

令和4年度における個別課題の現状および今後の予定

①高レベル放射性廃棄物等の地層処分システムに関する研究開発

令和5年3月29日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

本日の内容

- 第4期中長期計画及び年度計画
- 地層処分に対するJAEAの役割
- 令和4年度の成果

(1)地層処分システムに関する研究開発

- ① 処分システムに関する工学技術の信頼性向上
- ② 安全評価手法の高度化

(2)代替処分オプションの研究開発

- ① 処分容器の挙動評価
- ② 使用済燃料の挙動評価
- ③ その他の代替処分オプションの調査

* 本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業(高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597])の成果の一部を利用した。

第4期中長期計画及び年度計画

(2) 高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発

3) **高レベル放射性廃棄物等の地層処分システムに関する研究開発**

中長期計画（令和4年4月1日～令和11年3月31日）

深地層の研究施設計画や地質環境の長期安定性に関する研究の成果も活用し、処分事業の進展に応じ、関係機関と一層の連携を図りながら、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る**処分システム構築・評価解析技術の先端化・体系化**を図る。

年度計画（令和4年4月1日～令和5年3月31日）

地層処分に係る**処分システムの構築及び構築したシステムの評価**を行うための解析技術の先端化・体系化を図るための検討の一環として、令和4年度は、多重バリアの構成要素間の相互作用等がもたらす**場の状態の長期的な変遷及びこれを反映した核種移行**に関するデータ取得・データベース整備、モデル開発とその検証や適用性の確認を行う。その際は、地層処分基盤研究施設及び地層処分放射化学研究施設を活用し、また、深地層の研究施設計画や地質環境の長期安定性に関する研究の成果も用いて、関係機関と一層の連携を図りながら進める。

第4期中長期計画及び年度計画

- (2) 高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発
- 4) **代替処分オプション**の研究開発

中長期計画（令和4年4月1日～令和11年3月31日）

将来に向けて幅広い選択肢を確保し、柔軟な対応を可能とする観点から、海外の直接処分等に関する最新の技術動向を調査するとともに、高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発の成果を活用しつつ、**使用済燃料の直接処分等代替処分オプション**に特徴的な現象に着目した研究を着実に進める。

年度計画（令和4年4月1日～令和5年3月31日）

使用済燃料の直接処分に特徴的な現象を把握するため、令和4年度は、処分容器の有力な候補材料である銅の止水機能に影響を及ぼす可能性が指摘されている、硫化物が存在する環境下での**銅の腐食挙動**や、地下水中の炭酸が使用済燃料の**長期的な溶解挙動**に及ぼす影響に関するデータの取得等を進める。また、海外における最新の技術動向の調査の一環として、直接処分以外のその他代替処分オプションのひとつである**超深孔処分**を対象として、諸外国での事例検討の調査、成立性の検討に係る諸条件や技術の調査を実施する。

地層処分に対する JAEA の役割

処分事業 (NUMO)

社会の合意形成への寄与
実効的な技術共有

成果の活用

安全規制

JAEA

核燃料サイクル工学研究所
(地層処分基盤研究施設、
地層処分放射化学研究施設)

- 設計・安全評価に関する基盤研究
- NUMOとの共同研究

幌延深地層研究センター
東濃地科学センター

知識ベース等の
構築・公開

<https://www.jaea.go.jp/04/tisou/toppage/top.html>12

連携大学院
専門職大学院
実習生受入れ等

人材確保・育成等



地層処分システムに関する研究開発

(1) 処分システムに関する**工学技術**の信頼性向上

- 1) 人工バリア等の基本特性データベースの拡充
- 2) 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

(2) **安全評価**手法の高度化

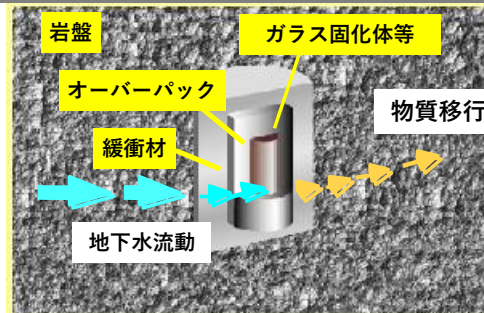
- 1) 放射性核種の移行に係る現象理解とそれに基づく評価モデルの高度化
- 2) 放射性核種の移行に係るデータベース開発

地層処分基盤研究施設（エントリ）



人工バリアシステムの健全性評価試験

地層処分における核種移行モデルの高度化



- 熱力学・収着・拡散データベース
- 緩衝材基本特性データベース
- グラウトデータベース
- ガラスの溶解に関するデータベース
- オーバーパックデータベース

各種データベースの構築（HPで公開中）

地層処分放射化学研究施設（クオリティ）



放射性物質の濃度分析



還元環境を模擬したグローブボックス内における放射性物質移行データの取得

放射性物質の溶解・移行挙動等の試験研究

人工バリアの長期性能評価に関する室内試験やデータベースの構築

多重バリアシステムの構成要素と期待される安全機能

廃棄物自体の人間への直接的な影響の抑制

→ 場所の選定

地下水を介した人間への影響の抑制

→ 多重バリアシステム
(天然バリア+人工バリア) 構築

地層処分に適切な地層(天然バリア)

長期的な安定性

- ・火山活動がない
- ・活断層が存在しない
- ・著しい隆起・侵食が生じない
- ・気候変動によって著しい影響を受けない

人工バリアの設置環境

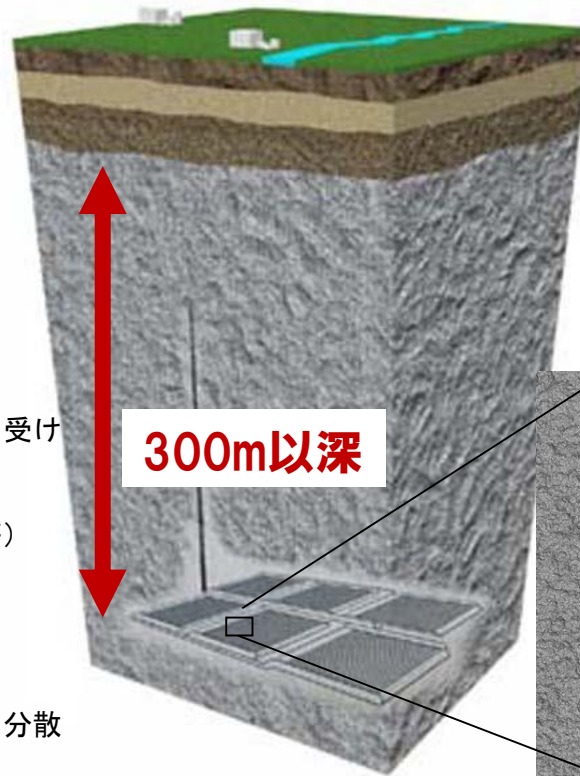
- ・好ましい地下水化学（還元性等）
- ・小さな地下水流速
- ・力学的安定性
- ・人間環境からの物理的障壁

天然バリアとしての機能

- ・放射性核種の移行抑制と希釈・分散

将来の人間活動の影響回避

- ・資源が存在しない



300m以深

人工（工学的）バリア

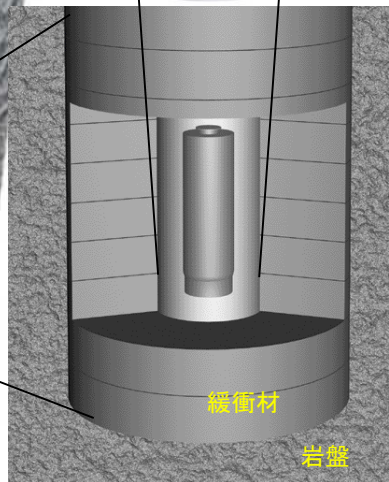


ガラス固化体 直径43cm
(ステンレス製キャニスタに充填されたもの)

- ・放射性核種を均一かつ安定に固定
- ・高い化学的耐久性により地下水への放射性核種の溶出を抑制
- ・熱や放射線に対する安定性

オーバーパック 厚さ19cm
(炭素鋼)

- ・ガラス固化体の発熱や放射能が高い期間、地下水とガラス固化体の接触を阻止
- ・地下水との反応によりガラス固化体近傍の還元性を維持
- ・放射性核種の腐食生成物への収着



緩衝材 厚さ70cm
(ベントナイト+ケイ砂)

- ・低透水性（オーバーパックと地下水の接触抑制）
- ・小さな物質移動速度
- ・放射性核種の移行遅延（収着）
- ・膨潤性と可塑性
- ・化学的緩衝性
- ・空隙水中での低い溶解度
- ・コロイド、微生物、有機物の移動に対するフィルター効果

令和4年度の実施内容

(1) 処分システムに関する**工学技術**の信頼性向上

1) **人工バリア等の基本特性**データベースの拡充

・**オーバーパック**の腐食挙動:

設計の前提条件を逸脱した環境条件や腐食性の高い地下水を想定した条件に係るデータ取得のうち、高炭酸塩条件や酸性水条件での炭素鋼への腐食影響のデータを拡充

・**緩衝材**の基本特性:

温度を制御した緩衝材の膨潤圧試験や圧密試験を実施。これにより、緩衝材の膨潤圧や圧密特性の温度依存性などの過渡期(廃棄体定置後のTHMC状態が大きく変化する期間)の緩衝材の力学挙動の理解に資するデータを取得

・**データベース整備・更新**(現在の状況):

- オーバーパックデータベース ; 1,988件
- 緩衝材基本特性データベース; 2,219件
- グラウトデータベース ; 材料203件、施工215件

2) **人工バリア等の長期複合挙動**に関する研究

・**セメント-緩衝材**相互作用評価モデルの高度化:

普通ポルトランドセメント(OPC)や低アルカリ性セメント(HFSC)と緩衝材を接触させた試験の接触界面における変質等のデータにより、セメント-緩衝材相互作用評価モデルの妥当性を確認

