

第4期中長期計画における取り組みと成果

④ 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及び代替処分オプションの研究開発

令和7年12月8日

日本原子力研究開発機構
核燃料サイクル工学研究所
BE資源・処分システム開発部

中長期計画期間における研究開発スケジュール (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年度～令和10年度）

活動の成果（令和4年度～令和6年度）

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

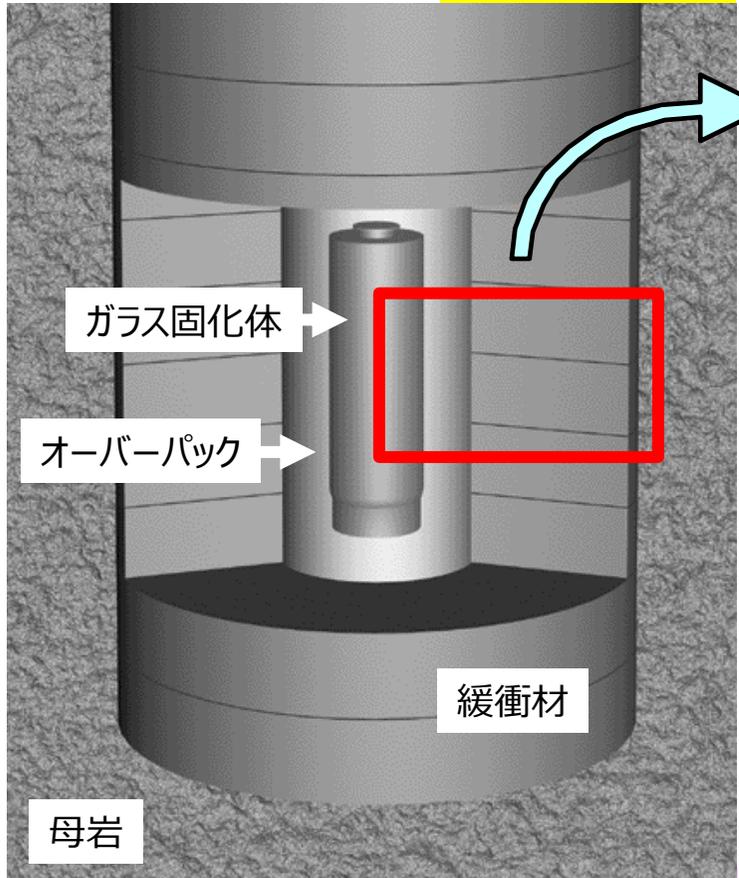


- 室内試験と原位置試験を組み合わせた岩石中の物質移行現象の理解，人工バリア挙動の理解及びデータベースの整備・拡充

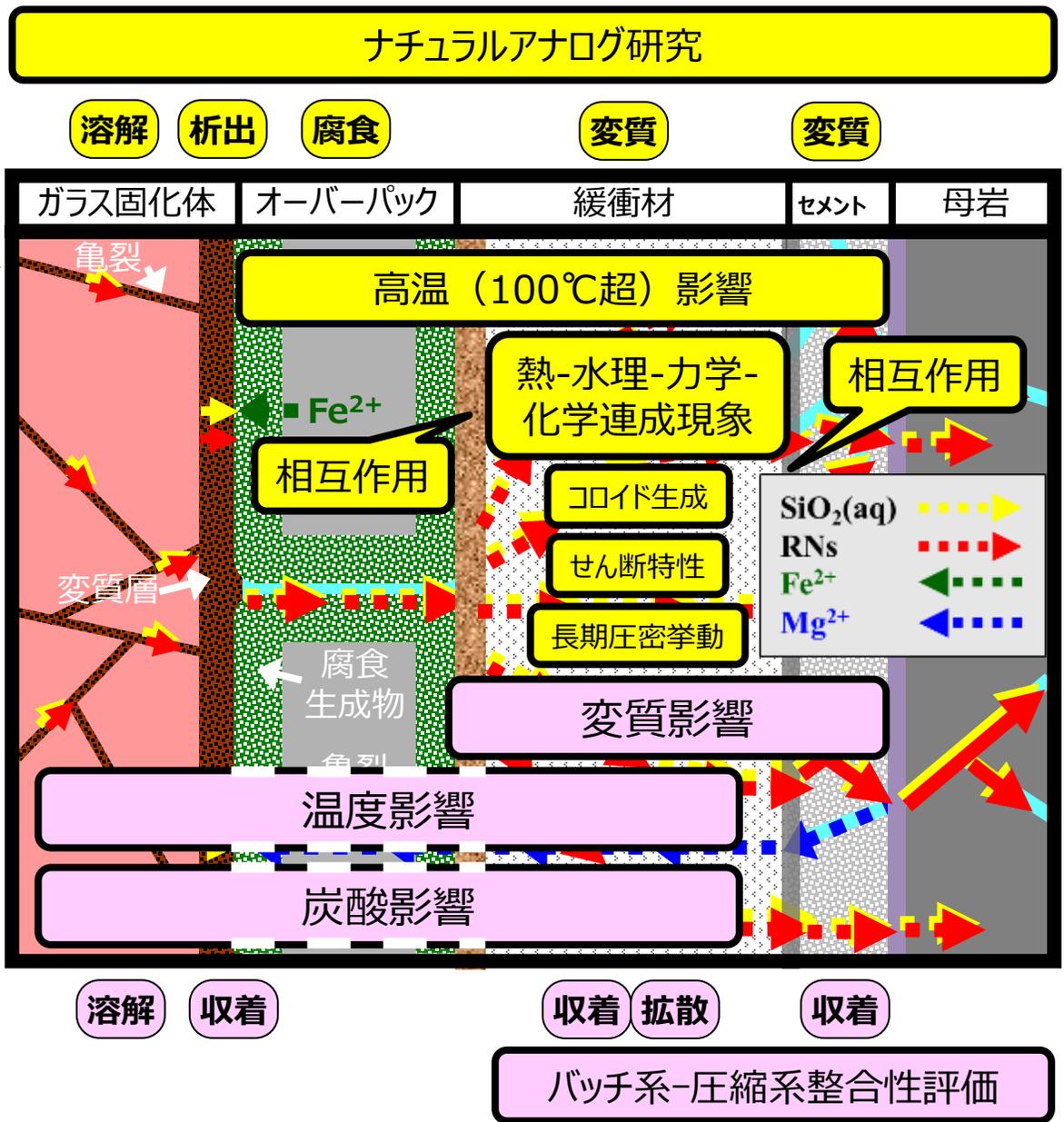
	細目	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発	高レベル放射性廃棄物等の地層処分システムに関する研究開発								
		処分システムに関する工学技術の信頼性向上							
		安全評価手法の高度化							

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 における研究項目（ニアフィールド）

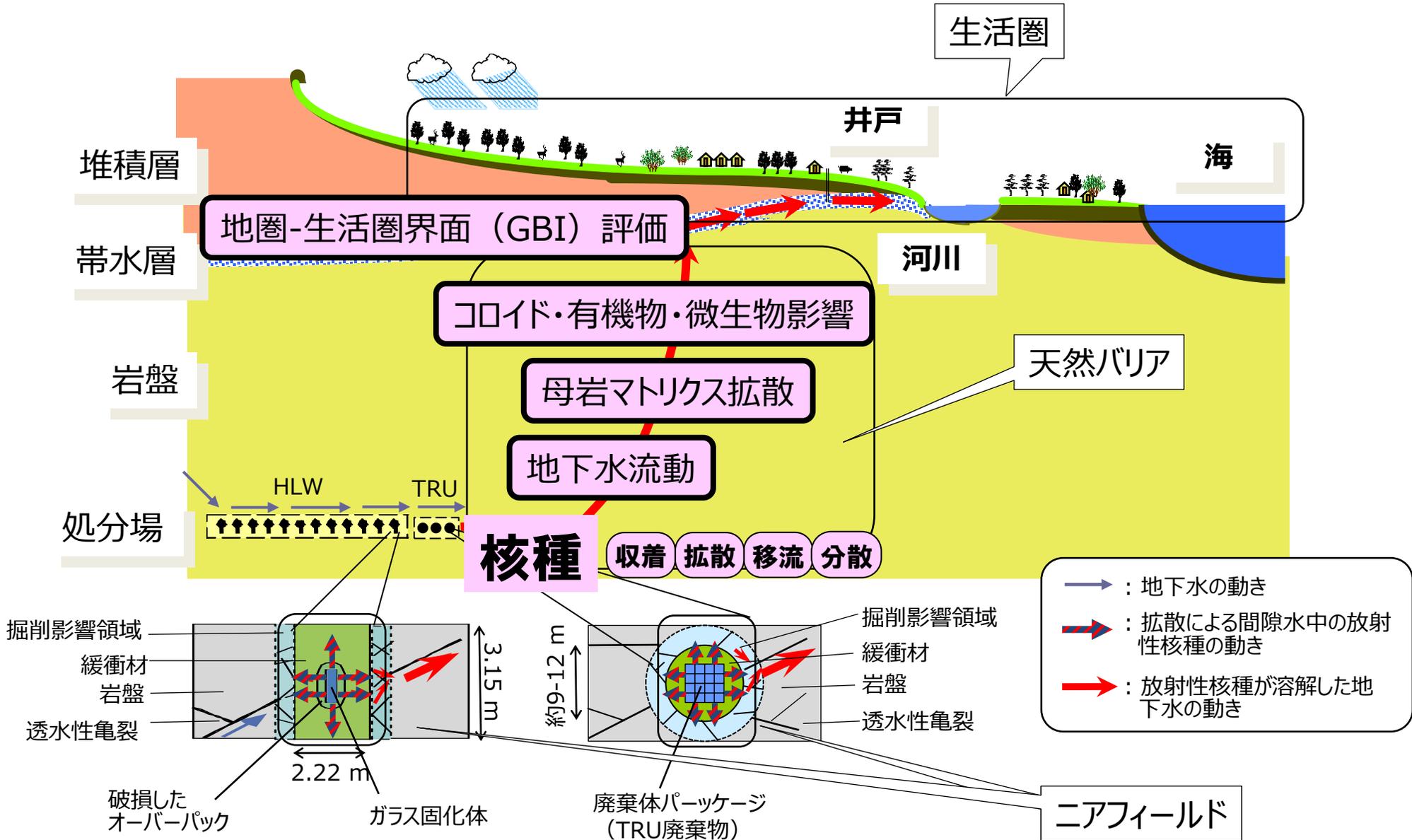
バリア材



核種



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 における研究項目（天然バリア，生活圏）



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 における研究項目（小項目と予算内訳）

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上

No.	小項目	交付金	エネ庁	NUMO	他
1-1	ガラス固化体の長期溶解挙動	△*		○	
1-2	処分容器の長期腐食挙動	△*	○	○	
1-3	オーバーパックと緩衝材との相互作用による長期変質挙動	△*	○	○	
1-4	緩衝材の基本特性	△*	○		
1-5	セメント系材料と緩衝材との相互作用による長期変質挙動	△*	○	○	
1-6	先進的セメント変質の評価	△*	○		
1-7	熱-水-応力-化学連成現象評価モデルの開発	△*	○	○	
1-8	坑道周辺的环境状態の変遷	△*	○		
1-9	人工バリアの基本特性データベースの拡充	△*	○		

*人件費および施設の維持管理費

科研費等 

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 における研究項目（小項目と予算内訳）

2. 安全評価手法の高度化

No.	小項目	交付金	エネ庁	NUMO	他
2-1	放射性核種の溶解度設定に資するデータ取得	△*	○	○	
2-2	ニアフィールドにおける核種移行総合評価技術の開発	△*	○	○	
2-3	天然バリア（岩盤）における核種移行総合評価技術の開発	△*	○		○
2-4	コロイド・有機物・微生物影響評価手法	△*	○	○	○
2-5	生活圏における核種移行総合評価技術の開発	○	○		
2-6	隆起・侵食を考慮した安全評価手法の開発	○			
2-7	沿岸海底下特有の地質環境を加味した処分システムの統合化に向けた研究	△*	○		
2-8	放射性核種の移行に係るデータベース開発	○	○	○	

*人件費および施設の維持管理費

科研費等 

ガラス固化体の長期溶解挙動

【研究の背景・狙い・目標・意義】

- ガラス固化体と、その周辺で想定される地下水や人工バリア材料等との相互作用といった諸現象の影響が評価可能なガラスの評価モデルを整備。

【実施内容と成果】

- FeCl_2 溶液, MgCl_2 溶液, 脱イオン水を試験溶液とする条件で, 模擬廃棄物ガラスを対象とした長期浸出試験を実施。
- 浸漬期間0.5年試料に関して, XRD分析やSEM, TEM分析により, 層状複水酸化物 (LDH) や蛇紋石鉱物, スメクタイト鉱物の析出を確認。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- ガラス固化体近傍で生じる多様な諸現象に関する知見を拡充。

