

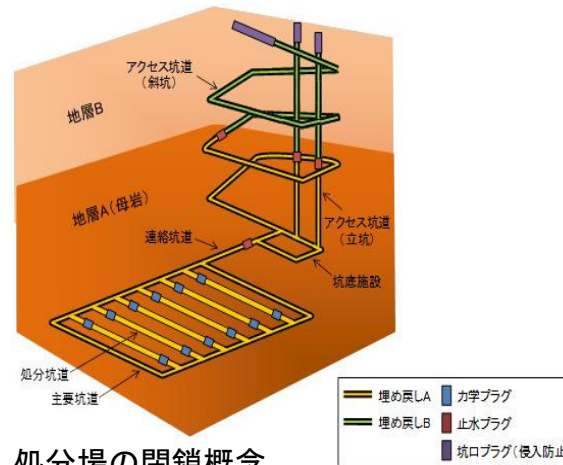
研究開発の現状について (経済産業省)

令和4年6月

資源エネルギー庁 放射性廃棄物対策課

(1) 高レベル放射性廃棄物処分確証技術開発※

処分場の閉鎖性能や、地下水の流れの調査手法、人工バリアや周辺岩盤の評価などに関する技術開発を、**幌延の地下施設等**で行うとともに、**沿岸海底下の地質環境調査技術**を構築する。

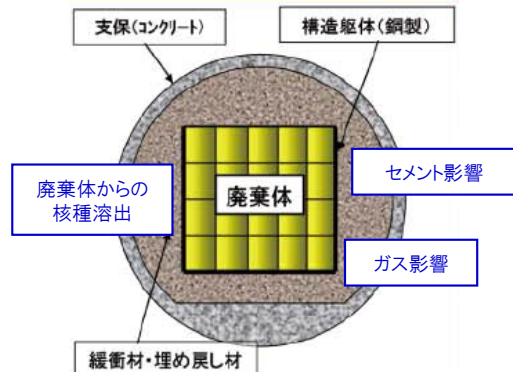


処分場の閉鎖概念

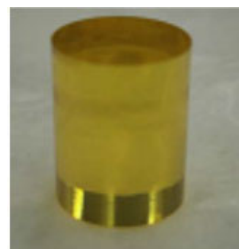
※岩盤中地下水流動評価技術高度化開発、地層処分施設閉鎖技術確証試験、地質環境長期安定性評価技術高度化開発、ニアフィールドシステム評価確証技術開発、沿岸部処分システム評価確証技術開発の5事業が含まれる

(2) T R U廃棄物処理・処分技術高度化開発

T R U廃棄物処分において鍵となる現象に対する影響評価技術を開発するとともに、核種閉じ込め技術、廃棄体パッケージの製作・健全性評価技術の開発を進める。



T R U廃棄物処分のイメージ



核種を閉じ込める技術の例
(BPIガラス固化)

(3) 回収可能性技術高度化開発

廃棄体を容易に回収する技術開発を行うと共に、坑道を解放した影響を評価するためのデータを**幌延の地下施設等**で取得する。



機械的除去
(オーガー方式)



流体的除去
(ウォータージェット)



PEMの回収
(エアベアリング)

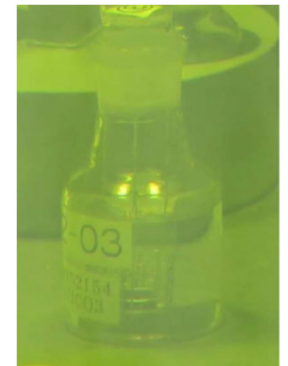
廃棄体回収作業の例

(4) 直接処分等代替処分技術高度化開発

直接処分に特有の課題に着目した技術開発を進めるとともに、他の代替オプション（超深孔処分）の調査を行う。



処分容器の例
(ポシヴァ社ウェブサイトより)



実際の使用済燃料を用いた
核種溶出試験

岩盤中地下水流動評価技術高度化開発

全体計画2.1.2（地質環境の特性）

□ 主な成果

- 瑞浪地域（移流場）を事例として、スケールに応じた最適な水理・物質移行パラメータ設定の手法を提示するとともに、地下水年代を考慮して広域地下水モデルで使用するパラメータ（透水係数 k や間隙率 n ）を校正する方法を例示し、地下水年代の考慮が効果的であることを確認した（図1）。
- 幌延地域（拡散場）を事例として、物理探査とボーリング調査を組み合わせ、広域スケールの範囲から長期的に安定な水理場・化学環境が存在する施設スケールを絞り込み、その三次元分布を調査・評価する方法を例示した（図2）。
- 塩素濃度とCl-37同位体比を用いて場の物質移行が拡散か移流かを判別する方法や、Kr-81による地下水年代測定の採取・分析方法を整備し、その有効性を確認した。

