



令和2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3年3月4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2年4月1日～令和3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する。

- (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2年4月1日～令和3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。

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

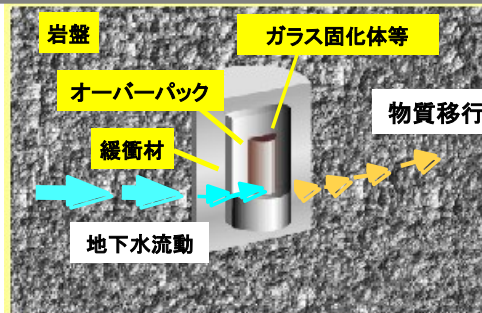


- (1) 処分システムに関する**工学技術**の信頼性向上
 - 1) 人工バリア等の基本特性データベースの拡充
 - 2) 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究
- (2) **安全評価**手法の高度化
 - 1) 放射性核種の移行に係る現象理解とそれに基づく評価モデルの高度化
 - 2) 放射性核種の移行に係るデータベース開発

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)



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

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

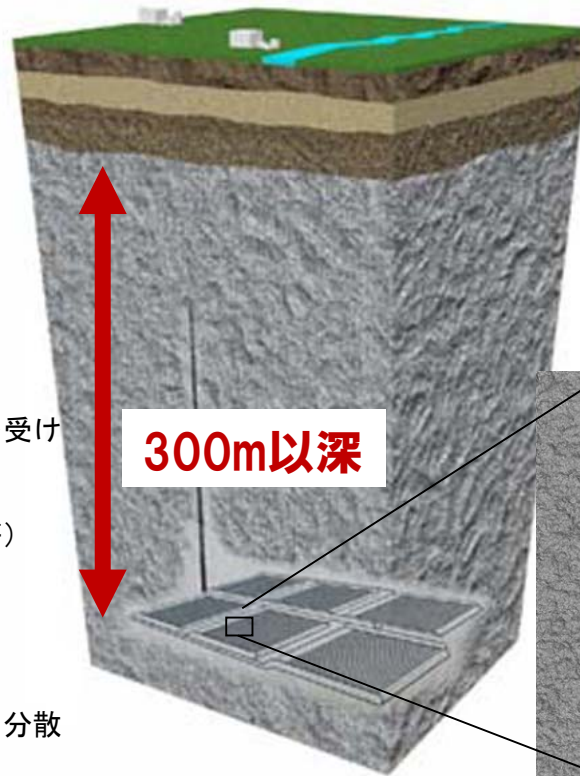
- ・好ましい地下水化学（還元性等）
- ・小さな地下水流速
- ・力学的安定性
- ・人間環境からの物理的障壁

天然バリアとしての機能

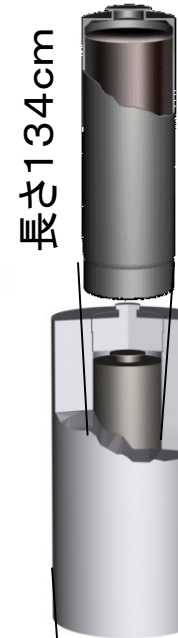
- ・放射性核種の移行抑制と希釈・分散

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)

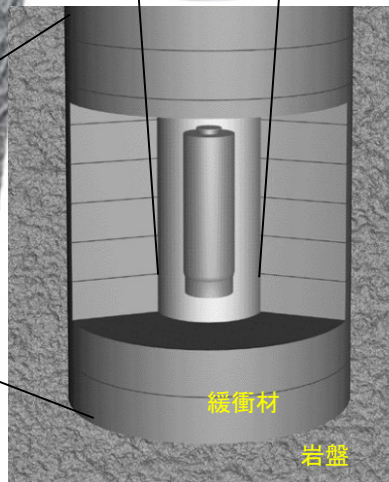
- ・放射性核種を均一かつ安定に固定
- ・高い化学的耐久性により地下水への放射性核種の溶出を抑制
- ・熱や放射線に対する安定性

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2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、沿岸域や高塩化物環境を想定した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:

セメンテーションのナチュラルアナログとして月布鉱床のベントナイト原鉱石の試料とその再構成試料を対象とした試験から、基本特性に関するデータ(透水係数、膨潤圧、剛性)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 ; 1,892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手法を構築し、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:

海水系地下水環境である幌延人工バリア性能確認試験を対象とした比較解析から、固有透過度のイオン強度依存性の違いがオーバーパック近傍の飽和度分布に与える影響が大きいことを確認し、海水系地下水条件での緩衝材の浸潤挙動をより適切に評価するために必要な連成モデルの概念を提示

令和2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:

過年度までに構築した地形・処分深度変遷解析ツールによる解析により、地形と処分場深度の変化を3つにパターン化し、性能評価上重要となり得る影響伝搬を抽出

・生活圏被ばく線量評価の信頼性向上:

既存の生活圏被ばく線量評価モデルを用いて、各核種の線量への換算係数に対して影響の大きなパラメータを抽出するとともに、海外におけるパラメータ設定の考え方を調査

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, 堆積岩:幌延)の割れ目部を対象に室内・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、室内および原位置試験によって現象理解を図り、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 ; 70,673件、文献数 780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

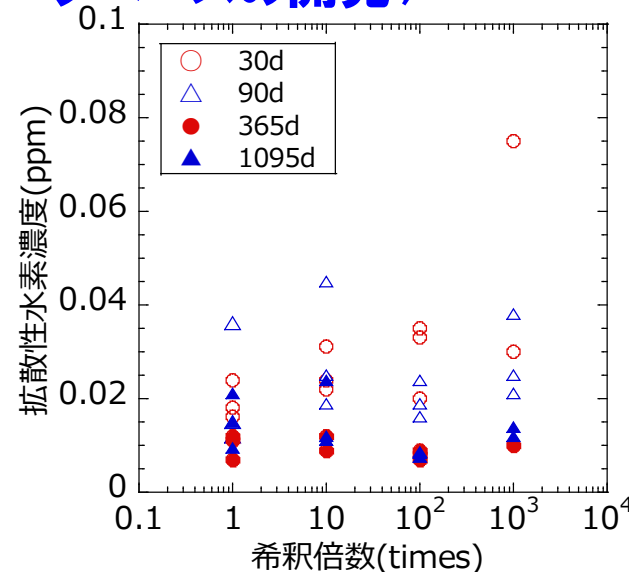
【オーバーパックの腐食挙動に関するデータの拡充】

➤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。

- **沿岸地下水**を想定した条件として、人工海水の濃度を変化させた水素吸収試験を実施し、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。
- **高塩化物環境**を想定した条件として、NaCl濃度を変化させた浸漬試験を実施し、腐食速度に対するNaCl濃度の影響は経時的に低下することを確認した。

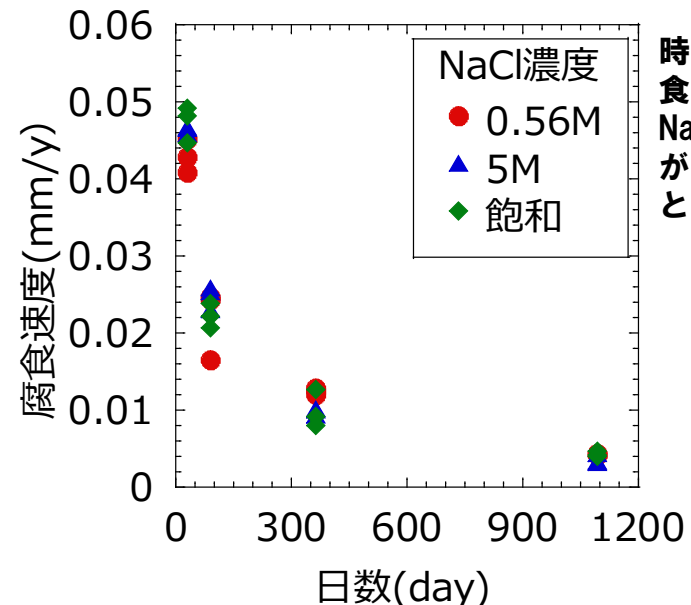
□ 意義／反映先

➤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。



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

人工海水濃度を変化させた水素吸収試験結果



時間とともに腐食速度に対するNaCl濃度の影響が小さくなることが確認された

NaCl濃度を変化させた浸漬試験結果

(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

➤ 緩衝材にセメンテーションが生じた場合にその基本特性に与える影響を把握するために、セメンテーションの影響を受けていると推察される月布鉱山産ベントナイト原鉱石の基本特性を調査した。

● 原鉱石と再構成試料※を対象とした圧密試験からセメンテーションが剛性に与える影響の検討を行った。その結果セメンテーションによって圧密に対する剛性が大きく、除荷による膨潤変形量が小さくなる傾向を示す結果を得た

