



日本原子力学会ウェビナー 「放射性廃棄物の管理」

高レベル放射性廃棄物の処分（その3）
セーフティケース

2022年 2月 10日

原子力発電環境整備機構（NUMO）技術部

藤山 哲雄



地層処分に係る本ウェビナーでの説明内容

第5回（2021年12月23日）

「高レベル放射性廃棄物の地層処分（その1）：その考え方」

- なぜ地層処分か？－国際的共通認識となった経緯
- わが国における地層処分計画の概要、NUMOの取り組み

第8回（2022年1月27日）

「放射性廃棄物処分と地質環境」

- 地層処分において地質環境に求められる要件や安全機能
- 地層処分における「安定な地質環境」の意味
- 地質環境の長期変動の評価に関するJAEAの研究

第9回（2022年2月3日）

「高レベル放射性廃棄物の処分（その2）：処分場の設計に係る現状と諸課題」

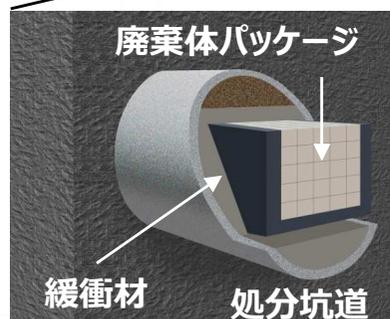
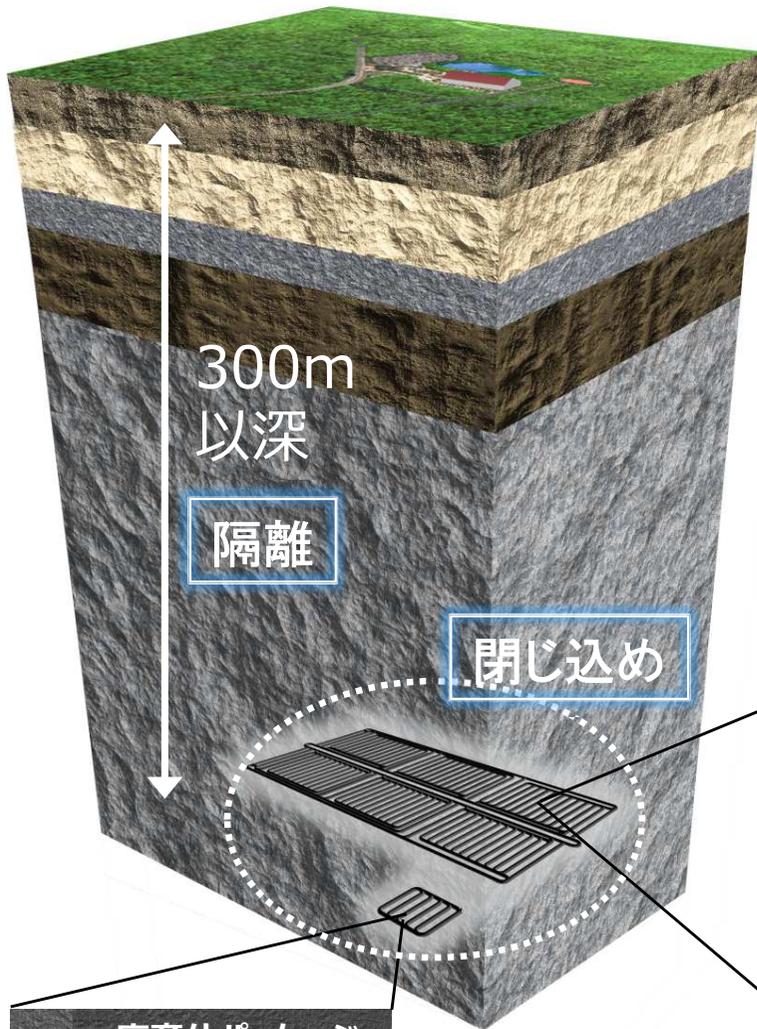
- 包括的技術報告書で示した処分場設計の考え方と今後の取り組み

第10回（本日）

「高レベル放射性廃棄物の処分（その3）：セーフティケース」

- 包括的技術報告書で示した処分場の安全評価の考え方と今後の取り組み
- セーフティケースとしての包括的技術報告書の役割

地層処分システムの基本概念



TRU等廃棄物
(19,000m³以上)

ガラス固化体
(4万本以上)

ガラス固化体

オーバーパック
(金属製の容器)

緩衝材
(ベントナイト)

岩盤

多重バリアシステム

- 放射性物質をガラス構造に取り込む
- 水に溶けにくい

- 放射能が高い期間、地下水とガラス固化体の接触を防止

- 水を容易に通さない
- 放射性物質を収着し移動を遅らせる

- 放射性物質を収着し移動を遅らせる

人工
バリア

天然
バリア

将来、地下水に溶けた放射性物質が地表に到達するとしても非常に長い時間がかかり、その間に放射能が減衰し、将来の人間が放射線の影響を受けるリスクは十分低くなる

安全確保のための基本方針

① 適切なサイトの選定

- 処分場に重大な影響を与える可能性のある自然現象（活断層や火山活動、著しい隆起・侵食など）が及ぶ範囲を回避
- 放射性廃棄物を長期間にわたって隔離し、閉じ込めるために必要な特性を備えた地質環境であることを確認

② 安全性に余裕をもたせた処分場の設計

- サイトの地質環境の特徴とその将来の変化を考慮して、安全性に余裕を持たせた処分場（地上施設・人工バリア・地下施設など）を設計

③ 解析による安全性の確認（安全評価）

- 処分場の閉鎖前：多重の安全対策が機能しないという異常状態を想定した解析によって放射線影響を評価
- 処分場の閉鎖後：将来、処分場の安全性を損なう可能性のあるさまざまな事象が起こることを想定し、処分場から放射性物質が地表に到達とした場合の人間への放射線影響を解析によって評価
- 放射線影響が許容できる範囲（規制機関が示す安全基準）に収まる場合は安全と判断、収まらない場合は処分場の設計の見直しやサイトの変更などを実施

包括的技術報告書の構成（2021年2月公表）

■ 第1章：報告書作成の背景と目的

■ 第2章：安全確保の基本的な考え方

- 地層処分事業の概要
- 安全確保のための基本方針

わが国の多様な地質環境を対象に
NUMOがどのように安全な地層処分を
実現しようとしているのかを説明したもの
(サイトを特定しないセーフティケース)

■ 第3章：適切な地質環境の選定技術、わが国の地質環境のモデル化

- 適切な地質環境を選ぶための方法、調査・評価技術の提示
- 全国規模の情報に基づく地下深部に広く分布する岩種に対する地質環境モデルの作成

■ 第4章：処分場（人工バリア、地上・地下施設）の設計と工学技術の提示

- 処分場の設計技術の提示
- 地質環境モデルに対する処分場の設計の実施
- 設計した処分場を建設・操業・閉鎖する工学技術の提示

■ 第5章、第6章：処分場が安全に機能することの確認（安全評価）

- 処分場の閉鎖前および閉鎖後の安全性を評価する技術の提示
- 設計した処分場に対する安全評価の実施

■ 第7章：技術的な信頼性に関する議論と今後の取り組み

- 技術的信頼性の確認と今後の取り組み

■ 第8章：まとめ

地質環境モデル (Site Descriptive Model) とは

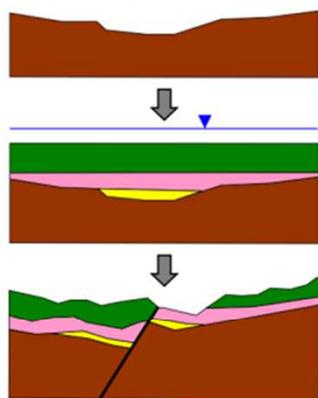
調査で得られた地質環境の情報・データに基づいて、**サイトの地質構造や熱・力学・水理・化学的な特性の空間的な分布や時間的な変化を表現したもの**



