

## 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開

### (3) タスク B：処分技術の実証と体系化

早野明<sup>\*1</sup>

高レベル放射性廃棄物の処分場の設計・建設では、坑道スケール～ピットスケールの岩盤に分布する断層・割れ目や坑道掘削後に生じる掘削損傷領域が、処分坑道などの施工性や人工バリアの長期安定性などに及ぼす影響を考慮しながら、処分坑道や処分ピット（処分孔）を合理的に配置するために、指標を設定することが考えられている。また、掘削される坑道やその周辺岩盤に発生する掘削損傷領域が水みちになることで地上と地下施設が直結する物質移行経路となることを防ぐために、坑道埋め戻しや止水プラグといった坑道シーリング技術による対策が考えられている。幌延国際共同プロジェクトのタスク B では、新第三紀堆積岩類を対象とした幌延深地層研究センターの地下施設での調査・施工を事例に、処分坑道や処分孔を配置するための指標設定を試行するとともに、処分場の設計・施工・操業・閉鎖などに関連する技術オプションを体系的に例示する。現在、国内外の既存事例や参加機関から提供される情報に基づき、処分坑道や処分孔の配置および人工バリアの位置に関連して、岩盤の力学的強度低下、湧水による処分坑道・処分孔への影響、あるいは人工バリアへの影響に着目し、これらに関連する特徴を予測する解析に取り組んでいる。この予測の妥当性を確認するための 500 m 試験坑道 8、9 での調査・施工・試験、および 350 m 試験坑道 6 での坑道埋め戻しと止水プラグ設置の実規模スケールの施工試験は、今後、HIP のフェーズ 2 において実施される。

**Keywords:** 幌延国際共同研究プロジェクト、タスク B、処分場設計、施工・操業技術、坑道埋め戻し、止水プラグ設置

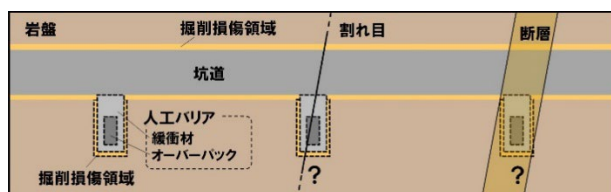
In the design and construction of a repository for high-level radioactive waste, it is considered to set criteria for the rational locating of disposal tunnels and holes, taking into account the effects of faults and fractures distributed in the host rock at the tunnel to pit scale and excavation damaged zones (EDZs) that occur after tunnel excavation on the workability of the disposal tunnels and the long-term stability of the engineered barriers. In addition, tunnel sealing technologies such as tunnel backfilling and hydraulic plugs will be considered to prevent short-circuit flow of radionuclides through the excavated tunnels and the surrounding EDZs. In Task B of the HIP, we will attempt to establish criteria for the layout of disposal tunnels and holes, and the systematic integration of technical options related to the design, construction, operation and closure of the repository, using the investigation and construction at the Horonobe URL for Neogene sedimentary rocks as a case study. Based on information provided by the participating organisations and existing case studies from Japan and overseas, the current focus is on the reduction of the mechanical strength of the rock mass, the effects of water inflow on disposal tunnels and holes, or the effects on engineered barriers, in relation to the locating of disposal tunnels and boreholes and the emplacement of engineered barriers, and is currently working on analyses to predict features associated with these. Investigation, construction and testing of the 500 m niches No. 8 and No. 9 to confirm the validity of these predictions, and full-scale tunnel backfilling and hydraulic plug installation test in the 350 m Niche No. 6, will be carried out in Phase 2 of the HIP.

