

幌延深地層研究計画
令和 7 年度調査研究成果報告

令和 8 年 7 月

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

本資料に関するお問い合わせは、下記へお願いいたします。

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 総務・共生課

〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2

TEL : 01632-5-2022

FAX : 01632-5-2033

目次

1. はじめに.....	1
2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題.....	3
(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認.....	3
(2) 処分概念オプションの実証.....	3
(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証.....	4
3. 令和7年度の主な調査研究の成果.....	9
(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認.....	9
(2) 処分概念オプションの実証.....	9
(3) 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得.....	12
(4) 地下施設の建設・維持管理、環境調査.....	12
(5) 開かれた研究・成果の発信.....	12
4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認.....	17
4.1 人工バリア性能確認試験.....	17
5. 処分概念オプションの実証.....	22
5.1 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.....	22
5.1.1 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.....	22
(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.....	24
(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.....	35
(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.....	47
(4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理.....	57
6. 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得.....	63
(1) 岩盤の水理.....	63
(2) 地下水と岩石の地球化学.....	64
(3) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発.....	67
(4) 地震観測.....	69
7. 地下施設の建設・維持管理.....	72
(1) 地下施設整備（令和5年度～令和7年度）の総括.....	73
(2) 地下施設の維持管理.....	75
(3) 掘削土（ズリ）の管理.....	76
(4) 排水の管理.....	77
8. 環境調査.....	79
8.1 排水量および水質調査.....	79
(1) 天塩川への排水量.....	80
(2) 地下施設からの排水の水質調査結果.....	80
(3) 天塩川の水質調査結果.....	83
(4) 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果.....	85
(5) 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果.....	86

(6) 浄化槽排水の水質調査結果.....	88
8.2 掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果.....	89
8.3 研究所用地周辺の環境影響調査	91
(1) 清水川の水質調査結果	91
(2) 魚類の調査結果	92
9. 安全確保の取り組み	94
10. 開かれた研究.....	95
10.1 国内機関との研究協力	95
10.2 国外機関との研究協力	99
11. 用語集	104
参考資料	110
参考文献	119
付録	125

図目次

図 1	令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題.....	4
図 2	令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画における研究課題の全体像.....	6
図 3	地下施設イメージ図および地下施設周辺の地質断面図.....	7
図 4	250m 調査坑道における主な調査研究の実施場所.....	14
図 5	350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所.....	14
図 6	500m 調査坑道における主な調査研究の実施場所.....	14
図 7	研究用地における主な施設と観測装置の配置.....	15
図 8	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所.....	15
図 9	研究用地周辺の地質断面図（図 8 の A-A' 断面）.....	16
図 10	緩衝材温度の出力点とその経時変化.....	17
図 11	人工バリア性能確認試験の概念図.....	18
図 12	人工バリア性能確認試験の計測データの一部.....	19
図 13	解体試験のイメージ図.....	20
図 14	浸潤試験結果と各機関の解析結果の一部.....	21
図 15	人工バリアやそれを定置する坑道の周辺において想定される地質構造の特徴を示すイメージ図（鉛直断面）.....	22
図 16	処分場の設計フローと体系化の研究で実施する課題の関係.....	24
図 17	構築した DFN モデル.....	25
図 18	推定した有効透水係数の比較.....	26
図 19	トレーサー試験の実施場所とボーリング孔のレイアウト.....	28
図 20	令和 7 年度に実施したトレーサー試験結果.....	29
図 21	重水またはトリチウム水に対する実効拡散係数 (D_e) と間隙率の関係.....	30
図 22	本研究で取得した声間層泥岩の重水（黒）、Cs（赤）および I（青）の実効拡散係数 (D_e) とイオン強度の関係.....	32
図 23	500m 試験坑道 8 における EDZ 透水試験の概要.....	33
図 24	TR01 と TR02 の EDZ 区間における透水試験結果とその解析結果.....	34
図 25	水質の計測・評価方法のフローチャート.....	35
図 26	地質環境特性調査に基づく坑道とピットの配置の評価を示すフロー図.....	36
図 27	500m 試験坑道 9 における地質調査の結果の例.....	39
図 28	500m 試験坑道 9 から掘削したボーリング孔と透水試験のレイアウト.....	40
図 29	透水試験孔で得られたボーリングコアの写真（孔口から 5 m まで）.....	40
図 30	ボーリング孔で確認された割れ目の分布図と推定した EDZ の広がり.....	41
図 31	透水試験結果.....	41
図 32	処分場の閉鎖段階のイメージ図.....	42
図 33	350m 試験坑道 6 におけるボーリング孔のレイアウト.....	43
図 34	AE-B 孔の割れ目分布、透水係数および間隙水圧.....	44
図 35	掘削面からの距離と透水係数・間隙水圧の関係.....	44
図 36	試験坑道と切欠き部を模擬した吹付け型枠および調査断面.....	46
図 37	地上吹付け試験の実施状況.....	46
図 38	吹付け試験後の調査結果.....	47
図 39	地下施設の設計において重要となる地質現象と課題 (3) で取り組む各種対策技術の関係.....	48
図 40	350m 調査坑道における掘削当時の主要な湧水箇所.....	49

図 41	350m 調査坑道内における湧水量の予測減少率と実測減少率の計算結果の一例	50
図 42	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解析と湧水抑制対策の判断手順	51
図 43	試験ピット周辺の EDZ の広がり の予測結果	52
図 44	ケーシング引き抜き後の EDZ の広がり の予測結果の平面図	52
図 45	岩盤に与えた振動がどの程度の距離まで伝わるかを調べるための試験の様子	53
図 46	500m 調査坑道の断層分布図と坑内湧水量の推移	54
図 47	500m 調査坑道において整備した排水システムの流路図	54
図 48	水圧擾乱試験で設定した試験区間と区間 4 のせん断割れ目の状況	55
図 49	せん断割れ目を対象とした水圧擾乱試験の結果	56
図 50	せん断割れ目を対象とした割れ目の開口幅と割れ目に垂直に作用する有効応力の関係	57
図 51	廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報や各課題で検討する項目と成果の反映先の関係	57
図 52	新たに構築した室内試験方法の概要	59
図 53	新たに構築した室内試験方法の結果の一例	59
図 54	室内試験の結果	59
図 55	EDZ の広がり と地山強度比の関係	61
図 56	坑道周辺の EDZ の広がりを調査・評価するためのフローチャート	62
図 57	HDB-6 孔の水圧観測結果、各立坑の掘削深度および坑内湧水量の観測値（平成 31 年 4 月～令和 8 年 3 月のデータ）	64
図 58	令和 7 年度の地下水の採取位置と水質分析結果の例	65
図 59	350m 試験坑道 2 および 350m 試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所	66
図 60	C08 における水圧モニタリング結果	67
図 61	C08 の区間 2 における水質モニタリング結果	67
図 62	地中変位計設置状況	68
図 63	鋼製支保工応力計設置例	68
図 64	計測器設置位置図	68
図 65	鋼製支保工応力計の計測結果	69
図 66	幌延町（宮園）で観測された地震の震央図	71
図 67	令和 8 年 1 月 13 日 1 時 58 分頃に発生した地震による地上および地下施設で観測された地震波形	71
図 68	地下施設整備の状況	72
図 69	地下施設整備の仕上げ・完成状況	73
図 70	施設整備期間中の掘削実績と湧水量の推移	75
図 71	地下施設の維持管理状況	76
図 72	二重遮水シートの構造	76
図 73	掘削土（ズリ）置場の吹付け作業完了後の様子	77
図 74	排水処理設備	78
図 75	排水系統と各水質調査の採水地点	79
図 76	地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点	81
図 77	天塩川の採水地点	83
図 78	天塩川での採水状況（令和 7 年 7 月 1 日）	83

図 79	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点	85
図 80	掘削土（ズリ）置場周辺地下水の採水状況（令和 7 年 5 月 7 日）	85
図 81	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点	87
図 82	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況（令和 7 年 7 月 1 日） ..	87
図 83	環境調査実施場所	91
図 84	清水川からの採水状況（令和 7 年 9 月 2 日）	92
図 85	生息魚類調査（令和 7 年 9 月 1 日）	93
図 86	安全パトロールの状況（令和 7 年 5 月 20 日）	94
図 87	安全行事の実施（安全大会：令和 7 年 7 月 1 日）	94
図 88	合同タスク会合での現地確認の様子（500m 調査坑道）	100

表目次

表 1	幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール	5
表 2	深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴	8
表 3	割れ目の閉塞/充填状況と岩石の透水性に応じた地層の分類と割れ目の代表的な 透水性の調査・評価手法	27
表 4	地上吹付け試験における材料の条件	46
表 5	幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震	70
表 6	地下施設整備の実績工程表（令和 7 年度）	72
表 7	地下施設整備の実績工程表（令和 5 年度から令和 7 年度）	74
表 8	天塩川への排水量	80
表 9	地下施設からの排水に関わる水質調査結果	82
表 10	天塩川の水質調査結果	84
表 11	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果	86
表 12	清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果	88
表 13	浄化槽排水の調査結果	89
表 14	掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果	90
表 15	清水川の水質調査結果	92
表 16	確認された重要種（魚類）	93
表 17	HIP 参加機関（令和 8 年 3 月末現在）	103

1. はじめに

国立研究開発法人^{*1}日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、平成13年3月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めています。この計画は、堆積岩を対象とした深地層の科学的な研究（地層科学研究）および地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた研究開発（地層処分研究開発）を目的として、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの調査研究段階に分けて実施してきています。地層処分のために地下を調査する施設には、最終処分場として使用しない施設で技術を磨く地下研究施設（ジェネリックな地下研究施設）と最終処分施設建設地としての適性を見定める地下研究施設（サイトスペシフィックな地下研究施設）の2つの種類があります。このうち、幌延深地層研究センターの地下施設は、ジェネリックな地下研究施設に該当します。

幌延深地層研究センターでは、北海道および幌延町により受け入れられた、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した研究課題である、実際の地質環境における人工バリア^{*}の適用性確認、処分概念オプション^{*}の実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力^{*}の検証について、令和2年度以降、第3期および第4期中長期目標期間^{*2}を目途に取り組むこととしました^{*3}。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、地下施設の埋め戻しを行うことを具体的工程として示します。

なお、令和7年2月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、高レベル放射性廃棄物については、「最終処分の実現に向け、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針に基づき、国が前面に立ち取り組む。」との考

※ このマークがついた用語は、11.用語集に説明を掲載しています。

*1：独立行政法人通則法の改正（平成27年4月1日施行）により新たに設定された分類のひとつで、研究開発に係るものを主要な業務として、中長期的（5年～7年）な目標・計画に基づき行うことにより、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の健全な発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

*2：第4期中長期目標の期間は、令和4年4月1日～令和11年3月31日の7年間です。

*3：令和2年度以降の研究期間は9年間であり、その期間を通じて必要な成果を得て研究を終了できるように取り組むこととしています（https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html）。

え方が示され、「地層処分の技術的信頼性の更なる向上に向け、引き続き、国、NUMO^{*4}、JAEA^{*5}等の関係機関が、全体を俯瞰して技術開発を着実に進め、最新知見を定期的に反映するとともに、その専門的な評価が国民に十分に共有されることが重要である。この際、幌延の深地層研究施設等における研究成果を十分に活用していく。」ことが示されました。

また、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）^{*6}」（以下、第4期中長期目標）が定められており、この第4期中長期目標を達成するために、原子力機構は、「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（令和4年4月1日～令和11年3月31日）」（以下、第4期中長期計画）を策定しました。第4期中長期計画では、幌延深地層研究計画について、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した3つの研究課題を進めること、「研究の実施に当たっては、稚内層深部（深度500 m）に坑道を展開して研究に取り組むとともに、更なる国内外の連携を進め、研究開発成果の最大化を図る」こととしています。

幌延深地層研究センターは、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」を、これまでと同様に、放射性廃棄物を持ち込むことや使用することなく、また最終処分場とはしないことを約束した「幌延町における深地層の研究に関する協定書」の遵守を大前提に、安全を最優先として研究を進めます。研究開発を進めるに当たっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の関係機関の資金や人材を活用していきます。

*4：原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan）の略称です。NUMOは、原子力発電所で使い終えた燃料（使用済燃料）を再処理する過程で発生する高レベル放射性廃棄物および関連して発生する長半減期核種の濃度が高い低レベル放射性廃棄物（地層処分相当低レベル放射性廃棄物）の地層処分を行う実施主体です。

*5：原子力機構（Japan Atomic Energy Agency）の略称です。

*6：原子力機構は、原子力基本法第2条に規定する基本方針および第7条に基づき、原子力に関する基礎的及び応用の研究並びに高レベル放射性廃棄物の処分等に関する技術の開発等を総合的、計画的かつ効率的に行うことを目的としています。中長期目標はこれを踏まえ、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会が、独立行政法人通則法第35条の4の規定に基づき定めた目標です。

2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」では、必須の課題のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の課題（令和2年度以降の必須の課題※）に取り組んでいます（図1、表1、参考資料）。

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

令和元年度までの人工バリア性能確認試験では、実際の地下環境におけるヒーターの加熱過程のデータを取得しましたが、減熱過程※のデータが取得されていません。令和2年度以降は、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、分析・評価します。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※などの確認を実施します。

また、令和元年度までの物質移行試験により、トレーサー※試験手法を確立することができました。ただし、これまでの研究結果から、幌延の堆積岩において、有機物や微生物が、放射性物質の岩盤への吸着を妨げ、閉じ込め効果を低下させる可能性が確認されており、令和2年度以降は、確立した試験手法を用いて掘削損傷領域※での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物の影響を確認するためのトレーサー試験を実施します。

(2) 処分概念オプションの実証

令和元年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方法の違い（締固め、ブロック方式など）による埋め戻し材※の基本特性（密度や均一性）を把握しましたが、緩衝材の施工方法や坑道閉鎖に関する様々なオプションの検討には至っていません。令和2年度以降は、人工バリア性能確認試験において、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の違い（締固め、ブロック方式など）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※の有無など）・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。さらに、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）を確認するための実証試験を行います。また、人工バリアシステムに対

する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。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

令和元年度までの検討では、まずは小規模な断層（幅数 cm）に着目して試験を行い、断層のずれが断層沿いの地下水の流れに与える影響などを確認しました。これまでの研究開発で手法の妥当性が確認できたため、この手法を使って、処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形で研究を進めることが可能となりました。令和 2 年度以降は、より大型の断層において、断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の作用に係る実証試験を実施します。さらに、地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術を実証するとともに、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。

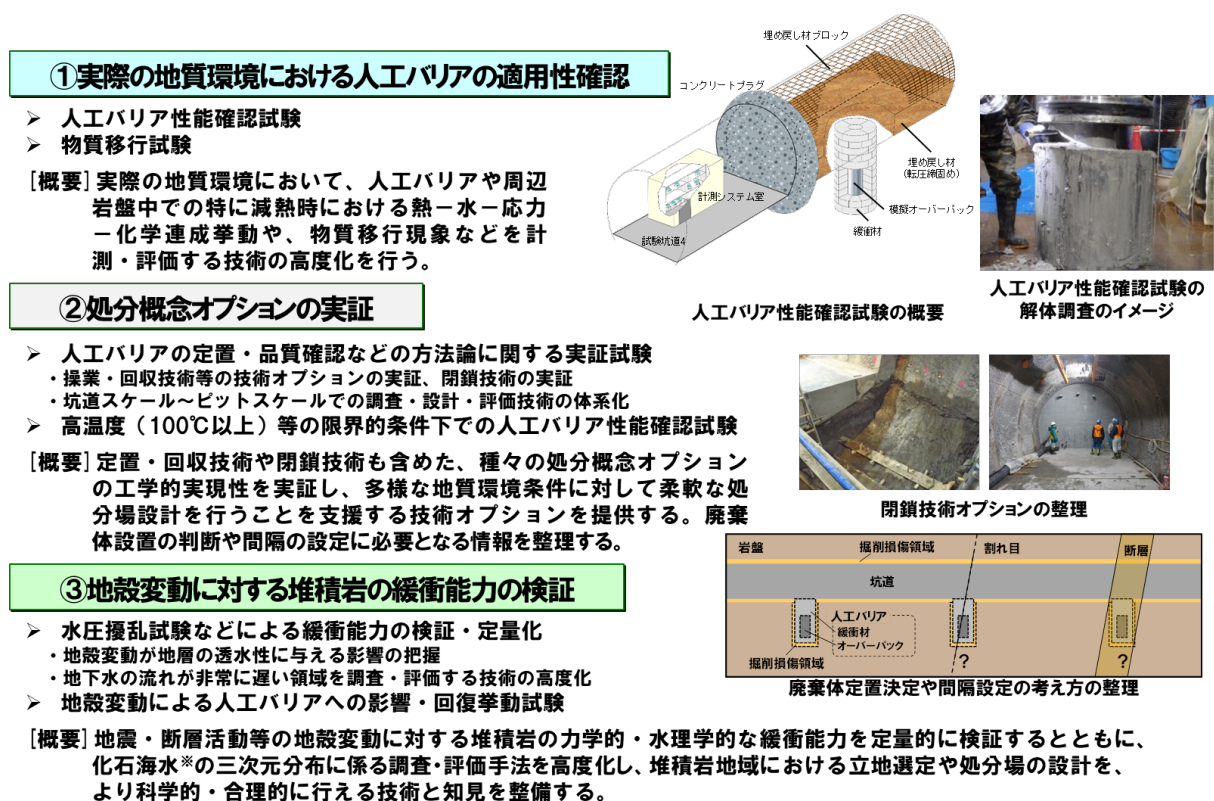


図 1 令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題
(令和 2 年度以降の必須の課題)

表 1 幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール

		第3期中長期目標期間			第4期中長期目標期間					
		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認										
1.1	人工バリア性能確認試験	浸漬時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認 国際プロジェクトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化					解体試験のデータ取得、連成モデルの適用性確認			
	1.2 物質移行試験	掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験、等								
2. 処分概念オプションの実証										
2.1 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										
2.1.1	2.1.1 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	搬送定置・回収技術 閉鎖技術の実証								
	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									
	(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				
	(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				
	(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					・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				
	(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				
2.2 高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験		100℃超の際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理 国際プロジェクト情報の収集・整理、等								
3.地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証										
3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化										
3.1.1	地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	数十cmの幅の断層を対象とした水圧擾乱試験 断層の活動性評価手法の整備、等								
	3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化	地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証、等								
3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験		人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理学的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発								
【施設計画】										
坑道掘削			掘削準備		350m調査坑道		換気立坑			
					東立坑		西立坑			
					500m調査坑道					
【維持管理】										

本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていきます。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題(2.1.2)に統合して実施する。

2.1.2を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。実施する場合には年度当初に示す計画書にて記載する。

表 1 に示したように、令和 2 年度以降の必須の課題のうち、令和 6 年度までに多くの課題を終了し、成果の取りまとめを行いました⁽¹⁾。また、令和 6 年度から、「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」（以下、体系化の研究）に着手しています。さらに、令和 2 年度以降の必須の課題に取り組むに当たって、成果を最大化する観点から、OECD/NEA^{*7} の協力のもと、令和 4 年度から幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project、以下、HIP）※を活用しています。

体系化の研究には、令和 6 年度までに終了した課題の成果を反映しつつ取り組んでいます。これらの課題の位置付けや成果の反映先を明らかにする観点で、実際の処分事業における時間スケールを横軸に、体系化の研究で対象としている空間スケールを縦軸に、令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画で取り組んでいる課題の全体像を整理して図 2 に示します。

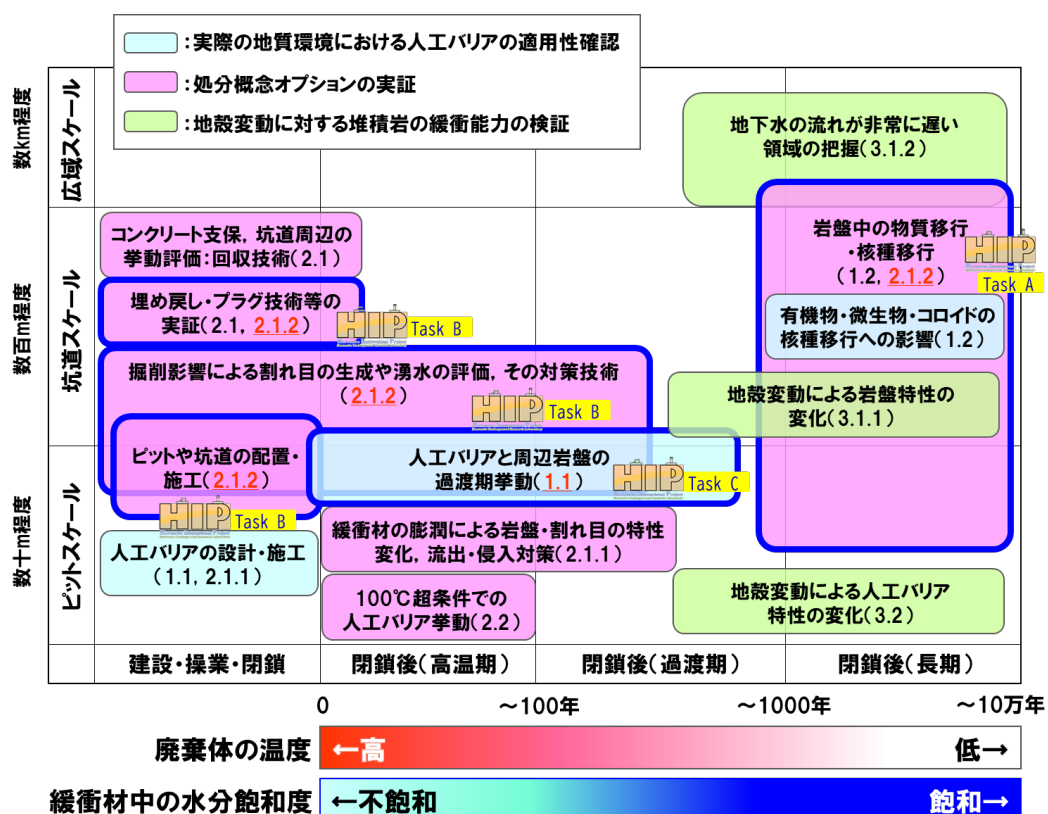


図 2 令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画における研究課題の全体像
 () 内の番号は表 1 に対応しており、青太枠・赤字の番号は本報告書で記載のある項目です。HIP の各タスクとの対応も合わせて示します。

*7: OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）は、安全かつ環境的にも受け入れられる経済的なエネルギー資源としての原子力エネルギーの発展に貢献することを目的として、原子力政策、技術に関する情報・意見交換、行政上・規制上の問題の検討、各国法の調査および経済的側面の研究などを実施しています。

なお、上記に挙げた令和 2 年度以降の必須の課題に対応するために、地下施設の深度 500 m に調査坑道を整備しました。地下施設は、図 3(a) に示すように 3 本の立坑と 4 つの深度の調査坑道からなり、立坑は各深度へのアクセスならびに地下施設の換気のための役割を担っています^{*8}。また、研究対象としている地層は、^{こえといそう}声問層と稚内層であり（図 3(b)）、声問層は稚内市声問付近、稚内層は稚内市の市街によく認められたことから、それぞれの地名が地層名として古くから与えられています。声問層（珪藻質泥岩）は、主に海底に降り積もった珪藻と呼ばれる植物プランクトンの遺骸から構成され、地下施設周辺の堆積年代は、約 400 万年前～200 万年前と推定されます^(2, 3, 4)。一方、稚内層（珪質泥岩）は、声問層と同様の珪藻の遺骸が堆積の進行に伴ってより深くに埋没することで地温の影響などを受けて溶解し、再沈殿⁽³⁾してできた鉱物を主成分としており、声問層より硬いことが特徴です。地下施設周辺の稚内層の堆積年代は、約 700 万年前～400 万年前と推定されます^(2, 3, 4)。

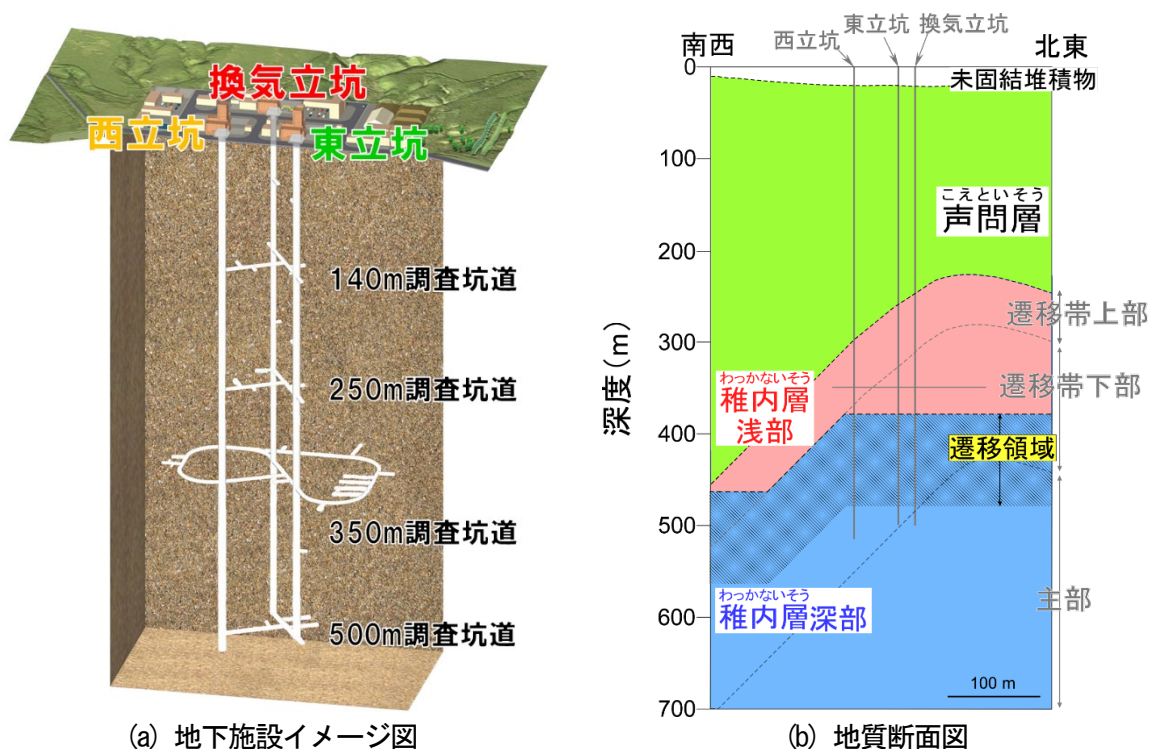
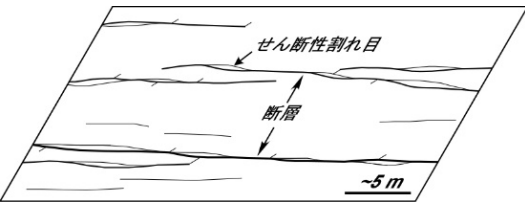
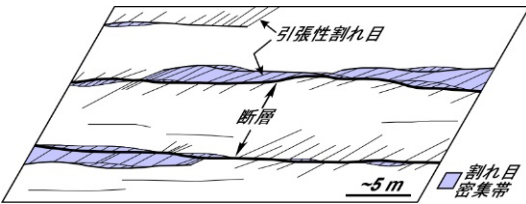
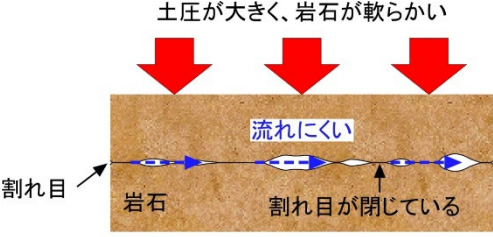
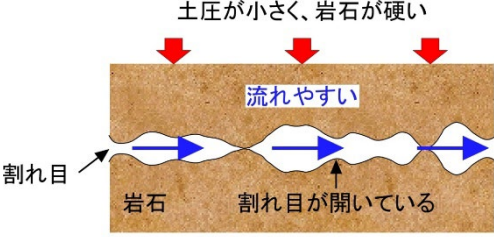


