



地層処分技術に関する研究開発成果の取りまとめと 今後の研究について

—高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発と 使用済燃料の直接処分研究開発—

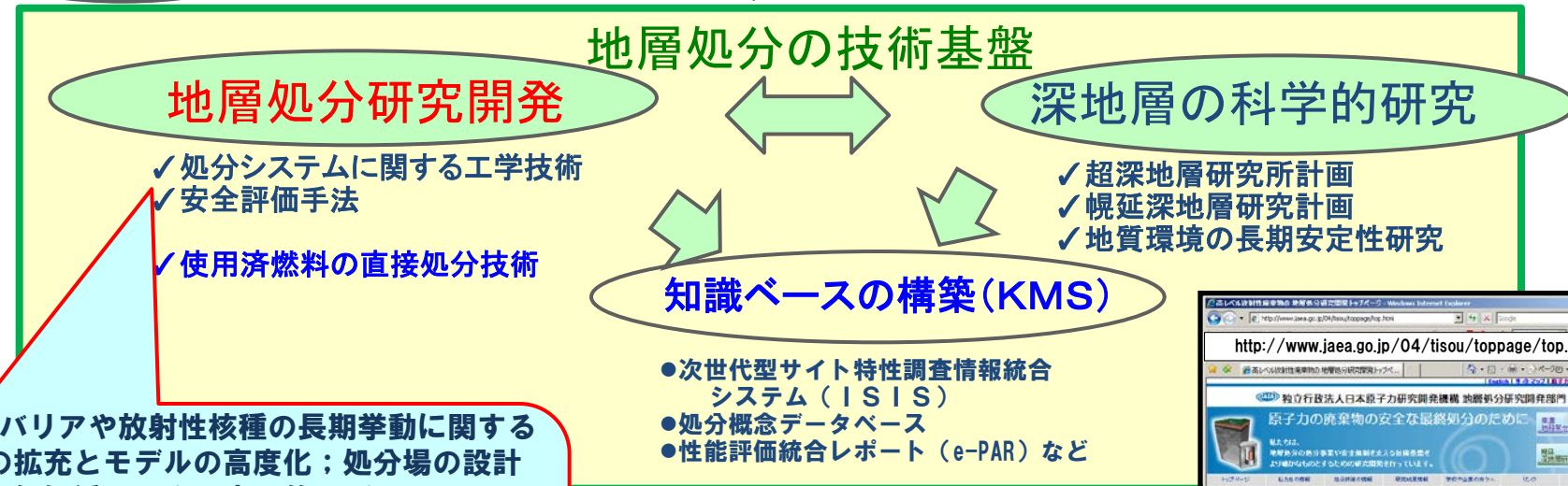
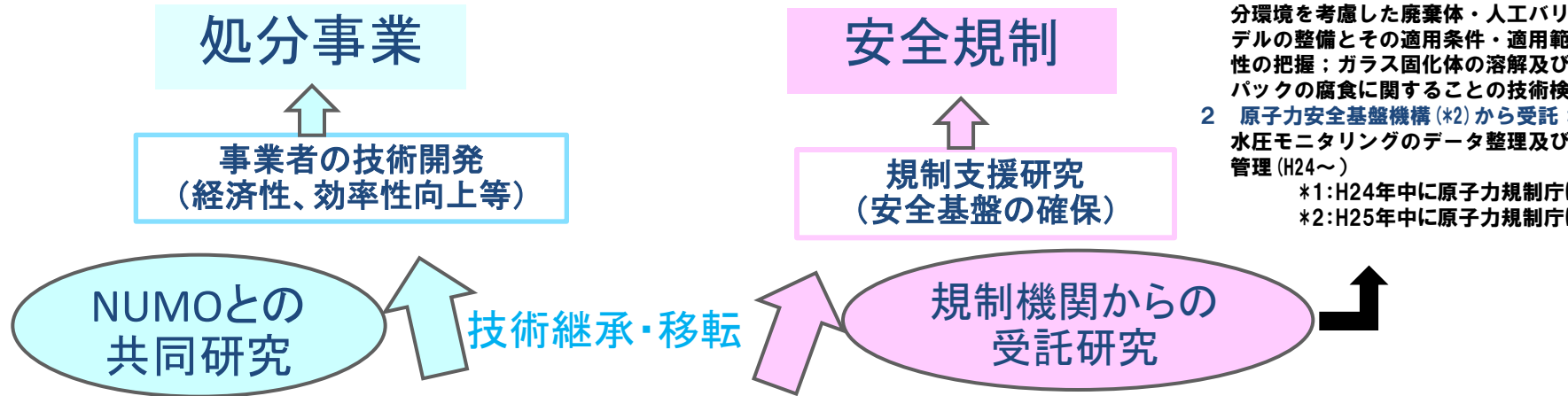
平成26年6月30日

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門

* 「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発」は以下「地層処分研究開発」と表記する。

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



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
- ✓ 幌延深地層研究所計画
- ✓ 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
処分事業に対する
信頼感の醸成



データベースは以下から直接アクセスできます

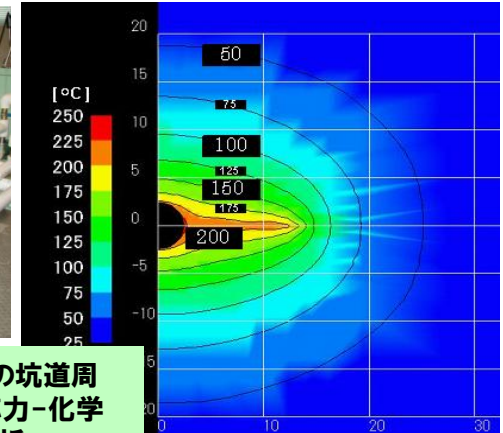
- 熱力学・吸着・拡散データベース**
地層処分の安全評価のためのデータベースです。
- グラウトデータベース**
地下坑掘削試験における湧水抑制のためのグラウト技術のデータベースです。
- オーバーバックデータベース**
オーバーバックの腐食試験や溶接試験に関するデータベースです。
- 緩衝材基本特性データベース**
緩衝材や処分場の設計と人工バリアの長期挙動評価のためのデータベースです。
- ガラスの溶解に関するデータベース**
ガラスの溶解挙動に関する公開情報を集約したデータベースです。

地層処分研究開発

運営費交付金及び資源エネルギー庁公募事業で実施

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
 - ・ガラス溶解データベース;数値データ 23,288件, 文献数237編
 - ・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
- 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物圏モデル構築・移行パラメータの整備
 - 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

3. 使用済燃料の直接処分研究開発

運営費交付金

- インベントリデータ整備
- 人工バリア概念の開発
- 性能評価モデル/データ整備
- 総合性能評価手法の開発

技術的取りまとめ報告書

資源エネルギー庁公募事業

- 先進的な人工バリア材料の開発
- 直接処分施設設計の概念構築

原子力機構が受託した資源エネルギー庁公募事業

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。
地質環境総合評価技術高度化開発	地質環境調査・評価に係るノウハウや様々な判断・意思決定等のための知識の分析・整理方法をエキスパートシステムとして体系化し、地質環境調査を総合的に支援するシステムを構築。

