

バックエンド研究：現在とこれから

九州大学 稲垣 八穂広

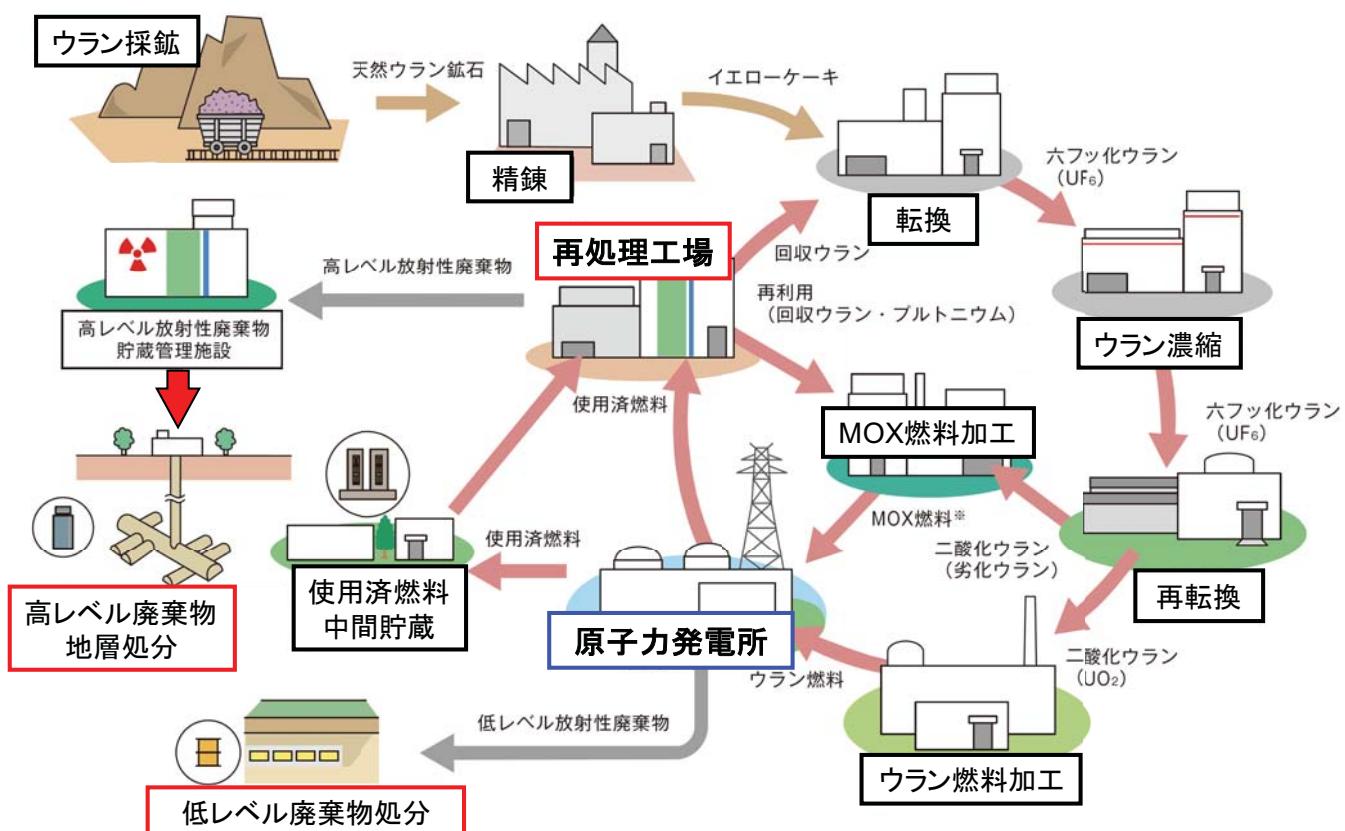
日本原子力学会創立60周年シンポジウム
2019年4月25日

キーワード

- ・バックエンド
- ・核燃料サイクル
- ・連携・統合
- ・分野横断的取り組み
- ・全体最適化

現在の核燃料サイクル(軽水炉サイクル)

