



令和3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研究開発

令和4年2月25日

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

- (3) 高レベル放射性廃棄物の処分技術等に関する研究開発
- 3) **高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発**

中長期計画（平成27年4月1日～令和4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、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る**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3年4月1日～令和4年3月31日）

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、**処分システムの設計・施工技術や安全評価のためのデータ**を取得するとともに、幌延深地層研究計画での地質環境調査や坑道を利用した試験で得られるデータ、また、超深地層の研究施設計画で取得された地質環境データ等も活用して、モデル化技術等の検証と適用性の確認等を進める。具体的には、**バリア材料間の相互作用等のニアフィールドの変遷**がバリア材の基本特性に与える影響に関するデータ取得及びモデル開発、並びに**ニアフィールドの変遷や母岩中の割れ目等の不均質性等を考慮した核種移行**に関するデータ取得及びモデル開発を実施し、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。

- (3) 高レベル放射性廃棄物の処分技術等に関する研究開発
- 4) **使用済燃料の直接処分**研究開発

中長期計画（平成27年4月1日～令和4年3月31日）

海外の直接処分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の地層処分研究開発の成果を活用しつつ、**代替処分オプション**としての使用済燃料直接処分の調査研究に取り組み、成果を取りまとめる。

年度計画（令和3年4月1日～令和4年3月31日）

地質環境や使用済燃料の特性の多様性を考慮に入れた処分施設の設計検討や閉じ込め性能に関する評価検討等の拡充と系統的整理を進める。具体的には、**純銅処分容器の硫化物環境**での腐食速度の経時変化や共存化学種濃度との関係に関するデータの取得、**使用済燃料の溶解速度**等に影響を及ぼす**炭酸影響**に関するデータの取得を実施するとともに、第3期中長期目標期間における成果を取りまとめる。

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

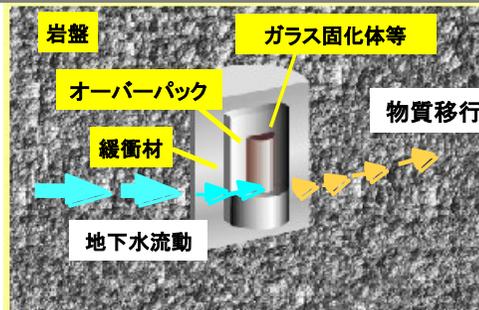


- (1) 処分システムに関する**工学技術**の信頼性向上
 - 1) 人工バリア等の基本特性データベースの拡充
 - 2) 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究
- (2) **安全評価**手法の高度化
 - 1) 放射性核種の移行に係る現象理解とそれに基づく評価モデルの高度化
 - 2) 放射性核種の移行に係るデータベース開発

地層処分基盤研究施設(エントリー)



地層処分における核種移行モデルの高度化



地層処分放射化学研究施設(クオリティ)



人工バリアシステムの健全性評価試験

- 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)

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



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

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

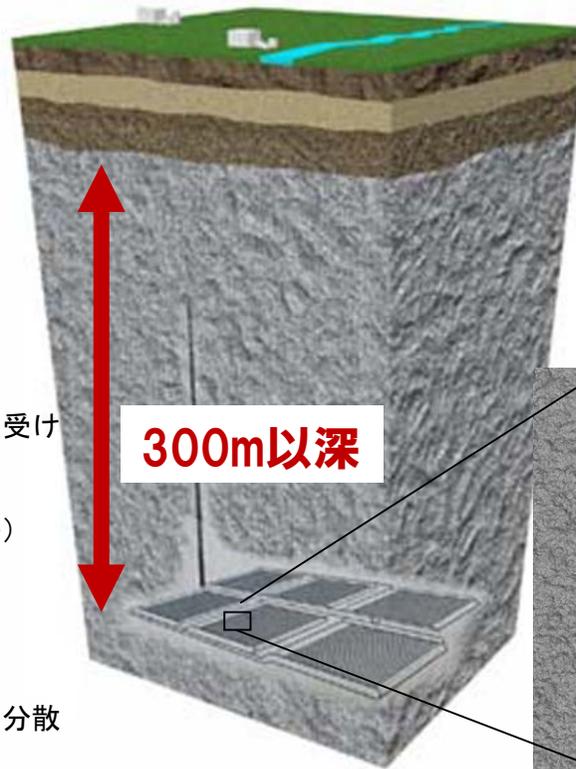
- ・好ましい地下水化学（還元性等）
- ・小さな地下水流速
- ・力学的安定性
- ・人間環境からの物理的障壁

天然バリアとしての機能

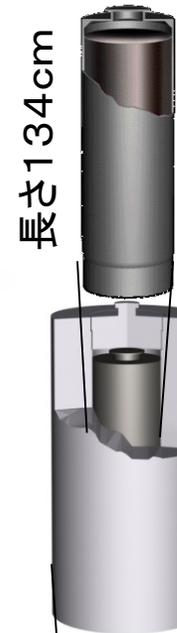
- ・放射性核種の移行抑制と希釈・分散

将来の人間活動の影響回避

- ・資源が存在しない



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)

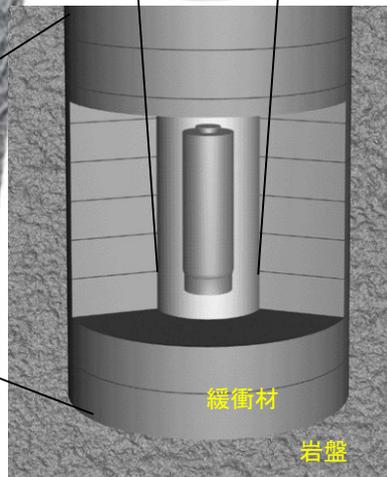
- ・放射性核種を均一かつ安定に固定
- ・高い化学的耐久性により地下水への放射性核種の溶出を抑制
- ・熱や放射線に対する安定性

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3年度の成果のまとめ

(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、より高温の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:

緩衝材の吸水過程における膨潤圧の一時的な低下が、緩衝材内部での吸水圧縮挙動の発生に起因することを解明するなど、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 ; 1,982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:

セメントとベントナイトとの接触による相互作用に関する実験結果を分析し、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)との接触界面における変質等のデータを取得

・**熱-水-応力連成**(3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、過渡期の評価にも適用できるように高度化した二次元長期力学解析コードの適用性を確認するとともに、三次元的な形状に起因する応力分布の再現性などモデル高度化に向けた課題を抽出

令和3年度の成果のまとめ

(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:

陸域を対象として開発した地形・処分深度変遷解析ツールを沿岸域にも対応できるように拡張し、地形の初期条件や処分場の位置の違いによる隆起・侵食と海水準変動の組合せによる影響の現れ方の違いの比較を試行

・生活圏被ばく線量評価の信頼性向上:

仮想的な地表環境条件を設定し、地形・標高、集水域、土地利用状況等の特徴に応じた生活圏構成要素と構成要素間の物質移行プロセスの設定を試行

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:

ニアフィールドの環境変遷を考慮した緩衝材中の核種移行モデルを構築したほか、岩石中(結晶質岩: グリムゼル・エスポ, 堆積岩: 幌延)の割れ目部を対象とした室内・原位置試験により、割れ目部の不均質性等を現実的に考慮した核種移行モデルを提示

・コロイド・有機物・微生物影響評価手法:

幌延URL等を活用し、実際の地質環境におけるコロイド・有機物・微生物の特性や核種移行への影響について、室内・原位置試験によって現象理解を図り、それらを反映した影響評価手法を提示

・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:

オーバーパックの腐食挙動

□ 成果

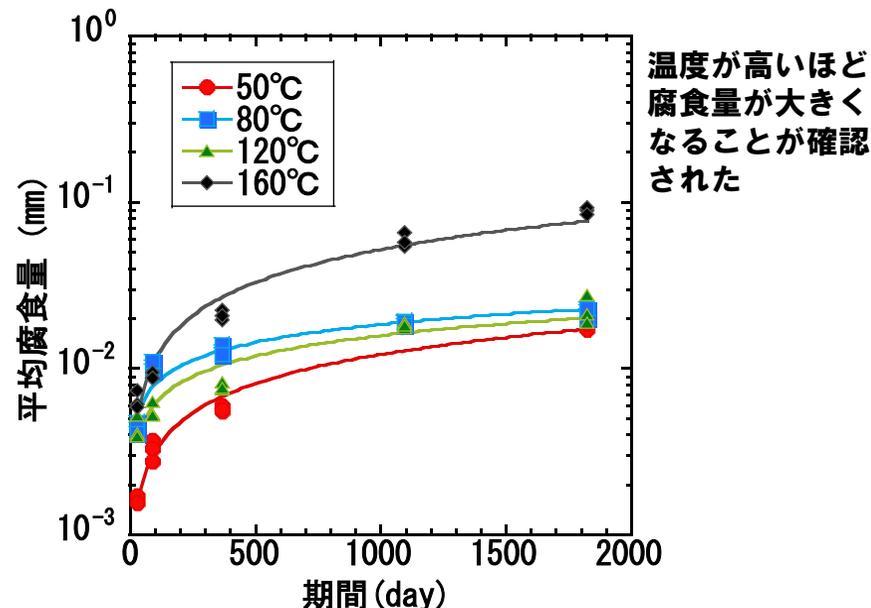
【オーバーパックの腐食挙動に関するデータの拡充】

➤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を含め、温度、地下水水質等による炭素鋼の腐食への影響に関するデータを拡充するため、広範な環境条件での腐食試験を実施している。

➤高温水環境を想定した条件として、試験温度を変化させた浸漬試験および水素吸収試験を実施し、温度が高いほど腐食量は大きいことを確認した。また、腐食に伴う炭素鋼の水素吸収量は十分小さく、水素脆化による破損が生じる可能性が低いことを確認した。

