



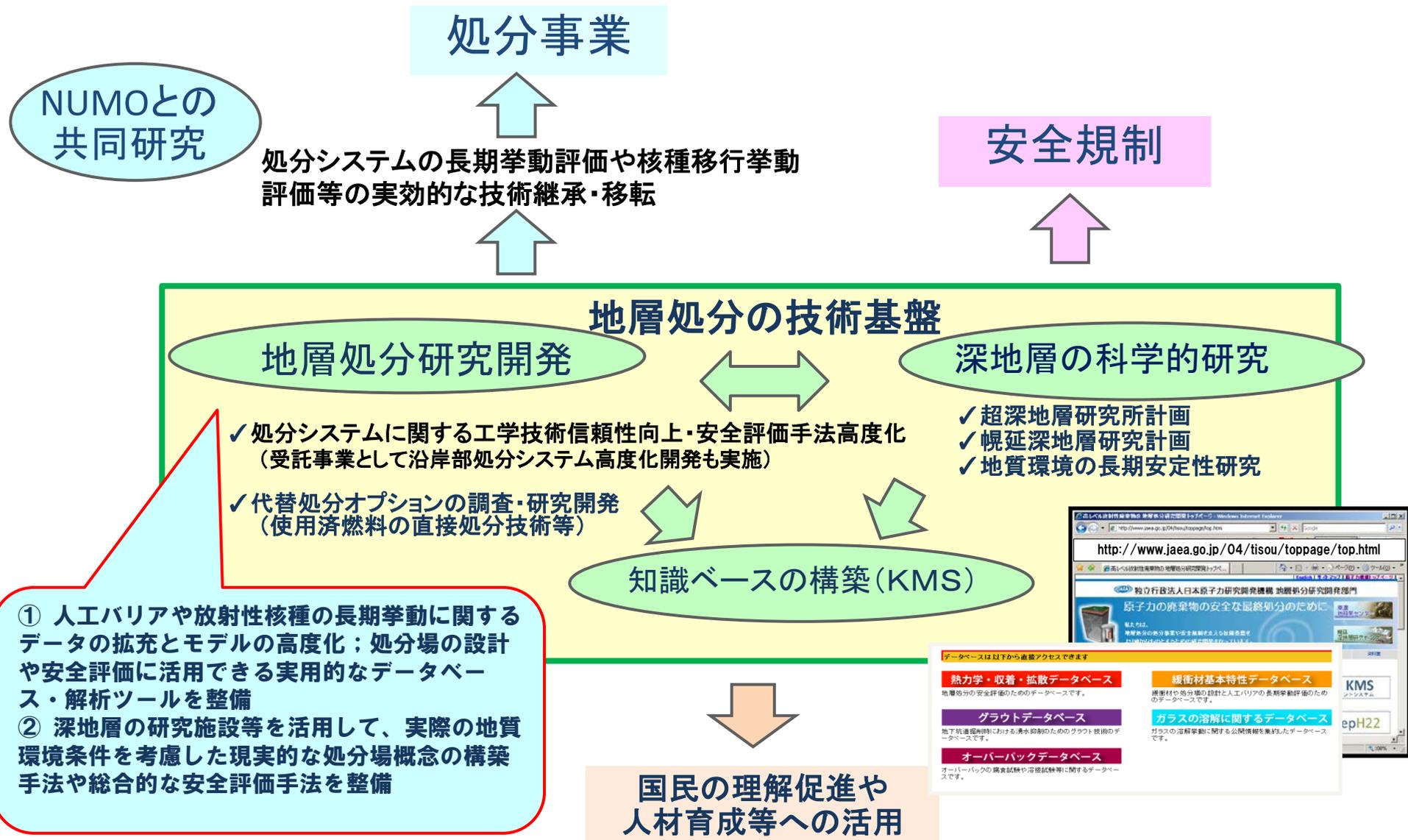
平成28年度における個別研究開発の現状および今後の予定

## ③高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発

平成29年3月1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

# 地層処分基盤研究開発の構成と成果の活用



# 国の全体計画に基づく資源エネルギー庁公募事業

## H20-24 HLW地層処分

(JAEA受託分)

### 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。

## 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。

# NUMO殿との共同研究

## 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

## 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

## 研究者の派遣など実効的技術共有・継承

## 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



# 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
<p><b>【処分システムに関する工学技術】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 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。</li> <li>● 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。</li> <li>● 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。</li> </ul>	<p><b>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</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・炭素鋼の腐食に対する<math>\gamma</math>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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>人工バリア等の長期複合挙動に関する研究</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>工学技術の信頼性向上</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・幌延URLを事例とした埋め戻し材の基本特性の取得</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・ナチュラルアナログ研究におけるデータの蓄積</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>

# 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

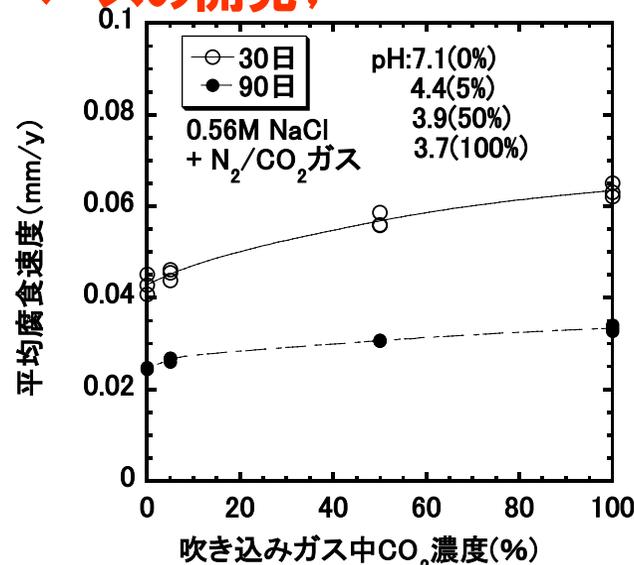
#### □ 成果

##### 【オーバーパックの腐食挙動に関するデータの拡充】

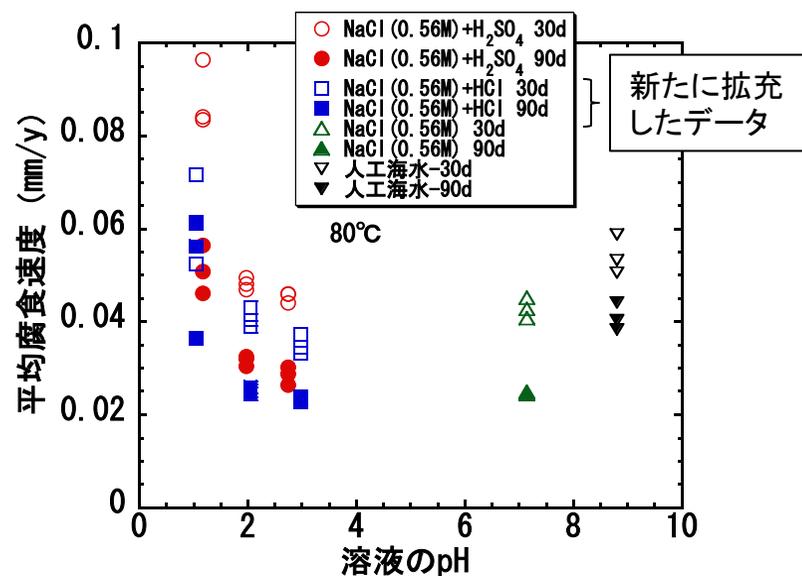
- 設計の前提条件を逸脱した環境条件を含め、温度、地下水水質による炭素鋼の腐食への影響に関するデータを拡充した。今後、これら最新の実験データを反映してデータベースを更新予定。

#### □ 意義／反映先

- 過酷な環境条件に対し、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
- 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