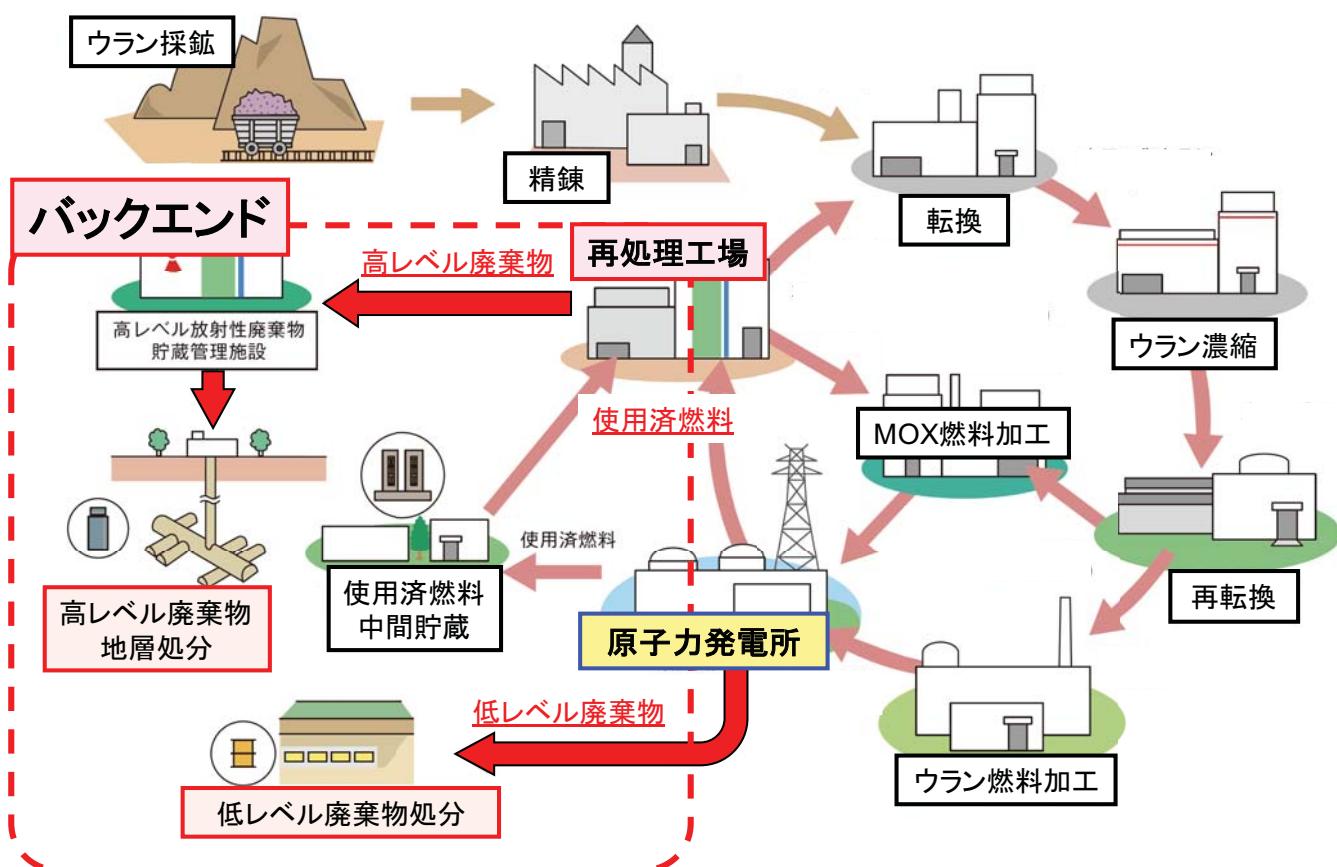
3



出展:原子力・エネルギー図面集2018を基に作成

核燃料サイクルのバックエンド

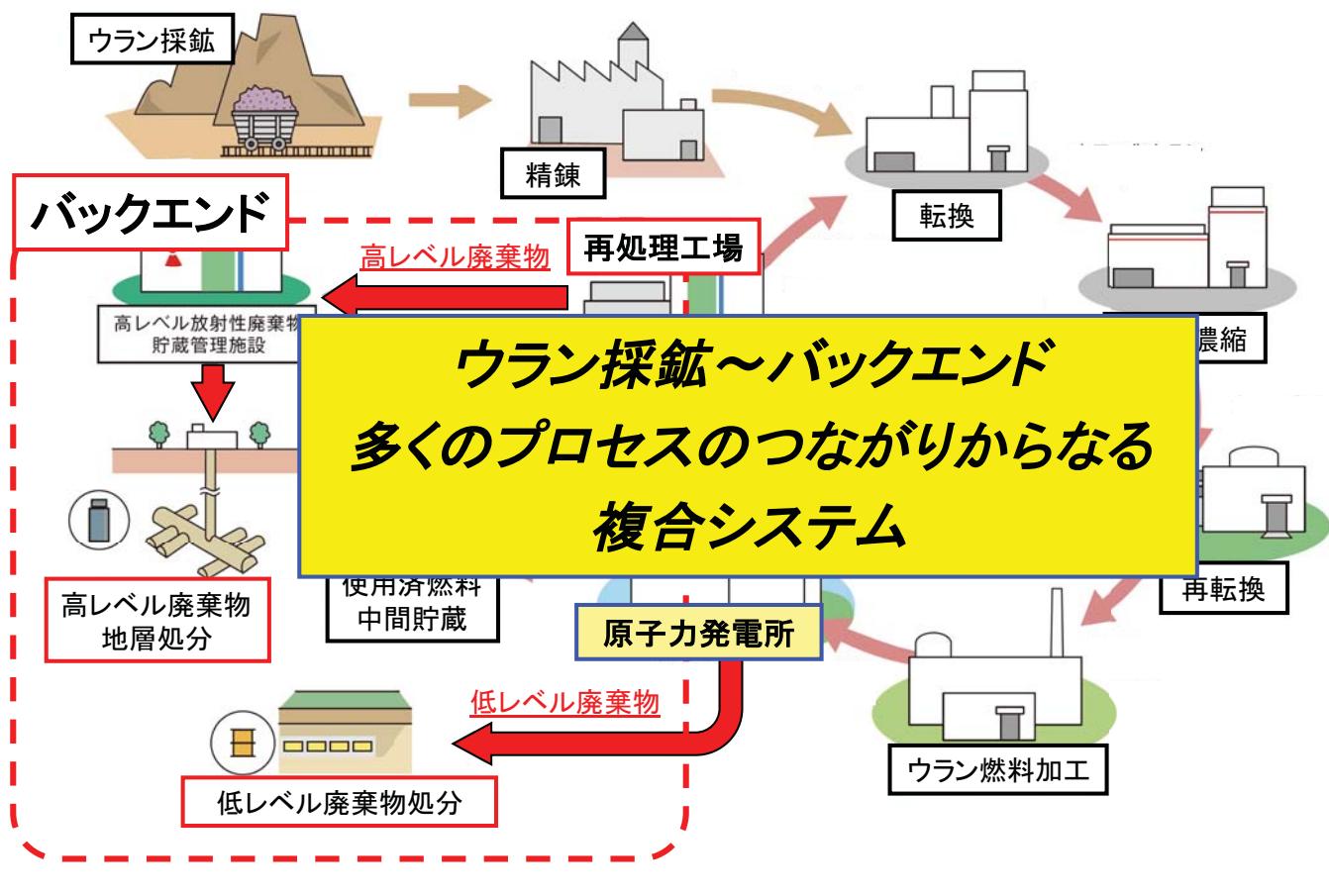
4



出展:原子力・エネルギー図面集2018を基に作成

核燃料サイクルの特徴

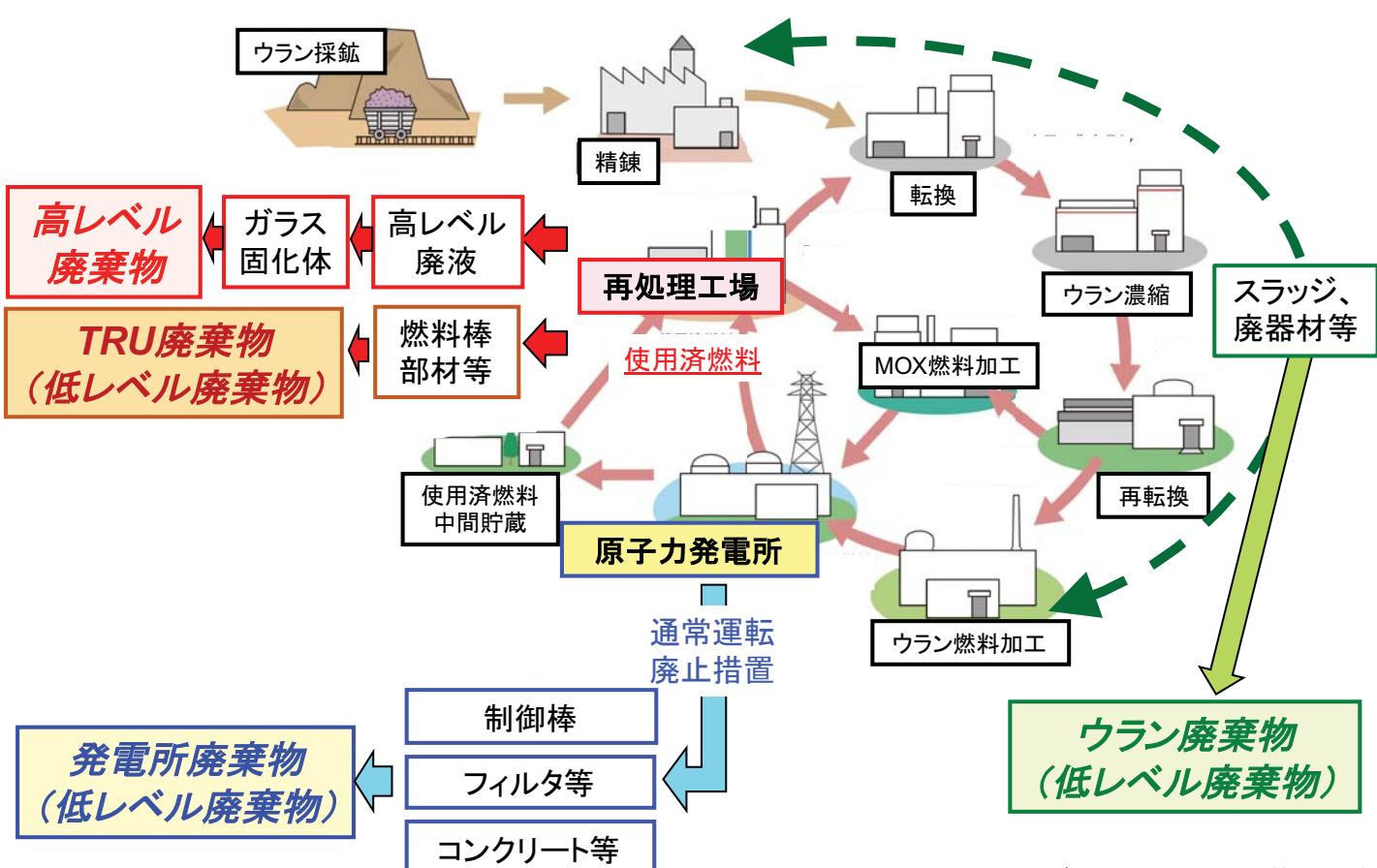
5



出展:原子力・エネルギー図面集2018を基に作成

核燃料サイクルからの放射性廃棄物の発生

6



出展:原子力・エネルギー図面集2018を基に作成

放射性廃棄物の分類

廃棄物の種類		廃棄物の例	発生場所
高レベル放射性廃棄物 HLW		ガラス固化体 (使用済燃料)	再処理施設 (原子力発電所)
低レベル放射性廃棄物 LLW	超ウラン核種を含む廃棄物 (TRU廃棄物)	燃料棒部材、廃液、 フィルタ等	再処理施設 MOX燃料加工施設
	放射能レベルの 比較的高い廃棄物(L1)	制御棒、炉内構造物等	原子力発電所
	放射能レベルの 比較的低い廃棄物(L2)	廃液、フィルタ、廃器材、 消耗品等	
	放射能レベルの 極めて低い廃棄物(L3)	コンクリート、金属等	
	ウラン廃棄物	スラッジ、廃器材、消耗品等	ウラン濃縮・加工施設
	研究施設等廃棄物	廃液、フィルタ、注射器等	医療機関・研究施設
クリアランスレベル以下の廃棄物		コンクリート等、原子力施設 の解体廃棄物の大部分	上記全ての施設

出展:原子力・エネルギー図面集2018を基に作成

放射性廃棄物の発生量(1)

廃棄物の種類		現保有量	2030年代前半までの発生量 予測(筆者推定含む)
高レベル放射性廃棄物 HLW		ガラス固化体:2,482本 放射能:10 ¹⁰⁻¹¹ GBq?	ガラス固化体 約40,000本 放射能:10 ¹¹⁻¹² GBq?
TRU 廃 棄 物	放射性ヨウ素を含む(Gr.1)	200ドラム缶 315本 放射能:未整理?	約320m ³ 放射能:未整理?
	ハル・エンドピース(Gr.2)	200ドラム缶 5278本 放射能:未整理?	約5800m ³ 放射能:未整理?
	濃縮廃液など(Gr.3)	200ドラム缶 29,967本 放射能:未整理?	約5200m ³ 放射能:未整理?
	難燃性及び不燃性廃棄物 (低発熱性:Gr.4L)	200ドラム缶 90,288本 放射能:未整理?	約5400m ³ 放射能:未整理?
	難燃性及び不燃性廃棄物 (発熱性:Gr.4H)	—	約1300m ³ 放射能:未整理?
	未処理の廃棄物	4240m ³ 放射能:未整理?	?

参考資料:NUMO「包括的技術報告書:我が国における安全な地層処分の実現(レビュー版)」(2018)

JNC「地層処分の技術的信頼性(第2次取りまとめ)」(1999)

NUMO「地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性向上に関する検討」(2014)

原子力規制委員会「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約 第6回国別報告」(2017)

放射性廃棄物の発生量(2)

廃棄物の種類		現受入(発生)量	発生量予測(筆者推定含む)
発電所廃棄物	放射能レベルの比較的高い廃棄物(L1)	—	57基の廃止措置:約8,000トン 放射能:未整理?
	放射能レベルの比較的低い廃棄物(L2)	JNFL 1号埋設(許容量200,000本) 200ℓドラム缶 約148,993本 JNFL 2号埋設(許容量200,000本) 200ℓドラム缶 約153,912本 放射能:未整理?	57基の廃止措置:約63,000トン 放射能:未整理?
	放射能レベルの極めて低い廃棄物(L3)	原電東海1号炉:約25,000トン 放射能:未整理?	BWR1基当たり約9,000トン PWR1基当たり約5,000トン 57基の廃止措置:約380,000トン
ウラン廃棄物		200ℓドラム缶 52,810本 放射能:未整理?	?

参考資料: NUMO「包括的技術報告書:我が国における安全な地層処分の実現(レビュー版)」(2018)
 ATOMICA「日本における放射性廃棄物の発生の現状と将来の見通し」(2005)
 日本原燃「埋設事業の概要」「運転情報」(2019)
 原子力規制委員会「使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約 第6回国別報告」(2017)

発生量データ:現時点では充分に整理・統一されていない

- ・単位の整合性(ガラス固化体本数、ドラム缶本数、トン、m³、GBq)
- ・算定方法の明快性(算定条件、算定根拠)、等

放射性廃棄物の発生量評価

廃棄物の処分 → 社会的合意を得て進める事業



廃棄物の「量」と「質」 → 判断・合意のための基本情報



廃棄物発生量データ(インベントリ) → 整理・統一が不充分
なぜ?

