

幌延深地層研究計画に関する 令和6年度の成果及び令和7年度の計画

(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

令和7年3月11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

解析条件などの詳細説明箇所には、
補足資料と付記しています。

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 (1/3)

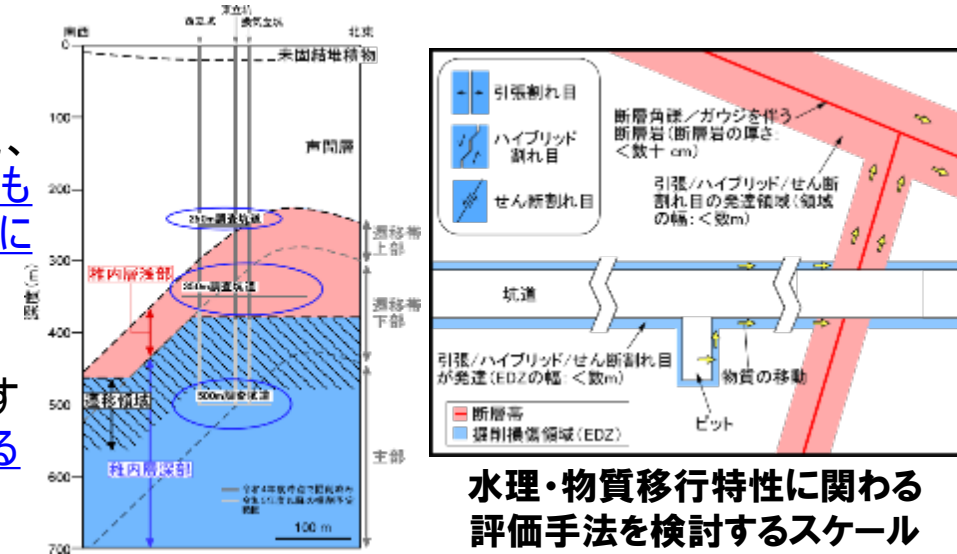
令和6年度調査研究計画で設定した体系化に向けた4つの課題

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

水みちの水理特性や物質の移行特性に関する情報に加え、人工バリアや処分坑道の設計（仕様やレイアウトなど）も考慮した物質移行解析を通じ坑道スケール～ピットスケールにおける閉じ込め性能の評価手法を体系的に整理する。

【令和6年度の計画】

- 人工バリアや岩盤の閉じ込め性能に大きく影響を及ぼすピット周辺の水みちの水理特性や物質の移行特性に関わる評価手法などの整理を進める。



水理・物質移行特性に関わる 評価手法を検討するスケール (イメージ図)

凡例で示す引張割れ目、せん断割れ目、ハイブリッド割れ目が断層帯およびEDZ内に発達

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（試験坑道8および9）において、先行ボーリング調査や物理探査を行い、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に、坑道やピットを掘削する段階に取得する必要がある情報とその情報の取得方法を整理する。また、350m調査坑道の試験坑道6において、実規模スケールの坑道の埋め戻しと止水プラグの施工試験を実施し、埋め戻しと止水プラグの設計から施工に至るまでの一連の技術を確認する。

【令和6年度の計画】

- 500m調査坑道における原位置調査に先立ち、断層や割れ目から坑道などへの湧水量や掘削損傷領域の発達範囲を予測するための解析を行い、原位置調査において取得すべきデータを検討する。試験坑道6周辺の掘削損傷領域の広がりや水理特性を調査するとともに、坑道の埋め戻しと止水プラグの設計を進める。

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 (2/3)

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

多連接坑道の処分孔に人工バリアを設置する場合を想定し、幌延で得られたデータを用いて、湧水抑制対策、処分孔の支保技術、緩衝材の流出現象を評価/抑制する技術、緩衝材の岩盤への侵入現象を評価/抑制する技術を整備する。

【令和6年度の計画】

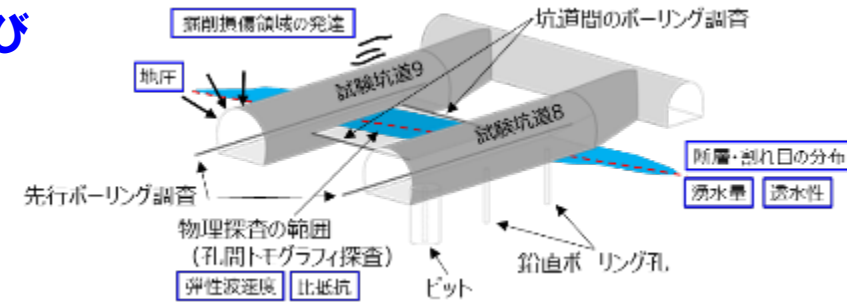
- これまでに得られたデータや深度500mに向けた掘削過程で得られるデータ(右上図)を用いて、多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術や緩衝材の流出現象を評価/抑制する技術について検討を進める。

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

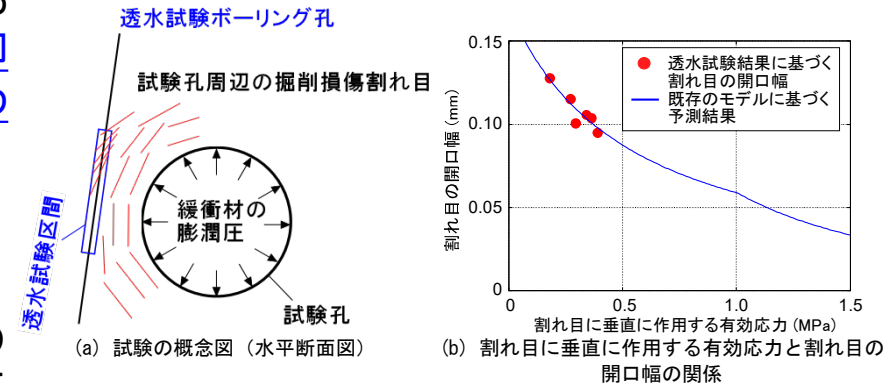
廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報(割れ目の湧水量、掘削損傷領域の広がりなど)の調査・評価手法について、実際に幌延で適用した調査・評価手法を体系的に整理する。

【令和6年度の計画】

- 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(右下図)などを用いて、幌延を事例とした、処分孔周辺に存在する割れ目の開きにくさや処分孔周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法の整理を進める。



500m調査坑道の試験坑道8および試験坑道9における
原位置調査のイメージ図



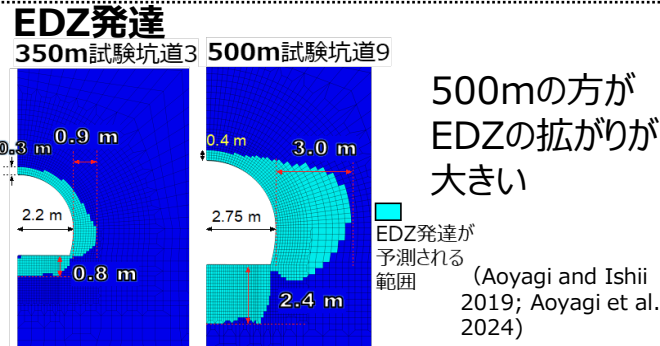
試験孔周辺に発達した掘削損傷割れ目を対象とした
透水試験の概念図と割れ目に作用する有効応力と開口幅の関係

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

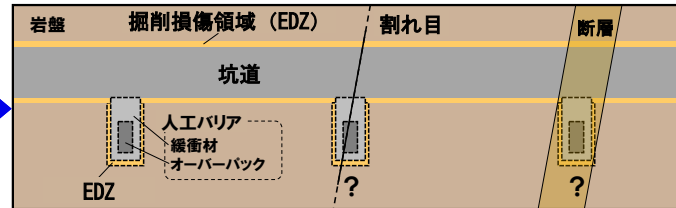
(3/3)

② 処分坑道・ピットを配置するための設計概念や指標および関連技術を体系的に整備

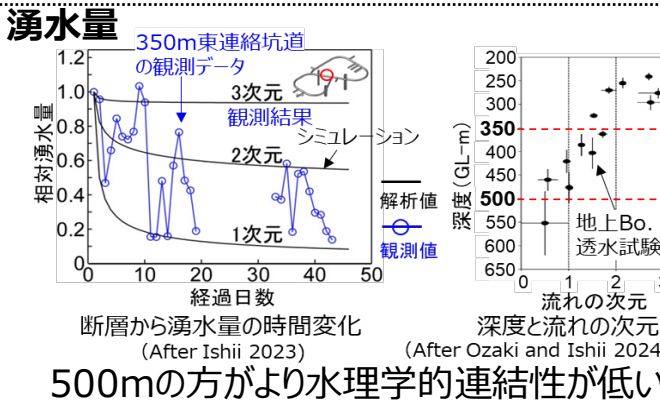
- 実際に坑道を掘削して、地質環境の調査、設計・施工、岩盤力学・水理・物質移動に関わる解析等を実施し、廃棄体設置や坑道・ピットの配置の設定に必要な情報等を整理するなど処分技術を実証



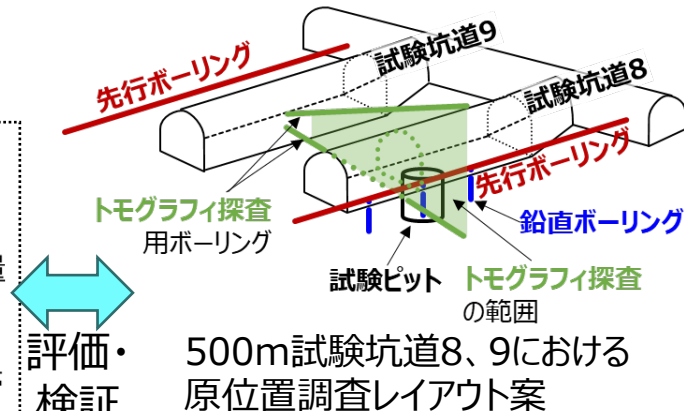
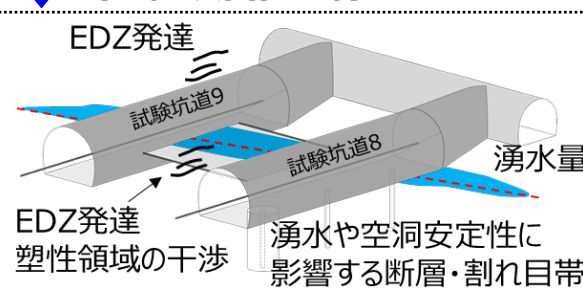
廃棄体定置や坑道・ピット配置の考え方や指標の情報を収集



