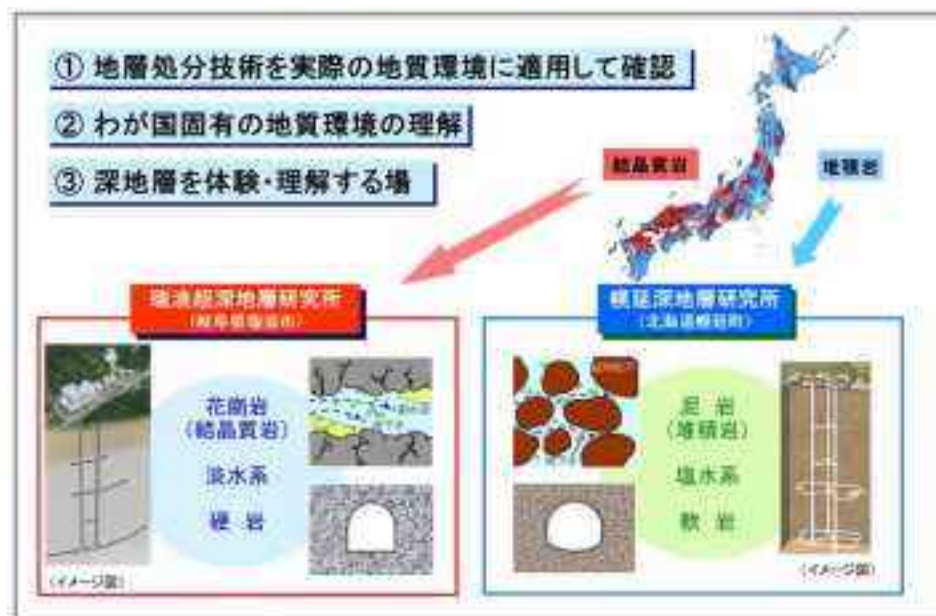


令和2年度以降の幌延深地層研究計画(案)について — 資料集 —

幌延深地層研究センターの意義や役割

幌延深地層研究センターは、原子力委員会が示した「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」(平成6年6月24日)において、「深地層の研究施設は、(中略)地層処分研究に共通の研究基盤となる施設であり、我が国における深地層についての学術的研究にも寄与できる総合的な研究の場として整備していくことが重要です。」と意義付けされた、堆積岩を対象として建設された深地層の研究施設です。また、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」(平成12年11月24日)では、「また、深地層の研究施設は、学術的研究の場であるとともに、国民の地層処分に関する研究開発の理解を深める場としての意義を有し、その計画は、処分施設の計画と明確に区分して進める必要がある。」とされています。

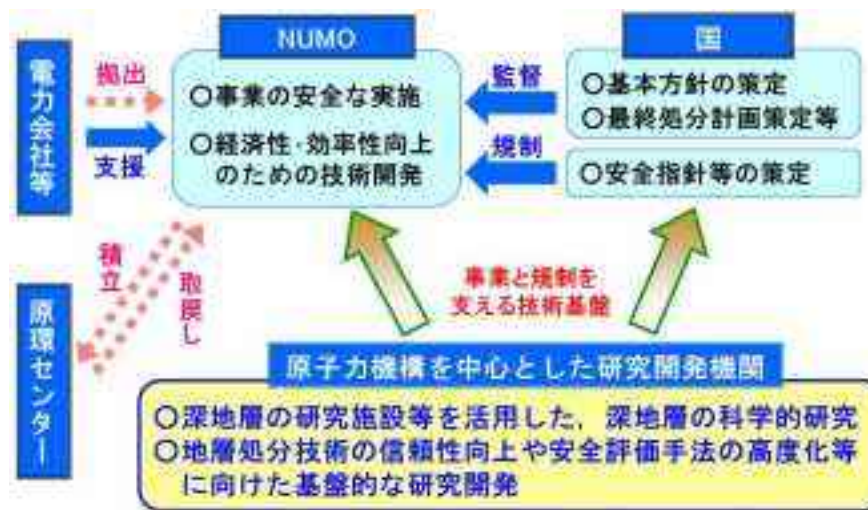
これを受け、幌延深地層研究センターは、これまでに開発してきた日本で地層処分を実施するために必要な技術や方法の信頼性について、実際の地質環境で確認していく役割を担っています。また、深地層を体験・理解するための貴重な場としての役割も担っています。



深地層の研究施設の役割

補足

- 上記の原子力長計では、「深地層の研究施設の計画は処分場の計画とは明確に区別して進めていく」としているほか、原子力委員会は「岐阜県及び新たに提案された北海道における深地層の研究施設の計画を地元の理解を得て推進する」とする文書を決定しています(平成10年6月2日)。
- 「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)では、「国及び関係研究機関は、最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくものとする」とされています。
- 幌延深地層研究センターの役割は、国の審議会(放射性廃棄物処分技術ワーキンググループ中間取りまとめ、平成21年5月22日)においても、「地層処分技術の信頼性等のより一層の向上のため、地下研究施設等を活用した研究開発を継続的に進めることが重要である」とされ、今もその重要性に変わりはありません。
- 「エネルギー基本計画」(平成30年7月)では、「我が国としても、科学的知見の蓄積を踏まえた継続的な検討を経て、地層処分することとされている。他方、その技術的信頼性に関する専門的な評価が国民に十分には共有されていない状況を解消していくことが重要である」とされており、広聴・広報活動の重要性が指摘されています。
- これまでに、論文や報告書等、幌延で得られた成果は、平成30年11月に公開されたNUMOの「包括的技術報告書(レビュー版)」に反映されており、同報告書においては深地層の研究施設を利用した更なる研究ニーズが示されています。
- また、今年6月に行われたG20軽井沢大臣会合では、世界の原子力主要国政府が参加する初めての「国際ラウンドテーブル」の立ち上げが合意されました(第1回は10月14日開催)。そこでは各国地下研究所間の研究協力や人材交流の促進といった国際協力の強化が協議される予定です。このことから、幌延は国際的にも重要性を増していくものと考えられます。



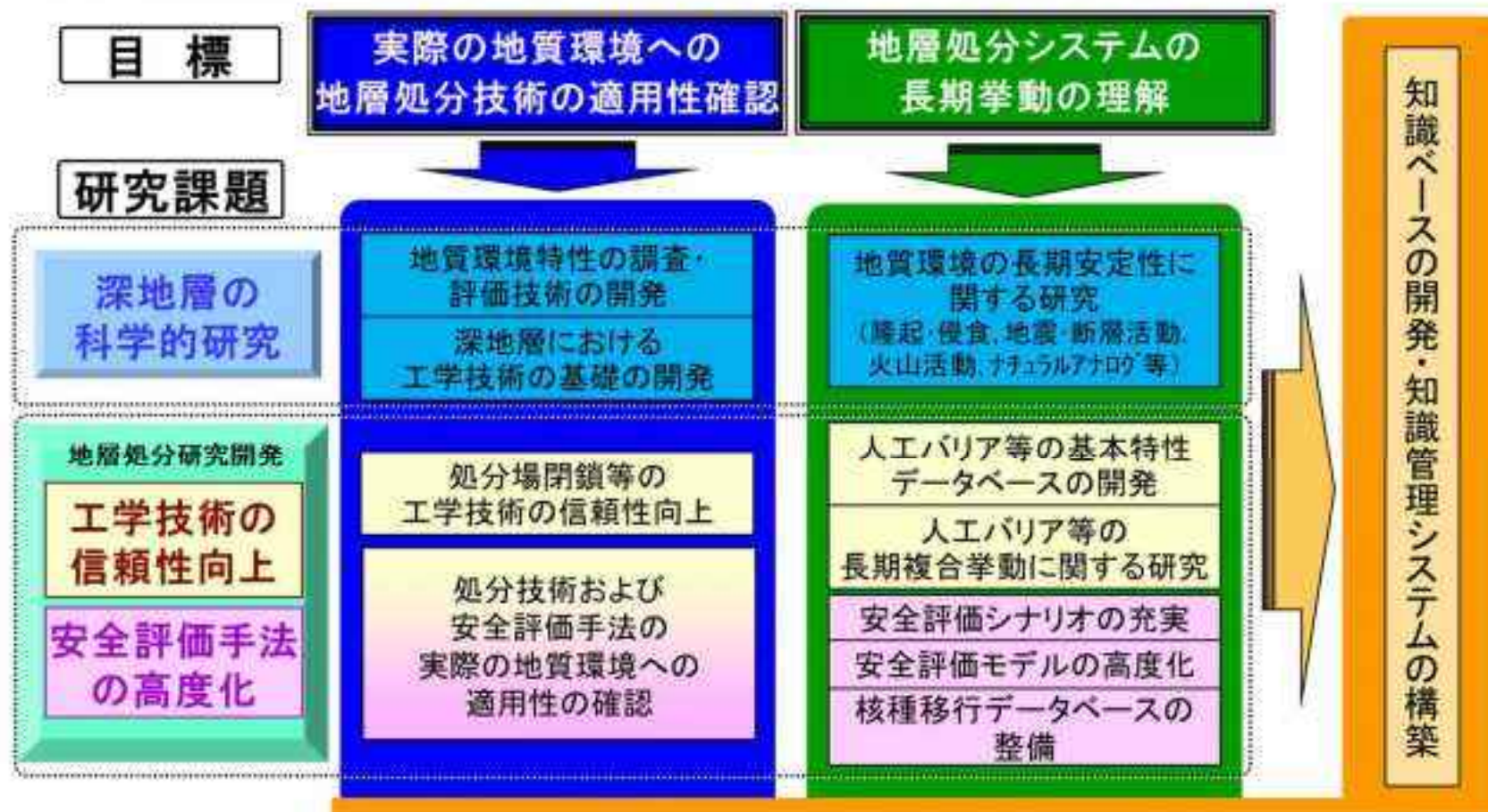
(原子力政策大綱等に基づく)

わが国の地層処分に係る体制と原子力機構の役割

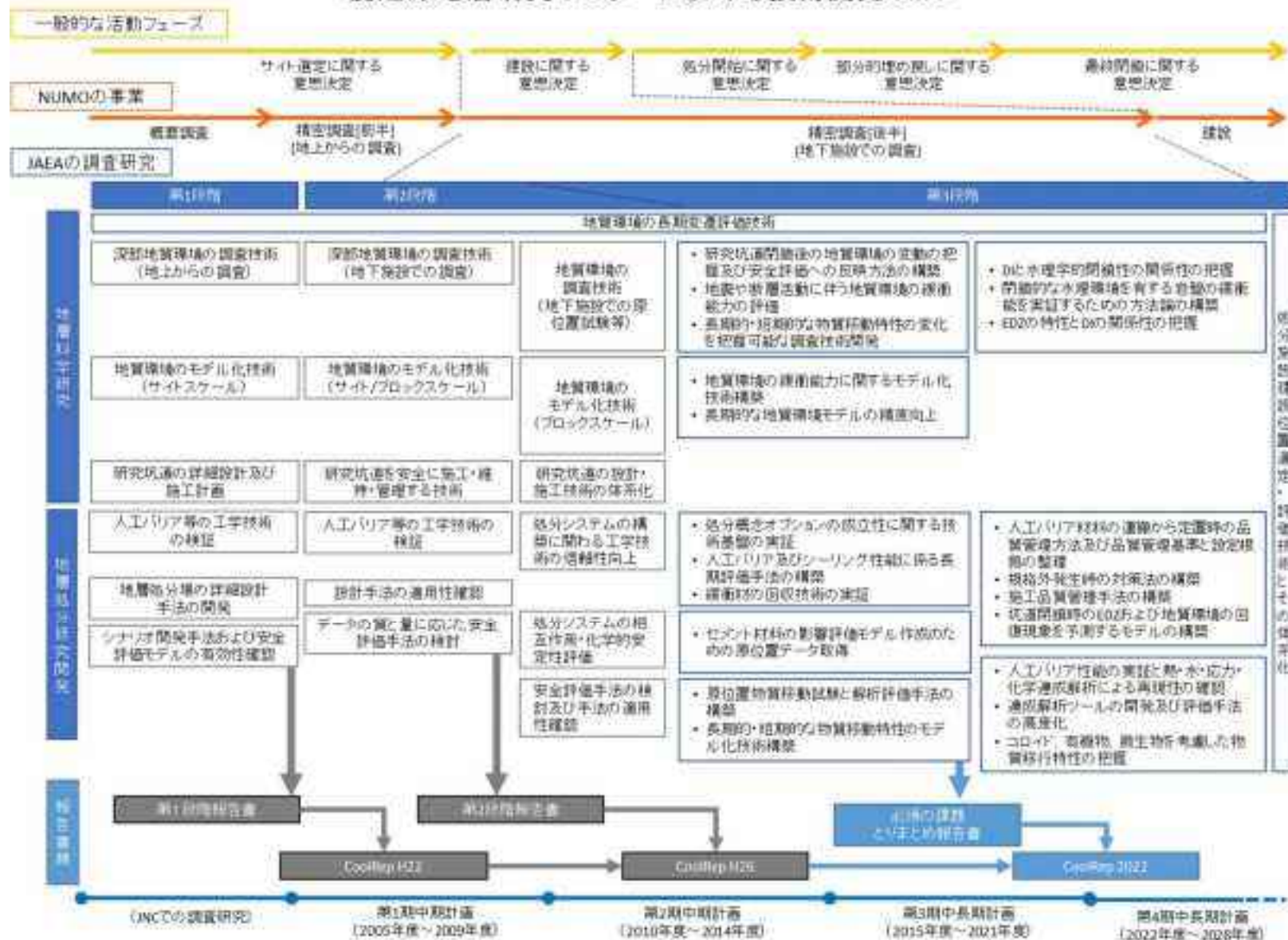
必要性・研究計画

JAEAにおける研究開発の目標と研究課題

- 地層処分の技術と信頼を支える基盤的な研究開発を推進
- 各研究課題は「地層処分基盤研究開発に関する全体計画」に基づく。



幌延深地層研究センターにおける技術開発マップ



必要性・研究計画

幌延深地層研究計画の概要

- 地上からの調査研究および地下施設の建設を通じた調査研究により、段階的に地質環境を調査評価する技術を整備するとともに、地下施設の建設・維持に必要な工学技術を整備することができた。また、処分場の設計や安全評価に必要な技術基盤の整備を進めている。
- これらの成果は、NUMOが行う地質環境調査や処分場の設計・安全評価、国による安全規制に反映される。

第1段階 (2001年度～2005年度) 地上からの調査研究段階	第2段階 (2005年度～2015年度) 坑道掘削時の調査研究段階	第3段階 (2010年度～) 地下施設での調査研究段階			
<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 幌延町全域を対象とした調査を実施し、研究所用地として適した領域を選定した。 先行した瑞浪の経験を参考にしつつ、堆積岩を対象として、必要な調査機器等を開発しながら、段階的に地質環境の調査およびモデル化を進めた。 <p>主な成果</p> <ul style="list-style-type: none"> 第1段階の地上からの調査によって地下の状態を予測したうえで、第2段階には、坑道を掘削しながら地下の状態を直に観察して、地上からの予測の妥当性を確認するとともに、周辺の岩盤や地下水の状態や変化を詳細に調べた。これらを通じて、段階的な調査によって地質環境を把握しモデル化していく技術を整備した。また、得られた地質環境情報をフィードバックしながら、地下施設を安全に建設・施工、維持・管理するための技術を整備した。 第3段階では、地下坑道を実験の場として活用し、人工バリア試験等により処分場の設計や安全評価に必要な技術の実証や現象理解の精緻化を進めている。 	<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 坑道の壁面観察や坑道内のボーリング調査により、周辺岩盤や地下水の性状、長期的な変化を観測した。あわせて、坑道掘削による周辺岩盤への影響を把握、モデル化した。 坑道の設計・建設・維持を通じて、技術の適用性を確認した。 処分場での使用が想定される低アルカリ性セメントの施工試験を実施し、実用性を確認した。 	<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 重点的に取り組むべき3つの課題を選定し、深度300mまでの地下坑道を利用して、模擬人工バリアを用いた試験など、原位での実証的な試験を実施している。 			
<p align="center">外部専門家による評価(深地層の研究施設計画検討委員会)</p> <ul style="list-style-type: none"> 全体として概ね適切に研究が進行され、当初5か年の目標を達成できたと評価します。今後は、技術の確立が可能な水準に達するまで、人工バリア性能確認試験および処分概念オプションの実証に関する試験を継続するとともに、本地下研究施設が最先端の地層処分技術を実証するプラットフォーム(共通基盤)として国内外の関係者に広く提供・活用されることを期待します。 (地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の実証については、地層処分事業における処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形での指標活用に向けた具体化を期待します。) 					
<p>今後の展開 ◆これまでの成果を精査したうえで、以下の研究課題を設定</p> <table border="1"> <tr> <td data-bbox="275 1300 593 1441"> <p>1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①人工バリア性能確認試験 ②物質移行評価手法の高度化 </td> <td data-bbox="602 1300 1167 1441"> <p>2. 処分概念オプションの実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①掘削・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 ②高温度(100℃以上)などの境界的条件下での人工バリア性能確認試験 ③坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 </td> <td data-bbox="1176 1300 1960 1441"> <p>3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 ②地殻変動による人工バリアへの影響・影響予測試験 ③地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化 </td> </tr> </table> <p>これらの研究課題については、令和2年度以降、第3期及び第4期中長期目標期間を目途に取り組み、その上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、埋め戻しを行うことを具体的工程として示す。</p>			<p>1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①人工バリア性能確認試験 ②物質移行評価手法の高度化 	<p>2. 処分概念オプションの実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①掘削・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 ②高温度(100℃以上)などの境界的条件下での人工バリア性能確認試験 ③坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 	<p>3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 ②地殻変動による人工バリアへの影響・影響予測試験 ③地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化
<p>1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①人工バリア性能確認試験 ②物質移行評価手法の高度化 	<p>2. 処分概念オプションの実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①掘削・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 ②高温度(100℃以上)などの境界的条件下での人工バリア性能確認試験 ③坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 	<p>3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 ②地殻変動による人工バリアへの影響・影響予測試験 ③地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化 			

必要性・研究計画

第1段階の研究成果の概要

- ・研究所設置地区及び研究所設置場所を選定
地区・用地の選定上の要件や考慮すべき条件とその重要性を示した。
- ・坑道掘削前の深部地質環境を把握
調査結果の解釈とモデル化を通じて、地層処分にとって重要な地質環境の特性・プロセスを把握し、その過程で得られた技術的知見を踏まえて統合化データフローを構築した。また、地上からの調査研究における主要な調査技術の有効性や技術課題などを整理し、堆積岩を対象とした地上からの調査・評価技術の整備を図った。堆積岩(軟岩)中での地下施設の仕様・レイアウトを決定し、地下施設を安全に建設・維持するための設計・施工計画を策定した。
- ・地下施設の設計・施工計画を策定
処分場の設計技術や性能評価技術それぞれの適用性について論じるとともに、技術の改良や代替技術の開発状況を取りまとめた。
- ・第2段階以降における調査研究の課題を具体化

第1段階研究成果取りまとめ:

「幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044, (2007) <https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5007732>

「幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書: 分冊「地層処分研究開発」, JAEA-Research 2007-045, (2007) <https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5007725>

必要性・研究計画

第2段階の研究成果の概要

・地質環境調査技術開発

地質・地質構造、地下水流動、地下水の地球化学的特性、及び岩盤力学特性といった地質環境情報を取得し、第1段階で構築した地質環境モデルの妥当性や調査・解析手法の有効性を確認するとともに、それまでの情報に基づいて、地上からの地質環境調査に必要な調査解析技術や得られる情報の品質や不確実性を把握した。

・深地層における工学的技術の基礎の開発

研究坑道の掘削を通じて、計測結果等の分析評価を行い、既往の地下施設設計手法等の適用性を評価した。また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合、想定外の事象に遭遇した場合、あるいは、坑道の掘削により地質環境を著しく乱す事象が生じた場合などにおいて、柔軟に設計変更ができること、さらに現状の対策工が適切に対応し得ることを示すことにより、設計・施工技術の有効性を確認した。さらに、地質環境の変化の事前予測や対策工実施後の品質保証のための工学技術の検討を行った。一方、安全衛生面からの坑道内の研究環境の維持・管理や安全確保のための技術開発を実施した。

・地質環境の長期安定性に関する研究

幌延地域を事例として、断層運動や海水準変動などの天然現象の履歴に関する調査手法と地下水の流動などに関する調査・解析手法とを組み合わせ、将来の天然現象に伴う地質環境の変化を予測する手法の検討を行うとともに、地震活動および活動に伴う地質環境への影響について把握した。

・地層処分研究開発

処分技術の信頼性向上においては、人工バリアなどの工学技術の検証ならびに設計手法の適用性の確認を行った。安全評価手法の高度化においては、安全評価モデルの高度化を行うとともに安全評価手法の適用性を確認した。

