



地層処分研究開発の進捗状況

平成27年2月5日

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

地層処分基盤研究開発の構成

- 1 原子力安全・保安院(*1)からJAEA安全研究センターが受託した案件に協力：時間スケールや処分環境を考慮した廃棄体・人工バリアの挙動モデルの整備とその適用条件・適用範囲と不確実性の把握；ガラス固化体の溶解及びオーバーバックの腐食に関する技術検討(H22～)
 - 2 原子力安全基盤機構(*2)から受託：地下の間隙水圧モニタリングのデータ整理及び測定品質管理(H24～)
- *1:H24年中に原子力規制庁に移管
*2:H25年中に原子力規制庁に移管

処分事業

事業者の技術開発
(経済性、効率性向上等)

安全規制

規制支援研究
(安全基盤の確保)

NUMOとの
共同研究

技術継承・移転

規制機関からの
受託研究

地層処分の技術基盤

地層処分研究開発

- ✓ 処分システムに関する工学技術
- ✓ 安全評価手法
- ✓ 使用済燃料の直接処分技術

深地層の科学的研究

- ✓ 超深地層研究所計画
- ✓ 幌延深地層研究計画
- ✓ 地質環境の長期安定性研究

知識ベースの構築(KMS)

- 次世代型サイト特性調査情報統合システム(ISIS)
- 処分概念データベース
- 性能評価統合レポート(e-PAR)など

① 人工バリアや放射性核種の長期挙動に関するデータの拡充とモデルの高度化；処分場の設計や安全評価に活用できる実用的なデータベース・解析ツールを整備

② 深地層の研究施設等を活用して、実際の地質環境条件を考慮した現実的な処分場概念の構築手法や総合的な安全評価手法を整備

国民・関係者の
信頼感の醸成
(人材育成にも活用)



データベースは以下から直接アクセスできます

<p>熱力学・吸着・拡散データベース</p> <p>地層処分の安全評価のためのデータベースです。</p>	<p>緩衝材基本特性データベース</p> <p>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。</p>
<p>グラウトデータベース</p> <p>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。</p>	<p>ガラスの溶解に関するデータベース</p> <p>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。</p>
<p>オーバーバックデータベース</p> <p>オーバーバックの腐食試験や溶解試験に関するデータベースです。</p>	

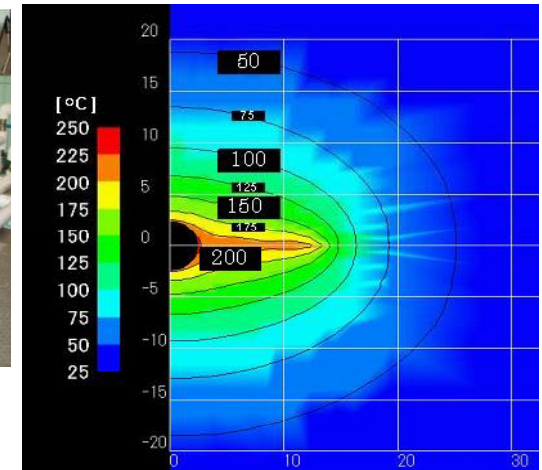
地層処分研究開発

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上

- 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; 1,711件
 - ・緩衝材基本特性データベース; 2,168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



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; 約 46,000件, 文献数約 670編
 - ・拡散係数データベース; 約 60項目 2,000件
 - ・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圈モデル構築・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

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
<p>【処分システムに関する工学技術】</p> <p>●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。</p> <p>●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。</p> <p>●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。</p>	<p>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</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>人工バリア等の長期複合挙動に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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ル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。 <p>工学技術の信頼性向上</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 	<p>課題ダイジェスト</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 <ul style="list-style-type: none"> ・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 ・原位置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 ・ナチュラルアナログ研究におけるデータの蓄積 <ul style="list-style-type: none"> ・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 	<p>必須の課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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

