



令和元年度における個別研究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2年3月11日

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所 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～平成34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（平成31年4月1日～平成32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坑道を利用した試験や両深地層の研究施設計画で取得される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～平成34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（平成31年4月1日～平成32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。

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発

(1) 処分システムに関する工学技術の信頼性向上

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

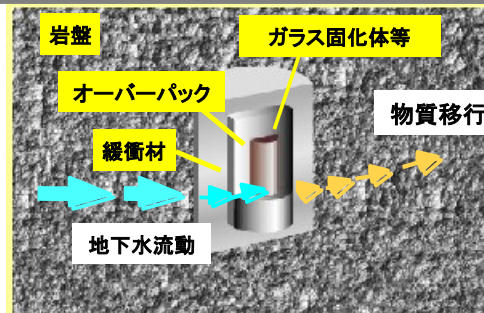
(2) 安全評価手法の高度化

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

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

令和元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、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

・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の加工方法を含む、基本特性把握(膨潤圧、透水係数等)のための評価手法を構築

・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; 1,874件
- 緩衝材基本特性データベース; 2,180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

・原位置試験データを活用した腐食モデルの適用性確認:

幌延URLにおける模擬オーバーパックの腐食データから、腐食深さの部位による腐食深さの違いを把握、また、観察された不均一腐食に適用するモデルの概念を例示

・熱-水-応力連成(3連成)挙動の解析評価:

これまで開発してきた3連成解析コードを用いて、FEBEXプロジェクトにおける原位置試験での約18年間の計測データを活用した再現解析を実施し、長期の計測データに対しても温度、相対湿度、全応力等のTHM連成挙動を概ね再現できることを確認

令和元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:

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・侵食の程度、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を構築

・地下水環境変化・核種移行の解析技術の整備:

海水準変動や隆起・侵食が処分場周辺の地下水環境変化や核種移行挙動に与える影響を定量的に評価する手法を整備

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:

マトリクス部と割れ目部を対象に、それぞれの不均質性を考慮した核種移行モデルを高度化し、その原位置試験等への適用性を提示

・コロイド・有機物・微生物影響評価手法:

幌延URL等を活用し、地下環境における全コロイド(無機/有機)のうちバイオコロイドへの希土類元素の収着特性データの取得、バイオフィルムの分布とその形成の潜在能力や収着特性についての評価手法の提示

・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); 1,772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

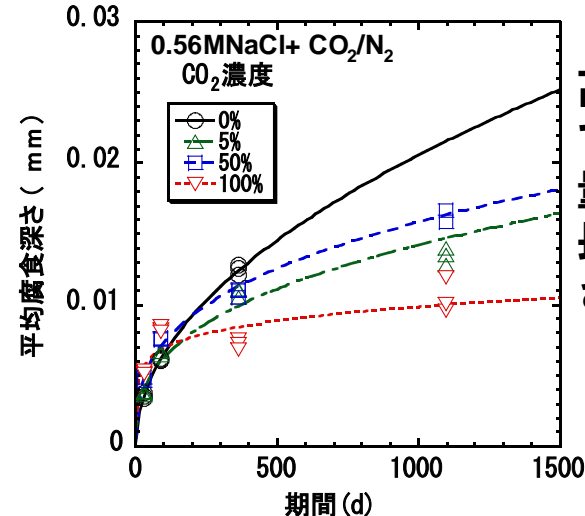
□ 成果

【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した。今後、これら最新の実験データを反映してデータベースを更新予定。

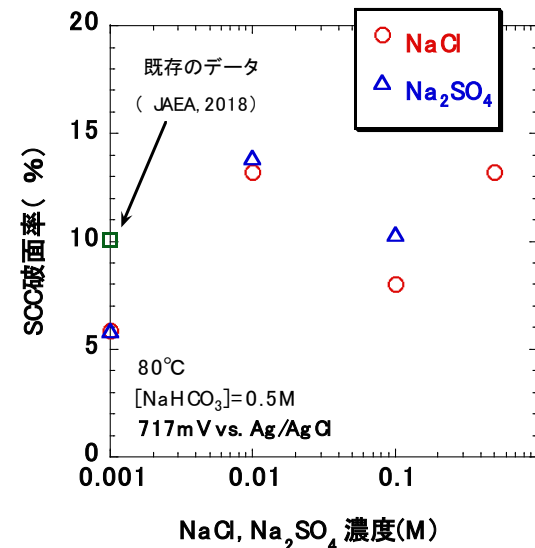
□ 意義 / 反映先

- 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
- 初期の地下水の浸潤や、ガラス固化体の発熱とそれによる塩濃縮等の環境条件が過渡的な期間における地下水水質の変化や地下水化学の不確実性への対応



高炭酸ガス環境では初期の腐食量は大きいですが、長期的には抑制される。

炭素鋼の応力腐食割れ (SCC) 感受性に及ぼす温度と炭酸塩濃度の影響



NaCl, Na₂SO₄濃度がSCC感受性に及ぼす顕著な影響は認められない。

炭酸塩溶液中の炭素鋼の応力腐食割れ (SCC) 感受性に及ぼすNaCl, Na₂SO₄濃度の影響

(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

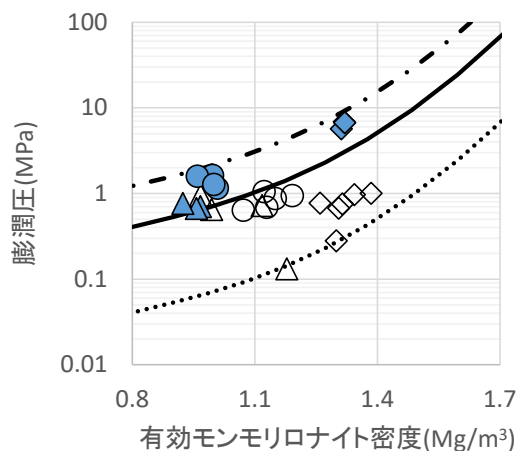
【セメンテーションの影響を受けていると推察されるベントナイト原鉱石の膨潤圧/透水係数】