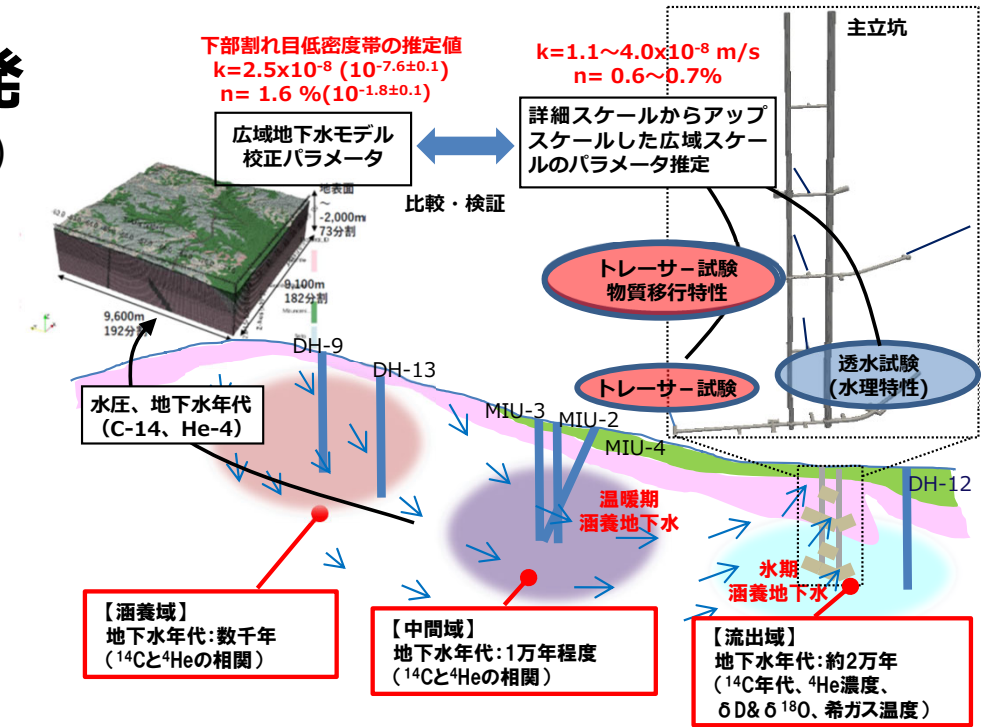


図1 地下水年代分布と広域地下水流動モデルの校正イメージ

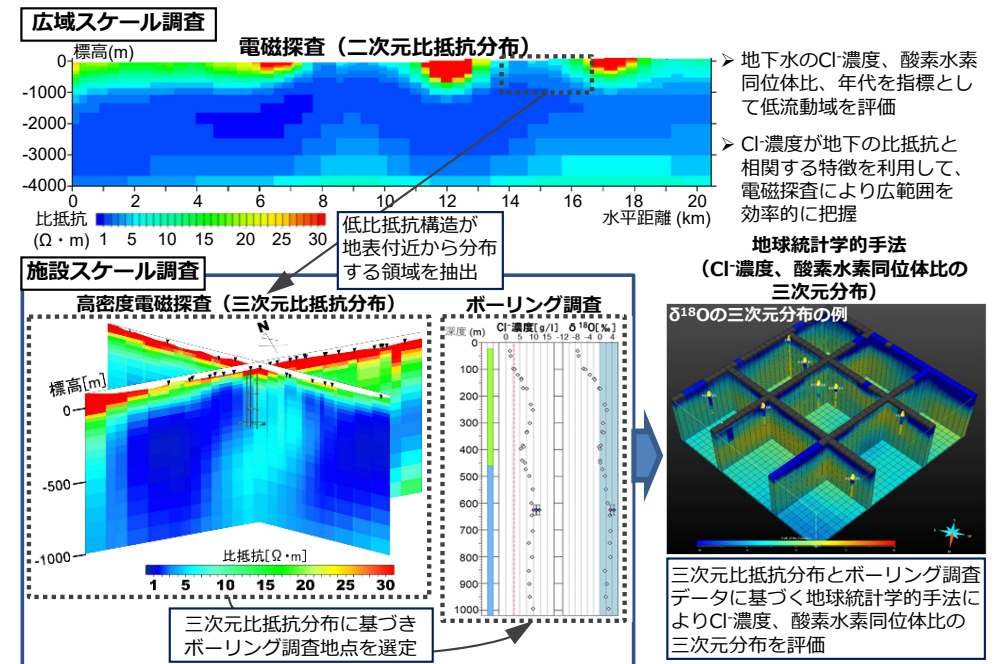


図2 電磁探査とボーリング調査を組合わせた低流動域の三次元分布評価の例

地層処分施設閉鎖技術確証試験

全体計画2.2.2（地上・地下施設）ほか

□ 主な成果

- 幌延（地下施設）において、底盤部の止水壁施工試験を実施するとともに、350m試験坑道2の側壁部岩盤に設けた切欠き部を対象に、止水プラグ施工のためのベントナイト吹付け試験を実施し（図1）、吹付け工法の適用性や乾燥密度や含水比のばらつきなどの施工品質を確認した。
- 岩種や配合に応じた埋め戻し材の材料特性に係る技術情報や、環境条件や処分場設計のバリエーションに応じて柔軟かつ適切な技術選択を可能とする複数の埋め戻し施工技術を整備した。
 - 転圧、吹付け：実規模施工試験で施工品質を確認。
 - スクリュー、ブロック：要素試験で実現性の見通しを確認。
- 品質保証体系の整備のための考え方を整理するとともに、オーバーパック・緩衝材・埋め戻し材に関する品質保証体系の素案を整理した。併せて、地下調査施設の実証試験等を想定した原位置状態把握技術（光ファイバ等）の適用可能性を示した（図2）。



図1 坑道側壁部におけるベントナイト吹付け試験の状況

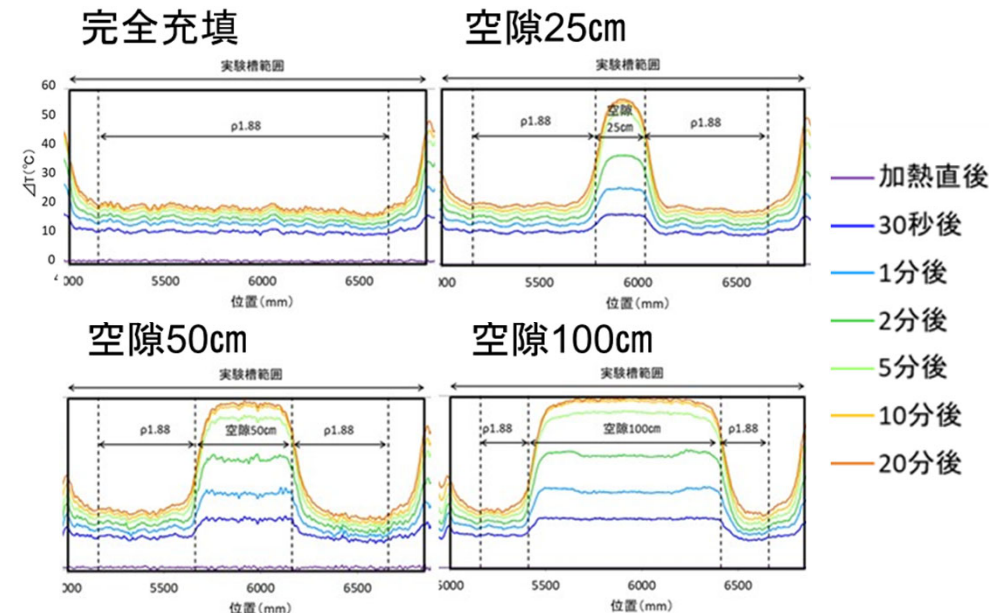


図2 加熱式光ファイバによる隙間検知

地質環境長期安定性評価技術高度化開発

全体計画2.1.1（自然現象の影響）

□主な成果

- 電磁探査や地震波解析（S波スプリッティング解析、地震波トモグラフィ等）などの地球物理学的手法、小断層解析などの地質学的手法、地下水・ガスの同位体分析などの地球化学的手法を適切に組み合わせることにより、地下深部のマグマの活動範囲（図1）や、深部流体の化学・熱的特徴及び移行経路、地下に伏在する活構造の分布などを高精度に把握しうる手法を提示できた。

- 幅広い時空間スケールでの隆起・侵食速度の評価手法として、熱年代法や宇宙線生成核種法、ルミネッセンス法等の個別要素技術の適用性を検討し、これまで年代測定が困難であった堆積物に対しても堆積年代の推定を可能とすることなどにより（図2）、隆起・侵食に係る調査・評価技術の拡充を図った。

