



平成29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

平成30年3月13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

エントリー・クオリティを活用した地層処分研究の位置づけと役割



処分事業

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

エントリー・クオリティでの
処分研究開発

- 設計・安全評価に関する基盤研究
(国の受託事業を含む)
- NUMOとの共同研究
- 成果の公開・施設見学受入れ等

連携

JAEA

地下研究施設を用いた研究
地質環境の長期安定性研究

知識ベース等の構築

データベースは以下から直接アクセスできます

熱力学・収着・拡散データベース

地層処分の安全評価のためのデータベースです。

グラウトデータベース

地下坑道掘削時における湧水抑制のためのグラウト技術のデータベースです。

オーバーバックデータベース

オーバーバックの腐食試験や溶接試験等に関するデータベースです。

緩衝材基本特性データベース

緩衝材や処分場の設計と人工バリアの長期挙動評価のためのデータベースです。

ガラスの溶解に関するデータベース

ガラスの溶解挙動に関する公開情報を集約したデータベースです。

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



H20-24 HLW地層処分

先進的地層処分 概念・性能評価 技術高度化開発	様々な廃棄物特性等に対応できる先進的・合理的地層処分概念の開発(処分概念データベースやサイクル廃棄物インベントリ評価ツールの開発など)。それらの特徴を適切に捉えられる性能評価技術等の高度化(一連の解析作業とレポート化をWeb上で可能とするシステム(e-PAR)構築など)。
処分システム化学影響評価高度化開発	地層処分システムの長期安全性に関する不確実性要因評価として、放射線、微生物影響及びバリア間複合作用による化学環境変化や核種移行への現象理解に基づく定量的影響評価手法の開発。
地下坑道施工技術高度化開発	日本の地下深部の特徴を踏まえ、地層処分システム長期性能への影響を最小限に抑えるグラウト技術を体系的に構築。

H20-24 TRU廃棄物地層処分

硝酸塩処理・ 処分技術高度化 開発	HLWとTRU廃棄物の併置処分における相互影響因子である硝酸塩に対し、処分後の硝酸塩の影響評価システムの構築。代替技術として放射性廃液を対象とした硝酸塩の除去技術の確立。
----------------------------------	---

H23-26 TRU廃棄物地層処分

セメント材料影響評価技術高度化開発	TRU廃棄物の地層処分に用いられるセメント材料を想定し、それらのニアフィールドバリア性能への長期的影響を反映した核種移行解析を実施可能とする技術開発。
--------------------------	---

H25-29 HLW及びTRU廃棄物地層処分

処分システム評価 確認技術開発	ニアフィールドのシステム変遷と核種移行評価先端技術開発、多様な廃棄物の共処分評価、過酷事象の影響評価、可逆性・回収可能性等を考慮した処分概念検討、評価確認技術の統合化。
----------------------------	--

H25-29 HLW等地層処分

地質環境長期安定性評価確認技術開発	文献調査や現地調査によって得られている数百万年程度の過去から現在までの地質環境(数十平方キロメートルの広さを対象)の変遷を把握し、これまで開発した地形モデル及び地質モデルを統合化して地形・地質モデルとし、地質環境の長期的な変化を三次元的に可視化・数値化する手法を構築。
--------------------------	--

H27-30 HLW等地層処分

沿岸部処分システム高度化開発	わが国における沿岸部固有の環境を踏まえ、概要調査段階で必要となる地質環境の調査・工学・安全評価に関する技術開発に取り組む。
-----------------------	---

H25-29 使用済燃料直接処分等代替処分技術

使用済燃料直接処分等の代替技術開発	わが国の直接処分に関するセーフティケースの構築を目標に、段階的にその信頼性を高めるよう全体計画を策定し、先進的な人工バリア材料の開発や処分施設設計の概念構築等を行う。
--------------------------	---

概要調査段階における設計・性能評価の高度化

実施期間	実施項目
H23-25	(1) 水理の観点から見た母岩の適性を評価する方法に関する検討
H23-25	(2) シナリオの構築に関する検討
H23-25	(3) 核種移行パラメータの設定に関する検討
H23	(4) 知識情報の品質確保に関する検討

放射性廃棄物地層処分の安全評価に向けた論拠の整備

実施期間	実施項目
H26-27	(1) 評価の枠組みとシナリオ開発に関する検討
H26-27	(2) FEP関連情報の整備
H26-27	(3) モデル開発・パラメータ設定

ニアフィールドシステムの長期挙動評価

H28-

- ガラスの多様な環境下での長期溶解挙動
- 鋳鋼製オーバーパックの長期腐食挙動
- オーバーパックと緩衝材の相互作用（長期変質挙動）
- 緩衝材/セメント反応挙動
- 緩衝材長期圧密挙動

核種移行挙動評価

H28-

- 評価の枠組みとシナリオ開発
- 核種移行パラメータ設定手法の整備
- 核種移行データ取得及びモデルの整備
- 核種移行データとモデルの検証

研究者の受入れなど実効的技術共有・継承

NUMO協力研究員による核種移行試験の実施



地層処分研究開発課題/成果

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上

- 人工バリア等の変質等の長期挙動
- 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

- ・オーバーパックデータベース; 1,748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

人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

- 工学技術の信頼性向上/人工材料開発
- 岩盤長期挙動予測評価技術の精緻化
- 地層処分実規模設備整備事業への協力



人工バリアを設置後の坑道周辺における熱-水-応力-化学状態変化に関する解析

緩衝材基本特性データベース

2. 安全評価手法の高度化

➢ 核種移行データベースの開発

- ・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; 57,867件, 文献数 696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

➢ 処分システム性能評価モデルの開発・改良への取り組み事例

- ・核種移行に対するコロイド、有機物、微生物の影響評価
- ・様々な天然事象影響に関する評価概念モデルの構築
- ・表層環境や日本の特徴を考慮した生活圏モデル構築・移行パラメータ整備
- ・岩盤中の水理・物質移行評価手法