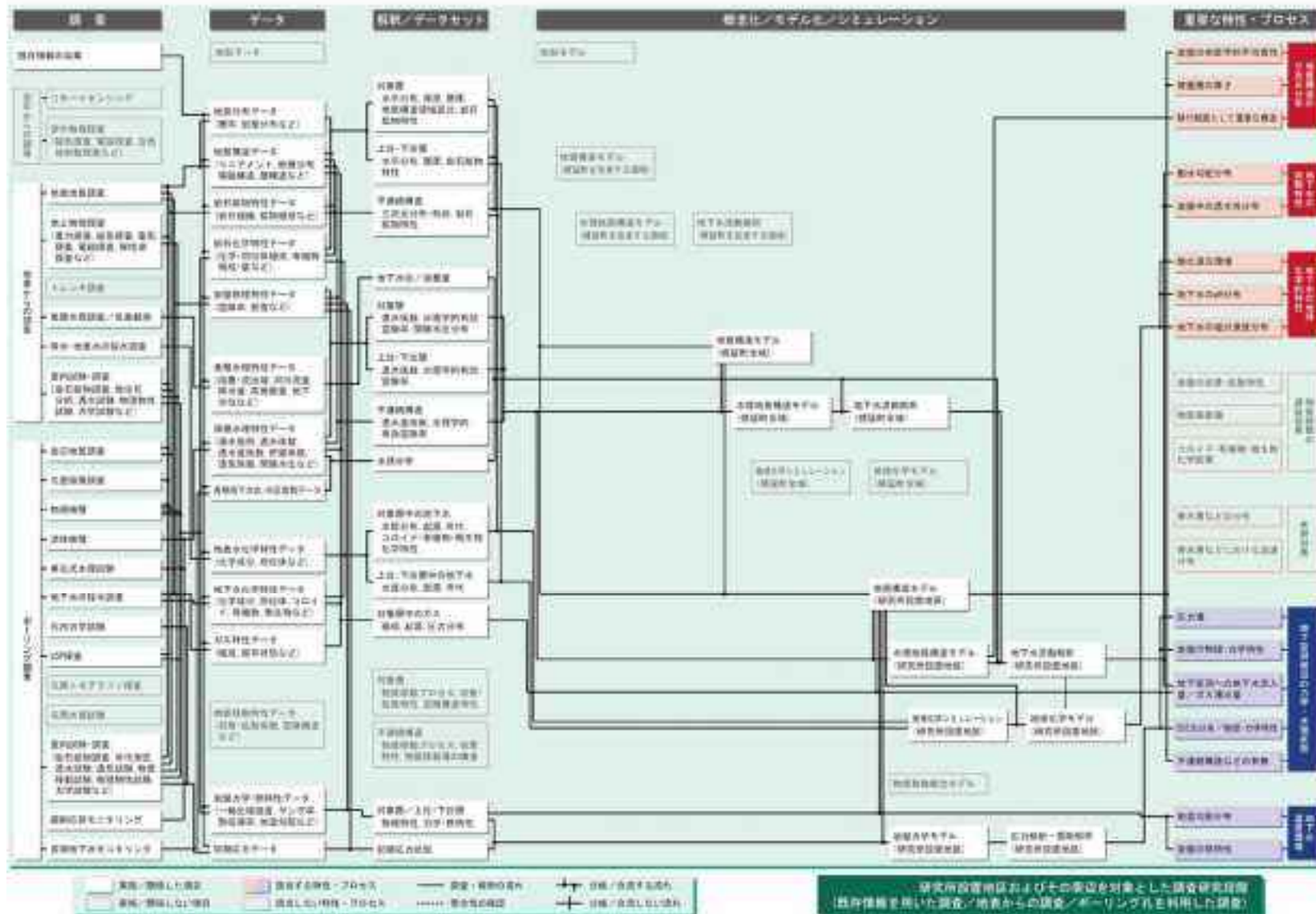
・地下施設建設

施工実績をまとめた。

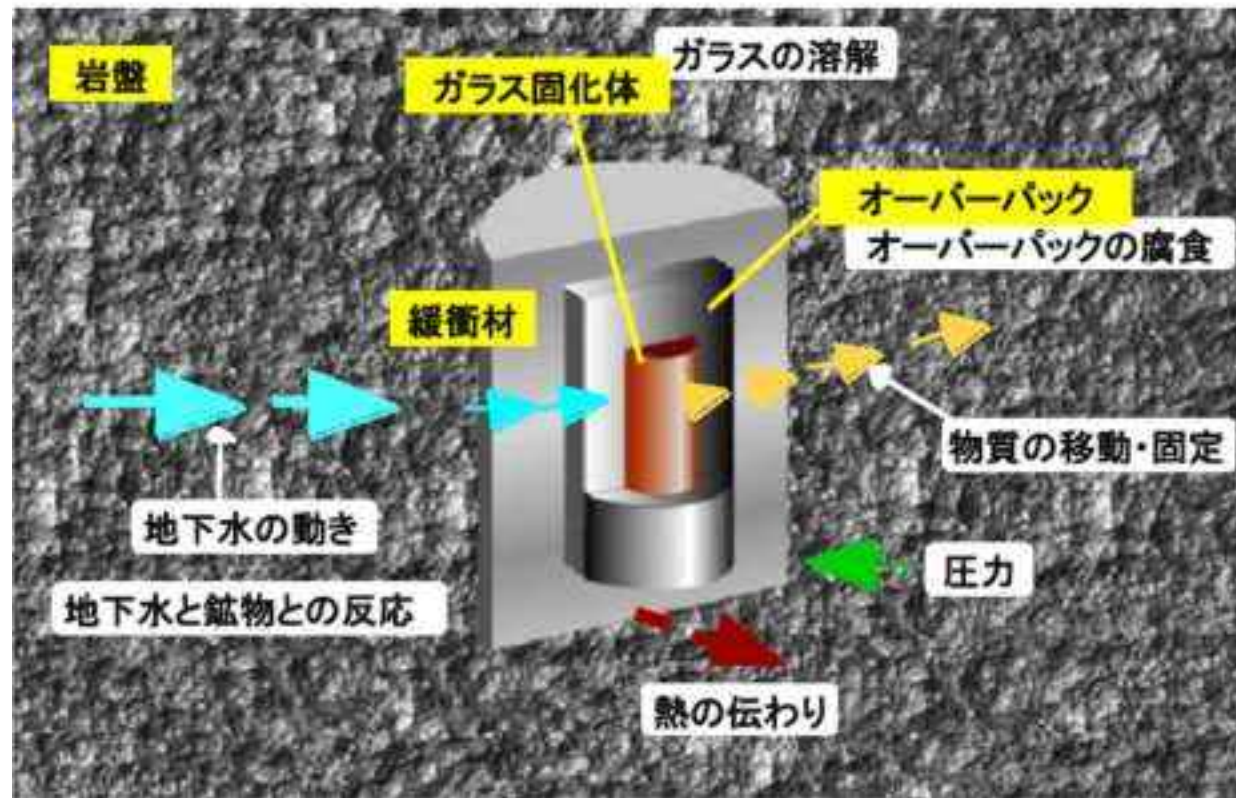
第2段階研究成果取りまとめ

「幌延深地層研究計画における坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階(第2段階:深度350mまで)研究成果報告書」, JAEA-Research 2016-025, (2017) <https://iopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5057531>

統合化データフロー(調査から特性・プロセスを把握するに至る流れ)(地上からの調査の例)

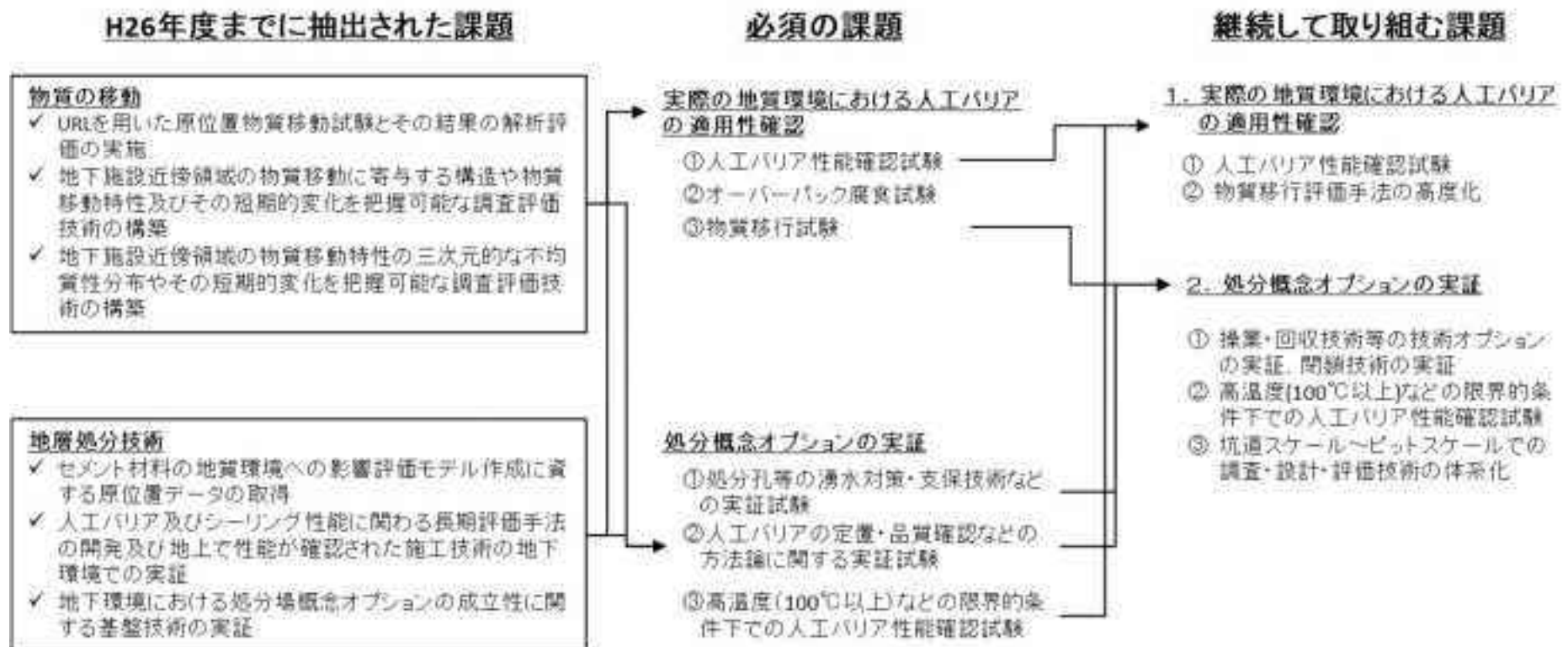


人工バリア周辺で生じる現象

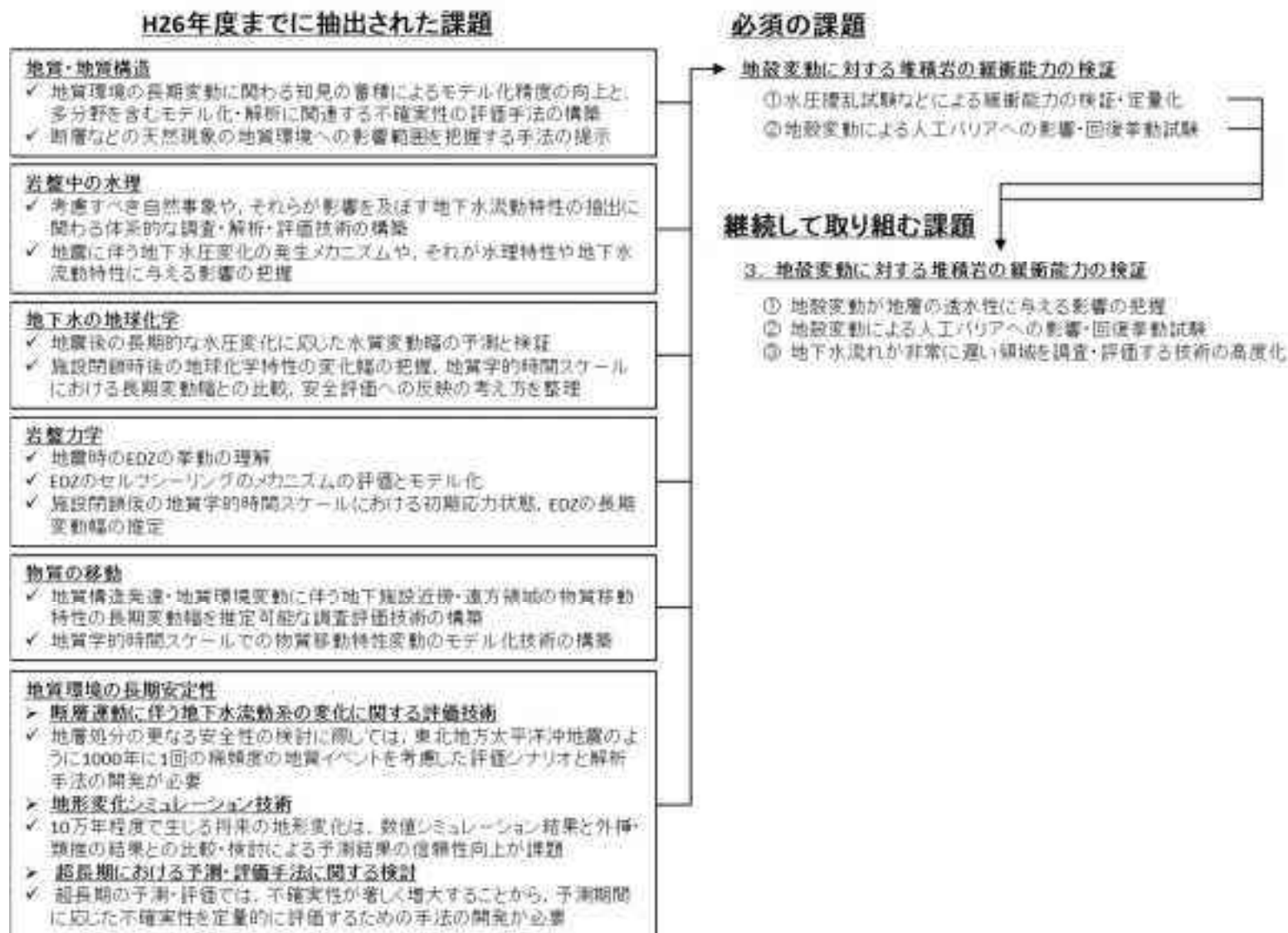


必要性・研究計画

研究分野ごとの課題の変遷



研究分野ごとの課題の変遷



地下研究施設と処分地選定プロセスにおける地下調査施設の違い、幌延深地層研究センターの位置付け

国際機関IAEAによる分類では、以下の2つの地下研究施設があります。

- ・Site-specific URL (Underground Research Laboratory)
最終処分候補地の適性を見定める地下研究施設 ⇒ “地下調査施設”
- ・Generic URL
最終処分場としない場所で技術を磨く地下研究施設 ⇒ “地下研究施設”

Site-specific URLの代表例はフィンランドのオンカロで、最終処分地としての適性が確認され、オンカロも処分場の一部となる予定です。幌延はGeneric URLに分類され、技術開発を実施することが役割で、最終処分場にはなりません。日本においては、処分事業はNUMOが実施することが法律で定められており、Site-specific URLはNUMOが場所選び、建設、運営を行います。また、原子力長計(原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画)(平成12年11月24日)より、「深地層の研究施設は、学術的研究の場であるとともに、国民の地層処分に関する研究開発の理解を深める場としての意義を有し、その計画は、処分施設の計画と明確に区分して進めることが必要である。」との記述があります。



NUMOのHPより転載
https://www.numo.or.jp/q_and_a/faq/faq100027.html

NUMOによるサイト選定プロセス



世界の地下研究施設

地層処分研究開発分野における国外機関との協力



外部評価委員会の委員一覧

地層処分研究開発・評価委員会委員(令和元年7月時点)

- 大西 有三(オオニシ ユウゾウ) : 京都大学名誉教授
小崎 完(コザキ タモツ) : 北海道大学大学院工学研究院エネルギー環境システム部門教授
小島 圭二(コジマ ケイジ) : 地圏空間研究所代表(東京大学名誉教授)
高橋 正樹(タカハシ マサキ) : 日本大学文理学部地球科学科教授
朽山 修(トチヤマ オサム) : 原子力安全研究協会技術顧問
中村 浩美(ナカムラ ヒロミ) : 中村浩美事務所科学ジャーナリスト/キャスター
西垣 誠(ニシガキ マコト) : 岡山大学大学院環境生命科学研究科特任教授
藤川 陽子(フジカワ ヨウコ) : 京都大学複合原子力科学研究所准教授
吉田 英一(ヨシダ ヒデカズ)* : 名古屋大学博物館教授
渡部 隆俊(ワタナベ タカトシ) : 原子力発電環境整備機構技術部長

https://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/hyouka_iinkai/meibo.pdf

* 吉田委員については、今年度より委員を委嘱

深地層の研究施設計画検討委員会委員(令和元年5月時点)

- 亀村 勝美(カメムラ カツミ) : 公益財団法人深田地質研究所副理事長
窪田 茂(クボタ シゲル) : 原子力発電環境整備機構技術部部長
嶋田 純(シマダ ジュン) : 熊本大学大学院先端科学研究部特任教授
進士 正人(シンジマサト) : 山口大学大学院創成科学研究科/工学部 教授
千木良 雅弘(チギラ マサヒロ) : 京都大学防災研究所教授
徳永 朋祥(トクナガ トモチカ) : 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系環境システム学専攻教授
西垣 誠(ニシガキ マコト) : 岡山大学大学院環境生命科学研究科教授(特任)
丸井 敦尚(マルイ アツナオ) : 国立研究開発法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

地層処分研究プロジェクトリーダー

- 増本 清(マスマト キヨシ) : 島根大学大学院環境システム科学系准教授
宮川 公雄(ミヤカワ キミオ) : 一般財団法人電力中央研究所地球工学研究所バックエンド研究センター
センター長

https://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/url_iinkai/meibo.pdf

A3資料が別途のため、非表示に設定してあります。
ページ数の調整のため、本スライドを挿入しています。

印刷の際に、設定の「すべてのスライドを印刷する」の選択肢で、
「非表示スライドを印刷する」のチェックをはずしてください

A3資料が別途のため、非表示に設定してあります。
ページ数の調整のため、本スライドを挿入しています。

印刷の際に、設定の「すべてのスライドを印刷する」の選択肢で、
「非表示スライドを印刷する」のチェックをはずしてください

A3資料が別途のため、非表示に設定してあります。
ページ数の調整のため、本スライドを挿入しています。

印刷の際に、設定の「すべてのスライドを印刷する」の選択肢で、
「非表示スライドを印刷する」のチェックをはずしてください

A3資料が別途のため、非表示に設定してあります。
ページ数の調整のため、本スライドを挿入しています。

印刷の際に、設定の「すべてのスライドを印刷する」の選択肢で、
「非表示スライドを印刷する」のチェックをはずしてください

A3資料が別途のため、非表示に設定してあります。
ページ数の調整のため、本スライドを挿入しています。

印刷の際に、設定の「すべてのスライドを印刷する」の選択肢で、
「非表示スライドを印刷する」のチェックをはずしてください

A3資料が別途のため、非表示に設定してあります。
ページ数の調整のため、本スライドを挿入しています。

印刷の際に、設定の「すべてのスライドを印刷する」の選択肢で、
「非表示スライドを印刷する」のチェックをはずしてください

幌延での研究の延長の必要性

深地層の研究施設計画においては、処分事業の進捗に先駆けて、3つの段階で調査研究を実施しています。すなわち地上からの調査研究の段階、坑道掘削中の調査研究の段階を経て、現在は地下施設での調査研究の段階に来ており、坑道を利用した調査研究に重点的に取り組んでおります。地層処分が行われる実際の地質環境において、技術や評価手法の妥当性を確認することは重要と考えています。

研究課題の設定にあたっては、これまでの研究成果や進捗状況で、どこまで区切りがつかない（成果）、何が足りないのか（課題）を明らかにした上で外部評価を受け、技術的に今後何が必要になるかについて意見をいただきました。さらに、抽出した課題に対して処分事業からのニーズがあるのかどうか（NUMOの包括的技術報告書に示された課題との比較）、地層処分研究開発調整会議で策定した全体計画の課題との整合を確認するとともに、海外で最も処分事業が進んでいるフィンランドでも何がまだ課題になっているのかを確認し、抽出した課題が今後も必要であることを確認しました。

実際の地質環境における試験の必要性

- 地下深部は、高い圧力、低酸素などの条件下で地下水や地層が存在しており、地上の環境とは大きく異なります。すなわち、様々な要素が複雑に関係して地下の環境は成り立っています。このような環境下で地下水の流れや物質の移動、それらに対する微生物やコロイドの影響度合い、更には設置した人工物の機能はコントロールされます。
- 一方、地上における試験では、ある限られたパラメータをコントロールした予察的な試験や特定のプロセス・現象の理解には有効ですが、上記のような地下の環境全体を再現した試験は困難です。さらには、同環境下で実際の処分スケール（例えば幌延の人工バリア単体での性能確認試験は、(W)5m×(H)10m×(L)5m）の試験を地上において実施するのも困難です。
- したがって、地上の試験と並んで、地層処分システムの信頼性の向上の検証には実際の地質環境下およびスケールでの試験が必要不可欠です。

幌延の地質環境特性

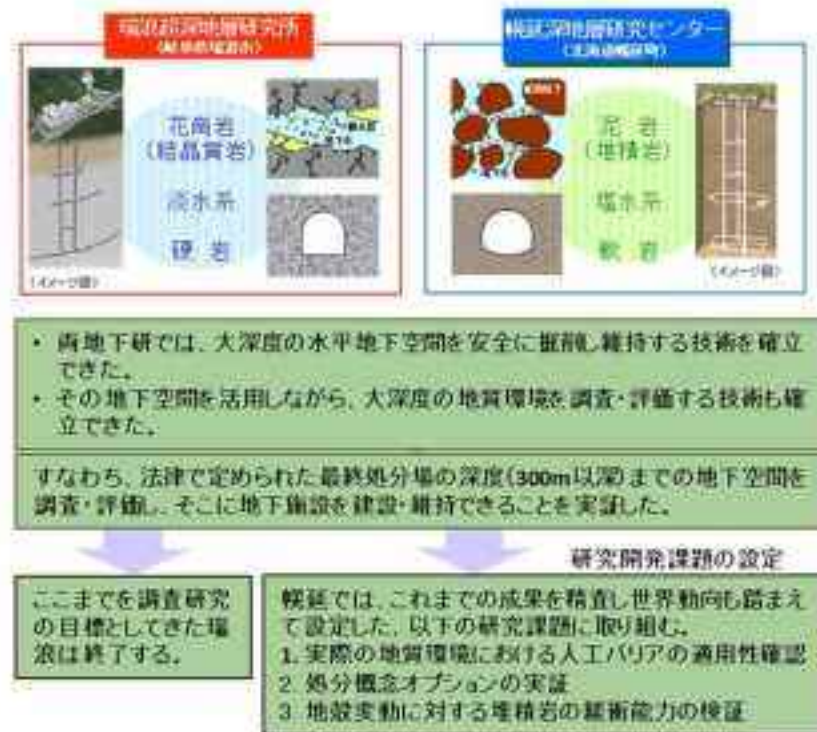
- わが国の地質環境は、海外の安定大陸と比較すると、割れ目の発達や地層の侵食、隆起・沈降など、様々な変動履歴を有しています。
- 幌延は、わが国を代表する岩種の一つである多孔質な岩石が分布していると同時に、この地質環境の特徴を有しています。
- すなわち、地殻変動に伴い発達した地質構造（断層や亀裂）や、過去の海水準変動の影響による沿岸域に特徴的な地形や高塩分濃度地下水の分布が認められます。
- わが国での地層処分システムの信頼性の向上に資するために、このような地質環境を有する場所で研究開発を進めることは重要です。

以上のことに加え、データ、知識、技術、人材が蓄積されている幌延において研究開発を実施することにより、合理的かつ効率的に信頼性の高い技術基盤の整備が可能です。

深地層の研究施設計画(瑞浪、幌延)と世界における地下研究の動向

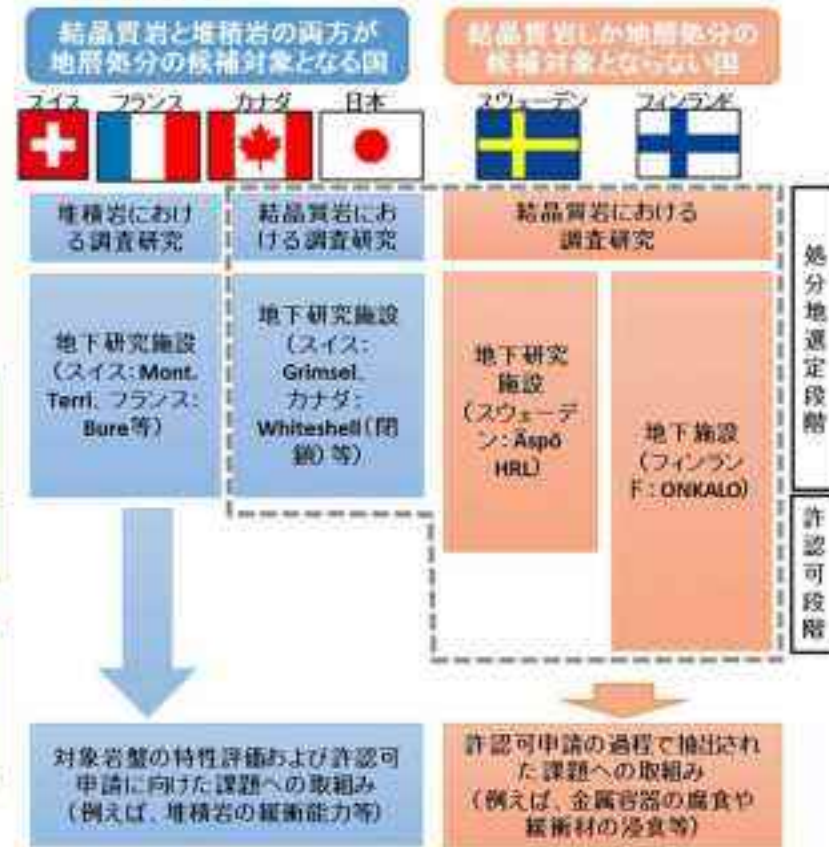
深地層の研究施設における研究開発の進展

- 結晶質岩(瑞浪超深地層研究所)および堆積岩(幌延深地層研究センター)を対象として、深地層の研究施設計画を進めてきた。
- 3つの研究領域のうち、瑞浪では「地質環境の調査・評価」に関する研究開発を行い、幌延では、これに加えて、「処分場の設計」や「安全評価」に関連した原位置試験も実施してきた。
- これまでの研究開発により、「地質環境の調査・評価」に関する当初の目標を達成したため、瑞浪での調査研究は終了し、今後は幌延における「処分場の設計」、「安全評価」に関する調査研究を継続する。