※再構成試料: 原鉱石を粉状に粉碎したものを締め固めることにより土粒子構造を再構成した試料

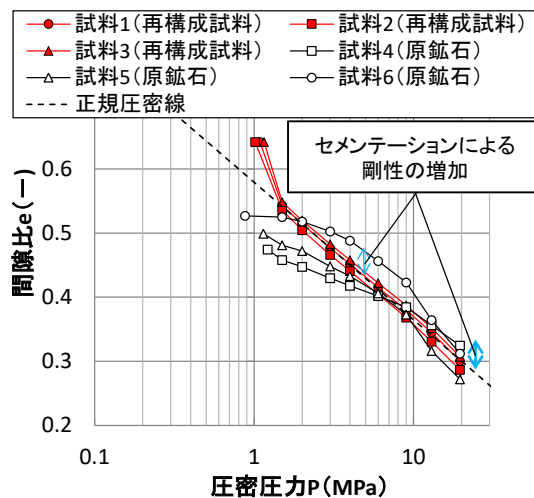
□ 意義 / 反映先

➤ セメンテーションが緩衝材の基本特性に与える影響等の理解への反映

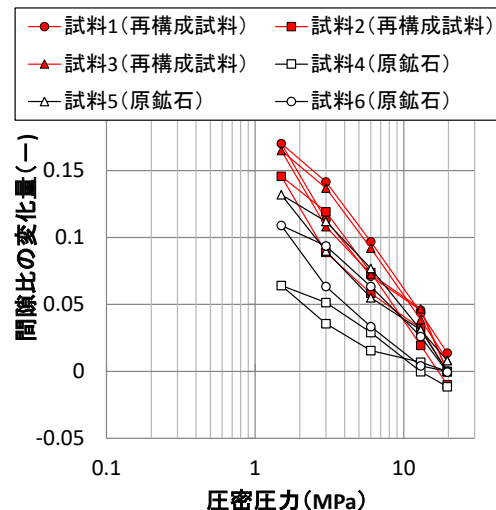
	透水性	膨潤性	剛性
原鉱石の基本特性 (再構成試料との比較)	変わらず ¹⁾	小 ¹⁾	大 ²⁾

1): 平成31年度までの成果、2): 令和2年度の成果

➤ 処分施設の長期挙動評価への反映



載荷過程



除荷過程・再載荷過程

セメンテーションした一般的な土質材料と同様に剛性が増加している。

原鉱石の除荷時の膨潤変形量は小さく、セメンテーションにより膨潤変形が抑制される可能性を示唆している。

月布鉱山産ベントナイト原鉱石と再構成試料を対象とした圧密試験

(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:

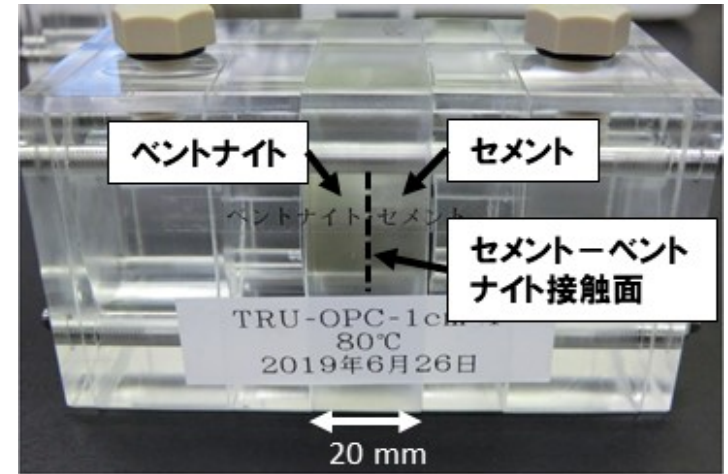
セメント-緩衝材相互作用評価モデルの高度化

□ 成果

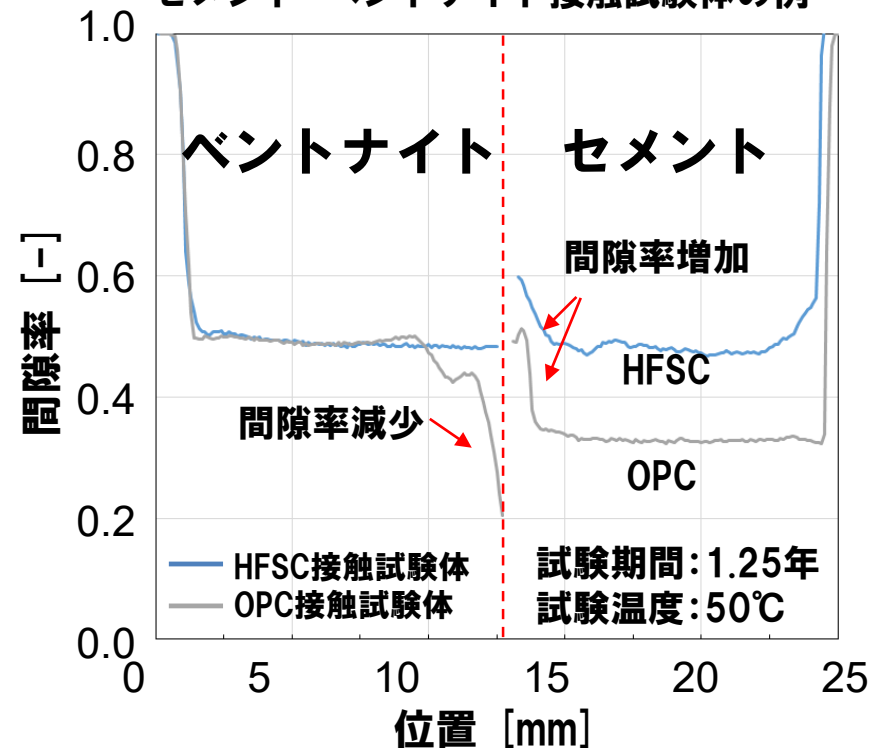
- セメント起源の**高pH間隙水**による影響を抑制するために開発された低アルカリ性セメント(HFSC)及び汎用性が高く幅広く利用されている普通ポルトランドセメント(OPC)のそれぞれと、緩衝材(ベントナイト)との接触による相互作用に関する実験手法を構築し、各セメント条件でのセメント及び**ベントナイトの変質状態**を比較した。
- その結果、セメント側はHFSC, OPCいずれの条件でも界面近傍で間隙率の増加が観察されたが、ベントナイト側はOPC条件でのみ界面近傍で間隙率の減少が観察された。X線回折分析等により、OPC条件でのベントナイト側界面近傍の間隙率の減少はケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)等の沈殿によること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。



セメント-ベントナイト接触試験体の例



接触試験体内の間隙率分布

(X線分析顕微鏡の透過X線データから推定) 10

(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)

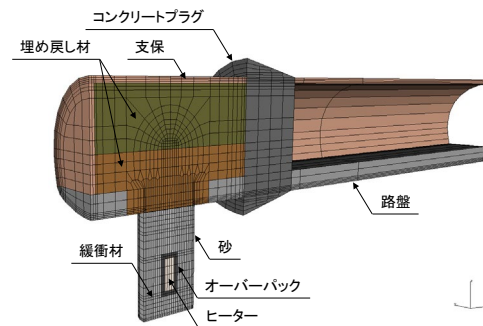
2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 熱-水-応力連成(3連成)挙動の解析評価

□ 成果

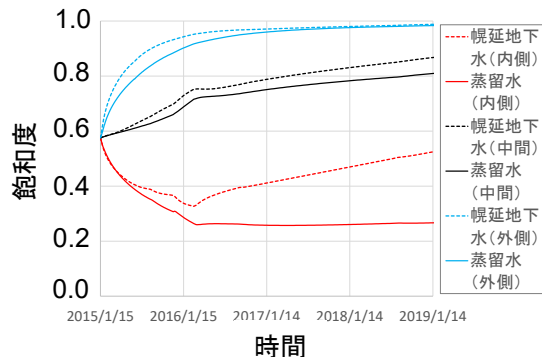
- 多様な地質環境条件に応じたTHMC連成挙動を再現できる現象解析モデルの構築を目指し、幌延人工バリア性能確認試験の計測データを活用して、①蒸留水や②幌延地下水条件での緩衝材の固有透過度を解析ケースとしたTHM連成解析を実施し、固有透過度のイオン強度依存性が浸潤挙動へ与える影響として、特にオーバーパック近傍の飽和度の経時変化に与える影響が大きいことを示した。
- 海水系地下水条件での緩衝材への浸潤挙動をより適切に評価するために必要な連成モデルの概念を整理した(右下図)。

