

令和2年度以降の幌延深地層研究計画 の成果報告(令和4年度～令和6年度) ③必須の課題のうち体系化への取り組み

令和7年10月20日

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

体系化の研究の全体像

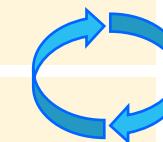
4つの課題の役割と成果目標

2.1.2 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

課題①：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

- 深度に応じた堆積岩の水理・物質移行特性の違いの実証
- 掘削損傷領域や人工バリア/処分坑道の設計(仕様やレイアウトなど)も考慮した閉じ込め性能の評価手法の整理

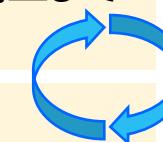
物質移行評価
技術(安全評価)



課題②：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を考慮した、 地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

- 人工バリアを定置するピットの配置位置や坑道の間隔を設計するための調査・設計・評価の一連の技術の体系化
- 高地圧下での坑道掘削や、実規模スケールでの埋め戻し/止水プラグの設計から施工までの一連の技術の実証

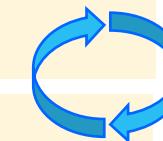
調査・設計・
施工技術



課題③：多連接坑道を考慮した湧水等抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、 緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

- 複数の坑道やピットを施工する際の湧水抑制対策や支保技術の整備
- 緩衝材の流出現象や岩盤への侵入現象を評価・抑制する技術の整備

各種対策技術



課題④：廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理

- 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要なピット周辺の割れ目からの湧水量や掘削損傷領域の広がりなどの調査・評価手法について、他の堆積岩との比較による体系的整理

地質環境特性
の体系化と
一般化

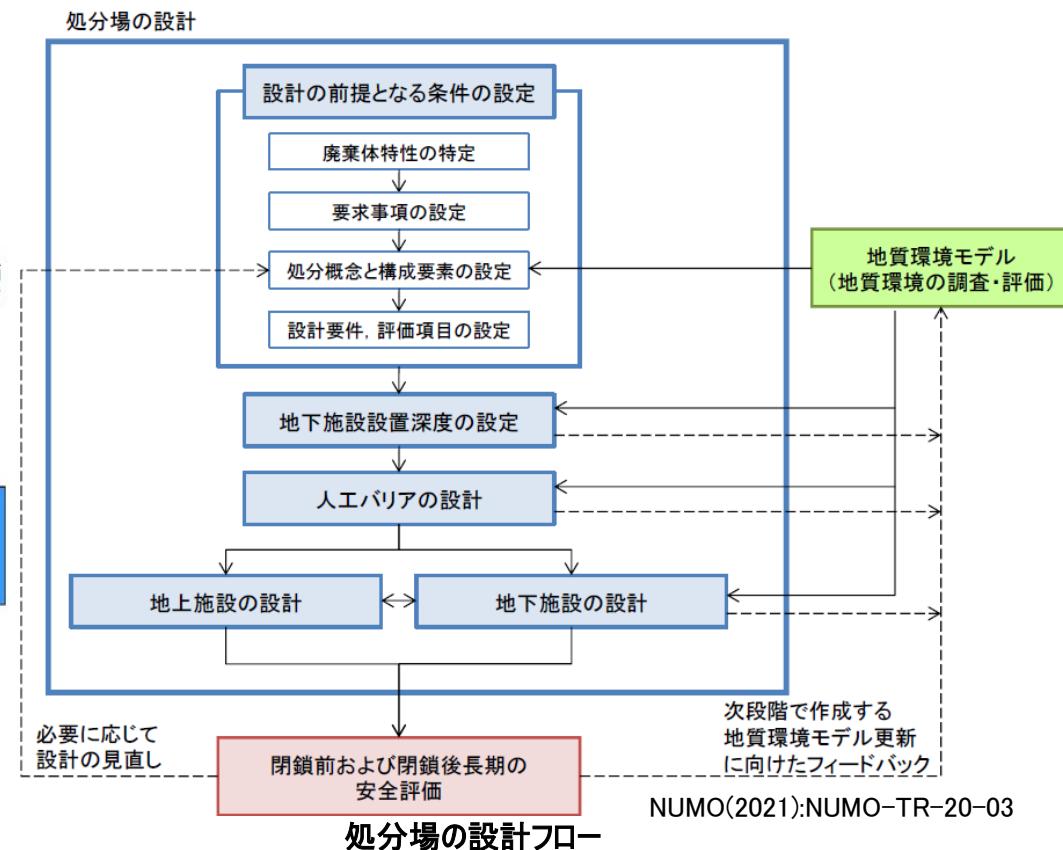
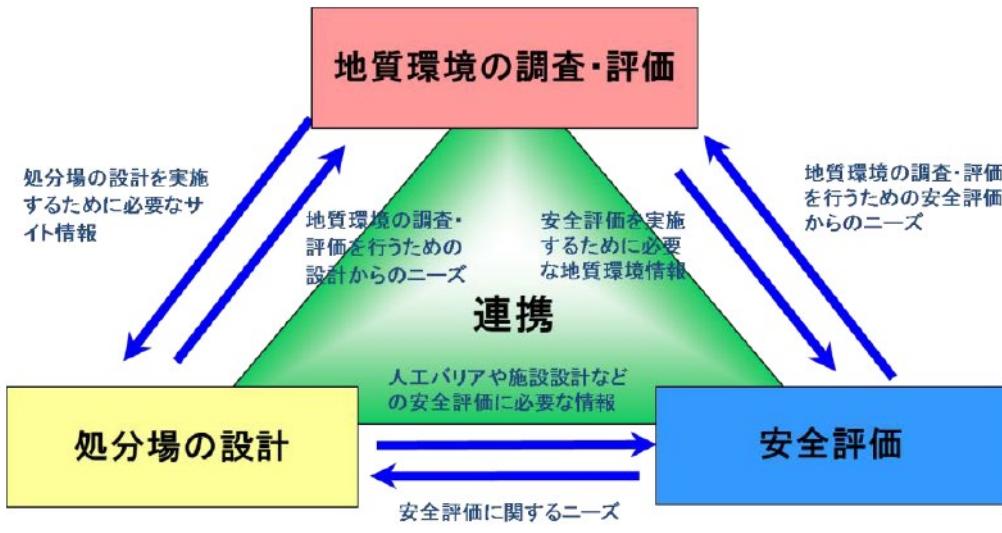


これまでに構築してきた地質環境調査、工学的対策、モデル化技術の体系的な適用による、
坑道やピットの配置に係る考え方、人工バリア材料などの設置方法、それらの閉じ込め性能を
評価する手法の体系的な提示【実際の地質環境に適用可能な技術基盤】

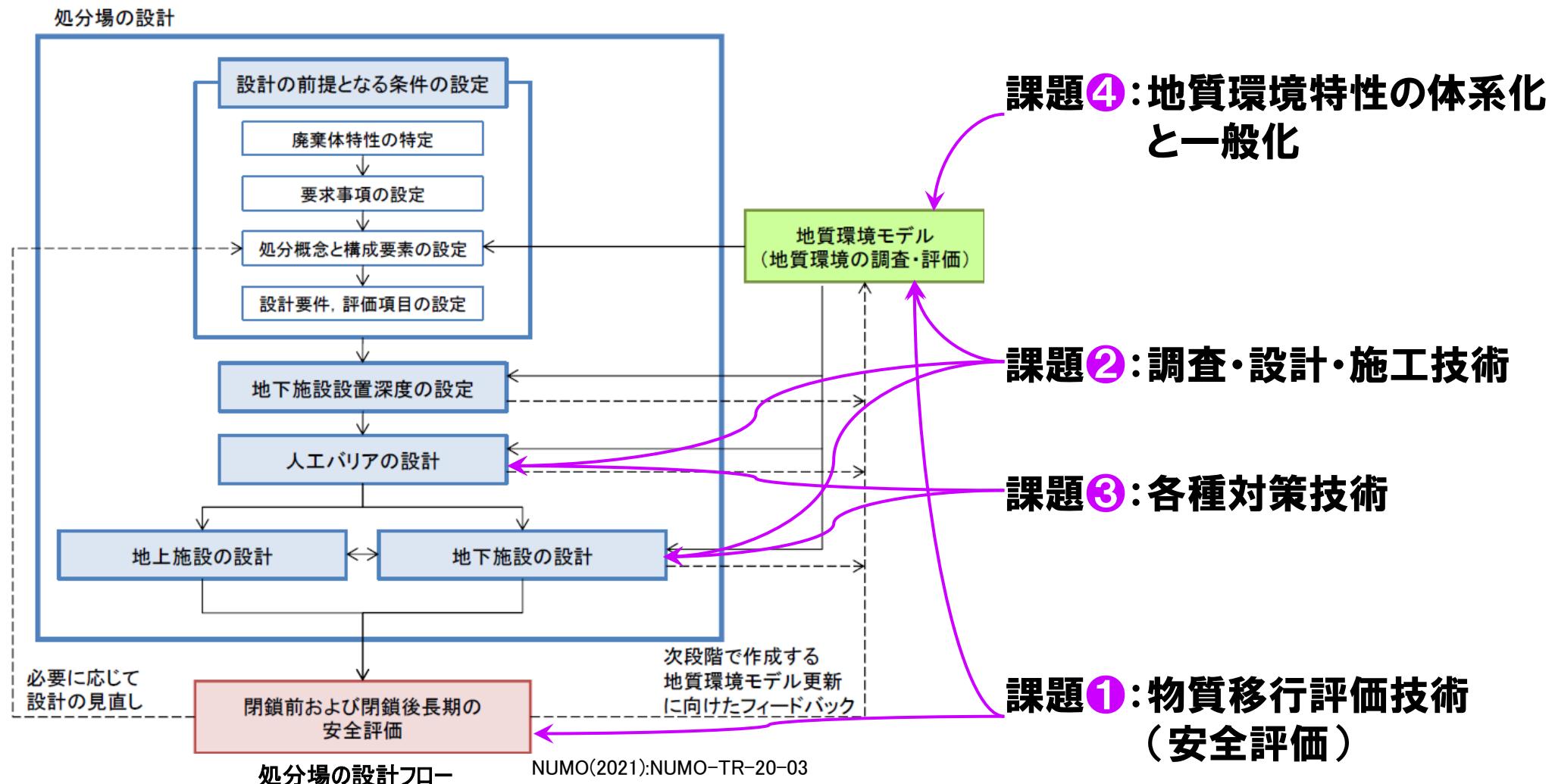
体系化の研究の全体像

NUMO包括的技術報告書に示された分野間連携、処分場設計フロー

- 調査・評価 ⇄ 設計 ⇄ 安全評価の相互の情報のやり取りを踏まえた連携作業が不可欠であり、相互フィードバック(必要なデータ・情報)が、不確実性低減や整合性確保において重要
- 処分場の設計：
 - ・廃棄体特性・地質環境モデル・要求事項に基づく処分概念と安全機能を担う構成要素の設定
 - ・地質環境モデルを参照した設置深度・人工バリア・地下/地上施設、操業方法と安全対策の設定・設計
 - ・安全評価結果に応じて各項目へのフィードバック・見直し