### 炭酸ガス濃度による炭素鋼の腐食速度への影響



### pH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

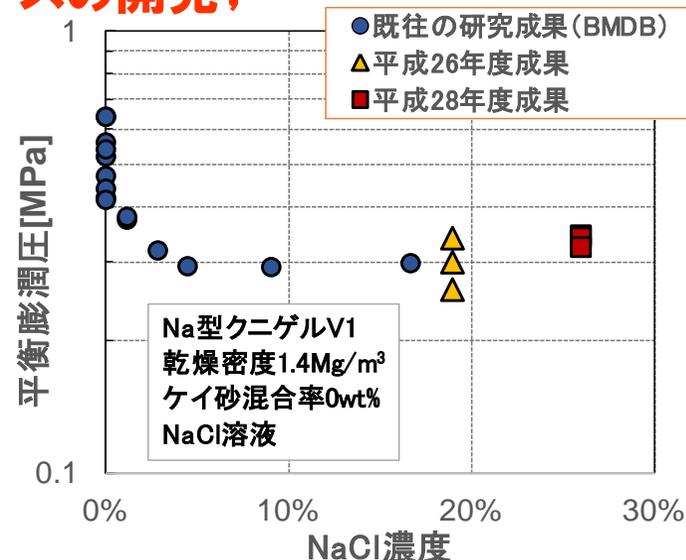
### □ 成果

【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】

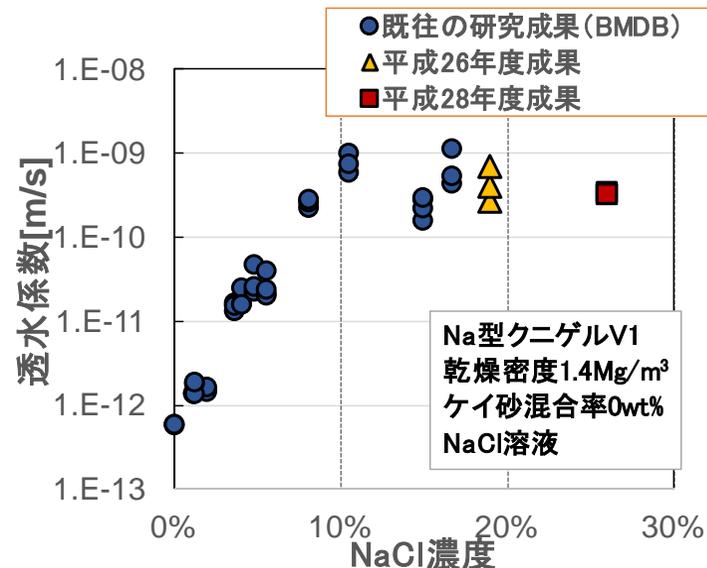
➤サイト選定で除外されると考えられる環境条件も含め、幅広い地下水条件に応じた緩衝材の基本特性データ取得のため、高塩化物イオン水(海水レベル以上の濃度)を用いた膨潤圧/透水試験を実施した。

### □ 意義／反映先

- 過酷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
- 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

# 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)

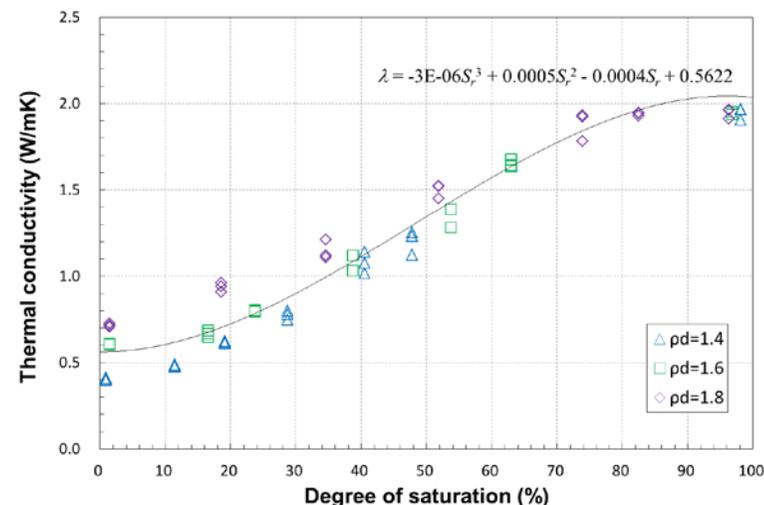
## 2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 熱-水-応力連成(3連成)挙動の解析評価

### □ 成果

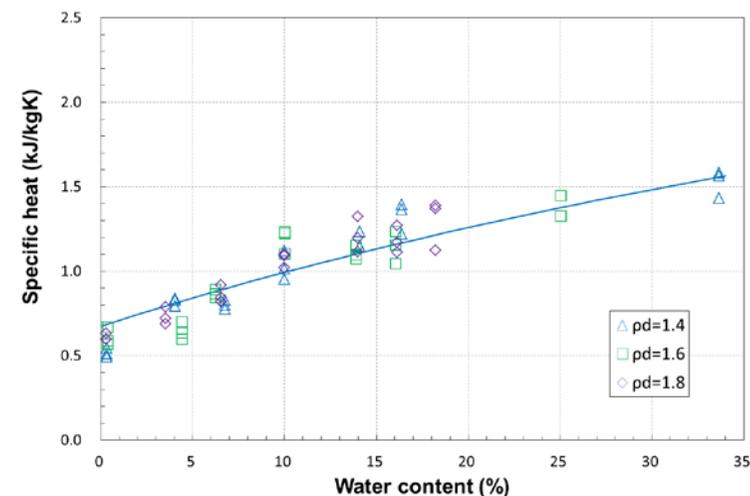
- これまで開発してきた**3連成解析**コードに対して、「1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発」で取得してきた試験データを基に、変形による緩衝材の密度・飽和度変化に伴う水理特性や熱特性変化を考慮できるように改良を実施した。

### □ 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
- 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



熱伝導率と飽和度の関係



比熱と含水比の関係

# 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)

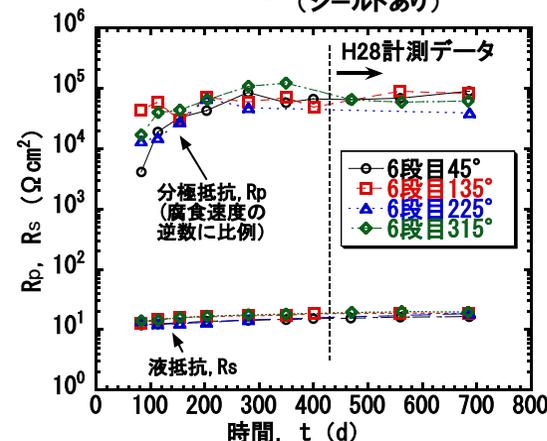
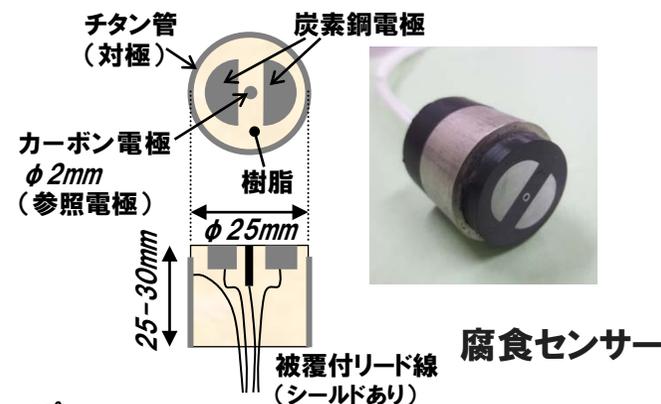
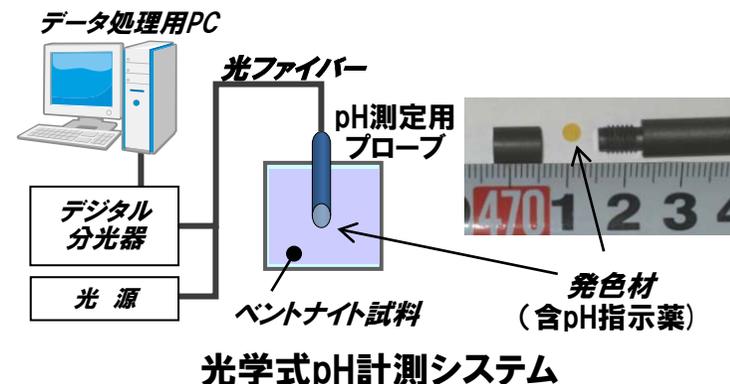
## 2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 4連成挙動把握のための計測技術

### □ 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、幌延URLに適用してデータ取得を継続した。また、温度変化に対応した検量線の作成など、より信頼性の高い計測データ取得のための改善を実施した。
- 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と、実測事例を提示。
- 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