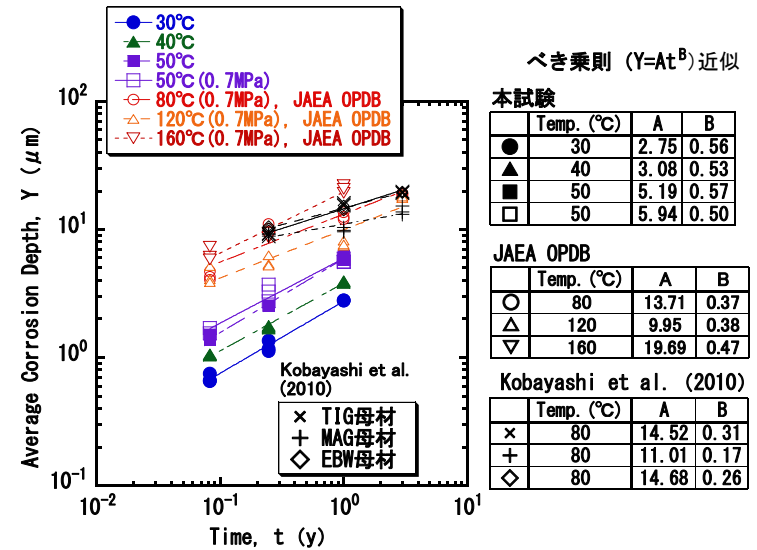
□ 成果

【オーバーパックの腐食挙動に関するデータの拡充】

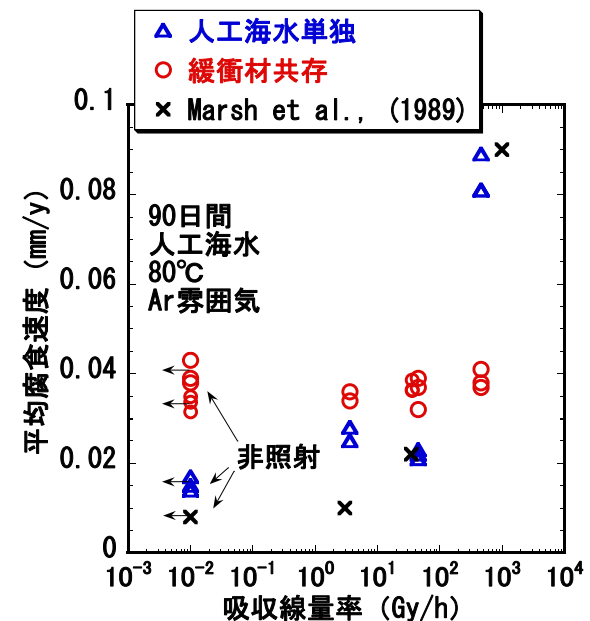
- 温度, 放射線など、炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に及ぼす環境因子の影響に着目した実験的検討によりデータを拡充するとともに、データベースを更新した。

□ 意義 / 反映先

- 温度条件に関する不確実性への対応や処分場設計における制限温度緩和の可能性の検討における基礎的情報
- 人工バリアの長期的な温度変化に対応したオーバーパックの長期腐食挙動の推定
- オーバーパック設計における合理的な遮蔽厚さ設定に資するための基礎的情報



