と周辺技術整備

3.2.4.4　方策３：将来世代が適切な判断を行うための環境整備

地層処分事業においては，現世代が今の時点で，100 年近い将来の事業のあり方を固定的に決めてしまうのではなく，将来世代がその時点における諸条件の中で一定の決定をする余地を残しておくことも重要である。

将来世代が行うことになる最も重要な意思決定は，処分場の閉鎖に関する決定である。地層処分は，可能な限り受動的な手段により安全を確保することを目標としており，NUMO は，処分場閉鎖に至るまでの間に，基本的にはその後の人間の能動的管理の必要性をなくすことを目指して，安全確保上必要なすべての対策を講じていく。しかしながら，すべての廃棄物の埋設が終了した後，いつの時点でどのような条件が整えば処分場の閉鎖を認めるのか，閉鎖後に何らかの管理を残すのか否か，残すとすればどのような管理をいつまで残すのか，といったことは，NUMO や国のみならず，関係自治体や地域住民にとっても重要な事項である。

閉鎖の可否を判断する上で，操業前から閉鎖完了に至るまでの間の継続的なモニタリングデータの収集と公開は，多重バリアシステムが期待する機能を果たしていることへの信頼感を得る有力な手立てとなりうる。そうしたモニタリングを継続しつつ，NUMO は処分場閉鎖に至るまでの間，廃棄体の回収可能性を維持する。閉鎖が完了した時点で NUMO は，操業中に蓄積した記録や情報，閉鎖措置の具体条件などを取り込んだより包括的なセーフティケースを構築し，モニタリングなど能動的管理に頼ることなく閉鎖後の長期安全性が担保できることを示す。一方，これらと並行して，閉鎖後のモニタリングや回収可能性維持の要否についても，国際的な動向を含むさまざまな視点からの検討を続けることは，将来世代が適切な判断を行うための環境整備であり，今から戦略的に計画を立て，タイムリーに実施していくことが重要である。

処分場閉鎖に向けて将来世代が適切な意思決定が行えるためには，上述のような技術的な備えを着実に進めるとともに，NUMO 自身が関係自治体や地域住民との間で相互に強い信頼関係を築いていく必要があり，そのためにも 3.2.4.3 で述べた日常的な情報提供や対話活動は重要である。

3.3　地層処分事業に関わる個別課題に対するNUMOの考え方

地層処分は，天然の地層という不均質で大きな空間領域を利用し，事業が長期にわたるため，技術的社会的不確実性が大きく，事業を取り巻く環境が変化する可能性がある。これらに適切に対応していくためには，事業全体を俯瞰しつつ，状況に応じて柔軟に対応する必要があり，そうした対応方針を，安全確保に向けた三つの方針の中で述べてきたが，特にさまざまな不確実性への対応を着実に行うためには，リスクマネジメント的手法を取り込んだ事業運営が求められる。

また，地層処分の上述のような特徴から，特に社会との対応という観点で考慮すべきいくつかの重要な課題があり，これらの課題については，国際的な場においても熱心な検討が続けられている。本節では，こうした課題について，現時点における NUMO の考え方や取り組みを紹介する。ただし，これらはあくまでも現時点での考え方を示すものであり，今後の規制制度の進展や国際的な議論の動向を注視しながら対応をさらに具体化していく必要がある。

- 地層処分事業におけるリスクマネジメント
- モニタリング
- 可逆性と回収可能性
- 処分場の閉鎖

3.3.1　地層処分事業におけるリスクマネジメント

地層処分事業は 100 年程度の長期にわたる事業であり，事業期間中の技術面，制度面，社会面におけるさまざまな不確実性に適切に対応していくことが求められる。安全性を確保するという行為は，さまざまな不安全状態を想定し，そのような状態に陥ることを未然に防止し，万一そのような状態になった場合の影響を最小限に抑える手立てを講じておくことであり，リスクを特定，分析，評価して，対応策を策定するという一般的なリスク管理の一つの具体的な形態である。

一般的にリスクマネジメントは，①組織が置かれている外部状況および内部状況の確定，②リスクアセスメントとして，リスク特定，リスク分析，リスク評価の実施，③リスク対応の実施，④ステークホルダーとのコミュニケーション・協議の実施とモニタリング・レビューによる改善という手順で行われる。また，こうしたプロセスを効果的に運用するための組織の運用管理体系を設定することも必要であり，①リスクを運用管理するための枠組みの設計，②リスクマネジメントの実施，③枠組みのモニタリング・レビュー，④枠組みの継続的改善などの要素から構成される。リスクマネジメントの国際規格ISO31000（Risk management－Principles and guidelines）は 2009 年 11 月に発行された。ISO31000 ではリスクの定義を「目的に対する不確かさの影響」と定め，特定分野に特化することない，一般的な概念が示されている。ISO31000 の特徴は，リスクマネジメントのための汎用的なプロセスと，そのプロセスを効果的に運用するための枠組み，それらを継続的に改善していく体系が示されている（図 3.3.1-1）。

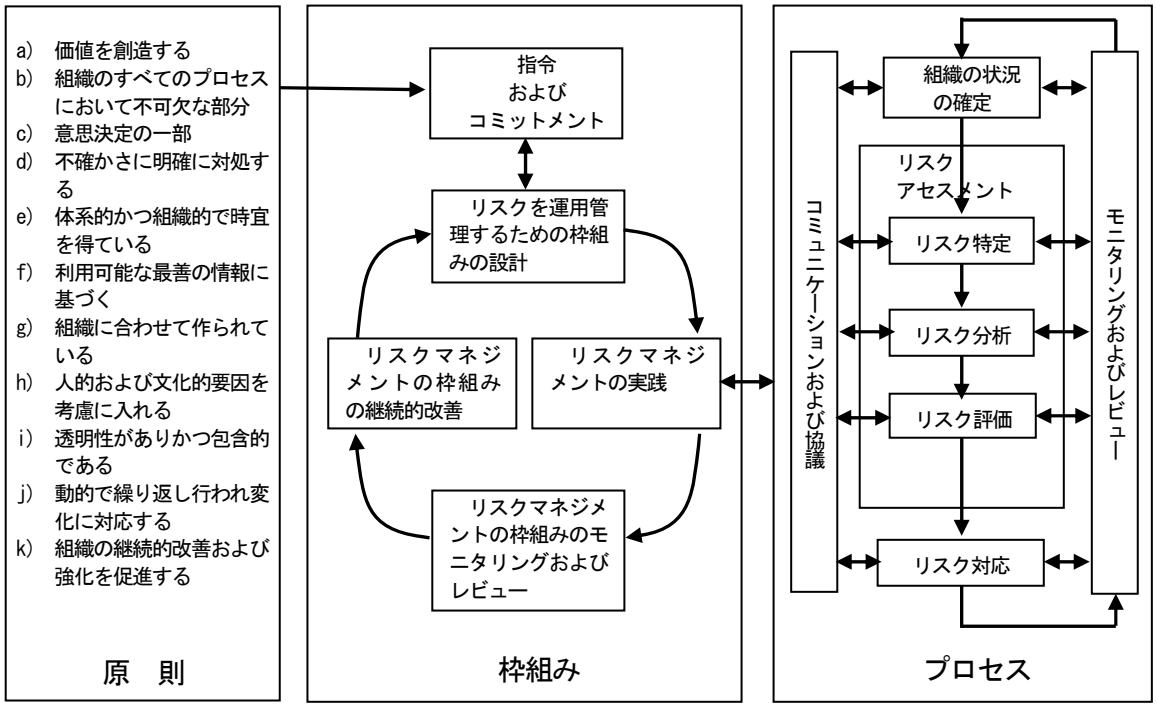


図 3.3.1-1 ISO31000 におけるリスクマネジメントの原則，枠組み，プロセスの関係（日本規格協会，2009 を一部修正）

閉鎖後長期の安全性の確保は，サイト調査や工学設計などにより状態を設定し（状況の確定），FEP（Feature Event Process）に基づいてシナリオの解析を行い（リスク特定），数学モデルやデータを用いた安全評価解析を実施し（リスク分析），安全基準と比較し（リスク評価），サイト調査を実施したり，工学的対策を再度検討する（リスク対応）というプロセスをレビューを含めて繰り返すことで達成され，こうした手法は ISO31000 のプロセスと完全に対応している。

事業期間中の安全性に関しても，調査や建設などに伴う労働災害や火災や，操業・閉鎖時の廃棄体の損傷による作業従事者の被ばく事故など，さまざまなリスクを洗い出し，それらの発生頻度や影響度の評価を踏まえ，設計の改良や保安管理体制の改善を進めることになるが，そうした活動のベースとして ISO31000 的リスク管理の考え方を適用していく。

地層処分事業は，社会的にも技術的にも多くの不確実性をはらんだ事業であり，事業全体の管理はリスク管理そのものといっても過言でない。現状でも NUMO の事業運営にはリスク管理的側面が織り込まれているが，それを今後どこまで ISO31000 的な管理体系として整備していくかについては今後組織として検討すべき重要課題である。

3.3.2　モニタリング

地層処分事業では，調査段階から閉鎖確認までの期間，安全確保や環境保全などの観点から，それぞれの段階においてさまざまな種類のモニタリングを実施する。モニタリングは，事業が正常に行われていることを確認する重要な手段であると同時に，その情報を国民や地域の住民に公開することは，事業に対する信頼性を高めていく上で不可欠の事項である。なお，処分場の閉鎖は，安全面からはモニタリングなどの能動的管理を必要としない，受動的に安全な状態を実現することが前提条件となるが，閉鎖確認から事業廃止までの期間については必要に応じてモニタリングを継続す

る。NUMO が行うモニタリングはその目的に基づき，以下の四つに分類される（操上ほか，2010）。

- 閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング
- 放射線安全の確保に関するモニタリング
- 一般労働安全の確保に関するモニタリング
- 周辺環境の保全に関するモニタリング

表 3.3.2-1に各モニタリングの概要を示す。

表 3.3.2-1 モニタリングの分類とその概要

目的※1		モニタリングの分類	概　要
閉鎖後長期の安全確保		長期後長期の安全確認に関するモニタリング	事業許可申請，事業許可以降の安全レビュー，閉鎖措置計画の申請，閉鎖措置の確認などにおいて，閉鎖後の長期的な安全性が担保できることを示すために実施するモニタリングである。閉鎖後長期の安全性を直接モニタリングにより示すことはできないため，安全評価で仮定された現象などが仮定とおり起こっていることを事業期間中のモニタリングにより確認することを基本とする。ベースライン状態を把握するためにサイト調査段階から行う必要がある。
事業期間中の安全確保	放射線安全の確保	放射線安全の確保に関するモニタリング	保安のための一環として放射線防護の確認のために行う放射線モニタリングであり，環境放射線モニタリング指針に基づいて実施する。また，管理区域におけるモニタリングは，現行の原子力施設周辺において実施されている放射線モニタリングを参考にして実施することができるが，地層処分事業では，管理区域が事業の進展とともに順次移動していくことを考慮して計画，実施する必要がある。
	一般労働安全の確保	一般労働安全の確保に関するモニタリング	坑道内の作業安全や良好な作業環境を確保するために，温度，湿度，酸素量，ガス，粉塵などを継続的に測定。土木，鉱山，原子力などの分野における現行の法規制あるいは基準類などに準拠して実施可能。
	周辺環境の保全	周辺環境の保全に関するモニタリング	周辺環境の保全の一環として行うモニタリング。事業の実施による周辺環境への影響を予測，評価するため，大気質（粉塵），気象，騒音・振動，河川・地下水の水圧・水質，動植物などの項目について継続的に測定。保全措置の効果を適宜評価し，必要があれば保全措置の改善もしくは追加措置の検討に資する。

このうち，地層処分事業固有のモニタリングは，閉鎖後長期の安全確認に関するモニタリングである。「高レベル放射性廃棄物等の地層処分にかかわる安全規制について（報告書）」（廃棄物安全小委員会，2008）では，事業許可以降 20 年を越えない期間ごとに行う定期的な評価（安全レビュー）において長期的な安全性が担保される見通しであることを確認するために，モニタリングに一定の役割を期待している。

しかし，事業許可申請時の安全評価で仮定されるシナリオ全体の確からしさをモニタリングによって直接的に確認することはできない。従って，モニタリングでは，安全評価で仮定された個別の現象のいくつか（例えば緩衝材の飽和現象）について，それが実際に起こっていることを確認したり，地質環境モデルに含まれる特定の事象（例えば地下水位の遷移状況）の予測の妥当性を確認することなどによって補完的に安全評価の妥当性を示すことが検討されている（操上ほか，2010）。

地下水シナリオ（JNC，1999）においては，地質環境（天然バリア）中の核種移行に関するパラメータとして，移行距離，亀裂の開口幅分布，亀裂密度（亀裂性媒体の場合），母岩の透水性，有効間隙率，動水勾配，実効拡散係数，分配係数などが挙げられている。これら多くは地下施設の掘削などの影響でほとんど影響を受けないと考えられ，調査段階における地質環境調査などで得られた

情報を地質環境モデルとして固定的に設定する。一方，動水勾配などの水理的条件は地下調査施設や地下施設などの建設により影響を受けるが，地下施設の閉鎖以降には掘削前の状態に徐々に近づくと考えられ，安全評価において仮定している将来的な水理的条件に近づくことをモニタリングによって確認することは，安全評価の妥当性を示す上で重要である。水質などの地化学的な条件についても，建設・操業時に外気が地下施設に持ち込まれることにより処分場近傍の母岩が酸化条件になることが予想されるが，地下施設閉鎖後に徐々に還元環境に戻ることが安全評価で仮定されている。このような観点から代表的な地下水水質についてもモニタリングによりその変遷を確認することが重要である。

地層処分事業で実施するモニタリング項目は，サイト条件が定まった段階でサイト固有の特性や安全評価からのニーズなどを考慮して決定する予定である。その際には，安全性に係る重要な現象やパラメータを抽出し，サイト調査で取得するか，あるいはモニタリングで状態の変遷を確認する必要があるかなどを整理して検討する必要がある。また，計測機器の耐久性や精度などに対する技術的実現性（既存技術および開発中であるが実用の見込みがある技術），ステークホルダーからの要望，モニタリングを実施することによる環境・バリア性能への影響，経済性などを考慮することが重要である。

モニタリングは地下環境などの時間的変遷に関する情報を取得する行為であり，変化を把握するためにはIAEA（2009a）が推奨するように，基準となる状態（ベースライン）を把握しておくことが重要である。そのため，地下調査施設の建設による擾乱を受ける前の地質環境，周辺環境，放射線の状態を「初期ベースライン」と定義し，初期ベースラインを把握するために，モニタリングを地下調査施設の建設前からモニタリングを開始することとする（操上ほか，2010）。なお，サイト調査段階においては，サイト調査とモニタリングは統合的に計画，実施，評価する必要がある。

モニタリングは，事業の開始から閉鎖措置の確認まで（必要性が認められれば事業廃止まで）の長期間にわたって実施されるものであるが，その間，モニタリングに対する要件の変化やモニタリング技術の進展が考えられる。従ってIAEA（2009a）が推奨しているように，モニタリングプログラムは将来の要件の変化や技術の進展に対応できるよう，定期的あるいは適切な時期に見直されることが柔軟な事業の進展において重要である。また，適切なメンテナンス，情報・品質管理，異常が検出された場合の適切な対応，情報公開を行うことが重要である。

閉鎖後の安全性はモニタリングを含む閉鎖後の能動的な制度的管理に依存してはならないということが地層処分の基本原則の一つであるが，一方で社会的要請などによりそのような制度的管理がある一定期間適用される可能性もある（WS-R-4 など）。NUMO としては，処分施設の安全性が十分に示され，人間が関与した安全確保から受動的安全性に移行してよいという判断がなされた段階で閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングは技術的役割を終えると考えており，閉鎖措置実施中は閉鎖に係るモニタリングを実施することを考えている。ただし，閉鎖後のモニタリングの在り方については，将来閉鎖の時点で，社会的要請などを考慮して，将来世代が判断するべき課題と考えており，NUMO としては将来世代が検討・判断するために必要な記録を残していく予定である。

3.3.3　可逆性と回収可能性

処分とは，元来「回収を意図しない隔離」を目指すものであるが，地層処分においては，安全性の担保と世代間にまたがる倫理問題などの関係で，可逆性と廃棄体の回収可能性をどこまで担保すべきかということが一つの重要な論点となっている。こうした議論は，深地層に放射性廃棄物を処

分する方策が選ばれた 1970 年代にすでに行われており（Polvani Report，1978），地中に埋設した廃棄物は技術的には回収することは可能であるとの基本的な認識が共有されている。なお，制度的には廃棄体の回収可能性については，米国の規制主体である NRC は，ユッカ・マウンティン事業での処分への規制の中で，廃棄物定置後の性能確認とその結果の NRC による評価が完了するまでの間の回収可能性の維持を義務付け，その期間は別途 NRC が指定しない限り廃棄物定置開始から 50 年と定めた（10CFR Part63）のが最初である。

事業の可逆性に関する議論は，IAEA において倫理的な課題として行われた（1995）。そこでの議論では，「放射性廃棄物の処分については，われわれの世代の責任としてその解決方策を示さねばならないが，処分事業を段階的に進めるための意思決定では，将来世代の意思が反映できるように準備しておくことが重要である」とされた。この議論を受け，1999 年に米国で開催された可逆性を含めた処分事業の進め方の議論では，「Adaptive Staging Approach : 処分を取り巻く環境の変化に適用できる段階的な進め方」が推奨された。この考え方では，将来の社会構造や住民意識および技術革新を含めた環境の変化に柔軟に対応できる事業の進め方からさらに一歩進めて，さまざまな選択肢を準備することで変化に対応するための方策を求めている。その中で廃棄物の回収可能性も可逆性を具体化する一つの技術的な対応策として位置付けられている。地層処分の可逆性，回収可能性にかかわる最新の動きとしては，OECD/NEA 主催の国際共同研究である R&R プロジェクトが進行中であり，諸外国の実施主体，規制主体，学識経験者といった幅広いメンバーで幅広い議論が行われている。

可逆性は事業の段階を戻すという一般的な意味であり，回収可能性は廃棄物の回収という可逆性を具体化する方策の一つと位置付けられる。一方，わが国では回収可能性に関して，国の報告書に下記の記述があり，NUMO が回収可能性に関する基本的考え方を検討する際の基礎となっている。

- 「処分場の閉鎖に際しては，建設段階及び操業段階に得られたデータを追加し，安全評価の結果が妥当であることの確認を行う。また，その妥当性を確認するまでの期間は，高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持することが重要である。」高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）（原子力安全委員会，2000 年（平成 12 年）11 月 6 日）
- 「処分場閉鎖までの間は，不測の事態への適切な対応等のために，廃棄体の回収可能性を維持することが必要と考えられ，事業実施主体の計画においてもこの点を考慮する必要がある。」放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度の在り方について（廃棄物安全小委員会，2006 年（平成 18 年）9 月 11 日）
- 「国は，事業許可申請に対する安全審査を行い，許可後は基本設計ないし基本的設計方針が適切に反映され維持されていることを確認することから，基本的廃棄体を回収するような事態が生ずることはないと考えられる。<中略＞埋設事業において，閉鎖までの間は，基本的に廃棄体を回収することは可能と考えられるが，これを安全かつ効率的に実施するために，回収可能性に配慮した設計の採用や具体的な回収手段を検討しておくことが重要と考えられる。」高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について（廃棄物安全小委員会，2008 年（平成 20 年）1 月 18 日）

NUMO は受動的安全性の確保された地層処分を実現するために，サイト調査段階で得られたすべての情報を統合し，安全性が担保できるという確信を持って事業許可の申請を行う。国による事業許可が得られたら，処分場の建設，操業を行い，地層処分システムを構築する。処分場の閉鎖に際

しては，建設段階および操業段階に得られたデータを追加し，安全評価の結果が妥当であることの確認を行い，閉鎖の判断を行う。閉鎖の判断は，人間が関与した処分場の管理から受動的な安全性の担保に移行しても良いという重大な判断であり，閉鎖の判断は地層処分システムが十分な信頼性を持って構築されたということが確認されたということである。閉鎖の判断は国によって閉鎖措置計画が認可されるという行為で行われるが，その際には地域住民を含む幅広いステークホルダーの合意を得ることも重要であると認識している。

NUMOは，閉鎖措置計画が認可されるまでの間は，上述の報告書の趣旨に従い廃棄体の回収可能性を維持し，閉鎖措置計画が認可されたのち，計画に基づいて閉鎖措置を行う。この段階では，図3.3.3-1に示すように廃棄体を定置した処分坑道はすでに埋め戻されており，処分坑道の端部には処分坑道内に定置したバリア材を保持する目的で力学プラグが設置された状態である。従って，閉鎖措置とは地下のアクセス坑道や立坑，斜坑など地下空洞をすべて埋め戻し，必要に応じてプラグを設置する作業を意味する。

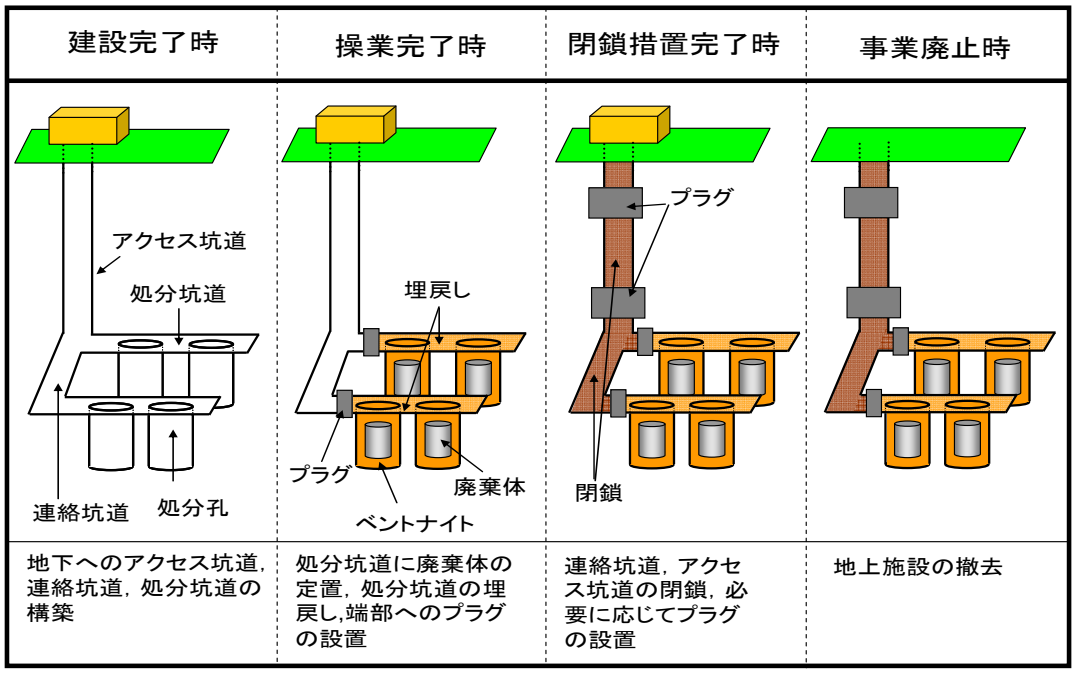


図 3.3.3-1 処分場の建設，操業，閉鎖措置の区分概念図

図 3.3.3-2に回収可能性とモニタリングに関するNUMOの基本的考え方を整理した図を示す。操業作業中までの期間は，閉鎖の判断を行うために必要なモニタリングを継続し，得られた結果は閉鎖の判断，つまり閉鎖措置計画の認可に適用する。閉鎖の判断がなされた段階で，処分場の受動的安全性が担保できるという判断がなされていることになり，閉鎖措置計画の認可以降は閉鎖後長期の安全性確保という観点では，モニタリングや回収可能性を維持する必要性は無くなると考えている。ただし，その時点では処分場の閉鎖措置がまだ実施されておらず，受動的安全性を担保するために確実に閉鎖措置を行う必要があり，そのために必要なモニタリングは実施する。いったん閉鎖措置が完了し，閉鎖確認が行われたら，安全性という観点からはモニタリングを継続する必要は無くなると考えるが，関係者からの要望などがあれば必要に応じてモニタリングを実施する可能性はある。

つまり，NUMO としては，閉鎖措置計画が認可された段階で回収可能性を維持する必要は無くな

ると考えている。ただし，処分場の安全性以外の何らかの理由により回収の議論がなされた場合には，その時点で適切に判断し，意思決定が行われるべきである。その場合の廃棄物の回収は，従来から指摘されているように（第２次取りまとめや NAGRA の報告書など），鉱山技術などを応用することにより技術的には不可能ではない。NUMO は，そうした場合にも備え，事業期間中に蓄積した記録や情報などを保存し，将来世代が適切な判断を行うための環境整備に努める。なお，閉鎖措置は十分な品質管理計画に基づいて実施するが，万一何らかの不具合などが生じた場合には，作業のやり直しを行う場合もあり得る。

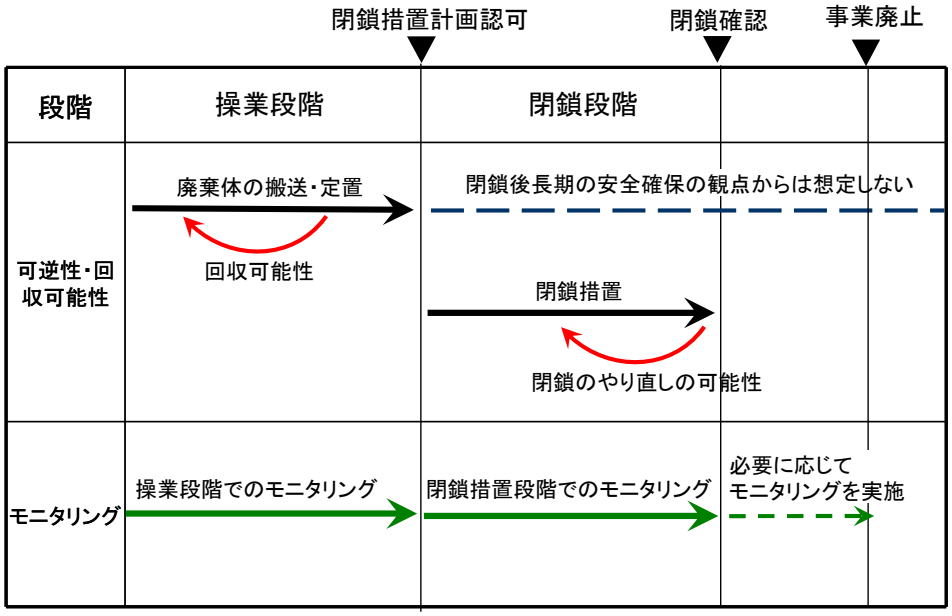


図 3.3.3-2 回収可能性に関する NUMO の基本的考え方

3.3.4　処分場の閉鎖

「処分場の閉鎖」とは，事業期間中の人的な管理に依存した安全性確保から，管理に依存しない受動的な安全確保（パッシブ・セーフティと呼ばれている：IAEA，2006）に移行する行為であり，長期の安全確保を保証する地層処分システムの完成を意味する。

平成 19 年に改正された炉規法では，第一種放射性廃棄物埋設事業に関する一連の許認可と検査などの手続きにおいて，実施主体は「閉鎖措置計画」を申請し，認可を受けるとともに閉鎖措置終了後は国の確認が必要であると規定されている。処分場の閉鎖とは，認可された基本設計どおりの廃棄物埋設施設の完成，埋設事業の実質的な終了という重要な側面を有し，またいったん処分場を閉鎖すると廃棄物の回収には多くの労力や時間が必要となる。このため，閉鎖措置計画を申請するに当たって，実施主体は，閉鎖後における廃棄物埋設施設の安全性の見通しについて，操業中に実施する安全確認のレビュー結果とともに国内外の最新の知見を集約して安全レビューを行うことが必要である。（廃棄物安全小委員会，2008）

また，国は NUMO が実施したレビュー結果をもとに，閉鎖後の長期の安全が確保されていることを国が改めて確認することとなっている（閉鎖措置計画の認可）。NUMO は，このような地層処分の安全確保の特徴を踏まえ，処分場を閉鎖を行うべきかについて，閉鎖措置を段階的な事業の進め方の重要な目標として検討し，必要な事項は現段階から準備するという姿勢で取り組んでいくこ

ととする。

処分場の閉鎖措置の具体的な作業は，連絡坑道，アクセス坑道を埋め戻し，必要に応じて坑道が地下水流の短絡流路となることを防止するためのプラグを施工し，関連する諸設備を解体・撤去することをいう。処分場の建設段階，操業段階，閉鎖段階の区分は図 3.3.4-1に示したとおりである。建設段階では，地下へのアクセス坑道，連絡坑道，処分坑道の構築を行う。操業段階では処分坑道に廃棄体を定置し，処分坑道の端部にプラグを設置する。実際の処分場の操業時には，パネルごとに建設と操業が並行して実施されることもあり得る（図 3.3.4-1）。すべての廃棄体が処分坑道内に定置され，閉鎖措置計画の許可が得られたら，前述の閉鎖措置を開始する。

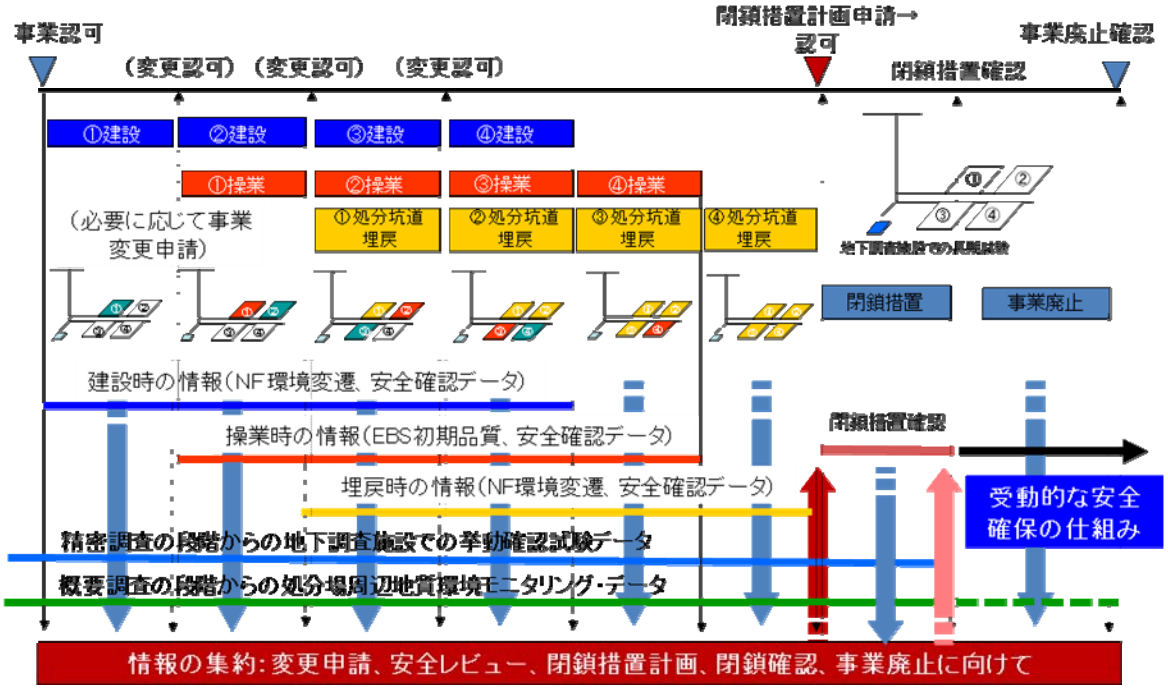


図 3.3.4-1 処分場の閉鎖に向けた技術的な情報の集約

前述のように，地層処分における閉鎖は人間が管理する状態から，受動的安全性へ移行する段階であるため，閉鎖の判断は地層処分事業にとって極めて重要なステップである。処分施設は，建設・操業中に実施する定期的な評価によって，閉鎖後に重要であると示す安全機能を発揮する方法で閉鎖をする。また，閉鎖措置は，適切な時期に安全に実施できる計画であることを確認された後でなければ実施しない。閉鎖措置に向けての取り組みとして，NUMO は以下のことを行う。

① 閉鎖後長期の安全性確保について，閉鎖の段階でも三つの安全確保の原則である，適切な地質環境，適切な人工バリアや処分施設の施工，そして長期安全性の評価により，妥当性の確認を行う。

② 廃棄物埋設施設を完成させるために必要な閉鎖のための埋め戻し方法や必要な技術を示す。

なお，処分場の閉鎖に当たっては，地域の方々の意思が尊重されることから，①，②の説明責任と将来世代の意思決定への選択肢が準備されていることを示すことが重要である。

① についての対応では，

a. 地質環境の変遷状況が把握できていること。閉鎖措置計画の認可において，事業許可申請時に提示した地質環境をそれ以降に蓄積される情報，データによって確認する，あるいは必要に応じて更新する。モニタリングは，信頼性を向上するためのデータを提供する重要な手法の一つであり，適切な運用，情報・品質管理と情報公開を行いながら実施する。また，建設・操業を通じて変動した処分場周辺の地質環境が，閉鎖に伴い安全設計で設定した状態に移行しつつあることを把握すること。そのためには，把握できる技術と方策が準備され，その信頼性が実証されていることが求められる。
b. 建設・操業における工学的対策が技術基準に適合していることを確認すること。許認可取得段階で設定した工学的対策による所定の品質（ここでは，人工バリアの定置品質とその周辺環境の把握）が，操業中の保安検査，施設確認を通じて保証されていることを示す。
c. 最新の知見に基づく安全評価の結果が，放射線防護上の基準値と比較して，問題となる値でないこと。また，安全評価結果の確からしさは，段階的に取得される情報に基づき準備していくセーフティケースに多面的なエビデンスと安全論拠を集約して説明していく。

②についての対応としては，事業許可申請書に記述された閉鎖措置方法について，閉鎖を申請する段階で十分に信頼性のある技術および計画が準備できていることが求められる。そのためには，閉鎖にかかわる技術が，あらかじめ実証などにより実現性が確認されている必要がある。また，閉鎖措置にかかわる品質保証活動や，閉鎖措置が十分な信頼度を持って実施されたことを確認する計画を準備していく。

第３章　参考文献

馬場健司，田頭直人（2009）：再生エネルギー技術の導入に係る社会的意思決定プロセスのデザイン－風力発電立地のケースー，社会技術研究論文集，vol.6.

BFE（2008）: Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil (Sectoral Plan for deep geological storage. Concept Part). Bern.

Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Ellis, S., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mhony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K.（2009）: Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan, -Summary Report-, NUMO-TR-09-03, 59p.

Defra, BERR, Welsh Assembly Government, Department of the Environment Northern Ireland（2008）: Managing Radioactive Waste Safely: A Framework for Implementing Geological Disposal, Cm 7386. ISBN 0101738625.

電中研（電力中央研究所）・電事連（電気事業連合会）（1999）: 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術.

独立行政法人原子力安全基盤機構（2008）: 日本語翻訳版 IAEA 安全基準　施設と活動のためのマネジメントシステム，安全要件 No.GS-R-3，2008 年 12 月.

独立行政法人原子力安全基盤機構（2009）: 平成 20 年度放射性廃棄物処分に関する調査（地層処分に関する調査）報告書，平成 21 年 12 月.

土木学会原子力土木委員会地下環境部会（2006）: 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方，2006 年 1 月.

ENRESA（2006）: FEBEX Full-scale Engineered Barriers Experiment Updated Final Report 1994-2004, Publ. Tec. 05-0/2006, 2006.

原子力委員会（2000）: 原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画（平成 12 年）.

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会（2000）: 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価.

原子力安全委員会（2000）: 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）.

廃棄物安全小委員会（2008）: 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について（報告書），平成 20 年 1 月.

放射線審議会基本部会（2010）: 放射性固体廃棄物埋設処分及びクリアランスに係る放射線防護に関する基本的考え方について，2010 年 1 月.

IAEA（1994）: Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories, IAEA-TECDOC-767.

IAEA（2003）: Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal, IAEA-TECDOC-1372.

IAEA（2006）: Geological disposal of radioactive waste, Safety Standards Series No. WS-R-4.

IAEA（2006）: Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

IAEA（2006）: The Management System for Facilities and Activities, Safety Standards Series No. GS-R-3.

IAEA（2008）: The Management System for the Disposal of Radioactive Waste Safety Guide, Safety Standards Series No. GS-G-3.4.

IAEA（2009a）: Geological disposal of radioactive waste, draft safety guide DS334, 2009-09-18.

IAEA（2009b）: Disposal of Radioactive Waste, SSR-5.

ICRP（1999）: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publ.81.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2008）: 信頼性のレベルを提示可能な体系的な検討結果のとりまとめ方法の整備，2008 年 1 月.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2010）: 平成 21 年度研究開発・評価報告書評価課題「地層処分技術に関する研究開発」（中間評価），JAEA Evaluation 2010-001，2010 年 8 月.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999）: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性. -地層処分研究開発第２次取りまとめ-分冊１ 総論レポート，JNC TN1400 99-020.

KASAM（2007）: Time for final disposal of nuclear waste – society, technology and nature.

経済産業省（2009a）: 平成 20 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費（地層処分実規模設備整備事業）報告書，平成 21 年 3 月.

経済産業省（2009b）: 平成 20 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費（地層処分概念理解促進事業）成果報告書，平成 21 年 3 月.

国土交通省（2008）: 公共事業の構想段階における計画策定プロセスガイドライン，15pp，2008 年 4 月.

操上広志，高橋美昭，吉澤勇二，三和公，赤村重紀，河野一輝（2010）: 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討，NUMO-TR-10-01，2010.

Miller W. M., Alexander W. R., Chapman N. A., McKinley I. G., and Smellie J. A. T.（2000）: Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. Waste management series, vol. 2, Pergamon, Amsterdam, The Netherlands.

三和公，土宏之，村元茂則，河野一輝，近藤浩文，伊藤久敏（2009）: 概要調査技術に係る実証研究（その 1），日本応用地質学会 平成 21 年度研究発表会 講演論文集.

NAGRA（2002）:「処分の実現可能性実証プロジェクト」報告書.

NAGRA（2007）: Zeitreise - Im Zeitraffer durch 300 Millionen Jahre Erdgeschichte.

NDA（2009）: Geological Disposal－ A Public and Stakeholder Engagement and Communications Strategy.

NDA （2009）: Geological Disposal: A Strategy for Sustainability Appraisal and Environmental Assessment,NDA/RWMD/014, July 2009.

NEA（2002）: Establishing and Communicating Confidence in Safety Case of Deep Geologic Disposal: Approaches and Arguments, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

NEA（2004）: Post-closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose - , OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

日本規格協会（2006）: JIS Q 9000:2006　品質マネジメントシステム―基本及び用語.

日本規格協会（2008）: JIS Q 9001:2008　品質マネジメントシステム―要求事項.

日本規格協会（2009）：リスクマネジメント - 原則及び指針.

日本工業標準調査会（2008）：JIS　品質マネジメントシステム―要求事項　JIS Q 9001:2008(ISO 9001:2008)，平成 20 年 12 月 20 日改正.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004a）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，「処分場の概要」の説明資料，NUMO-TR-04-01，2004 年 5 月.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004b）：概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠，「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料，NUMO-TR-04-02，2004 年 6 月.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004c）：Proceedings of the International Workshop on Bentonite Cement Interaction in Repository Environments，　NUMO-TR-04-05，2004 年 8 月.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2009）：放射性廃棄物の地層処分事業について～公募のご案内～，2009 年.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2009）：概要調査地区選定上の考慮事項，放射性廃棄物の地層処分事業について　分冊-2，2009 年.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2009d）：Study on strategy and methodology for repository concept development for the Japanese geological disposal project, NUMO -TR-09-04.

NUMO（原子力発電環境整備機構），（2010）：安全確保構想 2009 ～安全な地層処分の実現のために～，原子力発電環境整備機構　NUMO-TR-09-05.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2010）：地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～，NUMO-TR-10-02，2010 年 6 月.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2011)：地層処分における社会受容性向上に関する検討.

OECD/NEA（1977）：Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes, OECD/NEA Polvani Report.

OECD/NEA（2004）：Learning and Adapting to Societal Requirements for Radioactive Waste Management.

PNC（動力炉・核燃料開発事業団）（1998）：Fact4，地層処分研究開発 4.

梅木博之，大澤英昭，内藤守正，中野勝志，牧野仁史（2006）：地層処分技術に関する知識管理システムの基本的概念，JAEA-Research 2006-078，2006 年 12 月.

資源エネルギー庁・JAEA（日本原子力研究開発機構）（2009a）：高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画，2009 年 7 月.

資源エネルギー庁・JAEA（日本原子力研究開発機構）（2009b）：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画，2009 年 7 月.

社団法人日本電気協会原子力規格委員会（2009）：原子力発電所における安全のための品質保証規定 JEAC4111-2009，平成 21 年 3 月改定.

戦略的環境アセスメント総合研究会（2007）：戦略的環境アセスメント総合研究会報告書，19＋61＋3pp，2007 年 3 月.

総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会（2007）：放射性廃棄物小委員会報告書中間とりまとめ～最終処分事業を推進するための取組の強化策について～.

高橋美昭，北山一美，竹内光男，稲継成文，嘉代東一，石橋陽一郎，石黒純一（2006）：高レベル放射性廃棄物地層処分事業の概要調査地区選定段階における環境配慮の一考察，環境アセスメント学会 2006 年度研究発表会要旨集，pp.187-192.

第４章

地層処分事業の段階的な推進

第４章　目次

第 4 章 地層処分事業の段階的な推進 4-1
4.1 方針の具体的展開（ロードマップ） 4-1
4.1.1 基本的考え方 4-1
4.1.2 方針１の具体的展開（安全確保ロードマップ） 4-7
4.1.3 方針２の具体的展開（技術開発ロードマップ） 4-17
4.1.4 方針３の具体的展開 4-26
4.2 事業中の各段階における実施事項 4-28
4.2.1 サイト選定および安全審査の段階 4-28
4.2.2 建設～事業廃止までの段階 4-40

第4章　地層処分事業の段階的な推進

本章では第３章で提示した方針を事業の中でどのように展開するかについてロードマップとして提示する。4.1 では，方針１「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」に対して安全確保ロードマップ，方針２「信頼性の高い技術を用いた事業推進」に対して技術開発ロードマップ，方針３「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み」に対して信頼感醸成ロードマップを構築・提示した。また，4.2 では NUMO が各段階で実施する主要な技術的実施事項を整理した。サイト調査段階に関しては，調査地区選定上の考慮事項についても記述した。

4.1　方針の具体的展開（ロードマップ）

4.1.1　基本的考え方

4.1.1.1　処分事業の段階的な展開と主要なマイルストーン

NUMOでは，図 4.1.1-1に示すように，文献調査から事業の廃止まで段階的に事業を推進する計画を明示している（公募関係資料：NUMO，2009）。地層処分による安全確保の最終目標が，制度的な管理に依存しない地層処分システムへの移行であることから，サイト選定段階から閉鎖後の制度的管理までの段階的に安全確認を繰り返しながら，事業期間中に必要な措置を取ることにより安全な地層処分を実現していく。

事業の中で初期段階における重要なマイルストーンは，図 4.1.1-1中の上段に位置する処分施設建設地選定を行い，安全審査を申請するまでの四つである。特に，概要調査結果に基づいた「精密調査地区の選定」は，その時点で得られている候補サイトの中から地下調査施設を建設するに値するサイトを選定するという重要な意思決定となることから，NUMOが事業の初期段階において直面する最も重要なターゲットと位置付けている。

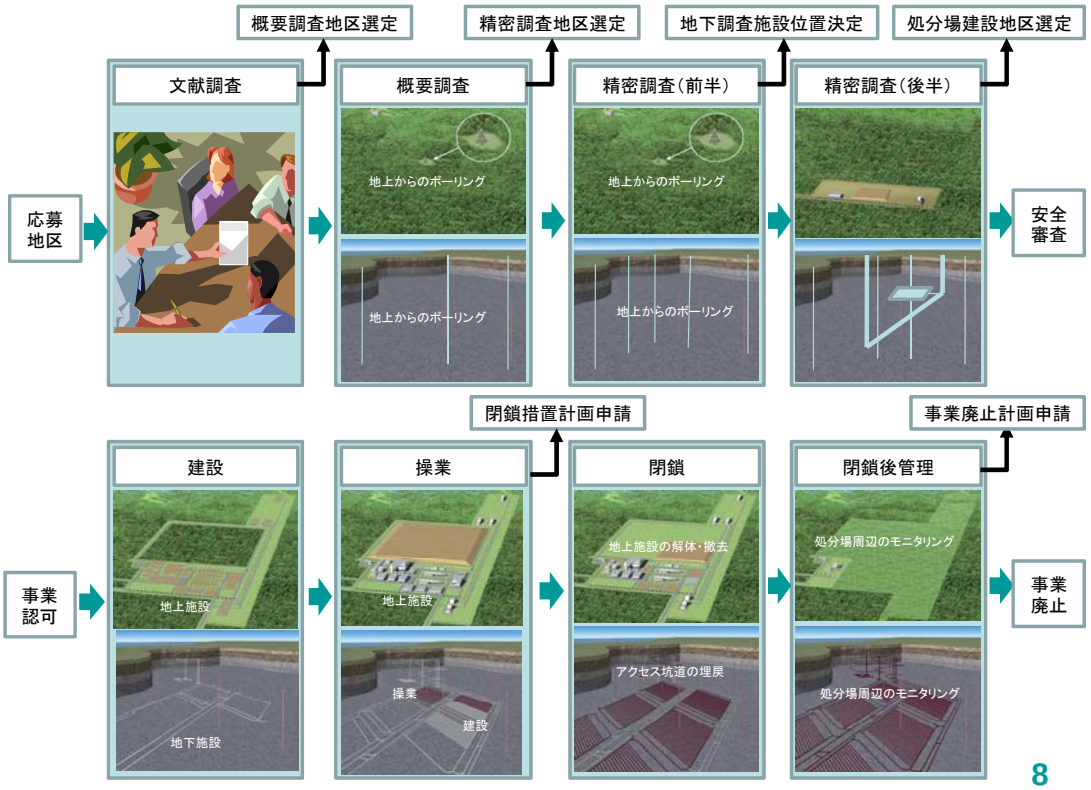


図 4.1.1-1 地層処分事業の段階的な展開（NUMO「公募関係資料」2009 を一部修正）

下段の事業展開では，事業認可を取得し，処分場の建設・操業を経て閉鎖，閉鎖後管理そして事業廃止までの流れを示している。これらの展開の中で，サイト調査段階で得られた情報をすべて統合して安全審査を受けるというステップと，操業終了後の閉鎖措置計画の認可を得るというステップは，重要なマイルストーンとなる。特に，処分場の閉鎖の判断を行うという行為は，長期の安全確保を制度的管理に依存しない受動的な安全システムに移行するという重要な意思決定であり，地層処分システムにより閉鎖後長期安全性が担保できるという合意を得るという意味で極めて重要なステップである。NUMO は，これらの重要なマイルストーンに向けて，安全性を繰り返し確認しながら，国や地元関係者とも十分に協議した上で地層処分事業を推進していく。

4.1.1.2　地層処分事業の展開と各分野間の連携

地層処分事業では，「適切なサイト選定と確認」，「適切な工学的対策」，「地層処分システムの長期安全性の評価」という三つの安全確保策を事業期間の中で段階的に展開することにより，安全性を確保する。その際には，これら三つの対策を行う「サイト調査・評価」，「工学的対策」，「安全評価」という三つの専門分野を連携させ，情報を統合化することによって，各段階における意思決定につなげていくことが重要である（図 4.1.1-2）。また，閉鎖後長期の安全性を確保するための取り組みは，事業期間中の安全性を確保した上で実施する必要がある。

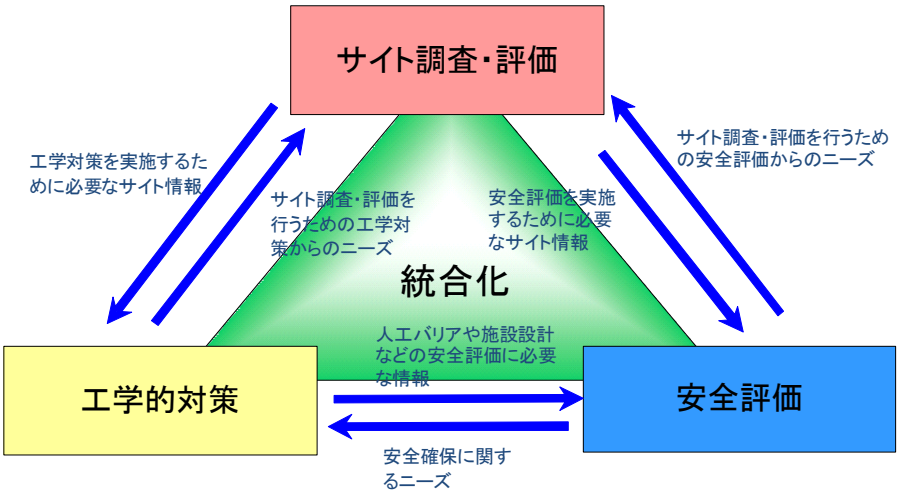


図 4.1.1-2 三つの専門分野間の連携・統合

4.1.1.3　三つの方針とロードマップの関係

NUMOは，安全な地層処分を実現することを目的として，100 年にわたる長期の事業期間の中で事業を段階的に着実に進めていくために三つの方針を策定した。この三つの方針を具体的に事業の中で展開していく方法として三つの方針それぞれに対してロードマップを作成し，これに基づいて事業を推進していく。図 4.1.1-3には三つの方針の関係を表した図を示す。中心となるのは方針１を具体的に展開する安全確保ロードマップであり，それを支えるものとして，方針２に対応した技術開発ロードマップと，方針３に対応した信頼感醸成ロードマップを位置付ける。

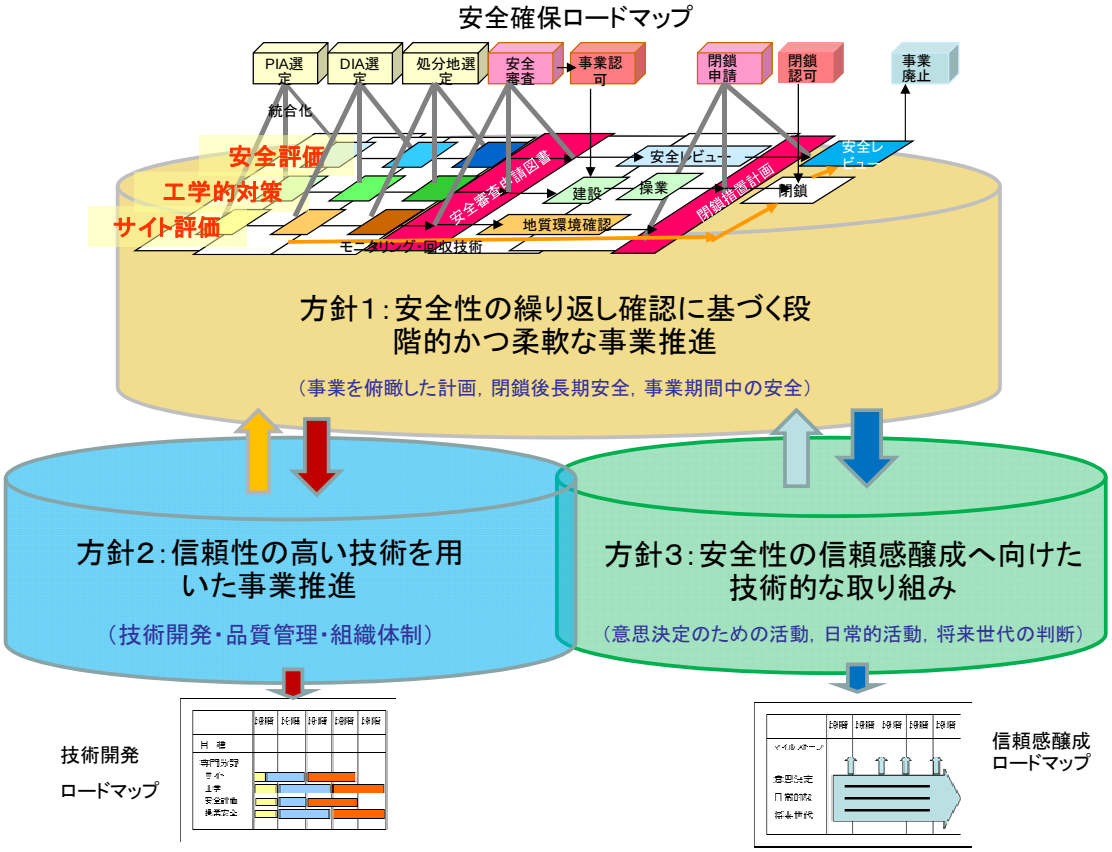


図 4.1.1-3 安全確保の三つの方針と事業全体の意思決定の枠組み

方針１「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」を具体的に展開するために策定したものが，安全確保ロードマップである。安全確保ロードマップはすべての段階を一枚のシートに記述した安全確保ロードマップ概要版と，段階ごとの実施事項をより詳細に記述した安全確保ロードマップ詳細版により構成される。安全確保ロードマップ概要版は，各段階で分野ごとに最も重要な実施事項を簡潔に記述したものであり，安全確保ロードマップ詳細版は，一つの段階を 1 枚のシートに記述し，実施事項を詳細に記述した上で，各実施事項のために必要な技術を提示したものである。

方針２「信頼性の高い技術を用いた事業推進」を実現するためには，

a）技術を事業期間の中でいかに準備するか（技術開発）

b）準備された技術を事業を実施する際にいかに用いるか（品質管理）

c）技術を開発し，使いこなすための組織体制や人材をいかに構築するか（組織体制）

といった点が重要であり，これらは 3.2.1 の方針策定の中で述べたとおりである。NUMO は，a）の技術開発の進め方について技術開発ロードマップを作成し，本報告書の中で提示することとした。

方針３「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み」とは，地層処分事業について関係者の理解を得た上で，その安全性に対する信頼感を醸成するための技術面における取り組みを提示するものである。これは技術の整備とともに段階的かつ柔軟な事業推進を支える重要な柱であり，地層処分事業のように公共性の高い活動を行うに当たっては非常に重要な課題である。NUMO は，地層処分の安全性に対する信頼感醸成を行うために，幅広い活動を行っていくが，本報告書ではそのうち，技術面における取り組みを中心に記述する。特に信頼感醸成ロードマップの中では，事業の進

展とともに関係者に提示できる技術的コンテンツが拡充されていくことから，どのような情報をどのように信頼感醸成につなげるのかといった取り組みについて提示する。
図 4.1.1-4に，安全確保ロードマップ，技術開発ロードマップ，信頼感醸成ロードマップの関係を表した図を示す。安全確保ロードマップでは安全な地層処分を実現するために事業の中で実施するべき事項がまとめられており，特に安全確保ロードマップ詳細版では事業の各段階で必要とされる技術を明示する。技術開発ロードマップでは，安全確保ロードマップ概要版において，重要な実施事項として明示された実施項目と，安全確保ロードマップ詳細版において安全な地層処分を実現するために必要な技術として明示された技術をターゲットとして，技術開発ロードマップを構成する。技術開発ロードマップは専門分野全体を 1 枚のシートに掲載した概要版と，技術開発を分野別に詳細に記述した分野別版により構成される。技術開発ロードマップでは技術開発をジェネリックな技術開発と，特定のサイトや処分場を対象とした技術開発に分けて提示した。また，信頼感醸成ロードマップでは，地層処分の安全性に対する信頼感を醸成するためにNUMOが行う技術的取り組みについて概括的に整理した。

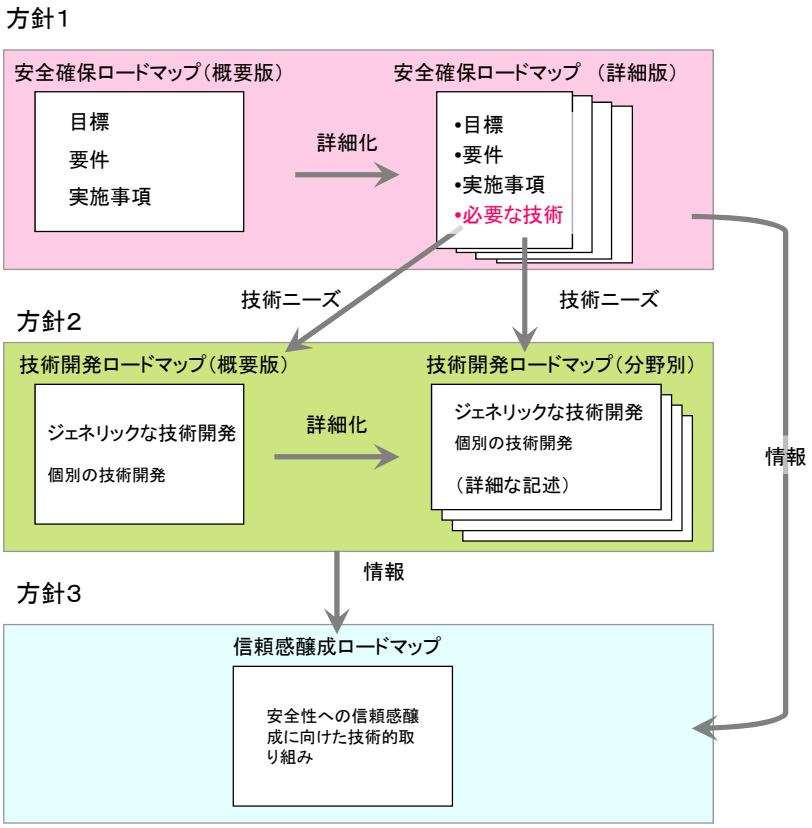


図 4.1.1-4 ロードマップの関係図

4.1.1.4 各段階における分野間の連携

安全確保のロードマップでは閉鎖後長期の安全性を確保するために，適切なサイト選定と確認，適切な工学的対策，地層処分システムの長期安全性の評価といった各分野での取り組みを提示した。しかし，実際の事業の中ではそれぞれの専門分野における実施事項は個別に実施されるものではなく，互いに連携して実施する必要がある。そのことにより，専門分野間において相互に情報ニーズ

を把握でき，より合理的に事業目標達成に向けた計画策定や実施が可能となる。また，サイト調査で得られた結果は専門家による評価を経て，工学的対策，安全評価へと情報が伝達され，必要に応じてサイト調査・評価，工学的対策の検討の見直し，安全評価のやり直しなどが行われ，最終的にはすべての情報が統合化されて，その段階における事業的な意思決定に使用する。

このような分野間の連携のプロセスは，特にサイト調査段階で重要であるが，各段階で特にサイト調査の内容が異なるため，必ずしも同じように連携が行われる訳ではなく，また連携には日常的に行われる作業担当者レベルでのものや，専門分野間で情報を持ち寄って重要な意思決定を行うといった連携作業も存在する。ここでは，作業担当者間で行われるような日常的な連携ではなく，ある段階における実施プロセスの中で行われる重要な連携作業について記述する（図 4.1.1-5）。また，各段階における分野間の連携プロセスは，4.2.2 で段階ごとに記述するので，ここでは，ある段階における分野間の連携について，その内容を精密調査地区選定段階（概要調査の段階）を例として示す。

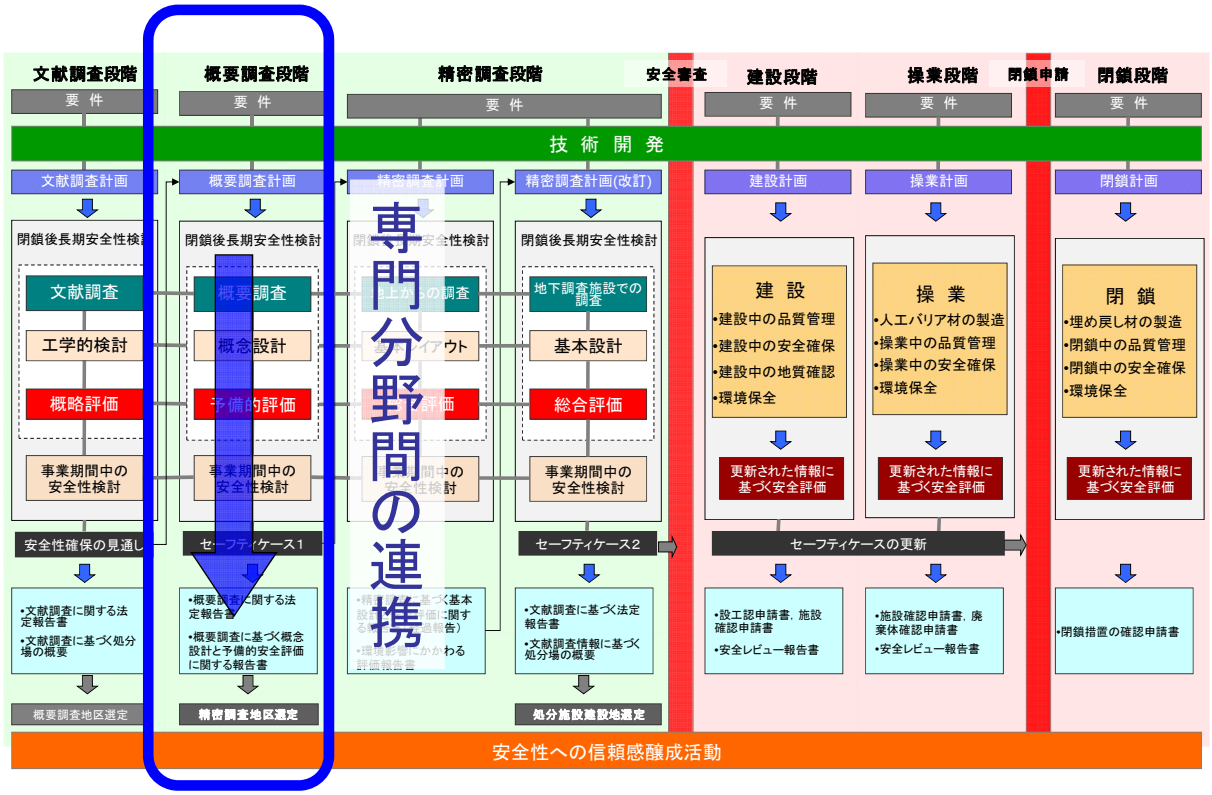


図 4.1.1-5 事業各段階における専門分野間の連携

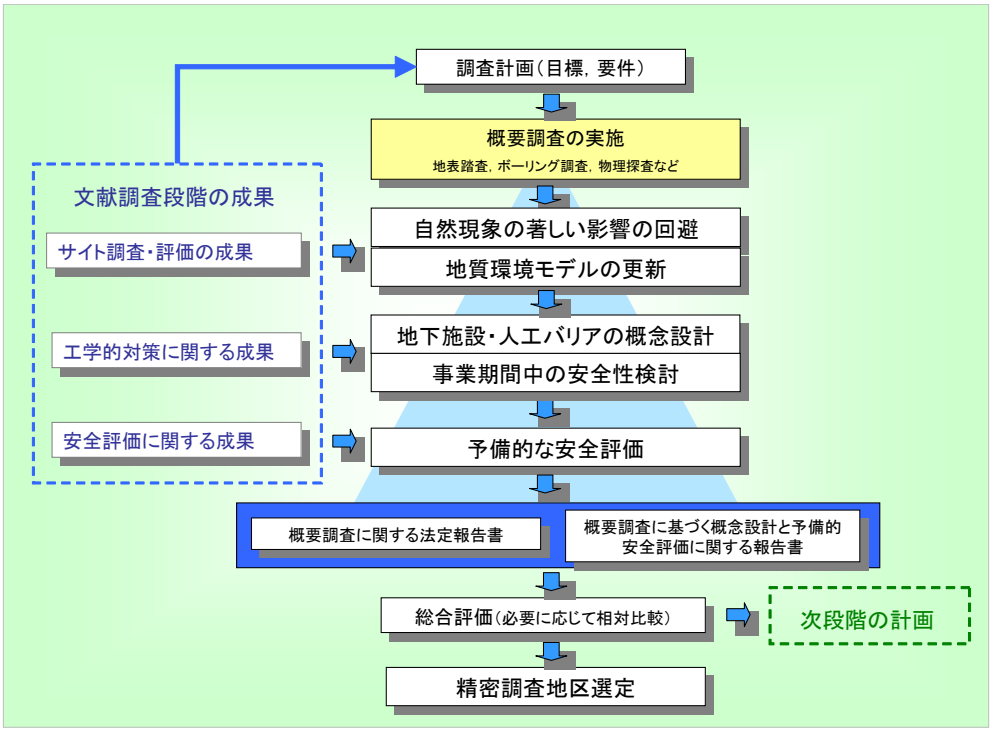


図 4.1.1-6 精密調査地区選定に至る意思決定の枠組み例

精密調査地区選定段階における意思決定の流れは，図 4.1.1-6に示すようになる。つまり，サイト調査・評価として実施する「自然現象の著しい影響の回避」および「地質環境モデルの更新」，工学的対策として実施する「地下施設・人工バリアの概念設計」および「事業期間中の安全性検討」，安全評価として実施する「予備的な安全評価」の中で専門分野が互いに連携しながら情報を伝達し，最終的にはそれぞれの検討成果を統合して報告書を取りまとめ，それに基づいて重要な意思決定が行われる。

4.1.1.5　各分野の段階間における連携

NUMO は，安全な処分の実現に向けて，段階的に繰り返し安全性の確認を実施しながら事業を推進していく。その中で，分野間における連携が行われて，最終的に情報の統合化が行われ，その段階において必要な意思決定を行うことは前節で述べた。

段階的に事業が推進される場合には，分野間における連携に加えて，段階間においても連携が行われ，継続性を持って事業を推進していく必要がある。つまり，ある段階で得られた情報は次の段階における初期条件として活用されることになり，これにより事業が連続性を持って効率的に推進されることになる。また，ある段階において構築されたセーフティケースにおいて，不確実性が存在している場合には，それ以降の段階において，追加のサイト調査・評価を実施したり，研究・技術開発などの取り組みによって知見を拡充することで不確実性を減ずる取り組みを行う。さらに，次段階での検討内容を視野に入れて，前の段階であらかじめ必要な情報を取得したり，技術的な検討を前倒しで実施することもある。このように，一つの段階の中で，単にその段階の目標達成を指向して実施事項を展開するのではなく，段階的な事業展開の中で，専門分野内あるいは分野間においても連携がなされることにより，事業を合理的に推進することが可能となる。

図 4.1.1-7は，全節での各段階での意思決定とともに，サイト評価，工学的対策，安全評価などの各

分野での作業が，段階間で継続的に展開していく流れを模式的に表している。

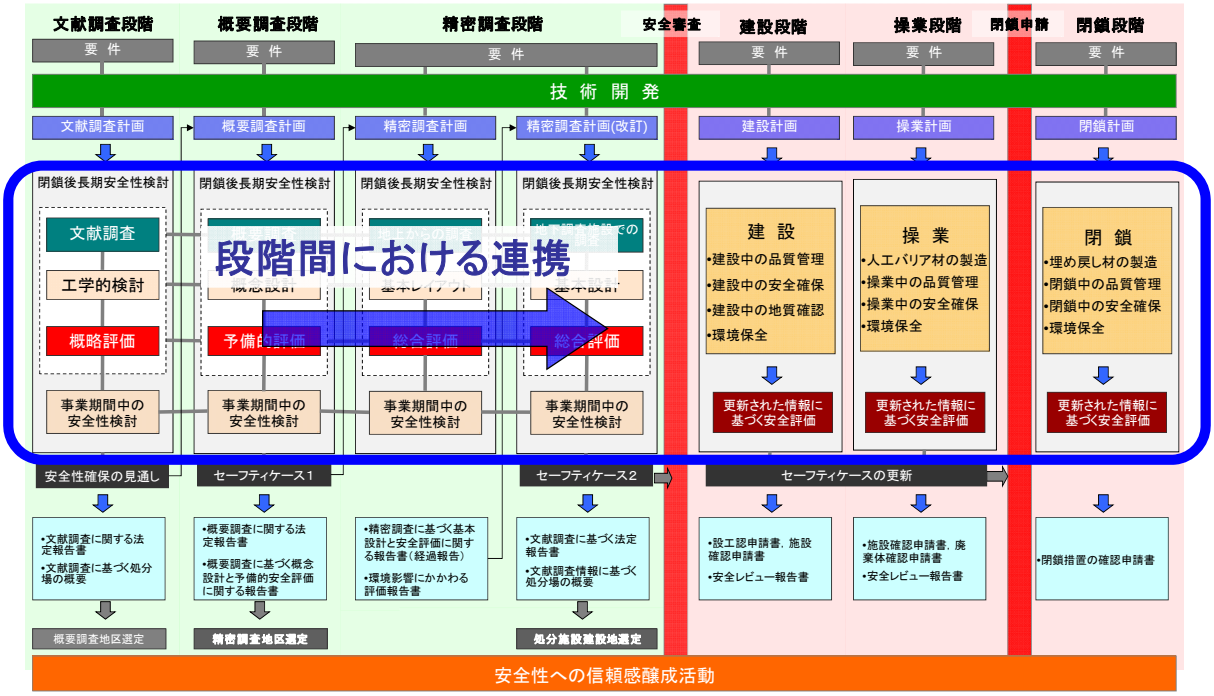


図 4.1.1-7 各段階での意思決定と段階間の各分野の連携

例えば，工学的対策の段階的な展開では，各段階で目標とする成果を準備しつつ，サイト評価や安全評価と連携し，統合化することで適切な工学的対策を準備していくことになる。特に工学的対策で重要な視点は，事業中（建設・操業・閉鎖）の安全確保と閉鎖後の安全確保を確実とする施設の設計であり，そのためには，段階的に得られる情報を介してサイト評価と安全評価の連携しつつ，施設の合理化や最適化を目指すことになる。

4.1.2 方針１の具体的展開（安全確保ロードマップ）

4.1.2.1 方針１を具体的に展開するに当たっての考え方

安全確保ロードマップは事業全体を俯瞰した上で，事業期間を 10 段階に分割し，各段階において目標，要件，実施事項，成果物としての主要な文書を明示する構造となっており，各段階で設定した目標をクリアしていくことにより，最終的に安全な地層処分が実現できるよう構成されている。

安全確保ロードマップ概要版では，各段階で分野ごとに最も重要な実施事項を簡潔に記述している（表 4.1.2-1）。主要な実施事項のうち，安全確保上特に重要な実施事項を赤色で，安全確保上重要な実施事項を黄色で表している。

全体の流れとしては，サイト調査段階初期においては，火山・火成活動，地震・断層活動などの自然現象の著しい影響を回避することに比重が置かれており，その後は地質環境の把握，処分場の設計・安全性の確認と進み，安全審査に望む。安全審査を経て事業許可が得られたら，処分場の建設，操業，閉鎖といった工学的な実施事項に主眼が移っていくことが分かる。

安全確保ロードマップ概要版はこのように，事業全体でどの段階でどのような実施事項に焦点が当てられているかを概観する上でも有用である。

一方，安全確保ロードマップ詳細版では，各段階における分野ごとの実施事項に加えて，各実施

事項を行うために必要となる技術を明示することにより，事業からの技術へのニーズへの橋渡し的な役割を果たしている。詳細版として提示した段階は，概要調査地区選定段階，精密調査地区選定段階，処分施設建設地選定段階のうち地上からの調査，処分施設建設段階のうち地下調査施設での調査，事業認可を受けたのちの建設段階，操業段階，閉鎖段階の段階であり，それぞれの結果を表 4.1.2-2~8 に取りまとめた。

表 4.1.2-1 安全確保ロードマップ（概要版）

段　階				概要調査地区選定段階（文献調査の段階）	精密調査地区選定段階（概要調査の段階）	処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）		安全審査の段階	建設段階	操業段階		閉鎖段階	閉鎖後～事業廃止
						地上からの調査	地下施設での調査			操業期間中	操業の終了・閉鎖措置計画認可申請		
				20 年間程度					10 年間程度	50 年間程度		10 年間程度	
各段階における事業目標				概要調査地区選定	精密調査地区選定	基本レイアウトの決定	処分施設建設地選定	事業許可の取得	処分施設の建設	操業の実施	閉鎖措置計画の認可	閉鎖措置の実施	廃止措置の実施と確認
安全確保にかかわる目標				・自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適格な地域を避ける）	・自然現象の著しい影響の回避 ・長期安全性確保の見通し ・事業期間中の安全性確保の見通し	・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・長期安全性の確保 ・事業期間中の安全性の確保	・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・長期安全性の確実な確保 ・事業期間中の安全性の確実な確保	・長期安全性の確実な確保 ・事業期間中の安全性の確実な確保	・新たな知見を踏まえた長期安全性の繰り返し確認 ・建設段階における安全性の確実な確保	・新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 ・操業段階における安全性の確実な確保	・すべての情報を統合した長期安全性の提示	・閉鎖段階における安全性の確実な確保	・新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 ・閉鎖後の段階における安全性の確実な確保
目標達成にかかわる要件				・考慮事項（法定要件＋付加的条件）への適合性 ・自主基準への適合性	・考慮事項（法定要件＋付加的条件）への適合性 ・安全審査基本指針（あるいは自主基準）への適合性	・考慮事項（法定要件＋付加的条件）への適合性 ・安全審査基本指針への適合性 ・自主基準への適合性	・考慮事項（法定要件＋付加的条件）への適合性 ・安全審査指針への適合性 ・自主基準への適合性	・安全審査指針への適合性 ・安全審査基本指針への適合性	・技術上の基準への適合性（設工認，施設確認，使用前検査）	・技術上の基準への適合性（施設確認，廃棄体確認，使用前検査）	・閉鎖措置計画の認可の基準への適合性	・閉鎖措置計画の認可の条件への適合性	・廃止措置計画の認可の基準への適合性 ・廃止措置の終了確認の基準への適合性
各分野における実施事項	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	自然現象の著しい影響の回避	文献調査による回避	概要調査による回避	回避できていることの確認							
			地質環境特性の把握	地質環境モデルの構築	地質環境モデルの更新	地質環境モデルの更新	安全審査に提示する地質環境モデルの構築	地質環境モデルの更新					
		適切な工学的対策	地下施設	概略検討	基本レイアウトの設定と概念設計	基本レイアウトの決定と基本設計	基本設計	詳細設計	施工	製造・施工	閉鎖の仕様確定	閉鎖(地下)	
			人工バリア		概念設計	仕様決定 製造/施工の実証			製造設備建設	製造・施工	現象確認		
		地層処分システムの長期安全性の評価		概略的な評価	予備的な評価	安全審査に向けた総合的評価		補足的評価	建設時取得データに基づく安全性の確認	操業時取得データに基づく安全性の確認	閉鎖に向けた総合的評価	閉鎖時取得データに基づく安全性の確認	
	事業期間中の各段階の安全性	一般労働安全の確保		情報収集・評価	対策立案（地上/地下施設）	基本設計		詳細設計	対策の実施	対策の実施・監視			
		放射線安全の確保		概略検討	概念設計	基本設計		詳細設計	対策実施・監視		監視		
		周辺環境保全		制約調査	影響予備評価	影響評価および保全措置		補足的検討	保全措置および監視（追加対策）				
安全確保にかかわる主要文書				・文献調査に関する法定報告書 ・文献情報に基づく処分場の概要	・概要調査に関する法定報告書 ・概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書	・精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書（経過報告） ・環境影響にかかわる評価報告書	・精密調査に関する法定報告書 ・精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書	・事業許可申請書 ・環境影響評価書	・設工認申請書，施設確認申請書，使用前検査申請書，安全レビュー報告書	・施設確認申請書，廃棄体確認申請書，安全レビュー報告書	・閉鎖措置計画の認可申請書，安全レビュー報告書	・閉鎖措置の確認申請書	・廃止措置計画の認可申請書，安全レビュー報告書，廃止措置終了の確認申請書

表 4.1.2-2 安全確保ロードマップ（詳細版）
概要調査地区選定段階（文献調査の段階）

段階				概要調査地区選定段階(文献調査の段階)	
事業目標				概要調査地区の選定	
安全確保に関する目標				・自然現象の著しい影響の回避(明らかに不適格な地域を避ける)	
目標達成にかかわる要件				・考慮事項(法定要件＋付加的事項)への適合性 ・自主基準への適合性	
主要な実施事項				①　概要調査地区選定上の考慮事項への適合性の確認 ②　サイトの地質環境特性に応じた概略的な処分場概念の構築 ③　精密調査地区選定上の考慮事項の作成 ④　概要調査計画の作成	
各分野における実施事項			アクション	実施内容	必要とされる技術・知見
	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	・文献調査を実施し，長期安定性・地質環境特性に関する文献情報を収集・整理する。	・収集した情報をデータベース化し，一元的管理する技術
			自然現象の著しい影響の回避	・文献情報を分析し，火山・火成活動，地震・断層活動の著しい影響の範囲，および隆起・侵食の概略的な評価を行ない著しい影響を回避する。→①④ ・精密調査地区選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→③④	・火山・火成活動，地震・断層活動，隆起侵食の影響を評価する技術 ・次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
			地質環境特性の把握	・文献情報に基づき，付加的に評価する事項について分析・評価し，広域的な地質環境モデルを作成するとともに，地質環境の長期変遷について検討する。→①②③④ ・精密調査地区選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→③④	・付加的に評価する事項の判断指標や根拠(自主基準) ・地質環境の各特性に係る情報を分析・評価する技術 ・地質環境モデルを構築する技術 ・地質構造発達史の検討に係る技術 ・次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
		適切な工学的対策	処分施設	・候補母岩を対象に，第2次取りまとめなどのジェネリックな処分場概念に基づいて，対象区域の地質環境特性に応じた概略的な処分施設概念を構築する。→①②④ ・次段階で取得すべき処分施設概念の成立性にかかわる重要なサイト情報を特定する。→④	・処分場概念を設定する技術(概略成立性判断の根拠) ・候補母岩選定に係る評価事項に対応する総合評価手法 ・重要な情報と不確実性を特定する手法と知見
			人工バリア	・候補母岩を対象に，地質環境モデルと長期予測に対応した安全概念に基づく人工バリア概念を，第2次取りまとめなどを参照して設定する。→①②③ ・次段階で取得すべき工学的対策の成立性にかかわる重要なサイト情報を特定する。→④	・安全概念の構築方法と人工バリアオプションの設定技術 ・重要な情報と不確実性を特定する手法と知見
		地層処分システムの閉鎖後長期安全性の評価		・文献調査情報と概略的な処分場概念に基づき，概略的な安全性の検討を行う。→②④ ・次段階で取得すべき安全性にかかわる重要なサイト情報を特定する。→④	・わが国の一般的な地質環境に対する安全評価技術(シナリオ，モデル，データセット，影響解析) ・重要な不確実性を特定するための手法と知見 ・他分野との連携に関する方法論
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保		・概略的な処分場概念に対応し，建設・操業時の安全性確保にかかわる情報を収集・評価する。→② ・付加的に調査する事項を用い，建設および操業段階で支障となりうる自然現象に関する情報を収集・評価する。→② ・処分施設の耐震性検討のための文献情報を収集・評価する。→④	・原子力施設の建設・操業時の想定事故・災害の設定 ・鉱山・地下施設建設での事故・災害に関する記録の分析・評価 ・自然現象の影響評価に係る評価手法と知見
		放射線安全の確保		・概略的な処分場概念に基づき，廃棄体の輸送時や地上施設における取り扱い時の公衆への安全確保の方針を検討する。→② ・概略処分場概念に基づき，地下施設での廃棄体の搬送・定置時の取り扱い方法，作業従事者の放射線に対する放射線災害への対策について概略検討する。→②	・地上での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見 ・地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見 ・耐震性評価手法と安定性の判断根拠
		周辺環境の保全		・文献調査を実施し，処分場概念に対応して，環境防護の観点(保護動植物の有無，騒音，振動，遺跡などの発掘可能性など)からの制約について情報を集約する。→②	・環境保全に関する知見，評価手法
安全確保に係る主要文書				・文献調査に関する法定報告書 ・文献情報に基づく処分場の概要	

表 4.1.2-3 安全確保ロードマップ（詳細版）
精密調査地区選定段階（概要調査の段階）

段階				精密調査地区選定段階(概要調査の段階)	
事業目標				精密調査地区の選定	
安全確保に関する目標				・自然現象の著しい影響の回避 ・長期安全確保の見通し ・事業期間中の安全確保見通し	
目標達成にかかわる要件				・考慮事項(法定要件＋付加的事項)への適合性 ・安全審査基本指針(あるいは自主基準)への適合性	
主要な実施事項				①　精密調査地区選定上の考慮事項への適合性の確認 ②　レファレンス処分場概念(含むセーフティケース)の構築 ③　処分施設建設地選定上の考慮事項の作成 ④　精密調査計画の作成 ⑤　安全審査基本指針への適合性を確認 ⑥　セーフティケースの構築	
各分野における実施事項			アクション	実施内容	必要とされる技術・知見
	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	・地上からの概略的な調査(物理探査, 地表踏査, ボーリング調査など)を複数のフェーズで段階的に実施する。 ・ベースラインモニタリングを視野に入れ, ボーリング孔等でのモニタリングを開始する。	・現地調査技術(物理探査, 地表踏査, ボーリング調査, モニタリングなど) ・現地調査を管理する技術(マニュアル, 調査システムフロー) ・収集した情報をデータベース化し一元的管理する技術
			自然現象の著しい影響の回避	・概要調査地区選定段階の評価の妥当性を確認するとともに, 自然現象の著しい影響を回避するためのほぼ最終的な評価を行う。→①⑥ ・処分施設建設地選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→④⑥	・火山・火成活動, 地震・断層活動, 隆起侵食の影響を調査・評価する技術
			地質環境特性の把握	・概要調査地区選定段階で構築した地質環境モデルを概要調査の進展に応じて更新する→①② ・候補母岩を含むスケールでの地質環境モデルを作成し, 地質環境の長期変遷について検討する。→②④⑥ ・処分施設建設地選定に必要な情報およびそれに係る不確実性を把握する。→④⑥	・付加的に評価する事項の判断指標や根拠(自主基準) ・地質環境の各特性に係る情報を分析・評価する技術 ・地質環境モデルを構築する技術 ・地質構造発達史の検討に係る技術 ・次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
		適切な工学的対策	処分施設	・候補母岩を対象に, 地質環境特性に応じて, 処分施設の基本レイアウトを複数設定し, 工学的対策の成立性の検討により実現性のある処分施設概念を構築する。→② ・安全審査基本指針(あるいは自主基準)に適合するようレファレンス処分場概念の安全機能と長期状態変遷を評価する→⑤ ・地下施設の閉鎖措置で求められる要件を検討する。→④⑥	・レファレンス処分場概念を構築する技術(技術上の判断指標と根拠) ・工学的成立性を評価する判断指標とレベル(自主基準) ・不確実性を特定する手法と知見
			人工バリア	・安全概念と安全機能に着目した人工バリアの概念設計と工学的成立性の概略検討を行い, レファレンス処分場概念として取りまとめる→②⑥ ・人工バリアの長期変遷を検討することで安全審査基本指針(あるいは自主基準)への適合性を確保する。→⑤⑥ ・次段階で取得すべき工学的対策の成立性にかかわる重要なサイト情報を特定する。→④, ⑥	・人工バリア概念を構築する技術(安全機能と判断指標) ・工学的成立性を評価する技術(実現性と長期変遷評価) ・安全機能を考慮した長期変質モデルの検証と考古学的な情報の活用 ・効率的な人工バリアおよび廃棄体の搬送・定置技術 ・不確実性を特定する手法と知見
		地層処分システムの閉鎖後長期安全性の評価		・レファレンス処分場概念に基づく予備的な安全評価を行い, 安全審査基本指針(あるいは自主基準)への適合性を確認し, 予備的安全評価書を作成する。→②⑤⑥ ・評価結果の信頼性を分析し, 重要なサイト情報や入力パラメータの不確実性の低減に向けての方策を検討し, 結果を精密調査に反映させる。→②④⑥ ・セーフティケースへの取りまとめ	・地表環境, 地質環境, 人工バリアに対するサイト固有の長期変遷を考慮した安全評価技術(シナリオ解析, モデル開発, パラメータ設定, 影響解析) ・母岩不均質性および処分場の設計を考慮した核種移行解析手法 ・安全評価にかかわる品質保証および不確実性管理手法 ・重要な不確実性を特定する手法と知見 ・他分野との連携に関する方法論 ・セーフティケース構築のための情報および知識の整理手法
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保		・レファレンス処分場概念に対応して, 建設・操業時の一般労働安全に係わる事項(自然災害, 事項など)を抽出しその影響を概略評価する。→①②④ ・影響を緩和するための安全対策を検討する。→①②⑤ ・地上・地下構造物の耐震検討のためのデータを収集し, 耐震性の評価を行う。→④	・地上からの調査段階での安全確保技術 ・処分場の建設・操業時の一般労働安全確保に関する知見 ・事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベル
		放射線安全の確保		・レファレンス処分場概念に対応して, 運搬時や処分施設における廃棄体取り扱い時の事故などを抽出し, その影響を概略評価する。→②⑥ ・概略評価に基づき, 廃棄体の地下への運搬, 定置時の取り扱い方法, 作業従事者の放射線に対する放射線災害への具体的対策を検討する。→②⑥	・地上での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見(輸送時も含む) ・地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見 ・地震動策定, 耐震性評価手法と安定性の判断根拠
		周辺環境の保全		・調査に取りかかる前に物理探査やボーリング掘削といった現場作業が周辺環境に及ぼす影響を予備的に評価し, 対応策を講じる。→②) ・レファレンス処分場概念を対象とした周辺環境への影響因子の予備検討を行う。→② ・次段階以降で地下掘削を開始した場合の影響について予備的に評価する。→②	・地上での調査段階での環境保全 ・処分場規模での環境影響の可能性を評価するための知見
安全確保に係る主要文書				・概要調査に関する法定報告書 ・概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書	

表 4.1.2-4 安全確保ロードマップ(詳細版)
処分施設建設地選定段階 (精密調査の段階のうち，地上からの調査段階)

段階				処分施設建設地選定段階(精密調査の段階のうち，地上からの調査段階)	
事業目標				処分施設の基本レイアウトの決定	
安全確保に関する目標				・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・長期安全性の確実な確保 ・事業期間中の安全性の確実な確保	
目標達成にかかわる要件				・考慮事項(法定要件＋付加的事項)への適合性 ・安全審査基本指針への適合性 ・自主基準への適合性	
主要な実施事項				① 精密調査計画書(地下調査施設の建設計画・調査・実証計画)の作成 ② 事業許可申請に向けた安全性の予備的確認 ③ 処分施設建設地選定の考慮事項への適合性の予備的確認 ④ 環境調査および環境影響評価 ⑤ セーフティケースの更新	
各分野における実施事項			アクション	実施事項	必要とされる技術・知見
	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	・レファレンス処分場概念をベースに，法定要件などの考慮事項への対応を目的として，処分施設建設候補地を中心とした地質環境に係る情報を得ることを目的として地上からの詳細な調査(物理探査，地表踏査，ボーリング調査など)を行う。 ・地上からの各種モニタリングを継続して実施する。	・現地調査技術(物理探査，地表踏査，ボーリング調査，モニタリングなど) ・現地調査を管理する技術(マニュアル，調査システムフロー) ・収集した情報をデータベース化し一元的管理する技術
			自然現象の著しい影響の回避	・地質環境特性に係る調査データに基づき，精密調査地区選定段階の評価の妥当性を確認する。→②③	・火山・火成活動，地震・断層活動，隆起侵食の影響を評価する技術
			地質環境特性の把握	・精密調査地区選定段で作成した地質環境モデルを調査の進展に応じて更新する→①，②，③ ・レファレンス処分場の地質環境特性の長期変遷を評価する。→①②③ ・地下調査施設における調査の対象および確認する事項を抽出し，調査計画を立案する。	・地質環境の各特性に係る情報を分析・評価する技術 ・地質環境モデルを構築する技術 ・地質構造発達史の検討に係る技術 ・次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
		適切な工学的対策	処分施設	・著しい自然現象の影響の回避を確認した地質環境モデルをベースにレファレンス処分場概念を見直し，処分施設の基本レイアウトを設定する。基本レイアウトをもとに処分施設の基本仕様を設定する→①②③④ ・処分施設の基本レイアウトと仕様に基づき，建設・操業・閉鎖手法を検討し，基本計画を策定する。→①② ・基本レイアウトおよび調査計画，実証試験計画に従い，地下調査施設の詳細設計と施工計画を立案する。→①	・地上調査で確認された候補母岩を対象に処分施設の基本レイアウトと仕様を設計する技術(判断指標と根拠) ・建設・操業・閉鎖計画を設定し，工学的成立性を評価する技術 ・効率的な人工バリアおよび廃棄体の搬送・定置技術 (地下調査施設・実証計画に反映) ・不確実性を特定する手法と知見
			人工バリア	・地質環境に対応した安全概念に基づき，レファレンス処分場概念で設定した人工バリア概念を見直し，基本仕様を設定する。→② ・基本仕様をベースに，人工バリアシステムの長期変遷の評価を行う。→② ・対象とする地下環境下での人工バリア候補材の性能面での検討を行う。→② ・人工バリアに関する地下調査施設での実証計画を作成し，予備試験を開始する。→①④	・人工バリア基本仕様を設定する技術 ・人工バリアの工学的成立性を評価する技術 ・長期変質モデルを検証する技術と考古学的な知見 ・不確実性を特定し，地下での実証計画に反映する手法と知見→II
		地層処分システムの長期安全性の評価		・見直された地質環境モデル，安全概念および工学的対策に基づき，地層処分システムの長期の状態変遷を検討する。→② ・安全審査基本指針の規定事項への遵守のためシナリオ設定などの予備的安全評価を行う。→②，③ ・地下調査施設で確認すべき事項を整理し，調査・実証計画に反映する。→① ・長期の安全性確保につながる安全論拠を収集し，セーフティケースとして取りまとめる。→③	・更新された知見(地質環境モデルの更新や工学的対策の具体化)に基づく，地表環境，地質環境，人工バリアに対するサイト固有の長期変遷を考慮した安全評価技術(シナリオ解析，モデル開発，パラメータ設定，影響解析) ・安全審査基本指針に対応した安全評価技術 ・母岩不均質性および処分場の設計を考慮した核種移行解析手法 ・安全評価にかかわる品質保証および不確実性管理手法 ・重要な不確実性を特定する手法と知見 ・他分野との連携に関する方法論 ・セーフティケース更新のための情報および知識の整理手法
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保		・処分施設の基本設計仕様と基本計画に基づき，建設・操業・閉鎖時に安全確保上留意すべき事象を抽出し，その対応策を検討するとともに，対応策の有効性を判断するための情報を蓄積する。これらの結果は，地下調査施設の建設と調査・実証試験に反映する。→①，⑤ ・地上からの詳細調査計画に基づき，調査中の安全計画を作成し実施する。	・地上からの調査段階での安全確保技術 ・処分場の建設・操業時の一般労働安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 ・事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術
		放射線安全の確保		・処分施設の基本レイアウトに基づき，廃棄体の輸送ルートの選定と線防護の取り組み方針を策定する。 ・処分施設の基本レイアウトに基づき，廃棄体の地下への運搬，定置時の取り扱い方法，作業従事者の放射線に対する放射線災害防止への取り組み方針を策定する。→②	・地上での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 ・地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 ・事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術 ・地震動策定，耐震性評価手法と安定性の判断根拠
		周辺環境の保全		・調査計画で記載した周辺環境への対応策を調査行為の中で実践し，その状況を監視する。→④ ・地下調査施設の建設計画，調査・実証計画に対する環境への影響評価を実施するとともに，対応策を設計する。地下調査施設の建設は，実機の建設時の環境対策も実証する役割を持たせる。→④	・地上での調査段階での環境保全対応技術 ・処分場規模での環境影響の可能性を考慮するための知見(地下の地質環境の影響は閉鎖措置への要件としても考慮しておく)
安全確保に係る主要文書				・精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書(中間報告) ・地下調査施設建設の環境影響に係る評価報告書	

表 4.1.2-5 安全確保ロードマップ（詳細版）
処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち，地下調査施設での調査段階）

段階				処分施設建設地選定段階(精密調査の段階のうち，地下調査施設での調査段階)	
事業目標				処分施設建設の選定	
安全確保に関する目標				・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・長期安全性の確実な確保 ・事業期間中の安全性の確実な確保	
目標達成にかかわる要件				・考慮事項(法定要件＋付加的事項)への適合性 ・安全審査指針への適合性 ・自主基準への適合性	
主要な実施事項				①　処分施設建設地選定の考慮事項への適合性の確認 ②　処分場の基本設計(建設・操業・閉鎖を含む) ③　地下調査施設での調査・試験	④　事業許可申請書の作成 ⑤　環境調査および環境影響評価 ⑥　セーフティケースの更新
各分野における実施事項			アクション	実施事項	必要とされる技術・知見
	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査作業	・地下調査施設を用いた詳細な調査(坑道での物理探査，地質調査，地下水調査，ボーリング調査など)を実施する。 ・必要に応じ地上からの調査を実施し，付加的な地下情報を取得する(例えば，地下水の涵養・流出域の調査など) ・地上からの各種モニタリングを継続して実施する。	・坑道での調査技術(地質調査，地下水調査，物理探査，ボーリング調査，モニタリングなど) ・現地調査を管理する技術(マニュアル，調査システムフロー) ・収集した情報をデータベース化し一元的管理する技術
			自然現象の著しい影響の回避	・許認可申請のために，地上からの詳細調査および地下での調査結果を分析し，処分施設の基本仕様と安全評価結果を総合的に判断し，著しい影響が回避されていることの判断を確認する。→①，④ ・自然現象の将来予測に伴う不確実性を特定し，設計・評価との連携でその対応策を検討する。	・火山・火成活動，地震・断層活動，隆起侵食の影響を評価する技術
			地質環境特性の把握	・安全審査に提示する地質環境モデルを構築し，地質環境特性の長期変遷を含む地質環境特性の総合評価を行う。→①，② ・地下での詳細な調査をもとに，ニアフィールドの特性を把握し，人工バリアの長期挙動評価に資する。	・地質環境の各特性に係る情報を分析・評価する技術 ・地質環境モデルを構築する技術 ・地質構造発達史の検討に係る技術 ・次段階の調査計画を立案するための技術(マニュアル)
		適切な工学的対策	処分施設	・基本設計で適用する施工技術を考慮した地下調査施設を建設する。地下施設の設計の妥当性，建設技術の適用性の実証も行う。→①，②，③，④ ・更新された地質環境モデル，地下調査施設での実証試験結果や設計の妥当性の検証結果をもとに，建設／操業／閉鎖における品質確保，物流，安全確保，経済性の観点から処分施設の基本設計を更新する。→②，④ ・処分場の技術指針(仮称)への適合性を照査する。→④ ・閉鎖措置に向けての基本計画を立案する。	・許認可申請に向けての処分施設の基本レイアウト，仕様を合理化・最適化する技術 ・安全性・合理性などを考慮して建設・操業・閉鎖の具体的な手順と工法を設定する技術 ・閉鎖措置に向けての不確実性を特定する手法と知見
			人工バリア	・人工バリアの基本仕様に従い，廃棄体・人工バリアの定置技術に関する実証および施工品質確保の確認のための実証試験を地下調査施設で実施する。→②，③，④ ・実証試験結果に基づき，人工バリアの基本仕様の見直し，許認可申請への仕様を決定する。→④ ・人工バリアの挙動を確認する試験を地下調査施設で継続して実施することで，初期段階での過渡的な挙動を把握する。→③，④	・処分施設の基本仕様設定に伴う人工バリアの最適化・合理化設計技術(廃棄体の回収技術を含む) ・地下施設等での搬送・定置実証技術とその結果に基づく工学的実現性の評価技術 ・長期変質モデルを検証する技術と考古学的な情報の活用技術
		地層処分システムの長期安全性の評価		・地下調査施設での取得データを加えて，安全審査に向けた処分場の安全性に係るすべての論拠を統合し，総合的な安全評価とその信頼性の評価をセーフティケースとして取りまとめる。→①，④，⑥ ・安全審査への対応として，最終的な地質環境モデルおよび工学的対策を用いた安全評価を行い審査指針の遵守を確認する。また評価に用いたすべての情報を整理する。→④，⑥ ・安全性に影響を及ぼすと考えられる現象のうち，原位置試験(実証)により確認することが有効なものを実施する。→③，⑥	・更新された知見(地下調査施設での取得データや建設・操業計画の具体化)に基づく，安全審査に対応した安全評価技術 ・安全審査に対応した安全論拠の統合技術 ・重要な不確実性を特定するための手法と知見
	事業期間中の安全性		一般労働安全の確保	・地下調査施設の建設計画，実証試験計画に基づき，作業時の労働安全確保対策を施し，安全管理を行う。→③ ・処分施設の基本仕様に基づき，建設／操業／閉鎖に係る公衆安全・作業員安全に関する詳細な計画を策定する(基本設計)→① ・地下調査施設を用いた建設・操業時の安全性に係る試験を行いその有効性を確認する。→③	・地下施設の建設・運営での安全確保技術 ・処分場の建設・操業時の一般労働安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 ・事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術
			放射線安全の確保	・処分施設の操業計画に基づき，廃棄体の輸送ルートや地上施設での放射線防護の取り組み方針を検討する(基本設計)。→② ・廃棄体の地下への運搬，定置時の取り扱い方法，作業従事者の放射線に対する放射線災害防止への取り組み方針を検討する(基本設計)。→②	・地上での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 ・地下施設での廃棄体取り扱い時の安全確保に関する知見と想定される事故・災害への対応策を設定する技術 ・事故・自然災害の安全評価に係る評価手法と判断指標およびレベルを設定する技術
			周辺環境の保全	・地下調査施設の建設による周辺環境への影響を調査・評価し，必要に応じて保全措置を行う。→⑤ (追加)・処分施設の建設／操業時の環境影響評価を行う。→④	・地下での調査段階での環境保全対応技術 ・処分場規模での環境影響の可能性を考慮するための知見
安全確保に係る主要文書				・精密調査に関する法定報告書 ・精密調査に基づく処分施設の基本設計と安全評価に関する報告書	

表 4.1.2-6 安全確保ロードマップ（詳細版）
建設段階のロードマップの詳細化と必要技術の抽出例

段階				建設段階	
事業目標				処分施設の建設	
安全確保に関する目標				・新たな知見を踏まえた安全性の繰り返し確認 ・建設段階における長期安全性の確実な確保	
目標達成にかかわる要件				・技術上の基準への適合性(設工認, 施設確認, 使用前検査)	
主要な実施事項				①　要求品質を満足した処分施設の安全な建設 ②　新たな知見に基づく長期安全性の確認とセーフティケースの更新(安全レビュー対応) ③　次段階の操業実施に備えた検討(使用前検査に向けた準備) ④　建設時の安全性確保 ⑤　施設建設による周辺環境への影響確認および低減	
各分野における実施事項			アクション	実施事項	必要とされる技術・知見
	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	・地下調査施設において計測を継続する。→② ・建設中に得られるデータを用い事業許可申請の内容の妥当性を確認する(地質環境モデルの更新)。→② ・安全レビューに向けたデータを蓄積する。→② 「建設期間は 40 年以上に及ぶと想定されるため, 建設時の調査, モニタリング技術計画を作成し, 手法の改良, データ管理, 計測機器の維持管理, 分析・解釈を経て数値的分析などによるフィードバックなど, 対象を体系化し系統的に実施する体制を準備する」	・調査・分析・解釈技術 ・モニタリング技術(維持管理, データ集積など) ・品質管理・修復技術 ・統計処理技術
			自然現象の著しい影響の回避		・火山・火成活動, 地震・断層活動, 隆起侵食の影響を評価する技術
			地質環境特性の把握		・地質環境の各特性に係る情報を分析・評価する技術 ・地質環境モデルを構築する技術 ・地質構造発達史の検討に係る技術
		処分場の設計・施工などの適切な工学的対策	処分施設	・事業申請に応じて, 処分場の詳細設計ならびに建設／操業／閉鎖にかかわる詳細計画を更新する。→① ・建設段階の安全確認への要件に対応した処分施設を建設する。→①② ・新たな知見や建設技術の導入による合理化をはかる→①②。 ・建設中の情報を記録する(建設完了確認, 安全レビューおよび閉鎖措置計画策定に利用)。→②	・処分施設の仕様設定技術(設計・建設・操業・閉鎖) ・技術基準を遵守するための品質検査, 品質確認技術 ・施設仕様を変更するための技術(現設計の仕様設定のプロセスの記録)
			人工バリア	・操業段階への準備として実証試験などを通じ廃棄体・人工バリアの輸送・定置技術を確認する。→③	・遠隔操業システムの設計・製作技術 ・遠隔搬送・定置のためのシステム制御技術 ・非破壊による品質検査技術
		地層処分システムの長期安全性の評価		・建設時に取得された新たなデータや場合によっては設計変更に対応した安全評価を実施する。(許認可申請によっては, 処分パネルごとの分割申請があり, 変更申請での安全評価が要求されることも想定)→② ・建設の妥当性確認と定期安全レビューに反映する。→②	・建設時に取得された新たなデータや設計変更などに対応した安全評価技術 ・安全レビューに対応した安全評価技術
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保		・建設計画に対応した一般労働安全対策を実施して処分施設の建設を実施する。→④ ・建設時の事故・災害を想定した対応策を準備する(リスク管理)。→①④,	・建設時の安全対策技術(発生防止・拡大防止技術) ・自然災害防止技術(洪水, 地震, 津波など)
		放射線安全の確保		・廃棄体の地上における輸送・オーバーパックへの封入計画を確定し, 公衆被曝を防ぐ対策を確立する(詳細設計)。→③ ・廃棄体の地下における輸送・定置計画を確定し, 作業従事者の被ばくを防ぐ対策を確立する。→③	・操業時の放射線安全対策技術(操業時のリスク評価, 対応技術)
		周辺環境の保全		・地下施設の建設による周辺環境への影響をモニタリングし, 必要に応じて建設計画の変更および影響拡大防止策を施す。(保全措置・監視)。→⑤	・建設時の周辺環境影響保全技術(排水, 換気, ズリ, 騒音など環境基準以下とするための防止技術, 異常時のリスク管理技術)
安全確保に係る主要文書				・設工認申請書, 施設確認申請書, 使用前検査申請書, 安全レビュー報告書	

表 4.1.2-7 安全確保ロードマップ（詳細版）
操業段階（操業期間中）

段階				操業段階(操業期間中)	
事業目標				操業の実施	
安全確保に関する目標				・新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 ・操業段階における安全性の確実な確保	
目標達成にかかわる要件				・技術上の基準への適合性(施設確認, 廃棄体確認, 使用前検査)	
主要な実施事項				①　要求品質を満足するように廃棄体, 人工バリアなどを設置 ②　新たな知見に基づく安全レビューによる長期安全性の確認とセーフティケースの更新 ③　地下施設(空洞)を長期間空けた状態で操業することによる周辺環境への影響を最小限に抑制 ④　操業時の安全性確保 ⑤　次段階の閉鎖に向けた検討(閉鎖措置計画の申請の準備)	
各分野における実施事項			アクション	実施事項	必要とされる技術・知見
	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	・建設と操業が並列して実施されることから，調査の焦点は建設に付随する活動となる。 ・安全レビューに対応し，この時点までに得られたデータおよび最新の知見を総合的に評価し，地質環境の長期安定性と地質環境特性を再評価する。→② ・必要に応じて地質環境モデル，長期変遷モデルの更新を行う。→②	・地質環境モニタリング技術 ・長期モニタリングの維持管理技術
			自然現象の著しい影響の回避		・新たな情報の分析・解釈手法
			地質環境特性の把握		・操業環境モニタリング技術 ・地質環境モデルの更新技術 ・長期変遷予測モデルの更新技術
		処分場の設計・施工などの適切な工学的対策	処分施設	・技術基準への適合性を常に監視しつつ操業を進めるとともに操業システムの継続的な改善をはかる。→① ・操業中の情報を記録する(操業環境の仕様前検査, 安全レビューおよび閉鎖措置計画策定に利用)。→② ・更新された地質環境モデルに対する詳細閉鎖仕様を設計する。→②⑤ ・閉鎖措置計画のための閉鎖設計を行い，実証試験などを通じて閉鎖技術の確認を行う。→②, ⑤	・操業システムを改良する技術 ・使用前検査技術 ・閉鎖措置設計技術と閉鎖技術の実証のための手法
			人工バリア	・要求品質を満たすよう廃棄体および人工バリアの定置を行う。→① ・輸送・定置システムの改善を行う。→① ・人工バリア定置後の処分坑道の埋め戻し。→①, ② ・回収可能性を維持する。→①, ②, ⑤ ・閉鎖措置に向けての実証施設での人工バリア挙動確認試験を継続して実施する。→⑤	・遠隔での人工バリアの搬送・定置技術 ・品質確認技術 ・不具合発生時の修復技術 ・廃棄体回収技術
		地層処分システムの長期安全性の評価		・建設時および施工時などそれまでに得られたデータや最新の知見に基づき安全評価を実施し，安全基準を担保していることを確認(セーフティケースを更新し，安全レビューに備える)。→② ・必要に応じて操業期間中に安全レビューを実施する。→②⑤	・建設時および施工時などそれまでに得られたデータや最新の知見に基づく安全評価技術 ・安全レビューに対応した安全評価技術
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保		・操業段階における対策を実施し，一般労働安全の確保に努める。→④ ・操業中の事故・災害を想定した対応策を準備する。→④ ・施設を長期間使用することになるため，定期的に保守点検を実施し，安全性を保持する。→④	・労働安全確保技術 ・事故・災害に対する発生防止・拡大防止技術
		放射線安全の確保		・策定した対策を実施し，地域住民, 作業従事者の放射線安全を確保する。→④ ・操業時の放射線事故を想定した対応策を準備する。 ・地上部における廃棄体の輸送やオーバーパックへの封入を安全に実施する。→①	・放射線安全対策技術 ・放射線事故時の回収, 補修, 回復技術
		周辺環境の保全		・操業時に排出する地下水, 換気などの周辺環境への影響を防止する設備を設置する。→③ ・長期にわたり地下空洞を保持することの周辺環境への影響の把握と影響拡大を防止する方策を施す。→③	・影響把握のためのモニタリング技術 ・影響拡大防止技術
安全確保に係る主要文書				・施設確認申請書, 廃棄体確認申請書, 安全レビュー報告書	

表 4.1.2-8 安全確保ロードマップ（詳細版）
閉鎖段階

段階				閉鎖段階	
事業目標				閉鎖措置の実施	
安全確保に関する目標				・閉鎖段階における安全性の確実な確保	
目標達成にかかわる要件				・閉鎖措置計画の認可の基準への適合性	
主要な実施事項				①　閉鎖措置計画に基づく確実な閉鎖措置 ②　閉鎖措置の確認 ③　閉鎖後の制度的管理に向けての準備 ④　事業廃止に向けての準備	
各分野における実施事項			アクション	実施事項	必要とされる技術・知見
	閉鎖後長期の安全性	適切なサイト選定と確認	調査	・処分場周辺の地質環境モニタリングを継続して実施する。→①②	・地質環境モニタリング技術
			自然現象の著しい影響の回避	・閉鎖措置までに集積した情報による最終確認を行う。→③④	・影響の回避を判断するロジックとエビデンス（すでに確立された技術として最終判断に適用）
			地質環境特性の把握	・閉鎖後の制度的管理と事業廃止に向け，必要に応じて地質環境モデルを更新する。→③，④	・地質環境モデルを改訂する技術と知見
		処分場の設計・施工などの適切な工学的対策	処分施設	・厳格な品質管理のもと，確実にアクセス坑道などを埋め戻し処分場を閉鎖する。→①，② ・閉鎖措置が所定の品質を満たしていることを確認する。→①，② ・閉鎖後の制度的管理の関する計画を立案する。→③，④	・閉鎖（埋め戻し，プラグなど）に伴う施工技術 ・品質確認と保証のための技術 ・閉鎖後の制度的管理を計画する技術
			人工バリア	・（閉鎖措置計画申請時に定置された人工バリアの初期品質が担保されていることを提示）	（状況によっては，実証施設での人工バリア挙動確認をする技術）
		地層処分システムの長期安全性の評価		・必要に応じて実施	・安全評価技術
	事業期間中の安全性	一般労働安全の確保		・閉鎖措置にかかわる安全対策の実施と監視	・閉鎖段階での安全確保技術
		放射線安全の確保		・監視	・監視のための技術
		周辺環境の保全		・保全措置および監視	・閉鎖段階での周辺へ環境影響保全技術
安全確保に係る主要文書				・閉鎖措置の確認申請書	

4.1.3　方針２の具体的展開（技術開発ロードマップ）

4.1.3.1　方針２を具体的に展開するに当たっての考え方

安全な地層処分の実現には,多岐にわたる学際的な知識と事業で必要とされるさまざまな技術を,それらが必要となる段階で使えるよう準備しておくことが必要である。このような知識と技術の整備について，原子力政策大綱（2005）においては，「NUMO は地層処分の安全な実施と経済性と効率性の向上を目的とした技術開発を進め，一方で，基盤研究開発機関は深地層の研究施設などを活用して，深地層の科学的研究や，地層処分技術の信頼性向上，安全評価手法の高度化などの基盤的研究を実施すること」とされており，NUMO では，この方針に基づいて役割分担の枠組みの中で事業に必要な技術開発を実施してきた。

本節では，このような背景から，安全確保ロードマップで規定した各段階の目標達成に必要とされる技術のうち,既存の技術レベルを分析し,「技術の開発や実証」が今後求められる項目を対象に,必要とされる段階までにどのように準備していくかについて「技術開発ロードマップ」として取りまとめることとした。

本ロードマップで扱う「技術開発」の対象には，ものづくりの技術と関連する知識および経験,調査結果の分析や設計および安全評価に必要となる手法や科学・工学的な知識，それらに使用するデータベースや研究成果などを含むものとする。技術開発ロードマップでは，各段階で関係機関の研究成果集約の方法をはじめ，各段階で品質が確保された知識と技術を適宜集約する方法についても言及する。

技術開発のロードマップでは，各段階での事業目標を達成するために設定された重要な実施事項をターゲットとして，その実施事項を確実に行うために必要な技術開発を段階的に提示する。図 4.1.3-1に技術開発ロードマップの構成を示す。技術開発ロードマップは全体提示した概要版と専門分野別の技術開発ロードマップにより構成される。技術開発ロードマップ概要版は，事業全体を俯瞰して段階的に技術の開発を行っていく大枠を示している。一方，図 4.1.3-1中の①から④は，分野ごとの技術開発内容を事業の進展に準じて記述している。

これまでにも述べてきたとおり，地層処分事業は事業期間が 100 年にもわたる長期のプロジェクトであり,すべての技術を事業の開始段階で開発するという方法は,必ずしも合理的とはいえない。従って，NUMO は今後も科学技術がさらに進展していくことを考慮し，常に最新の技術を取り入れながら事業を推進する。ただし，地層処分事業固有なニーズに基づく技術開発は，他分野の技術の進展を待っていくだけでは必要な技術レベルが確保される保証が無いことから，積極的に技術開発に取り組む必要がある。また，段階的に整備されていく規制からの要件や，幅広いステークホルダからの要件に適切に対応していくために必要な技術開発も実施する必要がある。

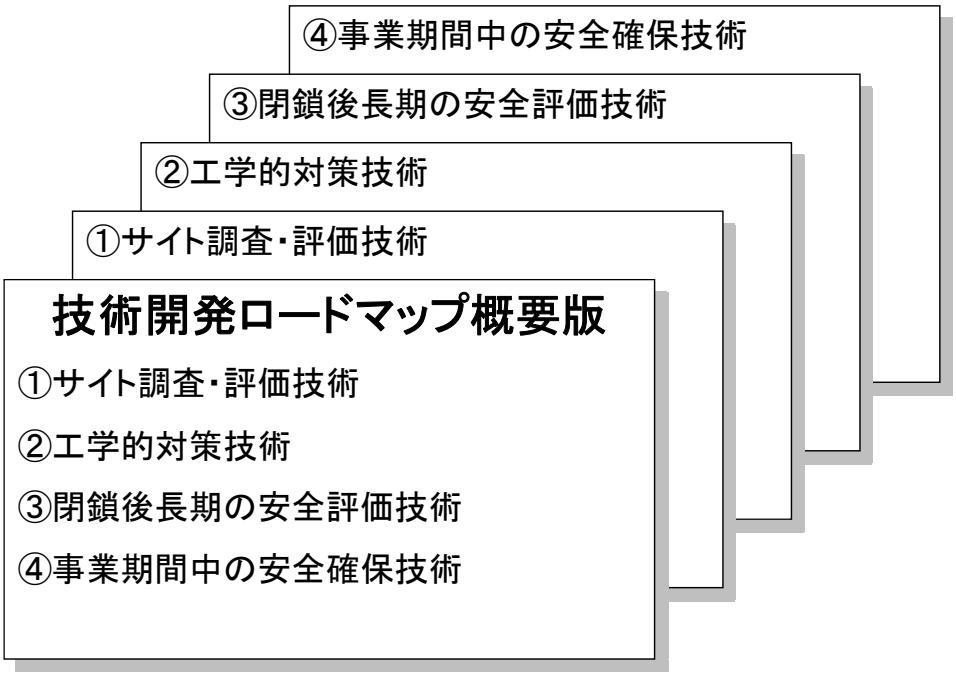


図 4.1.3-1 技術開発ロードマップの構成）

技術開発全体ロードマップでは，安全確保ロードマップの実施事項を行うために必要な技術として挙げられた内容のうち，技術開発が必要とされる技術分野の全体像を，①サイト調査・評価技術，②工学的対策技術，③閉鎖後長期の安全性評価技術，④事業期間中の安全確保技術，に分類して提示する。

4.1.3.2　技術開発ロードマップ

技術開発ロードマップ概要版を図 4.1.3-2に示す。技術開発ロードマップ概要版では，安全確保ロードマップで設定した各専門分野で必要な実施事項を遂行するために必要な技術の整備を，ジェネリックな段階と特定のサイト・処分場を対象とした段階においてどのように開発していくかを明示した。

図中の黄色く色づけされたボックスは，サイトの地質環境や処分場設計が確定していない段階において，いずれ必要となる技術のオプション整備や，事業で必ず必要となる科学技術的知見の取得を表している。一方，青いボックスは，サイトの地質環境や処分場設計が確定あるいは絞り込まれてきた段階において，事業で確実に必要となる技術に焦点を当てた開発を示している。

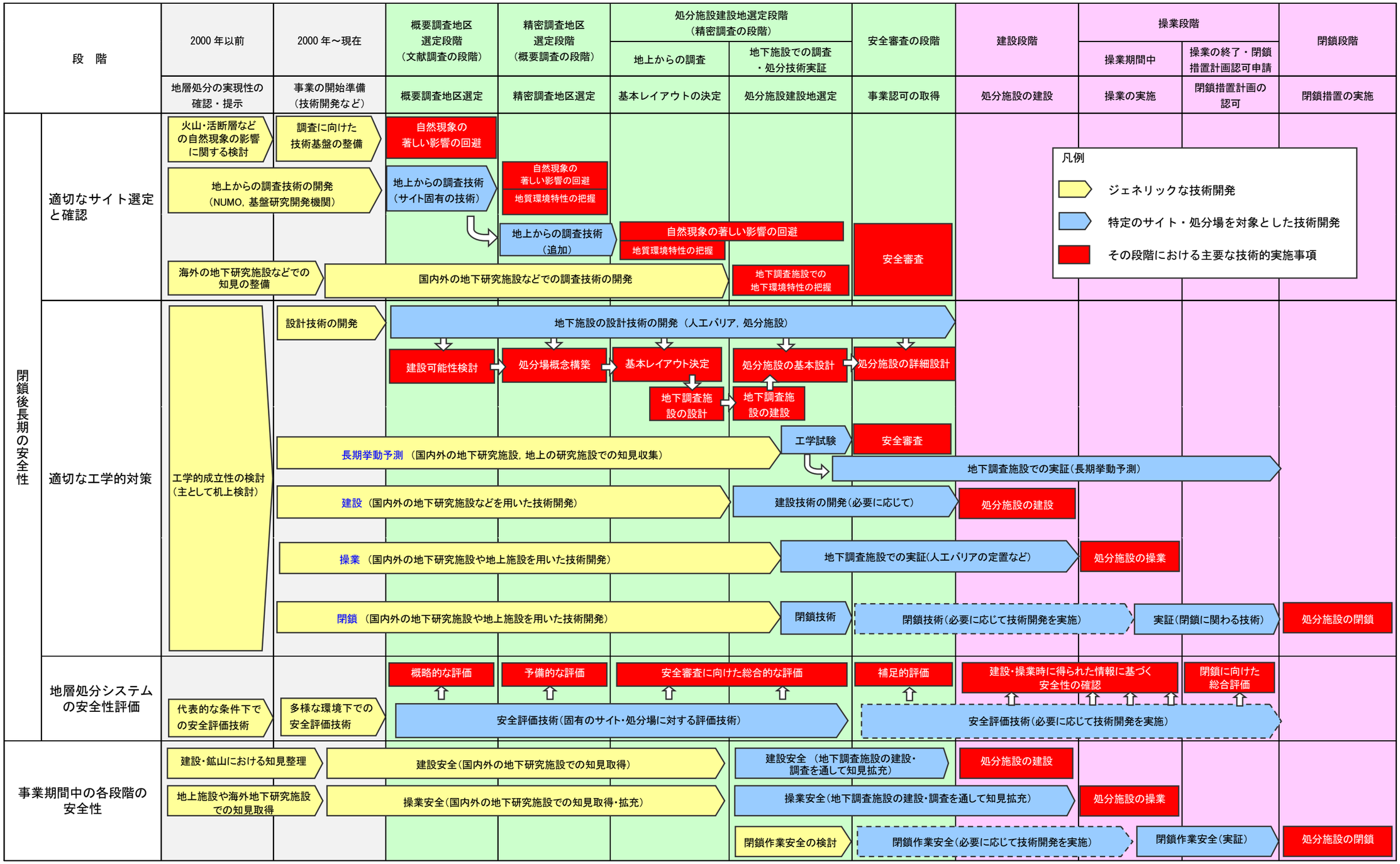


図 4.1.3-2 技術開発ロードマップ（概要版）

4.1.3.3　分野別の技術開発ロードマップ

4.1.3.2 で提示した技術開発ロードマップ概要版の中の，サイト調査・評価技術，工学的対策技術，地層処分システムの安全評価技術，事業期間中の安全確保技術の四つの専門分野それぞれにおいて必要な技術開発を記述したものを図 4.1.3-3から図 4.1.3-5に示す。

(1)　サイト調査・評価技術

サイトの調査・評価では，法的要件に関連する情報や，各段階で実施する施設設計や安全評価で求められる情報をサイト調査により取得・評価することにより，著しい自然現象の影響を避け，信頼性の高い地質環境モデルを構築することが求められる。各段階で必要とされる技術は以下の項目となる。

- 火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食の影響を評価する技術：火山・火成活動，地震・断層活動の発生可能性や影響範囲，隆起・侵食速度などを評価する技術
- 地質環境の各特性に係る情報を分析・評価する技術：地質・地質構造，地下水流動特性，地下水化学特性，岩盤特性（熱，物理，力学），物質移行特性などを評価する技術
- 地質環境モデルを構築する技術：地質環境の各特性に係る概念モデルや地質環境モデルを構築する技術
- 地質構造発達史の検討に係る技術：火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食の過去の履歴と地質・地質構造の分布・特性に基づき，地質構造の発達史を解明する技術
- 収集した情報をデータベース化し，一元的に管理する技術：収集した情報を透明性・追跡性を担保しながら一元管理できるデータベースを整備し，適切に運用・管理する技術
- 調査計画を立案するための技術：既存の情報や前段階の調査・評価の情報，工学的対策や安全評価からの情報や要求に基づき，次段階の合理的・効率的な調査計画を立案するための技術（マニュアル類やシステムフローなどの支援ツールの整備，および調査・評価技術の実証的検討）

(2)　工学的対策技術

工学的な対策には，地上および地下の処分施設の設計，建設，操業および処分場の閉鎖措置が含まれる。そのため，ものづくりの技術と知識，工学的対策を実施する上での品質確保，工期や予算からの要件を満たす合理的かつ効率的な対策などが求められ，これらを満足する技術を準備する必要がある。

- 処分施設を構築する母岩を設定する技術：地質環境モデル，地質環境特性の長期変遷，自然現象の発生可能性および影響範囲などの情報に基づき，処分施設の立地への要件に照らしあわせて母岩を選定する技術
- 処分施設を設計・建設する技術：選定した母岩を対象に，処分施設のレイアウト，施設の仕様を，目標品質を考慮してさまざまな要件から設計し，実現する技術。処分の段階に応じて，概念設計，基本設計，詳細設計へと合理化・最適化をはかる技術
- 人工バリアを設計・製作・定置する技術：廃棄体の受入基準の設定および検査，オーバーパックや容器への封入，地下施設への搬送・定置のための設備の設計と操作する技術。人工バリアを設計・製作，地下への搬送・定置装置の設計と操業技術およびそれらを検査・監視する技術

・ 処分施設の閉鎖措置を設計・施工する技術：建設・操業後の処分場の閉鎖にかかわる設計・施工技術

(3) 長期の安全評価技術

閉鎖後の長期の安全性は，安全評価によって提示される。この安全評価結果は，直接的に実証することは困難であることから，その確からしさは，評価の前提やシナリオおよび評価モデルの根拠となる証拠や関連する知識の集合体として認識されることから以下の技術が必要となる。

・ 安全概念と安全機能を設定する技術：地質環境モデル，地質環境特性の長期変遷，自然現象の発生可能性および影響範囲などの情報に基づき，安全要件を満足できる安全概念と各バリアの安全機能を設定する技術
・ 地層処分システムの構築と長期状態変遷を把握する技術：安全概念と安全機能に基づき地層処分システム（人工バリアとその周辺環境）を構築し，自然環境と安全機能の状態変遷を，処分場の建設前の初期状態から時間の経緯に沿って，異なる時間枠とさまざまなスケールで把握・記述する技術
・ シナリオ構築技術：地層処分システムの状態変遷をベースに，安全要件に対応した安全評価に向けてのシナリオを作成・分類する技術
・ 評価モデル・パラメータ設定技術：シナリオに沿って，プロセスや事象をモデル化し，関連する知識情報をもとに，影響解析のためのパラメータを設定する技術
・ 影響評価および安全基準遵守を確認する技術：各シナリオに沿って作成されたモデル化とパラメータを用いた核種移行解析コードで影響評価を行う技術とその結果を分析・解釈する技術
・ 不確実性への対応技術：事業の各段階でのセーフティケースの取りまとめにおいて，長期の安全評価に係る不確実性を特定し，その対応策を構築する技術

(4) 事業期間中の安全確保技術

対象となる技術は，調査・建設・操業・閉鎖中の一般労働安全および放射線安全にかかわる技術となる。また環境保全に係る技術もこの範疇としている。各段階で必要とされる技術は以下の項目となる。

・ 事業期間中の安全性を脅かす事象を設定する技術：サイト調査，処分施設の建設と操業および閉鎖段階において，一般労働安全と放射線安全に係る事象を推定し，その発生可能性や影響の程度などを設定する技術
・ 安全性確保に向けた対応技術：安全性に係る事象の影響の程度や範囲に対し，工学的な対策や制度的な対応策を整備する技術。例えば，事故や災害を防止する技術と影響を削減する技術
・ 事業期間中の安全評価技術と危機管理技術：事業期間中に想定される事故や災害に対応策の有効性を評価する技術と想定外事象への危機管理技術
・ 事業期間中の周辺環境への影響因子とその形態を設定する技術：事業の段階的な進展と各段階での実施事項を考慮して，周辺環境に与える影響因子を設定する技術
・ 環境保全技術：影響因子に対応して，その影響を防止あるいは削減するための技術。影響の状態を監視する制度やモニタリングする技術も含む

・ 環境影響評価技術 : 事業の開始段階から閉鎖確認に至るまでの周辺環境への対応策などの有効性を評価する技術

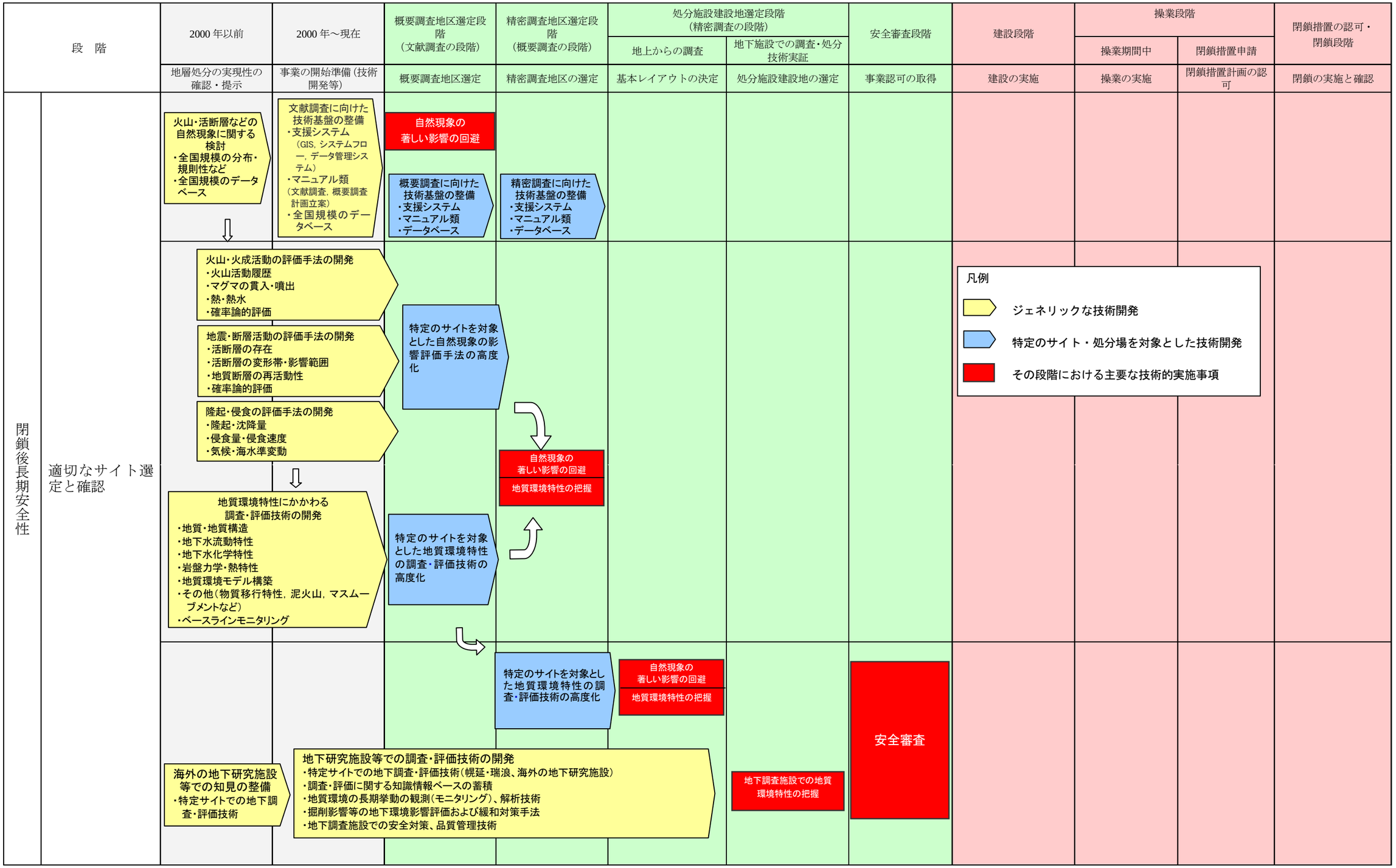


図 4.1.3-3 技術開発ロードマップ（適切なサイト選定と確認：関連技術の開発）

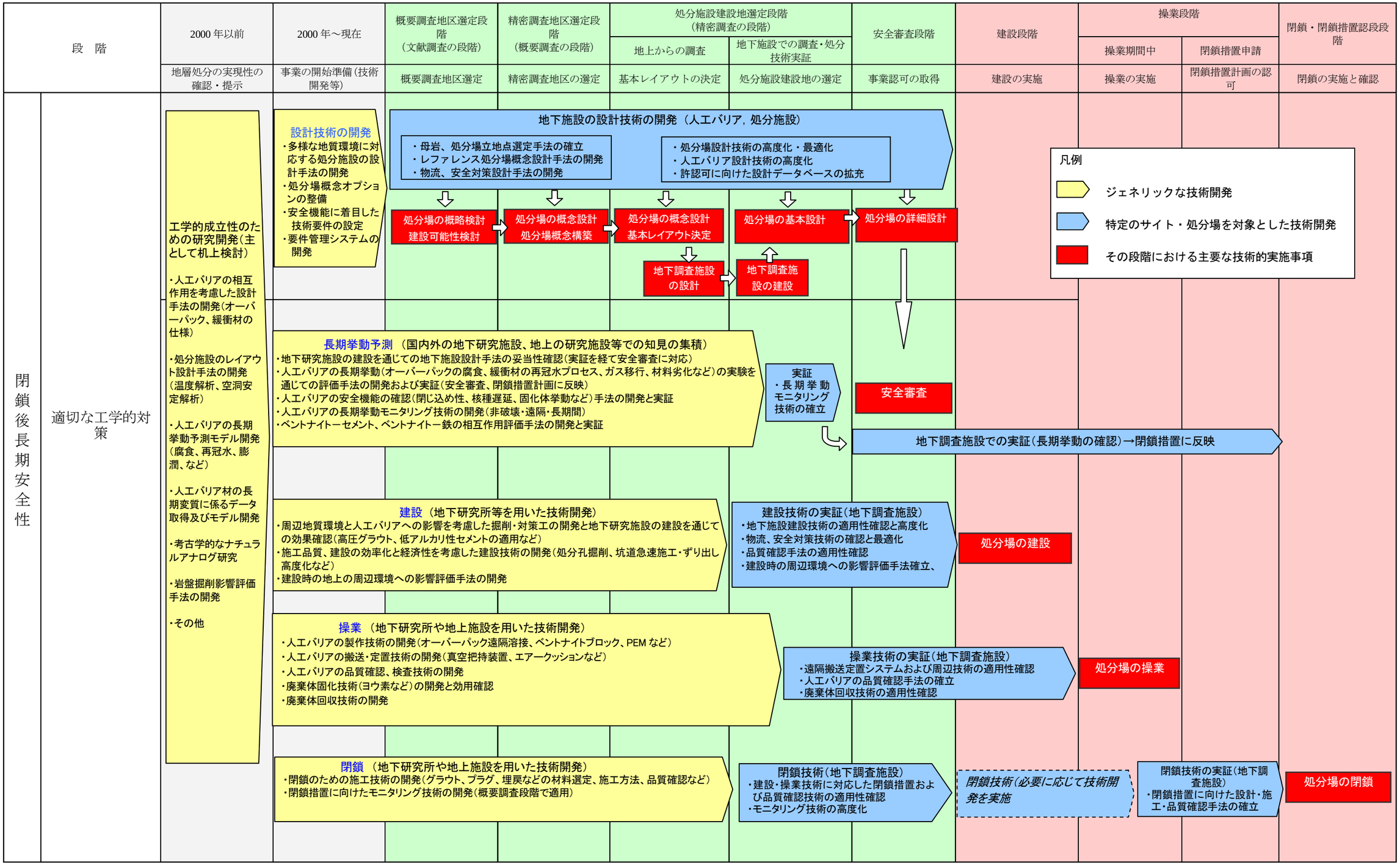


図 4.1.3-4 技術開発ロードマップ（適切な工学的対策：関連要素技術の開発）

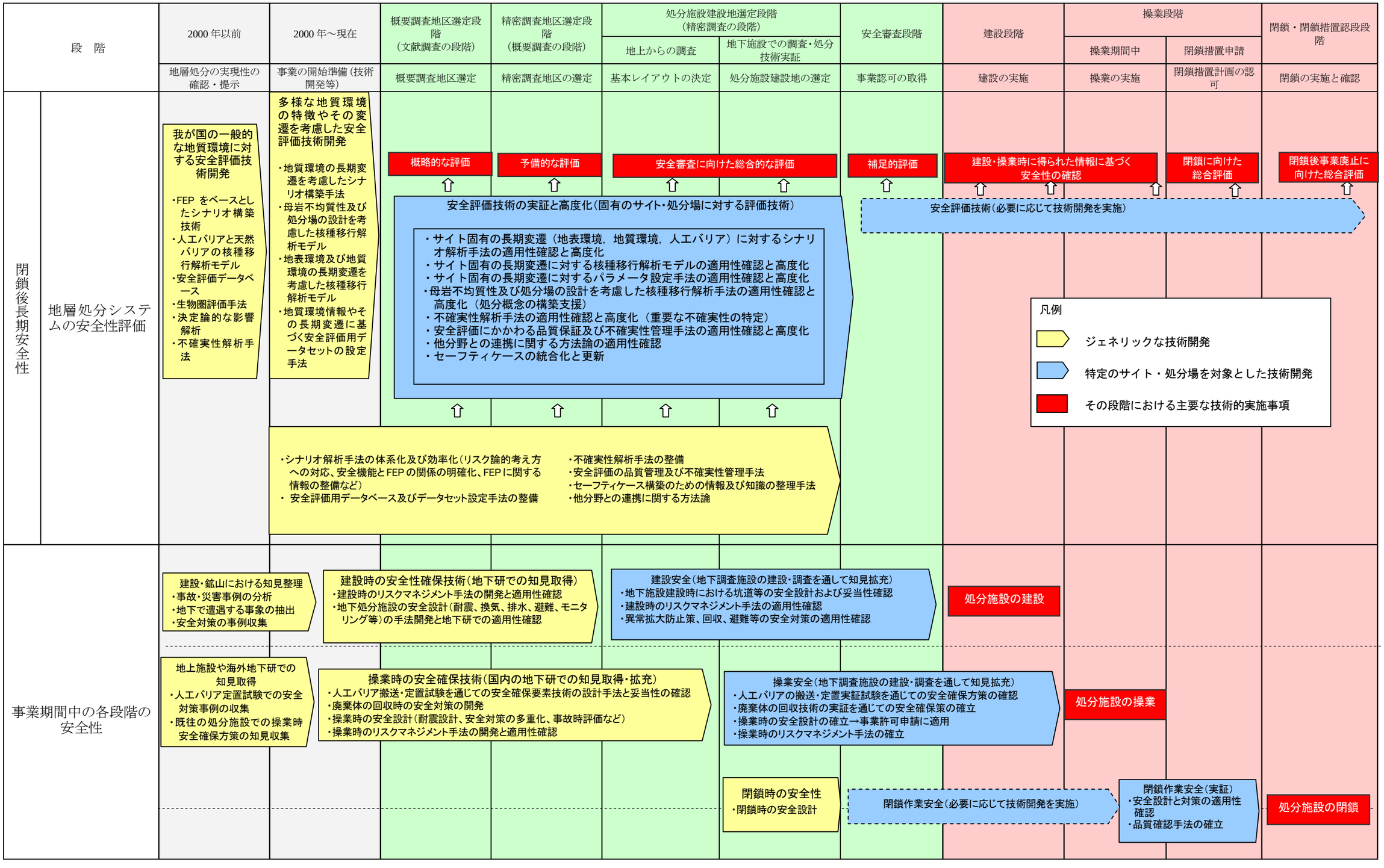


図 4.1.3-5 技術開発ロードマップ（地層処分システムの安全性評価：閉鎖後長期の安全性と事業期間中の安全性）

4.1.4　方針３の具体的展開

4.1.4.1　方針３を具体的に展開するに当たっての考え方

3.2.4.1 で述べたように，地層処分事業は社会的側面の非常に強い事業であり，各事業段階において安全な地層処分の実現に向けて行う技術的実施内容を分かりやすく提示していくとともに，社会のその時代の価値観に基本的な視点を置いて適切な施策を展開することが重要である。そのためには，各段階において得られる技術情報をホームページや説明資料などとして日常的に公開するとともに，地層処分にかかわる国民の関心事項，不安，懸念事項，成熟段階などの体系的な把握と分析を十分に行い，地層処分技術の現況が社会のその時代の価値観にどの程度適合しているか（社会適合性）を常に把握し，社会適合性を向上していくための施策や行動を継続的に行っていくことが重要である。

地層処分は，「地下深部における」，「遠い将来を視野に入れた」，「放射線の影響」という直感的に理解しにくい潜在的危険性を含む問題であるため，原子力分野の専門家以外の関係者に安全性への信頼感を醸成するには広範かつ継続的な取り組みが必要である。本報告書では，技術的な面で信頼感醸成のために取り組むべき内容を信頼感醸成ロードマップとして提示した（図 4.1.4-1）。

4.1.4.2　信頼感醸成ロードマップ

方針３「安全性への信頼感醸成へ向けた技術的取り組み」を段階的に事業を推進する中でどのように展開するかを信頼感醸成ロードマップという形で提示する。信頼感醸成ロードマップは第３章で提示した３つの方策（方策１：事業の各段階における意思決定にかかわる情報提供，方策２：安全性や技術の信頼性にかかわる日常的な情報提供と対話活動，方策３：将来世代が適切な判断を行うための環境整備）に基づいて構成した。

方策１は，各段階における重要な意思決定に向けて，個別の技術的取り組みから得られた成果を整理・統合して，安全性の根拠となる資料として提示する活動である。安全性の根拠を包括的に示す方法としてはセーフティケースという概念があるが，一般の関係者に対しては，技術的な論拠に基づいて構築したセーフティケースを理解しやすい形に再構成して提示する必要がある。信頼感醸成ロードマップでは，各段階における主要な意思決定事項を明示した上で，その意思決定に向けて提示する情報を整理する。

方策２は，技術的な実施事項から得られる情報を日常的に提供し，対話活動を実施するという取り組みと，地層処分の安全性に関する心配要因の分析や信頼感醸成活動という項目に分けて示した。前者は事業期間中に得られる情報をタイムリーに提示していく取り組みであり，例えばボーリング調査の現場で実施内容を紹介したり，調査によって得られた技術情報を分かりやすく構成して提示するといった活動である。後者は対象とする関係者の心配要因分析に基づいて，心配要因の除去を行うためにどのような対応が必要かを検討し，信頼感醸成に向けてどのような技術的取り組みを行うかという活動である。

方策３は，事業が長期間にわたることを考慮して，現世代が今の時点で 100 年近い将来のことまで一義的に決めてしまうのではなく，将来世代がその時点における諸条件の中で一定の決定の余地を残しておくという考え方である。将来世代がかかわる大きな意思決定には処分場の閉鎖の判断と，事業廃止の判断があり，また将来にわたって処分場をどのように扱うのかといった点が挙げられる。

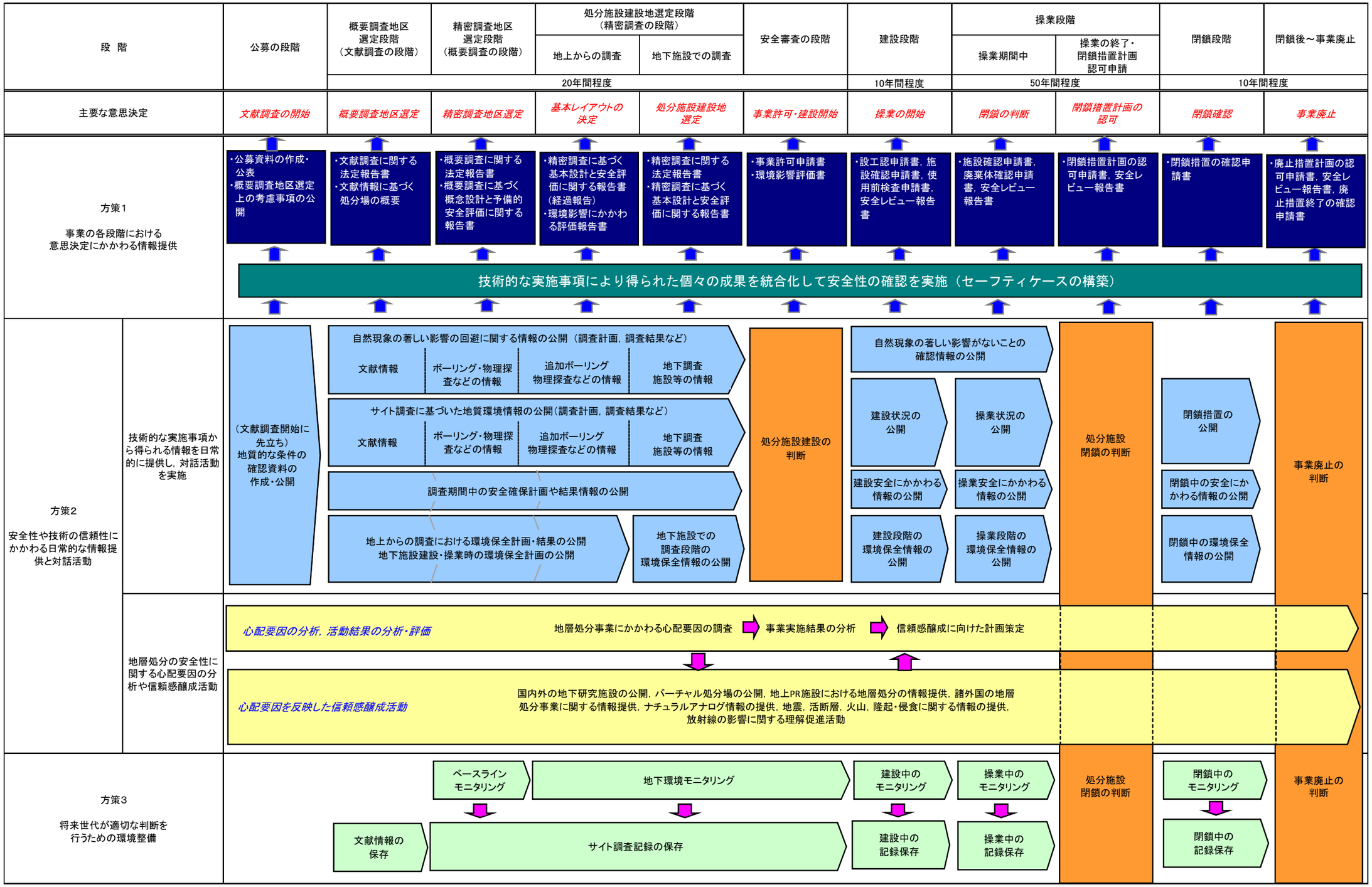


図 4.1.4-1 安全性への信頼感醸成のロードマップ

4.2　事業中の各段階における実施事項

4.2.1　サイト選定および安全審査の段階

4.2.1.1　概要調査地区選定段階（文献調査の段階）

・本段階における事業目標	：概要調査地区選定
・安全確保にかかわる目標	：自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適切な地域を避ける）
・目標達成にかかわる要件	：概要調査地区選定上の考慮事項への適合性（自然現象の著しい影響の回避）
・安全確保にかかわる主要文書	：文献調査に関する法定報告書，文献情報に基づく処分場の概要

(1)　実施事項

この段階の事業にかかわる目標は概要調査地区の選定であるが，安全確保にかかわる目標としては，自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適切な地域を避ける）が挙げられる。これらの目標達成にかかわる要件としては，すでに公表済みの法定要件に基づく「概要調査地区選定上の考慮事項」（NUMO，2009b）への適合性がある。また，付加的に評価する事項などにより，地質環境の条件を含む総合的な評価や必要に応じ相対的評価を行う。

概要調査地区選定段階では，この段階の実施事項の開始に先立ち，対象となる区域が「地質的な条件」により文献調査の対象となることを確認する。ここでいう「地質的な条件」とは，全国一律に評価する地震と噴火に関する考慮事項の考え方を適用した回避すべき条件であり，すでに公表している（NUMO，2009b）。この確認作業の結果，対象となる区域が条件を満足した場合のみ，文献調査を実施することになる。

対象となる区域が「地質的な条件」を満足した場合，NUMO は国に対して事業計画の変更申請を行う。NUMO は，国からの認可が得られ次第，「文献調査計画書」を作成・公表する。文献調査は「文献調査計画書」に基づいて実施するが，文献の収集方法としては，データベース検索，関係機関からの提供，一般の方々からの提供を予定している。収集する文献は，「概要調査地区選定上の考慮事項」の法的要件に関する事項および付加的に評価する事項に対応する内容であり，具体的には対象とする地域の長期安定性，地質環境特性などに関するものである。収集した文献は NUMO で開発した地質環境データ管理システムに入力することにより一元的に管理する。

NUMO は，文献調査により収集した資料を詳細に分析・評価し，断層活動，火成活動，隆起・侵食といった自然現象による著しい影響の記録の有無の確認を行い，「概要調査地区選定上の考慮事項」に基づいて概要調査地区の範囲を設定する。これにより，安全にかかわる目標として設定した自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適切な地域を避ける）を達成することができる。この検討結果に基づいて，NUMO は概要調査地区を選定し，「文献調査に関する法定報告書」を作成する。

あわせて，収集した一連の文献情報に基づいて広域的な地質環境モデルを構築し，これまで開発してきた処分場概念オプション（NUMO，2004a）を出発点として，対象区域の地質環境特性に応じた概略的な処分場概念を構築する。これらの情報に基づいて地層処分の閉鎖後長期の安全性に関する概略的な評価を行う。この作業から次段階の調査により取得すべき安全性にかかわる重要なサイトの情報を特定し，次段階の概要調査計画の策定に資する。

ただし，これらの作業は公開された文献・資料に基づいており，それらから得られる情報量には

限界があるため，不確実性が存在する。そのような不確実性は，安全性に及ぼす影響の程度を考慮し，次段階における調査項目として調査計画に含め，不確実性の低減をはかる。具体的には，工学的対策を検討する際には，地質環境の条件に含まれる不確実性の高い情報に関しては，十分な保守性を考慮した状態を設定して対策検討を行う。また，安全評価においても，モデルやパラメータに含まれる不確実性を評価した上で，既存のシステム性能評価モデルを活用した感度解析的な方法を用いることで，不確実性が安全性に及ぼす影響を幅広く検討できると考える。

上述したような処分場概念や閉鎖後長期の安全性の概略的な検討に基づき，応募区域に処分場を設置した場合の地上･地下施設のイメージを「文献情報に基づく処分場の概要」として取りまとめ公表する。これらの報告書とその補充文書からなる文書群により，安全性に関する検討を行う。この段階での安全性の検討は根拠となる情報が既存の文献に限られることなどから，セーフティケースとして文書化することはせず，その検討結果は，次段階の調査計画の策定に資することを主たる目的とする。

一方，事業期間中の安全性に関しては一般労働安全の確保，放射線安全の確保，周辺環境の保全という三つの観点から検討を行う。

一般労働安全の確保に関しては，建設・操業の実現性確認のための情報を収集・評価するとともに，建設および操業段階で支障となりうる自然現象の有無などを評価する。また，地下構造物の耐震性の検討のための文献情報も収集・評価する。

放射線安全の確保に関しては，廃棄体の地上施設までの運搬時や地上施設における廃棄体取り扱い時の公衆安全および作業員の安全に関する見通しを付ける。

周辺環境の保全に関しては，環境保護の観点からの制約を調査する。事業期間中の安全性の検討結果も「文献情報に基づく処分場の概要」の中に含める。

上記をフロー図として示すと図 4.2.1-1のようになる。

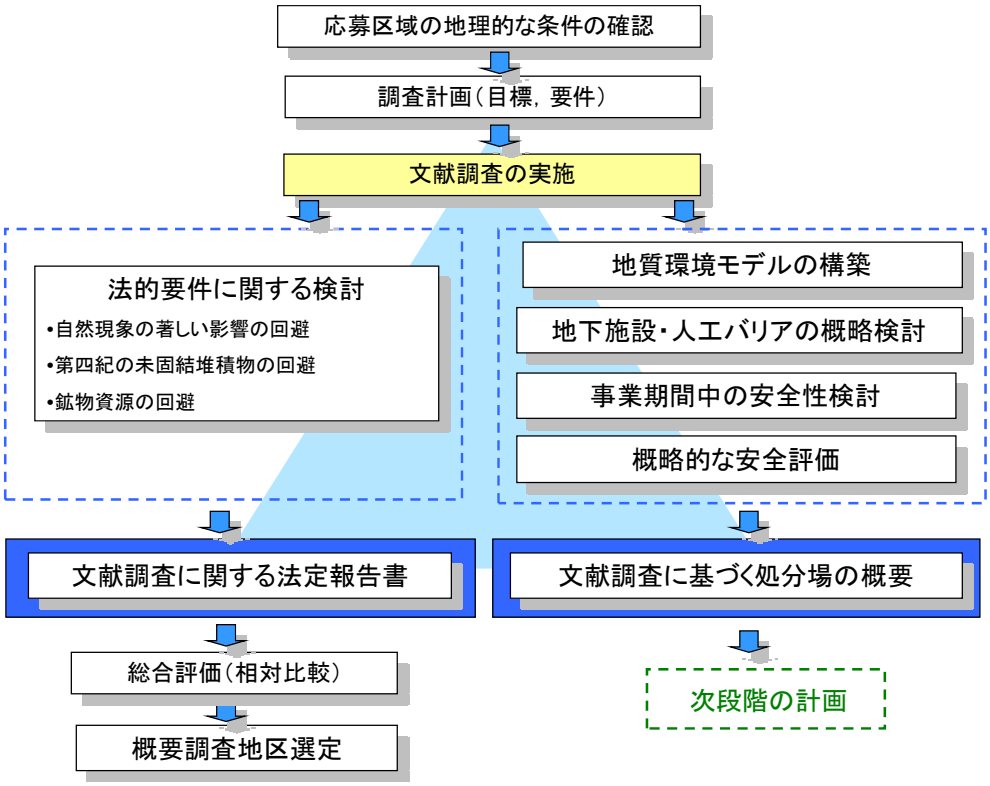


図 4.2.1-1 概要調査地区選定段階における実施フロー図

(2) 概要調査地区選定上の考慮事項について

NUMO は，調査地区選定上の考慮事項は，その選定段階の調査を開始する前に作成・公表することとしており，概要調査地区選定上の考慮事項は既に作成済みであり，公募関係資料として公開済みである。

サイト選定の最初の段階である概要調査地区の選定の目的は，文献調査で分かる範囲で，地震，噴火，隆起・侵食の観点から，処分施設建設地としての適性が明らかに劣る地域を含まないように概要調査地区を選定することである。

「概要調査地区選定上の考慮事項」は，概要調査地区を選定する上で考慮する事項とその評価の考え方などを示したものであり，最終処分法および同施行規則に示された概要調査地区の選定要件に基づくとともに，「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」（平成 14 年 9 月）（原子力安全委員会，2002）を踏まえて策定した。

「概要調査地区選定上の考慮事項」には，「法定要件に関する事項」と「付加的に評価する事項」がある。（表 4.2.1-1）

「法定要件に関する事項」は，最終処分法および同施行規則に定められた法定要件の内容を具体化した事項であり，概要調査地区を選定する上での除外要件となる。ここでは，地震，噴火，隆起・侵食，第四紀の未固結堆積物および鉱物資源に関する事項を対象に，全国規模でデータが整備された情報に加えて，個別の応募区域およびその周辺の地域を対象とする文献調査により概要調査地区としての適格性を評価する。

一方，「付加的に評価する事項」は，概要調査地区選定に関する除外要件には該当しないものの，「原環機構は，安全性確保の前提のもと，経済性および効率性にも留意して事業を行う必要がある」という事業推進に関する方針（通商産業省，2000）を踏まえ，次段階以降の選定要件や建設・操業に当たって必要な事項として設定したものであり，法定要件に対する適格性が確認された地区を対象に，①地層の物性・性状に関する事項，②地下水の特性に関する事項，③地質環境の調査・評価に関する事項，④建設・操業時における自然災害に関する事項，⑤土地の確保に関する事項，⑥輸送に関する事項により，必要に応じて相対比較を行う。

表 4.2.1-1 概要調査地区選定上の考慮事項

分類	法定要件に関する事項		付加的に評価する事項
	地質的な条件の事前確認に関する事項	文献調査により評価する事項	
考慮事項の内容	①地震 陸域では空中写真判読など，海域では海上音波探査などに基づいて，全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所は，文献調査の対象としない。 ②噴火 第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域は文献調査の対象としない。	①地震 繰り返し活動し，変位の規模が大きい活断層などについて，次の事項に該当すると明確に判断される場所，範囲は含めないように，概要調査地区を選定する。 ・全国一律に評価する事項で用いた以外の文献によって認められる活断層がある場所 ・活断層の幅（断層破砕帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲 ・活断層の分岐などの発生の可能性が高い場所 ・顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲 ②噴火 第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側の地域でも，将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域は含めないように，概要調査地区を選定する。また，将来も含め，マグマによる著しい熱の影響，強酸性の熱水，あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように，概要調査地区を選定する。 ③隆起・侵食 過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えていることが明らかな地域は含めないように，概要調査地区を選定する。 ④第四紀の未固結堆積物 地層処分を行おうとする地層が，第四紀の未固結堆積物である地域は含めないように，概要調査地区を選定する。 ⑤鉱物資源 地層処分を行おうとする地層において，その採掘が経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないように，概要調査地区を選定する。	①地層の物性・性状 岩盤の強度，変形・割れ目・風化・変質の状況，地温勾配，岩体の形状・規模，隆起・侵食の速度，異常間隙水圧・膨張性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性 ②地下水の特性 地下水の流量・流速，水温，pH，酸化還元性 ③地質環境の調査・評価 調査の範囲・規模・期間，調査技術・評価手法などの適用性，火成活動・断層活動などの地質環境の評価・モデル化の容易性，調査に対する土地利用などの制約 ④建設・操業時における自然災害 地震・地すべり・洪水などの重大な自然災害の発生可能性 ⑤土地の確保 土地の確保の容易性 ⑥輸送 利用可能な港湾または港湾候補地からの距離などの輸送の容易性
評価	文献調査の対象となることを確認	概要調査地区選定に関する法定要件に対する適格性を評価	法定要件に対する適格性が確認された地区を対象に，必要に応じて相対比較を実施
情報	NUMO が指定する全国規模の文献	応募区域およびその周辺の地域を対象とする全国規模および地域規模の文献その他資料	

4.2.1.2　精密調査地区選定段階（概要調査の段階）

・本段階における事業目標	：精密調査地区選定
・安全確保にかかわる目標	：自然現象の著しい影響の回避 長期安全性確保の見通し 事業期間中の安全確保の見通し
・目標達成にかかわる要件	：精密調査地区選定上の考慮事項への適合性，安全審査基本指針（あるいは自主基準）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	：概要調査に関する法定報告書，概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書

(1)　実施事項

この段階における事業目標は「精密調査地区の選定」であるが，安全確保にかかわる目標としては,「自然現象の著しい影響の回避」,「長期安全性確保の見通し」,「事業期間中の安全確保の見通し」がある。これらの目標達成にかかわる要件としては,「精密調査地区選定上の考慮事項」,「安全審査基本指針（あるいは自主基準）への適合性」がある。これらの要件を考慮した上で，この段階の目標を達成するために，NUMO は以下の事項を実施する。

概要調査の実施に先立ち「概要調査計画書」を公表し，それに基づいて，地域全体の広域的な地質環境の情報を得ることを主たる目的として，トレンチ調査，物理探査，ボーリング調査などの概要調査を実施する。

概要調査の結果に基づき,「精密調査地区選定上の考慮事項」に示す断層活動，火成活動，隆起・侵食といった自然現象による著しい影響が回避できることを確認するとともに,「精密調査地区選定上の考慮事項」の中の上記以外の要件に基づいて，精密調査地区を選定する。

精密調査地区選定段階では，概要調査で取得した地質環境の情報を踏まえて概要調査地区選定段階で構築した地質環境モデルを更新し，精密調査地区を対象としたスケールの地質環境モデルを構築し，地質環境の長期変遷についても検討を行う。

更新された地質環境モデルに基づいて，地上・地下施設の基本レイアウトを設定し，人工バリアの工学的実現性確認，長期安全性に関する予備的な評価，事業期間中の安全性の検討を行う。安全性の確認に当たっては，複数のフェーズで段階的に実施する中で，三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認，処分場設計・施工などの適切な工学的対策，地層処分システムの長期安全性の評価）を相互に連携させながら，不確実性の低減をはかる。

さらに，処分施設建設地選定段階以降の技術開発や基盤研究開発への追加すべきニーズを取りまとめる。また，効率的に事業を進めるために，地質環境特性，安全性，経済性などの観点から総合的に判断した上で，処分場概念をレファレンス処分場概念として一つに絞り込む。この際に，この段階での不確実性を考慮し，一つに絞り込むことが適当でない場合には，複数の処分概念オプションを示すことも検討する。

事業期間中の安全性について，一般労働安全の確保，放射線安全の確保，周辺環境の保全という三つの分野に分けて検討を行うという点は，前段階の概要調査地区選定段階と同様であるが，前段階が文献情報のみに基づいた検討であったのに対し，この段階では，現地踏査，トレンチ調査，ボーリング調査などからより詳細なサイトの情報が得られているため，より現実的な評価が可能になると考えている。

上記の検討結果を踏まえ，「精密調査地区選定上の考慮事項」に基づいて精密調査地区を選定し，法律に基づく「概要調査に関する法定報告書」を作成するとともに，処分場の設計，長期安全性や事業期間中の安全性などの評価結果を含む「概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書」を取りまとめ公表する。

これらの報告書とその補充文書から成る文書群により，この段階のセーフティケースを構成し公表する。また，次段階に向けて，処分施設建設地選定上の考慮事項を作成して公表し，これに基づき精密調査計画の立案を行う。

次段階の後半に予定している地下調査施設の建設が，地質環境や周辺環境に擾乱を及ぼす可能性があることに配慮し，影響を受ける前の状態を把握するためのモニタリングを必要に応じて開始する。

この段階における実施事項をフロー図として示すと図 4.2.1-2のようになる。

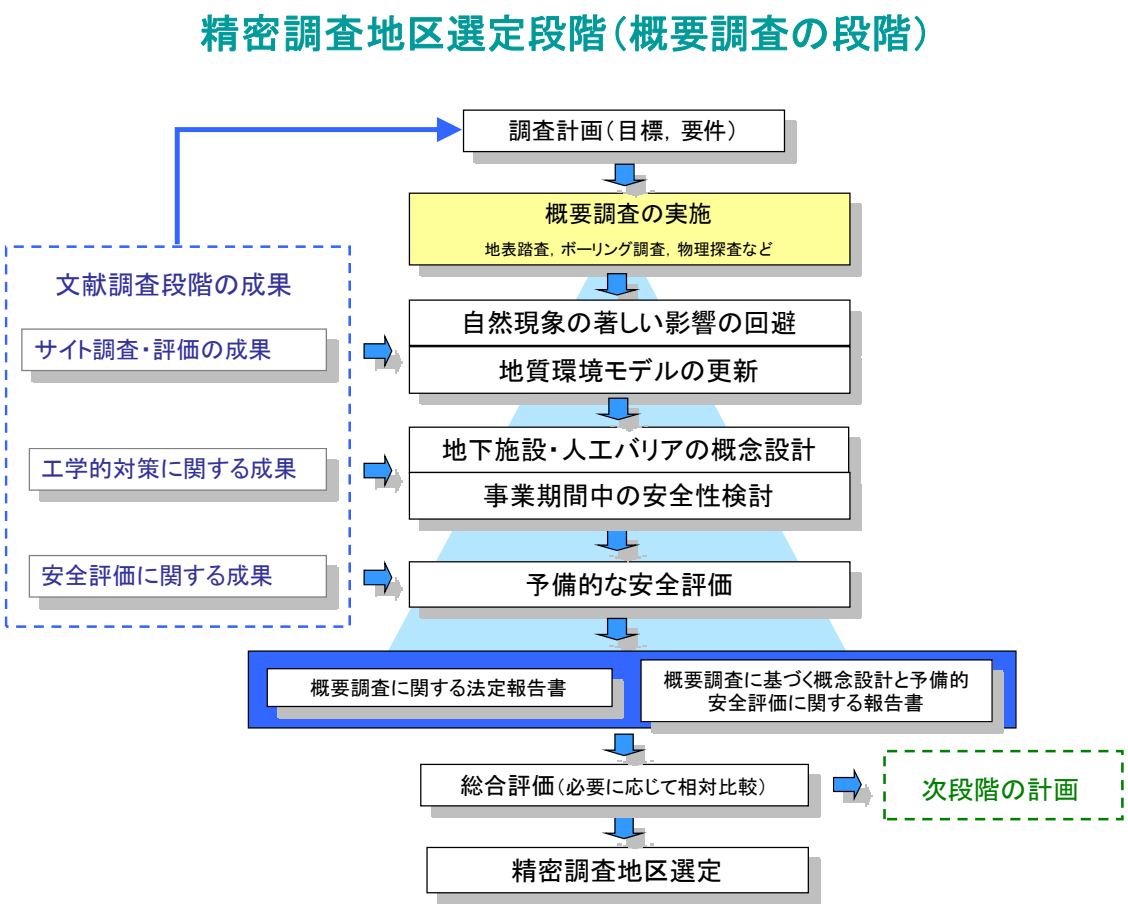


図 4.2.1-2 精密調査地区選定段階における実施フロー図

(2) 精密調査地区選定上の考慮事項について

NUMO は，調査地区選定上の考慮事項を，その選定段階の調査を開始する前に作成・公表することとしている。

精密調査地区選定の目的は，概要調査地区を対象として，概要調査（ボーリング調査，地表踏査，物理探査など）を実施し，その結果に基づき，地層処分を行おうとする地層およびその周辺の地層において，地震などの自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと，坑道の掘削に

支障がないこと，地下水の水流などが地下施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれることなどを確認し，これらを満足する概要調査地区の中から精密調査地区を選定することである。

精密調査地区選定段階については，サイト選定の中間段階に当たることから，「精密調査地区選定上の考慮事項」の策定に際しては，本段階に関して最終処分法に定められた選定要件をもとに，前段階（概要調査地区選定段階）の考慮事項への適格性などの確認，さらには次段階（処分施設建設地選定段階）の最終処分法に定められた考慮事項も踏まえて実施する必要がある。

本段階に関して最終処分法に定められた選定要件は次のとおりである。

- 当該対象地層などにおいて，地震などの自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと
- 当該対象地層などが坑道の掘削に支障のないものであること
- 当該対象地層など内に活断層，破砕帯または地下水の水流があるときは，これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること
- その他経済産業省令で定める事項

「精密調査地区選定上の考慮事項」についても，概要調査地区選定段階と同様に，「法定要件に関する事項」と「付加的に評価する事項」に分けられる。

「法定要件に関する事項」に関しては，上記の最終処分法に定められた選定要件を基本に，地層の安定性，坑道掘削の可能性，地下施設やバリア性能への影響の観点から，除外要件として設定することとなる。

この内，「地震などの自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと」については，概要調査地区内において，火成活動，断層活動，および隆起運動に伴う地層の著しい変動が生じていないことを確認するとともに，将来にわたり発生する可能の少ない地域から精密調査地区を選定する。

火山・火成活動に関しては，概要調査地区選定段階では，第四紀火山およびその影響範囲を除外することにより概要調査地区を選定するのに対して，本段階では，火成活動に伴う熱水噴出などの熱水対流，強酸性の地下水，あるいは地下に熱源の存在が推定されるような高い地温勾配などが認められる地域を含めないよう精密調査地区を選定するとともに，将来にわたり火成活動の影響を受ける可能性が小さい地域を選定するために，マグマに由来する成分（例えば He 同位体比）が地下水中に含まれていないことの確認などもあわせて検討する。

地震・断層活動に関しては，概要調査地区選定段階では，文献・資料に記載されている活断層およびその影響範囲を除外することにより概要調査地区を選定するのに対して，本段階では，概要調査地区内において文献・資料に記載されていない活断層の有無を確認するとともに，微小地震特性や地殻変動特性なども考慮することにより，将来にわたり活断層の発生する可能性が小さい地域を精密調査地区として選定する。

隆起・侵食に関しては，概要調査地区選定段階では，過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えている地域を除外することにより概要調査地区を選定するのに対して，本段階では，海水準変動に伴う侵食基準面の低下やそれに伴う地形変化，風化などを考慮しても，将来にわたり酸化的な雰囲気へ接近する可能性が小さい地域を精密調査地区として選定する。

また，「坑道の掘削に支障のないものであること」については，例えば，岩盤強度が著しく小さい地域，地圧（特に地山強度比）が著しく大きい地域，膨張性地山，大出水，ガス突出，泥火山に遭遇する可能性の高い地域など，現実的な工学的対策により地下施設の力学的安定性が確保できない

地域や坑道掘削作業を実施する上で必要となる安全的・技術的要件を確保できない地域は含めないように精密調査地区を選定する。

「活断層，破砕帯又は地下水の水流があるときは，これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること」については，例えば，ベントナイトの流出など，地層処分システムの長期健全性を確保できない地域は含めないように精密調査地区を選定する。

また，「除外要件」を満足する地区の中から精密調査地区としての特性を総合的に評価するために「付加的に評価する事項」を設定する。

「付加的に評価する事項」は，本段階の除外要件には該当しないものの，概要調査地区の中から，より好ましい精密調査地区を選定するに当たって考慮する事項や，処分施設建設地の選定段階や建設・操業・閉鎖の段階などに関して本段階で可能な範囲で見通しを得る事項である。基本的には，地質環境特性（地質・地質構造，地下水の流動特性，地下水・岩石の地化学特性，岩盤の熱・力学特性，岩盤中の物質移行特性など）および工学的特性（人工バリアの長期健全性，建設・操業時の安全性など），自然・社会環境特性（環境影響，土地確保，輸送，経済性など）などの観点から，総合的に評価することにより精密調査地区を選定する。

4.2.1.3　処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）

（i）　地上からの調査段階

・本段階における事業目標	：基本レイアウトの決定
・安全確保にかかわる目標	：自然現象の著しい影響の回避を確認 長期安全性の確保 事業期間中における安全性の確保
・目標達成にかかわる要件	：処分施設建設地選定上の考慮事項（法的要件＋付加的条件）への適合性，安全審査基本指針への適合性，自主基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	：精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書（経過報告），環境影響にかかわる評価報告書

(a)　実施概要

「処分施設建設地選定段階」は，「地上からの調査段階」と「地下調査施設での調査段階」の二つの段階に分けて実施する予定である。

「地上からの調査段階」における事業目標は，処分関連施設の基本レイアウトを決定することである。この基本レイアウトを基準として，地質環境の情報を得るために適した地下調査施設の配置や構成を検討・設定する。この段階の安全確保にかかわる目標は，自然現象の著しい影響の回避を確認，長期安全性の確実な確保，事業期間中における安全性の確実な確保の三つである。これらの目標を達成するために，要件として処分施設建設地選定上の考慮事項への適合性，安全審査基本指針への適合性，自主基準への適合性を満足する必要がある。これらの要件を考慮した上で，この段階の目標を達成するために，以下の事項を実施する。

まず，調査に先立ち「精密調査計画書」を公表し，それに基づき地下調査施設での調査の前段となる地上からの調査を実施する。地上からの調査は，前段階の概要調査によって得られた地質環境情報の確認，詳細化，特に，処分場建設候補地周辺の地下情報の取得を目的として実施する。

また，新たに取得された地質環境の情報に基づき地質環境モデルを更新し，それを踏まえて人工バリアや処分パネルのレイアウトなどの設計を見直し，廃棄体および人工バリア材の運搬・定置にかかわる再検討および長期安全性の評価を行って地層処分施設の基本レイアウトを決定する。それらの結果は，「精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書（経過報告）」として取りまとめ，関連する補充文書とあわせてこの段階のセーフティケースを示す。

あわせて，基本レイアウトに基づき，地下施設での調査や技術の実証などを目的に次段階で建設する地下調査施設の配置を決定し，精密調査計画（地下調査施設での調査）を立案する。

また，地下調査施設の建設に先立ち環境影響評価を行い，適切な環境保全策を講じる。それらの結果は「環境影響にかかわる評価報告書」として取りまとめる。

この段階における実施事項をフロー図として示すと図 4.2.1-3のようになる。

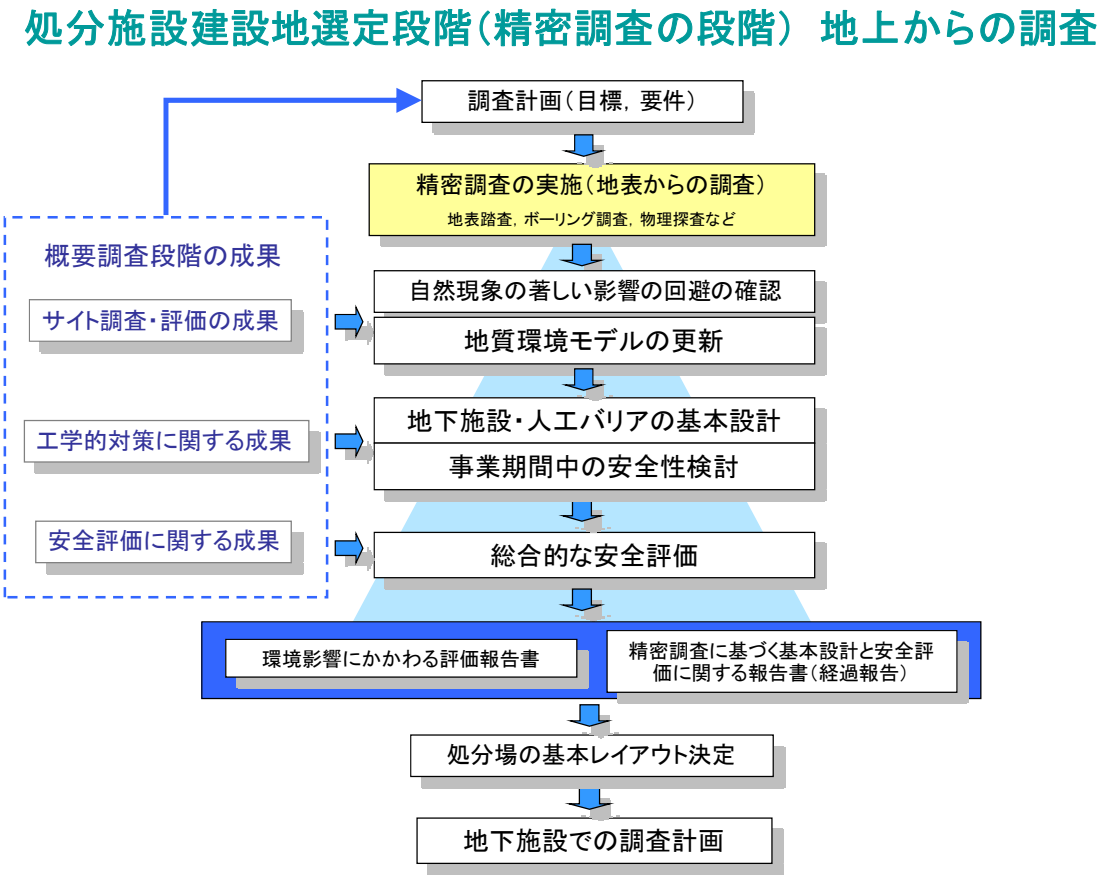


図 4.2.1-3 処分施設建設地選定段階（地上からの調査）における実施フロー図

（ii）地下調査施設での調査段階

・本段階における事業目標	：処分施設建設地選定
・安全確保にかかわる目標	：自然現象の著しい影響の回避を確認 長期安全性の確実な確保 事業期間中における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	：処分施設建設地選定上の考慮事項（法的要件＋付加的条件）への適合性，安全審査指針への適合性，自主基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	： 精密調査に関する法定報告書，精密調査に基づく基本設計と安全評価に関する報告書

(a) 実施概要

「処分施設建設地選定段階」の後半として実施する「地下調査施設での調査段階」における事業目標は，「処分施設建設地選定」である。

この段階の安全確保にかかわる目標は，自然現象の著しい影響の回避を確認，長期安全性の確実な確保，事業期間中における安全性の確実な確保である。これらの事業目標と安全確保にかかわる目標を達成するための要件は，処分施設建設地選定上の考慮事項（法的要件＋付加的条件）への適合性，安全審査指針への適合性，自主基準への適合性であり，これらの要件を考慮した上で，この段階の目標を達成するために，以下の事項を実施する。

この段階では，前段階の「①地上からの調査段階」で作成した「精密調査計画書」を改定し，地下施設での詳細な調査計画を記述し，対象としている母岩が地層処分に適していることを確認するために，対象母岩中まで坑道を掘削し，地下深部における岩盤の特性調査や原位置試験などを行う。また，三つの安全確保策（適切なサイト選定と確認，処分場の設計・施工などの適切な工学的対策，地層処分システムの長期安全性の評価）を相互に連携させながら，不確実性の影響を効率的に低減させ，閉鎖後長期の安全性にかかわる信頼性を向上させる。

地上・地下施設に関しては，基本設計を行い，人工バリアの仕様の決定，製造・施工の実証を行うとともに，地質環境モデルおよび基本設計に基づいて閉鎖後長期の安全評価を実施する。また，建設・操業段階の計画を立案し事業期間中の詳細な安全確保策の検討を行う。

さらに，地下調査施設などの一部を活用して，建設や操業にかかわる技術のうち地層処分に固有な主要技術については実証試験を行う。また，人工バリアやニアフィールドの長期的な性状変化の予測・評価に資するデータ取得を目的とした実証試験を開始する。また，周辺環境の保全に関しては，環境影響評価を実施し，必要に応じて保全策の策定を行う。

この段階における実施事項をフロー図として示すと図 4.2.1-4のようになる。

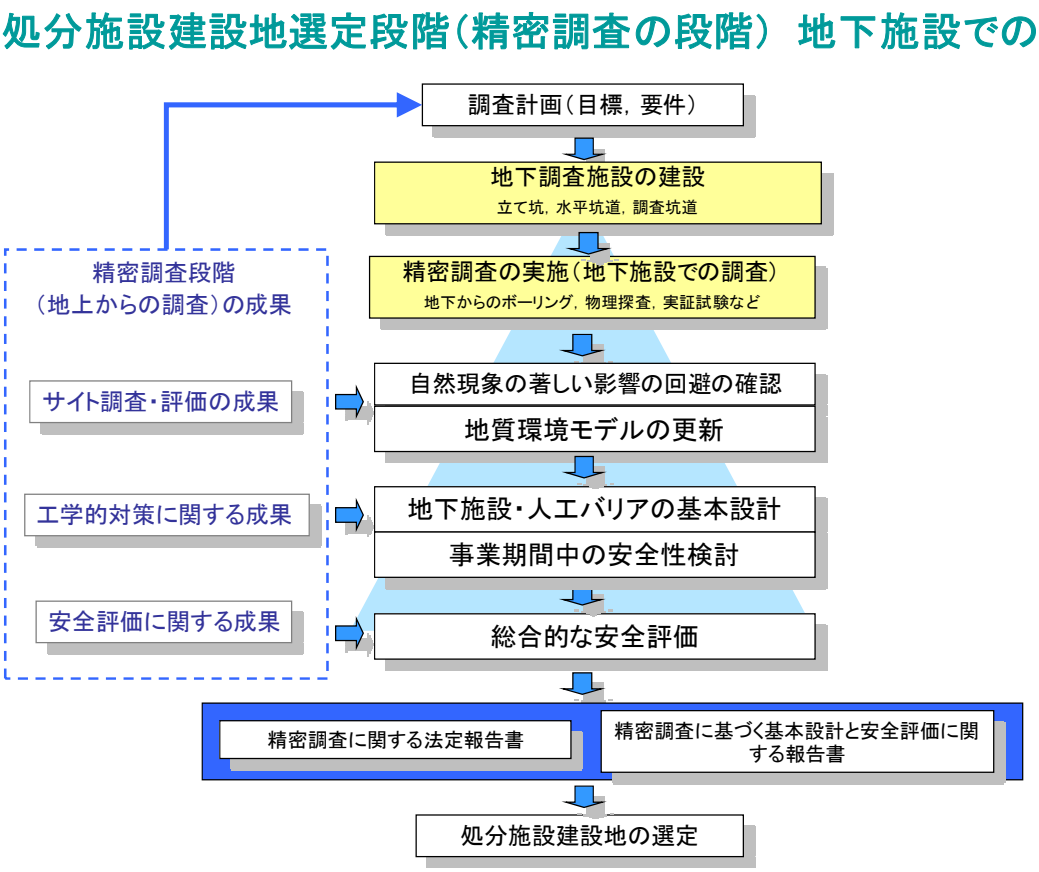


図 4.2.1-4 処分施設建設地選定段階（地下施設での調査）における実施フロー図

(b) 処分施設建設地選定上の考慮事項について

NUMO は，調査地区選定上の考慮事項（この段階では処分施設建設地選定上の考慮事項）は，その選定段階を開始する前に作成・公表することとしており，処分施設建設地選定上の考慮事項は処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）を開始する前に作成・公表する予定である。

処分施設建設地の選定の目的は，精密調査（地上からの調査および地下調査施設における調査）を実施し，その結果および前段階において取得した情報に基づき，地震などの自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないことを確認するとともに，地層処分システムの長期安全性が確実に確保される場所を処分施設建設地として選定することである。

処分施設建設地選定段階については，サイト選定の最終段階となることから，「処分施設建設地選定上の考慮事項」は，本段階に関して最終処分法に定められた選定要件はもとより，前段階（精密調査地区選定段階）の考慮事項への適格性などの確認，次段階の安全審査への準備を踏まえて策定する必要がある。

本段階に関して最終処分法に定められた選定要件は次のとおりである。

- 地下施設が当該対象地層内において異常な圧力を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の物理的性質が最終処分施設の設置に適していると見込まれること
- 地下施設が当該対象地層内において異常な腐食作用を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の化学的性質が最終処分施設の設置に適していると見込まれること
- 当該対象地層に地下水またはその水流が地下施設の機能に支障を及ぼすおそれがないと見込ま

れること
・ その他経済産業省令で定める事項

「処分施設建設地選定上の考慮事項」についても概要調査地区選定段階あるいは精密調査地区選定段階と同様に，「法定要件に関する事項」と「付加的に評価する事項」に分けられるが，「法定要件に関する事項」に関しては，上記の最終処分法に定められた選定要件を基本に，空洞安定性保持性能の確保，および地下施設やバリア性能への影響の観点から，除外要件として設定することとなる。

また，「除外要件」を満足する地区の中から処分施設建設地としての特性を総合的に評価するために「付加的に評価する事項」を設定する。「付加的に評価する事項」は，本段階の除外要件には該当しないものの，処分施設の設置位置を最終的に確定することとなることから，より好ましい処分施設位置を選定するに当たって考慮すべき事項や，安全審査に資する情報の取得，建設・操業・閉鎖の段階などに関して本段階で可能な範囲で見通しを得るべき事項である。

4.2.1.4 安全審査の段階

・本段階における事業目標	：事業許可の取得
・安全確保にかかわる目標	：自然現象の著しい影響の回避を確認 長期安全性の確実な確保 事業期間中の安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	：許可基準への適合性，安全審査指針への適合性（自然現象の著しい影響の回避の確認，長期安全性の確保，事業各段階における作業安全および一般公衆への安全性の確保）
・安全確保にかかわる主要文書	：事業許可申請書，環境影響評価書

この段階では，前の段階で作成した「事業許可申請書」を国へ提出し，事業許可を申請する。また，安全審査期間中においても，必要に応じて補足的な調査・評価を実施する。

また，処分場の建設・操業に伴う周辺環境への影響に関する調査や予測評価，処分場の建設，操業時における保全対策の策定などの環境影響評価を実施し，「環境影響評価書」を作成し公表する。あわせて，建設に向けた準備として設計および工事の方法の認可（以下，設工認という）の申請書などの作成も並行して進める。

4.2.2 建設～事業廃止までの段階

4.2.2.1 建設段階

・本段階における事業目標	：処分施設の建設
・安全確保にかかわる目標	：新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 建設段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	：技術上の基準への適合性（設工認，施設確認，使用前検査）
・安全確保にかかわる主要文書	：設工認申請書，施設確認申請書，使用前検査申請書，安全レビュー報告書

この段階では，NUMO は国から事業許可を受けた後，地層処分施設建設のための準備工事に着手

する。そして，特定廃棄物埋設施設は，随時設工認申請を行い，認可を受けた後，ガラス固化体受け入れ・一時保管施設などの地上施設，並行して，地下施設の建設に着手する。地上・地下施設の建設では，事業許可申請と，設工認申請において示した処分場設計に基づき，要求機能を満足するように品質を適切に管理しながら建設を進める。認可を受けたとおりに適切に建設が行われたことを，国による使用前検査を受検して確認する。

この段階では，建設中に取得する地質環境特性データ，各種のモニタリングデータなど，新たな情報が得られるため，これらの情報に基づき安全評価を行って処分場の安全性を再確認し，「安全レビュー報告書」として取りまとめ公表する。

また，これらの新たに得られた情報を用いて地質環境特性をより正確に地下施設設計に取り込むことにより，法律を遵守した上で，安全確保上の観点から必要に応じて処分坑道の位置や廃棄体の設置位置の変更を行う。また，操業技術・安全評価技術の高度化の観点から，地下調査施設で実証試験を必要に応じて実施する。

地上･地下施設の建設に際しては，原子力施設やトンネル･鉱山などの安全対策を参考として安全計画を立案し，国や地方自治体の承認を得た上で，それに従って建設を進める。

4.2.2.2　操業段階（操業期間中）

・本段階における事業目標	：操業の実施
・安全確保にかかわる目標	：新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 操業段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	：技術上の基準への適合性（施設確認，廃棄体確認，使用前検査）
・安全確保にかかわる主要文書	：施設確認申請書，廃棄体確認申請書，安全レビュー報告書

この段階では，ガラス固化体の受け入れ，オーバーパックへの封入，廃棄体の搬送，定置などが行われるため，各種基準や指針への適合性を確認するとともに，廃棄物受入施設などの性能，保安規定や核物質防護規定の遵守状況について国の定期的な検査を受ける。この段階においても，モニタリングを通じて得られる情報や新たな科学的知見を踏まえ，安全評価を行って処分場の安全性を再確認するとともに，定期的に「安全レビュー報告書」として取りまとめ公表する。

また，次段階の閉鎖について必要な技術の整備とその信頼性の向上をはかるために，閉鎖技術の実証試験を行うともに，精密調査段階以降から実施している人工バリアシステムの長期試験結果の取りまとめを行う。これらの情報も含め，この段階で得られる新たな情報や知見を加えてセーフティケースを更新し，「安全レビュー報告書」に反映する。

操業段階では，実際の放射性廃棄物を取り扱うため，一般労働安全とあわせて，放射線安全のための対策を確実に講じ，操業を安全に進める。地下施設の建設および操業は処分パネル単位で実施するため，隣り合うパネルで建設と操業が同時期に並行して実施される場合もあるが，放射性廃棄物を搬入・定置するパネルでは放射線管理区域として厳格な管理を行うなど，建設にかかわる輸送や作業と明確に区分する。

また，次段階に向けて，安全レビュー結果，各段階における繰り返しの安全確認結果，実証試験成果などに基づき総合的に安全性を評価し，閉鎖措置計画の検討を行う。

4.2.2.3　操業段階（操業の終了・閉鎖措置計画認可申請）

・本段階における事業目標	：閉鎖措置計画の認可
・安全確保にかかわる目標	：すべての情報を統合した長期安全性の提示
・目標達成にかかわる要件	：閉鎖措置計画の認可の基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	：閉鎖措置計画の認可申請書，安全レビュー報告書

この段階では，操業を終了し，サイト調査から操業終了までに得られたすべての情報に基づき安全評価を行ってセーフティケースを更新することで，閉鎖の意思決定のため安全性の確認を行い，「安全レビュー報告書」を作成する。

炉規法の規定によれば，処分場を閉鎖しようとする場合，NUMO は閉鎖措置計画を定め，経済産業大臣の認可を受けなければならないと規定されている。従って，NUMO は，「閉鎖措置計画の認可申請書」を作成し，国に申請して認可を受ける。

4.2.2.4　閉鎖段階

・本段階における事業目標	：閉鎖措置の実施
・安全確保にかかわる目標	：閉鎖段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	：閉鎖措置計画の認可の基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	：閉鎖措置の確認申請書

この段階では，炉規法の規定により，前の段階で認可された閉鎖措置計画に基づき，所要の品質を確保しつつ地下施設（連絡坑道やアクセス坑道など）を埋め戻し，処分場の閉鎖を行う。閉鎖措置が完了した時点で，実施状況や実施後の地形，地質，地下水の状況に関する事項を記載した「閉鎖措置の確認申請書」を作成し，経済産業大臣に申請を行い，確認を受けることと規定されている。なお，閉鎖まで，核物質の防護のための区域，廃棄体の回収可能性を維持する。

また最終処分法では，地層処分が終了したときは，あらかじめ処分施設の状況が定められた基準に適合していることが，経済産業大臣によって確認を受けなければならないと規定されている。閉鎖する場合，処分施設に関する記録は，NUMO から経済産業大臣に提出され，永久保存されることになっている。

この段階においても，一般労働安全とあわせて放射線安全のための対策を確実に講じることにより，閉鎖を安全に進める。あわせて環境保全にも努める。

炉規法や最終処分法に基づく手続きを実行する上で必要な閉鎖措置計画の認可基準は今後必要される時期までに具体化されるべき事項である。

4.2.2.5　閉鎖完了後～事業の廃止までの段階

・本段階における事業目標	：廃止措置の実施と確認
・安全確保にかかわる目標	：新たな知見を踏まえた長期安全性の確認 閉鎖後の段階における安全性の確実な確保
・目標達成にかかわる要件	：廃止措置計画の認可の基準への適合性，廃止措置の終了確認の基準への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	：廃止措置計画の認可申請書，安全レビュー報告書，廃止措置終了の確認申請書

この段階では，炉規法に基づき，事業の廃止措置に向けて，長期にわたり安全性が確保されることを総合的に評価することにより，セーフティケースを更新し，安全レビュー報告書を作成する。その上で，「廃止措置計画の認可申請書」の作成・申請・認可取得を行う。

認可された廃止措置計画に基づき，所要の品質を確保して地上施設の解体を行い，廃止措置を行う。また，その際，品質管理を適切に行い，それらを記録する。廃止措置が終了した時点で，「廃止措置終了の確認申請書」を作成し，国へ確認の申請を行い，廃止措置の確認を受けた段階で，当該事業は炉規法の対象からはずれる。

なお，NUMO は，閉鎖後の処分施設跡地の区域管理を行い，NUMO の解散（最終処分法では，別の法律で定めるとされている）によりその責任は完了することになる。このような区域管理の具体的内容については今後，社会的要請などを考慮して改めて判断する。

また，最終処分法によれば，処分施設の敷地およびその周辺を保護する必要がある場合には，NUMO からの申請を受けて，国はその区域を保護区域として指定することができる。保護区域内では，経済産業大臣の許可を受けない土地掘削は禁止される。現時点においては，NUMO 解散後の処分施設の扱いは明確になっていないが，NUMO としては，解散後の安全確保の妥当性を責任を持って証明し，国の確認を受けた後，国へ確実に管理業務を引き継ぐことが責務と考えている。

第５章

地質環境の調査・評価技術

第5章　目次

第5章 地質環境の調査・評価技術 5-1
5.1 わが国の地質環境の特徴と評価に対する考え方 5-1
5.1.1 自然現象の影響と将来予測 5-1
5.1.2 わが国の地質環境特性と多様な地質環境への対応 5-11
5.2 調査・評価の技術体系 5-16
5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方 5-16
5.2.2 自然現象の影響にかかわる調査・評価 5-23
5.2.3 地質環境特性にかかわる調査・評価 5-45
5.2.4 調査・評価業務を支援する技術 5-56
5.3 調査・評価技術の整備 5-67
5.3.1 調査・評価技術の進展 5-67
5.3.2 調査・評価技術の確認 5-106
5.3.3 課題と今後の技術開発 5-111
5.4 まとめ 5-117

第5章　地質環境の調査・評価技術

第 5 章では，第 3 章で示した安全確保に向けた NUMO の三つの方針に基づき実施する段階的な事業推進のうち，初期の概要調査地区および精密調査地区の選定段階を中心に，サイト選定のための地質環境の調査・評価の考え方と方法について述べる。このことを通じて，今後自治体からの応募があり次第，これらの調査・評価を実施するための準備が整っていることを示す。

5.1 では，わが国の地質環境の特徴を述べるとともに，火山・火成活動，地震・断層活動などの自然現象の将来予測や多様な地質環境への対応に関する基本的な考え方について述べる。5.2 では，サイト選定の初期段階である概要調査地区選定段階（文献調査の段階）および精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における自然現象の影響や地質環境特性にかかわる体系的な調査・評価の考え方や進め方について述べるとともに，各段階においてサイト選定作業を円滑かつ確実に遂行するための技術について述べる。5.3 では，5.2 の体系的な調査・評価において適用される調査・評価技術の整備状況を整理するとともに，技術的課題や今後の技術開発計画について述べる。5.4 では，本章のまとめを示す。

5.1　わが国の地質環境の特徴と評価に対する考え方

わが国は変動帯に位置していることから，地層処分システムを成立させるための前提条件として，将来にわたり火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避できる場所の中から処分施設建設地を選定する必要がある。そのため，サイト選定の初期段階に，応募区域周辺で生じている自然現象の過去の変動傾向などから将来の挙動を予測し，将来にわたりそれらの著しい影響を回避できる見通しを得ることが必要である。その上で，地層処分システムの場となる地質環境特性を把握するとともに，それらの長期的な変遷を理解することにより，以下にあげるような閉鎖後長期の安全確保にとって好ましい条件を有する場所を処分施設建設地として選定する（NUMO，2010a）。

- 坑道掘削や人工バリアの構築など，工学的対策にとって好ましい条件（力学的安定性，施設を通過する地下水流量が小さいなど）
- 人工バリアや天然バリアの核種の移行抑制など，地層処分システムの閉鎖後長期安全性にとって好ましい条件（還元性，地下水流速が遅い，移行距離が長い，擾乱に対する緩衝能力（回復力）を有するなど）

ここでは，サイト選定において調査・評価の対象となる，わが国の自然現象の特徴とその将来予測，そして多様な地質環境への対応に関する考え方について述べる。

5.1.1　自然現象の影響と将来予測

地質環境に著しい影響を及ぼす自然現象に関する情報は，サイト選定における意思決定（自然現象による著しい影響の回避）に対して重要な情報となるとともに，地質環境の擾乱を考慮に入れた地質環境の長期変遷や安全評価シナリオを検討する際の基礎情報となる。以下に，地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象とその特徴，および将来予測の考え方について述べる。

5.1.1.1　地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象とその特徴

日本列島は，アジア大陸の東縁部に沿って北東－南西方向に長く伸びる弧状列島であり，太平洋を取り巻く変動帯の中にある。また，ユーラシアプレート，北米プレート，太平洋プレートおよび

フィリピン海プレートといった，二つの大陸プレートと，二つの海洋プレートの会合部に位置している（中村，1983；小林，1983）。これらのプレートの運動，さらにはそれらのプレート間の相互作用に起因して，火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・沈降運動などが生じている。

また，わが国は，中緯度で比較的温暖な地域に位置し，周囲を太平洋や日本海などの海に囲まれた島国であることから，地球規模の周期的な気候・海水準変動に伴い，海水準に対する相対的な隆起・沈降，侵食基準面の相対的な変化が生じるとともに，気温や降水量などの変化により，地下水の流動状況の変化などといった水文環境に対する影響が生じている（図 5.1.1-1）。

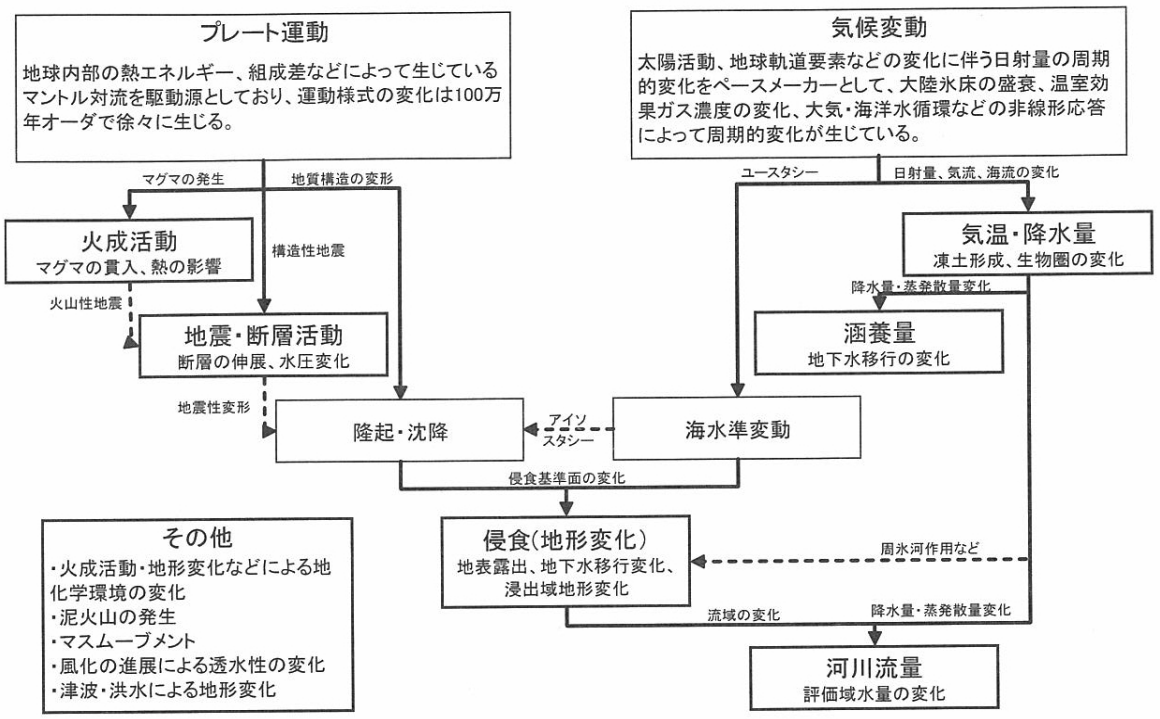


図 5.1.1-1 自然現象と地質環境への影響の関係（出典：土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会編，2007）

地層処分システムの長期変遷にかかわる現象は，大きく地球の内部エネルギーによるプレート運動などと，太陽活動や地球軌道要素などの周期的変化を主な要因とする気候変動のいずれか，あるいはその両方を起因として生じている。

地層処分システムが長期の安全性を有するためには，地質環境に著しい影響を及ぼす自然現象により，地層処分システムの性能が長期にわたって著しく損なわれることがないサイトを選定することが重要である。さらに，想定される変化（地層処分システムとして許容できる変化の範囲）を考慮し，適切な工学的対策（人工バリアや処分施設の設計・施工）を施すことと，地層処分システムにとって好ましい地質環境を有するサイトを選定することが重要である。このような観点のもと，地層処分事業において，わが国で考慮すべき地質環境に著しい影響を及ぼす自然現象としては，①火山・火成活動，②地震・断層活動，③隆起（運動）・侵食（作用）が考えられる（表 5.1.1-1）。

火山・火成活動は地下深部からのマグマの貫入・噴出やそれに伴い熱・熱水の放出などが生じる急激かつ局所的な現象である。火山・火成活動が地層処分システムに及ぼす影響として，マグマの貫入・噴出による処分施設の直接的破壊，熱・熱水の放出による天然バリアへの水理学的・地球化

学的影響などが考えられる。これらの影響は，放射性核種の地表への放出や地層処分システムの多重バリアの性能を低下させる可能性があるため，火山・火成活動による著しい影響を回避しなければならない。

地震とは，地殻内に蓄積されたひずみエネルギーが岩盤の破壊強度を超えたとき，岩盤を構成する岩石の一部に破壊（断層運動）が生じ，ひずみエネルギーを一気に解放するとともに，そこから地震波（実体波，表面波など）が発生する現象である（宇津，1984；加藤，1989 など）。断層運動が地層処分システムに及ぼす影響として，岩盤の破断･破砕に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊，周辺岩盤の破断・破砕・変位に伴う力学的・水理学的変化などが考えられる。これらの影響は，放射性核種が地下施設から漏出し地表付近の帯水層への移行が加速されることや地層処分システムの多重バリアの性能を低下させる可能性があるため，地震・断層活動による著しい影響を回避しなければならない。

表 5.1.1-1 わが国で考慮すべき自然現象と地層処分システムに及ぼす影響とその取り扱い

自然現象	地層処分システムに及ぼす影響	影響の程度	サイト選定における取り扱い
火山・火成活動	・マグマの貫入･噴出による処分施設の直接的破壊	・放射性核種の地表への放出の可能性がある	・既存情報や現地における調査･評価において，第四紀の火山･火成活動の痕跡が認められる場所や，過去の火山・火成活動の傾向･規則性から，将来火山・火成活動が生じると明確に判断される場所は，回避する。
	・熱･熱水の放出による天然バリアへの水理学的･地化学的変化	・地層処分システムの性能低下などの大きな影響を及ぼす可能性がある	
地震・断層活動	・地震動による地下施設の破壊	・既往の観測事例では，地表に比べて小さく，極めて大きな地震動の発生は考えづらい	・既存情報および実測データに基づいて，耐震設計による対処が可能であることなどを評価･確認する。
	・地震時の地下水圧の変化などに伴う一時的な周辺岩盤の水理学的変化	・数週間～数ヵ月後には元の状態に回復する観測事例があり，地下水流動に対して恒常的な影響を及ぼさないと考えられる	・既存情報および実測データに基づいて，その発生と影響について検討する
	・岩盤の破断･破砕に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊	・新たに形成される断層破砕帯を経路として，放射性核種が地下施設から漏出し，地表付近の帯水層への移行が加速される可能性がある	・既存情報や現地における調査･評価において，活断層などの存在が明らかな場所は，回避する
	・破断･破砕･変位に伴う周辺岩盤の力学的･水理学的変化	・地層処分システムの性能低下などの大きな影響を及ぼす可能性がある	
隆起・侵食	・処分施設の地表への接近，ならびにそれに伴う地下水流動および地化学条件の変化	・処分深度に対して隆起量，侵食量が大きい場合，大きな影響を及ぼす可能性がある	・著しい隆起が生じる地域では隆起量に応じた侵食が生じる可能性があり，地層処分システムに及ぼす影響は大きいことから，隆起が著しい場所は回避する

〔土木学会原子力土木委員会地下環境部会編（2001；2006），NUMO（2004）を参考に作成〕

隆起・侵食は，緩慢かつ広域的で，地表に生じている普遍的な現象であり，その変動量が長期間にわたり累積する。このため，著しい隆起・侵食が生じる地域では，地下施設の地表への接近や，それに伴う地下水流動や地球化学的条件の大きな変化が予測されることから，そのような地域はサイト選定において回避しなければならない（図 5.1.1-2）。一方，小規模な隆起・侵食については，過去の隆起・侵食の規模や傾向などに基づき，将来における隆起・侵食による影響について検討・評価を行い，必要に応じて適切な工学的対策（例えば，地下施設の配置（深度，水平位置））によりその影響を低減することが可能であるか検討していく。

地質環境に著しい影響を及ぼす可能性のある自然現象について，JNC は，過去から現在までの自然現象の活動履歴に関する情報の整備，各自然現象の規則性や傾向（周期性，継続性，地域性，変動範囲など）の把握，それらに基づく将来における活動の場，変動の規模や地質環境への影響など

について検討を行い，次のように取りまとめた（JNC，1999a；同，1999b）。

- 自然現象の種類や地域によって得られる情報の量や精度に違いはあるものの，おおむね過去数十万年まで遡って，活動の場所や変動の規模を追跡することができた。
- 自然現象によっては，過去数百万年における活動の特徴や傾向を推定することができた。
- これらの結果に基づき，10万年程度の将来にわたって，自然現象の活動やその影響が十分に小さいと期待できる場所を見出すことができるとの見通しを得た。

2000 年以降，これらの自然現象については，技術的な信頼性を向上させるための検討，調査・評価の実施に向けて技術の高度化・体系化に関する検討（例えば，JAEA，2010；木方ほか，2010）が進められ，知見が蓄積されている。

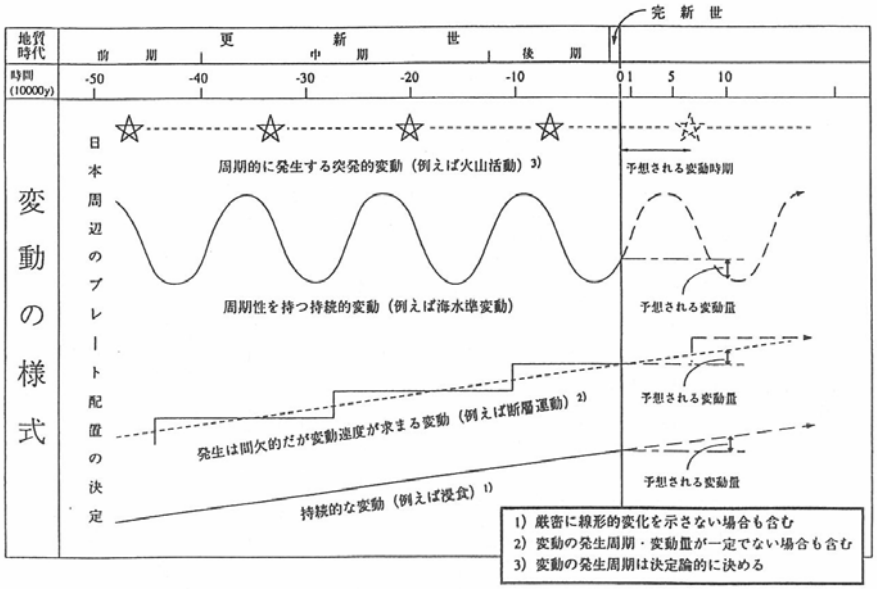


図 5.1.1-2 自然現象の変動様式（出典：田中・千木良，1997）

将来の自然現象については，過去から現在までの変動を検討し，その中から周期性，法則性，地域性などを見出すことにより過去の現象を将来へ外挿することが可能となる。この場合，変動の背景となるテクトニクス（例えば，プレートの運動など）の傾向が継続すると考えられる期間などの検討が重要である。

前述した自然現象のほか，地層処分システムに影響を及ぼす自然現象として，気候・海水準変動が挙げられる。気候・海水準変動については，氷河末端のモレーンや河成段丘などの地形に残された記録，海底・湖底堆積物や氷床のボーリングコアなどから取得された酸素同位体などの古気候指標に関する研究の成果（例えば，Emiliani，1955；小林・坂口，1982）により，過去数十万年の間，氷期（低海面期）と間氷期（高海面期）が周期的に繰り返していることが明らかにされている。気候・海水準変動が生じると，気温，降水量，蒸発散量，海水準などが変化し，涵養量，表流水の流量なども変化する。そのため，地下水流動状況，地下水の水質，侵食速度などに対して影響が及ぶことになる。これらの影響は，その要因である汎世界的な気候・海水準変動の周期的な繰り返しによるものであり，回避できない。しかし，過去の気候・海水準変動にかかわる記録に基づき，将来の気候・海水準変動の規模やその周期性を予測し，地質環境の好ましい特性が長期的に維持されうることを評価する。さらに，設計・施工での対応（例えば，処分施設の平面的な位置，深度など）や地層処分システム全体の安全性能（例えば，地下水流動や地下水化学特性などの変化を考慮した

隔離機能の確保）との関連を踏まえて検討し，対処する。なお，近年の地球温暖化が，将来の気候・海水準変動に及ぼす影響についても，国内外における研究動向を踏まえ検討する。

5.1.1.2 本論における自然現象の将来予測の考え方

(1) 地層処分事業における将来予測に関する動向

地層処分事業における将来予測については，これまで，原子力委員会バックエンド対策専門部会や土木学会原子力土木委員会地下環境部会編において，次のような考え方が示されている（原子力委員会バックエンド対策専門部会，1997；土木学会原子力土木委員会地下環境部会編，2001；同，2006)。「過去数十万年程度の地質学的記録のデータは比較的豊富であり，今後も現在と同様な造構応力状態が続き，それが長期的にみて変化しないならば，外挿法により過去数十万年程度の地質学的記録を基に，将来 10 万年程度の推論は可能である」とされた。このような背景のもと，地層処分事業においては，地質環境の長期的な変遷の要因となる自然現象の将来予測期間を将来 10 万年程度と想定し，検討を進めてきた。