**Keywords:** Horonobe International Project (HIP), Task B, Repository design, Construction and operation technology, Tunnel Backfilling, Installation of hydraulic plugs

## 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物処分場の設計・施工時において、Fig. 1 に示す通り、処分坑道や処分ピット（処分孔）を配置しようとする岩盤に断層や割れ目が分布し、また、坑道掘削に伴い掘削損傷領域（EDZ）が発達することが想定される。坑道周辺の断層や割れ目の規模や水理特性、EDZ の発達に伴う水理学的・力学的特性の変化などの地質環境特性は、処分坑道などの施工性や人工バリアの長期安定性に及ぼす影響などを考慮して、処分坑道や処分ピット（処分孔）の配置や施工の可否を判断する際の指標として設定される[1]。この指標に基づき処分坑道および処分孔を合理的に配置する手法や技術の信頼性向上には、地下研究施設において、処分場で想定される初期の地質環境調査・評価から、処分坑道および処分孔の設計および最終的な建設までの一連のプロセスの実証を通じて、その妥当性を確認することが重要である。このような指標は、例えば、フィンランドやスウェーデンの結晶質岩を対象に策定されているものの[2,3]、堆積岩を対象に検討されている事例はない。幌延国

際共同研究プロジェクト（HIP）が対象とする幌延地域に分布する新第三紀堆積岩類からなる岩盤では、坑道掘削に伴い坑道周辺に EDZ が形成され、水理学的・力学的特性が変化する。また、地層や領域によって水理学的連結性の程度に違いはあるが、水みちとして機能する断層やそれに付随する割れ目が分布している。これらは、岩盤に対して不均質性を生じさせる要因である。このように不均質性を有する母岩に対して、その特徴を理解しながら処分坑道や処分孔を配置するための概念・指標を策定することは重要であり、それを行うための方法論を構築する必要がある。



**Fig. 1** Schematic illustration showing the layout of the disposal tunnels/holes and the geological structures considered.

Current Status and Future Prospects of the Horonobe International Project,  
(3) Task B: Systematic Integration of Repository Technology Options by Akira HAYANO (hayano.akira@jaea.go.jp)

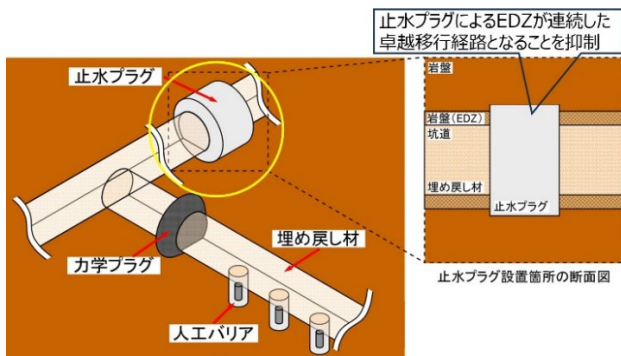
<sup>\*1</sup> 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター  
Horonobe Underground Research Center, Japan Atomic Energy Agency  
〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2

本稿は、日本原子力学会 2024 年秋の大会企画セッション「幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開」における講演内容に加筆したものである。

また、掘削される坑道やその周辺岩盤に発生する EDZ が水みちになることで地上と地下施設が直結する物質移行経路となることを防ぐために、坑道埋め戻しや止水プラグといった坑道シーリング技術による対策が考えられている

[1] (Fig. 2). このような地層処分における一連のプロセスにおいて適用する技術オプションもまた、地下研究施設において、その適用性を確認することが重要である。以上のような背景を踏まえ、HIP のタスク B では、新第三紀堆積岩類を対象とした幌延深地層研究センターの地下施設（以下、幌延 URL）での調査・施工を事例に、以下を実施することを目的としている。

- 処分場の操業に貢献し得る技術オプションを開発すること。
- 処分坑道周囲の好ましい適性を有する母岩に、処分孔を配置するための概念や指標の策定方法を構築すること。
- 処分孔を配置して建設する際に利用可能な技術オプションを実証し体系化を図ること。



**Fig. 2 Schematic illustration showing the repository access (ramps and shafts), connecting and disposal tunnels, provide potential short-circuit flow paths after closure. This is prevented by tailoring tunnel layout in relation to hydraulic gradients and emplacement of appropriate backfill and plugs/seals [4].**