温度による炭素鋼の腐食挙動への影響



γ線照射による炭素鋼の腐食挙動への影響

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

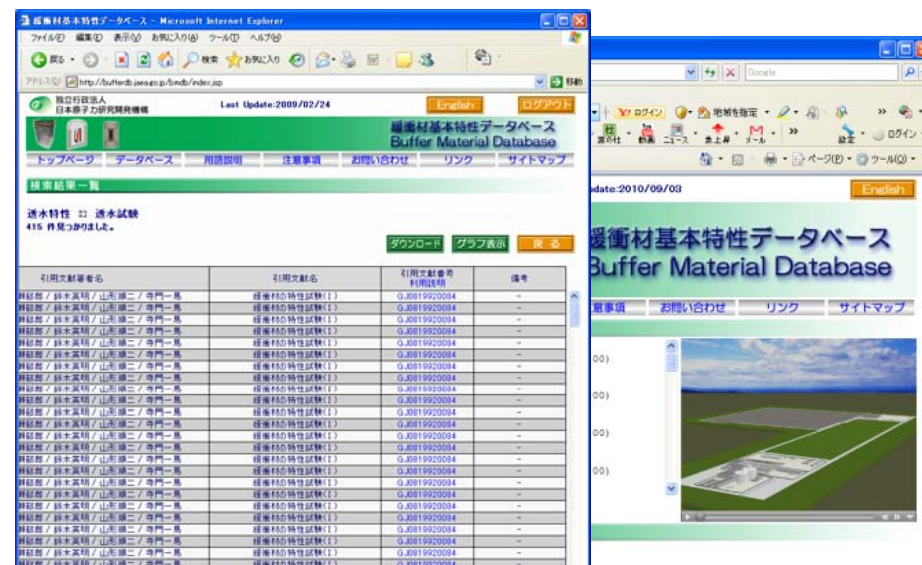
□ 成果

【緩衝材の膨潤性・透水性等基本特性に関するデータの拡充】

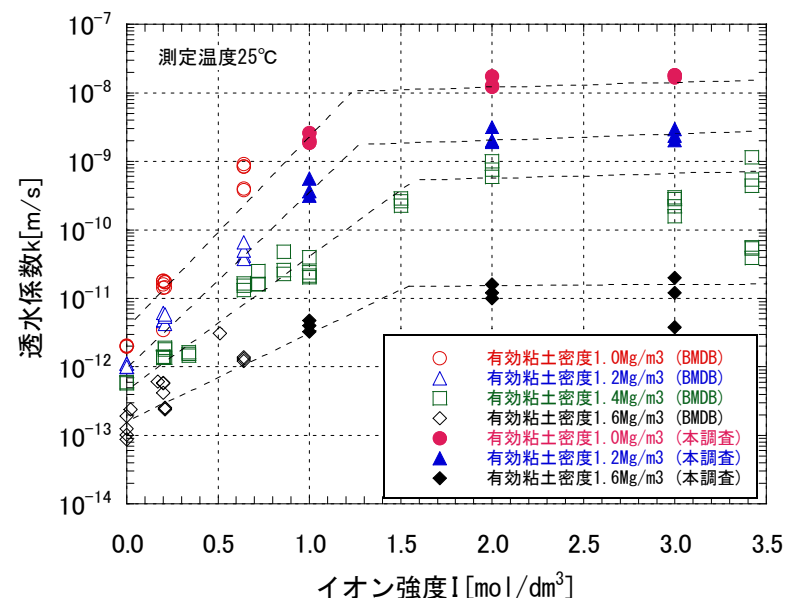
- 試験条件を高温、高塩水環境に拡張した膨潤圧、透水試験データを取得・収集し、データベースを拡充・更新した。
- 緩衝材の膨潤性について、試験方法の標準化に向けた手順の整理等を実施した。

□ 意義／反映先

- 緩衝材の長期影響評価において、オーバーパックの候補材料である炭素鋼(鉄)との相互作用による緩衝材の長期的な変質影響を評価するための手法開発に反映
- 保守的な温度制限($< 100^{\circ}\text{C}$)に対し、サイトの裕度を高める等の観点で、緩衝材の温度制限を検討する際の基礎的な情報として反映



緩衝材の透水・膨潤特性等のデータベース整備



高塩水条件下でのベントナイト系材料の透水係数の例
(<https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>)

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:

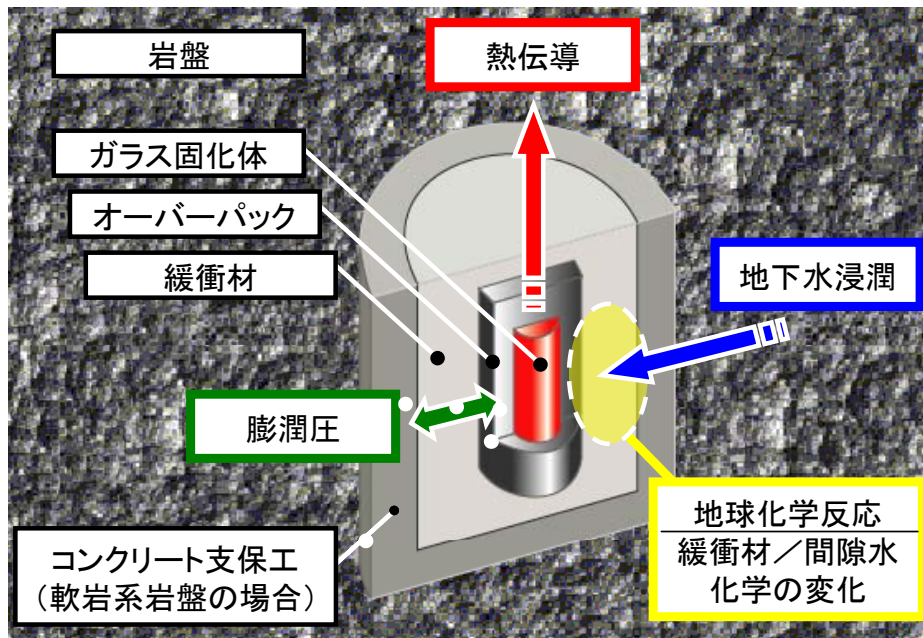
熱-水-応力-化学連成(4連成)挙動の解析評価

□ 成果

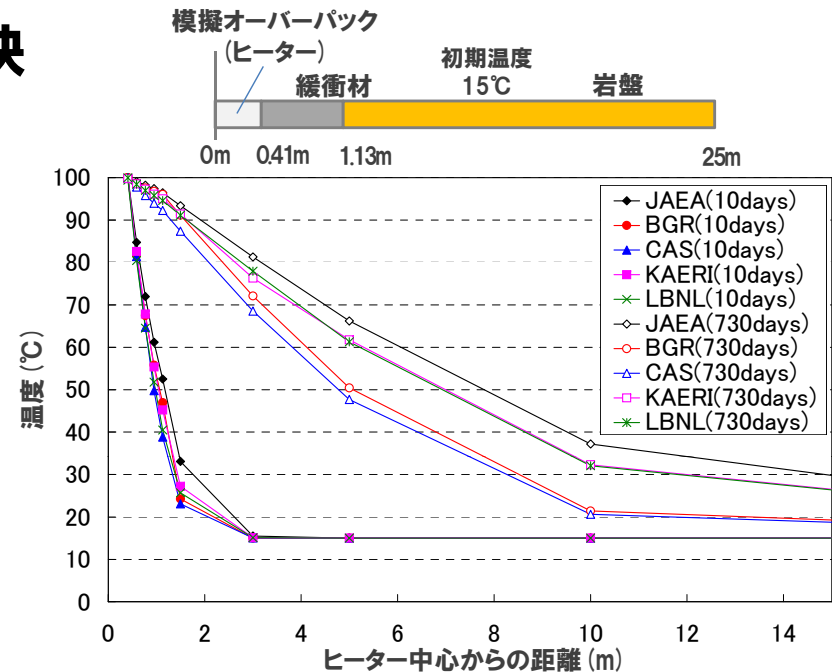
- 4連成解析コードについて、オーバーパックの腐食等に影響を及ぼす緩衝材中のpHの定量化に必要なベントナイト中の鉱物反応や、間隙水中の塩濃縮を考慮できるように4連成解析コードを改良した(国際共同研究 DECOVALEX-2015 を活用)。

□ 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4連成挙動評価手法を整備
- 核種移行解析のための初期条件の提示に反映



人工バリア模式図



人工バリア性能試験の解析結果例
(ヒーターからの距離と温度の関係)

DECOVALEX-2015での各国の計算結果の比較例

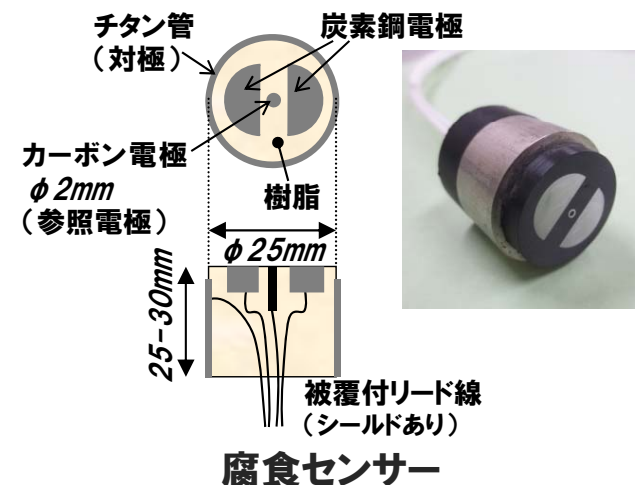
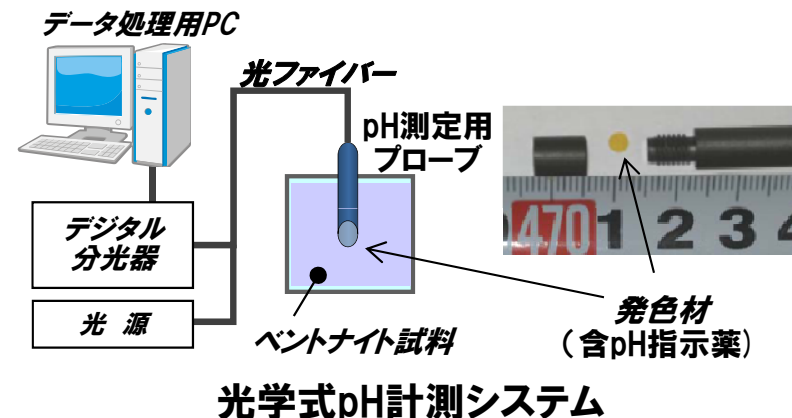
処分システムに関する工学技術の信頼性向上 (研究開発成果事例)

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

- 緩衝材中のpHを計測するための発色剤と光ファイバーを利用した光学式pH計測システムを開発し、室内試験により適用性を確認した。本システムを幌延URLで実施する人工バリア試験の緩衝材中のpH計測に適用した。
- 人工バリア設置初期など、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のセンサーの開発を行い、炭素鋼の腐食電位や交流インピーダンスなどの電気化学測定に必要な電極類を耐熱性の樹脂に埋め込んで一体化したセンサーを考案した。室内試験により、開発したセンサーが原位置で適用できるとの見通しが得られたことから、幌延URLで実施する試験の計測に適用した。