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

# 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)

## 3)工学技術の信頼性向上:

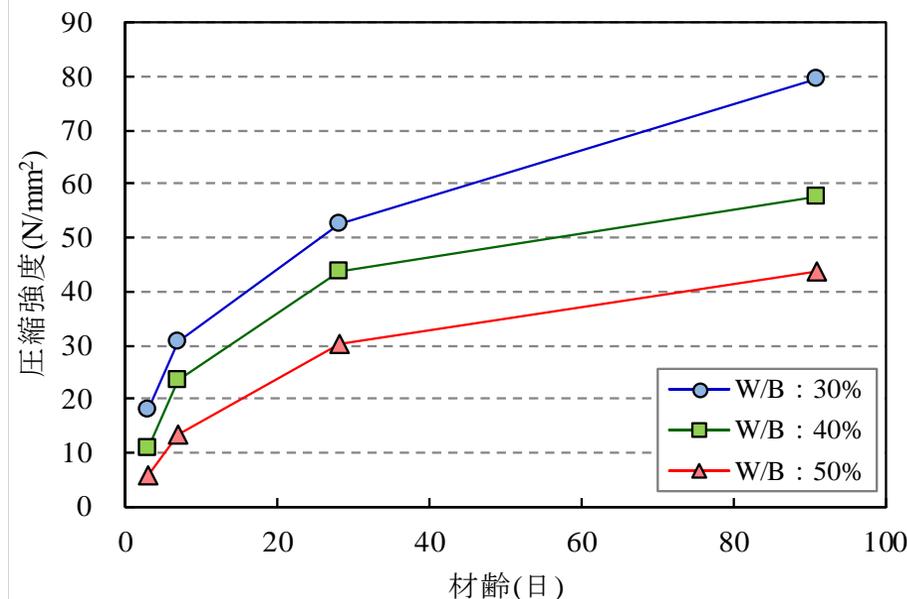
### 低アルカリ性セメントを用いた支保工の開発

#### □ 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 (HFSC424)

#### 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	◎			◎			◎	◎	◎			
	HPC		◎			◎							

HFSCの後の数値は、セメント(C)、シリカフェーム(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

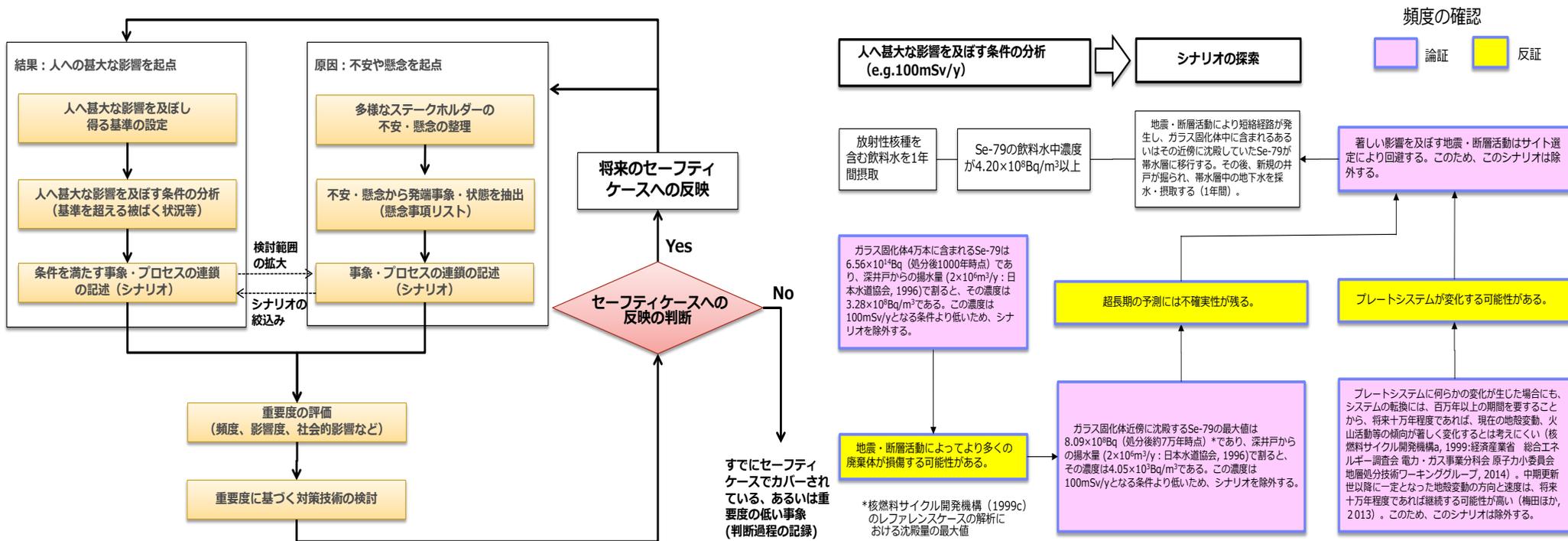
## 安全評価手法の高度化

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
<p>【安全評価手法の高度化】</p> <div data-bbox="95 591 464 895" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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</li> <li>●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</li> </ul> </div>	<div data-bbox="547 444 733 536" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 20px;"> <p>システム性能評価に係る手法の開発</p> </div> <div data-bbox="774 344 1257 636" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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と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。</li> <li>・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。</li> </ul> </div> <div data-bbox="547 996 733 1125" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <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> </div> <div data-bbox="774 822 1257 1300" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> </div>	<div data-bbox="1303 337 1725 644" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul> </div> <div data-bbox="1303 879 1725 1243" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul> </div>	<div data-bbox="1773 372 2032 608" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul> </div> <div data-bbox="1773 922 2032 1200" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul> </div>

# 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(シナリオ)を記述するための手順を構築・試行した。
- 意義/反映先: 実施主体が自主的により一層の安全性を追求する取組みに反映



地層処分システムにおける過酷事象の検討フロー

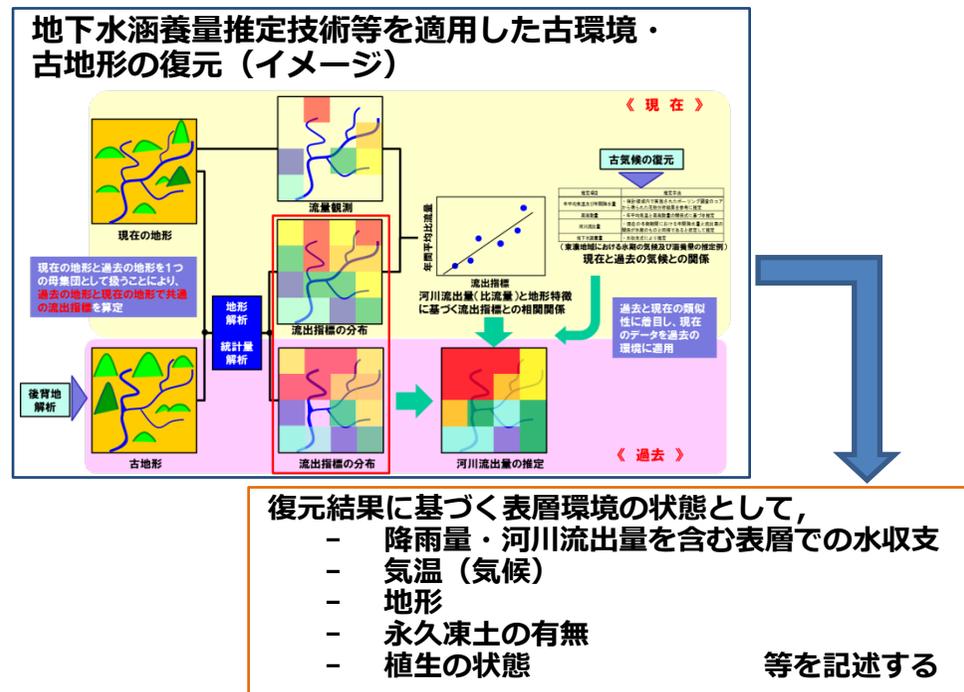
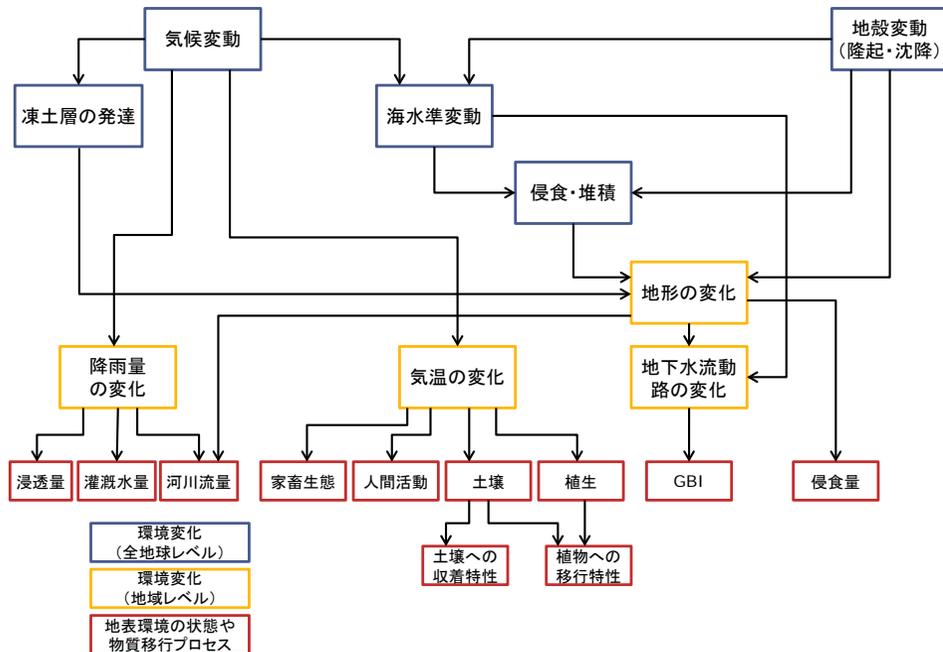
人への甚大な影響を起点としたシナリオの探索例