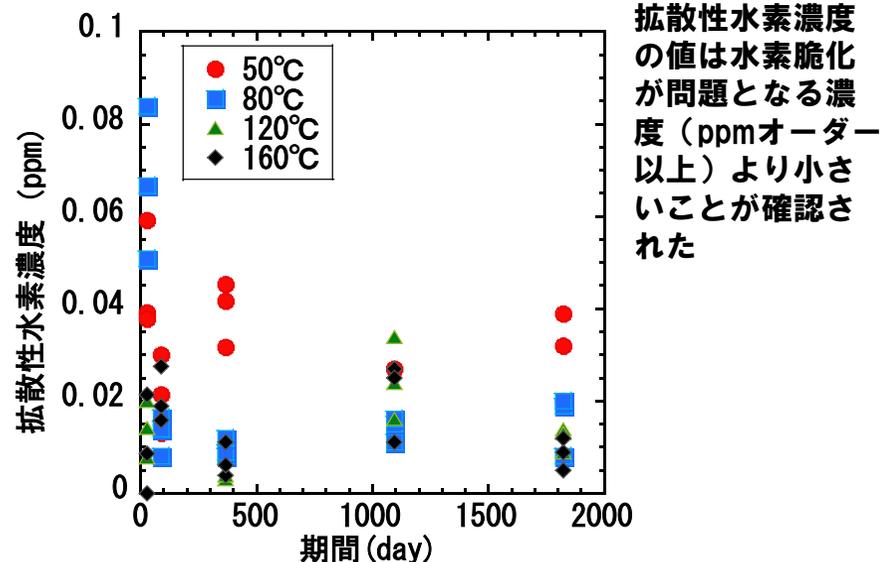
□ 意義／反映先

➤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ク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する。



温度が高いほど腐食量が大きくなることが確認された

試験温度を変化させた浸漬試験結果



拡散性水素濃度の値は水素脆化が問題となる濃度 (ppmオーダー以上) より小さいことが確認された

試験温度を変化させた水素吸収試験結果

(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の拡充及びデータベースの開発:

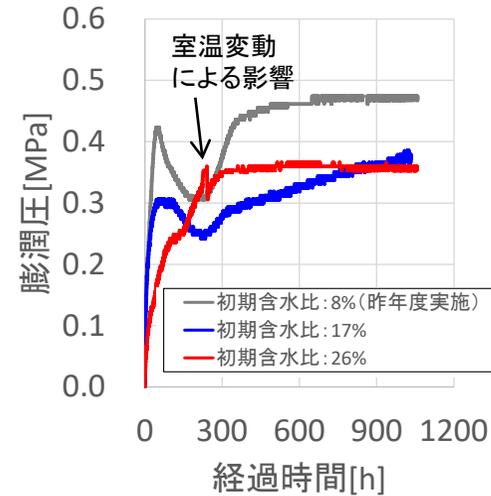
緩衝材の基本特性

□ 成果

- ▶ 膨潤圧試験中に膨潤圧が一度低下する要因を明らかにするため、初期含水比の異なる条件での膨潤圧試験を実施し、試験中のエックス線CT測定により膨潤圧の変化と供試体内部の状態変化の関係を把握した。
- ▶ 膨潤圧の低下は、供試体内部での吸水圧縮挙動(コラプス)の発生によって生じており、コラプスの有無によって膨潤圧の経時変化のグラフの形状が異なることがわかった。

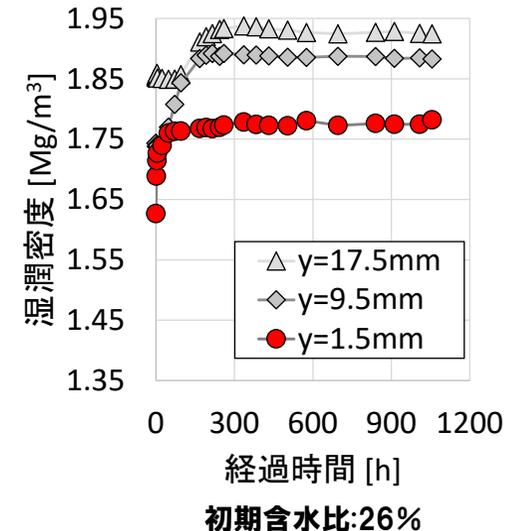
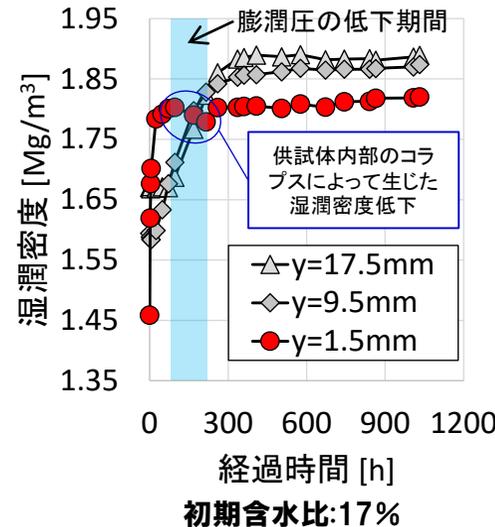
□ 意義/反映先

- ▶ 過渡期(廃棄体定置後のTHMC状態が大きく変化する期間)の緩衝材の力学挙動の理解
- ▶ 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)における連成挙動評価手法の整備のための基礎情報の提供



- 初期含水比が高い場合 → 膨潤圧が単調に増加
- 初期含水比が低い場合 → 膨潤圧が一度減少

初期含水比の異なる条件での膨潤圧の経時変化



X線CT測定により得られた供試体高さごとの湿潤密度の経時変化(y=0が浸潤面)

(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:

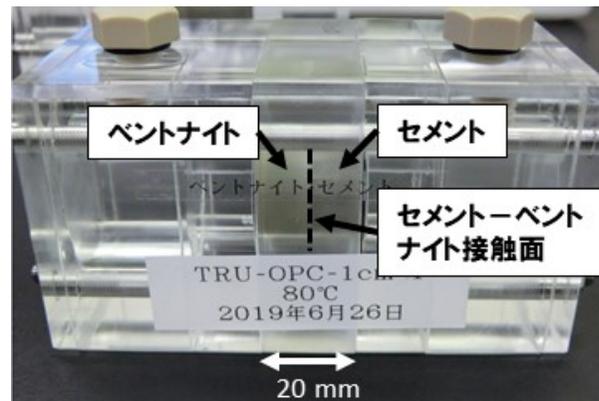
セメント-緩衝材相互作用評価モデルの高度化

□ 成果

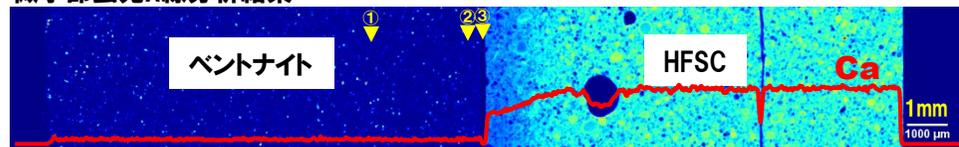
- セメント起源の高pH間隙水による影響を抑制するために開発された低アルカリ性セメント(HFSC)及び汎用性が高く幅広く利用されている普通ポルトランドセメント(OPC)のそれぞれと、緩衝材(ベントナイト)との接触による相互作用に関する実験手法を構築し、各セメント条件でのセメント及びベントナイトの変質状態を比較した。
- 微小部蛍光X線分析の結果、セメント側はHFSC、OPCいずれの条件でも界面近傍でCa濃度の低下が観察されたが、ベントナイト側はOPC条件でのみ界面近傍でCa濃度の増加が観察された。走査型電子顕微鏡分析により、OPC条件でのベントナイト側界面近傍ではシリカ鉱物の溶解とケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の沈殿を示唆する結果を得た。

□ 意義/反映先

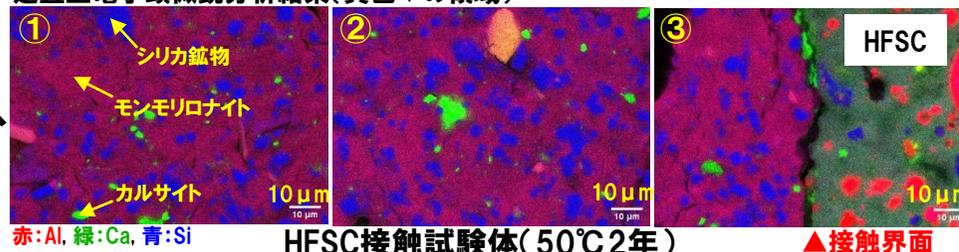
- セメント-緩衝材の相互作用に関する評価モデルの高度化に反映する。



微小部蛍光X線分析結果



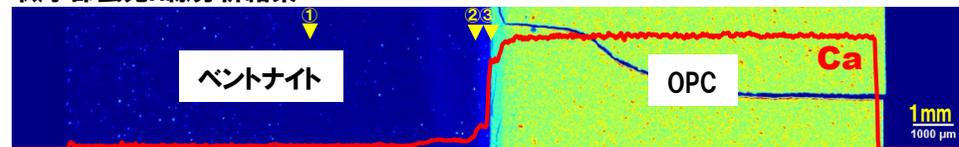
走査型電子顕微鏡分析結果(黄色▼の領域)



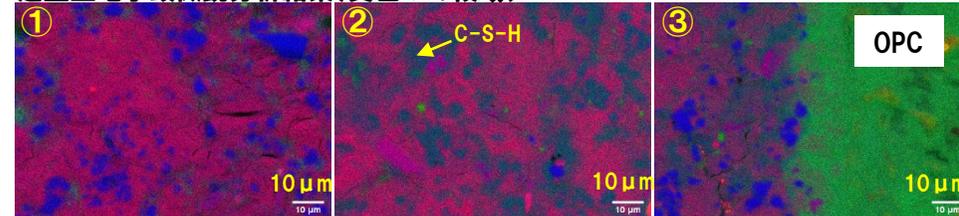
HFSC接触試験体(50°C 2年)

▲接触界面

微小部蛍光X線分析結果



走査型電子顕微鏡分析結果(黄色▼の領域)



OPC接触試験体(80°C 1年)

▲接触界面

(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)