□ 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となる緩衝材中の環境などの情報提供

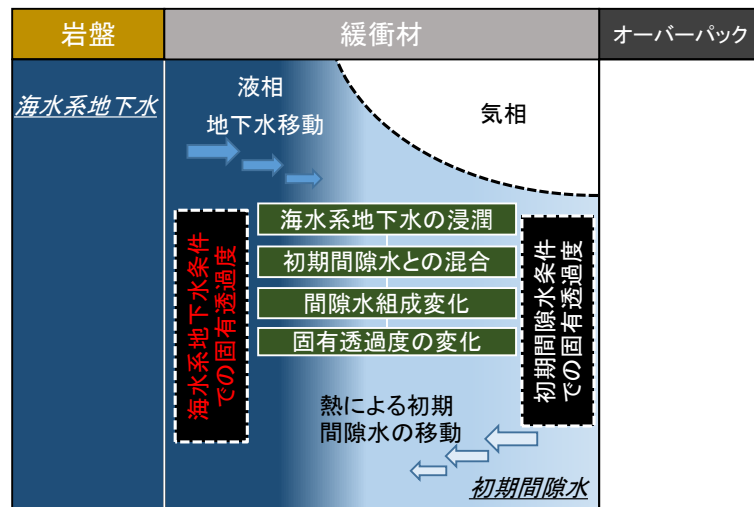


幌延人工バリア性能確認試験の解析メッシュ図の例



- オーバーパックに近づくほど①と②の差異は大きくなり、幌延地下水条件での固有透過度を設定した場合には緩衝材内側での飽和度上昇が生じた。
- 一方、計測結果からは緩衝材内側での飽和度上昇は確認できておらず、オーバーパックに近い緩衝材内側では初期間隙水である蒸留水条件の方が実測値に近い。

緩衝材中間深度での飽和度変化の比較



海水系地下水条件での緩衝材水理特性の変化の概念図11

(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

- ▶ 過年度までに構築した地形・処分場深度変遷解析ツール※にて隆起速度をパラメータとした解析を行い、隆起・侵食に起因する複数の地形・深度変化をパターン化(図1上)
- ▶ 地形と処分場深度の両方の変化が相対的に小さいパターンA、処分場深度の変化のみが大きいパターンB、両方の変化が相対的に大きいパターンCに分類し、性能評価上重要となり得る影響伝搬を抽出(図1下)

□ 意義／反映先

- ▶ 本ツールを用いて上記のどのパターンに近いかを推定することで、隆起・侵食の影響を考慮した性能評価において重要となる影響やその伝搬を見通すことができる
- ▶ 様々な条件で計算した処分場深度変化や地形変化を用いた地下水流動解析や表層環境の解析のインプットとしての活用

※隆起・侵食による地形および処分場深度の時間変化を、初期条件の地形、隆起速度やその分布、処分場の位置等の条件を変えて迅速に計算できるツール

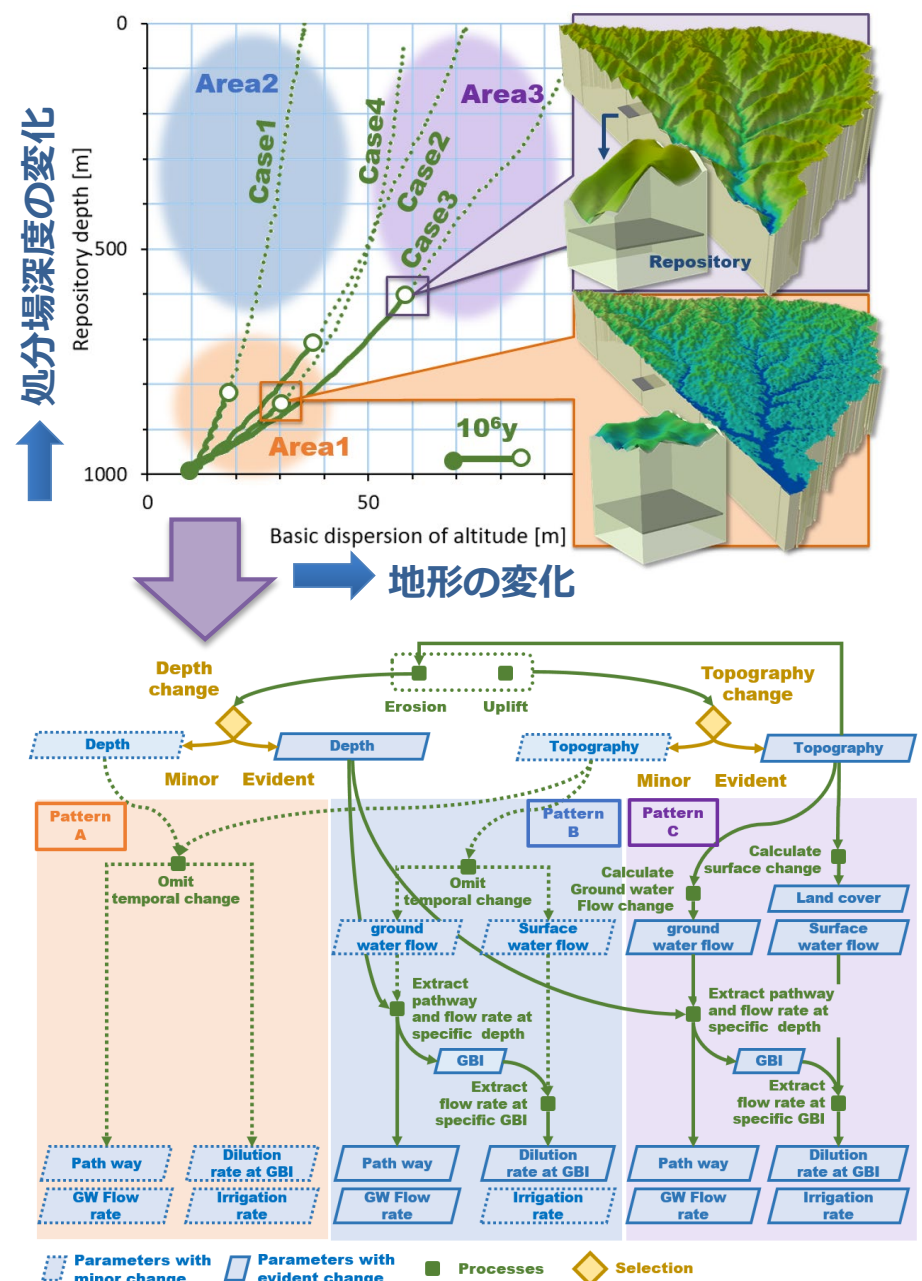


図1 隆起・侵食に起因する地形変化・深度変化のパターンに対する影響の伝搬経路

(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**

- 既存の生活圏被ばく線量評価モデル※を用いて、各核種の線量への換算係数に対して影響の大きなパラメータ(重要パラメータ)を抽出するため、各パラメータの設定範囲内でランダムにサンプリングした感度解析を実施。解析結果に対して、重回帰分析を行い重要パラメータを抽出(表1)
- 線量評価モデルにおけるパラメータの設定例として、処分サイト条件での評価が進められているスウェーデンにおけるパラメータ設定の考え方を調査(図1)

※: 加藤ほか(2019) JAEA-Data/Code2019-002, 2019

□ **意義/反映先**

- 抽出された重要パラメータについて、優先的にパラメータの設定範囲を見直すことで、評価の信頼性向上に反映。さらに、パラメータ設定の優先順位を示すことにより、パラメータ設定手法の構築に反映
- スウェーデンの評価事例等を参考に、わが国においてもサイト条件が特定された場合を想定し、標準的なパラメータ設定手法の構築に反映

表1 評価対象核種の線量評価における重要パラメータ

核種	パラメータ	単位	抽出された重要パラメータ	抽出されなかったパラメータ
Pu-233	濃縮水量	河川流量	栽培密度 (米)	ウェザリング率 (米, Pa)
	U-232	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	ウェザリング率 (米, U)
	U-233	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	年間浸透/流出量
	U-234	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	侵食速度
	U-235	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	年間浸透/流出量
	U-236	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)
	U-238	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)
	Np-237	河川流量	侵食速度	年間浸透/流出量
	Pu-238	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)
	Pu-239	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)
	Pu-240	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)
	Pu-241	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)
	Am-241	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	ウェザリング率 (米, Am)
	Am-242m	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)
	Am-243	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	侵食速度
	Cm-242	河川流量	農作物の摂取量 (米)	栽培密度 (米)
	Cm-243	河川流量	ウェザリング率 (米, Cm)	農作物の摂取量 (米)
	Cm-244	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	栽培密度 (米)
	Cm-245	河川流量	侵食速度	農作物への灌漑水 (米)
	Cm-246	河川流量	農作物への灌漑水 (米)	農作物の摂取量 (米)

