

令和5年度における個別課題の現状および今後の予定

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

令和6年3月13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5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])、NUMOとの共同研究(ニアフィールドシステムの状態変遷に伴うバリア材及び核種の長期挙動評価のための研究)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5年4月1日～令和6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を進める。その一環として、令和5年度は、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進める。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5年4月1日～令和6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5年度は、使用済燃料から炭素-14などの一部の放射性核種が処分後速やかに放出される現象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、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

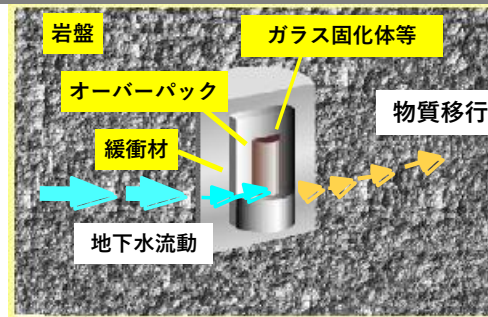
- 1) システム性能評価に係る手法の開発
- 2) 放射性核種の移行に係るデータベース開発

地層処分基盤研究施設（エントリー）



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
- オーバーバックデータベース

各種データベースの構築（HPで公開中）

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

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

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

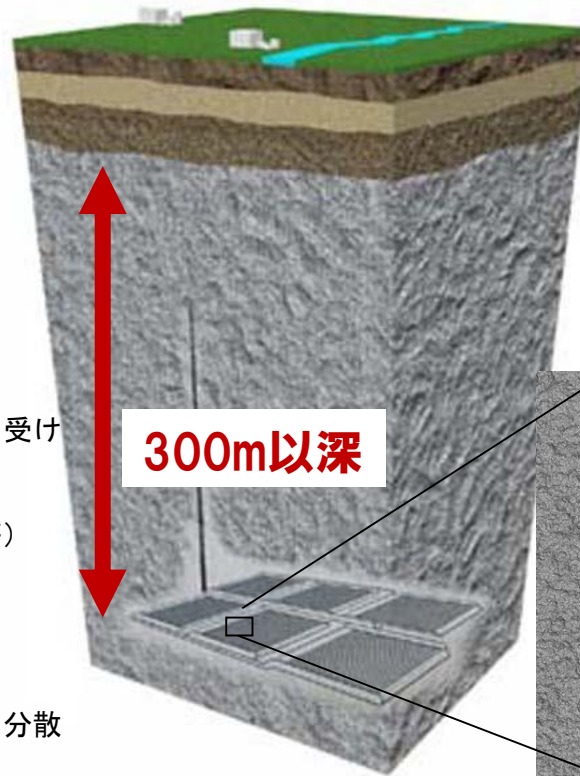
- ・好ましい地下水化学（還元性等）
- ・小さな地下水流速
- ・力学的安定性
- ・人間環境からの物理的障壁

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

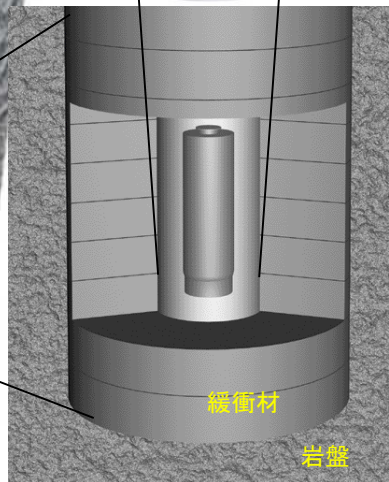


ガラス固化体 直径43cm
(ステンレス製キャニスタに充填されたもの)

- ・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5年度の主な成果

(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の拡充及びデータベースの拡充

・オーバーパックスの腐食挙動:

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など広範な環境条件下での浸漬試験結果を集約し、既存の腐食モデルによる腐食量評価の保守性を確認。

・緩衝材の基本特性:

10年以上の期間を対象とした緩衝材の長期圧密挙動を把握するための試験のうち、4年経過時点までの試験データからは二次圧密の加速は認められず。

・データベース整備・更新:

- オーバーパックスデータベース ;122件を新規登録

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:

二次鉱物の溶解・沈殿反応に係る現象解析モデルの改良を行い、間隙率や元素濃度の挙動の再現性が向上。

・熱-水-応力-化学連成挙動の解析評価:

室内試験で得られたデータから温度勾配水分拡散係数を設定。設定されたパラメータを基に、熱-水-化学連成解析に着手。

令和5年度の主な成果

(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:

隆起・侵食による地形・処分場深度変遷と地下水流動の変化を反映した核種移行解析手法を構築し、隆起・侵食が核種移行に与える影響の評価への適用の見通しを得た。

・生活圏被ばく線量評価の信頼性向上:

国内外の生活圏評価事例の調査や解析的検討に基づき、地質環境と生活圏とのインターフェイス (GBI) の設定に影響を与える表層／地質環境の特徴や評価で考慮すべき表層環境での核種移行プロセスを表現する数学モデルの候補を抽出。

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:

鉄との相互作用による緩衝材の収着特性変化の評価等、緩衝材の長期的な環境変遷等が核種移行へ及ぼす影響評価に向けた現象理解、岩石マトリクス部と割れ目部を対象とした室内・原位置試験等による核種移行経路の不均質性等を考慮したモデルの改良、現象理解を進めた。

・コロイド・有機物・微生物影響評価手法:

室内試験や幌延地下研究施設を活用し、コロイドが安定となる地下水組成の評価、有機物の緩衝材への収着挙動等、コロイド・有機物・微生物の特性や核種移行への影響に係るデータ取得と現象理解を進めた。

(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

オーバパックの腐食挙動

【目的】

- ▶ 多様な地質環境条件や場の状態の長期的な変遷に対応したオーバパック腐食寿命評価の信頼性の向上を図る。

【令和5年度の実施内容】

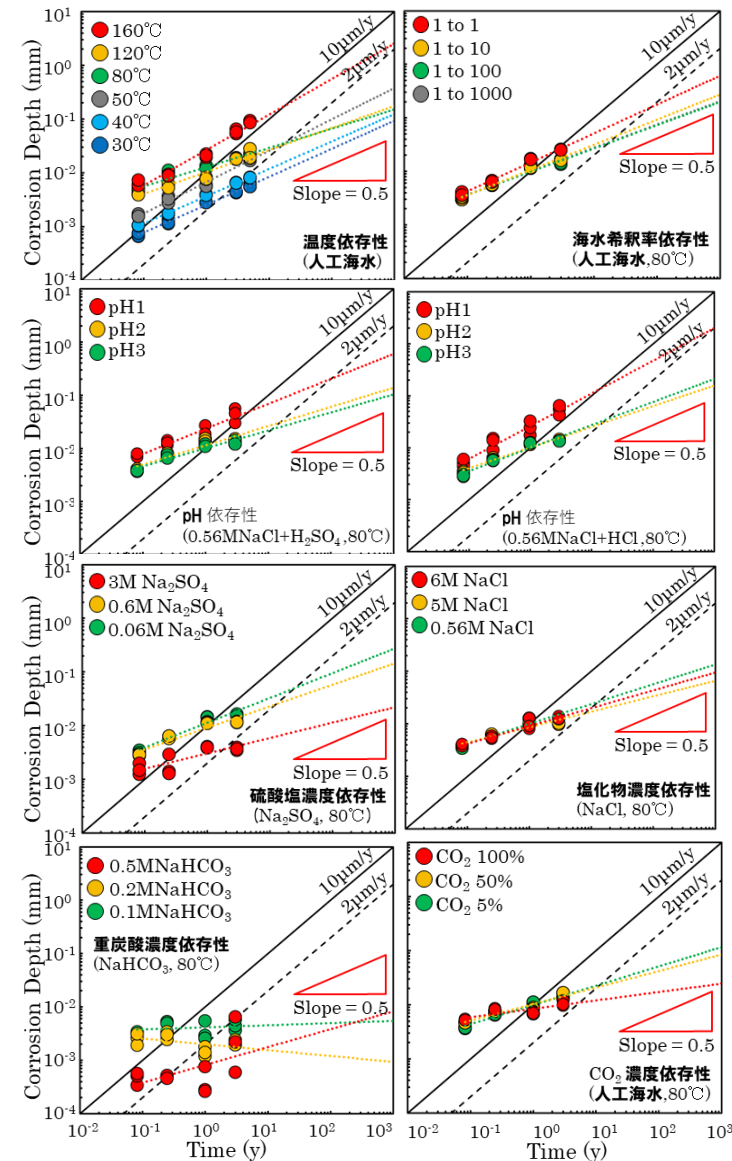
- ▶ 環境条件が炭素鋼の腐食へ与える影響に関し、設計の前提条件を逸脱した条件や腐食性の高い地下水を想定した条件を含め、より広範な環境条件(高温水/酸性水/高炭酸ガスなど)で実施してきた浸漬試験(低酸素雰囲気, 緩衝材共存, 期間最大5年)のデータを取りまとめて評価した。