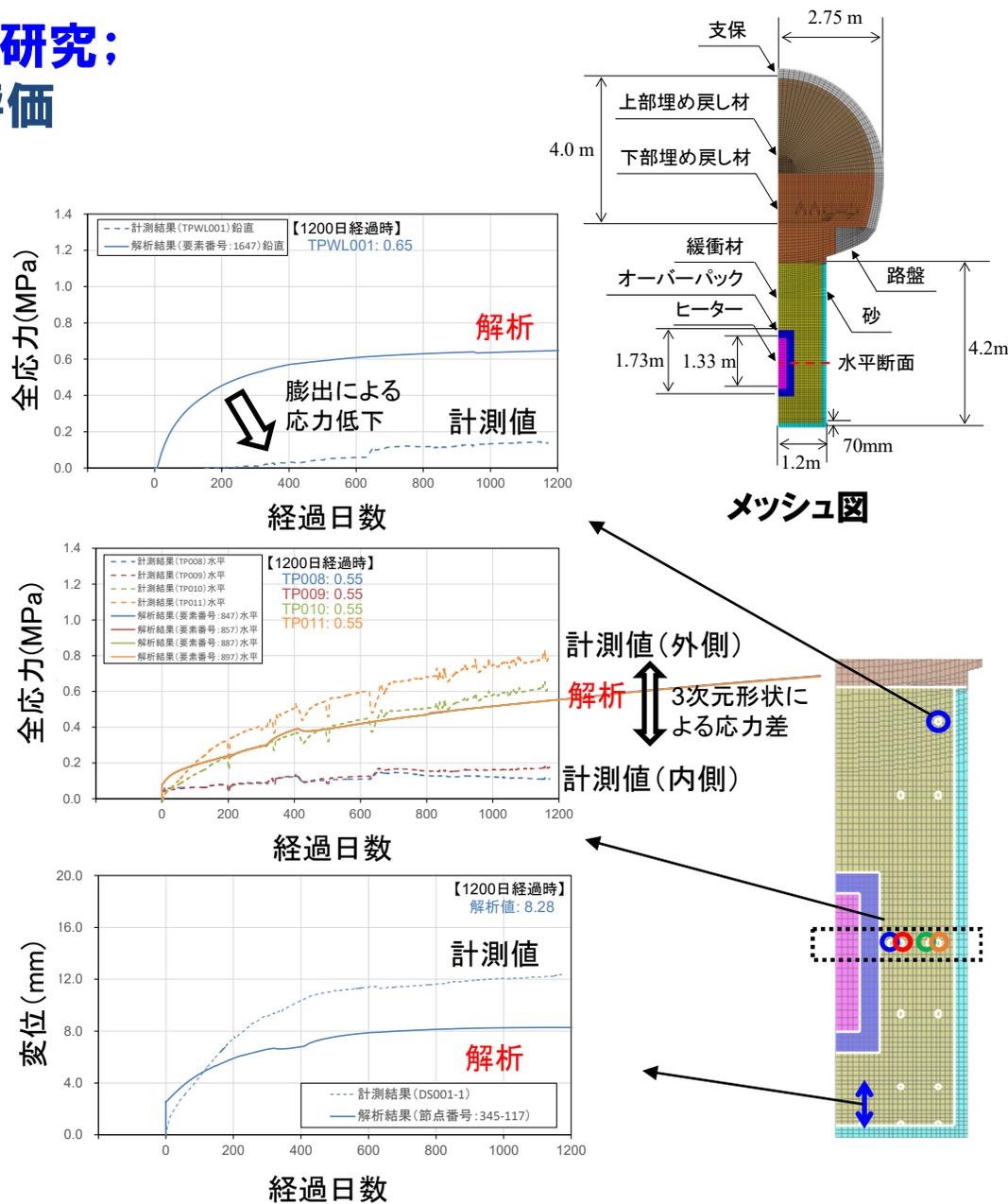
2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 熱-水-応力連成(3連成)挙動の解析評価

□ 成果

- 過渡期の評価にも適用できるように高度化した2次元長期力学解析コードに対して、過渡期の緩衝材の力学挙動に着目した時の再現性の把握と課題の抽出を行った。
- 原位置試験で確認されている地下水の浸潤に伴う緩衝材の膨潤挙動が表現できていることを確認した。特に、従来から課題とされていた変位の再現性の向上が確認された。
- 3次元的な形状に起因する応力分布や埋め戻し材への緩衝材の膨出挙動が適切に評価できていない等の課題が抽出された。

□ 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3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



(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:

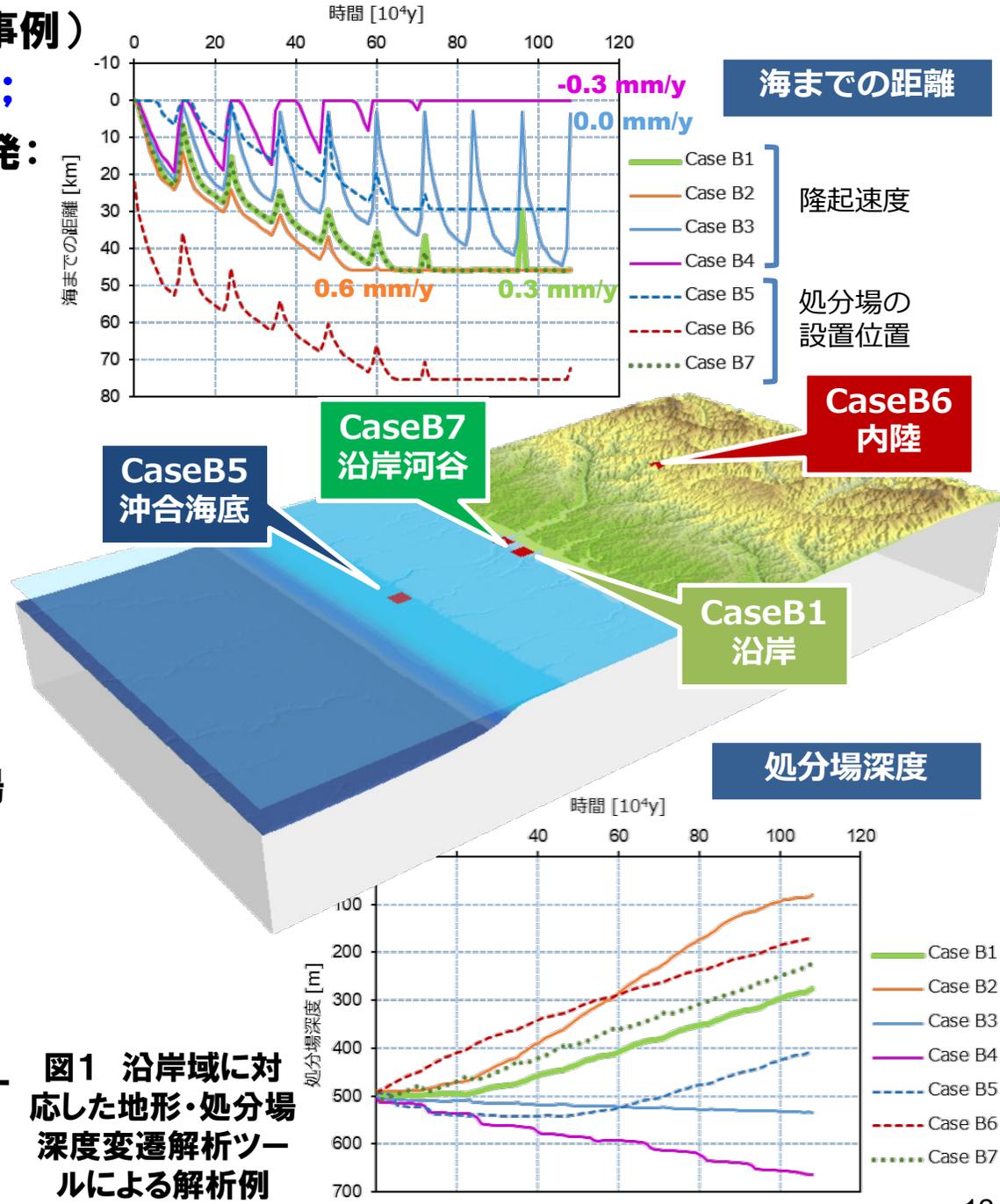
隆起・侵食を考慮した安全評価手法の開発:

□ 成果

- 陸域を対象として開発した地形・処分深度変遷解析ツールを沿岸域にも対応できるように拡張し、陸域から海域への土砂移動や堆積、海水準変動に伴うそれらの時空間的等を考慮できるようにした。
- 地形の初期条件や処分場の設置位置の違いによる、隆起・侵食と海水準変動の組み合わせの、処分場から海までの距離(塩水の影響をどの程度うけるかの目安)や処分場深度の変化への影響の現れ方の違いを概括的に把握するための試解析を行った(図1)。
- その結果、処分場から海までの距離や処分場深度の変化は、上記の条件に大きく依存する可能性が示唆された。

□ 意義／反映先

- 沿岸域の性能評価で想定される氷期一問氷期サイクルの影響は、処分場の位置にも依存する。地形変化や処分場深度の変化を評価することで、こうした影響の取り込みにむけた性能評価手法の高度化に反映していく。



(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

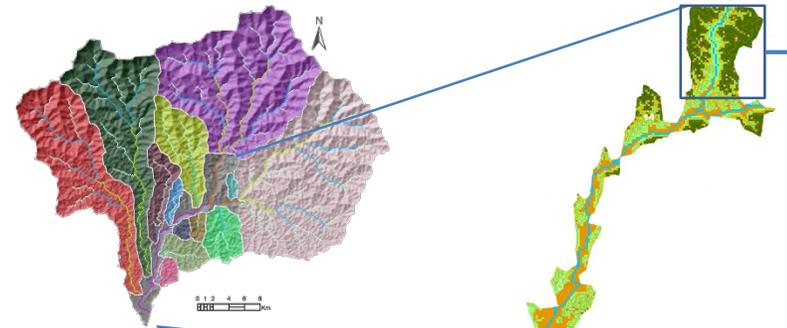
成果

- 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、過年度までに構築した地形・処分場深度変遷解析ツールを用いて仮想的な地表環境を作成し、地形・標高、集水域、土地利用状況等の地理情報に基づき評価領域を仮定した上で、生活圏構成要素と構成要素間の物質移行プロセスの設定を試行した。
- 試行においては、事前に幅広く整備した生活圏構成要素群と構成要素間の物質移行プロセス群*から、評価領域の地表環境の特徴に応じたものを抽出・整理するとともに、その過程を手順(右図)として明確化した。例えば、地形・標高や土地利用状況といった地理情報を活用し、構成要素の隣接関係や標高差に伴い生じる土砂や地表水の移行プロセスをより現実的に設定した。
- 本試行で設定した構成要素及び移行プロセスは、既存のジェネリックな生活圏評価では想定していない具体的な地理情報に基づき設定しており、実際の地表環境の特徴を具体的に反映したものである。