・**熱-水-応力-化学連成**挙動の解析評価:

幌延人工バリア性能確認試験で取得されたデータを用いて、THMC解析モデルへの塩水の浸潤が緩衝材の透水性に与える影響の追加、及び温度勾配水分拡散係数の更新を行い、そのモデルの適用性を確認

令和4年度の実施内容

(2) 安全評価手法の高度化

1) システム性能評価に係る手法の開発

・隆起・侵食を考慮した安全評価手法の開発:

地下から地表までの広域の核種移行挙動に着目する際に重要となる可能性のある、隆起・侵食による地形・処分場深度の変遷が地下水流動を介して核種移行に与える影響について、その有無や程度・傾向等の評価手法を構築

・生活圈被ばく線量評価の信頼性向上:

地形等の具体的な特徴を反映した生活圈評価モデル構築手法に係る検討として、生活圈構成要素のサイズや物質移行量を定量的に与えるための手順を整理

2) 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発

・緩衝材・岩石中の核種移行モデル開発:

バリア材料間の相互作用による環境変遷や高炭酸条件の影響を考慮できる緩衝材中の核種移行モデルを構築。また、岩石中(結晶質岩:グリムセルや瑞浪等, 堆積岩:幌延等)の割れ目部を対象とした室内・原位置試験に基づき割れ目部の不均質性等を考慮した核種移行モデルを構築

・コロイド・有機物・微生物影響評価手法:

幌延地下研究施設を活用した原位置試験等により、コロイド・有機物・微生物の特性やその核種移行への影響に係るデータ取得と現象解明を進め、それらを反映した核種移行評価モデルや評価手法を構築

・データベース整備・更新

(現在の状況):

- 熱力学データベース(平衡定数) ; 2,182件
- 収着分配係数データベース ; 79,072件、文献数 853編
- 拡散係数データベース ; 5,013件、文献数 288編
- ガラス溶解データベース ; 数値データ23,288件、文献数237編

(1) 処分システムに関する工学技術の信頼性向上 (研究開発成果事例)

1) 人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発

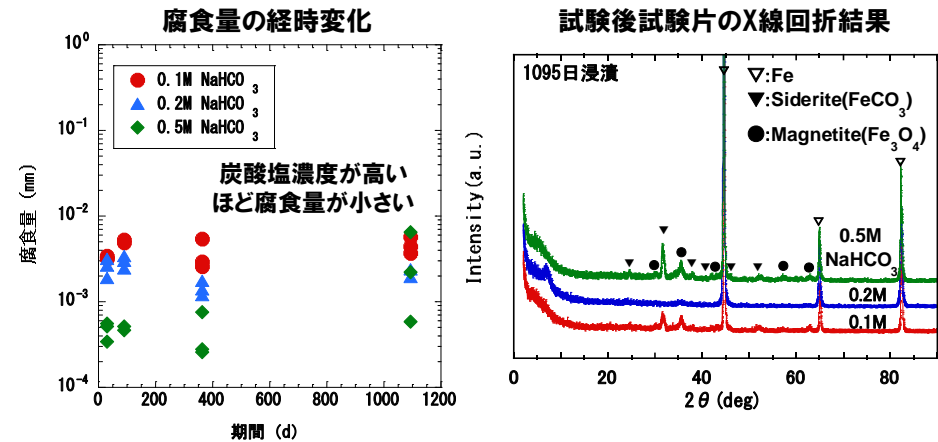
オーバーパッキの腐食挙動

【令和4年度の成果】

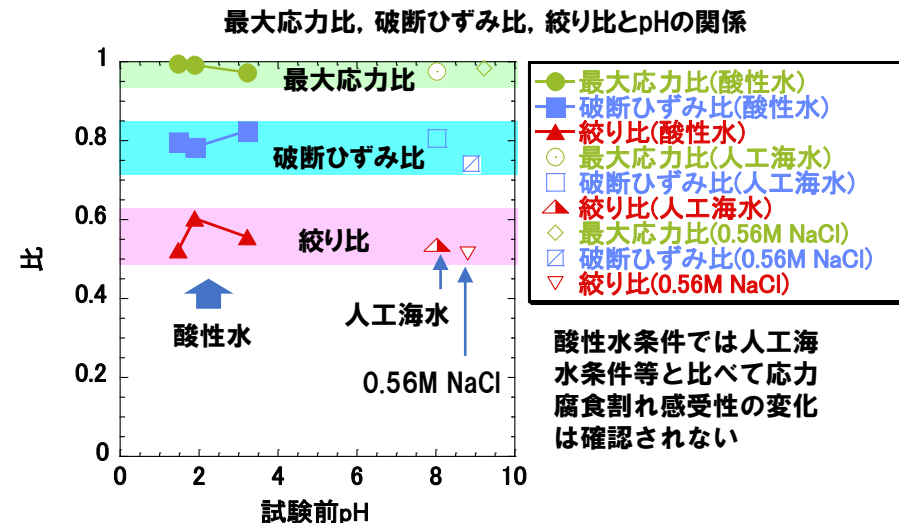
- 温度や地下水水質等が炭素鋼の腐食へ与える影響に関し、設計の前提条件を逸脱した条件や腐食性の高い地下水を想定した条件を含め、より広範な環境条件での腐食試験を実施した。
- 高炭酸塩環境を想定した条件として、緩衝材共存系で炭酸塩濃度を変化させた浸漬試験を実施し、炭酸塩濃度が高いほど腐食量が小さくなることを確認した。腐食生成物のシデライトやマグネタイトが腐食の抑制に関係している可能性がある。
- 酸性水環境を想定した条件として、緩衝材共存系でpH1.5～3の範囲での応力腐食割れ試験を実施し、人工海水条件等と比べて応力腐食割れ感受性が変化しないことを確認した。

【意義／反映先】

- 広範な環境条件に対し、耐食性の観点から炭素鋼オーバーパッキの適用性や堅牢性の推定に資するための基礎的情報を提供。



高炭酸塩環境を想定した条件での浸漬試験結果



酸性水環境を想定した条件での応力腐食割れ試験結果

(1) 処分システムに関する工学技術の信頼性向上 (研究開発成果事例)

1)人工バリア等の基本特性データベースの拡充

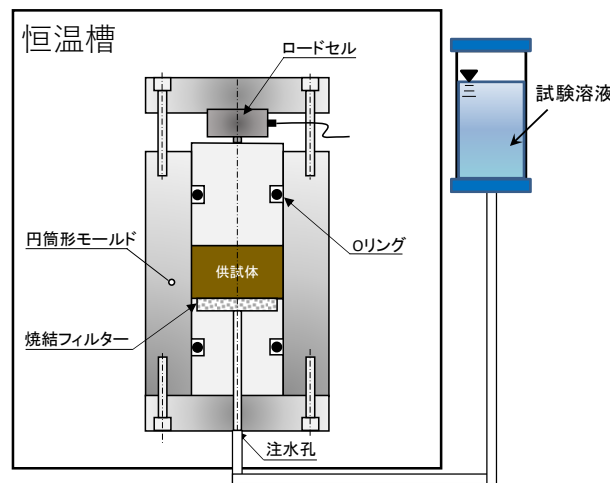
緩衝材の基本特性

【令和4年度の成果】

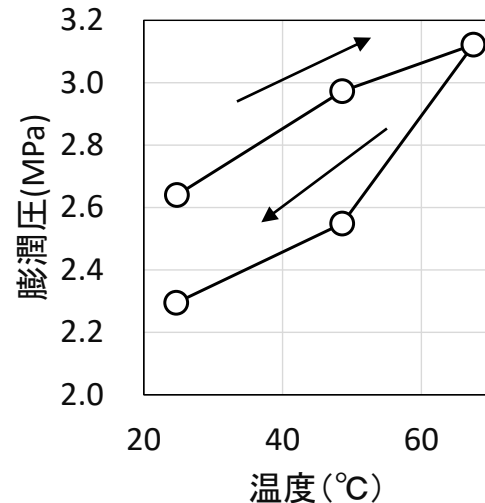
- 緩衝材の力学特性の温度依存性を考慮した力学モデルの構築に向けて、温度を制御した膨潤圧試験や圧密試験を実施した。
- 膨潤圧試験では温度増加により膨潤圧が増加する傾向があることや、圧密試験では温度増加に伴い間隙比-载荷圧関係が下方に移動することなど、緩衝材の力学特性の温度依存性に関する基礎的な知見を取得できた。

【意義／反映先】

- 過渡期(廃棄体定置後のTHMC状態が大きく変化する期間)における緩衝材の力学挙動の温度依存性に関する理解。

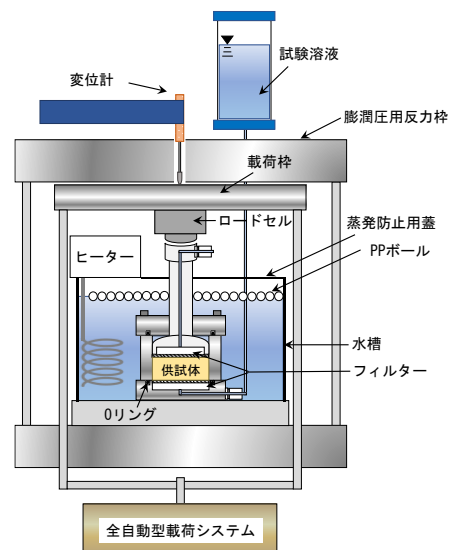


試験装置概略図

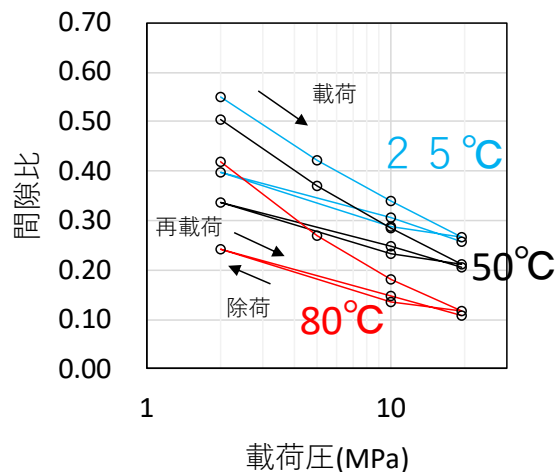


試験結果例

温度を制御した膨潤圧試験例



試験装置概略図



試験結果例

温度を制御した圧密試験例

(1) 処分システムに関する工学技術の信頼性向上 (研究開発成果事例)