【令和5年度の成果】

- ▶ いずれの試験条件においても、腐食量の経時変化はべき乗則で近似でき、長期腐食量の推定値は既存の腐食モデル(速度一定)に基づく腐食量を下回ることを確認した。
- ▶ 低酸素濃度, 緩衝材共存下において、広範な環境条件でも炭素鋼オーバパックの健全性に影響するような腐食は生じないことが示唆される。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

- ▶ 試験期間が20年を超える浸漬試験試料(人工海水, 低酸素雰囲気, 緩衝材共存)の分析により、腐食生成物が腐食量の経時変化に与える影響(腐食反応の抑制など)についての評価を進める。



各種条件における腐食量の経時変化

(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

緩衝材の基本特性

【目的】

- 地層処分後のオーバーパックの自重や岩盤クリープ等による土圧の作用により、緩衝材が圧密され、厚さが変化する可能性がある。
- このような変化に係る評価の信頼性向上のため、緩衝材の主成分であるベントナイトの長期圧密挙動(二次圧密)を把握する。

【令和5年度の実施内容】

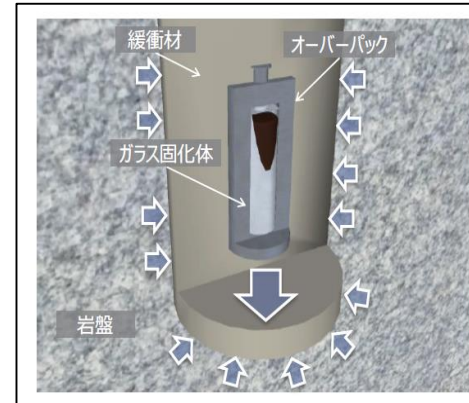
- 10年以上の長期圧密試験を念頭に、停電時にも載荷が継続可能な装置を利用し、データ取得を継続した。
- 中間評価として、試験開始から4年経過時点までのベントナイトの二次圧密を評価した。

【令和5年度の成果】

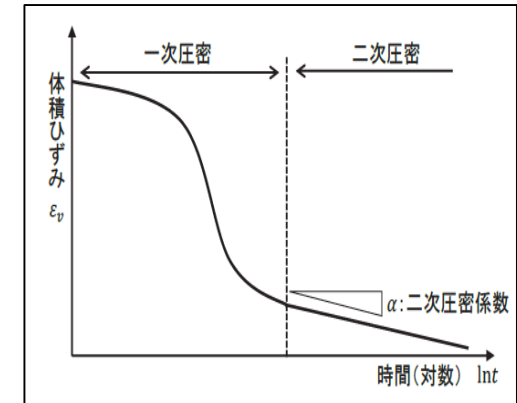
- 評価の結果、体積ひずみの変化は、時間の対数に対し直線的であり、二次圧密の加速※は認められなかった。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

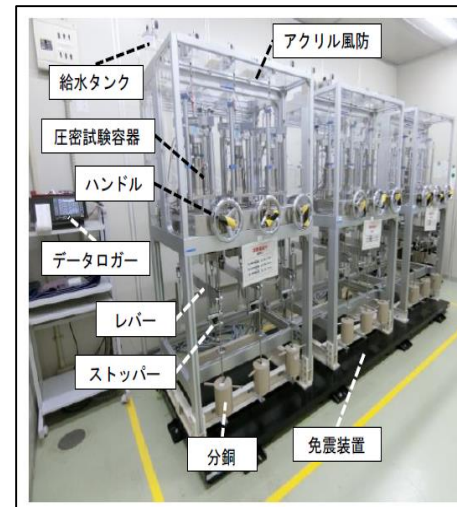
- 試験を継続し、さらに圧密が進んだとしても二次圧密の加速が生じないことを確認する。



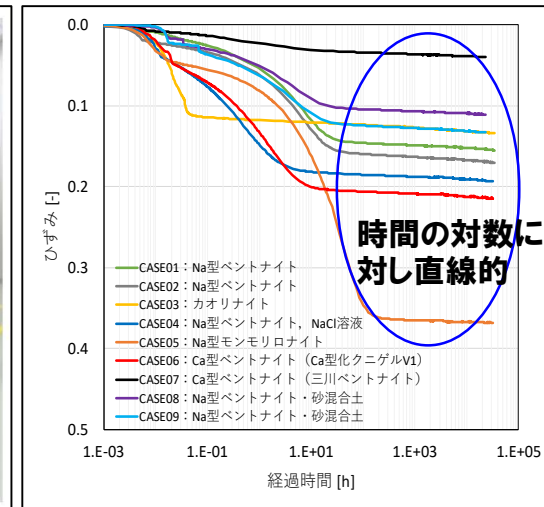
処分孔縦置き方式の人工バリアの概念図



粘土(ベントナイト等)の圧密試験における体積ひずみの時間変化の概念図



長期圧密試験装置



長期圧密試験結果の例

※ 高治ほか(2005):緩衝材長期力学挙動の信頼性向上、JNC-TJ8440 2004-011.

(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-緩衝材相互作用評価モデルの高度化

【目的】

- 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・変質に与える影響を評価するモデルを構築する。

【令和5年度の実施内容】

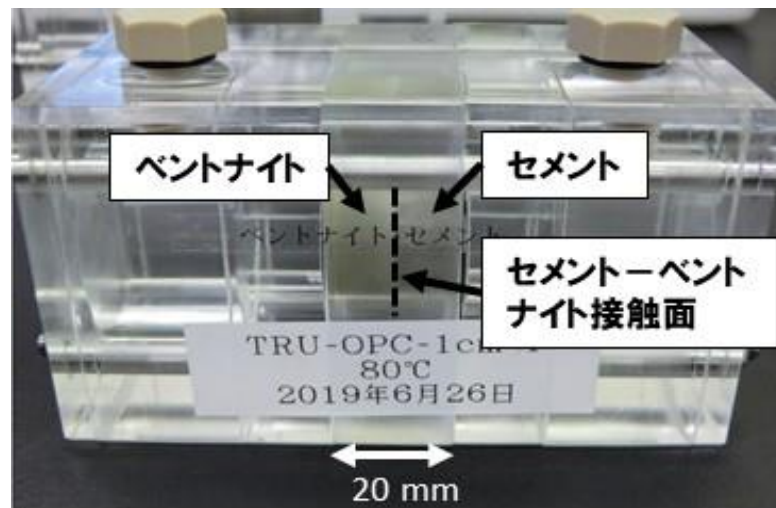
- OPC/HFSCと緩衝材を3年程度の期間接触させた試料の分析 (間隙率、元素マッピング) 及び再現解析を実施した。

【令和5年度の成果】

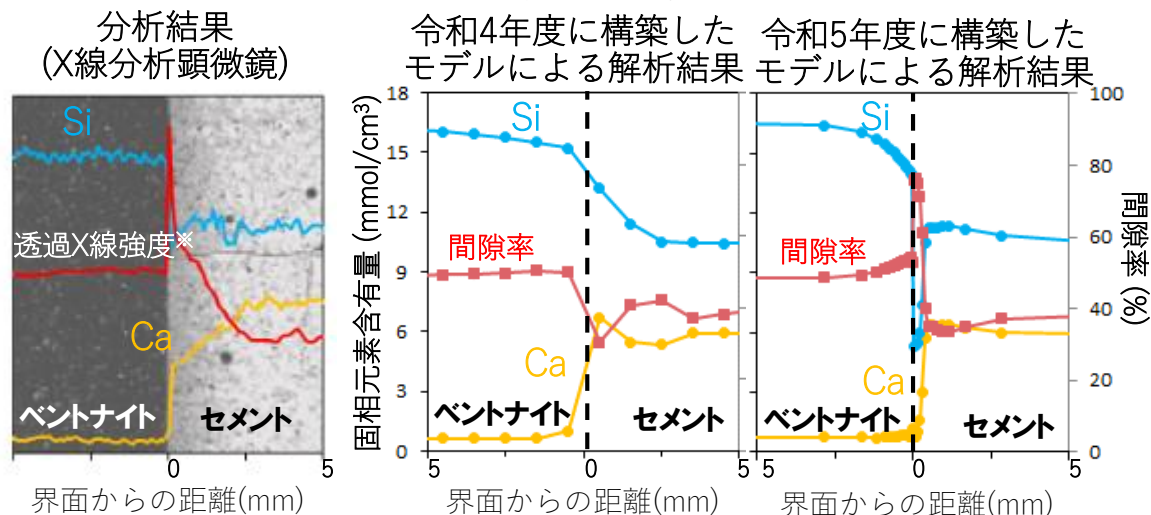
- 境界付近におけるC-(A)-S-Hの生成等に着目し、令和4年度に構築したモデルを基に二次鉱物の溶解・沈殿反応に係るパラメータを見直すことで、分析結果で得られた間隙率やSi及びCaの分布とその時間変化に対する再現性が向上した。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