350m調査坑道で適用性が確認された調査を、350mとは特徴が異なる500m調査坑道に適用し、施工とそれに並行した原位置調査により坑道・ピットの配置を決定する手順を確認



国内外の既存事例やHIPにおいて共有された情報に基づき、着目すべき地質環境特徴（評価項目）を特定



評価・検証

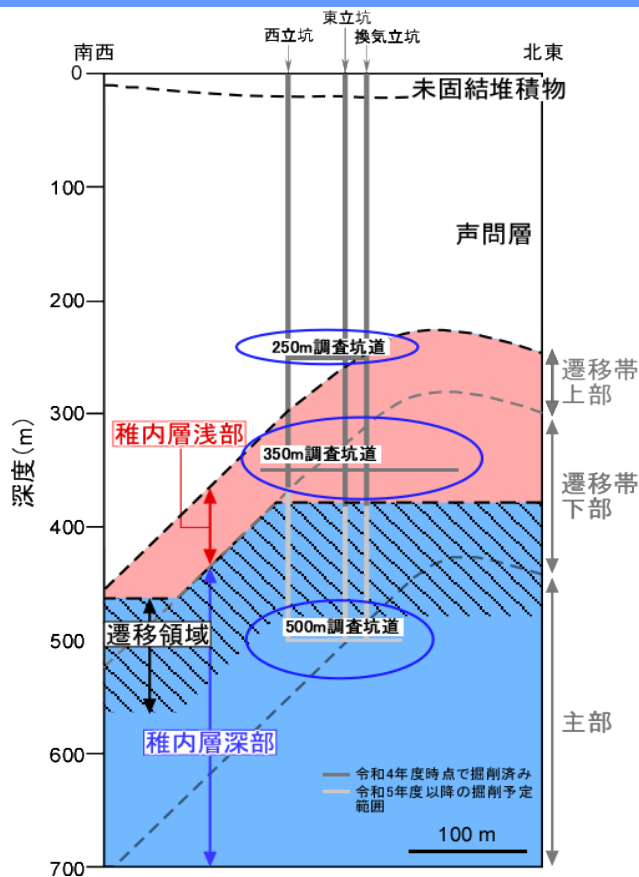
④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に資する地質環境の調査・評価情報の整理

③ 地質環境特性に基づく工学的対策（湧水抑制、処分孔支保、緩衝材流出抑制等）の検討

① 特性の異なる岩盤中の物質移行モデルの構築、地下深部から地上までの物質移行・閉じ込め性能の評価(安全評価技術の適用性評価)

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

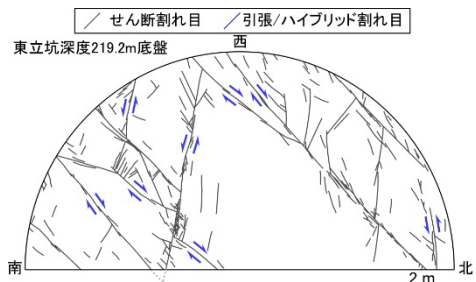
①坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化



地質断面図

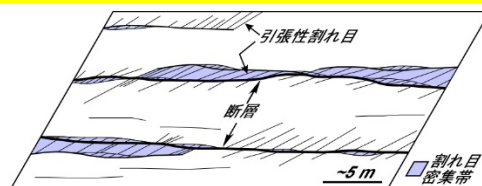
稚内層を力学的検討に基づき、割れ目が開きやすい（隙間ができやすい）浅部領域（ $DI < 2$ ）と割れ目が開きにくい（隙間ができにくい）深部領域（ $DI > 2$ ）に区分（ $DI = \text{平均有効応力} / \text{引張強度}$ ）（Ishii et al., Hydrogeol J, 2025）

深度250m（声問層）



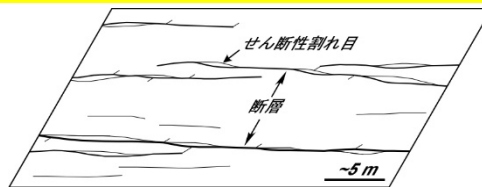
せん断割れ目のスケッチ (Ishii, 2017, IJRMMS)

深度350m（稚内層浅部: $DI < 2$ ）



断層のイメージ（多数の引張性割れ目が断層の連結を促進）（Ishii, 2016, JGR）

深度500m（稚内層深部: $DI > 2$ ）



断層のイメージ（連結を促進する引張性割れ目の発達が限定的）（Ishii, 2016, JGR）

- 数十本/10mの1D頻度でせん断割れ目が存在するものの、その開口性や水理学的連結性は限定的（舟木ほか, 2009, 応用地質）；坑道沿いにEDZ（青柳ほか, 2014, 土木学会論文集）
- 50～60%程度マトリクス間隙

HIP Task Aの中で検討



- 約1本/10mの1D頻度で存在する断層が水みちのネットワークを形成（Ishii, 2017, Eng Geol; Ishii et al., Hydrogeol J, 2025）；坑道沿いにEDZ（Aoyagi & Ishii, 2019, RMRE）
- 30～40%程度マトリクス間隙

既存の成果を活用しつつ検討

- 約1本/10mの1D頻度で断層が存在するものの、その水理学的連結性は限定的（Ishii, 2017, Eng Geol; Ishii et al., Hydrogeol J, 2025）；坑道沿いのEDZ？
- 30～40%程度マトリクス間隙

1.2 物質移行試験の成果を活用しつつ検討

既存の成果やHIPからの成果に基づき、水みち特性の異なる岩相の物質移行モデルを検討

⇒ 人工バリアや処分坑道の設計（仕様やレイアウトなど）も考慮した物質移行解析を検討

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

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

令和6年度成果概要

- 声問層の物質移行モデルの検討に必要な原位置トレーサー試験(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)を計画した上で孔間トレーサー試験を実施
- 孔間トレーサー試験の実施後、HIPタスクAの各機関で検討した物質移行モデルによる再現解析を実施

Task A全体スケジュール

令和6年度

Year	2023					2024					2025				2026				2027				2028				2029
Month	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3		
Project year	1	2				3				4				5				6				7					
Project Phase	Phase 1									Phase 2																	
A-1: 原位置試験案の検討																											
A-2: 室内試験																											
A-3: 原位置試験																											
A-4: 数値解析																											
A-5: 原位置試験																											
A-6: 数値解析																											

Phase 1

Phase 2

令和7年度計画

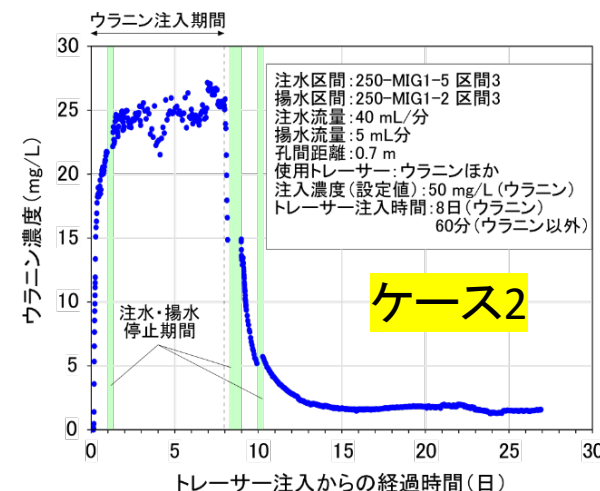
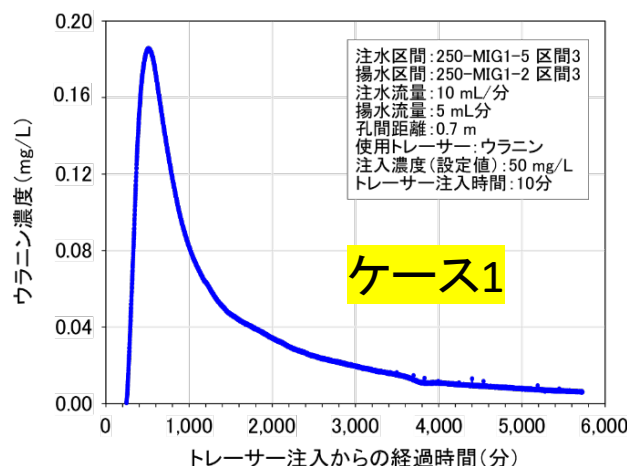
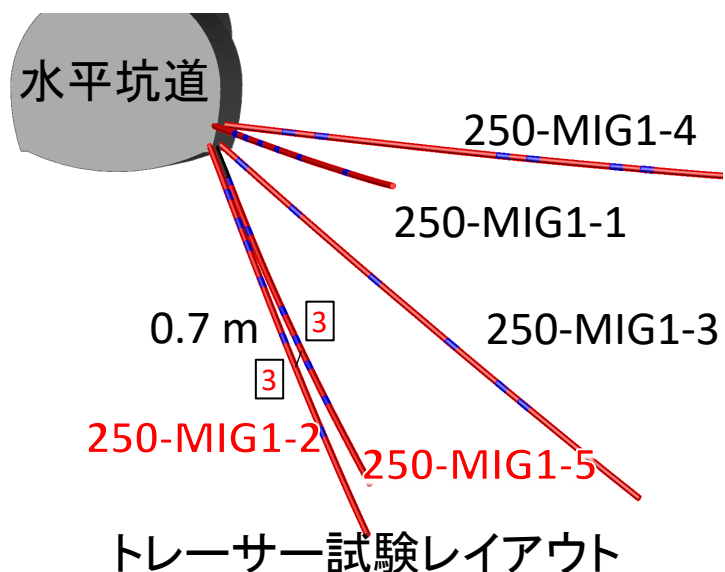
- 令和6年度に取得されたトレーサー試験結果の解析評価
- 異なる岩相に対する物質移行モデルの検討と、人工バリアや処分坑道の設計を考慮した物質移行解析手法の検討