これに対して，近年，原子力安全委員会において，放射性廃棄物の処分に関して安全基準や安全評価の考え方などの検討が進められた。「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方」（原子力安全委員会，2010）では，「放射性廃棄物の安全評価に際し数万年から数十万年の長期シナリオ評価を行うことが必要である」とされた。このため，安全評価の評価対象となる自然現象（火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食，気候・海水準変動）に対して，各自然現象の時間的変遷を十分に考慮したシナリオを設定することが求められている。

将来 10 万年より先の将来予測については，産総研深部地質環境研究センター編 (2007) において，「地質および気候関連事象の超長期予測でも，評価対象地域で過去に起きた地質学的な事象の履歴を明らかにし，これを将来に外挿することが基本となり，将来 10～100 万年間に外挿するのであれば，これと同じかこれ以上の過去にまで遡る必要がある」との考え方が示されている。

これらのことを踏まえ，自然現象の将来予測にかかわる NUMO としての考え方について，以下に整理する。

(2) 将来予測の基本スタンス

将来の自然現象の予測精度と予測可能期間は，事象や地域によって異なるものと考えられる。このため，事象および地域ごとに，過去の情報の量，精度さらには地質構造発達過程を考慮し，予測に用いる仮定を明らかにした上で，予測期間とその精度を設定し，将来予測を行う。

(3) 将来予測の方法論

地質環境の長期変遷の要因となる自然現象の将来を予測する方法は，①外挿による方法，②類推による方法，③現象論的モデルなどを用いた数値解析による方法，④確率論による方法の四つに大別される（例えば，田中・千木良，1997)。

外挿による方法（以下，「外挿法」という）は，過去から現在までに発生した変動の傾向を明らかにし，その傾向を将来へ外挿する方法であり，時間的な変動特性の外挿（継続性，周期性など），空間的な変動特性の外挿（収れん，移動，空白域など）を組み合わせる必要がある。類推による方法は，予測しようとする現象と類似の事例を検討することにより現象の一般化を図り，その類推から将来の変動・変化を予測する方法である。現象論的モデルによる方法は，現象のメカニズムを解釈

するための概念モデルを構築し，その概念モデルに基づき現象を複数のパラメータでモデル化し，数値解析により将来を予測する方法である。確率論による方法は，地殻変動の発生の可能性を数量的に見積もり，発生確率を求める方法である。

自然現象の将来予測を行う場合，これら四つの方法のうち外挿法が最も一般的な方法であるとされており（例えば，田中，2004），地層処分事業における自然現象の将来予測においても，外挿法を基本とする。ただし，上述した四つの将来予測の方法については，必要に応じて補完的に組み合わせる。

(4) 外挿法による将来予測の考え方

外挿法による将来予測では，まず，自然現象の過去から現在までの変動を明らかにすることが必要である。一般に，過去から現在までの変動の解明は，次に示す①～④の順序に従って検討される（図 5.1.1-3）。

① 過去から現在までの状態の把握・・・・・隆起量の分布など
② 変動の傾向（法則性）の把握・・・・・・等速運動，規則的な加速・減速およびその分布
③ 変動を引き起こすメカニズムの解明・・・断層運動，褶曲運動など
④ メカニズムの動力となる外部要因・・・・プレート運動など

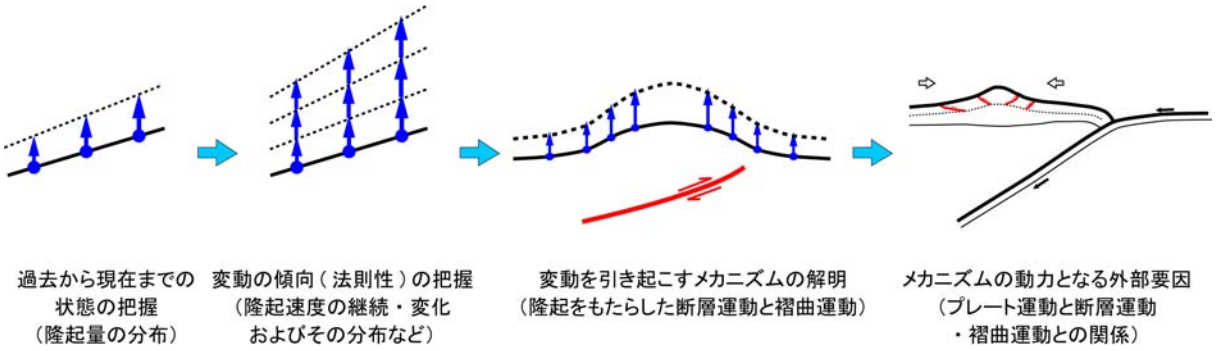


図 5.1.1-3 過去から現在までの変動の解明の基本的な流れ（隆起運動の例）

外挿法により将来発生する自然現象の予測を行う場合，基本的にこの順序を逆にたどって検討することとなる。ただし，②と④との関係，すなわち，変動の傾向と，プレート運動などの継続性の関係（経験則）に基づいて議論されることもある。

一般に，自然現象の将来を予測するためには，何らかの仮定が必要である。その本質は，「自然現象には何らかの秩序があり，同様の条件のもとでは，同様の現象が生じる」という考え方であり，これは斉一説と言われている（Lyell，1830 など）。上記の検討順序で言えば，②～④のいずれかの段階で斉一説に基づく仮定をおくことが将来予測には必要となる。例えば，②から予測をはじめる場合には，メカニズムの特定はできないが法則性が将来も続くことが仮定となる。③の場合における仮定は，現在生じている変動のメカニズムが将来も継続することである。④の場合は，変動のメカニズムを継続させる外的要因が不変であることが仮定となる。ここで重要な点は，できるだけ確からしい仮定を用いることである。

変動傾向に対して，そのメカニズムを明らかにできれば，法則性自体の妥当性を検証することが可能となる。また，③と④の関係を明らかにすることは，以下に述べるように，外挿法による将来予測が可能な期間を検討する際に重要である。

ただし，実際の文献調査ならびに概要調査では，検討すべきすべての事象のメカニズムやその動力となる外部要因まで，必ず把握できるものではない。将来予測の出発点が②～④のいずれになるかは地域性があり，また，議論の出発点も場合場合で異なるので，NUMO は，議論の出発点を明確にした上で，将来予測を行う。

なお，各自然現象の将来予測において導入する具体的な仮定については，5.2.2 において述べる。

(5) 過去の自然現象の履歴の把握

できるだけ長い過去の期間の自然現象（運動）の履歴を把握することが，外挿法の不確実性を低減させることを前述した。過去の履歴を把握するための調査・評価手法は，測地学的手法，地形学的手法，地質学的手法に大別される。各手法における将来の予測が可能な期間は，利用する現象の時間スケールに依存し，大局的に予測期間が短い順に，測地学的手法，地形学的手法，地質学的手法となる。従って，より長期間の運動を把握するためには，必然的に地質学的手法の果たす役割が大きく，10 万年程度を超える長期間の運動の法則性や地質構造発達過程を把握する際には，10 万年オーダーと 100 万年オーダーの運動の関係（地形学的手法と地質学的手法の連携）に留意する。

なお，各自然現象の具体的な調査・評価については，5.2.2 において述べる。

(6) 外挿法による将来予測が可能な期間の考え方

外挿法による将来予測の確からしさは，外挿に用いる過去から現在までのデータの品質と量に依存する。一般に，予測期間に対して十分に長い期間にわたって外挿の根拠となるデータがある場合，さらには，データ量が多い場合には，将来予測に含まれる不確実性は小さく，逆に，予測期間に対して取得されているデータの期間が短く，データが少ない場合には，将来予測に含まれる不確実性が大きいと考えられている。

外挿法による将来予測が可能な期間の考え方は，運動の法則性やメカニズムの継続性を仮定するか，運動のメカニズムの動力となる外部要因の継続性を仮定するかにより異なる。運動の法則性やメカニズムの継続性を仮定する場合，どの程度の期間のデータに対して，どの程度の将来の予測が可能かという時間スケールについては明確に定めることが難しく，取得データに基づき判断することが重要となる。現状としては，将来予測が可能な期間として，将来 10 万年程度が比較的多くの専門家の間で合意が得られている（JNC，1999a；土木学会原子力土木委員会地下環境部会編，2001；同，2006 など）。一方，運動のメカニズムとそれを引き起こした外部要因の関係に基づき，外部要因の将来の継続性を仮定した場合，将来予測が可能な期間が外部要因の継続する期間に置き換わる。

例えば，外部要因として太平洋プレートの運動を考えた場合，その運動の継続性が仮定として認められれば，仮定した太平洋プレートの運動の継続期間に応じた 10 万年程度よりも長い期間の将来予測も可能であると考えられる。JNC の東北日本弧の検討例では，東北日本弧の南北方向の軸をもつ隆起帯と沈降帯の配列を太平洋プレートからの圧縮応力による上部地殻の座屈褶曲によるものとし，プレートの運動が大きく変化しない限り，隆起・沈降帯の分布は現在と大きく変化せず，褶曲と逆断層による山地の隆起と盆地の沈降が継続するとした。この将来予測の例に当てはめれば，メカニズムの動力となる外部要因（上記(4)の④）であるプレート運動の継続性から検討されており，

その継続性を仮定できる時間が，外挿可能な期間と考えられる（JNC，1999b）。

運動の法則性または変動のメカニズム，または，メカニズムの外的要因の継続性を仮定する際，過去から現在までの運動に関するデータが取得される期間は地域により異なる点にも留意し，将来予測が可能な期間を調査データに基づき検討する。なお，安全評価シナリオの区分および時間枠を設定するには，自然現象の将来予測可能な期間を考慮する必要がある。シナリオ構築については，「第7章　地層処分システムの長期安全性評価技術」で述べる。

(7)　テクトニクスの継続性と将来予測期間

前述したように，運動のメカニズムとプレート運動の継続性とを結び付けることができれば，将来予測が可能な期間は，プレート運動の継続時間として捉えることができる。プレート運動の継続性については，NUMOにおいて取りまとめており，ここでは，その知見に基づいて，プレート運動の継続性に対する考え方を整理する（NUMO，2004）。

日本列島周辺では，30Ma頃から生じたアジア大陸東縁部での背弧海盆の形成がほぼ15Maに終了し（Jolivet *et al.*，1994），15Maから14Maにかけて日本列島周辺のプレートシステムの基本的枠組みが定まり，現在に至っている。また，日本列島周辺の海洋プレートの運動方向については，太平洋プレートが約2.5Ma以降，フィリピン海プレートが約1.5Ma以降変化がなく，現在に至っている。このように，日本列島周辺のプレート運動の変化（プレートの運動方向・運動速度，プレートの沈込み角度など）をみると，日本海，千島海盆，四国海盆の拡大などは15Ma頃に終了した後，現在に至るまで大きな変化はなく，ほぼ定常状態に達していると判断される（Jolivet *et al.*，1994；Kimura and Tamaki，1986；Okino *et al.*，1998）。日本列島における造構応力状態については，地域性があるが，少なくとも過去数十万年間以上にわたって，東西方向の圧縮状態で特徴付けられる地殻変動が継続していると考えられる。

例えば，太平洋プレートの運動に関しては，運動の規模が大きく，100 万年程度の将来にわたって大きな変化はないと考えられている。従って，太平洋プレートの運動の100万年程度の継続性を仮定することは十分に受け入れられと考えられる。これを（6）で取り上げたJNCの東北日本弧の検討例（JNC，1999b）に当てはめるならば，数十万年～百万年の遠い将来における予測の不確実性は大きくなるかもしれないが，評価対象とする事象にかかわる変動（地史）と，変動の駆動力となるプレート運動の関連性にかかわるデータに基づいて，100 万年程度の将来予測の議論は可能と言える。

このように，プレート運動の一様性を将来予測の仮定とし，その継続時間を予測期間に置き換える場合には，地域レベルでの地質構造発達過程を解明し，プレート運動との関連を把握することが必須である。NUMOは，地域性，さらには，データの品質・量により，外挿法により予測が可能な期間に差異がある点に留意して，将来予測期間を設定する

(8)　外挿法が適用できない場合の評価

(i)　プレート運動の一様性が仮定できない地域の評価

わが国には，海底の拡大，小陸塊の衝突やそれに伴うプレート境界の移動などにより，現在もテクトニクスが変化している可能性がある地域が存在する（日本海東縁部，新潟－神戸ひずみ集中帯，中央構造線沿い，伊豆半島の一部および伊豆－小笠原背弧リフト帯周辺，沖縄トラフなど）。これらの地域については，将来予測に関してより慎重な検討が必要である（NUMO，2004）。

なお，プレート運動が変化している地域であっても，当該事象の変化そのものの法則性やメカニズムを把握できるならば，その法則性やメカニズムの進行を仮定した現象論としての将来予測は原理的に可能である。しかしながら，予測期間を設定することは困難である。

（ii） 外挿自体ができない将来の評価

全く外挿し得ない将来については，現在の状態から移り変わるであろう次の状態（プレート運動の変化，広域応力場の変化など）を仮定し，そのような状態にあるほかの地域で起こっている自然現象を参考に，推定した状態に対して発生する可能性がある自然現象を想定することが考えられる。

(9) 将来予測の時間スケール

将来予測の時間スケールの設定では，まず，予測可能性と不確実性を整理することが重要である。この観点から，予測期間を定性的に以下の三つの期間に区分できると考えられる（表 5.1.1-2）。

期間Ａ：過去～現在のデータが充分にあり、外挿法などによる将来予測が可能な期間。外挿法では，予測期間に対して十分長い期間の地形地質情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に基づき将来を予測する。過去の変動傾向について，複数の仮説があったとしても，その差が小さいと判断できる。

期間Ｂ：不確実性は大きくなるが、外挿法などにより将来予測が可能な期間。外挿法では，外挿を否定する積極的なデータがないことを前提に，予測期間よりも短い過去の期間の地形地質情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に基づき将来を予測する。過去～現在のデータが少ない、あるいはバラツキがあることなどに起因し、過去の変動傾向について複数の仮説が考えられ，それらの間の差を考慮する。

期間Ｃ：外挿法による将来予測が難しい期間。過去～現在のデータからでは変化傾向が得られないか、または，過去～現在の変化傾向，その要因が継続するのかどうかがわからないか，継続しないことが想定される。

基本的には，前項までに提示したような考え方に沿った検討を行い，事象ならびに地域性を考慮して，各期間に対して具体的な年代を与え，将来予測の不確実性にかかわる情報を安全評価シナリオ構築において活用する。

表 5.1.1-2 サイト調査・評価からみた自然現象の将来予測期間の区分の考え方の整理

将来予測期間の定性的な区分		期間A	期間B	期間C
		過去～現在のデータが充分にあり、外挿法などによる将来予測が可能な期間。	不確実性は大きくなるが、外挿法などにより将来予測が可能な期間。	外挿法による将来予測が難しい期間。
将来予測の基本的考え方		外挿法では，予測期間に対して十分長い期間の地形・地質情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に基づき将来を予測する。過去の変動傾向について，複数の仮説があったとしても，その差が小さいと判断できる。	外挿法では，外挿を否定する積極的なデータがないことを前提に，予測期間よりも短い過去の期間の地形地質情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に基づき将来を予測する。過去～現在のデータが少ない、あるいはバラツキがあることなどに起因し、過去の変動傾向について複数の仮説が考えられ，それらの間の差を考慮する。	プレート運動の変化の可能性が見込まれるなど，変動傾向の変化の可能性が否定できない，あるいは，変動傾向そのものが得られないことに起因し，将来予測の不確実性が著しく大きくなる期間。傾向が変化した後の状態を想定し，その状態で生じうる事象を考慮する。
具体的な予測期間に関する専門家の合意または合意の可能性	法則性からの予測	法則性が見出される期間の長さに依存すると考えられるが，将来10万年程度まで予測できるとの合意がある。ただし，評価事項により異なること，予測可能期間の地域性があることが定性的には認識されている。		最も至近では，将来10万年程度よりも先を指すと考える場合がある。
	メカニズムからの予測	メカニズムの継続性が見出される期間の長さに依存すると考えられるが，少なくとも，将来10万年程度まで予測できるとの専門家の合意形成がなされている。ただし，評価事項により異なること，予測可能期間の地域性があることが定性的には認識されている。		
	駆動力と関連付けられたメカニズムからの予測	プレート運動といった駆動力との直接的な関係を示すことにより，予測可能期間を駆動力の継続時間に置き換えることができ，駆動力の継続時間を前提として，将来10万年より長い期間の予測に合意が得られる可能性がある。		
将来予測におけるパラメータ設定の不確実性（相対評価）		小	中	大
		本来的な現象のばらつき，調査時の観測誤差がある。	殆どの場合，予測の根拠となる地形地質情報が得られている期間が予測期間よりも短いために，変動傾向に関する理解・知識の不完全さが生じ，不確実性が大きくなる。このため，変動様式にかかわる複数の仮説をカバーするために生じる不確実性がある。これに，本来的な現象のばらつき，観測誤差を併せて考える。	変動傾向・様式にかかわる仮説の中で，最も保守的なケースを考える。
具体的な不確実性の例	火山・火成活動	火山分布の境界の不確実性，火山フロントの位置の経時変化・ふらつきなど		新たな火道の発生
	地震・断層活動	位置，三次元構造，活動性，変形帯の範囲，分岐，進展など		活断層ではない既存の断層の再活動，断層の新生
	隆起・沈降運動	隆起量の見積もりにかかわる誤差（段丘対比・編年の誤り，段丘比高計測の誤差など）	左記に加え，運動様式による違い	隆起・沈降傾向・様式の急激な変化

5.1.2 わが国の地質環境特性と多様な地質環境への対応

地層処分における地質環境の役割としては，人工バリアにとって適切な設置環境を提供するとともに，それ自体が天然バリアとして機能すること，それらが長期的に維持されることが求められる。これにかかわる地質環境の特性としては，地質・地質構造，地下水の流動特性や地化学特性，岩盤の熱特性や力学特性，物質移行特性が挙げられる。

JNC では，地球科学や土木工学などの分野に蓄積された地質環境特性に関する情報を整理・分析し，東濃地域や釜石鉱山での研究で得られた実測データと比較・検討することで，地層処分にとって重要な岩盤や地下水などの一般的な性質について，次のように取りまとめた（JNC, 1999a；1999b）。

- わが国の深部地下水は，一般に動きが遅く還元的な状態にある。
- 地温が十分に低く地圧も均質に近いような深部岩盤がわが国にも広く存在し得る。
- 岩盤中において地下水によって運ばれる物質は，連結した間隙ネットワーク中を拡散し分散・希釈されていくばかりではなく，割れ目表面から岩盤中へのマトリクス拡散や岩石や鉱物などとの化学的相互作用によって，物理的および化学的に遅延される。

5.1.1 に述べたように，現在の日本列島の地質的な特徴としては，成因や形成時期が異なるさまざまな種類の岩石で構成されており地質分布が複雑であること（図 5.1.2-1），また，断層で分断されていることが挙げられる。日本列島に分布する岩石の約 56%は堆積岩類（付加コンプレックスを含む）であり，約 40%は火成岩類（付加コンプレックスを含む），変成岩類は約 4%程度である（村田・鹿野，1995）。火成岩類，堆積岩類および変成岩類は，それぞれの起源となったマグマ，堆積物，原岩の性質およびそれらが固結する過程での温度や圧力などの条件の違いにより，さらに多種多様な岩石に分類される。また，形成後の環境条件の違いにより，岩石の性質は変化する。

地理・地形的な特徴としては，日本列島は起伏が大きく，国土の多くを丘陵や火山を含めた山地地域が占めており，山地が海岸付近まで迫っているところも少なくない。また，比較的温暖な気候や豊富な降水量，周囲を海に囲まれた島国といった特徴により，わが国では一般に地下水の水位が高く，地表付近まで地下水に満たされている。また，海岸付近の地下では，内陸側からもたらされた降水起源の地下水と海水起源の塩水が混在していると考えられる。このような地理的・地形的条件は，わが国における大局的な地下水の動きや，その水質を特徴付けている。

わが国の地質環境特性の調査・評価に当たっては，上述した特徴に留意した上で，重要な特性に着目して分類し，的確な調査・評価を行うことが重要である。なお，わが国の地質環境は，地下水や物質の移行経路や岩盤の力学特性に着目した場合，結晶質岩と堆積岩に大きく分類される。また，地下水化学特性の観点や，地下水化学特性の違いに起因する地下水流動特性の観点からは，地下浅部には主に降水起源の地下水が分布する内陸部と，海岸線付近において降水起源の地下水と海水起源の塩水が混在する沿岸部に大きく分類される。このようにわが国の地質環境は，地層処分にとって重要な地質環境特性に着目すると，結晶質岩と堆積岩，内陸部と沿岸域に大きく区分される（図 5.1.2-2）。実際には，地表付近に堆積岩が分布し地下深部に結晶質岩が分布する地域，内陸部であっても地下深部に塩水系の地下水が分布する地域，さらに，付加体のように亀裂性媒体と多孔質媒体としての特徴をもつ地質がさまざまな割合で存在する地域などが存在する。このような地域においても，結晶質岩と堆積岩，内陸部と沿岸域におけるそれぞれに特徴的な地質環境の特性を把握するための調査・評価の考え方やその方法を適切に組み合わせることにより，地質環境を把握することが可能であると考えられる。このような考え方に基づき，わが国の基盤研究機関およびNUMOでは，表 5.1.2-1に示す研究開発が進められてきた。

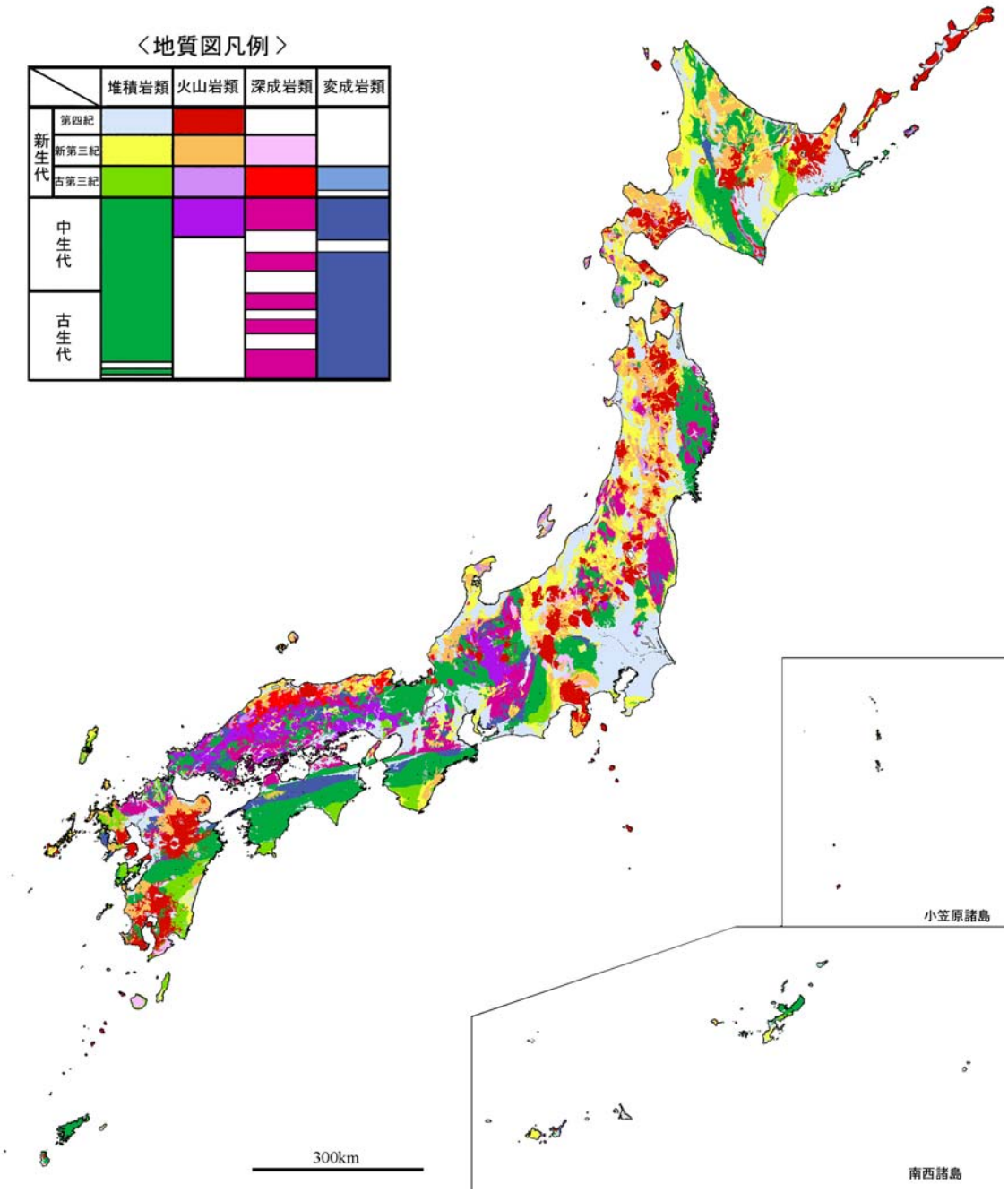


図 5.1.2-1 日本列島の地質分布（地質調査所編，1995 を編集，
承認番号 第 60635500-A-20101122-001 号）

日本の地質は，古生代～新生代のさまざまな堆積岩，火成岩，変成岩からなり，大局的にみて弧状列島の伸びの方向とほぼ平行な帯状分布をしている。

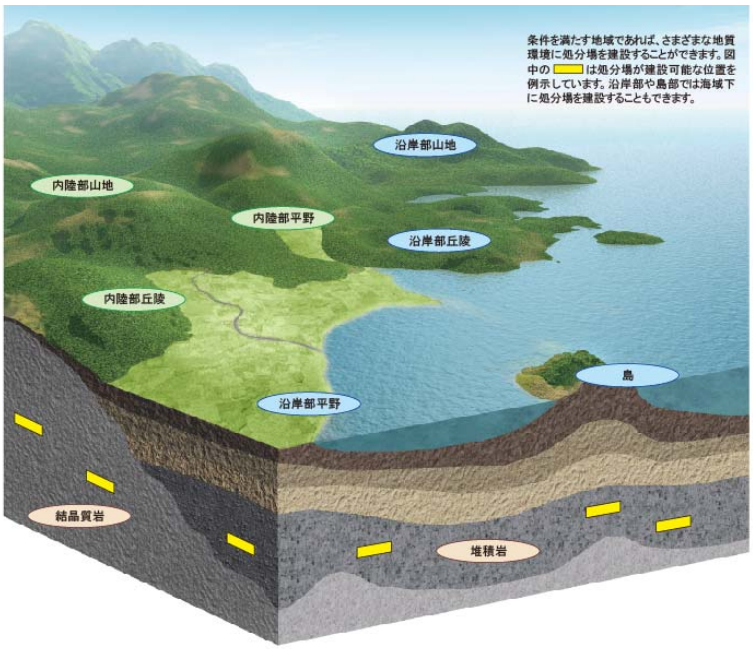


図 5.1.2-2 わが国の地質環境の基本的な分類（NUMO，2009a）

わが国の地質環境は，結晶質岩と堆積岩，内陸部と沿岸域に大きく分類される。

表 5.1.2-1 わが国の多様な地質環境の調査・評価に向けた研究開発

研究開発プロジェクト		瑞浪 URL	幌延 URL	幌延沿岸域	横須賀実証
実施機関		JAEA		JAEA，産総研，電中研，原環センター	NUMO，電中研
対象とする地質環境	地質条件	結晶質岩	堆積岩（新第三系泥岩・砂岩）		堆積岩（付加体含む）
	地理条件	内陸部		沿岸部	

JAEAは，2000 年までに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法を，実際の地下深部の地質環境に適用することにより，地質環境の特性として重要な地下水の流動特性や地下水化学特性，岩盤の熱・力学特性，岩盤中での物質の挙動などに関する理解を深めている。また，体系的に調査・解析・評価するための技術基盤の整備を目的として，深地層の研究施設計画を通じた研究開発を進めている。深地層の研究施設は，わが国の多様な地質環境のうち，結晶質岩・内陸部を対象とした地質環境（瑞浪地域；三枝ほか，2007）と，堆積岩・内陸部を対象とした地質環境（幌延地域；太田ほか，2007）において行われている（図 5.1.2-3）。なお，深地層の研究施設において得られた知見については，5.3 において詳述する。

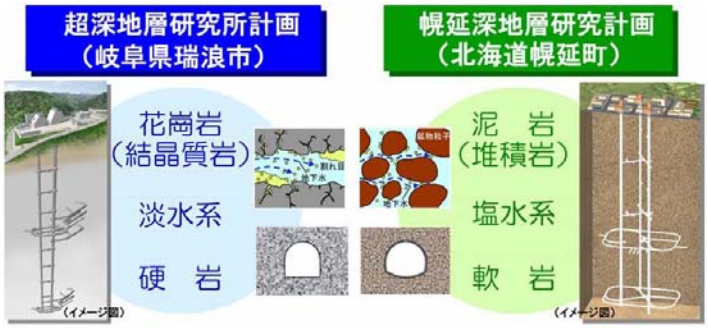


図 5.1.2-3 深地層の研究施設（JAEA の施設）の計画（出典：JNC，2005a）

岐阜県瑞浪市では花崗岩（結晶質岩），淡水系地下水が分布する地質環境を対象とした研究が進められ，北海道幌延町では泥岩（新第三紀の堆積岩），塩水系地下水が分布する地質環境を対象とした研究が進められている。

また，沿岸域（海岸線付近の陸地から浅海域までを含む領域）については，内陸部とは調査手法や取得できるデータの質や量が異なり，現状では技術的な課題が残されているが，近年，それらの解決に向けた取り組みが行われ，知見が蓄積されつつある。例えば，調査・評価技術の信頼性向上と体系的な整備を目的として，北海道幌延町の沿岸域において，国の基盤研究開発（沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化）が平成 19 年から始まった（太田ほか，2008）。このプロジェクトでは，対象とする深度を一般的に想定される処分場の深度と地質環境特性の把握の観点から地表～深度 1,000m程度，対象とする地質環境特性・プロセスを大規模不連続構造の分布・性状と地下水流動や水質形成に及ぼす影響と地下水環境（塩水と淡水の混在や長期滞留領域）とその長期変遷として，研究開発が進められている（図 5.1.2-4）。

NUMO では，概要調査の実施に向けて検討・構築してきた調査技術・評価手法の体系的な適用性を確認すること，調査・管理技術の整備を図ることを目的として，沿岸域・堆積岩の地質環境に該当する電中研・横須賀地区において実証研究を電中研との共同研究として進めてきた。

なお，これらのプロジェクトによって得られた知見についても，5.3 において詳述する。

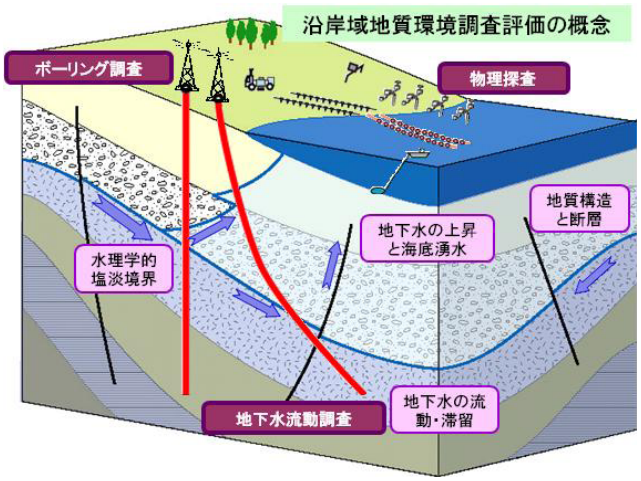


図 5.1.2-4 沿岸域におけるサイト調査と特徴的な現象（出典：大澤ほか，2008）

以上のように，わが国の地質環境は多様性を有しているが，深地層の研究施設計画を通じた研究開発および沿岸域を対象とした研究開発の成果により得られた知見（JAEA，2010）に基づき，それぞれに特徴的な地質環境特性に応じた調査・評価の考え方やその方法を適切に組み合わせることによって，基本的にわが国の多様な地質環境に対応した調査・評価を行うことが可能であると考えられる。

5.2 調査・評価の技術体系

第4章（4.1.3）で述べたとおり，NUMOは，事業の進展に応じて必要な時期までに段階的に技術を整備していく。ここでは，サイト選定の初期段階に実施する文献調査および概要調査おいて，NUMOがどのような考え方でどのように調査・評価を進めていくか述べる。さらに，調査・評価業務を的確に実施するためのマニュアル，支援ツールなどの各種支援技術について述べ，文献調査および概要調査に向けた基本的な技術体系が整備されていることを示す。

5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方

(1) 文献調査および概要調査の位置付け

概要調査地区選定段階では，自然現象による著しい影響を受けるような明らかに不適格な地域を回避して概要調査地区を選定することが目標であり（4.2.1 参照），文献調査により「概要調査地区選定上の考慮事項」にかかわる評価を行う。加えて，概略的な処分場概念の構築と，閉鎖後長期の安全性の概略的な評価のために，地質環境特性に関する文献情報も取得し，初期的な地質環境モデルを構築する。文献調査は，既存の限られた文献・資料に基づくものであり，その評価結果には比較的大きな不確実性が伴われることから，それらが地層処分システムの安全性に及ぼす影響の程度を考慮し，次段階の調査計画を検討する（NUMO，2010a）。

精密調査地区選定段階では，自然現象の著しい影響を回避し，閉鎖後長期および事業期間中の安全確保の見通しを得て，精密調査地区を選定することが目標となる（4.2.1 参照）。このため，概要調査により，これらに必要な情報を取得し，自然現象の著しい影響を回避できることを確認する。加えて，前段階で構築した地質環境モデルを更新し，さらに次段階に向けた地質環境モデルの構築を行い，閉鎖後長期および事業期間中の安全確保に関する評価に必要な情報を提供する。

(2) 体系的な調査・評価

文献調査および概要調査における地質環境の調査・評価は，自然現象の影響と地質環境特性の 2 つの分野に大別される。これらの調査・評価では，5.2.2 および 5.2.3 で述べるように，基本的には個々の評価項目に応じた調査を行う。しかしながら，図 5.2.1-1 に示すように，自然現象の影響に関する情報と地質環境特性に関する情報は，相互に関連している。例えば，地質環境特性として取得する地質・地質構造の情報は，自然現象の分野における各事象の分布や傾向，地質構造発達過程を検討するための基本的な情報となる。一方，自然現象の影響の分野における地質構造発達過程や将来予測の検討結果は，地質環境の長期変遷に関する評価に対する入力情報となる。また，さまざまな調査を実施する場合，ある調査によって取得された情報が，別の調査を計画・開始する際の入力情報となることがある。このようなことから，当該サイトの調査・評価に当たっては，調査・評価項目ごとの調査・評価の論理的な手順や取得データの多角的な利用を考慮して有機的に結びつけ，体系的に調査・評価を進めることが重要である（木方ほか，2010）。体系的な調査・評価を進める上で参考となる知見として，統合化データフローダイアグラム（三枝ほか，2007；太田ほか，2007；Ota *et al.*，2010；原環センター，2007：図 5.2.1-2）が挙げられる。これらを利用することにより，データの取得から調査結果の統合・解釈に至る一連の情報の流れを把握することができ，調査・評価の過程の追跡性および透明性を確保すること，処分施設の設計や閉鎖後長期の安全性評価との関連性を把握することができる。

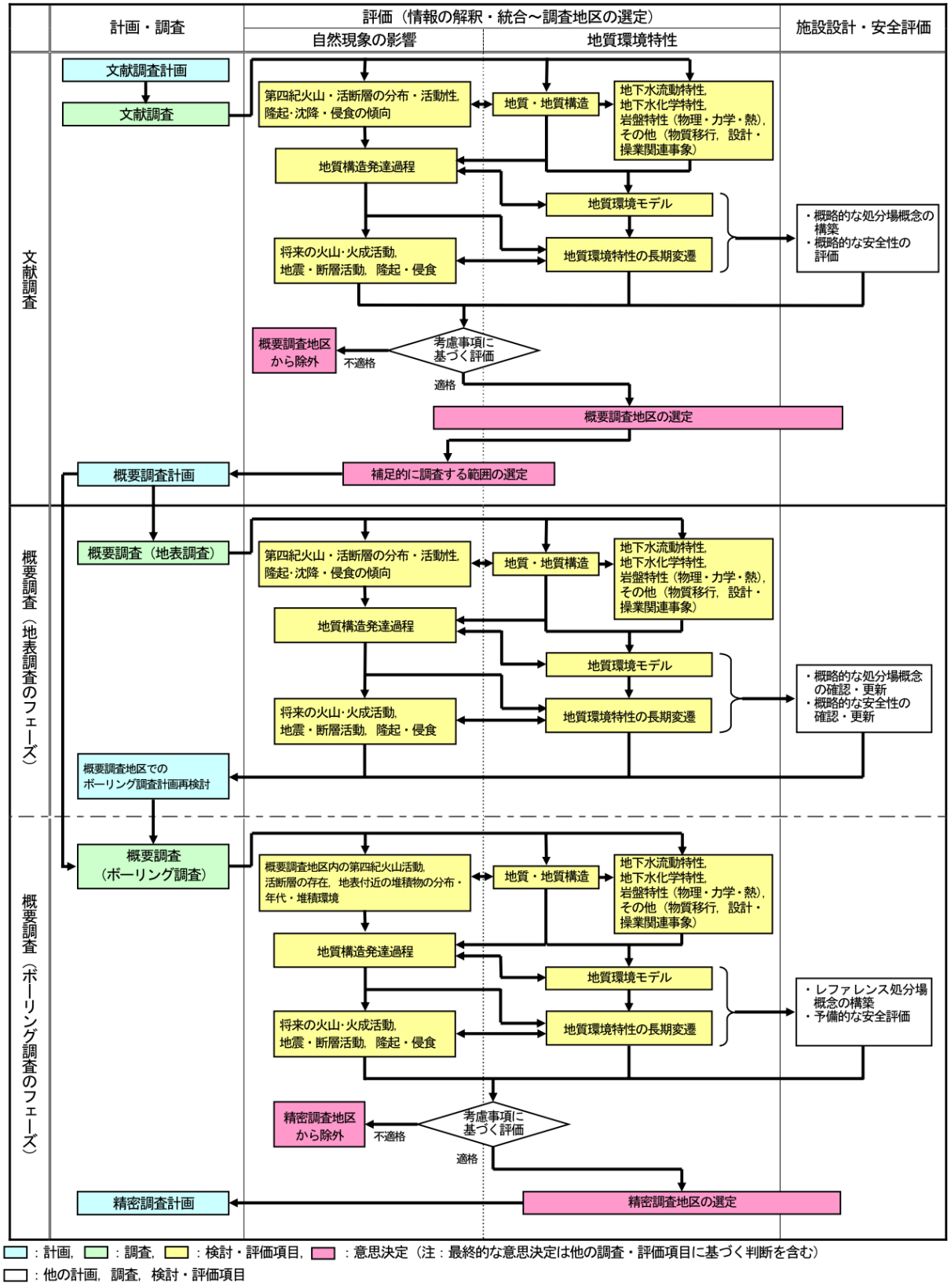


図 5.2.1-1 文献調査および概要調査の流れ，調査や情報の連携・共有化（検討例）

わが国の多様な地質環境において，共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。サイト調査・評価を合理的・効率的に進めるために，自然現象の影響と地質環境特性の評価において地質・地質構造や地質構造発達過程に関する調査は，両分野において連携して行い，情報を共有化する。

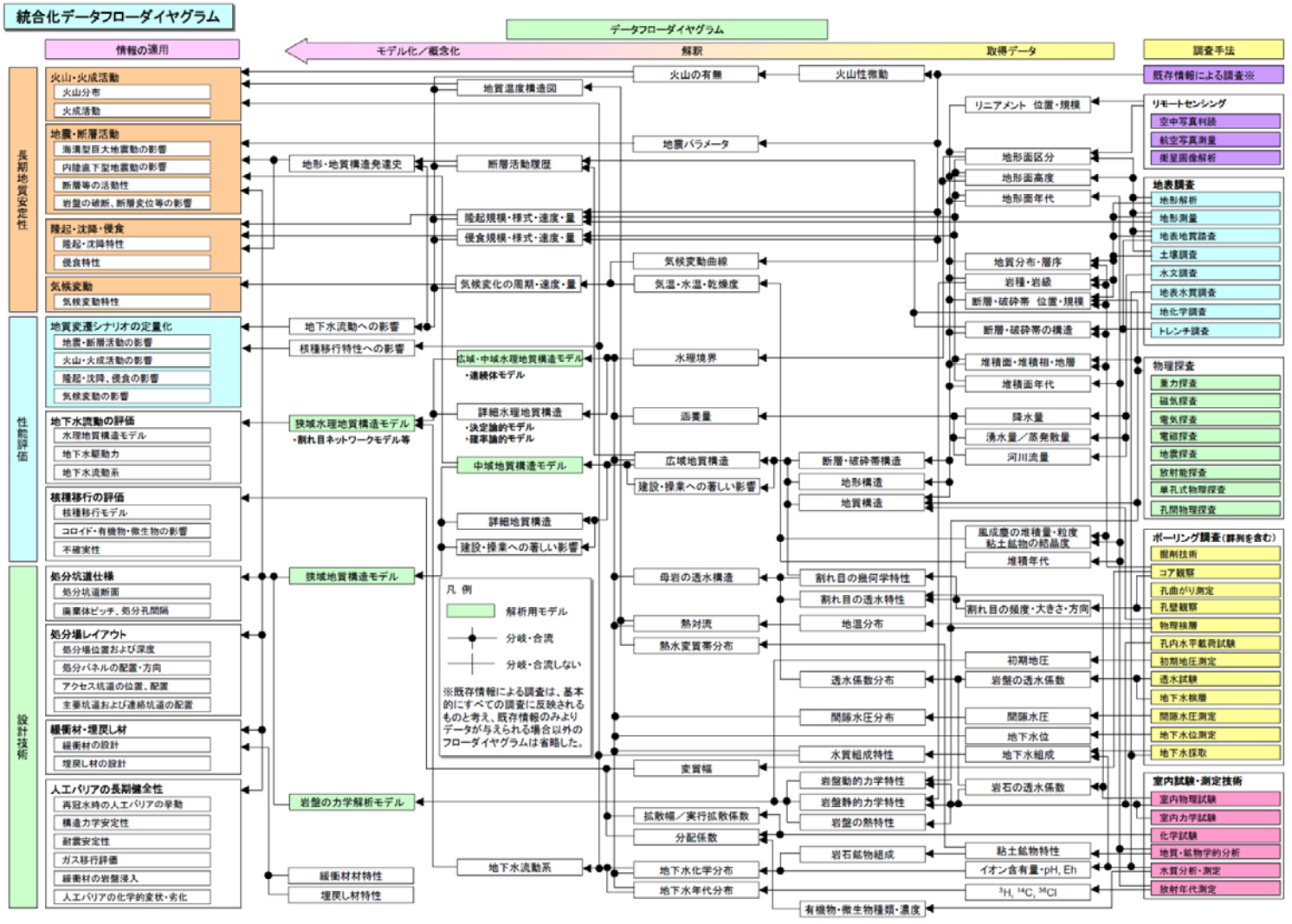


図 5.2.1-2 統合化データフローダイアグラム（出典：原環センター，2007）

地表からの調査・評価における長期地質安定性，性能評価，設計技術にかかわるデータの取得から評価に至る情報の流れを示したものである。

(3) 調査範囲の設定と調査項目

文献調査を実施する範囲は，応募区域およびその周辺の地域を対象とした「概要調査地区選定上の考慮事項」の評価に必要な情報を取得することができるように設定する。具体的には，**表 5.2.1-1** に例として示すように，国内外の調査事例を参考に，収集する情報の項目に応じて目安とする調査範囲を設定する。ただし，応募区域の広さ，地質環境の条件，調査途中の情報などに応じて，必要性が認められる場合は，範囲を拡大する。

表 5.2.1-1 文献調査で収集する情報の項目と調査範囲の目安（検討例）

情報の項目	調査範囲の目安
広域の地質・地質構造	応募区域の中心から半径 30km の円内
火山・火成活動	応募区域およびその外側 15km の範囲
自然環境（動植物，水・土壌など）	応募区域およびその外側 10km の範囲
地下水の流動	分水嶺の内側（応募区域が含まれる流域全体）
地震・断層活動	応募区域およびその外側 5km の範囲
隆起・侵食	応募区域内
第四紀未固結堆積物	
鉱物資源	
地層の物性・性状	
地下水の特性	
自然災害	
土地の確保	
輸送	輸送港湾候補地，輸送ルート

概要調査を実施する範囲は，「概要調査地区」と「補足的に調査を行う範囲」からなる。概要調査地区は，応募区域およびその周辺の地域のうち，「概要調査地区選定上の考慮事項」に適合する範囲の中から選定する。この際，閉鎖後長期および事業期間中の安全確保に関する評価に必要な地質環境特性に関する情報を取得できるように設定する。また，概要調査の段階では，概要調査地区における自然現象の影響や地質環境特性をより詳細に評価するため，火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食などに関して，概要調査地区の周辺で補足的に調査を行うことが必要になる場合がある。この場合，概要調査地区の周辺に，次に示す観点を踏まえて補足的に調査を行う範囲を設定する。

- 活断層や第四紀火山などが応募区域周辺に存在する場合，これらを含めないように概要調査地区を設定するが，それらの影響が及ばないことを念のため評価に調査が必要となる場合がある。
- 隆起・侵食については，広域的な自然現象であるため，概要調査地区内においてそれらの評価が可能な河成段丘や海成段丘などが分布しない場合，遠隔地に分布する河成段丘や海成段丘などにおける調査が必要となる場合がある。
- 概要調査地区の評価にあたり，広域の地質・地質構造の分布や発達過程などを把握するため，概要調査地区およびその周辺の広い範囲における調査が必要となる場合がある。

以上のことから，概要調査地区では，地質環境特性にかかわる調査・評価が主体となり，補足的に調査を行う範囲では，自然現象の影響，特に地震・断層活動，火山・火成活動にかかわる調査・評価や広域の地質構造発達過程にかかわる調査が主体となる。このような考え方に基づき設定する概要調査地区および補足的に調査する範囲のイメージを**図 5.2.1-3**に示す。なお，自然現象の個々の事象および地質環境特性の調査範囲の設定については，5.2.2 および 5.2.3 で述べる。

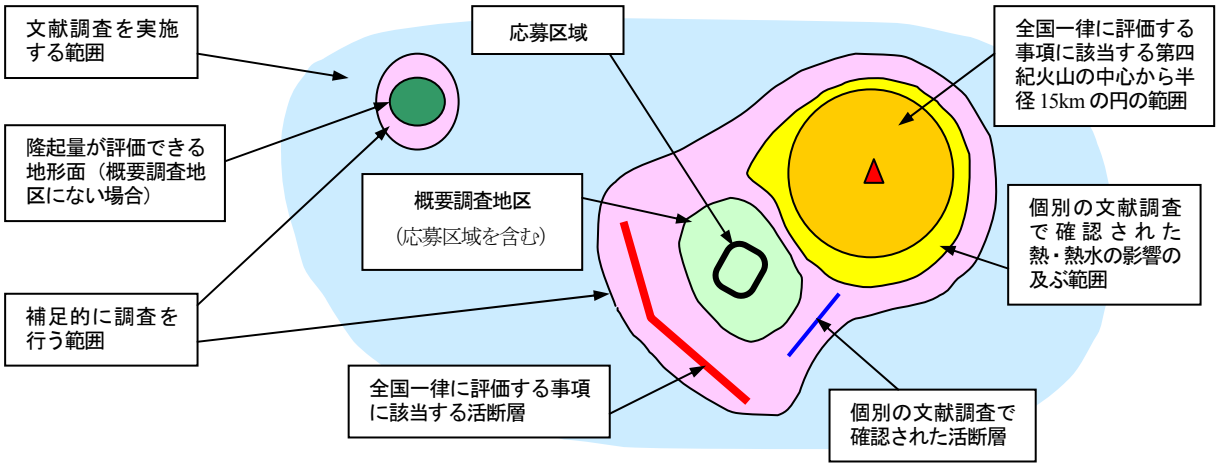


図 5.2.1-3 概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ（NUMO，2009b を一部修正）

(4) 概要調査の枠組み（段階的なアプローチ）

概要調査は，概要調査地区およびその周辺の地質環境を評価する上で必要な情報を確実かつ効率的に取得できるように，概要調査を複数のフェーズに区分し，段階的に実施する。段階的に調査調査を行うことにより，フェーズごとに調査結果を取りまとめ評価し，次のフェーズの調査計画を最適なものに見直すことができる（NUMO，2010c）。

調査・評価のフェーズ設定は，一般土木構造物の建設にかかわる地質調査（全国地質調査業協会連合会編，2009），わが国の深地層の研究施設計画（三枝ほか，2007；太田ほか，2007），諸外国の地層処分事業（SKB，2000）などを勘案すると，概要調査を前半と後半の二つのフェーズに区分することが適切と考えられる。前半の地表調査のフェーズでは，文献調査の評価結果を現地で確認し，その信頼性を向上させること，概要調査地区の地質環境特性の概要を把握すること，次フェーズの計画立案に資することを目的として，主に地表踏査，物理探査（空中，地上，海上）を実施する。これらは，ボーリング調査に比べて，対象となる地質環境の場を乱さず，広い範囲の面的な情報を取得することができることから，十分な調査を行うことが重要である。後半のボーリング調査のフェーズでは，地表調査のフェーズに取得できない地下深部の実データを取得し，前フェーズで認識された不確実性を低減することを主目的として，大深度のボーリング調査を実施する（図 5.2.1-4）。

概要調査の期間については，標準的な工程として 4 年程度を想定している。しかし，当該サイトの地質環境特性，文献による情報の量・精度，概要調査地区の広さ，地理条件などに応じて長くも短くもなり得る。なお，精密調査地区選定段階における目標や，閉鎖後長期の安全確保にとって重要となる事項については，期間を限定することなく，十分な調査・評価を行っていく。

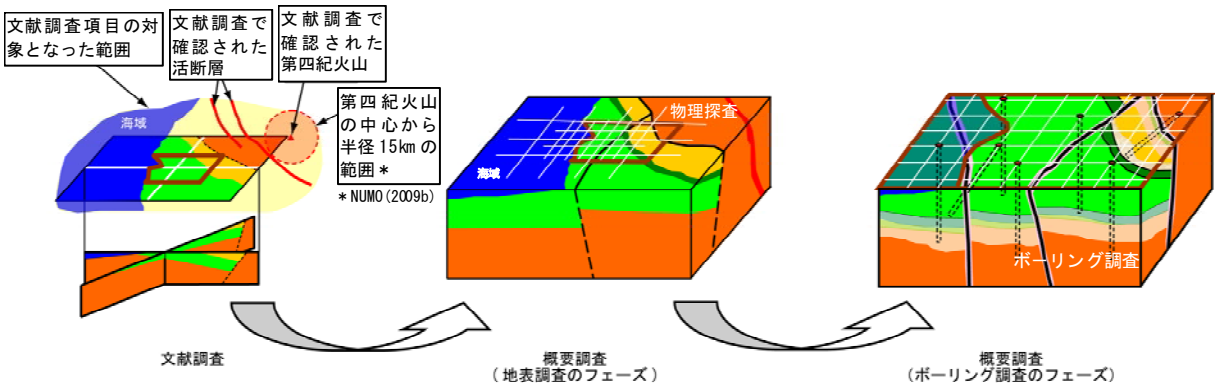


図 5.2.1-4 概要調査における段階的なアプローチのイメージ（2 フェーズの例）

概要調査を合理的に進めるために段階的なアプローチを採用し，二つのフェーズ（地表調査のフェーズ，ボーリング調査のフェーズ）に区分した例を示す。

(5) 調査・評価における不確実性

不確実性の管理は，NUMO における品質保証への取り組みにおいて重要な観点であり，サイト調査・評価から施設設計，安全評価への連携の際の情報に内在する不確実性についても，適切に管理・伝達されなければならない。

一般に，調査・評価にかかわる不確実性として，次に示すものが挙げられる。

① データの不確実性

② 地質環境の概念化の不確実性

①のデータの不確実性は，各種の調査により取得されるデータや，複数のデータを統合した情報（例えば，地質環境モデルのデータセット）などに含まれる不確実性である。これらは，測定誤差，測定精度（空間分解能，計測密度）など，複数の要因によって生じる。

②の地質環境の概念化の不確実性は，データの解釈に起因するもので，自然現象の将来予測や当該サイトで生じている現象の理解において不可避な時間的・空間的な不確実性である。前者については，将来予測の前提となる考え方（例えば，過去から現在までの変動・変遷の法則性）に内包される不確実性と考えられる。後者については，情報量の不足により個々の現象や複数の現象間の相互作用に関する理解が十分でないことなどに起因する。また，当該サイトが元来有している地質環境のさまざまな特性の不均質性や，データの代表性などにより，地質環境そのものの解釈・推定に伴う不確実性が含まれる。

文献調査で取得されるデータは，地表付近の情報であることが多く，地下深部の情報は非常に限られている可能性が高い。このため，この段階の地質環境モデルには，大きな不確実性があると考えられる。例えば，断層面の三次元分布について，地表における断層の位置と傾斜に関する情報しか得られていない場合，地下深部における分布・形状は，地表付近のデータのばらつきに依存して幅広く推定せざるを得ない。また，概要調査の段階においても，地質環境モデルを構築するための十分な情報が得られず，限られた情報から推定せざるを得ない場合が生じる。このような場合においては，取得された情報に基づく地質環境の理解度や，その時点における解釈・推定結果に含まれる不確実性の種類やその幅などを特定することが重要である。そのような不確実性にかかわる情報

を，施設設計・安全評価に提示する必要があると考えられる。さらに，施設設計・安全評価にかかわる検討との連携を通じて，処分施設の成立性，閉鎖後長期の安全確保に影響を及ぼす重要な構造，地質環境特性，現象などを特定し，次段階（または次フェーズ）の調査計画に反映し，不確実性を低減させていくことが重要である。

(6) 品質保証の考え方

NUMO では，ISO9001:2000 の考え方に基づき，概要調査地区選定段階における技術文書などを中心とする技術業務を対象に品質マネジメントシステムを構築して運用していることは，第 3 章ですでに述べたとおりである。この基本的な仕組みは，ISO9001 と同様で，プロセスの管理とレビューが中心である。サイト選定段階では，各段階の法定報告書などの文書を成果品として，成果品に至るまでの重要な一連の業務（プロセス）を明確にし（文書化），これを管理するとともに，文書化されたとおり実施していることを確認し，プロセスの透明性・追跡性を示す。

サイト選定の最初の段階である文献調査では，重要度の高い「文献調査に関する法定報告書」や文献調査の対象となる文献に関する「収集予定文献リスト」，「収集文献リスト」などの技術文書が成果品となる。文献調査における品質保証は，成果品である技術文書が，科学的・技術的な妥当性を確保できているか，「概要調査地区選定上の考慮事項」に基づき概要調査地区としての適合性を評価する際の客観性・公平性が確保できているかということに重点をおく。このような品質保証の活動を支援するツールとして，文献調査システムフローや地質環境データ管理システムを構築した。これは，文献による情報の収集・整理から始まり，個別の情報の分析・評価，地質環境モデルの構築，考慮事項に基づく評価に至る一連の作業と情報の流れを系統的に表示し，記録保存するシステムである（5.2.4 参照）。

また，文献調査では，地質学，地球物理学，土木工学，原子力工学などの各分野における国内外の第一線で活躍する専門家や，地層処分事業の海外事業者などの関係機関に所属する経験豊富な専門家により構成される委員会を組織・運営し，調査・評価のプロセスや調査・評価の結果について科学的・技術的な妥当性を有するものであるか確認しつつ，文献調査を進めていく。

概要調査では，文献調査と同様に重要度の高い「概要調査に関する法定報告書」や関連する技術文書などが成果品となる。文献調査との大きな違いは，概要調査では，地表踏査，物理探査，ボーリング調査などを現地で実施し，自然現象の影響や地質環境特性にかかわる情報（実測データ）を取得することである。実測データに基づく成果品は，地層処分システムの安全性に関するセーフティケースの構築において，重要な情報になる。したがって，NUMO では，概要調査の実施に向けて，さまざまな分野において適用実績のある信頼性の高い既存の技術を組み合わせた調査・評価手法，および取得データを適切に管理するシステムなどの体系的な整備を進めている。さらに，今後の技術の進展や新たな知見に応じて，調査・評価のプロセスや結果に対する判断が適切になされていることを，客観的に示すことも重要である。そのためには，定められたとおりに確実に業務が遂行されていることを確認する従来の品質マネジメントの仕組みに加え，調査・評価結果の品質や信頼性を向上させることができるような技術的確認の仕組みを，今後，NUMO 内および外部に構築していく。

5.2.2　自然現象の影響にかかわる調査・評価

ここでは，前項で述べた基本的な考え方に基づき，火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食などの自然現象の事象ごとに，地層処分システムへの影響とその取扱い，調査・評価の基本的な考え方や進め方について述べる。

5.2.2.1　火山・火成活動

(1)　地層処分システムへの影響とその取り扱い

火山・火成活動による地層処分システムへの影響としては，マグマの貫入・噴出による処分施設の直接的破壊，熱・熱水の放出による天然バリアへの水理学的・地球化学的変化や人工バリアの性能低下などが挙げられる。

これらの影響については，処分施設の直接的な破壊，放射性核種の地表付近への放出，処分システムの性能低下などが生じる可能性があることを踏まえ，マグマの貫入・噴出および熱・熱水の影響を，最終処分法に定められた「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱う。NUMO（2009b）は，将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出，マグマによる著しい熱の影響，強酸性の熱水，あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように概要調査地区を選定することとしている。

その他，火山・火成活動による影響の一つとして，火砕流堆積物の堆積が挙げられる。火砕流が発生し，サイトに到達した場合，その発生・到達時期によってその影響が異なる。建設・操業から閉鎖までの段階では，地上施設の直接的な破壊が考えられる。閉鎖後の段階では，火砕流堆積物の堆積に伴う地形変化，さらにはそれに伴う地下水流動への影響が考えられる。前者については，建設・操業時における安全性を確保する観点から回避することが必要であると考えられるが，これについては，「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針」（原子力安全委員会，2002）および「使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における『自然環境』の考え方について」（原子力安全委員会，2008a）を念頭に，建設・操業時の安全確保の一環として評価を行う。後者については，隆起・沈降運動や侵食作用などによる地形変化と同様に地質環境の長期変遷における一因として評価する。

また，マグマの貫入・噴出に伴う熱水活動のほかに，非火山性の温泉（例えば，紀伊半島南部の温泉）が存在する。非火山性の温泉の熱源について，これまで中新世の火成活動に関連する伏在火成岩体を熱源とする考え（中村ほか，1958）や，比較的若くかつ温かい四国海盆の沈み込みに伴う広域的な熱源からの熱伝導によるものであるとする考え（大石ほか，1995）が示されていた。しかし，近年，温泉ガスのヘリウム同位体比に基づく検討（Matsumoto *et al.*，2003），震源分布や地震波速度構造などの地球物理学的検討（Salah and Zhao，2003）が進められ，紀伊半島下では海洋地殻に加えて，スラブマントルから脱水した高いヘリウム同位体比を有する流体が上昇していると考えられること（Umeda *et al.*，2006a）が示されている。このように，非火山性の温泉の成因や起源を評価することが可能となり，マグマの貫入・噴出に伴う熱水活動との違いを検討することが可能となってきたと考えられる。非火山性の温泉の熱源については，近年の研究事例（例えば，Umeda *et al.*，2009）では，地球物理学的データ，温泉水の地化学データ（ヘリウム同位体比）などを組み合わせた調査・評価が行われ，能登半島における温泉の熱源は，火成活動に由来するものではなく，地下深部の花崗岩の放射壊変による熱が断層によって上昇したものであるとの考え方が示されている。これらのことから，非火山性の熱水に関する調査・評価については，地質環境特性にかかわる調査・

評価の一環として検討する。

(2) マグマの貫入・噴出

(i) 調査・評価の基本的な考え方

応募区域は第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側に位置するが，将来のマグマの貫入・噴出の可能性を否定できない地域（例えば火山フロント背弧側など）では，念のため，第四紀火山の分布，活動の規則性，火山・火成活動に関連する地下構造などに基づき，著しい影響を受けないことを確認する。

なお，国際地質科学連合（IUGS）は，2009 年 6 月に地質時代としての“第四紀”の始まりを従来より約80万年間さかのぼり258万年前とする国際層序委員会や国際第四紀学連合の提案を批准した。これを受け 2009 年 12 月の日本学術会議地球惑星科学委員会 IUGS 分科会，同 INQUA 分科会，日本地質学会，日本第四紀学会の四者の合同会議において，わが国においてもこの定義を受け入れ，その普及に努めることとした（遠藤・奥村，2010）。NUMO における第四紀火山の調査・評価については，変更された第四紀の期間に活動した火山と定義した場合，既存文献やデータベースがまだその変更に対応していないため，より古い火山の取り扱いに混乱が生じ，評価の品質に問題が生じる恐れがあることから，当面はこれまでどおり，「第四紀火山カタログ」（第四紀火山カタログ委員会編，1999）に示された，およそ 200 万年前から現在にかけて活動した火山を，第四紀火山とする。

わが国には，348 の第四紀火山があり（第四紀火山カタログ委員会編，1999），千島弧～東北本州弧～伊豆小笠原弧および山陰～九州～南西諸島にかけて二つの帯状に分布している。第四紀火山の分布は，島弧の中軸部で最も密となり，大陸側（背弧側）に向かって疎となっている。また，第四紀火山が分布する領域の海溝側の境界を火山フロント（杉村，1958）といい，その地理的位置は，沈み込んだ海洋プレートの上面に相当する深発地震面の深度が 100～110km 程度のところにほぼ一致している。日本列島における火山フロントは，新第三紀中新世以降大きな移動はない（大口ほか，1989；吉田ほか，1995）。わが国の火山フロントの背弧側に分布する第四紀火山の時間的・空間的分布に関する検討（JNC，1999b など）によれば，第四紀火山は特定の地域に偏在し，その中で活動を繰り返す傾向がある。火山フロントが不明瞭な山陰や九州地方北部では，深部からのマントル上昇に伴いマグマがもたらされ火山活動が生じている可能性が指摘されている（Iwamori, 1992；宇都，1995）。この地域の火山活動は独立単成火山群の分布が特徴であるが，鮮新世以降の活動域は全体的に山陰側に限定される傾向が認められる（宇都，1995；Kimura *et al.*，2003）。日本列島のような島弧におけるマグマの発生プロセスについては諸説ある（巽，1995；高橋，2000）。しかし，火山フロントよりも背弧側では火山・火成活動が生じることを示唆する上部マントル内の高温領域が分布することが，地表付近からマントルまでの地球物理学的データ（例えば，地震波速度構造：長谷川ほか，2004）によってとらえられている。また，上部マントルにおける高温領域は，第四紀火山の集中域に対応していることが明らかにされている（Tamura *et al.*，2002）。

これらの知見を踏まえ，マグマの貫入・噴出に関する将来予測については，過去の火山分布の偏在性に基づいて行う。具体的には，島弧スケールおよび個々の火山体スケールにおける火山・火成活動の傾向や規則性，地下のマグマの存否を把握し，それらに基づいて時間的・空間分布を外挿することにより評価する。また，必要に応じて確率論的評価手法（Martin *et al.*，2004；Chapman *et al.*，2009a；Jaquet *et al.*，2008 など）を用いた評価も参考にする。

文献調査では，応募区域において，第四紀にマグマの貫入・噴出が生じていないこと，将来にお

いてもマグマの貫入・噴出が生じるおそれが少ないことを確認するための調査・評価を行う。それらの結果を「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適合性の評価，概略的な処分場概念の構築および安全性の評価のための情報として提供する。

概要調査では，応募地区の近傍に第四紀火山あるいはマグマが存在する可能性がある場合は，概要調査地区から第四紀火山にかけての補足的に調査を行う範囲において地表調査を実施し，将来のマグマの貫入・噴出の可能性や範囲を評価する。さらに，概要調査地区における地質環境特性にかかわるボーリング調査の情報を用いて，第四紀火山のマグマの貫入・噴出を積極的に示す証拠がないことを確認する。これらの結果は，「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する評価，レファレンス処分場概念の構築および予備的な安全評価のための情報として提供する。

（ii） 文献調査および概要調査における調査・評価の流れ

文献調査および概要調査におけるマグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価の流れを図 5.2.2-1に，主な調査手法を表 5.2.2-1にそれぞれ示す。

文献調査では，文献・資料の収集・整理のほか，応募区域の周辺に分布する第四紀火山およびその周辺を対象として，空中写真判読，レーザープロファイラ画像解析などのリモートセンシング手法（佐々木・向山，2009 など）を活用し，火山地形や火口配列などの認定，火成岩類の分布・岩相・層序・年代・化学組成，火山体およびその周辺の地下構造，火山活動にかかわる地殻変動などの情報を取得する。その結果，評価の対象とすべき応募区域周辺の第四紀火山を認定するとともに，第四紀以前を含め可能な限り過去にさかのぼり活動履歴と発達過程を把握する。なお，火山体および周辺の地下構造，特に，地表からマントルまでの高温領域の分布に関する情報については，必要に応じて既往の物理探査記録の再解析も実施する。続いて，地震・断層活動，隆起・侵食，地質・地質構造，地質環境モデルの情報を考慮し，地形・地質構造発達過程を検討する。それらの結果を踏まえ，火山の分布・活動性，マグマの存在について評価する。また，マグマが将来移動する可能性については，三浦ほか（2006），土志田ほか（2006）などの検討事例を参考に，当該地域の火山活動の傾向や規則性の外挿，地形・地質構造発達過程の外挿，プレート運動との関連性や火山の寿命などを考慮して評価する。

概要調査は，文献調査の結果，地区の近傍に第四紀火山やマグマ供給系が存在する可能性がある場合，補足的に調査を行う範囲において，物理探査，地表踏査（年代測定，地化学分析を含む）などの地表調査を実施する。必要に応じて，火山体やその周辺の概略的な地下構造やマグマの分布を把握するために，地震波トモグラフィによる地震波速度構造解析（Xia *et.al.*，2007 など）や電磁探査による比抵抗構造解析（浅森・梅田，2005；Umeda *et al.*，2006b など）などの地球物理学的手法を用いる。なお，活動的な第四紀火山が対象となる場合，測地学的手法（GPS 測量，傾斜計による観測など）も有効であり，必要に応じてこれらの情報も取得する。また，地下のマグマの存否を示す証拠として，地下水の遊離ガスや溶存ガスに含まれるヘリウム（$^{3}He/^{4}He$ 比）や炭素（$^{13}C/^{12}C$ 比）の同位体比が有効であり，これらの地球化学的手法を組み合わせることにより，調査結果の信頼性の向上が図られるといった知見（Umeda，2009）も活用する。これらの情報に基づき，将来的なマグマの貫入・噴火の可能性とその範囲に関する評価を行う。さらに，概要調査地区内における地質環境特性の評価のためのボーリング調査により取得する情報に基づき，概要調査地区内に第四紀の火山・火成活動の痕跡が認められないこと，および概要調査地区の地下にマグマの存在を積極的に示唆する証拠が認められないことを確認する。

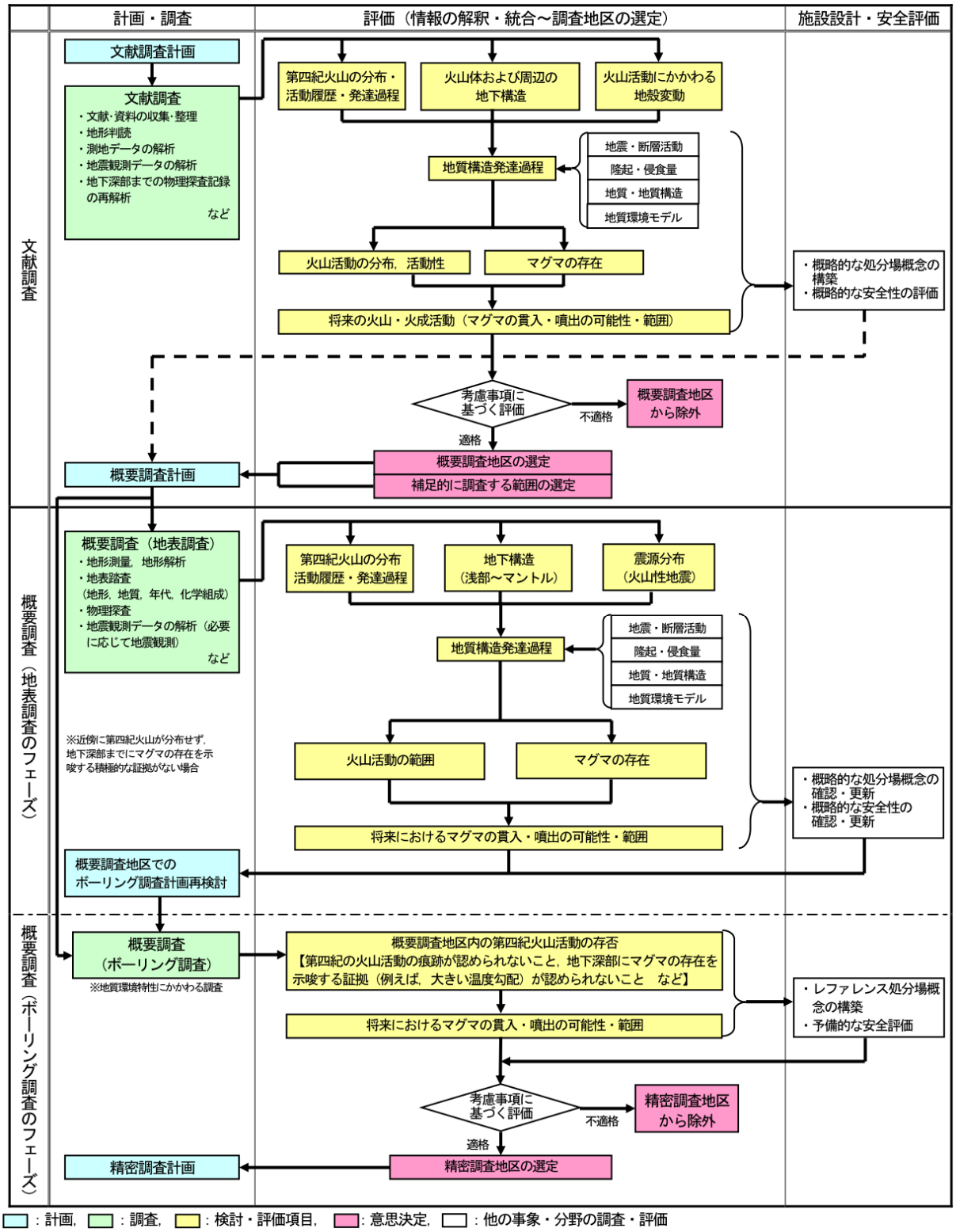


図 5.2.2-1 火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）かかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-1 に示した文献調査および概要調査の流れのうち，火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.2.2-1 火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる主な調査手法

調査手法		得られる情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備　考
地形学的手法	空中写真判読	溶岩台地，火砕流台地などの地形分類，火山に特有の陥没構造，火口の配列など	・火口の位置およびその変遷	精度：数 m（縮尺に依存）	・第四紀火山の活動履歴を把握するのに有効である。 ・時間スケールについては検証が必要である。
地質学的手法	地表踏査	火山岩類（噴出岩類，貫入岩類）の岩相・分布・層序，火口・岩脈の分布・配列，潜在する火山活動の徴候，火山活動と関連する地質・地質構造	・火山層序の認定，および火山活動様式の時代変遷を明らかにする。 ・年代・化学組成のデータと併せて，マグマ供給系の基本単位としての個々の第四紀火山を認定し，火山の活動履歴，形成発達史を明らかにする。 ・マグマの地下での移動および活動範囲の変遷と，火山の形成発達史，および地質構造要素などとの関連性を検討する。 ・年代・化学組成のデータと併せて，火山の時間的・空間的な位置・活動特性から，活動の規則性・偏在性を把握する。 ・地質・地質構造，地殻変動と火山活動との対応関係を把握する。	文献調査の結果に基づき，火山層序単元を認定する上での問題箇所や，年代値・化学分析値のデータが不足している箇所について，重点的に実施する。 文献調査，空中写真判読の結果に基づき，地質・地質構造，地殻変動と火山活動との対応関係に関わる問題箇所について，重点的に実施する。	・第四紀火山の活動性と形成発達史の検討の基礎データとして，また，マグマの地下での移動，およびそれと関連する火山活動の要因や地質構造要素との関係を検討するための基礎データとして有効である。 ・火山同士の時間的・空間的な活動の規則性・偏在性の検討の基礎データとして有効である。 ・関連する変動の時間スケールは，活構造との対応関係や火山活動の時間的・空間的活動特性との対応関係から推定する。
	放射年代測定（K-Ar 法，ﾌｨｯｼｮﾝﾄﾗｯｸ法）	火山岩類の放射年代	・火山岩類の岩相・分布・層序と併せて，マグマ供給系の基本単位としての第四紀火山を認定し，活動の履歴を明らかにする。 ・火山岩類の岩相・分布・層序と併せて，第四紀火山の時間的・空間的な活動の規則性・偏在性を把握する。	K-Ar 法：10^4～10^9 年 ﾌｨｯｼｮﾝﾄﾗｯｸ法：10^5～10^9 年	・K－Ar 法：Ar の逸散により誤差が大きい場合がある。 ・ﾌｨｯｼｮﾝﾄﾗｯｸ法：誤差が大きい場合がある。
	化学分析（XRF，EPMA，ICP-MS など）	岩石・鉱物の主成分および微量元素の化学組成	・マグマ溜りなどにおける諸過程（結晶分化，マグマの注入・混合など），および条件（温度・圧力など）を推定する。また，火山の形成発達史に伴うこれらの変化と，マグマの地下での移動との対応関係について検討する。	測定限界 主要成分：0.1wt% 微量成分：1～0.1ppm	・地殻内のマグマ溜りなどにおける諸過程・条件を推定するための基礎データとして有効である。
地球物理学的手法	空中磁気探査 空中電磁探査	広域的な磁気異常と比較的浅部の比抵抗構造	・磁気異常や比抵抗分布に基づき変質による低磁性・低比抵抗岩体を抽出する。	可探深度：500m 程度（電磁探査）	・広範囲の地下地質情報が得られる。
	微小地震観測 地震探査（地震波速度構造解析を含む）	3 次元地震波速度構造，微小地震の震源分布，S 波反射面分布	・第四紀火山下の低速度域，Vp/Vs 比から現在のメルト・高温領域の分布を推定する。併せて，S 波反射面や，液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関係から，マグマ供給系の位置・規模，構造を把握する。 ・地殻（～マントル）内の低速度域，Vp/Vs 比から現在のメルト・高温領域の分布を推定する。また，S 波反射面や，液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関連を検討する。	可探深度：40km 程度	・広い地域のデータが得られるが，解像度はせいぜい数 km 程度である。 ・低 SN 比・多量データの処理の効率化が必要である。
	電磁探査（MT 法）	2 次元比抵抗構造	・マグマ供給系に関連する地下構造，水理構造を推定する。 ・地殻（～マントル）内の比抵抗構造を把握しマグマ（熱源）の分布に関する情報を取得する。	可探深度：数 10km 程度 精度：深度の 1/10 程度	・比較的容易に深部構造のデータを得ることができる。 ・比抵抗断面の解釈が難しい場合がある（部分溶解域か熱水変質域かなど）。 ・岩石の種類，温度，マグマ・水などの液相の関与により比抵抗が変化する。
測地学的手法	GPS 測量	基準点変動量（水平・上下）	・地殻変動と火山活動（特に，マグマの移動）との関係・影響範囲を検討する。	精度：数 mm	・地殻変動調査としては一般的である。データを連続取得できる。20km 程度の間隔で既設置点がある。
	合成開口レーダー	基準点変動量（水平・上下）	・地殻変動と火山活動（特に，マグマの移動）との関係・影響範囲を検討する。	計測精度：数 cm	・地震時の地殻変動調査としては，近年，多くの検討事例において利用されている。
	地殻変動計測（傾斜）	傾斜変動量	・地殻変動と火山活動（特に，マグマの移動）との関係・影響範囲を検討する。	精度：数 mm	・局所的なデータである。地殻変動調査としての事例は少ないが，データを連続的に取得できる。

一方，概要調査地区の近傍に第四紀火山やマグマが存在する可能性が極めて低い場合には，概要調査地区における物理探査，地表踏査，ボーリング調査により取得する情報に基づき，念のため，第四紀の火山・火成活動の痕跡が認められないこと，マグマの存在を積極的に示唆する証拠が認められないことを確認する。

(3) 熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価

(i) 調査・評価の基本的な考え方

応募区域は第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側に位置するが，マグマに起因する将来の熱・熱水活動の可能性を否定できない地域（例えば火山フロント背弧側など）では，念のため，，地下構造（熱源の位置など），変質帯の分布，地下水化学組成などの情報に基づき，著しい影響が及ばないことを確認する。

日本列島における全国規模の温度構造，地熱資源賦存領域については，日本地熱資源賦存地域分布図（地質調査所，1980）などに示されており，地域レベルの情報としては，地熱資源図として熱水賦存領域の特徴（タイプ）が取りまとめられている。また，孔井や温泉などから得られる地温分布や地下水（熱水）の地化学特性については，地温勾配図（矢野ほか，1999；田中ほか，2004），日本の熱水系アトラス（村岡ほか，2007）などに取りまとめられており，酸性熱水や火山性の熱水の分布状況，深部熱水の地化学温度や特徴を概観できる。玉生ほか（2008）は，地質データ，地球物理データ，孔井データを総合的に解釈し，熱・熱水活動による高温域を抽出する方法を提示するとともに，高温域を含む地域のタイプ区分を示し，各タイプにおける熱・熱水活動の具体的な特徴を明らかにしている。

将来における熱・熱水の影響（範囲，規模）については，過去から現在までの熱水活動の範囲，地下のマグマの存否を把握し，(2) に述べた将来のマグマの貫入・噴出の可能性とその範囲の評価結果を考慮して，外挿法により評価する。

文献調査では，応募区域において，過去に著しい熱・熱水の影響が生じていないこと，将来においても熱・熱水の著しい影響が生じるおそれが少ないことを確認するための調査・評価を行う。それらの結果を「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適合性の評価，概略的な処分場概念の構築および安全性の評価のための情報として提供する。

概要調査では，文献調査の結果，応募区域の近傍に熱・熱水活動が存在あるいは将来発生する可能性が認められた場合，補足的に調査を行う範囲において地表調査を実施し，将来の熱・熱水活動の可能性や範囲を評価する。さらに，概要調査地区における地質環境特性にかかわるボーリング調査の情報を用いて，第四紀の熱水活動を積極的に示す証拠がないことを確認する。これらの結果は，「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する評価，レファレンス処分場概念の構築や予備的な安全評価のための情報として提供する。

(ii) 文献調査および概要調査における調査・評価の流れ

文献調査および概要調査における，熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価の流れを図 5.2.2-2 に，主な調査手法を表 5.2.2-2にそれぞれ示す。

文献調査では，まず文献・資料の収集・整理，空中写真判読，衛星画像解析などのリモートセンシング手法により，変質帯の分布やその形成年代などに関する情報を取得する。また，地下深部の熱源の位置を検討するために必要な情報を，地震波速度構造や熱構造などに関して物理探査記録の

再解析により取得する。続いて，現在の熱水賦存領域が応募区域の近傍に位置する場合には，必要に応じて数値解析（中尾ほか，2008 など）により対流系（流体流動）の評価を行い参考にする。その際には，広域的なモデルや解析手法の精度や不確実性に留意する。

概要調査は, 文献調査の結果､応募区域の近傍に熱水活動やマグマが存在する可能性がある場合，補足的に調査を行う範囲において，物理探査，地表踏査（年代測定，地化学分析を含む）などの地表調査を実施する。これらの調査において取得された情報に基づき，熱水活動の範囲やマグマの存否について評価する。その際には，深部熱源を評価した事例（例えば，Umeda *et. al.*，2006b）や熱源からの影響を評価した事例（例えば，JNC，2005a ; 坂川ほか，2005）を参考に，取得した情報をを統合して総合的な評価を行う。さらに，概要調査地区におけるボーリング調査によって取得される情報に基づき，第四紀の熱水活動の痕跡が認められないこと，将来の熱水対流の発生を積極的な示唆するような証拠（例えば，大きい温度勾配）が認められないこと，マグマ由来の地下水が認められないことを確認する。

一方，概要調査地区の近傍に熱水活動が存在する可能性が極めて低い場合には，概要調査地区における地質環境特性にかかわる物理探査, 地表踏査, ボーリング調査により取得する情報に基づき，第四紀の熱水活動の痕跡が認められないこと，将来の熱水対流の発生を積極的に示唆するような証拠（例えば，大きい温度勾配）が認められないこと，マグマ由来の地下水が認められないことを確認する。

(4) 火山・火成活動にかかわる調査範囲・位置などの設定の考え方

概要調査地区では，文献情報から，将来にわたりマグマの貫入・噴出および熱・熱水の影響が及ぶことが明確に判断される地域は除外されている。概要調査地区選定段階では，概要調査地区および補足的に調査を行う範囲において現地調査を実施し, 第四紀の火山･火成活動の痕跡がないこと，地下深部にマグマの存在を積極的に示唆する証拠が認められないことなどを，実測データに基き評価する。補足的に調査を行う範囲については，応募区域およびその周辺の第四紀火山の分布とその活動性，熱水賦存領域，地下構造（マグマの存在を示唆する構造）を考慮し，将来におけるマグマの移動・到達範囲や熱・熱水の影響が検討できるように設定する。

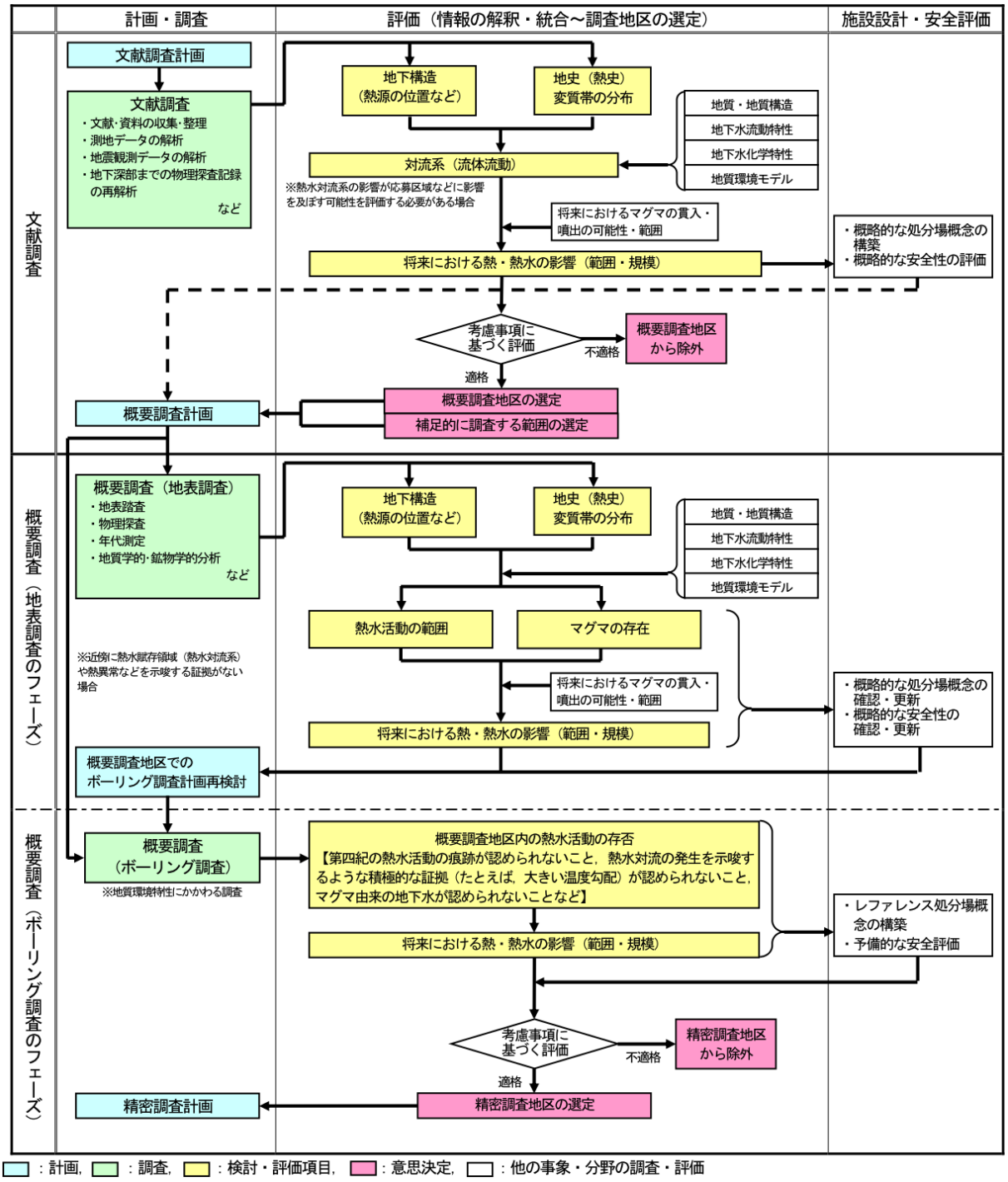


図 5.2.2-2 火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-1 に示した文献調査および概要調査の流れのうち，火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.2.2-2 火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる主な調査手法

調査手法			得られる情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備　考
地形学的手法		空中写真判読 衛星画像解析	変質帯の分布，火山地形，地すべり地形（粘土化に伴う），地表温度情報	・火山と変質帯との関連や，変質帯を規制する構造との概略関係を把握する。	精度：数 m（縮尺に依存）	
地質学的手法	地表調査	地表踏査 （変質帯調査）	変質帯の分布・規模・性状	・変質帯の種類，形成履歴，過程，地質・地質構造や火山との関連について検討し，変質鉱物や変質帯形成に係わった熱水系の性状（温度，泉質）を検討する。 ・温泉・地下水の分布，温度，成分などから地下深部での貯留温度（地化学温度），や天水・火山性起源流体などの混合状態の検討，同位体分析から火山性起源流体の有無や地下水の滞留年代の推定などを検討する。	―	・変質帯の形成は，地層の年代によっては複数回の熱・熱水の影響を受けている可能性があることに留意する必要がある。 ・変質年代の測定は試料の状況により適切な手法を適用する（熱ﾙﾐﾈｯｾﾝｽ，ﾌｨｯｼｮﾝﾄﾗｯｸ，ESR，U-Th/He，K/Ar など）。
		化学分析 （XRD 分析など）	変質鉱物の種類と分布		―	
		年代測定	変質岩，変質帯の変質年代		対象となる主な年代範囲：10^4～10^6	
		温泉・地下水等調査	温泉・噴気分布，泉温，泉質，湧出量		―	
		流体地化学分析 （同位体分析を含む）	主要溶存成分 同位体成分		測定限界 一般水質：10^{-2}mg/L 同位体　：10^{-1}‰	・水井戸や温泉水に含まれる He 同位体の分析から，マントル起源の流体の寄与の有無について考察可能となった。
	ボーリング調査	コア観察	変質帯の分布・規模・性状	・地層の分布，比抵抗分布，変質鉱物の分布などから変質帯の連続性を検討し，地表の変質状況と合わせた変質の解析，変質鉱物や変質帯形成に係わった熱水系の性状などを把握する。 ・温度プロファイル，地化学温度，地層分布などから周辺地域の地下温度構造を検討する。	―	・深度方向の情報が得られ，過去から現在の地温との関係が考察できる。
		化学分析 （XRD 分析など）	変質鉱物の種類・分布		―	
		年代測定	変質岩，変質帯の変質年代		地表調査と同じ	
		検層，孔内調査 （温度，比抵抗など）	温度プロファイル，温度勾配，地層ごとの温度特性，比抵抗分布		掘削口径や地下温度状況により適用できない場合もある。	・温度プロファイルは，特殊な環境ではわずかな間隔で大きく異なることがあることに注意する必要がある。
		流体採取および地化学分析 （同位体組成を含む）	主要溶存成分 同位体成分		測定限界 一般水質：10^{-2}mg/L 同位体　：10^{-1}‰	・流体採取は不可能な場合もある。
地球物理学的手法		空中磁気・電磁探査	広域的な磁気異常と比較的浅部の比抵抗構造	・磁気異常や比抵抗分布に基づき変質による低磁性・低比抵抗岩体を抽出する。	（電磁探査） 可探深度：500m 程度	・広範囲の地下地質情報が得られる。
		地震探査 微小地震観測	3 次元地震波速度構造， 微小地震の震源分布	・地殻（～マントル）内の低速度域，Vp/Vs 比から現在のメルト・高温領域の分布を推定する。また，S 波反射面や，液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関連を検討する。 ・地震波速度構造と高温領域との関係，地殻の温度構造と地震発生深度との関係，深部流体と微小地震分布との関係，比抵抗構造や地化学データと組み合わせ熱源の位置・規模を検討する。	可探深度：40km 程度	・広い地域のデータが得られるが，解像度は数 km 程度である。 ・精度向上には 3 次元速度構造を把握することが望ましい。
		電磁探査（MT 法，CSAMT 法）	2 次元（3 次元）比抵抗構造	・MT 法では低比抵抗域から変質帯，熱水貯留構造，熱源位置・規模，および透水ゾーンの分布を推定する。 ・CSAMT 法では比抵抗分布から火成岩の貫入場所，断裂構造，変質帯位置を検討する。	（MT 法） 可探深度：数 10km 程度， 精度：深度の 1/10 程度 （CSAMT 法） 可探深度：1km 精度：深度の 1/10 程度	・MT 法では比較的容易に深部構造のデータを得ることができるが比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT 法では，比較的浅部について精度のよい地下構造のデータを得ることができるが比抵抗断面の解釈が難しい場合があり，また測定値から離れた位置に送信源を設置する必要がある。
		重力探査	重力異常分布，密度構造	・局所的な重力異常域の分布により推定される基盤構造を踏まえ熱源の位置・規模を推定する。	可探深度：数 10km 測定精度：0.1mgal	・比較的容易に大局的な基盤構造を推定できる。 ・想定する密度構造モデルにより結果が異なり，一義的には決まらない。

5.2.2.2 地震・断層活動

(1) 地層処分システムへの影響とその取り扱い

地震・断層活動による地層処分システムへの影響としては，断層面に生じるせん断（変位）あるいは褶曲により生じる変形に伴う処分施設の破壊と，断層周辺の岩盤内に生じる局所的なせん断や引張破壊に伴う地下環境の力学的・水理学的変化，地震動による処分施設の破壊，地震時の地下水圧の変化などに伴う地下環境の水理学的･地球化学的変化,断層活動に伴う熱的影響が挙げられる。

これらのうち，活断層，活褶曲などが分布する場所は，大規模な地層の剪断（変位）や変形が生じることから，処分施設の破壊が想定され，処分施設を配置することが困難な場合にあたると判断し，最終処分法に定められている「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱う。NUMO（2009b）では，全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所，全国一律に評価する事項で用いた以外の文献によって認められる活断層がある場所や，活断層の幅（断層破砕帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲，活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲，顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲に該当すると明確に判断される場所や範囲は含めないように，概要調査地区を選定することとしている。なお，調査･評価の対象とする活断層の定義については，NUMO（2004）を踏襲し，“過去数十万年前以降繰り返し活動したことのある断層で，将来も活動する可能性のある断層”とする。

一方，次の①～③については，「地層の著しい変動」として取り扱わないこととし，地質環境特性の変化や工学的対策により対処する。

① 断層活動により断層周辺の岩盤内にひずみ，小断層，節理などが生じている範囲については，力学的・水理学的特性が変化した領域と捉えられるが，処分施設の著しい変形，埋設した放射性廃棄物の地表への接近をもたらす「地層の著しい変動」には該当しないとし，地質環境特性の変化として検討・評価する。

② 地震動による処分施設への影響については，鉱山や地下発電所の空洞における地震観測事例（例えば，Shimizu *et al.*，1996；Ishimaru and Shimizu，1997 など）に基づいて，地下深部におけるゆれ（地震動）は地表に比べて小さいと指摘されている。このことから，地震動による影響については，耐震設計などの工学的対策が可能であることから，「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱わないこととする。

③ 既往の地下水や間隙水圧の観測事例（例えば，Shimizu *et al.*，1996；Ishimaru and Shimizu，1997）において，地震の発生に伴い比較的広い範囲でそれらが変化することが知られている。しかし，これらの地震の発生に伴う変化は，一時的で短期間の間に元の状態に戻ること，浅層地下水中での変化である（佐藤ほか，1999；阿部・酒井，1999）との知見があることから，「地層の著しい変動」として取り扱わないこととする。なお，サイト調査・評価においては，地震観測データ，地震時に発生する水理学的・地球化学的変化に関するデータを取得するが，水理学的・地球化学的変化については地質環境特性において述べる。

断層活動に伴い地下深部のすべり面付近では，高温状態になるといわれており（福留，1984），破砕帯中の断層面に沿ってシュータキライトが形成されることがある（宇田ほか，1995）。断層破砕帯中に認められるシュードタキライト脈の幅は，数 mm 程度（例えば，Lin et al.，2003；Lin *et al.*，2005）である。野島断層を貫くボーリングコア試料を用いた研究によると，断層活動に伴う摩擦熱は，フィッション・トラック法では 200～300℃（田上ほか，1998），電子スピン共鳴（ESR）法では 300～350℃（福地ほか，2002）に達したことが示されている。野島断層を貫くボーリング調査で確認さ

れた断層破砕帯中に比較的低温（150℃以下）で安定な鉱物（スメクタイトや沸石など）が多量に存在することや（藤本ほか，1998），跡津川断層帯茂住断層の破砕帯中にもスメクタイトが確認され熱による再結晶などの痕跡が認められないこと（佐竹・村田，1998）が示されている。このように断層活動に伴う熱的影響は，局所的で瞬間的ものと考えられる。また，断層活動に伴う熱的影響を受けた証拠と考えられるシュードタキライトは，断層破砕帯中に認められることから，活断層の位置やその断層破砕帯の幅を特定することができれば，断層活動に伴う熱的影響（摩擦熱）を避けることは可能であると考えられる。

(2) 調査・評価の基本的な考え方

地震・断層活動については，活断層などの分布や活動性，変位地形の分布，地下構造，震源分布について調査し，その著しい影響の回避について評価する。

日本列島およびその周辺の活断層や活褶曲などの分布を網羅的に整理した資料としては，「50 万分の 1 活構造図」，「新編 日本の活断層」（活断層研究会編，1991），「活断層詳細デジタルマップ」（中田・今泉編，2002），「日本周辺海域の第四紀地質構造図」（徳山ほか，2001）などがある。また，阪神・淡路大震災以降，地震調査研究推進本部が中心となり，活断層調査が精力的に進められており，活断層の分布や活動性などに関する評価結果が公開されている。

しかし，わが国では，2000 年以降 M7 前後の被害地震が，これまでに活断層の存在が認められてない地域において複数発生している（例えば，2000 年鳥取県西部地震（M7.3），2004 年新潟県中越地震（M6.8），2008 年岩手・宮城内陸地震（M7.2）など）。これらの地震の震源域では，地形学的，地質学的，地球物理学的な調査などが行われ，短い活断層が存在することや，その活動性などに関する調査結果が報告されている。

このような状況のもと原子力の分野では，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会，2006）の改訂を受け，より詳細な活断層の調査・評価が行われてきている。活断層の調査・評価の手法については，地形学，構造地質学，測地学，地球物理学，地球化学の各分野において研究が進められている。それらの研究によれば，東北日本弧では中新世の堆積盆を形成した正断層が現在の応力場に応じて逆断層として再活動していること（インバージョンテクトニクス；Kato et al.，2004），横手盆地を対象とした総合的な調査により盆地縁辺部に位置する逆断層の分岐（フロントマイグレーション）により活断層の位置が移動すること，中央構造線，阿寺断層，野島断層などでは活動履歴の調査が進められ，それらの結果から西南日本の主要な構造線や活断層は第三紀の初期には活動していた（Tagami and Murakami, 2007 など）というような知見が得られている。また，断層の発達過程，断層活動の累積に伴う地層の変形の進行に関しても，断層模型実験による検討や数値解析的な検討（例えば，上田，2009）により知見が得られてきている。「活断層等に関する安全審査の手引き」（原子力安全委員会，2008b）には，既存の文献の調査や変動地形学的調査，地表地質調査，地球物理学的調査などを適切に組み合わせた十分な調査を行うことが記されている。

このことから，活断層の調査・評価に関する最新の知見や技術を活用することにより活断層の分布や活動性などに関する情報を取得し，地形・地質構造発達過程を踏まえて，応募区域およびその周辺に分布する活断層，活褶曲などの分布とその活動性，活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲について評価する。なお，活断層の幅とは，断層活動に伴い岩石が破砕され，不規則な割れ目の集合体となった断層破砕帯（角礫部，粘土部を含む）のことを指し，その外側の変形帯とは，断層活動に伴う地層の変形が生じている領域のことを指す。

文献調査では，応募区域において，過去数十万年の間に繰り返し活動を生じている活断層などが認められないこと，活断層の幅およびその外側の変形帯に含まれないこと，活断層の分岐などの発生の可能性が高い場所が含まれていないことを確認するための情報を取得し評価する。それらの結果は，「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件に関する事項に対する適合性の評価に利用するとともに，概略的な処分場概念の構築や概略的な安全性の評価を行う際の情報として提供する。

概要調査では，基本的に文献による情報に基づく評価結果の妥当性を確認する。つまり，概要調査地区もしくは概要調査の結果に基づき選定される精密調査地区において，活断層などが認められないこと，活断層の幅およびその外側の変形帯に含まれないこと，活断層の分岐などの発生の可能性が高い場所が含まれていないことを確認するための情報を取得し評価する。文献調査では，取得される情報が文献による情報に限られるため，概要調査では，現地調査によって精度，品質の高い情報を取得し評価を行っていく。なお，概要調査では，概要調査地区内における評価結果の信頼性を向上させるため，必要に応じて概要調査地区の周辺に設定する補足的に調査を行う範囲も含めて検討していく。概要調査の地表調査では，文献調査で得られなかった情報を取得し，これらの情報を文献調査により取得された情報に加えて，文献調査と同様の流れで評価を行う。これらの評価結果は，「精密調査地区選定上の考慮事項」に基づく評価に利用するとともに，レファレンス処分場概念の構築や，予備的な安全評価を行う際の情報として提供する。

活断層などの分布・活動性，活断層の幅およびその外側の変形帯の評価については，変動地形学的な考え方（渡辺・鈴木，1999）を重視した地形調査，地質学的調査，地球物理学的調査などにより把握する。また，地下に伏在している断層を検出するため，測地学，地球物理学（地震学を含む），地球化学的な観点からも検討する。

活断層や活褶曲などの将来予測は，活断層などの分布・活動性などにかかわる地形学的・地質学的な記録や測地学的な情報，地震学的な観点からの検討結果に基づき，それを外挿することにより予測する。その際，想定される変位量や断層の長さなどのパラメータと断層破砕帯の幅の相関関係（Otsuki，1978；緒方・本荘，1981）に関する知見，断層模型実験（上田ほか，2003；上田，2009など）から得られる知見，断層周辺のプロセスゾーン（金折，2001；吉田ほか，2009など）に関する知見などを参考にする。

活断層の幅の外側の変形帯の範囲に関する将来予測については，外挿法による予測を基本とするが，必要に応じて確率論的手法（例えば，各種地殻変動量に基づく歪速度モデルによる確率論的評価手法：Chapman *et al.*，2009b；Chapman *et al.*，2009c）を用いた評価を参考にする。

(3) 文献調査および概要調査における調査・評価の流れ

文献調査および概要調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを図 5.2.2-3に示すとともに，主な調査手法を表 5.2.2-3および表 5. 2. 2−4に示す。

文献調査では，まず文献・資料の収集・整理，空中写真や高解像度数値標高モデルを用いた地形判読，測地データの解析，物理探査記録の再解析，地震観測記録の解析などにより，応募区域およびその周辺の活断層の分布・活動性，変動地形の分布，震源分布に関する情報を取得する。続いて，火山・火成活動，隆起・侵食，地質・地質構造の情報を考慮し，地形・地質構造発達過程として総合的に取りまとめ，その上で活断層などの分布・活動性，活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲について検討・評価する。

概要調査の段階における調査では，地表踏査（地形，地質），物理探査などを実施する。また，活

断層などの分布や活動性を把握する上で，ボーリング調査（短尺，必要に応じて群列ボーリング），トレンチ調査の実施が必要な場合には，地表踏査，物理探査などの結果に基づいて調査地点を選定し，それらを実施する。なお，海域に分布する活断層などが検討の対象となる場合には，音響測深やサイドスキャンソナーなどの海底地形測量，海上音波探査などの物理探査，ピストンコアなどの海底試料採取，年代測定などを実施する。

地表調査で取得された情報に基づき，文献調査と同様に，活断層などの分布・活動性，活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲（将来における分岐・伸展の範囲を含む）に関する評価を行うが，概要調査地区内において活断層などが認められた場合には，これを避けた範囲内において大深度ボーリング調査を実施する方向で概要調査計画の修正を行う。

さらに，大深度ボーリング調査により概要調査地区内で確認された断層・破砕帯については，取得された情報に基づき，①分布・性状の確認（活断層と明確に判断される断層との比較を含む），②断層系のグルーピング，③各断層系の形成順序の検討，④活動性の評価を行い，概要調査地区内の活断層などの存否について確認する。

(4) 地震・断層活動にかかわる調査範囲・位置などの設定の考え方

概要調査地区では，文献に記述された活断層などが分布する場所，活断層の幅およびその外側の変形帯に含まれる範囲，活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲は除外されている。しかし，概要調査段階には，それらの判断の妥当性を確認するとともに信頼性を向上させるために，概要調査地区および補足的に調査を行う範囲において現地調査を実施し，総合的な評価を行う。こられの調査範囲は，活断層などの存在を示唆する変動地形が分布する領域のほか，段丘の分布や測地学的データなどから把握される隆起・沈降運動の境界を含む範囲を含めるように設定する。物理探査を実施する場合は，活断層などの存在を示唆する変動地形を横断する位置に測線を設定する。また，第四系が広く分布する地域で物理探査により伏在断層の有無を把握する場合には，その第四系を横断および縦断する位置に測線を設定する。ボーリング調査（短尺）を実施する場合には，活断層などの存在を示唆する変動地形に対応する断層などの有無，第四系や段丘面などにより変位の有無を把握することができる位置や断層の性状を把握することができる位置に設定する。

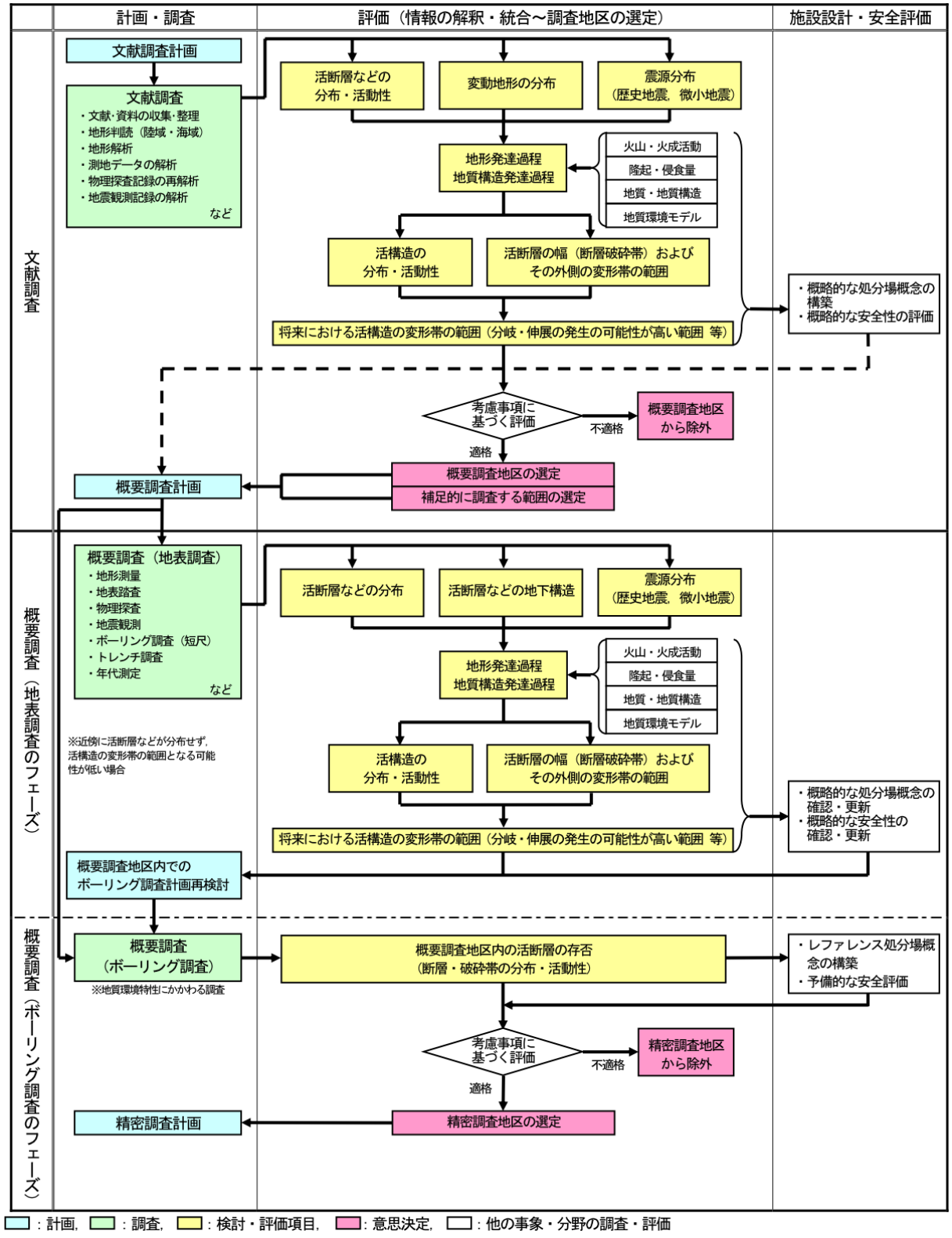


図 5.2.2-3 地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-1 に示した文献調査および概要調査の流れのうち，地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.2.2-3 地震・断層活動にかかわる主な調査手法（1. ：陸域）

調査手法		得られる情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備　　考
地形学的手法	地形判読 空中写真判読	変動地形，変動地形の可能性がある地形の分布，段丘面との関係	現地調査対象の変動地形，変動地形の可能性がある地形を抽出する。	精度：数 m（縮尺に依存）	・更新世後半以降の活動履歴を調査するのに有効である。 ・地表踏査による検証が必要である。
地質学的手法	地表踏査	地質層序，地質構造，微地形，断層の性状など	活断層・活褶曲・活撓曲の有無・分布・活動性などを検討する。	―	・調査の進行状況に応じて，適切な精度（概査→精査）で実施することが必要である。
	ボーリング調査	地質層序（地質柱状図），地質構造など	活断層・活褶曲・活撓曲の有無・分布・活動性などを検討する。	―	・地下の情報が直接得られる。
	トレンチ調査	断層の性状，断層周辺の地層の変形状況など	活断層の有無・分布・活動性を検討する。	―	・断層を直接確認できる。
	年代測定	第四系の堆積年代，地形面の形成年代，火山岩の生成年代など	活断層・活褶曲・活撓曲の活動性を検討する。	火山灰層序：10^0～10^6年 K-Ar 年代：10^4～10^9年 ^{14}C 年代測定：10^2～5×10^4年	
地球物理学的手法	反射法地震探査	2 次元（3 次元）地層境界等の反射面構造（反射断面）	反射断面から断層・褶曲の有無・位置，活動性を推定する。	可探深度：起振方法により異なる インパクター：1km S 波バイブレータ：1.5km P 波バイブレータ+爆薬：5km 空間分解能：数十 m（受振点間隔による）	・深部データを比較的精度良く求めることができる。 ・結晶質岩では，岩石密度および地震波速度の変化が小さく明瞭な反射面が得られない場合がある。
	屈折法地震探査	2 次元（3 次元）地震波速度構造	地震波速度構造から断層・褶曲の有無・位置を推定する。	可探深度 浅部：100～200m 深部：数～100km 精度：深度に対して±10%	・反射法に比べ，探査深度に対して長い測線長（探査深度の 7～10 倍），大きな発振エネルギーを必要とする。 ・断層に伴う破砕帯の分布や規模を低速度帯として検出することは可能であるが，断層の変位，傾斜を解析することは困難である。
	電磁探査（MT 法，CSAMT 法など）	2 次元（3 次元）比抵抗構造	比抵抗構造から断層の有無・位置を推定する。	（MT 法） 可探深度：数 10km 精度：深度の 1/10 程度 （CSAMT 法） 可探深度：1km 精度：深度の 1/10 程度	・比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT 法の場合，測定地から離れた位置に送信源を設置する必要がある。
	重力探査	重力異常分布，密度構造	局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ断層位置・規模を推定する。	可探深度：数 10km 測定精度：0.1mgal	・比較的容易に大局的な基盤構造を推定できる。 ・想定する密度構造モデルにより結果が異なり，一義的には決まらない。
測地学的手法	GPS 測量	基準点変動量（水平・上下）	地殻変動と断層活動の関係を検討する。	精度：数 mm	・地殻変動調査としては一般的である。データを連続取得できる。20km 程度の間隔で既設置点がある。
	合成開口レーダー	基準点変動量（水平・上下）	地殻変動と断層活動の関係を検討する。	計測精度：数 cm	・地震時の地殻変動調査としては，近年，多くの検討事例において利用されている。
地震学的手法	微小地震観測	微小地震の震源分布	微小地震の震源分布から震源断層を推定する。 微小地震の震源分布と活断層の分布，地質構造などの関係から，活断層の形状等について検討する。	―	
地球化学的手法	地化学調査 （Ra，He，CO_2 など）	土壌ガス（Ra，He，CO_2 など）の濃度分布	土壌ガスの濃度分布から断層・破砕帯の有無・位置を推定する。	―	・すべての活断層，地震断層および地質断層の探査に有効な手法ではない。 ・土壌ガスの濃度異常は，測定孔周辺の地質，土壌，閉鎖的な地下ガス循環系等を反映することから他の調査データと併せて解釈する必要がある。

表 5.2.2-4 地震・断層活動にかかわる主な調査手法（2. ：海域）

調査手法		得られる情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備　　考
地形学的手法	海底地形測量（音響測深，マルチビーム音響測深など）	変動地形，変動地形の可能性がある地形の分布	変動地形やその可能性がある地形を抽出する。	適用水深：10,000m 以上 測定精度（水中音速度補正+潮汐高補正） 浅海域(200～500kHz)：10cm 深海域(10～20kHz) ：水深の 1/100	・更新世後半以降の活動履歴を調査するのに有効である。
地質学的手法	海底試料採取	地質情報，層序	音波探査や年代測定などの結果と併せて，断層・褶曲の位置・活動性を推定する。	最大 20m 程度（海底の層相，採取方法によって異なる）	・地下データを直接得られる。 ・堆積物の種類に応じて適切な手法を選択する必要がある。
	ボーリング調査	地質層序（地質柱状図），地質構造など	音波探査や年代測定などの結果と併せて，活断層・活褶曲・活撓曲の有無・分布・活動性などを検討する。	ー	・地下の情報が直接得られる。
	年代測定	第四系の堆積年代，地形面の形成年代，火山岩の生成年代など	変位・変形に関与している地層，関与していない地層の年代を把握する。	火山灰層序：10^0～10^6 年 ^{14}C 年代測定：10^2～5×10^4 年 微化石分析：10^5～10^7 年	
地球物理学的手法	音波探査	2 次元（3 次元）地層境界等の反射面構造(反射断面)	反射断面から断層・褶曲の有無・位置，活動性を推定する。	可探深度（音源によって異なる） ｿﾉﾌﾟﾛｰﾌﾞ：～30m 程度 ｽﾊﾟｰｶｰ：30～200m 程度 ｳｫｰﾀｰｶﾞﾝ：100～1000m 程度 エアガン：数百～数千 m 精度（分解能）：（音源によって異なる） ｿﾉﾌﾟﾛｰﾌﾞ：10～50cm 程度 ｽﾊﾟｰｶｰ：0.5～3m 程度 ｳｫｰﾀｰｶﾞﾝ：1～数十 m 程度 エアガン：数～数十 m	・深部データを比較的精度良く求めることができる。 ・結晶質岩では反射面が得られない場合がある。
	電磁探査（MT 法, CSAMT 法）	2 次元（3 次元）比抵抗構造	地下構造から断層の有無・位置を推定する。	(MT 法) 可探深度：数 10km 精度：深度の 1/10 程度 (CSAMT 法) 可探深度：1km 精度：深度の 1/10 程度	・比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT 法の場合，測定地から離れた位置に送信源を設置する必要がある。
	重力探査	重力異常分布，密度構造	局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ断層位置・規模を推定する。	可探深度：数 10km 測定精度：1mgal 以下	・比較的容易に大局的な基盤構造を推定できる。 ・想定する密度構造モデルにより結果が異なり，一義的には決まらない。

5.2.2.3 隆起・侵食

(1) 地層処分システムへの影響とその取り扱い

隆起・侵食による地層処分システムへの影響としては，処分施設の地表への接近，それに伴う地下環境の水理学的・地球化学的変化が挙げられる。

これらの影響のうち，処分施設の地表への接近については，長い年月をかけて著しい隆起が生じるような地域では，その隆起量に見合った侵食が生じる可能性があることを踏まえ，著しい隆起・侵食を，最終処分法に定められた「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱う。NUMO では，過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えていることが明らかな地域は含めないように概要調査地区を選定することとしている（NUMO，2009b）。

また，「地層の著しい変動」に該当しない程度の隆起運動および侵食作用，すなわち隆起・侵食による地形変化（処分施設の設置深度や地形勾配の変化），それに伴う地下水流動状況や地下水質の変化，岩盤の物理的・化学的性質の変化などについては，処分施設の設置位置や深度の設定といった施設設計などの対処を含めて検討する。

ここでは，文献調査および概要調査の段階における隆起・侵食の著しい影響の回避，処分施設の設置位置や深度の検討に必要な情報を取得するための調査･評価の考え方･進め方について述べる。

(2) 調査・評価の基本的な考え方

隆起・沈降運動は，火山・火成活動，地震・断層活動などと密接な関係があり，プレート運動とも深くかかわっている。また，氷床の消長や海水準変動に伴いアイソスタティックな変動によっても生じる。隆起・沈降運動には，これらの現象が反映されていることに留意して，隆起・沈降量の分布，侵食量の分布について調査し，気候・海水準変動，その他の自然現象との関連性を考慮し，その影響を評価する。

文献調査では，応募区域において，過去に著しい隆起・侵食が生じていないこと，将来においても著しい隆起・侵食が生じるおそれが少ないことを確認するための情報を取得し評価する。それらの結果を「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件に関する事項に対する適合性の評価に利用するとともに，概略的な処分場概念の構築や概略的な安全性の評価を行う際の情報として提供する。

概要調査では，基本的に文献による情報に基づく評価結果の妥当性を確認する。つまり，概要調査地区もしくは概要調査の結果に基づき選定される精密調査地区において，著しい隆起や侵食が生じるおそれがないことを確認するための情報を取得し評価する。文献調査と概要調査では，検討の対象となる地域が大きく異なることも予想されるが，評価事項が同じであること，概要調査地区だけではなく，補足的に調査を行う範囲における調査結果も含めて検討する必要があることから，両段階において取得する情報，調査・評価の考え方は基本的に同じである。したがって，概要調査の地表調査では，文献調査により取得することができなかった情報を取得し，これらの情報を文献調査により取得された情報に加えて，文献調査と同様の流れで評価する。これらの評価結果は，「精密調査地区選定上の考慮事項」に基づく評価に用いるとともに，レファレンス処分場概念の構築や予備的な安全評価に必要な情報として提示する。

隆起・沈降量の調査・評価手法には，千年から十万年オーダーの隆起量を把握できる段丘を用いた地形学的手法（吉山・柳田，1995；小池・町田編，2001 など），千年から百万年オーダーの隆起量を把握できる堆積深度が明らかな地層を用いた地質学的手法（成瀬，1990；増田ほか，2001；藤原ほか，2005a など）などがあり，これらの適用可能な時間スケールの違いを考慮して，適切に組

み合わせて調査・評価を行う。なお，測地学的手法（多田ほか，1997；国見ほか，2001 など）により把握できる期間は，最大でも過去 100 年程度であり（水準測量），ほかの手法によって把握される隆起・沈降の傾向と必ずしも一致するとは限らないことが知られているため，参考資料とする。

一方，侵食量については，ダムの堆砂量データや高度分散量により評価する方法（Yoshikawa, 1974；藤原ほか，1999 など）に基づいて全国規模の侵食に関するマップが整備されている。しかしこれらのマップに用いられているデータ期間は短い。地域ごとの侵食量評価の知見としては，内陸では河川の下刻量（深さ）と隆起量がほぼ釣り合うというもの（高木ほか，2000）や，地質学的手法に基づき侵食量を評価した事例（高橋ほか，2005）がある。また，海岸部における侵食については，氷河性の最大海面低下約 140m と地殻変動による評価期間内の海面変化量の合計値（最大相対的海面変化量）を考慮する方法（産総研深部地質環境研究センター編，2007 など）がある。これらの既往の評価事例を参考に，サイトの地形発達状況，特に侵食により形成された地形の分布やその規模など，地質分布状況などについて調査し，侵食量を評価する。

隆起・沈降量の将来予測については，過去の変動量，法則性などを外挿することにより，将来 10 万年程度の予測を行う。さらに，プレート運動との関連性を考慮し，隆起・沈降運動をもたらした地形・地質構造発達過程を明らかにすることにより，プレート運動の継続性を想定できる期間において，地質構造発達過程を外挿することにより予測する。ただし，これらの予測期間については，地域ごとに地質構造の発達過程が異なることに留意する。

侵食量（最大下刻量）や将来の地形変化については，予測された隆起・沈降に対して，過去の侵食履歴と地形変化シミュレーションの結果を考慮して評価する。

(3) 文献調査および概要調査における調査・評価の流れ

文献調査および概要調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを図 5.2.2-4に示す。また，主な調査手法を表 5.2.2-5，表 5.2.2-6に示す。

文献調査では，文献・資料の収集・整理，空中写真や高解像度の数値標高モデルを用いた地形判読などにより地形・地質情報を取得し，応募区域およびその周辺の隆起・沈降量およびその分布，侵食量，測地学的な境界，気候・海水準変動などを把握する。「概要調査地区選定上の考慮事項」への適合性を評価する場合には，海成・河成段丘を用いた地形学的手法が最も適している。続いて，火山・火成活動（第四紀火山の分布など），地震・断層活動（活断層などの分布など），地質・地質構造の情報を考慮し，地形・地質構造発達過程を検討する。それらの検討結果を踏まえ，必要に応じて内挿・外挿するなどして，応募区域およびその周辺の過去の隆起量（分布），侵食量（最大下刻量）を評価する。将来の隆起・侵食については，地形・地質構造発達過程の外挿，地形変化予測モデルなどにより評価する。地形変化予測モデルによる地形変化の将来予測については，新旧地形面からの類推/モデル化（Sasaki *et al.*，2009），地形変化シミュレーション（JNC，2005a）といった研究事例を参考にして，河川による下刻だけではなく，河川の側刻，海岸侵食や断層運動の地形変化への影響も含めて検討する。

概要調査の段階における隆起・侵食にかかわる調査は，基本的に地表調査において実施する。しかし，隆起量や侵食量の指標となる段丘面の構成層やその形成年代に関する情報を取得するため，必要に応じて短尺のボーリング調査を実施する。その際には，同一段丘面内であっても段丘を構成する地質に多様性が認められる場合があること，ある段丘の形成年代の誤認がその地域の段丘全体の対比・編年に修正をもたらし，隆起量評価の見直しが生じる可能性があることから，一つの段丘

において地表地質踏査とボーリング調査（短尺）を併せて，複数個所で確認する。地下深部の地質環境特性の把握を主目的とする概要調査地区内における大深度ボーリング調査を，隆起量や侵食量の指標となる地形面上，または最終氷期以降の堆積物の分布域において実施した場合には，地表付近に分布する堆積物の分布，形成年代，堆積環境などを中・後期更新世の隆起量の指標となる情報，または最終氷期（海水準低下期）の侵食量の指標となる情報として取得する。また，概要調査地区内における大深度ボーリング調査の結果を用いて，隆起運動の背景にある地質構造発達過程を検討する。これらの結果を考慮して，地形・地質構造発達過程や隆起・沈降量を再評価し，さらに地質構造発達過程を外挿することにより将来の隆起・沈降量を予測する。

一方，侵食については，最終氷期以降の堆積物の厚さを，最終氷期の侵食深さの指標とみなせることから，これを把握するための物理探査，ボーリング調査を必要に応じて実施する。これらの調査により取得された情報と，隆起・侵食にかかわる更新情報に基づき，最大下刻量の評価を行い，地形変化予測モデルにより将来の侵食量を評価する。

(4) 隆起・侵食にかかわる調査範囲・位置などの設定の考え方

概要調査段階における隆起・侵食にかかわる調査は，概要調査地区および補足的に調査する地区にまたがって実施し，両地区の調査結果を総合的に判断して評価を行う。このため，調査範囲の設定は，概要調査地区および補足的に調査する地区の両者を合わせたものとして考える。

調査範囲設定に当たっては，段丘を用いた隆起量調査・評価の観点，最大下刻量の見積りの観点，さらに，隆起・沈降運動の様式，地形・地質構造発達過程の把握という観点から，概要調査地区の近傍を流下する河川の河口から上流域までを包含し，既知の活断層などの存在を示唆する変動地形の分布，測地学的な隆起・沈降境界などに留意することが重要である（木方ほか，2010）。概要調査地区および補足的に調査する地区に，変動地形と隆起・沈降境界が含まれるように設定する。

また，最終氷期の侵食の深さの指標となる最終氷期以降の堆積物を物理探査で把握する場合には，主要河川の河口部において，河川に対してできるだけ直交する方向に測線を設定し実施する。さらに，堆積物の確認のためのボーリング調査を実施する場合には，その最深部を狙ってボーリング調査地点を選定する。

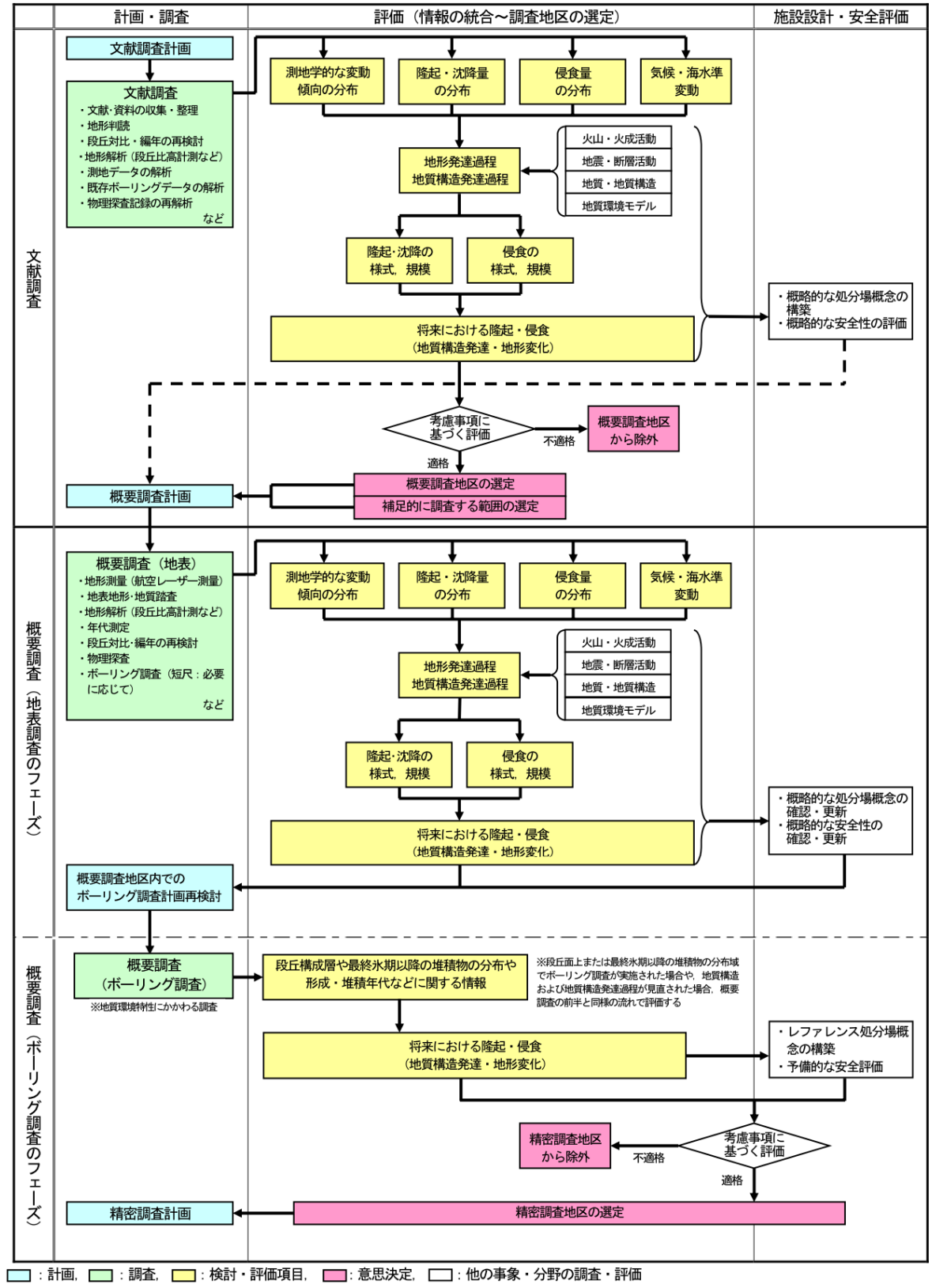


図 5.2.2-4 隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-1 に示した文献調査および概要調査の流れのうち，隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.2.2-5 隆起・沈降にかかわる主な調査手法

手法		得られる情報	対象期間	主な調査・研究事例	備考
地形学的手法	海成段丘	更新世海成段丘の旧汀線高度，段丘の離水年代，海水面高度	10^4～10^5年	小池・町田編（2001）	・MIS5eの海成段丘は我が国の海岸地域に広く分布する。 ・海成段丘の編年の信頼性と精度が重要である。
	河成段丘	更新世の河成段丘の比高，段丘形成年代	10^5年	吉山・柳田（1995） 田力・池田（2005） 幡谷（2006b）	・河成段丘は我が国の内陸部に比較的多く分布する。 ・河成段丘の編年，特に，MIS6段丘の認定の信頼性と精度が重要である。
	完新世の海成段丘	完新世海成段丘の旧汀線高度	地震隆起時 10^0～10^3年	太田ほか（1976）	・千葉県房総半島，新潟県佐渡島などで報告がある。
	山地高度（侵食速度）	山地の平均高度 （高度分散量）	10^6年	Ohmori（1987）	・Ohmori（1987）は赤石山地において最大の隆起量5～7mm/年と見積っている。
	山地の地形学的基準面	第三紀末の侵食小起伏面の高度，隆起年代	10^6年	第四紀地殻変動グループ（1968）	・準平原という仮説に対して批判がある。
地質学的手法	活断層の変位速度 （上下成分）	活断層による変位量	10^3～10^6年	活断層研究会編（1991） 中田・今泉編（2002）	・相対的な隆起・沈降量を示すが，段丘から見積られる隆起量等と組合せ，絶対的な隆起・沈降量を見積ることができる場合がある。
	特定の地層形成プロセス	前浜堆積物などの堆積深度，現在の高度	10^3～10^6年	藤原ほか（1996，1999） 白井・阿部（2001）	・古い時代でも適用可能な場合がある。
	地質断面 （特定の堆積面）	主に新第三紀～中期更新世の堆積層（境界面）の堆積期間，厚さ	10^5～10^6年	小池・町田編（2001）	・盆地での沈降量/速度の見積りに有効である。 ・堆積層の年代決定精度がよくないため，分解能は必ずしもよくない。
	特定の生物遺骸	離水したカキなど，潮位を示す生物遺骸の分布高度	地震隆起時	産総研深部地質環境研究センター編（2007）	・2007能登半島地震，2007年中越沖地震に伴なう隆起量の見積りに使われた。
	花崗岩，貫入岩の冷却史	FT年代，（U-Th）/He年代など	10^6～10^7年	田中ほか（1992），原山（1994），伊藤（2006）	・数100万年オーダーの長い時間での隆起・沈降量の積分値が得られる。
測地学的手法	全地球測位システム（GPS）	広域的なGPS観測データ	数ヶ月 ～10^1年	地震予知連絡会報で随時公表されている。	・上下変位の精度は水準測量に劣るが，リアルタイムで変動が把握できる。
	干渉合成開口レーダー（InSAR）	衛星画像データ，上下変動	数ヶ月 ～10^1年	宇根（2008），藤原（2006）	・地震時など，変動の前後の変化を面的に捉える。
	水準観測	１等水準点の測量データ（標高変化）	10^0～10^2年	壇原（1971） 国見ほか（2001）	・測地学的手法の中で，上下変動の検出精度はもっとも高い（0.1mm）が，適用できる場所が限られる。
	潮位観測	潮位観測（変動）記録	1日～10^2年	地震予知連絡会報において随時公表されている。	・海水量の増減の影響もあることに注意する必要がある。

表 5.2.2-6 侵食にかかわる主な調査手法

手法		得られる情報	対象期間	主な調査・研究事例	備考
地形学的手法	滝や遷急点の後退	河床測量成果，地質分布	数ヶ月～10^4年	早川・松倉（2003）	
	段丘面の侵食	開析谷の体積	10^4～10^5年	太田（1971），藤原ほか（2005b）	・海成段丘について計測された事例がある。
	沖積錐の体積	沖積錐の体積，河川の流域面積	10^4～10^5年	磯ほか（1980）	
	高度分散量など山地地形	地形計測データ	10^6年	Ohmori（1985）	
	成層火山の開析度	成層火山の侵食量（地形計測データ）	10^4～10^5年	鈴木（1969）	
	隆起量と侵食量の釣合	内陸部隆起量	10^4～10^5年	高木ほか（2000）	・内陸部では，第四紀後期の隆起量と侵食量がほぼ釣り合う。
	地形変化シミュレーション	地形変形量（シミュレーション結果）	10^4～10^5年	Nogami et al.（2003），JNC（2005a）Sasaki et al.（2009）	・検証方法の確立に課題がある。
地質学的手法	ダム堆砂	ダム堆砂量	10^0～5×10^1年	藤原ほか（1999）	
	盆地や湖の堆積土砂量	盆地や湖の堆積土砂量 堆積年代	10^4～10^5年	阿子島（1983）	
	沖積層の基底深度	ボーリングデータ，物理探査データ，基底深度分布	10^4年	鳥越ほか（2002）	・海退時の現在の海岸線付近の最大下刻量を見積る。
	花崗岩，貫入岩の冷却史	FT 年代，（U-Th）/He 年代	10^6～10^7年	田中ほか（1992），原山（1994），伊藤（2006）	・数百万年オーダーの長期間の隆起量と現地形から削剥量を見積もる。
	シリカ鉱物の分布深度	鉱物組成，形成時の分布深度	10^6年	高橋ほか（2005）	・古地温勾配，古地表温度の推定方法に課題がある。
	宇宙線生成核種	^{10}Be や ^{26}Al の計測値，侵食速度	10^4～10^5年	若狭ほか（2004）	・オーストラリア花崗岩地帯などでの適用事例がある。 ・わが国での適用事例は少ない。

5.2.3 地質環境特性にかかわる調査・評価

ここでは，自然現象の著しい影響を回避した上で，処分施設を設置しようとする地層および周辺の地質環境特性を把握する調査・評価について述べる。

なお，「概要調査地区選定上の考慮事項」のうち法定要件に関する事項として設定された，“第四紀の未固結堆積物”，“鉱物資源“については，地質分布と関連性があるため，これらの項目にかかわる調査・評価についても，本節において述べる。

本節では，5.2.3.1 において，調査・評価の考え方や流れ，概要調査地区設定の考え方について述べ，5.2.3.2 において地質環境の各特性にかかわる情報に基づいて構築される地質環境モデルなどの定義や構築手順などについて述べる。また，5.2.3.3 では，物質移行特性や施工・操業安全にかかわる事項について述べる。

5.2.3.1 地質環境特性の調査・評価

(1) 地層処分システムへの影響とその取り扱い

地層処分にとって重要な地質環境特性は，地下水化学特性，地下水流動特性，岩盤特性（熱・力学），物質移行特性などである。また，これらの基盤的な情報として地質・地質構造が挙げられる。

岩石の種類や分布・連続性，断層や割れ目の形状などは，岩盤の性質だけではなく，地下水や物質の移行経路の構造やその中での地下水と岩石の化学的な反応などを支配している。このため岩盤と地下水の特性を理解する際に，地質・地質構造との関係を考慮する必要がある。特に，地下水や物質の移行経路となる大小さまざまな地質構造要素に着目し，その幾何学的形状・構造や化学的な性質をとらえることが重要である（JNC，1999b）。また，地質・地質構造にかかわる情報から導かれる岩体の形状・規模は，地下施設の施工性，操業性，廃棄体の収容能力などと密接な関係があり，処分施設設計の基本的な条件となる（土木学会原子力土木委員会地下環境部会編，2001）。土木学会原子力土木委員会地下環境部会編（2001；2006）では，地下施設の設計・施工や安全評価に影響を与える地質環境の把握を容易にする観点および設計や施工上の制約を少なくする観点から，地質構造が単純であり，均質で大きな岩体であることを，概要調査地区または精密調査地区を選定する上での好ましい条件としている。これらのことを踏まえ，NUMO（2004；同，2009b）は，地下施設を設置しようとする地層およびそれを被覆する地層において割れ目，風化，変質が少ないこと，地下施設を収容し得る深さに良好な地層が広く分布することを当該サイトの地質環境特性の総合的な評価を高める条件としている。

地下水化学特性はオーバーパックの腐食およびガラスや核種の溶解に影響を及ぼすほか，緩衝材の化学的な安定性や緩衝材および岩盤中での核種・鉱物・地下水の相互作用を支配する重要な要素である。特に地下水の酸化還元状態は，オーバーパックの腐食速度およびガラスや核種の溶解速度に大きく影響する（JNC，1999b）。土木学会原子力土木委員会地下環境部会編（2001；2006）では，人工バリアの腐食および変質を考慮し，酸化的な環境，著しく酸性もしくはアルカリ性の地下水が支配的に分布する地域のうち，地層処分システムに対して著しい影響を及ぼすと判断される箇所は，概要調査地区または精密調査地区として避ける必要があるとしている。また，人工バリアの耐久性や核種移行の観点から，地下水は中性から弱アルカリ性であることを，精密調査地区を選定する上での好ましい条件としている。これらのことを踏まえ，NUMO（2004；同，2009b）は，地下水の酸性あるいはアルカリ性が著しくないこと，地下施設を設置しようとする地層や地下水が広範囲に酸化されていないことを当該サイトの地質環境特性の総合的な評価を高める条件としている。

地下水の動きや水みちの連続性などは核種移行経路と関連性があり，地層処分システムの核種閉じ込め機能に大きな影響を及ぼす（土木学会原子力土木委員会地下環境部会編，2006）。また，地下水の動きは地下水の水質とともにオーバーパックの腐食速度やガラスおよび核種の溶解速度を支配し，地下水の動きが大きい場合には，緩衝材自体の物理的な安定性に影響を及ぼすことも考えられる（JNC，1999b）。土木学会原子力土木委員会地下環境部会編（2001；2006）では，地下水の流速が速く地層処分システムに著しい影響を及ぼすと判断される場合には，概要調査地区または精密調査地区として避ける必要があるとしている。また，岩盤の透水性や動水勾配が小さい場合には地下水流動が遅くなり天然バリアの封じ込め機能がより向上し，人工バリアへの負担が低減できると考えられることから，透水性と動水勾配が小さいことを概要調査地区または精密調査地区を選定する上での好ましい条件としている。これらのことを踏まえ，NUMO は，地下施設を設置しようとする地層において地下水の流量・流速が小さいことを当該サイトの地質環境特性の総合的な評価を高める条件としている（NUMO，2004；同，2009b）。

岩盤特性（熱・力学）については，人工バリアの仕様や処分施設のレイアウトなどを決める上で重要な要素である。岩盤の熱特性は，処分場の温度環境や人工バリアの化学的な反応に影響を及ぼす。特に緩衝材の化学的な安定性はその品質維持にとって重要である。一方，力学特性は，処分場の建設・操業時における空洞安定性やオーバーパックや緩衝材の力学的な安定性を左右する（JNC，1999b）。土木学会原子力土木委員会地下環境部会編（2001；2006）では，第四紀の堆積層のうち未固結なものは強度が著しく小さく，坑道掘削が困難であることから，地下施設の設置対象から除外する必要があるとしている。また，掘削坑道の安定性や経済性などに大きな影響を及ぼすことから，処分施設の設置対象とする岩体は，掘削する空洞の力学的安定性を確保できる十分な強度があり，地山強度比が大きく，その強度特性と変形特性は設計・施工の観点から合理的な範囲であることを，精密調査地区を選定する上での好ましい条件としている。これらのことを踏まえ，NUMO は，処分施設を設置しようとする地層およびそれを被覆する地層において岩盤の強度が低くないこと，変形が小さいこと，地温勾配が小さいこと，地下施設を収容し得る深さに良好な地層が広く分布することを地質環境特性の総合的な評価を高める条件としている（NUMO，2004；同，2009b）。

岩盤中での物質移動は，天然バリアとしての機能に直接的に関与するものである。岩盤中における物質移動の主な原動力は地下水の動きであるが，単に動水勾配に沿った流れ（移流）だけではなく，濃度勾配により物質が岩盤のマトリクス中に拡散する現象（マトリクス拡散）を考慮することも重要である。また，地下水を媒体として移動する過程においては，物質が分散することや，鉱物の表面に収着するような現象にも注目すべきである（JNC，1999b）。物質移行特性にかかわる現象については，その地質環境の条件によって影響の有無やその程度が異なると考えられる。このため，物質移行特性は，地層処分にとって重要な地質環境特性の一つであるが，処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）における調査・評価が主体になると考えられることから，本書では 5.2.3.3 においてその他の項目として述べることとした。

(2) 調査・評価の基本的な考え方

文献調査および概要調査の段階では，地質環境特性に関する情報を取得し，地質構造発達過程と自然現象の影響の評価を踏まえて，応募区域およびその周辺の地質環境を評価する。地質環境特性の調査・評価における最終目的は，自然現象の著しい影響を回避した領域において，その地質環境が人工バリアにとって適切な設置環境であり，それ自体が天然バリアとして機能する地質環境を有

していること，そして，それらが長期にわたって維持されることを示すことである。そのためには，各段階の調査により取得した情報をもとに情報の統合・解釈を行い，地質環境モデルを構築（更新）し，それらを活用し施設設計や安全評価を行うことである。さらに，施設設計や安全評価の結果を地質環境特性の評価に反映させることも重要である。地質環境特性は，(1) で述べたように相互に関連性を有していることから，個々に評価するのではなく，各特性の相互関係，整合性を踏まえた評価が重要である。また，調査計画の立案に当たっては，施設設計や安全評価の観点から必要な情報の取得，特に概要調査計画の立案では，文献調査では取得できていない情報の取得や，文献調査で構築した地質環境モデルの不確実性を低減させることに加えて，施設設計や安全評価の観点から重要な地質環境特性にかかわる情報を取得できるようにする。これに関して，NUMO は米国ローレンスバークレー国立研究所（LBNL）と共同で，諸外国および日本における地質環境特性調査の実績調査と，仮想サイトにおける解析的検討に基づき，概要調査における重要なパラメータを把握し，それらを効率的に取得するための調査プログラムに関する考え方を検討した（後藤ほか，2007）。実績調査からは，概要調査の段階では，断層水理特性，境界条件，通過流量に関するものが各国共通の重要なパラメータであり，解析的検討からは，境界条件，断層水理特性，平均透水係数が地下水流動に大きな影響を及ぼすことから重要と判断された。以上を踏まえて，概要調査では，火山や活断層等の影響の有無，主要断層の特性，境界条件，対象地層の特性の把握を優先し計画することが提唱された。以上のことを考慮して，合理的・効率的な調査計画を立案し，的確に調査・評価を実施する。

(3) 調査・評価の流れ

文献調査から概要調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを，図 5.2.3-1に示す。

文献調査では，文献・資料の収集・整理のほか，空中写真判読，衛星画像解析などにより地質・地質構造，岩盤の水理特性，水文，地下水の水質，岩盤の物理・力学・熱特性などに関する情報を取得する。これらの情報のうち，第四紀の未固結堆積物の分布に関する情報，鉱物資源に関する情報に基づき，「概要調査地区選定上の考慮事項」のうち法定要件に関する事項に対する適合性を評価する。ここで，第四紀の未固結堆積物の分布および鉱物資源に関して，不適合と判断した場合（表 4.2.2-1 参照），それらを含めないように概要調査地区を設定する。次に，取得した情報に基づき，地質構造発達過程の編纂，地質環境モデルの構築を行う。この際，既往の地質図幅などの地表付近の地質・地質構造に関する情報のほかに，既往の資源探査やトンネルなどから取得される地下深部の情報も加えて推測する。地下深部における岩盤の水理特性や物理・力学・熱特性については，既往のデータベース（土木学会，2006 など）や文献・資料などから類似する地質環境のデータに基づいて推定することとなる。さらに，5.2.2 に述べた自然現象の影響に関する評価の結果を加え，地質環境の長期変遷に関する評価を行う。地質環境特性にかかわる文献調査の結果は，この段階において実施される施設設計や安全評価に対して情報を提供するとともに，その結果も踏まえ総合的に概要調査地区としての適性を評価して（NUMO，2004），概要調査地区を選定する。また，地質環境モデルに含まれる不確実性の低減や信頼性の向上，および施設設計や安全評価からの要求も考慮し，閉鎖後長期の安全性を確保する上で特に重要な構造・特性・現象を特定し，概要調査において明らかにすべき事項，それらの優先度などを明確にし，それらを反映した概要調査計画を立案する。

概要調査では，概要調査地区において地質環境特性を調査することにより，文献調査結果の妥当性を確認するとともに，文献調査では取得できなかった情報，文献調査で構築した地質構造モデル

に含まれる不確実性の低減や信頼性を向上させるために必要な情報，閉鎖後長期の安全性を確保する上で特に重要な構造や特性に関する情報などを取得し，概要調査地区内の地質環境特性をより詳細に評価する。地表調査では，地表踏査，物理探査，水文調査などを実施し，地質・地質構造，地下水流動特性，地下水化学特性などに関する情報を取得する。さらに文献調査の段階に取得された情報に概要調査により取得された情報を加え，地質環境の概念モデルおよび地質環境モデルを更新する。

概要調査地区が沿岸域に位置し，調査対象領域に海域が含まれる場合には，海底地形測量，物理探査，海底試料採取などを実施し，地質構造，地下水流動特性，地下水化学特性などに関する情報を取得する。沿岸域に特化した物理探査としては，三次元音波探査（佐伯ほか，2006；朴ほか，2008など）や海底電磁探査（吉村ほか，2006a など）などがあり，調査の必要性に応じて適用を検討する。海底堆積物には，過去の気候・海水準変動に関する情報が含まれることがあるため，試料採取では堆積状態をできるだけ乱さない状態で取得できる手法を適用する。また，沿岸域では内陸部に比べて海水準変動に応じた相対的な隆起・沈降（運動），侵食（作用）が生じ，地質環境特性，特に地下水流動特性，地下水化学特性に変化が想定されるため，地質環境特性の長期変遷にかかわる検討やその評価が重要になると考えられる。

地表調査のフェーズ終了時には，概略的な処分場概念や概略的な安全性の確認・更新を行い，ボーリング調査の計画を再検討する。

ボーリング調査では，地下深部までの地質環境特性にかかわる情報の取得を目的として，コア観察，物理検層，孔内試験，室内分析・試験，ボーリング孔を利用した物理探査などを実施する。これらの調査で取得した情報は，地表調査のフェーズと同様の流れで評価する。ただし，ボーリング調査では，地質・地質構造に関する情報だけでなく，岩盤の水理特性，地下水流動特性，地下水化学特性，岩盤特性（物理・力学・熱）などに関する情報も取得されるため，地質環境の概念モデルや地質環境モデルの更新においては，それぞれの関連性，整合性を図る。その際，地下水流動解析などの解析結果と実測データの比較を行うなどして，各モデルの整合性を確認し，整合性がとれない場合にはその要因を特定し，次の段階の調査計画に反映する。

地質環境特性にかかわる調査･評価については，結晶質岩を対象にした研究開発（三枝ほか，2007），堆積岩を対象とした研究開発（太田ほか，2007），沿岸域を対象とした基盤研究開発によって得られた知見（Ota *et al.*，2010；Amano *et al.*，2010；Niizato *et al.*，2010）を踏まえて進める。なお，これまでの NUMO における調査・評価技術の体系化検討を踏まえ，そのうちボーリング調査を中心とした技術を対象として電中研・横須賀地区において，電中研との共同研究により，ボーリング調査を中心とした概要調査技術の実証（5.3.2 参照）を行い，その適用性を確認している。

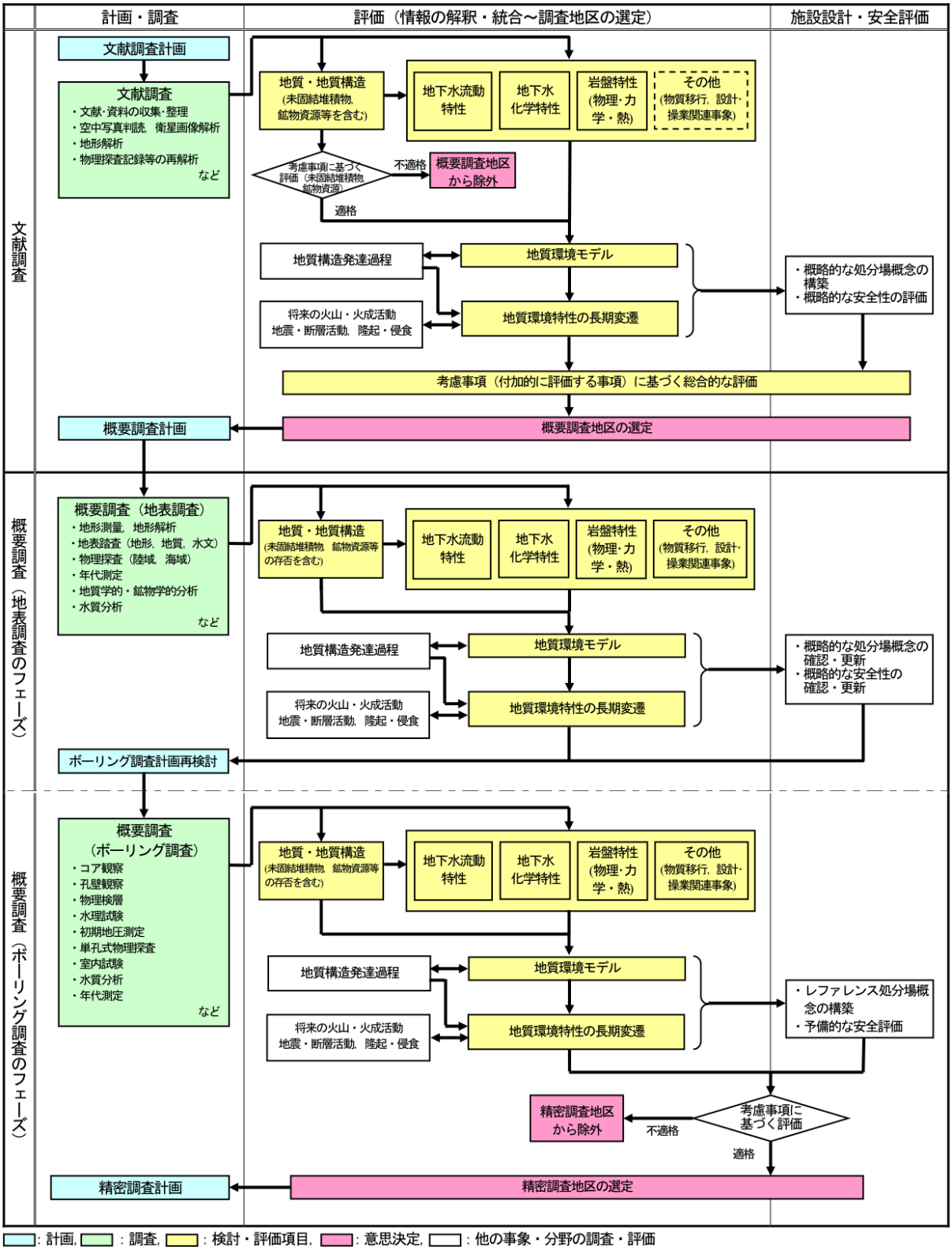


図 5.2.3-1 地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

わが国の多様な地質環境において，共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。図 5.2.1-1 に示した文献調査および概要調査の流れのうち，地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを抽出したものである。

(4) 概要調査の範囲・位置などの設定の考え方

地質環境特性の調査･評価を行うに当たり,応募区域において処分施設の設置が想定される深度を通過する地下水流動系を包含する水理境界（尾根，河川，断層などの応募区域およびその周辺の地下水流動に影響を及ぼす構造）が含まれること，また，将来の隆起・沈降および海水準変動を考慮し，応募区域およびその周辺における将来の大局的な地下水流動の上流側（涵養域）から下流側（流出域）が含まれること，そして，少なくとも処分施設の想定設置深度までの情報を取得するための調査が実施可能であることに留意して，概要調査地区を設定する。

概要調査地区において実施する物理探査測線の設定では，応募区域およびその周辺の地下深部の地質構造を把握できるような配置とし，測線間隔は，調査対象地域における地質分布，地形，人工構造物，もし海域を含む場合は海底地形，そして応募区域との位置関係を考慮して設定する（図5.2.3-2）。

ボーリング調査地点の選定では，応募区域およびその周辺において，地質・地質構造，岩盤の水理特性，地下水化学特性，岩盤特性（物理・力学・熱）などのうち不確実性が大きく，かつ施設設計や安全評価の観点から重要度の高い地質環境特性を把握できるように考慮して位置を選定する。ただし，物理探査結果の解釈において，地質・地質構造との対比を行うことの優先度が高い場合には，物理探査測線上またはその近傍にボーリング調査地点を設定する場合もある。また，水理学的に重要となる構造や地下水流動に影響を及ぼす構造（断層など）の水理特性が把握できる位置とする。ボーリング孔の掘削深度は，処分施設の想定設置深度，地下水流動状況，地下水質の分布を考慮して設定する。ボーリング調査は，地表調査終了後を基本とするが，合理的かつ効率的に概要調査を実施する観点から物理探査結果の解釈に利用するため,地表調査の段階に実施する場合もある。そして，ボーリング孔の効率的な利用として，初期ベースラインを理解するために実施するモニタリング（水位，水圧，水質など）孔としての利用も念頭におく。

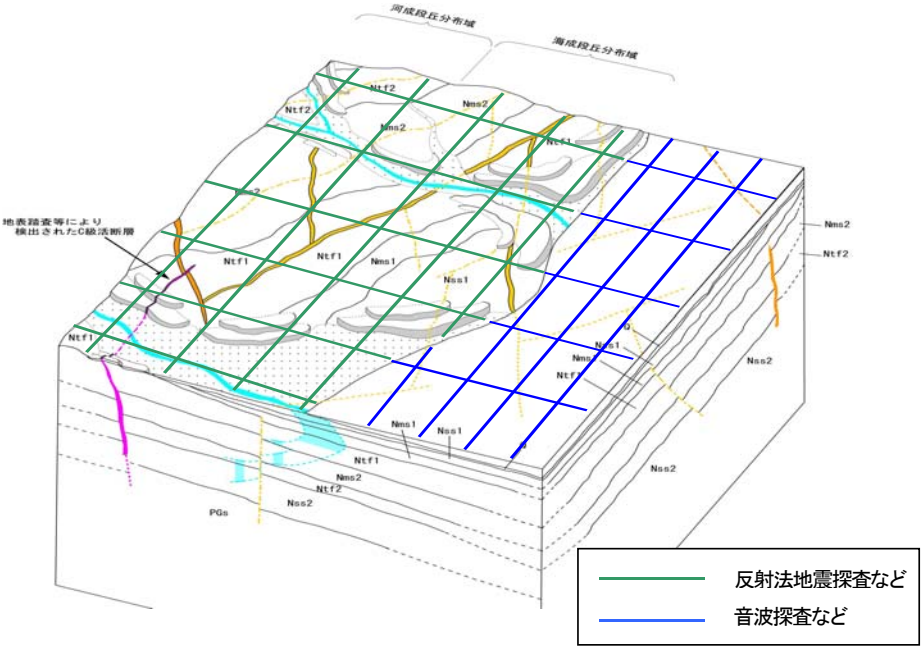


図 5.2.3-2 物理探査測線設定の検討例（原環センター，2002 を編集）

沿岸域・堆積岩を対象として反射法地震探査および音波探査などの測線設定を検討した例である。

5.2.3.2 地質環境モデルの構築

(1) 地質環境モデルの位置付け

サイト選定に当たっては，地質環境の調査・評価，施設設計，安全評価の三つの検討分野が互いに連携を図り，閉鎖後長期の安全性を確保できることを段階的に示すことが重要である。そのためには，対象地域の地質環境に関する情報を相互に利用可能な形式で整理し，地質環境の場の理解や不確実性に関する認識を共有する必要がある。地質環境モデルは，地質環境に関する情報を可視化することにより認識の共有化を図り，そのもととなるデータセットを通して施設設計や安全評価に必要なパラメータを提供することを可能にする。さらに，ステークホルダーの地下深部の地質環境に関する理解を深めるための媒体ともなりうる。

(2) 地質環境モデルの定義

NUMO では，海外および国内の先行事例（例えば，SKB, 2002）を参考に，地質環境モデルの構築にかかわる考え方をとりまとめた（NUMO，準備中）。以下に，地質環境モデルと，そのもととなる地質環境の概念モデルについて，定義と留意点について述べる。

＜地質環境モデル＞

- 地質環境の概念モデルをベースに，地質環境の各種特性の分布や性状を二次元または三次元で定量的に示したものの総称と定義する。
- モデル構築時の情報と地質環境の概念モデルに基づき構築されるため，情報の量や精度，作業仮説に依存した不確実性が内包されていることに留意する必要がある。
- 地質構造モデルをベースとして，水理地質構造（地下水流動）モデル，地下水化学モデル，岩盤特性（物理・力学，熱）モデルを構築し，各モデルの整合性が図ることが重要である。

＜地質環境の概念モデル＞

- 地層処分において重要な地質環境特性の場，現象，メカニズムなどに関する解釈を概念的に示したものと定義する。
- 必ずしも定量的に表現されるものではなく，過去から現在までの変遷に関する解釈，将来の変動に関する予測などの概念を含む場合もある。
- モデル構築時の情報量の不足，現象やメカニズムに対する理解の不足などに起因して，複数の概念モデルが構築されることもあり，それらが調査の進展に伴う情報量の増加により，一つの概念モデルに絞り込まれることがある。
- 地質・地質構造，水理地質構造（地下水流動），地下水化学，岩盤特性（物理・力学・熱）などの地質環境特性の各分野の概念モデルを構築し，それぞれの整合性を図ることが重要である。

(3) 地質環境モデルの空間スケール

地質環境モデルの空間スケールは，モデルの構築目的に応じて，適切なスケールであることが必要である。例えば，広域的な地下水流動状況を表現するためのモデルの場合，当該サイトの広域的な地下水流動系を包括したスケールで，当該サイトの候補母岩領域を通過する地下水の流動を評価するために必要となる領域（例えば，数十 km 四方）として設定することとなる（三枝ほか，2007）。一方，処分施設の設計（例えば，空洞の力学安定性の検討）に利用するモデルの場合は，構築する空洞の規模や空洞の掘削により物理的・力学的影響が検討可能なものであることが求められる。こ

のため，地質環境モデルの空間スケールを設定する際には，サイト調査・評価の観点からだけではなく，構築された地質環境モデルを利用する施設設計や安全評価の観点からも検討する必要がある。なお，異なる空間スケールの地質環境モデルが構築される場合には，各空間スケール間において，地質環境特性や現象の整合性または連続性を確保することが重要である。

複数の空間スケールを設定し地質環境モデルが構築された例を，図 5.2.3-3に示す。この例では，リージョナルスケールを数百km^2，ローカルスケールを数十km^2，サイトスケールを十数km^2としている。

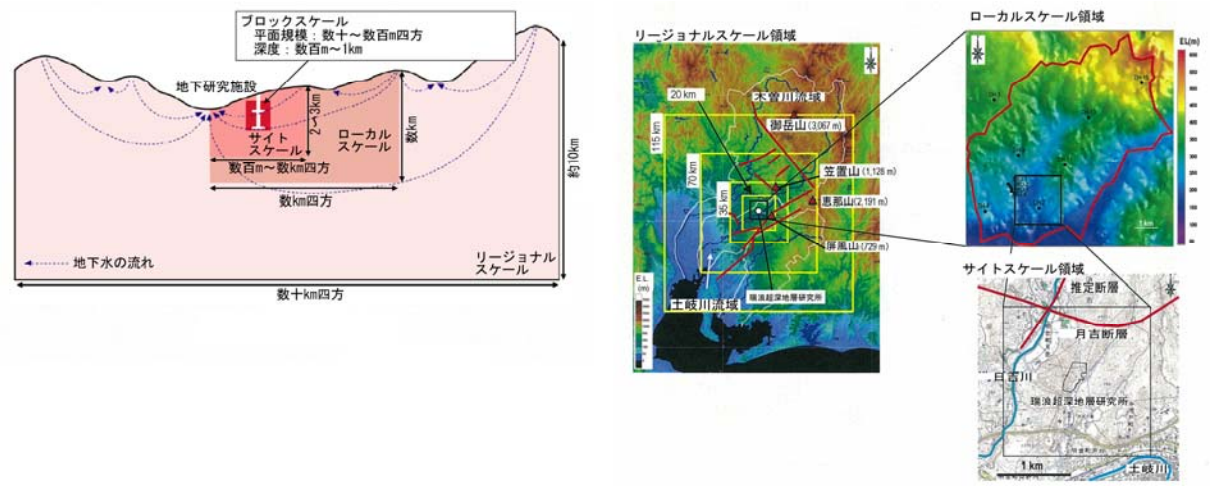


図 5.2.3-3 地質環境モデル構築領域として複数の空間スケールが設定された例（三枝ほか，2007を和訳）

東濃地域における広域地下水流動研究および超深地層研究所計画では，地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するとともに，地下水流動や物質移行などの評価の観点から四つの空間スケールが設定されている。

(4) 地質環境モデルの構築手順

地質環境モデルは，モデル構築時までに取得された情報をもとに構築された地質環境の概念モデルをベースとして，地質環境の各特性の分布や性状を定量的に可視化したものであり，地質環境の各特性の分布を支配する幾何形状がベースとなる。そこで，水理地質構造モデルや岩盤特性モデルの構築に先立ち，幾何形状要素に地質環境特性を包含するための地質構造モデルを構築する（図5.2.3-4）。

まず，モデル構築時までに取得された地質学的な情報，すなわち岩種・岩相，層序，割れ目分布，破砕性状，風化程度，変質程度などの情報に基づいて，水理地質構造，岩盤特性，地下水の地化学モデルを構築する上で重要と考えられる地質構造要素（岩体または地層，断層などの面構造など）の分類・特徴づけを行い，地質構造の概念モデルを構築する。地質構造の概念モデルには，各地質構造要素の成り立ちも含まれる。次に，地質構造の概念モデルをベースとして，各地質構造要素の三次元分布を定量的に表現（可視化）した地質構造モデルを構築する。なお，各地質構造要素の分布は，取得した情報をベースとして，内挿または外挿により推定する。

地質環境モデルのうち，水理地質構造モデルの構築に当たっては，まず，モデル構築時までに取得した水理学的情報（透水係数など）と上述した地質構造要素との関係を勘案した水理地質区分に

基づき，水理地質構造の概念モデルを構築する。次に，各水理地質区分の透水性の分布について，水理地質構造モデルの空間スケールや解像度に応じた補間方法を採用し（例えば，多孔質媒体として取り扱う場合，亀裂性媒体として取り扱う場合，多孔質媒体と亀裂性媒体を組み合わせて取り扱う場合など），透水性を設定する。そして，各水理地質区分の透水性の三次元分布を表現した水理地質構造モデルを構築する。また，地形状況，ポテンシャル分布，水文状況などの情報に基づいて当該サイトの地下水流動にかかわる境界条件を整理する。

地下水の地化学モデルの構築に当たっては，取得した地下水の水質に関する情報に基づく水質区分を行う。その際に，地下水化学特性の長期変遷を考慮した水質区分は，地下水の起源，岩石－水反応などを考慮して検討する。なお，各水質区分の分布を設定する際には，水理地質構造モデルを利用した地下水流動解析の結果や地下水流動の概念モデルと比較し，それらとの整合性について検討することが重要である。このような整合性の検討において，水理地質構造，地下水流動特性や地下水化学特性にかかわる概念モデル，または地質環境モデルの整合性に問題がある場合には，地下水流動解析における境界条件，水理地質区分やその水理特性の設定など再検討してモデルを再構築する。または，整合性に影響を及ぼす要因を特定し，次の段階（または次のフェーズ）の調査計画に反映する。

岩盤特性モデルの構築に当たっては，まず，取得した物理的・力学的情報（物性値など）と地質構造要素の関係を勘案した岩盤区分を行い，岩盤特性の特徴を記述した岩盤特性の概念モデルを構築する。そして，これをベースとして，各岩盤区分の境界や物性分布を表現した岩盤特性モデルを構築する。各岩盤区分の特性については，空間スケールや解像度に応じて適切な補間方法を採用する。

上記のように構築した地質環境の概念モデルや地質環境モデルは，概要調査地区の場の理解を深め，次段階の調査計画を作成する際の判断材料として利用するとともに，施設設計および性能評価で利用する各種パラメータの適用性，モデルに内在する不確実性やデータの信頼性を NUMO 内の技術者間で共有するためのツールとして用いる。

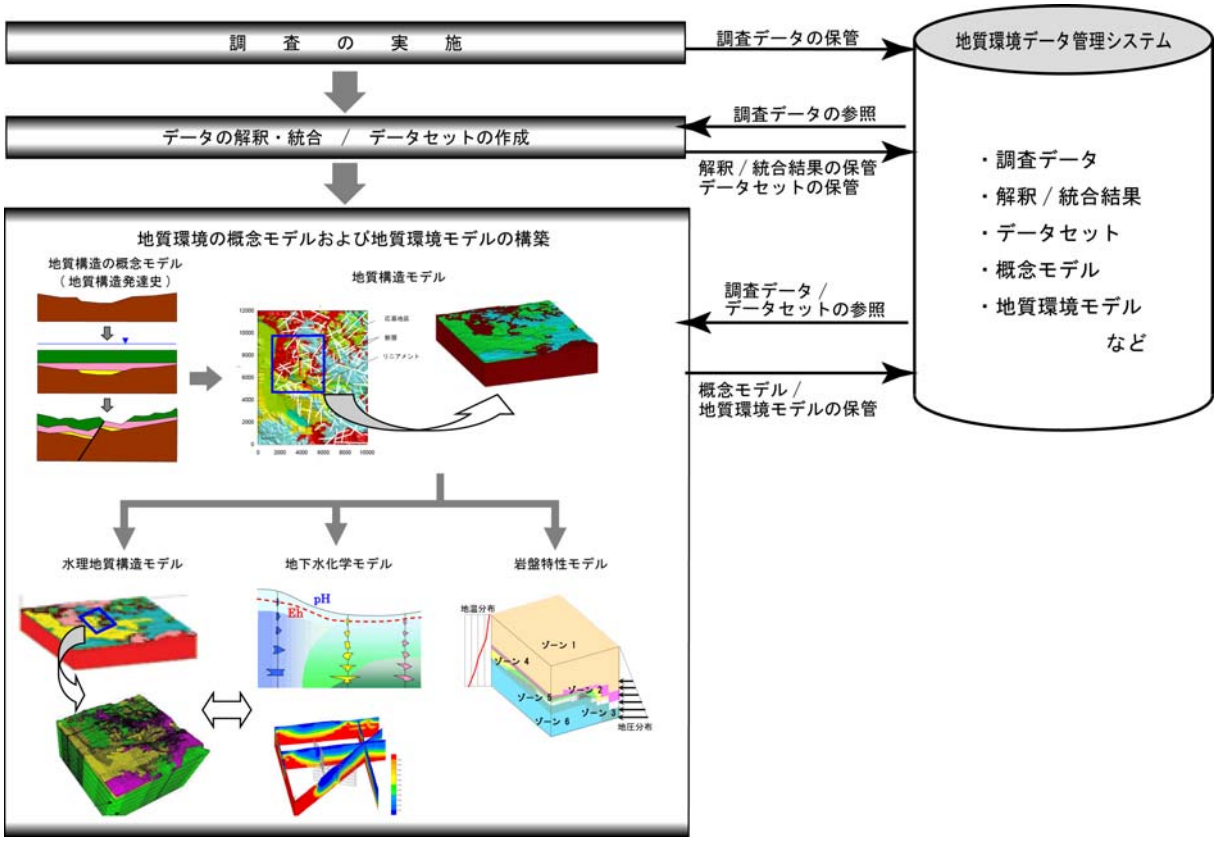


図 5.2.3-4 地質環境モデル構築の流れ（イメージ）

各段階の調査により取得された情報に基づき地質環境の概念モデル構築し，それをベースとして，地質環境の各特性の分布や性状を定量的に可視化した地質環境モデルを構築する。

5.2.3.3 その他

ここでは，物質移行特性，施工・操業安全に関する事項について，文献調査および概要調査における調査・評価の考え方について述べる。

(1) 物質移行特性

岩盤中での物質の移動は，天然バリアとしての岩盤の機能に直結するものである。物質の移動をもたらす主な原動力は地下水の動きであるが，物質移動においては，単に動水勾配に沿った流れ（移流）だけではなく，地下水を媒体として移動する過程において物質が分散する現象，濃度勾配によって割れ目中を移動する物質が岩盤のマトリクス中へ拡散する現象，鉱物の表面に吸着するような現象も生じる。また，地下水中のコロイド，有機物，微生物の存在は，核種の移行挙動に影響を及ぼすと考えられている。

岩盤中における物質の移行経路となり得る地質構造としては，岩石中の粒子間の間隙（粒子間間隙），岩石組織に起因する割れ目（層理面や片理面沿いに形成される割れ目など），地殻構造圧による岩石の破壊に伴って形成される割れ目（節理，断層など）が挙げられる。これらは，物質の移行経路となり得るが，遮水性を示すこともあるため，その性状に注意して評価する（原環センター，2006；中俣ほか，2007）。これらは，地質環境の地質・地質構造に関する情報の一部であり，5.2.3.2に述べた地質環境特性の調査・評価において取得した情報に基づいて，物質移行場の概念を検討する。

岩盤中での物質移行を遅延する現象であるマトリクス拡散や収着については，国内外の地下研究施設における原位置試験（例えば，Ota *et al.*，1999；Ota *et al.*，2003；Alexander *et al.*，2009）や室内実験などを通じて現象・挙動の理解に関する研究が進められている（例えば，吉田ほか，2002；栃木ほか，2007）。文献調査や概要調査の段階では，まず地質環境特性を把握するとともに，その地質環境下においてマトリクス拡散や収着が生じるかどうか，その影響の程度を検討していく。これらの検討に必要な情報を，地下水試料やボーリングコア試料を用いた分析などにより取得していく。さらに，必要に応じて物質移行特性にかかわる概念モデルの構築を行う。

地下水中のコロイド，有機物，微生物については，さまざまな地点において，その種類や量を把握する手法や，その調査事例が報告がされている。しかし，これらが物質移行に対して及ぼす影響については，現状では十分な知見が得られておらず，さらなる研究開発が進められている（例えば，村上ほか，2003；黒澤ほか，2004；Yoshida and Suzuki，2006；上岡，2007；SKB，2009 など）。このため，文献調査および概要調査の段階では，地質環境特性を把握するとともに，地下水中に含まれるコロイド，有機物，微生物の種類やその量について調査した上で，その条件下においてどのような現象や影響があるか，その影響の程度を検討していく。これらの検討に必要な情報を，地下水試料やボーリングコア試料を用いた分析などにより取得していく。

(2) 施工・操業安全に関する事項

施工・操業安全に関する事項としては，自然災害（地すべり，洪水など），異常間隙水圧，膨脹性地山，山はね，有害ガスなどが考えられる。これらの事象のうち，坑道の掘削が難航するなどの影響が生じる可能性があると考えられる異常間隙水圧，膨脹性地山，山はねについて，文献調査および概要調査における調査・評価の考え方を述べる。

（i） 異常間隙水圧

異常間隙水圧は，膨張性地山，大量湧水の原因の一つになると考えられている。施工時に異常間隙水圧に遭遇した場合，坑道の崩壊，坑道内への著しい押し出しなどが発生し，坑道の掘削が難航するなど施工時に影響が生じることがある。また，異常間隙水圧の解放に伴い発生する事象として，泥火山が知られている。泥火山が発生した場合，急激な流体の移動が生じることにより，天然バリア機能に対して影響を及ぼす可能性がある。

わが国における異常間隙水圧は，秋田・新潟などの油田地帯で実測されており（千木良・中田，1994），第三紀～第四紀堆積岩分布地域，特に油田・ガス田地域の地下深部（1,000～2,000m 程度）などの限られた条件を有する地域に分布していると考えられる（土木学会原子力土木委員会地下環境部会編，2001）。異常間隙水圧の解放により発生したものと考えられる泥火山については，背斜軸や断層などに沿って分布していることが知られている。わが国においては，北海道新冠町（千木良・田中，1997），新潟県松代町（新谷・田中，2005）などで認められている。

これらの知見を踏まえ，文献調査および概要調査の段階では，異常間隙水の存在が認められる地域と同様の特徴を有する地域であるか検討する。その際には，既往事例において異常間隙水の存在が認められる地域の地質・地質構造，水圧などと，当該サイトにおいて取得された情報を比較し，検討・評価する。これらの検討・評価を行うため，地質分布，地質構造，間隙水圧などの情報を取得する。また，それらの情報に基づき，処分施設の成立性，閉鎖後長期の安全性への影響を評価し，その影響が大きいと判断される場合には，その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

（ii） 膨張性地山

施工時に膨脹性地山に遭遇した場合，坑道の内空への著しい押し出しが発生し，坑道の掘削が難航するなど施工時に影響が生じることがある。膨脹性地山の原因について，現状では，せん断破壊説，吸水膨張説，クリープ説，大きな地圧説，高圧のガス・間隙水圧説などがあるものの，それぞれの要因が複雑に関連し，定説がない状況である。既設トンネルの工事などにおいて，膨脹性地山に遭遇した事例が多く報告されており，遭遇した場所は志田原ほか（2004）により整理されている。このような膨脹性地山は，新第三紀の泥岩・凝灰岩，変成帯や構造帯の蛇紋岩，熱水変質帯など特定の場所で発生していることが知られている（土木学会，1983）。また，膨張性地山に遭遇した場所の地層には，膨張性にかかわる粘土鉱物（スメクタイトなど）の含有量が高く，一般に強度が低いことなど（仲野，1975；同，1995；朝倉・小島，1995）が知られている。

これらの知見を踏まえ，文献調査および概要調査では，膨脹性地山が見られる地質と同様の特徴を有した地質が，当該サイトに分布するか検討する。その際には，既往事例において膨脹性地山が見られる地点の地質・地質構造，物理・力学特性などと，当該サイトにおいて取得された情報を比較し，検討・評価する。これらの検討・評価を行うため，地質分布，地質構造，岩盤特性（物理・力学）などの情報を取得する。また，それらの情報に基づき，処分施設建設時の安全確保，処分施設の成立性，閉鎖後長期の安全性の観点からも検討を行い，それらに対して影響が大きいと判断される場合には，その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

（iii） 山はね

山はねは，坑道の掘削時に坑壁が崩壊し岩片の急激な飛散が発生する事象であり，坑道の掘削時に影響を及ぼす事象である。山はねの原因については，大きな地圧により脆性な岩盤中に応力集中

を生じ，そこから亀裂が発生・連通し，連続的な破壊により周辺岩盤の弾性ひずみエネルギーが解放されることなどに起因すると考えられているが，発生機構については十分に明らかにされていない（川本ほか，2001）。既設トンネルの工事などにおいて発生した山はねは，地下深部の割れ目の少ない均質・堅硬な岩盤でかつ空洞周辺の応力が岩盤の破壊条件に近い条件となる場合に発生することが多いことが知られている。

このような知見を踏まえ，文献調査および概要調査の段階では，山はねが生じるような力学特性を有する岩体が当該サイトに分布するか検討する。その際には，岩盤中の割れ目頻度，力学特性などに関する情報に基づいて，検討・評価する。これらの検討・評価を行うため，地質分布，岩盤特性などの情報を取得する。また，それらの情報に基づき，処分施設建設時の安全確保，処分施設の成立性の観点からも検討を行い，それらに対して影響が大きいと判断される場合には，その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

5.2.4　調査・評価業務を支援する技術

前項までに述べてきた体系的な文献調査および概要調査を，合理的･効率的に調査計画を立案し，それに基づき的確に遂行するために，これらにかかわる業務を支援するためのマニュアルやツールを整備してきた。以下にその概要を述べる。

5.2.4.1　マニュアルの整備

(1)　文献調査マニュアル

NUMOは，文献調査に関する業務を，その品質，透明性，追跡性を確保しつつ，合理的・効率的に業務を実施するための文献調査マニュアルを整備した。文献調査マニュアルには，実施体制・分担と，①応募地区の地質的条件の事前確認，②文献調査計画書の作成，③文献・資料の収集，④収集した文献・資料に記載された地質環境情報の整理と文献・資料の管理，⑤地質環境の総合解析・評価，⑥概要調査地区の選定，⑦資料の公開，⑧品質管理の各業務についての具体的な進め方および支援システムの概要を記している。上記の①から⑥までの業務の手順を図 5.2.4-1に示す。

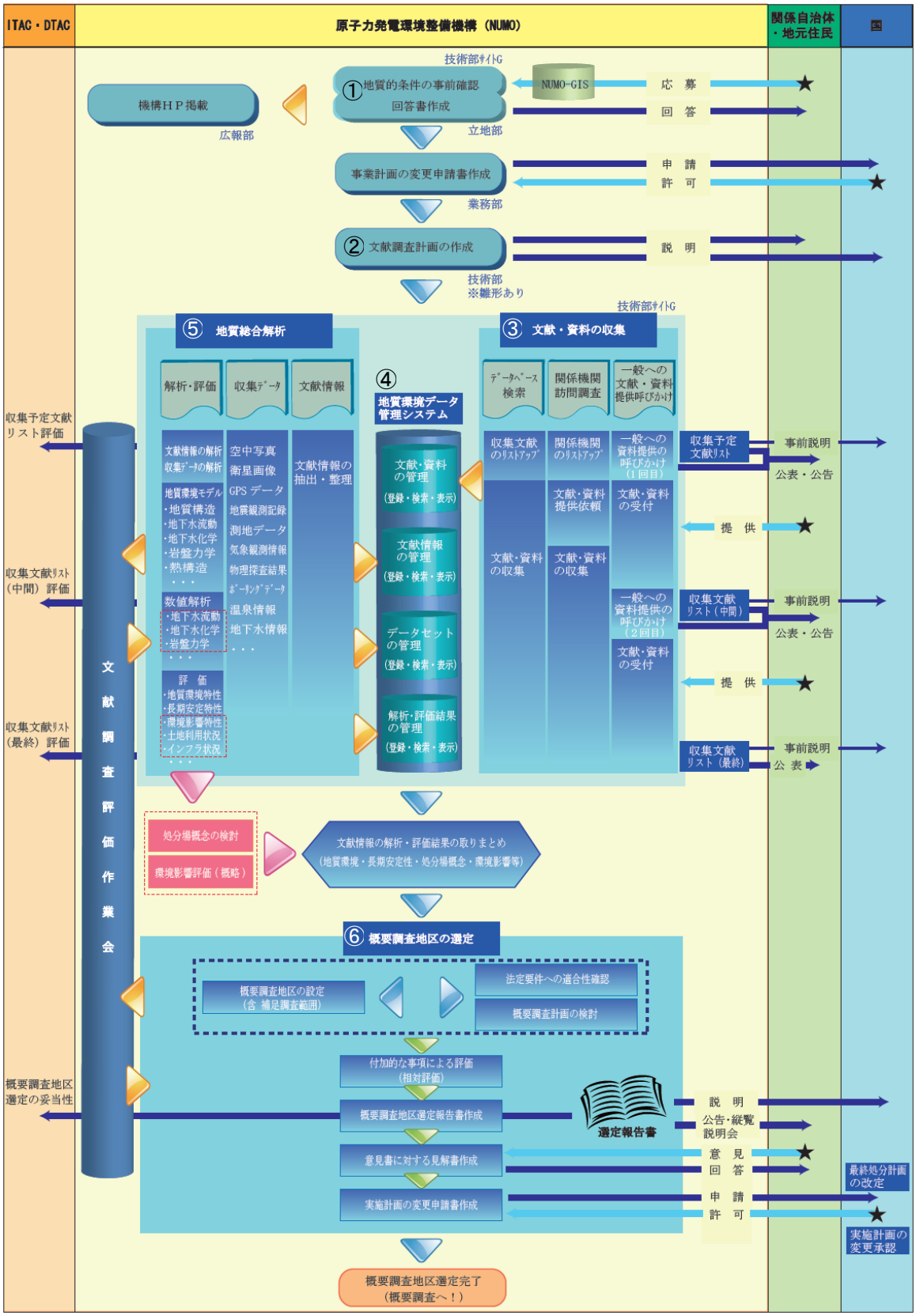


図 5.2.4-1 概要調査地区の選定までの基本的な流れ

①応募区域の地質的条件の事前確認から，⑥概要調査地区の選定に至る業務とその手順を示す。

(2) 概要調査計画立案マニュアルおよび概要調査施工管理マニュアル

サイト選定の第 2 段階（精密調査地区選定段階）における概要調査では，地上からの調査（地表踏査，物理探査，ボーリング調査など）により，地層処分システムに著しい影響を与える自然現象や地下深部の地質環境特性に関する情報を取得し，適切な工学的対策や閉鎖後長期の安全性の評価に必要な情報を取得・提供する。概要調査を的確かつ効率的に実施するためには，着手前の計画立案と調査実施中の管理が重要であることから，概要調査計画立案マニュアル（PIPM : NUMO，準備中）および概要調査施工管理マニュアル（PIMM）を作成した。

PIPMは，海外および国内の先行事例における経験や教訓を踏まえて，概要調査計画の立案に際して考慮すべき検討方針，手順および留意点などの基本的な考え方を取りまとめたものである。図 5.2.4-2に計画立案手順を示す。調査計画の立案はStep.1～Step.8 の 8 つのステップからなる。調査計画立案の前半の主要な検討は，Step.4 の調査目標（取得すべき情報）の設定に向けた，地質環境の概念およびモデル構築（Step.2）と，処分場概念の検討（Step.3）である。Step.2 では，文献調査により取得された情報に基づき，地質環境の長期安定性および地質環境特性の理解のために当該サイトの地質環境を概念化するとともに地質環境モデルを構築する。この際，文献調査により取得される情報の量や質を勘案し，計画立案時点での不確実性を把握する。Step.3 では，構築された地質環境の概念や地質環境モデルを踏まえ，処分場の設計や安全評価の観点から概要調査により取得すべき情報を検討する。Step.4 では，地質環境の概念および地質環境モデルの信頼性向上や不確実性の低減，処分場概念の信頼性向上など目的として概要調査の目標を設定する。

調査計画の後半（Step.5～Step.8）は，Step.4 において設定した調査目標を達成するための具体的な検討になる。まず，Step.5 では，調査目標を達成する上で有効となる調査手法を，当該サイトの地質環境や制約条件などを考慮し選定する。概要調査により取得される情報は，膨大かつ多分野にわたり，各分野で専門的な検討が行われ，各分野における検討が整合性を有して効率的に進められるために Step.6 では，調査により得られた生データを解釈する手法や，それらを地質環境モデルに反映する解析手法などについて検討する。Step.7 では，設定したすべての調査目標の達成に向けて，調査・評価の論理的な手順，調査実施上の環境条件や社会的な制約，調査データの多角的な利用を考慮して，調査・評価作業の組み合わせおよび手順を検討し，時間軸で展開することで，概要調査の全体計画を統合する。Step.8 では，Step.4 で設定した調査目標のすべてに対応した計画となっているか，概要調査を実施する上での環境条件や社会的な制約，期間，資源（人員・機材・予算）の効率性などを考慮して立案した計画が実現可能であるか検討する。

概要調査施工管理マニュアル（PIMM）は，当該サイトの地質環境を考慮し立案された概要調査計画を円滑に実施するため，個々の調査仕様の決定，実施計画の確定，調査の工程・品質・安全などの管理，想定外の事象発生時の対策など，概要調査実施時に必要となる現場管理の方法や手順，管理上の留意点など示したものである。施工管理のフローを図 5.2.4-3に示す。

PIMM では，Step.1～Step.9 で示す広範な活動に対して，マネジメントの手引きや確認事項をすべての調査手法で共通に取り扱う事項と調査手法ごとに取り扱う事項として整理した。

NUMO は，後述の電中研・横須賀地区での実証研究において，上記の各種マニュアルの適用を通じてその改善を図るとともに，文献調査や概要調査に向けての職員の調査計画立案や施工管理・品質管理の能力向上のための教育訓練に活用する方針である。

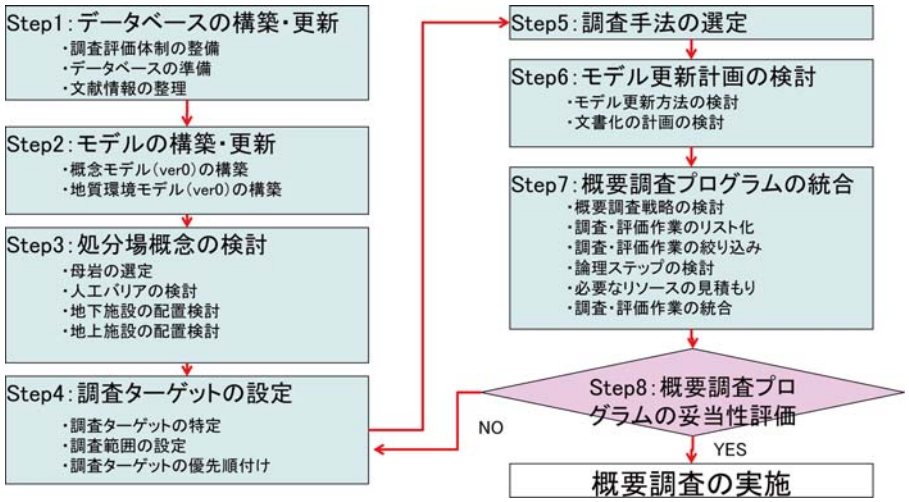


図 5.2.4-2 概要調査における計画立案手順

概要調査計画立案マニュアルは，Step1～Step8 の八つのステップからなる。調査計画の前半は調査目標の設定に向けた段階であり，後半は調査目標を達成するための具体的な検討の段階からなる。

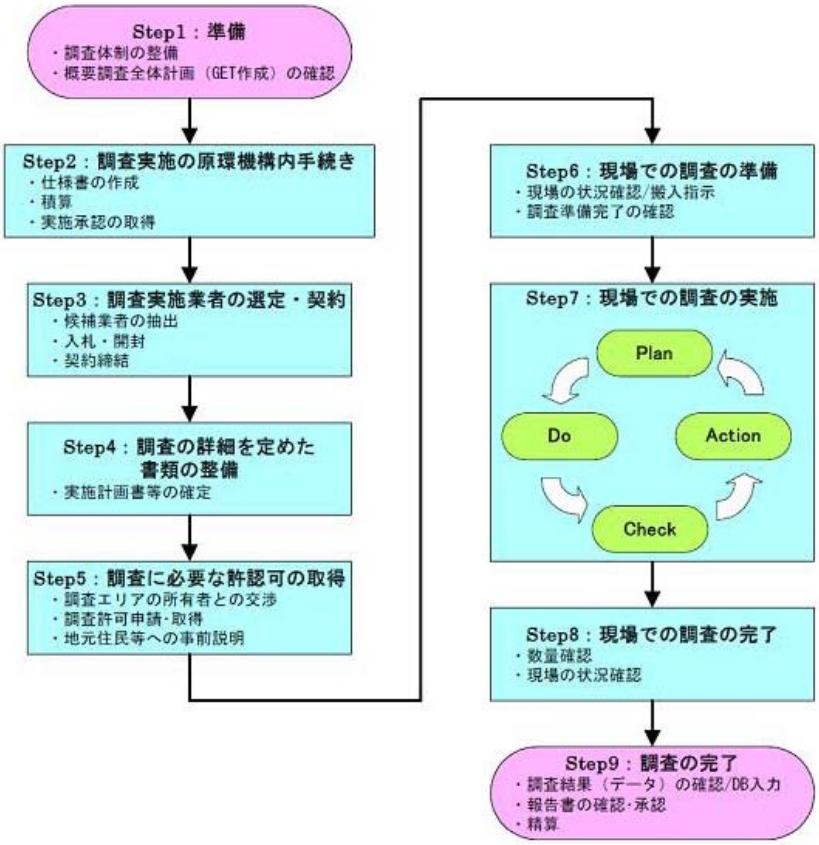


図 5.2.4-3 概要調査施工管理フロー

概要調査施工管理マニュアル Step1～Step9 で示す活動に対してマネジメントの手引きや確認事項を整理した。

5.2.4.2 業務支援ツール

文献調査では，収集した文献・資料を体系的に保管・管理するとともに，それらに記載されている地質環境情報や関係機関などから収集する地質環境に関するデータなどを体系的に整理・管理する必要がある。また，得られた地質環境情報について網羅的に解析を進め，考慮事項などに対する評価を行う必要がある。このため，NUMO は，文献調査における業務の合理化・効率化を進めるとともに追跡性，透明性，公平性，客観性を確保し，品質保証活動を支援するツールとして，NUMO 地理情報システム（NUMO-GIS），地質環境データ管理システム，文献調査システムフロー，そして，次段階へ進むための意思決定を支援するための手法として，意思決定支援理論 ESL（Evidential Support Logic），多属性効用解析 MAA（Multi-attribute Analysis）を用いた評価手法を整備した。これらの支援ツールは，概要調査においても適用することは可能であり，必要に応じて改良・高度化して利用する。以下に，整備されたこれらの技術の概要を述べる。

(1) NUMO地理情報システム（NUMO-GIS）

「地質的条件」による事前確認，および考慮事項のうち全国一律に評価する事項により概要調査地区としての適格性を検討するための支援ツールとして NUMO-GIS システムの構築と文献・資料の収集・データベース化（GIS 化）を実施している。

NUMO-GIS は，地形情報，地質情報，断層・地震情報，火山･地熱情報，隆起・侵食情報，地下資源情報，岩体情報，一般環境情報，自然･社会環境情報などの項目に関する全国規模で整備されている文献の情報を収集，GIS データに変換・登録し，複数の情報の重ね合わせ表示により正確かつ効率的な評価を可能とするデータベースシステムである。

NUMO-GIS を活用することによって，応募に伴う「地質的条件」による事前確認，および考慮事項のうち全国一律に評価する事項による概要調査地区としての適格性の検討を迅速かつ的確に行うことができる。

(2) 地質環境データ管理システムおよび文献調査システムフロー

NUMO-GISと地質環境データ管理システムおよび文献調査システムフローの関連性を図 5.2.4-4 に示す。地質環境データ管理システムは，文献調査およびそれに続く各選定段階の調査において取得する各種地質環境情報の解析・評価作業を円滑に進めるためのシステムであり，NUMO-GISに格納される地質環境情報や文献調査システムフローと連携することにより，文献調査を網羅的・説明的に進めることができるよう，システムを改良・拡充している。

文献調査では，短期間に膨大な量の文献・資料やそれに記載された図面・数値・記載などの地質環境の情報，さらには，空中写真や衛星画像，地震観測データ，気象観測データ，既往の物理探査やボーリング調査の結果など，さまざまな形式の地質環境情報を取り扱う。また，文献・資料の収集および文献情報の整理を行うとともに,各種解析作業および評価作業が同時並行的に進められる。

これらのことから，地質環境データ管理システムでは，収集した文献・資料およびそれらに記載されている地質環境情報と，文献情報から解析に用いるデータセット，さらには解析・評価結果に至るまでの意思決定レベルの異なる地質環境情報を体系的に保管・管理するとともに，各分野の技術者が必要時に必要な情報を適切かつ網羅的に検索・抽出することが可能なシステムを目指して整備を進めてきている。本システムを活用することで，合理的・効率的な文献調査の実施，選定過程の記録・管理，選定作業の品質保証を確保できるものと考えられる。

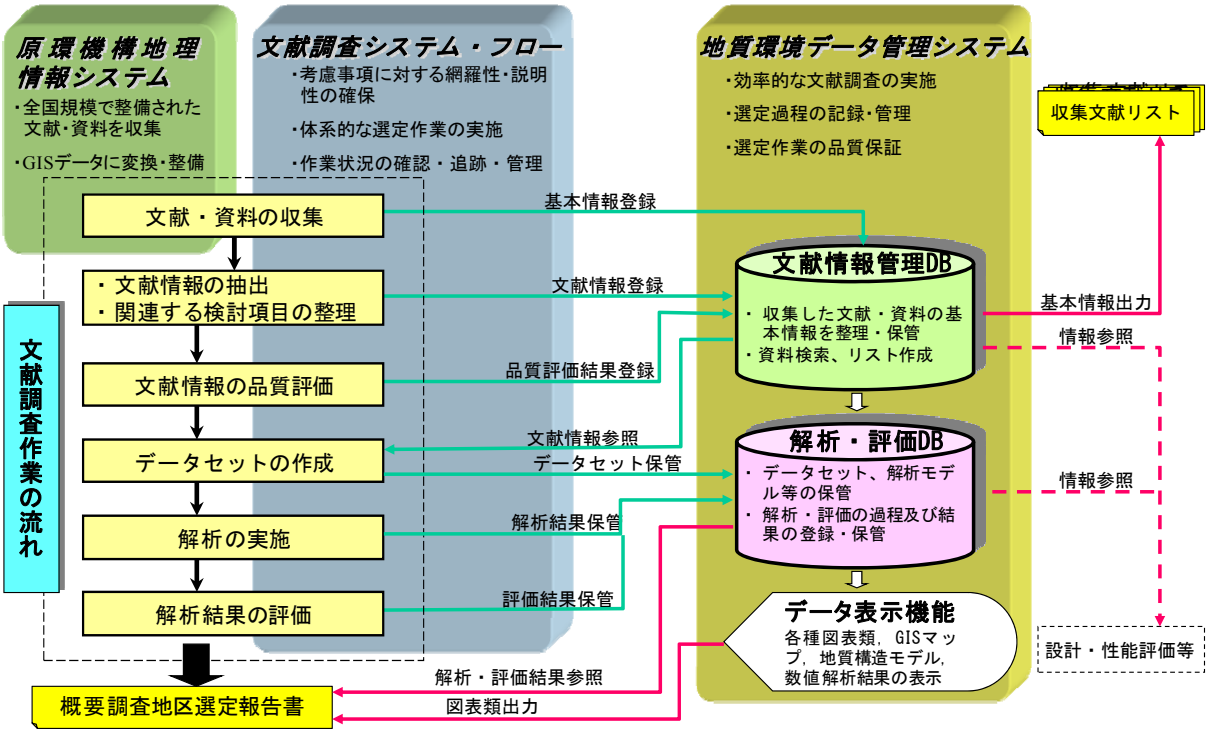


図 5.2.4-4 文献調査のための地質環境データ管理システムと支援ツールの概要

地質環境データ管理システムは，各種地質環境情報の解析・評価作業を円滑に進めるためのシステムであり，意思決定レベルの異なる地質環境情報を体系的に保管・管理するとともに，各分野の技術者が必要時に必要な情報を適切かつ網羅的に検索・抽出することが可能なシステムを目指している。

また，文献調査システムフローでは，文献調査を網羅的に進めることができるよう，概要調査地区を選定する上において必要となる各考慮事項について，文献情報から解析・評価結果に至るまでの一連のプロセスを体系的に実施するための方策として整備を進めている（図 5.2.4-5）

さらに，文献調査結果の品質保証の観点からは，文献情報から解析・評価結果に至るまでの作業プロセスおよび意思決定プロセスの追跡性を確保し，それらの妥当性を示すことが重要である。そのため，地質環境データ管理システムに保管されるさまざまな種類の意思決定レベルの異なる地質環境情報および解析・評価結果について，文献調査システムフローにより，評価・解析に至るまでの作業プロセスおよび解析・評価過程における意思決定プロセスを追跡的に管理することが可能なシステムとなるように，段階的に両システムの改良および連携機能の整備を進めている。

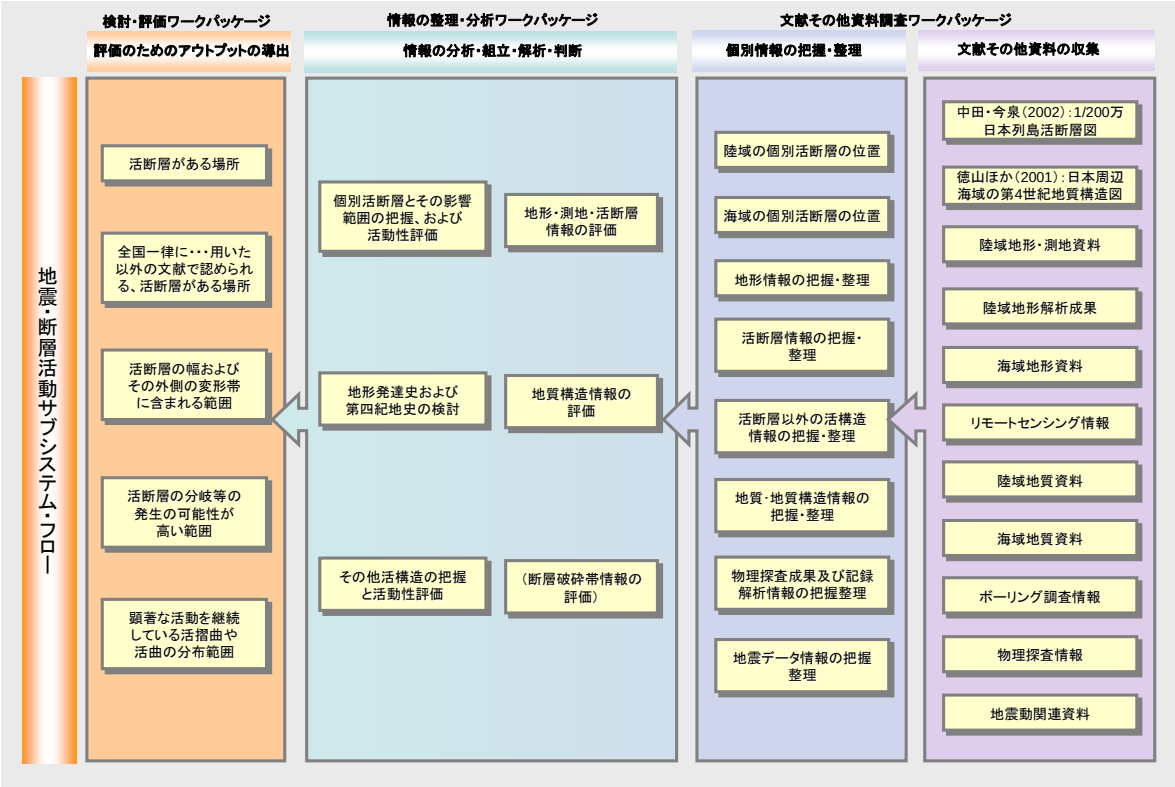


図 5.2.4-5 文献調査システムフロー（地震・断層活動の評価）

文献調査システムフローは，文献調査を網羅的に進めるために，概要調査地区を選定する上で必要となる各考慮事項（ここでは地震・断層活動）について，文献情報から解析・評価結果に至るまでの一連のプロセスを体系的に実施するための方策として整備している。

(3) 技術的意思決定支援手法

技術的意思決定を支援するための手法として，技術的な意思決定支援理論 ESL（Evidential Support Logic）および多属性効用解析 MAA（Multi-attribute Analysis）が知られている。

ESLは，資源（石油）探査分野や経営工学分野などで適用されており，さまざまな判断要素を考慮できる意思決定支援手法の階層分析法（Analytic Hierarchy Process）に，不確実性の定量的評価手法である区間確率理論（Interval Probability Theory）を組み込んだものである。すなわち，不確実な命題を判断する際の論理構造と判断の入手可能な証拠への依存性を階層プロセスモデルによって表現し，さらに，その判断と判断に含まれる不確実性を区間確率理論によって評価するものである。特長としては，①階層構造により命題に対する判断プロセスを提示でき，②区間確率を用いることによって，判断時に生じる不確実性（図 5.2.4-6：支持（緑）≠1-否定（赤），不確実性（白）が存在）を定量的に評価できることである（Hall *et al.*，2004）。その結果，不確実性を考慮した形で命題の現状を理解することができ，さらに現状の理解を深めるために次段階において何をすべきかの意思決定を支援できる手法である。

MAAは，ある条件の下に解析を行い，与えられた命題について総合評価を行うための解析手法である。地質環境，処分場概念といった条件に対して最も適している処分場サイトを得るといった命題を与えることにより，概要調査地区の選定という意思決定問題に対し，有効な相対評価支援手法となり得る（図 5.2.4-7および図 5.2.4-8）。

例えば，法定要件に関する事項のうち，個別地区ごとに評価する事項については，その評価結果の不確実性を ESL によって定量的に評価する。付加的に評価する事項については，MAA によって相対評価を実施し，その結果に含まれる不確実性を ESL により定量的に評価するといった活用が考えられる。

以上のことから，ESL および MAA の各々の特長を理解した上で，両手法を適切に適用することができれば，法定要件に関する事項のうちの個別地区ごとに評価する事項や付加的に評価する事項に関する意思決定において，追跡性，透明性，公平性，客観性を確保するための有効な手法となる。

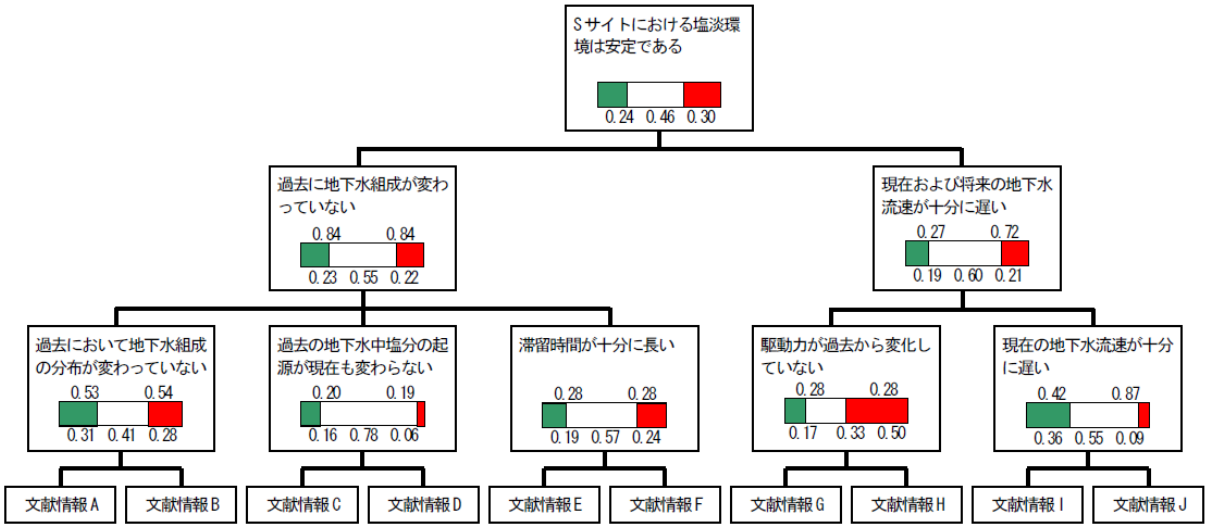


図 5.2.4-6 ESL を用いた検討事例

沿岸地域における地下水流動特性や地下水地化学特性などに関する文献情報に基づき，塩淡境界の安定性についてどの程度の不確実性があるか検討した事例を示す。この検討事例では，塩淡境界が安定であることに対して，不確実性（白）が大きく，検討に用いた文献情報のみでは塩淡境界が安定であるか不安定であるか判断することが困難な結果となっている。

	1. 技術的実現性						2. セーフティケース			3. 事業性					
	1.1 調査性	1.2 処分場の設計（レイアウト）	1.3 施工性（岩盤掘削）	1.4 操業性（人工バリアの定置）	1.5 閉鎖性（埋め戻し、プラグ）	1.6 モニタリング性（地質環境）	2.1 建設・操業時安全性	2.2 閉鎖後安全性	2.3 品質保証	3.1 経済性	3.2 環境影響性（主として周辺）	3.3 柔軟性	3.4 社会的受容性（回収可能性）	関連性の合計	各付加的評価事項の重み付け
1. 地層の物性・性状															
1.1 岩盤の物性															
1.1.1 強度	1	5	5		3		5			5		3	1	28	0.049
1.1.2 初期応力分布	1	3	5		1		3		1	1			1	16	0.028
1.1.3 割れ目（断層・破砕帯）	1	5	5	3	3	1	1	5	3	3		5		35	0.062
1.1.4 風化・変質		3	3		3	1	3	1	1	1	1	1		18	0.032
1.2 地温勾配		3	1	1			1	1		1	1	1		10	0.018
1.3 母岩の性状															
1.3.1 母岩の広さ	5	5				3	1	5	1	5	3	5		33	0.058
1.3.2 存在深さ	5	5	3	1	1	3	5	5	1	5		5		39	0.069
1.3.3 厚さ	1	5	1			1	1	3		1		3		16	0.028
1.3.4 地質構造	5	5	3	3	3	1	1	5	1	5	3	3		38	0.067
1.4 隆起・侵食速度	3	5						5				1		14	0.025
1.5 特異性の存在可能性															
1.5.1 異常間隙水圧		1	3	1	1		3		1	1				11	0.019
1.5.2 膨張性地山		1	3		1		3		1	3			1	13	0.023
1.5.3 ガス突出	1	1	3	1		1	3	1	1	3	1		1	17	0.03
1.5.4 山はね	1	3	3				3		1	3				14	0.025
1.5.5 大出水	3	3	5				5		1	3	1		1	22	0.039
2. 地下水の特性															
2.1 流量・流速															
2.1.1 透水係数	3	3	3	3	3	3	3	5	1	3	3	3	1	37	0.065
2.1.2 動水勾配	1	3	3	3	3	3	3	5	1	3	3	3	1	35	0.062
2.1.3 流速	1	1	1	1	1	3		5	1	1				15	0.026
2.1.4 流出点	1							5			3		3	12	0.021
2.2 地下水の化学特性															
2.2.1 酸化・還元性	3	1						5	5			3		17	0.03
2.2.2 pH	1					1		5	3		1			11	0.019
2.2.3 塩分濃度	3	1	1	1	1	1	3	5	3	1	3			23	0.04
3. 地質環境の調査・評価															
3.1 調査															
3.1.1 調査の範囲・規模	5	1				3		1	3	3		1	1	18	0.032
3.1.2 調査技術の存在	5					3			3	3				14	0.025
3.2 評価・モデル化の容易性	3	3						3			1			10	0.018
3.3 土地利用等の制約	5									1			3	9	0.016
4. 建設・操業時の自然災害															
4.1 地震		1	1				3	1		1				7	0.012
4.2 地すべり		1					1			1				3	0.005
4.3 洪水		1					3			1				5	0.009
4.4 津波		1					3			1				5	0.009
5. 土地の確保															
5.1 土地確保の容易性	1											1	3	5	0.009
5.2 土地購入費	1									3				4	0.007
6. 輸送															
6.1 利用可能な港湾の存在				3						1		1	1	6	0.011
6.2 輸送ルートの確保性				3						1		1	3	8	0.014