- セメントと緩衝材の境界付近における状態変遷が物質移行に与える影響を評価するためのトレーサーを添加した拡散試験手法等の適用可能性を検討する。



セメントと緩衝材を接触させた試験の概観



セメント-緩衝材相互作用に関わる試験後試料の分析結果とモデルによる解析結果の比較 (HFSCの一例、試験期間3年・50°C)

※透過X線強度が強くなる→固相の密度が小さい→間隙率が増加として評価

(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

【目的】

➤人工バリア等の長期複合挙動の評価手法の信頼性向上のため、幌延人工バリア性能確認試験で得られたデータを対象に、熱-水-応力-化学(THMC)連成解析モデルの妥当性検討を行う。

【令和5年度の実施内容】

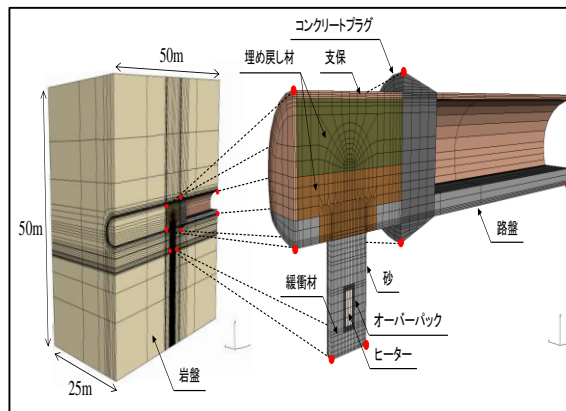
➤温度勾配下での緩衝材中の水分移動を把握する室内試験の再現解析を実施した。

【令和5年度の成果】

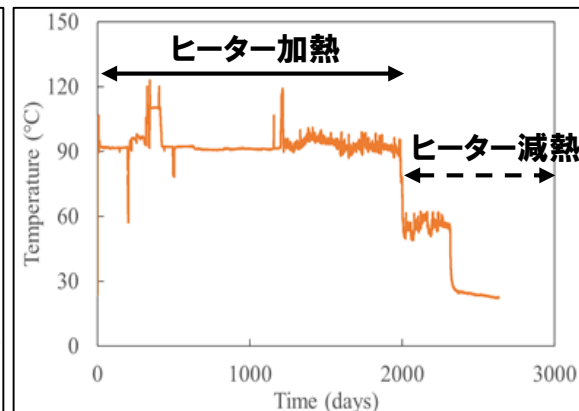
➤上記の再現解析により、試験結果を再現できる温度勾配水分拡散係数を設定し、幌延での原位置試験のTHC連成解析の入力データを整備すると共に、解析に着手した。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

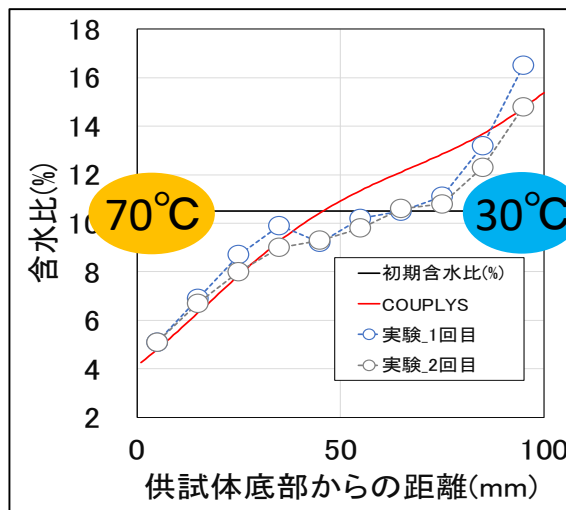
➤原位置試験の解析結果と計測データの比較により、特に減熱時の水分移動に着目してモデルの検証を行う。



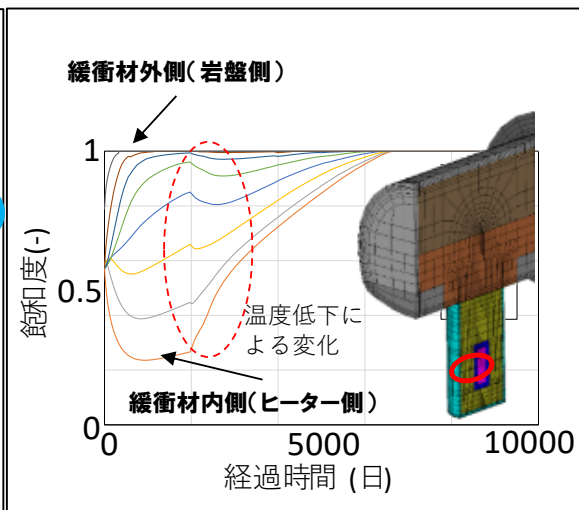
幌延人工バリア性能確認試験を対象にした解析メッシュ



模擬オーバーバック表面の温度の変遷



温度勾配下での緩衝材中の水分移動を把握する室内試験の再現解析結果



幌延人工バリア性能確認試験の試解析結果

(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

【目的】

➤ 隆起・侵食による地形・処分場深度変遷と地下水流動の変化を反映した核種移行解析手法を構築し、隆起・侵食が核種移行に与える影響を評価できるようにする。

【令和5年度の実施内容】

➤ JAEAが開発したツールにより得られた地形・処分場深度の変遷により変化する岩盤中の地下水の移行経路情報を10万年毎に抽出し、核種移行解析に反映させる方法を構築した(図1)。

➤ 地形・処分場深度変遷に伴う核種の岩盤中の移行距離と地下水流速の変化を「考慮する場合」と「考慮しない場合」での岩盤からの核種の移行率を比較した。

【令和5年度の成果】

➤ 移行距離と地下水流速の変化が核種移行率に与える影響は、移行遅延特性(分配係数Kd等)により特徴づけられる岩盤中の核種移行時間が長い場合などに顕在化する可能性が示唆された(図2)。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

➤ 地形・処分場深度変遷に伴う非定常な地下水流動と移行経路の変化を核種移行解析に反映させる手法の構築と適用性の確認。

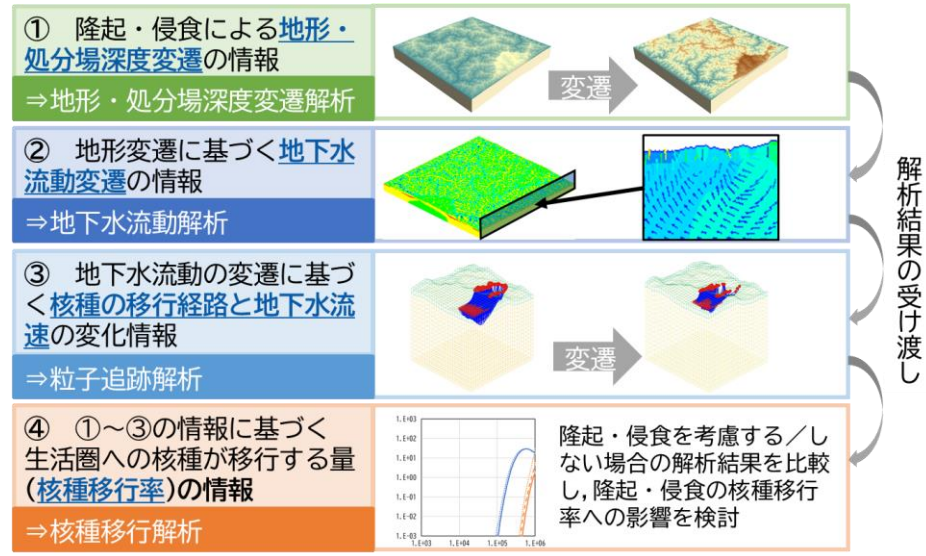


図1 隆起・侵食による地形・処分場深度の変遷が地下水流動を介して核種移行に与える影響の評価手法

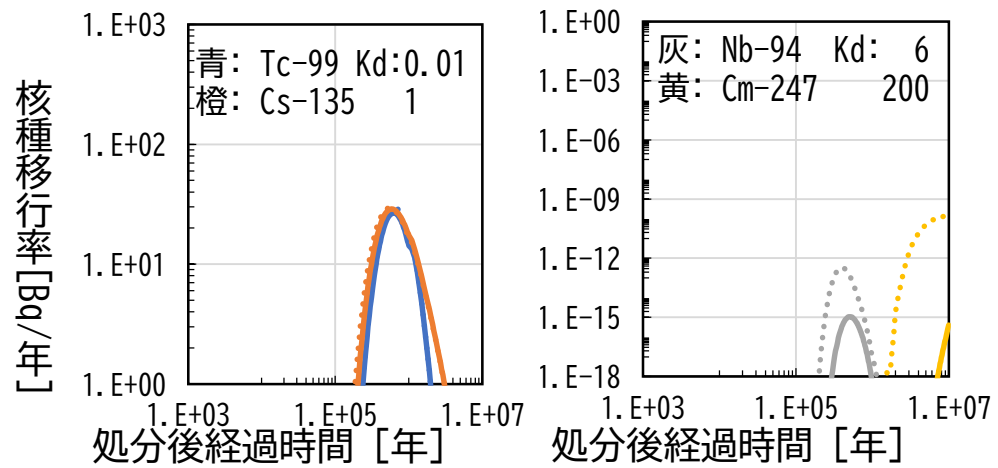


図2 隆起・侵食を考慮した核種移行解析結果の例 (実線は隆起・侵食を考慮しない場合、点線は考慮した場合。Kdは岩盤に対する吸着分配係数、単位は m^3/kg)