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

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

令和6年度成果概要:声問層における孔間トレーサー試験

- 物質移行特性に関するデータに乏しい声問層(DI>2)の割れ目(せん断割れ目)を対象に2孔間の原位置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



トレーサー試験結果(ケース2はウラニンの試験結果のみ)

ケース2のウラニン以外のトレーサーについては現在濃度分析を実施中。また、ケース2では、マトリクス拡散の影響を評価するために、トレーサー試験中に注水・揚水を3回停止(Stop and Flow test, Reedy et al, 1996)

使用トレーサー(括弧内は注入濃度)

ケース 1	ケース 2
ウラニン (50 mg/L)	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)

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

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

背景

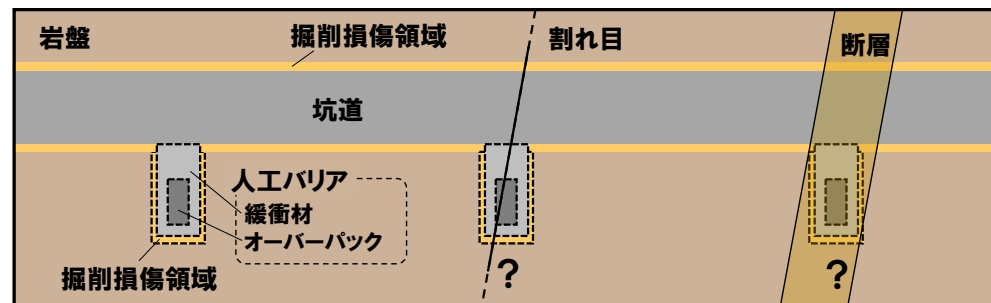
処分場の設計・施工・操業に貢献し得る技術オプションの開発として、新第三紀堆積岩類を対象としている幌延URLでの調査・施工を事例に、以下を実施；

- 処分坑道や処分孔を、好ましい適性を有する岩盤に配置・建設するためには、以下を考慮した詳細レイアウト設計が重要
 - ✓ 交差する断層・割れ目の分布や特徴
 - ✓ 人工バリアの品質への影響
(例えば、湧水による緩衝材の流出)
 - ✓ その影響に対してとり得る対策の有無

処分場の施工・操業の期間における調査により、処分坑道や処分孔の配置を合理的に判断できる指標が必要

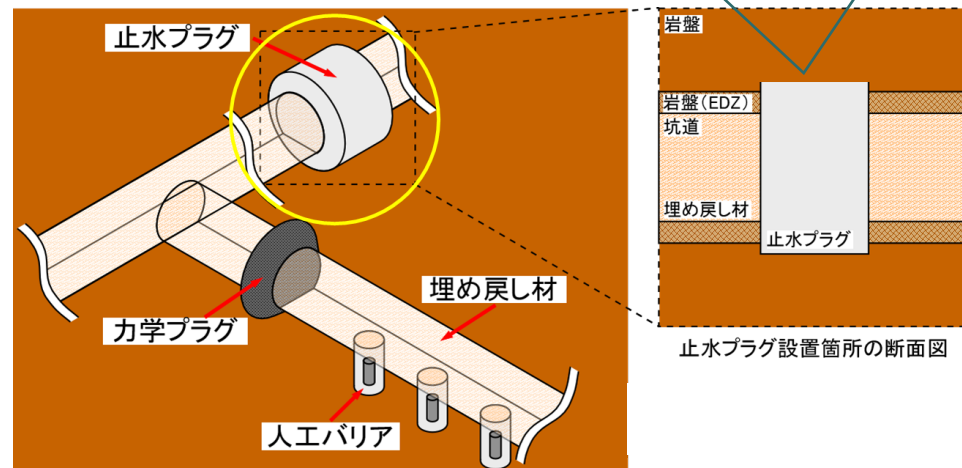
- 坑道閉鎖後に、坑道やその周辺の掘削損傷領域(EDZ)が選択的な物質移行経路になることを防ぐために、坑道埋め戻しや止水プラグといった坑道シーリング技術がその対策

設計概念の詳細化や施工技術の成立性の確認が課題



処分坑道や処分孔を配置する際に考慮する
割れ目や断層の特徴を表す模式図

止水プラグによるEDZが連続した卓越
移行経路となることを抑制

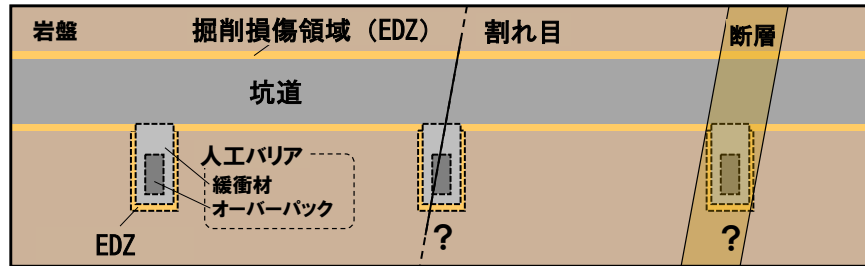


処分場の閉鎖段階を表す模式図

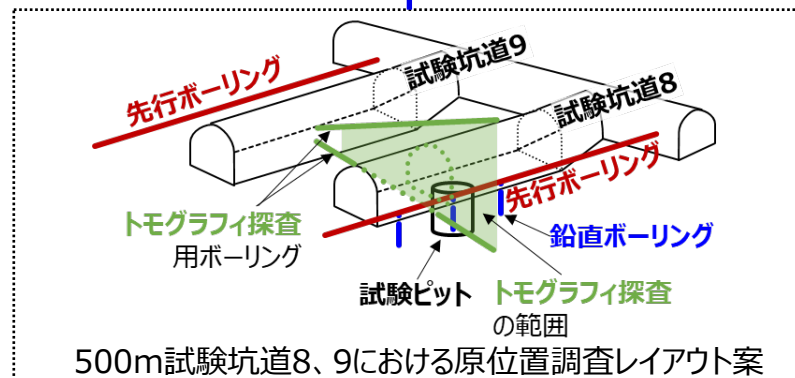
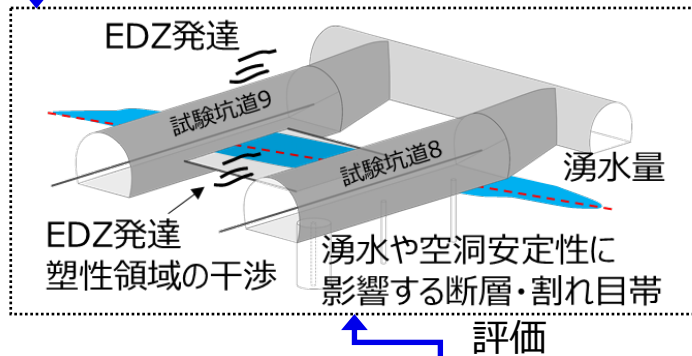
2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