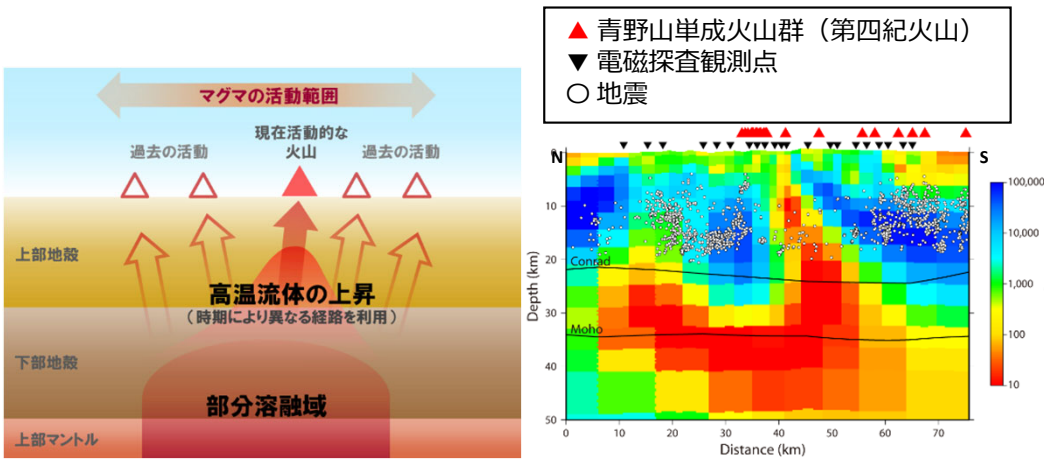


図1 マグマの活動範囲に関する概念モデル（左）と電磁探査の例（右）

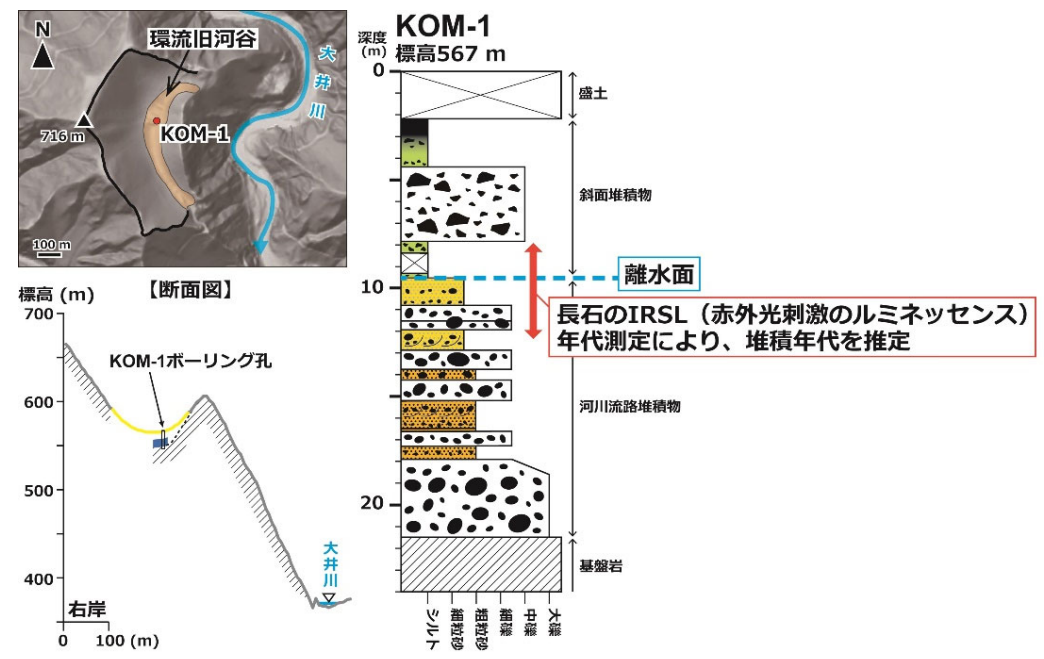


図2 環流旧河谷（蛇行する河川において流路の短絡が発生することで形成される昔の河川の痕跡）の堆積物のルミネッセンス法に基づく隆起・侵食速度の推定事例

ニアフィールドシステム評価確証技術開発

全体計画2.2.1（人工バリア）、2.3（閉鎖後長期の安全評価）

主な成果

- 異なる材料が共存するニアフィールドの過渡期から長期の環境変遷を評価するため、原位置試験や天然類似試料分析等によって、金属の腐食、緩衝材の変質（図1）、セメントと岩石の相互作用に関する評価モデルを構築したほか、緩衝材の流出（図2）に関する抑制対策技術と評価方法を提示。
- 実際の地質環境の特徴やニアフィールドシステムの長期環境変遷を考慮した核種移行評価を可能とするため、結晶質岩や堆積岩を対象とした室内試験や原位置試験等を通じて、より現実的な核種移行評価モデルを構築（図3）。
- 上記の個別現象研究の成果を踏まえて、異なる材料の相互作用を含むニアフィールドの長期変遷と、その変遷に応じた核種移行特性の変化を考慮した評価技術を構築（図4）。

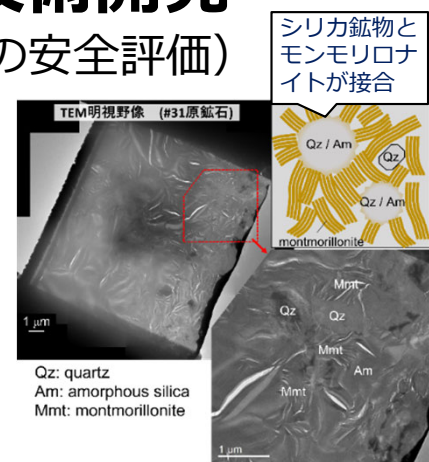


図1 原鉱石のセメンテーション状態

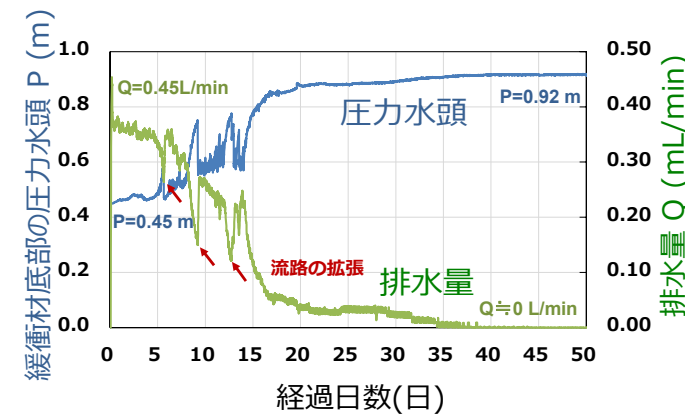


図2 緩衝材流出原位置試験結果の例（隙間未充填オプション）

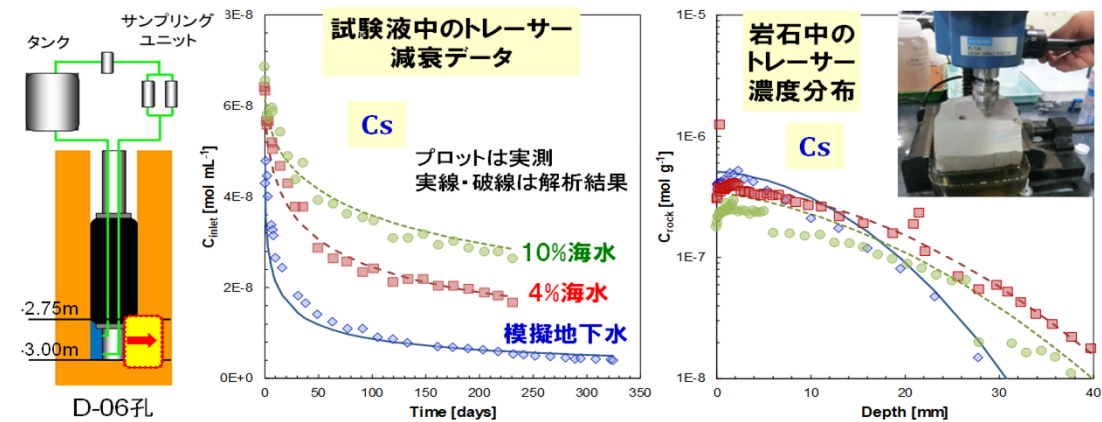


図3 幌延URLにおける堆積岩マトリクス中の原位置拡散試験の結果の例

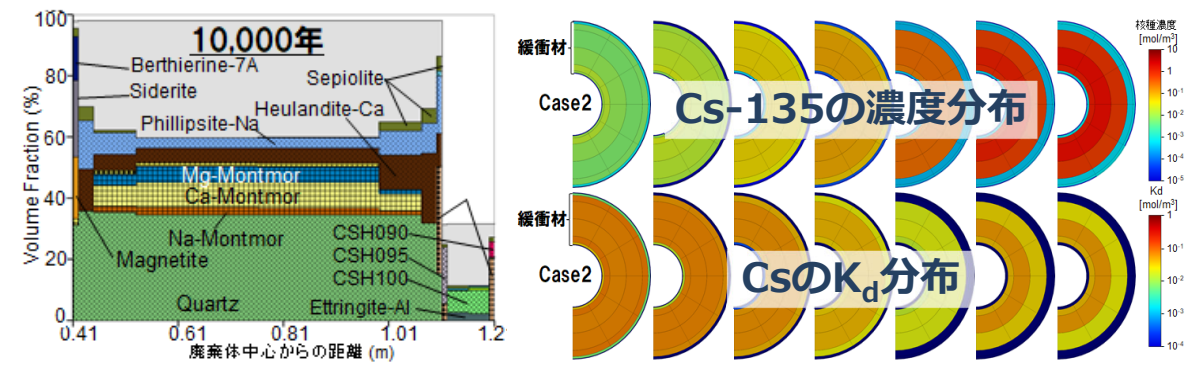


図4 ニアフィールドの環境変遷（緩衝材変質）と核種移行解析（Cs）の例 5

沿岸部処分システム評価確証技術開発

全体計画2.1.2（地質環境の特性）、
2.2.1（人工バリア）

□ 主な成果

- 文献調査から概要調査を想定した海陸連続三次元地質環境モデルについて構築手法の検討と不確実性の低減に向けた評価を実施した。また、沿岸部特有の地質環境特性把握に向けた新たな調査技術を含むボーリング調査（図1）の体系化や、海底湧出地下水調査ならびに浅海域における三次元音波探査など沿岸部海域を対象とした調査手法について技術開発と体系化に向けた検討を行った（図2）。
- 全国を対象とした深層地下水データから類型化した沿岸部の地下水質に基づいて、地下水成分の影響を想定して実施した各種試験により、操業から再冠水までの期間を想定した支保工等の設計に関わるセメント系材料の化学的変質に伴う力学特性変化、ならびに緩衝材（ベントナイト）の自己シール性に関わる膨潤特性やイオン交換挙動の体系的な知見整備、さらに緩衝材中のオーバーパックの変位挙動に関するデータ拡充を実施した（図3）。