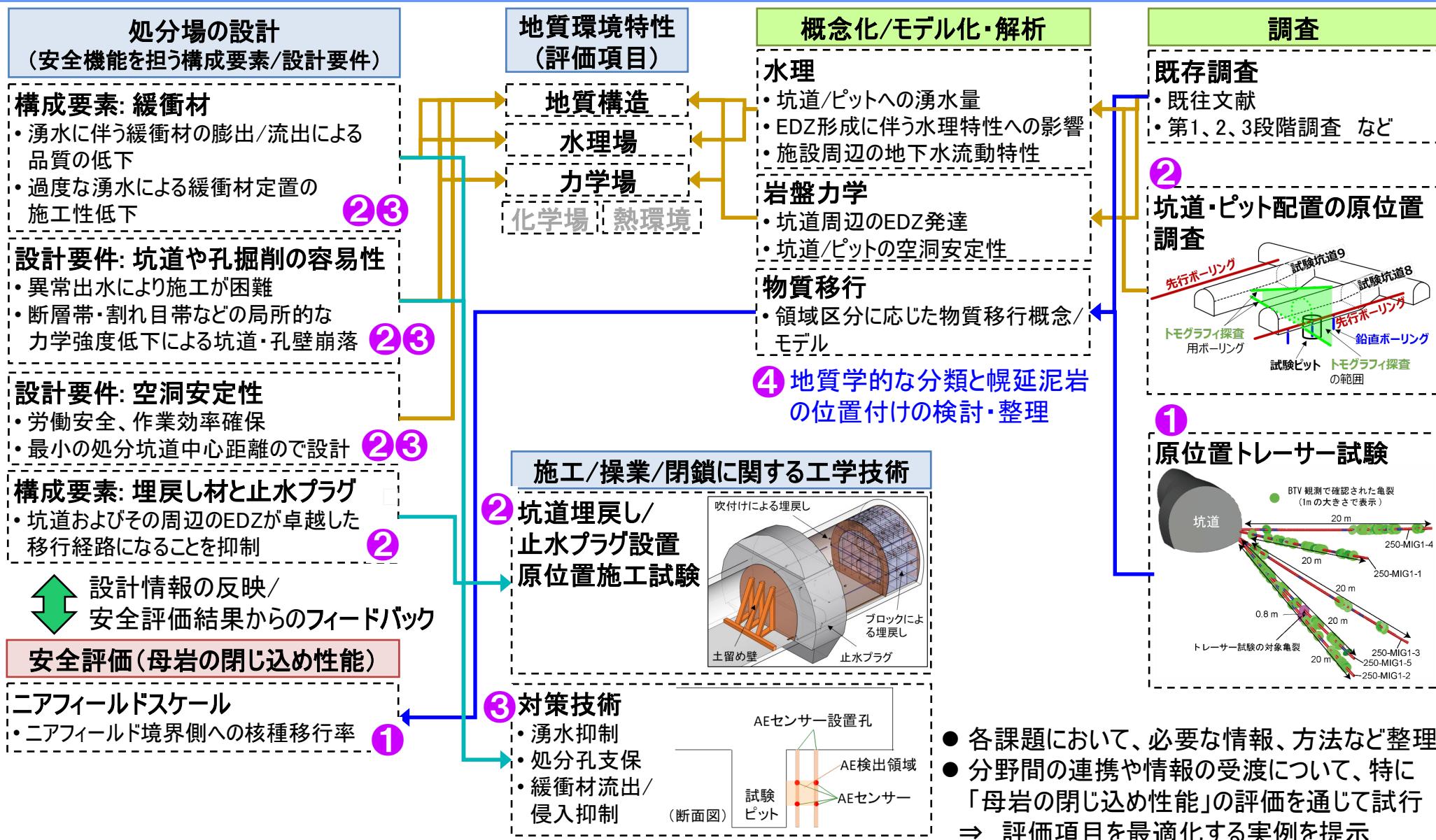
体系化の研究の全体像 処分場設計フローに対する4つの課題の対応



- 幌延URLを活用し、4つの課題を通じて、処分場の設計や安全評価の一部のプロセスを試行し、分野間のデータ・情報の受け渡しやフィードバックの実例を提示

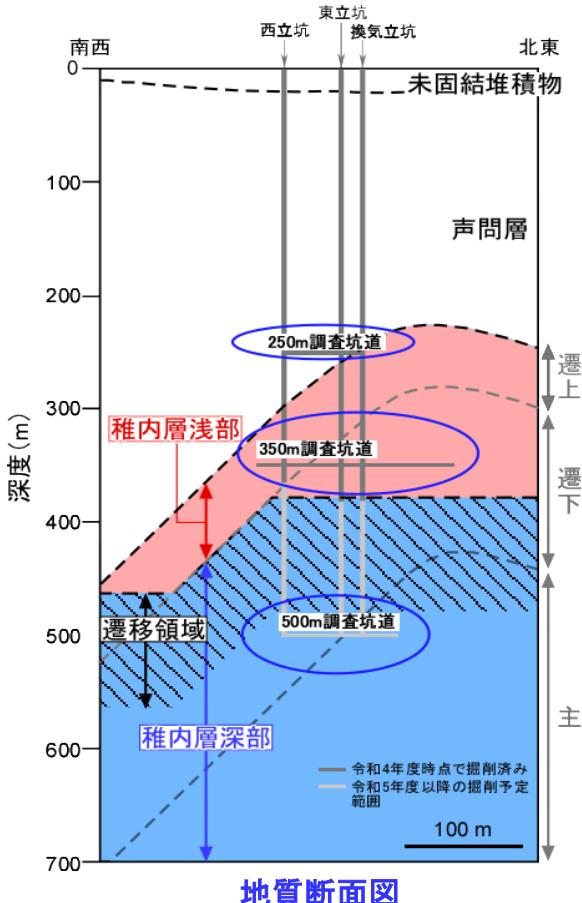
体系化の研究の全体像

4つの課題の位置付け・関係

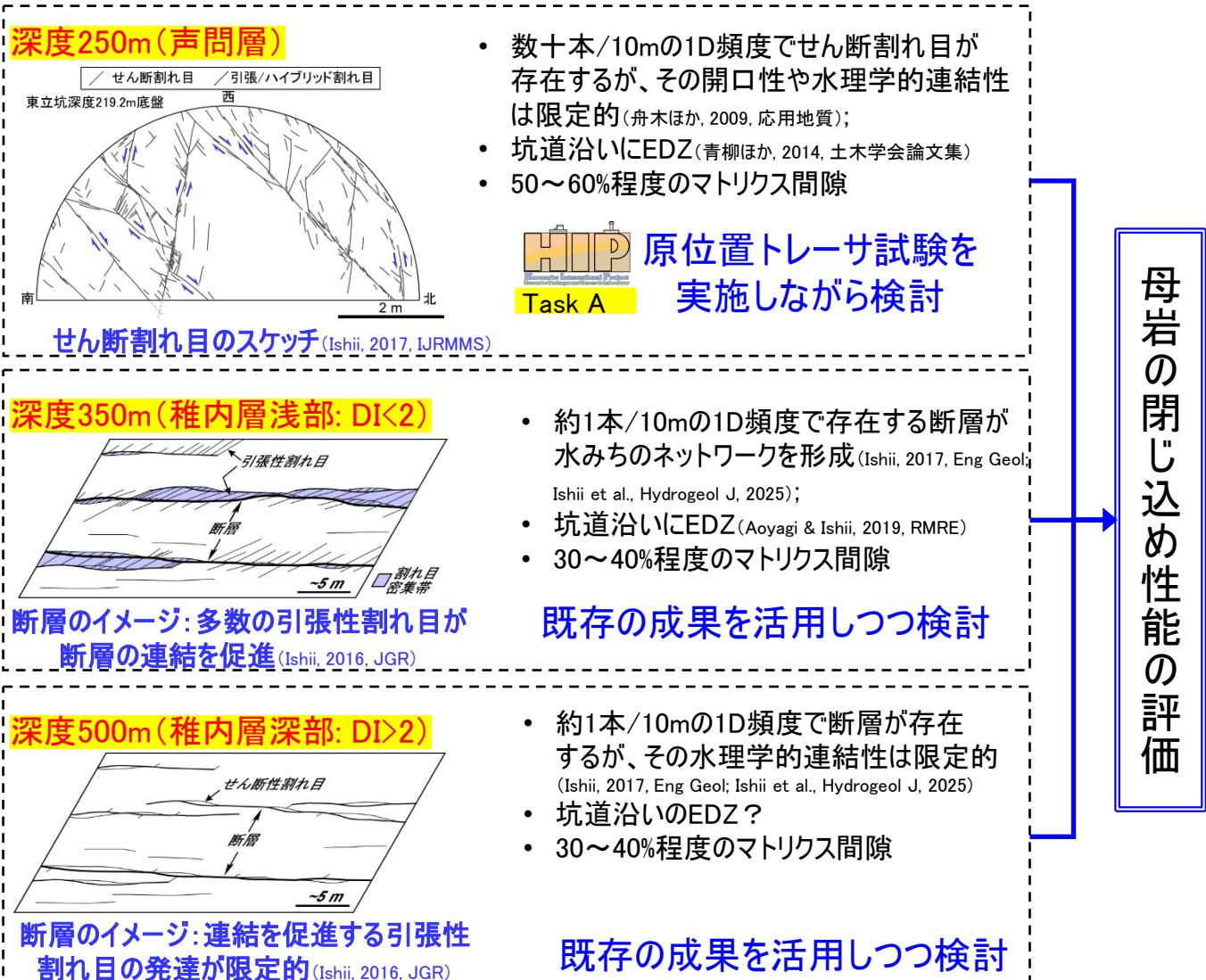


体系化の研究の全体像

3つの領域の物質移行モデル構築と閉じ込め性能評価(課題①)