5 相互の関連性大
3 相互の関連性あり
1 関連性小
関連性なし

図 5.2.4-7 MAA の重み付けによる相対比較（検討例）

付加的に評価する事項と総合評価のための共通的指標との関連マトリクス表を示す。

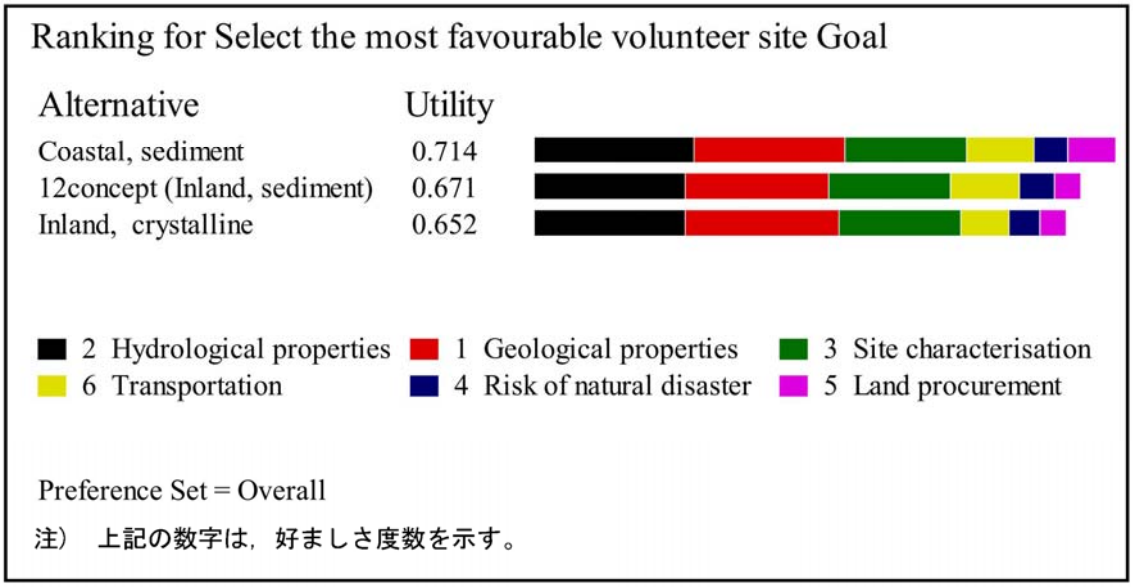


図 5.2.4-8 MAA による複数地点の相対比較の結果（検討例）

仮想的な 3 地点（沿岸域・堆積岩，内陸・堆積岩，内陸・結晶質岩）の MAA の重み付けによる好ましさの相対比較の結果を示す。

5.3　調査・評価技術の整備

ここでは 5.2 に示した調査・評価の技術体系を支える各分野の技術について，第２次取りまとめ（JNC，1999b）以降に進展したものを中心に整備状況をとりまとめた。加えて，NUMO が概要調査において適用する主要な技術を，事業者の観点から確認した結果について述べる。さらに，NUMO が的確に精密調査地区を選定する上での調査・評価技術の今後の課題と，技術開発の方針について述べる。

5.3.1　調査・評価技術の進展

調査・評価の技術体系を支える技術について，第２次取りまとめ時点での状況と課題，およびそれ以降の技術開発による個々の技術の進展と現状を，自然現象の影響，地質環境特性という二つの分野調査・評価，それに加えて多様な地質環境に対する調査・評価という観点で取りまとめた。

5.3.1.1　自然現象の影響にかかわる調査・評価技術

(1)　火山・火成活動にかかわる調査･評価技術

第２次取りまとめ（JNC，1999b）までに，火山の分布や活動年代を明らかにする年代測定法などの調査手法の整備に伴い，日本列島における第四紀火山分布図が編集され，第四紀火山の活動が偏在していること，過去数十万年の火山活動の変化が地域レベルの火山活動域の拡大･縮小として捉えられることなどが示された。また，火山の温度や地下水などへの影響を把握する手法が，地熱開発分野などにおける研究でも整備され，日本列島の地温勾配の分布が取りまとめられたことにより，火山からの影響範囲，マグマ溜りからの熱的な影響範囲とその期間などが検討された。第２次取りまとめでは，背弧側や西南日本の単成火山群などにおける新たな火山活動の発生可能性，および非火山地域における高温異常の評価などの課題が挙げられた。

第２次取りまとめ以降の進展としては，火山灰アトラスの改訂（町田・新井編，2003）によりテフラの対比の精度が向上したことがあげられる。また，地震波トモグラフィなどの地下深部の解析技術の高度化に伴い，火山の新規発生と移動の評価手法，深部熱源評価手法などの開発が進められた。また，地球化学的手法を活用した深部熱水の評価法が示され，わが国にマグマ起源以外の熱水が存在することが明らかにされた。さらに，海外で用いられている確率論的な火山活動の評価手法を，わが国の背弧側や単成火山分布域の評価に適用する検討が行われた。

火山・火成活動にかかわる調査・評価技術については，検討の基礎となる情報整備および火山活動履歴の評価，主要な検討事項であるマグマの貫入と噴出の評価，熱・熱水の評価，さらに確率論的評価という項目に分けて記述する。表 5.3.1-1～表 5.3.1-2に，これらの項目について，2000 年以降進展の見られた調査・評価技術を示す。

表 5.3.1-1 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術（1）

項目と内容		概　要	段階			文　献
			概要	精密	建設	
情報整備		全国規模の情報として，日本の第四紀火山[1]，新編火山灰アトラス[2]，・坑井温度プロファイルデータベース[3]，温泉地化学データベース[4]，日本の熱水系アトラス[5]が整備されている。	○			1)AIST(2010a) 2)町田・新井編(2003) 3)坂川ほか(2004) 4)浅森ほか(2003) 5)村岡ほか(2007)
火山活動 履歴調査		放射年代測定の適用が困難な第四紀火山噴出物試料に対して，肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法（RIPL 法）[6]，微量成分化学組成[7]，火山灰起源の石英中のガラス包有物の主成分化学組成[8]，斜長石斑晶の屈折率を用いた手法[9]が開発されている。		○		6)田村・山崎 (2004) 7)古澤・中村(2009) 8)古澤(2004) 9)大石(2010)
マグマの貫入・噴出の評価	新規火山の 発生評価	東北日本弧において，火山と地形・地下構造，地震波低速度分布，プレート運動の関連性の検討から，将来の火山発生評価手法[10),11)]が示された。また，カルデラ・大規模火砕流についてはカルデラ形成とテクトニクスとの関係が明らかにされ，[12),13)]。また，カルデラ生成噴火を評価するための作業仮説[14)]が提案されている。	○	○		10)Kondo(2009a；2009b) 11)近藤（印刷中） 12)Miura(2005) 13)三浦・和田(2007) 14)鍵山(2010)
	既存火山からの マグマの移動の 評価	マグマの移動の評価として，マグマの化学組成と火道分布方位の関係を現地調査で明らかにした火口移動に関する研究成果を用いて，マグマの水平移動に影響する要素を抽出する水平移動の評価法[15),16)]が提案されている。	○	○		15)三浦ほか(2006) 16)土志田ほか(2006)
	深部熱源評価	東北の背弧側火山の空白域での深部熱源評価を地震波トモグラフィによる地震波速度構造，微小地震分布，MT 法による比抵抗構造，地化学データ（3He/4He）等の組み合で行い，地下のマグマの状態やマグマ起源の熱的影響を評価する手法[17),18),19)]が示され，能登半島では非火山性温泉の熱源を解明するため、温泉ガスの希ガス同位体分析および三次元比抵抗構造解析を行い解明[20)]した。	○	○		17)JNC（2005a） 18)Umeda et al.(2006b；2009) 19)Umeda(2009) 20)Umeda et al.(2009)
	深部構造 評価手法	マグマの貫入・噴出の評価を支える新しい技術として，Double Difference トモグラフィ法[21)]，レシーバ関数[22)]，後続波[23)]を利用した地震波解析技術が開発され，地下深部でのマグマの存在や上昇過程の評価の精度が向上した。	○	○		22)Zhang and Thurber(2003；2006) 22)Shiomi et al.(2004) 23)Xia.et al.(2007)

概要：概要調査地区選定段階（文献調査の段階），精密：精密調査地区選定段階（概要調査の段階），建設：処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）
○：主な適用段階

表 5.3.1-2 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術（2）

項目と内容		概　要	段階			文　献
			概要	精密	建設	
熱・熱水の評価	総合的な熱・熱水の評価	評価の基礎として，地質・地球物理データの重ね合わせ表示による熱・熱水異常地域の抽出[24]を行い，高温域を含む地域のタイプ分け[25]を行っている。これを基に，地熱シミュレータによる地温分布の評価手法[26]，温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握手法[27]，変質帯の解析手法[28]が示された。また，流体/岩石反応で形成される地下水形成過程の解析法[29]を示した。さらに地化学手法を基にした深部熱水の評価手法の開発[30]が行われてる。	○	○	○	24)玉生ほか(2008) 25)玉生(2008) 26)中尾ほか(2008) 27)阪口(2008) 28)茂野(2008) 29)佐々木(2008) 30)AIST(2009a)
	熱履歴評価	複数の放射年代手法を組み合わせた熱年代学的手法による非火山地域の高温泉周辺の熱水変質履歴の評価手法[31]，大規模火砕流の熱の影響をフィッショントラック法による熱履歴解析[32]で深部に外挿する解析手法の構築などが行われている。低温（約 70 度以上）の熱履歴の解析には，(U-Th)/He 法年代測定システムが適用可能となっている。		○	○	31)花室ほか(2008) 32)松崎ほか(2004)
	熱源・火山からの影響評価	一次元熱輸送モデルによる熱流束や流体速度を評価する手法[33]，マグマ溜りの周辺岩盤の熱や地下水理などを計算するための解析コードである Magma2002 による 3 次元熱水系シミュレーションによる手法[34]などの技術開発が行われている。	○	○	○	33)JNC(2005a) 34)坂川ほか(2005)
確率論的評価		火山の時空間分布や地球物理学的情報に基づき，確率モデルにより，将来十万年間の火山発生予測を行う手法[35),36)]，独立単成火山に対する確率的評価手法，列島スケールの規模で，地球物理情報をベイズ法で確率モデルに取り込んだ multiple inference モデルによる手法の開発[37)]が進められている。	○	○		35)Chapman et al.(2009a) 36)Jaquet et al. (2008) 37)Martin et al.(2004)

概要：概要調査地区選定段階（文献調査の段階），精密：精密調査地区選定段階（概要調査の段階），建設：処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）

○：主な適用段階

（i） 情報整備

第四紀火山カタログ（第四紀火山カタログ委員会編，1999）に続いて，2000 年以降には，日本の第四紀火山（産総研，2010），新編火山灰アトラス（町田・新井編，2003），坑井温度プロファイルデータベース（坂川ほか，2004），温泉地化学データベース（浅森ほか，2003），日本の熱水系アトラス（村岡ほか，2007）などの火山・火成活動にかかわるデータベースが整備されている。

これらの情報は，文献調査計画や文献調査の段階などにおいて基礎的なデータとして火山・火成活動の評価に取り入れて活用することができる。概要調査地区は第四紀火山の中心から少なくとも 15km は離れた場所から選定する。

（ii） 火山活動履歴の評価

火山の年代を測定する手法（K-Ar 法，フィッショントラック法などの放射年代測定法）や対比の手法は基本的には確立されているが，精度や信頼性を向上させることを目的とした研究が進められている。例えば，放射年代測定の適用が困難な第四紀火山噴出物の試料に対して，肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法（RIPL 法：古澤，2004）が開発され，地層処分にかかわる調査研究などに適用された（梅田・古澤，2004）。また，微量成分化学組成を用いたテフラの対比（吉川ほか，1991；吉川ほか，2000；田村・山崎，2004），テフラ起源の石英中のガラス包有物の主成分化学組成を用いたテフラの同定（古澤・中村，2009），斜長石斑晶の屈折率を用いたテフラの対比（大石，2010）などの新しい手法の研究開発が進められている。

サイト選定のための調査・評価において，これらの手法は概要調査の段階以降で第四紀火山の活動性の把握のほか，地震・断層活動や隆起・侵食にかかわる調査・評価などにおいて地層対比を行う場合に，それぞれの手法の適用限界を認識した上で活用することが可能である。また，開発中の手法は信頼性を確認し適切に取り込んでいく。

（iii） マグマの貫入・噴出の評価

第四紀の火山活動は，プレート配置やプレートの沈み込み角度に支配され，限定された地域で繰り返し活動し，火山の分布に偏在性があることが理解されており，さらにマグマの存在や活動性を評価する技術が求められている。

概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階で適用される技術では，既存情報または既存情報と現地調査データに基づく，新規火山の発生評価手法（Kondo，2009a；Kondo，2009b；近藤，印刷中），既存火山からのマグマの移動を評価する手法（三浦ほか，2006；土志田ほか，2006）が提案されている。カルデラ・大規模火砕流についての新しい知見としては，カルデラ形成とテクトニクスとの関係が明らかにされ（Miura，2005；三浦・和田，2007），カルデラを形成する噴火の準備過程の進行状況を評価するための作業仮説が提案され，その検証の必要性が示されている（鍵山，2010）。また，火山体の深部や非火山地域を評価する手法として，物理探査データや地化学情報の組み合わせで地下のマグマの状態やマグマの活動性を評価する手法が開発されてきた（JNC，2005a；Umeda，2009 など）。

以上のうち，新規火山の発生評価手法（Kondo，2009aなど）では，はじめに島弧スケールの情報として，対象地域の火山フロントとの位置関係，プレートの沈み込みの継続性を考慮し，評価の時間スケールを設定する。次に火山クラスターのスケールでの検討を行う。まず火山岩の分布や岩相，層序，年代，化学成分の検討から，火山同士の時間的，空間的分布について評価する。次に，地形

データ，断層運動の分布とその時間変化，隆起・沈降運動の分布とその時間変化，重力データの検討から，火山活動に関連する地殻構造・変動を評価する。最後に，地震波速度構造の解析結果を基に，マントルウェッジ中の高温域について，地震波低速度異常域の位置と広がりの現状を把握した上で，火成活動の時間的，空間的分布パターンとの対比に基づき，その持続性に関する評価を行う（図 5.3.1-1）。以上の評価に基づき，将来の火山が発生する可能性とその範囲を評価する。

火山地帯，非火山地帯を問わず高温域における熱源については，震源分布，地震波トモグラフィ解析，MT法による深部比抵抗構造解析や地化学情報を組み合わせることによって評価が可能であると考えられている（Umeda *et al.*，2006b；Umeda *et al.*，2009；Umeda，2009 など）。例えば，非火山地域の中生界火山岩類からなる飯豊山での事例（Umeda *et al.*，2006b；Umeda *et al.*，2007a）では，地震波トモグラフィによる解析や電磁探査MT法による二次元断面解析で飯豊山直下にマグマの存在を反映する可能性がある異常域を捉えている（図 5.3.1-2）。この異常域はさらに地殻深部まで連続する傾向があり，地表ではマントル起源のHe同位体を多く含む高温泉が分布することや，異常域上部周辺に発生している微小地震の分布はマグマ溜りの周辺に発生している微小地震の分布と類似することなどから，この低比抵抗で地震波低速度層が示す異常域は，地殻の部分溶融を示すものであり，新しいマグマの活動を反映する可能性があることが示されている。以上のように異なる手法を適切に組み合わせることによって，対象地域と高温域の熱源の評価を行うことが可能であると考えられる。

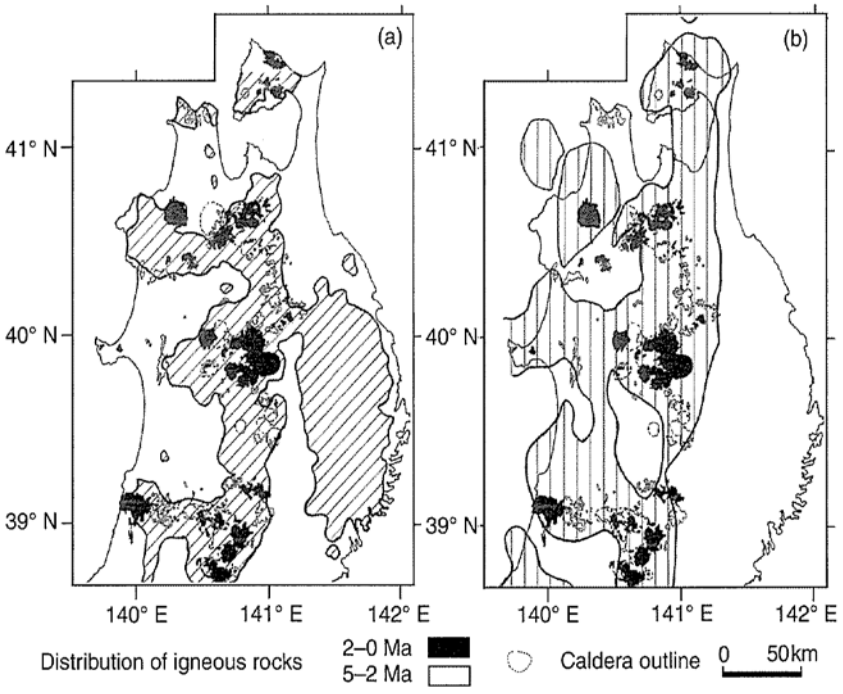


図 5.3.1-1 新規火山の発生可能性に関する検討例（出典：Kondo，2009a）

左図：東北地方の 5Ma 以降の火成岩の分布と標高 500m以上の山地の分布（斜め線）の重ね合せ。
右図：5Ma 以降の火成岩の分布と沈み込むプレートに沿ったマントルウェッジ内の地震波低速度領域（縦線）の重ね合せ。これらの事象が重なる地域では，将来火山が発生する可能性が高いと評価される。

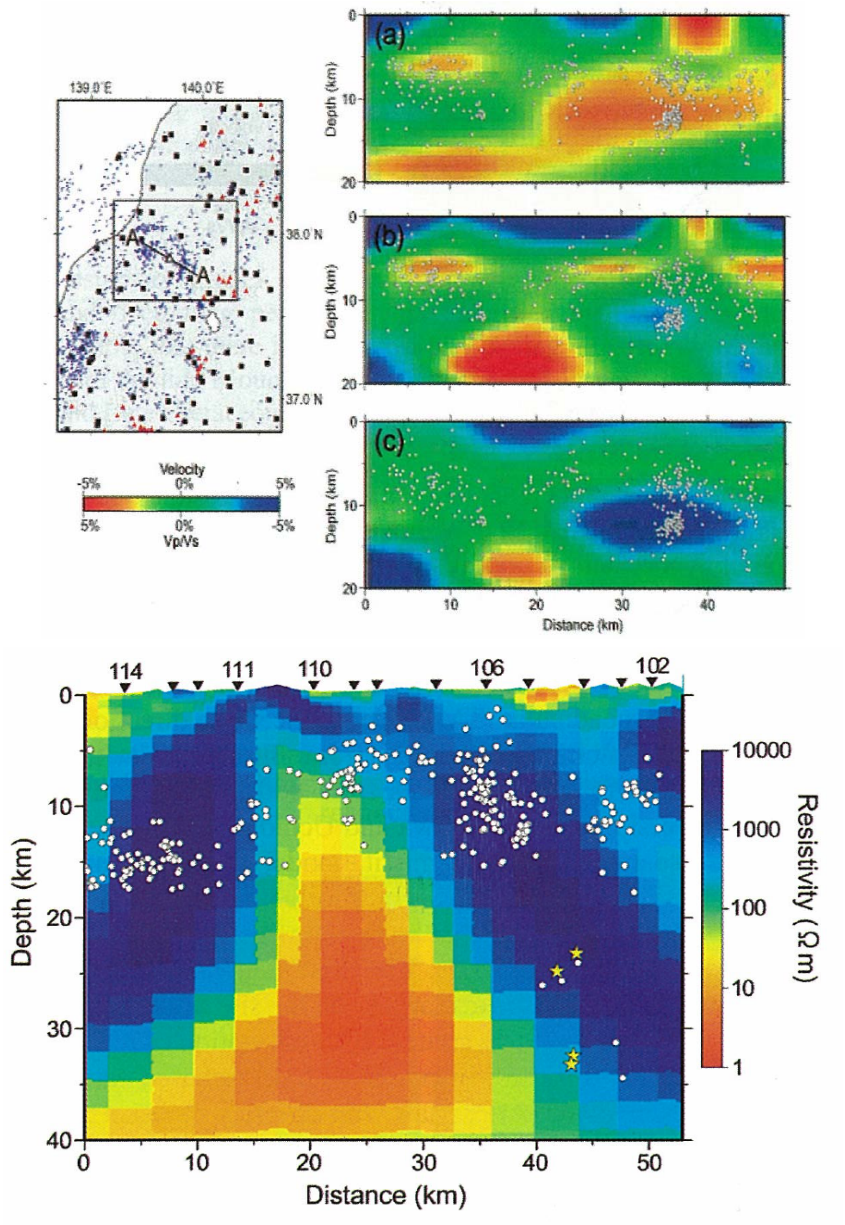


図 5.3.1-2 地球物理学的手法を用いたマグマの存在に関する検討例（出典：Umeda, 2009）

上図：飯豊山を横切る東西（A-A'）の地震波速度構造の断面図〔(a)P 波，(b)S 波，(c)Vp/Vs〕。下図：同地域の MT 法探査の二次元比抵抗モデル断面図（白点は微小地震の震源，黄色の☆印は深部長周期地震源）。両図における，深度 15km 以深のアノマリー（赤色）はマグマの存在を示唆している

これらの手法は，サイト選定のための調査・評価において，各調査地区とマグマ活動との関連性の評価を行う際に適用することが可能であると考えられる。

上記の評価手法を支える技術として，地震波解析では，地震観測網の整備とともに新しい解析手法として，Double Difference トモグラフィ法（Zhang and Thurber, 2003, 2006），レシーバ関数（Shiomi *et al.*, 2004），後続波（Xia *et al.*, 2007）を利用した手法が開発され，地下深部の構造，地震，マグマの存在の推定や発生メカニズムなどに関する情報提供に寄与している。

（ⅳ） 熱･熱水の評価

熱･熱水にかかわる調査･評価技術は，地熱資源開発の分野で開発されてきた技術が基本となる。概要調査地区選定段階から精密調査地区選定段階に適用可能な手法として，産総研は，深部流体の評価手法を示し，非火山性の熱水の存在とその主要な分布を明らかにしている（産総研，2009b）。さらに，熱履歴の解析手法としては，熱年代学的手法による熱履歴評価の手法（Umeda *et al.*，2007b；花室ほか，2008；大平，2005；金沢ほか，2005），熱源や火山からの影響評価手法としては，大規模火砕流の熱的影響を評価する手法（松崎ほか，2004），一次元熱輸送モデルによる熱流束や流体速度を評価する手法（JNC，2005a；Umeda *et al.*，2007c），マグマ溜りの周辺岩盤の熱や地下水理などを計算するための解析コードであるMagma2002による三次元熱水系シミュレーションによる手法（坂川ほか，2005）などの技術が開発されている。

サイト選定のための調査・評価において，これらの総合的な熱・熱水の評価手法，深部流体の評価手法は，対象地域の概略的な評価に有効である。特に，熱源や火山からの熱的影響の評価手法は，的確な条件（熱源の位置，物性など）が与えられれば，主に概要調査の段階以降に有効な評価手法として適用することが考えられる。

（ⅴ） 確率論的評価

上述した決定論的手法を補足する手法として，確率論的に将来の火山活動の評価を行う手法が検討されてきた。NUMOでは，国際テクトニクス会議での日本の火山・火成活動評価に関する議論に基づき，東北地方や九州地方において海外で用いられているカーネル法やコックスプロセス法などの確率モデルを適用し，将来の火山発生可能性を評価する手法を開発した（Chapman *et al.*，2009a；同，2009b；Jaquet *et al.*，2008；同，2009）。また，JNC（2005a）による独立単成火山に対する評価手法や，Martin *et al.*（2004）による島弧規模の地球物理学的情報をベイズ法で確率モデルに取り込んだmultiple inferenceモデルの開発が進められている。

これまでの検討により，確率論的な評価手法のわが国の地質環境への基本的な適用性が確認された。一方，これらの評価手法は，火山の分布や活動年代が主な入力情報であり，その精度は情報の質に依存する。限られた情報しか得られない場合や，より小さなスケールへの適用性，そして確率論的評価の結果をどのように活用していくか，などの検討課題が残されている。

(2) 地震･断層活動にかかわる調査・評価技術

第２次取りまとめ（JNC，1999b）までには，主要な活断層の分布を把握する手法，活断層周辺の岩盤や地下水の性状を把握する手法などが整備され，全国規模の陸域の活断層分布が200万分の1日本列島活断層図などとして示された。また，主な地震・断層活動は既存の断層帯において過去数十万年間にわたり同様の活動様式で繰り返し起こっていること，活断層の分布密度には偏在性があり，タイプと活動性には地域性があることが示された。第２次取りまとめ（JNC，1999b）では，地表に明瞭な変位を伴わない活断層の検出手法や断層活動による影響の評価が課題として挙げられていた。

第２次取りまとめ（JNC，1999b）以降は，地表で活断層が認識されていなかった内陸地域でM7クラスの被害を伴う地震（2000年鳥取県西部地震，2003年宮城県北部地震，2004年新潟県中越地震，2008年岩手・宮城内陸地震など）が発生し，それらの震源域を対象とした調査が行われた。2000年鳥取県西部地震（M7.3）は，長さ20km，幅10kmの震源断層により生じており，地表において確

認された変状はわずかなものであった。本地震後の調査では，震源断層の直上付近に短い推定活断層やリニアメントが認められている（井上ほか，2002 など）。2004 年新潟県中越地震（M6.8）や 2007 年新潟県中越沖地震は，背弧海盆に堆積岩類が厚く分布し活褶曲が発達する地域において生じた地震である。これらの地震については，断層関連褶曲の考え方に基づき，伏在した断層の活動により生じたものであるとの解釈がなされている（岡村・石山，2005；青柳・阿部，2007 など）。2008 年岩手・宮城内陸地震（M7.2）の発生域は山間部でありこれまで十分な調査が行われていない地域であり，活断層の存在が認められていなかった。しかし，地震後の調査では，短い活断層が存在することが報告されている（鈴木ほか，2008；遠田ほか，2010 など）。これらの調査の結果，震源断層と活断層の関係を把握することの重要性が認識された。また，このような地表に明瞭に出現しない断層は，伏在断層，未成熟な断層などとされ，その検出や評価の重要性が再認識された。

このような課題に対し，例えば，地表に明瞭な変位を伴わない活断層の評価には変動地形学的手法，断層関連褶曲の考えを基にした数値解析や模型実験を含めた解釈，地質断層の再活動を考慮した解釈が行われるようになってきた。また，断層の影響範囲の評価にも数値解析や模型実験と現状の比較で評価する手法が示された。さらに，国際テクトニクス会議の提言を基に確率論的に将来の断層発生の可能性を評価する確率論的手法が開発され決定論的手法とは別の観点からの評価が試みられている。

以下，地震・断層活動にかかわる項目は，活断層の存在の把握，活断層周辺の変形帯・影響範囲の把握，地質断層の再活動性の評価，断層活動に関する確率論的評価に分けて記述する。表 5.3.1-3～表 5.3.1-4にこれらの項目について，2000 年以降進展の見られた調査・評価技術を示す。

（i） 活断層の存在の把握

① 文献情報など

文献情報に関して，全国規模で整理された情報のうち，2000 年以降にまとめられた主なものとしては，活断層詳細デジタルマップ（中田・今泉編，2002），日本周辺海域の第四紀地質構造図（徳山ほか，2001），活断層データベース（産総研，2010b）がある。また，地域的な情報として，第四紀逆断層アトラス（池田ほか編，2002）や国土地理院による都市圏活断層図などが挙げられる。現在，地震調査研究推進本部は，活断層に対する情報の体系的収集・整備と評価の高度化により，活断層の詳細位置に各種調査・評価結果を併記した「活断層基本図（仮称）」の作成を進めている（地震調査研究推進本部，2009）。

全国規模の情報取得システムとしては，防災科学技術研究所による地震観測網（K-net・Kik-net，Hi-Net，F-net）や国土地理院による GPS 観測網の整備が行われ，精度の高い解析により活断層などの存在の把握にも活用が可能となっている。

表 5.3.1-3 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術（1）

項目と内容		概　要	段　階			文　献
			概要	精密	建設	
活断層の存在の把握	文献情報など	・全国規模の情報としては，2000 年以降，日本周辺海域の第四紀地質構造図[1]，活断層詳細デジタルマップ[2]，活断層データベース[3]，第四紀逆断層アトラス[4]，都市圏活断層図[5]等が整備されている。 ・防災科研による地震観測網[6]や国土地理院による GPS 観測網（GEONET）等が整備されており，活断層等の存在の把握に活用が可能となっている。	○			1)徳山ほか(2001)　2)中田・今泉編(2002) 3)産総研(2009)　4)池田ほか編(2002) 5)国土地理院　6)汐見ほか(2009)
	測地学的手法 （SAR,GPS）	・地球観測衛星搭載の PALSAR システムによる高分解能の地形変動解析[7]，GPS 連続解析による歪集中帯の存在が明確にされ[8]，また簡易的なプレート境界の歪蓄積モニターが可能となっている[9]。	○			7)雨貝ほか(2008) 8) sagiya et al.(2000)　9)鷺谷(2009)
	地形学的手法 （変動地形）	・航空レーザー測量では，植生のある地域での断層抽出技術，微細な変位地形の解析による断層の検出に適用されている[10),11)]。 ・明瞭な断層が地表に分布しない地域に対してリニアメント抽出手法の提示がされている[12),13)]。 ・段丘から見積もった隆起量の分布、あるいは、段丘の分布自体の情報を不明瞭な活断層の検出・活動性評価[14),15),16),17)]。	○	○		10)青柳・阿部(2009)　11)丸山ほか(2009) 12)高田ほか(2003)　13)木下ほか(2005) 14)田力・池田(2005)　15)幡谷(2006) 16)幡谷・濱田(2009)　17)田力ほか(2009)
	構造地質学的手法 （地質構造解析，年代測定）	・断層周辺の破砕・変形・変質の発達状況や断層ガウジの色調をもとにした活動性評価法[18),19)]，断層を構成する物質（断層岩）から直接活動性を評価するガウジなどの年代測定による評価手法[20)]が開発された。 ・熱年代学的調査を含めた地質構造発達史を踏まえて，断層の活動履歴を評価する手法[21),22)]が開発されている。 ・海底のタービダイトの詳細な解析で地震発生の頻度の解析手法[23)]が開発されている。		○	○	18)小林・杉山(2004) 19)相澤ほか(2005) 20)田上ほか(2010) 21)伊藤(2006) 22)Tagami and Murakami(2007) 23)池原(2000)
	地球物理学的手法 （反射法震探査，電磁探査，地震波解析）	・二次元手法の処理法の進展と三次元手法による資源調査[24)]，海域での地質構造解析，活断層，堆積物，地形調査[25),26),27)]，や陸域での地質地盤調査（小規模断層）分野[28)]での適用が進んでいる。また，海域の地質構造を精度よく把握するためのマルチチャンネル音波探査システムの開発が行われ，活断層調査に利用されている[29)]。 ・音波探査を補完する水深 200m 以浅の波打ち際に対応した海底電磁探査システムの開発・改良[30),31)]や，他の電磁法との組み合わせで沿岸域から海域に及ぶ電磁探査法の適用性が検討されている[32),33),34)]。 ・重力探査は活断層の長さを規定する手法として利用が考えられている[35)]。 ・活褶曲地帯での断層評価として，補正した震源分布から震源断層を推定し，有限要素法による模擬的変動解析で地質構造と対比する手法[36)]が提案されており，震源断層モデルの評価に，トモグラフィなどの地震波解析の適用が検討されている[37)]。	○	○		24)芦田(2005)　25)松岡(2007) 26)佐伯ほか(2006)　27)朴ほか(2008) 28)佐々木ほか(2008)　29)井上ほか(2007) 30)吉村ほか(2006a)　31)大澤ほか(2010) 32)吉村ほか(2009)　33)大里ほか(2009) 34)上田ほか(2010)　35) 井上ほか(2006) 36)青柳・阿部(2007) 37)岡田・長谷川(2005)

概要：概要調査地区選定段階（文献調査の段階），精密：精密調査地区選定段階（概要調査の段階），建設：処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）

○：主な適用段階

表 5.3.1-4 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術の整備状況（2）

項目と内容		概要	段階			文献
			概要	精密	建設	
活断層の存在の把握	地球化学的手法（H_2，He）	岩石の破壊により生じる水素ガスの測定やから,地下水や温泉,土壌ガスに含まれるヘリウム同位体の測定から断層の位置，断層を評価する手法の開発[38),39),40)]が進められている。		○		38)黒澤ほか(2010) 39)Shimada et al.(2008) 40)Umeda and Ninomiya(2009)
	総合的評価手法	地表に明瞭な地震断層が出現しないような地域で，微小地震活動，航空レーザー測量，反射法地震探査で震源断層にかかわる活構造を評価する手法[41)]が示された。	○	○		41)青柳・阿部(2009)
活断層周辺の変形帯・影響範囲の把握	変形領域の把握（活褶曲など）	・堆積環境にある海域では断層関連褶曲解析（growth strata 等）を利用して音波探査データとの組み合わせなどで断層構造の抽出に対して成果を上げている[42)]。 ・日本の活褶曲の形成メカニズムとタイプ分け[43)]が行われ，模型実験による活褶曲・逆断層帯の発達過程・影響帯の評価[44),45)]や，断層関連褶曲の考え方に基づき既存の地質データとバランス断面法による評価[46)]が行われている。 ・逆断層や横ずれ断層に関する評価として，地質調査結果を基にバランス断面法を適用した手法[),47),48),49)]，断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲の推定に数値解析プログラムを適用する手法の有効性[50),]が確認されている。	○	○		42)岡村(2000) 43)池田(2002) 44)上田ほか(2005) 45)上田ほか(印刷中) 46)岡村・石山(2005) 47)楮原ほか(2006) 48)小坂ほか(2009) 49)Kagohara et al.(2009) 50)JAEA(2010)
	断層の発達・伸展の評価	・逆断層に関して，模型実験による発達過程の解析からの評価手法[51)]が検討されている。 ・横ずれ断層に関して，中国地方と中部地方の主要断層の発達程度の比較[52)]，実験・シミュレーションによる評価[53),54),55),56)]が行われている。	○	○		51)上田ほか(2003) 52)松田ほか(2004) 53)上田(2009) 54)澤田・上田(2009) 55)小山・谷(2003) 56)Kase and Day(2006)
	地質環境特性への影響評価	・地下水流動など地下環境変化にかかわる断層のダメージゾーン，プロセスゾーンの地質学的評価[57),58),59)]，MT 法探査で取得された比抵抗によるダメージゾーンの広がりの評価[60)]の事例が示されている。	○	○	○	57)金折(2001) 58)吉田ほか(2009) 59)Yoshida et al(2005) 60)麻植ほか(2007)
地質断層の再活動性の評価		・近年発生した被害地震（宮城県北部，岩手・宮城内陸地震など）は既存の地質断層の再活動による可能性が示されている[61),62)]。また，モデル実験や数値解析による検討[63)]が進められている。	○	○		61)Kato et al.(2006) 62)遅沢(2009) 63)山田・松岡(2004)
断層活動に関する確率論的評価		・活断層・隆起などの地表変化，GPS データ，歴史地震データから得られる各々の歪速度分布，年間歪速度の超過確率から将来 10 万程度の断層発生予測手法[64)]が開発されている。 ・確率論的な地震ハザード解析として，防災分野[65),66)]では数十年程度の予測が行われている。	○	○		64)Chapman et al.(2009b)など 65)地震調査研究推進本部(2010) 66)Stirling et al.(2002)

概要：**概要調査地区選定段階（文献調査の段階）**，**精密**：**精密調査地区選定段階（概要調査の段階）**，**建設**：**処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）**

○：**主な適用段階**

② 測地学的手法

広域的かつ継続的なデータ取得による解析を可能とした手法として，地球観測衛星搭載の合成開口レーダーシステムと GPS による観測データがある。

地球観測術衛星「だいち」の合成開口レーダー（PALSAR）システムでは，数 10km の範囲の地殻変動を数 cm の精度で捉えることが可能であり，岩手・宮城内陸地震地域への適用では，解析結果として得られる干渉画像から断層の走向や変位のセンスを求められることが示されている（雨貝ほか，2008）。GPS 観測データからは，東北地方から近畿にかけての日本海側で，三角測量で指摘されていた変形集中帯の存在が明瞭となり（Sagiya *et al.*，2000），この変形帯と内陸地震との関連の可能性が指摘されている。また，定常時の地殻変動を広範囲で精度よく得られることから，解析が手軽に行えるようになり，広域的にはプレート境界におけるすべりの時空間分布やすべり欠損分布の推定が試みられ，数 km 間隔で設置された GPS 観測点のデータに基づき活断層周辺の歪の蓄積過程を捉えることが可能となっている（鷺谷，2009）。

サイト調査･評価の各段階において，合成開口レーダーのデータを用いた解析を行うことにより，活断層の検出や十分な観測密度の GPS 観測で断層に蓄積された歪，変形の有無の検討が可能であると考えられる。

③ 地形学的手法

変動地形学の基本的な考え方は，渡辺・鈴木（1999）や日本応用地質学会応用地形学研究小委員会（2002）などにまとめられているが，近年の地震において，起震断層相当の活断層などが全国規模の活断層図などに記載されていなかった事例もあり（2008 年岩手・宮城内陸地震など），空中写真判読に代表される地形調査により不明瞭な変動地形を事前に検出することは，現在も重要な課題となっている。

この課題に対する近年の新たな研究として，高田ほか（2003）および木下ほか（2005）は，活断層であるかどうか不明確なリニアメントの偏在性に着目し，明瞭な活断層が地表に分布しない地域に対してリニアメント判断基準の検討を行っている。また，広域的な地殻変動を把握するという観点から，段丘から見積もった隆起量の分布，あるいは，区分した段丘の分布から変動を抽出し，地表での位置が不明瞭な活断層の検出･活動性評価に活用する試みもなされている（田力･池田, 2005；田力ほか，2009；幡谷，2006b；幡谷ほか，2006；幡谷・濱田，2009）。さらに，航空レーザー測量で作成された DEM（Digital Elevation Model，以下 DEM という)の地形情報は，これまでにない解像度と客観性を有しており，2008 年岩手・宮城内陸地震域での適用事例（丸山ほか，2009）では，山間部の植生のある地域において断層変位地形が抽出されている。

サイト調査・評価の各段階では，変動地形学的手法は伏在断層の抽出や活動性の評価に適用が可能である。レーザー測量は詳細な DEM から変動地形を抽出する際に適用可能と考えられ，必要に応じて概要調査の段階以降に適用できると考えられる。

④ 構造地質学的手法

現地調査において確認された断層の活動性の評価に際して，断層とそれを覆う地層との関係に基づく評価ができない場合がある。このため，断層を構成する物質（断層岩）から直接断層の活動性を評価する手法の開発が進められている。主な手法には，断層岩を構成するガウジなどの年代測定（田上ほか，2010）によるものと断層沿いの破砕，変形，変質などの状況や断層ガウジの色調から評価（小林・杉山，2004；相澤ほか，2005）するものがある。また，断層岩や周辺地層の熱年代学的調査を含めた地質構造発達過程を踏まえて断層の活動履歴を評価する手法（Tagami and Murakami,

2007；伊藤，2006）も検討されている。

海域では，海底のタービダイトの詳細な解析によりで地震発生の頻度を解析する手法が開発されている（池原，2000）。

断層岩からの直接的な評価手法は開発段階であり，信頼性が得られた段階で概要調査以降の断層の活動性の評価に適用する。熱年代学的手法による断層の活動履歴の手法は，必要に応じて適用する。

⑤　地球物理学的手法

活断層調査に適用される一般的な物理探査手法は，反射法地震探査（海域では音波探査），電磁探査，重力探査などであり，このほか地震波を利用した解析・評価手法がある。

反射法地震探査では，近年二次元解析処理技術や三次元地震探査技術の進展が著しく，資源探査や海域での構造調査，表層の地形，堆積物調査への有効性が示され，活断層の調査にも活用が期待されている。また，浅海域を対象としたマルチチャンネル音波探査システムが開発され，2007 年の能登半島地震の海底断層の調査などで使用されている（井上ほか，2007）。三次元地震探査技術は，陸域では表層の地盤調査などで利用され，断層構造の抽出が行われている（佐々木ほか，2008）。反射法地震探査では，探査深度，目的に応じて多様な周波数の震源を適切に組み合わせることなどにより，適切な調査仕様を選択することで水平方向の地質構造の比較や地下深部から浅部までの情報を取得する際に活用することが考えられる。

電磁探査では，海上音波探査を補完する水深 200m から波打ち際に対応した電磁探査システムの開発や改良が行われ（吉村ほか，2006a；大澤ほか，2010），ほかの電磁法と組み合わせることにより沿岸域から海域に及ぶ電磁探査法の適用性が検討されている（吉村ほか，2009；大里ほか，2009；上田ほか，2010）。

主要な活断層近傍では，重力変化の大きい急変帯となっていることや，断層長が重力の急変帯を超えることは少ない（井上ほか，2006）ことなどから活断層の概略の位置，連続性を評価する手法の一つとして重力探査の活用も考えられる。

地震波を利用した解析手法は，地震観測網の整備と解析手法の高度化でより精度の高い地下構造の評価が可能となっているが，岡田・長谷川（2005）は，地震観測データをトモグラフィ解析することにより 1995 年兵庫県南部地震域，2003 年宮城県北部地震域での震源断層のイメージングを行っている。また，地震データの解析を基にした，活褶曲地域における震源断層評価として，青柳・阿部（2007）は新潟県中越地震の震源域において，補正した震源分布から震源断層を推定し，有限要素法による模擬的変動解析と地質構造とを対比する手法で，活褶曲地帯での断層評価を行う手法を示している。

地球物理学的手法は，調査対象地域の特徴に応じた手法を組み合わせてサイト選定のための調査・評価を進めるが，現地調査の初期では二次元の反射法地震探査（海上音波探査）を優先的に行い，必要に応じて三次元の反射法地震探査などを取り入れる。

⑥　地球化学的手法

伏在断層の存否および活動性を地球化学的に抽出，評価する手法の開発が進められている。主な手法として，岩石の破壊により生じる水素ガス（Kameda *et al*，2003）を地表で測定する手法（黒澤ほか，2010；Shimada et al.，2008）や温泉，地下水，土壌中のガスに含まれるヘリウム同位体を測定することで変動地形が不明瞭な断層や伏在断層を抽出する技術（Umeda et al.，2008；Umeda and Ninomiya，2009 など）などがある。

これらの手法は，概要調査の段階以降において，活断層の分布を把握する際に必要に応じて適用する。なお，開発中の手法は信頼性を確認した上で適切に取り込んでいく。

⑦　総合的評価手法

近年，震源断層の評価として，複数の調査手法を組み合わせ，総合的に評価する方法論が検討されている。青柳・阿部（2009）は，微小地震活動のデータ解析，航空レーザー測量による地形起伏量の変化ゾーンの抽出，反射法地震探査による不連続地下構造の解析を組み合わせることにより，震源断層にかかわる活構造を評価する手法を示している。地下深部の活断層の存在を三次元的に把握するためには，それぞれの個別の調査手法はもとより，測地，地質学，物理探査，地球化学，ボーリング調査，数値解析など複数の調査手法を適切に組み合わせることが重要であり，総合的な評価手法については今後も高度化していく必要がある。

（ⅱ）　活断層周辺の変形帯・影響範囲の把握

①　変形領域の把握

断層関連褶曲評価には，断層運動によって形成される撓曲（活褶曲）の発達過程に伴い形成される特徴的な堆積構造（growth triangle および growth strata）について音波探査データなどを基にバランス断面法などを活用し解析・評価する手法（岡村，2000）が適用されている。

活褶曲に関する知見は，池田（2002）により形成メカニズムに基づくタイプ分けとして示されている。活褶曲に関する評価手法は，新潟県中越地震域を対象に開発・検討されており，模型実験による活褶曲・逆断層帯の発達過程・影響帯を評価する手法（上田ほか，2005；上田，印刷中），断層関連褶曲の考えに基づき既存の地質構造データとバランス断面法により地下の断層形態を推定する手法（岡村・石山，2005）が示されている。活褶曲と関連した逆断層帯の影響範囲評価の事例（上田ほか，2005）では，模型実験による基盤の断層傾斜角と被覆層の物性の違いとの関係から，基盤の断層が低角度の場合はback-thrustの形成とfore-thrustの下盤側への前進により，変形帯の幅が広くなることが示された。また，被覆層内に流動変形を示す泥質岩（高圧泥岩）を伴う場合は，主要な撓曲崖～前縁地側に小規模な褶曲･逆断層群が発達するとともに，主断層の上盤側に正断層が形成されやすい傾向が認められ，変形帯の幅が広くなることが明らかにされている（図 5.3.1-3）。

逆断層帯の形成過程および変形領域の評価は，地質構造調査（地形，地質，物理探査）から得られた地質構造を基にバランス断面法を適用して解析する手法が用いられる。小坂ほか（2009）は，北上低地西縁断層帯に，楮原ほか（2006），Kagohara *et al.*（2009）などは，横手盆地東縁断層帯・千屋断層を対象に解析を行っている。

横ずれ断層については，JAEA が，断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲の推定を既存の数値解析プログラムで解析し，その有効性と適用性を確認している（JAEA，2010）。

サイト選定のための調査・評価の各段階において，横ずれ断層の数値解析や断層関連褶曲の概念を基にした解析は，その適用の可否を判断して文献調査での活用や，概要調査では地表調査結果などを考慮して評価に適用する。

②　断層の発達・伸展の評価

逆断層の評価としては，模型実験による発達過程の解析による評価手法（上田ほか，2003）があり，横ずれ断層の評価については，中部地方と中国地方での，横ずれ断層の発達程度の比較（松田ほか, 2004）や模型実験･シミュレーションによる横ずれ断層の発達過程や幅の検討が小山･谷（2003），Kase and Day（2006），上田（2009），澤田・上田（2009）などにより行われている。

横ずれ断層評価事例の中で，上田（2009）は，断層変位に伴う岩盤の変形過程に関して模型実験と実地盤の地表の変形帯の比較を行い，その結果から変形特性を把握し変形帯の幅を予測する手法と評価する上での留意点を示している。すなわち，変形過程の初期に，断層変位の増大に伴いリーデルせん断に相当する雁行状のフラクチャー群が形成され，次にリーデルせん断は連結し屈曲部を有する一連の主断層が形成される。屈曲部では逆断層成分を有する新しいフラクチャーが分岐・発生し外側へ発達するため断層の幅が広がる。しかし，屈曲部の岩盤深部ではフラクチャーゾーンの幅は狭く，より直線状の主断層が形成される。このような事実に基づき断層変位に伴う岩盤の変形を評価する上での留意点は，評価対象の断層の形態・活動性を把握し，断層の成長過程（発達段階）と岩盤の物性と応力状態を考慮し評価を行うことであるとしている。

上記の手法は，必要なデータが得られた段階で，モデル実験やシミュレーションを組み合わせた解析を行い，評価に適用する。

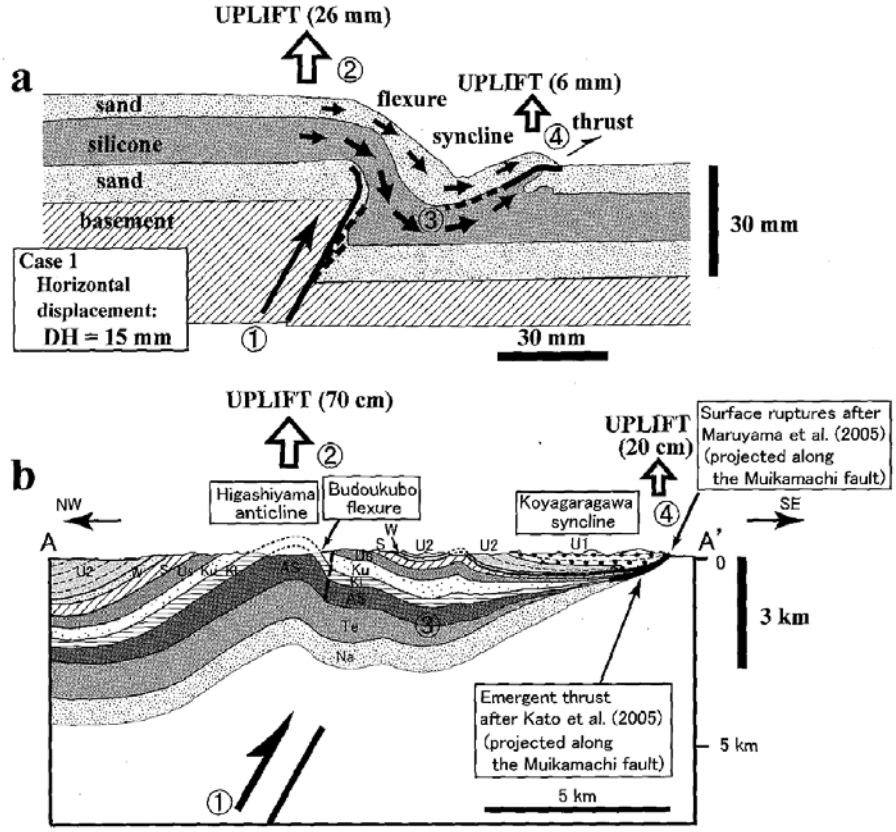


図 5.3.1-3 模型実験による褶曲・断層モデルと地質断面図の比較の例（出典：上田ほか，2005）

(a) ①：急傾斜逆断層である本震の震源断層の変位，②：主要な曲げ褶曲の形成（東山背斜，田麦山背斜に相当），③高圧泥岩のせん断と下盤側への流動，④：小褶曲と地表に小規模な低角逆断層の形成，以上の過程を模型実験で示した。図中の太実線はせん断帯を，破線は推定せん断帯を示す。(b) 地質断面は地質調査所（1992）と Yanagisawa *et al.* (1986)による。

③ 地質環境特性への影響評価

断層の発達過程で形成される破砕帯やその分布範囲に関する知見は，地下水流動，地下水の地球化学的状態の変化，岩盤中での物質の移動にかかわる影響を評価する上で重要であり，一般的に断

層の規模が大きいほど破砕帯の幅も大きくなるとされている。断層運動の影響が周囲の岩盤に及んだ範囲に関する地質学的知見は金折（2001）にまとめられている。近年では，花崗岩分布域において割れ目の発達過程や変質の程度などについて地質学的，地球化学的な調査を行い，地下水流動や岩盤中での物質の移動にかかわるダメージゾーンの研究が進められている（例えば，Yoshida *et al.*, 2005；吉田ほか，2009）。吉田ほか（2009）は，断層および割れ目の充填鉱物を用いることにより，断層の影響の及んだ範囲に形成される割れ目（酸化物で充填された連続性の悪いネットワーク状の割れ目）と既存の岩体に普遍的に形成されたバックグラウンド割れ目（連続性がよく熱水性起源の充填鉱物を有する単一割れ目）を区分する手法を示している。また，その手法を用いて岐阜県東部の阿寺断層では 200m 程度の範囲に短い割れ目の密度が増加し，ダメージゾーンが形成されているとしている。さらに，断層の近傍では，母岩の主成分元素のうち Na，K，Si などの減少が見られることや酸化鉱物が見られることから熱水変質と天水の循環が生じていたことを示唆するとしている。

麻植ほか（2007）は，MT 法探査で断層深部の比抵抗のイメージングにより，ダメージゾーンの広がりを評価している。

概要調査の段階以降の地表踏査，ボーリング調査，地下調査施設における調査において，これらの手法はダメージゾーンの判定や割れ目の形成履歴の解析をつうじて地質環境特性（岩体中の割れ目状態，分布特性，岩体の水理特性など）の評価に適用可能である。

（iii） 地質断層の再活動性の評価

東北日本弧では，新第三紀中新世に形成された正断層帯が新第三紀鮮新世～第四紀の広域的なテクトニクスの変化により逆断層活動へと変化しているとされ（佐藤，1996；Kato *et al.*，2006），近年発生した被害地震である宮城県北部地震や岩手・宮城内陸地震などは地質断層の再活動によることが示されている（Kato *et al.*，2004；遅沢，2009 など）。また，山崎（2006）によれば，南関東では基盤に大きな変位を与える中新世に形成された正断層（基盤断層：山崎，2006）のうち，長津田付近から東北東方向に推定される基盤断層が，鮮新世末頃に再活動を開始したが，前期更新世末には活動を停止したことが示されている。一方，北西走向の立川断層は反射断面や変位速度などによる考察から中期更新世に逆断層として再活動をはじめ現在も継続しているとしている。このような基盤断層の再活動の時期が顕著に異なる原因について，山崎（2006）は伊豆半島の衝突による応力場の局所的な変化によると推定している。このほか，梅田ほか（2010）では，活断層の多くが地質断層の分布と整合的であり，既存の地質断層が応力場の変化に伴い再活動したことを指摘している。

したがって，活断層以外では規模の大きな地質断層を対象に再活動性を検討していくことが重要であると考えられる。山田・松岡（2004）は既存断層の再活動の評価は，既存断層面の再活動ポテンシャルを検討することで可能であるとし，三次元的な解析では最大圧縮主応力軸方向と断層面の走向方向が 30°程度にあるとき，一般に最も再活動しやすいと考えられるとしており，このような知見も参考となる。

（iv） 断層活動に関する確率論的評価

国際テクトニクス会議での日本の地震・断層活動評価に関する議論に基づき，決定論的な評価を補足するための手法として，GPS，地震，地表変位などのデータを活用した断層活動の確率論的な評価手法が開発された（Chapman *et al.*，2009b；同，2009c）。ここでは，過去数万年の地表変位データ（活断層，活褶曲，隆起・沈降），数十年間の GPS データ，約 400 年間の歴史地震データからそ

れぞれの歪速度モデルを作成し，パラメータの幅や概念モデルの不確実性を考慮したロジックツリーを構築し，それに基づくモンテカルロ・シミュレーションを行うことにより，確率論的な歪速度分布図を作成し評価を行っている。

また，防災の観点からは，数十年程度の予測として地震ハザード解析を基にした地震動の発生確率値が示されている（地震調査推進研究本部，2010）。同様な地震のハザードマップはニュージーランドにおいても作成されている（Stirling *et al.*，2002）。

サイト調査・評価の各段階において，確率論的手法による評価結果は，確率論の算出に用いるデータの精度を考慮した上で，決定論的手法による評価の参考情報として利用することができる。また，火山・火成活動に関する手法と同様に，限られた情報しか得られない場合や，より小さなスケールへの適用性，そして確率論的評価の結果をどのように活用していくか，などの検討課題が残されている。

(3) 隆起･侵食（気候・海水準変動を含む）にかかわる調査･評価技術の現状

第２次取りまとめ（JNC，1999b）までに段丘などを指標とした過去の隆起量，侵食量を評価する手法の整備が行われた。全国の隆起・沈降速度の概略的な分布が把握され，各地の侵食速度については，面的な侵食と線的な侵食（下刻）に分けて検討が行われた。面的な侵食については地形の起伏状態と相関が大きいことを利用して全国の分布図が作成され，線的な侵食については代表的な河川を例としての侵食の規模やプロセスが検討された。第２次取りまとめ（JNC，1999b）では，内陸部の隆起・侵食量の評価手法の信頼性向上，海水準変動を含めた将来の地形変化予測手法の開発が課題として挙げられていた。

隆起・侵食，気候・海水準変動に関する基本的な調査・評価手法については，2000 年以降，情報整備がなされ，さらに，事例研究などを通じて，隆起・沈降量調査・評価，侵食量・侵食速度調査・評価，気候・海水準変動の復元などの手法の改良，高度化，体系化が図られている。河成段丘の対比･編年の信頼性の向上に伴い，過去 10 万年間程度の内陸部の隆起量を評価することが可能となり，活断層の活動性評価にも応用できる可能性が示された。将来の地形変化予測では，過去の侵食履歴に基づき，気候・海水準変動も考慮した地形変化予測手法や拡散方程式による地形変化シミュレーション技術の開発が進められ，長期的な地下水流動解析への情報提供が行われている。表 5.3.1-5にこれらの項目について，2000 年以降進展が見られた調査・評価技術を示す。

(i) 情報整備

全国規模の情報として，日本の海成段丘アトラス（小池・町田編，2001），最近約 10 万年間の全国の隆起・沈降量分布図（NUMO，2004），最近約 10 万年間の隆起速度分布図（藤原ほか，2005a）が過去 10 万年程度の隆起量の知見をまとめ，わが国に 10 万年間の隆起の総量が 300ｍを超えない地域が広く分布していることが示された。また，侵食に関連する情報として，200 万分の 1 日本列島の地すべり地形分布図（藤原ほか，2004）が整備された。

表 5.3.1-5 隆起・侵食（気候・海水準変動含む）にかかわる調査・評価技術

項目と内容		概　要	段　階			文　献
			概要	精密	建設	
情報整備		全国規模の情報として，日本の海成段丘アトラス[1]，最近約 10 万年間の全国の隆起・沈降量分布図[2]，最近約 10 万年間の隆起速度分布図[3]，200 万分の 1 日本列島の地すべり地形分布図[4]が整備された。	○			1)小池・町田編（2001） 2)NUMO(2004) 3)藤原ほか(2005a) 4)藤原ほか(2004)
隆起・沈降量の調査・評価	段丘対比・編年	年代測定データの誤解釈を避けるため，地形層序・地質層序・年代情報のバランスを重視した総合的な段丘対比・編年の考え方が示され[5]，詳細な火山灰分析手法[6]を使って実証された[7]。これらを支える技術として，数値標高モデル（DEM）を用いた段丘面の定量化手法とその段丘対比への応用[8]，河成段丘を構成する被覆層と段丘礫層の風化指標の見直しが行われた[9]。これらにより，内陸部の隆起量評価に用いる海洋酸素同位体ステージ 6 の後期（14 万年前頃）に形成された河成段丘の同定の信頼性が向上した。	○	○		5)幡谷(2005；2006a)；幡谷ほか(2005)　6)古澤(2004) 7)幡谷ほか(2006；2009) 8)山本ほか(2008) 9)濱田・幡谷(2009)
	河成段丘を用いた内陸部の隆起量評価	隆起量の指標となる海成段丘の比高の信頼性について適用手法を取りまとめ，誤差要因が整理された[10]。また，活断層の落差と段丘の比高から求められる断層両側の隆起量差とが釣り合うことから，河成段丘を用いた隆起量の見積もりの妥当性が示された[11]。	○	○		10)田力・池田(2005) 11)幡谷(2006b)
	堆積物による隆起・沈降運動の復元	年代が明らかな地層の堆積時の深度と現在の分布高度と海水準を比較することにより，過去から現在までの隆起・沈降運度を把握する手法[12]，シーケンス堆積相解析手法を用いて古地理，内陸盆地の発達過程を解明する手法[13]が示された。		○		12)白井・阿部(2001) 13)守屋ほか(2008)
侵食量・侵食速度の調査・評価	地形変化の予測 地形変化モデル	新旧海成段丘面上の侵食地形の比較から過去の侵食履歴・侵食量を見積もり，これと気候・海水準変動を組み合わせた地形変化予測手法[14]，拡散方程式による地形変化シミュレーションによる地形変化予測手法[15)16)]の開発が行われている。また，氷期－間氷期の 1 周期の間に形成される海成段丘面上の開析谷の深さとその体積を DEM を使って求め，これらから下刻速度と段丘全体の平均侵食速度を求める手法[17)]が提案された。	○	○		14)Sasaki et al.(2009) 15)JNC(2005a) 16)三箇・安江(2008) 17)藤原ほか(2005b)
	年代測定手法を応用した長期的侵食（削剥）量の評価	鉱物の閉鎖温度と埋没深度の関係に基づいて，年代測定手法を応用し，数百万年オーダーの地質体の上昇（隆起），削剥速度の評価を行う手法[18)19)20)]，鉱物・有機物の熱による変化（シリカ鉱物相転移など）と堆積物の埋積深度，年代，埋積時の地温勾配の推定などにより堆積層の隆起，削剥量を推定する手法[21)]が開発された。		○	○	18)川上ほか(2006) 19)末岡ほか(2010) 20)Yamada and Tagami(2008) 21)JNC(2005a)；石井ほか(2008)
	宇宙線生成核種を用いた侵食速度測定	地表物質と宇宙線が反応することにより生成される原位置宇宙線生成核種とその核種の年間生成量から，露出していた期間や侵食速度を推定する手法[22)23)24)]の開発が進められている。		○		22)若狭ほか(2004；2008) 23)松四ほか(2007) 24)Matsushi et al.(2006)
気候・海水準変動の復元		段丘の風成層の解析 25)，内陸盆地で掘削されたコアの堆積物解析 26)，花粉分析 27)により，地域的な気候変動の解析や植生変遷の復元が進められている。		○	○	25)Kimura et al.(2001) 26)佐々木ほか(2006) 27)守田ほか(2006)

概要：**概要調査地区選定段階（文献調査の段階）**，**精密**：**精密調査地区選定段階（概要調査の段階）**，**建設**：**処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）**

○：**主な適用段階**

（ⅱ） 隆起・沈降量調査・評価

サイトの隆起・沈降特性を的確に把握するためには，海岸部と内陸部にわたる隆起・沈降量（速度）分布の把握が必要である。海岸部の隆起量については，海成段丘を使った手法により過去 10 万年間の隆起速度分布が日本全国網羅的に取りまとめられた（小池・町田編，2001）のに対し，内陸部の研究が遅れていたため，その解決に向けた検討が進められた。また，地形学的手法では見積もりが難しい 10 万年よりも長期の隆起・沈降量評価に向けた検討も進められた。

① 河成段丘を用いた内陸部の隆起量調査・評価

過去 10 万年間程度の内陸部の隆起量評価については，河成段丘を用いる手法が提案されていたが（吉山・柳田，1995），河成段丘の対比・編年の信頼性を確保することと，隆起量の指標となる河成段丘の比高が隆起量をどの程度正しく反映しているかを示すこと，という信頼性向上にかかわる課題があった。前者については，地形層序・地質層序・年代データのバランスを重視した段丘対比・編年手法の検討が進められ，河成段丘の対比・編年の信頼性が向上した（幡谷，2005；同，2006a；幡谷ほか，2005；同，2006；幡谷・濱田，2009；山本ほか，2008；濱田・幡谷，2009；Hataya *et al.*, 2009：図 5.3.1-4）。後者に対しては，隆起量の指標となる河成段丘の比高の信頼性について適用性の取りまとめと誤差要因の整理や，断層変位との比較による妥当性の検証がなされた（田力・池田，2005；幡谷，2006b）。

これらの手法は，文献調査では既存データによる概略的な評価，概要調査では詳細なデータによる評価が可能であり対象地域における隆起量とともに，地殻変動の把握に向けた情報取得のため，各段階で適用する。

② 堆積物による隆起・沈降運動の復元

年代が明らかな地層の堆積時の深度が分かれば，その現在の位置と海水準と比較することにより，段丘面では復元が難しい古い時代を含む隆起・沈降運動を復元できる。2000 年以前には，藤原ほか（1997），下山ほか（1999）といった，海洋酸素同位体ステージ 5e に堆積した海成層から地殻変動を復元した検討事例があった。これに対し，2001 年以降には，より長期の変動が復元されるようになった（白井・阿部，2001；守屋ほか，2008 など）。

これらの手法は，サイト調査・評価において，その適用条件を確認して必要に応じて活用する。

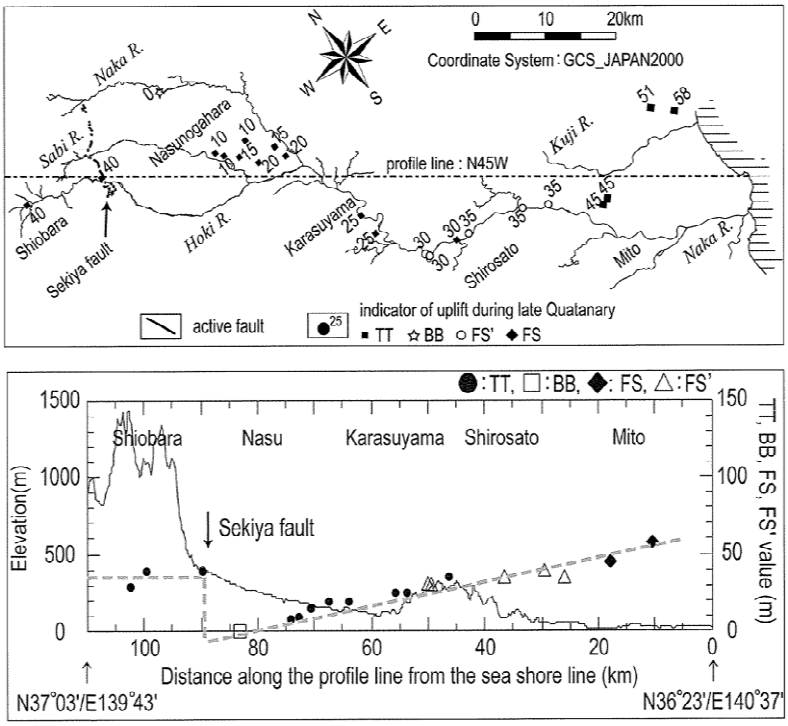


図 5.3.1-4 河成段丘を用いた内陸部の隆起量の調査・評価事例（出典：Hataya *et al.*, 2009）

上：那珂川流域の河川段丘の調査位置と用いた手法。下：河川段丘の詳細な対比・編年に基づく第四紀後期の隆起量のプロットと地形断面図。TT，BB，FS，FS'は吉山・柳田(1995)により定義された過去 10 万年程度の隆起量の指標となる段丘の比高。活断層の南東側の地域の傾動運動が明瞭に認められる。

（iii） 侵食量・侵食速度の調査・評価

侵食量については，ダムの堆砂量データや高度分散量により評価する方法に基づいて全国規模の侵食に関するマップが整備されている（Yoshikawa，1974；藤原ほか，1999 など）。しかしこれら侵食量の見積もりの根拠となったデータの取得期間は短い。このため，近年は，より長期の地形変化予測手法，地形変化（侵食量）の直接測定にかかわる検討が進められている。

① 地形変化の予測，地形変化モデルの構築

地形変化の予想手法としては，過去の侵食履歴に基づき，気候・海水準変動も考慮した地形変化予測手法（Sasaki *et al.*，2009）や，DEM を利用した海成段丘の開析谷の体積から侵食速度を求める手法が提案された（藤原ほか，2005b）。また，拡散方程式による地形変化シミュレーション技術の開発が進められている（JNC，2005a；三箇・安江，2008）。これらの研究開発上の課題としては，現実に即したパラメータの設定，河川の側方侵食，河川の凹形度，地質分布を含めたプログラムの開発，沿岸部を取り込んだシミュレーションの実行などがある。

これらの手法は開発段階であるが，概略的な地形変化予測を行うことができ，これらの結果を基にした地質環境の評価に利用することも可能であると考えられる。したがって現在のレベルで各段階の調査に適用するが，技術の進展とともにその信頼性を確認し，適切に取り入れていく。

② 年代測定手法などを応用した長期的な侵食（削剥）量の評価

長期的な変動履歴の解析手法として，鉱物の閉鎖温度と埋没深度の関係に基づいて，フィッショントラック法・(U-Th)/He 法などの年代測定手法を応用した数百万年オーダーの地質体の上昇（隆起），削剥速度の評価（末岡ほか，2010；川上ほか，2006；Yamada and Tagami，2008）や鉱物・有

機物の熱による変化（シリカ鉱物相転移など）と堆積物の埋積深度，年代，埋積時の地温勾配の推定などで堆積層の隆起，削剥量を比較的長い地質時代を対象に評価する手法の開発が進められている（JNC，2005a；石井ほか，2008）。

一方，宇宙線起源生成核種を用いた年代測定手法を応用した侵食速度推定手法の開発が進められている（若狭ほか，2004；松四ほか，2007；Mahara *et al.*，2010 など）。地表が宇宙線に曝された期間に，地表物質と宇宙線が反応することにより生成され，地表物質中に蓄積された，原位置宇宙線生成核種量とその核種の年間生成量から，露出していた時間や侵食速度を測定する手法であり中期更新世の海成砂岩層の侵食速度の推定（Matsushi *et al.*，2006），河床の露出年代から下刻速度を推定（若狭ほか，2008）している事例がある。

熱年代学的手法や鉱物・有機物の熱による変化を利用した手法は，過去の地温勾配を仮定する必要があるなど不確定要素が含まれ分解能の高い評価には適さないが，数百万年の長期の概略的評価が可能であるため，概要調査の段階以降において必要に応じて適用する。また，宇宙線起源生成核種を利用した侵食速度測定技術は，概要調査の段階以降において，日本における適用事例を参考にしつつ最新の情報を取り入れて必要に応じて活用する。

（ⅳ） 気候・海水準変動の復元

気候・海水準変動の解析については，過去数十万年間の地球規模での氷期－間氷期サイクルが存在することに対する知見は整理されているが（EPICA，2004 など），地域的な規模の変動に対する解析手法の整備と知見の蓄積が必要とされている。これに対して，段丘の風成層の解析（Kimura *et al.*，2001），内陸盆地で掘削されたコアの堆積物解析（佐々木ほか，2006），花粉分析（守田ほか，2006）などの研究により，地域の気候変動の解析や植生変遷の復元が進められてきた。

ここに示した地域的な気候・海水準変動の解析手法は，対象地域の条件を考慮して解析可能な手法があれば，精密調査地区選定段階以降において適用する。

5.3.1.2 地質環境特性にかかわる調査・評価技術

地質環境特性にかかわる分野では，第２次取りまとめ（JNC，1999b）までには，特に地層処分を目的として地下深部の地下水流動や岩盤中での物質の移動などにかかわる評価に必要なデータを取得する機器や手法の開発，サイト調査での地質環境調査の基礎になる要素技術（物理探査など）についての整備が行われてきた。それに続く第２次取りまとめ以降の技術開発の目標には，幌延および瑞浪の深地層の研究施設を利用して，手法の高度化と体系化を図りつつ，わが国の代表的な地質環境である堆積岩と結晶質岩における地質環境の不均質性に関する知見の蓄積が挙げられている。これに基づき，第２次取りまとめ以降の深地層の研究施設計画では，地質・地質構造に関するデータ取得から解釈･モデル構築までの一連の調査･評価の調査研究の成果を用いて，文献に基づく調査段階から地表からの調査段階（精密調査の前半までに相当）までを対象とした手法の高度化ならびに統合的調査評価システムが開発された。また，沿岸域を対象にした調査評価手法の整備では，沿岸域の断層評価手法，塩淡境界面形状把握，海底地下水湧出探査技術，ボーリング技術，物理探査技術の高度化調査などが行われた。

地質環境特性にかかわる項目は，地質･地質構造，地下水流動特性，地化学特性，物理・力学・熱特性，そのほかの特性およびモニタリングに区分して記述する。表 5.3.1-6～表 5.3.1-8にこれらの項目について，2000 年以降進展の見られた調査・評価技術を示す。

なお，ここに示した調査手法は，既存の手法を調査・評価対象に応じて改良したものや解析手法の高度化が行われたものである。NUMO は調査地域の地質環境特性に応じて，概要調査の段階以降，既存の調査・評価手法はもとより，これらの手法も選択肢として適用する。得られた結果は地質環境モデルの構築に反映される。

(1) 地質・地質構造

地質・地質構造にかかわる調査・評価技術では，文献情報と地表踏査のデータを基にして，物理探査とボーリング調査から，主に岩盤中の不均質性（岩相，地層の分布，割れ目帯）や不連続構造の三次元分布を把握するための手法，地質・地質構造をモデル化するための知見については，おおむね整備されてきている。

物理探査技術の進展は，近年の電子技術やコンピュータ関連技術の発展に伴い，大量の情報を高精度で効率よく取得，解析できるようになったことに負うところが多く，特に解析技術の進展によって精度の高い地質構造の把握が可能となってきている。技術開発が行われている分野は，地球科学の研究分野，土木地質，資源開発関連などさまざまであるが，地層処分にも適用可能なものが多い。このうち，反射法地震探査ではデータ処理技術の進展，例えば重合前マイグレーション処理（Yilmaz，2001）などの適用が広がり，断層構造など複雑な地質構造での解析精度が向上している（Schapper *et al.*，2009）。また，データ取得装置の多チャンネル化と併せて，二次元探査よりも探査結果の信頼性が高い三次元探査の適用も広がり，海域および陸域での資源探査（芦田，2005），詳細な堆積物や古地形情報，断層構造の三次元的解析（松岡，2007；佐伯ほか，2006；朴ほか，2008），地質地盤調査の小規模断層調査（佐々木ほか，2008）などに地下構造を正確に理解しやすく可視化する技術として利用されている。沿岸浅海域を対象とした調査では，これまで地球科学研究分野や資源探査分野で広く用いられてきたマルチチャンネル音波探査システムが沿岸域の地震活動に伴う断層調査に適用され，能登半島地震の海底断層の調査（井上ほか，2007）で使用されるなど，地質構造調査における使用実績が増えている。

電磁探査では，自然の地磁気・地電流を用いる MT 法では，鉄道や送電線などに起因する人工ノイズの影響を低減できる重み付けスタッキング法（根木ほか，2007a；同，2007b）が開発されて深部の地下構造の解析に用いられている。沿岸域においては，音波探査の適用困難な環境における補完的調査手法として，浅海用電磁探査法が開発され（吉村ほか，2006a），既存の手法と併せて陸域から浅海域までの連続した調査手法が整備されている。データ解析技術では多様な地質環境での適用を通じて三次元解析技術の開発が進められている（吉村ほか，2006b など）。

地下の情報を直接取得する手法としてのボーリング掘削技術は，すべての地球科学分野において重要な調査技術である。資源探査（石油，地熱，鉱物資源など）では従来から使用されており，内陸や海域で現在も広く用いられている技術である。また，火山・深海掘削などの科学掘削においても雲仙火山科学掘削プロジェクトや統合国際深海掘削計画などに伴う技術開発が進められている。地層処分の分野では，沿岸海底下での調査が困難な地形・地質条件下で，掘削の方位や傾斜を自由に制御しコア採取･孔内調査を効率的に行うことを目的としたコントロールボーリング掘削･原位置調査技術システムの開発（木方ほか，2006；同，2009）が行われている。

結晶質岩中の亀裂に関する研究における進展として，ボーリング孔の亀裂データと断層や基盤岩地形との関連を考慮した空間的な亀裂密度分布推定手法（栗原ほか，2008）やマルチスケールでの亀裂分布のシミュレーション技術が開発（小池ほか，2008）されている。堆積岩中の亀裂分布解析

としては，断層などの透水構造の三次元分布を把握する手法（石井ほか，2006；石井・福島，2006；Ishii *et al.*，in press），ボーリング調査結果に基づく亀裂の特性解析手法と地質構造モデルの構築手法（舟木ほか，2009）などが開発されてきている。

表 5.3.1-6 地質環境特性にかかわる調査・評価技術（1）

項目と内容			概　要	段階			文　献
				概要	精密	建設	
地質・地質構造	物理探査による調査・評価		反射法地震探査（海域では音波探査）においては，二次元手法の処理法の進展[1]と三次元手法による資源調査[2]，海域での地質構造解析，活断層，堆積物，地形調査[3)4)5)]，や陸域での地質地盤調査（小規模断層）分野[6)]での適用が進んでいる。また，浅海域の地質構造を精度よく把握するためのマルチチャンネル音波探査システム[7)]が開発されている。 音波探査を補完する水深200m～波打ち際に対応した海底電磁探査システムの開発[8)]や，陸域から海域に対応した手法の整備と三次元解析手法の開発[9)]が進められている。MT 法の解析に必要な高品質データの取得に重要なスタッキング法の開発[10)]が行われている。		○	○	1)Yilmaz(2001) 2)芦田(2005) 3)松岡(2007) 4)佐伯ほか(2006) 5)朴ほか(2008) 6)佐々木ほか(2008) 7)井上ほか(2007) 8)吉村ほか(2006a) 9)吉村ほか(2006b) 10)根木ほか(2007a；2007b)
	ボーリングによる調査・評価		掘削方位や傾斜を制御しコア採取や孔内調査を行うことができるシステムとして開発され，沿岸域などでの掘削にも対応している[11),12)]。		○	○	11)木方ほか(2006) 12)木方ほか(2009)
	結晶質岩中の亀裂分布解析		花崗岩中のボーリング孔の亀裂と基盤岩地形・断層との関連を考慮した空間的な亀裂密度分布推定手法[13)]，異なるスケール間の亀裂分布の法則性・相互関係を考慮可能なマルチスケールでの亀裂分布のシミュレーション技術[14)]が開発されている。		○	○	13)栗原ほか(2008) 14)小池ほか(2008)
	堆積岩中の亀裂解析（三次元構造）		水理特性解析の基礎となる断層などの透水構造の三次元分布を把握する手法について異なるスケールで開発[15)]されている。ボーリング調査結果に基づく亀裂の特性解析手法と地質構造モデルの構築手法[16)]，断層の成長メカニズムを考慮した岩盤力学的応力計算に基づく高透水構造の空間分布の調査・解析手法[17)]，シリカ鉱物の続成作用に基づく背斜構造の成長開始時期の調査・解析手法[18)]なども整えられている。		○	○	15)石井ほか(2006a；2006b) 16)舟木ほか(2009) 17)Ishii et al.(in press) 18)石井ほか(2008)
地下水流動特性	水理特性	深部岩盤を対象とした方法	深層岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法[19)]の開発で透水性などの水理パラメータを適切に解析するための一連の手法が開発され，堆積岩中の溶存ガスを含む地下水条件に対応するための試験装置が考案[20)]されている。		○	○	19)竹内ほか(2007) 20)竹内・平田(2003)
		透水性割れ目・水みちの把握	高感度孔内流速検層により孔井内の湧水箇所と逸水箇所を評価する手法[21)]，電気伝導度検層により透水性割れ目（水みち割れ目）を抽出，推定する方法[22)]，光ファイバ温度検層により流出・流入箇所を流速の変化する箇所として水みち分布モデルの推定手法[23)]などが開発された。		○	○	21)関ほか(2005) 22)松岡ほか(2007) 23)末永ほか(2000)
	地下水流向・流速の把握		固体トレーサの移動軌跡を超音波センサ追跡することによって，地下深部の極低流速に対応した10^{-9}m/s 程度の流向・流速の測定を可能とする計測方法[24)]が開発された。		○	○	24)戸井田ほか(2007a；2007b)

概要：**概要調査地区選定段階（文献調査の段階）**，**精密**：**精密調査地区選定段階（概要調査の段階）**，**建設**：**処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）**
○：**主な適用段階**

表 5.3.1-7 地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (2)

項目と内容			概　要	段階			文　献
				概要	精密	建設	
地下水流動特性	水理地質構造モデル・地下水流動解析	結晶質岩系の事例	岩盤中の地下水流動を評価するための数値モデルの作成から地下水流動解析までを統合した GEOMASS システムの開発[25]が行われている。		○	○	25)稲葉・三枝(2003)
		堆積岩系の事例	地下水流動解析を用いた地上からの調査の体系化とガスが溶存する塩水系地下水の存在する堆積岩地域での解析[26]，地層間隙内の地下水の結合度合い(pF)に応じた地下水の安定性のモデル化[27]などを進めている。		○	○	26)操上ほか(2008) 27)産総研(2010)
		長期変遷のモデル化	堆積岩が分布する沿岸域を対象として気候・海水準の長期的な変動を時間変動境界条件として考慮し，過去から現在までの長期間の地下水流動評価[27]，古地形分布モデルを用いて地下水流動解析[28),29),30),31)]が行われている。		○	○	28)操上ほか(2007) 29)尾上ほか(2009) 30)中田・長谷川(2010) 31)長谷川ほか(2010)
地下水化学特性	水質，年代評価		地下水の採水，分析技術に関する検討事例[32]，地下深部に分布する化石海水に関して，地下の岩盤中で生成される ^{36}Cl 地下水年代評価安定同位体データを基にした化石海水の同定手法を提案[33]している。		○	○	32)岩月ほか(2009) 33)馬原ほか(2006)
	地下水化学モデル		経時的な地下水の水質変化の範囲や程度などを定量的に評価するため,主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析(Multivariate Mixing and Mass balance modeling analysis)[34]，岩石コアから抽出した間隙水のイオン濃度を求め，地下水流動との関係を考察した事例[35]がある。			○	34)阿島ほか(2006) 35)伊藤ほか(2010a)
岩盤力学・熱特性	岩盤力学特性評価		一軸圧縮強度、RQD、割れ目の状態の 3 要素を指標とする岩盤評価方法[36),37)]が示され。地圧測定では，軟岩に適したオーバーコアリング法による応力測定システムの開発[38]，深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発[39]が行われている。 花崗岩を試料とした鉱物比の違いによる一軸圧縮強度の違いについての考察[40]，珪質岩の力学的な特徴を評価のため力学特性と岩盤特性との相関を深度方向で整理[41]が行われている。また，接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の測定手法の検討[42]が行われている。瑞浪超深地層研究所では、地表からボーリング調査を行い、その結果を用いて岩盤の力学的概念モデルを構築している[43]。	○	○	○	36)澤田ほか(2009) 37)澤田ほか(印刷中) 38)Ghimire et al.(2004a) 39)坂口ほか(2006)など 40)藤井ほか(2005) 41)真田ほか(2009) 42)藤井ほか(2006) 43)松井ほか(2000)
	熱特性評価		高温低温下における岩盤物性（物理、力学、透水、熱）について、既往文献調査を基にデータベース化を行い[44]。高温環境下における堆積軟岩の力学特性（三軸圧縮強度，クリープ特性の温度依存性）[45]が示されている。	○	○	○	44)土木学会(2006) 45)岡田(2005；2006)
	難工事評価		既存情報の整理より，事前の地質情報からトンネル施工時の地山の押出し性を判断・評価する基準および施工方法の設計方針[46]が提示され，また，概要調査段階までの情報で難工事遭遇可能性を評価する手法[47]が示された。突発湧水に伴う対策工コスト変動リスク評価[48]や断層・破砕帯部の立坑施工時に発生する蓋然性の高い崩落形態である高抜けと覆工破損に対してより安全な工法[49]が提示されている。	○	○	○	46)高橋ほか(2004) 47)新ほか(印刷中) 48)大津ほか(2008) 49)櫻井ほか(2006)

概要：概要調査地区選定段階（文献調査の段階），精密：精密調査地区選定段階（概要調査の段階），建設：処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）
○：主な適用段階

表 5.3.1-8 地質環境特性にかかわる調査・評価技術の現状一覧表(3)

項目と内容		概　要	段　階			文　献
			概要	精密	建設	
その他の特性	泥火山	泥火山噴出の起源となる流体は，深度 2km より深部から上昇し[50]，流体の形成に粘土鉱物の脱水の寄与が大きく，生物起源有機物の熱分解で生成した炭化水素ガスを含むこと[51]，また，外国の事例から泥火山の活動周期，噴出量についての知見[52]が得られている。泥火山の地下構造や地表での形態・規模を測地または物理探査手法により推定する事例[53)54)]が示されている。		○	○	50)井尻(2009) 51)新谷・田中(2009) 52)高橋ほか(2006) 53)鈴木ほか(2009) 54)田近ほか(2009)
	マスムーブメント	伊吹山の大規模崩壊によって形成された堰止湖堆積の ^{14}C 年代から崩壊の頻度を推定し，美濃帯で発生する可能性がある大規模崩壊の予測手法[55)]が示され，地震時の大規模地すべりの事例[56)]が示されている。	○	○		55)小嶋ほか(2006) 56)大野ほか(2010)
	物質移行特性	熱力学・収着・拡散データベース[57)]が整備されている。結晶質岩中の透水性割れ目における放射性核種の移行・遅延を規制するプロセスや場の構造などの把握とモデル化，原位置試験手法やモデル化手法などの開発[58)59)60)]が進められている。		○	○	57)JAEA(2005-2009) 58)JNC(2005b) 59)三枝ほか(2007) 60)太田ほか(2007)
モニタリング		瑞浪および幌延におけるボーリング孔を利用した地下水の水圧，水質の長期モニタリング[61)62)]，東海事業所では，人工バリアの性能確認のためのモニタリングの技術開発および適用性確認を進め[63)]，このほかでは，地中無線通信による伝送技術などの開発[64)]，「技術的選択肢（技術メニュー）」の開発を進めている[65)66)]。		○	○	61)JNC(2005a) 62)太田ほか(2007) 63)牧野ほか(2005b) 64)高村ほか(2006) 65)竹ヶ原ほか(2004) 66)RWMC(2009)

概要：**概要調査地区選定段階（文献調査の段階）**，**精密**：**精密調査地区選定段階（概要調査の段階）**，**建設**：**処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）**

○：**主な適用段階**

(2) 地下水流動特性

地表からの地下の岩盤の水理特性にかかわる調査・評価技術については，ボーリングコアやボーリング孔を利用した試験・検層に基づき，岩盤中の水みちとなる亀裂に対する評価はおおむね整備されている。ここでは，水理地質構造モデルの構築に用いられる岩盤の水理特性や岩盤中の地下水の流向・流速の調査技術，また，空間的な地下水流動状況を評価するための水理地質構造のモデル化および地下水流動解析技術の現状について述べる。サイト選定のための調査･評価の各段階では，利用可能なデータの量や精度を考慮し，適切なツール（モデリングソフト，地下水流動解析コードなど）を利用した調査・評価を行う。なお，その際には，既往の解析事例を参考に，解析条件などの設定を行う。

(i) 水理特性の調査技術

ボーリング孔を利用した原位置水理試験は，従来から一般土木分野において，浅部の地盤を対象として適用されてきた技術であり，試験方法やデータの解析方法については，すでに規格化されている（地盤工学会，2004）。放射性廃棄物の処分施設は地下 300m 以深に設置するため，原位置水理試験のうち，深部岩盤に適用可能な水理試験方法を適用する。

深部岩盤を対象とした水理試験方法では，竹内ほか（2007）が，図 5.3.1-5に示す試験装置を用いてパルス試験，スラグ試験，揚水試験および回復試験などの複数の非定常試験を連続的に行う手法を開発している。この手法は，水理試験を相対的に短時間で終了できるパルス試験から開始し，リアルタイムで岩盤の透水性を算定しながら順次時間を要する試験を実施するものである。図 5.3.1-6に，この手法による原位置水理試験の適用事例を示す。この事例では，試験中にリアルタイムで圧力データとその時間微分プロットを確認し，これに基づいた水理パラメータの把握や試験終了の判断を行うことにより，深部岩盤での水理試験を効率的に実施できることを示している。堆積岩中において溶存ガスを含む地下水に対応した手法（竹内・平田，2003）も開発されている。

高透水性の割れ目の分布と透水性を把握するための調査技術では，新しい検層技術として，ボーリング孔内の湧水箇所や逸水箇所を評価する高感度孔内流速検層（関ほか，2005），ボーリング孔内の電気伝導度分布の経時変化から透水性割れ目を検出する電気伝導度検層（竹内ほか，2004；松岡ほか，2007；Takeuchi *et al.*，2008），光ファイバを用いて深度ごとの経時的な温度変化を高精度に測定することで水みちを推定する光ファイバ温度検層（末永ほか，2000）などが開発されている。

(ii) 地下水流向・流速の調査技術

ボーリング孔内において，岩盤中の地下水の流向，流速を計測する調査技術は，従来から浅部の一般土木調査の分野で適用されている。しかし，放射性廃棄物の処分施設の設置深度では，一般土木で対象とする浅層の地下水流速と比べて極めて遅いため，極低流速場でも適用可能な計測技術が開発されている（斎藤ほか，2006；戸井田ほか，2007a など）。このうち，戸井田ほか（2007a；2007b）は，ボーリング孔内の一定区間をパッカーで仕切り，計測区間中に固体粒子トレーサを浮遊させて，その軌跡を 1 組の超音波センサで追跡し，固体粒子トレーサの流動軌跡から三次元的流向・流速を測定する技術を開発している。開発された測定装置は室内の性能試験により 10^{-9}m/s 程度の流向・流速を計測することが可能であることが示されている。

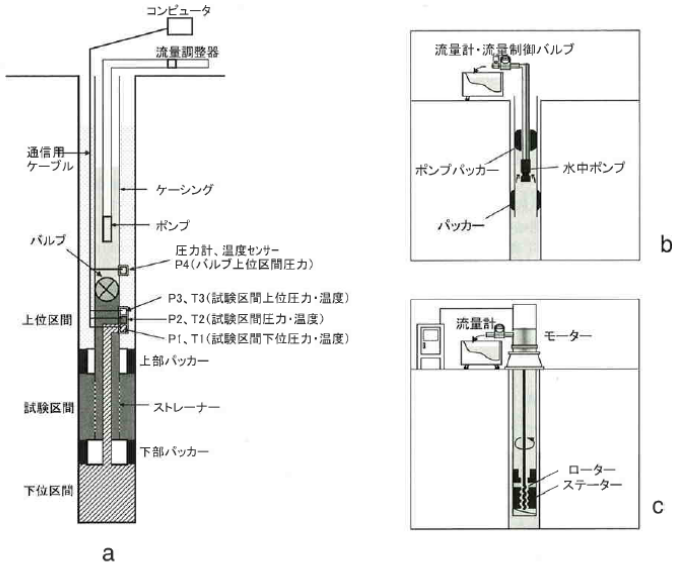


図 3　試験装置とポンプの概念図
a：試験装置の概念図
b：ポンプパッカーの概念図
c：キャビティーポンプの概念図
Fig. 3　Schematic view of hydrotesting test tool and pumps
a : Schematic view of hydrotesting tool
b : Schematic view of pump packer
c : Schematic view of cavity pump system

図 5.3.1-5 水理試験の概念（出典：竹内ほか, 2007）

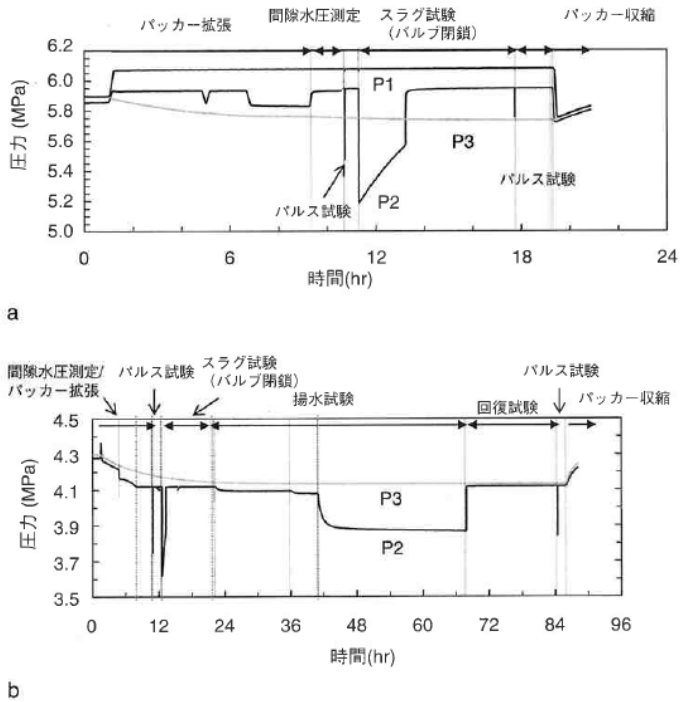


図 5　シーケンシャル試験の例
a：低透水性岩盤における例
b：高透水性岩盤における例
Fig. 5　Example of sequential tests
a : Test for a low permeable rock
b : Test for a high permeable rock

図 5.3.1-6 試験結果の例（出典：竹内ほか, 2007）

（iii） 水理地質構造モデル化および地下水流動解析技術

処分施設の設置領域周辺の空間的な地下水流動状況は，地質環境の調査データに基づいて水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施して評価する。ここでは，水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析技術の現状について述べる。

① 結晶質岩系サイトにおける水理地質構造モデル化・地下水流動解析の事例

稲葉・三枝（2003）は，各種地質データの解析を支援するLandmark社製ソフトウェア群，地質構造モデルの構築および可視化を支援するEarthVision，水理地質構造モデルの作成と数値解析を行うFrac-Affinityを統合化したGEOMASSシステムを開発した。このうち，Landmark社製ソフトウェア群は，地質データの統合管理，地質データの可視化，物理探査データの解析，衛星画像処理などを，EarthVisionは，地質構造の複雑な幾何学形状の効率的なモデル化を，Frac-Affinityは，地質構造モデルに対して指定したパラメータを可視化（図 5.3.1-7）することなどが可能である。

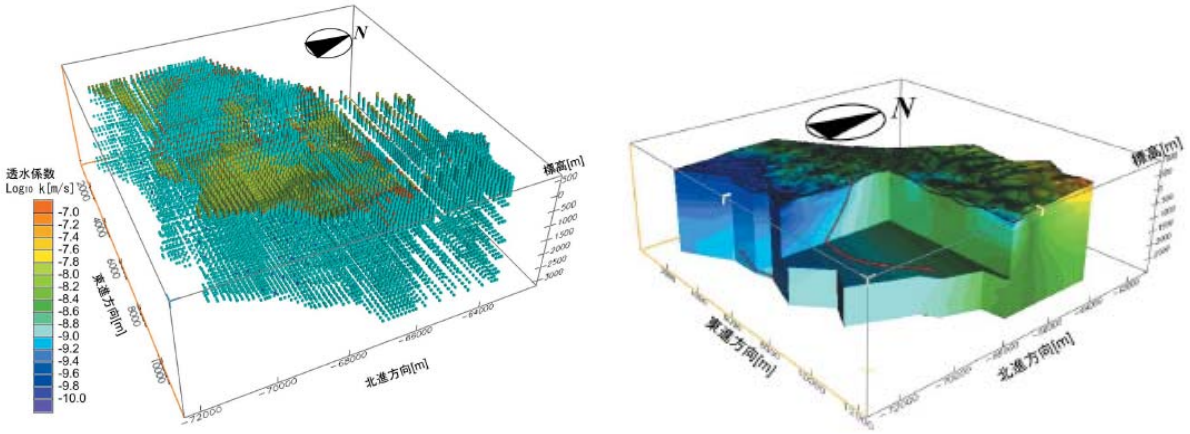


図 5.3.1-7 GEO MASS システムによる水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析の事例（出典：稲葉ほか，2003 を編集）

左：Frac - Affinity による各格子の中心（節点）とその点における透水係数の分布の表示。右：EarthVision による地下水流動解析結果の可視化。

② 堆積岩系サイトにおける水理地質構造モデル化・地下水流動解析の事例

操上ほか（2008）は北海道北部の幌延地域に分布する新第三紀堆積岩を対象とした地下水流動系の把握に関する事例研究を通じて，地下水流動解析を用いた地上からの調査の体系化，ガスが溶存する塩水系地下水が存在する堆積岩地域での調査のための技術開発の概要を取りまとめている。また，産総研では，地下水流動とその滞留時間，深部地化学環境に関する研究が実施されており，地層間隙内の地下水の結合度合い(pF)に応じた地下水の安定性に係る研究により，深部地下水環境の安定性がモデル化されつつある（産総研，2010b）。

③ 地質環境の長期変遷モデル化・地下水流動解析の事例

操上ほか（2007）は，幌延周辺において堆積岩が分布する沿岸域を対象として，自然事象の長期変遷による地下水流動への影響に着目し，気候・海水準の長期的な変動を時間変動境界条件として設定して，過去から現在までの長期間にわたる地下水流動変遷のモデル化を実施した。また，尾上ほか（2009）は，東濃地域を対象として広範囲における古地形を概括的に推定し，その古地形に基づいた地下水流動解析を行い，地形変化による将来の地下水流動特性の変化を推定するための方法

論を提示した。

(3) 地下水化学特性

地質環境の長期評価において，現状の地下水化学特性を精度良く把握し，過去から現在までの地下水の変遷を理解することは，処分場の性能を評価する上で重要である。近年地上からの調査で岩盤や地下水化学的特性の不均質な分布を把握するための地下水の採取技術, 調査技術（地下水組成, 同位体組成の分析技術など），データの解析，モデル化の手法が整備されている。また，第２次取りまとめ以降の課題となっていた数百万年程度の地下水年代を評価する技術の整備が行われている。概要調査段階以降では, ここに示した最新の知見も考慮して地下水化学特性を把握することとする。ここでは，近年進展の見られた水質・年代評価技術と水質形成のモデル化に関する事例を示す。

(i) 水質・年代評価

地下水の湧水，井戸水，ボーリング孔からの採水などにより，地下水を採取・分析することにより，地下水化学特性を表す溶存イオン成分やpH，酸化還元電位などの物理化学パラメータを取得する。ボーリング孔を利用した地下水化学特性に関する調査はこれまで多く事例が報告されている（例えば，古江ほか，2003；同，2005；彌榮ほか，2004；岩月ほか，2009）。このうち，岩月ほか（2009）は, 地下水の採水および分析技術について, 地下深部に分布する地下水の物理化学パラメータ（pH, 酸化還元電位，温度）を測定する際の考え方や測定値の補正方法を取りまとめて整理している。また，馬原ほか（2006）は，地下深部に分布する化石海水に関して，地下の岩盤中で生成される ^{36}Cl の放射平衡論の議論を基にした地下水年代評価と安定同位体データを基にした地下水起源の情報を加味した化石海水の同定手法を提案している。中田・長谷川（2010），長谷川ほか（2010）は，幌延地区の堆積岩および東濃地区の結晶質岩を対象にして，^{4}He，^{14}C，^{36}Cl を用いた地下水年代評価法を適用し，既存の調査から推定される広域的な地下水流動と整合していることを示すとともに，堆積岩中の地下水については，堆積時からほとんど移動していないことを示している。

(ii) 地下水化学モデル

処分施設周辺の地下水化学特性を空間的に表現するための地下水化学モデルの構築手法や岩石－水の化学反応を考慮した解析手法を適用した事例として，阿島ほか（2006）などが挙げられる。阿島ほか（2006）は，地下研究施設の建設に付随して起こる経時的な地下水の水質変化の範囲や程度などを定量的に評価するため，主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析（Multivariate Mixing and Mass balance modeling analysis）を適用している。伊藤ほか（2010a）は，京都府亀岡市の砂岩からなる試験地の深度 100m ボーリングの岩石コアから抽出した間隙水のイオン濃度を求め，地下水流動との関係を考察している。試験地では間隙水のイオン濃度の深度方向の分布は，陽イオン濃度が pF によって異なる傾向を示し，浅部では地下水流動が活発であること，深部では地下水が滞留し間隙水の水質が長期間変化しなかったことを示している。

(4) 岩盤力学･熱特性

概要調査以降では，岩盤の力学・熱特性や難工事評価などにいて，地下施設の工学的実現性の観点から評価可能な情報の取得が必要となる。下記には既存情報や地上からの調査（ボーリング調査など）を用いて，岩盤の力学・熱特性や三次元応力分布を把握するための調査・評価技術開発が行

われている調査研究事例を示す。地下施設の施工性などにかかわる各段階の岩盤評価法と地質環境モデル（岩盤特性モデル）へ反映するデータ取得のための手法は，対象地域の特性に応じて適用する。

（i） 力学特性

地下施設の建設可能性について，対象となる地層が建設に支障がないことを評価する技術が必要となるが，澤田ほか（2009）や澤田ほか（印刷中）は，坑道建設評価のための岩盤評価法を示している。また，坑道設計に重要な入力データとなる地圧の測定技術に関しては，Ghimire *et al.*（2004a；2004b）や坂口ほか（2006）が新たな測定方法の開発を行い，コントロールボーリングシステムの開発の中では，孔内での応力測定装置の開発・高度化が進められている（木方ほか，2009）。

精密調査地区選定段階では，地表からのボーリング調査や物理探査が行われ，ボーリングコアなどから地下岩盤の情報を得ることができる。澤田ほか（2009；印刷中）は，ボーリング調査から得られたコアで岩盤を分類し，岩盤の物性値や施工性を推定する岩盤評価法を開発し，岩盤の硬さ，割れ目間隔，割れ目状態の 3 要素で岩盤を分類し，それに応じて強度や変形性，さらに掘進速度や支保程度を推定する評価分類図を作成している。評価分類図の例を図 5.3.1-8に示す。

力学特性にかかわる技術開発では，稲田花崗岩を試料とした鉱物比の違いによる一軸圧縮強度の違いについての考察（藤井ほか，2005），力学特性と岩盤特性との相関を深度方向で整理し珪質岩の力学的な特徴を評価する手法の開発（真田ほか，2009），接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の測定手法の検討（藤井ほか，2006）などが行われている。瑞浪超深地層研究所では，地表からボーリング調査を行い，その結果を用いた岩盤の力学的概念モデルが構築されている（松井ほか，2000）。

（ii） 熱特性

高温・低温下における岩盤物性（物理，力学，透水，熱）について，既往文献の調査結果を基にデータベース化が行われている（土木学会，2006）。また，岡田（2005；2006）は高温環境下における堆積軟岩の力学特性の温度依存性評価を行い，三軸圧縮強度は，常温と比較して 60℃で低下し，変形特性は，同条件で細粒砂岩のヤング率 E が減少する傾向が見られた。また，クリープ特性の温度依存性は，常温から 95℃の範囲の実験結果で凝灰岩のクリープ特性に温度の影響が見られ，最小ひずみ速度や破壊時間なども温度に依存することを示した。

（iii） 難工事評価

地下施設建設工事の施工計画や工程などを検討する上で，工事中止や工期延長，建設費の大幅増額につながる難工事の可能性を事前に把握しておくことは重要である。

最近の研究成果としては，既往トンネル工事事例の情報を整理・分析した結果から難工事遭遇可能性を評価するための岩盤評価法が開発（新ほか，印刷中）されている。また，超大深度立坑工事で発生する可能性の高い崩落形態についての考察（櫻井ほか，2006）や，突発湧水に伴う対策工コスト変動リスク評価（大津ほか，2008），事前の地質情報からトンネル施工時の地山の押出し性を判断・評価する基準および施工方法の設計方針の提示（高橋ほか，2004）がなされている。

新ほか（印刷中）は，難工事につながる事象として山はね，地山の膨張，大湧水，有害ガスなどを挙げているが，このうち地山膨張ならびに山はねについて，遭遇可能性評価の検討を行っている。

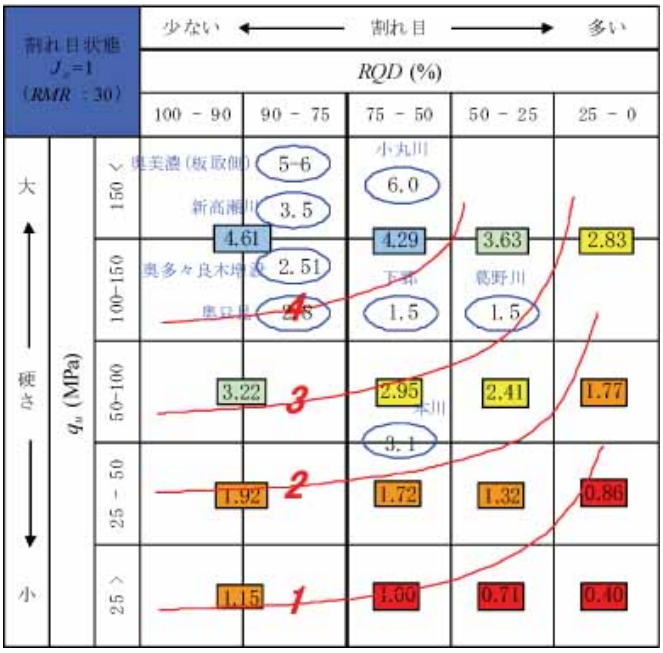


図 5.3.1-8 岩盤分類評価要素からの粘着力の評価図（出典：澤田ほか, 2009）

ボーリング調査から得られる岩盤情報 3 要素（岩盤の硬さ qu, 割れ目間隔 RQD, 割れ目状態 Jc）より粘着力を推定する評価図。図中の地点名は既往の建設地点の実績を示す。

(5) そのほかの特性

処分場建設時および閉鎖後長期の安全性に重大な影響を及ぼす可能性のある事象として，泥火山およびマスムーブメントが挙げられる。

泥火山は火山ガスの噴出を伴う円錐形をした泥や岩石の堆積体であるとされ（Bates and Jackson, 1987），国内陸域では北海道の新冠や新潟県十日町市松之山などに知られ，海域では近年資源探査に伴う詳細な海底調査などで多くの泥火山の存在が明らかとなっている（Kopf，2002）。

松之山の泥火山については，ボーリング調査，物理探査，地化学探査などでその物理化学的性状や構造，含まれる流体の起源についての知見が得られている（新谷･田中，2009；石原･田中，2009；鈴木ほか，2009 など）。また，泥火山の特性は，膨張性地山を形成することと高塩分濃度の地下水からなることである。高橋ほか（2006）によれば国外の事例から泥火山の活動周期，噴出量についての知見が得られている。

マスムーブメントは，地表の構成物質がそれ自体の重みで塊（マス）として動く現象で，地崩れ，地すべり，クリープからなる（産総研深部地質環境研究センター編，2007）が 100 万 m^3 を超えるような巨大規模崩壊は，火山体周辺と四万十帯の泥質堆積岩地域に多く，これら以外では付加体堆積物中の石灰岩体周辺，三波川帯の結晶片岩地域，グリーンタフ地域に比較的多いとされる（千木良，1995；産総研深部地質環境研究センター編，2007）。

小嶋ほか（2006）は，付加体である美濃帯の伊吹山の大規模崩壊によって形成された堰止湖堆積物の ^{14}C 年代から崩壊の頻度を推定し，美濃帯で発生する可能性がある大規模崩壊の予測手法を示した。また大野ほか（2010）により地震時の大規模地すべりの事例が，田近・岡村（2010）により大規模地すべり地形の発達の事例が示されている。

また，物質移行などについては，深地層研究計画（三枝ほか，2007；太田ほか 2007），で進められており，熱力学・収着・拡散データベースの整備（JAEA，2005-2009），ボーリングコアを用いて重要な元素（Cs，Se，Np，Th）についての物質移行・遅延プロセスの室内試験からモデル化を進めている（牧野ほか，2005 など）。

泥火山，マスムーブメントは特殊地質環境で発生する現象であることから，ここに示した事例などを基に対象地域の評価を行い，地質環境モデルに反映させる。物質移行については，今後の地下研究施設などでの移行・遅延プロセスの解明やモデル化による情報を取り込んだ評価を行う。

(6) モニタリング技術

概要調査の段階あるいは精密調査の地上からの調査段階に開始するベースラインモニタリングには，以下の技術を適用することができる。これらはモニタリング技術として，主に国および JAEA により開発，整備されている。主なモニタリング技術として，JAEA が所有する岐阜県瑞浪市，北海道幌延町の 2 つの深地層の研究施設において，ボーリング孔を利用した地下水の水圧，水質の長期モニタリングが導入されている（JNC，2005a；太田ほか，2007）。JNC（2005a）は，既存の地下水の水圧・水質の長期モニタリングシステムをまとめており，このうち，幌延深地層研究センターにおいてはピエゾ水頭計測方式のシステムおよび直接圧力計測方式のシステムを設置してモニタリングを行っている。2 つの地下研究所においては，そのほかにも，精密制御定常信号システムを利用した高分解能の探査技術，光ファイバ地中変位計の開発（中山ほか，2008）などの技術開発およびその適用性確認が行われている。また，JAEA の東海研究開発センターでは，室内連成試験設備などを利用して人工バリアの性能確認のためのモニタリングの技術開発および適用性確認を進めて

いる（JNC，2005b）。さらに，国は地中無線通信による伝送技術などの開発（例えば，高村ほか，2006）とともに「技術的選択肢（技術メニュー）」の開発を進めている（竹ヶ原ほか，2004；RWMC，2009a）。また，ここでは地層処分場の地下施設での適用を念頭にしたモニタリングのあり方に関する検討も行われている(須山ほか，2010)。

5.3.1.3　多様な地質環境にかかわる調査・評価技術

多様な地質環境が存在するわが国において代表的な地質環境である結晶質岩，堆積岩を対象として，実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認を目的とした研究が，超深地層研究所計画（内陸部の結晶質岩を対象）と幌延深地層研究計画（内陸部の堆積岩を対象）として行われている。また，調査実績，経験的な知識に乏しく研究開発の余地の大きい沿岸域を対象とした研究開発が実施されている。

上記2箇所の深地層の研究施設計画では，地上からの処分施設建設地選定段階に必要となる基盤技術の整備・強化を目的として，第２次取りまとめ（JNC，1999b）で示したような地質環境の調査・評価技術を実際の地質環境に適用することでその実用性や信頼性を確認することとともに，体系的な調査・評価技術を整備することを課題としている。すなわち，これまで開発してきた技術の組み合わせで必要なデータが取得できること，それらのデータに基づいて地層処分システムの設計や安全性の検討ができること，その信頼性を保障することが重要であるとしている。そのため，調査－予測－検証のプロセスを何度も繰り返し，地質環境の調査を最適化していくとしている（JAEA，2010）。

沿岸域では，地層処分に関する研究のほか，資源探査，活断層調査，土木工事に関する調査が行われており，これらから得られる知見は，地層処分へ有効に反映できる可能性があると考えられる。

以下では，多様な地質環境を代表した研究の概要を示し，既存技術の地層処分への適用性や開発された調査・評価技術および課題について述べる。

(1)　結晶質岩を対象とした調査・評価技術

結晶質岩を対象とした調査・評価技術は，JAEAが超深地層研究所計画で体系的に実施している。本研究は，1996 年度に岐阜県瑞浪市のJAEA用地（正馬様用地）で開始され，その後は瑞浪超深地層研究所用地において進められている。本研究の第1段階調査は，2005年3月に終了し（図 5.3.1-9），現在は第2段階の調査研究が進められている。2009年度末時点で，2本の立坑の掘削と水平坑道の掘削が行われている。

第1段階の研究で得られた主な技術的知見として，地質・地質構造については，地質環境とその不連続構造を予測，把握するための手法が示されている。地下水流動特性については，ローカルスケール（数キロメートル四方以上）やサイトスケールの調査・解析領域の設定手法や段階的調査解析手法が示されている（JNC，2005a）。地下水化学特性については，水質形成プロセスを把握するためのM3解析手法（阿島ほか，2006）や溶存成分に関する複数の調査手法（阿島ほか，2006；三枝ほか，2007）が整備されている。また，ローカルスケールやサイトスケールにおける物理･力学特性，初期応力状態および地下の温度環境データを把握する技術を整備し，これを基にしたモデル化手法や掘削影響予測手法の整備も行われている（JNC，2005a）。物質移行特性については，岩盤中の水みちとなる断層や割れ目の性状，またそれらの天然バリア機能としての収着・拡散といった特性を把握することがこの段階では重要である。そのための方法として深層ボーリングのコアを用い

た室内試験によって収着データベースの整備をすることなどが重要となる。その例として，釜石鉱山の花崗岩類の収着係数，拡散係数の妥当性の確認や（太田ほか，2005）。物質移行場の構造特性・空隙構造特性の値や範囲を推定が挙げられる。

以上のような各段階の調査を展開する上で，調査手法の組み合わせ，取得するデータの種類・解釈，情報の統合を行う統合化データフローの構築による体系的な調査・評価手法が示されている。

本研究は，わが国の代表的な地質環境である内陸部の結晶質岩を対象として，地質環境の調査・評価技術の適用性を評価してきたものである。図 5.3.1-9に示した特定の地質環境下における地質環境モデル構築に至るまでの調査･評価の過程および結果の統合は，NUMOが示した地質環境モデルの構築方法に通じるものである。

ここで行われた調査・研究をとおして整備した調査・評価技術や知見の多くは場所や地質環境条件が異なっていても，多くの場合普遍的に適用できると考えられる（三枝ほか，2007）。海外の結晶質岩に関する調査研究事例について，これまでに NUMO が実施した調査を通じて得た技術の適用性に関する知見に，本研究で得られた知見を反映させることにより，より堅実な結晶質岩の調査・評価に反映していくことを考えている。

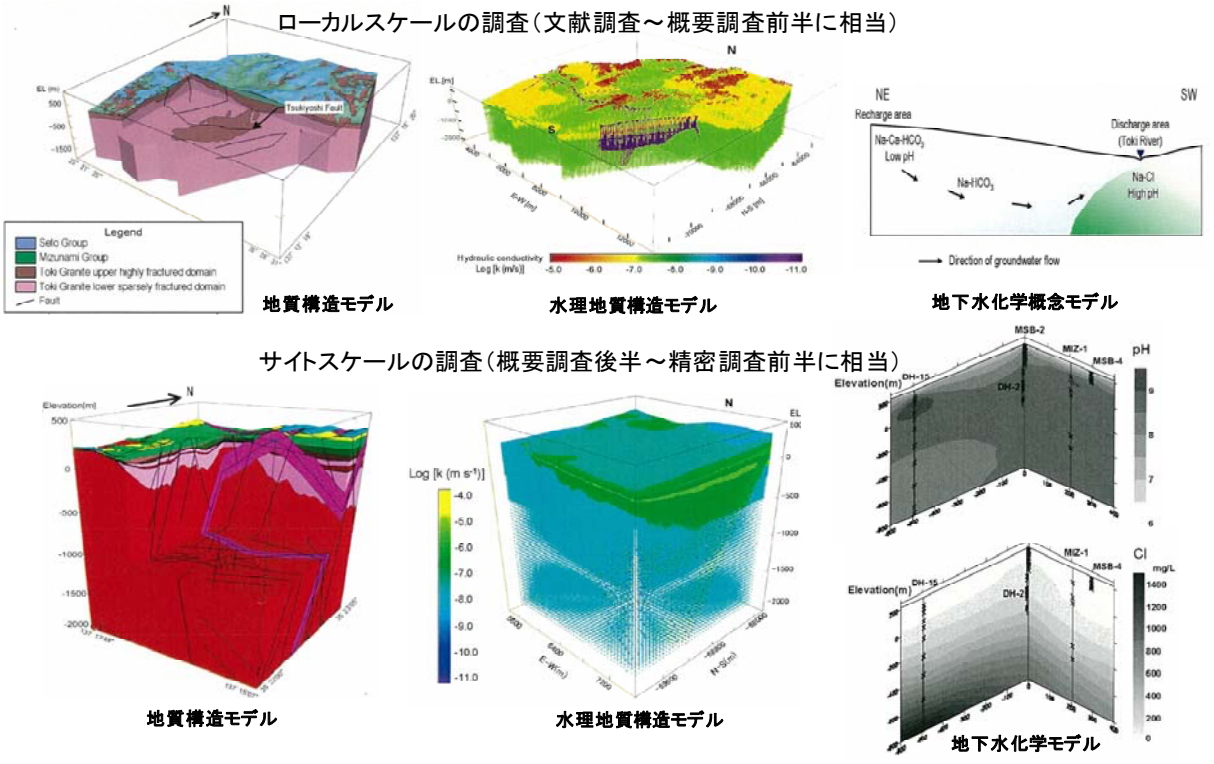


図 5.3.1-9 瑞浪超深地層研究所計画第 1 段階（地表からの調査段階）の成果の例（三枝ほか，2007 を編集）

(2) 堆積岩を対象とした調査・評価技術

堆積岩を対象とした調査･評価技術については，JAEAが幌延深地層研究計画で体系的に実施している。本研究は，第 1 段階として，2001 年 3 月から 2006 年 3 月の間「研究所設置地区および研究所設置場所の選定」，「地上からの地質環境の調査研究」，「深地層における工学技術の基礎の開発」，

「地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査」が実施された（例えば, 太田ほか, 2007：図 5.3.1-10）。

第 2 段階の調査では，2005 年度から坑道掘削時の調査研究が進められており，2009 年度末時点で換気立坑および東坑とそれらを連結する水平坑道の掘削が行われている。

第 1 段階の研究で得られた主な技術的知見として，地質・地質構造については，海成堆積物の地層中で断層帯の位置とその水理特性を把握するために，地下浅部の地層の比抵抗を把握することが有効であること，一方で VSP 探査は物性値の変化に乏しい地層では有効性が低いことが示された。また，珪藻化石を用いた後背地解析法の有効性，段丘の対比をする上での RIPL 法の有効性，GPS 基線長（観測点間の距離）と自然地震との関係を検討することが地質環境（応力や歪）に対する地震の影響の有無や程度の把握に有効であることなどが示された。

岩盤の水理については，対象地域が多孔質岩盤であるか，亀裂性岩盤かを初期の段階で見極めることが重要であること，また岩盤の水理特性に応じた手法の開発と柔軟な対応が求められること，さらに，深部の地下水流動と生物圏の境界である表層水理に関する調査が重要であることが示されている。ボーリング孔を利用した調査では，流体検層から水理試験位置選定のプロセスや水理試験シーケンスなどがほぼ体系化され，流体電気伝導度検層では，水みち箇所の抽出やその透水性などについて総合的な検討が可能となっている。また，ボーリング孔を利用した調査を実施する場合に調査対象の岩盤，地下水化学特性などに適した調査手法（調査の組み合わせ）が異なるため，調査の早い段階でその場に合わせた調査手法の体系化が必要であることが知見として得られている。

地下水化学特性については，透水試験中の揚水した地下水，コアからの間隙水の抽出水の分析など，適用した調査手法および解析手法（主成分解析など）の有効性が示され，個々の要素技術は処分事業における調査・評価に適用できることが示されている。

岩盤の力学特性に関する調査研究では，調査地域の岩盤は水平方向に岩相変化に乏しい新第三紀の堆積岩であるが，深度方向には必ずしも物性が均一ではないことが示された。このような地域の岩盤調査では, 物理検層データのように深度方向の連続データが重要であることが指摘されている。初期応力測定では，大曲断層が推定される位置を挟んだ東西領域の深度 500m 程度までの範囲において，主応力方向や主応力値が変化する可能性が小さいことを示すデータが得られている。

幌延深地層研究計画では，地山強度が小さく，塩水系地下水で可燃性ガスが存在する堆積岩を対象として，地上からの調査研究における調査・評価技術の整備を行っている。また，深地層の研究施設を設置するという前提条件に基づき地質環境要件と安全要件を基本的な要件として設定し，既存情報を用いた調査および広域的な調査から研究所設置地区の絞り込みを行い，さらに，ボーリング孔を利用した調査結果などに基づき研究所設置地区を選定している。また，このような地上からの調査研究における知識と経験に基づいて構築された体系的な枠組みとして, 段階的な調査・解析・評価を合理的に進めるため，統合化データフローを構築している。

このように段階的に地点選定を行った手法は，概要調査から精密調査に至るサイト選定の手順に準拠している。また，研究所敷地内および周辺地区での地質環境の調査は，わが国の代表的な地質環境である内陸部の堆積岩を対象にして，サイト調査・評価技術の適用性を実証してきたものである。現在は，主に地下の研究施設を中心にした研究が進められているが，地層からの調査に引き続き，地下施設での調査に至る一連の流れは，調査対象の理解が進んでいく過程を示している。ただし，この過程で，地上からの調査では把握できなかった事象として，岩相変化が少ない地層にもかかわらず，深度方向の物性が均一でないように，調査の進展に伴い，新たな事象の理解に対する不確実性の存在の顕在化など，今後の文献調査以降のサイト選定段階で起こり得る可能性を先行的に

示している。NUMO は，本研究で得られた知見を踏まえ，調査の進展に併せて，地質環境を理解するための一連の方法論の詳細化とその評価，そしてその過程で得られた経験と知見の知識化の重要性（太田ほか，2007）を認識しつつ，これまで NUMO が実施した海外の先行的事例調査によって得た堆積岩の調査・評価に関する知見を生かして，堅実なサイト調査・評価に反映していくことを考えている。

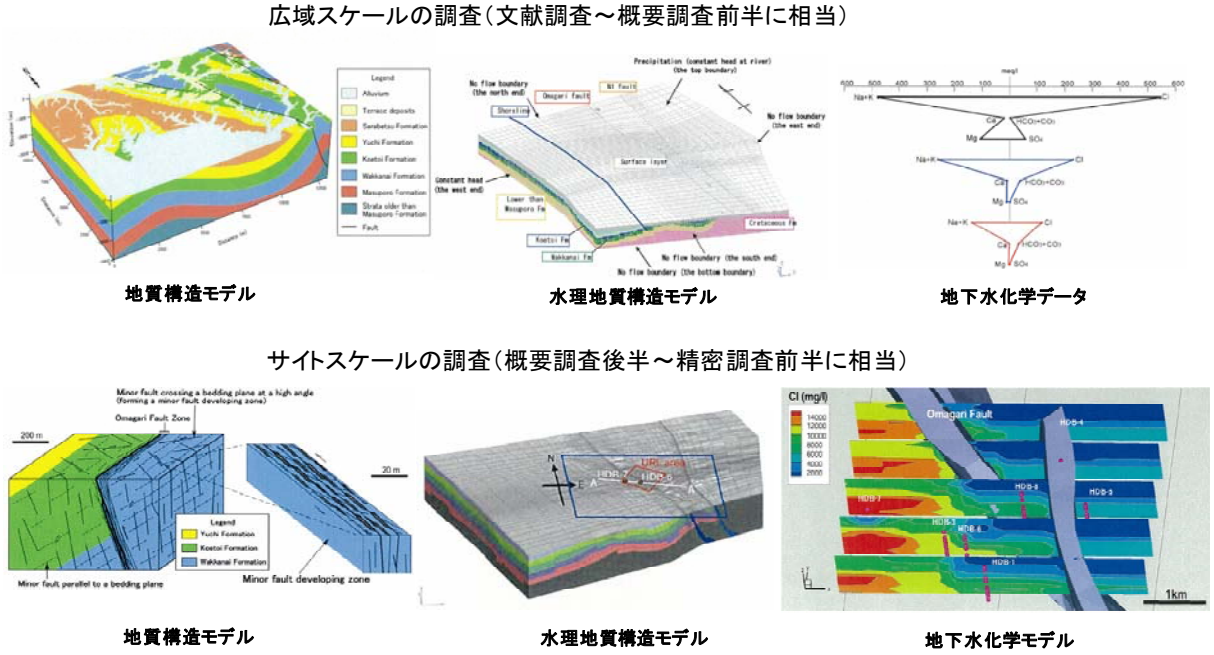


図 5.3.1-10 幌延深地層研究計画第 1 段階（地表からの調査段階）の成果の例（太田ほか，2007 を編集）

(3) 沿岸域を対象とした調査・評価技術

沿岸域を含む海域においては，前出のように物理探査技術分野において，ここ 10 年間で大量の情報を高精度で効率よく取得，解析できるようになり，特に三次元地震探査では，三次元可視化技術と堆積学とが融合した新しい学問・技術領域として提唱され（高野ほか，2006），すでに石油・天然ガスの資源探査では重要な調査･評価技術として発展している。地層処分分野でも資源エネルギー庁の委託事業として，沿岸域を対象とした研究も行われており，これまで技術的な空白域であった領域が補完されてきている。沿岸域を対象にした研究事例として，高精度物理探査技術高度化調査（平成 12 年度～平成 18 年度），塩淡境界面形状把握調査（平成 14 年度～平成 18 年度），平成 19 年度から開始された沿岸域プロジェクト（太田ほか，2008）などがある。地層処分以外の沿岸域（海域）における調査は，海上保安庁による沿岸域海底活断層調査，文部科学省の交付金による地方公共団体の活断層調査の一部，国土地理院による沿岸海域基礎調査，石油・ガスなどの資源探査，海底トンネル工事，その他研究機関による学術調査などが行われている。

以下にこれらの技術の概要と地層処分に応用した場合に考えられるサイト調査・評価技術としての現況を述べる。

①　高精度物理探査技術高度化調査

本研究では,概要調査段階で適用する物理探査を対象にして,要素技術を高度化開発したもので,沿岸域については，技術的な空白を補完するものとして海底電磁法の計測機器および海水の影響を補正できる解析手法の開発が行われた（原環センター，2004）。この研究では米国西海岸のモンテレー湾において，沿岸域の活断層を対象にした探査結果が示されている（吉村ほか，2006a）。

本研究成果は，結晶質岩の地質環境や音波探査が困難な極浅海域において，沿岸域では一般に実施される音波探査を補完する技術として適用できるものと考えられる。

②　塩淡境界面形状把握調査

沿岸域では雨水を起源とした淡水系地下水と海水を起源とした塩水系地下水が互いに接して，境界面を形成していると考えられている。塩淡境界面形状把握調査（産総研，2007 など）は，野外調査により塩淡境界面の形状や境界面に沿った地下水流動の把握と地質状況に応じた塩淡境界面の形成機構の解明を通して概要調査で適用可能な精度の高い塩淡境界面形状推定手法の開発を目的として行われた。ここでは，千葉県および茨城県の沿岸域での現地調査に基づく研究と井戸台帳，地下水・岩石資料を用いた統合データベースが構築された。

千葉県蓮沼海浜公園の研究試験地では，ボーリング調査および物理探査法による塩淡境界面の把握手法の検証・評価が行われた（丸井ほか，2004；上原ほか，2008）。深部の塩淡境界面構造解明のための AMT 法による調査･解析手法の開発が行われ，海岸平野の電磁探査では，探査深度の異なる 3 つの手法（AMT，TEM，ループ法）を適用し地層の比抵抗分布を解析している（Mitsuhata *et al.*, 2006）。また，検層により塩淡境界の深度，形状を推定する手法として，地下水化学特性を把握する地化学検層が有効であることが明らかにされている（丸井ほか，2004）。

茨城県東海村の研究試験地では，蓮沼海浜公園研究試験地で開発した手法で塩淡境界面の把握を試み，地下水観測井による塩淡境界面の観測を行っている（伊藤ほか，2007）。さらに地下水流動解析を行うための基礎データとして弾性波探査で地質構造の解明など行っている。

上記の先行調査事例は，地質環境の調査･評価において，沿岸域の塩淡境界面の形状把握に適用できる部分がある。ただし，地下深部の塩淡境界面形状把握については，次項で説明する沿岸域プロジェクトの進展で得られる成果を反映することが効果的である。

③　沿岸域プロジェクト

沿岸域プロジェクトは，幌延深地層研究計画の活用を視野に入れ，海域から陸域までを包括した地質環境を対象に，沿岸域特有の地質環境特性に関する知識を蓄積しつつ，調査・評価技術の信頼性向上と体系化の推進を目標として平成 19 年度から 5 カ年程度の計画で開始された（太田ほか，2008）。具体的な研究内容は，塩淡境界/地下水総合評価技術の開発，沿岸域地質構造/断層評価技術の開発，関連データベースの開発からなり，以下のように段階的に研究開発を進めることとしている。

- 既存の技術や知見，幌延と瑞浪の両地層研究所で整備した地上からの体系的な調査・評価技術や統合化データフローなどを活用し，一連の調査・評価の考え方を体系的に整理する。
- 物理探査やボーリング調査などを組み合わせて適用し，個々の調査・評価技術の適用性を確認するとともに，塩水と淡水が混在する場における地下水流動や水質形成・変化，その時間変遷などに関する理解を深め，その調査・評価技術を整備する。

- 地下水流動と地下水年代を関連付けて評価する技術，孔内での各種調査を組み合わせたコントロールボーリング技術，海底における地下水湧水の探査技術などの最新の技術を適用し，沿岸域に特徴的な現象や地質環境条件に関する知見を拡充しつつ，調査・評価技術の信頼性を向上する。
- 沿岸域を対象とした一連の調査・評価技術の適用性確認や信頼性向上などの研究開発成果を統合するとともに，施設設計・安全評価の観点も念頭において，沿岸域における体系的な調査・評価技術の方法論として取りまとめる。

沿岸域プロジェクトは現在進行中のプロジェクトであり，沿岸域に適用可能な技術の開発や信頼性の向上，高度化が進められている（原環センター，2009b；産総研，2008；2010b；図 5.3.1-11）。現在までに得られた成果のうち，幌延町の沿岸域では，海岸線付近の陸域から浅海域を含む範囲で複数の電磁探査法の実施と既存データを用いた解析から，塩淡境界面や断層系に着目した電磁法探査技術の適用性の検討（吉村ほか，2009；大里ほか，2009 など）が行われ，二次元または三次元比抵抗分布の取得ができることが初めて示され，地質構造および地下水の水質分布に関する情報が得られた。しかし，褶曲・断層などでは既存情報と整合しない部分もあり（吉村ほか，2009），高度化に取り組んでいる。

地下水流動解析では，地下水の長期的な流動・滞留状況の評価に主眼をおいた塩淡境界の現状解析と海水準変化（120m 低下）を考慮した予測（伊藤ほか，2010b）が試みられている。また，電磁探査法から得られる水理地質構造を基にしたモデルから二次元および三次元地下水流動解析を試み，地質構造要素の影響を感度解析により示している（吉村ほか，2010）。

JAEA は北海道幌延町の沿岸域を事例とした古水理地質学的研究を進めており，沿岸域に特徴的な地質環境特性（塩水と淡水の混在など）に着目し，その時間的・空間的変遷の調査・評価をとおして，沿岸域の地質環境を対象とした総合的な調査・評価技術の整備を図っている。具体的には，沿岸域プロジェクトを含む幌延深地層研究計画において整備した調査・評価技術や取得した地質環境の特性や長期変遷に関する数多くの情報を踏まえ，①沿岸域を対象とした統合化データフローダイアグラムに基づき，沿岸域における地質環境特性の長期変遷を段階的に調査・評価するための方法論の整備（Ota *et al.*，2010），②地質環境特性に影響を及ぼすと考えられる地形変化や気候・海水準変動を把握し（Niizato *et al.*，2010），長期的な地下水流動の様式やその変遷を表現する概念モデルの構築（Amano *et al.*，2010）を実施している。

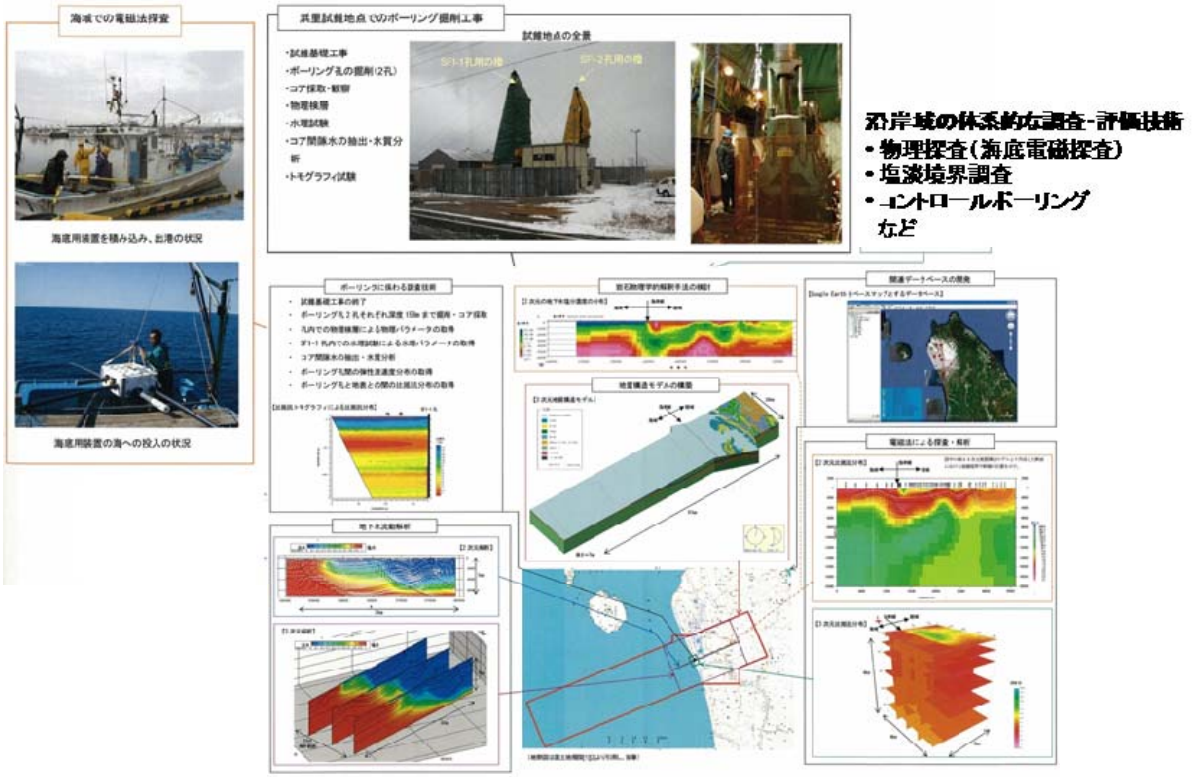


図 5.3.1-11 沿岸域プロジェクトの実施内容および成果の例（原環センター，2009b を編集）

④ 地層処分以外の沿岸域（海域）での調査

海上保安庁などの活断層関連の調査（海上保安庁，2010）は，1995 年から開始され，沿岸域海底活断層調査では 18 箇所，地方公共団体の活断層調査では，沿岸海域の調査は 10 箇所程度で実施されている。調査では，基本的に音波探査とピストンコアリング（ボーリング調査）の組み合わせによる地質構造の解明が行われている。そのほか，断層の延長部の調査事例では，沿岸部における海上全磁力探査による磁気異常から断層の延長を推定する手法が示されている（長尾ほか，2009）。

国土地理院の調査は，沿岸海域の開発，利用，促進を目的にし，沿岸陸域から水深 50m 程度までを対象に地形・地質の基本情報整備として 1999 年から行われ，これまで 4 地域の結果が沿岸海域地形図としてまとめられている。

資源調査は海域を対象に物理探査やボーリング調査により深部構造の把握が行われ，近年では 2007 年に三次元資源探査船「資源」が導入されて，日本海沿岸や三陸沖で物理探査（反射法地震探査）が行われている。石油・天然ガス資源を調査する基礎試錐調査によって掘削深度 3,000m 級の大深度ボーリングが掘削されている。さらに，三次元地震探査データを単に構造解釈に用いるだけでなく，地震波のさまざまな属性に着目して，地層流体を含んだ岩石特性の変化を把握するための技術開発が進んでいる。

海底トンネル工事では青函トンネルにおいて，規模の大きな出水箇所が貫入岩の位置に対応しており，磁気探査で予測可能とされている事例がある（日本鉄道建設公団，1990）。

各研究機関による沿岸海域を対象とした物理探査（空中重力，海底磁力，反射法地震探査など）による調査，研究が多数行われており，空中重力探査（Segawa *et al.*，2005；西坂ほか，2006）では，

陸域と海域で等価のデータが，短時間で取得可能であることから沿岸域での活用が期待される。また，沿岸域の重力探査空白域を補完することを目的とした海底重力計の開発(大熊ほか，2010)も行われている。

地球科学的研究分野においては，物理探査船の「大陸棚」，海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」およびさまざまな海洋調査船による調査研究が進められているまた，手法の組み合わせによる事例では，マルチチャンネル反射法地震探査とボーリングや検層データとの組み合わせで，100万年スケールの地質変動が解明できる可能性が示されている（古屋ほか，2009）。

⑤ 沿岸域での調査事例の地層処分への反映

沿岸域を対象とした地層処分に関する技術の適用性，高度化は現在も継続している。公的機関による既存手法による活断層調査や資源探査からの深部地質構造に関する知見や調査解析事例は地層処分にも適用される一般的な手法である。このような既存の調査・評価技術と開発・高度化されつつある物理探査手法などとの組み合わせにより，基本的にはさまざまな環境に対応した調査を行うことが可能となってきていると考えられる。

5.3.2 調査・評価技術の確認

概要調査に適用する地表踏査，物理探査，ボーリング調査などの調査技術については，既存の技術を当該サイトの地質環境や制約条件などを考慮し適切に選択するとともに，それらの調査技術を組み合わせることにより，信頼性の高い調査を行う必要がある。

JAEA では，岐阜県・瑞浪地域に分布する花崗岩類，北海道・幌延地域に分布する堆積岩類を対象とし，地表からの調査段階（サイト選定における精密調査地区選定段階および処分施設建設地選定段階の地上からの調査の段階に相当）に関する調査・研究を行い，両地域における地質環境特性にかかわるデータの取得から解釈・地質環境モデル構築までの一連の検討を行い，地下深部の地質環境に対する地表からの調査技術として，その成果を取りまとめた（三枝ほか，2007；太田ほか，2007）。

このような状況のもと，NUMOでは，概要調査の実施に向けて検討・構築してきた調査技術・評価手法の体系的適用性を確認すること，調査・管理技術の整備を図ることなどを目的として，電中研・横須賀地区の研究所敷地内において，ボーリング調査を主体とする実証研究を2006年度から電中研との共同研究として進めてきた。実証研究では，文献調査および概要調査の各段階に相当するサイト調査を模擬して実施した（図 5.3.2-1）。

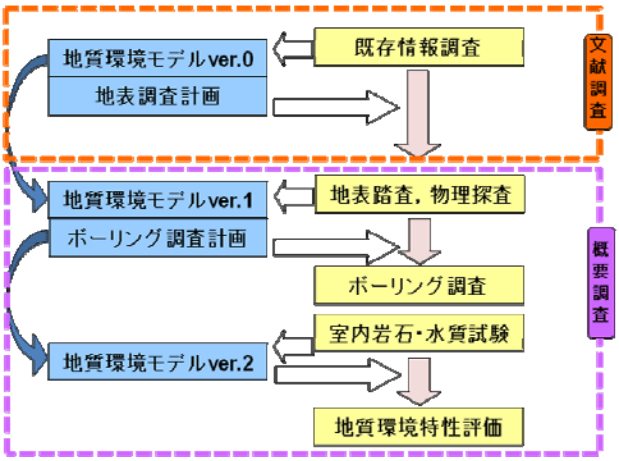


図 5.3.2-1 実証研究の全体フロー

文献調査に相当する既存情報調査においては，収集・整理した文献情報および空中写真判読結果から概要調査地区選定上の考慮事項に基づき，法定要件に関する事項および付加的に評価する事項に関する情報を整理し，評価した。

概要調査に相当する地上からの調査では，電中研・横須賀地区の研究所敷地内を対象とした地表踏査，物理探査および同敷地内で 2 孔（深度 350m，500m，離間距離約 10m）のボーリング調査を実施した（図 5.3.2-2）。

物理探査は電中研・横須賀地区の研究所敷地内を対象とした電気探査，ボーリング孔を利用した VSP 探査および比抵抗トモグラフィーを実施した。

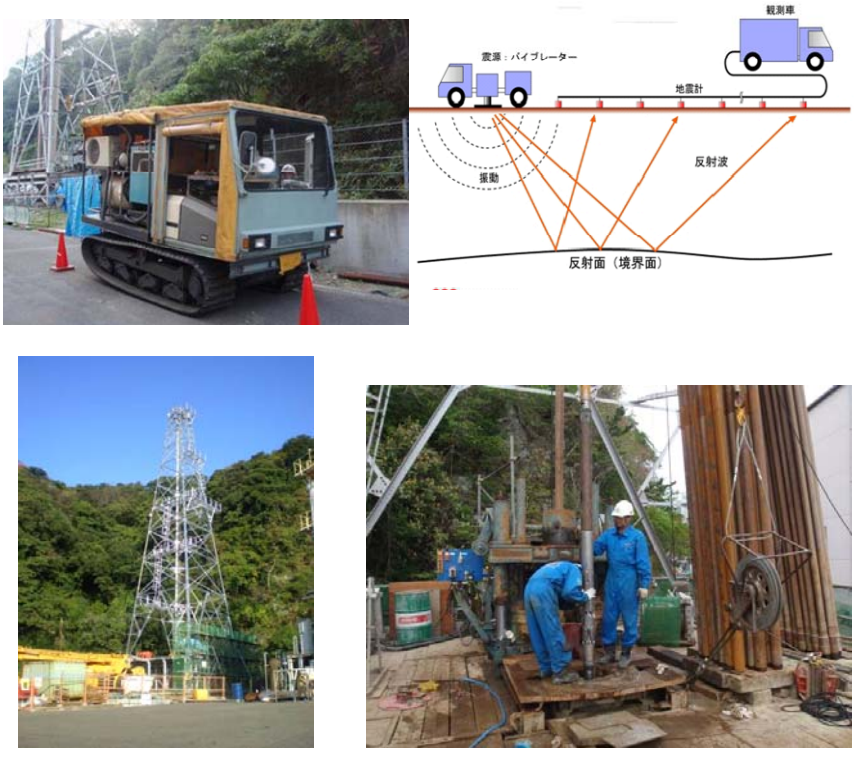


図 5.3.2-2 電中研・横須賀地区における共同研究の実施状況

ボーリング調査の実施に当たっては，コア採取率およびコア形状保持の向上を基本方針とした調査の計画立案から調査・評価に至る一連の検討とプロジェクト管理方法などの修得を行っている。そのため，計画段階ではケーシングプログラムをはじめ，掘削孔径，泥剤の選定などについて検討した。調査実施段階では，孔壁の押し出しによる掘削障害なども発生したが，地質性状と孔壁の状態を的確に把握し，掘削ビット形状の改良，ビット径の変更など，その都度状況に応じて既存技術の適切な選択と一部の改良を適切に実施することによって，深度 500m までのボーリング調査を比較的高いコア採取率とコア形状保持を維持しながら実施することができた。また、当該サイトにおける岩石や地下水の特性を把握するため、概要調査にて実施する各種の孔内検層・試験および室内岩石・水質試験を実施し、地質・岩盤性状の違いに応じた孔内検層・試験の手法・手順の適用性を確認することができた。

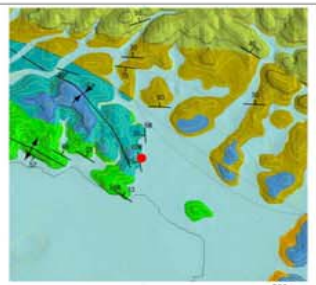
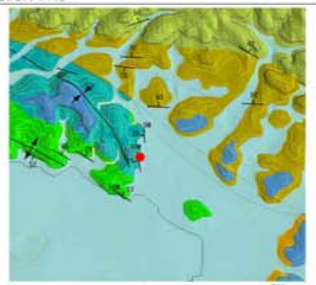
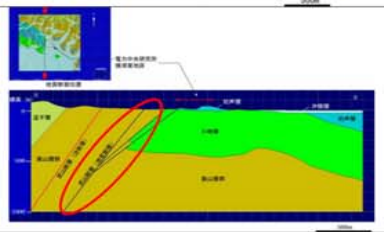
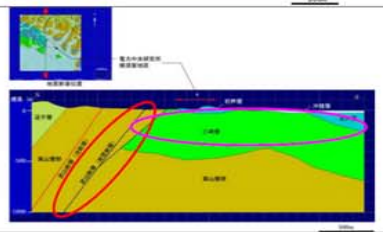
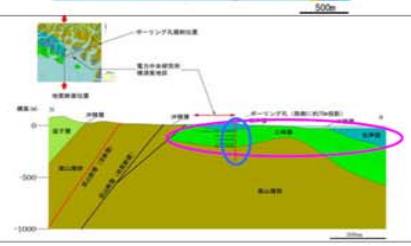
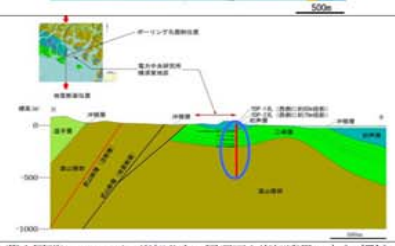
実証研究により取得した地質環境にかかわるデータは、調査段階ごとに整理し，その結果に基づき，地質環境モデルを調査の進展に応じて構築・更新した。実証研究では，実際の概要調査に比べて調査・取得データが限られているものの，既存情報調査段階，地表調査段階，ボーリング調査段階と調査の進展に応じて地下深部の地質環境特性に関するデータが取得・蓄積され，これらのデータを整理・解釈し、モデルに反映することによって地質環境モデルに内在する地下深部の地質環境特性に関する不確実性が低減し，その信頼性を向上させることができることを確認した（表 5.3.2-1）。

なお，実証研究において実施した一連の調査･試験に関する調査管理技術を整理することにより，文献調査から概要調査に至る調査・評価の流れを検討するとともに，地質・岩盤性状の違いに応じたボーリング掘削，孔内検層・試験の内容とその手順についても検討し，取りまとめを行った（表 5.3.2-2および図 5.3.2-3）。

さらに，ボーリング調査を実施する際に想定される発生事象に対するリスク評価についても検討した（表 5.3.2-3）。リスク評価は，人的災害にかかわる事項と技術的な不具合にかかわる事項に分類し，各作業工種の評価指標を分析してリスクレベルを整理した。抽出した発生事象については，低減措置，残存リスク発生時の対策を取りまとめることにより，調査・試験に携わる作業員が潜在的なリスクの存在とその重大性，対策を認識する情報となり，災害の未然防止に役立てることができた。

既存情報調査，地表調査（地表地質踏査，物理探査）およびボーリング調査からなる実証研究を実施した結果，文献調査から概要調査の実施に向けて検討・構築してきた地質環境の調査技術・評価手法の体系（5.2 参照）のうち，主に地質環境特性に係る調査・評価の論理的な手順や取得データの多角的な利用に関する適用性を実証することができた。また，概要調査の計画立案から調査・評価に至る一連の業務を実施することにより，調査実施の工程管理・品質管理にかかわる的確かつ合理的な意思決定や安全管理などに関する手法の有効性を確認することができた。地質・地質構造の判定，掘削方法などについても，研究経過および結果の評価を適切に行うことができた。さらに，この実証研究においては，技術的信頼性をより確実なものにして行くため，広く国内外の専門家との意見交換をしながら進めた。なお，実証研究で得られた成果は，概要調査計画の策定，概要調査マニュアルなどの整備に反映した。

表 5.3.2-1 段階別の取得・更新データ，モデルの確実度および信頼度の対比（地質構造モデルの例）

	実証研究（その1）			実証研究（その2）
	既存情報調査段階	地表調査段階	ボーリング調査段階（YDP−1孔）	ボーリング調査段階（YDP−2孔）
取得・更新データ	・実証研究地点周辺は，既往の調査量が豊富な地域であり，本調査段階における地質構造モデルの構築に必要な地質分布，層序，地質構造等の基本情報の取得が可能であった。 ・実証研究地点及びモデル構築領域には，新第三紀以降の堆積岩が分布する。 ・実証研究地点の地質層序は，下位から築山層群，三浦層群（三崎層，初声層，逗子層），上総層群，相模層群，沖積層である。 ・築山層群は，珪質泥岩，凝灰質砂岩，凝灰質砂岩泥岩互層からなり，上位層とは不整合関係にある。 ・三浦層群三崎層は，泥岩，凝灰質砂岩及び凝灰岩の互層を主体とする。上位の初声層とは整合または側方移行関係である。地表地質分布から推定される層厚は，300m以上～600m以上である。モデル構築に際して三崎層の層厚は，既存情報から得られたデータの中央値に基づき，層厚450mと設定した。 ・三浦層群初声層は，スコリア質及び軽石質の粗粒凝灰岩からなる。地表地質分布から推定される層厚は，実証研究地点付近で50m以上，モデル構築領域の南部で200m以上である。 ・モデル構築領域の北部には，地質平面図において表現可能な規模の西北西－東南東走向の断層が8条分布する。 ・実証研究地点の西方の丘陵部には，西北西－東南東方向の褶曲軸を持つ褶曲構造が発達する。	・実証研究地点の西部の丘陵斜面には，凝灰質砂岩を主体とし，スコリア質砂岩及びパミス質砂岩が挟在する三浦層群初声層が連続的に分布する。 ・実証研究地点の北西部の丘陵斜面には，既存情報（既存の地質図幅）に示されている三浦層群三崎層及び築山層群，並びにこれらの分布境界に位置する断層が，分布しないことを確認した（下図の赤丸の範囲）。 ・実証研究地点南部の海岸付近には，スコリア質砂岩及びパミス質砂岩を挟在する凝灰質砂岩からなる三浦層群三崎層が分布することを確認した。 ・地表調査（地表地質踏査，横坑内地質観察）の結果を踏まえ，実証研究地点及びその近傍の地質分布，断層分布を変更した地質構造モデルに更新した（下図の白抜きの走向・傾斜の分布範囲）。	・YDP−1孔掘削地点では，沖積層（深度0～0.6m），三浦層群初声層（深度0.6～39.0m），三浦層群三崎層（深度39.0～207.43m），築山層群（深度207.43～354.00m）が分布する。三浦層群と築山層群の境界深度は，深度207.43mを境に岩種と卓越する層理面の走向傾斜が変化すること，深度207m付近に基底礫岩とみなせる礫岩が分布すること，深度207.43m以深の地層は微化石分析の結果により築山層群と同一時期の地層であると推定されることから判断された。 ・三浦層群初声層は，シルト質砂岩（スコリア質）からなる。層理・葉理面の走向傾斜は，北～南～北北東～南南西走向，低～中角度西傾斜である。 ・三浦層群三崎層は，シルト質砂岩，砂質シルト岩，中～粗粒砂岩の各岩相が卓越し，これらの岩相の違いにより5層に細分されることを確認した。層理・葉理面の走向傾斜は，北～南～北北東～南南西走向，低～中角度西傾斜である。 ・築山層群は細粒凝灰岩，含礫泥岩，細粒砂岩を挟在する泥岩（破砕質）からなる。層理面の走向傾斜は，北西－南東走向で中角度北傾斜，北西－南東走向で中角度南傾斜，東西走向で北傾斜が卓越する。 ・YDP−1孔掘削地点の地下の地質分布データを基に，三浦半島南部の地質構造発達史，重力異常と地質分布の関係を考慮し，地質構造モデルを更新した。	・YDP−2孔では，沖積層（埋め戻し土：深度0～1m），三浦層群初声層（深度1～40m），三浦層群三崎層（深度40～217.20m），築山層群（深度217.2～502.00m）が分布する（深度0～190mはカッティングス観察結果に基づく）。 ・ボーリング調査地点における三浦層群と築山層群の不整合面は，40～45°程度の傾斜を有する。 ・三浦層群三崎層中では，両ボーリング孔間における比抵抗構造の変化深度がほぼ一致すること，岩相変化深度がほぼ一致することから，両ボーリング孔間に分布する三崎層は，ほぼ水平な構造を有していると考えられる。 ・両ボーリング孔間で確認された築山層群は，類似した岩相を呈するが，岩相分布，層理面・岩相境界の走向・傾斜に基づく対比が困難であり，微化石分析結果に基づく年代値が異なることから，側方連続性が悪い地層であると判断される ・深度217.20～313.80m，深度350.00～361.05m，深度389.70～502.00mは，YDP−1孔の深度207.43m以深で確認されたものと同様の破砕質の泥岩を主体とし，細粒凝灰岩，含礫泥岩，凝灰質砂岩等を挟在する。 ・深度361.05～389.70mは，凝灰質砂岩が卓越する。 ・YDP−2孔掘削地点の地下の地質分布データを基に，三浦半島南部の地質構造発達史，重力異常と地質分布の関係を考慮し，地質構造モデルを更新した。
地質構造モデル 地質平面				
地質断面				
確実性	・地表地質分布は，地表地質踏査等に基づき作成された既存情報（地質図）であることから確実性は高いが，地下深部の情報という点では，地表分布に基づく推定のため確実性は低い。	・地表地質分布の変更点は，現地での観察結果によるもので確実性は高いが，地下の地質分布については，新たなデータによる更新はなく，前段階と同じである。	・ボーリング掘削地点の深度354mまでは，ボーリング調査（コア観察，孔壁観察等）の結果によるデータであり，確実性は高い。ボーリング調査地点以外については，前段階と同じである。	・築山層群については，岩相分布，層理面や岩相境界の走向・傾斜，微化石分析結果を基に両ボーリング孔の対比が行われているが，側方連続性が悪く，築山層群を細分し，モデルに表現することは困難である。 ・ボーリング調査地点以外については，前段階と同じである。
信頼性	・公的機関の資料（地質調査所発行の地質図幅等）に基づくデータであり，信頼性は高い。	・地質構造モデルの地表付近の更新部分は，地表地質踏査及び横坑内地質観察による観察データに基づくものであり，信頼性は高い。	・地質構造モデルの更新部分は，ボーリング調査結果に基づくものであり，信頼性は高いが，築山層群と解釈した深度207.43m以深の泥岩（破砕質）については，堆積年代と地層対比の関係に問題が残る。	・地質構造モデルの更新部分は，基本的にボーリング調査結果に基づくものであり，信頼性は高い。ただし，ノンコア区間においては岩相境界深度の正確な認定は困難であり，やや信頼性に劣る。

○：地質構造モデルの更新箇所（既存情報調査段階⇒地表調査段階），○：地質構造モデルの更新箇所（地表調査段階⇒ボーリング調査段階：YDP−1孔），○：地質構造モデルの更新箇所（ボーリング調査段階：YDP−1孔⇒ボーリング調査段階：YDP−2孔），●：ボーリング調査地点

表 5.3.2-2 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査内容（出典：電中研，2010）

	掘削・調査計画 （孔壁の安定性が高い） （例：三浦層群）	掘削・調査計画 （孔壁の安定性が低い） （例：葉山層群）
計画深度	500m	500m
掘削孔径 （最終孔径）	HQ（98.4mm）	PQ（123mm）
掘削水の種類	泥水（ベントナイト泥水）	泥水（フレックス泥水，KCl ポリマー泥水）
掘削方法	ワイヤーライン工法	ワイヤーライン工法
ケーシング プログラム	2 段階 （1 段目：孔口保護，2 段目：掘削・調査スパンを考慮）	3（～4）段階 （1 段目:孔口保護，2 段目以降：掘削・調査スパンを考慮）
掘削・調査 スパン	200～300m	100m （葉山層群出現深度以深）
検層・試験時の孔内状況	・清水環境（孔内洗浄により置換） （泥水環境下で取得データの品質に影響がない検層・試験項目については，泥水環境下で実施）	・泥水環境（泥壁を保持） （泥水環境下で適用可能な検層・試験を選択の上実施．透水試験・採水の際には，フラッシングを実施）

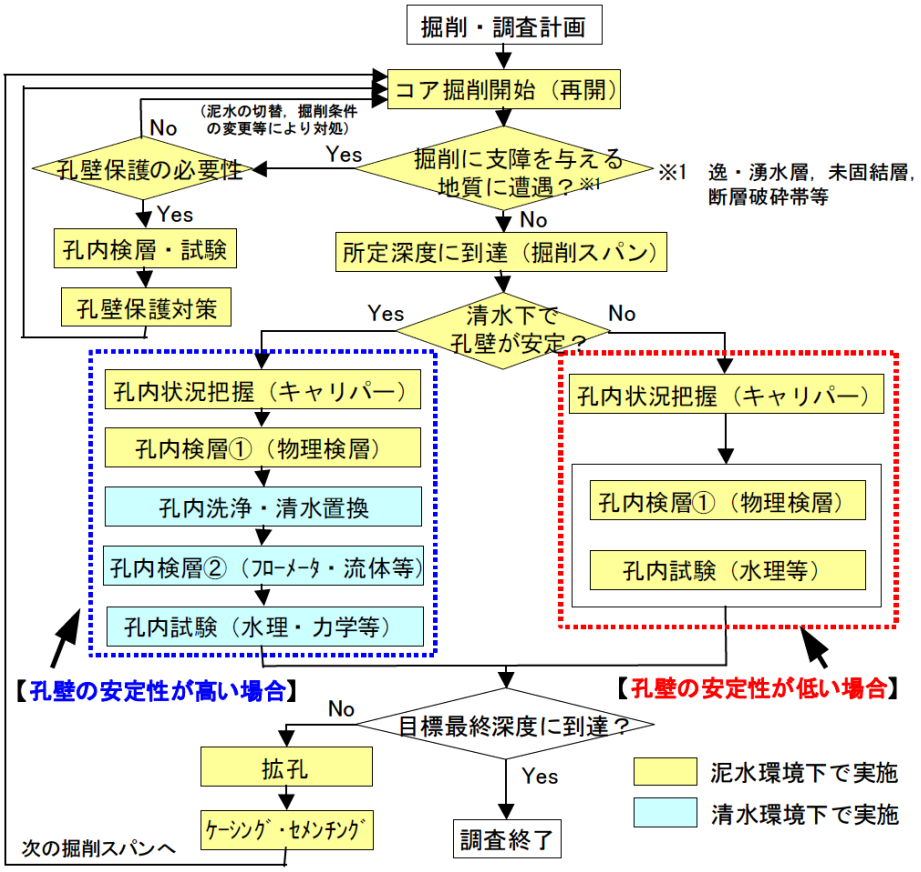


図 5.3.2-3 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査手順（出典：電中研，2010）

清水による掘削で孔壁が自立可能か否かに着目し，ボーリング掘削・調査内容および手順を検討した。

表 5.3.2-3 ボーリング調査におけるリスク評価結果の例

（人的災害にかかわる事項）

	発生事象	評価点				リスクレベル		低減措置	残存リスク発生時の対策
		作業	作業の頻度	危害の発生可能性	危害の重大性	評価値	レベル		
1	クレーンの転倒	仮設工(櫓設置撤去)	3	2	6	30	a	作業計画の遵守	連絡，必要な場合は病院への搬送
2	巻き込まれ，挟まれ	ボーリング掘削工	3	2	6	30	a	回転物の防護	連絡，必要な場合は病院への搬送
3	作業床の不備	孔内試験	3	2	3	15	b	作業周囲の整理・整頓	連絡，必要な場合は病院への搬送

（技術的な不具合にかかわる事項）

	発生事象	評価点				リスクレベル		低減措置	残存リスク発生時の対策
		作業	作業の頻度	危害の発生可能性	危害の重大性	評価値	レベル		
1	既に掘削した浅部にて，地盤応力により孔形状が変形し，装置が抑留	掘削	1	3	6	24	a	キャリパー検層やボアホールTVの実施 場合によってはダミーパッカーの降下試験 結果によって拡幅掘削	拡幅掘削などにより，形状復旧
2	スライム化した掘削泥水が装置内部に浸入し，操作不能	透水試験	2	3	6	30	a	孔内洗浄の徹底 装置の操作マニュアルの事前確認	スライムなどの排出作業による操作性の復旧
3	孔壁への載荷荷重が大きすぎるために孔壁を壊してしまい，載荷板が抑留	孔内水平載荷試験	1	2	6	18	b	適切な実施計画による載荷荷重の設定	拡幅掘削などにより装置の回収，孔形状の復旧
4	ロッドの孔内落下	ロッドを使う全作業	3	2	3	15	b	手順書の確認 特にホールドの確認	同一のロッドやタップによる回収
5	昇降中，ワイヤーが切断して，装置が孔内に落下	ワイヤーを使う全作業	3	3	6	36	a	作業前のワイヤーの点検と装置荷重の確認	ワイヤー交換 タップによる回収

（評価指標と算定表）

作業の頻度

評価項目	評価点	評価の目安
頻繁にある	3	工事期間中毎日
時々ある	2	特定作業中
めったにない	1	工事期間中2～3回

危害の発生可能性

評価項目	評価点
確実に起こる	4
可能性が高い	3
可能性がある	2
ほとんどない	1

危害の重大性

評価項目	評価点
極めて有害	6
有害	3
わずかに有害	1

リスクレベルの区分

評価項目		評価値	リスクレベル
重大なリスク	大きなリスク	24 以上	a
	中程度のリスク	12～23	b
小さなリスク		6～11	c
些細なリスク		5 以下	d

評価値＝（作業の頻度＋危害の発生可能性）×（危害の重大性）

5.3.3 課題と今後の技術開発

ここでは，“NUMO が的確に精密調査地区を選定する”ために必要な技術について，基盤研究開発機関との議論を経て，目標とする技術レベル，現状の技術レベル，今後の課題，必要な時期，分担（NUMO／各機関）について取りまとめた成果（NUMO，2010b）について述べる。

5.3.3.1 課題の抽出

(1) 自然現象の著しい影響の評価

ここでは，一般に確度の高い評価が可能とされている将来 10 万年程度を対象とした火山･火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食（気候・海水準変動を含む）に関する調査・評価技術について検討を行った（表 5.3.3-1，表 5.3.3-2）。

火山･火成活動については，対象地域の第四紀火山の分布や活動履歴に関するデータを取得し，精度の高い評価ができることが目標となる。これに対し，火山･火成活動の調査・評価は現状の技術で行うことが可能と考えられるが，検討事例の蓄積による技術の信頼性の向上，技術の体系化を進める必要がある。特に検討が必要な項目としては，研究機関による後期鮮新世～前期更新世の火山の活動履歴を精度よく評価する技術の整備や NUMO として確率論的評価手法の改良（概要調査規模の領域の評価，安全評価への情報提供の方法）が挙げられる。

地震・断層活動については，対象地域の活断層の分布や活動性，過去 10 数万年間またはそれ以前からの活動履歴を把握できることが目標となるが，基本的な調査・評価手法は整備されていると考えられる。今後はこれらの手法の適用事例の蓄積や改良により信頼性の向上，体系化を進めるが，今後特に高度化や体系化が必要と考えられる課題としては，断層の活動性の評価手法（特にボーリング調査や地下坑道で出現した断層が活断層であるかどうかの評価手法)，地表の短い活断層の評価手法（震源断層との関連の有無），確率論的評価手法，地域特性に応じた総合的調査・評価手法（モデル評価も含む）などが挙げられる。

隆起・侵食（気候・海水準変動を含む）については，過去 10 数万年間またはそれ以前からの隆起・沈降量および侵食量，気候・海水準変動，地形変化を把握できることが目標となる。現状の技術によりおおむね隆起・侵食の評価は可能であると考えられる。今後改良や高度化，信頼性の向上が必要なものとして，研究機関などによる岩石・鉱物の化学組成・結晶構造，有機物組成などの温度・時間指標を用いた間接的に隆起量・侵食量を推定・評価する手法，および宇宙線曝露起源の同位体測定や閉鎖温度の低い鉱物を用いた年代測定による直接的な侵食量評価手法，地形変化予測手法などが挙げられる。

また，安全評価の観点から，自然現象の将来 10 万年程度を超える超長期の評価が求められる可能性がある。これはサイト選定に必要な要件ではないが，プレート運動の継続性を含めた将来予測の可能性や不確実性に関する科学的立場からの検討が課題である。この課題については，現在 NUMO で検討を進めている。

(2) 地質環境特性の把握

ここでは，地質環境の場の理解にかかわる項目（地質・地質構造，地下水流動特性，地化学特性，岩盤・力学特性，そのほかの特性（泥火山，マスムーブメント，物質移行，コロイドなど），と地質環境特性の長期変遷について検討を行った（**表 5.3.3-3**)。

地質環境の場の理解については，JAEA の２つの深地層の研究施設計画における，地表からの調査段階（NUMO の文献調査から精密調査の前半に相当）の調査研究を通して，わが国の主要な岩種である結晶質岩と堆積岩を対象とした調査・評価に関する知見が得られている。ここでは，地質環境特性の各項目のデータ取得からモデル構築に至る一連の作業を段階的に繰り返し，地質環境の理解を深め不確実性を低減させていくという，体系的な調査･評価の具体的な事例が示された。一方，沿岸域については，文献情報に基づく活断層の推定，海上・海底での物理探査，塩淡境界面の形状把握，海底の地下水湧出探査，コントロールボーリングによる掘削・調査などに関する技術開発が行われ，陸域から海域にかけての一続きの調査・評価が可能になりつつある。さらに，後述する概要調査技術の実証的な検討を通して，付加体からなる地質環境の調査・評価に関する知見が得られている。以上のことから，NUMO は，これまで構築してきた調査・評価体系に，以上の知見を取り入れることにより，わが国の多様な地質環境に対する調査･評価を的確に実施できると考えている。

これらの技術において，検討事例の蓄積による技術の信頼性の向上や，技術の体系化に関する課題以外に，検討が必要と考えられる項目は以下のとおりである。

断層水理特性にかかわる調査・評価手法については，断層が水みちになるか遮水壁となるか，断層性状と水理特性の関係などを考慮して，調査・評価を合理的・効率的に行うための手法の体系化が必要と考え，現在 NUMO と LBNL（米国ローレンスバークレー国立研究所）が共同で検討を進めている（Karasaki *et al.*，2010）。

コロイド・有機物・微生物についての理解は進んでいるが，原位置での分析は一部で進められているのみでそれらが核種移行に及ぼす影響評価技術の整備が課題である。三次元応力場の解析手法については引き続き検討を行う必要がある。

塩淡境界面の分布・形状について，現在，幌延地域などにおいて国および基盤研究開発機関による検討が進められている。今後の課題としては，過去から現在に至る塩淡境界の変遷を把握する手法のが課題としてあげられている。

海域におけるボーリング調査は，主に資源探査を目的としているため，地下水化学特性を含めた詳細な岩盤特性を直接確認している事例は極端に少ない。現在，沿岸域を対象とした基盤研究開発が実施されているが，海域におけるボーリング調査の実施を通じた調査・評価技術の体系化は十分に進んでいない。そこで，沿岸から海域における調査・評価技術（各種試験を含む）について，実証試験を含め，事例の蓄積や技術の体系化が課題である。

地質環境の長期変遷については，将来 10 万年程度における長期的変動をおおむね想定でき，その想定に基づきレファレンス処分場概念の安全評価が可能であることが求められる。今後検討が必要と考えられる項目としては，将来 10 万年程度の地質環境特性（地形・地質・地質構造特性，地下水流動特性，地下水化学特性，物質移行特性）の時間的・空間的変遷に関する知見の整理，長期的な地質環境の変化を評価する手法の確立，その体系化・実用化などが挙げられる。

5.3.3.2　主な課題と今後の技術開発

前項で抽出した検討項目のうち，知見・実績の蓄積，整備，高度化などに関する各課題は，今後の基盤研究開発の進展や調査･評価事例の蓄積によって改善されると考えられる。事業者として NUMO が検討すべきと認識された主な技術課題として，以下の項目が挙げており，現在検討を進めている。

- 自然現象の超長期評価の考え方および方法論
- 地質環境特性の長期変遷を評価する手法の確立および体系化
- 沿岸域から海域における深部地質調査技術の適用性確認および実証

NUMO は，今後も最新の科学的知見や技術開発の成果を取り込み，これまでに体系化した調査・評価技術を改善していく。これと並行して，精密調査における技術開発ニーズについても検討し，必要な技術開発を進めていく。

表 5.3.3-1 調査・評価手法のまとめ（1）

項目		現状	サイト選定への適用	課題
火山・火成活動	情報整備	・第四紀火山，火山灰，温泉，熱水賦存領域の分布やその特徴などに関する全国規模のデータベースが整備された。	・文献調査の段階における基礎データとして活用することができる。	—
	火山活動履歴の調査・評価	・火山の活動履歴を把握する手法は基本的に確立されており，テフラの認定や対比などについて精度や信頼性を向上させるための研究開発が行われている。	・概要調査の段階以降において，各手法の適用限界や信頼性を確認した上で活用することができる。	—
	マグマの貫入・噴出の評価	・地質学的･地球物理学的･地球化学的データに基づき，第四紀火山の活動性や深部熱源を総合的に評価する手法が開発されている。	・サイト選定の各段階において，各調査地区とマグマ活動との関連性の評価を行う際に活用することができる。	・評価事例の蓄積や評価手法の信頼性の向上
	熱・熱水の評価	・熱水賦存域の調査･評価手法は，地熱資源分野の技術開発において確立されており，地質学的･地球物理学的･地球化学的データなどに基づき，熱・熱水の影響を総合的に評価する手法が開発されている。	・総合的な熱･熱水の評価手法などは，概略的な評価に有効であり，熱源や火山からの熱的影響の評価手法は，評価に必要な情報が得られた場合に有効であると考えられる。	・評価事例の蓄積や評価手法の信頼性の向上
	確率論的評価	・NUMO や JAEA により，確率論的に将来の火山活動を評価する手法の開発が行われている。	・決定論的手法を用いた評価を補足する手法として適用していく。	・確率論的手法による結果の利用方法に関する検討や手法の高度化
地震・断層活動	活断層の存在の把握	・活断層データベースなどの全国規模の情報整備，SAR や GPS など測地学的手法，航空レーザー測量を用いたなど地形学的手法の整備が進み，微細な変位地形やひずみの分布などに基づいた検討が行われるようになってきた。 ・物理探査手法では，3 次元探査の適用，沿岸海域に対応したシステムの開発，解析手法の高度化などが進められている。また，トモグラフィの解析精度の向上は深部地質構造の解明に大きく寄与した。 ・断層の分布や活動性を評価する際に適用する，地球化学的手法や構造地質学的手法の開発が進められている。 ・上記の手法を総合的に組み合わせて評価する手法の開発が進められている。	・文献調査の段階における基礎データとして活用することができる。 ・測地学的手法や地形学的手法は文献調査や概要調査の初期の段階で適用する。 ・物理探査，地化学探査などは概要調査で地下での活構造の検出や確認に活用していく。 ・構造地質学的手法は上載法が適用できない場合など有効な手法であり手法の高度化を進めながら適用していく。 ・総合的な評価手法は，対象地域に応じて適切な手法を組み合わせて適用していく。	・地表の短い活断層などの評価手法の高度化 ・断層の活動性（特に地下で遭遇する）を評価するための手法の高度化 ・地域の特性に応じた総合的な評価手法（モデル実験など含む）の高度化

表 5.3.3-2 調査・評価手法のまとめ（2）

項目		現状	サイト選定への適用	課題
地震・断層活動	活断層周辺の変形帯の把握，活断層周辺の影響範囲の把握，断層の発達・伸展の評価 地質環境特性への影響評価	・断層関連褶曲の考え方に基づく検討が進展し，褶曲地帯の地表変形と深部の断層の理解が進んだ。 ・横ずれ断層や逆断層の模型実験や数値解析による検討で，断層の発達過程や周辺への影響についての理解が進んだ。	・サイト選定の各段階において，各手法の適用性を考慮して評価に適用していく。	・地質調査結果と模型実験やモデル解析を組み合わせた手法の整備
		・ダメージゾーンやプロセスゾーンに対する地質学的手法の適用や物理探査（比抵抗法）によるイメージングによる解析が進められている。	・精密調査地区選定段階以降の地質調査，ボーリング調査，地下調査施設における調査において，適用可能である。	・花崗岩地域以外の地質環境における事例検討や手法の高度化
	地質断層の再活動性の評価	・応力場の変化にともなう既存断層の再活動の事例が示され，モデル実験などによる解析も進められている。	・事例を参考に評価を行う。	・活動性の評価の一環としてとして，手法の整備と高度化
	確率論的評価	・数十年程度の地震動の発生確率はハザードマップとして公表されている。10 万年程度の予測としては，NUMO の歪速度による確率論的評価手法が開発されている。	・決定論的手法を補足する目的での適用が考えられる。	・確率論的手法による結果の利用方法に関する検討や手法の高度化
隆起・侵食	情報整備	・海成段丘アトラス，最近 10 万年間の隆起速度分布図など全国規模の情報が整備された。	・文献調査の段階における基礎データとして活用することができる。	—
	隆起・沈降量の調査・評価	・河成段丘について，対比・編年，隆起量評価の指標としての信頼性について検討が行われ，手法の妥当性や信頼性が向上した。また堆積物を用いた隆起・沈降運動を復元する手法の検討事例が蓄積された。	・文献調査や概要調査の段階において，隆起量の評価だけでなく，活断層などの抽出にも適用していく。	—
	侵食量・侵食速度の評価	・年代測定，鉱物相転移の温度依存性を利用した長期的侵食速度の推定手法や，宇宙線生成核種を利用して直接的に侵食速度を推定する手法の開発が進められている。また，長期の地形変化を予測する手法の開発が進められている。	・侵食速度測定手法などは，概要調査の段階以降において，その適用性などを考慮して必要に応じて活用していく。 ・地形変化予測手法は，適用限界を考慮しつつ地下水流動解析への基礎データとしても利用していく。	・手法の改良，事例の蓄積などをつうじた実用化 ・体系的な調査・評価手法の高度化
	気候・海水準変動の復元	・風成層やコアの堆積物の解析により地域的な気候変動を解析する研究が進められている。	・各手法の適用性などを考慮して，活用していく。	・評価事例の蓄積や評価手法の信頼性の向上

表 5.3.3-3 調査・評価手法のまとめ（3）

項目		現状	サイト選定への適用	課題
地質環境特性	地質・地質構造	・地下構造を把握するための 2 次元または 3 次元の物理探査技術（解析手法を含む）の改良や高度化，沿岸域などの地質環境に応じた手法の開発が進められている。 ・結晶質岩，堆積岩を対象とした亀裂の分布解析手法の検討が進められた。 ・沿岸海底下において効率的に調査を行うボーリングシステムの開発が行われている。	・各手法の適用性などを考慮して，概要調査の段階以降に適用する。	・海域におけるボーリング調査事例の蓄積とそれに基づく調査・評価手法の体系化
	地下水流動特性	・シーケンシャル水理試験法をはじめとする地下深部を対象とする水理試験手法，地下水流向･流速測定手法などが整備された。また，堆積岩，結晶質岩における水理地質構造モデルの作成から地下水流動解析が行われ，さらに気候･海水準変動を考慮した解析を行う手法が示された。	・サイト選定の各段階において，対象地域に応じた手法を選定して適用する。	・断層に関連した水理特性評価の手法の体系化
	地下水化学特性	・地下水の安定同位体を利用した地下水年代測定から地下水の特性や流動解析を行う手法の整備が進められ，また，地下水化学モデルの構築手法が提示されている。	・各手法の適用性などを考慮して，概要調査の段階以降に適用する。	・地質環境の長期変遷を考慮した評価手法の高度化
	岩盤力学・熱特性	・既存情報や地上からの調査で得られる情報に基づいて，地下施設の建設可能性や難工事遭遇可能性を評価する岩盤評価手法が構築されている。 ・熱特性については，データベースが整備されるとともに，堆積軟岩の温度依存性評価が行われた。	・主に概要調査以降からデータの取得を行い，手法の適用は対象地域の特性に応じて行う。	・三次元応力場解析手法についての検討
	そのほかの特性	・泥火山やマスムーブメントに対する知見の蓄積が進み，物質移行特性ではデータベースの整備や物質移行プロセスのモデル化などが進められている。	・泥火山やマスムーブメントは特殊地質環境で発生する現象であることを考慮し対象地域の評価に反映させる。	・今後の地下研究施設などでの物質移行・遅延プロセスの解明，モデル化の検討による評価技術の整備
総合的な調査・評価		・深地層の研究施設計画などでは，統合化データフローダイアグラムを構築し，体系的な調査・評価手法が示されている。	・サイト選定の各段階において，体系的な調査･評価を行う上での参考事例として活用することができる。	・沿岸域および海域における調査・評価手法の体系化

5.4 まとめ

第5章では，ある地点が与えられた場合に，サイト選定の初期段階である概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階において，NUMOが地質環境の調査・評価をどのような考え方でどのように実施していくのか，そしてそれに必要な技術がこの10年間でどの程度整備され，今後どのような進展が期待されているか述べてきた。以下にそれらの要点をまとめる。

(1) 前提となる考え方

わが国は変動帯に位置するため，処分施設建設地として選定されるサイトは，将来にわたり火山・火成活動，地震・断層活動，隆起・侵食などの自然現象による著しい影響を回避できる場所であることが求められる。NUMOでは，将来の自然現象の発生およびその影響については，対象とする事象および地域により異なる過去の情報の量・精度，そして地質構造発達過程を考慮し，予測に用いる仮定を明らかにした上で，10万年程度あるいはそれ以上の適切な期間について，外挿法などにより予測し評価を行う。自然現象による著しい影響を回避できることを確認した上で，地質・地質構造，地下水の流動特性や化学特性，岩盤特性などの地質環境特性を把握するとともにそれらの長期変遷を評価し，処分場の設計・施工などの適切な工学的対策および地層処分システムの閉鎖後長期安全性の評価に必要な情報を提供する。わが国には多様な地質環境が存在するが，上記の地質環境特性の観点からは，大きくは結晶質岩（硬岩）と堆積岩（軟岩），そして内陸部と沿岸域の区分の組み合わせにより代表される。内陸部の結晶質岩と堆積岩の調査・評価技術については，JAEAの深地層の研究施設計画を通じた研究開発による知見が蓄積されている。沿岸域については，基盤研究開発機関による検討が進められている。基本的には,これらの調査・評価の考え方や方法を適切に組み合わせることにより，多様な地質環境に対応した調査・評価を行うことができると考えられる。

(2) 調査・評価の技術体系

以上の前提に基づき，自然現象の各事象と地質環境特性について，既存および2000年以降に進展した技術を組み合わせた調査・評価の考え方と進め方を，事業者としての観点から体系的に取りまとめた。

火山・火成活動については，マグマの貫入・噴出や熱水活動を対象として，過去から現在の活動の分布や傾向に基づき，将来の活動の発生可能性や影響範囲を予測し評価する。このため，調査・評価は，応募区域が第四紀火山の中心から半径15kmの円の外側に位置するが，将来のマグマの貫入・噴出や熱水活動の可能性を否定できない場合（例えば火山フロント背弧側など）に限り，念のため，著しい影響が及ばないことを確認する。文献調査では，第四紀火山の分布や活動履歴，火成活動に関連する地下構造などに関する文献情報に基づき，火山・火成活動の傾向やマグマ供給系の存在について評価し，概要調査地区として選定する可能性のある区域において，第四紀火山のマグマの貫入・噴出や熱水活動を示唆する証拠がないこと，将来においてもそれらが生じるおそれが少ないことを確認する。概要調査では，文献調査の結果，概要調査地区の近傍に第四紀火山やマグマ供給系が存在し，将来その著しい影響が概要調査地区に及ぶ可能性がある場合，概要調査地区から第四紀火山およびその周囲にかけて「補足的に調査する範囲」を設定し，地表踏査や物理探査などを必要に応じて実施する。その結果と概要調査地区における地質環境特性のためのボーリング調査の情報を合わせて，将来的にマグマの貫入・噴出や熱水活動が概要調査地区に及ぶことを示唆する証拠がないことを確認する。

地震・断層活動については，活断層や活褶曲などによる地層の剪断（変位）や変形を対象として，活断層や活褶曲などの分布や活動性，地形・地質構造発達過程に基づき，将来の分布や著しい影響が及ぶ範囲について評価する。文献調査では，活断層などの分布や活動性，変動地形，震源分布などに関する情報に基づき，応募区域において，活断層や活褶曲などが存在する，活断層の破砕帯およびその外側の変形帯に含まれる，活断層の分岐・伸展などが発生する可能性が高い，ということを積極的に示す証拠がないことを確認する。概要調査では，概要調査地区および「補足的に調査する範囲」において，地表踏査や物理探査などを実施し，その結果に応じて短尺のボーリング調査やトレンチ調査などを実施する。これらの結果から，活断層などの分布および地下構造，地形・地質構造発達史について検討し，将来の活断層などの分布・活動性，活断層の破砕帯およびその外側の変形帯の範囲（分岐・伸展などによるものも含む）に関する評価を行う。

隆起・侵食については，隆起・沈降運動および侵食作用を対象として，これらの量と分布，変動傾向に基づき，将来の隆起・沈降量を予測し，侵食量（最大下刻量）や地形変化を評価する。文献調査では，隆起・沈降量および侵食量の分布，測地学的な変動傾向などを把握し，応募区域において，過去に著しい隆起・侵食が生じていないこと，将来も著しい隆起・侵食が生じるおそれが少ないことを確認する。概要調査では，概要調査地区および「補足的に調査する範囲」において，地表踏査を実施し，その結果に応じて物理探査や短尺のボーリング調査を実施する。これらの結果から，地形・地質構造の発達過程や隆起・沈降量を再評価し，それらを外挿することにより将来の隆起・沈降量を予測する。侵食については，最大下刻量の評価を行い，地形変化予測モデルにより将来の侵食量を予測する。その結果，将来に処分施設が地表に接近するような著しい隆起・侵食が生じるおそれがないことを確認する。

地質環境特性については，自然現象の著しい影響を回避した領域の地質環境が，人工バリアにとって適切な設置環境であり，それ自体が天然バリアとして機能する地質環境を有していること，そして，それらが長期にわたって維持されることを評価する。そのために，段階的な調査により，地質・地質構造，地下水の流動特性および化学特性，岩盤特性（熱・力学）などの情報を取得し，地質環境モデルを構築・更新する。地質環境モデルは，地質環境の各特性の場，現象，メカニズムなどに対する解釈を示す概念モデルとデータに基づき，特性の分布や性状，およびそこに含まれる不確実性を定量的に表現したものであり，地質環境の場を規定する地質構造モデルを基礎に，互いに整合性の取れた水理地質構造モデル，地下水化学モデル，岩盤特性モデルなどを構築する。さらに，上述した自然環境に関する調査・評価結果を踏まえて，地質環境特性の長期変遷について検討する。これらの地質環境モデルや地質環境特性の長期変遷に関する情報を，施設設計や安全性の評価に提供し，総合的な評価を行うことにより，次段階の調査地区の選定を行う。文献調査では，上記の各特性に関する文献情報を収集・分析し，地質環境モデルを構築する。その結果に基づき，地質環境モデルにおける不確実性の低減，施設設計や安全性の評価からの要求などの観点から優先度を明確にし，概要調査計画を立案する。概要調査では，まず地表踏査や物理探査などの地表調査により，文献調査の結果の妥当性を確認するとともに，文献調査では取得できなかった情報，地質構造モデルの不確実性の低減に必要な情報などを取得し，概要調査地区内の地質環境特性をより詳細に評価する。概要調査地区に沿岸部の海域が含まれる場合には，海底地形測量，物理探査，海底試料採取などを実施する。これらの情報に基づき，地質環境モデルを更新し，不確実性の評価や概略的な施設設計や安全性の評価の結果を踏まえて，ボーリング調査の計画を検討する。ボーリング調査では，コア観察，物理検層，孔内試験，室内分析・試験などにより，地下深部までの詳細な情報を取得す

る。取得した情報に基づき，地質環境モデルを更新し，施設設計や安全性の評価に必要な情報を提供する。

NUMO は，以上の調査・評価にかかわる業務を円滑・確実に進めるために，「文献調査マニュアル」，「概要調査計画立案マニュアル」，「概要調査施工管理マニュアル」などの業務マニュアル，「NUMO 地理情報システム（NUMO-GIS）」，「地質環境データ管理システム」，「文献調査システムフロー」などのデータ統合・管理の支援システム，そして， ESL（Evidential Support Logic）や MAA（Multi-attribute Analysis）を用いた技術的意思決定の支援手法を整備した。

以上のことから，NUMO が文献調査および概要調査を実施するための，技術的な体系は整備されていると考えれらる。

（3）調査・評価の体系を支える技術の進展と今後への期待

上述した体系的な調査・評価に必要な技術について，自然現象と地質環境特性の項目ごとに，NUMO および基盤研究開発機関を中心とした技術開発による 2000 年以降の進展と，今後の進展への期待について取りまとめた（表 5.3.2-1~3 の一覧表を参照)。

火山・火成活動については，わが国の火山灰に関するデータが整理され，テフラの対比の精度が向上した。また，地震波トモグラフィなどの地下深部の解析技術の高度化に伴い，火山の新規発生やマグマの移動の評価手法，深部熱源の評価手法における信頼性が向上した。さらに，地球化学的手法を活用した深部熱水の評価手法が開発され，マグマ起源以外の熱水の存在が明らかになった。また，以上の決定論的な評価を補足する手法として，海外で用いられている確率論的な評価手法をわが国の背弧側の火山空白域や単成火山に対して適用し，基本的な有効性が確認された。これらの技術の進展により，対象地域の第四紀火山の分布や活動履歴に関するデータを取得し，将来の評価を行うことは，現状の技術で可能と考えられる。今後は，後期鮮新世～前期更新世の火山の活動履歴を精度よく評価する技術の整備や，確率論的評価手法の改良（概要調査規模の領域の評価，安全評価への情報提供の方法）などの進展が期待される。

地震・断層活動については，地表で活断層が認識されていなかった内陸地域の M7 クラスの被害を伴う地震（2000 年鳥取県西部地震，2003 年宮城県北部地震，2004 年新潟県中越地震，2008 年岩手・宮城内陸地震など）に対する調査を通して，震源断層と活断層の関係，伏在断層や未成熟な断層の検出，既存の活断層図の十分性などの課題が見出された。このような課題に対し，例えば，地表に明瞭な変位を伴わない活断層の評価には変動地形学的手法，断層関連褶曲の考えを基にした数値解析や模型実験を含めた解釈，地質断層の再活動を考慮した解釈が行われるようになってきた。また，断層の影響範囲の評価にも数値解析や模型実験と現状の比較で評価する手法が示された。また，以上の決定論的な評価を補足する手法として，測地などの複数のデータの歪速度に基づき断層変位の発生を確率論的に評価する手法が開発され，一定の適用性が確認された。これらの技術の進展により，対象地域の活断層の分布や活動性，過去 10 数万年間またはそれ以前からの活動履歴を把握，将来の評価を行うことは，現状の技術で概ね可能と考えられる。今後は，以下の項目に関する検討を進めることにより，より一層の信頼性の向上が期待される。

- 地層処分に適用する活断層の判定基準
- 地表に生じた二次的な断層・短い断層の評価（成因の多様性，地震動への評価など）
- 断層の活動性評価（活断層の認定，活動傾向，成熟度，固有地震より一回り小さい地震）
- 伏在断層，未成熟な断層の調査・評価手法

・　探査（地質学的）とモデル解析などを組み合わせた手法の構築・高度化
・　物理探査手法，総合的調査・評価の体系化（適切な仕様の選択と複数の手法の組み合わせ）
・　確率論的評価手法の改良（概要調査規模の領域の評価，安全評価への情報提供の方法）

隆起・侵食については，情報の整備および事例研究などを通じて，隆起・沈降量，侵食量・侵食速度の推定，気候・海水準変動の復元などの手法の高度化，体系化が図られた。河成段丘の対比・編年の信頼性の向上に伴い，過去 10 万年間程度の内陸部の隆起量を精度よく評価することが可能となった。また，過去の侵食履歴と気候・海水準変動に基づく，将来の地形変化の予測手法やシミュレーション技術の開発が進められ，長期的な地下水流動解析への情報提供が可能になってきた。これらの技術の進展により，過去 10 数万年間またはそれ以前からの隆起・沈降量および侵食量，気候・海水準変動，地形変化を把握，将来の評価を行うことは，現状の技術で概ね可能と考えられる。今後は，間接的な隆起量・侵食量の間接的な評価手法（岩石・鉱物の化学組成・結晶構造，有機物組成などの温度・時間指標の適用），直接的な侵食量の評価手法（宇宙線曝露起源の同位体測定や閉鎖温度の低い鉱物を用いた年代測定手法の適用），地形変化予測手法などの進展が期待される。

地質環境特性については，JAEA の２つの深地層の研究施設計画における，地表からの調査段階（NUMO の文献調査から精密調査の前半に相当）の調査研究を通して，わが国の主要な岩種である結晶質岩と堆積岩を対象とした調査・評価に関する知見が得られている。ここでは，地質環境特性の各項目のデータ取得からモデル構築に至る一連の作業を段階的に繰り返し，地質環境の理解を深め不確実性を低減させていくという，体系的な調査・評価の具体的な事例が示された。一方，沿岸域については，文献情報に基づく活断層の推定，海上・海底での物理探査，塩淡境界面の形状把握，海底の地下水湧出探査，コントロールボーリングによる掘削・調査などに関する技術開発が行われ，陸域から海域にかけての一続きの調査・評価が可能になりつつある。さらに，後述する概要調査技術の実証的な検討を通して，付加体からなる地質環境の調査・評価に関する知見が得られている。NUMO は，これまで構築してきた調査・評価体系に，以上の知見を取り入れることにより，わが国の多様な地質環境に対する調査・評価を的確に実施できると考えている。今後は，地質環境特性の場の把握のための技術としては，断層水理特性の調査・評価を合理的・効率的に進めるための手法の体系化，そして，三次元応力場の解析手法などの進展が期待されている。沿岸域については，過去から現在に至る塩淡境界面の分布・形状の変遷を把握するための手法の高度化，海上でのボーリング調査を含む調査・評価事例の蓄積や技術の体系化・実証などの進展が期待される。地質環境特性の長期変遷については，将来 10 万年程度の地形・地質構造，地下水流動特性，地下水化学特性，などの時間的・空間的変遷を評価する手法の体系化・実用化などの進展が期待される。

以上の調査・評価技術のうち，概要調査に適用される主要なものについて，NUMO がこれまで整備してきた体系的な調査・評価技術の中での適用性を確認すること，調査管理技術の整備を図ることを目的として，ボーリング調査を主体とする実証的な検討を行った。その結果，文献調査，地表調査，ボーリング調査により段階的にデータを取得・解釈し，地質環境モデルを更新する過程を通して，地質環境モデルの不確実性が低減されることを確認した。また，調査計画立案から結果の評価に至る一連の業務を実施することにより，調査実施の工程管理・品質管理にかかわる的確かつ合理的な意思決定や，安全管理などに関する手法の有効性を確認することができた。

以上のことから，今後あらゆる地点からの応募に対して，NUMO が的確に文献調査および概要調査を実施し，サイト選定にかかわる評価を行うための準備は十分に整っていると考えられる。

参考文献

阿部寛信，酒井隆太郎（1999）：地震・断層活動が水理環境に及ぼす影響，サイクル機構技報，No.5，pp.77-83.

相澤泰隆，小林健太，梅津健吾，山本　亮（2005）：2000 年鳥取県西部地震の余震域およびその周辺に分布する断層岩類，地質学雑誌，第 111 巻，第 12 号，pp.737-750.

阿島秀司，戸高法文，岩月輝希，古江良治（2006）：多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築，応用地質，第 47 巻，第 3 号，pp.120-130.

阿子島功（1983）：山形県馬見ヶ崎川流域における過去 2 万年間および最近の侵蝕速度，地形，第 4 巻，第 1 号，pp.97-106.

Alexander, W.R., Frieg, B. and Ota, K.(eds.)（2009）: The Nagra-JAEA in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock III: The RRP project final report，Nagra Technical Report NTB 00-07.

雨貝知美，鈴木　啓，和田弘人，藤原みどり，飛田幹男，矢来博司（2008）：干渉合成開口レーダーを用いた平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動の検出，国土地理院時報，第 117 集，pp.15-20.

Amano, K., Niizato, T., Yokota, H., Ota, K., Lanyon, B. and Alexander, W.R.（2010）: Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (2) Integrated palaeohydrogeological approach for development of site evolution models，Proc. 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), Tsukuba, Japan，3-7 Oct. 2010，ASME.

青柳恭平，阿部信太郎（2007）：2004 年新潟県中越地震と地質構造の関係－活褶曲地域における震源断層評価－，電力中央研究所報告，N06030，23p.

青柳恭平，阿部信太郎（2009）：明瞭な活断層が見出されない地域での震源断層評価－長野県西部地震震源域における地球物理学的調査－，電力中央研究所報告，N08038，19p.

朝倉俊弘，小島芳之（1995）：膨張性地山の調査・試験・解析，地質と調査，63，pp.7-14.

浅森浩一，梅田浩司（2005）：地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理学的調査技術－鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域への適用－，原子力バックエンド研究，Vol.11，No.2，pp.147-156.

浅森浩一，梅田浩司，石丸恒存，小松　亮（2003）：温泉地化学データベースの作成，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7450 2002-003.

麻植久史，小池克明，吉永　徹，高倉伸一（2007）：布田川－日奈久断層帯の深部比抵抗構造のイメージングと微小地震分布からの考察，応用地質，第 48 巻，第 4 号，pp.180-191.

芦田　譲（2005）：日本列島をめぐる領土と資源エネルギー，季報エネルギー総合工学，Vol.28，No.1，pp.48-57.

Bates, R.L. and Jackson, J.A.（1987）: Glossary of geology, third edition，American Geological Institute，988p.

朴　進牛，鶴　哲郎，野　徹雄，瀧澤　薫，佐藤　壮，金田義行（2008）：紀伊半島南東沖南海トラフでの高分解能 3 次元反射法地震探査と重合前深度マイグレーション処理，物理探査，第 61 巻，第 3 号，pp.231-241.

Chapman, N., Goto, J. and Tsuchi, H.（2009a）: Likelihood of Tectonic Activity Affecting the Geological Stability of a Repository in Japan: Development of NUMO’s ITM Methodology, Stability and

Buffering Capacity of Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste : Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, pp.67-75.

Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Jaquet, O., Litchfield, N., Mhony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M. and Wallace, L.（2009b）: Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan, -The Tohoku Case Study-, NUMO-TR-08-03, 92p.

Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Hasenaka, T., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, M., Mahony, S., Miyoshi, M., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K.（2009c）: Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan, -The Kyushu Case Study-, NUMO-TR-09-02, 186p.

千木良雅弘（1995）: 風化と崩壊, 近未来社.

千木良雅弘, 中田英二（1994）: 堆積岩の続成作用（その 1）－圧密・脱水と水理地質特性－, 電力中央研究所報告, U94026, 45p.

千木良雅弘, 田中和弘（1997）: 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴, 地質学雑誌, 第 103 巻, 第 8 号, pp.781-791.

地質調査所（1980）: 日本地熱資源賦存地域分布図, 地質調査所.

地質調査所（1992）: 新潟県中部地域, 日本油田・ガス田図 13.

地質調査所編（1995）: 100 万分の 1 日本地質図第 3 版 CD-ROM 版, 数値地質図 G-1, 地質調査所.

第四紀地殻変動研究グループ（1968）: 第四紀地殻変動図, 第四紀研究, 第 7 巻, 第 4 号, pp.182-187.

第四紀火山カタログ委員会編（1999）: 日本の第四紀火山カタログ v.1.0（CD-ROM 版）, 日本火山学会.

壇原　毅（1971）: 日本における最近 70 年間の総括的上下変動, 測地学会誌, 第 17 巻, 第 3 号, pp.100-108.

電力中央研究所（2010）: 高レベル放射性廃棄物処分 9. 概要調査に向けた地質環境の調査技術・評価手法の実証, 地球工学研究所・環境科学研究所 研究概要－2009 年度研究成果－.

土木学会（1983）: トンネルの地質調査と岩盤計測, 土木学会, 231p.

土木学会岩盤力学委員会岩盤の熱環境に関する研究小委員会（2006）: 熱環境下の地下岩盤施設の開発を目指して－熱物性と解析－, 土木学会, 252p.

土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会編（2007）: 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 土木学会, 372p.

土木学会原子力土木委員会地下環境部会編（2001）: 概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方, 土木学会, 102p.

土木学会原子力土木委員会地下環境部会編（2006）: 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 土木学会, 144p.

Emiliani, C.（1955）: Pleistocene temperatures, Journal of Geology, Vol.63, pp.538-578.

遠藤邦彦, 奥村晃史（2010）: 第四紀の新たな定義：その経緯と意義についての解説, 第四紀研究, 第 49 巻, 第 2 号, pp.69-77.

EPICA community members（2004）: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, Nature, 429, pp.623-628.

藤井義明，大高憲道，中川嘉文，児玉淳一（2006）: 接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の推定に関する基礎実験，資源と素材，Vol.122，No.10/11，pp.483-488.

藤井幸泰，竹村貴人，高橋　学，林　為人，赤岩俊治（2005）異方性を考慮した稲田花崗岩の一軸引張割れ目の特性，応用地質，第 46 巻，第 4 号，pp.227-231.

藤本光一郎，大谷具幸，田中秀美，樋口孝幸，富田直人，伊藤久男，Agar, S.M.（1998）: 地震直後の断層破砕帯の性質－地質調査所平林坑井のコアの物質科学的解析，地球号外，断層解剖計画，Vol.21，pp.149-153.

藤原　治，増田富士雄，酒井哲弥，岡崎浩子，斉藤　晃，鈴木俊秀（1996）: 海浜堆積物からみた下総台地の隆起運動像，堆積学研究，43，pp.39-46.

藤原　治，増田富士雄，酒井哲弥，布施圭介，斉藤　晃（1997）: 房総半島南部の完新世津波堆積物と南関東の地震隆起との関係，第四紀研究，第 36 巻，第 2 号，pp.73-86.

藤原　治，三箇智二，大森博雄（1999）: 日本列島における侵食速度の分布，サイクル機構技報，No.5，pp.85-93.

藤原　治，柳田　誠，清水長正，三箇智二，佐々木俊法（2004）: 日本列島における地すべり地形の分布・特徴，日本地すべり学会誌，第 41 巻，第 4 号，pp.335-344.

藤原　治，柳田　誠，三箇智二，守屋俊文（2005a）: 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究，原子力バックエンド研究，Vol.11，No.2，pp.113-124.

藤原　治，柳田　誠，三箇智二，守屋俊文（2005b）: 地層処分から見た侵食作用の重要性－海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例に－, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.139-146.

藤原　智（2006）: 宇宙から大地の動きを見る衛星干渉合成開口レーダー（SAR）による地殻変動検出，ないふる，No.56，pp.2-3.

福地龍郎，溝口一生，嶋本利彦，林　愛明（2002）: ESR 解析による断層摩擦発熱温度の推定－野島断層と高速剪断実験結果を例として－，地球号外，沈み込み帯地震発生帯－その物質科学と深海掘削－，Vol.36，pp.82-89.

福留高明（1984）: 熱源として見た活断層，秋田大学鉱山学部地下資源研究施設報告，49，pp.33-40.

舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也 (2009) : 新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか？, 応用地質，第 50 巻，第 4 号，pp.238-247.

古江良治，岩月輝希，水野崇，彌榮英樹（2003）: 試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7520 2003-001.

古江良治，岩月輝希，濱　克宏（2005）: 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対する試み，応用地質，第 46 巻，第 4 号，pp.232-236.

古澤　明（2004）: RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見いだした火山活動，地質学雑誌，第 110 巻，第 1 号，pp.19-37.

古澤　明，中村千怜（2009）: 石英に含まれるガラス包有物の主成分分析による K-Tz の識別，地質学雑誌，第 115 巻，第 10 号，pp.544-547.

古屋　裕，伊藤谷生，佐藤比呂志，平田　直，駒田希充，津村紀子，浅尾一巳，荒井良祐，半場康弘（2009）: 反射法地震探査による房総半島南西部内房沿岸の浅部地下構造, 地震研究所彙報，Vol.84，pp.307-329.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2002）: 平成 13 年度地層処分経済性向上

調査地層処分サイト評価技術確証試験　報告書（第3分冊）調査システムの総合評価，平成14年3月．

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2004）：平成15年度地層処分技術調査等高精度物理探技術高度化調査　報告書，平成16年3月．

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2006）：平成17年度地層処分技術調査等地質環境評価技術高度化調査　報告書，平成18年3月．

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2007）：平成18年度地層処分技術調査等地質環境評価技術高度化調査　報告書，平成19年3月．

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2009a）：平成20年度地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム工学要素技術高度化開発　報告書（第3分冊）－モニタリング技術の開発－，平成21年3月．

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2009b）：平成20年度地層処分技術調査等委託費　地層処分共通技術調査　沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発　報告書，平成21年3月．

原子力安全委員会（2002）：金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針，平成14年10月3日（平成18年9月19日一部改訂）．

原子力安全委員会（2006）：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，平成18年9月19日．

原子力安全委員会（2008a）：使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における「自然環境」の考え方について，平成20年10月27日．

原子力安全委員会（2008b）：活断層等に関する安全審査の手引き，平成20年6月20日．

原子力安全委員会（2010）：余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方，平成22年4月1日．

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会（1997）：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について，平成9年4月15日．

Ghimire, H.N., Ishijima, Y., Sugawara, T. and Nakama, S.（2004a）: Development of Stress Measuring System by Overcoring Method Suitable for Soft Rocks，Shigen-to-Sozai，Vol.120，No.1，pp.32-38.

Ghimire, H.N., Ishijima, Y., Sugawara, T., Matsui, H. and Nakama, S.（2004b）: Stress Measurement in Weak Rock by Borehole Deformation Method - A Case Study of Horonobe，Shigen-to-Sozai，Vol.120，No.10/11，pp.545-554.

後藤淳一，土　宏之，Karasaki, K.（2007）：概要調査における調査プログラム最適化に関する検討，日本応用地質学会平成19年度研究発表会講演論文集，pp.107-108.

Hall, J.W., Blockley, D.I. and Davis, J.P.（1998）: Uncertain inference using interval probability theory，International Journal of Approximate Reasoning，Vol.19，No.3/4，pp.247-264.

濱田崇臣，幡谷竜太（2009）：段丘の対比・編年の信頼性向上のための風化指標の検討－新潟県中越地域等に分布する段丘の観察・分析結果に基づいて－，電力中央研究所報告，N08063，33p.

花室孝広，梅田浩司，高島　勲，根岸義光（2008）：紀伊半島南部，本宮および十津川地域の温泉周辺の熱水活動史，岩石鉱物科学，Vol.37，No.2，pp.27-38.

原山　智（1994）：世界一若い露出プルトンの冷却史－北アルプス・滝谷花崗閃緑岩の年代と冷却モデル－，地質学論集，43，pp.87-97.

長谷川昭，中島淳一，海野徳仁，三浦　哲，諏訪謡子（2004）：東北日本弧における地殻の変形と内

陸地震の発生様式，地震，第 56 巻，第 4 号，pp.413-424.

長谷川琢磨，中田弘太郎，富岡祐一，後藤和幸，柏谷公希，濱　克宏，岩月輝希，武田匡樹，小坂寛（2010）：地下水年代測定評価技術の開発（その 12）－東濃地域における ^{4}He と ^{14}C 地下水年代測定の適用性検討－，電力中央研究所研究報告，N10001，20p.

幡谷竜太（2005）：河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討（1）段丘対比の考え方の提案と河成段丘の編年に関わるケーススタディ，電力中央研究所報告，N05005，28p.

幡谷竜太（2006a）：河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討（2）那珂川沿いに分布する河成段丘の層序，電力中央研究所報告，N05016，29p.

幡谷竜太（2006b）：河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討（3）過去 10 万年間の隆起量分布により明らかにされる内陸部の地殻運動，電力中央研究所報告，N05017，21p.

幡谷竜太，濱田崇臣（2009）：河成段丘の分布から見た内陸部の隆起特性評価－新潟県中越地域の例－，電力中央研究所報告，N08044，33p.

幡谷竜太，柳田　誠，佐藤　賢，佐々木俊法（2005）：宮城県川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ 6 河成段丘の認定とその意義，第四紀研究，第 44 巻，第 3 号，pp.155-167.

幡谷竜太，柳田　誠，山本真哉，佐藤　賢，古澤　明（2006）：新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序，応用地質，第 47 巻，第 3 号，pp.140-151.

Hataya, R., Yanagida, M.. and Sato, M.（2009）: Study on characterisation of Quaternary tectonic movement by uplift estimation using fluvial terraces, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste : Application to Crystalline Rock，OECD/NEA No.6362，pp.217-225.

早川裕一，松倉公憲（2003）：日光，華厳滝の後退速度，地学雑誌，第 112 巻，第 4 号，pp.521-530.