図1 駿河湾沿岸部でのボーリング掘削と流向流速計の調整

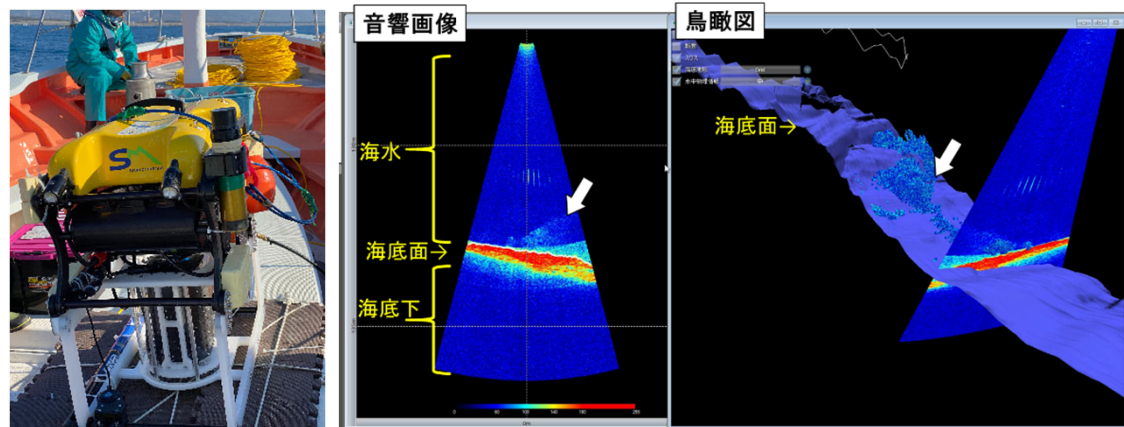


図2 ROV（水中ドローン）と音響カメラを用いた海底湧出地下水調査

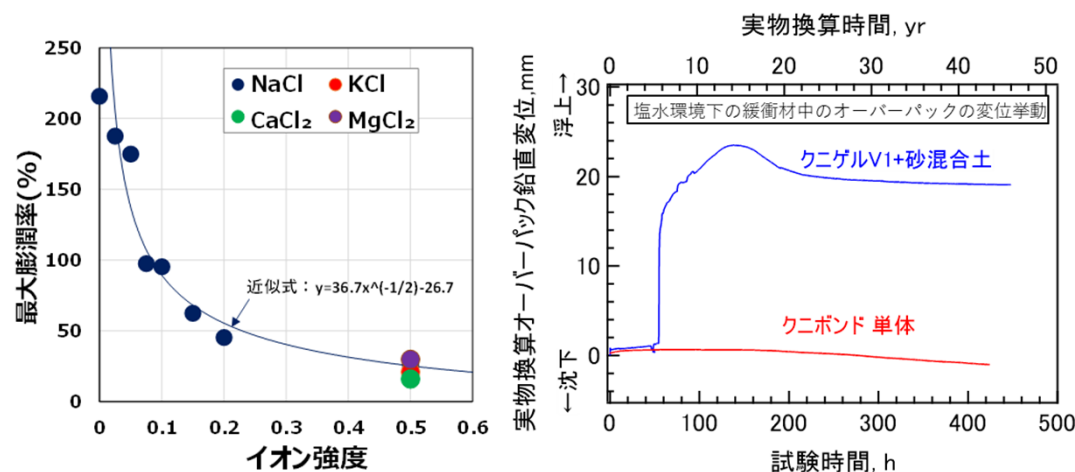


図3 緩衝材やオーバーパックの性能評価にかかる知見の拡充の例 6

TRU廃棄物処理・処分技術高度化開発

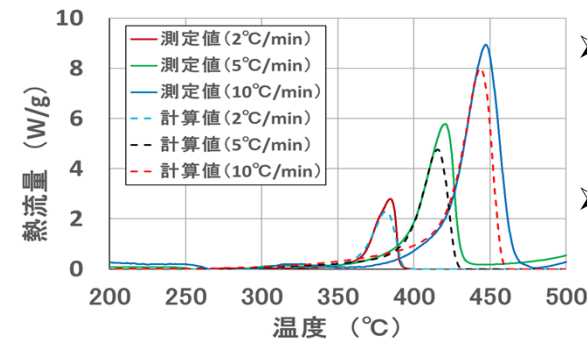
全体計画2.2.1（人工バリア）、2.3.1（シナリオ構築）

□ 主な成果

- ・プレキャストセメント系充填材と角型金属容器で構成される実規模大の廃棄体パッケージの製作性確認試験を実施し（図1）、PWHT（溶接後熱処理）による残留応力低減やガス発生抑制のための充填材製作時の乾燥条件等、閉鎖後数百年程度の核種の閉じこめ性をもつ容器の製作に必要な技術を取りまとめた。
- ・火災発生時のアスファルト固化体の延焼に伴う硝酸塩と有機物の化学反応の促進の可能性について評価するために、模擬アスファルト固化体の熱量測定を実施し、評価に必要なアスファルト固化体の発熱速度モデルを整備した（図2）。
- ・モックアップによるガス移行試験により、既往の一次元要素試験と異なる3次元の二相流特性や低圧力での破過を確認し、それらの挙動を再現できるようにモデルを改良した（図3）。
- ・TRU廃棄物処分システムの状態設定のために、個別現象における各モデルの高度化を実施した。



図1 廃棄体パッケージの製作性確認試験
（左：金属容器の製作、右：プレキャストセメント系充填材の乾燥）



- 火災発生を想定した昇温速度条件においても対応可能なアスファルト固化体の発熱速度モデルを整備。
- 整備したモデルを用いて、火災発生時における熱反応促進の可能性が評価可能。

図2 模擬アスファルト固化体の熱量測定値と整備した発熱速度モデルによる計算値との比較

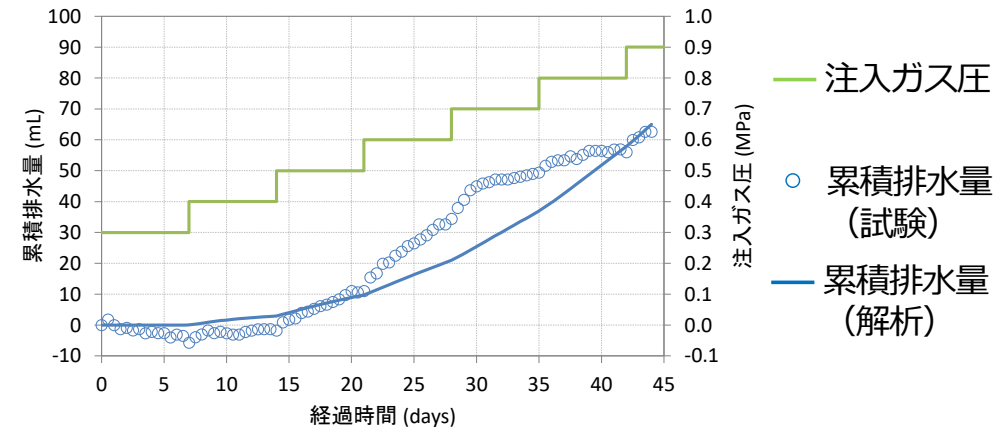


図3 ガス移行試験結果と再現解析結果

回収可能性技術高度化開発

全体計画2.2.3（回収可能性）

□ 主な成果

- 現行の2つの定置概念（縦置き・ブロック方式と横置き・PEM方式）に対して、廃棄体を拘束する土質材料の除去技術の迅速化を図り（図1）、設定した目安の除去時間が達成できる見通しを得た。
- 現行の2つの定置概念をベースに廃棄体回収の作業時間短縮（容易性向上）を図る詳細設計オプション案を考案した（図2）。除去作業を省略するオプション案の成立性・実現性の提示に向けた技術開発課題を抽出・整理した。
- 回収可能性の維持期間の追加に伴う安全性への影響について、建設～回収までの状態変遷を表現するストーリーボードを整備した。安全性に影響を及ぼす要因やシナリオを整理するとともに、定量化に必要な物性値や地質環境のモデル化手法を、実際の地下環境を活用し整備することで、回収可能性の維持が処分システムの安全性へ及ぼす影響を分析・整理した（図3）。