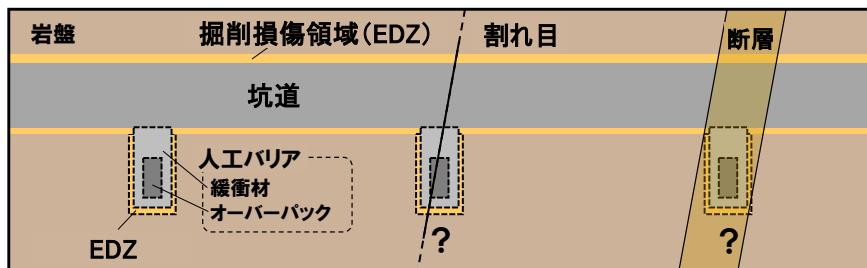


- 浅部領域：割れ目が開きやすい（隙間ができるやすい）($DI^* < 2$)
 - 深部領域：割れ目が開きにくい（隙間ができるにくい）($DI^* > 2$)
- ※ $DI = \text{平均有効応力} \div \text{引張強度}$
- (Ishii et al., Hydrogeol J, 2025)

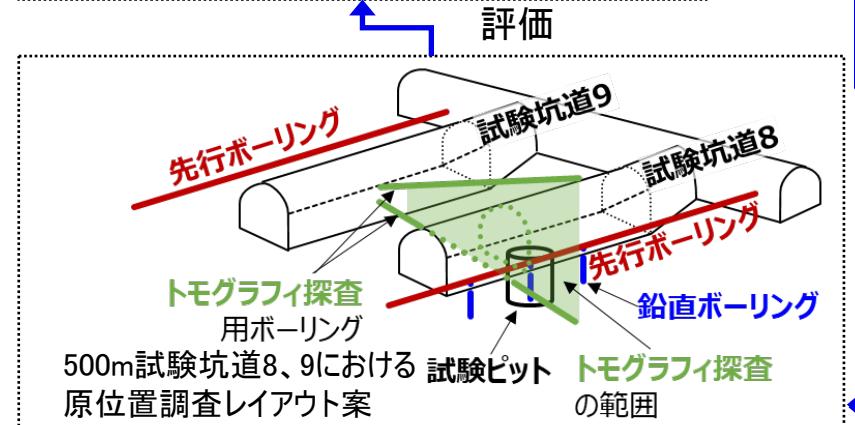
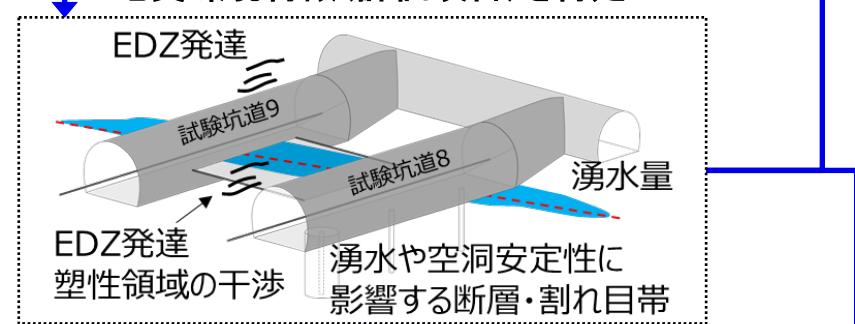


体系化の研究の全体像

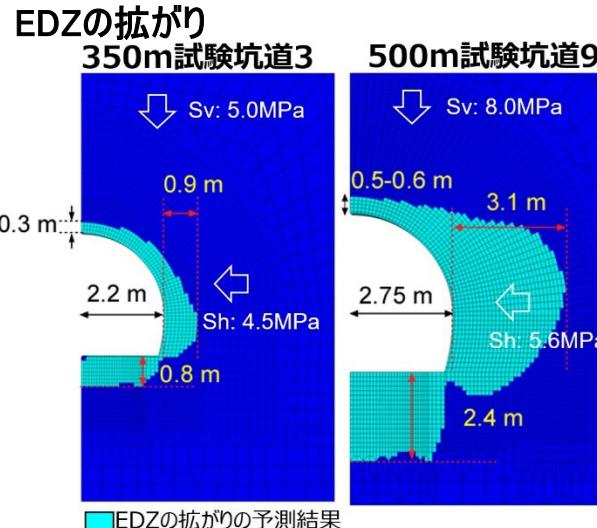
ピット・坑道の配置に関する調査・評価の進め方(課題②)



国内外の既存事例調査やHIPの活用により、廃棄体定置や坑道・ピット配置の考え方や指標の情報を収集し、原位置で確認する地質環境特徴(評価項目)を特定



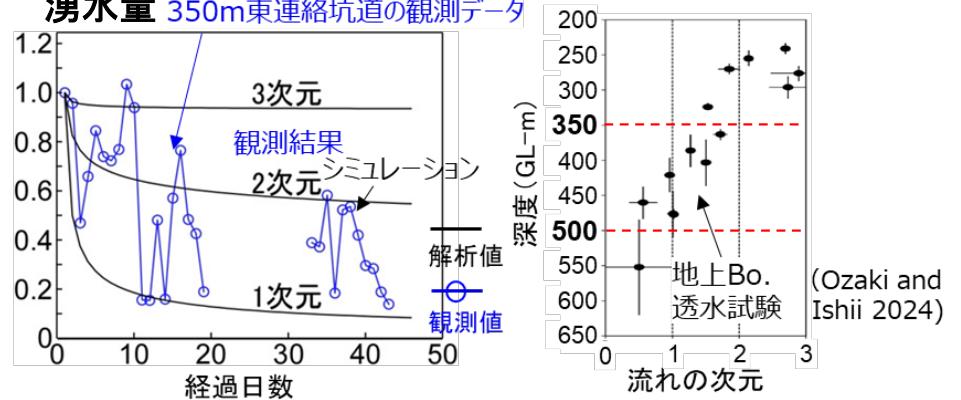
これまでに構築した概念や評価手法により深度500mを予測



500mの方が
EDZの拡がりが
大きい

(Aoyagi and Ishii 2019; Aoyagi et al. 2024)

涌水量 350m東連絡坑道の観測データ



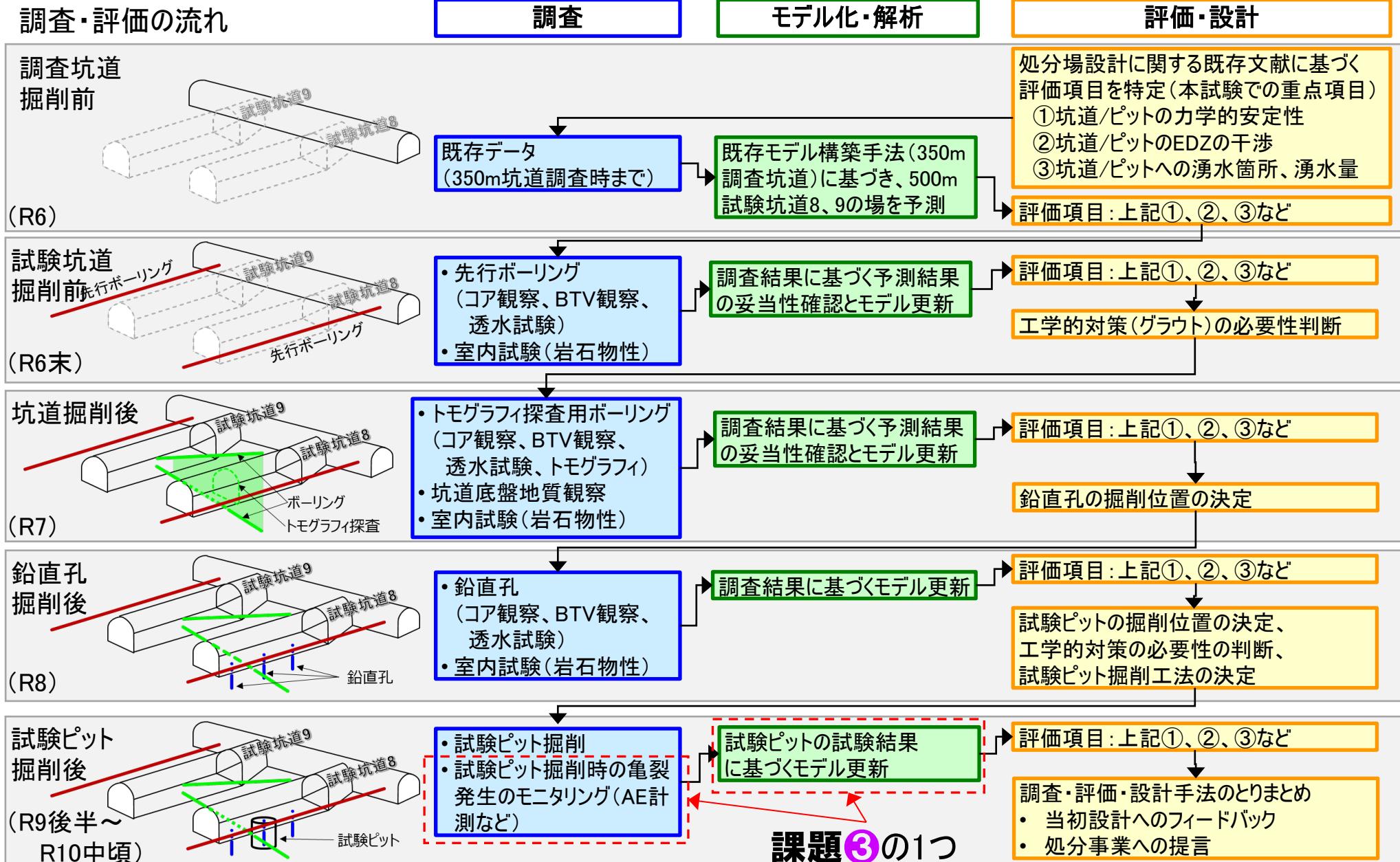
地下施設の深度と水みちのつながり方の次元(流れの次元)の関係

500mの方がより水理学的連結性が低い

妥当性評価・検証

体系化の研究の全体像

ピット・坑道の配置に関する調査・評価の進め方(課題②③)