図 3 地下施設イメージ図および地下施設周辺の地質断面図

^{*8}：地下施設で火災が発生した際に、換気立坑から煙や有毒ガスなどを排気し、東立坑もしくは西立坑からの避難を可能とするため、立坑を3本掘削するレイアウトを採用しています。これは、幌延の地下水にはメタンガスが含まれているため、地下水から湧出するメタンガスの発火・爆発の可能性を考慮して、速やかに地上まで避難することを想定しているためです。

稚内層は、図 3(b)に示すように地質環境の特徴から浅部と深部に分けられます。稚内層深部である深度 500 m の地質環境については、稚内層浅部である深度 350 m と比べて土圧や地下水圧が高く、地下水や物質の動きが極めて緩慢であるという特徴があります⁽¹⁾。深度 500 m（稚内層深部）と深度 350 m（稚内層浅部）の地質環境の特徴を表 2 に示します。

表 2 深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴

	深度 500 m（稚内層深部）	深度 350 m（稚内層浅部）
分布する割れ目の特徴	 断層沿いに割れ目の発達が乏しく、断層内を水が流れにくい	 断層沿いに多数の割れ目が発達し、断層内を水が流れやすい
割れ目の開口状況	土圧が大きく、岩石が軟らかい  割れ目が閉じており、水が流れにくい ---> 水の動き(遅い)	土圧が小さく、岩石が硬い  割れ目が開いており、水が流れやすい —> 水の動き(速い)
土圧 地下水圧	土圧が大きく、岩石が軟らかい 地下水圧が高い	土圧が小さく、岩石が硬い 地下水圧が低い

3. 令和7年度の主な調査研究の成果

令和7年度は、「幌延深地層研究計画 令和7年度調査研究計画」⁽⁵⁾にしたがって、令和2年度以降の必須の課題に関わる調査研究および地下施設の建設・維持管理などを実施しました。

調査研究では、令和2年度以降の必須の課題のうち、主に「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」に取り組むとともに、必須の課題への対応に必要なデータ取得を継続しました。以下に調査研究の成果の概要を示します。

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

人工バリア性能確認試験では、解体試験までの状態を把握するためのデータ取得を自動計測機器により継続しました。また、解体試験計画の具体化や室内試験を対象とした解析検討を継続するとともに、原位置試験※における埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度などを解析するための準備を行いました。これらの取り組みは、HIPのタスクC（実規模の人工バリアシステム解体試験）の一環として実施しています。

(2) 処分概念オプションの実証

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ついて、以下の4つの課題に取り組みました。

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

坑道スケールにおける岩盤の閉じ込め性能評価では、既存の研究結果に基づき、断層の代表的な透水性※と亀裂ネットワークモデル※を組み合わせることで岩盤の平均的な水の通しやすさの指標である有効透水係数※を推定しました。HIPのタスクA（物質移行試験）の課題として複数の割れ目が関与していると考えられる場においてトレーサー試験を実施し、多様な水理・力学条件の影響を受ける場合でも既存の装置を用いてトレーサー試験を成立させることが可能であることを示しました。

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

坑道とピットの配置に関する調査・評価・施工技術について、500m 調査坑道で実施した先行ボーリング調査で得られたコア試料と孔壁画像の観察を通じて、500m 試験坑道 8 および 500m 試験坑道 9（以下、500m 試験坑道 8・9）に出現する断層を予測し、坑道を掘削した後の底盤観察の結果と比較しました。その結果、先行ボーリング調査によって、坑道に出現する断層を事前に捉えられることや、断層の走向・傾斜や分布頻度の傾向を把握できる可能性が示されました。また、500m 試験坑道 8・9 の掘削時の湧水量は少なく、先行ボーリング調査時における湧水の程度と整合する結果を得ました。さらに、500m 試験坑道 9 を掘削した後に、ボーリング調査により掘削損傷領域（以下、EDZ）の広がりとその透水性を確認した結果、500m 試験坑道 9 の側壁面から最大 3.1 m 程度まで坑道掘削に起因する割れ目が発達しており、その領域では割れ目のない領域と比較して透水性が高いことが分かりました。

坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の調査・設計・施工技術について、実規模スケールの坑道の埋め戻しと止水プラグ設置の施工試験（以下、原位置施工試験）に先立ち、350m 試験坑道 6 の周辺の EDZ の広がり及周边岩盤の透水性の変化を調査した結果、坑道掘削後に坑道周辺で形成されたと解釈される引張割れ目が発達する領域では、割れ目の少ない領域に比べて透水性が高くなる傾向を確認しました。坑道の埋め戻しと止水プラグの施工において、地上での吹付け試験を実施し、施工手順や施工品質を確認し、350m 試験坑道 6 における原位置施工試験計画の具体化を進めました。

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

湧水抑制対策技術の整備に必要となる湧水量の予測手法の整備を目指し、350m 調査坑道における湧水量の減少速度を、地上からのボーリング調査から推定した断層や割れ目内の水みちのつながり方の次元[※]に基づいて予測した結果、近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮することで、湧水量の長期的な減少速度を予測できることを実証しました。

ピット周辺の EDZ の範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法の整備を目的として、500m 調査坑道における試験ピットの掘削に先立ち、

掘削に伴う EDZ の広がり予測解析を実施した結果、坑道底盤部付近で EDZ の広がりが大きく、試験ピットの深度が深くなるにつれて小さくなることが分かりました。

緩衝材の流出現象を評価する上で重要な、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量の評価手法を整備するため、断層の代表的な透水性と亀裂ネットワークモデルを組み合わせることで、岩盤の水の通しやすさを推定する手法を開発しました。この手法を用いることで、特に水みちのつながり方の次元が低い地下深部における湧水量をより適切に予測できるようになりました。

緩衝材の岩盤への侵入現象の評価技術の整備に向けて、350m 調査坑道において既存の割れ目と断層を対象として水圧擾乱試験[※]を実施し、割れ目の開きにくさを調査しました。その結果、破碎物を伴わないせん断[※]性の割れ目についても、水圧擾乱試験や既存のモデルを適用することにより割れ目の開きにくさを定量的に調査できることを確認しました。

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

本課題では、坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）、および EDZ の広がりなどの地質環境の調査・評価を行い、地下施設の設計や岩盤の閉じ込め性能の評価を含めて、処分場設計時の地下施設設置深度を評価するための地質環境の調査・評価手法を整備します。

坑道やピット周辺に存在する割れ目のずれにくさに関する評価手法の整備に向けて、原位置試験の条件により近い条件で透水試験用パッカーの圧力変化を活用して割れ目のずれる量を推定する手法を新たに構築しました。地下水の流れにくさについては、水みちのつながり方の次元が低く、割れ目内の水みち同士の連結が少ない岩盤でも、地層の代表的な透水性を適切に求めることができる計算手法を構築しました。また、EDZ の広がりや坑道壁面の安定性の指標となる地山強度比^{⑥※}に相関性があることを確認しました。さらに、これまでに幌延深地層研究センターで実施してきた EDZ の広がりに関する調査事例を基に、様々な岩盤に対して適用可能と考えられる EDZ の広がりを調査・評価するためのフローチャートを構築しました。

(3) 令和 2 年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

必須の課題に関わる調査研究における基礎情報として、既存のボーリング孔などにおける地下水の圧力や水質の観測など、地下施設での調査研究で使用する各種データの取得と計測手法の妥当性の確認を継続し、地質環境を推定するための手法について信頼性の向上を図りました。

(4) 地下施設の建設・維持管理、環境調査

令和 5 年度から再開した掘削工事などの施設整備業務は、西立坑の掘削が令和 7 年 6 月に深度 510 m まで完了するとともに、500m 調査坑道の掘削が令和 7 年 9 月に完了しました。その後、路盤の整備や機器の設置を行い、当初の予定より 2 か月半早く、令和 8 年 1 月に完了しました。

また、地下施設からの排水などの水質調査および研究所用地周辺の環境影響調査を行い、排水基準や協定値を超える排水が無いことを確認しています。

(5) 開かれた研究・成果の発信

令和 7 年度も国内外の研究機関との連携を図るとともに、大学などの専門家の協力を得ながら、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業なども活用して、幌延深地層研究計画を着実かつ効率的に進めました。幌延深地層研究計画の成果は、原子力機構の核燃料サイクル工学研究所などの成果と合わせて、一連の地層処分技術として、NUMO が行う処分事業や、原子力規制委員会の安全規制に適宜反映していきます。

国内機関との研究協力として、北海道科学大学、東京大学、京都大学などの大学、幌延地圏環境研究所^{*9}および電力中央研究所^{*10}などの研究機関との共同研究を行い、研究を推進しました。

国外機関との研究協力では、令和 4 年度に開始した HIP を継続し、フェーズ 1（令和 4 年度～令和 6 年度）の成果を取りまとめました⁽⁷⁾。HIP は令和 7 年度からフェーズ 2 として進めており、フェーズ 1 に引き続き 3 つのタスクを設定して研究活動を進めています。タスク A（物質移行試験）では、多様な水理・力学条件で試験を成立させ、信頼性の高い物質移行データを取得す

^{*9}：幌延地圏環境研究所は、公益財団法人北海道科学技術総合振興センターが設置した研究所であり、国の補助を受けて、幌延深地層研究センターの施設や設備を活用した地下空間利用を中心とする研究を実施しています。

^{*10}：一般財団法人電力中央研究所は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を実施しています。

ることを目的として、揚水区間、注水流量、揚水流量、トレーサー注入時間などの条件を変えたトレーサー試験を 250m 調査坑道で実施しました。タスク B（処分技術の実証と体系化）では、500m 調査坑道掘削前の先行ボーリング調査結果に基づき、断層の分布と坑道掘削時の湧水量を予測し、坑道掘削後の観察・計測結果と比較しました。その結果、予測の妥当性が確認できました。また、埋め戻し材・止水プラグの施工手順や施工品質を地上試験で確認し、原位置施工試験計画に反映しました。タスク C（実規模の人工バリアシステム解体試験）では人工バリア性能確認試験の解体試験計画を検討するとともに、原位置試験を対象とした解析検討の事前準備として、過去の室内試験の再現解析を各機関で連携して進めました。また、これらの実施計画や進捗状況、結果について、管理委員会や 3 つのタスクごとの会合において議論しました。さらに、令和 7 年 12 月に合同タスク会合を幌延深地層研究センターで開催し、主にタスク A とタスク B において各深度で実施している原位置試験の進捗状況について確認しました。なお、HIP には、令和 8 年 3 月末現在、原子力機構を含めて国内外の 7 か国 11 機関^{*11}が参加しています。

以上のように、令和 7 年度は計画していた調査研究を進めて、想定していた成果を得ることができました。

令和 7 年度に地下施設で実施した主な調査研究の実施場所を図 4、図 5 および図 6 に示します。また、研究所用地における主な施設と観測装置の配置を図 7 に、幌延町内で実施した調査研究に関わる主要なボーリング調査や観測地点などの位置を図 8 に示します。さらに、図 8 に示した A-A' 断面の地質断面図を図 9 に示します。

*11：原子力機構の他、オーストラリア放射性廃棄物機関（ARAWA、オーストラリア）、連邦放射性廃棄物機関（BGE、ドイツ）、英国地質調査所（BGS、英国）、電力中央研究所（CRIEPI、日本）、韓国原子力研究所（KAERI、韓国）、韓国原子力環境公団（KORAD、韓国）、原子力発電環境整備機構（NUMO、日本）、原子力テクノロジー国営会社（RATEN、ルーマニア）、原子力環境整備促進・資金管理センター（RMMC、日本）、国営放射性廃棄物会社（SERAW、ブルガリア）です。

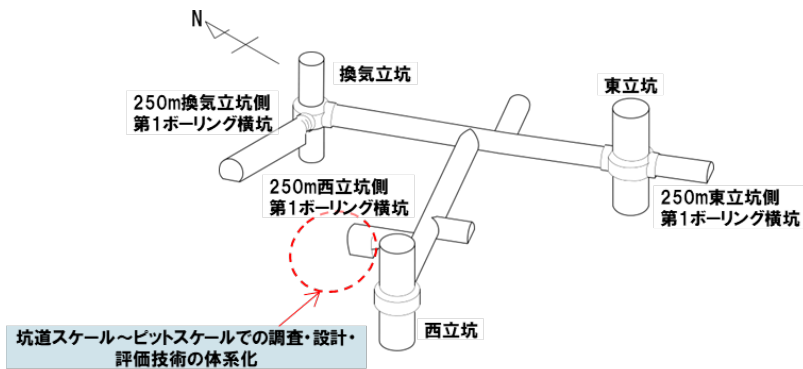


図 4 250m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

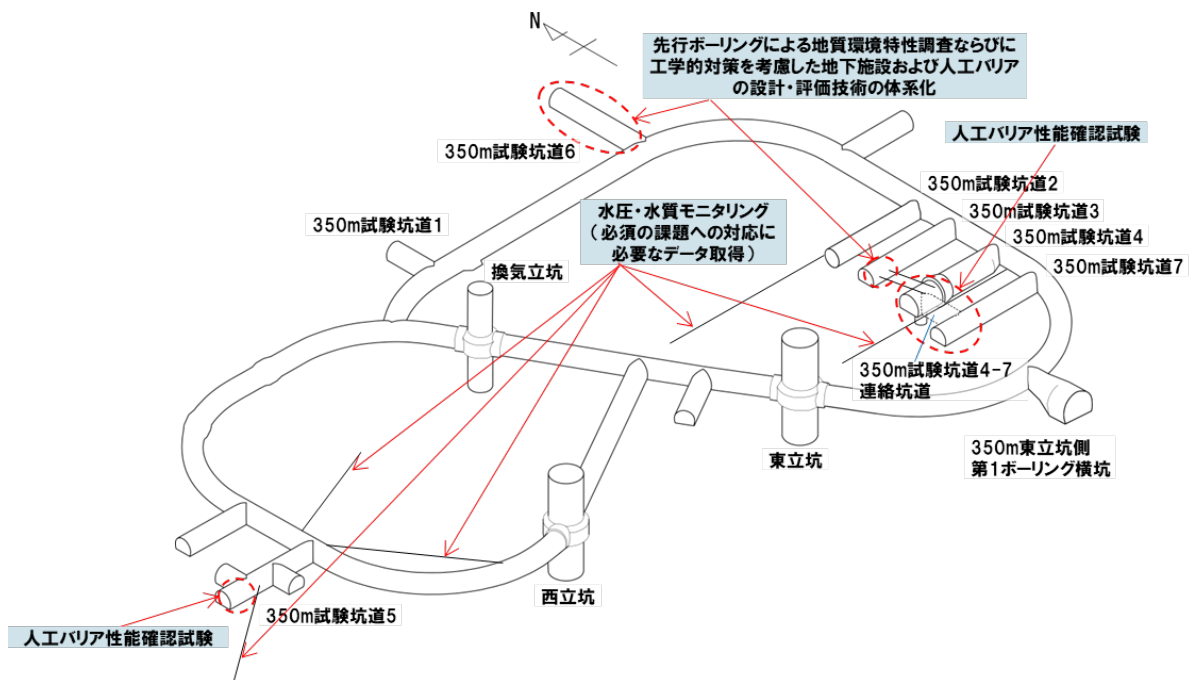


図 5 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

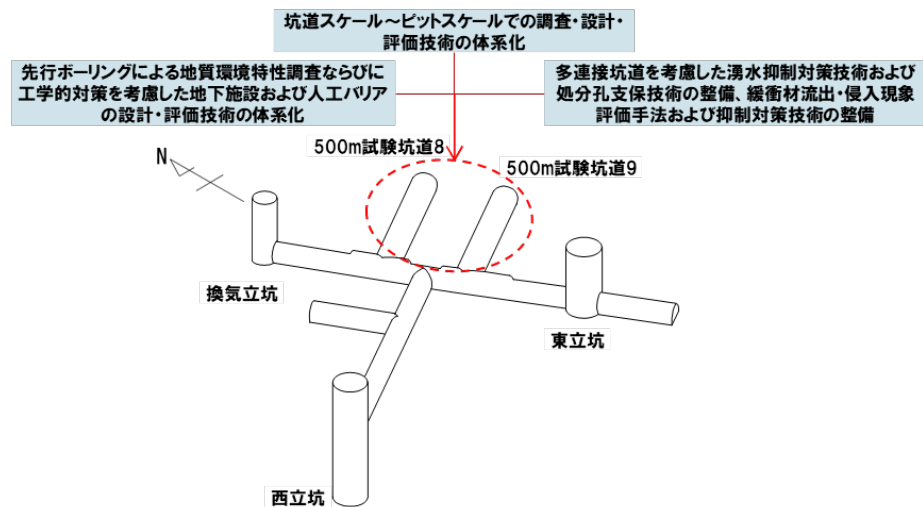


図 6 500m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

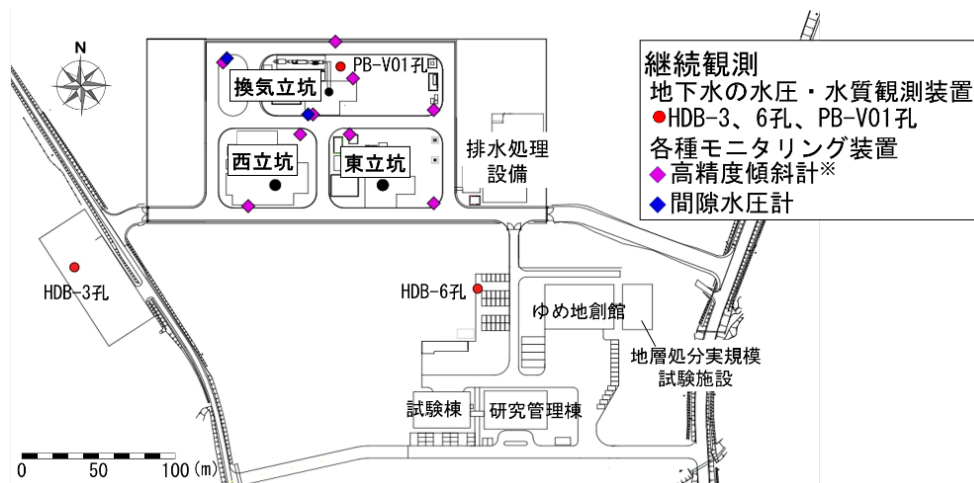


図 7 研究用地における主な施設と観測装置の配置

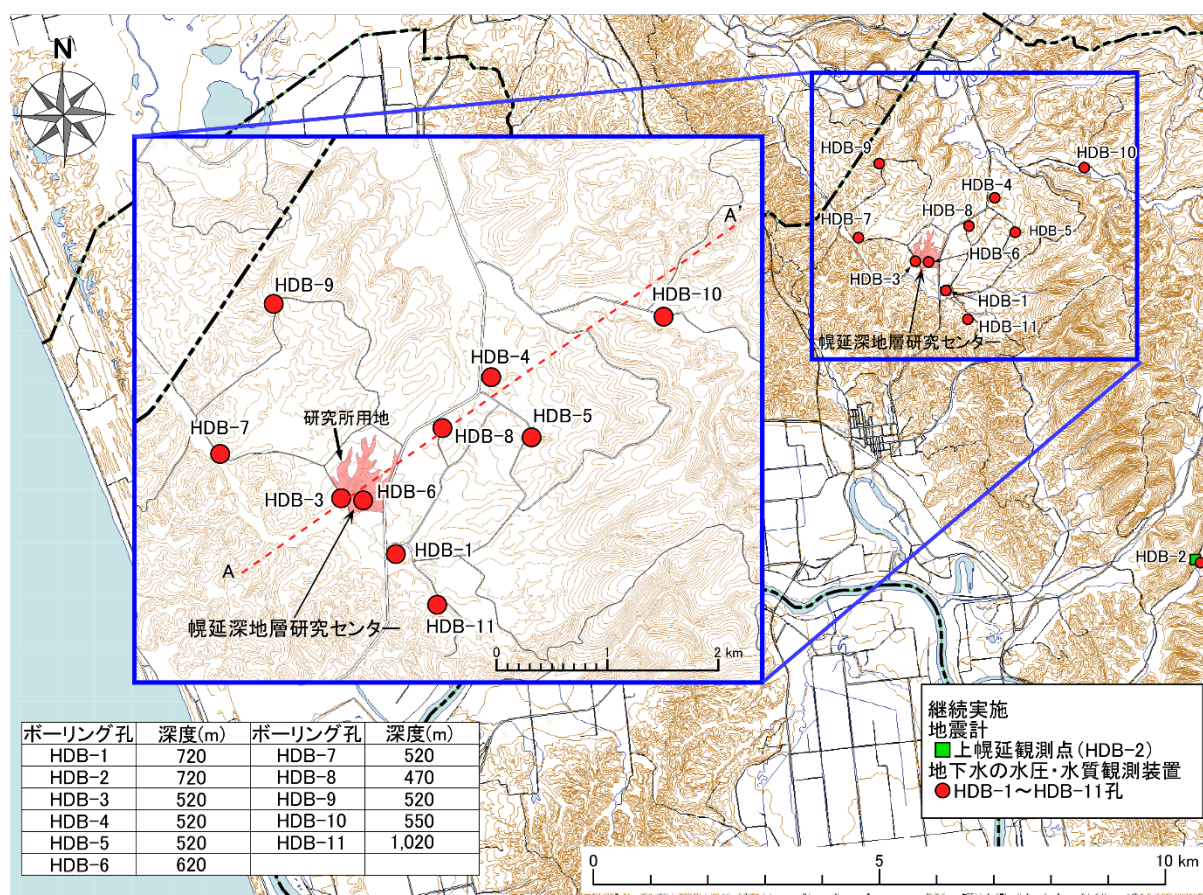


図 8 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成

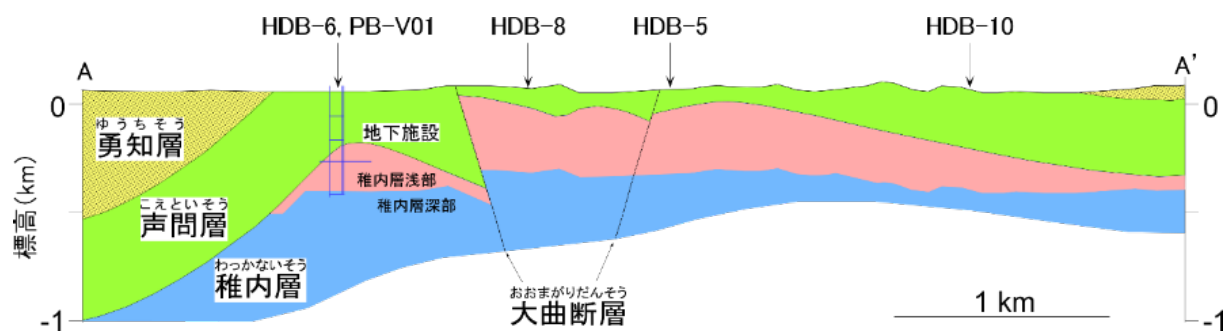


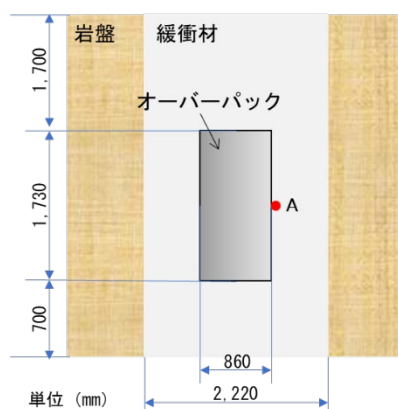
図 9 研究所用地周辺の地質断面図 (図 8 の A-A' 断面)

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

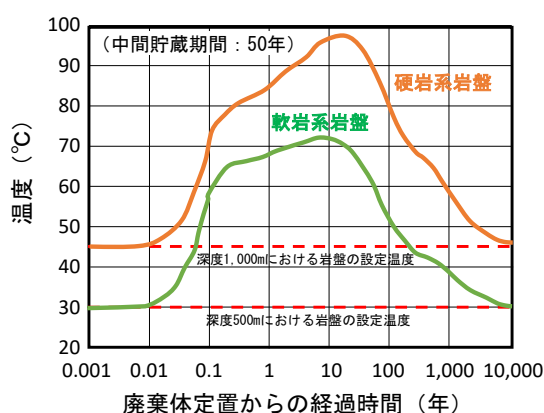
4.1 人工バリア性能確認試験

令和2年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体試験により得られる、より詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学連成現象^{*}の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体試験により、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそれらの境界面のサンプリングや分析を行います。人工バリア性能確認試験の解体試験については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体試験により得られるデータを基に、熱－水理－力学－化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の安全評価における初期状態の把握やオーバーパック^{*}（以下、OP）の寿命を評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定に役立ちます。

処分場において、温度が下がる速さは周囲の環境条件により異なりますが、人工バリアや周辺岩盤の温度は埋設後数十年程度で最も高くなり、その後、数千年かけて徐々に低下していくことが予測されています（図10）⁽⁸⁾。減熱過程は、このような人工バリアや周辺岩盤の温度が低下していく過程を想定したものです。



(a) 緩衝材温度の出力点（点A）



(b) 緩衝材温度の経時変化

図10 緩衝材温度の出力点とその経時変化

本図は、参考文献(8)の図4.2.2-92、図4.2.2-100および図4.2.2-102を基に作成しました。

令和7年度は、人工バリア性能確認試験（図 11）の解体試験までの状態を把握するために既設の自動計測機器によるデータ取得を継続しました。緩衝材中の計測データの一例として、図 12 に緩衝材の下から 5 段目付近（図 12(a)）で取得したデータを示します。図 12(b)に示す緩衝材中の温度分布は、模擬 OP 内部に設置したヒーターの加熱に伴い温度が上昇し、加熱開始から 2,315 日経過後にヒーターを停止した後は地下環境下の温度（約 23℃）で一定になることが確認できます。