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上 処分容器の長期腐食挙動

【研究の背景・狙い・目標・意義】

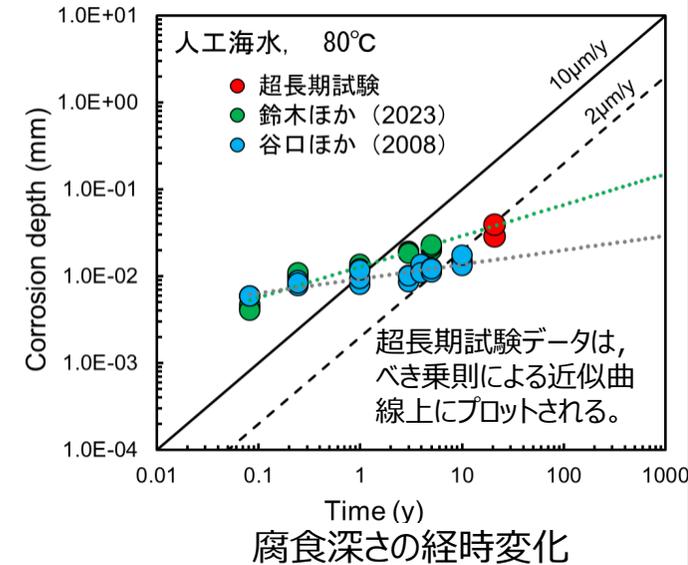
- 長期の腐食試験データを取得し、オーバーパック腐食寿命評価の信頼性を向上。

【実施内容と成果】

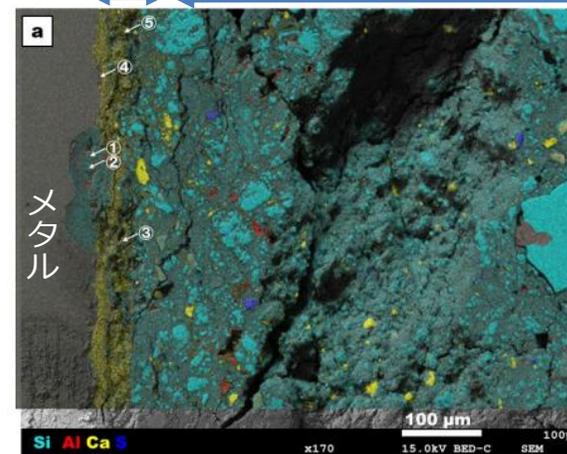
- 「超長期試験」(試験期間：約21年、温度：80℃、試験溶液：人工海水、共存物：緩衝材)の一部を終了し、腐食挙動に関するデータを取得した。腐食量の経時変化の傾向や腐食生成物種は既存データ(鈴木ほか、2023)と一致することを確認。
- 電子顕微鏡観察の結果、メタル近傍の腐食生成物が複数の構成物からなることを確認。

【地層処分事業や他分野への貢献】

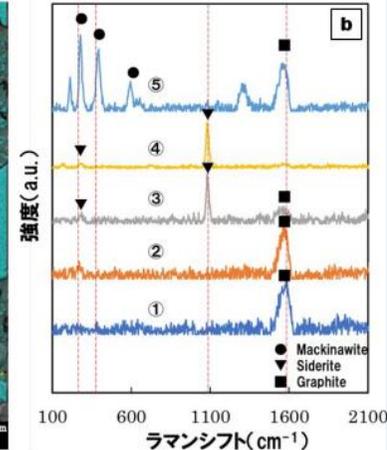
- 21年間という、わが国で実施された緩衝材共存系の腐食試験としては最も長期の腐食試験による腐食データを提供するとともに、長期の腐食試験においても概ねべき乗則に従い、腐食速度が低下する可能性を提示。



腐食生成物層 ← 緩衝材



左図の丸数字の位置を分析



走査型電子顕微鏡分析結果と顕微ラマン分析結果

オーバーパックと緩衝材との相互作用による長期変質挙動

【研究の背景・狙い・目標・意義】

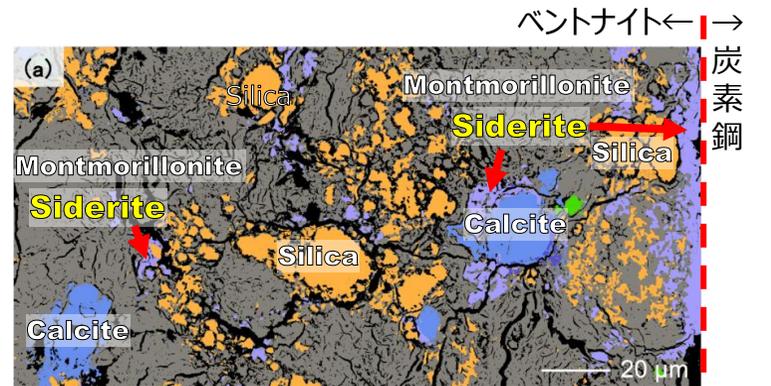
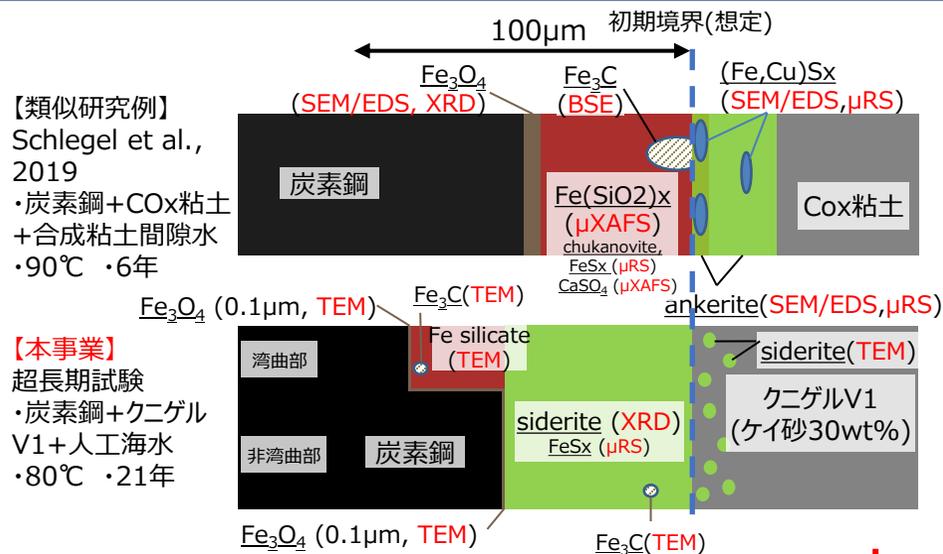
- 炭素鋼およびベントナイトの材料間に生ずる腐食生成物を同定し、これらに支配的な影響を与える環境条件を解明。

【実施内容と成果】

- 腐食生成物の大まかな分布を定量的に確認するため、EPMAを用いた鉱物組成マッピングを試行。
- 類似の条件における腐食生成物の種類（とその評価方法）を整理し、比較を進めた結果、主たる腐食生成物に違いがある一方、腐食生成物の種類には類似性を確認。
- シデライト (FeCO_3) は、
 - A. 界面近傍で層状に（腐食生成物の大半）,
 - B. 一部はカルサイト (CaCO_3) の周囲に,
 - C. 界面から比較的離れた箇所では空隙近くに,
 それぞれ存在することを確認。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- より現実的なバリア材の変質挙動評価に貢献。



粒子輪郭と構成元素組み合わせに基づく鉱物種（該当するものを図中に表示）

Montmorillonite	Feldspar	Carbonate
Silica	orthoclase	siderite
Zeolite	anorthoclase	dolomite
Pyrite	albite	calcite
Biotite	labradorite	Pore
	anorthite	

※石英または玉髄

緩衝材の基本特性

【研究の背景・狙い・目標・意義】

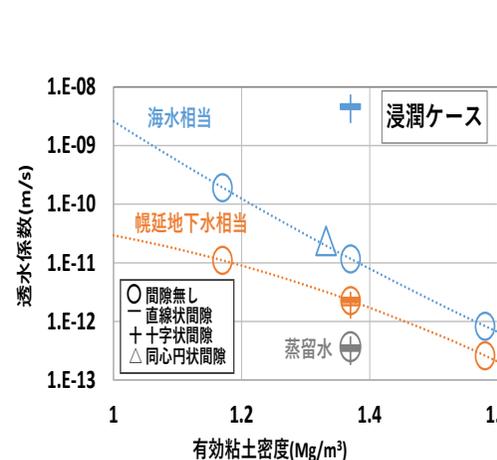
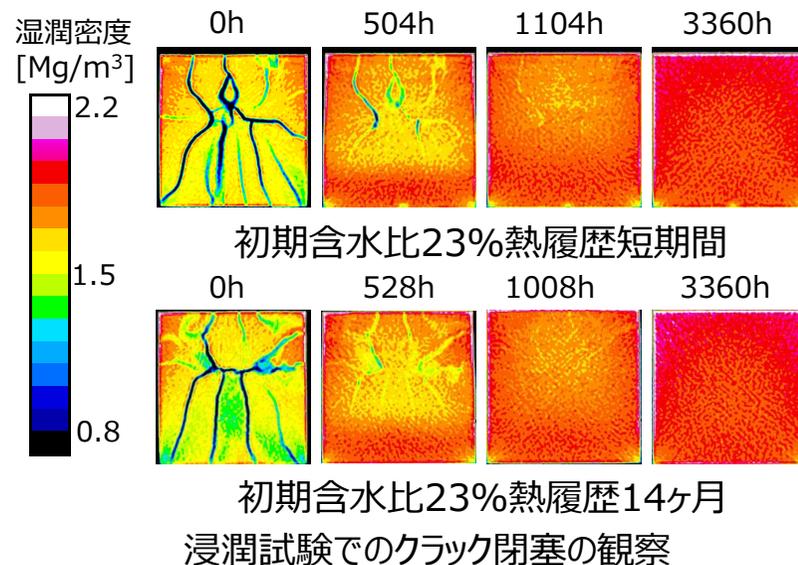
- 緩衝材が制限温度（100℃）を超えた場合の特性評価。
- 乾燥収縮により緩衝材にクラックが生じることを確認済。
- 生じたクラックは地下水の浸潤に伴い閉塞すると考えられるが、閉塞したクラックが緩衝材の水理特性や力学特性に与える影響を評価する必要性。

【実施内容と成果】

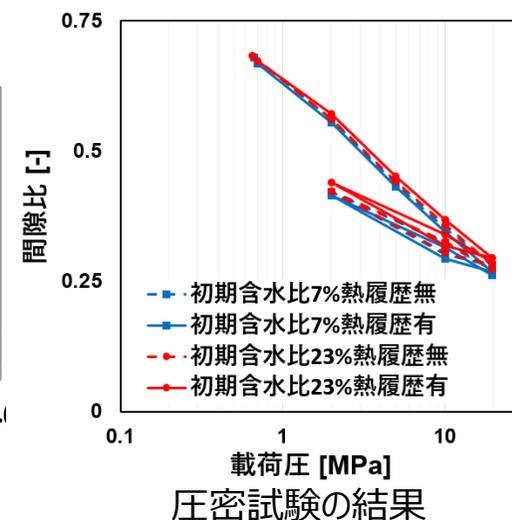
- 熱履歴によりクラックが生じた供試体を対象に浸潤試験を実施し、クラックの閉塞過程をX線CTにより観察；飽和後にクラックが閉塞することを確認。
- クラックを模擬した供試体を対象に透水試験を実施；クラックが閉塞後の透水性はクラックのない供試体とほぼ一致。
- 熱履歴によりクラックが生じた供試体を対象に多段階の圧密試験を実施；載荷圧と間隙比の関係はクラックのない供試体とほぼ一致。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 地層処分の閉鎖後長期安全評価の信頼性向上。



透水試験の結果



圧密試験の結果

セメント系材料と緩衝材との相互作用による長期変質挙動

【研究の背景・狙い・目標・意義】

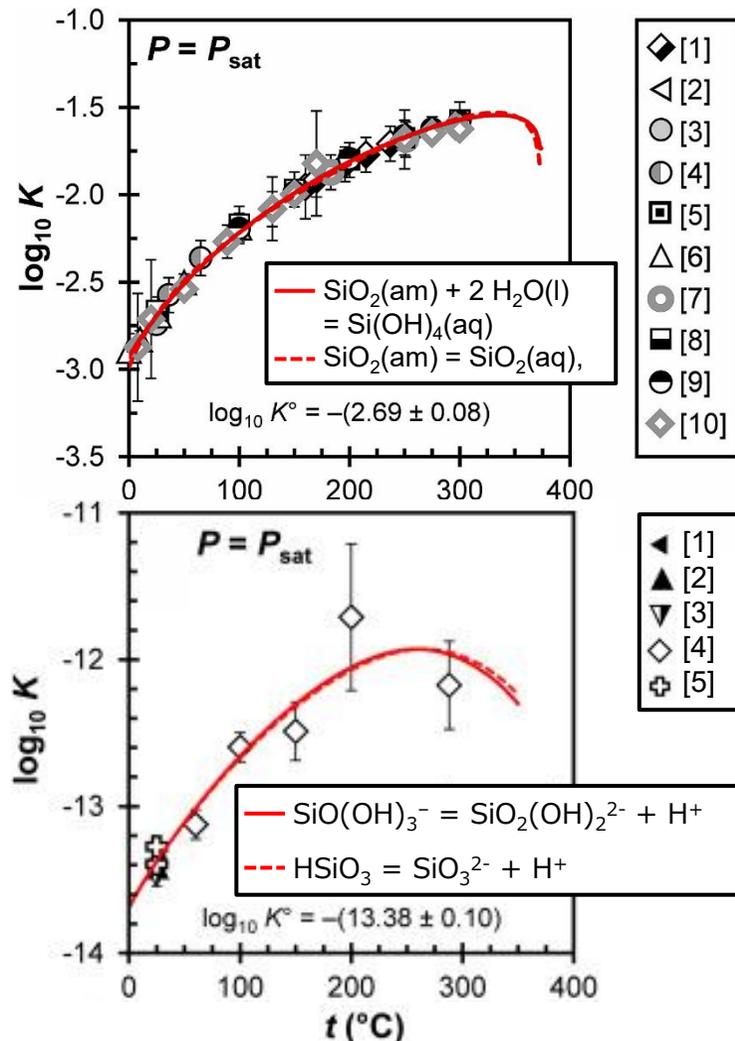
- 複数の異なる材料で構成されるニアフィールドの状態変遷を評価するため、解析モデルの構築とデータ整備を実施中。
- 人工バリアの構成材料として用いられる粘土やセメント、天然バリアを構成する造岩鉱物の多くはケイ素を含んでおり、ケイ素を含む鉱物の熱力学データ整備が特に重要。