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

実施内容： 坑道・ピットを配置する際に必要となる情報の取得方法の整理

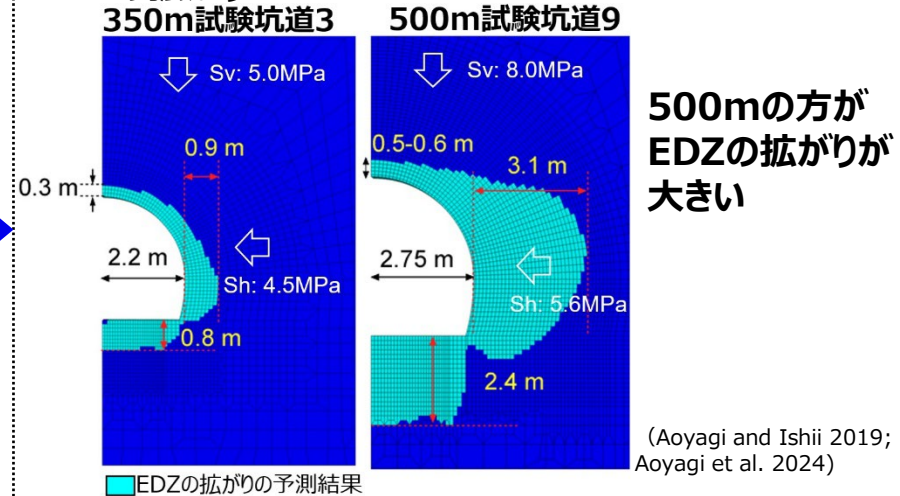


廃棄体定置や坑道・ピット配置の考え方や指標の情報を、国内外の既存事例調査やHIPの活用により収集し、原位置で確認する地質環境特徴（評価項目）を特定

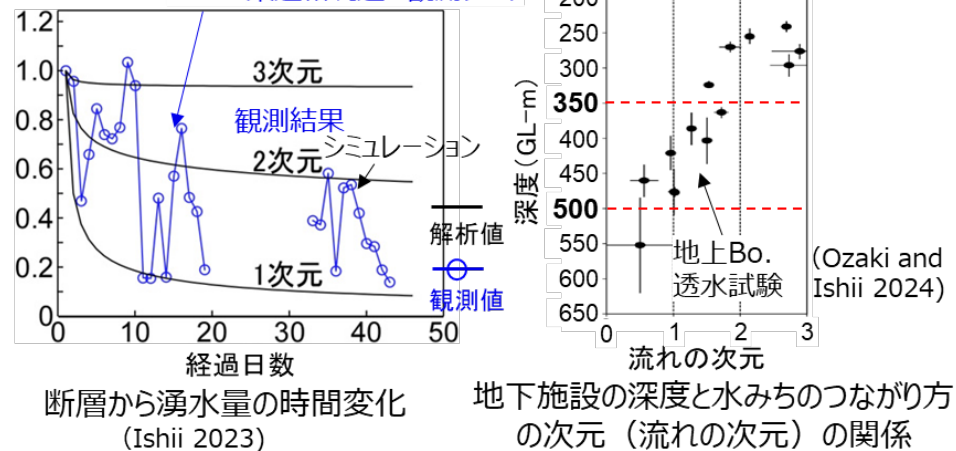


これまでに構築した概念や評価手法により深度500mの場を予測

EDZの拡がり



湧水量 350m東連絡坑道の観測データ



500mの方がより水理学的連結性が低い

妥当性評価・検証

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

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

令和6年度成果概要

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

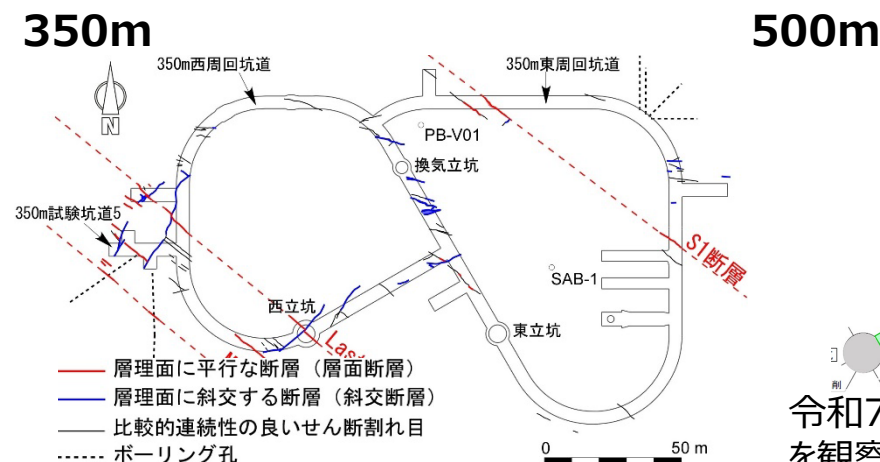
岩盤力学

- 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

- 国内外の既存情報（NUMO-SC、SKB）に基づき、原位置において確認する地質環境特性（評価項目）を特定
- 試験坑道8、9における掘削損傷領域の拡がりと湧水量の予測には、350m調査坑道における調査において妥当性が確認された手法を適用し、深度350mにおける特徴との違いを確認



350m：坑道壁面観察により断層と坑道との交差状況を把握

⇒ 主な水みちである斜交断層のサイズが小さいため、離れた地点のパイロット孔に基づいた断層と坑道との交差状況の予測には大きな不確実性が伴う

500m：坑道掘削前のボーリング調査と坑道の底盤観察を令和7年度に実施し、断層と坑道との交差状況を把握

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

令和6年度成果概要

評価項目

(原位置において確認すべき特徴)

地質構造

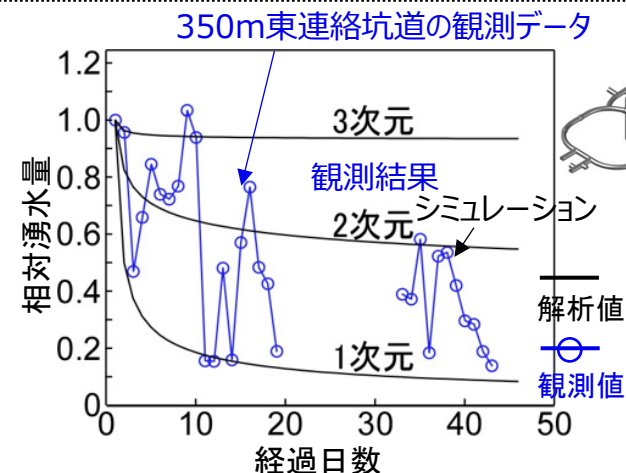
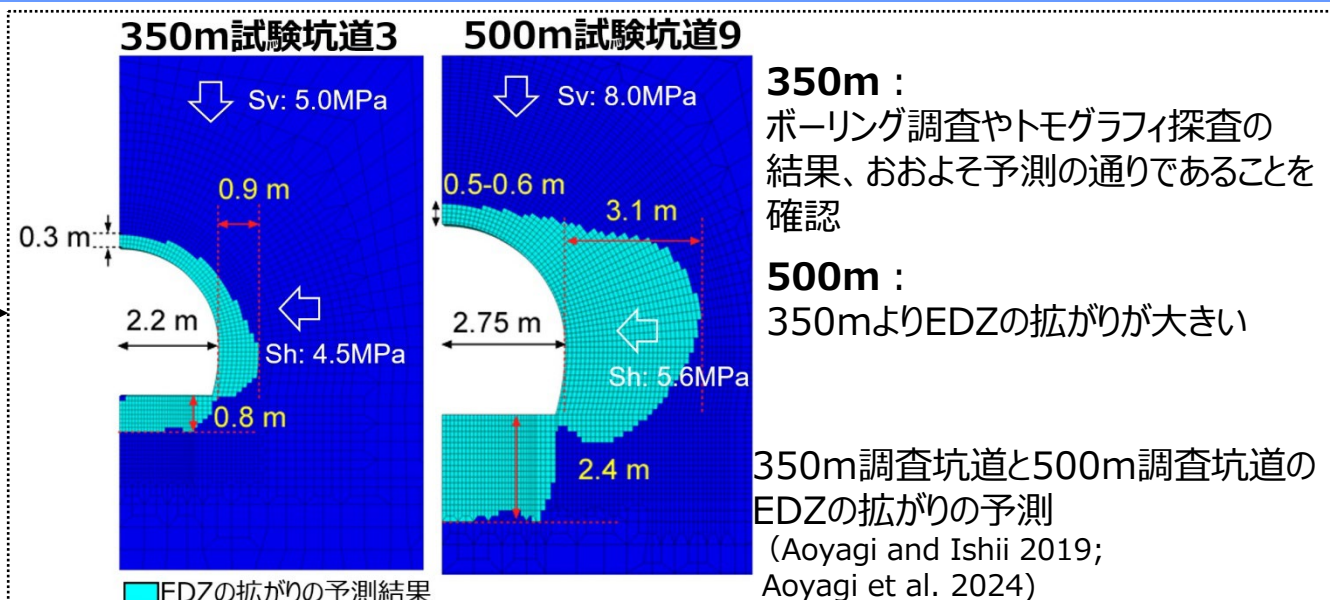
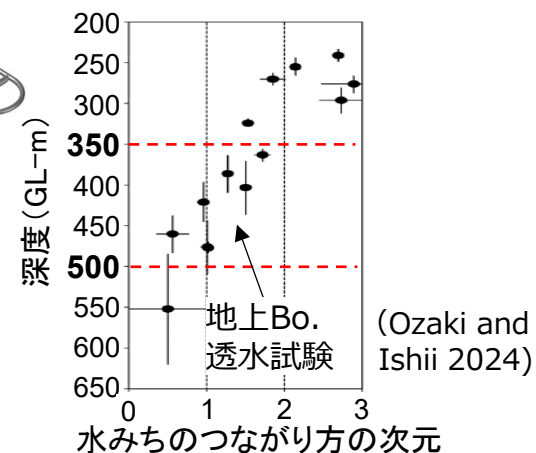
- 顕著な湧水を伴う断層
- 力学強度の低下を伴う断層/割れ目帯
- EDZ割れ目

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

断層から湧水量の時間変化
(Ishij 2023)

地下施設の深度と水みちのつながり方 の次元の関係

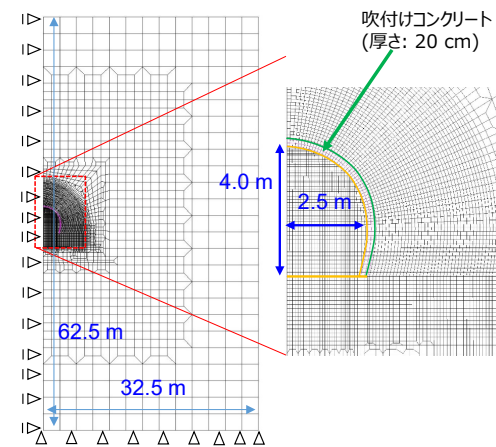
500mは350mと比較して、水理学的連結性が低く、湧水量の減少がより早い

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

解析モデルの例（500m試験坑道9）

吹付けコンクリート
(厚さ: 20 cm)

- 二次元の掘削解析を水理・力学連成させることにより実施（解析コードはFLAC3D）
- 350mおよび500m調査坑道については、実際の坑道の寸法やコンクリート打設厚さを再現したモデルを構築。
- 岩盤物性値として、室内力学試験で得られた値を採用。コンクリートは打設後24時間経過時点の物性値を設定
- 初期地圧条件は、350mについては水圧破碎試験、500mについては水圧擾乱試験により得られた値を採用
- 間隙水圧値は坑道掘削前の計測値を採用
- 破壊規準として、Crack initiation stress（実際にマイクロクラックが生じ始める応力）を一軸および三軸圧縮試験から求め、Mohr-Coulombの破壊規準線を設定
- 掘削時は壁面は非排水状態とし、掘削完了後は壁面およびEDZに相当する破壊領域を排水条件に設定



解析物性値 (Aoyagi et al.2024)

	350mの稚内層岩石	500mの稚内層岩石	コンクリート
ヤング率 (GPa)	1.82	2.12	9.29
ポアソン比	0.17	0.24	0.2
粘着力(MPa)	2.37	2.26	-
内部摩擦角 (degree)	17.5	19.6	-
引張応力(MPa)	1.83	1.2	
間隙率	0.4	0.35	-
密度 (kg/m ³)	1840	1990	2350
Skempton's coefficient, B	0.83	0.72	-
Biot's coefficient, α	0.92	0.95	-
透水係数 (m/s)	1.0×10^{-11}	1.0×10^{-12}	-