- | | |
|------------|-------------|
| ・複数の廃棄物発生源 | ・複数の廃棄物管理組織 |
| ・廃棄物の組織間移行 | ・組織間の連携不十分 |

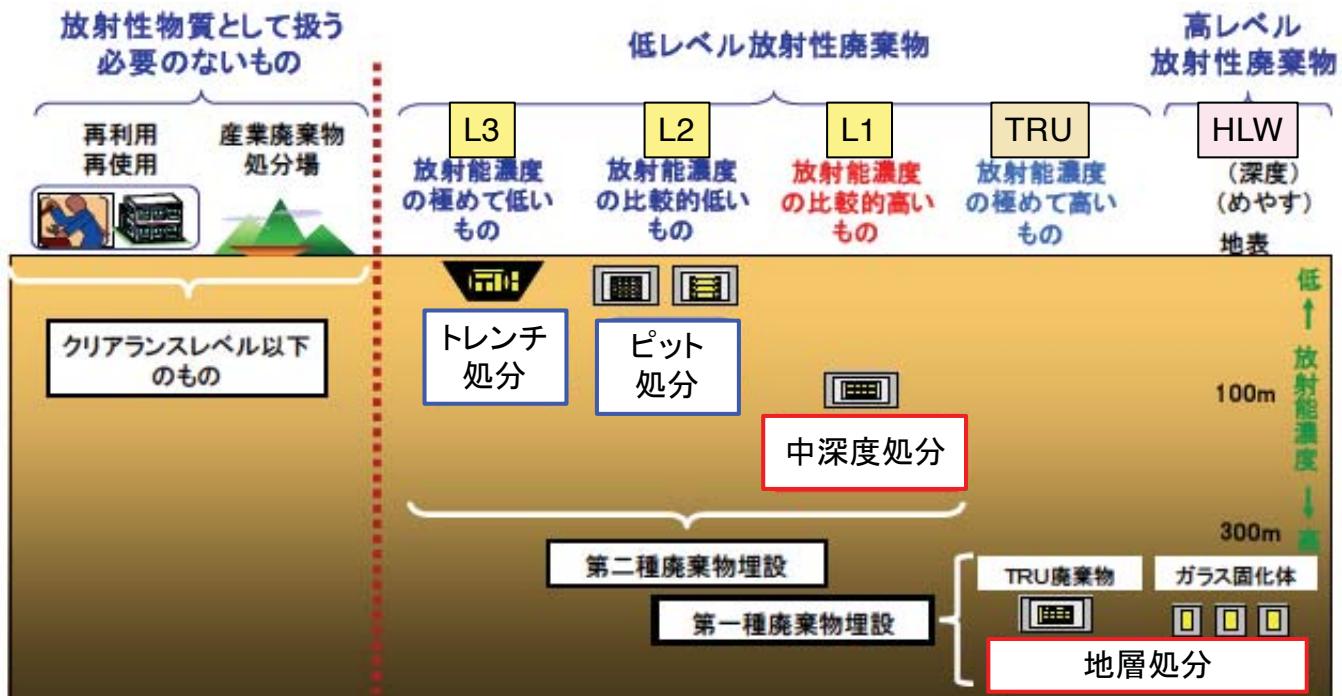


廃棄物発生量(インベントリ)に関する
「情報の一元化」「信頼性の高いデータベース構築」
組織の連携が望まれる

放射性廃棄物の処分概念

【処分】人の能動的関与がなくても安全な状態にすること

廃棄物の種類(放射能レベル等)に応じた処分方法



出展:炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について 原子力規制委員会2016

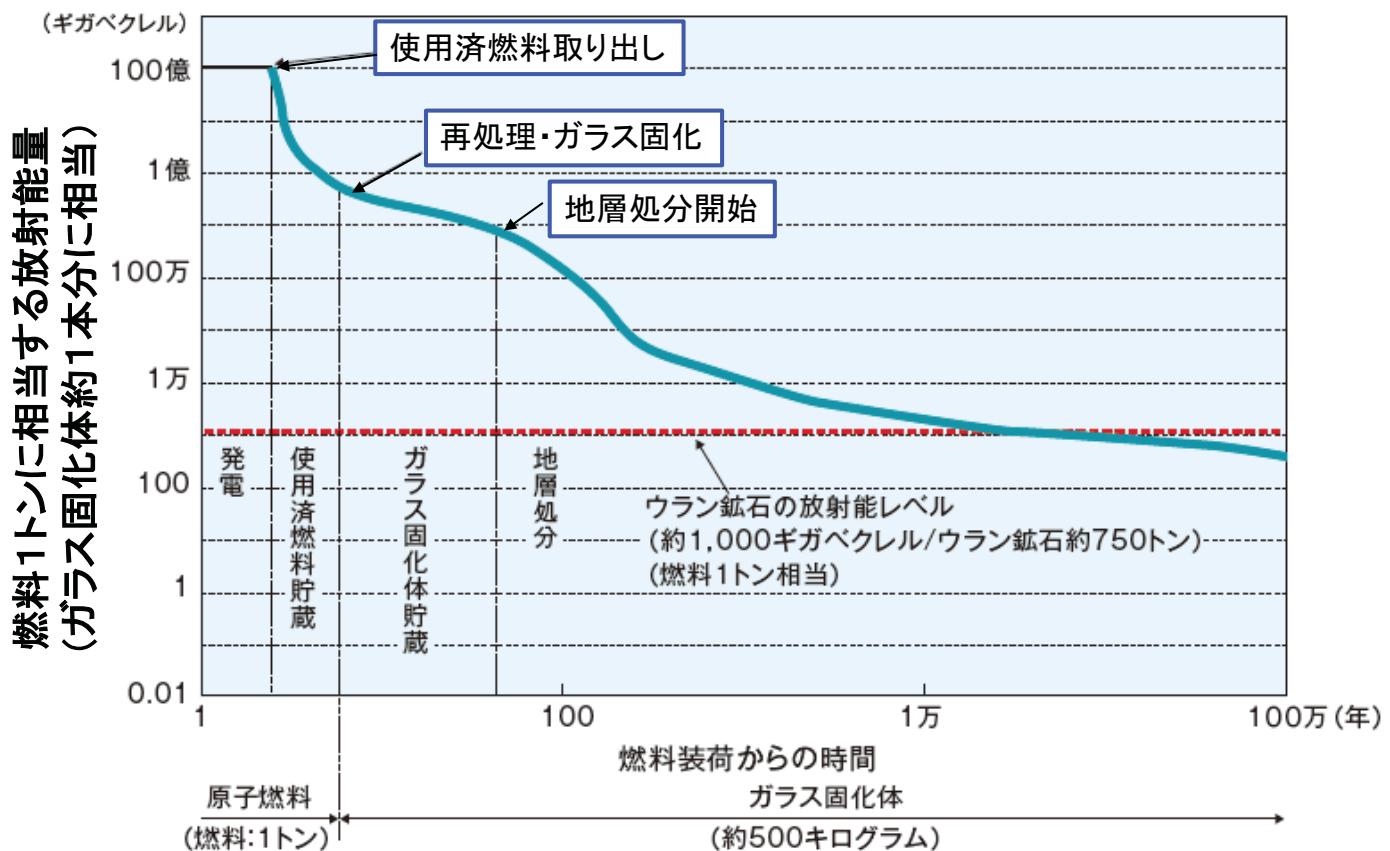
高レベル放射性廃棄物の特徴

廃棄物の種類	廃棄物の例	発生場所
高レベル放射性廃棄物 HLW	ガラス固化体 (使用済燃料)	再処理施設 (原子力発電所)
低レベル放射性廃棄物 LLLW	超ウラン核種を含む廃棄物 (TRU廃棄物)	再処理施設 MOX燃料加工施設
	放射能レベルの 比較的高い廃棄物(L1)	原子力発電所
	放射能レベルの 比較的低い廃棄物(L2)	
	放射能レベルの 極めて低い廃棄物(L3)	
ウラン廃棄物	スラッジ、廃器材、消耗品等	ウラン濃縮・加工施設
研究施設等廃棄物	廃液、フィルタ、注射器等	医療機関・研究施設

高レベル放射性廃棄物

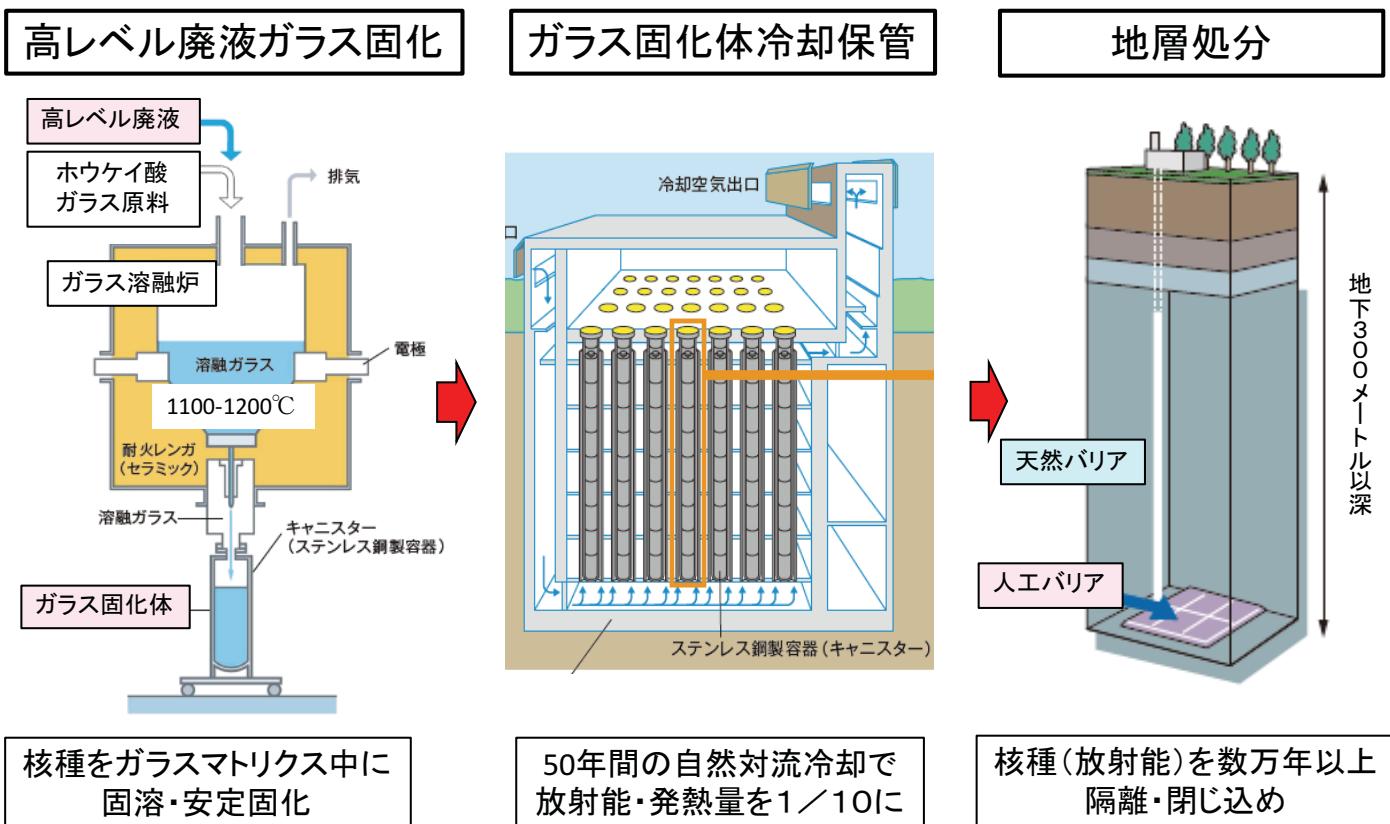
物量(重量、体積)は小さいが、サイクルで発生する全ての廃棄物の放射能総量の大半(~90%)を含有