解析結果の受け渡し

(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

【目的】

- 地形や土地利用等の表層環境の特徴を踏まえた核種移行モデルの構築、妥当性確認等を通じて、わが国の表層環境の具体的な特徴を反映可能な生活圏評価手法を整備する。

【令和5年度の実施内容】

- 国内外の表層環境における核種移行モデルに関する調査・分析を通じて、わが国の既存の生活圏評価モデルの具体的な表層環境への適用に向けた留意点等を整理。
- 地質環境と生活圏とのインターフェイス (GBI) 近傍での核種移行プロセスに関する調査・分析を通じて、GBIの位置や希釈水量に影響を与える表層/地質環境の特徴を整理。

【令和5年度の成果】

- 表層環境での核種移行に係る数学モデルの比較・分析 (図1) により、モデルの相違の有無を明確にし、評価上重要な核種移行プロセス (例えば、侵食) をモデル化する際に適用可能な数学モデルの候補を抽出した。
- GBIの位置や希釈水量に影響を与える特徴を抽出・整理するとともに、それらの特徴の違いによるGBIの位置や希釈水量の変化の程度を地下水流動・粒子追跡解析により確認した (図2)。

【今後の計画 (令和6年度の計画)】

- 潮流 (海流) 場や物質移行挙動の評価手法や解析事例の調査に基づく、沿岸域を対象とした評価に必要な情報の整理および概念モデル作成の試行、GBI設定にあたって重要となる表層・地質環境の特徴の整理を行う。

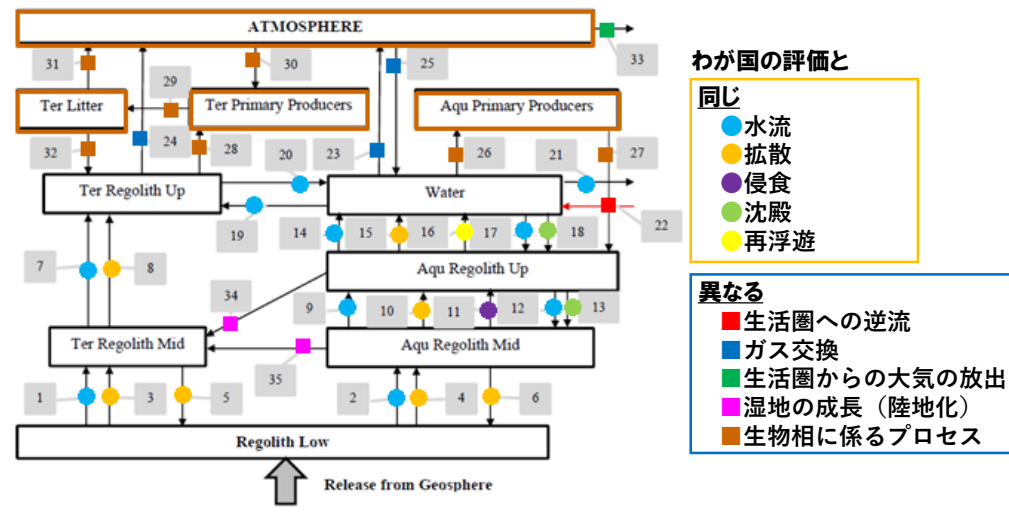


図1 SR-Siteとわが国の生活圏評価における核種移行プロセスの相違点 (事業段階の異なる評価間の比較)

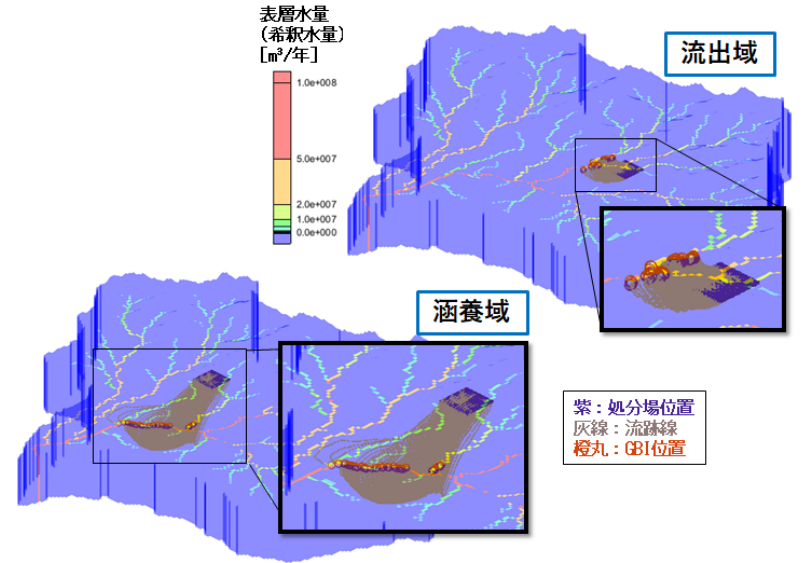


図2 処分場領域近傍の地下水流動傾向の相違によるGBI位置の変化に係る解析結果の例 (流跡線部分を拡大)

(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

緩衝材・岩石中の核種移行モデル開発 (緩衝材)

【目的】

- 処分場の環境変遷等による緩衝材中の核種移行特性変化の理解と、それを考慮した評価モデルの構築。

【令和5年度の実施内容】

- 複数の溶存化学種共存条件等での核種拡散データ取得と、その挙動を解析可能なモデルの構築。
- 処分場で使用が想定される緩衝材(クニゲルV1)中のコロイド透過特性の検討
- オーバーパック緩衝材相互作用により放出される鉄による緩衝材の核種収着特性の変化を計算科学で評価
- TRU廃棄物に含まれる有機物等共存下での知見が少ないPd(II)の溶解挙動の評価

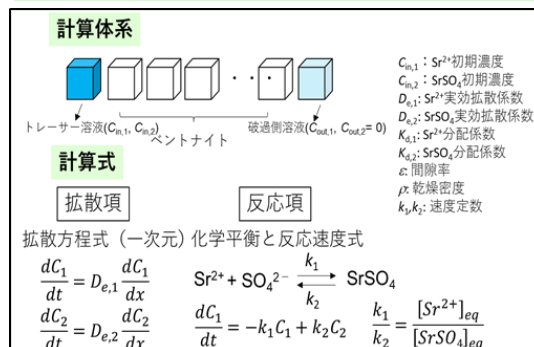
【令和5年度の成果】

- 複数化学種(Sr^{2+} , $SrSO_4$) 共存下での拡散データ取得、化学種割合の変化に応じた拡散挙動解析手法構築
- 既知の粒径のコロイドを用いた拡散試験による緩衝材密度の違いによるコロイド透過特性の評価
- 鉄との相互作用による緩衝材構成鉱物の収着特性変化を計算科学を用いて評価し、酸解離定数等を算出
- 有機物(イノサッカリン酸:ISA)共存下でPd(II)の溶解度を制御する固相の同定

【今後の計画(令和6年度の計画)】

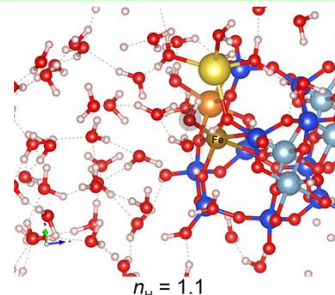
- 緩衝材間隙の不均質性等を考慮した核種、コロイド移行評価、バリア材界面で生じる間隙閉塞等の影響評価、核種収着への硝酸塩影響評価等を進める