*: 長尾ほか, JAEA-Research 2016-003, 2016

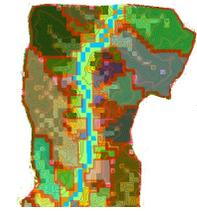
意義/反映先

- 本試行に基づき整備されるモデル構築手法は、概要調査によって得られた場の情報に基づき、精密調査地区選定を行うための安全評価において、場の特徴を反映した生活圏評価モデルの構築に活用することが可能となる。



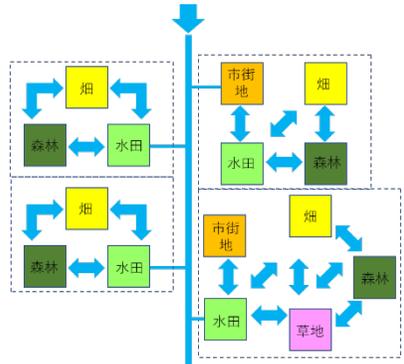
① 地形・処分場深度変遷解析ツールを用いて仮想的な地表環境を作成

② 地形・標高、集水域、土地利用状況に基づき評価領域を仮定



③ 評価領域内の生活圏構成要素(河川、水田、畑、市街地、森林等)を抽出

森林	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱 地滑り・崩壊・落石	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱	
	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱 地滑り・崩壊・落石	
畑	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱	
水田	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱	土壌の移動 地表水の移動 拡散 生物擾乱	市街地



④ 考慮すべき構成要素間の物質移行プロセスを抽出・整理 (色付きセルで示される構成要素間の物質移行プロセスを白セル内に記載する。)

⑤ 生活圏構成要素の位置関係と物質移行プロセスを概念化

図 仮想的な地表環境条件に基づく生活圏構成要素と構成要素間の物質移行プロセスの設定手順(イメージ)

(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)

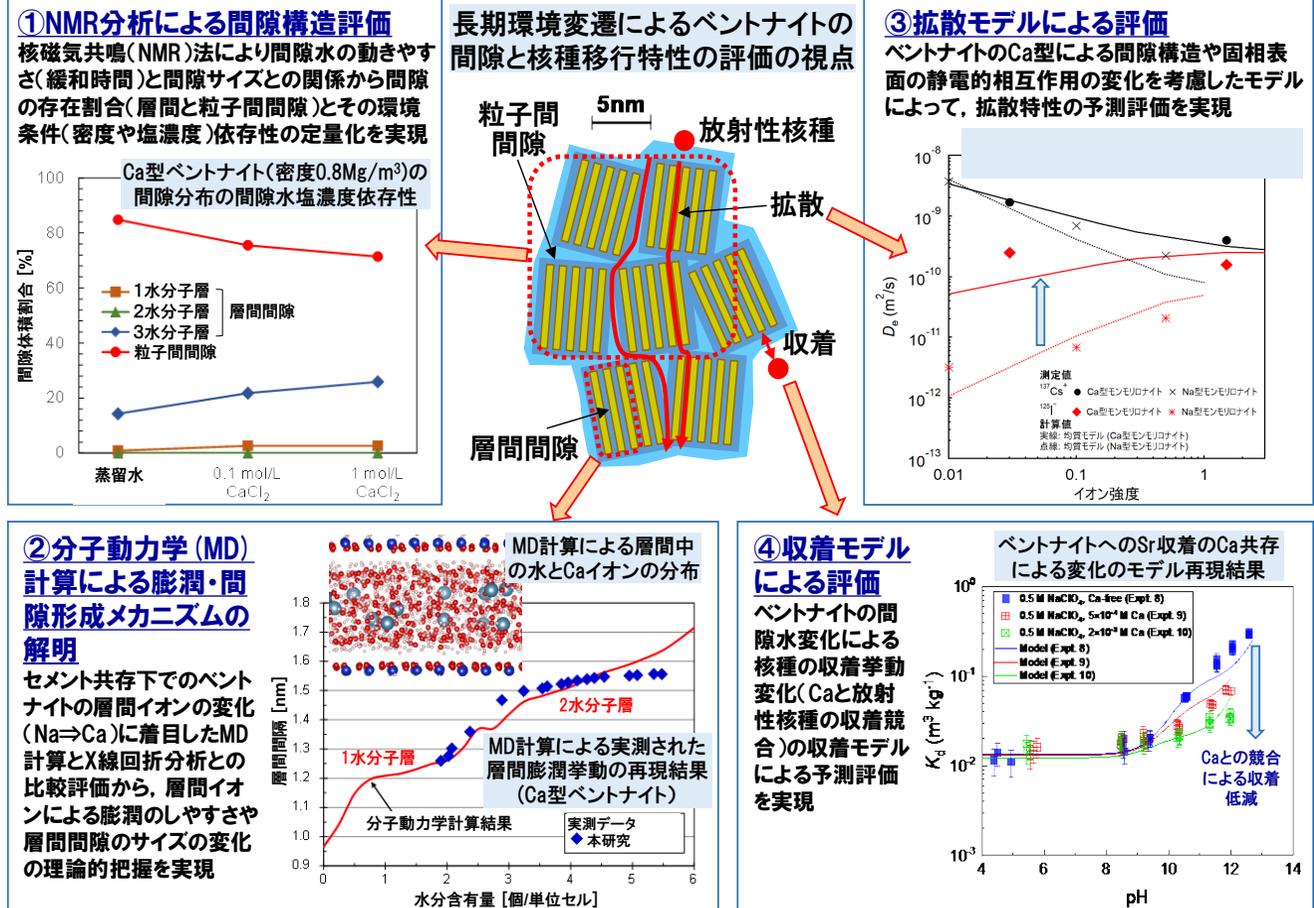
□ 成果

- オーバーパックやセメントとの相互作用に伴う緩衝材ベントナイト中の環境変遷と核種移行特性の変化に関する現象解明と定量評価モデルを構築した。
- このうち、セメント系材料の共存によるベントナイトのNa型からCa型への変遷を対象に、先端的な分析・計算科学技術の適用によって、膨潤特性と間隙構造の変化、それに伴う収着・拡散挙動の変化を予測可能なモデルを提示した。(右図)
- これらデータを含む国内外の最新の知見・データを反映した核種移行データベースを更新・公開した。

□ 意義/反映先

- NUMOや安全規制における安全評価で必要となる、ニアフィールド長期変遷を考慮したより現実的な核種移行評価を可能とするモデル/データベースを提示

Ca型ベントナイトの間隙構造・間隙水特性と核種移行評価モデルの研究成果例



(2) 安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

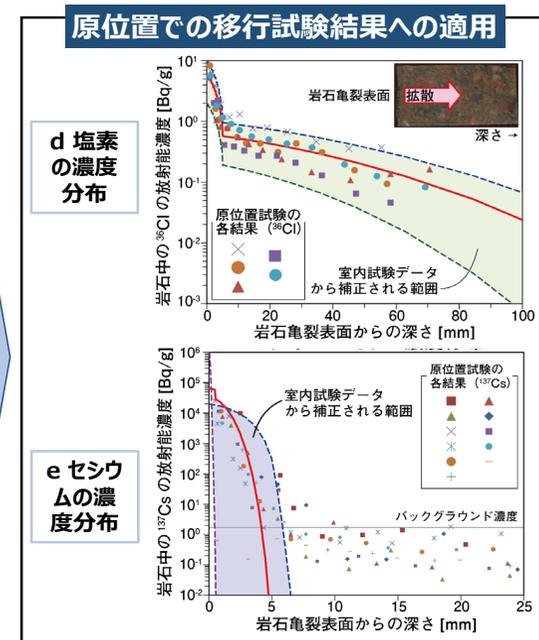
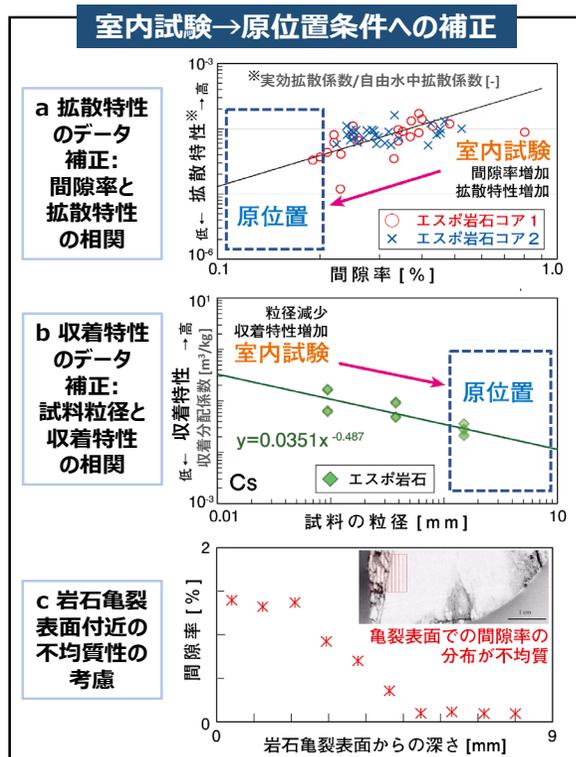
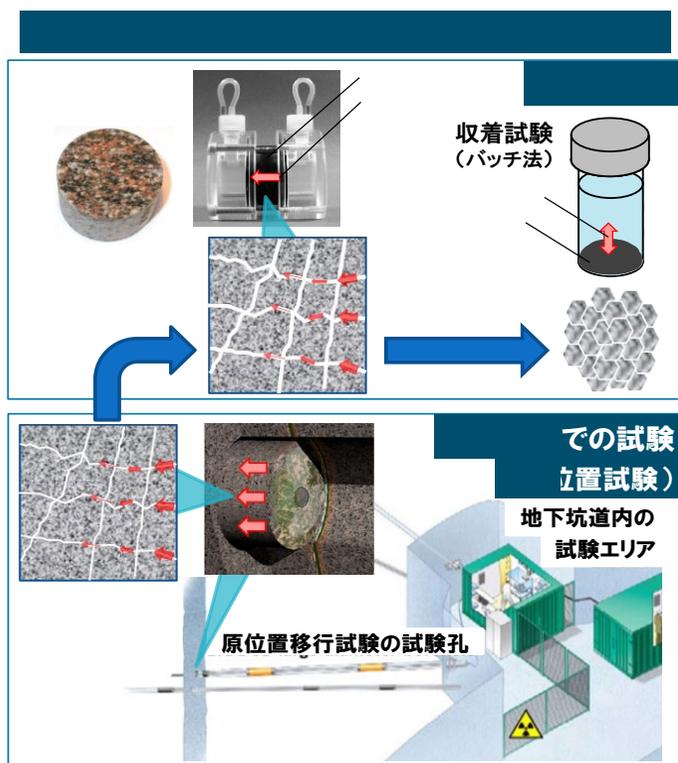
2) 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発： 収着・拡散モデル/データベースの開発 (岩石)