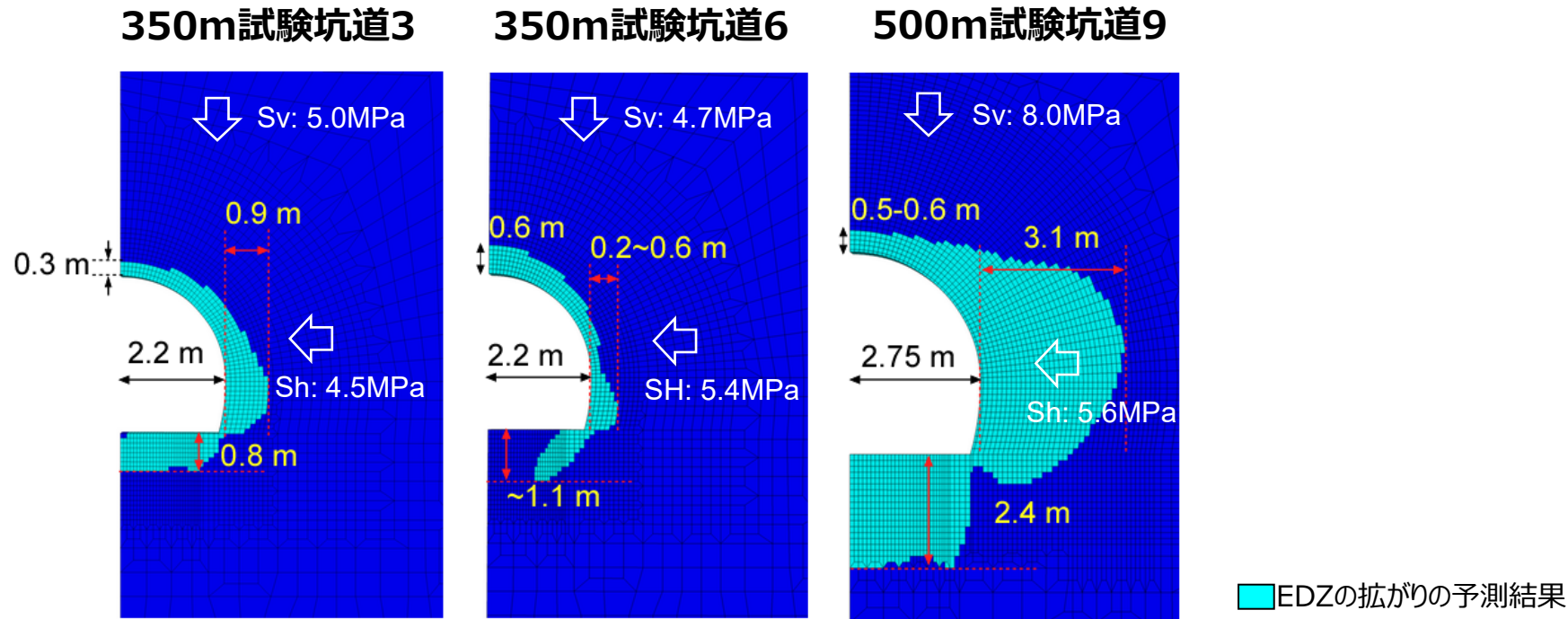
地圧条件 (Aoyagi et al. 2024)

	SHmax	Shmin	Sv	PP	(MPa)
350m試驗坑道3	6.0	4.5	5.0	2.4	
350m試驗坑道6	5.4	4.2	4.7	1.8	
500m試驗坑道9	7.2	5.6	8.0	4.3	

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

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

令和6年度成果詳細 EDZの拡がりの予測解析



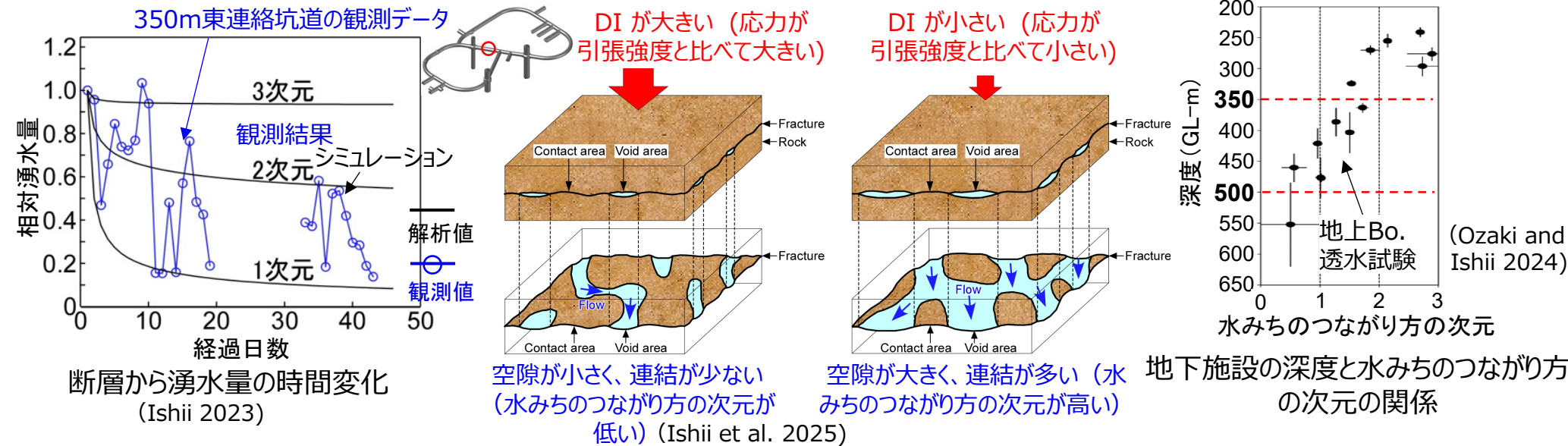
(Aoyagi and Ishii 2019; Aoyagi et al. 2024)

- 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と比較して違い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していく。

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

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

令和6年度成果詳細 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連した最近の成果】

- 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に関連しており、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を考慮した解析により、坑道湧水量の時間変化が予測可能であることを示唆

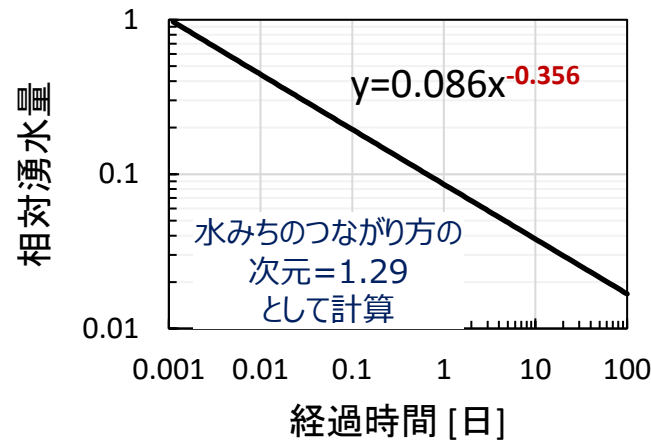
2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

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

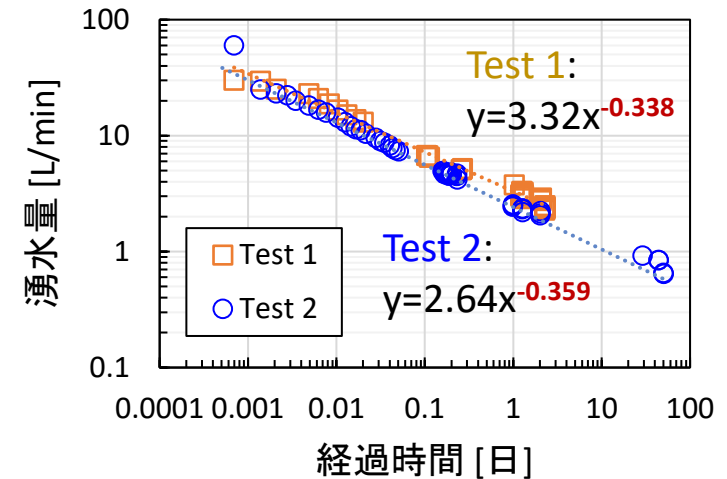
令和6年度成果詳細 坑道掘削時の湧水量の予測解析



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476.5m の断層 (水みちのつながり方の次元 1.29) を対象として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500m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500mにおいてパイロット孔や坑道の湧水量観測を行い、予測の検証を実施予定

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

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

令和6年度成果概要

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

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

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

トモグラフィ探索

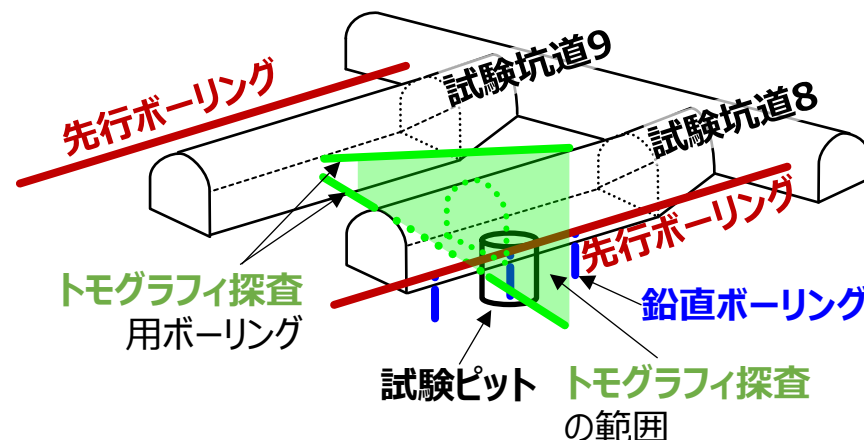
- 弾性波
- 透水試験
- 湧水量計測

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を検討

⇒R7年2月から先行ボーリングを実施

【令和7年度計画】

- 500m試験坑道8、9における原位置調査の調査結果に基づき、令和6年度に実施した予測手法の妥当性確認と手法の更新を実施

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

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

地層処分場の閉鎖段階では、処分場を生活環境から隔離するために、処分場の操業のために建設した坑道を埋め戻すとともに止水プラグを設置して閉鎖を確実にすることが検討されている。堆積岩系の岩盤においては、結晶質岩系の岩盤と比べ国内外での検討事例が少なく、また力学特性やEDZの分布等が異なるため、止水プラグの施工の観点で以下のような課題がある。

