NUMO
原子力発電環境整備機構

地層処分研究開発調整会議
（第３回会合）
資料4

研究開発の進め方について（案）

概要版

2017年12月

原子力発電環境整備機構（NUMO）

※図表のうち引用記載がないものについては調整会議メンバー提供または作成

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（１）自然現象の影響
①　火山・火成活動の発生および影響の評価技術の高度化

目的および実施概要

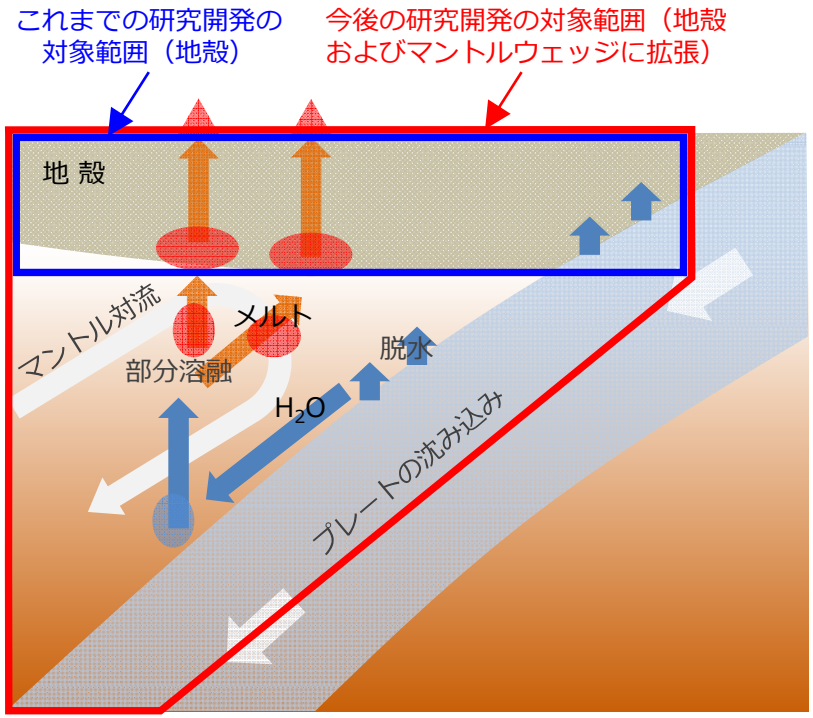
- ◆ 新たな火山・火成活動の発生に係る予測の信頼性向上に向け，地殻～マントル内の地下構造，火山の活動様式に応じたマグマの影響範囲，沿岸部海域におけるマグマの有無を把握するための調査・評価技術の高度化を図る。
- ◆ 火山・火成活動の新たな発生の可能性を評価するための地下構造の調査技術について，遠地地震などを用いた地震波データの拡充などを通じて地殻～マントル内の流体の分布や移動の把握精度を地下数十km以深の領域まで向上させ現象理解を深めることにより，地下のマグマの発生・上昇に係る既存のモデルの信頼性向上を図る。（実施項目a）
- ◆ 火山の活動様式に応じてマグマの影響範囲を把握するための技術について，特に影響範囲が大きくなる場合（カルデラや単成火山群など）の調査・評価事例の蓄積を図る。（実施項目b）
- ◆ 陸域で有効性が確認されたマグマ・深部流体の有無や分布を確認するための地下構造の調査技術（特に地震学的手法）について，沿岸部海域でも陸域と同程度の精度や空間分解能で調査・評価が可能となるように技術を整備する。（実施項目c）

実施項目

a.　将来の火山・火成活動の発生に係る評価技術の高度化
- マントルウェッジにおける流体の分布に係る知見の蓄積・分析
- 火成活動に関与する流体などの移動に係る知見の蓄積・分析

b.　マグマの影響範囲を把握するための技術の高度化
- 活動様式の異なる火山を対象としたマグマの影響範囲の調査・評価に係る知見の蓄積・分析

c.　沿岸部海域におけるマグマの有無を確認するための技術の高度化
- 内陸部とは調査・観測環境が大きく異なることが想定される沿岸部海域における地震学的手法の高度化



将来の火山・火成活動の発生に関与する
流体分布に係る解析の対象範囲の拡張

【外部有識者　主なご意見】
- 高度化の達成目標をより具体的に示すと良い。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（１）自然現象の影響
②　深部流体の移動・流入に係る現象理解および影響の評価技術の整備

目的および実施概要

- ◆ 地下深部からの流入の可能性が想定される非火山性の深部流体について，その形成や移動に係る現象理解を深め，流入の可能性や影響の評価に必要な技術基盤の整備を図るとともに，沿岸部海域における深部流体の有無などを確認するための調査・評価技術を整備する。
- ◆ 深部流体については，深部上昇水や長期停滞水などの分類に応じて，その形成メカニズムや分布特性，移動・流入に関与する地殻内の条件や地質環境特性を明らかにするための地質学的・地球物理学的・地球化学的特徴などの知見を蓄積し，流入の可能性や熱・水理・地化学的な影響の調査・評価技術の体系化に係る技術基盤を整備する。（実施項目a）
- ◆ 陸域で有効性が確認されたマグマ・深部流体の有無や分布を確認するための地下構造の調査技術（特に地震学的手法）について，沿岸部海域でも陸域と同程度の精度や空間分解能で調査・評価が可能となるように技術を整備する。（実施項目b）

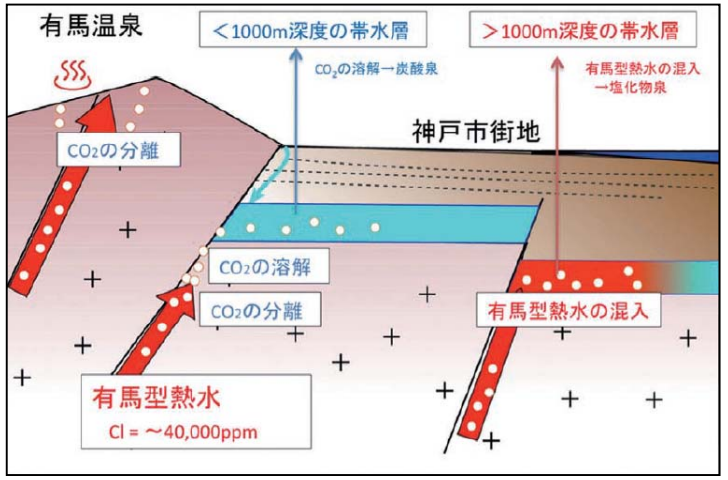
実施項目

a.　深部流体の形成・移動に係る調査・評価技術の整備
- 地下深部における深部流体の形成，地表付近への深部流体の流入に係る知見の蓄積・分析
- 深部流体の地球物理・化学的特徴に係る知見の蓄積・分析

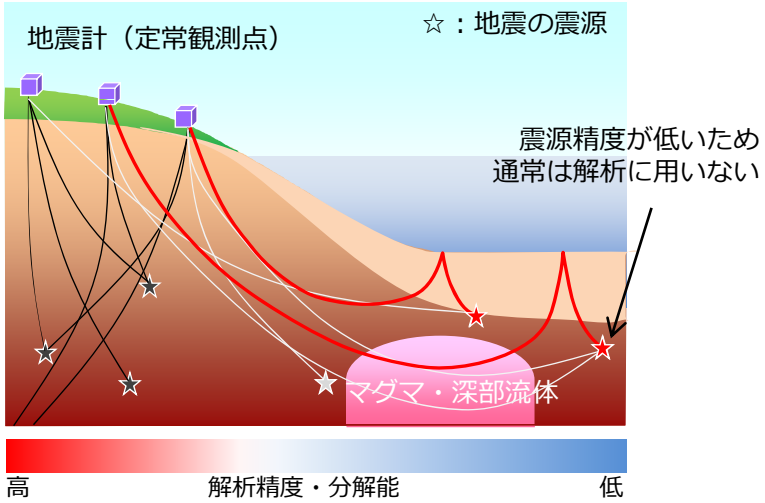
b.　沿岸部海域における深部流体の有無などを確認するための技術の整備
- 内陸部とは調査・観測環境が大きく異なることが想定される沿岸部海域における地震学的手法の高度化

【外部有識者　主なご意見】

- 深部流体の定義を明確に示すべきである。
- 深部流体の分類に応じて，調査・評価の手法も変わってくると考えられることから，それを念頭に置いた整理が必要である。



深部流体（深部上昇水）の上昇の模式図



沿岸部海域における地震学的手法の高度化

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（１）自然現象の影響
③　地震・断層活動の活動性および影響の調査・評価技術の高度化

目的および実施概要

- ◆ 地形的に不明瞭な活断層の分布・活動性，上載地層がない場合の断層の活動性，地震・断層活動の水理学的・力学的影響に係る調査・評価技術の信頼性向上に向け，複数の手法を組み合わせた調査・評価技術を体系的に整備する。
- ◆ 活断層の検出に係る測地学的手法を含めた地下に伏在する断層の活動性および地質構造発達史を背景とした断層破砕帯内物質の鉱物・化学組成や放射年代測定を用いた断層の活動性の評価技術を整備する。（実施項目a・b）
- ◆ 地震の発生に伴う長期間湧水や地下水圧・水質の変化に係る調査・解析事例の蓄積・分析を図る。（実施項目c）
- ◆ 海陸接合部付近における活断層の検出・評価が可能となるように陸・海域で適用性が確認された調査・評価技術の組み合わせに係る適用事例を取りまとめ，技術基盤として整備する。（実施項目d）

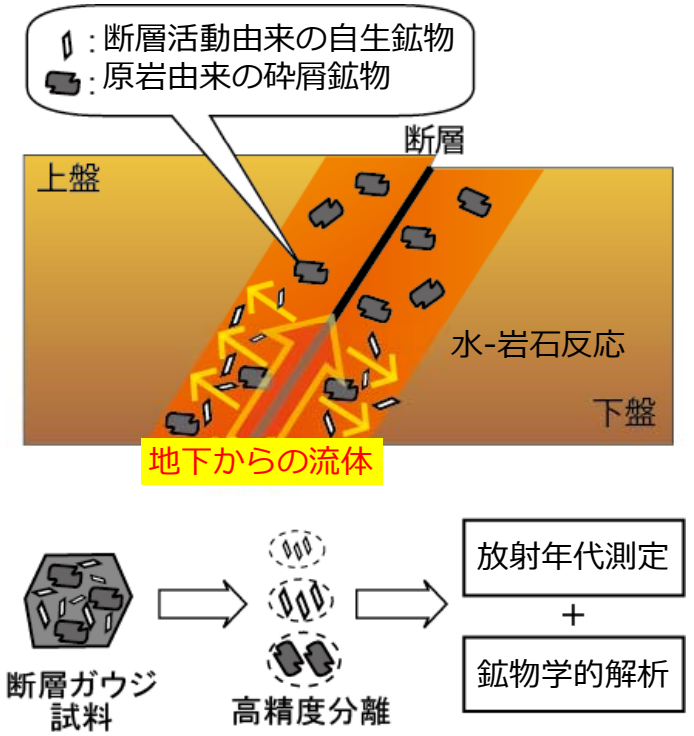
実施項目

a. 地表地形から特定が困難な活断層を検出し活動性を把握するための技術の高度化
   - 測地学的データなどの収集・解析，地殻変動シミュレーション技術の整備
   - 地形・地質学的データなどの収集・解析

b. 上載地層がない場合の断層の活動性や地質断層の再活動性を把握するための技術の高度化
   - 破砕帯内物質の鉱物・化学組成に係る定量的指標の検討
   - 放射年代測定技術の開発

c. 地震および断層活動による水理学的・力学的影響を把握するための技術の高度化
   - 地震・断層活動に伴う長期間湧水や地下水圧・水質の変化に係る調査・解析事例の蓄積・分析

d. 陸域から海域にかけて活断層の分布を連続的に確認するための技術の高度化
   - 陸域から海域にかけて連続的に分布する活断層を対象とした調査技術および調査事例に係る技術情報の取りまとめ