## 2 タスク B の概要、実施内容

タスク B には、以下に示す 6 か国 8 機関が参加しており、

このうち 3 機関\*は地層処分事業の実施主体である。

- ドイツ連邦放射性廃棄物機関（BGE）\*
- 英国地質調査所（BGS）
- オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）
- 日本原子力研究開発機構（JAEA）
- 韓国原子力研究所（KAERI）
- 原子力発電環境整備機構（NUMO）\*
- 原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）
- ブルガリア国営放射性廃棄物会社（SERAW）\*

タスク B は、Fig. 3 に示す通り 4 つのサブタスクから構成される。

サブタスク B-1 では、国内外の事例調査だけでなく参加機関からの情報提供により関連情報を収集し、方法論の整備として、「処分坑道や処分孔を配置するための指標やその考え方の整備」と「地質環境調査・評価、処分坑道および処分孔の配置、工学的対策を含む技術オプションの体系的統合」を検討する。検討する方法論の一部については、サブタスク B-2, 3, 4 において実施される幌延 URL を対象としたモデル化・解析、原位置調査および試験を通じて、それらの実証に取り組む。

サブタスク B-2 では、500 m 調査坑道 8, 9 において、坑道および試験孔の配置を検討するための原位置調査を実施する（Fig. 4）。原位置調査として実施する坑道掘削前のボーリング調査や坑道掘削時に行う坑道壁面地質観察（あるいは底盤観察）によって得られる情報に基づき、坑道および試験孔の配置を評価する。さらに、坑道掘削後に、水みちや EDZ の分布、また、それらの透水性を確認するためのボーリング調査、坑道内における湧水量測定を行う。さらに、坑道間における EDZ 発達によって生じる塑性領域の干渉を確認するためのトモグラフィ探査（弾性波、比抵抗）などの調査も行い、坑道および試験孔の配置の評価結果を検証する。そして、ここまでのデータに基づき試験孔の掘削位置を決定し、実規模スケールの試験孔を掘削する。こ

HIPのフェーズ	フェーズ1		フェーズ2			
年	R5	R6	R7	R8	R9	R10
<b>B-1: 設計概念・基準および体系的統合アプローチの整備</b>						
-a: 関連情報の共有						
-b: 技術的な枠組みの構築および事例研究						
-i: 処分坑道、処分孔の配置の概念・基準の検討						
-ii: 処分坑道、処分孔の配置に関連する技術の体系的統合の検討						
<b>B-2: 技術オプションの体系的統合の実証</b>						
-a: 坑道掘削前の解析						
-b: 地質環境調査・評価／坑道掘削／工学的対策に関する技術の原位置での実証						
-c: 適用した技術の技術的信頼性の評価						
-d: 坑道掘削後の解析						
<b>B-3: 処分場の操業に関する技術の実証</b>						
-a: 操業技術						
-b: 遠隔操作およびロボット技術						
-c: 品質保証・管理手法						
<b>B-4: ポアホールテスト</b>						
-a: ベントナイトブロックの定置に関する確認						
-b: ベントナイトの膨潤および閉塞に関するモニタリング						
-c: シール材の漏出率に関する確認						

幌延URL内での原位置調査・試験

**Fig. 3 Planned schedule of each subtask in Task B.**



の試験孔を活用した原位置試験として、掘削直後における力学的挙動や、緩衝材を定置した際の緩衝材品質への影響を確認するための試験を現在検討している。以上の原位置調査・試験のほとんどはフェーズ 2 に実施にされる予定であり、フェーズ 1 では、サブタスク B-1 において整理する坑道および試験孔の配置の判断に関連する特徴に基づき、それを予測するためのモデリングおよび数値解析を行う。

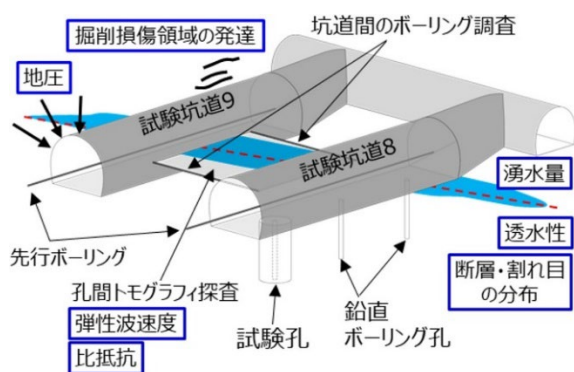


Fig. 4 Three-dimensional view of the *in situ* experimental site at a depth of 500 m