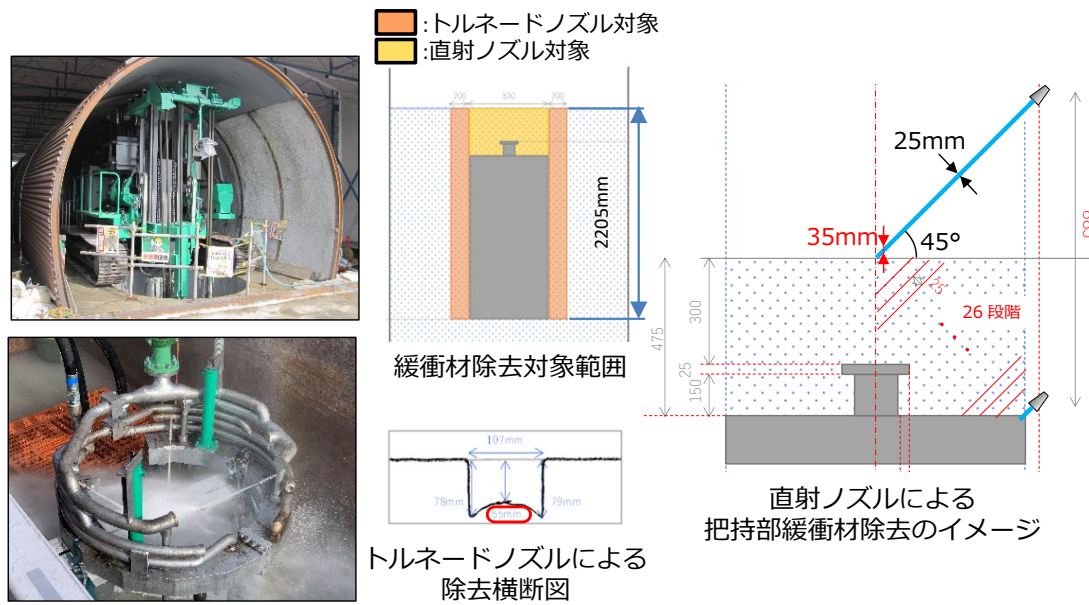


図1 廃棄体回収のための除去技術の例

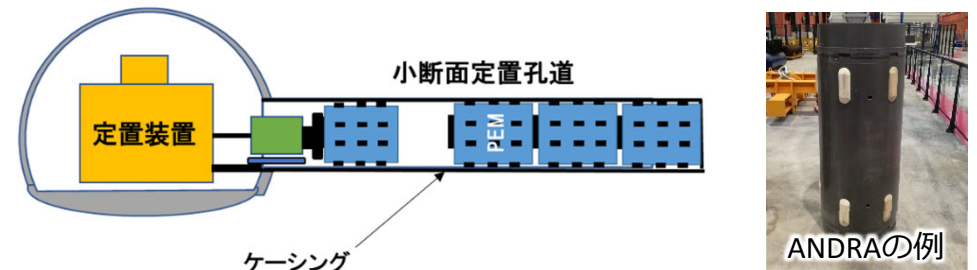


図2 埋め戻し材を不要とする施工オプション案の例（狭隘断面坑道の採用、摺動によるPEMの定置・回収技術の具体化）

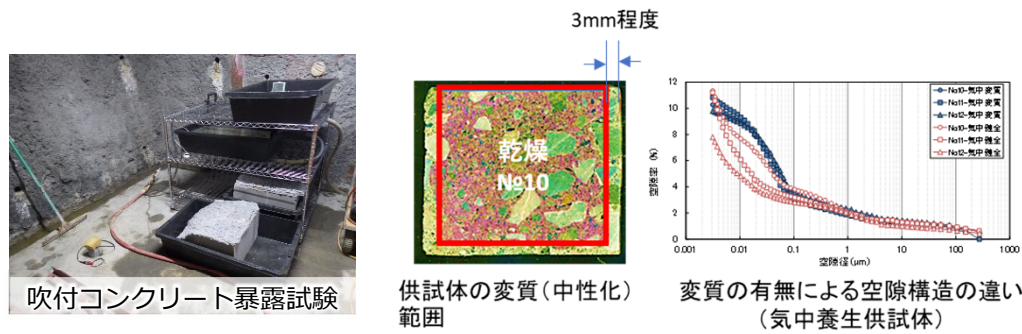


図3 定量化に必要な物性値の取得（幌延地下研の活用）

直接処分等代替処分技術高度化開発

全体計画3.2（代替処分オプション）

□ 主な成果

使用済燃料の溶解挙動など直接処分に特有な現象を理解・評価するための技術基盤の整備と、その他の代替処分オプションに関する最新の知見の拡充等を実施。

- 諸外国における直接処分の処分容器の材料である銅に着目し、日本の処分環境で想定し得る硫化物の濃度に応じた処分容器としての寿命評価の見通しを提示（図1）。
- 日本の地下水における炭酸濃度に着目し、炭酸濃度とウラン酸化物の溶解速度の関係を定量化（図2）。
- 超深孔処分に関する諸外国での検討事例や関連技術の現状を調査し、技術的実現性に係る課題等を提示。