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

セメントー緩衝材相互作用評価モデルの高度化

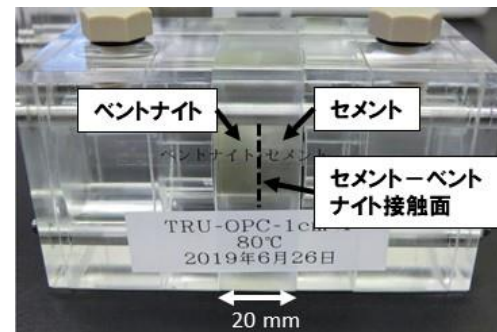
【令和4年度の成果】

➤坑道の支保工等での使用が検討されているセメント(HFSC及びOPC)を対象に、材料の違いがセメント・緩衝材(ベントナイト)の劣化・変質に与える影響とその温度依存性を把握するための試験／分析と、劣化・変質を評価するためのモデル開発を実施した。

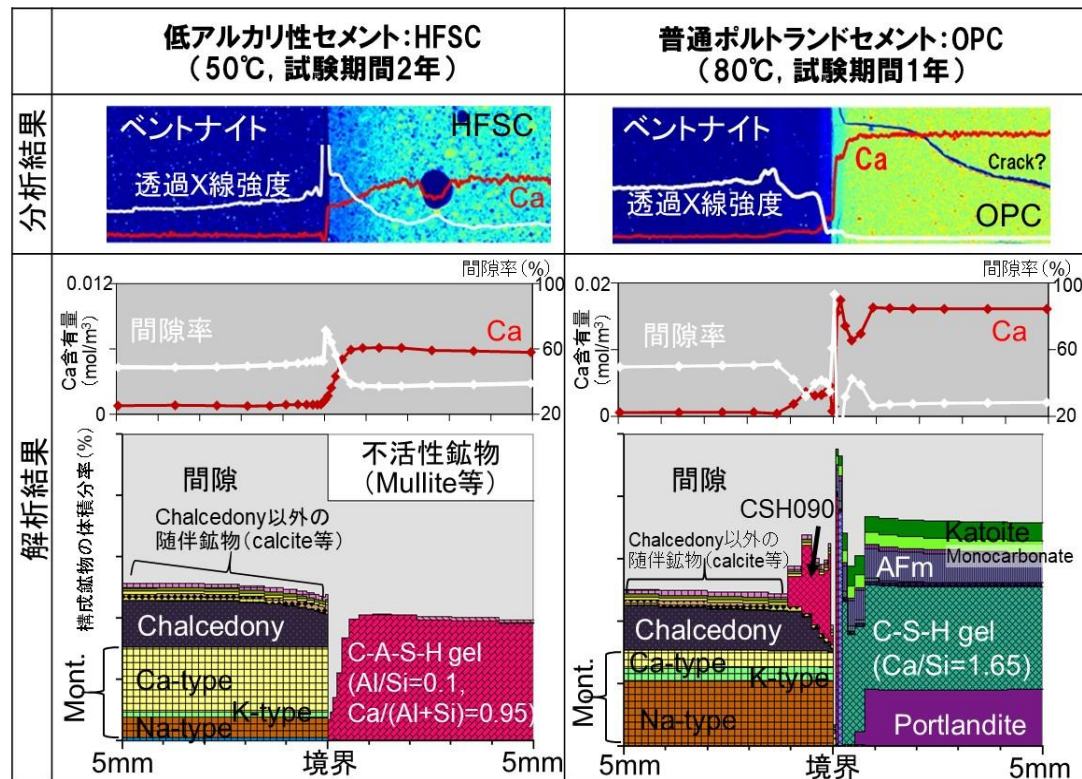
➤試験後試料の分析により、セメントと緩衝材の境界付近における間隙率やCaの濃度の分布を把握した。また、境界付近におけるこれらの分布の違いを、セメントー緩衝材の相互作用を取り込んだ反応輸送解析により、構成鉱物の変化と関連づけて概ね解釈可能となった。

【意義／反映先】

➤セメントー緩衝材の相互作用による人工バリア等の長期複合挙動評価に資するための評価モデルの高度化に反映。



セメントと緩衝材を接触させた試験の概観



試験後試料の分析結果とモデルによる解析結果の比較 11

(1) 処分システムに関する工学技術の信頼性向上 (研究開発成果事例)

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

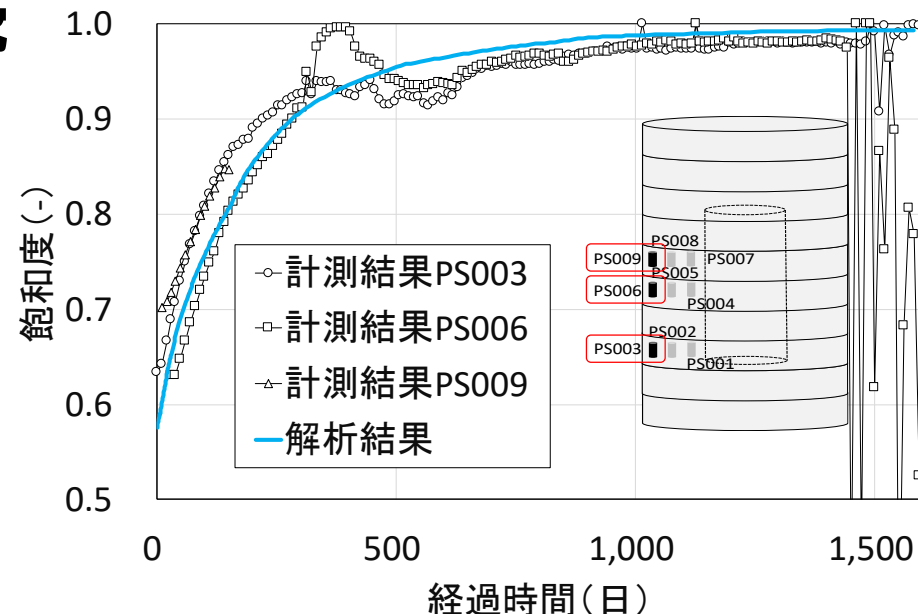
熱-水-応力-化学連成挙動の解析評価

【令和4年度の成果】

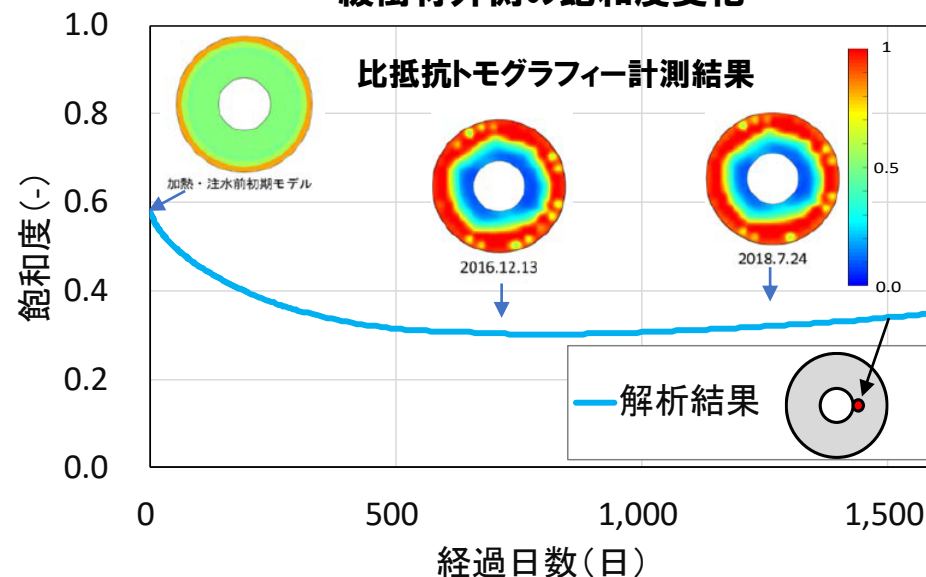
- 幌延人工バリア性能確認試験で取得されたデータを用いて、THMC解析モデルへの塩水の浸潤が緩衝材の透水性に与える影響の追加、及び温度勾配水分拡散係数の更新を行い、そのモデルの適用性を確認した。
- THMC連成解析モデルによる解析では、緩衝材外側の浸潤挙動(飽和度変化)を概ね良好に再現し、緩衝材内側の飽和度が低下する挙動も比抵抗トモグラフィ計測結果と整合的な結果が得られた。

【意義／反映先】

- 処分坑道・人工バリアの過渡期(坑道の掘削・閉鎖・地下水の飽和)におけるTHMC連成挙動評価手法の整備。
- 処分施設の設計検討へ反映。
- オーバーパック腐食評価に必要なとなる緩衝材中の環境などの情報提供。



緩衝材外側の飽和度変化



緩衝材内側の飽和度変化

(2) 安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

1) システム性能評価に係る手法の開発

隆起・侵食を考慮した安全評価手法の開発

【令和4年度の成果】

地下から地表までの広域の核種移行挙動に着目する際に重要となる可能性のある、隆起・侵食による地形・処分場深度の変遷が地下水流動を介して核種移行に与える影響について、その有無や程度・傾向等を評価することを目的として、複数の解析技術・ツールを組み合わせた評価手法を構築した (図1)。

この手法を用いて、地形の変遷パターン(隆起速度、隆起速度分布(傾動あり/なし))や処分場の位置(流出域、涵養域)を変化させた場合の処分場からの核種(粒子)の移行距離等の変化を感度解析的に検討した。