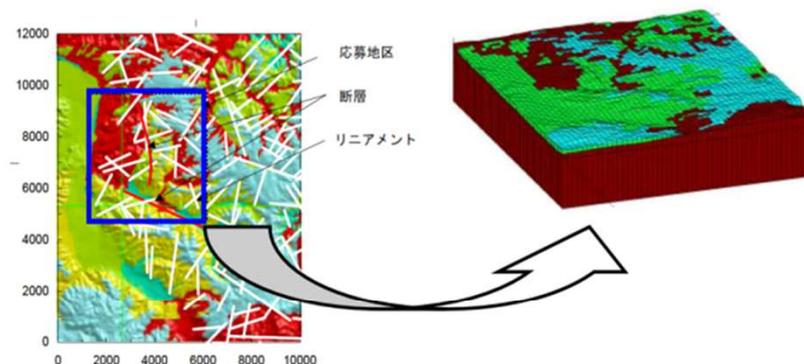
処分場の設計および安全評価を行うための「場」となる

特定のサイトを対象としない包括的技術報告書では、JAEA 幌延・瑞浪を含む全国で得られている最新の地質環境情報をもとに、わが国の地下深部に広く分布する3岩種に対する地質環境モデルを作成

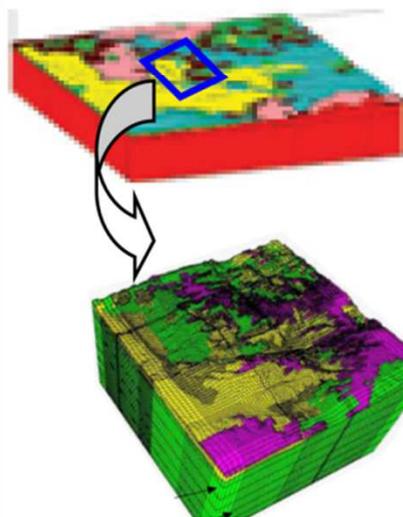
地質構造の概念モデル
(地質構造発達史)



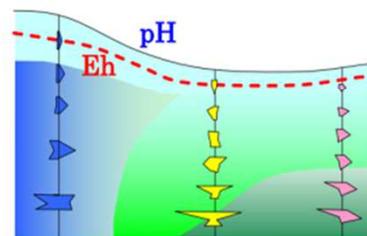
地質構造モデル



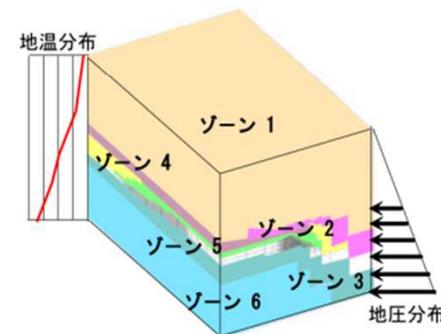
水理地質構造モデル



地下水化学モデル



岩盤特性モデル

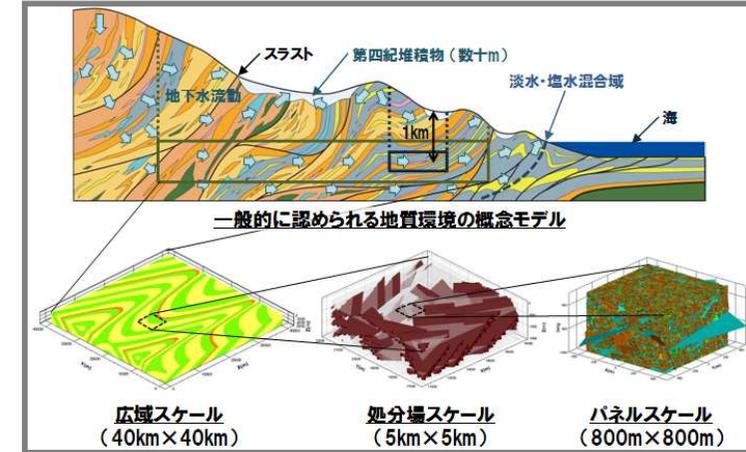
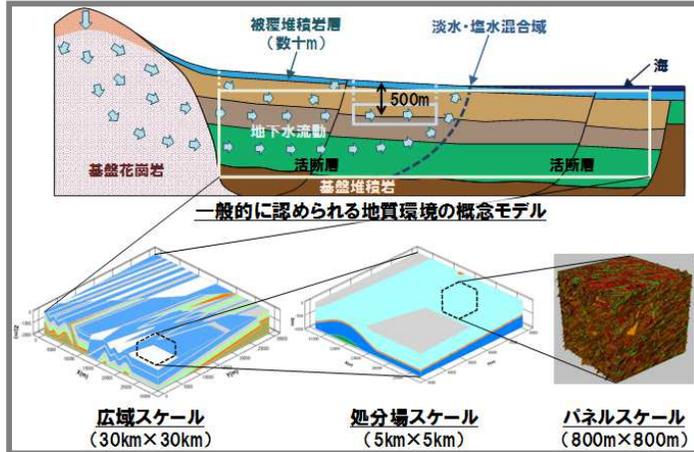
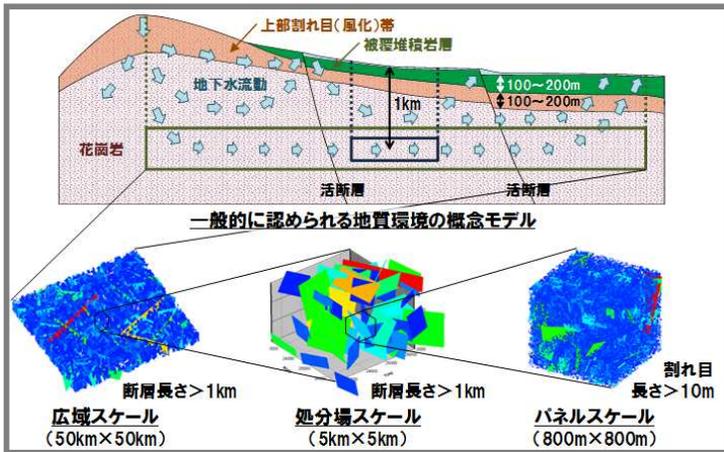


地質環境モデルと人工バリアの設計

深成岩類 (モデル水質: 2種類)

新第三紀堆積岩類 (モデル水質: 2種類)

先新第三紀堆積岩類 (モデル水質: 2種類)