破砕帯内物質を用いた検討例

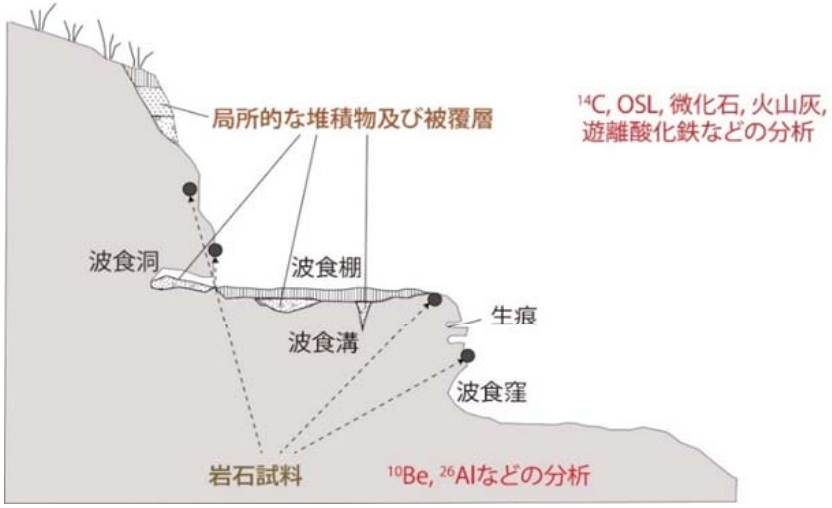
【外部有識者　主なご意見】

- 坑道の掘削までの段階および掘削以降の段階に適用する技術として展開を示すと良い。
- 地震に伴いどの程度の深部の地下水が関係しているのかという観点から，長期間にわたる湧水の事例の検討を引き続き実施しておくべきである。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（１）自然現象の影響
④　地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化

目的および実施概要

- ◆ 将来の隆起・侵食の予測の信頼性向上に向け，過去百万～数十万年前以前からの隆起・侵食量の調査・評価に適用可能な手法を拡充するとともに，海成段丘などの有効な指標に乏しい沿岸部陸域および海域における隆起・侵食の調査・評価技術の整備を図る。
- ◆ 従来の海成・河成段丘などを用いた地形学的手法と堆積物の年代測定に加えて，鉱物の年代測定法における閉鎖温度の違いを用いた熱年代学的手法や分布が局所的な堆積物を対象とした化学分析・年代測定などの手法について，各手法の精度・適用限界を踏まえた適用方法の検討を通じて技術の整備を図る。（実施項目a）
- ◆ 有効な指標に乏しい沿岸部陸域・海域を対象に，岩石侵食段丘における露出年代測定，礫層や土壌の経験的風化指標による対比・編年，高精度の地形デジタルデータを用いた地形解析，陸域での隆起・侵食様式の海域への外挿などの手法を組み合わせた適用事例の蓄積および適用方法の整備を通じて調査・評価技術の高度化を図る。（実施項目b）



沿岸部の岩石侵食段丘における年代測定手法の例

実施項目

a. 地形学的手法や年代測定などを用いた過去百万～数十万年前以前からの隆起・侵食を把握するための技術の拡充
   - 熱年代学的手法を用いた評価技術の整備
   - 分布が局所的な堆積物を用いた評価技術の整備

b. 沿岸部の隆起・侵食を把握するための技術の高度化
   - 岩石侵食段丘における露出年代測定技術の整備
   - 礫層や土壌を用いた段丘対比・編年手法の整備
   - 沿岸域の地形解析技術の整備
   - 陸域での傾向の海域への外挿に基づく評価手法の整備
   - 各手法を適切に組み合わせた最適なアプローチによる沿岸部での適用事例の蓄積

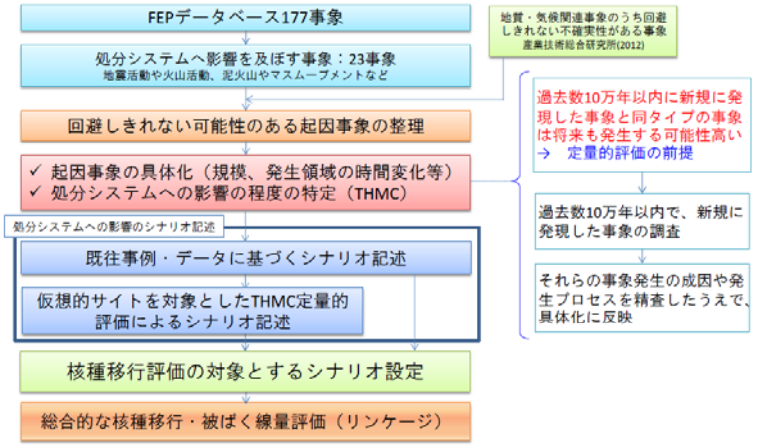
【外部有識者　主なご意見】

- 隆起・侵食の評価はどの程度までの将来を対象とし，年代測定手法などに求める精度やターゲットを明確にしておく必要がある。
- 熱年代学的手法を用いた鉱物の年代測定はどれくらいの精度・誤差があるのか。その信頼度も含めて検討する必要がある。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（１）自然現象の影響
⑤　長期的な自然現象の発生可能性および地質環境の状態変遷の評価技術の整備

目的および実施概要

- ◆ 将来10万年程度を超える長期における自然現象の発生可能性に係る予測の信頼性向上に向け，これまでに整備してきた評価技術の高度化を図る。
- ◆ 将来10万年程度を超える期間に新規に発生する可能性のある事象について，これまでのサイトを特定しない条件における検討に対して，今後は自然現象の地域的な変動傾向を踏まえた科学的知見（1.(1)①～④で取得）に基づき考慮すべき影響に係るシナリオを体系的に整理し，地域性を考慮した地質環境の状態変遷に係る評価技術を整備する。（実施項目a）
- ◆ 実施項目aで整理したシナリオの科学的な説明性向上に向け，将来10万年程度を超える期間を対象に，プレート運動の継続性の変化や気候・海水準変動も考慮した自然現象の発生可能性とその不確実性を確率論的に数値化するための技術を整備する。（実施項目b）

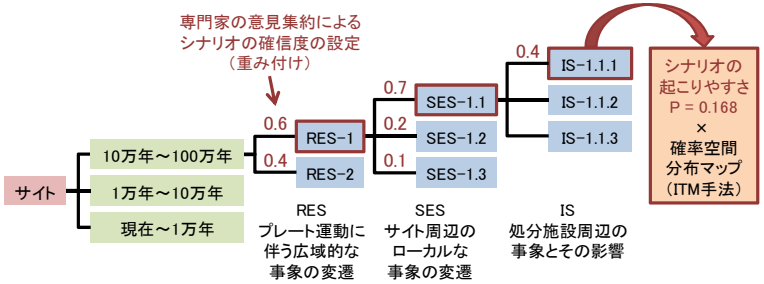


地質・気候関連事象に係る影響評価シナリオの設定方法の例

実施項目

a.　自然現象に係る長期的なシナリオ設定および地質環境の状態変遷に係る影響評価のための手法の整備
- 地域的な変動傾向を踏まえた着目すべき現象や不確実性要因などの整理
- 自然現象の発生が地質環境へ及ぼす影響要因に係るシナリオの整理
- 地域性を考慮した地質環境の状態変遷に係る影響評価手法の整備

b.　長期にわたる自然現象の発生可能性とその不確実性を評価するための技術の高度化
- 自然現象の発生可能性および不確実性の確率論的評価に係る事例研究
- 事例研究の結果に基づく評価技術の高度化



確率論的評価手法におけるロジックツリーの基本構造の例

【外部有識者　主なご意見】

- 項目aおよび項目bの関連性が分かりにくい。項目aは1.(1)①～④で記載した技術を統合し不確実性が低い場所を選定していくプロセスであり，その指標として不確実性を明示した方が良い。
- 項目bでは，確率論で算出された数値をどのように取り扱うのかが課題である。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（２）地質環境の特性
①　水みちの水理・物質移動特性の評価技術の整備

目的および実施概要

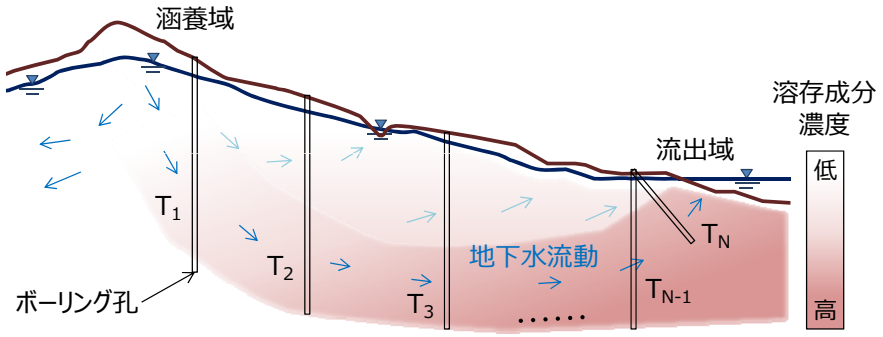
- ◆ 概要調査において重要となる涵養域から流出域までの広域的な地下水流動（移流場）や地下水の長期滞留域（拡散場）の三次元分布に係る調査・評価の信頼性向上に向け，それぞれの水理・物質移動場に応じた方法論を整備する。
- ◆ これまでに整備された広域的な水理・物質移動場の調査・評価技術について，地下水流動解析結果と地下水の水質・年代の三次元分布との対比や地質環境の長期変遷の評価などを通じて妥当性を確認する。（実施項目a・b）
- ◆ 割れ目密度の高いわが国の岩盤に適用できるように水みちの水理・物質移動特性に係る調査技術の高度化を図るとともに，微細透水構造モデル（1.(2)③および3.(2)①に反映）を構築し，水みちの分布に起因する水理・物質移動場の不均質性を考慮した解析条件の設定手法の最適化を図る。（実施項目c）

実施項目

a. 内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化
- 地下水流動解析結果と地下水の水質・年代の三次元分布との対比
- 重要な条件やパラメータの種類や取得密度などの評価

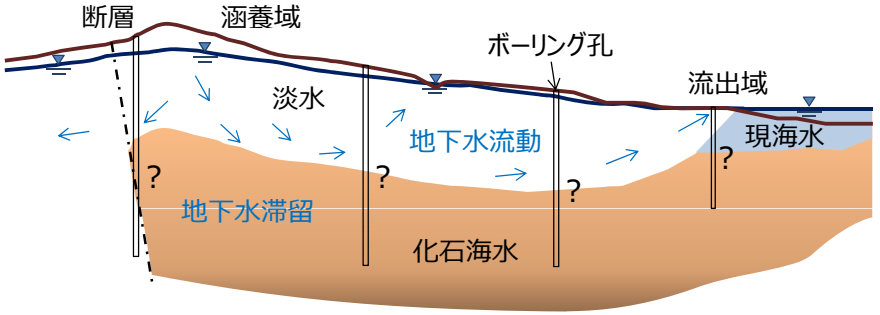
b. 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術の高度化
- 化石海水の滞留域の古水理地質学的変遷の調査・評価
- ボーリング調査や物理探査を組み合わせた調査技術の体系化

c. 水みちの水理・物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化
- 水みちの検出技術および微細透水構造の調査技術の高度化
- 微細透水構造モデルおよび水理地質構造モデルの構築
- 広域的な水理・物質移動場の解析条件の設定手法の最適化



地下水年代：$T_1<T_2<T_3<\ \cdots<T_{N-1}<T_N$

地下水の水質・年代の三次元分布との対比による広域地下水流動解析結果の妥当性確認の例



化石海水の滞留域の三次元分布の調査・評価の例

【外部有識者　主なご意見】

- 広域地下水流動解析結果と地下水の水質の三次元分布との対比においては，地下深部の水質を境界条件として把握しておくことが重要である。
- ボーリング調査データと物理探査データとを組み合わせて水理場の不均質性を把握する技術を検討すると良い。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（２）地質環境の特性
②　沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備

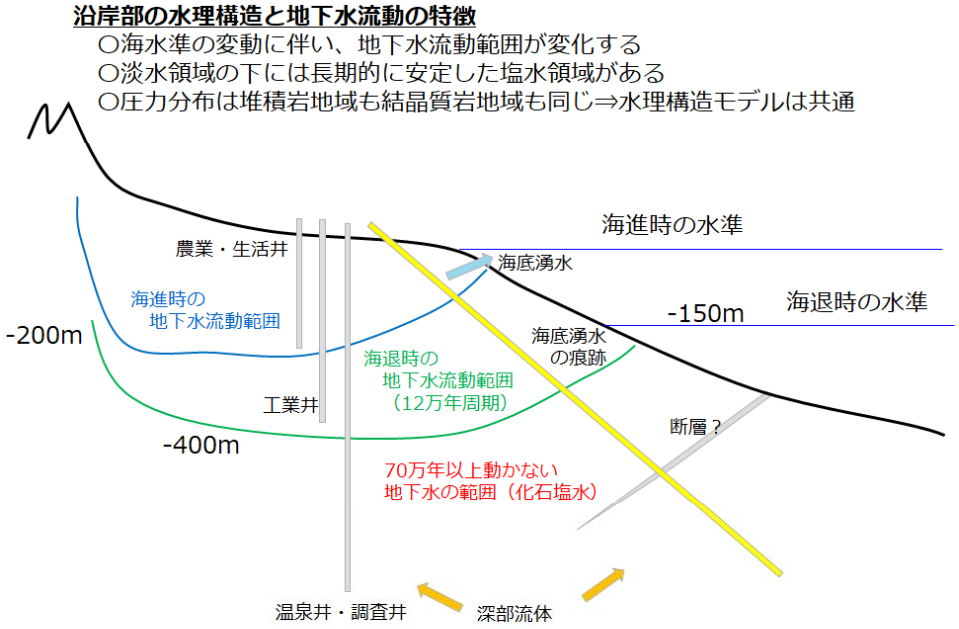
目的および実施概要

- ◆ 沿岸部の陸域から海域までの広範囲を対象とした概要調査の的確な実施に向け，地質環境調査・評価技術の整備を図る。
- ◆ これまでに資源探査や学術調査を通じて整備されてきた地質環境調査技術について，実証的な取り組みを通じて地層処分におけるサイト調査の観点から適用性を評価するとともに，処分場の設計や安全評価に必要となる地質環境情報を求められる精度で取得できるように高度化を図る。（実施項目a）
- ◆ 適用性が確認された調査技術を用いた事例研究を通じて，これまでに一部の地域で存在が確認された長期的に安定な水理場・化学環境の分布を確認し，わが国の沿岸部の水理場・化学環境モデル（1.(2)③に反映）を構築したうえで，地質環境調査・評価技術を体系的に整備する。（実施項目b）