その結果、隆起・侵食による地形・処分場深度の変遷の影響は、処分場の位置(流出域、涵養域)で異なる傾向を示す可能性が示唆された(図2):

- 流出域: 隆起速度や傾動の有無によらず粒子の移行距離・移行時間の変化の傾向はほぼ同様
- 涵養域: 移行距離等の変化が流出域の場合よりも複雑

【意義／反映先】

地下から地表までの広域の核種移行挙動への隆起・侵食の影響評価の信頼性向上の観点での、評価技術詳細化の課題、概要調査や精密調査での取得が期待される情報等の具体化。

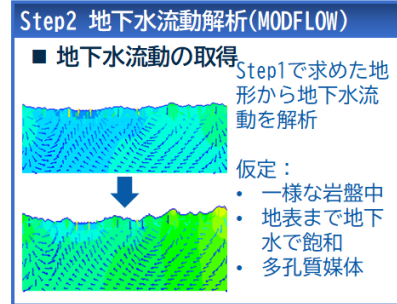
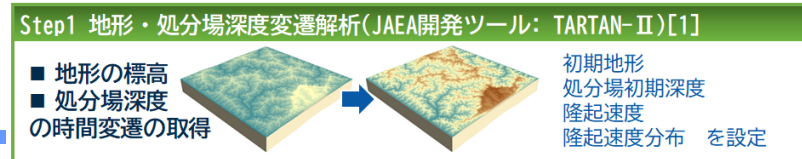


図1 隆起・侵食による地形・処分場深度の変遷が地下水流動を介して核種移行(粒子の移行)に与える影響の評価手法



図2 隆起・侵食に伴う処分施設からの粒子移行距離の変化 (ケース番号の後の括弧内の数値は隆起速度を示す)

(2) 安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

1) システム性能評価に係る手法の開発

生活圏被ばく線量評価の信頼性向上

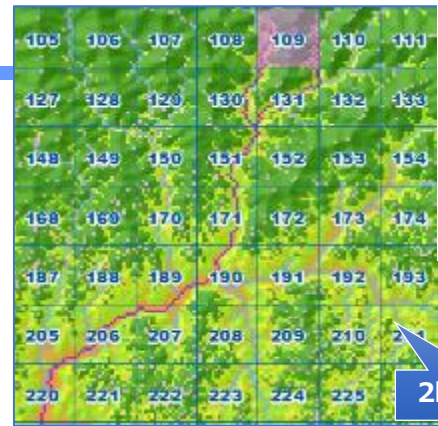
【令和4年度の成果】

- 地形等の具体的な特徴を反映した生活圏評価モデル構築手法に係る検討として、これまで概念的に設定していた生活圏構成要素や物質移行プロセスの特徴について、生活圏構成要素のサイズや物質移行量を定量的に与えるための手順を整理し設定を試行した。
- 地形の標高データを基にして生活圏構成要素のサイズや物質移行量を一定のアルゴリズムに則り算出できるようにしたことにより(ArcGISの計算モデル構築機能を活用)、生活圏評価モデルを構築する際のコンパートメントの大きさやコンパートメント間の移行係数を一貫した考えに基づき設定できる見通しが得られた。

【意義／反映先】

- 地形等の情報に基づく生活圏構成要素のサイズや物質移行量の設定のための手法と手順は、概要調査や精密調査によって得られた場の情報に基づき、場の特徴を反映した生活圏評価モデルを構築していくための基盤技術となる。

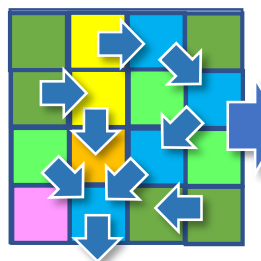
① 試行対象領域の設定



- 青線で示すグリッドは任意に区分した2km×2kmの領域
- 生活圏への核種流入域(GBI)をグリッド109(図中赤色網掛け)内の任意の位置に設定
- 河川1はGBIがあるグリッド109から南西方向に走る核種を含む河川、河川2には核種を含まないと仮定



② ArcGISの計算モデル構築機能を活用した地表水の移行量の算出



出発グリッド・土地利用	到着グリッド・土地利用	セル数	流量
1 森林	1 河川	〇〇	●●
1 水田	1 河川	〇〇	●●
1 河川	3 河川	〇〇	●●

- グリッドごとに土地利用間の移行量、グリッド間の移行量を集計

③ 生活圏構成要素のサイズや構成要素間の物質移行量の設定

グリッド190

河川1				4.9E+08		
1.6E+06	市街地	1.2E+06		4.2E+05	1.2E+04	
3.5E+05	5.0E+06	水田	0			2.0E+05
0	1.2E+04	8.4E+04	畑	グリッド189		
				河川1		
				6.6E+05	市街地	1.5E+06
		3.6E+05		2.4E+04	3.7E+06	水田

- グリッド190-189間の地表水の移行方向(青色矢印)と移行量(セル内数値;単位 [m³/y])

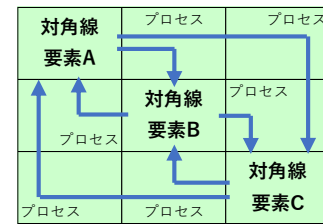


図 地形等の具体的な特徴を反映した生活圏構成要素のサイズや構成要素間の物質移行量の設定例

(2) 安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

2) 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発

収着・拡散モデル/データベースの開発 (緩衝材)

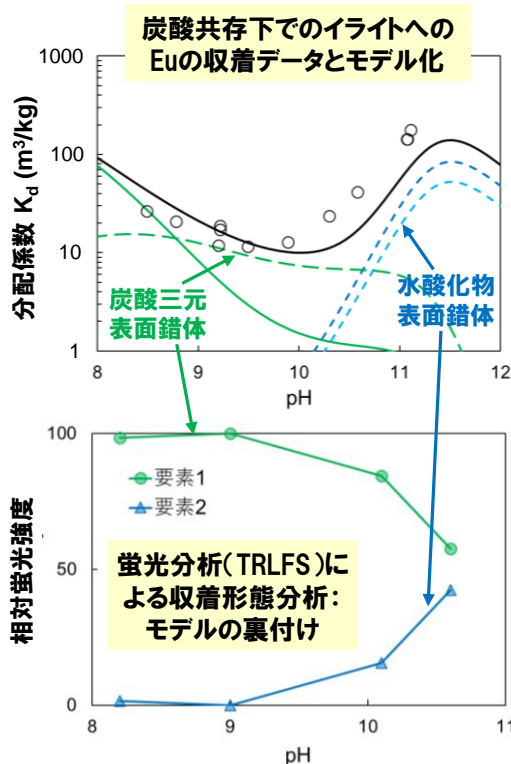
【令和4年度の成果】

- バリア材料間の相互作用に伴う環境変遷や高炭酸濃度の間隙水条件に伴う緩衝材・粘土中の核種移行特性の変化に関する現象解明を進め、定量評価モデルの構築に反映。
- 高炭酸条件による影響が大きいアクチニド元素を対象に、炭酸共存下での粘土鉱物中の収着・拡散現象を、先端的な分析技術や計算科学技術を適用して解明した(左図:収着機構分析、右図:粘土中移行挙動解析)。
- また、これまでに開発してきた粘土中の収着・拡散モデルを、高炭酸条件まで適用可能なモデルに拡張するとともに、核種移行解析・不確実性解析ツールに統合することで、炭酸影響を含めた評価を可能とした(下図:評価例)。

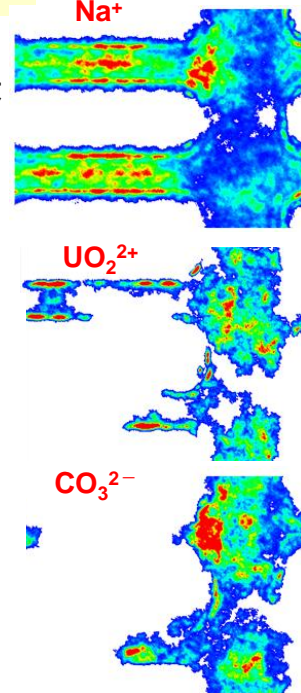
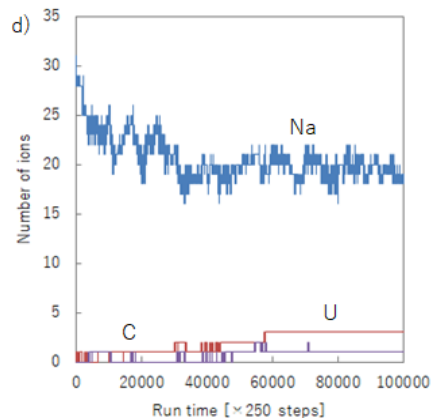
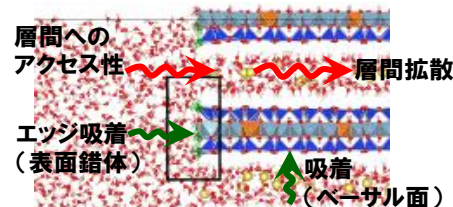
【意義/反映先】

- NUMOの包括的技術報告書で課題として挙げられた高炭酸条件での信頼性の高い核種移行評価を実現可能とした。

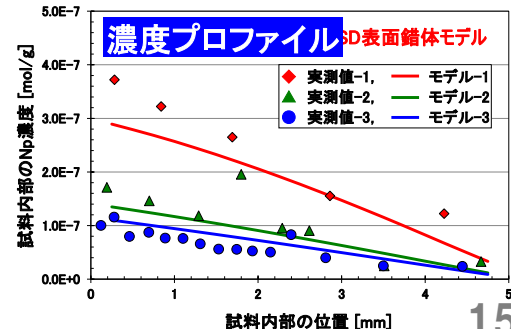
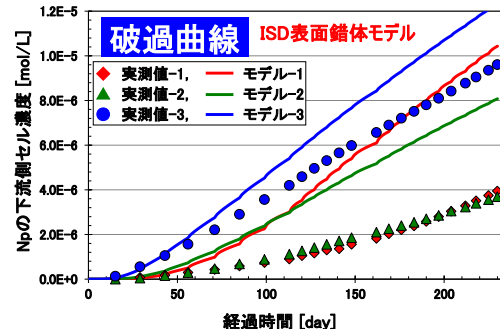
高炭酸条件下での粘土バリア中のアクチニドの収着・拡散モデルの高度化