処分場の安全評価・設計の基礎となるデータベースの開発

成果と抽出課題

処分システムに関する工学技術の信頼性向上

コアメッセージ	成果ダイジェスト	課題ダイジェスト	必須の課題
【処分システムに関する工学技術】 ●処分場設計の技術基盤として必要なオーバーバックおよび緩衝材の基本特性について、処分後の過渡的な条件におけるデータを拡充し、公開データベースに格納することにより広く活用できる環境を整備できた。 ●処分場設計の技術基盤として必要な処分後の過渡的な現象を評価するためのオーバーバックの腐食挙動および緩衝材中のpHを連続計測可能なセンサーの開発や連成解析コードの改良を行うことにより、評価のための技術を整備することができた。 ●処分場の施工に関する技術基盤として、地質環境に対する化学的影響の少ない支保工材料の施工性、実規模の人工バリアを定置する技術を確認し、処分に必要な施工技術が実際の地質環境で適用可能である見通しを示すことができた。	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開発 ・オーバーバック、緩衝材の基本特性に関して、試験条件を高温環境、高塩水環境に拡張した試験データを取得し、データベースを拡充した。 ・炭素鋼の腐食に対するγ線の影響が緩衝材共存下で著しく緩和されることを示したことにより、オーバーバックの遮蔽厚さを合理化できる可能性を提示した。 ・緩衝材の重要な機能である膨潤性について、試験方法の標準化に向けた手順の整理等を実施した。 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 ・処分坑道埋め戻し後のニアフィールドにおける過渡的現象を評価するために、熱-水-応力-化学連成解析コードを、ベントナイト中の鉱物反応(pHの定量化)や間隙水中の塩濃縮を考慮できるように改良した。 ・幌延URLで実施するオーバーバック腐食試験および人工バリア性能確認試験に適用するオーバーバックの腐食挙動および緩衝材中のpHを連続計測可能なセンサーを開発した。 ・緩衝材の変質の主な要因である鉄-ベントナイト相互作用に伴う緩衝材中の二次鉱物の生成による影響範囲が限定的であることを解明した。 ・考古学的鉄製品のナチュラアナログ研究により実験データに基づく長期腐食量評価の保守性・妥当性を支持するデータを取得した。 工学技術の信頼性向上 ・坑道の設計技術として、幌延URLを活用して、地質環境の特徴を評価する基礎データを取得した。施工した地下坑道の力学的安定性評価のための検証データを蓄積し、長期予測手法の適用性を確認した。 ・坑道の建設技術として、幌延URLを活用して、地質環境に対する化学的影響を低減するための低アルカリ性セメントの施工性を確認した。 ・また、処分事業の各段階で検討すべきグラウト技術に関する内容をガイドラインとして提示した。 ・人工バリアの定置技術として、幌延URLを活用して、実規模の人工バリアを所定の精度で施工できることを確認した。	課題ダイジェスト ・処分後初期の環境条件が過渡的な状況や過酷な状況を含め、影響因子が複雑に作用する状態等、より拡張した試験条件下での試験データの取得 ・現象理解およびパラメータ取得のための長期試験の実施 ・幌延URLを事例とした埋め戻し材の基本特性の取得 幌延URLで実施する実規模の人工バリア性能確認試験において熱-水-応力-化学連成現象の検証データを取得。 ・検証データと解析結果との比較による評価手法(解析コード)の妥当性評価 ・原位試験に向けて開発した計測センサーの適用性(耐久性、応答性)確認 ・幌延URLで実施している原位置かつ実規模の人工バリア性能確認試験で取得されるデータにより、設計・施工した人工バリアが所期の機能を発揮することを検証 ・ナチュラアナログ研究におけるデータの蓄積 幌延URLを活用した、坑道の力学的長期挙動、低アルカリ性セメントの地質環境への影響に関する検証データを拡充	必須の課題 ・幌延URLで取得されるデータを活用した個別の設計・施工技術等の検証、妥当性・適用性評価 ・上記の設計・施工技術等の処分システムの工学技術としての体系化

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

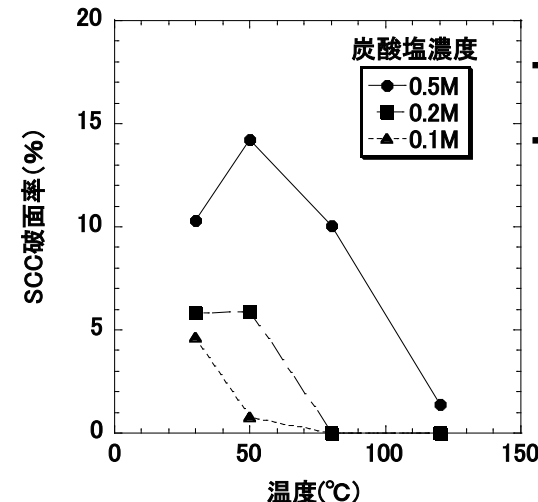
□ 成果

【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**沿岸海底**における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。

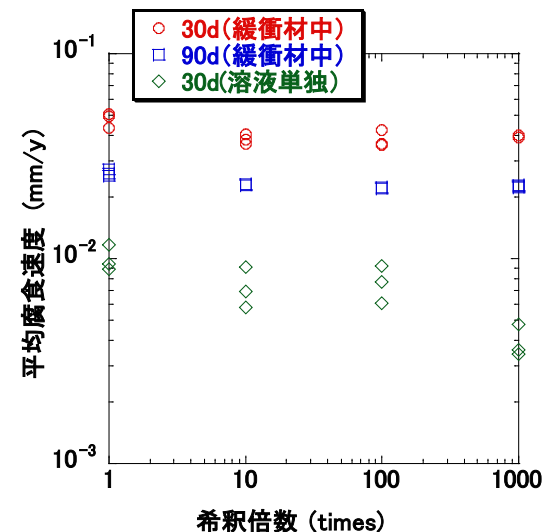
□ 意義／反映先

- 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
- 沿岸海底域**における処分を想定したオーバーパック設計、長期挙動評価



- ・高炭酸塩条件ほど SCC感受性大。
- ・30～50℃付近で感受性極大。

炭素鋼の応力腐食割れ（SCC）感受性
におよぼす温度と炭酸塩濃度の影響



- ・溶液単独では希釈度合いが大きいほど腐食速度が小。
- ・緩衝材共存下では希釈度合いによる影響は小。

人工海水の希釈度合いによる炭素鋼
の腐食速度への影響

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

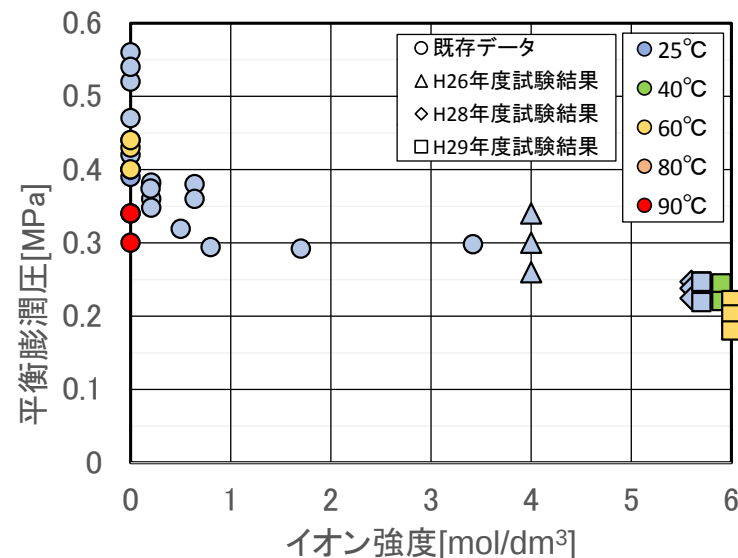
□ 成果

【高塩化物イオン濃度の影響を考慮した緩衝材の膨潤圧/透水係数】

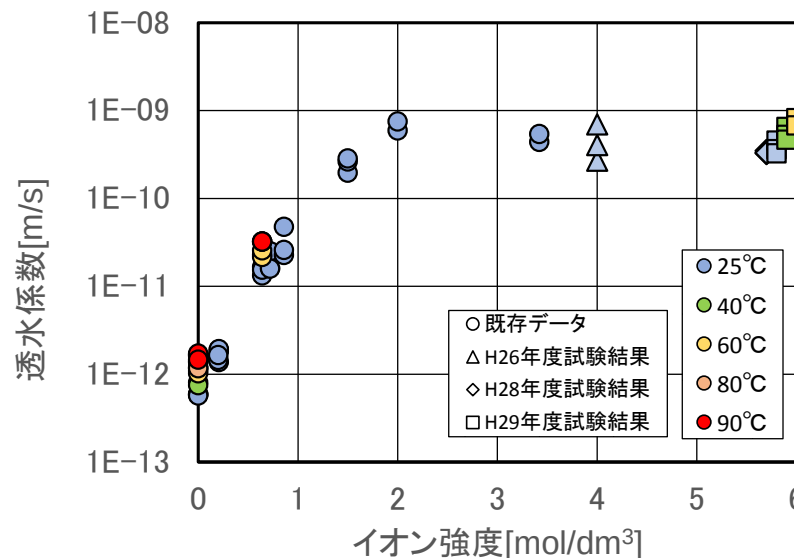
- サイト選定で除外されると考えられる環境条件も含め幅広い地下水条件に応じた緩衝材の基本特性の把握のため、高塩化物イオン水（海水レベル以上の濃度）、試験温度（25℃、40℃、60℃、80℃、90℃）を変えた膨潤圧/透水試験を実施し、データを取得した。