実施項目

a. 沿岸部陸域・海域を対象としたサイト調査の観点からの既存の調査技術の適用性確認および高度化
   - 三次元物理探査による地質構造調査技術の高度化
   - 海底湧水および微地形調査の体系化による広域地下水流動調査技術の高度化
   - 海水の影響を考慮したボーリング調査技術の高度化

b. 沿岸海底下に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を把握するための技術の整備
   - 物理探査やボーリング調査などの組み合わせた地質環境調査および断層や海水準変動の影響評価
   - 既存ボーリング孔を利用した全国規模での水理場・化学環境の調査および沿岸部の水理場・化学環境のモデル化
   - 地質環境調査・評価技術の体系的な整備



沿岸部の陸域から海域を対象とした地質環境調査・評価の例

【外部有識者　主なご意見】

- 沿岸海底下に長期にわたり安定に存在する水理場・化学環境の把握は重要である。地質構造や地質環境特性の違いとの関連性を考慮すると良い。
- 全国規模での水理場・化学環境の調査はわが国の多様な地質環境の条件を考慮して実施すると良い。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（２）地質環境の特性
③　地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化

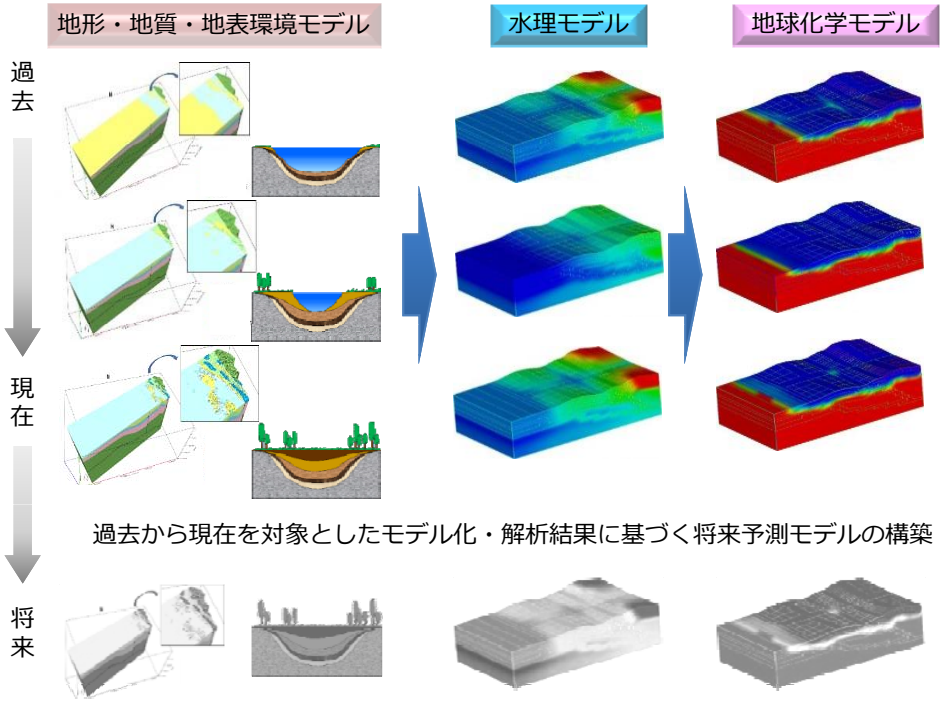
目的および実施概要

- ３段階のサイト調査において地質環境の長期安定性を示すうえで必要であるだけでなく，安全評価の基盤となる地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の信頼性向上を図る。
- これまでに事例研究を通じて整備された水理場・化学環境の長期変遷モデル化技術の信頼性向上に向け，断層活動に伴う水理場などの地質環境特性の変化に係る調査・解析などを通じて評価技術の妥当性を確認するとともに，同モデル化技術を活用し将来予測のための方法論を整備する。（実施項目a）
- 包括的技術報告書で提示する3岩種の地質環境モデルを活用し，長期的な地形変化や気候・海水準変動に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の時間的・空間的変化に係る現実的なモデル（3.(2)②に反映）の構築を通じて，安全評価との連携を考慮したモデル化技術を整備する。（実施項目b）

実施項目

a.　水理場・化学環境の長期変遷をモデル化する技術の高度化
- 断層活動に伴う岩盤の透水性の変化に係る評価
- 入力パラメータの設定の妥当性確認
- 過去から現在までを対象としたモデル化・解析結果に基づき将来予測を行うための方法論の整備

b.　生活圏を考慮した地質環境特性の長期変遷をモデル化する技術の整備
- 長期的な地形変化や気候・海水準変動に伴う地質環境特性の時間的・空間的変化に係るモデルの構築
- 地下浅部の酸化帯や希釈に係る最新の科学的知見の蓄積



水理場・化学環境の時間的・空間的変遷に係るモデル構築の概念

【外部有識者　主なご意見】
- 地質環境の長期変遷に係るモデル化は非常に難しい項目であるため，今後5年間の目標を明確に定めた方が良い。
- 生活圏を考慮した地質環境の長期変遷に係るモデル化は，いかに信頼性を確保しつつ取り組むことができるかが重要である。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（２）地質環境の特性
④　ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備

目的および実施概要

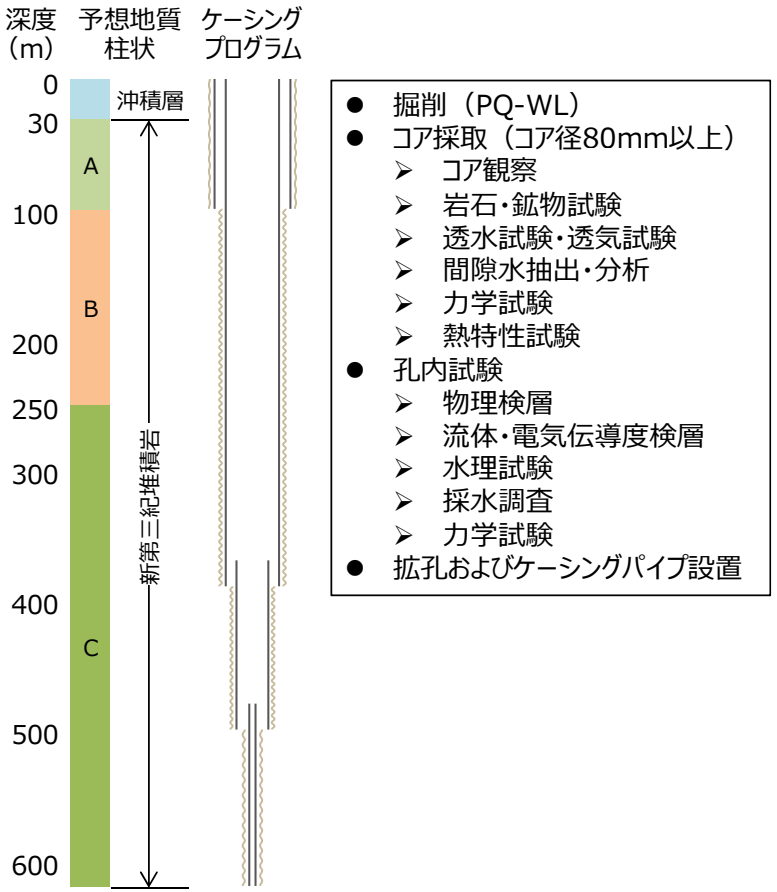
- ◆ わが国の多様な地質環境を対象とした概要調査を念頭に置き，ボーリング孔の掘削・調査から長期モニタリングおよび閉塞に至るまでの一連の技術を体系的に整備する。
- ◆ 概要調査において特に重要な調査技術であるボーリング孔の掘削・調査について，これまでに国内で地層処分のサイト調査の観点から実績がない膨潤性・崩壊性を有する脆弱層を挟在する岩盤においても実施可能となるように実証的な取り組みを通じて技術の整備を図る。（実施項目a）
- ◆ これまでに整備された個別のモニタリング技術について，サイトにおける数十年という時間スケールを視野に入れた適用性，精度の向上，多目的化などの観点から改良を加え高度化を図る。（実施項目b）
- ◆ 国際的な課題である処分場の閉鎖後にボーリング孔が水みちとならないように確実に閉塞する技術について，既存のボーリング孔における閉塞材や閉塞手法などの適用試験を通じて新たに整備する。（実施項目c）

実施項目

a. 脆弱層を対象としたボーリング孔の掘削・調査技術の整備
   - 大深度ボーリング孔掘削，掘削泥水や掘削機器の適用性の確認および掘削パラメータや掘削手法の最適化
   - 各種の孔内調査・試験およびコア調査・試験の実施可能性の確認

b. 岩盤の力学的・水理学的変化および地下水の地球化学的変化の長期モニタリング技術の高度化
   - 光ファイバセンシング技術を用いた岩盤の変形測定技術の改良
   - 水圧・水質観測に係る多目的モニタリングシステムの改良

c. ボーリング孔の閉塞技術の整備
   - ボーリング孔内残置物の回収および閉塞材の選定技術の開発
   - 既存ボーリング孔における閉塞技術の適用試験



脆弱層を対象としたボーリング調査の計画案

【外部有識者　主なご意見】

- 脆弱な地層をその性状や特性から分類し，それぞれに対応する技術として整理できると良い。

１．地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
（２）地質環境の特性
⑤　サイト調査のための技術基盤の強化

目的および実施概要

- ◆ わが国の多様な地質環境を対象としたサイト調査の信頼性向上に向け，最新の科学・技術的知見（1.(1)および1.(2)①～④で取得）の集約や品質マネジメントシステムの整備を通じて技術基盤の強化を図る。
- ◆ サイト調査やセーフティケースの更新に適宜反映することを念頭に置き，これまでに引き続き，地質環境特性および自然現象が及ぼす影響なども考慮したその長期変遷に係る最新の科学的知見について集約する。（実施項目a）
- ◆ サイト調査に活用できるようにするため，陸域～海域を対象とした地質環境調査・評価技術に係る技術的知見の拡充を図るとともに，地質環境調査・評価に適用する品質マネジメントシステムなどの高度化を図る。（実施項目b）