□ 成果

- 結晶質岩(スイスグリムゼルやスウェーデンエスポ等)と堆積岩(幌延)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。
- エスポやグリムゼルの国際共同研究を通じて、室内試験と原位置試験で得られたデータの差異とその原因を特定し、室内試験データから地下深部での移行特性を評価する手法を構築(2021年12月にプレス発表を実施)。

□ 意義/反映先

- 実際の地質環境の特徴や多様な環境条件へ適用可能な核種移行モデルとデータベースを提示。



スウェーデンエスポの原位置・室内データを活用した補正手法の適用例

(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** ;

コロイド・有機物・微生物影響評価手法

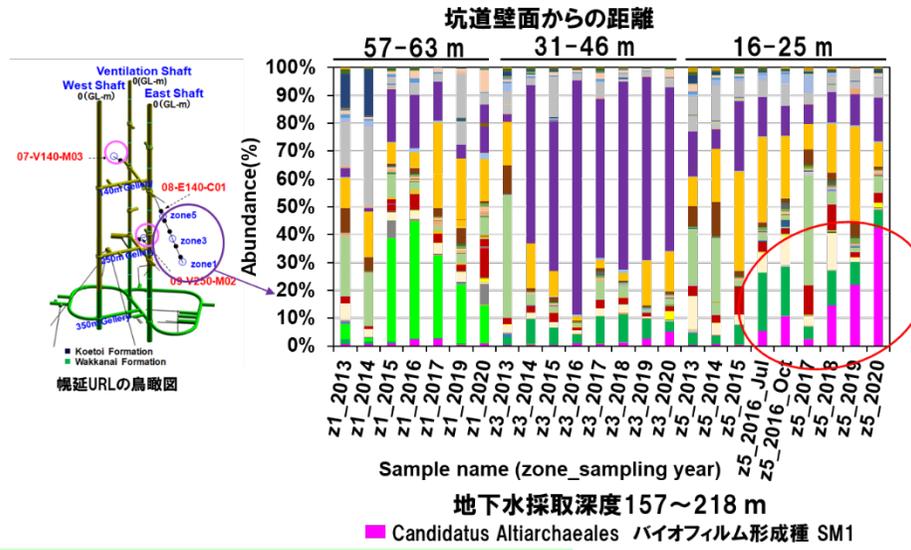
地下施設建設に伴う周辺環境の経時変化調査(微生物種組成の例)

□ **成果**

- **幌延地下研究施設**を活用して、**コロイド・有機物・微生物の影響評価**に係る室内および原位置でのデータ取得 (コロイド密度、有機物錯生成、微生物種・代謝等)と、核種移行への影響評価モデルを構築
- 同施設における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*の収着特性データを拡充し、微生物代謝との関連性を考察
 - *アクチノドのアナログ元素として使用

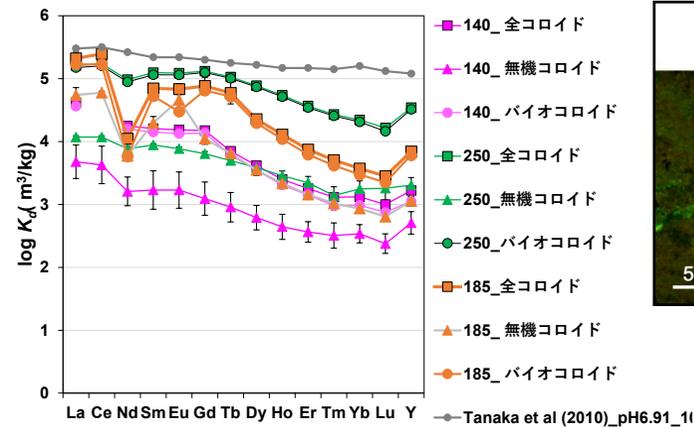
□ **意義／反映先**

- 実際の原位置条件への適用性を念頭において、室内および原位置における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評価プロセスのモデル化・評価手法を提示



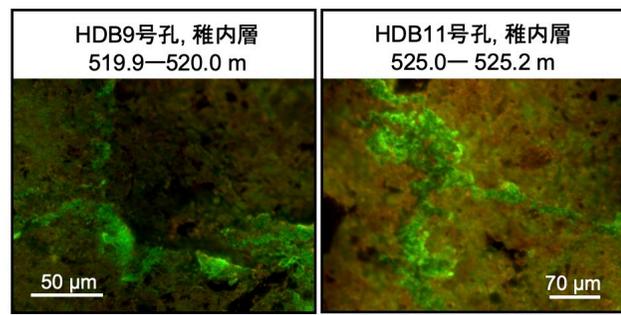
□地下施設建設過程における微生物種組成の経時変化から、**バイオフィーム形成領域**が徐々に拡大していることを確認

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



バイオコロイドを含むコロイドによる核種収着効果を反映した評価モデルに反映させるためのデータベースを整備

深部堆積岩中の微生物分布調査



幌延地下の稚内層から採取した岩石試料中にて、亀裂内部に微生物細胞が分布することを確認。黄緑色の蛍光像が微生物細胞。亀裂以外のマトリクス領域には、微生物の濃集部は確認されていない。(東京大学との共同研究成果)

代替オプションとしての使用済燃料の 直接処分研究開発等

- (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（1/4）

■「核燃料サイクル政策の選択肢について」（平成24年6月21日 原子力委員会決定）

「・・・最終処分場に関しては、すでに発生している研究炉の使用済燃料や福島第一原子力発電所の使用済燃料対策などを考えると、**使用済燃料を直接処分することを可能にしておくことの必要性は明らかである。したがって、直接処分を可能とするための技術開発や所要の制度措置の検討に早急に着手すべきである。・・・**」

■「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（平成27年5月22日閣議決定）

「・・・国及び関係研究機関は、**幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分その他の処分方法に関する調査研究を推進するものとする。・・・**」

■「エネルギー基本計画」（平成30年7月3日 閣議決定）

「・・・地層処分の技術的信頼性について最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映するとともに、**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、使用済燃料の直接処分など代替処分オプションに関する調査・研究を着実に推進する。・・・**」

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の環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