➤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を選定し、**試料の加工方法**を含む、基本特性把握(膨潤圧、透水係数等)のための評価手法を構築。セメンテーションの影響を受けていると推察される原鉱石は、膨潤圧は低下、透水性は変化しない可能性を示唆する結果を得た。

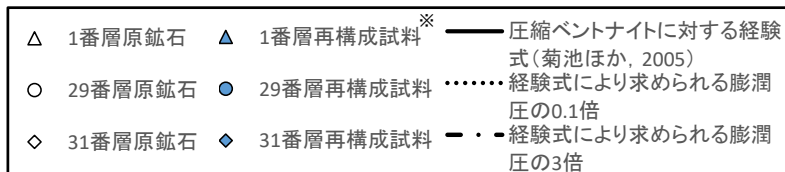
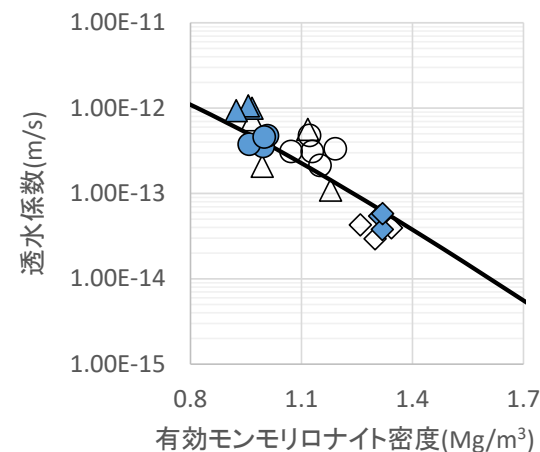
□ 意義／反映先

- 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
- 処分施設の長期挙動評価への反映

原鉱石の膨潤圧試験結果



原鉱石の透水試験結果



※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

(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:

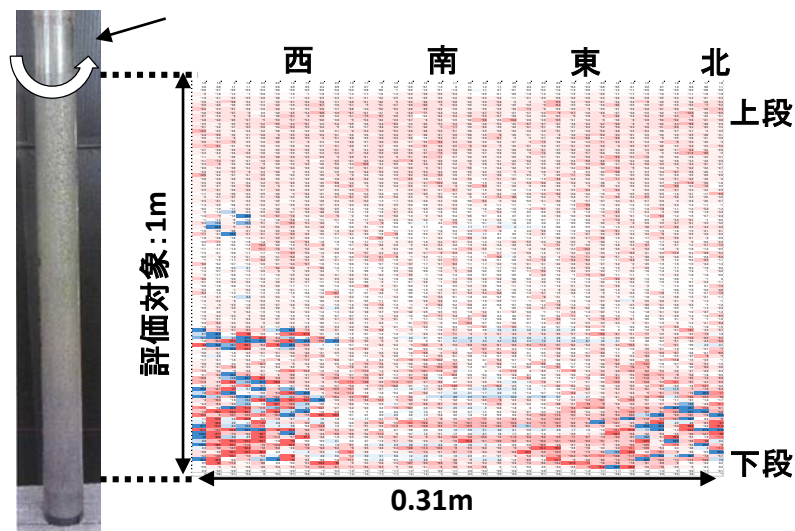
原位置試験データを活用した腐食モデルの適用性確認

□ 成果

- 幌延URLにおけるオーバーパック腐食試験で得られた模擬オーバーパックの腐食データの解析や緩衝材中の環境条件に関する調査を実施し、腐食深さの部位による腐食深さの違いを把握するとともに、模擬オーバーパック表面への酸素供給速度の違いの観点から今回観察された不均一腐食に適用するモデルの概念を例示した。

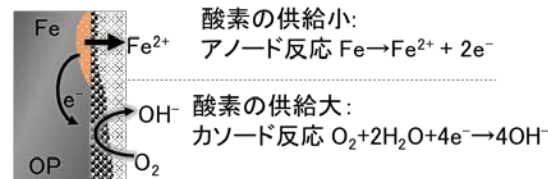
□ 意義/反映先

- 原位置での試験で得られた腐食データに基づいてオーバーパックの不均一腐食挙動に関して工学規模の評価事例を提示。

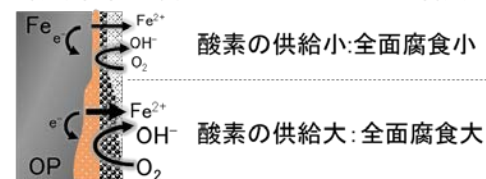


幌延URLでの原位置試験に用いた模擬オーバーパックの腐食深さ分布の展開図 (赤色ほど腐食量大)

- 酸素供給速度の違いによる腐食セル形成 (マクロセル腐食)



- 酸素供給速度の違いに対応した全面腐食の進展



模擬オーバーパックにおける不均一腐食モデルの概念

(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:

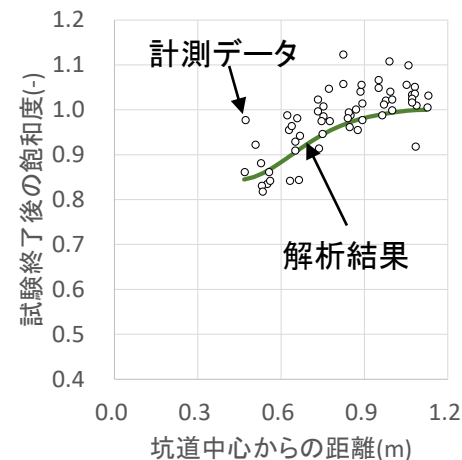
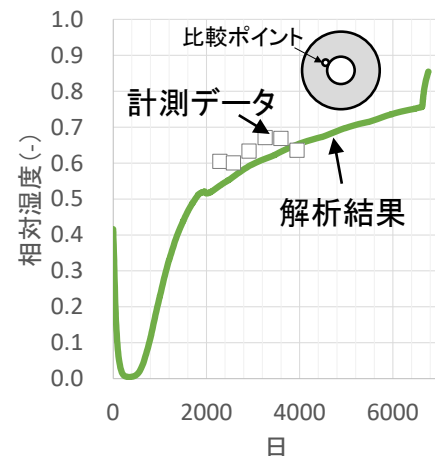
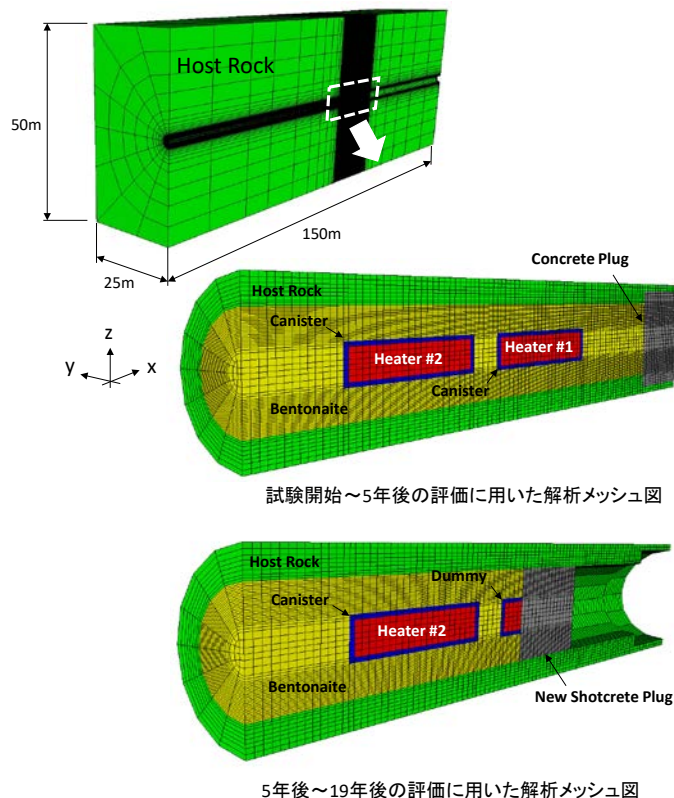
熱-水-応力連成(3連成)挙動の解析評価

□ 成果

- これまで開発してきた3連成解析コードを用いて、FEBEXプロジェクトにおける原位置試験での約18年間の計測データを活用した再現解析を実施した。幌延人工バリア性能確認試験等と比較してより長期の計測データに対しても温度、相対湿度、全応力等のTHM連成挙動を概ね再現できることを確認。

□ 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連成挙動評価手法を整備
- 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情報提供や核種移行解析のための初期条件の提示に反映



FEBEXプロジェクトにおける原位置試験の再現解析結果例
(相対湿度と水分飽和度の比較)

(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:

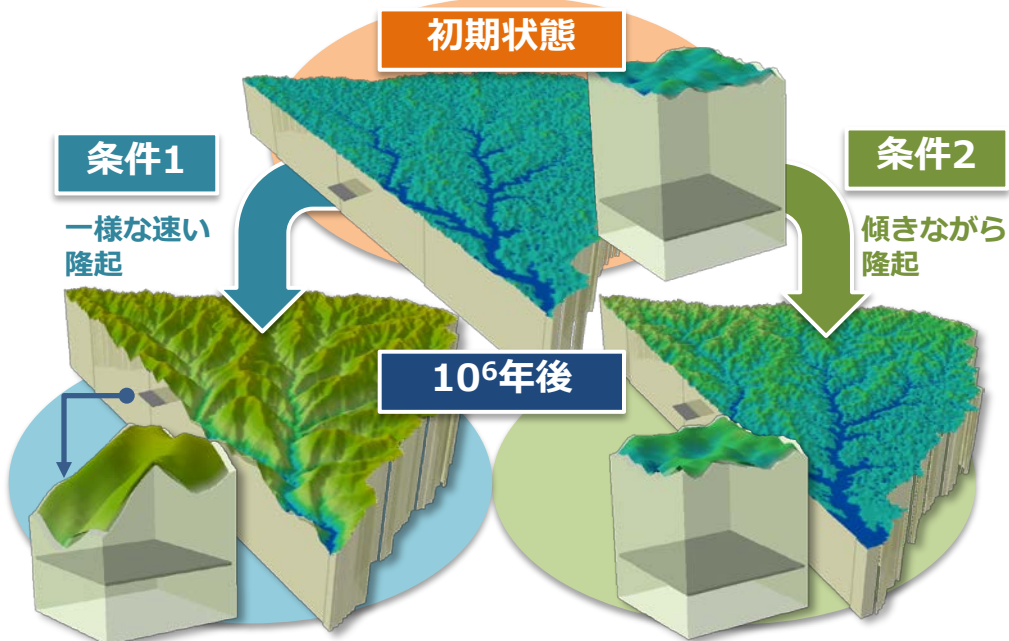
隆起・侵食を考慮した安全評価手法の開発

□ 成果

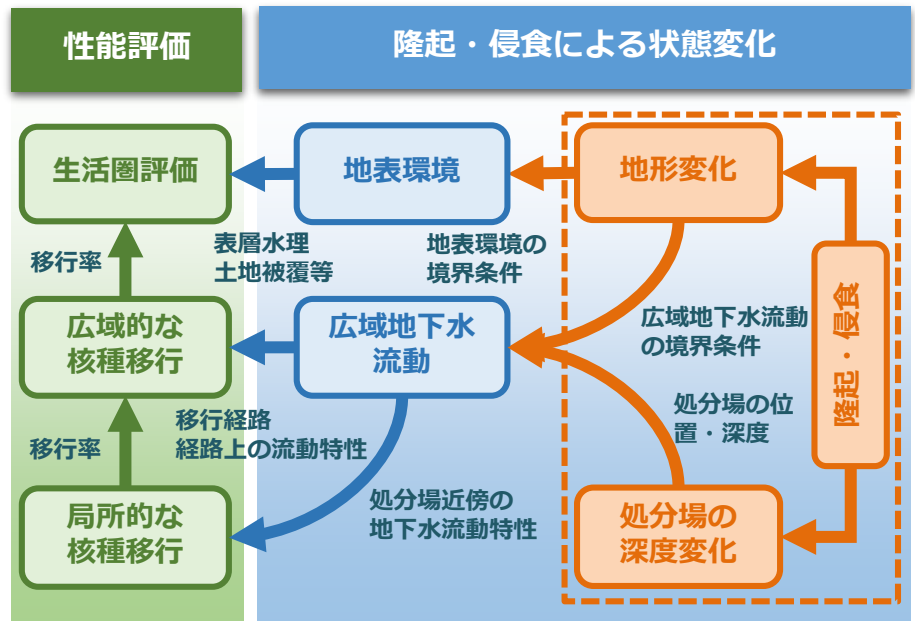
- 隆起・侵食による地形および処分場深度の時間変化を、初期条件の地形、隆起・侵食の程度、処分場の位置等の条件を変えて迅速に計算できるツールを構築。
- 本ツールにより、上記の条件の想定に応じた地形と処分場深度の時間変化の推定、条件が異なる場合の違いの比較等が可能(右上図)。