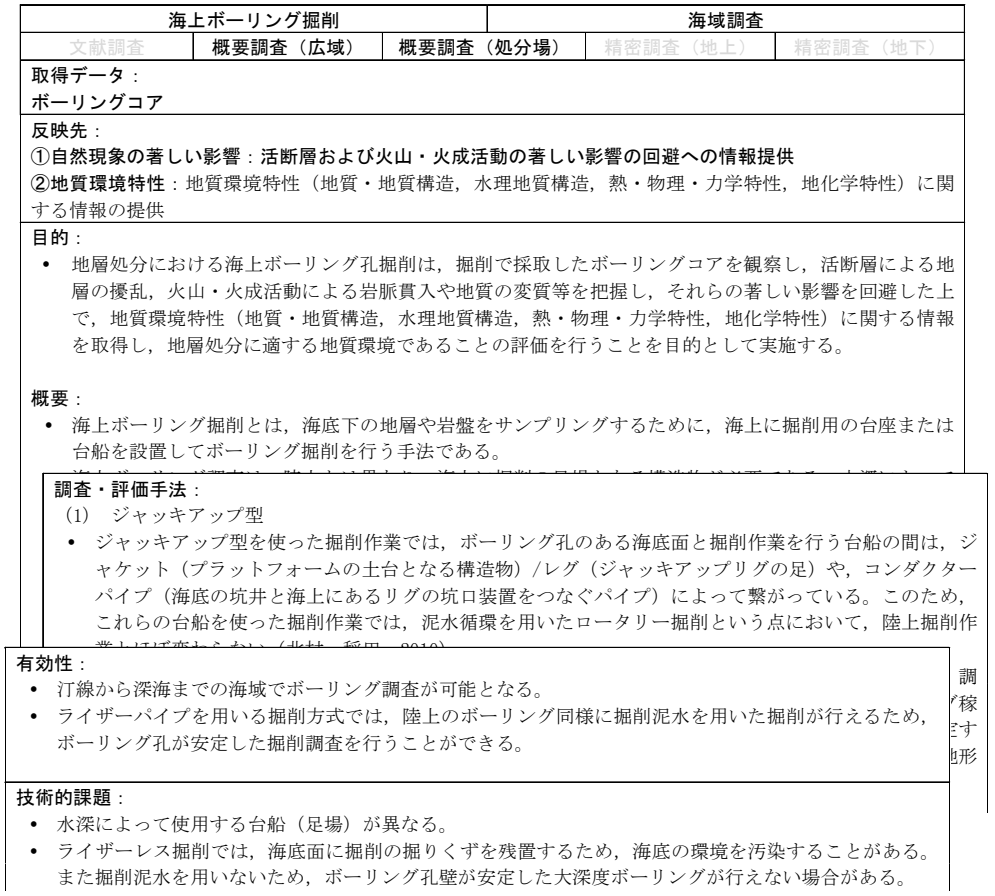
実施項目

a. 多様な地質環境の特性に係る科学的知見の拡充
   - 地質環境特性とその長期変遷に係る最新の科学的知見の集約

b. 陸域～海域を対象とした地質環境調査・評価に係る技術基盤の拡充
   - 最新の技術的知見の集約および手法・適用方法，有効性や技術的課題などの分析・整理
   - 品質マネジメントシステムの高度化

【外部有識者　主なご意見】

- この取り組みはサイト調査に向け不可欠である。



地質環境調査・評価技術に係る技術的知見の分析・整理の例

２．処分場の設計と工学技術
（１）人工バリア
①　人工バリア代替材料と設計オプションの整備

目的および実施概要

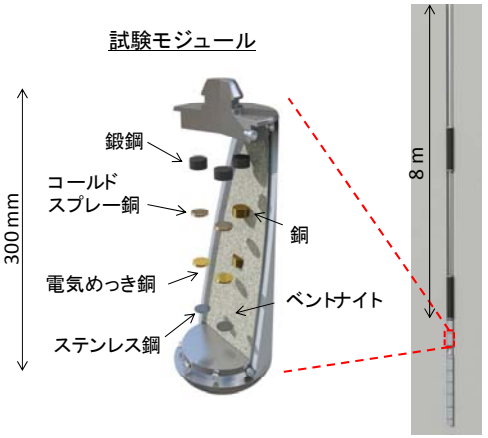
- ◆ これまでオーバーパックに用いる材料については炭素鋼鍛鋼品を，緩衝材に用いる材料はNa型ベントナイトのクニゲルV1をレファレンスの仕様として検討を行ってきている。今後安全確保を第一に経済合理性や調達の多様性を確保して，人工バリア材料の選定を進めるために，様々な代替材料（例えば，炭素鋼鋳鋼品や銅コーティングによるオーバーパック，Ca型ベントナイトによる緩衝材など）の技術的な成立性を確認する。（実施項目a）
- ◆ これまでに安全性に加えて操業の効率性や回収の容易性なども考慮した設計オプションを整備してきた。今後，サイトの地質環境特性に対し柔軟に対応して，より合理的な人工バリア仕様を設計できるようにするために，上記の代替材料の成立性を踏まえた有望な設計オプションを検討する。（実施項目b）

実施項目

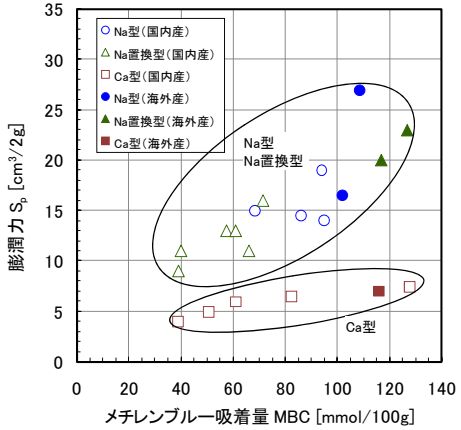
a.　人工バリア代替材料の成立性の検討
- オーバーパック材料の特性試験（炭素鋼鍛鋼品および鋳鋼品，銅）
- ベントナイト材料の特性試験（Na型，Ca型）

b.　人工バリア設計オプションの整備
- 人工バリア概念の開発と選定
- 人工バリア仕様の最適化

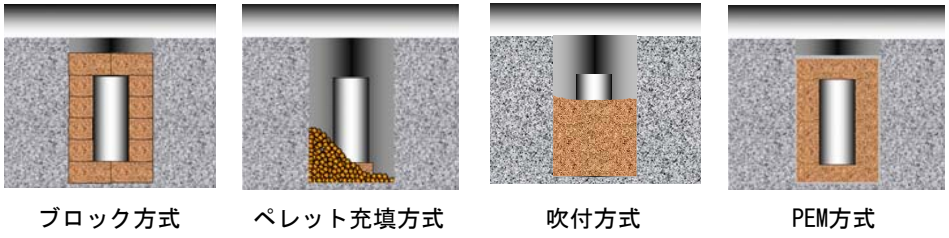
【外部有識者　主なご意見】
- Ca型ベントナイトにはセメントとの共存性が良い点や炭酸に対する影響が少ないなどのメリットもあるので，良い取り組みである。
- ベントナイトの特性データの拡充は幅広くデータベースを活用できるように，メチレンブルー吸着量など比較的簡単に求められる共通的な指標とセットで取得しておいた方が良い。



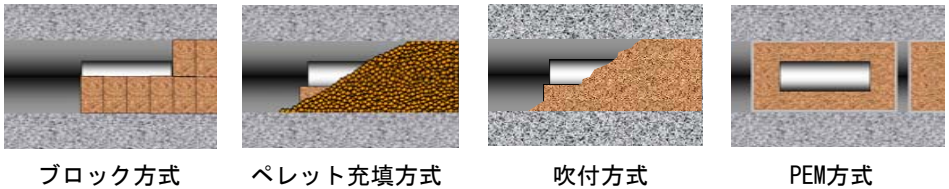
オーバーパック材料の
原位置腐食試験の概要



国内外の様々なベントナイトの
基礎物性試験結果を整理した例



（a）処分孔竪置き定置方式



（b）処分坑道横置き定置方式

人工バリア設計オプションの例

２．処分場の設計と工学技術
（１）人工バリア
②　TRU等廃棄物に対する人工バリアの閉じ込め機能の向上

目的および実施概要

◆ 操業期間中の安全性の向上を目的としたTRU等廃棄物の廃棄体パッケージの設計オプションの可能性について検討し，これまでに操業中に加えて閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージの設計仕様を示している。今後こうした設計オプションについて，さらに安全性や定置性などの性能の向上を図るために，製作性および構造健全性に関する実証的な試験等を実施して性能を評価し，廃棄体パッケージの設計オプションの改良を進める。（実施項目a）

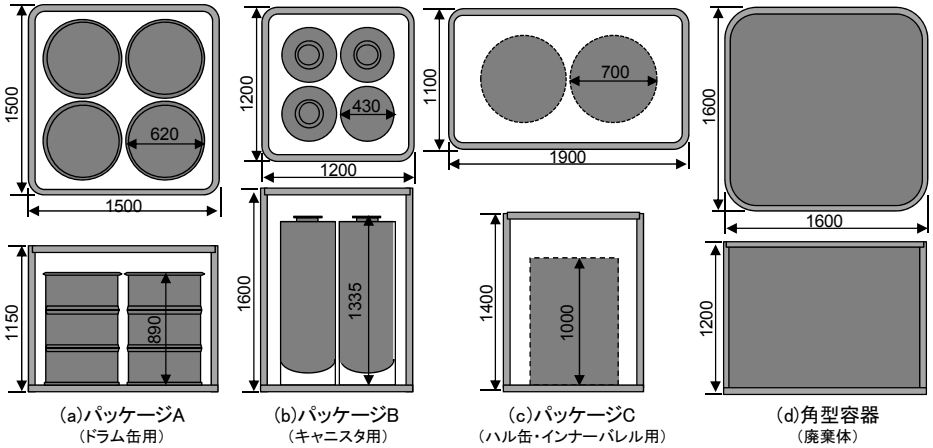
◆ TRU等廃棄物に対する閉じ込め性能の一層の向上を図り，閉鎖後長期にわたる処分場の安全性を高めるために，可溶性で収着性の低い陰イオン核種に対して，これまでに研究開発が進められてきた固定化技術の実現性を高めるとともに，新たな吸着材の開発を進める。（実施項目b）

実施項目

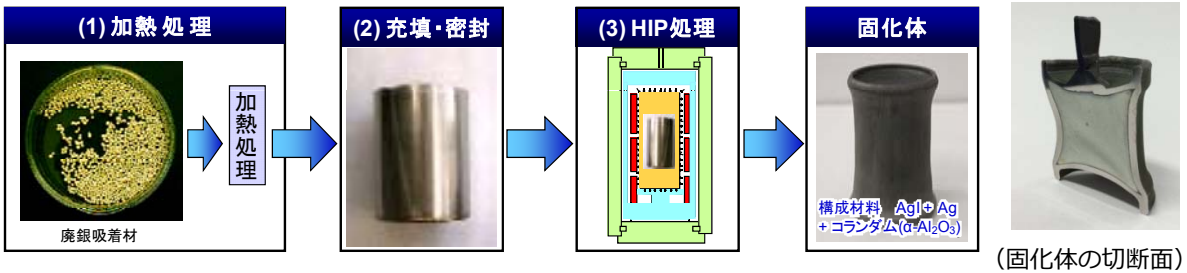
a.　廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価
- 廃棄体パッケージの製作に係る要素技術の開発
  （放射性分解ガスの発生抑制技術，蓋接合技術など）
- 廃棄体パッケージの試作
- 長期閉じ込め性能および堅牢性の評価
  （応力腐食割れの評価，落下試験など）

b.　陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発
- ヨウ素代替固化技術の開発
- 陰イオン吸着材の開発

【外部有識者　主なご意見】
- 陰イオン吸着材については，使用可能な量が確保できるかといったことも視野に入れて，研究開発を進める必要がある。



操業期間中の閉じ込め性能を高めたTRU等廃棄物の
廃棄体パッケージの仕様・寸法の例



（固化体の切断面）

ヨウ素代替固化技術の処理プロセスの例（アルミナ固化体※）

※ヨウ素を吸着した廃銀吸着材（アルミナを基材）を容器に充填した後に，HIP（熱間等方圧加圧）処理してアルミナ固化体にすることで，物理的にヨウ素を閉じ込める。

２．処分場の設計と工学技術
（１）人工バリア
③　高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発

目的および実施概要

- ◆ 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術については，これまで竪置き方式を中心に研究開発が進められてきた。今後は有力な設計オプションの一つと考えられるPEM方式を対象として，地下での搬送定置作業を効率的に実施するための仕様の合理化を進め，適用性・実用性という観点で段階的に技術の実証に取り組む。（実施項目a）
- ◆ オーバーパックについては，これまでに主に炭素鋼鍛鋼品に対する製作技術が構築されている。今後は2.(1)①で述べた代替材料に対する製作技術および遠隔操作化・自動化された蓋接合技術の実用化，信頼性向上に向けた開発を進める。（実施項目b）
- ◆ 構築された人工バリアが設計で想定した安全性を有していることを担保するために，施工プロセスの品質管理に加えてそれを補完するモニタリングによる品質保証体系を整備する。（実施項目c）