体系化の研究の全体像

他の堆積岩との比較の一例(課題④)

- 割れ目の発達する堆積岩について、いくつかの地質学的情報に基づいて分類し、幌延の岩盤がどの分類に属するかを整理
- 割れ目の幅とその開きにくさ、ピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法を既存の成果に基づき整理し、分類I-aおよびI-bの堆積岩に反映可能な成果として提示**

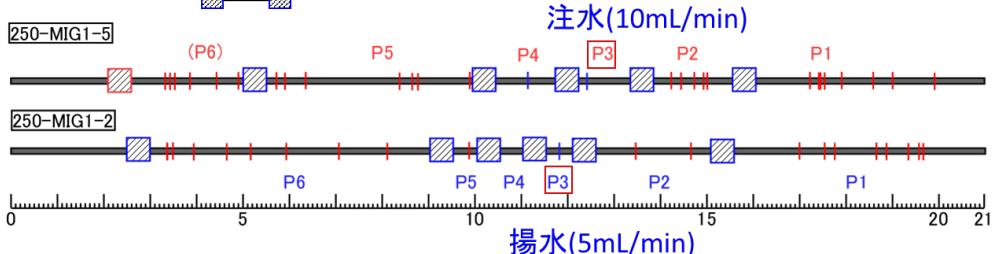
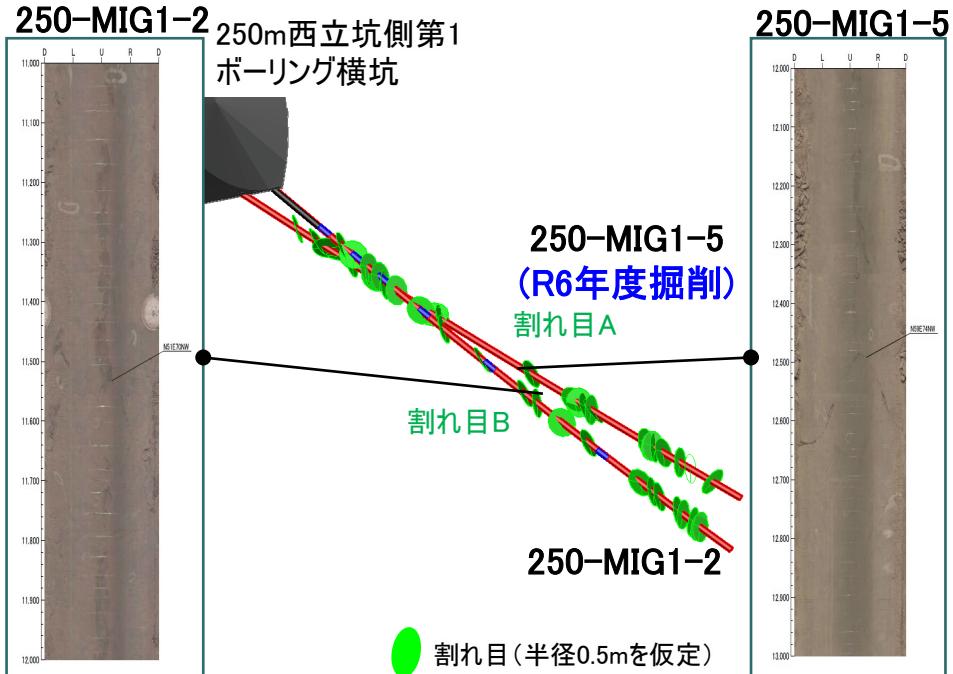
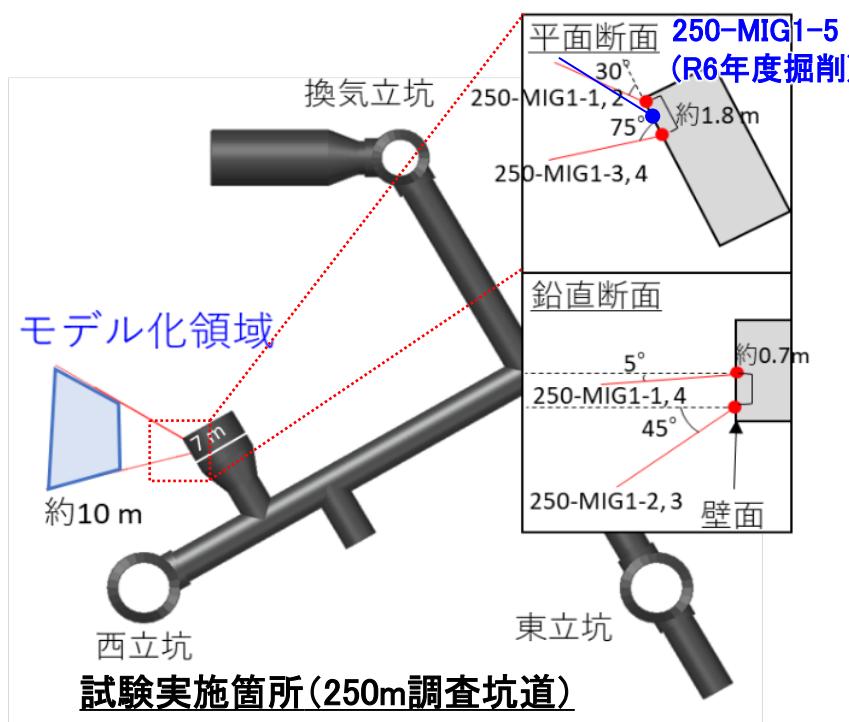
分類	粘土鉱物による割れ目の自己閉塞	鉱物充填による割れ目の自己閉塞	割れ目充填鉱物の溶解	岩石(健岩部)の透水性	地層例	割れ目の開口幅とDIとの相関性	割れ目の水理学的連結性とDIとの相関性	割れ目の開口幅	割れ目の代表的な透水性
幌延の岩盤が属する分類									
I-a	限定的	限定的	限定的	小	稚内層泥岩、 パルフリス泥岩 (イスウェレンベルグ)	強い	強い	大～小	大～小
I-b				大	声問層泥岩		弱い		大
II			強い	-	セントビーズ砂岩 (英セラフィールド)	弱い		大	
III		強い	-		トアキアンードメリアン泥岩 (仏トゥルヌミール)			小	小
IV	強い	-			オパリナス泥岩 (スイスモンテリ)				

令和6年度の成果概要

①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

【声問層を対象にしたトレーサー試験におけるデータ取得】

- 声問層の物質移行モデルの検討に必要となる原位置孔間トレーサー試験の対象試験区間を、割れ目観察や水圧応答試験の結果をもとに選定
- 孔間トレーサー試験の最適な試験条件(注水流量、揚水流量など)を計画した上で試験を実施



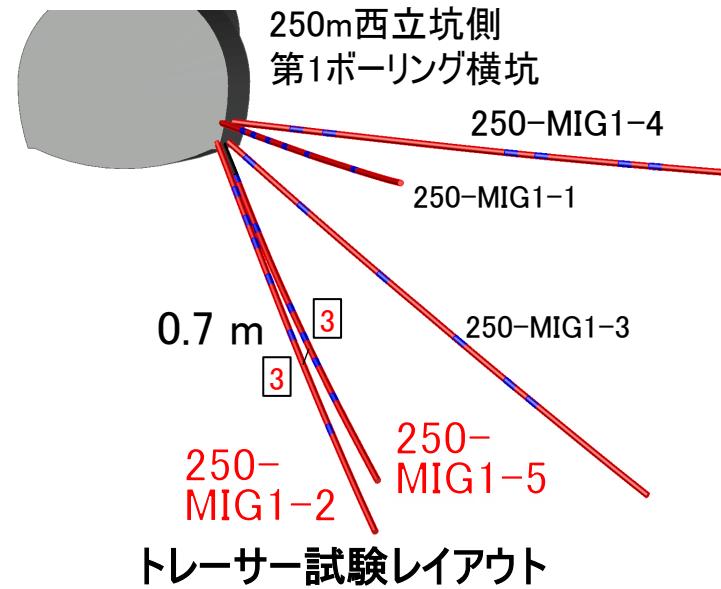
- 孔間距離約0.8 mのボーリング孔間で水理学的連結性が確認できる割れ目を特定
- 孔間トレーサー試験を可能とする流量条件(注水流量:10 mL/min、揚水流量:5 mL/min)を決定

令和6年度の成果概要

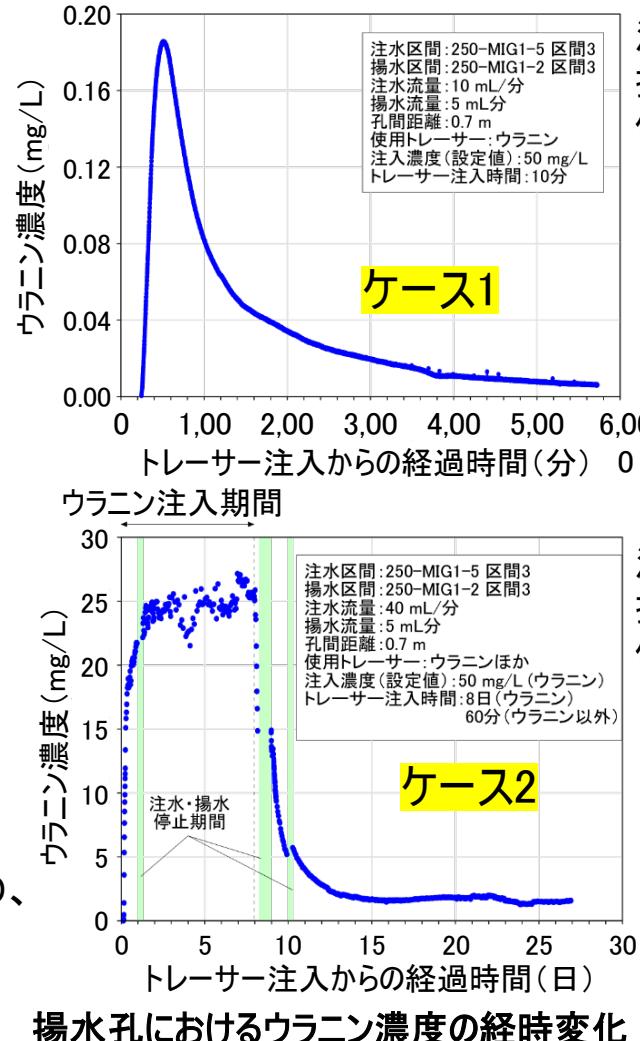
①坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