サブタスク B-3 では、坑道埋め戻しや止水プラグ設置といった閉鎖技術や廃棄体回収などの技術オプションを開発する。特に、坑道の埋め戻しから止水プラグの設置までの一連の設計および施工技術を確認・実証するための試験は、幌延 URL の 350 m 試験坑道 6 における原位置試験として実施する。その試験は、Fig. 5 に示すように坑道の妻面から数メートルの区間を埋め戻した後に切欠き部を持つ止水プラグを設置する計画である。これら施工試験の実施にあたっては、あらかじめ坑道周辺の EDZ の広がりや岩盤の透水性の変化を把握し、埋め戻し材や止水プラグの材料仕様等の設計を行う必要があり、フェーズ 1 からフェーズ 2 前半にかけて 350 m 試験坑道 6 の掘削に伴う周辺岩盤の EDZ や透水性の分布の調査を実施する。本施工試験は、令和 8 年度から実施する計画である。

サブタスク B-4 では、CSIRO によって、ボアホール処分概念を対象としたベントナイトブロック定置試験が計画さ

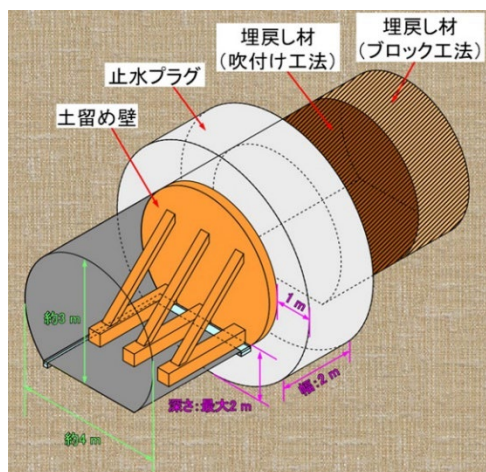


Fig. 5 Schematic of a full-scale construction test of the closure technologies, including hydraulic plug emplacement and backfill.

れているが現在調整中である。

次章では、フェーズ 1 において具体的な活動が行われているサブタスク B-1～3 の活動状況について紹介する。

### 3 フェーズ 1 における活動状況

#### 3.1 サブタスク B-1：設計概念・基準および体系的統合アプローチの整備

サブタスク B-1 のフェーズ 1 では、「処分坑道や処分孔を配置するための指標やその考え方の整備」に関して、処分坑道や処分孔の配置に必要な指標とその考え方を議論する上で必要な情報を収集するとともに、サブタスク B-2 において実施する原位置調査において確認すべき特徴を明確にするために、幌延 URL 周辺の地質環境を考慮しながら、着目する事象について議論を進めている。その際、国内外の事例が示された文献を参考にだけでなく、HIP でのタスク会合などを通じて参加機関から関連情報を収集し、検討を進めている。我が国の実施主体である NUMO の包括的技術報告書[1]では、処分孔の定置位置の考え方として、断層・割れ目に対処する際に、処分孔の掘削、および緩衝材や埋め戻し材の施工の関連から、以下の通り好ましくないケースが示されている。

- 断層・割れ目からの湧水が多い場合には、排水処理量が增大
- 断層・割れ目からの処分孔内（あるいは処分坑道内）への湧水が多い場合、緩衝材（あるいは埋め戻し材）の施工が困難
- 断層・割れ目から処分孔内への湧水が、緩衝材定置後も長期間継続すると緩衝材の一部が湧水により断続的に流出するパイピング現象が発生し、緩衝材の品質の確保が困難
- 断層・割れ目が密集するなど局所的に岩盤の力学的強度が低下している場合、処分孔壁（あるいは処分坑道の切羽）の崩落などが発生