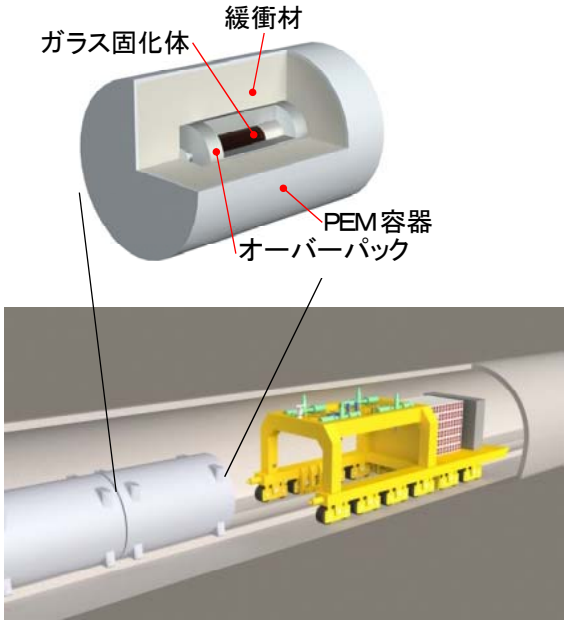
実施項目

a. PEMの製作・施工技術の開発
- PEMの再冠水試験
- 組立試験，隙間埋め戻し技術の開発
- 遠隔搬送定置装置の概念設計，要素技術開発

b. オーバーパックの製作技術の開発
- 鋳鋼製オーバーパックの製作技術の開発
- 銅コーティングオーバーパックの製作技術の開発
- 遠隔操作化・自動化された蓋接合技術（検査・後熱処理を含む）の開発

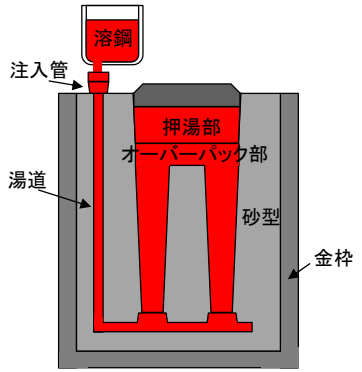
c. 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備
- 人工バリアの製作・施工に係る品質保証体系の具体化
- 関連するモニタリング技術の高度化（光ファイバーの活用など）

【外部有識者　主なご意見】
- オーバーパックについては，蓋との接合部，溶接部が最もネックになっているのではないか。新材料の開発にあたっては，溶接部に焦点を当てておく必要がある。



PEMの仕様例と搬送定置の概念

鍛鋼品の鍛造工程



鋳鋼品の鋳込み工程

炭素鋼オーバーパックの製作状況

銅コーティングオーバーパックの製作例（NWMO製作）

２．処分場の設計と工学技術
（２）地上・地下施設
①　処分施設の設計技術の向上

目的および実施概要

◆ これまでにサイト選定で想定される候補母岩を対象として処分場の設計を試行して，所要の安全機能を確保するための判断指標を導入し，既存知見に基づいた設計基準値の目安を設定した。多様な地質環境に柔軟に対応した処分施設の設計を可能とするため，これらの判断指標・基準の目安について，今後も新たな知見に対して適切に整備・更新していく。また，設計オプションの整備を踏まえつつ，実用性と合理性を高めてより最適化された処分場の設計を示し，今後の事業実施に備える。（実施項目a）

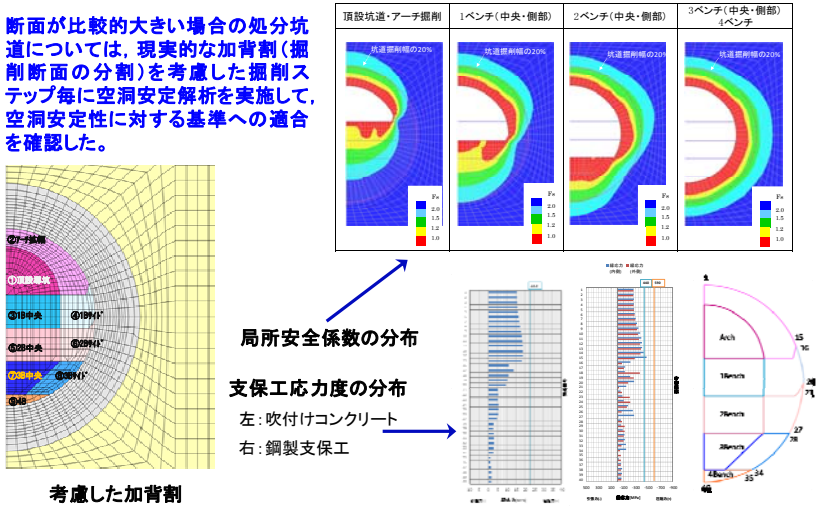
◆ 地下施設の坑道は複雑で長大であり地下深くに展開されること，建設と操業を同時並行で実施するなどの特殊な条件により，換気・排水システムの設計は難易度の高いことが，これまでの検討で示されている。建設・操業期間中の安全で良好な作業環境の維持を確実なものとするために，換気・排水システムについて，今後坑道内の火災などさらにシステムの異常状態までも考慮できるように信頼性の高い評価技術を整備し，多重防護の考え方に基づく安全対策を用意する。（実施項目b）

実施項目

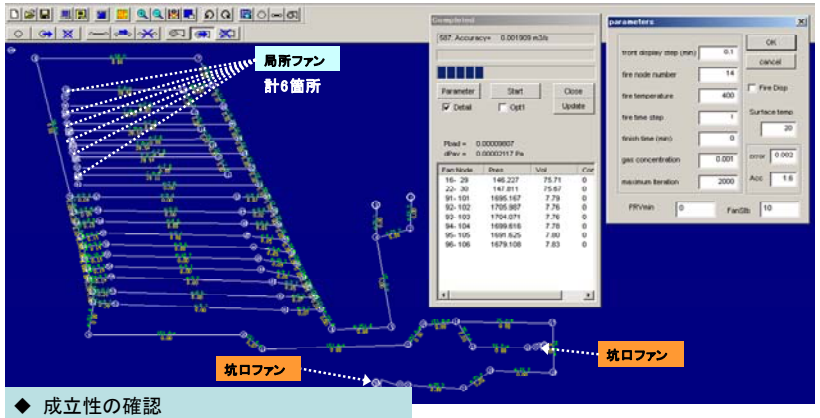
a.　設計技術の体系的整備
- 地下施設の設計要件に係る目安基準の整備更新
  （坑道の安定性基準，レイアウト決定特性，廃棄体の定置基準など）
- 「処分場の概念設計」の実施

b.　建設・操業システムの設計技術の整備
- 排水システム設計と湧水量評価技術の整備
- 坑道内火災に対する換気システム設計・評価技術の整備
- 異常事象に対する安全対策の具体化（特に坑内火災）

【外部有識者　主なご意見】
- 掘削時の突発的な湧水に対しては事前にいろいろな対処が可能であるが，坑道内の火災には注意が必要である。



坑道の力学安定性の指標・基準に対する照査の例



◆ 成立性の確認
- ✓ 換気ルートが確保されていること
- ✓ 所要換気量を満足していること
- ✓ 制限風速範囲内であること
- ✓ 現実的な換気設備を設定していること

左記の成立性の確認を行ったうえで，換気ファンの動作点を確認

通気網解析による建設中の換気システムの成立性の確認例

２．処分場の設計と工学技術
（２）地上・地下施設
②　処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

目的および実施概要

- ◆ プラグや埋め戻し材による坑道シーリングの設計・評価技術については，これまでに原位置での人工バリア性能確認試験等を通じて試行的な設計とその適用性などに関する検討が進められている。今後は，坑道シーリングによる処分場全体の閉じ込め性能を評価すること，これまでの設計概念をさらに詳細化することを目的とした検討を進める。（実施項目a）
- ◆ 坑道シーリング技術の性能については，これまでにベントナイトを中心とした基本特性データを用いた解析的な検討や要素試験などにより評価を行ってきた。今後は坑道シーリングの長期性能に影響を与えることが想定される事象や地質環境条件などを考慮した室内試験や工学規模の試験を実施して性能を検証する。（実施項目b）
- ◆ 坑道シーリングの施工技術については，多様な地質環境や設計オプションへの柔軟な対応を可能とするために，湧水等の施工品質への影響が想定される事象に対する対策技術とあわせて複数の施工技術を整備する。（実施項目c）

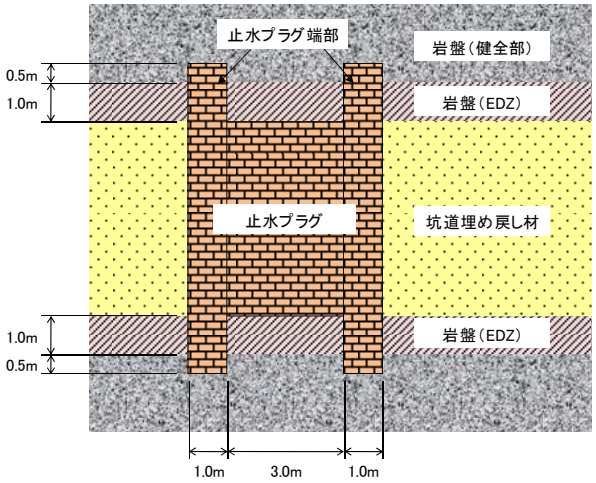
実施項目

a.　坑道シーリングの設計・評価技術の整備
- 坑道シーリングによる閉じ込め性能の評価技術の構築
- 設計要件の整理と設計手法の整備

b.　坑道シーリング技術の性能確認
- シーリング材料の基本特性データの拡充
- 工学規模のシーリング試験とその評価

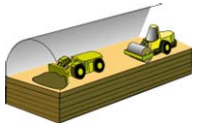
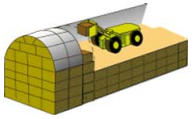
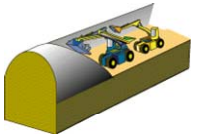
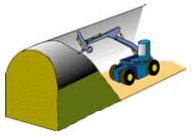
c.　坑道シーリングに関わる施工技術の整備
- 坑道埋め戻しを対象とした施工技術オプションの整備
- 影響事象に対する施工管理基準の明確化

【外部有識者　主なご意見】
- 坑道シーリングに係る試験では，様々な試験条件に対して適切に性能の比較ができるように，配慮する必要がある。



止水プラグの仕様の設定例

EDZ：掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone）の略

撒出し・締固め工法	ブロック工法
	
横（斜め）締固め工法	吹付け工法
	

埋め戻しの施工法の例

２．処分場の設計と工学技術
（２）地上・地下施設
③　処分場建設の安全性を確保する技術の高度化

目的および実施概要

- ◆ 坑道周辺の掘削損傷領域（EDZ）の大きさや水理特性の変化については，これまで単設坑道における局所的な情報が得られている。それらに基づき今後は坑道が連接するような場合も含めて広範囲な領域におけるEDZの拡がりや経時変化の把握を目的として，評価技術を整備する。（実施項目a）
- ◆ 坑道掘削技術については，基本的に一般のトンネル工事技術が利用可能である。今後は処分場建設の安全性・効率性の向上を目的として，掘削技術の遠隔操作化・自動化について検討する。（実施項目b）
- ◆ グラウトなどの湧水対策技術については，これまで実効性に着目して材料や注入技術の開発を中心に整備が行われてきた。今後は湧水に対する安全性の向上や排水およびその処理にかかるコストを低減することを目的として，多連接坑道への適用などを目標に技術を整備する。（実施項目c）

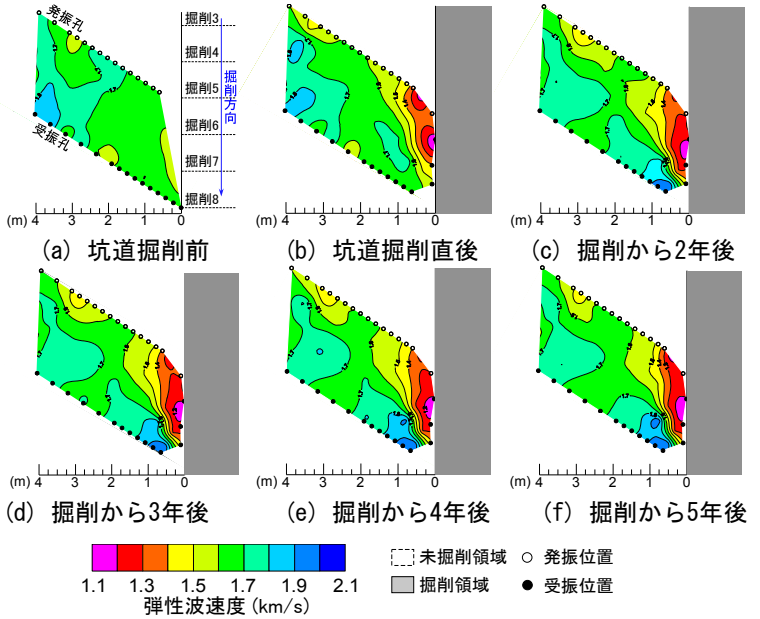
実施項目

a.　坑道の掘削損傷領域の評価技術の整備
- 広範囲な領域における掘削損傷領域の評価技術の整備

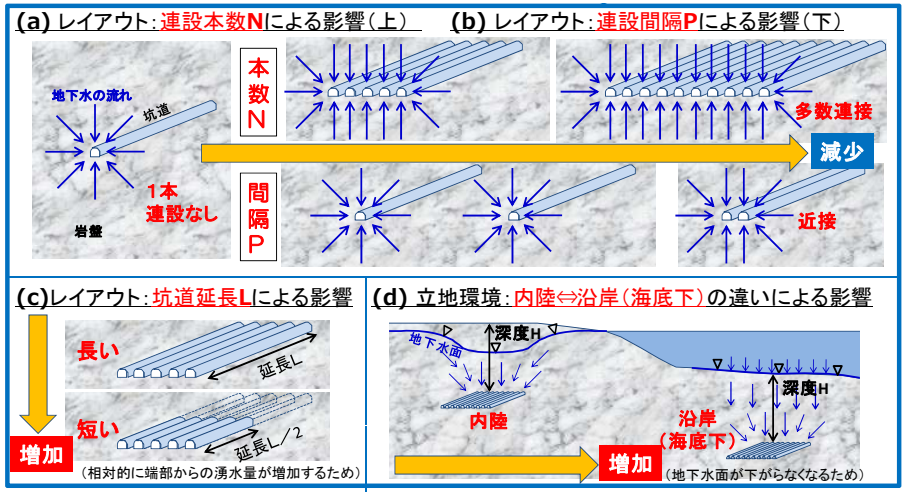
b.　掘削技術の高度化
- 掘削技術の遠隔操作化・自動化技術の検討

c.　湧水対策技術の整備
- 沿岸部など多様な環境条件におけるグラウト施工の適用性評価
- 多連接坑道を対象としたグラウト施工の影響と対策効果に係る評価手法の整備