□ 意義／反映先

- 想定するサイトでの隆起・侵食の影響を考慮した核種移行評価や生活圈評価を行うための一連の流れ(右下図)について、その起点となる地形と処分場深度の時間変化の評価手法を整備。
- 条件が異なる場合の比較が容易に行えることによる、地形と処分場深度の時間変化への影響が大きい条件の効果的な抽出、及びサイトの調査での留意点の抽出等への反映。



地形変化・深度変化の計算例



構築したツール

隆起・侵食の影響を評価するための一連の流れ

(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:

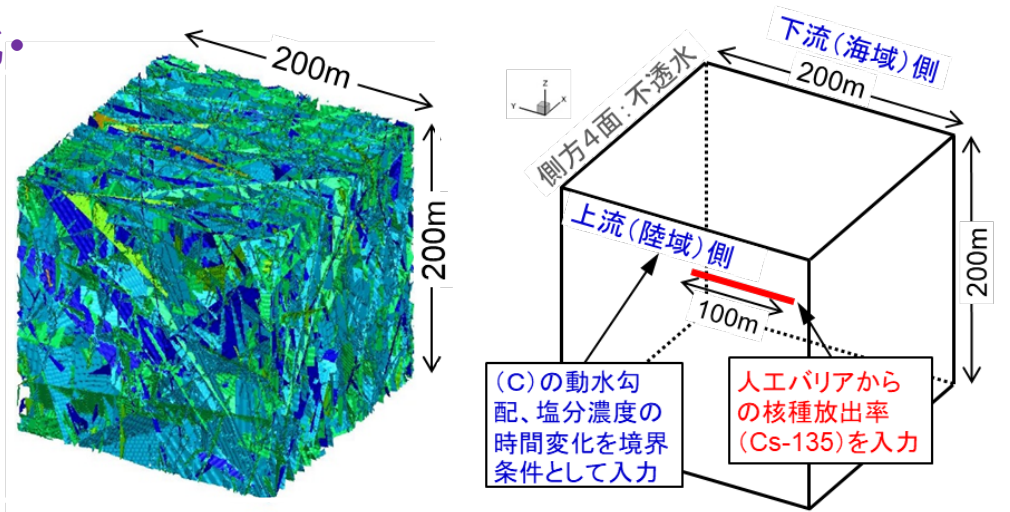
亀裂性媒体の特徴を考慮した地下水環境変化・核種移行の解析技術の整備

□ 成果

- 数十キロメートルの広域スケール、坑道周辺のブロックスケールを対象に、海水準変動や隆起・侵食が処分場周辺の地下水環境の変化に与える影響を定量的に評価する手法を整備
- 地下水環境の変化を、核種移行評価に必要な情報である処分場周辺の地下水流速や塩分濃度の経時変化などの情報に基づき4種類のパターンに分類
- それらの情報に基づき、処分場周辺におけるブロックスケールを対象とした亀裂ネットワークモデルに適用し、地下水環境の変化が花崗岩などの亀裂性媒体中の核種移行挙動に与える影響を考慮した解析手法を整備

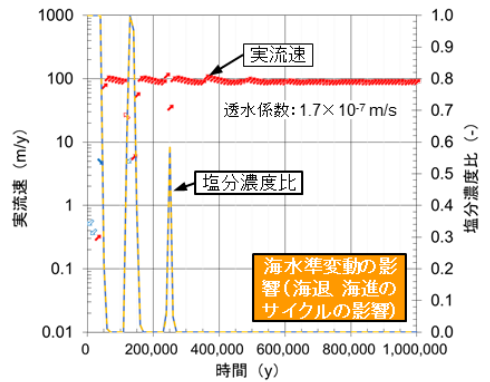
□ 意義 / 反映先

- 沿岸部の地下水環境の変化を、花崗岩などの亀裂性媒体の特徴を考慮して評価することの重要性を提示
- 沿岸部の地下水環境の変化とそれに応じた処分坑道周辺の三次元のブロックスケールの核種移行挙動の評価手法を整備

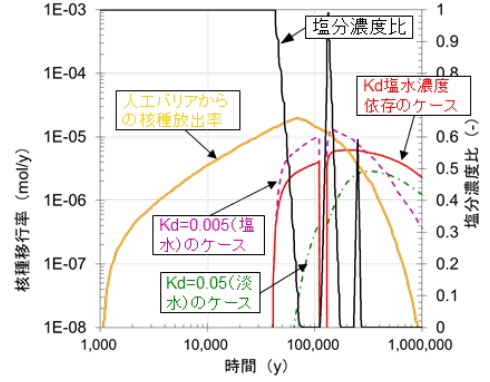


(a) 亀裂部とマトリクス部の二重空隙モデルの例

(b) 外側・内側境界条件



(c) 広域スケールの解析から求めた実流速、塩分濃度比の時間変化



(d) 核種移行解析結果の例 下流(海域)側への核種移行率

参考文献: 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所 (2018), 沿岸部処分システム高度化開発 平成27年度~平成30年度取りまとめ報告書