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。
--------------------------	--

H25-29 使用済燃料直接処分

使用済燃料の直接処分技術開発(主に処分場設計技術開発)	日本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。
------------------------------------	--

(運営費交付金では主に安全評価研究)

NUMOとの共同研究(H23－H25)

目的（要旨）：

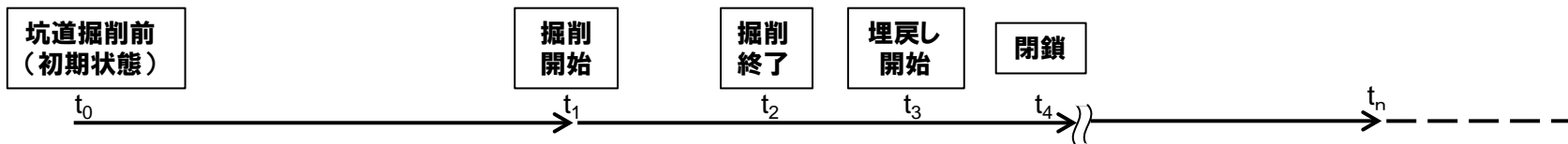
NUMOが実施する処分場の概念設計や予備的安全評価に関連する主要な技術テーマにつき、JAEAが蓄積してきた技術を、実施主体の視点に沿って実用化するための具体的な考え方と進め方を策定し、必要な開発課題と今後の計画を明らかにすること。JAEAからNUMOへの技術移転の一端を担うこと。

実施項目	NUMO分担	JAEA分担
(1) 対象母岩の選定に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 対象母岩選定について国外の最新の事例調査とわが国における進め方の検討および課題の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 母岩特性評価に関わるこれまでの知見・情報の整理
(2) シナリオの構築に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> ➤ シナリオ構築に関わる国内外の最新の事例調査とシナリオ構築の進め方に関する検討および課題の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ニアフィールドを対象とした現象理解と安全機能への影響に関わるこれまでの知見・情報の整理
(3) 核種移行パラメータの設定に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> ➤ パラメータ設定に関わる国外の最新の事例調査とパラメータ設定の進め方の検討および課題の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 核種移行データベースやモデル等の基盤技術等に関わるこれまでの知見・情報の整理
(4) 知識情報の品質確保に関する検討(H23-24)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 知識情報の品質確保の進め方の検討と課題の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 知識情報の品質確保に関わるこれまでの知見・情報の整理
(1)－(4) 共通	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 事業の視点からの要件と考え方の整理 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 基盤研究開発へのフィードバック検討

機構改革計画を踏まえた取りまとめの方針

- 深地層の研究施設計画と同様、第2期中期計画としての成果の取りまとめと必須の課題を明確にした今後の研究開発計画の策定
 - 「地層処分システムで起こる現象のメカニズムについての先進的な評価手法開発と、それに必要なデータベース整備に重点化」という方針に留意
 - 処分事業の段階設定を念頭に置き研究開発成果の反映先を明確化
 - 成果のコアメッセージと必須の課題の明確化(深地層の研究施設計画とも連携)
 - 将来の技術移転に留意し、処分実施主体・規制機関等が活用しやすい情報・技術パッケージ(CoolRepH26)として体系的に整備
 - 使用済燃料の直接処分研究開発については「第1次取りまとめ」に成果を反映できるように実施

処分事業の段階に対応する地層処分研究開発成果の位置付け



	A1群) 地質環境の初期状態の理解	A2群) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解	A3群) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解
第2期中期計画におけるコアメッセージ	<ul style="list-style-type: none"> 坑道掘削前の母岩の地質環境状態のサイト記述モデルを構築するための方法論を調査量と不確実性との関連性に着目して体系化 異なる調査分野との連携、データの相互活用により地質環境モデルの信頼性が向上 など 	<ul style="list-style-type: none"> 地下数百mまでの掘削に伴う地質環境への影響を評価するための調査解析技術を適用し、その有効性や適用限界を確認 掘削影響を軽減するための有効な工学技術等について、これまでに得られた知見を集約、整理 など 	<ul style="list-style-type: none"> 地下施設の閉鎖後に想定される天然現象に伴う地質環境の長期的な変動の傾向やパターンを推測する技術を整備し、それらの適用性を実際の地質環境条件下で確認 など
成果ダイジェスト(例)	<ul style="list-style-type: none"> 重要な地質環境特性を把握する際に有効な調査解析手法とその限界の提示 各地質環境モデルの信頼性(不確実性)評価手法の提示 など 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削に伴う各地質環境特性(地質、水理、水質、岩盤力学)変化の理解 掘削影響領域評価技術 など 	<ul style="list-style-type: none"> 天然現象(隆起・浸食、地震・断層活動、気候・海水準変動)による地下水への影響評価解析技術 など

工学技術

人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

- 処分坑道・人工バリア過渡期(掘削～閉鎖～飽和)における熱-水-応力-化学連成挙動評価技術開発及び原位置試験による妥当性評価

工学技術の信頼性向上

- 岩盤長期挙動予測評価技術の信頼性向上。原位置試験によるモデル確認等
- 新材料開発。低アルカリ性コンクリート材料の施工性実証、化学モデルの原位置適用性評価

人工バリア等の基本特性データベースの拡充及びデータベース開発

- 人工バリア長期挙動予測不確実低減
- 緩衝材、オーバーパック基本特性
- 埋め戻し材基本特性データ

安全評価

評価手法の開発

- 天然現象影響評価技術
- 物質移動特性の評価手法の構築

モデル化技術の開発

- 表層環境を考慮した生物圏モデル構築等
- 岩盤中水理・物質移行評価手法整備
- コロイド、有機物、微生物の影響評価モデル開発

データベース開発

- 核種移行パラメータに関するデータベースの開発

地層処分研究開発

地層処分研究開発に関するCoolRepH26 (カーネル) 取りまとめ基本方針

- **カーネルの構成:**
 - カーネル2:工学技術
 - カーネル3:性能評価研究
 - カーネル4:TRU廃棄物
 - **カーネル5:使用済燃料の直接処分研究開発**
- **過去5年間のうちに開始した課題について、既存のCoolRepH22カーネルの目次に対応する項目がない場合、新規項目を設けて記載（たとえば工学技術の「埋め戻し材」）。**
- **背景・目的・方法・結果・意義をコンパクトにまとめて提示。重要な図表の貼付。原著・原典等とのリンク。**
- **資源エネルギー庁受託事業の成果についても記載。原典として個々の公開事業報告書とリンク。**
- **NUMO共同研究の成果についても記載。**
- **使用済燃料の直接処分については、第1次取りまとめをベースに、レビューワークショップでのコメントへの対応などを含めCoolRep化を進める。公開にあたっては事前に関係機関等との調整を踏まえる。**

成果と抽出課題

処分システムに関する工学技術

成果

- 処分場設計の技術基盤として、複合的条件での
 - ・データベースの開発、拡充
 - ・連続データが取得可能なセンサー開発
 - ・現象を評価できる解析コードの改良
- 地質環境に対する化学的影響の少ない材料の施工性確認
- 実規模の人工バリアの設置技術について見通し