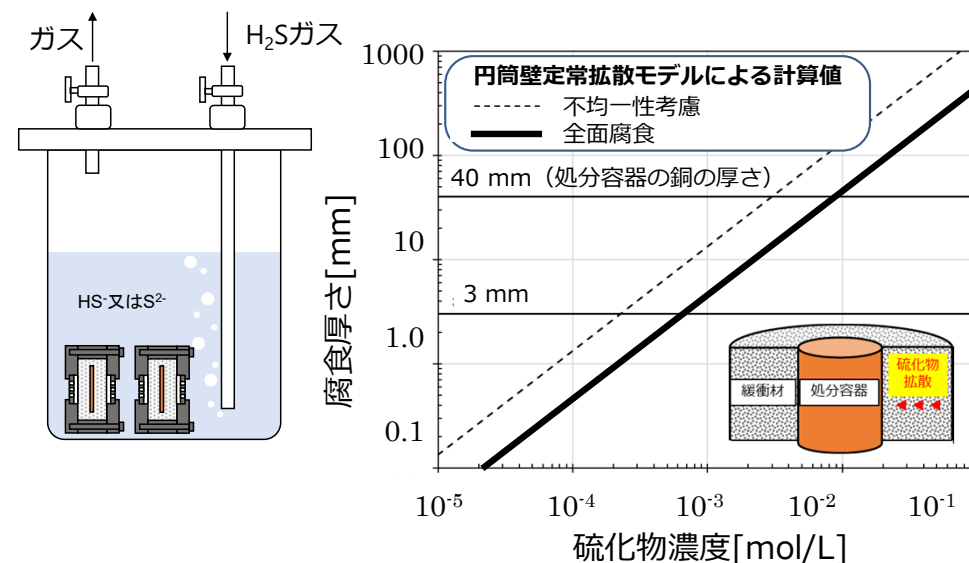


図1 腐食試験と5万年間での銅の腐食量の硫化物濃度依存性評価の例

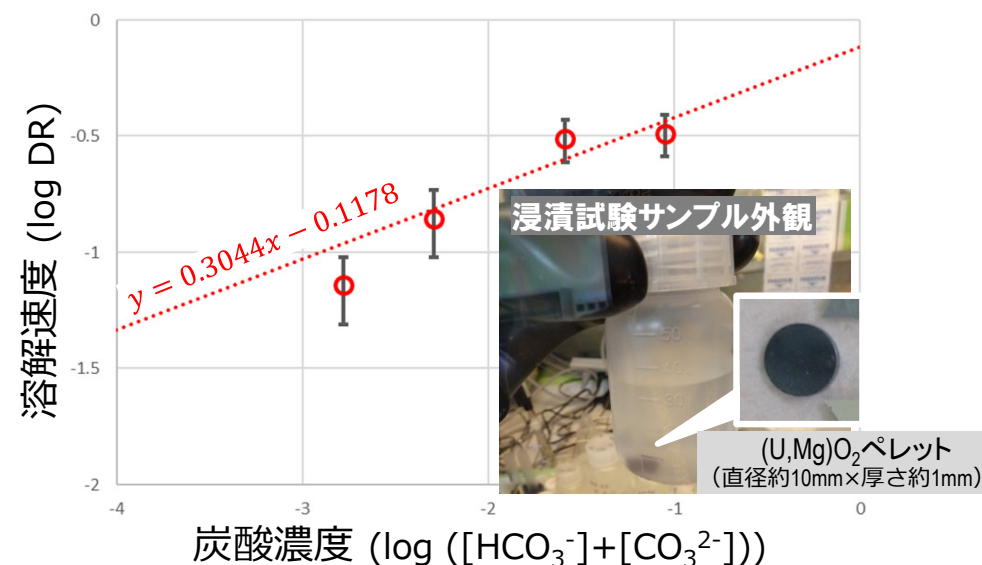


図2 UO_2 溶解速度の炭酸濃度依存性 9

放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する 研究調査の支援等に関する業務

全体計画3.1（技術マネジメント）

□主な成果

- 大学・研究機関の若手研究者に委託し、合計で14件の地層処分に関する萌芽的・基礎的研究テーマの実施により、若手研究者の育成支援と地層処分分野の研究者の裾野拡大に貢献。

- 地層処分に関する若手研究者が参加する人材育成セミナーを毎年開催し、参加者が異分野の専門家との相互理解や協働の重要性等を学ぶことが可能なセミナープログラムを作成（図1）。

- 学習者が地層処分事業全般について説明できる素養を独学で身に着けることを目的とした地層処分に関するリテラシー育成教材を作成（図2）。



図1 人材育成セミナーにおけるグループワークの様子



図2 地層処分に関するリテラシー育成教材の一部（検討段階のもの）

地質環境の調査・評価

- 地質環境の長期安定性に関する研究開発
 - － 火山・熱水活動、深部流体、断層運動、隆起・侵食、気候・海水準変動の各自然現象の影響評価について、最先端の科学的知見を積極的に取り入れつつ（例えば図1）、特に数km四方スケールでの調査・評価技術を整備
 - － 整備した個別技術を適切に組み合わせて地質環境のモデル化・評価が実施できるよう、一連の調査パッケージを提示
- 沿岸海底下の処分に関する研究開発
 - － 沿岸部の深部データが少ない地質環境にこれまでの調査技術を適用し、地質環境モデルを構築・調査手法の体系化や沿岸部海域を中心とした地質環境特性データにかかる知見の拡充を実施
 - － 取得した現場データを用いて工学設計や安全評価分野との分野間連携を実施するとともに、不確実性を考慮した確率論的安全評価を実施し、地層処分システム設計の最適化の方法論を提示

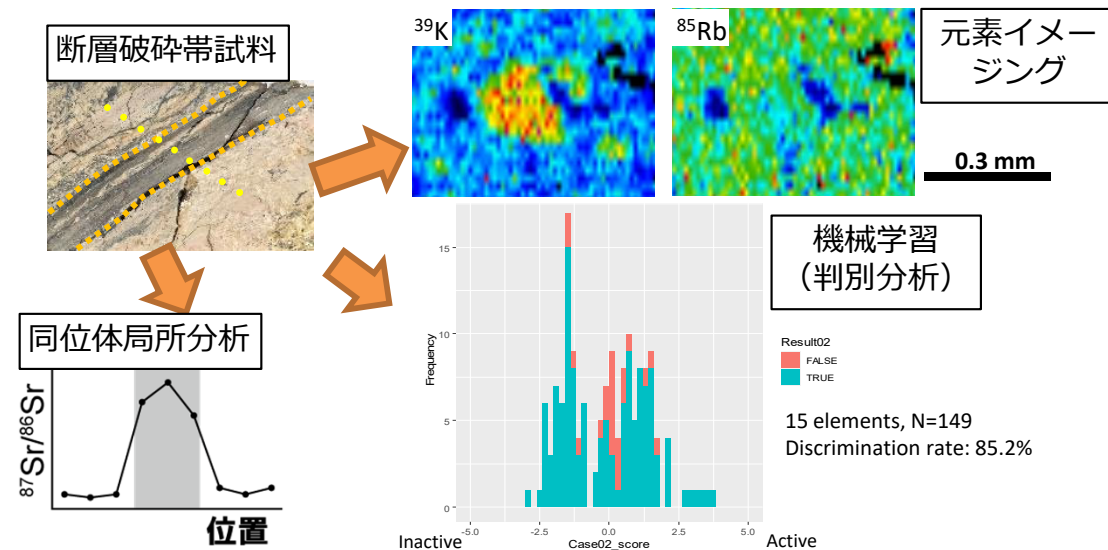


図1 断層破碎帯試料に対する高精度局所分析や、化学組成等のデータを用いた機械学習に基づく活動性評価技術開発のイメージ

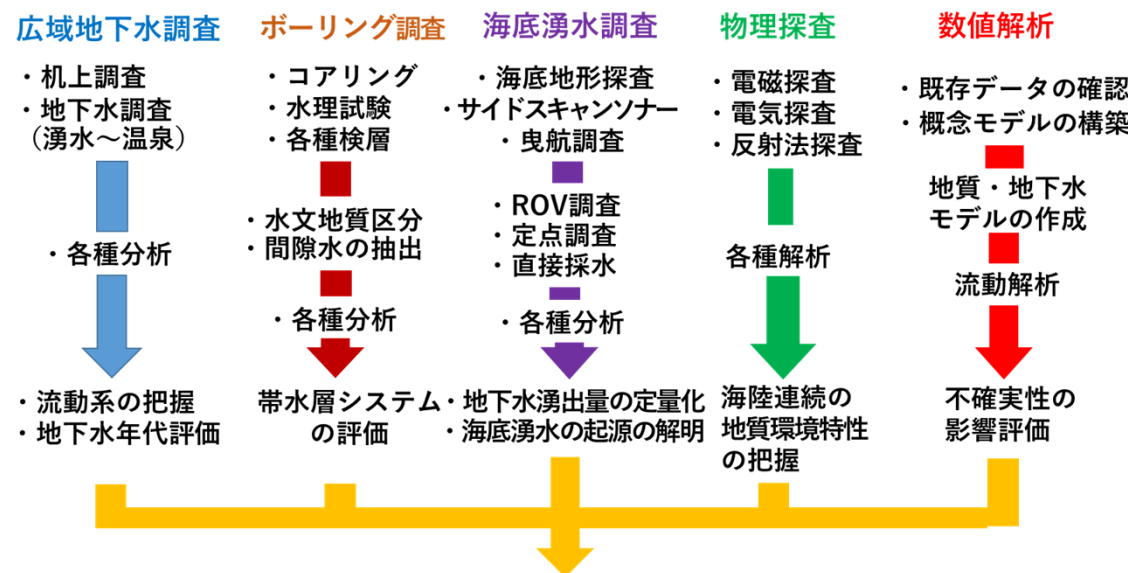


図2 調査技術の実証と体系化

処分場の設計と工学技術

- 処分場の建設及び閉鎖に関する研究開発
 - － 地層処分事業における遠隔・操業シミュレーションプラットフォームの構築（例えば図1）
 - － 閉鎖技術オプションの開発整備
 - － 詳細設計・施工技術オプションの開発整備（図2）
 - － 原位置状態確認に係る技術開発
 - 回収可能性関連技術の高度化開発
 - － 回収可能性の維持に伴う安全性への影響の定量化技術の開発
 - 人工バリア材の開発及び性能評価に関する研究開発
 - － 陰イオン吸着材の開発
 - － 100℃を超えた場合の影響を評価するための試験研究およびモデル化
 - － 過渡期から長期のニアフィールド環境変遷評価技術開発
 - － 緩衝材挙動評価（自己シール性（図3）、THM連成、等）
 - － ナチュラルアナログによる現象解析モデルの高度化
- 廃棄体（HLW, TRU）別ではなく一体的に研究開発を実施