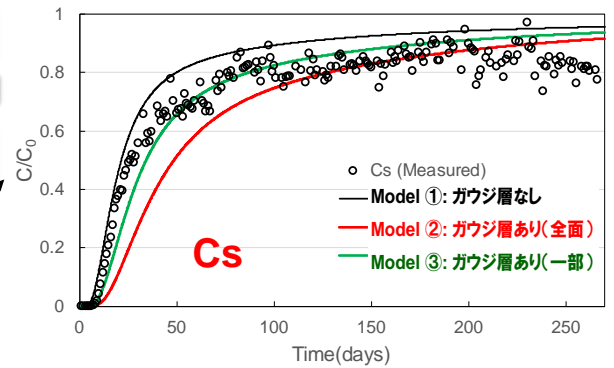
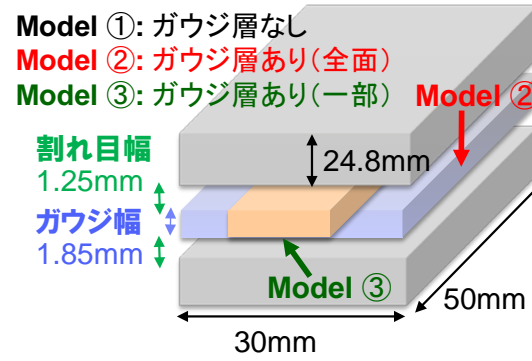
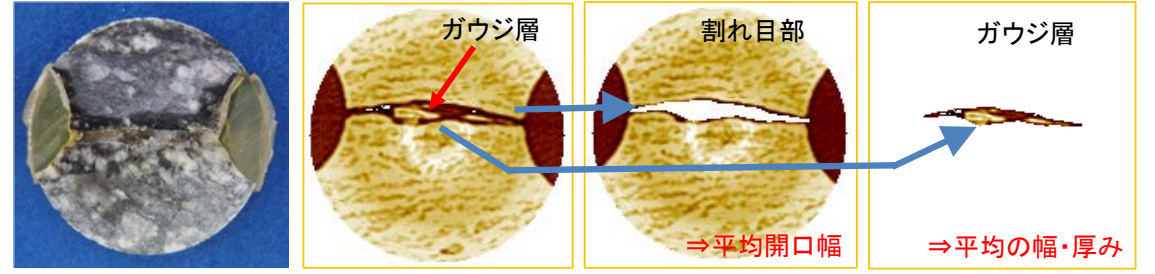
(2) 安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

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

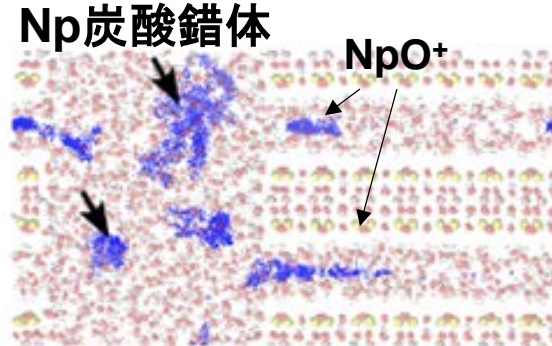
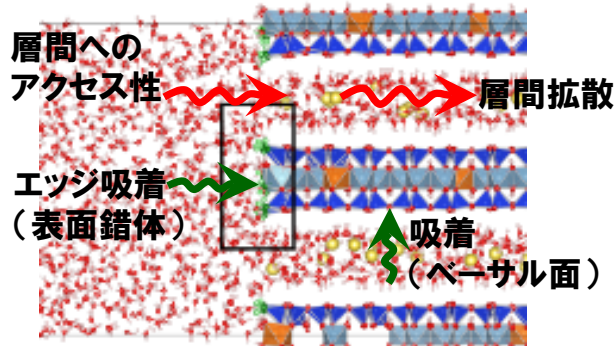
□ 成果

- 結晶質岩(スイスグリムゼルの花崗閃緑岩)と堆積岩(幌延の泥岩)のマトリクス部と割れ目部を対象に、それぞれの不均質性を考慮した核種移行モデルを高度化し(右上図は割れ目中のガウジの存在状況とその収着効果を考慮したモデル)、その原位置試験等への適用性を提示
- 緩衝材ベントナイトや岩石中の粘土層間を含む核種拡散モデルの高度化に資するため、分子動力学計算や第一原理計算によるナノスケールでの核種移行メカニズムを解明(右下図は粘土中のアクチノイド炭酸錯体の移行評価例)

より複雑な性状のグリムゼルの岩石割れ目中の核種移行モデルの高度化



分子動力学計算によるNpイオン・炭酸錯体の粘土層間へのアクセス性評価



□ 意義／反映先

- 今後の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(地質環境やバリア変遷影響)へ適用可能な核種移行モデルとデータベースを提示

(2) 安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

2) 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発： コロイド・有機物・微生物影響評価手法

□ 成果

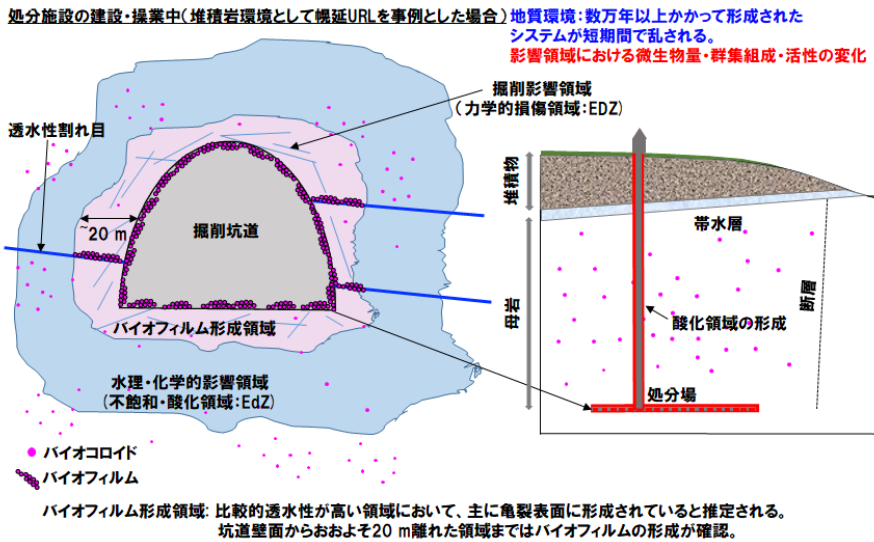
- コロイド・有機物・微生物の影響評価に係る室内および原位置でのデータ取得(主に幌延)と、核種移行への影響モデルの構築と適用性評価
- 幌延URLを活用し、地下環境に分布する地下水を対象として、全コロイド(無機/有機)のうちバイオコロイドへの希土類元素*の収着特性データを取得
- 幌延を事例として、地下環境におけるバイオフィルムの分布とその形成の潜在能力、収着特性について評価手法を提示し、核種移行解析に必要な収着特性データ等を整備