【実施内容と成果】

- 地殻に広く分布するケイ素のうち単量体のシリカ (SiO₂) 分子の熱力学特性を整理し, pH 6~13.5, 0~100°C, 1~270 barの範囲で平衡・溶解度が評価可能な体制を整備。
- 非晶質シリカの溶解および溶存シリカ種の酸解離に関して実験で取得した平衡定数 (log K) について, 広い温度範囲で評価可能。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 地下水・セメント・ガラス・粘土・岩石など, 処分環境に存在する材料間の反応を統一モデルで評価が可能となり, セメント系材料と緩衝材との相互作用に関係する粘土の溶解, 二次鉱物の生成, セメントの水和・溶脱の長期反応予測の信頼性を向上。



SiO₂(am)溶解(上図), HSiO₃酸解離(下図)に関する温度を関数とした平衡定数記号は実験値, 実線は本研究で計算されたもの。

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上 先進的セメント変質の評価

【研究の背景・狙い・目標・意義】

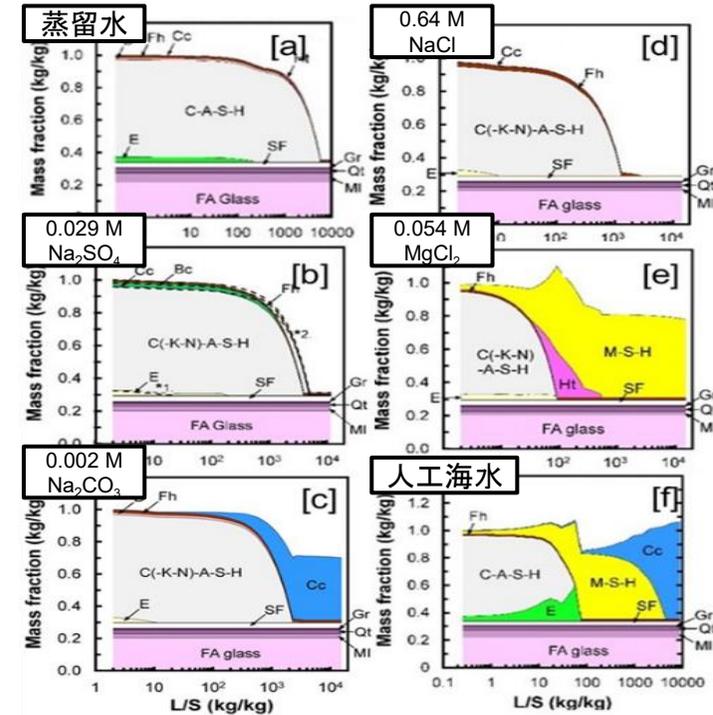
- 処分場が高アルカリ環境になることを抑制するために開発された先進的セメント系材料（High-content Fly-ash Silica-fume Cement (HFSC)）の水和・溶脱に対して地下水が与える影響を把握し、変質挙動の将来を予測。

【実施内容と成果】

- 海水に含まれる様々な成分（ Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 等）を対象に各イオンがHFSCの溶脱挙動に影響を与える把握する室内試験を実施。
- 溶脱反応の促進への相対的影響は、
 $\text{SO}_4^{2-} < \text{CO}_3^{2-} < \text{Cl}^- < \text{Mg}^{2+} < \text{人工海水}$
- HFSCの溶脱に伴い生じる二次鉱物種は、モデルと分析結果で概ね一致し、水和・溶脱の精度よく予測。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- HFSCの水和・溶脱により生じる鉱物相を予測できることで、収着データをとるべき鉱物相の絞り込みが可能。
- 環境負荷の観点から使用されるフライアッシュセメントの水和・溶脱の評価が可能となり、その耐久性などの評価に貢献。



HFSC-溶液反応に伴う鉱物組成変化の評価結果

溶液条件の違いによる溶脱時期の推定結果

反応溶液	C-A-S-Hゲルの消失が推定される液固比 (L/S)	二次鉱物種 (XRD分析結果)
[a] 蒸留水	6485	—
[b] 0.029 M Na_2SO_4	4205	Ettringite
[c] 0.002 M Na_2CO_3	2306	Calcite
[d] 0.64 M NaCl	1316	—
[e] 0.054 M MgCl_2	90	Hydrocalcite, M-S-H
[f] 人工海水	58	Ettringite, M-S-H, calcite

熱-水-応力-化学連成現象評価モデルの開発

【研究の背景・狙い・目標・意義】

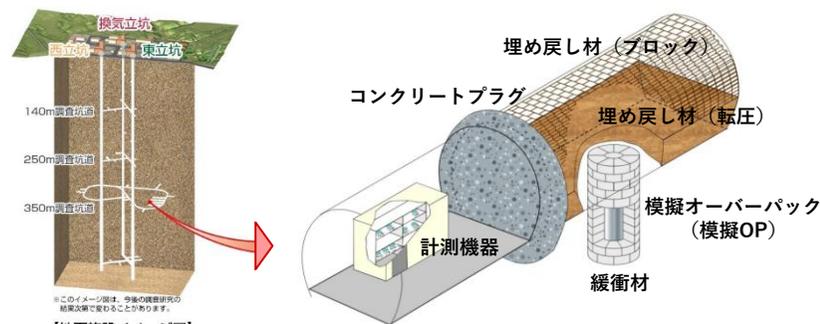
- 過渡期におけるニアフィールド環境の把握をはじめ、核種移行解析の初期状態の設定や、オーバーパックの腐食寿命評価の基盤情報の提供を目的として、熱(T)-水(H)-応力(M)-化学(C)の連成解析コードを開発中。
- 実規模の人工バリアを模擬した原位置試験で得られた情報を通じて、THMC連成解析コードの検証を実施。

【実施内容と成果】

- 緩衝材の水理特性に及ぼす間隙水中の塩濃度の影響を考慮したTHC連成解析コードCOUPLYSを構築し、緩衝材の浸潤挙動を再現できることを確認するとともに、スメクタイトのNa型化や二次鉱物の生成などの情報を取得。
- 力学挙動を評価する解析コードMACBECEの高度化として、不飽和-飽和を考慮した弾塑性モデルを導入した三次元プロトタイプを作成。

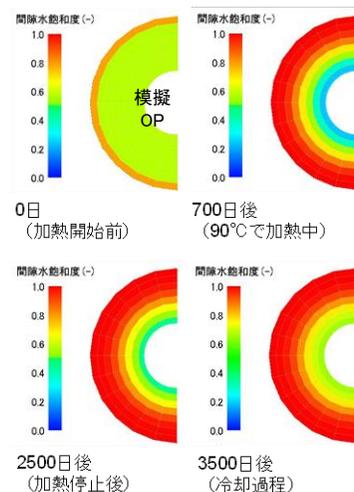
【地層処分事業や他分野への貢献】

- 解体調査に先立ち解析結果を提示することにより、人工バリア性能確認試験の成果の最大化に貢献。

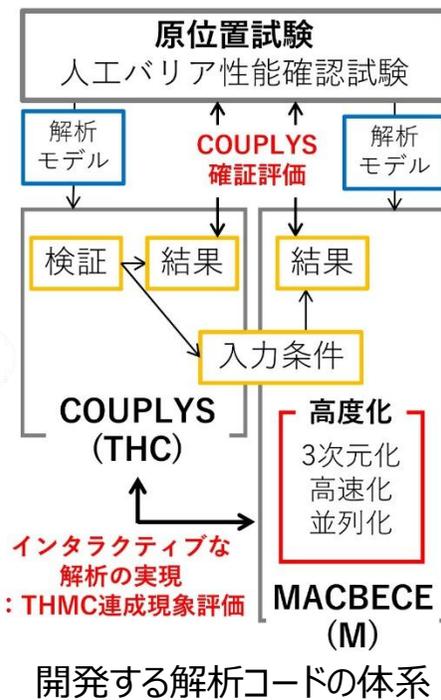


人工バリア性能確認試験

(幌延の地下研究施設で行っている実規模の原位置試験)



緩衝材内部の飽和度分布
(加熱, 冷却を考慮した時間変化をTHC解析で評価)



1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上 坑道周辺の環境状態の変遷

【研究の背景・狙い・目標・意義】

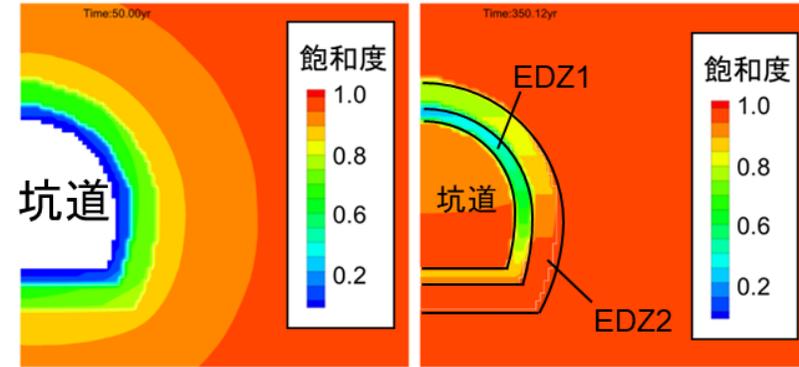
- 坑道掘削や埋戻しに伴う周辺岩盤の水の飽和度変化やクリープ（ひずみの増大）などが、水理・力学的な長期的地質環境変化に影響を及ぼす可能性。
- クリープに及ぼす飽和度の影響を評価する必要性。

【実施内容と成果】

- 幌延深地層研究センター地下施設の岩石試料を取得し、坑道周辺岩盤内の飽和度分布を把握。
- 種々の飽和度・载荷応力速度で一軸圧縮試験を行い、破断までの時間の違いを確認。
- 3つの飽和度における岩石試料を用いた多段階クリープ試験の結果に粘弾性モデルが適用できることを確認。

【地層処分事業や他分野への貢献】

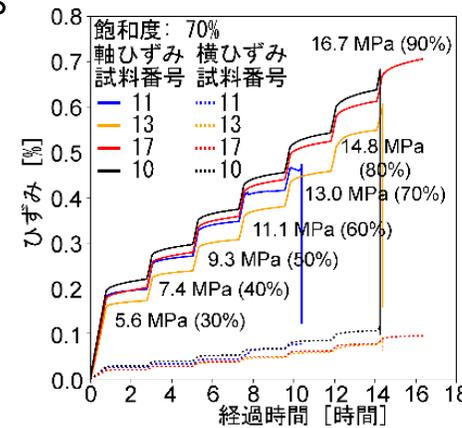
- 飽和状態で取得したデータを用いた解析が保守的な結果を示すことを提示；処分場設計の信頼性向上に貢献。