□ 意義／反映先

- 広範な環境条件に対する緩衝材の挙動評価のための基礎的情報
- 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



イオン強度と平衡膨潤圧の関係



イオン強度と透水係数の関係

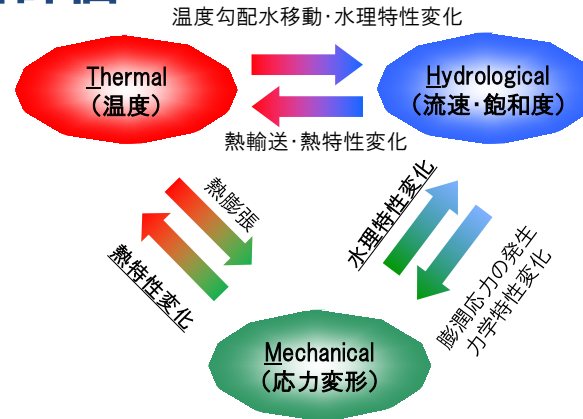
既存データ: 緩衝材基本特性データベースより

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)

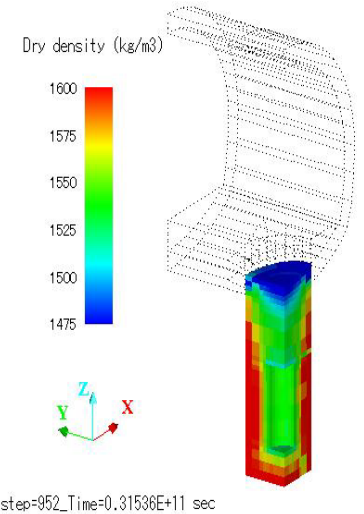
2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 熱-水-応力連成(3連成)挙動の解析評価

□ 成果

- 密度変化に伴う熱・水理特性変化を評価可能となるように改良した3連成解析コードを用いて、幌延URLでの人工バリア性能確認試験の再現解析により適用性を確認するとともに、縦置き定置方式を対象とした事例解析によりニアフィールドの長期挙動評価を実施した。



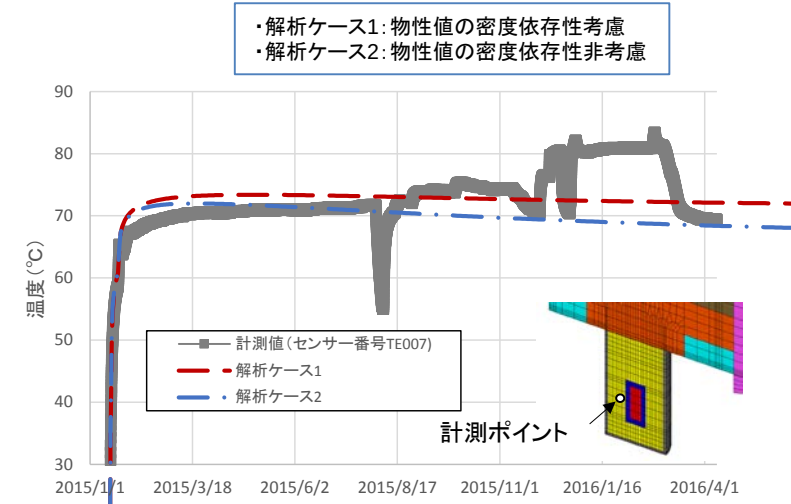
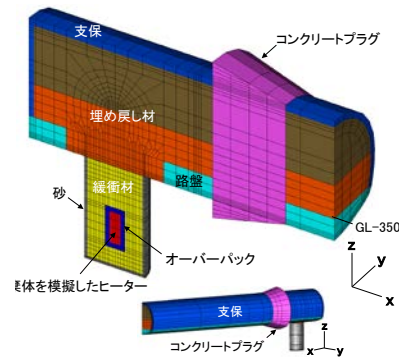
3連成解析モデル概念図
(下線付きが追加したスキーム)



過渡期終了時の緩衝材密度分布
の解析結果例(縦置き定置方式)

□ 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



人工バリア性能確認試験の再現解析結果例

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）

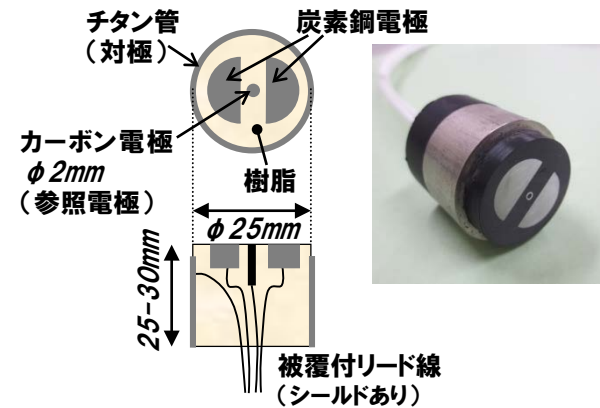
2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究： 4連成挙動把握のための計測技術

□ 成果

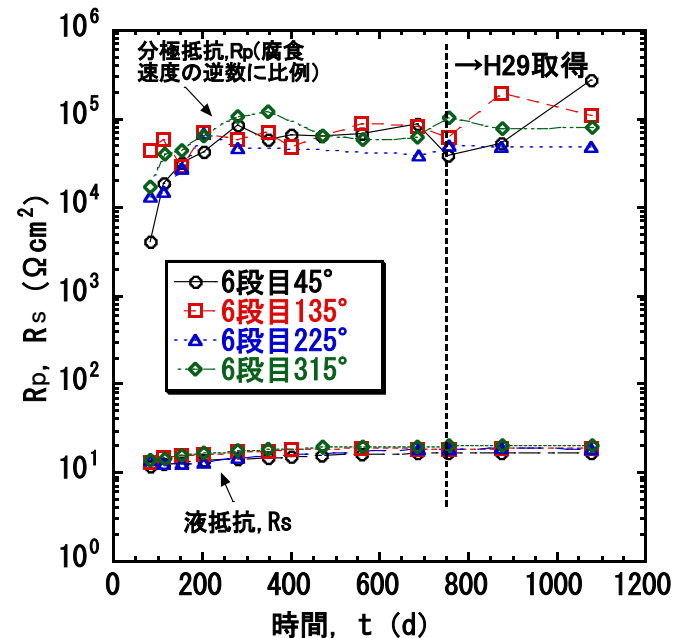
- 緩衝材の再冠水など、環境条件の変化を伴う場における**オーバーパックの腐食挙動を評価**するために開発された腐食センサーを行いて幌延URLで計測を継続して実施し、炭素鋼オーバーパックの腐食速度について原位置での実証的なデータを取得した。

□ 意義/反映先

- 原位置において緩衝材中のオーバーパックの腐食挙動の連続計測が実現可能である見通しと、実測事例を提示。
- 原位置でのTHMCに関する計測データや連成解析等に基づく緩衝材中の環境条件の変遷に対応した腐食挙動の理解やメカニズムの解釈に反映可能