【外部有識者　主なご意見】
- 多連接坑道に対する湧水対策技術は鉱山での事例が参考になる。大学等から蓄積した有用な情報が得られるのではないか。



掘削影響試験における弾性波トモグラフィ調査の例



多連接坑道におけるグラウト設計・評価パラメータの検討例

２．処分場の設計と工学技術
（３）回収可能性
①　廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備

目的および実施概要

- ◆ 高レベル放射性廃棄物の回収技術については，これまでに竪置き方式を対象として要素技術の開発と適用性の確認が進められてきた。今後は横置きPEM方式を対象として，回収装置の遠隔操作化・自動化の開発や回収技術の実現性を確認する。（実施項目a）
- ◆ TRU等廃棄物に対する回収技術については，人工バリア設計オプションの整備（2.(1)① ，2.(1)② ）を踏まえた有望な回収技術概念に対する検討を進め，信頼性と実現性の高い回収技術を確立する。（実施項目b）
- ◆ 処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の管理の在り方の具体化に向けて，回収可能性を維持する程度に応じた安全性への影響等に対する評価を実施し，影響を最小化するための対策技術の開発に取り組む。（実施項目c）

実施項目

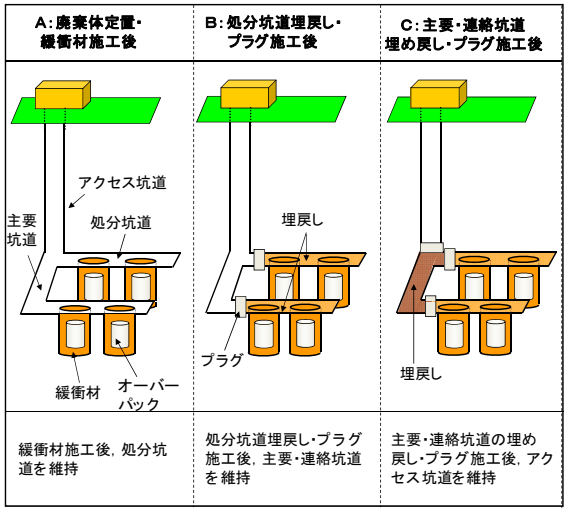
a. 高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発
- 横置きPEM方式を対象とした技術実証

b. TRU等廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発
- 回収技術の概念検討
- 有望な回収技術概念に対する技術の適用性検討

c. 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備
- 操業期間中の安全性への影響の評価技術の整備（開放された坑道への影響など）
- 閉鎖後長期の安全性への影響の評価技術の整備（地下環境の攪乱による人工バリア，母岩への影響など）
- 影響低減対策技術の検討

【外部有識者　主なご意見】
- なし

竪置き方式を対象とした模擬坑道における実証試験の様子（緩衝材除去）



回収時の状態の検討例

回収可能性の維持において定量化すべき情報（例）

1.安全性への影響
- 操業期間中の安全性への影響
- 閉鎖後長期の安全性への影響

2.回収の容易性
- 単位ﾕﾆｯﾄ当たりの回収時間
- 全廃棄体の回収作業時間

3.最終処分せずに回収可能性を維持できる期間

4.回収可能性に係る費用

２．処分場の設計と工学技術
（４）閉鎖前の安全性の評価
①　閉鎖前の処分場の安全性評価技術の向上

目的および実施概要

- ◆ 建設から閉鎖までの処分場で起こり得る異常事象として，これまでに火災，水没，電源喪失，廃棄体落下などを特定して評価シナリオを作成した。今後さらにシナリオの網羅性を高めていくために，事象の重畳など複合的な事象の発生等についても評価シナリオの検討を実施する。（実施項目a）
- ◆ 上記の過酷な状況を想定した評価シナリオに対する評価結果の妥当性，信頼性の向上のために，安全性の評価上重要なパラメータを実際に取得し，評価技術の整備を進める。（実施項目b）
- ◆ 評価シナリオに基づく異常事象への対応策として，これまでに搬送車両が逸走した場合や異常出水などに伴い水没した状態を想定して，その対応策および復旧作業の進め方の検討を行っている。今後閉鎖前の処分場のさらなる安全性の確保を目的として，関連する施設の具体的な事故事例などを参考に実践的な検討を実施し，事故対策および影響緩和策を2.(2)①の施設設計に反映する。（実施項目c）

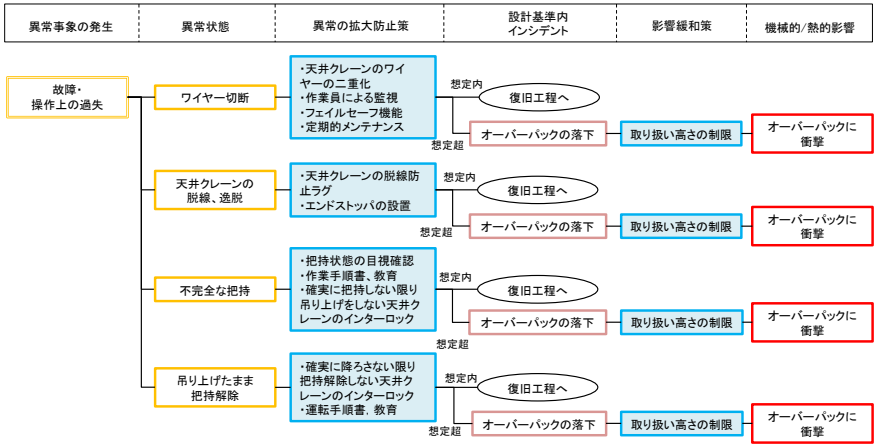
実施項目

a.　閉鎖前の安全性の評価シナリオの構築
- 複合的な事象の発生に対する評価シナリオの構築
- ハザードデータベースの更新

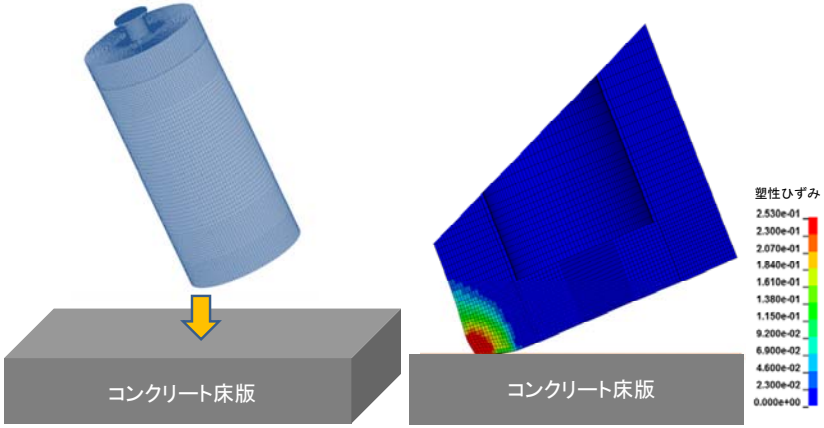
b.　閉鎖前の安全性評価技術の整備
- 複合的な事象等に対する評価モデルの最適化
- 充填材からの水素ガス発生量データの取得
- アスファルト固化体の熱物性データの取得と評価モデルの開発

c.　事故対応技術の整備
- 事故等に対する対応策と復旧策の検討

【外部有識者　主なご意見】
- 坑道内の火災に対する対策としては，極力可燃物を持ち込まないこと，車両の電動化やケーブル方式などについても検討しておく必要があるのではないか。



評価シナリオ作成におけるイベントツリー分析の例
（オーバーパックの落下）



〈衝突モデル〉　〈断面拡大図〉

オーバーパックの落下衝撃時の構造解析
（高さ9 mからの落下）

３．閉鎖後長期の安全性の評価
（１）シナリオ構築
①　地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化（1/2）

目的および実施概要

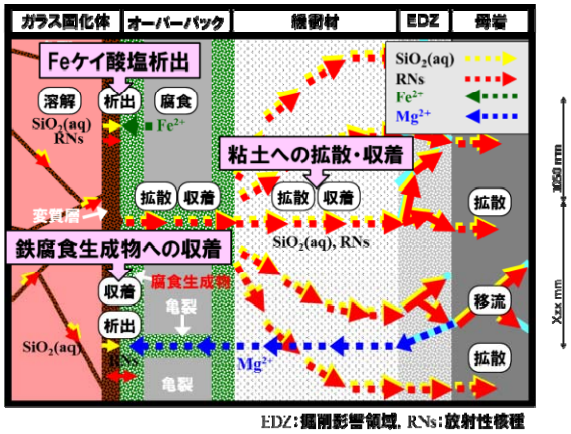
- ◆ これまでは，温度（T），水理（H），力学（M），化学（C）の観点から地層処分システムの安全機能に関る現象を個々にモデル化することに重点を置き，試験等が実施されてきた。今後は地層処分が本来有する安全性をより包括的に示すため，各構成要素や各現象間の相互作用による場の変化の評価に焦点をあて，現象解析モデルの構築・高度化を行う。（実施項目 a,b,c,d,e)
- ◆ また，廃棄体定置後の過渡期から閉鎖後長期を対象とした連続的な解析が可能となるように，現象解析モデルの統合化技術を開発する。（実施項目 f)

実施項目

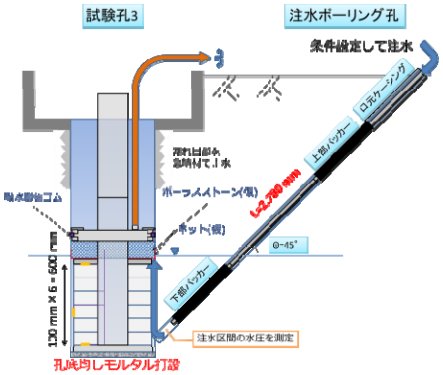
a. 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化
- オーバーパック由来の鉄等のガラス溶解速度への影響評価のための長期浸漬試験
- 長期浸漬試験を用いたハル・エンドピースからの核種溶出モデルの高度化

b. ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化
- 緩衝材の流出現象等の理解と現象解析モデルの構築
- セメント系材料-緩衝材間，オーバーパック-緩衝材間の相互作用理解のための試験の実施と現象解析モデルの高度化

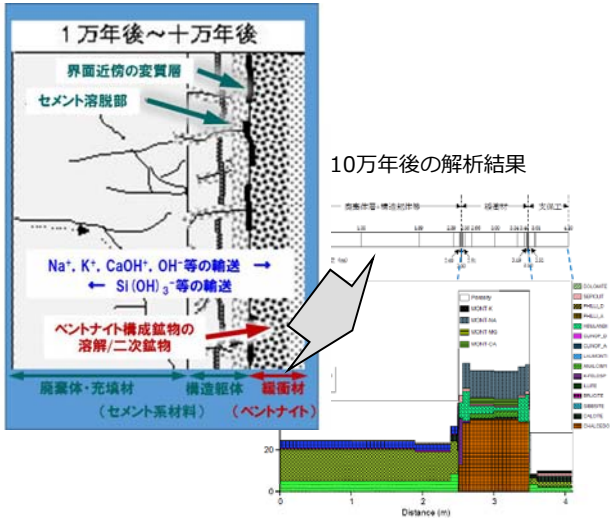
c. 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討
- 処分坑道を模擬した小規模モックアップ試験体を用いたガス移行試験の実施
- 試験結果を用いた現象解析モデルの妥当性検討
- 現象解析モデルを用いた試解析による核種移行へのガス影響評価