複数化学種共存下での緩衝材中の核種拡散挙動解析手法の構築



緩衝材中での複数化学種の化学平衡と反応速度を考慮した解析が可能な手法を構築

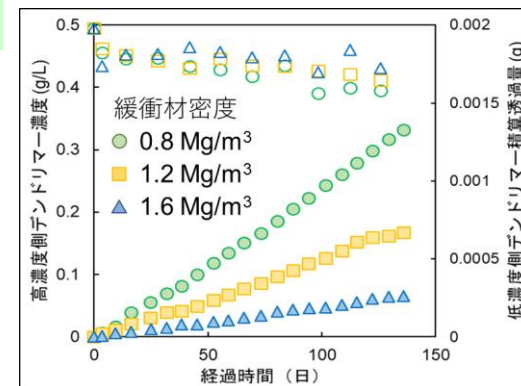
鉄との相互作用した緩衝材構成鉱物の収着特性の評価



Fe(III)が存在するモンモリロナイト端面へのH⁺収着MD計算のスナップショット

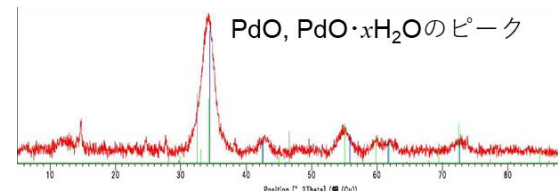
MD計算より評価した酸解離定数 (pK _a)	Surface group	Mineral, y: Layer charge	Edge	pK _a
	Fe(III)-OH ₂	montmorillonite, y = 0.33	1 3 0	7.7
	Fe(III)-OH	montmorillonite, y = 0.33	1 3 0	15.6

既知の粒径の粒子(デンドリマー)の緩衝材(クニゲルV1)透過挙動



デンドリマーの積算透過量の時間変化 (どの緩衝材密度でもデンドリマー(粒径5.7nm)は透過するが、密度増加に伴い透過速度は低下)

ISA共存下でのPd(II)固相の同定



ISA共存下で生成したPd(II)固相のXRD測定結果 (ISA共存下でも溶解度を制御する固相はPdO、PdO·xH₂Oであり、ISAを含む固相は生成しない)

(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

緩衝材・岩石中の核種移行モデル開発 (岩石)

【目的】

- 不均質性を考慮した岩石中での核種移行評価手法の構築、地下環境下での鉱物への元素の取込挙動の評価。

【令和5年度の実施内容】

- 岩石マトリクス部の間隙構造や組成の不均質性を考慮した核種拡散経路を室内試験や分析・計算科学を用いて評価
- 岩石割れ目不均質性を考慮した核種移行モデルを用いた核種移行へ影響を及ぼす要因の評価
- 移行遅延現象として核種移行評価へ新たに組み込むため、堆積岩中炭酸塩への元素取込挙動、化学形態を評価。

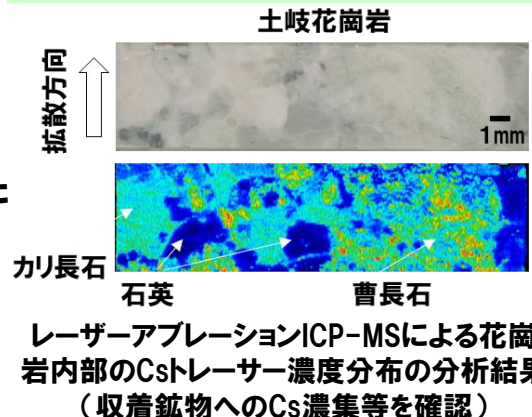
【令和5年度の成果】

- 花崗岩中の核種の拡散データの取得と岩石内部の元素分布分析により、拡散に寄与する経路や鉱物の知見を取得
- 岩石中の鉱物粒界を想定したランダムウォーク法による粒子追跡解析により、移行が抑制される間隙構造等を評価
- 岩石割れ目の不均質性を考慮した核種移行評価モデルを用いた感度解析により、割れ目表面変質層中の収着拡散等を重要パラメーターとして抽出
- 炭酸塩中にウランがリン酸塩として取り込まれることを確認

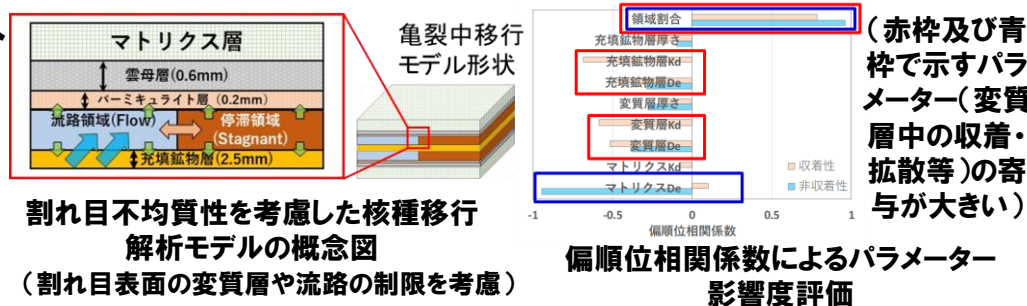
【今後の計画(令和6年度の計画)】

- 原位置試験試料の分析等による岩石割れ目からマトリクス部への主要な核種移行経路の明確化
- 地下環境中の炭酸塩や鉄鉱物、セメント-岩石の接触により生成する鉱物等への核種の取込挙動の分析。

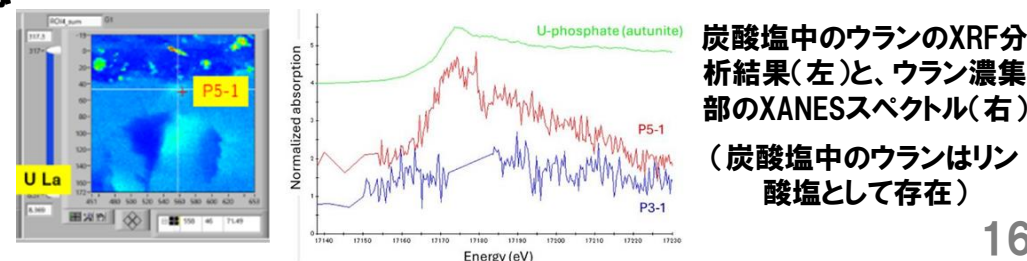
花崗岩中の核種拡散挙動の分析



割れ目不均質性を考慮した評価モデルと重要パラメーターの抽出



炭酸塩中のウランの化学形態の分析



(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

【目的】

- コロイド・有機物・微生物の特性評価と、核種移行への影響メカニズムの解明と評価モデルの構築。

【令和5年度の実施内容】

- 天然コロイドのサイズに応じた元素収着特性データの拡充
- ベントナイトコロイドの生成・安定性を検討し、安全評価でコロイド影響の考慮が必要な地下水組成を明確化。
- これまで核種移行評価で考慮されていない有機物の緩衝材等への収着を、収着試験及び計算科学により検討
- 知見が十分でない地下水中や岩石表面での微生物空間分布や特性等に関する基礎情報の拡充

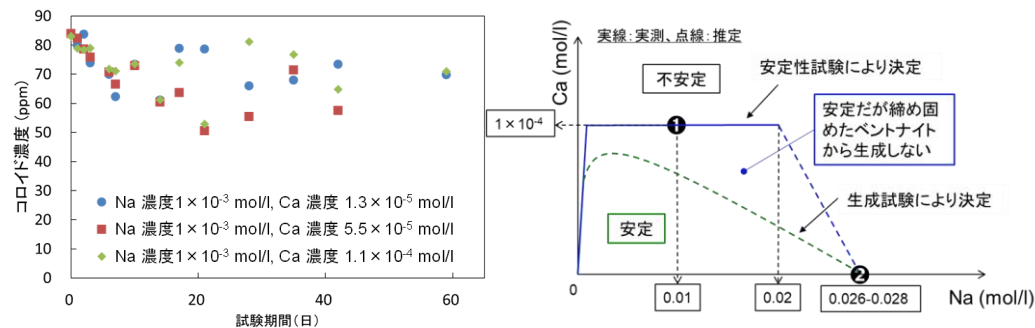
【令和5年度の成果】

- ランタニド元素が主に10kDa以上の天然コロイドに収着していることを確認
- 緩衝材から生成するベントナイトコロイドが安定に存在する地下水組成(Na,Ca濃度)を明確化
- 有機物(フミン酸)の緩衝材への収着挙動について、カルボキシル基量に依存した収着挙動の変化等を評価
- 幌延地域の地下水中微生物は深度によらず種の均一性が高いこと、岩石亀裂表面の微生物分布を確認