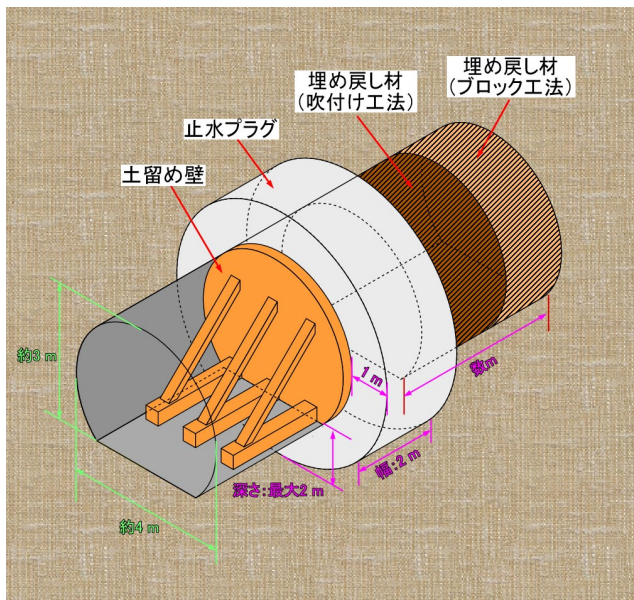
- 坑道の空洞安定性の観点から施工される鋼製支保/吹付けコンクリート等の止水プラグ施工時の取り扱い
- EDZを拡大させない切欠きの拡幅掘削方法
- 切欠き部拡幅後の坑道天端部の空洞安定性を考慮した止水プラグの施工方法

堆積岩を対象とした止水プラグが実際に構築可能かどうか確認するために、350m試験坑道6における原位置施工試験を実施して、坑道の埋め戻しから止水プラグの設置までの一連の施工技術を確認・実証する。

原位置施工試験の実施スケジュール

(青線：机上検討・室内試験、オレンジ線：幌延地下研を利用した取組)

止水プラグの原位置施工試験 (350m試験坑道6)	R5 (2023)	R6 (2024)	R7 (2025)	R8 (2026)	R9 (2027)
原位置施工試験計画の検討	研究計画の具体化、施工試験の準備				
坑道シーリングの設計 (埋め戻し材、止水プラグ)	材料物性試験、施工品質の確認（室内試験）、地上施工試験（埋め戻し材・止水プラグ）				
地質環境調査の実施 (EDZの分布、岩盤の水理特性)	ボーリング調査、弾性波・比抵抗トモグラフィ探索、透水試験・間隙水圧測定等				
原位置施工試験の実施	坑道の埋め戻し、止水プラグの設置、計測データ取得				



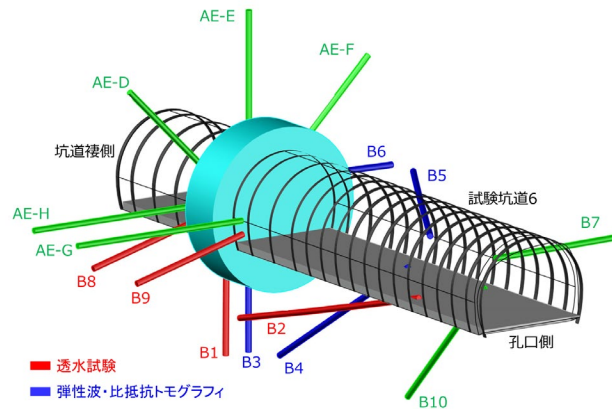
坑道埋め戻しと止水プラグの
原位置施工試験の概念図

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

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

令和6年度成果概要

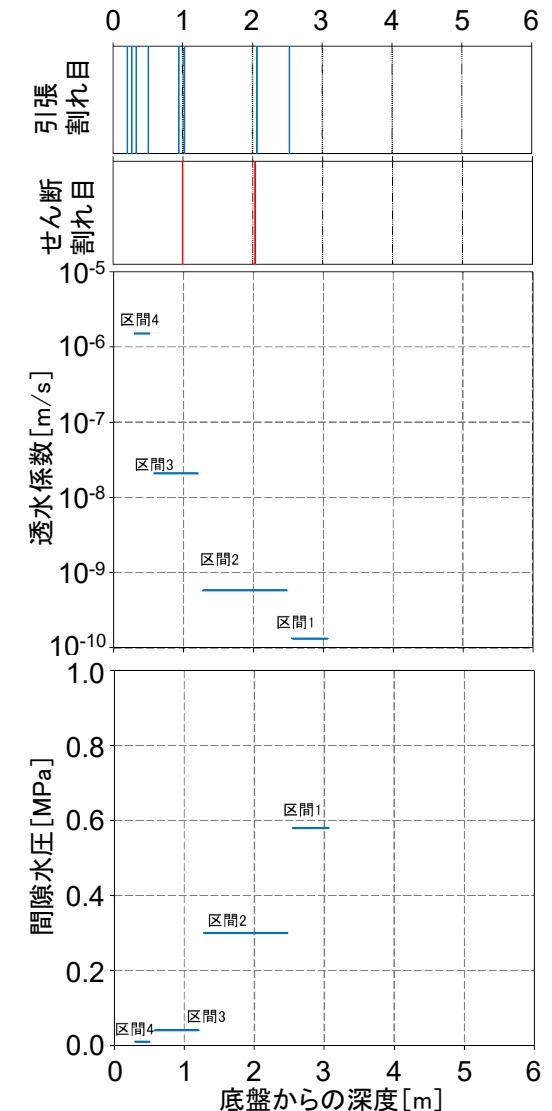
- 試験坑道6周辺の割れ目の分布状況と岩盤の水理特性を把握するために、ボーリング孔の掘削を行い、コア観察、BTV観察、トモグラフィ探査、水理試験を実施。
- コア観察の結果より、坑道の底盤部（B1孔、B2孔、B4孔）では深度1.2 m程度まで、側壁部（B5孔、B6孔）では深度1.0 m程度まで引張割れ目の頻度が高いことを確認。
- トモグラフィ探査では、P波・S波弾性波トモグラフィと比抵抗トモグラフィを実施して、坑道周辺のEDZや水分量分布を推定するためのデータを取得。
- 水理試験の結果より、坑道の底盤部では岩盤の掘削面から深度1.2 m程度までの範囲ではそれよりも深い位置の岩盤と比較して透水係数が 10^{-8} m/s $\sim$ 10^{-6} m/sと相対的に高い値を、間隙水圧が0.01 MPa $\sim$ 0.04 MPaと相対的に低い値を示すことを確認。



試験坑道6におけるボーリング孔のレイアウト



S波弾性波探査の実施の様子



坑道底盤部(B2孔)における割れ目の分布と水理試験の区間における透水係数および間隙水圧

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

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

令和6年度成果概要

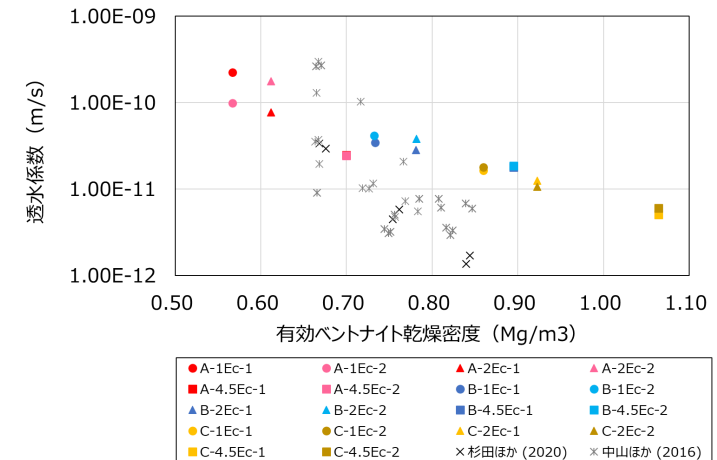
- 坑道の埋め戻しの施工方法として吹付け工法に着目し、幌延泥岩とベントナイトを混合した埋め戻し材の材料特性を把握するための室内試験を実施。
- 吹付け工法の施工性を確認するための地上吹付け試験を実施。室内試験の結果を基に2種類の埋め戻し材の材料配合を設定し、試験では初期含水比を変化させ、施工後の乾燥密度や施工性へ及ぼす影響を確認。

地上吹付け試験の材料配合と条件

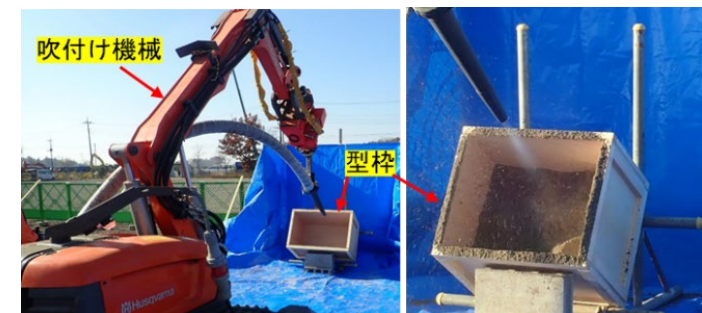
試料名	埋め戻し材配合		施工含水比	1ケース当たりの試験数量
	クニゲルV1	幌延泥岩		
埋め戻し材 A	30 %	70 %	36.0 % + 2条件	2
埋め戻し材 B	40 %	60 %	32.5 % + 2条件	

令和7年度計画

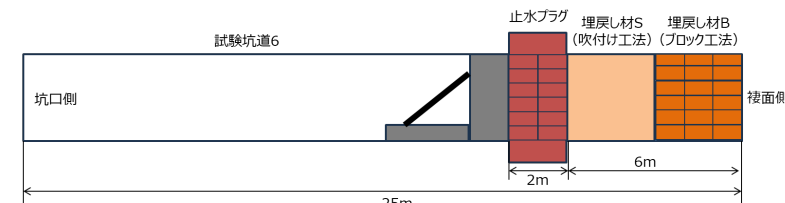
- ボーリング調査による割れ目の観察やトモグラフィ探査、水理試験を継続して、坑道周辺のEDZの拡がりや水理特性の評価を実施。
- 坑道周辺の調査結果を踏まえて、坑道埋め戻しと止水プラグの性能や材料仕様を検討。施工方法についても地上試験を実施して原位置施工試験に向けた検討を実施。
- 原位置施工試験の概念図から詳細化を図り、試験レイアウトや実施手順などの試験計画の策定。