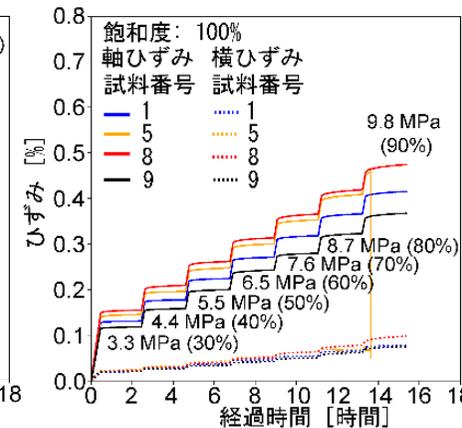
坑道掘削から50年後

埋戻しから300年後

坑道周辺岩盤内の飽和度分布



飽和度70%



飽和度100%

異なる飽和度の岩石試料を用いた
多段階クリープ試験結果

人工バリアの基本特性データベースの拡充

【研究の背景・狙い・目標・意義】

- さまざまな地下深部の地質環境を考慮した条件下で取得した人工バリアの構成要素の基本特性をデータベースとして公開しデータの幅広い活用を促進。

【実施内容と成果】

- 幅広い地質環境条件とその時間的な変遷（過渡期～閉鎖後長期）を考慮した広範な条件における基本特性データを登録し，データベースを更新。

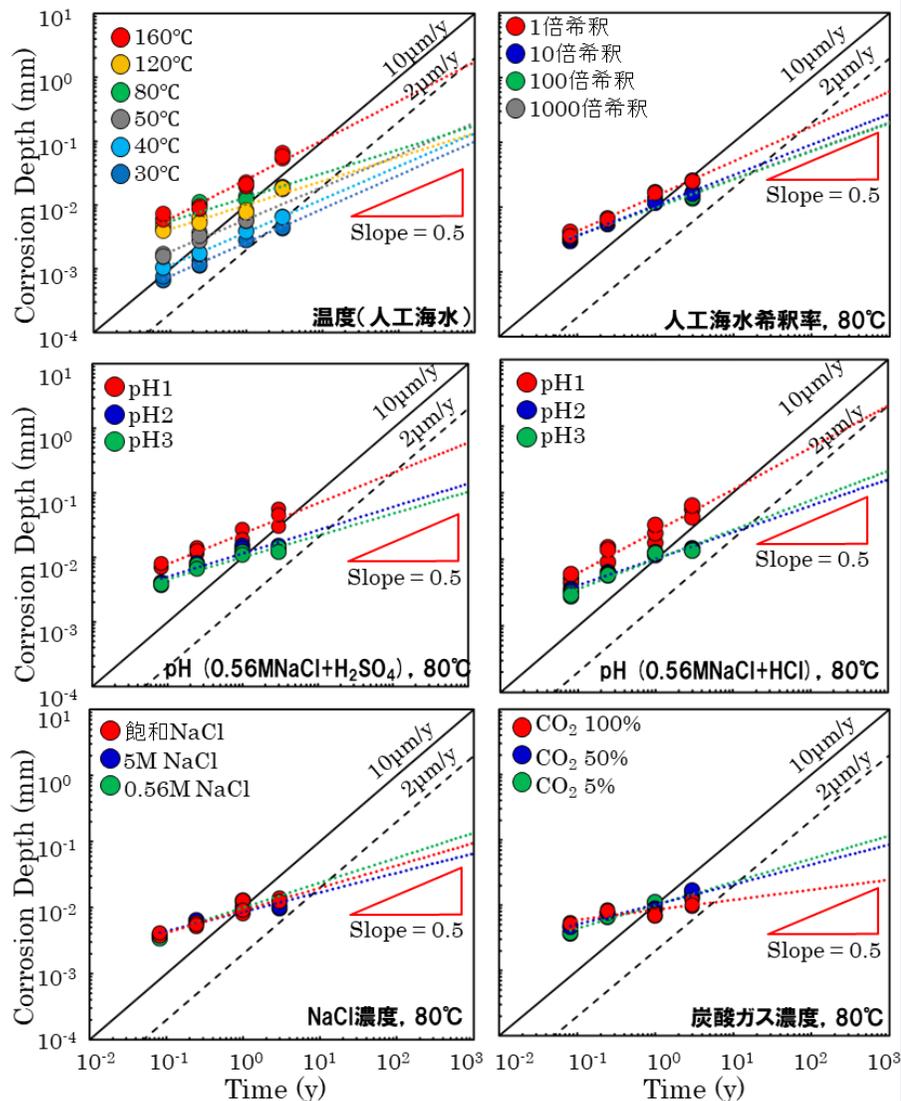
【地層処分事業や他分野への貢献】

- AI技術を用いた腐食解析モデルの開発などに活用。

人工バリアの基本特性データベースの整備状況

データベース名	件数 (年度末)
オーバーパック	1,892 (R3) 2,073 (R6) →
緩衝材基本特性	2,219
グラウト	203 (材料) 215 (施工)

炭素鋼: 1,691 (+181)
銅 : 349 (+0)
チタン : 33 (+0)



各種条件における腐食深さの経時変化

成果のまとめ

【総括】

わが国の地層処分システムの信頼性向上に向けた現象理解・モデル化に貢献。

【成果】

- ガラス・オーバーパック（炭素鋼）・緩衝材・セメントといったバリア材に対して、より現実的な特性評価に向けた基盤情報を獲得。
- 鉄-ベントナイト・セメント-ベントナイトといったバリア材界面で起こる現象理解の深化。
- 熱-水-応力-化学連成モデルの高度化により、より現実的な解析評価を実現。
- オーバーパックデータベースの更新により、より多様な環境における腐食データの提供に貢献。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- より現実的な評価に資する基盤情報を提供することで、過度な保守性を排した地層処分システム構築に貢献。

放射性核種の溶解度設定に資するデータ取得

【研究の背景・狙い・目標・意義】

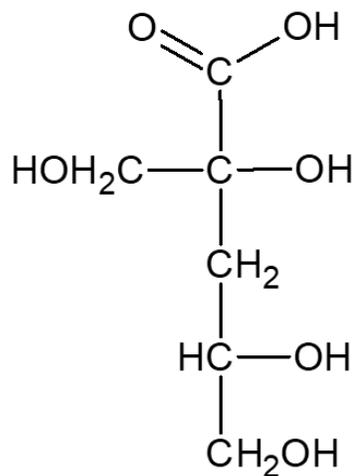
- TRU廃棄物由来の有機物であるイソサッカリン酸 (ISA) との錯生成により核種の溶解度が上昇する可能性。
- 一部の元素 (遷移金属等) は実測データがないため影響の程度が不明。

【実施内容と成果】

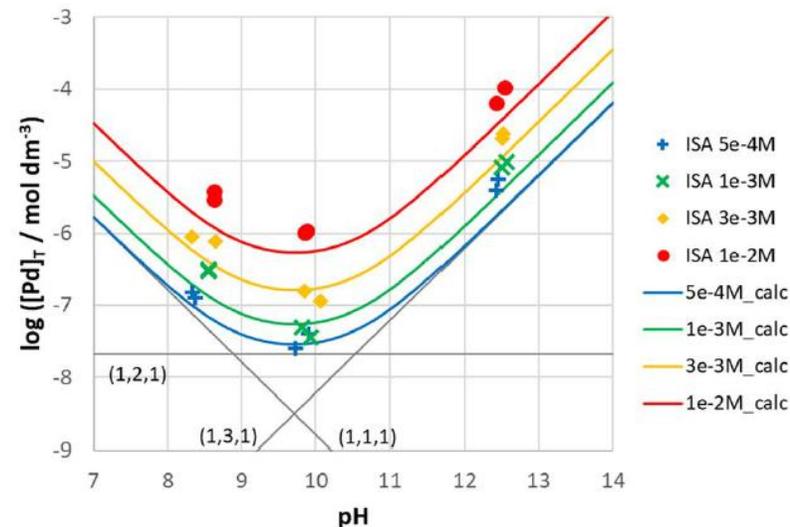
- データの不足していた評価対象核種であるPd(II)について、バッチ式溶解度試験と錯体構造解析を実施。
- pHに依存して変化するPd-ISAの3つの錯体種を設定し、錯生成定数を決定。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 熱力学データベース反映することで、安全評価の信頼性向上に貢献。



イソサッカリン酸の構造式



溶存Pd濃度のISA濃度およびpH依存性

Pd-ISA錯生成反応式とI=0における錯生成定数

錯生成反応式	$\log_{10}K_{(1,n,1)}^0$
$\text{Pd}^{2+} + \text{H}_2\text{O}(l) + \text{ISA}^- \rightleftharpoons \text{PdOHISA}(aq) + \text{H}^+$	8.1 ± 0.4
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}(l) + \text{ISA}^- \rightleftharpoons \text{Pd}(\text{OH})_2\text{ISA}^- + 2\text{H}^+$	$-(0.8 \pm 0.4)$
$\text{Pd}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}(l) + \text{ISA}^- \rightleftharpoons \text{Pd}(\text{OH})_3\text{ISA}^{2-} + 3\text{H}^+$	$-(11.4 \pm 0.4)$

ニアフィールドにおける核種移行総合評価技術の開発

【研究の背景・狙い・目標・意義】

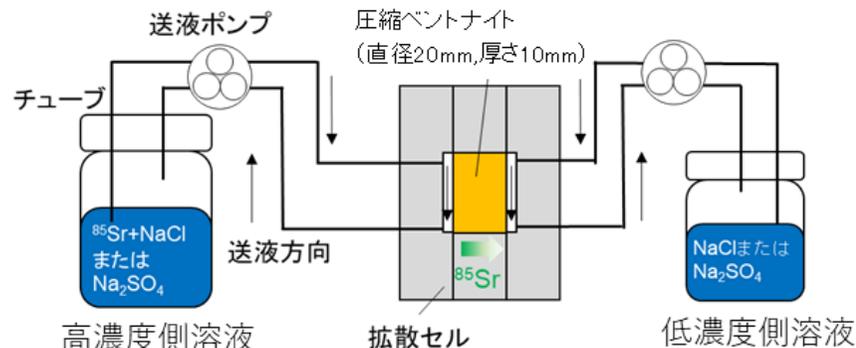
- 複数化学種共存条件等を考慮した評価手法の構築。

【実施内容と成果】

- 低濃度側溶液への積算透過量の時間変化（破過曲線）と圧縮ベントナイト中の ^{85}Sr の濃度分布から実効拡散係数 (D_e) をと収着分配係数 (K_d) を評価し、 Sr^{2+} と $\text{SrSO}_4(\text{aq})$ 共存状態での拡散挙動を検討。
- Na_2SO_4 溶液の場合、 NaCl 溶液の場合と比較して D_e , K_d がともに低下； Sr^{2+} と比較して D_e と K_d が小さい $\text{SrSO}_4(\text{aq})$ の割合が増加した結果と推測。
- Na_2SO_4 溶液での圧縮ベントナイト中での Sr^{2+} の割合を試算し、自由水中での割合（平衡定数）と比較；計算の結果からは、 K_d から算出した Sr^{2+} の割合が高く、 $\text{SrSO}_4(\text{aq})$ の収着を考慮する必要性を示唆。

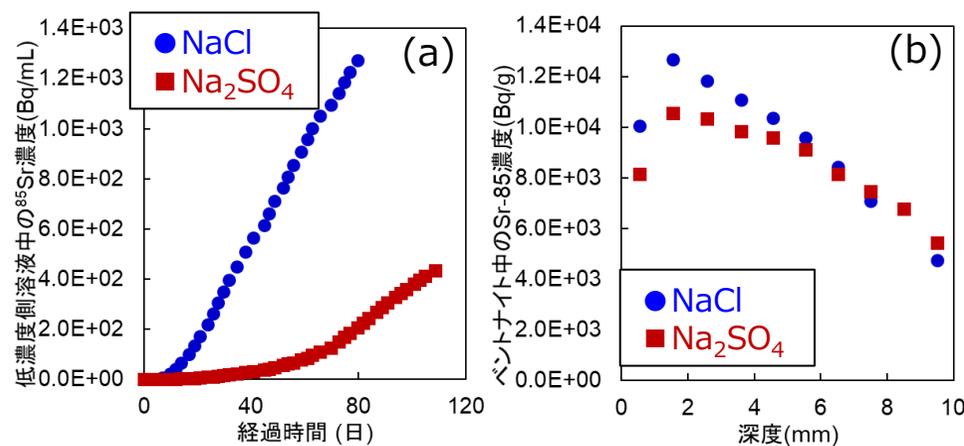
【地層処分事業や他分野への貢献】

- より現実的な核種収着挙動評価に貢献。



試験溶液：NaCl溶液 (0.1 mol/l)・ Na_2SO_4 溶液 (0.05 mol/l)
 ベントナイト乾燥密度：0.8 Mg/m³
 トレーサー： ^{85}Sr (Sr濃度 1×10^{-7} mol/l) 試験条件

圧縮ベントナイト中の ^{85}Sr 拡散試験体系及び条件



^{85}Sr の拡散試験結果

(a)破過曲線 (b)圧縮ベントナイト中のSr濃度分布

天然バリア（岩盤）における核種移行総合評価技術の開発

【研究の背景・狙い・目標・意義】

- 地下環境下での岩盤の不割れ目近傍の鉱物組成や間隙構造等の不均質性が核種移行に及ぼす影響とそのメカニズムの解明。

【実施内容と成果】

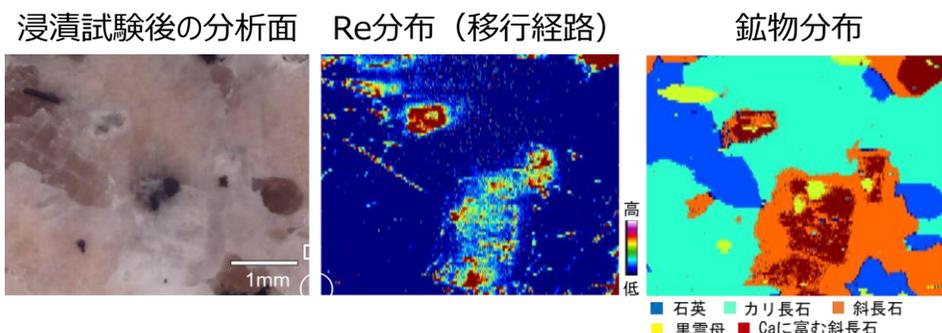
- 土岐花崗岩を対象に、非吸着性トレーサーとして ReO_4^- を用いた浸漬試験を実施し、花崗岩中の Re の移行経路を推定。
- 割れ目近傍の微小割れ目がマトリクス深部への移行を促進すること、石英の粒界、黒雲母中の間隙、斜長石の変質が移行経路の形成に影響することを解明。
- トレーサー浸漬試験と表面分析を組み合わせることで、割れ目からマトリクスへの核種移行挙動を明らかにするための新たな手法を構築。