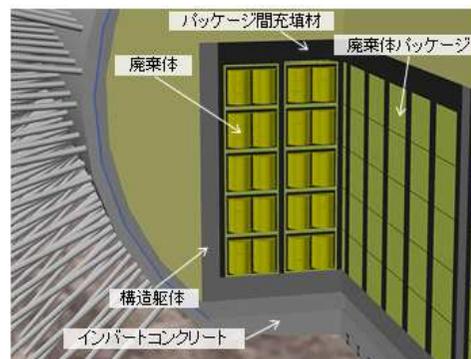
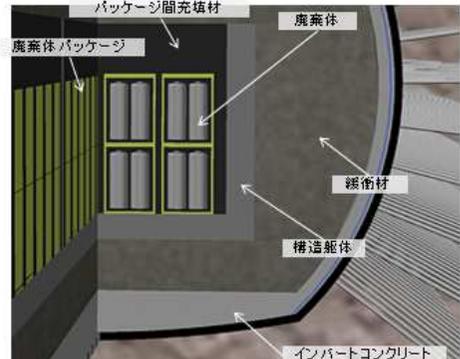
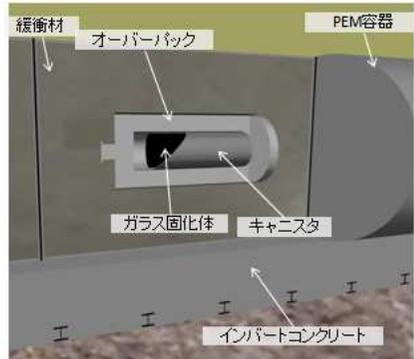
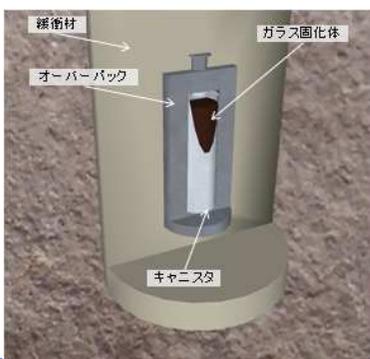
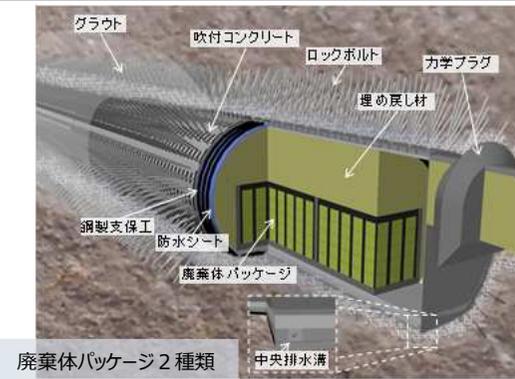
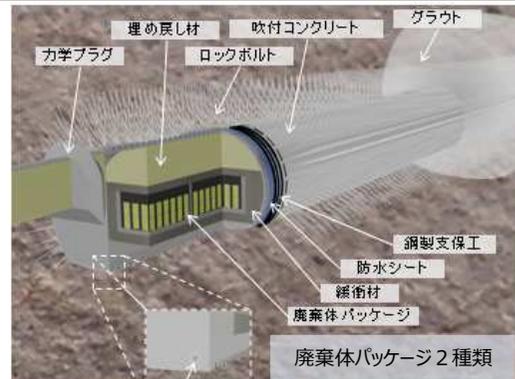
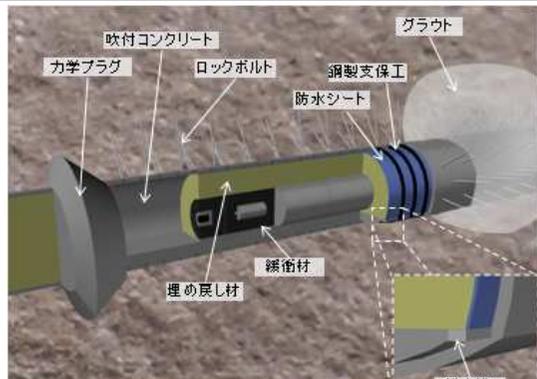
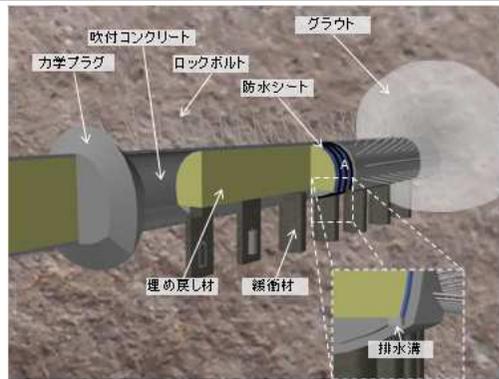


HLW 縦置き・ブロック方式

HLW 横置き PEM方式

TRU等廃棄物 (緩衝材有り)

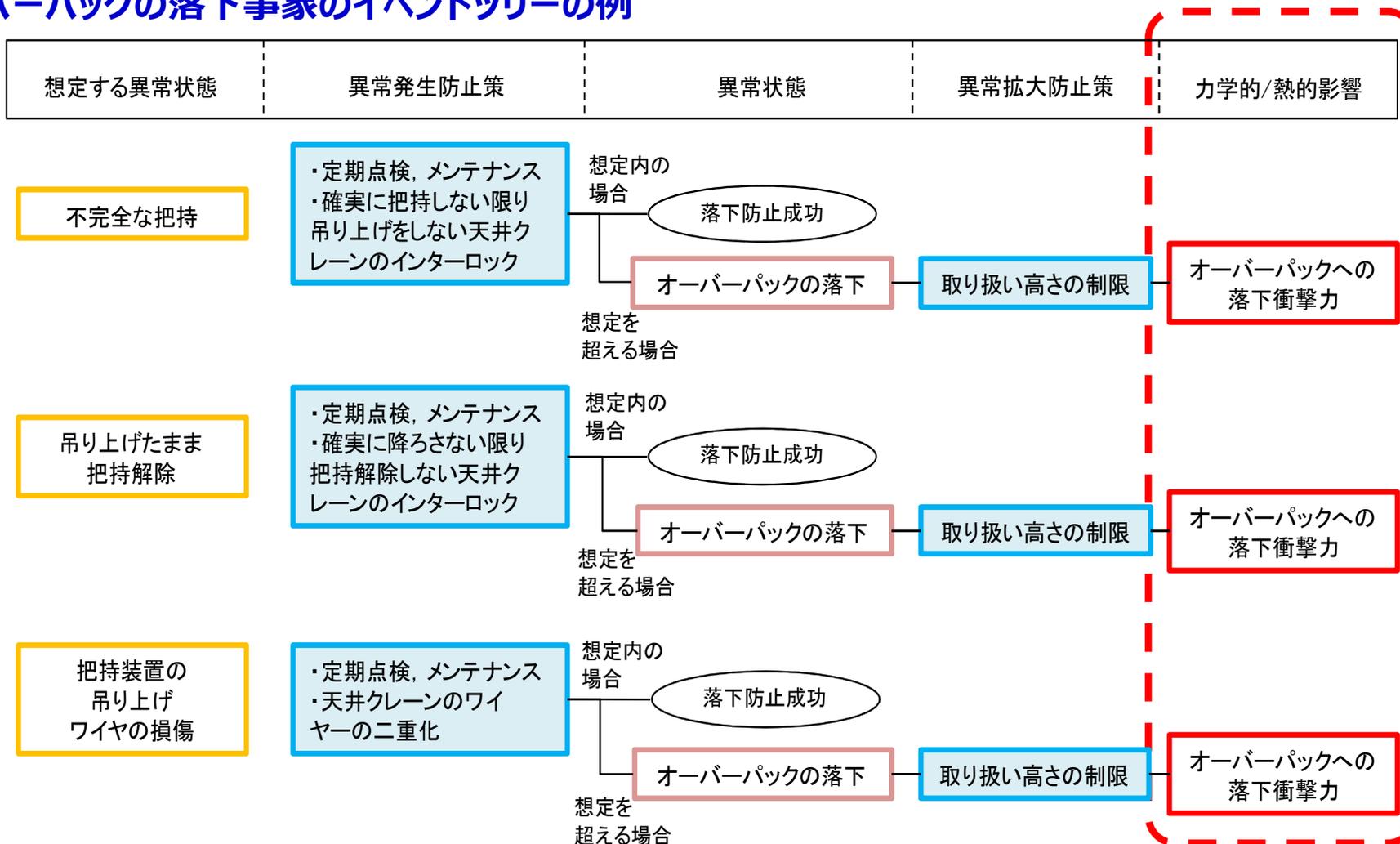
TRU等廃棄物 (緩衝材無し)