世界における地下研究と地層処分事業の動向

- 地層処分の対象岩種が結晶質岩のみの国(スウェーデン、フィンランド)では、集中的に研究開発が進められ、処分場の許認可申請の段階に至っている。
- 両方の岩種が対象となり得る国(スイス、カナダ)においても、堆積岩に先行して、結晶質岩を対象とした研究開発が進められた。なお、フランスでは、結晶質岩を対象とした地下研究の場が確保できなかった。
- 堆積岩については、現在も研究開発が継続されており、処分場選定に向けた動きもみられる。



※海外では実施主体により事業と併行して地下研での研究開発が行われている。

道3更問、専門有識者1-2 必要性・研究内容

第4回確認会議 資料8 P2を一部修正

第3回確認会議 資料6 (p48)を再掲・加筆修正

深地層の研究施設(瑞浪と幌延)

- 深地層の研究施設計画は、地質環境の調査・評価技術(瑞浪、幌延)や、処分場の設計・安全評価技術(幌延)を実際の地質環境に適用することを通じて、その信頼性・実用性を確認し、得られた成果を処分事業や安全規制に反映することを目的に、段階的に進められてきました。
- 瑞浪超深地層研究所においては、当初に設定した研究目標を達成したため、今後は坑道の埋め戻しを行う計画です。
- 幌延深地層研究センターにおいては、これまで必須の課題の成果に基づいて研究課題を検討し、令和2年度以降、第3期及び第4期中長期目標期間を目途に研究開発に取り組みます。その後、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、埋め戻しを行うことを具体的工程として示します。

2つの深地層の研究施設

瑞浪超深地層研究所
(瑞浪町(福井県))

花崗岩
(結晶質岩)
淡水系
硬岩

幌延深地層研究センター
(北見市(北海道))

泥岩
(堆積岩)
淡水系
軟岩

- 地層処分において重要となる「地下水の流れ方*」、「地下水の水质」、「岩盤の固さ」に着目して、それらの特性が異なる地質環境を対象に研究開発を実施している。
* 結晶質岩: 岩盤の割れ目を流れる、堆積岩: 粒子の隙間を流れる。

研究開発成果の反映先

	文献調査段階	概要調査段階	精密調査段階
処分事業 (NUMO)	文献の収集	地上からの調査	地下調査施設(坑道)での調査および地上からの調査
	地質環境の評価	地質環境の調査・評価	地質環境の調査・評価
	処分場の設計(建設可能性検討※)	処分場の設計(概念構築※)	処分場の設計(基本設計※)
	安全評価(概念的※)	安全評価(予備的※)	安全評価(総合的※)

※NUMO(2011)より

研究成果の反映

研究開発 (JAEA地下研)
瑞浪超深地層研究所
幌延深地層研究センター

第1段階: 地上からの調査研究段階
第2段階: 坑道掘削時の調査研究段階
第3段階: 地下施設での調査研究段階

安全規制 (規制委員会)
安全審査基本指針 ~ 安全審査

- 深地層の研究施設計画は、地層処分事業における処分地選定のプロセスを想定して段階的に進めており、現在は瑞浪、幌延ともに第3段階の地下施設での調査研究を実施しています。
- これまでの成果については、各段階の報告書やWeb上に体系化した報告書(CoolRep)として取りまとめるとともに、個別の論文や学会発表等を通じて公表してきています。
- 公表された情報や知見は、NUMOの「包括的技術報告書」に反映されるなど、わが国における安全な地層処分の実現に向けた技術基盤を構成しています。

地層処分における研究領域と深地層の研究施設計画

地質環境の調査・評価

処分場の設計

安全評価

連携

- 地層処分技術を構成する3つの研究領域である、「地質環境の調査・評価」、「処分場の設計」および「安全評価」に関する研究開発を、瑞浪、幌延、東海において実施しています。
- これらの研究領域について原子力機構では、「地質環境の調査・評価」については地層科学研究として、「処分場の設計」および「安全評価」については地層処分研究開発として実施しています。

研究開発の現状と今後

瑞浪超深地層研究所

成果のとりまとめ(進捗状況の確認)

地層科学研究を完了

埋め戻しに着手

幌延深地層研究センター

研究開発を継続

外部有識者によるレビュー

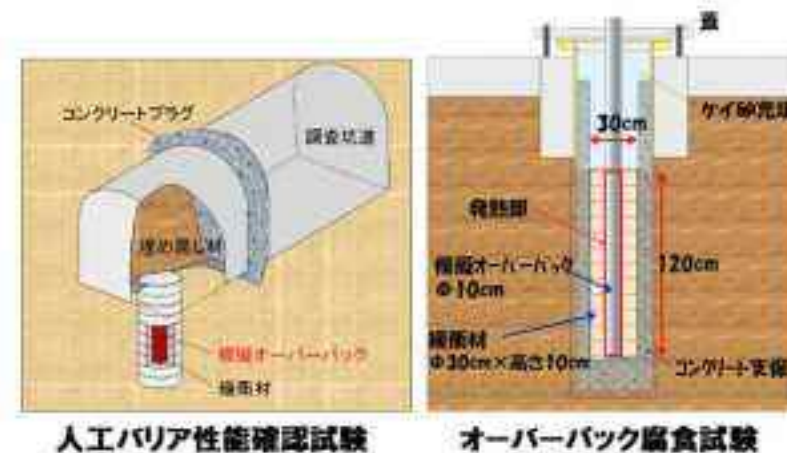
- 地層科学研究のみを実施していた瑞浪については、当初の目標を達成したため、調査研究を終了して、地下施設の埋め戻しを行う計画です。
- 幌延における地層科学研究についてはほぼ当初の目標を達成してきていますが、地層処分研究開発において様々な課題が指摘されたことから、今後は地層処分研究開発を中心に取り組んでいきます。なお、地層科学研究のうち、地層処分研究開発の目的である処分システムの設計・施工や安全評価とリンクした形での指標活用が考えられるもの、例えば、岩盤の水の流れやすさや地球化学的特性のデータの取得等については、地層処分研究開発を進める観点から、引き続き必要最低限の研究開発に取り組まします。

平成26年度に設定した必須の課題

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーバック腐食試験、物質移行試験を通して、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、「精密調査後半」に必要となる実証試験の技術基盤を確立する。

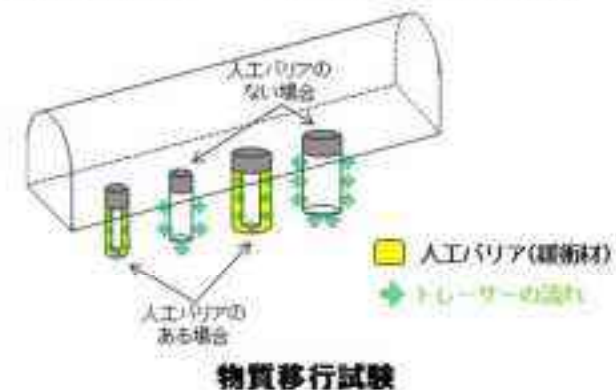
- 人工バリア性能確認試験
- オーバーバック腐食試験
- 物質移行試験



②処分概念オプションの実証

人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。

- 処分孔等の湧水対策・支保技術などの実証試験
- 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験
- 高温(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験



③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地震・断層活動等の地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。

- 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

※ 青色はこれまで取り組んできた課題、黒色はこれまで取り組んでいなかった課題

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

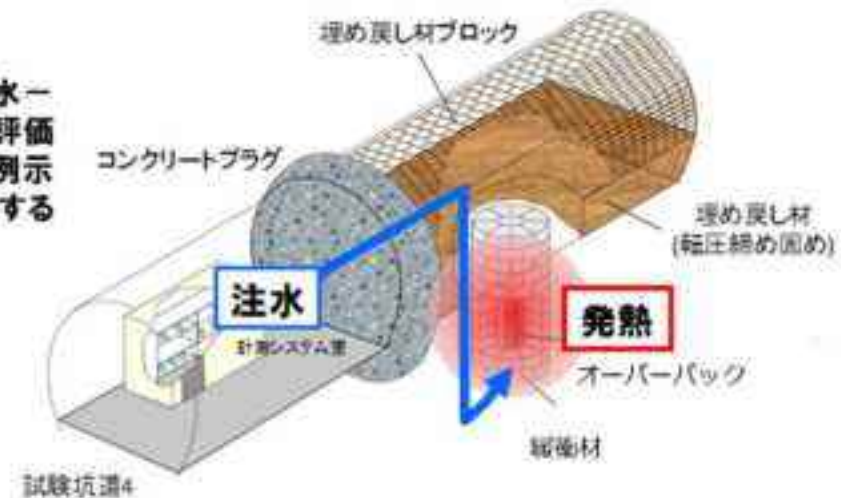
1) 人工バリア性能確認試験

【研究の背景・必要性・目標・意義】

実際の地質環境下における処分孔整置き方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象に関する試験をととして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認、ならびに施工方法などの工学的実現性の例示等を行い、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基盤情報を整備する。

【実施内容】

- 人工バリア(緩衝材、オーバーバック)に関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の適用性確認
- 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の適用性確認
- 熱-水-応力-化学連成評価手法の整備、適用性確認



人工バリア性能確認試験の概念図



緩衝材ブロックの製作と試験孔への定置



埋め戻し材の施工(左:転圧締め固め、右:ブロック積み上げ)

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1) 人工バリア性能確認試験

【成果】

(人工バリア、埋め戻し材の設計)

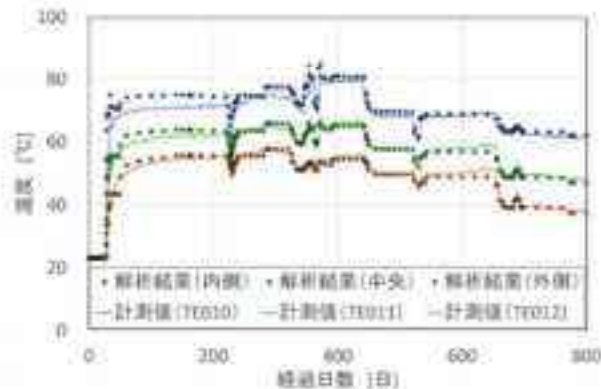
- 緩衝材及びオーバーバックに関する設計手法を構築し、幌延の地質環境条件を例とした試設計を実施。設計要件に基づく設計の実施が可能であることを確認

(人工バリア、埋め戻し材の施工)

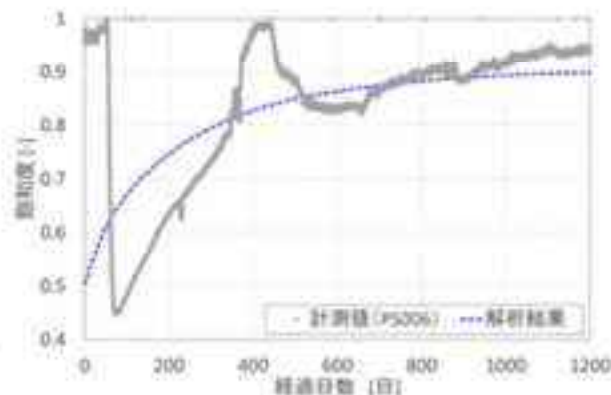
- 真空把持装置を用いた緩衝材ブロックの定置を実証
- 掘削スリ混合埋め戻し材を製作し、転圧締固め及び埋め戻し材ブロックによる原位置施工や品質管理手法の適用事例を明示

(熱-水-応力-化学連成評価手法の整備、適用性確認)

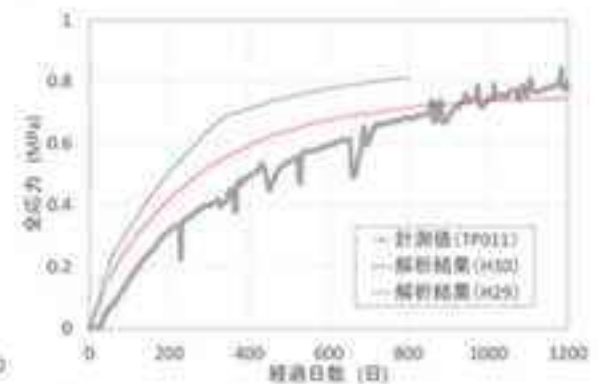
- 解析ツールの力学モデルを拡張(緩衝材の膨潤に伴う密度低下による剛性の低下を考慮)することにより、緩衝材の膨潤挙動の再現性が向上することを確認。
- 緩衝材の膨潤変形による密度変化に伴う熱特性、水理特性及び力学特性の密度依存性を考慮できるようモデルを高度化



緩衝材中の温度



緩衝材中の飽和度



緩衝材中の土圧

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1) 人工バリア性能確認試験

【地層処分事業や他分野への貢献】

- 安全評価における核種移行の初期状態の設定やオーバーバックの寿命評価に必要なニアフィールド環境条件の設定に活用

【外部委員会の評価】

人工バリア性能確認試験を継続し、人工バリア内の過渡的な現象を再現する予測モデルの妥当性を検証するとともに、得られた研究成果を余す所無く国内外の論文等に公表し、海外の先行URLと比肩しうる先進的な試験サイトとして広く世界にアピールすることを期待する。(深地層の研究施設計画検討委員会)

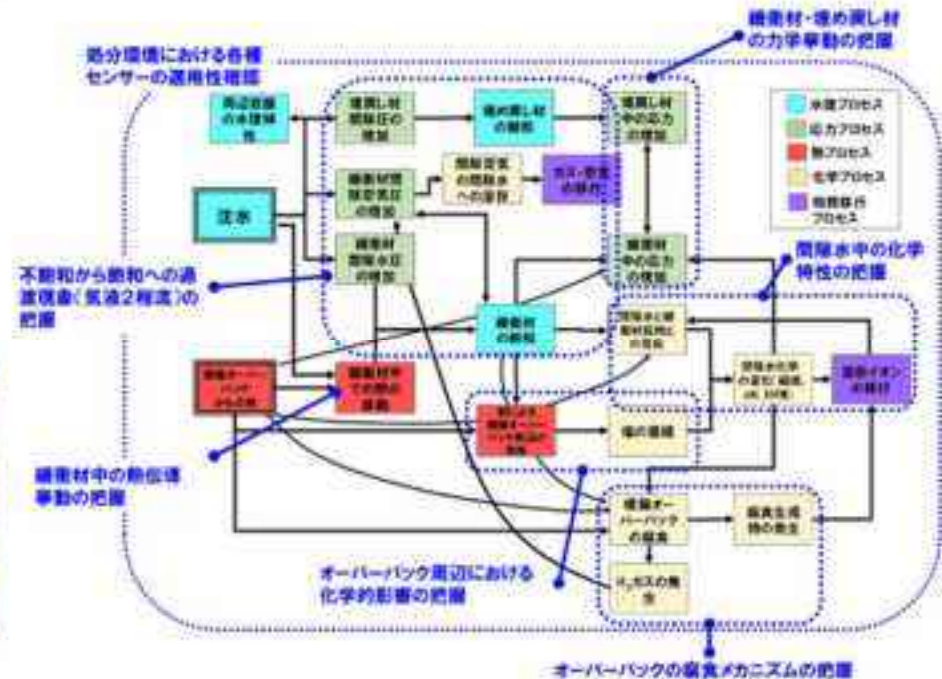
【令和2年度以降の取り組み】

1.1 人工バリア性能確認試験

- 減熱試験及び解体調査による飽和度等の検証データ取得、連成モデルの適用性確認
- 国際プロジェクト(DECORVALEX等)における解析コード間の比較検証、改良・高度化



人工バリア性能確認試験の解体調査のイメージ



人工バリア性能確認試験で考慮する複合現象

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

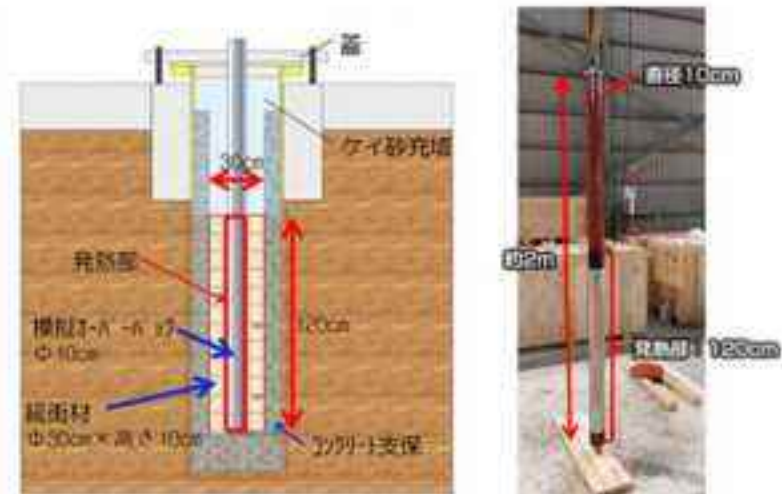
2) オーバーバック腐食試験

【研究の背景・必要性・目標・意義】

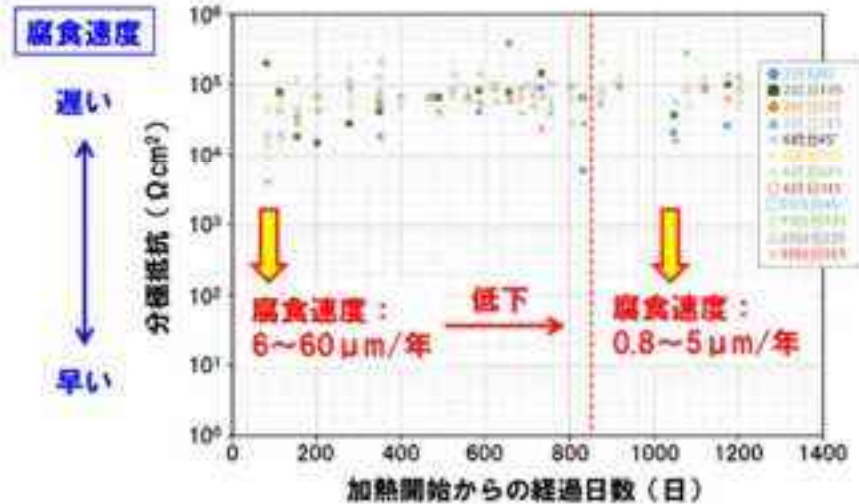
- ・ 緩衝材の再冠水過程では、飽和度等の環境条件の不均一性によって不均一な腐食の可能性がある。また、環境条件の変化に伴って腐食挙動も経時的に変化すると考えられる。
- ・ このような挙動を把握するには、ある程度のスケールの試験が必要であり、室内試験では限界があることから、工学的スケールでの検討が必要である。
- ・ 緩衝材の再冠水～飽和の過程を工学規模で再現し、オーバーバックの腐食量や不均一性のデータを取得して既往の腐食量評価手法の妥当性、適用性を確認する。更に、環境条件の不均一性に加えてオーバーバック溶接部に代表される材料側の不均一性も伴う系での不均一腐食挙動を確認する。

【実施内容】

- 試験坑道に掘削した試験孔に緩衝材と模擬オーバーバックを設置して腐食試験を実施
- 約3年間にわたる環境条件や腐食挙動のモニタリングデータを取得し、経時的な変化を把握



オーバーバック腐食試験の概念図



腐食センサーによるモニタリングの結果

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

2) オーバーバック腐食試験

【成果】

- 地下水環境におけるオーバーバックの耐食状況の把握
- 腐食モニタリング手法の適用性の確認
 - ・オーバーバックの溶接部と母材で腐食挙動に有意な差は認められないことを確認
 - ・腐食センサーを用いたモニタリングが少なくとも数年間以上は可能であることを確認
 - ・室内試験に基づく既往の評価手法の保守性、妥当性を確認

【地層処分事業や他分野への貢献】

- オーバーバック設計における腐食しろ設定や腐食量評価の保守性、妥当性を示すデータとしての活用
- オーバーバック溶接部の健全性や信頼性を示すデータとしての活用

【外部委員会の評価】

概ね適切に研究が遂行され、当期5カ年の目標を達成

【令和2年度以降の取り組み】

令和元年度までに終了するため、令和2年度以降の取り組みは無し。



模擬オーバーバックの取り出し・腐食生成物の採取

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
 3) 物質移行試験

【研究の背景・必要性・目標・意義】

幌延地域に分布する泥岩は断層等の構造性の割れ目が分布することが知られているため、岩盤基質部における拡散および割れ目を介した移流・分散が主要な移行形態として考えられる。したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行特性を総合的に評価することが必要。そのために、幌延の泥岩を事例として、岩盤基質部および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサー試験等を実施し、それぞれの構造の物質移行特性評価手法を構築することが重要。また合わせて、世界的にも事例が少ない泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法を確立することも重要。

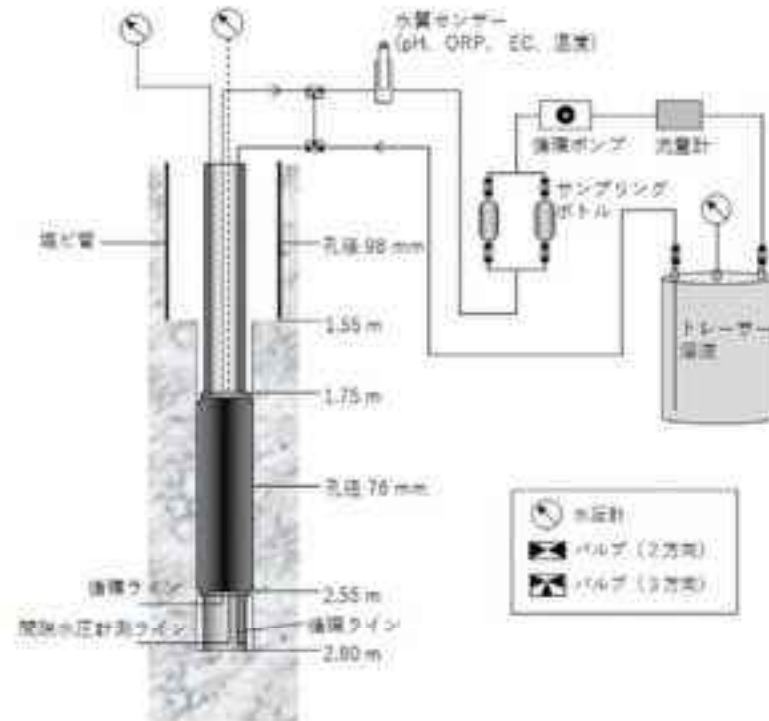
【実施内容】

(健岩部を対象とした試験)

- 健岩部を対象とした原位置拡散試験を実施し、その後オーバーコアリングを実施
- 試験区間内のトレーサー濃度減衰データおよび岩石試料中の濃度プロファイルから物質移行パラメータを取得

(割れ目を対象とした試験)

- 割れ目を対象としたトレーサー試験(ダイホール試験)を実施
- 単一の割れ目を対象としたトレーサー試験を事例とし、溶存ガス環境下でのトレーサー試験における最適な試験条件を検討
- トレーサーが移行した直接的な痕跡の情報に基づき、割れ目帯中の物質移行概念を検討