分子動力学 (MD) 計算によるウラン-炭酸錯体の粘土層間へのアクセス性評価



Np(V)のベントナイト中の拡散挙動の炭酸依存性の核種移行モデルによる評価



(2) 安全評価手法の高度化(研究開発成果事例)

2) 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発

収着・拡散モデル/データベースの開発(岩石)

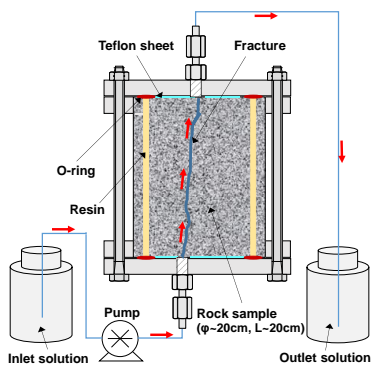
【令和4年度の成果】

➢ 結晶質岩(スイスグリムゼルや瑞浪等)と堆積岩(幌延等)の岩石マトリクス及び割れ目部を対象に、体系的な室内・原位置試験を通じて、岩盤中の核種移行現象解明とより精緻な核種移行モデルを構築。

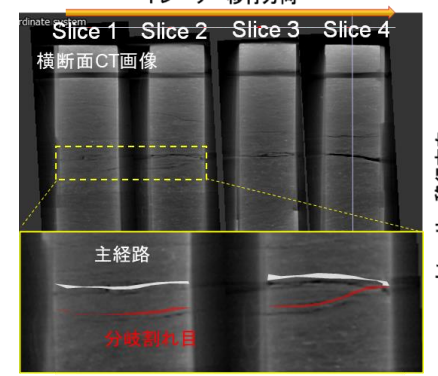
➢ グリムゼルの大型コア(約20 cm)を対象に実施した室内トレーサー試験試料を対象に、割れ目の開口幅やガウジ層の充填状況等の不均質性に係るデータをX線CTデータから取得(上図)するとともに、それら割れ目特性等を反映したモデルの改良と破過データの解釈を試み、割れ目部の不均質性を考慮した核種移行モデルの適用性を評価(下図)。

スイス・グリムゼルの大型コアを用いた室内トレーサー試験・分析とモデル化の結果

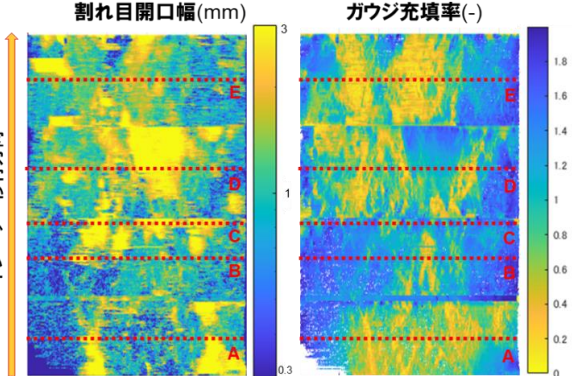
室内トレーサー試験装置



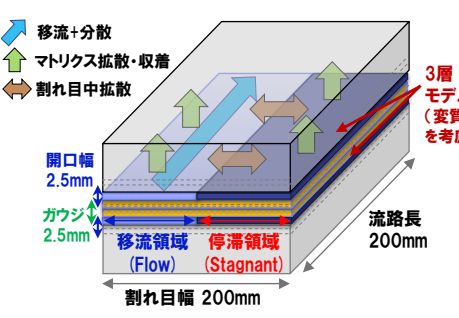
グリムゼルの大型コア試料のX線CT像



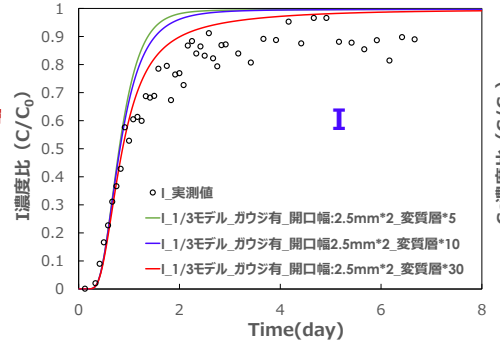
X線CT分析による主経路割れ目の不均質性評価



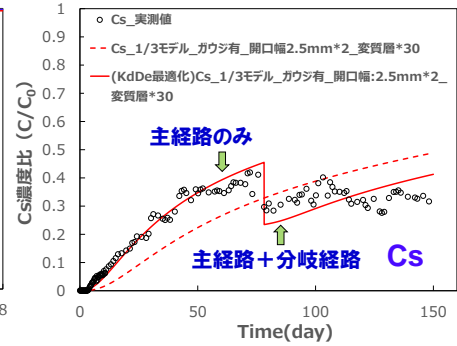
グリムゼル割れ目中核種移行の概念モデル



非収着性トレーサー:ヨウ素の解析結果



収着性トレーサー:セシウムの解析結果



【意義/反映先】

➢ 複雑な天然の割れ目を含む岩石を対象に、割れ目等の不均質性の把握とそれを反映した核種移行モデルの構築手法を提示。

(2) 安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

2) 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発

コロイド・有機物・微生物影響評価手法

【令和4年度の成果】

➤ 幌延地下研究施設を活用して、コロイド・有機物・微生物の特性やその核種移行への影響に係る室内および原位置でのデータ取得と現象解明を進め、それらを反映した核種移行評価モデルや評価手法を構築。

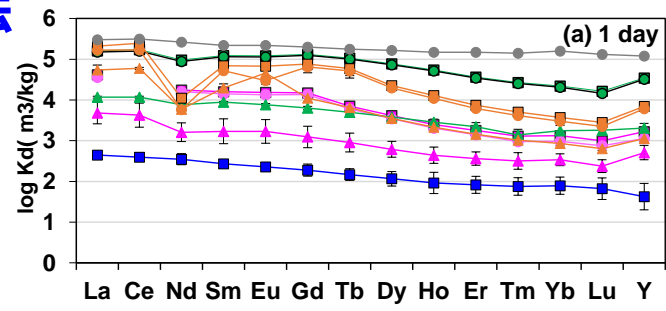
➤ 幌延の深部原位置地下水を対象に、全コロイド(無機/有機)およびバイオコロイドへの希土類元素*やセレンの収着データを拡充し、微生物コロイドの寄与を把握(上図)するとともに、微生物代謝との関連性を解明(中図:希土類、下図:セレン)。

*アクチノイドのアナログ元素として使用

【意義／反映先】

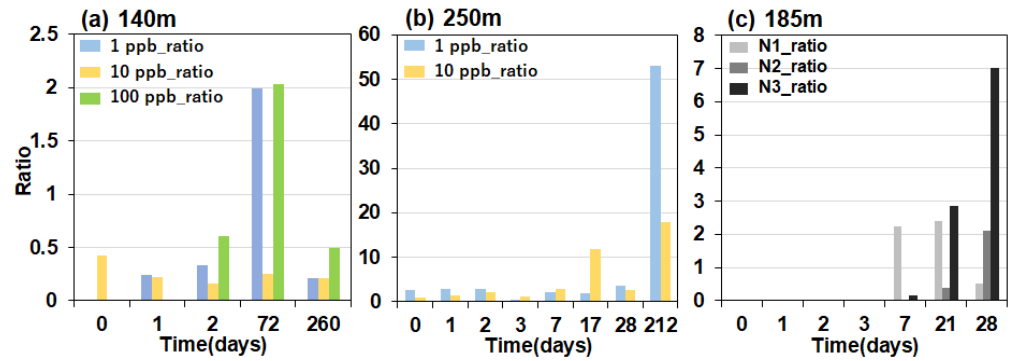
➤ 実際の原位置条件への適用性を念頭に、室内および原位置でのデータ取得手法を構築するとともに、核種移行への微生物等の影響プロセスのモデル・評価手法を提示。

地下水中のコロイドへの希土類元素の収着分配係数評価



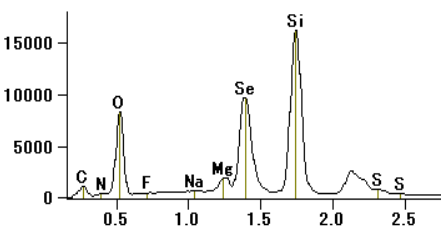
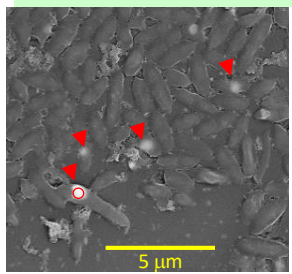
- 140_全コロイド
 - ▲ 140_無機コロイド
 - 140_バイオコロイド
 - 250_全コロイド
 - ▲ 250_無機コロイド
 - 250_バイオコロイド
 - 185_全コロイド
 - ▲ 185_無機コロイド
 - 185_バイオコロイド
 - 350_全コロイド
 - Tanaka et al (2010)_pH6.91_100ppb
- バイオコロイドを含むコロイドによる核種の収着効果を核種移行評価モデルに反映させるための収着分解係数のデータベースを整備