【今後の計画(令和6年度の計画)】

- 天然コロイドへの収着についての室内試験データの原位置適用性評価、緩衝材・セメント等への有機物収着挙動評価、緩衝材が微生物活性に及ぼす影響評価等

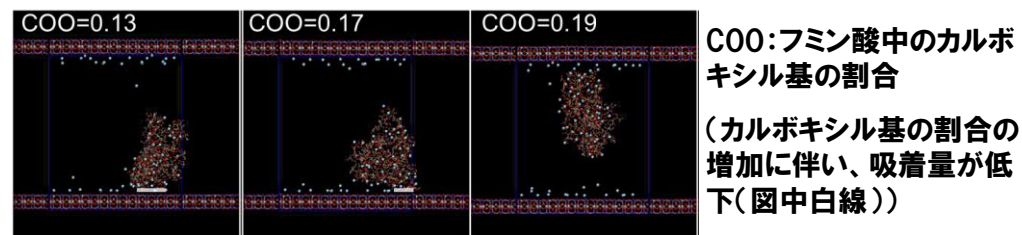
ベントナイトコロイドが安定に存在する地下水組成の検討



コロイド安定性評価試験結果
(Ca濃度 1×10^{-4} mol/l程度まで安定)

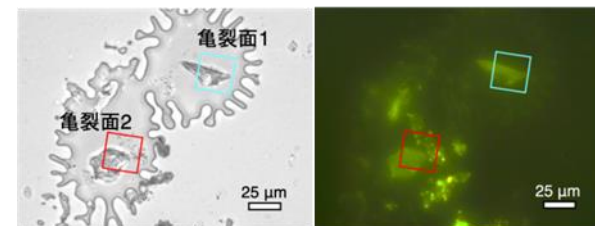
コロイドが安定となるNa,Ca濃度領域のイメージ

緩衝材への有機物収着挙動の評価



緩衝材構成鉱物(モンモリロナイト)へのフミン酸収着挙動のMD計算結果

岩石表面に存在する微生物の分析



(亀裂面表面で微生物細胞を確認(図中□の範囲を分析))

幌延地域の堆積岩亀裂面の微生物分布の分析

令和5年度の成果のまとめと今後の計画

成果のまとめ

(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の拡充及び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条件や腐食性の高い地下水を想定した条件など広範な環境条件での浸漬試験結果を集約し、既存の腐食モデルによる腐食量評価の保守性を確認。

・緩衝材の基本特性:

10年以上の期間を対象とした緩衝材の長期圧密挙動を把握するための試験のうち、4年経過時までの試験データからは二次圧密の加速は認められず。

・データベース整備・更新:

- オーバーパックデータベース ;122件を新規登録

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:

二次鉱物の溶解・沈殿反応に係る現象解析モデルの改良を行い、間隙率や元素濃度の挙動の再現性が向上。

・熱-水-応力-化学連成挙動の解析評価:

室内試験で得られたデータから温度勾配水分拡散係数を設定。設定されたパラメータを基に、熱-水-化学連成解析に着手。

令和5年度の成果のまとめと今後の計画

成果のまとめ

(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:

隆起・侵食による地形・処分場深度変遷と地下水流動の変化を反映した核種移行解析手法を構築し、隆起・侵食が核種移行に与える影響の評価への適用の見通しを得た。

・生活圏被ばく線量評価の信頼性向上:

国内外の生活圏評価事例の調査や解析的検討に基づき、地質環境と生活圏とのインターフェイス (GBI) の設定に影響を与える表層／地質環境の特徴や評価で考慮すべき表層環境での核種移行プロセスを表現する数学モデルの候補を抽出。

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:

鉄との相互作用による緩衝材の収着特性変化の評価等、緩衝材の長期的な環境変遷等が核種移行へ及ぼす影響評価に向けた現象理解、岩石マトリクス部と割れ目部を対象とした室内・原位置試験等による核種移行経路の不均質性等を考慮したモデルの改良、現象理解を進めた。

・コロイド・有機物・微生物影響評価手法:

室内試験や幌延地下研究施設を活用し、コロイドが安定となる地下水組成の評価、有機物の緩衝材への収着挙動等、コロイド・有機物・微生物の特性や核種移行への影響に係るデータ取得と現象理解を進めた。

令和5年度の成果のまとめと今後の計画

今後の計画

- 緩衝材の温度が100℃を超えることによる緩衝材の特性に与える影響を評価するための室内試験や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変遷の評価
- ニアフィールド・天然バリア及び生活圏のそれぞれにおける核種移行に関するモデルの開発・検証・適用性確認やそのためのデータ取得、人工バリア特性や核種移行に関するデータベースの拡充を継続して実施

代替処分オプションの研究開発

- (1) 臨界安全評価技術の高度化**
- (2) 使用済燃料からの核種溶出挙動評価**
- (3) 直接処分システムの成立性の検討に向けた
基盤情報の整備**
- (4) その他代替処分オプション**

研究開発の位置づけ (1/3)

【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 (2/3)

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

➤ 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

■ 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

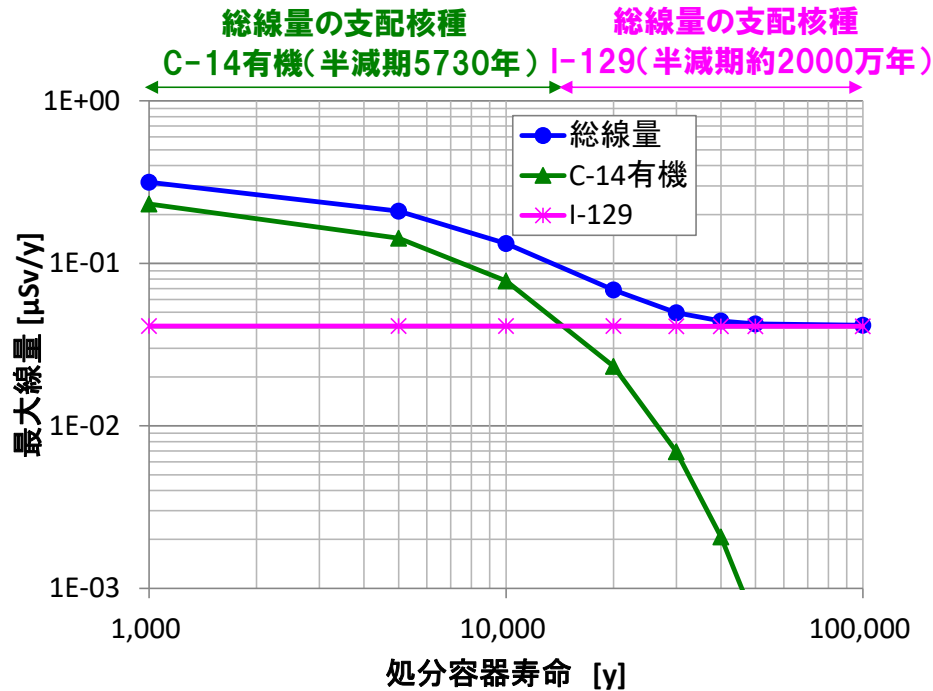
➤ 安全評価

- ・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 (3/3)

補足：直接処分第1次取りまとめ以降の主な着目点

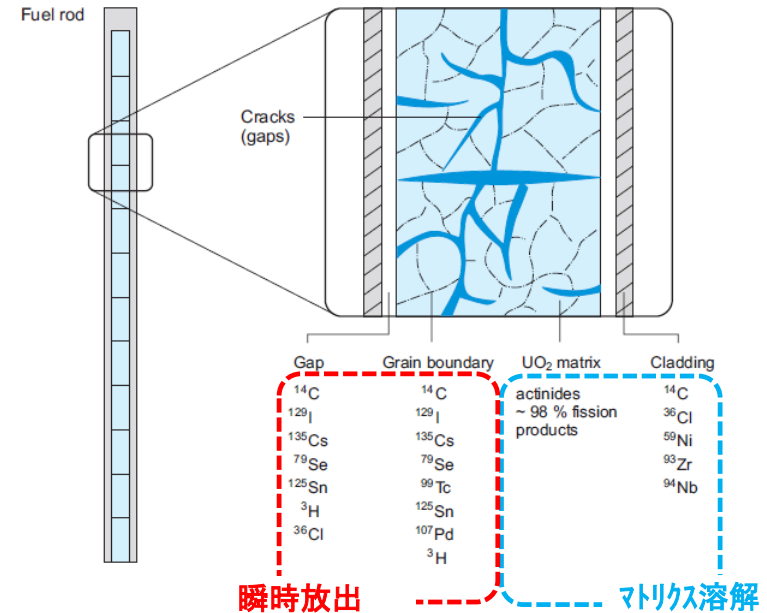
処分容器の閉じ込め期間の長期化と
最大線量の低減効果との関係



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5年度の主な成果

(1) 臨界安全評価技術の高度化:

多様な使用済燃料を対象とする臨界解析を行い、 UO_2 使用済燃料とMOX使用済燃料等の燃料の違い等による処分後の臨界の起こりやすさ／起こりにくさを解析により概略的に把握するとともに、より多様な使用済燃料の処分後の臨界安全性の評価手法の構築に向けた課題等の具体化を進めた。

(2) 使用済燃料からの核種溶出挙動評価:

UO_2 ペレットの長期浸漬試験に着手して溶解速度に及ぼす地下水中の炭酸濃度の影響を確認するとともに、ウランマトリクス表面状態等が溶解速度に及ぼす影響の理解に向け、溶解に伴いウランマトリクス表面の欠陥が増加すること等を浸漬試験後の試料表面のラマン分光分析により明らかにした。

(3) 直接処分システムの成立性の検討に向けた基盤情報の整備:

発熱量の大きな使用済燃料の処分後のニアフィールド熱影響の把握等の課題を抽出するとともに、それらに関連する試解析を通じて、熱影響が顕著となる使用済燃料の種類等を具体的に把握した。

(4) その他の代替処分オプション:

直接処分以外のその他代替処分オプションとして、超深孔処分を対象に、諸外国での最新の事例検討の調査を継続するとともに、工学的成立性の検討の鍵となる因子の整理と関連技術の調査を、これまで主に着目してきた「建設段階」に加えて「操業段階」も対象として実施し、超深孔処分の成立性の検討に向けての留意点や技術的課題等を抽出した。

(1) 臨界安全評価技術の高度化

【目的】

- 処分後の未臨界の確保の確実性を高めるとともに、この結果に基づき、処分容器への使用済燃料集合体の収容体数の合理化事例を提示することを目的とする。

【令和5年度の実施内容】

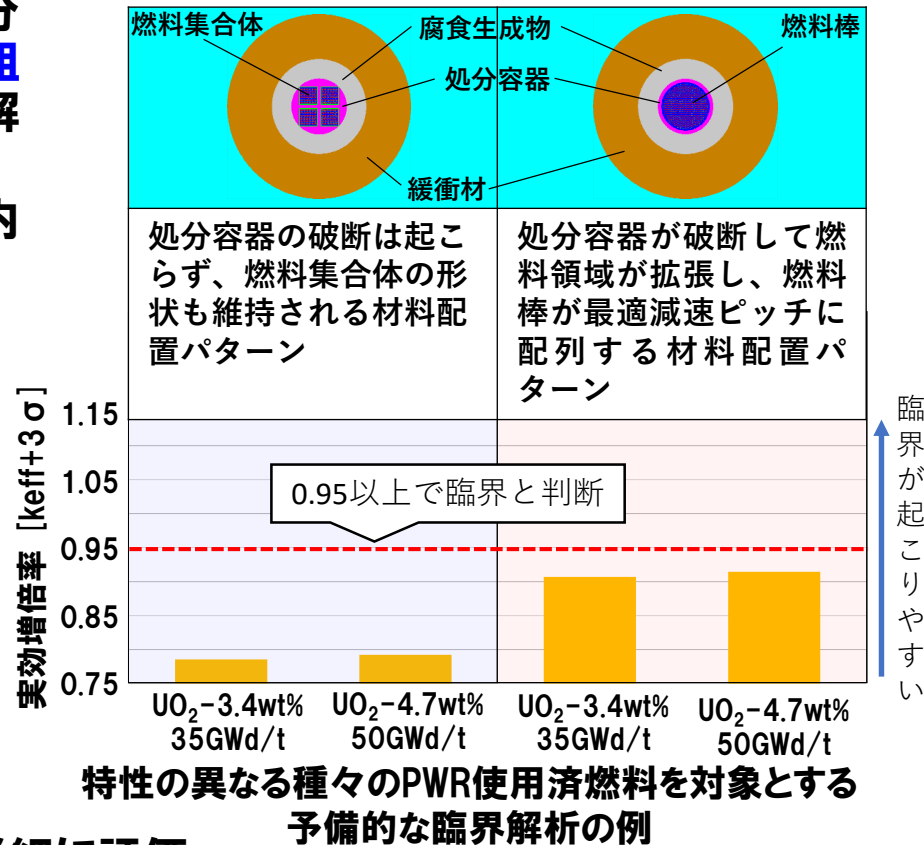
- 処分容器の強度劣化と腐食生成物の体積膨張によって処分容器の破断が起こることで臨界が起こりやすい処分容器の状態や燃料の配置に至ることを仮定して、**燃料組成の異なる種々のPWR使用済燃料を対象とする臨界解析を実施。**
- 燃料多様性の処分後の臨界に及ぼす影響に関する国内外の事例調査とその適用性を検討。

【令和5年度の成果】

- 燃料組成の異なる種々のPWR使用済燃料による臨界の起こりやすさの違いを概略的に把握した(例:右図)。
- 国内外の事例調査や上記解析結果から、わが国における多様な使用済燃料を対象とする臨界安全評価手法の構築に向けて、使用済燃料中の燃焼度分布の考慮の有無等の評価上の不確実性の取り扱い等に係る課題を整理した。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

- 使用済燃料の多様性の処分後の臨界への影響をより詳細に評価していくための臨界解析のアプローチや手法等の具体化を進める。



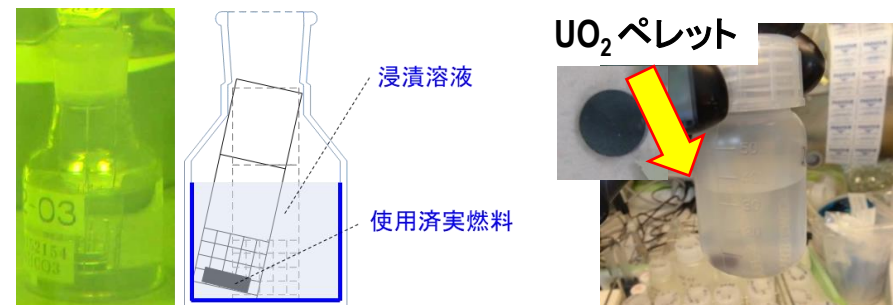
(2) 使用済燃料からの核種溶出挙動評価

【目的】

- わが国の地層処分において想定される条件(炭酸濃度*の高い地下水等)に対応した瞬時放出率及び長期溶解速度を設定するとともに、設定の根拠となる燃料溶解メカニズムを理解する。

【令和5年度の実施内容】

- 瞬時放出率について実際の使用済燃料を用いた低酸素雰囲気下での浸漬試験を実施(右図左上)。
- 長期溶解速度の炭酸濃度依存性を評価するためのUO₂ペレット長期浸漬試験に着手(右図右上)、表面状態等が溶解速度に及ぼす影響の理解に向け、浸漬試験後の試料表面のラマン分光分析を実施。



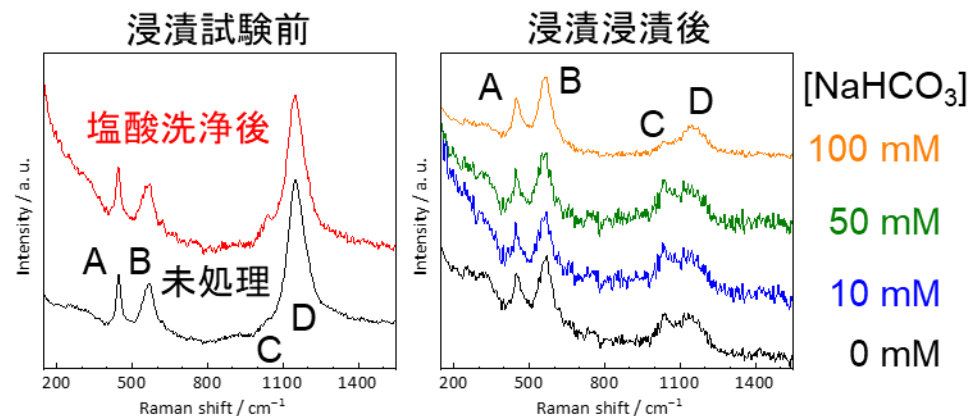
使用済燃料を用いた浸漬試験外観 UO₂ペレット浸漬試験外観

【令和5年度の成果】

- UO₂ペレット浸漬試験によりUO₂マトリクス溶解速度の炭酸濃度依存性を取得するとともに、溶解に伴いウランマトリクスの表面の欠陥が増加すること等を把握した(右図下)。
- 実際の使用済燃料を用いた浸漬試験により、低酸素雰囲気での瞬時放出率データを新たに取得した。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

- 炭酸濃度等の試験条件を拡充した瞬時放出率等に関する実測値の取得や、浸漬によるUO₂ペレット表面状態の経時変化等の分析を行う。



浸漬試験前後のUO₂ペレット表面のラマン分析結果
(バンドDの強度が低下し、表面欠陥の増加を示唆)