幌延泥岩を用いた埋め戻し材の 有効ベントナイト密度と透水係数の関係



埋め戻し材の地上吹付け試験



試験坑道6における坑道埋め戻しと 止水プラグの施工試験イメージ

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

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

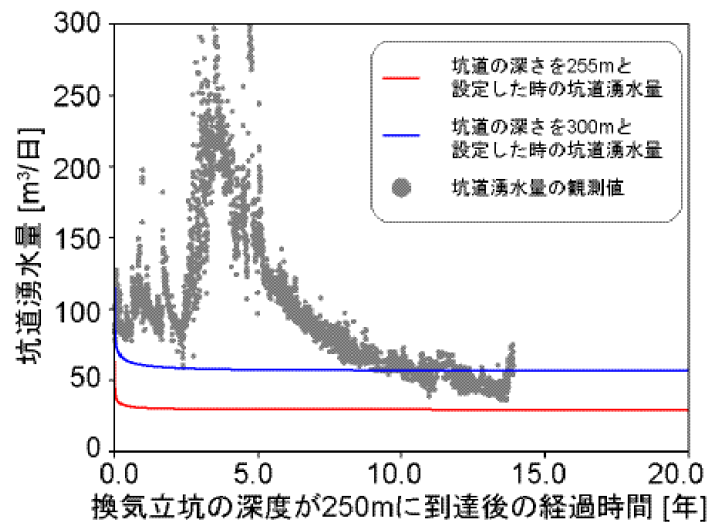
- ①近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量の予測手法と湧水抑制対策への反映
- ③断層や割れ目からの定常的な湧水量や減少量の予測手法と流出抑制対策への反映

令和6年度成果概要

- 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、定常的な湧水量に寄与する湧水箇所を稚内層浅部まで(深度255m～300m)と仮定することで、立坑/坑道掘削に伴う定常的な湧水量とURL周辺の地下水水圧の変化を再現。深度400m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500mまで掘削しても定常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。

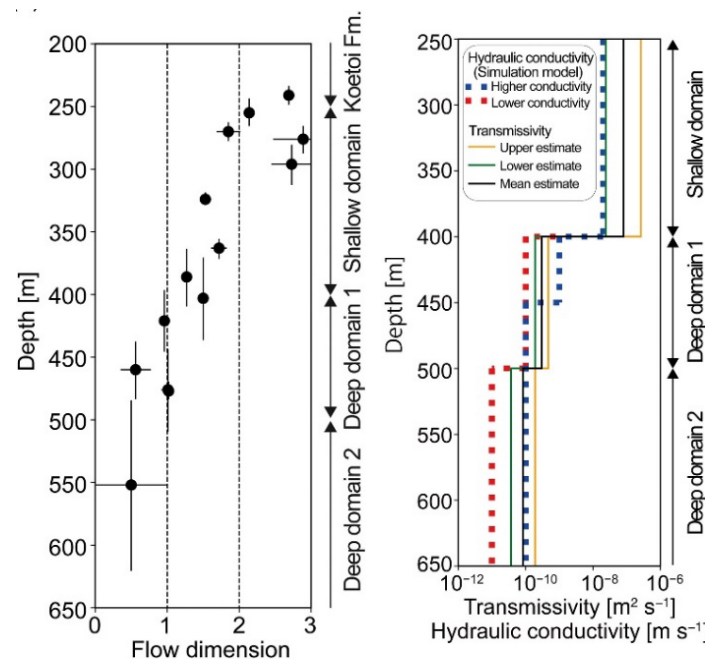
令和7年度計画

- 予測結果の検証に向け、立坑や水平坑道掘削時の湧水量の観測を継続。
- 坑道および断層や割れ目からの湧水量の減少速度を予測するための手法整備に向けた解析を実施。



湧水量の観測値と解析値の比較

(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)19

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

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

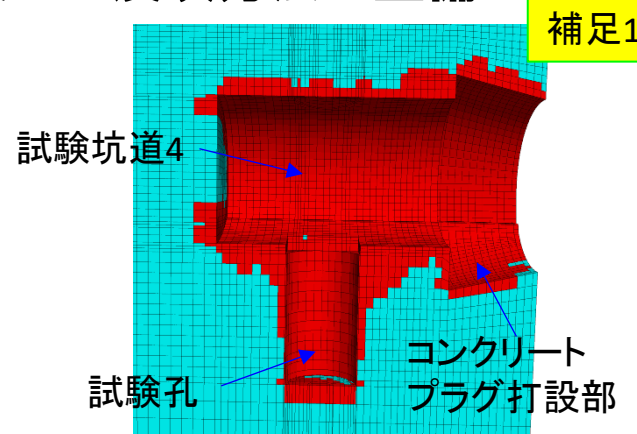
④ピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と侵入抑制対策への反映方法の整備

令和6年度成果概要

- 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。

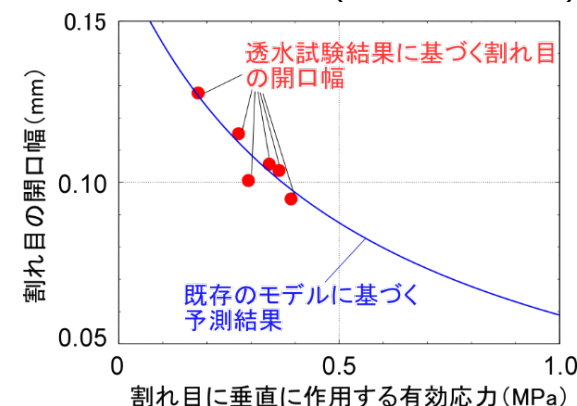
令和7年度計画

- 500m調査坑道において施工予定の試験孔周辺のEDZの拡がりに関する予察的な解析を実施するとともに、EDZの拡がりを把握するための試験計画を検討。
- 350m調査坑道を対象として断層や既存割れ目を対象として割れ目の開きにくさを評価するための試験計画を検討。



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）



膨潤圧の発生による割れ目に作用する応力と開口幅の関係（Aoyagi and Ishii 2024）

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

④廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

令和6年度成果概要

- 割れ目の発達する堆積岩について、いくつかの地質学的な情報に基づいて分類し、幌延の岩石がどの分類に区分されるかを整理。

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続性と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fris泥岩（ス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）				

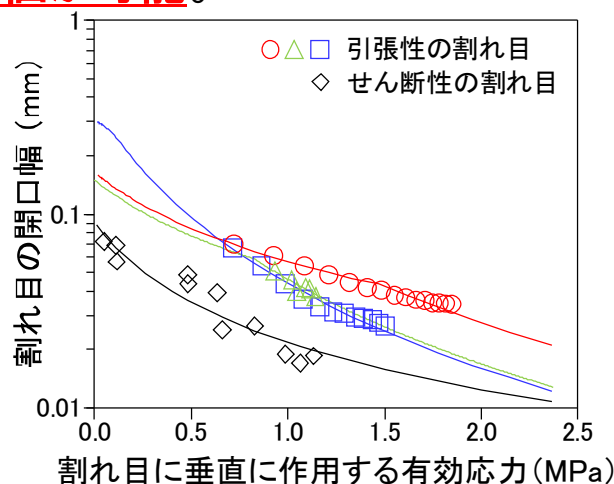
- 割れ目の幅とその開きにくさ、ピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法を既存の成果に基づき整理し、分類I-aおよびI-bの堆積岩に反映可能な成果として提示。

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

④廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

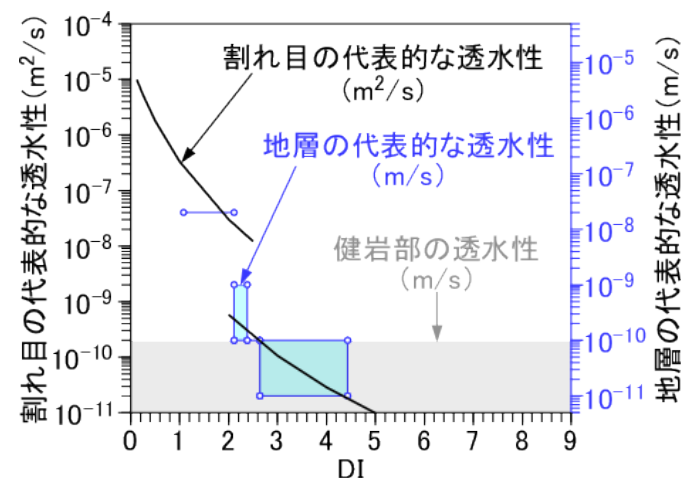
令和6年度成果概要

- 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)

令和7年度計画

- 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に関する調査・評価手法に関する整理を拡充。
- 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報のうち、割れ目からの湧水量や、ピット周辺のEDZの拡がりについて、調査・評価手法を整理。

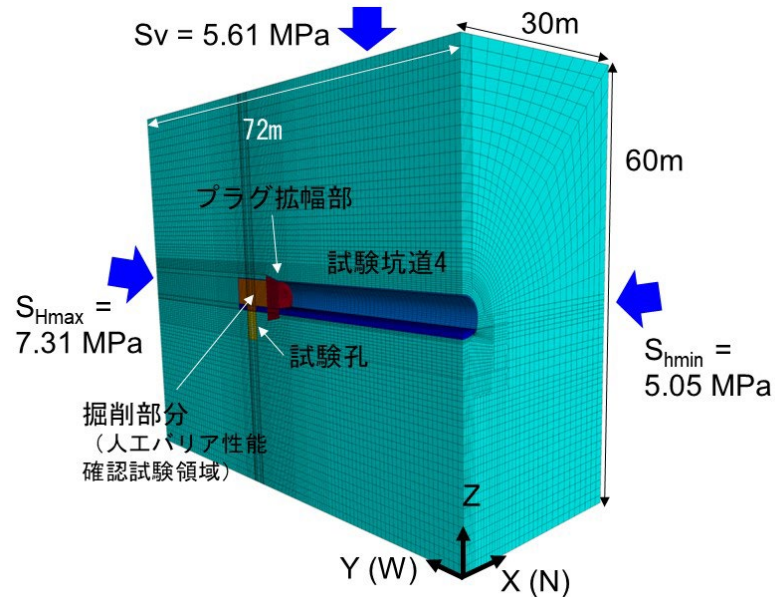
2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化に係る成果

- Aoyagi, K. (2024) : Overview of the Horonobe International Project (HIP) , Seventh International Conference on Geological Repositories (ICGR-7) : Empowering Progress in Developing Deep Geological Repositories.
- 青柳和平, 尾崎裕介, 大野宏和, 石井英一 (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.
- Aoyagi, K., Ozaki, Y., Tamura, T., Ishii, E. (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.
- 青柳和平, 館幸男 (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.
- 早野明 (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, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E. and Suzuki, Y. (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, E., Ozaki, Y., Aoyagi, K., Sugawara, K. (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, J.W., Hong, C.H., Kim, J.S. (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, H., Ishii, E. and Takeda, M. (2024) : Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, Geoenergy, vol.2, geoenergy2023-047.
- 尾崎裕介 (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, Y., Aoyagi, K., Ohno, H., Kimura, S. (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, Y., Ishii, E. (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, N., Murakami, H., Aoyagi, K., Tamura, T. and Hayano, A. (2024) : Prediction of geological characteristics around the experimental galleries at a depth of 500 n 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.
- 末武航弥, 緒方奨, 安原英明, 青柳和平, 乾徹, 岸田潔 (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.
- 田村友識, 石井英一 (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.