図 12(c)は比抵抗※トモグラフィ※測定により算出された緩衝材中の比抵抗分布を飽和度に換算した結果を示します。人工バリア性能確認試験で設置した緩衝材の初期の飽和度は 57.6%（初期含水比 10.5%）であり、加熱 2 日前のデータは初期の飽和度からほとんど変化していないことが確認できます。ヒーターの加熱開始後は、模擬 OP に近い緩衝材内側では、加熱に伴って乾燥することで飽和度が低下していることが確認できます。一方、緩衝材外側では、岩盤側からの地下水浸潤によって飽和度が徐々に増加していく傾向が確認できます。減熱試験を開始した後は、加熱により乾燥した内側の緩衝材の飽和度が徐々に増加傾向にあることが確認できます。このような温度変化に伴う飽和度変化の計測データは、連成解析に使用するモデルの適用性を確認する上で重要となります。

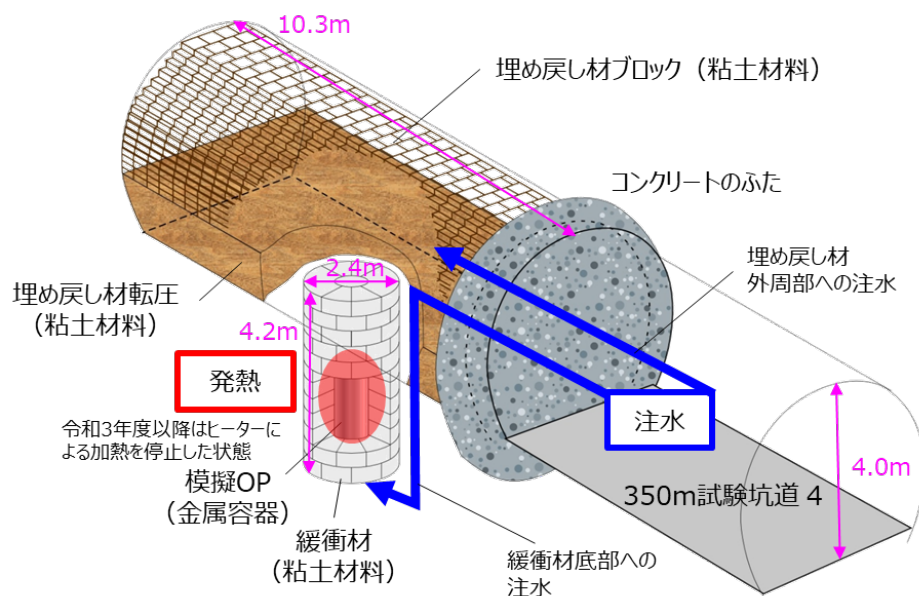


図 11 人工バリア性能確認試験の概念図

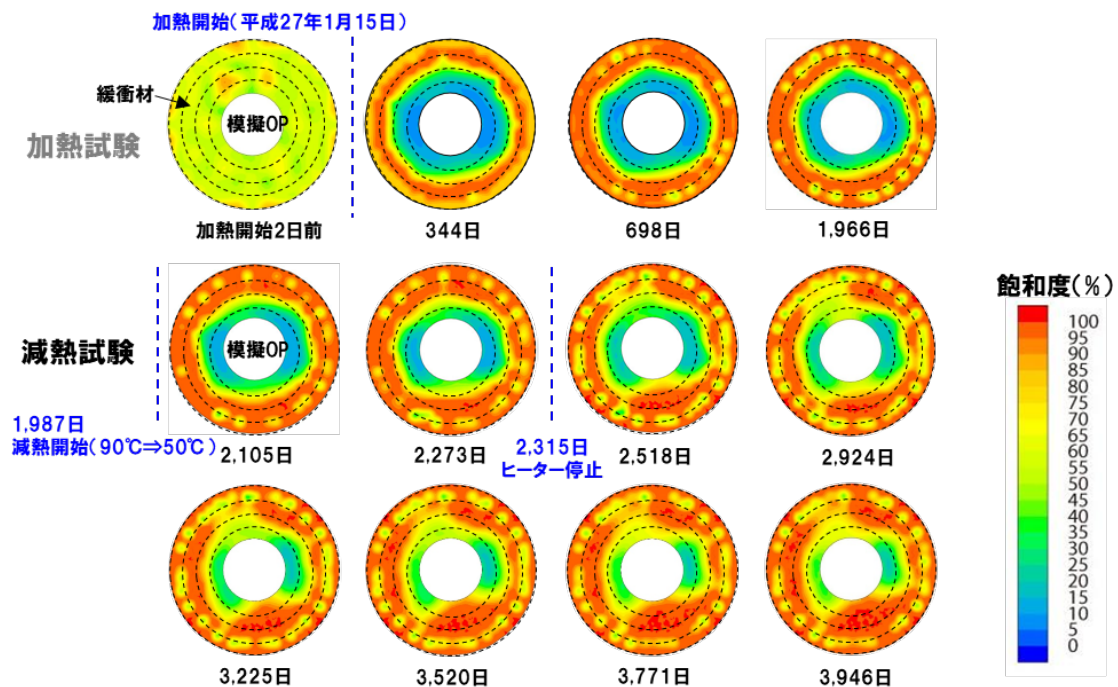
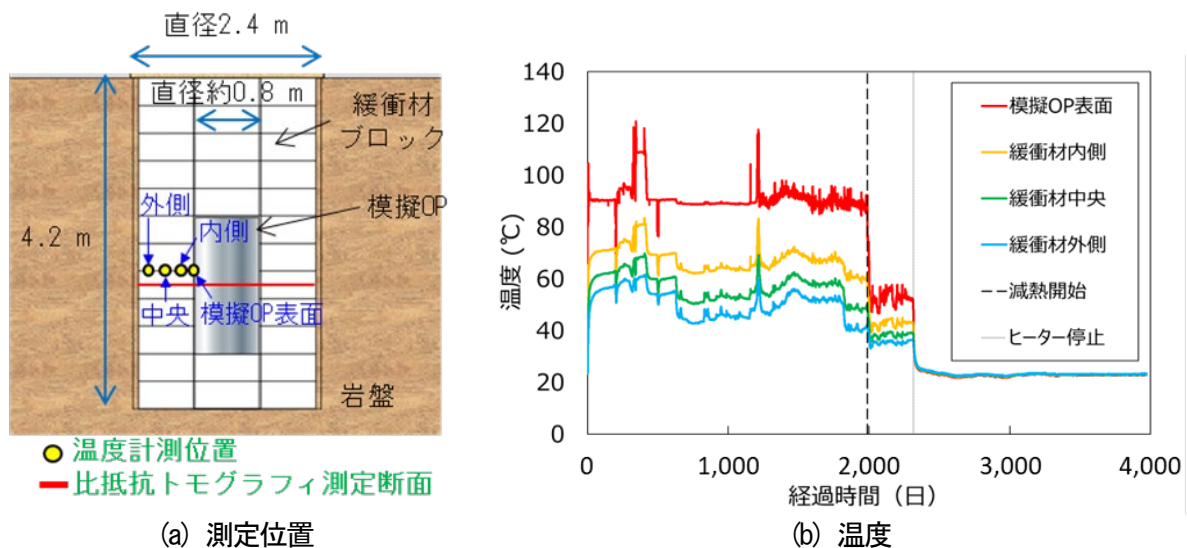


図 12 人工バリア性能確認試験の計測データの一例

HIP のタスク C (実規模の人工バリアシステム解体試験) においては、解体試験の準備および解体試験のデータを使用した解析検討に向けた準備として、参加機関の間で試験計画の具体化に向けた議論や、室内試験を対象とした解析検討を継続するとともに、原位置試験における埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度などを対象とした解析検討に着手しました。

図 13 に解体試験のイメージを示します。解体試験では、まず、人工バリア性能確認試験を実施している 350m 試験坑道 4 の埋め戻し部と隣接した 350m 試

験坑道 7 をつなぐアクセス坑道を掘削します。その後、埋め戻し材のサンプリングを行い、試験孔部に設置した人工バリア（緩衝材および模擬 OP）のサンプリングを行います。その他にも、コンクリートプラグ、埋め戻し部の吹付けコンクリートや、岩盤と吹付けコンクリートの境界面を調査するためのサンプリングも実施します。サンプリングした試料は地上の分析施設で分析し、センサーの計測データや数値解析による予測結果も踏まえて、埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度、模擬 OP の錆の深さや成分など、各材料がどのように変化しているかを調査します。

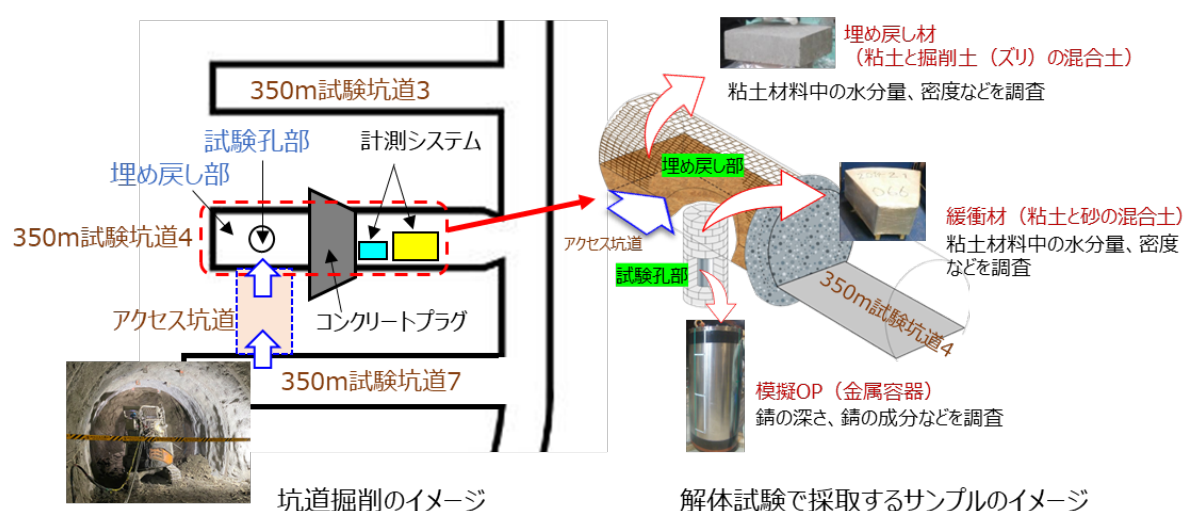


図 13 解体試験のイメージ図

解析検討では、原子力機構が開発した解析コードと室内試験結果との比較に加えて、タスク C の参加機関のうち、原子力機構、NUMO、韓国原子力研究所（KAERI）^{*12}、電力中央研究所（CRIEPI）が独自に開発している解析コードとの比較も行いました。複数の解析コード間で比較検証を実施することは、解析コードの妥当性を確認する上で重要となります。解析検討の一例として緩衝材の浸潤試験結果を活用した解析結果を図 14 に示します。図に示すように各参加機関の解析結果は、浸潤試験結果を精度よく再現できることが確認できました。このように個別の室内試験結果の再現性を事前に確認することは、より複雑な現象が発生していることが想定される人工バリア性能確認試

^{*12}：韓国原子力研究所：KAERI（Korea Atomic Energy Research Institute）は、政府出資の韓国で唯一の原子力分野全般に係る研究機関で、学際的な原子力研究開発を通じて、原子力の学術的進歩、エネルギー開発・利用の推進を目指しています。この一環として、使用済燃料の直接処分を対象とした輸送・貯蔵に係る技術開発や地下研究坑道を利用した研究開発などを進めています。

験の解析検討を効率よく進める上で役立ちます。

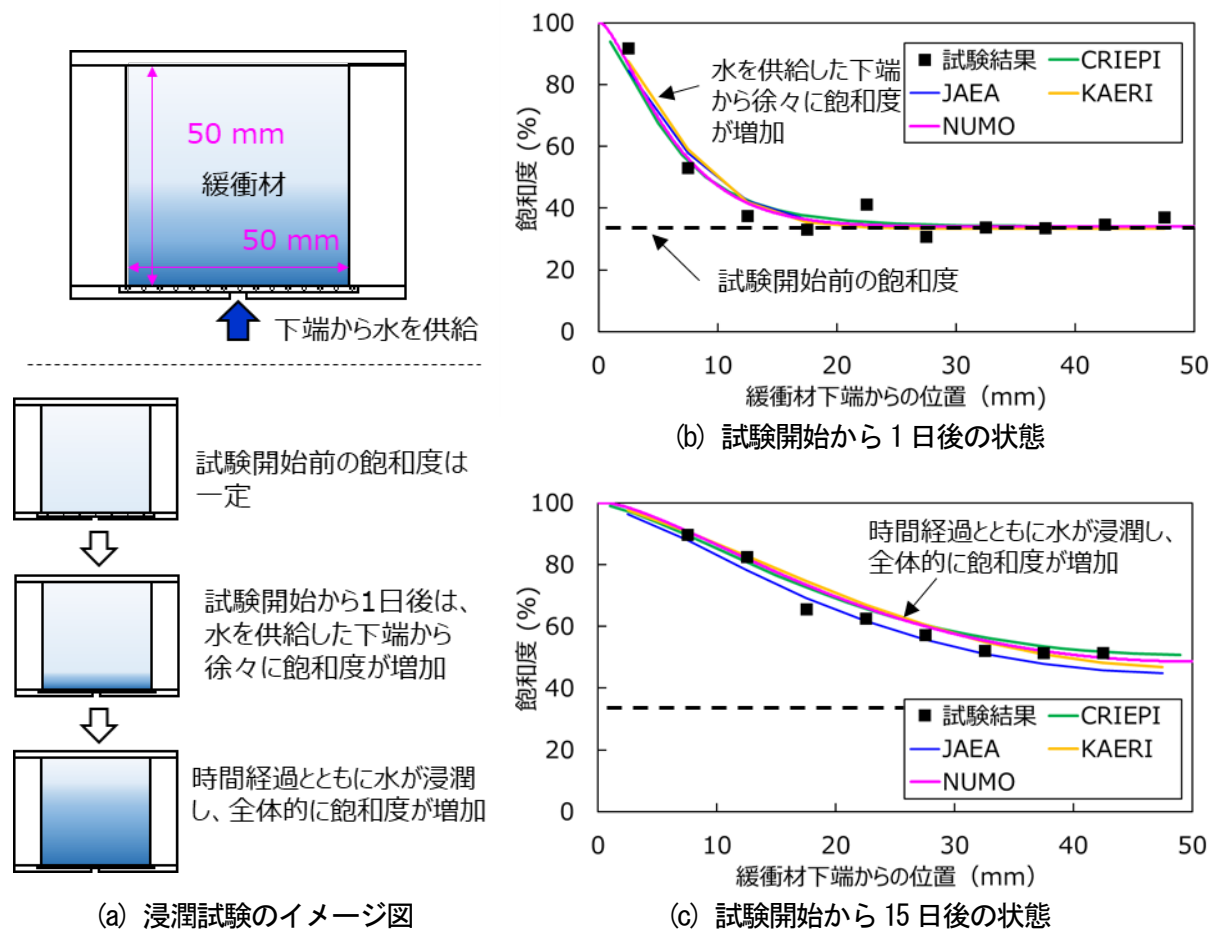


図 14 浸潤試験結果と各機関の解析結果の一例

5. 処分概念オプションの実証

5.1 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

5.1.1 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

処分事業では、坑道あるいはピット（処分孔）内に流入する地下水の量や、岩盤中の断層や割れ目の力学的な強度などを把握し、ピットの掘削や人工バリアの施工の可否あるいは工学的対策の必要性などを判断することが重要です（図 15）。このため、実際の地質環境において廃棄体の設置方法などの実証試験を通じた坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化に取り組みます。これまでに構築・確認してきた各要素技術を体系的に適用し、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方法を体系的に整理します。具体的には、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および人工バリアの設計・評価技術、多接続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、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術、廃棄体設置の判断や間隔などの設定に必要となる情報の整理を行い、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術として体系化します。

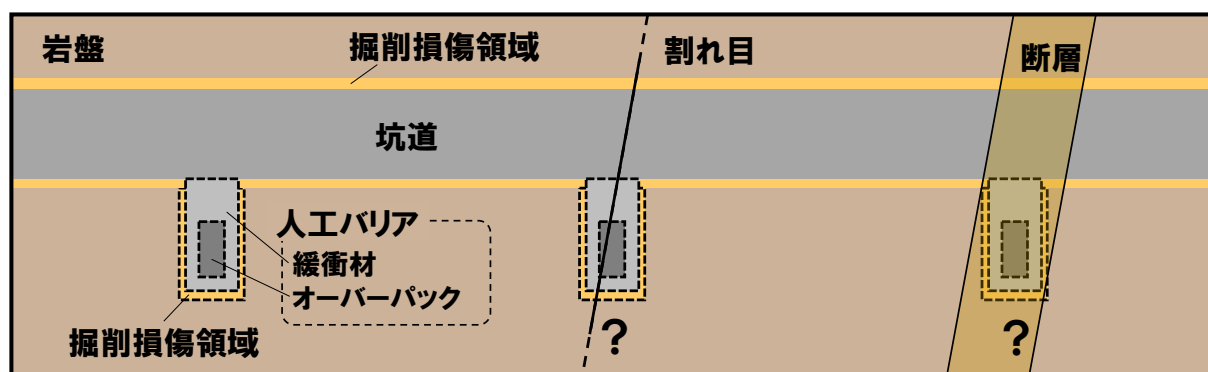


図 15 人工バリアやそれを定置する坑道の周辺において想定される地質構造の特徴を示すイメージ図（鉛直断面）

処分場の設計では、図 16 に示す設計フローの通り、廃棄体特性、地質環境モデルおよび要求事項に基づいて処分概念および処分施設（人工バリア・地下施設・地上施設）の仕様や操業方法、安全対策なども含めて段階的に設定されます。設計後には、閉鎖前および閉鎖後長期の安全評価が実施され、そ

の結果に基づき必要に応じて設定・設計内容が再検討されます。あわせて、設計で顕在化した不確実性が次段階で低減されるよう、地質環境調査・評価計画へ情報がフィードバックされます⁹⁾。設計フローの中で、体系化の研究で実施する4つの課題がどこに対応するのかを、図16に示しています。これら4つの課題では、将来、処分事業で想定されている調査・設計・評価を、幌延の地質環境を事例として試行します。その過程で得られた結果や知見を踏まえ、各段階で必要となる情報やその取得方法を整理するとともに、調査・設計・評価の方法論を、より実用的かつ効率的なものとして構築することを目指しています。具体的な実施内容は以下の通りです。

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」では、幌延の地質環境を事例に、各種調査に応じて得られる情報を基に地質環境モデルを構築・更新し、物質移行解析を実施することで、閉じ込め性能の評価手法を体系的に整理します。

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」では、人工バリアおよび地下施設の設計として、人工バリアを定置するピットや坑道の配置を評価する際に、地質環境モデルから必要となる情報として、断層・割れ目分布やEDZの特徴(図15)を整理し、これまでに構築した調査・解析手法を適用することにより、それらが評価可能であることを実証します。さらに、坑道埋め戻しと止水プラグの設置についても、必要な調査・設計・施工上の要点を整理し、掘削後に得られる調査結果との比較により評価の妥当性を検証して、必要な情報と取得方法、ならびに調査計画・解析条件の最適化に資する知見を取りまとめます。

課題(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」では、断層や割れ目からの湧水量や岩盤の力学的強度などの地質環境の調査・評価を行い、多連接坑道のピットに人工バリアを設置する場合の地下施設の設計に反映可能な地質環境の調査・評価手法を整備します。

課題(4)「廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理」では、坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ(物質の動きにくさ)、およびEDZの広がりな

どの地質環境の調査・評価を行い、地下施設の設計や岩盤の閉じ込め性能の評価を含めて、地下施設設置深度を評価するための地質環境の調査・評価手法を整備します。

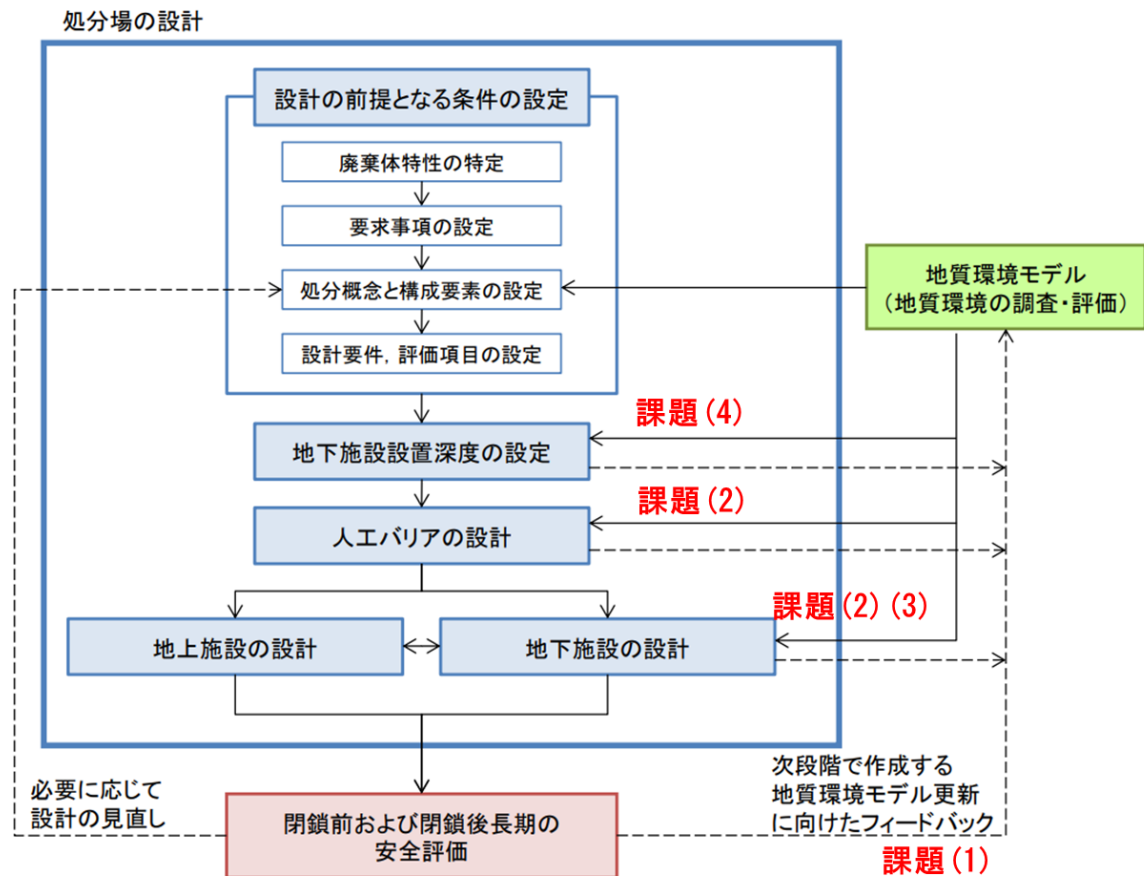


図 16 処分場の設計フローと体系化の研究で実施する課題の関係⁽⁹⁾

(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

廃棄体の定置の判断に当たっては、緩衝材や OP といった人工バリアの機能、埋め戻し材やプラグの機能、坑道周辺岩盤の閉じ込め性能を評価することが重要となります。本課題では、既存の先行研究の情報、幌延における研究成果、および後述する課題(2)～(4)の検討結果を用いて、調査により得られる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します。

坑道スケールに着目した場合、その地下水流動評価では、個々の亀裂をす

べてモデル化するのではなく、亀裂の統計情報に基づいた評価を行います。この評価では、その統計量から算出される亀裂を含む岩盤の平均的な水の流れやすさを示す有効透水係数を用いて、岩盤を連続体として取り扱います⁽⁹⁾。そこで坑道スケールの岩盤の閉じ込め性能の評価手法の体系化を目的として、既存の研究結果に基づいて岩盤の有効透水係数を推定する手法を提示しました⁽¹⁰⁾。岩盤の有効透水係数は、岩盤に含まれる亀裂の数やそのつながり方などの亀裂の幾何学的な特徴と、評価するスケールにおける個別の亀裂の平均的な水の流れやすさを示す有効透水量係数*から算出できます。そこでまず、亀裂の幾何学的な特徴を評価するために、これまでに実施されたボーリング調査や地質観察の結果に基づき、稚内層の主な水みちである断層を対象とした亀裂ネットワークモデル（以下、DFN モデル）を構築しました（図 17）。

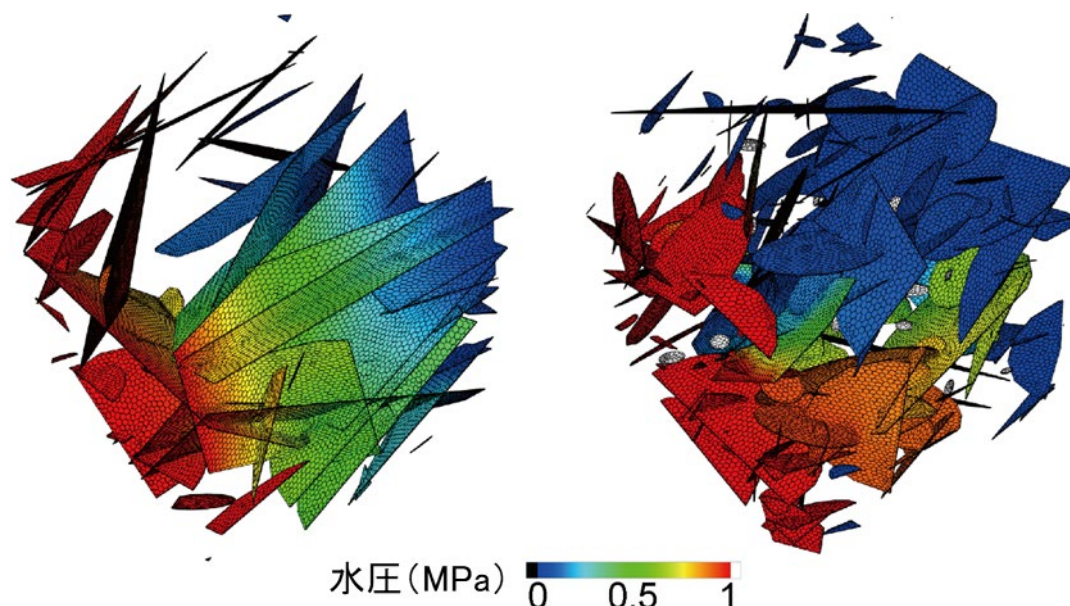


図 17 構築した DFN モデル

地質観測結果に基づいて検討した亀裂の平均半径が 20 m のモデル（左）と 5 m のモデル（右）を用いて地下水流動解析を実施した際の水圧分布を示しています。

構築した DFN モデルの各亀裂に有効透水量係数を付与して地下水流動解析を行うことで岩盤の有効透水係数を算出しました。坑道スケールにおける亀裂の有効透水量係数は、水理試験などで調査可能な局所的な透水量係数*の不均質性と水みちのつながり方の次元の相乗効果を考慮することで計算できます⁽¹¹⁾。これまでの研究や、令和 6 年度に実施した課題(4)における情報の整理から、令和 6 年度に分類した 5 つの地層（表 3）⁽¹²⁾の分類 I-a の岩盤にお