# 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: 表層環境の時間的変遷を考慮した生活圈モデル構築の一環として, 地殻変動・気候変動に応じて生じる地質・気象プロセスが表層環境の状態に与える影響とその関係を一般論的に整理したうえで, 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活用した表層環境の状態変遷の設定方法を検討した。
- 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



## 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

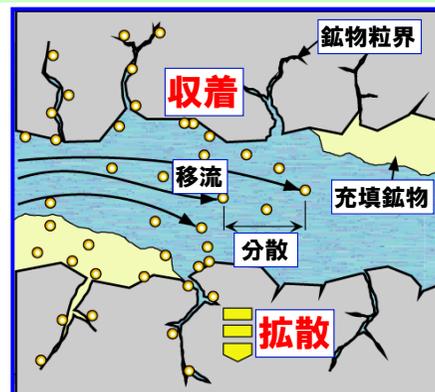
#### □ 成果

- グリムゼル岩の割れ目試料を対象とした室内試験を実施し、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データの評価手法の構築
- 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評価
- 幌延原位置トレーサー試験と連携した堆積岩系の物質移行評価技術の体系化

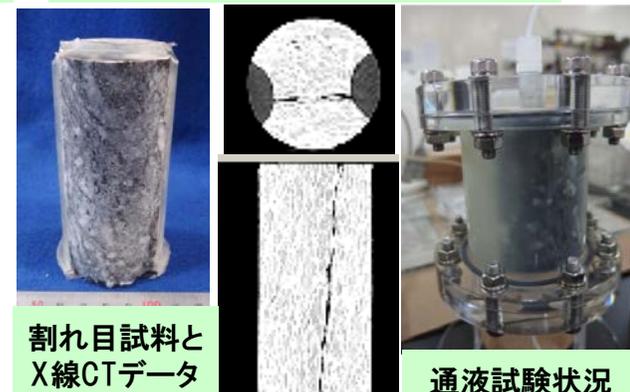
#### □ 意義／反映先

- 結晶質岩及び堆積岩のマトリクス～割れ目までを含む核種移行評価技術の構築, 原位置条件への適用性確認

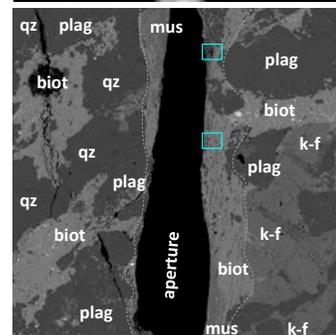
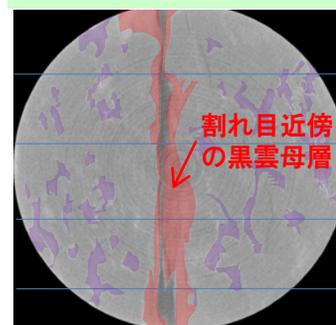
割れ目中核種移行モデル概念



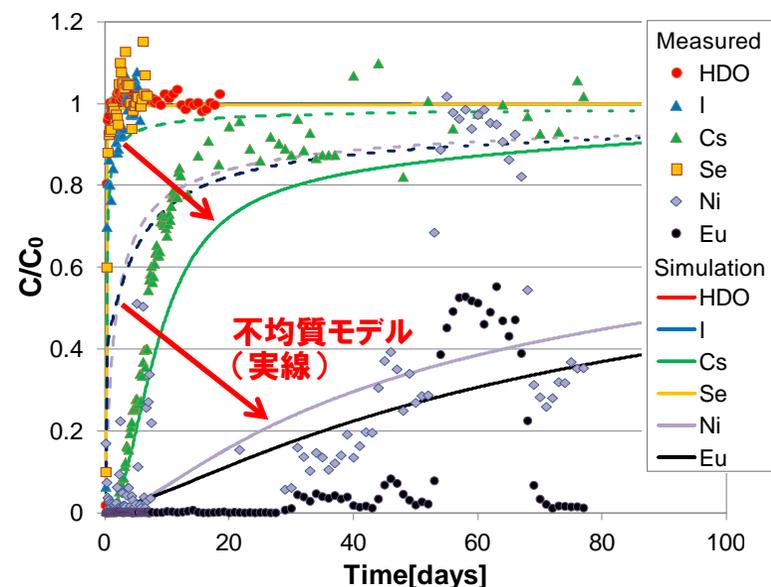
グリムゼル岩割れ目の室内試験



鉱物分布の不均質性



グリムゼル岩割れ目の不均質性の分析的な理解とそれを反映した通液試験破過曲線の評価



## 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

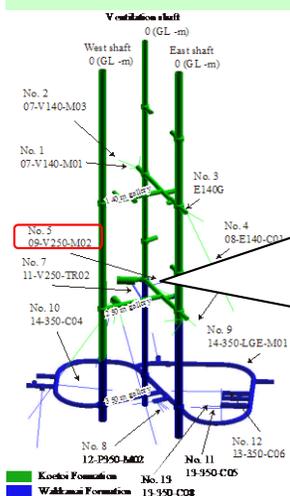
#### □ 成果

- 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(-250m坑道)の地下水中の溶存腐植物質濃度を定量し、同地下水から分離・精製した腐植物質の回収量及び組成との相違を確認
- 幌延URLにおける堆積岩地下水中的コロイドを対象とし、コロイド密度および希土類元素の微生物サイズコロイドへの分配係数データを取得

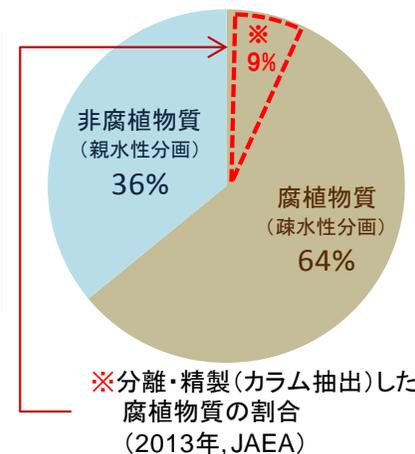
#### □ 意義 / 反映先

- 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、核種移行への影響評価プロセスのモデル化・評価手法を提示

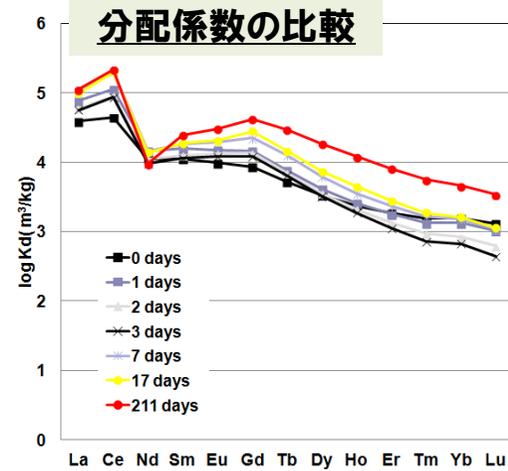
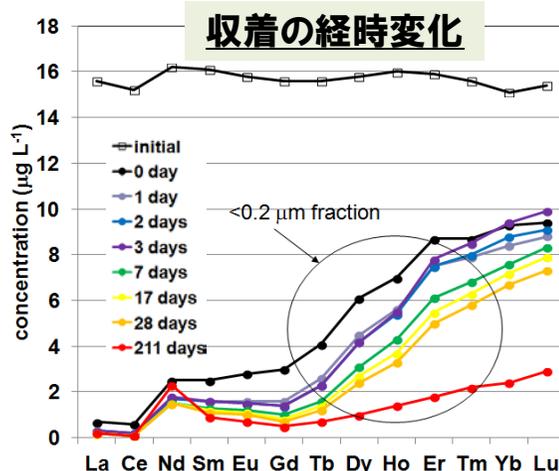
#### 幌延URLの深部地下水中の腐植物質濃度の定量評価



サイト: 幌延URL 深度-250 m  
分析方法: DAX-8法 (Tsuda et al., 2012)  
TOC: 11 mgC L<sup>-1</sup>