腐食センサーの模式図と外観



腐食モニタリングによる分極抵抗Rp（腐食速度の逆数に比例）と液抵抗Rsの経時変化

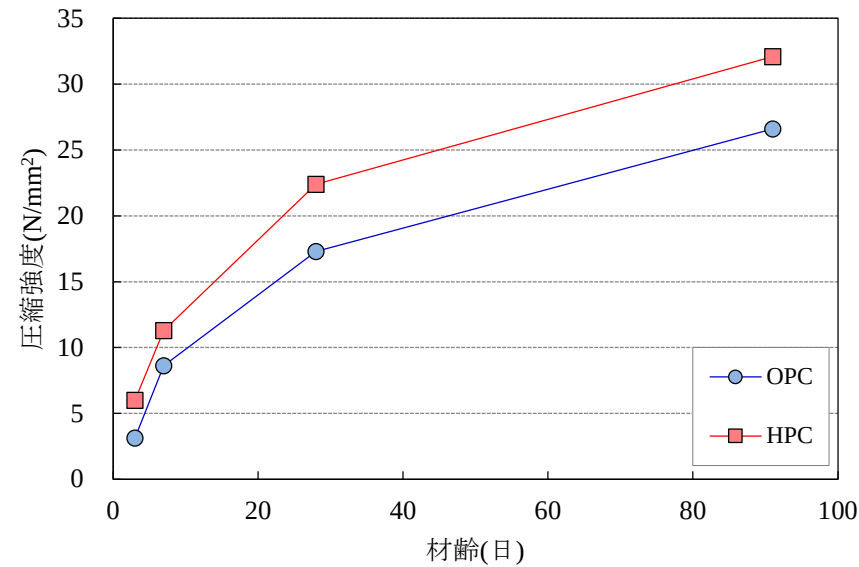
3)工学技術の信頼性向上；
低アルカリ性セメントを用いた支保工の開発

□ 意義 / 反映先

- 低アルカリ性セメントを用いた支保工（場所打ちコンクリート）に関して配合をパラメータとした基本特性（圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、割裂引張強度）を取得した。

□ 意義 / 反映先

- 岩盤条件等に応じて配合選定が可能となる低アルカリ性セメントを用いた支保工（場所打ちコンクリート）の基本特性に関するデータを整備
- 地下施設の設計に用いる支保工（場所打ちコンクリート）の適切な配合選定に反映



材齢と圧縮強度の関係の例（HFSC226）

配合の組み合わせ（支保工：場所打ちコンクリート 7ケース）

結合材構成比		HFSC226			HFSC325			HFSC424			HFSC523		
水結合材比(%)		30	40	50	30	40	50	30	40	50	30	40	50
セメント	OPC		◎			◎		済	済	済			
	HPC		◎			◎							

HFSCの後の数値は、セメント(C)、シリカフューム(SF)、フライアッシュ(FA)の重量比を示す。
OPC: 普通ポルトランドセメント、HPC: 早強ポルトランドセメント

成果と抽出課題

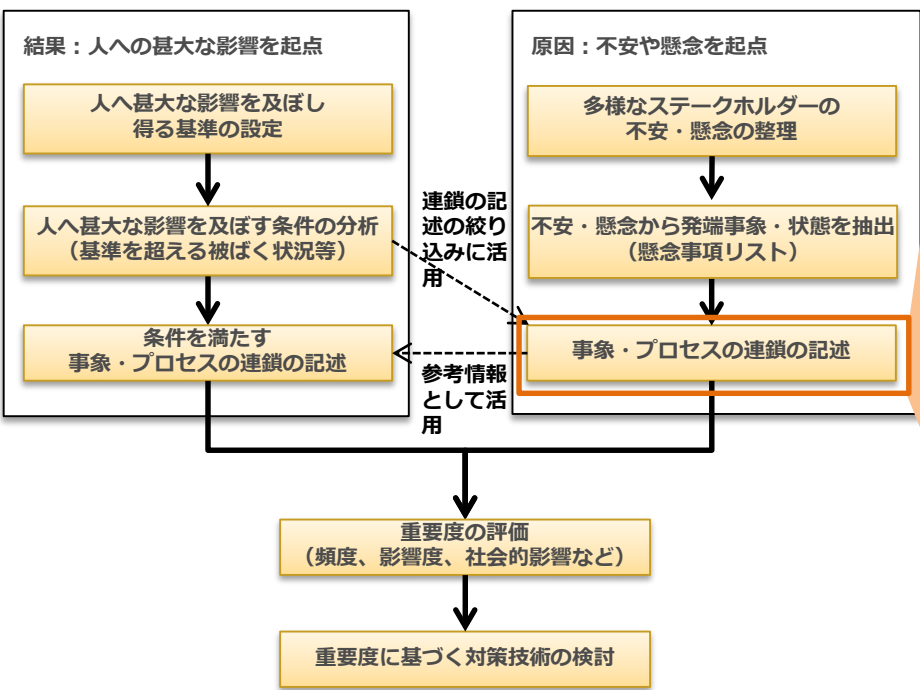
安全評価手法の高度化

コアメッセージ	成果ダイジェスト	課題ダイジェスト	必須の課題
【安全評価手法の高度化】 ●わが国において発生可能性の高い自然事象や多様な前提条件が地層処分システムに与える影響の評価を体系的に実施可能 ●メカニズム理解に基づく影響評価モデルの改良とパラメータ設定手法の確立、および具体的な地質環境条件への適用を通じた確認	システム性能評価に係る手法の開発 ・わが国の主要な侵食プロセスである河川侵食が地表接近時の処分場に与える影響を評価するための複数の概念モデルを構築し、地表接近時においてもシステムが頑健であることを改めて明らかにした。 ・異なる前提条件(廃棄物インベントリ、処分概念オプション等)間の相違を評価するための技術の整備・体系化を進め、その効率的な実施を促進・支援できるようになった。 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発 ・核種移行データベース(熱力学、収着・拡散、ガラス溶解)の機能とデータを拡充するとともに、実際の地質環境等を考慮したパラメータと不確実性の評価手法を構築した。 ・ガラス溶解、緩衝材中の収着・拡散、岩石中の水理・核種移行に係る現象のメカニズム理解を深めるとともに、ガラス溶解や緩衝材中の収着・拡散現象に係るモデルを最新のメカニズム理解を反映し高度化した。 ・国内外の原位置試験との連携によって、有機物・微生物・コロイド等の影響評価モデルの高度化するとともに、適用性評価事例を提示した。 ・わが国での自然事象による長期変遷を考慮した生活圏モデルの構築に向けて留意すべき点を、国際的な経験等の分析を通じて、明らかにした。	・地層処分システムの長期変遷に係るわが国の地質環境の特徴及び起こりやすさの異なる自然事象を考慮したシナリオ構築から影響評価までの一連の評価技術の開発 ・発生可能性の極めて低い事象の安全評価における取扱いの明確化 ・地下研究施設で取得されたデータを活用した総合的な性能評価手法の適用性確認 ・バリア材共存とシステム長期変遷を考慮した核種移行モデルとデータベースの開発 ・現象のメカニズム理解に基づくモデル高度化の先端的な計算科学や分析技術を適用した推進 ・核種移行モデルの原位置条件での確認、天然事例に基づく長期時間スケールでの確認 ・隆起・侵食と気候・海水準変動の複合的な影響を考慮したGBI/被ばく経路の設定方法の開発	・事象の特徴や起こりやすさを考慮した安全評価技術の体系化 ・地下研究施設から得られる坑道周辺の知見を活用した安全評価手法の適用性確認 ・システム変遷についての核種移行評価モデルとデータベースの先端化 ・地下研究施設の原位置試験や天然事例評価による時空間スケールを含めたモデル確認