井尻　暁（2009）：海底泥火山堆積物中の間隙水の起源，地学雑誌，第 118 巻，第 3 号，pp.435-454.

池田安隆（2002）：日本の活褶曲帯の形成メカニズムとその起源，活断層研究，第 22 号，pp.67-70.

池田安隆，今泉俊文，東郷正美，平川一臣，宮内崇裕，佐藤比呂志編（2002）：第四紀逆断層アトラス，東京大学出版会.

池原　研（2000）：北海道北端部，利尻トラフの海底堆積物中にタービダイトとして記録された地震第四紀研究，第 39 巻，第 6 号，pp.569-574.

稲葉　薫，三枝博光（2003）：地下水流動の予測解析統合システム（GEOMASS システム）の概要と東濃地域への適用事例，サイクル機構技報，No.18，pp.71-82.

井上大栄，宮腰勝義，上田圭一，宮脇明子，松浦一樹（2002）：2000 年鳥取県西部地震震源域の活断層調査，地震，第 54 巻，第 4 号，pp.557-573.

井上直人，楠本成寿，竹村恵二（2006）：重力異常からみた活断層・地震断層・地殻変動，号外地球，活断層・古地震とアクティブテクトニクス，54，pp.233-238.

井上卓彦，村上文敏，岡村行信，池原　研（2007）：2007 年能登半島地震震源域の海底活断層，地震研究所彙報，Vol.82，pp.301-312.

石原朋和，田中和広（2009）：泥火山周辺の地質構造と地下水の地化学特性－新潟県十日町市蒲生における検討－，地学雑誌，第 118 巻，第 3 号，pp.350-372.

石井英一，福島龍朗（2006）：新第三紀珪質岩における断層の解析事例，応用地質，第 47 巻，第 5 号，pp.280-291.

石井英一，安江健一，田中竹延，津久井朗太，松尾公一，杉山和稔，松尾重明（2006）：北海道北部，

幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性，地質学雑誌 ，第 112 巻，第 5 号，pp.301-314.

石井英一，安江健一，大平寛人，古澤　明，長谷川健，中川光弘（2008）：北海道北部，大曲断層近傍の背斜成長の開始時期，地質学雑誌，第 114 巻，第 6 号，pp.286-299.

Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T. and Ota, K.（in press）: Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan，Journal of Structural Geology，doi: 10.1016/j.jsg.2009.10.012.

Ishimaru, K. and Shimizu, I.（1997）: Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan: A study for stability of geological environment in Japan，Proc. 30th International Geological Congress，24，pp.31-41.

磯　望，山川克己，米澤　宏，松原敏子（1980）: 岐阜県高原川流域における土石流による岩屑供給と沖積錐の成長速度，地理学評論，第 53 巻，第 11 号，pp.699-720.

伊藤久敏（2006）: 閉鎖温度の低い年代測定法を用いた地殻浅部の熱履歴と変動史の評価ー野島断層と柳ヶ瀬断層の例ー，電力中央研究所報告，N05060，18p.

伊藤成輝，丸井敦尚，宮越昭暢，ガヤルドアドリアン，市村隆人（2007）: 揚水に伴う沿岸域堆積軟岩中の塩淡境界形状と地下水流動の変化，地下水学会誌，第 49 巻，第 1 号，pp.33-48.

伊藤成輝，町田　功，丸井敦尚（2010a）: 間隙水の化学的性質と地下水流動との関係 - 3 段階で遠心分離した砂岩間隙水の水質分析結果に基づいてー，地下水学会誌，第 52 巻，第 2 号，pp.183-194.

伊藤成輝，丸井敦尚，越谷　賢（2010b）: 幌延沿岸域における地下水流動・塩淡境界解析の解析条件，日本地下水学会春季講演会講演要旨，pp.108-111.

Iwamori, H.（1992）: Degree of melting and source composition of Cenozoic basalts in Southwest Japan: evidence for mantle upwelling by flux melting，J. Geophys. Res.，97，B7，pp.10983-10955.

岩月輝希，森川佳太，細谷真一，吉川英樹（2009）: 深部地下水の物理化学パラメータ（pH，酸化還元電位）の測定とその留意点，地下水学会誌，第 51 巻，第 3 号，pp.205-214.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2010）深地層の科学的研究カーネル
http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/images/stories/pdf/Kernel_Shinchiso.（2010 年 4 月 19 日）

JAEA（日本原子力研究開発機構）(2005-2009) : 熱力学・収着・拡散データベース，2005-2009JAEA.

Jaquet, O., Connor, C. and Connor L.（2008）: Probabilistic Methodology for Long-Term Assessment of Volcanic Hazards，Nuclear Technology，Vol.163，No.1，pp.180-189.

Jaquet, O., Lantuéjoul, C and Goto, J.（2009）: Cox process models for the estimation of long-term volcanic hazard，Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities, edited by Connor, C.B., Chapman, N.A. and Connor, L.J.，Cambridge University Press，pp.369-384.

地盤工学会（2004）: 地盤調査の方法と解説，地盤工学会，956p.

地震調査研究推進本部（2009）: 新たな地震調査研究の推進について，23p．平成 21 年 4 月 21 日.

地震調査研究推進本部（2010）: 全国地震動予測地図 2010 年版，平成 22 年 5 月 20 日.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999a）: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー総論レポート，JNC TN1400 99-020.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999b）: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー分冊 1　わが国の地質環境，JNC TN1400

99-021.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（2005a）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－分冊 1　深地層の科学的研究，JNC TN1400 2005-014.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（2005b）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成 17 年取りまとめ- -分冊 2 工学技術の開発-，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-015.

Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M.（1994）：Japan Sea, Opening history and mechanism: A synthesis，J. Geophys. Res.，Vol.99，No.B11，pp.22237-22259.

鍵山恒臣（2010）：カルデラ生成噴火の準備過程解明に向けた研究の展望，地質学雑誌，第 116 巻，第 9 号，pp.463-472.

楮原京子，今泉俊文，宮内崇裕，佐藤比呂志，内田拓馬，越後智雄，石山達也，松多信尚，岡田真介，池田安隆，戸田　茂，越谷　信，野田　賢，加藤　一，野田克也，三輪敦志，黒澤英樹，小坂英輝，野原　壮（2006）：横手盆地東縁断層帯・千屋断層の形成過程と千屋丘陵の活構造，地学雑誌，第 115 巻，第 6 号，pp.691-714.

Kagohara, K., Ishiyama, T., Imaizumi, T., Miyauchi, T., Sato, H., Matsuta, N., Miwa, A. and Ikawa, T.（2009）：Subsurface geometry and structural evolution of the eastern margin fault zone of the Yokote basin based on seismic reflection data, northeast Japan, Tectonophysics, Vol.470, No.3/4, pp.319-328.

海上保安庁海洋情報部（2010）：http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/FAULTS/main.html（2010，4 月）.

Kameda, J., Saruwatari, K. and Tanaka, H.（2003）：H_2 generation in wet grinding of granite and single-crystal powders and implications for H_2 concentration on active faults, Geophysical Research Letters, Vol.30, doi:10.1029/2003GL018252.

上岡　昇（2007）：コロイドによる核種吸着性－希土類元素を中心に，地質ニュース，631 号，pp.29-32.

金折裕司（2001）：断層の影響はどこまで及んでいるか，応用地質，第 41 巻，第 6 号，pp.323-332.

金沢　淳，富山眞吾，及川輝樹，梅田浩司（2005）：地質温度計による熱履歴の調査手法について，サイクル機構技報，No.26，pp.1-18.

Karasaki, K., Onishi, T., Gasperikova, E., Goto, J, Miwa, T., Tsuchi, H., Ueta., K., Kiho, K. and Miyakawa, K.（2010）：Development of characterization technology for fault zone，Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan.，ICEM2010-40121.

Kase, Y. and Day, S.M.（2006）：Spontaneous rupture processes on a bending fault，Geophysical Research Letters，Vol.33，L10302, doi:10.1029/2006GL025870.

活断層研究会編（1991）：新編日本の活断層 - 分布図と資料，東京大学出版会，437p..

Kato, N., Sato, H., Imaizumi, T., Ikeda, Y., Okada, S., Kagohara, K., Kawanaka, T. and Kasahara, K.（2004）：Seismic reflection profiling across the source fault of the 2003 Northern Miyagi earthquake (Mj 6.4), NE Japan: basin inversion of Miocene back-arc rift，Earth, Planets and Space，Vol.56，No.12，pp.1369-1374.

Kato, N., Sato, H. and Umino, N.（2006）：Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan，Journal of Structural Geology，Vol.28，No.11，pp.2011-2022.

加藤碵一（1989）：地震と活断層の科学，朝倉書店.

川上源太郎，大平寛人，在田一則，板谷徹丸，川村信人（2006）：熱年代学データに基づく日高山脈

の上昇史，地質学雑誌，第 112 巻，第 11 号，pp.684-698.

川本朓万，石黒幸文，呉　旭（2001）：山はねとその対策に関する文献調査，トンネルと地下，第 32 巻，第 7 号，pp.47-56.

木方建造，新　孝一，鈴木浩一，宮川公雄，岡田哲実，増原康布，井ヶ田徳行，小早川博亮，山本真哉（2006）：コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発（フェーズ 1），電力中央研究所報告，N01，98p.

木方建造，新　孝一，大津正士，宮川公雄，鈴木浩一，岡田哲実，須永崇之，小早川博亮，末永　弘，井ヶ田徳行，山本真哉（2009）：コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発（フェーズ 2），電力中央研究所報告，N03，97p.

木方建造，新　孝一，近藤浩文，田中靖治，幡谷竜太，上田圭一，長谷川琢磨（2010）：高レベル放射性廃棄物処分に係る概要調査の体系化研究，電力中央研究所報告，N11.

Kimura, G. and Tamaki, K.（1986）: Collision, rotation and back arc spreading: the case of the Okhotsk and Japan Seas，Tectonics，5，pp.389-401.

Kimura, J., Okada, Y., Nakayama, K. and Okada, S.（2001）: Variations of magnetic susceptibility and fine quartz accumulation rate in Daisen loam over the past 200000 years: Interaction between winter and summer monsoons in south-west Japan，Island Arc，Vol.10，No.2，pp.85-97.

Kimura, J., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagano, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi,N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, T., Ninomiya, A. and Tanase, A.（2003）Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction，Island Arc，Vol.12，No.1，pp.22-45.

木下博久，野原　壯，中田　高，池田安隆，伊藤　潔，大槻憲四郎，鷺谷　威，高田圭太，遠田晋次（2005）：比較的規模の大きな地下活断層の特徴とその調査手法の検討，活断層研究，第 25 号，pp.27-37.

小林健太，杉山雄一（2004）：2000 年鳥取県西部地震の余震域とその周辺における断層と断層岩ー"未知の断層"の検出に向けて，地質ニュース，第 602 号，pp.36-44.

小林国夫，坂口　豊（1982）：氷河時代，岩波書店.

小林洋二（1983）：プレート“沈み込み”の始まり，月刊地球，Vol.5，No.9，pp.510-514.

小池克明，劉　春学，天野健治，栗原　新（2008）：広域的な地質構造・物性分布の空間モデル作成と有効性の検証ー東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディー，Journal of MMIJ，第 124 巻，第 12 号，pp.700-709.

小池一之，町田　洋編（2001）：日本の海成段丘アトラス（CD-ROM および付図），東京大学出版会.

小嶋　智，西尾洋三，徐　勝，永澤智江，後藤紘亮，大谷具幸，矢入憲二（2006）：滋賀県東部，姉川流域に分布するせき止め湖堆積物の特徴と ^{14}C 年代，応用地質，第 47 巻，第 4 号，PP.196-207.

Kondo, H.（2009a）: Regional-scale volcanology in support of site-specific investigations，Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities, edited by Connor, C., Chapman, N, Connor, L.，Cambridge University Press，pp.307-325.

Kondo, H.（2009b）: Understanding the Characteristics of Long-term Spatio-temporal Variation in Volcanism and the Continuity of the Related Phenomena for Estimating Regions of New Volcano Development，Stability and Buffering Capacity of Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste : Application to Crystalline Rock，Workshop Proceedings Manchester, United Kingdom 13-15 November 2007，pp.247-255.

近藤浩文（印刷中）：地質環境の長期安定性にかかわる新規火山の発生可能性評価の考え方，電力中央研究所報告.

Kopf, A.J.（2002）：Significance of mud volcanism，Reviews of Geophysics，Vol.40，1005，doi:10.1029/2000RG 000093.

小坂英輝，立石　良，三輪敦志，市川八州夫，鎌滝孝信，今泉俊文（2009）：北上低地西縁断層帯・花巻市下堰田地区の断層露頭と地層変形ーバランス断面による地下断層形状の推定，活断層研究，第 30 号，pp.37-46.

小山良浩，谷　和夫（2003）：横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析，土木学会論文集，750/Ⅲ-65，pp.171-181.

国見利夫，高野良仁，鈴木　実，斉藤　正，成田次範，岡村盛司（2001）：水準測量データから求めた日本列島 100 年間の地殻上下変動，国土地理院時報，第 96 集，pp.29-32.

栗原　新，天野健治，劉　春学，小池克明（2008）：花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈ー瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩からの知見ー，Journal of MMIJ，Vol.124，No.12，pp.710-718.

操上広志，安江健一，新里忠史，今井　久，塩崎　功，山下　亮（2007）：気候・海水準変動が地下水流動に与える影響に関する解析的検討ー幌延地域を例としてー，地下水流動解析とモデル化に関するシンポジウム発表論文集（日本地下水学会），pp.59-66.

操上広志，竹内竜史，藪内　聡，瀬尾昭治，戸村豪治，柴野一則，原　稔，國丸貴紀（2008）：幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究，土木学会論文集 C，Vol.64，No.3，pp.680-695.

Kurikami, H., Suzuki, S., Wakasugi, K., Ueda, H., Ishiguro, K., Tsuchi, H., Kaku, K., Gaus, I. and Vomvoris, S.（2009）Study on strategy and methodology for repository concept development for the Japanese geological disposal project，NUMO-TR-09-04.

黒澤　進，茨木　希，James, S.，油井三和，Alexander, R.（2004）：グリムゼル岩盤試験場におけるコロイドと核種の移行遅延実験に関する解析，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2004-016.

黒澤英樹，石丸恒存，島田耕史，丹羽正和，小坂英輝，斉藤 聡，二ノ宮 淳（2010）：水素ガス原位置測定による断層破砕帯調査手法の検討，JAEA-Research 2009-043，35p.

Lin, A., Tanaka, N., Uda, S. and Satish-kumar, M.（2003）：Repeated coseismic infiltration of meteoric and seawater into deep fault zones: a case study of the Nojima fault zone, Japan，Chem. Geol.，Vol.202，1/2，pp.139-153.

Lin, A., Lee, C., Maruyama, T. and Chen, A.（2005）：Meso- and microstructural of coseismic shear zone of the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi earthquake, Taiwan，Bull. Seism. Soc. Am.，Vol.95，pp.485-501.

Lyell C.（1830）：Principle of Geology, Volume 1.（Secord J.A. 編, 河内洋佑訳（2006）：地質学原理（上），朝倉書店，195p）.

町田　洋，新井房夫編（2003）：新編火山灰アトラス[日本列島とその周辺]，東京大学出版会.

馬原保典，中田英二，大山隆弘，宮川公雄，五十嵐敏文，市原義久，松本裕之（2006）：化石海水の同定法の提案ー太平洋探鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価ー，地下水学会誌，第 48 巻，第 1 号，pp.17-33.

Mahara, Y., Hohjo, K., Kubota, T., Ohta, T., Mizuochi, Y., Tashiro, T., Sekimoto, S., Takamiya, K., Shibata, S. and Tanaka, K.（2010）：Vertical distribution of ^{10}Be, ^{26}Al, and ^{36}Cl in the surface soil layer of weathered granite at Abukuma, Japan，Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B，Vol.268,

7/8，pp.1197-1200.

牧野仁史，澤田　淳，前川恵輔，柴田雅博，笹本　広，吉川英樹，若杉圭一郎，小尾　繁，濱　克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，三枝博光，竹内真司，岩月輝希，太田久仁雄，瀬尾俊弘（2005）：地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 - 2 つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第 1 段階）における地質環境情報に基づく検討，JNC TN1400 2005-021.

Martin, A., Umeda, K., Conner, C., Weller, J., Zhao, D. and Takahashi, M.（2004）: Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc Japan，J. Geophys. Res.，109，B10208，20p.

丸井敦尚，楠瀬勤一郎，林　武司（2004）: 沿岸域の塩淡境界面と地下水流動，物理探査，第 57 巻，第 4 号，pp.351-357.

丸山　正，遠田晋司，吉見雅行，小俣雅志（2009）: 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層沿いの詳細地形－地震断層・変動地形調査における航空レーザ計測の有効性, 活断層研究, 30 号，pp.1-12.

増田富士雄，藤原　治，酒井哲弥，荒谷　忠（2001）: 房総半島九十九里浜平野の海浜堆積物から求めた過去 6000 年間の相対的海水準変動と地震隆起, 地学雑誌, 第 110 巻, 第 5 号, pp.650-664.

松田時彦，岡田真介，渡辺トキエ（2004）: 横ずれ活断層の累積変位量・断層長・破砕帯幅から見た断層の発達度－中国地方と中部地方の比較，活断層研究，第 24 号，pp.1-12.

松井裕哉，前田信行，吉川和夫（2000) : MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 2001-001.

Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K.（2003）: $^{3}He/^{4}He$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula，Earth Planet. Sci. Lett.，Vol.216，pp.221-230.

松岡清幸，竹内真司，新堀雄一（2007）: 電気伝導度検層を用いた水みちの検出例，物理探査学会学術講演会講演論文集，166，pp.149-152.

松岡俊文(2007) : 地圏環境資源研究における物理探査の役割, 産業総合研究所部門研究成果報告誌, Green Report 2007，pp.13-15.

Matsushi, Y., Wakasa, S., Matsuzaki, H. and Matsukura, Y.（2006）: Long-Term Denudation Rates of Actively Uplifting Hillcrests in the Boso Peninsula, Japan, Estimated from Depth Profiling of in Situ-Produced Cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al，Geomorphology，Vol.82，pp.283-294.

松四雄騎，若狭　幸，松崎浩之，松倉公憲（2007）: 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的応用，地形，第 28 巻，第 2 号，pp.87-107.

松崎 達二，角田地文，石丸恒存，鎌田浩毅，檀原　徹，岩野英樹，吉岡　哲（2004）: 大規模火砕流による基盤岩への熱的影響の検討：フィッション・トラック法による熱履歴解析，応用地質，第 45 巻，第 5 号，pp.238-248.

彌榮英樹，岩月輝希，古江良治，水野　崇（2004）: 超深地層研究所計画（第 1 段階）における地下水の地球化学特性調査，サイクル機構技報，No.23，pp.41-49.

Mitsuhata, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A., and Kusunose, K.（2006）: Various scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain，Geophysics，vol.71，no.6，pp.B167-B173.

Miura, D.（2005）: Effects of changing stress states on the development of caldera-bounding faults: Geological evidence from Kumano caldera，Japan，J. Volcanol. Geotherm. Res.，Vol.144，pp.89-103.

三浦大助，和田穣隆（2007）：西南日本弧前縁の圧縮テクトニクスと中期中新世カルデラ火山，地質学雑誌，第 113 巻，第 7 号，pp.283-295.

三浦大助，土志田潔，幡谷竜太，阿部信太郎（2006）：活火山の火口移動に関する検討－電力重要構造物の立地に関わる基本的留意点－，電力中央研究所報告，N05024，19p.

守田益宗，関口千穂，佐々木俊法，宮城豊彦，須貝俊彦，柳田　誠，古澤　明，藤原　治，守屋俊文（2006）：東海地方の中間温帯における中期更新世以降の植生変遷―内陸小盆地堆積物の花粉分析から―，季刊地理学，第 58 巻，第 3 号，pp.123-139.

守屋俊治，鎮西清高，中嶋　健，壇原　徹（2008）：山形県新庄盆地西縁部の鮮新世古地理の変遷－出羽丘陵の隆起時期と隆起過程，地質学雑誌，第 114 巻，第 8 号，pp.389-404.

村上由記，岩月輝希，長沼　毅（2003）：東濃地域における地下水化学と地下微生物の相互作用，地学雑誌，第 112 巻，第 2 号，pp.277-287.

村岡洋文，阪口圭一，玉生志郎，佐々木宗建，茂野　博，水垣桂子（2007）：日本の熱水系アトラス，産業技術総合研究所地質調査総合センター，110p.

村田泰章，鹿野和彦（1995）：「100 万分の 1 日本地質図第 3 版 CD-ROM 版」から求めた日本列島を構成する岩石の分布面積，地質ニュース，493 号，pp.26-29.

長尾年恭，神谷親征，佐柳敬造（2009）：静岡県・焼津沖（想定糸魚川-静岡構造線延長部）での海上磁気探査，東海大学海洋研究所研究報告，第 30 号，pp.39-44.

中俣公徳，鶴田忠彦，天野健治，西本昌司，吉田英一（2007）：遮水性構造として機能する断層の内部構造と変形・変質作用－瑞浪超深地層研究所に分布する土岐花崗岩での研究事例－，日本応用地質学会平成 19 年度研究発表会講演論文集，pp.207-208.

中村久由，前田憲二郎，鈴木　孝（1957）：紀伊半島中南部地方の温泉群について，地質調査月報，Vol.9，pp.357-370.

中村一明（1983）：日本海東縁新生海溝の可能性，地震研究所彙報，Vol.58，pp711-722.

仲野良紀（1975）：膨張性地山の実体，トンネルと地下，第 6 巻，第 10 号，pp.15-25.

仲野良紀（1995）：膨張性トンネルの吸水膨張説再考－限界状態の土質力学の観点より－，地質と調査，63，pp.37-43.

中尾信典，菊地恒夫，玉生志郎（2008）：熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション，地質調査研究報告，第 59 巻，第 1/2 号，pp.53-64.

中田弘太郎，長谷川琢磨（2010)：地下水年代測定評価技術の開発（その 10）－北海道幌延地域における ^{4}He・^{36}Cl 法適用の試み－，電力中央研究所報告，N09027，21p.

中田　高，今泉俊文編（2002）：「活断層詳細デジタルマップ」付図 200 万分の 1 日本列島活断層図，東京大学出版会.

中山　雅，真田祐幸，杉田　裕（2008）：幌延深地層研究計画; 平成 19 年度調査研究成果報告，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2008-074

成瀬　洋（1990）：日本の第四紀盆地の形成と変遷，大阪経済大学教養部紀要，Vol.8，pp.69-86.

根木健之，梅田浩司，浅森浩一（2007a）：MT 法スペクトル・データの効果的なスタッキング方法，物理探査学会学術講演会論文集，116，pp.176-179.

根木健之，梅田浩司，松尾公一，浅森浩一（2007b）：MT 法データのロバスト・スムージング手法の開発とスタッキングへの応用，物理探査学会学術講演会論文集，Vol.117，pp.195-198.

日本鉄道建設公団青函建設局（1990）：津軽海峡線工事誌（青函トンネル上・下）.

日本応用地質学会応用地形学研究小委員会（2002）：応用地形フォーラム（2），応用地質，第 43 巻，第 5 号，pp.320-327.

Niizato, T., Amano, K., Ota, K., Kunimaru, T., Lanyon, B. and Alexander, W.R.（2010）: Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (3) Conceptualisation of long-term geosphere evolution，Proc. 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), Tsukuba, Japan，3-7 Oct. 2010，ASME.

西坂直樹，大野裕記，浅野彰洋，瀬川爾朗（2006）：四国北西部伊予灘周辺地域におけるヘリコプター搭載型重力測定，電力土木，321，pp.122-126.

Nogami, M., Fujiwara, O. and Sanga, T.（2003）: Landform development simulation of a small drainage basin during the future of 120,000 yrs.，Trans. Jap. Geomorphology Union，Vol.24，pp.105-106.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004）：概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠，－「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料－，NUMO-TR-04-02.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2009a）：処分場の概要，公募関係資料　放射性廃棄物の地層処分事業について　分冊 1.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2009b）：概要調査地区選定上の考慮事項，高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料 2，2009 年 4 月.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2010a）：安全確保構想 2009～安全な地層処分の実現のために～，NUMO-TR-09-05.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2010b）：地層処分技術開発ニーズの整理，～精密調査地区選定に向けて～，NUMO-TR-10-02.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中）：概要調査計画立案の基本的考え方.

尾上博則，笹尾英嗣，三枝博光，小坂　寛（2009）：過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み，日本原子力学会和文論文誌，Vol.8, No.1, pp.40-53.

緒方正虔，本荘静光（1981）：電力施設の耐震設計における断層活動性の評価，応用地質，第 22 巻，pp.67-87.

大口健志，吉田武義，大和和良（1989）：東北本州弧における新生代火山活動域の変遷，地質学論集，第 32 号，pp.431-455.

大平寛人（2005）：進化したフィッション・トラック熱履歴解析―岩石がたどった温度–時間パスのモデリングと最近の成果―，地球科学，第 59 巻，第 4 号，pp.267-227.

大石　朗，松村容一，吉田　裕，橋詰良吉（1995）：流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動/の検討，温泉科学，Vol.45，pp.63-75.

大石雅之（2010）：斜長石斑晶の屈折率を用いたテフラ対比の検討，第四紀研究，第 49 巻，第 1 号，pp.35-42.

Ohmori, H.（1985）: A comparison between the Davison scheme and landform development by concurrent tectonics and denudation，Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo，Vol.17，pp.19-28.

Ohmori, H.（1987）: Mean Quaternary uplift rates in the central Japanese mountains estimated by means of geomorphological analysis，Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo，Vol.19，pp.29-36.

岡田知己，長谷川昭（2005）：DD トモグラフィによる震源断層とアスペリティのイメージング―1995 年兵庫県南部地震（M7.3）・2000 年鳥取県西部地震（M7.3）・2003 年宮城県北部地震（M6.4）

の場合―，地震予知連絡会会報，73，pp.624-628.

岡田哲実（2005）：高温環境下における堆積軟岩の力学特性（その１）－三軸圧縮試験による温度依存性の把握－，電力中央研究所報告，N04026，26p.

岡田哲実（2006）：高温環境下における堆積軟岩の力学特性（その２）－一軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価－，電力中央研究所報告，N05057，20p.

岡村行信（2000）：音波探査プロファイルに基づいた海底活断層の認定―fault related fold, growth strata 及び growth triangle の適用―地質調査所月報，51，2/3，pp.59-77.

岡村行信，石山達也（2005）：2004 年新潟県中越地震震源域での地質構造を用いた伏在断層モデルの作成，活断層・古地震研究報告，第 5 号，pp.17-28.

Okino, K., Kasuga, S. and Ohara, Y.（1998）: A New Scenario of the Parece Vela Basin Genesis，Marine Geophysical Researches，20，1，pp.21-40.

Okubo, S., Suyama, Y., Bowden, A., Yoshimura, K., Toida, M., and Metcalfe, R.（2004）: Uncertainty assessment of geological modeling using Evidential Support Logic，Butsuri-Tansa，Vol.57，No.4，pp.403-409.

大熊茂雄，駒澤正夫，押田淳(2010)：海底重力計の製作と実海域実験，物理探査学会第 123 回学術講演会論文集，pp.127-130

大野亮一，山科真一，山崎孝成，小山倫史，江坂文寿，笠井史宏（2010）：地震時大規模地すべりの発生機構－荒砥沢地すべりを例として－，日本地すべり学会誌，第 47 巻，第 2 号，pp.8-14.

大里和己，山岡昌信，中嶋　智，吉村公孝，岡崎幸司，茂田直孝，藪内　聡，山中義彰（2009）：幌延地域の沿岸域電磁法探査（その 2）－調査結果とその解釈－，物理探査学会第 121 回学術講演会論文集，pp.79-82.

大澤英昭，太田久仁雄，濱　克宏，澤田　淳，竹内真司，天野健治，三枝博光，松岡稔幸，宮本哲雄，豊田岳司，岩月輝希，前川恵輔，國丸貴紀，新里忠史，浅森浩一，平賀正人，山中義彰，重廣道子，島田顕臣，阿部寛信，梅木博之（2008）：「地質環境総合評価技術高度化開発; 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書（受託研究），日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2008-085-1.

大澤健二，光畑裕司，上田　匠，内田利弘，佐波瑞恵，佐藤龍也（2010）：浅海電磁探査システムの改良・動作試験と幌延沿岸域における予備実験，物理探査学会第 122 回学術講演会論文集，pp.271-274.

遅沢壮一（2009）：荒砥沢ダムにおける 2008 年岩手・宮城内陸地震（M6.9）の地表地震断層，後期中新世カルデラ縁正断層が再動した逆断層，地球科学，第 63 巻，第 5 号，pp.321-326.

Ota, K., Amano, K. and Ando, T.（1999）: Brief overview of in situ contaminant retardation in a fractured crystalline rock at the Kamaishi In Situ Test Site，Proc. International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments, Kamaishi, Japan, 24-25 Aug. 1998，JNC TN7400 99-007，pp.67-76.

Ota, K., Möri, A., Alexander, W.R., Frieg, B. and Schild, M.（2003）: Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix calculations，J. Contam. Hydrol.，Vol.61，pp.131-145.

太田久仁雄，佐藤稔紀，竹内真司，岩月輝希，天野健治，三枝博光，松岡稔幸，尾上博則（2005）：東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7400 2005-023.

太田久仁雄，安部寛信，山口雄大，國丸貴紀，石井英一，操上広志，戸村豪治，柴野一則，濱　克宏，松井裕哉，新里忠史，高橋一晴，丹生屋純夫，大原英史，浅森浩一，森岡宏之，舟木泰智，茂田直孝，福島龍朗（2007）：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第

1 段階）研究成果報告書，分冊「深地層の科学的研究」，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-044.

太田久仁雄，茂田直孝，丸井敦尚，内田利弘，木方建造，長谷川琢磨（2008）：沿岸プロジェクト（１）全体計画，日本原子力学会 2008 年秋の大会，pp.719.

Ota, K., Amano, K., Niizato, T., Alexander, W.R. and Yamanaka, Y.（2010）：Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (1) Strategic overview，Proc. 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management(ICEM2010)，Tsukuba, Japan, 3-7 Oct. 2010，ASME.

太田陽子（1971）：日本海沿岸地域の海成段丘と第四紀地殻変動－その 1.朝日山地西縁地域－，横浜国立大学理科紀要　第二類　生物学・地学，18，pp.61-72.

太田陽子, 松田時彦, 平川一臣（1976）：能登半島の活断層, 第四紀研究, 第 15 巻, 第 3 号, pp.109-128.

大津宏康，堀田洋平，三枝博光，井尻裕二，尾上博則（2008）：不連続性岩盤における突発湧水リスク評価手法の事後評価への適用，土木学会論文集 F，Vol.64，No.4，pp.353-368.

Otsuki, K.（1978）：On the relationship between the width of shear zone and the displacement along fault, Journal of the geological Society of Japan，Vol.84，No.11，pp.661-669.

三枝博光，瀬野康弘，中間茂雄，鶴田忠彦，岩月輝希，天野健治，竹内竜史，松岡稔幸，尾上博則，水野　崇，大山卓也，濱　克宏，佐藤稔紀，久慈雅栄，黒田英高，仙波　毅，内田雅大，杉原弘造，坂巻昌工（2007）：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第１段階）研究成果報告書，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-043.

佐伯龍雄，稲盛隆穂，高野　修（2006）：熊野海盆北縁部における三次元地震探査，物理探査，第 59 巻，第 3 号，pp.249-259.

Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T.（2000）：Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan，Pure Appl. Geophys.，Vol.157，pp.2303-2322.

鷺谷　威（2009）：GPS 観測に基づく日本列島の地震テクトニクス，地震 2，第 61 巻，特集号，pp.S479-S487.

齋藤宏則，大江俊昭，新屋敷直木，八木原晋，海野裕哉，戸井田克，田中真弓，佐藤光吉，鈴木健彦，長井　敏，西垣　誠（2006）：超音波反射エコーを用いた地下水 3 次元流向・流速測定のための安定浮遊固体レーサの開発，原子力バックエンド研究，Vol.13，No.1，pp.23-30.

坂川幸洋，梅田浩司，鈴木元孝，梶原竜哉，内田洋平（2004）：日本の坑井温度プロファイルデータベース，地震 2，第 57 巻，第 1 号，pp.63-67.

坂川幸洋，梅田浩司，浅森浩一（2005）：熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布と雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション，原子力バックエンド研究，Vol.11，No.2，pp.157-166.

阪口圭一（2008）：温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討, 地質調査研究報告, 第 59 巻，第 1/2 号，pp.65-69.

坂口清敏，吉田宣生，南　将行，原　雅人，鈴木康正，松木浩二（2006）：深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発と室内実証試験，資源と素材，Vol.122，No.6,7，pp.338-344.

櫻井春輔，清水則一，芥川真一，吉田秀典，佐藤稔紀，山地宏志（2006）：国内超大深度立坑工事の地山崩壊形態から見た崩壊発生機構に関する考察, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp.662-673.

Salah, M.K. and Zhao, D.（2003）：3-D seismic structure of Kii Peninsula in southwest Japan: evidence for slab dehydration in the forearc，Tectonophys.，Vol.364，pp.191-213.

真田祐幸，丹生屋純夫，松井裕哉，藤井義明（2009）：幌延地域に分布する珪質岩に対する幾つかの岩盤応力測定法の適用性と推定された応力状態，Journal of MMIJ，Vol.125，No.10/11，pp.530-539.

三箇智二，安江健一（2008）：河床縦断形のシミュレーション，地形，第29巻，第1号，pp.27-49.

産総研（産業技術総合研究所）深部地質環境研究センター編（2007）：概要調査の調査・評価項目に関する技術資料－長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方－，地質調査総合センター研究資料集，no.459.

産総研（産業技術総合研究所）（2007）：平成18年度地層処分技術調査等委託費，地層処分共通技術調査，塩淡境界面形状把握調査　成果報告書.

産総研（産業技術総合研究所）（2008）：平成19年度地層処分技術調査等委託費，地層処分共通技術調査，沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発　成果報告書.

産総研（産業技術総合研究所）（2009）活断層データベース，http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/.

産総研（産業技術総合研究所）（2009）：平成20年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査（放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質情報データの整備）平成20年度事業報告書.

産総研（産業技術総合研究所）（2010）：日本の第四紀火山, http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/.

産総研（産業技術総合研究所）（2010）：平成21年度地層処分技術調査等委託費，地層処分共通技術調査，沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発　成果報告書.

佐々木寿，向山　栄（2009）：地形判読を支援する新しい地形表現方法の開発とその利用－航空機レーザスキャナDEMを用いたカラー標高傾斜図（ELSAMAP），応用地質，第49巻，第6号，pp.318-330.

佐々木宗建（2008）：地下水水質の形成過程の基礎的数値解析，地質調査研究報告，第59巻，第1/2号，pp.117-122.

Sasaki, T., Morimoto, T., Ikeda, H., Shiraishi, T. and Sugi, S.（2009）：Groundwater flow prediction method in consideration of long-term topographic changes of uplift and erosion, In Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, OECD/NEA No.6362, pp.277-288.

佐々木泰，浜田憲彦，藤原八笛，鶴旨　純，中東秀樹（2008）：地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析，物理探査，第61巻，第3号，pp.243-249.

佐々木俊法，須貝俊彦，柳田　誠，守田益宗，古澤　明，藤原　治，守屋俊文，中川　毅，宮城豊彦（2006）：東濃地方内陸小盆地埋積物の分析による過去30万年間の古気候変動，第四紀研究，第45巻，第4号，pp.275-286.

佐竹　洋, 村田正信（1998）: 地下水から見る断層周辺の水の動き, 月刊地球, Vol.20, No.3, pp.160-164.

佐藤比呂志（1996）：日本列島のインバージョンテクトニクス，活断層研究，第15号，pp.128～132.

佐藤　努，酒井隆太郎，大澤英昭，古屋和夫，児玉敏雄（1999）：淡路島で地震後異常に湧出した地下水の酸素・水素同位体比，日本水文科学会誌，29，pp.13-24.

澤田昌孝，上田圭一（2009）：横ずれ断層の進展に伴う地盤の破壊領域評価のための数値シミュレーション，電力中央研究所報告，N08028，19p.

澤田昌孝，新　孝一，秦野輝儀，津田延裕，三和　公，土　宏之（2009）：概要調査段階の処分空洞建設性評価－ボーリングコアを利用した評点式岩盤評価法－, 第38回岩盤力学シンポジウム,

pp.347-352.

澤田昌孝，新　孝一，猪原芳樹（印刷中）：概要調査における坑道建設評価のための岩盤評価法（その 1）－概要調査データに基づく岩盤物性，施工性の評価法－，電力中央研究所報告，

Schapper, S., Jefferson, R. and Calvert, A.（2009）: Anisotropic velocities and offset vector tile prestack-migration processing of the Durham Ranch 3D, Northwest Colorado, The Leading Edge, Vol.28, pp.1352-1361.

Segawa J., Komazawa, M., Kumar, K., Nakayama, E., Joseph, E. J., Kusumoto, S., Onodera, K. and Kuroishi, Y.（2005）: Examination of consistency of marine gravity with land gravity in and around the Japanese Islands using a helicopter-borne gravimeter, Earth Planet Space, Vol.57, pp.243-252.

関　陽児，菱田省一，小西千里，内藤一樹，渡部芳夫（2005）：高感度ヒートパルス式孔内流速計の現場適用例：みずみちの捕捉と低透水性岩盤への浸透流の検出，応用地質，第 46 巻，第 4 号，pp.190-197.

志田原巧，秦野輝儀，大塚正幸，荒井　融，畑元浩樹，土　宏之（2004）：事前検討段階での地下施設の施工難易度推定に関する予備的検討，平成 16 年度研究発表会講演論文集，日本応用地質学会.

茂野　博（2008）：地熱井変質データベースの構築と事例 6 地域のモデル化による多様な変質環境の検討，地質調査研究報告，第 59 巻，第 1/2 号，pp.71-107.

Shimada, K., Tanaka, H. and Saito, T.（2008）: Rapid and Simple Measurement of H2 Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments, Resource Geology, Vol. 58, No.2, pp.196-202.

Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S. and Sasaki, S.（1996）: Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine, Eng. Geol., Vol. 43, pp.107-118.

下山正一，木下裕子，宮原百々，田中ゆか里，市原季彦，竹村恵二（1999）：旧汀線高度からみた九州の後期更新世地殻変動様式，地質学雑誌，第 105 巻，第 5 号，pp. 311-331.

新　孝一，澤田昌孝，猪原芳樹，志田原巧（印刷中）：概要調査における坑道建設評価のための岩盤評価法（その 2）－難工事事象遭遇可能性の評価法－，電力中央研究所報告，

新谷俊一，田中和広（2005）：新潟県十日町市松代に分布する泥火山の地質，自然災害科学，Vol.24-1，pp.49-58.

新谷俊一，田中和広（2009）：新潟県十日町市における泥火山噴出物の起源，地学雑誌，第 118 巻，第 3 号，pp.340-349.

Shiomi, K., Sato, H., Obara, K. and Ohtake, M.（2004）: Configuration of subducting Philippine Sea plate beneath southwest Japan revealed from receiver function analysis based on the multivariate autoregressive model, J. Geophys. Res., Vol.109, B04308, 13p.

汐見勝彦，小原一成，針生義勝，松村　稔（2009）：防災科研 Hi-net の構築とその成果，地震 2，第 61 巻，特集号，pp.S1-S7.

白井正明，阿部信太郎（2001）：浅海成堆積サイクルの詳細な解析による地殻変動復元手法の検討，電力中央研究所報告，U01016，20p.

SKB（2000）: Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository, Svensk Kärnbränslehantering AB, TR-00-20.

SKB（2009）: Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2008, Svensk Kärnbränslehantering AB, TR-09-10.

Stirling, M.W., McVerry, G.H. and Berryman, K.R.（2002）: A new seismic hazard model for New Zealand,

Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 92, pp.1878-1903.

末永　弘，Schreck, M.，宮川公雄，中川加明一郎（2000）：光ファイバ温度検層による水みち推定への適用性検討，電力中央研究所報告，U99068，20p.

末岡　茂，田上高広，堤　浩之，長谷部徳子，田村明弘，荒井章司，山田隆二，松田達生，小村健太朗 (2010)：フィッション・トラック熱年代に基づいた六甲地域の冷却・削剥史，地学雑誌，第 119 巻，第 1 号，pp.84-101.

杉村　新（1958）：“七島－東北日本－千島”活動帯，地球科学，第 37 巻，pp.34-39.

須山泰宏，田辺博三，江藤次郎，吉村公孝(2010)：閉鎖時の意志決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討，原子力バックエンド研究（印刷中）

鈴木浩一，徳安真吾，田中和広（2009）：電磁探査法および地形・地質調査による新潟県十日町市泥火山の深部地下構造，地学雑誌，第 118 巻，第 3 号，pp.373-389.

鈴木隆介（1969）：日本における成層火山体の侵食速度，火山，第 14 巻，第 3 号，pp.133-147.

鈴木康弘，渡辺満久，中田　高，小岩直人，杉戸信彦，熊原康博，廣内大助，澤　祥，中村優太，丸島直史，島崎邦彦（2008）：2008 年岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義－一関厳美町付近の調査速報－，活断層研究，第 29 号，pp.25-34.

田近　淳，中迎　誠，石丸　聡，原口　強，中田　賢，志村一夫（2009）：2003 年十勝沖地震に伴う新冠泥火山の変動の記録，北海道立地質研究所報告，第 80 号，pp.147-156.

田近　淳，岡村俊邦（2010）：大規模地すべり地形の発達，積丹半島沼前地すべりの例，日本地すべり学会誌，第 47 巻，第 2 号，pp.15-21.

多田　堯, 鷺谷　威, 宮崎真一（1997）:GPS でみた変動する日本列島, 科学, Vol.67, No.12, pp.917-924.

田上高広，長谷部 徳子，蒲原 秀典，竹村恵二（1998）：500m コアのフィッショントラック熱年代学から見い出された野島断層近傍の温度異常 （総特集 断層解剖計画），地球，号外，Vol.21，pp.175-179.

Tagami, T. and Murakami, M.（2007）: Probing fault zone heterogeneity on the Nojima fault: Constraints from zircon fission-track analysis of borehole samples, Tectonophysics, 443, pp.139-152.

田上高広，渡辺裕美子，板谷徹丸（2010）：地震断層の年代学--最近の新展開と今後の展望，月刊地球，Vol.32，No.1，pp.3-9.

田力正好，池田安隆（2005）：段丘面の高度分布からみた東北日本弧中部の地殻変動と山地・盆地の形成，第四紀研究，第 44 巻，第 4 号，pp.229-245.

田力正好，池田安隆，野原　壮（2009）：河成段丘の高度分布から推定された，岩手・宮城内陸地震の震源断層，地震 2，第 62 巻，第 1 号，pp.1-12.

高田圭太，中田　高，野原　壮，原口　強，池田安隆，伊藤　潔，今泉俊文，大槻憲四郎，鷺谷　威，堤　浩之（2003）：震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討－中国地方を事例として－，活断層研究，23，pp.77-91.

高木俊男，柳田　誠，藤原　治，小澤昭男（2000）：河岸段丘から推定した河床高度変化の歴史，地学雑誌，第 109 巻，第 3 号，pp.366-382.

高橋一晴，新里忠史，安江健一，石井英一（2005）：北海道北部幌延町における地球化学的特徴を用いた侵食量の推定，核燃料サイクル開発機構（研究報告），JNC TN5400 2005-011.

高橋　浩，進士正人，中川浩二（2004）：事例に基づく押出し性地山におけるトンネルの設計・施工法の提案，土木学会論文集，777，VI-65，pp.83-96.

高橋正明，森川徳敏，戸丸　仁，高橋　浩，大和田道子，竹野直人，風早康平（2006）：遠別旭温泉・歌越別泥火山について，地質ニュース，第627号，pp.48-53.

高橋正樹（2000）：島弧・マグマ・テクトニクス，東京大学出版会，322p.

高村　尚，奥津一夫，須賀原慶久，虎田真一郎，大内　仁（2006）：地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討，原子力バックエンド研究，Vol.12，No.1/2，pp.21-29.

高野　修，荒戸裕之，中西健史，松岡俊文，佐伯龍男（2006）：三次元反射法地震探査技術の進展がもたらす地質学，とくに堆積学分野へのインパクト，物理探査，第59巻，第3号，pp225-231.

竹ヶ原竜大，虎田真一郎，朝野英一，大内　仁，坪谷隆夫（2004）：地層処分にかかわるモニタリングの研究－位置付け及び技術的可能性－，原環センター技術報告書，RWMC-TRJ-04003.

竹内真司，下茂道人，城まゆみ，Chin-Fu Tsang（2004）：電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価，第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.451-456.

竹内真司，中野勝志，平田洋一，進士喜英，西垣　誠（2007）：深層岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法の開発と適用，地下水学会誌，第49巻，第1号，pp.17-32.

Takeuchi, S., Amano, K., Takeuchi, R. and Saegusa, H.（2008）: Fluid electric conductivity logging: Useful application for characterization of water-conducting features，36th IAH Congress 2008，Toyama，Japan.

竹内竜史，平田洋一（2003）：溶存ガスを含む地下水調査手法に関する一考察，第38回地盤工学研究発表会 講演論文集，pp.1259-1260.

玉生志郎（2008）：地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分け―東北地方と中国・四国地方の例―地質調査研究報告，第59巻，第1/2号，pp.45-52.

玉生志郎，阪口圭一，佐藤龍也，加藤雅士（2008）：地質・地球物理データの重合処理による熱・熱水異常地域の抽出―東北地方と中国・四国地方の例―，地質調査研究報告，第59巻，第1/2号，pp.7-26.

田村糸子，山崎晴雄（2004）：北陸層群のテフクロノロジーーテフラ層序および広域テフラ層との対比に基づく北陸層群の堆積年代－地質学雑誌，第110巻，第7号，pp.417-436.

Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y. and Shukuno, H.（2002）: Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones，Earth Planet. Sci. Lett.，Vol.197，pp.105-116.

田中明子，山野　誠，矢野雄策，笹田政克（2004）：日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース，数値地質図DGM P-5，産業技術総合研究所地質調査総合センター.

田中秀実，坂　幸恭，安部武史，小浜俊介，板谷徹丸（1992）：赤石裂線の断層ガウジとその K-Ar 年代，地質学雑誌，第98巻，第1号，pp.39-48.

田中和広（2004）地質環境の将来予測の考え方と現状，月刊地球，Vol.26，No.6，pp.344-348.

田中和広，千木良雅弘（1997）：我が国の地質環境の長期変動特性評価（その1）－将来予測の基本的考え方と課題－，電力中央研究所報告，研究報告：U96027.

巽　好幸（1995）：沈み込み帯のマグマ学，東京大学出版会，186p.

栃木善克，甲川憲隆，向井　悟，神徳　敬，笹本　広，柴田雅博，油井三和（2007）：花崗岩質岩石のマトリクスにおける拡散深さに関する研究，JAEA-Research 2007-024，27p.

遠田晋次，丸山　正，吉見雅行，金田平太郎，栗田泰夫，吉岡敏和，安藤亮輔（2010）：2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層－震源過程および活断層評価への示唆－地震2，第62巻，pp.153-178.

戸井田克，田中真弓，杉本映湖，菱谷智幸，西垣　誠，大江俊昭，佐藤光吉，小舞正文（2007a）：孔内 3 次元流向・流速測定における計測区間内の地下水流動状況評価について，地下水学会誌，第 49 巻，第 4 号，pp.309-326.

戸井田克，田中真弓，長井　敏，鈴木健彦，佐藤光吉，小舞正文，大江俊昭，西垣　誠（2007b）：超音波反射エコーを利用した孔内地下水 3 次元流向･流速計測手法について，地下水学会誌，第 49 巻，第 4 号，pp.291-307.

徳山英一，本座英一，木村政昭，倉本真一，芦寿一郎，岡村行信，荒戸裕之，伊藤康人，徐　垣，日野亮太，野原　壮，阿部寛信，坂井眞一，向山建二郎（2001）：日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史，海洋調査技術，第 13 巻，第 1 号，pp.27-53.

土志田潔，三浦大助，幡谷竜太（2006）：マグマの水平移動に対する評価法の提案－隠岐島前火山の火道分布に基づく化学組成の影響の検討－，電力中央研究所報告，N05026，19p.

鳥越祐司，幡谷竜太，柳田　誠，佐藤　賢，佐々木俊法（2002）：氷期（最大海退期）における海水面低下による影響を考慮した河川の下刻作用による最大侵食ポテンシャルの履歴，日本地質学会第 109 年学術大会講演要旨，日本地質学会，P-266，p.338.

宇田進一，日吉　直，皆川　潤，林　愛明（1995）：兵庫県南部地震，地質・地盤と災害-報告書，日本応用地質学会阪神・淡路大震災調査委員会編，4.2　淡路島北部地域，pp.60-108.

上田圭一（2009）：横ずれ断層の変位に伴う岩盤の 3 次元変形過程－ヘリカル X 線 CT を用いた断層変位実験による検討－，電力中央研究所報告，N08039，22p.

上田圭一（印刷中）：模型実験による活褶曲－逆断層帯の発達過程の検討，電力中央研究所報告，

上田圭一，井上大栄，宮腰勝義，宮川公雄，三浦大助（2003）：長大な活断層系における活動性調査法の高精度化－現地調査・模型実験による断層系の発達過程・断層変位地形の形成過程に関する検討－，電力中央研究所報告，U03022，20p.

上田圭一，井上大榮，鳥越祐司（2005）：2004 年新潟県中越地震震源域における上部新生界の変形機構－模型実験による基礎的検討－，地震 2，第 58 巻，第 3 号，pp.309-327.

上田 匠，内田利弘，光畑裕司（2010）：沿岸域 MT 法における 2 次元解析の検討と幌延沿岸域データへの適用，物理探査学会第 122 回学術講演会論文集，pp. 275-278.

上原大二郎，菊池　晃，田中篤史，勝田　充，永川　誠，大熊　勝，渡辺京志，光畑裕司（2007）：九十九里浜沿岸地域における陸上－海底横断電気探査法の適用，物理探査，第 60 巻，第 6 号，pp.489-499.

Umeda, K.（2009）: An Integrated approach for detecting latent magmatic activity beneath non-volcanic regions: An example from the crystalline Iide Mountains Northeast Japan, Stability and Buffering Capacity of Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rocks, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007，pp.289-301.

梅田浩司，古澤　明（2004）：RIPL 法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定，月刊地球，Vol.26，No.6，pp.395-400.

Umeda, K. and Ninomiya, A.（2009）: Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, Geochem. Geophys. Geosyst.，Vol.10，10Q08010，doi:10.1029/2009GC002501.

Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T.（2006a）: Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high ^{3}He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan，J. Volcanol. Geotherm. Res.，Vol.149，pp.47-61.

Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Ogawa, Y.（2006b）: Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a non-volcanic region, northeast Japan，Geochem.

Geophys. Geosyst.， 7Q08005，doi:10.1029/2006GC001247.

Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S. and Oikawa, T.（2007a）: Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan，J. Geophys. Res.， Vol.112，B05207，doi:10.1029/2006JB004590.

Umeda, K., Hanamuro, T., Yamada, K., Negishi, Y., Iwano, H. and Danhara, T.（2007b）: Thermochronology of non-volcanic hydrothermal activity in the Kii Peninsula, Southwest Japan: evidence from fission track dating and helium isotopes in paleo-hydrothermal fluids, Radiation Measurements, 42, pp.1647-1654, doi:10.1016/j.radmeas.2007.09.013.

Umeda, K., Sakagawa, Y., Ninomiya, A. and Asamori, K.（2007c）: Relationship between helium isotopes and heat flux from hot springs in a non-volcanic region, Kii Peninsula, southwest Japan，Geophys. Res. Lett., Vol.34，L05310，doi:10.1029/2006GL028975.

Umeda, K., McCrank, G.F. and Ninomiya, A.（2008）: High ^{3}He emanations from the source regions of recent large earthquakes, central Japan, Geochem. Geophys. Geosyst., Vol.9 , Q12003 , doi:10.1029/2008GC002272.

Umeda, K., Ninomiya, J. and Negi, Y.（2009）: Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, Central Japan，J. Geophys. Res.， Vol.114，B01202.

梅田浩司，安江健一，浅森浩一（2010）: 高レベル放射性廃棄物の地層処分における断層研究の現状と今後の展望，月刊地球，Vol.32，No.1，pp.52-63.

宇根　寛，佐藤　浩，矢来博司，飛田幹男（2008）: SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析，日本地すべり学会誌，第 45 巻，第 2 号，pp.125-131.

宇都浩三（1995）: 火山と年代測定 : K-Ar，40Ar/39Ar 年代測定の現状と将来，火山，第 40 巻，特別号，pp.S27-S46.

宇津徳治（1984）: 地震学　第 2 版，共立出版.

若狭　幸，松崎浩之，松倉公憲（2004）: 原位置宇宙線生成核種年代測定法ー侵食地形変化速度の解明への適用，地形，第 25 巻，第 3 号，pp.247-265.

若狭　幸，森口有里，松崎浩之，松倉公憲（2008）: 宇宙線核種濃度から推定される木曽川上流寝覚ノ床における下刻速度，季刊地理学，Vol.60，No.2，pp.69-76.

渡辺満久，鈴木康弘（1999）: 活断層地形判読，古今書院，184p.

Xia, S., Zhao, D., Qie, X., Nakajima, J., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A.（2007）: Mapping the crustal structure under active volcanoes in central Tohoku, Japan using P and PmP data，Geophys, Res. Lett.， Vol.34, No.10，L10309,doi:10.1029/2007GL030026,

Yamada, K. and Tagami, T.（2008）: Postcollisional exhumation history of the Tanzawa Tonalite Complex, inferred from (U-Th) /He thermochronology and fission track analysis，J. Geophys. Res.， Vol.113, B03402，doi:10.1029/2007JB005368.

山田泰広，松岡俊文（2004）: 地質構造モデリングによる少断層の形態と断層再活動ポテンシャルの推定，物理探査学会第 110 回学術講演会論文集，pp.117-120.

山本真哉，幡谷竜太，濱田崇臣（2008）: 数値標高モデルを用いた段丘面形状の定量化と段丘対比への応用，電力中央研究所報告，N07017，25p.

山崎晴雄（2006）: 関東平野の地震地質ー南関東の基盤断層と活断層の関係ー，月刊地球，Vol.28，No.1，pp8.-16.

柳沢幸夫，小林巖雄，竹内圭史，立石　雅昭，茅原一也，加藤　碵一（1986)）：小千谷地域の地質，地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅），177p.

矢野雄策，田中明子，高橋正明，大久保泰邦，笹田政克，梅田浩司，中司　昇（1999）：日本列島地温勾配図，地質調査所.

Yilmaz, O.（2001）: Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data，Society of Exploration geophysicists books Chapter 5.

吉田英一，佐藤治夫，仙波　毅（2002）：マトリクス拡散による物質移動の遅延効果の評価手法とその検討，応用地質，第 43 巻，第 1 号，pp.24-34.

吉田英一，大嶋章浩，吉村久美子，長友晃夫，西本昌司（2009）：断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴ー阿寺断層における'ダメージゾーン'解析の試みー，応用地質，第 50 巻，第 1 号，pp.16-28.

Yoshida，H.，Takeuchi，M.，Metcalfe，R.（2005）: Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orgenic belt Japan，Engineering Geology，Vol.78，pp.275-284，doi:10.1016/j.enggeo.2005.01.002

Yoshida, T. and Suzuki, M.（2006）:Migration of strontium and europium in quartz sand column in the presence of humic acid: Effect of ionic strength，J. Radional. Nucl. Chem.，Vol.270，No.2，pp.363-368.

吉田武義，大口健志，阿部智彦（1995）：新生代東北本州弧の地殻・マントル構造とマグマ起源物質の変遷，地質学論集，第 44 号，pp.263-308.

Yoshikawa，T.（1974）: Denudation and Tectonic Movement in Contemporary Japan，Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo，Vol.6，pp.1-14.

吉村公孝，大久保秀一，山根一修（2006a）：海底電磁探査による伏在断層や地下水理情報の取得可能性について，地学雑誌，第 115 巻，第 3 号，pp.400-415.

吉村公孝，坂下　晋，大久保秀一，山根一修，瀬谷正巳（2006b）：地層処分における電磁法解析技術の開発（その 6）ー北海道幌延町における AMT 法 3 次元調査ー物理探査学会第 115 回学術講演会論文集，pp.209-212.

吉村公孝，岡崎幸司，大里和己，大澤健二，山岡昌信，中嶋　智，茂田直孝，藪内　聡，山中義彰（2009）：幌延地域の沿岸域電磁法調査（その 1）-調査の概要-，物理探査学会第 121 回学術講演会論文集，pp.75-78.

吉村公孝，若松尚則，安藤賢一，橋本修爾，茂田直孝，藪内　聡（2010）：沿岸域の水理地質構造に着目した塩淡境界に関する地下水流動解析，日本原子力学会「2010 年春の年会」予稿集，pp.411.

吉川周作，吉田史郎，須川英司（1991）：東海層群の火山灰層とその対比，地球科学，第 45 巻，6 号，pp.453-467.

吉川周作，水野清秀，加藤茂弘，里口保文，宮川ちひろ，衣笠善博，三田村宗樹，中川康一（2000）：神戸市東灘 1,700m ボーリングコアの火山灰層序，第四紀研究，第 39 巻，第 6 号，pp.505-520.

吉山　昭，柳田　誠（1995）：河成地形面の比高分布からみた地殻変動，地学雑誌，第 104 巻，第 6 号，pp.809-826.

全国地質調査業協会連合会編（2009）：改訂 地質調査要領ー効率的な地質調査を実施するために，経済調査会，386p.

Zhang, H. and Thurber, C.（2003）: Double - Difference Tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California，Bull. Seism. Soc. Am，Vol.93，pp.1875-1889.

Zhang, H. and Thurber, C. (2006) : Development and applications of double - difference seismic tomography, Pure Appl. Geophys., Vol.163, pp.373-403.

第 6 章

処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術

第6章　目次

第6章 処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術 6-1
6.1 地層処分事業における設計の基本方針 6-1
6.1.1 段階的な設計の進め方と技術・知識の進展と成果の反映 6-2
6.1.2 不確実性への対処 6-3
6.1.3 品質保証の考え方 6-4
6.2 処分場の安全機能と技術要件 6-6
6.2.1 安全機能と技術要件の体系的な整備の枠組み 6-6
6.2.2 閉鎖後長期の安全確保の要件 6-7
6.2.3 事業期間中の安全確保の要件 6-21
6.2.4 事業の進展に伴う安全機能と技術要件の更新 6-28
6.3 処分場の設計 6-29
6.3.1 基本的な設計の流れ 6-29
6.3.2 人工バリアの設計 6-32
6.3.3 地下施設の設計 6-35
6.3.4 地上施設の設計 6-46
6.3.5 高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合の留意点 6-48
6.4 処分場の建設・操業・閉鎖 6-51
6.4.1 処分場の建設 6-51
6.4.2 処分場の操業 6-56
6.4.3 処分場の閉鎖 6-62
6.4.4 事業期間中の安全確保 6-64
6.4.5 閉鎖後長期と事業期間中の安全性両立の観点からの分析 6-69
6.5 多様な地質環境への対応 6-72
6.5.1 沿岸域への対応 6-72
6.5.2 想定される地質環境特性へ対応するための処分概念・技術オプション 6-79
6.6 工学的対策を支える技術の整備 6-99
6.6.1 工学的対策を支える技術の概要 6-99
6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況 6-101
6.6.3 地層処分施設の耐震性評価 6-119
6.6.4 建設・操業・閉鎖技術 6-122
6.6.5 工学的対策を支える技術に対する今後の課題 6-138
6.7 まとめ 6-140

第6章　処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術

本章では，三つの安全確保策のうち，「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」を実施するために必要な技術とその技術が着実に整備されていることを示すとともに，「事業期間中の安全確保」の具体的な方法などを示す。

放射性廃棄物が長期にわたり人間とその生活環境に有意な影響を及ぼさないようにするという地層処分事業の目標を達成するため，「適切な工学的対策」を，「適切なサイト選定と確認」および「地層処分システムの長期安全性の評価」と連携して実施する。まず，第5章で示されている「適切なサイト選定と確認」に係る技術により，応募区域およびその周辺において段階的に地質環境などの調査を行い，地層処分システムに与える影響が大きいと考えられる自然現象の著しい影響として火山，活断層などを回避できるように適切なサイト選定を行う。選定したサイトにおいて調査により取得する地質環境の情報に基づき，地質環境に適合するように「適切な工学的対策」として人工バリアを含む処分場を設計する。処分場の設計では，地層処分の閉鎖後長期にわたる受動的安全性が確保できるようにするために，好ましい条件を有する候補母岩の選定や長期安全性評価とのやりとりを踏まえて安全で合理的な多重バリアシステムを設計するとともに，建設・操業・閉鎖の各作業が安全かつ効率的に実施できるようにする。このように設計された処分場に対して，第7章で示されている「地層処分システムの長期安全性の評価」に係る技術により，放射性廃棄物が長期にわたり人間とその生活環境に有意な影響を及ぼさないことを確認する。これら三つの安全確保策の連携のもと，NUMOは，地質環境の情報が段階的に詳細化される過程で，処分場の設計を繰り返し実施し，設計方針が今後整備される安全審査指針に適合していることを事業許可申請時に示す。国から「事業許可」および「設計および工事の方法の認可」を受けると，国の検査を受検しつつ，「適切な工学的対策」としての建設・操業を，認可された設計仕様どおりに実施する。処分場の閉鎖は，閉鎖措置計画の認可申請により，処分場が閉鎖後長期の受動的安全性を確保できることを操業段階終了までに取得した情報に基づき示すとともに，適切な閉鎖措置の計画を示した上で実施する。

「閉鎖後長期の安全」と「事業期間中の安全」が確保できる処分場を設計するにあたり，6.1では処分場の設計に対するNUMOの基本方針を説明し，6.2では処分場を構成する各構成要素に求める安全機能と技術要件を体系的に整理して示す。6.3では処分場の設計の基本的な流れを説明し，6.4では建設・操業・閉鎖に適用する技術と，それらの安全性や効率性を向上させるためのNUMOの取り組みを示す。6.5では，多様な地質環境へ対応するための設計上の特徴や留意点，坑道内への湧水や高湿度条件などの実際に想定される地下の環境条件を踏まえた現実的な処分概念を示すことで，事業者として多様な地質環境へ対応するための準備を着実に行っていることを示す。そして6.6において，設計，建設・操業・閉鎖を支える技術について，基盤研究開発機関と連携して2000年以降に着実に整備が進み信頼性向上に寄与していることを示す。最後に6.7で本章のまとめを示す。

6.1　地層処分事業における設計の基本方針

本節では，処分場の設計に対するNUMOの基本方針として，地質環境情報の詳細化や技術・知識の進展に伴って段階的に設計をどのように進めるのか，地層処分事業固有の特徴である空間的・時間的スケールの大きさに起因する不確実性へどのように対処するのか，品質保証をどのような考え方で行うのかについて述べる。

6.1.1　段階的な設計の進め方と技術・知識の進展と成果の反映

地層処分事業では，三段階のサイト選定プロセスを経ながら，段階的にサイトの地質環境の情報，自然・社会環境に関する情報を蓄積していく。NUMO は，処分場を構成する地上・地下施設の設計を，各段階におけるサイトに係る情報や技術・知識の進展に応じて繰り返し実施し，その詳細度や信頼性を向上させていく。

処分場の設計では，基本的に各段階で同様の手順，方法を適用するが，その段階の情報の多寡に応じて合理的な範囲で設計を実施した上で処分場概念を構築し，併せて事業工程の確保や経済性を確認する。特に地質環境の情報については，段階的な情報の詳細化が顕著である。例を挙げると，地下施設設計において坑道の仕様を設定する場合，概要調査地区選定段階（文献調査の段階）では，岩盤種類に応じた簡易的な力学的安定性評価により，掘削可能な坑道径や深度を概略設定するのに対して，その後の調査の進展に伴い岩盤の応力状態や力学特性などが明らかなると，合理的な掘削方法や手順を設定し，岩盤特性に応じた詳細な解析を実施して坑道の仕様を決定することになる。

地層処分は，閉鎖後長期の安全性を確保することが目的であり，人工バリアを含む地下施設の設計では，長期という時間スケールに起因する性能の変化の要因や不確実性の増大の要因を考慮する必要がある。設計上考慮する要因については，ベントナイト系材料，セメント系材料や金属系材料といった人工バリア材料の長期挙動に関する技術開発を基盤研究開発機関と協力しながら進め，国内外の情報も含めて最新の知見を集積して設定する。さらに，現在進めている安全かつ効率的な操業システムに関する技術開発は今後も継続し，これらの工学技術の進展を，建設・操業・閉鎖技術の選定に反映する。信頼性の高い技術を絞り込んだ上で，効率的で安全性が高い技術へと開発を集約させていく。採用する技術の信頼性に加えて，効率的な適用という視点から，処分場概念も柔軟に変更していくこともあり得る。このことから，第 4 章の技術開発ロードマップに示しているように，精密調査地区選定段階（概要調査の段階）においても，精密調査の後半での地下調査施設での実証に向けた建設・操業・閉鎖技術の選定の方向性を見極めることが重要である。

以上のような，地質環境情報の段階的詳細化，技術・知識の進展に加え，基本レイアウトに基づく地下調査施設の範囲設定，精密調査での地下調査施設における技術の実証に向けたオプションの絞り込み，事業許可申請時期などを考慮した上で，サイトに適した設計仕様を決定しつつ，設計の信頼性や合理性を向上させていく（図 6.1.1-1）。また，処分場の設計においては，調査の進展に伴う設計の詳細化が実施項目ごとに異なる特徴がある。図 6.1.1-2は，調査の段階的な進展に伴って設計実施項目毎の設計が詳細化していくイメージを示している。例えば，地下施設のうち処分深度・エリアについては，文献調査，概要調査の結果を踏まえて，地下施設を設置する候補岩体，掘削可能深度，核種移行抑制に有利な位置などを検討して，概要調査終了までに詳細化していくことを線の色が徐々に濃くなることで示している。なお，図中には，設計実施項目毎の意志決定時期の目安を示すとともに，意志決定以降も調査の進展を踏まえた検討を継続することについて，線を延長することで示した。

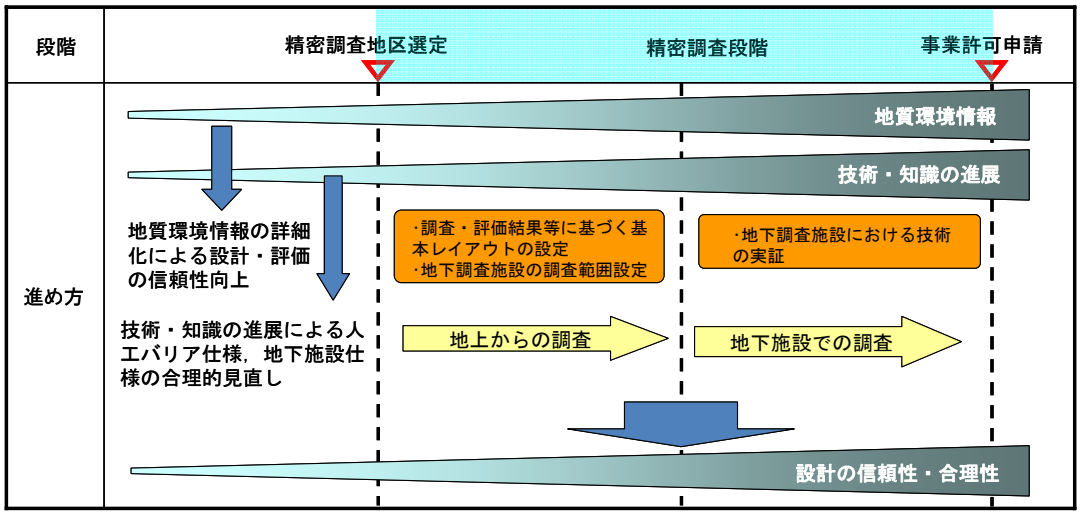


図 6.1.1-1 段階的な設計の進め方

実施項目		主要な検討項目	文献調査段階	概要調査段階	精密調査段階		事業許可申請段階
					地上	地下	
人工バリア設計	廃棄体	オーバーパック材質，構造仕様など			▽		
	ベントナイト，セメント	緩衝材・充填材等の材料選定，構造仕様など			▽		
地下施設設計	処分深度，エリア	候補岩体選定，掘削可能深度，核種移行抑制に有利な位置		▽			
	地下坑道	内空断面，支保仕様，離間距離			▽		
	レイアウト	処分パネルの数，配置，アクセス方式，物流等を考慮した連絡坑道配置，プラグ配置など				▽	
地上施設設計	地上施設エリア	必要面積，位置，専用道路，ゾーニング，環境保全など		▽			
	廃棄体受け入れ・検査・封入施設	施設の仕様（放射線安全，構造など）				▽	
	その他の施設・設備	その他の施設・設備の仕様，配置，構造など）					▽
建設方法，手順		坑道掘削方法(工法，対策工，工程など）					▽
操業方法，手順		廃棄体，人工バリアの搬送・定置方法，オーバーパックの遠隔溶接方法，工程など				▽	
閉鎖方法，手順		閉鎖方法，プラグ施工方法など					▽

▽：意思決定時期の目安

図 6.1.1-2 段階的な処分場設計の詳細化イメージ

6.1.2 不確実性への対処

処分場の設計における不確実性への対処として，主に，空間的スケールの大きさに起因する地質環境の情報と時間的スケールの大きさに起因する人工バリアの長期状態変遷を考える。

6.1.2.1 地質環境情報の不確実性への対処

構造物の設計では不確実な事項に対して設計仕様に余裕を持たせることが一般的であり，処分場

の設計においても同様な考え方が有効であると考える。地質環境情報の不確実性については，調査の進展に伴って見つかる湧水亀裂などによって廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所（図 6.1.2-1参照）の比率や，力学特性，熱特性の不確実性による処分場の全体面積への影響を考慮して，処分場を設置する候補母岩の選定領域に余裕を持たせることで対処することができると考えられる。処分場の規模は母岩特性の不確実性に起因して変わり得るが，調査の進展に伴って母岩の力学特性や熱特性に関する調査情報は充実するため，処分場の規模に関する精度は高まっていく。一方，調査の進展に伴って見つかる湧水亀裂などの分布についても不確実性は低減すると考えられるが，このことは当初の段階で余裕を見込んで設定した候補母岩の選定領域を必ずしも狭めるものではない。場合によっては，亀裂が多く見つかり，廃棄体を定置するのが好ましくない場所が増えることも考えられる。このような場合，当初設定した候補母岩の選定領域が面積的に不足することも考えられ，廃棄体定置位置の好ましさを評価するなどして合理的に処分場エリアを決めていくことや，　処分場を多層に配置するなどの対応策が考えられる。

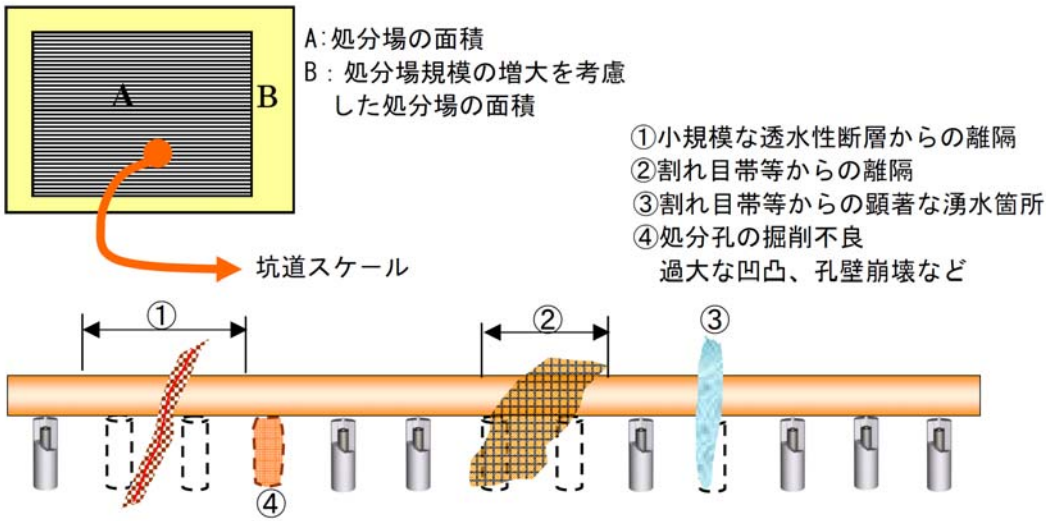


図 6.1.2-1 廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ

6.1.2.2　人工バリアの長期の性能変化に係る不確実性への対処

地層処分においては，閉鎖後長期の安全性を確保するために，人工バリアを含む地下施設の設計を行う上で，長期的な観点から安全性に影響が及ぶおそれのある要因に配慮して設計を行うことが重要である。人工バリアの性能は，長期的に変化することが想定され，時間の経過とともにその不確実性が増大することが考えられる。性能の低下の要因や不確実性の増大の要因については，安全評価結果などを分析・評価し，人工バリアが現状の技術で合理的に達成できる範囲において高い基本性能を確保するように設計上考慮することが重要である。また，人工バリアの長期挙動に関する科学技術的知識の進展を踏まえ，逐次設計に反映することも重要である。

6.1.3　品質保証の考え方

処分場の設計を行う際，まず，地層処分事業に適用される法令・規制などの要求事項を踏まえ，設計対象に求められる安全機能や技術要件（6.2 参照）を明確にする。その際，国内外において蓄積されてきた地層処分に関する技術や知見などを適切に考慮し，サイト調査の進展に応じて，機能や

要件をよりサイトに適したものへと最適化を図っていく。NUMO は，長期間にわたる事業において，それらの修正や変遷を明確なトレーサビリティを持って関係者内で共有していくため，要件管理システムを構築している。設計のアウトプットには，設計図面，設計計算書，仕様書などがある。アウトプットの品質を保証するため，設計の適切な段階で，各種の計算や検討，解析に不備がないかどうかを検証するとともに，それらの手法が妥当であるかどうかを確認する。また，設計や解析に必要となる入力データのうち，地質環境の情報には，試験方法やバラツキなどに起因する不確実性が伴うため，入力データの適切性については NUMO 内で適切性を確認する（チェックアンドレビュー）。次にモデルあるいは解析コードについての妥当性を確認する。これらの妥当性は，国内外で実施されている，あるいはこれから実施していく実験や工学規模の実証試験成果を最大限に活用し実験や実証試験成果のみでその妥当性を判断することが困難である場合には，国内外の中立性のある専門家によるレビューなどを通じて確認していく。設計手法や解析手法については，必要に応じて複数の手法で解析などを行い，結果をクロスチェックすることにより妥当性を検証する。このようなクロスチェックは設計における不適合の発生を予防することにも効果がある。万一，不適合が発生した場合には，適切な是正対策をとる。

建設・操業・閉鎖では，使用前検査，施設確認における検査項目，頻度，規格値を明確にし，それらを満足していることを確認しつつ作業を進める。必要に応じて，材料特性，寸法，機器の校正などの自主基準を策定する。また，測定に多くの時間を要し高い頻度での測定が困難な特性については，代替指標による管理を行う場合も考えられるが，この際は代替指標と保証したい品質の相関性に関する十分なデータをあらかじめ取得しておく。必要なデータを取得する際に，人工バリアをなるべく傷めないという観点からは，例えば人工バリアの品質管理に際しては有効な非破壊検査の採用なども考えていく。

さらに，処分場の設計，建設・操業・閉鎖に関する品質の記録は，適切に保存，管理する。記録は全事業段階を通じて行い，トレーサビリティを明確にする。万一，品質に不具合が確認された場合には，是正処置を施し，所定の品質を保証する。以上，NUMO は，処分場の設計，建設・操業・閉鎖に関して，ISO9001 の考え方にも準じて，客観的な測定結果に基づく作業の継続的改善を行っていくとともに，地層処分事業の段階的遂行に合わせて，品質マネジメントシステムの改善も図っていく。

6.2　処分場の安全機能と技術要件

本節では，事業期間中と閉鎖後の安全性を確保する上での安全機能について述べるとともに，安全機能を達成するために必要な技術要件を示す。

2000 年以降，放射性廃棄物の処分に関する国際的な安全要件の考え方の整備や，わが国の炉規法の改正，第一種埋設規則の施行など，安全規制の考え方が整備されてきている。NUMO は，第２次取りまとめおよび第 2 次 TRU レポートに記載された安全確保の考え方や技術要件を出発点としつつ，処分場の安全機能と技術要件について体系的な整備を進めている。

本節では，第 3 章の安全確保の目標で示した閉鎖後長期と事業期間中の安全確保の基本概念に基づいて，サイト選定を開始する前の段階における地層処分の要件について述べた。6.2.1 では，サイト選定の進展にあわせて段階的に地層処分の要件を詳細化するために，要件の整備の体系的な枠組みについて概説した。6.2.2 では，閉鎖後長期の安全確保の要件として，高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物の処分場についてその安全機能を示し，多重バリアシステムの設計にどう反映されるのかを技術要件として記述した。また，6.2.3 では事業期間中の安全確保の要件について述べ，放射線安全，一般労働安全の安全対策が地上施設や地下施設の設計にどう反映されるのかを技術要件として示した。また，6.2.4 では，段階的に安全機能と技術要件を更新するための考え方を示した。

なお，文中や表で使用している「安全機能」は閉鎖後長期および事業期間中の安全確保のために処分場が有するべき役割または要件のことである。ただし，事業期間中の安全確保に対しては，語感のため，「安全機能」という用語の代わりに「安全対策」という言葉を使用した。

6.2.1　安全機能と技術要件の体系的な整備の枠組み

地層処分の安全確保においては，段階的に明らかになる地質環境の情報にあわせて，サイトの地質環境特性に適した処分場の設計を実施する。また，地層処分事業が長期間にわたることから，将来の技術開発の進展や知見の蓄積に対しても柔軟に対応して，技術の信頼性を確認しつつ，適切な安全対策を実施する（第 3 章参照）。この項では，サイト選定プロセスにあわせて，段階的に安全機能と技術要件を最適なものとするための考え方とその体系的な整備の枠組みについて述べる。

なお，安全機能と技術要件の体系的な整備においては，国際的な地層処分の安全要件を示した IAEA の地層処分を含む放射性廃棄物管理の安全要件の基準（IAEA，2006，2010）や安全規制報告書（廃棄物安全小委員会，2008），「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会, 2010）などを参考として, NUMO として用語や体系化の枠組みを設定した。また，技術要件の内容については，高レベル放射性廃棄物については第２次取りまとめ，地層処分低レベル放射性廃棄物については第 2 次 TRU レポートを参考にしている。この他にも，余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方（土木学会，2009）も参考にした。

図 6.2.1-1には，放射線防護に関連する安全確保の基本概念と事業段階の関係を例示する。廃棄体受入から閉鎖までは，事業期間中の安全確保が対象であり，「操業時閉じ込め」，「放射線遮へい」，「放射線管理」を基本的な安全対策の考え方とする（廃棄物安全小委員会，2008）。一方，閉鎖後については，「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」をその基本概念としている。これらの概念は，高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両者で共通的に適用する。

ここでは「閉じ込め」は対象とする段階によって，「操業時閉じ込め」と「閉鎖後閉じ込め」に分けた。操業期間中（数十年程度）は廃棄体に密閉性を持たせることや，固化することにより，放射

性物質が容易に放出させない安全対策としての機能を設定した。一方，閉鎖後については，地下深部に放射性物質を閉じ込め，放射性物質の放出を最低限にするための対策として，地層処分システムの機能を設定した。それぞれの段階で，「閉じ込め」の考え方や期待する期間が異なることから，混乱を避けるために，“操業時”，“閉鎖後”という言葉を付け加えている。なお，一般労働安全と環境保全の期間は事業期間中に限られるので，特に図中には示していない。

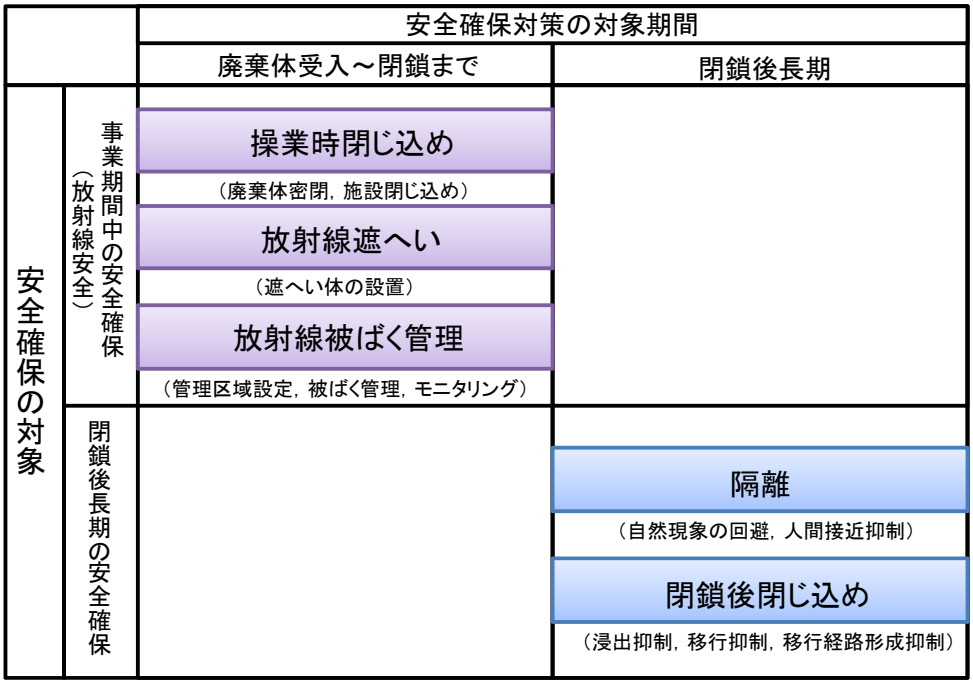


図 6.2.1-1 安全確保の基本概念と事業段階の関係

本節で設定する技術要件は，事業段階が進み，地質環境特性が明らかにされた場合や，技術開発などにより地層処分の技術や知見に進展があった場合に，安全に対する信頼性を向上させるため柔軟に見直す。そのため，要件が設定された経緯や根拠などの追跡性を確保できるよう，技術要件を体系的に整備し，将来の技術要件の変更を柔軟かつ確実に実施できるようにする（6.2.4 参照）。

6.2.2 閉鎖後長期の安全確保の要件

地層処分の目的は，高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物を長期間にわたり生活環境から十分に離された安定な地下深部に埋設し，また，廃棄物に含まれる放射性物質を閉鎖後の長期間にわたり閉じ込めることである（3.1 参照）。これらの二つの地層処分の安全の基本概念を「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」と呼ぶこととし，これらのイメージを図 6.2.2-1に示す。



図 6.2.2-1 隔離と閉鎖後閉じ込めの概念図

「隔離」とは，廃棄物および付随する危険性を人間社会から十分に遠ざけ，地下深部に保持することである（IAEA，2010）。すなわち，生活環境から十分離された安定な地下深部に廃棄物を埋設し，侵食のような地形変動から防護すること，および地層が障壁となって，偶発的な人の接近の可能性を最小にし，人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難にすることである。

「閉鎖後閉じ込め」とは，廃棄物からの放射性物質の放出および分散を防止あるいは抑制し，地下深部にとどめることである。放射能，特に短寿命放射性核種の有する放射能の大部分が減衰するまで廃棄物を閉じ込めること，長寿命の放射性物質の生活環境までの移行に非常に時間がかかり，その間に放射能の大部分を減衰させることである。

これらの「隔離」，「閉鎖後閉じ込め」に関する措置が相補的に働き，その将来における放射線学的な影響の受入が可能なほど低くなるように工学的な対策をとる。その具体的な手段として，多重バリアシステムを構築する。多重バリアシステムは，複数の物理的な障壁（バリア）を多重化し，単一のバリア材の性能に地層処分の安全性が過度に依存しないようにする対策の考え方である。多重バリアシステムは，人工バリアと天然バリアで構成され，「隔離」は主に生物圏からの離隔距離を確保すること，および，天然の岩盤を物理的な障壁とすることにより達成し，「閉鎖後閉じ込め」は天然バリアと人工バリアの多重バリアシステムにより達成する。

以上の考え方は，対象とする廃棄物（高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物）および地質環境特性によらず，地層処分の共通的な安全確保の考え方である。

6.2.2.1　閉鎖後長期の安全機能と技術要件の体系化の枠組み

図 6.2.2-2に，階層構造を基本とした閉鎖後長期の安全機能と技術要件の体系化の枠組みを示す。「多重バリアシステムの安全機能」は，閉鎖後長期の安全確保の基本概念（隔離および閉鎖後閉じ込め）に基づいて，処分場の安全確保上の役割として設定する。技術要件は，多重バリアシステムの安全機能が確保されるように，サイトの地質環境特性や人工バリアなどの材料特性や長期挙動の理解に基づいて（6.6.2 参照），処分場の構成要素ごとに設定する。技術要件の設定の考え方を表 6.2.2-1に示した。

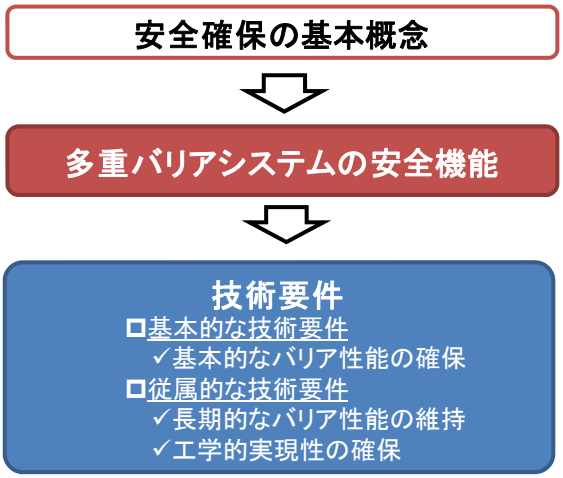


図 6.2.2-2 閉鎖後長期の安全確保に関する要件の体系化の枠組み

表 6.2.2-1 技術要件の設定の考え方

技術要件の設定の視点		説明
基本的な技術要件	基本的なバリア性能の確保	多重バリアシステムの安全機能が確保できるように，安全機能に基づいて，技術要件を設定する。例えば，緩衝材の低透水性など。
従属的な技術要件	長期的なバリア性能の維持	閉鎖後長期間にわたり多重バリアシステムの性能が維持されるよう，人工バリア材料の長期的な特性や，バリア材料間の相互作用の理解に基づいて，設計上の対策を検討し，技術要件を設定する。例えば，セメントーベントナイト相互作用の考慮など。
	工学的実現性の確保	実現性の見通しのある技術を用いて，サイトの地質環境特性において，安全機能を合理的に確保するように，設計上の対策を検討し，技術要件を設定する。例えば，緩衝材の施工技術など。

技術要件の設定においては，まず，廃棄体からの核種の浸出抑制や，核種移行の抑制などの「閉鎖後閉じ込め」の基本となる安全機能が確保されるよう技術要件を設定する。これらを基本的な技術要件と呼ぶ。基本的な技術要件とは，地下水による核種移行を抑制し，多重バリアシステム内に閉じ込めるために，必要最低限満たさなければならない技術要件として設定する。

また，閉鎖後長期の安全性が確保されることの判断は安全評価に基づくが，バリア性能の長期的な変化は，安全評価で考慮すべきシナリオやモデルを複雑にする可能性があるので，合理的に設計で対応できる範囲で，必要に応じて長期的なバリア性能を維持できるように対策を実施しておく。例えば，セメントーベントナイト相互作用（6.6.2 参照）については，その材料学的な影響評価の技術開発が進んでいるが，それと並行して建設・操業時の安全性が損なわれない範囲で，影響低減対策として低アルカリ性セメントの開発とその適用性についても技術開発を進めている。将来的には，これらの技術開発成果に基づいて長期的なバリア性能が維持できるよう技術要件を設定する。以上の技術要件に加えて，施工性，経済性などの工学的実現性を確保する観点から技術要件を設定する。

これらの長期的なバリア性能の維持と工学的実現性の確保に関する技術要件は，基本的な技術要件に対して従属的に設定することから，従属的な技術要件と呼ぶこととする。

なお，以下では，文献調査を開始する前の現時点においては，第２次取りまとめで示されている安全機能や設計要件を上記に示した体系的な整備の枠組みにより再整理した。また，将来は，体系的に整備された技術要件を出発点として，サイトの地質環境特性に適した安全機能と技術要件を整備する。その際，地質調査・評価や安全評価と連携し，設計の結果と調査結果，評価結果を相互にフィードバックさせることにより，試行錯誤的に安全機能と技術要件を最適なものとする。

6.2.2.2　高レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能

表 6.2.2-2に，「隔離」，「閉鎖後閉じ込め」の概念と「安全機能」の関係を示す。「隔離」に関しては，安定な地質環境の選定と処分深度により，天然バリアの有する特性を利用して確保する。一方で，「閉鎖後閉じ込め」に関しては，廃棄体からの核種の浸出を抑制し，かつ，浸出した核種の移行を抑制し，大部分の放射性物質を廃棄物とその周辺に閉じ込めるための対策を施す。このため廃棄体周辺の人工バリアの設置と埋め戻し材やプラグ設置などの閉鎖措置および天然バリアに有する機能にも期待して閉鎖後閉じ込めの機能を確保する。

表 6.2.2-2 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能

基本概念	多重バリアシステムの安全機能	安全機能の説明
隔離	地質の長期的な変動からの防護	生活環境から十分離された安定な地下深部に廃棄物を埋設し，侵食のような地形変動から防護すること
	人の接近の抑制	偶発的な人の接近の可能性を低減するため，人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難であること
閉鎖後閉じ込め	核種の浸出抑制	廃棄体からの核種の浸出を抑制し，核種放出率を低下させるとともに，核種を廃棄体近傍に保持することで放射能を減衰させること
	核種移行の抑制	浸出した核種の移行を抑制することにより，核種移行率を低下させるとともに，遅延により放射能を減衰させること
	アクセス坑道などの卓越した移行経路の形成抑制	処分場の建設に伴う，アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路とならないこと

(1)　多重バリアシステムの安全機能と構成要素の関係

多重バリアシステムの安全機能は，地下深部に埋設した放射性廃棄物から，放射性物質が地下水を介して移行し，最終的に人間の生活環境に影響を及ぼすことを想定し，地下水を介した移行を低減するための安全対策として設定した。多重バリアシステムは，人工バリアと天然バリアにより構成され，閉鎖後長期の安全性を確保するための種々の安全機能を有する。高レベル放射性廃棄物の

地層処分の人工バリアは，ガラス固化体をオーバーパックに封入した後，地下深部の安定で好ましい条件を有する地質環境に設置され，その周囲に緩衝材を施工することによって形成する（NUMO，2004b）。なお，「隔離」については，基本的に自然現象についてはサイト選定により回避した上で，処分深度を確保することとし，以下の検討では，多重バリアシステムによる「閉鎖後閉じ込め」について技術要件を展開する。

表 6.2.2-3には，安全機能とバリア構成要素の関係を示す。「核種の浸出抑制」においては，地下水との接触により廃棄体から放射性物質が浸出することを抑制することを目的として，安全機能を設定した。廃棄体であるガラス固化体はガラスの性質により，放射性核種を物理化学的に安定に閉じ込め，地下水に溶けにくい性質を有していることからバリアとしての機能を設定した。また，ガラス固化体の発熱が著しい期間は，地下水の熱対流や蒸発などの現象が複雑に生起する可能性が高く，その結果，この期間の安全評価シナリオが複雑になる。そこで，安全評価上の不確実性を低減するために，発熱の著しい期間，地下水とガラス固化体の接触を確実に阻止するようにすることが重要である。そのため，地下水をガラス固化体と接触させないように，オーバーパックを設ける。

「核種移行の抑制」に関しては，懸念事象として廃棄体近傍の移流による溶存核種の移行，地下水流による移行，コロイド化した放射性核種の地下水中の移行，拡散による移行などが考えられるため，それぞれ安全機能を設定し，それらを緩衝材に期待している。

また，天然バリアについては，収着により核種移行を遅延するとともに，分散による移行フラックスの低減を安全機能としている。ただし，これらの機能は，設計で確保するものではなく，天然の岩盤が持つ特質として安全評価において考慮する。

「アクセス坑道などの卓越した移行経路の形成抑制」に関しては，廃棄体の埋設のために建設した坑道類が卓越した核種移行経路となって閉鎖後長期の安全性に影響を与えることを懸念し，閉鎖用のプラグや埋め戻し材を施工する。

表 6.2.2-3 高レベル放射性廃棄物の閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		構成要素
隔離	地質の長期的な変動からの防護	（処分深度の確保と自然現象の著しい影響の回避による） ＊1	―
	人の接近の抑制	（サイト選定と深度の確保による）＊1	―
閉鎖後 閉じ込め	核種の浸出抑制	ガラスマトリクスによる浸出抑制	廃棄体
		発熱が著しい期間の地下水接触の防止	オーバーパック
	核種移行の抑制	核種の溶解度制限＊2	緩衝材
		移流による移行の抑制	
		コロイド移行の防止・抑制	
		収着による核種移行の遅延	
		分散による移行フラックスの低減	天然バリア
	卓越した移行経路の形成抑制	処分場の建設に伴う，アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路とならないこと	閉鎖用埋め戻し材 閉鎖用止水プラグ

＊1「隔離」については，サイト選定により回避する
＊2 核種の溶解度制限はバリア材料の機能ではなく，還元環境を保つことなどにより機能として発現する。

高レベル放射性廃棄物の人工バリア基本構成例とバリアの安全機能の関係の例を図 6.2.2-3に示す。

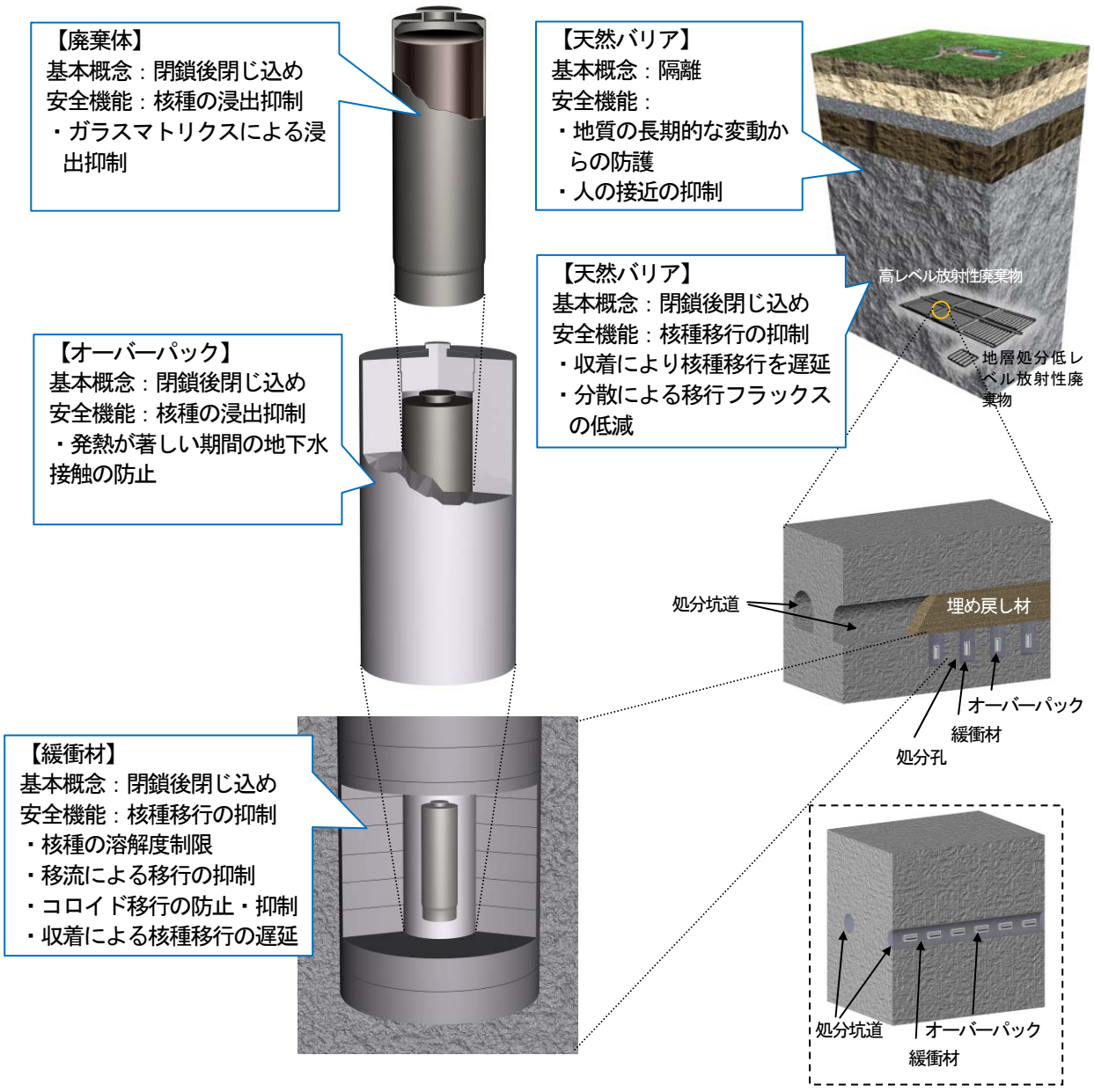


図 6.2.2-3 高レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能と基本構成要素

(2) 多重バリアシステムの構成要素の技術要件

表 6.2.2-3において整理した構成要素の安全機能が確保されるように技術要件を設定する。なお，ここでは技術要件のうち，バリア性能の確保と，長期的なバリア性能の維持に関する技術要件について示した。工学的実現性の確保については，施工方法の選定などにあわせて設定するものとし，ここでは述べない。

(i) 天然バリア

天然バリアの安全機能は，人工バリアのように設計により確保するものではなく，天然の岩盤が持つ特性として期待するものである。天然バリアには，収着による核種移行の遅延，分散による移行フラックスの低減などの機能を期待している。

また，天然バリアのうち処分場を設置する地層（以下，母岩と呼ぶ）は，放射性廃棄物を安定して隔離し，また，廃棄物に含まれる放射性物質を閉鎖後の長期間にわたり閉じ込めるのに有効な特性を有することが望まれる。そこで，これら母岩の好ましい特性として設定し，表 6.2.2-4にまとめて示した。

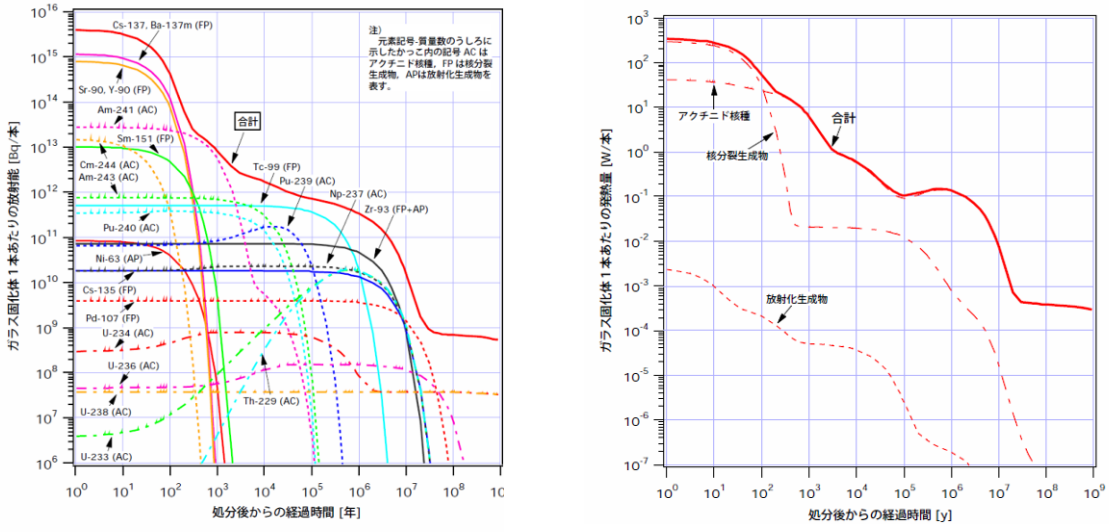
表 6.2.2-4 母岩の好ましい特性

分類	好ましい特性
熱環境	閉鎖後の処分場の温度が低いこと
力学場	坑道の力学的安定性が確保できるとともに，閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること
水理場	閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく，緩慢であること
化学環境	閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が核種の難溶解性と人工バリアの安定性に適していること

このほか，工程や経済性の観点や，所定の廃棄体数量を収容できる地層・岩体の広がりを持ち，かつ処分場の建設，操業時に，空洞の力学的安定性を確保するのに良好な岩盤力学特性を有することも期待している。

（ii）廃棄体

廃棄体はガラス固化体とその容器であるキャニスタで構成される。廃棄体の重量，寸法については図 2.1.2-2 に示したとおりである。廃棄体の発熱特性を図 6.2.2-4に示す。貯蔵期間 50 年の標準的なガラス固化体の発熱量と放射能の経時変化を示す。



(a) ガラス固化体の放射能の経時変化，(b) 発熱量の経時変化（出典：JNC，1999a）

図 6.2.2-4 ガラス固化体廃棄体特性

放射能の経時変化においては，処分後数百年までは，比較的半減期の短い核分裂生成物である Cs-137（Ba-137m）や Sr-90（Y-90）のような放射能が支配的であるが，数百年以降ではアクチノイ

ド核種である Am-241 が支配的となる。さらに数千年以降では，より半減期の長い核分裂生成物である Tc-99 や Zr-93 およびアクチノイド核種の放射能が支配的となる。発熱量の経時変化においても，処分後百年程度までは，Cs-137（Ba-137m）や Sr-90（Y-90）の寄与が支配的であるが，数百年から数千年までは Am-241 が支配的に寄与する。

廃棄体の仕様，製造は，発生者側（電力会社，原燃，JAEA）において実施されることから，地層処分事業の設計項目には含まれない。ただし，すでに述べたように，閉鎖後長期の安全確保の観点から，「ガラスマトリクスによる浸出抑制」の安全機能を期待している。

処分施設の設計および安全評価に必要なガラス固化体特性は，表 6.2.2-5に示すとおりである。NUMOが廃棄体を受け入れる際には，これら 25 項目のガラス固化体特性データが取得されていること，また，直接測定ではなく，運転管理やR&D情報に基づき設定されたデータについては，その評価方法や設定方法の妥当性についても確認を行う（日本原子力学会，2010）。

一方，運転管理状態の逸脱により発生したガラス固化体（以下，逸脱固化体という）やガラス固化設備の溶融炉運転立ち上げ時や洗浄運転時に発生するガラス固化体（以下，非定常ガラス固化体という）については，その特性を十分把握した上で，処分における対応を検討することとする（日本原子力学会，準備中）。

表 6.2.2-5 ガラス固化体の特性（出典：日本原子力学会，2010）

放射性核種濃度	固化ガラス熱特性（熱容量，熱伝導度）
高レベルガラス固化体表面線量率	固化ガラス密度
固化ガラス化学組成	キャニスタ材質
発熱量（発熱核種インベントリ）	キャニスタ寸法・形状
高レベルガラス固化体重量	キャニスタ溶接部の健全性（胴部）
プレナム部容積	キャニスタ母材の健全性
表面汚染密度	キャニスタ強度
固化ガラス重量	キャニスタ熱特性
固化ガラス寸法（外径・高さ）	キャニスタ溶接部の健全性（蓋部）
固型化の状態（均質性）	破損・欠陥がないこと（外観）
固化ガラス破砕係数	整理番号
固化ガラス浸出速度（溶解速度）	整理番号の表示方法・位置
最低結晶化温度	―

（iii）オーバーパック

オーバーパックには，発熱が著しい期間の廃棄体と地下水の接触防止の安全機能を設定している。表 6.2.2-6には，炭素鋼オーバーパックの技術要件を示す。安全機能に影響を与える事象としては，オーバーパックの貫通孔の発生や力学的な変形，破壊による機能の喪失がある。これらの懸念事象による影響を防止あるいは低減するような対策としてバリア性能の確保のための技術要件を設定する。

「耐食性」の技術要件については，地下環境において想定される腐食の進展により，オーバーパックの安全機能が損なわれないように，腐食に対する適切な対策を設定する。また，ガラス固化体

からの放射線により地下水が放射線分解し発生した酸化性化学種の影響により局部腐食が生じる可能性も挙げられているため，設計上の対応を講じる。「構造健全性」の技術要件については，地下環境において，埋設後に作用するさまざまな応力に対して，オーバーパックが機械的に破損しないように対策を講じる。オーバーパックに作用する応力の要因としては，水圧，地圧などの処分深度に依存する圧力や，岩盤クリープ変形などに起因する応力，また，腐食膨張に伴い緩衝材が圧密され，その反作用として現れる圧密反力などが挙げられる。「溶接部の耐食性，構造健全性」の技術要件については，オーバーパックの溶接部が物理的にも化学的にも弱部となって，オーバーパックに期待される安全機能が損なわれないよう，溶接方法を選定する。このほかの長期的なバリア性能の維持のための技術要件については表 6.2.2-6に示している。

表 6.2.2-6 オーバーパックの閉鎖後長期の安全確保のための技術要件

分類		技術要件	技術要件の説明	設計項目
基本的な技術要件	基本的なバリア性能の確保（核種の浸出抑制）	耐食性	所定の期間，腐食により安全機能が損なわれないこと	オーバーパックの設計（材料設計，形状・厚さの設計）
		構造健全性	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること	オーバーパックの設計（材料設計，形状・厚さの設計）
		溶接部耐食性・構造健全性	溶接部の機械強度，耐食性が母材と比較して著しく劣らないこと	オーバーパックの溶接設計（材料設計，蓋構造設計，溶接法，溶接条件）
従属的な技術要件	長期的なバリア性能の維持	耐熱性	廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと	オーバーパックの設計（材料設計）
		耐放射線性	放射線脆化が著しくないこと	オーバーパックの設計（材料設計）
		残置物との相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	坑道の設計（支保工の材料設計）
		バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	オーバーパックの設計（材料設計）
		ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	オーバーパックの設計（材料設計，形状・厚さの設計）

（iv）緩衝材

緩衝材の技術要件を表 6.2.2-7に示す。安全機能に支障のある懸念事象としては，地下水流による移行やコロイドによる移行がある。過去の検討経緯を踏まえ，緩衝材は，ベントナイトを主とする材料を圧縮成形したものを前提として技術要件を設定した。

「低透水性」の要件については，緩衝材が有する低透水性を活かし，周囲の動水勾配がある程度大きくなっても，物質移行が拡散により支配されるように材料組成と緩衝材の乾燥密度を設定する。「コロイドろ過能」の要件については，廃棄体から浸出した核種がコロイド化し，コロイドの移行を物理的に阻止するための対策として，コロイドのろ過性能が確保されるように緩衝材の乾燥密度を設定する。「収着能」の要件については，緩衝材の有する収着能力を活かし，核種の拡散による移行を遅延するための対策を講じる。緩衝材の間隙水中に溶存した核種は，拡散現象により移行する

が収着現象が期待できる場合は，その移行を遅延する。そのほかの長期的なバリア性能の維持に関する技術要件は，**表** 6.2.2-7に示すとおりである。

表 6.2.2-7 緩衝材の技術要件

	分類	技術要件	技術要件の説明	設計項目
基本的な技術要件	基本的なバリア性能の確保（核種移行の抑制）	低透水性	低透水性を有することにより緩衝材中の地下水の動きを遅くして結果的に緩衝材中の物質の移動が遅くなるようにすること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
		コロイドろ過能	放射性核種がコロイドとして移行することを抑制すること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
		収着能	ガラス固化体から放射性核種が溶解した場合，それを収着することによって放射性核種の移動を抑制すること	緩衝材の設計（材料設計）
従属的な技術要件	長期的なバリア性能の維持	自己修復	施工後変形などにより隙間が生じたとしても，自己修復できること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
		耐熱性	廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	地下施設レイアウトの設計（坑道離間距離，廃棄体ピッチ）
		耐放射線性	廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計（材料設計）
		緩衝材流出の抑制	地下水流による緩衝材の流出が著しくないこと	地下施設レイアウトの設計
		残置物との相互作用の影響	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	坑道の支保設計（材料設計）
		バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
		ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	緩衝材の設計（材料設計）
		物理的緩衝性	オーバーパックの腐食膨張，岩盤の変形を緩和し，オーバーパックを機械的な破壊から保護するよう，物理的緩衝性を有すること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
		オーバーパックの沈下の防止	廃棄体オーバーパックを力学的に支持すること	緩衝材の設計（材料設計）
		施工時の隙間の充填（自己シール性）	施工時の隙間を充填するよう，膨潤性を有すること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計） 操業システムの設計（施工技術）

(v) 埋め戻し材・プラグ

処分場の閉鎖措置は，処分場の建設や操業に用いたアクセス坑道や，ボーリング孔を埋め戻すことにより完了する。仮に掘削された坑道を放置しておくと，地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり，それ自体が地下水の卓越した水みちとなったりするなど，処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが予測される。そこで，埋め戻されたアクセス坑道が卓越した移行経路とならないよう，アクセス坑道には埋め戻し材と止水プラグ（低透水性を期待するプラグ）および必要により力学プラグ（力学強度を期待するプラグ）を設置する。

6.2.2.3 地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の安全機能

(1) 地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ

地層処分低レベル放射性廃棄物は，性状の異なるさまざまな廃棄物で構成され，また，高レベル放射性廃棄物に比べて放射能量や発熱量が低いといった特徴がある。地層処分低レベル放射性廃棄物は，第1次TRUレポート（電事連・JNC，2000）および第2次TRUレポートの評価において，その特性に応じたグループ分けが行われている。具体的には，廃銀吸着材を主要な廃棄物とするグループ1，ハル・エンドピースを主要な廃棄物とするグループ2，硝酸塩を含む廃棄物をまとめたグループ3，その他の廃棄物をまとめたグループ4の四つのグループに分類されている（図2.1.2-6参照）。なお，地層処分低レベル放射性廃棄物の廃棄体特性（内訳，物量，核種ごとの放射能量，発熱量など）については，NUMO（準備中b）に詳しく記述してあるので，そちらを参照していただきたい。

(2) 閉鎖後長期の安全性の要件と多重バリアシステムの構成要素の関係

地層処分低レベル放射性廃棄物についても，処分場の安全確保の基本概念は廃棄体性状や地質環境特性によらず共通である。

表 6.2.2-8には，グループごとの多重バリアシステムの安全機能とバリア構成要素の関係を示す。地層処分低レベル放射性廃棄物は，廃棄体グループごとに特性が異なり，確保すべき安全機能が異なる。したがって，廃棄体グループごとに多重バリアシステムの構成要素も異なる。ここでは，NUMO（準備中d）に基づいて，安全機能と構成要素の関係を示した。

地層処分低レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの構成要素は，グループごとの特徴と地質環境を考慮して検討している。このため，グループの特徴と地質環境により，廃棄体と廃棄体パッケージ，充填材，緩衝材を適宜選定して構成する。また，高レベル放射性廃棄物に比べ発熱性が低いものについては，複数の廃棄体をパッケージ化し，坑道内に集中配置する概念を検討している。

「核種移行の抑制」の安全機能のうち「移流による移行の抑制」，「コロイド移行の防止・抑制」については，緩衝材により確保する。また，「収着による核種移行の遅延」については，緩衝材・充填材・天然バリアの各媒体の収着特性により確保する。「分散による移行フラックスの低減」については，天然バリアの特性として期待する。

「卓越した移行経路の形成抑制」の安全機能については，廃棄体の埋設のために建設した坑道類が卓越した核種移行経路となって閉鎖後長期の安全性に影響を与えることを懸念し，プラグや埋め戻し材を施工するほか，地下施設の設計の際に影響を受けにくいレイアウトにするなどの対策を施す。

なお，「核種の浸出抑制」の安全機能は，第2次TRUレポートでは，代替技術として取り上げら

れている。例えば，岩石固化技術や，BPI ガラス固化技術，アルミナセメント固化技術などの技術開発が進められており，これらの技術の実用化の目途が立てば，「固化マトリクスなどによる浸出抑制」の安全機能を設定できる（NUMO，準備中 b)。また，第２次 TRU レポートでは，「核種漏えい開始の遅延」の安全機能は，安全評価シナリオに取り入れられていないが，廃棄体パッケージなどにより確保することが検討されている（NUMO，準備中 b)。

なお，地層処分低レベル放射性廃棄物の事業期間中の安全確保に関する安全機能と処分場構成要素の関係は高レベル放射性廃棄物の処分場とその基本的な考え方は同じであるので，記述は割愛する。なお，これらの安全機能の設定の詳細については，第 2 次 TRU レポートおよび NUMO（準備中 b）を参照していただきたい。

表 6.2.2-8 地層処分低レベル放射性廃棄物の閉鎖後長期の安全確保の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		廃棄体グループ				構成要素
			1	2	3	4	
隔離	地質の長期的な変動からの防護	（処分深度の確保と自然現象の著しい影響の回避による）*1	－	－	－	－	
	人の接近の抑制	（サイト選定と深度の確保による）*1	－	－	－	－	
閉鎖後閉じ込め	核種の浸出抑制	固化マトリクスによる浸出抑制	●*2				廃棄体
		核種漏えい開始の遅延	●*2	●*2	●*2	●*2	廃棄体パッケージ
	核種移行の抑制	核種の溶解度制限*3	●	●	●*2	●*2	緩衝材
		移流による移行の抑制	●	●	●*2	●*2	
		コロイド移行の防止・抑制	●	●	●*2	●*2	
		収着による核種移行の遅延	●	●	●	●	充填材
							天然バリア
		分散による移行フラックスの低減	●	●	●	●	
	卓越した移行経路の形成抑制	アクセス坑道に沿った移行経路の形成抑制	●	●	●	●	閉鎖用埋め戻し材 閉鎖用止水プラグ

＊1「隔離」については，サイト選定により回避する
＊2 代替概念の採用によっては期待できる安全機能
＊3 核種の溶解度制限はバリア材料の機能ではなく，還元環境を保つことなどにより機能として発現する。

地層処分低レベル放射性廃棄物の人工バリア基本構成例とバリアの安全機能の関係の例を図6.2.2-5に示す。

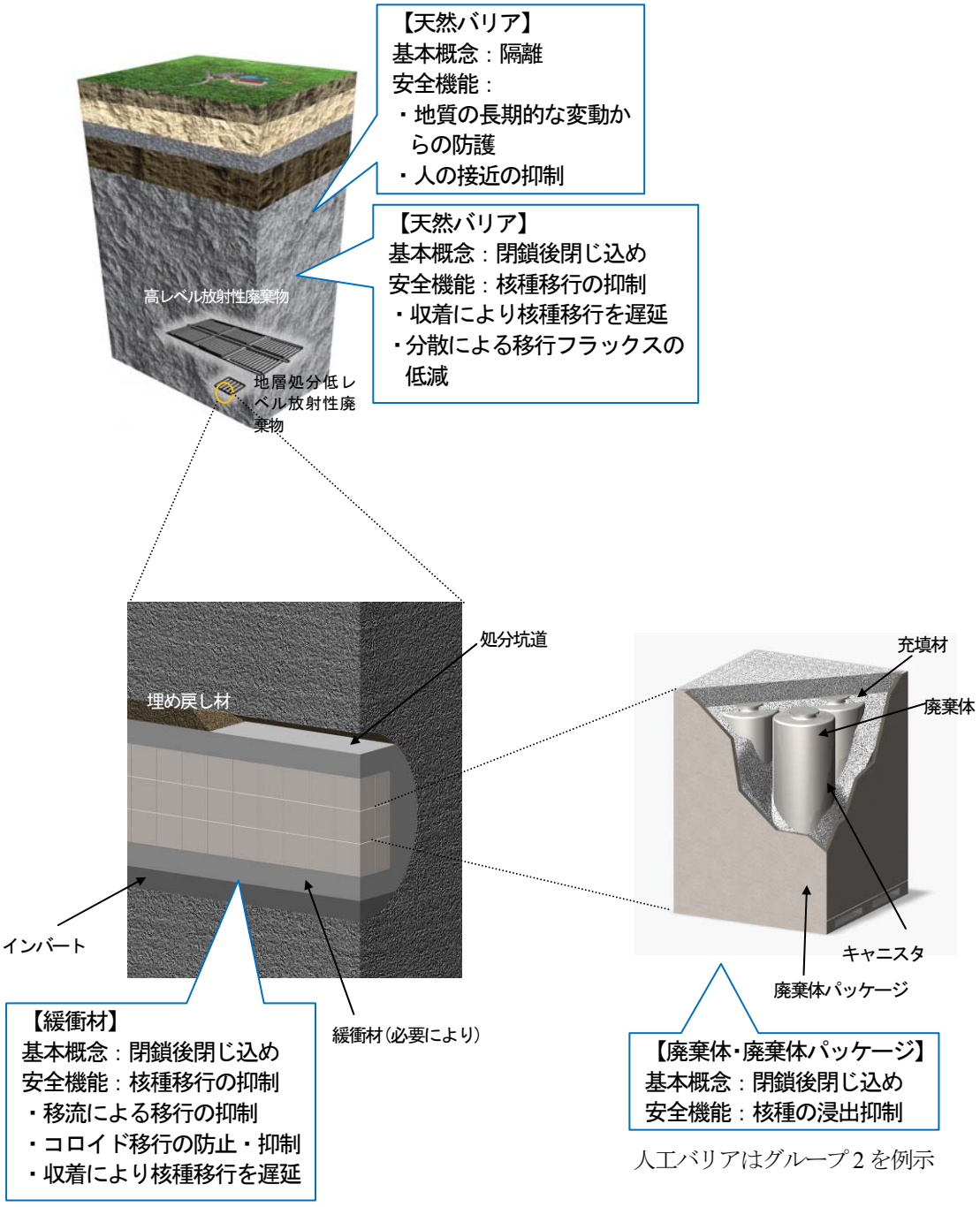


図 6.2.2-5 地層処分低レベル放射性廃棄物の多重バリアシステムの安全機能と基本構成要素

6.2.2.4 併置処分の考え方

高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の併置は，処分場概念オプションの一つである。これらの施設を併置する場合には，併置によって双方の処分場の閉鎖後長期の安全性が損なわれないことが要件である。現状では，高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低

レベル放射性廃棄物処分場の廃棄体と人工バリアの仕様および地下施設形状の違いなどから建設・操業・閉鎖をそれぞれ独立したエリアで行うこととしている。このため，併置処分による閉鎖後長期の安全性が損なわれないという要件に対しては，両処分場が互いに影響を及ぼす可能性が小さいと考えられる十分な距離を確保することにより対応する。影響を及ぼす因子としては，熱，化学（有機物，硝酸塩，高アルカリ性地下水）などを考慮する（原子力委員会，2006）。

6.2.3　事業期間中の安全確保の要件

第3章に述べたように，閉鎖までの事業期間においては，処分施設の建設や操業などに従事する作業者はもとより，周辺地域の一般公衆の安全を確保する。この期間の安全確保の対象を「放射線安全」，「一般労働安全」，「環境保全」に分類し，その要件について述べる。

6.2.3.1　放射線安全の安全対策の考え方

(1)　操業期間中の放射線防護の基本的な考え方

操業期間中は，輸送されてきた廃棄体の受入・検査の工程，容器封入・検査の工程，廃棄体の搬送定置作業の工程などにおいて，放射線安全上の対策を措置する。潜在的な危険性としては，廃棄物からの外部放射線および廃棄物から漏えいした放射性物質の摂取による地域住民および作業従事者の被ばくであり，そのための安全対策を措置する。放射線防護の考え方は，「操業時閉じ込め」と「放射線遮へい」を基本的な考え方とする（廃棄物安全小委員会，2008）。

「操業時閉じ込め」とは，閉鎖までの操業期間中において放射性物質を限定された区域に閉じ込め，施設外への放出を防止することを目標とする。「放射線遮へい」とは，廃棄物からの放射線による地域住民および作業従事者の被ばくを合理的に十分低減する措置をいう。廃棄体からの放射能レベルに応じて適切な遮へい体を設置することで，空間線量率を低減することを目標とする。これらの基本的な概念に基づいた安全対策が確実に機能することで，操業期間中に地域住民および作業従事者が受ける影響が放射線学的に十分容認できるレベルにまで低減する。また，これらの放射線安全の対策に加え，「放射線被ばく管理」を実施することにより，操業期間中の放射線安全を確保する。

(2)　操業期間中の放射線被ばく管理

「放射線被ばく管理」の目的は，操業時閉じ込めや放射線遮へいの安全対策に加え，運用面から放射線被ばくの可能性を低減することが目的である。「放射線被ばく管理」の考え方は，原子力施設のそれと同様であり，管理区画設定，放射線モニタリング，人の出入り管理，物品の搬出入管理などを実施する。「実用発電用原子炉の設置，運転などに関する規則の規定に基づく線量限度などを定める告示」（経済産業省，2001）では，下記条件を超える恐れのある区域に対して放射線管理区域（以下，「管理区域」という）とし，放射線業務従事者に対する適正な放射線防護を目的とした放射線被ばく管理を義務づけている。

- 外部放射線の線量　　：1.3mSv/3ヶ月→2.6μSv/h（500時間/3ヶ月）
- 空気中の放射性同位元素濃度　：3ヶ月の平均濃度が告示別表の1/10
- 表面汚染密度　　：表面汚染密度限度の1/10

地層処分対象の廃棄物は，廃棄体受入時に表面汚染の有無などを確認し，廃棄体容器の密閉性（閉じ込め）が確認されたものだけを受入る。そのため，通常時には放射性物質の経口摂取のリスクを排除することができる。一方で，高い放射能を有していることから，適切な遮へい対策を施し，管

理区域を設定し，遠隔操作などにより放射線取り扱い作業時間を短縮し，作業従事者の被ばくのリスクを低減する。また，操業期間中は，作業従事者の被ばく管理を実施し，施設内はもちろんのこと，敷地の境界などの野外において放射線モニタリングを実施する。

(3) 操業期間中の放射線防護の安全対策の考え方

放射線防護の概念に基づき，処分場が有するべき安全確保上の役割を「安全対策」として示す（表 6.2.3-1）。「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」に関しては，廃棄体自身に放射性物質を閉じ込めることを期待するが，廃棄体を容器などに封入することによる漏えいの防止も含意する。「施設外への放射性物質の過大な放出の防止」に関しては，先の廃棄体からの漏えいの防止の機能が失われた場合の機能であり，漏えいの可能性とその影響の程度を評価し，施設ごとに対策を講じる。「放射線の遮へい」については，廃棄体の外側に適切な遮へい体を設置することによる。「放射線管理区域の設定」は，放射線管理を適切に実施するための措置として，設計時に考慮することとする。また，管理区域においては放射線モニタリングを実施し，作業従事者の被ばく管理を実施し，作業従事者の被ばくが過度にならないように管理する。

表 6.2.3-1 放射線防護に関する基本的な安全対策

安全対策		説明
操業時 閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	操業期間中において廃棄体からの放射性核種の漏えいを防止すること
	施設外への放射性物質の過大な放出の防止	操業期間中において放射性物質取扱施設からの放射性核種の過大な放出を防止すること（廃棄体受入時）
放射線 遮へい	放射線の遮へい	廃棄体からの外部放射線による空間線量率を遮へいにより低減すること
放射線 被ばく管理	放射線管理区域の設定	放射線管理区域を設定すること
	モニタリング・被ばく管理	作業従事者の被ばく管理，管理区域および敷地周辺において放射線モニタリングを実施すること

(4) 異常事象に対する安全対策の考え方

「異常事象」とは，通常運転を逸脱させるような何らかの要因が施設もしくは廃棄体に加えられた事象と定義する。地下施設では廃棄体の落下・転倒や衝突などが挙げられる。「事故」とは，異常が拡大して施設から外に放射性物質が放出される事象とする。図 6.2.3-1には，異常事象の要因から事故に発展するまでの経過を模式的に示す。

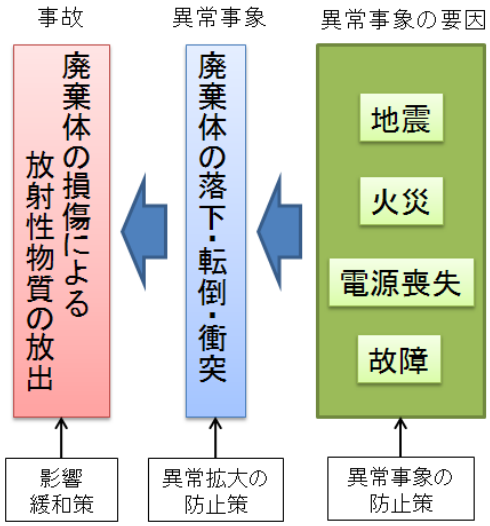


図 6.2.3-1 地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係

異常事象の発生に伴い，最終的に事故にまで発展するには，地震，火災，電源喪失などの異常事象の要因を起点として，操業中に廃棄体が装置から逸脱し落下，転倒し，あるいは搬送装置の逸走などにより施設壁面に衝突するような異常事象が発生し，さらに廃棄体が損傷するなどして，漏えいした放射性物質が空気中に放出されるという過程を経る。従って，異常事象に対する安全対策の考え方は，廃棄体の落下・転倒・衝突などの異常事象の発生防止対策を要因ごとに検討すること，異常が発生した場合に備えて放射性物質の飛散などを防ぐためのフィルタなどの除染機能を有した機器を含む換気系設備などによる異常拡大防止対策を施した上で，万が一，事故にまで発展した場合は，除染などの事故の影響緩和策を実施することを基本とする。

6.2.3.2　一般労働安全の安全対策の考え方

一般労働安全とは，放射性物質の取り扱いを伴わない作業時の安全のことであり，一般労働安全を確保する期間は，現地で地質調査などを開始する精密調査地区選定段階から事業の廃止に至る閉鎖までの期間が対象である。一般労働安全では，労働災害対策と作業環境対策を安全対策とした。労働災害対策においては，自然災害（地震，津波，土砂崩れなどを要因とする労働災害）および人的災害（坑道内の落盤，水没，火災，爆発，酸素不足などを要因とする労働災害）に対する安全対策を講じる。施設の基本的な安全対策としては，災害の発生・拡大を防止する対策が要求されるとともに，災害時に労働者の人命が確保されるよう，避難経路の確保も要求される。作業環境とは，地下あるいは地上施設の環境（温度，湿度，酸素濃度，粉じん濃度，ラドン濃度，照度，騒音レベルなど）のことであり，安全対策の設定においては，これらの環境が労働に適するように改善または維持するための対策を講じる。

表 6.2.3-2には，以上の安全対策をまとめて示した。

表 6.2.3-2 一般労働安全に対する安全対策の考え方

安全対策		説明
労働災害対策	災害の発生・拡大の防止	労働災害の要因となる事象の発生防止と拡大の対策を有すること
	災害時の避難経路確保	災害時の避難経路が確保されていること
作業環境対策	作業環境の維持	労働に適する環境を維持すること

6.2.3.3 環境保全対策の考え方

事業期間中の環境保全対策は，対策を施す環境要素を分類し，それぞれの環境要素に対して適切な対策を実施する（NUMO，2004b）。基本的な考え方を以下に示す。

- 事業の各段階を通じて処分場を建設する地域の環境に十分配慮することが重要である。
- 事業の各段階で生じる環境への影響について，それぞれの段階の前段階で調査，予測および評価を行い，環境に与える影響をできる限り回避，低減するとともに，必要に応じて代償措置（復元，創出）をとることを含めた適切な保全措置を講ずることができるようあらかじめ準備を行う。
- 当該段階においては実際にモニタリングなどを行ってその効果を確認し，必要があれば保全措置の改善もしくは追加の措置を講ずるといった計画的かつ柔軟な対応が重要である。

対策を施す環境要素は，以下の環境要素を基本とし，表 6.2.3-3に示す環境保全対策を行うことにより事業期間中の環境影響をできる限り回避，低減する。

- 環境の自然的構成要素の良好な状態の保持；人の健康，生活環境および自然環境に影響を及ぼす環境要素
- 生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全；動物・植物・生態系を対象にした環境要素
- 環境への負荷低減；事業実施により発生する環境への負荷を対象にした環境要素

さらに，事業期間中は事前の環境影響評価結果を元に，上記の環境要素に対して必要な環境保全対策を実施し，事業の進展の適当な時期において再度環境影響評価を行い，環境保全対策の有効性を確認する。事業の途中段階での環境影響評価の結果，環境影響の程度が著しい場合には，追加の環境保全措置などを実施する。

表 6.2.3-3 環境保全対策の考え方

環境保全対策対象の環境要素			環境保全対策の説明
環境の自然的構成要素の良好な状態の保持	大気環境	大気質	大気汚染物質の排出を低減する対策が施されていること
		騒音・振動	騒音・振動の対策が施されていること
		悪臭	悪臭物質の発生を低減する対策が施されていること
	水環境	水質	水質汚染物質の排出を低減する対策が施されていること
		地下水	周辺環境に著しい影響を与える地下水位低下や地下水水質変化を低減する対策が施されていること
	土壌環境・その他	地形・地質	保全対象の地形・地質に影響を与えない対策が施されていること 地盤沈下などの有意な発生を低減する対策が施されていること
		土壌	土壌汚染の影響を低減する対策が施されていること
生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全	動物・植物・生態系		天然記念物や学術的価値の高い動物・植物への影響を低減する対策が施されていること 地域を特徴付ける生態系に対する影響を低減する対策が施されていること
環境への負荷低減	廃棄物		事業に伴い発生する廃棄物量を低減する対策が施されていること
	温室効果ガス		温室効果ガスの排出量を低減する対策が施されていること

6.2.3.4 事業期間中の安全確保の要件との処分施設の構成要素の関係

処分施設は，地上施設，地下施設および操業システムから構成され，事業期間中の安全を確保するためのさまざまな安全対策を有する。地上施設は，廃棄体受入・封入・検査施設や人工バリアの製造施設などから構成され，地下施設は，アクセス坑道，主要坑道，処分坑道などの坑道類から構成される。一方，操業システムは，廃棄体の受入と人工バリアの施工にかかわる一連の作業，設備を示す。操業システムを地上・地下施設の一部と捉え，施設ごとに技術要件を整理することもできるが，ここでは，操業にかかわる作業の相互の関係や，工程計画の連続性，および操業区画の設定などの観点から，廃棄体の取り扱いに関する作業を操業システムとして，総合的に安全対策を設定した。表 6.2.3-4には，事業期間中の安全確保に関する基本的な安全対策と処分施設の構成要素ごとの「安全対策」との関係を示す。

「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」に関しては，操業期間中の放射性物質の漏えいを防止するために，廃棄体自身が放射性物質を密封する機能を有する。また，搬送機器・設備には，地震，故障などの際に異常事象の発生防止の機能を持たせるとともに，異常の拡大防止対策として，廃棄体への衝撃を緩和する機能をオーバーパックに期待し，また，施設からの放射性物質の放出の防止の安全対策を，廃棄体受入建屋に備える。

「放射線遮へい」については，廃棄体の取り扱いは遠隔操作を基本とし，遮へい壁を適切に設け

ることとする。また，搬送時には，搬送容器に遮へい機能を持たせることで，合理的に廃棄体からの放射線を遮へいする。

一般労働安全のうち作業環境として，空洞の力学的安定性，酸素濃度，温度・湿度，ラドン濃度の管理の機能を，地上・地下施設に設ける。このほかにもサイトの環境に応じて，必要に応じて作業環境の維持のための機能を追加する。災害の発生・拡大防止については，防火対策を挙げている。また，避難経路の確保についても地上・地下施設の設計時に考慮する。

表 6.2.3-4 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係

基本的な安全対策			安全対策	構成要素
放射線安全	操業時閉じ込め	廃棄体から放射性物質の漏えいの防止	廃棄体の密封	廃棄体
			搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和	オーバーパック 廃棄体搬送機器・設備
		施設からの放射性物質の過大な放出の防止	負圧管理および遠隔操作	廃棄体受入建屋
	放射線遮へい		遮へい壁による放射線の遮へい	廃棄体受入建屋 廃棄体定置機器・設備
			搬送容器による放射線の遮へい	廃棄体搬送機器・設備
	放射線被ばく管理	管理区域の設定	放射線管理区域の設定	廃棄体受入・封入・検査施設 地下施設の一部
		被ばく管理・モニタリング	作業従事者の被ばく管理および放射線取扱作業従事時間の制限，放射線モニタリングの実施	管理区域内（地上，地下）
			モニタリングポストの設置	施設屋外
一般労働安全	作業環境の維持		空洞の力学的安定性の確保（＊）	地上施設 地下施設
			換気経路の確保	
			排水対策	
	災害の発生・拡大の防止		防火対策	
			その他の災害防止対策	
	災害時の避難経路の確保		避難経路の確保	

（＊地下施設でのみ考慮する安全対策）

6.2.3.5 地上施設の技術要件

地上施設は，ガラス固化体を受入，地下に搬送し，処分するための所要の準備と地下施設で行われる作業を支援する一群の施設である。廃棄体受入・封入・検査施設，緩衝材の成型，加工に必要な施設に加え，排気・排水処理施設，掘削土置き場など地下施設の建設，操業に必要となる一連の施設で構成される。さらにサイトの地質環境特性によってはガラス固化体を受入るための港湾施設

や専用道路も処分場の敷地内に設置する場合がある。これらの施設は，処分場の閉鎖に伴い最終的には撤去されるため，閉鎖後長期の安全確保にかかわる技術要件は特に考慮する必要はなく，事業各段階を対象とした安全確保にかかわる技術要件を対象とすればよい。

地上施設を構成する各施設には，個々の施設の機能に対応して技術要件を考慮するが，ここでは例として廃棄体受入・封入・検査施設の安全にかかわる技術要件を示す。廃棄体は地上施設（廃棄体受入・検査施設）からの払い出し時に表面汚染検査により汚染のないことが確認され，かつ，その閉じ込め性はオーバーパックなどにより確保される。ただし，輸送中の廃棄体の振動などにより廃棄体の破損の可能性を考慮すると，地上施設のうち，廃棄体受入・封入・検査施設については，廃棄体などにより汚染する可能性があるエリアが存在する。従って，廃棄体受入・封入・検査施設に対しては，一般的な建屋に対する技術要件に加えて，放射線防護対策と放射線被ばく管理を適切に行うことが技術要件となる。その他の地上施設については，放射性物質を取り扱わないことから基本的に管理区域を設定する必要はない。

6.2.3.6　地下施設の技術要件

地下施設は，地上施設から廃棄体や建設資材などを搬送するためのアクセス坑道（立坑，斜坑）や連絡坑道，廃棄体を定置するための処分坑道あるいは処分孔（廃棄体を竪置きに定置する場合）などから構成される。以下では，地下施設を設置する候補母岩の評価事項および，地下施設レイアウト，坑道および操業システムの技術要件について概説する。

(1)　地下施設レイアウトの技術要件

候補母岩の評価で設定した地下施設建設の可能領域内への廃棄体の適切な配置が技術要件となる。このため，地下施設建設可能領域での処分パネルの規模や数などを検討するために，対象とする岩盤の規模や空間的な広がり，割れ目の位置や長さ，幅，方向などの空間的な分布を考慮して地下施設レイアウトを設定する。

一般労働安全としては，施設内の作業従事者の安全を確保することを技術要件とし，空洞の力学的安定性確保の観点から，主たる地圧の方向と坑道の方向の関係を考慮する。また，酸素濃度，温度・湿度，ラドン濃度の管理においては，平常時や何らかの異常時においても，換気経路を確保することとし，かつ，風速が過大とならないよう，経路を設計する。また，火災・事故防止対策と緊急時の避難経路の確保についても，地下施設レイアウトに関する技術要件とする。

また，施工実現性の観点から，年間 1,000 体の廃棄体が定置できるよう，操業工程計画に支障がないことを技術要件とする。例えば，工期内に建設，操業，閉鎖ができることや物流経路を確保すること，操業スケジュール変更に柔軟に対応できることなどを考慮して操業用坑道，建設用坑道，換気坑道，排水坑道，避難用坑道などを適切に配置する。

(2)　坑道の技術要件

地下の施設は地上と地下を結ぶアクセス坑道（立坑，斜坑），各処分パネルを結ぶ連絡坑道，処分パネルの外側に配される主要坑道，廃棄体が定置される処分坑道または処分孔（竪置きの場合）から構成される。また，地下での廃棄体，緩衝材の積み替えや排水設備，換気設備などを設置するための坑道が必要となる。

各坑道の利用目的にあわせた役割により，各坑道が所要の内空断面（形状，寸法，断面積）を有

していることと，建設・操業・閉鎖の各作業段階を通じて力学的安定性が確保されていることが技術要件となる。なお，操業期間中の放射線管理区域の設定に関する要件は，操業にかかわる技術要件で記述した。

(3) 操業にかかわる技術要件

操業は，廃棄体の受入と人工バリアの施工にかかわる一連の施設，設備，作業を示す。技術要件の設定では，操業にかかわる作業の相互の関係や，工程計画の連続性および操業区画の設定などの観点から，廃棄体の取り扱いに関する技術要件を設定する。例えば，なお，操業期間中の放射線管理区域の設定や遠隔操作によりオーバーパックの溶接，廃棄体の定置や，人工バリアの施工を実施することなどが技術要件となる。

6.2.4 事業の進展に伴う安全機能と技術要件の更新

ここまでに示した安全機能と技術要件は，文献調査を開始する前の段階において，わが国の多様な地質環境に対応することを目的として設定されたものであり，既往の高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の基本構成の検討に基づいている。今後，事業が進展し，前提条件が変わった際には，安全確保の基本概念に沿って，柔軟に内容を見直し，より適切な安全機能と技術要件の設定とする（7.1，8.1 参照）。前提条件の変化の要因を以下に例示する。

- サイトの調査・評価の進展に伴い，地質環境モデルが更新された場合
- 指針類の整備，民間規格の整備など，安全規制の枠組みが整備された場合
- 技術開発などにより地層処分の技術や知見に進展があった場合

なお，安全機能と技術要件の見直しを行う際には，要件の枠組みに沿って見直すこととし，見直しに伴い変更が必要となる設計や安全評価項目の範囲を明確にすること，また，要件管理システムを利用することなどにより変更の追跡性を確保する。

6.3　処分場の設計

処分場の設計は，サイト調査・評価の進展に応じて明確となる地質環境の条件を前提とし，地層処分事業の各段階における安全性および閉鎖後長期の安全性を確保すべく地下施設と人工バリアの仕様，また，必要となる地上施設や操業システムを具体化するものである。

以下に処分場の設計の基本的な考え方を説明する。

6.3.1　基本的な設計の流れ

処分場の設計対象の主な部位を図 6.3.1-1に示す。主な設計対象は，地上施設と地下施設，および地下施設に含まれる人工バリアである。主な人工バリアは，高レベル放射性廃棄物処分ではオーバーパックと緩衝材，地層処分低レベル放射性廃棄物処分では廃棄体パッケージ，緩衝材，充填材である。地下施設のうち両者に共通するものとして，坑道の支保工，坑道の埋め戻し，およびプラグ，地層処分低レベル放射性廃棄物処分では構造躯体がある。

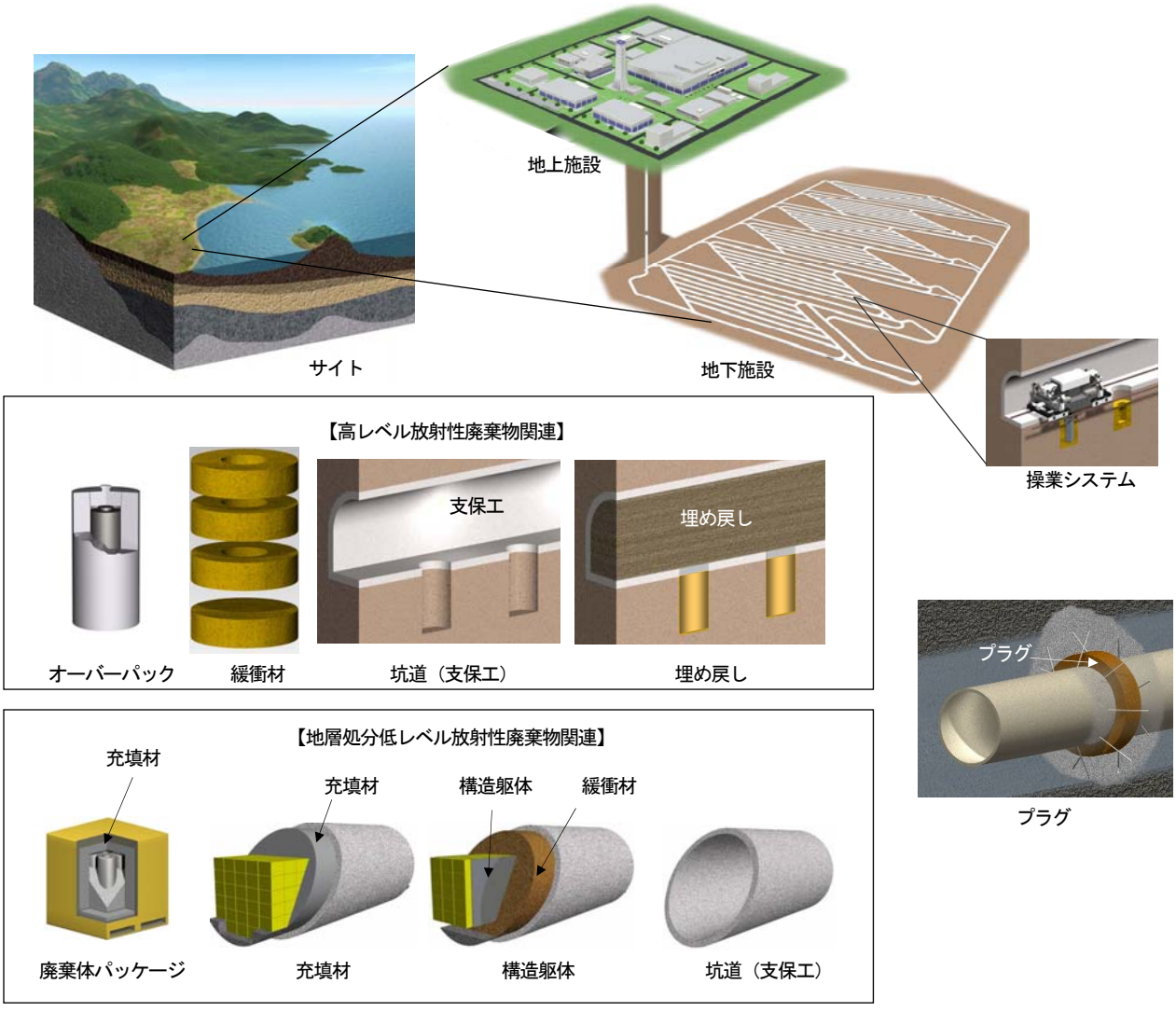


図 6.3.1-1 主な設計対象部位

処分場の設計の基本的な手順を図 6.3.1-2に示す。処分場の設計にあたり，6.2 では処分場に求められる安全機能と安全機能に対応した技術要件を明確化した。処分場の安全機能は，地質環境に依存するものと，地質環境に依存せず多重バリアシステムが本来的に具備すべきものがある。概要調査地区選定時には地質環境の情報が少ないため，処分場の安全機能と技術要件は，第２次取りまとめや第 2 次TRUレポートで示されている普遍的なもの，幅広い地質環境を想定したものを用いることが考えられる。精密調査地区選定段階では，概要調査に基づいて地質環境の情報が実際に得られることから，地質環境の情報や廃棄体特性に適合するように安全機能や技術要件を設定する。

設定した安全機能と技術要件に基づき，人工バリア，地下施設および地上施設の設計を相互に連携させながら進めていく。

まず，地質環境の情報をもとに地質・地質構造，地下水流動・地下水化学などを把握する。また，岩盤の力学特性と直接関連する坑道の力学安定性と，地温分布，廃棄物発熱特性などから求まる最大深度と坑道径を評価し，地下施設を設置可能な候補母岩領域を把握する。そして，候補母岩領域から核種の移行時間と移行経路が相対的に有利となる（長くなる）領域を絞り込む。さらに，廃棄物量から決まる処分場の規模を踏まえ，深度・エリアを選定する。

人工バリアについては，選定された候補母岩の特性を踏まえオーバーパックと緩衝材の設計を行い，オーバーパックの材質・形状・寸法や緩衝材の材料・密度・配合・寸法といった人工バリア仕様を設定する。

また，選定した候補母岩の深度・エリアへのアクセス方法を検討し，該当深度における各坑道の断面仕様や処分坑道内の廃棄体定置仕様を設定する。廃棄体と人工バリアを定置するために，必要となる坑道断面を確保するため，坑道の力学安定性評価に基づく支保設計を実施する。また，廃棄体の発熱に関する熱的評価を行い，人工バリアに有意な温度上昇が生じないよう廃棄体埋設密度を設定し廃棄体の定置間隔などを設定する。

設定した処分坑道仕様・廃棄体定置仕様を踏まえ，処分パネルの規模と数，およびその配置に加え，主要・連絡坑道の配置やアクセス坑道の数や配置などを検討し，地下施設のレイアウトを設定する。また，坑道の埋め戻しとプラグに関する設計を行う。

地上施設については，まず，自然・社会環境条件，輸送ルートなどを考慮して地上施設設置区域を選定し，設定した地下施設の深度とエリアとの位置関係などから，アクセス方法を検討し，坑口位置を設定する。そして，必要となる建屋群の配置を，放射性物質取り扱い区域や，建設資機材などの物流動線に留意して検討を行う。安全評価による地層処分システム全体の性能が十分であることを確認した上で，以上を処分場概念として取りまとめる。

また，地層処分低レベル放射性廃棄物については，高レベル放射性廃棄物処分におけるオーバーパック，緩衝材に相当する要素として，廃棄体パッケージ，緩衝材，充填材および構造躯体が挙げられる。

なお，上記の手順では一方向的な流れを説明したが，実際の設計では，それぞれの検討項目について，検討結果や設定値のやりとりや修正・再設計などを必要に応じて柔軟かつ適切に実施する。

次項以降に図 6.3.1-2に示す各設計の内容を説明する。なお，項番号との対応は図に示したとおりである。

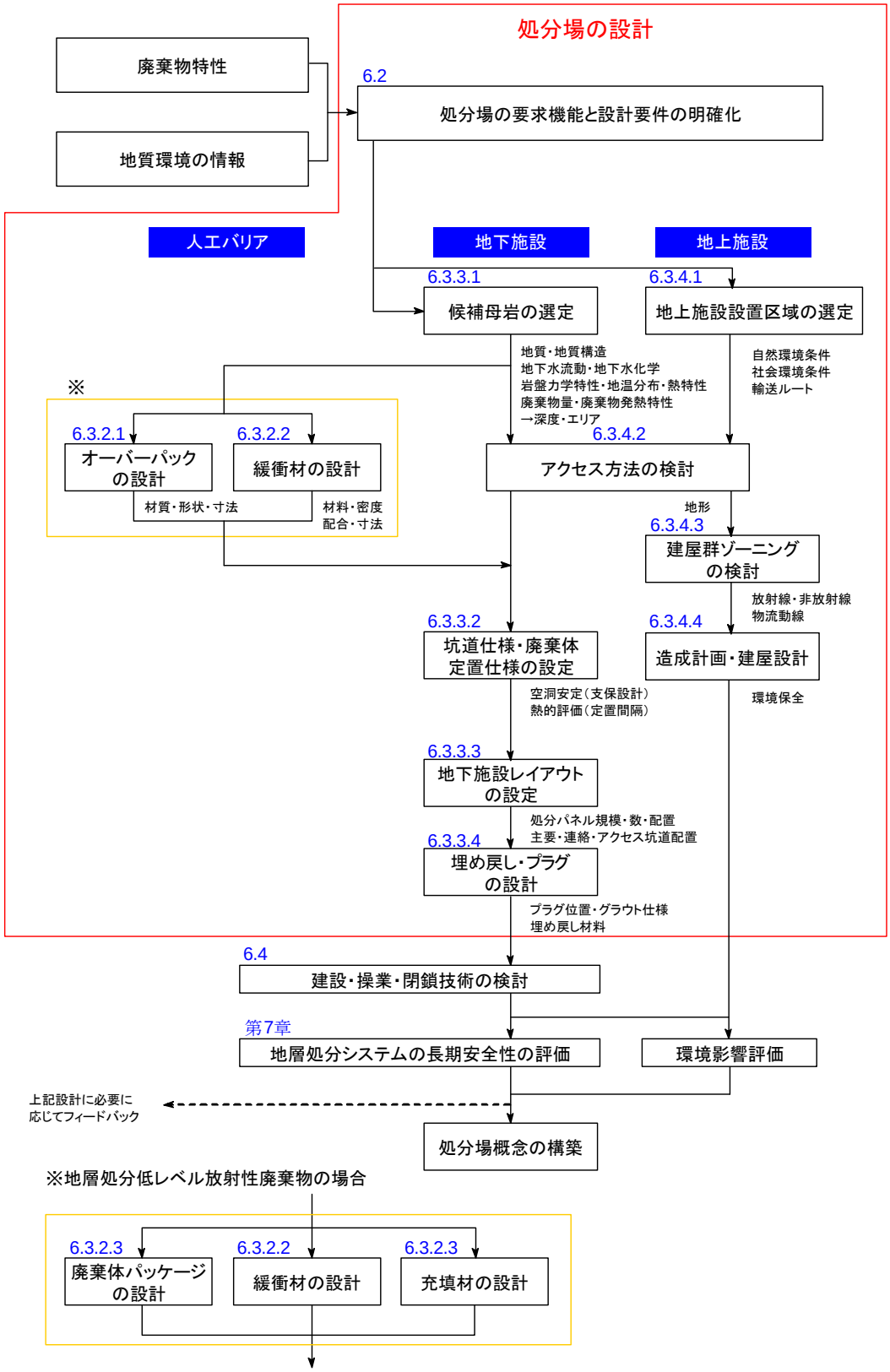


図 6.3.1-2 処分場の設計手順

6.3.2　人工バリアの設計

人工バリアについて，高レベル放射性廃棄物処分にかかわるオーバーパックと緩衝材，地層処分低レベル放射性廃棄物処分にかかわる廃棄体パッケージおよび充填材の設計の流れを説明する。

6.3.2.1　オーバーパックの設計

6.2 で述べたように，オーバーパックには，廃棄体中の短寿命核種の放射能が減衰するまでの間，地下水がガラス固化体と接触し，核種が溶出することを防止する機能を期待する。これにより発熱が著しい期間の放射性核種の移行を防ぎ，高温環境における核種移行の理解に関する安全評価上の不確実性を低減させる。発熱の著しい期間は，ガラス固化体の放射能と発熱の特性を考慮すると初期の 1,000 年間程度であり，オーバーパックは少なくともこの期間，地下水とガラス固化体との接触を防止する。

オーバーパックの候補材料としては，これまでのところ炭素鋼が有力候補である。また，還元性の環境で優れた耐食性を発揮し得る銅や高耐食性金属であるチタン（低合金チタンを含む）もオーバーパックの候補材料である。銅やチタンを使用する場合には，それぞれの内側に炭素鋼を強度部材として用いる複合オーバーパックが合理的である。概要調査により，サイトの地質環境特性が明らかになると，サイト条件に最適な材料を選定することになる。材料選定においては，閉鎖後長期の安全性に対する頑健性に加え，施工や溶接にかかわる技術開発成果を考慮する。

オーバーパックの技術要件に関しては，腐食や荷重に対する健全性，すなわち耐食性や耐圧性が重要である。収納するガラス固化体が円柱形であることや耐圧性の観点から円筒形が合理的であると判断している。オーバーパックの厚さは，耐食性と耐圧性に加え，ガラス固化体からの放射線が引き起こす水の放射線分解が腐食に影響を及ぼさないようにするための遮へい性を考慮して設定する。オーバーパックの厚さの検討手順を図 6.3.2-1に示す（JNC，1999b）。

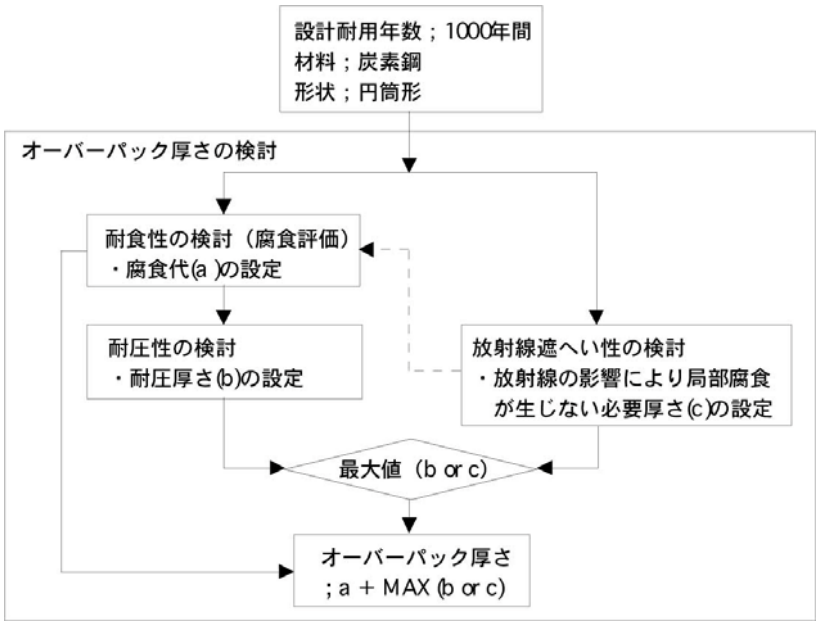


図 6.3.2-1 オーバーパック厚さ検討の手順例（出典：JNC，1999b）

炭素鋼の腐食寿命に関して，第２次取りまとめなどの既往検討により 32mm 以上の腐食代を与えることで，1,000 年以上のガラス固化体の閉じ込め性が期待できることが示されている。チタンについては，人工バリアの環境条件に応じて適切な合金種を選択すれば，1,000 年間程度では脆化しないという知見が得られている。また銅については，40mm 程度の腐食代で 1,000 年間の腐食寿命が期待できる。

炭素鋼オーバーパックの耐圧上必要な厚さは第２次取りまとめの検討事例では，蓋部；110mm，胴部；50mmである。また，局部腐食の進展を防止するため，放射線を遮へいする上で必要な厚さは 150mmである。以上から，現時点では，炭素鋼オーバーパックの厚さは，岩盤の種類やオーバーパックの部位によらず，放射線遮へい厚さ 150mm（耐圧厚さを含む）に腐食代 40mmを加え 190mmを基本としている（図 6.3.2-2）。このような設計仕様が現状技術で十分対応可能であることは試作を通じて確認されている（JNC，1999b；原環センター，2010a）。試作されたオーバーパックの重量は約 6tである（原環センター，2010a）。また，6.6.4.2 で説明するとおり，板厚が 190mmと厚い円筒部と蓋部の溶接技術について，TIG溶接，MAG溶接，電子ビーム溶接などの技術開発が基盤研究開発機関により進められている（6.6.4.2 参照）。

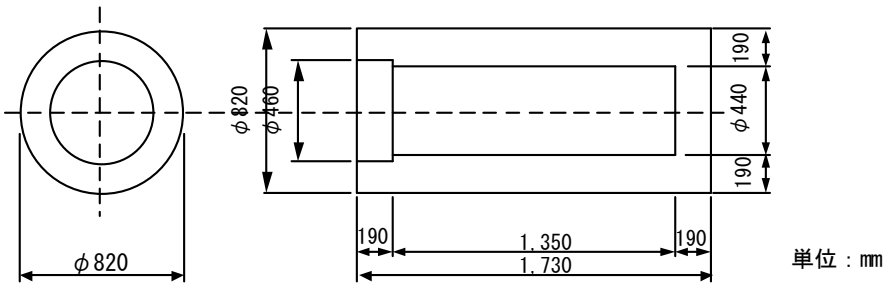


図 6.3.2-2 炭素鋼製オーバーパックの設計仕様例（出典：JNC，1999b）

6.3.2.2　緩衝材の設計

高レベル放射性廃棄物処分および地層処分低レベル放射性廃棄物処分に使用される緩衝材の設計では，6.2 に示される技術要件を満足するように仕様（材料，乾燥密度，緩衝材厚さ）を設定する。

高レベル放射性廃棄物処分における人工バリアのうち緩衝材の設計フローを図 6.3.2-3に示す。緩衝材の設計は，6.2 に示している「安全機能」が確保されるよう，廃棄体特性や地質環境特性を考慮して「技術要件」を設定する。緩衝材に求められる技術要件としては，安全機能に対応して，低透水性を有すること，コロイドろ過機能を有すること，自己シール性などを設定した。ここで設定した技術要件に対して，製作性･施工性を考慮して緩衝材の仕様範囲を検討する。

図 6.3.2-4にブロック方式を一例とした緩衝材の仕様範囲の検討の一例を示す。図中の曲線は，緩衝材の各技術要件が満足する乾燥密度および厚さの上限値または下限値を示しており，曲線で囲まれた範囲（斜線部）がすべての技術要件を満足する仕様範囲となる。この仕様範囲から図 6.3.2-3 のフローの後半に従い，品質管理方法や経済性などを考慮して，最終的な緩衝材の材料仕様や形状・寸法を決定する。また，調査が進むにつれて得られる情報や，品質管理方法，長期挙動の評価の結果を踏まえて，必要に応じて，材料仕様や形状・寸法を再度見直し，サイトに適した緩衝材の仕様を設定する。

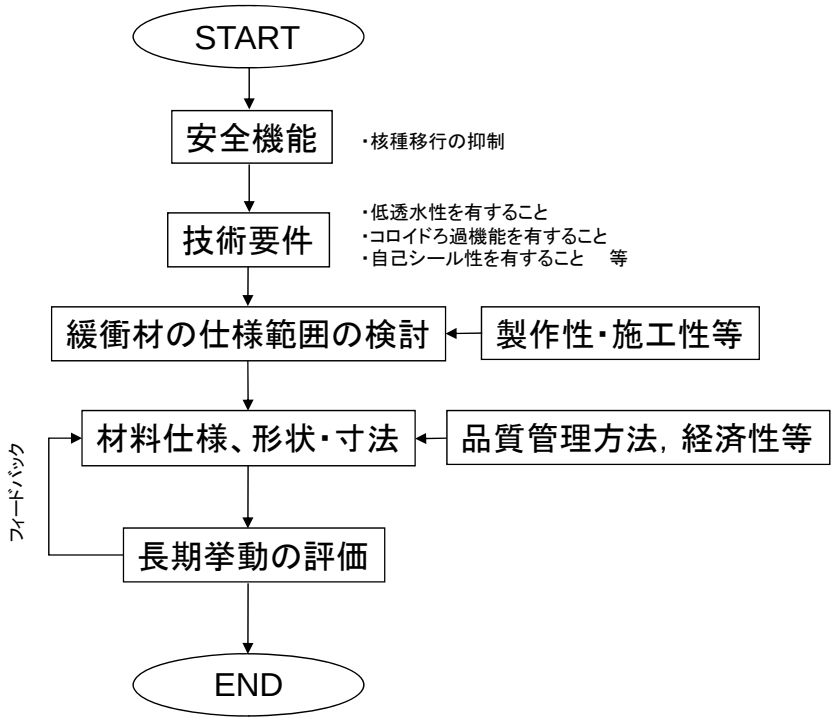


図 6.3.2-3 緩衝材の設計フロー（NUMO，準備中 d）

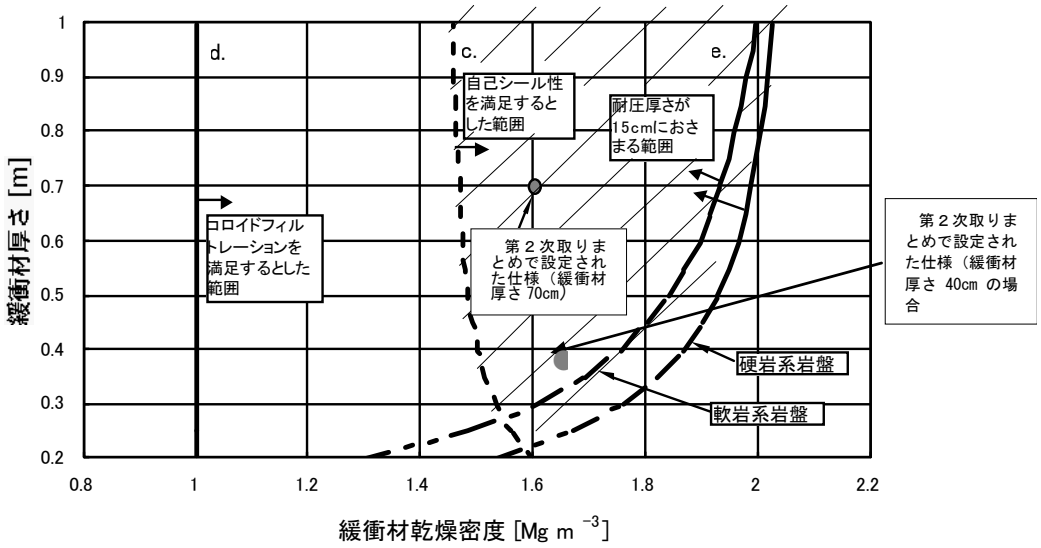


図 6.3.2-4 ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の確認（JNC，1999b に一部加筆）

6.3.2.3　廃棄体パッケージおよび充填材の設計

地層処分低レベル放射性廃棄物の容器としては，200Ｌドラム缶，キャニスタ，角型容器などが検討されている。これらの廃棄体は，地下の処分坑道内に直接定置する場合と，複数本の廃棄体を廃棄体パッケージに収納した上で処分坑道内に定置する場合が想定されている。廃棄体パッケージは，廃棄体とパッケージの隙間を埋める充填材，およびパッケージ容器から構成される。また，必要に応じて放射線遮へいに必要な遮へい体を施すことも検討する。

図 6.3.2-5に廃棄体パッケージの概要と設計手順を示す。

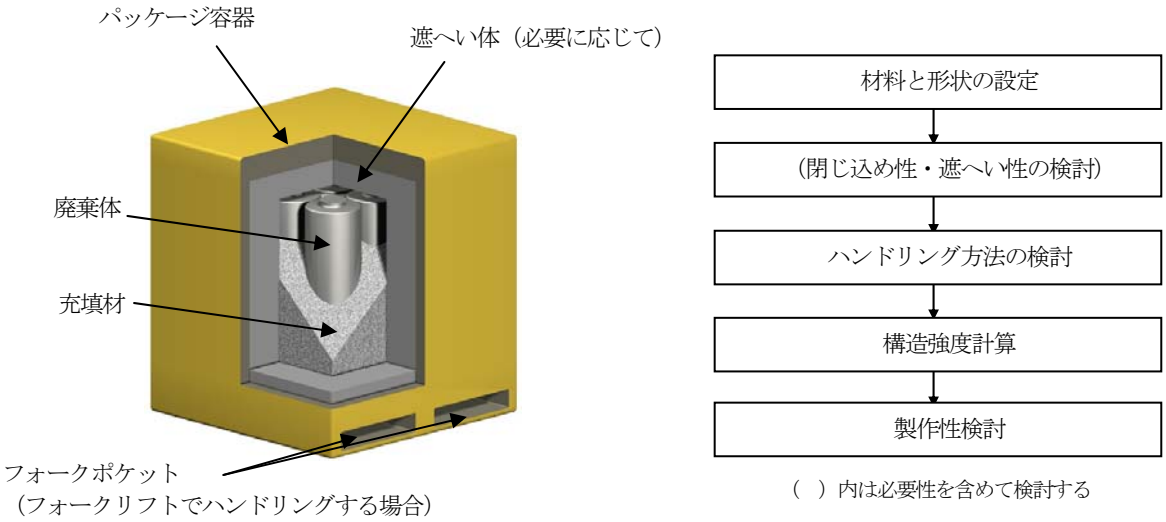


図 6.3.2-5 廃棄体パッケージの概要と設計手順

廃棄体パッケージの設計では，金属製材料あるいはセメント系材料といった材料の選択と形状や寸法を設定する。また，蓋の構造や胴部との接合方法あるいはフォークリフトやクレーンなど，廃棄体パッケージの搬送・定置に必要となる部位を検討する。そして，ハンドリング時，積み重ね時，埋め戻し後に廃棄体パッケージに作用する荷重を算定し，廃棄体パッケージの力学的健全性を構造計算により照査する。

また，廃棄体パッケージ内および処分坑道に施す充填材には，収着による核種移行の遅延機能を期待する。設計で検討する内容は，充填材領域の形状と寸法，および充填材の材料仕様である。前者は廃棄体パッケージ・構造躯体の形状，大きさならびに内部の収納状況により規定される。後者に関して，充填材は，廃棄体定置後に施工するため遠隔施工になるため，そのための機械や設備などの条件を整理し，セメント系材料の配合設計を行う。施工性，品質などは試験練りを通じて確認する。

6.3.3　地下施設の設計

地下施設は，①候補母岩の選定，②坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定，③地下施設レイアウトの設定，④埋め戻し・プラグの設計の手順で設計する。なお，①と②の間で，地上施設の設計と連携をはかりながら「アクセス方法の検討」を行う（図 6.3.1-2参照）が，これについては，6.3.4で説明する。

6.3.3.1　候補母岩の選定

サイト選定の初期の段階では（特に精密調査地区選定まで），応募いただいた区域の中から地下施設を設置するのに好ましい候補母岩を選定することが重要な意思決定事項となる。候補母岩は，最終処分法で定める深度300mより深い地層を対象に，概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2004a），NUMOが今後策定する精密調査地区選定上の考慮事項と，表 6.2.2-2 で示した地層処分の環境条件などを踏まえて選定する。表 6.3.3-1には，NUMOが考えている候補母岩選定のための評価項目例を示す。表 6.3.3-1には，表 6.2.2-2 の項目に加え，施工上に必要となる力学場の観点，地下施設全体を候

補母岩中に配置するための岩体の広がりの観点や，工程・経済性の観点からの項目を加えた。

表 6.3.3-1 候補母岩選定のための評価項目例

評価項目	評価指標の例	評価に必要な情報
【熱環境】 閉鎖後の処分場の温度が低いこと	地温勾配，岩盤の熱特性など	岩盤特性モデルおよび廃棄体の発熱量と岩盤特性に基づく廃棄体専有面積や温度の経時変化
【力学場】 坑道の力学的安定性が確保できるとともに，閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること	初期地圧，側圧比，岩盤の力学特性，地山強度比など	岩盤特性モデルおよび岩盤特性に基づく坑道離間距離や支保の仕様
【水理場】 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく，緩慢であること	動水勾配，地温勾配，地下水組成，透水係数，有効間隙率，地下水流向，地下水移行経路長，地下水移行時間など	水理地質構造モデル，地質環境の長期変遷
【化学環境】 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が核種の難溶解性と人工バリアの安定性に適していること	酸化還元電位，地下水のpH，地下水組成，鉱物組成など	地下水化学モデルおよび地下水化学特性に基づく人工バリアの長期挙動
【母岩の広がり】 処分場を収容できる面積（容積）を有するとともに，処分パネルを効率的に配置できる形状を有すること	母岩の空間的な広がり，断層・破砕帯の分布など	地質構造モデルおよび処分場の規模，処分パネルの数・形状の仮設定情報
【工程・経済性など】 工程確保の見通しがあるとともに，経済性が確保されること	建設工程，操業工程，掘削土量など	アクセス坑道の延長距離，処分形態や処分坑道断面の仮設定情報

表 6.3.3-1に示した評価項目のうち，熱環境，水理場，力学場の観点からの評価の具体的な考え方を以下に示す。

熱環境の観点では，深度が増すと地温が高くなるため，作業環境の維持や人工バリアの熱的温度制限を考慮し領域の下方限界（最大深度）を把握する。

力学場の観点では，法定要件である地下 300m 以深に設置する坑道の大きさは，岩盤の強度と坑道に作用する地圧の関係から決まる。一般に深度が増すと地圧が大きくなり，坑道の力学安定性が低下する傾向があるため，坑道の力学的な安定が確保できる最大深度を把握する。

図 6.3.3-1には，熱環境と力学場の観点から設定される坑道径と深度の関係を示す。空洞安定性から制限される最大深度は，坑道径が大きくなると小さくなり，岩盤の力学強度に応じて大きくなる。岩盤中では坑道の鉛直方向と水平方向に作用する地圧が異なる場合がある。このような坑道断面方向の地圧の異方性が大きくなると同じ坑道径でも最大深度は小さくなる。また，坑道の力学安定性による最大深度は，掘削手順や支保工の種類などによっても変わる。また，熱影響の観点について，図 6.3.3-1に，高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の発熱性廃棄体を含むグループ２の処分坑道を例として熱的制限から決まる坑道径と深度の関係を示す。高レベル放射性廃棄物の熱影響については，深度が深くなるに従い地温が高くなるため，人工バリアの温度上昇の熱的制約から廃棄体間の離隔（専有面積）が大きくなる。地層処分低レベル放射性廃棄物の熱影響については，第 2 次TRUレポートを参考にすると，深度 300mで外径 13m程度の処分坑道になる。人工バリアの温度上昇の熱的制約から坑道断面あたりに収納できる廃棄体量は少なくなり，坑道径も小さくなる。これらの関係は，岩盤の熱特性，地温勾配，廃棄体の発熱特性によって変わる。

このように法定深度以深で，岩盤の力学条件および熱的制限により掘削可能な深度と坑道径の関係を把握し，操業上必要な坑道径を確保できる範囲を把握する。

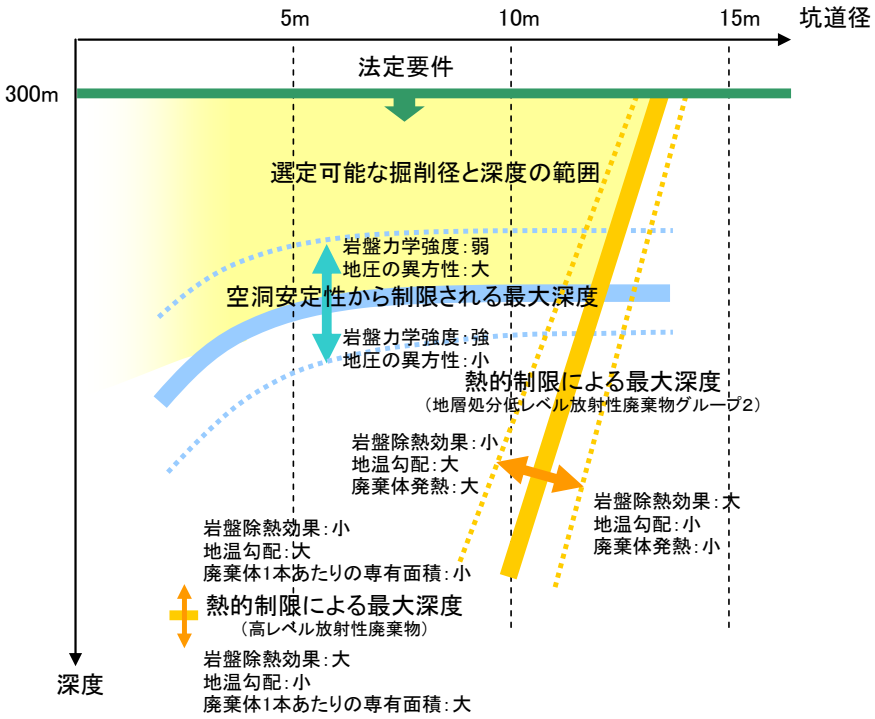


図 6.3.3-1 坑道径と深度の関係

水理場の観点では，候補母岩の地下水流動（下降流，上昇流，流出点など）や処分エリア・深度ごとの地下水移行経路と地下水移行時間を評価し，上記で説明した坑道の力学的観点および熱的観点での成立性が評価された領域から，相対的に核種移行評価の観点から有利な領域，例えば，地下水移行経路と地下水移行時間とが相対的に長くなる領域を処分場の設置エリアとして抽出する。地下水の移行時間の算定手法としては，深度ごとに規則的に配置した点から出発する粒子の動きを算定する粒跡線解析（図 6.3.3-2）などがある。この際，長期的な処分場の地質環境の変遷に関連して，沿岸域では隆起・浸食などに起因して，海水準が変動することが想定される。その結果，塩淡境界が移動し，地下水流動（流向・流速）に加えて，地化学条件も時間的に変遷する（6.5.1 参照）。さらに，核種の移行先となる生物圏も時間的に変遷する。上記の評価項目に加え，沿岸域では，地下水流動の将来変遷も考慮し，総合的観点から処分場の設置エリアと深度を設定する。

また，処分エリアの規模を設定する際には，母岩中に廃棄体を定置することが好ましくない局所的な箇所があることに留意し，工学的判断によりある程度の余裕を持ったエリアを設定する（6.1.2 参照，第 8 章に具体的な検討事例を示す）。なお，廃棄体を定置することが好ましくない箇所とは，破砕帯や坑道内への湧水が多い箇所などのことである（図 6.1.2-1 参照）。なお，候補母岩は複数種の岩盤にまたがる場合もある。

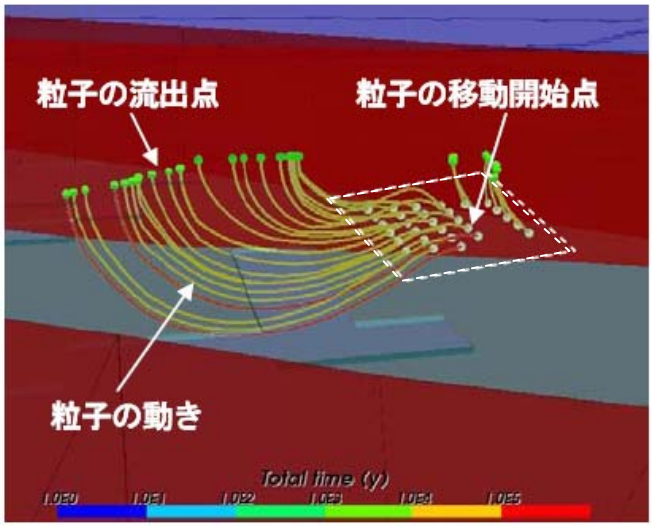


図 6.3.3-2 粒跡線解析のイメージ

6.3.3.2 坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定

(1) 高レベル放射性廃棄物処分

坑道仕様の設定では，坑道の断面寸法と断面形状の設定および支保工の設計が主な設計項目であり，廃棄体定置仕様の設定では，主に熱的観点からの廃棄体設置間隔（廃棄体埋設密度）の設定が主な設計項目である。

(i) 坑道仕様の設定

まず，人工バリアの設計で設定した緩衝材の仕様を踏まえ，緩衝材と廃棄体を設置するために必要な坑道の大きさ，また，緩衝材やオーバーパックを地下施設内に搬送し，定置する設備や機械を仮設定し，それらから決まる坑道の建築限界（最低限必要となる坑道の大きさ）を設定する。坑道

の断面形状は，力学的安定性（坑道が力学的に安定でその変形量が小さいこと），作業性（建設・操業・埋め戻しの作業を円滑に行うことができること），経済性（必要断面積を包括しつつ極力小さな断面とすること）から設定する。

(a) アクセス坑道

アクセス坑道は地上施設と地下施設を結ぶ坑道で，両施設間の人員と物資の搬送および換気と排水などの経路となる坑道である。立坑と斜坑の２種類が考えられる。

① 立坑

立坑の断面形状には，円形，楕円形，四角形などが考えられる。処分場では，施工深度が大きく地圧が大きくなるため，地圧が等方均一に作用する場合には力学安定性の観点から，形状としては円形が有利である。地圧の異方性が大きいサイトにおいては，楕円形状の採用もありうる。立坑は，建設・操業・閉鎖の各作業や換気・排水などの用途に複数本構築する。立坑を廃棄体の搬送経路とする場合には，遮へい機能付き移動車両を揚重するための設備により立坑の径を設定する。また，建設用に用いる場合には，地下の水平坑道施工時の施工条件などを踏まえ立坑の径を設定する。第２次取りまとめにおける検討を参考にすると，内径 6.5m 程度が目安となる。

② 斜坑

斜坑の場合，その形状と寸法は次に示す連絡坑道と同じ考え方で設定でき，勾配や線形（直線，らせん，多角形）は，処分場のレイアウトと関連して設定する。勾配は，輸送手段をタイヤ方式の車両とすると 12～14%程度以下，ベルトコンベヤで 25%程度以下としている例が多い（土木学会，2006）。また，線形は，敷地条件（位置，面積，形状など），廃棄体の搬送装置の形状寸法や能力，走行安全性などを考慮して設定する。

なお，アクセス坑道の種類や配置は，地下水流動方向などを踏まえ，閉鎖後長期の安全性の観点や建設・操業・閉鎖の作業性などの観点から総合的に判断して決定する。

(b) 連絡坑道

連絡坑道は，アクセス坑道と処分坑道とを結ぶ坑道であり，物資の搬送経路や換気・排水経路となるものである。連絡坑道の形状や寸法は，坑道の力学的安定性とともに，施工性や操業時の作業性を考慮して決定する。勾配は，施工中の湧水を自然流下させるため，0.3～0.5%程度が目安となる（土木学会，2006）。処分坑道との交差角度は，操業に要する装置や施工実績を考慮して設定する。交差部の力学安定性は，坑道の力学安定性の評価によって確認する。

(c) 処分坑道と処分孔

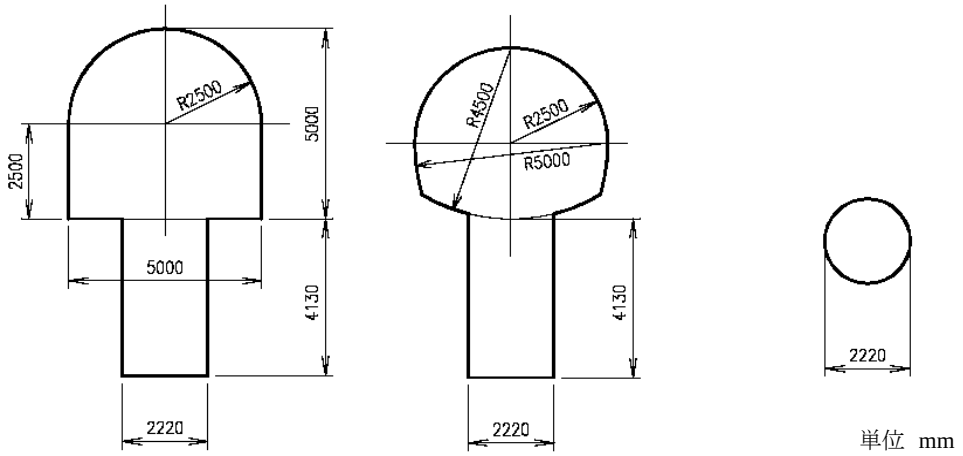
廃棄体の代表的な定置方法には処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式がある。

① 処分孔竪置き定置方式

処分孔竪置き定置方式は処分坑道の床面に処分孔を掘削し，その処分孔内に廃棄体を定置するものである。この場合の処分坑道の形状と寸法は，処分孔掘削機械，廃棄体，緩衝材定置装置の寸法と形状などを踏まえて決定する。第２次取りまとめでは，硬岩系岩盤においては幌型断面形状を，軟岩系岩盤においては，坑道の力学安定性をより重視し，三芯円形状が示されている（図 6.3.3-3(a)）（JNC，1999b）。

② 処分坑道横置き定置方式

処分坑道横置き方式は処分坑道に廃棄体を定置させる。その形状や寸法は，基本的には人工バリアの仕様と，その定置設備により決定する（ 図 6.3.3-3(b)）（JNC，1999c）。



硬岩系岩盤　　軟岩系岩盤

(a) 処分孔竪置き定置方式　　(b) 処分坑道横置き定置方式

図 6.3.3-3 処分坑道断面の仕様例（出典：JNC，1999c）

（ii） 各坑道の力学的安定性の検討

各坑道の工学的実現性の観点について，まず，坑道の力学的安定性を確保するための支保工の必要性を検討する。支保工が必要となる場合には，支保工仕様（厚さ，強度など）を設定した上で，坑道の力学安定性評価を行う。

(a) 支保工の検討

支保工は坑道の掘削に伴って力学的に不安定となる坑道周辺の岩盤の安定を，施工中から供用期間にわたって保ち，掘削作業の安全と完成後の坑道の安全な供用を確保するために設置される。支保工には吹付コンクリート，覆工コンクリート，コンクリートセグメント，ロックボルト，鋼製支保工などがあり，それぞれを単独あるいは組み合わせて用いる。

(b) 坑道の力学的安定性

6.2 で述べたとおり，地下施設を構成する各坑道には，建設時から最終的に埋め戻しが行われるまで坑道の力学的安定性が確保されていることが要求される。精密調査における調査坑道の掘削前は，地上からのボーリング調査などで得られた岩盤の力学特性データをもとに，主に数値解析的な手法などに基づき，空洞の力学的安定性を評価する。数値解析による検討では二次元あるいは三次元弾塑性解析などにより，岩盤の最大せん断ひずみ，局所安全率，支保工応力度などを指標として坑道の力学安定性を評価し，必要となる坑道離間距離と廃棄体ピッチを算定する。図 6.3.3-4は，局所安全率が 1.2 以下になる領域が坑道掘削径の 20%以下になるかどうかを算定した事例である。

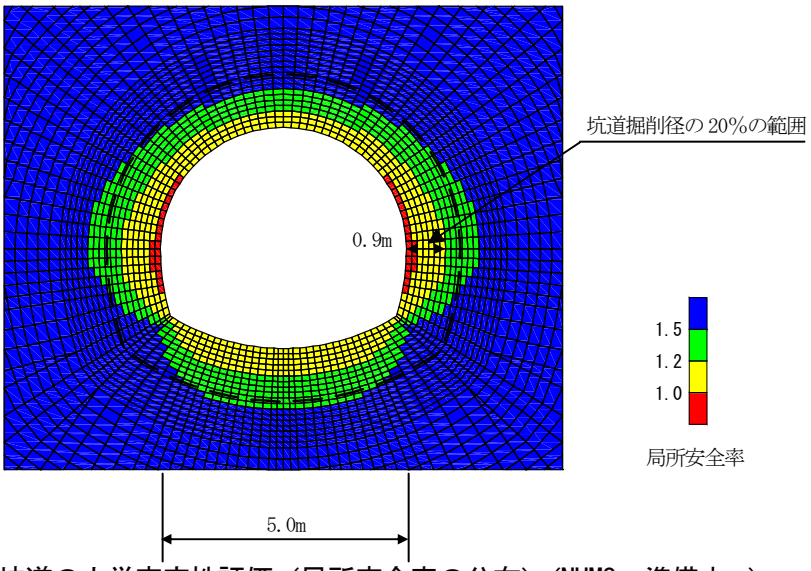


図 6.3.3-4 坑道の力学安定性評価（局所安全率の分布）（NUMO，準備中 a）

なお，将来，サイトが特定された段階においては，その地質環境の条件に応じて割れ目による岩盤の不連続性や異方性，支保工の効果などにも留意してサイトに適した解析手法を選択する。また，サイト調査から得られる事前の情報だけでなく，情報化施工の考え方に基づき，建設時における調査や計測から得られる情報を適宜，支保工の仕様の設定に反映する。

また，上記の掘削時の空洞の力学安定性評価に加え，2006 年に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会，2006）を参照し，耐震重要度に応じた耐震設計を行う。NUMO が実施した耐震性評価の検討事例については，6.6.3 で説明する。

（iii） 廃棄体定置仕様の設定

廃棄体定置仕様に関して，処分坑道離間距離と廃棄体ピッチは，力学的安定性に加え，坑道埋め戻し後の人工バリアの温度制限の観点から，廃棄体発熱による熱的影響を考慮して設定する。

坑道の力学安定性が確認された処分坑道を処分パネルに配置するためには，廃棄体からの放熱に伴う緩衝材の温度上昇によって，緩衝材に安全機能を損なうような変質が生じないよう適切な廃棄体ピッチを確保する。このため，廃棄体定置後のニアフィールドにおける温度の時間的変化を解析的に評価し，緩衝材の最高上昇温度が一定の制限温度を下回るよう処分坑道離間距離と廃棄体ピッチを設定する。

第２次取りまとめでは，温度が 100℃未満の場合には緩衝材性能を損なうような変質は生じにくいと考え，緩衝材の制限温度の目安として 100℃を設定し，ニアフィールドの温度分布の解析が行われている。人工バリア各部位の温度は，廃棄体定置後 10 年から 20 年程度で最大となり，その後徐々に低下することが示されている（JNC，1999b）。

処分パネルの坑道配置を合理的に検討する上での基本的な設計パラメータとして，処分坑道離間距離xDおよび廃棄体ピッチyを用いる（図 6.3.3-5参照）。これらは，地下施設の概略総面積（廃棄体１本あたりの専有面積xD×yと廃棄体本数の積），処分坑道の総延長（廃棄体ピッチyと廃棄体本数の積），総掘削量（処分坑道総延長×坑道断面積）を支配する重要なパラメータでもある。経済性，サイト選定の柔軟性を高めるなどの観点から地下施設規模をできるだけ小さくするためには，地下施設の総面積を最小化（専有面積xD×yを最小化）するとともに，処分坑道の総延長を最小化（廃棄

体ピッチyを最小化）することが望ましい（JNC, 1999b）。一方，概要調査地区選定段階の設計では，岩盤の熱特性を十分把握することが難しく，処分深度や地質環境に応じて設計結果が変わる可能性があることに留意する。例えば，NUMOが実施した岩盤熱特性が地下施設の占有面積に与える影響を考察した検討によれば，熱特性の分布を考慮して設計すると平均値で設計した場合に比して５％の確率で専有面積が数10%割程度以上増加する（Umeki et al.，2004）。

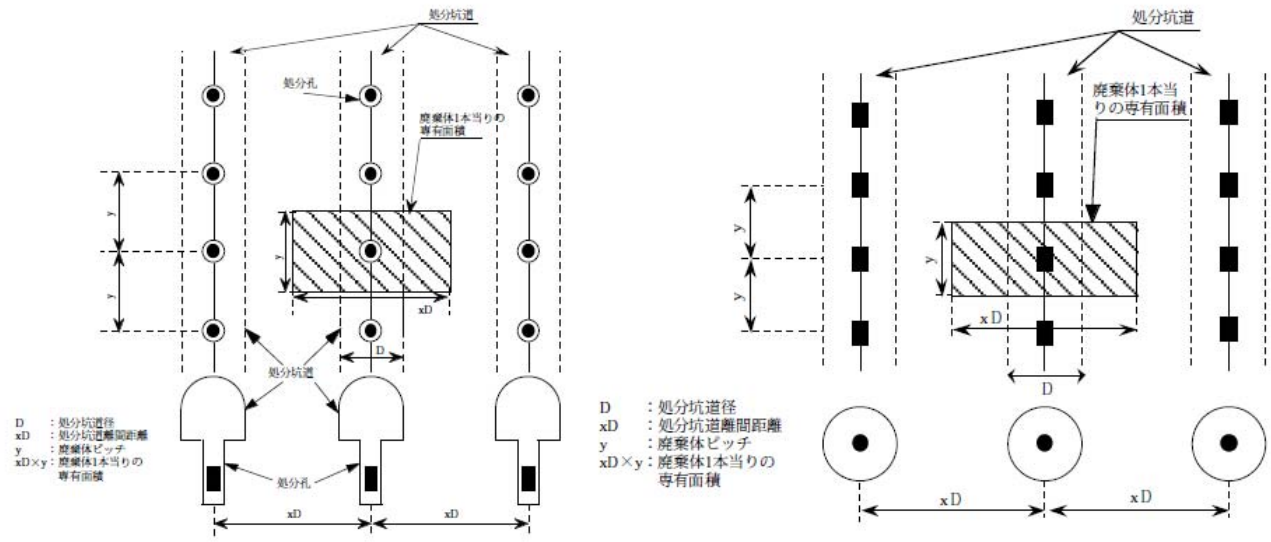


図 6.3.3-5 廃棄体１本あたりの専有面積（出典：JNC, 1999b）

(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設においても，アクセス立坑，斜坑，主要・連絡坑道などの仕様の設定は，高レベル放射性廃棄物処分施設のそれぞれの考え方と基本的には同じである。一方，処分坑道は，地層処分低レベル放射性廃棄物が高レベル放射性廃棄物と比較して発熱性の低いものが多いため，廃棄体の定置効率を高めるため，坑道を大断面とし多くの廃棄体を集約して定置することを指向している（NUMO, 準備中 b）。廃棄体の定置密度を高める方が経済的に有利となる。処分坑道の形状は，地質環境の条件を踏まえて選定するが，円形坑道，幌型空洞などが考えられる。

坑道が大断面になると，実際の坑道掘削では力学安定性の確保や作業の安全性確保の観点から，坑道断面を複数に分割して掘削する。数値解析により坑道の力学安定性を評価する場合には，そのような実際の施工手順を模擬して実施する。なお，高レベル放射性廃棄物処分施設の坑道の力学的安定性で説明したとおり，将来，サイトが特定された段階においては，その地質環境特性に適した解析手法を選択すること，および建設時に得られる力学安定性にかかわる計測情報を適切に力学安定評価にフィードバックすることが重要である。

また，地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道には，必要に応じて構造躯体を構築する。構造躯体は廃棄体，緩衝材，充填材などの搬送・定置作業を効率化し，操業中の作業の安全を確保するためのものである。構造躯体には期待する機能に応じて種々の形態が考えられる。第 2 次 TRU レポートでは，幌形坑道では，構造躯体を厚さ 1m 前後の鉄筋コンクリート製とし，側壁部上部に廃棄体定置クレーンを走行させる形態，円形坑道では，構造躯体を厚さ 5cm の鋼製とし，廃棄体は処分坑道端部からフォークリフトなどの車両系定置装置で所定箇所に定置する形態が示されている（電

事連・JNC，2005)。構造躯体は，用途に応じて想定されるクレーン荷重，充填材施工時に作用する充填圧，埋め戻しにより作用する荷重などを考慮した構造解析により設計する。

6.3.3.3　地下施設レイアウトの設定

(1)　高レベル放射性廃棄物処分施設

高レベル放射性廃棄物処分では廃棄体を定置する処分坑道群，それらを取り囲む主要坑道からなる複数の区画（処分パネル）および主要坑道とアクセス坑道を結ぶ連絡坑道から構成される（図 6.3.3-6)。廃棄体を処分する領域を複数の処分パネルに独立させることで，地質環境の条件などに応じて柔軟な地下施設レイアウトが可能になるとともに，建設・操業・閉鎖という主要な作業を錯綜することなく並行して実施することが可能になる。

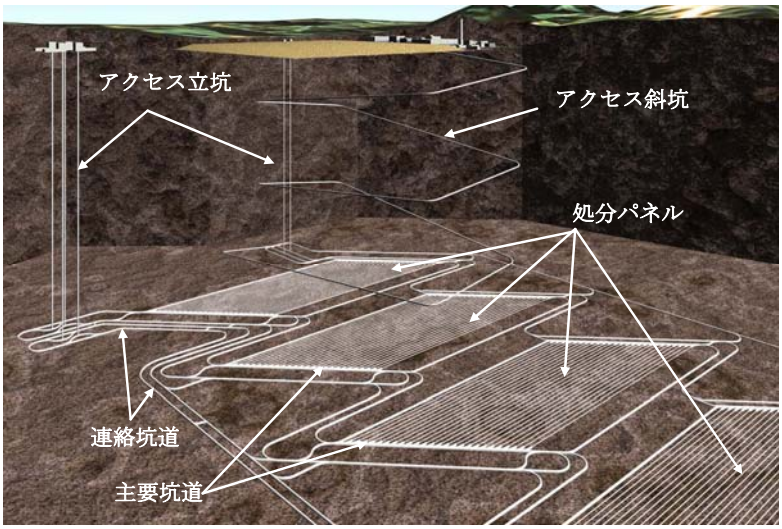
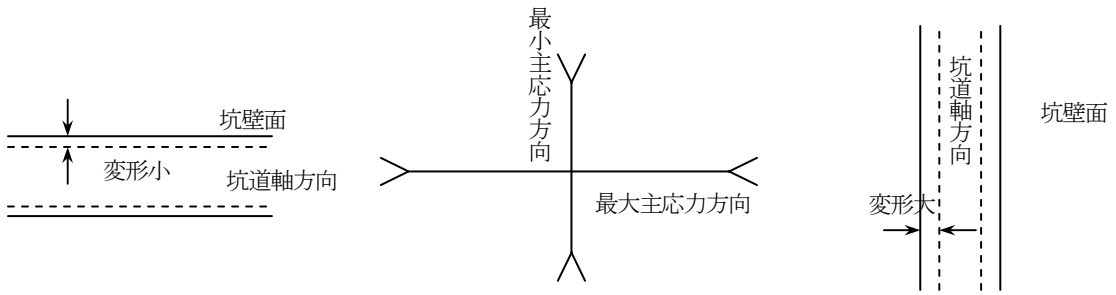


図 6.3.3-6 地下施設レイアウト例（高レベル放射性廃棄物処分場）

地下施設レイアウトの検討では，処分パネルの規模と数を設定し，処分パネルを構成する坑道群の方向を設定する。次に，それらを取り囲む主要坑道，および地上施設と接続するアクセス立坑や斜坑の配置を設定する。坑道群の方向や配置は，建設・操業・閉鎖作業の安全性や物流の確保のほか，岩盤の主応力方向，地下水流動方向などの地質環境の条件も考慮する。

岩盤の主応力方向に関して，坑道軸方向を水平面内の最大主応力方向に一致させるほうが坑道の変形は小さく空洞安定性の面で有利である（図 6.3.3-7)。地下施設は，処分坑道，主要坑道，連絡坑道など多くの坑道群から構成されており，すべての坑道の方向を一致させることはできないが，処分坑道がほかの坑道と比較して総延長が長いことから，処分坑道軸を水平面内の最大主応力方向に向けることが望ましい。

一方，岩盤中の割れ目と坑道の方向については，地下発電所の考え方（電力土木技術協会，1988）によると，坑道軸方向を割れ目に直交させるように配置することが空洞の安定上望ましいとの考え方が示されている。また，卓越した地圧の作用方向と割れ目の卓越方向が一致しない場合には，両者の空洞安定性への影響の度合いを考えた場合，後者の方が影響が大きくなることから，最大主応力より割れ目などの地質的不連続面との関係を重視して決める方が望ましいとの考え方が示されている。



＜坑道軸を最大主応力方向にした場合＞　　＜坑道軸を最小主応力方向にした場合＞

図 6.3.3-7 主応力方向と坑道軸方向の関係

地下水流動に対しては，地下施設の形状の短辺方向が主要地下水流動方向と直交する方が，地下施設を通過する地下水流量は少なくなり，核種移行の観点からは有利であると考えられる（図6.3.3-8）（JNC，1999b）。

総延長が最も長くなる処分坑道の坑道軸はこれらに加えて，力学場や水理場に影響を与えうる岩盤中の亀裂の状況なども踏まえて設定する。なお，上記の力学安定性および地下水流動方向の観点から有利と考えられる処分坑道の方向が違うことも大いに想定されるが，そのような場合にはそれぞれの得失を総合的に判断し最もよい地下施設レイアウトを見出すことになる。

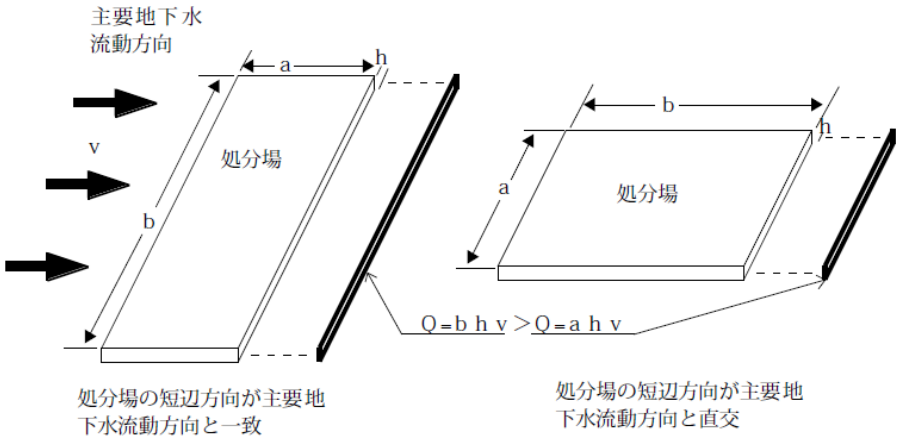


図 6.3.3-8 地下水流動方向と処分場の方向（出典：JNC，1999b）

また，主要・連絡坑道は，作業時の安全確保，管理区域の明確化の観点から，各処分パネルに対して独立した物流動線が確保できるように配置する。坑道の曲率や坑道同士の接続部の角度などは，操業機械の回転半径なども考慮して決定する。

アクセス立坑および斜坑の本数は，地下施設における建設・操業・閉鎖作業を円滑かつ安全に実施するために必要な本数とする。また，アクセス坑道は主要な地下水流動方向を踏まえ，天然バリア中の核種移行抑制の観点から，適切な位置に配置する。

(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

地層処分低レベル放射性廃棄物処分では，処分坑道の本数が高レベル放射性廃棄物処分のように多くはないため，処分パネルという概念ではなく，処分坑道を以下の観点で配置する（NUMO，準備中 b)。

- 重要核種を含むグループ１，２の処分坑道を主要な地下水の流れに対して上流側に配置して，緩衝材がセメント系材料の溶出成分の影響を受けないようにするとともに，核種の移行距離を長くする。
- 硝酸塩を含むグループ３の処分坑道は，ほかのグループの人工バリアおよび天然バリア特性に及ぼす影響をできるだけ排除するように，ほかのグループから主要な地下水の流れの向きに対して水平方向に離して配置する。

硬岩系岩盤，深度 1,000mにおける地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設のレイアウト例を図 6.3.3-9に示す。

高レベル放射性廃棄物処分は，処分パネル別に建設，操業，閉鎖作業を並行して進めるのに対し，地層処分低レベル放射性廃棄物処分場は地下施設全体として，建設・操業・閉鎖と順番に進める。操業とほかの作業とは錯綜しないので，アクセス坑道，主要坑道を放射線管理の観点から作業別には分けない。

アクセス立坑および斜坑の本数と配置は，高レベル放射性廃棄物処分と同様の考え方で設定する。

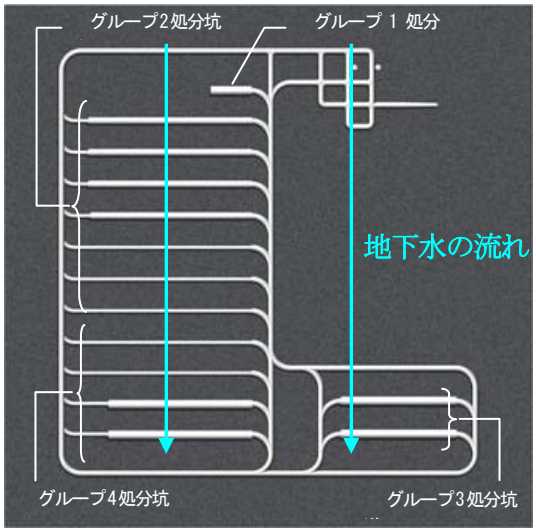


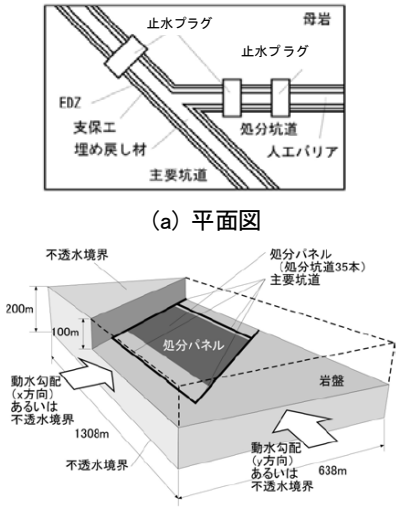
図 6.3.3-9 地下施設レイアウト例（地層処分低レベル放射性廃棄物処分場）
（NUMO，準備中 b をもとに作成）

6.3.3.4 埋め戻し・プラグの設計

埋め戻し・プラグの設計では，埋め戻し材，プラグの仕様とそれらの設置位置を設定する。6.2

で述べたとおり，坑道の埋め戻し材と止水プラグには，閉鎖後の移流による核種移行の抑制など，力学プラグには緩衝材の密度低下につながる膨潤挙動の低減などを期待する。

具体的には，坑道の残された空間を埋め戻し，必要に応じて掘削影響領域などを止水プラグで分断することや，緩衝材の移動・流出を防止する力学プラグを処分坑道端部などに設置する。設計の妥当性については，埋め戻し材やプラグなどの単体評価ではなく，これらを組み合わせた閉鎖システム全体として評価する。NUMOはJAEAと共同で閉鎖システム性能に関する検討を進めている（NUMO，2006）（図 6.3.3-10）。



(a) 平面図

(b) パネル規模の解析で考慮した前提境界条件

図 6.3.3-10 閉鎖システムの評価で考慮したプラグ，埋め戻し材の配置関係，および処分パネル規模の解析で考慮した前提・境界条件の設定（NUMO，2006）

また，アクセス坑道の埋め戻し終了後，アクセス坑道の坑口にプラグが設置される。このようなプラグには，埋め戻し材の膨潤応力に抵抗でき，人間の不用意な侵入を防ぐという観点から，第２次取りまとめでは強度の高いコンクリートプラグが適するとされている（JNC，1999b）。

6.3.4　地上施設の設計

地上施設は，廃棄体を受入，地下に搬送して定置するための必要な準備と事業管理に必要な施設，また，地下施設で行われる作業を支援する一群の施設である。

また，地下施設の建設で発生した掘削土（岩や土砂）を再び埋め戻し材として利用する場合には，再利用するまでの間保管しておくための場所が必要となる。サイト条件によっては廃棄物を受入るための港湾施設や専用道路も処分場の敷地内に設置する場合がある。

地上施設の全体配置として，高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を併置する場合のイメージを図 6.3.4-1に示す。

このように地上施設の役割は多様であるが，必ずしも集中して配置する必要はなく，地形などの条件の特徴を踏まえて配置することができる。また，地上施設は地下施設の建設に先立ってその多くを建設する必要があるとともに，処分場の閉鎖に伴い最終的には撤去されることになる。なお，地上施設の建設や操業には，通常の原子力施設や一般の産業施設で確立されている技術を基本的に適用することができる。

地上施設は,① 地上施設設置区域の選定,② アクセス方法の検討,③ 建屋群ゾーニングの検討,④ 造成計画・建屋設計の手順で設計する。



① 高レベル放射性廃棄物受入・封入・検査施設
② 地層処分低レベル放射性廃棄物受入・検査・廃棄体パッケージ製作施設
③ 地層処分低レベル放射性廃棄物廃棄体パッケージ容器製作施設
④ 緩衝材製作・検査施設
⑤ プラグ製造施設
⑥ 埋め戻し材製作・検査施設
⑦ 掘削土置き場
⑧ アクセス坑道出入管理施設
⑨ 坑道換気施設
⑩ 排水処理施設
⑪ 廃棄物処理施設
⑫ 排気筒
⑬ コンクリート供給施設
⑭ ユーティリティ施設
⑮ メンテナンス施設
⑯ 管理棟
⑰ 保安施設
⑱ 輸送車両専用門
⑲ 港湾施設
⑳ PR 施設

図 6.3.4-1 地上施設イメージ図（高レベル放射性廃棄物，地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を併置する場合）

6.3.4.1 地上施設設置区域の選定

地上施設設計では，まず，地上施設の設置区域を選定する。設置区域の選定では，応募区域の地理・地形などの自然環境条件や，周辺の土地利用状況などの社会環境条件を考慮する。また，廃棄体を輸送するための周辺のインフラ設備，例えば港湾，道路などの整備状況を確認し，それらが使用可能かどうかを検討するとともに，廃棄体の概略輸送経路を検討する。また，インフラ設備が未整備の場合，それらの拡充や補強，新設などにより廃棄体輸送経路が確保できるか否かを検討した上で設置区域を選定する。