(3) 直接処分システムの成立性の検討に向けた基盤情報の整備

【目的】

- わが国で想定される地質環境条件や使用済燃料の多様性等に配慮しつつ、直接処分システム全体の成立性の検討に向け、最新の技術基盤の集約・体系化のための取り組みを進める。

【令和5年度の実施内容】

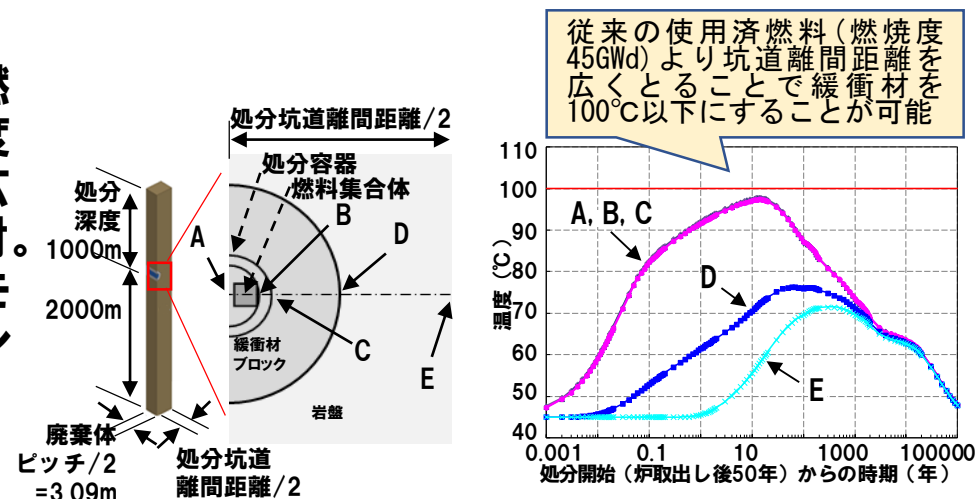
- 先行事業等で実施した、限定した種類の使用済燃料に対する地下施設の概念設計に対して、高燃焼度化UO₂使用済燃料やMOX使用済燃料等を含む幅広い特性の使用済燃料の処分に対する適用性を検討。
- 長期安全性の論拠や反証等の連鎖から成る討論モデルの試作や、予備的な核種移行解析等を通じてシステム全体の安全性の論証に向けた課題を整理。

【令和5年度の成果】

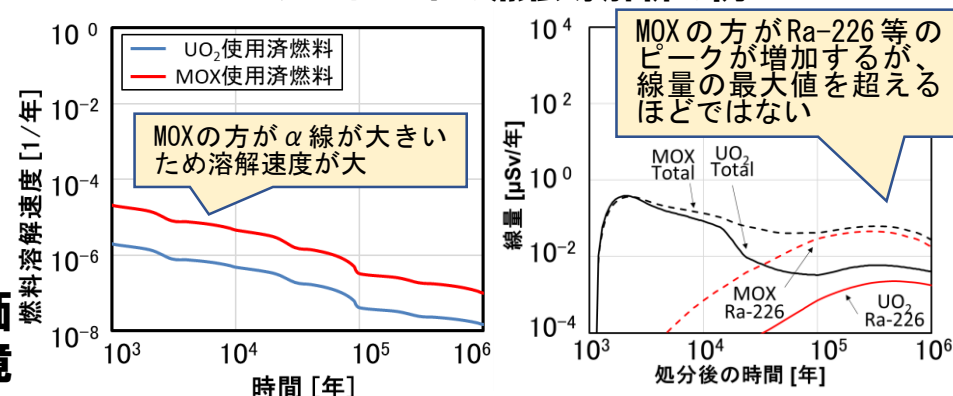
- 直接処分の工学的成立性や長期安全性を示すために重要な課題として、発熱量の大きな使用済燃料の処分後のニアフィールド熱影響の把握等の課題を抽出するとともに、それらに関連する試解析(例:右図)を通じて、熱影響が顕著となる使用済燃料の種類等を具体的に把握した。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

- 直接処分システム全体を対象とした設計や安全評価の検討に向けて、対象とする使用済燃料や地質環境の条件を拡充した試行的な解析等を通じて、課題の具体化等を進める。



高燃焼度化されたUO₂使用済燃料を処分する場合のニアフィールドの熱伝導解析の例



α線による酸化雰囲気による溶解速度の増加とその核種移行への影響の評価例

(4) その他代替処分オプション

【目的】

- 直接処分以外のその他の代替処分オプションとして、超深孔処分に着目し、その工学的成立性や閉鎖後長期安全性についての技術的知見を包括的に提示する。

【令和5年度の実施内容】

- 建設段階と操業段階を対象とした、超深孔処分の技術動向や知見の調査・整理。

【令和5年度の成果】

- 諸外国の検討事例の調査・分析を通じて、既往の検討事例で指摘された課題等を整理(共通課題/事例特有課題、課題に対する進捗状況等)。
- 工学的成立性の検討の鍵となる因子の整理、及び関連技術の現状把握・課題抽出(例えば、建設段階及び操業段階の両方に関係するケーシング技術に関するもの等)。

【今後の計画(令和6年度の計画)】

工学的成立性において重要となる因子について、操業段階での廃棄物の定置に係る因子についての関連技術等に係る情報の拡充を図るとともに、閉鎖段階での深孔の閉鎖に係る因子等の検討に着手する。

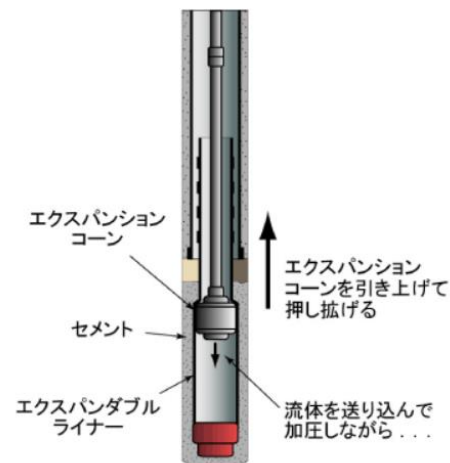
本事業で対象とする検討の範囲と展開

	建設段階	操業準備段階	操業段階	閉鎖段階
要求事項	深孔が適切に掘削できる	深孔が健全に維持できる	廃棄物が支障なく定置できる	深孔が安全に閉鎖できる
設計要件	深度確保	孔径維持	廃棄体降下	閉鎖の実施
	孔径確保	孔壁維持	廃棄体定置	シールの実施
			廃棄体防護	シール性維持

工学的成立性の鍵となる可能のある因子の抽出、知見の整理



ケーシングのスリム化のための技術例：
エクspアンダブル・チューブラー



(石油・天然ガス資源情報ホームページ:

<https://oilgas-info.jogmec.go.jp/termist/1000297/1000330.html>

(閲覧日: 2024年3月7日)

令和5年度の成果のまとめと今後の計画

成果のまとめ

(1) 臨界安全評価技術の高度化:

多様な使用済燃料を対象とする臨界解析を行い、 UO_2 使用済燃料とMOX使用済燃料等の燃料の違い等による処分後の臨界の起こりやすさ／起こりにくさを解析により概略的に把握するとともに、より多様な使用済燃料の処分後の臨界安全性の評価手法の構築に向けた課題等の具体化を進めた。

(2) 使用済燃料からの核種溶出挙動評価:

UO_2 ペレットの長期浸漬試験に着手して溶解速度に及ぼす地下水中の炭酸濃度の影響を確認するとともに、ウランマトリクス表面状態等が溶解速度に及ぼす影響の理解に向け、溶解に伴いウランマトリクス表面の欠陥が増加すること等を浸漬試験後の試料表面のラマン分光分析により明らかにした。

(3) 直接処分システムの成立性の検討に向けた基盤情報の整備:

発熱量の大きな使用済燃料の処分後のニアフィールド熱影響の把握等の課題を抽出するとともに、それらに関連する試解析を通じて、熱影響が顕著となる使用済燃料の種類等を具体的に把握した。

(4) その他の代替処分オプション:

直接処分以外のその他代替処分オプションとして、超深孔処分を対象に、諸外国での最新の事例検討の調査を継続するとともに、工学的成立性の検討の鍵となる因子の整理と関連技術の調査を、これまで主に着目してきた「建設段階」に加えて「操業段階」も対象として実施し、超深孔処分の成立性の検討に向けての留意点や技術的課題等を抽出した。

令和5年度の成果のまとめと今後の計画

今後の計画

- **使用済燃料から一部の放射性核種が処分後速やかに放出される現象等について、条件を拡充しつつデータの取得等を実施**
- **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継続するとともに、閉鎖段階で必要な技術の情報収集に着手**