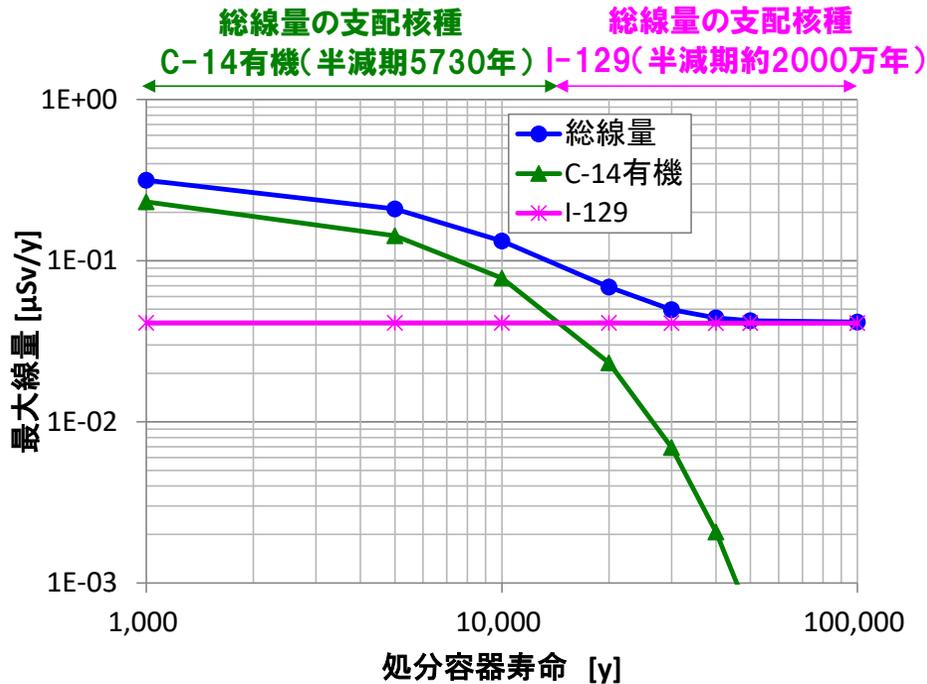
➤ 安全評価

- ・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

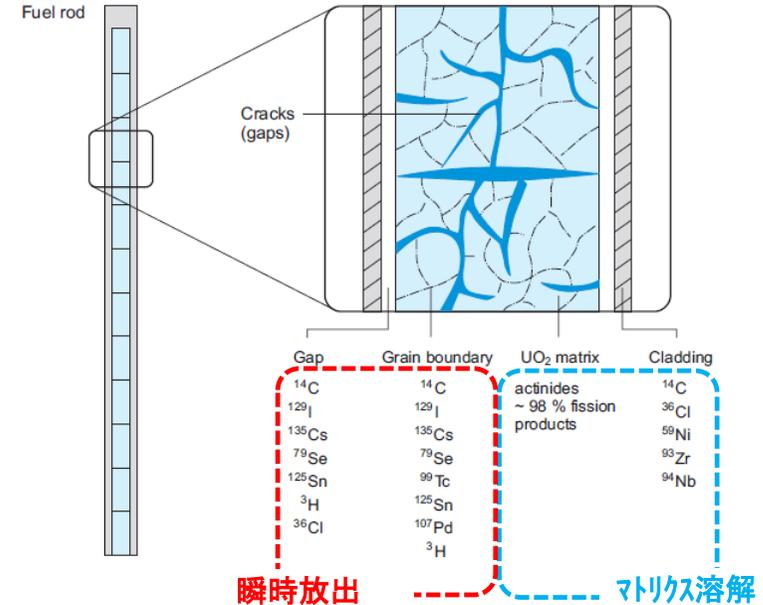
処分容器の閉じ込め期間の長期化と最大線量の低減効果との関係



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3年度の成果のまとめ

(1) 処分容器の挙動評価

・ 処分容器の長寿命化:

純銅を対象とした腐食挙動データ取得のうち、腐食を促進する作用を有する**硫化物等**について代表的な化学種の濃度をパラメータとした腐食試験(主に、応力腐食割れに着目)を実施し最長100日間までのデータを拡充

・ 処分後の**臨界安全評価**:

処分場閉鎖後において実際に起こり得る挙動のうち、処分容器の腐食に伴う状態変化と燃料被覆管の腐食に伴う状態変化が同時に起こる場合の実効増倍率を評価し、それらの状態変化の影響は軽微である見通しを得た

(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**を溶解指標物質を用いた試験から評価し、溶解速度の**炭酸濃度依存性**を確認した。また、大気雰囲気下の使用済燃料の浸漬試験における、**瞬時放出率**評価対象核種の溶出挙動と放出割合を明らかにした。

(3) その他の代替処分オプションの調査:

超深孔処分の実現のための事業段階ごとの要求事項とそれを満たすための設計要件等の具体化を試み、要求事項・設計要件とそれらを実現するために必要な技術や条件とを関連付けることで、超深孔処分の実施に必要な技術や重要な情報等の整理を効率的に行える見通しを得た。

(1) 処分容器の挙動評価：処分容器の長寿命化

□ 成果

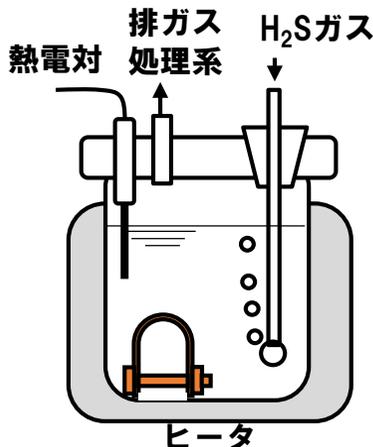
- 環境条件によっては極めて長い寿命を期待できる純銅を対象として腐食を促進する作用を有する硫化物等について代表的な化学種の濃度をパラメータとした腐食試験(主に、応力腐食割れに着目)を実施し、最長100日間までのデータを取得。
- 100日間までのデータでは、硫化物濃度が高いほど硫化銅の生成反応により腐食は促進されること、また断面の分析により硫化物共存下では粒界腐食が発生する可能性のあること、硫化物濃度が高い条件では緩衝材の有無は皮膜厚さに影響しない(緩衝材が腐食反応の抑制に寄与していない)こと等を確認。

□ 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
- 地下水組成等の地質環境条件に応じた純銅製処分容器の閉じ込め期間の評価に反映

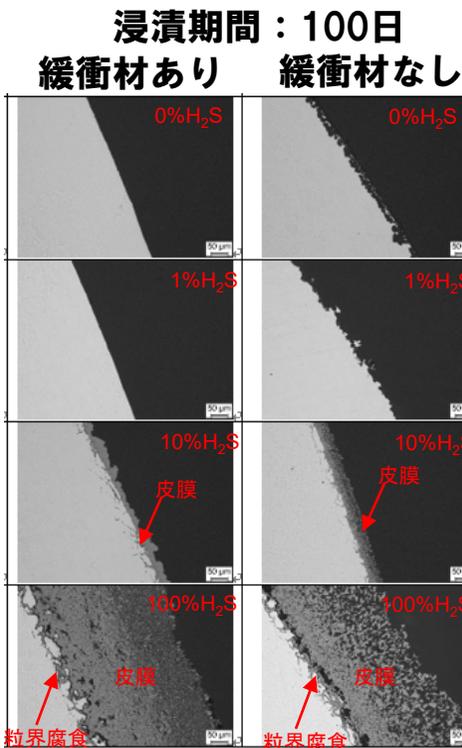
硫化物濃度をパラメータとした純銅の応力腐食割れ試験結果の例(80℃人工海水)

腐食試験のイメージ



- H₂S共存下では皮膜の下に粒界腐食とみられる腐食形態が発生
- H₂S濃度が高いほど腐食生成物皮膜の厚さ大
- H₂S濃度が高い条件で緩衝材は腐食反応の抑制に寄与していない

試験後の断面観察結果



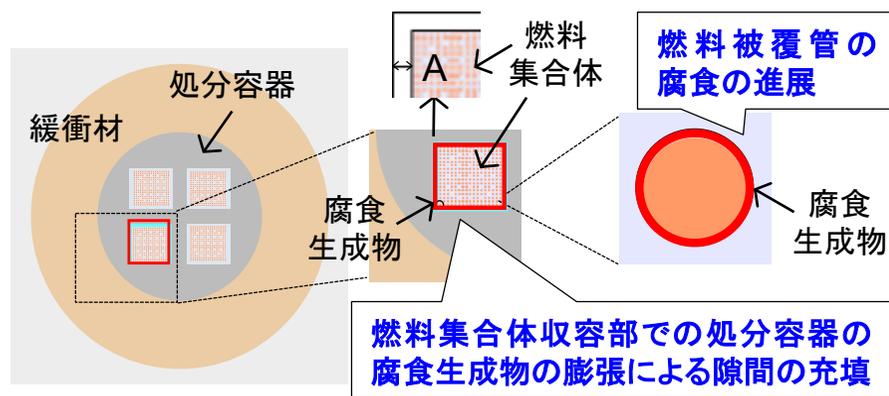
(1) 処分容器の挙動評価：処分後の臨界安全評価

□ 成果

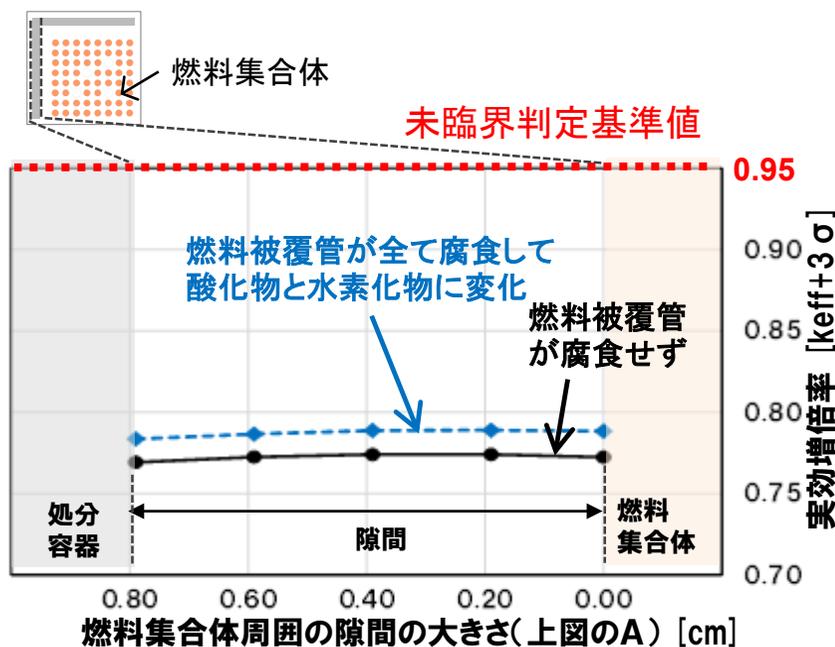
- 処分場閉鎖後において実際に起こり得る挙動のうち、処分容器の炭素鋼の腐食の進展による密度や組成等の状態の変化が処分後の再臨界の可能性に及ぼす影響に関する海外の先行事例の評価結果に着目して、わが国で想定される使用済燃料や処分容器を対象とする臨界解析を行い、同様の影響が生じることを確認。
- さらに、上記の処分容器の腐食による状態変化と、令和2年度に評価を行った、燃料被覆管の腐食に伴う状態変化(ジルカロイの酸化物の生成、水素吸収の影響等)が同時に起こる場合の実効増倍率を評価。
- その結果、これらの現象が同時に起こる場合でも、実効増倍率は未臨界判定基準値より十分低く、臨界可能性に対する影響は軽微である見通しを得た(右下図)。

□ 意義／反映先

- 処分後において現実的に起こり得る現象をモデルに反映した、過度に保守的ではない臨界安全評価を行うために基礎情報となる、複数の状態変遷の組合せに起因する実効増倍率の知見の蓄積。



臨界解析で対象とした状態変化の例



(左側の処分容器の腐食生成物の体積膨張により隙間は減少する)

臨界解析結果の例

(二つの状態変化が同時に起こる場合の実効増倍率)