*アクチノドのアナログ元素として使用

□ 意義／反映先

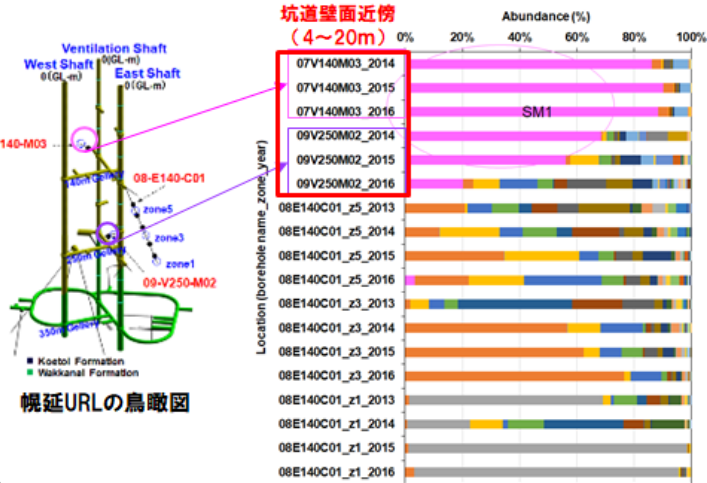
- 実際の原位置条件への適用性を念頭において、室内および原位置におけるデータ取得手法を構築するとともに、核種移行への微生物等の影響評価プロセスのモデル化・評価手法を提示

ニアフィールド領域におけるバイオフィルム形成領域の概念図



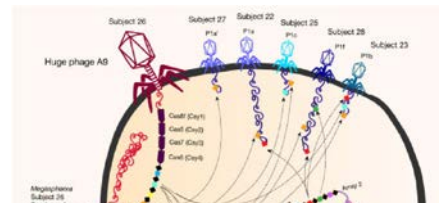
□微生物のDNA解析、顕微鏡観察、現存量調査等の結果から、バイオフィルム形成種(SM1)は坑道壁面近傍約20 mの範囲に分布することを確認

幌延URLにおけるバイオフィルム特性調査

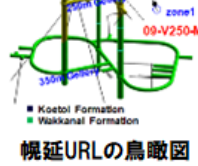


rnS3遺伝子に基づくバイオフィルム形成種SM1の空間分布と経時変化
バイオフィルムによる核種収着効果を考慮した核種移行モデルに反映させるためのデータベースを整備

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



巨大なゲノムサイズのバクテリオファージを幌延URLからも発見し、これらは地球上の様々な環境に分布すること、新しいCRISPR-Casシステムによる生物学的戦略を有することを示した。
処分環境における微生物生態系を理解する上で、ウイルスの宿主情報や生態戦略の解明は重要な情報。
Al-Shayeb et al. (2020) Nature (カリフォルニア大学との共同研究成果) 13



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 (1/2)

■ 「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 (2/2)

【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)
- 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広範囲に実施し、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）

令和元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を実施しデータを拡充

- 処分後の臨界安全評価:

使用済燃料や処分容器等の材料の腐食やそれに伴う変形等の状態変遷の臨界可能性に対する影響評価のうち、腐食膨張の影響、鉄イオンの移行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 UO_2 の溶解速度のデータ取得のうち、ペレット状に成型した UO_2 の溶解速度に及ぼす全炭酸濃度(IC)やペレット密度の影響に関するデータを拡充

(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を対象とした水理・物質移行評価のためのモデル構築のうち、母岩中での透水性の不均質性等の影響評価に重点をおいたモデルを構築し、透水性の不均質性の状況に応じて優先的な物質移行経路が大きく異なる可能性を例示

(1) 処分容器の挙動評価：処分容器の長寿命化

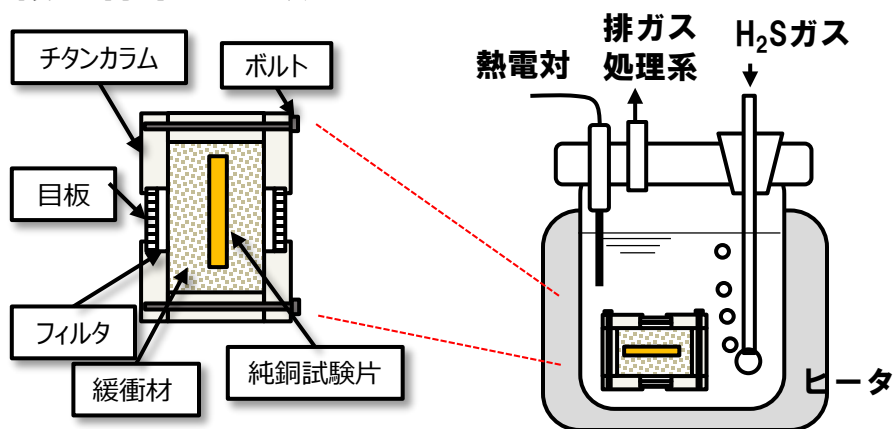
□ 成果

- 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ものの、緩衝材共存下では硫化物による影響が緩和されること等を確認。