トレーサー試験装置の概念図

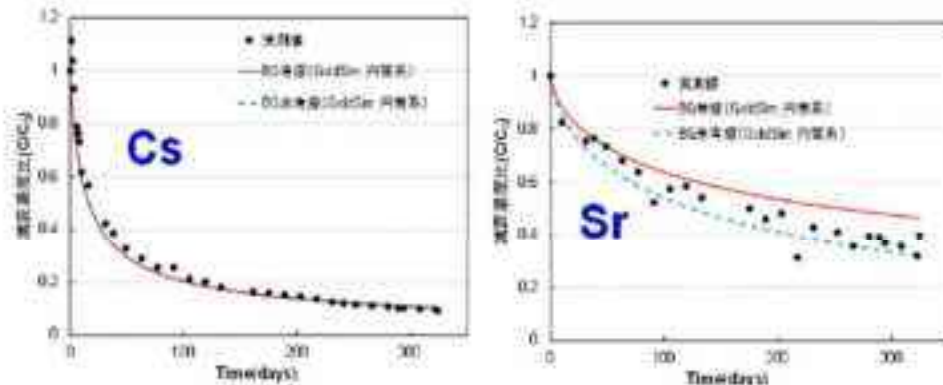
(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

3) 物質移行試験

【成果】

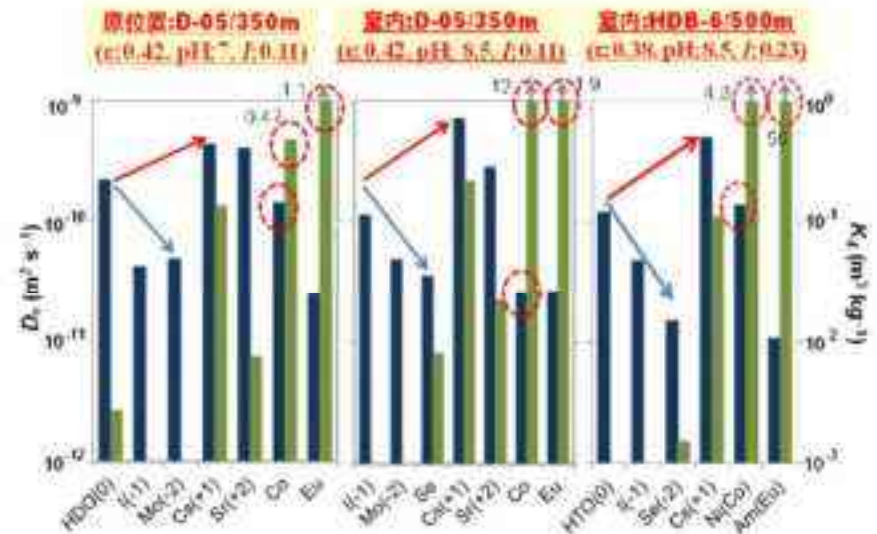
(健岩部を対象とした試験)

- 健岩部における物質移行挙動の解明
- 堆積岩の健岩部を対象としたトレーサー試験手法の確立(緩衝材の有無を含む)
 - ・1次元の解析結果と実測値は整合的であり、1次元の解析でも健岩部における移行挙動を解釈可能であることを確認
 - ・原位置試験および室内試験で得られた各トレーサーの物質移行特性(実効拡散係数と収着分配係数)は整合的であり、原位置試験データの妥当性を確認



トレーサー試験の結果(セシウムとストロンチウム※)

※天然に存在する放射性同位体元素を使用



原位置および室内拡散試験で得られた各トレーサーのDe (青色バー)とKd(緑バー)の比較 (ε: 間隙率、I: イオン強度)

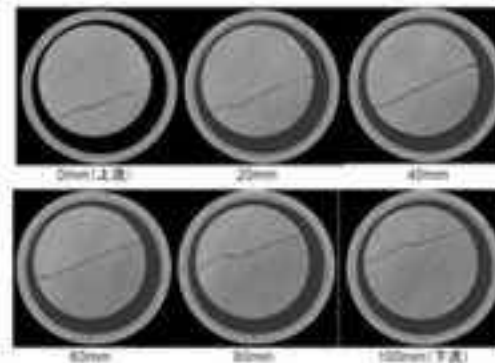
(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

3) 物質移行試験

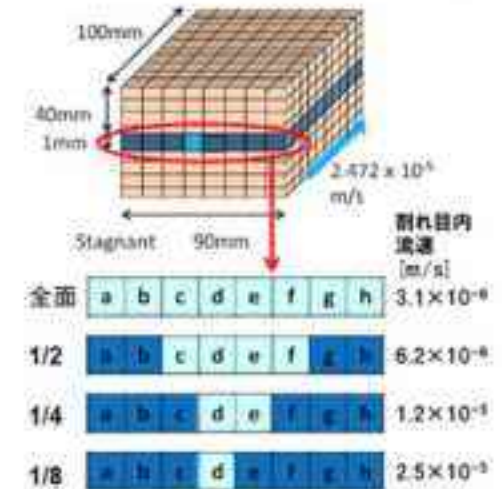
【成果】

(割れ目を対象とした試験)

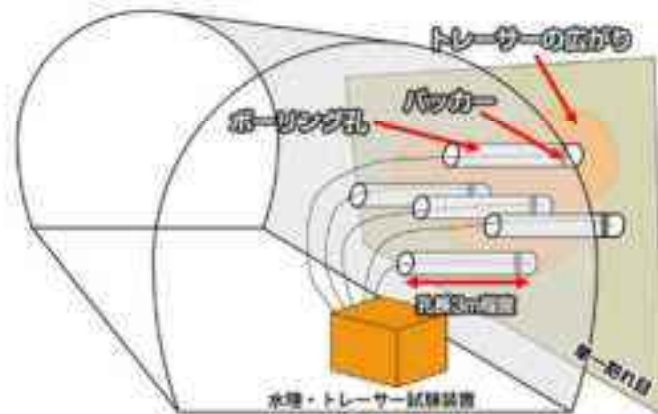
- 割れ目における物質移行挙動の解明
- 堆積岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の確立
 - ・割れ目内の選択的な流れを考慮したモデルにより、割れ目内の不均質な流れにおけるトレーサーの移行挙動を整合的に解釈可能
 - ・ガスが溶存する地下水環境下における物質移行試験技術を開発



X線CT像から評価された割れ目



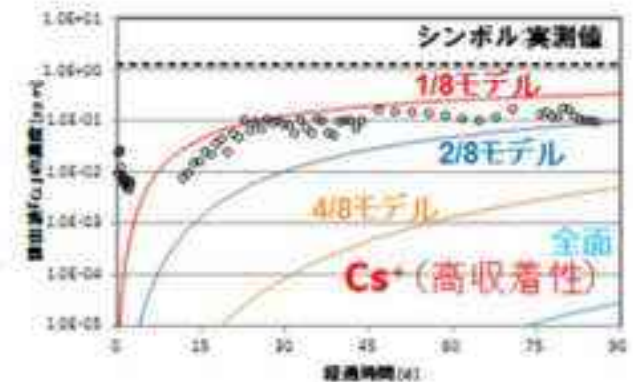
不均質な流れを仮定したモデル



割れ目を対象としたトレーサー試験 (ダイボール試験) のイメージ



試験後に採取した岩石試料



トレーサー試験結果との解析結果の比較

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
 3) 物質移行試験

【地層処分事業や他分野への貢献】

安全評価におけるモデル化や核種移行解析における入力パラメータの取得。室内試験の妥当性の確認。

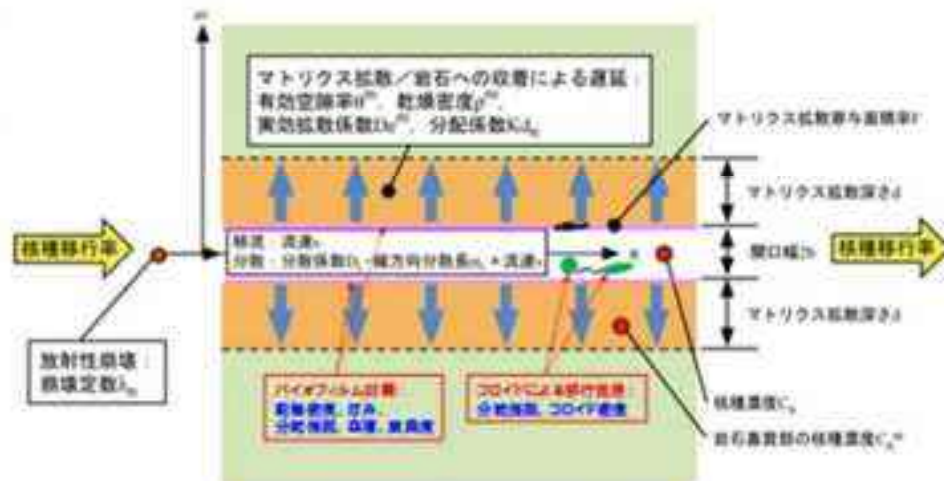
【外部委員会の評価】

実験においては計測できなかった項目や、解析による計測結果の評価においては評価しきれていない項目が見られる。

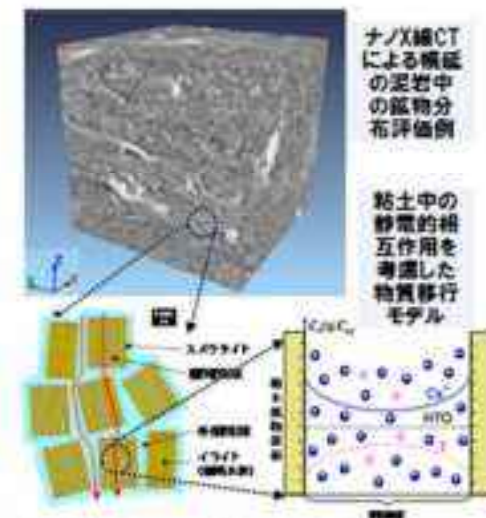
【令和2年度以降の取り組み】

1.2 物質移行評価手法の高度化

- 割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削影響領域を含むブロックスケール(数m~100規模)における遅延性能評価手法の整備
- 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化



コロイド及びバイオフィーム影響を考慮した
 一次元平行平板モデルの概念図



室内試験による拡散データ取得とモデル化

(2) 処分概念オプションの実証

1) 処分孔等の湧水抑制対策・支保技術などの実証試験（湧水抑制対策）

【研究の背景・必要性・目標・意義】

- ・地層処分場の建設時には、高地圧・高間隙水圧条件が予想される。また、堆積軟岩の場合には割れ目・断層に挟在物が存在する影響で従来のセメント系材料の注入が難しいことなども想定される。さらに、グラウトの周辺岩盤や人工バリアシステムに与える影響評価、多連接坑道を対象とした湧水対策効果を評価する手法の整備なども重要である。
- ・地層処分の地下環境条件を考慮した湧水抑制対策技術やグラウト材の浸透評価手法の開発など、実際の地質環境における一連の湧水抑制対策技術の実証を目標とする。

【実施内容】

- ・突発的な大量湧水を回避するための予測手法の開発
- ・グラウト材の浸透評価手法の検討
- ・海水条件下で使用可能なグラウト材料の開発



大量湧水発生状況（深度
350m）



粘土質せん断帯に含まれる
メルトインクルージョンの顕微鏡写真

【成果】

- ・突発的な大量湧水の発生の原因となりうる粘土質せん断帯の分布の予測手法として、メルトインクルージョン※に着目した湧水抑制対策(グラウト)の事前予測が有効であることを提示
※ガラス状の物質。結晶中に取り込まれたマグマが噴火時に急冷してガラスとなったもの。火山灰に含まれる)
- ・等価多孔質媒体モデルによるグラウト浸透解析の結果と、現場透水試験の結果は整合的であり、設定したグラウトの改良範囲が妥当であることと、解析の有効性を提示
- ・海水条件下で処分孔まわりの低透水領域を改良することが可能となる溶液型グラウト材料の配合を提案

(2) 処分概念オプションの実証

1) 処分孔等の湧水抑制対策・支保技術などの実証試験（湧水抑制対策）

【地層処分事業や他分野への貢献】

湧水抑制の困難な火山灰層起源の粘土質せん断帯の分布を事前に予測することで、適切な掘削計画の立案や地下工事の効率化に寄与。

ここで得られた成果は、トンネル施工等の土木分野においても活用できるものである。

【外部委員会の評価】

塩水環境下のグラウト材・工法に関する継続的な検討に加え、地層処分事業等において実用性のある形での知識の蓄積、技術の継承が望まれる。

【令和2年度以降の取り組み】

令和元年度までに終了するため、令和2年度以降の取り組みは無し。

(2) 処分概念オプションの実証

1) 処分孔等の湧水抑制対策・支保技術などの実証試験 (支保技術)

【研究の背景・必要性・目標・意義】

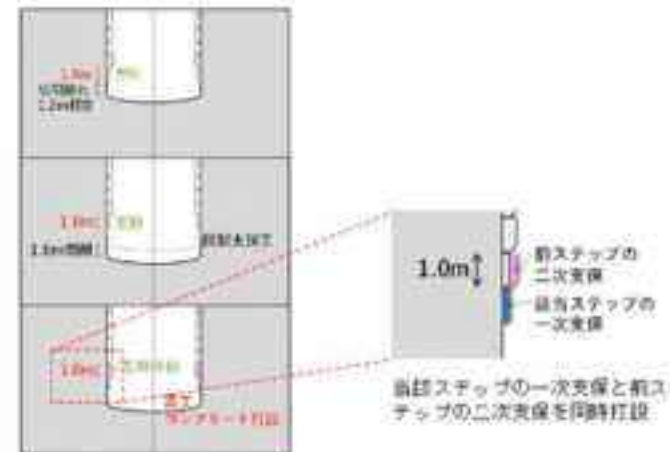
- ・国内外の地下空洞開発事例において、支保設計、情報化施工技術、支保及び岩盤の計測技術が構築されている。
- ・このような事例がある中で、地層処分場で想定されるような、広範囲に及び、なおかつ深度300m以深という大深度に展開される大規模地下施設においても、既存の技術が適用可能かどうかを確認し、課題がある場合には技術の整備を行う必要がある。そこで、立坑や水平坑道における支保技術、情報化施工技術、長期的な計測技術を整備することを目標とする。

【実施内容】

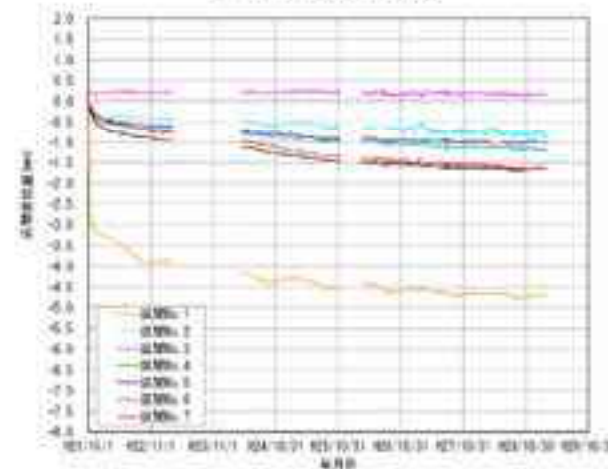
- ・立坑掘削時の情報化施工技術の構築
- ・低強度・高地圧地山における大深度立坑支保設計手法の開発
- ・岩盤および支保工の安定性を長期的に計測する技術の構築(二重支保の適用可能性の検討)

【成果】

- ・立坑掘削前のパイロットボーリング孔の情報やグラウト施工情報を基に、覆工コンクリートの打設長を決定するフローを構築
- ・吹付コンクリート・鋼製支保工応力計測と、弾性波トモグラフィ調査を組み合わせた解釈により、長期的に岩盤と支保工の両方の安定性をモニタリングすることが可能になった・光ファイバ式変位計の長期岩盤変位計測技術としての有効性を実証



深度380m以深において適用可能な二重支保の概念



光ファイバ式変位計による計測結果

(2) 処分概念オプションの実証

1) 処分孔等の湧水抑制対策・支保技術などの実証試験（支保技術）

【地層処分事業や他分野への貢献】

ここで得られた成果は、トンネル施工等の土木分野においても活用できるものである。

【外部委員会の評価】

光ファイバーを用いたモニタリング技術に関する継続的な検討に加え、地層処分事業等において実用性のある形での知識の蓄積、技術の継承が望まれる。

【令和2年度以降の取り組み】

令和元年度までに終了するため、令和2年度以降の取り組みは無し。

(2) 処分概念オプションの実証

2) 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証研究

【研究の背景・必要性・目標・意義】

処分場の操業に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術を実証する。

【実施内容】

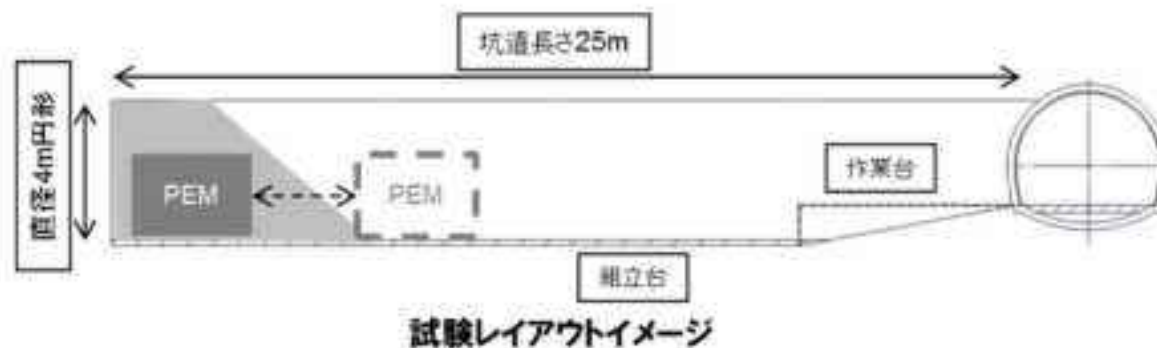
- ・処分坑道横置き定置方式について、PEM(Prefabricated Engineered barrier system Module)方式の搬送定置・回収技術の実証
 - 搬送・定置技術:エアベアリング方式を用いた搬送装置(重量物の搬送技術)の地下環境への適用性確認
 - 回収技術:PEM-坑道間の狭隘な隙間に対する、隙間充填技術および充填材の除去技術の整備、実証



要素試験の実施状況
(エアベアリング方式)



模擬PEMの設置状況



(2) 処分概念オプションの実証

2) 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証研究

【成果】

- ・現場打設のコンクリート坑道面においてもエアヘアリング方式で重量物が搬送可能であることを確認
- ・走行時の牽引力や空気供給量などのデータを取得し、実機の製作・運転方法などに反映
- ・模擬PEM-坑道間の隙間に対し、下部狭隙部にはベレット方式、上部空間には吹付け方式による隙間充填試験を実施し、適用性を確認

【地層処分事業や他分野への貢献】

人工バリア横置き方式のオプション技術の提示

【外部委員会の評価】

- ・今後は、技術の確立が可能な水準に達するまで、処分概念オプションの実証に関する試験を継続する。
- ・プレハブ式人工バリアモジュール(PEM)を用いた搬送定置・回収技術で計画されている試験の内、また実施されていない隙間充填材やPEMの回収試験を着実に実施することを期待する。
- ・多くの既存技術も利用しつつ検討することが必要な課題と思われる。今後、開発～実証した技術と既存技術をどのように組み合わせるかで適用していくのか、全体像として示して頂くが良い。

【海外の状況】

- ・処分事業が進んでいるフィンランドの取り組みにおいて、実施主体ボシバ社の処分場建設許可段階のセーフティケースに関する規制機関(フィンランド:STUK)のレビュー報告書に示された操業許可申請に向けた課題として、廃棄体設置の最終判断や廃棄体間隔の設定のための個別技術の体系化の必要性が示されている。



スクリー方式による埋め戻し材の施工

(2) 処分概念オプションの実証

2) 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証研究

【令和2年度以降の取り組み】

2.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

- 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築
- 搬送定置・回収技術の実証(緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術の技術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプション提示、回収維持の影響に関する品質評価手法の提示)
- 閉鎖技術(埋め戻し方法:プラグ等)の実証



緩衝材の除去技術



オーガー掘削による隙間充填材の除去



ウォータージェットによる除去試験

除去技術オプションの整理



スクルー方式による埋め戻し材の施工



切り欠きの掘削とプラグの施工例

閉鎖技術オプションの整理

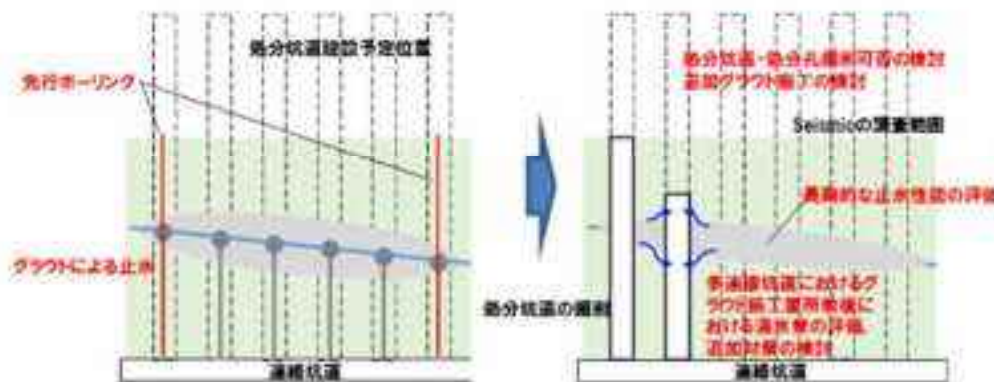
(2) 処分概念オプションの実証

2) 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証研究

【令和2年度以降の取り組み】

2.3 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

- 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した、地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化
- 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の適用事例の提示、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の提示
- 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要なとなる情報の整理



設計評価、工学的対策の検討イメージ



支保工設計と適用事例



定置位置決定特性の考え方の整理

(2) 処分概念オプションの実証

3) 高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【研究の背景・必要性・目標・意義】

- ・ 人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。
- ・ 実際の処分事業では、オーバーバックが100℃以下になってから処分することが基本であるが、何らかの要因によって100℃を超えた状態になることを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する。

【実施内容】

100℃超の高温環境下における人工バリアの閉じ込め機能を確認する研究に関する机上検討

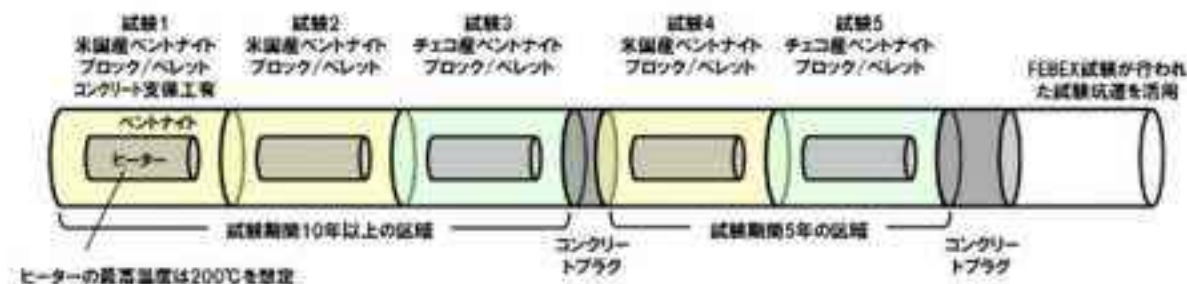
【成果】

- ー (当該研究課題は深度500mでの実施を想定していたため、机上検討のみ)

【令和2年度以降の取り組み】

2.2 高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験

- 100℃超時のニアフィールドにおいて発生する現象の整理
- ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示(国際プロジェクト情報を収集し、発生する現象を整理)