いて、水理試験などで調査可能な亀裂の局所的な透水量係数の分布はダクティリティインデックス（以下、DI）※と関連することが示されています^(12、13)。また、水みちのつながり方の次元も DI と関連することが示されており、稚内層におけるその深度分布が推定されています⁽¹⁴⁾。局所的な透水量係数の不均質性と水みちのつながり方の次元の相乗効果は、Landau-Lifshitz-Matheron の式⁽¹⁵⁾を適用することで定量的に評価できることから、既存の研究成果にその式を適用して有効透水量係数を算出し、それを DFN モデルに付与して有効透水係数を推定しました。図 18 は、本手法により推定した有効透水係数、従来手法（亀裂の透水量係数を対数正規分布に従って付与する方法）により推定した有効透水係数および地下施設全体の湧水量や地下施設周辺のボーリング孔の地下水圧変化から直接推定した有効透水係数の比較結果です。従来手法で推定される有効透水係数は、局所的な透水量係数の不均質性は考慮している一方で水みちのつながり方の影響を考慮していません。その結果、水みちのつながり方の次元が低い地下深部において、水圧や湧水量から導かれる有効透水係数を過大評価しています。他方、本手法による有効透水係数はこれらの両方を考慮しているため、水圧や湧水量から直接測定した有効透水係数を適切に評価することができました。

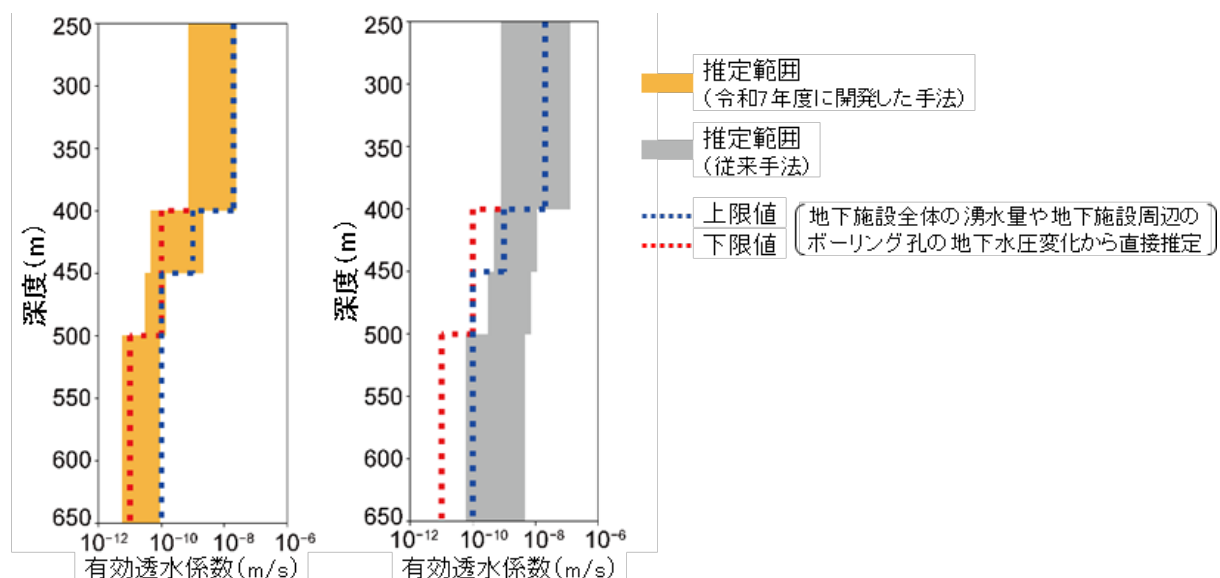


図 18 推定した有効透水係数の比較

本手法および従来手法のいずれにおいても、原位置の亀裂分布を適切に反映していると考えられる平均半径 20 m の DFN モデルを用いた推定結果を示しています。

表 3 割れ目の閉塞/充填状況と岩石の透水性に応じた地層の分類と割れ目の代表的な透水性の調査・
評価手法^(11、13、14、16)

分類	粘土鉱物の膨潤※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	主要な水みち割れ目の局所的な透水性と岩石の強度・応力状態との相関性	主要な水みち割れ目の水理学的連結性※と岩石の強度・応力状態との相関性	主要な水みち割れ目の代表的な透水性	主要な水みち割れ目の代表的な透水性の調査・評価手法
I-a	限定的	限定的	限定的	小	稚内層遷移帯・稚内層主部 ^b （珪質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）、パルfris層 ^c （石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類；スイスウェレンベルグ）	強い ^h	強い ⁱ	大～小	水理試験などから得られる原位置データに加えて、DI と割れ目の局所的な透水性や水理学的連結性との関係から推定可能 ^{b、c}
I-b				大 ^a	声間層 ^d （珪藻質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）				
II			強い	—	セントビーズ砂岩層 ^e （砂岩/先新第三紀堆積岩類；英セラフィールド）	弱い	弱い	大	水理試験などから得られる原位置データより推定可能 ^{d、e、f、g}
III			強い		トアキアン・ドメリアン頁岩層 ^f （石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類；仏トゥルヌミール）				
IV	強い	—	オパリナス粘土層 ^g （粘土質泥岩/先新第三紀堆積岩類；スイスモンテリ）						

a：原位置透水試験において割れ目を含む区間と健岩部の透水性の差が3桁未満⁽¹⁷⁾

b：参考文献(11、13、14、18、19、20、21、22、23、24)に基づく

c：参考文献(13、21、25、26、27、28、29、30)に基づく

d：参考文献(11、14、17、20、21、22、24、31、32、33、34、35)に基づく

e：参考文献(16、36、37、38、39、40)に基づく

f：参考文献(41、42、43、44、45、46、47、48、49、50)に基づく

g：参考文献(44、46、51、52、53、54、55、56、57)に基づく

h：割れ目の開口幅とDIが一定の関係で相関し、その関係をバートン・バンディスのモデル⁽⁵⁸⁾で再現可能

i：DI<2.0の領域で水理学的連結性が高く（水みちのつながり方の次元が1.5以上、動水勾配※が相対的に小さい）、DI>2.0の領域で水理学的連結性が低い（水みちのつながり方の次元が1.5未満、動水勾配が相対的に大きい、若い外部由来の地下水がない）^(14、21)

このように分類 I-a に相当する岩盤では、DI の値に基づいて透水性⁽¹⁰⁾や物質移行の挙動⁽⁵⁹⁾をモデル化することで岩盤の閉じ込め性能を体系的に評価することができます。一方で、分類 I-b に該当する岩盤においては、その性能を評価するための原位置データや解析が十分ではありません。そこで、声問層が分布する 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑において、HIP のタスク A（物質移行試験）の課題として透水試験やトレーサー試験を実施し、その岩盤の閉じ込め性能を評価しています。タスク A では、フェーズ 1 の期間である令和 6 年度までにボーリング孔の掘削や透水試験などを実施し、その結果に基づいてトレーサー試験を実施しました（図 19）⁽⁷⁾。

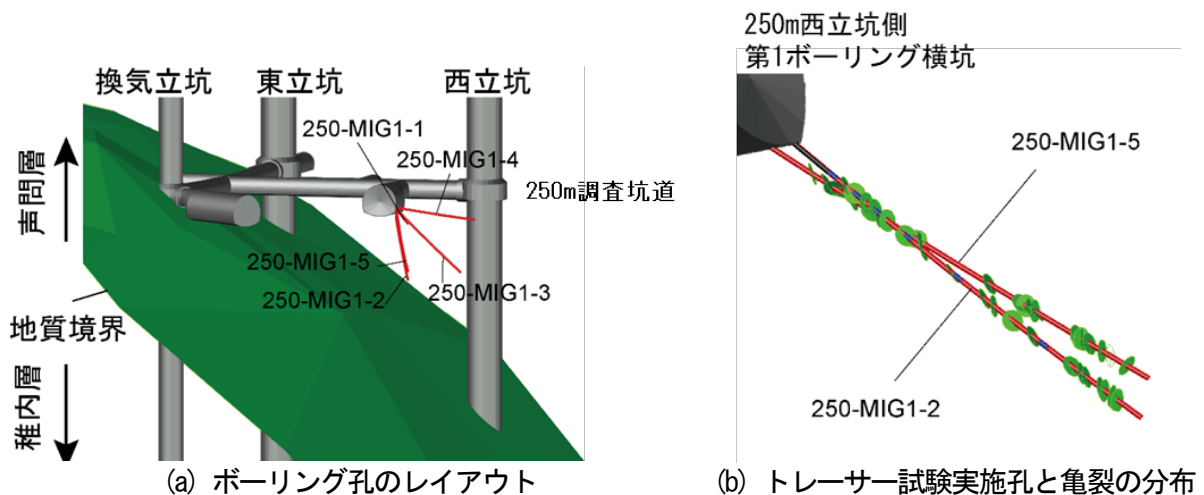


図 19 トレーサー試験の実施場所とボーリング孔のレイアウト

(a)に示したボーリング孔のうち、近接した 250-MIG1-2 孔と 250-MIG1-5 孔を使用してトレーサー試験を実施しています。(b)に示した円盤は、ボーリング孔内で観察された亀裂の分布を表しています。

令和 6 年度までの原位置試験では試験時の水圧および流量の安定性の問題から、離隔距離を約 70 cm とする限られた範囲における物質移行特性のデータ取得に留まっていました。そこで令和 7 年度は、岩盤のより代表的な物質移行特性に関するデータ取得を目的として、図 20(a)に示すように離隔距離を約 1.7 m に延長した範囲でダイポール試験*を実施しました。ダイポール試験の離隔距離の延伸に伴い、試験期間を長期化する必要があります。一方で原位置試験を実施している周辺の地下水にはガスが多く含まれています。試験期間の長期化による揚水時間の延長は、原位置試験実施場所周辺の水圧の低下を招き、それに伴う脱ガスの発生がダイポール試験の継続を阻害します。そこで、揚水量を最小限に抑えることで、揚水地点の水圧低下を抑制しながら

らダイポール試験を実施しました。令和 6 年度の試験ではポンプを使用して揚水を行っていましたが、揚水量を抑制するために揚水区間の水圧による自然流出を利用してトレーサーの回収を行いました。図 20 に、トレーサー試験の結果の一例を示します。試験期間中には湧水量の減少が認められますが、バルブを調整することにより試験区間の水圧を一定に保ちつつ揚水量を 0.3 mL/min から 0.7 mL/min の間に維持して試験を実施することができました（図 20(b)）。このように揚水量を抑制することで、約 3 週間試験を継続し破過曲線※を取得することができました（図 20(c)）。令和 7 年度中には、トレーサーの種類や異なる注入条件下において計 3 回のトレーサー試験を実施することができました。この結果、令和 6 年度から令和 7 年度にかけて、離隔距離やトレーサーの種類、注入方式を変化させた様々な条件において、これら条件を適切に反映した物質移行特性に関するデータを取得することができました。

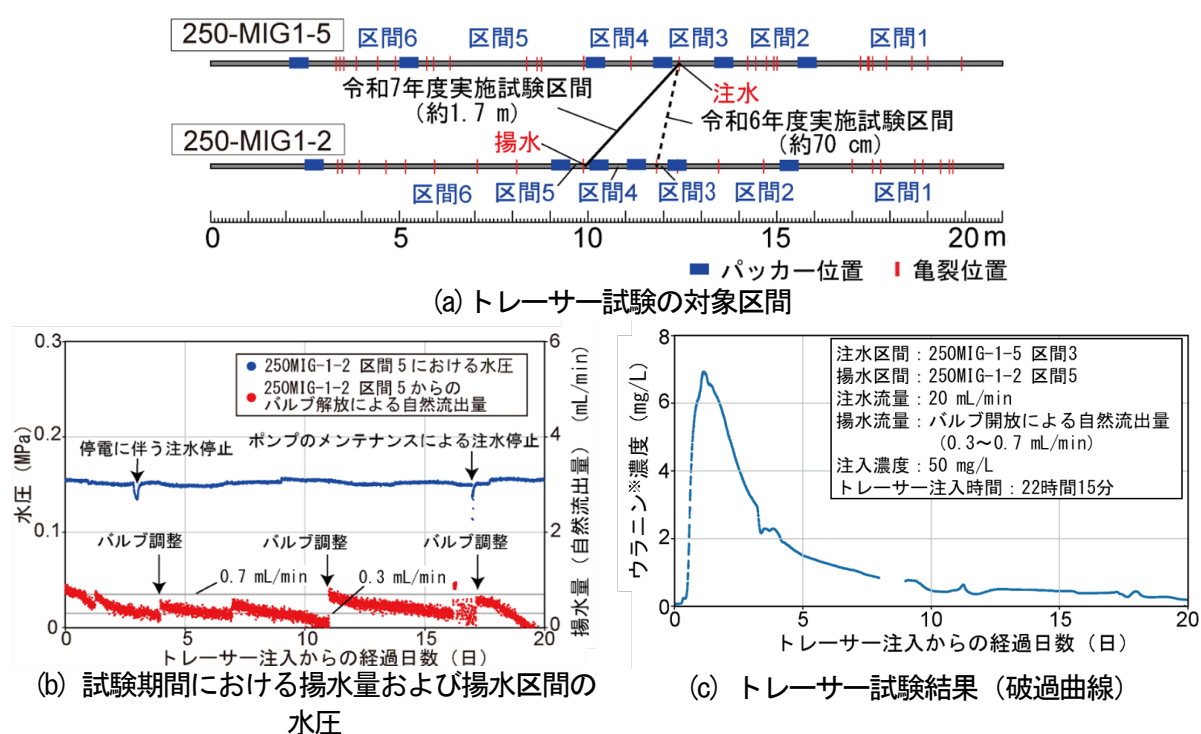


図 20 令和 7 年度に実施したトレーサー試験結果

また、分類 I-b に該当する岩盤は、健岩部の空隙率や透水性が高い特徴を有しています。このような岩盤の閉じ込め性能を適切に評価するためには、健岩部において物質がどの程度の速さで自然に広がるかを示す「実効拡散係

数」を把握することも重要です。そこで、原位置試験を実施している場所で採取した岩石コアを用いて実験室内での拡散試験を実施し、トレーサーの実効拡散係数を取得しました。対象としたトレーサーは、電気的に中性である重水^{*}、陽イオンであるセシウム (Cs)、陰イオンであるヨウ素 (I) の3種類です。拡散試験では、採取した声間層泥岩コアを直径 20 mm、厚さ 5 mm の円盤状に加工した上で、模擬地下水と接触させ、時間の経過に伴う溶液中のトレーサー濃度変化および試験終了後の岩石内部の濃度分布を測定しました。模擬地下水には、イオン強度（水の中に溶けているイオンの「量」と「電荷の強さ」をまとめて表す指標）の異なる溶液を用いました。これらの実測データを数値解析により再現することで、実効拡散係数を評価しました。図 21 は、本研究で得られた重水の実効拡散係数を間隙率との関係で整理した結果を示しています。図中の直線は、岩石中の拡散が間隙率に依存することを示す経験則（Archie 則⁽⁶⁰⁾）を表しています。本研究の結果、および既往研究の稚内層泥岩の結果^(61, 62)はこの関係と良好に整合しており、電気的に中性な物質の拡散係数が主として岩石の間隙構造、すなわち間隙率や屈曲度^{*}といった幾何学的特性によって説明できることを示しています。

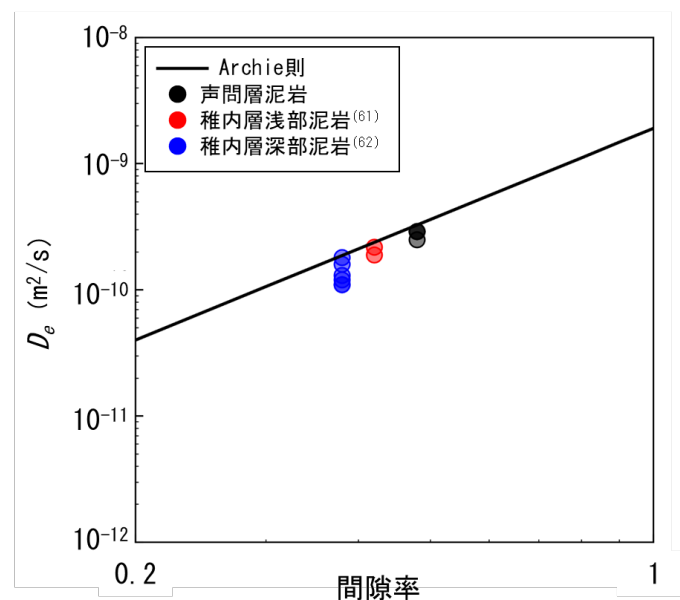


図 21 重水またはトリチウム水^{*}に対する実効拡散係数 (D_e) と間隙率の関係

本研究で得られた声間層泥岩の結果を、既往研究データの稚内層泥岩と比較して示します。実線は、Archie 則⁽⁶⁰⁾を表します。

一方、イオンである Cs および I では、地下水のイオン強度に応じた明瞭な違いが確認されました（図 22）。電氣的に中性な重水がイオン強度に依存せずほぼ一定の拡散係数を示すのに対し、Cs は低イオン強度条件で拡散が促進され、高イオン強度条件で抑制される傾向を示しました。一方、I は Cs とは逆の傾向を示しました。このような挙動の違いは、鉱物表面の電荷によって形成されるイオンの分布（電気二重層）による電氣的な相互作用により説明されます。すなわち、低イオン強度条件では電気二重層が発達し、負に帯電した鉱物表面近傍では陽イオンである Cs が濃縮されやすくなる一方、陰イオンである I は排除されやすくなります。その結果、Cs は拡散が促進され、I は抑制されるという対照的な挙動を示すと考えられます。この電気二重層の影響と間隙サイズの分布を考慮したモデル⁽¹⁰⁾により実効拡散係数を評価したところ、実験で観測されたイオン強度依存性を含む拡散挙動を整合的に再現できることが確認されました。以上の結果から、電氣的に中性な物質の拡散は主として岩石の間隙構造により規定される一方、イオンの拡散は地下水化学条件および電気二重層効果の影響を強く受けることが確認されました。また、これまで開発を進めてきたモデルが間隙サイズ分布の異なる声間層泥岩にも適用可能であることが示され、原位置トレーサー試験の再現解析に必要なパラメータ設定の高度化につながる知見が得られました。なお、本課題については、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 7 年度「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業[JPJ007597]：地層処分安全評価確証技術開発（核種移行総合評価技術開発）」）の成果を一部活用しました。

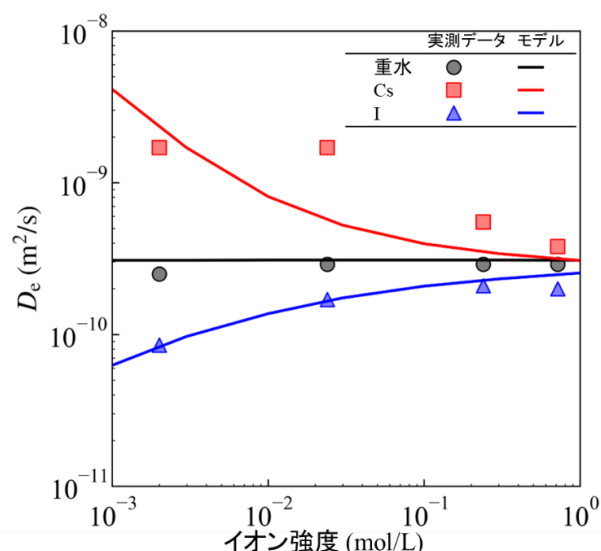
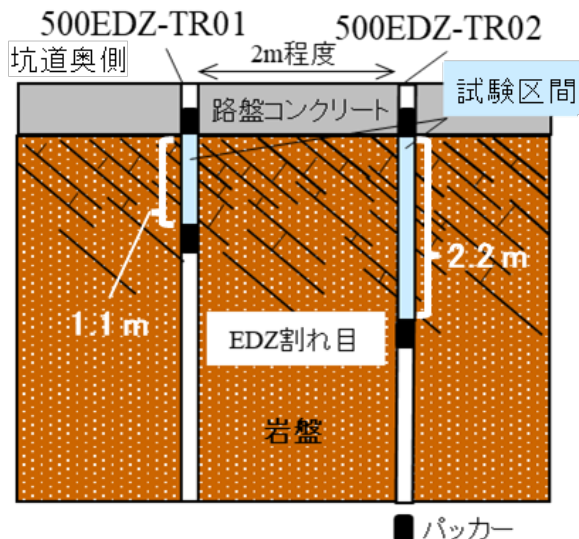


図 22 本研究で取得した声間層泥岩の重水（黒）、Cs（赤）および I（青）の実効拡散係数 (D_e) とイオン強度の関係

実線は電気二重層効果を組み込んだモデルによる計算結果を示し、実験データをおおむね整合的に再現しており、モデルの声間層泥岩への適用性が確認されました。

ピットスケールにおける岩盤の閉じ込め性能の評価では、人工バリアから流出した物質が坑道の周囲に形成される EDZ を介して、割れ目や断層を含む岩盤中に移行することを想定します。その評価では、EDZ の物質移行特性に関する条件を設定する必要があります^(9, 63)。令和 6 年度までの研究では、深度 350 m における EDZ の物質移行特性に関するデータ取得を行いました⁽⁶⁴⁾。一方で、深度 500 m では深度 350 m と比較して EDZ の広がりが大きくなることが予測されており^(12, 65)、ピットスケールにおける岩盤の閉じ込め性能も深度に応じて異なることが想定されます。これらの結果を踏まえ、令和 7 年度は、深度 500 m における EDZ を対象としたトレーサー試験に着手しました。

500m 試験坑道 8（図 6 参照）において 2 本のボーリング孔を掘削し、EDZ を対象とした透水試験を実施しました。EDZ の範囲は、掘削した孔（500EDZ-TR01 孔および 500EDZ-TR02 孔、以下、TR01 および TR02）のコアおよび孔壁の観察結果に基づいて推定しました（図 23）。



(a) ボーリング孔の配置と試験区間の概念図

(b) 試験装置の設置状況

図 23 500m 試験坑道 8 における EDZ 透水試験の概要

この推定結果を踏まえ、当該区間を確実に評価できるようパッカーにより試験区間を設定し（区間長 TR01:1.1 m、TR02:2.2 m）、段階定流量注水試験を行いました（図 24）。段階定流量注水試験では、対象区間に定流量（40、60、80、100、120、140 mL/min、1 ステップ 20 分間）注水し、その際の間隙水圧を計測しました。取得した水圧データの再現解析から対象区間の透水係数を求めたところ、TR01 で 5.3×10^{-8} m/s、TR02 で 1.1×10^{-7} m/s と健岩部（ 1×10^{-11} m/s 程度⁽²⁴⁾）と比べて高い透水性が確認されました。また、水みちのつながり方の次元は TR01 と TR02 とともに 3 に近い値を示しました。この値が 1.5 より大きいと、割れ目内の水みち同士のつながりが多いことが推定されます。透水試験中には、一方の孔で注水した際に他方の孔において水圧応答が観測され、両孔間の水理的な連続性が確認できました。これらの結果から、両孔を利用した EDZ を対象とするトレーサー試験の実施可能性が確認できました。令和 8 年度は、同様の EDZ 区間を対象にトレーサー試験を実施する予定です。

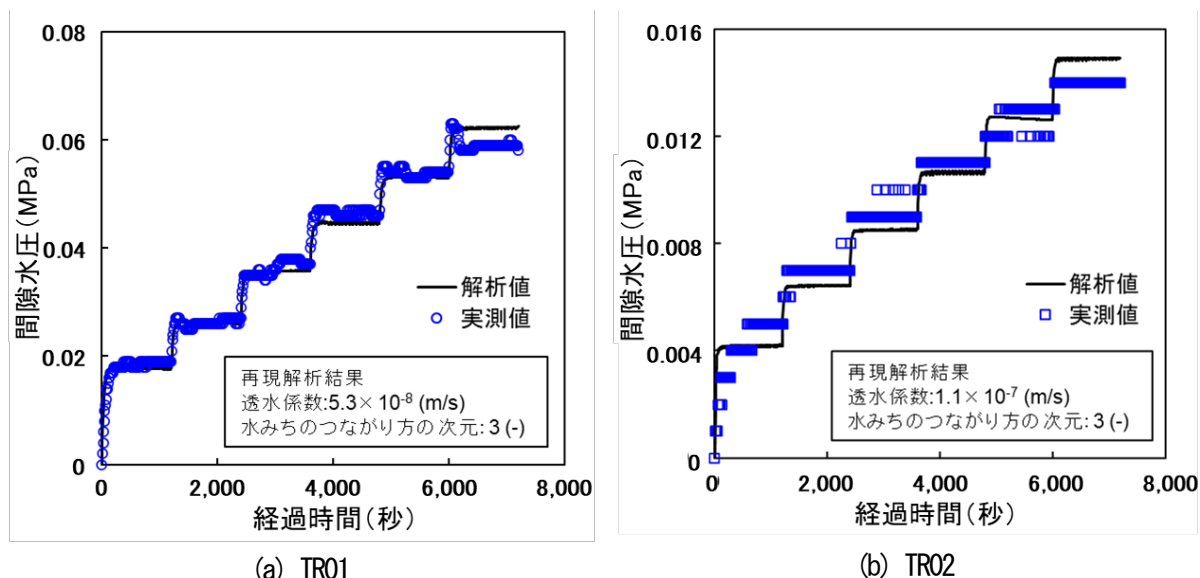


図 24 TR01 と TR02 の EDZ 区間における透水試験結果とその解析結果

図は段階注水試験における水圧変化を示します。段階的に注水量を増加させることにより（40、60、80、100、120、140 mL/min、1 ステップ 20 分間）、水圧が階段状に増加する様子が確認されました。TR02 については、40 mL/min 注水の際に区間内の気泡の影響が考えられたため、60 mL/min 以降のデータを再現解析の対象としました。解析結果は実測値と一部差異が見られるものの、水圧変化の全体的な傾向は再現できており、対象区間の透水特性を評価する上で有効な結果が得られました。

物質の化学状態や移行しやすさに影響を与える地下水の水質（pH、酸化還元電位※など）や微生物・有機物などの地下水コロイド※との相互作用は、坑道スケールとピットスケールの両方において岩盤の閉じ込め性能に影響するため、重要な情報になります。令和 7 年度は、これまでに実施してきた深度 350 m までの調査坑道を利用した水質の計測（6 章参照）に加えて、500m 調査坑道のボーリング孔（500EDZ-P8 孔）を利用した水質観測も実施しました。その結果、地下水の pH は 6.6、酸化還元電位は -220 mV であるとの結果が得られ、深度 350 m までと同様に中性・還元的な地下水が分布していることが確認できました。