#### 幌延URLの地下水中共コロイドへの希土類元素の収着評価



# 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。・・・」

# 直接処分第1次取りまとめについて(1/2)

## ■ 目的

限定的な前提条件の下で予備的に地層処分システム的设计・安全評価を行うことにより、直接処分の技術的基盤の整備に向けた課題を抽出する。

## ■ 主要工程

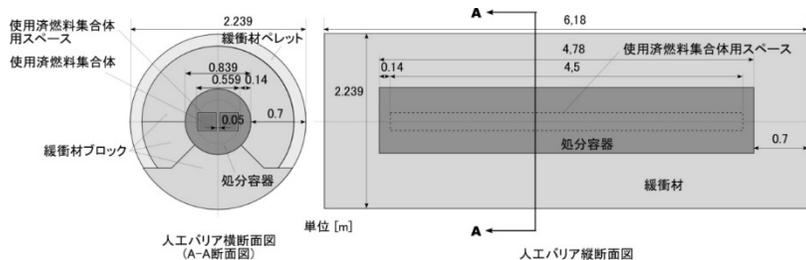
年度	内容
平成25年度	使用済燃料の直接処分に関する研究に着手。 同時に「直接処分第1次取りまとめ」のドラフト執筆作業を開始。
平成26年度	第1ドラフト作成。 国内レビュー・国際レビューの実施。 レビューコメント等を反映したドラフトの見直し・更新に着手。
平成27年度	最終ドラフト作成。
平成27年12月	「わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価 -直接処分第1次取りまとめ-」( JAEA-Research 2015-016)公開。

# 直接処分第1次取りまとめについて(2/2)

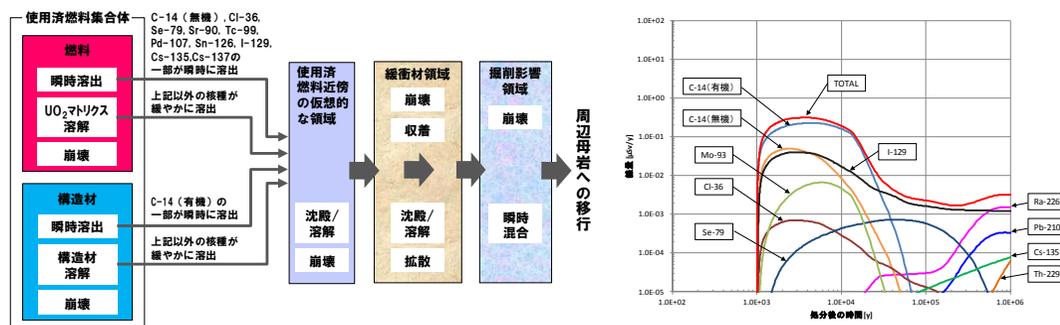
## ■ 成果

- 設計・安全評価の予備的な検討を通じて、わが国の直接処分に関する現状の技術レベルを提示

### 【工学技術の成果例:人工バリア設計】



### 【安全評価の成果例:核種移行評価】



- 直接処分に関する技術的基盤の整備に向けて今後検討すべき課題を抽出・分類・整理

- 直接処分第1次取りまとめにおける予備的な検討をより包括的なものとするための課題
- 使用済燃料に特有の主な課題
- ガラス固化体・TRU廃棄物と共通の主な課題



- ✓ 機構の中長期計画や年度計画への反映
- ✓ 現在実施している直接処分の研究開発の基盤

# 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
<p><b>【使用済燃料の直接処分研究開発】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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ました。</li> <li>●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</li> </ul>	<p><b>工学技術</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・搬送・定置設備の概念設計を行った。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>安全評価</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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に基づき、基本シナリオを対象とした安全評価を行った。</li> <li>・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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・より長寿命な処分容器の設計</li> <li>・臨界安全性評価の考え方・手法の整備</li> <li>・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</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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</li> </ul>

～H26年度 | H27年度～

# 課題を踏まえた直接処分研究開発の一例(1/2)

## ● 工学技術:

- 直接処分施設の設計検討
- 先進的な材料の開発及び閉じ込め性能評価手法の高度化

● 処分容器(図1)について、設計に係わる一連の解析(臨界解析・遮へい解析・構造解析等)を使用済燃料に特有の条件(核種量、寸法、重量等)に適用し、我が国のPWRとBWRを対象とした処分容器の寸法や燃料集合体の収容本数を設定。

● 緩衝材について、使用済燃料の処分容器の大きさや重さはガラス固化体の場合と大きく異なるものの、緩衝材の厚さや密度等の仕様はガラス固化体の場合と同様とできることを、岩盤クリープ変形・廃棄体自重沈下・処分容器腐食膨張変形等の複合解析により確認。

● 直接処分での総線量の最大値は、半減期が約5700年と長いC-14が支配的となり、ガラス固化体よりも2桁程度大きくなるため、処分容器寿命の長期化が課題(図2)。超長期の耐久性が期待できる処分容器の新材料候補としてバルク金属ガラスに着目し、物理化学的性質の比較や溶射試験による溶射膜の形成状況の確認等により、Ni基合金等が有望な候補となることを示唆。

図1 直接処分の検討例

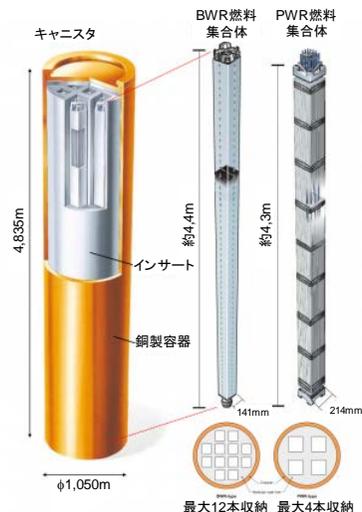
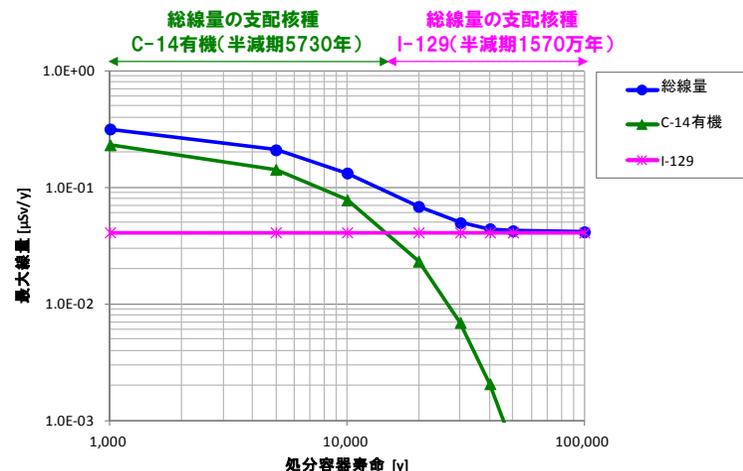


図2 処分容器の長寿命化による線量低減効果解析結果例

(数万年程度までの長寿命化  
⇒線量低減に一定の効果)

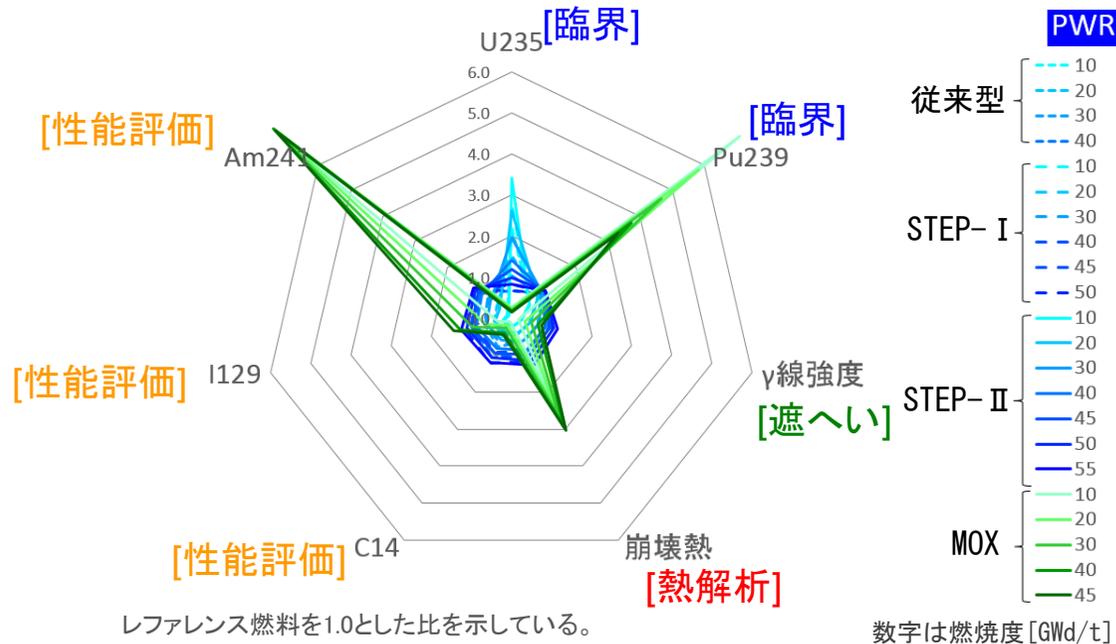


# 課題を踏まえた直接処分研究開発の一例(2/2)

## ● 安全評価:使用済燃料の多様性に関する課題

- 使用済燃料の発生量の推計結果に基づき、設計・性能評価の観点から使用済燃料のインベントリ特性を比較し、着目すべき特徴を明らかにした。
- これらの成果は、直接処分研究の設計・性能評価におけるモデルインベントリ設定へ反映予定。