【声問層を対象にしたトレーサー試験におけるデータ取得】

- 孔間トレーサー試験を計画・実施し、トレーサー注入条件(注入時間、トレーサーの種類)や流量条件(注水・揚水流量)の異なる2ケースの破過曲線を取得



- ケース2のウラニン濃度：
注入開始から8日程度でおおむね濃度が一定となり、注入停止後、急激に低下し、15日後以降、低濃度で推移
- ケース2では、マトリクス拡散を評価するため、試験中に3回、注水・揚水を停止



注入流量: 10 mL/分
揚水流量: 5 mL/分
使用トレーサー: ウラニン (50 mg/L)
トレーサー注入時間: 10分

- ケース1のウラニン濃度：
注入開始から600分程度でピークに達し、その後徐々に低下

注入流量: 40 mL/分
揚水流量: 5 mL/分
使用トレーサー:
ウラニン (50 mg/L), アミノG酸 (50 mg/L),
HDO (30 %), I (5000 mg/L),
Br (5000 mg/L), Mo (50 mg/L),
Cs (1500 mg/L), Sr (50000 mg/L),
Ni (50 mg/L), Co (50 mg/L)
トレーサー注入時間: 10分 (ウラニン)、
60分 (ウラニン以外)

令和6年度の成果概要

②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を考慮した、
地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

【500m調査坑道原位置調査における取得データの検討】

評価項目

(原位置において確認すべき特徴)

地質構造

- 顕著な湧水を伴う断層
- 力学強度の低下を伴う
断層/割れ目帯
- EDZ割れ目

岩盤力学

- EDZの拡がり
- 坑道間の塑性領域の干渉

水理

- 坑道、試験孔への湧水量

調査

先行ボーリング

- ・コア観察
- ・室内力学試験
- ・透水試験
- ・湧水量計測

試験坑道8、9

- ・坑道底盤地質観察
- ・湧水量計測

トモグラフィ探査

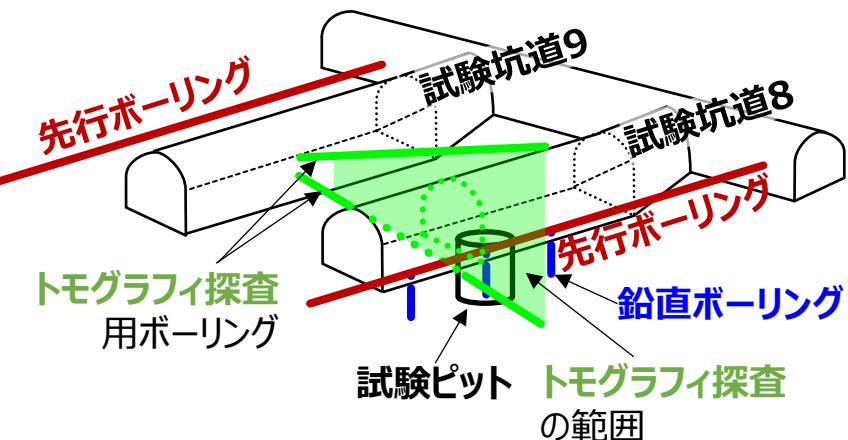
- ・弾性波
- ・透水試験
- ・湧水量計測

鉛直ボーリング

- ・コア観察
- ・透水試験
- ・湧水量計測

試験ピット

- ・孔壁観察
- ・湧水量計測



500m試験坑道8、9における原位置調査の模式図

- 評価項目に対する調査項目とその調査レイアウト、手順を検討
⇒R7年2月から先行ボーリングを実施



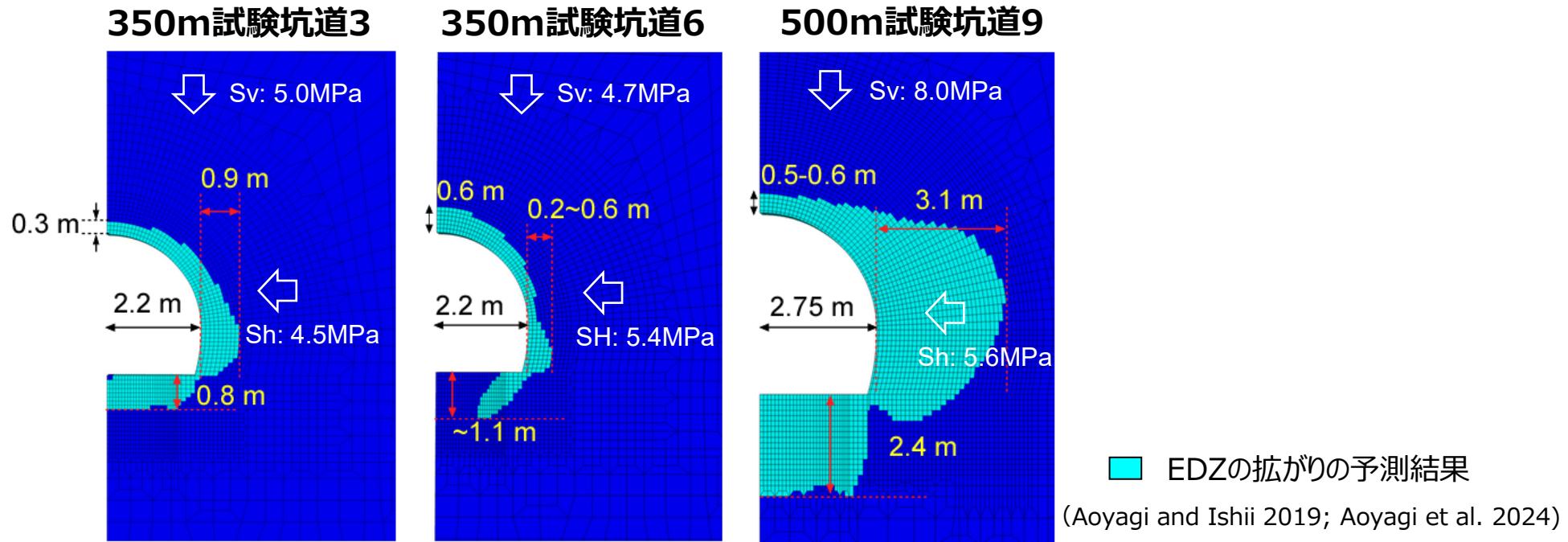
評価項目に対する評価を行い、
以下を評価・判断

- ✓ 試験ピットの位置
- ✓ 坑道間隔の妥当性

令和6年度の成果概要

②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を考慮した、
地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

【 EDZの拡がりの予測解析】

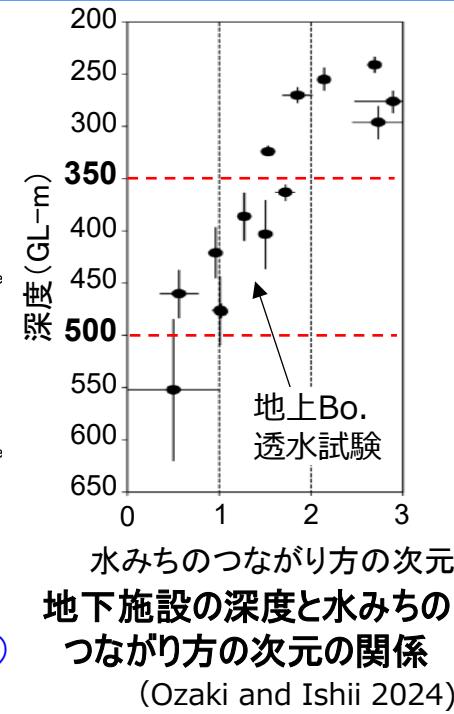
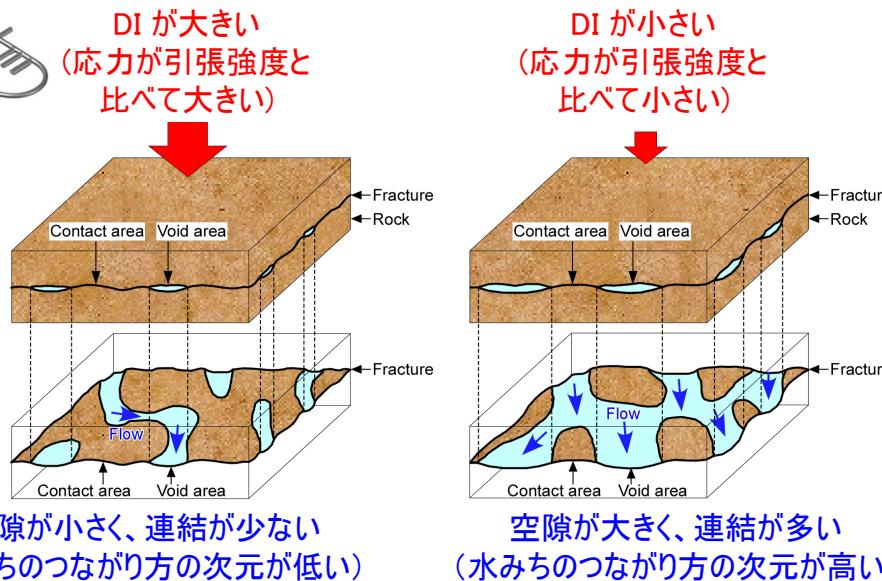
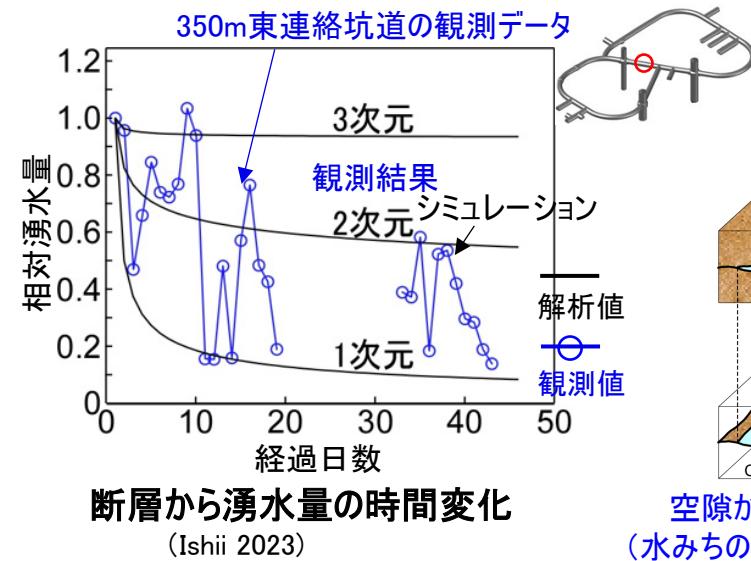