各深度において希土類元素により代謝が活性化する微生物の経時変化



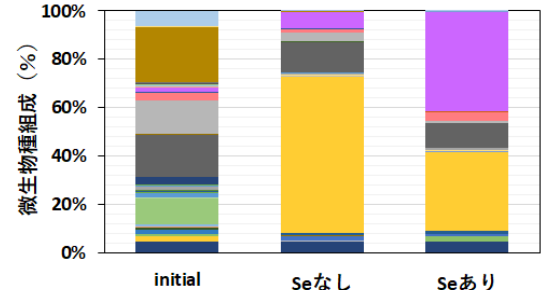
350 m地下水では活性化する微生物が未検出/低頻度。

地下水中の微生物とSe(IV)の取込挙動評価



培養細胞のSEM/EDS結果

- ・地下水中の微生物とセレンの相互作用に関する現象解明に向けたデータ取得を実施
- ・硫酸還元菌等の一部の微生物が細胞内にセレンを濃集する現象を確認



- *Deltaproteobacteria Pelobacteraceae*
- *Deltaproteobacteria Other*
- *Firmicutes Acidaminobacter*
- *Deltaproteobacteria Desulfobulbaceae*

Se添加に伴う微生物群集組成の変化 17

令和4年度の成果のまとめと今後の計画

○地層処分システムに関する研究開発 成果のまとめ

工学技術の信頼性向上に向けて、人工バリア等の基本特性データベースの拡充と長期複合挙動の評価モデルの高度化のための実験や解析評価を進め、データベース整備・更新やモデル化に向けての知見を得た。このうち、過渡期（廃棄体定置後のTHMC状態が大きく変化する期間）の緩衝材の力学挙動として吸水圧縮挙動を解明した成果について、論文1報を発信した。

安全評価手法の高度化に向けて、システム性能評価に係る手法の開発と放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発のためのデータ取得、先端分析や計算科学手法を適用した現象理解やモデル高度化を進めた。このうち、粘土鉱物と核種との相互作用を先端的計算科学手法により解明した成果や、岩盤中の核種移行評価モデルに関する成果など、核種移行関連の論文7報を国際誌等で発信した。また、隆起・侵食による地形と処分場深度の変遷が核種移行に与える影響手法開発の成果を日本原子力学会で発表した。

以上のとおり、令和4年度の計画に対し、着実に実績・成果を上げており、当初の目標を達成した。

令和4年度の成果のまとめと今後の計画

○地層処分システムに関する研究開発 今後の計画

地層処分に係る処分システムの構築及び構築したシステムの評価を行うための解析技術の先端化・体系化を図るための検討の一環として、引き続き、多重バリアの構成要素間の相互作用等がもたらす場の状態の長期的な変遷及びこれを反映した核種移行に関するデータ取得・データベース整備、モデル開発とその検証や適用性の確認を、以下の項目等について進める。

- ・ニアフィールド長期挙動評価について、より長期の室内試験試料等を用いて炭素鋼ーベントナイトーセメントの相互作用に関わる現象解明を進めるとともに、熱的条件（100℃超を含む）が緩衝材の力学特性に与える影響の検討に着手する。
- ・ニアフィールドや地質環境の長期変遷等を反映した核種移行モデルの高度化に向けて、多様な条件での核種移行データ取得、先端分析・計算科学技術による現象解明、地下研究施設での原位置試験と連携したモデルの妥当性確認を行う。
- ・安全評価手法の開発について、地形変遷を考慮した地下水流動解析、地下水流動と処分場深度を考慮した処分場内からの地表への粒子追跡解析の結果等に基づき核種移行解析を実施し、隆起・侵食が地層処分システムの安全評価に及ぼす影響を把握する。

代替処分オプションの研究開発

- (1) 処分容器の挙動評価**
 - 処分容器の長寿命化
 - 処分後の臨界安全評価
- (2) 使用済燃料の挙動評価**
- (3) その他の代替処分オプションの調査**

研究開発の位置づけ (2/4)

【目標】

わが国における使用済燃料の直接処分等代替処分オプションについての技術的基盤を提供

【経緯】

- 予備的な設計と安全評価を代表的な地質環境特性と使用済燃料特性という限定された条件下で実施することで「**直接処分第1次取りまとめ**」*を作成。

- ・ 現状の技術レベルを検討
- ・ 多様性への対応や現実的な評価などに関する課題を抽出

*: わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価—直接処分第1次取りまとめ—, JAEA-Research 2015-016)

- 「**直接処分第1次取りまとめ**」で抽出された課題を踏まえた、地質環境特性と使用済燃料特性の多様性への対応を中心とした調査研究を実施し、技術的基盤の整備を進めた。

- ・ **多重バリアの閉じ込め性**に関する検討（処分容器、人工バリア等）
- ・ **処分施設の設計**に関する検討（処分容器、緩衝材、坑道等）

研究開発の位置づけ (3/4)

補足：直接処分第1次取りまとめにおいて抽出された課題

■ 限られた前提条件を対象とした予備的な検討をより包括的なものとするための課題

地質環境条件の多様性

直接処分第1次取りまとめで取り扱わなかった岩種(堆積岩/軟岩系岩盤)、地下水水質について検討対象を拡張

使用済燃料の多様性

わが国に存在する(および今後発生が予測される)使用済燃料の仕様や特性に関する調査と情報整理を継続

多様性を踏まえた廃棄体設計の考え方、インベントリの設定について検討と直接処分第2次取りまとめへの反映

安全評価のシナリオの拡充

基本シナリオ以外のシナリオについての検討とそれらのシナリオに基づく評価

様々な処分概念オプションの考慮

様々な与条件や制約などに対応するための多様な処分概念オプションとその効果に関する検討

■ 使用済燃料に特有の主な課題

➤ 工学技術

工学技術の全体的課題

- ・保障措置、核物質防護の要件に対応した地下施設/設備の設計検討
- ・廃棄体発熱量に起因する緩衝材制限温度等の設定の考え方の再検討

地下施設の設計に関わる課題

- ・燃焼度クレジットを考慮した臨界安全性評価の考え方・手法の整備
 - ・多様な使用済燃料の条件を想定した設計、最適化
 - ・C-14の閉じ込めを考慮したより長寿命の処分容器の検討
 - ・廃棄体形状や重量を考慮した、定置方式に対応した坑道の設計
- ##### 設計された人工バリアの埋設後の挙動に関わる課題
- ・廃棄体発熱等を考慮した処分システム的环境条件の変遷の理解

■ ガラス固化体・TRU廃棄物と共通の主な課題

➤ 工学技術

- ・地下研究施設等での工学技術の実証
- ・処分場レイアウトの選択肢の拡充
- ・可逆性や回収可能性、モニタリング等を考慮した処分概念検討
- ・処分施設の最適設計

➤ 安全評価

安全機能に影響を与える可能性のある現象

- ・放射線や地下水化学の影響等を含めた燃料溶解メカニズム理解
- ・燃料タイプや照射履歴などに応じた性状把握と核種放出挙動理解
- ・燃料および放射化金属から放出されるC-14の化学形の理解
- ・廃棄体(燃料、構造材)からの核種放出メカニズムの理解
- ・構造材(特に被覆管)表面の酸化膜中でのC-14機構の理解
- ・安全評価に及ぼす放射線影響の評価・解析
- ・核分裂性物質の移行に伴う臨界可能性評価

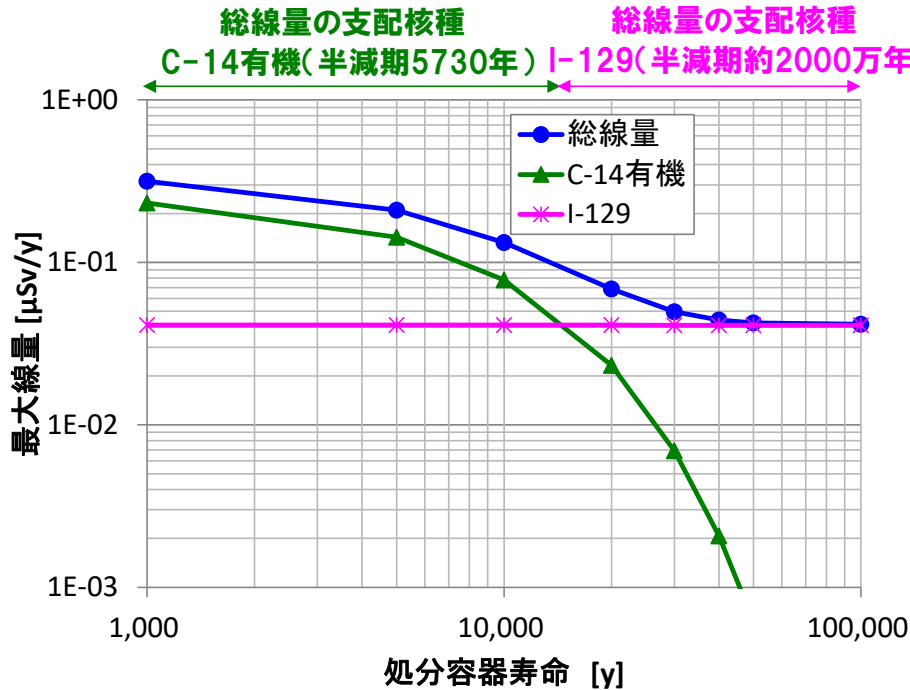
➤ 安全評価

- ・地質環境の多様性を考慮した安全評価技術の整備
- ・処分場設計のバリエーションを考慮した安全評価技術の整備
- ・コロイド・有機物・微生物の影響評価とモデル化
- ・緩衝材や岩盤の変形・変質と核種移行への影響

研究開発の位置づけ (4/4)