高レベル放射性廃棄物の放射能の減衰



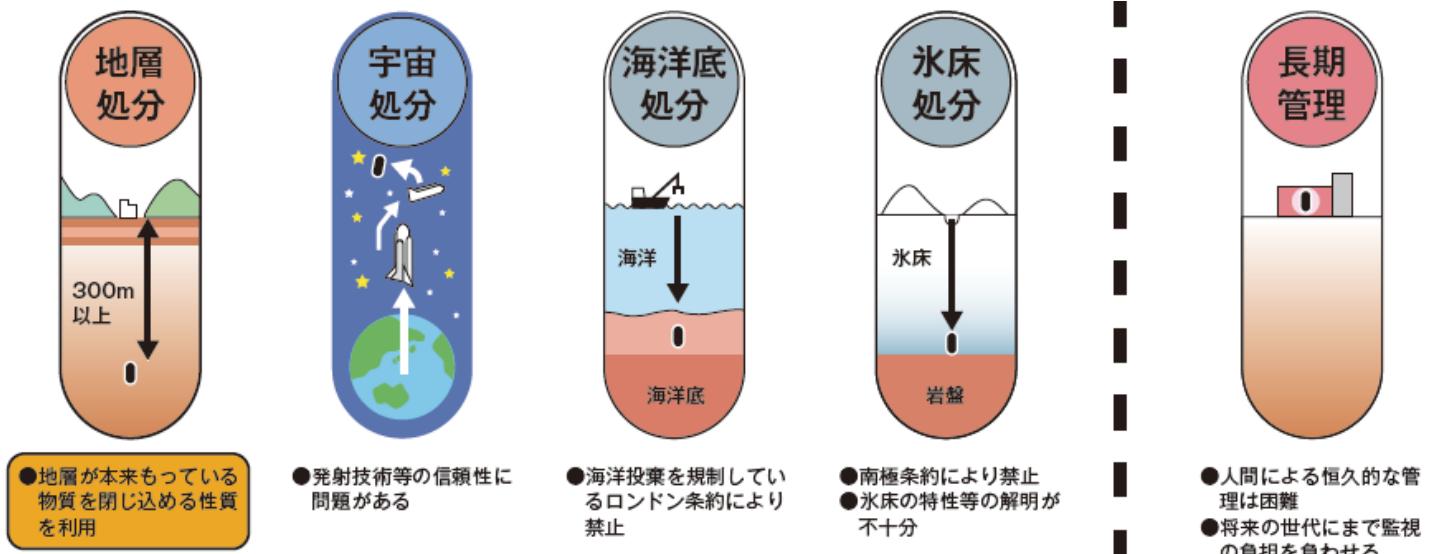
出展:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」1999 (JNC) を基に作成

高レベル放射性廃棄物の処理・処分概念



出展:原子力・エネルギー図面集2018を基に作成

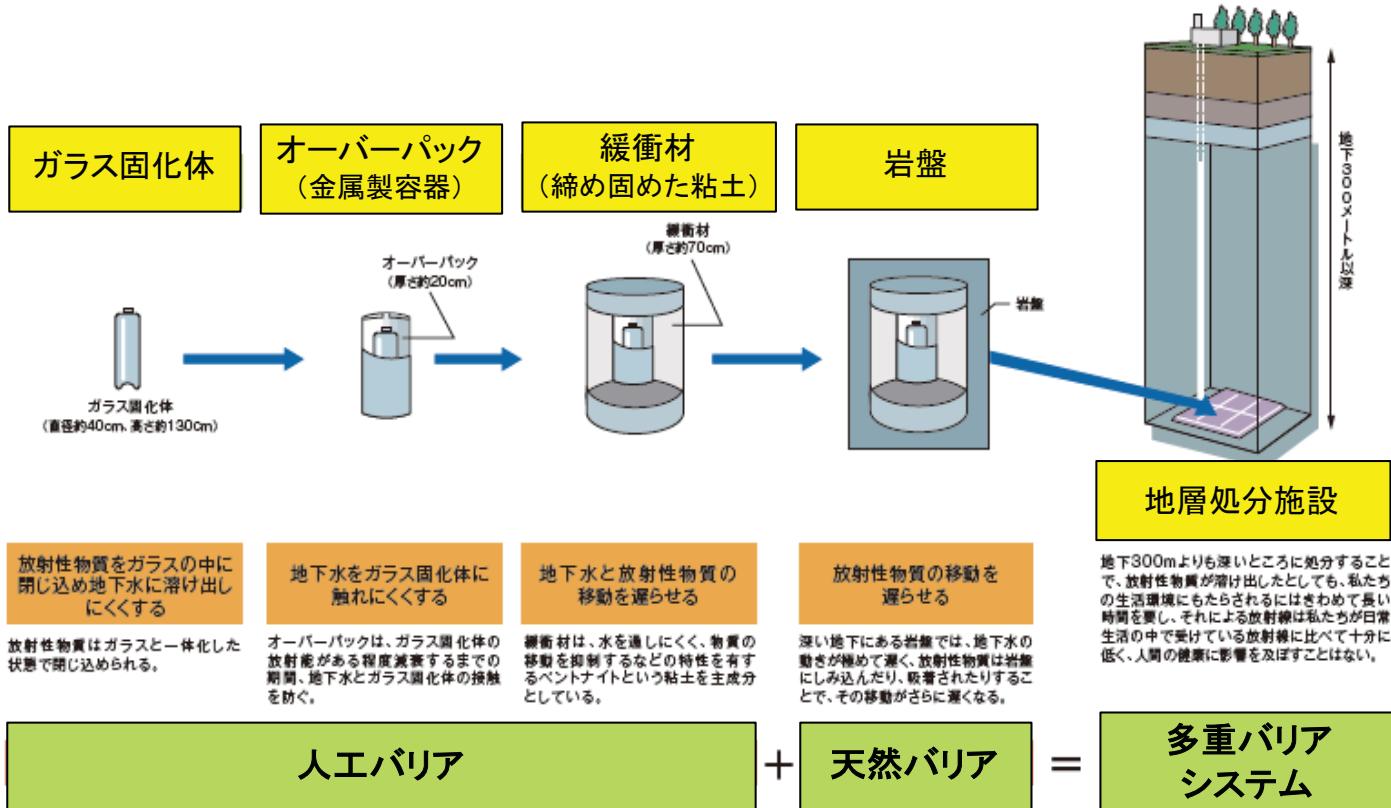
高レベル放射性廃棄物の処分方法の検討



- ・**地層処分**：地下資源等が長期間保存されてきた多数の実例あり、実現可能性が最も高い
- ・**宇宙処分**：発射技術等の信頼性に問題あり
- ・**海洋底処分**：海洋投棄を規制しているロンドン条約により禁止されている
- ・**氷床処分**：南極条約により禁止されており、氷床の特性解明も不十分
- ・**長期管理**：人による数万年以上の半恒久的管理が困難

出展：原子力発電環境整備機構HP資料を基に作成

地層処分の隔離・閉じ込め機能: 多重バリアシステム



出展：原子力発電環境整備機構HP資料を基に作成

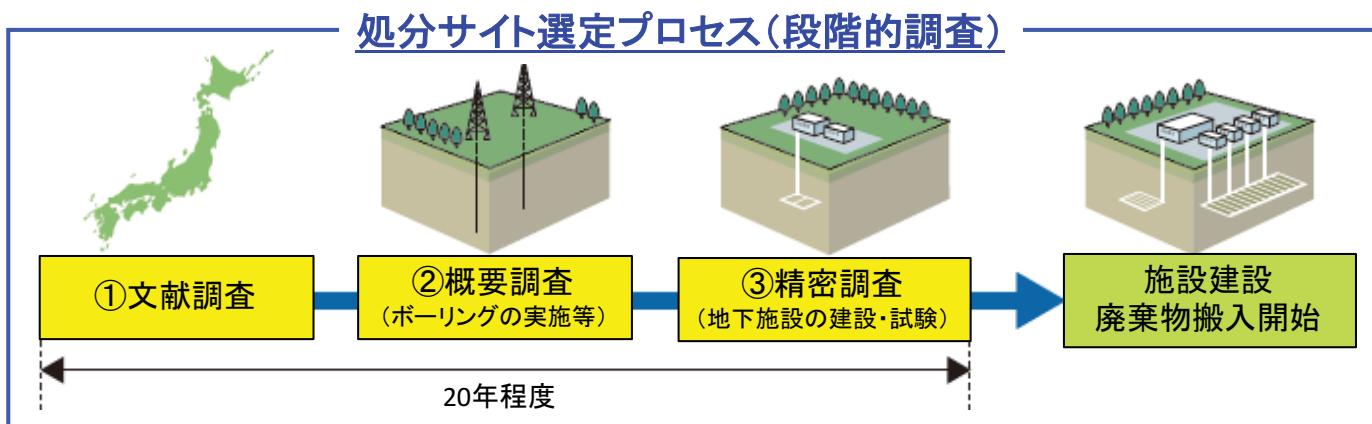
日本の地層処分事業に係るこれまでの経緯

17

1992	「地層処分の技術的可能性（第1次取りまとめ）」策定（旧PNC）
1999	「地層処分の技術的信頼性（第2次取りまとめ）」策定（旧JNC）
2000	「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）」成立
2000	原子力発電環境整備機構（NUMO）設立
2002	「最終処分施設の設置可能性調査区域」公募開始（NUMO）
2005	「TRU等廃棄物処分技術検討書（第2次TRUレポート）」策定（JAEA、電事連）
2007	高知県東洋町応募（その後、取下げ）
2007	地層処分対象にTRU等廃棄物を追加
2011	東電福島第一原子力発電所事故発生
2015	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）改定（可逆性・回収可能性の担保、国による科学的有望地の提示）
2016	「最終処分関係行政機関等の活動状況に関する報告書」策定（原子力委員会「放射性廃棄物専門部会」）
2017	「科学的特性マップ」公表（資源エネルギー庁）
2018	「包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現（レビュー版）」公表（NUMO）