また、これまでに幌延深地層研究センターや他の地下研究施設などで実施されてきた調査事例をもとに、深部地下水を対象とした pH や酸化還元電位の計測・評価方法を整理して取りまとめました⁽⁶⁶⁾。図 25 には、その内容を基に地上からの調査（図 25(a)）および坑道での調査（図 25(b)）に対して作成したフローチャートを示します。幌延深地層研究センターの地下施設ではこれまでに、500m 調査坑道も含めた各深度で計測に十分な量の地下水が確保でき、高品質な水質データが得られています。一方、令和 6 年度に分類した 5 つの

地層の分類Ⅲや分類Ⅳに該当する岩盤のように（表 3 参照）、主要な水みち割れ目の透水性が低く十分な量の地下水を確保することが難しい場合（図 25(b)の右分岐）には、模擬地下水を循環させて平衡に達した後に水質を計測する手法などが適用されています^(67, 68)。このような場合も含め、様々な岩盤に対してこのフローチャートが適用可能であると考えられ、地球化学特性の調査・解析に関する既存の評価手順⁽⁶⁹⁾と併せて、岩盤の閉じ込め性能の基礎となるデータ取得に資するものとなります。

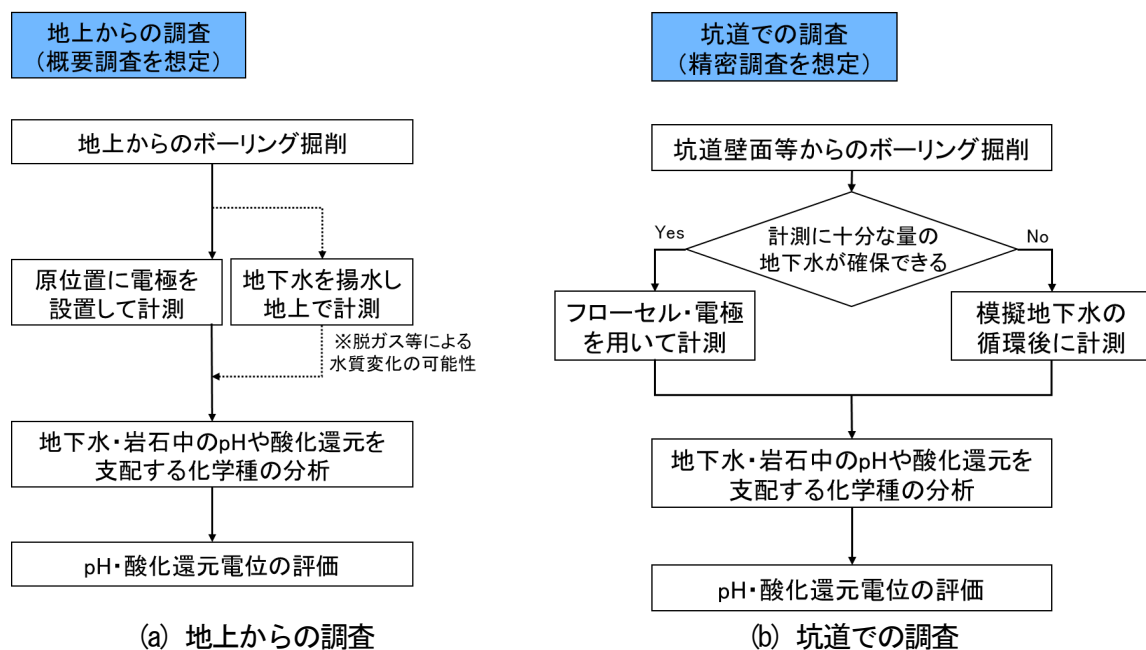


図 25 水質の計測・評価方法のフローチャート

(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

坑道やピットを掘削したり、埋め戻し材や人工バリアを施工したりする際には、坑道・ピット内への湧水が多くなる条件や、断層・割れ目の密集によって局所的に岩盤の力学的強度が低下する条件を、あらかじめ把握しておくことが重要です（図 15）。その上で、そのような条件下でも必要な設計条件を満たせることを確認し、施工が成立するかどうかを判断する必要があります。

幌延深地層研究センターの地下施設周辺の岩盤には、断層や割れ目が分布しています。また、掘削に伴って坑道周囲に EDZ が広がります。これらが湧

水量や坑道の安定性に影響を及ぼします。本課題では、こうした点を踏まえ、以下の技術の実証に取り組みます。

- ・ 坑道とピットの配置に関する調査・評価・施工技術
- ・ 坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の調査・設計・施工技術

これらの実証は、HIP のタスク B（処分技術の実証と体系化）の課題として設定しています。

このうち、坑道とピットの配置に関する調査・評価技術の実証では、500m 試験坑道 8・9（図 6 参照）を対象として、先行ボーリングや物理探査などの原位置での地質環境特性の調査を実施します。図 26 に示すように、主に先行ボーリングによって得られる調査データと、これまでに構築してきた解析手法が、坑道の間隔とピットの配置（位置・間隔）の評価に適用できることを確認します。

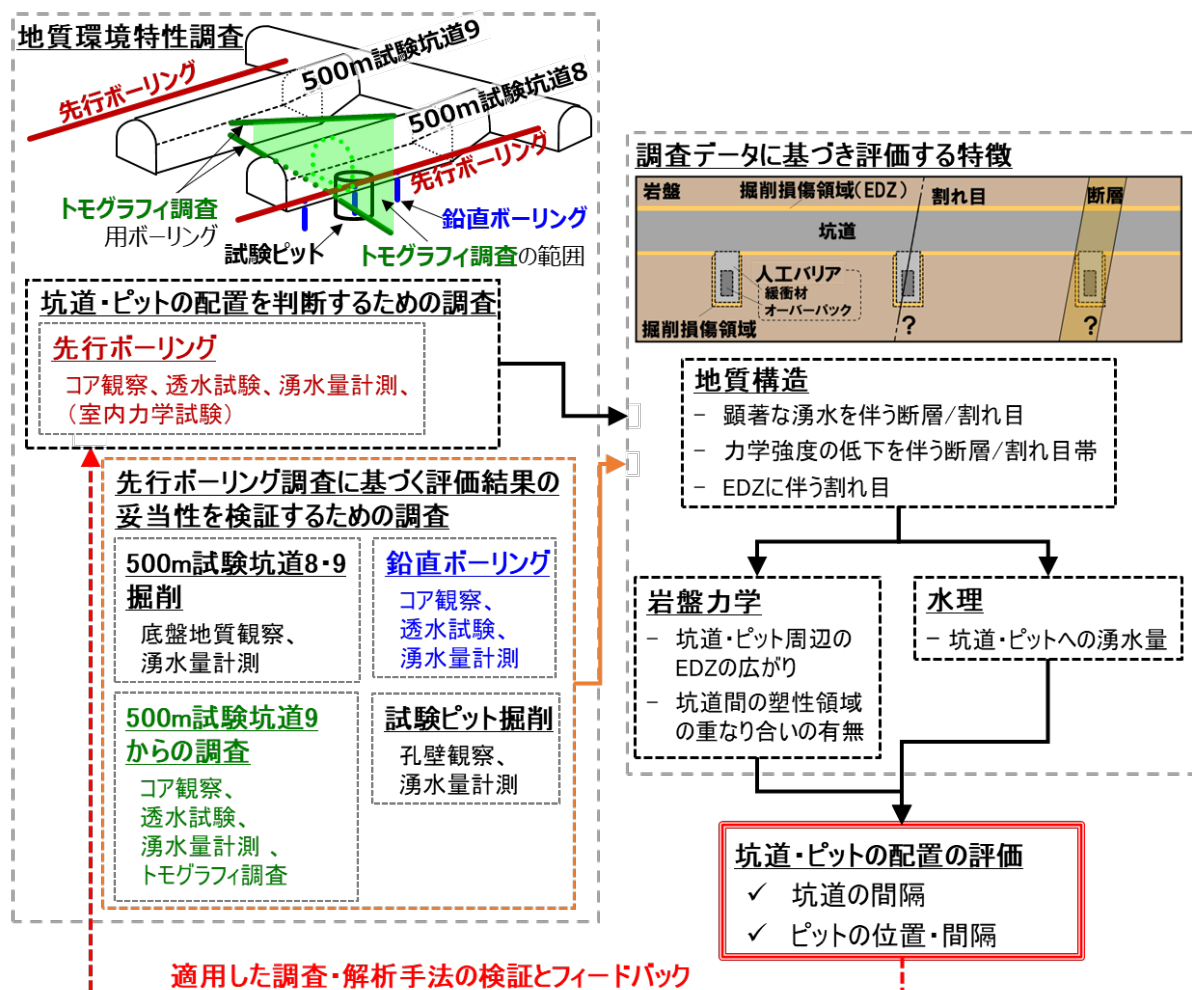


図 26 地質環境特性調査に基づく坑道とピットの配置の評価を示すフロー図

調査に当たっては、国内外の地層処分事業における処分場設計の考え方^{例え}ば、(9、70)を踏まえ、掘削によって坑道・ピット周辺に生じる EDZ の広がり、坑道やピットへの湧水量に着目します。EDZ の広がり、岩盤の力学的強度の低下を引き起こし、坑道やピットの安定性に影響します。特に、隣り合う坑道の間で EDZ が重なり合うことは好ましくないため、その広がり、坑道・ピット間隔を設定する上で重要な情報となります。一方、掘削中の大量湧水は、坑道やピットの施工を難しくする恐れがあります。さらに、人工バリア定置後は、緩衝材の流出などによって品質低下につながる可能性もあります。このため、湧水量も重要な情報です。地層処分事業における地下施設の建設では、このような懸念が生じない範囲で、設計どおりに坑道とピットを配置できることを、施工前の予測や施工時の調査により確認することが重要です。

500m 試験坑道 8・9 での調査では、図 26 に示す通り、「顕著な湧水を伴う断層/割れ目」、「力学強度の低下を伴う断層/割れ目帯」、および「坑道掘削により生じる割れ目」といった地質構造の分布を把握します。その上で、「坑道・ピット周辺の EDZ の広がり」、「坑道間の塑性領域の重なり合いの有無」、および「坑道・ピットへの湧水量」を確認し、坑道やピットの配置を評価します。本技術の実証では、事前の予測解析や先行ボーリング調査など、坑道掘削前および掘削時に得られる情報によって、坑道やピットを設計の範囲内に配置できるかどうかを事前に確認するための手法の有効性を示します。また、事前予測や先行ボーリングなどに基づく推定・評価結果を、坑道掘削後に坑道内から実施するボーリング調査や底盤観察で得られる調査結果と比較することで、その妥当性を検証します。これらの調査結果を踏まえ、後述する課題(3)で検討する湧水抑制対策やピット掘削などの技術の適用を通じて、人工バリアを定置するピットの配置位置や坑道間隔を設計するために必要な情報と、その取得方法を整理します。さらに、データ取得条件や解析条件の適切性を確認し、調査計画および解析手法の最適化に資する知見と留意点を整理します。

令和 7 年度は、500m 試験坑道 8・9 の掘削に先立ち、先行ボーリング調査で得られたコア試料の観察結果と、BTV^{*}調査により取得した孔壁画像の判読結果に基づいて、500m 試験坑道 8・9 内に出現する断層の分布を推定しました。その後、500m 試験坑道 8・9 の掘削後に坑道底盤の地質観察を行い、先行ボー

リング調査に基づく推定結果と比較しました。既往研究により、稚内層に分布し水みちとして機能する個々の断層の規模は、おおむね数十 m 以下と限定的であることが示されています⁽⁷¹⁾。このため、離れた位置にあるボーリング孔の情報を外挿して、坑道に出現する断層の位置を推定することには大きな不確実性が伴いますが、断層の分布頻度は深度 500 m と深度 350 m で大きな違いはない^(17, 72)ことから、深度 500 m においても、深度 350 m と同程度の頻度、すなわち数 m に 1 本程度の断層が分布すると推定されました。坑道から 3 m 程度離れた位置で実施した先行ボーリング調査に基づき推定した結果、断層が数 m に 1 本程度で分布していることが確認でき、過去の推定結果と整合する結果が得られました。さらに試験坑道における地質観察を行った結果、先行ボーリング調査により坑道に出現する断層を事前に捉えられることを確認するとともに（図 27）、断層の走向・傾斜や分布頻度の傾向を把握できる可能性が示されました。

また、湧水量については、断層の水みちとしてのつながりが乏しい（水みちのつながり方の次元が 1.0 に近い）ため、湧水量が急速に減少すると予測しました。すなわち、500m 試験坑道 8・9 においては複数の断層が分布するものの、断層からの定常的な湧水量は非常に少なく、数 $\text{m}^3/\text{日}$ と予測しました。実際に、先行ボーリングを用いた透水試験の結果では、透水性の高い断層は確認されず、ボーリング孔からの湧水量もわずかであり、予測と整合する結果が得られました。このことから、500m 試験坑道 8・9 の掘削に伴う湧水量は多くないと見込まれ、湧水抑制対策（グラウト※）は不要と判断しました。さらに、試験坑道掘削後に坑道内で確認した湧水点の湧水量も少なく、最大で 0.1 L/min 程度でした。加えて、掘削前後で全坑道の湧水量に大きな変化は見られなかったことから、両坑道からの湧水量は少なかったと考えられます。以上の結果から、先行ボーリング調査は、処分坑道およびピットのレイアウト設計において必要となる断層の分布や湧水量に関する情報を事前に把握する上で、有効な調査手法となり得ることが示されました。



図 27 500m 試験坑道 9 における地質調査の結果の例

(a) で、赤い線は断層を、赤い点線は、先行ボーリング調査で確認された断層の走向・傾斜に基づき外挿した位置を示します。

先行して掘削した 500m 試験坑道 9 を対象として、EDZ の広がり进行调查し、令和 6 年度に実施した予測解析結果との比較を実施し、妥当性を確認しました。調査では、図 28 に示すように 500m 試験坑道 9 から 3 本のボーリング孔を 500m 試験坑道 8 に向けて掘削しました。得られたボーリングコアの観察に加え、BTV 調査および弾性波*トモグラフィ調査により、EDZ の広がりを確認しました。図 29 に示した、透水試験用のボーリング孔で得られたボーリングコアの写真から、吹付けコンクリート部を含む孔口から 3.0 m 程度の範囲まで割れ目が密に発達していることが分かります。また、この割れ目の表面を観察すると、引張破壊の証拠を示す割れ目が多く確認されました。これは、過去の 350m 調査坑道の事例と同様に、坑道掘削に起因する割れ目 (EDZ 割れ目) であると判断する根拠のひとつとなります。さらに、壁面から約 1.7～2.8 m の範囲にせん断割れ目も確認されていますが、これらはもともと存在している割れ目なのか、坑道掘削により生じたものなのかの判断が難しいため、EDZ の広がり の範囲に含めています。また、弾性波トモグラフィ調査孔についても同様の観察を行いました。坑道壁面からの距離と割れ目の分布の関係

を図 30 に示します。500m 試験坑道 9 の側壁面では、壁面から最大で約 3.1 m まで割れ目が密に発達していることから、この範囲を EDZ の広がりと推定しました。

令和 6 年度に実施した予測解析では、500m 試験坑道 9 の壁面から 3.1 m まで EDZ が広がる結果を得ましたが⁽⁶⁵⁾、今回の観察結果はこれと整合的でした。なお、350m 調査坑道では、側壁面の EDZ の広がりには 1.0 m 程度でした^(73, 74)。これは、深度 500 m に作用する地圧が大きいことや、岩盤が深度 350 m よりも軟らかいことに起因すると考えられます（表 2 参照）。

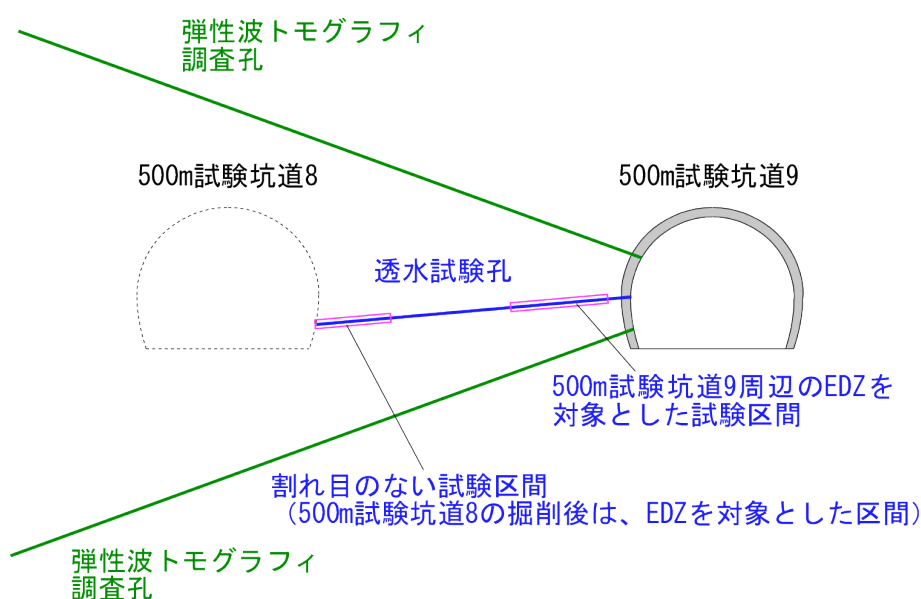


図 28 500m 試験坑道 9 から掘削したボーリング孔と透水試験のレイアウト



図 29 透水試験孔で得られたボーリングコアの写真（孔口から 5 m まで）
図中の矢印は、BTV 調査により確認された割れ目の確認位置を示しています。なお、青色矢印は引張割れ目、赤色矢印はせん断割れ目を示しています。

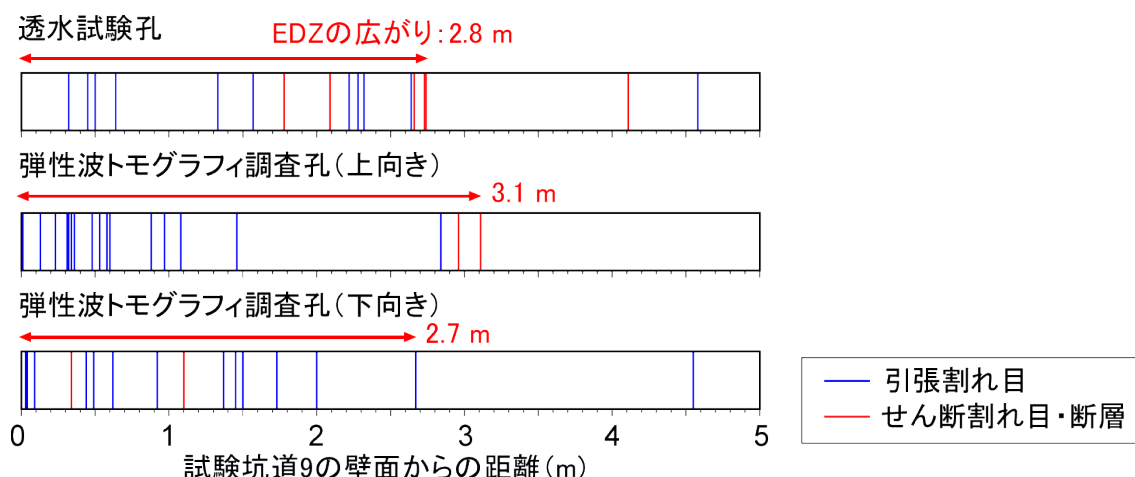


図 30 ボーリング孔で確認された割れ目の分布図と推定した EDZ の広がり
割れ目が密に発達している区間を EDZ の広がりとして定義しています。

上記の EDZ の広がりを踏まえ、500m 試験坑道 9 周辺の EDZ を対象とした透水試験を、図 28 に示すレイアウトを設定した上で実施しました。図 31 に示す通り、EDZ では、割れ目のない領域と比較して4桁ほど高い透水性（透水量係数）が得られました。以上のように、500m 試験坑道 9 の周辺における EDZ の広がりと透水性のデータを取得することができました。今後は、500m 試験坑道 8 を掘削した後の EDZ 割れ目の広がりや、透水性の増大に関する情報を取得し、予測解析の妥当性を検証していきます。

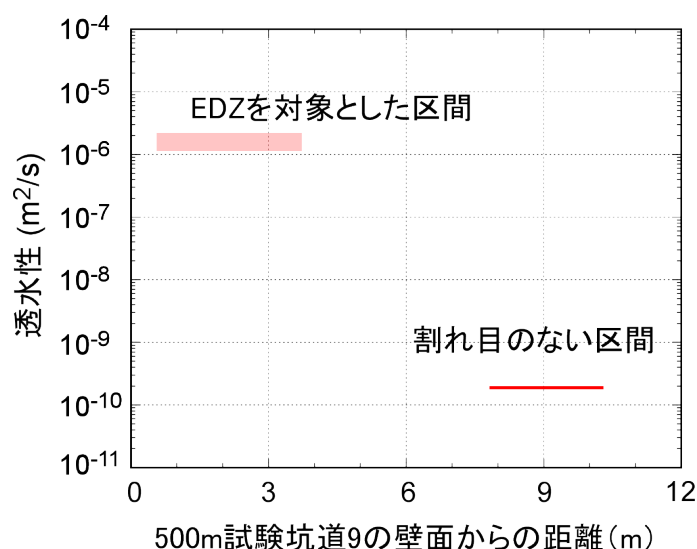


図 31 透水試験結果

透水性を算出する解析において、条件によって算出される値が異なってくることから、ここでは幅を持たせた値として EDZ の透水性を示しています。

処分場の閉鎖段階では、「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路になることの抑制」を確保するため、適切な材料で坑道を埋め戻すとともに、閉鎖を確実とするために止水プラグを設置することが検討されています（図 32）⁹⁾。そこで、坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の施工技術の実証では、350m 試験坑道 6（図 5 参照）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設置の施工試験（原位置施工試験）を実施し、埋め戻し材と止水プラグの設計から施工に至るまでの一連の技術が成立することを確認します。

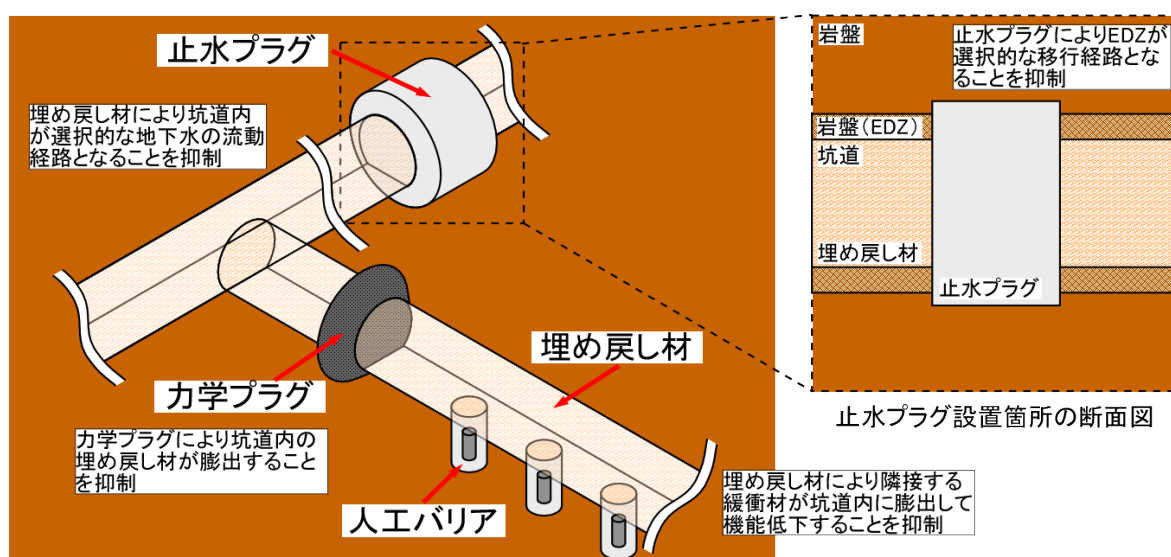


図 32 処分場の閉鎖段階のイメージ図

令和 7 年度は、原位置施工試験に先立ち、設計に必要な情報を取得するために、350m 試験坑道 6 の底盤、側壁および天端からボーリング孔を掘削した調査を継続しました（図 33）。その調査では坑道周辺の EDZ の広がりと同地岩盤の透水性の変化を把握するため、コア試料の観察、ボーリング孔内にカメラを挿入した割れ目分布観察、および透水試験を実施しました。図 34 は、天端に掘削した AE-B 孔の割れ目分布と透水係数、間隙水圧の関係を示したもので、坑壁（掘削面）から約 0.7 m の範囲まで引張割れ目が認められました。また、3.0 m 付近から深い領域にはせん断割れ目が多く分布しています。透水係数は、引張割れ目が多く分布する掘削面付近の区間②で 10^{-7} m/s オーダーの値を示し、せん断割れ目が多く分布する区間①で 10^{-9} m/s オーダーの値を示しました。このような透水試験を実施した 9 つのボーリング孔における試

験結果を、坑道壁面からの距離と透水係数・間隙水圧の関係として図 35 に整理しました。図 35 では、坑道からの距離が近く引張割れ目が多く存在する区間を青色（EDZ）で、せん断割れ目が主体となる区間を赤色（天然割れ目）で、割れ目を含まない区間を黒色（健岩部）でプロットしました。その結果、EDZ では健岩部に比べて透水係数が最大で 4 桁程度高くなる傾向を確認しました。また、間隙水圧は坑道近傍で 0 MPa に近く、坑道壁面からの距離とともに増加することを確認しました。