補足1-1

ピット周辺のEDZの解析の詳細（青柳ほか、2025）

数値解析モデルと地圧条件



岩盤と吹付けコンクリートの物性

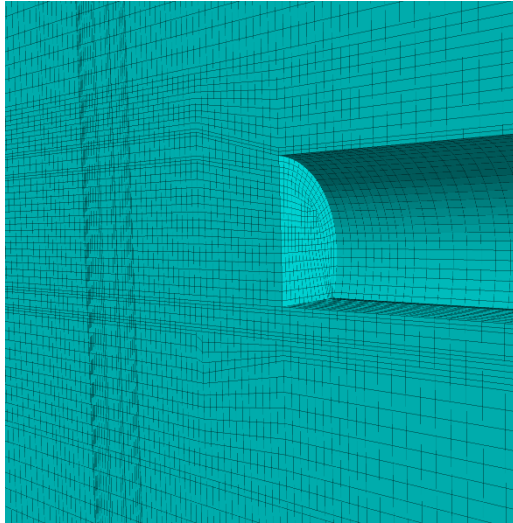
物性	岩盤	コンクリート
ヤング率 (GPa)	1.82	9.29
ポアソン比	0.19	0.2
密度 (g/cm ³)	1.84	2.35
見掛けの粘着力 (MPa)	2.37	—
見掛けの内部摩擦角 (°)	17.5	—

- 初期地圧は地下施設建設前の水圧破碎法により推定された値を採用
- 一軸及び三軸圧縮試験でCrack initiation stress (マイクロクラックが発生し始める応力状態) に相当する応力を基にMohr-Coulombの破壊規準を設定
- 破壊と判定された領域をEDZと評価。破壊後の要素は完全塑性挙動
- コンクリートのヤング率は材齢24時間のものを設定
- 鋼製支保工は省略

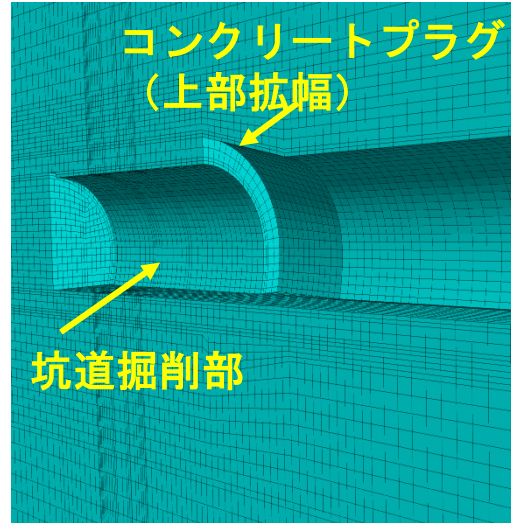
補足1-2

坑道、試験孔掘削の解析での再現

①プラグ手前までの掘削

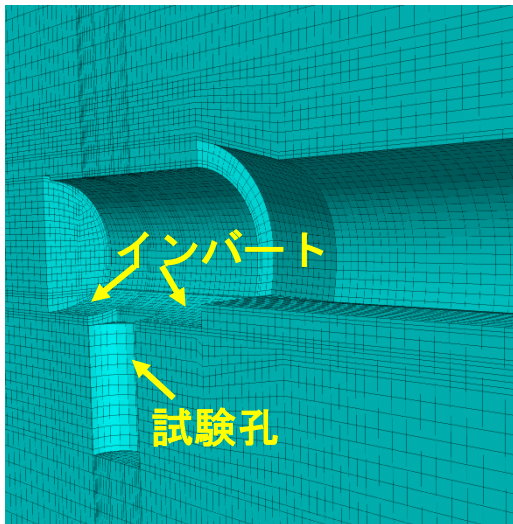


②人工バリア性能確認試験領域の掘削

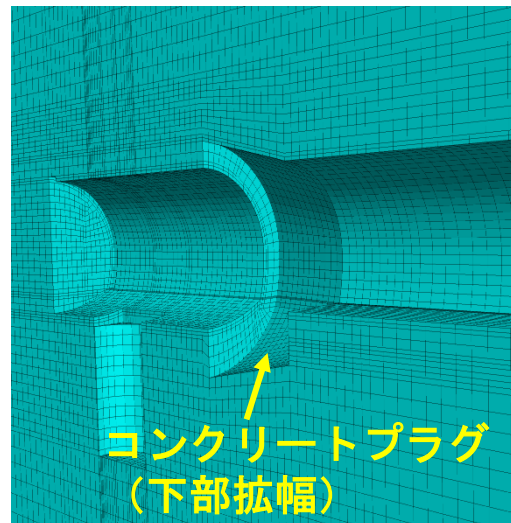


- 実際の施工に合わせ、プラグ部は1m間隔、坑道部は1.5m間隔で掘削
- 掘削後、吹付け部に相当する要素を追加
- その後、次のサイクルの掘削に移行

③インバートと試験孔掘削



④プラグ下部の拡幅

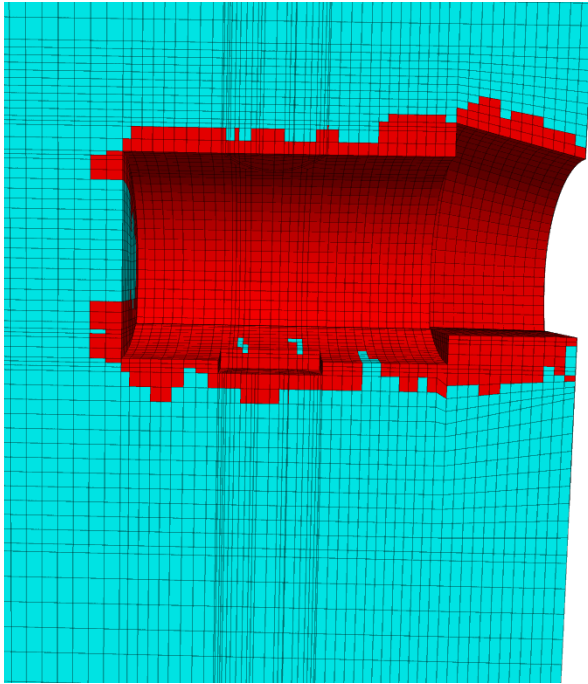


- 試験孔は約5m分の要素を一気に取り除いたうえで、収束するまで計算を進める
- プラグ下部についても、相当する要素を一気に除去して収束するまで計算を進める

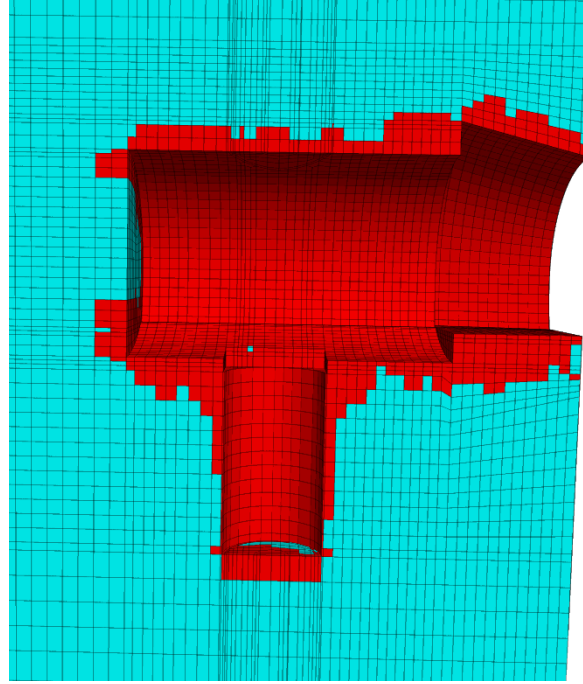
補足1-3

EDZの三次元的な広がり

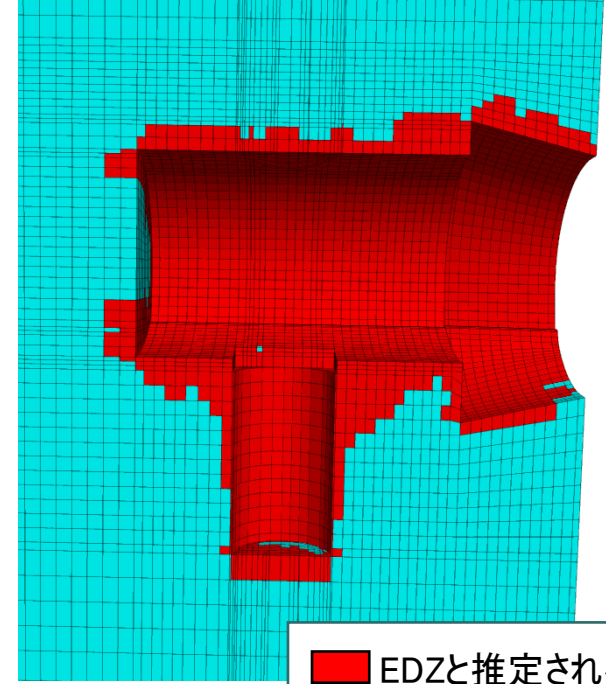
試験坑道掘削完了後



試験孔掘削後



プラグ下部拡幅後



EDZと推定される領域

- 試験坑道掘削後は、坑道周辺にEDZが発達することを確認
- 試験孔掘削後、試験孔浅部において、試験坑道の底盤のEDZと連結することによりEDZが拡大する傾向を確認
- プラグ下部の拡幅により、試験孔からプラグ下部の間の岩盤においてEDZが拡大することを確認