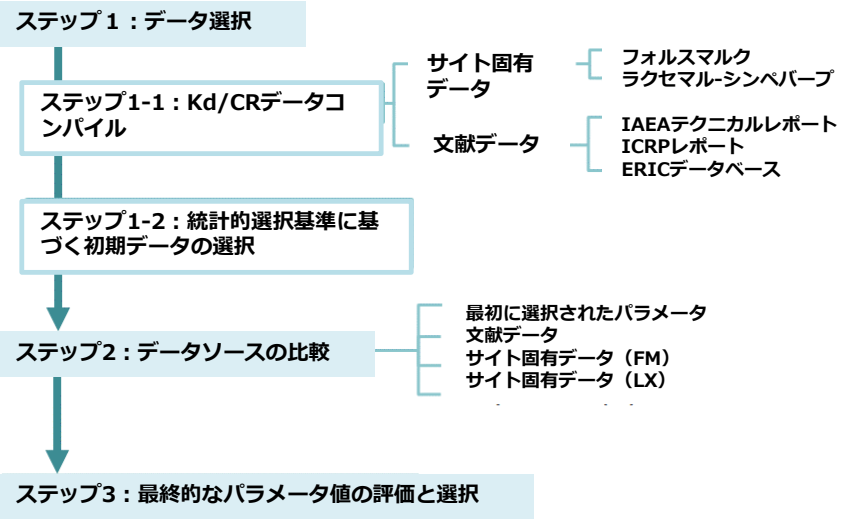
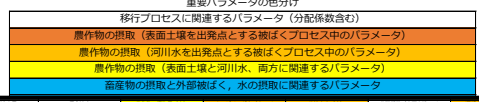


図1 スウェーデンにおける元素固有のパラメータの設定プロセス

(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

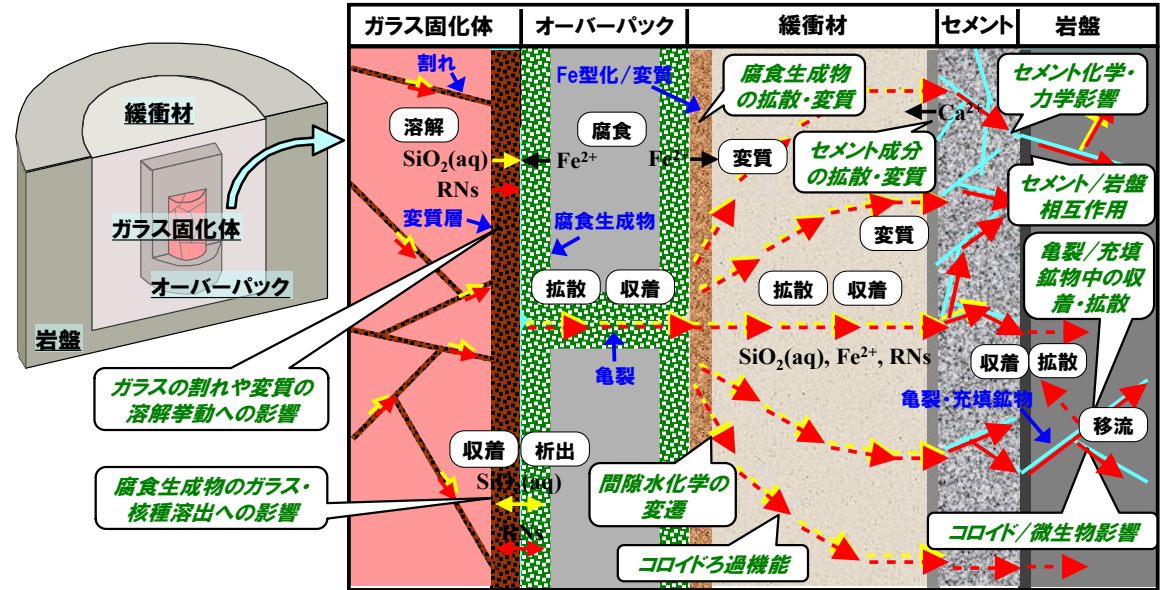
➤ 処分システムを構成するバリア材の相互作用による環境変遷に伴う核種移行への影響評価のため、オーバーパックやセメントとの相互作用に伴う緩衝材ベントナイトの間隙構造や核種移行特性の変化を定量化する評価モデルを提示：

- ①核磁気共鳴法やデンドリマーを用いた手法により、ベントナイト中の間隙特性 (サイズや連続性) の定量評価を実現
- ②分子動力学法により層間イオンと膨潤・層間水特性との関係を理論的に説明
- ③環境変遷に応じた核種収着・拡散特性の変化を評価可能なモデルを構築

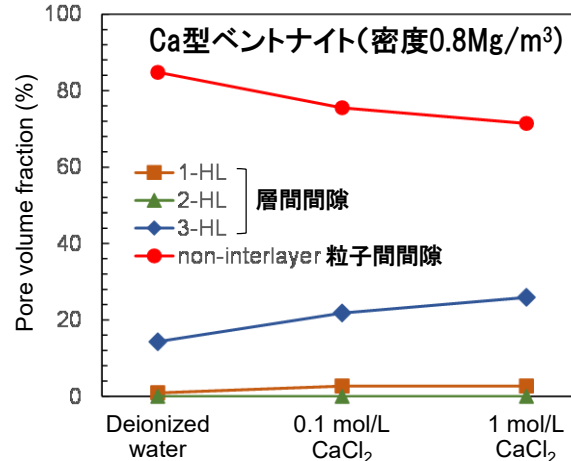
□ 意義 / 反映先

➤ 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

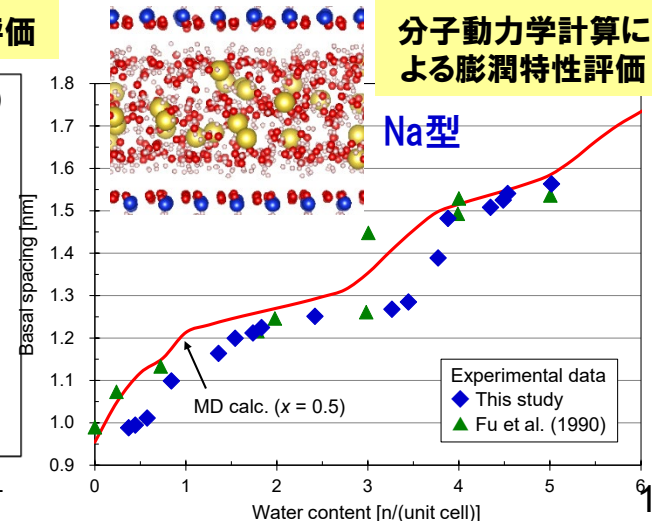
バリア材の相互作用によるニアフィールド長期変遷を反映した核種移行評価



核磁気共鳴法によるベントナイト間隙評価



分子動力学計算による膨潤特性評価



(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)

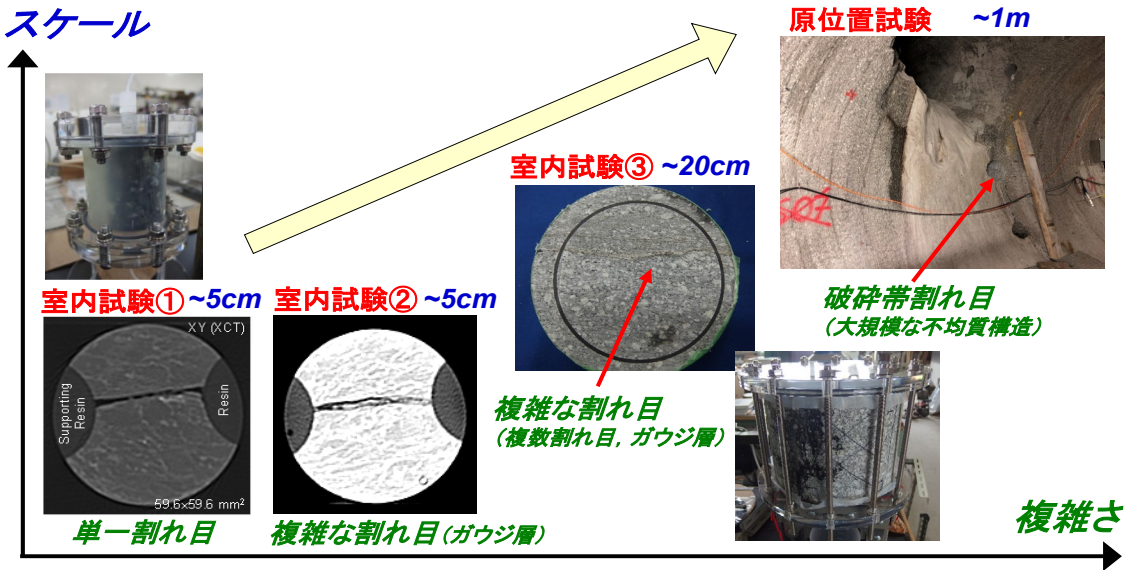
□ **成果**

- **結晶質岩**(グリムゼルの花崗閃緑岩)と**堆積岩**(幌延の泥岩)の割れ目部を対象に、単純・小規模から複雑・大規模試験へと、室内・原位置試験により、現実的な**核種移行モデル**を段階的に構築
- グリムゼルの岩石については、現在大型コア試料を用いた室内トレーサー試験を用いた室内トレーサー試験によって、モデルの高度化のための割れ目や移行経路の不均質性を把握
- 幌延の泥岩については、原位置トレーサー試験結果に対し、複雑な移行経路の推定とそれを反映した解析モデルの適用性を提示