補足: 直接処分第1次取りまとめ以降の主な着目点

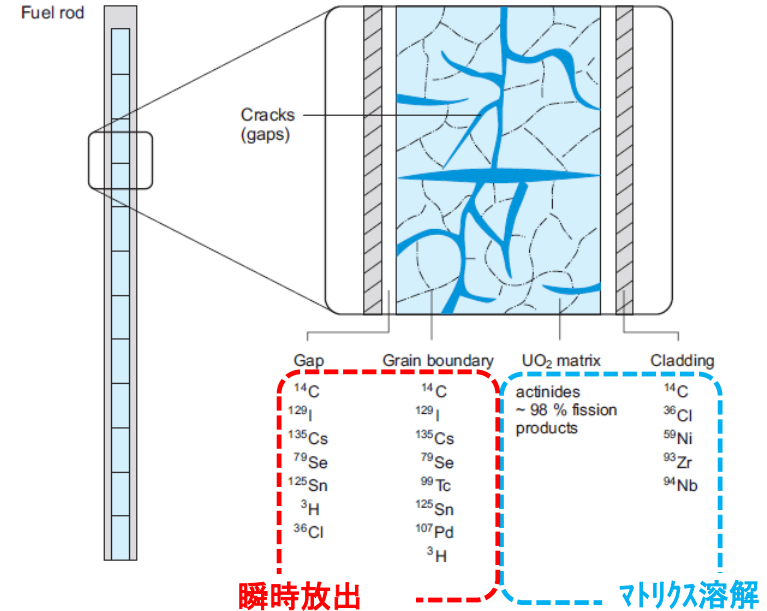
処分容器の閉じ込め期間の長期化と
最大線量の低減効果との関係



閉じ込め期間の長期化(数万年以上)
⇒最大線量の低減(1桁強)の可能性

処分容器の腐食挙動の研究、寿命評価 等

使用済燃料中の主要核種分布



- 粒界や隙間に存在する放射性核種は容器破損時の地下水との接触によって瞬時に放出 (IRF: Instant Release Fraction)
- 燃料マトリクスの溶解は長期にわたりゆっくりと進行

使用済燃料からの核種放出挙動の研究・評価

令和4年度の実施内容

(1) 処分容器の挙動評価

・ 処分容器の長寿命化:

地下水中に硫化物(銅に対して腐食を促進する作用を有する)が存在する環境での処分容器の腐食寿命を評価し、処分容器に5万年程度の長寿命が期待できる硫化物濃度などの条件を提示した。

・ 処分後の臨界安全評価:

処分容器に収容できる使用済燃料本数の合理的な設定に向けて、処分場閉鎖後における処分容器などの材料や燃料等の状態や配置等をより現実的に想定した臨界安全評価を行い、現実的な想定により再臨界の発生可能性は低くなるとの見通しを得た。

(2) 使用済燃料の挙動評価:

炭酸共存下における UO_2 マトリクスの溶解速度の炭酸濃度依存性を確認した。また、大気雰囲気下での使用済燃料の浸漬試験を行い、燃焼度の違いの瞬時放出率への影響を確認した。

(3) その他の代替処分オプションの調査:

代替処分オプションとしての超深孔処分について、諸外国での検討事例の調査や、わが国で想定される岩盤の条件を想定したケーススタディを行い、わが国での超深孔処分の成立性の把握に向けた留意点や課題を整理した。

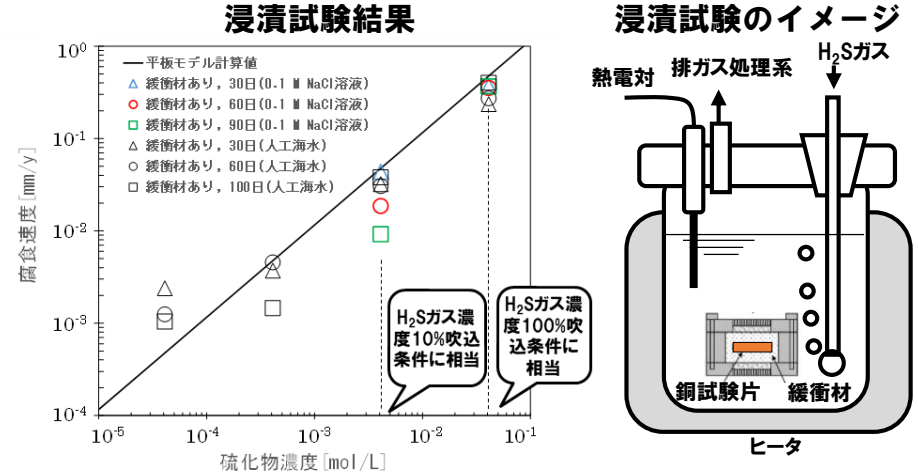
(1) 処分容器の挙動評価：処分容器の長寿命化

【令和4年度の成果】

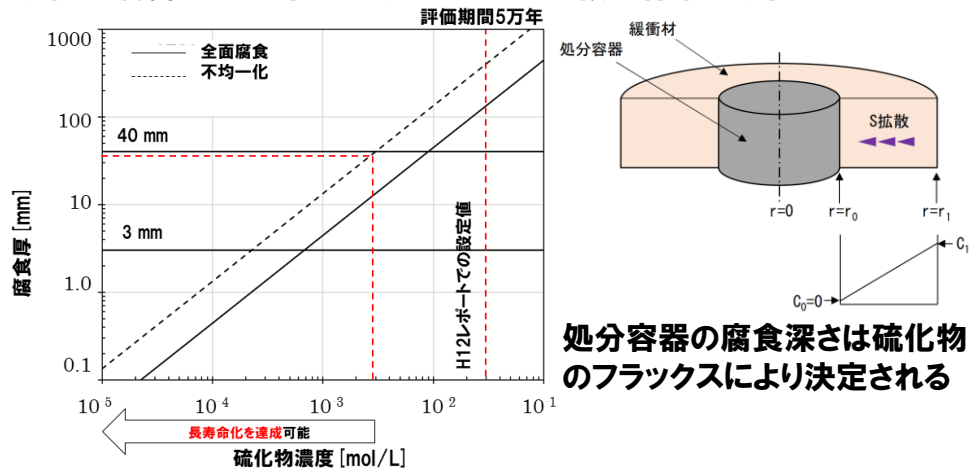
- 直接処分に特徴的な安全評価上の支配核種であるC-14(半減期約5700年)の閉じ込め性の向上には、**処分容器の長寿命化**が有効。
- 環境条件によっては極めて長い寿命を期待できる純銅を対象に、銅の腐食を促進する作用を有する硫化物の濃度をパラメータとした腐食試験(浸漬試験, 応力腐食割れ試験)を実施し、最長90日間までのデータを取得。
- 硫化物濃度が高いほど、腐食生成物である硫化銅の生成反応により全面腐食が進展すること、硫化銅の下地保護性が低く、腐食反応の抑制による有意な腐食速度の低下が期待できないこと等を確認した。また、応力腐食割れは観察されなかった。
- 地下水中の硫化物濃度に応じた処分容器の腐食寿命を、浸漬試験から得られた硫化物濃度と腐食速度との関係と緩衝材中の硫化物の拡散を考慮したモデルにより試算した結果、銅の厚さ40mmの条件において5万年程度の腐食寿命が期待できる環境は硫化物濃度が3mM以下であると推定。

【意義／反映先】

- 硫化物濃度等が異なる幅広い地下水条件に対する純銅の処分容器材料としての適用性評価に反映



硫化物濃度と5万年間の腐食厚さの関係 緩衝材中の硫化物輸送モデル



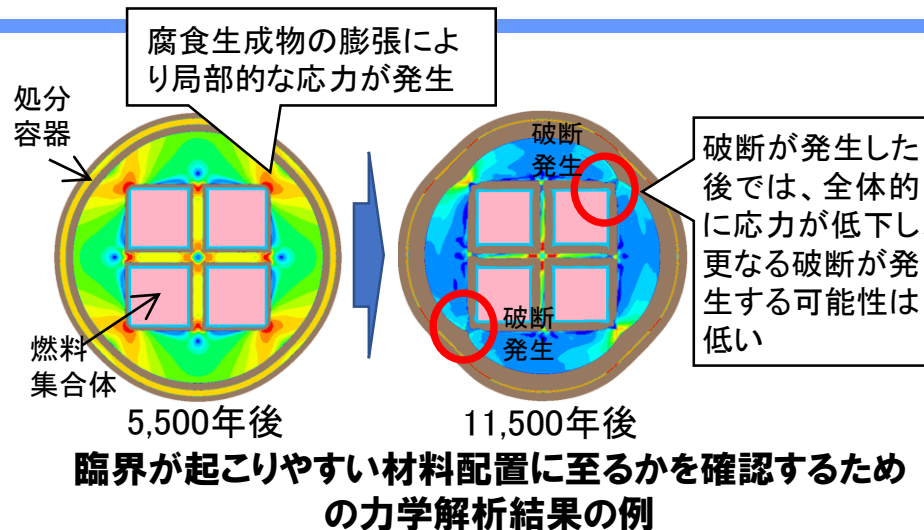
(1) 処分容器の挙動評価：処分後の臨界安全評価

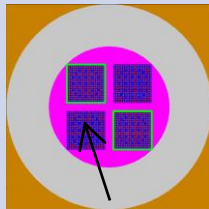
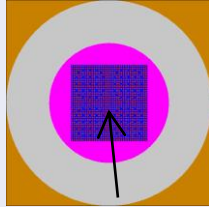
【令和4年度の成果】

- 処分容器などの材料や燃料等の状態や配置を過度に保守的に想定した臨界安全評価では、処分容器に収容できる使用済燃料が大幅に制限されるため、収容体数の合理的な設定に向けて、それらのより現実的な状態や配置を想定しモデル化した**臨界安全評価手法の構築**が必要。
- 現実的な状態や配置として、処分容器の強度劣化と腐食生成物の体積膨張によって処分容器の破断が起これることで臨界が起これやすい処分容器の状態や燃料の配置に至るかに着目し、PWR使用済燃料を4体収容できる処分容器の仕様を対象として、臨界が起これやすい燃料の配置に至るかを把握するための力学解析を行い、その可能性が高くないことを確認(右上図)。
- さらに、このような状態や配置に至ることを仮定したモデルにより臨界解析を行い、実効増倍率を評価すると、未臨界判定基準値より低く、現実的な状態や配置を考慮する場合には再臨界が発生する可能性は低いとの見通しを得た(右下図)。