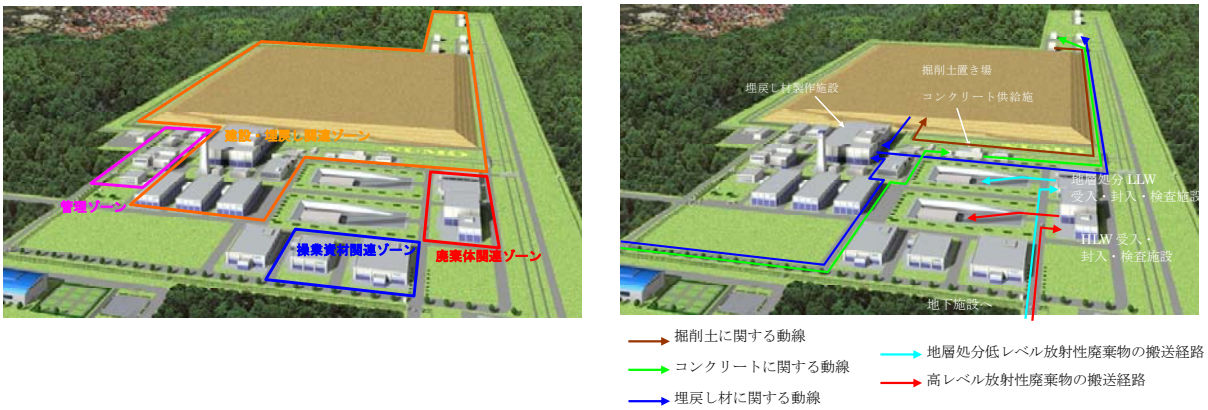
6.3.4.2 アクセス方法の検討

地下施設の深度・エリアの設定と平行して地上施設から地下施設へのアクセス方法，すなわち立坑，斜坑，それらの組み合わせなどと坑道の本数を検討する。この後，地下施設の設計は，坑道細部の設計と地下施設レイアウトの設定と進むが，地下施設のレイアウトの検討が進んだ時点で，アクセス方法および坑口位置の詳細について再検討し最適化していく。

6.3.4.3 建屋群ゾーニングの検討

廃棄体を取り扱う建屋，操業関連資材を取り扱う建屋，建設・閉鎖に関する建屋および管理に関する建屋などについて，それぞれが担う作業が効率的に実施できるよう建屋群を用途に応じてゾーニングする。図 6.3.4-2には，廃棄物運搬と建設・閉鎖作業の動線を示す。その際，廃棄体の受入から地下施設への払い出しまでの作業動線，あるいは，建設・操業・閉鎖・管理などに必要な物資や

作業動線が交わらないように配慮する（地層処分低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物を併置処分する場合には，共有できる施設を共有し合理化を図る。例えば，管理ゾーンおよび建設・埋め戻し関連ゾーンの建屋は基本的には共有する。



（a）地上施設のゾーニング　　（b）作業動線

図 6.3.4-2 地上施設のゾーニングと作業動線（併置処分）

6.3.4.4　造成計画・建屋設計

地上施設の中で最も大きな面積を占めるのは掘削土置き場である。掘削土置き場に仮置する土量は，サイトによっては 1,000 万 m^3 オーダーになる（NUMO，準備中 b)。地下施設の建設工事で発生する掘削土は，地下施設の埋め戻し材料として再利用することが考えられるため，掘削と同時に地上へ搬送し，再利用するまでの期間，地上施設の敷地内に仮置きする。地上施設の造成計画の際には，掘削土の風雨による飛散や流出などの防止対策を講じ，周囲の環境への影響を極力低減する対策を実施する。また，地上施設の各建屋は，それぞれの建屋の要件（6.2 参照）に応じた設計を行う。

6.3.5　高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合の留意点

高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の地下施設を併置する場合の地下施設レイアウト例を図 6.3.5-1に示す（NUMO，準備中b)。この例では，両施設の処分坑道を地下水の流れの向きに対して直交するように配置し，アクセス坑道を上流側に配置している。

高レベル放射性廃棄物処分施設では，各処分パネルの作業を独立して行うこととし，地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設では，建設・操業（廃棄体搬送以外）・閉鎖作業を順に行うことを想定している。

なお，両施設へのアクセスを別系統にすることで，それぞれの施設における建設・操業・閉鎖などの作業が錯綜しないようにする。

地質環境の条件によっては，まとまった岩体の大きさを確保出来ない可能性もあり，その場合は望ましい岩体の分布にしたがって，両処分施設の位置関係はもちろん，高レベル放射性廃棄物処分施設の場合の処分パネルや地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の各坑道の配置などを考えることとなる。

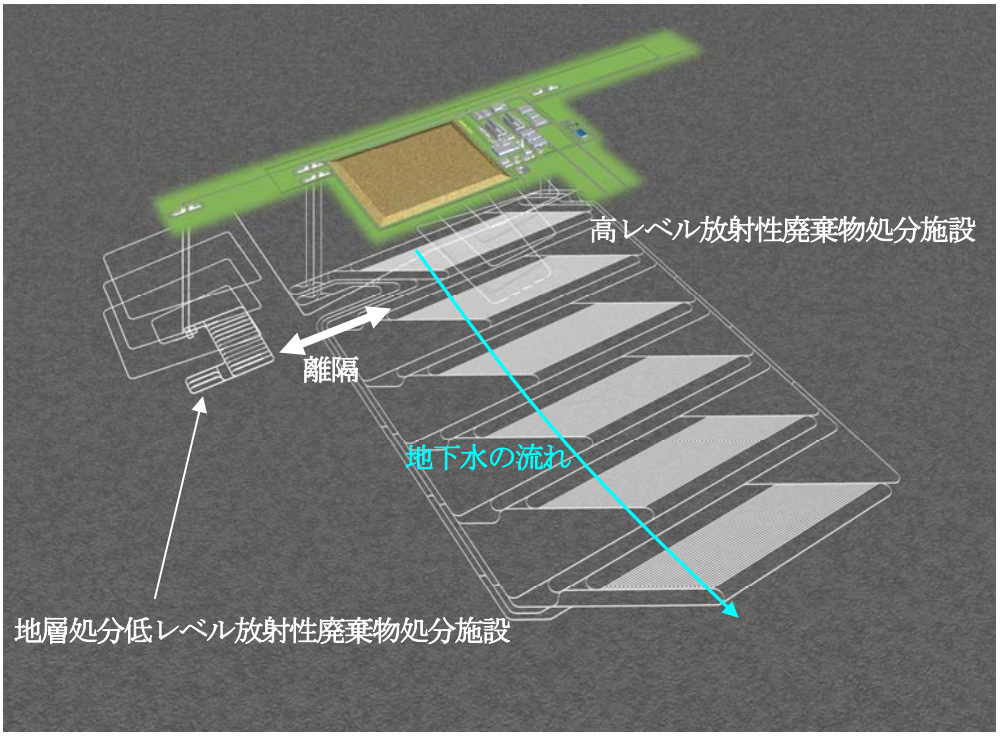


図 6.3.5-1 併置処分地下施設レイアウト例（NUMO，準備中 b を編集）

高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を併置する場合には，それぞれの廃棄体の特性などが違うことに起因する有意な相互影響を回避することが重要である（NUMO，準備中 b）。地層処分低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物とを相互に近接して処分するとした場合の相互影響因子として，熱，水，応力，化学および放射線を考慮し，影響のないように両施設を離して配置する。

原子力委員会（2006）によると，熱に関しては，高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の距離が近いときには相互に熱影響があるが，両施設を 50m程度離すことによって他方の施設に起因する温度上昇はほとんどなくなることが示されている。これは，グループ 2 のハル・エンドピースを対象に検討されている。また，化学に関しては，地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の有機物，硝酸塩，セメントによる高アルカリ性地下水が高レベル放射性廃棄物処分場へ与える影響を検討対象としている。これらの影響因子の経時影響を図 6.3.5-2に示す。図 6.3.5-2では，地下水流動方向に対して，低レベル放射性廃棄物処分施設の横方向と上流方向へのそれぞれの影響が及ぶ距離を時間的に示したものである。同図に示すように，影響範囲が最も遠方まで及ぶと評価された因子は硝酸塩である。硝酸塩は高レベル放射性廃棄物処分施設のオーバーパックの腐食への影響が懸念されるが，オーバーパックの設計耐用年数 1,000 年では，硝酸塩の影響範囲は 50m程度である。実際のサイトでは，地質環境特性に応じて，適切な離隔距離を考慮してそれぞれの施設を配置することになる。

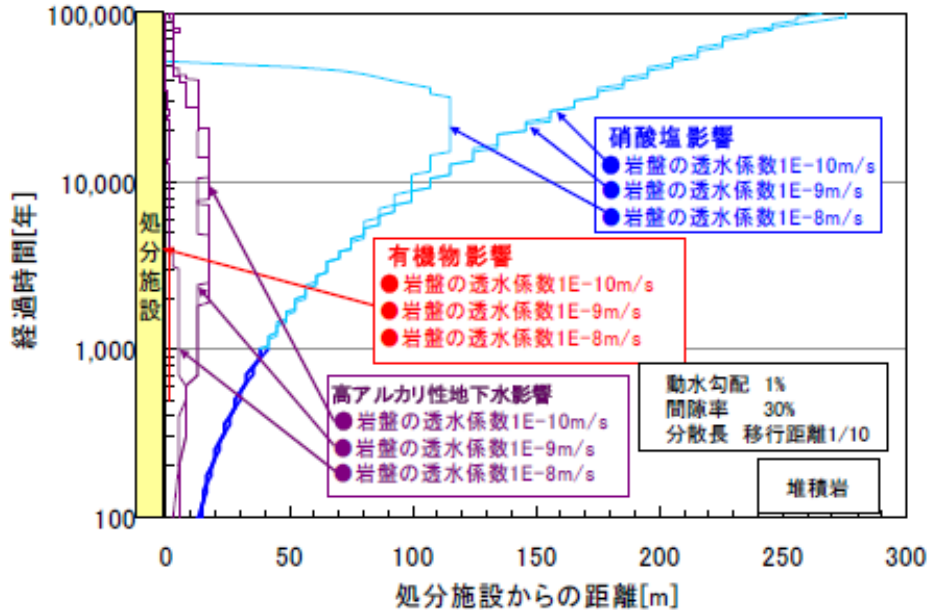


図 6.3.5-2 相互影響因子の影響範囲の時間的変化（出典：経済産業省資源エネルギー庁・JAEA, 2007）

6.4　処分場の建設・操業・閉鎖

本節では，6.3 で述べた考え方に従い設計される処分場の建設・操業・閉鎖に適用する技術の概要を説明する。第２次取りまとめでは，処分場の建設・操業・閉鎖について概略の工程が示されている。NUMO は，それらを事業者の視点から分析し，課題を整理するとともに，効率性，品質向上，事業期間中の安全確保などに関する検討を進めており，それらの内容についてもあわせて説明する。

6.4.1　処分場の建設

6.4.1.1　地上施設の建設

地上では，まず敷地の造成や敷地内道路の整備を行い，事業期間を通じて所要の電力や水などを供給するためのユーティリティ施設や管理棟などの共用施設を建設する。次に，本格的な地下施設建設に必要となる坑道内の換気施設や湧水の処理施設などの建設にとりかかる。これらの作業と並行して地下施設の建設準備も進めていき，準備が整った後に地下施設の建設を開始する。地上施設の建設には，一般産業施設や原子力施設の建設に用いられている既存技術が適用できると考えており，その際に環境影響の回避，低減などの周辺環境保全に十分に努める。

6.4.1.2　地下施設の建設

(1)　高レベル放射性廃棄物処分施設

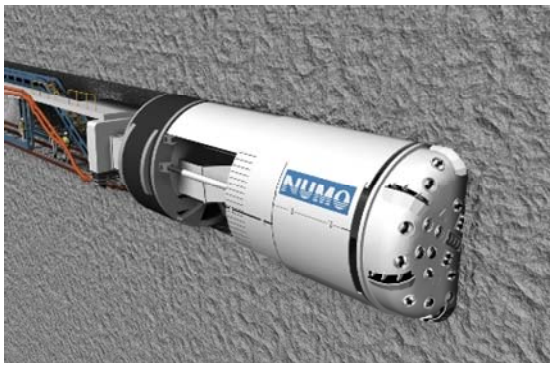
(i)　掘削技術

地下施設はアクセス坑道，連絡坑道および処分坑道から構成される坑道群であり，6.3 に述べた設計方法に基づき設定された仕様を満足するように建設される。地下施設の建設は，避難経路や坑道換気経路の確保など，作業安全と良好な作業環境を常に確保しながら，岩盤の状態や工事の進捗に応じた適切な方法を用いて進める。

坑道の掘削については，地質環境の条件を踏まえ，類似の土木工事などで実績のある掘削工法の中から，立坑，斜坑，水平坑道のそれぞれの坑道掘削の特徴に適した施工方法を適用する。例えばトンネルボーリングマシン（Tunnel Boring Machine）工法（図 6.4.1-1）は，地質環境の条件が良好で掘削延長距離が長い場合には，掘削効率が高く有望な掘削工法である（日本トンネル技術協会，2000）。また，国の基盤研究開発では，幌延，瑞浪の深地層の研究施設において，坑道掘削時の調査研究が進められており，ショートステップ工法により安全に立坑の建設が進められている（JAEA，2008a）（図 6.4.1-2）。



（写真提供：東京電力株式会社）



（NUMO，2002）

図 6.4.1-1 トンネルボーリングマシンの外観例と掘削イメージ

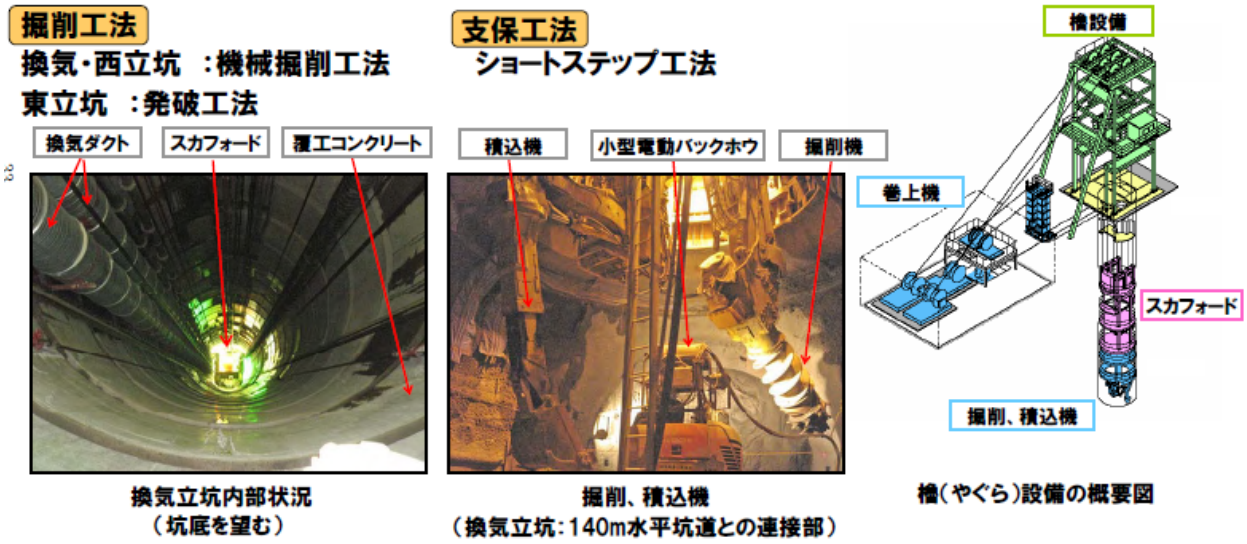


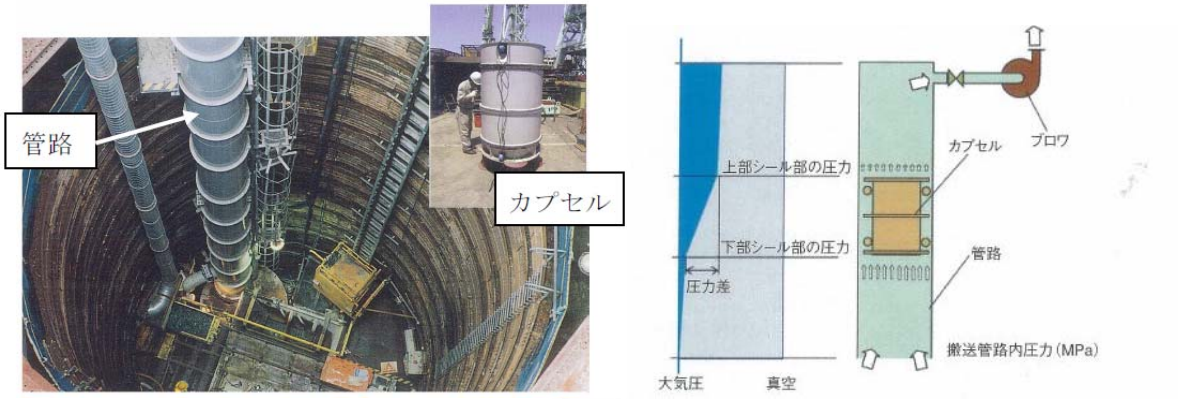
図 6.4.1-2 ショートステップ工法による立坑の掘削（出典：JAEA, 2008a）

（ii） 工程確保の観点からの取り組み

地下施設の建設工程について，第２次取りまとめでは，処分場全体を六つの処分パネルに分割し，一つの処分パネルを 10 年間で建設する工程が示されている。この工程は，1 日 24 時間，連続的かつ円滑に建設されることを前提としており，想定ケースのうち最も工事数量の多い堆積岩における処分孔竪置き方式の場合には，13 本の処分坑道を並進して掘削することとしている（JNC, 1999b）。

実際の地質環境では，岩盤の不良部などに遭遇し，その箇所の施工に相当の時間を要することが想定される。事業者としては，一般労働安全への配慮や工程確保の視点からも，適切な作業動線の確保，良好な作業環境の維持，緊急時の避難経路の確保，工程計画に適切な裕度を持たせることが必要であると考えている。地下施設の建設では，立坑掘削と処分坑道掘削が工程上のクリティカルパスとなり，加えて処分孔竪置き方式の場合には処分孔の掘削も工程上のクリティカルパスとなる。このため，それぞれの施工効率を向上させることが必要となる。

掘削土（ずり）の搬出に関して，立坑掘削時にはワイヤロープとずりキブルを用いた仮設的な搬送方式が一般的であるが，ずり出し能力は高くはない。そこで，立坑の完成後，ずり出し設備をスキップ方式などずり出し能力の高い本設設備に変更し，地下施設の坑道群建設時における大量のずり出しに対応する。アクセス坑道の断面や本数が限られた中での大規模地下施設の建設では，立坑内のずり出し能力を従来技術に対して向上させることが有効であり，例えば空気カプセル輸送技術（図 6.4.1-3）の立坑内ずり搬送への適用性検討などを行っている（原環センター，2005）。空気カプセル輸送技術は，被輸送物を積載したカプセルを管路内に入れ，ブロアで管路内の空気を吸引することにより発生するカプセル上下間の差圧を駆動力としてカプセルを移動させる技術である。本技術は，すでに資材輸送用のパイプラインシステムや，掘削土搬送に実用化されている技術である。



(a)　空気カプセル輸送　　(b)　カプセル移動原理

図 6.4.1-3 空気カプセルによる鉛直ずり出し技術（出典：原環センター，2005）

処分坑道横置き定置方式の場合には関係ないが，処分孔竪置き定置方式の場合には，処分坑道の掘削に引き続き処分孔を掘削することになり，処分孔の掘削効率の向上が工程確保のために重要となる。処分孔の深さは一つの処分孔に廃棄体 1 体を定置する場合は 4m程度になる。処分孔掘削に対しては，一軸圧縮強度が 200MPa程度の硬岩を対象にフィンランドのOlkiluotoやスウェーデンのエスポ地下研究所において，直径 1.75m，深さ 8m程度の処分孔掘削の実証試験が行われている（図 6.4.1-4；Christer Andersson et al.，2002）。

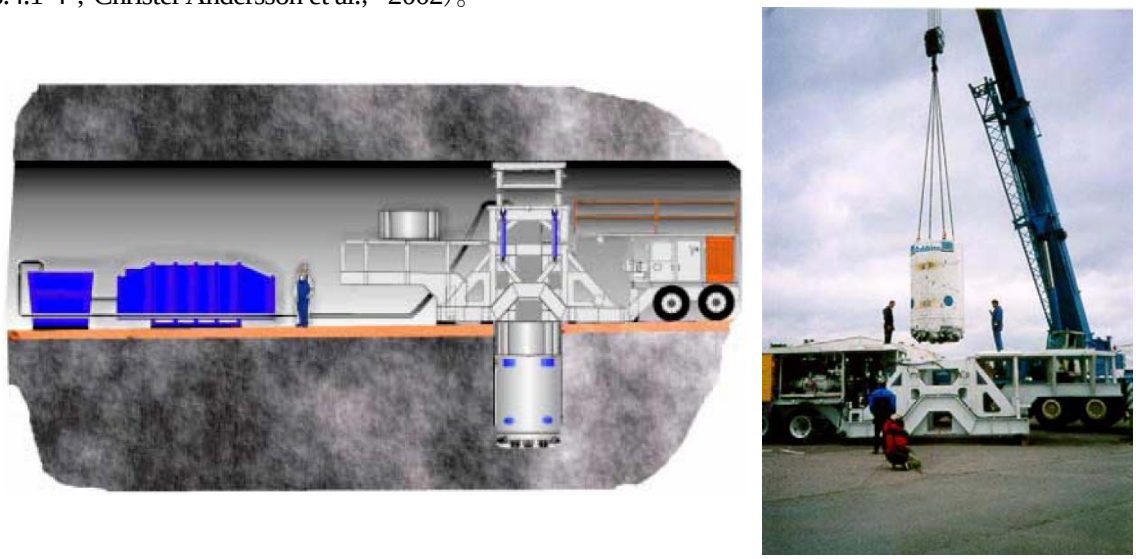


図 6.4.1-4 スウェーデン，エスポ地下研究所で実施された処分孔掘削
（Christer Andersson et al.，2002）

スウェーデンの実証事例では，処分孔切羽のずりを流体輸送により揚土する全断面掘削機が使われ，14 孔の処分孔掘削の平均的な掘削速度は 2.5 時間/m であった。処分孔掘削では，掘削以外にも機械の移動やセット，掘削後の調整などの時間が必要であり，それらを含めると 1 孔あたりの施工時間は，50 時間程度から 250 時間程度と報告されている（Christer Andersson et al.，2002）。

一方，第２次取りまとめでは，1 日あたり 1 本の処分孔を掘削するという設定で工程が検討されている（JNC，1999b）。上記のスウェーデンにおける実績などを参考にすると，第２次取りまとめの工程を満足させるためには，効率的に処分孔を掘削することができる技術を整備する必要があり，

NUMO は処分孔の高速掘削機械の概念設計などを行っている（NUMO，準備中 c）。

鉛直下向きの掘削は，水平掘進と異なり掘削進行方向にずりが溜まるため，カッターディスク面で切削されたずりをクラムシェルバケットにより適宜排土することが困難で，カッターがスタックし易く損耗が激しいという課題がある。このような課題を踏まえ，スウェーデンの事例のように掘削ずりに水を混合してスラリー化し，切羽部から上方にスラリー輸送することによって排土するシステムが利用されている。しかしながら，この方法ではスラリーポンプの配管システムなどが必要であり，短時間に処分孔を掘削して次の処分孔掘削に移動するといった細やかな動きには不向きである。そこで，カッターヘッドとカッターホイールが直交して回転する二軸回転機構を採用した掘削・ずり搬出機械を検討している（図 6.4.1-5）。カッターホイールに排土機能を持たせることによりずりをスラリー化することなく，乾いた状態で排土口からカッターホイール内に収土し，バキュームポンプで上部へ排土することが可能である。また，カッターホイールが掘削機能も担っており，掘削効率が向上する。乾式でずりの揚土が可能であることから，ずり出し設備がコンパクトになり，機械設備の構内移動や準備時間も短縮される。

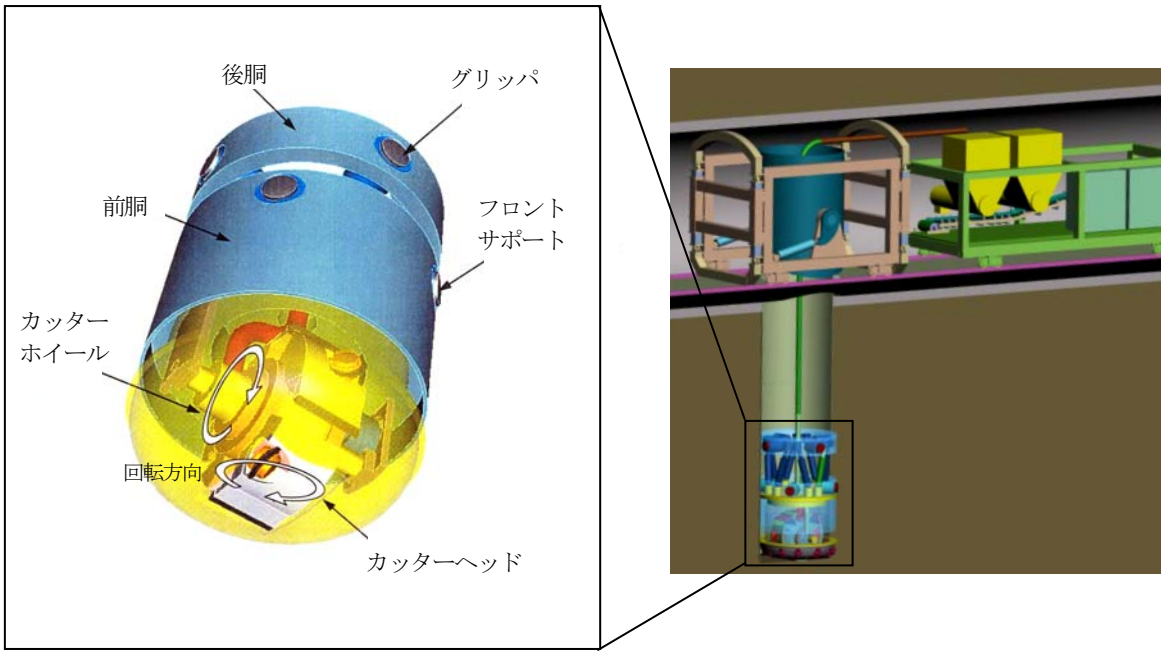


図 6.4.1-5 2 軸回転機構を有する処分孔掘削機（NUMO，準備中 c）

(2) 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

アクセス坑道である立坑や斜坑，主要坑道や連絡坑道の掘削工法は，基本的に高レベル放射性廃棄物処分施設の坑道掘削方法と同様である。処分坑道の断面が，高レベル放射性廃棄物の処分坑道と比較して大きくなるため，一度に全断面を掘削するのではなく，断面を分割して掘削と支保工構築を進める方式が有効である。例えば，円形坑道では上半，下半に分割することが考えられる。図 6.4.1-6は，下半の掘削状況のイメージを示したものである。実際は，上半の掘削を数十m程度先行して進め，坑道延長方向で作業が錯綜しないようにして，上半と下半の作業を並行して進める。比較的大きな断面の坑道建設に際しては，国内の地下発電所，石油備蓄基地など大規模地下空洞の施工実績も参考にしつつ，適切な施工方法を採用していく（図 6.4.1-7）。

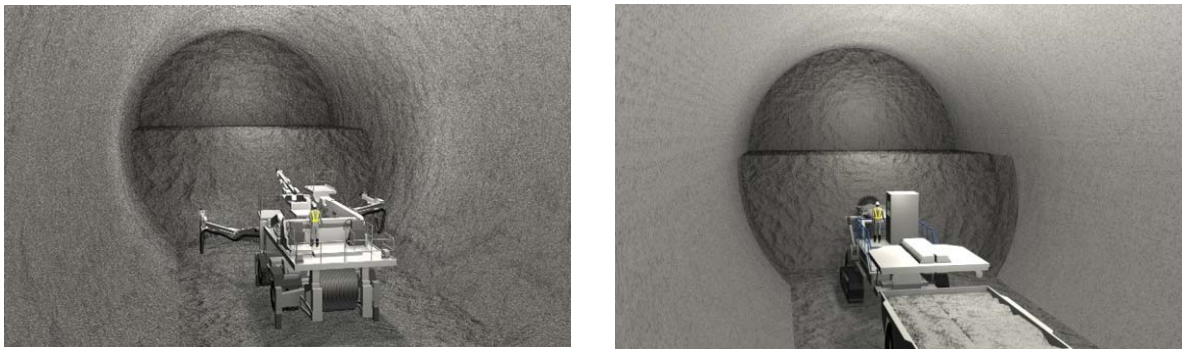


図 6.4.1-6 円形処分坑道の掘削イメージ（左；発破掘削，右；機械掘削（NUMO，準備中 b））



図 6.4.1-7 大空洞の建設時の様子（写真提供：東京電力株式会社）

グループ 1 と 2 に分類される廃棄体を処分する処分坑道には，人工バリアとして緩衝材を敷設することを基本に考えている。底部緩衝材については，廃棄体定置前に敷設を完了させる必要がある。緩衝材は，処分場の閉鎖後長期の安全性を確保するために施される重要な人工バリアである。緩衝材の施工方法については，国内外において鋭意技術開発が進められており，代表的な方式として原位置施工方式やブロック定置方式がある。基盤研究開発機関では，実規模かつ実環境下において人工バリアの施工技術と品質管理方法の確立などを目的とした試験が実施されており，特に地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の人工バリアの施工とその品質管理への適用が可能であると考えられる。図 6.4.1-8は，試験の一項目として実施された底部緩衝材施工の状況であり，緩衝材を撒き出し，大型振動ローラで締固め施工した事例である。（原環センター，2008b）



図 6.4.1-8 底部緩衝材施工（出典：原環センター，2008b）

このような工法により底部緩衝材の敷設が終了すると，構造躯体の構築へ移る。構造躯体は，鋼製あるいは鉄筋コンクリート製が考えられる。比較的大断面の空洞とはいえ，空洞内で建設作業を行う上での空間的な制約は大きく，そのことを考慮した施工方法を採用する。鋼製の構造躯体に対しては，鋼材を処分坑道内に搬入し，それぞれの部材を現地で溶接あるいはボルト接合により組み立てる。また，鉄筋コンクリート製の構造躯体については，足場，鉄筋，型枠を現地で組み立て，コンクリートを打設するという一般の鉄筋コンクリート構造物の施工を基本としつつ，地上で鉄筋コンクリート部材を製作し地下で組み立てるプレキャスト施工の併用も考えられる。緩衝材を必要とするグループ 1，2 の処分坑道では，底部緩衝材上に構造躯体を施工するため，作業従事者や施工機械などが底部緩衝材の上を移動することに対して，適切に緩衝材の養生を行う必要がある。

6.4.2　処分場の操業

6.4.2.1　高レベル放射性廃棄物処分施設

操業作業は，地上施設における廃棄体の受入・封入・検査，地上から地下への搬送，処分坑道内への定置の順に作業が行われる。

(1)　地上での作業

ガラス固化体の受入開始により処分場の操業が開始される。地上施設での操業においては，専用輸送容器に入れられたガラス固化体の受入から地下への廃棄体搬送装置への積み込みまでの工程が，ガラス固化体と廃棄体の取り扱いや検査などの技術，放射線管理の面などから最も重要な作業となる。

(i)　ガラス固化体の受入

(a)　ガラス固化体の処分場への輸送

ガラス固化体の輸送には，海上輸送および陸上輸送についてすでに実績がある。ガラス固化体は，貯蔵施設において 30～50 年間ほど冷却貯蔵された後に，発熱量や放射能レベル，寸法など必要な検査が行われた上で，専用輸送容器に収納されて処分場へ向け搬出される。

放射性物質の輸送については，IAEA が「放射性物質安全輸送規則」（IAEA，1996；以下，IAEA 輸送規則という）を定めており，各国ともこれを国内法令に取り入れて安全規制を実施している。

わが国でも IAEA 輸送規則を取り入れて放射性物質の輸送に関する法令が定められており，ウランやプルトニウム，原子力発電に用いる核燃料やその使用済燃料，原子力発電所や再処理施設から発生する放射性廃棄物などの核燃料物質などの輸送に関する法令体系（以下，輸送関係法令という）が整備されている。

輸送関係法令に基づく安全規制では，輸送容器の線量当量率については，輸送容器表面において 2mSv/h，表面から 1m の位置において 0.1mSv/h を超えないことが技術基準として定められている。ガラス固化体は人間が近づくことができないほど高い放射線を発するものであるため，ガラス固化体の専用輸送容器はこの基準を満足する遮へい能力をもつように設計・製作される。

(b)　地上施設での受入作業

処分場へ輸送されたガラス固化体（輸送容器）は，専用輸送車両に積載された状態のまま高レベル放射性廃棄物受入・封入・検査施設へ搬入される（図 6.4.2-1）。同施設内では，輸送途上におけ

る輸送容器やガラス固化体への損傷などの異常発生の有無について検査を行い，オーバーパックへの封入前にその健全性を確認する。



図 6.4.2-1 返還ガラス固化体の輸送に使用されている輸送車両（出典：原燃，2000）

（ii） 廃棄体の製作・検査

受入検査に合格したガラス固化体は，①オーバーパックへの収納，②オーバーパックの上蓋溶接，③オーバーパック溶接部の検査の工程を経て，廃棄体とされ地下施設へ搬送される。これら一連の作業は遠隔操作で行う。オーバーパック溶接装置と，超音波探傷試験によるオーバーパック溶接部の検査装置の使用を想定した，ライン方式による廃棄体製作概念を図 6.4.2-2に示す。オーバーパックの遠隔溶接・検査に関する技術の整備状況は 6.6.4.2 で説明する。

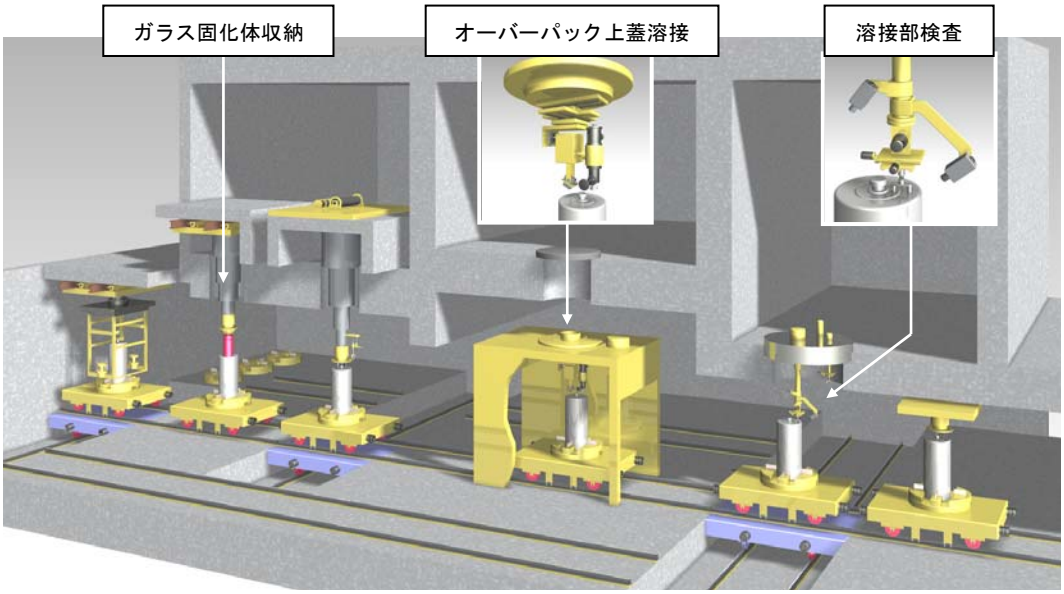


図 6.4.2-2 遠隔操作による廃棄体製作工程の概念図（炭素鋼単体オーバーパックの場合）
（NUMO，2002）

（iii） 緩衝材の製作

緩衝材は人工バリアの一つとして廃棄体とともに処分坑道へ定置することから，両者を適切に地下へ搬送し定置作業が滞ることがないように，廃棄体および緩衝材の製作設備の設計，製作工程の調整・管理を行う。緩衝材の形態としては，6.6.4.3 で説明するように，ブロック方式，原位置施工方式（原位置締固め方式，ペレット充填方式，吹付方式）などの技術の整備が進んでいる（原環センター，2003b，2004b，2005，2009b など）。どのような施工方式とするかについては，地質環境特性，技術的適用性，長期安全性，経済性などを総合的に評価した上で決定する。

（iv） 埋め戻し材などの製作

廃棄体と緩衝材の定置が完了した処分孔定置方式の処分坑道（処分孔の上部）は，適切な時期に埋め戻される。また，閉鎖時には主要・連絡坑道など，すべての坑道を順次埋め戻していく。埋め戻しに用いる埋め戻し材は，採用する埋め戻し工法などによってさまざまな仕様のものが考えられるが，基本的には埋め戻し後長期にわたって地下水が流れにくいように設計し，埋め戻し材製作・検査施設において製作する。

(2) 地下での作業

（i） 廃棄体および緩衝材の地下への搬送，定置

地上施設内での検査終了後，廃棄体を地下に搬送し処分坑道内に定置する。図 6.4.2-3に，地上施設から定置位置までの廃棄体搬送の流れを概略的に示す。廃棄体の搬送に使用するアクセス坑道の形態や定置方式の組み合わせに応じ，搬送途中に廃棄体を縦方向または横方向へ傾転する（原環センター, 2001）。また, 搬送作業と定置作業では装置に求められる機能が異なるため, 現時点では別々の装置を使用することを検討している。

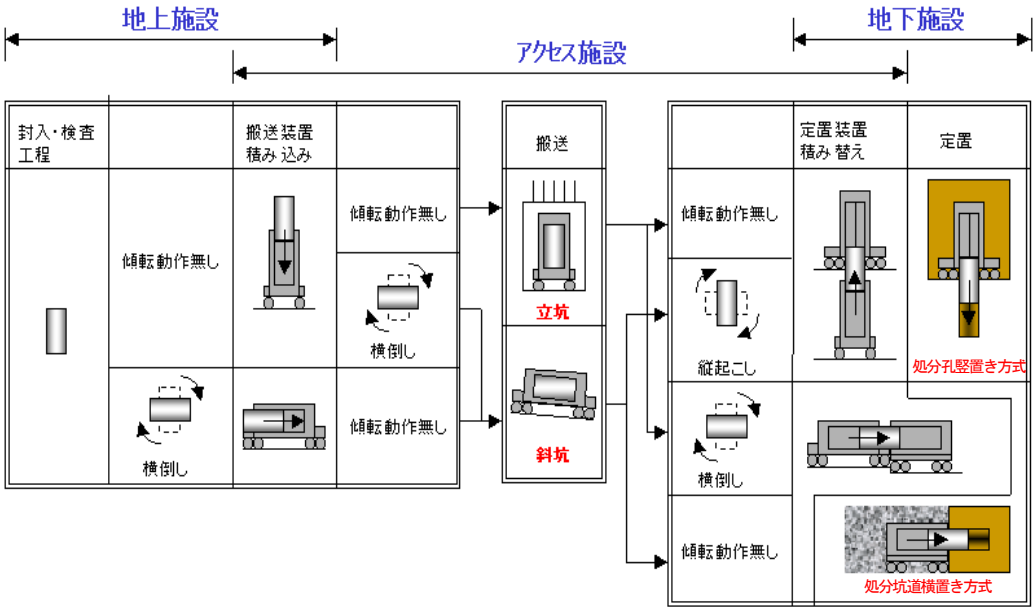
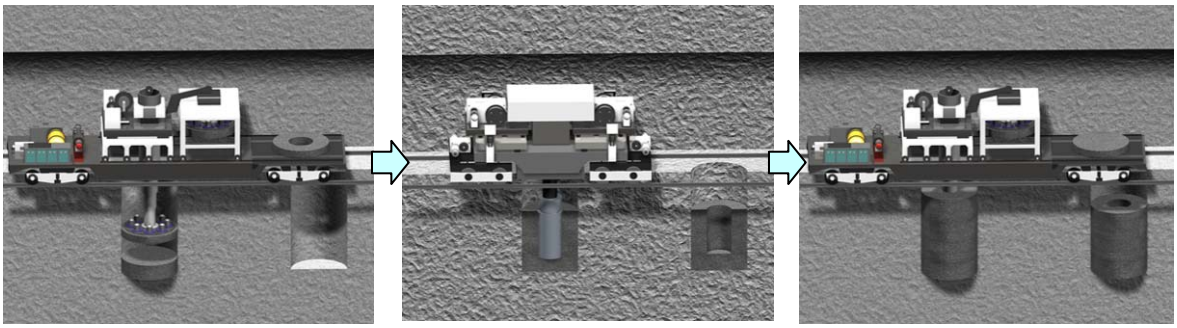


図 6.4.2-3 廃棄体の搬送と定置の流れ（原環センター，2001 を一部修正）

竪置き定置方式の場合について，緩衝材ブロック方式を例とした廃棄体および緩衝材定置作業の手順の概念を図 6.4.2-4に示す。緩衝材定置装置を用いて，地上施設で製作した緩衝材ブロックを処

分孔下部から順に所定の高さまで定置する。その後，廃棄体定置装置を用いて，廃棄体を緩衝材の内側に定置する。再び，緩衝材定置装置を用いて緩衝材を処分坑道底面の高さにまで定置し，一つの処分孔の定置作業が完了する。廃棄体と緩衝材の搬送および定置をどのような方式で行うかについては，6.5.2 で説明するように地質環境の条件，安全性，作業性，経済性などを総合的に検討して決定することになる。



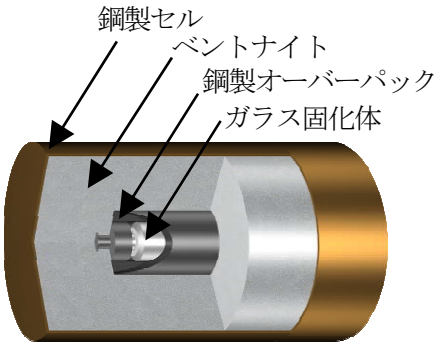
(a) 底部緩衝材設置　(b) 廃棄体定置　(c) 上部緩衝材定置

図 6.4.2-4 緩衝材および廃棄体定置手順（竪置き定置方式の場合）(NUMO, 2002)

(ii) 緩衝材の品質の信頼性向上と作業性の効率性向上

横置き定置方式の場合は，緩衝材外径とほぼ同程度の内径の処分坑道内で，緩衝材と廃棄体を数100m水平移動させ，所定の位置に定置する必要がある。この場合，処分坑道内の限定された作業空間で，緩衝材と廃棄体を交互に搬送後，的確に定置するための遠隔搬送・定置技術とともに，位置決めなどの定置精度の確保が考慮すべき点として認識されてきた。また，搬送・定置作業は，廃棄体底部の緩衝材定置，廃棄体定置，上部緩衝材定置と複数の搬送装置が交互に処分坑道を往来することより，物流の観点からの改善検討を加えてきた。

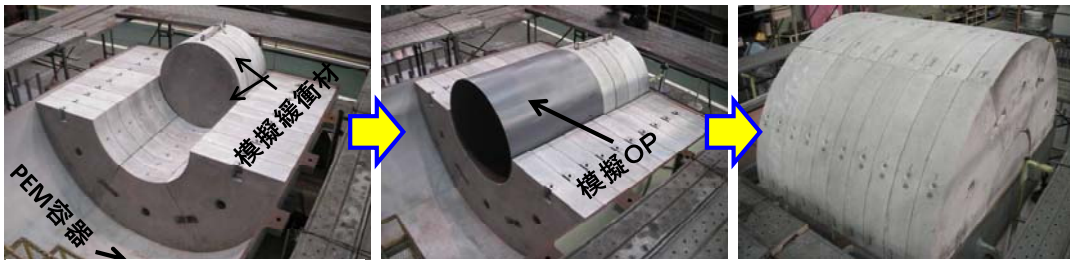
これらを考慮し，NUMOは地上施設であらかじめ緩衝材と廃棄体を鋼製セル内に格納し，地下施設へ鋼製セルを搬送・定置するPEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module）方式を，従来から検討が進められてきたブロック定置方式，ペレット充填方式などと並び有力な定置方式であると位置づけて検討を進めている。図 6.4.2-5には，PEM容器の構造および基盤研究開発機関にて製作されたPEM容器と模擬緩衝材と模擬オーバーパックを用いたPEM容器内の組立確認試験状況を示す。PEMの利点は，地上施設での組立による品質の信頼性向上と搬送作業の効率化が期待できる点である。一方，PEMは廃棄体，緩衝材，鋼製セルを含めて約35tと比較的重量が重いため，空間的制約が大きい処分坑道内での水平方向への搬送・定置の機構，PEM容器と処分坑道との隙間の充填技術に着目し，基盤研究開発機関において技術開発が着実に進められている（6.6.4.3参照）。



(a) PEMの構造



(b) PEM容器の製作例（出典：原環センター，2007a）



下半模擬緩衝材ブロックを PEM 容器に設置したとこ

模擬オーバーパック(OP)を設置したところ

上半模擬緩衝材ブロックを組み上げたところ

(c) 模擬緩衝材と模擬オーバーパックによる PEM 内緩衝材組立の確認試験状況（原環センター，2008b に一部加筆）

図 6.4.2-5 PEM 方式

(iii) 物流検討

建設と操業，および次項で説明する閉鎖では，地下施設内に多くの物流が発生する。各種の作業を円滑に実施するため，NUMOは，地下施設の建設・操業・閉鎖にかかわる物流を体系的に検討している。操業作業に注目すると，高レベル放射性廃棄物処分では，図 6.4.2-6に示すタイムチャート例のように，1 日あたり 5 体の廃棄体を定置する場合，次のような特徴を持つ。

- 一つの廃棄体について地上から処分坑道内定置まで作業が連続しており，並行して作業が進められない。
- 廃棄体の地下での搬送と定置装置が一体化しており，処分坑道入り口での積み替えがない。
- アクセス搬送装置から地下搬送定置装置へは坑底施設で積み替えるが，搬送定置装置への積み替えなので，非常に時間を要してアクセス搬送装置が拘束され地上に戻るまでに 5 時間以上必要である。
- 搬送定置装置の系列数は廃棄体数と同じである。
- 緩衝材を 1 日 5 廃棄体分定置しなければならない。
- アクセス坑道の延長増加や定置方式を横置きに変更した場合にさらに時間がかかる。

このような操業を効率的に行うには，坑道内の物流を最適化することが重要であり，NUMO は，種々のバリア形態や定置方式についての物流を検討している。

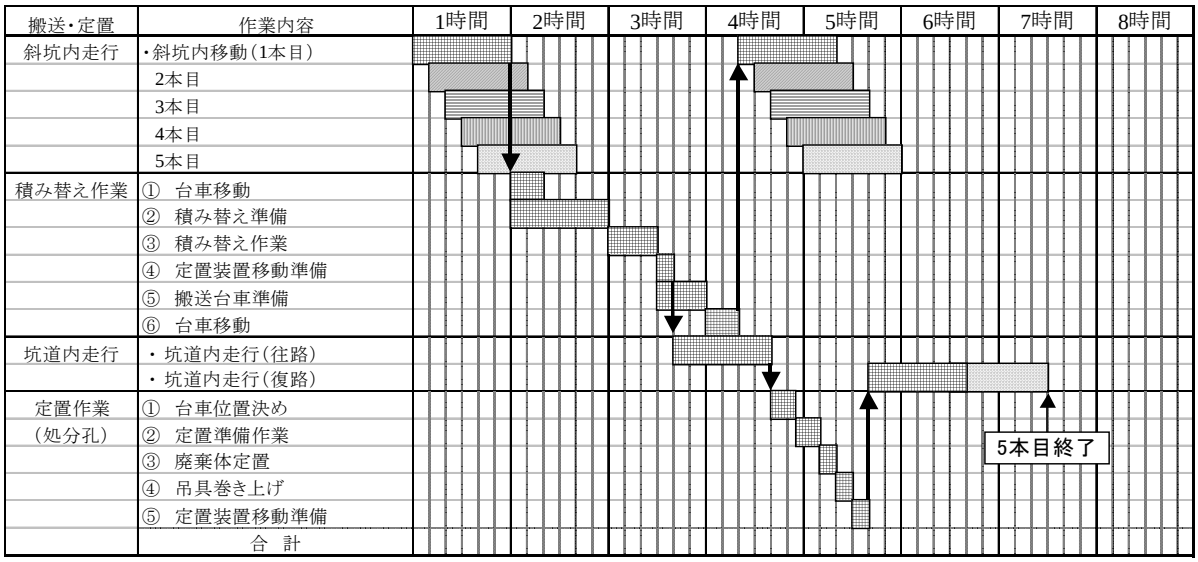


図 6.4.2-6 高レベル放射性廃棄物処分場における廃棄体の搬送・定置タイムチャートの例（処分孔竪置き方式）（原環センター，2001 に一部加筆）

6.4.2.2 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設

(1) 地上での作業

地層処分低レベル放射性廃棄物は，貯蔵施設において発熱量や放射能レベルおよび寸法など必要な検査が行われた上で，専用輸送容器に収納されて処分場へ向け搬出される。廃棄体の中には比較的高い放射線を発するハル・エンドピースなどが存在するため，輸送容器からの廃棄体取り出し以降の作業は，遮へい対策を講じた区域内で，遠隔操作により実施する。

受入検査に合格した廃棄体は，①廃棄体パッケージ容器への収納，②モルタル充填，③廃棄体パッケージの検査の工程を経て地下施設へ搬送される。これら一連の作業は遠隔操作で行う。

(2) 地下での作業

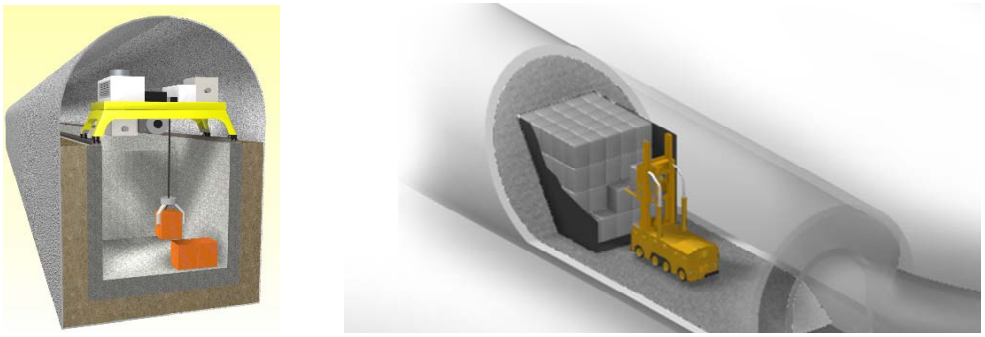
(i) 廃棄体の搬送

地上施設から地下施設まではアクセス立坑あるいは斜坑により廃棄体を搬送する。高レベル放射性廃棄物処分場と併置する場合でも，地層処分低レベル放射性廃棄物用の専用のアクセス立坑あるいは斜坑を利用し，搬送設備も専用のものとする。搬送作業に人が携わる場合には，廃棄体あるいは搬送設備に遮へい機能を持たせる。

アクセス立坑で廃棄体を搬送する場合には，重量物の搭載が可能な専用エレベータでの搬送になる。専用エレベータによる廃棄物の大深度への搬送は，米国の TRU 廃棄物の地層処分場である WIPP（Waste Isolate Pilot Plant）ですでに実施されている（U. S. DOE，2004）。アクセス斜坑で搬送する場合には，トラックなどのタイヤ方式の搬送車両や軌道方式の搬送車両が考えられる。アクセス斜坑をほかの用途にも使用する場合や搬送の柔軟性の観点からは，タイヤ方式の搬送車両による搬送が有効である。

（ii） 廃棄体の定置

地下施設に搬送された廃棄体または廃棄体パッケージは，物流などを円滑に実施するなどの観点から必要に応じて坑底施設で一時保管する（NUMO，2010b）。一時保管した廃棄体または廃棄体パッケージは，専用の搬送車両で処分坑道まで搬送する。処分坑道に到着した廃棄体または廃棄体パッケージをクレーンやフォークリフトにより所定の位置に定置する（図 6.4.2-7）。これらの作業は遠隔操作で実施する。このため，位置検知や自立制御に関する技術が重要になる。近年，土木工事における建設技術の高度化により坑道内を完全自動で自立走行できる搬送機械が実用に供されており，それらの先端技術を取り入れていくことになる。



(a) クレーン方式　　(b) フォークリフト方式

図 6.4.2-7 廃棄体の定置（地層処分低レベル放射性廃棄物）

（iii） 充填材の施工

廃棄体の定置が終了した構造躯体内への充填材の施工は遠隔操作で実施する。充填材は遠隔操作により構造躯体内の隙間に密実に充填させるため，流動性，材料不分離性に優れたものを適用する（電事連・JNC，2005）。

6.4.3 処分場の閉鎖

閉鎖段階では，地下施設を地上から隔離することを目的として，連絡坑道，アクセス坑道およびボーリング孔の埋め戻しを行う。地上施設は，建設または操業が終了した段階で不要となった施設から順次解体・撤去作業を行う。

6.4.3.1 地下施設の閉鎖

(1) 安全評価結果の妥当性確認，閉鎖措置計画

操業終了後の処分場の閉鎖に際しては，建設および操業時に取得された地質環境の情報を，事業許可申請時の安全評価に用いたデータベースに追加して長期安全性の評価を行い，事業許可申請時に行った安全評価の結果が妥当であることの確認が国によって行われる。この確認が終わるまで，廃棄体の回収可能性を維持する（原子力安全委員会，2000）。廃棄体の回収技術の検討状況については6.6.4で説明する。

また，坑道の埋め戻しおよび坑口の閉塞に関する計画を「閉鎖措置計画」として定め，国の認可を受けた上で閉鎖を開始する。図 6.4.3-1に閉鎖措置計画申請前の処分場のイメージを示す。図中の紫色の部分が操業段階で埋め戻され，図中の白色の部分が閉鎖の対象となる坑道である。

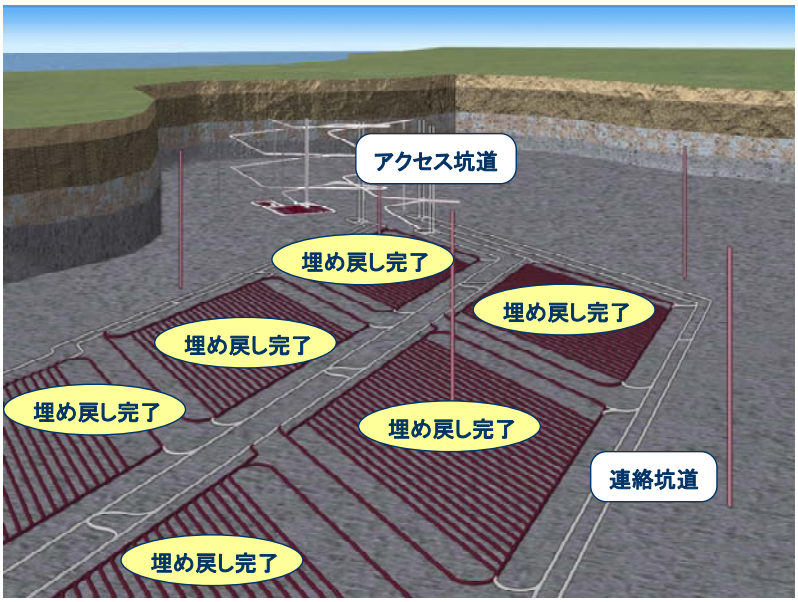


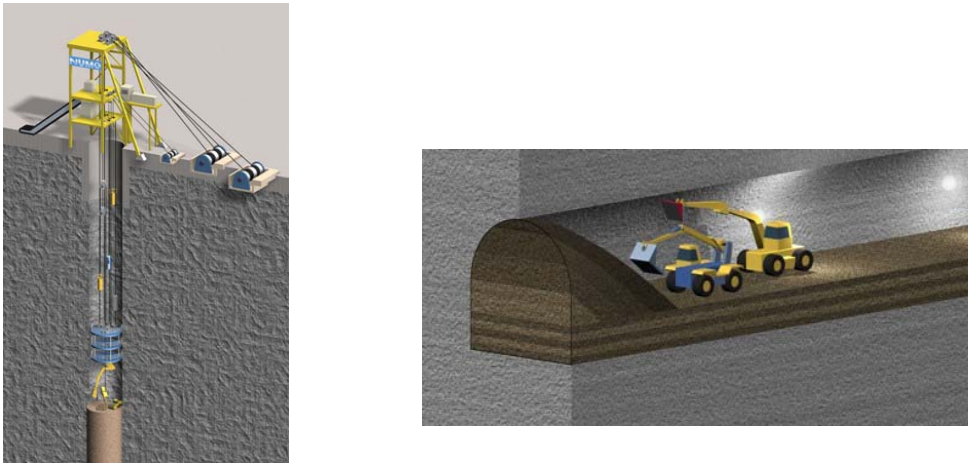
図 6.4.3-1 閉鎖措置計画申請時の処分場イメージ

(2) 連絡坑道の閉鎖

連絡坑道は処分パネル間あるいは処分パネルとアクセス坑道を結ぶ坑道であり，処分パネルの周囲にほぼ水平に展開するものであるが，処分パネルが多層配置または傾斜配置される場合その一部は立坑または斜坑となる。水平に展開する坑道に対しては，ブロックの積み上げあるいは埋め戻し材の締固め，吹付などの原位置施工方式を適用する。

(3) アクセス坑道の閉鎖

立坑の閉鎖は，立坑下部より重力方向へ順次締固めながら埋め戻していく方法が有効であり，工法としては原位置施工方式の適用が有望である。また，斜坑に対しては，坑道の形状に合わせて柔軟な対応が可能な締固め工法と横締固め工法の組み合わせを適用する（図 6.4.3-2）。



(a) 立坑の閉鎖　　(b) 斜坑の閉鎖

図 6.4.3-2 アクセス坑道の閉鎖作業イメージ

(4) プラグの設置

岩盤の割れ目などからの湧水量が多い場合には，坑道建設時または操業時においてセメント系グラウトの注入などによる止水対策が適宜実施されるが，長期的には止水機能が低下していずれは水みちとなりバリア機能に影響を与える可能性がある。このような割れ目に対しては粘土系グラウトの注入や，低透水性を有するベントナイト系材料からなる止水プラグの設置などの方法により閉鎖時に適切に処置する。止水プラグの施工や割れ目の充填方法に関しては，JAEAなどがその実現性に関する研究を実施し，止水の有効性や施工技術の確認が行われている。このような割れ目に対する処置は，操業時における処分坑道の埋め戻しにおいても実施するものである。坑道内の湧水の状況によっては，処分場の閉鎖までの間に地下水が緩衝材や埋め戻し材に浸潤し，閉鎖の完了していない空間側へ膨潤することが考えられる。この対策として，強度を持たせたコンクリート製などの力学プラグを坑道の端部に設置することが考えられる（JNC，1999b）。

(5) 坑口の処置

閉鎖の終了後は，坑道内の埋め戻し材の密閉および不用意な人間の侵入の防止を目的としたプラグをアクセス坑道の坑口に設置する。このプラグは，埋め戻し材の膨潤応力や人間の不用意な侵入に対抗できるものとする。

(6) ボーリング孔などの埋め戻し

処分場には，サイト調査段階に地表から掘削されたボーリング孔や，湧水を緩和するための水抜き孔など，さまざまな方向や径，長さのボーリング孔などが残存することになる。特に地表からのボーリング孔は地下施設と地表を短絡する水みちに，坑道内からのボーリング孔などは岩盤内での新たな水みちとなる可能性があるため，これらは適切に止水処置をする。

6.4.3.2 地上施設の解体・撤去

地下施設の建設，地上施設と地下施設での操業，および地下施設の閉鎖の作業がそれぞれ終了していくのに伴い，地上施設は不要となるものから順次解体・撤去を行っていく。

受入時のガラス固化体や地層処分低レベル放射性廃棄物の表面や輸送容器の内面は，放射性物質により汚染している場合がある可能性が否定できないため，受入時には表面汚染密度検査を行い，汚染がある場合は除染などの処置を行って汚染拡大を防止する。このため，廃棄体の受入・封入・検査施設内の建物構造物や機器類が汚染される可能性は少ないと考えられるが，解体・撤去においては汚染の有無を確認しながら作業を進める。仮に汚染している場合には，現在開発されている原子力発電所などの解体技術を適用するなどして汚染レベルに応じた工法で解体するとともに，発生する廃棄物はその汚染レベルに応じ，法令などで定められている方法により，適切な施設において処理・処分する。

6.4.4 事業期間中の安全確保

NUMO は，サイト選定から事業廃止までの事業各段階において施設周辺の一般公衆や作業従事者の放射線安全および一般労働安全の確保を徹底する。

事業期間中の安全対策については，第２次取りまとめや，その事業化技術の取りまとめ（電中研・電事連，1999）での検討結果も踏まえ，NUMOとしての取り組みの基本的な方針をまとめている

（NUMO，2004b）。その後，NUMOではこの方針を踏まえて，具体的な安全対策の検討を進めてきている。2008 年には新たに地層処分低レベル放射性廃棄物が事業対象に加わり，これについても安全対策の検討を開始している。また，2007 年に炉規法が改正され，地層処分事業についてもこれまでの埋設事業や廃棄物管理事業と同様な枠組みが適用されることとなり，NUMOはこれを踏まえ，6.2 で示したように，事業期間中の安全対策のうち放射線安全に関しては，安全対策を「操業時閉じ込め」，「放射線遮へい」，「放射線被ばく管理」に分類し，それぞれに対して安全確保に関する要件を設定して対策を検討している。また，一般労働安全に対する安全対策は「作業環境の維持」と労働災害に対する「災害の発生・拡大の防止」と「災害時の避難経路確保」に分類して対策を検討している。なお，事業期間中の安全確保のために施す対策については，それらが閉鎖後長期の安全を低下させることがないよう十分に検討した上で適応していく（6.4.5参照）。

6.4.4.1　放射線安全の確保

放射性廃棄物が持ち込まれるため，操業期間中は放射線防護のために「操業時の閉じ込め」，「放射線遮へい」，「放射線被ばく管理」を対象とした安全対策を実施する。この対策は，ほかの原子力施設の安全対策と基本的に同様であるが，これまでに例のない地下深部の環境下において放射性物質を取り扱う作業を伴うため，その特殊性を考慮して，操業段階から閉鎖段階に必要な信頼性の高い設備の設計，建設を行うとともに，必要な技術開発を進め，安全操業に万全を尽くす。

例えば「放射線被ばく管理」としては炉規法により処分場に放射線管理区域を設定する（NUMO，2004b）。放射線管理区域外であるアクセス坑道や地下での搬送経路では，「操業時の閉じ込め」と「放射線遮へい」の対策として高レベル放射性廃棄物を遮へい容器付きの搬送装置で搬送することを基本とする。また，ガラス固化体をオーバーパックに封入し遮へい容器に入れるまでの地上施設での作業や，廃棄体を遮へい容器から取り出す地下での積み替えや定置の作業は，放射線管理区域を設定して遠隔操作で実施する。特に，廃棄体をオーバーパックに封入する工程は高放射線場の環境となり，地下施設内でオーバーパックを定置する工程は放射線遮へいが必要な環境となる。このため，1995 年に操業を開始した高レベル放射性廃棄物貯蔵管理施設で蓄積された知見などを活用しつつ，地下深部での作業などの地層処分事業固有の課題を考慮して，遠隔操作による確実な封入技術や搬送・定置技術の開発が計画的に実施されている。

NUMO は，さまざまな異常事象の抽出とその異常事象による影響，およびそれらに対する対策の検討を実施している。具体的には，6.2 で示したように，「異常事象」（通常運転を逸脱させるような何らかの要因が施設もしくは廃棄体に加えられた事象と定義）に対する対策は，まず，“異常事象の防止”の対策を十分に施し，それでも異常事象が発生したときには“異常拡大の防止”の対策を施す。“異常事象の防止”の対策と，“異常拡大の防止”の対策に加えて，異常事象が万一事故にまで発展した場合をも想定して，“影響の緩和策”の対策を適切に実施する。

想定される異常事象と対策の例を表 6.4.4-1に示す。

ただし，これらの異常事象に対する対策は，サイト条件や最新の技術の進展を踏まえて，適宜，安全性の向上に留意した適切な対策を選定していく。

表 6.4.4-1 操業中に想定される異常事象と安全対策

要因		異常事象	安全対策 安全対策の例
装置・設備に起因する異常事象	搬送・定置設備の故障，損傷	・搬送・定置設備の機能停止によるガラス固化体または廃棄体の転倒，落下	・重要機能へのインターロックの設置（過走行防止，吊り上げ高さ制限） ・転倒防止機能，脱輪防止機能の設置 ・多重化措置（吊りワイヤの二重化など） ・吊り荷の確実な保持機構の採用 ・搬送・定置設備の定期点検の実施
	運転操作のミス	・建屋，他設備との衝突によるガラス固化体または廃棄体の転倒，落下	・運転範囲の制限 ・運転要領書の整備 ・ヒューマンエラー防止機能の設置（フールプルーフ機能設置）
	電源喪失	・搬送・定置設備の機能停止によるガラス固化体または廃棄体の転倒，落下	・フェイルセーフ機能の設置（安全側に保持）
自然現象などに起因する異常事象	地震	・搬送・定置設備の揺れによるガラス固化体または廃棄体の転倒，落下 ・建屋の倒壊 ・坑道，処分孔の崩落	・搬送・定置設備の耐震設計 ・建屋，坑道，処分孔の耐震設計
	落盤	・落石による廃棄体の転倒，落下 ・坑道，処分孔の崩落	・支保工の品質管理と施工管理
	火災・爆発	・搬送・定置設備の延焼	・警報・消火設備の設置 ・不燃性・難燃性材料の使用 ・着火源の排除 ・必要に応じて可燃性ガス対策 ・異常な温度上昇の防止対策
	地震以外の自然現象（台風，浸水，出水，豪雪など）	・搬送・定置設備の機能停止によるガラス固化体または廃棄体の転倒，落下 ・建屋の倒壊 ・搬送・定置設備や坑道の浸水	・転倒防止機能，脱輪防止機能の設置 ・風，積雪荷重などを考慮した建屋の設計 ・防水堤，排水設備の設置

また，NUMO で検討している安全対策検討のうち，地上から地下への廃棄体搬送を対象とした検討例を以下に説明する。

検討の流れは，まず，a 事故事象を抽出し，b 事故を防止するための安全対策を施す。c それでも発生するかもしれない異常事象を想定し，d 異常事象が発生したときの自動対応機構を準備する。e 次に，その対応機構が作動しない場合にはさらに次の機構が作動するという多重化を施す。f さらに重大な事象について，敷地外に放出された放射性物質による影響を評価する。

この流れに従い「斜坑における廃棄体搬送車両の逸走」の検討例を以下に示す。

a 事故事象として，「斜坑における廃棄体搬送車両の逸走」を抽出する。

b ガラス固化体はオーバーパックに封入され，さらに遮へい容器に入れられて搬送される。制限速度以上になった場合，駆動力を車輪に伝達せず，自動的に制動する車両設計とする。

c 制御が効かず重力により加速する状態になった場合を想定する。

d 曲線に入るまでに速度を減じて停止するように，水平区間を設ける。

e それでも速度を減じない場合を想定して，衝突時衝撃緩和区間を設けておく。斜坑の安全設計例を図 6.4.4-1に示す。

f ガラス固化体が損傷して飛散した微粉などが外部へ出ることは無いと考えられるが，逸走による損傷を仮に想定して評価する。例えば，逸走の衝突速度から固化ガラス微粉発生率を導出し，この微粉のキャニスタ外への放出，空気中への移行，建物から大気中への移行を保守的に影響評価する。大気中へ移行した放射性物質による敷地外一般公衆への影響が基準以下であることを確認する。

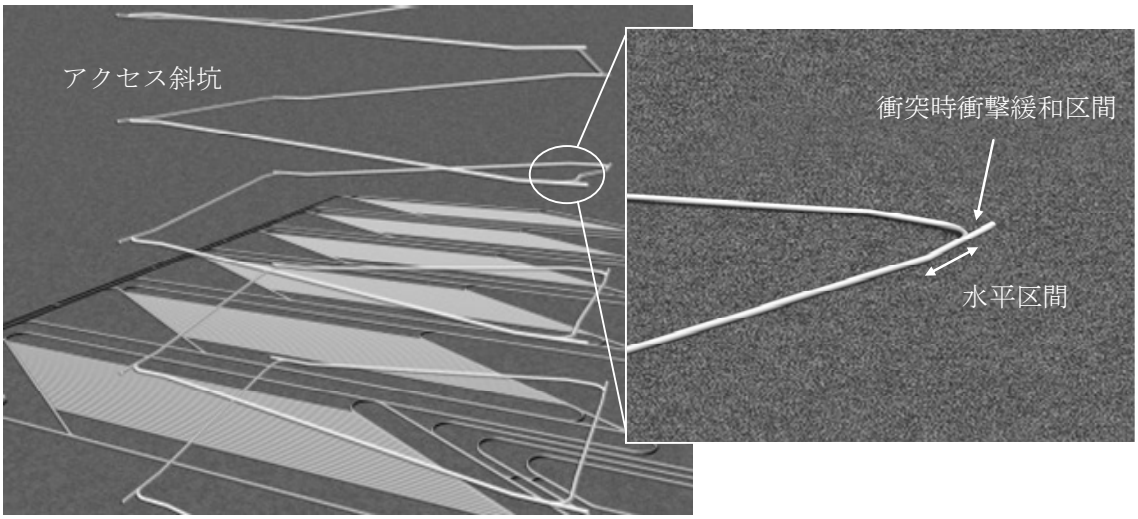


図 6.4.4-1 斜坑の安全設計例

高レベル放射性廃棄物処分施設では，地上施設の一部を除いて，廃棄体はオーバーパックに封入された形で扱われることから，事故時の評価のうち放射性物質の外部放出の評価においては，オーバーパックの衝突などに対する堅牢性の評価が重要である。地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設でも廃棄体を収納するパッケージの堅牢性の評価が重要になると考えられる。

このような背景から，NUMOではオーバーパックの衝突解析を実施している（NUMO，準備中d）。具体的には，オーバーパックがある衝突速度で剛壁に衝突した場合の容器健全性を，オーバーパックに発生する最大塑性ひずみと材料の破断ひずみとの比較により評価した。図 6.4.4-2はその例であり，上述した車両の逸走によってオーバーパックが坑道壁面に衝突したと想定した場合の塑性ひずみ分布である。最大塑性ひずみは4.6%であり，材料の破断伸びを27%とすると，それ以下であることから，オーバーパックは破損しない可能性が高く内容物の外部放出は考えられない結果となった。なお，この例では衝突姿勢を水平と仮定し，衝突速度は11%の勾配の斜路を50m程度逸走した場合を想定し9.7m/s と設定している。

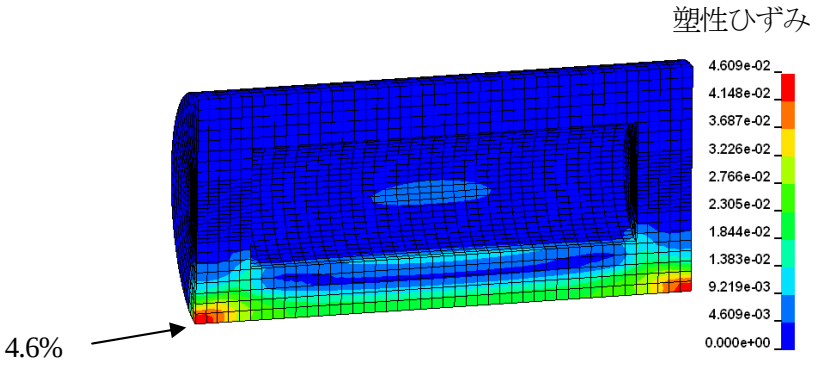


図 6.4.4-2 オーバーパックの衝突解析例（搬送車両逸走，廃棄体水平）

6.4.4.2　一般労働安全の確保

地下施設内では，第２次取りまとめで示されたように，建設・操業・埋め戻しをパネル毎に独立に並行して進めること，建設時に最大で 13 切羽を併進するものと仮定すると，作業の最盛期には地下施設内で最大 200 人程度が作業をすることになり，その一般労働安全対策は非常に重要である。一般労働安全のための安全対策は，6.2 の一般労働安全の確保で示したように，作業従事者に対する「作業環境の維持」と，労働災害に対する「災害の発生・拡大の防止」および「災害時の避難経路確保」に分類して検討している。

一般労働安全の対策例を以下に示す（NUMO，2004b）。

- 地下坑道掘削時の現象（切羽の不安定，湧水および湧水に起因する地山の崩壊，ガスの発生，山はねなど）に対して事前調査や掘削中の施工管理を十分に行う。
- 温度，湿度，ガス，粉塵に関して，換気設備による換気や必要な場合には冷房設備などにより適切な作業環境を維持する。
- 緊急退避所を設置することや緊急避難経路を確実に確保する。
- 地震，落盤，火災・爆発などの自然現象に起因する異常事象に対しては，耐震設計，不燃性・難燃性材料の使用と着火源の排除などの対策を確実に実施する。

これらの，一般労働安全については，基本的に土木工事などにおける安全対策を適用できるが，事例の少ない地下深部での大規模な工事であることから，その時点での信頼性の高い技術を用いて，地下の調査施設や処分場の建設を安全に進める。地下での坑道掘削時には，切羽の不安定現象や山はねに対する力学安定対策，湧水対策，ガス対策などの適切な安全対策を施しながら作業を進める。これらの事業期間中の安全対策（岩盤中へのロックボルト挿入による力学安定対策，セメント系材料の注入による湧水対策など）に必要となる材料を閉鎖後も岩盤中などに残置する場合には，6.4.5 で説明するように，閉鎖後長期の安全機能を有意に損なうことがないように十分配慮した上でそれらを採用する。ガス対策としては，岩盤中から発生するガスのほかに，内燃機関などを使用する場合に発生する有毒ガス，発破を用いる場合に発生する後ガスなどが対象であり，適切に換気設備を設計し，除去または希釈により坑内の作業従事者に新鮮な空気を供給するように，温度，湿度，粉塵に対する対策と併せて実施する。

さらに，万一地下施設において緊急事態が発生した場合も想定して，坑内の作業従事者の安全を確保するための緊急退避所や緊急避難経路を確保しておく。特に処分場の地下施設は多数の坑道群が建設され，場所を移動しながらの作業が長期間にわたって行われることから，常に避難経路が確

保された状態のもとで作業を行うことができるよう，計画段階から十分な検討を行い地下施設全体の作業計画を立てておく。

NUMO は，一般労働安全についてもサイト特性を踏まえ，必要に応じて，放射線安全で述べたような多重化した対策の検討を進めている。検討例として沿岸海底下に地下施設を建設する場合の坑道内湧水に対する排水対策を以下に示す。沿岸海底下では坑道内には海底と短絡する断層破砕帯が存在する可能性があり，湧水量が多くなる場合を想定したものである。

a 基本的には，顕著な湧水が想定される岩体は候補母岩の選定により回避するか，グラウトなどで止水を図る。

b 次に，通常湧水量を想定し，自然流下によりアクセス坑下の排水槽に集水する。排水槽に集水した湧水は高揚程ポンプなどで地上に排水する。

c 排水槽は避難に必要な時間を確保するのに十分な湧水量の貯水を可能なものとする。

d ポンプは点検，修理ならびに異常湧水時を考えて，通常の二倍の予備台数を設置しておくとともに，万一の電源喪失に備えて非常用電源系統を確保する。

このような想定湧水量の排水設備とは別に，大規模な突発的な湧水が想定した対策も視野に入れて検討を行う。例えば，青函トンネルなどの事例を参考にすると図 6.4.4-3のように十分に余裕をもったポンプ設備でも対応できない場合，非常用水門を閉じて排水坑道全体を貯水槽として利用する。この非常用貯水槽の容量は青函トンネルの例では通常排水量の約 3.5 日分である （竹内，1987）。

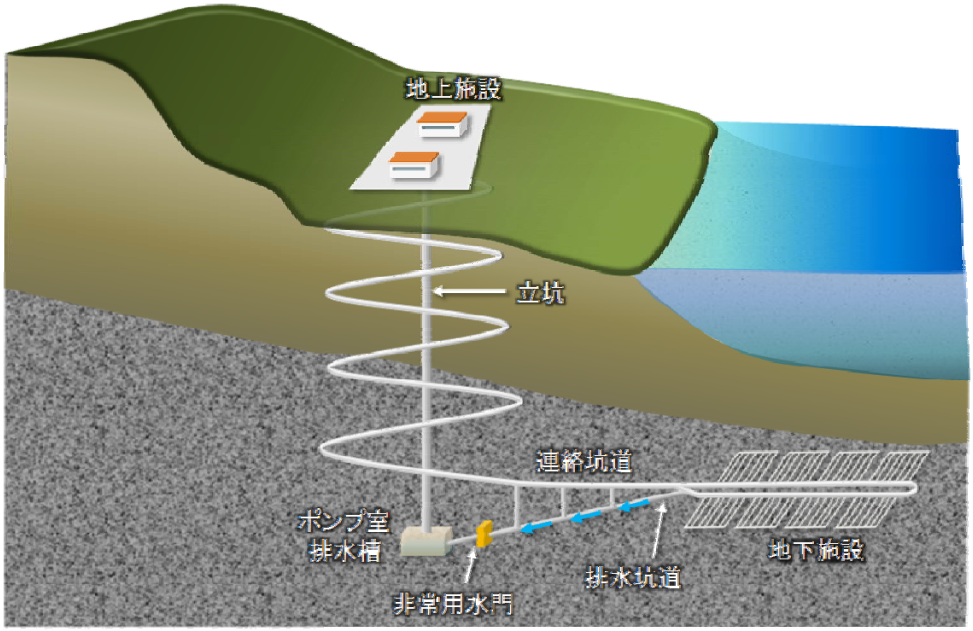


図 6.4.4-3 排水坑道，排水槽，ポンプ室の模式図

6.4.5 閉鎖後長期と事業期間中の安全性両立の観点からの分析

建設・操業および閉鎖の各段階における作業は，程度の差はあるものの，深部地質環境の条件を変化させる可能性がある。さらに，各作業を安全に実施するためには，人工バリア以外のさまざまな材料（主として人工材料）を地下に持ち込む必要がある。具体的には，6.4.4で説明したように，事業期間中の坑道の力学安定性を確保するためには支保工（鋼製材料，セメント系材料）が必要となり，坑道掘削時の湧水を抑制するためには，主にセメント系材料によるグラウト注入などの対策

工が必要となる。これらの多くは閉鎖後も地下施設内，あるいは近傍の岩盤内に残置されることになる。

このため，閉鎖後長期の安全性を確保するために天然バリアと人工バリアに期待しているバリア機能に対して，建設，操業および閉鎖作業は，深部地質環境の条件変化と人工バリア以外の残置物（主として人工材料）の存在，という二種類の影響を与えることになる。これら二種類の影響について，作業段階ごとに影響を与えうるバリアを含めて図 6.4.5-1にまとめて示す。深部地質環境の条件変化については，第 7 章で説明する安全評価により閉鎖後長期の安全性を評価し，必要に応じて設計あるいは建設・操業・閉鎖で影響を低減する方策をとる。

人工バリア以外の残置物は，上記のとおり事業期間中の安全性を確保する対策のために必要となる材料である。しかしながら，閉鎖後長期のバリア機能を確保する必要がある地層処分においては，これらの材料がバリア機能に与える影響を把握し，万一有意な影響が想定される場合には，それらを閉鎖前に撤去する，あるいは影響の少ない材料（例えば，低アルカリ性セメントなど）を適用するなどの対応が必要となる。

閉鎖後長期の安全性に影響を与える因子	因子の分類			影響を受けるバリア	記号*
	作業段階	作業段階における作業，事象	具体的な影響		
深部地下環境の条件変化	建設・閉鎖	建設：坑道掘削 閉鎖：プラグ部拡幅掘削	（力学的影響） 坑壁近傍岩盤の力学的な影響による掘削損傷領域の発生	天然バリア	A1 C1
			（水理学的影響） 掘削損傷領域の形成による処分坑道近傍の地下水流動経路の変化	天然バリア	A1 C1
			（水理学的影響） 破砕帯などの高透水部との交差による連続した水みちの形成	天然バリア	A1
	操業・閉鎖	坑道内への湧水・浸水の存在	（水理学的影響） 湧水・浸水による廃棄体や緩衝材定置時，定置後の人工バリア品質への影響	人工バリア	A3
		操業：廃棄体定置 閉鎖：廃棄体の存在	（熱的影響） 定置された廃棄体の発する熱による緩衝材や周辺岩盤の温度上昇	天然バリア 人工バリア	B1, B2 C1, C2
	建設・操業・閉鎖	深部地下への空気の導入	（化学的影響） 坑道開放中の酸素や二酸化炭素による影響	天然バリア 人工バリア	A1, A2 B1, B2 C1, C2
人工バリア以外の残置物（主として人工材料）の存在	建設・閉鎖	セメント系材料の使用 建設時：吹付コンクリート，覆工コンクリート，インバートコンクリート，グラウトなど 閉鎖時：プラグ，グラウト	セメント系材料による地下水組成変化に起因する岩盤の劣化	天然バリア	A1 C1
			セメント系材料に起因するアルカリ環境下における緩衝材の変質	人工バリア	A2, A3 C2
			セメント系材料に起因するアルカリ環境下における炭素鋼オーバーパックの孔食	人工バリア	A2 C2
			オーバーパック孔食による密閉性消失後のガラスの溶解	人工バリア	A2 C2
			コンクリート支保の劣化による坑道に沿った卓越移行経路の形成	天然バリア	A1
	建設・閉鎖	鉄系材料（鋼製支保工，ロックボルトなど）の使用	鋼製支保工の腐食膨張による影響	天然バリア 人工バリア	A1 A2
	建設・操業	有機物（セメント混和材，防水シート，裏面排水材など）の使用	有機物による放射性核種移行特性への影響（核種溶解度上昇，収着分配係数の変化）	天然バリア	A1 B1

*記号

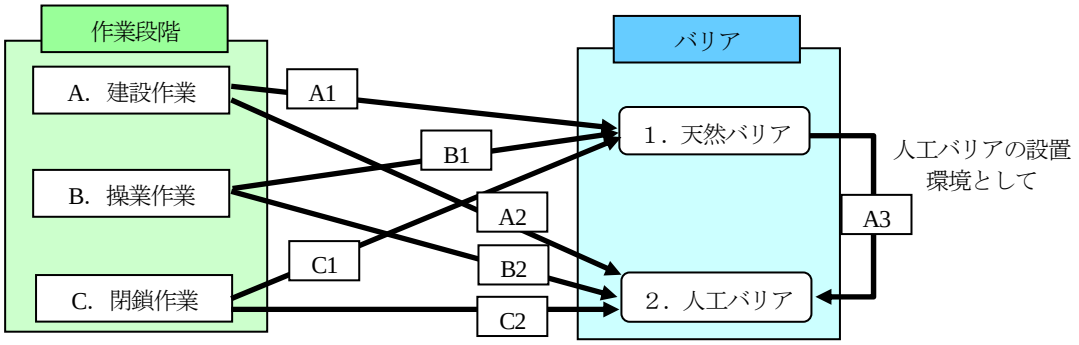


図 6.4.5-1 閉鎖後長期安全性に影響を与える因子

6.5　多様な地質環境への対応

処分施設の設置可能性を調査する区域の応募を募っている現段階において，NUMOは，わが国の多様な地質環境に対応できる処分場概念の検討を実施している。具体的な応募をいただくと，まず応募区域およびその周辺の文献調査に基づき，図 6.3.1-2で示した設計の手順に沿って処分場概念の構築を行う。処分場の設計は，調査の進展に伴い拡充していく地質環境の情報に応じて，地質環境に適したものへと詳細化していくが，サイト選定の初期の段階における処分場概念構築では，地質環境条件の特徴に応じた処分場の姿を検討の出発点とすることにより，その後の処分場概念構築を効率的に実施することができると考えている。

NUMO では，これまで基盤研究開発機関などで検討が進められてきた内陸部に加え，多様な地質環境への対応として，沿岸域の地質環境条件を考慮した設計上の特徴および留意点を整理している。また，現実的な地下の環境条件やこれまでの技術開発の進展を踏まえた処分概念と適用する技術のオプションを取りまとめている。

6.5.1　沿岸域への対応

処分場概念構築の出発点として，第２次取りまとめで示されている結晶質岩と堆積岩，あるいは降水系地下水と海水系地下水といった地質環境特性に応じた処分場概念を活用することができる。NUMO は，これに加えて周囲を海に囲まれたわが国の地理的条件を考慮し，特に，沿岸域の地質環境を地下水流動場や地下水化学環境などの観点から特性を分析し，設計上の特徴や留意点を整理し，サイトに適する処分場概念構築を行う準備を整えている。

沿岸域への対応としては，候補母岩の選定における地下水移行時間や汀線からの離岸距離，緩衝材や埋め戻し材の材料設計への影響などの特徴と留意点を整理した。また，技術的視点以外にも「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」について，その制約を設計に反映する。

6.5.1.1　沿岸域の地質環境を考慮した設計上の特徴・留意点

沿岸域については，陸域と海底の地形条件や，それに伴う地下水流動場の違い，降水系地下水と海水系地下水といった地下水化学環境の違いにより処分場概念が特徴付けられる。また，図 6.5.1-1 に示すように，長期的には気候変動に伴う海水準変動が想定され，それに伴って塩淡境界が移動し地下水流動（流向，流速）に加えて地下水化学環境も時間的に変遷する。地下施設を海底下に配置する場合には，地上施設を地下施設の真上に配置することができないという制約があり（6.5.1.2 参照），汀線からの距離が施設の概念や設計に影響を及ぼす。

ここでは，このような沿岸域の地質環境の特性やその長期的な変動を考慮した候補母岩の選定，地下水化学環境の変化に伴う人工バリアの材料設計，地下施設の設計における離岸距離の制約に関してそれらの特徴と留意点を取りまとめた。

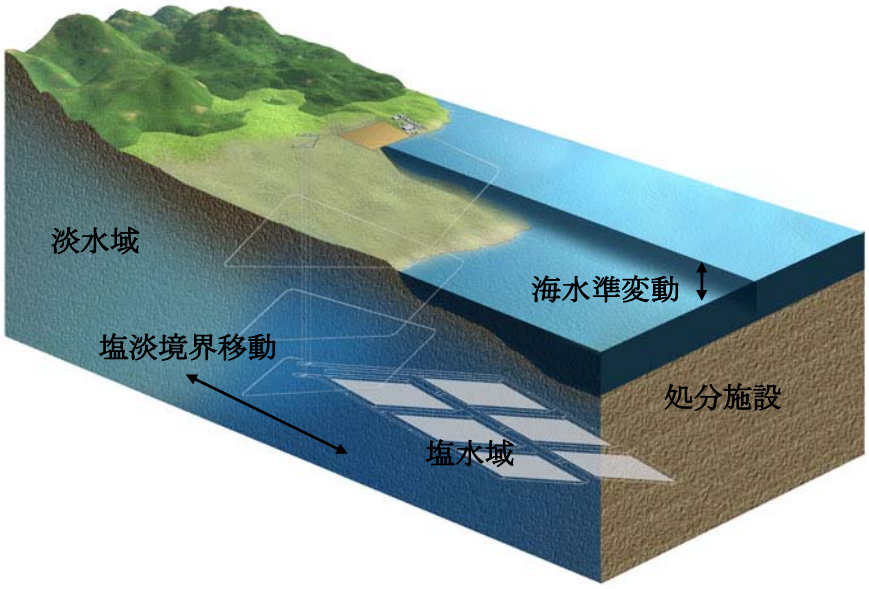


図 6.5.1-1 沿岸域における長期的な海水準変動と塩淡境界の移動

(1) 候補母岩の選定における地下水流動場と地下水化学環境

沿岸域の地質環境の特性と設計上の特徴と留意点を以下に説明する。図 6.5.1-2は，地形が急峻な場合の沿岸部の地下水環境の特徴を示したものである。地下水流動は物質移行との関係が深く，地下水化学環境は緩衝材の膨潤性などと関係があるため，沿岸域は地下水流動や地下水化学環境の特徴により，図 6.5.1-2に示す①～③の領域に概略区分けすることができる。地下水の流向，流速の観点では，①の領域は内陸部の降水系地下水の動水勾配と塩淡境界面付近の地下水流動特性の影響を受ける沿岸域であり，陸域地形が急峻であると動水勾配は大きくなる傾向がある。また，降水系地下水と海水系地下水の密度差に起因して塩淡境界に沿って上向きに降水系地下水が流れる傾向がある。③の領域は，内陸部の地下水の動水勾配の影響を受けない沖合域であり，地下水流動が緩慢な領域である。①と③の中間に位置する②の領域は，現在は沖合域ではあるものの，長期的には気候変動に伴い海水準が変動すると陸域になる可能性がある領域であり，降水系地下水と海水系地下水が周期的に変化し得る領域である。③の領域は，海底地形が急峻である場合，長期的に海水準が変動しても，海水準変動に敏感ではなく海域を維持する可能性が大きいと考えられる領域である。

一方，図 6.5.1-3に示すように，陸域と海底の地形が緩やかな場合には，①の領域における地下水の動水勾配は，地形が急峻な場合と比較して小さくなる傾向にある。また，長い将来にわたり海域を維持する③の領域は汀線からの距離は大きくなる傾向がある。降水系地下水と海水系地下水が周期的に代わり得る②の領域幅も広くなる。

このように沿岸域では，地下水流動場や地下水化学環境に応じて，大きく①，②，③の領域で特徴が異なると考えられる。

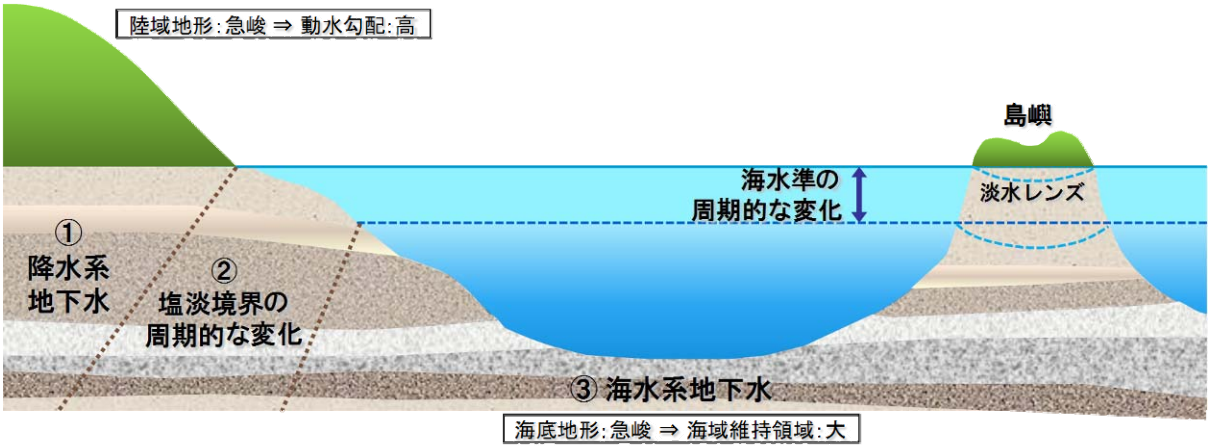


図 6.5.1-2 沿岸部におけるサイト環境の特徴（地形が急峻な場合）

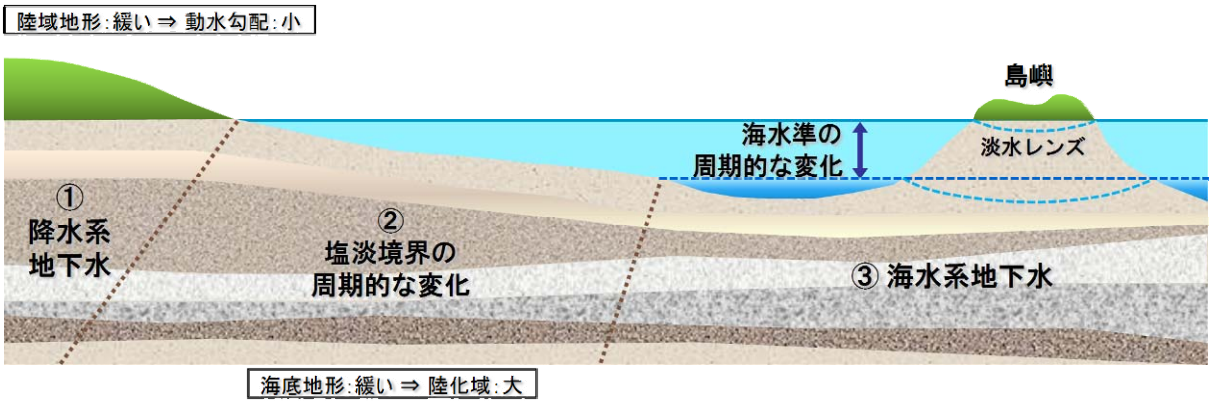


図 6.5.1-3 沿岸部におけるサイト環境の特徴（地形が緩やかな場合）

この沿岸域の特徴に応じた処分場設計の留意点として，まず，候補母岩の選定が挙げられる。地下水流動場や地下水化学環境は，候補母岩を通過する地下水の移行経路やその特性（移行形態，地下水の流速・流向，移行時間，地下水のpH，地下水組成など）を指標として，複数の候補母岩の処分環境条件を比較することで，核種移行の抑制の観点から相対的に好ましい領域を選定するための評価項目である（6.3.3参照）。長期的な地質環境の変遷を踏まえて上記の評価を行う際には，陸域において考慮する隆起・侵食に加えて，海水準変動により核種の移行先である流出点が変わるなどの影響を踏まえた評価を①，②，③のいずれの領域も対象に行う必要がある。

沿岸域を対象とした長期的な地質環境特性の変遷は，周期的な海水準変動の影響により塩淡境界が移動し，その移動の海水準変動への追随性は岩盤の透水性に依存するという特徴がある。核種移行の抑制の観点から，地下水の流速，流出点（移行時間に影響）や地下水中の塩分濃度（核種の溶解度や分配係数に影響）などの周期的な変遷が，核種移行に及ぼす影響の程度を評価することが必要である。候補母岩の選定においては，粒跡線解析により，移行経路や移行時間などの評価を行うが，海水準変動に伴い移行経路と流出点が変化することに留意する必要がある。海退により汀線が海側に移動することにより，例えば②の領域は，動水勾配が小さい拡散場である海域より，地下水が塩淡境界に沿って上昇する流動場となる沿岸域，陸域の動水勾配の影響を受ける領域へと移行していくことが考えられる。海水準変動に伴う移行経路と流出点が変化するイメージを図 6.5.1-4に示す。

候補母岩の評価においては，天然バリアとして期待する岩体の領域をどの程度に設定するかに留意する必要がある。例えば，サイト調査の初期の段階では，地質環境モデルや粒跡線解析結果に不確実性が大きいと想定される。その際には，天然バリアとして期待する岩体の領域を候補母岩から下流側に適切に設定し，サイト調査の進展とともに，不確実性を合理的に低減することで，初期に実施した候補母岩の評価やその選定結果を段階的に確認していくことも重要な方策である。

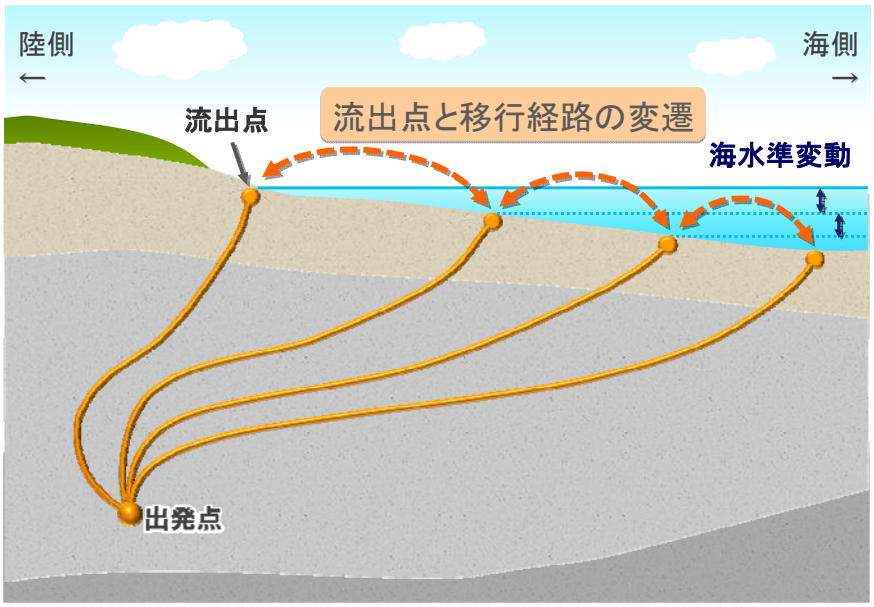


図 6.5.1-4 粒跡線解析による海水準変動による流出点移動のイメージ

(2) 地下水化学環境の変化に伴う人工バリアの設計

沿岸域の特徴に応じた処分場設計の次なる留意点として，人工バリアの材料設計が挙げられる。緩衝材，埋め戻し材に使用する主要な材料であるベントナイトは，塩分により膨潤特性が影響を受ける（6.6.2 参照）。海水準の変動に伴い，沿岸域では地下水の塩分濃度などの地下水化学場が変化することとなり，緩衝材や埋め戻し材の仕様が図 6.5.1-2に示した①，②，③の領域別に異なるものとなる可能性がある。①と③の領域は，将来にわたり降水系地下水と海水系地下水がそれぞれ卓越する領域である。①の領域については，図 6.3.2-4 などをもとに緩衝材の仕様を選定する。③の領域については，海水系地下水環境下におけるベントナイト材料の基本特性への影響を考慮した緩衝材，埋め戻し材の仕様（材料，配合など）を設定する必要がある。また，②に関しても，周期的な塩淡境界の移動の影響を受け，将来的に塩水環境に変化する領域として人工バリアを設計することとなる。

海水系地下水環境下における人工バリア材料の設計については，2000 年以降に塩水環境を対象とした人工バリア材料の基本特性に関する知見が拡充されたことを受けて，緩衝材および埋め戻し材の設計の変更の必要性について検討した事例を示す（表 6.5.1-1）。なお，塩水環境における材料の基本特性の理解については，6.6.2 で概説しているので，そちらを参照されたい。

表 6.5.1-1 緩衝材および埋め戻し材の設計の例示

	淡水環境（JNC，1999c）	塩水環境	設定理由
緩衝材	円筒形 ・ケイ砂混合ベントナイト（ケイ砂 30 重量%，乾燥密度 1.6Mg/m^3） ・厚さ 70cm	円筒形 ・ケイ砂混合ベントナイト（ケイ砂 30 重量%，乾燥密度 1.6Mg/m^3） ・厚さ 70cm	塩水環境における膨潤性の低下，透水性の上昇を考慮しても，淡水の仕様が成立する（JNC，2005）。
埋め戻し材	掘削土混合ベントナイト（ベントナイト含有率 15 重量%，乾燥密度 1.8Mg/m^3）	掘削土混合ベントナイト（ベントナイト含有率 40 重量%，乾燥密度 1.8Mg/m^3）	塩水環境における膨潤性の低下，透水性の上昇を考慮し，周辺岩盤と同程度の透水性とする（JNC，2005）。

（i） 緩衝材

塩分濃度の高い地下水の分布が予測される場合には，緩衝材の特性である透水係数や膨潤量の変化に留意して設計する必要がある。影響を受ける緩衝材の設計の技術要件としては，「低透水性を有すること」，「自己シール性」，「緩衝材の流出抑制」などが挙げられる。そこで，以下ではこれらの技術要件に着目して，塩水環境下の緩衝材の設計の考え方とその例を示す。

「低透水性を有すること」については，その暫定的な指標としてペクレ数を用いる。ペクレ数は，１より十分小さい場合，拡散による移行が支配的となり，移流による移行が抑制されていると判断できる。そこで，海水系の透水係数の有効粘土密度との関係式からペクレ数を求め，乾燥密度との関係を図 6.5.1-5に示す。ペクレ数は，有効粘土密度 1.0～2.0Mg/m^3 の領域で 0.003 未満の値であり，移流による移行が抑制されていると判断できる。

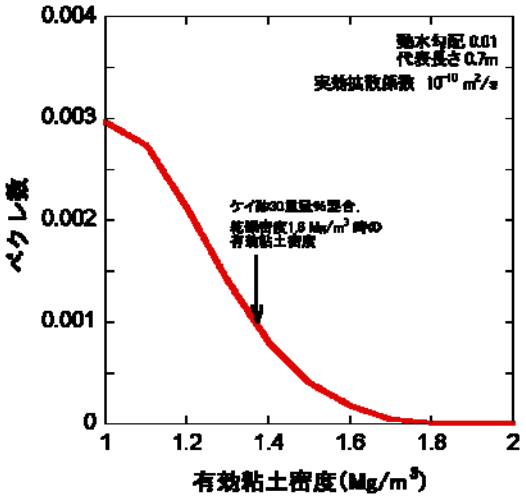


図 6.5.1-5 海水条件での有効粘土密度とペクレ数の関係（NUMO，2010c）

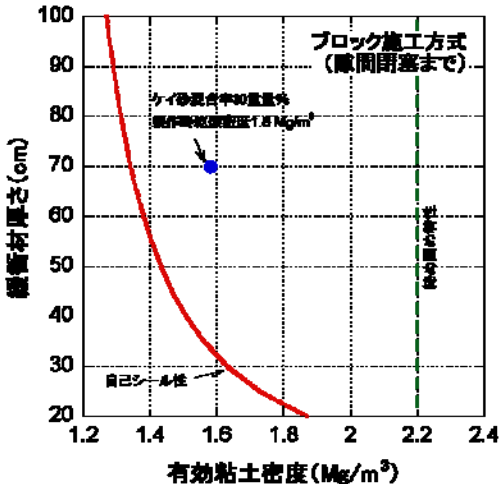


図 6.5.1-6 海水条件での自己シール性と有効粘土密度，緩衝材厚さの関係（NUMO，2010c）

「自己シール性」については，施工時の隙間を閉塞できるように，体積膨潤比が隙間比の二倍となる条件を暫定的な指標として，緩衝材の厚さと有効粘土密度を求めた（図 6.5.1-6）。自己シール性が必要となるのは，定置後，隙間を充填し，閉塞するまでの期間である。なお，隙間の割合は，施工方法に依存する。処分孔の有効粘土密度の上限値は，ブロックの製作可能性（締固めの成立性）

で決まる。

ブロック定置方式を例とすると，現在の緩衝材ブロックの仕様例（ケイ砂混合率 30 重量%で乾燥密度は 1.8Mg/m^3）（JNC，1999b）から，有効粘土密度を見積もると 1.58Mg/m^3 である。この条件であれば，自己シール性を有し，かつ締め固めも可能である仕様である。この仕様は，膨潤後の緩衝材の平均乾燥密度に換算すると 1.6Mg/m^3（ケイ砂混合率 30 重量%）に相当する。

なお，施工時の隙間が小さい場合はその影響は比較的小さいが，大きくなるほど影響は大きくなる。従って，人工バリアの施工方法の選定に合わせて，施工時の隙間の割合を見積もり，隙間が大きく，影響が大きい場合には，自己シール性を確保するために，有効粘土密度を高くするなどの対策を検討する。

「緩衝材の流出抑制」については，処分孔と透水性の高い割れ目が接触している場合に，主要成分であるベントナイトが地下水の流れによって流出する現象である。6.6.2で示すように，緩衝材の流出に関する試験では，ベントナイトの流出は，地下水の流れが一定以上，速い場合にのみ起こり，また，塩水環境では緩衝材の膨潤性が低下するため，おこりにくい現象であることが分かっている。従って，特に緩衝材の設計には反映しない。

（ii） 埋め戻し材

埋め戻し材には，アクセス坑道に沿って卓越した移行経路が形成されることを抑制する安全機能を期待している。埋め戻し材は，緩衝材同様，ベントナイトを主成分として使用しており，塩水環境では，その性能が低下する可能性がある。埋め戻し材の技術要件としては，周囲の岩盤と同程度かそれより低い透水性を求めている。例えば，周囲の岩盤の透水係数が 10^{-10} m/s であると仮定すると，埋め戻し材の有効粘土密度は 1.2 Mg/m^3 よりも高い値が必要となる。埋め戻し材は，粒度調整した掘削土と混合した材料を圧縮成形し施工するが，掘削土の混合率を 60 重量%未満とし，乾燥密度 1.8Mg/m^3 以上とした場合に，有効粘土密度が 1.2 Mg/m^3 以上となる。

以上は，あくまでも仕様例であり，実際の設計においては，サイトの地質環境特性を考慮して，また，止水プラグの配置などと組み合わせ，アクセス坑道が卓越した移行経路とならないよう，合理的な対策を検討する。

(3) アクセス坑道の設計に関して

海底面下に地下施設を配置する場合，地上施設を地下施設の直上に配置することはできないことから（6.5.1.2 参照），直上に地上施設を配置する場合と比較して必然的にアクセス坑道が長くなる。処分場領域として，海底の地形，岩盤の透水性，必要な処分深度などを考慮して沖合部への配置を想定したレイアウトとアクセス坑道の検討例を図 6.5.1-7に示す。

アクセス坑道が長くなると，アクセス坑道掘削に時間を要する，地下施設建設工程が長くなることに加え，地下施設の換気・排水設備の能力増強が必要になることなどが想定される。NUMO は，アクセス坑道の延長と建設工期，換気・排水設備能力などの関係を検討しており，この離岸距離の制約に関しては，アクセス坑道長がある程度の距離を超える領域では，第２次取りまとめで示されているアクセス坑道の本数を増やすか，坑道断面を大きくするなど設計上の対応が必要となることを把握している（NUMO，準備中 c）。

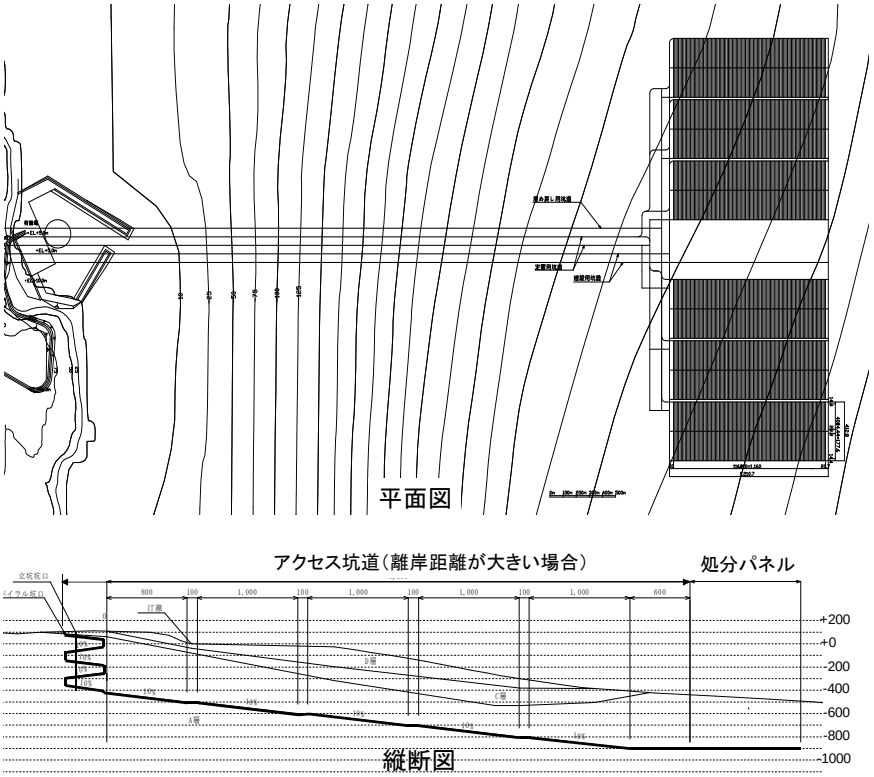


図 6.5.1-7 離岸距離が大きい場合のアクセス坑道を含む処分場レイアウト例（NUMO，準備中 c）

6.5.1.2　廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約への配慮

前述した内容が，沿岸域の地質環境特性を考慮した場合の技術的な視点からの設計の特徴である。一方，沿岸域における設計では，次のような技術的視点以外の点に関する留意も必要である。

海洋投棄による海洋の汚染を防止することを目的とした廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter，1972）（以下，ロンドン条約という）と呼ばれる国際条約があり，1996 年の改正では従来よりも厳しい内容となり，廃棄物の海中への投棄と，海底下への廃棄も原則禁止とされている（環境省，2003a）。

処分場を沿岸海底下に設置する場合，この「海底下への廃棄」に当たるのではないかという懸念が生じるが，1996 年の改正では，海底下について「陸上からのみ利用することのできる海底の下の貯蔵所を含まない」と定めている（環境省，2003b）。現状では，陸域に廃棄体の地下施設への搬入口を設置することを想定しているため，条約に抵触することはないと考えられる。

ロンドン条約に対応する国内法として，海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（以下，海洋汚染防止法という）があるが，同法は制定当時から炉規法および放射線障害防止法などの関連法令による体系が十全であることから，「第 52 条；この法律の規定は，放射性物質による海洋の汚染及びその防止については，適用しない」とされている（海洋汚染・海上災害防止法研究会　編，1996）。

6.5.2　想定される地質環境特性へ対応するための処分概念・技術オプション

6.5.2.1　想定される地質環境特性へ対応する処分概念・技術オプションの考え方

NUMO は，サイト選定の各段階に応じて処分場概念の構築・評価を繰り返し，精密調査地区選定段階では，応募区域の地質環境に適した処分場概念を構築する。現実の地下環境では，岩盤の力学強度が低く処分孔の自立性が悪いとか，緩衝材を定置する箇所への湧水があるなどの制約条件が想定される。NUMO は，公募を行っている現時点までは，精密調査地区選定段階の処分場概念の構築に資するため，それらの地質環境の条件に対応できる処分概念・技術オプションについて，現状の技術開発の到達レベルなどを勘案して検討を進めている。なお，ここでいう処分概念・技術オプションとは，バリアの形態や組み合わせ，廃棄体の定置方式，処分坑道の断面などの処分概念と，操業技術の組み合わせのことと定義する。

ここでは，第２次取りまとめで示されている代表的な処分概念である処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式を検討の出発点とし，まずそれらを作業性の観点から特徴や課題を整理する。そして，坑道内への湧水があるといった現実の地下環境において想定される条件のもとで，実際にそれらを作りこむときに，どのような処分概念になり，どのような技術を組み合わせるのが適当なのかついて，NUMO が検討した成果を述べる（NUMO，準備中 c）。

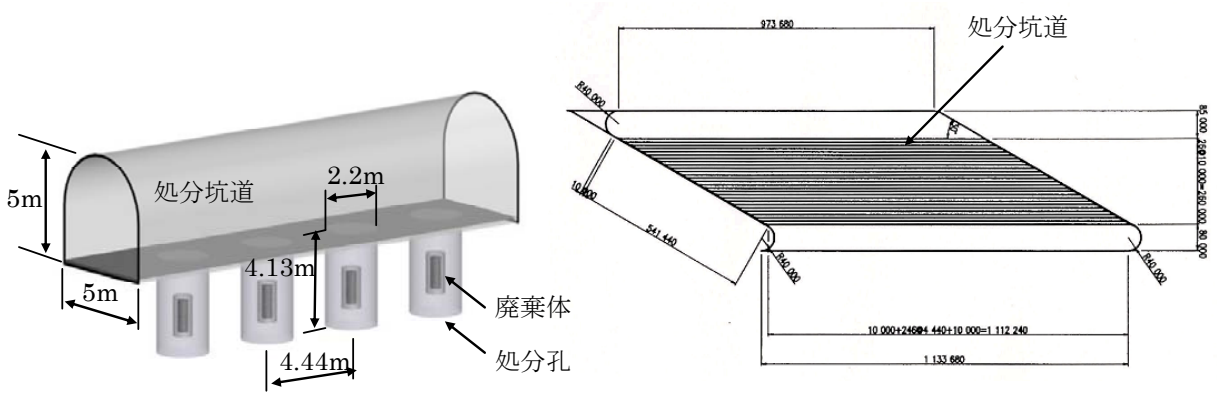
作業性については，工学的実現性に係る定置作業性，事業を進める上で重要な操業安全と効率性（物流性）に関する特徴を述べる。また，現実の地下環境で想定される条件は，操業環境の維持の観点からその特徴を述べる。その上で，それらに対応する処分概念・技術オプションとその絞り込みの考え方を定置方式別に説明する。

6.5.2.2　処分概念・技術オプションの基本形態の特徴

(1)　廃棄体定置方式

廃棄体の定置方式は処分概念を形作る上での大きな要素である。代表的な廃棄体定置方式として処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式がある（JNC，1999b）。

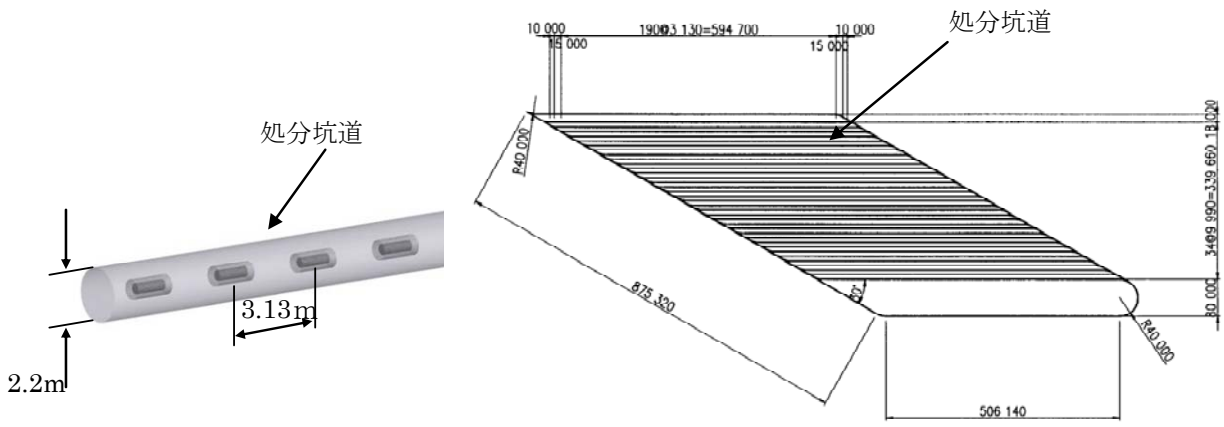
処分孔竪置き定置方式は，処分坑道から掘削した処分孔に廃棄体と緩衝材を定置するものである。廃棄体は，坑道の力学的安定性の確保や，発熱による人工バリアへの閉鎖後長期の性能への影響などを回避するために必要な間隔を設けて定置される。処分孔の上部の処分坑道は，坑道を埋め戻すまでの間は物流経路として有効に利用できる。第２次取りまとめでは，硬岩において，1 処分パネルに長さ 800m程度の処分坑道 27 本を配置し，処分坑道に直径 2.2m，深さ 4.13mの処分孔を 4.44m の間隔で配置する例が示されている（JNC，1999b）（図 6.5.2-1）。



(a) イメージ図　　(b) 処分パネル平面図（例）

図 6.5.2-1 処分孔竪置き定置方式(左：(NUMO，準備中 c)，右：(JNC，1999b を一部加筆・修正))

処分坑道横置き定置方式は，処分坑道内に緩衝材と廃棄体をある間隔をおいて定置するもので，理想的には坑道の径を必要な人工バリアの径まで小さくできるため掘削量や埋め戻し量が小さくなるという特徴がある。第２次取りまとめでは，軟岩において，一つの処分パネルに長さ 600m程度，直径 2.2mの処分坑道 35 本を配置し，処分坑道内に 3.13mの間隔で廃棄体を定置する例が示されている（JNC，1999b）（図 6.5.2-2）。



(a) イメージ図　　(b) 処分パネル平面図（例）

図 6.5.2-2 処分坑道横置き定置方式（左：(NUMO，準備中 c)，右：(JNC，1999b を一部加筆・修正))

(2) 搬送・定置技術オプション

処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式について，廃棄体と緩衝材を搬送し定置する技術のオプションのうち代表的なものを図 6.5.2-3に示す（NUMO，準備中c)。

ブロック方式は，複数に分割した緩衝材ブロックをあらかじめ地上施設で製作し，地下に搬送し組み立てるものである。底部および側部の緩衝材ブロックを設置後，廃棄体を定置し上部緩衝材ブロックを設置する。処分孔壁，あるいは処分坑道壁と緩衝材ブロックの隙間を充填する必要がある場合には，ベントナイトペレットなどを充填する。

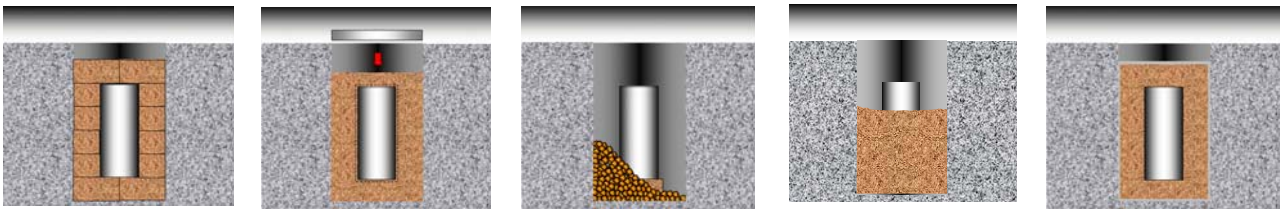
原位置施工方式は，緩衝材材料を地下に搬送し，原位置で所期の密度まで締固め施工するものである。底部および側部緩衝材を撒き出し，締固め施工後に廃棄体を定置し，上部緩衝材を撒き出して締固め施工を行う。

ペレット充填方式は，まず，廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し，その上に廃棄体を定置する。側部および上部緩衝材，地上で製作したペレット状の緩衝材を充填することにより構築する。

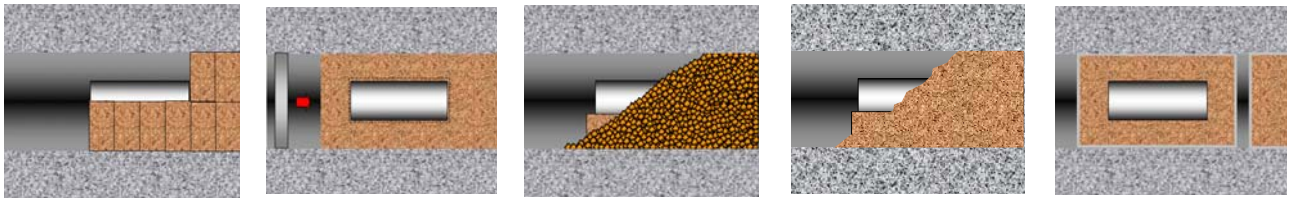
吹付方式は，まず，廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し，その上に廃棄体を定置する。側部および上部緩衝材を吹付により構築する。

PEM 方式は，6.4.2.1 で説明したとおり，廃棄体と緩衝材を地上施設において所定の形状に組み立てたものを，地下に搬送し処分孔内あるいは処分坑道内に定置するものである。

なお，それぞれの方式の技術の整備状況は，6.6.4.3 で説明する。



(a) 処分孔竪置き定置方式



(b) 処分坑道横置き定置方式

図 6.5.2-3 搬送定置技術オプション（NUMO，準備中 c）

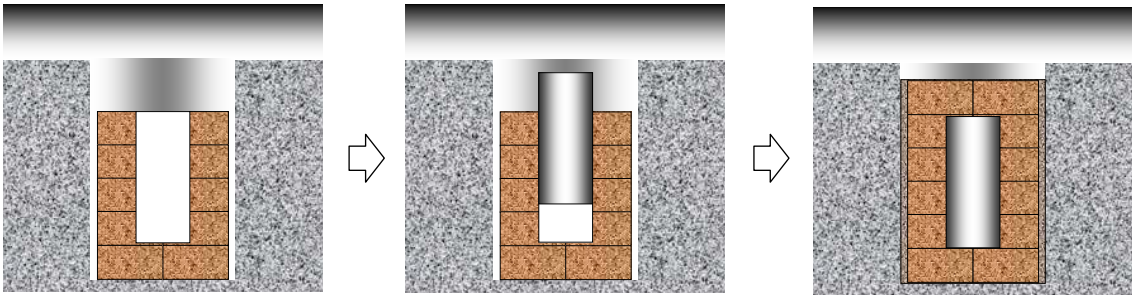
(3) 基本形態の特徴

処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式について，技術オプションとの組み合わせは種々のものが考えられるが，これまでの基盤研究開発成果などを踏まえ，現時点における現実的な基本形態として，以下の 3 パターンを設定する。なお，この設定は，ほかの組み合わせを排除するものではなく，技術開発の進展や地質環境に応じて判断する。

(i) 処分孔竪置き定置方式

処分孔竪置き定置方式については，6.6.4.3 に示すとおり，ブロック方式や締固め方式について，実規模レベルでの製作・実証が行われており，その実現性が示されている（原環センター，2010b）。特にブロック方式は，緩衝材ブロックの製作と真空把持装置を用いたハンドリング技術が開発されており（原環センター，2004b），技術開発レベルは最も高いと考えられるため，この方式における基本形態として考える。

定置作業の手順を図 6.5.2-4に示す。まず，底部および側部の緩衝材ブロックを定置し，次に，オーバーパックを定置する。上部緩衝材定置後に，必要に応じて隙間に緩衝材ペレットなどを充填する。



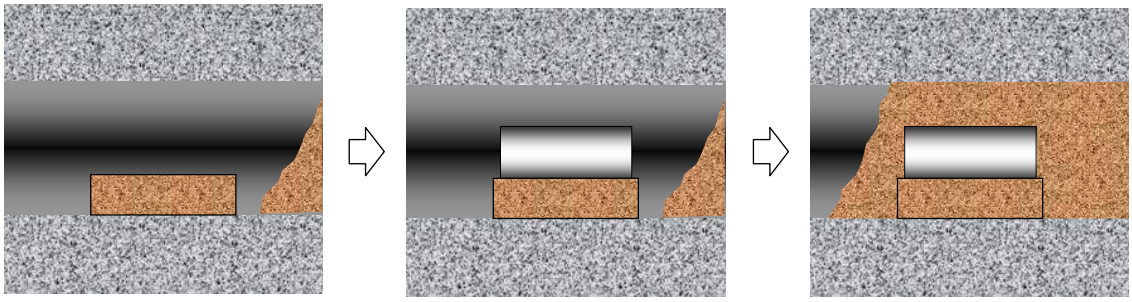
(a)　底側部緩衝材ブロック定置　　(b)　オーバーパック定置　　(c)　隙間充填

図 6.5.2-4 処分孔竪置き定置方式の基本形態（NUMO，準備中 c）

(ii)　処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）

処分坑道横置き定置方式は，狭隘空間での長距離・遠隔施工になること，廃棄体と緩衝材の定置方向も重力方向とは異なる水平方向であることなどから，作業の難易度は処分孔竪置き定置方式よりも高くなると考えられる。例えば，ブロック方式を適用する場合，ブロックの定置やオーバーパックの定置作業には水平移動が伴うため，鉛直方向の定置と比べて荷重の支持方法など，定置装置の設計への要求事項が多くなると考えられる。また，長距離の遠隔施工になるため，坑道壁面の仕上がり精度との関連もあり，ブロックを横方向に設置する方式では，定置済み緩衝材を正確に認知し，精度の高い緩衝材位置決め技術が必要になる。このような課題に対し，第２次取りまとめ以降，緩衝材の施工を簡便に行うための技術として，ペレット充填方式や吹付方式が基盤研究開発機関により開発されている（6.6.4.3 参照）。これらのうち吹付方式は，高密度の緩衝材を狭隘空間においても施工できる実績があることから（原環センター，2010b），処分坑道横置き定置方式の基本形態として考える。

定置作業では，まず，底部にオーバーパックを定置するための緩衝材を，遠隔施工が比較的容易と考えられるブロック方式にて定置する。次に，オーバーパックを定置し，残った空間を吹付工法により緩衝材を施工する。



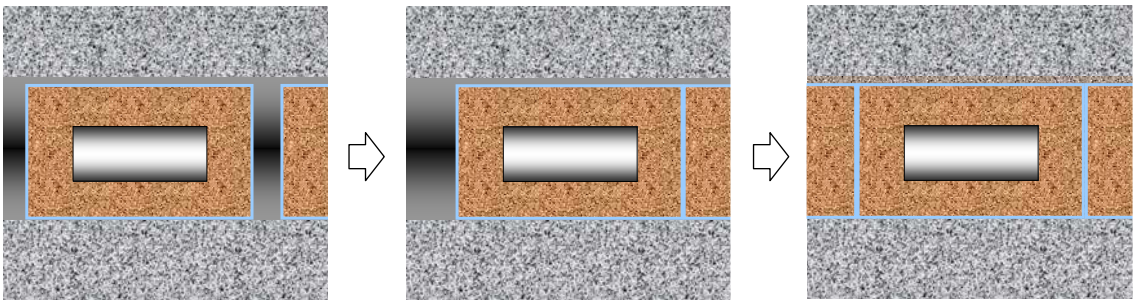
(a)　底側部緩衝材ブロック定置　　(b)　オーバーパック定置　　(c)　吹付施工

図 6.5.2-5 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）の基本形態（NUMO，準備中 c）

(iii)　処分坑道横置き定置方式（PEM方式）

処分坑道横置き定置方式は，上記のとおり処分孔竪置き定置方式に比べて作業の難易度が高いと考えられる。原位置での処分坑道横置き定置方式の作業性と緩衝材の施工品質を向上させるための方策として，6.4.2.1 で説明した PEM 方式が提案され，第２次取りまとめ以降，基盤研究開発機関により技術が着実に整備されている（原環センター，2004b，2009a）。従って，処分坑道横置き定置

方式については，上述の原位置で施工する吹付方式に加え，PEM 方式も基本形態として考える。定置作業では，まず，PEM を地上施設で組み上げ，地下に搬送し，処分坑道内に定置する。PEM と処分坑道の坑壁との隙間（基盤研究開発では 15cm 程度を想定）には，緩衝材ペレットなどを充填する。



(a)　PEM 搬送　　(b)　PEM 定置　　(c)　隙間充填

図 6.5.2-6 処分坑道横置き定置方式（PEM 方式）の基本形態（NUMO，準備中 c）

6.5.2.3　処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性

ここでは，現時点で有望と考えられる技術オプションをあてはめた処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式について，それぞれの作業の特徴と，改善あるいは対応策が必要な課題を説明する。作業の特徴と課題は，「定置作業」，「操業安全」，および「作業の効率性（物流性）」の観点から説明する。

(1)　処分孔竪置き定置方式

【定置作業の特徴】

処分孔竪置き定置方式では，緩衝材とオーバーパックを上部の処分坑道から処分孔に順次定置する。定置装置自体は比較的広い処分坑道で稼動するため，動作スペースの広さの観点から，定置装置の設計の自由度は比較的高いと考える。また，定置作業の方向は重力方向と同じである上下方向であることから，作業にとっては有利な方向である。底部・側部緩衝材を定置した後，オーバーパックを定置し，上部緩衝材を定置する。緩衝材ブロック定置方式はブロックの製作と真空把持装置による定置装置の要素試験が実施されており，技術の整備が進んでいる（原環センター，2010c）。詳細は 6.6.4.3 を参照されたい。

【操業安全の特徴】

定置装置が稼動する処分坑道の空間に比較的余裕があるため，定置装置が坑壁と接触し稼動停止状態に陥る可能性は少ない。定置装置が仮に処分坑道内を移動中に停止したとしても，廃棄体が遮へい体の中にある場合は，人が坑道内に入坑し修理などの作業を行うことも可能である。また，処分坑道を埋め戻すまでは，処分坑道内は二方向からアクセスすることが可能であり，換気も坑道全断面を利用した坑道換気が可能である。

【効率性（物流性）の特徴】

処分坑道を通り抜けることが可能であり，複数の定置装置の動線が錯綜しない。1 日当たり 1 本

の処分坑道内に複数の廃棄体を定置する場合でも，定置装置をすれ違いや待ち合わせをさせることなく，数珠つなぎで稼動させることができるため稼働率を高く設定することができる。

(2) 処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）

【定置作業の特徴】

定置装置は，直径が 2m 強の狭隘空間内を最大 1km 程度移動し，緩衝材と廃棄体を定置するため，狭隘空間内での長距離の遠隔作業になる。定置手順としては，底部緩衝材ブロックを定置し，オーバーパック定置後，側部および上部緩衝材を施工する。吹付方式は，材料の圧送距離の制約から処分坑道の長さをポンプ圧送が可能な距離にまで短くする必要がある（NUMO，準備中 c)。定置作業は，1 本の処分坑道内で，廃棄体単位で緩衝材定置と廃棄体定置とを，必要な設備機械を入れ替えながら繰り返し進めることになる。

【操業安全の特徴】

処分坑道は一旦緩衝材と廃棄体を定置すると一方向からのアクセスしかできなくなる。また，処分坑道内で廃棄体は遮へいされていないため，終始遠隔作業になる。定置装置が稼動する処分坑道の断面が小さいため，定置装置が坑壁と接触し稼動停止状態に陥る可能性は処分孔竪置き方式よりも高いと考えられる。アクセスが一方向になるため，坑道換気はできず必要であれば風管などを用いて換気を行うことになる。風管を用いる場合，その移動や撤去作業を遠隔で実施する必要がある。

【効率性（物流性）の特徴】

定置作業空間が狭隘で，長距離，一方向アクセスとなるため，効率性は処分孔竪置き定置方式と比べると低い。

(3) 処分坑道横置き定置方式（PEM方式）

【定置作業の特徴】

PEM 方式は，処分坑道内への横置き定置を原位置で緩衝材を施工する方式に対して，地上で廃棄体と緩衝材の組立てを実施することにより，品質の信頼性向上と，処分坑道での搬送・定置の作業性改善を目的とした方式である。国の基盤研究開発では，処分坑道の断面積をなるべく拡げずに，重量物（約 35t）である PEM を搬送する方法として，鋼製セルの組み立てと PEM の搬送・定置方法に関する実証試験などが進められている（原環センター，2004b，2009c)。基盤研究開発で実証試験が進められている方法は，エアベアリングにより PEM の重量を支えて水平移動させ，定置位置でエアジャッキにより一時的に PEM 重量を支え，その間にエアベアリングを退避させ，その後エアジャッキの操作により PEM を定置する方法である。これにより狭隘空間における重量物搬送の実現性の見通しが示されているとともに，PEM を搬送する床面の不陸を 10mm 程度に抑える必要があることなど，工学的対策での注意点などが確認されている（6.6.4.3 参照)。搬送性および閉鎖後長期の安全性の観点から，坑壁と PEM のクリアランスや坑道の線形への制約，PEM を構成する鋼製セルの残置による閉鎖後長期の安全性への影響については検討が必要である。

【操業安全の特徴】

処分坑道は一旦 PEM を定置すると一方向からのアクセスしかできなくなるなど，操業安全上の特徴は，基本的には原位置施工による吹付方式とほぼ同程度であると考えられる。隙間充填作業が必要ない場合には，作業工程が PEM の搬送と定置に集約されるため，操業安全面は向上する。

【効率性（物流性）の特徴】

定置作業空間が狭隘で，長距離，一方向アクセスとなるため，PEM 方式の効率性は処分孔竪置き定置方式と比べると低いと考えられるが，原位置施工による吹付方式と比較すると，定置作業の種類と回数が少なくなるため効率性は高くなる。

6.5.2.4　現実の地下環境の特徴と適応性

(1)　現実の地下環境の特徴

大深度に大規模な坑道群を建設する際には，従来のトンネル建設工事でも経験があるように，地質不良部と遭遇したり，突発的な湧水に見舞われたりすることが想定される。しかしながら，これらの事象に対しては，類似の建設工事で実績のある対策工を施すことにより対応できるものと考えている。ここでは，操業環境を維持するという観点から，対応が必要と考えられる地下環境の特徴を述べる。

岩盤の力学特性については，竪置き方式の処分孔が，処分坑道掘削により生じた掘削影響領域内での掘削となるため，岩盤の強度が低い場合には無支保で力学的安定性を確保できないことも想定される。この場合は，処分孔の力学的安定性を確保するための対策が必要になる。

また，緩衝材の施工とその品質確保に影響を及ぼすと考えられる地下環境条件として，坑道内の湿度と坑道内の緩衝材施工箇所への湧水が挙げられる。坑道内の湿度について，国内の文献（酢谷ほか，1991）を参考にすると，坑道内における相対湿度は 70 %～90 数%であり，換気を行わない場合は 100%と想定される。また，坑道内への湧水について，国内の文献（日本鉄道建設公団，1987；大島ほか，1987；日本トンネル技術協会，1983）を参考にすると，堆積岩（泥質岩など）で 0～0.3ℓ/分/m，結晶質岩（花崗岩類）で 0～0.6ℓ/分/m が想定される。これらを踏まえ，湿度や湧水に関して以下のことを想定しておく必要があると考えられる。

- 坑道内の湿度は換気により管理することを基本とするが，高湿度環境であると考えられる。
- 坑道延長の長い地下施設においては，岩盤の状態に不均質性があることが想定されるため，湧水量については幅を見ておく必要がある。
- 通常のトンネルに比べて深度が大きく，間隙水圧が高いことが予想される。

これより，緩衝材定置時の現実的な作業環境としては，高湿度で坑道内への湧水があることを想定しておくことが適当であると考えられる。このような作業環境として高湿度，湧水を想定した場合の緩衝材の状態について，基盤研究開発機関と国外関連機関により以下の知見が得られている。

基盤研究開発機関では，ブロック型緩衝材の搬送技術に関する研究の予備試験として，ブロックが高温・多湿環境に暴露された際の性状変化と，環境影響を受けにくい緩衝材仕様を把握することを目的とした高温・多湿環境に所定時間放置する実験が行われている（図 6.5.2-7）。この実験結果では，周辺環境湿度を考慮して含水比を高めに調整したブロックでは 48 時間後でも表面に亀裂は発生しないが（図 6.5.2-7，上欄），含水比を低めに設定した場合にはブロック内の飽和度と周辺環境

の湿度の差異により，吸水によるブロック表面の割れが発生する（図 6.5.2-7，下欄）。このことより，高湿度環境下に緩衝材ブロックをある程度の時間，定置しておく必要がある場合には，緩衝材ブロックの製作時初期含水比を定置環境の湿度を考慮して適切に設定することが必要となる。ただし，高湿度環境を想定して高めに初期含水比を調整したベントナイトブロックは，地上での保管時に乾燥によるひび割れが発生するため，保管時には外気に触れないような処理を施しておく必要がある。

坑道内への湧水が緩衝材定置に与える影響について，SKB では水滴が緩衝材に落下した場合の緩衝材の膨潤状況を評価している（Börgesson et al.，2005）（図 6.5.2-8）。水滴がベントナイトブロックに落下するとベントナイトは急速に膨潤するため定置作業に影響を及ぼすことが想定される。このため，定置作業時はトンネル壁面からの滴水などがブロックに触れないよう，防滴対策を施した定置装置などによる作業工程を考慮する必要がある。

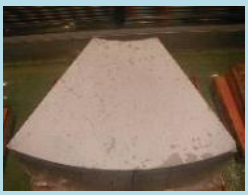
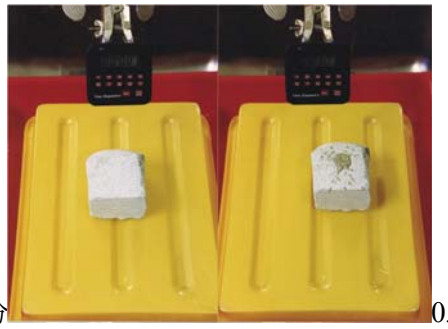
状態・条件		試験開始時	２４時間後	４８時間後
高温多湿環境下 **問題なし**	ベントナイト：50% ケイ砂：50% **含水比：7%** 乾燥密度：1.9Mg/m^3 温度:45℃ 湿度:95%			
高温多湿環境下 7 時間後より吸湿による剥離発生	ベントナイト：70% ケイ砂：30% **含水比：4%** 乾燥密度：1.9Mg/m^3 温度:45 湿度:95%			

図 6.5.2-7 高温多湿環境下での緩衝材ブロックの挙動（原環センター，2005 を編集）



0 分　0.5 分後



34 分後　48 分後

図 6.5.2-8 水滴落下試験（出典：Börgesson et al.，2005）

(2) 現実の地下環境への適応性

現実に想定される地下環境に対して，処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式（原位置吹付，PEM 方式）の適応性を以下に説明する。

処分孔竪置き定置方式について，処分孔の自立性が良好でない場合には，支保工を施すことにより処分孔の力学安定性を確保する。坑道内の高湿度条件については，換気による対応が基本である。処分孔竪置き定置方式の場合，処分坑道を埋め戻すまでは坑道換気が可能であり，処分坑道内に外気を十分給気することにより坑道内の湿度を低下させることが期待できる。湧水がある場合は，処分孔内に地下水が溜まることになり対策が必要である。いずれの場合も，処分孔竪置き定置方式では対応すべき箇所が「処分孔」として独立しているため，必要な箇所に必要な対策，処分孔底部に溜まった湧水のポンプアップなど，を施すという局所的な対応が可能である。なお，ポンプアップした水は処分坑道内の排水設備で排水する。

処分坑道横置き定置方式では，原位置で緩衝材を施工する場合，処分坑道内の高湿度条件に関して，廃棄体定置後は処分坑道内の換気が難しくなるので留意する必要がある。また，坑道内への湧水が緩衝材定置に有意な影響を及ぼす場合は，処分孔竪置き定置方式の処分坑道内の排水設備のように坑道に沿った設備での対応になる。

PEM 方式の場合は，PEM 自体の搬送・定置には高湿度や湧水に対する対策は不要である。ただし，PEM と処分孔壁との隙間をベントナイト材料で充填する必要がある場合には，充填材の施工時に高湿度や湧水の影響を検討する必要がある。

6.5.2.5 作業性および地下環境条件を考慮した技術オプション

(1) 技術オプションの考え方

ここでは，処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式について，6.5.2.3で説明した基本形態の作業性と，6.5.2.4で説明した地下環境条件を踏まえ，作業性の改善と地下環境への適応を考慮した処分概念・技術オプションを説明する。定置方式ごとの作業性と現実に想定される地下環境条件への適応性を図 6.5.2-9にまとめる。

処分孔竪置き定置方式は，作業性は良好であると考えられるが，処分孔の力学安定性や湧水対策などの地下環境への適応性については必要に応じて処分孔ごとに局所的な対応を行う。

処分坑道横置き定置方式のうち原位置で緩衝材を施工する吹付方式では，作業性の改善とともに地下環境への適応性を向上させることが必要である。PEM方式は，品質確保の確実性と原位置施工方式の作業性の改善をはかる概念であるが，具体的に適用する技術は基盤研究開発が進められており，それらの成果を踏まえてさらに作業性の改善をはかる処分概念・技術オプションを整備する。PEM容器は，水密性を持たせる場合とそうでない場合が考えられる。水密性を持たせる場合，PEM本体の地下環境条件への適応性は高くなる。なお，図 6.5.2-9はPEM容器に水密性を持たせた場合を記載した。また，上記のとおりPEMと処分坑壁との隙間をベントナイト材料で充填する必要がある場合には，高湿度や湧水の影響を考慮した充填材の施工を満足する技術オプションを検討する。
図 6.5.2-9では，作用性と地下環境への適応性について比較したが，処分概念・技術オプションの特徴を総合的に比較する際には，表 6.5.2-1で後述するように複数の適切な因子などをもとに比較する。

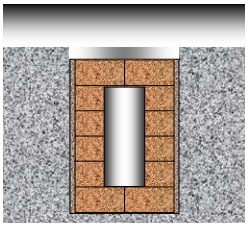
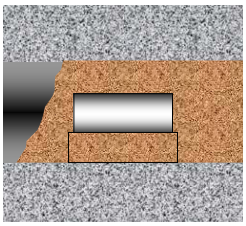
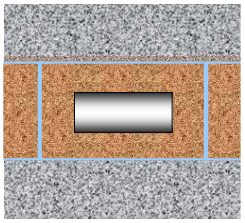
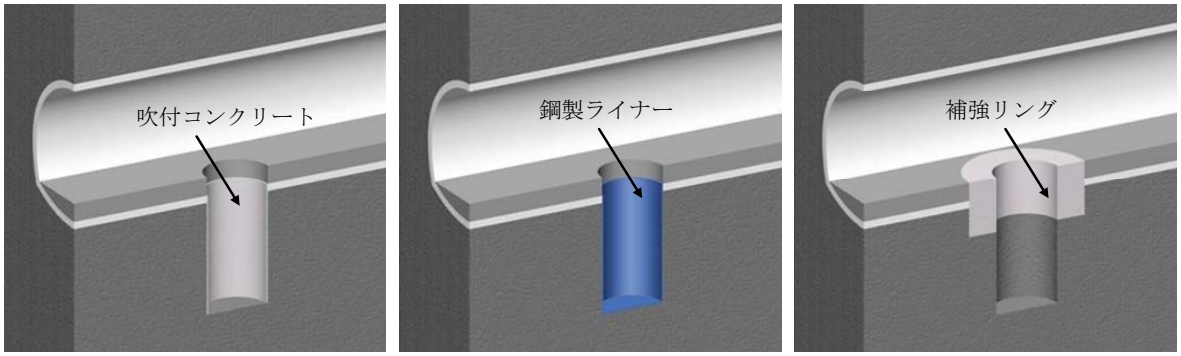
分　類	処分孔竪置き定置方式	処分坑道横置き定置方式	
		原位置施工方式	PEM 方式
			
作業性			
【定置作業性】	処分坑道に空間的余裕があり，定置装置の空間的制約は少ない。 緩衝材ブロック製作・定置に関する要素技術は実証済みである。	底部緩衝材ブロック，側部・上部緩衝材吹付に関する要素技術は開発済みである。 吹付材料の圧送距離に応じて処分坑道長を設定する。	狭隘空間での重量物搬送・低地技術は開発中である。
【操業安全性】	処分坑道に空間的余裕があり定置装置の稼動は容易である。 坑道換気が可能である。 処分孔上部遮へい後，入坑が可能である。 2 方向の入坑・避難経路が確保できる。	処分坑道内の換気は容易ではない。 廃棄体定置後は入坑することはできない。	処分孔道内の換気は容易ではない。 廃棄体定置後は入坑することはできない。
【効率性（物流）】	搬送性は良好と考えられる。 往復作業がないため稼働率を上げることができる。	狭隘空間での往復作業になるため，搬送距離が長いと効率が低下する。	狭隘空間での往復作業になるため，搬送距離が長いと効率が低下する。
地下環境への適応性			
【空洞安定性】	処分孔別に必要に応じて補強が必要である。	坑道断面が小さいので竪置き方式に比べて有利である。	坑道断面が小さいので竪置き方式に比べて有利である。
【高湿度対策】	ブロック仕様，処分坑道内換気により対応可能である。	高湿度対策として十分な換気を行うのは難しい。	緩衝材が PEM 容器内に収納されているので，換気は不要である。
【湧水対策】	処分孔別に湧水低減策，排水策，地下水と緩衝材の接触防止策で対応する。	処分坑道全線で排水工を施す。	鋼製セルに水密性を持たせる場合，本体については，湧水対策は不要である。 隙間充填に関して，湧水対策を施す必要がある。

図 6.5.2-9 処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式の作業性と現実に想定される地下環境条件への適応性

(2) 処分孔竪置き定置方式

処分孔竪置き定置方式では，廃棄体を定置する処分孔がそれぞれ独立しているため，対策が必要な箇所について個々に対策を施すことが可能である。従って，技術オプションは局所的な対応策となる。

岩盤の力学特性に関して，無支保で処分孔の安定が確保できない場合には，図 6.5.2-10に示すように吹付コンクリートを施したり，鋼製ライナーを建て込んだりする。また，処分孔壁は上部の肩部に応力が集中し力学安定性上の弱部になることが多いため，上部に補強リングを施し安定を図ることも考えられる。



(a) 吹付コンクリート　　(b) 鋼製ライナー　　(c) 補強リング

図 6.5.2-10 処分孔の力学安定性確保策（NUMO，準備中 c）

処分孔竪置き定置方式は，力学的な制約に加え，高湿度や湧水に対しても処分孔別に必要に応じて対策を施すことができる柔軟性があることが特徴である。図 6.5.2-11には，現実に想定される地下環境における処分孔竪置き定置方式の技術オプション適用イメージを示す。湧水がない場合には通常の定置作業を行う。湧水がある場合で湧水量が非常に多いとき，処分孔に廃棄体を定置することなく埋め戻し，放棄することもあり得る。湧水量が少ないときは，湧水対策を実施する。湧水対策としては，処分孔内への湧水を低減するため，処分孔周辺に水抜きボーリングを施し地下水を低下させる湧水低減策，処分孔内に浸入した地下水をポンプで排水する排水策，埋め戻し前の緩衝材と地下水との接触を鋼製ライナーなどを設置することで防止する接触防止策などがある。なお，接触防止策は，鋼製ライナーの浮き上がりを防止するため背面をポンプで排水する必要がある。

湧水低減策は，処分孔内への湧水量は低減できるが，完全に止水することは困難であるため，緩衝材設置時から緩衝材の膨潤が始まることになる。排水策は，緩衝材を定置する直前に処分孔内に溜まっている地下水をポンプアップする方法であり，この対応策も緩衝材定置時から地下水と緩衝材の接触が始まる。これらの二つの対策は処分孔内への湧水量が少ないときに有効であると考えられる。湧水がある程度多くなると，接触防止策をとる。接触防止策で鋼製ライナーなどを使用するときは，処分孔の補強も兼ねることができる。また，湧水低減策と排水策は緩衝材定置時から緩衝材の膨潤が始まるため，処分坑道埋め戻しまでの間，緩衝材の処分坑道内への膨潤流出防止対策を施す必要がある。

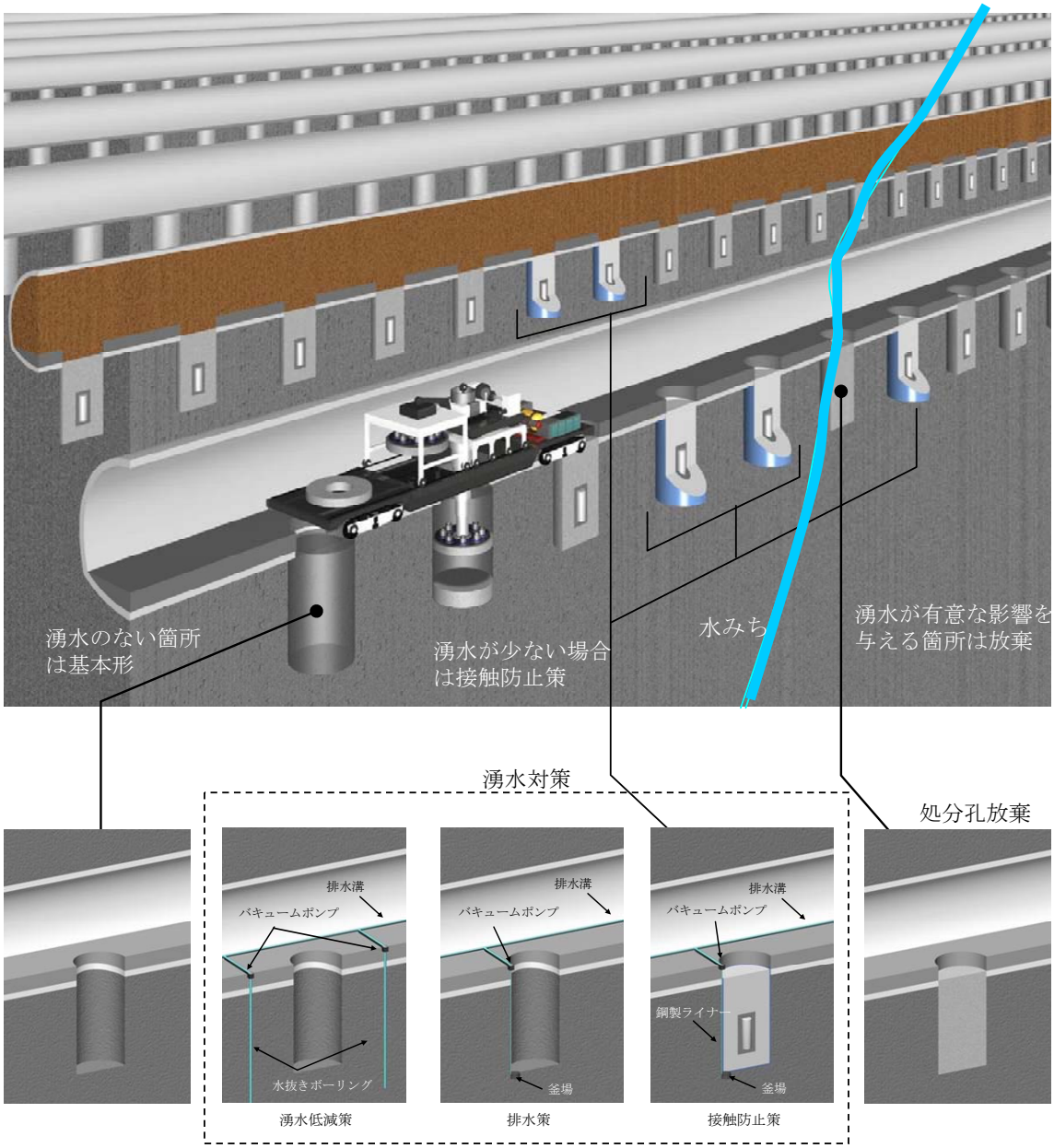


図 6.5.2-11 想定される地下環境条件を考慮した技術オプション適用事例（NUMO，準備中 c）

(3) 処分坑道横置き定置方式

(i) 原位置施工方式

処分坑道横置き定置方式では，まず，作業性を改善するための技術オプションを示し，操業環境維持の観点からの対策を加える。

底部緩衝材をブロックで定置し，側部・上部緩衝材を吹付施工する方式について，作業性を考慮した概念とその定置手順を図 6.5.2-12に示す。処分坑道断面は第２次取りまとめで示されている坑道断面とほぼ同じ径とするものの，作業性や排水性を考慮して坑道底部に定置装置走行用のインバートを設ける。底部緩衝材上にはオーバーパックの定置を安定させるための鋼製台座を設置する。オーバーパックとオーバーパックの間には，緩衝材ブロックからなるスペーサを設置する。設置手順を，図 6.5.2-13に示す。坑道掘削後，底部緩衝材ブロックをインバート上に設置し，その上にオーバーパック定置用台座を設置する。その後，オーバーパックを専用定置装置により所定箇所に定

置する。定置装置はインバート上を走行する。インバートをガイドとして走行することにより，長距離遠隔移動がやりやすくなる。オーバーパック定置後，側部・上部緩衝材を吹付する。吹付は，インバート上を走行する遠隔装置により行う。

また，吹付では材料をポンプ圧送するが，圧送性を考慮して施工延長を 100mとし，処分坑道長は坑道両側から 100mずつ施工することとし，図 6.5.2-14に示すように処分パネル内に作業坑道を二本追加し，処分坑道長が 200mになるようにする。なお，処分坑道端部には緩衝材流出防止用の力学プラグを設置する。

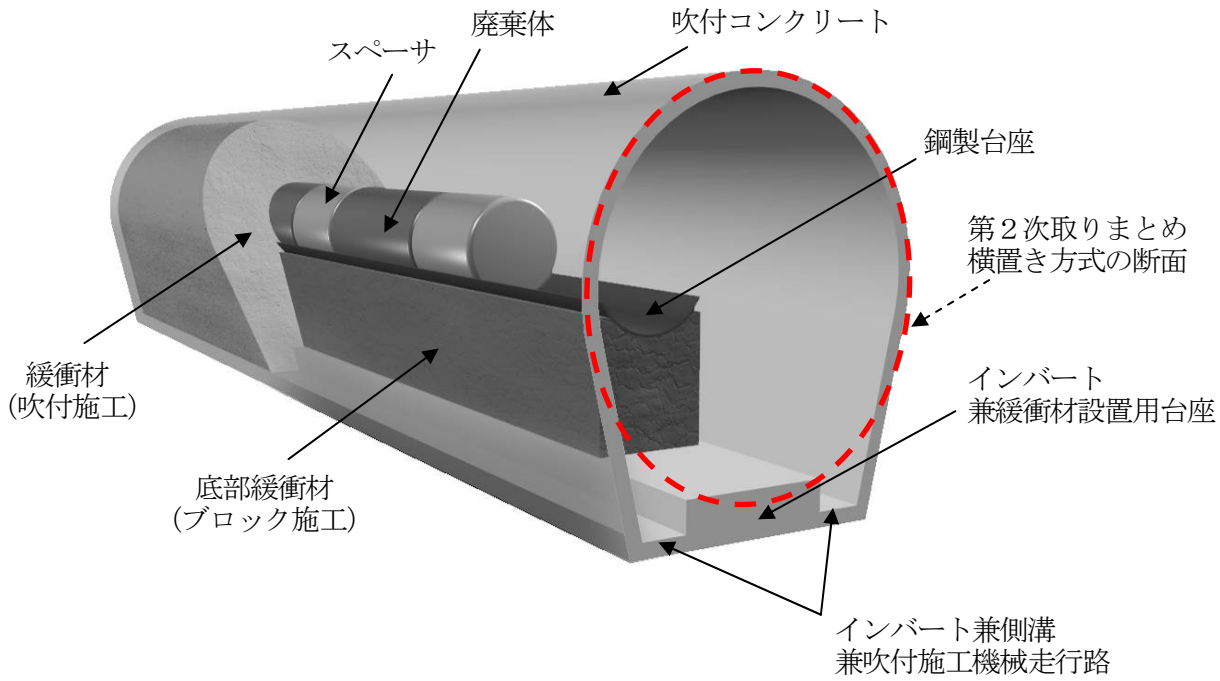
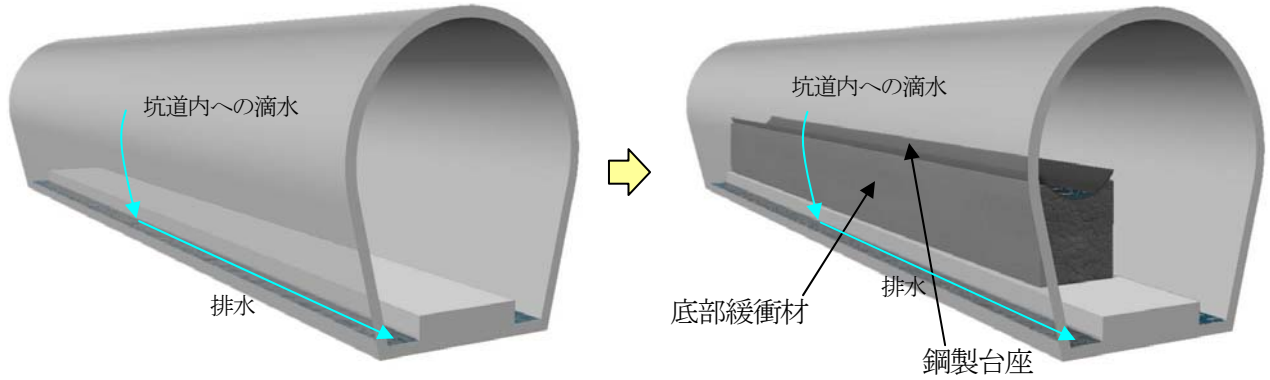
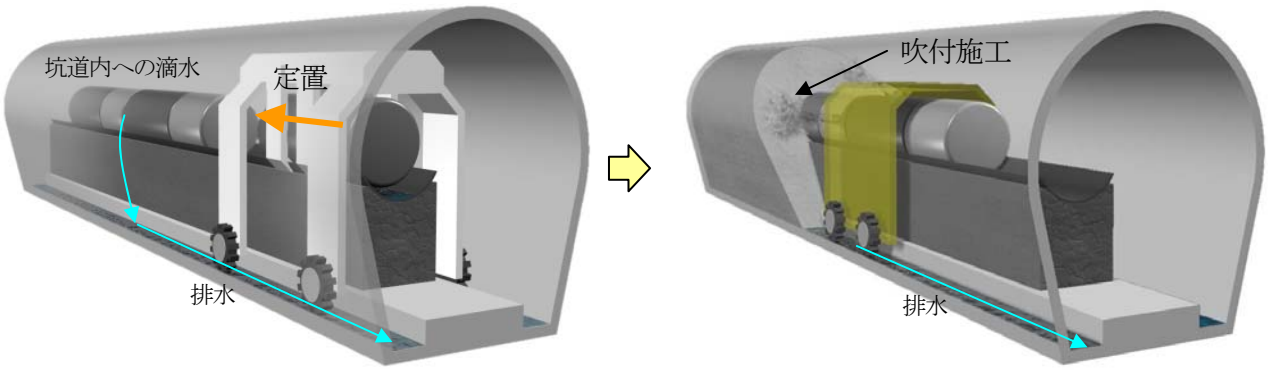


図 6.5.2-12 作業性を考慮した処分坑道横置き定置方式（原位置施工）（NUMO，準備中 c）



(a)　処分坑道掘削　　(b)　底部緩衝材・鋼製台座設置



(c)　オーバーパック定置　　(d)　側部・上部緩衝材吹付施工

図 6.5.2-13 処分坑道横置き定置方式定置手順（NUMO，準備中 c）

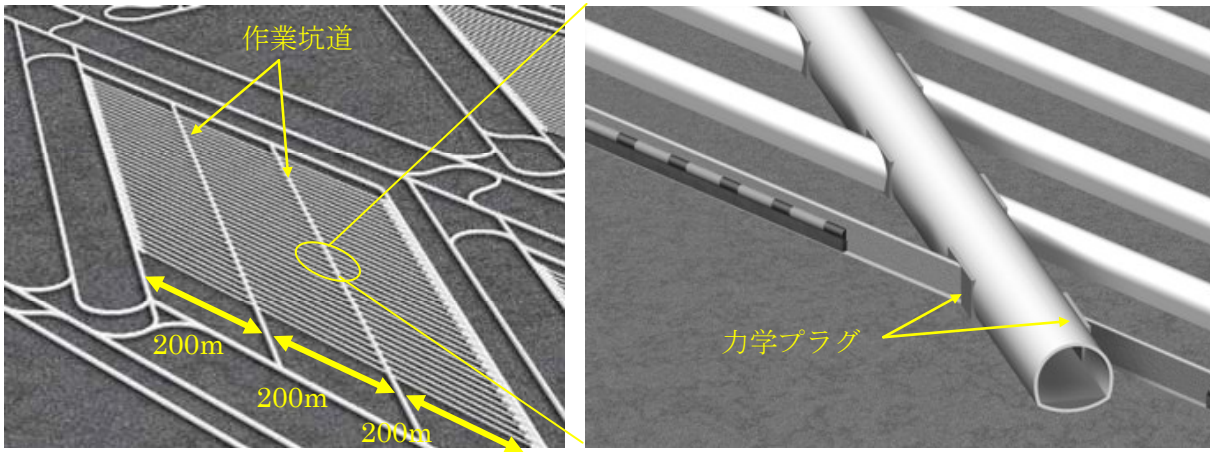


図 6.5.2-14 処分坑道横置き定置方式地下施設レイアウト（NUMO，準備中 c）

地質環境への適応性について，坑道内への湧水対策の方法としては，支保工背面に防水シートを敷設し，坑道内への浸入を遮断することで対応可能である。処分孔竪置き定置方式と異なり処分坑

道単位で対策を施す。なお，図 6.5.2-12で示した概念は，インバート部が側溝を兼ねており，湧水量が少ない場合には，防水シートを施さず坑道内に浸入する地下水，滴水などを直接側溝に流し排水することを念頭に置いたものである。

一方，高湿度については換気が有効である。しかしながら，坑道定置方式で廃棄体を定置中の処分坑道の換気は，風管を用いた強制換気にならざるを得ないこと，その風管を配置する空間的な余裕がないこと，また，仮に配置したとしてもそれを風管の筒先を遠隔で移動し，最終的に撤去する技術が必要になることなど課題が多い。

これを踏まえ処分坑道長を，1 日あたりの廃棄体定置数を目安に廃棄体 5 体分に相当する 25m程度*) をとし，換気をしない概念を図 6.5.2-15に示す。

*) 第２次取りまとめで示されている横置き定置方式の廃棄体ピッチより 20m（≒3.13m×6（廃棄体両端部の緩衝材含む））と力学プラグ設置部などを考慮。さらに主要坑道とのすりつけ部の長さも必要。この場合，底部緩衝材定置と鋼製台座を設置後，早い時期にオーバーパック５体を定置し，速やかに側部・上部緩衝材を施工することで，底部緩衝材ブロックが放置される時間を短くすることができる。

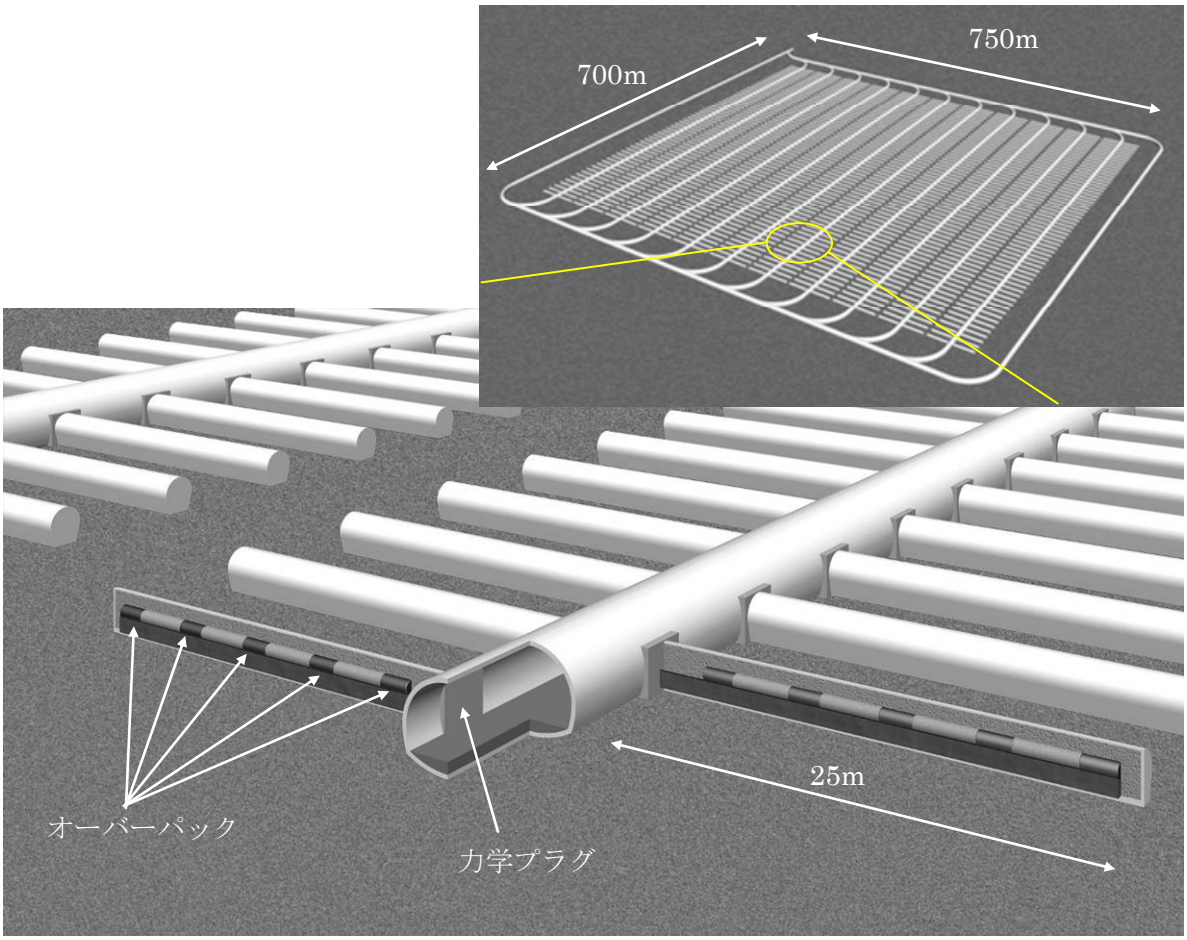


図 6.5.2-15 処分坑道レイアウト（短処分坑道版）（NUMO，準備中 c）

（ii） PEM方式

PEM方式は横置き定置方式を対象に，地上施設であらかじめ緩衝材と廃棄体を鋼製セル内に格納

し，地下施設へ鋼製セルを搬送・定置する方式である。PEMは坑道内での作業工程を削減し，人工バリアの定置品質を確保するための作業の効率化が期待できる。一方，約35tと比較的重いPEMを狭隘な処分坑道内で，前方状況を確認しにくい状態で遠隔操作により水平に数百メートル移動させるための技術が必要となる。必要となる技術のうち，国の基盤研究開発ではエアジャッキとエアパレットを用いた搬送・定置概念を対象に技術開発が進められている（原環センター，2004b，2009cなど）（6.6.4.3参照）。

NUMOでは，PEMの利点を考慮しつつ，重量物のPEMの処分坑道内における信頼性の高い搬送・定置装置として，処分坑道断面を拡幅し，PEMを上部から機械的に把持する概念について検討を実施している（NUMO，2010c）（図 6.5.2-16）。同図に示す概念は，図 6.5.2-17に示すように充填材充填装置を連結した搬送装置が処分坑道に敷設した軌道上を走行するものである。

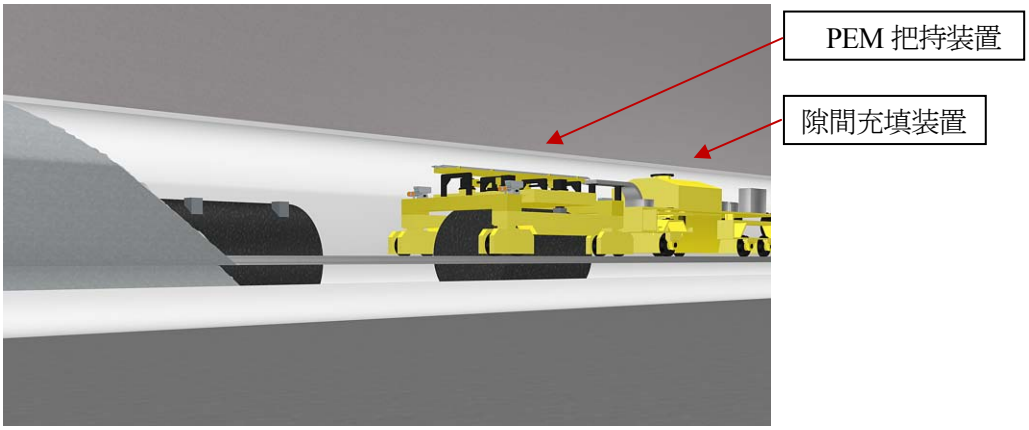


図 6.5.2-16 処分坑道断面の拡幅による作業性向上を目的とした PEM の搬送概念（NUMO，準備中 c）

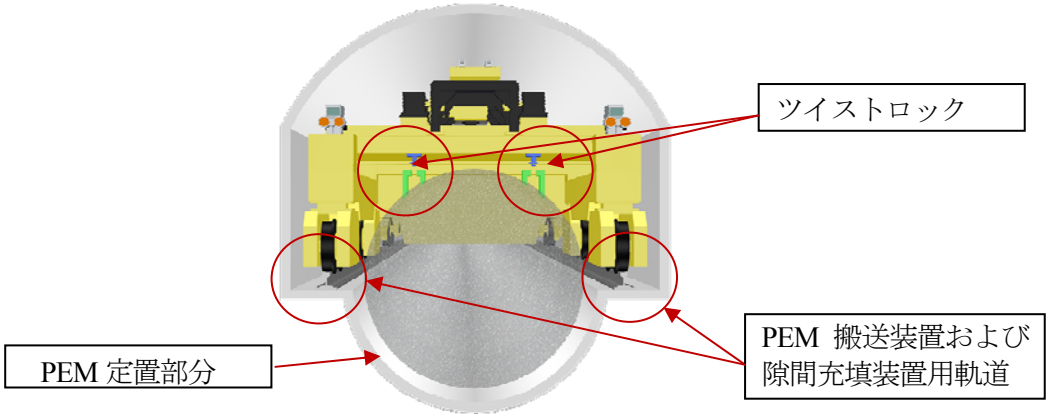


図 6.5.2-17 処分坑道断面の拡幅の PEM 概念－処分坑道断面形状例（NUMO，準備中 c）

定置作業工程を図 6.5.2-18の左側に示す。まず，PEMを機械的に把持した搬送装置で処分坑道を所定位置まで水平移動する。所定位置において搬送車両を下降させてPEMを定置する。次に，一つ前に定置されたPEM周囲の空隙に，ノズルにより粒状ベントナイトを充填する。粒状ベントナイトはPEM定置装置に連結された充填材搬送装置のタンクに搭載し，PEM搬送の作業工程の阻害にならないようにしている。また，PEMのツイストロックを用いた把持・搬送・定置時の動作概念を図6.5.2-18の右側に示す。ただし，図の定置装置の昇降動作距離は 4 倍に強調して示している。

これらの機構により操舵性と PEM 前方の視認性が向上し，定置品質の向上とともに機械的な故障などのリスクを低減できると考えている。NUMO としては，現状の技術開発状況を考慮し，基盤研究開発などにより処分坑道を拡幅する必要がない技術が確立されたと判断されれば，処分坑道断面の縮小などの合理化を図ることとしている。

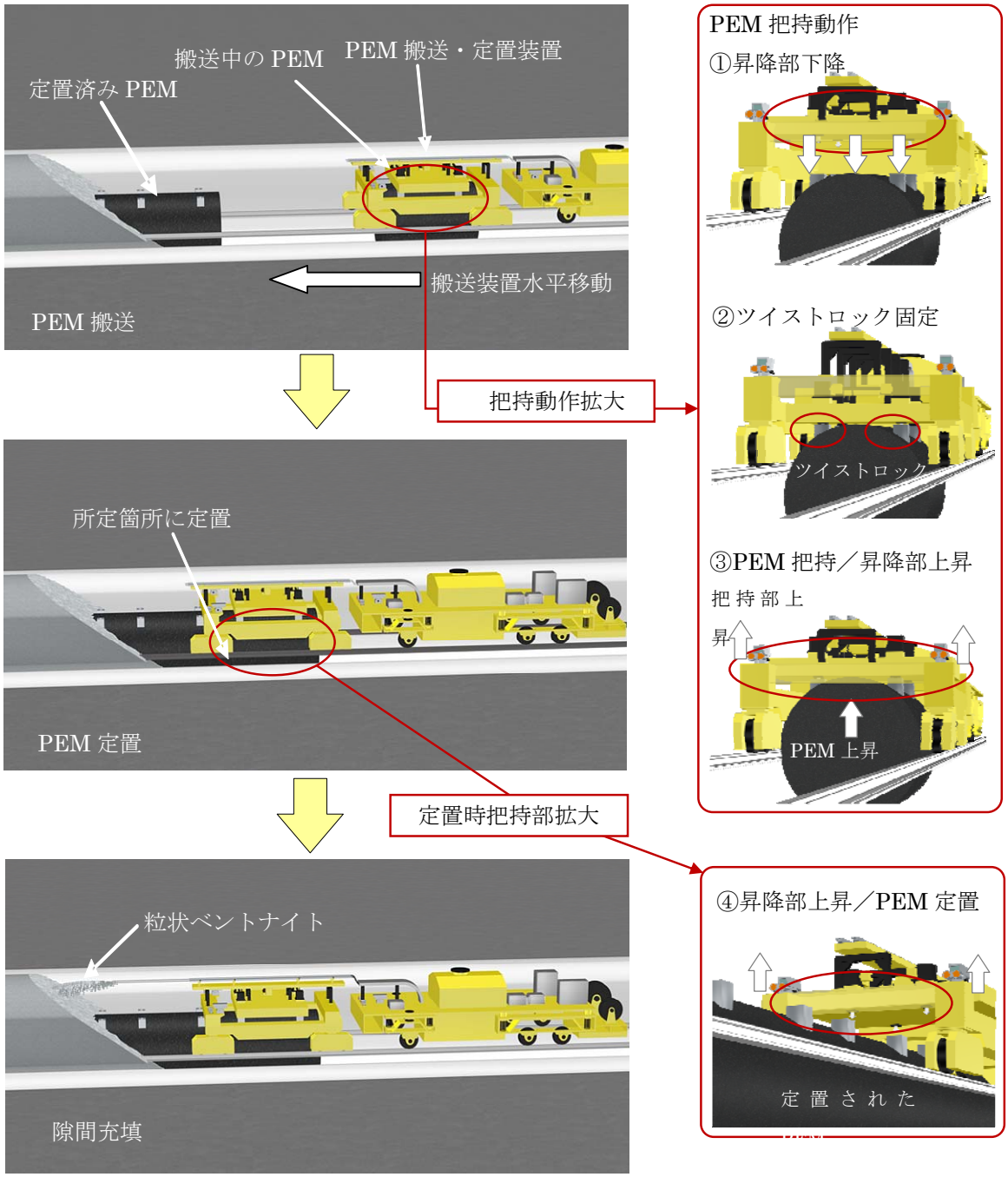


図 6.5.2-18 処分坑道断面の拡幅の PEM 概念－把持・搬送・定置工程（NUMO，準備中 c）

6.5.2.6　処分概念・技術オプションの特徴のまとめ

本項では，第２次取りまとめで示されている代表的な処分概念である処分孔竪置き定置方式と処分坑道横置き定置方式を検討の出発点とし，それぞれの作業性，現状の技術開発の到達レベルや現実の地下環境への適応性を踏まえ，現実的な処分概念を説明してきた。

NUMO は，サイト選定に応じて処分場概念の構築・評価を繰り返し，精密調査地区選定段階までに，実際の地下環境に適した処分場概念を構築する。その過程で，複数の処分概念を検討し，それぞれの特徴や得失を比較し，最適な処分概念へと絞り込む。

処分概念の絞り込みを効率的，かつ適切に実施するには，共通的に必要とされる基軸に沿って進めることが有効である。この基軸となる設計因子として，NUMOは「閉鎖後長期安全性」，「操業安全性」，「工学的実現性／品質保証」，「工学的信頼性」，「サイト調査とモニタリング」，「回収可能性」，「環境影響」，「社会経済的側面」を設定している（NUMO，2004b）。表 6.5.2-1には，これらの設計因子を踏まえた処分概念・技術オプションの絞り込みの視点をまとめる。

表 6.5.2-1 処分概念・技術オプションの絞り込みの視点

分　類		特徴比較項目
閉鎖後長期安全性	核種移行	・ 定置方式の形状に対する移行フラックス ・ 処分孔および処分坑道の掘削影響領域の連続性
	人工バリアの長期安定性	・ ニアフィールドにおける残置物と人工バリアとの相互作用
操業安全性	放射線安全	・ 遮へいの有無 ・ 事故時・復旧時の人のアクセスの可能性
	一般労働安全	・ 避難経路の数・延長 ・ 換気・排水経路の数・延長 ・ 落盤
工学的実現性／品質保証	工程	・ 処分孔・処分坑道の掘削速度
	定置作業性	・ 定置装置稼動部の空間的制約 ・ 緩衝材搬送・定置，廃棄体搬送・定置技術レベル
	技術開発の進展	・ 実証による技術の成立性の確認
	効率性（物流）	・ 物流量 ・ 搬送・定置の作業量
	地下環境への適応性	・ 想定される地下環境条件への適応性
工学的信頼性		・ 建設・操業作業への擾乱に対する頑健性 ・ 操業条件（１日あたりの定置廃棄体数など）の変化に対する柔軟性
サイト調査とモニタリング		・ サイト調査のしやすさ ・ モニタリングのしやすさ
回収可能性		・ 回収のしやすさ ・ 適用する回収技術の実証
環境影響		・ 施工数量（掘削土，排水）
社会経済的側面		・ ステークホルダーの受容性 ・ 施工数量

「閉鎖後長期安全性」については，処分孔竪置き定置方式における処分坑道周りの掘削影響領域と処分孔周りの掘削影響領域の連続性，処分坑道の防水シートやロックボルト，セメント系支保工

などの残置物の種類と量など，対象とする処分概念・技術オプションについて処分場の閉鎖後長期安全性を判断する。

「操業安全性」では，処分概念ごとの操業安全性に関して，避難経路の数や延長，遮へいの有無，復旧作業時の人のアクセスの可能性，換気・排水経路などを評価し，操業安全性が十分に確保されているかどうかが判断材料となる。

「工学的実現性／品質保証」では，処分場の建設・操業・閉鎖について，詳細な品質レベルに至るまでの技術的な実現可能性を評価する。操業だけでなく，建設・閉鎖を含めた実現可能性を判断する必要がある。例えば，全体工程の制約がある場合，処分孔竪置き定置方式における処分孔の掘削速度が十分なのかどうか（6.4.1.2 参照）なども評価する。また，緩衝材や廃棄体の定置技術の完成度や操業環境維持の観点からの適応性は全因子の中でも重要な評価項目である。現時点においては，現在の技術レベルだけで判断するのではなく，開発中の技術の今後の見通しや，今後の技術開発への投資対効果も含めて判断することになるが，レファレンス処分場を絞り込んでいく精密調査地区選定段階では，その時点で最も信頼性の高い技術を優先的に選ぶことになる。

「工学的信頼性」については，換気・排水などの設備，あるいはエレベータやずり出し装置など，建設にかかわる設備や，緩衝材や廃棄体を搬送・定置する装置について，建設作業や操業作業に影響を与える可能性のある擾乱に対する頑健性を判断する。また，1 日あたりの廃棄体定置数などの前提条件の変動に対する柔軟性を持つことが重要である。

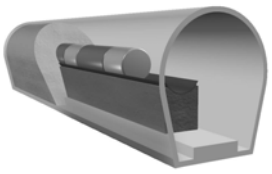
「サイト調査とモニタリング」については，それぞれの観点からの技術的要件を処分概念と技術オプションが満足しているかどうかを判断する。

「回収可能性」については，定置後閉鎖前までの廃棄体の回収の容易さが判断材料となる。処分孔竪置き定置方式では，処分坑道を埋め戻す前までは，回収すべき廃棄体の直上までアプローチすることができ，個別に廃棄体を回収することができる。一方，処分坑道横置き定置方式では，定置済み廃棄体を端部から順番に回収していく必要がある。これらの違いをどう評価するかが処分概念と技術オプションを絞り込む際の判断指標となる。

「環境影響」については，地層処分事業に関するすべて環境影響を評価する。掘削量，埋め戻し量など，施工数量が増えると一般的には環境に与える影響も大きくなるため，極力施工数量が小さい処分概念が有利である。

「社会経済的側面」については，ステークホルダーの受容性や処分費用が評価指標となる。後者については，掘削量，埋め戻し量，換気・排水量などが施工数量に依存するため，施工数量の小さな概念と技術オプションが有利である。

処分概念・技術オプションの絞り込みは，これらの特徴を総合的に比較し進めていくが，それぞれの因子や判断指標が占める重みは，地質環境の情報の充実度やその時点での技術到達レベルによって異なる。また，絞り込みが，その時点における最も信頼性の高い技術を選ぶものなのか，それとも，その時点では未完成ながら，完成するとより信頼性の高い技術が実現することを見越し，次段階の技術開発目標を明確にするためのものなのかなどによっても異なる。このように因子そのものの重み付けも変化させながら，段階に応じた絞り込みを行っていく。サイトが特定されていない現時点では，定量的な比較はできないが，ここで示した処分概念・技術オプションの特徴を，上記の視点に照らして整理したものを図 6.5.2-19に示す。

比較の視点	処分孔竪置き定置方式	処分坑道横置き定置方式	
		原位置施工方式	PEM 方式
			
閉鎖後長期安全性	処分孔と処分坑道の掘削影響領域の連続性	処分坑道の防水シートやセメント系材料の影響	PEM 容器と坑壁の隙間の影響
操業安全性	処分孔上部遮へい後，入坑可能 避難経路として２方向確保	廃棄体定置後は入坑不可	廃棄体定置後は入坑不可
工学的実現性／品質保証			
－工程	処分孔掘削速度の向上が必要	―	―
－定置作業性	処分坑道に空間的余裕があり，定置装置の空間的制約は小さい 緩衝材ブロック製作･定置に関する要素技術は実証済み	底部緩衝材ブロック，側部・上部緩衝材吹付施工に関する要素技術は開発済み	遠隔での重量物搬送・定置技術は開発中
－効率性（物流）	搬送性は良好と考えられる	搬送性は竪置き方式より難易度が高い	坑道断面を大きく確保すれば搬送性は良好と考えられる
－地下環境への適応性			
・空洞安定性	処分孔ごとに必要に応じて補強	坑道断面が小さいので安定性は確保しやすい	坑道断面が小さいので安定性は確保しやすい
・高湿度対策	処分坑道内換気により対応	風管換気になるが難易度は高い	換気は不要
・湧水対策	処分孔別に湧水低減策，排水策，地下水と緩衝材の接触防止策で対応	処分坑道単位で排水工を施す	水密な PEM 容器に対する湧水対策は不要
工学的信頼性	―	―	―
サイト調査とモニタリング	―	―	―
回収可能性	処分坑道の埋め戻しまでは回収すべき廃棄体の直上までアプローチすることが可能	処分坑道端部から順次回収する必要がある	処分坑道端部から順次回収する必要がある
環境影響	掘削土量：大	掘削土量：小	掘削土量：中
社会経済的側面	施工数量：大	施工数量：小，ただし作業坑道の追加や力学プラグの追加が必要	施工数量：中

－：サイトの地質環境特性の明確化および処分概念の詳細化において特徴付けられる事項

図 6.5.2-19 設計因子に基づく処分概念・技術オプションの特徴整理

6.6　工学的対策を支える技術の整備

6.6.1　工学的対策を支える技術の概要

前節までに，処分場に求められる技術要件，処分場の設計，建設・操業・閉鎖方法，ならびに適切な工学的対策に関する NUMO の技術的取り組みについて説明した。本節では，処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術を支える技術開発として，人工バリア材料の長期挙動などの現象理解や建設・操業に係る技術開発に関する国の基盤研究開発成果を中心に，以下の項目について，技術が着実に整備されていることを説明する。

6.6.2　人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況
　6.6.2.1　ガラス固化体の長期挙動
　6.6.2.2　オーバーパックの長期挙動
　6.6.2.3　緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用
　6.6.2.4　低アルカリ性セメントの開発
6.6.3　地層処分施設の耐震性評価
6.6.4 建設・操業・閉鎖技術
　6.6.4.1　低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認
　6.6.4.2　オーバーパックの遠隔溶接・検査技術
　6.6.4.3　緩衝材の製作・搬送・定置技術
　6.6.4.4　廃棄体回収技術

NUMOは適切な役割分担のもと，技術開発を基盤研究開発機関と連携して進めている。表 6.6.1-1 に工学的対策に関する技術開発項目のうち，2000 年から現在まで開発を進めている項目と，本節での記載箇所の関係を示す。なお，表 6.6.1-1には，前節までの関連する箇所も示した。

閉鎖後長期の処分場の要求機能や技術要件を設定あるいは決定する上で，人工バリア材料の長期挙動を理解することが重要である。また，「オーバーパックの設計」や「緩衝材の設計」を行う際には，異種材料間の相互作用やオーバーパックの腐食挙動に関する知見が不可欠である。これらは，2000 年以降基盤研究開発などにおいてその理解が深まっている。NUMO では 2002 年より国内の大学や研究機関の専門家からなる委員会を組織し，人工バリア長期挙動に関する国内外の最新の研究動向を調査・分析するとともに，基盤研究開発機関をリードしながら，優先的に取り組んでいく課題を設定している。また, 2004 年にセメントーベントナイト相互作用に関する国際ワークショップ, 2005 年には, 鉄ーベントナイト相互作用などの人工バリアの長期挙動に関する国際ワークショップを開催し，海外の専門家との間で知見を共有し，また，その解決策について情報交換をした。6.6.2 では，これらの人工バリア材料の長期挙動に関する 2000 年以降の進展について概説する。

6.6.3では，地層処分施設の耐震性評価について説明する。地層処分施設の地震時の安全性については，第２次取りまとめ（JNC，1999b）および第2次TRUレポートにおいて（JNC，2005）検討されているが，2006年9月の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会，2006）の改定や「2007年新潟県中越沖地震」の発生を受け，近年では原子力施設に対し最新の知見を反映した耐震性評価が実施されている。また，2010年8月に策定された「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会，2010）によれば，地震に対する設計上の考慮について，次のような記述がある。

「廃棄体の取り扱い中の落下事故あるいは一時貯蔵時の転倒事故などを想定しても，放射性固体廃棄物が容器に固型化されており容易に飛散する恐れがない場合，含有する放射性物質が飛散することがないように放射性固体廃棄物が封入されるよう廃棄体が設計されている場合，あるいは取り扱う放射性固体廃棄物の放射能濃度が一般公衆の被ばくの観点から十分に低い場合には，耐震設計上の重要度分類のＣクラスの施設に対応するものとして定め，これに適合しない場合には，耐震設計上の重要度分類のＢクラスの施設に対応するものとする。」これより，地層処分施設についても耐震重要度に応じた耐震設計は必須になると考えられる。NUMOとしては，今後耐震重要度分類の考え方を整理し，耐震設計を処分場の設計に反映していく予定である。ここでは，保守的な評価として，施設への影響が大きいと考えられる地震動を仮想的に想定し，地層処分施設の耐震性について，操業時の空間保持の観点から評価を行ったので，その内容を紹介する。

6.6.4 では，処分場の建設・操業・閉鎖技術に関する技術開発状況を説明する。2000 年にNUMOが設立され，2002 年に公募方式による処分場の候補サイトの選定が始まったことを受け，応募区域のどのような地質環境に対しても適切かつ円滑に調査や処分場概念構築を進めていくため，建設・操業・閉鎖技術においても多様な地質環境への適応性を検討する必要性が生じた。そのため，基盤研究開発機関では，2000 年より，操業技術に関する実規模あるいは工学規模の実証を含めた種々の要素試験が実施され，廃棄体や人工バリアの製作・搬送・定置に関する技術が整備されている。また，瑞浪，幌延における深地層の研究施設の建設が始まり，地層処分施設の建設にかかわる有用な知見が培われている。表 6.6.1-1に示す処分場の建設工法については，JAEAの瑞浪，幌延の深地層の研究施設などの建設を通じて，低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認試験が実施されている。操業技術については，6.4 節あるいは 6.5.2 で説明してきたとおり，基盤研究開発において，オーバーパックあるいは緩衝材の製作・搬送・定置技術の整備が着実に進められている。6.6.4.2 と 6.6.4.3 には，オーバーパックの遠隔溶接・検査技術と緩衝材の製作・搬送・定置技術の技術開発状況を説明する。

6.6.4.4 では，廃棄体の回収技術について説明する。『高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第１次報告)』（原子力安全委員会，2000）では，「処分場の閉鎖に際しては，建設段階および操業段階に得られたデータを追加し，安全評価の結果が妥当であることの確認を行う。また，その妥当性を確認するまでの期間は，高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持することが重要である。」とされている。また，『高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について』（廃棄物安全小委員会，2008）では，「埋設事業において，閉鎖までの間は，基本的に廃棄体を回収することは可能と考えられるが，これを安全かつ効率的に実施するために，回収可能性に配慮した設計の採用や具体的な回収手段を検討しておくことが重要と考えられる。」とされている。このような背景を踏まえ，閉鎖措置計画認可を受けるまでの期間の回収の具体的方法や技術について，NUMO の検討状況や基盤研究開発機関における研究開発成果について説明する。

表 6.6.1-1 工学的対策における技術開発項目と本節での記載項目

主な実施項目		2000 年から現在までに開発を進めている項目	本節での記載箇所	備考 : 6.2 から 6.5 での関連箇所
処分施設の仕様の設定（地下調査施設も含む）	長期状態設定技術	○	6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況	6.2 処分場の安全機能と技術要件
	空洞安定性評価（操業中・長期）	○	6.6.3 地層処分施設の耐震性評価	6.3.3.2 坑道仕様・廃棄体定置仕様の設定
処分施設の建設工法の設定と施工	坑道・処分孔掘削技術	○		6.4.1 処分場の建設
	ずり出し技術	○		
	低アルカリ性セメントの施工技術	○	6.6.4.1 低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認	
	グラウト・埋め戻し・閉鎖・シーリング技術	○		6.4.3 処分場の閉鎖
ニアフィールド長期挙動評価把握	ニアフィールド相互作用を考慮した長期挙動評価	○	6.6.2.1 ガラス固化体の長期挙動 6.6.2.2 オーバーパックの長期挙動 6.6.2.3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用	
	緩衝材長期挙動評価（変質・流出・変形）	○		
	ガス移行挙動評価	○		
人工バリア仕様設定	オーバーパック代替材料開発	○	6.6.2.2 オーバーパックの長期挙動	
	オーバーパック長期腐食評価	○		
	技術要件整理	○	6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況	6.2 処分場の安全機能と技術要件
人工バリア施工方法と定置（その１）	オーバーパック溶接・搬送・定置技術	○	6.6.4.2 オーバーパックの遠隔溶接・検査技術	6.4.2 処分場の操業
	緩衝材製作・搬送・定置技術	○	6.6.4.3 緩衝材の製作・搬送・定置技術	
	（PEM 製作・搬送・定置技術）	○		
人工バリア施工方法と定置（その２：設計・施工管理，検査対応）	オーバーパック検査技術	○	6.6.4.2 オーバーパックの遠隔溶接・検査技術	
	緩衝材検査技術	○		
	品質確認	○		6.4.2 処分場の操業

6.6.2 人工バリア材料の基本特性と長期挙動に関する技術の整備状況

NUMOでは，設計・安全評価に反映することを目的として，人工バリア材料の基本特性と長期挙動の理解について，国内外の研究成果を調査し取りまとめている（NUMO，準備中g）。図 6.6.2-1に，人工バリアとその周辺の支保工や岩盤を含む領域（ニアフィールド領域と呼ぶ）で生起する可能性のある物理・化学的な現象を高レベル放射性廃棄物の人工バリア構成を例として模式的に示した。ニアフィールド要素の複雑な相互作用のなかでも重要となる地下水の影響を考慮し，地下水の変遷

と各人工バリア材料間の相互作用による影響を示している。ここで取り上げた現象は，FEP[1]リストなどに取り上げられている複数の現象から，個々の現象の物理的・化学的な相互関係をPID[2]として整理し，特に重要なプロセスとして抽出した現象である（手順の詳細は（NUMO，準備中g）を参照)。これらの現象の整理に基づいて，ニアフィールド領域の状態変化は次のようであると考えている。

人工バリアの定置後から，ニアフィールド領域への地下水の流入と緩衝材の膨潤，核種の放射壊変に伴う廃棄体の高い発熱性により，ニアフィールド領域の物理的・化学的な状態が変化する。やがて，廃棄体の発熱量の低下，地下水による緩衝材の含水飽和の完了などに伴い，状態の変化は緩慢になると考えられる。

この間，コンクリート支保工を利用している場合には，地下水とコンクリートの反応により，地下水の組成や pH が変化し，さらにその反応水が緩衝材の構成鉱物と反応する。そのため，緩衝材の鉱物組成や間隙率，Ca 型化などにより，緩衝材の性能が接触部から徐々に変化する（6.6.2.3（2）および 6.6.2.3（3）参照)。これらの影響を低減するために，低アルカリ性セメントの開発が進められている（6.6.2.4 参照)。

オーバーパックとの境界部では，閉鎖後の初期には廃棄体の発熱により，緩衝材の温度が上昇するが，時間が経過するとともに低下する。温度が 100℃よりも高い時期が長期間継続するとイライト化による緩衝材の性能の変化の可能性が懸念されるが，これまでの知見から，その可能性は低いことが分かっている（6.6.2.3（4）参照)。また，オーバーパックの腐食に伴い Fe^{2+}イオンが緩衝材中に拡散するが，鉄水酸化物や鉄炭酸塩鉱物として沈殿する。また，一部は緩衝材と反応するが，その程度は Fe^{2+}イオンの供給量（腐食速度）と Eh，pH，温度などのニアフィールド領域の物理・化学環境に依存する（6.6.2.3（3）参照)。

また，オーバーパックの腐食においては，初期には操業に伴い地下に流入した酸素を酸化剤とした腐食反応が進行するが，酸素が消費された後は水を酸化剤として，ゆっくりと腐食反応が進み，オーバーパックの厚さが徐々に減少する（6.6.2.2（1）参照)。腐食が進行して，機械強度を保持する厚さが保てなくなると，地下深部の高い封圧や緩衝材からの圧密反力により，オーバーパックが機械的に破壊し，地下水が廃棄体と接触する可能性が高くなる。接触水の化学組成によっては，不動態化する可能性もある（6.6.2.2（2）参照)。また，溶接部の腐食量は母材と同程度であることが示されている（6.6.2.2（4）参照)。

廃棄体と地下水が接触してからは，ガラスマトリクスが水と反応することにより，核種が浸出する。核種の浸出率は，ガラスマトリクスの溶解速度や，表面変質層内の拡散などにより律速される（6.6.2.1 参照)。廃棄体から浸出した核種は，難溶性の核種（例えば，ウラン，トリウム，アメリシウムなどのアクチニド元素）であれば，溶解度制限により，その大半はガラス固化体の周辺で沈殿する。溶存した核種は濃度勾配に規制されて，オーバーパック腐食生成物の間隙水，緩衝材の間隙水中を拡散し，途中，鉱物表面に吸着されることにより遅延されて，最終的に緩衝材と岩盤（またはコンクリート支保工と岩盤）の境界にまで達する。この間，放射能は徐々に減少する。また，難溶性の核種の一部は，廃棄体から浸出した後に，コロイドを形成する可能性があるが，緩衝材の細孔により濾過され，緩衝材から外側には浸出できない。岩盤に達した核種は，亀裂内の地下水流と地下水中を拡散することにより移行する。

[1] FEP：地層処分において生起する可能性のあるさまざまな現象（Feature, Event, Process）の略称
[2] PID：プロセス　インフルエンス　ダイアグラムの略称

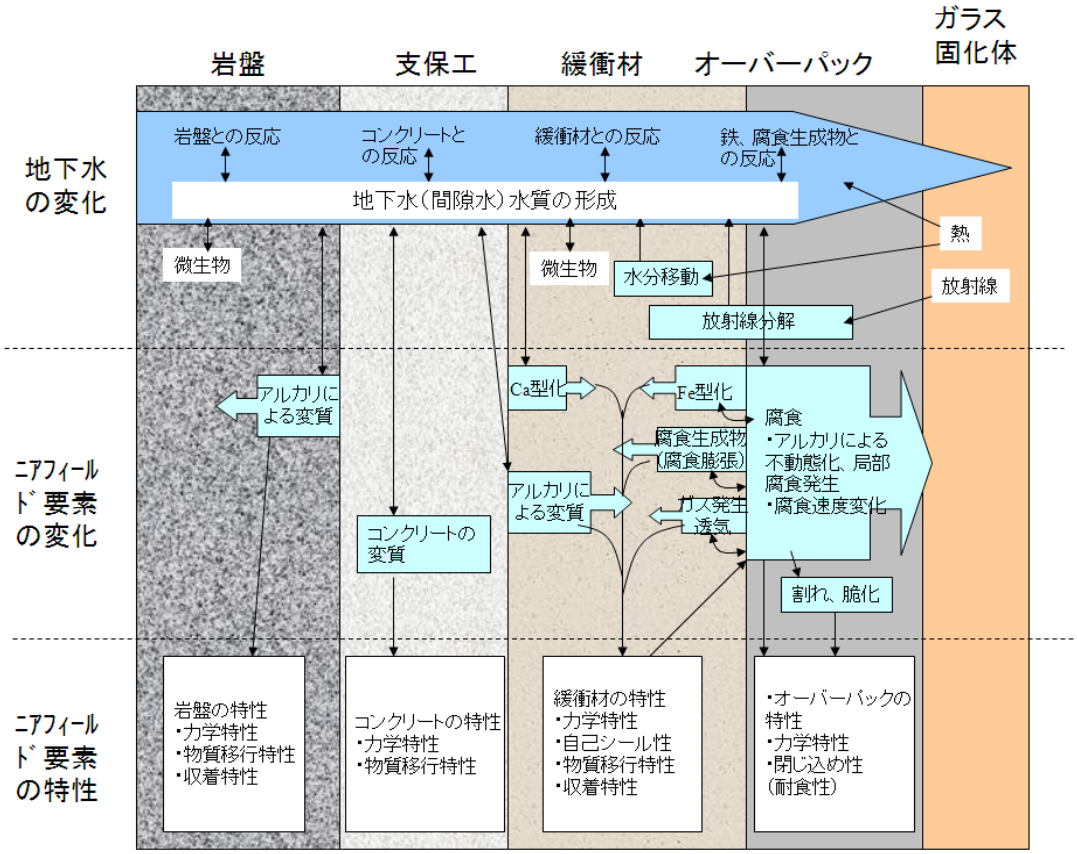


図 6.6.2-1 地下水中心としたニアフィールド要素の相互作用図

ニアフィールド領域の状態変化に関する知見の整備を通じて以下の点が重要であること分かった。

- 個々の人工バリア材料の特性，長期挙動の理解だけでなく，構成要素間の物理的・化学的な相互作用の理解が重要であること
- 保守性を取り入れたアプローチを基本とするが，それぞれの人工バリア要素で独立に保守的な指標を設定するのではなく，人工バリア材料の特性とバリア間の相互作用を考慮して，全体システムとして相互に矛盾しないように保守性の設定が必要である。例えば，オーバーパックの腐食や鉱物反応などの化学反応は，緩衝材中の遅い物質移行により律速されていることを考慮して，腐食速度の設定や鉄―ベントナイト相互作用反応を論じるべきであることなど。

これらの現象理解に関する技術開発は，主として基盤研究開発機関により進められているが，本項では，人工バリアの設計や安全評価で重要となる，物理的・化学的な現象理解に関する知見の整備状況について概説する。

6.6.2.1 ガラス固化体の長期挙動

ガラス固化体に対しては 6.2 節に示したように「ガラスマトリクスによる浸出抑制」の安全機能を期待している。放射性物質は，ホウケイ酸ガラスに分子レベルで混合されており，地下水と接触したとしてもすぐに浸出することはない。ただし，非常に緩慢ではあるが，ガラスマトリクス自身が地下水中に溶けるため，それに伴い核種が溶解することとなる。

ガラスの溶解挙動については，1980 年代にガラス中の元素の溶解析出反応とガラスマトリクス溶

解反応を加味したGrambowモデル（Grambow. B，1985，1987）が提唱され，現象理解に大きな貢献をなした。しかし，1990年代に入ると，同モデルだけでは，ガラスの長期溶解・変質を説明できないことが示唆され，長期溶解反応やガラス表面変質層中における固相形成反応について，メカニズムや速度が十分理解されていないとの指摘がなされた（Lemmens. K et al.，1992）。

ガラス表面での物質移行が，ガラスの溶解・変質の律速過程であるとする速度論的溶解モデル（ガラスマトリクスの水和変質（Lemmens. K et al.，1992；Grambow. K et al.，2001；Inagaki et al.，1994，Mitsui et al.，2001），保護的なゲル層による溶解反応の抑制（Jégou. C et al.，2000，Gin. S et al.，2001，Vernaz. E et al.，2001），二次鉱物生成による溶存ケイ酸の消費（D.M.Strachan et al.，2000，D.M.Strachan，2001，W.L.Ebert et al.，1991）が提唱され，ガラス固化体の現象理解とそのモデル化が進んだ（図6.6.2-2）。

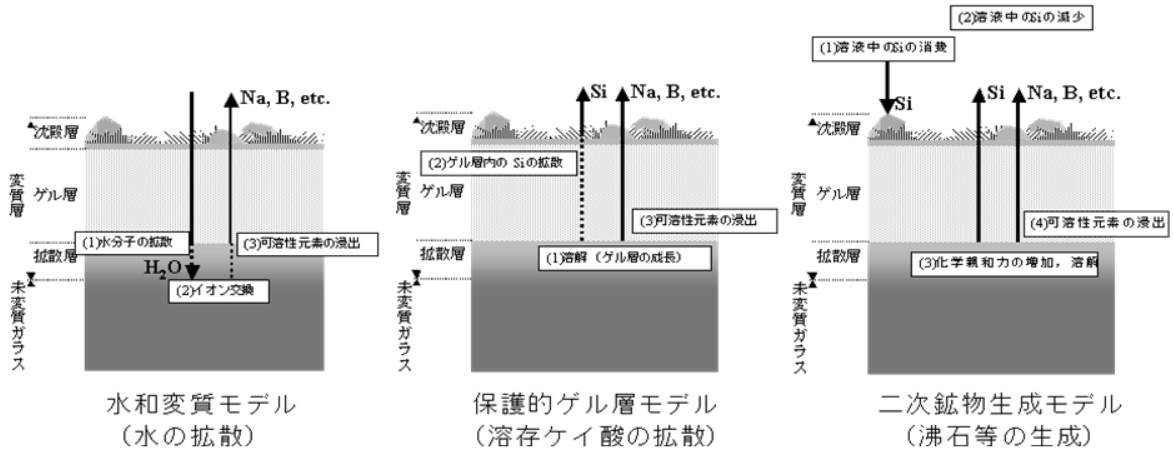


図6.6.2-2 ガラス表面での物質移行過程を考慮した長期溶解モデル（出典：稲垣ほか，2004）

第２次取りまとめにおいては，上記のような現象により，溶解速度が時間とともに低下する可能性については把握していたが，保守性の観点から，ガラス固化体からの核種浸出挙動の評価は溶解速度が時間に依らず一定とするモデルが採用されていた。

2000年以降は，上記のモデルを評価シナリオやモデルに採用することを視野に入れて，ガラスの溶解に関する現象理解の深化とモデルの高度化の試みとして，ガラスの溶解のpH依存性を確認する研究が行われている（Inagaki et al.，2009；Inagaki et al.，2010）。さらに，JAEAにおいては，ガラスの溶解・変質の現象理解などの研究を支援するため，ガラスの溶解に関するデータベースを開発しており，そのプロトタイプのデータベースの改良が行われ（林ほか，2008），JAEAのホームページ上で公開されている（http://migrationdb.jaea.go.jp/GlassDB/）。

以上のように2000年以降のガラス固化体の溶解挙動に関する現象理解の研究が継続的に進められている。今後，これらの成果を，蓋然性の高いシナリオの検討や，安全評価モデルとガラスの寿命などの検討に反映していく。

6.6.2.2 オーバーパックの長期挙動

6.2節に示したように，オーバーパックには「閉鎖後閉じ込め」のうち「廃棄体からの浸出抑制」の安全機能として，「発熱が著しい期間，地下水との接触を避けること」が要求される。この安全機能を確保するための技術要件として，

・ 所定の期間，腐食により安全機能が損なわれないこと
・ 埋設後に作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること
・ 溶接部の機械強度，耐食性が母材と比較して著しく劣らないこと

を挙げた。以下では，これらの技術要件に関連し，母材の腐食挙動と溶接部の耐食性について，オーバーパック材料の挙動に関する基盤研究開発成果を取りまとめて示す。

オーバーパックの腐食は，緩衝材を浸透し，オーバーパック界面に達した地下水との接触によって発生する。オーバーパックの腐食挙動には，大きく分けると全面腐食と局部腐食という二つの腐食モードがある。全面腐食は不動態化せず，表面からほぼ均一に腐食が進行する形態である。一方，金属表面を不動態皮膜が覆うため，腐食速度は極端に遅くなるが，何らかの原因で不動態皮膜の一部が破壊され，その部分が局部的に腐食する状態を局部腐食と呼ぶ。局部腐食は応力腐食割れとも密接に関連することから，オーバーパックの設計で重要視されている。