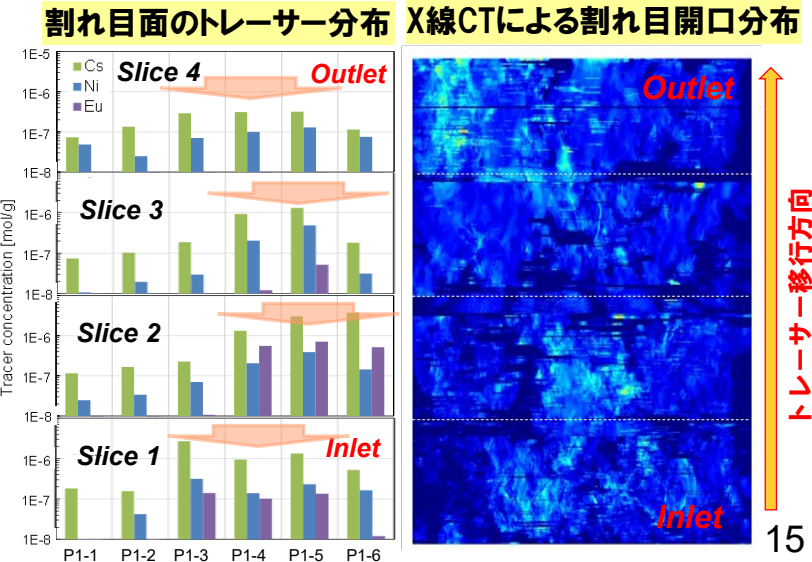
□ **意義／反映先**

- NUMOや安全規制における安全評価で必要となる、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

結晶質岩割れ目を対象とした現実的核種移行モデルの開発アプローチ



グリムゼルの大型コア試料 (~20cm) を用いた室内トレーサー試験の結果の例



(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)

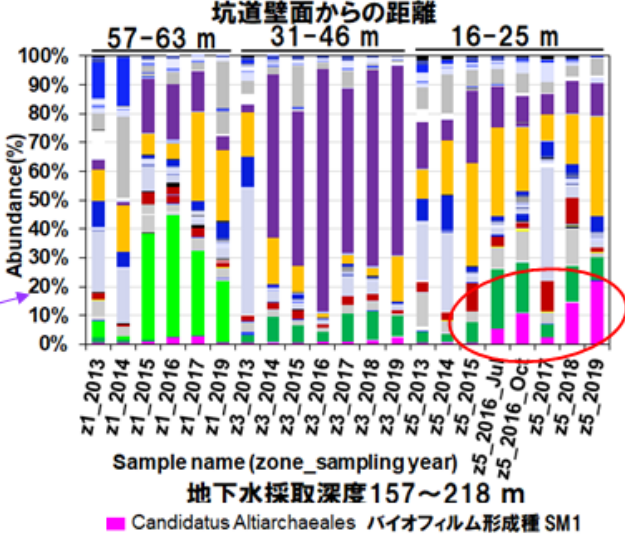
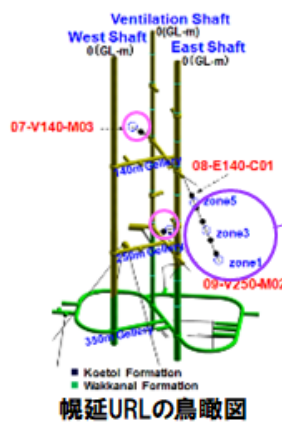
□ 成果

- 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

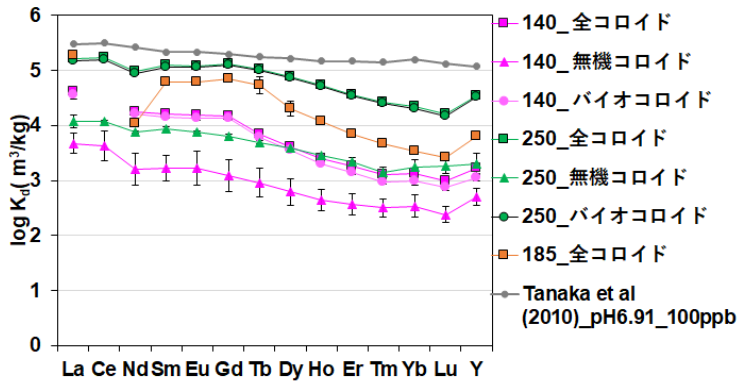
□ 意義 / 反映先

- 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



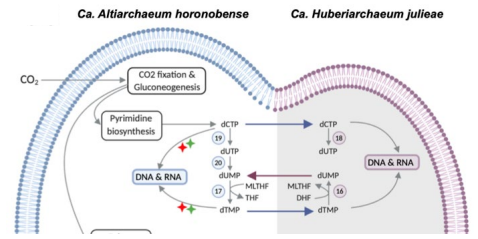
□地下施設建設過程における微生物種組成の経時変化から、バイオフィーム形成領域が徐々に拡大していることを確認

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

微生物のメタゲノム解析による代謝機能の解明研究事例



幌延地下に優占するバイオフィーム形成種について、共生菌の存在や共生機構としてCRISPR-Casシステムを利用した生物学的戦略を有することを解明した。処分環境における微生物生態系を理解する上で、優占種の宿主情報や生態戦略の解明は重要な情報。(デュースブルク=エッセン大学, カリフォルニア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