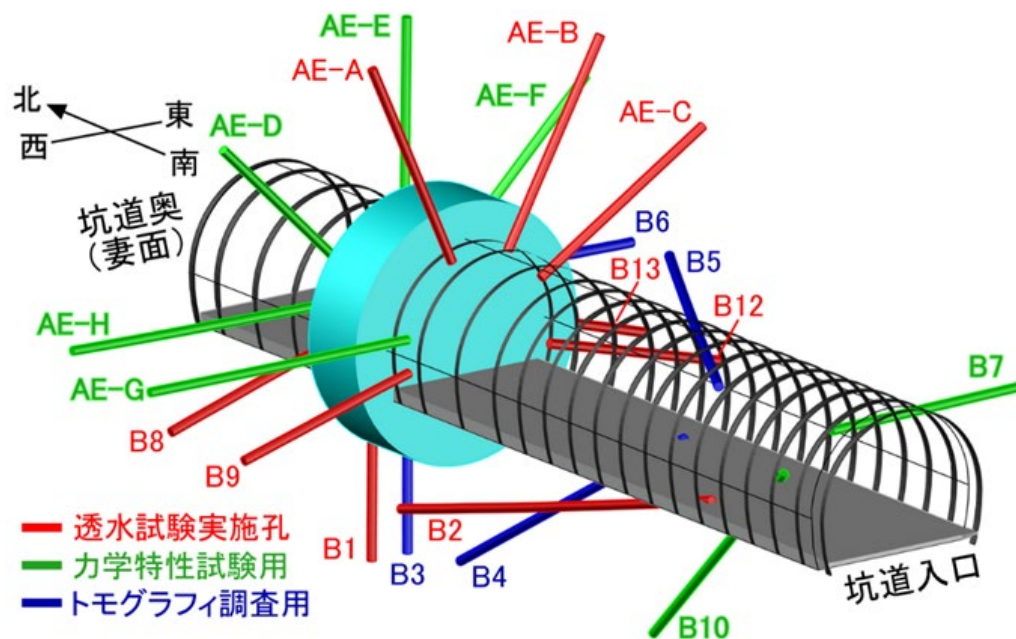


図 33 350m 試験坑道 6 におけるボーリング孔のレイアウト

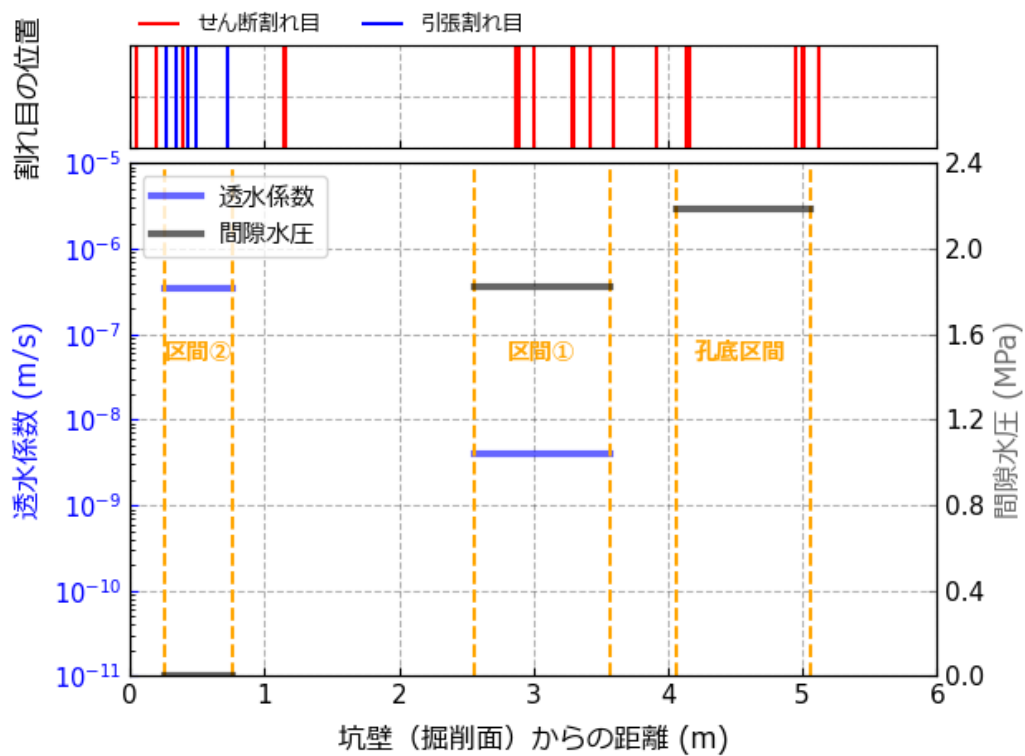


図 34 AE-B 孔の割れ目分布、透水係数および間隙水圧

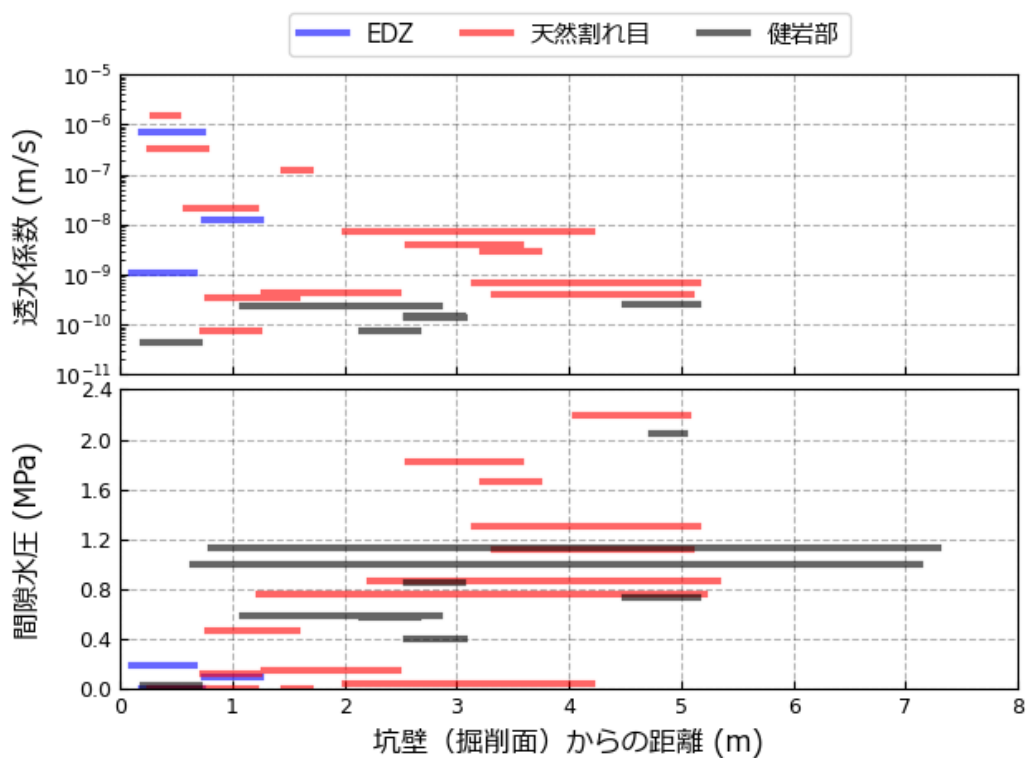


図 35 掘削面からの距離と透水係数・間隙水圧の関係

図 33 に赤色で示した、透水試験実施孔における試験結果です。

坑道の埋め戻しと止水プラグの吹付け工法による原位置施工試験の事前検討として、坑道と切欠き部の一部（天端）の形状を実寸で模擬した型枠（図 36）を用いた地上吹付け試験を実施しました（図 37）。この試験では、これまでの試験結果^(74, 75)を踏まえて設定した配合（表 4）の埋め戻し材料と止水プラグの材料を用いて、施工手順や施工品質（乾燥密度※など）を確認しました。坑道の部分を模擬した坑道断面部には埋め戻し材料と止水プラグの材料を、切欠き部を模擬した天端部には止水プラグの材料を吹付け工法により施工しました。試験中の各段階では、型枠に吹付けられた材料の乾燥密度やリバウンド材（付着せずに跳ね返って落ちた材料）の割合などを調査しました。図 38 にそれらの調査結果を示します。埋め戻し材（坑道断面 A・B）、止水プラグ（坑道断面 C・D）、および止水プラグ（天端部）の計 5 つの領域において乾燥密度を測定した結果（図 38(a)）、施工後の平均乾燥密度は、埋め戻し材・止水プラグともに目標値（表 4）を上回ることが確認できました。図 38(b) に吹付け材料の含水比とリバウンド率（リバウンド材の量÷吹付けた材料の総量）の関係を示します。埋め戻し材および止水プラグともに、含水比が低下するとリバウンド率が増加する傾向が確認されました。一方で、図中赤枠部分は含水比が低いにも関わらず、計算上のリバウンド率が低く算出されています。これは、坑道断面部の下部において、吹付け面付近に堆積したリバウンド材を巻き込みながら吹付けられたためリバウンド率が低く見積もられており、実際のリバウンド率は高いと考えられます。また、上向きに吹付けを行う止水プラグの切欠き部の天端ではリバウンド材の量が多くなる傾向が見られました。これらの調査・試験の結果を踏まえて 350m 試験坑道 6 における原位置施工試験計画の具体化を進めました。

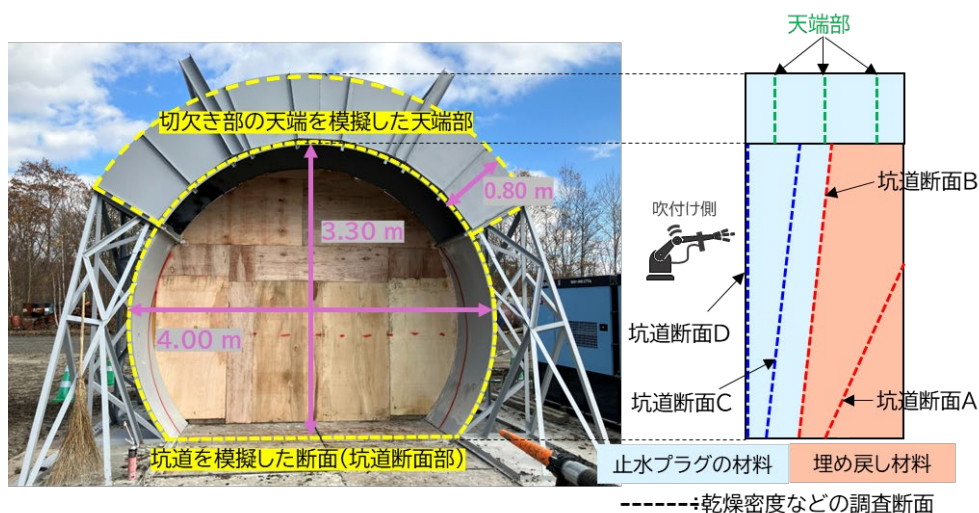


図 36 試験坑道と切欠き部を模擬した吹付け型枠および調査断面



図 37 地上吹付け試験の実施状況

表 4 地上吹付け試験における材料の条件

材料名	配合 (%)	施工含水比 (wt%)	目標乾燥密度 (Mg/m^3)
埋め戻し材	ベントナイト※ : 40 幌延の泥岩 : 60	32.5	1.30
止水プラグ	ベントナイト : 70 ケイ砂 : 30	18.6	1.43

- ② ピットの支保技術として、ピット周辺の掘削損傷領域の範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法の整備
- ③ 緩衝材の流出現象を評価/抑制する技術として、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と流出抑制対策への反映方法の整備
- ④ 緩衝材の岩盤への侵入現象を評価/抑制するための技術として、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

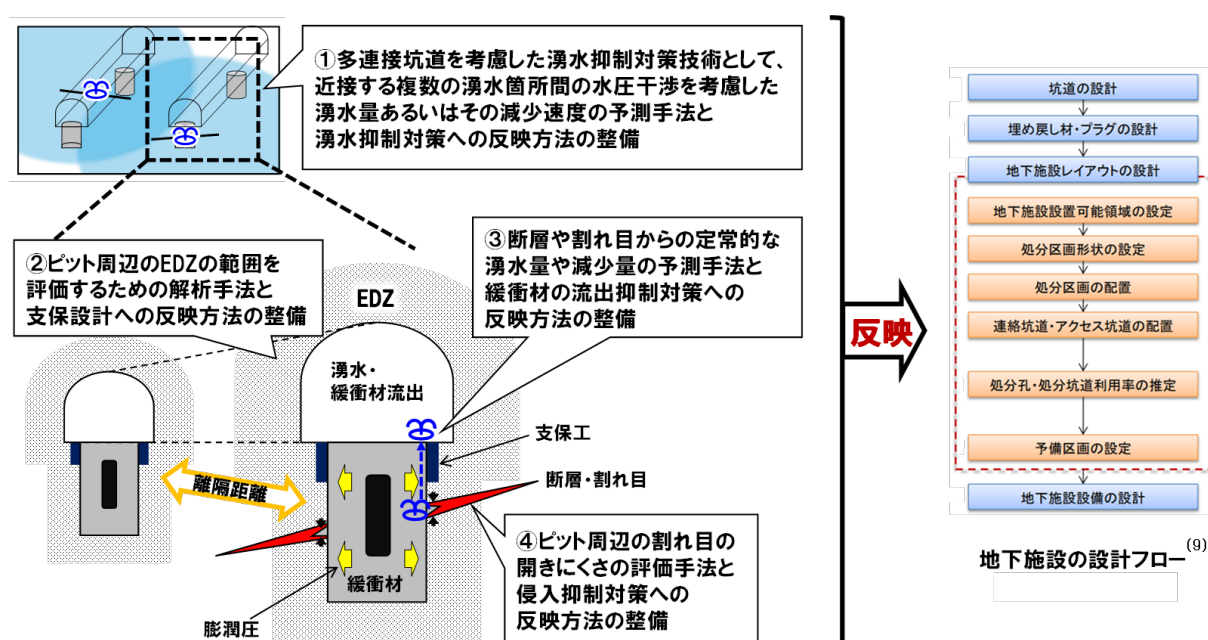


図 39 地下施設の設計において重要となる地質現象と課題(3)で取り組む各種対策技術の関係

令和 7 年度は、①の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あるいはその減少速度の予測手法と湧水抑制対策への反映方法の整備に関して、複数の湧水箇所からの湧水量の減少速度を予測する手法の整備を行いました⁽⁷⁶⁾。具体的には、350m 調査坑道を地層の分布に基づいて南西側領域および北東側領域に区分し、各領域における掘削時の主要な湧水箇所（南西側領域で 3 箇所、北東側領域で 5 箇所：図 40）の総湧水量の減少率を掘削当時および掘削から 10 年後の湧水量から計算しました。この実測の減少率を断層や割れ目内の水みちのつながり方の次元を考慮した湧水量解析から求まる予測の減少率と比較しました。解析では、各領域内で湧水箇所同士が水圧干渉する場合としない場合の 2 つの条件で行いました。その結果、水圧干渉が生

しない場合、南西側領域では実測の減少率が予測の減少率の範囲内ですが（図 41(a)）、北東側領域では実測の減少率が予測の減少率の最大値よりも最大で4倍程度高い可能性が分かりました（図 41(b)）。一方で、水圧干渉の可能性を考慮すると北東側領域でも実測の減少率が予測の減少率の範囲内に収まることが分かりました（図 41(b)）。したがって、350m 調査坑道では坑道内に複数の湧水箇所が存在するため、近接する湧水箇所間で水圧干渉が発生し、湧水箇所が単独の場合と比べて湧水量がより速く減少したと考えられます。

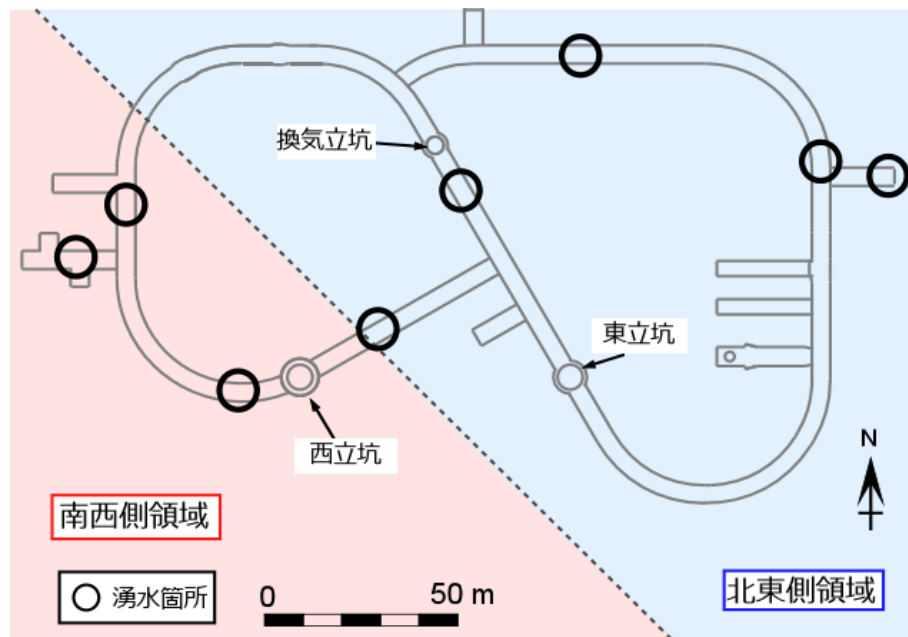


図 40 350m 調査坑道における掘削当時の主要な湧水箇所⁽⁷⁶⁾

赤色で示す南西側領域は稚内層の遷移帯上部、青色で示す北東側領域は稚内層の遷移帯下部に対応します。

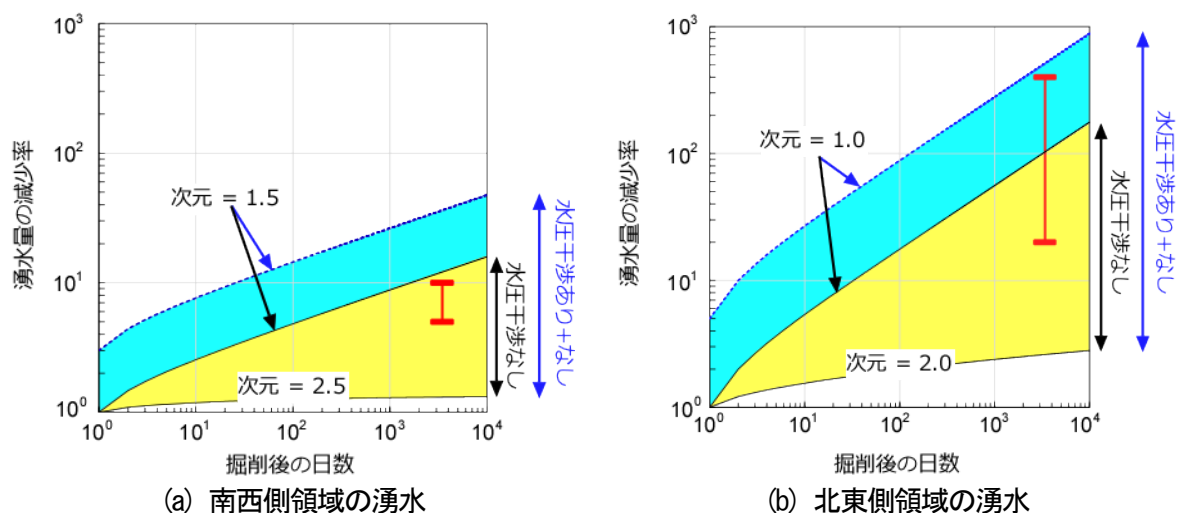


図 41 350m 調査坑道内における湧水量の予測減少率と実測減少率の計算結果の一例⁽⁷⁶⁾

湧水量の減少率は、掘削当時の湧水量を 1 とし、掘削後の任意の時間の湧水量をその逆数として計算しました。赤の太線は実測減少率（推定誤差を考慮するために値を範囲で示しています）を、黒の曲線内の黄色の領域は湧水箇所同士の水圧干渉が生じない場合の予測減少率の範囲をそれぞれ示します（推定誤差を考慮するために値を範囲で示しています）。水圧干渉の可能性を考慮すると、予測減少率の範囲は黄色で示す領域に加え、最大で水色で示す領域まで拡大します。予測減少率を算出するための解析では、既存のボーリング調査結果に基づき、水みちのつながり方の次元を図 40 の南西側領域で 1.5~2.5、北東側領域で 1.0~2.0 と設定して計算しました。

以上のように、断層や割れ目内の水みちのつながり方の次元を考慮した湧水量解析により、近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉が湧水量の長期的な減少率（減少速度）に与える影響を実際に予測できることを 350m 調査坑道のデータを用いて実証しました⁽⁷⁶⁾。この結果、複数の湧水箇所間の水圧干渉が想定される場合は湧水量の減少速度の加速が見込めるため、湧水抑制対策の必要性を検討する上で重要な判断材料を提供できるようになりました⁽⁷⁶⁾。具体的には、湧水断層が密集する場合の湧水量予測に必要な解析手法を整備し、図 42 に示すような湧水抑制対策の判断手順をフローチャートとして提示することができました。このように、①の多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術に関する知見を整理できたことから、所期の目標を達成できました。今後、湧水量に関する検討は③の「緩衝材の流出現象を評価/抑制する技術」として、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と流出抑制対策への反映方法の整備」の中で実施します。

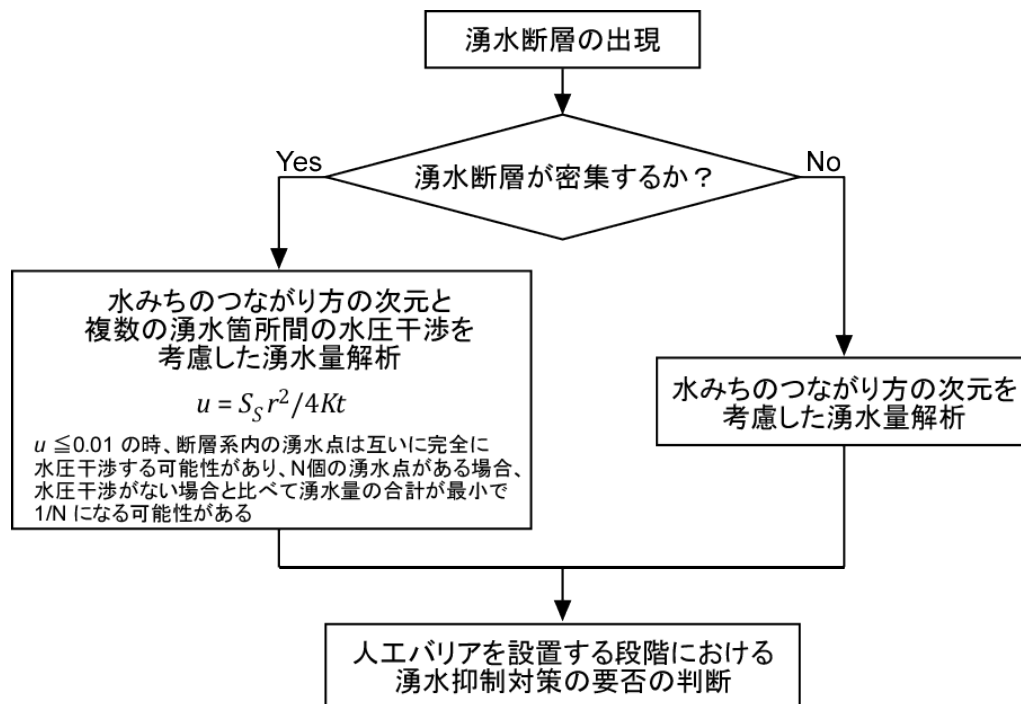


図 42 近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量解析と湧水抑制対策の判断手順

図中の式で、 K/S_g は水頭拡散率 (m^2/s ; 水圧の伝搬速度を表す指標)、 r は湧水点間の距離 (m)、 t は時間 (s) を表します⁽⁷⁾。

②のピット周辺の EDZ の範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法に関しては、500m 調査坑道における試験ピットの掘削に先立ち、EDZ の広がり予測する解析を実施しました。試験ピットは、350m 試験坑道 4 (図 5 参照) の人工バリア性能確認試験において実績のある方法で掘削する予定です。具体的には、ケーシングと呼ばれる筒状の鉄製の枠組みを回転させながら所定の深度まで設置した後に、ケーシング内部の岩盤を掘削機で除去し、最後にケーシングを引き抜く作業を実施します⁽⁷⁸⁾。

予測解析でもその施工順序を再現しました。図 43 および図 44 に、EDZ の広がり予測結果を示します。結果として、ケーシングを引き抜く前は、ケーシングが岩盤を補強する役割を有しているので、EDZ はほとんど広がりませんが、ケーシングを引き抜いた後は、人工バリア性能確認試験で掘削した試験孔の EDZ の広がり評価結果⁽⁷⁹⁾と同様に、坑道底盤部付近で EDZ の広がりが大きく、試験ピットの深度が深くなるにつれて小さくなること分かりました (図 44)。

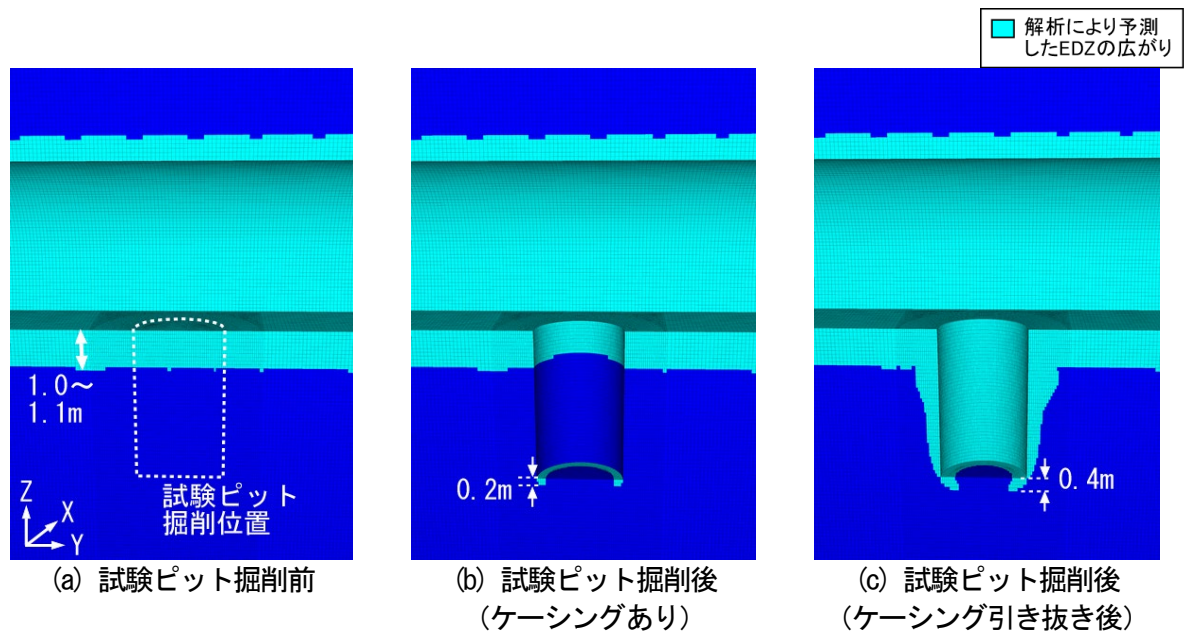


図 43 試験ピット周辺の EDZ の広がり の予測結果

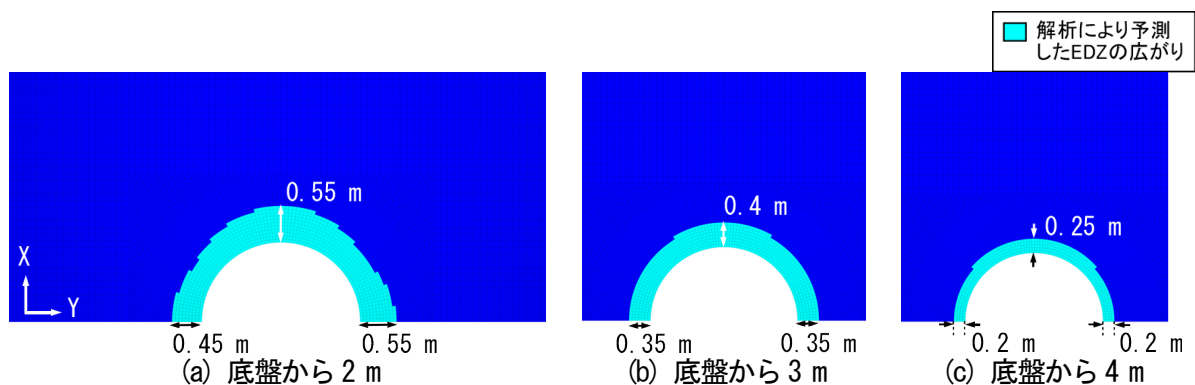
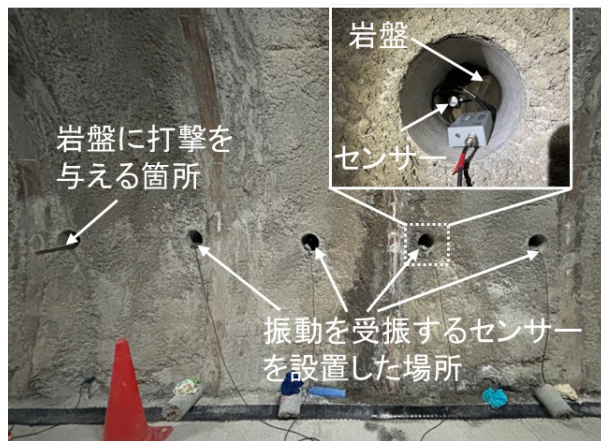