1)人工バリア等の基本特性データベースの拡充及びデータベース開発

- オーバーバック、緩衝材、両者の複合作用(鉄-ベントナイト相互作用)、埋め戻し材(幌延URLの掘削ずりを主材としたベントナイト混合土)の基本特性データに関して、試験条件を高温環境、高塩水環境に拡張設定して取得、データベース化
- 炭素鋼の腐食に対する γ 線の影響が緩衝材共存下では著しく緩和され、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。
- 緩衝材の機能の一つ、膨潤性の試験方法の標準化を進めた。設計への適用にあたり、供試体の寸法効果や試験セルとの摩擦影響が課題であることを解明
- 鉄-ベントナイト相互作用による緩衝材中の二次鉱物の生成が緩衝材の変質の主な要因であるが、その影響範囲は限定的であることを解明。

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

- 処分後初期の熱-水-応力-化学連成現象解析コードを改良し、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可能とした
- 幌延URLの原位置・実規模の人工バリア性能確認試験を行い、pH及びオーバーバックの腐食条件の連続モニタリング技術を開発。pHセンサー、電気化学計測用センサーを開発

3)工学技術の信頼性向上

- 幌延URLを活用して、母岩の特徴を評価する基礎データを取得。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
- 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
- 実規模の人工バリアについて、定置装置による所定精度での施工確認

抽出課題

- 長期複合現象の評価コードの妥当性確認や評価モデルの信頼性向上、開発したセンサーの適用性確認(地下研究施設を活用した実規模試験)
- 人工バリアの地下定置技術や坑道の力学挙動、開発したセメント材料の地質環境に対する影響確認(地下研究施設でのデータ取得)

1)人工バリア等の基本特性データベースの拡充及びデータベース開発

- 評価モデルの信頼性向上のため、現象理解・パラメータ取得のための長期試験実施
- 処分後初期の環境条件が過渡的な状況や影響因子が複雑に作用する状態下での試験データ蓄積
- 原位置・実規模の人工バリア性能確認試験を通じ、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

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

- 幌延URLで実施する実規模人工バリア性能確認試験で検証データを取得。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

3)工学技術の信頼性向上

- 幌延URLの地下環境条件下において実規模の人工バリアを所定の精度で構築できることの確認
- 幌延URLで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拡充

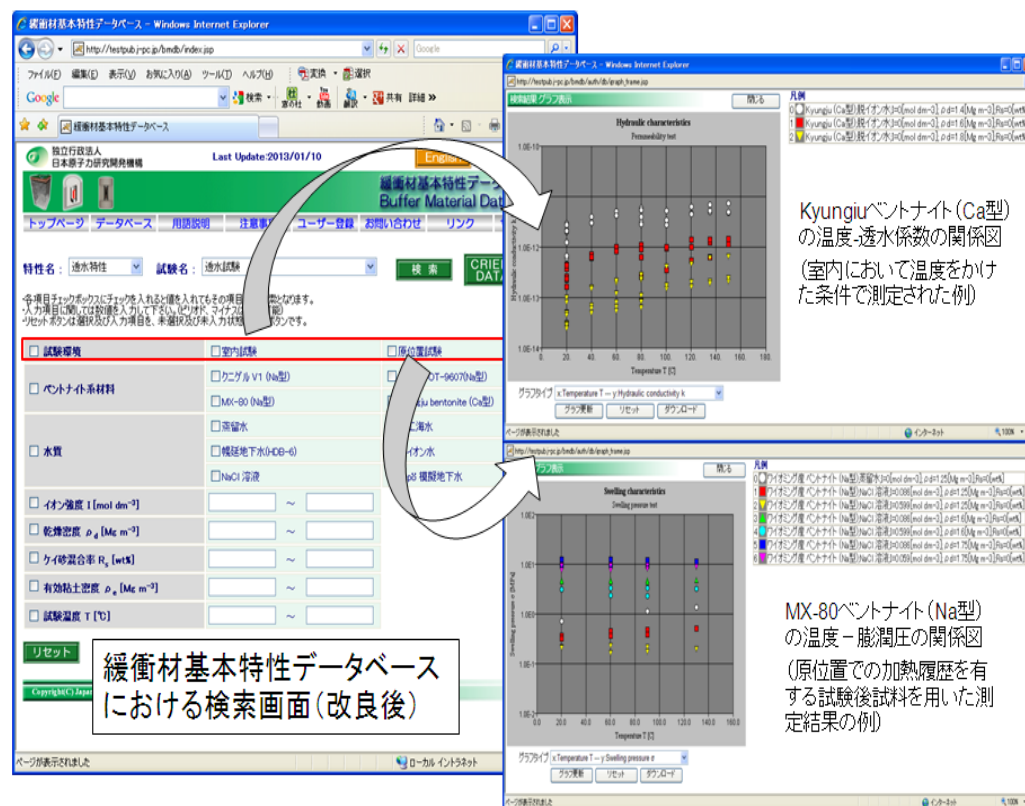
処分システムに関する工学技術の信頼性向上 (研究開発成果事例)

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: 人工バリア等の変質等の長期挙動

□ 成果

【緩衝材の基本特性への熱の影響に関するデータの拡充】

➤ 熱影響を受けた緩衝材の特性(膨潤性, 透水性)の変化に関わる319件のデータを収集



□ 意義 / 反映先

- 緩衝材の長期安定性評価において、オーバーパック候補材の炭素鋼(鉄)との相互作用に伴う長期的な変質影響を評価するための手法開発
- 保守的な温度制限 (<100°C) に対し、サイト裕度の拡大等の観点で、緩衝材の温度制限検討の基礎的情報

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:

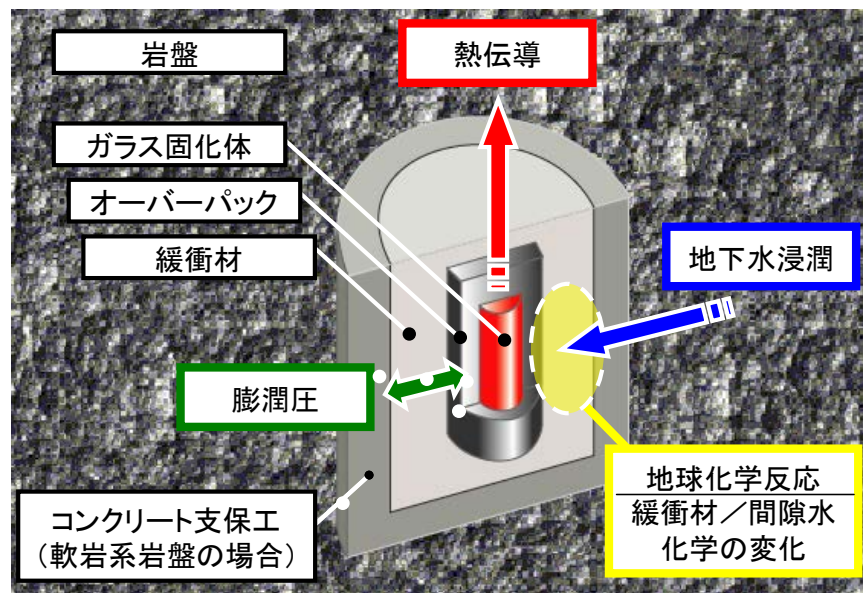
熱-水-応力-化学連成(4連成)挙動の解析評価

□ 成果

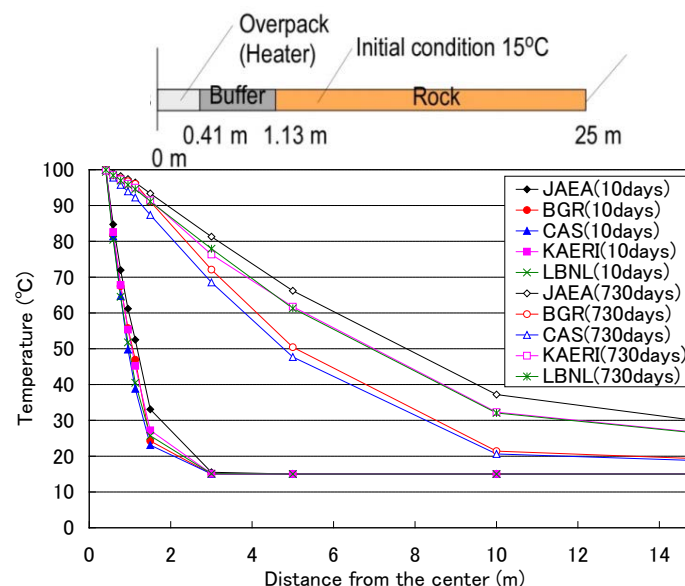
- 4連成解析コードの高度化。オーバーパックの腐食等に影響を及ぼす緩衝材中のpHの定量化に必要なベントナイト中の鉱物反応や、間隙水中の塩濃縮を考慮、4連成解析コードの改良(国際共同研究 DECOVALEX-2015 を活用)

□ 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を提示



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

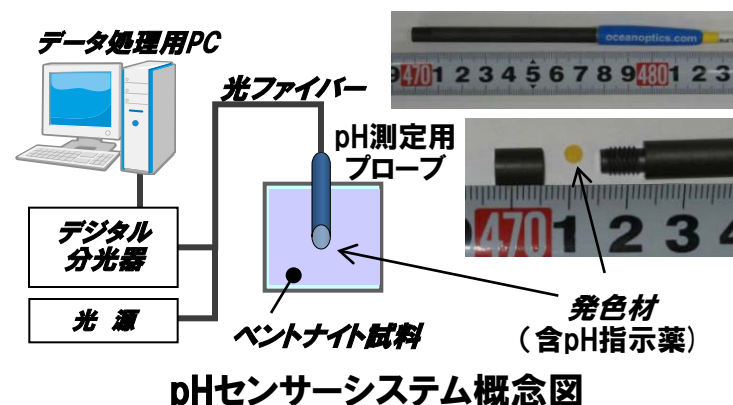
- 緩衝材中のpHの計測。発色剤と光ファイバーを利用したpHセンサーシステムを開発
- 人工バリア設置初期など環境条件の変化を伴う場におけるオーバーパックの腐食挙動を評価するためのセンサーの開発。炭素鋼の腐食電位測定や交流インピーダンスなどの電気化学的測定に向け、必要な電極類を耐熱性の樹脂に埋め込んで一体化したセンサーを考案・試作、室内試験により計測を実施して適用性を確認。原位置で計測が可能となる見通し

□ 意義/反映先

- 原位置において緩衝材中のpHや電位の連続計測が実現可能であることを提示
- 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



低pH 高pH
pHの差異による発色材の色



pHセンサーシステム概念図

成果と抽出課題

安全評価手法の高度化

成果

- 安全評価における天然現象（とくに隆起・浸食現象）の影響評価手法、生物圏評価モデル、岩盤中水理・物質移行評価手法の改良
- 室内及び原位置試験による現象理解を踏まえた核種移行パラメータの設定手法を提示
- 評価基盤としてのデータベースの拡充

1) 評価手法の開発

- 地質の長期的変動として、隆起・侵食による地形変化の概念モデルを開発。このモデルに基づく安全評価を試行。隆起・侵食に関するプロセスと安全機能の関係を把握。
- 幌延URLを活用して堆積岩を対象とした適切な原位置トレーサー試験方法の検討

2) モデル化技術の開発

- 実際の地表環境を考慮した生物圏評価においてアプローチの適用性の確認。長期的変遷を考慮した地表環境の状態設定の考え方を整理
- 岩石亀裂内の地下水流動や物質移行の室内試験手法の高度化とデータの蓄積
- 核種移行評価におけるコロイド・有機物・微生物の影響評価モデルの開発として、幌延URLを活用した試験等により、地下水化学に対する微生物影響評価モデルの適用性確認

3) データベース開発

- グリムゼルや幌延URLを事例として核種移行パラメータ評価手法の開発、緩衝材の収着・拡散モデルの高度化。直接処分のための収着・拡散パラメータ設定手法を提示。
- 熱力学データベース、収着・拡散データベース、ガラス溶解のデータベース更新、データの拡充

抽出課題

- 天然現象の影響評価としての隆起・浸食評価モデル等の構築とこれらの長期変動を考慮した生物圏評価モデルの構築・様式化
- 岩盤中の物質移行試験手法及び岩盤性能の評価技術構築（地下環境での確認）
- 実際の地下環境の状態を考慮した、コロイド、有機物、微生物の核種移行への影響評価モデル開発とデータ拡充
- 先端的な分析・計算技術を用いた、核種移行モデル/パラメータ設定手法の確証

1) 評価手法の開発

- 隆起・侵食の動的平衡状態に加えて、隆起・侵食速度変化や地形発達を考慮したモデル検討
- 幌延URL350m調査坑道を活用したトレーサー試験に向けた適切なサンプル処理方法・試験条件の提示

2) モデル化技術の開発

- 具体的な表層環境やその変遷を考慮した生物圏評価モデル構築
- 開発した計測技術を活用した日本の地下環境の亀裂データ取得・蓄積
- コロイド三元系収着の評価のためのモデル開発、天然無機コロイドの特性調査手法の開発、核種溶解度評価に活用できる地下水有機物の錯形成データの拡充、核種移行に対する微生物影響評価手法の高度化・核種収着評価に資するバイオフィルム収着・拡散係数データの拡充

3) データベース開発

- 深地層研究施設での割れ目系トレーサー試験との連携。先端的な分析・計算技術の適用等を通じた核種移行モデル/パラメータ設定手法の確証・高度化

安全評価手法の高度化 (研究開発成果事例)