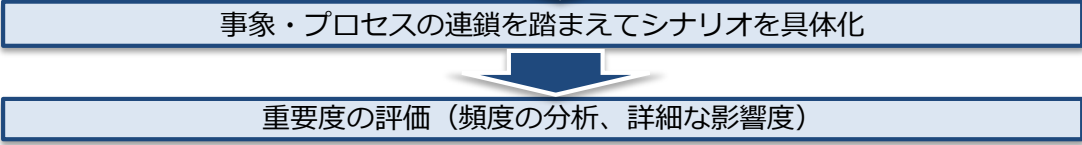
安全評価手法の高度化（研究開発成果事例）

1) システム性能評価に係る手法の開発： 地層処分における過酷事象の概念構築

- 成果：東京電力福島第一原子力発電所の事故を受け、地層処分の安全性を示していくためには、これまで想定外とされていたあるいは未知の事象を探索していくことが必要である。そこで、地層処分システムにおける過酷事象を探索できるようにするため、これまでの安全評価と異なる考え方を導入して事象・プロセスの連鎖を記述するための手順を構築・試行した。
- 意義／反映先：本研究で構築した枠組みに沿って、様々な試行を繰り返すことで、地層処分の信頼性向上と理解促進に資するための新たな知見を創出することが可能になる。



不安や懸念	発端事象		地質環境の変化		処分システムへの影響	状態の変化
火山、地震等が多い日本での地層処分は選択すべきでないのではないかな？	1-A	マグマ上昇経路の変化・新生	処分施設を直撃するマグマの貫入	火山の噴火（溶岩の流出）	破壊・溶融された廃棄体が溶岩と一緒に噴出する	・地表放出
				火山の噴火（火山灰の噴出）	廃棄体の破片や溶融した廃棄体が火山灰と一緒に噴出する	・地表放出
	火山の噴火（火砕流の発生）			廃棄体の破片や溶融した廃棄体を含む火砕流が発生する	・地表放出	
	火山噴火の未遂			地表には達しないが、廃棄体が破壊されバリア機能が損なわれる	・溶解の促進	
	1-B		マグマが処分場近傍に達して、地下水が高温、低pHとなる	分配係数、溶解度が変化し、バリア機能が劣化する	・溶解の促進 ・核種濃度の増加	
	1-C	爆発的噴火	カルデラの形成		破壊された廃棄体が火山灰や火砕流と共に噴出する	・地表放出
	1-D		処分施設を直撃する爆発的噴火	火山灰の噴出	廃棄体の破片や溶融した廃棄体が火山灰と一緒に噴出する	・地表放出
				火砕流の発生	廃棄体の破片や溶融した廃棄体を含む火砕流が発生する	・地表放出
	1-E		爆発的噴火による崩壊	火山体の崩壊と崩壊	火山体の崩壊によって廃棄体の埋没深度が浅くなる 廃棄体を含んだ崩壊土砂が下流に堆積する	・移行経路の短縮 ・露呈
	地下水位の上昇					地下水位の上昇により、地下水和の接触面積が増加し、地下水和の速度が増加する



地層処分システムにおける過酷事象の検討フロー

事象・プロセスの連鎖の記述例

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； 表層環境の時間的変遷を考慮した生活圈モデル構築手法の整備

- 成果:地形変化シミュレーションや地下水涵養量推定技術等による古環境・古気候の復元結果を適用した地表環境の状態変遷の設定方法(昨年度紹介)を活用し、表層環境の状態変遷の整理・概念化を実施した。
- 意義／反映先:実施主体が行う安全評価に利用可能な、対象とすべき表層環境条件及びその変遷の状況が具体化された場合の、それらの特徴を踏まえた生活圈モデル構築に反映

時間的変遷を考慮した表層環境の 状態変遷の設定方法

地形変化シミュレーションや地下水涵養量推定技術等を適用した古環境・古地形の復元

- 河川の状態（流出量等）
- 地下水涵養量
- 地形の特徴
- 気候の状態

等

- 推定結果等に基づく表層環境の状態として、
- 降雨量・河川流出量を含む表層での水収支
 - 気温（気候）
 - 地形
 - 永久凍土の有無
 - 植生の状態
- 等を記述する

平野部における表層環境の状態変遷の整理・概念化の例

Time	サイクル	地表環境の概念化					
		地形の特徴(※1)	河川の状態(※1)	地下水涵養量の状態	永久凍土の影響	気候の状態(※2)	植生の状態(※2)
現在	間氷期 (現在)	東部の大半は山岳・丘陵地(森林帯)となっており、西部は細長く発達した海岸砂丘の海岸とその内陸に湿地帯や平野状の地形が広がっている。	一級河川の主流とともに支流が発達している。また、沼が存在する。	—	考慮せず	冷温帯	夏緑樹林
	氷期	[現在-間氷期]と比較して、氷期の海退により海域の陸化が進んでいる。平坦な地形が広く分布する。	平坦な(流出しにくい)地形が広く分布するため、[現在-間氷期]と比較して、1割弱程度の流量となる。	[現在]と比較して、2分の1程度の涵養量となる。	考慮せず	亜寒帯	針葉樹林
330ka	間氷期	[現在-間氷期]と比較して、海進により陸域が減少している。平坦な地形が広く分布する。	平坦な(流出しにくい)地形が広く分布するため、[現在-間氷期]と比較して、6割程度の流量となる。	[現在]と比較して、2倍程度の涵養量となる。	考慮せず	冷温帯	夏緑樹林
	氷期	[現在-間氷期]と比較して、氷期の海退により海域の陸化が進んでいる。平坦な地形が広く分布する。	平坦な(流出しにくい)地形が広く分布するため、[現在-間氷期]と比較して、数%程度のかなり小さい流量となる。	[現在]と比較して、6~7割程度の涵養量となる。	考慮せず	亜寒帯	針葉樹林
1Ma	間氷期	[現在-間氷期]と比較して、海進により陸域が大きく減少している。平坦な地形がさらに広く分布する。	平坦な(流出しにくい)地形が広く分布するため、[現在-間氷期]と比較して、2割程度の流量となる。	[現在]と比較して、3倍程度の涵養量となる。	考慮せず	冷温帯	夏緑樹林
	氷期	[現在-間氷期]と比較して、氷期の海退により海域の陸化が進んでいる。平坦な地形がさらに広く分布する。	平坦な(流出しにくい)地形が広く分布するため、[現在-間氷期]と比較して、1%程度のかなり小さい流量となる。	[現在]と比較して、7割程度の涵養量となる。	考慮せず	亜寒帯	針葉樹林

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;