稚内層は、珪質泥岩からなる比較的均質な岩盤であるが、コア観察と坑道壁面地質観察の結果、2 種類の断層が確認されている。一つは層理面に平行な断層（層面断層）、もう一つは層理面に斜交する断層（斜交断層）で、斜交断層の方が透水性に寄与することがこれまでの調査により分かっている[5]。また、坑道壁面の割れ目マッピングでは、坑道掘削後の応力再配分によって新たに形成された割れ目（EDZ 割れ目）が観察されている[6]。これらの地質構造は、稚内層における水理学的および力学的な不均質性の要因になっており、幌延 URL における地質環境を事例として試験孔の配置を検討する場合、着目する必要がある地質構造である。

前述の包括的技術報告書[1]からの情報や幌延 URL における地質環境の特徴を踏まえて、安全機能を確保する要素や設計要件と原位置において確認すべき特徴の関係を整理した（Fig. 6）。タスク B では、緩衝材の品質確保、坑道掘削の容易性、空洞安定性が主な着目点になる。特に、緩衝

材の品質確保に関しては、緩衝材を処分孔に定置した後の膨出やパイピング現象による流出を生じさせる可能性がある著しい湧水を伴う断層の分布や、その湧水の程度・量を把握する必要がある。また、幌延 URL 周辺の堆積軟岩に対しては、空洞安定性に関連して、EDZ 割れ目の発達も含め力学強度の低下に関する特徴を把握することが重要である。



Fig. 6 Relationship between the components/design requirements to ensure the safety functions targeted in Task B and the features to be identified in the *in situ* investigation.

### 3.2 サブタスク B-2: 技術オプションの体系的統合の実証

前節で述べたとおり、サブタスク B-1 において検討を進めている「処分坑道や処分孔を配置するための指標やその考え方の整備」の議論の状況を踏まえて、500m 試験坑道 8, 9 周辺の調査では、地質構造、特に斜交断層の分布、応力状態と EDZ の広がり、水圧分布や湧水量に着目しており、フェーズ 1 では、それを予測するための解析に取り組んでいる。

地質構造に関しては、JAEA がこれまでに取得したデータに基づき、斜交断層の分布を推定するとともに、BGS では、断層の水理学的連結性を決定するため、グラウト材を

含む亀裂充填物を特定するための室内分析を実施している。

岩盤力学に関しては、KAERI, NUMO および JAEA が、500 m 試験坑道 8, 9 における EDZ 発達を予測するための解析を行うとともに、KAERI では、コアサンプルを用いた力学室内試験を実施している。水理に関しても、JAEA と KAERI で湧水量を予測するための解析を実施している。本報では、坑道周辺に発達する EDZ の広がりに対する予測の結果を紹介する。Fig. 7 は、500 m 試験坑道 9 は 350m 試験坑道 6 と比較して、EDZ が底盤や側壁方向により広がりやすい傾向があることを示している。350 m 試験坑道 6 における予測結果は、これまでに実施されたボアホールテレビ (BTV) 調査やコア観察によって確認された実際の EDZ の広がりとはほぼ一致していることから、ここで適用されている予測手法の妥当性は確認されている [7]。水理・力学的条件の異なる 500 m 試験坑道 8, 9 においても原位置調査に基づき予測手法の妥当性を検証する予定であり、さらなる手法の信頼性向上につなげることができると考えている。

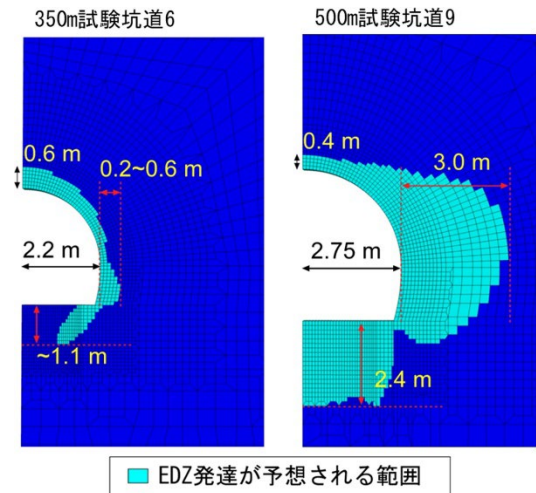


Fig. 7 Numerically predicted EDZ extent around the niches (left: 350 m Niche No. 6; right: 500m Niche No. 9).