地下深部の環境条件が，金属の不動態化を引き起こさず，全面腐食が優勢となる条件であれば，腐食の不均一化は一般的には比較的小さい。坑道閉鎖後短期においては，埋め戻し以前に地表から持ち込まれた残余の酸素の溶解により界面に侵入した地下水は酸化性溶液となる。このため，溶液中の溶存酸素を酸化剤とする腐食が進行する。腐食反応の進行により，溶存酸素が充分に消費されると，その後は本来の無酸素（還元性）のまま地下水が界面に侵入するため，水素イオンが酸化剤となってゆっくりと腐食が進む。一方，局部腐食には孔食，隙間腐食といった腐食形態がある。また，応力腐食割れについては，環境因子，材料因子ならびに応力因子の三つの因子が揃うことで発生する。

上述以外の腐食形態として水素脆化があり，これは周辺に存在する酸素が消費された後に，水の還元によるカソード反応から生じた水素が炭素鋼に吸蔵されることによって生じる。

オーバーパックの溶接部に対しては，2000 年以降，遠隔溶接技術の開発にあわせて，溶接部の耐食性の評価が進展している。溶接部は，溶接方法に依存して，母材には含まれない不純物が含まれることや，金属結晶の微細構造が異なることなどから，母材と異なる腐食挙動を示す可能性がある。そのため，溶接部の腐食挙動を試験的に調べ，母材のそれと比較する研究が進められている。溶接部の腐食挙動に関する評価は，母材のそれと基本的に同じであり，全面腐食，局部食・孔食，応力腐食割れ感受性，水素脆化がある。

オーバーパックの設計では，これらの腐食挙動を考慮して，発熱が著しい期間に地下水と廃棄体が接触することがないように，オーバーパックの厚さを決定している（JNC，1999b）。また，今後，遠隔溶接技術の選定において，工学的実現性の観点に加えて，溶接部の腐食挙動の観点からも比較検討を実施する。表 6.6.2-1に母材および溶接部の腐食挙動理解に関する科学的な知見の整備状況の要約を示す。

表 6.6.2-1 母材と溶接部の腐食挙動理解に関する科学的な知見の整備状況の要約

	項目	科学的な知見の整備状況
母材	全面腐食挙動	腐食速度データが拡充され，試験により腐食速度が長期的には鈍化することが示された。
	不動態化，局部腐食	緩衝材による pH 緩衝効果や低アルカリ性セメントの利用により，不動態化を回避できる見通しが示された。また，局部腐食の試験データが拡充され，局部腐食が起こったとしても腐食寿命に影響を及ぼすような顕著な影響はないという見通しも示された。
	放射線分解生成物の腐食に対する影響	ガラス固化体のγ線に起因する地下水の放射線分解生成物（過酸化水素など）による腐食速度に対する影響は顕著ではないことを試験的に確認し，従来の設計で考慮していた放射線遮へい代（150mm）が保守的な設定であることが示された
溶接部	全面腐食挙動	酸化性環境では選択的な腐食が確認されたが，溶接材料組成の改良で改善出来る目処が立っている。また，還元性環境では，耐食性は母材と同等以上である。
	応力腐食割れ，水素脆化など	炭酸塩溶液中で応力腐食割れ感受性，水素脆化感受性について評価し，感受性は母材よりも低いことが示された。

(1) 全面腐食挙動に関する理解の進展

2000 年以降は，処分環境を模擬した長期間にわたる腐食試験などが実施され，緩衝材中の腐食メカニズムの理解が進展したほか，腐食速度のデータが拡充されており，従来の設定の保守性が確認されている。

例えば，沿岸域を想定した塩水環境を模擬し人工海水などを用いた低酸素雰囲気下，緩衝材中での 10 年間にわたる長期浸漬試験が実施され，腐食速度の低下が示されている（谷口ほか，2009）。この試験では，実際の腐食環境に近付けるために，緩衝材（圧縮ベントナイトにより模擬）中に金属試験片を埋め込み，その腐食量を測定した。炭素鋼の表面に炭酸鉄の被膜が生成するため，腐食速度は時間とともに減少することなどが示された。また，1～10 年の腐食変化の傾きより推定される腐食速度は 2μm/年（1,000 年あたり 2mm）未満であり，寿命評価上の設定 10μm/年よりも十分低い（JNC，1999b）ことから，1,000 年以上の寿命が期待できる。そのほか，代替材料の腐食挙動データの拡充や，ナチュラルアナログ試料の分析結果に基づく，腐食速度の評価なども実施されている（JNC，2005；JAEA，2010a）。また，ナチュラルアナログによる腐食量の評価においては 1,000 年間で 10mm以下とされており，第２次取りまとめ（JNC，1999b）で設定した 31.8mmよりも低い値が示されており（図 6.6.2-3），オーバーパックの寿命が設計上想定されている 1,000 年よりも長い可能性が示されつつある。

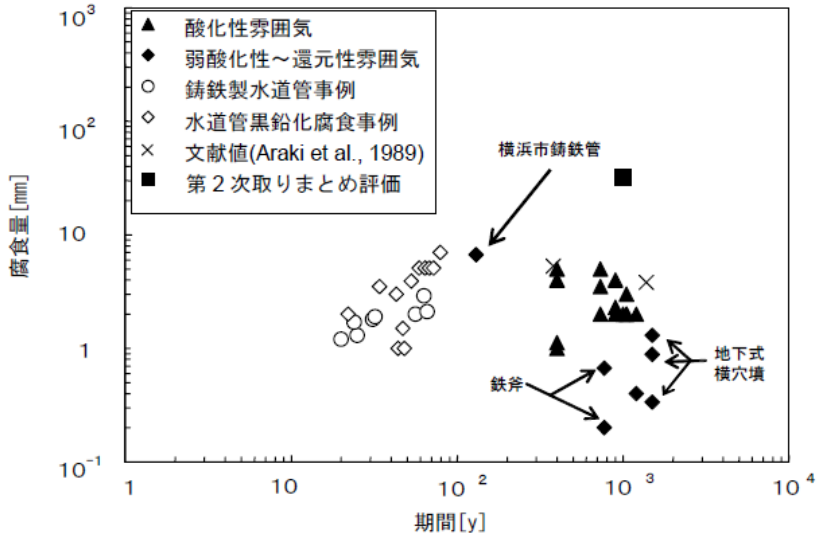


図 6.6.2-3 鉄遺物などのナチュラルアナログの腐食量評価（出典：JNC，2005）

(2) 局部腐食，不動態化に関する理解の進展

炭素鋼が不動態化する条件は，炭酸塩濃度が高い，高 pH の環境である。緩衝材中の炭素鋼は不動態化しにくいことから，全面腐食を主要な腐食形態として評価が実施されている（JNC，1999b）。2000 年以降は，コンクリート支保工の利用も想定して，炭素鋼の局部腐食に対するセメント系材料の影響に関する現象理解が進められている。

谷口ほか（2002）は，高pH環境における炭素鋼の不動態化条件を調べた。緩衝材間隙水のpHが約10.5 以上の条件で，炭素鋼が不動態化する可能性があるが，緩衝材のpH緩衝作用により，緩衝材湿潤前の溶液のpHが 13 以下であれば，湿潤後のpHが 10.5 以下となるため，炭素鋼が不動態化しない可能性が示された（図 6.6.2-4）（JNC，2005）。今後，緩衝材のpH緩衝作用の長期的な変化

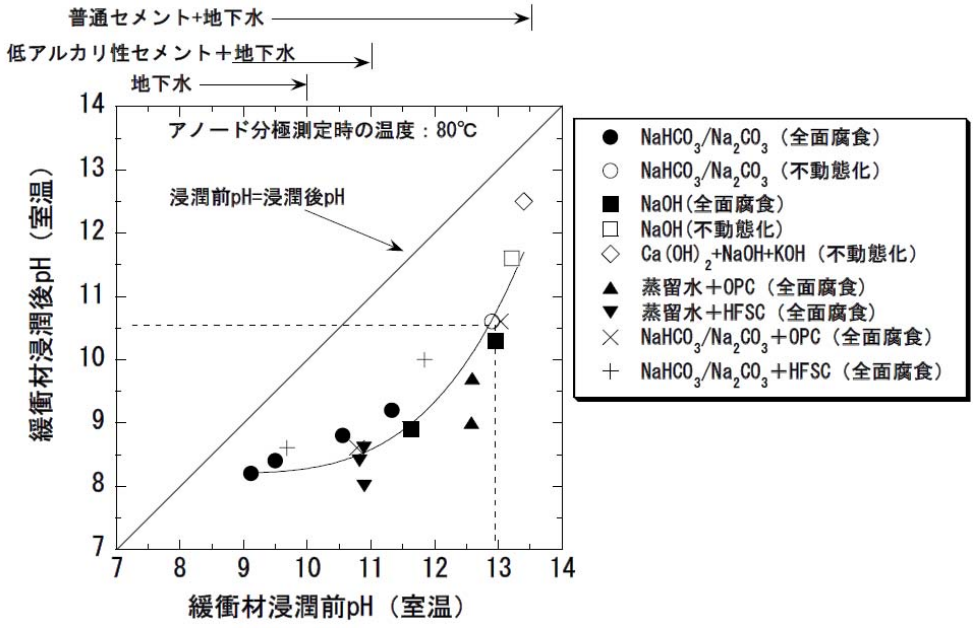


図 6.6.2-4 緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件（出典：JNC，2005）

などについても継続的な検討を進める必要がある。

また，局部腐食の炭素鋼の腐食寿命に対する評価も進められている。図 6.6.2-5に示すように，酸化性環境での孔食係数（最大腐食深さを平均腐食深さで除した値であり，値が大きいほど，孔食が進展していることを示している）は，平均腐食深さが大きくなるに従って小さくなる傾向にあり，緩衝材中での平均腐食深さ 0.1 mm以上の腐食量に対する孔食係数は，土壌中に長期埋設されていた鋼構造物で観察される値とほぼ同程度になることが明らかになっている（図 6.6.2-5）。従って，セメント材料に起因する高pH環境によって炭素鋼が不動態化し，孔食が発生しても，腐食寿命に影響を及ぼすような顕著な腐食の局在化は生じにくいとされている（JNC，2005）。

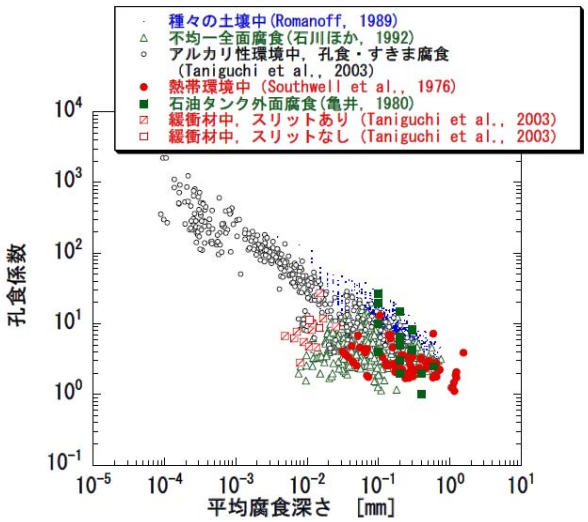


図 6.6.2-5 種々の環境における鉄鋼材料（非合金）の平均腐食深さと孔食係数の関係（出典：JNC, 2005）

(3) 放射線照射影響

第２次取りまとめでは，ガラス固化体からの放射線による放射線分解生成物より炭素鋼材料の局部腐食の可能性を懸念し，机上検討により炭素鋼の不動態化を起こさないように，放射線分解生成物の生成量（濃度）を抑制するために，放射線遮へい代として 150mm を設定していたが，試験検討の必要性が指摘されていた（JNC，1999b）。2000 年以降，放射線照射下における炭素鋼挙動に関する研究が進展し，放射線影響の定量的な評価が進んでいる。

ガラス固化体からは，中性子線とγ線が放射されているが，オーバーパックの遮へい効果により，γ線の方が影響は大きい。オーバーパック表面におけるγ線は厚さに依存するが数 10mGy/y 程度と見積もられている。

放射線分解生成物によるオーバーパックの腐食に対して緩衝材が有する緩衝能力について明らかにするため，γ線（30～50Gy/h）を照射して炭素鋼の腐食速度を測定したところ，水溶液中では，従来の知見のとおり腐食速度がわずかに増加する傾向が認められたが，圧縮ベントナイト中に埋め込まれた炭素鋼については，γ線の照射による顕著な腐食量の増加は観測されなかった（表 6.6.2-2）（JAEA，2008b）。また，放射線照射下において腐食電位を測定したところ，照射の有無にかかわらず，自然電位の変化はないことが確認された。また，不動態化保持電流密度は緩衝材相当の圧縮ベントナイト中では放射線により増大することは顕著ではなく，放射線照射による酸化性化学種の影

響がベントナイトにより緩和される可能性が示唆されていると考えられる（産業創造研究所, 2005, 2006，2007；JAEA，2008b）。

表 6.6.2-2 放射線照射が炭素鋼の腐食に及ぼす影響（JAEA，2008b を編集）

試験条件	腐食速度（mm/y）（緩衝材中）	腐食速度（mm/y）（水溶液中）
照射あり	0.0318－0.0390	0.0212－0.0235
照射なし	0.0379－0.0432	0.0143－0.0171

これらの結果に基づき，ベントナイト中では腐食で溶出した鉄の拡散が抑制され，腐食試験片近傍に高濃度で留まるため，ベントナイト間隙水がγ線照射を受けても過酸化水素などの生成が抑制され，間隙水組成がほとんど変化しないため，放射線影響の抑制作用が発現していると推定されている（JAEA，2010b）。

以上のように, 緩衝材中ではオーバーパックの腐食に対する放射線の影響が小さいことが示唆された。この現象については, 今後も知見を拡充し, オーバーパックの設計に反映させる予定である。

(4) 腐食に対する微生物の影響

環境中に存在する微生物には，活動に必要なエネルギーを鉄や硫黄の酸化還元反応により得る種類がある。そのため，金属材料が自然環境に晒される場合，微生物による腐食の促進の可能性があることが示されている（Little et al.，1991）。そのため，オーバーパックの腐食に対する微生物の腐食挙動の影響について検討が進められた。

炭素鋼の腐食に対する微生物の影響としては，多くの形態が存在しており，硫酸還元菌（SRB）と硫酸の生成が関係していることが多い（Little et al.，1991）。微生物の腐食に対する影響の予測は難しいことから，国際的に採用されているアプローチは，人工バリア領域で微生物活動が生じないことを実証し，腐食挙動に対する影響の可能性を排除する方法である。この様な研究は，スウェーデン（Pedersen，2000）とカナダ（Stroes-Gascoyne et al.，2002）で実施されているが，微生物活動が存在しないとの論拠は両国の研究で異なっている。スウェーデンの研究では，高圧縮したベントナイトにより生じる膨潤圧力により，微生物の活動が阻害されることを示唆しており，カナダの研究では，水の低い活量により微生物の新陳代謝が抑制されることを示唆している。いずれの方法においても，微生物活動を抑制する主要な要件は，乾燥密度が高い圧縮ベントナイトを使用することである。また，微生物の代謝副産物による影響も評価されているが，微生物活動の金属容器の腐食に対する影響は，僅かであることが示されている（King et al.，2002，2003，2004）。

一方，わが国では，第２次取りまとめ（JNC，1999a）において圧縮ベントナイトのろ過効果などにより人工バリア中での微生物の移行が阻害され，生息や活動が制限されることにより，微生物による地層処分システムへの影響は無視できるほど小さいと判断されている。室内実験による研究では，栄養剤を投入した人工海水（30℃）において，ベントナイト中に生息する硫酸還元菌の増殖試験を実施し，ベントナイト/水比が大きくなるほど，SRBの活性が低下し，約1,000g/lでは，ほとんど増殖ができなくなったことが報告されている（谷口ほか，2001）。

また，金属腐食に対する影響に限らず，処分施設の安全評価に資するため微生物の影響を評価する試みが実施されているところであり，微生物影響評価手法のプロトタイプとして，地球科学解析コードであるPHREEQC-2の使用が提案され，幌延深地層研究所で採取した原位置微生物を用いた室内実

験結果の解析を行い，その有効性が確認されたと報告している（JAEA，2009c）。

(5) 溶接部の腐食挙動に関する理解

(i) 溶接部の全面腐食挙動の影響評価

溶接部の金属組織は急速な融解と凝固により母材と比べて構造が微細となり化学組成が異なる。このため溶接部と母材の耐食性が異なる可能性がある。母材と溶接部の耐食性を比較するために，実規模で実施されたオーバーパック溶接試験体を用いた耐食性試験が実施されており，炭素鋼母材の腐食シナリオに基づいて，溶接部の耐食性が母材と同等または著しく低下しないことを評価している（原環センター，2010d）。

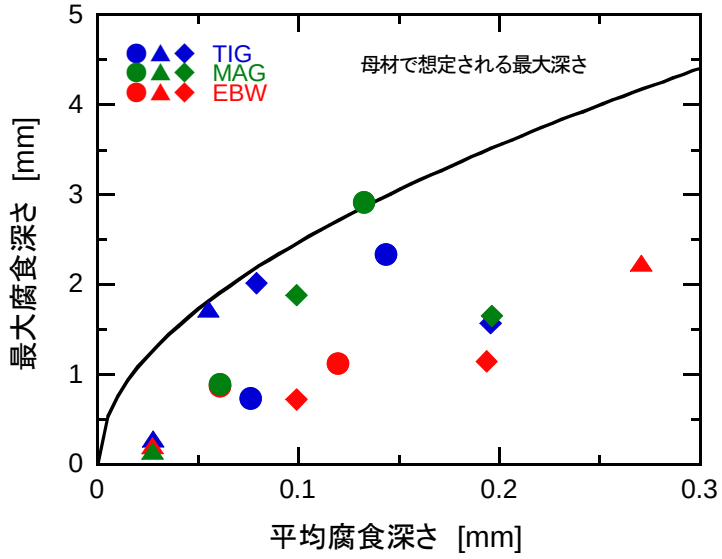
酸化性環境における溶接部の腐食挙動は，全面腐食型になることが確認されている（原環センター，2009c）。溶接金属部には溶接材料に起因すると考えられる選択的な腐食が確認されたが，平均腐食深さに対する最大腐食深さは母材で想定した値を下回る結果となっている（図 6.6.2-6）。またこの選択的な腐食は溶接材料組成の改良で改善出来る目処が立っている。還元性環境における溶接部の腐食速度は，母材の腐食シナリオで想定されている 10μm/yを下回っており，溶接部の耐食性は母材と同等以上であると評価されている（図 6.6.2-7）（原環センター，2010d）。

(ii) 溶接部の応力腐食割れ，水素脆化などの影響評価

溶接時の熱影響による応力腐食割れ感受性について炭酸塩溶液中で調べたが，溶接部の応力腐食割れ感受性は母材よりも低くなる。これは，溶接部の結晶粒が母材と比較して小さく，その組織構造が複雑であるため，粒界割れが進展し難くなることが感受性低下の要因であると考えられている。また溶接部の応力腐食割れ発生の臨界炭酸塩濃度は母材と同じでおよそ 0.5mol/ℓであり，溶接によって高 pH 環境での炭素鋼の応力腐食割れ感受性が高くなる傾向は認められていない（原環センター，2009c）。

水素脆化に関しては，還元性雰囲気での腐食に伴い鋼中に侵入する水素量の調査と，溶接部各部位（母材，熱影響部，溶接金属）の水素脆化感受性が評価されている。溶接部は母材にくらべ水素濃度が高い傾向があるが，最大でも 0.05ppm にとどまるため，水素脆化による割れの発生の可能性は低いと評価されている（原環センター，2009c）。

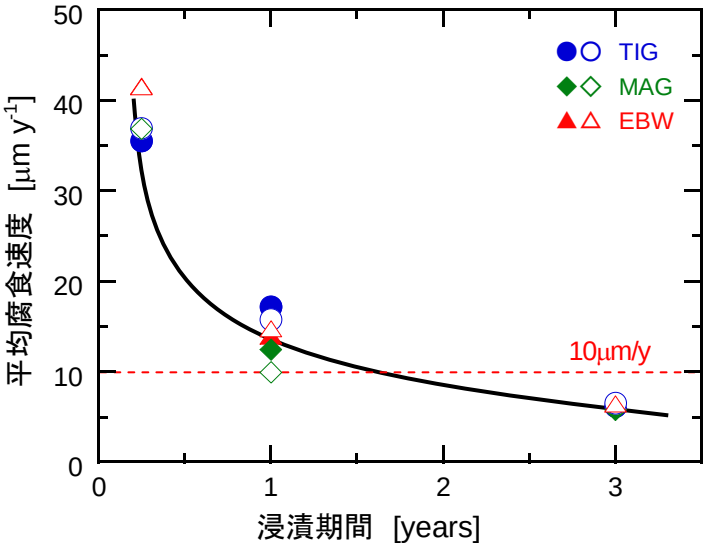
このように，第２次取りまとめ以降に母材について，長期的な試験検討やナチュラルアナログとの比較が進展し，従来よりも長い寿命が期待できる見通しがある。また，溶接部の腐食挙動に関するデータの大幅な蓄積がなされ，その現象理解が進展し，評価モデルも高度化されている。溶接部については，残留応力の影響なども懸念されているが，これまでのところ熱処理などにより，その影響が低減できる見通しがある（原環センター，2010d）。今後，これらの知見をオーバーパックの設計に反映し，処分場の閉鎖後の安全性に対する信頼性を向上させる。



●人工海水，▲人工海水＋ベントナイトスラリー，◆人工淡水

空気吹き込み 80℃，浸漬期間（30~365days）

図 6.6.2-6 酸化性雰囲気における炭素鋼溶接部の平均腐食深さに対する最大腐食深さ（原環センター，2009c を編集）



圧縮ベントナイト（1.6g/cm²） ＋ 人工海水，N_2 ガス雰囲気，80℃，

浸漬期間（90days~3years），●▲◆溶接部つき，○△◇母材

図 6.6.2-7 還元性雰囲気における炭素鋼母材，溶接部の平均腐食速度の経時変化（原環センター，2009c を編集）

6.6.2.3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用

6.2 において緩衝材の技術要件として，「核種移行の抑制」の安全機能を期待しており，

・ 廃棄体周辺の地下水流動を抑制すること

・ 放射性核種のコロイドとしての移行を抑制すること
・ 収着により核種移行を遅延すること

を述べた。これらの安全機能に関連する緩衝材の特性としては，膨潤性や透水性が挙げられる。また，緩衝材の性能を長期的に維持するよう，セメントーベントナイト相互作用や鉄ーベントナイト相互作用の緩衝材の基本性能に対する影響を確認し，必要に応じて対策を検討する必要がある。これらの要件に関連した現象の理解として，緩衝材の特性に対する塩水の影響，長期的な挙動やほかのバリア材料との相互作用として，セメント系材料とベントナイト相互作用，炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用，熱の影響としてイライト化を取り上げる。これらの現象については，特に 2000 年以降にその知見の拡充が進んでおり，緩衝材の長期挙動の理解の向上に寄与している。

表 6.6.2-3 緩衝材の基本特性と長期挙動・相互作用に関する科学的な知見の整備状況の要約

項目	科学的な知見の整備状況
塩水の影響	塩分濃度が高いほど，膨潤圧は小さくなるが，有効粘土密度が 1.5Mg/m^3 以上では，純水による膨潤圧との差は顕著ではない。また，体積膨潤比は有効粘土密度が高いほど増加するが，塩分濃度が高いほど小さいことが知られている
セメントとベントナイト相互作用	モンモリロナイト，曹長石および石英混合物と蒸留水を，試験温度 50～150℃，反応期間 10～200 日で反応させて，二次生成物の同定を行い，主な二次生成物は方沸石（アナルサイム）であることが確認されている。また，複数のセメント硬化体と，圧縮ベントナイトを接触させた試験では，緩衝材中の物質移行だけでなく，セメント硬化体中の物質移行も反応の進行を遅くするのに大きく寄与することが分かっている。
炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用	温度および鉄／ベントナイト重量比をパラメータとした反応試験では，双方の高い条件でのみベントナイトの変質が起こることを示唆した。また，圧縮ベントナイトに鉄片試料を埋め込み，約 10 年間にわたり室温で実施した試験でも，同様にスメクタイトの変質はされなかった。国内のベントナイト鉱山のナチュラルアナログ研究では，鉄を多く含む緑色脈の周辺の粘土鉱物としてはスメクタイトであり，膨潤性は維持されていることが報告されている。
イライト化	イライト化は，130℃以下でほとんど生じることがなく，緩衝材の安全機能に対する顕著な影響がないことが示唆されている。
緩衝材の流出	浸食現象は降水系地下水条件において留意するべき事象であるが，海水系条件ではその影響が小さいことが示唆された。サイトの地下水が降水系地下水である場合には，処分孔に接する亀裂の流出挙動に対する影響を評価した上で，適切な対策を講じる。

(1) 緩衝材の膨潤性，透水性に対する塩水の影響

緩衝材の特性のうち，透水性，膨潤性は，接触する水の塩濃度の影響を受けることが知られている。わが国は周囲を海で囲まれており，特に沿岸域に処分場を建設する場合には，周囲の地下水が海水を起源とする塩濃度の高い地下水（塩水）である可能性がある。そのため，沿岸域に処分場を建設する場合には，緩衝材に求められる安全機能が確保されるように緩衝材を設計する必要がある。

緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトは水と接触すると吸水し，膨潤する性質（膨潤性）を有している。そのため，膨潤性を定量的に表す膨潤量や膨潤圧は，技術要件で述べた自己シール性や自

己シール性の指標となる。図 6.6.2-8に示すように，膨潤圧は塩分濃度が高いほど小さくなるが，有効粘土密度が 1.5Mg/m^3 以上では，その差は顕著ではない。一方，体積膨潤比は有効粘土密度が高いほど増加するが，塩分濃度が高いほど小さいことが知られている（JNC，2005；田中ほか，2005）。

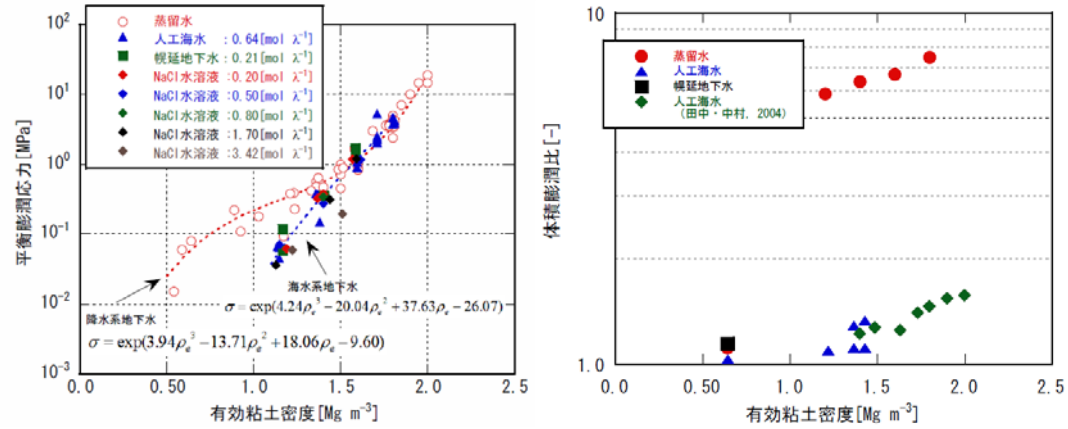


図 6.6.2-8 体積膨潤比と膨潤応力の有効粘土密度に対する依存性（出典：JNC，2005）

また，透水係数は塩水条件下の方が 10~50 倍程度高いことが報告されている（図 6.6.2-9）。従って，これらの塩水条件下における緩衝材特性の変化を考慮して設計を実施する必要がある。

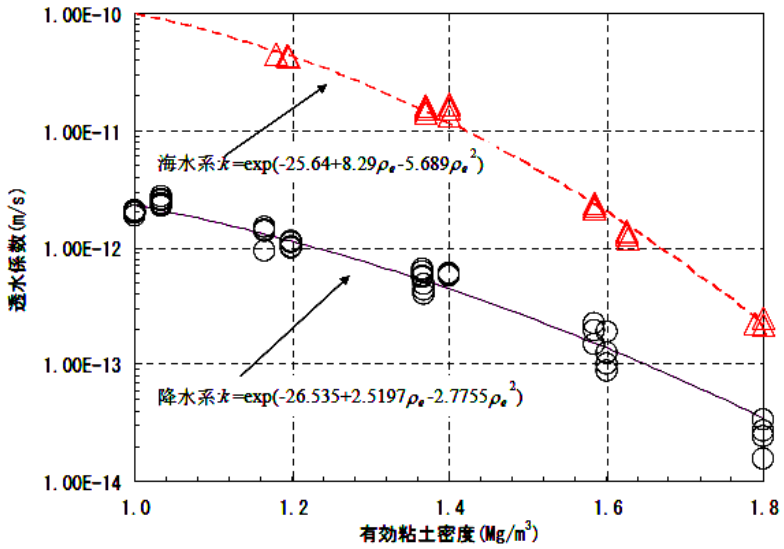


図 6.6.2-9 有効粘土密度と透水係数の関係（出典：電事連・JNC，2005）

6.5.1 項では，2000 年以降に取得された塩水環境下での緩衝材の体積膨潤比，透水係数のデータに基づいて，緩衝材の仕様（緩衝材ブロック製作時および膨潤飽和後）を検討した。今後も体積膨潤比や膨潤応力のデータの拡充と取得方法の標準化（棚井ほか，2010）などを実施し，データベース化（http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/）することで，緩衝材の設計に対する信頼性を向上させる。

(2) セメントーベントナイト相互作用

処分場の建設では，湧水の止水のためのグラウトや地下の坑道を力学的に支持するコンクリート

支保，止水プラグ（ベントナイト）を力学的に支持する力学プラグとしてセメント系材料を利用する可能性がある。これらのセメント系材料は，長期間にわたっては地下水中にカルシウム（Ca）を溶出する可能性や，地下水との反応により高いpHの反応水を生成する可能性がある（図 6.6.2-10）。セメントと地下水の反応に伴い，緩衝材の性能に影響を与える可能性のある現象をセメントーベントナイト相互作用と呼び，表 6.6.2-4に整理して示す。

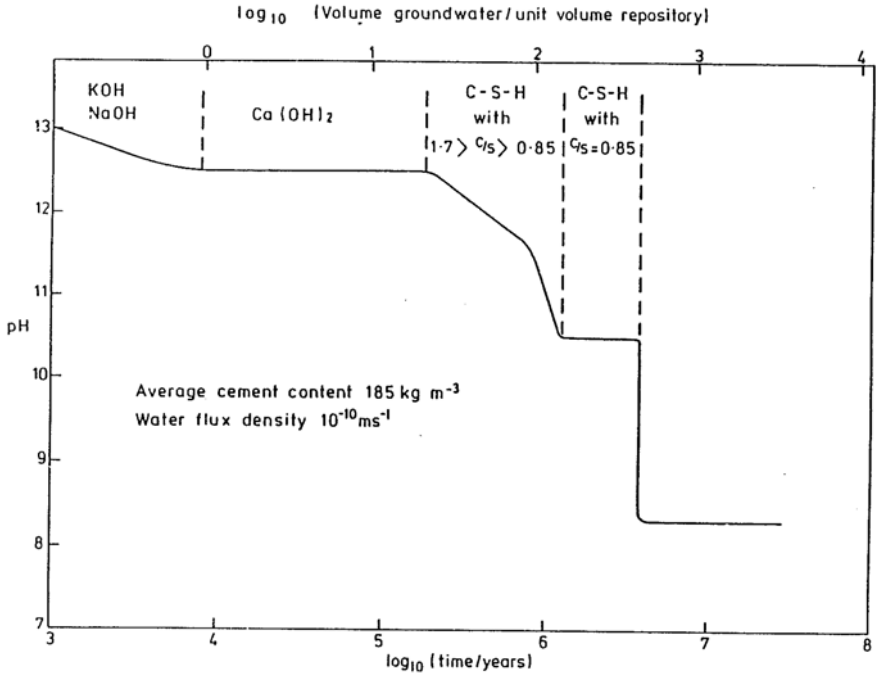


図 6.6.2-10 セメントからの浸出液の pH の経時変化（出典：Atkinson, 1985）

コンクリート支保，プラグなどを通過して緩衝材に接する地下水は Ca イオンの多い組成となるため，イオン交換により緩衝材中の Na 型スメクタイトが Ca 型スメクタイトに変化し，透水性の上昇と膨潤性の低下が起こる可能性が指摘されている。しかし，三原（1999）は乾燥密度が 1.8Mg/m^3 と高い条件であれば，Ca 型化したベントナイトの透水係数および核種の実効拡散係数は Na 型の値と同程度であると報告している。

スメクタイトの溶解速度に関して反応温度と pH を包括的に検討して定式化しているものに Cama et al.（2000），Metz et al.（2002），Kohler et al.（2003），Sato et al.（2004），Kuwahara（2006）などがある。反応溶液の pH が溶解速度の影響因子であり，アルカリ領域で pH が上昇するにつれて溶解速度の上昇が見られる。しかし，これらの報告における溶解速度の絶対値は，同じ条件で比較しても異なっており，温度や pH 以外の因子によるものと考えられる。反応速度に対する化学親和度の影響は遷移状態理論（TST）によって説明されるが，亀井（2007），Cama et al.（2000）の溶解速度と反応溶液濃度から算出した化学親和度の関係は TST に従った化学親和度依存性では説明できなかった。また，溶解速度は平衡状態への到達度に支配され（Takase，2004），相関イオンの影響を受けない（Sato et al.，2004）ことが報告されている。今後，飽和度や共存化学種の触媒・抑制影響因子濃度の影響に関する検討，モデル化が必要である。

セメントとの相互作用による二次鉱物相と生成量は液相組成（pH，pe，イオン濃度など）の影響を受ける。二次鉱物として確認されている相のいくつかは準安定相であり，長期間では安定相に移

行すると考えられている。(Oda，2004)。セメンテーションの現象は実験条件によって異なり，考慮する必要はないという指摘もある。しかし，生成した二次鉱物の成長によりセメンテーションに近い現象が生じることも考えられ，この空隙充填作用により，物質移行を抑制できる可能性もある。

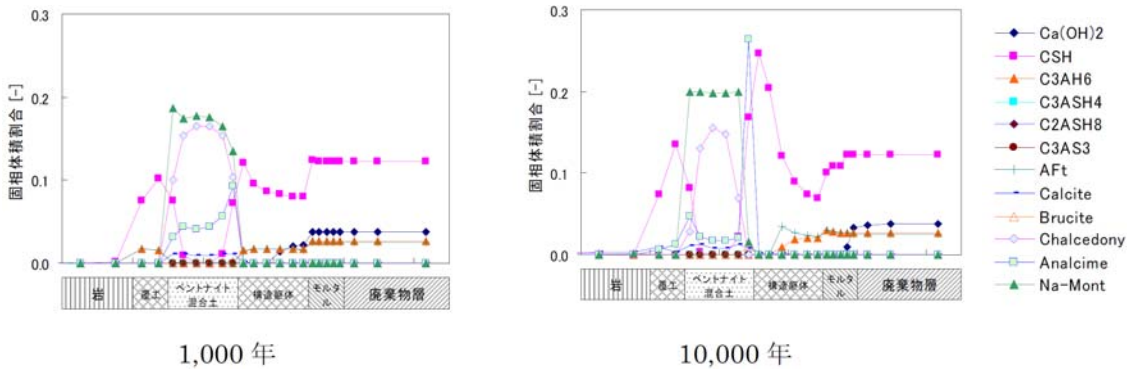
一方で，先の試験に比べると，緩衝材中では物質移行が制限されるため，反応の進行が遅くなる可能性がある。原環センター（2010h）では，複数のセメント硬化体と，圧縮ベントナイトを接触させた試験を実施し，緩衝材中の物質移行だけでなく，セメント硬化体中の物質移行も反応の進行を遅くするのに大きく寄与することが分かっている。

また，これらの試験手法の高度化に加え，緩衝材中のアルカリ成分やカルシウム，ナトリウムなどの溶存成分の物質移行と化学反応を連成させる予測解析手法の開発が進展した。図 6.6.2-11に示すように，解析によれば，セメントと緩衝材の境界部では，二次鉱物の生成，鉱物の溶解により空隙が閉塞され，物質移行が制限される様子が再現されている（原環センター，2003a)。

また，これらのセメントーベントナイト相互作用に関する影響評価に加え，低アルカリ性セメントの材料開発も進展している。

表 6.6.2-4 セメントとベントナイト相互作用に関する現象の整理

項目	現象の説明と考えられる影響
(1) 緩衝材中粘土鉱物の Ca 型化	コンクリート支保，プラグなどを通過して緩衝材に接する地下水はカルシウムイオンの多い組成となるため，イオン交換により緩衝材中のナトリウム型スメクタイトがカルシウム型スメクタイトに変化し，透水性の上昇と膨潤性の低下が起こる可能性がある。
(2) 緩衝材中粘土鉱物の溶解	緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが地下水に溶解する現象で，高ｐH条件で特に促進される。その結果，膨潤特性や透水特性が変化し，緩衝材に期待されている安全機能への影響が懸念されている。
(3) 二次鉱物の沈殿	緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが，二次鉱物を生成して置換される現象で，スメクタイトが鉱物学的に不安定化する物理化学条件の時に顕著となる。その結果，膨潤特性や透水特性が変化し，緩衝材に期待されている安全機能への影響が懸念されている。
(4) セメンテーション	セメントー緩衝材の境界領域近傍で，双方の間隙中に二次鉱物が沈殿し，間隙を閉塞する現象。その結果，膨潤特性や透水特性が変化し，緩衝材に期待されている安全機能への影響が懸念されている。



1,000 年　　10,000 年

図 6.6.2-11 地球化学解析による人工バリアの鉱物相の空間分布の変化（原環センター，2003a を編集）

以上のように，ベントナイト特性への影響の少ないセメント材料の開発およびそれらの材料の実施工への適用性を確認するための検討が進められている（6.6.4.1 参照）。セメントーベントナイト相互作用は，人工バリア性能に影響を与える可能性のある現象で，長期間にわたり緩やかに進行する。このことを解析評価において考慮し，信頼性を向上させることが重要である。今後も，相互作用にかかわる基礎データを蓄積し，試験などで得られた知見を反映して解析コードの高度化を進める。

(3) 炭素鋼腐食生成物とベントナイトの相互作用

炭素鋼製オーバーパックの腐食に伴い緩衝材中に放出された鉄の腐食生成物により，緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが変質し，期待される膨潤性などの基本性能に影響を及ぼす可能性がある。そこで，緩衝材の長期安定性の視点から，腐食生成物と緩衝材の間の相互作用によってもたらされる地層処分システムの安全性への影響を検討する必要がある。第２次取りまとめでは，炭素鋼の腐食生成物が緩衝材の安全機能に影響を与える可能性は低いと考えられてきた。

2000 年以降，本課題に対するさまざまな試験が行われている。バッチ式の試験により，$FeCl_2$ 溶液や鉄粉を用い Na 型ベントナイトと Fe を反応させると，Na 型ベントナイトの層間陽イオンが Fe^{2+} に置き換わる鉄型化が確認されている（Kozai et al.，2001，Manjanna et al.，2007）。一方，炭素鋼片と圧縮ベントナイトを接触させた試験は，クニゲル V1 を用いた試験（Ishidera et al.，2007，陶山ほか，2008）や MX-80 を用いた試験（Carlson et al.，2007）が実施されており，双方共に鉄型化は，確認されていない。また，一部の Fe（Ⅲ）を結晶構造中に多く含むスメクタイトが，バッチ式の試験により，多量の鉄粉（0 価であり，Fe（Ⅲ）を還元する能力がある）を加えると，膨潤性のないバーチェリン様の鉱物を形成する可能性が指摘された（Lantenois et al.，2005）。しかし，上野ほか（2008）は，Lantenois ら（2005）の試験の結果が反応性の高い鉄粉の微粉末を加えて実施されており，炭素鋼片と圧縮ベントナイトを接触させた試験に比べ腐食による鉄の供給が極端に多いことに依っていると指摘している。上述の圧縮ベントナイトを用いた処分環境を模擬した試験（陶山ほか，2008）では，10 年間の試験期間に鉄片試料の腐食は生じているものの，Lantenois ら（2005）に示されたようなスメクタイトの変質は確認できなかったとした。

また，地球化学計算コードを用いた長期安定性の評価解析の結果（Wersin et al.，2007）では，緩衝材性能に対する鉄による鉱物学的変質の影響については少ないと評価されている。さらに，JAEA（2008）では，ベントナイトの変質が発生する条件を明らかにするため，温度および鉄／ベントナイト重量比をパラメータとした反応試験の結果が報告されている（表 6.6.2-5）。試験後試料のX線回折測定結果から，温度，鉄／ベントナイト重量比の高い条件でのみベントナイトの変質が起こることを示唆した。また，約 10 年間にわたり室温で実施した試験でも，同様にスメクタイトの変質は確認されなかった（笹本ほか，2009）。

表 6.6.2-5 ベントナイトの変質と試験条件（JAEA，2008 を編集）

試験期間	試験温度 (℃)	鉄／ベントナイト重量比			
		0.1	0.2	0.5	1.0
45 日程度	80				○
	100				○
	120		○	○	○
	150	○	○	○	×
90 日程度	80				○
	100				○
	120		○	○	○
	150	○	○	○	×

○：変化が認められない条件　×：変化が認められた条件

上記の鉄－スメクタイトの相互作用が起こりにくいことは，ナチュラルアナログ研究の事例からも示唆されている。国内のベントナイト鉱山では，まれに鉄を多く含む緑色脈が見つかることがある。その周辺のスメクタイトの組成を調べてみると，緑色脈内ではグローコナイト様の非膨潤性の粘土鉱物が生成しているが，脈と接する緻密なベントナイトでは，鉄の拡散による侵入が認められるものの，粘土鉱物としてはスメクタイトであり，膨潤性は維持されていることが報告されている（Fukushi et al.，2008）。このことは，緩衝材中では Fe イオンの供給が物質移行に制限されるため，反応が進みにくいことを示唆している。

以上のように，鉄－スメクタイトの相互作用については，変質を示唆するデータが一部で得られているが，実際の処分環境では，緩衝材中の物質移行が制限されていることや，炭素鋼の腐食速度が遅く，鉄の供給量が少ないことから，鉄－スメクタイトの反応は顕著には進まない可能性が示唆されている。この現象の理解については，今後も継続的に技術開発を進め，上記の考えを支える論拠を充実させることが重要である。

(4) イライト化

ガラス固化体からの発熱により，緩衝材周辺は周囲の地温に比べ高温状態におかれる。この高温状態により緩衝材は物理的・化学的な特性に対して影響を受け，バリア性能を低下させる可能性があるため，これまで処分場の温度が 100 ℃を超えないことが技術要件として与えられている（JNC，1999b）。緩衝材の温度制限を 100 ℃とする理由としては，高温条件におけるスメクタイトのイライト化による膨潤特性，透水特性の変化が懸念事象として考えられている。モンモリロナイトは，100℃を超えるような環境に長期間さらされると，非膨潤性のイライトという粘土鉱物に変化することが知られている。イライト化の反応が進むためには，緩衝材が高温状態に長期間さらされると同時に，カリウムイオンが外部から供給されることが条件となる。なお，この現象については，第２次取りまとめにおいて影響が顕著でないことが示されているため，ここでは簡単にその論拠を述べるにとどめる。

イライト化の発生条件には，高温環境とカリウムイオンが不可欠であるが Huang ら（1993），このような物理化学的環境は，現実的な処分環境においてはまれである。また，既往の研究成果から，130 ℃以下ではイライト化はほとんど生じることがなく，緩衝材の安全機能に対する顕著な影響は

ないことが示唆される（石川ら，1994）。しかし，さまざまな化学反応が高温で促進されることを考慮して，安全評価上の不確実性を増大させないために，処分場の温度が 100℃を超えないことを設計要件として設定している。

(5) 緩衝材の流出現象

緩衝材には自己シール性により周辺岩盤の亀裂に侵入，充填し，地下水流動を抑制する機能が求められる。しかし，人工バリア周辺の岩盤の開口幅が大きい場合，また高い割れ目頻度を有する場合には，膨潤によるベントナイトの割れ目への侵入が止まらず，緩衝材密度の低下により緩衝材の諸機能並びに構造力学安定性に影響を与えることが懸念される（JAEA，2005）。

緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象については，初動の侵入速さに関するデータの整備（松本，棚井，2003）と，降水系地下水と海水系地下水に大別した水質の違いによる挙動の把握を実施した（松本，棚井，2004）。その結果，海水系地下水では，試験条件の範囲（最大平均流速 8×10^{-6}m/s）では，侵食現象は起こらないことが確認されている。一方，降水系地下水においては平均流速 2×10^{-6}m/s において侵食現象が確認されている。浸食現象は降水系地下水条件において留意するべき事象であるが，海水系条件ではその影響が小さいことが示唆された（JAEA，2005；松本ほか，2005）。

また，ベントナイト密度分布の X 線 CT スキャナを用いた非破壊検査による取得（松本，棚井，2008）ならびに，侵入現象モデルの入力データの整備を進め，評価手法の妥当性・適用性について検討を行った。その結果，実際の侵入現象では，既存のモデル化で用いられている粘度といった物性パラメータ以外に評価上影響する要因が含まれていることが推測され，現状の物性パラメータによる侵入現象のモデル化には限界があることが示された（松本，棚井，2010）。

浸食現象は降水系地下水条件において留意するべき事象であるが，海水系条件ではその影響が小さいことが示唆された。サイトの地下水が降水系地下水である場合には，処分孔に接する亀裂の流出挙動に対する影響を評価した上で適切な対策を検討する。今後も流出現象については，現象理解を継続的に進める必要がある。

6.6.2.4 低アルカリ性セメントの開発

6.6.2.2および6.6.2.3に述べたように，オーバーパックの不動態化セメント系材料とベントナイト相互作用の影響を低減し，安全評価の不確実性を低減する対策の一つとして，低アルカリ性セメントの開発が進められてきた（JAEA，2009a，2009b）。

処分施設の緩衝材や施設周辺の岩盤に対する影響を軽減することを目的に開発された低アルカリ性セメントには，①クリンカー設計型，②ポゾラン質混和材添加型，③アルミノシリケート系混和材添加型に大別される（植田ほか，2008）。植田ほか（2008）は上記の三つの低アルカリ性セメントと一般に普及している普通ポルトランドセメント（以下，OPCという）の硬化体の力学特性，化学特性について，室内試験により比較した。力学特性については，低アルカリ性セメントは，OPCとほぼ同等の特性を有していた。一方で，化学特性については，蒸留水を利用した試験では，いずれのセメント系材料においてもOPCに比較して水和した硬化体のCaの溶出溶解度が低く低アルカリ性であり，海水系地下水に接してもHFSCとSACはOPCに比較してCaの溶脱量が小さかった。しかし，ブロック試料を海水系地下水に浸漬した場合には，共存イオンの影響によりOPC硬化体の変質は抑えられたが，低アルカリ性セメント硬化体は純水や淡水系地下水に浸漬した結果と変わらなかった。セメント水和鉱物の溶解現象は共存イオンの影響を受けるため，長期評価においては地下水成分の影響を評価する

ことが重要であることを示唆している。

以上のように，低アルカリ性セメントの材料開発が進展しており，OPC と同程度の材料特性を有しながらも，アルカリ成分の浸出量や浸出液の pH を低下させられることが示されつつある。低アルカリ性セメントの施工性に関する技術開発成果については 6.6.4.1 に示す。

6.6.3　地層処分施設の耐震性評価

2006 年の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会，2006）の改定や，2010 年の「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会，2010）の策定を踏まえ，地層処分施設についても耐震重要度分類に応じた耐震設計が必要になると考えられる。地層処分のための地下施設は，耐震設計の観点からこれまでの原子力発電関連施設に比べて，地下深部に建設する構造物であること，大規模な連接坑道を有する広い面積の構造物であること，閉鎖後も安全性を確保する必要があることなどの特殊性を有している。地震が多く発生するわが国では，地震時における施設の安全検討は極めて重要であり，長期的な検討スケジュールを踏まえた上で，段階的かつ戦略的に検討を進めていく必要がある。

発電用原子炉施設を対象にした基準地震動策定において，距離減衰式，波動伝播特性など国内外の研究・適用事例は膨大であるが，地下深部の地震伝播特性についての研究事例は少ない。

放射性廃棄物処分における地震動にかかわる技術開発は，原子力発電所の基準地震動策定などを参考にしつつ，安全規制，候補サイトの調査，処分場の設計などとの関係を考慮しつつ進めていく。NUMOはこれまでに，地下深部における地震動評価に資するため，地下深部地震動評価手法，国の委員会などで実施されている審査における活断層評価および強震動評価，地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会における活断層評価，震源断層の設定，最近発生した地震などに関する最新知見を収集・整理してきた。地下深部地震動評価手法について，近年，国内で発生した大規模な内陸地殻内地震の調査研究によって，新たな知見が増えてきている。これらの地震では大きな震源近傍の地震動が観測され，地震被害も大きかった。地震動や地震被害を大きくした要因として，地震動の周期の長短やアスペリティ（大きなゆれを起こす地震波が発生すると考えられる部分）の位置といった震源特性による影響に加え，深部地盤構造に起因する地震動増幅などが指摘されている。例えば，2007 年新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所サイトでの強震動の要因として，深部地盤における不整形性の影響，古い褶曲構造での増減などが明らかとなってきている（東京電力, 2008）（図 6.6.3-1）。

NUMOは，これらの知見を踏まえ，図 6.6.3-2のように褶曲構造モデル，段差構造モデル，半地溝構造モデルなどの地下構造モデルを設定し，工学的基盤より下部の深部地盤の不整形性がサイトの地震動特性に及ぼす影響を解析的に検討している（NUMO，準備中a）。検討により，深部地盤の不整形性により地震動の伝播特性が異なること，不整形構造境界の近傍において地震動振幅の大きな領域が局在化することなどが明らかとなっている。

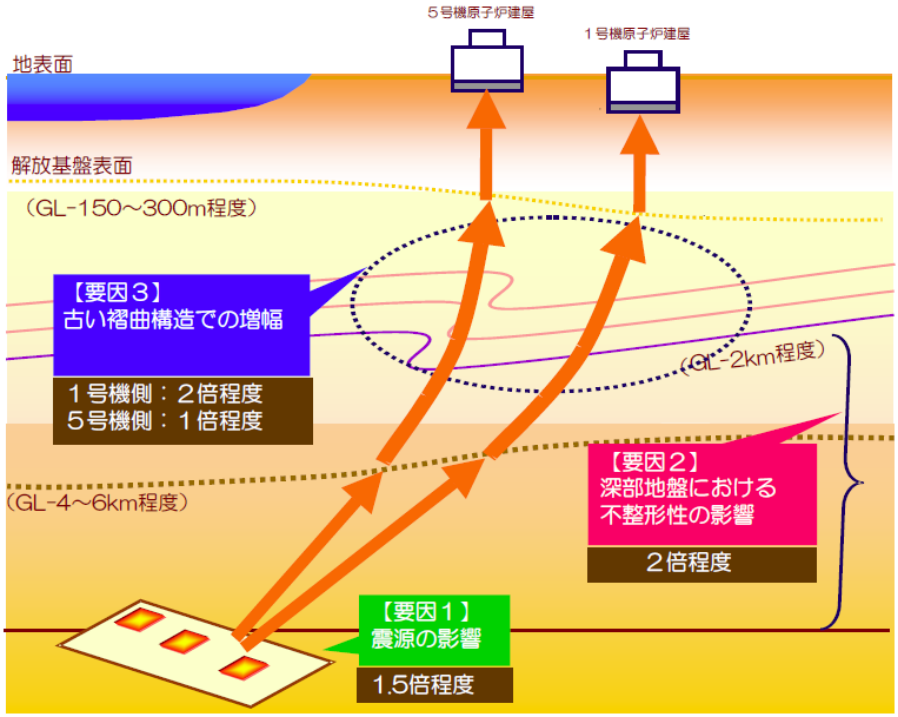
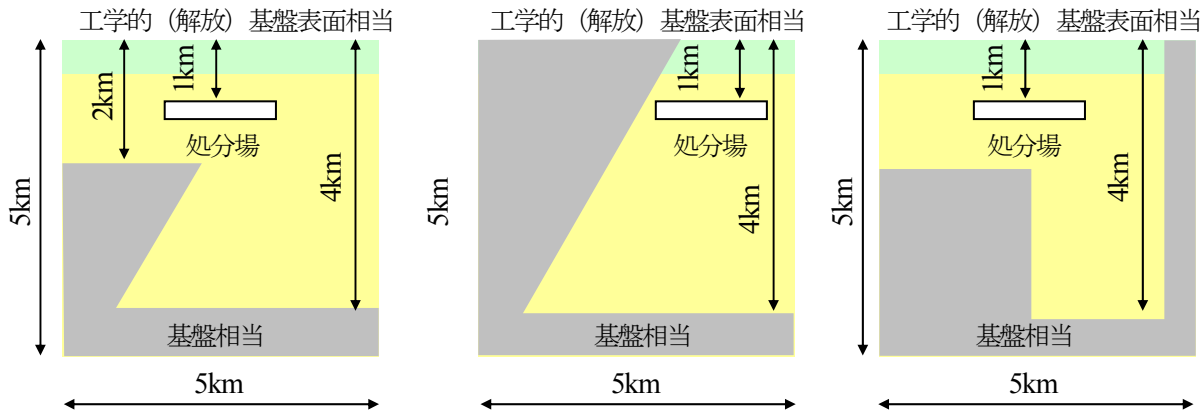


図 6.6.3-1 中越沖地震の地震動が大きかった要因分析（出典：東京電力，2008）



(a) 褶曲構造モデル　　(b) 段差構造モデル　　(c) 半地溝構造モデル

図 6.6.3-2 深部地下構造モデル（NUMO，準備中 a）

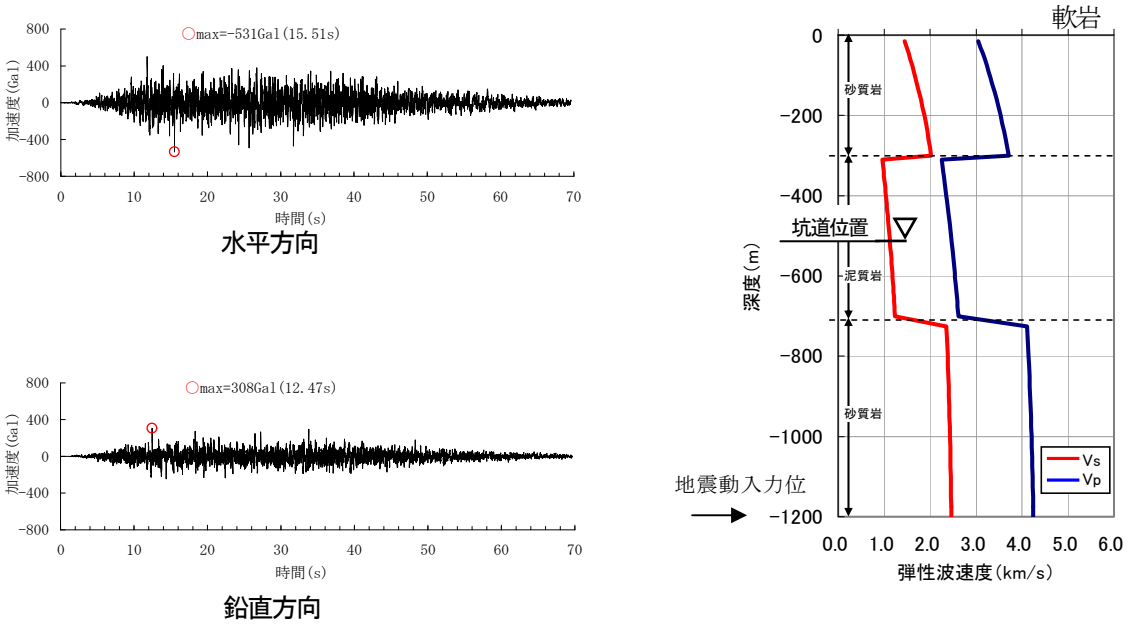
NUMO は，このような深部地震動に関する検討を踏まえて，保守的に地下施設に与える影響が大きいと考えられる地震動を設定し，操業期間中の空間保持の観点から処分坑道の耐震性を次のように評価している（NUMO，準備中 a）。

岩盤条件は，現時点でサイトが特定されていないため，第２次取りまとめと同様の岩盤モデルを用いた。対象施設は，高レベル放射性廃棄物処分施設と地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道とし，操業中の耐震安全性評価を行った。

検討用地震動は，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に示される「距離減衰式に基

づく経験的な方法」による標準応答スペクトルを用い，保守的となるようマグニチュードMj＝8.0，等価震源距離Xeq＝25kmとして作成した（図 6.6.3-3（a））。この地震規模Mj＝8.0 は日本国内で発生した内陸地殻内地震としては最大規模であり，日本列島周辺で発生しているプレート間地震や海洋プレート内地震と同クラスである。「距離減衰式に基づく経験的な方法」による標準応答スペクトルは，せん断弾性波速度Vsが 2200m/s以上の地震基盤相当における応答スペクトルである。検討対象とした地盤条件は第２次取りまとめと同様であり，解析モデル下端においてせん断弾性波速度Vsが 2200m/s以上であることから，地震動の設定位置は解析モデルの地盤最下端レベルであるG.L.-1200mとした（図 6.6.3-3（b））。

処分坑道の耐震性評価においては，坑道掘削時の応力状態を二次元静的FEM解析で求め，これを常時応力とし，地震時増分応力を二次元動的FEM解析（水平動・鉛直動同時入力）によって算出した。さらに，これらを重ね合わせた応力状態にて地震時安全性を評価した。高レベル放射性廃棄物処分坑道の解析結果の一例を図 6.6.3-4に示す。常時と地震時の岩盤の最大せん断ひずみは同程度であり，処分坑道に対する地震の影響は小さい。地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道についても同様であり，操業時の各坑道の力学的安定性が確保されていれば，地震時にも安定性は確保される見通しが得られた。処分場は，大規模な連接坑道群を有する地下構造物であり，坑道群には多くの交差部がある。今後は，これらの特徴を踏まえた地層処分施設全体の地震時挙動特性を把握していくとともに，閉鎖後長期の地震影響評価の基本的な考え方を整理していく。



（a）地震動時刻暦波形　　（b）　地盤モデルの弾性波速度

図 6.6.3-3 検討用地震動の時刻歴波形と地盤モデルの弾性波速度の深度分布（NUMO，準備中 a）

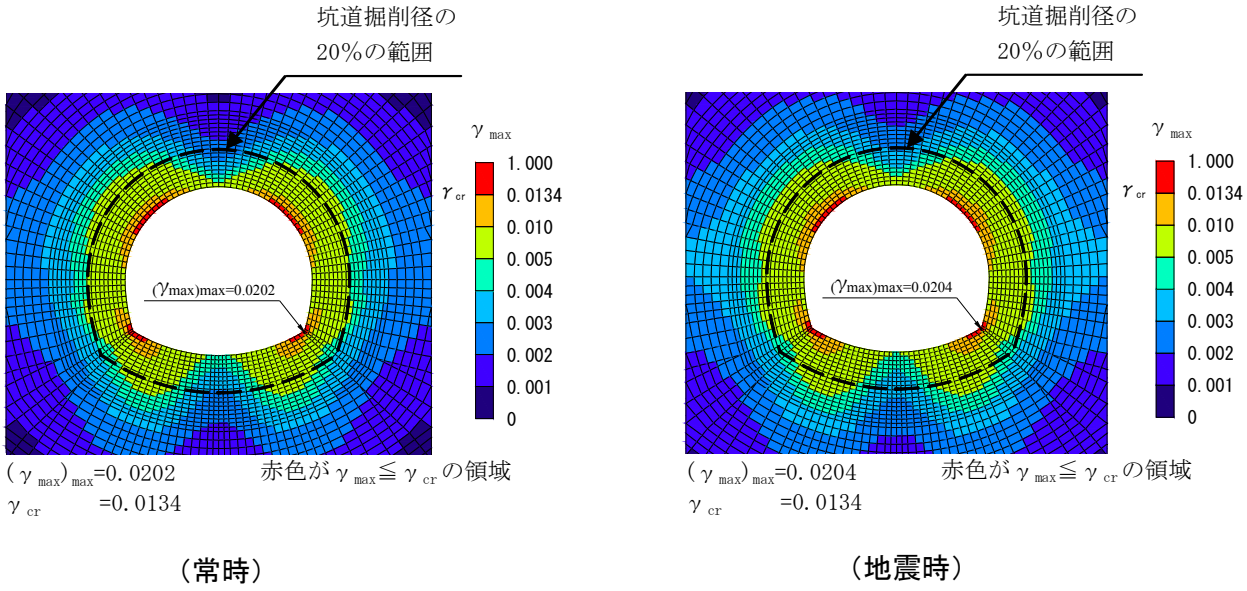


図 6.6.3-4 坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみ（高レベル放射性廃棄物処分坑道）（NUMO，準備中）

6.6.4　建設・操業・閉鎖技術

2000 年にNUMOが設立され，2002 年に公募方式による処分場の候補サイトの選定が始まり，これを受け，応募区域のどのような地質環境に対しても適切かつ円滑に建設・操業・閉鎖を進めていための技術開発が行われている。JAEAでは瑞浪，幌延における深地層の研究施設の建設を通じて，地層処分施設の建設にかかわる有用な知見が蓄積している。また，基盤研究開発機関は，2000 年より，操業技術に関する実規模あるいは工学規模の実証を含めた種々の要素試験を実施している（表 6.6.1-1）。

ここでは，これらの検討状況のうち，JAEA の瑞浪，幌延の深地層の研究施設などの建設を通じて適用性確認試験が実施されている低アルカリ性セメントの開発状況について示した。基盤研究開発については，オーバーパックの遠隔溶接・検査技術と緩衝材の製作・搬送・定置技術の技術開発状況を示した。また，閉鎖措置計画認可時までの期間を対象とした回収の具体的方法や技術について，NUMO の検討状況や国の基盤研究開発機関における開発成果について示した。

6.6.4.1　低アルカリ性セメントの実施工への適用性確認

放射性廃棄物処分施設においては，構造強度の確保などの観点から，また，既存の地下構造物における実績を考えると，セメント系材料が広く適用されることが想定される。しかし，既存のセメント系材料を処分場に適用する場合，その溶脱により生じる高アルカリ成分が，緩衝材の膨潤性の低下や天然バリアとしての岩盤の変質など，それらの機能に有意な影響を与えることが懸念される。このため，これらの影響を回避・低減するための代替材料を適用可能なように準備しておくことが，処分場の成立性を担保するために重要となる。このようなニーズのもと，JAEAが開発した低アルカリ性セメント（入矢ほか，2003）を吹付コンクリートや立坑覆工コンクリートなどに用いる場合の，実施工への適用性が確認されている。

(1) 吹付コンクリートの実施工への適用性確認

吹付コンクリートは，近年の山岳トンネル工事において施工実績が非常に多いNATM工法における主要な支保部材であり，地下施設の建設においても適用される可能性が高いと考えられる。このような背景から，JAEAにて開発されたHFSC（Highly Fly ash contained Silica fume Cement）などのポゾラン材料を高含有したタイプの低アルカリ性セメントを用いた吹付コンクリートの実施工への適用性検討が実施された（図 6.6.4-1）。



(a) 地下での HFSC 吹付施工の様子　　(b) HFSC 吹付施工後の坑内状況

図 6.6.4-1 HFSC 吹付コンクリートの模擬施工状況（出典：JAEA，2009d）

これまでに，シリカフューム，フライアッシュなどを種々に混合したセメントペーストに対する材料特性試験を行い，その結果をもとに地下施設の支保工としての吹付コンクリートに適した HFSC を検討してきた。HFSC の強度特性に関しては，HFSC のベースコンクリートで 25N/mm^2 以上，吹付コアで 35N/mm^2 以上の材齢 28 日圧縮強度が確認されている。地下施設への適用例として，幌延深地層研究所では設計基準強度 36N/mm^2 に対して高強度用の配合を選定し，さらに現地骨材を使用した配合や現地プラントを用いた配合により地上での吹付施工試験を実施し，その適用性が確認されている（入矢ほか，2006）。

原位置での実証としては，幌延深地層研究所の 140m 調査坑道において，普通ポルトランドセメント，シリカフュームおよびフライアッシュの混合比を 4：2：4 とする低アルカリ性セメント（以下，HFSC424）を選定し，吹付コンクリートの原位置試験により HFSC コンクリートは，原位置においても，普通ポルトランドセメントと同等の施工性と強度発現性が確保されることが確認されている。リバウンド率（壁面に付着せず跳ね返ってくるコンクリート量の割合）に関しても，13.3%という結果が得られており，同施設において普通ポルトランドセメントを用いた吹付コンクリートのリバウンド率（23.9%）よりも小さいことから，坑内における吹付施工時においても坑内粉塵濃度の低減が期待される（入矢ほか，2006）。

以上より，坑道の支保工の吹付コンクリートへの適用を目的とした HFSC の配合選定試験ならびに地上・地下における吹付施工試験を行い，要求される性能と品質を確保し得ることを実証し，原位置への適用の見通しを得ている。

(2)　立坑覆工コンクリートの実施工への適用性検討

JAEAは，HFSC424について，場所打ちコンクリートとして立坑の覆工に使用することを想定して，強度発現性，施工性，寸法安定性などの基礎特性について検討している。

立坑の覆工の仕様を満足するHFSC424を用いた場所打ちコンクリートの配合においては，施工性を示す各種試験においてその性能を確認しており，掘削や脱枠のために早期強度が要求される立坑建設においては，脱枠などの施工上のサイクルタイムに問題がないことが確認されている。また，低アルカリ性セメントにシリカフュームの混入により自己収縮が生じるため，乾燥収縮と合わせて寸法安定性を確認しておく必要がある。HFSC424では超微粒子であるシリカフュームを含んでいるため普通ポルトランドセメントの自己収縮量より大きい傾向を示しているが，単位結合材量を多くした配合においては普通ポルトランドセメントとほぼ同等となっている。乾燥収縮量は，普通ポルトランドセメントより小さくなっており，シリカフュームやフライアッシュのポゾラン反応による水和組織の緻密化が影響している。両者を合わせた全収縮量は普通ポルトランドセメントとほぼ同等であり，寸法安定性の観点からは実用上，大きな問題はないことを把握している（NUMO，準備中e)。

このように，HFSC424 を用いた低アルカリ性コンクリートは，適切な配合を選定することで，強度，施工性および，ひび割れなどの初期欠陥の発生要因に対して大きな問題は無く，実用が可能との見通しを得た。今後は，原位置での施工試験により，バッチャープラントでの材料製造を通じて，強度，施工性を確認するとともに，施工後の初期段階において，ひび割れなどの初期欠陥が生じないことを確認していくことが重要である。

6.6.4.2　オーバーパックの遠隔溶接・検査技術

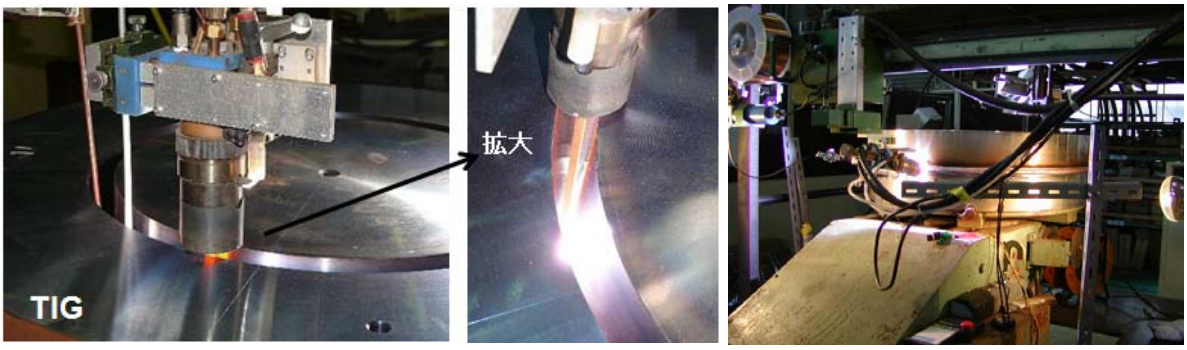
オーバーパックの封入について第２次取りまとめでは，溶接影響を考慮した材料の品質，溶接法の作業効率や遠隔自動化，また検査については超音波探傷法での欠陥の検出性，およびオーバーパックの健全性確保の目安となる欠陥の大きさの定量化などを留意点として挙げている（JNC, 1999b)。

国の基盤研究開発では，第２次取りまとめに示されたオーバーパックの基本構造を基に，溶接・検査を前提にした平蓋と落し蓋の二つの蓋構造を提示している（原環センター，2001)。これを図6.6.4-2に示す。深さ 190mmという厚板の溶接になること，また，平蓋の場合には内周と外周の比が約２倍になるというオーバーパック特有の構造を有していることが分かる。またオーバーパックに要求される機能や溶接性の観点から，その材質を調査，検討して炭素鋼鍛鋼品（SF340A）を試験対象材料としている。



図 6.6.4-2 オーバーパック蓋構造の概念図（原環センター，2001 を編集）

溶接技術については，第２次取りまとめでの評価が高い代表的な高エネルギービーム溶接法である電子ビーム溶接，および代表的なアーク溶接法であるTIG溶接（図 6.6.4-3），MAG溶接（図 6.6.4-4）などを対象に，国の基盤研究開発において実規模の蓋構造試験体を用いた溶接試験が実施されている。その結果，電子ビーム溶接はその溶接原理からオーバーパック 1 本当たり 30 分程度での封入が可能であるが，封入溶接において必須となる電子ビームの終端処理工程において微小な傷が発生しやすいこと，また特に平蓋では大きな内外周差に起因する入熱量の差により溶融金属が外側に膨出する現象が見られることが確認されている（原環センター，2002）。一方，アーク溶接法は多層盛であることから，オーバーパック 1 本当りに要する溶接時間が，TIG溶接で 24～30 時間，MAG溶接はその 1/10 程度となる。しかし，TIG溶接はその原理，使用実績，および一般的な評価からも明らかなとおり，現時点では最も高品質の溶接が可能であることが確かめられている。このように溶接技術については，蓋構造との関係を含めてオーバーパックへの適用性，適用条件といった技術的特徴が網羅的に把握されている（原環センター，2002，2004a，2008a，2009a）。



（a）落とし蓋構造へのTIG溶接適用例（出典：原環センター，2009a）　（b）平蓋構造へのTIG溶接適用例（出典：原環センター，2003c）

図 6.6.4-3 落とし蓋構造，平蓋構造でのTIG溶接試験状況

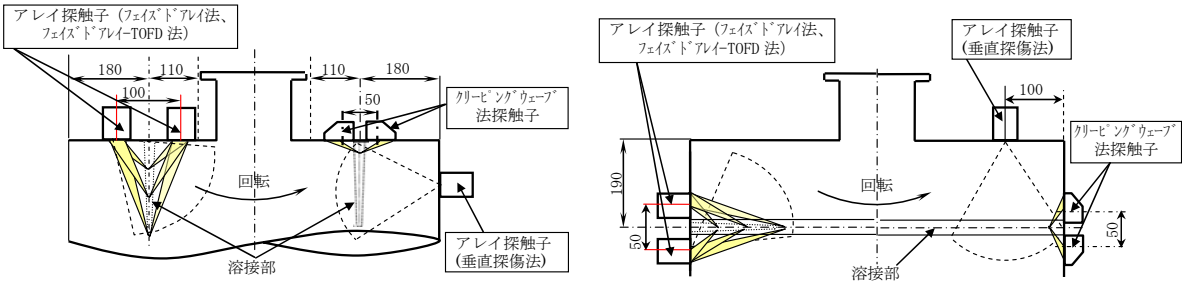


（a）落とし蓋構造へのMAG溶接適用例（出典：原環センター，2008a）　（b）平蓋構造へのMAG溶接適用例（出典：原環センター，2004a）

図 6.6.4-4 落とし蓋構造へのMAG溶接適用例

検査技術については，溶接により発生する可能性のある傷の検出と定量を行って，溶接部の構造健全性を評価するという視点から，超音波探傷法の適用性を把握することが重要である。超音波探傷には各種の方法があるが，その原理などから表面，表層，内部，深部というように探傷深さに応

じた使い分けが求められる。国の基盤研究開発では，こうした特徴に着目して，人工欠陥，および自然欠陥を付与した実規模大の試験体に対して超音波探傷試験を実施し，表面と表層にはクリーピングウェーブ法，内部と深部には飛行時間回折法（TOFD法），あるいは，フェイズドアレイ法，およびフェイズドアレイ－TOFD法の組み合わせが適することを提示している（図 6.6.4-5）。また，自然欠陥付与試験体の破壊試験を行って超音波探傷試験の結果と比較することで，欠陥寸法に対する検出確率を算定し，探傷深さ 190mmに対して高さ 2mm以上の欠陥を 100%の確率で検出可能であることが確認されている（原環センター，2008a）。



(a) 落し蓋を対象とした検査方法　　(b) 平蓋を対象とした検査方法

図 6.6.4-5 超音波探傷法を用いた溶接部の検査方法の概念（原環センター，2008a に一部加筆）

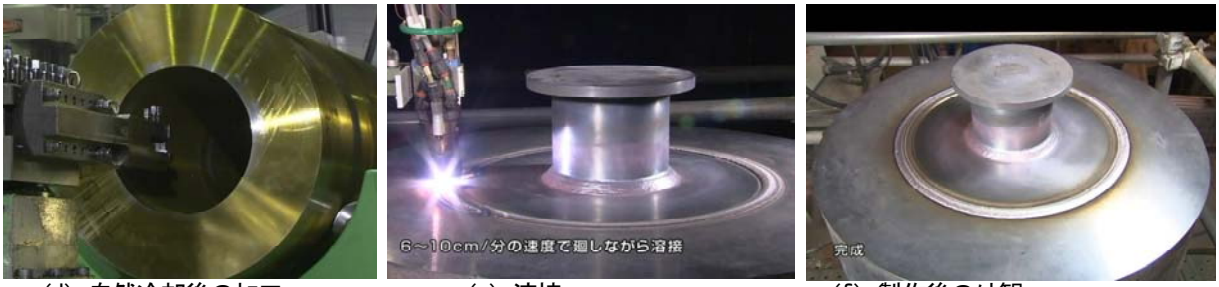
溶接部には母材と同様，1,000 年間の健全性が求められる。金属が短時間の内に加熱，溶融，凝固のプロセスをたどる溶接部では，金属組織，化学組成，応力状態の変化や傷の発生などが想定される。従って，こうした溶接影響を前提にした健全性評価が求められる。国の基盤研究開発では，溶接傷の存在を前提にして，破壊力学に基づくオーバーパック溶接部の構造健全性評価手法が提示され，亀裂進展と各種の腐食，放射線照射脆化など，懸念される材料の劣化による溶接部の破壊が寿命期間中には生じないことを，溶接・検査終了時点で評価するための検討が進んでいる（Asano, 2006，2010；原環センター，2007b，2008a，2009a）。

こうした溶接・検査技術の開発成果の一部は地層処分実規模設備整備事業（図 6.6.4-6, 図 6.6.4-7）における炭素鋼製オーバーパックの製作に利用され，その技術の適用性が確認されて一般に紹介されている。

NUMO は今後，これらの知見を反映し，また，国の基盤研究開発と相互に補完し合ってデータの収集と技術の信頼性の向上を図りつつ設計手法の検討を進めることで，閉鎖後長期の安全性と成立性に対する信頼性を向上させる。



(a) 1000℃程度に加熱後切り出し　(b) 鍛造（高さ調整）　(c) 鍛造（厚さ調整）



(d) 自然冷却後の加工　(e) 溶接　(f) 製作後の外観

図 6.6.4-6 炭素鋼オーバーパックの製作状況（原環センターホームページを編集）



図 6.6.4-7 製作された炭素鋼オーバーパック（出典：原環センター，2010e）

6.6.4.3 緩衝材の製作・搬送・定置技術

(1) 緩衝材の製作・搬送・定置に必要となる技術の概要

緩衝材は定置後初期の段階では，地下水とオーバーパックの接触を遅延させることが期待されている。また，オーバーパックの閉じ込め機能が失われた後の長期に対しては，閉鎖後閉じ込めのための安全機能として核種移行の抑制が期待されている。この長期に対する核種移行の抑制は，緩衝材内部の物質移行を拡散支配にすることにより担保する。このため緩衝材は，核種の移行抑制が期待できる密度以上に圧縮成型する必要がある。また，圧縮成型して密度を上げることによりコロイドによる核種移行を抑制し，核種の収着現象による核種移行の遅延効果が期待できる。上記の機能に加え，長期変質による特性の変化やほかのバリアとの関係なども考慮して設計により緩衝材の材

質（材料組成，密度）と形状，厚さが設定される。

緩衝材の製作・搬送・定置技術は設計で設定されるこれらの材質と形状，厚さを的確に実現させる製作方法や地上施設から地下施設へ効率的に搬送方法および処分孔または処分坑道への的確な定置施工方法の選定と技術の確立が必要である。その際，製作･搬送･定置技術に加えて品質確認技術を含めた品質保証方法を確立することが重要である。これに対して第２次取りまとめまではベントナイトを主体とした緩衝材の基本物性や基本特性を試験室内での試験を中心に把握し，設計に必要なデータの整備に力点が置かれていたため実規模での検討事例が乏しかった。また，一般産業においても同様の使用目的と狭隘な地下施設内での施工などの条件下でベントナイトを用いた実績は示されていない。このため第２次取りまとめ以降では，国の基盤研究開発を中心に緩衝材の製作・搬送・定置に対する工学的信頼性を向上させることを目的に，各種の要素試験と実規模レベルでの試験が行われている。

(2)　緩衝材の製作に関する技術の開発状況

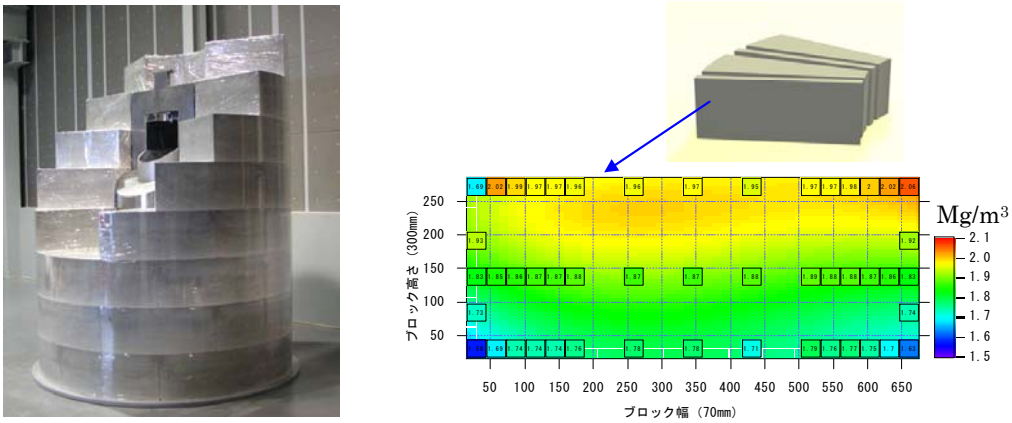
図 6.6.4-8には，2,000tプレス機で高さ 35cmの緩衝材ブロック圧縮成型時の状況を示す。プレスによる圧縮成型時には材料条件を考慮した圧縮時間や速度，圧縮力の保持時間などを考慮することにより，型枠から取り出した後の緩衝材ブロックの寸法変化（圧縮により締め固められているため，圧縮力を除荷したあとから，徐々に緩衝材寸法が変化をはじめる現象）の影響をある程度制御可能であることを確認している。また，型枠の脱型時には，緩衝材ブロックに亀裂が発生することがあるため，この亀裂発生を制御するような脱型条件について知見が蓄積されている。プレス機により製作された実規模の一軸プレス機により製作したブロックの密度分布状況を図 6.6.4-9に示す。ブロック内の密度分布は目標乾燥密度 1.6Mg/m^{3}以上を達成している（原環センター，2004b）。こうした緩衝材の製作・搬送・定置技術の開発成果の一部は，地層処分実規模設備整備事業（図 6.6.4-9）における緩衝材ブロックの製作に利用され，その技術の適用性が確認されて一般に紹介されている。

また，ブロックの製作方法については，一軸プレス機による実績以外に CIP（冷間等方圧プレス）による製作性の確認なども行われている（原環センター，2004b；Awano，2001）。



(a)　2,000t プレス機　　(b)　中央;脱型状況　　(c)　完成したブロック

図 6.6.4-8 プレス機による緩衝材ブロック製作状況（(a)出典：原環センター，2004b，(b)(c)原環センターホームページを編集）



(a) 実規模緩衝材展示状況（出典：原環センター，2010d）

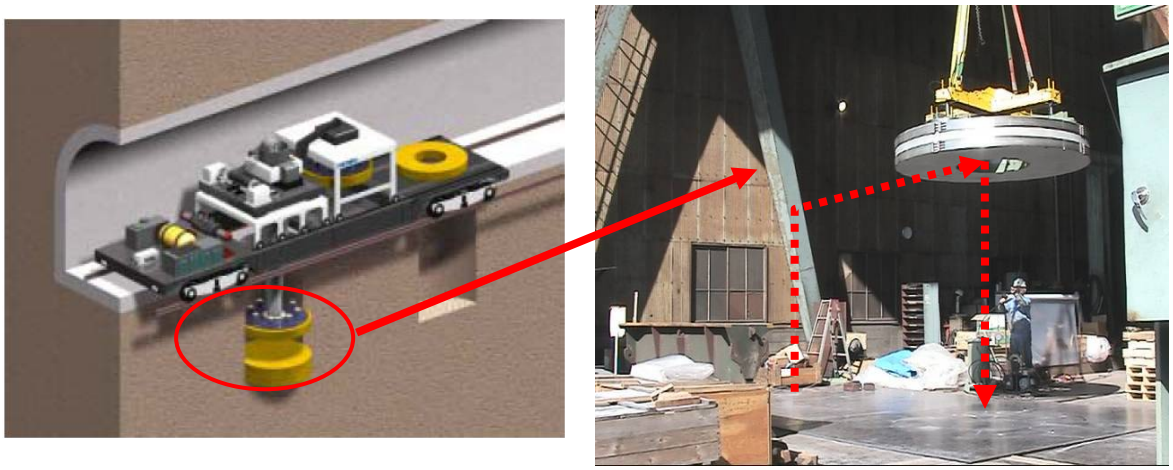
(b) 緩衝材ブロック密度分布（原環センター，2004b を編集）

図 6.6.4-9 実規模緩衝材展示状況と緩衝材ブロックの密度分布

(3) 緩衝材の搬送・定置に関する技術の開発状況

地上・地下施設での積み卸し，積み替え，処分孔への定置作業時には緩衝材ブロックに損傷を与えず，かつ，狭隘な空間で把持が行える真空吸引技術の利用を想定している。特に処分孔への緩衝材定置時には狭隘な空間内で精度良くブロックを定置するために，位置決めに有利なテレスコピック（重なり合った筒が伸び縮みする構造）の先端に真空吸引装置を取り付けて用いる。このため，真空把持の際緩衝材ブロックが確実に把持し，かつ，損傷を与えないか，真空吸引ポンプ停止時の把持性能への影響がないかなどについて実規模の緩衝材ブロックを用いた試験が実施されている（原環センター，2004b）。

図 6.6.4-10に搬送定置装置のうち真空吸引把持部を示し，図 6.6.4-11に真空吸引性能確認状況を示す。これらの試験により搬送・定置時の真空吸引技術の有効性の確認と吸引ポンプ停止時などの不具合発生時にも直ちにブロックが落下することはないことなどの安全性が確認されている。



(a) 竪置き緩衝材定置装置の概念図（NUMO，2004b）　(b) 真空吸引把持（原環センター，2004b に一部加筆）

図 6.6.4-10 ブロック真空把持装置のうち真空把持部

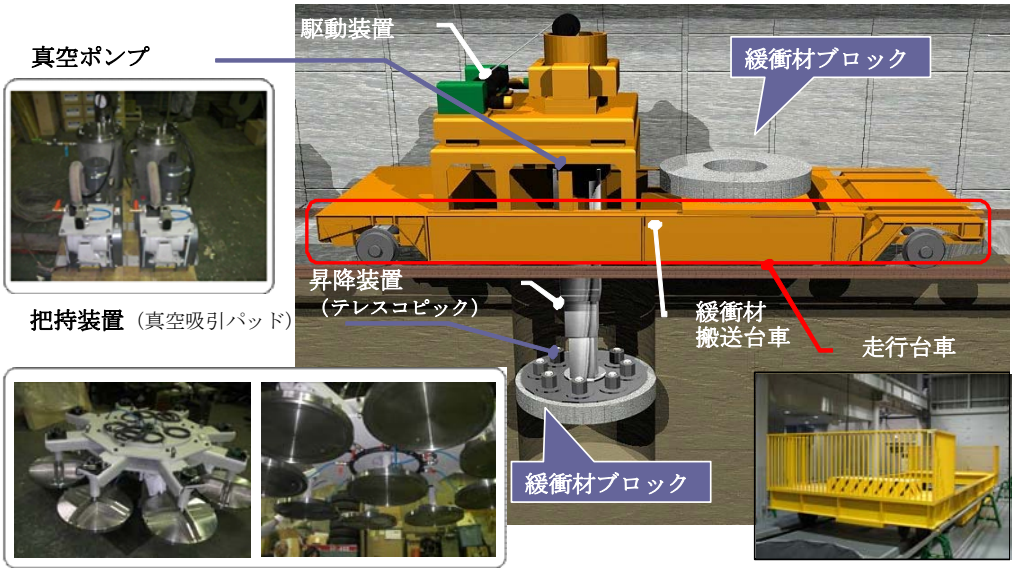


図 6.6.4-11 実規模ブロック真空把持実証状況（原環センター，2010d を編集）

(4) 緩衝材の製作・搬送・定置技術のオプションの開発状況

緩衝材の製作方法にはブロック型の緩衝材を積み上げる方法以外にさまざまな工法が提案されている。提案されている工法にはそれぞれ特徴や利点，適応条件があるため，第２次取りまとめ以降も国を中心に各技術の適用性の確認が行われている。

図 6.6.4-12に実規模での原位置充填方式の試験状況を示す。試験はハンマーを用いた填圧により目標乾燥密度 1.6Mg/m^3 以上の緩衝材製作が可能なこと，廃棄体部分の空間を維持するために設置された内型枠が，填圧作業後の取り外しに際して有効に作動することを確認している。また，ハンマーの打撃による衝撃が周辺の岩盤に悪影響を与えないことを試験値と解析により確認している（原環センター，2003b）。



(a) 締固めハンマーと内型枠　(b) 内型枠の脱型状況　(c) 製作された緩衝材

図 6.6.4-12 原位置締固め緩衝材の施工試験（出典：原環センター，2003b）

上記までの処分孔定置方式に対して，処分坑道定置方式（横置き定置）は発生する掘削土量の低減，施工費用の低減，掘削時の周辺地山へ与える影響の低減などの利点がある一方，狭隘な処分坑道内での人工バリア搬送・定置作業は技術的に難易度が高く，現状でも横置き定置方式の概念構築を含めて，要素試験，実規模試験などによる工学的信頼性を上げるための技術開発が進められている。

主に検討されている横置き定置方式の概要を以下に示す。

図 6.6.4-13にPEM方式の定置工程概念を示す。PEMの定置工程は図に示すように水平移動時にはエアベアリングによりPEMの重量を支持し搬送装置により所定の位置まで移動後，PEMの重量をエアジャッキで把持して，その間に底部のエアジャッキを退避させる。最後に水平度を保ちつつ静かにPEMを下降させて設置後，エアベアリングを始動させて定置装置を退避させる（原環センター，2009c）。

実規模のPEM容器の製作とエアベアリングでの水平移動試験により乗り越えられる処分坑道底部の段差の高さの確認やエアジャッキでのPEMの昇降定置試験などが実施されている(図6.6.4-14)。

また，国の基盤研究開発では緩衝材ペレットを用いた「隙間充填技術」について，横置き定置方式を前提にして，実規模の模擬処分孔を用いた隙間充填試験を実施し，使用する緩衝材ペレットの形状や寸法，異なるサイズの混合ペレットの効果，隙間充填の程度，緩衝材ペレット供給条件などについて定量的な評価を行い，緩衝材ペレットの圧空を利用した隙間充填技術の成立性と適用条件を把握している（原環センター，2008c）。

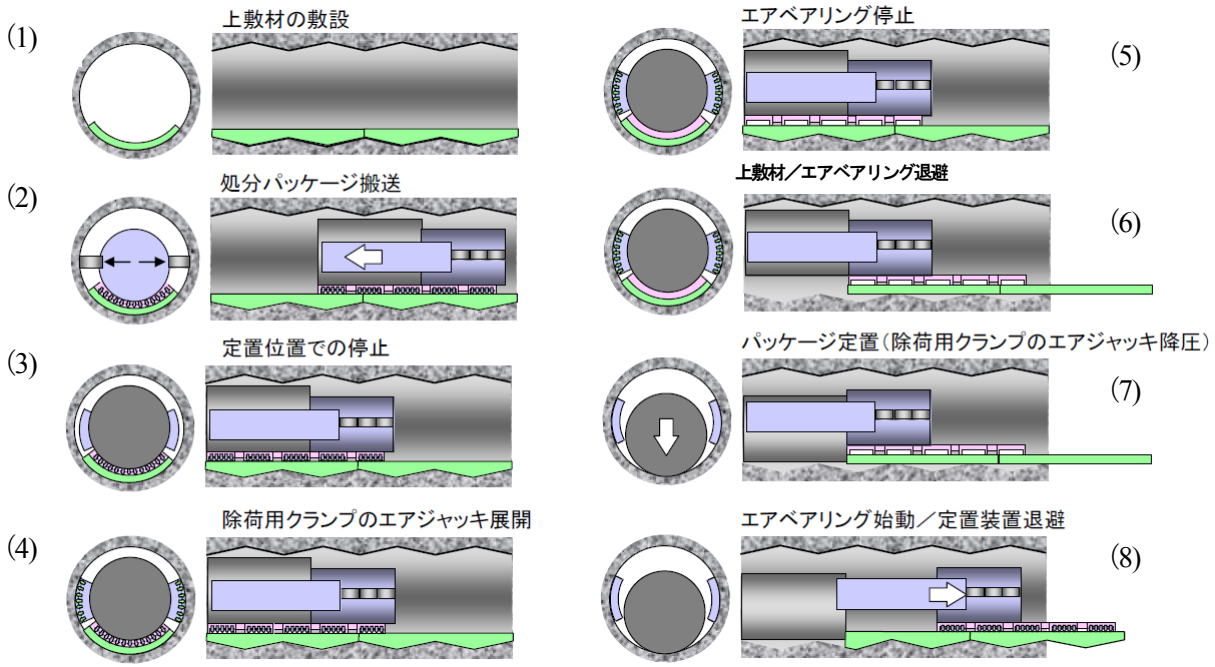
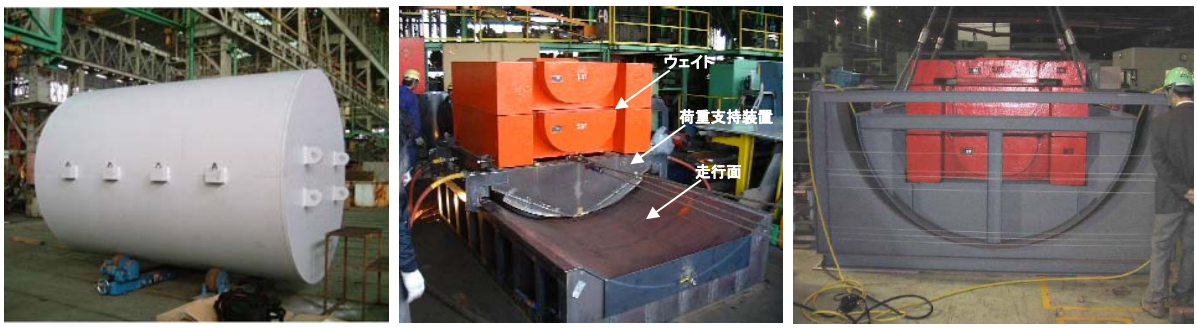


図 6.6.4-13 PEM 方式工程概念（出典：原環センター，2009c）

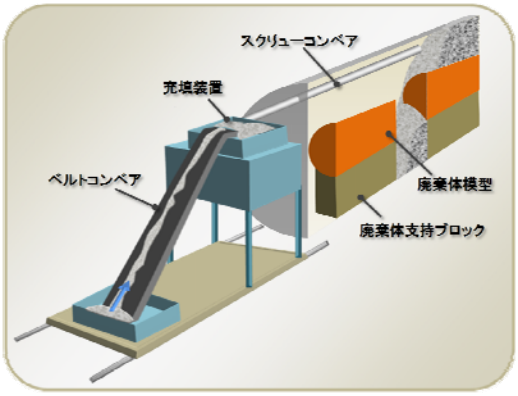


(a) 実規模 PEM 容器製作例　(b) エアーパレット牽引試験例　(c) エアジャッキ作動試験例

図 6.6.4-14 PEM 方式試験例（(a)(c)出典：原環センター，2009c　(b)出典：原環センター，2004b）

図 6.6.4-15にペレット充填方式の施工試験状況を示す。廃棄体はブロック状の緩衝材の上に定置され，残された空間にペレット状の緩衝材を移送して充填する。試験は充填前のペレットの特性把握，ペレット充填後の密度分布（平均 1.3Mg/m^3）の把握，ペレット充填時の安息角の把握と到達可能な密度，残存する空隙の位置などを確認している（原環センター，2005）。

図 6.6.4-16（a）に吹付方式による緩衝材の施工試験状況を示す。超音速ノズル（図 6.6.4-16（b））を用いて高速でベントナイト材料を吹付けることによりベントナイト単体でも乾燥密度 1.6Mg/m^3 の高密度の緩衝材の施工を行うことが実証されている。また，ベントナイト系材料のような締固め土がシリコンオイルのような無極性分子の中につけても崩壊しないという性質を利用して，シリコンオイルに吹付け後の緩衝材サンプルを付けて浮力を測り，その浮力から密度を算定するという品質管理方法も確立されており，現場での迅速な品質管理が可能である（原環センター，2010b）。





(a)　施工試験装置（横置き）イメージ図
（原環センター，2005 を参考に作成）

(b) ペレット充填状況
（原環センター，2005 を一部修正）

図 6.6.4-15 ペレット充填方式の施工試験





(a)　吹付施工法の機械構成

(b)　実規模縦型処分施設吹付試験状況

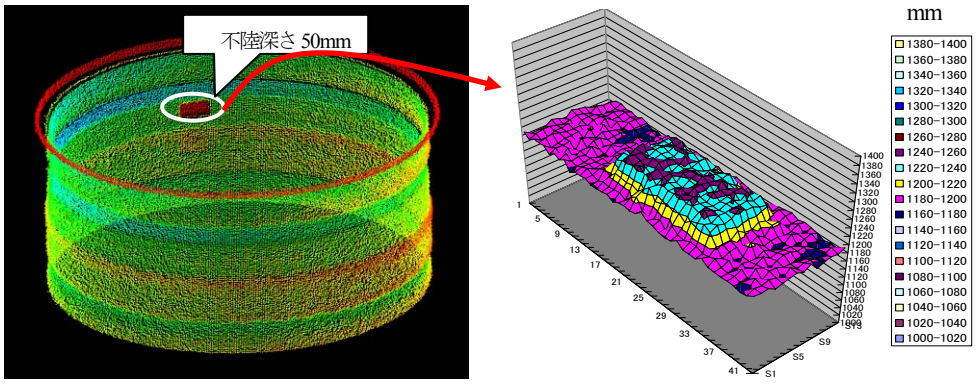
図 6.6.4-16 吹付施工試験（出典：原環センター，2010b）

(5)　緩衝材の搬送・定置にかかわるその他の関係技術の開発状況

最終的な人工バリアの品質は処分孔の形状と人工バリア定置時の施工精度の影響を受けるため，人工バリア定置直前の処分孔の状態把握し，定置後の人工バリアの状態を精度良く計測する必要が

ある。さらにこの計測作業は搬送・定置作業の障害とならないように短時間で行う必要がある。

このため処分孔の形状を計測するためにレーザー計測器とデジタル画像データを用いた計測方法の検討が実験的に行われている。実験は実規模の模擬処分孔を製作し，処分孔の壁面の状態（色，不陸，キズ）に対応した計測時間と計測精度に関するデータを取得し，デジタル画像データとレーザー計測装置を組み合わせた計測装置の概念構造が提示されている（原環センター，2004b）。図6.6.4-17にレーザー計測による模擬処分孔の形状の計測例と壁面に設けられた不陸部の分析結果の例を示す。



(a) 計測された模擬処分孔の形状　　(b) 不陸部分の分析表示例

図 6.6.4-17 レーザー計測による処分孔形状と壁面状態の把握状況（原環センター，2004b に一部加筆）

地下施設は作業空間が狭いため地下施設内に計測用や機械の制御用のケーブルを設置することは好ましくない。また，これらのケーブルは地下施設を埋め戻すときに撤去する必要があるが，埋め戻し作業と撤去作業を同時に行うことは作業性を著しく損なうことが想定される。このため，地下施設の中で遠隔定置装置の制御や計測データの無線により制御するシステム検討が行われている（原環センター，2009c）。図6.6.4-18にメッシュ型無線LANにより制御するシステムの概念を示す。

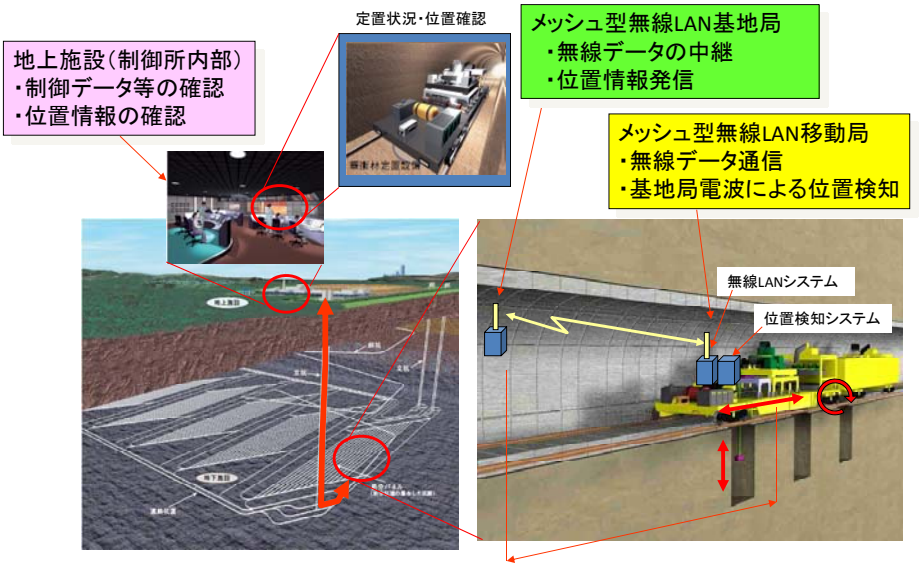


図 6.6.4-18 メッシュ型無線 LAN システムによる遠隔定置装置制御概念（原環センター，2009c に一部加筆）

6.6.4.4　廃棄体回収技術

ここでは，閉鎖措置計画認可時までの期間の回収の具体的方法や技術について，NUMOの検討状況や国の基盤研究開発機関における開発成果について説明する。閉鎖措置計画の認可時は処分坑道が埋め戻され，地上施設と地下施設をつなぐアクセス坑道や主要坑道，連絡坑道などは埋め戻されていない状態である。回収が必要になる原因については，安全確保のための工学的な問題だけではなく，現状ではその原因を技術面からは同定できないような政治的，社会的な問題も想定される。ここでは，特定の廃棄体について品質管理上の問題が判明したために回収することになったと想定し，必要な技術の検討状況を説明する。また，必要な回収手段や技術の特徴を示すことを主眼に，高レベル放射性廃棄物の竪置き定置方式を中心に説明し，横置きなどのほかの定置方式については技術的に異なる点について補足する。

(1)　回収を考慮する時期

回収可能性を考慮する時期は，処分場に廃棄体が持ち込まれる操業段階から，処分場が受動的安全性を担保できると判断できる閉鎖措置開始までを考える。ここでは，操業段階において回収に用いられる技術の検討が有意義だと考えられる処分孔の埋め戻し後，処分坑道を埋め戻す前の段階の前後の具体的な回収方法を示す。

(2)　処分坑道埋め戻し前の回収作業

廃棄体周囲に緩衝材ブロックが定置され，処分孔上部はさらに十分な遮へい機能を持つように埋め戻し材で埋め戻されている。このため処分坑道内は放射線の影響のない非管理区域である。この時点からの回収作業では，まず，処分孔上部の埋め戻し材除去により放射線の影響を考慮する必要があるため，①遮へい扉の設置，管理区域の設定を行い，②処分孔上部埋め戻し材などを除去する。次に，③廃棄体周囲の緩衝材の拘束を除去し，④廃棄体を取り出す。そして，⑤廃棄体を遮へい容器に収納し，⑥地上施設へ搬送する。⑦地上施設では廃棄体の洗浄，検査などを実施する。

地下での②～⑤の作業は，管理区域での遠隔作業が想定され，地上での⑦の作業も管理区域内での作業となる。①，④～⑥の回収作業は，定置技術や一般的な建設技術の流用により対応が可能と考えられるが，②，③については，他産業などでの例がないため以下のように新たに回収装置の概念検討を実施している。

②の処分孔上部埋め戻し材および上部緩衝材を除去するための専用装置の概念検討例を　図6.6.4-19に示す。回収作業は掘削前の放射線の影響のない段階で，処分孔上部の正確な位置に装置を据え付ける。装置の据え付け後は放射線の影響を考慮して遠隔操作により掘削作業を行い，上部埋め戻し材と上部緩衝材を除去して廃棄体把持部を露出させる。

③の廃棄体周囲の緩衝材の拘束除去の技術は，緩衝材膨潤圧による廃棄体の拘束が小さい場合には，廃棄体をそのまま引き抜くことが可能であるが，拘束が大きい場合には石材やコンクリートの切り出しなどに用いられるオーバーコアリング技術の適用を有望な方法として想定している。これは図 6.6.4-20に示すような円筒形の筒の先端にカッターを装着し，円筒の回転により緩衝材を切削して廃棄体と緩衝材の間の拘束を除去する。切削時の発熱除去や切削屑の除去のための水または圧縮空気を用いることとなり，高放射線場での水または圧縮空気および切削屑の回収の検討が重要である。この際，廃棄体の品質管理上の問題が発生した場合を想定していることから，放射線場からの排水が処分孔や処分坑道に浸水することを抑えるために，極力，水の使用量を低減することに留

意する必要がある。今後は実際に掘削や排土が可能な機構，設備や除去した緩衝材や緩衝材を除去するために用いた掘削水または循環空気の回収機構や処理方法を検討した上で，これらの遠隔操作性の確認，必要な機構の検討が必要である。

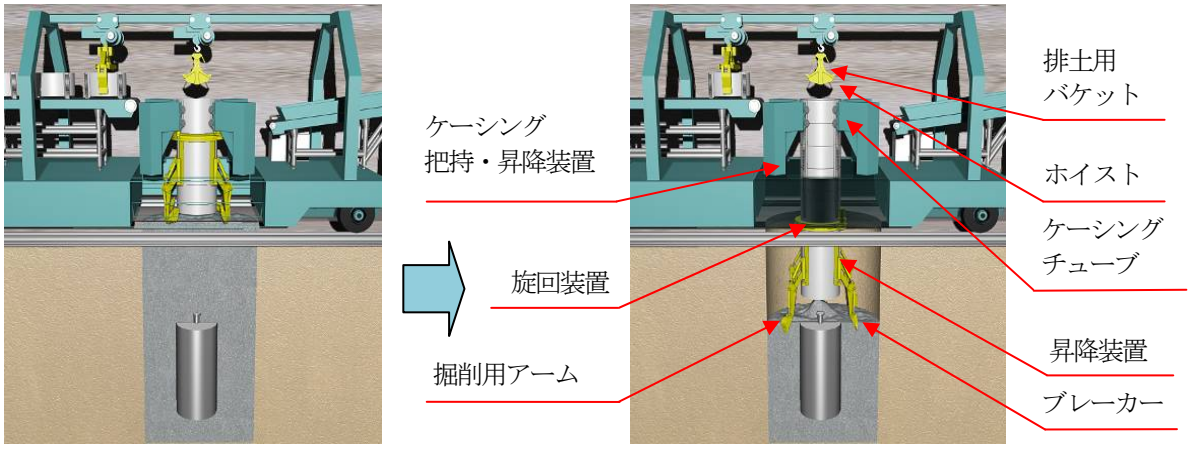


図 6.6.4-19 ②処分孔上部埋め戻し材など除去装置の例（NUMO，準備中 c）

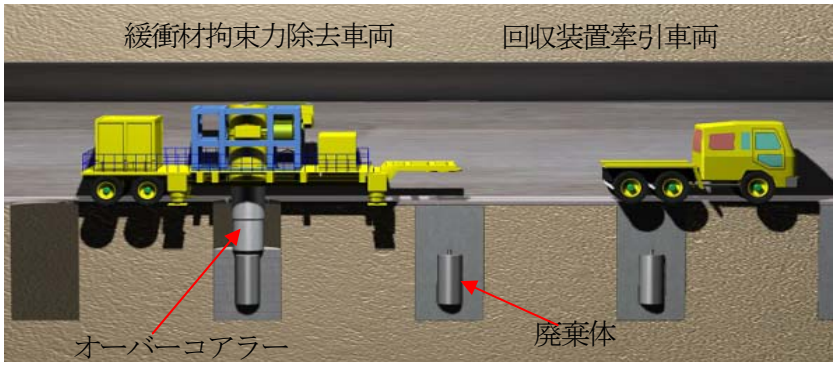
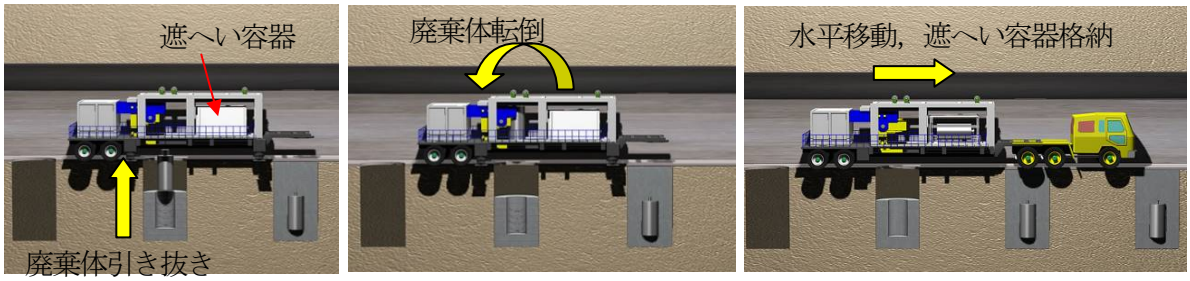


図 6.6.4-20 ③廃棄体周囲の緩衝材の拘束除去装置の例（NUMO，準備中 c）

次の④廃棄体を引き抜き，⑤廃棄体の遮へい容器への収納については，図 6.6.4-21に示す。このように廃棄体の搬送や取り扱い時に用いられる技術は廃棄体定置時の技術が活用できると考えられる。



(a) 廃棄体引き抜き　　(b) 廃棄体の転倒　　(c) 遮へい容器への格納

図 6.6.4-21 ④廃棄体の回収，⑤遮へい容器への収納例（NUMO，準備中 c）

②および③の工程で必要となる緩衝材などを除去する技術には，オーバーコアリングに代表される機械的に掘削する方法の他にもいくつかの方法が考えられる。その中の一つに液体を用いて緩衝材などをスラリー化させて除去する方法がある。この方法は，国の基盤研究開発機関で実験的な検討が行われている。具体的には，緩衝材などの表面に比較的低い圧力で塩水を噴射し，緩衝材などをスラリー化して除去する方法の適用性検討が進められている。

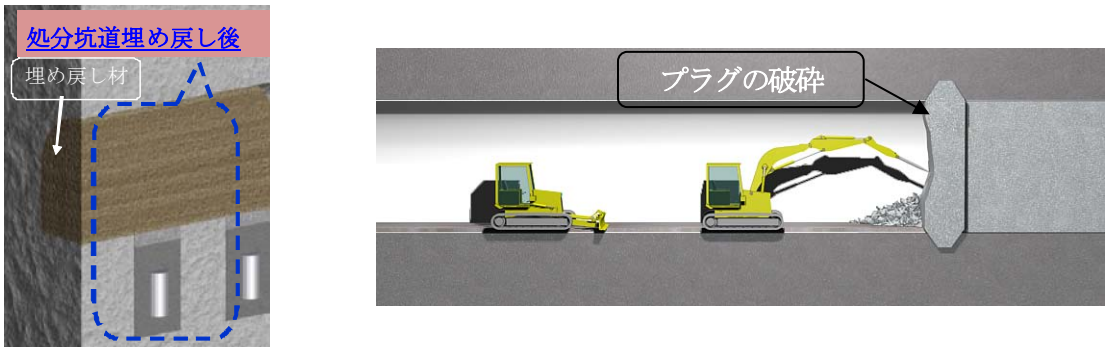
(3)　処分坑道埋め戻し後の回収作業

処分坑道埋め戻し後の状況を図 6.6.4-22に示す。処分坑道埋め戻し後は処分坑道端部にプラグが設置されており，この時点で回収を行うためには，端部のプラグの除去，処分坑道内部の埋め戻し材の除去，必要により処分坑道の補修などを実施する。これらの作業は放射線の影響を考慮する必要がないため，処分場建設時に用いられた掘削技術などが適用できる。

処分坑道埋め戻し材除去後は前記の処分坑道埋め戻し材の回収作業と同様の作業が実施される。

(4)　閉鎖後長期の安全性に与える影響

回収作業が閉鎖後長期の安全性に与える影響については，回収のために掘削された部分は，もともと緩衝材や埋め戻し材で埋め戻されていた場所であり，回収作業後には当初と同様に埋め戻せば，地下水流動に与える影響は少ないと考えられる。



(a)　処分坑道埋め戻し後の状況　　(b)　強度プラグ除去状況の例

図 6.6.4-22 処分坑道埋め戻し後の状況および強度プラグ除去状況の例（NUMO，準備中 c）

(5)　高レベル放射性廃棄物横置き定置方式の場合

横置き定置方式では，廃棄体が定置された処分坑道の緩衝材を除去しつつ，竪置きと同様にオーバーコアリングによる緩衝材除去を想定している（図 6.6.4-23）。廃棄体の抜き出し，遮へい容器への収納はほぼ定置作業の逆の手順であり，定置装置の機構，技術が活用できる。また，緩衝材除去技術に関しては，国の基盤研究開発で検討されている塩水を用いた緩衝材除去技術（図 6.6.4-24参照）を用いることも考えられる（原環センター，2010b）。

竪置き定置方式と横置き定置方式を比較した場合，竪置き定置方式は処分坑道からの回収作業により比較的容易に回収が可能であるが，横置き定置方式では処分坑道に連続して廃棄体が定置されているため，個別の廃棄体の回収作業は困難である。このため，横置き定置方式を対象にして，新たに回収用の坑道を設置し，その坑道から回収を実施するなどの概念についても検討を行っている。

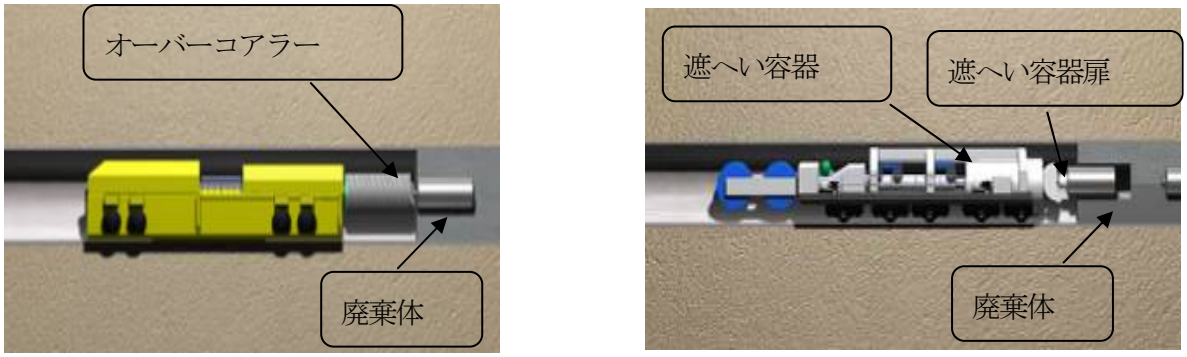


図 6.6.4-23 廃棄体周囲のオーバーコアリングおよび廃棄体の抜き出しと遮へい容器への収納例（NUMO，準備中 c）

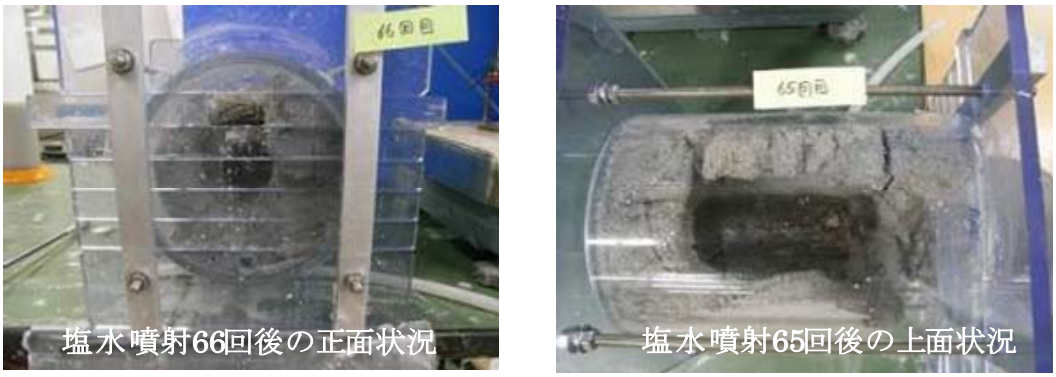


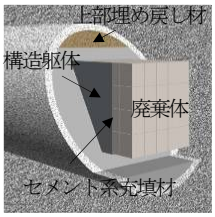
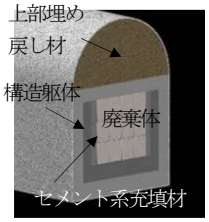
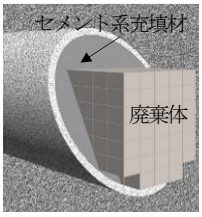
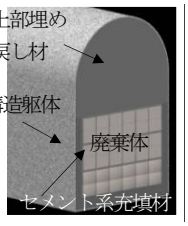
図 6.6.4-24 横置き定置方式を模擬した緩衝材除去実験の状況（出典：原環センター，2010b）

(6) 地層処分低レベル放射性廃棄物の場合

地層処分低レベル放射性廃棄物の定置概念と回収維持期間の工程を表 6.6.4-1に示す。地層処分低レベル放射性廃棄物の場合には，廃棄体をパッケージに収納してセメント系材料で固定したものを集積して定置することおよび緩衝材を設置する廃棄体と設置しない廃棄体があることが高レベル放射性廃棄物とは異なる。

地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の標準である円形処分坑道では，廃棄体には処分坑道端部からアクセスすることとなる。これに対して，幌型処分坑道の場合には天井クレーンを使用して，上方からのアクセスも可能である。いずれの処分坑道においても，地層処分低レベル放射性廃棄物は集積して定置されているため，高レベル放射性廃棄物とは異なり，個々の廃棄体にアクセスすることは困難である。また，廃棄体あるいは廃棄体パッケージを回収するためには，その周囲の拘束を除去する必要がある。地層処分低レベル放射性廃棄物の場合には，除去対象が緩衝材（土質系材料）ではなくセメント系材料である。セメント系材料の場合，土質系材料に比して拘束の除去は難しくなるが，原子力発電所における解体技術や一般的な建設技術を応用することで可能である。

表 6.6.4-1 地層処分低レベル放射性廃棄物処分概念の回収維持期間と作業工程

<table>
<tr><td colspan="2">処分概念</td><td>グループ 1,2 円形</td><td>グループ 1,2 幌型</td><td>グループ 3,4 円形</td><td>グループ 3,4 幌型</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td>
</td><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td rowspan="5">坑道上部埋め戻し後に必要となる作業工程</td><td rowspan="4">坑道上部埋め戻し前に必要となる作業工程</td><td>上部埋め戻し材（土質系）の掘削</td><td>同左</td><td rowspan="3">坑道内セメント系充填材の掘削と廃棄体パッケージの回収（横からの作業）</td><td>上部埋め戻し材（セメント系）の掘削</td></tr>
<tr><td>構造躯体内セメント系充填材の除去と廃棄体パッケージの回収（横からの作業）</td><td>構造躯体内セメント系充填材の掘削（上からの作業）</td><td>構造躯体内セメント系充填材の掘削（上からの作業）</td></tr>
<tr><td></td><td>廃棄体またはパッケージの回収（上からの作業）</td><td>廃棄体またはパッケージの回収（上からの作業）</td></tr>
<tr><td colspan="4">廃棄体の輸送</td></tr>
<tr><td colspan="4">地上施設での作業</td></tr>
</table>

6.6.5 工学的対策を支える技術に対する今後の課題

2000 年以降から現在までの工学的対策を支える技術について，前節までに NUMO と国の基盤研究開発機関などでの検討状況を概説した。

今後はこれらの技術の検討状況と,「地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～」（NUMO，2010f）で技術課題を抽出し，課題解決の優先度を設定して，各課題を着実に解決していく。

特に工学的対策に係る課題の技術開発の優先度は，例えば地下水条件や岩盤力学条件などによりサイトごとに異なる事が想定される。このため, NUMO としては技術課題の開発状況などを踏まえ，技術開発課題の優先順位も必要により適宜見直し，効率的な技術開発を実施していく。

表 6.6.5-1に開発の優先度が高いか比較的高い工学的対策を支える技術の課題の例を示す。課題は以下の三項目に分類して示した。

(1) 人工バリアの長期挙動・相互作用に関する知見の整備に関する技術開発

長期的な安全性の提示において，長期挙動理解だけでなく，定置後から所期の性能が発現するまでの過渡期の人工バリア，ニアフィールド環境の理解とその説明が求められるようになるため，今後，人工バリア材料の挙動理解の重要性が増す。そこで，従来の材料挙動に関する理解をより深めると共に, すでに検討が開始されているベントナイトの再冠水挙動などの国の基盤研究開発成果

（原環センター，2010d）などの進展状況も踏まえつつ，検討が不足している項目については，引き続き技術開発が必要と考えている。

⑵　人工バリアの製法・搬送定置の工学的実現性の向上に関する技術開発課題

NUMO は，所定の安全機能を有するように実際の処分環境において人工バリアを施工する必要があるが，これまでは概念的な検討が主であった。今後は，事業者として，より工学的実現性を意識した技術開発とその実証が重要と考えている。

⑶　人工バリアの信頼性向上に関する技術開発課題

第２次取りまとめにおいて，技術的開発課題として示されているテーマのうち，人工バリアの信頼性向上に資する課題については，引き続き知見の拡充を行い，より一層の信頼性向上に努めることが重要と考えている。

表 6.6.5-1 工学的対策を支える技術に対する今後の課題

工学技術の開発分野	技術課題	技術課題の概要
人工バリアの長期挙動・相互作用に関する知見の整備に関する技術開発（O/P;オーバーパック）	ガラスマトリクスからの浸出挙動の評価手法の高度化	浸出挙動に関する現象理解の高度化，データ拡充
	O/P 腐食挙動現象理解の高度化およびデータ拡充	現実的な腐食速度の再設定，腐食生成物の現象理解の高度化およびデータ拡充と設計への反映
	過渡期のニアフィールド現象の理解，コードの高度化およびデータ拡充	過渡期のニアフィールド現象である再冠水挙動や塩濃縮現象などの連成現象に関する現象理解，コード高度化およびデータ拡充と設計への反映
	O/P－緩衝材界面の相互作用影響の評価手法の高度化	O/P―緩衝材界面の温度・化学環境の相互作用影響の評価手法の高度化と設計への反映
	セメントーベントナイト相互作用影響の評価手法の高度化	セメント系材料とベントナイト系材料の長期変質挙動から人工バリアとニアフィールドの長期特性の把握と設計への反映
人工バリアの製法・搬送定置の工学的実現性の向上に関する技術開発課題	O/P 遠隔溶接・検査技術開発	O/P 遠隔溶接・検査技術開発，実証試験の実施
	竪置き人工バリア搬送・定置（ブロックなど）に関する要素技術の開発と実証	人工バリア製作・搬送・定置工程を含めた竪置き定置方式の必要要素技術の開発と地上での実証試験および地下調査施設での実証試験準備
	横置き定置方式の概念選定とそれに係る要素技術の開発と実証	横置き定置方式概念選定（原位置施工，PEM 方式など）。製作・搬送・定置の必要要素技術開発と地上での実証試験および地下調査施設での実証試験準備
	回収技術概念選定と要素技術の開発および実証	定置概念，廃棄体特性に応じた必要な回収要素技術の開発と地上施設での実証試験および地下調査施設での準備
人工バリアの信頼性向上に関する技術開発課題（O/P;オーバーパック）	O/P 腐食挙動に対する放射線影響の評価手法の高度化	O/P 厚さ設定に関係する放射線分解によって生じる酸化性化学種供給速度などデータ拡充と設計への反映
	O/P 溶接部の耐食性評価技術の高度化	地質環境を考慮した条件での O/P 溶接部の耐食性評価技術の高度化と設計への反映
	O/P 溶接部の腐食速度低減対策の技術の高度化	地質環境を考慮した条件での O/P 溶接部の腐食速度低減対策の高度化と設計への反映

6.7 まとめ

本章では，冒頭に述べたように三つの安全確保策のうち，「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」を実施するために必要な技術が着実に整備されていることを示すとともに，「事業期間中の安全確保」の具体的な考え方や方法などについて事例を交えて説明した。

第２次取りまとめや第 2 次 TRU レポートなどでは，わが国における幅広い地質環境における高レベル放射性廃棄物処分と地層処分低レベル放射性廃棄物処分について，処分施設や人工バリアに求められる要求機能や設計要件，設計や建設・操業・閉鎖の基本的な考え方や手順が示された。NUMO は，設立以降，それらを踏まえ事業者の立場で，事業を進めるために必要となる工学的対策の検討を深めている。以下に，これらの主要な技術の進展をまとめる。

(1) 地層処分の安全機能と技術要件の整備

2000 年以降の国際基準の整備や技術の進展に基づいて，閉鎖後長期の安全確保に向けた工学的対策の要件を更新した。閉鎖後長期の安全確保のために必要な技術要件については，「閉鎖後閉じ込め」，「隔離」といった安全確保の基本概念に基づいて，基本的な安全機能と処分場構成要素との関連付けを行った上で，構成要素ごとに安全機能を満足するように技術要件を体系的に整備した。これにより地質環境の調査・評価の進展に応じて，個々の地点に対する技術要件を明確化して設計に反映していく準備を整えている。

(2) 候補母岩の評価の考え方と処分場の設計

処分場の設計について，地質環境の調査・評価からの情報を受けて，まず取り組むのが，処分場に適した候補母岩の選定である。この検討は，サイト選定の初期の段階における事業者としての重要な意思決定事項であるとの認識に立ち，NUMO は，地質・地質構造，地質の長期安定性，地下水流動，地下水化学，空洞の力学的安定性や廃棄体発熱特性などを考慮した候補母岩の評価の考え方を示し，その基本的な評価技術を整理した。

(3) 建設・操業・閉鎖の安全性と工程計画の実現性の向上の取り組み

処分場の建設・操業・閉鎖に適用する基本的な技術や手順は，第２次取りまとめなどで示されている。これに対して，NUMO は事業者として，ガラス固化体 4 万本の処分場規模に対し，建設工程（建設開始から操業開始まで 10 年）や操業工程（年間 1,000 体のガラス固化体を処分）を実現するための課題の分析を行い，クリティカルな工程を解消するための手順や方法の検討を行ってきた。処分孔掘削やずり出しといった建設技術の効率化に関する検討，あるいは品質向上と地下での操業作業を軽減するための検討を実施した。それらの検討の中で，廃棄体と人工バリアを予め地上施設で一体型のモジュールに組み上げた上で搬送・定置する PEM（Prefabricated Engineered barrier system Module）方式を従来の原位置での施工・定置方式に加え，有力な工学的対策として位置付け，その実現性に関する検討などを進めている。また，事業期間中の安全確保のうち，操業安全については，安全の多重化を基本とした安全対策を検討するとともに，事業期間中の安全確保のために施す対策工が閉鎖後長期の安全性に影響を及ぼさないよう対策工の材料などに関する検討を行っている。

(4) 多様な地質環境に対応した工学技術の整備

NUMO は，サイトの地質環境を特定せず多様な地質環境を想定し，処分場の設計，建設・操業・

閉鎖に関する技術の整備を進めてきた。また，サイト選定の初期の段階における設計を効率的に実施することを目的として，わが国の多様な地質環境への対応した設計手法の確立を目指した検討を行ってきた。特に，周囲を海に囲まれたわが国の地理的条件も踏まえ，沿岸域における地下水流動場や地下水化学環境などの観点から設計上の特徴や留意点を整理し，サイトに適した処分場の設計を行う準備を整えている。

また，多様な地質環境に対応できるよう処分概念や適用する操業技術のオプションを整備してきた。例えば，処分孔竪置き定置方式，処分坑道横置き定置方式について，作業性，現状技術の到達レベルなどの観点から特徴や課題を整理するとともに，現実の地下環境において想定される条件（湧水，高湿度環境，岩盤強度の局所的な脆弱性など）を考慮し，特に操業環境の維持の観点から，これまでに検討の主体であった処分概念をより現実的に検討し，処分概念・技術オプションの高度化を図っている。

(5) 基盤研究開発による工学技術の整備

工学技術については，2000 年以降，国の基盤研究開発機関と連携して研究開発が進められており，技術の信頼性や安全性に関する知見が着実に向上している。人工バリアの仕様を設定する上では，選定されたサイトの地球化学特性や人工バリア間の相互作用を考慮することが重要であり，オーバーパックの腐食形態や放射線影響，塩水環境における緩衝材の特性，緩衝材とセメントや鉄との相互作用などについての理解が進展している。建設・操業・閉鎖に係る技術開発としては，オーバーパックの遠隔溶接や検査技術，人工バリアの製作・搬送・定置技術の実証に向けた要素試験が着実に進められている。

以上のことから，多様な地質環境に対応した処分施設の設計手法が整備されていること，PEM 方式などの有望な技術オプションの整備や技術開発の進展により，建設や操業の効率化が可能となっていること，そして，人工バリアの長期挙動や相互作用に関する理解が進展し，人工バリアの設計技術の信頼性が向上していることを示した。今後も，NUMO は事業者の立場で，基盤研究開発機関における研究開発と歩みを合わせつつ，工学的対策と事業期間中の安全確保対策の実現性とさらなる信頼性の向上に取り組んでいく。

参考文献

Awano, T., Kanno, T., Kawakami, S., Ueda, H. and Kimoto, T.（2001）: Manufacturing and Handling Techniques of the Monolithic Buffer Material for HLW Disposal, ICEM'01, International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Bruges, Belgium.

Asano, H., Kataoka, S., Maeda, K. and Aritomi, M.（2006）: Long-term integrity of waste package final closure for HLW geological disposal, (IV) Influence of Welding and Prediction of Long-Term Integrity of Weld Joint –, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.43, No.8, pp924-936.

Asano, H., Aritomi, M.（2010）: Long-Term Integrity of Waste Package Final Closure for HLW Geological Disposal, (VI) Consistency of the Structural Integrity Evaluation Model for the Weld Joint, J. Nucl. Sci. Technol. Vol.47, No.1,pp70-83.

Atkinson, A.（1985）: The Time Dependence of pH within a Repository for Radioactive Waste Disposal, AERE11777.

Börgesson, L., Sandén, T., Fälth, B., Åkesson, M., Lindgren, E.（2005）: Studies of buffers behabior in KBS-3H concept Working during 2002-2004, SKB R-05-50.

Carlson, L., Karnland, O., Oversby, V.M., Rance, A.P., Smart, N.R., Snellman, M., Vähänen, M. and Werme, L.O.（2007）: Experimental Studies of the Interactions between Anaerobically Corroding Iron and Bentonite, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 32, 1-7, pp.334-345.

Cama, J. et al.（2000）: Smectite dissolution kinetics at 80℃ and pH8.8.,Geochimica et Cosmochimica Acta, 64, 2701-2716.

Christer Andersson, Åsa Johansson（2002）: Boring of full scale deposition holes at the Äspö Hard Rock Laboratory Operational experiences including boring performance and a work time analysis, TR-02-26, SKB.

電中研（電力中央研究所）・電事連（電気事業連合会）（1999）：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術.

電事連・JNC（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構）（2000）: TRU 廃棄物処分概念検討書.

電事連・JNC（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構）（2005）: TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ―，JNC TY1400 2005-013.

電力土木技術協会（1988）: 電力施設地下構造物の設計と施工.

土木学会（2006）: トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説.

土木学会（2009）: 余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方.

Ebert, W. L. Bates, J. K.（1991）: The Importance of Secondary Phases in Glass Corrosion, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 212, pp.89-97.

Fukushi, K., Sugiura, T., Morishita, T., Takahashi, Y., Hasebe, N., Ito, H., (2008): Iron-Bentonite Interactions found in the Kawasaki bentonite deposit, Zao area, Japan. Applied Geochemistry, 25, pp.1120-1132.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2001）: 平成 12 年度，高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書（第 2 分冊）－遠隔操作技術高度化調査－，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2002）: 平成 13 年度，高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書－遠隔操作技術高度化調査－(1/2)，経済産業省資源エネルギ

ー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2003a）：平成 14 年度　TRU 廃棄物関連処分技術調査―人口バリア長期性能各章試験―報告書，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2003b）：平成 14 年度　地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書(2/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2003c）：平成 14 年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査 報告書－遠隔操作技術高度化調査－(1/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2004a）：平成 15 年度，地層処分技術高度化調査等遠隔操作技術高度化調査報告書(1/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2004b）：平成 15 年度，地層処分技術高度化調査等遠隔操作技術高度化調査報告書(2/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2005）：平成 16 年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査 報告書（2/2），経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2007a）：原環センター2006 年度技術年報.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2007b）：平成 18 年度，地層処分技術調査等，遠隔操作技術高度化調査報告書－(1/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2008a）：平成 19 年度，地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第 1 分冊)－遠隔操作技術高度化開発－(1/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2008b）：平成 19 年度　管理型処分技術等委託費　地下空洞型処分施設性能確証試験報告書，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2008c）：平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発－遠隔操作技術高度化開発(2/2)－，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2009a）：平成 20 年度，地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第 1 分冊)－遠隔操作技術高度化開発－(1/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2009b）：平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発－人工バリア品質評価技術の開発－，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2009c）：平成 20 年度，地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第 1 分冊)－遠隔操作技術高度化開発－(2/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2010a）：平成 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費（地層処分実規模設備整備事業）報告書，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2010b）：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム工学要素技術高度化開発　報告書（第 1 分冊）―遠隔操作技術高度化開発―(2/2)，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2010c）：平成 21 年度　地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 2 分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（1/2），経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2010d）；平成 21 年度　地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－人工バリア品質確認技術の開発－（2/2），平成 22 年 3 月，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2010e）；平成 21 年度 核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分実規模設備整備事業) 報告書，平成 22 年 3 月，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2010f）；原環センターHP（http://www.rwmc.or.jp/）.

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2010g）：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費　TRU 廃棄物処分技術　人工バリア長期性能評価技術開発報告書(第 1 分冊)-人工バリアの長期挙動の評価-.

原燃（日本原燃株式会社）（2000）：会社案内，パンフレット，2000.08.

原子力安全委員会（2000）：高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）.

原子力安全委員会（2006）：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針.

原子力安全委員会（2010）：第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方.

原子力委員会（2006）：長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方－高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性－.

Gin, S., Mestre, J. P.（2001）：SON 68 nuclear glass alteration kinetics between pH 7 and pH 11.5," J. Nucl. Mater., 295, pp.83-96.

Grambow, B.（1987）：Nuclear Waste Glass Dissolution: Mechanism, Model and Application. Technical Report-JSS Project Phase IV 87-02.

Grambow, B.（1985）：A general rate equation for nuclear waste glass corrosion, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 44, pp.15-27.

Grambow, B., Müller, R.（2001）：First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment. J. Nucl. Mater. 298, pp.112–124.

林真紀, 笹本広, 吉川英樹 (2008)：ガラスの溶解に関するデータベースの改良　JAEA- DATA/Code 2008-008.

Huang, W., Longo, J. M., Pevear, D. R.（1993）：An Experimentally Derived Kinetic Model for Smectite-to-Illite Conversion and Its Use as a Geothermometer, Clays and Clay Minerals, Vol.41, No. 2, pp.162-177.

IAEA（International Atomic Energy Agency）（1996）：放射性物質安全輸送規則.

IAEA（International Atomic Energy Agency）(2006)：No. WS-R-4, Geological Disposal of Radioactive Waste.

IAEA（International Atomic Energy Agency）（2010）：DS-354,No.SSR-5,Disposal of Radioactive Waste.

Inagaki, Y., Furuya, H., Idemitsu, K., Yonezawa, S.（1994）: Corrosion behavior of a powdered simulated nuclear waste glass: A corrosion model including diŠusion process, J. Nucl. Mater., 208, pp.27.

稲垣八穂広，三ツ井誠一郎，牧野仁史，石黒勝彦，亀井玄人，河村和廣，前田敏克，上野健一，馬場恒孝，油井三和（2004）：高レベルガラス固化体の性能評価に関する研究ー現状と信頼性の向上にむけてー，原子力バックエンド研究，Vol.10，No.1-2，pp.69-83.

Inagaki, Y., Mitsui, S., Makigaki, H., Idemitsu, K., Arima, T., Banba, T., Noshita, K.（2009）: Measurement of HLW glass dissolution/alteration kinetics by using micro-reactor flow-through test method,Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, MRS.

Inagaki, Y., Makigaki, H., Mitsui, S., Idemitsu, K., Arima, T., Noshita, K.（2010）: Initial dissolution rate of P0798 simulated HLW glass as a function of pH and temperature measured by using micro-reactor flow-through test,American Ceramic Society, Glass and Optical Material Division,.

石川博久，柴田雅博，藤田朝雄（1994）：放射性廃棄物地層処分における緩衝材のイライト化変質シミュレーション，粘土科学，vol.34，pp.149-156.

Ishidera, T., Ueno, K., Kurosawa, S. and Suyama, T.（2007）: Investigation of Montmorillonite Alteration and Form of Iron Corrosion Products in Compacted Bentonite Being in Contact with Carbon Steel for Ten Years. Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, ANDRA, Lille, pp.269-270.

入矢桂史郎，三原守弘（2003）：ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発,コンクリート工学年次論文集,Vol.25 No.1 Page.185-190.

入矢桂史郎，中山雅，小西一寛，三原守弘（2006）：ポゾラン高含有低アルカリ性吹付けコンクリートの施工性,コンクリート工学年次論文集,Vol.28 No.1 Page.173-178.

Jegou, C., Gin, S., Larche, F.（2000）: Alteration kinetics of a simplified nuclear glass in an aqueous medium: EŠects of solution chemistry and of protective gel properties on diminishing the alteration rate, J. Nucl. Mater., 280, pp.216-229.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2008a）：幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究計画.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2008b）：平成 19 年度　地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2009a）：高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（その 1），JAEA Research 2008-112.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2009b）：高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（その 2），JAEA Research 2009-013.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2009c）：地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム科学影響評価高度化開発報告書.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2009d）：プレス発表「低アルカリ性セメントを用いた地下施設の本格的な施工に成功」，2009 年 10 月 15 日.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2010a）：COOL REP.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2010b）平成 21 年度　地層処分技術調査等委託費　高レベル放射性廃棄物処分関連　処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999a）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－，総論レポート，JNC TN1400 99-020.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999b）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－，分冊 2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（2005）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－，－分冊 2　工学技術の開発－．JNC TN1400 2005-015

海洋汚染・海上災害防止法研究会（1996）：海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律の解説

海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律（1972）

亀井玄人　ほか（2007）：TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発　平成 18 年度報告, JAEA-Research 2007-0671.

環境省（2003a）：ロンドン条約及びロンドン条約 96 年議定書の概要－中央環境審議会地球環境部会第 1 回海洋環境専門委員会　配付資料－.

環境省（2003b）：1972 年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約の 1996 年の議定書－中央環境審議会地球環境部会　第 1 回海洋環境専門委員会　配付資料－

経済産業省（経済産業省告示第 187 号）（2001）：実用発電用原子炉の設置，運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示.

経済産業省資源エネルギー庁，JAEA（日本原子力研究開発機構）（2007）：地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化－国の地層処分基盤研究開発の成果と今後の展開－

King, F., M. Kolar, and S. Stroes-Gascoyne（2002）：Theory manual for the microbiological copper corrosion model CCM-MIC.0.　Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report No: 06819-REP-01200-10091.

King, F., M. Kolar, and S. Stroes-Gascoyne（2003）: Preliminary simulations of the long-term activity of microbes in a deep geologic repository using CCM-MIC.0 and the implications for corrosion of copper containers.　Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report No: 06819-REP-01200-10116.

King, F., M. Kolar, S. Stroes-Gascoyne, and P. Maak（2004）: Model for the microbiological corrosion of copper containers in a deep geologic repository.　In Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, V.M. Oversby and L.O. Werme (eds.), Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 807 (Materials Research Society, Warrendale, PA), pps. 811-816.

Kohler, S.J. et al.（2003）：An experimental study of illite dissolution kinetics as a function of pH from 1.4 to 12.4 and temperature from 5 to 50℃,　Geochimica et Cosmochimica Acta, 67, 3383-3595.

Kozai, N., Adachi, Y., Kawamura, S., Inada, K., Kozaki, T., Sato, S., Ohashi, H., Ohnuki, T., Banba, T.（2001）：Characterization of Fe-Montmorillonite: A Stimulant of Buffer Materials Accommodating Overpack Corrosion Product, Nuclear Science and Technology, 38, 12, pp.1141-1143.

Kuwahara, Y.（2006）」In-situ AFM study of smectite dissolution under alkaline conditions at room temperature, Am.Miner., 91, 1142-1149.

Lantenois, S., Lanson, B., Muller, F., Bauer, A., Jullien, M. and Plançon, A.（2005）：Experimental Study of Smectite Interaction with Metal Fe at Low Temperature: 1. Smectite Destabilization, Clays and Clay Minerals, 53, 6, pp.597-612.

Lemmens, K., Iseghem, P. V.（1992）：The Long-term Dissolution Behaviour of the Pamela Borosilicate Glass

SM527 -Application of SA/V Accelerating Parameter, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 257, pp.49-56.

Little, B., P. Wagner and F. Mansfeld（1991）: Microbiologically influenced corrosion of metals and alloys. Int. Mater. Rev. 36, 253-272.

Manjanna, J., Kozaki, T., Kozai, N. and Sato, S.（2007） : A New Method for Fe(II)-Montmorillonite Preparation Using Fe(II)-Nitrilotriacetate Complex, Journal of Nuclear Science and Technology, 44, pp.929-932.

松本一浩，棚井憲治（2003）：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価(Ⅱ)，JNC TN8400 2003-006.

松本一浩，棚井憲治（2004）：緩衝材の流出／侵入特性，JNC TN8400 2003-035.

松本一浩，棚井憲治，菅野毅，岩田裕美子（2005）：拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析，JNC TN8400 2005-009.

松本一浩，棚井憲治（2008）：X 線 CT スキャナによる亀裂内侵入ベントナイトの密度測定に関する適用性，原子力バックエンド研究, Vol.15 No.1, pp.27-35.

松本一浩，棚井憲治（2010）：緩衝材の侵入現象モデルに関する適用性の確認，JAEA Research 2009-070.

Metz, M. et al.（2002）: Dependence of smectite dissolution rate on deviation from equilibrium., Geochimica et Cosmochimica Acta, 66/S1, A509.

三原守弘（1999）: ナトリウム型ベントナイトのカルシウム型化に伴う透水係数及び核種の実効拡散係数の変化，サイクル機構技法，08-1999-0267.

Mitsui, S., Aoki, R.（2001）: Effect of a siliceous additive on aqueous alteration of waste glass with engineered barrier materials, Journal of Nuclear Materials, 298, pp.184-191.

日本原子力学会（2010）: 地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特性～報告書,「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネージメント」特別専門委員会.

日本原子力学会：地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の機能と要件～報告書,「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネージメント」特別専門委員会（公開準備中）.

日本鉄道建設公団（1987）：渇水の調査及び対策に関する研究報告書.

日本トンネル技術協会（1983）：トンネル施工に伴う湧水，渇水に関する調査研究（その 2）報告書.

日本トンネル技術協会（2000）：TBM ハンドブック，2000 年 2 月.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2002）：処分場の概要，高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料－2.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004a）：概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠,「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料，NUMO-TR-04-02.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004b）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，NUMO-TR-04-01

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2006）：処分システムに求められる閉鎖性能の考え方，NUMO-TR-06-01.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中 a）：地層処分施設の耐震性評価.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中 b）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性，「処分場の概要」の説明資料.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中 c）：処分概念と技術オプションの整備.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中 d）：地層処分の要求機能と技術要件.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中e）：低アルカリセメントの適用性.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2010f）：NUMO-TR-10-02，地層処分技術開発ニーズの整理，～精密調査地区選定に向けて～.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中 g）：準備中

Oda, C.（2004）: An Analysis of Cement-Bentonite Interaction and Evolution of Pore Water Chemistry, Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, A3-74-79.

大島洋志, 高木盛男, 榎本秀明, 辻徹（1987）: 鉄道トンネルの湧水量実態調査，トンネルと地下，Vol. 18, No. 1，pp.43-49.

Pedersen K.（2000）: Microbial processes in radioactive waste disposal. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company Report, SKB TR 00-04.

酢谷佳尚，渡辺邦夫，佐久間秀樹，野口義文（1991）: 釜石鉱山におけるベンチレーションテストを用いた湧水量の測定，第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.182-186.

Sato, T. et al.（2004）: Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions., Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cemen Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, A3-38-41.

産業創造研究所（2005 9 ：バリア機能総合調査(バリアシステム放射線影響評価)，経済産業省資源エネルギー庁地層処分技術調査等委託費平成 16 年度成果報告書.

産業創造研究所（2006）: バリア機能総合調査(バリアシステム放射線影響評価)，経済産業省資源エネルギー庁地層処分技術調査等委託費平成 17 年度成果報告書.

産業創造研究所（2007）: バリア機能総合調査(バリアシステム放射線影響評価)，経済産業省資源エネルギー庁地層処分技術調査等委託費平成 18 年度成果報告書.

笹本広，陶山忠広（2009）: 鉄ーベントナイト反応に関わる実験的検討ー室温における10年程度の試験後試料の分析結果ー，JAEA-Research 2009-039.

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会（2008）: 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について.

Strachan, D. M., Croak, T. L.（2000）: Compositional effects on long-term dissolution of borosilicate Glass, Journal of Non-Crystalline Solids, 272, pp.22-33.

Strachan, D. M.（2001）: Glass dissolution: testing and modeling for long-term behavior, Journal of Nuclear Materials, 298, pp.69-77.

Stroes-Gascoyne, S. and F. King（2002）: Microbially influenced corrosion issues in high-level nuclear waste repositories. In Proc. CORROSION/02 Research Topical Symposia, (NACE International, Houston, TX).

陶山忠宏，上野健一，笹本 広（2008）：炭素鋼と10年間接していたベントナイトの変質挙動調査, JAEA-Data/Code 2008-007.

Takase, H.,（2004）: Discussion on PA model development for bentonaite barriers affected by chemical interaction with concrete: Do we have enough evidence to support bentonite stability?, Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, A3-107-112.

竹内忠之（1987）：青函トンネルの排水計画と設備概要．1987．ページ:51-61，鉄道と電気，Vol4, No.10.

棚井憲治，菊池広人，中村邦彦，田中幸久，廣永道彦（2010）：ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討－日本原子力研究開発機構／電力中央研究所共同研究成果報告－，JAEA-Research 2010-025.

田中幸久，中村邦彦（2005）: 質現象に関する最近の研究と今後の研究展開，粘土科学，vol.45，No.1，pp31-56. 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響とその評価，土木学会論文集，No.806，pp.93-111.

谷口直樹，川崎学，藤原和雄（2001）：ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオーバーパック材料の腐食への影響，JNC TN8400 2001-011.

谷口直樹，川上進，森田光男（2002）: ベントナイト／ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件，核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2001-025.

谷口直樹，川崎学，内藤守正（2009）: 緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討－Ⅱ,－10年間浸漬試料の腐食生成物分析結果－, JAEA–Research 2008-108.

東京電力（2008）：平成 19 年新潟県中越沖地震を踏まえた柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の策定について，原子力安全委員会，耐震安全評価特別委員会，第 7 回会合，第 7-2-2 号.

植田浩義，兵藤英明，鈴木覚，廣永道彦，山本武志，西田孝弘，西内達郎，杉山大輔（2008）: 低アルカリ性セメントの処分場における長期適用性に関する検討, NUMO-TR-08-02.

上野健一，笹本広，陶山忠宏（2008）: 緩衝材長期安定性に関する概略的評価 －鉄－ベントナイトの相互作用に関わる影響評価－ JAEA-Research 2008-073.

Umeki H., Sakabe Y., Ueda H., Takahashi Y., McKinley I. G., Takase H., Shimbo H., and Ijiri Y.（2004）: Managing uncertainty on site characteristics for the design of a high-level radioactive waste repository, 3rd Asian Rock Mechanics Symposium“Contribution of Rock Mechanics to the New Century”November 30 – December 2, 2004, Kyoto, Japan.

U. S. DOE（2004）: Compliance Recertification Application. Rapport DOE/WIPP 04-3231

Vernaz, E., Gin, S., Jegou, C., Ribet, I.（2001）: Present understanding of R7T7 glass alteration kinetics and their impact on long-term behavior modeling, J. Nucl. Mater., 298, pp.27-36.

Wersin, P., M. Birgersson, M., Snellman, M (2007) : Impact of iron on the bentonite buffer wirhin the KBS-3H disposal concept: results from reactive transport modeling, 3rd International Meeting in Lille "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement" French National Agency for Radioactive Waste Management (ANDRA) Lille, France.

第７章
地層処分システムの
長期安全性評価技術

第7章　目次

第7章 地層処分システムの長期安全性評価技術 7-1
7.1 基本的考え方 7-2
7.1.1 セーフティケースへの反映 7-2
7.1.2 地質環境の調査・評価および処分場の設計との連携 7-4
7.1.3 不確実性への対応 7-8
7.2 安全評価の進め方 7-12
7.2.1 基本的手順 7-12
7.2.2 シナリオ構築のアプローチ 7-14
7.2.3 モデル開発とデータセットの整備 7-21
7.3 安全評価を支える技術の整備 7-34
7.3.1 安全評価に関する技術開発 7-34
7.3.2 シナリオ開発に関する取り組み 7-39
7.3.3 核種移行解析モデル開発に関する取り組み 7-72
7.3.4 核種移行パラメータ設定に関する取り組み 7-92
7.3.5 今後の課題 7-94
7.4 まとめ 7-95

第7章　地層処分システムの長期安全性評価技術

第5章では，長期安定性と地質環境特性をどのように評価していくかについて，第6章では，放射性廃棄物の特性や地質環境特性を考慮して設計される施設・設備を地層処分事業としてどのように実現していくかについて示した。本章では，第5章，第6章の記述内容に基づき具体化されるシステムの構成を与条件として，閉鎖後長期の安全性評価（以下，安全評価という）をどのように実施していくかについて述べる。

本章は，四つの節から構成されている。7.1では，地層処分事業の特徴を踏まえた安全評価の基本的な考え方について述べる。そして，7.2では，基本的な考え方に基づく安全評価の具体的な方法論を概括的に示す。さらに，7.3では，2000年以降，基盤研究開発機関およびNUMOが取り組んできた安全評価に関する重要な技術開発成果について概説し，今後の課題について述べる。そして，7.4では，本章のまとめについて記述する。

7.1　基本的考え方

本節では，地層処分事業の特徴を踏まえた安全評価の基本的な考え方について述べる。

第２次取りまとめにおいては，高レベル放射性廃棄物を対象として，地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法を開発し，具体的なサイトを特定せず，わが国の一般的な地質環境の条件を想定してシステムの安全性を総合的に評価した（JNC，1999a；1999b）。一方，第 2 次 TRU レポートにおいては，第２次取りまとめの地質環境条件に基づき，地層処分低レベル放射性廃棄物を対象として，システムの安全性を総合的に評価した（電事連・JNC，2005a；2005b）。この結果，高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物が人間に及ぼすと想定される影響は，諸外国で提案されている安全基準に示された防護レベルを下回ることが確認された。また，適切なサイト選定や調査がなされ，それに基づいて処分場の設計がなされることにより，わが国の幅広い岩種や水理地質学的条件においても処分の安全性を確保できる見通しが得られている。

一方，事業段階においては，サイト選定の進展に応じて，地層処分事業を進めるためのさまざまな意思決定が段階的に行われることから，その都度適切に閉鎖後長期安全性に係る論拠を取りまとめていくことが求められる。このためには，文献調査，概要調査，精密調査と進む過程で，詳細化されるサイトの地質環境特性や処分場の設計に応じた安全評価を行うとともに，評価結果の信頼性向上に関する議論や次段階以降で必要となる課題や対策を明らかにしていく必要がある。従って，事業の進展に応じて閉鎖後長期安全性を評価していくためには，以下の点に配慮することが重要と考える。

- セーフティケースへの反映
- 地質環境の調査・評価および処分場の設計との連携
- 不確実性への対応

以下では，これらの項目に対する基本的な考え方を示す。この基本的な考え方は，高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物のいずれについても共通に適用されるものであり，廃棄物や処分概念の特徴および事業段階に応じて具体化されることとなる。

7.1.1　セーフティケースへの反映

3章で述べたように，近年，安全評価は，セーフティケースの枠組みの中でとらえられており，その傾向が国際的に幅広く受け入れられている。例えば，OECD/NEAにおいては，「セーフティケースは，処分場開発計画のある段階において，処分場の閉鎖後長期安全性を支持するための論拠を収集したものである。セーフティケースは安全評価の結果とそれに対する信頼性の記述を含む。また，未解決の課題に言及し，将来の段階でこれらを解決するための作業方針を明示することが必要である。」と定義されている（OECD/NEA，2004a）。

NUMOは，上述の動向を踏まえつつ，事業の進展に伴って蓄積される情報や最新の科学的知見も取り込むことにより，信頼性の評価と強化を反復的に進める必要がある。

以下に，セーフティケースへの反映を念頭に，安全評価を実施するための進め方を示す。また，図7.1.1-1に概略的なフローを示す。

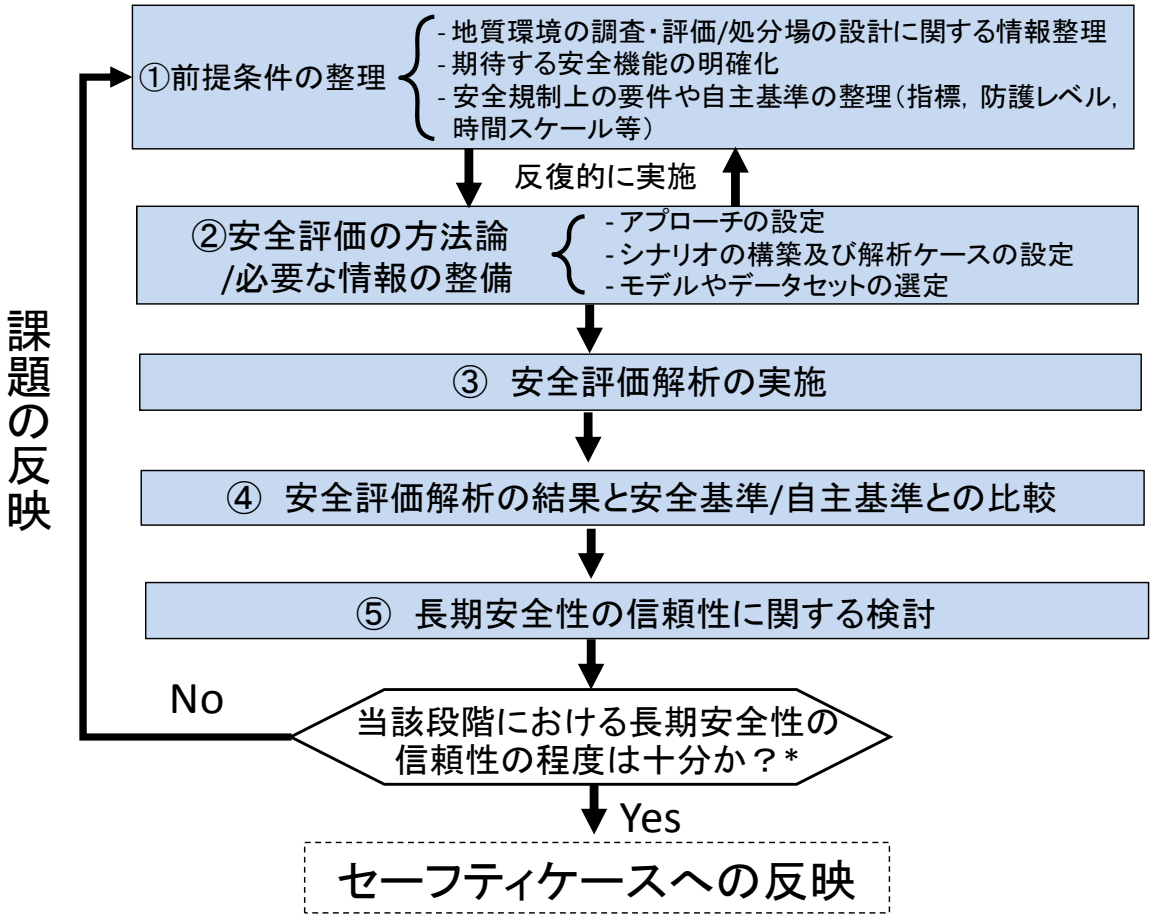


図 7.1.1-1　セーフティケースへの反映に向けた安全評価の進め方
（NUMO，2004 に基づき作成）

①では，前提条件として，その段階における地質環境や処分場の設計について不確実性を含めて整理するとともに，それらを与条件とした場合に期待する安全機能を明確化する。さらには，安全規制上の要件や自主基準についても整理する。

②では，まず，安全評価のアプローチ（目的や不確実性の取り扱いなど）を設定する。その上で，安全規制上の要件などを考慮しつつ，シナリオの構築および解析ケースの設定を行うとともに，モデルやデータセットの選定を行う。これにより，安全評価を実施する上で必要となる情報を整理する。

③では，②の段階にて行う整理に基づき安全評価（解析）を行う。

④では，安全評価の結果と，安全基準あるいは自主基準との比較を行い，長期安全性の見通しについて検討する。

⑤では，閉鎖後長期の安全性の信頼性を向上させるため，OECD/NEAによって提案されている論点（OECD/NEA，2002：表 7.1.1-1）などを参考にしつつ，多面的な観点から長期安全性の信頼性に関する検討を行う（多面的な議論）。なお，これらの多面的な議論は，セーフティケースの重要な構成要素であり，事業の各段階において得られるサイトの地質環境特性などの特徴に沿って，長期安全性に関する信頼性を向上させていくことが重要である。

当該段階において，長期安全性の信頼性の程度が十分と判断された場合には，安全評価の結果と信頼性に関する記述および次段階以降における課題とその対策などを取りまとめていく。一方，長

期安全性の信頼性の程度が十分ではないと判断された場合には，必要に応じて，不確実性の低減や性能向上に向けた課題を明確にした上で，地質環境の調査・評価や処分場の設計にフィードバックする。

上記で示した考え方は，一般的なものであり，具体的な作業は事業の進展に応じて変化することが想定されるものの，セーフティケースの作成に向けて，長期安全性評価を進めるための出発点として用いることができると考える。

表 7.1.1-1 地層処分の信頼性に関する重要な論点（OECD/NEA，2002 を和訳）

地層処分システム自体の信頼性	・多重バリアシステムの本質的な頑健性 ・一部の安全機能が損なわれることを仮想的に想定したシナリオおよび関連する計算結果 ・よく知られた他のシステムの事例やナチュラルアナログとの比較
地層処分システムに関するデータや知識の信頼性	・研究プログラムやサイト調査の品質 ・品質管理体制 ・多様なソースや取得方法に基づくデータ ・形式に則ったデータトラッキング手法の使用
アプローチの信頼性	・論理的であり，明快かつ体系的な評価アプローチ ・監査することが可能なフレームワークのもとでの評価の実施 ・反復的な実施による理解の改善 ・独立した専門家によるレビュー
評価モデルの信頼性	・評価結果と直感的な理解との整合性 ・代替的な概念モデルや評価アプローチの考察 ・実験結果や自然の観察との比較によるモデルの妥当性の検討 ・複数のモデルの相互比較 ・ナチュラルアナログとの比較 ・古水理地質学的（Paleohydrogeological）情報などの独立した証拠
セーフティケースおよび評価の信頼性	・解析上の仮定に関する明確な記述及び根拠の説明 ・仮定の蓋然性あるいは保守性についての論証 ・感度解析 ・不確実性の取り扱いと低減方法についての明確な対策 ・多様な安全指標の使用 ・解析結果の妥当性に関する多様な理由づけ
設計やサイト調査へのフィードバックによる信頼性向上	・処分概念や仕様変更の根拠 ・処分システムの全体的な品質及び安全性

7.1.2 地質環境の調査・評価および処分場の設計との連携

閉鎖後長期安全性に関する信頼性の評価は，安全評価のみならずサイト選定や処分場の設計などを含めた多様な視点から論じることが重要である（例えば，OECD/NEA，2004a）。

そこで，地層処分事業における安全評価においては，閉鎖後長期の安全性の信頼性を段階的に向上させるという観点から，地質環境の調査・評価，適切な処分場の設計を密接に連携させつつ反復的に実施することが重要となる。すなわち，段階が進むに連れて，以下の三つの点を同時に考慮し，信頼性を向上させていくこととなる。

- 地質環境の理解の深化と不確実性の定量化（低減する場合もある）
- 地質環境の理解に基づく処分場設計の具体化
- 安全評価の精度の向上

安全評価においては，図 7.1.1-1で示したように，基本的な流れは各段階で共通的なものであるものの，事業全体としての主要な実施事項や入手可能な情報の制約に応じて，各段階において力点を置くポイントや連携の在り方（情報の授受など）が変化するものと考えられる。

上記の内容を踏まえ，文献調査，概要調査，精密調査における自然過程シナリオを例として，地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携した各段階における安全評価の主要な実施項目を図7.1.2-1に示す。

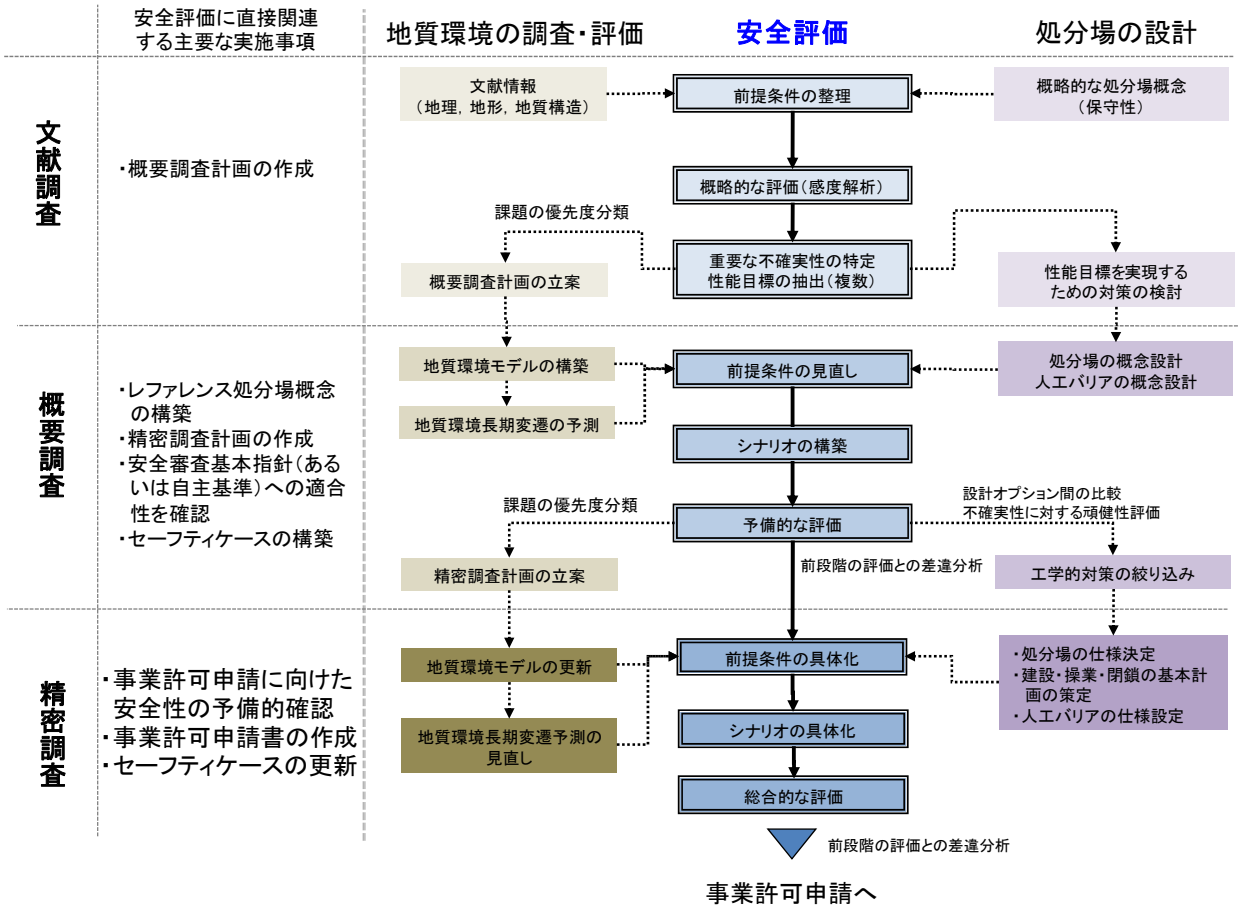


図 7.1.2-1　地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携した安全評価の主要な実施項目（自然過程シナリオを対象とした例）

以下では，安全評価に関連する入手可能な情報の制約について述べた後，それらを踏まえた各段階における安全評価の役割について記述する。なお，安全評価とは，地層処分システム全体が有する機能について解析した結果を指針や適切な基準と比較し，長期安全性を判断することを意味する。一方，性能評価とは，地層処分システム全体あるいはその要素である個別システムが有する機能について解析した結果を適切な基準と比較し，その性能を判断することを意味する（JAEA，2010b）。この際，解析の対象が地層処分システム全体で，比較の基準が安全性にかかわるものである場合には，安全評価と性能評価は同義になる（JAEA，2010b）。このため，本報告書では，各事業段階で比較対象とすべき指針や基準が明確化されていないことから，明確な使い分けをしないこととして，安全評価と表現することとする。但し，調査の初期段階（例えば，文献調査の段階や概要調査の段

階）においては，地質環境の情報に関する不確実性が大きいと考えられることから，安全評価というより，むしろ，性能評価という意味合いが強いことに留意する必要がある。

7.1.2.1　概要調査地区選定段階（文献調査の段階）における安全評価の役割

初期の段階における安全評価の目的は，後の段階において，研究開発や地質環境の調査・評価，処分場の設計の最適化などの対策を取ることにより安全評価の不確実性が低減あるいは緩和され，基準値を満足することについての見通しを示すことに重点を置くべきであると考えられている（OECD/NEA，2002：OECD/NEA，2004a：IAEA，2006）。

概要調査地区選定段階（文献調査の段階）においては，一般的に，地理，地形，地質構造といった情報が入手可能と考えられるものの，地質環境の情報に関しては限定的であり不確実性を避けることはできない。また，処分場の設計も，地質環境の不確実性に対応できるようジェネリックで保守性を重視したものであると考えられる。このため，この段階における安全評価としては，前提条件の整理に反映するという観点から，既存のシステム性能評価モデルを活用した感度解析が有効なアプローチの一つであると考えられる。この感度解析においては，入手可能な情報の制約，文献データのばらつき，処分場の設計に関する複数の選択肢などを考慮して，入力パラメータの範囲を保守的に幅広く設定することが必要になると考えられる。このような条件に基づく感度解析により，例えば，評価結果に及ぼす影響が大きいパラメータや任意の性能目標値を満足するためのパラメータの組み合わせ（定量的な十分条件）を抽出することが可能である（例えば，JNC，1999a，1999b，2005；電事連・JNC，2005a）。なお，前述したように，本段階における感度解析の結果は，前提条件の整理（安全機能との関連付け）に反映することを目的としているものであることに留意しなければならない。

評価結果に及ぼす影響が大きいパラメータの種類は，不確実性を効果的に低減するため，優先的に取り組むべき課題を判断する際に有益な情報である。一方，定量的な十分条件については，各安全機能にどの程度の性能を期待するか（性能割り当て）の選択肢を整理し，各選択肢に対する課題と対策を具体化する際の有益な情報である。この際，定量的な十分条件は，前提条件に大きく依存するものであることに加え，安全機能の多重性やシステムの頑健性により複数の候補が存在し，あくまで十分条件であることに留意する必要がある。

これらの整理に基づき，地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携しながら閉鎖後の安全確保の考え方を具体的に策定し，概要調査計画の立案に反映していく。

以下に文献調査における安全評価の役割についてまとめる。

- 次段階以降の地質環境の調査･評価や処分場の設計によって不確実性を効果的に低減するための課題の優先度分類に資するため，不確実性が評価結果に与える影響が大きいパラメータを抽出すること
- 性能割り当ての選択肢や関連する課題の具体化に反映させるため，定量的な十分条件を複数抽出すること

7.1.2.2　精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における安全評価の役割

この段階における主要な実施事項のうち，安全評価にかかわる事項は，レファレンス処分場概念の構築，精密調査計画の作成，安全審査基本指針への適合性確認，セーフティケースの構築である。以下では，これらの実施事項を踏まえ，得られる情報の種類や量について述べた後，概要調査段階

における安全評価の役割について論じる。

本段階においては，文献調査で得られた情報に加え，地上からの調査（地質踏査，物理探査，ボーリング調査等）により，地質環境特性に関する情報として，透水性や亀裂頻度などの知見が拡充される。これらの知見に基づき，安全評価へのインプットとして，地質環境モデルが構築される。さらには，対象とする岩盤の長期安定性に関する知見が充実することから，地質環境の長期変遷についても予測される。また，処分場の設計においては，地質環境モデルに基づき，地下施設と人工バリアの概念設計（基本レイアウトや人工バリア材料の選定など）が行われる。

以上を踏まえ，安全評価においては，地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携しつつ，前提条件を再整理することとなる。この際，前提条件には，地質環境特性に応じた複数の処分場の設計が想定される。そこで，処分場の設計の絞り込みのためには，設定された前提条件に基づくシナリオの策定や予備的な評価を行い，各選択肢に対して期待できるシステムの性能を定量的に把握することが重要となる。また，概要調査地区選定段階（文献調査の段階）と同様に，地質環境特性と絞り込まれた処分場の設計に基づき，不確実性の影響が大きいパラメータを抽出し，精密調査計画に反映することも重要である。さらには，このような定量的な解析に加えて，表 7.1.1-1などを参考として安全性の信頼性に関する検討を行い，この段階における安全評価の信頼性を向上させる必要がある。そして，安全評価の結果と信頼性，および，次段階以降の課題とその対策を取りまとめていく。

以下に，上述の内容を踏まえた精密調査地区選定段階（概要調査の段階）における安全評価の役割についてまとめる。

- 可能性があるすべての処分場概念に対して予備的な安全評価を行うことにより，安全審査基本指針（あるいは自主基準）への適合性を確認するとともに，閉鎖後長期の安全性の見通しを得ること
- 処分場の設計の絞り込みに資するため，地下施設のレイアウトや人工バリア設計などに関するオプション間の比較を閉鎖後長期の安全性の観点から行うこと
- 処分施設建設地選定段階(精密調査の段階)で作成する地質環境モデルの更新に反映させるため，閉鎖後長期の安全性を確保するために重要な地質環境の特徴や条件を抽出すること
- 関連する試験研究などを効果的に推進するために，閉鎖後長期の安全性の観点から重要な安全評価モデル・パラメータを特定すること

7.1.2.3　精密調査段階における安全評価の役割

この段階における主要な実施事項のうち，安全評価にかかわる主要な事項は，事業許可申請に向けた安全性の予備的確認，事業許可申請書の作成，セーフティケースの更新である。以下では，これらの実施事項を踏まえ，追加される情報の種類や量について述べた後，精密調査段階における安全評価の役割について論じる。

処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）においては，地下調査施設を用いた詳細な調査により坑道スケールでの知見が拡充されることから，地質環境モデルや地質環境長期変遷の予測が更新されることとなる。また，前段階で絞り込まれた処分場の設計に基づき，地下施設や人工バリアの仕様が決定されるとともに，建設・操業・閉鎖の基本計画が具体化されることとなる。

安全評価においては，これらを与条件として，地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携しつつ，前提条件の見直しを行うこととなる。そして，見直された前提条件に基づき，拡充された

知見を取り込んだ安全評価を行い，安全性に対する信頼性を向上させる必要がある。また，安全評価結果に加えて，安全性の信頼性に関する検討を行い，安全審査に向けてすべての論拠を統合する必要がある。

以上を踏まえ，精密調査段階で行う安全評価の中心的な役割は以下の通りである。

- 地下調査施設での取得データを加えて，安全審査に向けた処分場の安全性にかかわるすべての論拠を統合し，総合的な評価とその信頼性の評価を実施すること。

7.1.3　不確実性への対応

本項では，不確実性への対応として，不確実性管理と品質管理の考え方について述べる。

7.1.3.1　不確実性管理

(1)　安全評価における不確実性

システムの安全機能は，適切なサイト選定と工学的対策によって確保されるものである。しかしながら，地質環境の調査・評価は不均質で広い天然の岩盤を対象としたものであるため，安全評価結果には不確実性が伴う。また，地層処分で考慮するような長期間の時間スケールに対して，現在の地質環境が将来どのように変遷するかについても不確実性が伴う。なお，近年，これらに加えて，建設時の対策がシステムの閉鎖後の状態に与える影響も重要視されてきている（ANDRA，2005；SKB, 2006）。システムの閉鎖後の状態を設定する際には，操業安全などにかかわる対策の影響を，熱，力学，水理学，化学といった条件に関する擾乱として考慮することが必要となる。これにより，閉鎖前の安全性と閉鎖後長期の安全性を適切に両立させることが重要となる。

安全評価においては，期待する安全機能を前提としつつ不確実性に配慮することが必要である。安全評価における不確実性は，一般的に，シナリオに関する不確実性，モデルに関する不確実性，パラメータに関する不確実性の三つに分類されている（例えば，ICRP，2000；OECD/NEA，1997，1999；IAEA，2003a）。これらの不確実性は，上述の時間／空間スケールに加え，そこで起こり得る現象の複雑さや知識の限界などに起因するものである。安全評価の信頼性を向上させるためには，これら不確実性の個々の要因を特定し，その特徴に応じた対策を採ることが重要となる。

(2)　不確実性への対策

NUMO においては，上述の不確実性に対して，不確実性要因の抽出，重要度分類，重要な不確実性の影響低減策，および，残された不確実性の取り扱いという四つの手順を通じて対処することが必要と考える。以下では，不確実性への対策の考え方について述べる。

不確実性の抽出：

安全評価においては，地質環境の調査・評価および処分場の設計より得られる情報（ボーリング調査の結果など）に基づいて，それらをシナリオ，モデル，パラメータの不確実性として適切に取り込むことが必要となる。このため，得られる情報からシナリオ，モデル，パラメータ設定に至る判断過程（解釈，選択，アナロジー，内外挿など）を可能な限り明らかにし，不確実性要因を選択肢として整理する。具体的な整理方法としては，ロジックツリー（CRIEPI，2005）などが考えられる。

不確実性の重要度分類：

抽出されたそれぞれの不確実性要因は，シナリオやモデルあるいはパラメータ値についての複数

の選択肢の存在として整理される。安全評価に関する不確実性には多様なものが含まれ，整理された選択肢のすべてについて同様の取り扱いをすることは合理的ではないと考えられる。

そこで，まず，専門家による定性的な検討および安全評価結果への影響の大きさに関する定量的な検討を通じて，不確実性に対する重要度分類を行う。

不確実性の低減策：

重要度が高いと判断される不確実性要因については，低減するための対策を講じる。このような対策は，基盤研究開発，地質環境の調査・評価および処分場設計との連携において横断的に検討されるべきものである。また，対策を講ずることの可能な時期も種々に異なることから，事業の段階と対応付けて適切に計画することが重要と考えられる。例えば，サイト調査の結果に不確実性が含まれ，その影響として安全評価結果が左右される場合，以下のように複数の対策を考えることができる。

- 次段階のサイト調査によってデータや情報を拡充し，情報不足に起因する不確実性を低減する
- 工学的対策（深度やレイアウトの変更）により，不確実性の影響を避けるあるいは低減する

これらの対策を判断する際には，効果の見通しや工程なども含めた総合的な検討が必要である。

残された不確実性の取り扱い：

それぞれの不確実性要因について，低減するための対策が講じられず，その影響を完全に排除することは困難となり，不確実性な状況も想定される。このため，残された不確実性を考慮した上で，合理的な範囲における保守性を見込んで，シナリオ，モデルおよびパラメータ値をそれぞれ設定することが必要となる。

7.1.3.2　信頼性向上に向けた品質保証

安全評価の結果が妥当なものとして受け入れられるために，以下の点が綿密に検討されていることを示す必要がある。

- シナリオは過不足なく定義されているか，
- 評価の目的に照らし個々のモデルやコード，データは十分に妥当性が検討されているか，
- これらを組み合わせたシステム全体の解析の手順や数値計算は正しく実行されているか，

安全評価において，信頼性向上の観点から重要な点は，関連する作業について透明性と追跡性が確保されることである。

そこで，安全評価に関する包括的な品質管理体系を準備することは有効である。また，安全評価においては，多くの知見が統合され，シナリオ，モデル，パラメータとして取り込まれることから，その統合過程や判断過程について追跡できるようにしておくことが重要となる。このため，SKB においては，SR-Can 運営文書と呼ばれる一連の品質マネジメント計画書が用意されている（SKB, 2006）。また，CRIEPI においては，専門家判断の不確実性を考慮しつつ，シナリオ，モデル，パラメータに対する追跡性と説明性を保持しながら評価計算を実施する手法が検討されている（CRIEPI, 2005）。

また，第三者によるピアレビューは，安全評価の品質保証のための重要な方法である。ピアレビューについては，規制機関によるレビュー（例えば，USNRC，2003）に加え，日本原子力学会などの外部の独立した機関や国際機関によるレビュー（例えば，OECD/NEA，2000c: OECD/NEA，2004b）

により，その信頼性を確保しておくことが肝要である。さらには，国際的に合意された一般的な方法論や知見（OECD/NEA，1991b ; OECD/NEA，2000b）に加え，最新の動向（例えば，Ebashi et al., 2010）を適切に反映することも肝要である。また，安全評価の結果を，諸外国の評価結果と相互比較を行うことにより，類似点や相違点を明らかにすることも有効な方法である。

以下では，シナリオ，モデル，データセットの作成について，追跡性と透明性を確保するための主な対策について記述する。

シナリオの作成に関しては，前述のように，過不足なく定義されているかを確認することが重要である。このためには，国際的な FEP リストや国内外の安全評価事例（例えば，OECD/NEA，2000b ; JNC, 1999c ; 電事連・JNC, 2005a ; SKB, 2006）を起点とすることが対策の一つである。また，シナリオ構築に至る一連の方法論（OECD/NEA，2001）がなされており，これらは追跡性と透明性確保の観点から有効な対策である。

モデル開発については，モデル開発の一般的な手順に含まる検証および確証を適切に行うことが重要となる。また，開発されたモデルについて，過去の使用実績や検証結果の有無から分類しておき，その分類に応じて解析モデルの品質情報を整理しておくことも重要である。これらの対策によって，モデル化の対象となる個々の現象の理解や概念モデルの作成，さらに数学モデルや計算モデルの各作成過程で生じる過誤，あるいはモデルに対応したデータ取得／設定の過程で生じる過誤についても対処することができる。

データセットについては，調査や実験などから得られた生データに基づき，実際の地質環境特性を考慮した補正や保守性といった観点から設定することとなる。追跡性や透明性といった観点からは，以下の点に配慮することが重要である。

- 実際のサイトで実施する地質環境の調査・評価や処分場の設計によって得られる信頼性の高いデータを使用すること
- 類似条件で取得されたデータや信頼性の高い既存のデータベース（例えば，収着データベース）を用いた比較検討を行い，データのばらつきの範囲を推定すること
- 一連の作業過程や判断過程を適切に記録しておくこと
- データセットに含まれる残された不確実性を整理し，対策と重要度分類を行うこと
- 外部の専門家のレビューを受けること

影響解析については，解析ケースに対応した一連の計算作業においても，個々の評価モデルの計算において誤ったデータを用いる，あるいは，あるモデルの計算結果をほかのモデルの計算に誤って受け渡すといった過誤が生ずる可能性が考えられる。このような過誤に関しては，例えば個々の安全評価モデルやデータセットに固有の記号を付し，シナリオに沿った解析ケースごとに用いるモデルやデータセットを一つのシートに記録するといった方法が挙げられる。第２次取りまとめでは，コードやデータを用いた安全評価解析作業において，入力データの管理，解析手順（内容）の管理，解析結果の管理を適切に行うための計算機システムが開発された（Neyama et al., 1998）。また，Nagra では，こうした性能評価解析におけるデータセット管理のための定型化された方法（マニュアル）を導入している（Nagra，2002）。NUMO においては，これらの対策を参考としつつ，安全評価にかかわる品質保証に取り組み，安全評価の信頼性を向上させていくことが重要と考える。NUMO は，このような取り組みとして，例えば，サイトの地質環境特性に応じて処分場の設計や安全評価を体系的かつ効率的に実施するため，計算機支援型の処分場概念構築システムを開発している（NUMO,

2004)。このシステムでは，入力情報を履歴データベースとして管理することにより，解析の再現性や用いたモデル，データの追跡性を確保できるようになっている。

一方，事業において安全評価を適切に行う際には，これまでに述べたモデルやデータセットといったリソースに加えて，これらを問題に応じて適切に活用するための知識が必要となる。このため，相互比較や検証などを通じてモデルやデータセットに対する品質管理とともに，関連する知識についても体系的な品質管理を行うことが必要となる。さらには，知識の不足に起因する不確実性がどこに含まれているのかを明らかにし，安全評価のそれぞれの作業においてどのように不確実性が伝播するのかを記録・管理することが重要となる。JAEA は，このような目的のために地層処分知識マネジメントシステム（KMS）の開発を進めている（JAEA，2010b)。NUMO としては，他の関連機関を含めて地層処分に関する情報がこのシステムに格納されることにより，リソースと知識の管理を進めることが期待できると考える。安全評価に関しては，特に，性能評価統合レポートシステム（PAIRS）が開発されている（JAEA，2010b)。このシステムは，「安全評価に用いるリソース」と「リソースを正しく適用するための知識」とを電子報告書という媒体を通じて有機的に結合したものであり，安全解析においてパターン化することの可能な作業を自動化したものである。これにより，事業の進展に伴って更新される情報や最新の知見が安全評価結果に与える影響を把握する場合に，人的ミスの可能性を低減するとともに，作業の追跡性を確保しながら安全評価を効率的に実施することが可能になると考える。

7.2　安全評価の進め方

本節では，地層処分事業の特徴を考慮した安全評価の具体的な進め方について述べる。

7.2.1　基本的手順

地層処分の安全評価が，通常の工学システムの評価と大きく異なる点は，極めて長い時間スケールを考慮しなければならないこと，および天然の地層という不均質で大きな空間領域を有するシステム要素を含むことである。このため，従来の工学技術のように，システムを実際に作ってその挙動を確かめ，設計にフィードバックしながら最適化を図り安全性を実証するという直接的な方法を取ることができない（OECD/NEA，1983）。

これらの点を考慮した安全評価については，各国での研究や経験をベースとした国際機関のプロジェクトにおいて議論が重ねられ，一般的な方法論が確立されている（IAEA，1995 : OECD/NEA，1991a，1991b，1997，2000c，2002a，2004a）。

一般的な方法論に沿った安全評価の基本的手順は，まず，サイトに対する地質環境の調査・評価と処分場の設計に基づきシステムを設定する。そして，設定したシステムの安全機能を明確にするとともに，想定されるシステムの将来挙動を記述し，システムの理解を深める。これを念頭に，シナリオ構築，モデル開発，パラメータ設定，影響解析が実施されることなる。

NUMO が各段階で実施する安全評価についても，この基本的手順に沿って進めるものの，廃棄体や処分概念の特徴も踏まえつつ，以下の目的を考慮することが重要と考える。

- 解析結果を安全規制上の指針や基準と比較し，安全基準の遵守を確認すること（安全基準遵守の確認）
- 閉鎖後長期の安全性を主張するため，仮想的な状況を考慮した解析を行い，システムの頑健性を確認すること（頑健性の例証）
- 処分場の設計の最適化に資する情報を提供すること（設計オプション間の比較）
- 重要な地質環境の情報を特定すること（重要な不確実性の特定）

特に，地層処分低レベル放射性廃棄物については，高レベル放射性廃棄物に比べて放射能量が少ないものの，廃棄物の種類が多様であることや，多様な廃棄物に含まれる物質がバリア材料に与える影響などを考慮する必要がある。第 2 次 TRU レポートでは，これらの点を考慮した上で，レファレンスケースの解析結果が諸外国で提案されている防護レベルを下回ることが示されるとともに，地質環境特性の変動が安全評価結果に大きな影響を与える可能性があることが示されている。そのため，幅広い地質環境特性に対する地層処分システムの頑健性を確保させる必要がある。そこで，地層処分低レベル放射性廃棄物に対する安全評価においては，上述の基本的手順に沿って進められるものの，処分概念を合理的に高度化するため，システムの応答の仕組みを予め把握するための感度解析を重視したアプローチを採用している（NUMO，準備中）。

影響解析の方法には，決定論的な方法と統計論的な方法とがある。決定論的方法では，各解析ケースに対して，一つのパラメータに一つの値を設定して解析が行われる。この方法の長所としては，個々の不確実性の取り扱いと解析結果との対応が分かりやすいこと，短所としては，考慮すべき不確実性の組み合わせが網羅的であるか否かの確認が困難であることなどがある。一方，統計論的な方法では，パラメータの不確実性を幅あるいは分布として表現し，種々のパラメータ値の組み合わ

せに対して繰り返し計算が行われ，解析結果についても幅あるいは分布として評価を行われる。この方法の長所としては,パラメータの不確実性の組み合わせを網羅的に把握することができること，短所としては，パラメータの幅あるいは分布の設定やパラメータ間の相関関係を考慮した組み合わせ方が問題となることである。NUMO においては，決定論的な方法と統計論的な方法を，安全評価の目的や用途に応じて，相互補完的に組み合わせて用いていくことが重要と考える。

また，影響解析においては，すべての不確実性やそれらの組み合わせを考慮した解析を行うのではなく，以下のような考え方に基づいて不確実性を取り扱い，事象の蓋然性（起こりやすさ）や包括性（ある事象の影響の程度が別の事象の影響の程度に包含されること）などを考慮して，安全評価上考慮すべき不確実性を合理的に設定することが重要と考える。

- 地質環境の調査・評価と処分場の設計において不確実性を考慮した上で対策が取られることから，過度に保守的な不確実性の組み合わせを考慮しないことを基本的な考え方とする。但し，頑健性の例証や設計オプション間の比較という目的に照らして，一部の安全機能やその性能に焦点を当て，あえて非現実的な想定を考慮する場合もある。
- 専門家の判断や感度解析などにより影響が大きいと判断された不確実性のうち，その影響を完全に排除できないものについては，安全評価上，合理的な範囲における保守性を見込んで取り扱うこととする。

次項以降では，安全評価手順のうち，シナリオ構築，モデル開発，パラメータ設定に関する具体的な進め方について述べる。

7.2.2　シナリオ構築のアプローチ

安全評価におけるシナリオは，サイト調査・評価および工学的対策に基づいて設定される地層処分システムの将来挙動を記述したものであり，安全評価の出発点となるものである。本項では，シナリオ構築の方法論について，検討事例を含めて述べる。

シナリオ構築における主な留意点として，国際的に以下の点が合意されている（OECD/NEA，2001）。

- 可能性のあるすべてのシナリオを列挙することは不可能であることから，重大な抜け落ちがないように合理的な十分性を目指すことが肝要であること
- 評価に必要な情報の統合に加え，不足している知見の明確化が重要であること
- シナリオの構築過程や判断過程について透明性があり，方法や結果を追跡できること
- シナリオ解析は，さまざまなステークホルダー（科学的専門家，安全規制側，国民など）とのインターフェイスとなりうること
- 研究開発の優先度，データ取得，資金の配分にかかわる意志決定に資すること

第２次取りまとめ（JNC，1999d）および第２次 TRU レポート（電事連・JNC，2005a）においては，国際的に合意が得られた体系的なアプローチ（OECD/NEA，1991b）を踏襲しながら，システムの特性（Features），イベント（Events），プロセス（Processes）（以下，FEP）に基づくシナリオ解析手法（ボトムアップ的アプローチ）によりシナリオが作成された。近年の動向としては，ボトムアップ的アプローチに対して，判断の追跡性の向上や作業の効率化を目的として，安全機能を基軸としたシステムの理解の重要性が認識されている（例えば，Nagra，2002；SKB，2006；ANDRA，2005；JNC，2005）。特に，安全機能を基軸としたシステムの理解を中心にしたシナリオ解析手法（トップダウン的アプローチ）においては，期待する安全機能の時間的な変遷を明確化することが重要である（例えば，ONDRAF/NIRAS，2001；OECD/NEA，2002）。

なお，NUMO は，3.1.2.1 で記述したように，リスク論的考え方への対応として，まず，自然過程シナリオと人為過程シナリオ（意図的な人間侵入を除く）に大別することを考えている。このうち，自然過程シナリオについて，本項では，事業者としての安全評価の目的（詳細は 7.2.1 参照）に照らして，以下の３つに分類することを考えている。

- 現状の知見に照らして科学的に確からしいと予見され，防護の一層の最適化の観点から，被ばく線量が合理的に達成できる限り低くなることを確認するためのシナリオ（標準シナリオ）
- 処分システムが様々な不確実性に対応しうるものであることを確認するためのシナリオ（変動シナリオ）
- 万一の場合にも極端に大きな影響は生じない（放射線防護上の特別な措置は必要としない）ことを確認するためのシナリオ（仮想シナリオ）

一方，人為過程シナリオは，処分場の存在を認知しない偶発的な侵入のみを評価対象とし，処分場と人間との予測不能な接触の可能性を小さくする対策が講じられていることを十分に理解した上で，万一の場合にも極端に大きな影響は生じない（放射線防護上の特別な措置は必要としない）ことを確認するためのシナリオである。

なお，リスク論的考え方の地層処分への具体的な展開は，今後検討される状況にある。従って，

これらの分類については，今後の安全規制の動向等を踏まえ，必要に応じて改訂していく可能性が残されていることに留意する必要がある。

NUMOのシナリオ構築は，上述の考え方や動向を踏まえ，ボトムアップとトップダウンのシナリオ解析手法を組み合わせることで，安全評価に用いるシナリオを効率的に構築することを目指すものである（Wakasugi et al.，2009）。シナリオ構築の前提となるシナリオ分類について検討した例を**図 7.2.2-1**に示す。以下では，**図 7.2.2-1**で示した手順に沿って，シナリオ分類の概要について述べる。

まず，地質環境の調査・評価や処分場の設計を踏まえ，対象とするシステムを設定する。その上で，地質環境の調査・評価や処分場の設計と連携しつつ，期待する安全機能の時間的な変遷の整理，およびシステムの将来挙動の記述を同時並行的に進め，システムの理解を深める。

図 7.2.2-2は，6.2 に基づき，閉鎖後閉じ込めを確保するために必要な安全機能と構成要素の対応付けを行い，それぞれの安全機能がどのように時間変化するかを，第２次取りまとめのレファレンスケースを対象として整理した事例である。このような整理により，各時間枠で存在する機能やその相互関係（多重性や相互補完性）を概略的に把握することができる。

システムの将来挙動を記述する際には，安全機能に着目した上で，FEPや感度解析の知見も活用しながら，分野の異なる専門家の知見を適切に取り込むことが重要となる。この際には，分野の異なる専門家が議論する際の枠組みを提供することが必要となり，このためのツールとして，NUMOはストーリボードを開発している（Wakasugi et al.，2009）。なお，ストーリボードとは，対象とする時間スケールあるいは空間スケールごとに，バリアの状態や核種の移行に関係するプロセスを，概念図と言葉を用いて描写したものである。図 7.2.2-3は，自然現象の著しい影響はサイト選定により回避されていることを前提として，蓋然性の高い状態変化と核種移行プロセスを専門家の議論に基づいて作成したストーリボードの例である。この作成手順の概要について以下に記述する。() 内は，図 7.2.2-3の事例における設定例を示す。

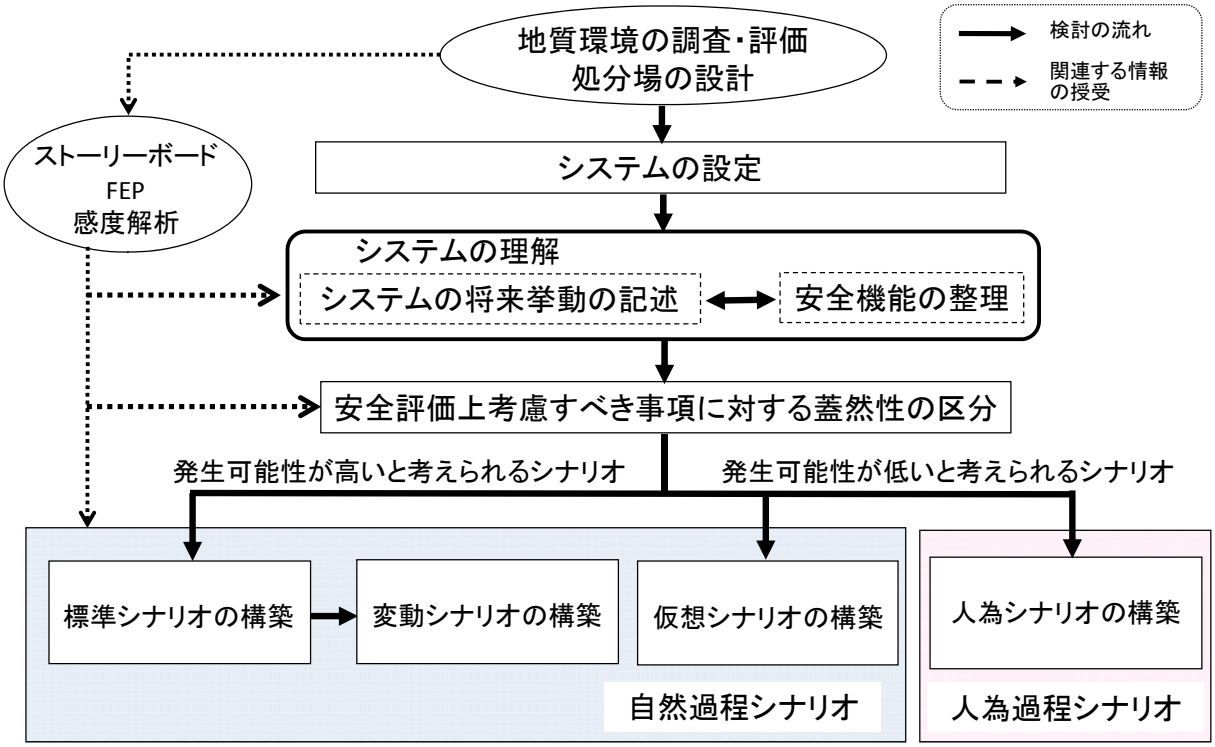
- 前提条件や目的の設定：場とその状態変遷を設定する（仮想的な地質環境）
- 専門家の選定：地層処分全体を理解するゼネラリストと各分野の専門家を収集する（安全評価，人工バリア，地質・地質構造，水理，岩盤力学，地球科学，設計など）
- 時間枠の設定：環境条件や安全機能の変遷を考慮して設定（建設前，建設・操業・埋め戻し・閉鎖，再冠水までの過渡期，オーバーパックの閉じ込め期間，核種の放出開始～気候変動の開始，自然事象の予測可能な期間）
- 対象領域の設定：各分野の専門家の知見を包括的に取り込めるように，対象領域を設定（人工バリアスケール，処分場スケール，天然バリアスケール，地表水文系スケールを設定）
- 各セルへの記載内容：蓋然性が高いと考えられる現象やプロセスのうち，安全機能や感度解析の観点から安全評価上重要と考えられるものを記述する。この際，環境変遷，安全機能の時間変化，核種移行挙動について，概念図と文字を用いて記述することとし，ほかの時間枠と対象領域における記述内容と連続性を持たせて齟齬がないようにする。進め方としては，ゼネラリストが出発点となるストーリボードを作成し，それに基づいて関連する分野の専門家と議論しながら，ストーリボードを改訂していくこととする。
- 不確実性などの留意事項：蓋然性が高く，安全評価上重要と考えられる現象やプロセスについて，知見不足などの理由により，判断できない，あるいは蓋然性は高くないが可能性を否定できない，あるいは意見の一致が得られないといった問題点が生ずる可能性がある。これ

らの内容は，各時間枠における留意事項の欄に記述する。

このような手順に基づいてストーリボードを整理することにより，地層処分システムの将来挙動を効果的に捉えることが可能となり，システムの理解を効果的に深めることができる。なお，ストーリボードは，FEP などの詳細な分析を踏まえて最終的に更新することにより，さまざまなステークホルダーと対話する際に有効な表現方法にもなりうると考える。

また，FEP としては，国際的な FEP リスト（OECD/NEA, 2000b）や国内外の事例（第２次取りまとめや TRU 第 2 次レポート）に基づき，以下の項目について整理することとする。この際，膨大な FEP 情報から考慮すべき知見を効率的に収集するため，安全機能にかかわるプロセスに着眼して整理することが重要と考える。

- 名称
- 概要
- プロセス間の関係（プロセスインフルエンスダイアグラム）
- 現象，特性に関する理解の現状
- 発生の安全機能への影響の可能性と関連する不確実性
- 可能性および関連する不確実性
- 核種移行評価上の取り扱い
- 今後の課題
- 文献



•リスク論的考え方の地層処分への具体的な展開は，現状未決定
•今後の安全規制の議論などを踏まえ，この検討例を柔軟に改訂

図 7.2.2-1 シナリオ分類（検討例）

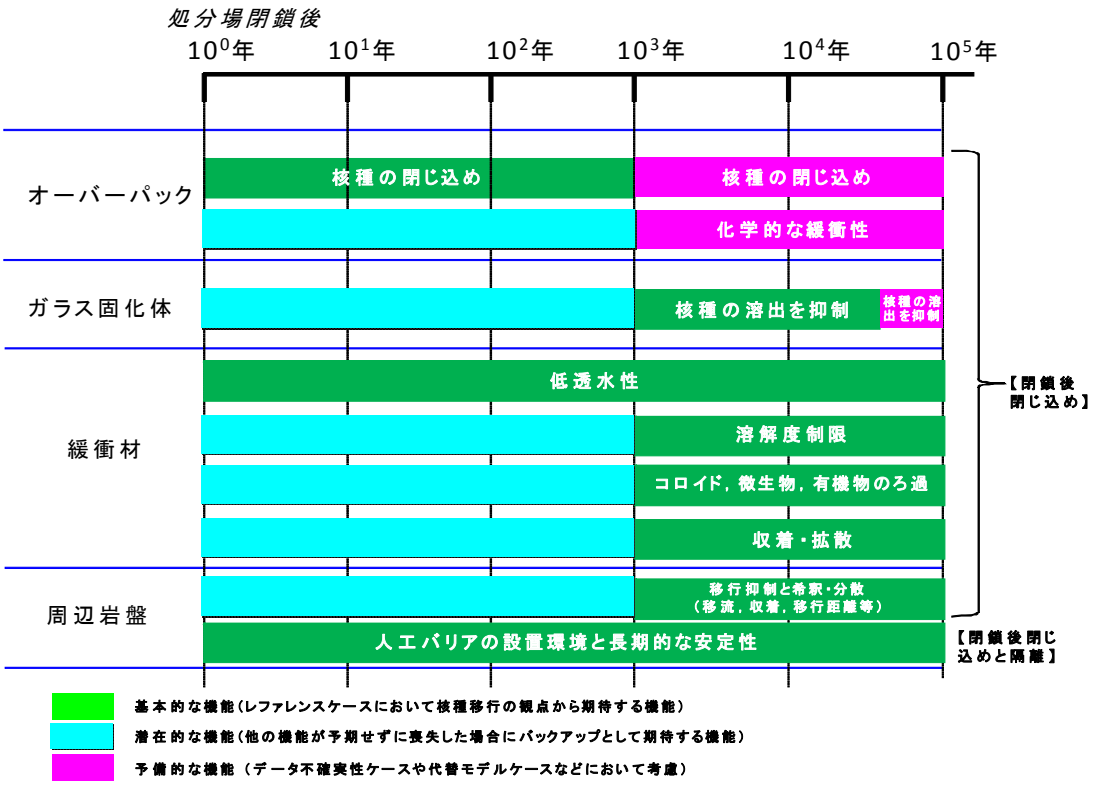
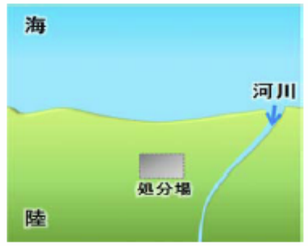
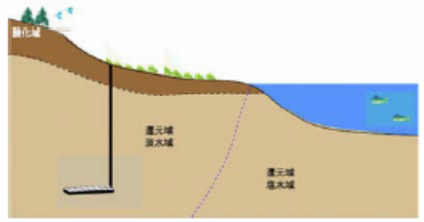
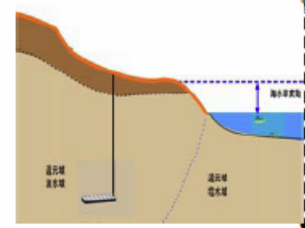
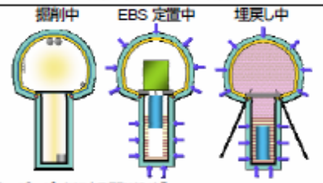


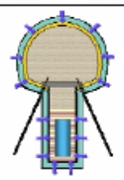
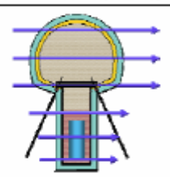
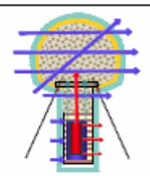
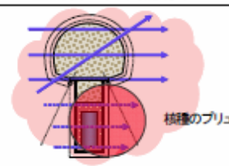
図 7.2.2-2 期待する安全機能の時間的な変遷（第２次取りまとめに基づく例）

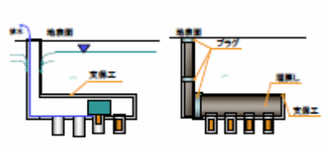
<table>
<tr><td></td><td>場と状態設定の理解</td><td colspan="3">

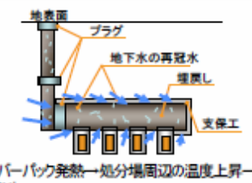
現状の場の理解


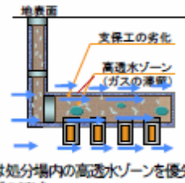
処分場の深度とレイアウト
基本パラメータの項目（現在）
●処分場深度
●岩種：第三紀堆積岩（泥岩）
●動水勾配
●透水係数
●有効間隙率
●隆起速度
●地温勾配
●気温
●降雨量
●河川流出高
●処分場立地周囲：淡水域、還元雰囲気</td><td colspan="2">

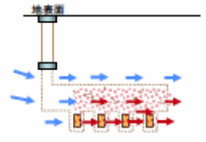

氷期最盛期での状況
基本パラメータ（氷期最盛期）
●岩種：第三紀堆積岩
●動水勾配
●透水係数
●有効間隙率
●隆起速度
●地温勾配
●海水準
●気温
●降雨量
●河川流出高
●凍土厚さ
●処分場立地周囲：淡水域、還元雰囲気</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>建設前</td><td>建設・操業・埋戻し・閉鎖</td><td>再冠水までの過渡期</td><td>オーバーパックの閉じ込め期間</td><td>核種の放出開始～気候変動の開始</td><td>自然現象の予測可能期間</td></tr>
<tr><td rowspan="4">処分概念
・陸地処分
・ガラス固化体４万本
・堆積岩
・処分場（平面配置）
・廃棄体竪置き方式
</td><td>人工バリアスケール</td><td>
処分深度における状態
・初期応力
・間隙水圧
・地温</td><td>

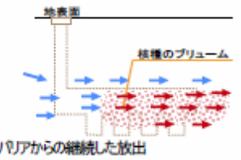
【オーバーパックによる閉じ込め】
・掘削→掘削影響領域（EDZ）の発生→間隙の増大、応力緩和→透水性の増加
・覆工背面での排水→不飽和領域の発生
・オーバーパックからの発熱→ベントナイトの温度上昇
・ベントナイトへの再冠水→膨潤圧発生
・岩盤のクリープ変形→岩盤応力の回復
・埋め戻し部への再冠水→EDZ 不飽和領域の回復</td><td>
【オーバーパックによる閉じ込め】
・廃棄体の発熱→ベントナイト温度上昇
・再冠水→間隙水圧の回復→ベントナイトの膨潤
・岩盤のクリープ変形→岩盤応力の回復
・支保工の劣化→高 pH プルームの発生→間隙増加→透水性増大</td><td>
【オーバーパックによる閉じ込め】
・地下水のオーバーパック接触
→腐食→ガス発生→ベントナイト中の移行
→腐食膨張→ベントナイト変形
→腐食生成物→ベントナイトの変質
・岩盤クリープ変形→岩盤応力の回復
・支保工の劣化→高 pH プルームの発生→間隙増加→透水性増大</td><td>
【人工バリアによる閉じ込め】
・地下水とガラス固化体の接触
→ガラス固化体の溶解→核種の浸出→ベントナイト中の拡散移行（収着）→EDZ／埋戻し中への移行（拡散・希釈・収着）
・オーバーパックの腐食進展→腐食膨張／腐食生成物→ベントナイトとガラス固化体の変質・変形→安全機能への影響
・支保の劣化→高透水領域の発生／高 pH プルームの発生→岩盤／ベントナイトの変質による安全機能への影響</td><td>

【人工バリアによる閉じ込め】
・ガラス固化体の溶解進展→核種の浸出→ベントナイト中の拡散移行（収着）→EDZ／埋戻し中への移行拡大（拡散・希釈・収着）
・オーバーパックの腐食進展→腐食膨張／腐食生成物→ベントナイトとガラス固化体の変質・変形の進展→安全機能への影響
・高 pH プルームによる岩盤／ベントナイトの変質の進展→安全機能への影響</td></tr>
<tr><td>処分場スケール</td><td>
処分深度における状態
・初期応力
・間隙水圧
・地温
・塩水の存在（古海水？）</td><td>