□ 意義/反映先

- 原位置において緩衝材中のpHや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を提示
- 原位置での計測データを用い、4連成解析コードの検証が可能になる。メカニズムの解釈、現象理解を踏まえた解析コードの改良に反映可能
- 処分場の操業～閉鎖時における地球化学特性の連続モニタリングへの要求に応えることが可能

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）

3) 工学技術の信頼性向上:

グラウト技術の開発

□ 成果

- **要素技術の開発**: pH11以下の低アルカリ性を有するグラウト材料を開発し、その物性値をグラウトデータベースに格納した。処分坑道における長期影響評価の観点から、処分場における許容湧水量の目安、グラウト材料、注入工法及び注入装置の適用例を示した。
- **原位置適用性試験**: 幌延URLにおいて、開発した低アルカリ性セメントの止水性及び高圧対応パッカーの適用性を確認した。グリムゼルテストサイトにおいて、開発した溶液型材料の注入試験及び数値解析を用いたグラウト浸透範囲予測解析の検証を実施した。
- **グラウト影響評価技術の開発**: グラウト材料による地下水、岩盤及び人工バリアへの影響評価で必要となる水理-物質移行、化学反応-物質移行モデルを開発した。
⇒実施主体が作成する概念設計における湧水抑制対策に、直接的に反映することを目的に、**グラウト技術のガイドライン**として、上記の成果を取りまとめた。

□ 意義/反映先

わが国の処分場の建設・操業に不可欠なグラウト技術を、地下深部の特徴を踏まえ、地層処分システムの長期性能への影響を最小限に抑えた技術として体系的に構築したことにより、実施主体における湧水抑制対策の策定に反映可能



グラウトデータベース



グラウト技術のガイドライン

深度	部位	許容湧水量の目安	グラウト材料	注入工法	注入装置
0 m	浅部	1L/min/m	OPC or 低アルカリ性セメント	従来の孔配置	既存技術で対応可能
	深部	1L/min/m	OPC or 低アルカリ性セメント		・高圧対応パッカー ・ジェットグラウトポンプ
300 m	処分坑道	1L/min/m	低アルカリ性セメント or 溶液型	坑道断面内への孔配置	
	処分孔	0.6L/min/pit	溶液型	対応困難な場合は従来の孔配置 坑道断面内への孔配置	・高圧バルブ(流量圧力制御装置)
1000 m	処分坑道	0.6L/min/m	溶液型	坑道断面内への孔配置 Grout孔 Fractures アクセス・連絡坑道 処分坑道	・暴噴対策装置

開発したグラウト設計技術の処分場への適用を想定した検討事例

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
<p>【安全評価手法の高度化】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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 	<p>システム性能評価に係る手法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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圈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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 <ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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見聞を活用した安全評価手法の適用性確認 <ul style="list-style-type: none"> ・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:

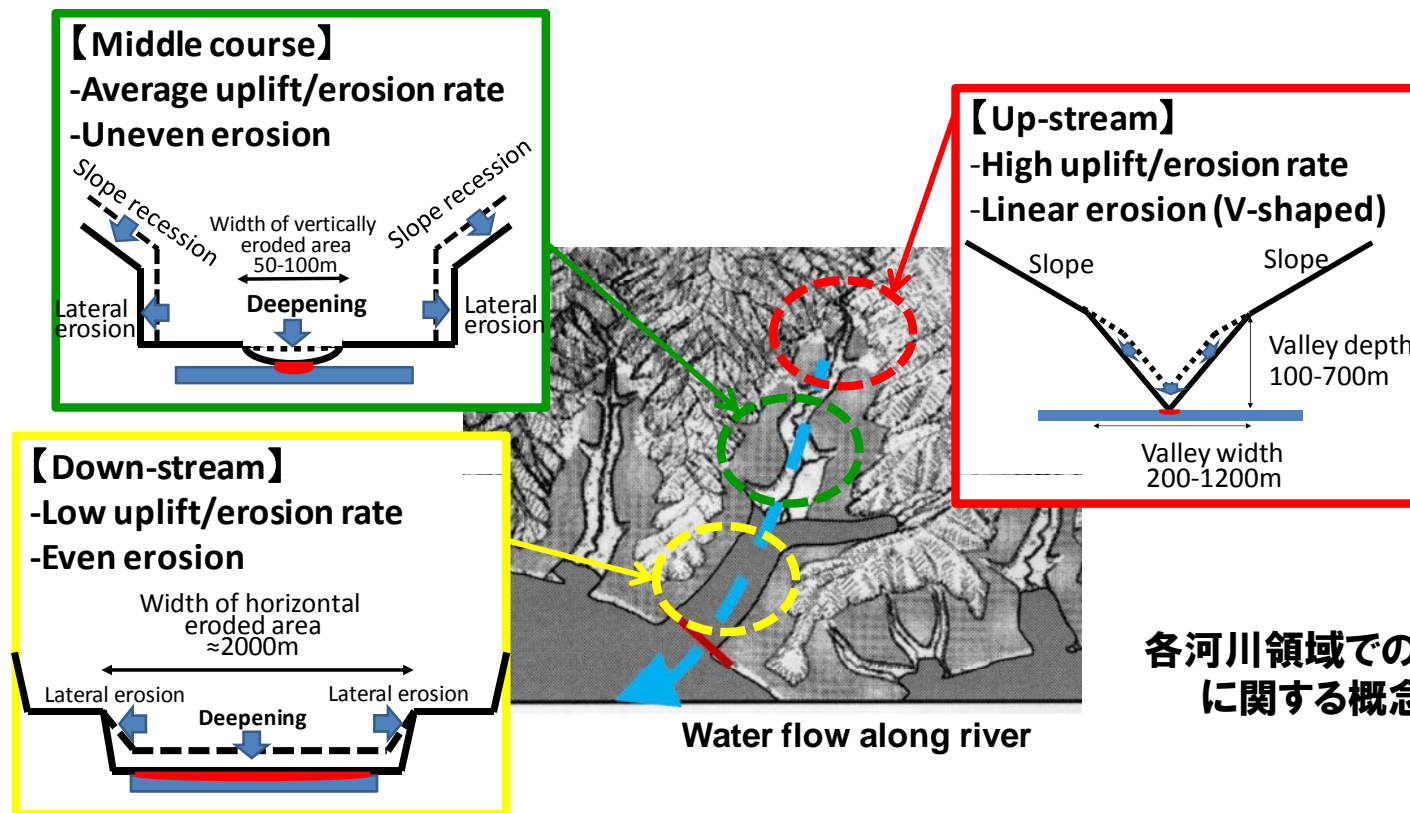
わが国の河川侵食形態を踏まえた概念モデルの構築

□ 成果

- 処分場が地表へ接近することを想定した隆起・侵食シナリオの検討。日本の侵食形態(侵食モード)を踏まえた概念モデルを構築し、これに基づき安全評価を実施。隆起・侵食に関するプロセスと安全機能の関係を定量的に把握