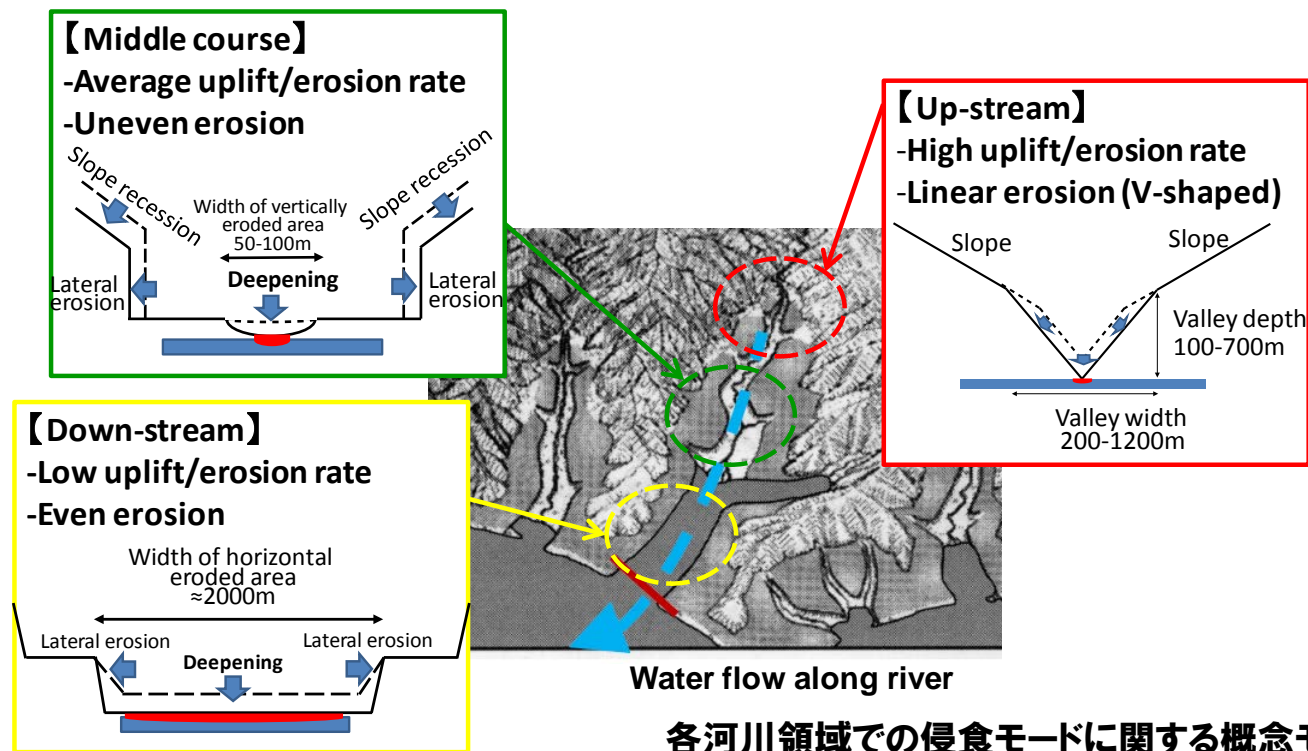
1) 評価手法の開発: 天然事象影響評価

□ 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



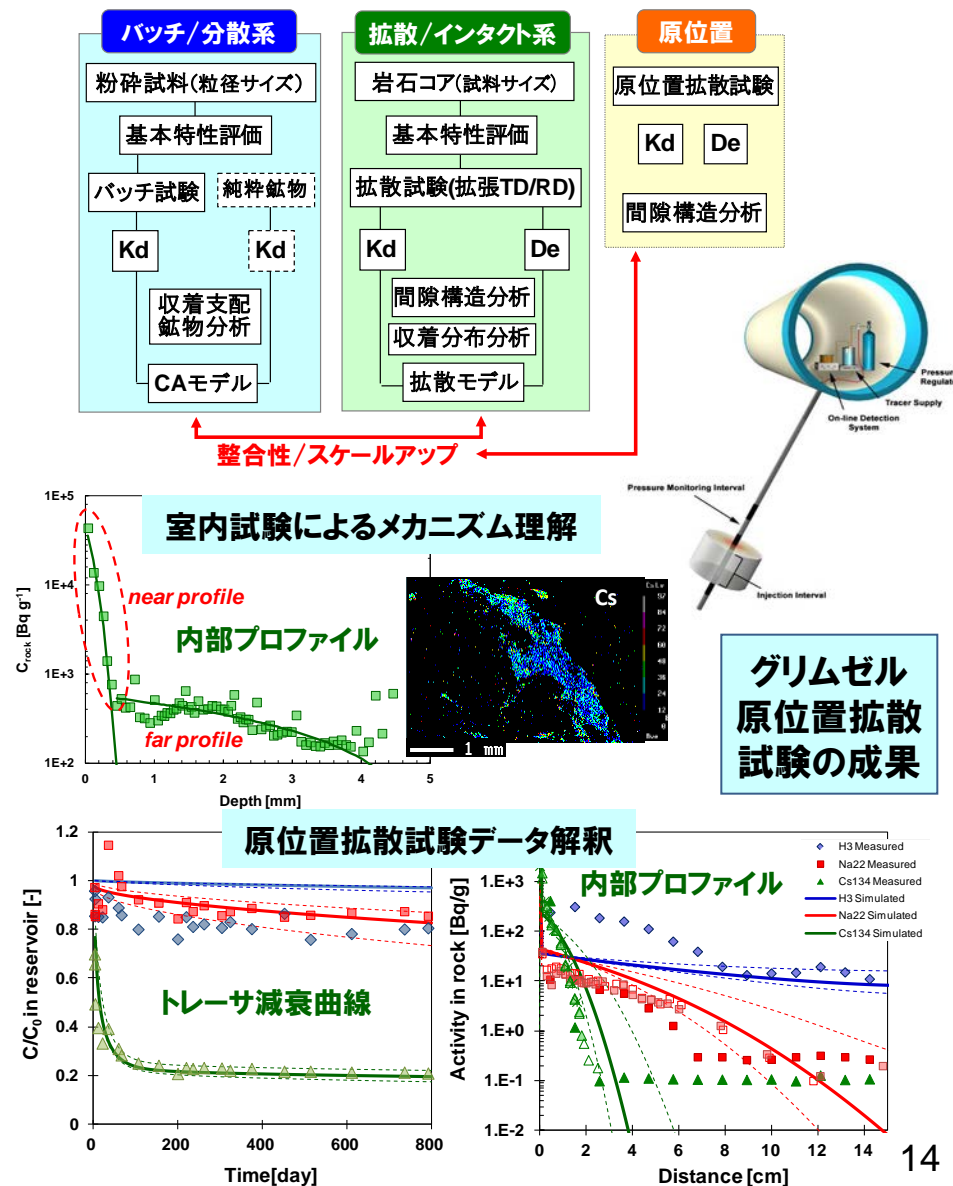
3) データベース開発：収着・拡散データベースの開発

□ 成果

- グリムゼル花崗岩の原位置拡散試験、室内データに基づく原位置パラメータ評価手法の提示
- 幌延の原位置トレーサー試験と連携した、割れ目系を含む室内データ取得手法、パラメータ評価を含む原位置試験評価手法の開発(着手)
- 緩衝材収着・拡散モデルの高度化、幌延を活用したパラメータ設定手法の改良と適用事例の提示
- 最新の方法論に基づく核種移行パラメータ設定手法の提示(土壤中Cs収脱着評価＝福島環境動態解析への反映も含む)