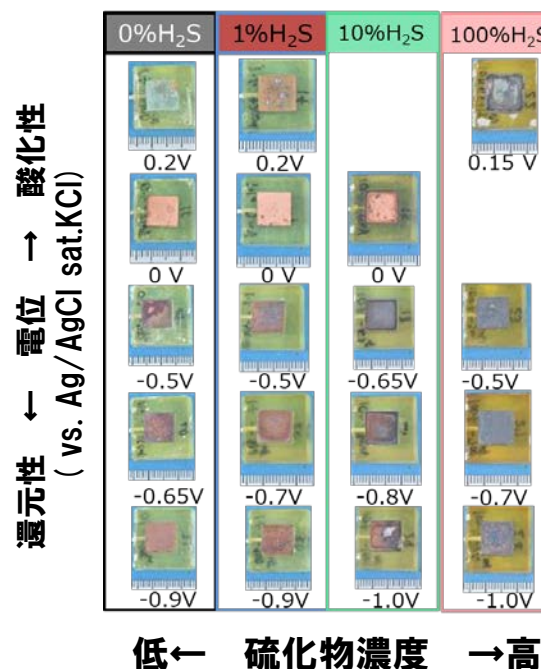
□ 意義/反映先

- 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

緩衝材中の試験カラム 腐食試験のイメージ



硫化物濃度をパラメータとした緩衝材中での純銅の腐食試験結果の例（80℃人工海水）



- H₂S濃度1%以下では全体的にH₂S濃度0%との腐食挙動の違いは小。
- H₂S濃度10%以上では黒灰色の皮膜（硫化銅）形成領域が拡大。

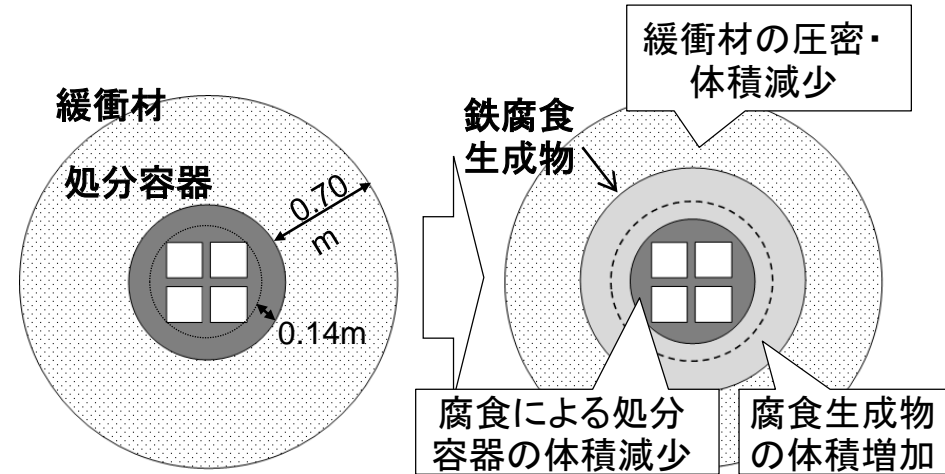
(1) 処分容器の挙動評価：処分後の臨界安全評価

□ 成果

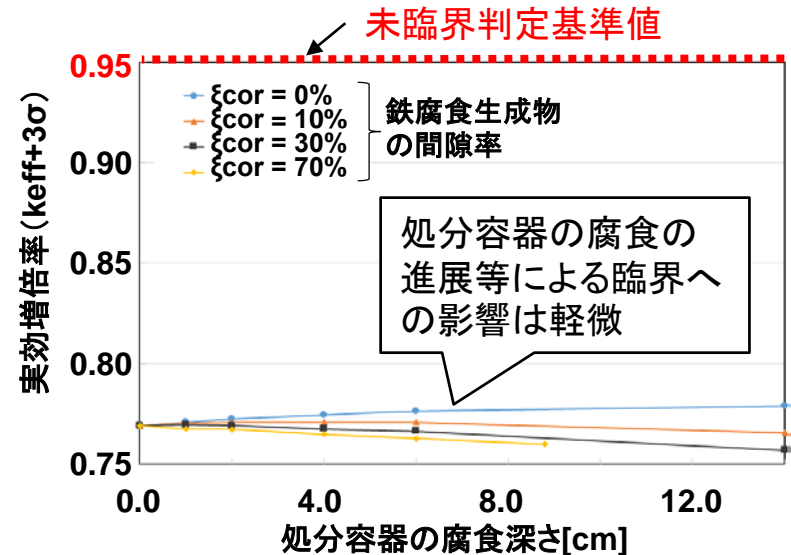
- 使用済燃料や処分容器等の材料の腐食やそれに伴う変形等の、処分場閉鎖後において実際に起こり得る挙動が処分後の再臨界の可能性に及ぼす影響に関する知見を、臨界安全評価の海外事例等の調査を通じて収集・整理。
- 上記の調査結果等を参考に、将来起こり得る状態とその確からしさなども考慮し、炭素鋼処分容器の腐食に伴う状態変化(腐食膨張の影響、鉄イオンの移行の影響等)に起因する実効増倍率の変化を評価。
- その結果、処分容器の腐食の進展とそれに伴う周辺材料の形状等の変化による影響を考慮しても実効増倍率は未臨界判定基準値より十分低く、臨界可能性に対する影響は軽微である見通しを得た。

□ 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係る状態変遷の抽出
- 想定される状態変遷に起因する実効増倍率の変化の知見の蓄積



予備的な臨界解析で対象とした現象の例
(左:初期状態、右:状態変化後)



臨界解析結果の例(腐食進展による実効増倍率の変化)