国際プロジェクトHoIBENT試験の概要(スイスの地下研で実施予定)

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

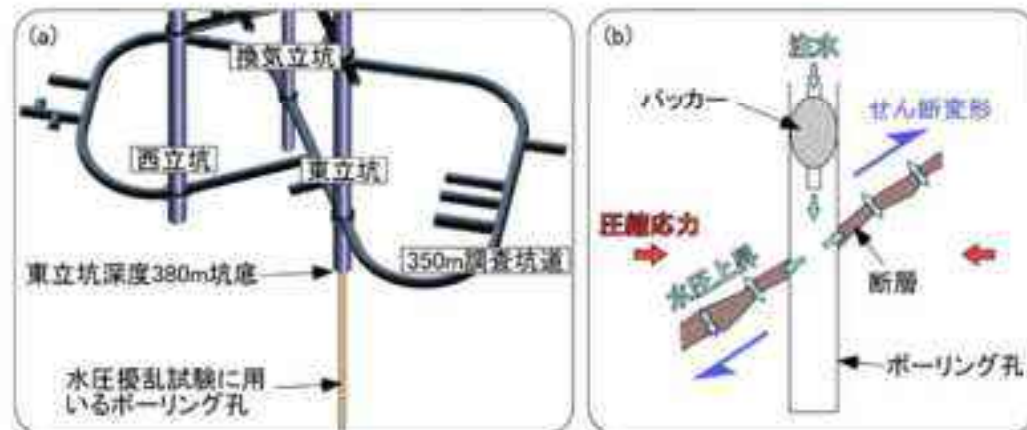
【研究の背景・必要性・目標・意義】

- ・ 岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある。
- ・ 断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する。
- ・ 本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測且つマッピングが可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば、処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる。

→断層は動いたとしても、その透水性は、地層の力学的な緩衝能力が働くことにより、一定の値を超えない。
この現象を定量的に示したい。

【実施内容】

- ・ 断層の変形様式(脆性的or延性的)を支配し得る岩石の強度・応力状態を表す指標を考案するために、関連する既存研究のレビューを行うとともに、机上検討やコア観察・室内実験(破壊実験)を実施
- ・ 水圧擾乱試験を実施し、モデルの有効性を検証



水圧擾乱試験の概要

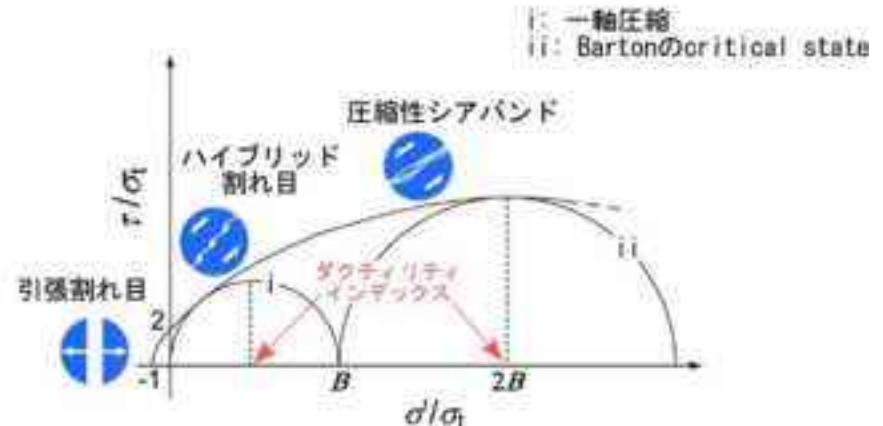
(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

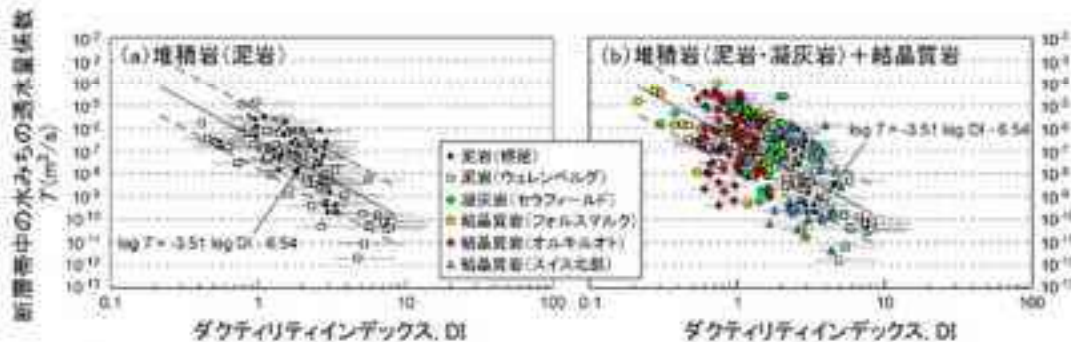
【成果】

- ・ダクティリティインデックス:DI)が断層のダメージゾーンの変形様式と定量的な対応付けが可能であることが確認でき、DIが断層の変形様式を支配し得る岩石の強度・応力状態を表す指標として有効である見通しを得た。
- ・すなわち、地殻変動(応力状態の変化)に対する断層の透水性を予測できる見通しを得た。

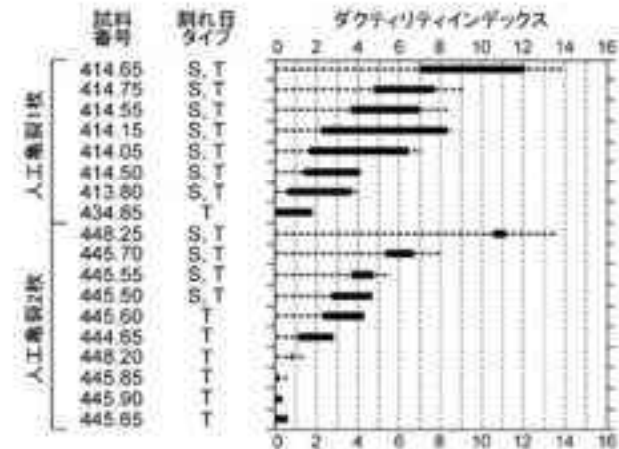
※ダクティリティインデックス(DI):平均応力を引張強度で除した値(=引張強度で標準化したモール円の中心位置)
 断層帯中の水みちの透水性はダクティリティインデックスが大きくなるほど小さくなる
 ・2以上:せん断割れ目(圧縮性シアバンド)が形成
 ・2未満:引張・ハイブリッド割れ目が形成



断層に作用する応力状態とダクティリティインデックスの関係



断層帯で検出された水みちの透水性とDIの関係



人工亀裂(断層面を模擬)を用いた破壊実験の結果(DIが2以下だと引張性割れ目のみが形成)

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

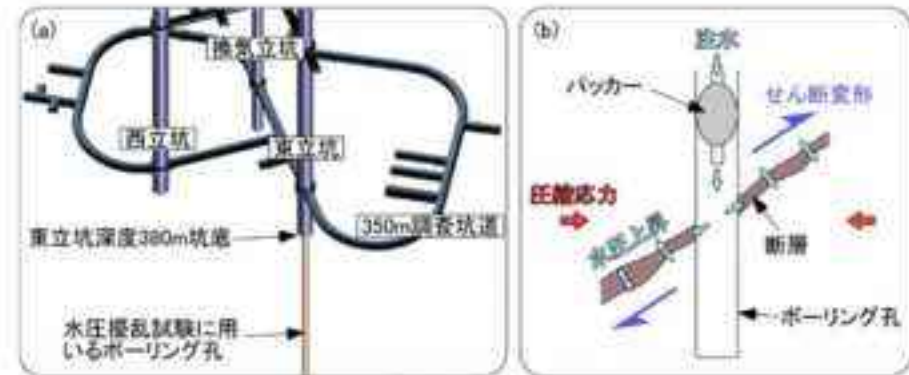
【成果】

水圧擾乱試験を実施し、モデルの有効性を検証

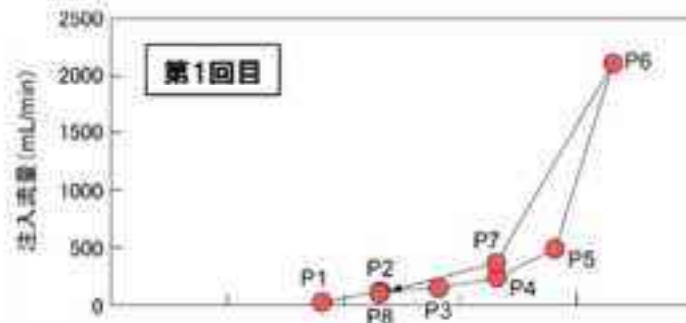
- ・水圧擾乱試験では、断層内の水圧を人工的に上昇させることによって断層内にせん断変形を誘発させ、それに伴う断層の透水性の変化を観測

※水圧を上昇させることは、隆起・侵食によって断層の深度が浅くなる(有効応力が低下する)現象を模倣

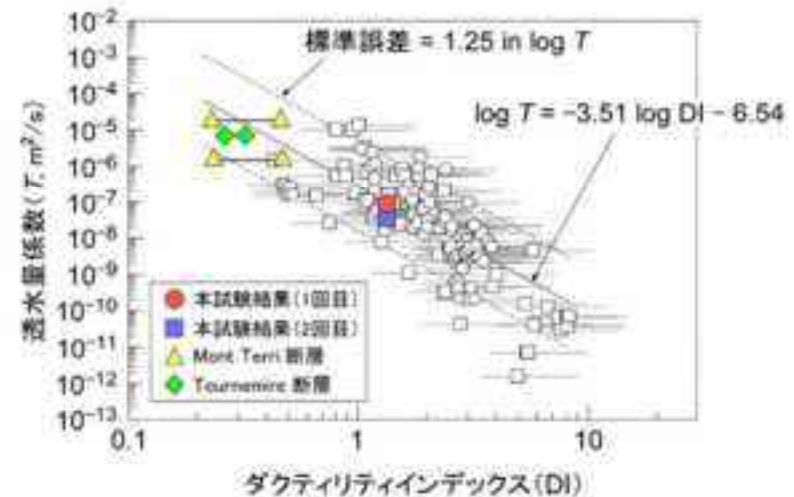
- ・水圧擾乱試験を行った結果、新たにせん断変形が起こったり、有効応力が低下したとしても、断層帯亀裂の透水性はDIの経験式の範囲を超えないことを確認



水圧擾乱試験の概要



水圧擾乱試験時における注入流量と試験区間の水圧との関係



ダクティリティインデックスの経験式と今回実施した水圧擾乱試験結果や他の既報データとの比較

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

【地層処分事業や他分野への貢献】

・断層の透水性とDIの関係性を検討した結果、両者には十分な相関性が認められ、断層の潜在的な透水性の上限は、DIを用いた経験式によりある一定の幅を持って統一的に予測できる可能性が高いことが分かった。このような経験式は、特にサイト固有のデータが多く得られていない段階において、断層の再活動を考慮した処分場閉鎖後の断層の透水性を保守的かつ合理的に設定する際の一つの根拠となり得る。

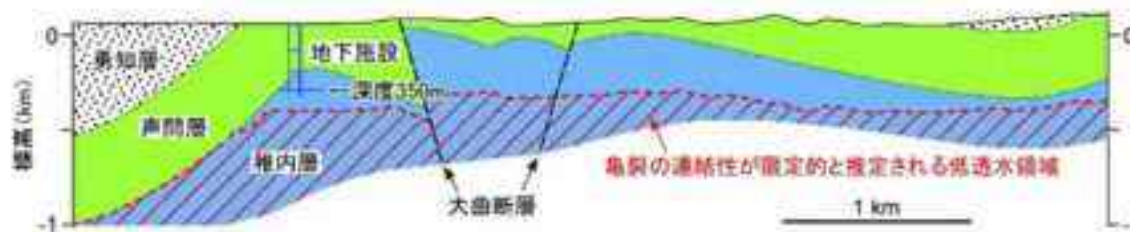
【外部委員会の評価】

- ・できるだけ一般論としての堆積岩の特性評価を意識したまとめと今後の課題とする必要がある。
- ・堆積岩他地域や結晶質岩への展開・比較、地層処分事業における処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形での指標活用に向けた具体化を期待する。

【令和2年度以降の取り組み】

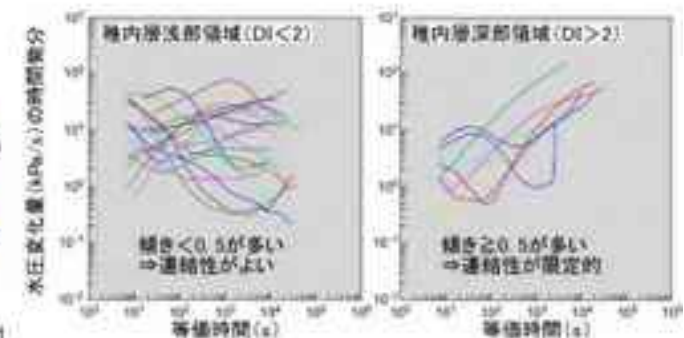
3.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

- DIを用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の構築
- 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の構築



亀裂の不連続性の評価⇒堆内層のDI>2が連結性限定的

亀裂の不連続性のDI依存性



透水試験の詳細解析⇒DI>2で連結性限定的

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証
2) 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

【研究の背景・必要性・目標・意義】

- 地震・断層活動等の地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。

【実施内容】

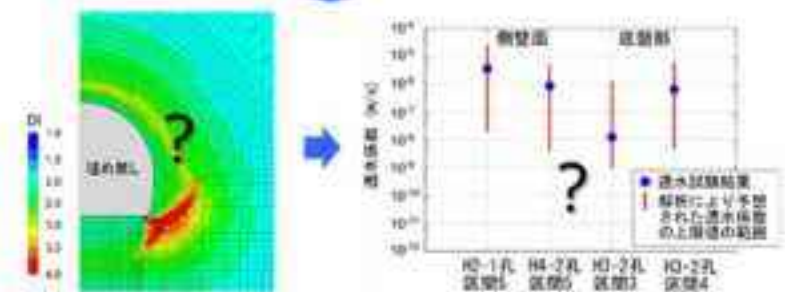
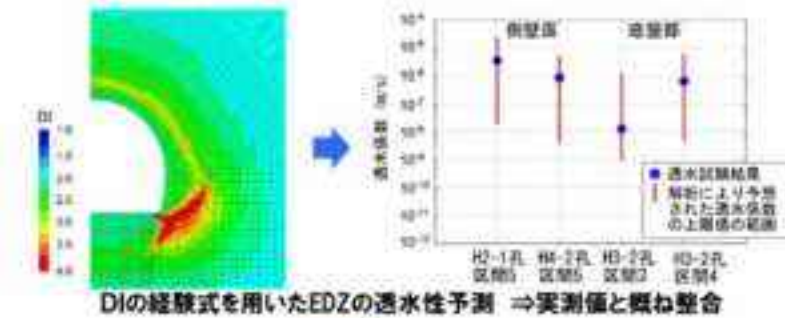
- 地震や断層活動に起因する岩盤の損傷により、人工バリアの自己治癒能力(ひび割れの修復)を確認する研究の机上の検討

【成果】

- 一 (当該研究課題は深度500mでの実施を想定していたため、机上検討のみ)

【令和2年度以降の取り組み】

- 3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験**
- 緩衝材膨潤や埋め戻しに伴う掘削影響領域(EDZ)の緩衝能力を解析する手法の開発
 - DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証
 - 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築



(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3) 地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

【研究の背景・必要性・目標・意義】

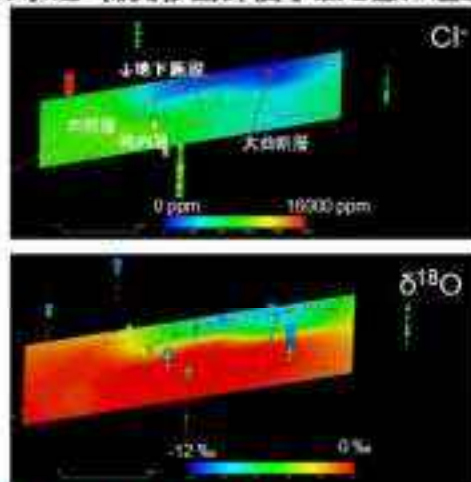
- ・地下水流れが非常に遅い領域(化石海水領域に相当と仮定)の分布を把握することは、処分事業における処分場選定の際に有用な情報になり得る。このため、地上からの調査により、化石海水の三次元分布を評価する既存技術の高度化を図る。

【実施内容】

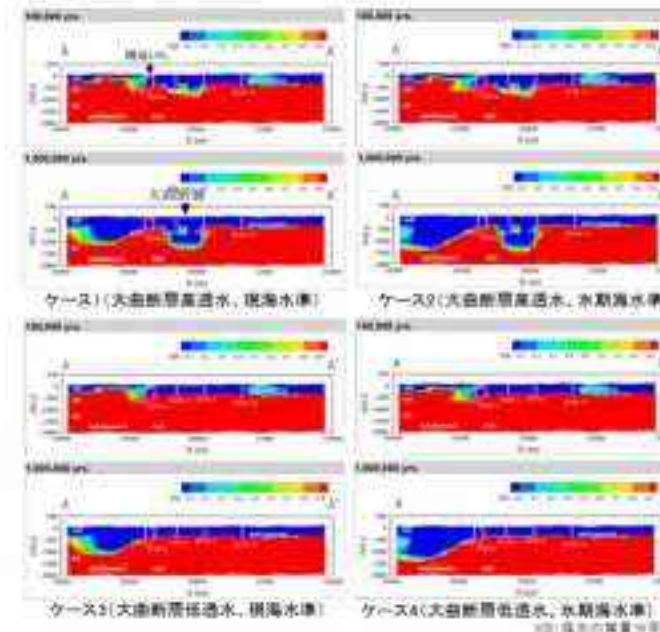
- ・地上からのボーリング調査や物理探査の既存結果に基づき、化石海水の三次元分布の再評価
- ・地下水流れが非常の遅い領域(化石海水のような塩濃度の高い地下水の分布)を解析的に評価する技術の改良

【成果】

- ・化石海水の指標として、Cl⁻及び水の安定同位体を基に分布を推定
- ・既存の水理・物質移動評価手法を基に塩濃度分布を推定



地下水のCl⁻及びδ¹⁸O分布の推定例



塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析の例

【令和2年度以降の取り組み】

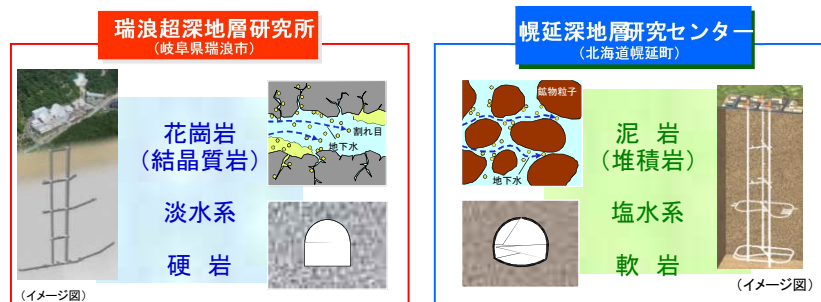
3.3 地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

- 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の高度化
- 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の高度化(地下水滞留時間評価のための水理解析、塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析)

必要性・研究計画

深地層の研究施設(瑞浪と幌延)

- 瑞浪、幌延の両深地層の研究施設では、地質環境の評価のための体系的な調査・解析・評価技術の基盤の整備と、深地層における工学技術の基盤の整備を目的とした地層科学研究を行ってきています。
- 瑞浪については、この地層科学研究について、当初の目的を達成できたため、埋め戻す方向で進めています。
- 幌延については、地層科学研究に加えて、処分システムの設計・施工に関する技術の開発および安全評価手法の信頼性確認を目的とした地層処分研究開発も併せて実施してきました。
- このうち、地層科学研究については、幌延もほぼ当初の目的を達成してきているが、地層処分研究開発において様々な課題が指摘されたことから、今後は地層処分研究開発を中心に取り組んでいきます。
- なお、地層科学研究のうち、地層処分研究開発の目的である処分システムの設計・施工や安全評価とリンクした形での指標活用が考えられるもの、例えば、岩盤の水の流れやすさや地球化学的特性のデータの取得等については、地層処分研究開発を進める観点から、引き続き必要最低限の研究開発に取り組みます。



- 両地下研では、大深度の水平地下空間を安全に掘削し維持する技術を確立できた。
- その地下空間を活用しながら、大深度の地質環境を調査・評価する技術も確立できた。

すなわち、法律で定められた最終処分場の深度(300m以深)までの地下空間を調査・評価し、そこに地下施設を建設・維持できることを実証した。

研究開発課題の設定

- ここまでを調査研究の目標としてきた瑞浪は終了する。
- 幌延では、これまでの成果を精査し世界動向も踏まえて、以下の研究課題に取り組む。
 1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
 2. 処分概念オプションの実証
 3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

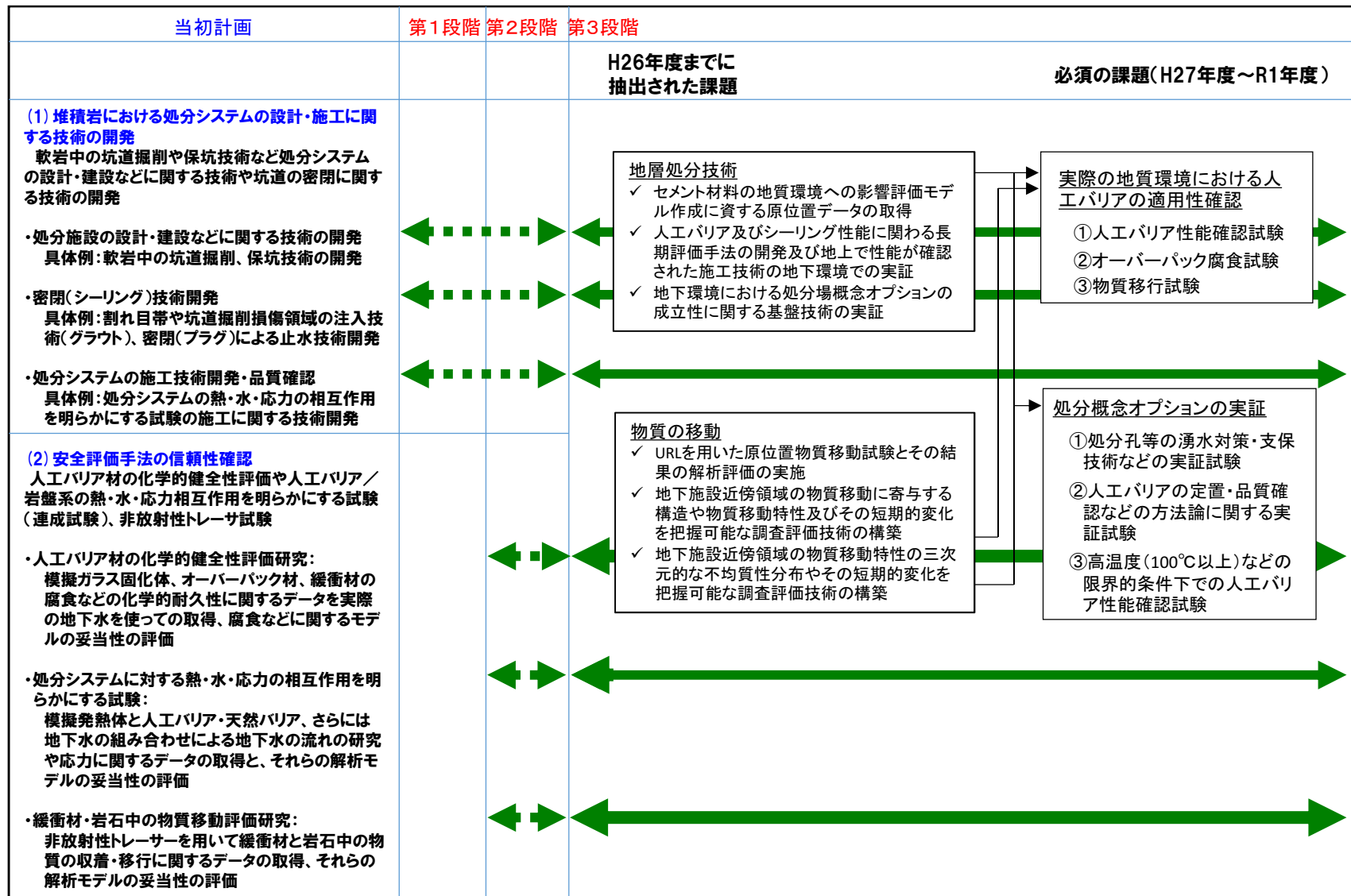
必要性・研究内容

研究課題の変遷: 当初計画～必須の課題(1.地層科学研究)