- 350m調査坑道については、原位置で確認されたEDZ割れ目の発達範囲と概ね整合する結果
- 500m調査坑道では地圧値が大きいことや、差応力も大きいこと、さらに岩盤の強度物性も深度350mと比較して違うがそれほどないことから、EDZの拡がりが深度350mと比較して大きいと推定
- 破壊モードについてはすべてせん断破壊と判定された。掘削直後の壁面の非排水条件設定の影響で有効応力の低下は見られるが、引張強度に達して破壊した要素はない
- 解析により得られた破壊モードの妥当性については今後検討

令和6年度の成果概要

②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を考慮した、地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

【坑道掘削時の湧水量の予測解析】



【水みちのつながり方の次元に関する最近の成果】

- 断層と交差した坑道から湧出する地下水の湧水量の自然減少傾向は、水みちのつながり方の次元を考慮した数値計算によって説明可能 (Ishii 2023)
- 割れ目の法線方向の応力が水みちの局所的な連結性と関連しており、DI を指標として水みちのつながり方の次元の評価が可能であることを提示 (Ishii et al. 2025)
 - 水みちのつながり方の次元は、坑道湧水量の時間変化を算定する数値計算に利用でき、深度と相関するため、深度に応じた予測が可能であることを示唆

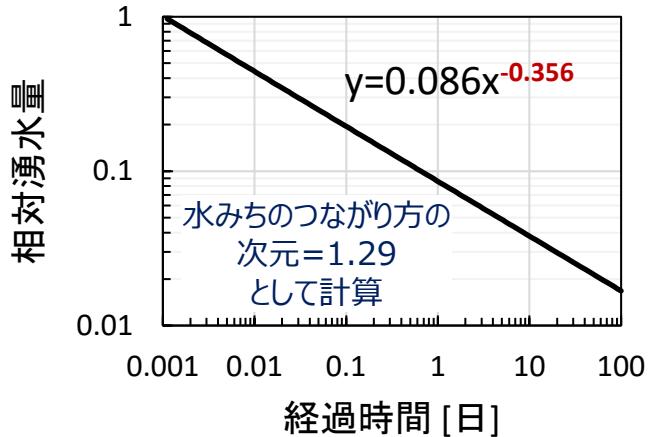
令和6年度の成果概要

②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を考慮した、
地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

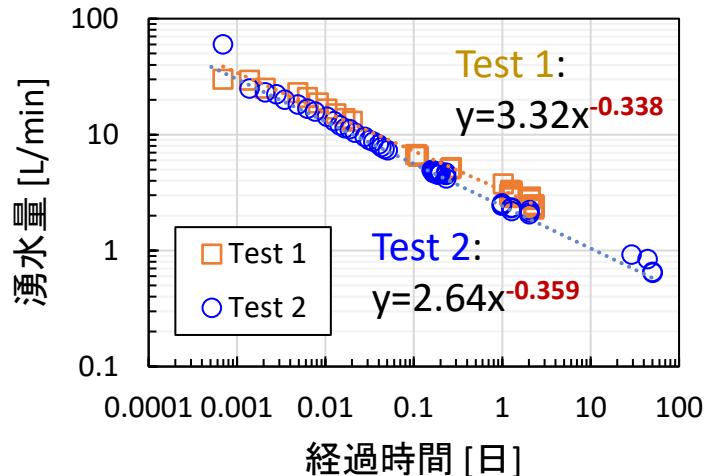
【坑道掘削時の湧水量の予測解析】



予測



原位置試験



350-FZ-01孔を用いた連続湧出試験における
湧水量変化の事前予測と実測結果(村上・石井 2023)

【湧水量予測の予察試験の結果】

- 深度476.5 m の断層（水みちのつながり方の次元 1.29）を対象に連続湧出試験を実施した結果、湧水量の時間変化の傾向（傾き）は事前予測した傾向と一致（村上・石井 2023）
 - 深度500 mに分布する断層も水みちのつながり方の次元が低く、湧水量の自然減少効果が期待され、定常的な湧水量は坑道全体の湧水量と比較してわずかであると推測（Ozaki and Ishii 2024）
- **深度500 mにおいてボーリング孔や坑道での湧水量観測を行い、予測の検証を実施予定**

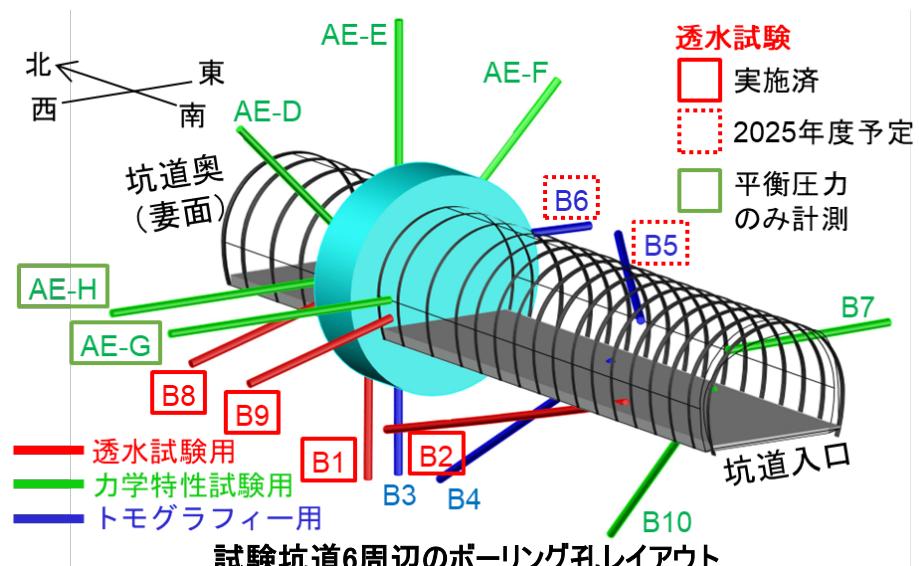
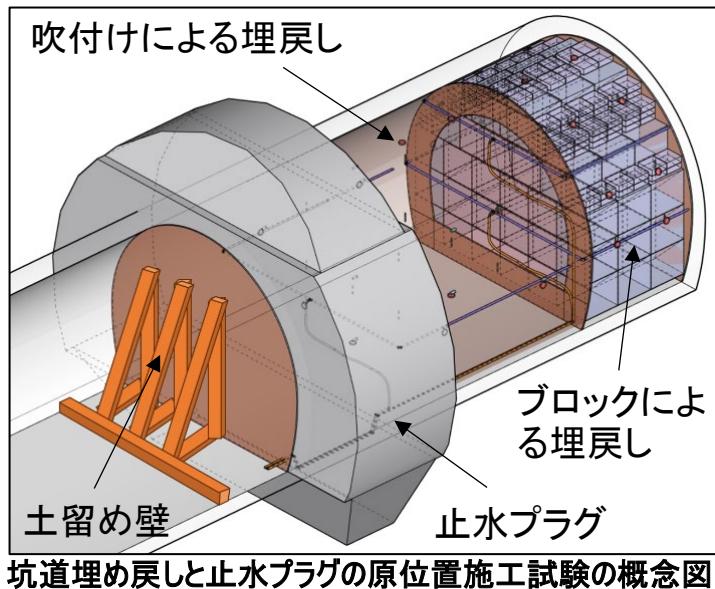
令和6年度の成果概要

②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を考慮した、地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

- 処分坑道、連絡坑道、アクセス坑道および周辺の掘削損傷領域(EDZ)が相互に連結して放射性物質の短絡経路になることを防ぐため、処分場閉鎖段階に埋戻し材とともに止水プラグを設置(NUMO, 2021)
- 堆積岩での主な課題：結晶質岩と比べ国内外での検討事例が少なく、また、岩盤強度やEDZ分布などが異なるため、止水プラグの施工の観点から以下が課題
 - ✓ 坑道の空洞安定性の観点から施工される鋼製支保/吹付けコンクリート等の止水プラグ施工時の取り扱い
 - ✓ EDZを拡大させない切欠きの拡幅掘削方法
 - ✓ 切欠き部拡幅後の坑道天端部の空洞安定性を考慮した止水プラグの施工方法