18

地層処分の進め方



処分サイト選定プロセス（調査候補地選定）

国による科学的特性マップ提示

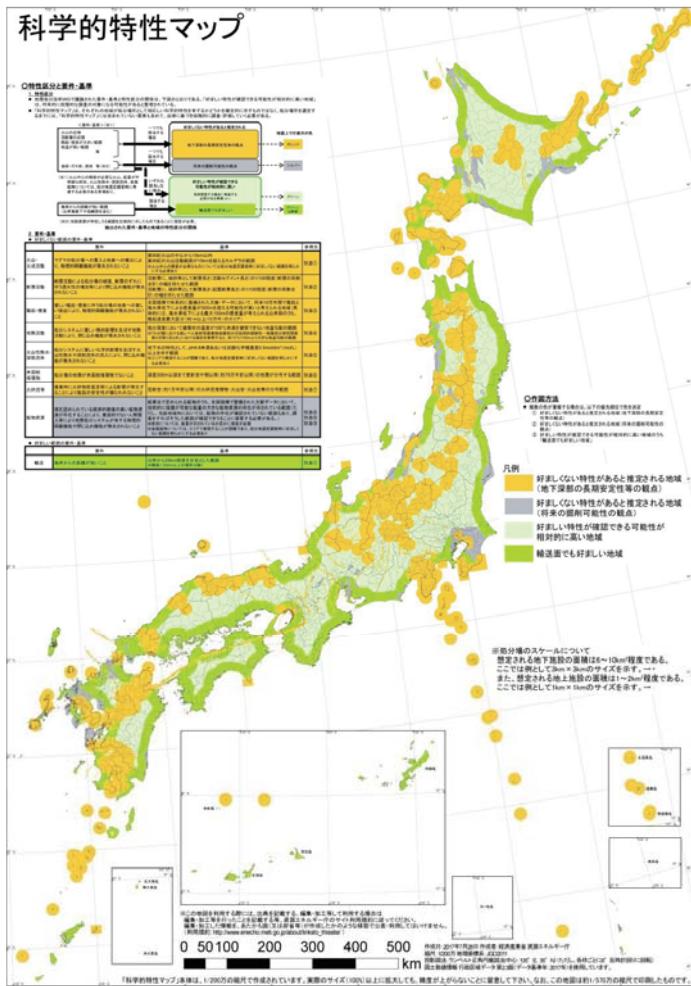
重点的な理解活動（説明会開催等）

- ・調査候補地：自治体からの応募
- ・複数地域に対し国から申入れ

文献調査の開始に向けて
新たなプロセスを追加

科学的特性マップ

19



- ・全国の地域特性を4区分（色）で示す

- : 好ましくない（地下深部安定性等）
 - : 好ましくない（将来の掘削可能性等）
 - : 好ましい
 - : 輸送面でも好ましい（海岸からの距離）

- #### ・日本全国に占める面積割合

- : 約 30 %
 - : 約 5 %
 - : 約 35 %
 - : 約 30 %

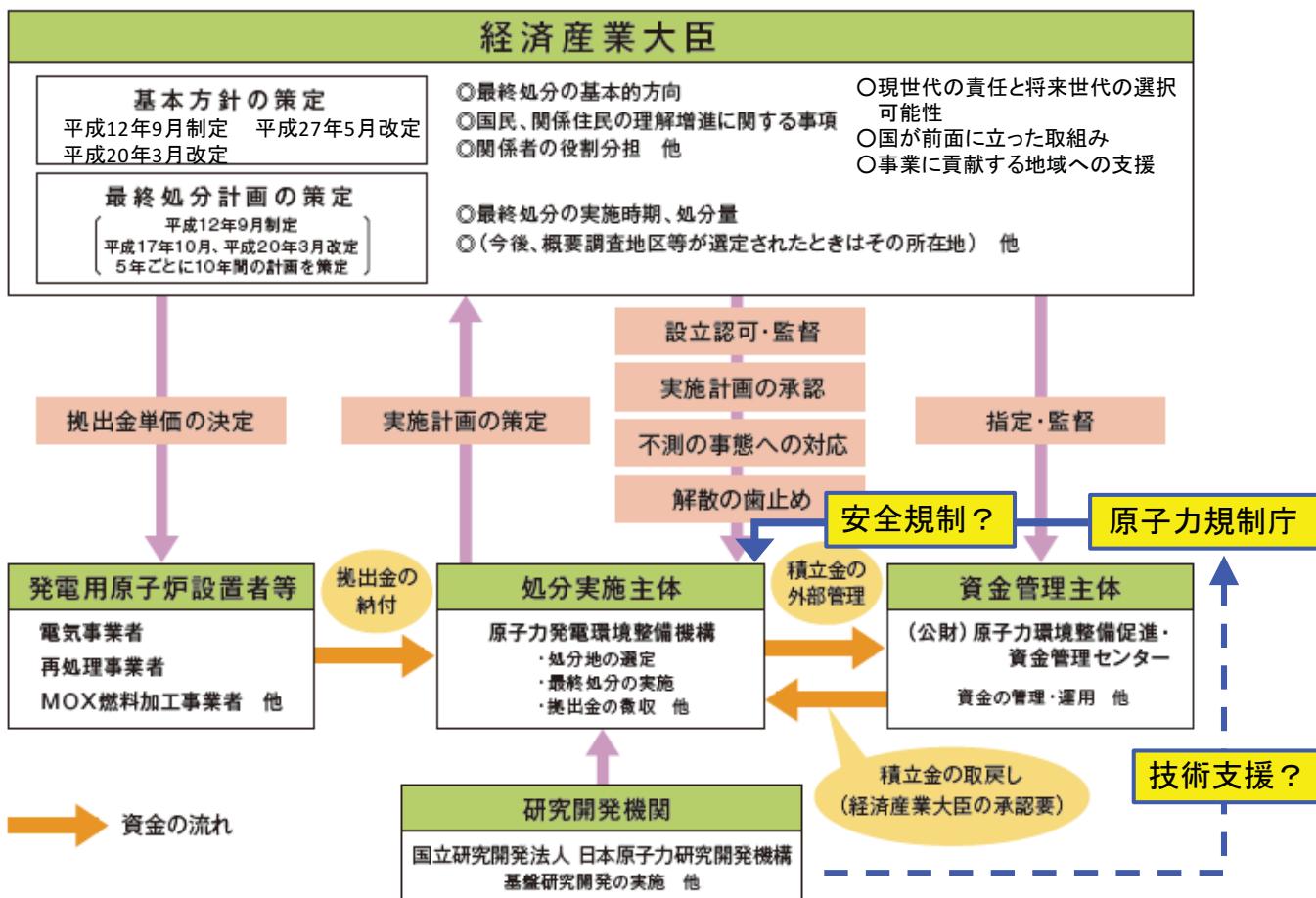
- #### ・地域特性区分に一部でも含まれる自治体数

-  : 約 1 0 0 0
 -  : 約 3 0 0
 -  : 約 9 0 0
 -  : 約 9 0 0

出展:資源エネルギー庁「科学的特性マップ」2017
を基に作成

地層処分の実施体制

20



出展:原子力委員会「新大綱策定会議資料」を基に作成

地層処分の技術的評価

予備的技術評価

- ・地層処分の技術的可能性評価（第1次取りまとめPNC1992）
- ・地層処分の技術的信頼性評価（第2次取りまとめJNC1999）

サイト選定

- ・地質環境の調査と評価
- ・将来の自然現象の発生可能性評価
- ・段階的調査：文献調査 → 概要調査 → 精密調査

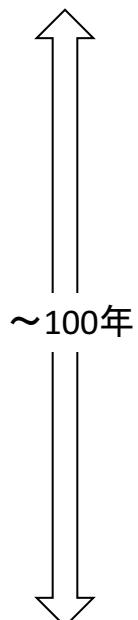
処分場の設計

- ・地上施設
- ・人工バリア
- ・地下施設