当初計画	第1段階	第2段階	第3段階
			<p>H26年度までに抽出された課題</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>地質・地質構造</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地質環境の長期変動に関わる知見の蓄積によるモデル化精度の向上と、多分野を含むモデル化・解析に関連する不確実性の評価手法の構築 ✓ 断層などの天然現象の地質環境への影響範囲を把握する手法の提示 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>岩盤中の水理</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 考慮すべき自然事象や、それらが影響を及ぼす地下水流動特性の抽出に関する体系的な調査・解析・評価技術の構築 ✓ 地震に伴う地下水圧変化の発生メカニズムや、それが水理特性や地下水流動特性に与える影響の把握 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>地下水の地球化学</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地震後の長期的な水圧変化に応じた水質変動幅の予測と検証 ✓ 施設閉鎖時後の地球化学特性の変化幅の把握、地質学的時間スケールにおける長期変動幅との比較、安全評価への反映の考え方を整理 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>岩盤力学</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地震時のEDZの挙動の理解 ✓ EDZのセルフシーリングのメカニズムの評価とモデル化 ✓ 施設閉鎖後の地質学的時間スケールにおける初期応力状態、EDZの長期変動幅の推定 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>物質の移動</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地質構造発達・地質環境変動に伴う地下施設近傍・遠方領域の物質移動特性の長期変動幅を推定可能な調査評価技術の構築 ✓ 地質学的時間スケールでの物質移動特性変動のモデル化技術の構築 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>地質環境の長期安定性</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価技術 ✓ 地層処分の更なる安全性の検討に際しては、東北地方太平洋沖地震のように1000年に1回の稀頻度の地質イベントを考慮した評価シナリオと解析手法の開発が必要 ➢ 地形変化シミュレーション技術 ✓ 10万年程度で生じる将来の地形変化は、数値シミュレーション結果と外挿・類推の結果との比較・検討による予測結果の信頼性向上が課題 ➢ 超長期における予測・評価手法に関する検討 ✓ 超長期の予測・評価では、不確実性が著しく増大することから、予測期間に応じた不確実性を定量的に評価するための手法の開発が必要 </div>
<p>(1) 深部地質環境特性に関する研究 地質環境条件の測定や、坑道掘削に伴うそれらの変化の把握、あるいは実際の深地層中での物質移行試験等により、堆積岩を対象として開発を行ってきた地質構造、水理、水質等に関するモデルの妥当性を確認</p>			<p>必須の課題(H27年度～R1年度)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 ② 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験 </div>
<p>1) 地表から行う調査研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・物理探査やボーリング試験 ・モデル解析等 	↔		
<p>2) 坑道を掘削しながら行う調査研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地層や断層の分布、地下水の性質等を観察、調査 ・坑道掘削影響試験 		↔	
<p>3) 坑道を利用して行う調査研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・精密な物理探査やボーリング調査 ・非放射性のトレーサー注入試験 ・岩盤や地下水の性質の空間的な不均質性調査 			←
<p>(2) 調査技術開発と関連機器の開発 地質環境調査の要素技術(例えば地震波を利用した弾性波反射法など)を系統的に組み合わせ、地上及び地下坑道での総合的な調査手法の有効性確認</p>	←		→

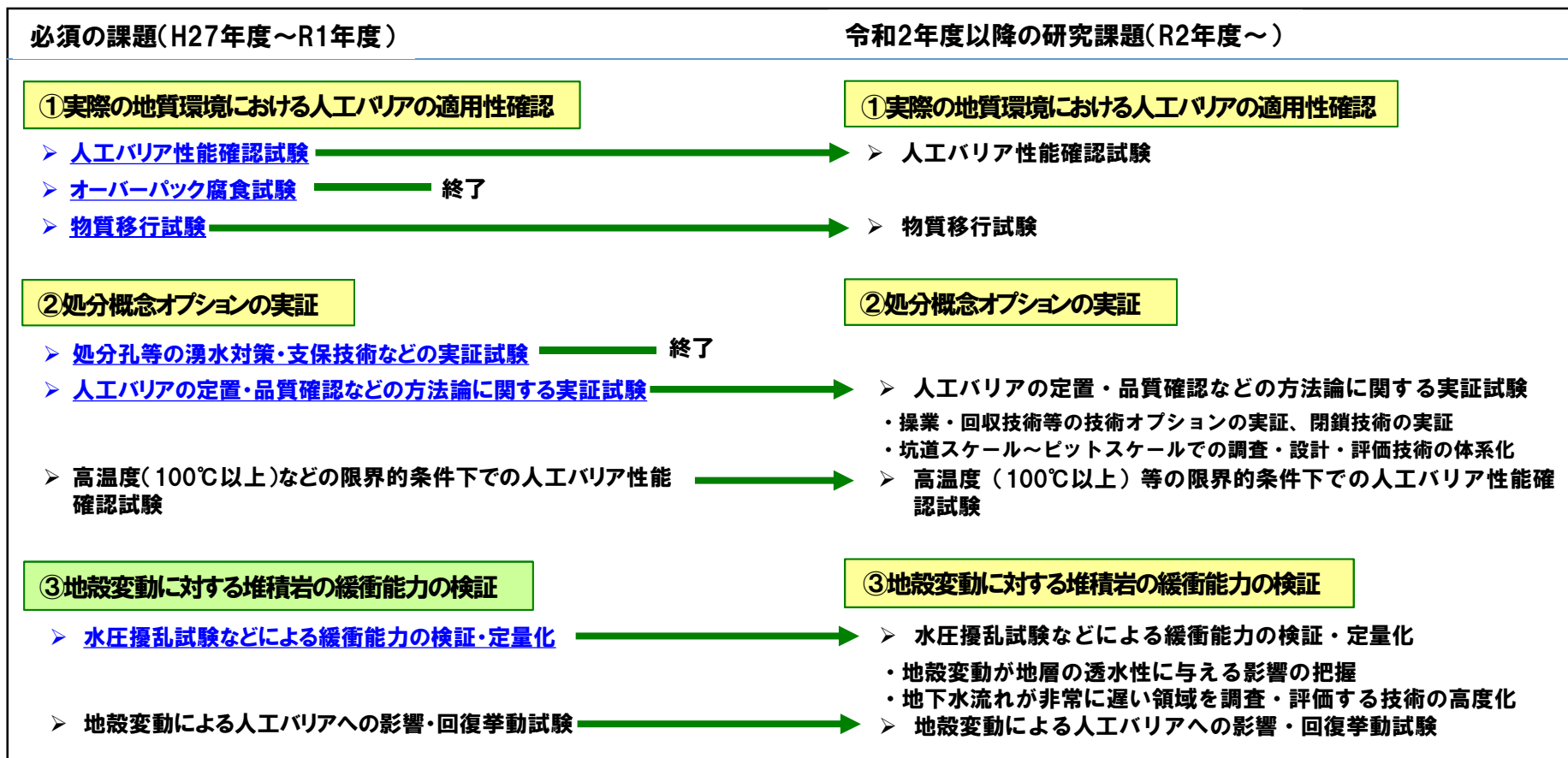
必要性・研究内容

研究課題の変遷：当初計画～必須の課題(2.地層処分研究開発)



必要性・研究内容

研究課題の変遷: 必須の課題～令和2年度以降の研究課題



- 地層科学研究
- 地層処分研究開発

*令和2年度以降の研究課題については、地層処分研究開発を中心に取り組んでいきます。なお、地層科学研究のうち、地層処分研究開発の目的である処分システムの設計・施工や安全評価とリンクした形での指標活用が考えられるもの、例えば、岩盤の水の流れやすさや地球化学的特性のデータの取得等については、地層処分研究開発を進める観点から、引き続き必要最低限の研究開発に取り組めます。

最近の国内外の動向：フィンランドの課題（1/2）

処分場建設許可段階のセーフティケースに関する規制機関 (STUK) のレビュー報告書に示された操業許可申請に向けた課題	幌延深地層研究計画の今後の課題
<p>モニタリング:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 処分サイトの水理・地球化学・力学のモニタリングプログラム ✓ EBSモニタリングプログラム 	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積岩の緩衝能力を考慮した、埋め戻し時の地質環境およびEDZの回復現象(割れ目・透水性)の把握
<p>処分サイトの適切性:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ EBSに基づく性能目標及び性能目標と設計要件の関係性、基盤岩が維持すべき属性/設計要件と維持すべき岩盤特製の関係性の明確化 ✓ 建設に伴う擾乱を定められた設計要件の範囲内に維持する方法/建設活動の長期的影響の調査(EDZ、熱により誘発された亀裂)/閉鎖後の擾乱の回復 ✓ 長期にわたり岩盤が望ましい特性を維持すると予想される理由 ✓ 深度により変化する基盤岩性能が、処分場の安全性に与える影響の明確化(処分深度の設定) <p>✓ 亀裂ネットワークのモデル化の信頼性</p> <p>✓ 多様な地殻荷重条件下(氷河期など)での地震の影響</p> <p>✓ 地下水流動と地下水化学の整合性</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・地質環境特性と工学的対策のトレードオフ関係の具体化とその品質保証の検討 ・堆積岩の緩衝能力を考慮した、埋め戻し時の地質環境およびEDZの回復現象(割れ目・透水性)の把握 ・堆積岩の緩衝能を踏まえたEDZにおける物質移行挙動の把握 ・異なるダクティリティインデックスを有する(異なる深度の)堆積岩における緩衝能力の実証 ・堆積岩の緩衝能力を考慮した、埋め戻し時の地質環境およびEDZの回復現象(割れ目・透水性)の把握 ・処分場、人工バリア設計手法高度化(特に、処分深度) ・海外でも事例の少ない堆積岩の割れ目中の物質移行試験・評価手法の確立 ・長期変遷モデル・解析技術の実証

最近の国内外の動向：フィンランドの課題（2/2）

処分場建設許可段階のセーフティケースに関する規制機関 (STUK) のレビュー報告書に示された操業許可申請に向けた課題	幌延深地層研究計画の今後の課題
処分施設の位置決定: ✓ 処分場の展開位置の決定手法の明確化と評価 (岩盤分類ガイドライン)	・日本版RSCシステムならびに工学的対策に基づく廃棄体定置位置決定基準とその品質確認方法の構築
緩衝材、埋戻し材、閉鎖: ✓ 緩衝材・埋め戻し材の目標性能達成時間の不確実性の影響 ✓ 閉鎖構造物の予想性能 ✓ 緩衝材・埋め戻し材・閉鎖の性能に影響を与える要素とその不確実性	・緩衝材の膨出対策技術の実証 ・バイピング/エロージョン発生メカニズムの把握と抑制対策技術の実証 ・埋め戻し、隙間充填技術の高度化・実証 ・埋め戻し、力学・水理プラグの施工技術の実証及び品質管理手法の整備
実証、製造、設置試験: ✓ 処分概念の実現可能性の実証 ✓ EBSの搬送、再生可能な方法で定置する能力の実証	・多段配置などの他の概念オプションの実証 ・人工バリアの定置技術及び回収技術の実証

専門有識者1-2 必要性・研究内容

深地層の研究施設計画の概要：幌延深地層研究センター(北海道幌延町)


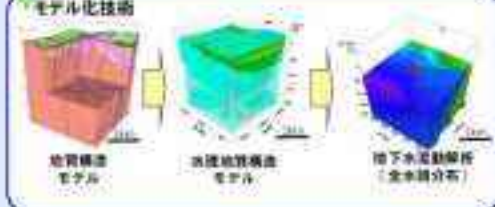
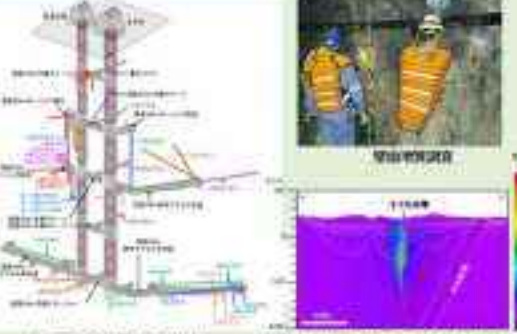
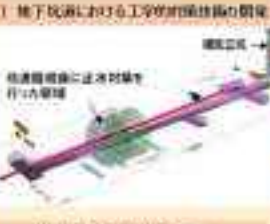
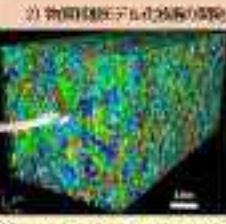

- 地上からの調査研究および地下施設の建設を通じた調査研究により、段階的に地質環境を調査評価する技術を整備するとともに、地下施設の建設・維持に必要な工学技術を整備することができた。また、処分場の設計や安全評価に必要な技術基盤の整備を進めている。
- これらの成果は、NUMOが行う地質環境調査や処分場の設計・安全評価、国による安全規制に反映される。

第1段階(2001年度～2005年度) 地上からの調査研究段階	第2段階(2005年度～2015年度) 坑道掘削時の調査研究段階	第3段階(2010年度～) 地下施設での調査研究段階			
<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 幌延町全域を対象とした調査を実施し、研究用地として適した領域を選定した。 先行した瑞浪の経験を参考にしつつ、堆積岩を対象として、必要な調査機器等を開発しながら、段階的に地質環境の調査およびモデル化を進めた。 <p>主な成果</p> <ul style="list-style-type: none"> 第1段階の地上からの調査によって地下の状態を予測したうえで、第2段階には、坑道を掘削しながら地下の状態を直に観察して、地上からの予測の妥当性を確認するとともに、周辺の岩盤や地下水の状態や変化を詳細に調べた。これらを通じて、段階的な調査によって地質環境を把握しモデル化していく技術を整備した。また、得られた地質環境情報をフィードバックしながら、地下施設を安全に建設・施工、維持・管理するための技術を整備した。 第3段階では、地下坑道を実験の場として活用し、人工バリア試験等により処分場の設計や安全評価に必要な技術の実証や現象理解の精緻化を進めている。 	<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 坑道の壁面観察や坑道内のボーリング調査により、周辺岩盤や地下水の性質、長期的な変化を把握した。あわせて、坑道掘削による周辺岩盤への影響を把握、モデル化した。 坑道の設計・建設・維持を通じて、技術の適用性を確認した。 処分場での使用が想定される低アルカリ性セメントの施工試験を実施し、実用性を確認した。 	<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 重点的に取り組むべき3つの課題を選定し、深度350mまでの地下坑道を利用して、模擬人工バリアを用いた試験など、原位置での実証的な試験を実施している。 			
<p>外部専門家による評価(深地層の研究施設計画検討委員会)</p> <ul style="list-style-type: none"> 全体として概ね適切に研究が進行され、当期5カ年の目標を達成できたと評価します。今後は、技術の確立が可能な水準に達するまで、人工バリア性能確認試験および処分概念オプションの実証に関する試験を継続するとともに、本地下研究施設が最先端の地層処分技術を実証するプラットフォーム(共通基盤)として国内外の関係者に広く提供・活用されることを期待します。 (地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の実証については、地層処分事業における処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形での指標活用に向けた具体化を期待します。) 					
<p>今後の展開 ◆これまでの成果を精査したうえで、以下の研究課題を設定</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td data-bbox="257 1308 560 1453"> <p>1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①人工バリア性能確認試験 ②物質移行評価手法の高度化 </td> <td data-bbox="571 1308 1164 1453"> <p>2. 処分概念オプションの実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①掘削・掘削技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 ②高温(100℃以上)などの境界的条件下での人工バリア性能確認試験 ③坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 </td> <td data-bbox="1176 1308 1960 1453"> <p>3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 ②地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験 ③地下水流れが変化する領域を調査・評価する技術の高度化 </td> </tr> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 10px;">これらの研究課題については、令和2年度以降、第3期及び第4期中長期目標期間を目標に取り組み、その上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、埋め戻しを行うことを具体的工程として示す。</p>			<p>1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①人工バリア性能確認試験 ②物質移行評価手法の高度化 	<p>2. 処分概念オプションの実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①掘削・掘削技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 ②高温(100℃以上)などの境界的条件下での人工バリア性能確認試験 ③坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 	<p>3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 ②地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験 ③地下水流れが変化する領域を調査・評価する技術の高度化
<p>1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ①人工バリア性能確認試験 ②物質移行評価手法の高度化 	<p>2. 処分概念オプションの実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①掘削・掘削技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 ②高温(100℃以上)などの境界的条件下での人工バリア性能確認試験 ③坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 	<p>3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 ②地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験 ③地下水流れが変化する領域を調査・評価する技術の高度化 			

専門有識者1-2 必要性・研究内容

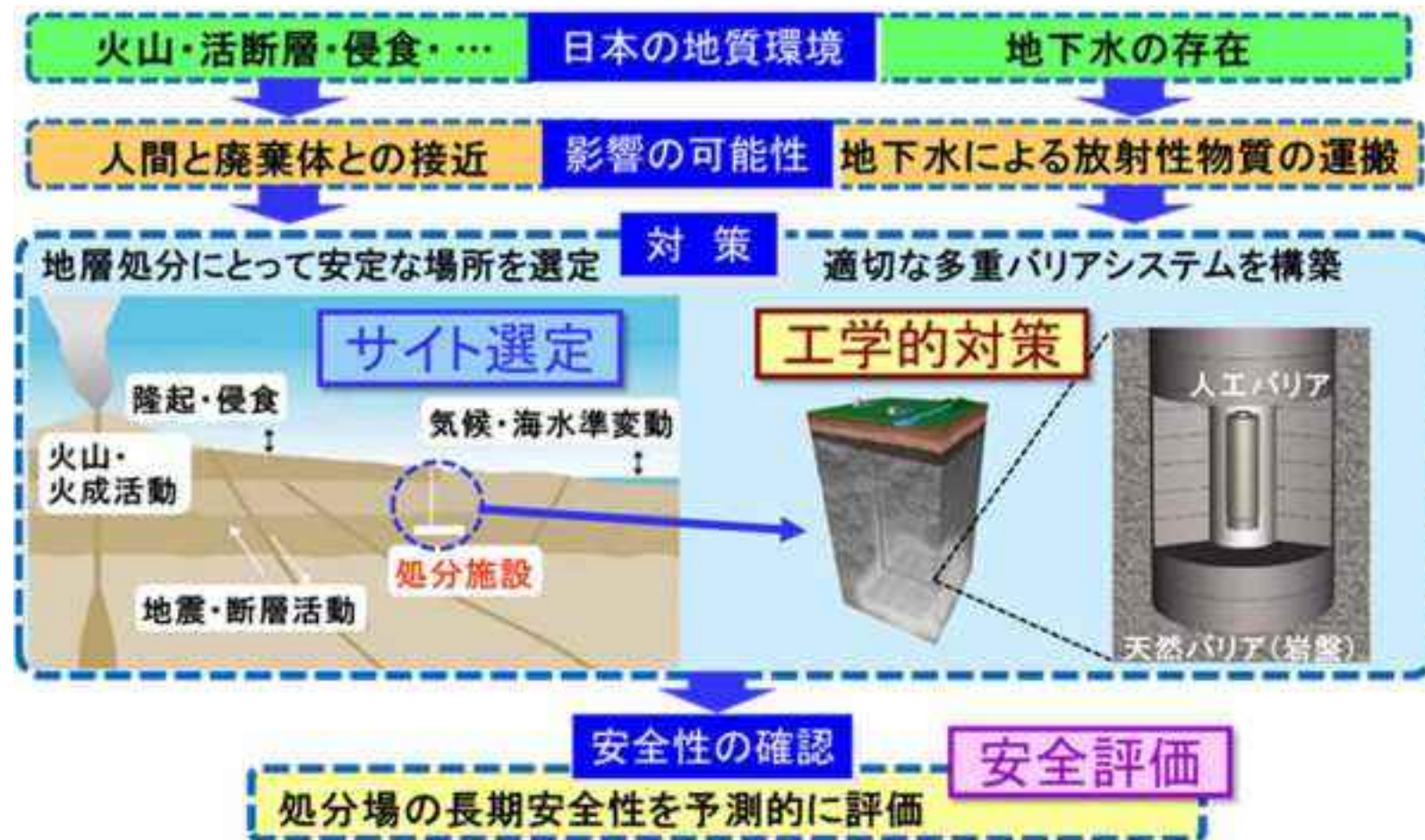
深地層の研究施設計画の概要:瑞浪超深地層研究所(岐阜県瑞浪市)

- 地上からの調査研究および地下施設の建設を通じた調査研究により、段階的に地質環境を調査評価する技術を整備するとともに、地下施設の建設・維持に必要な工学技術を整備することができた。
- これらの成果は、概要調査等の各調査段階において、NUMOが行う地質環境調査や国による安全規制に反映される。

第1段階(1996年度～2004年度) 地上からの調査研究段階	第2段階(2003年度～2013年度) 坑道掘削時の調査研究段階	第3段階(2010年度～2019年度) 地下施設での調査研究段階
<p>地上からの調査技術</p>  <p>モデル化技術</p> 		<p>① 地下坑道における工学的評価技術の開発</p>  <p>② 物理数値モデルの開発</p>  <p>③ 坑道閉鎖技術の開発</p> 
<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 地上からの物理探査やボーリング調査等により、地質構造や地下水の流れなどを確認するとともに、地下深部の環境に適応可能な調査機器等の開発を行った。 調査結果に基づき地質環境モデルを作成し、調査の進展に応じて、モデルを更新しつつ信頼性の向上を図った。 	<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 坑道の壁面観察や坑道内のボーリング調査により、周辺の岩盤や地下水の性質を確認し、その長期的な変化を観測した。あわせて、坑道掘削による周辺岩盤への影響を把握、モデル化した。 地下坑道の設計・建設・維持を通じて、先行ボーリング調査や湧水対策などを含む工学技術の適用性を確認した。 	<p>概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 深度500mまでの地下坑道を利用した調査研究として重点的に取り組むべき3つの課題を選定し、原位置での試験を実施している。2019年度までの調査研究により、当初目標とした成果が得られる見込みである。 <p>各課題で開発した主な技術</p> <ol style="list-style-type: none"> 坑道への湧水量を大幅に低減させる止水技術 亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動を評価するための試験・モデル化技術 坑道閉鎖に伴う環境回復を評価するための試験技術
<p>主な成果</p> <ul style="list-style-type: none"> 第1段階の地上からの調査によって地下の状態を予測したうえで、第2段階には、坑道を掘削しながら地下の状態を直に観察して、地上からの予測の妥当性を確認するとともに、周辺の岩盤と地下水の状態や変化を詳細に調べた。これらを通じて、段階的な調査によって地質環境を把握しモデル化していく技術を整備した。また、得られた地質環境情報をフィードバックしながら、地下施設を安全に建設・施工、維持・管理するための技術を整備した。 第3段階には、地下坑道を実験の場として活用し、原位置試験等により処分場の設計や安全評価にとっても重要となるような地質環境情報を取得した。 		
<p align="center">外部専門家による評価(深地層の研究施設計画検討委員会)</p> <p>全体として概ね適切に研究が遂行され、所期の目標を達成できたと評価します。今後は、得られたデータや知見が地層処分研究開発全体の枠組みの中にフィードバック・継承されるとともに、関連分野の研究開発・人材育成に最大限有効に活用されるよう、国内外に広く提供・展開されることを期待します。</p>		