□ 意義／反映先

- 実施主体が行う安全評価に利用可能な、隆起・侵食影響評価のモデリング技術に反映



各河川領域での侵食モードに関する概念モデル

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：

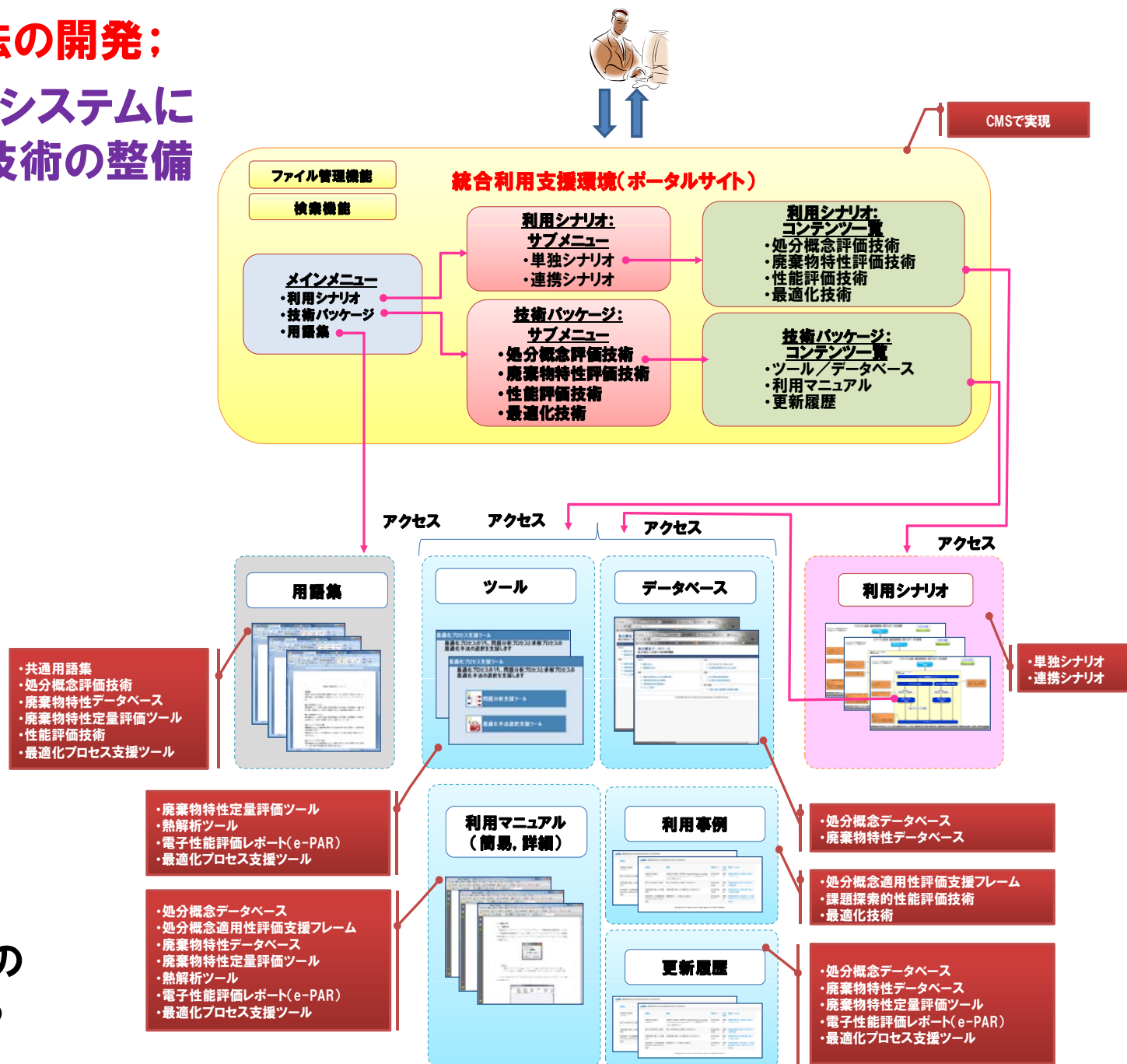
多様な前提条件が地層処分システムに与える影響についての評価技術の整備

□ 成果

- 前提条件(廃棄体インベントリや処分概念オプション等)の多様性に関するデータベースの構築
- 異なる条件下でのインベントリ解析や核種移行解析を実施する支援ツールの整備(解析条件設定, 実行管理, 結果整理等のGUIによる可視化等)
- 上記を有効に利用するための体系化環境、利用マニュアル、及び利用シナリオ等の整備

□ 意義／反映先

- 多様な前提条件に応じた解析の効率的な実施を促進・支援する技術基盤を整備



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:

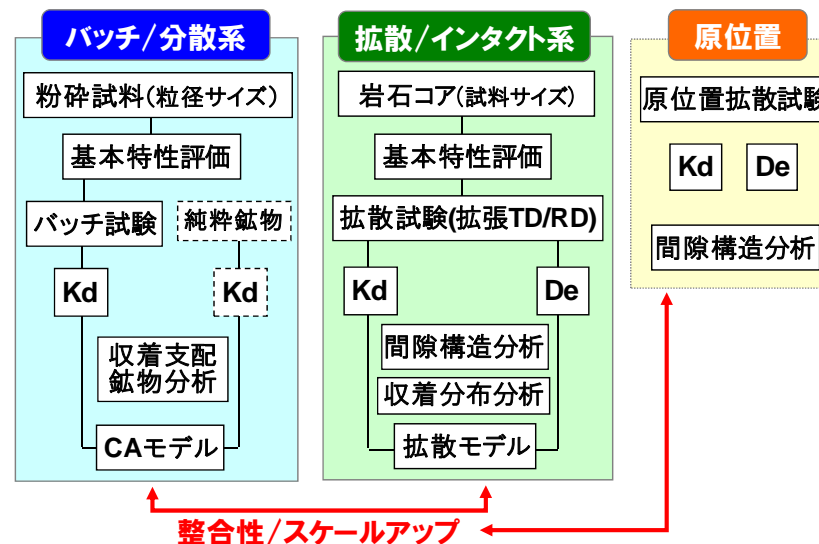
収着・拡散データベースの開発

□ 成果

- 幌延の原位置トレーサー試験と連携した、割れ目を含む室内データ取得・評価、その結果の原位置試験条件設定への反映
- グリムゼル花崗岩のマトリクス部の室内データ取得と原位置条件へのアップスケール法の適用性評価
- 圧縮ベントナイト中の不均質間隙構造の分析評価と拡散モデルの高度化、モデルに基づく核種移行パラメータ/不確実性の評価手法の開発
- 最新のデータ取得/モデル化/パラメータ設定の方法論を反映した福島事故廃棄物処分やCs環境動態評価の検討