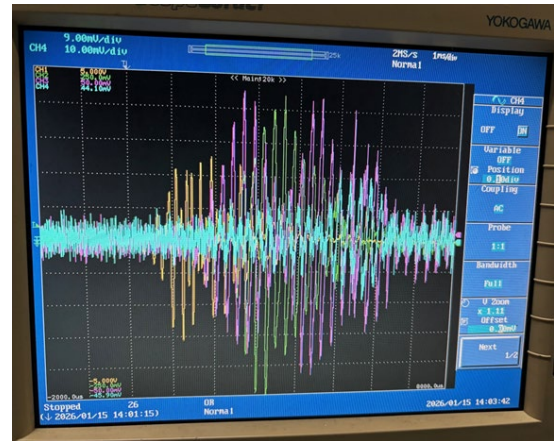
図 44 ケーシング引き抜き後の EDZ の広がり の予測結果の平面図

EDZ の広がり の予測結果を、試験ピットを上から見た平面図として示しています。

また、図 43 および図 44 に示すような試験ピット掘削中およびケーシング引き抜き後の EDZ の広がり を調査するための計測計画を検討した結果、岩盤損傷時の振動 (AE^{*}) の計測が最も有効であることが分かりました。そこで、実際に 500m 調査坑道で AE を計測するための準備として、図 45 に示すように、岩盤に与えた振動がどの程度の距離まで伝わるかを調べるための試験を、500m 試験坑道 8 で実施しました。この試験では、岩盤に振動を受振するセンサーを設置した上で、岩盤に直接打撃を与えて、その打撃の振動がどの程度まで伝わるかを、振動の波形を見ながら確認しました。試験の結果、岩盤に与えた振動は、約 5 m の範囲に伝わることを確認できました。これらの予測解析と原位置試験結果を踏まえて、AE 計測のレイアウトを検討しました。



(a) 試験実施場所の様子



(b) 取得した波形

図 45 岩盤に与えた振動がどの程度の距離まで伝わるかを調べるための試験の様子

③の断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と流出抑制対策への反映方法の整備に関しては、断層の代表的な透水性と DFN モデルを組み合わせることによって有効透水係数を推定する手法を開発しました⁽¹⁰⁾。この手法は、課題(1)において坑道スケールの岩盤の閉じ込め性能の評価手法の体系化を目指して提示した手法ですが、課題(3)の③においても、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量をより適切に予測できるという点で活用できます。さらに、500m 調査坑道において断層や湧水の調査を行うとともに、地下施設全体の湧水量（以下、坑内湧水量）を継続して観測しました。500m 調査坑道の底盤において幅約 1 m の範囲（図 46(a)の黄色の範囲）を調査した結果、図 46(a)の青色の線で示される複数の断層が確認されました。また、事前に断層や割れ目内へのグラウト注入を行わなかったにも関わらず、500m 調査坑道の掘削中に坑内湧水量の定常的な増加が認められませんでした（図 46(b)）。つまり、深度 500 m は、地下水の通り道として機能する断層が複数存在する環境であるにも関わらず、坑内湧水量（約 50 m³/日）を変化させるほどの湧水が発生しなかったと言えます。この結果は、500m 調査坑道における定常的な坑内湧水量に関する事前の予測結果⁽¹¹⁾や上記の DFN モデルによる推定結果と調和的でした。さらに、今後の、500m 調査坑道における各坑道の湧水量を詳細に観測するために排水システムを整備しました（図 47）。

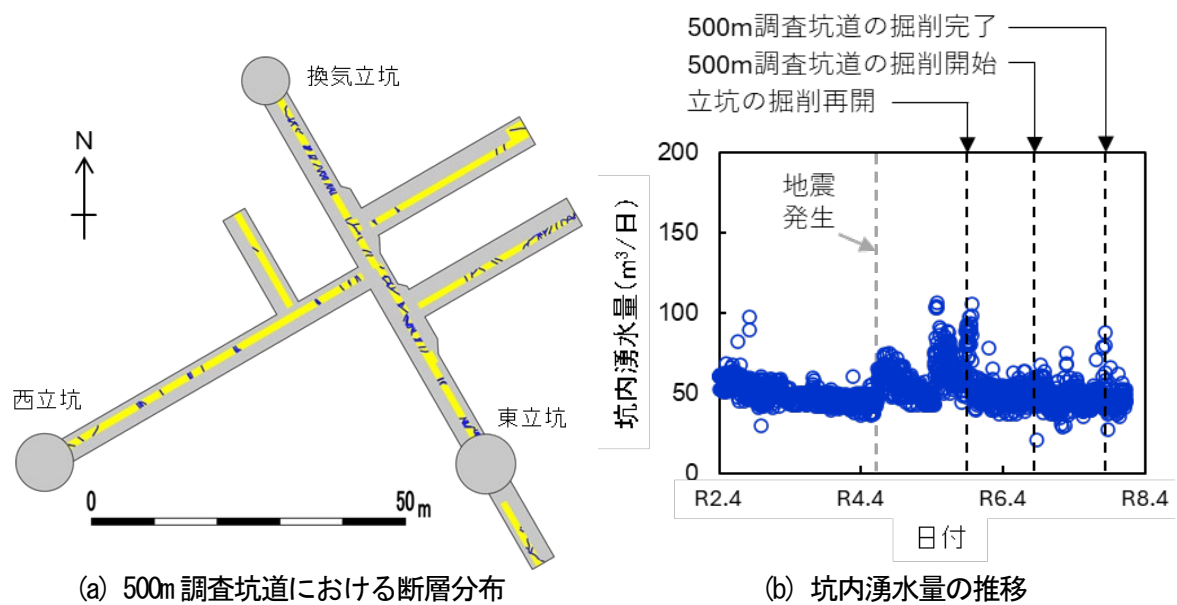


図 46 500m 調査坑道の断層分布図と坑内湧水量の推移

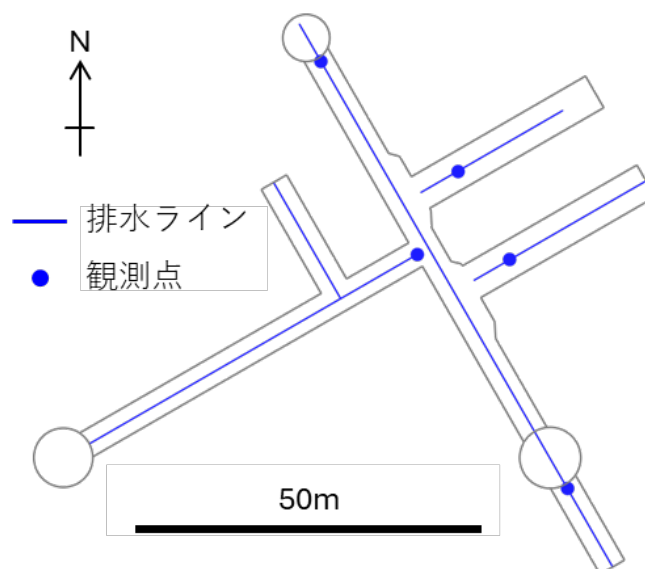


図 47 500m 調査坑道において整備した排水システムの流路図

坑道内に湧き出した地下水は排水ラインを通して各観測点に集まります。観測点に流れ込む地下水の流量を定期的に計測することで、湧水量の変化を把握します。

④のピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と緩衝材の侵入抑制対策への反映方法の整備に関しては、350m 東立坑側第1ボーリング横坑（図 5 参照）において、水圧擾乱試験を実施しました。これまでは、断層（破砕物を伴う割れ目）や掘削損傷割れ目（引張割れ目）を対象とした試験を実施し、割れ目の開きにくさの評価をしてきましたが、今回はせん断割れ目（破砕物を伴わない割れ目）を対象とした試験を実施しました。坑道周辺で実施して

きた地質観察の結果、割れ目は断層、せん断割れ目、掘削損傷割れ目の三種類に大別できることが確認されています。これらの割れ目の開きにくさを調べるにより、ピットを掘削した時に遭遇する割れ目の種類に応じて、緩衝材の流出や割れ目への侵入が生じる可能性を把握するとともに、その要因に応じた対策の立案に役立つ成果が得られます。

水圧擾乱試験では、割れ目を確認した深度をパッカーで区切り、そこに注水して圧力（区間圧力）を上げていきながら、注水した流量の変化を見ることで、割れ目がどの程度開いたかを確認しました。図 48(a)に、水圧擾乱試験の実施区間を示します。試験は4区間で実施し、区間2～区間4はせん断割れ目を、区間5は断層を対象として実施しました。図 48(b)に、区間4で確認されたせん断割れ目の孔壁展開画像とボーリングコアで確認されたせん断割れ目の写真を示します。

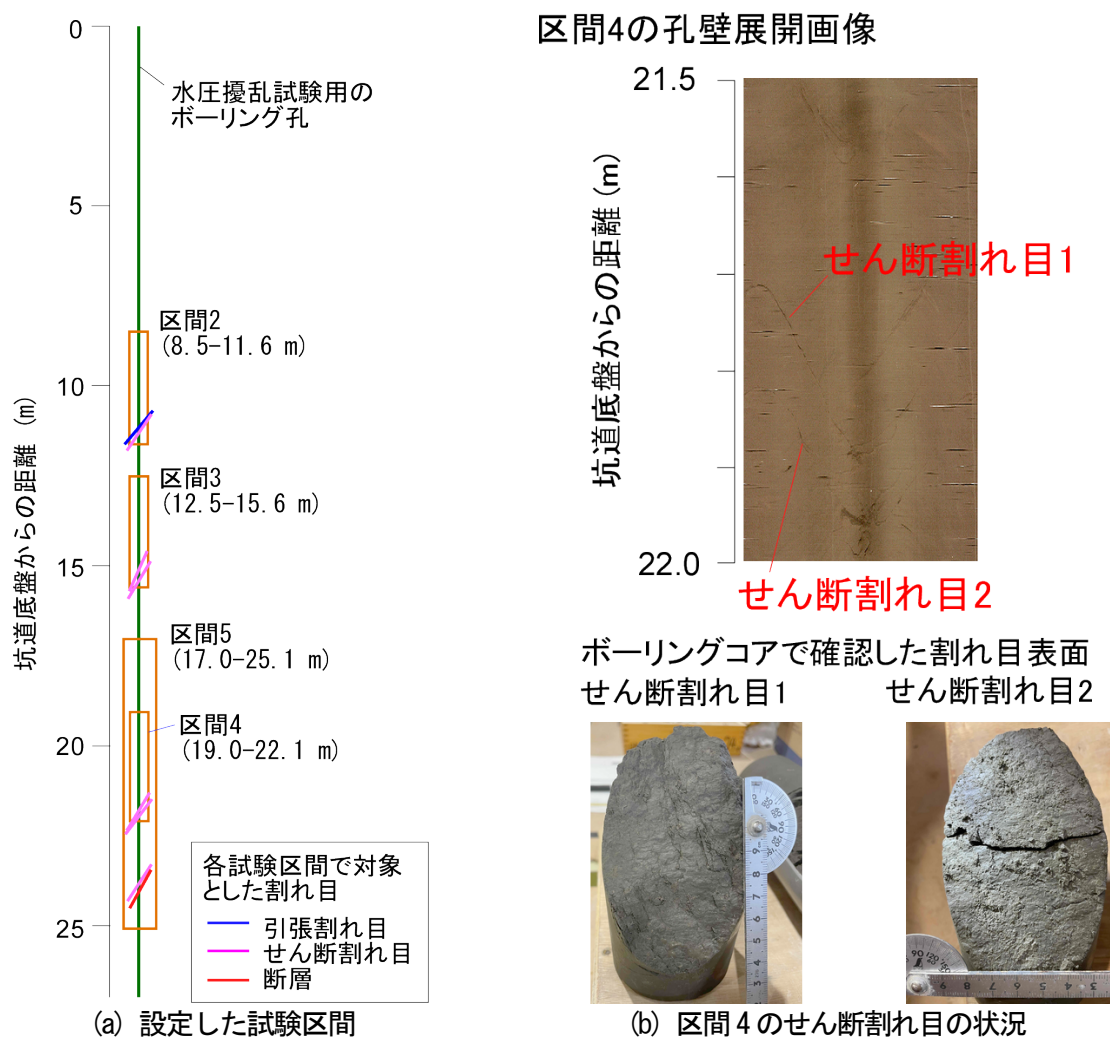


図 48 水圧擾乱試験で設定した試験区間と区間4のせん断割れ目の状況

次に、例として区間4の試験結果を図49に示します。区間圧力を2.6 MPaから0.2 MPaずつ、注水流量を調整しながら増大させました。その結果、区間圧力を4.6 MPaに増大させた時に注水流量が急激に増大し始めました。この試験結果と既存のモデル^(80, 81)に基づき、割れ目の開口幅の変化と割れ目に垂直に作用する力の関係を図50に整理しました。割れ目に垂直に作用する力が大きい状態では割れ目の開口幅は0.02 mm程度と非常に小さいですが、割れ目に垂直に作用する力が1.6 MPa以下となった時点から割れ目の開口幅が顕著に増大することを確認しました。このことから、破砕物を伴わないせん断割れ目についても、水圧擾乱試験や既存のモデルを適用することにより割れ目の開きにくさを定量的に調査できることを確認しました。さらに、この結果は、既存のモデルの適用性が広がる可能性を示唆しています。

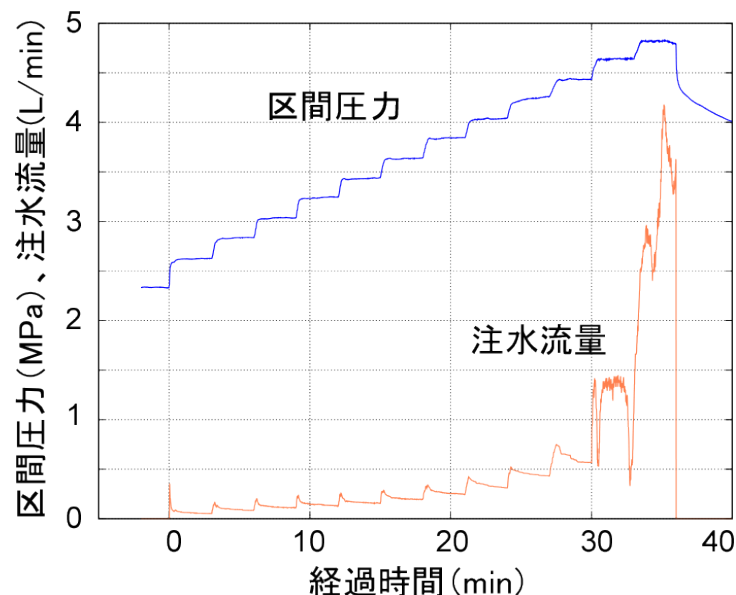


図49 せん断割れ目を対象とした水圧擾乱試験の結果

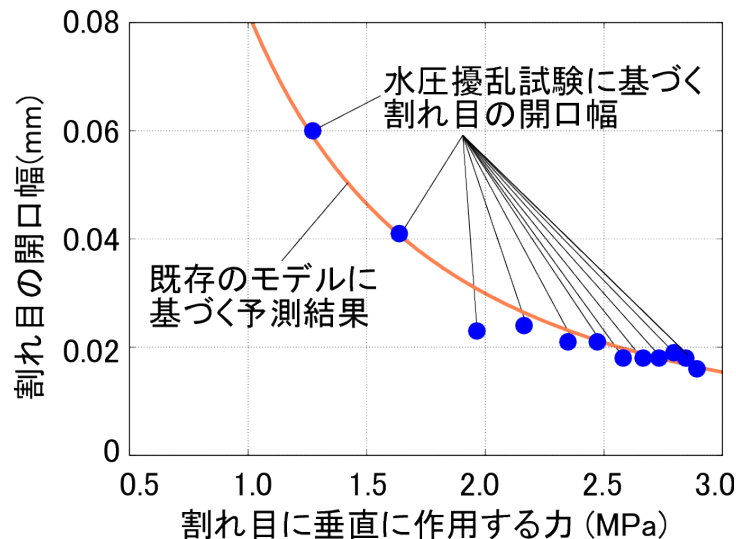


図 50 せん断割れ目を対象とした割れ目の開口幅と割れ目に垂直に作用する有効応力の関係

(4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

廃棄体の設置の判断や間隔の設定に当たっては、緩衝材やオーバーパックの機能、坑道やピットの安定性および廃棄体周辺の岩盤の閉じ込め性能を担保するために必要な情報を整理することが重要となります。例えば、坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）、EDZ の広がりなどの情報を取得することが重要となります。本課題では、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の調査・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します。さらに、これらの整理結果を踏まえ、地下施設設置深度の設定に反映可能な地質環境の調査・評価手法を整備します。

(図 51)。

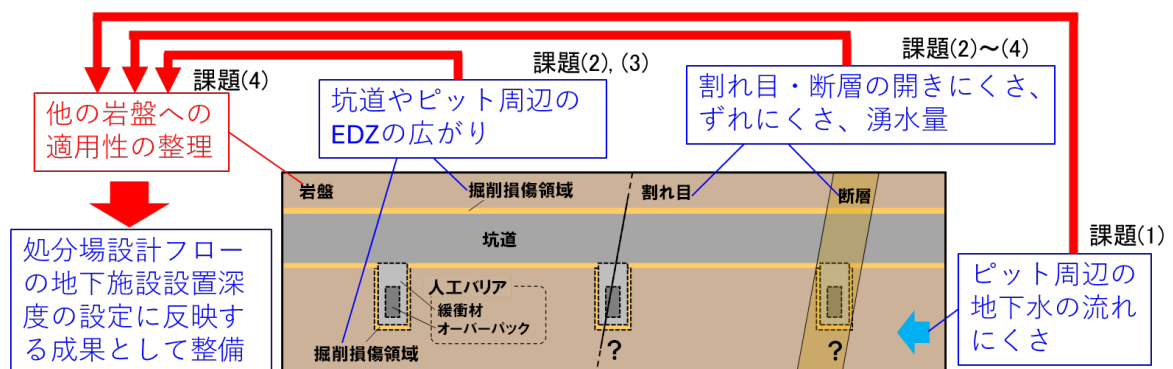


図 51 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報や各課題で検討する項目と成果の反映先の関係

令和 7 年度は、坑道やピット周辺に存在する割れ目のずれにくさに関する評価手法の整備に向けて、過年度に構築した透水試験用パッカーの圧力変化を活用した割れ目のせん断変位量の推定手法の信頼性を向上させるために、関連する室内試験の方法を見直しました。室内試験では、透水試験で得られるパッカーの圧力変化から、2 つのパッカーで区切られた孔内試験区間の長さの変化を算出するための関係式を構築します。過年度の室内試験の条件はひとつのパッカーのみを用いた方法でしたが、今回、原位置試験の条件により近い 2 つのパッカーを連結させた室内試験の方法を新たに構築しました(図 52)⁽⁸²⁾。新たな方法では、過年度の方法では直接求めることが出来なかったパッカーの圧力変化から試験区間の長さの変化を算出するためのパラメータを直接求めることができます。室内試験では、ボーリング孔へのパッカー設置を模擬するため、稚内層の岩石の硬さに対応した材料として、アルミ製（硬い場合）およびアクリル製（軟らかい場合）のパイプを使用しました。パッカー圧の初期値は、深度 350 m～深度 500 m において原位置試験を行う際に想定される水圧を考慮して、3.0 MPa、5.0 MPa、6.9 MPa の 3 通りと設定しました。今回の方法の試験結果の一例を図 53 に示します。パッカー圧の低下とともにパッカー間の距離が増大する傾向を確認しました。また、過年度の方法と今回の方法で得られる試験結果を比較したところ、両者には違いがあり、過年度の方法はせん断変位量を 1.2 倍～1.5 倍もしくは 0.6 倍～0.9 倍に過大もしくは過小評価する可能性があることが分かりました（図 54）。さらに、パッカー圧の初期値の違いについては、パッカー圧が小さいほど両者の結果の違いが大きくなることが分かりました（図 54）。今回得られた知見は、今後実施する原位置試験における割れ目のずれにくさの評価に反映していきます。

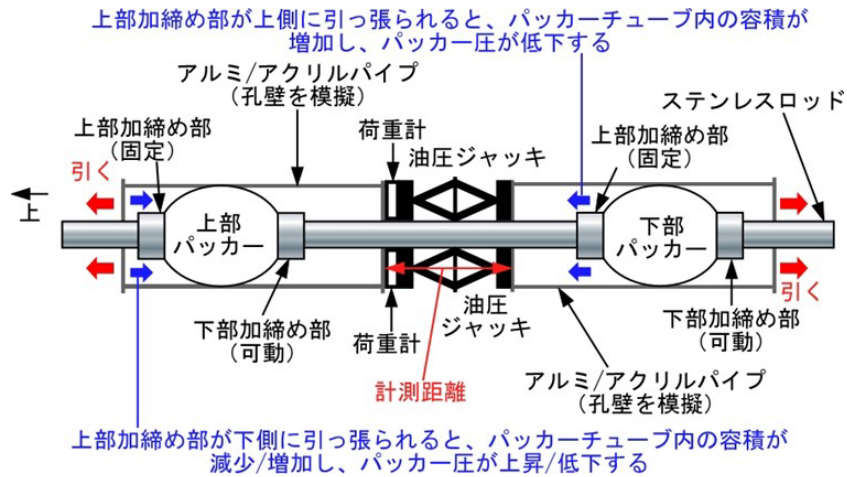


図 52 新たに構築した室内試験方法の概要⁽⁸²⁾

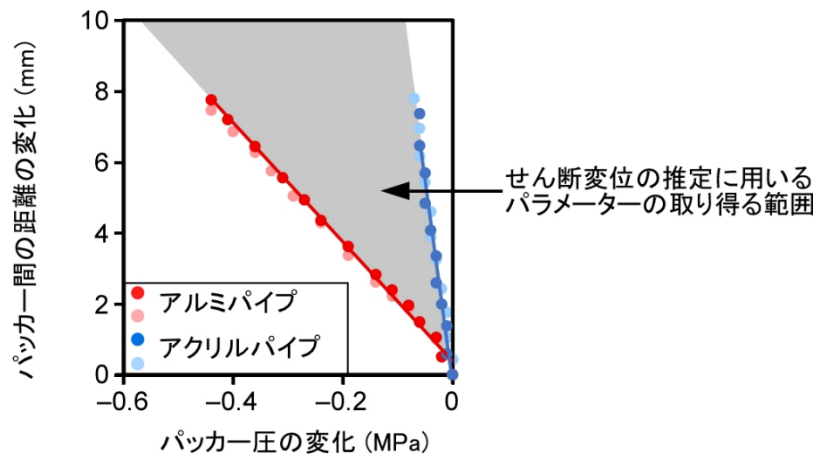


図 53 新たに構築した室内試験方法の結果の一例⁽⁸²⁾

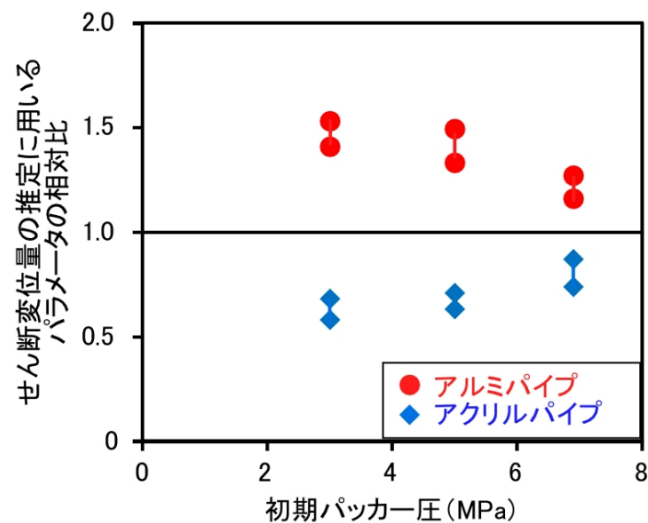


図 54 室内試験の結果⁽⁸²⁾

縦軸のせん断変位の推定に用いるパラメータの相対比は、今回の室内試験結果に対する過年度の室内試験結果として計算しました。このパラメータの相対比が、そのまません断変位の推定値の相対量になります。

坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさについては、課題(3)の④に記載した通り、割れ目に垂直に作用する有効応力と割れ目の開口幅の関係に関わる原位置試験データの拡充を進めました。

坑道やピット周辺の地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）については、この評価に必要となる、地層の代表的な透水性の計算方法を新たに構築しました⁽¹⁰⁾。この方法では、はじめにボーリング調査や坑道掘削時の地質観察などで得られる割れ目分布のデータから割れ目の地質学的なつながり方をモデル化し、DFN モデルを作成します。次に、それぞれの割れ目に代表的な透水性を与え、複数の割れ目を含む領域の地下水の流れをシミュレーションすることで地層の代表的な透水性を計算します。この時、本方法では、割れ目内の水みちのつながり方の次元を考慮して割れ目の代表的な透水性を決定します（課題(1)を参照）。これにより、水みちのつながり方の次元が低く、割れ目内の水みち同士の連結が少ない岩盤（例えば表 3 の分類 I-a に属する岩盤の一部）でも地層の代表的な透水性を簡易な方法で求めることができるようになりました。この地層の代表的な透水性は、ピット周辺に存在する割れ目からの湧水量の予測に必要です。課題(3)の③に記載したように、本方法により求められる地層の代表的な透水性は 500m 調査坑道掘削時の坑内湧水量と整合することが確認できています。