➤ 2019年度までの調査研究をもって当初の目標を達成できることから、研究開発を終了し、埋め戻しに着手する。

地層処分の基本的概念



地層処分において想定されるリスク・シナリオ

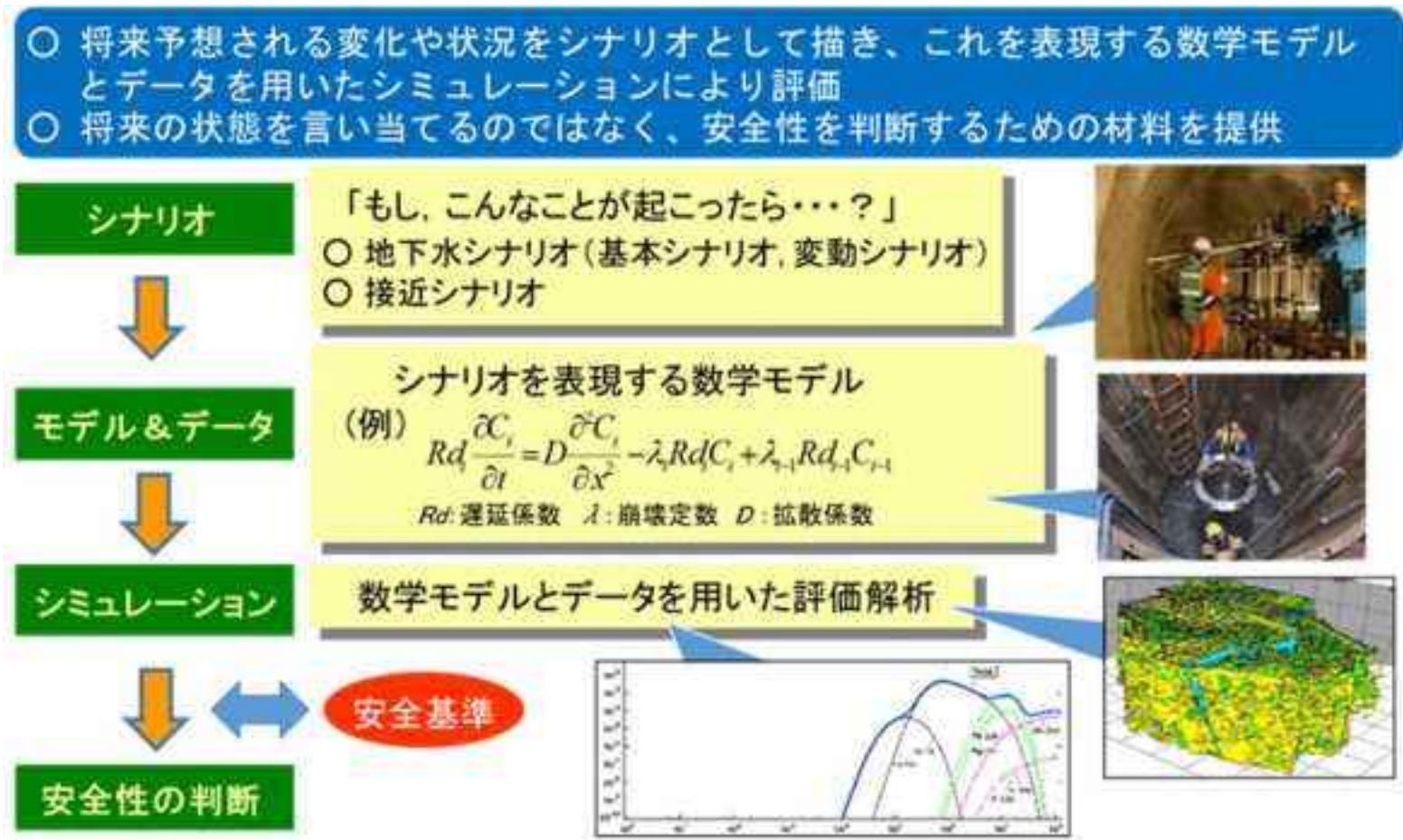
地層処分の基本的概念

天然の地層と人工物との組み合わせによる**多重バリアシステム**



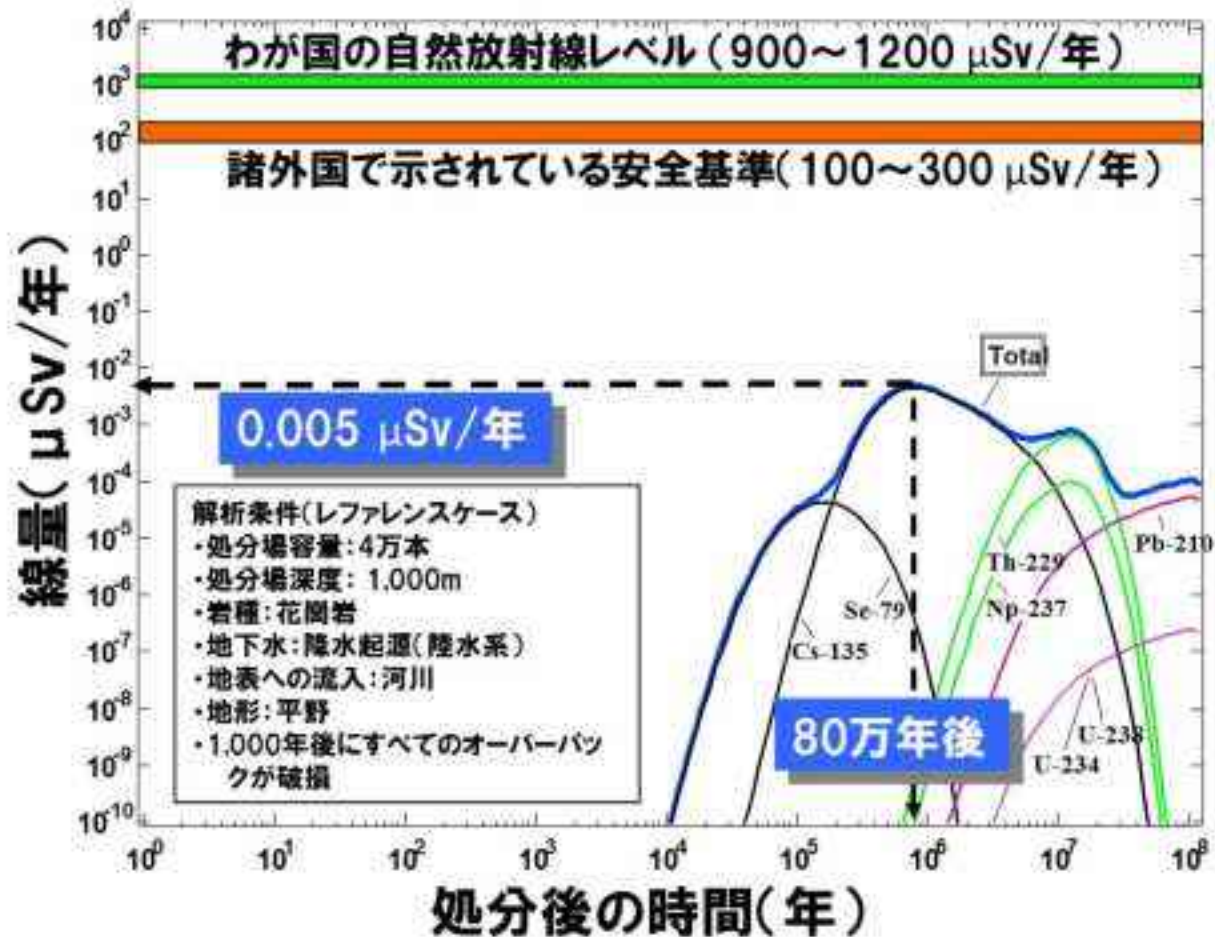
地層処分における物質の閉じ込め機能

地層処分**の**基本的概念



地層処分システムの安全評価の手順

地層処分の基本的概念



地層処分システムの安全評価の結果の例 (第2次取りまとめ)

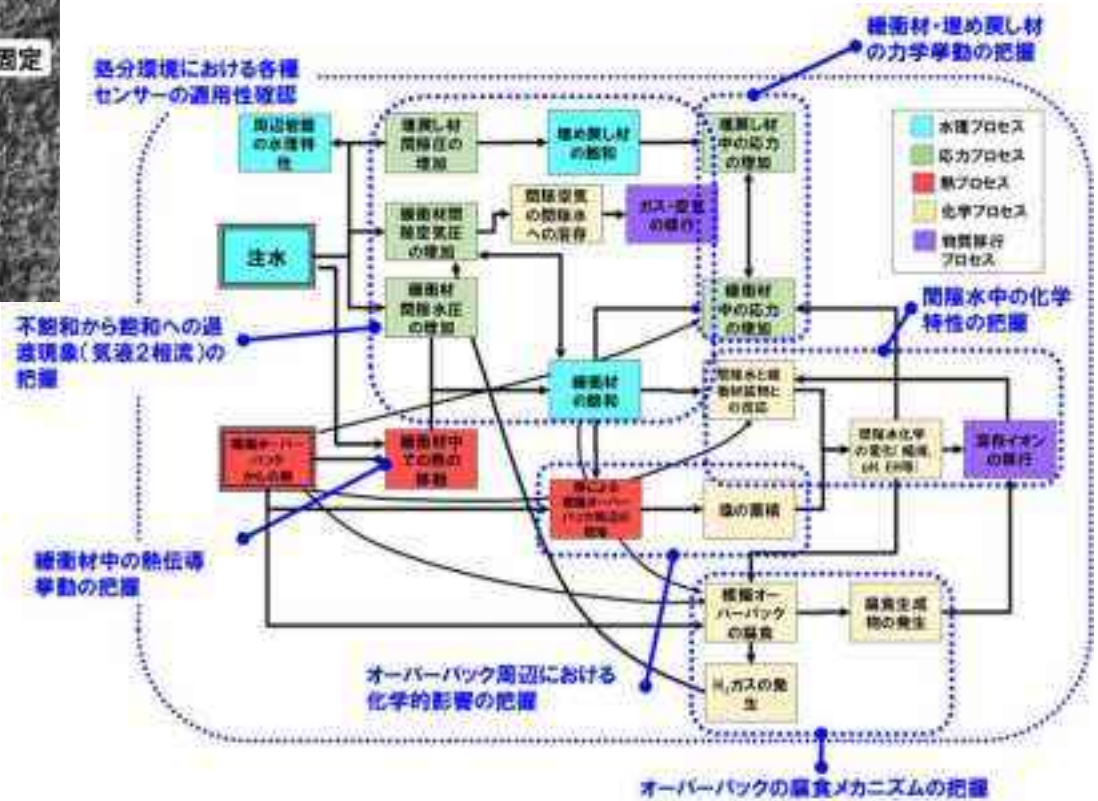
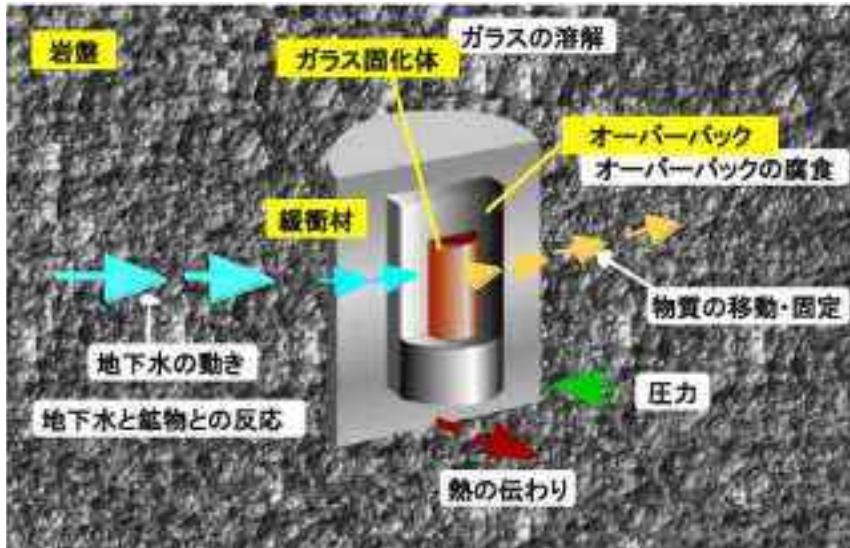
地層処分の基本的概念

安全評価に用いる対象核種と放射能イベントリー(ガラス固化体)

核種	半減期 [y]	放射能 [Bq/本]	核種	半減期 [y]	放射能 [Bq/本]
炭素-14	5.7×10^3	1.2×10^8	ウラン-234	2.5×10^5	9.8×10^7
塩素-36	3.0×10^5	4.8×10^8	ウラン-235	7.0×10^8	3.0×10^6
セレン-79	3.0×10^5	3.2×10^9	ウラン-236	2.3×10^7	4.6×10^7
ストロンチウム-90	2.9×10	8.2×10^{14}	ウラン-238	4.5×10^9	3.9×10^7
ジルコニウム-93	1.5×10^6	7.2×10^{10}	ネプツニウム-236	1.5×10^5	2.3×10^5
ニオブ-93m	1.6×10	6.4×10^{10}	ネプツニウム-237	2.1×10^6	1.4×10^{10}
ニオブ-94	2.0×10^4	1.5×10^8	プルトニウム-236	2.9	2.9×10^4
テクネチウム-99	2.1×10^5	5.2×10^{11}	プルトニウム-238	8.8×10	5.4×10^{11}
スズ-126	2.3×10^5	1.1×10^{10}	プルトニウム-239	2.4×10^4	6.8×10^{10}
ヨウ素-129	1.6×10^7	3.8×10^7	プルトニウム-240	6.6×10^3	3.3×10^{11}
セシウム-135	2.3×10^6	1.8×10^{10}	プルトニウム-241	1.4×10	2.2×10^{12}
セシウム-137	3.0×10	1.2×10^{15}	プルトニウム-242	3.8×10^5	4.2×10^8
鉛-210	2.2×10	7.6×10^2	プルトニウム-244	8.0×10^7	1.3×10^2
ラジウム-226	1.6×10^3	1.6×10^3	アメリカシウム-241	4.3×10^2	3.5×10^{13}
ラジウム-228	5.8	3.3	アメリカシウム-242m	1.4×10^2	2.0×10^{11}
アクチニウム-227	2.2×10	8.8×10^4	アメリカシウム-243	7.4×10^3	8.1×10^{11}
トリウム-228	1.9	5.6×10^6	キュリウム-243	2.9×10	1.9×10^{11}
トリウム-229	7.3×10^3	1.1×10^4	キュリウム-244	1.8×10	1.4×10^{13}
トリウム-230	7.5×10^4	8.7×10^4	キュリウム-245	8.5×10^3	1.7×10^{10}
トリウム-232	1.4×10^{10}	3.3	キュリウム-246	4.8×10^3	2.8×10^9
プロトアクチニウム-231	3.3×10^4	1.1×10^5	キュリウム-247	1.6×10^7	1.1×10^4
ウラン-232	6.9×10	5.5×10^6	キュリウム-248	3.5×10^5	3.4×10^4
ウラン-233	1.6×10^5	3.0×10^6			

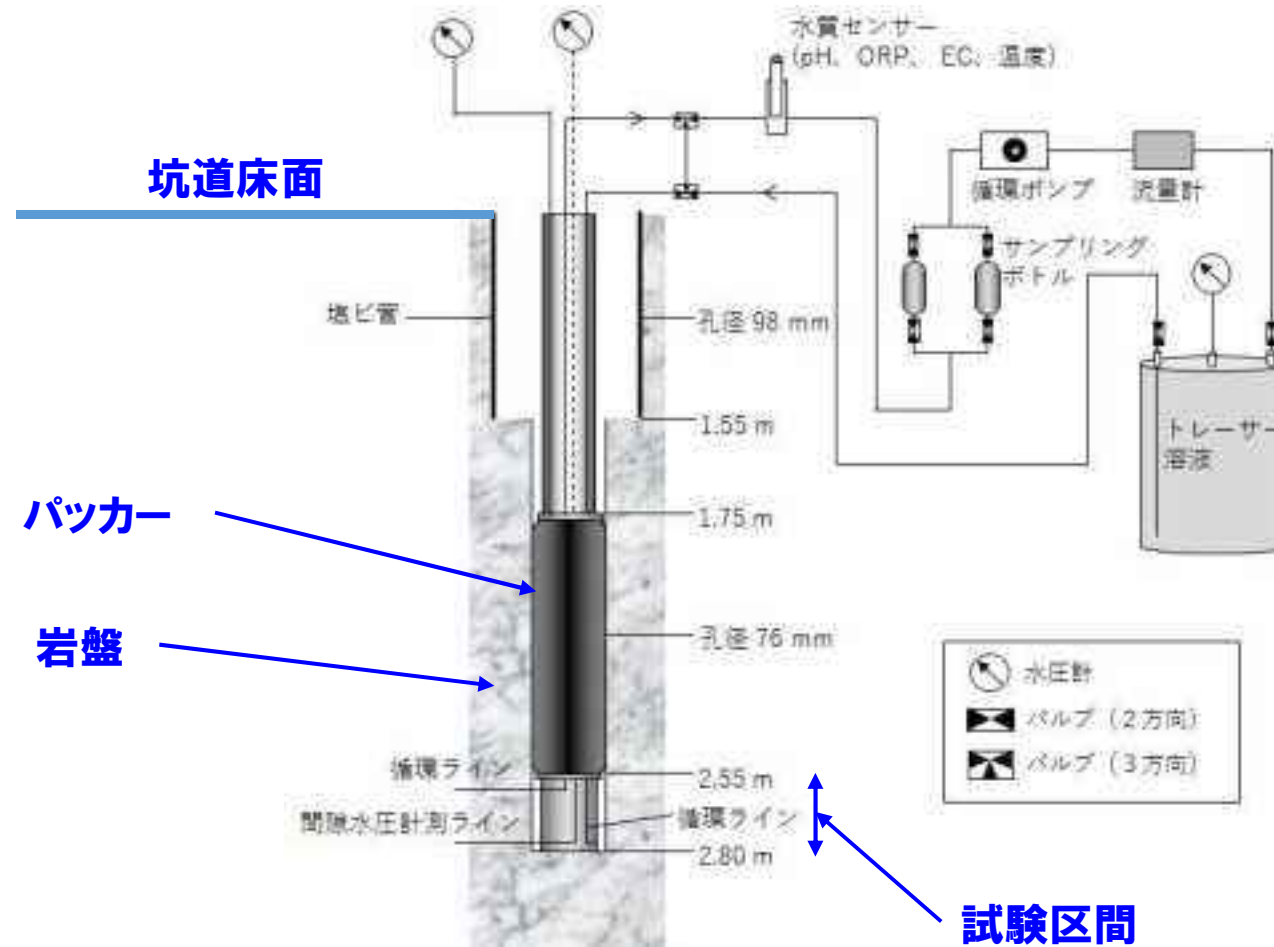
NUMO包括的技術報告書(レビュー版)を和訳

人工バリア周辺で生じる現象



人工バリア性能確認試験で考慮する複合現象

トレーサー試験装置の概念図



専門有識者3-2更問、専門有識者4-9更問 必要性・研究内容

物質移行試験について

専門有識者3-2(p31)

更問1: 資料集59ページのセシウムとストロンチウムの図で、濃度比になっていますが、濃度としては何ppm位になりますか。

トレーサー濃度とバックグラウンド濃度

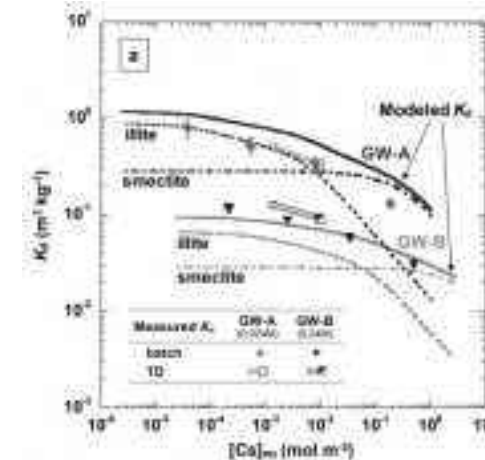
	注入濃度	バックグラウンド濃度
Cs(セシウム)	100 ppm	数ppb
Sr(ストロンチウム)	20 ppm	数ppm

更問2: 低濃度域と高濃度域で同一であるというのは岩盤であるからという理解でよろしいでしょうか。

更問3: 岩盤と粘土は明らかに収着に関する現象が違うという理解でよろしいでしょうか。

更問4: 濃度依存性はないということですか。

- ✓ 幌延の珪質泥岩中には粘土鉱物(イライト、スメクタイトともに10~10数%程度)が含まれており、これら粘土鉱物の寄与が支配的である吸着に寄与するという点で、粘土(緩衝材)における吸着現象と同様に取り扱えると考えております。
- ✓ 低濃度域では、粘土鉱物層のエッジ付近への吸着が支配的であるのに対し、より高濃度域ではエッジ付近の吸着サイトが飽和し、粘土鉱物層の表面への吸着が支配的になります。
- ✓ 一般的には吸着には濃度依存性があることが知られています。資料集59ページの図は、バックグラウンド中に含まれる天然の安定同位体の濃度が収着分配係数に与える影響を評価したものになります。使用したトレーサー濃度(20ppm)に対してバックグラウンド濃度(数ppm)が高いストロンチウムにおいてもバックグラウンド濃度の考慮/未考慮によって収着分配係数へ与える影響の差異が小さいと考えられることから今回の実験におけるバックグラウンド濃度レベルにおいては収着分配係数に対する濃度依存性の影響は小さいと考えております。



室内試験によるCsの収着分配係数の濃度依存性の検討

専門有識者4-9(p34)

更問5: 研究を継続する部分として得られるものの優先順位、研究の必要性の部分に戻った時に、それぞれの項目の中で、こういうパラメーター、こういう結果を得ることが、色々な実験をすれば様々な結果を得ることになるが、その優先順位、重要性を具体的な実験と関連づけて説明してほしい。

- ✓ 物質移行試験において重要な要素として、核種の移行経路と核種の移行に影響を及ぼす要因の2つをあげることができます。核種の移行経路としては、健岩部、割れ目、断層、掘削影響領域があります。核種の移行に影響を及ぼす要因としては、地下水の地球化学的特性(pH、酸化還元状態等)、微生物・有機物等をあげることができます。これらは、いずれも核種の移行を評価するうえで欠くことができない要素ですので、優先順位をつけるのは困難です。