処分場閉鎖前の安全評価（シナリオの設定）

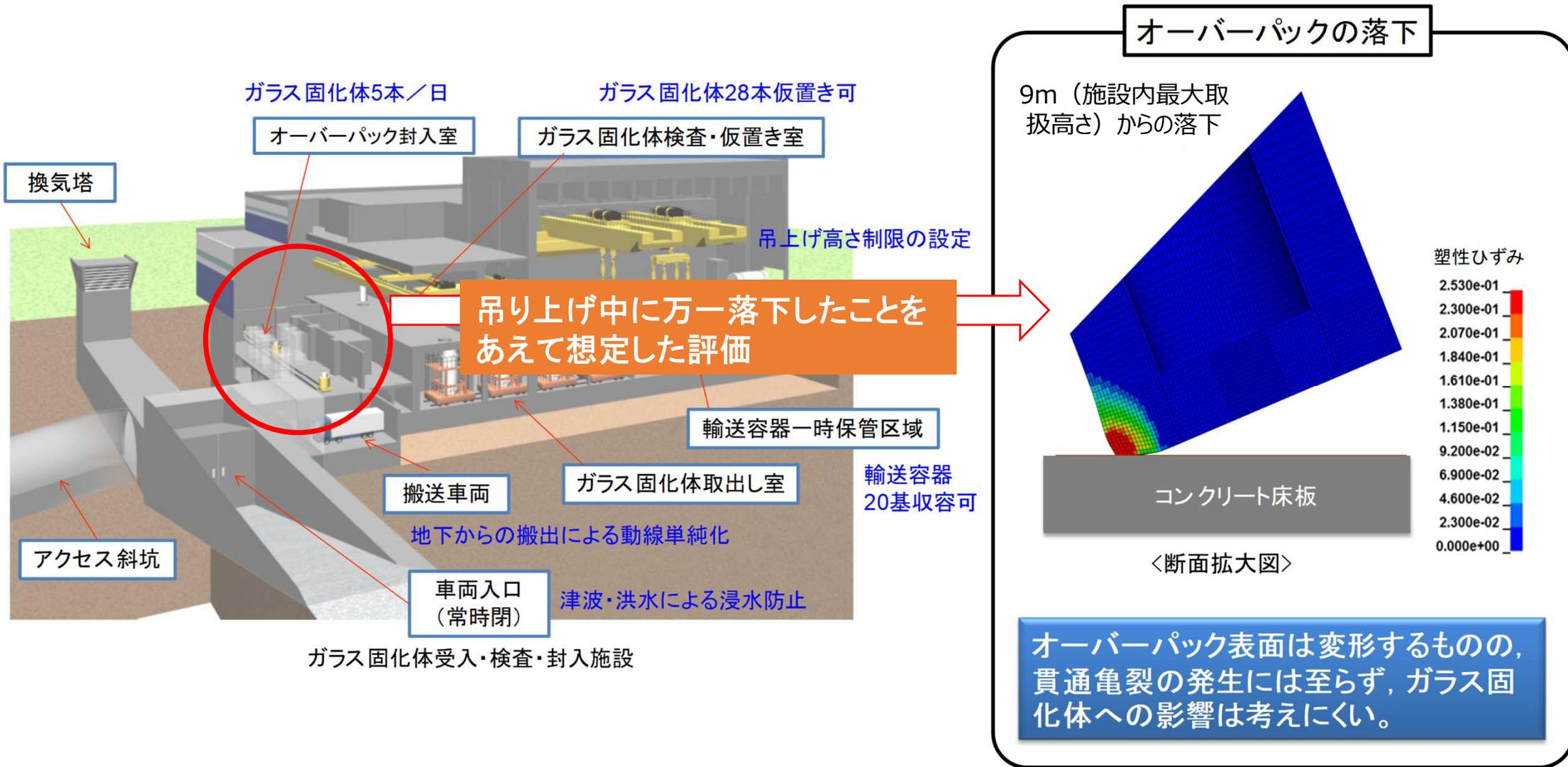
■ 施設内に異常事象が発生し、設計した多重の安全対策があえて無効化することを想定したシナリオの抽出

オーバーパックの落下事象のイベントツリーの例



処分場閉鎖前の安全評価（影響評価の例）

■ 異常状態を想定したシナリオに対して放射線影響の大きさを評価



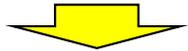
地上施設におけるガラス固化体の異常状態の評価事例

処分場閉鎖後長期の安全評価の手順

地質環境モデルと
設計した処分場の仕様



処分場のふるまいの推定



安全評価シナリオの設定



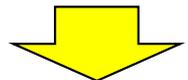
核種移行解析モデル・データの
設定



放射性核種の移行量の計算



生活圏での被ばく線量計算



安全性の考察



- ◆ 最新の科学的知見に基づくシステムの理解
- ◆ 不確実性を考慮して、安全評価上のシナリオを幅広く設定
- ◆ 地質環境の不均質性や人工バリアの三次元形状などを反映
- ◆ 不確実性を考慮して、保守性に留意してモデル・データを設定
- ◆ 生活圏モデル（地表環境、被ばく形態等）の設定

線量基準

- 地層処分の規制基準は今後整備
- 包括的技術報告書ではIAEAなど国際的な考え方を参照して設定

安全評価シナリオ区分とめやす線量（包括的技術報告書）

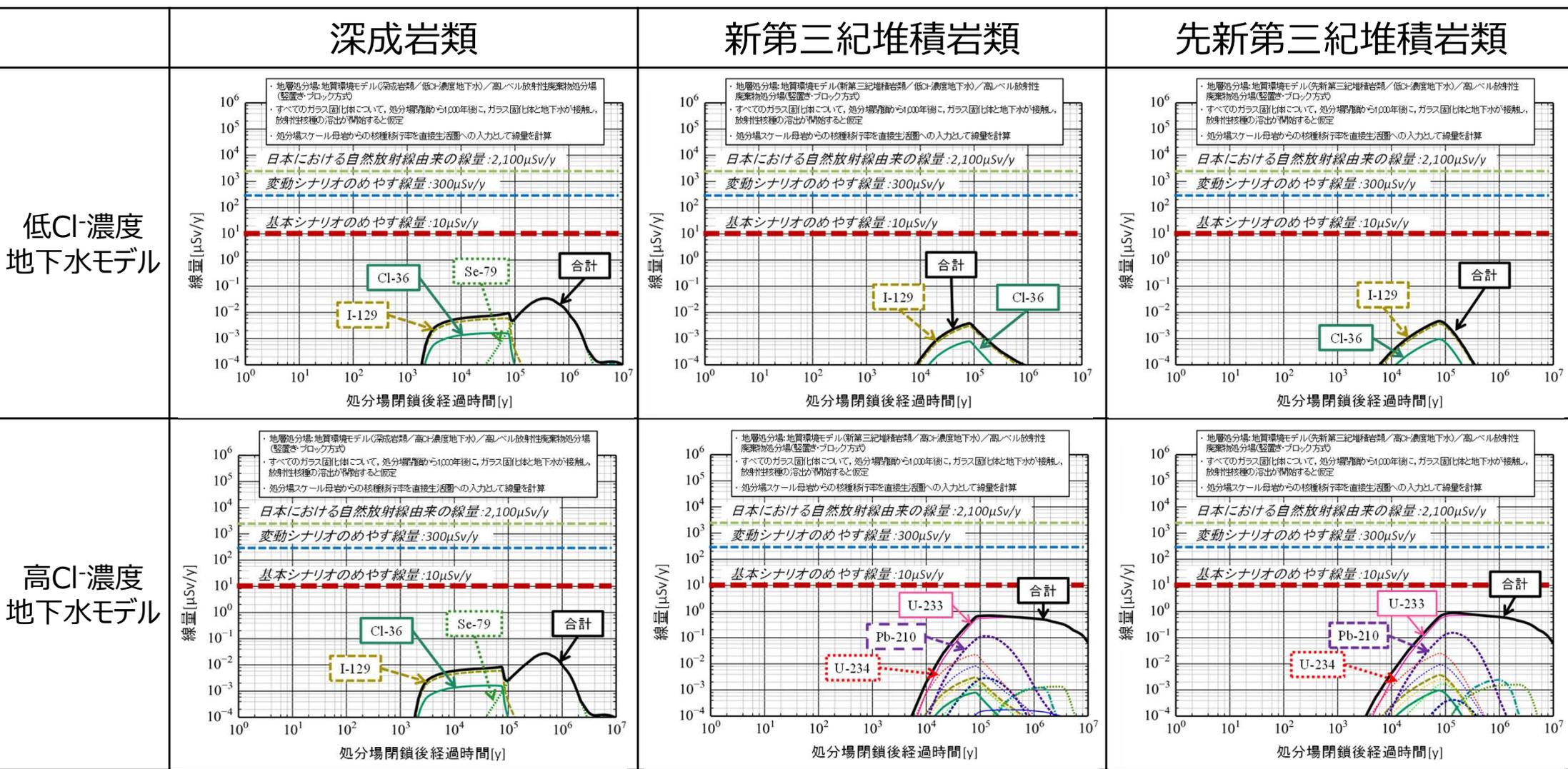
- ICRP(2013)やIAEA(2011)を参照し、発生可能性に応じてシナリオを区分してそれぞれめやす線量を設定
- 計算上最大の線量が現れるまでの時期が確認できるまでを評価期間と設定