【意義／反映先】

- 処分後において現実的に起これる状態や配置を反映した臨界安全評価に基づく合理的な収容本数の設定



臨界安全評価モデルの概要		材料配置の起これやすさと再臨界の起これやすさ
 <p>燃料集合体の形状が維持</p>	<p>処分容器の破断による燃料収容部の一体化が生じない</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・力学解析から、比較的起これやすい材料配置のパターンと考えられる。 ・実効増倍率は0.82となり、再臨界が起これる可能性は低い。
 <p>燃料棒が離散して最適減速状態に配列</p>	<p>処分容器の破断により燃料収容部が一体化する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・力学解析からは起これにくい材料配置のパターンと考えられる。 ・燃料収容部が一体化して中性子が漏れにくくなり、臨界が起これやすくなるものの、実効増倍率は0.92となり、基準値(0.95)以下に留まる。

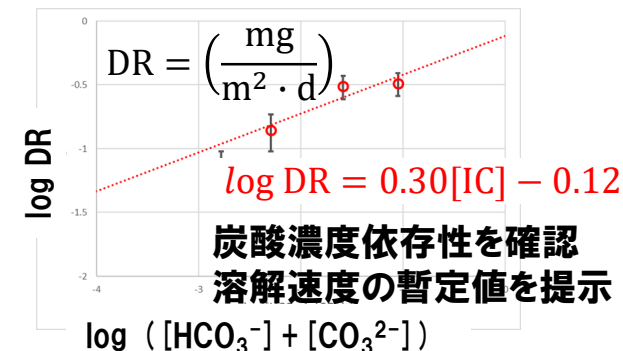
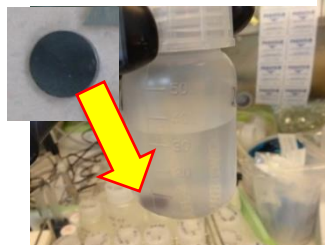
現実的な材料の状態と配置の変化を取り入れた臨界安全評価モデルとその解析結果の整理例

(2) 使用済燃料の挙動評価

【令和4年度の成果】

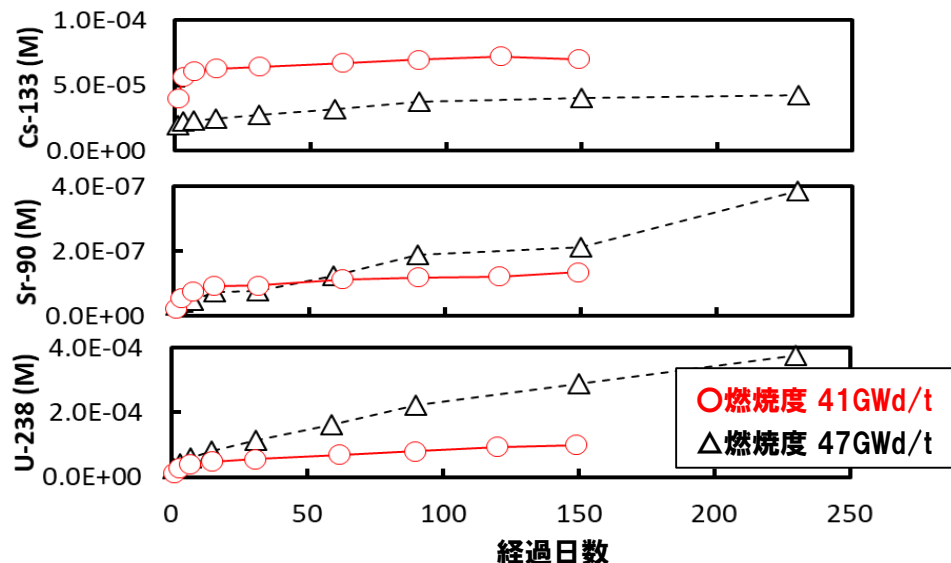
- 長期溶解速度と瞬時放出率として取り扱われる使用済燃料からの放射性核種の溶出挙動について、わが国の処分環境として想定される高い炭酸濃度条件等の影響の検討や溶解メカニズムの理解に向けた検討、実際の使用済燃料を用いたデータ取得等を実施。
- **長期溶解速度**の炭酸濃度依存性を把握するためのウランの浸漬試験を実施。マトリクス溶解指標物質としてMgを添加した $(U,^{26}Mg)O_2$ 固溶ペレットで浸漬試験を行うことで、ウランの再沈殿の影響を排除した溶解速度を取得でき、これを溶解速度の暫定値として提示(右上図)。あわせて、ウラン溶解のメカニズムの理解に重要となる再沈殿 UO_2 の表面状態の分析を実施。
- **瞬時放出率**については、実際の使用済燃料を用いた大気雰囲気下の浸漬試験を行い、瞬時放出率への燃焼度の影響を確認(右図下)。

$(U,^{26}Mg)O_2$ ペレット



浸漬試験サンプル外観

溶解速度に及ぼす炭酸濃度影響



【意義／反映先】

- 核種移行評価のソースタームとして重要となる使用済燃料からの放射性核種の溶出挙動評価の信頼性向上

核種溶出挙動の例

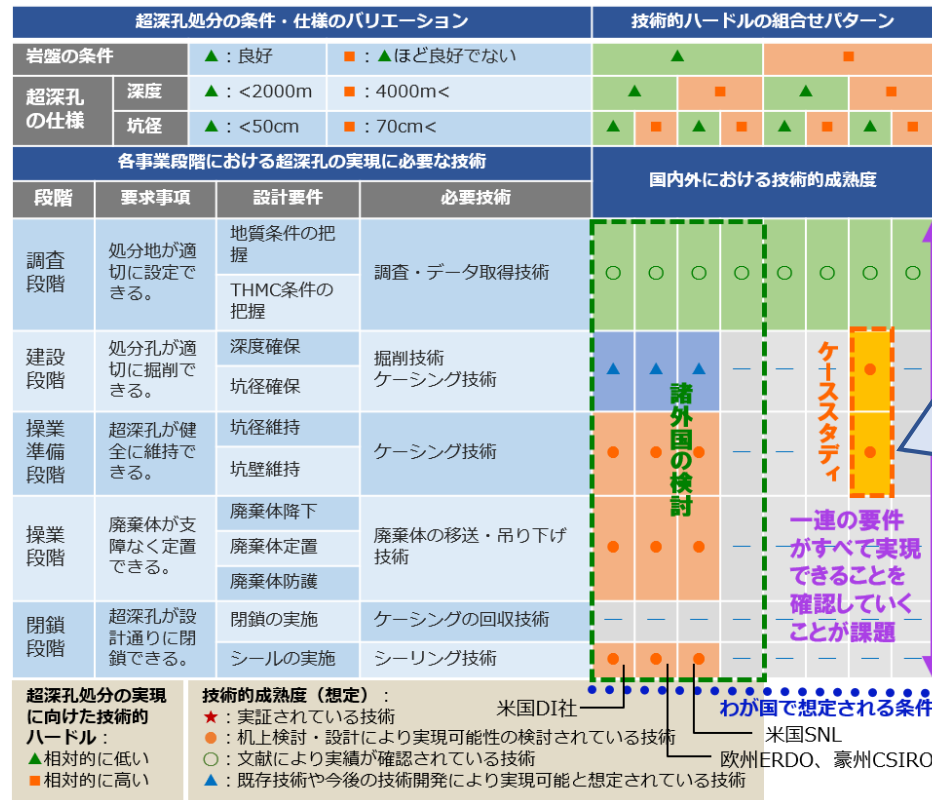
(3) その他の代替処分オプションの調査

【令和4年度の成果】

- 直接処分以外のその他の代替処分オプションとして、諸外国で検討事例のある**超深孔処分**に着目し、諸外国の先行検討事例における考え方、背景、特徴、技術的課題を調査するとともに、わが国における超深孔処分の成立にむけた留意点や課題を整理。
- その結果、近年さまざまな国で検討が進められているものの、事業化の例はなく、実施に必要な技術の実証もされていないこと、岩盤等の条件も比較的好ましい場合が多いことを確認。
- 仮に世界最高水準の性能の掘削関連技術を適用することを想定すれば、理論的にはかなりの深度まで掘削できる可能性があることを確認。ただし、適用する技術の実証や対象とする地質環境条件への対応性が重要であり、地質環境条件が複雑なわが国では特に慎重な検討が重要になることが示唆。

【意義／反映先】

- わが国における超深孔処分の成立性の検討に参照可能な技術情報の整備(主に建設段階に係る掘削関連技術)



超深孔処分の成立性に影響する因子とその状態のバリエーションの例

令和4年度の成果のまとめと今後の計画

○代替処分オプションの研究開発

成果のまとめ

代替処分オプションの研究開発については、直接処分に特有の課題である処分容器の長寿命化や使用済燃料からの核種放出挙動評価について、実験によるデータの取得等を行った。その結果、処分容器の有力な候補材料である銅について長寿命の達成が期待できる硫化物濃度等の環境条件を提示するとともに、地下水中の炭酸の濃度依存性を考慮した燃料溶解速度の暫定値を提示した。また、直接処分以外のその他の代替処分オプションについては、超深孔処分を対象として、諸外国での事例検討の調査や成立性の検討に係る諸条件や技術について掘削段階を対象とした調査等を実施した。

それらに加え、過年度の成果を含めて個別成果を論文投稿や学会発表等を通じて発信した(論文投稿1報、国内学会発表1件、JAEA公開技術資料1件)。

以上のとおり、令和4年度の計画に対し、着実に実績・成果を上げており、当初の目標を達成した。

令和4年度の成果のまとめと今後の計画

○代替処分オプションの研究開発

今後の計画

代替処分オプションの研究開発については、直接処分に特有の課題である、処分後の未臨界確保の確実性向上に向けた臨界安全評価の高度化や使用済燃料からの核種放出挙動評価のためのデータ整備などの取り組みを今後も継続的に進めるとともに、直接処分システムの成立性に関する基盤情報の整備拡充を、ガラス固化体の地層処分の技術等で適用可能な部分の活用等も図りつつ進めていく。また、直接処分以外のその他の代替処分オプションについては、引き続き、超深孔処分を対象として、操業段階で必要な技術の調査等を進めていく。