さらに、フェーズ 1 では、試験坑道 8, 9 において実施する原位置調査の計画を検討している。Fig. 8 に示す通り、地質構造、岩盤力学および水理に関する評価項目の予測結果の妥当性を確認するために、複数のボーリング調査、壁面観察 (あるいは底盤観察)、トモグラフィー探査といった調査を実施することを計画している。この原位置調査におけ

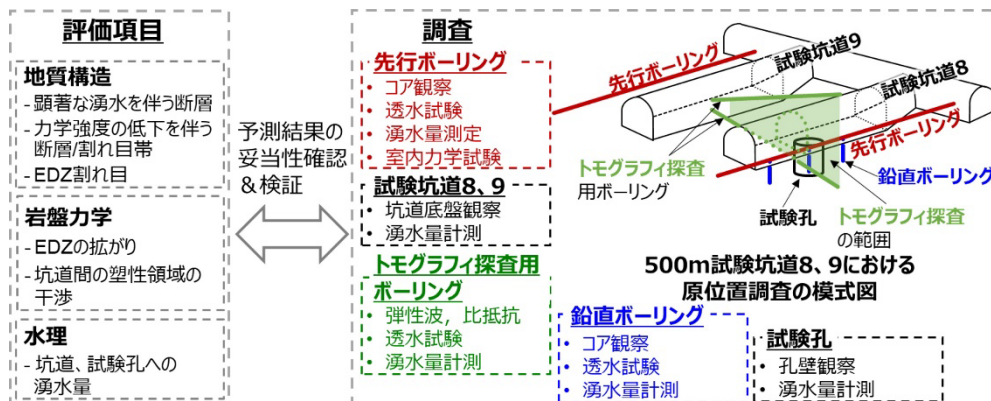


Fig. 8 Evaluation items for considering the layout of tunnels and a test hole, and investigation items for evaluating them.



る計画、実行、取得データに基づく検証を通じて、「予測解析の結果の妥当性確認のために原位置で取得すべきデータ」、「結果を検証するために原位置で取得すべきデータ」、「試験孔の位置などを決定する際、合理的な評価項目（指標）」について議論し、これらを明らかにしていくことが重要であると考えている。三つ目に関して、地層処分事業において施工・操業時に扱われる「処分坑道や処分孔を配置するための指標」は、安全機能を構成する各構成要素の性能や設計要件が満たされているか簡便に評価するために用いられると考えられる。よって、タスク B では、着目する評価項目に関して、安全機能や設計要件との関係を整理するとともに、「原位置調査データから直接評価できるか、あるいは、モデリングも組み合わせで評価できるか」といった視点で議論していきたいと考えている。

### 3.3 サブタスク B-3

サブタスク B-3 では、坑道埋め戻しや止水プラグ設置といった閉鎖技術や廃棄体回収などを含む処分場の施工・操業に関する技術実証に取り組む。この取り組みは主に RWMC と JAEA により実施される。サブタスク B-3 の取り組みのうち、350 m 試験坑道 6 における実規模スケールの坑道埋め戻しおよび止水プラグ設置の実証が、幌延 URL における原位置試験として実施される。この実規模スケールの原位置での実証はフェーズ 2 に実施されるが、それに先立ち、埋め戻し材と止水プラグの要求性能を設定して両者の材料仕様等の設計を具体化し、それに基づき坑道埋め戻しと止水プラグ設置を設計する必要がある。そのため、フェーズ 1 では、その設計に必要な情報として 350 m 試験坑道 6 周辺における EDZ の広がりや岩盤の透水性の変化を把握するための原位置調査を実施しており[8]、フェーズ 2 の前半にかけてこの調査を継続する。