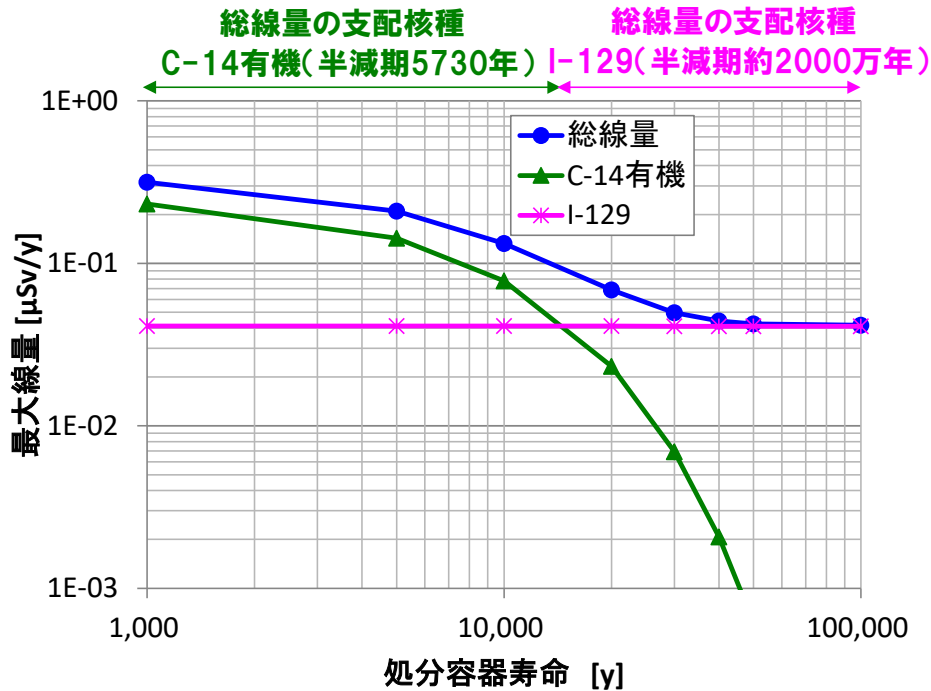
➤ 安全評価

- ・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

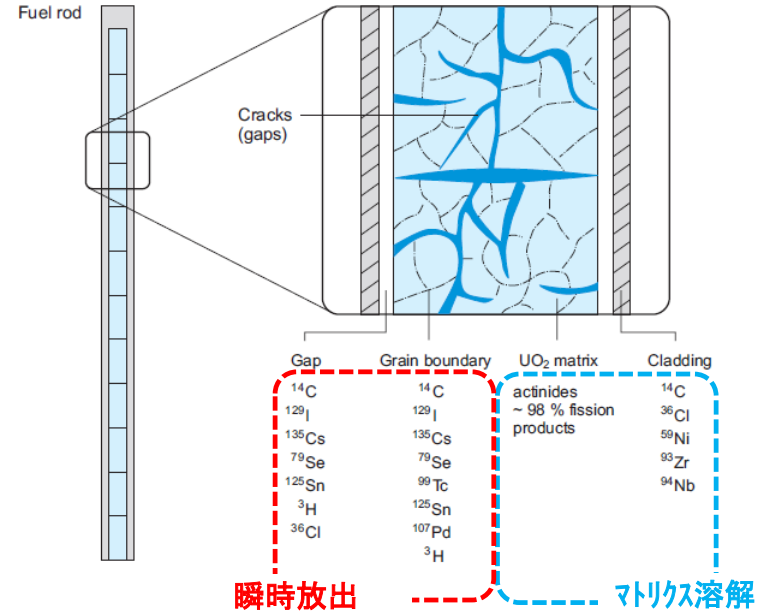
処分容器の閉じ込め期間の長期化と最大線量の低減効果との関係



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2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、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)に起因する実効増倍率の変化を評価し、それらの状態変遷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**UO₂の溶解現象**の理解を目的として、ペレット状に成型したUO₂の表面状態を分析するとともに、使用済燃料からの核種の瞬時放出率の評価を目的として、使用済燃料の浸漬試験に着手

(3) その他の代替処分オプションの調査:

超深孔処分システムで想定される移行経路をパターン化し、水理・物質移行解析により各パターンが生じる条件等を分析した結果、超深孔中および超深孔沿いの上方向の卓越的な移行により地表近くまで至るような状況の発生は限定的であるとの見通しを得た

(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、データを取得。
- 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。

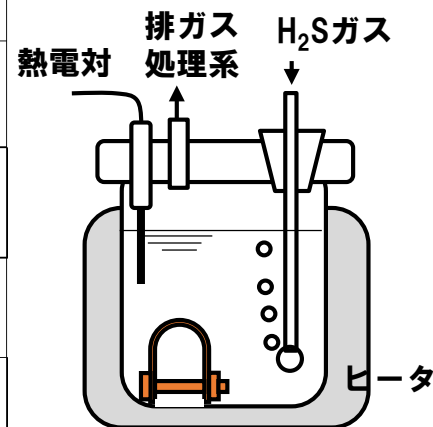
□ 意義/反映先

- 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

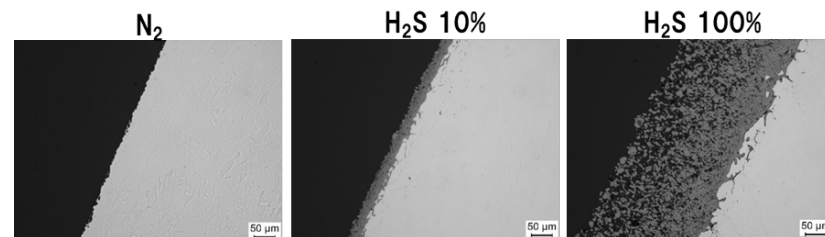
硫化物濃度をパラメータとした純銅の応力腐食割れ試験結果の例(80℃人工海水)

H ₂ S濃度	30日	60日
0%		
1%		
5%		
10%		
50%		
100%		

腐食試験のイメージ



- H₂S濃度が高いほど腐食生成物皮膜の厚さ大
- 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。



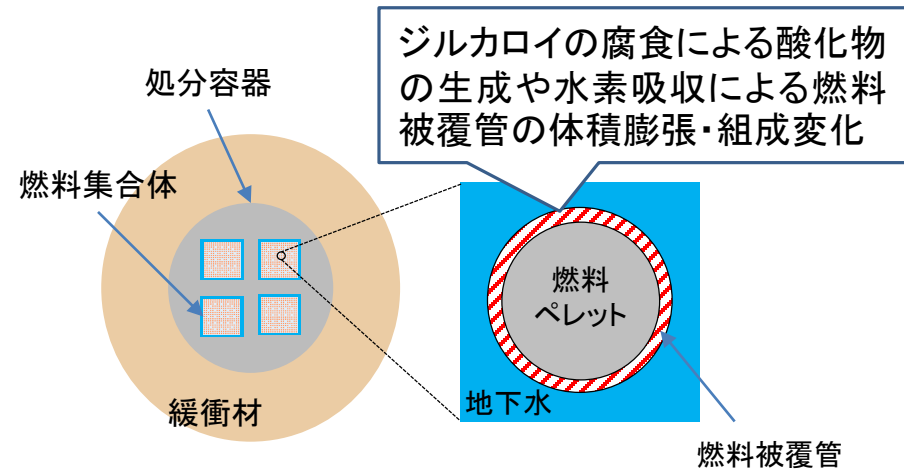
(1) 処分容器の挙動評価：処分後の臨界安全評価

□ 成果

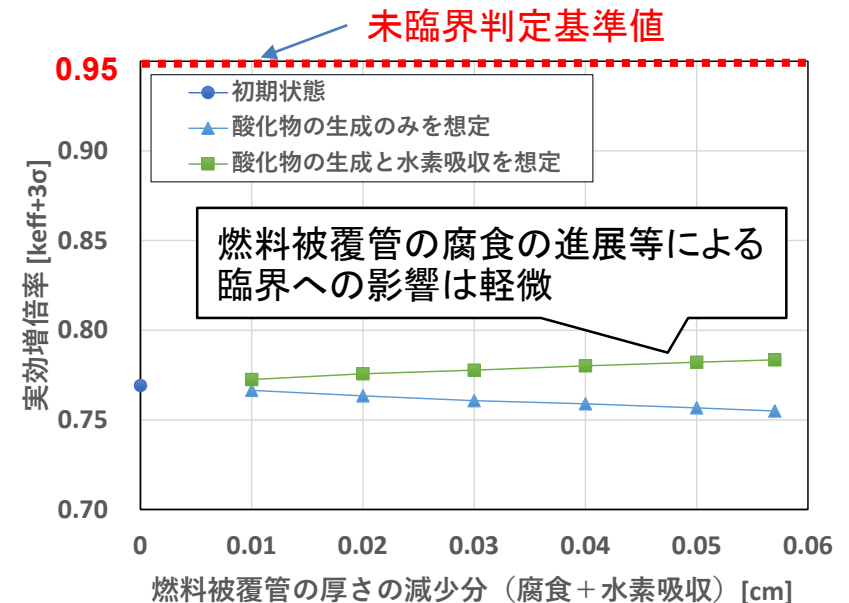
- 処分場閉鎖後において実際に起こり得る挙動のうち、燃料集合体の材料の腐食の進展が処分後の**再臨界**の可能性に及ぼす影響に関する知見を燃料被覆管の長期腐食挙動に関する国内外の文献調査等を通じて収集・整理。
- 上記調査結果等を参考に、将来起こり得る状態とその確からしさなども考慮し、燃料被覆管の腐食に伴う状態変化(ジルカロイの酸化物の生成、水素吸収の影響等)に起因する実効増倍率の変化を評価。
- その結果、実効増倍率は未臨界判定基準値より十分低く、臨界可能性に対する影響は軽微である見通しを得た。

□ 意義／反映先

- 過度に保守的とならない現実的で合理的な臨界安全評価手法の構築に向けて重要となる、処分後の臨界の可能性に関する状態変遷の抽出
- 想定される個別の状態変遷や複数の状態変遷の組合せに起因する実効増倍率の変化の知見蓄積



臨界解析で対象とした現象の例



臨界解析結果の例

(ジルカロイの腐食進展による実効増倍率の変化) 24

(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、**

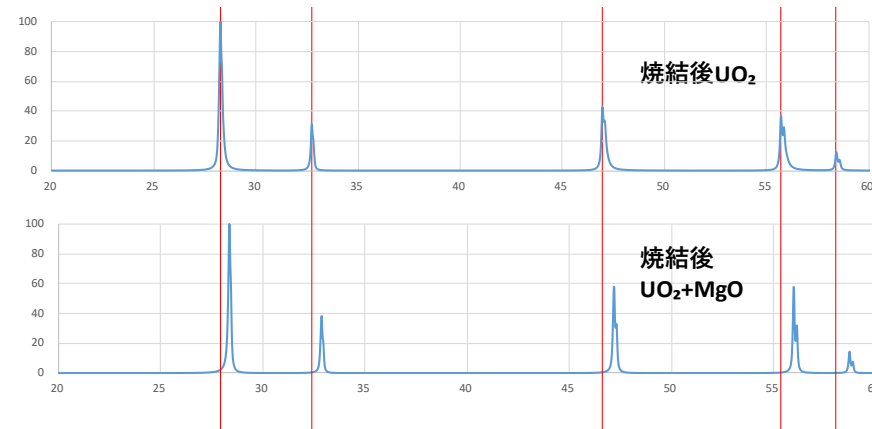
- マトリクス溶解指標物質であるMgを添加した(U,Mg)O₂固溶ペレットを調製し、溶解速度測定に着手
- 溶解速度測定に使用したUO₂ペレットの表面分析を実施し、UO₂の溶解挙動を詳細に考察
(原子力科学研究所にて実施)