【地層処分事業や他分野への貢献】

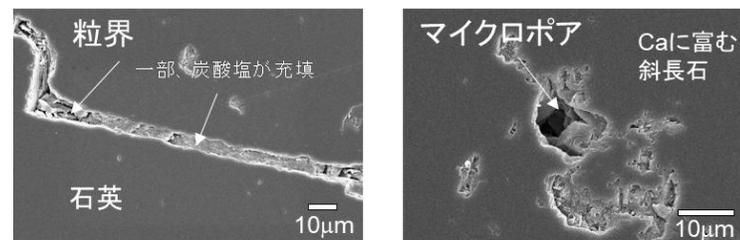
- 岩盤割れ目の変質層による不均質性を考慮した、信頼性の高い核種移行評価モデルの構築に貢献。

浸漬試験の条件

溶液条件	0.01 M NaReO_4 溶液 (ReO_4^-)
岩石試料サイズ	1 cm^3 のブロック状試料
浸漬期間	1カ月程度



土岐花崗岩を対象とした浸漬試験の結果



石英中の粒界 (Re分布の①) Caに富む斜長石中のマイクロポア (Re分布の②)

SEM観察の結果：二次電子像

コロイド・有機物・微生物影響評価手法

【研究の背景・狙い・目標・意義】

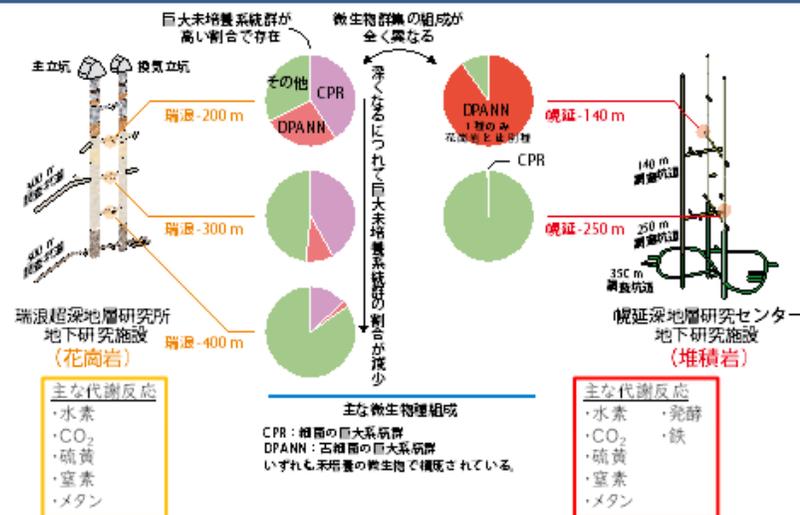
- 地下微生物の多くは未知であり、その働きは未解明。
- 安全評価の信頼性向上のために、微生物代謝が関わる現象理解が必要。

【実施内容と成果】

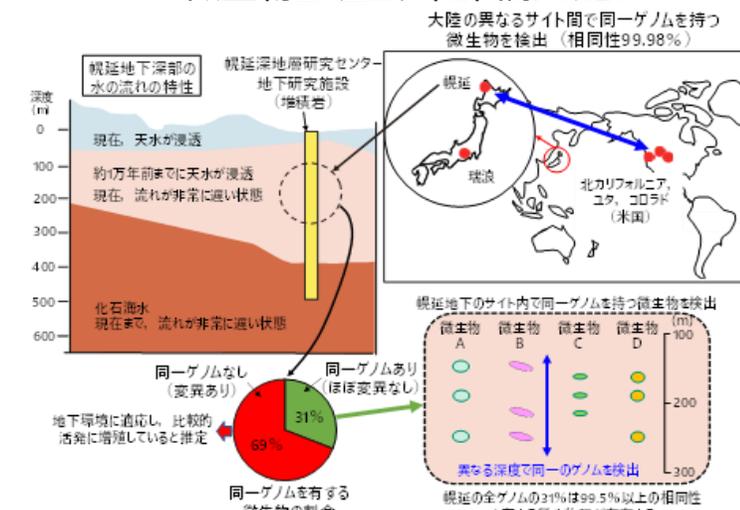
- 瑞浪・幌延の地下研究施設で採取した微生物を数年間モニタリングし、微生物群集や代謝反応を網羅的に解析。
- いずれの岩盤にも新種の未知微生物が豊富に存在；種組成が著しく異なるにも関わらず、代表的な代謝反応が共通していることを解明。
- 堆積岩では、全体の約31%で同一ゲノムが存在することを発見；アメリカ大陸の微生物とも一部のゲノムが重複。
- 同一ゲノムの検出は、地下水の流れが非常に遅い地下環境において物質の移動が制限されていることを提示；地下環境の長期安定性を把握できる手法として有用。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 地層処分システムの安全性評価だけでなく、水素やCO₂の地中貯留に関わる技術開発にも有用となる情報を提供。



花崗岩及び堆積岩地下の深度の違いによる微生物コミュニティと代謝の違い



過去から現在までの幌延地域における地下水の流れの概念と微生物の空間分布

生活圏における核種移行総合評価技術の開発

【研究の背景・狙い・目標・意義】

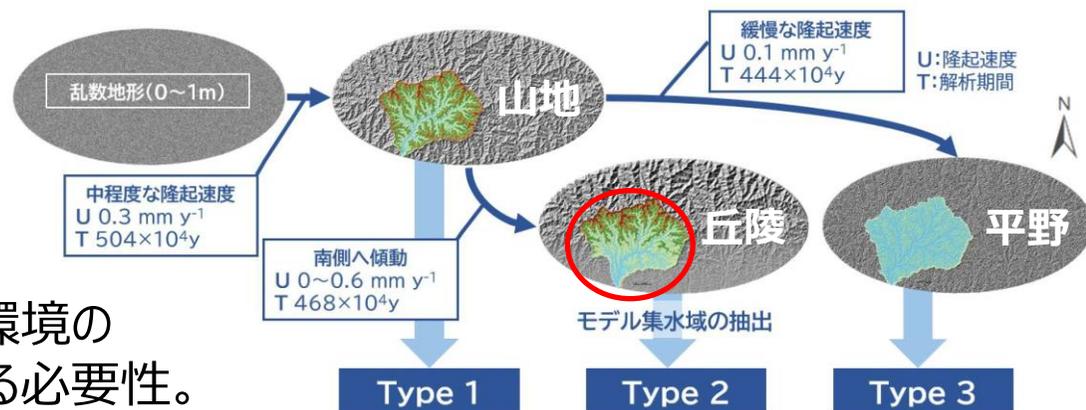
- これまでのわが国の地層処分の安全評価では、生活圏の構成要素や核種移行・被ばくプロセスを一般的かつ簡略化。
- 今後、処分サイトの具体化に伴い、表層環境の特徴を反映した生活圏評価手法を構築する必要性。

【実施内容と成果】

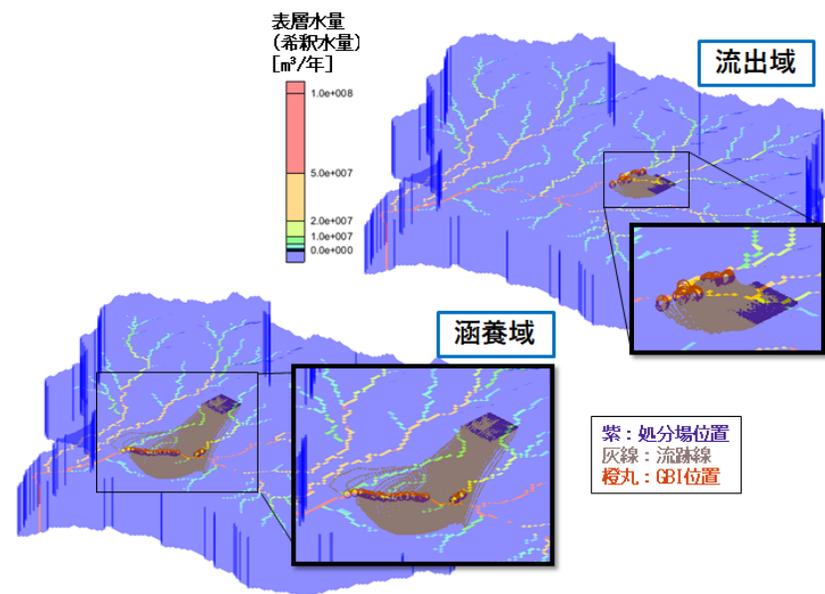
- 原子力機構が開発した地形・処分深度変遷ツールを用いて3種類のモデル集水域を抽出し、地形データ、土地被覆データ、河川流量・土砂移動データからなる地理情報を作成。
- 地下水流動・粒子追跡解析により、処分場設置場所の違いによるGBIの位置や希釈水量の分布の変化を確認。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 表層環境の特徴を反映した生活圏評価手法の構築に貢献。



地形・処分深度変遷ツールを用いた地形データの作成手順



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 (Type 2)

2. 安全評価手法の高度化

隆起・侵食を考慮した安全評価手法の開発

【研究の背景・狙い・目標・意義】

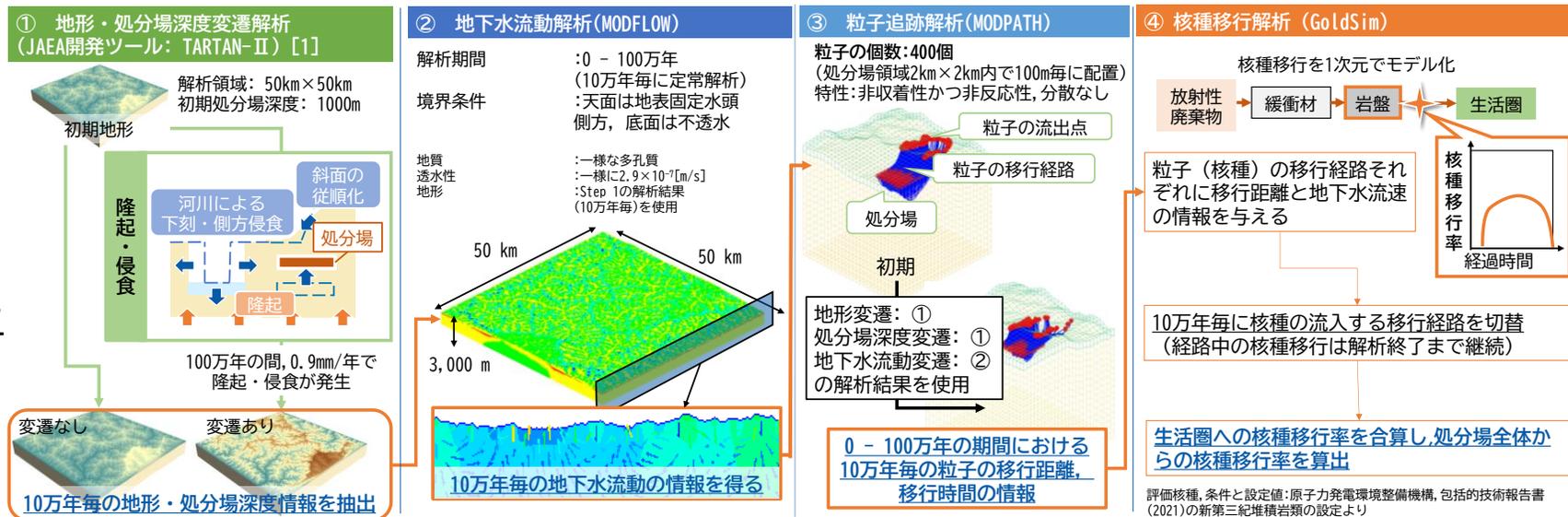
- わが国の広い地域で認められる緩慢な隆起・侵食の影響を安全評価で考慮する必要性。

【実施内容と成果】

- 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の情報を10万年毎に抽出し、核種移行解析に反映させる評価手法を構築。
- 隆起・侵食を考慮した核種移行解析を実施した結果、考慮しない場合の解析結果と比較して、岩盤に対する収着分配係数が大きく移行時間が長い核種で顕在化する可能性。