(2) 使用済燃料の挙動評価

□ 成果

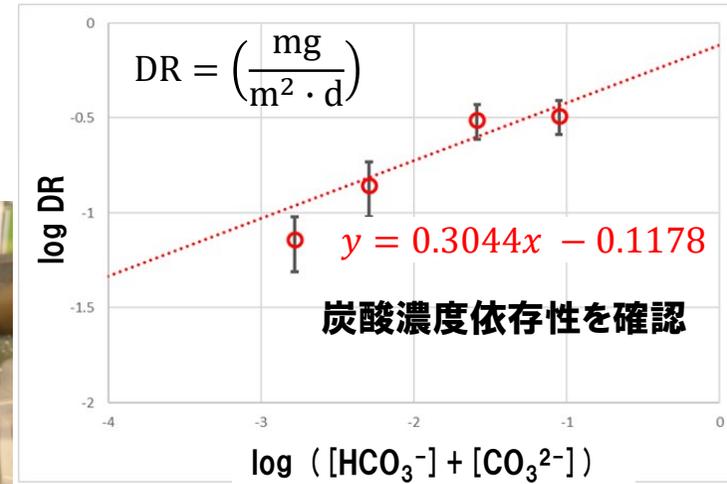
- 炭酸共存下での**燃料溶解挙動**の詳細な理解に向けて、
 - マトリクス溶解指標物質であるMgを添加した (U,²⁶Mg) O₂固溶ペレットを調製し、マトリクス溶解速度を評価し、炭酸濃度依存性を確認(右図上)。
 - UO₂ペレットの表面分析から、マトリクス溶解速度に影響する最表面の溶解反応を明らかにするための課題を抽出。(原子力科学研究所にて実施)



(U,²⁶Mg)O₂ペレット

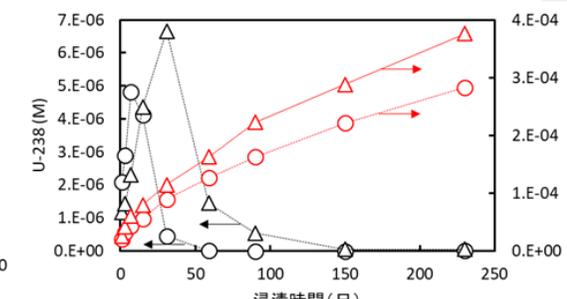
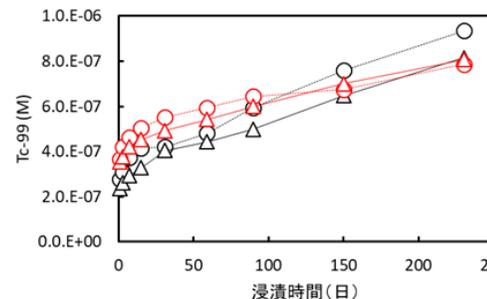
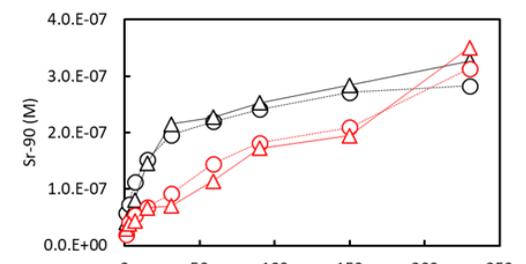
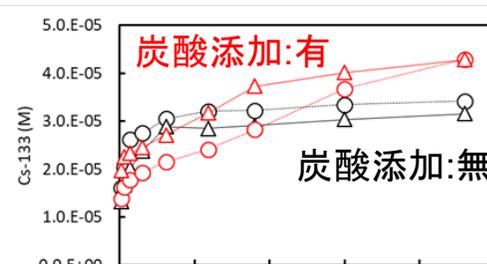


浸漬試験サンプル外観



溶解速度に及ぼす炭酸濃度影響

- 実際の使用済燃料を用いた大気雰囲気下の浸漬試験における、**瞬時放出率**評価対象核種の溶出挙動と放出割合を明らかにした(右図下)。(大洗燃料試験施設AGFにて実施)



○ 試料1(NaCl, 端部あり) △ 試料2(NaCl, 端部なし) ● 試料3(NaHCO₃, 端部あり) ▲ 試料4(NaHCO₃, 端部なし)

□ 意義／反映先

- 高炭酸条件下での使用済燃料からの放射性核種の長期溶解及び瞬時放出に関する挙動評価の信頼性向上

(3) その他の代替処分オプションの調査

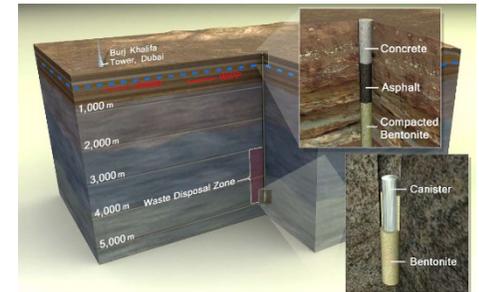
□成果

- **超深孔処分**に関する諸外国での最新の技術情報を確認(米国Deep Isolation社: シーリングに関する技術報告書: 2021年公開等)
- 超深孔処分相当深度のTHMC情報や掘削技術等を確認(既存のケーシング技術の適用範囲・制約の調査等)
- 超深孔処分の実現のための事業段階ごとの要求事項とそれを満たすための設計要件等の具体化を試み、要求事項・設計要件とそれらを実現するために必要な技術や条件とを関連付けることで、超深孔処分の実施に必要な技術や重要な情報等の整理を効率的に行える見通しを得た。

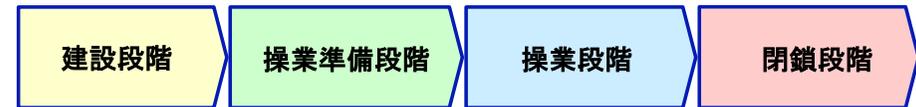
□意義／反映先

- わが国の諸条件を考慮した場合の適用性・成立性を検討していくための留意点や検討方法を整備

超深孔処分の検討例 (米国) (SANDIA REPORT, SAND2012-7789, 2012)



【要求事項】	超深孔が適切に掘削できる。	超深孔が健全に維持できる。	廃棄体が支障なく定置できる。	超深孔が安全に閉鎖できる。
【設計要件】	深度確保 坑径確保	坑径維持 坑壁維持	廃棄体降下 廃棄体定置 廃棄体防護	閉鎖の実施 シールの実施 シール性能維持



【段階】	【要求事項】	【設計要件】	【実施に必要な技術(現段階での推定)】
建設段階	超深孔が適切に掘削できる。	深度確保 坑径確保	ケーシング必要/不要/どの程度必要か(岩盤強度、応力場、間隙水圧が関係)
操業準備段階	超深孔が健全に維持できる。	坑径維持 孔壁維持	弱部(岩盤強度が弱い、透水性が高い等)の存在に対する対応。
操業段階	廃棄体が支障なく定置できる。	廃棄体降下 廃棄体定置 廃棄体防護	廃棄体の降下方法(坑内の状況、流体の有る/なし等) 廃棄体の防護の要否
閉鎖段階	超深孔が安全に閉鎖できる。	閉鎖の実施 シールの実施 シール性能維持	ケーシングの回収の可否、バリア材の導入の可否 埋め戻し材の設置技術

超深孔処分が成立するための要求事項や設計要件の設定およびそれに必要な技術等の抽出・分析のイメージ

令和3年度の研究開発成果に係る自己評価

評価の視点	自己評価
①令和3年度計画の達成度(見込み)	<p>令和3年度は、高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発については、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。また、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解析評価やデータ取得を進め、詳細な現象理解やモデル化に向けての知見を得た。特にこれらの成果の一つである地下深くの岩盤中の放射性物質の動きをより正確に推定する手法構築の成果についてはプレス発表を行い、新聞3紙(茨城新聞, 電気新聞, 日刊工業新聞)に掲載されるとともに、ラジオニュース(茨城放送(LuckyFMラジオ))としても放送された(1件)。</p> <p>さらに、代替オプションとしての使用済燃料の直接処分研究開発等については、直接処分について特有の課題である処分容器の長寿命化、処分後の臨界安全評価、使用済燃料からの核種放出挙動評価のための実験や解析評価を進め、詳細な現象理解やモデル化に向けての知見を得た。また、その他の代替処分オプションについては、超深孔処分の実施に必要な技術や重要な情報等の整理を、事業段階ごとの要求事項・設計要件と関係づけることで効率的に行う手法の見通しを得た。</p> <p>それらに加え、令和3年度には、第3期中長期計画期間中の成果をCoolRep R4として取りまとめ公開するとともに、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18報、国際学会発表9件、国内学会発表16件、JAEA公開技術資料1件、プレス発表1件)</p> <p>以上のとおり、令和3年度の計画に対し、着実に実績・成果を上げており、当初の目標を達成する見込みである。</p>

＊ 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[JP007597])の成果の一部を利用した。

参考資料)令和3年度論文等成果実績(1/4)

掲載論文 (1/2)

【Applied Geochemistry】

- Wilson J., Bateman, K., Tachi, Y. : The impact of cement on argillaceous rocks in radioactive waste disposal system: a review focusing on key processes and remaining issues. (2021.5掲載)
- Mei, H., Aoyagi, N., Saito, T., Kozai, N., Sugiura, Y., Tachi, Y.: Uranium (VI) sorption on illite under varying carbonate concentrations: Batch experiments, modeling, and cryogenic time-resolved laser fluorescence spectroscopy study. (2021.12掲載)

【Applied Clay Science】

- Fukatsu, Y., Yotsuji, K., Ohkubo, T., Tachi, Y. : Diffusion of tritiated water, $^{137}\text{Cs}^+$, and $^{125}\text{I}^-$ in compacted Ca-montmorillonite: Experimental and modeling approaches (2021.6掲載)

【Minerals】

- Bateman, K., Amano, Y., Kubota, M., Ohuchi, Y., Tachi, Y. : Reaction and alteration of mudstone with hyperalkaline cement pore fluids: Comparison of batch and flow experimental data.. (2021.5掲載)
- Bateman, K., Murayama, S., Hanamachi, Y., Wilson, J., Seta, T., Amano, Y., Kubota, M., Ohuchi, Y., Tachi, Y., Evolution of the Reaction and Alteration of Mudstone with Ordinary Portland Cement Leachates: Sequential Flow Experiments and Reactive-Transport Modelling. (2021.9掲載)