➤ **使用済燃料からの核種の瞬時放出率の評価に向けて、実際の使用済燃料を用いた浸漬試験に着手**
(大洗燃料試験施設AGFにて実施)

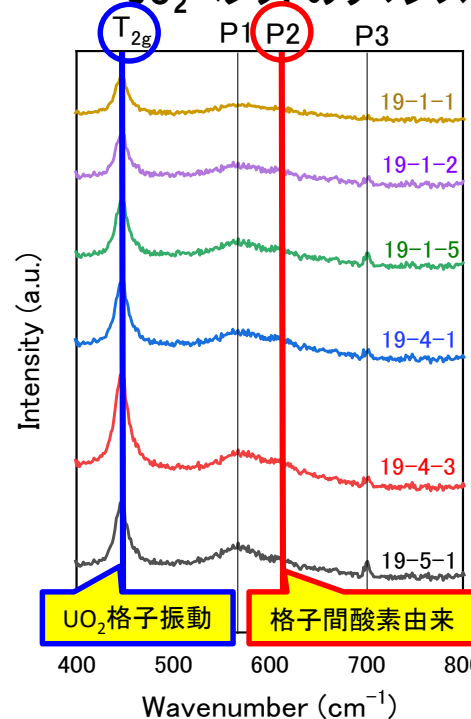
□ 意義／反映先

➤ **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**

調製した(U,Mg)O₂固溶ペレットのXRDスペクトル(左)とSEM-EDX画像(右)

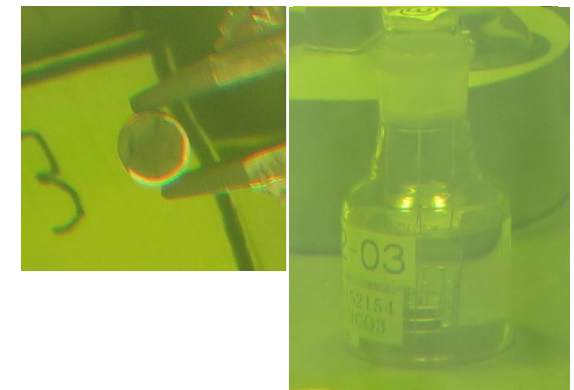


UO₂ペレットのラマンスペクトルとピーク強度比



試料	炭酸濃度	強度比 P ₂ /T _{2g}
19-1-1	50	0.181
19-1-2	10	0.153
19-1-5	0	0.108

燃料浸漬試験に使用した使用済燃料の切断面(左)と試験実施状況(右)

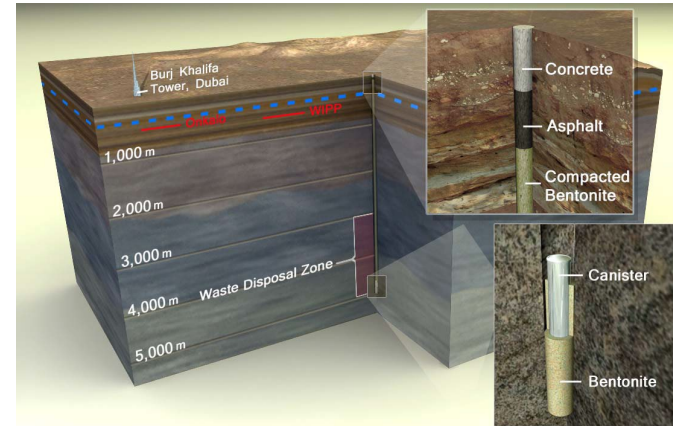


(3) その他の代替処分オプションの調査

超深孔処分の検討例（米国）

□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:超深水平孔処分での閉鎖後安全評価等)
- 超深孔処分相当深度のTHMC情報や掘削技術等を確認(既存の地質環境調査技術の適用範囲・制約の調査等)
- 超深孔処分の閉鎖後安全性に影響する因子の検討として、超深孔処分システム全体のスケールを対象に、**想定される移行経路をパターン化**し、水理・物質移行解析により各パターンが生じる条件等を分析。その結果、安全性への影響が大きくなる可能性のある超深孔中及び超深孔沿いの上方向の卓越的な移行により地表近くまで至るような状況の発生は限定的との見通しを得た。

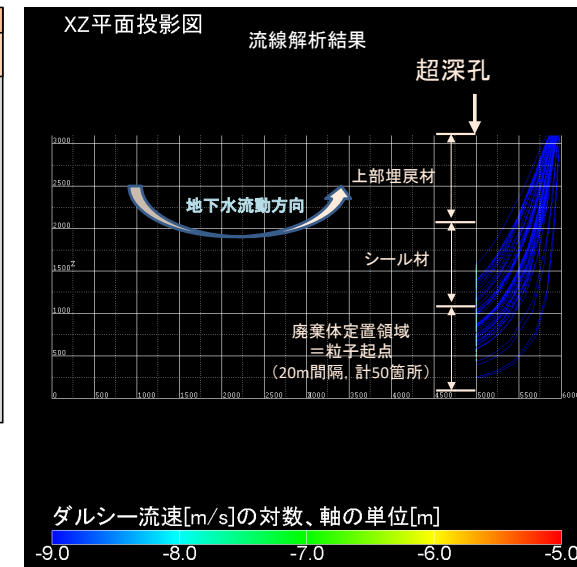
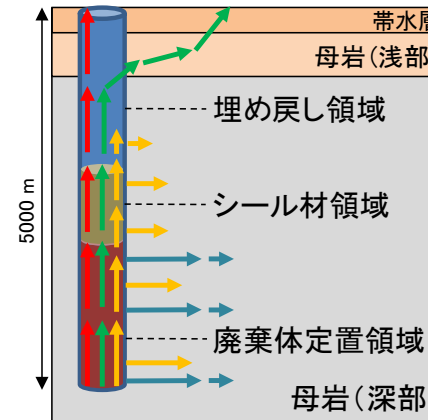


(SANDIA REPORT, SAND2012-7789, 2012)

□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

移行経路のパターン化と水理・物質移行解析の例



令和2年度論文等成果実績 (1/4)

掲載論文

【原子力学会和文論文誌】

- 杉田裕, 谷口直樹, 牧野仁史, 金丸伸一郎, 奥村大成: 使用済燃料直接処分での処分容器の耐圧厚さの検討(7/21掲載)
- 遠藤, 館, 石寺, 寺島: デンドリマーを用いた圧縮ベントナイト中のコロイドの拡散・ろ過挙動の評価手法の構築(掲載決定)

【原子力バックエンド研究】

- 阿部徹, 平野史生, 三原守弘, 本田明: 硝酸イオン化学的変遷挙動評価モデルの施肥由来の硝酸性窒素汚染事例への適用(6/15掲載)
- 高山裕介, 菊池広人: 塩水条件下での緩衝材の力学挙動に対する弾塑性構成モデルの適用性に関する研究(6/15掲載)
- 山口正秋, 加藤智子, 鈴木祐二, 牧野仁史: 地層処分における隆起・侵食影響評価のための地形・処分場深度変遷解析ツールの開発(12/15掲載)
- 北村, 赤堀, 長田: 使用済燃料直接処分における放射性核種の瞬時放出率設定手法の構築(12/15掲載)
- Kitamura, A. et al.: Methodology development and determination of solubility-limiting solid phases for a performance assessment of geological disposal of high-level radioactive and TRU wastes (12/15掲載)

【Crystals】

- Benbow, S., Kawama, D., Takase, H., Shimizu, H., Oda, C., Hirano, F., Takayama, Y., Mihara, M., Honda, A., A Coupled Modeling Simulator for Near-Field Processes in Cement Engineered Barrier Systems for Radioactive Waste Disposal (8/29掲載)

【International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences】

- Takayama, Y., Impact of non-linear elastic behavior on bentonite density evolution at the FEBEX (11/7掲載)
- Gens Antonio, Alcoverro Jordi, Radim Blaheta, Hasal Martin, Michalec Zdenek, Yusuke Takayama, Lee Changsoo, Lee Jaewon, Kim Geon Young, Kuo Chia Wei, Kuo Wan Jung, Lin Chung Yi: HM and THM interactions in bentonite engineered barriers for nuclear waste disposal (12/19掲載)