【地層処分事業や他分野への貢献】

➤ 隆起・侵食の影響を考慮することで、安全評価の信頼性向上に貢献。



隆起・侵食による核種の移行距離と地下水流速の変化を反映した核種移行解析

2. 安全評価手法の高度化

沿岸海底下特有の地質環境を加味した処分システムの統合化に向けた研究

【研究の背景・狙い・目標・意義】

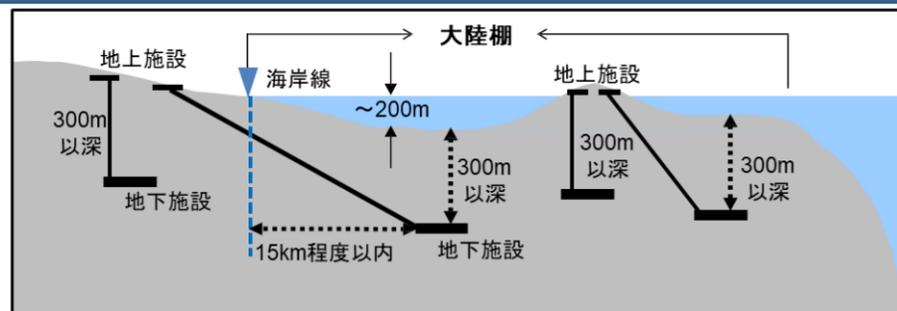
- 沿岸海底下に特徴づけられる地質環境の特性やその変遷が処分場の設計や安全評価に与える影響を統合的に実施していくための方法論の構築に向けた課題を整理。

【実施内容と成果】

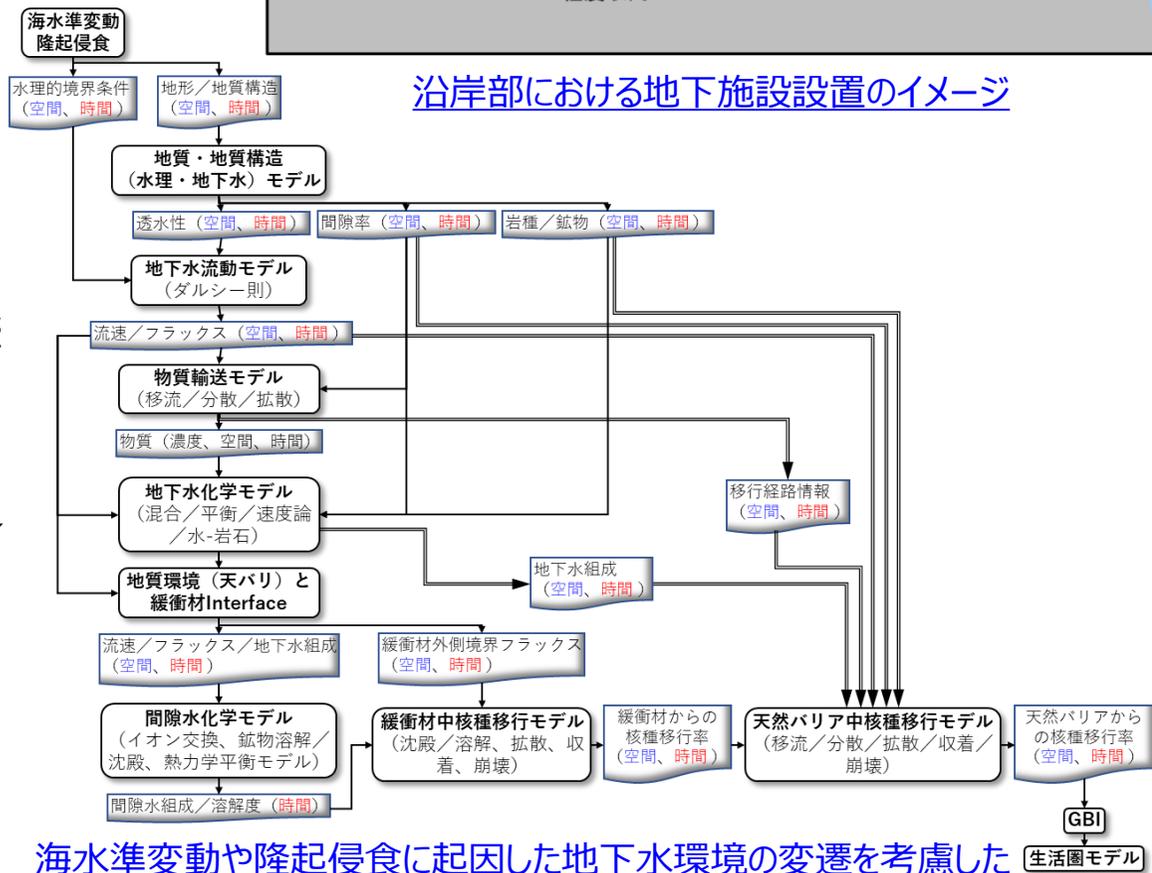
- 地下水環境に影響を及ぼす因子が処分場の設計や安全評価に及ぼす影響を検討する手法や課題について調査。
- 地下水環境の変遷を考慮した地質環境特性～核種移行評価間のモデル／データフローを整理し、フロー図に対応付けした形で調査した課題を整理。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 沿岸海低下の地層処分における安全評価の信頼性向上。



沿岸部における地下施設設置のイメージ



海水準変動や隆起侵食に起因した地下水環境の変遷を考慮した地質環境特性～核種移行評価間のモデル／データフローの例

2. 安全評価手法の高度化

放射性核種の移行に係るデータベース開発

【研究の背景・狙い・目標・意義】

- 地層処分環境の不確実性や長期変遷を考慮した性能評価には、多様な条件で取得された信頼性の高い K_d を収録したデータベース（SDB）開発が重要。

【実施内容と成果】

- 実測データが乏しい条件として、炭酸共存下でのアクチノイド元素の収着を対象として K_d を取得。さらに、先端的表面分析手法やモデルによる収着挙動評価を実施。
- 文献調査により新たに7,500点以上の K_d データを確認し、ガイドラインに基づいたの信頼度評価を実施；SDBに登録。

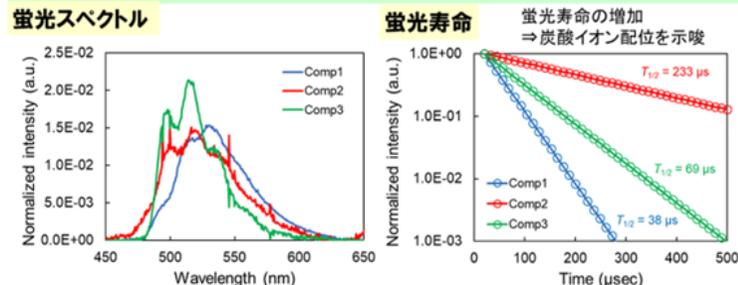
【地層処分事業や他分野への貢献】

- 幅広い地質環境条件における核種移行パラメータ設定への信頼性向上に貢献。

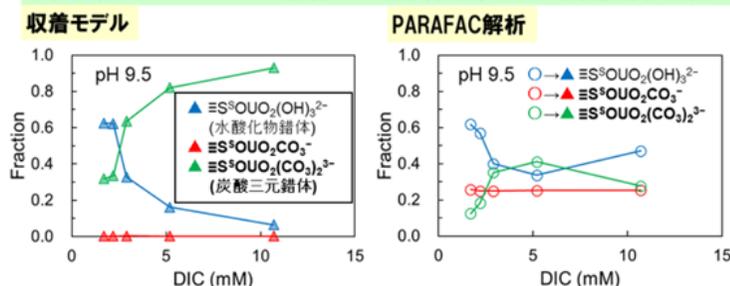
JAEA-SDB
における
信頼度評価
の例 →

Checkpoint	Evaluation	Rating
Data table Cs/170: REF: Comarmond et al. (2021) [Ⓒ] JAEA-SDB version 5 - DATA: Cs/Clay minerals; clay, shaley clay, silty clay, #109642~109699 [Ⓒ] GUIDELINE: Revision 4b (May 19, 2005) [Ⓒ]		
I-a.1	SDB [Ⓒ] All mandatory fields are completed. [Ⓒ]	Yes [Ⓒ]
I-a.2	SDB [Ⓒ] All mandatory information are given. [Ⓒ]	Yes [Ⓒ]
I-b	SDB [Ⓒ] A table of K_d values (mL/g) is given. [Ⓒ]	class 1 [Ⓒ]
II-a	SDB [Ⓒ] The solid phases used in the experiments were clay, shaley clay, and silty clay. No information on the mineralogical properties is given. [Ⓒ]	B [Ⓒ]
II-b	SDB [Ⓒ] The final pH values are given. [Ⓒ]	A [Ⓒ]
REF	The pH values were adjusted with NaOH or HCl solutions. [Ⓒ]	

(a) 炭酸共存下でのイライトに対するU(VI)の収着のTRLFS-PARAFAC解析結果



(b) 収着モデルとPARAFAC解析による表面化学種のDIC濃度依存性解析の比較



炭酸共存下でのイライトに対するU(VI)収着挙動評価

放射性核種の移行に係るデータベースの整備状況

データベース名	件数	文献数
熱力学	2,669	--
収着分配係数-(R3)	79,072	852
(R7)	86,610	924
拡散係数	5,013	286
ガラス溶解	23,288	237

成果のまとめ

【総括】

わが国の地層処分システムの信頼性向上に向けた現象理解・モデル化に貢献。

【成果】

- 人工バリアおよび天然バリア中の核種移行データの取得やモデルの高度化により、より現実的な核種移行挙動評価に貢献。
- 生活圏における評価モデルの高度化により、より精緻な生活圏評価モデルの構築に貢献。
- 収着データベースへのデータおよび信頼度評価の追加により、より多様な条件におけるバリア材に対する核種の収着挙動評価の信頼性向上に貢献。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- より現実的な評価に資する基盤情報を提供することで、過度な保守性を排した地層処分システム構築に貢献。

中長期計画期間における研究開発スケジュール (代替処分オプションの研究開発)

中長期計画（令和4年度～令和10年度） 活動の成果（令和4年度～令和6年度）

海外の最新の技術動向調査と代替処分オプションに特徴的な現象に着目した研究を実施



- 直接処分の工学技術，安全評価の技術的基盤の整備・拡充
- その他代替オプションとしての深孔処分に関する知見の調査・整理

	細目	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
高レベル放射性廃棄物 等 の 地 層 処 分 研 究 開 発	代替処分オプションの研究開発								
		使用済燃料直接処分に関する閉じ込め性能に関する評価検討等の拡充・整理							
		その他代替処分オプション（超深孔処分）の成立性に係る技術や情報の調査・整理							

No.	小項目	交付金	エネ庁	NUMO	他
1	使用済燃料の直接処分に関する研究開発	△*	○		
2	その他代替処分オプションに関する研究開発	△*	○		

*人件費および施設の維持管理費

代替処分オプションの研究開発の位置づけ

【概括的評価である「直接処分第1次取りまとめ*」において抽出された課題】

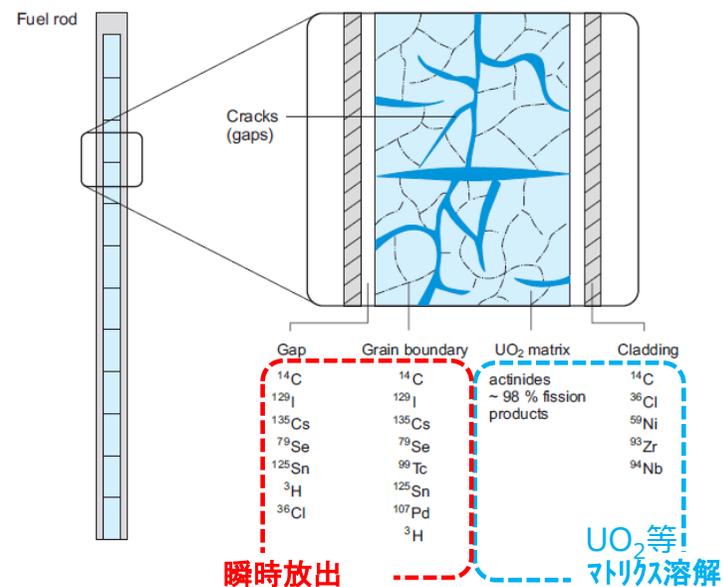
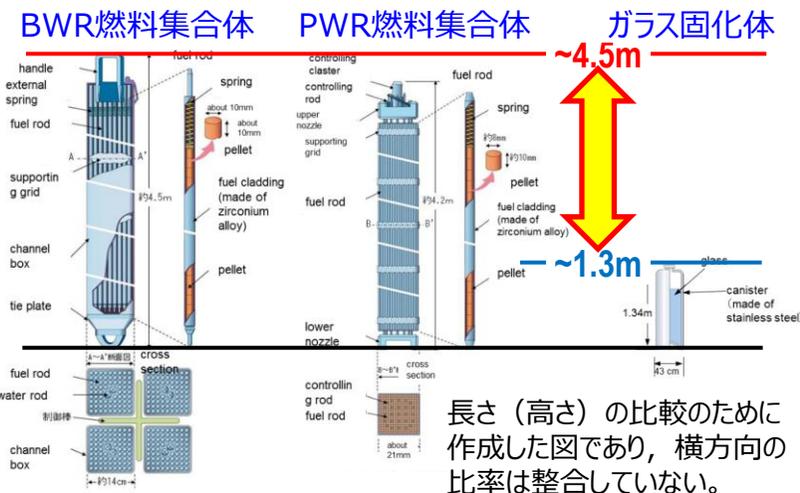
- 限られた前提条件を対象とした予備的な検討をより包括的なものとするための課題