□ 意義／反映先

- 原位置確証やモデル高度化等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:直接処分評価、処分事業(NUMO共同研究)等へ反映



使用済燃料の直接処分研究開発（1/2）

■ 地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成25年度～平成29年度）における使用済燃料の直接処分研究開発に関する分類、細目、研究開発課題

分類	細目	研究開発課題
廃棄物データベース開発	①インベントリデータ整備	使用済燃料に関する発生量評価とインベントリ評価
処分場の工学技術	②処分場設計技術開発	直接処分に関する方策の検討
		設計技術開発
		設計支援システム開発
	③人工バリア概念の開発	使用済燃料の特徴を考慮した人工バリア概念の設定
		人工バリア概念設定に資するデータの整備及び評価手法開発
性能評価技術	④性能評価モデル／データ整備	現象理解・モデル開発
		データ整備・データベース開発
	⑤総合性能評価手法の開発	地質環境条件の設定
		シナリオの開発
		処分場周辺における臨界可能性評価
		直接処分総合性能評価手法開発
		直接処分に係る技術・知識・情報・データ等の知識ベース化

使用済燃料の直接処分研究開発 (2/2)

■ 直接処分の技術的取りまとめに向けた段階的取り組みと位置づけ

地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成25年度～平成29年度）より

第1次取りまとめ（平成25年度）

使用済燃料の直接処分の**実現可能性**及びその課題を提示

使用済燃料の直接処分の実現可能性について、諸外国で進められている直接処分に関する技術や、先行して実施されてきたHLW及びTRU廃棄物に関するこれまでの国の基盤研究開発成果も取り込みつつ、最新の知見や技術に基づき検討結果をまとめ報告書を作成。国内外の専門家によるレビューの実施。また、第1次取りまとめに向けた研究開発や技術的取りまとめを通して、**第2次取りまとめに向けた課題の抽出**等を行い、後続する研究開発計画の見直しや更なる具体化も実施。

第2次取りまとめ（レビュー版）（平成27年度迄を目処）

使用済燃料の直接処分の**技術的信頼性**を提示

第2次取りまとめに向けた研究開発は、上記の第1次取りまとめで提示される課題等への対応を行うことで、使用済燃料の直接処分が技術的信頼性を持って実現できることを示すことを目標とする。このため、レビューの対象として、使用済燃料の直接処分に関するセーフティケースの試案を作成する。

← 国内外の有識者レビュー等

第2次取りまとめ（最終版）（平成29年度迄を目処）

使用済燃料の直接処分が技術的信頼性を持って実現できることを示す。

わが国の幅広い地質環境条件を対象とした、
使用済燃料の直接処分に関するセーフティケースの例示

直接処分第1次取りまとめドラフトの構成

項目	記載概要
1. 序論	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料の直接処分に係る研究開発の背景 地層処分基盤研究開発における位置づけと技術報告書の取りまとめ 直接処分第1次取りまとめ作成の基本的考え方と進め方 本書の構成
2. 使用済燃料の直接処分に関する国際動向と日本の現状	<ul style="list-style-type: none"> 国際動向：処分対象の高レベル放射性廃棄物と処分概念、セーフティケース、可逆性と回収可能性、諸外国における規制の動向、保障措置および核物質防護 わが国の現状：地層処分を取り巻く状況、使用済燃料の直接処分に係る研究開発と計画の現状、規制等の状況、使用済燃料の発生状況と特徴 研究炉等の使用済燃料
3. 使用済燃料の直接処分を対象とした工学技術と安全評価	<ul style="list-style-type: none"> 予備的設計・性能評価の目的：限られた条件の下で、使用済燃料の特徴や新しい科学技術的知見を取り入れた設計と安全評価を予備的に試行することを通じて、設計と安全評価のアプローチや評価解析の枠組みを構築するとともに、第2次取りまとめにむけての課題を抽出することにより直接処分の実現可能性を提示することを目的とする。
3.1 前提条件	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境条件に関する設定 使用済燃料 処分施設および廃棄体に関する設定
3.2 工学技術	<ul style="list-style-type: none"> 目的および検討の進め方 地下施設の設計の手順：使用済燃料処分のための地下施設の概念、地下施設の設計フローの構築 地下施設の設計：設計条件、処分容器の設計、緩衝材の設計、坑道の設計、設計された地下施設のレファレンス仕様 設計された人工バリアの埋設後挙動の確認：埋設後の再冠水時の人工バリア挙動の評価、その他の挙動に対する評価の考え方 処分場の建設・操業・閉鎖：検討の進め方、搬送・定置設備の設計、封入設備の設計、処分場の建設・操業・閉鎖
3.3 予備的安全評価	<ul style="list-style-type: none"> 安全評価の進め方 使用済燃料を対象とした直接処分システム：地質環境、処分場、生活圏、直接処分システムの安全機能 安全評価のシナリオ：シナリオ開発、基本シナリオの記述、基本シナリオ以外のシナリオと評価の考え方 基本シナリオに基づく解析：目的、核種移行解析の考え方、評価対象核種、モデルとデータ、解析結果 安全性に関する多様な議論：不確実性の取り扱い、地質環境の長期的な変動の取り扱い、補完的指標による評価
4. 第2次取りまとめに向けた課題と今後の進め方	<ul style="list-style-type: none"> 第2次取りまとめに向けた課題：前提条件に関する課題、工学技術に関する課題、安全評価に関する課題 今後の進め方：第2次取りまとめに向けての進め方、使用済燃料直接処分に関する知識マネジメントの考え方と進め方
5. まとめと結論	<ul style="list-style-type: none"> 直接処分第1次取りまとめの成果 直接処分第1次取りまとめの結論
(付録)	<ul style="list-style-type: none"> 隆起・侵食を考慮した解析における風化帯でのデータ設定 「基本シナリオの核燃料サイクルコスト比較に関する報告書」に示された課題に対する取り組み状況

直接処分第1次取りまとめ

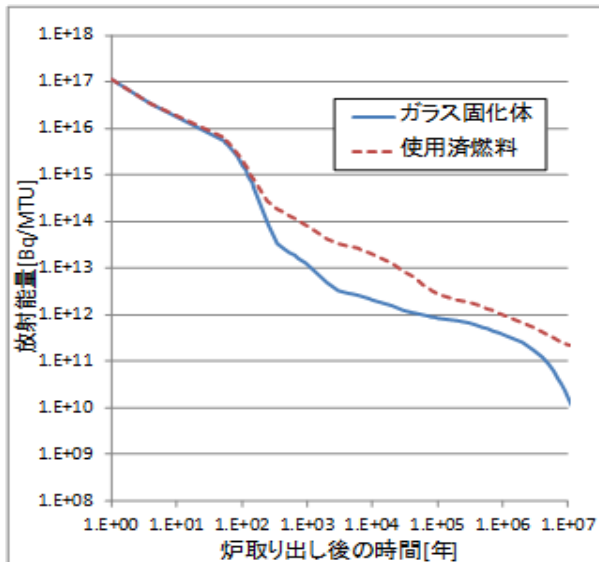
■ 直接処分第1次取りまとめの進め方

- 考える処分概念やシナリオについての網羅的な検討ではなく、最終的にセーフティケースの検討を通して技術的信頼性を提示するという目標に向け、今後進める検討の起点となるよう、前提条件や評価の範囲を予備的に設定。
- H12レポートおよび 第2次TRUレポートの成果を有効に利用しつつ、これらの報告書以降の海外の性能評価報告書、個別研究開発課題の成果等から得られる最新の知見を取り入れた検討・評価