### 使用済燃料のインベントリ特性比較



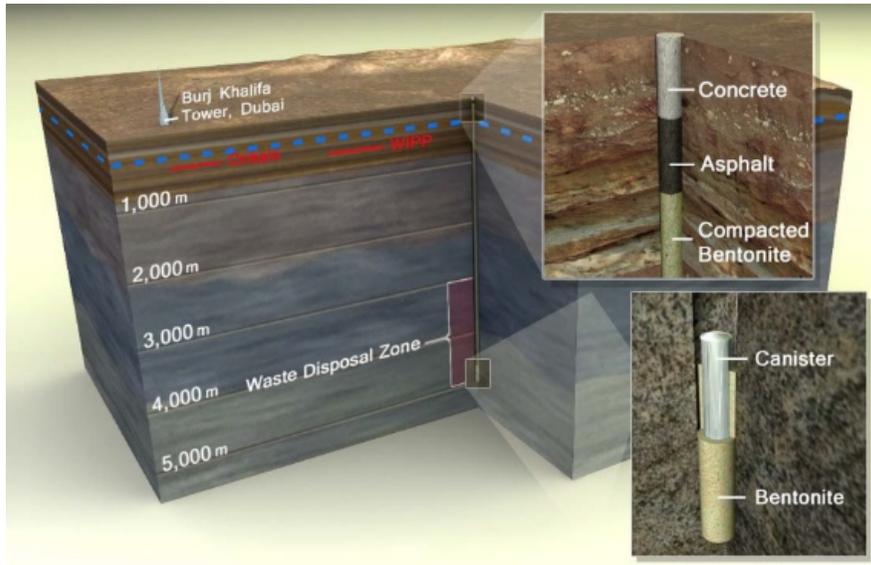
- $UO_2$ 燃料とMOX燃料はプロファイルが大きく異なる
- $\gamma$ 線強度・崩壊熱・放射能量は、燃焼度が大きくなるにつれて、値が外側に広がっていく傾向

→ $UO_2$ 燃料とMOX燃料の違い、燃焼度を類型化で重視すべき

# その他：代替処分オプションの検討

- わが国の高レベル放射性廃棄物の処分方法についての幅広い選択肢を確保するために、代替処分概念等に関する調査研究を行う。
- これまでに検討された最終処分方式の取り扱いに関する情報を取りまとめる。
- 超深孔処分等、現在検討段階にあるその他の代替処分概念について、諸外国の事例調査を行うことにより、それらの考え方、特徴、検討の背景、技術的課題等を明らかにし、わが国の諸条件を考慮した場合の有効な代替処分オプションについて検討する。

## 超深孔処分の検討例(米国) (SANDIA REPORT, SAND2012-7789, 2012)



- 米国等で具体的な検討が行われている超深孔処分の概念や考え方(地質環境の基本要件及びサイト選定条件等)を調査し、今後の我が国への適用の検討において着目する課題として、地質環境条件(応力、水理)や地震活動による掘削や定置への影響の可能性等を抽出。
- 以下を実施中：
  - a. 超深孔処分相当の深度での地質環境の特徴の調査及び情報整理
  - b. 超深孔掘削等の関連技術の開発動向や実績に関する調査及び情報整理
  - c. 超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と予察的解析の準備

補 足

【第1次取りまとめの概要】

# 『直接処分第1次取りまとめ』国際レビューワークショップ

● 日時：平成26年12月17日～18日

● 参加者：

## 国外（9名）

- スイス：放射性廃棄物管理共同組合（Nagra）、MCM社
- スウェーデン：スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）
- 米国：サンディア国立研究所（SNL）
- 英国：放射性廃棄物管理会社（RWM）
- 韓国：韓国原子力研究所（KAERI）

## 国内（55名）

資源エネルギー庁，国内専門家（大学、研究機関等），  
基盤調整会議タスクフォースメンバー（研究機関等），原子力機構

● 抽出された主要な課題

### 工学技術

- オーバーパック寿命（1000年）の再検討すべき
- 緩衝材の温度制限を再検討すべき
- 定置装置の設計にはより実用的観点からの検討すべき 等

### 安全評価

- 最新の現象理解を踏まえて，モデルの単純化の正当性などを丁寧に説明すべき。
- 不確実性を考慮したデータの設定の議論が重要であり，感度解析的アプローチも取り入れるべき 等

 第2次取りまとめに向けた課題として，対応策の具体化を進める。

# 直接処分第1次取りまとめの概要

## 直接処分第1次取りまとめの進め方と前提条件

### ■ 予備的設計・安全評価の進め方

網羅的な検討を行うのではなく、今後の直接処分の技術的基盤の整備に向けた起点となるよう、前提条件や評価の範囲を設定し、予備的な設計・安全評価を行うことにより、取り組むべき課題を抽出する。

### ■ 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）／硬岩系
- ・処分場の設置深度：1,000m

#### ➤ 使用済燃料特性

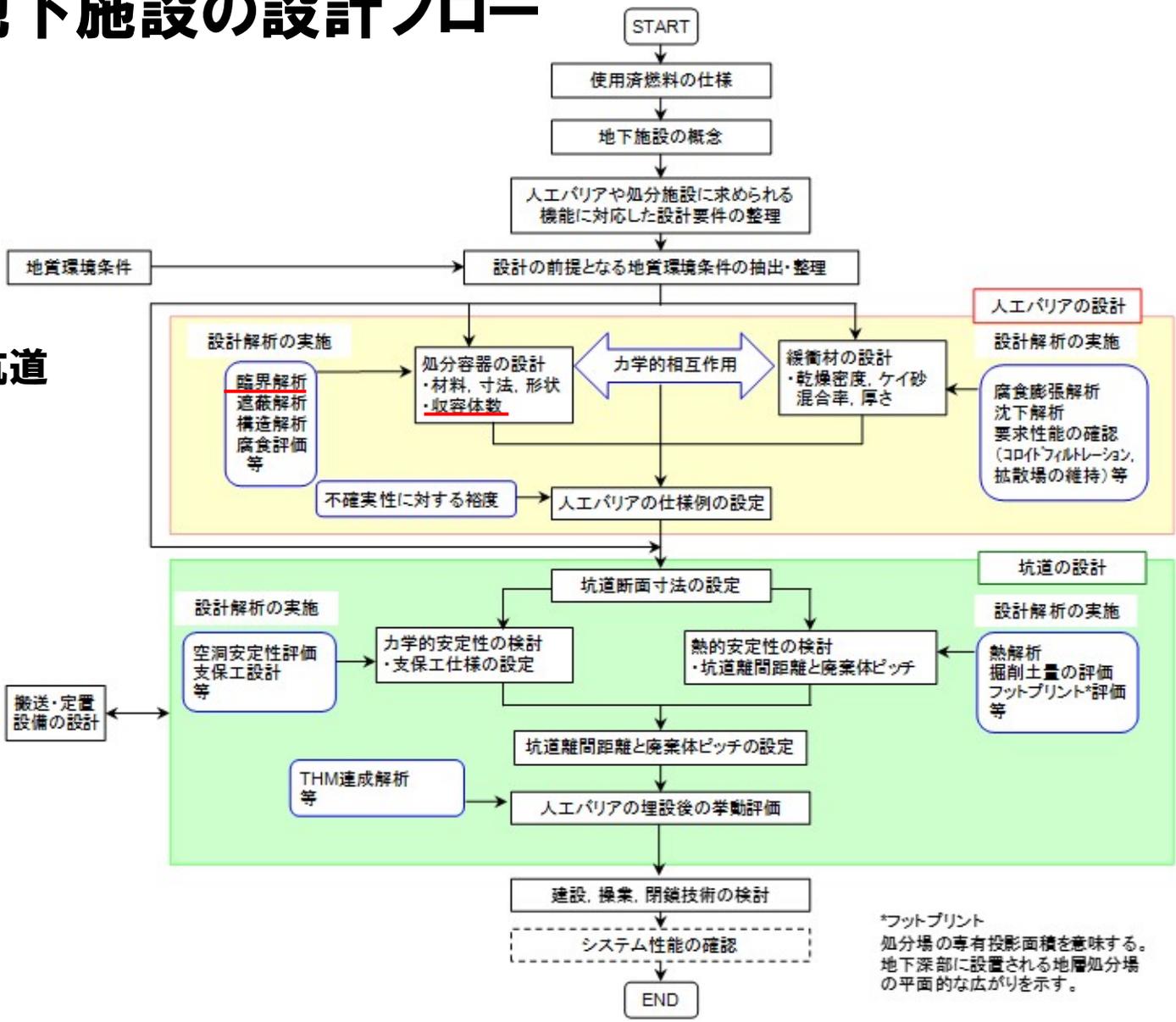
H12レポートのモデルガラス固化体の設定に用いた使用済燃料と同様に、以下の使用済み燃料の仕様を設定