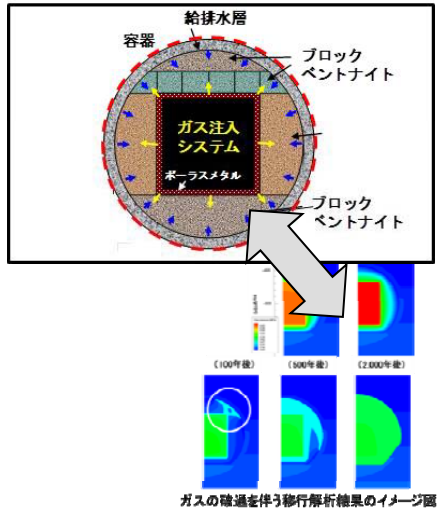
ガラスの溶解に影響するプロセス



緩衝材流出試験



セメント系材料による緩衝材の変質現象理解と連成解析結果例



ガス影響評価のための小規模試験（案）と連成解析イメージ

3．閉鎖後長期の安全性の評価
（1）シナリオ構築
①　地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化（2/2）

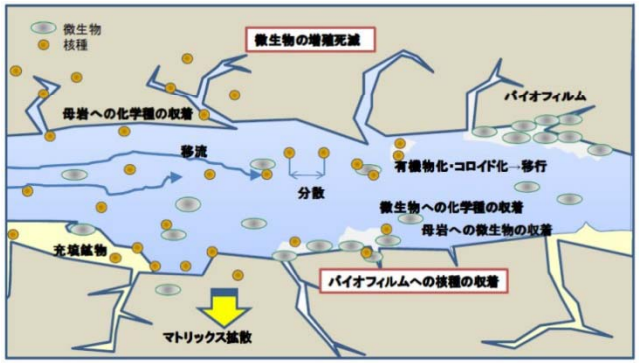
実施項目

d.　コロイド・有機物・微生物の影響評価手法の構築・高度化
- 以下のデータを用いた影響評価手法の構築・高度化
- ベントナイトコロイドの生成挙動等のデータ
- 天然コロイドの定量方法と核種収着等に関するデータ
- 有機物，微生物の核種収着特性に関するデータ

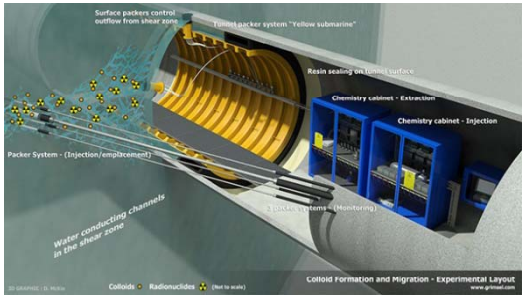
e.　硝酸塩の現象解析モデルの妥当性検討
- 硝酸塩による土壌汚染事例や長期浸漬試験による長期の硝酸塩移行データの収集
- 収集データを用いた現象解析モデルの妥当性確認

f.　現象解析モデルの統合化技術の構築
- 開発した連成解析システムへの現象解析モデルの取り込みと，それに応じたシステムの拡張
- 連成プラットフォームを用いた試解析による安全評価上の重要な課題の抽出

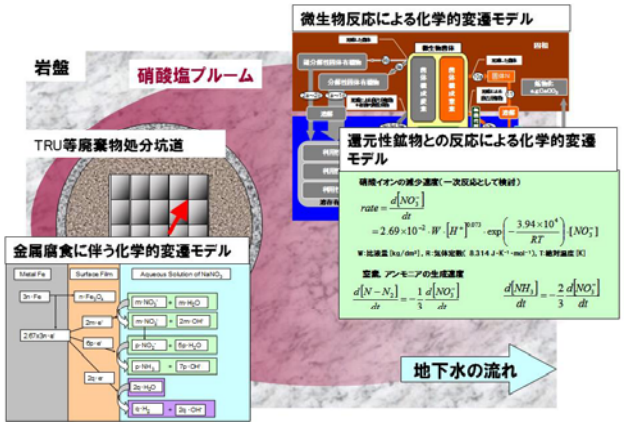
【外部有識者　主なご意見】
- TRU等廃棄物に，より重点を置いた研究開発を実施すべき。例えば，ハル・エンドピースなどの廃棄体からの核種溶出が挙げられる。
- ガス発生の影響評価に際しては，それが核種移行へどのような影響を与えるのかを検討をすべき。



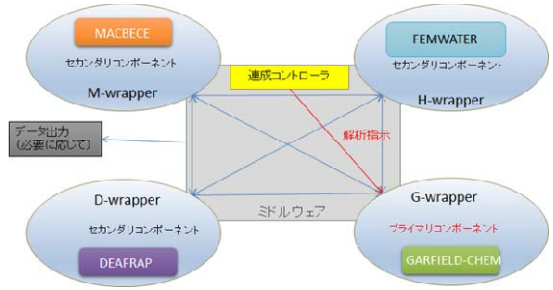
コロイド・有機物・微生物等の核種移行への影響の概念図



ベントナイトコロイドによる核種移行評価のための試験（スイスグリムゼル地下試験場*）



ニアフィールドにおける硝酸塩の反応メカニズム



個別モデル名称	種別	コード概要
GARFIELD-CHEM	化学物質輸送解析コード	可変グリッド法を用いた化学物質輸送解析モデル
MACBECE	力学解析コード	人工バリア材等の変形や割れを表現する。有限要素法による解析モデル
DEAFRAP	力学解析コード	人工バリア材等の変形や割れを表現する。個別要素法による解析モデル
FEMWATER等	水理解析コード	有限要素法を用いた静的な水理解析モデル
GARFILED-RNT	核種移行解析モデル	可変グリッド法を用いた核種移行解析モデル

連成解析プラットフォームの概念図

* : http://www.grimsel.com/

３．閉鎖後長期の安全性の評価
（１）シナリオ構築
②　リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化

目的および実施概要

- ◆ これまでに，リスク論的な考え方に基づき,各構成要素の安全機能を基軸としFEPの発生可能性を論ずるシナリオ構築手法を開発した。今後は，作成したシナリオに対応する核種移行解析ケース設定に関する情報の管理ツールを整備する。（実施項目 a）
- ◆ シナリオの発生可能性の議論をより効果的かつ効率化するとともに閉鎖前の処分場の状態の変化も含めたストーリーボードの高度化を行う。(実施項目 b)
- ◆ これまで，国内外における最新の考え方を反映し人間侵入シナリオと稀頻度事象シナリオの作成と解析評価手法を開発した。今後は，引き続き国内外の事例等を収集し，シナリオの発生可能性などについて評価手法へ反映する。（実施項目c）

実施項目

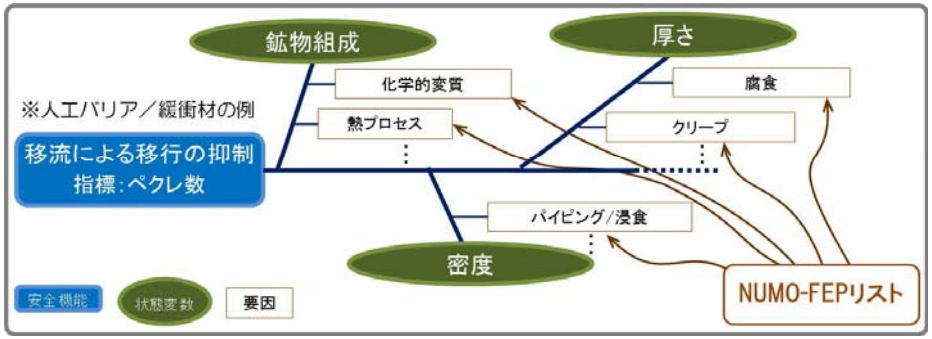
a. シナリオ構築から核種移行解析ケース設定に用いる情報の管理ツールの整備
   - シナリオに応じた核種移行解析ケース設定に係る判断やその論拠の管理ツールの整備
   - FEPリストの更新

b. 様々なデータを利用可能なストーリーボードの高度化
   - 現象解析結果等の根拠の効果的な表現手法の構築
   - 考えられる複数の状態設定の効果的な表現手法の構築

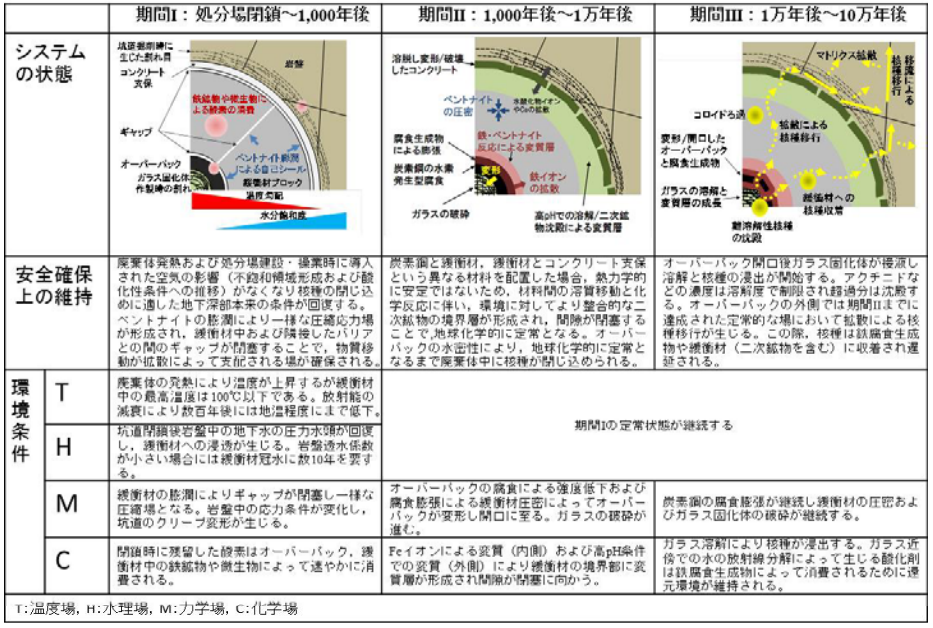
c. 人間侵入シナリオと稀頻度事象シナリオに関する検討
   - 国際会議等を通じた情報収集（記録保存の有効性等）
   - 収集した情報に基づき発生可能性を考慮した評価手法の構築

【外部有識者　主なご意見】

- 閉鎖後からのストーリーボードが主なので，処分場の変遷を表現するため掘削の前段階も含めた一連の構成とすべき。
- ストーリーボードの電子化の際に，基本シナリオに対して，何らかの外部事象が生じたときシステムがどのような変遷をたどるのかといったシナリオの分岐についても表現可能であると，より重要な課題について共有でき望ましい。



安全機能と当該機能へ影響を与えうる重要なFEPとの関係を整理した管理ツール

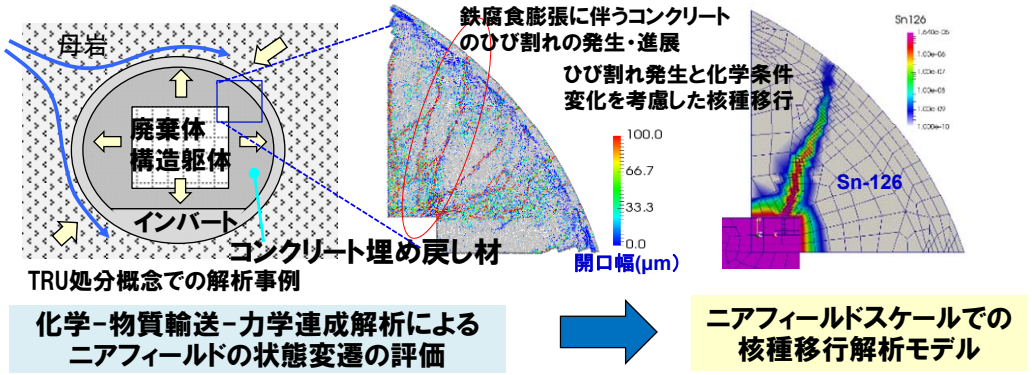


ストーリーボード（例：ガラス固化体周辺の変遷）

３．閉鎖後長期の安全性の評価
（２）核種移行解析モデル開発
①　地層処分システムの変遷等を反映した核種移行解析モデルの構築

目的および実施概要

- ◆ 核種移行解析において，複雑なニアフィールドのTHMC状態の時間的変遷については，例えば，解析の初期から緩衝材が全て変質した状態の核種移行パラメータを用いるといった保守的な条件を設定することとしている。今後は，地層処分が本来有する安全性をより現実的に示すため，ニアフィールドの状態変遷に応じた核種移行パラメータの時間変化などを取り入れた核種移行解析モデルを構築する。（実施項目 a）
- ◆ 母岩の割れ目中の核種移行解析モデルでは，水みちの微細透水構造や充填物への収着等を詳細に考慮していなかった。今後は，より現実の場を反映した核種移行解析モデルへと改良する。（実施項目b）