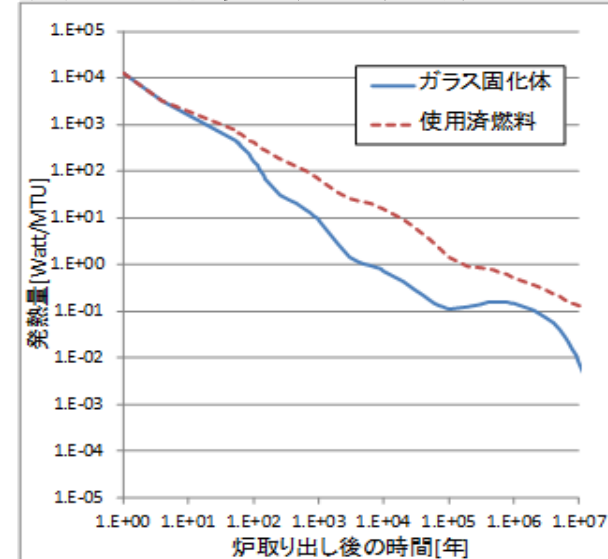
■ 前提条件

- 地質環境条件：H12レポートのレファレンスケースの設定に準拠し、以下の地質環境条件を設定
 - 地形：平野、地下水：降水起源（陸水系）、岩種：結晶岩（酸性岩）、処分場の設置深度：1,000 m
- 使用済燃料特性：H12レポートのモデルガラス固化体と等価な使用済燃料特性の設定
 - 炉型：PWR, 濃縮度：4.5%, 燃焼度：45,000MWD/MTU
 - 炉取り出し後から処分までの期間：54年（H12レポートのガラス固化体のケースと整合を図るため）
 - 使用済燃料の放射エネルギーと発熱量の時間変化（ガラス固化体との比較で示す）：

全放射エネルギーの時間変化(1MTUあたり)



発熱量の時間変化(1MTUあたり)



地下施設設計事例

➤ 人工バリアの設計

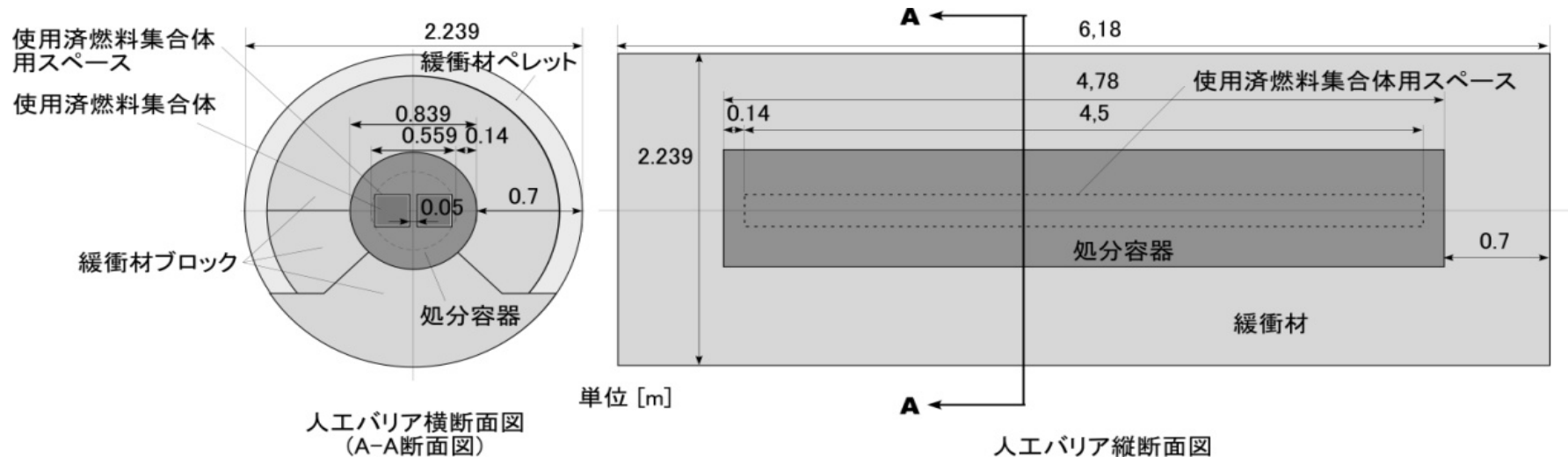
処分容器の設計：

- 臨界解析，遮蔽解析，構造解析，腐食評価を行い，処分容器への使用済燃料集合体の収容体数，処分容器の材料・構造・寸法・形状を設定

緩衝材の設計：

- 処分容器との力学的相互作用を評価するために，腐食膨張解析，沈下解析を行い，岩盤の保護性能，廃棄体の支持性能およびコロイドのろ過などのその他の要求性能の確認を行い，H12レポートにおける緩衝材の仕様が，使用済燃料の直接処分においても成立することを確認

人工バリアのレファレンス仕様



直接処分第1次取りまとめドラフトのレビュープロセス(1/2)

■ 骨子レビュー

- 「第1次取りまとめ骨子」を国内外の専門家に送付しコメントをいただいた。
- 国内専門家（大学、研究機関、企業等）：5名
- 国外専門家（スイス）：5名
- 上記に加えて骨子レビュー会議（平成26年2月6日）を開催し、レビューコメントの確認と対応方針の確認・議論を行った。
- 国外専門家（スイス）：2名
- 抽出された主要な課題：
 - 第1次取りまとめ報告書の目的（実現可能性等）の明確化
 - H12レポート以降の最新知見の反映
 - 安全評価での保守的ではない現実的な扱い
 - 使用済燃料の多様性の扱い（MOXや将来使われる可能性のある炉燃料や福島第一発電所の燃料デブリ等など）
 - 品質保証面での海外レビューの十分な反映
 - 成果のCoolRepH26としての取りまとめ



これらを反映して第1次取りまとめドラフトを作成

直接処分第1次取りまとめドラフトのレビュープロセス(2/2)

■ ドラフトレビュー

- 「第1次取りまとめドラフト」を国内の専門家に送付しコメントをいただいた。
 - 国内専門家（大学、研究機関等）：14名
 - 基盤調整会議タスクフォースメンバー（研究機関等）：12名
- 上記に加えてドラフトレビュー会議（平成26年6月6日）を開催し、レビューコメントの確認と対応方針の確認・議論を行った。
 - 国内専門家（大学、研究機関等）：8名
 - 資源エネルギー庁：2名
 - 基盤調整会議タスクフォースメンバー（研究機関等）：11名
- 抽出された主要な課題
 - 第1次取りまとめでの安全戦略，安全機能の考え方等の明確化
 - 第1次取りまとめでの予備的評価の位置付け，それに向けての前提や条件の設定に係る背景や仮定等の丁寧な説明
 - 処分の観点での使用済燃料とガラス固化体との違いの丁寧な説明
 - 第2次取りまとめに向けて抽出された課題の適切な分類による整理
 - 第2次取りまとめで作成するセーフティケースの枠組みとの関係の明確化