安全評価

- ・閉鎖前
- ・閉鎖後
 - シナリオ解析
 - 核種移行解析
 - 被ばく線量評価

処分場の建設・操業・閉鎖



地層処分に必要な技術・学術分野

学術分野：文科省「系・分野・分科・細目表」、学問の一覧（Wikipedia）に基づく分類

サイト選定

地質学、岩石学、鉱物学、鉱床学、地球物理学、地震学、火山学、地形学、気候学、水文学、地球化学、資源工学、土木工学、、、

処分場の設計

「サイト選定」に必要な分野に加え、
地盤工学、建築工学、構造工学、
地震工学、施工・建設マネジメント、
熱工学、材料学、原子力学、、、

安全評価

「処分場設計」に必要な分野に加え、
放射線影響科学、環境関連化学、
生体関連化学、無機化学、有機化学、
放射化学、生物学、考古学、、、

処分場の建設・操業・閉鎖

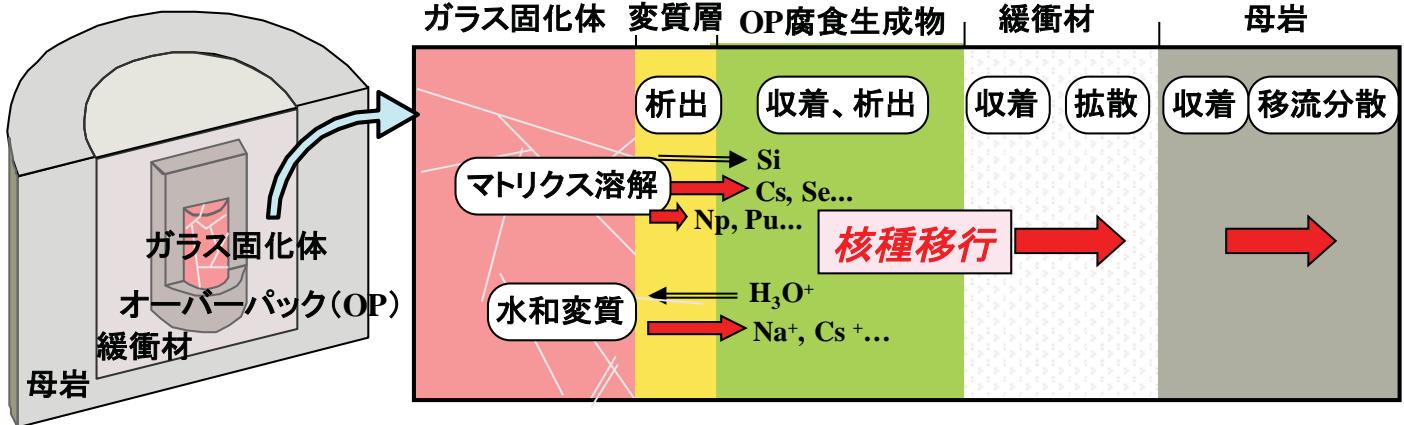
輸送工学、ロボット工学、、、

地層処分の信頼性

- ・様々な分野の連携
- ・分野横断的な取り組み が必要

分野連携の例:核種移行解析におけるガラス性能評価

23



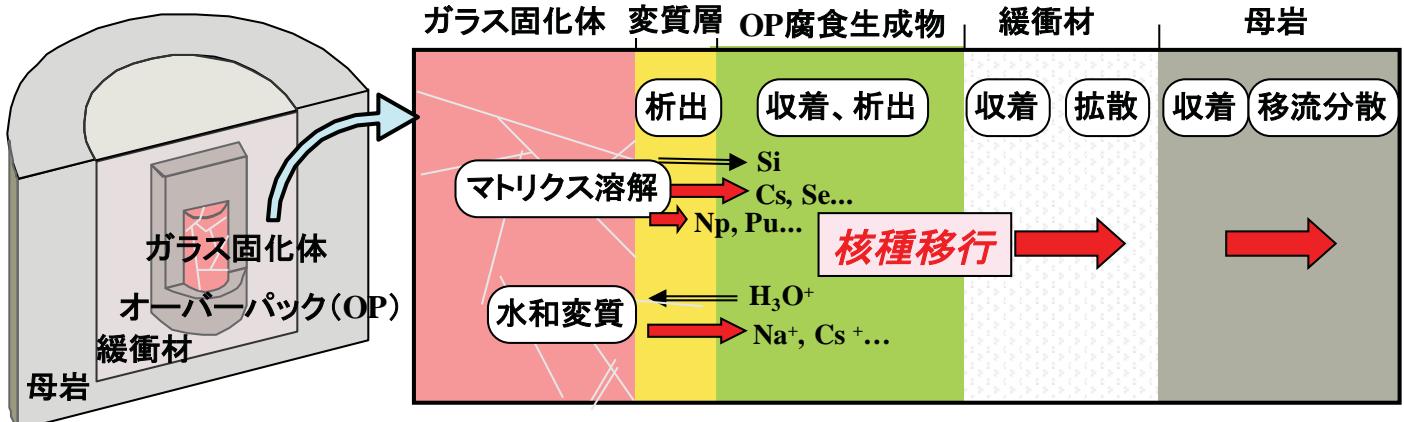
ガラス溶解(核種放出源)

ガラス溶解速度 = 核種移行のソースターム

環境条件、共存物質との相互作用により変化

分野連携の例:核種移行解析におけるガラス性能評価

24

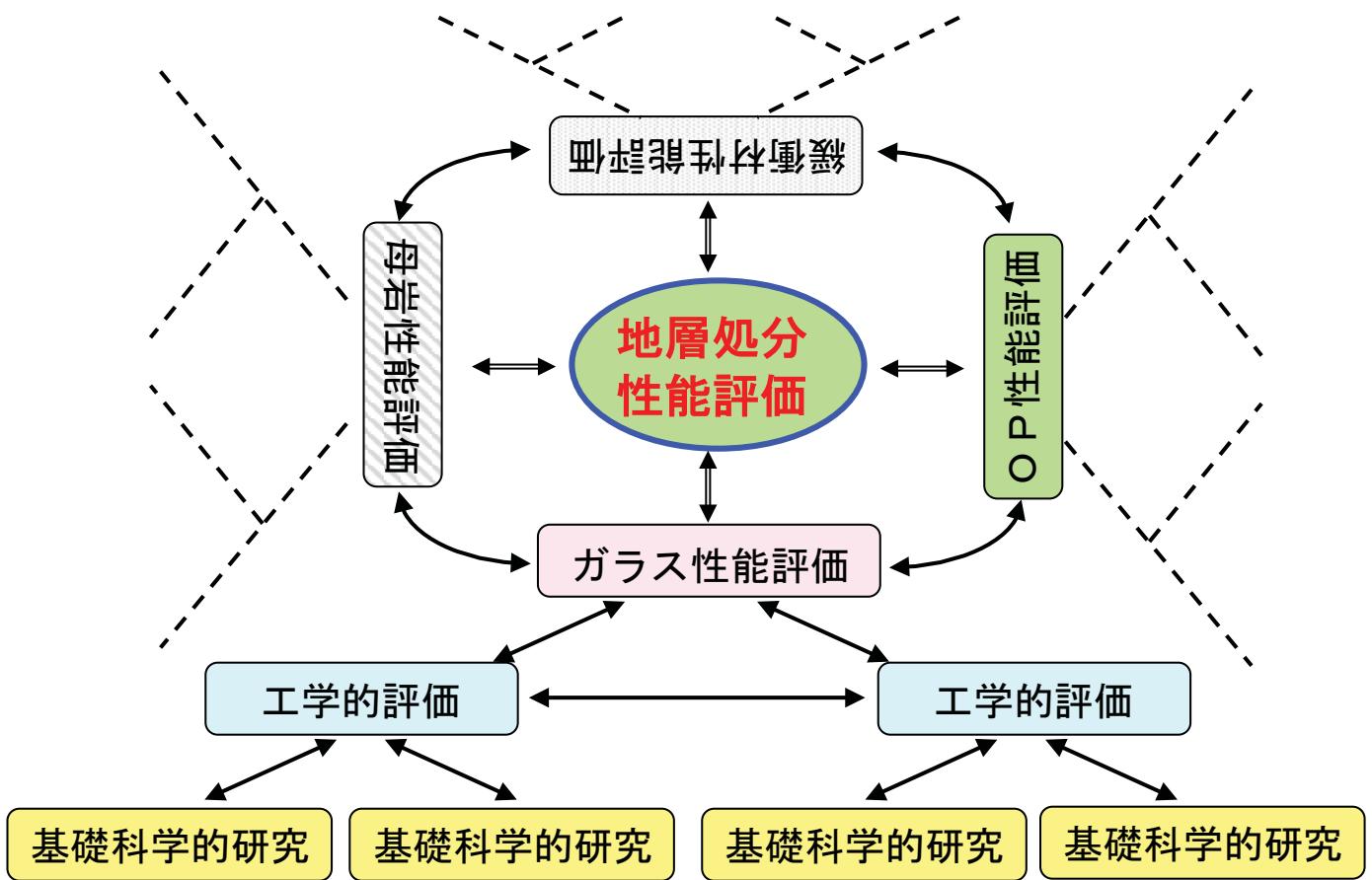


バリア要素	現象	ガラス溶解速度への影響
オーバーパック腐食	・地下水pH変化 ・腐食生成物へのSi吸着	ガラス表面変質層変化 → 溶解速度変化 溶存Si濃度減少 → 溶解速度増加
緩衝材	緩衝材へのSi吸着、拡散	溶存Si濃度減少 → 溶解速度増加