➡ 350m試験坑道6における原位置施工試験により、
坑道埋め戻しから止水プラグ設置までの一連の施工技術を確認・実証

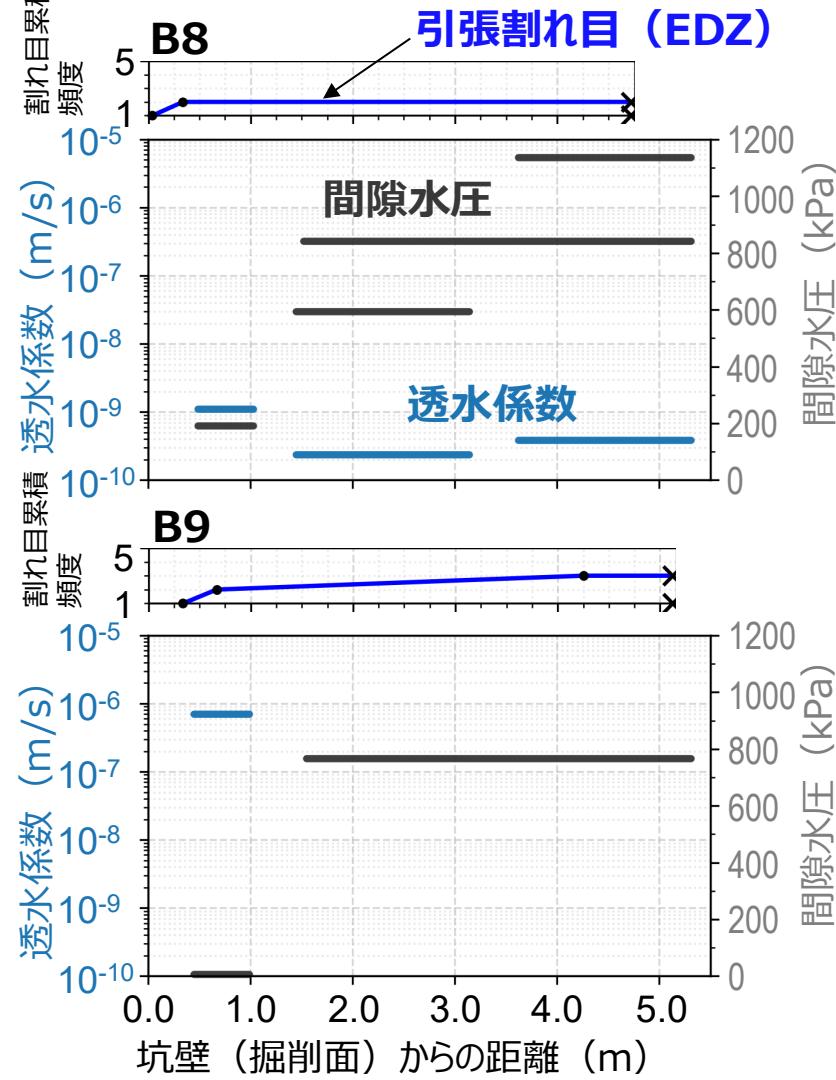
令和5～7年度：止水プラグ設計のため、試験坑道6周辺のEDZ分布や水理特性を把握するための原位置調査を実施



令和6年度の成果概要

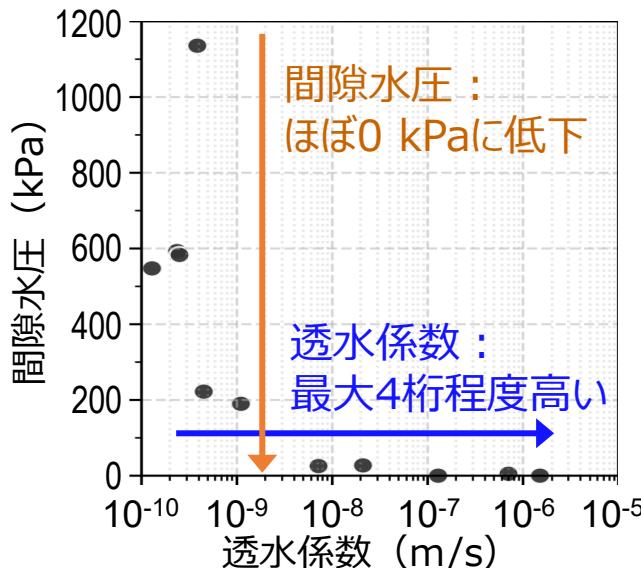
②先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策を考慮した、
地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

【試験坑道6周辺のEDZ分布や水理特性を把握するための原位置調査】



R6に追加した調査結果一例:B8、B9孔(側方)における
割れ目分布、透水係数、間隙水圧

- コア観察に基づくEDZ推定結果:
 - ✓ 引張割れ目の分布から推定したEDZ分布は、坑道の天端、側方、底盤ともにこれまでの解析結果(予測)と整合的
 - ✓ 天然割れ目(せん断割れ目)が分布し、引張割れ目の頻度が低い箇所あり
- 水理特性の結果:
 - ✓ EDZ区間の透水係数は、健岩部と比較して最大で4桁ほど高い
 - ✓ 坑壁近傍の間隙水圧はほぼ0 kPaであり、坑壁から1.5 m程度離れると500~1200 kPa



試験区間の透水係数と間隙水圧の関係
(これまでの取得結果)

令和6年度の成果概要

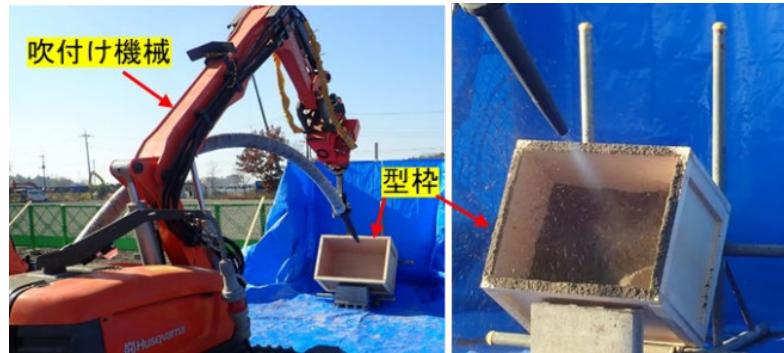
②先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策を考慮した、地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

【幌延の泥岩とベントナイトを混合した埋戻し材と施工方法の検討】

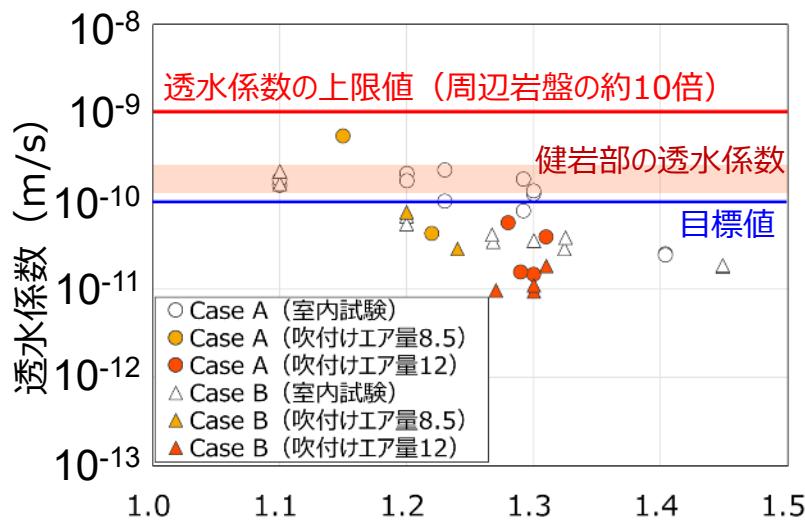
- 幌延泥岩を使用した埋戻し材の締固め試験、透水試験、膨潤圧試験を実施し、最適な施工含水比、配合設計および施工管理の検討に必要な材料の基本的な特性を確認
- 約0.5m四方の型枠を対象に一定方向の地上吹付け試験を実施し、初期含水比や材料配合などの違いが施工後の乾燥密度や施工性へ及ぼす影響を確認
- 試験坑道6における周辺岩盤における健岩部の透水係数に基づき、目標値を設定し、それを満足する材料仕様や施工条件を室内試験および地上吹付け試験から材料仕様を決定

材料配合と吹付け試験条件

試験ケース	材料配合(%)	施工含水比(wt%)	吹付けエア量(m ³ /min)	
A	室内	ベントナイト:30 幌延の泥岩:70	-	-
	A-3		32.0	8.5
	A-1, 2		32.0, 35.0	12
B	室内	ベントナイト:40 幌延の泥岩:60	-	-
	B-3		32.5	8.5
	B-1, 2		32.5, 34.5	12



埋め戻し材の地上吹付け試験



試験結果:透水係数と乾燥密度
(室内試験、吹付け試験)

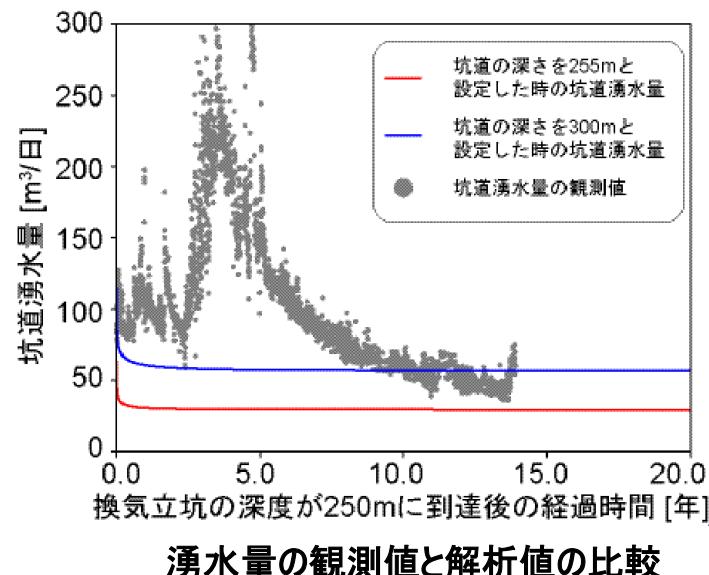
令和6年度の成果概要

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

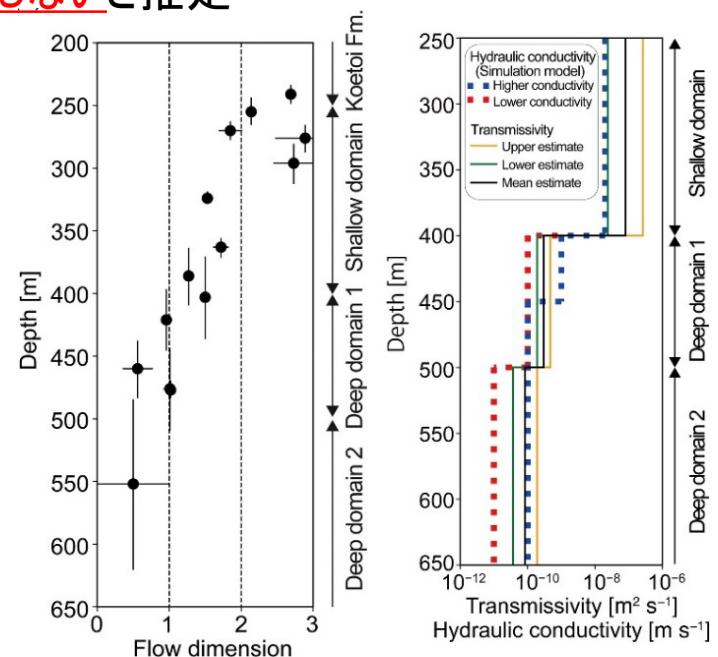
- ①近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量の予測手法と湧水抑制対策への反映
③断層や割れ目からの定的な湧水量や減少量の予測手法と流出抑制対策への反映