トレーサー試験で回収した岩石試料を用いた室内試験

中央付近に単一割れ目を含む岩石試料

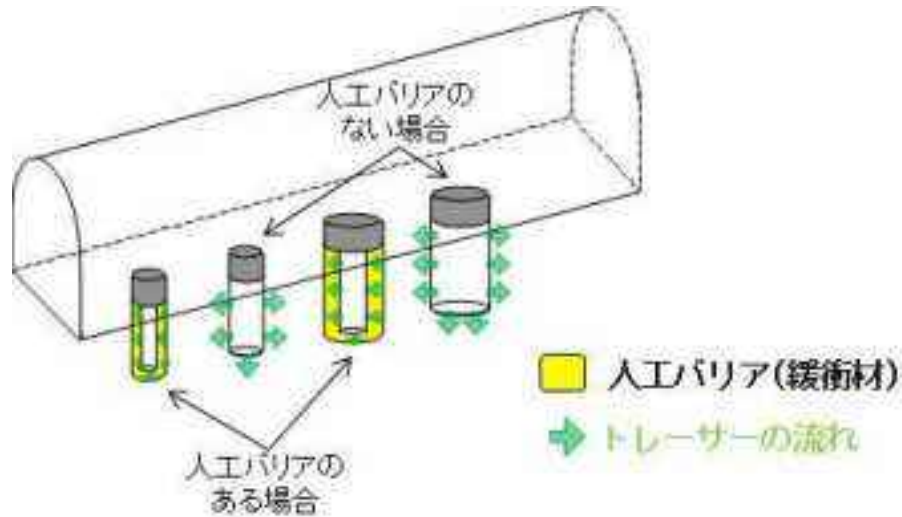


下流側

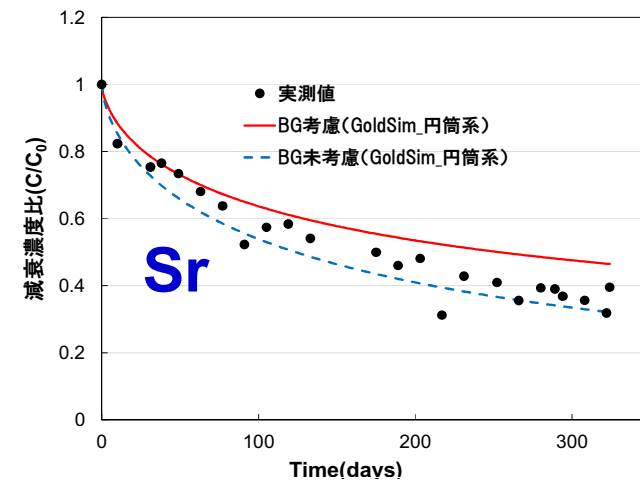
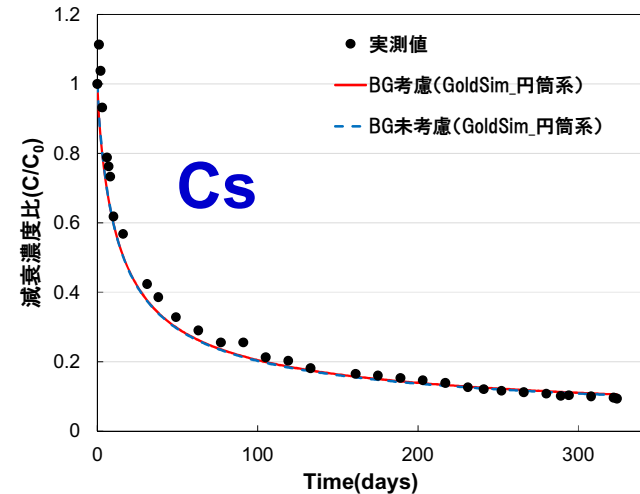
上流側
(トレーサー注入側)

通水方向

トレーサー試験の結果

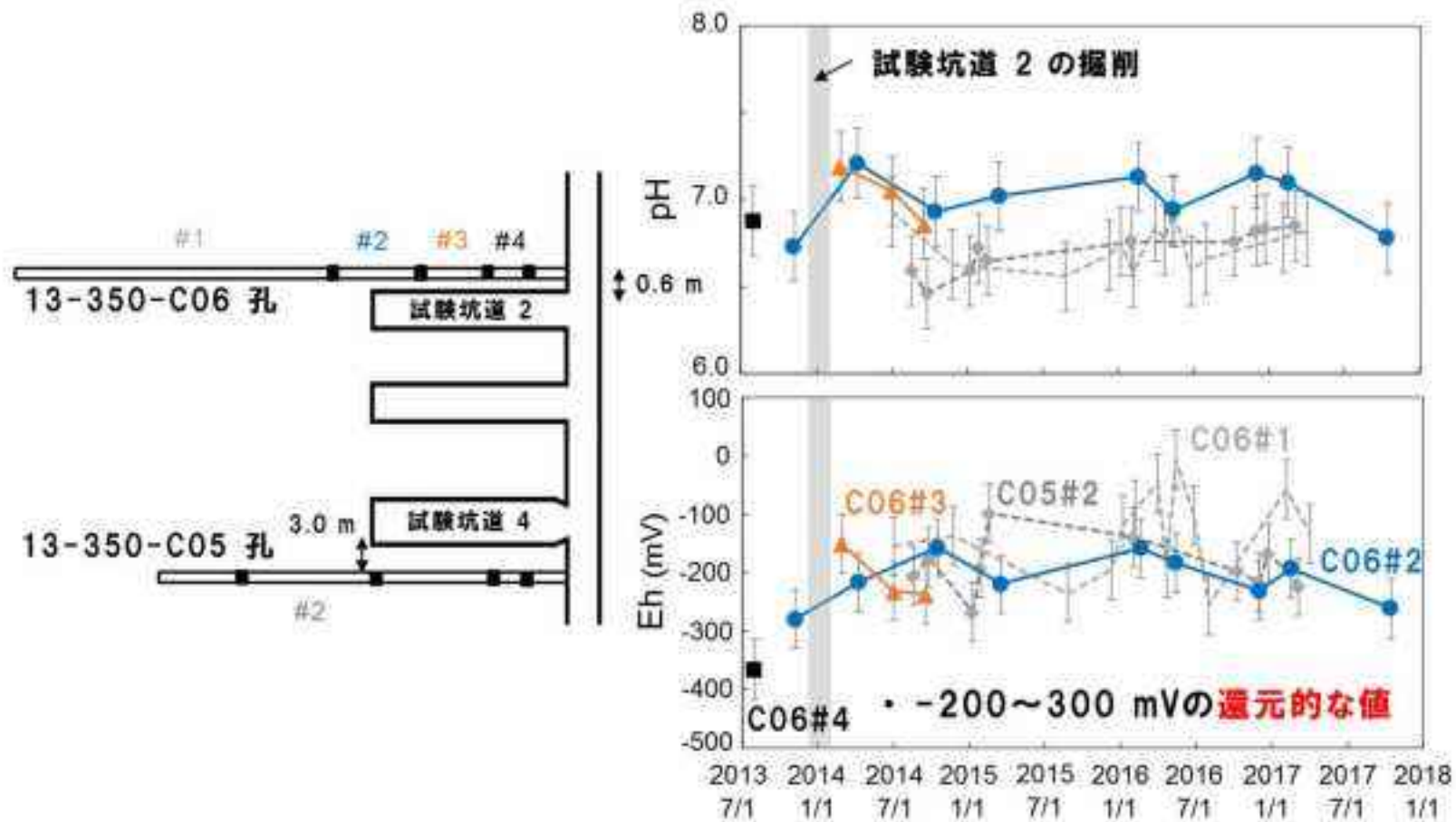


物質移行試験
 (第1回確認会議資料p9の図を再掲)



トレーサー試験の結果(セシウムとストロンチウム)
 (緩衝材の無いケース)
 (第1回確認会議資料p13の図を再掲)

微生物を使った物質移行試験



350m調査坑道周辺の地下水のpHと酸化還元電位の経時変化

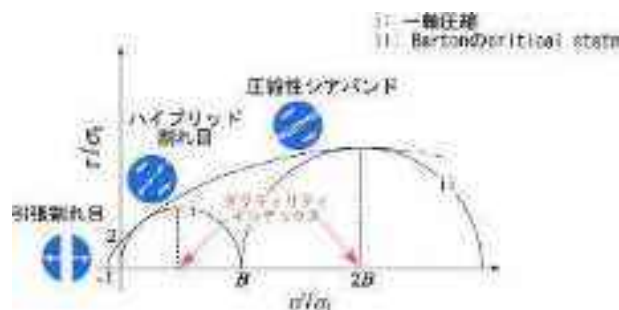
DI(ダクティリティーインデックス)の概念

- DI (ダクティリティーインデックス) ※は、地層に力が掛かった時に、地層が変形したり、地層に割れ目ができて壊れたりするかどうかを判断するための目安として考えたものです。
- 例えば、粘土のような柔らかい材料では、力が掛かった時に、変形はするものの、割れ目ができて壊れるようなことは起こりにくいものです。一方、レンガのような固い材料では、力が掛かった時に、ある程度は変形せずに形は保たれますが、やがて割れ目ができて壊れます。
- DIによって、このような「地層の柔らかさ・固さ」と「掛かる力」から、「それを受けて変形するのか、割れ目ができて壊れるのか」を数値で判断できます。DIの値が大きくなると、変形はするものの大きく壊れることはなく、小さくなるとその逆となります。DIの値は、地層の水の通り易さの目安にもなります。

※ダクティリティー：延性度 (=柔軟性、しなやかさ)、インデックス：指標

DIの詳細な説明

岩盤に作用している平均応力を岩盤の引張強度で割った値として定義しました。岩盤に作用している応力と引張強度との関係なので、岩盤が破壊するとき延性的に破壊するのか、脆性的に破壊するのかといった破壊形態も表現できます。岩盤の破壊を表現するモール円との関係で表現します。類似のパラメータとして、地山強度比があり(岩盤の一軸圧縮強度を土被り(鉛直応力)で割った値で定義)、トンネルや坑道掘削のしやすさの目安として土木分野で良く用いられています。DIは圧縮強度の代わりに引張強度を使うことで、岩盤の透水性との相関もみることができます。



断層に作用する応力状態とダクティリティーインデックスの関係

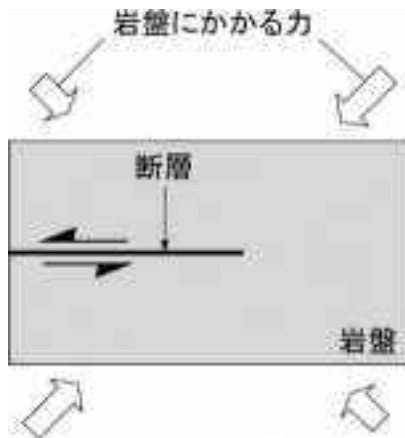
- ダクティリティーインデックス(DI)：平均応力を引張強度で除した値 (=引張強度で標準化したモール円の中心位置)
- 断層帯中の水みちの透水性はダクティリティーインデックスが大きくなるほど小さくなる
 - 2以上：せん断割れ目(圧縮性シアバンド)が形成
 - 2未満：引張・ハイブリッド割れ目が形成

幌延の深度350mの地質は珪質泥岩で、圧縮強度は平均で20MPa程度です。学会の分類によると軟岩に分類されますが、軟岩の中では強度が大きい方に分類されます。DIは2未満です。

ダクティリティーインデックス(DI)の概念

岩盤の水の流れやすさを四次元的
 (三次元+時間変化)に推定するた
 めのパラメーター

既にある断層に力がかかると断層は動く



岩盤にかかっている力と
 岩盤の固さのバランス
 (DI)で割れ目ができるか
 変形するのかが決まる

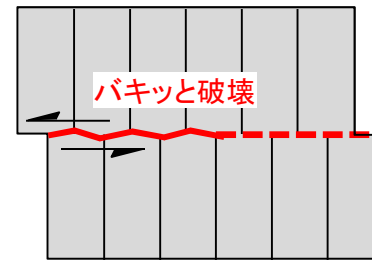
$$DI = \frac{\text{岩盤にかかる力}}{\text{岩盤の固さ}}$$

- ※岩盤にかかる力は深度が深くなると大きくなります
- ※岩盤にかかる力は平均応力を用います
- ※岩盤の固さは引張強度を用います

レンガのような固いイメージ



DIが小さい(岩盤にかかる力に対して
 岩盤が十分に固い)と割れ目ができる

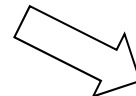
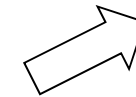


将来的に水が
 流れやすい岩盤

$DI < 2$

$DI \gg 2$

この違いを数値で判断できる



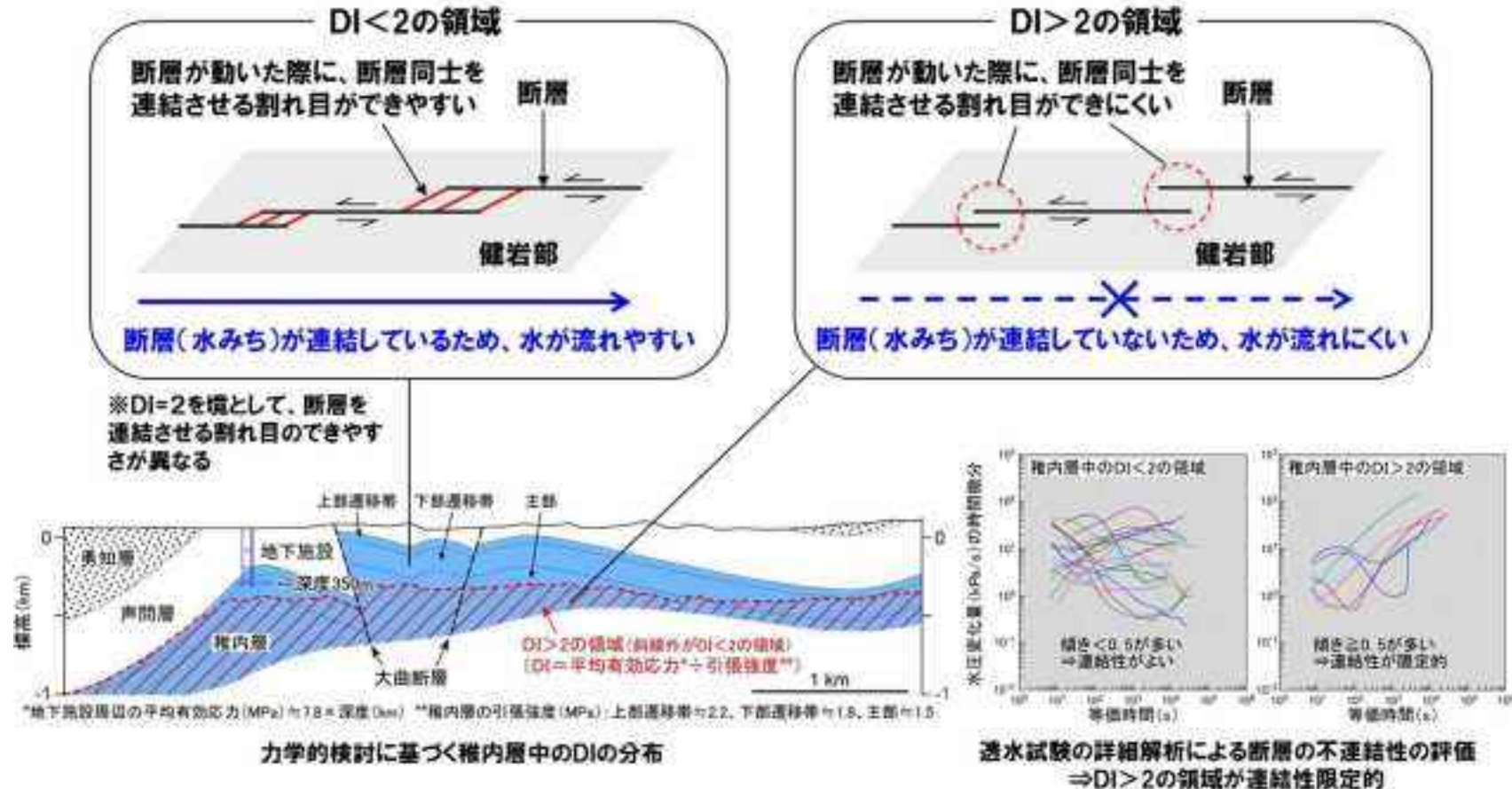
将来的に水が
 流れにくい岩盤

DIが大きい(岩盤にかかる力に対して岩盤が十分
 に柔らかい)と変形する(割れ目はできない)



粘土のような柔らかいイメージ

断層の連結性とダクティリティーインデックスの分布



力学的検討に基づく権内層中のDIの分布

透水試験の詳細解析による断層の不連結性の評価
 ⇒ DI > 2の領域が連結性限定的

断層の不連結性のDI依存性
 (第4回確認会議 資料集p43に追記)

深地層研究所(仮称)計画と令和2年度以降の研究課題の関係

深地層研究所(仮称)計画	令和2年度以降の研究課題
<p>4.3地層科学研究の内容 深部地質環境特性に関する研究として、上記のような特徴を持った地層の力学的な特性や熱の影響をみる熱的特性、塩水と淡水の塩淡境界に着目した地下水の流動・水質及び物質移動、さらに坑道掘削による影響を明らかにしていくこと【F】が主要な研究課題となります。～ ～これにより、「第2次取りまとめ」で示される予定の地層処分に係わる適切な地質環境の要件に関し、実施主体が行う処分地の選定に求められるデータの種類の精度の決定に資することとします。【D】</p> <p>(3) 坑道を利用して行う調査研究 ～～また、地層中に非放射性的トレーサーを注入し、その動きを観察することにより地層中での水や物質の挙動を実際に確認します。【B】～</p> <p>4.4地層処分研究開発の内容 (1) 処分システムの設計・施工に関する技術の開発 ・処分施設の設計・建設などに関する技術の開発【C】【D】【G】 具体例:軟岩の坑道掘削、保安技術の開発 ・密閉(シーリング)技術開発【C】【D】【G】 具体例:割れ目帯や坑道掘削損傷領域の注入技術(グラウト)、密閉(プラグ)による止水技術開発【C】【D】【G】 ・処分システムの施工技術開発・品質確認 具体例:処分システムの熱・水・応力の相互作用を明らかにする試験の施工に関する技術開発【A】【E】</p> <p>(2) 安全評価手法の信頼性確認 ・人工バリア材の化学的健全性評価研究:模擬ガラス固化体、オーバーパック材、緩衝材の腐食などの化学的耐久性に関するデータを実際の地下水を使っての取得、腐食などに関するモデルの妥当性の評価【A】【D】【E】 ・処分システムに対する熱・水・応力の相互作用を明らかにする試験:模擬発熱体と人工バリア・天然バリア、さらには地下水の組み合わせによる地下水の流れの研究や応力に関するデータの取得と、それらの解析モデルの妥当性の評価【A】【D】【E】 ・緩衝材・岩石中の物質移動評価研究:非放射性的トレーサーを用いて緩衝材と岩石中の物質の収着・移行に関するデータの取得、それらの解析モデルの妥当性の評価【B】【D】【F】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・実際の地質環境における人工バリアの適用性確認 今後は、注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸潤させた場合のデータを取得します。その後、減熱時のデータを取得します。加えて、人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度の確認を実施します。【A】 今後は、確立した試験手法を用いて掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物が放射性物質を取り込んだ移動する影響が限定的であることを確認するためのトレーサー試験を実施します。【B】 ・処分概念オプションの実証 今後は、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法(締固め、ブロック方式等)の違いによる緩衝材の品質の違いを把握するとともに、埋め戻し方法(プラグの有無等)・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを実証試験で明らかにします。【C】 更に、人工バリアの品質を踏まえて、廃棄体の設置方法(間隔など)を実証試験で確認します。【D】 また、人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法を開発します。【E】 ・地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 今後は、より大型の断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力(自己治癒能力)の作用に関する実証試験を実施します。さらには、地下水が動いていない環境を調査してモデル化する技術を実証するとともに【F】、人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を解析する手法を開発します。【G】

当初計画における研究期間20年程度について

当初計画において、以下の3つの調査研究段階を6～10年程度でラップさせながら実施していく工程を検討して、全体で20年程度を想定したものです。

- ・第1段階「地上からの調査研究段階」
- ・第2段階「坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階」
- ・第3段階「地下施設での調査研究段階」

当初計画における研究スケジュール



妥当性・研究計画

平成10年当時と現在の研究開発の取り巻く環境や状況変化

研究開発を取り巻く環境の技術的な側面の変化として、以下のような点を挙げるすることができます。

- 可逆性・回収可能性の担保(国際的な議論¹⁾、「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)における記載²⁾
- 「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」(平成18年)の策定
- NUMOの地層処分研究開発に関わる主導的役割(地層処分研究開発調整会議において策定した全体計画へのNUMOニーズの反映)³⁾
- 特殊法人(サイクル機構)から独立行政法人(原子力機構)への移行を機に第三者評価の導入⁴⁾
- 平成26年度の機構改革により、必須の課題に絞り込んだ取り組み⁵⁾

¹⁾ 例えば、フランスの「放射性廃棄物等管理計画法」制定など。

²⁾ 「最終処分事業は長期にわたる事業であることを踏まえ、最終処分を計画的かつ確実に実施させるとの目的の下で、今後の技術その他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保するものとする。」

³⁾ 「最終処分関係行政機関等の活動状況に関する評価報告書」(原子力委員会 平成28年)

⁴⁾ 例えば、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成20年)。

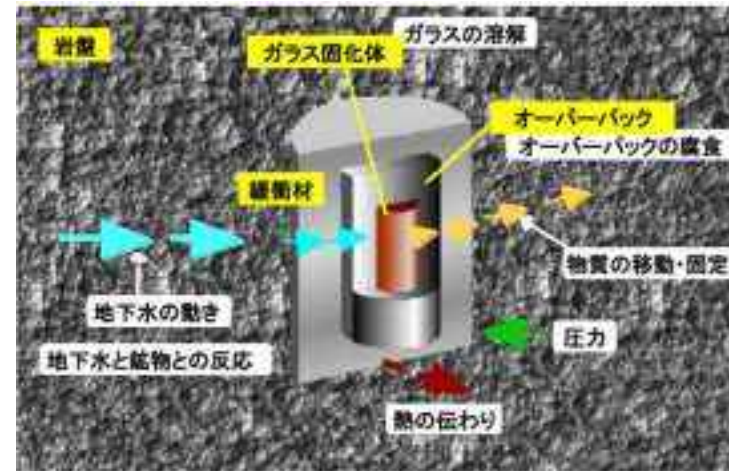
⁵⁾ 「日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書－今後の研究課題について－」(平成26年)。

妥当性・研究内容

人工バリア性能確認試験で得られる成果の意義

- 第2次取りまとめ(1999)では、仮想の地質環境を幅広く設定して、処分場や人工バリアを設計し、安全評価を実施しました。この評価においては、人工バリアや地質環境において、例えば、オーバーバック1000年で機能を失うなどの保守的な条件を設定しています。
- その結果、諸外国で設定されている安全基準を下回っていることから、日本においても地層処分が可能との判断がなされました。
- 一方で、実際の地質環境に調査技術やモデル化・解析技術を適用して、その有効性を実証することが第2次取りまとめ以降の重要な課題となり、幌延の深地層の研究施設計画を開始しました。

- ✓ 幌延で実施している人工バリア性能確認試験で得られる成果としては、我が国に広く存在する堆積岩における人工バリアやその周辺で生じる、**熱-水-応力-化学連成現象を把握**することや、**連成モデルや解析ツールの有効性**が示されることです。
- ✓ 現象を把握することの具体例としては、熱によるオーバーバック周辺の乾燥に伴う塩の蓄積などです。
- ✓ 現象を正しく理解することで、**安全評価で想定しているシナリオが適切である**ことを示すことができます。このことが重要と考えています。
- ✓ さらに、第2次取りまとめで示した**人工バリアの仕様(緩衝材の厚さなど)**を**合理化**する際の設計の妥当性を評価するツールの整備と位置づけることができます。



人工バリア周辺で生じる現象
(第3回確認会議 資料集p10を再掲)



人工バリア性能確認試験で考慮する複合現象
(第3回確認会議 資料集p24を再掲)