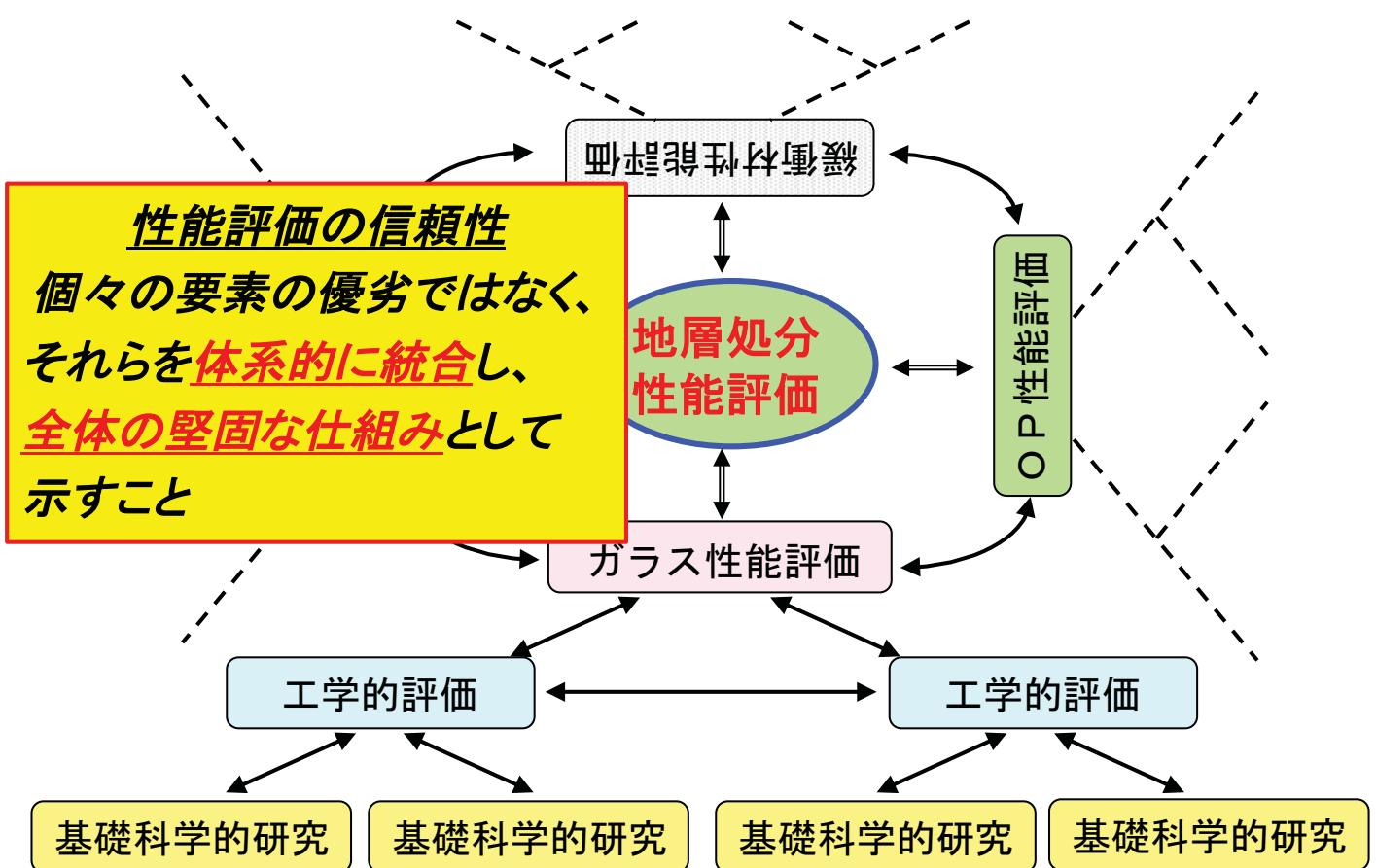


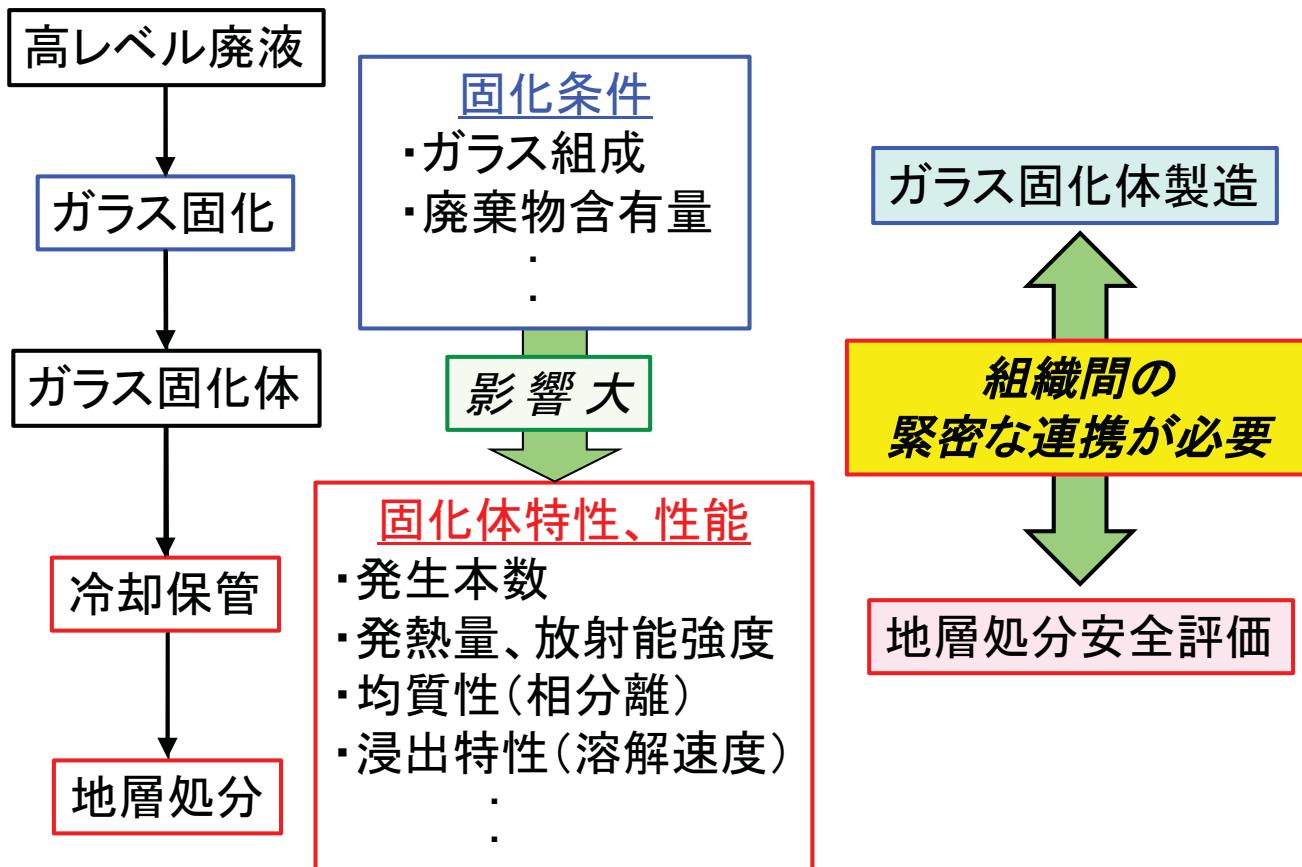
バリア間の相互作用 → 分野間の緊密な連携が必要

分野連携・統合の仕組み例:人工バリアの性能評価



分野連携・統合の仕組み例:人工バリアの性能評価





地層処分の特徴と技術マネジメントの必要性

長期間

- サイト選定から処分場閉鎖まで100 年にわたる事業
- 閉鎖後数万年以上の安全性評価

技術分野

地質環境調査・評価、工学・設計、安全評価等の様々な分野の技術知見の適切な連携・統合が必要

信頼性

長期安全性の論拠となるデータ・情報の信頼性を確保する仕組みが必要

柔軟性

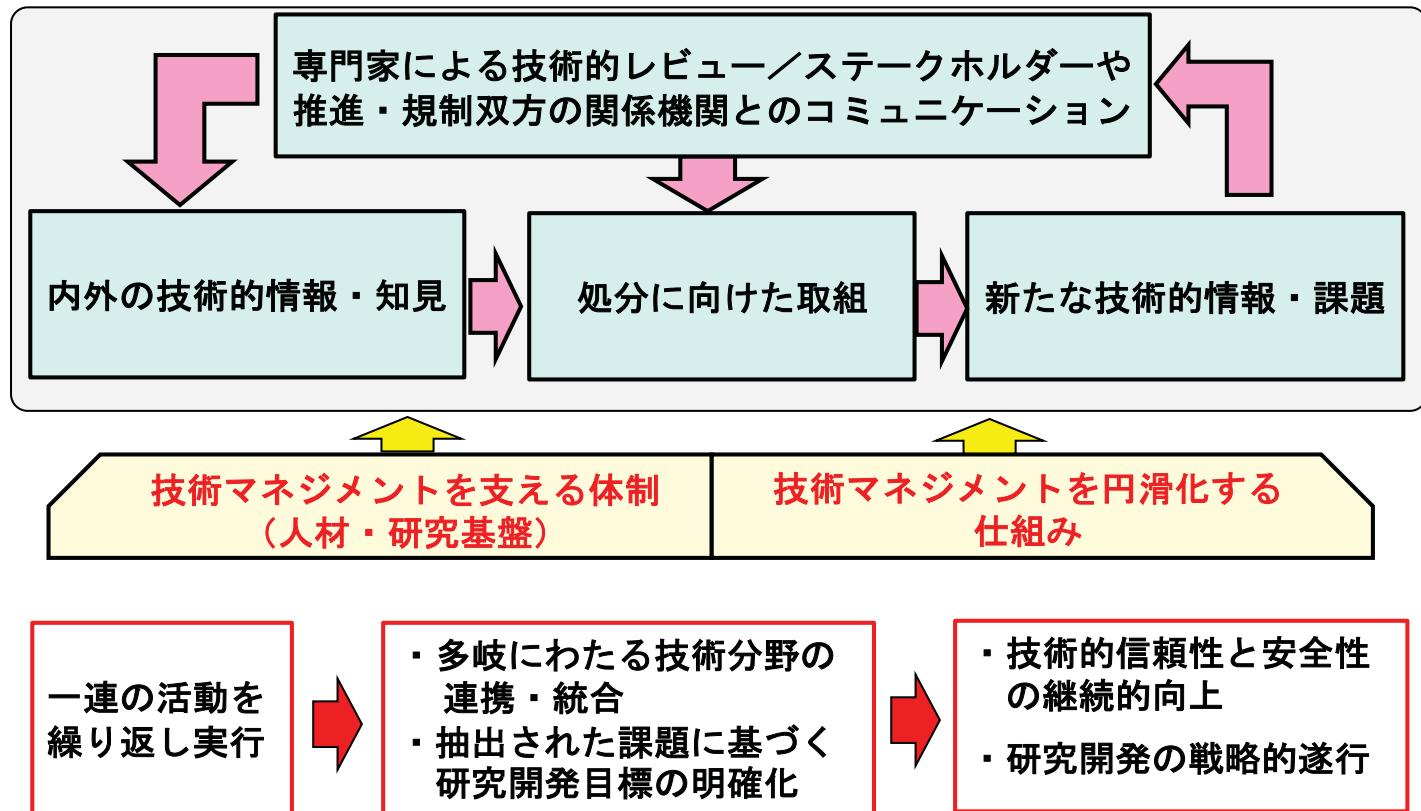
技術の進歩や社会的要件の変化に対応し、段階的に目標を明確にする取り組みが必要

事業推進

処分事業全体を見通し、分野の連携・統合と継続的な人材の確保・育成をはかり、事業を進めるプロジェクトマネジメント力が必要（技術マネジメント）

地層処分研究開発における技術マネジメントの提言 (地層処分研究開発調整会議)