- ・炉型：PWR
- ・濃縮度：4.5%
- ・燃焼度：45,000MWD/MTU
- ・燃料集合体1体あたりのウラン量：0.4614 MTU

炉取り出し後から処分されるまでの期間：50年

# 工学技術：地下施設の設計フロー

- 地下施設：人工バリア
  - 処分容器
  - 緩衝材
- 坑道
  - アクセス坑道
  - 連絡坑道
  - 主要坑道
  - 処分坑道



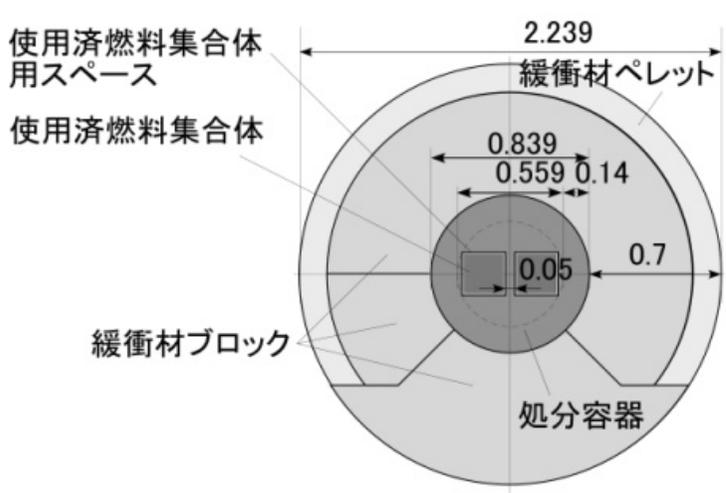
■ ガラス固化体を対象とした設計フロー (H12レポート) を出発点として、使用済燃料を対象とした地下施設設計のフローを構築

# 工学技術：人工バリア設計結果の概要

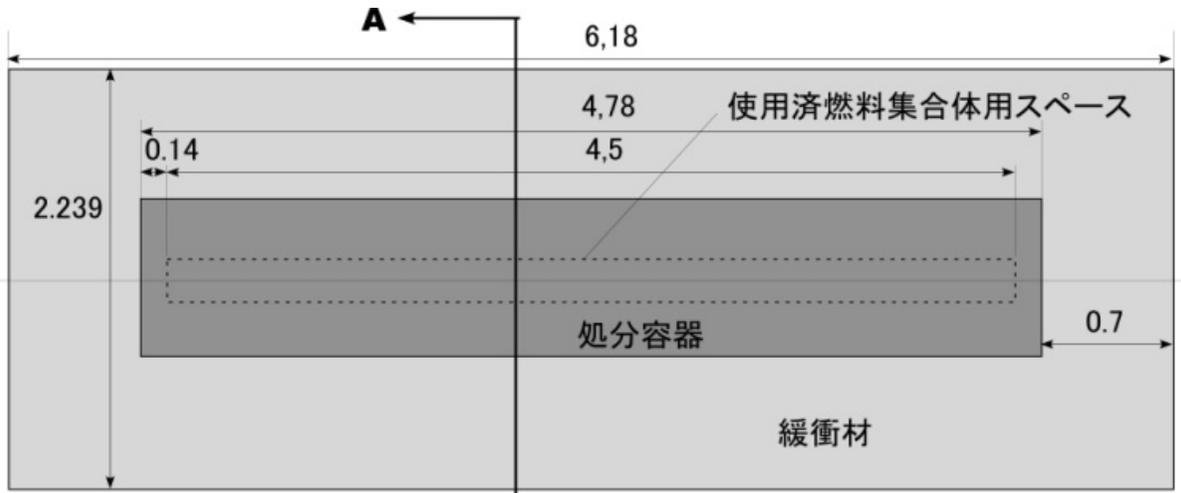
## ■ 人工バリアの仕様例

炭素鋼処分容器	
収容体数	2体
燃料集合体間隔	0.05m
処分容器厚さ	0.14m
腐食しろ	0.04m
直径	0.839m
長さ	4.78m

ベントナイト緩衝材	
厚さ	0.7m
乾燥密度	1.6Mg/m <sup>3</sup>
ケイ砂混合率	30wt%



人工バリア横断面図 (A-A断面図)



単位 [m]

人工バリア縦断面図

# 安全評価：使用済燃料を対象とした地層処分システム

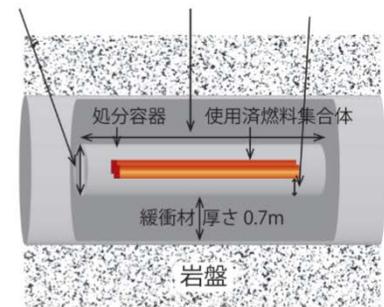
## ■ 安全評価の前提となる地質環境条件の設定, 処分場仕様 等

**生活圏** H12レポートのレファレンスケースと同様の地表環境と人間の生活様式を設定  
 GBI(Geosphere-biosphere interface): 放射性核種が地下水により地下から帯水層を經由して生活圏に至る経路を想定

### 地質環境条件

地形: 平野  
 地下水: 降水起源(陸水系)  
 岩種: 結晶岩(酸性岩)  
 硬岩系

処分容器直径 839 mm  
 処分容器長さ 4,780 mm  
 処分容器厚さ 140 mm



処分容器: 設計寿命 1,000年

### 地質環境の長期変動性

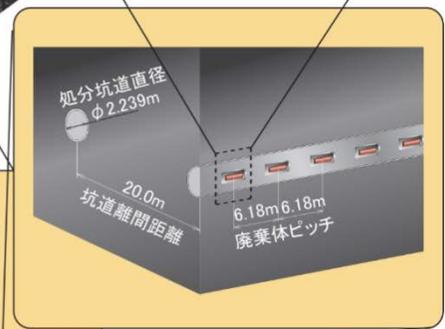
地質環境に関する変動現象

・急激かつ局所的な現象  
 (例: 地震・断層活動や火山・火成活動)  
 数十万年の時間スケールで見れば規則的であり、影響範囲の推論が可能  
 ⇒ 法定要件, NUMOの考慮事項\*によって基本的に排除

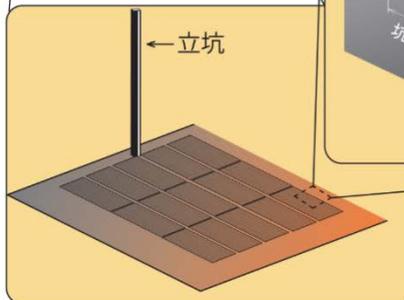
・緩慢かつ広域的な現象  
 (例: 隆起・沈降・侵食および気候・海水準変動)  
 緩慢かつ広域的であることから、過去の地質学的記録を基に将来予測が可能  
 ⇒ 蓋然性の高い事象として考慮



処分場深度 1,000m



硬岩系岩盤では空洞は自立するため、支保の使用は想定しない



処分場レイアウト

廃棄体 34,677体  
 (処分容器1体あたりPWR燃料集合体2体収納)