【坑道からの湧水量の変化に関する検討】

- 断層の水理学的連結性を考慮して地層の有効透水係数を設定し、定的な湧水量に寄与する湧水箇所を稚内層浅部まで（深度255 m～300 m）と仮定することで、立坑/坑道掘削に伴う定的な湧水量とURL周辺の地下水水圧の変化を再現
- 深度400 m以深の掘削では有効透水量係数の低い断層のみに遭遇し、その湧水量はわずかで、立坑/坑道を深度500 mまで掘削しても定的な湧水量は増加しないと推定
- 立坑掘削時の湧水量の一時的な増加は数年で無視できるレベルまで低下。隣接する湧水点同士の局所的な水圧干渉の影響を示唆



(Ozaki and Ishii, 2024)



水みちのつながり方の次元、岩盤の有効透水係数、
断層の有効透水量係数の深度変化

(Ozaki and Ishii, 2024)

令和6年度の成果概要

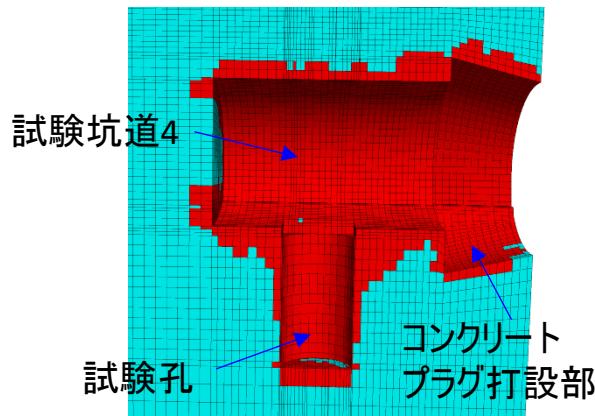
③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

②ピット周辺の掘削損傷領域の評価

④ピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と侵入抑制対策への反映方法の整備

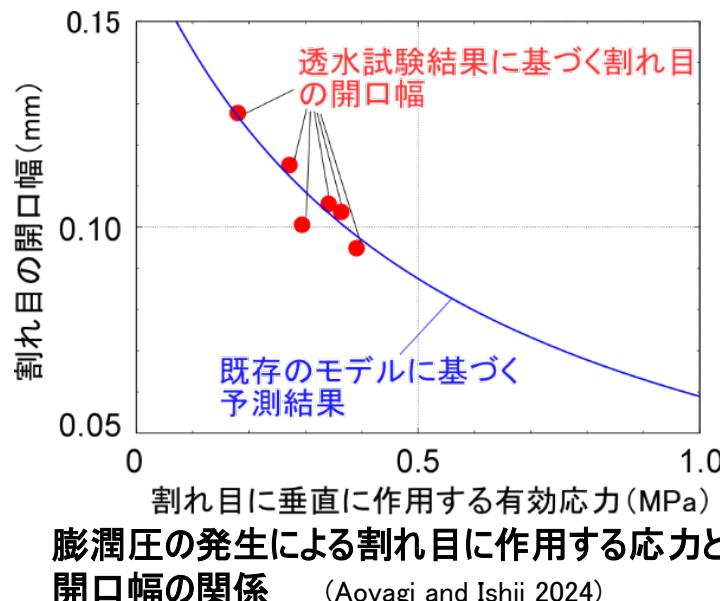
【試験孔周辺のEDZの拡がりと緩衝材膨潤による開口幅の変化の検討】

- ピット周辺のEDZの拡がりに関して、人工バリア性能確認試験で掘削した試験孔浅部は坑道底盤のEDZの影響を受けて拡がりが大きく、中心深度では壁面から0.3～0.6mの範囲まで拡がり、深度の増大とともにその拡がりが小さくなることを、数値解析および原位置試験により確認
- ピット周辺のEDZ割れ目の開きにくさに関して、長期透水試験結果とBarton-Bandisのモデルに基づく予測結果から、緩衝材の膨潤によって周辺のEDZ割れ目は少しずつ閉じていく、すなわち開きにくくなることを定量的に提示



解析により得られた坑道および試験孔周辺のEDZの拡がり(赤色部分)

(青柳ほか、2025)

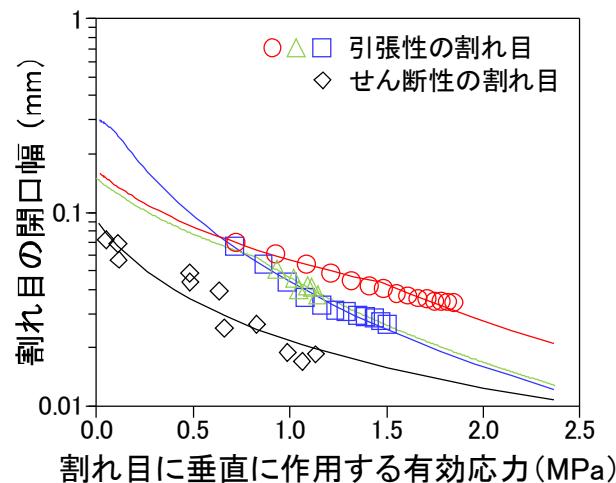


令和6年度の成果概要

④廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理

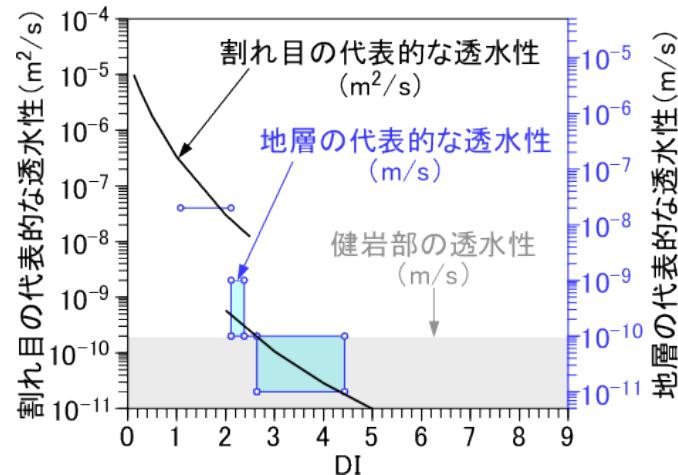
【処分孔周辺の割れ目の開きにくさや地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法の整理】

- 人工バリア性能確認試験の試験孔周辺に発達した掘削損傷割れ目に対して過年度に実施した透水試験の例などを用いて検討
- 割れ目の開口幅や透水性は、DIの空間分布と既存の経験式に基づく推定結果を基に評価が可能
- 緩衝材の膨潤、水圧変化や地殻変動に伴って割れ目のずれや開口が生じる場合の割れ目の開きにくさや透水性については、水圧擾乱試験・水理試験や、DIを用いた経験式、Barton-Bandisのモデルによって評価が可能



割れ目に作用する垂直応力と開口幅の関係

(水圧擾乱試験、透水試験結果とBarton-Bandisモデルによるフィッティング)
(Ishii 2020; 2022; Aoyagi and Ishii 2024)



割れ目の代表的な透水性とDIの関係

(Ishii 2021; Ozaki and Ishii 2023; Ishii et al. 2025)

2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化に係る成果

- Aoyagi (2024) : Overview of the Horonobe International Project (HIP), Seventh International Conference on Geological Repositories (ICGR-7) ; Empowering Progress in Developing Deep Geological Repositories.
- Aoyagi et al. (2024) : Transmissivity prediction of the Excavation Damaged Zone fracture around the gallery at 500 m at the Horonobe Underground Research Laboratory, Proc. CouFrac2024- The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, No.C-2-1.
- 青柳ほか (2025) : 堆積軟岩を対象とした高レベル放射性廃棄物模擬処分孔掘削時の岩盤損傷の発達状況, 第16回岩の力学国内シンポジウム講演集(インターネット), pp.269-274.
- 青柳・館 (2024) : 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (1)幌延深地層研究計画における国際共同プロジェクトの重要性, 原子力バックエンド研究, Vol.31, No.2, pp.124-127.
- 早野 (2024) : 講演再録 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, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, pp.134-139.
- Hirota et al. (2024) : Biofilm Formation on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock, Microbial Ecology, 87, pp.132_1-132_15.(<https://doi.org/10.1007/s00248-024-02451-7>)
- Ishii et al. (2025) : Rock strength and stress dependence of local flow-path connectivity within faults or fractures: a preliminary overview of virtual and in-situ hydraulic tests, Hydrogeology Journal, vol.33, pp.63-85.
- Kim et al. (2024) : Estimation of the Excavation Damaged Zone at the Horonobe URL using a Hydro-Mechanical-Damage coupled model, Proc. CouFrac2024- The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, No.P-40.
- Ohno et al. (2024) : Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, Geoenergy, vol.2, geoenergy2023-047.
- 尾崎 (2024) : 講演再録 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開(2)タスクA:物質移行試験, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, pp.128-133.
- Ozaki et al. (2024) : Variation of electrical resistivity distribution around the opened and backfilled tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, Proc. CouFrac2024- The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, No.B-1-3.
- Ozaki and Ishii (2024) : Relationship between fault transmissivity, flow dimensions and effective hydraulic conductivity in siliceous mudstone of the Wakkanai Formation around the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan, Geoenergy, vol.2, geoenergy2023-056.
- Sato et al. (2024) : Prediction of geological characteristics around the experimental galleries at a depth of 500 m in the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan: Overview of a part of Horonobe International Project, Seventh International Conference on Geological Repositories (ICGR-7) ; Empowering Progress in Developing Deep Geological Repositories.
- 末武ほか (2025) : 大規模三次元連成解析に基づく幌延深地層研究センター350m調査坑道での掘削～長期透水試験に対する再現シミュレーション, 第16回岩の力学国内シンポジウム講演集(インターネット), pp.304-309.
- 田村・石井 (2024) : 水圧変化に応答する小規模断層の弾性的な剪断変位量を示す地質学的証拠:幌延の地下研究施設の例, 日本地球惑星科学連合2024年大会.