シナリオ区分		各シナリオの意味	めやす線量
自然事象	基本シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ● 地層処分システムに対して発生する可能性が最も高いと想定されるシナリオ → もしも被ばくが起きるとすれば発生可能性が高いとみなすべきもの 	<p>安全性確保の水準：300μSv/y ->ICRPの推奨値と同水準</p> <p>基本シナリオに対する事業者としての努力目標：10μSv/y ->諸外国の規制基準の最小値（スウェーデン）と同水準</p>
	変動シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ● 基本シナリオに対して、科学的知見に基づいて合理的に設定できる不確実性を考慮したシナリオ 	<p>著しい影響の水準： 20～100mSv(事象発生1年目) 1～20mSv/y(事象発生2年目以降) ->ICRPが推奨する緊急時被ばくの参考値などと同水準</p>
	稀頻度事象シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ● 発生可能性が極めて小さいと考えられる自然事象にかかわるシナリオ → このようなシナリオを想定したとしても著しい放射線学的影響がないことを示すもの 	<p>著しい影響の水準： 20～100mSv(事象発生1年目) 1～20mSv/y(事象発生2年目以降) ->ICRPが推奨する緊急時被ばくの参考値などと同水準</p>
人間侵入シナリオ		<ul style="list-style-type: none"> ● 偶発的な人間侵入の発生可能性は極めて小さいが、あえて過酷な条件を想定して評価するシナリオ 	<p>著しい影響の水準： 20～100mSv(事象発生1年目) 1～20mSv/y(事象発生2年目以降) ->ICRPが推奨する緊急時被ばくの参考値などと同水準</p>

基本シナリオの評価例（高レベル放射性廃棄物）

- 線量の最大値は約0.9 $\mu\text{Sv}/\text{y}$ （支配核種U-233）（先新第三紀堆積岩類の高Cl濃度地下水のケース）

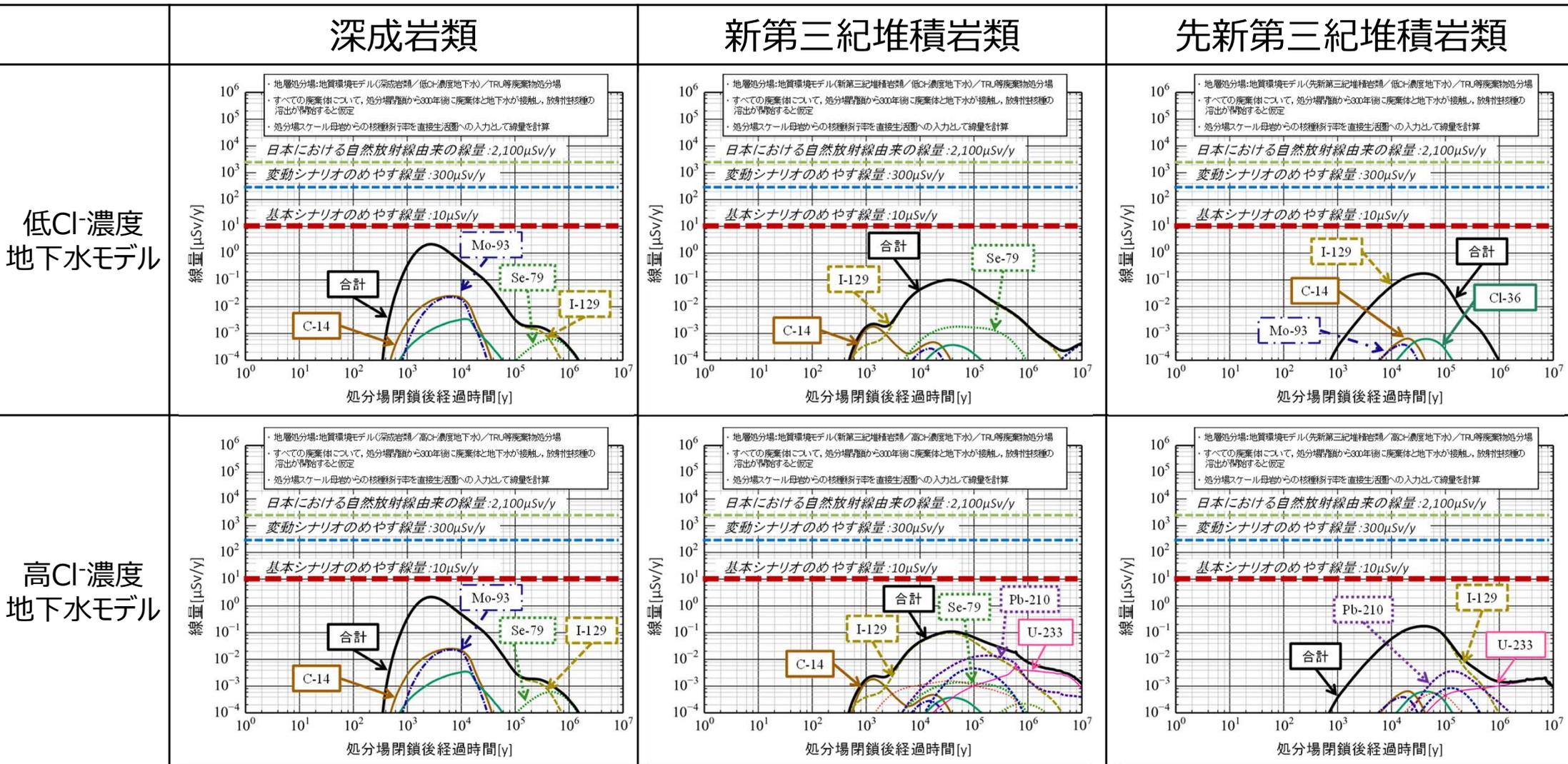
※ガラス固化体4万本分の線量



基本シナリオの評価例 (TRU等廃棄物)

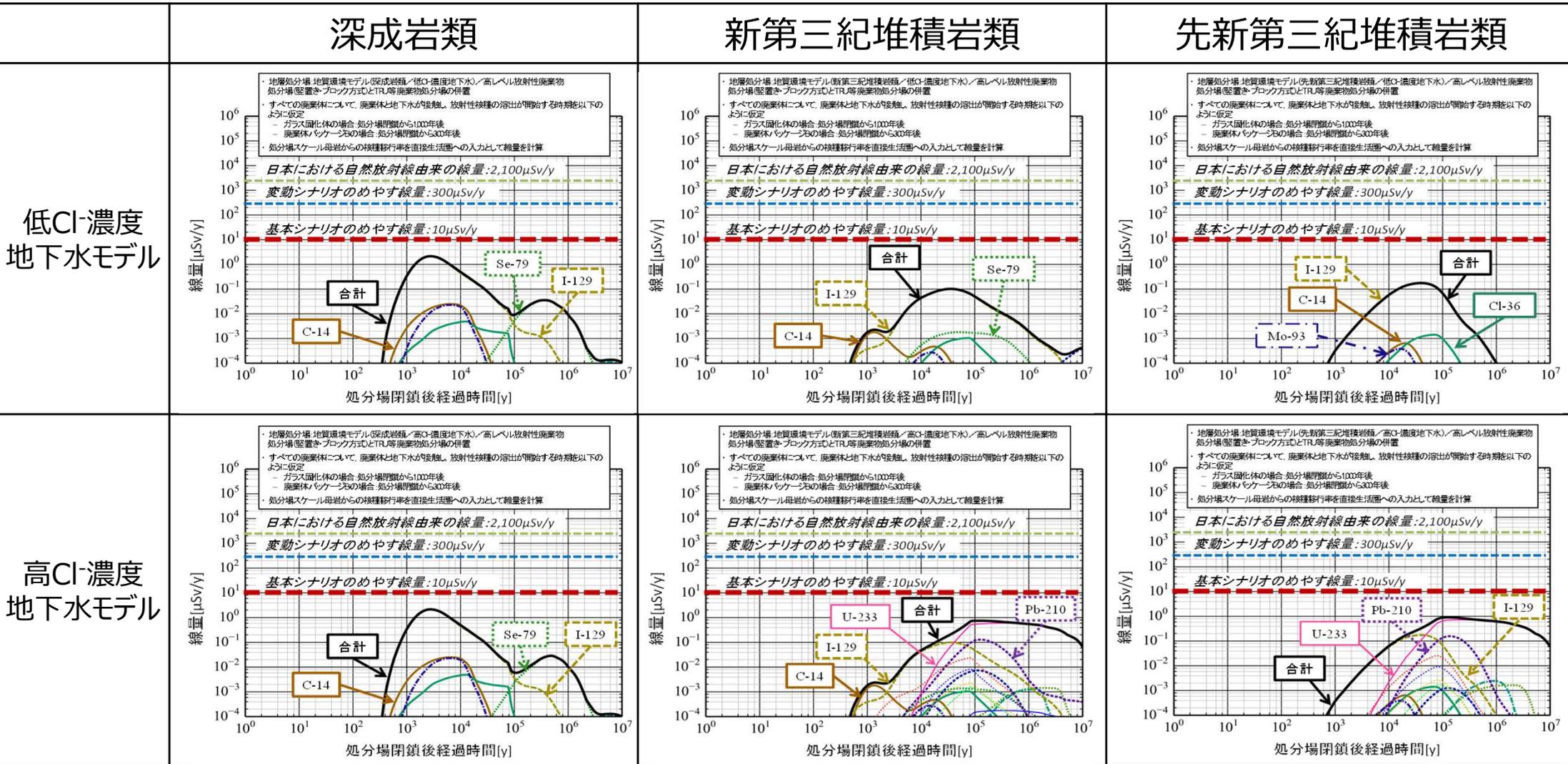
- 線量の最大値は約2 $\mu\text{Sv}/\text{y}$ (支配核種I-129) (深成岩類のケース)