(2) 使用済燃料の挙動評価

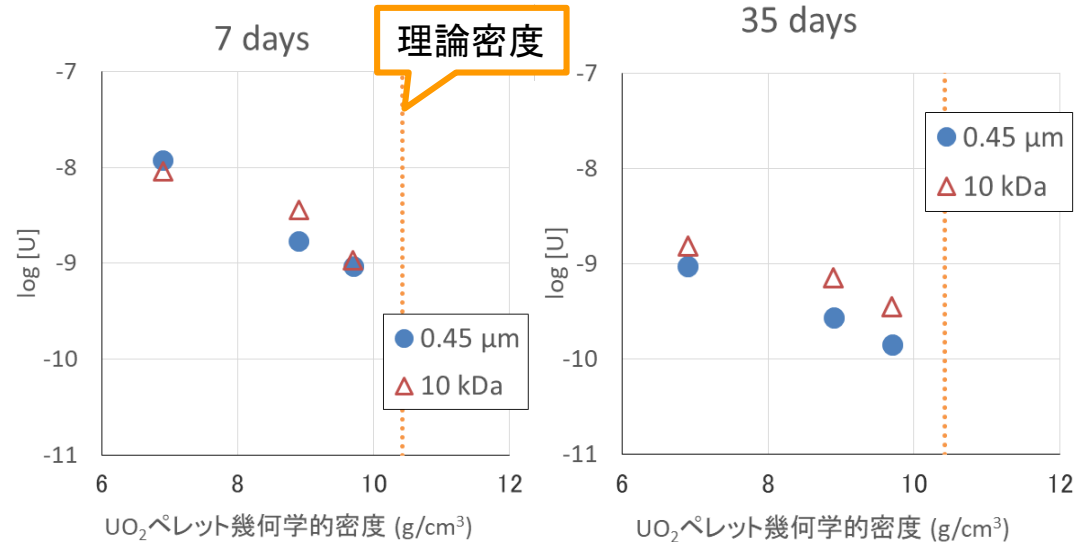
□ 成果

- 炭酸共存下において、ペレット状に成型した UO_2 の溶解速度測定を実施し、溶解速度に及ぼす全炭酸濃度(IC)やペレット密度の影響に関するデータを取得
- 炭酸共存下において、非晶質 UO_2 を溶解度制限固相とするウラン溶解度測定を実施し、溶解度データを取得
- 使用済燃料からの核種の瞬時放出率の評価のために、実際の使用済燃料を用いる浸漬試験の準備を実施(試験器具の設計、 H_2O_2 定量分析に関する予備的試験等)

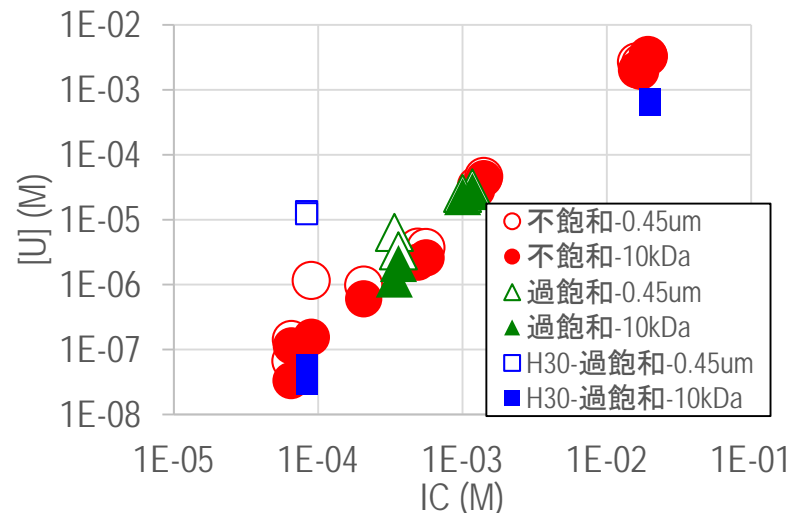
□ 意義／反映先

- 高炭酸条件における使用済燃料からの放射性核種の長期溶解および瞬時放出に関する挙動評価の信頼性向上

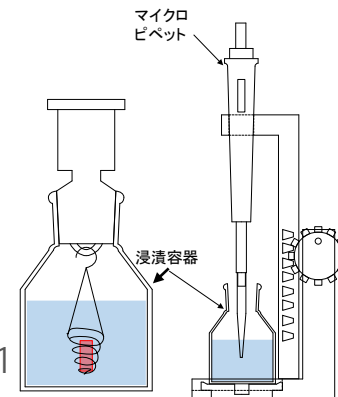
異なるペレット密度での UO_2 の溶解速度試験における溶存ウラン濃度の時間変化の例



非晶質 UO_2 溶解度の無機炭素濃度依存性



ホットセル内で使用する試験器具の設計例



(3) その他の代替処分オプションの調査

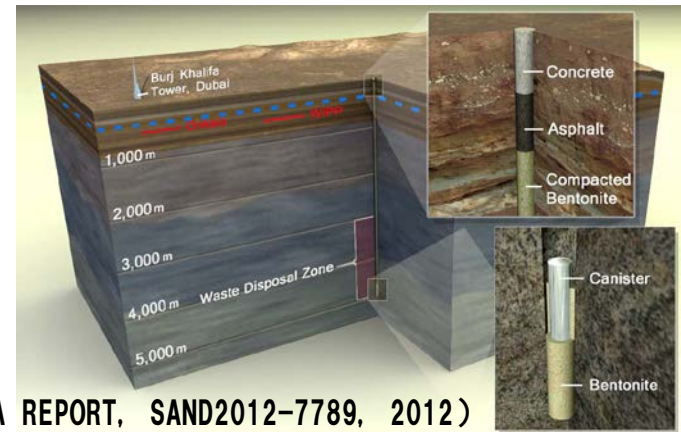
□ 成果

- 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SNL:超深孔処分相当深度での密度流解析、米国Deep Isolation社:超深水平孔処分での定置間隔検討 等)
- 超深孔処分相当深度のTHMC情報や掘削技術等についての現状を確認(THMC情報の不足、超深孔で想定している深さと径での掘削実績なし)
- 超深孔処分における「母岩中の移行」、「EDZの移行」、「核種閉じ込め・移行抑制性能」の影響評価のための水理・物質移行解析モデルを構築し、母岩の不均質性等に起因して優先的な移行経路が異なる可能性を例示。

□ 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)

水理・物質移行解析モデルと解析例

評価領域