\* NUMO-TR-04-02

# 安全評価：燃料からの核種の溶出プロセス・パラメータの検討

## ■ 燃料・構造材からの瞬時溶出 (IRF) およびマトリクス溶解に関するパラメータ調査・検討

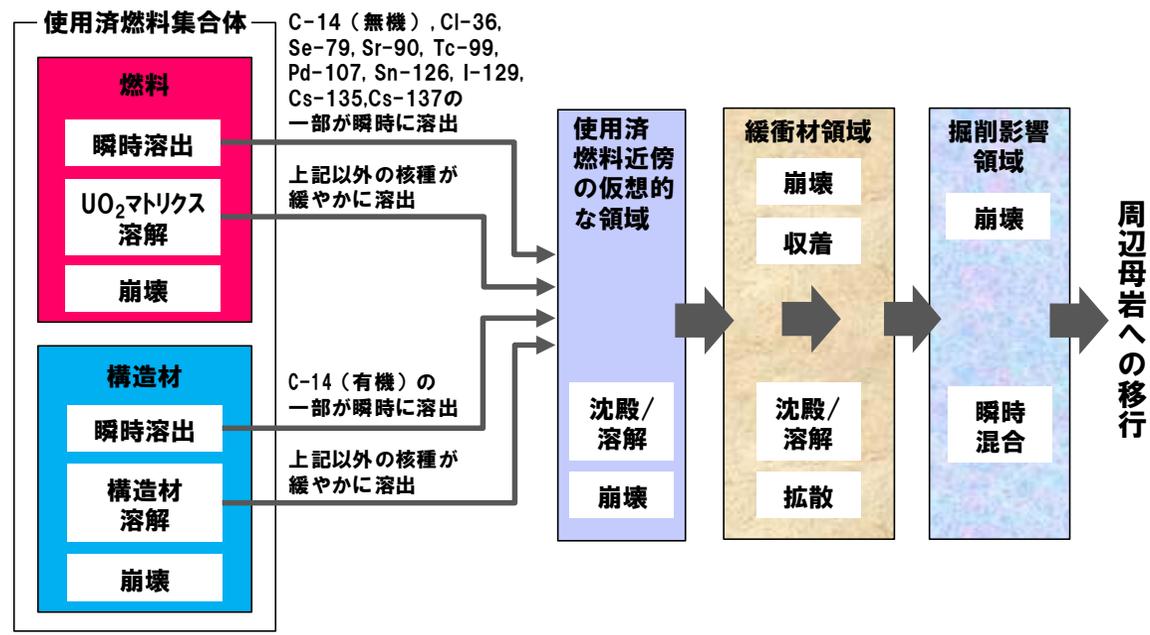
パラメータ		今回設定値	スイス EN 2002	スウェーデン SR-Site	フィンランド Safety Case 2012
瞬時放出 (IRF)	使用済燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 10%</li> <li>・Cl 10%</li> <li>・Se 4%</li> <li>・I 4%</li> <li>・Cs 4%</li> <li>・Sr 1%</li> <li>・Tc 2%</li> <li>・Pd 2%</li> <li>・Sn 4%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 10%</li> <li>・Cl 10%</li> <li>・Se 4%</li> <li>・I 4%</li> <li>・Cs 4%</li> <li>・Sr 1%</li> <li>・Tc 2%</li> <li>・Pd 2%</li> <li>・Sn 4%</li> </ul> <p>*PWR 48GWd/tHM</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 9.2%(10%)</li> <li>・Cl 7.6%</li> <li>・Se 0.38%</li> <li>・I 2.5%</li> <li>・Cs 2.5%</li> <li>・Sr 0.25%</li> <li>・Tc 0.2%</li> <li>・Pd 0.2%</li> <li>・Sn 0.03%</li> </ul> <p>*上記以外の核種も設定 *構造材も含んだ全インベントリを基準にした中央値。( )は構造材を除いて燃料のみを基準とした概略値</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 5.5%(10%)</li> <li>・Cl 8.2%(10%)</li> <li>・Se 0.4%</li> <li>・I 5.0%</li> <li>・Cs 5.0%</li> <li>・Sr 1.0%</li> <li>・Tc 1.0%</li> <li>・Pd 1.0%</li> <li>・Sn 0.01%</li> </ul> <p>*上記以外の核種も設定 *構造材も含んだ全インベントリを基準にした値。( )は構造材を除いて燃料のみを基準とした概略値</p>
	構造材金属	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 20% (有機形態)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 20% (有機形態)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 20%</li> </ul> <p>*上記以外の核種も設定</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・C 20%</li> </ul> <p>*上記以外の核種も設定</p>
長期 マトリクス溶解	燃料マトリクス 溶解	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>1 \times 10^{-7} (y^{-1})</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・After <math>10^3y</math>: <math>2.4 \times 10^{-6} (y^{-1})</math></li> <li>・After <math>10^4y</math>: <math>5.3 \times 10^{-7} (y^{-1})</math></li> <li>・After <math>10^5y</math>: <math>4.0 \times 10^{-8} (y^{-1})</math></li> <li>・After <math>10^6y</math>: <math>1.6 \times 10^{-8} (y^{-1})</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>1 \times 10^{-7} (y^{-1})</math></li> </ul> <p>(対数triangular分布、 : <math>10^{-8} \sim 10^{-6} y^{-1}</math>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>1 \times 10^{-7} (y^{-1})</math></li> </ul>
	構造材金属 の腐食溶解	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ジルカロイ: <math>8.77 \times 10^{-5} (y^{-1})</math></li> <li>・ステンレス、インコネル: <math>1.18 \times 10^{-4} (y^{-1})</math></li> </ul> <p>*評価はジルカロイで代表</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全金属: <math>3 \times 10^{-5} (y^{-1})</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全金属: <math>10^{-3} (y^{-1})</math></li> </ul> <p>(対数triangular分布、 <math>10^{-4} \sim 10^{-2} (y^{-1})</math>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ジルカロイ: <math>10^{-4} (y^{-1})</math></li> <li>・その他金属: <math>10^{-3} (y^{-1})</math></li> </ul>

# 安全評価：基本シナリオに基づく解析

## ■ 人工バリア中核種移行モデル

### 概念モデル：

H12レポートにおけるレファレンスケースのモデルに対し、ソースタームモデル(使用済燃料からの核種の溶出)に係わる部分を変更



人工バリア中核種移行に関するプロセス

## ■ 天然バリア中核種移行モデル

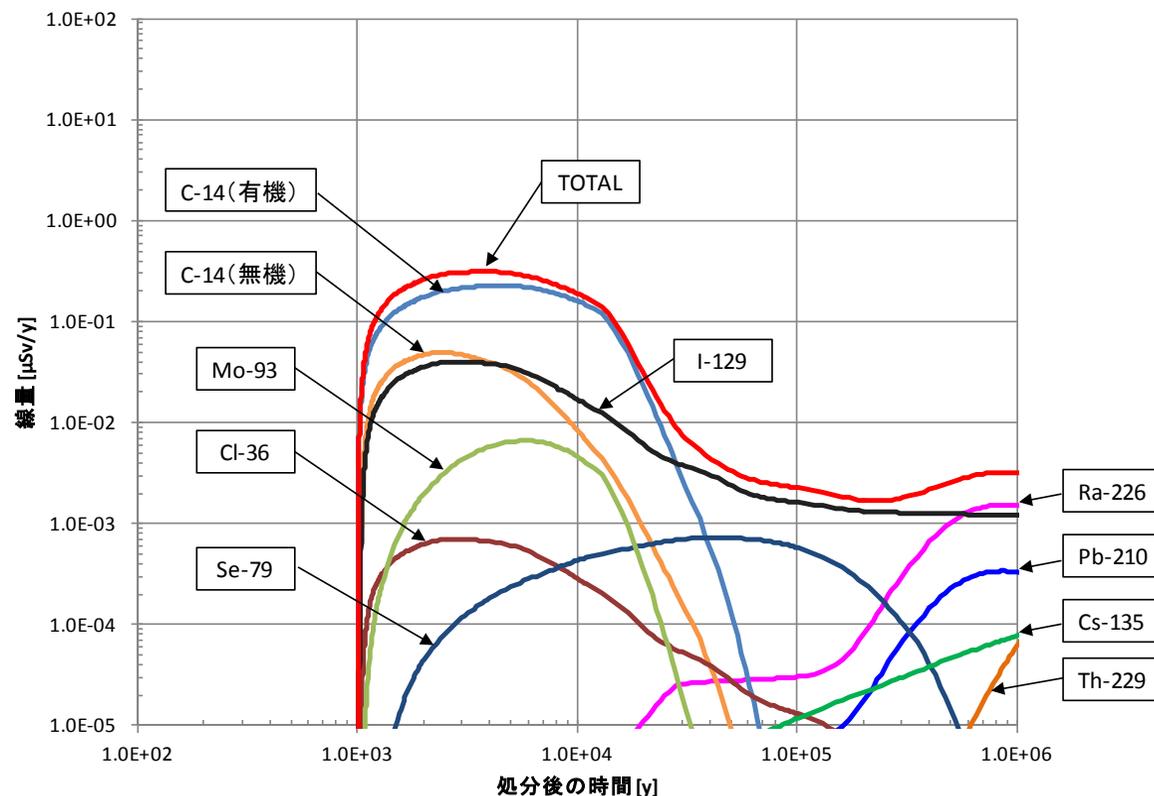
### 概念モデル：

H12レポートにおけるレファレンスケースのモデルと同一モデルを使用  
- 1次元並行平板モデルの重ね合わせ

# 安全評価：基本シナリオの線量評価

## ■ 基本シナリオの線量評価結果(農作業従事者グループ)

- 処分容器 1 体に対する解析で求められた母岩からの核種移行率に、安全評価で想定する処分容器の総体数 (34, 677体) を乗じ、さらに被ばくグループへの換算係数を乗じることにより線量を求めた。



- 処分後10万年まで：人工バリアからの移行率が高くかつ母岩に対する分配係数が  $0 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  の核種 (C-14 (有機および無機), I-129, Cl-36, Mo-93) が高い線量を示す。
- 処分後10万年以降：人工バリアからの核種移行率が高くかつ母岩中の分配係数が他の核種と比べて小さい核種 (I-129, Se-79, Ra-226, Pb-210など) が高い線量を示す。

# 予備的な検討を通じて抽出・再確認された課題

今後の直接処分の技術的基盤の整備に向けた課題を以下の3つの観点で整理した。

## ■ 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

### ➤ 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

## ■ 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

- ・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