【ISME Journal】

- Meheust et al.: Aquatic Elusimicrobia are metabolically diverse compared to gut microbiome Elusimicrobia and some have novel nitrogenase-like gene clusters. (7/17掲載)

【Materials and Corrosion】

- Fujimoto S, Tsuchiya H, Ogawa S, Iida Y, Taniguchi N. Stress corrosion cracking of copper in swollen bentonite simulating nuclear waste disposal environment. . 2021;72:333-338. (1/5 掲載)

【Applied Clay Sci】

- Savage, D., Wilson, J., Benbow, S., Sasamoto, H., Oda, C., Walker, D., Kawama, D., Tachi, Y., Using natural systems evidence to test models of transformation of montmorillonite. (9/15掲載)
- Sugiura, Y., Ishidera, T., Tachi, Y. : Surface complexation of Ca and competitive sorption of divalent cations on montmorillonite under alkaline condition. (12/16掲載)
- Yotsuji, K., Tachi, Y., Sakuma, H., Kawamura, K.: Effect of interlayer cations on montmorillonite swelling: Comparison between molecular dynamic simulations and experiments. (掲載決定)

令和2年度論文等成果実績 (2/4)

【Microporous and Mesoporous】

- Ohkubo, T., Yamazaki, A., Fukatsu, Y., Tachi, Y. : Pore distribution of compacted Ca-montmorillonite using NMR relaxometry and cryoporometry: Comparison with Na-montmorillonite. (12/29掲載)

【J. Radioanal. Nucl. Chem】

- Kitamura, A., Yoshida, Y.: Prediction of thermodynamic data for radium suitable for thermodynamic database using an electrostatic model and correlation with ionic radii among alkaline earth metals. (1/4掲載)

【Earth and Space Chem】

- Francisco, P.C.M, Tachi, T.: Impacts of Si on Se (IV) immobilization on ferrihydrite: An in situ ATR-IR spectroscopic study. (11/18掲載)

【Internatioanl J. of Systematic and Evolutional Microbiology】

- Ueno, A., Tamazawa, S., Tamamura, S., Murakami, T., Kiyama, T., Inomata, H., Amano, Y., Miyakawa, K., Tamaki, H., Naganuma, T., Kaneko, K.: *Desulfovibrio subterraneus* sp. nov., a mesophilic sulfate-reducing deltaproteobacterium isolated from a deep siliceous mudstone formation. (掲載決定)

【Journal of Computer Chemistry】

- 木本・河村・牧野: 粗視化分子動力学法による水和モンモリロナイトの組織構造シミュレーション(12/10掲載)

投稿中論文(2021/2/22現在)

【Nature】

- Esser et al.・・・Amano, Y.・・・(17名): CRISPR-mediated resistance to archaeal episymbionts.

【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.

【Applied Clay Sci】

- Hirano, S., Nagaoka, T., Matsumoto, N., Amano, Y. : Microbial communities and carbon steel corrosion in compacted buffer materials composed of Kunigel V1 from Japan and silicate sand mixture at different dry densities from 1.0 to 1.6 g/cm³.
- Fukatsu, Y., Yotsuji, K., Ohkubo, T., Tachi, Y. : Diffusion of tritiated water, ¹³⁷Cs⁺, and ¹²⁵I⁻ in compacted Ca-montmorillonite: Experimental and modeling approaches.
- 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.

【J. Contaminant Hydrology】

- Soler et al.: Predictive modelling of a matrix diffusion experiment in gneiss at the ONKALO underground rock characterisation facility. Comparison between different teams, codes and approaches.

令和2年度論文等成果実績 (3/4)

投稿中論文(つづき)

【Computers and Concrete】

- Oda, C., Kawama, D., Shimizu, H., Seta, T., Benbow, S., Hirano, F., Takayama, Y., Takase, H., Mihara, M., Honda, A: Modeling of concrete degradation in a TRU waste repository by coupled non-linear processes

【Water Resources Research】

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

国際会議

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

- Kitayama, A. Taniguchi, N., Mitsui, S., Electrochemical behavior of carbon steel with bentonite/sand in saline environment, vol.72, issue1-2, pp. 211-217, Materials and Corrosion (Materials and Corrosion論文掲載1/5)
- Yusuke Ogawa, Satoru Suzuki, Naoki Taniguchi, Manabu Kawasaki, Hiroyuki Suzuki, Rieko Takahashi: Corrosion resistance of a cast steel overpack for high-level radioactive waste disposal in Japan, vol.72, issue1-2, pp. 52-66, (Materials and Corrosion論文掲載1/5)

【4th Asian Clay Conference (ACC-2020) (6/9 発表)】

- S. Anraku, H. Satoh, C. Walker, Y. Amano, A. Sakurai, M. Nakayama, Y. Tachi: In situ interactions of concretes with mudstones from Horonobe URL.
- Hu, Q., Wang, Q., Zhao, C., Tachi, Y., Fukatsu, Y. : Pore connectivity of clay materials implicated in fluid flow and chemical diffusion

【Clay Conference 2020 (要旨投稿)→開催延期(2021.6)】

- Fukatsu, Y., Yotsuji, K., Ohkubo, T., Tachi, Y. : Investigation on diffusion of $^{137}\text{Cs}^+$, $^{125}\text{I}^-$ and HTO in compacted Ca-montmorillonite by experimental and modelling approaches
- Sugiura, Y., Ishidera, T., Tachi, Y. : Competitive sorption of divalent cations onto montmorillonite under high pH condition

【JpGU-AGU 2020(要旨投稿7/12-16発表)】

- Francisco, P., Tachi, Y. : Impacts of Si on Se (IV) immobilization on ferrihydrite: An in-situ ATR-IR spectroscopic investigation
- Bateman, K., Amano, Y., Tachi, Y. : Reaction and alteration of mudstone with cement pore fluids

【PACIFICHEM2020(要旨投稿)→開催延期(2021.12)】

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

【ERICA-CASH II Final Conference(1/24発表)】

- Walker, S.C., Anraku, S., Sasamoto, H., Mihara, M: C(-A)-S-H gel solubility model development and its application to high content fly ash silica fume cement, January 24-27, 2021) (基調講演)

令和2年度論文等成果実績 (4/4)

国際会議(つづき)

【AGU Fall Meeting 2020(要旨投稿 12/1-17発表)】

- Francisco, P.C.M, Matsumura, D., Kikuchi, R., Ishidera¹, T., Tachi, Y.: Selenide [Se(-II)] retention and mobilization in anoxic, iron-rich environments: Impacts of iron phase precipitation and transformation
- Fukatsu, Y., Tachi, Y.: Investigation on solute transport in heterogeneous fracture of crystalline rock by flow-through test and micro X-ray CT
- Tachi, Y., Ito, T., Fukatsu, Y., Akagi, Y., Satoh, H., Hu, Q., Martin, A.J.: Realistic modeling approach for tracer migration and retention in fractured crystalline rocks from the Grimsel Test Site. (招待講演)
- Hu, Q., Wang, Q., Oware, P., Tachi, Y., Fukatsu, Y., Illvsky, J., Almer, J.: Quantifying isolated pore space in geological barrier materials

【Glass Conference 2020(要旨投稿:12/7-10, 16-18発表)】

- Iwata, H., Sekine, N., Mitsui, S.: Effects of steel overpack on aqueous alteration of vitrified high-level radioactive waste. (招待講演)

【3rd International Conference on Discrete Fracture Network Engineering, DFNE 2021, 発表予定】

- 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

国内学会

【第67回材料と環境討論会(10/28発表)】

- 長田柁平, 井上博之, 北山彩水, 土橋竜太, 圧縮ベントナイト中での銅電極のカソード分極への硫化物イオンの影響

【日本地球惑星科学連合大会:JpGU2021(6月発表予定)】

- 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

JAEA公開技術資料

- 佐藤 久, 澤田 淳, 高山 裕介:単一亀裂を対象とした亀裂の間隙構造データの取得技術の開発と亀裂内での透水・物質移行特性データの取得, JAEA-Research 2020-012 (公開済)
- 鈴木英明, 高山裕介:ニアフィールドにおける過渡期の熱-水-応力連成挙動に及ぼす緩衝材の密度変化の影響評価, JAEA-Research 2020-015 (公開済)
- 杉田裕, 菊池広人, 星野笑美子:幌延深地層研究計画で得られた掘削土を用いた埋め戻し材の特性試験, JAEA-Data/Code 2020-017 (公開済)
- 北村暁:JAEA-TDB-RN in 2020: Update of JAEA's Thermodynamic Database for Solubility and Speciation of Radionuclides for Performance Assessment of Geological Disposal of High-level and TRU Wastes, JAEA-Data/Code 2020-020(印刷中)