□ 意義/反映先

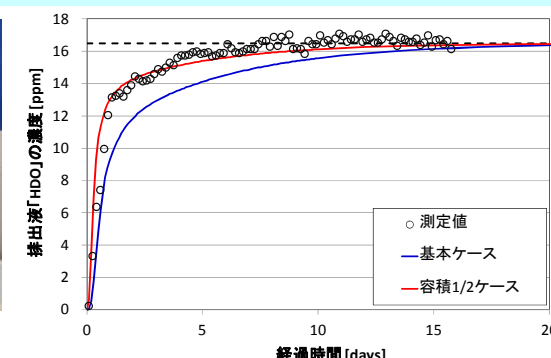
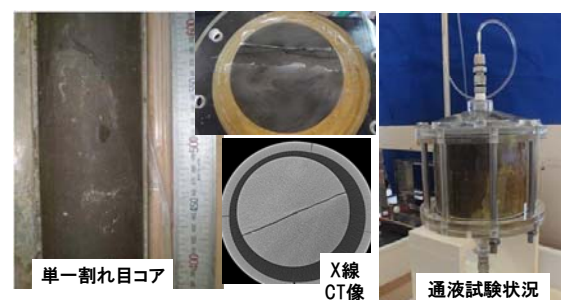
- 最新の知見を反映した核種移行モデル/パラメータ評価の方法論を構築し、直接処分評価、処分事業(NUMO共同研究)、福島事故廃棄物評価等へ反映



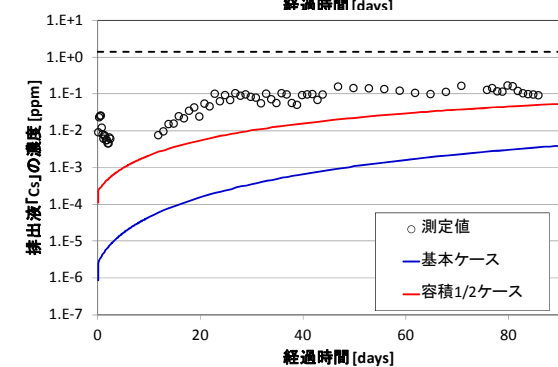
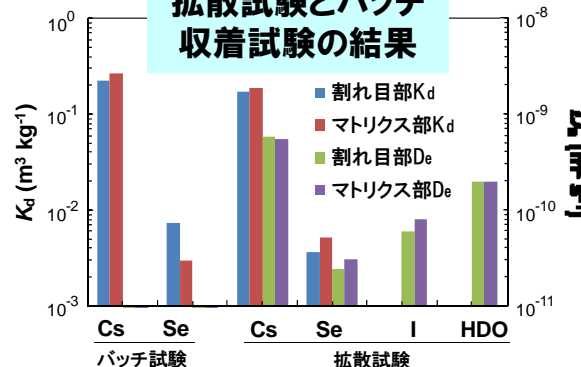
幌延URLにおける原位置トレーサー試験準備状況



幌延岩の単一割れ目試料の低流量通液試験の破過データと解析結果



拡散試験とバッチ収着試験の結果



NUMOとの共同研究

平成23～25年度：概要調査段階における設計・性能評価の高度化

目標：NUMOが概要調査段階で実施する候補母岩の設定，処分場の概念設計および予備的安全評価へのJAEAの技術の活用。

- ・実施主体の視点で実用化の方法論と具体化策を検討。
- ・この共同研究を通じ，JAEAからNUMOへの実効的な技術移転に寄与。

- (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
- (2) シナリオの構築方法に関する検討
- (3) 核種移行パラメータの設定に関する検討
- (4) 知識情報の品質確保に関する検討（H23年度のみ、H24年度以降は(2)および(3)において実施）

平成26～（H27年度）：放射性廃棄物地層処分の安全評価に向けた論拠の整備

目標：JAEA, NUMOそれぞれの研究開発成果等を共有し，地層処分の安全評価に向けて，シナリオ，モデル，データの設定や，その科学的論拠の整備等を効率的に行う。

・本共同研究の成果は，JAEAが行う使用済燃料の地層処分の安全評価や，NUMOの包括的技術報告書にも活用。

- ・ひきつづきJAEAからNUMOへの実効的な技術移転を進める。

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