## 4 フェーズ 1 における成果見込みおよびフェーズ 2 における展開

フェーズ 1 においては、3 章で述べた通り、サブタスク B-1 における「処分坑道や処分孔を配置するための指標やその考え方の整備」の検討の中で、500 m 試験坑道 8、9 の原位置調査において対象とする評価項目を決定し、サブタスク B-2 においてそれらを予測するための解析を実施している。これらをフェーズ 1 の成果として取りまとめる。また、サブタスク B-3 では、350 m 試験坑道 6 で実施する坑道埋め戻しと止水プラグ設置に先立ち、その坑道での原位置調査を実施している。この調査は、フェーズ 2 に跨いで実施する計画ではあるが、フェーズ 1 が終了する令和 6 年度までの結果に基づき、350 m 試験坑道 6 周辺の地質・水理特性について取りまとめる。

フェーズ 2 においては、幌延 URL での原位置調査および試験が本格的に進められる。サブタスク B-2 では、処分坑道・処分孔や人工バリア位置に影響する特徴について予測した結果の妥当性を確認するために、500 m 試験坑道 8、9 においてそれらの坑道を掘削しながら原位置調査をフェーズ 2 の前半において実施する。また、サブタスク B-3 における坑道埋め戻しと止水プラグ設置の実規模スケールの原位置での実証試験は、フェーズ 2 の中頃に実施される。

タスク B では、サブタスク B-1 において検討する「地質環境調査・評価、処分坑道および処分孔の配置、工学的対策を含む技術オプションの体系的統合」が最終的な成果である。フェーズ 2 では、サブタスク B-2、3、4 において実施されるモデル化・解析、原位置調査および試験を通じて行われる予測手法、調査技術、施工技術の実証に取り組むとともに、その結果に基づき、Fig. 9 が示すように、「安全機能を確保する構成要素/設計要件」、「地質環境特性」、「モデル化・原位置調査」、それから、「施工・操業の段階で適用可能な工学技術」の関係を例示する。