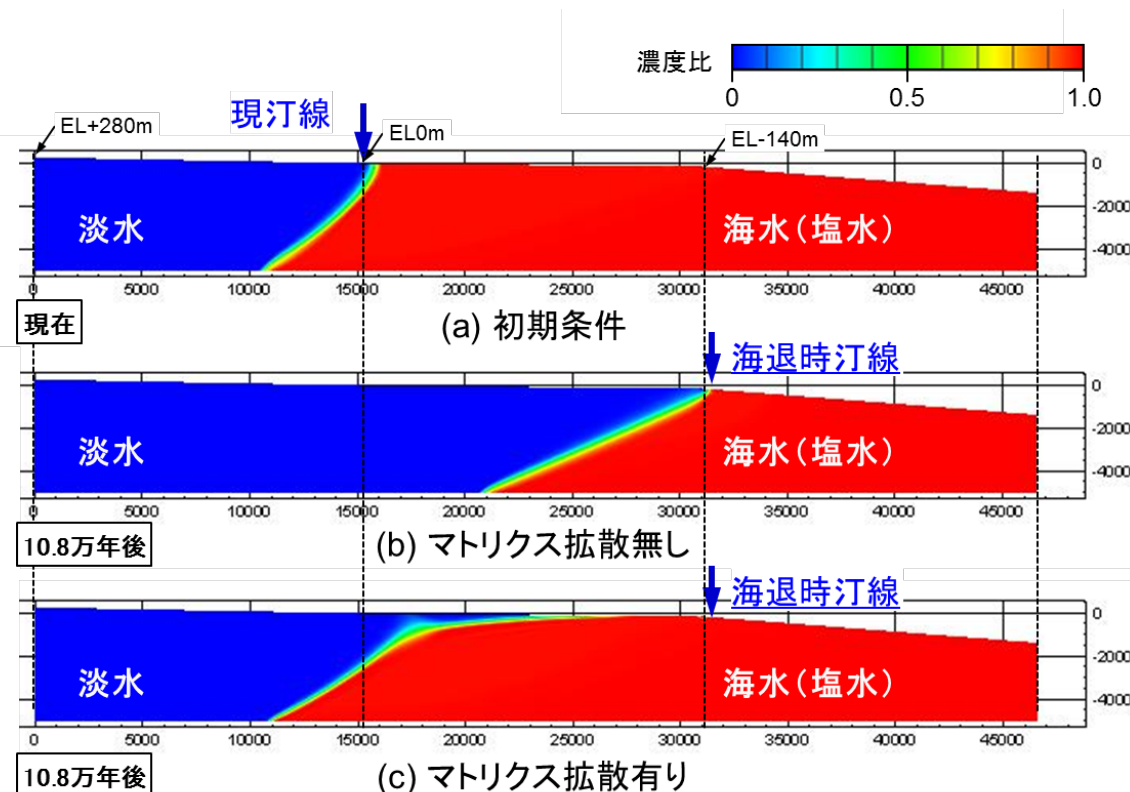
沿岸部における亀裂性媒体の特徴を考慮した地下水環境変化の解析技術の整備

□ 成果

- わが国の沿岸部を想定した2次元鉛直断面の地形モデルを対象に、水位差ならびに淡水と塩水の密度差に起因した亀裂中での地下水流動と移流分散による塩分の移動に加えて、マトリクス部での塩分の拡散を考慮した解析モデルを構築
- 約12万年周期の海水準変動に伴う地下水環境(塩水濃度、地下水流速など)を解析
- マトリクス拡散の有無が地下水環境の解析結果に影響を与える可能性を例示

□ 意義／反映先

- 沿岸部における亀裂性岩盤を対象とした地下水環境の評価において、マトリクス拡散による塩分の移動を適切に考慮することの重要性を提示
- 核種移行評価に必要な情報(地下水流速、塩分濃度の経時変化、核種の移行経路の時空間的な変化など)の抽出手法の整備



マトリクス拡散の有無が地下水環境の解析結果に与える影響検討の例
(最大海退時:10.8 万年後の淡水と塩水の濃度分布の比較)

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 (2017), 平成28年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書.

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

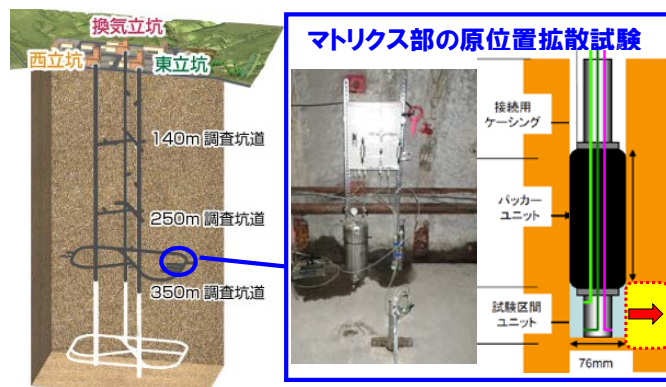
□ 成果

- 幌延堆積岩のマトリクス中の物質移行特性を原位置条件で安定同位体トレーサーを用いて評価する手法を構築
- グリムゼル岩の割れ目を対象とした室内試験により、割れ目近傍の不均質性の定量化とそれを反映した核種移行モデルを構築
- スウェーデンエスポ及びフィンランドオンカロにおける原位置トレーサー試験情報(SKBタスクフォース)を活用した多様な原位置条件に対するモデル化手法の適用性を評価

□ 意義／反映先

- 結晶質岩及び堆積岩のマトリクス及び割れ目に対する核種移行評価技術の構築、原位置条件への適用性確認

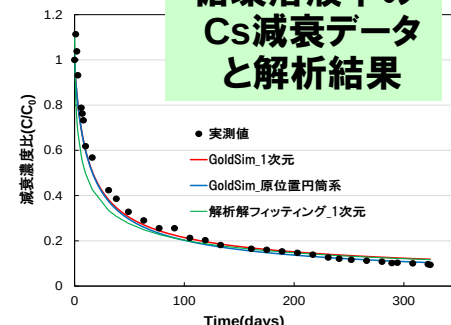
幌延350m坑道での原位置拡散試験



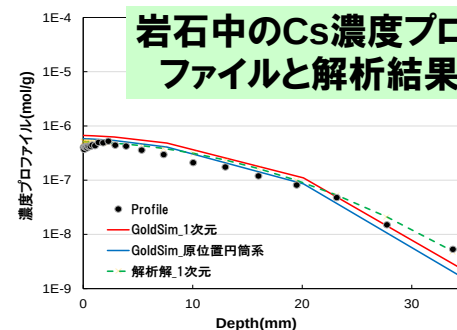
原位置と室内試験データの比較評価

- 原位置と室内試験データとの比較から、拡散における陽イオン加速や陰イオン排除の傾向、収着分配係数の傾向の整合性を確認
- 原位置と室内とで、岩圧影響等による拡散係数の差異、化学条件影響による分配係数の差異を確認

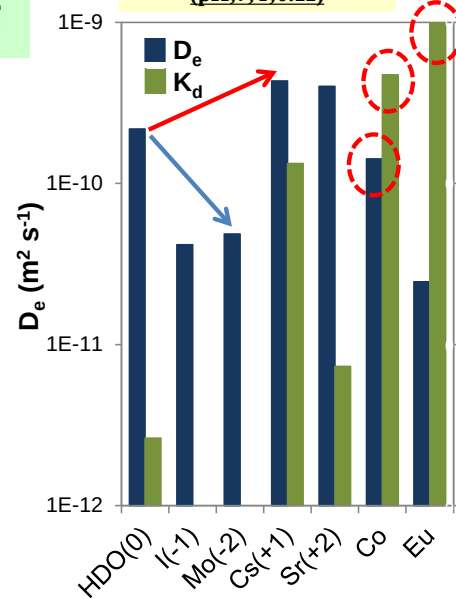
循環溶液中のCs減衰データと解析結果



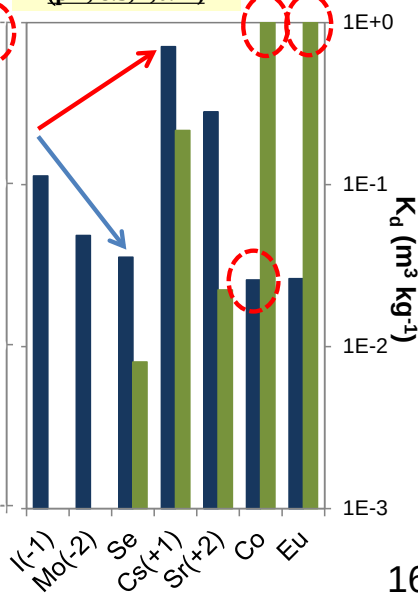
岩石中のCs濃度プロファイルと解析結果



原位置:D-05/350m (pH:7, I_0 :0.11)