・建設・操業中の排水→アクセス坑道、処分坑道周辺の間隙水圧の減少、地表近辺の地下水面の低下
・オーバーパックの発熱→処分場全域での温度上昇
・埋戻し→再冠水→間隙水圧の回復
・埋戻し→処分場周辺応力場の回復
・プラグ設置→地表への地下水経路の遮断</td><td>

・オーバーパック発熱→処分場周辺の温度上昇→熱対流の発生
・再冠水→処分場周辺の間隙水圧の回復
・支保工の劣化→坑道周辺の高透水領域の発生→坑道に沿っての地下水流動
・支保工の劣化→高 pH プルームの発生</td><td>

・地下水は処分場内の高透水ゾーンを優先的に移動
・熱の影響の低減
・コンクリート支保工の劣化→EDZ を含めて沿っての地下水流動の卓越ルートの形成
・高 pH 環境の形成</td><td>【処分場スケールでの閉じ込め】


・核種の人工バリアからの放出（地下水流動の方向と EDZ に沿って卓越経路の移行可能性）
・コンクリート支保工の劣化→坑道に沿っての地下水流動の卓越ルートの形成
・高 pH 環境の形成</td><td>【処分場スケールでの閉じ込め】


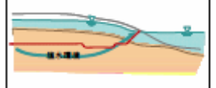
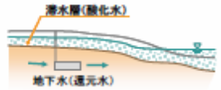
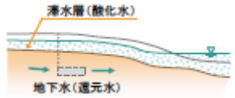
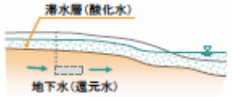
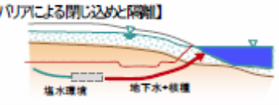
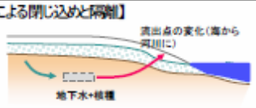
・核種の人工バリアからの継続した放出</td></tr>
<tr><td>天然バリアスケール</td><td></td><td>
</td><td>
</td><td>
</td><td>【天然バリアによる閉じ込めと隔離】

</td><td>【天然バリアによる閉じ込めと隔離】

</td></tr>
<tr><td>・地下水移行が基本プロセス
・隆起・侵食速度
・淡水、還元環境</td><td>・処分場の建設・操業→処分場周辺の地下水流動場の変化→天然バリア性能への影響（回復プロセスの予測）
・広域では初期の地下水流動状態（処分場スケールでの地下水流動場の擾乱）</td><td>・閉鎖後→処分場周辺の地下水流動場の回復
・広域では初期の地下水流動状態（処分場スケールでの地下水流動場の擾乱）</td><td>・処分場スケールでの地下水流動場の擾乱の回復</td><td>・初期の地下水流動系の維持→移流・分散・拡散での核種移行
・気候変動の始まり→海水準変動→地下水変動→地下水流動系の変化（有意な変化なし？）</td><td>・気候変動→海水準変動→地下水流動場の変化→流出点の変化（海から河川に）
・高透水ゾーンに沿う核種移行速度の増大
・天然バリア中の核種収着</td></tr>
<tr><td></td><td>地表水文系</td><td>現状での海水産物の消費状況が基本となる</td><td>初期状態の継続</td><td>・初期状態の継続</td><td>・初期状態の継続</td><td>・地下水の流出点→海底堆積物での収着→海水による希釈→現状の生態系維持</td><td>・氷河期の到来→生物圏の変化（海から河川に）
→凍土の発生→地表水系の変化→生態系の変化</td></tr>
<tr><td>その他の天然事象</td><td></td><td>火山・活断層・泥火山・マスムーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</td><td>火山・活断層・泥火山・マスムーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</td><td>火山・活断層・泥火山・マスムーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</td><td>火山・活断層・泥火山・マスムーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</td><td>火山・活断層・泥火山・マスムーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避</td></tr>
<tr><td>不確実性など留意事項</td><td></td><td>・処分深度に古海水の存在の確認</td><td>・処分システムの安全機能への残置物の影響度[セメント材料による高アルカリ影響]
・建設・操業による天然バリアへの影響（領域とレベル）
・海底の堆積物と食物チェーン</td><td>・再冠水のプロセスと環境回復のレベル
・処分場スケールでの不飽和領域の残存の影響
・EDZ に沿った卓越流路の形成</td><td>・オーバーパックの腐食膨張と生成物の安全機能への影響
・EDZ と支保劣化に伴う卓越流路の形成可能性（プラグ等の工学対策の効果）</td><td>・高アルカリ、腐食生成物、ガス、微生物によるベントナイトの変質プロセスと安全機能への影響
・1000 年以降での生物圏の設定</td><td>・気候変動にともなう地表水文系と地形の変化予測
・凍土発生の深さと分布
・生物圏の設定</td></tr>
</table>

図 7.2.2-3 ストーリボードの例（高レベル放射性廃棄物を対象）

蓋然性を区分していく上では，安全評価において考慮すべき項目（以下，考慮すべき項目）を，影響の程度と発生可能性の観点から分類し，シナリオ区分と対応付けていくことが重要と考える（図 7.2.2-4）。なお，安全評価において考慮すべき項目とシナリオ区分との対応付けは一義的に定まるものではなく，採用する安全確保対策や時間スケールの考え方などに依存して対応関係が変化する可能性がある。安全確保対策や時間スケールの考え方は，サイトの地質環境特性や安全規制の枠組みに応じて変化するものである。これらが明確化されていない現段階では，安全評価において考慮すべき項目のそれぞれがどの区分に入るかを示すことは困難である。従って，これらの点が明らかになった段階で，シナリオの区分とその内容を具体化することとする。なお，自然過程シナリオに対するシナリオ構築の方法論については，技術開発事例として 7.3.2 に記述する。

以下では，地層処分の安全評価において考慮すべき事項を分類していくための考え方について記述する。地層処分の安全評価において考慮すべき事項は，多岐にわたるものである。この中には，システムに影響を及ぼす可能性が無視しうる程極めて小さいことが一般的に示されているもの（例えば，隕石の落下）や閉鎖後長期安全性に関する議論から除外すべきことについて国際的に合意が得られているもの（例えば，意図的な人間侵入）が含まれており，これらについては，安全評価上，除外することができる（図 7.2.2-4の⑤）。また，安全確保対策により，システムへの影響が無視できるほど小さいと判断できるものについては，安全評価上，除外することができる（図 7.2.2-4の④）。なお，発生可能性を考慮すべきであり，かつ，影響が小さいと一般的には言えないものについては，まず，適切なサイトや深度の選定により，回避できる可能性を判断する。そして，回避が可能と考えられるものについては，仮想シナリオあるいは人為シナリオに分類していく（図 7.2.2-4の③）。一方，回避することが困難な事象のうち，発生可能性が高いと考えられるものについては，標準シナリオに分類するとともに（図 7.2.2-4の①），蓋然性が低いものあるいは蓋然性を判断できないものについては，システムに対する不確実性あるいは変動要因として捉え，変動シナリオとして分類していくこと（図 7.2.2-4の②）が重要である。

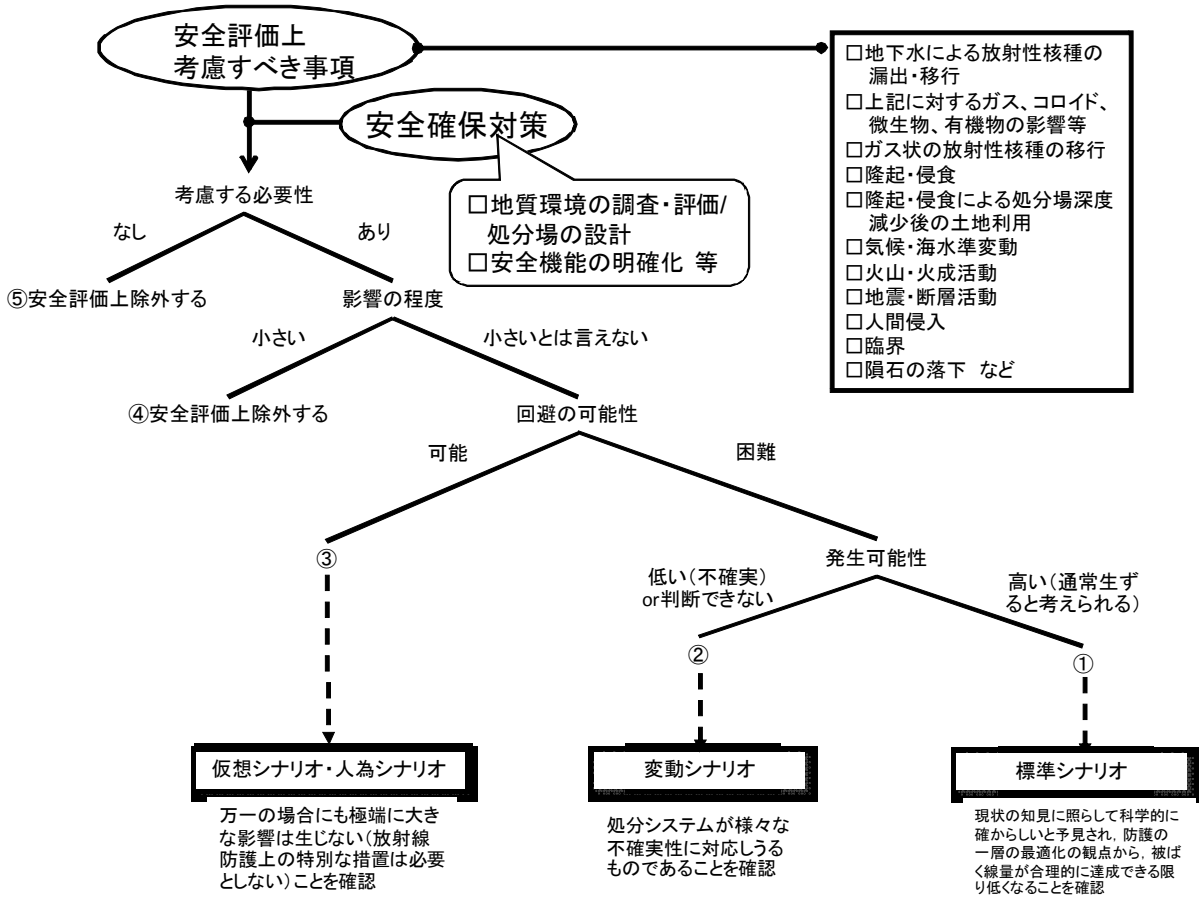


図 7.2.2-4 蓋然性の区分に関する考え方

7.2.3　モデル開発とデータセットの整備

安全評価を行うためのモデルは，不確実性に対する安全機能の発揮を考慮して保守的に簡略化・統合化することで，システム全体の挙動を評価するためのモデル（システム性能評価モデル）である。このモデルは，多重バリアシステムの要素に沿って，人工バリア核種移行モデル，天然バリア核種移行モデル，生物圏モデルから構成される（例えば，JNC，1999d：電事連・JNC，2005a）。ここでは，人工バリアと天然バリア，および生物圏に大別し，モデル開発およびデータセットの整備について記述する。

7.2.3.1　人工バリアと天然バリア

モデル開発は，一般に，概念モデル（与えられた評価の目的のもとにシステムを記述するための仮定の集合）の開発，数学的定式化と計算モデルの開発，検証（Verification），確証（Validation）というステップを繰り返しながら進められる。

シナリオに沿って，まず，科学的な原理，法則や，室内およびフィールドにおける観察，実験から得られる情報をもとに，想定されるプロセスの組み合わせながら，可能性のある概念モデルを明らかにする。概念モデルに対して数学的な定式化（数学モデル）を行った後，計算コードを作成する。

検証は，計算コードが与えられた数学モデルを数値的に正しく解いていることを，解析解との比較やベンチマークなどによって確認する作業である。確証では，モデルを用いた予測解析と実験の結果とを比較することによってモデルの妥当性を検討し，最も適切な概念モデルとそれに対応した数学モデルを選択する。モデルの妥当性を検討する際には，安全評価で考慮する時間的，空間的スケールの大きさについて留意しておくことが重要である。ナチュラルアナログはモデルの妥当性を時間に対して保証していくための有効な手段の一つと考えられている。

それぞれの現象についての理解度，数値計算技術や計算機性能あるいは実験技術上の制約により，個々のモデルの開発レベルやデータの整備状況は同じではない。システム性能評価モデルを作成するためには，これらのバランスをとりながら実際的な道具として簡略化・統合化する必要がある。

以下では，人工バリアと天然バリアに対するモデル開発およびデータセット作成の方法論について述べる。

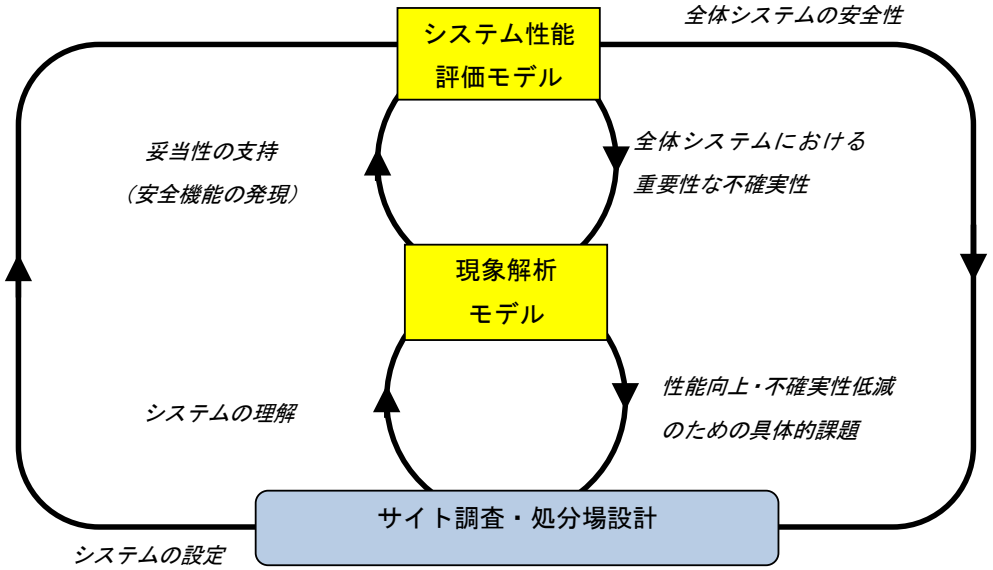
（1）　相互補完的なモデル開発

システム性能評価モデルは，複数の現象を保守的に簡略化・統合化することで，システム全体の挙動を評価するためのモデルである。一方，個別現象とその影響を現実的に評価するためモデルとしては，現象解析モデルがある。

NUMOとしては，人工バリアと天然バリアの核種移行について，安全基準の確認，頑健性の例証，オプション間の比較，重要な地質環境特性の特定といった安全評価の目的に応じて，これらの二つのモデルを相互補完的に用いていくことが重要と考える（Ishiguro et al.，2006；図 7.2.3-1）。すなわち，システム性能評価モデルにおける簡略化や統合化の妥当性を現象解析モデルによって支持し，逆に，システム性能評価モデルを用いた解析結果に基づき地層処分システム全体の性能に対する個々の現象解析モデルの重要度を明らかにしていく。

この考え方に対する技術開発事例を 7.2.3.3 に示す。7.2.3.3 では，処分場周辺における岩盤の不均質性や処分場の設計オプションをより現実的に評価するためのモデルを開発し，それを既存のシス

テム性能評価モデルの結果と比較考察している。なお，地質環境の調査・評価や処分場の設計については，システムの設定やシステムの理解に対する与条件となるものであるとともに，逆に，全体システムとしての安全性や信頼性向上に向けた課題がフィードバックされることとなる。



目的 ＼ 評価モデルの種類	システム性能評価モデル	現象解析モデル*
安全基準の確認	○	-
頑健性の例証	○	-
オプション間の比較	-	○
重要な不確実性の特定	○	-

○　目的に対する相対的な優先度が高いことを意味する。

－　目的に対する相対的な優先度が低いことを意味する（使用を否定するものではない）。

＊　現象解析モデルは，安全機能の発現を説明する際に用いられることもある。

図 7.2.3-1 システム評価モデルと現象解析モデルとの関係

(2) システム性能評価モデル

システム性能評価モデルは，前述のように，核種移行に関連する多様な現象を個別具体的に表現するものではなく，鍵となる現象や安全機能に着目して定量化することが重要である。期待する安全機能としては，容器による閉じ込めを含めた廃棄体からの溶出抑制，人工バリアによる核種の移行抑制，天然バリアによる核種の移行抑制が挙げられる（6.2.2.3）。システム性能評価モデルでは，これらの安全機能の効果を定量的に表現することにより，廃棄体中の核種が生物圏に流入すると考えられる割合（生物圏への核種移行率）を規定することとなる。そこで，地下水中の核種移行に関するシステム性能評価モデルおよびデータセットの構成を整理した（図 7.2.3-2）。以下では，この構成に沿って，人工バリアと天然バリアに対するモデルの概要について記述する。なお，これらに対するモデル上の詳細な特徴や関連する数学モデルについては，（NUMO，2010a）に記す。

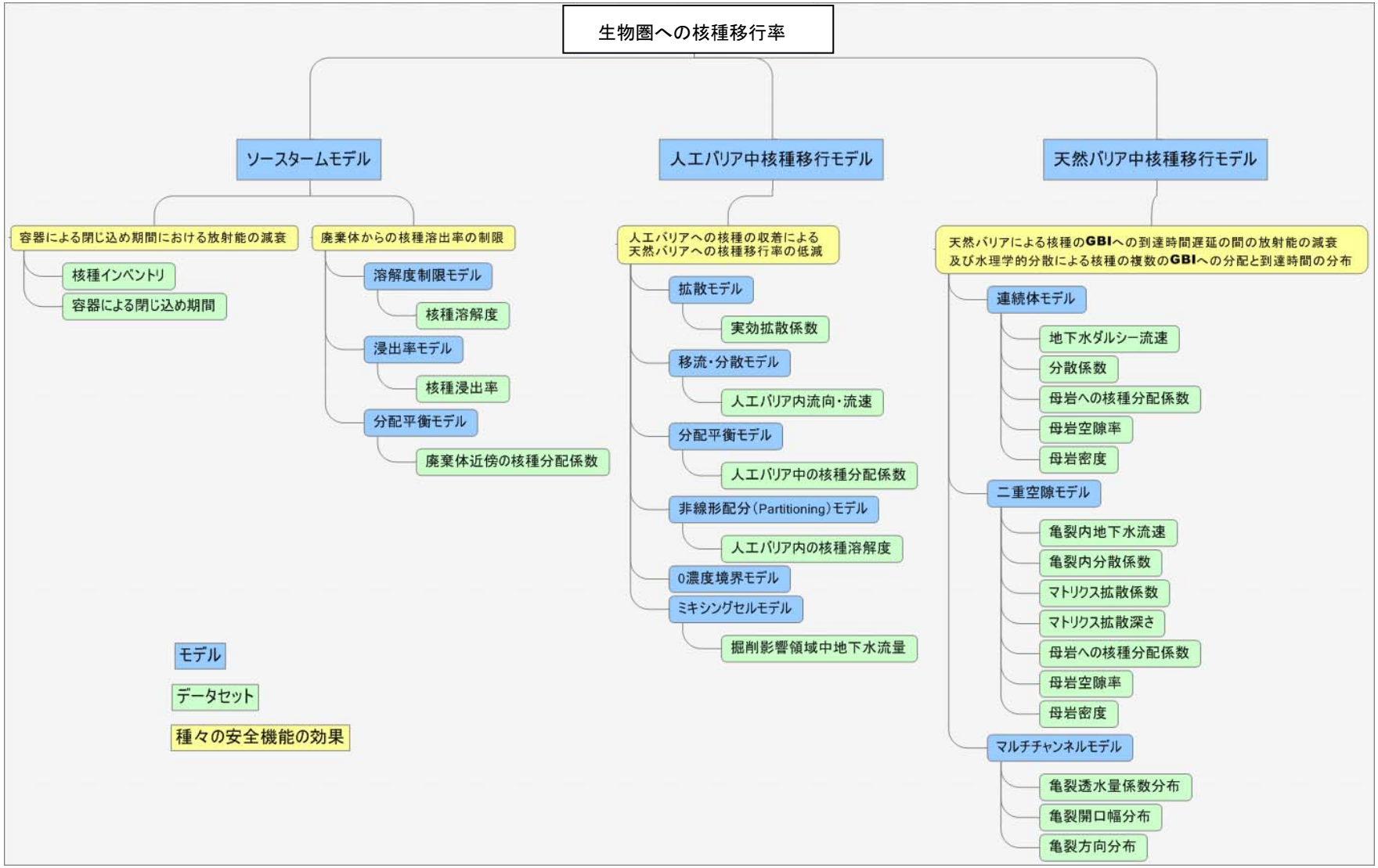


図 7.2.3-2 地下水中での核種移行に関するシステム性能評価モデルおよびデータセットの構成

（ⅰ） ソースタームモデル：

ソースタームモデルは，廃棄体中とその近傍に存在する各核種の量（インベントリ）の時間変化を表現するものである。数学モデルとして表現する際には，通常，（当該核種の廃棄体中のインベントリの時間変化）＝（親核種の放射性壊変による生成）－（当該核種の放射性壊変による消滅）－（廃棄体からの核種浸出率）という形式の（常）微分方程式として表現される（図 7.2.3-3）。

容器による閉じ込め期間においては，廃棄体からの核種浸出率を 0 とすることにより，廃棄体中の放射能の減衰が表現される。一方，腐食による強度の低下などの理由で生ずる容器の閉じ込め機能の喪失後は，廃棄体からの核種浸出率に従って核種の浸出が開始される。

廃棄体近傍の核種総量の時間変化やそれに伴う人工バリアへの核種移行率を算出するモデルは，対象とする廃棄体や核種の種類によって異なることとなる（溶解度制限モデル，浸出率モデル，分配平衡モデル，等）。

例えば，高レベル放射性廃棄物ガラス固化体中のアクチニドなどの難溶解性の元素の場合には，ガラスが溶解しても，人工バリア中の地下水流れがなく核種移行が遅いため，核種の大半は沈殿して廃棄体近傍に留まることとなる（溶解度制限モデル）。一方，可溶性の元素の場合には，ガラス固化体の溶解速度によって人工バリアへの核種移行率が規定されるものと考えられる（浸出率モデル）。他方，一部の TRU 廃棄物などでは，可溶性の核種が廃棄体とその近傍に収着することによって液相と固相の間に分配されることを想定し，液相中の核種濃度によって人工バリアへの核種移行率が規定される（分配平衡モデル）。

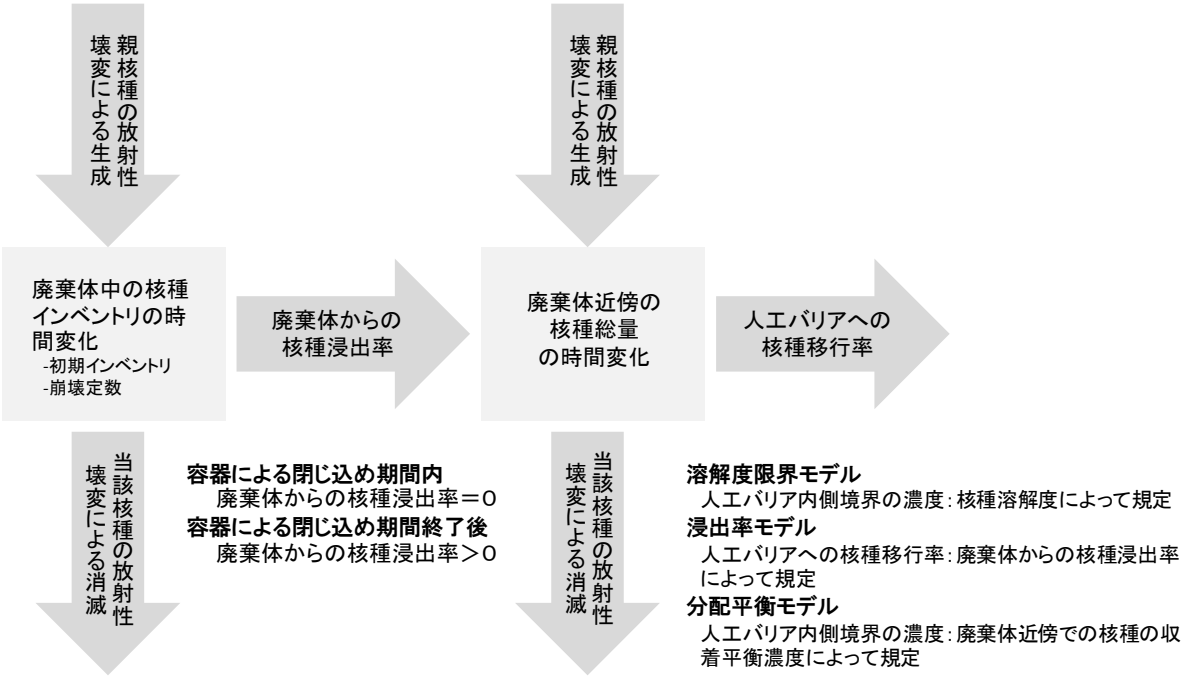


図 7.2.3-3 ソースタームモデルにおける核種量の時間変化のイメージ

（ⅱ） 人工バリア中の核種移行モデル：

人工バリア中の核種移行モデルは，人工バリア中の各位置における核種質量の時間変化を表現するものである。数学的な定式化においては，コロイド状の核種がろ過され移行には寄与しないことを前提とすれば，（各位置での核種の質量の時間変化）＝（液相中の核種の拡散あるいは分散による

移動）＋（液相中の核種の移流による移動）＋（親核種の壊変による生成）－（当該核種の壊変による消滅）という形式の（偏）微分方程式として表現される（図 7.2.3-4）。

人工バリア中の核種移行モデルの廃棄体側の境界条件は，前述したソースタームモデルによって規定される。具体的には，ソースタームに溶解度限界モデルあるいは分配平衡モデルを適用する場合には，廃棄体領域と人工バリアとの境界における核種の濃度が境界条件として指定され，また，浸出率モデルを用いる場合には，核種の移行率が境界条件として指定される。他方，母岩側の境界においては，マスバランスが保たれるように，後述する天然バリア中核種移行モデルと連立する場合が多い。

また，人工バリア内部の核種の移動が拡散による場合には，人工バリアの外側において 0 濃度であることを仮定して核種の濃度勾配を保守的に表現するモデル（0 濃度境界モデル）や，人工バリアの外周にある掘削影響領域内の地下水流れによって人工バリアから移行した核種が瞬時に完全に混合されることを仮定して境界での核種濃度を規定するモデル（ミキシングセルモデル）などが用いられる。

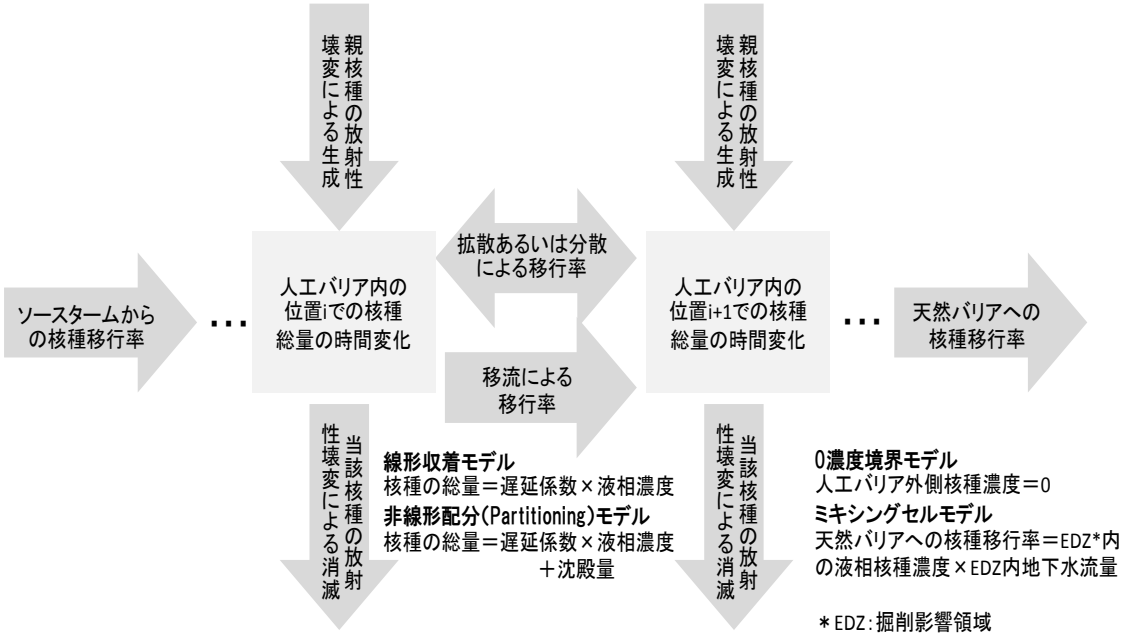


図 7.2.3-4 人工バリア中核種移行モデルにおける核種量の時間変化のイメージ

（iii） 天然バリア中核種移行モデル：

天然バリア中核種移行モデルは，母岩中移行経路内の任意の位置における核種量の時間変化を表現するものである。天然バリア中核種移行モデルの重要な特徴は，母岩の空間的不均質性に対応する必要があることである。この点を踏まえた天然バリア中核種移行モデルとしては，多孔質媒体モデルや二重間隙モデル，または，これらの複合モデルが一般的である。また，天然バリア中核種移行モデルの重要な特徴は，母岩の空間的不均質性に対応する必要があり，亀裂透水量係数分布を仮定したマルチチャンネルモデルを適用した例がある（JNC，1999a）。

多孔質媒体モデルは，前出の人工バリア中核種移行モデルの場合と同様，（各位置での核種の質量の時間変化）＝（液相中の核種の拡散あるいは分散による移動）＋（液相中の核種の移流による移動）＋（親核種の壊変による生成）－（当該核種の壊変による消滅）という形式の（偏）微分方程

式として定式化される（図 7.2.3-5）。ただし，地下水の流向・流速や分配係数といったデータセットは，母岩の空間的不均質性に対応して位置によって異なるものとなることがある（不均質性を表現した連続体モデル）。

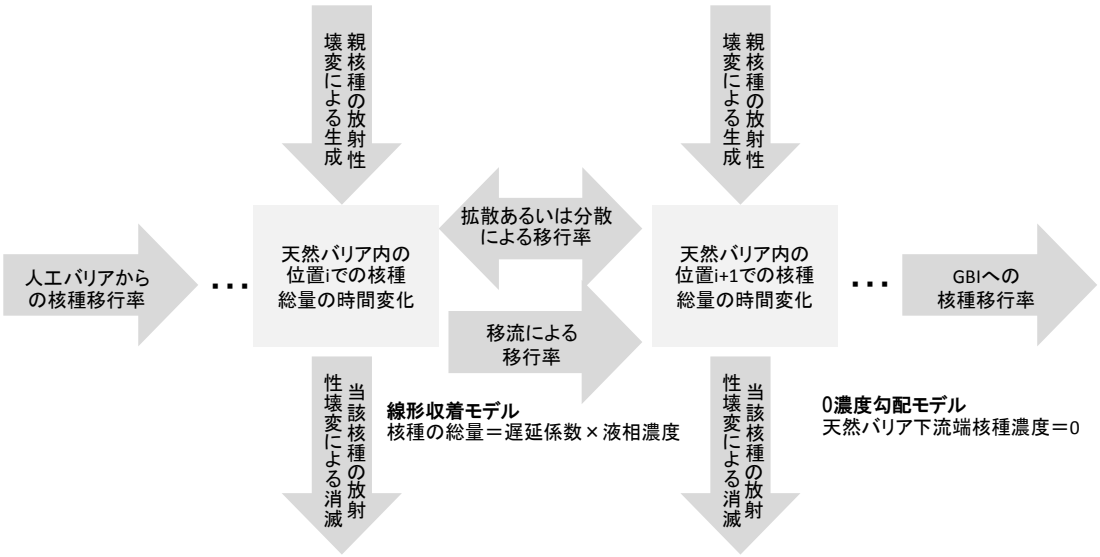


図 7.2.3-5 天然バリア中核種移行モデル（多孔質媒体モデル）の核種量の時間変化のイメージ

二重間隙モデルは，高透水性の亀裂等の主要流動経路とそれら流動部に接する母岩（マトリクス）を考慮したモデルであり，亀裂内での移流・分散による核種移行とマトリクス内での拡散による核種移行とを連成して解く必要がある（図 7.2.3-6）。この場合には，亀裂とマトリクス部に対応してそれぞれ異なる方程式が必要となり，亀裂内地下水流速，亀裂開口幅，マトリクス内実効拡散係数，マトリクス空隙率，岩石密度，および，マトリクス内の核種分配係数についてのデータセットが必要となる。母岩の不均質性に起因して，これらのデータセットには，位置によって異なる数値が含まれる場合がある。特に，特性の異なる複数の亀裂が存在する場合には，第２次取りまとめのように，マルチチャンネルモデルを適用することにより，不均質場を表現することもある。マルチチャンネルモデルとは，複数の二重空隙媒体モデルを考慮してそれぞれに異なる亀裂内流速と亀裂開口幅とを定義したモデルである。

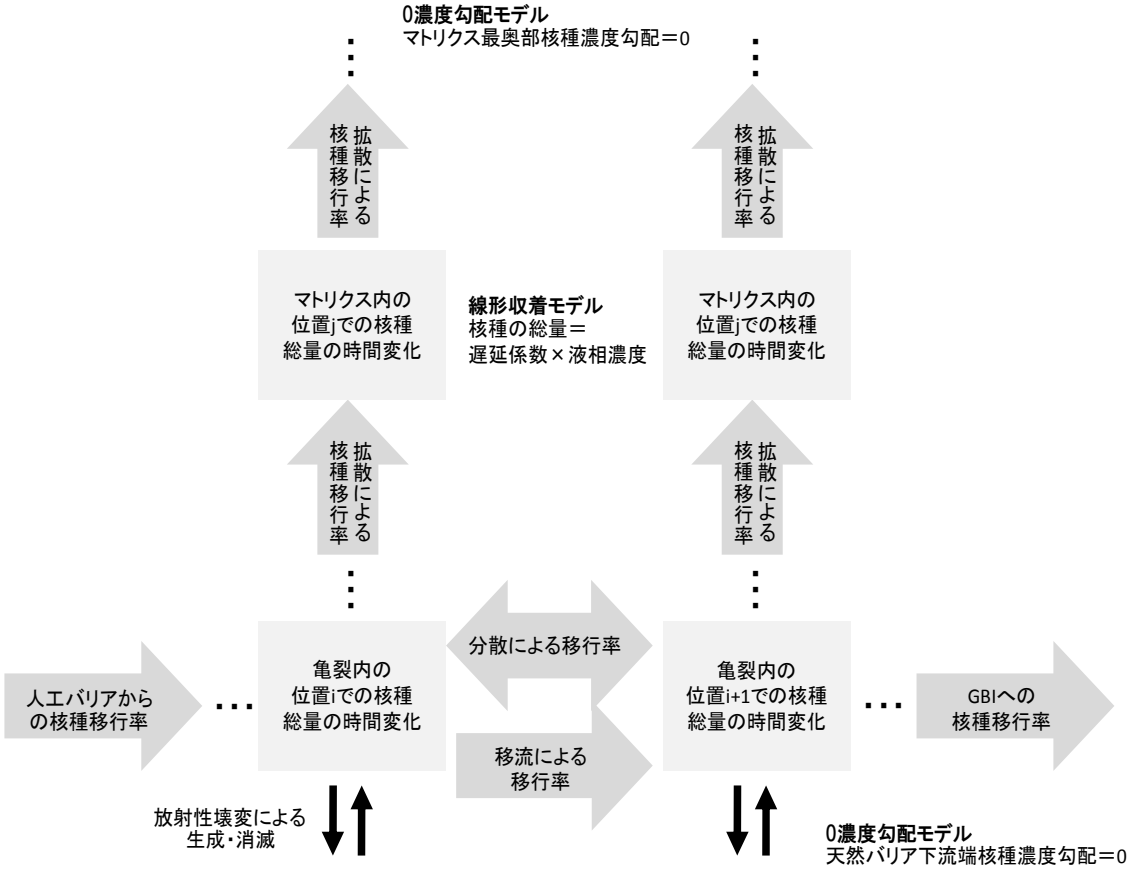


図 7.2.3-6 天然バリア中核種移行モデル（二重間隙モデル）の核種量の時間変化のイメージ

(3) 現象解析モデル

前述のように，現象解析モデルは，システム性能評価モデルにおける簡略化や統合化の妥当性を支持することが主な目的である。現象解析モデルとしては,以下のような例を挙げることができる。

- 地下水流動解析モデル（広域およびニアフィールド）
- ニアフィールド地球化学解析モデル
- ニアフィールド力学解析モデル
- ニアフィールド核種移行解析モデル
- 熱 - 水 - 応力 - 化学連成解析モデル

各モデルの概要およびその目的について整理した事例を表 7.2.3-1に示す。

(4) システム性能評価モデルと現象解析モデル間の情報の授受

システム性能評価モデルと現象解析モデル間では，一つのモデルの計算結果に基づきほかのモデルの入力データや境界条件が設定されるというような情報の授受の関係が存在する。このため，安全評価において，重大な抜け落ちがないようにするためには，このような情報の流れをあらかじめ整理しておくことが有用である。概要調査地区選定段階（文献調査の段階）においては，一般的に，現象解析モデルを利用する上で必要となるサイトの情報を入手することが困難であると考えられる。一方，精密調査地区選定段階（概要調査の段階）以降では，地表調査および少数のボーリング調査

と処分場の設計に関する情報が増加することから，それらを入力条件とした種々の現象解析を行うことが可能となる。そこで，精密調査地区選定段階（概要調査の段階）を対象として，現象解析モデルとシステム性能評価モデルにおける情報の流れを，ソースターム，人工バリア，天然バリア，生物圏に大別し，モデル間と情報の授受を整理した（表 7.3.2-1，図 7.2.3-7）。精密調査地区選定段階において得られる情報の種類や量は，サイトの特徴や調査のやりやすさに応じて変化することが考えられる。従って，このフローチャートは，事業段階において情報の流れを整理するための出発点であることに留意する必要がある。なお，精密調査地区選定段階以降においても，同図で示したフローチャートはほぼ同様のものであると考えられ，拡充された情報に基づき改訂していくこととする。

表 7.2.3-1 現象解析モデルの概要と目的について整理した例

現象解析モデル	概要	目的	
地下水流動解析 モデル（広域）	水理地質構造モデル，涵養量および海岸や河川湖沼等の境界条件に基づき，将来の地形変化や気候・海水準変動を考慮した広域の地下水流動を把握する（定常飽和流動モデルあるいは非定常密度流モデル）	ニアフィールド地下水流動解析の境界条件を設定	処分地点および深度に関するオプション比較
地下水流動解析 モデル（ニアフィールド）	地質環境モデルにおける母岩の不均質な透水性と設計における坑道や人工バリアの形状・特性に基づき，広域地下水流動解析の結果を境界条件として，ニアフィールド内の地下水流動を把握する（定常飽和流動モデル）	核種移行解析のための詳細な流速情報を提供	廃棄体定置位置や坑道設計などに関するオプション比較
ニアフィールド 地球化学解析モデル	鉄，ベントナイトおよびコンクリートなどの相互作用に伴う地球化学条件の時間的変化およびバリア材料の変質を把握する（多成分反応移動解析モデル）	核種溶解度や分配係数設定のために空隙水質の情報を提供	バリア材料に関するオプション比較
ニアフィールド 力学解析モデル	応力場の時間変化とオーバーパックおよびガラス固化体の変形・破壊挙動を把握する	閉じ込め期間およびガラス破砕の情報を提供	人工バリア形状や仕様に関するオプション比較
ニアフィールド 核種移行解析モデル	母岩の不均質性に起因する複雑な核種移行経路やさまざまな設計オプションの影響を考慮した核種移行率を把握する（三次元核種移行モデル）	システム性能評価モデルのパラメータ設定	廃棄体定置位置や坑道設計などに関する設計オプション比較
熱 - 水 - 応力 - 化学連成 解析モデル	坑道掘削，廃棄体や人工バリアの設置および坑道閉鎖に起因する熱，水理，力学あるいは化学的擾乱によってその後のニアフィールド環境条件がどのように変遷するかを把握する	種々の擾乱により，人工バリアの不可逆的な変質や形状変化などが生じないことを説明	

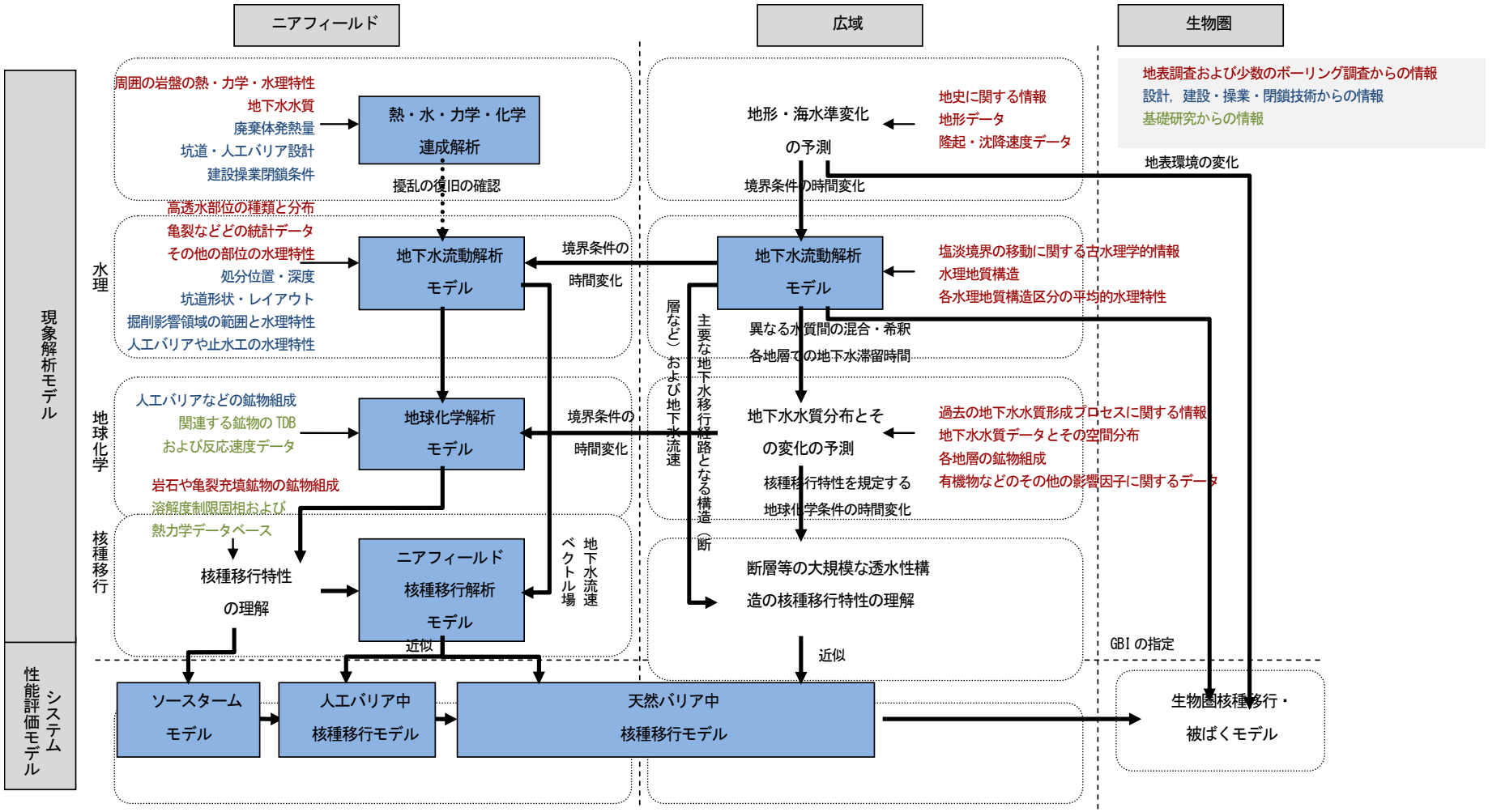


図 7.2.3-7 安全評価のための解析モデルフローチャート（精密調査地区選定段階（概要調査の段階））

(5) データセットの整備

データセットについては，蓋然性の高いシステムの状態やその不確実性を考慮して導出されるシナリオやモデルに応じて，室内やフィールドにおける実験やデータベース等を活用しながら適切に設定していくことが重要である。図 7.2.3-2より，人工バリアと天然バリアに対するデータはモデルに対応して多岐にわたることがわかり，これらの整備には多大の費用と時間を要すると考えられる。このため，信頼性の確保とデータ取得効率の観点から，汎用性があり共通に用いることが可能なデータベースについては，国際共同プロジェクトによって開発が行われている。

安全評価に用いるデータセットの設定においては，実験によるデータ取得，既存のデータベースの利用，現象理解に基づくモデルによる推定といった方法が考えられる（例えば，舘ほか，2009）。以下では，文献調査と概要調査を対象として，これら三つの方法に対するデータセット設定の考え方について述べる。

第２次取りまとめやそれ以降の研究開発により，安全評価にかかわる種々のデータベースやデータセットが整備された（7.3.4 参照）。このうち，岩種や地下水の分類ごとに整理されているものは，文献調査から得られる情報をもとに推定される岩種や地下水の性質などに応じて，文献調査段階における安全評価のためのデータセット設定に用いることができる。なお，サイトの地質環境特性に大きく依存しないデータについては，サイトに対して共通に用いることが可能である。

一方，概要調査段階においては，サイトにおけるボーリングなどを用いた実際の調査データが得られることが想定される。このため，サイトにおける地下水や岩石のコアサンプルが入手可能となり，それらを用いた実験によるデータ取得が基本となる。そして，既存のデータベースや現象理解に基づくモデルを用いて，実験により取得されたデータとの比較分析を行い，設定値の信頼性を向上させることとなる。また，調査期間を考慮するとすべてのパラメータに対して十分なデータが得られない可能性がある。この場合には，類似の環境条件で取得されたデータや既存のデータベースなどを活用することにより，データの取り得る範囲を推定する必要がある。

これらのデータセットの設定においては，信頼性を高めるための研究開発が継続して進められており，最新の成果を活用していくことが重要である。第２次取りまとめ以降に更新されたデータセットの作成に関する技術の進展については，7.3.4 において述べる。

7.2.3.2　生物圏

安全評価においては，人間の生活環境である生物圏およびこれによる被ばくの形態（被ばく経路）を想定し，モデルの構築とデータセットの作成を行い，人間への放射線学的な影響を推定することが必要となる。このような評価は，生物圏評価と呼ばれる（JNC，1999c：電事連・JNC，2005a）。

生物圏には，人工バリアや天然バリアのようにバリア機能を期待するものではない。また，将来の人間の環境や生活様式を予測することは困難である。このため，長期間安定に存在する地下深部の地質環境やそこに構築される人工バリアと比較して，不確実性が相対的に大きくなる。このため，地層処分を対象とした生物圏のモデル化に当たっては，IAEA の国際共同プロジェクト BIOMASS において検討されているレファレンスバイオスフィアの考え方（IAEA，2003b）を適用していくことが基本となる。レファレンスバイオスフィアは，人間生活の環境や生活様式の仮定を安全評価の目的に沿って整合性を取りながら合理的に設定し適切な評価指標（線量など）に変換するための道具として生物圏をとらえる考え方である。この概念は，第２次取りまとめや第 2 次 TRU レポートなどの国内の事例に加え，米国（NRC，2009）やスイス（ENSI, 2009）などの国外の事例でも取り込まれている。

生物圏の主要な構成要素は，人間の生活環境とそれを取り巻く生物圏に大別される。NUMO としては，これら二つの構成要素について，レファレンスバイオスフィアの考え方を考慮した上で，サイト周辺の条件やわが国の一般的な知見に基づき，適切にモデル化を行うとともに，データセットを作成することが重要と考える。以下では　，これらの二つの構成要素およびデータセットの整備に対する考え方について述べる。

(1)　地表環境

生物圏の取り扱いに関しては，時間的な変遷を考慮しない場合と考慮する場合のアプローチが考えられる。

時間的な変遷を考慮しない場合には，現在と同様な生物圏が将来も継続するという仮定をおいて，サイトの地質環境特性に基づき，地形や地下水などを考慮して GBI（放射性核種が生物圏へ流入すると想定される場所）や評価条件を設定し，モデル化を行う。第２次取りまとめにおいては，この考え方に基づき，幅広い地質環境特性に対応した生物圏評価が行われている。

一方，生物圏の時間的な変遷を考慮する場合には，将来の生物圏に変化を与えうる自然事象を考慮する必要が生じる。自然事象の例としては，氷期―間氷期サイクルによる気候変化，海水準変動および隆起・侵食による地形の変化などが考えられる。これらの自然事象は，GBI や被ばく経路などの設定に影響を与える可能性があることから，適切に取り扱うことが重要と考える。具体的な例としては，海水準変動と隆起・侵食により，核種を収着した沿岸海域堆積層が地表となり，その土地を利用することにより被ばくが生ずるといったことが想定される。このため，生物圏評価モデルは，現在の生物圏に対応したモデルから別のモデルへの時間的な変遷を考慮することが必要になり，時間変遷に対応した技術開発事例を 7.3.3.1 に示す。

NUMO は，これらの二つの取り扱いを，安全評価の目的やステークホルダーからの要求や懸念に応じて適切に組み合わせながら用いていくこととする。

(2)　人間の生活様式

前述のように，将来の人間の環境や生活様式を予測することが基本的に困難であることから，将

来の人間の生活様式については，現世代の人間の生活様式を前提として，被ばく経路やそれに基づく人間への影響を評価する考え方を適用することができる。この考え方は，国際的な議論とも整合的である（ICRP，2000）。

生物圏/決定グループについて，国際放射線防護委員会の勧告では，「現在利用できるサイトまたは地域の情報に基づくサイト固有のアプローチか，もっと一般的な習慣と条件に基づいた様式化されたアプローチを用いて規定すべきである」と記述されている（ICRP，2000）。また，「様式化されたアプローチの使用は，評価の時間尺度が長くなるほど重要になる」と記述されている。

NUMO は，これらの考え方に基づいて人間の生活様式を設定し，モデル化していくことが重要と考える。この際，安全評価を実施すべき期間が長期にわたることを考慮して，線量以外の補完的な指標も視野に含めて検討することが必要となる。また，上述した生物圏の変遷が人間の生活様式に影響を与える可能性もあり，仮にこのことを考慮する必要が生じた場合には，その影響を適切に考慮していくこととする。

(3) データセットの整備

一般に，生物圏評価では，百種類を超えるデータを取り扱うこととなり，その多くはサイトの特徴に関連するものが多い。このため，限られた資源を有効に活用して生物圏評価を行うためには，重要な核種移行プロセスや被ばく経路（KIPPs: key information, processes and pathways）を特定するとともに，評価結果に及ぼす影響が大きいパラメータに焦点をあてて，信頼性を向上させていくことが重要と考える（加藤ほか，2005）。例えば，評価結果に及ぼす影響が大きいパラメータとしては，GBI における流量や食物の摂取量などが考えられ（JNC, 2005b），これらに対しては，文献情報に加え，サイトで取得されたデータに基づいて設定することが重要と考える。そして，類似条件で取得されたデータやわが国の一般的なデータなどとの比較分析を行い，信頼性を向上させる。また，その他のパラメータについては，サイトで取得されたデータの活用を基本とするものの，わが国の一般的なデータのみならず，国際機関，諸外国，国内の評価事例で用いられているデータも活用することを視野に入れ，信頼性を向上させることとする。

7.3　安全評価を支える技術の整備

本節では，2000 年以降，基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する技術開発の整備状況について概説する。

7.3.1　安全評価に関する技術開発

安全評価は，7.2 で述べたように，システムの設定やシステムの理解を含むシナリオ構築，モデル開発，パラメータ設定，影響解析といった手順に沿って進められる。そこで，これらの手順の各要素および各手順における他分野との連携の観点から，2000 年以降，基盤研究開発機関および NUMO が取り組んできた安全評価に関する技術開発の現状を整理した（表 7.3.1-1）。表 7.3.1-1 に示したさまざまな研究分野のうち，NUMO は，安全評価の信頼性を向上させるため，事業者として重視する以下の四点を考慮して，シナリオ開発およびモデル開発に関する信頼性を向上させるための技術開発を行ってきた（表 7.3.1-1 の青字）。

① <u>地質環境の多様性と長期変遷に対応できるようにすること</u>：

サイトや岩種を特定しない研究開発段階においては，わが国の一般的な地質環境を対象とて，地層処分システムの閉鎖後長期安全性が評価された（JNC，1999a；電事連・JNC，2005a）。一方，事業段階の安全評価においては，サイトが有する地質環境の特徴を安全評価に適切に取り込むことが必要である。事業編で述べたように，公募方式の事業においては，地質環境特性として，地理，地形，地質学的にさまざまな可能性が考えられる（例えば，地理的には内陸部，沿岸部，島部，地形的には山地，丘陵，平野など）。このため，想定されるさまざまな地質環境特性に対応できるように，安全評価手法を整備しておくことは，地質環境の多様性への対応という観点から重要である。また，地質環境特性は，隆起・侵食や気候・海水準変動などに影響を受けて，長期的に変遷していく可能性がある。例えば，沿岸域の地質環境は，内陸部に比べて，海水の影響や塩淡境界の長期変遷を考慮する必要があるといった特徴を有する。このような特徴を考慮した安全評価手法を整備しておくことは，地質環境の長期変遷への対応という観点から重要である。

② <u>さまざまな設計オプションに対応できるようにすること</u>：

処分場は，放射性廃棄物の特徴や地質環境の条件を考慮して，閉鎖後の安全性に加え，実用性，経済性，品質保証，効率性といった種々の視点も含めた総合的な評価に基づいて，段階的に設計が具体化／詳細化される。これらの総合的な評価には，廃棄体の定置方式などのさまざまな設計オプションが含まれる。サイトや岩種を特定しない研究開発段階の安全評価においては，代表的な地質環境の条件および設計を設定した上で，まず，単体の廃棄物に対して人工バリアと天然バリアを想定した核種移行解析を実施し，その結果に廃棄体の本数を乗じることで，システム全体の性能を保守的に評価した（JNC，1999a）。この評価方法では，地質環境が有する空間的な不均質性をより現実的に取り扱うことや種々の設計オプションを比較検討することが困難である。このため，これらの特徴を考慮するためのより現実的な安全評価手法を整備しておくことは，さまざまな設計オプションへの対応という観点から重要である。

③ <u>更新される知見を適切に安全評価に取り込めるようにすること</u>：

地層処分事業は長期的なプロジェクトであり，その間に関連する種々の科学的な知見が段階的に拡充されることが想定される。このため，NUMO としては，それらの知見を適宜整理する

とともに，それらを適切な段階で安全評価に取り込むことができるようにしておくことが重要である。

④ 超長期の不確実性を考慮して自然事象の影響を仮想的に評価できるようにすること：

自然事象の著しい影響については，適切なサイト選定によって回避されることが地層処分事業の基本的な考え方である。しかしながら，地層処分の安全評価において対象とする時間スケールが超長期となることから，その発生時期や頻度に関する不確実性を考慮することが必要となる。このため，わが国の一般的な特徴やサイト固有の特徴を考慮した上で，遠い将来において自然事象が地層処分システムに与える影響を仮想的に評価するための手法をあらかじめ整備しておくことは重要である。これにより，ステークホルダーからのさまざまな要求や懸念に対して応えることが可能になる。

本報告書では，これらの視点を踏まえ，NUMO が進めてきた技術開発の現状を 7.3.2 および 7.3.3 に述べる。さらに，安全評価においては，サイトの地質環境が有する不確実性を考慮した上で，対象とするシナリオに応じて，核種移行パラメータを適切に設定することが重要である。このため，核種移行解析パラメータ設定に関する信頼性および追跡性を向上させるためには，その基盤となる情報をデータベースとして取りまとめておくことやそのパラメータ設定への利用方法を整備しておくことが必要となる。それらについては基盤研究機関が行ってきた関連する技術開発の現状を 7.3.4 に記述する。なお，基盤研究機関が行ってきたシナリオ構築やモデル開発などの研究開発については，本報告書では詳細に掲載しないものの，地層処分事業の進展に応じて適宜活用・参考としていくものである。また，安全評価を支える個別現象の研究の進展（コロイド，収着などの現象理解）については，6.6.2 に示す。

7.3.2 項以降の目次構成を，以下に記す。

7.3.2　シナリオ開発に関する取り組み
- 7.3.2.1　地質環境の長期変遷に関するシナリオ開発（①）
- 7.3.2.2　ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオ開発（③）
- 7.3.2.3　自然事象に関するシナリオ開発（④）

7.3.3　核種移行モデル開発に関する取り組み
- 7.3.3.1　地質環境および生物圏の変遷に対応した核種移行解析モデル化技術の開発（①）
- 7.3.3.2　岩盤不均質性および処分場設計に対応した核種移行解析モデル化技術の開発（②）

7.3.4　核種移行パラメータ設定に関する取り組み
- 7.3.4.1　データベースの整備（①②）
- 7.3.4.2　データセット作成方法の構築（①②）

なお，第 3 章で述べた評価期間に関する考え方は，これらの技術の前提条件となるものである。本節では，評価期間に関する考え方がサイトの地質環境特性や安全規制側との議論に依存して変化する可能性があることから，評価期間の区分を設けずに技術の進展を示すこととした。

表 7.3.1-1 2000 年以降の安全評価に関する技術の進展（1／3）

項目		概要	文献	各研究成果が対象とする領域		
				A	B	C
シナリオ構築	効率的なシナリオ構築手法	ストーリボードと安全機能に基づく解析手法と FEP に基づく解析手法を組み合せたシナリオ構築手法の構築	Wakasugi et al.，2009	○	○	
		FEP と安全機能の関係を階層化して網羅性と効率性を向上させる手法の構築 マトリクス形式による FEP の相関関係を整理するためのツールの構築	JNC，2005（分冊 3_4.1.1） 牧野ほか，2007	○	○	
		既存の成果に基づき，シナリオを部分的に更新していくための考え方とその適用事例の整備	稲垣ほか，2008 稲垣ほか，2009	○	○	
		懸念される事象の影響について，安全機能と核種移行パラメータとの連鎖で分析し，影響の重要度を分類していく考え方の構築	大井ほか，2008 Ohi et al.，2009	○	○	
	FEP 情報の整備	FEP のリストや各 FEP に対する知見の文献情報に基づく整理（我が国の典型的な地質環境と人工バリアにおける地下水移行シナリオを対象） FEP 間の相関関係に対して，シナリオとして取り込む必要性や影響の有無に関する判定を実施 ・これらの成果の FEP データベースとしての公開	神崎ほか，2009	○	○	
	将来の長期変遷を考慮したシナリオ構築	**沿岸域における地質環境の特徴を，シナリオとしてより現実的に評価するための方法論の構築**	**7.3.2.1**	○	○	
		ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオを開発するための方法論の構築	**7.3.2.2**	○	○	
	自然事象の影響評価手法	天然現象の特徴とそれによる影響の伝播に関する地球科学的な知見を THMC（熱，水理，力学，化学）の変化に着目して整理し，核種移行解析モデル・パラメータ設定へとつなげていく手法の構築	JNC，2005（分冊 3_4.1.2） 川村ほか，2008 川村ほか，2009 Kawamura et al.，2008 江橋ほか，2009b Miyahara et al.，2009	○	○	
		サイト選定や工学的対策により回避することが前提となっているシナリオが発生したと仮定した場合（what if）の性能評価上の取り扱い手法の構築	Miyahara et al.，2008	○	○	
		遠い将来において，自然事象の著しい影響を仮想的に評価するための手法の構築	**7.3.2.3**	○	○	

各研究成果が対象とする領域　A:人工バリア　B:母岩　C:生物圏

表 7.3.1-2 2000 年以降の安全評価に関する技術の進展（2／3）

項目		概要	文献	各研究成果が対象とする領域		
				A	B	C
モデル開発	母岩の不均質性および設計オプションを考慮した解析手法	掘削影響領域における核種移行および遅延をより現実的に評価するための二次元の核種移行モデルの構築	若杉ほか，2004	○		
		母岩の不均質性や設計オプションをより現実的に評価するための三次元の核種移行モデルの構築	**Wakasugi et al.，2008** **7.3.3.2**	○	○	
		処分場の合理化・最適化の設計研究との連携強化に向けた，処分場デザインの変化に対応可能な核種移行モデルの構築	Murakami and Ahn，2008a Murakami and Ahn，2008b	○	○	
		地質環境特性の空間的不均質性を踏まえ，好ましい部位に処分場のレイアウトを展開し，多数の廃棄物を定置することで処分システム全体の性能改善を図るアプローチの構築	高瀬ほか，2006	○	○	
	地表環境および地質環境の長期変遷を考慮した解析手法	生物圏における気候変動の影響を，冷帯気候やツンドラ気候での降水量の減少に着目し，灌漑水量，浸透／流出量，食物摂取のパラメータを変更することで取り扱う生物圏評価モデルの構築と線量への換算係数の整備（高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物を対象）	JNC，2005 鈴木ほか，2006			○
		帯水層等の表層環境での水理・物質移行を生物圏評価に陽的に取り込むためのモデル構築手法の構築	稲垣ほか，2007 板津ほか，2009			○
		沿岸域における地質環境の特徴とその長期変遷を，核種移行解析モデルとして取り込むための方法論の構築	**7.3.3.1**		○	○
	解析コードの改良	地下水解析コード（FEGM）および核種移行解析コード（FERM）に関する改良が行われ，それらをエスポ地下研究施設（SKB）の地下水解析・塩化物イオン濃度解析に適用	長谷川ほか，2004		○	
		核種移行パラメータの時間的変化を考慮した核種移行解析を効率的に解析するための核種移行解析モデルの構築	小尾，2010	○	○	
核種移行パラメータ設定	データベースや知見の整備	ガラス溶解に関するデータベースの構築	林ほか，2005 林ほか，2008	○		
		熱力学データベースの構築	Kitamura et al，2010	○	○	
		収着データベースの構築	舘ほか，2009	○	○	
		拡散データベースの構築	栃木・舘，2009 栃木・舘，2010	○	○	

各研究成果が対象とする領域　A:人工バリア　B:母岩　C:生物圏

表 7.3.1-3 2000 年以降の安全評価に関する技術の進展（3／3）

項目		概要	文献	各研究成果が対象とする領域		
				A	B	C
		生物圏移行データベースの構築	放医研，2009			○
		天然放射性核種の濃度とフラックスにかかわるデータ収集・整理および集水域に着目した天然放射性核種のフラックスの算出方法の構築	JNC，2005 IAEA，2005			○
核種移行パラメータ設定	データベースや知見の整備	ICRP1990 年勧告を反映した現行法令に基づく生物圏評価対象核種に対する線量への換算係数の整備（高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物）	鈴木ほか，2006			○
		収着や拡散に関するデータ測定方法の標準化	原子力学会，2006	○	○	
	安全評価用データセットの設定	実際の地質環境等を対象とした収着分配係数の設定の試行と収着データベースの活用に関する方法論の構築	JNC，2005（分冊 3_4.2.1） Ochs et al.，2008 舘ほか，2009 舘ほか，2010		○	
		特定の地表環境条件に関係する生物圏パラメータを，パラメータの重要度，データベースの整備状況，データ入手可能性などを考慮しつつ設定する手順の構築	Kato and Suzuki，2007 Kato et al.，2009 Smith and Kato，2010			○
影響解析	感度解析・不確実性解析手法	評価結果に対して影響が大きいパラメータやその定量的な条件の抽出	Wakasugi et al.，2000 若杉ほか，2002 仲島・牧野，2006 Ohi et al.，2007 江橋ほか，2009a	○	○	
		・生物圏評価で重要な GBI（Geosphere-Biosphere Interface）の設定に影響を与える不確実性要因の地質環境の特徴と関連付けた整理 ・多数の生物圏評価パラメータの中から重要度の高いパラメータを特定するための手法の構築	JNC，2005 加藤・鈴木，2008 Kato and Suzuki，2007 Kato et al.，2009 Smith and Kato，2010			○
	補完的指標	表層での希釈水量などの不確実性を排除するための，処分場下流の断層破砕帯から帯水層への地下水の流出点での放射性核種のフラックスと天然のフラックスを比較する手法の構築	Miyahara and Kato，2007			○
他分野との連携		具体的な地質環境が与えられた場合の地質環境の調査・評価から核種移行解析に至る一連の作業手順・手法の例示	牧野ほか，2005	○	○	

各研究成果が対象とする領域　A:人工バリア　B:母岩　C:生物圏

7.3.2　シナリオ開発に関する取り組み

7.2.2 において述べたように，NUMO が行うシナリオ開発では，対象とする地質環境の条件やこれと対応する処分場概念といった前提条件に応じて，システムの理解を深め，また，その理解に基づきシナリオ構築を行うこととしている。第２次取りまとめにおいては，陸域を中心としたシナリオが開発された。ここでは，NUMO が進めてきた「沿岸域を対象としたシナリオ開発（7.3.2.1)」，「ニアフィールドの長期変遷シナリオ開発（7.3.2.2)」，「自然事象のシナリオ開発（7.3.2.3)」について記述する。

7.3.2.1　地質環境の長期変遷に関するシナリオ開発

地質環境は種々の自然事象の影響により長期的に変遷することが予想される。また，このような自然事象の中には，火山活動や断層活動のようにサイト選定により著しい影響を回避することが基本であるものと，気候・海水準変動や隆起・侵食のように，継続的に生じているものでその程度を評価していくものと考えられるものとがある。特に,沿岸域においては，気候・海水準変動や隆起・侵食による処分システムと環境の動的な変遷（海水の影響や塩淡境界の分布など）が重要な特徴と考えられる。ここでは，これらの特徴を踏まえて，地質環境の長期変遷に関するシステム理解及びこれに対応したシナリオ開発の具体例について説明する。図 7.3.2-1は，沿岸域を対象としたシナリオ構築の手順を示している。

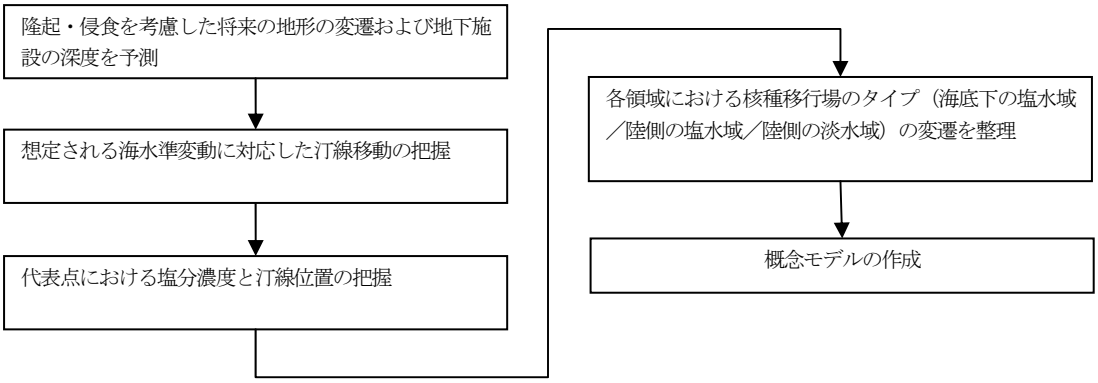


図 7.3.2-1 沿岸域を対象としたシナリオ構築の手順

(1)　気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷の類型化

気候･海水準変動および隆起･侵食による処分場を含む地域の環境変遷の類型化の方法に関して，沿岸域を例として説明する。想定する具体例の特徴を，表 7.3.2-1にまとめる。

上表に示した条件に従い,海水準の周期的変動および代表点(現在の汀線から沖合にそれぞれ3km, 4km，5km離れた海底面とした）の標高（現在の海水準に対する）を算出した結果が図 7.3.2-2である。各代表点では 0.5mm/yの速度で継続的に隆起が生じているものとし，また，現在のように海底に位置している期間には侵食は生じないが，隆起および海退によって将来地表に露出した際には，当該期間を通じて隆起速度を上回らない程度の侵食が生じることを仮定している。なお，簡単のため, 堆積はここでは考えないこととする。各代表点の標高は, 侵食速度によって異なることとなり，侵食速度を隆起速度と等しいとした場合（ケースa）には，図 7.3.2-2の実線で示したように，海底に位置する期間には標高は 0.5mm/yで上昇し，また，地表に露出している期間には，隆起が等量の

侵食によって相殺されるため標高は変化しないこととなる。他方，侵食速度を 0 とした場合（ケースb），同図において破線で示したように，時期によらず各代表点の標高は 0.5mm/yという一定の速度で上昇することとなる。侵食速度の不確実性に起因する各代表点の標高の幅について，ケースaとケースbとは，それぞれ，下限と上限に対応することとなり，実際の各代表点の標高はこの両極端の間（図 7.3.2-2における実線と破線の間）で推移するものと考えられる。

表 7.3.2-1 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関して想定する例

海水準変動の周期	10 万年 海退：7.5 万年 海進：2.5 万年	参考：過去数十万年程度については 10 万年程度の明瞭な周期性が認められている（JNC，1999b など）。
海水準変動の範囲	現在の海水準～-120m	参考：過去数十万年程度の海水準は，現在の水準と比較して，＋数 m～－120m程度の範囲で変動している（JNC，1999 など）
地形勾配	5%	—
隆起速度	0.5 mm/y	参考：藤原ほか（2005）によれば，日本列島における隆起速度は最大 1mm/yr 程度であり，中でも 0.6mm/yr を超える地域は分布が限られる。
侵食速度	＜隆起速度	参考：JNC（1999b）など
地温勾配	3℃/100m	参考：日本における平均的な地温勾配

侵食速度の想定に関するケース a とケース b とでは，環境変遷の様相が顕著に異なるものと考えられる。ケース a では，海退時の侵食によって隆起量が相殺されるため，将来，このような期間の割合が増すにつれて標高の上昇は徐々に鈍化することとなる。そして，その後は海水準の振幅の範囲内に留まり，海進・海退の度に海底と陸域の環境が交互に現れることとなる。一方，ケース b では，標高の上昇が一定速度であるため，各代表点は 20 万年～40 万年後には離水し，その後は恒久的に陸域の環境となって丘陵から山地へと推移することが予想される。

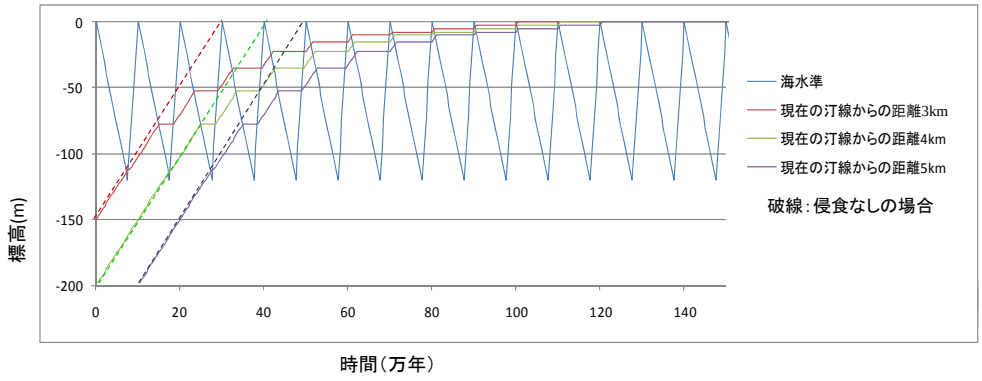


図 7.3.2-2 代表点における標高の時間変化

上図に示したように，標高が上昇する速度の鈍化は，現在の汀線に近い位置から順に始まることとなり，初期の標高の低い沖合の代表点の標高が，汀線に近く標高の高い代表点に徐々に追いついていくという挙動を示す。そして，このことは，ケースaの場合には，海底の地形勾配が徐々に小さくなることを示唆している。実際，現在の汀線から 8kmの範囲内の海底地形の変化を算出した結果（図 7.3.2-3）が示すように，時間の経過とともに地形勾配は減少する。例えば 60 万年後には，現在の汀線から 8kmにある範囲が海水準の振幅の範囲内に含まれるようになり，また，70 万年後にはこの範囲の平均地形勾配が 1%を下回ることとなる。

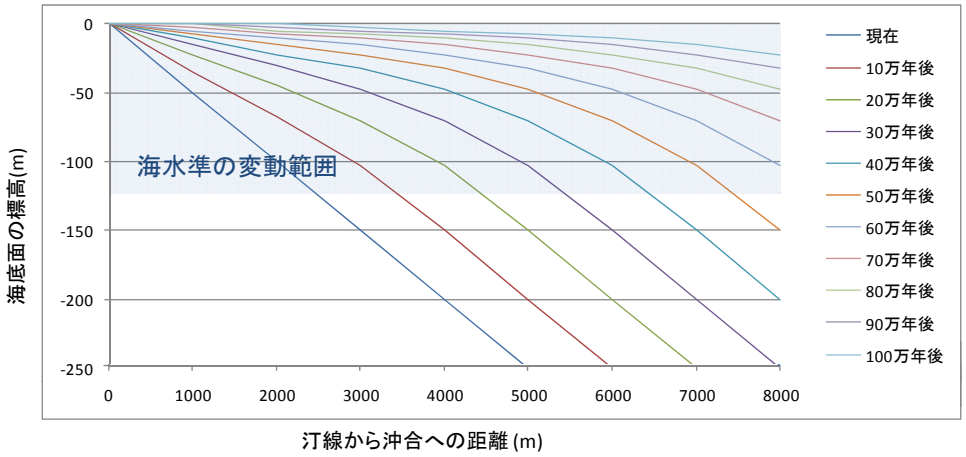


図 7.3.2-3 侵食速度が隆起速度と等しい場合（ケース a）の地形勾配の時間変化

侵食速度の不確実性に対応して想定した上記の二つのケースに応じて，図 7.3.2-4に示すように，将来の汀線の移動も大きく異なったものとなり，以下のような特徴を呈することとなる。なお，海退時の汀線位置は，侵食の影響に依存しないため，いずれのケースでも同じである。

- ケース a では，海退時の汀線は時間の経過とともに徐々に沖合へと移行するのに対して，海進時の汀線は一定である。また，このため，汀線の移動距離は徐々に拡大する
- ケース b では，海進時も海退時も汀線が徐々に沖合へと移行し，汀線の移動距離は時間に依らず一定である

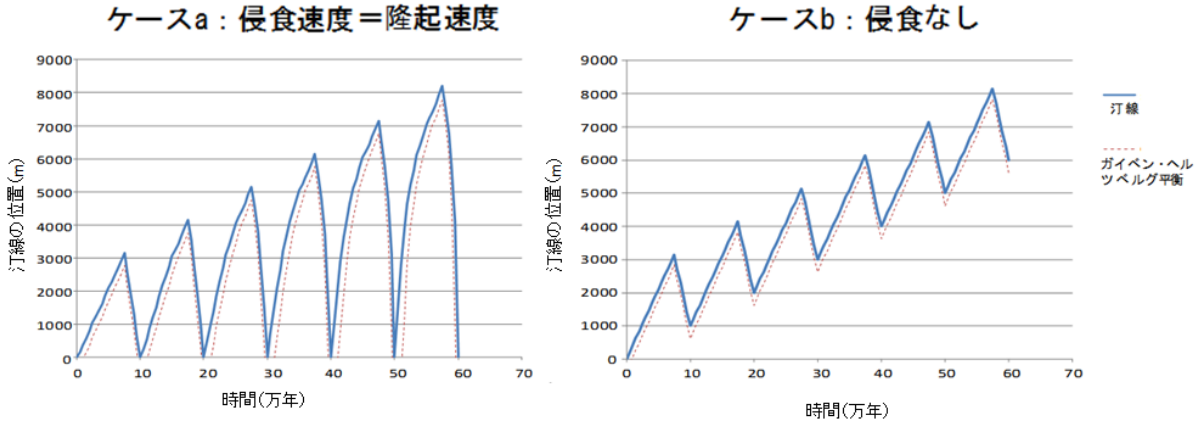


図 7.3.2-4 将来の汀線の移動挙動の侵食速度依存性

処分場が設置される地下深部においても，塩水域と淡水域との境界（塩淡境界）が生ずることとなるが，その位置は，汀線とは一致しないことが知られている。なお，実際には，塩水と淡水とは非混合性ではないために遷移域を伴うが，ここでは，対象とする系全体のスケールに比して遷移域は十分に小さいものと仮定する。

地下水流動が定常状態にある場合の，塩淡境界の平衡位置は，ガイベンヘルツベルグの式から推定することができ（Domenico and Schwartz，1998），淡水と海水の密度差（約 2.5%）に起因して，

陸域の塩淡境界は当該地点の標高の 40 倍に相当する深度に位置することとなる。なお沿岸地域の地下では，比重の大きい海水が淡水の下方にくさび状に入り込み，塩淡境界が形成されていると考えられており，ガイベン・ヘルツベルグの法則は，陸域と海域の条件が長期間一定であったとした時の塩淡境界形状を表す法則である。この法則によれば，陸域の地下水位（海水面から地下水面までの高さ）をh，淡水の密度をρf，海水の密度をρs，重力加速度をgとすると，水圧の釣り合いから海水面から塩淡境界面までの深さHは，$\rho sgH = \rho fg(H + h)$ から求められる。$\rho f = 1000kg/m^3$，$\rho s = 1025kg/m^3$ を代入すると，H/h=40 となり，地下水位の 40 倍程度深部に塩淡境界が形成されることになる（日本地下水学会，2010）。図 7.3.2-4に示した汀線近傍の赤い点線は，想定される処分場位置として，例えば標高-750mにおける塩淡境界のガイベンヘルツベルグ平衡の位置を示したものである。

図 7.3.2-2に示したように海水準および標高が時間とともに変化するような動的な系では，深部の塩淡境界は，必ずしも各時点でガイベンヘルツベルグ平衡の状態を保ちつつ移行するわけではない。特に，地層処分の母岩となるような低透水性の地層では，塩淡境界が海水準および標高の変化に追随できず，ガイベンヘルツベルグ平衡に対して遅れが生ずることが予想される。つまり，海退時には，陸側の地形勾配を駆動力として塩淡境界が沖合へと移動するのに対して，海進時にはガイベンヘルツベルグ平衡よりも海側に残留した淡水と海水との比重の差を駆動力として塩淡境界が陸側へと移動することとなる。従って，塩淡境界の移動は，一般に，海退時のほうが海進時よりも大きいものと考えられる。他方，すでに述べたように，海退時において，海水準は約 7.5 万年間で 120m低下するのに対して，海進時には約 2.5 万年間で 120m上昇することから，汀線の移動は，海進時のほうが 3 倍程度速いこととなる。以上は，母岩の透水性に応じて，地下深部の塩淡境界の移動に関して，以下の類型化が可能であることを示唆している。

① 母岩の透水性が十分高く，海進・海退のいずれにおいても，汀線の移動に追随しガイベンヘルツベルグ平衡の位置にある
② 海退時には汀線の移動に追随しガイベンヘルツベルグ平衡の位置にあるが，海進時には追随できない
③ 母岩の透水性が低く，海進・海退のいずれにおいても汀線の移動に追随できない
④ 母岩の透水性が極めて低く，塩淡境界はほとんど移動しない

なお，侵食速度が隆起速度と等しいことを想定したケースaにおいて，上記に従って，気候・海水準変動および隆起・侵食に伴う環境変遷の類型化を行った結果を図 7.3.2-5に示す。

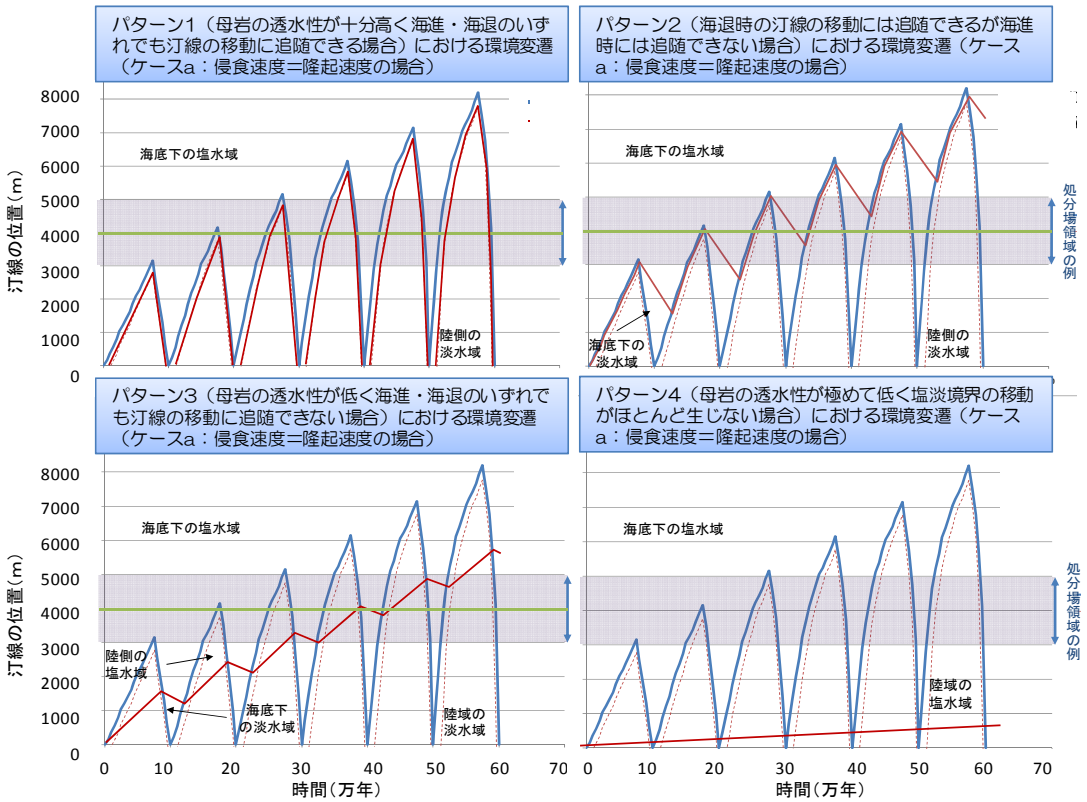


図 7.3.2-5 沿岸域における環境変遷の類型化の概念

図 7.3.2-5に示したように，低透水性の母岩中における塩淡境界の移動が海進時あるいは海退時の汀線の移動から遅れることで，海底下に淡水が取り残された領域（図中の「海底下の淡水領域」）や陸域に取り残された塩水（同，「陸側の塩水領域」）が生ずることとなる。このような過渡的な環境を含めて考えた場合，例えば，現在の汀線から沖合 3km～5kmの範囲に処分場を展開した場合の中心部（沖合 4km）での環境は，各パターンにおいて，時間とともに，次のように推移することとなる。

- パターン 1：海底下の塩水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の塩水域⇒陸側の淡水域・・・・・
- パターン 2：海底下の塩水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域・・・・・
- パターン 3：海底下の塩水域⇒陸側の塩水域⇒海底下の塩水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域・・・・・
- パターン 4：海底下の塩水域⇒陸側の塩水域⇒海底下の塩水域⇒陸側の塩水域・・・・・

侵食速度を 0 と仮定したケース b においても，同様の類型化を行うことが可能である。この場合には，すでに述べたように，一定期間を経過すると，処分場を含む領域は離水し，完全に陸域の環境へと推移することとなる。（NUMO，2010a）

NUMO は，これまでに，多様な地質環境を仮想的に設定して密度流解析を行い，その結果と対照することによって，以上のような環境変遷の類型化の妥当性についての検証を行ってきた。

気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷として重要なものは，塩淡境界の移動を伴う過渡的な地下水流動およびこれに伴う地下水水質の変化であると考えられる。NUMO は，これまでに国内外で開発されてきた密度流解析コードの調査を行い，地層処分事業で用いる解析モデルの候補を選定して環境変遷の予測を行うための方法論と手順を整備してきた。また，非定常密度流解析モデル DTRANSU を用いて，仮想的な地質環境における気候・海水準変動および隆起による環境変

遷予測も試みてきた。なお，DTRANSU を含む既存の密度流解析コードは，侵食に伴う地形変化を逐次反映する機能を有するものではないために，侵食の影響が顕著とはならない程度の期間内を対象として解析を実施した。密度流解析モデルの調査および方法論の整備，DTRANSU を用いた仮想的な地質環境における気候・海水準変動および隆起による環境変遷予測の試行については，技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。

(2) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷についてのシナリオの構築

前項において述べたように，将来の気候・海水準変動および隆起・侵食の複合的な影響によって生ずる沿岸域での環境変遷は，ある程度類型化することが可能である。ここでは，前出の四種類のパターンのうち最も複雑な変遷挙動に対応するケースaのパターン 3（図 7.3.2-5）を例として，次節で述べるニアフィールドの長期変遷に関するシナリオ開発のための境界条件をまとめることとする。

廃棄体と人工バリアおよびその近傍にある母岩からなるニアフィールドにおいては，7.2.1 に述べた種々の安全機能が期待されており，また，これらの安全機能についてのシステムの性能は，種々の熱的条件，水理条件，力学・物理条件，および化学条件といったニアフィールド環境条件によって規定されることとなる。次節において，ニアフィールドの変遷に関するシナリオを構築する際には，これらの環境条件がどのような現象の影響を受けつつ，どのように変化するのかをシナリオとしてまとめる。そこで，このような検討の前提として，境界条件となる処分場の領域周辺の環境条件がどのような現象によって影響されつつ時間の経過とともに推移するかを設定する必要がある。このような観点から，ニアフィールドの境界条件として着目すべき処分場周辺の環境条件と，気候・海水準変動や隆起・侵食による環境変遷において予想されるこれらの環境条件への影響因子を整理した結果を表 7.3.2-2に示す。

表 7.3.2-2 ニアフィールドの境界条件として着目すべき処分場領域周辺の環境条件および気候・海水準変動や隆起・侵食による環境変遷における影響因子

環境条件		影響因子
熱的条件	• 地温	• 隆起・侵食による深度減少
水理条件	• 地下水流向分布 • 地下水流量分布 • 圧力分布	• 隆起・侵食による地形変化 • 海水準変動による地下水流動基準面の変化 • 塩淡境界の移動による流向・流速の変化
力学および物理条件	• 地圧 • 水圧	• 隆起・侵食による深度減少 • 海水準変動による基準面の変化
化学条件	• 地下水水質	• 塩淡境界の移動による水質変化 • 異なる水質間での混合

上表に挙げた環境条件およびこれらに対する影響因子に着目して作成した概念モデルの例が表 7.3.2-3～表 7.3.2-6 である。ここでは，図 7.3.2-6に示した環境変遷のパターンに従い，時間および空間を以下のように区分することとした。

- 空間区分：現在の標高-750m において汀線から沖合 3km～5km に展開される処分場領域の中で，汀線からの距離に応じて環境変化に位相差が生ずることから，処分場領域を陸側，中央部および沖合側の三つに区分する
- 時間区分：上記の三つの処分場領域において環境変化の生ずる 2 回目～6 回目の海水準変動のそれぞれにおいて処分場よりも汀線が陸側にある期間と海側にある期間とを区分する

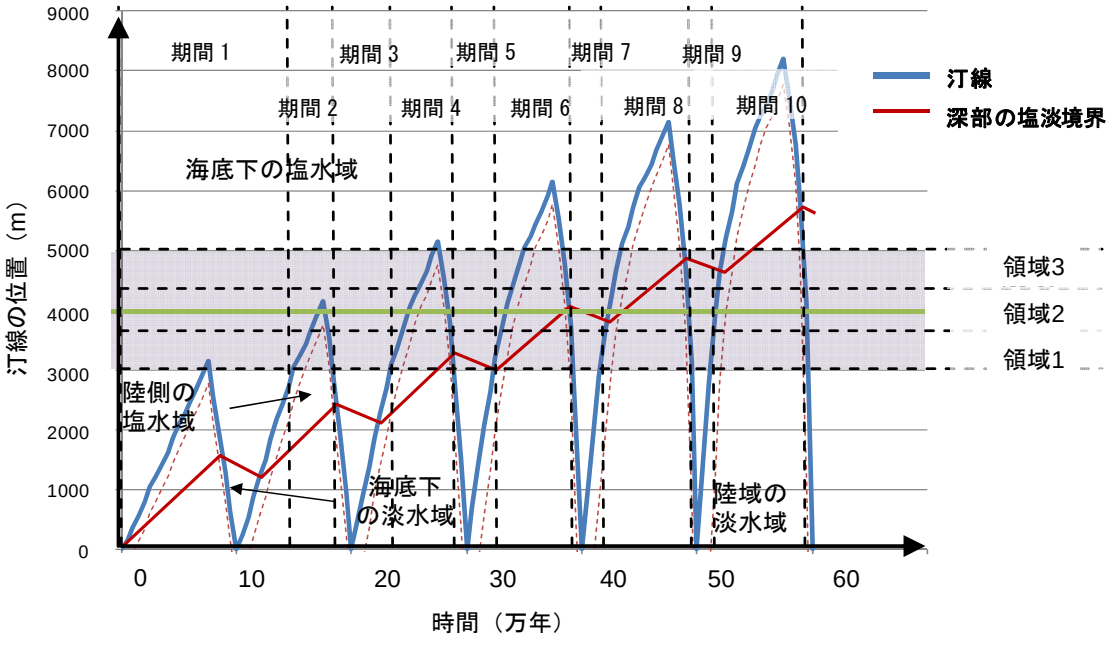
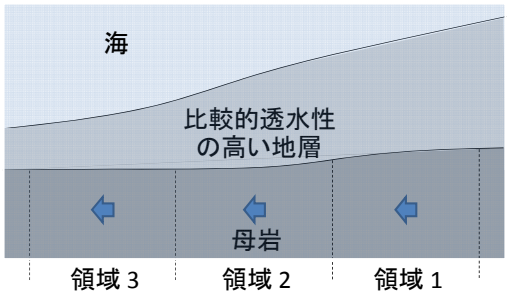
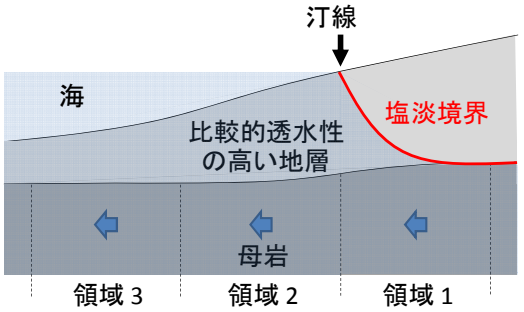
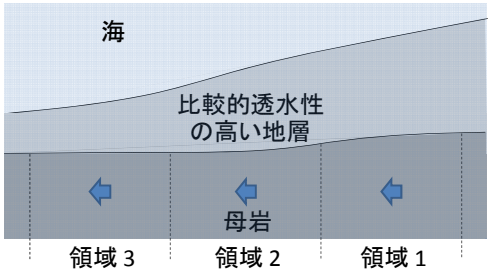


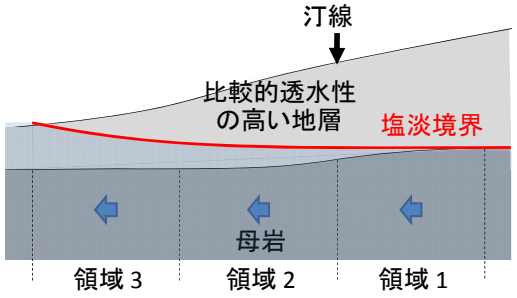
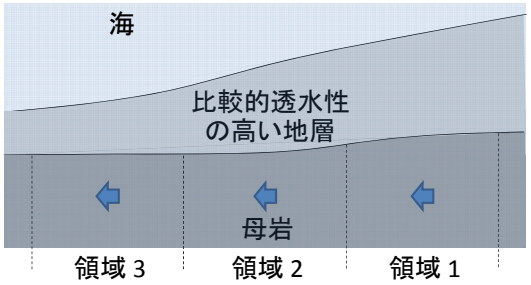
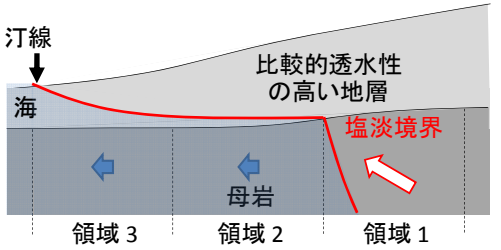
図 7.3.2-6 ストーリボードのための時間・空間区分

表 7.3.2-3 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケース a：パターン 3）(1/4)

		期間 1	期間 2	期間 3
				
領域 1	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下
	水理条件	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側，塩淡境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		10 万年間で地圧が?MPa 程度低下
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 2	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 3	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）

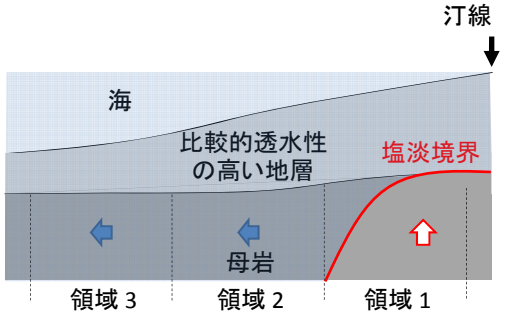
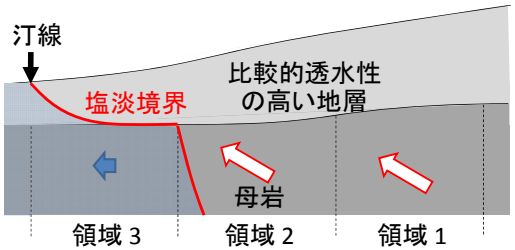
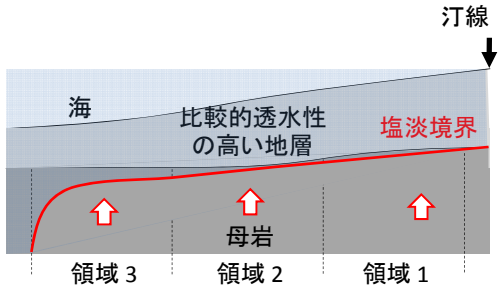
矢印は，地下水の流向と大きさを意味する

表 7.3.2-4 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケース a：パターン 3）(2/4)

		期間 4	期間 5	期間 6
				
領域 1	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	汀線および塩淡境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水
領域 2	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側，塩淡境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 3	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	汀線よりも陸側，塩淡境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側，塩淡境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）

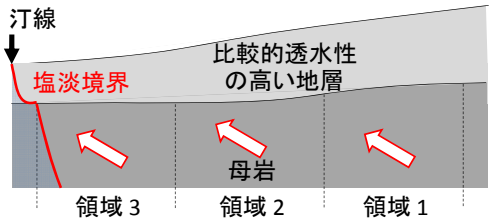
矢印は，地下水の流向と大きさを意味する

表 7.3.2-5 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケース a：パターン 3）(3/4)

		期間 7	期間 8	期間 9
				
領域 1	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下		
	水理条件	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きの遅い流れ	汀線および塩淡境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きの遅い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	降水起源の地下水	降水起源の地下水	降水起源の地下水
領域 2	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流動	汀線および塩淡境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きの遅い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水	降水起源の地下水
領域 3	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に海進時には陸側に微小な流れ	汀線よりも陸側，塩淡境界よりも海側にあり，海側に向かった遅い流れ	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きの遅い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水

矢印は，地下水の流向と大きさを意味する

表 7.3.2-6 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関する概念モデルの例（ケースａ：パターン3）(4/4)

		期間 10
		
領域 1	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下
	水理条件	汀線および塩淡境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下
	化学条件	降水起源の地下水
領域 2	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下
	水理条件	汀線および塩淡境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下
	化学条件	降水起源の地下水
領域 3	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5℃程度低下
	水理条件	汀線および塩淡境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下
	化学条件	降水起源の地下水

矢印は，地下水の流向と大きさを意味する

7.3.2.2　ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオ開発

7.3.1 において述べたように，地層処分事業では拡充された知見の整理とその閉鎖後長期安全性に与える影響の把握が求められる。そこで，研究などにより得られた最新の知見をシナリオ開発へどのように取り込んでいくかについて，ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオ開発を例として示す。

地層処分事業において，ニアフィールドを構成する人工バリアや周辺母岩は核種移行を抑制するバリアとして機能するため，システムの将来挙動を理解することは，処分場設計にまで影響を与えるため，重要である。そのため，第２次取りまとめ以降もニアフィールドにおける長期的変遷が人工バリアや周辺母岩へ及ぼす物理的・化学的影響の理解のためにさまざまな研究がなされてきた。その例として，低酸素濃度雰囲気下での緩衝材中における炭素鋼の腐食速度とその適用条件やオーバーパックの腐食膨張に伴うガラス固化体の破砕メカニズムの解明などが挙げられる（NUMO，2010a）。NUMO は，このような新たな知見に対して情報を FEP カタログという形で整備を進めている（NUMO，2010a）。また，閉鎖後長期安全性に与える影響の把握に対しては，7.2 において記述したストーリボードを用いた視覚的な理解方法を用いることを行ってきた。特に後者の手法を導入したことにより，安全機能を持つ各システム間の相互作用を直感的に理解することができるようになった。

本項では，新たな知見を取り入れてストーリボードを構築するところから，基本シナリオの構築に至るまでの一連を説明する。

ニアフィールドにおいては，サイト調査，処分場の建設・操業・閉鎖に引き続き，前節で述べた地質環境の変遷によって規定される境界条件下で人工バリアおよび近傍の母岩から成るシステムの変遷が生ずることとなる。ここでは，主として第２次取りまとめ（JNC，1999a）以降に関連する種々の研究領域において得られた知見（NUMO，2010a）を集約することで，このようなシステムの現実的な変遷を時系列的に整理する。

（1）　地層処分における経年変化の捉え方

種々の産業分野における建造物や機器などは，製作・設置直後の初期状態において機能を発揮するように設計されている。このため，その後の経年変化は，ほぼ「劣化」と同義のものとして捉えられることが多い。そして，このような「劣化」が進行して期待する機能の低下や安全上の問題が生ずるようになると，当該部分の補修や交換といった修復が行われることとなる。

地層処分システムは，上述した現代の通常の工学における考え方とは，以下の二つの点において大きく異なっている。

① 非修復系による受動的安全性：地層処分システムの機能が求められる期間が極めて長期に及ぶため，その間の状態の監視および修復に依存しない受動的な安全性を達成することを基本として設計される。

② 経年変化を前提とした機能性：高レベル放射性廃棄物の閉鎖後初期の状態においては，廃棄物の発熱のために高温であり，また，人工バリア内が未飽和で酸化性環境にあるような状態であり，この間はオーバーパックにより廃棄物を閉じ込めることが基本である。その後，温度低下，水分飽和，還元性環境への推移，そして異なる人工バリア材の境界での種々の反応と変質等が進行して定常的な状態となった後には，低透水性や低拡散性あるいは収着性といった安全機能へと重点を移していくこととなる。また，密封性を失った後のオーバーパックも，将来の酸化

性地下水の侵入や水の放射線分解による酸化剤の生成といった変動要因に対する頑健性をもたらすものとして期待することができる。このように，経年変化を前提として，安全機能が時系列的に展開されるように多重バリアシステムの設計が行われる。

上記の②は，地層処分システムにおいては，経年変化が必ずしも「劣化」ではないことを意味しており，また，このことが，修復に頼ることなく長期にわたって受動的に安全性を確保するという①の要請を満足する上で重要な要件となっている。

このような前提のもとに，NUMO の行う地層処分事業においては，最新の知見に基づき地層処分システムの長期変遷についての理解をまとめ，これを安全評価の前提とすることに加え，システムの理解に基づく初期条件の設定（処分場の設計）と品質管理に情報を提供することが重要である。

(2) ニアフィールドにおけるシステム変遷の特徴

初期の期間における地層処分の安全確保の目標は，主として核分裂生成物に由来する高い放射能を有する高レベル放射性廃棄物を閉鎖後の地下施設に搬入・定置し保持する際の安全性の確保（人工構築物としての安全性）である。これに対して，数万年以上の長期の時間経過後においては，安全確保の目標が，沈殿（二次鉱物生成）や鉱物などへの収着などによる放射性核種の地質環境中における安定性の確保（天然系としての安定性）へと変化する。そして，この間の変遷期には，「人工構造物としての安全性」と「より天然に近い系（環境に適応して材料間の境界などが変質した人工バリアシステム）としての安定性」とを各時期の放射能レベルおよび不確実性を勘案して適切なバランスで組み合わせることで，想定される種々の不確実性の影響を考慮しても双方が共に喪失することのないよう，確実に前者から後者へと推移することが重要となる。

人工構造物としての安全性は，構造的な強度や応力緩衝性あるいは材料の耐久性によった以下のような工学的対策によってもたらされるものである。

- 高レベル放射性廃液のガラス固化
  - 核種（特に可溶性のもの）の溶出率制限
- オーバーパックへのガラス固化体の封入
  - ガラス固化体と地下水の接触の抑制
- 緩衝材の設置
  - 止水性
  - 力学的緩衝性

他方，上述した工学的対策の組み合わせによる施設としての安全性を補完し，徐々に長期的安全確保の主役となるものは，人工バリアを含むより天然に近い系としてのニアフィールドの安定性であり，これは，

- 難溶解性の元素の沈殿や結晶化
- 収着
- 材料の表面や異種材料間の境界面に緻密な変質層が形成されることによる物質移動抑制
- 可塑性に優れた緩衝材の進入あるいは二次鉱物の沈殿による開口部の自己シーリング
- 自然事象の影響などの処分場周辺環境の急激な変化に対する頑健性

といった種々のメカニズムによってもたらされるものと考えられる。なお，ニアフィールドの長期変遷についてのシステム理解は技術資料（NUMO，2010b）に詳しくまとめている。

また，このような機能的な変遷は，図 7.3.2-7にまとめたように，地下深部の環境と必ずしも整合

的ではない人工構築物の特徴が，周囲の環境に適応していく過程と見ることもできる。

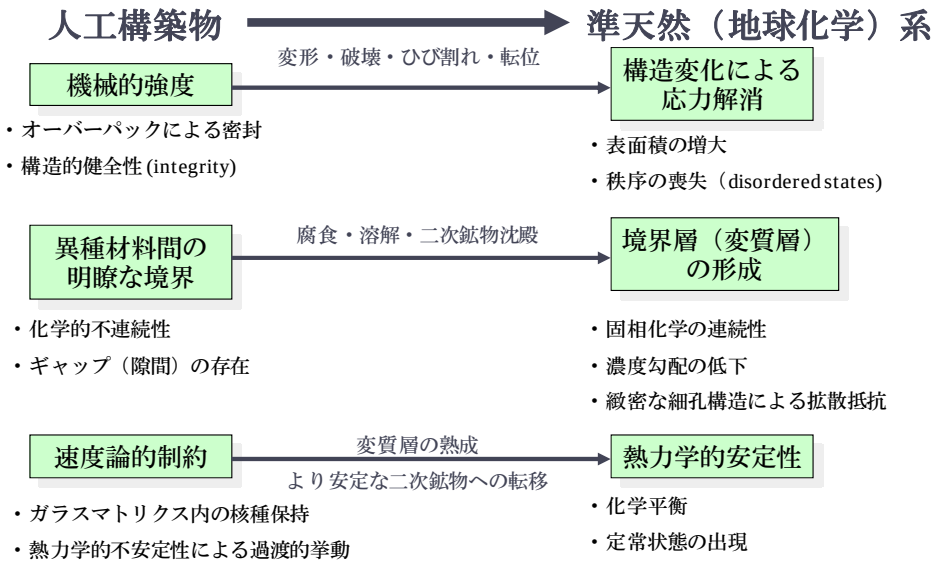


図 7.3.2-7 地層処分システムの機能的変遷に対応する特徴の変化

(3) システムの理解に基づく安全機能の設定

ここでは，システムの理解に基づく安全機能と性能目標の設定の考え方を述べる。地下水による放射性核種の漏出と移行を想定した場合のニアフィールドでの閉じ込めは，核種移行率の低減および移行を遅延する間の放射能の減衰を目指すものであり，以下に挙げる安全機能が考えられる。

- 容器による閉じ込め
- 廃棄体からの浸出抑制
- 核種収着性
- 低拡散性
- 低透水性
- 顕著な核種移行が生じる経路形成の防止

また，これらの安全機能は，高レベル放射性廃棄物や地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分あるいは低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分などにおいて一般的に適用可能なものであり，廃棄物の特徴や処分概念に対応して適切な機能を選択し（例えば，発熱による廃棄体周囲の環境条件の過渡的挙動が問題とならないような廃棄物については「容器による閉じ込め」は安全機能として選択しないなど），組み合わせることで安全確保を目指すこととなる。

安全機能を選定し，性能目標を設定して設計を行うためには，将来の地層処分システムの物理・化学的状態および状態の変化をもたらすような現象群を十分に理解するとともに，現状の知見では排除することのできない不確実性を抽出することを目的とした「システム理解」が重要である。また，システム理解は，安全評価のみならず，設計やサイト調査にも密接に関連するものであり，これらの間の連携を取りつつ進めるとともに，その成果を共有することによって分野間の整合性を確保することが肝要である。

システム理解は，以下に示す手順に従い行う。

i. 地下水による放射性核種の漏出・移行に含まれる具体的な現象（以下，核種移行という）を抽出する

ii. 抽出された現象に安全機能を対応付け，各安全機能を地層処分システムのどの部位に期待するかを明らかにする
iii. 地層処分システムの各部位において安全機能の発現に寄与する具体的な現象（以下，安全機能に寄与する現象という）を抽出する
iv. 安全機能に寄与する現象を規定するような地層処分システムの状態（以下，環境条件という）を抽出する
v. 環境条件の変遷に関与するような具体的な現象（以下，環境条件への影響因子という）を抽出する
vi. 地質環境の特徴や処分施設・人工バリアの仕様を踏まえ，「環境条件への影響因子」によって生ずると予想される「環境条件」の変遷，環境条件の変遷に対応した「安全機能に寄与する現象」の振る舞い，環境条件の変遷および安全機能に寄与する現象の振る舞いに応じた「核種移行」について，実験や原位置での観察あるいはコンピュータシミュレーションなどを含む当該時点で得られる最適の科学的知見を整理する
vii. システム理解に関する科学的知見に含まれる不確実性要因を抽出する

なお，サイト調査によって明らかにされる地質環境の条件や設計によって具体化される処分施設・人工バリアの仕様を適宜取り入れつつ，システム理解が進められることが必要である。他方，サイト調査および設計はシステム理解に基づき行われるものであるため，これらと並行しつつ，上記の i～vii の過程を反復的に繰り返しつつ進めることとなる。そして，核種移行挙動，安全機能に寄与する現象，環境条件および環境条件への影響因子（これらを総括して，以下，システム理解に関連する FEP という）について，地層処分システムの構成要素および安全機能と対応付けながら，必要に応じて時間や空間スケールで区分しつつ，整理することが必要である。また，この成果は，設計やサイト調査との連携も勘案して多角的な観点から利用可能なものとすることが求められ，さらに，多分野間の整合的な情報の共有にも留意することが必要である。そこで，NUMO では，システム理解の結果を，ストーリボードと呼ぶ視覚的な表現を活用した形式で整理している。なお，ストーリボードにおいて取り上げる「システム理解に関連する FEP」については，基盤研究開発における最新の知見に基づき整理することが重要と考える。また，残された不確実性要因を明らかにしておくことが重要であることから，NUMO では，FEP カタログとして関連する基盤情報の整備を進めている。

表 7.3.2-7および表 7.3.2-8に，高レベル放射性廃棄物地層処分に関する第２次取りまとめのリファレンスケースを例として，「システム理解に関連するFEP」を抽出した結果を示す。なお，これらのFEPおよびFEP間の相互作用に着目しつつ, ニアフィールド環境がどのように変遷するかをストーリボードとして整理した結果の例を表 7.3.2-9 ～
表 7.3.2-12に示す。なお，これらのストーリボードの詳細およびこれらに対して現時点で最適と考えられる科学的知見および対応する不確実性要因に関するFEPカタログについては技術資料（NUMO，2010a）に示す。

第２次取りまとめ以降のオーバーパック腐食に関する研究において還元環境での炭素鋼の全面腐食速度を２μm/年程度と想定することが現実的であることが示されている（JNC，2005）。また，オ

ーバーパックの変形・開口に対する腐食代を 10m とするのは保守的であるという解析結果が得られている（NUMO，2010a）。これらのことから，オーバーパックの開口時期は，現実的には 1 万年後程度と予想されることに着目し，ニアフィールドの環境変遷を，安全確保上の意義の観点から以下の三期間に区分して，それぞれについてストーリボードを作成し，検討を進めている。

- 期間 I ：坑道閉鎖後の過渡期（坑道閉鎖～1,000 年後）
  - ➢ 廃棄体からの熱および処分場の建設・操業時に導入された空気の影響（不飽和領域の形成及び酸化性条件への推移）が回復して核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が成立する
  - ➢ 緩衝材中のベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され，緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することで，物質移動が拡散によって支配される場が確保される
- 期間 II ：オーバーパック開口までの期間（1,000 年後～1 万年後）
  - ➢ 炭素鋼と緩衝材，緩衝材とコンクリート支保という熱力学的には両立しない材料間の溶質移動と化学反応に伴い，環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され，間隙が閉塞することで定常的な地球化学的構造が成立する
  - ➢ オーバーパックの水密性により，上記の定常的な地球化学的構造が出現するまで廃棄体中に核種が閉じ込められる
- 期間 III ：1 万年後～10 万年後
  - ➢ オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始するが，ガラス近傍の Si 濃度の上昇および表面変質層による溶解抑制によって浸出率は徐々に低下する
  - ➢ ガラス近傍での水の放射線分解によって生ずる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持され，アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する
  - ➢ オーバーパックの外側では期間 II までに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生ずる。この際，核種は鉄腐食生成物や緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される

表 7.3.2-7 システム理解に関連する FEP の整理例（第２次取りまとめリファレンスケース）(1/2)

現象			関連する環境条件
核種移行		• 核種の溶解 • 核種の拡散 • 核種の移流・分散	• 水質（pH，Eh および主要塩濃度など） • 温度 • 地下水（実）流速
安全機能	容器による閉じ込め	• 炭素鋼の耐食性 • 炭素鋼の力学的強度 • 炭素鋼容器の構造的安定性	• 水質（pH，Eh および主要な塩濃度など） • 緩衝材水分飽和度 • 温度 • 放射線強度 • 圧力（水圧，地圧およびそのほかの応力）
	廃棄体からの浸出抑制	• ガラス固化体の低浸出性 • 核種の難溶解性	• 水質（pH，Eh および主要塩濃度など） • 温度 • 地下水流速
	核種収着性	• 緩衝材への核種の収着 • 岩石への核種の収着	• 水質（pH，Eh および主要塩濃度など） • 緩衝材の鉱物組成 • 岩石の鉱物組成（亀裂充填鉱物，亀裂表面，マトリクス（変質部，未変質部など））
	低拡散性	• 緩衝材の低拡散性	• 緩衝材中ベントナイト有効密度 • 緩衝材の鉱物組成（ベントナイトの種類） • 温度
	低透水性	• 緩衝材の止水性 • 母岩の低透水性	• 緩衝材中ベントナイト有効密度 • 緩衝材中ベントナイト組成 • 緩衝材中のギャップおよび割れ目の有無と形状 • 母岩マトリクス部の透水性 • 母岩中の亀裂特性 • 坑道掘削影響領域の透水性
	卓越した移行経路形成防止	• 坑道埋め戻し材の低透水性	• 埋め戻し材中ベントナイト有効密度 • 埋め戻し材中ベントナイト組成 • 埋め戻し材中のギャップおよび割れ目の有無と形状

表 7.3.2-8 システム理解に関連するFEPの整理例（第２次取りまとめリファレンスケース）(2/2)

環境条件		環境条件への影響因子
熱的条件	温度	• ガラス固化体の発熱 • 輻射 • 熱伝導（人工バリアおよび母岩中） • 蒸発および水蒸気の移動
水理条件	地下水（実）流速	• 地下水飽和流動（定常流れ，密度差による非定常流れ）
	緩衝材水分飽和度	• 再冠水 • 蒸発および水蒸気の移動
	母岩マトリクス部の透水性	• 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） • 地下水不飽和流動
	母岩中の亀裂特性 坑道掘削影響領域の透水性	• 岩盤の割れ • 応力場の変化による亀裂開口幅の変化 • 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）
力学的条件 および 物理条件	圧力（水圧，地圧およびそのほかの応力）	• 岩盤クリープ • 緩衝材の膨潤 • 炭素鋼の腐食膨張
	緩衝材中ベントナイト有効密度 緩衝材中ギャップ・割れ目の有無と形状	• 緩衝材の膨潤 • 緩衝材の化学的変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） • 緩衝材の侵食
	埋め戻し材中ベントナイト有効密度 埋め戻し材中ギャップ・割れ目の有無と形状	• 埋め戻し材の膨潤 • 埋め戻し材の化学的変質 • 埋め戻し材の侵食
化学条件	水質（pH，Eh および主要塩濃度など）	• 異なる水質間の混合 • 地下水 - 岩石反応 • 微生物および有機物の反応 • 操業時の空気の侵入 • 鉄の腐食および腐食生成物と水の反応 • 緩衝材と水の反応 • セメント系材料の溶脱・変質
	緩衝材の鉱物組成	• 緩衝材の化学的変質
	岩石の鉱物組成（亀裂充填鉱物，亀裂表面， マトリクス（変質部，未変質部など）	• 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿） • 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）

表 7.3.2-9 ニアフィールド環境変遷ストーリボード

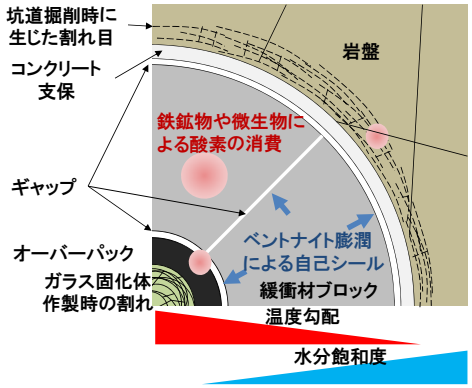
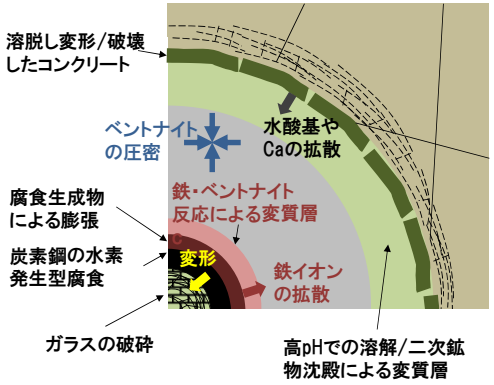
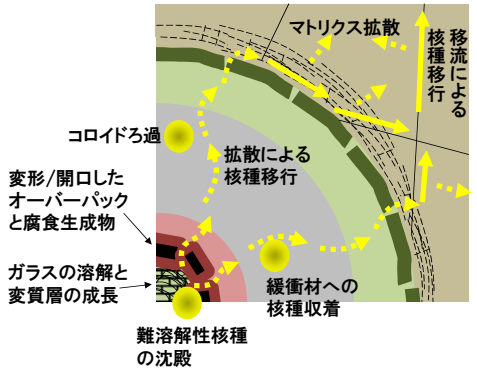
		期間Ⅰ：処分場閉鎖～1000 年後	期間Ⅱ：1000 年後～1 万年後	期間Ⅲ：1 万年後～10 万年後
システムの状態				
安全確保上の意義		廃棄体発熱および処分場建設・操業時に導入された空気の影響（不飽和領域形成および酸化性条件への推移）が回復し核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が成立する。 ベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され，緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することで，物質移動が拡散によって支配される場が確保される。	炭素鋼と緩衝材，緩衝材とコンクリート支保という熱力学的には両立しない材料間の溶質移動と化学反応に伴い，環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され，間隙が閉塞することで，定常的な地球化学的構造が成立する。オーバーパックの水密性で，上記の定常的な地球化学的構造が出現するまで廃棄体中に核種が閉じ込められる。	オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始する。アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する。オーバーパックの外側では期間Ⅱまでに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生ずる。この際，核種は鉄腐食生成物や緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される。
環境条件	T	廃棄体の発熱により温度が上昇するが緩衝材中の最高温度は 100℃以下である。放射能の減衰により数百年後には地温程度にまで低下。	期間Ⅰの定常状態が継続する	
	H	坑道閉鎖後岩盤中の地下水の圧力水頭が回復し，緩衝材への浸透が生ずる。岩盤透水係数が小さい場合には緩衝材冠水に数百年を要する。		
	M	緩衝材の膨潤によりギャップが閉塞し一様な圧縮場となる。岩盤中の応力条件が変化し，坑道のクリープ変形が生ずる。	オーバーパックの腐食による強度低下および腐食膨張による緩衝材圧密によってオーバーパックが変形し開口に至る。ガラスの破砕が進む。	炭素鋼の腐食膨張が継続し緩衝材の圧密およびガラス固化体の破砕が継続する。
	C	閉鎖時に残留した酸素はオーバーパック，緩衝材中の鉄鉱物や微生物によって速やかに消費される。	Fe イオンによる変質（内側）および高 pH 条件での変質（外側）により緩衝材の境界部に変質層が形成され間隙が閉塞に向かう。	ガラス溶解により核種が浸出する。ガラス近傍での水の放射線分解によって生ずる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持される。

表 7.3.2-10 各期間におけるシステムの変遷（1/3）

期間Ⅰ；坑道閉鎖後の過渡期（0～1,000 年後）

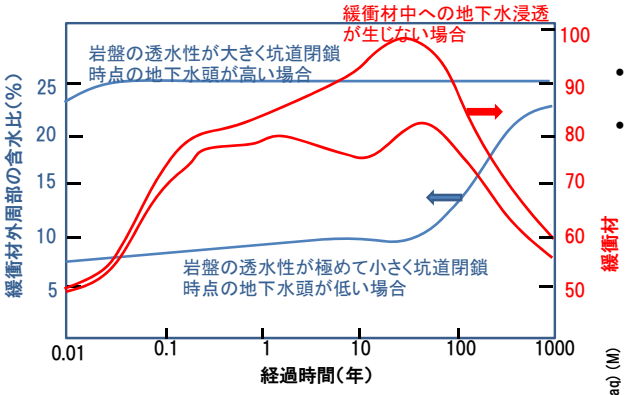
安全確保上の意義

- 廃棄体からの熱および処分場の建設・操業時に導入された空気の影響（不飽和領域の形成および酸化性条件への推移）が回復して核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が成立する
- 緩衝材中のベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され，緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することにより，物質移動が拡散によって支配される場が確保される

環境条件の変遷及び関連する現象

	廃棄体	緩衝材	坑道支保・周辺岩盤
T	Sr-90 や Cs-137 の崩壊熱により温度が上昇するが，これらの核種の放射能の減衰と緩衝材への熱伝導によって徐々に地温まで低下	廃棄体からの熱伝導により温度が上昇する。緩衝材中に地下水が浸透することによって熱伝導率は上昇し，また，ベントナイトの膨潤によってギャップが閉塞して熱伝達が改善されるため，緩衝材内側の温度上昇は 100℃以下に制限される	緩衝材からの熱伝導により温度が上昇するが熱対流が生じるほどの温度勾配とはならない
H	オーバーパックの水密性のために水は廃棄体の内部には浸透しない。	周囲の岩盤からの湧水により緩衝材と坑壁間のギャップは底部から水没し，これに伴って緩衝材中への地下水の浸透が生ずるが，その速度は温度勾配によって影響される。緩衝材中の地下水は蒸発し，水蒸気の移動も生ずる。緩衝材の水分飽和後はベントナイトの膨潤・自己シールによって止水性が確保される	処分場建設・操業中に低下していた地下水圧は坑道閉鎖後徐々に回復し，同時に，緩衝材への地下水浸透が生ずる
M	ベントナイトの膨潤圧に対してオーバーパックが十分な強度を有するため有意な変形は生じない	緩衝材の水分飽和に伴い，ベントナイトが膨潤し，緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞する（自己シール）。ベントナイトの膨潤後は，人工バリア内はほぼ均一な圧縮場となる	ベントナイトの膨潤圧によって応力場が変化する。亀裂開口幅の変化や岩盤クリープによる坑道形状変化の可能性
C	初期には鉄の酸素消費型腐食が生ずるが，緩衝材中の酸素は速やかに消費されるため減肉は問題とはならない	閉鎖時の空隙中には空気が残されているがその中の酸素は緩衝材中の鉄鉱物および微生物によって消費されるため，緩衝材の水分飽和後は速やかに還元性へと推移する。100℃以下ではベントナイトの熱変質は有意なものとはならない	坑道閉鎖時に残留する酸素は亀裂中を流下するが，亀裂充填物中の鉄鉱物および微生物によって速やかに消費される

条件変化の程度および時間・空間スケール

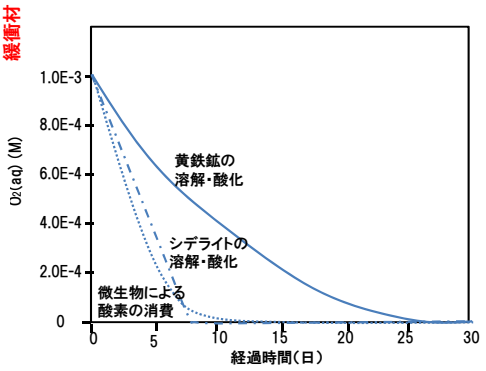


温度変化および緩衝材再冠水の時間スケール

- 緩衝材中の温度は数十年でピークに達し 1000 年以内に地温程度に低下する
- 周囲の岩盤からの地下水供給が遅い場合には緩衝材の冠水に数百年を要し，この場合には，緩衝材中のピーク温度が 20℃程度上昇する

残留酸素消費の時間スケール

- 緩衝材中の黄鉄鉱により間隙水中の溶存酸素は 1 年以内に消費される
- 微生物活動あるいはシデライト溶解・酸化の寄与を考えれば酸素の消費はさらに速やかに生ずる



不確実性要因

- 緩衝材中あるいは境界上のギャップの大きさ（影響先；緩衝材の自己シール）
- 周辺岩盤透過性および坑道閉鎖時点での地下水圧力水頭の低下程度（影響先；冠水期間と最高温度））
- 緩衝材中の黄鉄鉱の含有率および反応に寄与する比表面積（影響先；溶存酸素の消費速度）
- 緩衝材中の微生物の種類と含有率（影響先；溶存酸素の消費速度）

表 7.3.2-11 各期間におけるシステムの変遷（2/3）

期間 II；オーバーパック開口まで（1,000 年～1 万年後）

安全確保上の意義

- 炭素鋼と緩衝材，緩衝材とコンクリート支保という熱力学的には両立しない材料間の溶質移動と化学反応に伴い，環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され，間隙が閉塞することで，定常的な地球化学的構造が成立する。
- オーバーパックの水密性により，上記の定常的な地球化学的構造が出現するまで廃棄体中に核種が閉じ込められる。

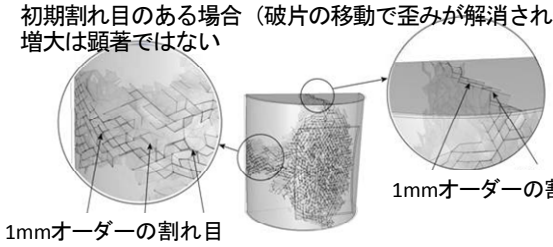
環境条件の変遷および関連する現象

	廃棄体・オーバーパック	緩衝材	支保・周辺岩盤
T/H	期間 I における定常状態が継続する		
M	炭素鋼の腐食により，未腐食部の減肉による強度低下と腐食生成物による体積増加に伴う緩衝材膨潤圧の増大が生じて変形し，開口に至る。また，これに伴いガラス固化体が破砕する	オーバーパックの腐食膨張により緩衝材の圧密が生ずる一方で，ベントナイトが周辺岩盤中の亀裂に侵入し地下水によって浸食されるが，前者が優勢となるため，緩衝材の密度および膨潤圧は上昇する。下記の化学的変質領域では力学特性が変化	緩衝材中のベントナイトが周辺岩盤中の亀裂に侵入し，先端部では浸食が生ずる
C	還元性環境で水素発生型の腐食が進み，腐食生成物としてシデライトやマグネタイトが生ずる。孔食などの局所的な腐食の進展は時間の経過とともに顕著なものではなくなり，腐食深さは全面的にほぼ一様となる。腐食により生ずる水素ガスは，オーバーパックと緩衝材の境界での蓄積・圧力上昇と緩衝材中の通気・圧力低下を繰り返す	炭素鋼の腐食で生ずる溶存鉄イオンが内側から緩衝材中に拡散し，ベントナイトの変質（陽イオン交換，鉄スメクタイト化など）が生ずる。外側からは支保中のセメントの溶脱により水酸基，Ca，Na，や K などが拡散してベントナイトの変質（陽イオン交換，モンモリロナイト溶解，CSH，CASH やゼオライトの沈殿）が生ずる。水素ガスの蓄積により圧力が上昇すると緩衝材中の間隙を押し広げて通気する	支保中のセメントの溶脱により水酸基，Ca，Na，や K などが緩衝材中に拡散し，同時に周辺岩盤の亀裂中に進入する

条件変化の程度および時間・空間スケール

オーバーパック変形によるガラスの破砕

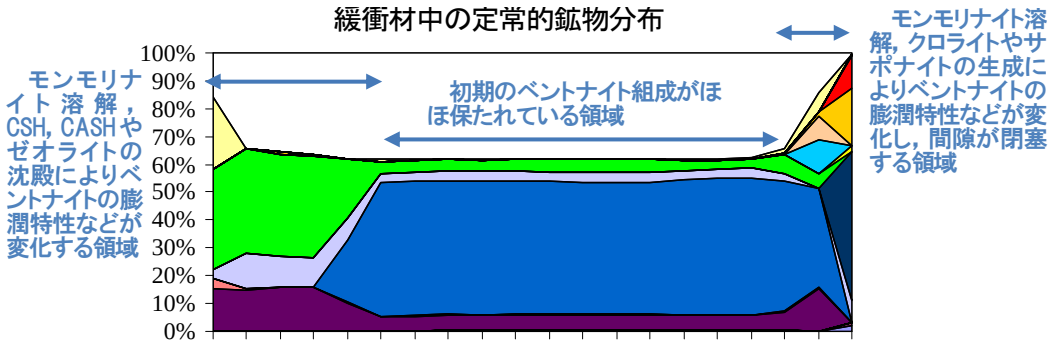
- 初期割れ目のない場合（表面積の顕著な増大）
- 初期割れ目のある場合（破片の移動で歪みが解消され表面積増大は顕著ではない



オーバーパック変形・破断（側面）



緩衝材中の定常的鉱物分布



不確実性要因

- 還元環境での炭素鋼の全面腐食速度（シデライトなどの被膜による腐食抑制効果の有無）
- 高 pH での炭素鋼の不動態化および孔食
- 鉄イオンの見かけの拡散係数およびベントナイトとの反応生成物の種類
- 高 pH でのモンモリロナイト溶解速度および二次鉱物の種類
- ガス通気時の境界変質層（緩衝材と鉄あるいはコンクリート間）の破壊

表 7.3.2-12 各期間におけるシステムの変遷（3/3）

期間 III；核種移行期間（1 万年後～10 万年後）

安全確保上の意義

- オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始するが，ガラス近傍の Si 濃度の上昇および表面変質層による溶解抑制によって浸出率は徐々に低下する
- ガラス近傍での水の放射線分解によって生ずる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持され，アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する
- オーバーパックの外側では期間 II までに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生ずる。この際，核種は鉄腐食生成物や緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される

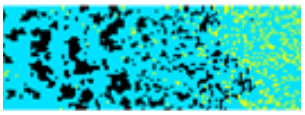
環境条件の変遷および関連する現象

	ガラス固化体	オーバーパック	緩衝材・岩盤
M	オーバーパックの変形により破砕する。この間，表面の変質により力学特性が変化する	炭素鋼の腐食膨張が継続し変形が進む	オーバーパックの腐食膨張により緩衝材の圧密が進む
C	イオン交換で生じた欠陥を水分子が拡散して加水分解が生じ，ガラスマトリクスの崩壊・溶解に至る。未変質部と変質部の境界付近のシリカやホウ素の残留している部分（拡散層）での水分子の拡散は，加水分解に対する律速機構となり得る。溶出したシリカの一部は再沈殿して変質層（ゲル層）を形成し，他はオーバーパックや緩衝材へと散逸し，種々の化学反応に寄与する 水の放射線分解により酸化剤が生成される	ガラス表面での放射線分解で生じた酸化剤は鉄腐食生成物（シデライトやマグネタイトなど）との反応によって消費され，還元環境が維持される	期間 II における定常的な鉱物組成分布が継続する
核種移行	ガラス溶解に伴い，核種は含有率に応じて調和的に溶出する。その後，アクチニドなどの難溶解性の核種の濃度はそれぞれの溶解度で制限され超過分は沈殿する	核種は鉄腐食生成物に収着すると考えられるが，関連する情報やデータは限られている	核種を含むコロイドは緩衝材中で濾過され，溶存した核種のみが拡散によって岩盤に至る。この間，緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される

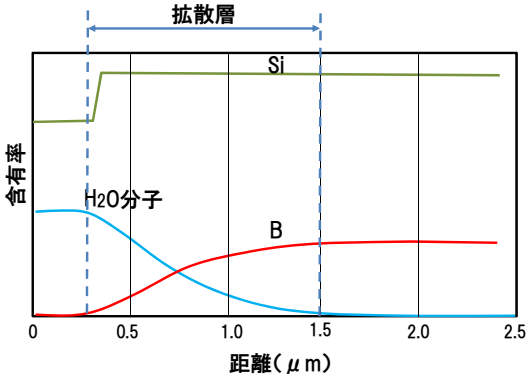
条件変化の程度および時間・空間スケール

ガラス表面変質層による溶解抑制

ガラスの水和変質は，まず，ガラスマトリクスと水素イオン（ヒドロニウムイオン）とが反応することによって開始され，この水素イオンは液相側から供給されるため，表面変質層を拡散により通過して健全なガラスマトリクスに到達することが必要となる。従って，変質層中の実効拡散係数が小さい場合には，この水素イオンの変質層中の拡散がガラス変質の律速過程になるものと考えられる。他方，表面変質層の成長していない初期段階や変質層の拡散係数が大きい場合には，ガラス溶解の反応速度が律速過程になる可能性も考えられる。



青:Si
緑:B
黒:空隙(H_2O)



不確実性要因

- ガラスから溶出した Si が鉄腐食生成物あるいは緩衝材に収着することによる溶解促進の可能性

(4) シナリオ構築

サイト調査や地層処分システムの設計と連携をとりつつ，前項に述べた方法によってシステムの理解を図り，その結果をストーリボードやFEPカタログとして取りまとめた後，これを踏まえて安全評価上想定すべきシナリオを構築することとなる。それぞれのシナリオにおいては，以下の要素が相互に矛盾なく記述されることが求められる。

- 環境条件の変遷：地質環境の特徴や処分施設・人工バリアの仕様を踏まえ，環境条件への影響因子によって生ずると予想される環境条件の変遷
- 安全機能の時間的変化：環境条件の変遷に対応した，安全機能に寄与する現象および期待できる性能の程度
- 核種移行挙動：環境条件の変遷および安全機能に寄与する現象と期待できる性能の程度に応じた核種移行

シナリオの構築に当たっては，安全評価上想定するシナリオの網羅性を確保することが求められる。そこで，前項で述べたシステム理解に基づき事象の連鎖としてのシナリオを展開する際に，データのばらつきや知識の不足などのために可能性を一通りに特定することができないため，複数の代替的なシナリオを選択肢として考慮せざるを得ない箇所(シナリオ分岐)を抽出する必要がある。ただし，環境条件の変遷や安全機能の時間的変化あるいは核種移行挙動に関するすべての可能性を列挙することは不可能であり，ここで言う網羅性とは，安全性に関する主張を論証する上で遺漏がないという実践的な意味において理解されるべきものである。具体的には，以下のように，安全評価の目的に応じて有意と考えるべき差異を明確化することで，シナリオの離散化を行うことが必要と考えられる。

- 時間区分：廃棄物中の放射能の減衰，人工バリア材の変質，地質環境や生物圏の変遷およびこれらに関する不確実性の増大などの観点からの評価期間の区分
- 様相区分：安全機能に関する性能および核種移行挙動への影響の観点から環境条件を定性的に区分した様相（モード）の定義

7.3.2.1で例示した沿岸域のサイトにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分（第２次取りまとめのリファレンスケース（結晶質岩系）における処分孔竪置きの処分概念を想定する）を例とし，ニアフィールドを対象として，上記の時間区分および様相区分を行ったものを，表 7.3.2-14に示す(時間区分については，前出のストーリボード（表 7.3.2-13）と同じものを想定する)。

このような離散化のもとに，各時間区分において，環境条件，安全機能に関する性能，および核種移行挙動のすべてが同じ様相にあるような二つのシナリオは同一視することが合理的である。逆に，どこかの時間区分において，環境条件，安全機能に関する性能，および核種移行挙動のうち一つでも異なる様相にあるようなシナリオが派生する可能性がある場合には，シナリオの分岐が生ずるものと考える。なお，ここで，シナリオ構築を含む安全評価は反復的に繰り返し行われるものであることから，過去に行われた解析やそのほかの検討の結果得られた知見を活用することが可能であり，上述した注目すべき様相の区分などにおいてもFEPカタログを活用することで，このような知見の利用を進めることが重要と考えられる。

以上を前提として，まず，ストーリボードとして表現されるシステム理解に基づき，各時間区分における環境条件，安全機能に関する性能，および核種移行挙動のそれぞれについて，蓋然性が高く通常生じると想定せざるを得ないような様相およびその時間的変遷の原因となるような現象（影

響因子）を指定することによって，シナリオを定義する。この際，いずれも蓋然性が高いと考えられるような複数の可能性が存在する場合には，シナリオの分岐が生じることも考えられる。なお，分岐の妥当性については定量的な解析を行う段階で感度解析を行って確認する。

表 7.3.2-13 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド環境条件の様相区分の例

環境条件		様相の区分
熱的条件	温度	標準（地温程度）／やや高（ガラス溶解促進・核種移行特性変化）／高（緩衝材熱変質）
水理条件	処分孔周辺の地下水流速	低（ニアフィールドの核種移行が母岩中の拡散によって支配される）／中（母岩中の移流によって支配される）／高（緩衝材中の拡散によって律速される）
	緩衝材水分飽和度	乾燥（施工時よりも低下した状態）／初期値／飽和
	母岩マトリクス部の透水性	標準（拡散支配となる状態）／高（移流支配となる状態）
	坑道掘削影響領域の透水性	小（処分孔周辺地下水流速低）／初期状態（同中）／大（同高）
力学的条件および物理条件	圧力（水圧，地圧およびそのほかの応力）	低（標準以下）／標準（水圧＋容器腐食膨張後の緩衝材膨潤圧）／高（標準以上）
	緩衝材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	緩衝材中ギャップ・割れ目	なし／あり
	埋め戻し材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし／あり
化学条件	水質（pH）	低（標準以下）／標準（地下水－緩衝材反応の平衡状態）／高（標準以上）
	水質（Eh）	還元性／酸化性
	緩衝材のベントナイトタイプ	Na 型／Ca 型
	緩衝材中の初期成分以外の鉱物割合	低（初期不純物の反応・溶解）／初期状態／高（二次鉱物の沈殿）

注：標準や初期値以上あるいは以下として定義される様相については，FEP カタログに含まれる過去の解析や検討の事例および予察な解析の結果などを踏まえ，安全評価の観点から「有意な」差異とみなすべきしきい値を設定する。

既出の沿岸域のサイトにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分のニアフィールドを対象として，第 6 章に示したシステム理解に基づき 100 万年後までを目安としてベースシナリオを記述した例を表 7.3.2-14に示す。

他方，変動シナリオの構築は，以下の手順で実施する。

i. システムの理解において抽出された不確実性要因に対応して，環境条件，安全機能に関する性能，および核種移行挙動のうちの一つあるいは複数のものの様相がベースシナリオから変化するメカニズムを抽出する
ii. 上記の様相変化が生ずる可能性および時期を検討する
iii. 一つの様相変化がほかの因子に及ぼし得る影響を検討する
iv. 想定される具体的なメカニズムによって環境条件，安全機能に関する性能，および核種移行挙動のうちの一つあるいは複数のものの様相が時間の経過とともにどのように変化するかを想定し変動シナリオを定義する

v. FEP カタログとの対照により重要な抜け落ちがないかを確認する

表 7.3.2-14 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるベースシナリオの例（ニアフィールド）

			閉鎖後 1,000 年間	1,000 年～1 万年後	1 万年～10 万年後
核種移行	核種の溶解		－	－⇒○	○
	核種の拡散		－	－⇒○	○
	核種の移流・分散		－	－	－⇒○(母岩のみ)
安全機能	容器による閉じ込め		○	○⇒－	－
	廃棄体からの浸出抑制		△	△⇒○	○
	核種収着性		△	△⇒○	○
	低拡散性		△	△⇒○	○
	低透水性		△	△⇒○	○
	卓越移行経路形成防止		△	△⇒○	○
環境条件	熱	温度	やや高⇒標準*1	標準	
	水理	処分孔周辺地下水流速	中		
		緩衝材水分飽和度	初期値⇒飽和*2	飽和	
		母岩マトリクス透水性	標準		
		掘削影響領域透水性	初期状態		
	力学物理	圧力	低	低⇒標準*3	標準
		緩衝材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*4	低
		緩衝材中ギャップ・割れ目	あり⇒なし*5	なし	
		埋め戻し材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*6	低
		埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし		
	化学	水質（pH）	標準	標準⇒高*7	高⇒標準*8
		水質（Eh）	酸化性⇒還元性*9	還元性	
		緩衝材のベントナイトタイプ	Na 型	Na 型⇒Ca 型*10	Ca 型
		緩衝材中初期成分以外の鉱物割合	初期状態	初期状態⇒高*11	高

注 1：安全機能の「○」は安全機能として期待されていることを，「△」は他の機能のバックアップとして期待されていることを示す。
注 2：表中のピンク色の網掛けは様相変化が生じる箇所を示す。
注 3：環境変遷の要因；*1（廃棄体発熱量低下・熱伝動），*2（緩衝材再冠水），*3（緩衝材膨潤・容器腐食膨張），*4（アルカリ条件でのベントナイト溶解），*5（緩衝材膨潤・自己シール），*6（アルカリ条件でのベントナイト溶解），*7（セメント反応・水酸基の拡散），*8（セメント溶脱による C/S 比低下），*9（残留酸素の散逸・鉄などとの反応による消費），*10（セメント反応・Ca の拡散・イオン交換），*11（アルカリ条件での二次鉱物沈殿）

7.3.2.3　自然事象に関するシナリオ開発

地層処分の閉鎖後長期の安全性を議論する際には，考慮すべき自然事象として，以下の項目を考慮していく必要がある。

- 気候変動
- 海水準変動
- 隆起・侵食
- 地震・断層活動
- 火山・火成活動

気候・海水準変動は汎地球規模で生じている事象であり，また，わが国の多くの地域は隆起傾向にあること，そして，これらの事象は将来にわたって継続的に生ずる発生可能性が高いことから，NUMO では，7.3.2.1 に述べたように，これらの自然事象の影響を前提として地質環境および生物圏の長期的変遷についてのシナリオ開発を行っている。

他方，地震・断層活動および火山・火成活動については，わが国において一般的に発生し得ると考えられる規模の地震などを除いて，適切なサイトを選定することで著しい影響を回避することが可能である。そこで，このような適切なサイト選定を行うことを前提として，地震・断層活動および火山・火成活動を仮想シナリオに区分することが適当と考えられる。以下に，断層活動を例として，これらの稀頻度の自然事象に関するシナリオ開発および影響解析についての予察的な検討の結果をまとめる。なお，他の事象については，技術資料（NUMO，2010a）を参照されたい。

(1)　地震・断層活動に関するシナリオ開発

(i)　力学的影響

断層・破砕帯の構造については，変位量の大部分を受け持った断層岩部（断層破砕物から成る）と，その周辺の割れ目が発達したダメージゾーンに区分する定義が一般化している。深度 1,000m 程度の地下で新たな断層が発生する場合，断層の発生直後はまだ断層岩やダメージゾーンは発達していない。しかし，その後，断層運動が繰り返されることにより，断層岩とダメージゾーンの幅はそれぞれ 10m 程度および 100～200m 程度までに達することがある。

また，断層・破砕帯のように歪みが局所的に集中している部分の周辺にも，歪みが（先行的に）発生している変形領域が広範に分布することが想定される。そのような変形領域内には微小亀裂の発達や既存亀裂の変形などが想定される。

(ii)　化学的影響

断層の新生後，地表から涵養される地下水との化学的相互作用や断層に沿った熱水作用などにより，角礫や砂状の破砕物などの比表面積の大きい部位の変質が進み，断層沿いのガウジが成長しやすくなる可能性が考えられる。

(iii)　熱的影響

断層活動による断層摩擦発熱により温度の上昇が生じる。断層摩擦発熱は，断層活動の深度に応じた地圧と岩盤の強度，活動の様式などにより規定されるものと考えられている。断層摩擦発熱により上昇する断層周辺の温度は，熱により形成された断層ガウジの鉱物組成や鉱物の帯磁率測定，

ESR 信号の測定などにより推定され，一般に 300℃以上と言われている。Fukuchi ほか（Fukuchi et al., 2007）による野島断層の断層ガウジの研究では，断層ガウジの中心部の幅約 10cm に亘って黒色化している箇所の ESR 測定から，過去には 400～450℃以上で 5 分間に相当する摩擦熱を被り，最近では少なくとも 300～350℃で約 5 分間に相当する摩擦熱を被った可能性が推定されている。このような情報から，断層活動により，地温は，活動直後の短時間に限り 300℃以上まで上昇する場合もあることが考えられる。

（ⅳ） 水理学的影響

断層の透水性は，断層構造を構成する部位ごとに異なることが知られている。

NUMOでは，断層の構造ごとの透水性について，多くの建設工事の事例や研究事例などを収集・整理し，表 7.3.2-15に示す断層の構造ごとの透水性の範囲を推定している。この結果（各事例の中央値）に基づき，断層・破砕帯の透水性は母岩の約 1,000 倍程度，また，周辺の広範な変形領域の透水性は母岩の約 10 倍程度と設定することとする。

表 7.3.2-15 断層の各部位における透水係数に関する情報のまとめ

区分	透水係数（m/sec）	
	分布範囲	各事例の中央値
断層・破砕帯	10^{-14}～10^{-7}	10^{-13}～10^{-8}
	10^{-10}～10^{-5}	10^{-8}～10^{-7}
広範な変形領域	10^{-13}～10^{-6}	10^{-11}～10^{-8}
（母岩）	10^{-13}～10^{-8}＞	10^{-13}～10^{-8}

（ⅴ） 地層処分システムへの影響

前項に述べた知見に基づき，将来，処分場を横切る断層が新生した場合，断層によって直撃される廃棄体については，廃棄体や人工バリアの破壊といった直接的な影響が生ずるものと考えられ，それ以外の廃棄体についても，地下水流動や地下水水質の変化といった間接的な影響が生ずるものと想定される。また，断層の新生時の地下水流動パターンとしては，A）深部地下水の上昇，およびB）地表水の引き込みが考えられる。

A）の場合，新生断層から一定の範囲内にある廃棄体については母岩中の移行距離が短縮されることとなるが，それ以上離れた廃棄体については移行距離は不変と考えられる。なお，このシナリオでは断層および母岩中の地下水は還元性であるものと考えられる。他方，B）の場合，新生断層を通じて深部に下降した地表水は処分場を通過してほかの既存の透水性断層などに至り，そこから地表に向かうという保守的な仮定をおくこととする。ここで，断層割れ目帯と交差するものも含めすべての廃棄体について核種移行距離は不変と仮定することができる。なお，このシナリオでは母岩および断層中の地下水は酸化性であるものと想定する。

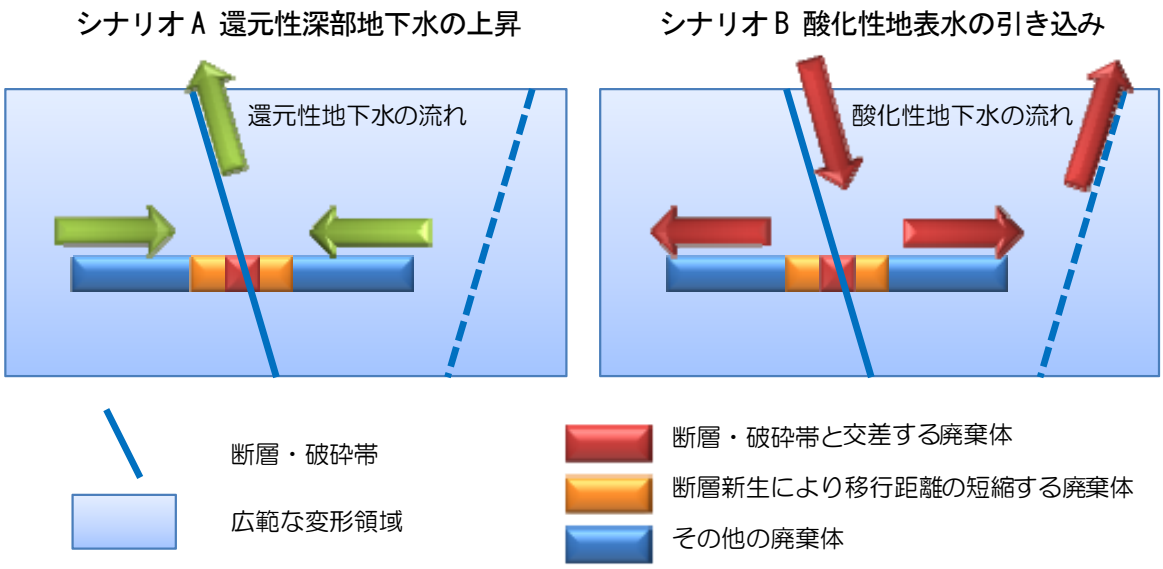


図 7.3.2-8 断層活動の影響に関するシナリオの概念

以上の二種類のシナリオ, および断層との位置関係に応じた廃棄体区分のそれぞれについて, 7.2.1 に述べた方法に従いストーリボードとして整理した。結果を表 7.3.2-16にまとめる。

(2) 断層活動の影響に関する予察的解析

(i) 解析条件

前節に述べたシナリオに従い，処分場を横断する新たな断層が将来生じた場合の仮想的な状況を想定して，予察的な影響解析を行った。解析にあたり，以下のような仮定を置くこととした。

- 新たな断層は 10 万年後に生ずるものとし，それまでの核種移行については，第２次取りまとめリファレンスケースと同一の核種移行モデルおよびデータセットを用いる。また，断層新生以前の核種移行距離はいずれの廃棄体についても 100m と想定する。
- 断層と交差する廃棄体および人工バリアは安全機能を喪失し，廃棄体および人工バリア内の核種は瞬時に断層に至るものとする。
- 断層活動直後の過渡的な地下水流動は数日から数か月程度の短期的なものであるため無視できるものとする。また，その後の地下水流動の変化は応力場の変化による間隙水圧の変化ではなく，断層活動に伴う岩盤の透水性の変化によるものとし，動水勾配も初期の値に復帰するものと仮定する。

主要な解析条件を表 7.3.2-17に示す。ここで，断層・破砕帯およびその周辺の広範な変形領域の水理特性については，現状の知見に顕著な不確実性が含まれることから，それぞれ代替的なモデルを考えることとした。特に，広範な変形領域については，個々の既存亀裂の開口に伴い透水量係数が 10 倍になるというモデル，および既存亀裂の開口幅は変わらず，同等の開口幅を持つ亀裂が多数発生することによって亀裂頻度が 10 倍になると仮定したモデルの両者（いずれも広範な変形領域の平均透水係数は 10 倍となる）について解析を行うこととした。

シナリオＡで主要な核種移行経路となる新生断層とシナリオＢにおける既存の断層では水理特性が異なる可能性も考えられるが，予備解析では，簡単のため同等と仮定した。なお，解析条件の詳細については，技術資料（NUMO，2010a）を参照されたい。

表 7.3.2-16 処分場を横断する新たな断層が生じた場合のストーリボード

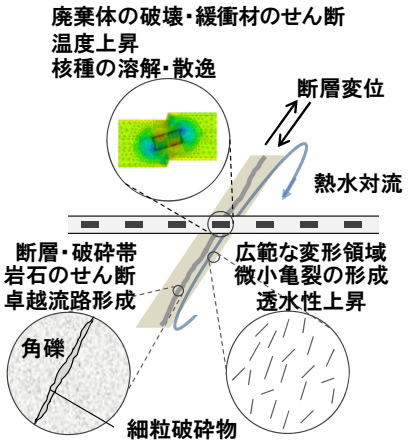
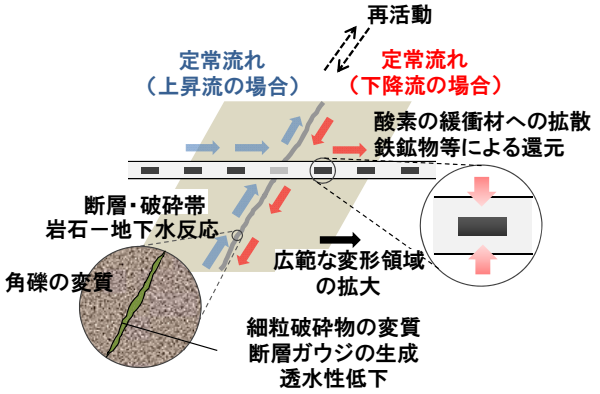
		断層新生直後の現象	その後の定常的変遷
			
シナリオ A 深部地下水の上昇	断層と交差する廃棄体	T: 断層摩擦発熱により 300℃以上まで上昇（数分間） H: 発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下 M: 廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 C: 核種の溶解および人工バリア外への散逸	T: 再活動時の温度上昇 H: 発熱に起因する熱水対流 M: 緩衝材の反復的せん断 C: 核種は枯渇
	それ以外の廃棄体	T: 若干の温度上昇（短期間） H: 間隙水圧変化による過渡的流動 M: 地震動 C: N/A	T: N/A H; 広範な変形領域の透水性上昇に伴う流速増大 M: 地震動 C: 還元性雰囲気での核種移行
シナリオ B 地表水の引き込み	断層と交差する廃棄体	T: 断層摩擦発熱により 300℃以上まで上昇（数分間） H: 発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下 M: 廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 C: 核種の溶解および人工バリア外への散逸	T: 再活動時の温度上昇 H: 発熱に起因する熱水対流 M: 緩衝材の反復的せん断 C: 核種は枯渇
	それ以外の廃棄体	T: 若干の温度上昇（短期間） H: 間隙水圧変化による過渡的流動 M: 地震動 C: N/A	T: N/A H; 広範な変形領域の透水性上昇に伴う流速増大 M: 地震動 C: 周辺の地下水の酸化・緩衝材中の鉄鉱物による還元

表 7.3.2-17 断層活動に関する予察的影響解析の条件

水理条件	断層活動以前	第２次取りまとめリファレンスケースと同じ
	断層透水係数	モデル１：母岩平均透水係数より２桁高い（6.4×10^{-8}m/s） モデル２：第２次取りまとめの断層と同一（1.0×10^{-5}m/s）
	広範な変形領域の亀裂特性	モデル１：断層新生前と同じ透水量係数分布で頻度のみ 10 倍 モデル２：断層新生前の透水量係数分布の 10 倍（頻度は同一）
	動水勾配	0.01
溶解度および分配係数	シナリオ A	断層新生前後とも第２次取りまとめと同じ
	シナリオ B	断層新生前：第２次取りまとめと同じ 断層新生後：酸化性条件の数値を用いる
人工バリア	断層割れ目帯と交差する廃棄体	機能喪失し，廃棄体および人工バリア内の核種は瞬時に人工バリア外部に至る
	そのほかの廃棄体	健全
母岩中核種移行距離	断層新生前	すべての廃棄体：100m
	シナリオ A	断層割れ目帯と交差する廃棄体（300 体）：0m 断層近傍の廃棄体：各廃棄体から断層までの距離 そのほかの廃棄体：100m
	シナリオ B	すべての廃棄体：100m

（ii） 解析結果

解析結果の例を図 7.3.2-9に示す。これらの結果から，予備解析において着目した不確実性要因の感度は次のようにまとめられる。

- シナリオ A ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が 0.001 μ Sv/y 程度であるが，シナリオ B ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が 100 μ Sv/y 以上となっており，地下水の酸化還元状態が大きな感度を有することが分かる。ただし，断層活動直後に生じる最大被ばく線量は，断層活動によって破壊されていない広範な変形領域内の廃棄体の寄与によるものであり，酸化性地下水が人工バリアの周囲を流れたとしても緩衝材の止水性が確保されており酸化剤の進入は拡散によるものであること，および緩衝材の内側には大量の二価鉄鉱物が残留していることを考えれば，ピークの継続期間（数万年程度）は廃棄体近傍は還元性に保たれ溶解度限界が働く可能性もある。
- シナリオ A においては，断層によって破壊された廃棄体からの核種が断層に直接流入するために断層の透水係数は大きな感度を示すのに対して，シナリオ B においては，いずれの廃棄体においても広範な変形領域中で一定の核種移行距離が確保されているため，断層の透水係数の感度は小さい。
- 広範な変形領域のモデルの感度は顕著なものではなく，断層新生による影響が亀裂頻度の上昇をもたらすものであっても，あるいは亀裂開口幅の増大をもたらすものであっても，平均透水係数が一定であれば影響の大きさはほぼ同じになるものと考えられる。

図 7.3.2-9におけるシナリオBについての解析結果において，被ばく線量の合計に対して支配的な寄与を有するのは，断層によって破壊されていない広範な変形領域内の総数の多い廃棄体であり，これらがすべて酸化性条件下にあることによるものと考えられる。他方，酸化性地下水が人工バリアの周囲を流れたとしても，これらの廃棄体については，緩衝材の止水性が確保されており，酸化剤の進入は拡散によるものであること，および緩衝材の内側には大量の二価鉄鉱物が残留していることから，断層新生後 10 万年程度以上の間，廃棄体近傍は還元性に保たれるものと予想される（NUMO, 2010b）。そこで，新生断層によって破壊される廃棄体の近傍は酸化性となるが，それ以外の廃棄体については還元性にとどまる（ただし，緩衝材の外側はすべて酸化性であるとする）と仮定した解

析を行った。結果は図 7.3.2-10に示すとおりであり，最大被ばく線量は1μSv/y程度となることが分かる。

以上の予察的解析結果より，第２次取りまとめと同様の地質環境を想定して10万年以降に処分場を直撃するような断層が新生することを想定しても，断層により破壊などの直接的な影響を受ける廃棄体数が限られること，加えて，断層の直撃を受けない大多数の廃棄体についても一定以上の安全性能が保持されることが予想される。従って，最大被ばく線量は10 mSv/y あるいは100 mSv/y 以下であることが示された。特に，断層に沿った酸化性の地表水の地下への引き込みを想定した場合でも断層によって破壊されていない廃棄体による化学的緩衝効果を期待できるのであれば，断層新生の影響は，想定したすべての状況で1μSv/y 程度以下にとどまるものと考えられる。ただし，本解析結果は，地質環境特性に強く依存するものと考えられることから，今後，対象地域が特定された時点でサイトに固有の地質環境特性を考慮して同様の解析を行う必要である。また，稀頻度事象の影響については，事例数が限られることなどから上記のシナリオおよびモデルには顕著な不確実性が含まれざるを得ないため，今後の専門家間の議論を通じてコンセンサスを得つつ様式化を進めることも必要と考えられる。

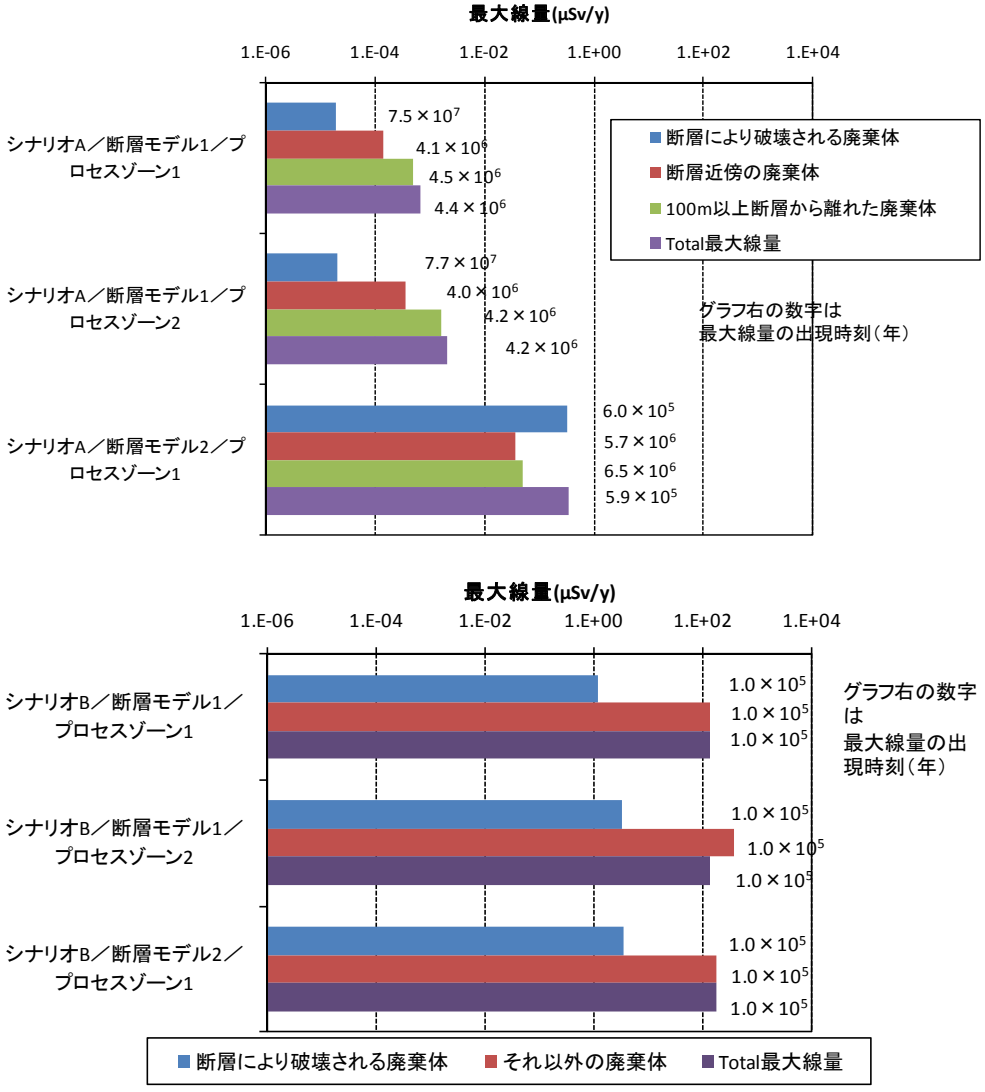


図 7.3.2-9 断層新生の影響に関する予察的解析結果のまとめ

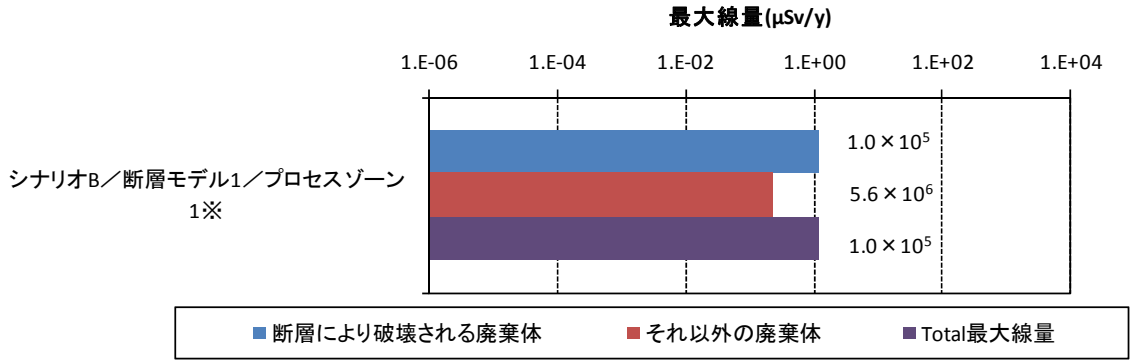


図 7.3.2-10 シナリオ B において破壊されていない廃棄体の人工バリア内側を還元性と仮定した場合の解析結果

7.3.3　核種移行解析モデル開発に関する取り組み

ここでは，NUMO が進めてきたモデル開発を中心とした現象解析技術について，主要な成果をまとめる。また，NUMO が進めてきた現象解析技術については，例題に適用した事例についても述べることとする。そして，最後に基盤研究機関が進めてきたデータセットの作成を中心とした現象解析技術について述べる。

7.3.3.1　地質環境および生物圏の変遷に対応した核種移行解析モデル化技術の開発

沿岸域においては，気候・海水準変動および隆起・侵食により環境条件，特に水理および地下水水質が長期的に変遷するものと予想される。NUMO は，陸域を主な対象とした第２次取りまとめ以降の重点的な研究課題として，このような環境変遷に対応して現象解析を行うために，以下の技術開発に取り組んでいる。

① 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷の予測
② 変遷する地質環境における核種移行解析
③ 変遷を考慮した生物圏評価

図 7.3.3-1には，沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順を示す。

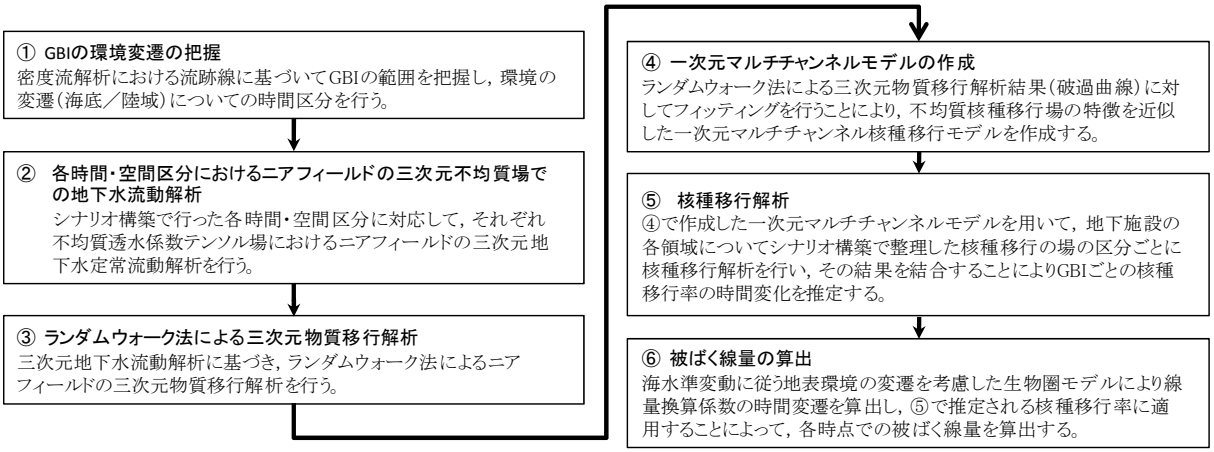


図 7.3.3-1 沿岸域の環境変遷に対応した核種移行解析の手順

(1)　変遷する地質環境における核種移行解析技術の開発

前項において例示したように，密度流解析によって予測される処分場領域の代表点での地下水流向・流速および地下水水質の時間変化は，一般に，極めて複雑な挙動を示す。このため，このような複雑な場における核種移行解析結果の意味を適切に把握し，かつ，種々の不確実性に対して頑健な安全評価結果を得るためには，密度流解析結果をそのまま核種移行解析の入力情報として用いるのではなく，保守性を担保しつつ簡単化を行って核種移行の場に関する前提条件を設定することが必要と考えられる。

7.3.2.1 に示したように，気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に伴い，沿岸域にある処分場領域内の核種移行の場としては，以下の四つのタイプが考えられる。

a. 海進および海退に従う海底下の塩水の流動
b. 塩淡境界の移動に伴う陸側の塩水の流動
c. 海底下の淡水の浮力による上方への流動

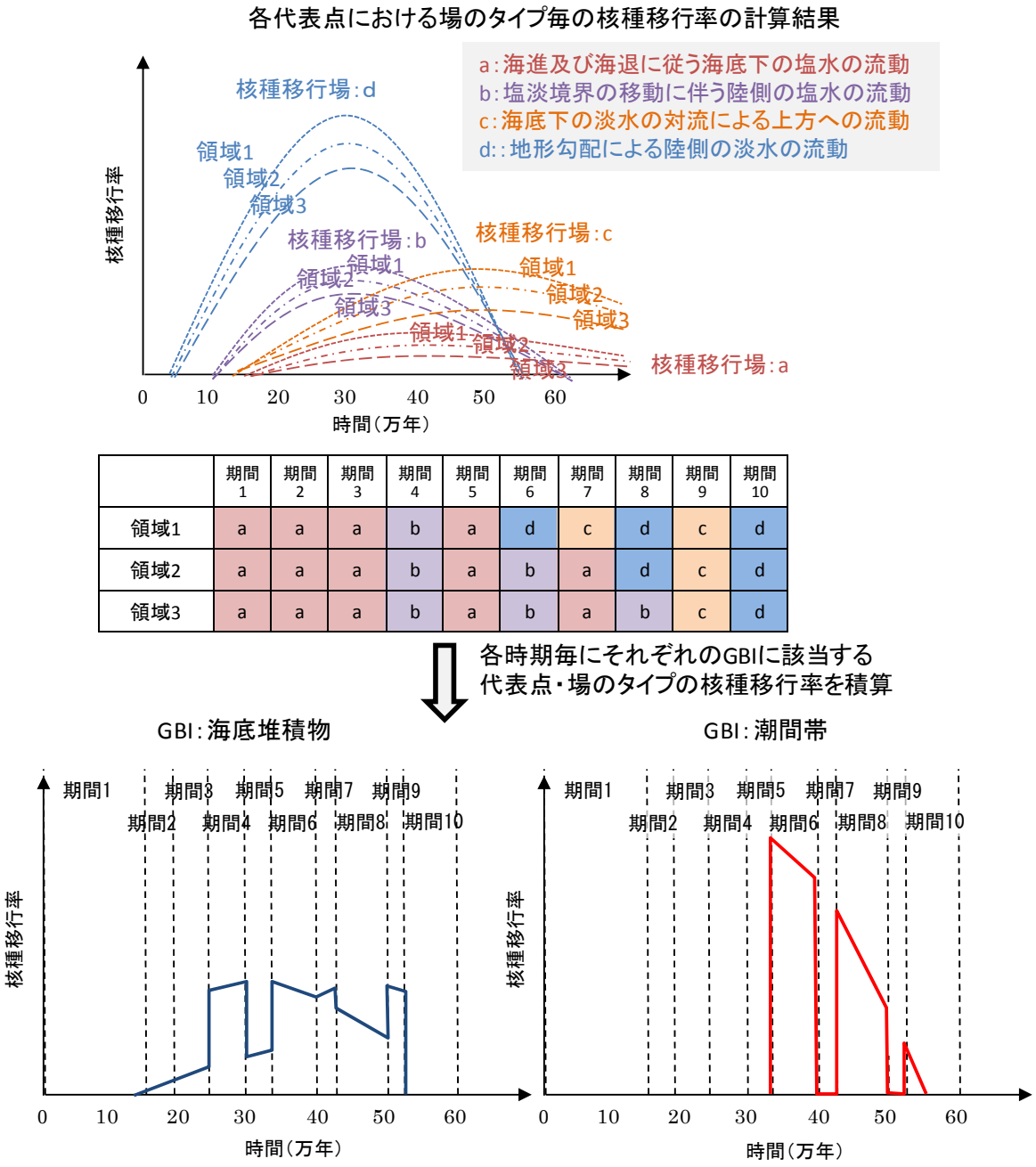
d. 地形勾配による陸側の淡水の流動

そこで，密度流解析結果に基づき，まず，当該地域での気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷のパターンの分類を行い，処分場領域内の代表点ごとに，核種移行の場のタイプがどの時期に切り替わるかを明らかにする。次に，該当する環境変遷パターンにおいて生ずる核種移行の場のタイプごとに，以下の情報を抽出する。

- 処分場領域内の代表点毎の地下水の流向および流速の最大値
- 処分場領域内の代表点毎の代表的な地下水水質（塩分濃度）
- 処分場領域内の代表点毎の GBI（地質環境と生物圏のインターフェース）

そして，核種移行解析においては，それぞれの核種移行の場のタイプが将来にわたって継続することを仮定した計算を並行して行い，それぞれ対応するGBIへの核種移行率を算出する。さらに，密度流解析結果に基づく代表点ごとの核種移行の場のタイプの切り替え時期に対応して各GBIへの核種移行率を切り替えて合算する。例として，7.3.2 にストーリボードを示した環境変遷パターン 3 に対して以上の解析の手順を適用した場合を，図 7.3.3-2に模式的に示す。

上述したそれぞれの場のタイプにおける核種移行解析に際しては，母岩の不均質性に起因する複雑な核種移行経路を適切に考慮する必要があり，NUMOは，この目的のために，ランダムウォーク法による三次元不均質場核種移行解析モデルPartridge（Particle tracking in deep geological environment）（Wakasugi et al.，2008）を開発しており，また，この現象解析モデルによる詳細な解析結果をマルチチャンネルモデルで近似することでシステム性能評価を行う解析技術を構築している。この点については，7.3.3.2において述べることとする。なお，詳細については，技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。



	期間1	期間2	期間3	期間4	期間5	期間6	期間7	期間8	期間9	期間10
領域1	a	a	a	b	a	d	c	d	c	d
領域2	a	a	a	b	a	b	a	d	c	d
領域3	a	a	a	b	a	b	a	b	c	d

図 7.3.3-2 沿岸域の環境変遷に対応して核種移行率を算出するイメージ

図は，密度流解析結果に基づく代表点ごとの核種移行の場のタイプの切り替え時期に対応して各 GBI への核種移行率を切り替えて合算する手順を示している。

(2) 変遷を考慮した生物圏評価技術の開発

前節において述べた方法により想定される各 GBI への核種移行率の時間変化を算出した後，これに起因する被ばく線量の評価を行うことになる。生物圏の変遷や生活習慣の変化といった要因のために，遠い将来に生ずるかも知れない被ばく線量についての予測には大きな不確実性が含まれざるを得ないため，生物圏評価に当たっては，以下に述べる様式化されたアプローチを用いることが国際的な合意となっている。

前項で述べたような環境変化を考慮するに当たって，Biosphere Model Validation Study（BIOMOVS II，1996）の第 2 フェーズで開発されている生物圏評価のための様式化アプローチを用いる。この手法は，IAEA の生物圏モデルに関する国際プログラムや評価手法（BIOMASS）（IAEA，2003），BIOCLIM プロジェクト（BIOCLIM，2004）のもとで開発され，種々の事例への適用を通じて検証・改良が行われてきたものである。このアプローチにおける主要な段階は次のとおりである。

- 生物圏評価のための評価コンテクストの設定
- 着目する生物圏システムの特定
- 被ばくグループの想定
- 生物圏モデルの構築と評価の実施
- 生物圏評価結果の分析

NUMO が地層処分事業において行う生物圏評価も，このような国際的に合意された手法に基づくものである。以下に，上記の段階のうち，主なものについて概要を述べる。なお，各段階の内容については，技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。

（ⅰ） 被ばくグループの想定

BIOMASS では，生物圏に含まれる種々の媒体（大気圏，地質媒体，土壌，堆積物，水域，動物群，植物群）のそれぞれに関連する人間活動を分類しており，このリストを参照することで，対象とする生物圏システムにおいて被ばくにつながる可能性のある人間活動のタイプを抽出することができる。例えば，前出の例についてこのようなアプローチを適用すると，線量が最も高くなりうるのは下記の被ばくグループであると考えられる。

- 海洋環境（潮間帯を含む）を利用する海洋漁業被ばくグループ
- 臨海部の土地を使って放牧を行う農業被ばくグループ

次第に寒冷化する時期には，農業システムの変化やそれに伴う食生活や居住率の変化が農業被ばくグループに生じると考えられるが，新たな別の被ばくグループを考える必要はない。また，被ばく経路としては，吸入（ガス，粉塵，煙霧質），外部被ばく（汚染された体表面と浸透），および種々の食品の摂取を想定することとなる。

（ⅱ） 生物圏モデルの構築と評価の実施

前項までの検討結果に基づき，例えば，下記のように生物圏を構成するコンパートメントおよびこれらの間の核種移行を設定することができる。

(a) GBI：処分場領域が陸側の淡水域にある場合には潮間帯堆積物が GBI となり，それ以外の場合には沿岸海底堆積物が GBI となる
(b) 沿岸海底堆積物
(c) 沿岸海水
(d) 潮間帯堆積物
(e) 潮間帯水
(f) 表層土壌
(g) 飽和度の変化する下部土壌
(h) 大気
(i) 植物群

(j)　動物群

(k)　人間社会

以上のコンパートメントから成る生物圏内での核種移行および被ばくに関するすべてのプロセスについて技術資料（NUMO，2010b）に示すような支配方程式を定義し，汎用の生物圏評価コードである AMBER（Enviros and Quintessa，2006）に入力して生物圏評価を行うこととなる。

なお，線量換算係数の算出に当たっては，環境変遷の影響を把握することを目的として，以下の点を想定した解析を行うこととした。なお，解析の詳細については技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。

- 気候条件の変化（亜寒帯気候⇒ツンドラ気候⇒亜寒帯気候・・・・・）
- GBI の変化（海底堆積層⇒潮間帯堆積層⇒海底堆積層・・・・・）

上述に基づき，農業従事者グループと漁業従事者グループに対して算出した線量換算係数の例を表 7.3.3-1に示す。農業従事者グループに対する線量換算係数は，上述した汚染された海底堆積層が潮間帯さらには土壌へと変遷することで環境変遷を考慮しない場合よりも約 2 倍程度大きい。また，漁業従事者グループに対する線量換算係数はツンドラ気候において海藻摂取量が増大するため，現在の気候条件よりも大きくなっている。

表 7.3.3-1 算出した線量換算係数の例

核種	線量換算係数(Sv y^{-1}/Bq y^{-1})	
	海洋漁業者	農業従事者
Se-79	7.37E-15	5.41E-14
Sr-90	3.92E-18	4.79E-16
Nb-93m	1.34E-25	9.63E-23
Nb-94	3.38E-17	1.11E-14
Tc-99	8.62E-18	2.87E-18
Pd-107	7.37E-19	2.16E-20
Sn-126	1.06E-14	1.06E-14
Cs-135	8.52E-18	9.22E-17
Cs-137	6.14E-17	6.14E-16

核種	線量換算係数(Sv y^{-1}/Bq y^{-1})	
	海洋漁業者	農業従事者
Sm-151	6.80E-18	2.25E-19
Zr-93	2.78E-17	1.39E-17
Np-237	2.59E-16	9.87E-18
U-233	5.17E-17	4.57E-17
Th-229	1.44E-14	1.55E-14
Pu-240	6.43E-15	1.19E-15
Cm-245	1.86E-14	4.76E-15
Cm-246	1.90E-14	1.93E-15
Am-243	2.01E-14	6.70E-15

7.3.3.2　岩盤不均質性および処分場設計に対応した核種移行解析モデル化技術の開発

(1)　三次元不均質場核種移行解析モデルPartridgeの概要

7.3.2.1 に述べた種々の場のタイプにおける核種移行解析に際しては，母岩の不均質性に起因する複雑な核種移行経路を適切に考慮する必要があり，NUMO は，この目的のために，ランダムウォーク法による三次元不均質場核種移行解析モデル Partridge を開発しており，また，この現象解析モデルによる詳細な解析結果をマルチチャンネルモデルで近似することでシステム性能評価を行う解析技術を構築している。

Partridge は，三次元不均質場における地下水流動と物質移動を解析するためのソフトウェアパッケージであり，その特徴は以下の点にある。

- 大規模な破砕帯や亀裂密集部のような決定論的に表現される高透水部と統計的に表現される多数の亀裂を含む複雑な不均質性を呈する岩盤と連続体として表現される人工構造物とから

成る三次元透水係数場モデル内での定常飽和地下水流動を有限要素法により解析することができる

- 透水性の高い亀裂や断層・破砕帯と低透水性の岩体マトリクスという極めてコントラストの強い三次元地下水流速ベクトル場において，亀裂などの中での比較的速い流速による移流と分散，そして，低透水性の岩体マトリクス中での分子拡散による，いわゆる二重空隙媒体中の物質移動問題をランダムウォーク法によって解析することができる
- 上記の三次元不均質二重空隙媒体中の物質移動解析結果に対して，必要に応じて多数の一次元チャンネルモデルによる近似を行うことができる

このうち，不均質透水係数場モデルの設定においては，さまざまな分野で設計用ツールとして用いられている各種の CAD およびメッシュジェネレータによって定義された人工構造物を，クラックテンソル法によって表現された亀裂状媒体を含む不均質岩盤中に挿入することが可能である。また，亀裂と岩体マトリクスのそれぞれにおける地下水流速の間の極端なコントラストのために従来は膨大な計算量を必要としていた三次元二重空隙媒体中の物質移動問題に対して，ランダムウォーク法を適用することによって数値解析の効率が向上されている。

Partridge による解析のための一連の操作（パラメータ値の入力，外部データの取り込み，種々の計算の実行および計算結果の描画）は，市販の汎用グラフィックス用ソフトである AVS を用いた専用のグラフィカルユーザーインターフェイス（GUI）を用いて実行することができる。なお，Partridge の定式化や数値解法については，技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。

(2) 三次元不均質場核種移行解析モデルPartridgeの検証

一般にモデル開発では，概念モデル（「与えられた評価の目的のもとにシステムを記述するための仮定の集合」と定義される）の開発，数学的定式化と計算モデルの開発，検証（Verification），確証（Validation）というステップを繰り返す手順が確立されている。

このうち検証は，計算モデルが与えられた数学モデルを数値的に正しく解いていることを，解析解との比較やベンチマークなどによって確認する作業である。確証では，モデルを用いた予測解析と実験の結果とを比較することによってモデルの妥当性を検討し，最も適切な概念モデルとそれに対応した数学モデルを選択する。モデルの妥当性を検討する際には，安全評価で考慮する時間的，空間的スケールの大きさについて留意しておくことが重要である。ナチュラルアナログ（天然類似現象）はモデルの妥当性を時間に対して保証していくための有効な手段の一つと考えられている。

Partridge は，地下水流動解析に用いる市販の水理解析モデルである FEMWATER を除いて NUMO およびその委託先が新たに開発した解析モデルであり，解析モデルの品質管理上の区分のうちクラス 3 に該当するため，定めたガイドライン（NUMO，2010a）に沿って体系的な品質管理を行っている。ここでは，このうち，特に重要な検証の結果について以下にまとめる。

(i) 不均質透水係数場作成に関する検証

検証を目的として，100m立方の体系に対し統計的に発生させた亀裂データと理論値の比較を行った。得られた亀裂データと理論値との比較結果は図 7.3.3-3および図 7.3.3-4に示すとおりであり，Partridgeを用いて発生させた亀裂ネットワークは，透水量係数，半径，および方向に関して理論値あるいは検証用データとよく一致し，妥当であることが示された。

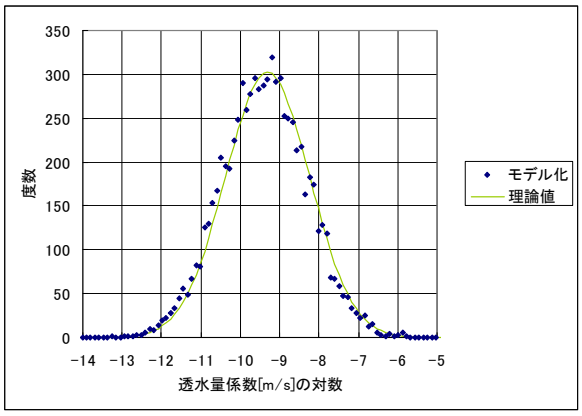


図 7.3.3-3 統計的に発生させた亀裂の透水量係数[m/s]の対数の度数分布と理論値の比較

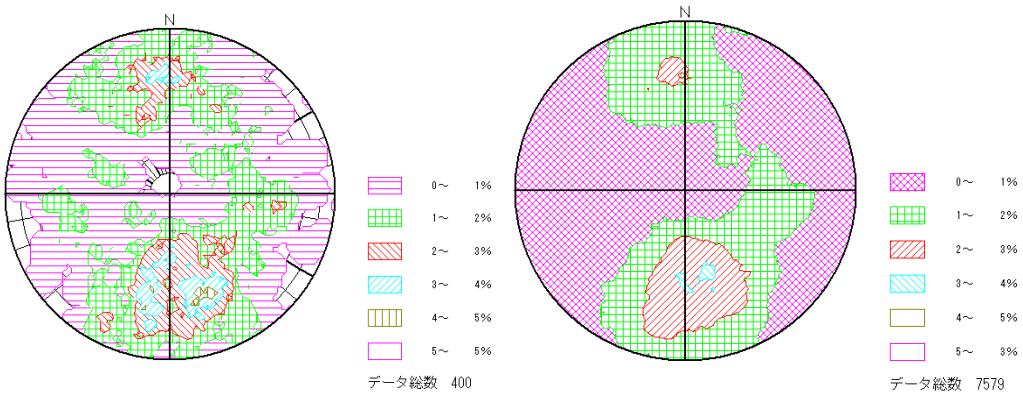


図 7.3.3-4 検証用データ（左）および Partridge を用いて作成した亀裂ネットワークのシュミットネット投影図（右）

（ii） 核種移行解析についての検証

Partridgeにおけるランダムウォーク法による核種移行解析を検証するために，均質および不均質の連続体を設定し，非吸着・保存性トレーサのパルス入力を想定して，拡散による核種移行のみの場合や移流・分散が生じる場合などの種々の解析を行い，既存の差分法による核種移行解析モデルによる計算結果との比較を行った。これらのケースはいずれも一辺の長さが 100mの立方体を解析対象領域とし，また，この領域の鉛直中心線上にソースを配置した。結果は，いずれの条件においてもPartridgeの解析結果が妥当なものであることを示している。例として，ダルシー流速 0.01 m/y，縦方向分散長 1.0ｍのケースについて各時刻の下流側での濃度分布の比較結果を図 7.3.3-5に示す（粒子数 200 万）。

そのほか，不均質母岩および坑道や人工バリアを含む現実的なニアフィールドにおける核種移行問題に Partridge を適用し，タイムステップ幅や粒子数などの主要な計算制御パラメータの影響について評価を行った。Partridge の詳細な検証事例については，技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。

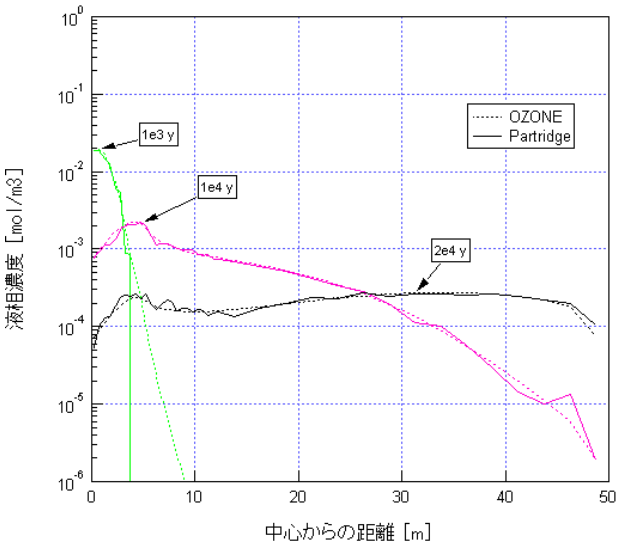


図 7.3.3-5 不均質連続体における移流・分散問題についての検証結果の例

(3) 不均質場についての例題の設定

母岩の透水性は地層処分システムの安全性能を規定するものとして最も重要性の高いものの一つと考えられるが，各スケールにおいて階層的に存在する不均質性の影響を直接的に受けるものであるために，スケールによらず一つの透水係数値によって代表することは適切ではない（例えば，透水性がほぼ一様に 10^{-9}m/s の岩盤と，10^{-10}m/s 程度の健全部と数十 m 間隔で分布する 10^{-7}m/s 程度の破砕帯を有する巨視的平均透水係数 10^{-9}m/s の岩盤とでは天然バリアとしての安全性能は大きく異なる可能性がある)。そこで，以下のように，各スケールで考慮すべき高透水部を含めたスケールごとの平均透水係数を定義するものとする。

- 健全部平均透水係数：任意の数 m 区間に存在すると考えられる高透水部（個々の亀裂など）を含んだ平均透水係数。それぞれの廃棄体パッケージおよびその直近の緩衝材と交差するものと想定すべき高透水部を含んだ平均的透水性に相当する。
- ブロックスケール平均透水係数：任意の数十 m 区間に存在すると考えられる高透水部（小規模の割れ目帯など）を含んだ平均透水係数。各坑道と交差するものと想定すべき高透水部を含んだ平均透水係数に相当するが，このスケールで遭遇する小規模割れ目帯などの高透水部を避けて廃棄体を定置するあるいはさらに止水プラグを設置することによって核種移行解析における直近の外側境界条件となることを避けることは可能である。
- 処分パネルスケール平均透水係数：任意の数百 m 区間に存在すると考えられる高透水部（断層など）を含んだ平均透水係数。該当する断層などの高透水部の分布に合わせて適切な処分パネル形状（あるいは止水工）を採用することによって坑道と交差する（あるいは掘削影響領域と短絡する）ことは避けることが可能であるが，このような高透水部（断層）は各廃棄体周辺の緩衝材から散逸して健全部あるいは小規模の割れ目帯を移行した放射性核種の地表へのクリティカルパスになるものと考えられる。

本試行で考慮した不均質透水係数場の例を岩種ごとに表 7.3.3-2にまとめる。まず，結晶質岩および堆積硬岩については，岩体マトリクス自体は難透水性とみなすことができる場合がほとんどである。従って，透水性への寄与は亀裂によるものと考えられるが，ここで，わが国で想定される多様な地質環境への対応を考える上では，第２次取りまとめでリファレンスとして想定されたような比

較的低透水性の亀裂が低頻度で等方的に分布するパターン（タイプ 1）に加えて，健全部の平均透水係数のより高いものを考える必要があるものと考えられる。また，その例としては，透水性の亀裂ネットワークの発達した結晶質岩（タイプ 2）と，層理面に由来する亀裂系が発達しており，個々の透水性は小さいものの頻度が高いために平均透水係数が大きくなるような古い堆積岩（タイプ 3）といった例などが考えられる。なお，ここで，亀裂の成因が本来は層理面であったものの「ズレ」である場合には，亀裂の方向性に顕著な偏りが生じるために，透水係数の異方性が存在するものと想定する。

堆積軟岩については，マトリクスおよび亀裂の双方が透水性に寄与する可能性があり，また，その特徴には深度などの要因も関連するものと考えられる。まず，ある程度の脆性を有するものについては，層理面に起因する亀裂および変位を伴う亀裂が分布しており，深部においてはマトリクスおよび亀裂のいずれも圧密されているために低透水性を呈するような場合（タイプ 1）が考えられる。また，浅部において地圧が低下した場合あるいは深部でも岩盤の脆性がより高いような場合には，マトリクスの圧密の程度が低下するとともに亀裂の開口幅が増大することによって，マトリクスおよび亀裂のいずれにおいても地下水の流れが顕著に生じるものと考えられる（タイプ 3）。なお，いずれの場合においても，ブロックスケールでは，褶曲運動などに関連して生じた破砕帯が分布する可能性があるものと想定される。他方，砂岩・凝灰岩層のように一定の可塑性を有する地層では，応力的な履歴にもよるものの，亀裂の頻度が極めて低く，岩盤全体としての透水性にはあまり寄与しない場合（タイプ 2）が想定される。

以上の種々の不均質場を，亀裂については第２次取りまとめと同様の統計的亀裂ネットワークモデルを，また，割れ目帯などについては，Conditioned Boolean Simulationの手法を適用することによって作成し，以下で述べる解析に用いた。不均質場の例を図 7.3.3-6に示す。また，不均質場作成の方法については，技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。

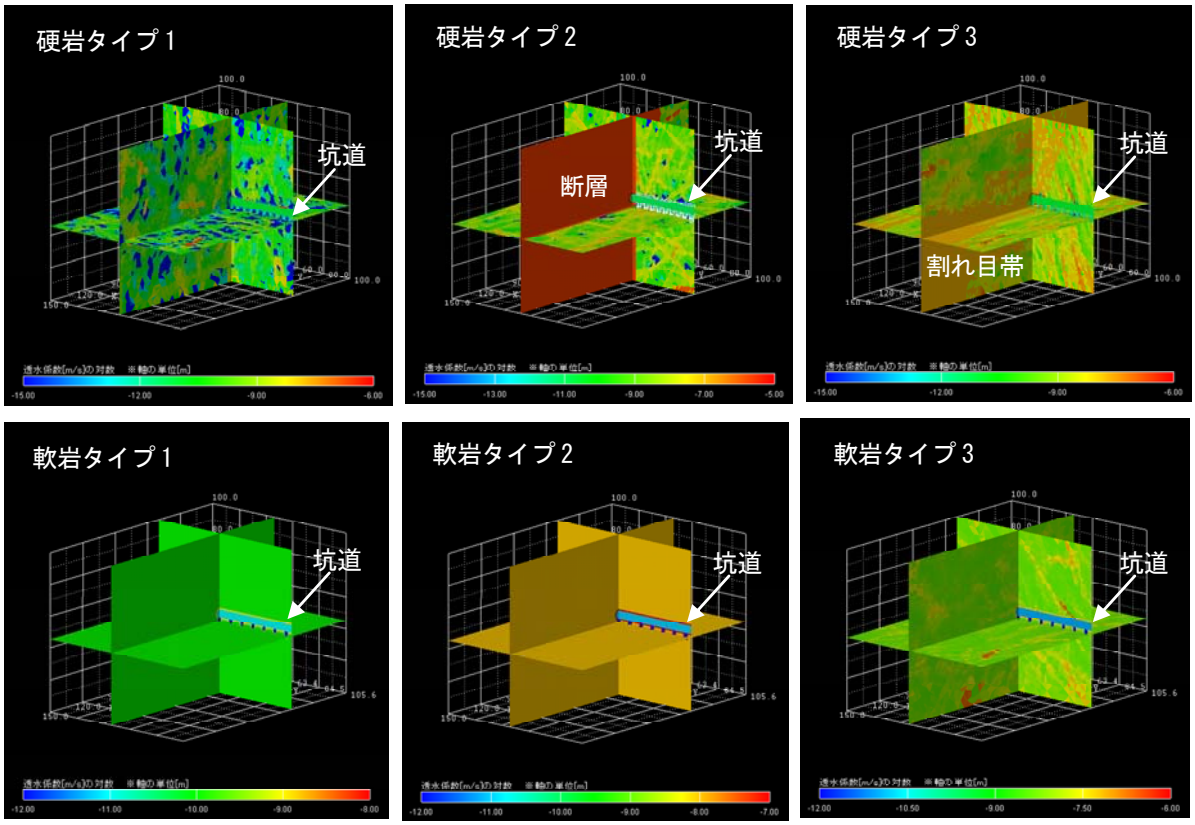


図 7.3.3-6 各岩種について作成した不均質透水係数場の例

表 7.3.3-2 試行で想定した不均質透水係数場の例

岩種	タイプ	マトリクス透水性（亀裂透水性）	平均透水係数 (m/s)			該当する地質環境の事例	モデル	備考
			健全部	ブロックスケール	処分パネルスケール			
結晶質岩堆積硬岩	1	低（低）	10^{-10}	10^{-10}	10^{-8}	H12 リファレンス（花崗岩）	亀裂	難透水性のマトリクスおよび等方的で低頻度かつ低透水性の亀裂ネットワークがランダムに分布
	2	低（高）	10^{-8}	10^{-7}	10^{-7}	花崗岩		個々の亀裂の透水性が高く，ブロックスケールではより高透水性の断層が分布している
	3	低（低）	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	付加体		個々の亀裂の透水性は低いが頻度が極めて高く明瞭な異方性を示す。割れ目帯あり
堆積軟岩	1	低（低）	10^{-10}	10^{-10}	10^{-9}	新第三紀堆積軟岩（深部）	亀裂または連続体	地圧のために亀裂（等方的/低頻度）は閉塞しマトリクス部も圧密されている
	2	高（低）	10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}	新第三紀-第四紀 砂岩＋凝灰岩	連続体	亀裂は極めて低頻度のため平均透水係数にはほとんど寄与しない
	3	高（高）	10^{-8}	10^{-8}	10^{-7}	新第三紀堆積軟岩（浅部）	ハイブリッド	マトリクス部の層理面および亀裂が開口しているためいずれも一定の透水性を示す。ブロックスケール以上では透水性の高い割れ目帯が含まれる

＊透水係数の数値はいずれもおおよその数値でありオーダーを表現したものである

なお，本試行では，第２次取りまとめ（JNC，1999a；1999b；1999c）において作成された種々の岩種および地下水水質についての核種移行データセットの中から，本試行で想定する条件に該当するものを抽出して用いることとした。これらのデータセットについても，技術資料（NUMO，2010b）を参照されたい。

（4） 各岩種における核種移行挙動の理解

上述した 6 種類の岩種それぞれにおける核種移行挙動の特徴を比較することを目的として，三次元核種移行解析モデル Partridge を用いて解析を行った。ここでは，不均質場のパターンによってどのように核種移行挙動の特徴が異なることを把握するために，種々の核種移行の場のタイプ，すなわち，a. 海進および海退に従う海底下の塩水の流動，b. 塩淡境界の移動に伴う陸側の塩水の流動，c. 海底下の淡水の浮力による上方への流動，および d. 地形勾配による陸側の淡水の流動，のうち d.を想定して解析を行った。なお，環境変遷パターンに応じてこれらの核種移行の場が時系列的に変化することを想定した解析については，8.において試行の結果を説明することとする。

（i） ニアフィールドの地下水流動状況

6 種類の岩種の不均質透水係数場（前出の 100m立方の等価透水係数テンソル場）のそれぞれを動水勾配0.01 の水平方向の流れの中に置いた場合の解析領域中央の坑道近傍でのダルシー流速分布を図 7.3.3-7に示す。ここで，各図の中央に上下に並ぶ青色（低流速）の円形の領域は処分孔内の緩衝材を，また，その外周にある明色（比較的高流速）の円筒形は掘削影響領域を示す。

均質場である軟岩タイプ 1 およびタイプ 2 における区分的に均質な流れと比較して，亀裂などに

よる不均質性を考慮したそのほかのケースにおける流動状況は複雑なパターンを呈している。最も亀裂頻度の低い硬岩タイプ 1 では，透水性の亀裂に沿って少数の大きな流路が分布しており，亀裂と全く交差していない一部の処分孔の周囲は滞留域（青色）となっていることが分かる。また，硬岩タイプ 2 では，坑道と直交する幅 5m の高透水性の断層内の流れ（中央を水平に横切る赤い（最大流速）帯）が顕著であり，周囲から断層に向けて地下水が流入していることが分かる。割れ目帯が複雑な形状で分布している硬岩タイプ 3 では，割れ目帯の分布域に対応して比較的速い流れ（橙色）が見られる。また，層理面に由来する高頻度の亀裂が明瞭な異方性を有するために，左から右への指向性の強い流れが生じている。亀裂頻度の低い軟岩タイプ 3 では，硬岩タイプ 1 と同様に少数の高透水性の亀裂が支配的な流路となっているが，マトリクス部分にも一定の透水性を仮定しているために, 全く亀裂のない領域においても一定の流れが存在していることが大きな相違点である。

（ii） 粒子軌跡から見た核種移行の特徴

図 7.3.3-7に示した各岩種におけるニアフィールドのダルシー流速場に基づき，技術資料（NUMO, 2010b）に述べた手法で各要素に含まれる亀裂中の実流速およびマトリクス中の流速を推定し，これに対して同技術資料に示したランダムウォーク法による核種移行解析を行った。ここで，粒子は放射性壊変しないCs同位体であるとし，緩衝材およびそれぞれの母岩での分配係数を仮定して各ケースにおいて合計10万個程度を24体のガラス固化体内にパルス入力して, その後の挙動を解析した。そして, 少数（100 個）の粒子をランダムに抽出して 10 万年後までの軌跡を描画した結果を図 7.3.3-8 に示す。なお，これらの結果において粒子軌跡の色は各タイムステップでの粒子の移動速度に対応している。

硬岩タイプ 1 では，亀裂頻度が低いために母岩の透水性が小さく，また，空隙率および実効拡散係数も小さいために，緩衝材および上部坑道埋め戻し材中の核種移行の方が周辺の母岩中の核種移行よりも顕著に速く，各粒子は，緩衝材および埋め戻し材の内部を拡散によりランダムに移行する（緩衝材および埋め戻し材の内部が粒子軌跡によって充たされていることと対応する）。そして，10 万年後には，坑道と交差する少数の透水性亀裂に沿って母岩中を移行する粒子の軌跡がいくつか見られる（上部坑道から斜め上方に移行する軌跡群）。これに対して，透水性亀裂の頻度が顕著に高い硬岩タイプ 2 およびタイプ 3 では，各処分孔においてこれらの亀裂との交差部が存在していることからガラス固化体から緩衝材に至った核種は上部坑道に拡散する以前に処分孔から亀裂へと移行している。また，硬岩タイプ 2 では，坑道中央部で幅 5m の高透水性断層と直交しているために，断層内での粒子の移動が卓越して生じているのに対して，硬岩タイプ 3 では，複雑な形状で分布する割れ目帯に沿って母岩中の卓越した核種移行経路が生じていることが分かる。低透水性の均質連続体である軟岩タイプ 1 では，坑道近傍は母岩中でも拡散支配の場であり，粒子は等方的に広がっている。また，粒子は 10 万年後でも坑道の直近に留まっている。他方，マトリクスが透水性であり顕著な移流が生じている軟岩タイプ 2 およびタイプ 3 ではマトリクス内を拡散でランダムに移行する粒子軌跡が時間とともに地下水流動方向（左側）に徐々に推移していることが分かる。

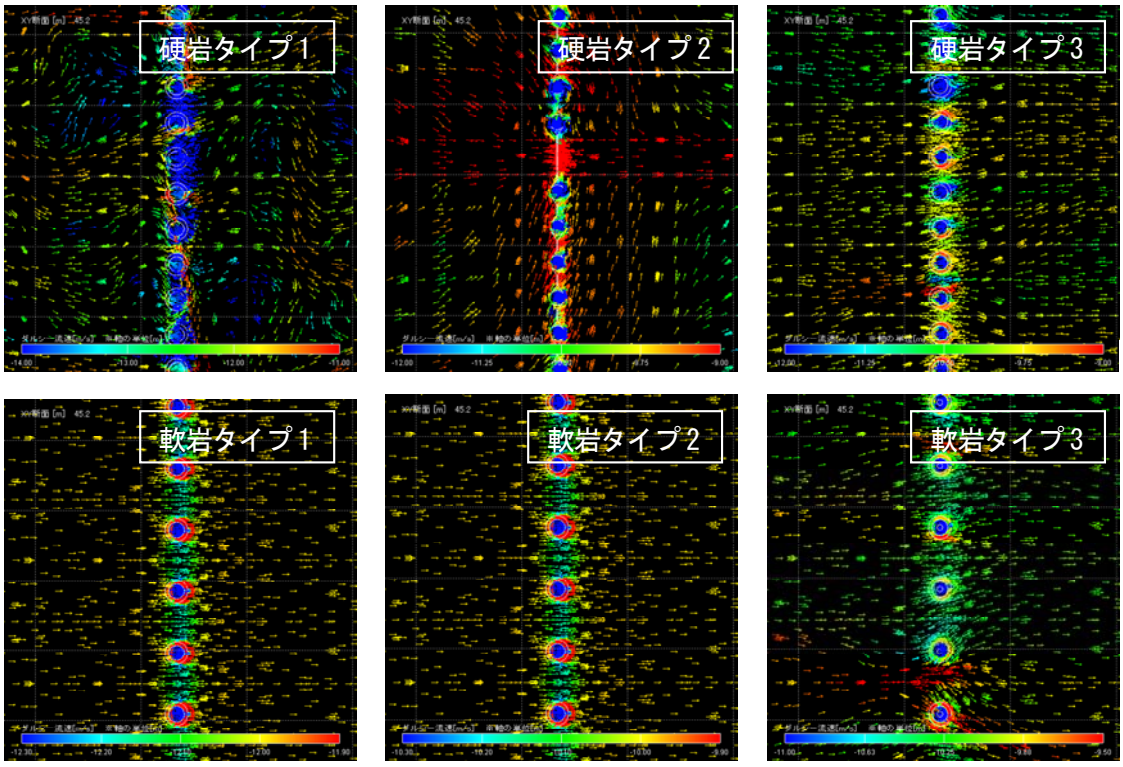


図 7.3.3-7 各岩種に対応した不均質透水係数場におけるダルシー流速分布(領域中央の坑道近傍の水平断面)

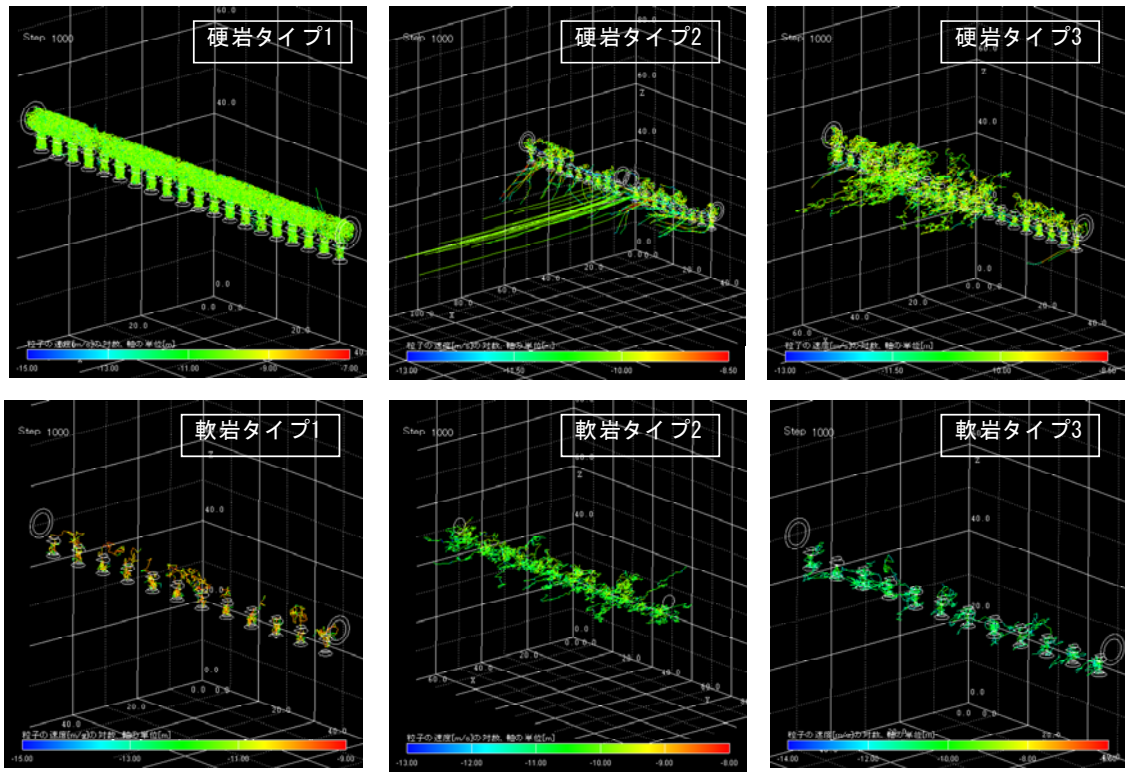


図 7.3.3-8 各岩種に対応した少数の粒子軌跡（各ガラス固化体でパルス入力：10 万年後）

（iii） 下流端での移行率の時間変化から見た核種移行挙動の特徴

解析領域内に含まれる 24 体のガラス固化体中に時刻 0 でパルス入力した約 10 万個の粒子のその後の挙動は，それぞれの不均質場における拡散 - 移流方程式の基本解とみなすことができる。そこで，ソースタームとして，第２次取りまとめリファレンスケースと同様に，ガラス固化体の浸出率律速（溶解期間 7 万年）を仮定してこの基本解に対する畳み込み積分を行い，さらに，Cs-135 の半減期（約 260 万年）に対応した減衰の係数を乗ずることによって，同じく，人工バリア外側境界および解析領域下流端での Cs-135 の移行率を算出することができる。