29

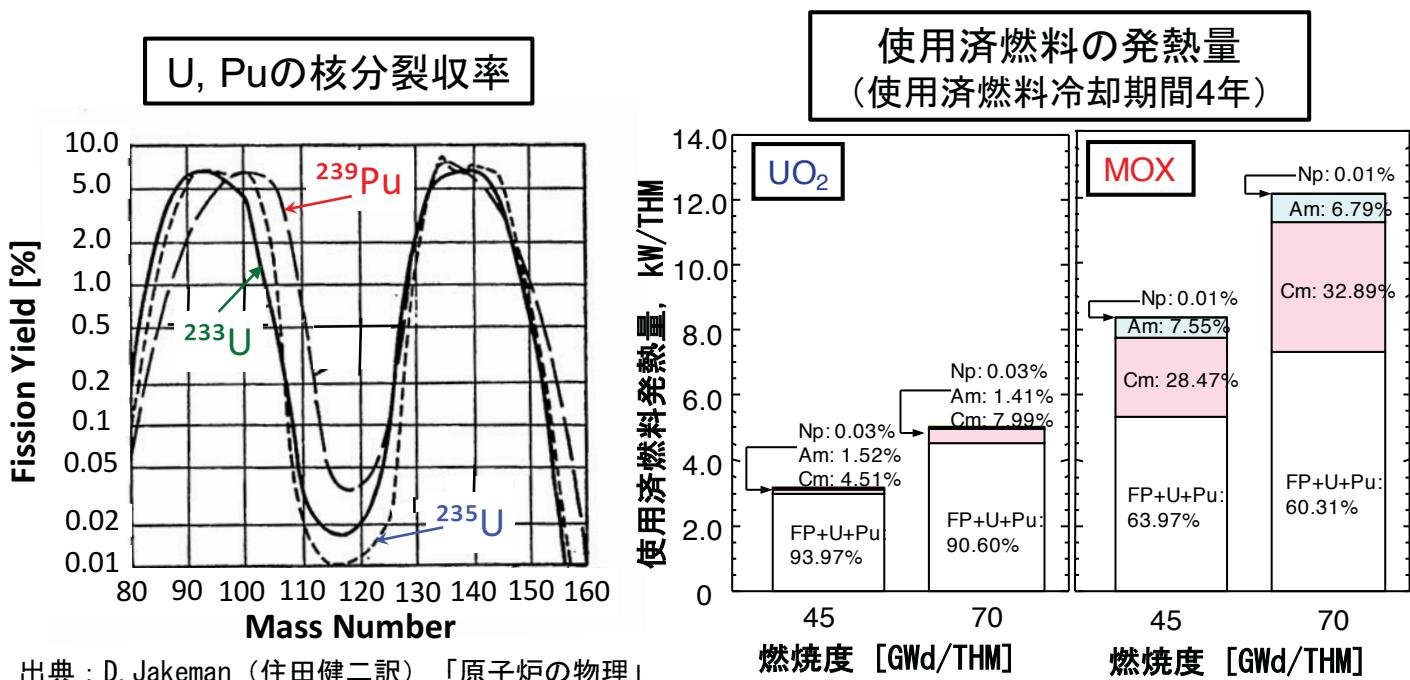


出典：「地層処分研究開発に関する全体計画（H30-34年度）」地層処分研究開発調整会議2018を基に作成

30

サイクル上流プロセスとバックエンドの関連

例) Puサーマル(軽水炉でのMOX燃料利用)

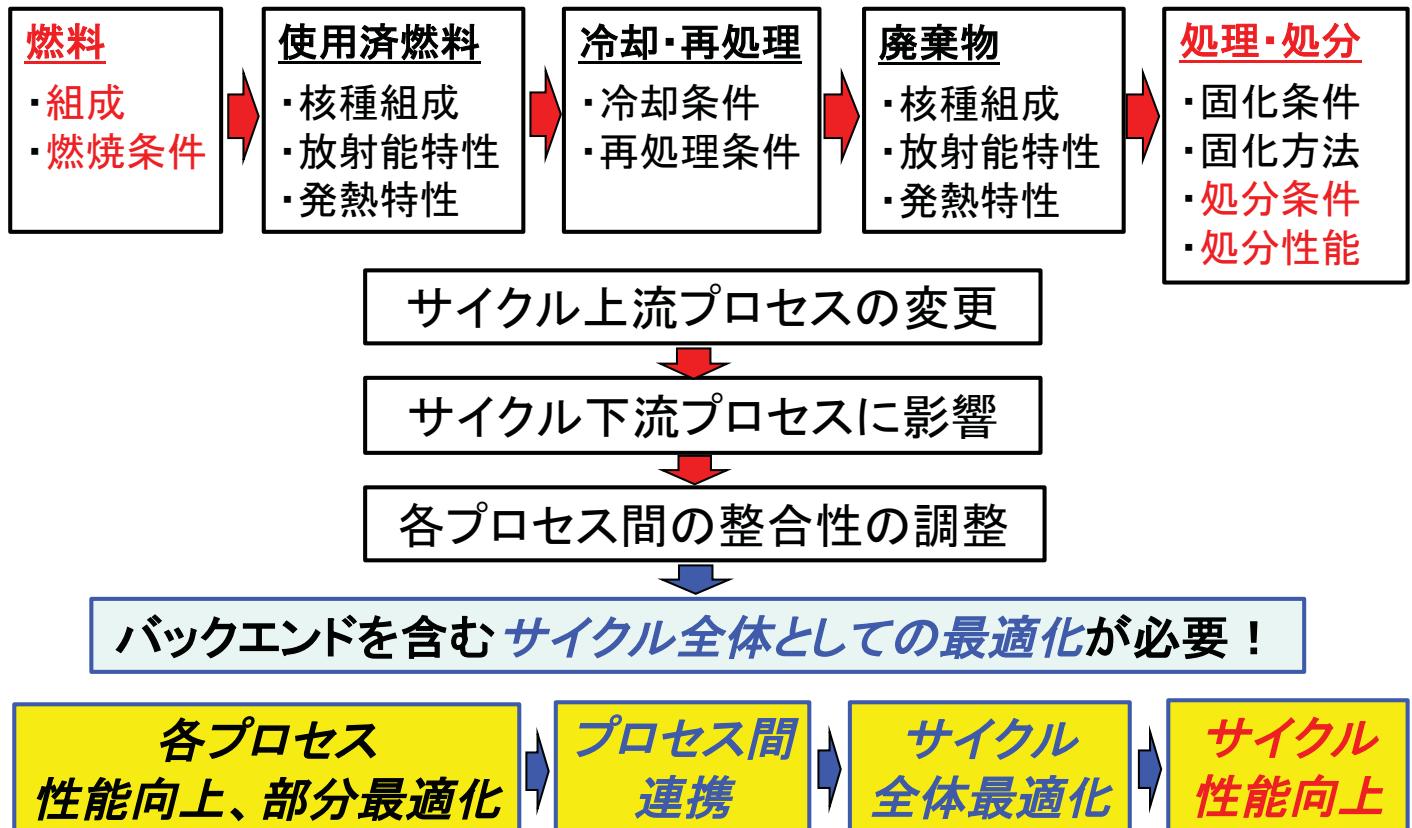


出典 : D. Jakeman (住田健二訳) 「原子炉の物理」
1971

出典 : Y. Inagaki, et. al, JNST 2009

サイクル上流プロセスとバックエンドの関連:全体最適化

例) Puサーマル(軽水炉でのMOX燃料利用)



今後の核燃料サイクルに求められる性能の種類

- ・ 安全性
- ・ 経済性
- ・ 環境負荷低減性
- ・ 資源有効利用性
- ・ 核拡散抵抗性

さまざまな観点からの性能

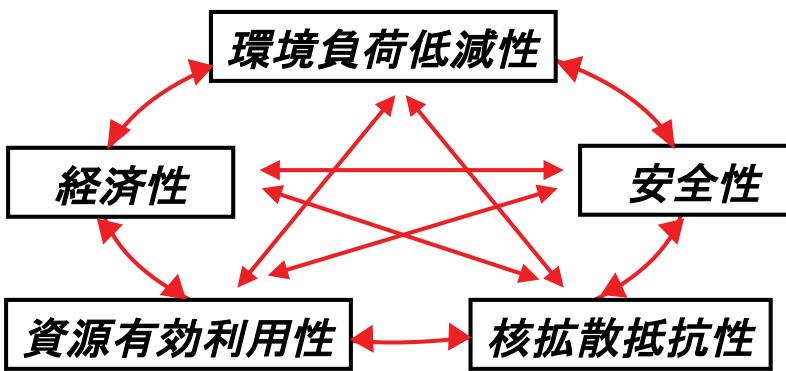
サイクル全体としての
総合性能評価が必要

出展:JAEA「高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズII」等

総合性能評価に必要な課題

相関性、整合性の
定量的、体系的評価

総合性能評価のための
ロジック構築



核燃料サイクル進展に必要な研究開発

研究開発段階

- ・ 安全性
- ・ 経済性
- ・ 環境負荷低減性
- ・ 資源有効利用性
- ・ 核拡散抵抗性



数値、技術データで
表せる性能



実現段階

- ・ 確実性、信頼性
- ・ 柔軟性、外乱抵抗性
- ・ 修復容易性



数値、技術データだけでは
表せない性能



長期展望、全体最適化、総合性能の観点

サイクル全体を見通した研究開発の仕組み(技術マネジメント)



核燃料サイクルの真の実力を引き出す唯一の方法？

部分最適化と全体最適化:留意すべき点

部分最適化

細分化



意図せずとも自然に進む

全体最適化

統合化



確固たる意図と戦略がなければ
進まない！

まとめ

- ・バックエンド進展には、分野・組織間の連携・統合が重要
- ・核燃料サイクル進展にも、プロセス間の連携・統合が重要
- ・核燃料サイクルの真の実力を引き出すには、分野・組織・プロセス間の連携・統合に基づく全体最適化が肝要
- ・そのための戦略と実行の仕組み（技術マネジメント）を早急に構築すべき

【戦略】Strategy

長期的・全体的展望に立った闘争の準備・計画・運用の方法（基本とする考え方）。戦略の具体的遂行である戦術とは区別される。

（大辞林第二版）

ご清聴ありがとうございました。

謝 辞

資料作成にご協力いただいた
大和田氏(RWMC), 植田氏(RWMC), 小畠氏(東芝), 河村氏(mcm)
をはじめとする皆様に感謝いたします。