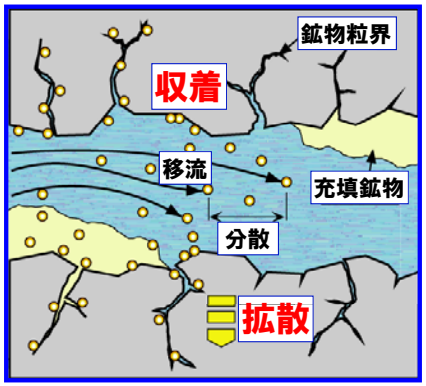


連成解析結果の核種移行解析モデルへの反映の例

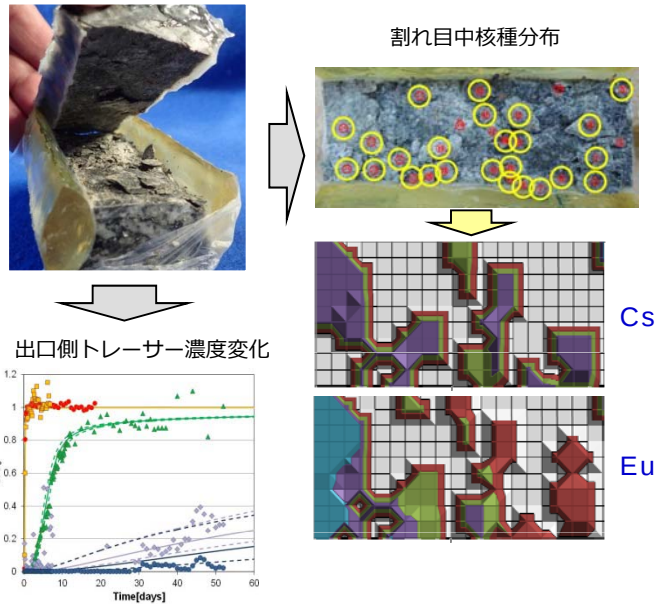
実施項目

a. ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築
   - 変質したセメント系材料や緩衝材等を対象とした核種移行解析モデルの構築
   - 地質環境モデルやニアフィールド現象解析モデルによるシステムの状態変遷の設定結果を核種移行解析モデルへ反映するための手法構築

b. 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化
   - 割れ目中の微細スケールにおける核種移行のメカニズムの把握
   - 核種移行解析モデルの妥当性検討



割れ目中核種移行概念



割れ目中の通液試験（室内）

【外部有識者　主なご意見】

- TRU等廃棄物に，より重点を置いた研究開発を実施すべき。例えば，保守的に取扱っている廃棄体領域におけるセメント系材料中の核種移行解析モデルを構築し，評価に反映すべき
- 割れ目中の充填物を核種移行解析モデルに取り込み，より確からしい評価が可能となるようにすべき

3．閉鎖後長期の安全性の評価
（2）核種移行解析モデル開発
②　施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化

目的および実施概要

◆ 母岩特性に応じたパネル配置や処分坑道などの設計の違いを定量的に把握することを目的として，これまでニアフィールドスケールを対象とし，三次元の粒子追跡解析に基づき,一次元の核種移行解析モデルを作成する手法を構築した。今後は，広域スケールから処分場スケール，パネルスケール，ニアフィールドスケールを対象にスケールに応じた合理的な詳細度を有する核種移行解析モデルを構築するとともに，それらを整合的に連結する方法の構築を行う。（実施項目 a）

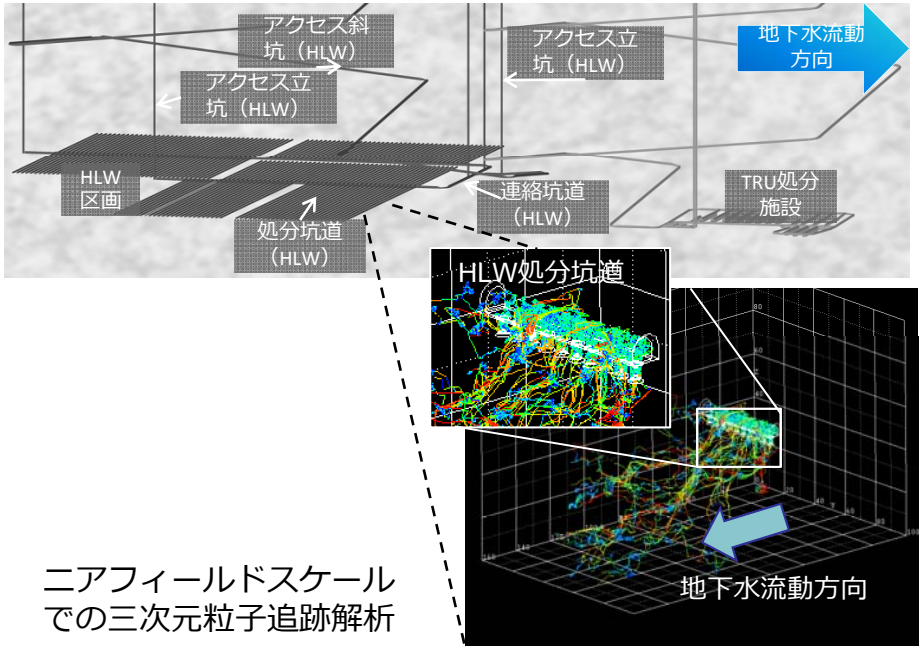
◆ 生活圏評価モデルについては,これまでに，全ての核種が代表的な箇所のGBI*を経て生活圏へ到達することを基本として開発を行ってきた。今後は，地形変化などに伴うGBIの変化や複数のGBIへの核種の流入を評価に取り込むため，気候・海水準変動による時間変化を考慮した地質環境モデルを用いたGBIの特定手法や既存の生活圏モデルとの結合方法を構築する。（実施項目 b）

実施項目

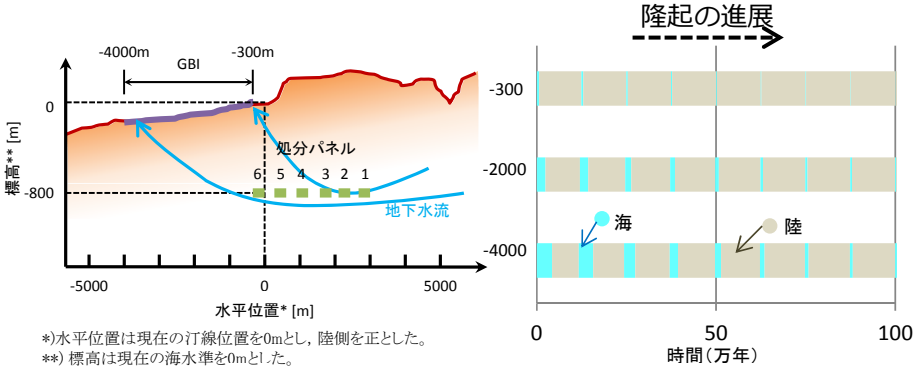
a.　施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化
- 施設設計や母岩特性を反映した三次元モデルを用いた粒子追跡解析手法の広域スケールへの拡張と核種移行解析モデルの構築
- 各スケールを考慮した核種移行解析モデルの結合方法の構築
- 時間変化を考慮した地質環境モデルを踏まえた地層処分システムの状態変遷の核種移行解析への反映手法の検討

b.　地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化
- 地質環境モデルを対象としたGBI空間分布の特定手法の構築
- GBIの空間分布に応じた生活圏モデルの結合手法の構築

【外部有識者　主なご意見】
- 核種移行解析モデルの高度化に際しては，調査技術や設計との連携が必要なので，それらとの情報交換を行いながら研究開発を行うことが分かるようにすべき
- 生活圏評価については，GBIと生活圏モデルの結合の中で，コンパートメントモデルの改良も視野に入れるべき



ニアフィールドスケールでの三次元粒子追跡解析



*)水平位置は現在の汀線位置を0mとし，陸側を正とした。
**) 標高は現在の海水準を0mとした。

海水準変動と隆起に伴うGBIの変化の概念図

*地圏-生活圏インターフェイス（Geosphere-Biosphere Interface）

３．閉鎖後長期の安全性の評価
（３）核種移行解析に用いるパラメータに関するデータの整備
①　核種移行等に関するデータの取得およびデータベース整備

目的および実施概要

◆ これまでは，主に日本全体を幅広く対象とした第2次取りまとめや第2次TRUレポートで示された地下環境を対象とし，データ取得を行ってきた。今後は，データが十分に整備されていない沿岸海底下や比較的炭酸濃度が高い地下水が存在する場等の地質環境やニアフィールドの変遷に重点を置き，地質環境モデルや現象解析モデルの検討において得られた処分場環境の長期変遷も考慮し，核種移行パラメータ設定に係るデータの拡充を実施する。また，これらの地質環境等において重要であることが明らかとなったアクチノイドやその子孫核種に重点を置いて生活圏評価に必要なデータの拡充を実施する。（実施項目 a, b）

◆ これまでは，室内試験で取得したデータを用いた核種移行パラメータの設定手法を構築した。今後は，調査段階に取得した地下水水質などのサイト固有のデータを使用したパラメータ設定手法へ高度化する。（実施項目 c）

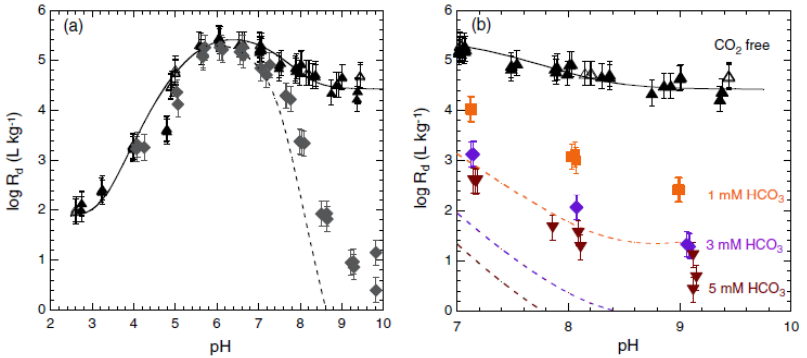
実施項目

a. 想定される様々な処分場環境を対象とした核種移行パラメータ設定に資するデータの拡充
- 比較的炭酸濃度が高く，かつ，還元性の地下水中における核種の沈殿・様々な母岩や緩衝材等への収着に係るデータの取得
- 沿岸海底下を想定した核種の沈殿・収着・拡散に係るデータの取得
- 想定される変質した緩衝材を対象とした核種の収着，拡散に係るデータの取得

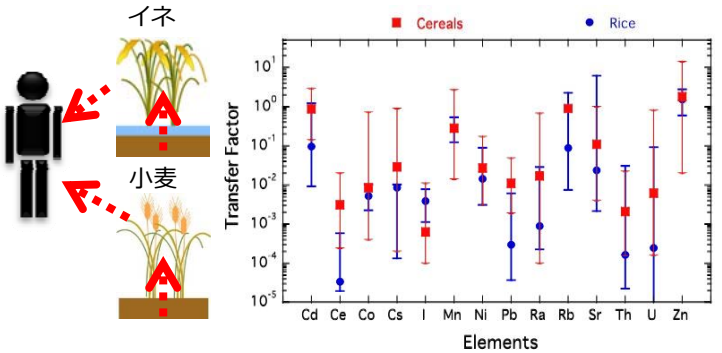
b. 様々な生活圏を想定した生活圏評価に係るデータの拡充
- 重要であることが新たに明らかとなった核種に関する地表土壌への収着分配係数の取得
- ヨウ素等の生活圏における移行に関するデータ取得

c. サイト調査を反映した核種移行パラメータの設定方法の構築
- ボーリング調査等で取得したデータを用いる核種移行パラメータ設定方法の構築

【外部有識者　主なご意見】
- 現象解析モデルの構築などで重要であることが判明したパラメータについて，適宜，データ取得計画に反映することが出来るようにすべき。
- 線量評価上の支配核種となるC-14やI-129については，地表での移行メカニズムが複雑なため，研究が必要。



比較的炭酸濃度が高い条件でのU（VI）のモンモリロナイトへの収着*



穀物類への元素の移行係数の取得結果

*Marques Fernandes et al. (2012) Uranium sorption on montmorillonite in the absence and presence of carbonate a macroscopic and microscopic study.