室内:D-05/350m (pH:8.5, I_0 :0.11)



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

研究開発の位置づけ

■「エネルギー基本計画」（平成26年4月 閣議決定）

高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた取り組みの抜本強化のための方策として「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、幅広い選択肢を確保する観点から、直接処分など代替処分オプションに関する調査・研究を推進する。」としている。

■「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。・・・」

■「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（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。・・・」

成果と抽出課題(機構中期計画に基づく)

使用済燃料直接処分の研究開発

コアメッセージ	成果ダイジェスト	課題ダイジェスト	必須の課題
【使用済燃料の直接処分研究開発】 ●使用済燃料の地層処分システムの予備的設計・安全評価を通して、多重バリアシステムを基本とした処分概念と安全確保の考え方や現状の技術レベルを示すことができた。 ●予備的設計・安全評価を通じて、直接処分の研究開発に係る、今後の課題を抽出・整理した	工学技術 ・使用済燃料を対象とした地層処分システムの地下施設(人工バリアおよび坑道)の設計フローを提示するとともに、設計要件を整理し、レファレンスとする条件のもと坑道横置き方式を対象として、処分容器や緩衝材を含む地下施設の設計を行い、レファレンス仕様を提示した。 ・搬送・定置設備の概念設計を行った。 ・使用済燃料に特有の留意点等を明らかにしつつ、今後の課題を抽出した。 安全評価 ・使用済燃料の直接処分に特有な現象について、既往の知見を整理し、レファレンスとする条件および地下施設仕様を対象として、地質環境の長期的な変遷を考慮に入れたリスク論的な考え方に基づき、基本シナリオを対象とした安全評価を行った。 ・使用済燃料に特有の留意点等を明らかにしつつ、今後の課題を抽出した。	・使用済燃料の特徴、実際の使用済燃料の多様性および地質環境条件の多様性を考慮した、設計のバリエーションの提示 ・設計の前提となる考え方(緩衝材温度制限等)の見直しと提示 ・保障措置、核セキュリティの要件に対応した地下施設/設備の設計上の留意点の整理と設計への反映 ・より長寿命な処分容器の設計 ・臨界安全性評価の考え方・手法の整備 ・廃棄体重量・形状および定置方式に対応した、搬送・定置設備、坑道、および地上設備の設計 ・使用済燃料の直接処分に特有な現象についての理解を深めつつ、地質環境の長期的な変遷など、不確実性を考慮したシナリオ区分とそれに基づく体系的なシナリオの設定 ・実際の使用済燃料の多様性および地質環境条件の多様性や不確実性を考慮した、評価モデルおよびパラメータの設定 ・使用済燃料からの核種の浸出挙動等に関する試験研究計画の策定	・使用済燃料の特徴および関連する現象についての理解深化に応じた地層処分システムの設計および安全評価の実施。 ・使用済燃料の地層処分システムの長期的性能に関する論拠等を前提条件の多様性も考慮しつつ整理

使用済燃料直接処分に関する技術開発（1/4）

【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）
- 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）

使用済燃料直接処分に関する技術開発（2/4）

●多重バリアの閉じ込め性に関する検討：処分容器の例

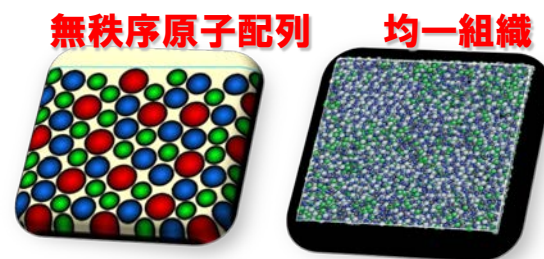
【目的・必要性】

C-14の閉じ込め等の観点から

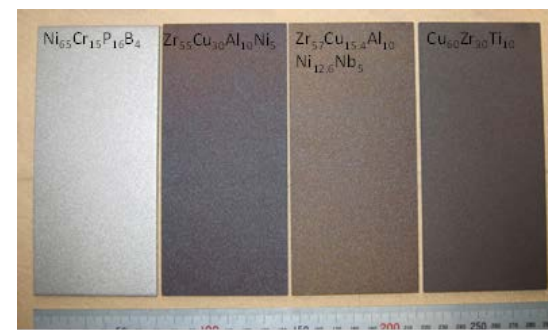
- 処分容器の長寿命化が可能な材料の選択肢拡充のため、耐食性等に優れた新材料の開発
- 過度な保守性を排除した従来の処分容器の候補材料（炭素鋼、チタン、銅等）の腐食寿命評価手法の構築に向けた知見整備

【主な実施内容・成果】

- 種々の金属ガラスを対象として、溶射による施工性確認、耐食性評価を実施。
 - Ni基金属ガラスが施工性、耐食性ともに比較的良好であり、処分容器の候補材料として最も有望であることを確認。
- 従来の候補材料を対象に、腐食試験、文献調査を実施。
 - 炭素鋼の長期腐食速度推定モデルを選定。銅の応力腐食割れ等に対する感受性を指摘。ニッケル基合金の放射線影響に対する優位性を確認。



【金属ガラス（アモルファス合金）】



Ni基、Zr基、Cu基金属ガラス溶射膜の表面
（左から $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$, $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$,
 $\text{Zr}_{57}\text{Cu}_{15}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{12.6}\text{Nb}_5$, $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ ）

使用済燃料直接処分に関する技術開発（3/4）

●処分施設の設計に関する検討：

【目的・必要性】

使用済燃料の処分に対する既存の技術の適用性を示すとともに、幅広い選択肢を確保するため、人工バリア、坑道、搬送・定置設備、地上施設の概念設計を実施。

【主な実施内容・成果】

● 処分容器：

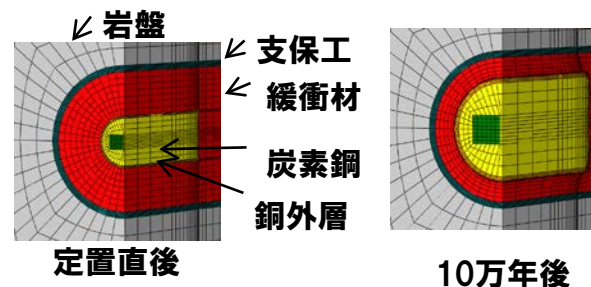
臨界・遮蔽・構造・伝熱解析等を実施し、基本仕様(形状・寸法等)を例示。

● 緩衝材：

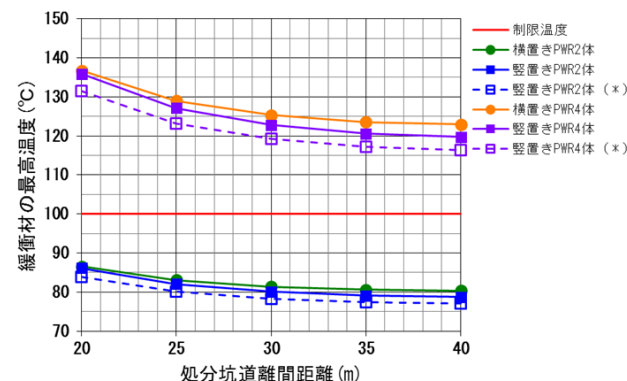
岩盤クリープ、廃棄体の自重沈下、処分容器の腐食膨張を考慮した複合解析を実施し、緩衝材の健全性を確認。