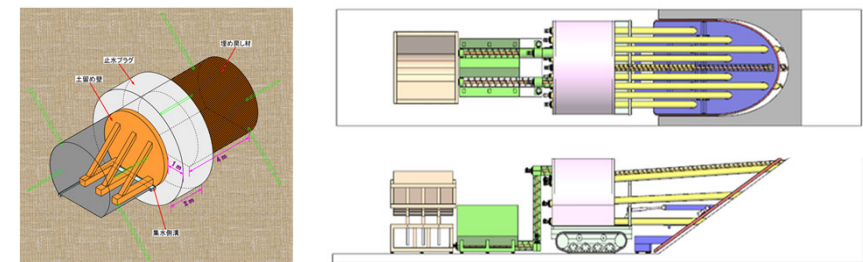
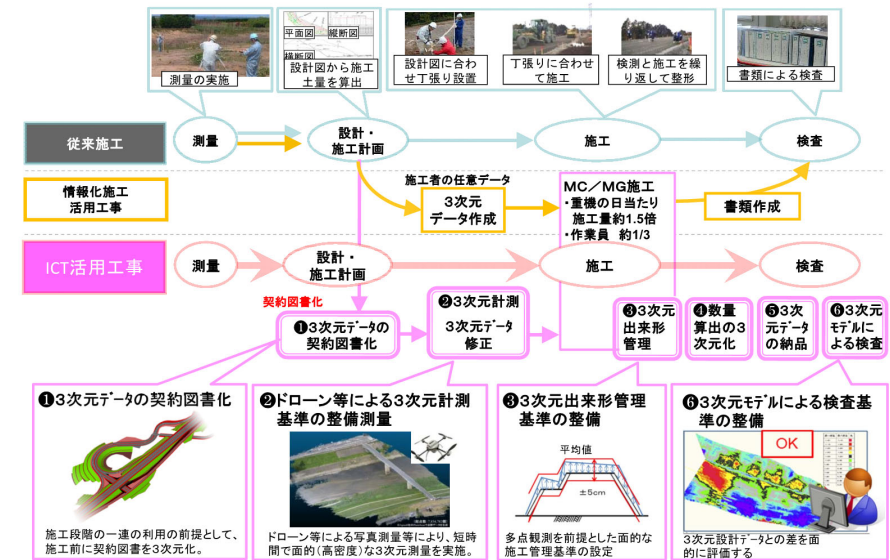


図2 粘土材料を主体とした施工試験のイメージ
(左：止水プラグの実規模実証、右：埋め戻し材の施工技術オプション)

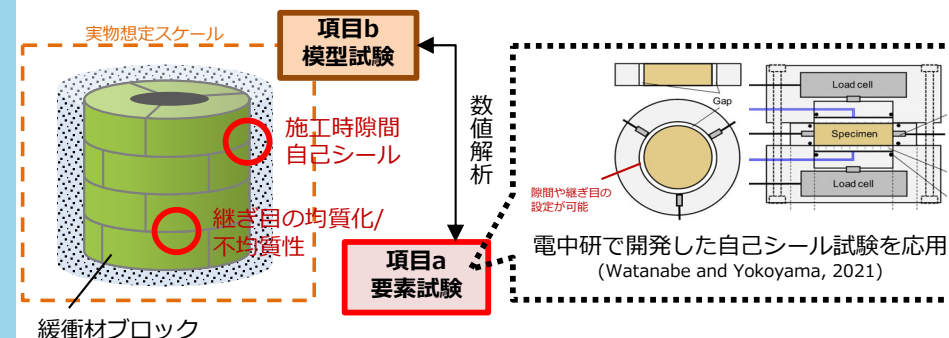


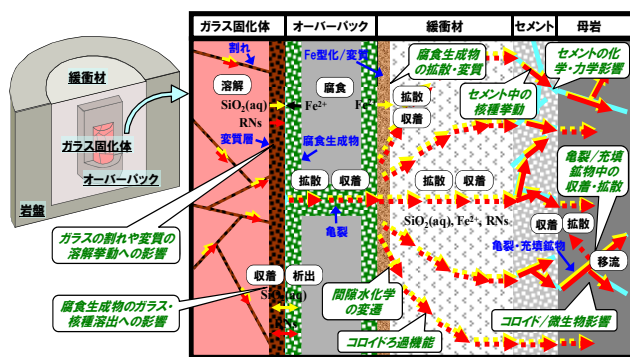
図3 緩衝材自己シール性試験のイメージ 12

閉鎖後長期の安全評価

- ニアフィールド中の核種移行挙動評価
 - － バリア間相互作用による環境変遷を考慮した核種移行評価技術開発
 - － ハル等廃棄体からの核種溶出
- 岩盤中の核種移行挙動評価
 - － 不均質場における核種移行モデルの構築
 - － 地球化学環境変遷等の核種移行への影響を評価するための技術開発

- 生活圏の核種移行評価
 - － 生活圏における核種移行及び被ばくプロセスの数学モデル化に関する検討
 - － 核種移行及び被ばくプロセスに用いる核種移行パラメータの設定手法の整備
- 廃棄体（HLW, TRU）別ではなく一体的に研究開発を実施

ニアフィールド中の核種移行評価

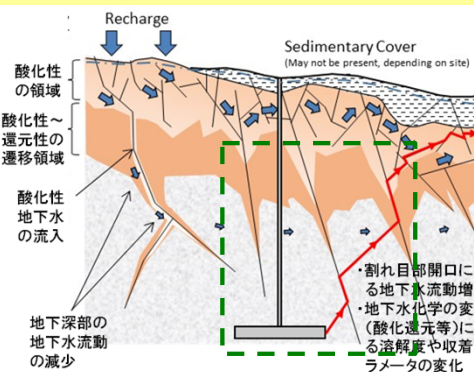


長期変遷・核種移行の現象理解

現象解析モデル開発

地層処分共通
+TRU個別課題

岩盤中の核種移行評価

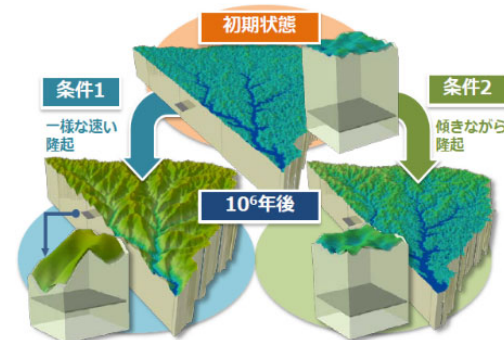


核種移行・地球化学の現象理解

現象解析モデル開発

安全評価への反映

生活圏の核種移行評価



表層環境・核種移行の現象理解

現象解析モデル開発

その他の項目

- 代替処分オプション
 - － 臨界安全評価や核種放出パラメータ設定手法の高度化
 - － 直接処分システムの成立性の検討に向けた技術基盤の整備
 - － その他代替処分オプションの評価
- 継続的な最先端の研究・技術開発
 - － 常に最新技術が適用できるようにしておくことへの意識醸成
- 分野間連携の強化（体系的な取組の実施）
 - － 分野間相互の情報のやりとりの円滑化
 - － 抜け落ち課題発見への期待
- 技術マネジメントを支える仕組み作り
 - － 国内外の大学や研究機関等との連携（共同研究等）の推進
 - － 人材育成プログラムの開発や継続を通じた若手人材の育成