※TRU廃棄物19,000 m^3 分の線量



基本シナリオの評価例（高レベル放射性廃棄物+TRU等廃棄物）

- 高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物の併置処分でも、基本ケースの最大線量の評価結果は、「めやす」として設定した目標値年当たり10 μSvを下回る



閉鎖後長期の安全評価に対する解析ケース

基本シナリオの解析

No.	ケース
1	基本ケース
2	ガラス溶解速度の不確実性ケース
3	ハル・エンドピース腐食速度の不確実性ケース
4	構造躯体の劣化に関する不確実性ケース
5	硝酸プルームの広がりに関する不確実性ケース
6	母岩の割れ目の連結性に関する不確実性ケース
7	緩衝材への核種の収着分配係数の不確実性ケース
8	緩衝材中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
9	母岩への核種の収着分配係数の不確実性ケース
10	母岩中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
11	溶解度設定における温度影響の不確実性ケース
12	溶解度制限固相の熱力学データの不確実性ケース
13	新規火山発生の直撃を仮想したケース
14	地下深部からの断層伸展直撃を仮想したケース
15	ボーリング作業従事者の被ばくを仮想したケース
16	ボーリング孔による核種移行経路短絡を仮想したケース

変動シナリオの解析

稀頻度事象シナリオの解析

人間侵入シナリオの解析

変動シナリオの評価例（高レベル放射性廃棄物+TRU等廃棄物）

- 変動ケースの最大線量の評価結果は、いずれも「めやす」として設定した目標値年あたり300 μ Sv（ICRPの勧告している線量拘束値）を下回る

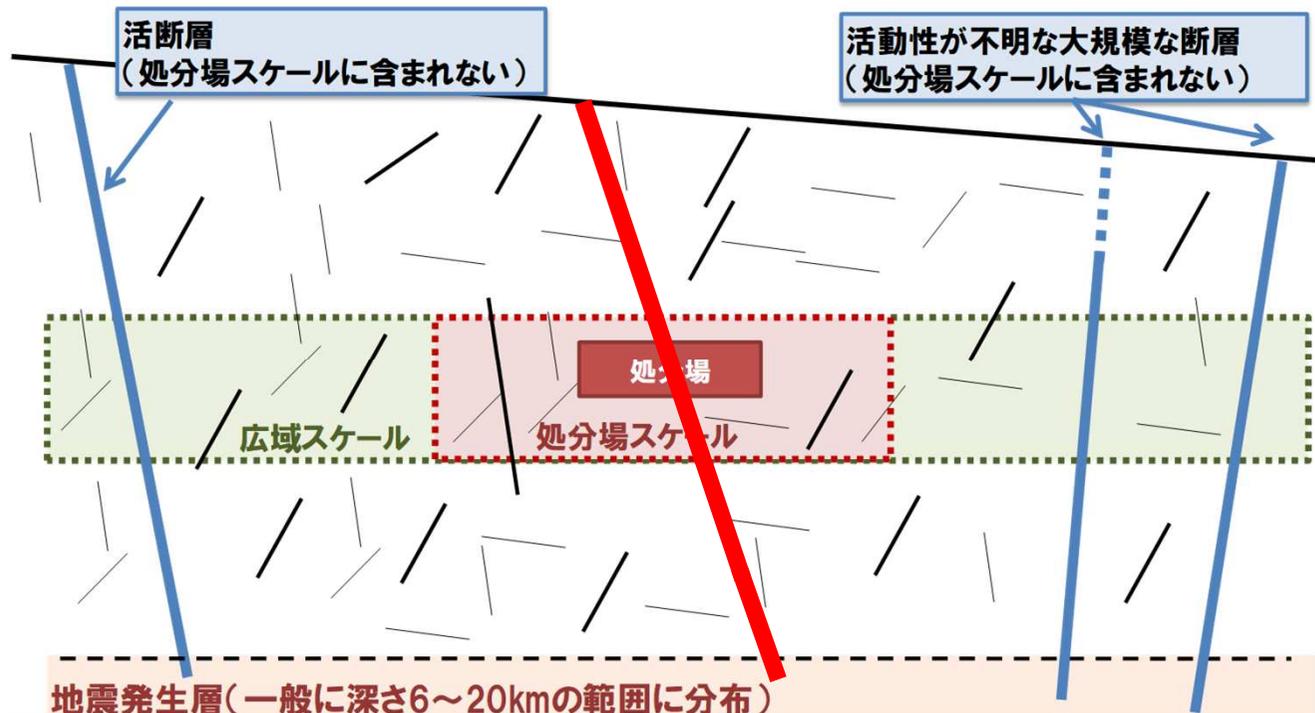
※線量の最大値をプロット

	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
低Cl濃度 地下水モデル			
高Cl濃度 地下水モデル			

稀頻度事象シナリオの評価：断層伸展ケースの例

シナリオの考え方

- 活断層は基本的に同じ場所で繰り返し活動することから、活断層の影響が及ぶ範囲を避けてサイトを選定しておけば、将来もこの影響を受けることは考えにくい
- 地震発生層と呼ばれる深さ6～12kmの地下深部に存在する活断層や、今後成長する断層の全てを把握することは困難
- 地震発生層から伸展してきた断層が処分場（面積25km²）を偶然直撃する確率を試算すると 2.2×10^{-7} （回/年）程度と極めて小さい確率であるが、調査における活断層の見落としなどの可能性も考慮して、1,000年後にあえて起こることを仮定して評価を実施



- 長さ10kmの断層が処分場を直撃し、バリア機能を失った廃棄体から放射性物質が断層を介して地上に移行するモデルを設定
- 線量の評価結果 14 mSv/y
≡ 稀頻度事象シナリオの「めやす」
線量 (1-20 mSv/y)

閉鎖後長期の安全評価に関する今後の取り組み

- サイトや技術オプションの性能比較を可能とするより現実的な性能評価技術の開発
- 安全評価シナリオの作成から解析ケース設定に至る一連の作業の追跡性の向上
- 核種移行パラメータを設定するために必要なデータの継続的な拡充

分類	主な技術開発項目
(1) 地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none">・ ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化・ 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討・ 現象解析モデルの統合化技術の構築 など
(2) リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化	<ul style="list-style-type: none">・ シナリオ構築から核種移行解析ケース設定に用いる情報の管理ツールの整備・ 様々なデータを利用可能なストーリーボードの高度化 など
(3) 地層処分システムの状態変遷などを反映した核種移行解析モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none">・ ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築・ 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化
(4) 施設設計などを反映した核種移行解析モデルの高度化	<ul style="list-style-type: none">・ 施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化・ 地質環境の変遷に応じた生活圈評価手法の高度化
(5) 核種移行などに関するデータの取得およびデータベース整備	<ul style="list-style-type: none">・ 処分場について想定される多様な環境や状態を対象とした核種移行パラメータの設定に資するデータの拡充・ さまざまな生活圈の条件を想定した評価に係るデータの拡充 など

セーフティケース（Safety Case）の役割

数万年以上にわたる安全確保の信頼を確かなものとするため、

- 安全性を支えるありとあらゆる論拠や根拠を体系的に取りまとめたもの
 - ✓ caseの意味：場合、事例、主張の論拠・証拠
 - ✓ safety caseという用語は他の産業分野でも使用
- 安全評価によって安全基準への適合性を示すだけでなく、様々な論拠によって安全性に対する確信の程度（confidence）を提示
 - ✓ ナチュラルアナログや線量以外の補完的指標などによる安全性の傍証
 - ✓ 品質保証、人的資源確保、知識管理など安全確保に必要なマネジメントに関わる戦略やエビデンスの提示
 - ✓ 残された不確実性を特定し、どう対応するか戦略を合わせて提示
- 事業の各段階（処分地の調査、許認可、建設・操業中、閉鎖時など）において、その時点の最新の科学技術的知見に基づき事業者が作成
 - ✓ 段階的に進める事業の節目において、ステークホルダーが「次の段階に進んでよいか？」を判断するための材料を提供
 - ✓ セーフティケースを繰り返し作成し、処分場の安全性に関する説明性を段階的に向上

【参考】IAEAによるSafety Caseの定義

IAEA 安全用語集 (2018)

Safety case: A collection of arguments and evidence in support of the safety of a facility or activity. **施設や作業の安全性を支える論拠と証拠を集めたもの**

- normally include the findings of a safety assessment and a statement of confidence in these findings.
- For a disposal, the safety case may relate to a given stage of development. In such cases, the safety case should acknowledge the existence of any unresolved issues and should provide guidance for work to resolve these issues in future development stages.