- 地質環境条件の多様性 (地層処分と共通)
- **使用済燃料の多様性**
- 安全評価のシナリオの拡充 (地層処分と共通)
- **様々な処分概念オプションの考慮**

- 使用済燃料に特有の主な課題

- 工学技術：**保障措置・核物質防護**, **廃棄体発熱量の増大**, **臨界安全性評価**, **長寿命処分容器の検討**, **長尺廃棄体の搬送・定置**, 等
- 安全評価：**燃料および構造材からの核種の溶解・放出挙動評価**, **放射線 (特にα線) 影響評価**, 等

青太字：R4～6年度に実施， 緑字：過去に検討実績



* JAEA-Research 2015-016 (2015)26

1. 使用済燃料の直接処分に関する研究開発 処分容器の長寿命化に関する検討

【研究の背景・狙い・目標・意義】

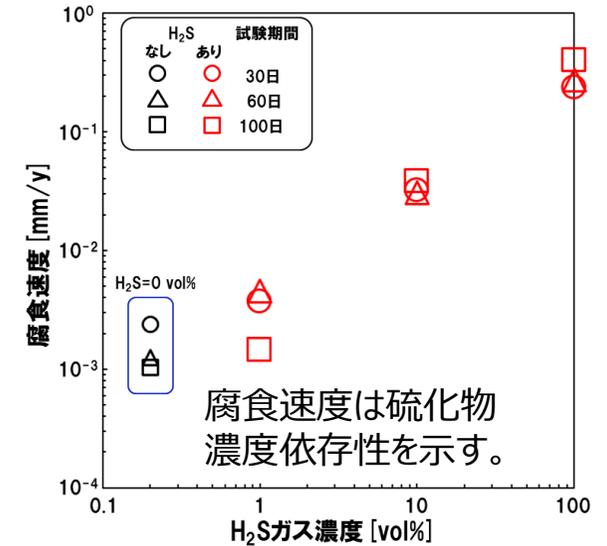
- 直接処分に特徴的な安全評価上の支配核種であるC-14等の閉じ込めを考慮し、処分容器の長寿命化が必要。
- 純銅は、環境条件によっては極めて長い寿命を期待できるが、幅広い地質環境条件を考慮すると腐食挙動の知見は十分ではなく、わが国における適用条件や長寿命達成の可能性を提示するためには試験データの拡充が必要。

【実施内容と成果】

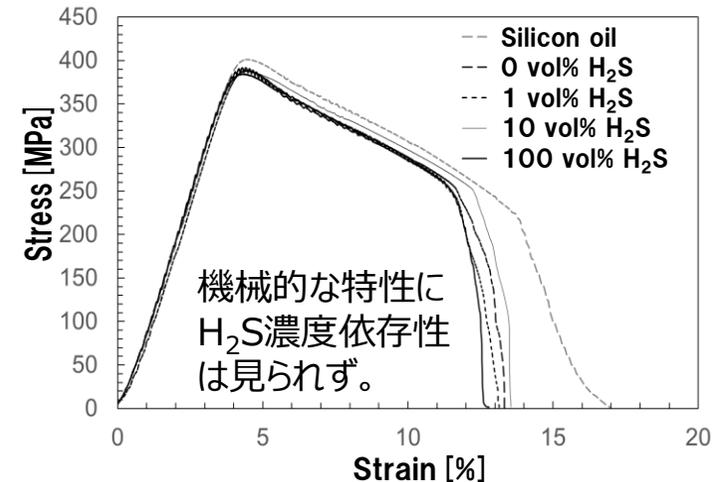
- 銅の腐食を促進する作用を有する硫化物の濃度をパラメータとした腐食試験（浸漬試験，応力腐食割れ試験）を実施し，最長90日間までのデータを取得。
- 硫化物濃度が高いほど，腐食生成物である硫化銅の生成反応により全面腐食が進展すること，硫化銅の下地保護性が低く，腐食反応の抑制による有意な腐食速度の低下が期待できないこと等を確認。また，応力腐食割れは確認されず。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 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できる知見を獲得。



腐食速度と硫化物濃度の関係

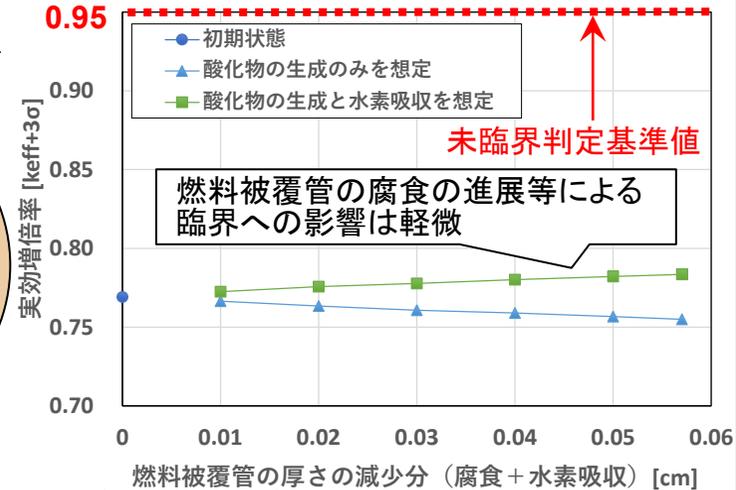
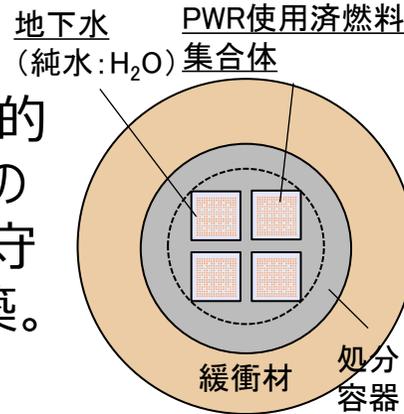


硫化物共存下における純銅の応力-ひずみ曲線

1. 使用済燃料の直接処分に関する研究開発 臨界安全評価技術の高度化

【研究の背景・狙い・目標・意義】

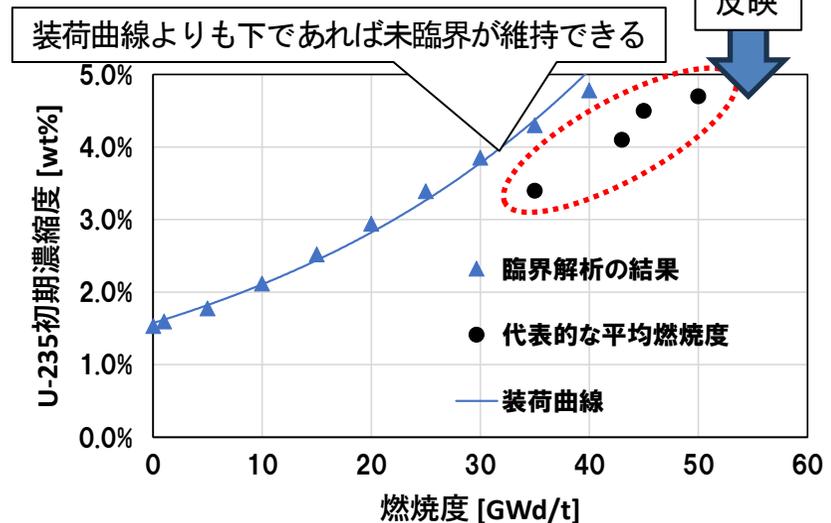
- わが国の使用済燃料を対象とし、現実的に起こりうる廃棄体や人工バリアの状態の変化を取り入れることにより、過度な保守性を排除した臨界安全評価手法を構築。



【実施内容と成果】

- 金属材料の腐食等の進展が反応度に及ぼす影響を解析により評価を行い、反応度の変化の傾向や最大値などの情報を整備。
- 上記の情報と、燃料内の燃焼度分布等の違いによる不確実性を考慮しつつ、多様な UO_2 使用済燃料を対象とする処分後の臨界安全評価を例示。

処分後の材料の変化が臨界に及ぼす影響の評価の例
(ジルカロイの腐食進展による実効増倍率の変化)



【地層処分事業や他分野への貢献】

- 諸外国の直接処分システムにおける臨界安全評価手法の高度化に貢献。

多様な UO_2 使用済燃料を対象とする処分後の臨界安全評価の例

使用済燃料からの核種溶出挙動評価

【研究の背景・狙い・目標・意義】

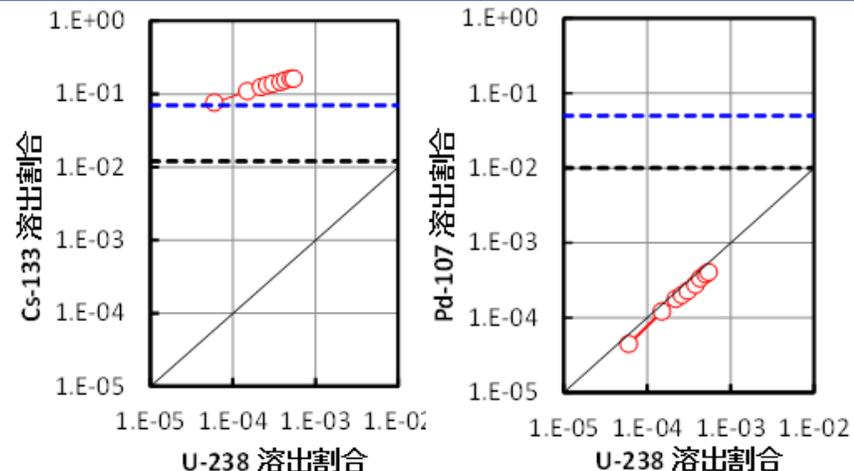
- 直接処分システムの安全評価に必要なパラメータとして瞬時放出とマトリクス等の長期溶解速度。
- 日本においては、還元環境下はもとより、炭酸共存の影響評価が特に必要。

【実施内容と成果】

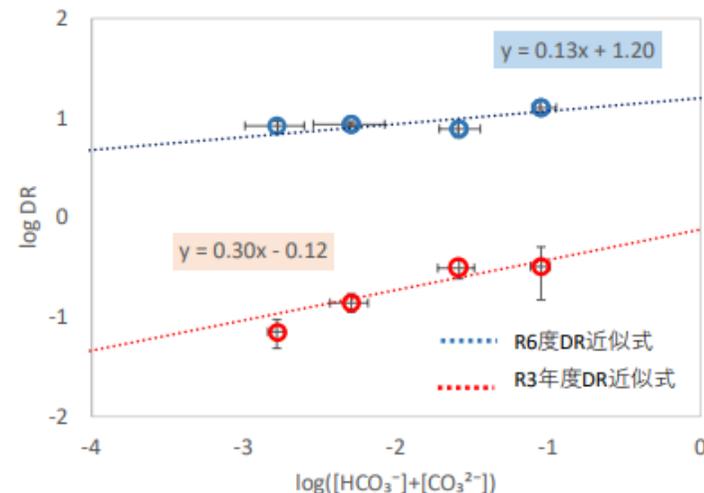
- 瞬時放出については、ふげんの燃料を用いた浸出試験を行い瞬時放出率（IRF）を求め、文献調査による設定値と比較することにより妥当性を確認。
- 長期溶解速度については、ウランの再沈殿の影響を排除するため、Mgを混入したウランペレットを作成し、長期的な浸出試験を実施。長期溶解速度の炭酸影響、ウランの沈殿による溶解速度変化を評価し、炭酸濃度の依存性を確認。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- ウランの溶液化学に関する理解の深化。



U-238の溶出割合で規格化された核種の溶出割合
とIRF設定値との比較
(青破線 IRF設定値(最大値), 黒破線 IRF設定値(推奨値))



UO₂溶解速度に及ぼす炭酸イオン濃度の影響

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

【研究の背景・狙い・目標・意義】

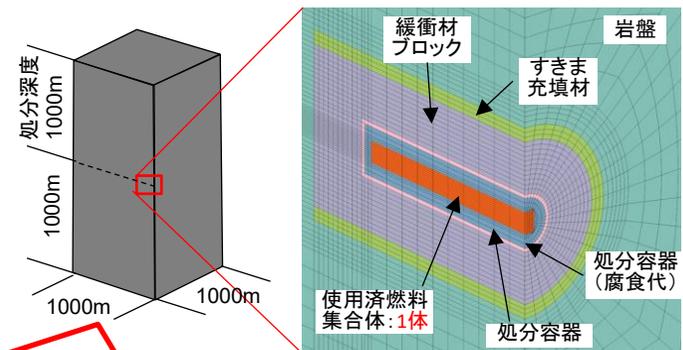
- 多様な使用済燃料を対象とする処分システムの構築に必要な技術情報の整備に向けた課題整理の一環として、MOX使用済燃料の処分後の発熱の影響と緩和方策の検討に着手。