## 5 まとめ

HIP のタスク B では、新第三紀堆積岩類を対象とした幌延 URL での調査・施工を事例に、処分坑道や処分孔を配置

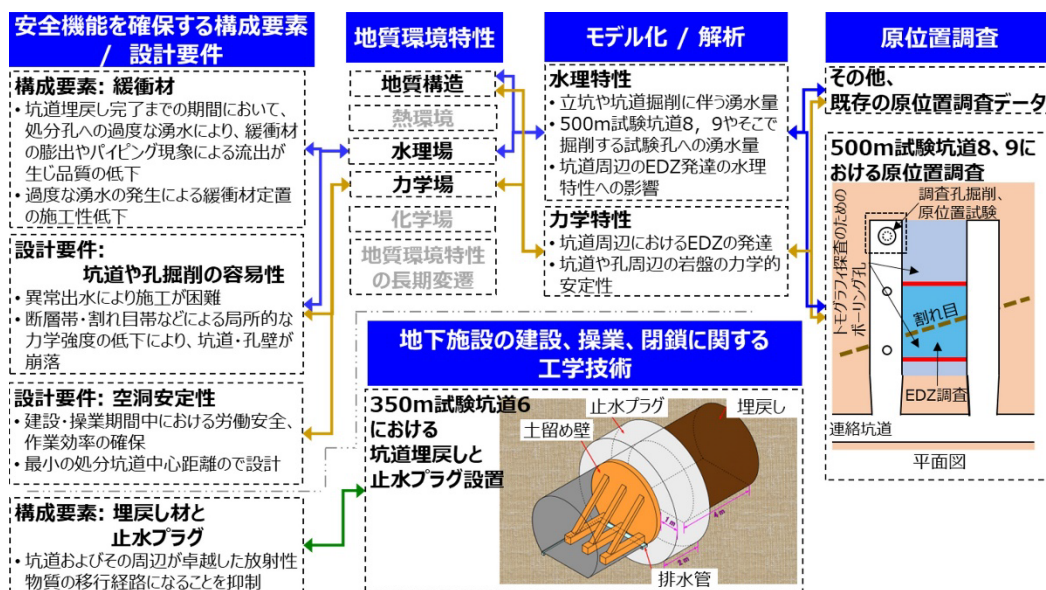


Fig. 9 Schematic framework for systematic integration in Task B

するための指標設定を試行するとともに、処分場の設計・施工・操業などに関連する技術オプションを体系的に整理することを目的としている。主な取り組みである処分坑道や処分孔の配置および人工バリア（緩衝材）の定置に関して、岩盤の力学的強度低下、湧水による処分坑道・処分孔への影響、あるいは人工バリアへの影響について着目し、それに関連する特徴を予測する解析を実施している。今後、予測解析の結果も踏まえながら 500 m 試験坑道 8、9 での原位置調査を実施する予定である。また、もう一つの主な取り組みである坑道埋め戻し、および止水プラグ設置に関して、350 m 試験坑道 6 において実規模スケールの実証試験を予定しており、現在、これに先立つ地質構造分布や水理の調査を実施している。これらの原位置調査や技術の実証は令和 7 年度からのフェーズ 2 において本格的に実施される。

タスク B において議論する「処分坑道や処分孔を配置するための指標やその考え方の整備」における指標は、安全機能を構成する各構成要素の性能や設計要件が満たされているか、簡便に評価するために設定されるものであり、加えて、指標は安全機能や設計要件、原位置調査および施工技術を結び付ける役割を担うと考えている。このような、方法論の検討は、国際共同研究である HIP の枠組みを活用することが非常に重要であると考えている。地層処分への安全確保に関する基本的な考え方は地層処分事業の実施主体により構築されるものであり、HIP の枠組みを活用して実施主体と研究開発機関が直接議論を交わすことにより、処分場の設計・施工・操業・閉鎖に関する技術における実施主体のニーズを適切に取り込みながら研究開発を推進することができる。また、施工が進行中の URL を活用した処分場の施工・操業・閉鎖に係る事例研究は、現在において世界的にもみても貴重かつ希少であり、実施主体・研究開発機関を問わず研究者・技術者の有意義な人材育成の場になることが期待される。

## 謝辞

本発表は、幌延国際共同プロジェクト（HIP）の成果の一部である。参加機関のメンバーには、計画策定、解析や室内試験など、本タスクの取り組みにご尽力いただいている。ここに謝意を表す。また、本研究の一部は、令和 5 年度より経済産業省資源エネルギー庁から受託している「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）（地層処分施設施工・操業技術確証試験）」の成果を使用している。

## 参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- [2] Svensk Kärnbränslehantering AB: Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main

report, PSAR version, SKB TR 21-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2022).

- [3] McEwen, T. (ed.) et al.: Rock Suitability Classification RSC 2012, POSIVA 2012-24, Posiva Oy (2012).
- [4] Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO): The NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case, NUMO-TR-21-01, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- [5] Hayano, A., Ishii, E.: Relationship Between Faults Oriented Parallel and Oblique to Bedding in Neogene Massive Siliceous Mudstones at The Horonobe Underground Research Laboratory, Japan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **44** (2), pp.022004 (2016).
- [6] Aoyagi, K., Ishii, E.: A Method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **52** (2), pp.385-401 (2019).
- [7] Aoyagi, K. et al. (in press): Transmissivity prediction of the Excavation Damaged Zone fracture around the gallery at 500 m at the Horonobe Underground Research Laboratory. *CouFrac2024 - The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application (ISRM 2024 Specialized Conference)*, (Yasuhara & Hashimoto ed.) Kyoto, Japan, November 13-15 (2024).
- [8] 木村駿 他: 幌延の堆積岩における止水プラグの原位置施工試験の概要 (1) 全体概要と坑道周辺の水理条件の把握. 日本原子力学会 2024 秋の大会, 仙台, 令和 6 年 9 月 11~13 日, 1M09 (2024).