IAEA SSG-23 (2012)

1.3 The safety case is the collection of scientific, technical, administrative and managerial arguments and evidence in support of the safety of a disposal facility, covering the suitability of the site and the design, construction and operation of the facility, the assessment of radiation risks and assurance of the adequacy and quality of all of the safety related work associated with the disposal facility.

1.3 **セーフティケースは、処分施設の安全を裏付ける科学的、技術的、経営管理上の論拠ならびに証拠を集めたものであり、サイトの適合性ならびに施設の設計、建設および操業、放射線リスクの評価、そして処分施設と関連するあらゆる安全にかかわる作業の適切性と品質の保証を包含するものである。**

IAEA SSG-23 (2012)

4.6 (中略) the role of the safety case should be to provide:

- Integration of relevant information in a structured, traceable and transparent way that demonstrates an understanding of the behaviour and performance of the disposal system in the period after closure;
- Identification of uncertainties in the behaviour and performance of the disposal system, analysis of the significance of the uncertainties, and identification of approaches for the management of significant uncertainties;
- Demonstration of long term safety by providing reasonable assurance that the disposal facility will perform in a manner that protects human health and the environment;
- Support to decision making in the step by step approach to development of a disposal facility;
- Facilitation of communication between interested parties on issues relating to a disposal facility.

【参考】IAEAによるSafety Caseの役割

IAEA SSG-23 (2012)

4.6 (中略) セーフティケースの役割は以下の事項をもたらすべきものである。

- 閉鎖後の期間における処分システムの挙動及び性能の理解を実証する、構造化された、追跡可能で透明性のある方法で、関連する情報を統合する；
- 処分システムの挙動及び性能における不確実性を特定し、不確実性の重要性を解析し、重要な不確実性の管理のためのアプローチを特定する；
- 処分施設は人の健康と環境を防護するように機能するという合理的な保証を提供することにより、長期の安全を実証する；
- 処分施設の開発の段階的アプローチにおける意思決定を支援する；
- 処分施設と関連する課題について関係者間のコミュニケーションを促進する。

【参考】IAEAによるSafety Caseの役割

IAEA SSG-23 (2012)

4.8 Development of the safety case should commence at the inception of the project and should be continued through all steps in the development and operation of the facility through to its closure and licence termination. The safety case should also be used throughout all steps to guide the site selection process, the facility design, excavation and construction activities, operation of the facility and its closure. It should be used to identify research and development needs, to identify and establish limits, controls and conditions at the various steps, and primarily to provide the basis for the licensing process. It will also be the main vehicle of communication with interested parties, in terms of explaining the safety features and how a reasonable level of safety will be ensured.

4.8 セーフティケースの開発は、プロジェクトの開始時に始めるべきであり、施設の開発及び操業から閉鎖に至るまでのあらゆる段階を通して施設の閉鎖及び許認可の終了まで継続すべきである。セーフティケースはまた、サイト選定プロセス、施設的设计、掘削及び建設活動、施設の操業及びその閉鎖の指針とするために、全ての段階を通して利用されるべきである。セーフティケースは、研究開発ニーズを特定するため、様々な段階での限界、制約及び条件を特定し確立するために、そして主に許認可プロセスの基礎を提供するために利用されるべきである。セーフティケースはまた、安全性の特徴及び合理的なレベルの安全がどのように確保されるのかを説明する観点で、関係者との主たるコミュニケーション手段ともなる。



【参考】 OECD/NEAによるSafety Caseの定義

OECD/NEA (2013) :The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories

A safety case is a formal compilation of evidence, analyses and arguments that quantify and substantiate a claim that the repository will be safe.

セーフティケースは、処分場が安全であるという主張を定量化し実証するための証拠、分析、論拠を体系的に取りまとめたものである。

セーフティケースとしての包括的技術報告書の位置づけ

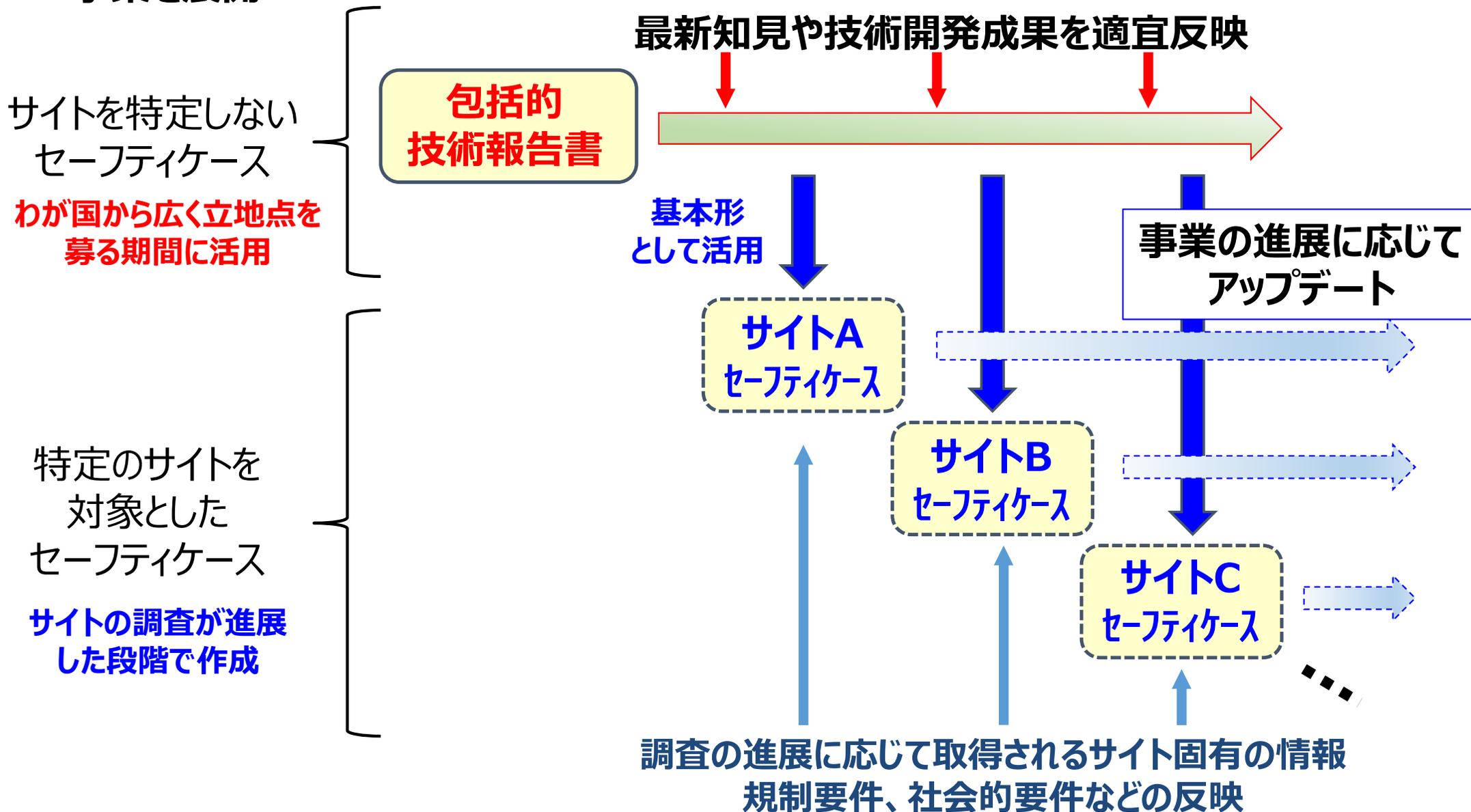
- 最新の科学的知見や技術を統合し、安全な地層処分の実現に向けた技術や、それを支える科学的知見を包括的に提示
- 安全評価により、処分場の閉鎖前および閉鎖後長期の安全性を確保できる見通しを確認
- 特定のサイトを対象として作成するセーフティケースの基本形として活用