これらを反映して第1次取りまとめドラフトを修正（～6月末）

成果と抽出課題

使用済燃料の直接処分研究開発

成果

- わが国での高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物の地層処分に関する研究成果，及び諸外国で先行して進められている直接処分に関する研究開発成果を踏まえ，使用済燃料の特徴を考慮しつつ設計と安全評価の試行。
- 上記を通じて第2次取りまとめに向けた課題の抽出・整理。

1)工学技術

- 炭素鋼製の処分容器にモデル使用済燃料の集合体を収容・密封する廃棄体仕様と人工バリア仕様の設定・地下施設における搬送・定置設備の概念設計を実施。坑道横置き方式を例として，建設，操業の観点から坑道(処分坑道及び主要坑道)の設計を実施。
- モデル使用済燃料の集合体収容体数をパラメータとした熱解析を実施し，収容体数と廃棄体1体当たりの専有面積(坑道離間距離と廃棄体ピッチの積)の関係を提示。
- 放射線分解により生成される酸化性化学種の容器の腐食への影響を考慮して，容器設計において，モデル使用済燃料を対象として，収容体数を変化させた遮蔽解析を実施し，遮蔽厚さを設定。
- 地上施設のうち，処分容器の封入設備について検討。

2)安全評価

- 使用済燃料に特有な現象について，既往の知見を整理し，それに基づき“基本シナリオ”を設定。また，不確実性を適切に考慮するために，リスク論的な考え方に基づくシナリオ区分を提示。
- モデル使用済燃料を対象とした容器内臨界可能性を評価し，臨界にならない容器の設計に反映。
- モデル使用済燃料を対象とした安全評価用パラメータ(核種の瞬時溶出挙動，UO₂マトリクス溶解挙動とそれに伴う核種溶出挙動)を諸外国の性能評価レポートを中心とした既往文献の調査に基づき設定。
- 溶解度，収着・拡散パラメータを，一部現象論的モデルによる検討を加え，最新のデータベースを用いて設定。

抽出課題

- 実際の使用済燃料及び地質環境条件の多様性や不確実性を考慮した，設計及び安全評価シナリオ・モデル・パラメータの設定。
- 工学規模や実規模，あるいは処分場で想定される地下環境条件での実証。
- 直接処分第2次取りまとめ以降の研究開発の展開を見据えた試験研究計画の立案。

1)工学技術

- 実際の使用済燃料の多様性及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検討。工学規模や実規模，あるいは処分場で想定される地下環境条件での工学技術の実証。
- 緩衝材温度制限の考え方等の検討。
- 放射線分解による酸化還元フロントに対する，安全評価の観点からの不確実性の取り扱い方法の具体化。
- 処分容器材料や蓋構造，溶接・検査方法のオプションに対応した封入設備の設計。工学的規模や実規模での溶接・検査技術の実現性の検討。

2)安全評価

- 使用済燃料の特徴を踏まえ個別現象についての理解を深めるとともに，不確実性を適切に考慮したシナリオ区分に基づく網羅的かつ体系的なシナリオの設定。
- 容器内臨界安全評価のより現実的なモデルの構築，人工バリア近傍及び母岩においてウラン・プルトニウムが蓄積するシナリオを対象とした臨界安全評価の実施。
- 使用済燃料の多様性等を考慮した，現象理解に基づくパラメータと不確実性の設定の実施。直接処分第2次取りまとめ以降の研究開発の展開を見据えた試験研究にも着手し，その結果も一部反映する。
- 廃棄体が大きくなることによる掘削影響領域の拡大等の挙動と影響を考慮した評価モデル/パラメータの不確実性の設定。
- 地質環境の多様性に対応するとともに，不確実性を考慮したモデル・パラメータの設定。

必須の課題(案)

第2期中期計画で実施した研究開発は、地層処分基盤研究開発に関する全体計画に沿って実施したものであり、抽出課題(pp. 8, 12, 23)も全体計画に沿った研究開発を進めるうえで必須のものである。今後の研究開発の方向性を示すうえで、それらの課題は下記の視軸のもとに整理できる。

● 地層処分研究開発: 処分システム構築・評価解析技術の先端化研究

ー ニアフィールド複雑系の評価解析技術開発

- e.g. ・ 処分場閉鎖前から処分場閉鎖後長期にいたるニアフィールドシステム変遷に関する一貫した現象論的モデルとデータベース開発
 - ・ 工学規模や実規模あるいは処分場で想定される地下環境条件での工学技術の実証研究

ー 地質環境の長期変動性研究成果の活用

- e.g. ・ 長期変動にリンクした生活圏モデル開発

ー 合意形成プロセスを考慮した処分概念構築手法の開発

- e.g. ・ 処分システム最適化技術(e.g.多様な廃棄物の共処分)
 - ・ システム性能確認モニタリングシステムの開発

ー レジリアンスの視点を考慮した処分概念構築プロセスの検討

- e.g. ・ 地層処分システムのロバスト性概念の検討

ー 地層処分システム評価確証技術の統合化

- e.g. ・ 要素技術相互の関連性を踏まえ、先端的技術等を反映した系統的統合
 - ・ 関連する多種多様な知識の体系化

● 使用済燃料の直接処分研究開発: 第2次取りまとめでの技術的信頼性の見通しの提示

- ー 使用済燃料及び地質環境条件の多様性や不確実性を考慮した、設計及び安全評価の試行(シナリオ・モデル・パラメータの設定と評価解析)

まとめ

- 研究開発成果と必須の課題(案)に関する要点 -

● 地層処分研究開発:

- 機構改革の基本的方向である「地層処分システムで起こる現象のメカニズムについての先進的な評価手法開発と、それに必要なデータベース整備に重点化」という点に留意し、「処分システムの工学技術」と「安全評価手法」に係る研究開発の成果を、事業者・規制機関等のユーザーがそれら成果を容易に活用できるように情報・技術パッケージ(CoolRepH26)として整備
- 地層処分事業の段階的推進における意思決定ポイントに資することを念頭に研究成果が蓄積されつつあり、地層処分研究開発については処分システム構築・評価解析技術の先端化研究(深地層の研究施設計画との連携等を含む)としての必須の課題(案)を明確にすることにより、今後の研究計画策定の基盤を提示

● 使用済燃料の直接処分研究開発:

- 日本におけるその実現可能性について、諸外国の研究開発成果や、これまでのHLW及びTRU廃棄物に関する基盤研究開発成果を反映し、最新の知見や技術に基いて「第1次取りまとめドラフト」を作成
- 今後、地層処分基盤研究開発調整会議や海外専門家によるレビューを実施した後、CoolRepH26のカーネルとして公開予定
- 平成29年度迄に作成する予定の「第2次取りまとめ」に向けセーフティケースを構築することにより、今後の研究計画策定の基盤を提示