上述した手法によって各岩種についてのCs-135 の人工バリア外側境界および解析領域下流端での移行率を算出した結果を図 7.3.3-9に示す。

いずれの岩種においても Cs-135 の人工バリア外側での核種移行率に顕著な差異は認められない。これは，Cs-135 の放出率がガラス固化体からの浸出率で規定されていること，および人工バリア外側の地下水流速の感度が顕著ではない範囲にあるためと考えられる。他方，解析領域下流端での移行率には，以下に述べるような特徴が見られる。

- 低透水性の均質な連続体である軟岩タイプ 3 では，下流端での移行率は極めて小さい（ガラス固化体 1 体当たりの移行率が 10^{-3}Bq/y 以下であるため図中には表示されていない）
- 亀裂の頻度が低く透水量係数も比較的小さい硬岩タイプ 1 および低透水性のマトリクスに規定された軟岩タイプ 3 における最大移行率はいずれも 10^{2}Bq/y 程度であるが，ピークの出現時期は亀裂の影響の顕著な硬岩タイプ 1 のほうが早い
- 硬岩タイプ 3 と軟岩タイプ 2 における最大移行率はいずれも 10^{3}Bq/y 程度であるが，ピークの出現時期は亀裂を含む硬岩タイプ 3 のほうが若干早い
- 硬岩タイプ 2 は，中央の大規模な断層のために顕著に最も高い被ばく線量（10^{4}Bq/y 程度）を示し，また，断層を経路とした核種移行率とそのほかの部分のより遅く小さい核種移行率とが重なりあっているものと推定される

なお，技術資料（NUMO，2010b）では，上記の計算方法を述べるとともに，ほかの処分概念や掘削影響領域の代替モデルなどを含めた多くの解析事例について概要をまとめている。

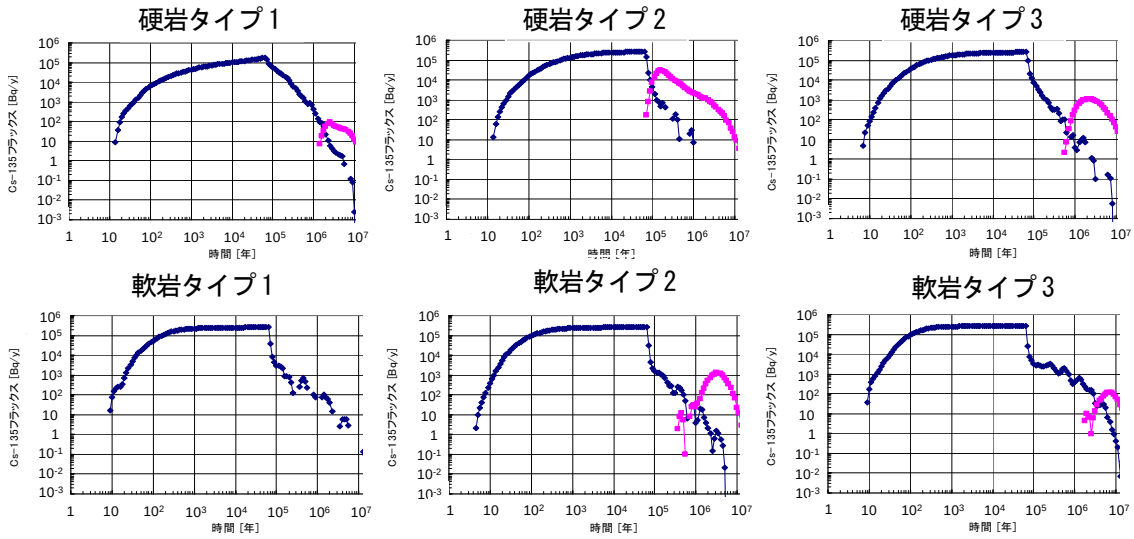


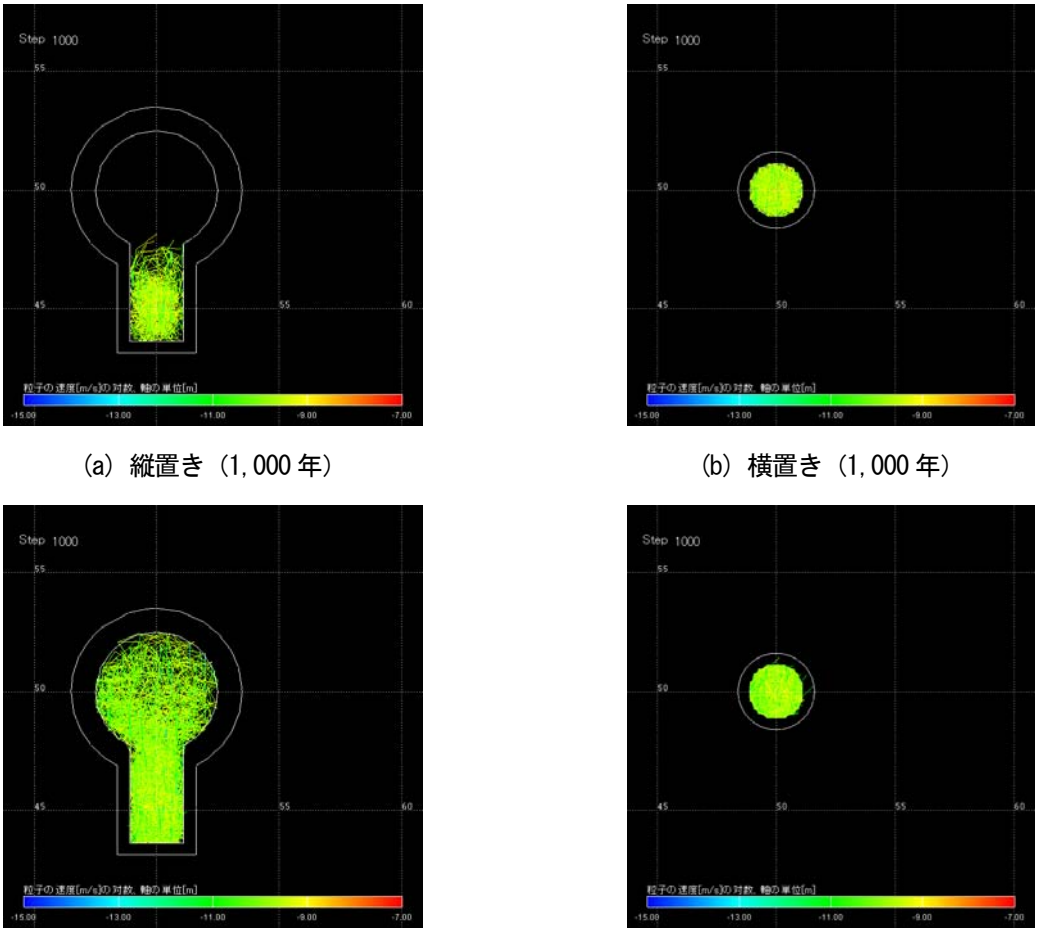
図 7.3.3-9 Cs-135 移行率（ガラス固化体 1 体当たりの平均）の時間変化

(5) 核種移行解析結果に基づく処分場設計への情報提供

前節に述べた Partridge による詳細な解析は，それぞれの不均質場の特徴および坑道の形状や配置あるいは人工バリアの特性といった設計仕様によって核種移行挙動がどのように変化するかを定量的に示すことの可能なものである。このため，Partidge は従来の保守的な簡単化に基づくシステム性能評価モデルによる核種移行解析では保守性の中に埋没する傾向のあった種々の設計オプション間の差異を定量的に分析する際の有用なツールとなり得る。ここでは，以下に，いくつかの典型的な例について，このようなツールを用いた定量的な情報の授受を介した設計と安全評価との連携について，具体例を通じて説明する。

(i) 縦置きと横置きの比較

第２次取りまとめ（JNC，1999d）において想定したような良好な岩盤においては，緩衝材中の拡散による核種移行のほうが岩盤中のマトリクス拡散も考慮した平均的な移動よりも速いものであるために，横置きの場合，ガラス固化体から放出された核種はまず緩衝材中に貯留される。この時点での緩衝材空隙水中での核種濃度は，可溶性の核種（Cs-135 など）の総インベントリが緩衝材中で吸着平衡にあるものとして算出した空隙水中濃度とほぼ等しいものである（図 7.3.3-10参照）。その後，時間をかけて岩盤中に移行していくこととなるが，この岩盤中への核種移行率の最大値は上記の緩衝材中の核種濃度によって規定されるものとなる。このような観点からは，竪置きの場合には，処分孔内の緩衝材に加えて上部坑道内に埋め戻し材が存在し，かつ，後者の体積が支配的であるために，この場合の緩衝材中濃度は横置きの場合よりも顕著に低減されるはずである。



(a) 縦置き（1,000 年）　(b) 横置き（1,000 年）

(c) 縦置き（1 万年）　(d) 横置き（1 万年）

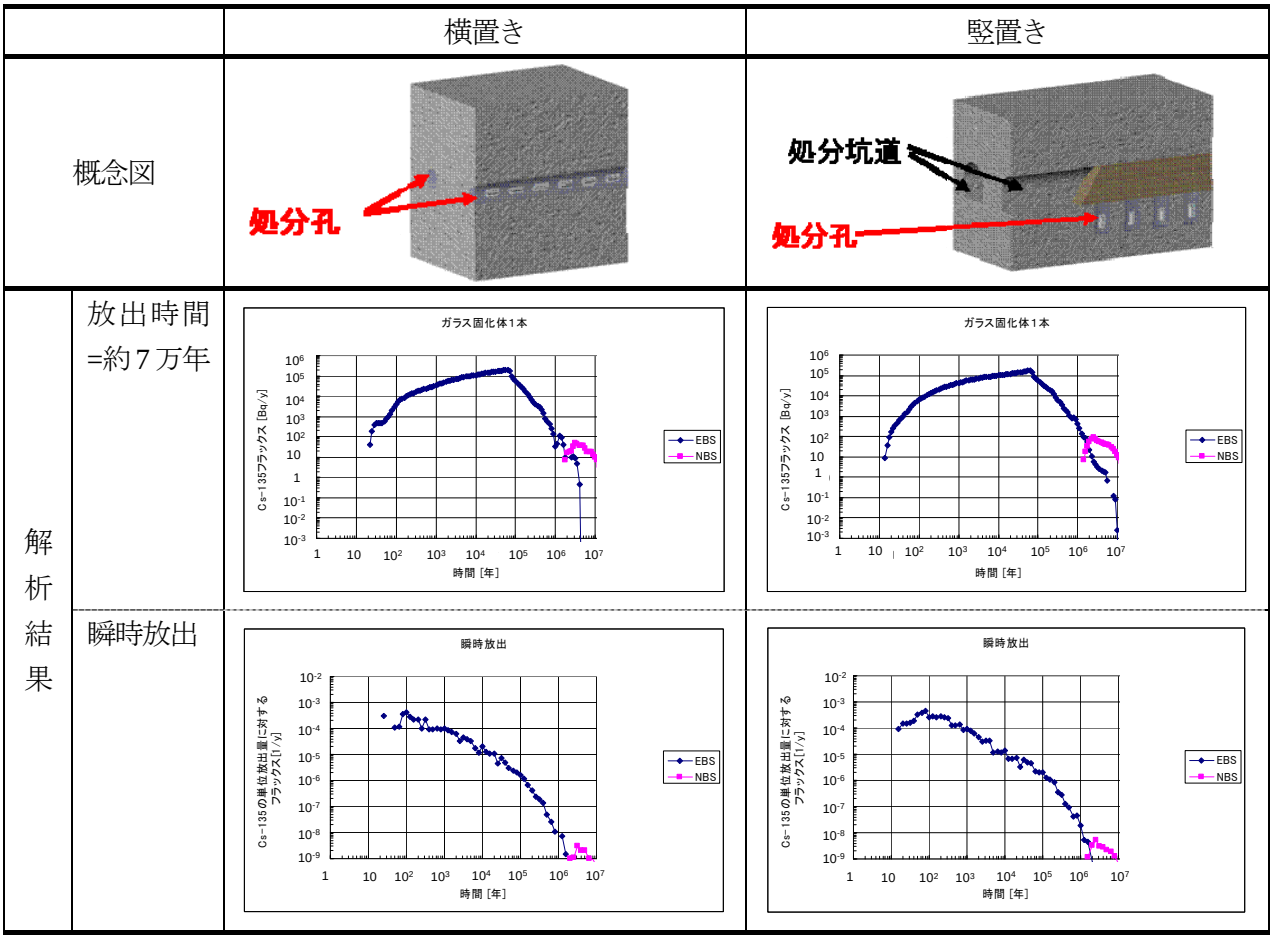
図 7.3.3-10 ニアフィールド内の Cs-135 の軌跡（硬岩タイプ 1）

しかしながら，実際には，ほぼ同等の岩盤を想定したケースにおいて算出された人工バリアからの核種移行率の最大値は竪置きおよび横置きの場合でほぼ等しい（図 7.3.3-11参照）。この理由は，図 7.3.3-12に示すように，竪置きの場合には確かに上部坑道埋め戻し材における核種の存在割合が支配的となる時期があるものの，それは，緩衝材中に核種が移行してから一定時間経過した後であることによる。すなわち，竪置きの場合には，まず，核種は横置きの場合と同様に緩衝材中にほぼ全量が移行してそこで蓄積され，約 1 万年をかけて徐々に上部坑道へと推移する。他方，施設から岩盤に移行する核種フラックスのピークはおよそ 100 年程度経過した時点で生じており，この時点では，竪置きの場合においてもほぼ全量が処分孔内の緩衝材中に存在しており，横置きとの差異は顕著なものとはならない。なお，瞬時放出モードで見られるこのような傾向は，ガラス固化体からの核種放出期間にわたって畳み込み積分を行った結果（図 7.3.3-11上側の図）においても同様である。

竪置きの場合に上部坑道への核種移行が遅くなる原因としては，

- この移行が拡散によるものであるために，移行に要する時間スケールは距離の二乗に比例して長くなること
- 竪置きの処分孔内にある廃棄体上底から上部坑道埋め戻し材までの距離はおよそ 1.7m 程度であり，廃棄体側面から岩盤（処分孔側壁）までの距離約 0.7m よりも顕著に長いこと

によるものである。実際，この条件で岩盤および上部坑道への拡散時間を試算すると，後者は前者の約 6 倍程度となり，上部坑道への進入に先立って核種は岩盤へ移行することが分かる。



（EBS：人工バリア，NBS：母岩）

図 7.3.3-11 竪置きおよび横置きの核種移行率の比較

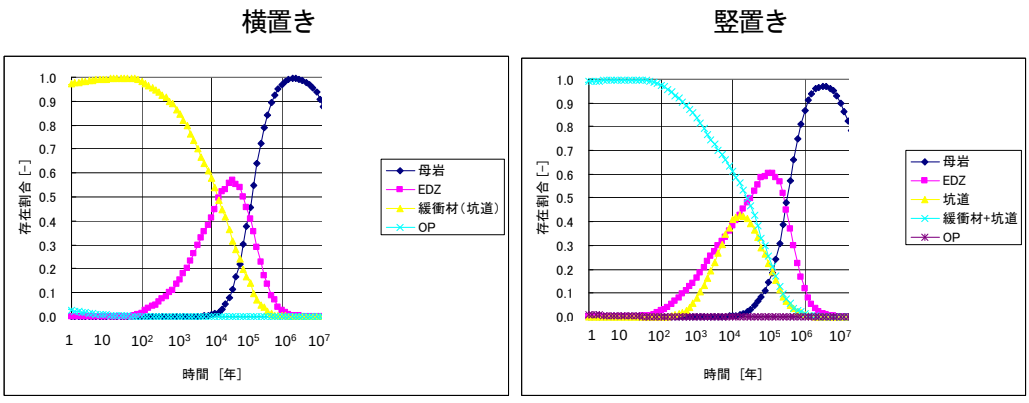


図 7.3.3-12 各領域に存在する核種の割合とその時間変化（瞬時放出モード）

（ii） 断層からの離隔に関する知見（硬岩タイプ 2 の場合）

坑道の中央部で直交する幅 5mの高透水性断層を有する硬岩タイプ 2 の解析領域下流端での

Cs-135 の移行率は，この断層のために最も高い被ばく線量（10^4Bq/y程度）を示し，また，断層を経路とした核種移行率とそのほかの部分のより小さい核種移行率とが重なりあっているものと推定される。そこで，解析対象領域に含まれる約 30 体の廃棄体それぞれから移行した核種の人工バリアおよび下流端での移行率の最大値（パルス入力に対するもの。畳み込み積分は行っていない）を比較した。断層直近の廃棄体からの移行率の最大値は十分離れた廃棄体よりも 2 桁程度大きく，また，断層の集水域に対応して約 30m以内にある廃棄体からの核種移行率の最大値には有意な影響があることが分かった。また，Np-237 についても同様の解析を行い，解析対象領域に含まれる約 30 体の廃棄体それぞれから移行した核種の人工バリアおよび下流端での移行率の最大値（パルス入力に対する）を比較した結果を図 7.3.3-13に示す。この比較結果より，断層直近の廃棄体と断層から十分離れた廃棄体の間の移行率最大値の差は約 6 桁に達しており，断層の影響がより顕著であることが分かる。

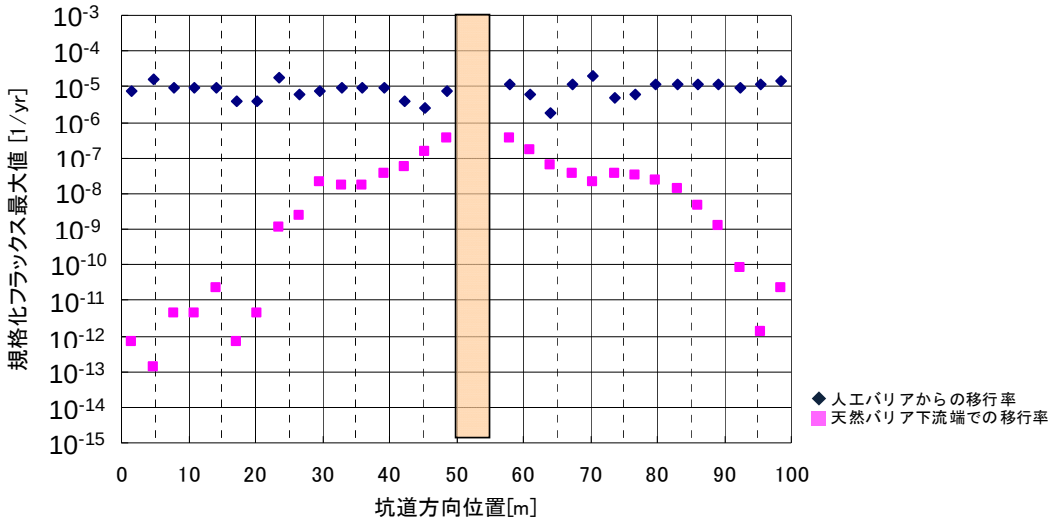


図 7.3.3-13 Np-237 移行率最大値（パルス入力に対する）の廃棄体依存性（硬岩タイプ 2）

他方，坑道および掘削影響領域にベントナイトプラグによる止水工を施した場合でも母岩中の透水性亀裂のために坑道と断層をつなぐ短絡路が多数存在しており，止水工の効果は有意なものとはならないことが分かった。

（iii） 割れ目帯からの離隔に関する知見（硬岩タイプ 3：地下水主流動方向と坑道が直交する場合）

硬岩タイプ 3 では，不定形の高透水性割れ目帯が分布するため，核種移行に対してより複雑な影響パターンを呈するものと予想される。そこで，例題として，図 7.3.3-14（左）に示すように，地下水主流動方向と直交する 4 本の坑道を配置した体系を想定してPartridgeによる核種移行解析を行った。粒子軌跡は図 7.3.3-14（右）に示すとおりであり，各坑道と割れ目帯とが交差する部分において卓越した移行経路が形成されていることが分かる。

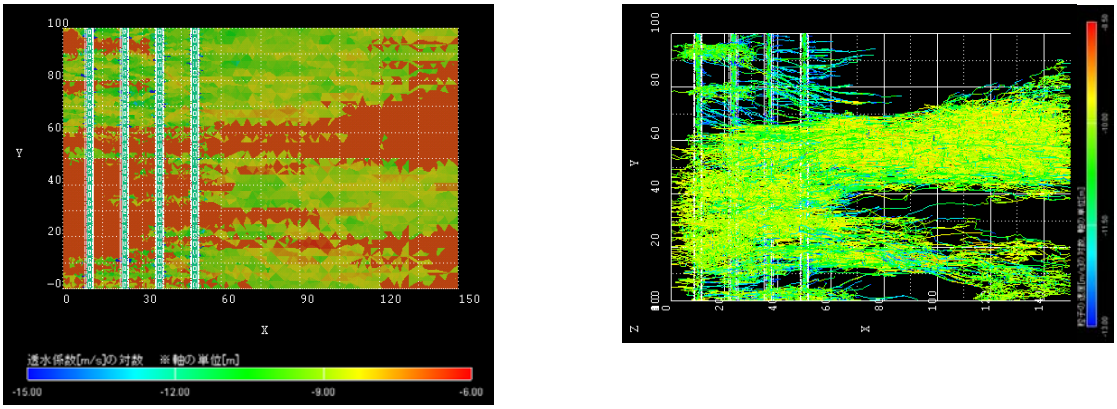


図 7.3.3-14 硬岩タイプ3において割れ目帯および地下水主流動方向と坑道が直交する場合の不均質透水係数場（左）および粒子軌跡（右）（坑道を通る水平断面）

最上流側および最下流側の坑道からの Np-237 の移行率を比較した結果を図 7.3.3-15に示す。Np-237 の最大移行率の坑道間の差異は 1 桁程度あり，処分パネル内の天然バリア性能がある程度期待できることを示している。実際，各坑道から移行する粒子のその後の挙動を追跡することで，不均質場における水理学的分散効果のために，最上流側の坑道から出発した粒子のうち下流側坑道の掘削影響領域に至るものの割合は 1%程度であり，ほとんどの核種が坑道に影響されず天然バリア性能の期待できる領域を移行していることが確認できる（NUMO，2010b）。

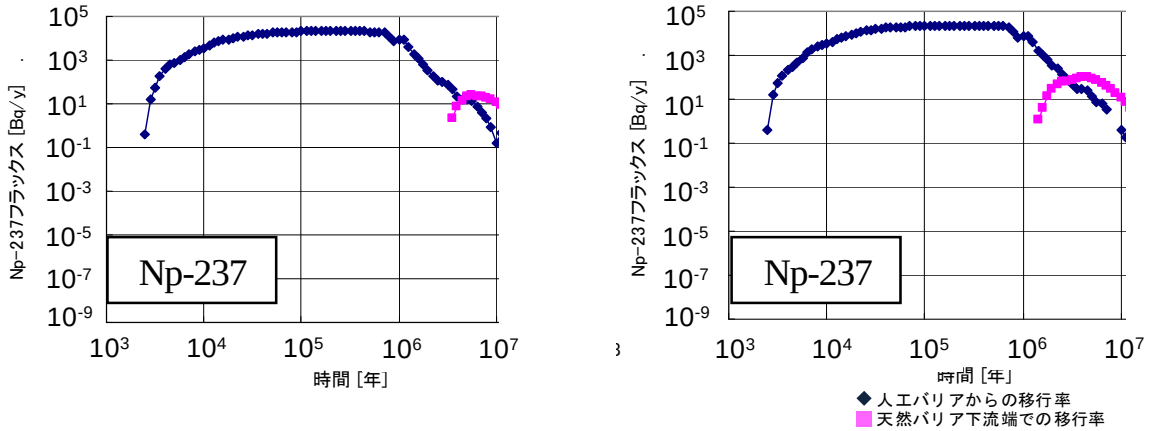


図 7.3.3-15 最上流側（左）と最下流側（右）からの核種移行率計算結果の比較
（ガラス固化体 1 体当たりの平均：硬岩タイプ 3：割れ目帯および地下水主流動方向と坑道が直交する場合）

硬岩タイプ 3 の場合も割れ目帯による核種移行率への影響は顕著であり，例えば，最下流側の坑道に定置された廃棄体からのNp-237 移行率の最大値の比較結果（図 7.3.3-16）は，割れ目帯との相対的な位置関係によって大きな差異が生ずることを示している。坑道近傍にもその下流側にも割れ目帯の分布していない坑道右端の 8 体の廃棄体（図中のA）からのNp-237 移行率の最大値は，解析領域下流端において極めて小さくグラフの下限以下となっているのに対して，坑道と割れ目帯の交差部であり下流側にも割れ目帯の分布している部位に置かれた廃棄体（同B）からの核種移行率の最大値は顕著に大きなものとなっている。また，坑道近傍のみに割れ目帯の存在している部位の廃棄体や坑道近傍には割れ目帯はないが下流側には存在している部位の廃棄体からの核種移行挙動は

その中間的な数値を示している。なお，Bに該当する箇所の左右に止水工を配置した場合の解析結果は，硬岩タイプ 2 の場合と同様，このような止水工の効果が限定的であることを示唆している。

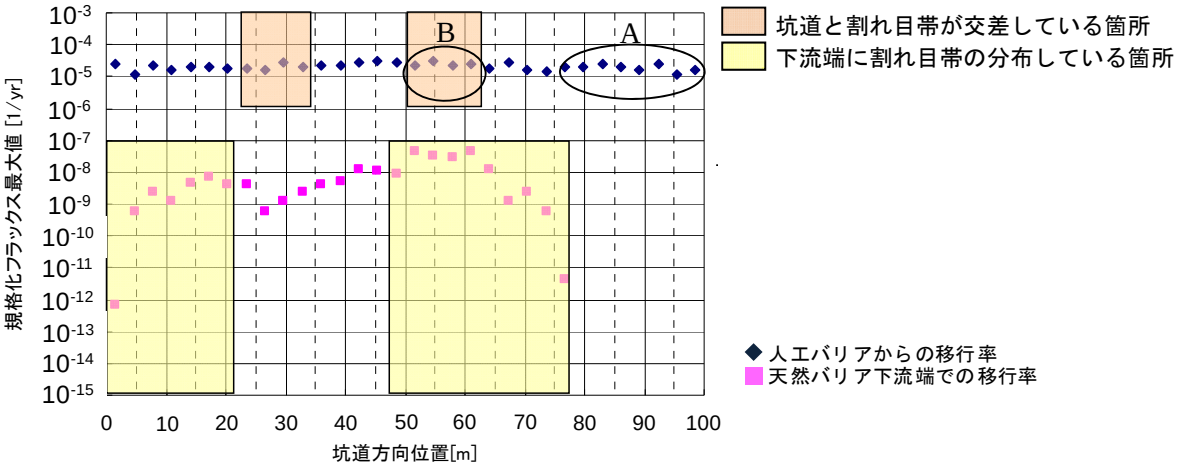


図 7.3.3-16 最下流側坑道における各廃棄体からの Np-237 最大移行率の比較（硬岩タイプ 3：割れ目帯および地下水主流動方向と坑道が直交する場合）

(6) 地層処分低レベル放射性廃棄物に関する検討状況

前項までに述べた技術開発事例は，概要調査以降における処分場概念の詳細化の段階を想定し，主として高レベル放射性廃棄物を対象として検討してきたものであるが，その成果である評価手法自体は，地層処分低レベル放射性廃棄物についても適用可能と考えられる。他方，7.1.2.1 において述べたように，地層処分低レベル放射性廃棄物には多様な種類のものが含まれ，個々の廃棄体の特徴を詳細に検討し，安全性を確保する必要がある。また，「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」（資源エネルギー庁・JAEA，2006）において，幅広い地質環境に柔軟に対応するための代替技術が示されており，これらの代替技術を活用することも視野に入れて，安全確保の頑健性の向上を図ることとしている。そこで，地層処分低レベル放射性廃棄物については，前項までに述べた解析技術による詳細な定量的検討を行うのに先立ち，個々の廃棄物の特徴に対して，代替技術を含めた適切な工学的対策を対応付けることにより，幅広い地質環境特性における安全確保の方策を明らかにすることが至急の課題となる。

このため，NUMOでは，システム性能評価モデルを用いた感度解析を通じて，これらの代替技術を対象とした高度化対策の抽出と地層処分システムの頑健性の向上を目的とした検討を行っている（NUMO，準備中）。このような感度解析の結果，例えば，廃銀吸着材のセメント混練固化体などのグループ 1 廃棄物に含まれるI-129 は，極めて長寿命であり，また，岩石への収着による移行遅延がほとんど生じないため，天然バリア性能に期待することができず，人工バリアからの放出率を制限することが必要となることが示されている。なお， 図 7.3.3-17に示すように，グループ 1 廃棄物に含まれるI-129 に対しては，一定溶出率が大きい場合においても，充填剤のKdを制限することによって人工バリアからの放出率を制限することが可能である。

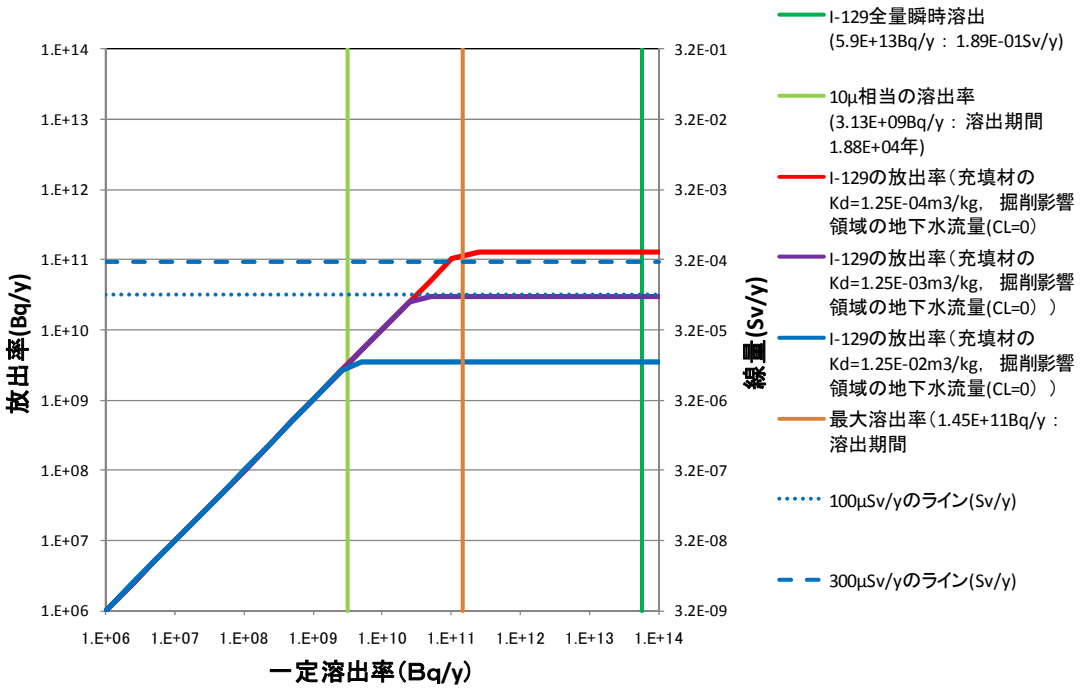


図 7.3.3-17 I-129 に対する工学的対策の効果についての感度解析結果の例
（グループ 1 廃棄物の溶出率制限）

7.3.4 核種移行パラメータ設定に関する取り組み

安全評価の信頼性を確かなものとするためには，より現実的なモデルの開発に加え，対象とするシナリオやモデルに対応して，パラメータや境界条件に関するデータを適切に設定することが必要となる。

7.2.3 で述べたように，安全評価で用いるデータは多岐にわたるものである。今後，NUMO が実施する安全評価においては，サイトが有する地質環境特性に対応したパラメータ設定が必要となる。第２次取りまとめ以降，基盤研究期間では，核種移行パラメータ設定を支える技術として，データベースの整備やデータセットの作成に関する検討が鋭意進められている。本項では，これらの現状について記述する。

7.3.4.1 データベースの整備

基盤研究開発機関は，核種移行解析に関するパラメータに関する以下のデータベースや調査データを公開している。NUMO は，データセットを作成する際の基盤情報として，これらを用いていくこととなる。

- 熱力学データベース（TDB）：放射性元素および地球化学元素に関する熱力学データベースを種々の地球化学コード（PHREEQC など）で利用可能なフォーマットで整備したもの（Kitamura et al.，2010）
- 収着データベース（SDB）：国内外の文献から抽出されたベントナイトや岩石などに対する分配係数データを整理したものであり，また，指定された条件に該当するデータの検索やデータ群に対する回帰分析などの処理を行う機能を有する（舘ほか，2009）
- 拡散データベース（DDB）：文献から抽出されたわが国に分布する種々の岩石などに対する

実効拡散係数データを整備したもの（栃木・舘，2009；栃木・舘，2010）

- ガラスの溶解に関するデータベース：文献より，ガラス，ガラス組成，試験法，溶液，共存物，成分，変質生成物，試験条件，試験結果などに関する情報を集約したもの（林ほか，2005；林ほか，2008）
- 生物圏移行データ：わが国の風土，農業活動などを反映した環境移行パラメータとして，水田・畑土壌での核種の動きやすさ（Kd）や農作物への核種の移行割合（TF）に関するパラメータを集約したもの（NIRS，2009）

7.3.4.2　データセット作成方法の構築

安全評価に用いる分配係数データセットを設定する際の方法としては，以下の三つのものが提案されている（舘ほか，2009）。

- 方法1：実験によるデータ取得
- 方法2：収着・拡散データベースの利用
- 方法3：メカニスティックモデルによる推定

このうち方法1は，最も直接的なものであり，今後の地層処分事業の進展に伴い，概要調査や精密調査の対象地域が選定後は，原位置の地下水や岩石コアサンプルなどが入手可能となるため，重要性を増していくものと予想される。この方法に関しては，JAEA などにより，以下が進められている（舘ほか，2009）。

- 実験手法や条件などの標準化
- データの品質管理
- バッチ試験などのデータから原位置の分配係数を推定する方法の確立

他方，方法2は，既往の実験データに基づき対象とする地質環境の条件での分配係数値を設定するものであり，文献調査段階などの初期において特に重要である。また，概要調査以降の方法1が適用可能となる段階においても，時間的制約などのために実験を行っていない元素の分配係数値の推定や，新たに行った実験の結果と文献値との比較による妥当性の確認といった観点から方法1を補足する手法として有用である。この方法については，前出の JAEA の収着データベースの利用に関して以下の方法論が開発されている（舘ほか，2009）。

- 膨大な数のデータから当該条件に関連するものを抽出し，さらに，信頼度の評価を経てスクリーニングを行う方法
- 実験条件と実際の処分環境との相違を考慮して，後者に適用すべき分配係数値の補正を行うためのコンバージョンファクターの設定

方法3は，表面錯体生成モデルなどの熱力学的収着モデル（TSM）に基づき各元素の指定された条件での分配係数を理論的に推定するものであり，

- TSM および対応するデータベースの作成
- EXAFS などの分光学的手法やその他の実験手法による収着形態の理解に基づくモデルの妥当性評価

を通じて方法1および方法2の信頼性をさらに高めるための基盤的研究が進められている（舘ほか，2009）。

7.3.5　今後の課題

前節までに，2000 年以降 NUMO および基盤研究開発機関が取り組んできた技術開発の整備状況を 7.3.2 および 7.3.3 で説明した。

今後は，これらの技術の整備状況と，NUMO で取りまとめている「地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～」(NUMO, 2010c) などを踏まえて具体的な技術課題を抽出する。そして，課題優先度を設定した上で，各課題を着実に解決することにより安全評価技術の信頼性を向上させていくことが重要である。

上記の報告書に示した課題のうち，特に開発の優先度が高い安全評価を支える技術の課題の例を表 7.3.5-1に示す。

表 7.3.5-1 安全評価技術の課題

課題	開発計画技術
安全規制の動向やバリア機能の現実的な性能把握などの観点から，蓋然性の高いシナリオ評価に関する技術	● 蓋然性に基づくシナリオ構築技術の整備 ● 安全規制から示されるシナリオの枠組みに即したデータ設定技術の開発（例：最尤値の設定）
安全規制の動向やバリア機能の現実的な性能把握などの観点から地球環境の長期変遷を考慮した性能評価に関する技術	● 蓋然性に基づく地質環境の長期的変遷を考慮したシナリオ構築技術の整備 ● 地質環境の多様性や地質環境の長期的変遷を考慮したファーフィールドの特性評価技術 ● 地質環境の長期的変遷を考慮した水理・核種移行モデルの整備 ● 地表環境の長期的変遷を考慮した生物圏モデルの開発
段階的に増える地質環境の情報を用い，効率的な不確実性の低減および安全に対する信頼性の向上を実現するため，サイト調査，設計，性能評価が有機的に連携できるための技術	● サイト調査―安全評価の連携 ➢ 地質環境モデルの情報（移行経路情報・水理特性などの長期的変遷など）の安全評価への取り込みに関する技術 ➢ サイト調査により安全評価の不確実性を効率的に低減させるための技術の整備 ● 設計―安全評価の連携 ➢ 安全評価の観点からの設計オプションの絞り込みに必要な評価技術の整備 ➢ 閉鎖前の安全性と閉鎖後の安全性のバランスを図るための評価技術の整備 ● 地下研究施設を活用した「安全評価―サイト調査―設計」の連携の実証

7.4 まとめ

本章では，セーフティケースの作成や地質環境の調査・評価および工学的対策との連携といった事業者の観点から，長期安全性を評価するための考え方について記述した。また，基盤研究開発機関および NUMO においては，事業段階において閉鎖後長期安全性を評価するための整備してきた技術基盤の概要について記述した。また，さらなる信頼性向上のための，安全評価における技術開発の今後の課題についても取りまとめた。

以下では，基盤研究開発機関および NUMO における主要な技術開発の進展についてまとめる。

- 地質環境の多様性と長期変遷の対応として，沿岸域を事例として，海水の影響や塩淡境界の分布の時間的な変遷をより現実的に取り扱い，シナリオとしてパターン化するための手法を開発した。また，事業段階において，関連する種々の科学的な知見を適切に安全評価に取り込めるようにするため，安全機能とストーリボードに基づくトップダウン的なシステムの理解に着目し，ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオを開発するための手法を開発した。さらには，基盤研究開発機関においても，効率的なシナリオ構築手法，FEP 情報の整備，自然事象の影響評価手法などのシナリオ構築に関する検討や安全評価を支える個別現象の研究が進められている。これらのことから，事業の進展に応じて活用可能なシナリオ構築技術の選択肢が着実に拡充しているものと考える。
- また，上述した沿岸域における特徴を踏まえ，水理および地下水の水質の変遷に着目した天然バリアの核種移行および生物圏を評価するためのモデル化技術を整備した。また，処分場の設計においては，廃棄体の定置方式などの種々のオプションが想定される。このため，安全評価においては，これらの特徴が長期安全性に与える影響をより現実的に評価できるようにするため，三次元の核種移行解析モデルを開発した。さらには，基盤研究開発機関においても，掘削影響領域における核種移行および遅延をより現実的に評価するためのモデル開発や生物圏における気候変動の影響を考慮したモデル開発などが進められている。これらのことから，事業の進展に応じて活用可能なモデルの選択肢が着実に拡充しているものと考える。
- 長期安全性評価の信頼性を確保するためには，地質環境の多様性や長期変遷を考慮した上で，核種移行パラメータを適切に設定することが重要である。2000 年以降，基盤研究開発機関は，様々なデータベース（熱力学データベース，収着・拡散データベース，ガラスの溶解に関するデータベースなど）の開発・更新を行った。さらには，整備されたデータベースを用いたパラメータの設定手法についても検討が進められた。これらのことから，核種移行パラメータを設定する上で必要な基盤となる技術が強化されたと考える。

以上のことから，2000 年以降，地質環境の多様性や長期変遷，および種々の設計オプションなどを考慮したより現実的な安全評価技術が整備され，処分事業における長期安全性評価技術の信頼性が向上しているものと考えている。

参考文献

ANDRA (2005)： Dossier Argile 2005.

BIOCLIM (2004) : Development and Application of a Methodology for Taking Climate-Driven Environmental Change into Account in Performance Assessments. BIOCLIM Deliverable D10-12, April 2004. Available from ANDRA, http://www.andra.fr/bioclim/.

BIOMOVS II (1996)：Development of a Reference Biospheres Methodology for Radioactive Waste Disposal. BIOMOVS II Technical Report No. 6, published on behalf of the BIOMOVS II Steering Committee by the Swedish Radiation Protection Institute, Sweden.

電事連（電気事業連合会）・JNC（核燃料サイクル開発機構）(2005a)：TRU 廃棄物処分技術検討書−第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ− , JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.

電事連（電気事業連合会）・JNC（核燃料サイクル開発機構）(2005b)：TRU 廃棄物処分技術検討書根拠資料集，FEP 辞書.

電中研（電力中央研究所）(2005)：核燃料サイクル関係推進調整等（放射性廃棄物等広報対策等-放射性廃棄物処分におけるセーフティケースに関する社会的受容性調査）報告書，平成 18 年 3 月.

Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. (1998) : Physical and Chemical Hydrogeology 2nd edition，John Wiley & Sons.

江橋健，小尾繁，大井貴夫 (2009a)：高レベル放射性廃棄物地層処分における性能評価パラメータの安全裕度評価方法の例示，原子力バックエンド研究 Vol.15 No.2, pp.99-115.

江橋健，川村淳，稲垣学，小尾繁，柴田雅博，板津透，仲島邦彦，宮原要 (2009b)：仮想的な堆積岩分布域における地層処分の地下水シナリオを対象とした隆起・侵食の影響評価手法の例示，JAEA-Research 2008-117.

T. Ebashi, K. Ishiguro, K. Wakasugi, H. Kawamura, I. Gaus, S. Vomvoris, A. J. Martin, P. Smith (2010)： Trends in Scenario Development Methodologies and Integration in NUMO's Approach, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan [in printing].

ENSI(2009)：Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Erläuterungsbericht zur Richtlinie, ENSI G-03.

Enviros and Quintessa (2006)：AMBER 5.0 Reference Guide. Enviros, Culham and Quintessa, Henley-on-Thames, UK.

藤原 治，柳田 誠，三箇智二，守屋俊文（2005）：“地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究，原子力バックエンド研究，11，113-124

Fukuchi, T., Yurugi, J., and Imai, N. (2007) : ESR detection of seismic frictional heating events in the Nojima fault drill core samples, Japan. *Tectonophysics*, Vol.443, p.127-138.

長谷川琢磨，田中靖治，馬場保典，五十嵐敏文(2004)：Aspo Hard Rock Laboartory 建設に伴う地下水流動の変化に着目した解析モデルの検証，土木学会論文集，757/III-66，pp.189-202

放射線医学総合研究所 (2009)： 平成２０年度放射性廃棄物共通技術調査等委託費,放射性核種生物圏移行評価高度化調査.

IAEA (1995)：The principles of radioactive waste management, Safety Series No. 111-F, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

IAEA (2003a) : Geological Disposal of Radioactive Waste, DRAFT SAFETY REQUIREMENTS, International Atomic Energy Agency, IAEA Safety Standards Series, DS-154, Vienna, Austria.

IAEA (2003b) : "Reference Biospheres" for Solid Radioactive Waste Disposal : Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOsphere Modelling and ASSessment (BIOMASS Programme). IAEA-BIOMASS-6, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA（2005）: Natural activity concentrations and fluxes as indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal, Results of a coordinated research project, IAEA-TECDOC-1464.

IAEA (2006) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

ICRP（2000）: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long lived Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 81, Pergamon Press, Oxford and New York.

JAEA（日本原子力研究開発機構）(2010a) : http://kms1.jaea.go.jp/kmsif/kms_login.html.

JAEA（日本原子力研究開発機構）(2010b) : カーネル【性能評価研究】, http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/images/stories/Kernel%20Seinohyouka_0613.pdf.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－, 分冊 1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(1999c) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－ 分冊２地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(1999d) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－, 分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－分冊３－安全評価手法の開発－, JNC TN1400 2005-016.

加藤智子, 鈴木祐二, 牧野仁史, ほか (2005) : 生物圏データの重要度に関する検討, NUMO-TR-05-01, JNC TN1400 2005-024.

T. Kato and Y. Suzuki（2007）: Extended biosphere dataset for safety assessment of radioactive waste geological disposal", Proceedings on the International Symposium on Environmental Modeling and Radioecology, Rokkasho, Aomori, Japan, October 18-20, 2006, ISBN 978-4-9980604-9-9 C3040, pp.336-339.

加藤智子, 鈴木祐二（2008）：地層処分生物圏評価における感度解析による重要パラメータの抽出に関する検討", JAEA-Research 2008-021.

T. Kato, Y. Suzuki and T. Ohi（2009）: Development of the methodology on priority of element-specific biosphere parameters for geological disposal applicable to any proposed repository site." Jpn. J. Health Phys., 44(1), pp.72-79.

A. Kitamura, K. Fujiwara, R. Doi, Y. Yoshida, M. Mihara, M. Terashima and M. Yui（2010）: JAEA thermodynamic database for performance assessment of geological disposal of high-level radioactive and TRU wastes, JAEA-Data/Code 2009-024.

K. Ishiguro, H. Ueda, K. Wakasugi, Y. Sakabe, K. Kitayama, H. Umeki, H. Takase (2006)：EBS Modelling for the Development of Repository Concepts Tailored to Siting Environments, NEA EBS Workshop, La Coruna, 24-26 August 2005, OECD/NEA.

神崎裕, 武田聖司, 木村英雄 (2009)： レベル放射性廃棄物処分における地下水移行にかかわる安全評価のシナリオ構築のための FEP データベース(受託研究) JAEA-Data/Code 2009-011.

川村淳, 大井貴夫, 新里忠史, 安江健一, 常盤哲也, 丹羽正和, 島田耕史, 黒澤英樹, 浅森浩一, 河内進, 江橋健, 北村暁, 石丸恒存, 牧野仁史, 梅田浩司, 瀬尾俊弘 (2008)：高レベル放射性廃棄物地層処分における天然現象影響評価に関する研究, JAEA-Research 2008-018.

M. Kawamura, K. Yasue, T. Niizato, T. Tokiwa, T. Ebashi, T. Ohi, H. Makino, T. Ishimaru and K. Umeda (2008)：Study on Perturbation Scenario for Uplift and Denudation in Performance Assessment of a HLW Disposal System, 2008 East Asia Forum on Radwaste Management Conference, 5A .

川村淳, 江橋健, 牧野仁史, 新里忠史, 安江健一, 大井貴夫（2009）：高レベル放射性廃棄物処分における隆起・侵食/沈降・堆積に起因するシナリオの検討, JAEA-Research 2008-119.

小尾繁，稲垣学（2010）：Goldsim による核種移行パラメータの時間変化を考慮した地層処分核種移行解析モデルの構築，JAEA-Data/Code 2010-006.

林真紀, 佐竹憲治, 吉川英樹, 油井三和（2005）：ガラスの溶解速度データベースの構築, JNC TN8400 2005-008.

林真紀, 笹本広, 吉川英樹（2008）：ガラスの溶解に関するデータベースの改良，JAEA-Data/Code 2008-008.

稲垣学, 加藤智子, 吉田英爾, 小山田潔, 深谷友紀子, 鈴木祐二, 大井貴夫（2007）：表層での水理・物質移行を考慮した生物圏における評価に関する検討, JAEA-Research 2007-029.

稲垣学, 蛯名貴憲（2008）：処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築（１), JAEA-Research 2008-022.

稲垣学, 蛯名貴憲（2009）：処分環境や設計オプションに対応した性能評価手法の構築（２）, JAEA-Research 2008-114.

板津透, 稲垣学, 加藤智子, 鈴木祐二, 小山田潔, 江橋健, 川村淳, 蛯名貴憲, 宮原要（2009）：“表層環境を考慮した生物圏評価手法の構築に関する検討”, JAEA-Review 2009-015.

牧野仁史, 川村淳, 若杉圭一郎, 大久保博生, 高瀬博康（2007）：高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発, JAEA-Data/Code 2007-005.

牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘（2005）：地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 ―２つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第１段階）における地質環境情報に基づく検討―”, JNC TN1400 2005-021.

K. Miyahara and T. Kato（2007）： “Illustration of HLW repository performance: using alternative yardsticks to assess modeled radionuclide fluxes”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXI, MRS Symposium Proceedings, Vol.1107, pp.673-680.

K. Miyahara, M. Inagaki, M. Kawamura and T. Ebina（2008）： “"What-if?" Calculations to Illustrate Fault-Movement Effects on a HLW Repository”, Proceedings of International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, Nevada, September 7-11, 2008, pp.593-599.

K. Miyahara, M. Inagaki, M. Kawamura, T. Ebina and I. G. Mckinley（2009）： “Disruptive effects on a HLW repository due to uplift-erosion in the distant future”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management

XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1193, pp.177-184.

H. Murakami and J. Ahn（2008a）: Development of Geologic Repository Models for Design and Decision Making, proceedings of 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC), P16P1212.

H. Murakami and J. Ahn（2008b）: Development of Compartment Models for Radionuclide Transport in Repository Region, proceedings of 2008 International High-Level Radioactive Waste Conference, Las Vegas (USA).

Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland.

仲島邦彦, 牧野仁史 (2006) ：決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討(II), JAEA-Data/Code 2006-013 .

Neyama, A., Ishihara, Y. and Fusaeda, S. (1998) : Quality Assurance Program with Computer-Oriented Management System for Performance Assessment, Proc. of the 1998 International High-Level Radioactive Waste Management Conference.

日本地下水学会（2010）：地下水用語集 HP 版 http://homepage3.nifty.com/jagh/yougo/yougo.html

日本原子力学会（2006）:【標準委員会 技術レポート】収着分配係数の測定方法－浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順－, （社）日本原子力学会, AESJ-SC-TR001:2006.

NRC (2009) : 10 CFR Part 63 - DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA.

NUMO（原子力発電環境整備機構）(2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性―「処分場の概要」の説明資料―

NUMO（原子力発電環境整備機構）(2010a) : 地層処分事業のための安全評価技術の開発，その 1；シナリオ構築 (準備中).

NUMO（原子力発電環境整備機構）(2010b) : 地層処分事業のための安全評価技術の開発，その 2；地下水移行シナリオについての安全解析 (準備中).

NUMO（原子力発電環境整備機構）(2010c) : 地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～.

NUMO（原子力発電環境整備機構）(準備中) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性,「処分場の概要」の説明資料.

M. Ochs, S. Kunze, Y. Saito, A. Kitamura, Y. Tachi and M. Yui（2008）: Application of the Sorption Database to Kd -setting for Horonobe Rocks", JAEA-Research 2008-017 (2008).

OECD/NEA (1983) : Long-Term Measurement of High-Level Radioactive Waste; The meaning of a Demonstration.

OECD/NEA (1991a) : Can long-term safety be evaluated International Collective Opinion?, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (1991b) : Review of Safety Assessment Methods, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (1997) : Lessons learnt from Ten Performance Assessment Studies, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (1999) : Confidence in the Long-term Safety OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2000a)：OECD/NEA International Peer Review of the Main Report of JNC's H12 Project to Establish the Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency International Review Group, NEA/WM/PEER(99)2.

OECD/NEA (2000b)：Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste – An International Database –.

OECD/NEA (2000c)：Regulatory Review of Assessments of Deep Geologic Repositories: Lessons Learnt, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2001)：Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, May 1999, Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency, Madrid, Spain.

OECD/NEA (2002)：Establishing and Communicating Confidence in Safety Case of Deep Geologic Disposal: Approaches and Arguments, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2004a)：Post-closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose - , OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

OECD/NEA (2004b)：Safety of Disposal of Spent Fuel, HLW and Long-lived ILW in Switzerland An international peer review of the post-closure radiological safety assessment for disposal in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland, ISBN 92-64-02063-2.

OECD/NEA (2008)： Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?, Symposium Proceedings, Paris, France, 23-25 January 2007, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.

大井貴夫, 稲垣学, 川村淳（2008）：シナリオの重要度をわかりやすく提示可能なシナリオ解析手法の整備, JAEA-Research 2008-023.

Ohi, T., Takase, H., Inagaki, M., Oyamada, K., Sone, T.,Mihara, M., Ebashi, T., Nakajima, K. (2007)：Application of a comprehensive sensitivity analysis method on the safety assessment of TRU waste disposal in JAPAN. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX (Mater. Res.Soc. Symp. Proc. Vol. 985) , Boston, Massachusetts, U.S.A, November 27- December 1, 2006, pp.129-134.

T. Ohi, M. Inagaki, M. Kawamura and T. Ebashi（2009）: A Systematic Approach to Evaluate the Importance of Concerns Affecting the Geological Disposal of Radioactive Wastes", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.1124, pp.407-412 (2009).

ONDRAF/NIRAS (2001) : Technical Overview of SAFIR-2: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS Report NIROND 2001-05E, Belgium.

資源エネルギー庁（資源エネルギー庁）・JAEA（日本原子力研究開発機構）（2006）：TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.

SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-CAN project, SKB Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, Sweden.

G. Smith and T. Kato（2010）: International Collaboration in Assessment of Radiological Impacts Arising from Releases to the Biosphere after Disposal of Radioactive Waste into Geological Repositories, Journal of the Korean Nuclear Society, Nuclear Engineering and Technology, Vol.42, No.1, pp.1-8.

鈴木祐二, 加藤智子, 牧野仁史, 大井貴夫（2006）：TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種を考慮した生物圏評価データセットの整備と線量への換算係数の算出, JAEA Data/Code 2006-011.

舘幸男，栃木善克，陶山忠宏，齋藤好彦，Ochs, M.，油井三和（2009）：地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発 JAEA-Data/Code 2008-034.

舘幸男, 四辻健治, 陶山忠宏, M. Ochs, 油井三和（2010）: 地層処分安全評価のために現象論的収着・拡散モデル/データベースの開発－ベントナイト系プロトタイプモデル/データベースの開発－, JAEA-Research 2009-069 (2010).

栃木善克, 舘幸男（2009）: 緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備”, JAEA-Data/Code 2008-035.

栃木善克, 舘幸男（2010）: 緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備－海外の緩衝材データの拡充とその活用法－, JAEA-Data/Code 2009-029.

高瀬博康 稲垣学 須山泰宏（2006）: “地質環境条件の空間的不均質性に応じた施設レイアウト等の工学的対策によるシステム全体性能の改善の可能性について”, 原子力バックエンド研究, Vol.13, No.1, pp.13-22 .

USNRC (2003) : Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804, Revision 2, US Nuclear Regulatory Commission.

K. Wakasugi, E. K. Webb, H. Makino, Y. Ishihara, Y. Ijiri, A. Sawada, T. Baba, K. Ishiguro and H. Umeki (2000)：A Trial of Probabilistic Simulation for Reference Case in the Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM5, Osaka, 2000.11.27-12.1), Vol.4, pp.1469-1475.

若杉圭一郎, 小尾繁, 牧野仁史（2002）: モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に対するデータ不確実性解析,サイクル機構技報,No14, JNC TN1340 2001-010, pp.149-160.

若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾繁（2004）: 核種移行解析における掘削影響領域のモデルバリエーションに関する検討, 原子力バックエンド研究, Vol.10, No.1-2, pp.21-30.

Wakasugi, K., Ishiguro, K., Kitayama, K., Takase, H., Noguchi, T., Shizawa, A., Hane, K. (2008) : Development of performance assessment methodologies to evaluate differences among repository design options, 2008 East Asia Forum on Radioactive Waste Managemen Conference, 20-23 October 2008, Tokyo, Japan.

Wakasugi, K., Ishiguro, K., Koyama, T., Shiratsuchi, H., Yashio, S., Kawamura, H. (2009) : Developing a methodology for scenario analysis based on understanding of long-term evolution of geological disposal systems, the 33rd International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (MRS 2009 meeting), May 24-29, 2009 Saint Petersburg, Russia.

第８章

処分場概念の構築における安全確保策の連携

第8章　目次

第8章 処分場概念の構築における安全確保策の連携 8-1
8.1 処分場概念の構築における安全確保策の連携と統合化の基本的考え方 8-1
8.1.1 段階的な処分場概念の構築の進め方 8-1
8.1.2 三つの安全確保策の連携と統合化の進め方 8-3
8.1.3 処分場概念構築の支援システムの開発 8-5
8.2 精密調査地区選定段階における安全確保方策の連携の進め方 8-8
8.2.1 閉鎖後の長期安全性確保の考え方と概要調査計画の策定 8-9
8.2.2 地質環境モデルの構築と更新 8-11
8.2.3 候補母岩の評価・選定 8-13
8.2.4 工学的対策の検討と安全評価の連携 8-21
8.2.5 安全評価の役割 8-24
8.2.6 処分場概念の構築 8-25
8.2.7 精密調査計画の策定 8-26
8.3 まとめ 8-26

第8章　処分場概念の構築における安全確保策の連携

NUMO では，適切なサイト選定，工学的な対策，安全評価の三つの安全確保策を軸として，段階的に事業を進めることで，地層処分の安全性を確保しようとしていることを述べた（第 3 章）。また，各段階ごとに三つの安全確保策を連携し，個々に得られた情報や成果を相互にフィードバックさせながら，繰り返し安全性を確認する重要性についても述べた（第 4 章）。第 5 章から第 7 章においては，連携の中心となる，サイト調査・評価，工学的対策（設計，建設・操業・閉鎖），安全評価を支える技術の整備状況について述べた。

本章では，処分場概念の構築の進め方とその中心となる安全確保策の連携について述べる。8.1 では処分場概念を構築するための基本的考え方，ならびに処分場概念の構築を支援するシステムの開発成果について述べる。また，8.2 では NUMO で重点的に技術開発に取り組んでいる精密調査地区選定段階に焦点を当て，この段階における安全確保策の連携に向けた技術的な検討成果を事例とともに示した。なお，処分場概念の構築では第 5 章から第 7 章で示した技術を活用して進めるため，それらの中から本章では主要な図表を再掲した。

8.1　処分場概念の構築における安全確保策の連携と統合化の基本的考え方

処分場概念とは，地層処分施設とそのサイトにおける地質環境特性を含めた地層処分施設の設計仕様やレイアウト，建設・操業・閉鎖やモニタリングの方法，事業期間中の安全対策および閉鎖後長期の安全性，品質保証，環境影響や社会経済的側面などを含めた処分場についての包括的な概念である（NUMO，2010a）。NUMO は，長期間にわたり段階的に進められる地層処分事業において，質的，量的に進展する地質環境の情報を反映して，処分場の設計や安全評価を体系的かつ柔軟に行い，サイトの地質環境に適合した処分場概念を構築するための基本的な進め方と具体的な方法論を構造化アプローチとして整備してきた（NUMO，2004；NUMO，2007）。

以下では，段階的なサイト選定と処分場概念の構築の基本的な進め方，ならびに処分場概念の構築に向けて実施する三つの安全確保策の目的や連携の進め方について述べる。

8.1.1　段階的な処分場概念の構築の進め方

段階的なサイト選定において，サイトの地質環境に適した処分場概念を構築するための基本的な進め方や具体的な方法論については，次のような視点が重要となる（NUMO，2004）。

- 長期的な地層処分事業の各段階に対応して，段階的に詳細化されるサイトの地質環境情報の反映
- サイトの地質環境特性に応じた設計とそれに対する安全評価
- 最新の科学技術的な知見の反映
- 処分場概念の種々のオプションの整備

上記の視点から，サイトの地質環境特性に適した処分場概念を構築するためには，サイト選定の各段階において三つの安全確保策を連携させ，地質環境の適性，地層処分システムの安全性とその工学的な実現性を繰り返し確認することが重要である。

また，各段階の終わりには，地質環境特性，処分場の設計，安全評価の結果を統合化して，処分場概念を構築・更新する。処分場概念のサイトへの適性は，閉鎖後長期安全性，操業安全性，工学的実現性／品質保証などの視点からその安全性と実現性を評価する（NUMO，2004）。

図 8.1.1-1には，2000 年までの研究開発段階から，サイト選定開始までの準備段階，サイト選定段

階における処分場概念の構築の段階的な進め方を概略的に示した。

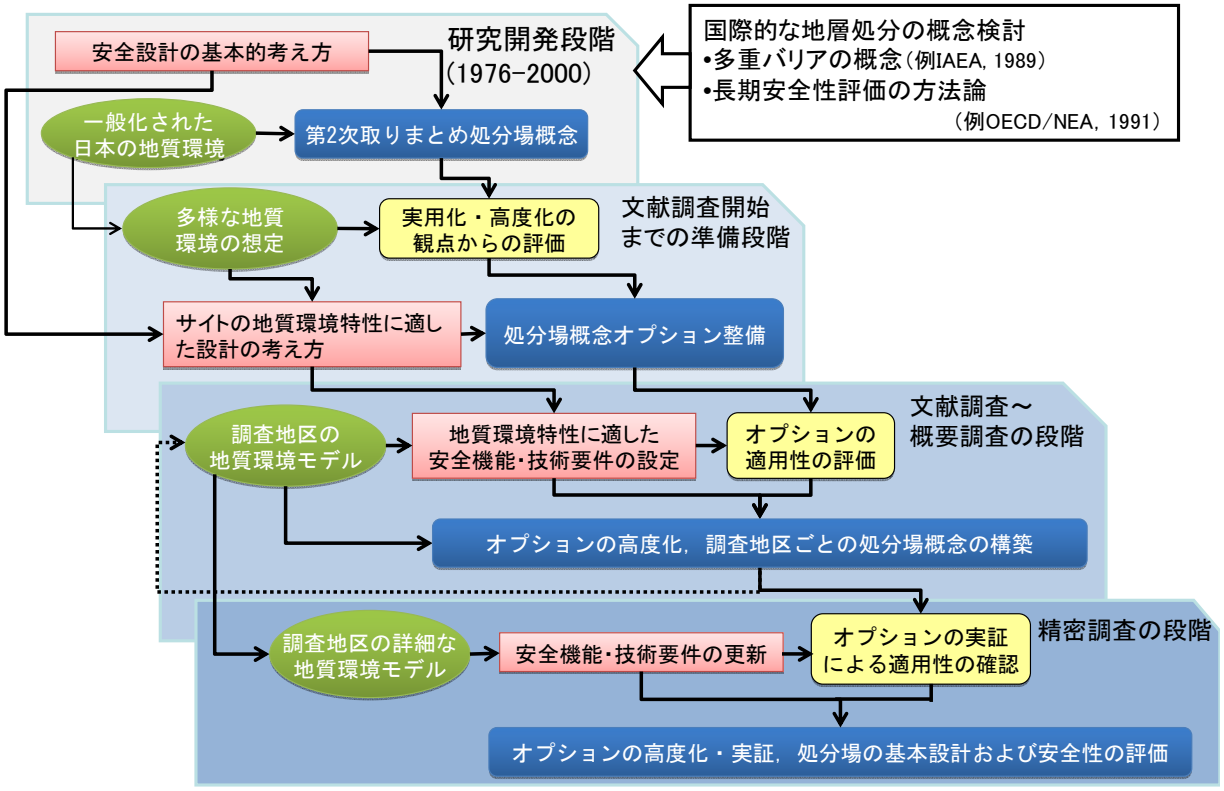


図 8.1.1-1 段階的な処分場概念の構築の進め方

わが国では 1976 年から PNC，および JNC により，地層処分の研究開発が進められ，その成果が 1999 年に第２次取りまとめとして示された。この間，国際的な地層処分の概念検討や，各国の実施主体との共同研究などを通じて，多重バリアシステムによる放射性物質の人間社会からの隔離を基本とした処分場概念（第２次取りまとめ処分場概念）が開発された。

2000 年に NUMO が設立されて以降，現在に至るまで，NUMO は第２次取りまとめの処分場概念を出発点とし，実際に処分場を建設，操業する観点や，新たな知見を反映して処分場概念を高度化する観点から，段階的な処分場概念の開発の方法論の検討を進めてきた（NUMO，2004）。例えば，多様な地質環境を想定し，サイトの地質環境特性に適した設計の考え方について整備を進めた（6.5 参照）。また，地質環境の不確実性に柔軟に対応しつつ，所定の安全性を有する地層処分システムの構築が可能となるよう，国の基盤研究開発機関と連携して処分場概念のさまざまなオプションの整備を進めている（6.5 参照）。

今後，サイト選定が開始された段階には，第５章から第７章で示した三つの安全確保策を支える技術を活用し，サイトに適した処分場概念を構築する。

サイト選定の初期段階である概要調査地区選定，および精密調査地区選定段階においては，火山，断層，隆起・侵食などの自然現象の著しい影響が回避できると判断した地域において，地層処分を行おうとする地層あるいは岩体の領域（以下，候補母岩の領域という）の評価と選定が主な実施事項の一つである（4.1；6.3 参照）。候補母岩の選定においては，地質環境特性に応じて設定した安全機能と技術要件に基づいて，処分場の設計，安全評価を実施し，閉鎖後長期の安全性確保の観点からの評価項目（熱環境，水理場，化学環境）と工学的な実現性確保の観点からの評価項目（力学場，

母岩の広がり）について，候補母岩としての適性を評価する。それぞれの段階の終わりには，サイト調査・評価，設計，安全評価および候補母岩の評価結果を統合して処分場概念を構築し，次段階の調査計画を策定するための判断材料とする。

サイト選定の最終段階である処分施設建設地選定段階の前半においては，ボーリング調査などの地表からの調査により地下深部の情報を拡充する。また，それらの情報に基づいた処分場の設計や安全評価の結果などを踏まえて，処分場概念を更新し，前段階に選定した候補母岩の領域において地下調査施設の位置と深度を決定する（4.2 参照）。

処分施設建設地選定段階の後半においては，地下調査施設を建設し，候補母岩の詳細な特性に関する情報を収集して，前段階の候補母岩の評価結果について確認する。また，処分場の建設，操業，閉鎖の方法について，地下調査施設を利用した実証試験により，廃棄体搬送・定置装置などの基本設計や施工時の品質管理に関する情報を収集する（4.2 参照）。この他，地下深部での原位置試験，地下水や岩石試料を使用した室内試験により，安全評価に必要な物質移行パラメータを取得する。以上の結果に基づいて，処分場概念を更新して処分施設建設地の選定の判断材料とする。

8.1.2　三つの安全確保策の連携と統合化の進め方

処分場概念の構築における各段階の安全確保策の連携の進め方について述べる。ここで述べる連携とは，三つの安全確保策の実施において，処分場概念の構築に必要となる幅広い知識や評価すべき事項に関する情報を共有し，相互のニーズと結果を共有しながら作業を進めることにより，地層処分の安全確保という目的を合理的に達成するための活動である（図 8.1.2-1）。一方，統合化とは，安全確保策の連携により，調査，設計，安全評価の作業を進めた結果を集約し，結果の相互の一貫性などを確認した上で取りまとめる行為である。

地層処分は，原子力工学，土木工学，地質学，地球化学，材料科学などの広範な技術分野により支えられている。そのため，それぞれ技術分野の用語や考え方を共有し，地層処分という共通の目的に向けて事業を進める必要がある。連携は特別な技術ではないが，意思決定に基づいて事業を効率的に進めるための重要な手段である（Littleboy et al.，1998；Jonkman et al.，2002）。

安全確保策の連携を進める上では，情報を共有するための枠組みなどの整備が必要である。例えば，第 5 章で述べた地質環境モデルは，地質環境特性に関する情報共有の枠組みの一例である。また，第 6 章で述べた，安全機能と技術要件の体系的な整備においては，処分場の設計と安全評価の分野間で安全機能と技術要件の情報を共有する。この他にも，第 7 章で述べたシナリオ解析の際のストーリボードも，調査や設計と安全評価で共通の認識を持つための枠組みである。

この章の主題である「処分場概念の構築」は統合化の例である。処分場概念の構築においては，第 5 章から第 7 章で示したさまざまな技術に加え，品質管理や社会経済性などの，NUMO が事業を推進する視点からも評価し，矛盾がないことを確認する（図 8.1.3-1）。このように統合化は，処分場概念を完成させるための重要なプロセスである。

統合化により構築した処分場概念は，次段階の連携の出発点となり，安全機能の詳細化や調査計画，技術開発計画の策定に反映するとともに，調査の進展にあわせて，適宜更新する。

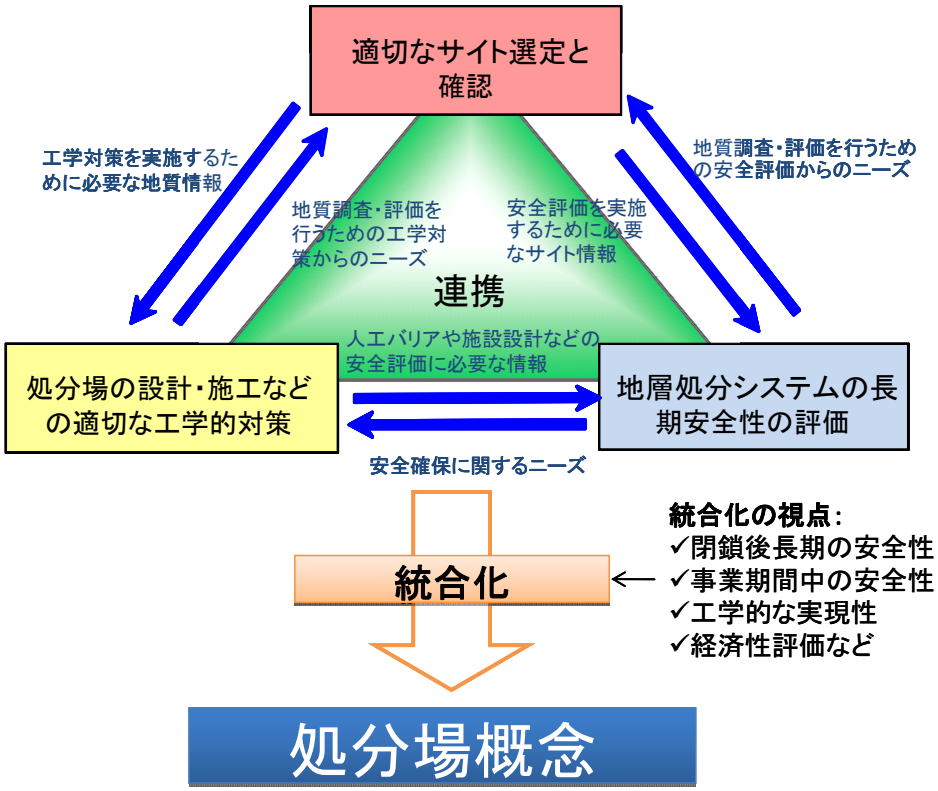


図 8.1.2-1 安全確保策の連携と統合化による処分場概念の構築

図 8.1.2-2には，安全評価を中心とした連携を段階的に進める概略的な流れを示した。精密調査地区選定段階（概要調査の段階）を例とすると，各段階の最初には地質調査・評価の結果を受けて，サイト調査・評価の結果としての地質環境モデル，地質環境の長期変遷の予測結果，人工バリアや処分場のレイアウトなどの設計の結果に基づいて，閉鎖後長期安全性確保の考え方および安全評価の前提条件を更新する。この前提条件に基づいて予備的な安全評価を実施し，次段階の調査計画の立案や，工学的対策の絞り込みを行い次段階に進む。なお，8.2 では，この段階の進め方を中心に述べる。

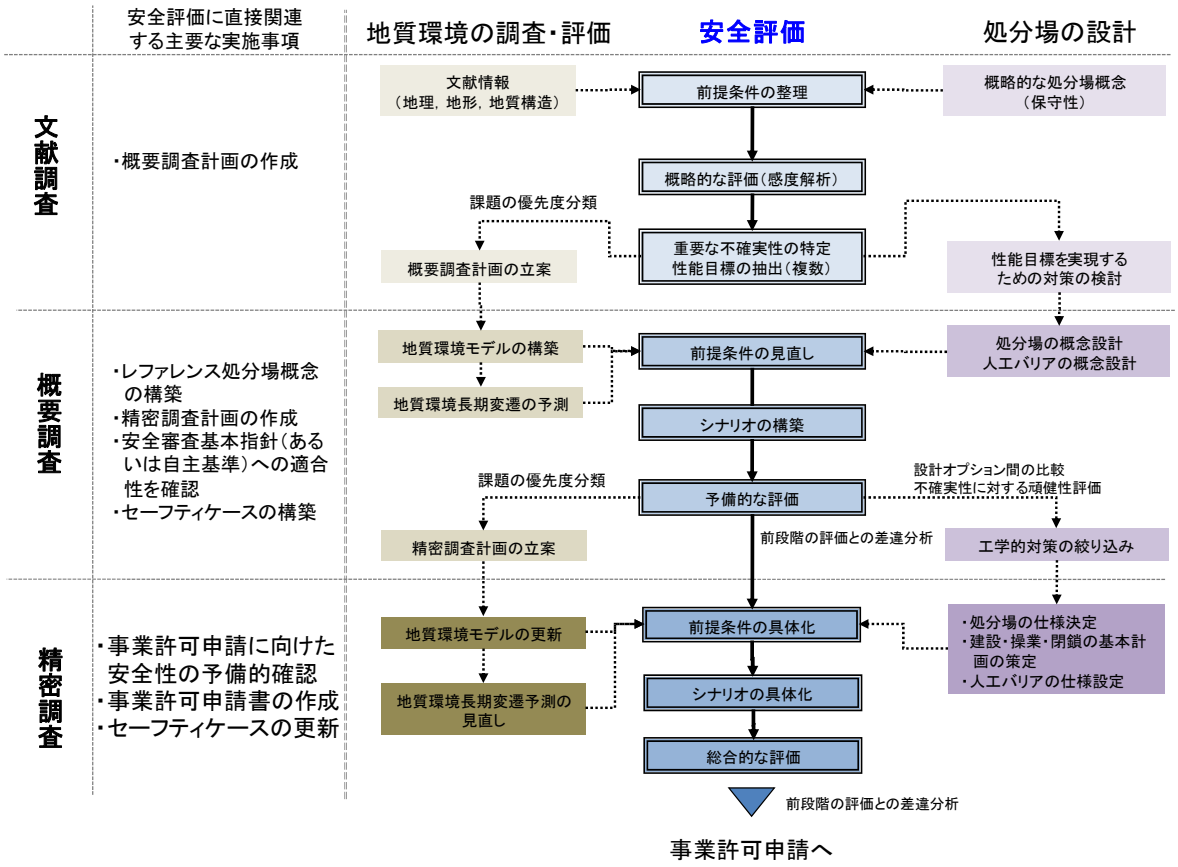


図 8.1.2-2 サイト調査・評価，工学的対策と連携した安全評価の実施事項（図 7.1.2-1 の再掲）

なお，地層処分システムの安全機能は，適切なサイト選定と工学的対策によって確保されるものであるが，地質環境の調査・評価は天然の岩盤を対象としたものであるため，その結果には不確実性が伴うと考えられる。また，地層処分で考慮するような長期間の時間スケールに対して，現在の地質環境が将来どのように変遷するかについても不確実性が伴う。そのため，地質環境の調査・評価，および処分場の設計により得られる情報に基づいて，それらをシナリオ，モデル，パラメータの不確実性として安全評価に適切に取り込むことにより，不確実性に適切に対処する（7.1 参照）

8.1.3　処分場概念構築の支援システムの開発

処分場概念の構築を支援するツールとして，NUMO がこれまでに開発してきた要件管理システムについて述べる。

8.1.3.1　要件管理システムの開発

技術要件や設計因子から展開される処分場概念構築にかかわる要件は多岐にわたる。その中には，安全性や工学的実現性の観点から必ず満たさなければならないニーズに基づいた要件と，具備していた方が好ましい要件などの重要度に基づいた要件があり，要件の階層化がなされる特徴をもつ。また，個々の要件が相互に関係する場合や，一つの要件を充足させることにより，ほかの要件に影響を及ぼすなどの特徴をもつ（NUMO，2007）。

6.2.5 に述べたように，長期にわたる地層処分事業では，サイト調査や研究開発などの新たな知見

に基づいた要件の詳細化や変更がなされる場合がある。そこでNUMOでは，処分場概念の構築に関連した要件ならびに関連する情報の管理を支援するために，図 8.1.3-1に示すような概要調査地区選定段階に適用する要件管理システムの開発を行っている（NUMO，準備中a)。今後，段階的に整備される安全規制や新たな知見に基づいた要件，NUMOが自主的に設定するニーズに基づいた要件（自主基準）などを適切に取り込んでシステムを拡充し，精密調査地区選定段階の処分場概念構築の品質管理に活用するとともに，要件を基軸とした三つの安全確保策の連携を図るツールとして活用する計画である。

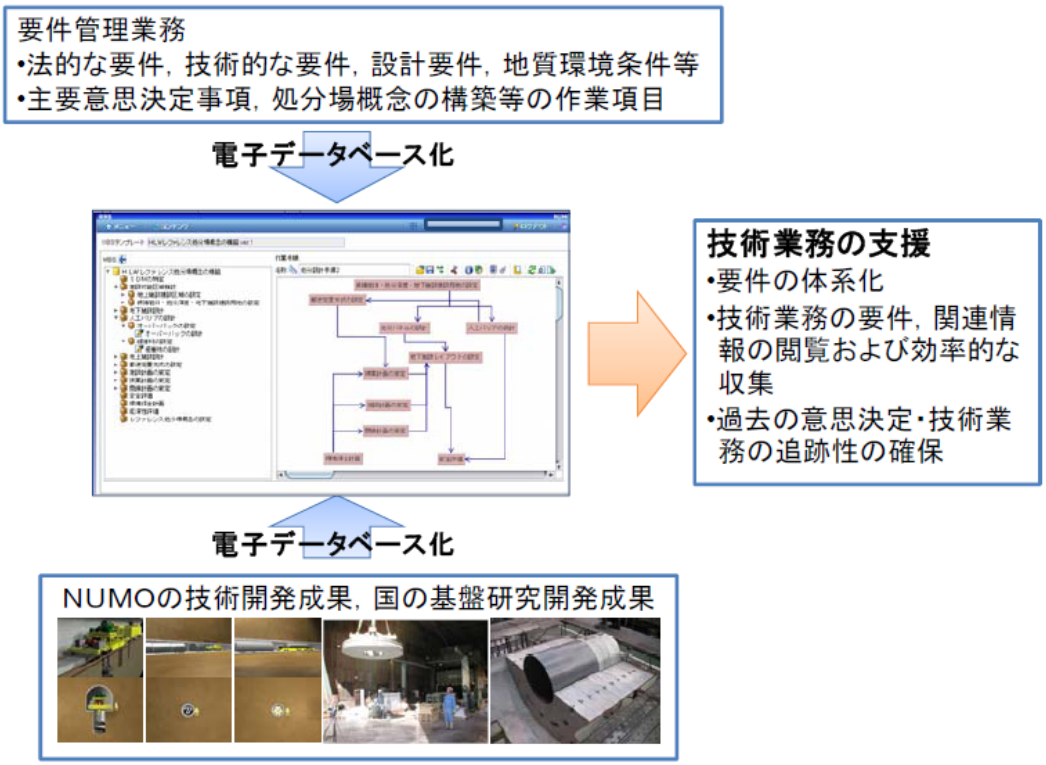


図 8.1.3-1 要件管理システム（図 3.2.2-1 の再掲）

8.1.3.2 処分場概念構築支援システム

処分場概念を構築するためには，サイト選定の初期の段階から，サイトの地質環境特性に関する限られたデータや情報を用いて概略的な処分場の設計仕様と安全性能を把握し，そのサイトに適合する処分場概念の構築の見通しや，その後の調査，技術開発の方向性を明らかにしていくことが重要である。このための手段として，処分場概念構築支援システムを開発した（図 8.1.3-2，NUMO，2004；NUMO，2010)。

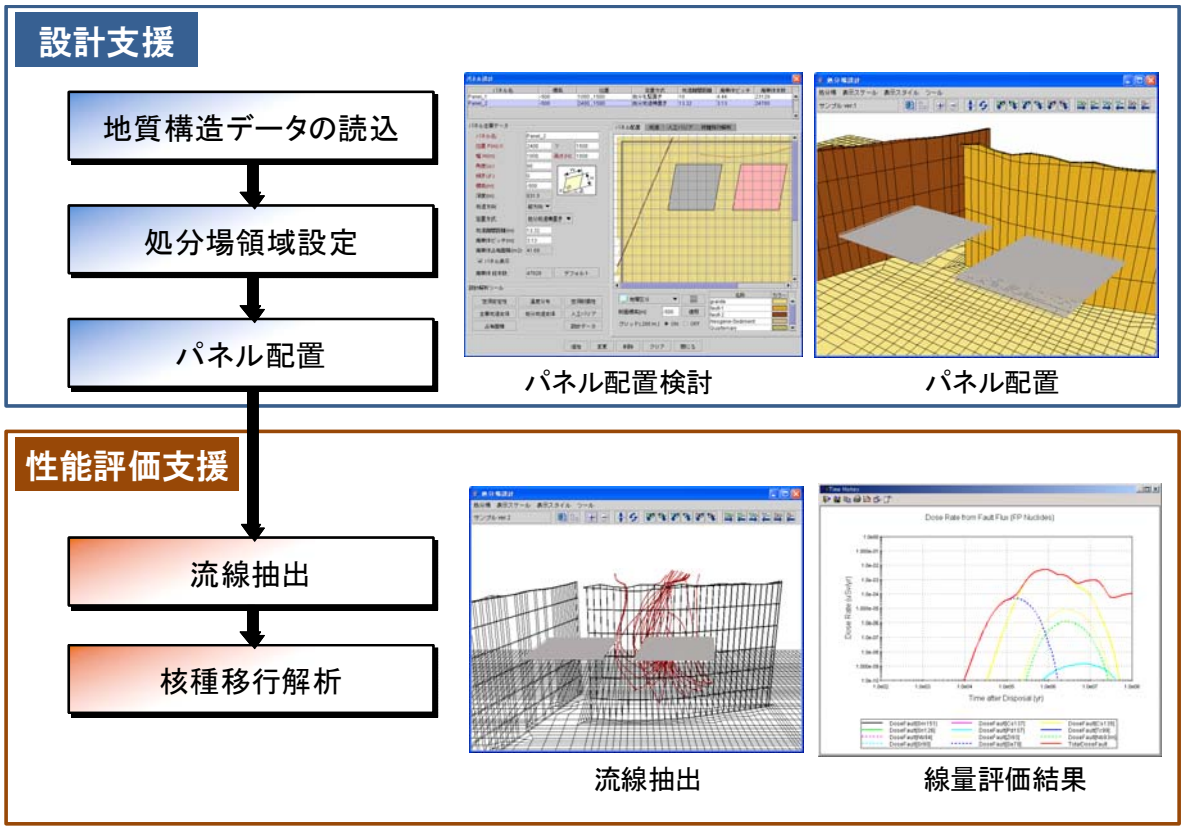


図 8.1.3-2 処分場概念構築支援システム（NUMO, 2010）

以下に，処分場概念構築支援システムが持つ設計機能と性能評価機能の概要を紹介する。

(1) 設計機能

設計機能は処分場の設計手順に沿った支保工設計，空洞安定性解析，人工バリア設計，熱解析の各機能、ならびに処分パネルの設計機能から構成される。それぞれの機能は，サイトの地質環境特性に応じて簡便に設計を行うことができるよう，煩雑な数値解析を避け，理論解や三次元解析結果を基に，第２次取りまとめの数値解析とほぼ同等の精度を確保する計算式，または近似式に基づいた設計計算を行うことができる。また，関連するデータベースとともに体系化を行っている。

(2) 安全評価機能

安全評価機能については，サイトの地質環境特性や設計仕様に応じて特徴づけられる人工バリア，天然バリア，生物圏の各モデルを柔軟に表現することができるよう，米国で開発された汎用解析コード GoldSim（Kossik and Miller, 2004）を導入し，データベースとあわせた安全評価の体系化を行っている。これによってモデル間のデータ受け渡しなどの処理をユーザーが行うことなく，地層処分システム全体の流跡線解析，核種移行解析などを一貫して実施できる状態にある。

処分場概念の構築においては，特にサイト選定の初期段階にこのシステムを活用して，既往の処分場概念の適用性や安全性の評価に適用する計画である。

8.2　精密調査地区選定段階における安全確保方策の連携の進め方

8.1においては，段階的な処分場概念の構築における安全確保策の連携の基本的な考え方と支援システムの開発について述べた。この節では，これまでに述べた考え方に基づいて，精密調査地区選定段階で実施される主要な意思決定事項を対象として，その具体的な連携方法について検討した事例を示す。

精密調査地区選定段階は，以下に示すように地質環境の調査・評価，処分場の概念設計，および予備的な安全評価を実施し，「閉鎖後長期の安全確保」，「事業期間中の安全確保」の見通しを得ることが目標である（4.2 参照）。

- ボーリング調査などの現地調査により取得されるデータに基づき，地質環境の長期安定性の評価，地質環境モデルの構築を行い，また，調査地区の地質環境の評価を実施する。
- 地質環境モデル，およびこの段階までに得られている技術開発成果に基づいて，処分場の概念設計を実施するとともに，処分場概念オプションの中から，閉鎖後長期安全性，工学的実現性および経済性などを有する対策を絞り込む。
- 候補地区の地質環境の長期安定性や地質環境特性，および処分場の概念的な仕様を対象とした予備的な安全評価を実施する。また，この段階までに整備される安全審査基本指針と比較する。

図 8.2-1 には，概要調査計画の策定から，概要調査に基づいた処分場概念の構築，精密調査計画の策定に至る主要な実施事項とその流れを示した。これらの項目の実施に当たっては，以下に示すように，安全確保策の連携を進めながら，実施結果を統合化して処分場概念の構築を行う。

なお，地質環境モデルの構築や候補母岩の評価については，すでに第 5 章，第 6 章において，基本的な考え方や，支援する技術について示した。この節では，精密調査地区選定段階に着目し，連携の観点からの基本的な考え方と事例検討の結果を記述した。

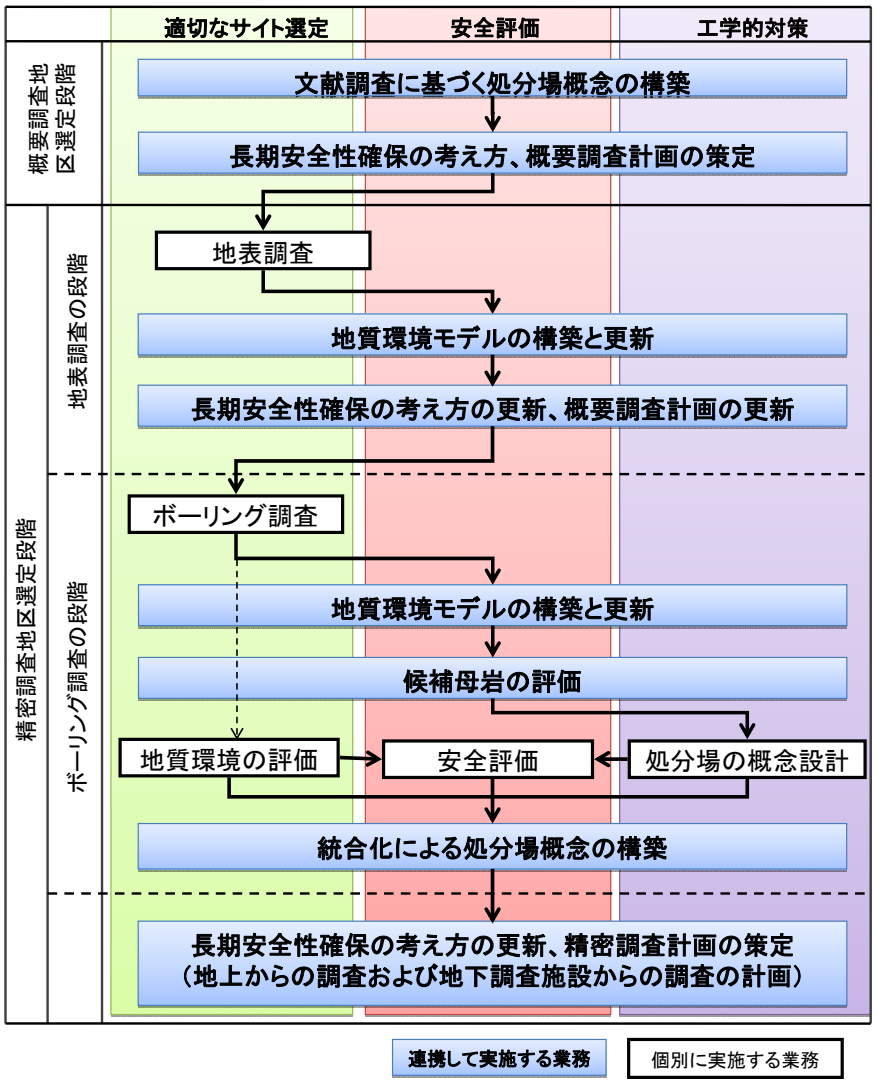


図 8.2-1 精密調査地区選定段階の主要な実施事項とその流れ

8.2.1 閉鎖後の長期安全性確保の考え方と概要調査計画の策定

閉鎖後の長期安全性確保の考え方は，文献情報および概要調査により次第に明らかになる地質環境に関する情報を反映し，より適切なものへの見直しを行う。さらに，それに基づいて概要調査計画を更新する。以下では，長期安全性確保の考え方および概要調査計画の策定についてその進め方の例を示す。

8.2.1.1 閉鎖後長期安全性確保の考え方の策定

閉鎖後長期安全性確保の考え方は，地層処分システムの安全機能を整備することにより策定する（7.1 参照）。まず，多様な地質環境を想定した地層処分システムの安全機能（図 8.2.1-1）を出発点として，文献情報に基づいて処分場概念を構築する。この段階に得られる地質環境特性の情報は文献情報に限られるため，概要調査地区選定段階に策定する閉鎖後長期安全性確保の考え方は，概要調査計画や処分場の概念設計の方針検討（例えば，技術要件の設定）への反映を主な目的とする。

精密調査地区選定段階においては，概要調査の進展（例えば，地表調査の段階，ボーリング調査の段階）により更新される地質環境モデル（水理地質構造，化学環境など）に基づいて，前段階に

策定した長期安全性確保の考え方に従って，調査，設計，安全評価，および関連する技術開発を実施する。この段階の終わりには，設計や安全評価の結果などを踏まえて，人工バリア材料オプションや処分概念・技術オプションなどの処分場概念オプションを絞り込み，サイトに適した処分場概念（レファレンス処分場概念）を構築する。この処分場概念を踏まえて，精密調査計画の策定や処分場の設計方針（技術要件と性能指標，自主的な設計基準など）の検討に反映することを目的として，閉鎖後長期安全性確保の考え方を策定する。

なお，長期安全性確保の考え方を策定する際に整備した安全機能や技術要件は，追跡性確保のため，要件管理システムによる変更履歴などの記録管理を計画している（8.2.4.1 参照）。

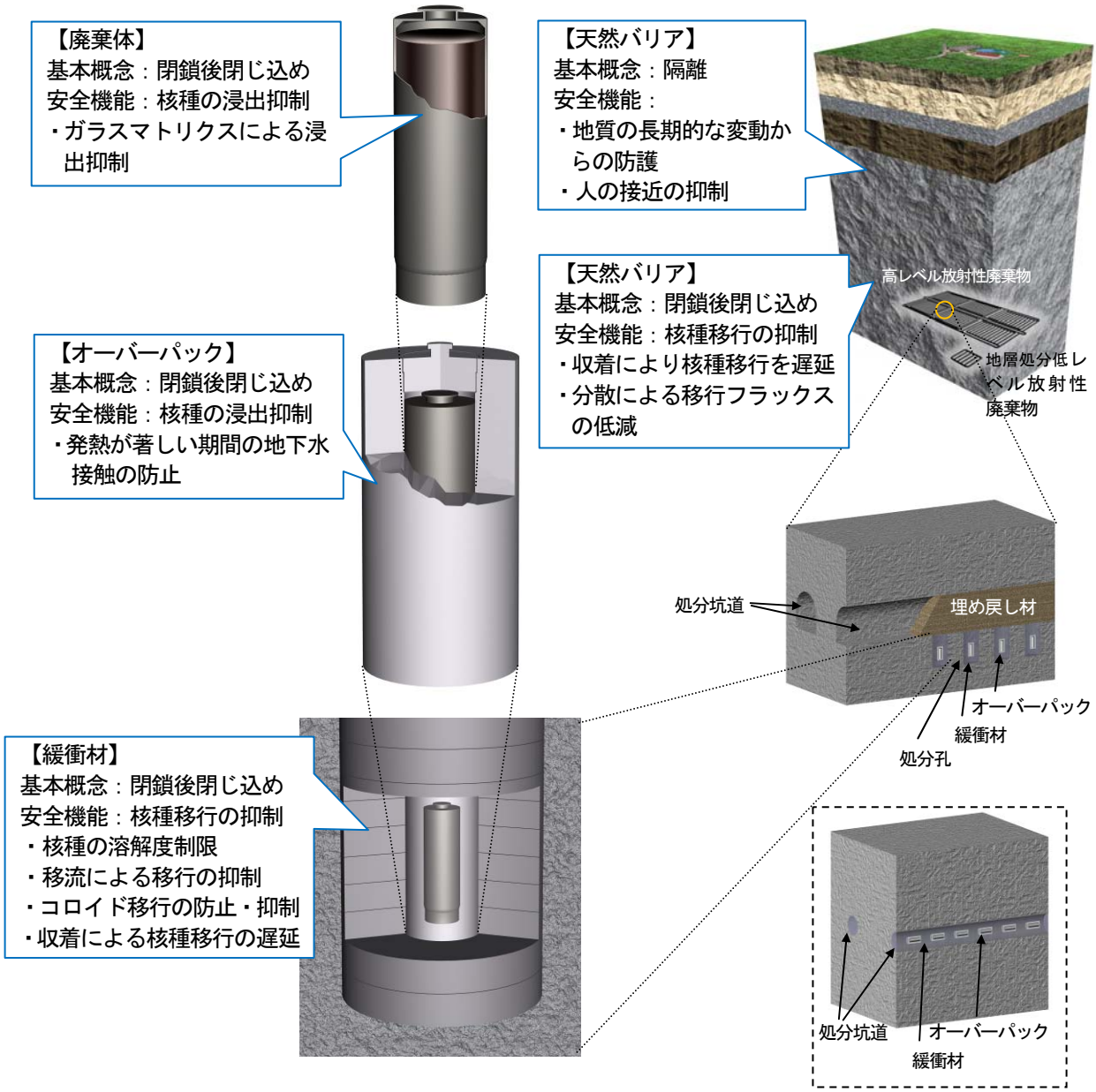


図 8.2.1-1 地層処分システムの安全機能の概念図（高レベル放射性廃棄物）（図 6.2.2-3 の再掲）

8.2.1.2 概要調査計画の策定および更新

概要調査計画の策定や更新においては，概要調査地区選定段階（文献調査の段階）において設計，

安全評価の観点からのニーズを集約して，これらを概要調査の目標設定に反映する。概要調査は，前半の地表調査踏査の段階（地表踏査や物理探査など），後半のボーリング調査の二段階に分けて実施する計画を検討している（5.2 参照，図 8.2.1-2）。これは，文献調査の結果に基づく地質環境の理解は文献情報の量や精度に依存するため，概要調査を二段階に分け，前半が終了した時点で，その段階までに得られている情報に基づいて調査計画を見直すことで，合理的かつ効率的に概要調査ができると考えているためである。概要調査では，地表からの調査（地表踏査，物理探査，ボーリング調査など）に基づき，地質環境に著しい影響を与える自然現象が生じない地域であることの確認や，地下深部の地質環境特性に関する情報を取得する。

概要調査計画は，文献情報に基づき構築した地質環境モデルに基づいて，概要調査計画立案マニュアルに準じて策定する（5.4.参照）。概要調査計画の策定における連携としては，文献情報により構築した処分場の概念に基づいて，調査目標を設定し，調査計画に反映することが例として挙げられる。例えば，精密調査地区選定段階（概要調査の段階）においては，処分場を設置する候補母岩を選定し，処分場の基本レイアウトを設定する。そのため，母岩の分布や規模，好ましい処分環境の条件（熱環境，水理場，力学場，化学環境，6.2 参照）に関連する調査項目や調査の範囲を設定する。

候補母岩の選定で考慮する母岩の評価項目は，文献情報に基づいて構築した処分場概念を用いた感度解析などにより，閉鎖後長期安全性に影響を及ぼす不確実性を評価し，影響の大きな不確実性の項目を優先的な評価項目として設定することが考えられる。例えば，候補母岩の評価項目（6.3 参照，表 8.2.3-1参照）のうち，水理場に影響を与える断層や割れ目の水理特性が，処分場の安全性に対して重要と考えられれば，優先的な調査項目として，調査計画に反映する。

なお，調査計画の策定にあわせて，調査データの取得・解釈から地質構造モデルの構築に至る一連のデータの連関や，設計・安全評価の項目との関係について，あらかじめ連携の項目として，十分に調整しておくことで，調査の過不足や，設計・安全評価に必要な調査データを効率的に取得することができる。例えば，統合化データフローダイアグラム（5.2 参照）などの形で調査項目を整理することで，調査・設計・安全評価の関係者間の情報を共有するための技術的検討が進められている（原環センター，2007；三枝ほか，2007；太田ほか，2007；Ota et al.，2010）。

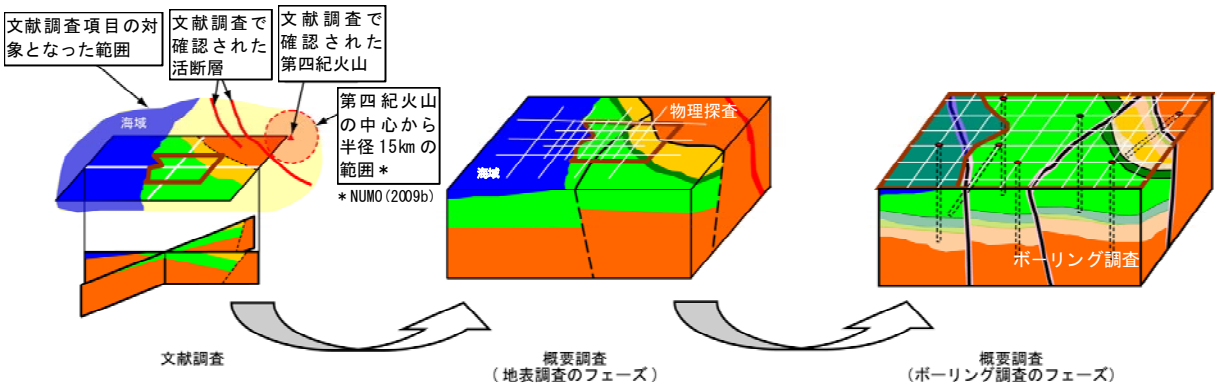


図 8.2.1-2 概要調査における段階的なアプローチのイメージ（図 5.2.1-3 の再掲）

8.2.2　地質環境モデルの構築と更新

この段階で構築する主な地質環境モデルは，地質構造，水理地質構造，地下水の地化学特性，岩

盤特性などに関するモデルである（図 8.2.2-1）。地質環境モデルは，調査により直接取得したデータからのみ構築するものではなく，データの解釈，データや解釈の不確実性の把握，モデルに基づいた解析結果と計測データの比較によるモデルの妥当性の確認などを経て構築される。

地質環境モデルの構築においては，まず，サイト調査の結果に基づいて，地質環境の概念モデルを構築する。地質環境の概念モデルとは，地層処分において重要な地質環境特性の場，現象，メカニズムなどに関する解釈を概念的に示したものである（5.2 参照，太田ほか，2007；大澤ほか，2008；Amano, K. et al.，2010）。

地質環境モデルは，地質環境の概念モデルをベースとして，モデル構築時までに取得された情報に基づき，それぞれの地質環境特性の分布や性状を二次元または三次元で定量的に表現したもので（5.2 参照，Nagra，2002；JNC，2005；太田ほか，2007），地質構造，水理地質構造，地下水の地化学特性，岩盤特性などに関するモデルからなる。

地質環境モデルの構築に際しては，まず，地質構造，地下水の水理・化学特性などの地質環境の概念モデルの整合性を確認する。次に，地質構造モデルやその他のモデル間の整合性や妥当性について，実測の地質環境特性の分布との比較を行い確認する。例えば，地下水流動解析や密度流解析により得られた塩分濃度分布と実測データと比較を行いモデル間の整合性や妥当性を確認する。また，解析と実測データとの整合性が確認できない場合には，解析に用いた境界条件や，透水係数分布の設定などを検討して，差異の要因を特定し，追加的な調査の実施や次段階の調査計画の策定に反映する。

地質環境モデルの構築では、モデルが持つ不確実性の程度に応じて、複数の地質環境モデルを設定する場合や，地質環境特性のパラメータに不確実性の情報（例えば，データのばらつきの幅や統計的な評価結果など）を加えることにより，地質環境モデルが持つ不確実性を表現する。例えば，岩盤の力学特性（割れ目や層理面，劈開面などの岩盤分離面の分布頻度や方向など）の空間的な広がりに起因した不確実性が大きな場合には，岩盤の力学特性モデル（岩盤の物性値のデータセット）を複数設定することも考えられる。

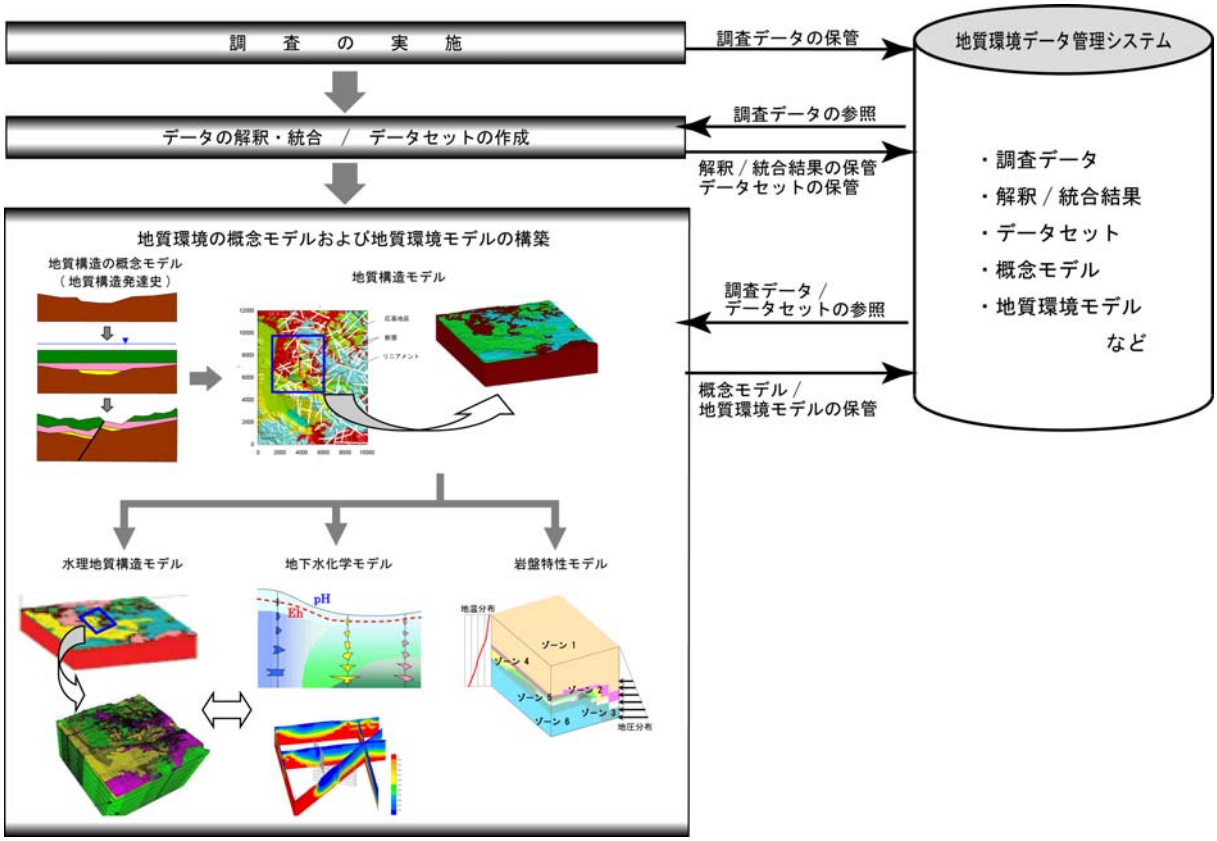


図 8.2.2-1 地質環境モデル構築の流れ（イメージ図）（図 5.2.3-4 の再掲）

8.2.3　候補母岩の評価・選定

候補母岩は，地下施設を建設し廃棄体を埋設する対象となる岩体である。候補母岩の評価は，天然バリアとして求められる安全機能（6.2 参照），廃棄体および人工バリアの設置環境として好ましい処分環境の条件（6.2 参照），ならびに所定量の廃棄体を収容できる岩体の広がり（処分場の収容性）や，工程・経済性などの地層処分事業の成立性の観点から評価を行う（表 8.2.3-1）。

表 8.2.3-1 候補母岩選定のための評価項目例（表 6.3.3-1 の再掲）

評価項目	評価指標の例	評価に必要な情報
【熱環境】 閉鎖後の処分場の温度が低いこと	地温勾配，岩盤の熱特性など	岩盤特性モデルおよび廃棄体の発熱量と岩盤特性に基づく廃棄体専有面積や温度の経時変化
【力学場】 坑道の力学的安定性が確保できるとともに，閉鎖後の処分場とその周辺の力学場が人工バリアの安定性に適していること	初期地圧，側圧比，岩盤の力学特性，地山強度比など	岩盤特性モデルおよび岩盤特性に基づく坑道離間距離や支保の仕様
【水理場】 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流束が小さく，緩慢であること	動水勾配，地温勾配，地下水組成，透水係数，有効間隙率，地下水流向，地下水移行経路長，地下水移行時間など	水理地質構造モデル，地質環境の長期変遷
【化学環境】 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が核種の難溶解性と人工バリアの安定性に適していること	酸化還元電位，地下水の pH，地下水組成，鉱物組成など	地下水化学モデルおよび地下水化学特性に基づく人工バリアの長期挙動
【母岩の広がり】 処分場を収容できる面積（容積）を有するとともに，処分パネルを効率的に配置できる形状を有すること	母岩の空間的な広がり，断層・破砕帯の分布など	地質構造モデルおよび処分場の規模，処分パネルの数・形状の仮設定情報
【工程・経済性など】 工程確保の見通しがあるとともに，経済性が確保されること	建設工程，操業工程，掘削土量など	アクセス坑道の延長距離，処分形態や処分坑道断面の仮設定情報

図 8.2.3-1は，候補母岩の評価において，評価指標に影響を与える地質環境を概念的に示したものである。5.1 で述べたように，わが国の地質環境の基本的な分類は，地理的な特徴（内陸域，沿岸域）と地質学的特徴（結晶質岩，堆積岩）の組み合わせにより分類できる。図 8.2.3-1では，地形・地質の基本的な分類のうち沿岸域の堆積岩分布地域を模式的に示した。地質構造は先新第三紀堆積岩（硬岩系岩盤）を基盤として，その上部に新第三紀堆積岩（軟岩系岩盤）が分布するものとした。例えば，地下水の流れ（青い矢印）に影響を与える地質環境の特性としては，表層地形，汀線の位置，岩盤の透水特性，断層の分布と透水特性，塩淡境界の分布などが考えられる。

地表踏査，物理探査やボーリング調査に基づく概要調査では，上記の地質環境特性の実測データが得られることが期待されるが，地下深部の詳細な地質構造や，断層の分布については，限られた情報に基づいた推定にとどまるものと考えられる。例えば，概要調査では，地下深部の地質構造や断層の形状，走向・傾斜，あるいは断層の透水特性の空間的分布にはその解釈やモデル化においてある程度の不確実性が残る。

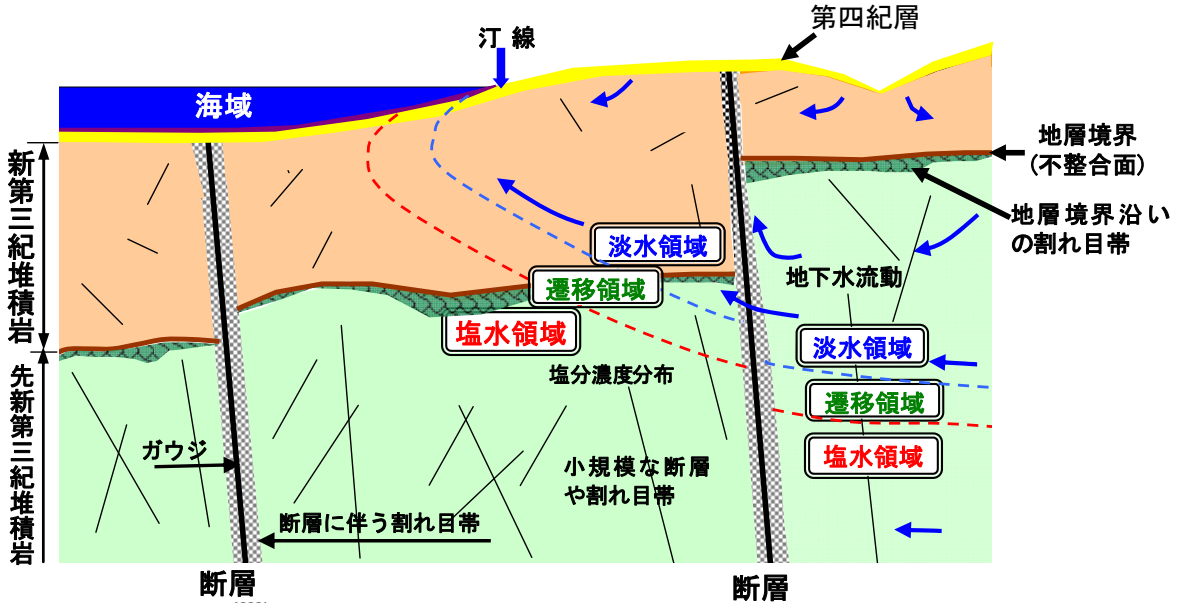


図 8.2.3-1 候補母岩の評価において考慮する地質環境の概念図

母岩の評価は，地質環境モデルに基づいて進める。図 8.2.3-2には候補母岩の評価・選定の手順の例を示した。まず，地質構造モデルに基づいて，地下 300m以深に分布が推定される岩体を抽出し，候補母岩とする。

熱環境，力学場の評価からは処分場設置可能深度を設定する。次に水理場および化学環境に基づく核種移行抑制の観点から，処分場設置環境として相対的に好ましい条件の領域を抽出する。また、地質環境に応じた工学的対策の効果や実現性を評価して，その領域の岩体の広がりや，地上施設との位置関係（アクセス坑道の延長距離）などの工程・経済性に関する評価項目を加えた総合的な評価により，候補母岩を選定する。

以上述べたように，候補母岩の評価は，天然バリアとしての母岩の特性と処分環境としての場の理解，人工バリアなどの具体的な工学的対策をあわせて評価することを基本として，調査・評価の進展や，地下深部の地質環境に関する情報の質，量に応じて評価を行う。

以下では，安全確保策の連携の事例として具体的な母岩の評価の方法について検討した事例を，評価項目ごとに示す。

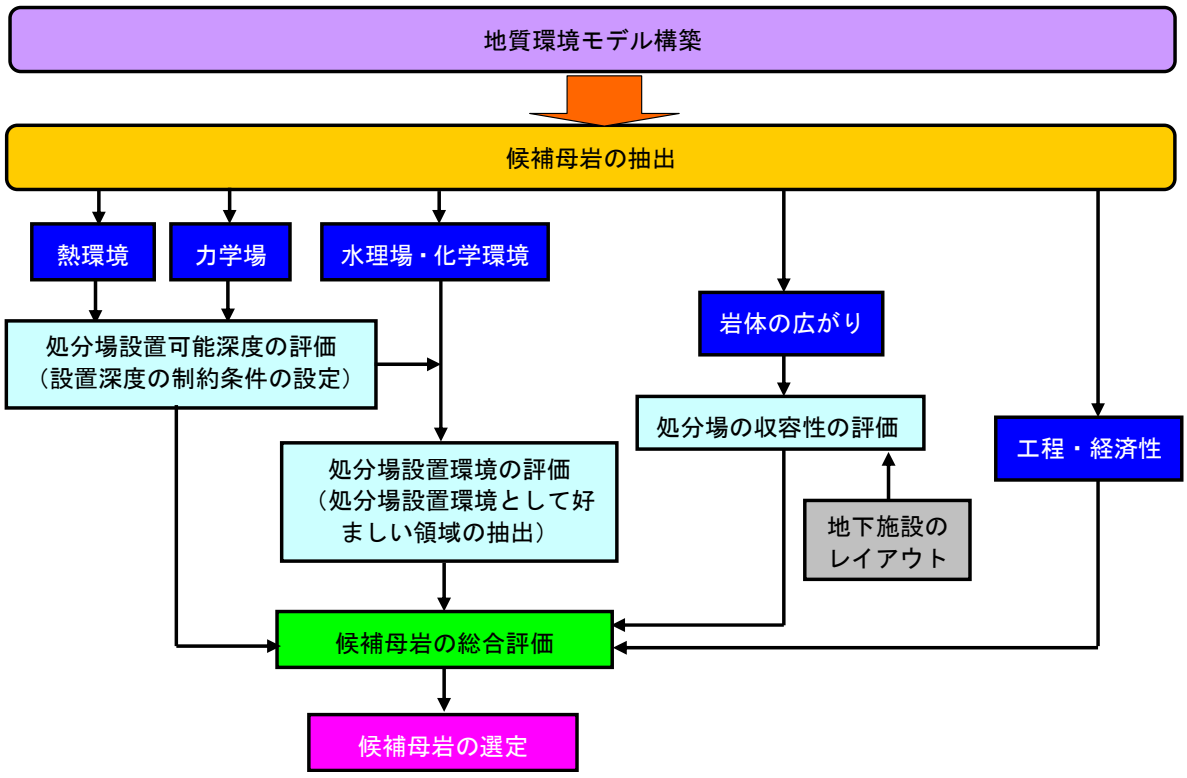


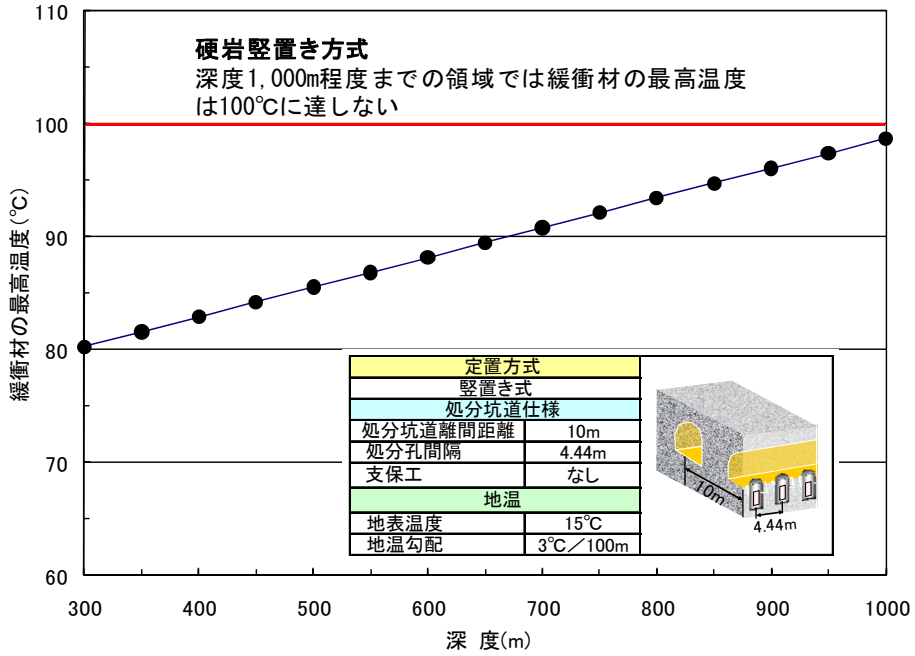
図 8.2.3-2 候補母岩の評価・選定の手順の例

(1) 熱環境の評価

熱環境の評価は，岩盤特性モデルで示される地温勾配に基づいた地温の深度方向の分布と，母岩の熱特性（比熱，熱伝導率），さらに処分坑道間隔と廃棄体の間隔で規定される廃棄体の専有面積（6.3 参照）を考慮して，深度に応じた緩衝材の最高温度を熱解析により求める。ここでは，緩衝材の最高温度が 100℃未満となる深度を目安として，処分場概念構築の制約条件となる処分場の設置可能深度を設定する（6.3 参照）。

図 8.2.3-3では，硬岩系岩盤を母岩とした場合を想定し，竪置き方式，地表温度を 15℃，地温勾配を 3℃/100mと設定して，緩衝材の最高温度（オーバーパックとの境界部）と深度の関係を示した。この図で示した深度 1,000m程度以浅の領域では，緩衝材の最高温度は 100℃以下となり，この深度までの領域が処分場の設置可能深度と判断できる。仮に地温勾配がより高い場合には，100℃以下となる範囲は，より浅い範囲となる。ただし，そのような場合には，処分坑道間隔や廃棄体の間隔を大きく取ることにより，設置可能深度の範囲を広げることができる。

このように，熱環境の評価は，岩盤の熱特性に加えて，工学的対策（この例では，処分坑道間隔や廃棄体の間隔）もあわせて評価することが重要である。なお，処分場の設置可能深度は，次に示す力学特性の観点からも検討する。



処分場概念構築システムにより作図し加筆

図 8.2.3-3 処分深度と緩衝材最高温度の関係の例示

(2) 力学場

力学場の評価は，岩盤特性モデルで示される岩盤の物理特性，変形・強度特性と地圧などの岩盤特性モデルに基づいて，合理的な支保工の適用性を考慮した坑道の力学的安定性を評価することにより行う。坑道の力学的安定性は，岩盤の最大せん断ひずみ，局所安全率，支保工応力度などを評価指標とした力学解析により，制約条件となる坑道の力学的安定性が確保できる処分場の設置可能深度を設定する（6.3 参照）。

図 8.2.3-4には，硬岩系岩盤を母岩としたケースを想定し，坑道間の岩盤の局所安全率を評価指標とした坑道の力学的安定性の評価結果を例示した。ここで示したケースでは，深度 1,000m程度までの範囲で坑道の力学的安定性があると判断できる。

力学場は，坑道の安定性評価により設定する処分場設置可能深度に影響を及ぼす。力学場の不確実性への対応としては，地圧の主応力方向や卓越する割れ目の方向に対して，処分坑道の方向をより力学的に安定な方向へ設定する対応や，合理的な支保工の検討を含めた坑道の力学的安定性を検討し，熱環境の不確実性への対応とあわせて，候補母岩の領域で成立可能な処分坑道の規模・形状，処分坑道間隔などの処分方式のオプションによる工学的対策を準備することが挙げられる。

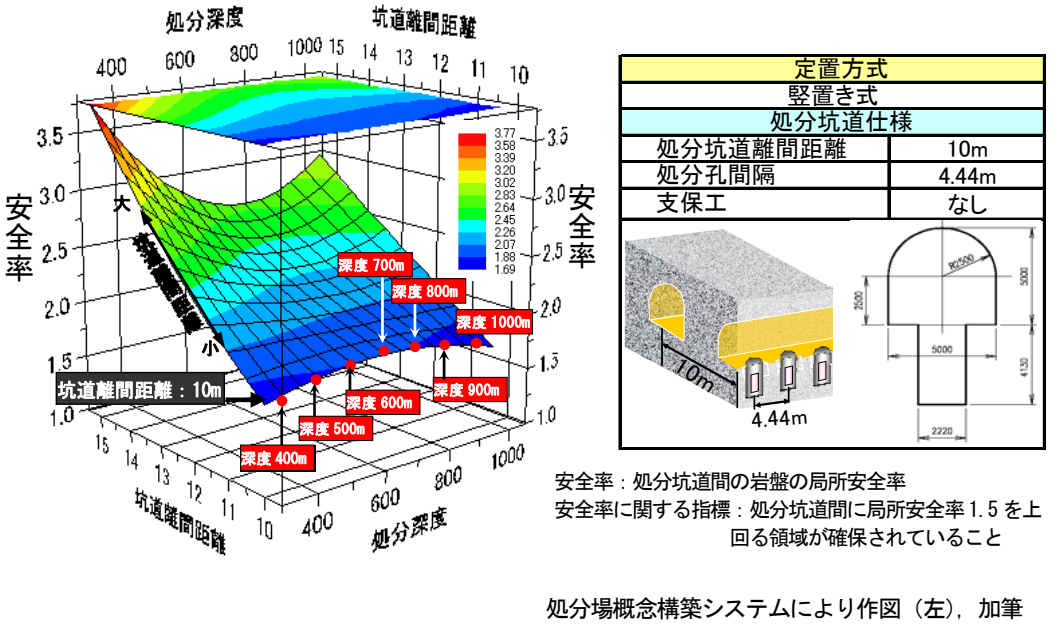


図 8.2.3-4 深度と坑道の安定性（局所安全率）の関係の例示

(3) 水理場

水理場の評価は，水理特性を考慮する上で重要な地質環境の特性（岩盤の透水性の三次元的な分布）などの情報を含む水理地質構造モデルに基づいて実施する。水理場は，工学的対策が過剰とならないよう，地下水の流速や流量などが緩慢であることが好ましい。評価指標としては，核種の移行抑制の観点から，地下水の移行時間や流束などが考えられる（表 8.2.3-1）。例えば，地下水移行時間を指標とした水理場の評価では，母岩を通過する地下水が着目する評価点までの移行時間を相対的に比較し，地下水の移行時間が相対的に長い領域が好ましい母岩であると考える。移行時間を算定する移行経路長は，出発点から候補母岩中を地下水が移行する距離や，出発点から地表付近の帯水層に到達するまでの距離を基準とすることが考えられる（図 8.2.3-5）。

図 8.2.3-6，図 8.2.3-7は，スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社（SKB）で検討されたOskarshamn地域のLaxemarサイト（赤い流跡線）およびSimpevarpサイト（青い流跡線）における粒跡線解析結果を示したものである（SKB，2004）。それぞれの候補母岩の深度 500mの評価点から地表までの地下水の移行経路は図 8.2.3-6に，評価点の地下水移行時間の分布は図 8.2.3-7に示されており，2 箇所のサイトならびにサイト内の移行時間の分布が比較されている。

評価指標を用いた比較は，水理地質構造モデルに基づき，地下水の流動解析や粒跡線解析などの数値解析を実施することで行う（太田ほか，2007；SKB，2004）。数値解析を行う際には，地下水の移行形態（亀裂性媒体・多孔質媒体，密度流・浸透流など）を考慮して適切な手法を選定する。また，地下水の流動に影響を与える地質構造（例えば断層や割れ目）の分布や透水特性（透水係数，透水量係数，比貯留係数，有効空隙率など）の不均質性とその設定上の不確実性の取り込みが重要である。そのため，数値解析では複数の解析ケースを設定し，解析結果と概要調査によって得られた地下水流動に関するデータ（間隙水圧や塩分濃度の分布など）との整合性を確認し，モデルならびに設定したパラメータの妥当性を検証する（尾上ほか，2007）。

例えば，地下水の流動を規制する断層については，その断層の性状（断層ガウジの有無，割れ目充填鉱物，角礫化の範囲など）や透水特性などを把握し，評価指標を通して処分場設置環境への影

響を評価する。また，ボーリング調査で得られる情報が質・量において不十分である場合には，次段階の調査の結果もあわせてその影響を評価することを基本とし，この段階で得られる断層の特性に関する情報に基づいて，工学的な対策の検討や，感度解析などを実施し，次段階の調査計画に反映する。

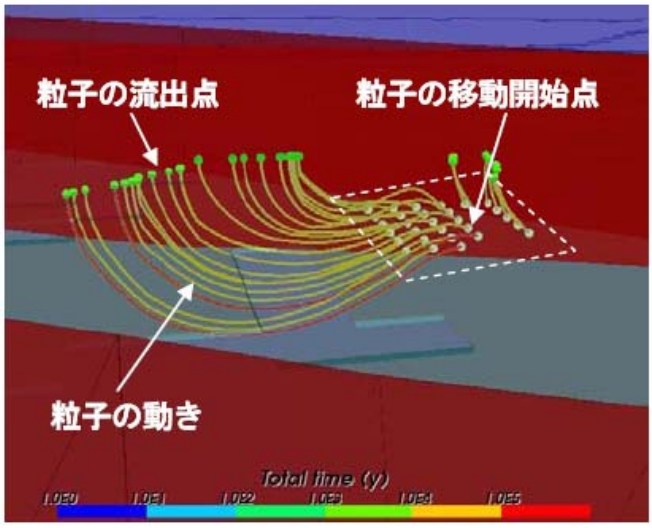
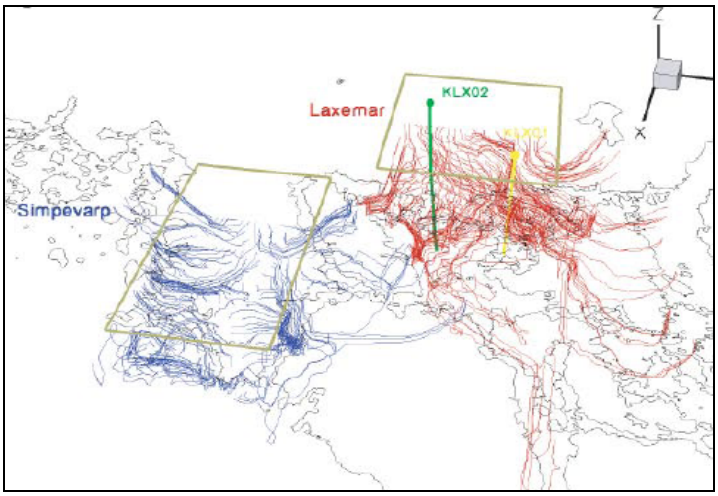
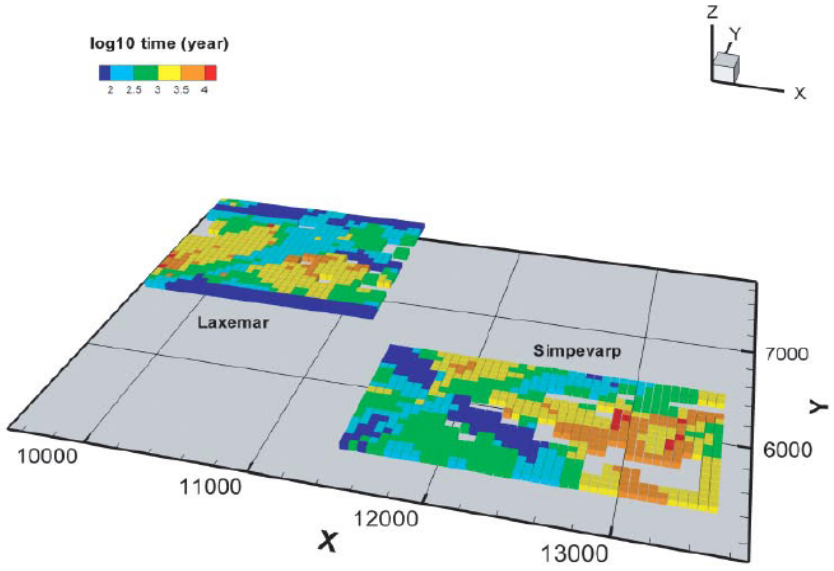


図 8.2.3-5 流跡線解析の評価点と流跡線のイメージ図（図 6.3.3-2 の再掲）



2 つの候補母岩の領域（Laxemar（赤線），Simpevarp（青線））の地下水の移行経路

図 8.2.3-6 粒跡線解析結果（移行経路）の例（出典：SKB，2004）



2 つの候補母岩の領域（Laxemar，Simpevarp）の粒跡線沿いの地下水移行時間

図 8.2.3-7 粒跡線解析結果（移行時間）の例（出典：SKB，2004）

(4) 化学環境

化学環境の評価は，地下水の化学的な特性（地下水の pH，酸化還元電位，地下水組成，鉱物組成など）の情報を含む地下水化学モデルに基づいて行う。化学環境は，安全機能のうち，核種の溶解度制限（核種の溶解度を低く維持し，移行を抑制する機能）や，緩衝材や母岩の収着性の観点，および，人工バリアの安全機能の長期的な維持に適した環境であることなどを，工学的対策の検討や安全評価の結果に基づいて評価する。

地下水の化学環境は，地下水と岩石の相互的な化学作用や地下水の流動と密接にかかわるものであり，それらの相互作用が概念的に整合性を有して理解されていることを確認する上でも重要である（岩月ほか，1998）。例えば，図 8.2.3-1の候補母岩の評価において考慮する地質環境の概念図で示したように，沿岸域を想定した場合には，陸側の淡水と，海側の塩水を起源とする地下水が接触することで，遷移領域を含む塩淡境界を形成する結果，塩分濃度などの地下水組成が空間的に変化することが考えられる（6.5 参照）。また，隆起や気候変動に起因する海水準変動により，汀線が移動することによっても塩淡境界が移動することも考えられ，地下水組成の分布が，時間によっても変化する可能性がある（7.3 参照）。従って，塩淡境界の空間的な広がりや，時間的な変遷を考慮して，地下施設の位置や人工バリアの設計，安全評価を実施し，その適性を評価する。

(5) 候補母岩の総合的な評価・選定

前項までで，候補母岩の個別の評価（表 8.2.3-1）についての基本的な考え方を述べた。総合的な評価では，個別の評価結果およびその評価の論拠となったサイト調査・評価，処分場の設計，安全評価の結果を比較し，相互に矛盾がないことなどを確認して，母岩選定の基本情報として統合する。具体的には，処分場の基本レイアウトの設計に基づいた収容性の評価や，それに基づく建設，操業工程の実現性の見通し，費用試算などに基づいた経済性についても評価して，母岩の選定を行う。最終的な母岩の選定は，上記の候補母岩の評価結果に加え，この段階の開始時点までに準備される「精密調査地区選定上の考慮事項（4.2 参照）」などの観点や社会的な条件なども含めて，多角的な

視点から検討を重ねた上で選定する。

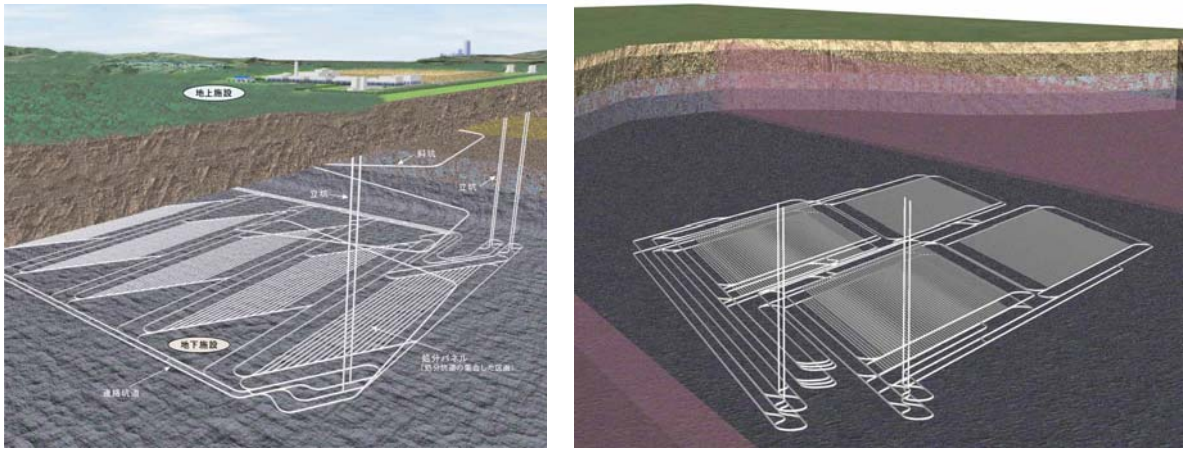
なお，以上で述べた候補母岩の評価の基本的な考え方は，サイト調査・評価の進展や得られた情報の質や量にあわせて，必要な検討事項を追加するなど，実際の事業の進展にあわせて柔軟に改良して適用する。

8.2.4　工学的対策の検討と安全評価の連携

処分場の設計では，候補母岩の評価の重要な論拠となる地下施設の基本レイアウトや坑道の仕様，人工バリアの仕様などの具体的な工学的対策を整備する。処分場の概念設計は，安全機能から設定した技術要件（6.2 参照）に基づいて，候補母岩の地質環境特性に適した人工バリアの概念仕様や地下施設の基本レイアウトなどを設定する。また，この段階までに整備してきた処分場概念オプションの実現性，さらに安全評価によるオプション間の相互比較を行う（6.5，7.3 参照）。

処分場の地下施設の位置，深度や坑道のレイアウトは，次段階の地下調査施設の建設場所を選定する上で重要な要因となるため，候補母岩の評価の進捗を踏まえて，基本レイアウトとして設定し，精密調査地区選定段階の前半の調査計画に反映する。地下施設の基本レイアウトは，候補母岩の評価で例示した内容に加え，操業の効率性（物流，工程計画など），操業安全に関する制約（換気計画，避難経路確保など），さらに建設費用や建設開始から操業開始までの時間の制約などを総合的に評価して設計する。

図 8.2.4-1には，これまでに検討してきた地下施設のレイアウトのオプション（概念図）を例示した。母岩の分布形状や空間的な広がりを考慮して，処分パネルレイアウトを柔軟に組み合わせることができる。地下施設の基本レイアウトの設計仕様項目としては，廃棄体を定置する単位区画としての処分パネルの形状，規模，数や配置，また，主要坑道・連絡坑道，および地上施設からのアクセス坑道や換気・排水・電源用の坑道の配置などがある。アクセス坑道は，立坑および斜坑方式があり，物流などの操業システム，搬送効率，排気・排水，避難，地上施設と地下施設の位置関係，施工性・作業の安全性，経済性の観点から坑道の方式を選定するとともに，主要な地下水流動方向を踏まえ，天然バリア中の核種移行抑制の観点から，適切な坑口位置とルートを設定する（6.3 参照）。



平面パネルレイアウト

多層パネルレイアウト
（候補母岩の広がりが小さな場合のパネルレイアウトのオプション）

図 8.2.4-1 候補母岩の広がりや形状に対応した処分パネルレイアウトのオプション

基本レイアウトの検討は，処分場の規模と候補母岩の広がり（規模）を比較して，処分場の収容性を評価する。候補母岩の候補母岩の広がり（規模）は，高レベル放射性廃棄物で 4 万本の廃棄体，また，地層処分低レベル放射性廃棄物では約 19,000m^3 の廃棄体が収容できる処分場の規模が必要であり，その規模は，高レベル放射性廃棄物で約 6 km^2，地層処分低レベル放射性廃棄物で約 0.25 km^2 と見積もられている（NUMO，2004；NUMO，準備中 b）。

なお，収容性の評価に際しては，湧水や処分孔の掘削不良などにより，廃棄体を設置できない箇所や，坑道を交差する割れ目などが人工バリアの性能に影響を与えると判断される場合などを考慮して，必要に応じて処分場の規模に余裕を持たせるなどの対策が必要となる（図 8.2.4-2，SKB，2006；POSIVA，2007；SKB，2008），収容性の評価はこのような対策を考慮した上で行う。

例えば，処分坑道と交差する小規模な透水性断層や割れ目帯などがある場合を想定し，割れ目帯が核種移行に与える影響を評価した上で対策と効果を確認し，止水プラグなどの工学的対策を決定する（図 8.2.4-3，Umeki, et al.，2004）。ただし，地表からの調査では，地下の割れ目などの分布といった詳細な構造を把握することができない。このため，この段階までに得られている情報に基づいて，対策工の設置による処分場規模の増大の可能性を考慮した収容性の評価を行い，母岩の広がり（規模）に応じた柔軟なレイアウトの検討を行う。

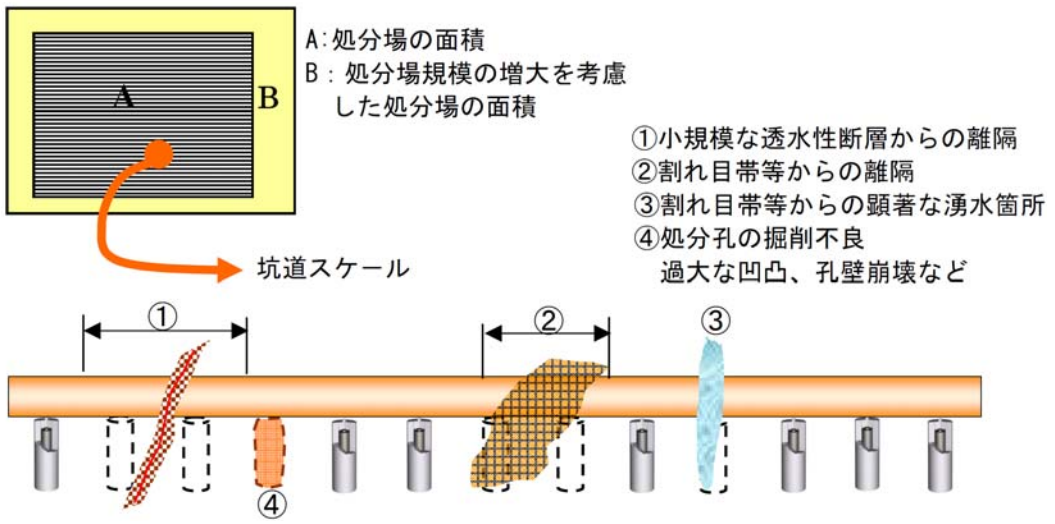
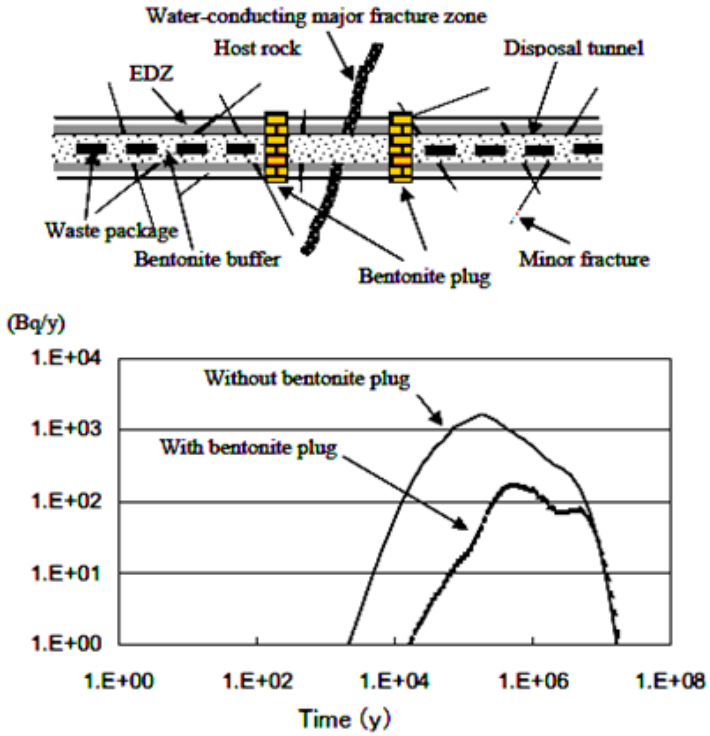


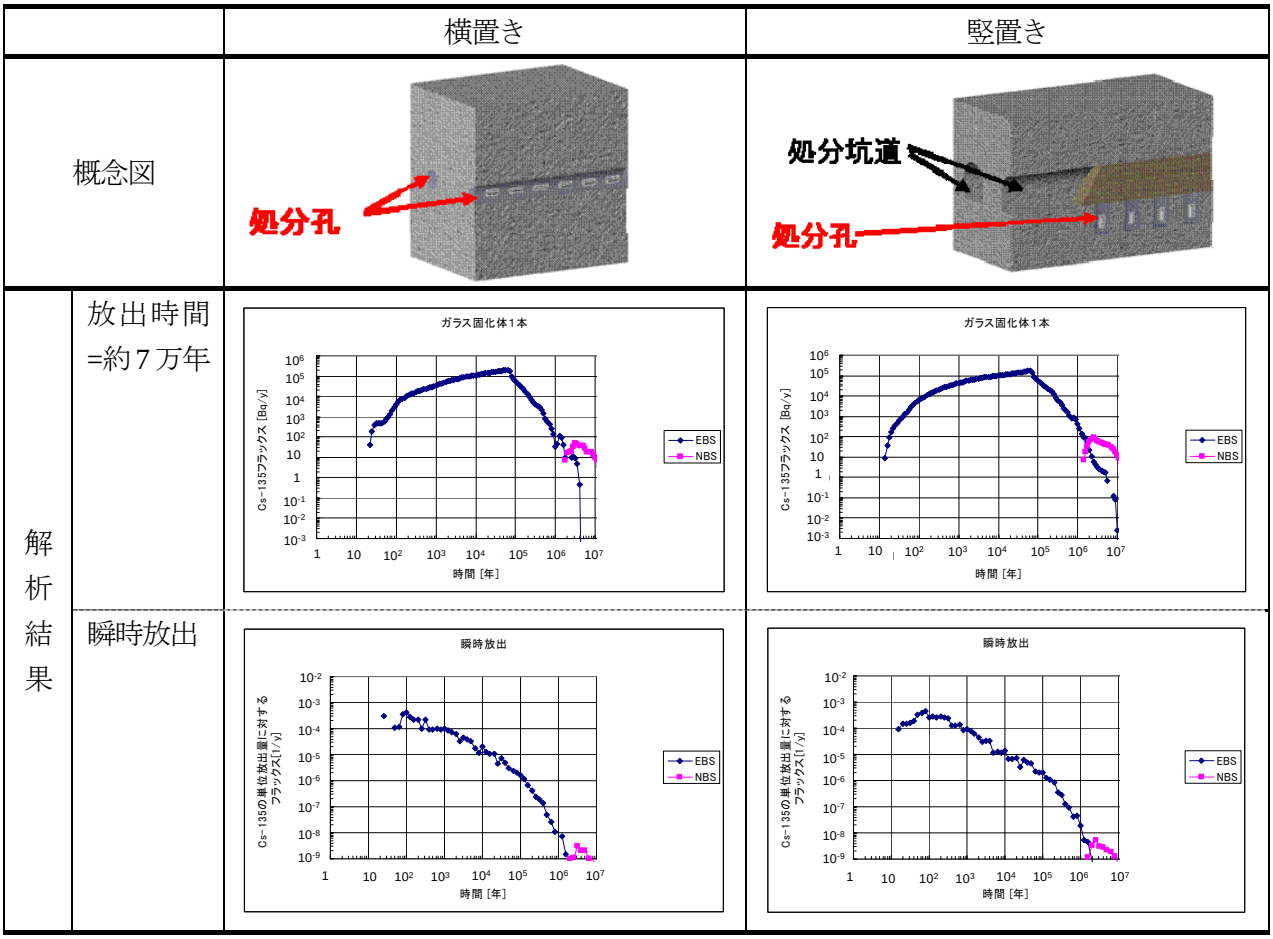
図 8.2.4-2 廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所のイメージ（図 6.1.2-1 の再掲）



処分坑道から 50m 離れた地点における Cs-135 の濃度の比較
（プラグがある場合はﾋﾟｰｸ濃度は低く，また，ﾋﾟｰｸの出現時間も遅い結果となりプラグの効果が示されている）

図 8.2.4-3 破砕帯への対策工（ベントナイトプラグ）の効果の予察的検討（Umeki, et al., 2004）

また，技術オプションの比較では，人工バリアの定置方式（竪置き方式／横置き方式）に応じて複数の人工バリアの搬送・施工技術を準備しているが（6.5 参照），オプション間の比較においては，工学的な実現性だけでなく，安全評価の視点からも評価する。第 7 章では定置方式の違いが，核種移行に与える影響について予察的に評価した結果を示した（図 8.2.4-4，7.3 節参照）。このような安全評価からの視点からの検討結果を，人工バリアの設計にフィードバックして，遠隔操作技術の実現性の観点からの制約条件をあわせて検討することにより，定置方式の設定を行う場合も考えられる。これらの結果は，次段階の地下調査施設で実施する搬送定置技術などの地下調査施設の実証試験計画に反映する。



（EBS:人工バリア，NBS：母岩）

図 8.2.4-4 廃棄体定置方式（竪置き，横置き）による核種移行率の比較（図 7.3.3-12 の再掲）

8.2.5　安全評価の役割

精密調査地区選定段階においては，文献調査で得られた情報に加え，地上からの調査（地質踏査，物理探査，ボーリング調査など）により，地質環境特性に関する情報として，母岩の透水性や割れ目頻度などの知見が拡充される。これらの知見に基づき，安全評価へのインプットとして，地質環境モデルが構築される。さらには，地質環境の長期安定性に関する知見が充実することから，地質環境の長期変遷についても予測される。また，処分場の設計においては，地質環境モデルに基づき，地下施設と人工バリアの概念設計（基本レイアウトや人工バリア材料の選定など）が行われる。安全評価においては，これらを与条件として，地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携しつつ，安全機能を設定してシナリオを構築する。また，この段階に得られる情報の質・良に応じて，地質環境モデルが複数提示された場合は，それにあわせて複数の処分場概念が構築されることも想定される。

以上に基づいて，精密調査地区選定段階の安全評価の代表的な役割をまとめ以下に示す。

- 可能性があるすべての処分場概念に対して予備的な安全評価を行うことにより，安全審査基本指針への適合性を確認するとともに，閉鎖後長期の安全性の見通しを得ること
- 処分場の設計の絞り込みに資するため，地下施設のレイアウトや人工バリア設計などに関するオプション間の比較を閉鎖後長期の安全性の観点から行うこと

・ 処分施設建設地選定段階(精密調査の段階)で作成する地質環境モデルの更新に反映させるため，閉鎖後長期の安全性を確保するために重要な地質環境の特徴や条件を抽出すること
・ 関連する試験研究などを効果的に推進するために，閉鎖後長期の安全性の観点から重要な安全評価モデル・パラメータを特定すること

8.2.6　処分場概念の構築

ここまでに述べた実施事項の結果を統合して処分場概念を構築する。処分場概念に統合化する際には，地質環境の調査・評価，処分場の設計，安全評価の結果を，論拠の十分性，確からしさ，一貫性などの観点から確認し，必要に応じて論拠の追加を行い処分場概念を構築する。

統合化した処分場概念については，閉鎖後長期の安全性，事業期間中の安全性，工学的な実現性，経済性などについて総合的に評価し，地質環境特性，社会的な条件に適合し，安全性と実現性を有する概念を当該サイトに適した処分場概念(レファレンス処分場概念)として選定する(図 8.2.6-1)。

レファレンス処分場概念は，精密調査計画の立案，処分場建設地選定段階以降の技術開発課題の設定の根拠となるとともに，許認可申請に向けた処分場の基本設計と安全評価の起点となる概念である。なお，不確実性を考慮して一つに絞り込むことが適当でない場合は，設計上の評価と安全評価を満足する概念であれば，複数のレファレンス処分場概念を提示する場合もある。

この段階の地質環境の調査は地表からの調査に限定されることから，地質環境特性の情報にはある程度の不確実性が含まれると考えられる。また，人工バリア材料の長期的な挙動についても不確実性を持つ。これらの不確実性については，次段階以降の調査や継続的な技術開発による科学的な知見の拡充により低減が期待できる。そのため，処分場概念として統合化する際には，不確実性の要因とその内容を把握し，次段階で取り組むべき優先的な課題や，必要な技術開発の計画を検討して精密調査計画に反映する。

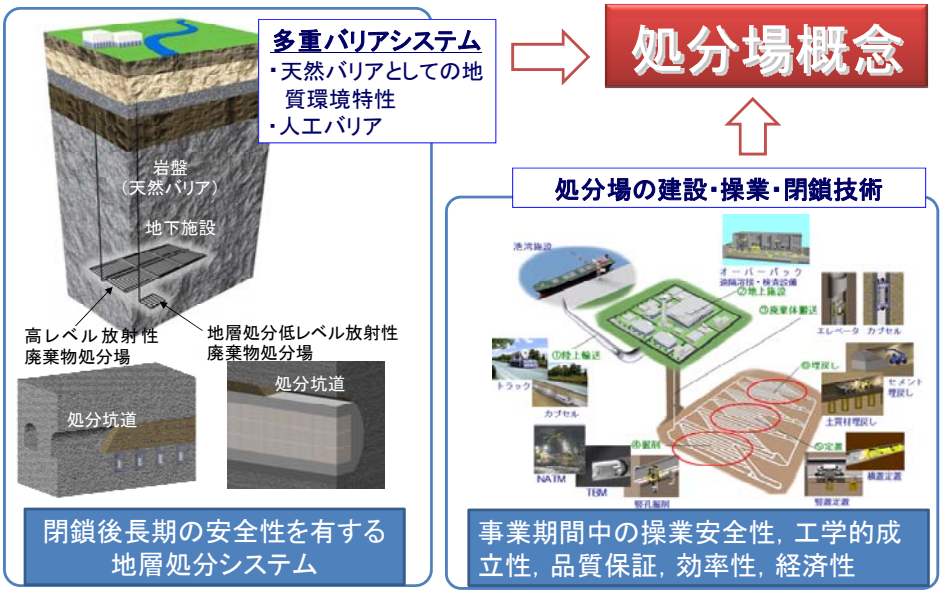


図 8.2.6-1 統合化による処分場概念の構築のイメージ

8.2.7　精密調査計画の策定

精密調査は，前半のボーリング調査を主体とする地上からの調査の段階と，後半の地下調査施設での調査の段階に分けて調査を実施する計画である（4.1 参照)。

前半の地上からの調査の段階では，前段階で構築した処分場の概念設計に基づいて，処分場の候補母岩と処分場の基本レイアウトに基づいたボーリング計画を策定する。その際には，前段階で特定した重要な地質環境の不確実性の低減に向けた観点から調査計画を策定する。地質構造モデルの不確実性（例えば，断層や地層境界の分布形状など）や候補母岩の水理場，化学環境の不確実性が閉鎖後長期安全性に及ぼす影響が感度解析などで大きいと評価された場合は，概要調査で更新された水理地質構造モデル，地下水化学モデルに基づいて，必要と考えられる範囲を対象とした調査ボーリングも実施する柔軟な調査計画を策定する。

調査の後半では，ボーリング調査により更新される処分場のレイアウトに基づいて，地下調査施設を建設する。このため，地下調査施設の建設が，地質環境や周辺環境に擾乱を及ぼす可能性があることを考慮し，ボーリング調査計画では，地下調査施設建設前の地質環境の状態を把握することなどを計画に反映する。以上の精密調査計画の策定の考え方については，実際の調査計画を進める際に得られている情報の質や量に基づいて，必要な調査項目を加えるなど，柔軟に適用する。

8.3　まとめ

処分場概念の構築においては，適切なサイト選定，工学的対策，安全評価を連携させ，地層処分の課題に適切に対処しつつ，地層処分システムの安全性と実現性に対する信頼性を向上させることが重要である。本章では，サイト選定段階における処分場概念の構築における適切なサイト選定，工学的対策，安全評価の三つの安全確保策の連携の考え方とその支援システムの開発状況について示すとともに，精密調査選定段階における連携による主要な実施項目の進め方を示した。

NUMO は，長期間にわたり段階的に進められる地層処分事業において，質的，量的に向上する地質環境の情報を反映して，処分場の設計や安全評価を体系的かつ柔軟に行う。そのため，三つの安全確保策の連携によりサイトの地質環境に適合した処分場概念を構築するための基本的な進め方と具体的な方法論の開発を進めてきた。

三つの安全確保策の連携のポイントは，連携する分野間での情報共有とその枠組みの整備が挙げられる。例えば，設計や安全評価に必要な地質環境特性の調査項目をあらかじめサイト調査・評価の担当者と綿密に調整し，調査計画の策定に反映することで，サイト調査を効率よく実施できると考えている。また，処分場概念構築の支援システムとして，処分場概念構築システムや要件管理システムを開発していることを述べた。

処分場概念構築における連携の考え方の例として，精密調査地区選定段階の概要調査計画の策定，地質環境モデルの構築，候補母岩の評価について，検討事例を交えながら示した。例えば，母岩（廃棄体を埋設する地質体)の評価は，天然バリアとしての母岩の特質と処分環境としての場の理解と，人工バリアなどの具体的な工学的対策とをあわせて考えることを述べた。最終的には，安全評価，工程・経済性の評価を加えた総合評価により母岩の適性を評価する考え方を示した。

以上のように，文献調査および概要調査の開始に向け，処分場概念の構築のための基本的な考え方と関連する技術の整備を進めてきた。今後，文献調査が開始されれば，安全確保策の連携と結果の統合化により，サイトに適した処分場概念を構築し，地層処分システムの安全性と実現性に対する信頼性を向上させる。

参考文献

Amano, K., Niizato, T., Yokota, H., Ota, K., Lanyon, B. and Alexander, W.R.（2010）：Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (2) Integrated palaeohydrogeological approach for development of site evolution models, Proc. 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), Tsukuba, Japan, 3-7 Oct. 2010, ASME.

IAEA（1989）：Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High-Level Radioactive Wastes, IAEA Safety Series No. 99.

岩月輝希，豊嶋賢治，吉田英一（1998）：深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状，バックエンド研究，4.

Jonkman, R.M., Bos, C.F.M., Breunese, J.N., Morgan, D.T.K., Spencer, J.A., Sondena,, E.（2002）：Best Practices and Methods in Hydrocarbon Resource Estimation, Production and Emission Forecasting, Uncertainty Evaluation, and Decision Making, SPE Reservoir Evaluation & engineering, Vol.5, No.2.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（2005）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－ 分冊 1 深地層の科学的研究，JNC TN1400 2005-014.

Kossik,R., and Miller,I.（2004）：A Probabilistic Total System Approach to the Simulatio of Complex Environmental Systems, Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference..

Littleboy,A.K., Degnan,P.J. Mcleod, R.S., Norris,S.（1998）: Site Characterisation Strategy and Its Role in Post Closure Performance Assessment, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 506, Materials Research Society.

Nagra（2002）：Project Opalinus Clay: Safety Report – Demonstration of disposal Feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra NTB 02-05.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，NUMO-TR-04-01.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2007）：段階的な事業の推進における構造化アプローチと要件管理，NUMO-TR-07-01.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2010）：安全確保構想 2009，NUMO-TR-09-05.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中 a）：要件管理システムの開発.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（準備中 b）：地層処分低レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性.

OECD/NEA（1991）: Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive WasteManagement Committee.

尾上博則，三枝博光，大山卓也，遠藤令誕（2007）：繰り返しアプローチに基づくサイトスケールの水理地質構造のモデル化・地下水流動解析（ステップ４），JAEA Research 2007-034.

大澤英昭，太田久仁雄，濱克宏，澤田淳，竹内真司，天野賢治，三枝博光，松岡稔幸，宮本哲雄，豊田岳司，岩月輝希，前川恵輔，國丸貴紀，新里忠史，浅森浩一，平賀正人，山中義昭，重廣道子，島田顕臣，阿部寛信，梅木博之（2008）：「地質環境総合評価技術高度化開発－次世代サイト特性調査情報システムの開発－」平成 19 年度報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-085（Part1, Part2, Part3）.

太田久仁雄，安部寛信，山口雄大，國丸貴紀，石井英一，操上広志，戸村豪治，柴野一則，濱克宏，

松井裕哉，新里忠史，高橋一晴，丹生屋純夫，大原英史，浅森浩一，森岡宏之，舟木泰智，茂田直孝，福島龍朗（2007）：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-044.

Ota, K., Amano, K., Niizato, T., Alexander, W.R. and Yamanaka, Y.（2010）: Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (1) Strategic overview，Proc. 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010), Tsukuba, Japan, 3-7 Oct. 2010，ASME.

POSIVA（2007）: Modelling of Hydro-Zones for Layout Planning and Numerical Flow Model in 2006, Working Report 2007-01

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2007）：平成 18 年度地層処分技術調査等地質環境評価技術高度化調査　報告書，平成 19 年 3 月.

三枝博光，瀬野康弘，中間茂雄，鶴田忠彦，岩月輝希，天野健治，竹内竜史，松岡稔幸，尾上博則，水野崇，大山卓也，濱克宏，佐藤稔紀，久慈雅栄，黒田英高，仙波毅，内田雅大，杉原弘造，坂巻昌工（2007）：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2007-043.

SKB（2004）: Variable-density groundwater flow simulations and particle tracking – Numerical modeling using Darcy Tools -Preliminary site description of the Simpevarp area – version 1.1, SKB R-04-65.

SKB（2006）: Final repository for spent nuclear fuel Underground design Forsmark, Layout D1 SKB R-06-34.

SKB（2008）：Underground design Forsmark Layout D2, SKB R-08-116.

Umeki, H., Sakabe, Y., Ueda, H., and Takahashi, Y., McKinley, I.G., Takase, H., Shimbo, H., and Ijiri, Y.（2004）：Managing uncertainty on site characteristics for the design of a high-level radioactive waste repository, 3rd Asian Rock Mechanics Symposium“Contribution of Rock Mechanics to the New Century”November 30 , December 2, 2004, Kyoto, Japan.

第 9 章

おわりに

第9章　目次

第9章 おわりに..... 9-1

第9章　おわりに

地層処分事業を進めていく上では，放射性廃棄物処分に特有な閉鎖後長期の安全性を確認するとともに，他の原子力施設と同様に事業期間中の安全を確保することが重要である。このため，NUMOでは，「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」を事業を進めて行く上での目標と定めた。

地層処分を行う放射性廃棄物は，放射能自体は時間とともに減衰していくものの，放射能の潜在的な環境への影響は長期間残存すると考えられることから，事業期間終了後，数万年以上にわたる将来世代に影響が及ばないことを確認しておく必要がある。このため，サイト選定の初期の段階から念入りな地質などの調査を行い，放射性廃棄物を隔離して閉じ込めておける安全な処分に適した場所を選ぶとともに，その後も処分場の建設，操業，閉鎖の各段階に応じて安全性を慎重に繰り返し確認しながら事業を進めていくこととしている。また，地層処分の事業は100年に及び，そのような長期の事業では，新しい技術的知見の反映や社会的変化などにより必要に応じて事業の修正も行えるよう配慮しておく必要がある。

このため，長期的な視野に立ち，かつ事業全体を俯瞰した上で，「方針１：安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」，「方針２：信頼性の高い技術を用いた事業推進」，「方針３：安全性への信頼感醸成へ向けた技術的な取り組み」の三つの方針で柔軟に事業を進めることとしており，各方針を達成するための具体的な方策を定め，ロードマップを作成し，事業の各段階において適切に実施できるようにしている。

一方，安全な地層処分を支える技術については，事業の各段階で，その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いることが重要であり，必要な時期までに必要なレベルで準備が整うよう，NUMOは2000年の設立以降，基盤研究開発機関との適切な役割分担のもと，計画的に技術開発を進めてきた。NUMOは地層処分の安全な実施と経済性および効率性の向上などを目的とした技術開発を進めるとともに，基盤研究開発機関の成果を合わせて，事業に必要な技術を体系的に整備している。

本報告書では，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，産業技術総合研究所，放射線医学総合研究所，電気事業連合会，日本原燃株式会社などの関係機関の協力を得て，最新の技術開発成果を取り入れて，安全な地層処分を支える技術の整備状況について取りまとめた。

安全な地層処分を支える技術は，NUMOが設立された2000年以降，以下の点で着実な進展を見せている。

① 実際に調査を行いサイト選定するための技術が体系的に整備された
② 調査・設計・評価において多様な地質環境に対応が可能となった
③ より現実的な調査・設計・評価を行うなど技術の信頼性が向上した

その結果，当面の概要調査地区選定段階とその次の段階である精密調査地区選定段階の実施事項を支える具体的な技術の準備が整うとともに，処分場の閉鎖までに必要となる技術について実現可能な見通しが得られた。

今後は，サイト固有の課題や，処分施設建設地選定段階以降に必要となる技術を中心に，一層の信頼性の向上を目指し，基盤研究開発機関と緊密に連携し技術開発に取り組んでいく。

地層処分に関する国による安全規制の枠組みが整備され，事業を安全に推進していく仕組みが確立されている。NUMO は，国の安全規制のもとで，安全確保構想に基づき，地層処分事業全体を俯瞰した上で，事業を安全に実施する。また，NUMO は基盤研究開発機関と連携して，安全な地層処分を支える技術を計画的に整備している。これらのことから，わが国において安全な地層処分実現に向けて事業を着実に進めるための準備は十分整っており，その方法は確立しているといえる。

NUMO では，現在，国や関係機関と連携して，総力を挙げて，サイト選定の最初の段階である文献調査を早期に開始できるよう，国民の皆さまとの相互理解活動に取り組んでいる。この中で，地層処分が安全にできることを示し，国民の皆さまに，地層処分の必要性と安全性をご理解いただけるように努力していく。

そのため，今後の立地・広報活動における地層処分の安全性に関する説明の技術的な拠り所として本報告書を活用するとともに，最終版発行時にはその概要版と一般向けパンフレットを併せて発行し，本報告書の内容を，専門家から一般の国民の皆さまに至るまでの幅広い読者にお伝えしたいと考えている。併せて，本報告書を踏まえ，一般の国民の皆さまが疑問や不安に感じている事項に自信を持って答えていくことにより，一人でも多くの国民の皆さまに地層処分事業の必要性と安全性についてご理解いただき，NUMO の事業推進についてご支援いただけるよう努力していきたい。

本報告書の作成に当たり，NUMO の技術アドバイザリー委員会，基盤研究開発機関など，多くの専門家の方々から有益なご意見やご助言をいただいた。今後は，日本原子力学会や海外の専門家などの第三者的な学術機関などの評価（レビュー）を得て，2010 年度末を目途に最終版を取りまとめる予定である。

用語集

【ア行】

安全審査

原子力事業者は，原子力施設の設置または変更を行おうとする場合，「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」などの関係法令の定めるところにより，施設や設備の基本設計など安全性について，行政庁による審査（一次審査）を受け，その結果についてさらに原子力安全委員会による審査（二次審査）を受けて，必要な許可を取得することとされており，この許可を得るまでの審査のことをいう。

安全評価

地層処分システムが安全上受け入れられるものか否かを判断するため，システムの将来挙動の予測を踏まえた人間とその生活環境への影響に関する解析結果を，放射線の影響を表す適切な線量などの指標を用いて示し，安全基準と比較する行為を指す。

安全レビュー

事業の進展に伴い得られるデータや最新知見を踏まえてもなお，廃棄物埋設施設の操業中のみならず閉鎖後も含めた長期的な安全性が担保される見通しであることを事業者が確認すること。事業の許可を受けた日から 20 年を超えない期間ごとの実施が「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」によって規定されている。

イエローフェーズ

原子炉の使用済燃料から再処理により有用物質を分離して生じる廃液中に一定量以上の硫酸塩もしくは塩化物イオンを含んでいる場合，珪酸塩と硼珪酸塩溶融物に対する硫酸塩および塩化物の溶解度が非常に低いことから，溶解度を超えた硫酸塩および塩化物は分離相となり，珪酸塩と硫酸塩（塩化物）の非混和性のために，溶融物の溶融表面に浮遊する。これを防ぐためには，廃液中の全酸化物量を制限する必要があり，ガラス固化が非効率的となる。同様の現象は，モリブデン酸塩やクロム酸塩を含む廃液のガラス固化においても生じる。これらの分離相は有色であり，イエローフェーズと呼ばれる。

埋め戻し材

坑道の掘削により影響を受けた領域を空間として放置しておくと，地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり，地下水の卓越した水みちとなるなど，処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが想定される。このような影響を排除するために，処分のために掘削した坑道や立坑（地上施設と地下施設を結ぶトンネル）などを埋めるもの。材料としては粘土などが考えられている。

塩淡境界

地下における海水と淡水の境界面をいう。海岸部付近の地層中では，降水系地下水（淡水）と海水系地下水（塩水）の密度差に起因して，淡水の下に海水が侵入している現象が見られる。

オーバーパック

ガラス固化体を封入する容器をいう。ガラス固化体に地下水が接触することを防止し，地圧などの外力からガラス固化体を保護する。人工バリアの構成要素の一つで，材料としては鉄などが考えられている。

【カ行】

回収可能性

地層処分において，いったん定置した廃棄物を再度取り出す行為が可能であること。2000 年に EU/EC が取りまとめた「地層処分場における長寿命放射性廃棄物の回収可能性に関する協調行動」では「処分場システムが具備する能力であり，何らかの理由によって回収が望まれた場合に廃棄体パッケージを回収すること」とされている。

概要調査

三段階のサイト選定段階のうち，二段階目の精密調査地区選定のための調査（Preliminary Investigation）。ボーリング調査，地表踏査，物理探査などの地表からの調査が行われる。

概要調査地区

概要調査を実施する地区。応募区域およびその周辺地域の文献調査結果に基づき，NUMO が選定する。

海洋投棄

放射性廃棄物の処分方法の一種で，固体廃棄物や固化した廃棄物を海洋に投棄して処分する方法。国際的には，1975 年に発効した廃棄物その他の物体の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（ロンドン条約）によって投棄が規制されており，1993 年 11 月の第 16 回条約加盟国会議において放射性廃棄物の海洋投棄の禁止が採択された。

火山フロント

島弧に沿う火山分布域の海溝側の縁を連ねた線をいい，背弧側に比べ火山体数が多く明瞭にたどることができる。

火成活動

地下深部で形成されたマグマが地殻に貫入したり，地表に噴出したりする，あるいはマグマにより地下水，岩盤などにさまざまな物理的・化学的な影響を生じさせる現象をいう。

活褶曲

層状の地層に水平方向の応力が作用することなどにより，波状に変形する運動を褶曲運動といい，この褶曲運動が現在あるいは最近まで進行し，地形の変形などとして認められ，将来も活動する可能性のあるものを活褶曲という。公募関係資料「概要調査地区選定上の考慮事項」では，過去数十万年前以降活動したものを対象としている。

活断層

過去数十万年前以降繰り返し活動したことのある断層で，将来も活動する可能性のある断層をいう。

活撓曲

地層が厚く堆積しているような地域で，深部の基盤が断層運動などにより上下に変位することにより，地表付近では断層が生じず，地層が連続したまま屈曲しているもので，現在あるいは最近まで活動し，将来も活動する可能性のあるものをいう。公募関係資料「概要調査地区選定上の考慮事項」では，過去数十万年前以降活動したものを対象としている。

ガラス固化

再処理の過程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液を，ガラスを形成する成分と一緒に高温で加熱することにより水分を蒸発させ溶融した後，非晶質に固結（ガラス化）し，物理的・化学的に安定な形態にするプロセス。廃液はステンレス製の堅牢な容器（キャニスタ）に閉じ込められた状態でガラス固化され，人工バリアの構成要素の一つであるガラス固化体となる。ガラス固化体は放射性物質を安定な形態に保持し，地下水に対する耐浸出性に優れることが特徴。

環境保全

事業活動その他の人の活動に伴って環境に加えられる影響であって，環境の良好な状態を維持する上での支障の原因となるおそれのあるもの（環境負荷）の発生の防止，抑制または回避，影響の除去，発生した被害の回復またはこれらに資する取り組みをいう。

緩衝材

人工バリアの構成要素の一つで，候補材料はベントナイトなどの粘土。オーバーパックと岩盤の間に充填し，地下水の浸入や放射性物質の移動を抑制するものをいう。さらに岩盤の変位を物理的に緩衝するクッションの働きや，地下水の水質を化学的に緩衝して変化を抑える働きを持つ。

キャニスタ

高レベル放射性廃棄物をガラス固化する際の容器，あるいは地層処分低レベル放射性廃棄物のハル・エンドピースなどが収納されている容器。

局部腐食

表面に生成する不働態皮膜（腐食作用に抵抗する酸化被膜）によって耐食性が保たれている場合に，金属表面状態の不均一あるいは環境の不均一などの原因でその一部が破壊され新生面が露出すると，その部分が選択的に溶出し局部的に腐食が進行する。この腐食形態を局部腐食という。オーバーパック材料選定に際して局部腐食生起の有無が重要な条件の一つとなる。

亀裂性媒体

岩盤中の地下水や地下水中の物質の移動を考える上での岩盤の分類の一つをいう。岩盤中に亀裂（割れ目）が発達しており，亀裂を主要な移行経路として地下水などの動きを取り扱うことができ

る。花崗岩などがこれに相当する。一般には多孔質媒体と対語をなす。

空中写真判読

航空機などから撮影した地表面の写真（空中写真）を用いて，地形，地質，土壌，植生などの状況を読み取る調査をいう。

掘削影響領域

岩盤が，掘削の影響を受け，初期の性質から変化している領域をいう。破壊特性や変形特性などの力学特性，透水係数などの水理特性，あるいは空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの地球化学特性が変化することが想定される。

グラウト

地盤や構築物の間隙・割れ目・空洞に対して，止水や弱部の補強を目的として固結材を注入する工法。注入材にはセメント，粘土，水ガラス系の薬液などがあり，セメントは強度や経済性の点で優れ，広く用いられている。

結晶質岩

マグマが冷えて固まってできた火成岩（例：花崗岩）および既存の岩石が熱や圧力によって変化してできた変成岩（例：結晶片岩，片麻岩）をいう。

原位置施工方式

緩衝材や埋め戻し材を施工する方法として，原位置において，振動ローラーなどの機械を用いて土質系材料にエネルギーを与えることで，材料を締め固めて密度を増大させる方法。

原子力政策大綱／原子力長期計画

原子力委員会は，原子力基本法に沿って国の施策を計画的に進めるために，1956 年（昭和 31 年）からおおむね 5 年ごとに，9 回にわたって「原子力長期計画」（正式名称：原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画）を策定してきた。10 回目の見直しでは，「原子力政策大綱」と名称を改め，2005 年（平成 17 年）10 月に，今後 10 年程度の原子力の基本方針として閣議決定された。

建設・操業・閉鎖

建設は，廃棄体定置のための地下施設（地下坑道群）と地上施設を構築することを指す。操業は廃棄体の受け入れに始まり，オーバーパックへの封入や廃棄体パッケージ，緩衝材などの製作，これらの搬送・定置，その後に行う処分坑道の埋め戻し作業までの一連の作業をいう。閉鎖は，連絡坑道，アクセス坑道の埋め戻しを指す。

構造化アプローチ

段階的な事業の意思決定において，技術的，社会・経済的な要件に対して，サイト調査・評価，工学的対策，安全評価を統合化して対応する枠組みは，事業の各段階において情報量の差異はあるものの類似の構造をとる。このような意思決定の枠組みをあらかじめ定め，段階的な事業に適用し

ていく方策を「構造化アプローチ」と呼ぶ。

構造躯体

第二種特定放射性廃棄物を処分するに当たり，廃棄体や廃棄体パッケージの定置空間と緩衝材などの設置空間を区画分けするものである。人工バリアの種類や処分坑道の形状を踏まえ，鉄筋コンクリート製や鋼製など適切な部材で構成する。

坑道離間距離

隣接して掘削される坑道や処分孔間の距離をいう。空洞の力学的安定性や廃棄体からの放熱による緩衝材や充填材などの人工バリアの熱変質防止などの観点から，適切な坑道離間距離が設定される。

高レベル放射性廃棄物

原子炉の使用済燃料から再処理により有用物質を分離して生じる廃液またはそれを固化したものをいうが，一般には後者の意味でガラス固化体を指して用いられることが多い。なお，諸外国の中には使用済燃料を再処理しない方針の国もあり，その場合には使用済燃料自体が高レベル放射性廃棄物となる。本報告書では，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」における「第一種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「高レベル放射性廃棄物」を用いている。「第一種特定放射性廃棄物」には，海外再処理により発生する TRU 廃棄物を一定の基準に基づき交換され返還されるガラス固化体も含まれる。

【サ行】

再冠水

廃棄体の定置後，地下水が周辺岩盤から埋め戻し材や緩衝材などに浸潤し飽和する。この地下水により飽和状態になる過程を再冠水という。再冠水の期間（再冠水時間）やその状態を把握することは，廃棄体定置後のニアフィールド周辺の長期の状態変遷を理解する上で重要である。

最終処分基本方針

わが国における原子力政策（原子力白書や原子力大綱など）で規定された放射性廃棄物処分に関する基本的な取り組みや方策をいう。2000 年（平成 12 年）「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に基づき閣議決定され，「高レベル放射性廃棄物は，安定な形態に固化した後，30 年間から 50 年間程度冷却のための貯蔵を行い，その後，地下の深い地層中に処分する」とされている。2008 年（平成 20 年）「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の改正によって長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の一部などが地層処分対象として追加されたことに伴い，改定された。

最終処分計画

国は 2000 年（平成 12 年）に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」を定め，「国の基本方針及び最終処分計画の明確化」，「拠出金の納付」，「概要調査地区等の選定」，「処分の実施主体」，「資金管理主体」などを定めた。「最終処分計画」では，5 年ごと，10 年を一期として策定するとし，そこには，最終処分を実施する時期，量，概要調査地区などの所在地などを記述するものとしている。

2008 年（平成 20 年）「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の改正によって長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の一部などが地層処分対象として追加されたことに伴い，改定された。

最終処分法

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律。原子力発電所の運転に伴って生じた使用済燃料の再処理後に生ずる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の最終処分を計画的かつ確実に実施するため，最終処分費用の拠出制度，最終処分を実施する主体の設立，拠出金の管理を行う法人の指定などの関係規定の整備を行うことを目的として 2000 年に制定された法律。2008 年に改定され，長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の一部などが地層処分対象として追加された。

サイト

本書では，地層処分施設を建設することが可能と考えられる場所を幅広く意味する語として「サイト」を用いる。特定の地域を指している「処分施設建設地」および「応募区域」とは別の語として使い分けている。

サイドスキャンソナー

水中曳航式の送受波器から水底に向けて扇状に発振された超音波が，水底表層部で反射した波の信号をもとに，露岩分布，水底の地質（底質）の相違，砂堆・海釜の形状などの情報を画像化するシステムをいう。

サイト選定（／サイト選定段階）

応募地区から概要調査地区，精密調査地区，最終処分施設建設地を順次選定する段階を総称して，サイト選定段階という。

サイト調査・評価

サイトの地質環境特性，ならびに，地質環境の安定性に係る地形・地質・岩盤・地下水などの調査・評価全般のことをいう。

酸化還元性

物質を酸化あるいは還元する性質をいう。一般に地下深部は，金属が腐食しにくいなどの還元性の環境にあるとされている。

自己シール性

緩衝材の特性の一つで，地下水の浸入に伴う膨潤によって，周辺岩盤との隙間や緩衝材内に生じた隙間を充填する特性をいう。

自主基準

実施主体が安全な処分の実現に向けて自主的に定める基準で，上位の行動規範から，地層処分事業各段階でのサイト選定の考慮事項，意思決定の判断指標や尺度，品質保証のルールなどから構成され，その項目は階層構造をなす。自主基準は，事業の進展に伴い整備されていく法規制や技術基

準に従い見直される性格を有する。項目によっては，法規制が整備されたのちにも実施主体独自の基準として保持していくものもある。

支保工

支保工は，坑道の掘削に伴って力学的に不安定となる坑道周辺の岩盤を施工中から完成後にわたって安定に保ち，掘削作業の安全と完成後の坑道の安全な供用を確保するために設置される構造物をいう。支保部材としては，吹付コンクリート，覆工コンクリート，コンクリートセグメント，ロックボルト，鋼製支保工などが一般的であり，単独あるいは組み合わせて用いられる。

遮へい

放射線をさえぎり，外部への放射線の影響を少なくすること。遮へい材としては多くの場合，水，コンクリート，鉛，鉄などが用いられる。

収着

収着は，固体の空孔の中あるいは表面で起こる反応をいう広義の用語である。なお，それを使うに当たっては，吸収と吸着の反応の間の技術的区分の問題は除かれている。吸収は主として固体の空孔内で起こり，固体の吸収能力はその体積に比例するような反応を一般的に示すのに用いられる。吸着は，固体表面で起こる反応を示すものであって，固体の吸着能力はその有効表面積に比例する。後者の過程の一例はイオン交換であり，そこでは固体の表面にある荷電位置を占めたイオンが液中のイオンにより交換されるのである。

充填材

廃棄体パッケージの中や外の空間を埋める材料およびその部位のことをいう。セメント系材料などを検討している。操業期間中は万一の汚染拡大防止，処分場閉鎖後は長期間にわたって核種が容易に漏れ出ないようにする機能を期待することもある。

受動的安全性

IAEA による Passive Safety の概念を和訳した用語で，地層処分の長期安全確保の原則（IAEA）である「能動的な制度的管理に依存しない安全確保方策」をいう。受動的な安全確保は，地層処分にとって実質的に最終段階となる「閉鎖措置」によって実現される。

処分坑道

廃棄体と廃棄体に応じた人工バリアを定置する坑道のことをいう。

処分場

地層処分に必要な人工バリアを含む一群の施設（処分施設）と天然の岩盤（天然バリア）によって構成され，閉鎖後長期間にわたって高レベル放射性廃棄物などを人間環境から安全に隔離するための機能を持つシステムをいう。従って処分場は，閉鎖までに必要な一群の施設と閉鎖後長期にわたる安全機能が期待される構成要素すべてを総称したものを指す。閉鎖後の長期にわたる安全機能に着目し，一つのシステムとして表現する際には，多重バリアシステムという。

処分場概念

地層処分施設とその立地点におけるサイト環境条件を合わせた，処分場についての包括的な概念で，地層処分施設の設計仕様やレイアウト，建設・操業・閉鎖やモニタリングの方法，事業期間中の安全対策および閉鎖後の長期安全性，品質保証，環境影響や社会経済的側面などに関する概念を含む。

処分パネル

高レベル放射性廃棄物を埋設するための処分坑道群とそれを取り囲む坑道からなる一つの区画をいう。

人工バリア

生活環境への放射性廃棄物の漏出を防止，および低減するために設けられる人工構築物。地層処分の場合，ガラス固化体，オーバーパックおよび緩衝材からなる。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

新第三紀

地質年代単元の一つで，約 2300 万年前から約 260 万年前の期間。新生代（Cenozoic Era）の一部をなす Neogene Period の訳語。

深地層の研究施設

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として，深部地質環境の調査・解析・評価技術および深地層における工学技術の基盤の整備を目的とした研究施設。

ステークホルダー

ステークホルダー（利害関係者）の定義については，国際的にも必ずしも定まったものがあるわけではないが，IAEA 安全用語集においては，「ステークホルダーには一般に，所有者，運転者，従業者，メディア，公衆などを含んでいる」とされ，また IAEA INSAG-20（原子力の課題におけるステークホルダー関与）では，「与えられた課題または決定に特定の関心のある者で，このグループに一般公衆を含めることができる」とされている。

ストーリボード

対象とする空間スケールと時間スケールごとに，バリアの状態や核種の移行に関係するプロセスを，概念図や言葉を用いて描写したもの。

生物圏

地球表面において，人間を含むいろいろな生物が住んでいる部分であり，大気圏，水圏および地圏の一部から成る。生物圏は，人間の生存場所，あるいは最も広義の人間環境を含んでいる。

精密調査

三段階のサイト選定段階のうち，三段階目の処分施設建設地選定のための調査（Detailed

Investigation)。地表からさらに詳細な調査を行うとともに，地下に調査施設を建設して，地下の特性などを調べるための調査が行われる。

精密調査地区

精密調査を実施する地区。概要調査結果に基づき，NUMO が選定する。

セーフティケース

IAEA では「ある施設または活動の安全を裏付ける論拠および証拠を収集したもの」，OECD/NEA では「ある特定の（放射性廃棄物）処分場の開発段階において，処分場の長期の安全を裏付ける論拠を収集したもの」と定義され，事業者が自主的に作成，更新する。

浅地中処分

液体廃棄物を濃縮した廃液や放射能レベルの低い使用済み樹脂，可燃物を焼却した焼却灰などをセメントなどでドラム缶に固形化したものや，配管やフィルターなど固体状の廃棄物で放射能レベルの比較的低いものを，浅地中にコンクリートピットなどの人工構築物を設置して埋設する方法。

全面腐食

金属材料表面が均一に腐食する状態。一般に腐食速度が小さい時や金属表面を保護性皮膜で覆わない時に生じる。オーバーパック表面に局部腐食が発生しない条件で，オーバーパックの材料選定や厚さ設定に際して全面腐食の速度が重要な条件の一つとなる。

戦略的環境アセスメント

戦略的環境アセスメント（SEA:Strategic Environmental Assessment）とは，個別の事業実施に先立つ「戦略的（Strategic）な意思決定段階」，すなわち，個別の事業の計画・実施に枠組みを与えることになる計画（上位計画）や政策を対象とする環境アセスメント。早い段階からより広範な環境配慮を行うことができる。

【タ行】

第一種／第二種特定放射性廃棄物

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では「第一種特定放射性廃棄物」と「第二種特定放射性廃棄物」を定めている。「第一種特定放射性廃棄物」は具体的にはガラス固化体を意味している。日本では，再処理委託した外国より返還されたガラス固化体（再処理に伴い発生する TRU 廃棄物を一定の基準に基づきガラス固化体と交換したものを含む）や，JAEA および原燃において作られるガラス固化体が地層処分の対象となる。「第二種特定放射性廃棄物」は具体的には政令で定められている。JAEA および JNFL の再処理工場や MOX 燃料工場の操業・解体に伴って生じる TRU 廃棄物のうちの一部が地層処分の対象となる。

第一種／第二種廃棄物埋設

2007 年に改正された「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により，廃棄物埋設の事業区分に係る基準が定められた。同法では，核燃料物質又は核燃料物質によって汚染され

た物であって，これらに含まれる政令で定める放射性物質の放射能濃度が政令で定める基準を超える物の埋設の方法による最終的な処分を第一種廃棄物埋設（地層処分）といい，第一種廃棄物埋設以外は第二種廃棄物埋設という。

堆積岩

海底や河床などに運ばれた泥や砂などの堆積物や，火山噴出物などが固まってできた岩石（例：砂岩，泥岩）をいう。

第 2 次 TRU レポート

TRU 廃棄物処分の事業ならびに制度化に資するため，電気事業者などと JNC が協力し，2000 年に取りまとめた「TRU 廃棄物処分概念検討書（第 1 次 TRU レポート）」以降，両者が進めてきた研究開発の最新の成果を反映し，当該廃棄物処分の技術的成立性および安全性の見通しについてより確かなものとすることを目的に，2005 年に関係機関の協力を得て取りまとめたものである。正式名称：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－

第２次取りまとめ

1997 年 4 月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発などの今後の進め方について」に従い，関連する研究機関などの協力を得て，JNC が 1999 年 11 月に公開した報告書。正式名称：「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－」。

第四紀

地質年代単元の一つで，約 260 万年前から現在までの期間。Quaternary Period の訳語。その開始時期は，これまでは約 170 万年前からとされていたが，2009 年に国際地質科学連合（IUGS）により再定義され，日本の各学会においても 2010 年 1 月にこれに従う決定を下した（日本第四紀学会ホームページ 2010 年 1 月 22 日「第四紀と更新世の新しい定義と関連する地質時代・年代層序の用語について」http://wwwsoc.nii.ac.jp/qr/news/teigi09.html）。NUMO では，この変更への対応をまだ行っていないため，現時点では旧定義を用いている。

第四紀火山

第四紀は約 260 万年前以降から現在までの期間をいうが，「日本の第四紀火山カタログ」（1999）では，約 200 万年前以降に活動したことが認められる火山を第四紀火山とし，日本全国で 348 の第四紀火山が記載されている。

多孔質媒体

岩盤中の地下水や地下水中の物質の移動を考える上での岩盤の分類の一つをいう。多孔質の岩盤は粒子や間隙からなり，透水性や貯留性は間隙の大きさと量に依存する。新第三紀の堆積岩がこれに相当する。一般には亀裂性媒体と対語をなす。

多重バリアシステム

放射性廃棄物を，長期間にわたり生物圏から隔離し，放射性物質の移動を抑えることにより，処分された放射性廃棄物による影響が，将来にわたって人間とその環境に及ばないようにするための多層の防護系から成るシステムをいう。工学技術により設けられる人工バリアと，天然の地層である天然バリアにより構成される。

段階的アプローチ

段階的アプローチは，Step by step approach（IAEA）あるいは Phased approach（OECD/NEA）と訳され，地層処分事業をサイト調査，建設，操業，閉鎖まで段階的に進めていく方策をいう。各段階では，実施者による意思決定とともに，規制当局，為政者の意思決定も考慮される場合がある。

段丘

河川・海・湖などに隣接していて，崖によって境された平坦面。過去に形成された河床や海浜などが隆起して取り残されたもの。

段丘対比・編年

同じ時代に形成された段丘を認定することを「対比」，段丘が形成された年代を明らかにすることを「編年」という。

断層破砕帯

断層の活動に伴い，岩石が破砕され，不規則な割れ目の集合体となったもので，角礫部，粘土部などから構成される，ある幅を持った帯をいう。

地下施設

廃棄体を地上から地下に搬送するためのアクセス坑道や連絡坑道，廃棄体を埋設するための処分坑道と処分孔などをいう。

地質環境（／地質環境特性）

地層処分の観点から見た地下の環境を地質環境という。地質・地質構造，岩盤の正常・力学特性，地下水の地球化学特性，地下水の流動特性などが含まれ，これらの特性を総称し，地質環境特性と呼ぶ。

地質環境モデル

地質環境特性にかかわるサイトの具体的なデータを用いて，二次元または三次元座標における構造の幾何学的性状や諸特性の分布を可視化するもので，地質構造モデル，水理地質構造モデル，地球化学モデル，岩盤力学モデル，物質移動モデルなどがあり，これらの総称。

地上施設

ガラス固化体受入・封入・検査施設，緩衝材製作・検査施設，管理棟など，地下での建設や操業から閉鎖までに必要な地上の施設をいう。地下施設の閉鎖後は撤去されるが，閉鎖後管理が行われ

る場合，その間は必要な施設が残される。

地層

狭義には，堆積岩などの成層構造をなした岩体に限定して「地層」と呼ぶが，ここでは成因や構成要素を限定せず，地層処分において考慮される一定の広がりと深さを持った地層および岩体を含む意味で用いる

地層処分基盤研究開発調整会議

地層処分に関する研究開発を計画的，かつ効率的に実施することを目的として，資源エネルギー庁や JAEA が中心となって，国の基盤研究開発を対象とした全体計画（高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画，TRU 廃棄物の地層処分基盤研究に関する全体基本計画）を策定し，技術基盤の継続的な強化を目指して研究開発が進められている。資源エネルギー庁が設置した地層処分基盤研究開発調整会議には，JAEA，原環センター，電中研，産総研，放医研が基盤研究開発機関などとして参加している（2009 年度現在）。

地層処分システム

閉鎖後長期の安全性を評価する上で対象となるシステム全体の総称。一般に多重バリアシステム（または処分場）に人間環境（生物圏）が含まれる。

地層処分低レベル放射性廃棄物

TRU 廃棄物の中には，長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるため，高レベル放射性廃棄物と同様に深い地層へ処分する必要のある廃棄物があり，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では「第二種特定放射性廃棄物」と特定されている。本報告書では，この「第二種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「地層処分低レベル放射性廃棄物」を用いている。

地表踏査

地表面で行う現地調査をいう。地表で確認できる事項，例えば，地層・岩石の分布，地質構造，活断層の分布などを調べる。

中間貯蔵施設

原子力発電所の運転に伴って発生する使用済燃料を，再処理に備えて発電所外で一時的に安全に貯蔵管理しておく施設。これまで，使用済燃料は再処理施設に搬出されるまで各発電所内で貯蔵されてきている。現在，年間約 1,000 トンの使用済燃料が発生する一方で，操業が予定されている再処理施設の処理能力は年間 800 トンであり，発電所内での貯蔵が厳しくなると予想されることから建設が進められている。

長期安定性

ここでは地質環境の状態（変動の傾向などを含む）の長期にわたる安定性を指す。岩盤や地下水などの地質環境に大きな変化を及ぼす可能性のある自然現象として，地震・断層運動，噴火，隆起・侵食といったものが考えられる。

超長期

10 万年程度を超える長期間を指す。

低アルカリ性セメント

その浸出液の pH が最大でも 11.0 程度のセメントを指す。現在国内で市販されているセメント系材料の pH は約 12.5～13.0 の高アルカリ性を示し，これを処分場において使用した場合，地下水の pH を上昇させることが想定される。この場合，ニアフィールドのバリア機能に有意な影響を及ぼす可能性があり，この影響を低減するためには，セメント系材料からの pH を 11.0 程度にすることが必要であるといわれている。このような背景から，低アルカリ性セメントの開発とその適用性が検討されている。

定置

オーバーパックに封入したガラス固化体，廃棄体パッケージや緩衝材などを処分坑道内の所定の位置に据えること。

低レベル放射性廃棄物

わが国では，放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に区分される。低レベル放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物以外の放射性廃棄物の総称である。

天然バリア

処分された廃棄物と人間の生活環境との間にある地層などを指し，天然のものではあるが，廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁としての役割も期待される。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

閉じ込め

放射性核種の放出を防止する，または放出を最少限に抑制するための処分施設の設計を意味する。閉じ込めは，人工バリアまたは人工バリアとサイト環境によって提供される。通常は，廃棄物が処分システムに対して悪影響を与え得る熱エネルギーを生じる期間，あるいは，放射能の減衰によって廃棄物に起因する危険性が十分に低減するまでの期間において，閉じ込めを提供するように処分システムの設計がなされる。

トレンチ調査

主に，活断層の活動履歴を明らかにすることなどを目的に，細長い溝（トレンチ）を掘って行う地質調査をいう。断層を横切る方向に溝を掘り，断層にそって生じた地層のずれ（変位）の量，ずれた地層・断層を覆う地層の年代を測定するなどして，活断層が活動した年代や活動の頻度を調べる。

【ナ行】

ナチュラルアナログ

放射性廃棄物埋設後の放射性核種の挙動や人工バリアの腐食・変質など，地層処分システムにお

いて想定される現象と類似した，自然界で過去に起こった長期的変化に関する現象をいう。火山から噴出した火山ガラス, 古代の遺跡などから発掘される銅鐸, 地下に埋設された古い鋳鉄管などは，人工バリアの候補材であるガラスや金属に類似しているため，これらの地下での長期的な変化を調べることにより，人工バリアで生じ得る現象を確認したり，評価方法の妥当性をチェックすることができる。また，天然の放射性核種を含むウラン鉱床などは，地層処分システム全体のナチュラルアナログの研究の場として利用できる。

ニアフィールド

人工バリアと，その設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域をいう。

【ハ行】

バーチャル処分場

バーチャル（Virtual）とは，実態を伴わない仮想的な状況をいう。バーチャル処分場は，三次元コンピュータグラフィックを用いて処分場を疑似的に体験できる処分場である。視覚や聴覚，運動感覚に訴える人工的な空間をコンピュータにより作り出し，人間があたかもその環境に存在するような環境を生み出すことが可能である。

廃棄体

容器に封入し，または容器に固型化した放射性廃棄物。

廃棄体パッケージ

廃棄体をまとめて金属性などの箱に収納し充填材を充填したもの。

ハル・エンドピース

燃料集合体をせん断・溶解した後の残渣であり，被覆管（ハル）と集合体端末片（エンドピース）などから構成される。ハルは主にジルカロイ，エンドピースは主にステンレス鋼製。

品質管理，品質保証，品質マネジメント

国際標準化機構（International Organization for Standardization）の規格（ISO 9000:2000）では，以下のように定義されている。

- 品質管理（Quality Control）：品質要求事項を満たすことに焦点を合わせた品質マネジメントの一部
- 品質保証（Quality Assurance）：品質要求事項が満たされるという確信を与えることに焦点を合わせた品質マネジメントの一部
- 品質マネジメント（Quality Management）：品質に関して組織を指揮し，管理するための調整された活動。品質に関する指揮および管理には，通常，品質方針および品質目標の設定，品質計画，品質管理，品質保証および品質改善が含まれる。

フールプルーフ

工業製品や生産設備，ソフトウェアなどで，利用者が誤った操作をしても危険に晒されることがないよう，設計の段階で安全対策を施しておくこと。基本的には，「人間は間違いをおかす」ことが前提となっており，多くの事故がヒューマンエラーから引き起こされている分析に基づく。

フェイルセーフ

設備やシステムの安全設計思想の一つで，想定される事故や誤作動を仮定し，そのことが発生しても，被害を最小限に抑える装置やシステムをあらかじめ組み込んでおくなどの対応策をいう。

不確実性

天然現象には偶然的要素に支配される側面もあり，現象の理解の程度や定義のあいまいさなどから，これに基づくモデルやデータには必然的に結果を確実に予測できない面がある（不確実性）。放射性廃棄物処分の性能評価では取り扱う現象が多岐にわたり，空間的規模や時間的領域が広範にわたるため，必要とされる精度のレベルも個々の解析に応じて異なると考えられ，不確実性についても十分考慮しておく必要がある。

普通ポルトランドセメント

建築・土木構造物などに最もよく使用されているセメントであり，ケイ酸三カルシウム，ケイ酸二カルシウム，カルシウムアルミネート，カルシウムアルミノフェライト，硫酸カルシウムなどを成分に含む。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート材料は，これまでに一般建造物や土木工事などに用いられており，多くの施工実績がある。地層処分においても，地下施設の立坑や水平坑道を建設する際には，坑道の空洞安定性を保つためにコンクリート材料が支保工として使用されることが検討されているが，普通ポルトランドセメントは，地下水と接触すると近傍の水の pH を 12.5 以上の高アルカリ性にすることから，地層処分システムを構成する緩衝材や周辺岩盤の性質が長期的に変化し，そのバリア機能が低下する可能性がある。

物理探査

人工的に発生させた地震波や電磁波などを利用して，空中，地上，水上などから地下の状況を間接的に調査することをいう。地質構造の状況，鉱床の有無などを調査することができる。

プラグ

坑道の中間部や端部をふさぐために設置される構造物。埋め戻し材や緩衝材の移動や流出を防いだり，水の通りやすい経路を分断したり，不用意な人間侵入を防ぐ目的で設置される。

ブロック方式

緩衝材の施工方法の一つで，ブロック型の圧縮成形体を製作し，地下施設で成形体を組み上げて緩衝材を施工する方法。

文献調査

文献その他の資料（記録文書，学術論文，空中写真，地質図など）から得られたデータに基づく

分析・解析作業。

併置

本資料では，高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を同じ場所に設置することを「併置」という。

ペレット方式

緩衝材の施工方法の一つで，球状，粒状に成形した緩衝材を施工空間に充填し，緩衝材を施工する方法。

ベントナイト

モンモリロナイトという鉱物を主成分とする粘土の一種で，緩衝材の主要材料。ベントナイトは，その層間に入っている交換性の陽イオンの違いによって二つのタイプに分類される。Na イオンが入っているものを Na 型ベントナイト（膨潤型），Ca イオンの場合は Ca 型ベントナイト（非膨潤型）という。Ca 型ベントナイトは，Na 型ベントナイトに比べ層間結合が比較的強いため水が浸潤しにくいが膨潤性能は劣る。

膨潤圧

緩衝材に含まれるベントナイトは，その主成分であるモンモリロナイトの層間に水を取り込むことにより膨潤する。このモンモリロナイトの層状体が外界に対して働かせる圧力が膨潤圧である。

法定要件

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」および同施行規則に示された概要調査地区の選定要件のこと。

ボーリング調査

地下の地質状況などを調べるため，地中に直径数 cm～十数 cm 程度の円筒状の孔を掘って行う調査をいう。この際に採取した岩石試料，孔を用いた各種の計測などによって，地下の岩石，地下水などに関するさまざまな情報を取得することができる。高レベル放射性廃棄物の地層処分では，ボーリング調査を行う深さは，数百 m～千 m 程度となる。

母岩

処分場が設置される地層のこと。

補完的安全指標

地層処分システムの安全を評価するための尺度を安全指標という。指標には，人間への放射線影響を直接示すリスクや線量などがあるが，生物圏モデルでなされている仮定に依存せずに，線量やリスクに基づく評価を補完するための指標を補完的安全指標という。例えば，処分システムの隔離能力や放射性廃棄物の潜在的な危険性を示す尺度として，放射性核種の濃度や移動量（フラックス），時間，放射能毒性指数などが挙げられる。

【マ行】

マーカー

処分施設の存在を認識させることを目的としたもの。IAEA の安全基準文書「放射性廃棄物の地層処分」（WS-R-4）において，地層処分施設に関する情報の入手可能性を維持するための措置の 1 つとして示されている位置標識。

未固結堆積物

礫，砂，泥などの堆積物が固結していない状態にあるものをいう。

【ヤ行】

余裕深度処分

一般的であると考えられる地下利用に対して十分な余裕を持った深度（例えば，地表から 50～100m 程度）に埋設する処分を指す。

【ラ行】

レファレンスケース

「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－，JNC，平成 11 年」や「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－電気事業連合会・JNC，平成 17 年」では，処分場の閉鎖後に地下水によって放射性物質が人間の生活環境にもたらされる場合の影響をさまざまな条件で数多くのケースを評価している。これらケースのうち基本的なケースをレファレンスケースという。

レファレンス処分場概念

それぞれの概要調査地区に対して成立性が高いと考えられる処分場概念をレファレンス処分場概念と呼ぶ。より具体的には，技術開発により，この段階までに整備されてきた，人工バリア材料，溶接技術や人工バリアの搬送定置技術などから，サイトの地質環境特性や技術の信頼性などを考慮して，成立性が高い技術を絞り込むが，それらを含む処分場概念のこと。レファレンス処分場概念を設定することにより，精密調査の段階以降の技術開発や実証試験を効率的に進めることができる。

炉規法

核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律。この法律は 1957 年（昭和 32 年）に制定され，核原料物質，核燃料物質および原子炉に関し，（１）平和利用に限定，（２）計画的利用実施の確保，（３）災害防止と安全確保，を図るための規制を定めている。また，国際規制物資に関し，原子力の研究，開発および利用に関する条約，その他の国際約束を実施するための規制を定めている。2007 年に改正され，高レベル放射性廃棄物などの埋設による最終処分に係る安全規制が盛り込まれた。

【A～Z 行】

EBW 溶接

電子ビーム溶接法：EBW（Electron Beam Welding）は，真空中で形成した電子ビームを照射した際の衝突発熱により，材料を溶融接合させる方法である。熱の集中性が高く，溶接速度も速いため，

低入熱で熱影響部の極めて狭い溶接が可能である。真空中で溶接材料を用いず直接母材を溶融接合するため，空間や溶接材料からの不純物混入の可能性も少ない。予熱の必要がなく，一度に深い溶け込みが得られるため作業能率も高い。比較的厚肉の場合でも高品質な溶接が短時間で可能であり，オーバーパック封入方法の有力な候補の一つと考えられる。

FEP

地層処分システムに影響を及ぼすと考えられるシステムの特質（Feature），そこで生ずる事象（Event）や過程（Process）をいう。

GIS

GIS（Geographic Information System，地理情報システム）とは，「地理的位置を手がかりに，位置に関する情報を持ったデータ（空間データ）を総合的に管理・加工し，視覚的に表示し，高度な分析や迅速な判断を可能にする技術」。例えば，位置情報を使ってすべての情報をまとめ，地図や航空写真の上にその情報を重ね合わせることで，さまざまな情報の関連性が一目でわかるようになり，これまでには想像できなかった新しい情報が得られるとともに，空間的な関係を視覚的にわかりやすい形で表現できる。

ITC（School of Underground Waste Storage and Disposal）

放射性廃棄物の処分に必要な人材を養成するため，2003 年，スイスに設立された非営利の国際教育研修機関。放射性廃棄物の地層処分計画を進める 16 ヶ国において政策決定，事業実施，安全規制，研究開発などを担う 61 の組織を法人会員とする。ITC はこれまでに欧州をはじめ，米国，日本などにおいて年数回，科学技術，社会科学など多様な分野で 1～2 週間程度の研修コースを年数回開催してきており，これまでの受講者は 43 カ国から 600 名を超えている（2010 年 3 月末現在）。
ITC School: http://www.itc-school.org/

MAG 溶接

オーバーパック溶接技術オプションの一つ。アーク溶接技術の一種で，シールドガス（溶接部が大気と触れるのを防ぐ）に不活性ガスと炭酸ガスを混合したものを使用して溶接する方法。

MIG 溶接

オーバーパック溶接技術オプションの一つ。アーク溶接技術の一種で，シールドガス（溶接部が大気と触れるのを防ぐ）にアルゴンやヘリウムなどの不活性ガスのみを使用して溶接する方法。

MOX 燃料

MOX 燃料（Mixed Oxide Fuel の略）のこと。ウランとプルトニウムを混合させて作られる燃料。

PEM 方式

高レベル放射性廃棄物の人工バリア施工方法の一つで，地上施設であらかじめ廃棄体を含むオーバーパック，緩衝材を専用の容器内に施工し，一体化したものを地下施設に定置する方法。PEM は，Prefabricated Engineered barrier system Module の略語。

THMC

熱－水－応力－化学連成挙動の略。廃棄体定置後のニアフィールドにおいて，熱，水理，応力，化学のプロセスが相互に作用して起こる挙動をいう。ニアフィールドでは，ガラス固化体からの発熱に伴う温度変化，周辺岩盤から緩衝材への地下水の浸入，緩衝材の膨潤に伴う応力，地下水と緩衝材の構成鉱物などとの化学反応が相互に作用することが想定され，これを同時に取り扱うために熱－水－応力－化学連成挙動のモデル化が行われる。

TIG 溶接

オーバーパック溶接技術オプションの一つ。アーク溶接技術の一種で，タングステン電極からアークを出し，不活性ガス中で溶接する方法。

TRU 廃棄物

再処理工場や MOX 燃料工場の操業および解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物。ウランより原子番号が大きい放射性核種（TRU 核種 : Transuranium nuclides）を含む廃棄物であることから TRU 廃棄物と呼ばれる。TRU 廃棄物は，使用済燃料の燃料被覆管（ハル）や使用済み燃料集合体の末端部分（エンドピース），放射性ヨウ素を除去するために使用した使用済みの銀吸着材（廃銀吸着材），使用済燃料の溶解などに用いられたプロセス濃縮廃液，施設内で使用されるゴム手袋（難燃性廃棄物），工具，金属配管（不燃性廃棄物）などの雑固体廃棄物など，施設の操業に伴い発生する廃棄物（操業廃棄物）や，配管や設備などの施設の解体に伴い発生する廃棄物（解体廃棄物）などさまざまなものを含む廃棄物である。この TRU 廃棄物の中で「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」により定められた「物または定められた放射性物質についての放射能濃度を超えるもの」を含む廃棄物が，地層処分対象となる「地層処分低レベル放射性廃棄物」となる。

what if

極端なあるいは物理的にはありえないようなシナリオをあえて想定して解析を行うこと。What-if 解析を行う目的は，そのようなことが起きたとしても影響が小さいことを示すことによって，さまざまな不確実性を内包するシステムに対して強力に頑健性を論証することである。一般にシナリオに伴う不確実性の評価は容易ではないが，想定されるシステムの変遷を包絡するようにシナリオが設定されていることを確かなものとするという観点で，極端な（あるいは物理的にはありえないような）”what-if”シナリオを含めるといった対応を行うことが可能であることが平成 17 年取りまとめ（JAEA）でも示されている。