【実施内容と成果】

- 緩衝材の最高温度を100℃以下に維持するための複数の方策について効果を確認。
 - 冷却期間→100年以上の長期間要。
 - 緩衝材の物性値→吹付け施工などで含水比を高めることが有効。
 - 地上での冷却期間がより短期の場合でも、100℃を超える緩衝材の領域は容器近傍に限定。

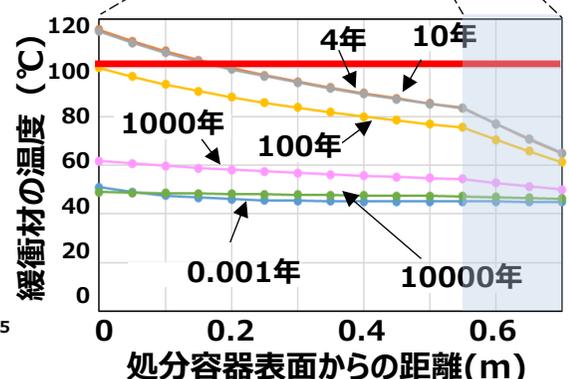
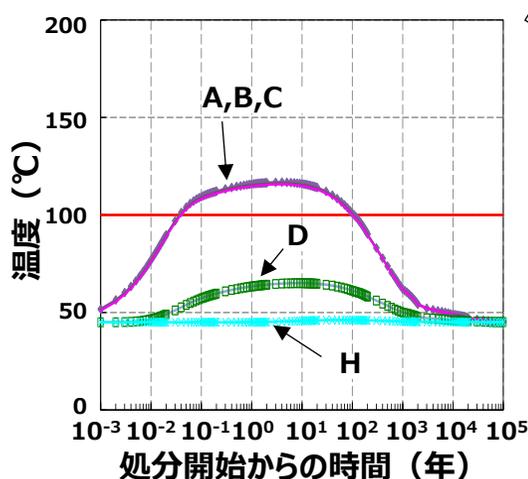
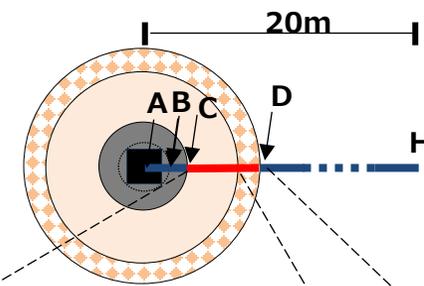
【地層処分事業や他分野への貢献】

- ガラス固化体の地層処分における熱影響評価への適用性。



初期発熱量がUO₂使用済燃料の5倍以上であり、熱の影響が大きいいため、まず1体の廃棄体のみ対象とするモデルで計算。

三次元熱伝導解析の解析モデル



三次元熱伝導解析結果 (緩衝材含水比12%, 冷却期間150年の例)

深孔処分に関する調査検討

【研究の背景・狙い・目標・意義】

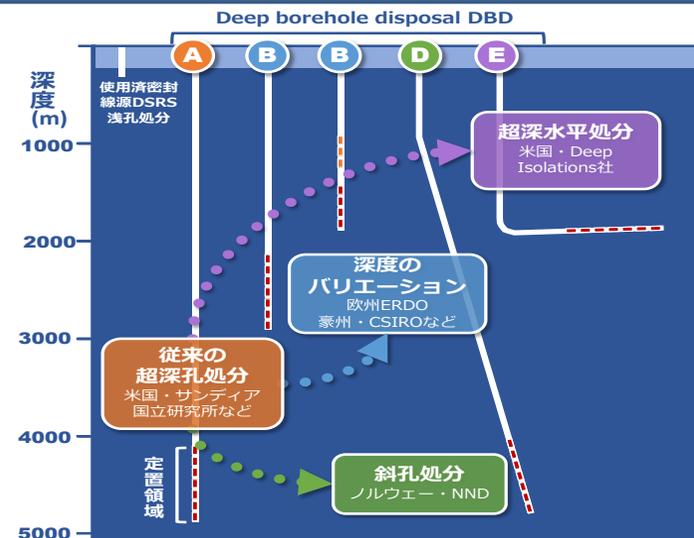
- 直接処分以外の代替処分オプションとして、深孔処分に関する知見を調査・整理。
- 深孔処分場の「建設段階」「操業段階」「閉鎖段階」の各段階で必要な技術の現状や課題等の整理。
- わが国での成立の可否や条件等を具体化。

【実施内容と成果】

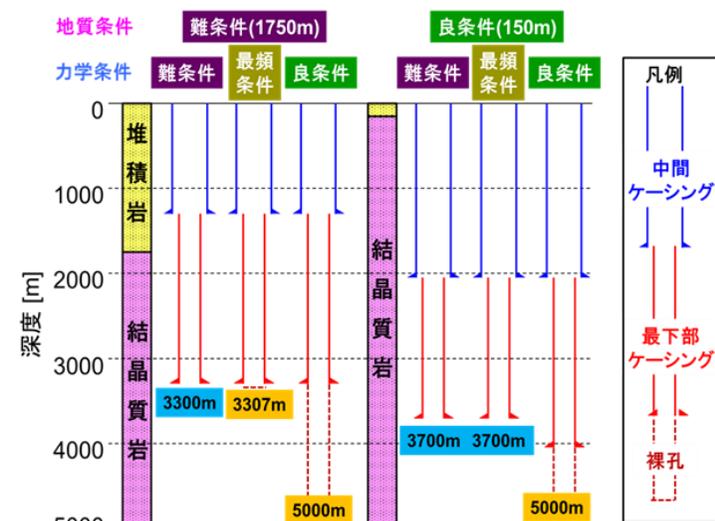
- 深孔処分相当深度（数千m）までの深孔の掘削，廃棄体の定置，深孔の閉鎖など，ガラス固化体の地層処分や使用済燃料直接処分とは異なる技術の現状や課題等を，諸外国での事例検討等の調査を通じて分析・整理。
- 石油や地熱よりも大きい深孔処分相当の孔径を対象に，掘削可能深度の予察的推定を実施。
- 成立の可否の判断に係る主要な論点等を，諸外国の中でも検討が進んでいる米国SNL等を参考として整理。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- わが国での深孔処分の成立の可否等の判断の一助に貢献。



諸外国で提案されている深孔処分の一覧



掘削可能深度の予察的推定の結果例

成果のまとめ

【総括】

わが国の代替処分オプションの成立性に向けた検討の着実な進展に貢献。

【成果】

1. 使用済燃料の直接処分に関する研究開発

- ガラス固化体の地層処分でない特徴（臨界安全，核種放出，熱影響，等）を考慮した実測値の取得や解析評価により，わが国における直接処分の成立性検討に向けた基盤情報を獲得。

2. その他代替処分オプションに関する研究開発

- 諸外国での事例検討等の調査を通じて深孔処分の特徴を分析・整理するとともに，わが国における深孔処分の成立性検討に向けた基盤情報を獲得。

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 臨界安全評価・核種放出挙動評価などは，わが国のみならず諸外国における直接処分システムの信頼性向上にも貢献。
- わが国での深孔処分の成立の可否等の判断に貢献。

成果の発信・普及等：プレス発表

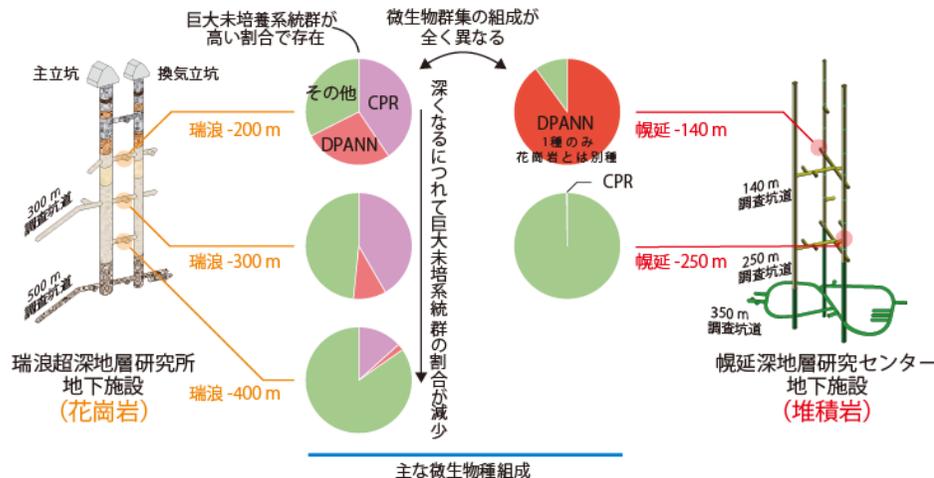
核燃料サイクル工学研究所所属の職員による研究成果のプレスリリース（令和4年度～令和6年度）

原子力機構の地下研究施設を活用して地下の未知微生物の働きを解明する

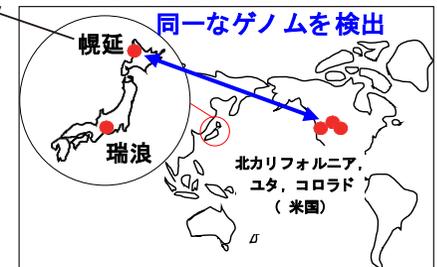
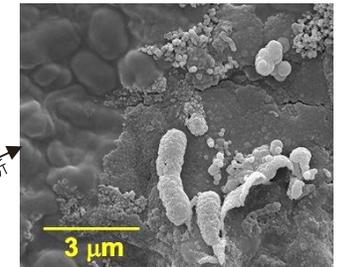
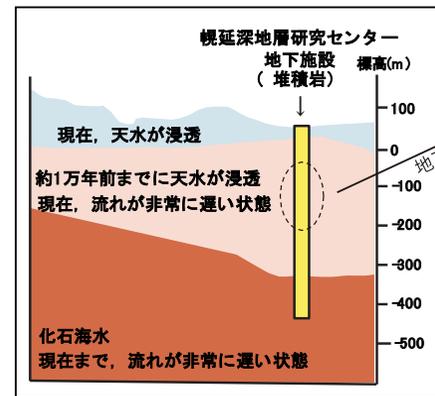
－微生物コミュニティから地下環境の長期安定性を推定－

（令和7年2月4日付）

- 瑞浪・幌延各URLの地下水に未知の微生物が豊富に存在。
- 異なる岩石でも代表的な代謝反応が共通；米国微生物とも一部のゲノムが重複。
- 最終氷期までの比較的地下水が流れやすかった時代に移動してきた微生物が、最終氷期終了時期（約1万年前）から現在までの地下水の流れが非常に遅い環境下で、長期にわたって移動を制限された可能性を提示。



CPRは細菌の巨大系統群、DPANNは古細菌の巨大系統群であり、いずれも未培養の微生物で構成されている。系統樹上で基部を占める。



成果の発信・普及等：国民との相互理解促進・人材育成の取り組み

○ 国民との相互理解促進のための活動の展開

令和4年度～令和6年度の実績

・施設見学の実施

エントリー・クオリティ 1,108名
(R4: 64名, R5: 519名,
R6: 525名)



施設見学・意見交換
(地層処分基盤
研究施設)

・イベントを通じた地層処分に関する国民との相互理解促進

子供を含めた一般の方々を対象としたイベントに出展し、科学や機構の業務に興味を持ってもらう活動を実施。

(主な活動)

令和4年度地層処分技術に関する研究開発報告会 (R4.9)

青少年のための科学の祭典全国大会 (R4.7, R5.7, R6.7)

「高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する勉強会」への講師派遣
(福井県原子力平和利用協議会主催) (R4.8)

日立市立小学校科学クラブでの出張授業 (R5.1)

東海村主催「がっちゃんご祭り実験教室」 (R5.4, R6.9)

フレンドリートーク (地域の方々との意見交換会) (R6.5)



可搬型人工バリア
模型の展示・説明



青少年のための科学の
祭典2023全国大会



地層処分技術に関する
研究開発報告会

➤ 見学者の受け入れや広報活動等を通じ、
地層処分に関する相互理解を促進

○ 人材育成の取り組み

令和4年度～令和6年度の実績

・夏期実習生・特別研究生の受け入れ：のべ13名

➤ **うち1名がJAEA入構**

・核サ研での核種移行評価実習 (文科省「国際原子力人材育成イニシアティブ事業」)：17名

・原環センター主催の「地層処分に関する人材育成セミナー」への講師派遣

・日本原子力学会バックエンド部会週末基礎講座への講師派遣

・東京大学専門職大学院や大学連携ネットワークでの講義・実習

・NUMOとの共同研究の枠組みを活用した、NUMOの若手を中心とした技術者の受け入れ



地層処分放射化学研究施設
(クオリティ) で実験作業に従事する
NUMO技術者

➤ 次世代の原子力を担う人材育成ならびに、わが国の地層処分に関する技術力向上に貢献