【mBio】

- Jaffe, A., ...Amano, Y....(11名): Patterns of gene content and co-B39 occurrence constrain the evolutionary path toward animal association in CPR bacteria. (2021.7掲載)

【J. Radioanalytical Nuclear Chemistry】

- Ishidera, T. : Diffusion of acetic acid, butyric acid and butanol in compacted montmorillonite. (2021.8掲載)

【RSC Advances】

- McGrady, J., ...Kitamura, A., Kimuro, S. (7名): The kinetics and mechanism of H_2O_2 decomposition at the U_3O_8 surface in bicarbonate solution. (2021.8掲載)

【Water Resources Research】

- Tachi, Y., Ito, T., Gylling, B., Modeling the in-situ long-term sorption and diffusion experiment (LTDE-SD) at the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden: A scaling approach from laboratory to in-situ conditions. (2021.12掲載)

【Nuclear Technology】

- Soler, J.M., Tachi, Y., Ito, T.,(他23名): Predictive modeling of a simple field matrix diffusion experiment addressing radionuclide transport in fractured rock. Is it so straightforward? (2021.12掲載)

【Environmental Science & Technology】

- Francisco, P.C.M., Matsumura, D., Kikuchi, R., Ishidera, T., Tachi, Y., Selenide [Se (-II)] immobilization in anoxic, Fe (II) -rich environments: Coprecipitation and behavior during phase transformations. (2022.2掲載)

参考資料)令和3年度論文等成果実績(2/4)

掲載論文 (2/2)

【Journal of Advanced Concrete Technology】

- Oda, C., Kawama, D., Shimizu, H., T., Benbow, S., Hirano, F., Takayama, Y., Takase, H., Mihara, M., Honda, A: Modeling concrete degradation by coupled non-linear processes (公開10/29)

【土木学会論文集】

- 高山裕介, 菊池広人: X線CT測定による膨潤圧試験中のベントナイトの吸水圧縮挙動の観察(公開9/20)

【原子力学会誌, ATMOΣ 連載講座】

- 山本陽一, 小川裕輔, 小林正人, 高山裕介, 西本壮志: オールジャパンでとりくむ地層処分のいま 第3回 処分場の設計と工学技術(その1)(公開2/10)
- 石田圭輔, 三ツ井誠一郎: オールジャパンでとりくむ地層処分のいま 第5回 処分場閉鎖後の安全評価(その1)(投稿済)

【NIMS微細構造解析プラットフォーム利用報告書】

- Walker, S.C., NMRを用いたC-A-S-Hゲルの構造解析(9/22公開)

【RSC Advances】

- McGrady, J., Kumagai, Y., Watanabe, M., Kirishima, A., Akiyama, D., Kitamura, A., Kimuro, S.: The kinetics and mechanism of H₂O₂ decomposition at the U3O₈ surface in bicarbonate solution. (8/31掲載)

【Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry】

- Ishidera, T.: Diffusion of acetic acid, butyric acid and butanol in compacted montmorillonite. (8/28掲載)

参考資料)令和3年度論文等成果実績(3/4)

学会発表

【日本地球惑星科学連合大会:JpGU2021(2021.6発表)】

- Bateman, K., Amano, Y., Tachi, Y. : Evolution of the reaction and alteration of mudstone with cement leachate: Flow experiments and reactive-transport modelling.
- Mei, H., Aoyagi, N., Saito, T., Kozai, N., Tachi, Y. : A study of U(VI) sorption on illite under carbonate-rich environments: Batch experiments, TRLFS and modeling.

【日本原子力学会 2021年秋の大会(2021.9発表)】

- 岩田 孟, 紀室 辰伍, 北村 暁, 宮部 俊輔, 前野 真実子, 田中 武流, 檜枝 愛美, "イソサッカリン酸共存下におけるパラジウムの溶解度(2).

【粘土科学討論会(2021.9発表)】

- 深津勇太, 石寺孝充, 館 幸男, 圧縮ベントナイト中の複数化学種共存下でのNp(V)拡散挙動評価.

【日本腐植物質学会第37回講演会(2021.11発表)】

- 江口綾乃, 紀室辰伍, 天野由記, 館幸男, フミン酸共存下における幌延堆積岩へのEuの収着挙動の評価.

【日本原子力学会 北関東支部 若手研究者・技術者発表会(2022.1発表)】

- 岩田 孟: ガラス固化体の溶解に及ぼすFeイオン影響.

【日本原子力学会 2022年春の年会(2022.3発表予定)】

- 紀室 辰伍, 岩田 孟, 江口 綾乃, 西川 義朗, 館 幸男, IV価テクネチウムの溶解度に及ぼす有機物影響の評価.
- 松井 直樹, 大窪 貴洋, 館 幸男, 杉浦 佑樹, 四辻 健治, 分子動力学計算によるスメクタイト外表面でのカチオン-水移行挙動解析.
- Mei, H., Aoyagi, N., Saito, T., Kozai, N., Sugiura, Y., Tachi, Y., Cryogenic TRLFS investigation on U(VI) sorption on illite in the presence of carbonate ions.

【日本地球惑星科学連合大会:JpGU2022(2022.5発表予定)】

- Nishimura, H., Kouduka, M., Fukuda, A., Ishimura, T., Amano, Y., Beppu, H., Miyakawa, K., Suzuki, Y., The Fe(III)-dependent anaerobic methane-oxidizing activity in a deep underground borehole demonstrated by in-situ pressure groundwater incubation.
- Saito, T., Nishi, S., Toda, K., Miyakawa, K., Amano, Y., Classification and ion complexation properties of natural organic matters in deep groundwater using fluorescence spectroscopy and multivariate analysis.
- Saito, T., Nishi, S., Toda, K., Miyakawa, K., Amano, Y., Classification and ion complexation properties of natural organic matters in deep groundwater using fluorescence spectroscopy and multivariate analysis.
- Tachi, Y., Ito, T., Fukatsu, Y., Akagi, Y., Satoh, H., Martin, A.J., Realistic modeling approach for radionuclide transport in heterogeneous fractured crystalline rocks.
- Takeda, M., Ohno, H., Tachi, Y., Murayama, S., Development of solute transport modelling for multiple flow paths around the faults in mudstone.

【第68回材料と環境討論会】

- 北山彩水, 谷口直樹, 木村航, 梶山浩志: 硫化水素吹込み下での純銅の電気化学的挙動(10/26発表)

【第37回 バックエンド夏期セミナー】

- 小尾 繁, 牧野 仁史, 山口 正秋, 江橋 健, 高橋 博一, 土家 輝光, 三津山 和明, 超深孔処分に係る技術情報の調査

参考資料)令和3年度論文等成果実績(4/4)

国際会議発表

【TransRet2020 (International Scientific Workshop on Processes Influencing Radionuclide Transport and Retention–Investigations Across Scales)(2021.10発表)】

- Metcalfe, R., Kawama, D., Benbow, S.J., Tachi, Y. : Evolution of radionuclide transport and retardation processes in uplifting crystalline rocks.

【 The 11th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS 11) (2021.10発表)】

- Hu, Q., Wang, Q., Zhao, C., Zhang, T., Tachi, Y., Fukatsu, Y., Fluid flow and chemical transport in shallow and deep mudrocks being implicated by pore geometry and connectivity.

【AGU Fall Meeting 2021) (2021.12発表)】

- Fukatsu, Y., Tachi, Y., Investigation of the effect of biotite distribution on anion diffusion in crystalline rock.

【PACIFICHEM2021(2021.12発表)】

- Kimuro, S., Suzuki, S., Tachi, Y.: Determination of the apparent complexation constants of deep groundwater humic acid with Zr (IV) by CE-ICPMS.

【The 8th International Conference on Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste (2022.6発表予定)】

- Wilson, J., Bateman, K., Kawama, D., Tachi, Y., The impact of cement on argillaceous rocks in radioactive waste disposal systems: an overview of research needs, and ongoing work being undertaken in Japan.
- Bateman, K., Murayama, S., Hanamachi, Y., Wilson, J., Seta, T., Amano, Y., Kubota, M., Ohuchi, Y., Tachi, Y., Reaction and Alteration of Mudstone with Cement Leachates: Flow Experiments and Reactive–transport Modelling.

【8th International Workshop on Long-term Prediction of Corrosion Damage in Nuclear Waste Systems】

- Yusuke Ogawa, Satoru Suzuki, Naoki Taniguchi, Ayami Kitayama, Manabu Kawasaki, Hiroyuki Suzuki, Rieko Takahashi: Corrosion studies on a cast steel overpack for high-level radioactive waste disposal in Japan (申し込み済)

【17th International Clay Conference】

- Kikuchi, R., Horiuchi, M., Saito, M., Ishiwata, T., Nishiki, Y., Sato, T., Takayama, Y. Mitsui, S.: Natural evidence for the cementation in bentonite buffer based on transmission electron microscopy observation of bentonite ores (申し込み済)

【3rd International Conference on Discrete Fracture Network Engineering】

- Park, Y.-J., Sawada, A., Ozutsumi, T., Tanaka, T., Hashimoto, S., Morita, Y: Long-Term Density-Dependent Groundwater Flow Analysis and its Effect on Nuclide Migration for Safety Assessment of High-Level Radioactive Waste Disposal with Consideration of Interaction between Fractures and Matrix of Rock Formation in Coastal Crystalline Groundwater Systems (申し込み済)

JAEA技術資料

- 杉浦, 陶山, 館:Development of JAEA Sorption Database (JAEA-SDB) : Update of Sorption/QA Data in FY2021, JAEA-Data/Code (2022.3公開予定)..

プレス発表

- 地下深くの岩盤中の放射性物質の動きをより正確に推定する手法を構築 ～地層処分の安全評価の信頼性向上に貢献～ (2021.12.15発表)