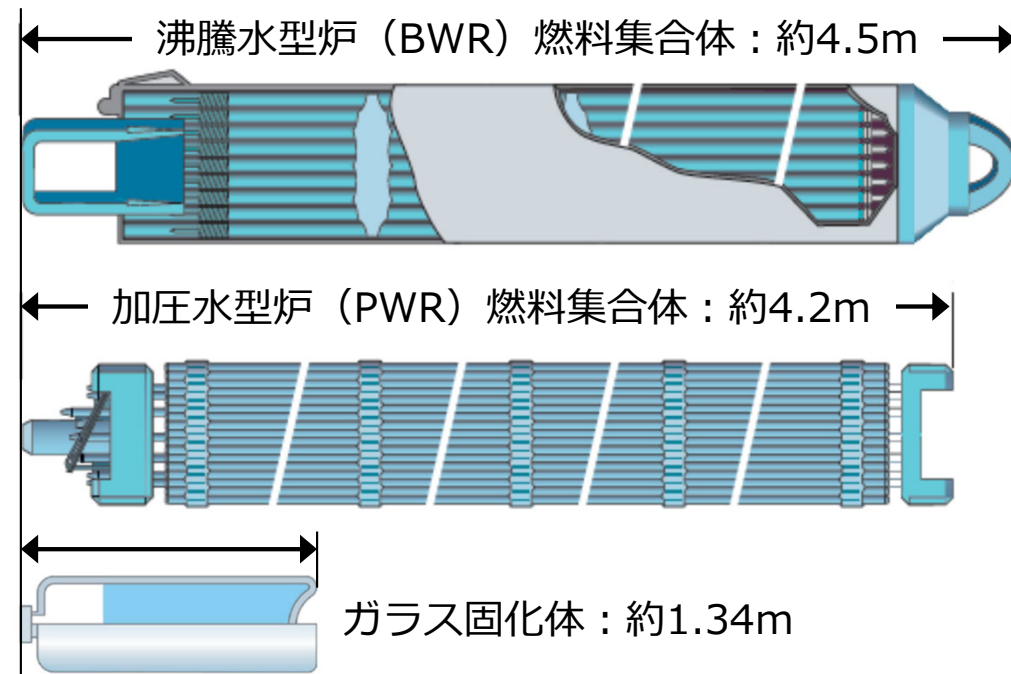


図1 ガラス固化体と使用済燃料の長さの比較

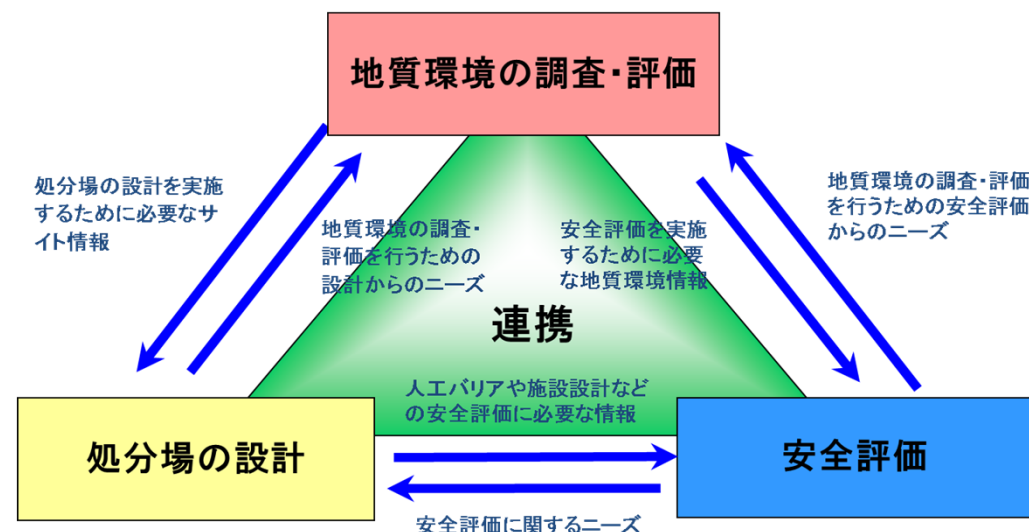
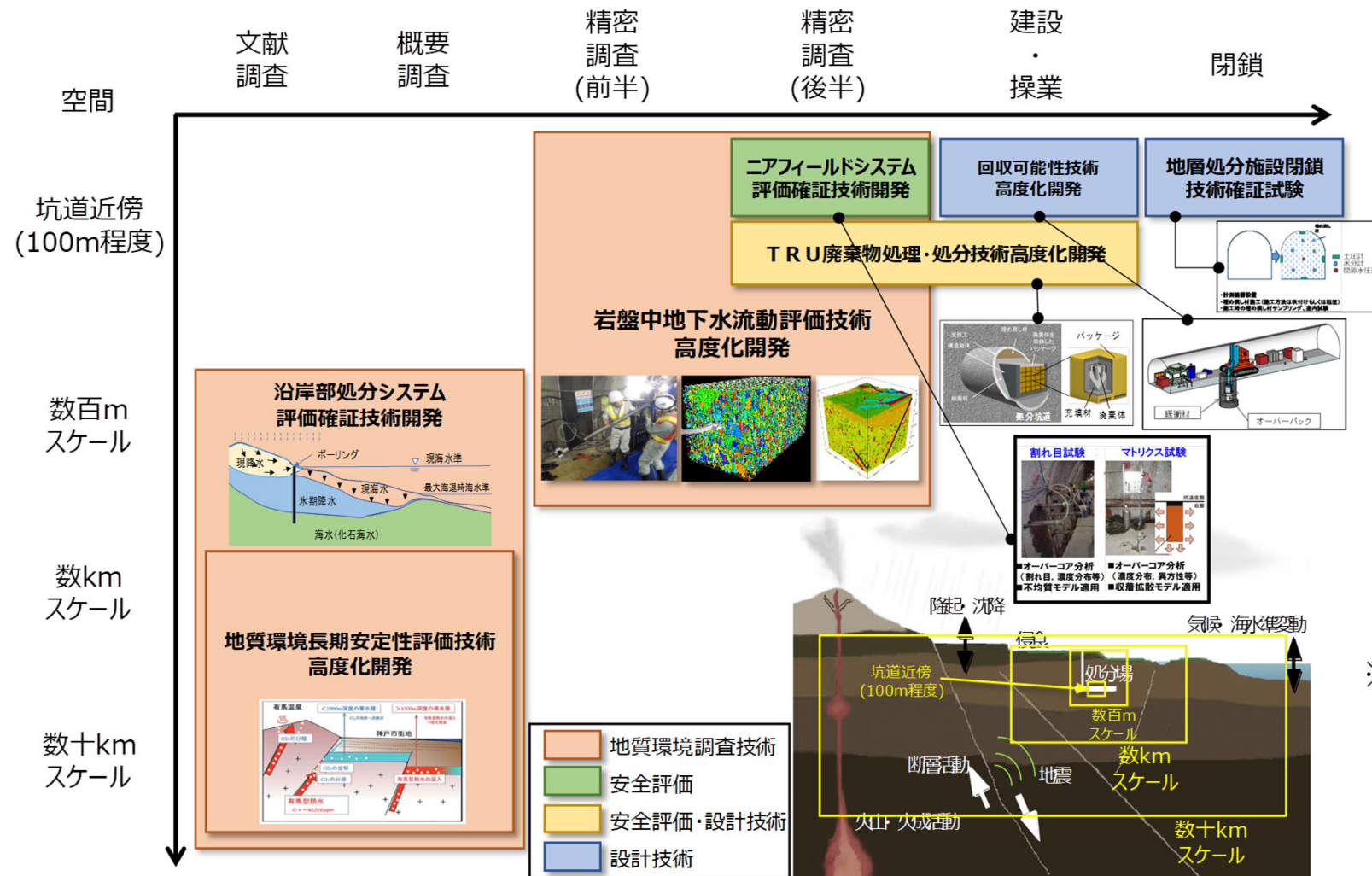


図2 地質環境の調査・評価、処分場の設計、安全評価の連携（NUMO, 2021）

まとめ

- 「地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）」に沿って、処分事業における各段階や各スケールに応じて着実に研究開発を進めている。
- 一方、処分事業として文献調査が開始され、対話活動が活発になっている現在では、地質環境の長期安定性をわかりやすく説明するとともに、個別要素技術だけではなく体系的な技術開発を重要視する必要性を認識。



※この他に「直接処分等代替処分技術高度化開発（安全評価技術）」を実施中