● 坑道：

岩盤(硬、軟)、定置方式(縦、横、PEM)等に応じた力学的な解析を実施し、安定であることを確認。



腐食膨張による緩衝材変形の解析結果例



緩衝材最高温度の坑道離間距離依存解析結果例

使用済燃料直接処分に関する技術開発（4/4）

処分後の臨界安全性の評価

→未臨界を維持できる処分容器への
収容体数の検討

○燃料の多様性(初期濃縮度、燃焼度)の 考慮

国内に存在する多様な使用済燃料を対象とする
臨界解析を行い、処分後に未臨界が維持で
きる使用済燃料がわが国において広く存在する
可能性を示唆。

○既存の臨界解析技術の処分の体系への 適用性を確認

人工バリアシステムを対象とする臨界解析への
既往の臨界実験を対象にした既存技術(解析
コード、データライブラリ等)の適用性を確認。

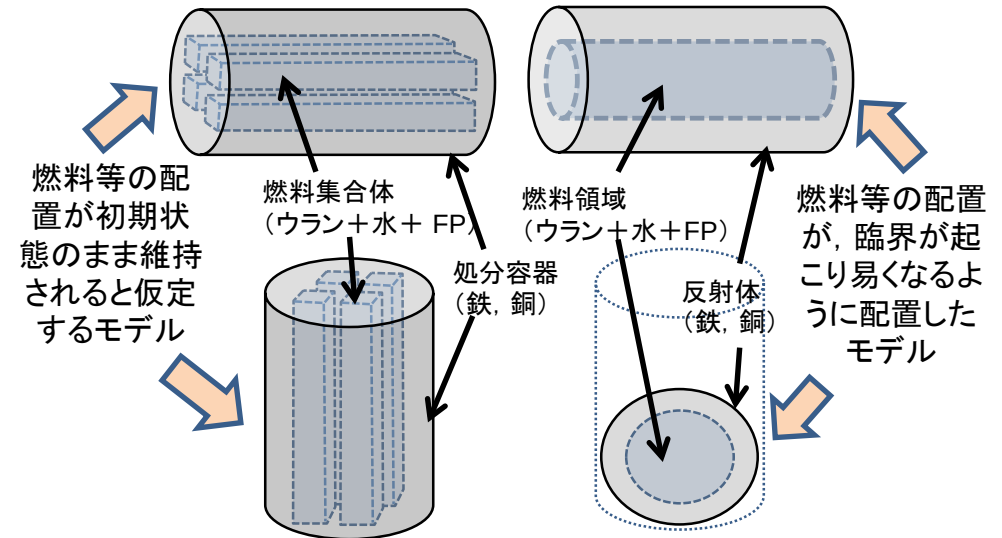
○燃料集合体や処分容器の配置等に応じた臨 界の起こりやすさの違いの検討

保守的に「臨界が最も起こり易くなる配置」(右図)
を想定した場合、収容体数が大幅に制限される。

→より現実的な配置での収容体数の検討が必要

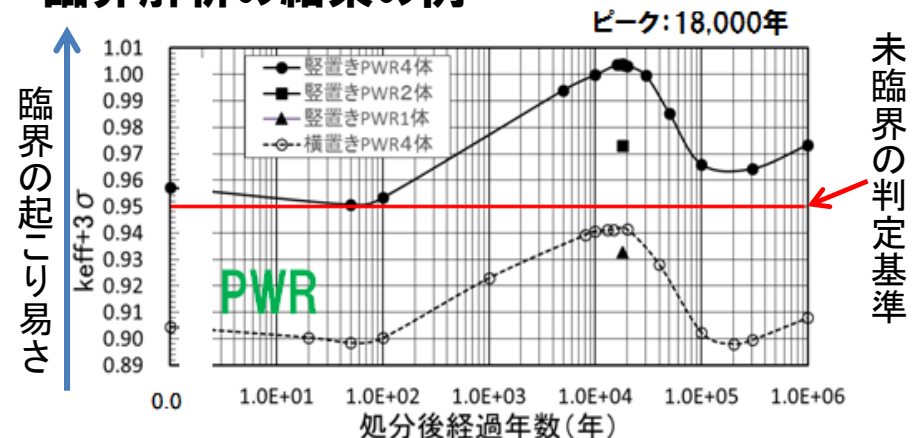
直接処分を想定した臨界解析モデルの例

横置き定置を想定



縦置き定置を想定

臨界解析の結果の例



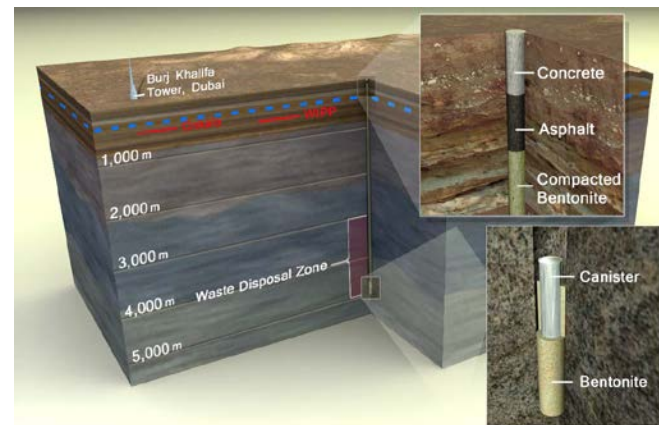
その他の代替処分オプションについての調査・研究

【目的・必要性】

「放射性廃棄物WG中間とりまとめ(平成26年5月)」での議論等を踏まえ、超深孔処分等、現在検討段階にあるその他の代替処分オプションについて、

- 諸外国の事例調査により、それらの考え方、特徴、検討の背景、技術的課題等を把握
- わが国の諸条件を考慮した場合の適用性や課題等の検討

超深孔処分の検討例（米国）



(SANDIA REPORT, SAND2012-7789, 2012)

【主な実施内容・成果】

- 超深孔処分についての先行検討事例の調査(米国, スウェーデン、スイス、英国、IAEA)
 - ・ 米国等では結晶質岩を対象(主に閉鎖後安定性、応力状態の均質性等)。
 - ・ わが国の深度1,000m以深の情報は新第三紀堆積岩類が最多。
- 地質環境特性や掘削技術のわが国での既存情報等の調査
 - ・ 深度1,000m以深の地質環境特性(JOGMEC基礎試錐、NEDO地熱開発)
 - ・ 掘進長1,000m以上の掘削技術(温泉分野、地熱分野、石油・天然ガス分野)
 - ・ 超深孔相当深度(5,000m等)での情報は限定的(掘進長の最大6,310m, 最終孔径の最大215.9mm)
- 安全性の評価事例等の調査
 - ・ 米国ではシール材中での熱対流と拡散による移行評価(透水性の極めて小さい岩盤)
 - ・ 岩盤中での地下水流動による移行を考慮することが課題と考えられる。