今後考慮すべき主な不確実性

	包括的技術報告書における設定	今後考慮すべき条件
放射能インベントリの幅	再処理施設の標準的な設計条件 ガラス固化体貯蔵期間（30年・50年）でインベントリを計算	使用済燃料の燃焼条件や冷却期間の幅、ガラス固化体貯蔵期間の分布など
処分場閉鎖からの過渡的現象	閉鎖後ただちに飽和を仮定して安全評価を実施	再冠水・還元環境回復などの過程を考慮した初期状態の設定
地質環境特性の時間的変遷	適切なサイトにより好ましい地質環境特性が長期にわたり維持される 地下深部に処分施設を設置	気候変動、地表環境の変化、隆起・侵食による岩盤厚さ減少を考慮した地質環境特性の変遷

包括的技術報告書を基本形としたセーフティケースの展開 (イメージ)

- NUMOは文献調査を開始したが、より多くの地域から応募いただけるよう引き続き事業を展開

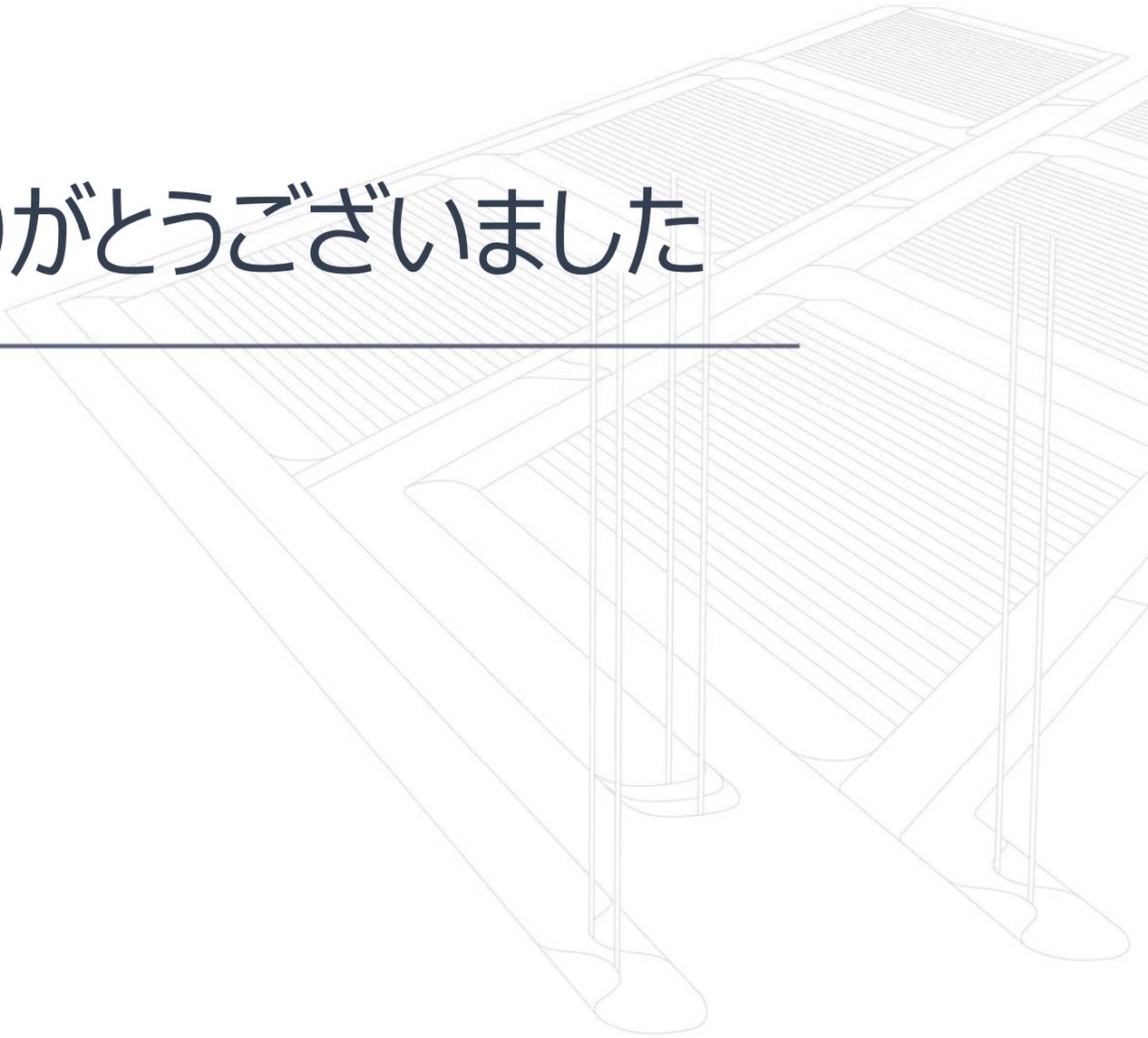


サイトを特定しない
セーフティケース
わが国から広く立地点を
募る期間に活用

特定のサイトを
対象とした
セーフティケース
サイトの調査が進展
した段階で作成



ご清聴ありがとうございました





参考文献

- 原子力発電環境整備機構（2021）：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－， NUMO-TR-20-03.
- IAEA(2011)： Disposal of radioactive waste, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series, No. SSR-5.
- IAEA (2012)： The safety case and safety assessment for radioactive waste, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series, No. SSG-23.
- IAEA (2018)： IAEA Safety Glossary, terminology used in nuclear safety and radiation protection.
- ICRP (2013)： Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste, Publication 122, Annuals of the ICRP, Vol. 42, No. 3.
- OECD/NEA (2013)： The nature and purpose of the post-closure safety cases for geological repositories, NEA/RWM/R(2013)1.
- 田口研治：機能安全とその保証に関する理論的枠組， ZIPC WATCHERS Vol.14, <https://www.zipc.com/jp/assets/download/watchers/vol14-05.pdf>.

【用語解説】

用語	説明
TRU等廃棄物	再処理や MOX 燃料製造に伴って生ずる放射性廃棄物は超ウラン（TRans-Uranic）核種を含むことから、その略称として第2次 TRU レポートなどで用いられた「TRU 廃棄物」という表記が定着している。しかし、TRU 廃棄物には燃料の核分裂により生成する Sr-90、I-129 などの核分裂生成物や使用済燃料の構成材料の放射化により生成する C-14 や Co-60 などの放射化生成物といった超ウラン（TRU）核種以外の放射性核種も含まれることから、「TRU 等廃棄物」と表記した。TRU 等廃棄物は地層処分対象の低レベル放射性廃棄物（第二特定種放射性廃棄物）を指す。
地質環境モデル	地質環境を対象に、現時点で認められる地層や断層などの形状や分布、岩盤の熱的・力学的な性質、地下水の地球化学的な性質、地下水の流動や物質の移行などの性質の状態を可視化したものをいう。また、モデルの構築に用いたデータや解釈の過程などの説明の記述も地質環境モデルに含まれる。

【用語集】

- NUMO包括的技術報告（2021）の「用語集」
<https://scct.numo.or.jp/GeoCom2/faces/content/content10003960/content.xhtml>

【情報サイト】

- NUMO地層処分技術オンライン説明会（改訂した「包括的技術報告書」、2021年開催）
<https://www.numo.or.jp/technology/techpublicity/lecture/210513.html>
包括的技術報告書を、総論と地層処分技術の主要3テーマ（地質環境、処分場設計、長期安全評価）の計4テーマに分けて説明。当日の資料、質疑と回答、説明映像を上記URLに掲載。