坑道やピット周辺の EDZ の広がりの評価手法の整備に向けて、土木分野におけるトンネル設計において壁面の安定性を検討する際に用いられる地山強度比と呼ばれる指標に着目した検討を行いました。地山強度比は、岩盤の安定性を評価するための基本的な指標のひとつです。一般的に地山強度比が 2 よりも小さい場合は坑道の変形が大きくなり、周辺岩盤の安定性に影響を及ぼすと言われています。そこで、幌延深地層研究センターの地下施設や、これまでに様々な岩種を対象として掘削された地下研究施設において調査された EDZ の広がり、地山強度比との関係を整理・分析しました。その結果、図 55 に示すように、地山強度比と EDZ の広がりには相関性があり、地山強度比が 2 より小さくなると EDZ の広がりが顕著に大きくなることを確認しました。このことから、EDZ の広がり、坑道を掘削する深度の応力状態や岩盤の強度に依存することが分かります。さらに、幌延深地層研究センターの地下施設は地山強度比が 2 より小さい坑道（500m 調査坑道および 250m 調査坑道）

と 2 より大きい坑道（350m 調査坑道）の両者を有することから、本地下施設で得られた知見は他のサイトでも幅広く適用できると考えられます。

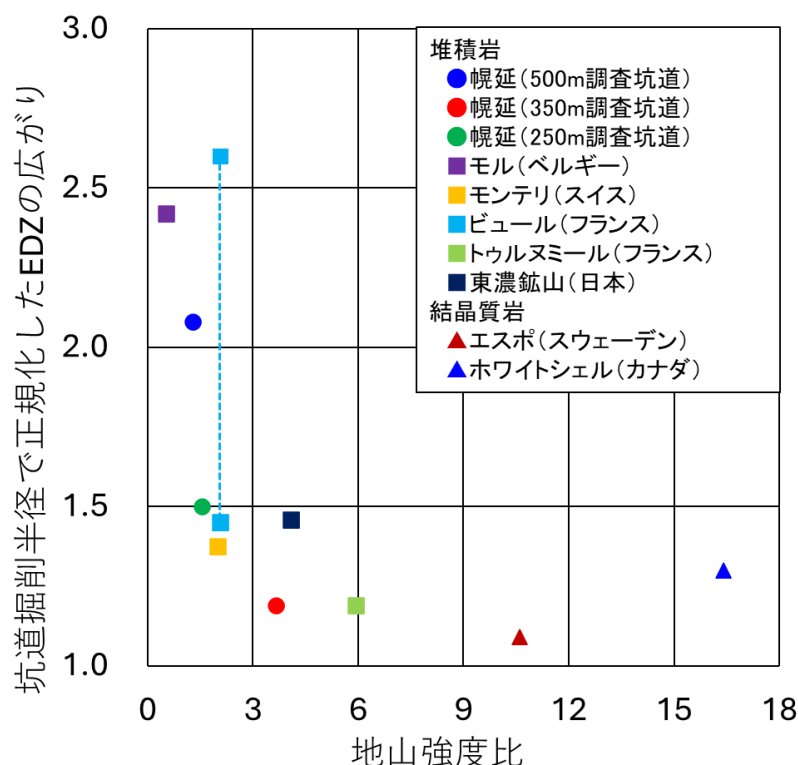


図 55 EDZ の広がり と 地山強度比 の関係

それぞれの施設で掘削された坑道の大きさが異なることから、グラフの縦軸は、坑道の中心から EDZ の外側までの距離の平均値を、坑道掘削半径で除した値（正規化した値）として示しています。ビュールでは、引張割れ目の発達に伴う EDZ と、せん断割れ目の発達に伴う EDZ がそれぞれ評価されていることから、これらを考慮して幅を持たせて記載しています。

これまでに幌延深地層研究センターで実施してきた EDZ の広がりを把握するための調査事例を基に、図 56 に示すような、坑道掘削前から掘削後に至る EDZ の広がりを調査・評価するためのフローチャートを作成しました。まず坑道掘削前には、地上からのボーリング調査や先行ボーリング調査を実施し、そこで得られた岩石試料を用いた室内試験により坑道を掘削する深度に対応する岩盤の物性を調べます。また、地下に作用する圧力の情報についても、地上からのボーリング調査で調査します。それらの情報を基に、数値解析により EDZ の広がりを事前に予測します。坑道掘削中および坑道掘削後は、壁面の地質観察や、ボーリング調査による割れ目の発達状況の確認、トモグラフィ調査による割れ目発達状況の空間分布の把握や、坑道の安定性の検討の

ための変位計測などを行った上で、EDZ の広がりを検証します。その後、得られた結果を踏まえて数値解析を実施して、坑道掘削に伴う EDZ の広がりを総合的に評価します。課題(2)ではこのフローチャートに則って 500m 試験坑道 8・9 の EDZ の広がりを評価しますが、必要に応じてこのフローチャートを更新していきます。なお、先述のとおり EDZ の広がりには地山強度比に依存することや、幌延深地層研究センターの地下施設の坑道は幅広い地山強度比を有することから、本課題で適用性が検証されたフローチャートは他のサイトでも幅広く適用可能であると考えられます。

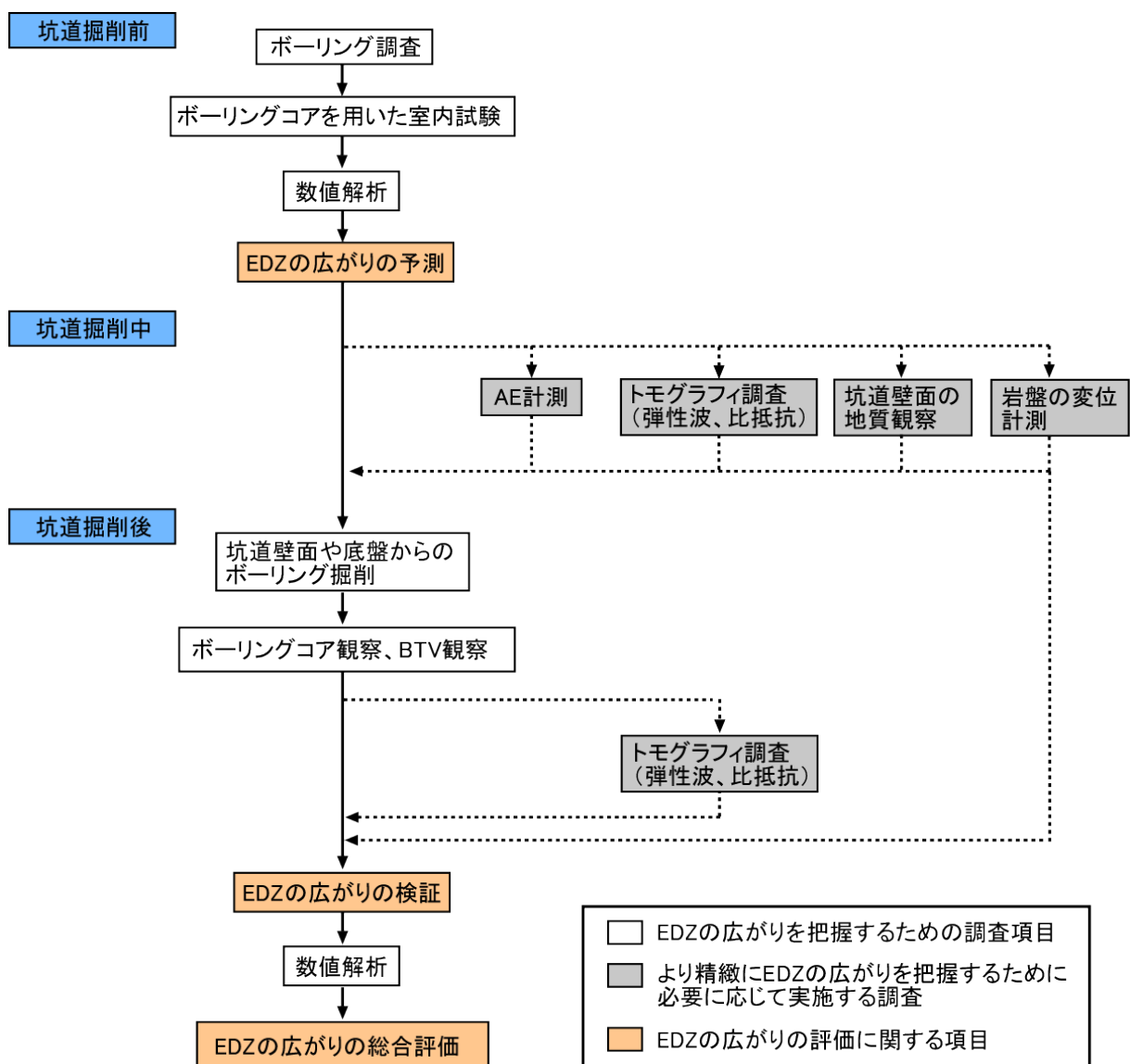


図 56 坑道周辺の EDZ の広がりを調査・評価するためのフローチャート (65、73、80、83、84、85)

6. 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

令和2年度以降、人工バリア性能確認試験や物質移行試験などの処分システムの設計・施工や安全評価に関わる基礎情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや岩石の鉱物組成や化学組成、地下水のpHや酸化還元電位、化学組成などのデータの取得などについては、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要であることから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システムの設計・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることとなります。なお、処分システムの設計・施工手法や安全評価手法の信頼性を確認するために必要となるデータが取得できているかを含めて評価することが必要であるため、計測手法の妥当性を確認し、必要に応じて調査技術・機器の改良を行います。

(1) 岩盤の水理

岩盤の水理に関しては、立坑や坑道掘削時の周辺の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削した既存のボーリング孔で水圧観測を行っています。令和7年度は、東立坑から南東に約100 m離れたHDB-6孔（図7参照）で水圧観測を継続しました。図57に、平成31年4月から令和8年3月までの観測結果を示します。令和5年9月29日から立坑の掘削が再開され、令和7年9月4日に深度500 mにおける坑道の掘削が全て完了しました。これまでの研究で、地下施設周辺の深度450 m以深の地層は透水性が低いため、この深度に立坑を掘削してもHDB-6孔の観測区間に水圧低下がほとんど生じず、坑内湧水量も大きく増加しないと予測されています⁽¹¹⁾。実際に立坑および500m調査坑道の掘削の影響を見ると、HDB-6孔の深度369 mの観測区間は地震（図57の①）の影響により判断が難しいですが、それよりも深い深度447 m以深の観測区間では立坑掘削に伴う水圧低下が認められません。また、実際に観測された坑内湧水量も大きな増加はなく、予測結果と整合的でした。今後は、立坑や坑道掘削後の周辺の地質環境の変化を把握するため、水圧観測や、坑内湧水量の観測を継続します。

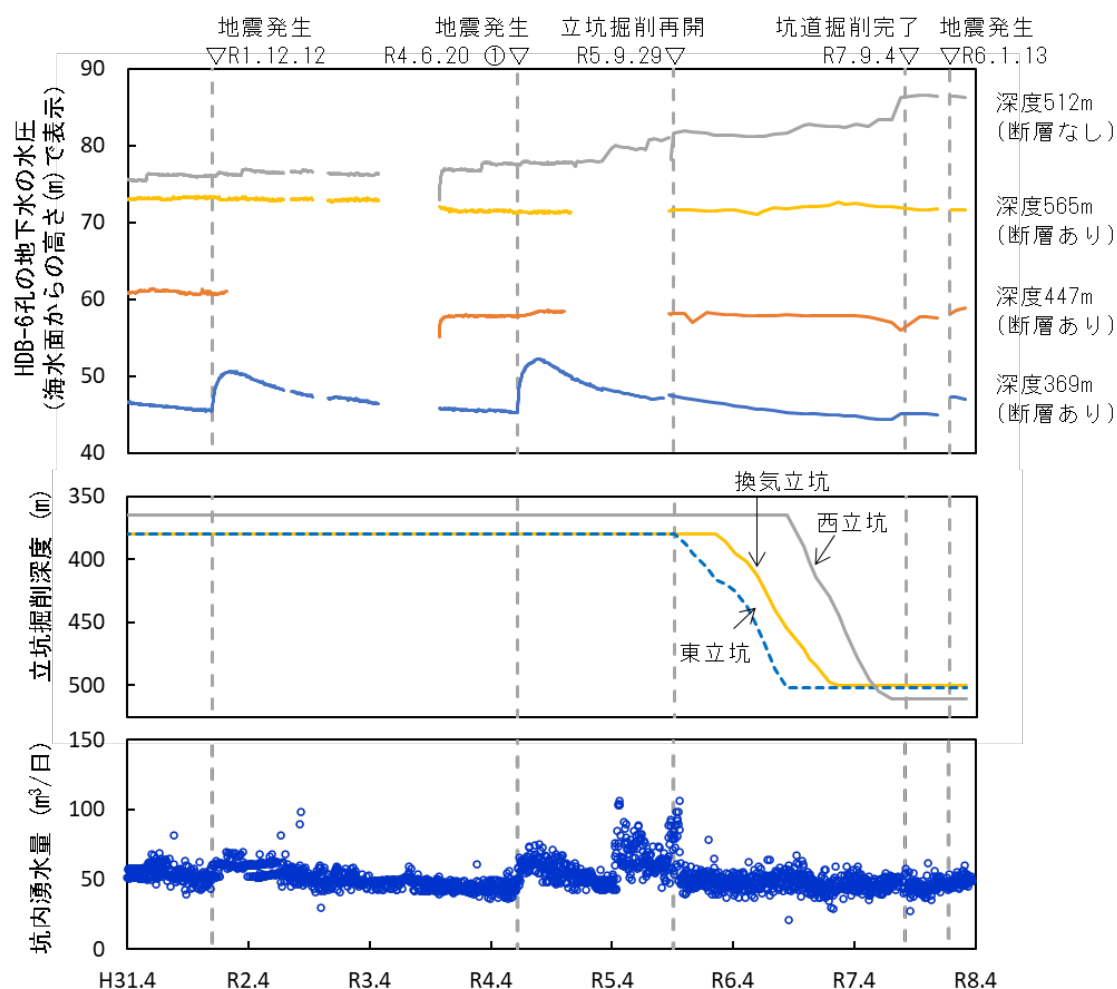


図 57 HDB-6 孔の水圧観測結果、各立坑の掘削深度および坑内湧水量の観測値（平成 31 年 4 月～令和 8 年 3 月のデータ）

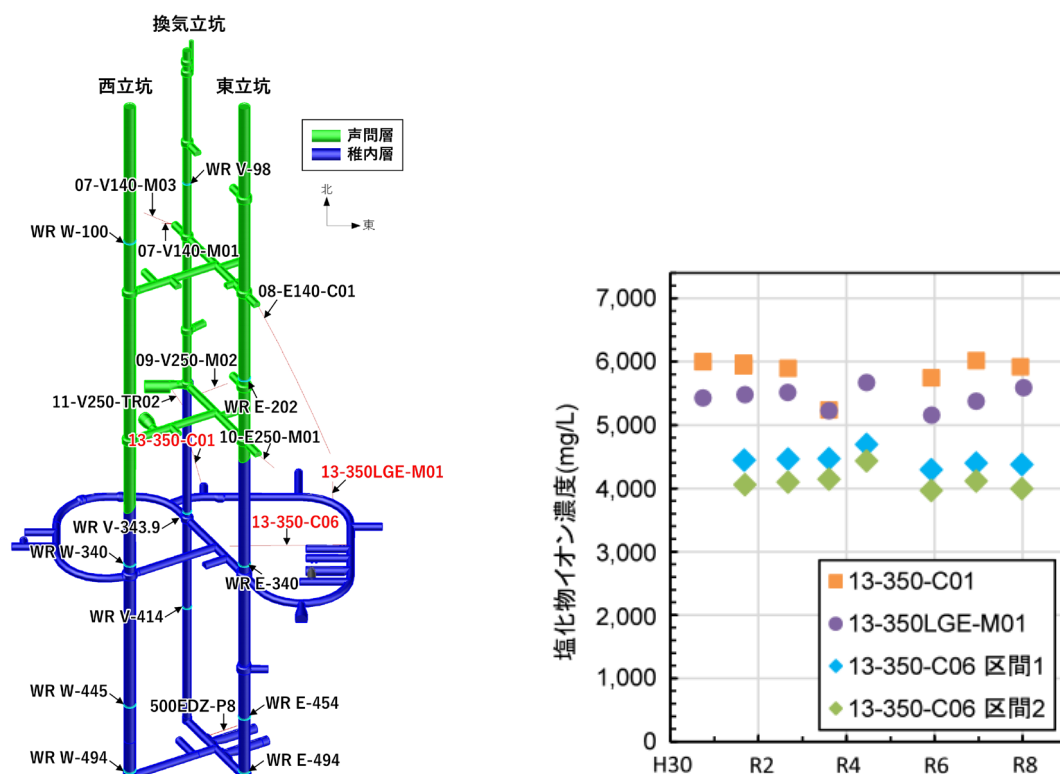
水圧データが途切れている期間は、センサーの不具合によるデータの欠測期間です。

(2) 地下水と岩石の地球化学

地下施設の建設や人工バリア性能確認試験の実施に伴う坑道周辺の地下水の水質の時間的な変化を把握することを目的として、坑道で採取した地下水の pH や電気伝導度、酸化還元電位などの物理量を測定するとともに、採取した地下水の水質を分析しています。

令和 7 年度は、令和 6 年度に引き続き、地下施設の 3 本の立坑に設置した集水リング※や、140m、250m、350m および 500m 調査坑道から掘削したボーリング孔などで採取した地下水の溶存成分を分析しました。図 58(a)に令和 7 年度の地下水の採取位置（集水リングおよびボーリング孔の位置）を、図 58(b)に分析結果の一例として 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔（図 58(a)の赤文字）で採取した地下水の塩化物イオン濃度の分析結果を示します。

350m 調査坑道から掘削したボーリング孔の地下水の塩化物イオン濃度は、令和7年度までに大きな変化は認められませんでした。



(a) 集水リングとボーリング孔の位置

(b) 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔における地下水の塩化物イオン濃度の経時変化

図 58 令和7年度の地下水の採取位置と水質分析結果の例

350m 調査坑道に設置した水圧・水質モニタリング装置によるモニタリングを、令和7年度も継続しました。装置の設置箇所を図 59 に示します。350m 試験坑道 2、3、4 および 350m 試験坑道 7 掘削後の経時変化の把握や観測装置の長期的な性能確認の一環として、13-350-C05 孔、13-350-C06 孔、13-350-C07 孔、13-350-C08 孔および 13-350-C09 孔（以下、C05、C06、C07、C08 および C09）の 5 孔を用い、水圧・水質モニタリングを継続しました。C08 における水圧のモニタリングの結果を図 60 に、水質のモニタリングの結果を図 61 に示します。350m 試験坑道 4 では、平成 26 年度に人工バリア性能確認試験の一環として坑道の一部を埋め戻し、坑道の埋め戻し部分を冠水させるため、平成 27 年 1 月から試験孔底および埋め戻し範囲の坑道内に継続して地下水を注水しています。350m 試験坑道 4 に最も近い区間 4 の間隙水圧は、注水に用いている給水孔からの自然湧水量の増減に伴い不定期に変化していますが、それ以外に大

きな水圧変動は認められませんでした（図 60）。水質に関しても顕著な変化は認められませんでした（図 61）。これらのデータは、令和 2 年度以降の必須の課題のひとつである、人工バリア性能確認試験における熱－水理－力学－化学連成挙動の解析で、人工バリアの外側境界条件となる周辺岩盤中の水圧や水質条件の設定に反映します。

今後も水圧・水質モニタリングを継続し、地下水の水圧や水質の分布とその時間的な変化を評価していきます。

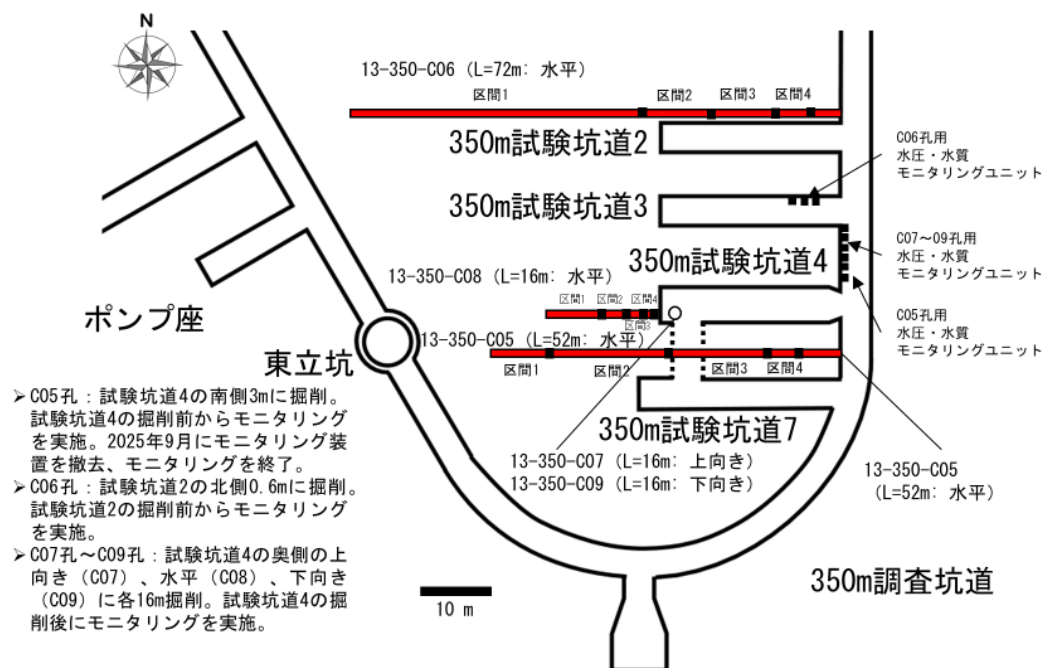


図 59 350m 試験坑道 2 および 350m 試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

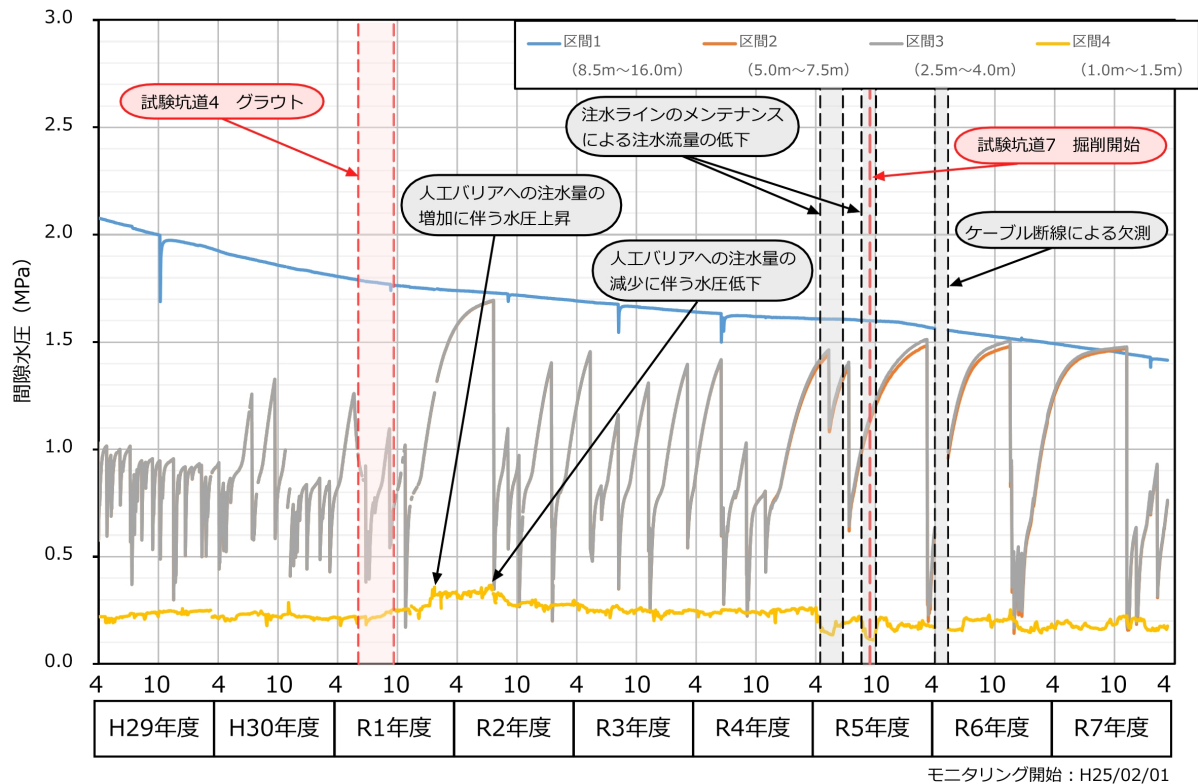


図 60 C08 における水圧モニタリング結果

水圧が急激に低下している箇所は、採水およびメンテナンスによる影響です。

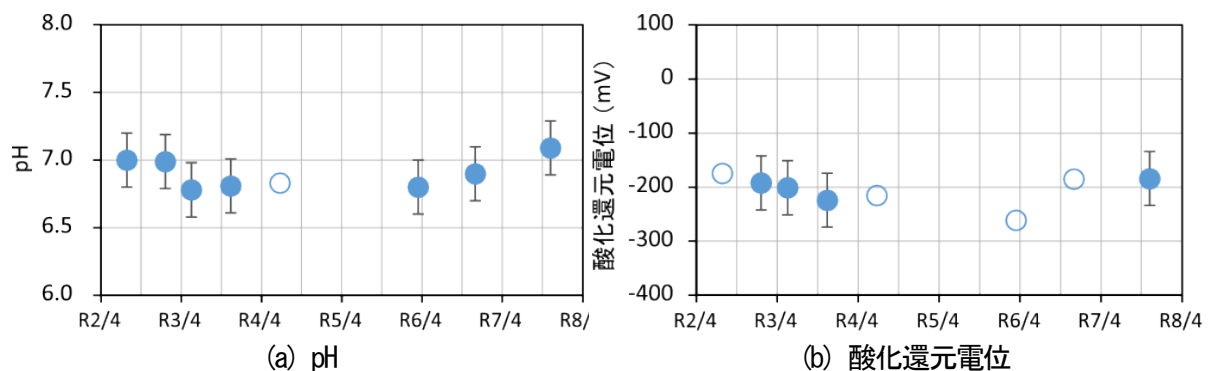


図 61 C08 の区間 2 における水質モニタリング結果

白抜きのデータ（○）は、電極の劣化や表面への汚れ・気泡の付着などの影響により、信頼性が劣る可能性のあるデータを示しています。

(3) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

平成 21 年度に東立坑の深度 160 m に設置した光ファイバー式地中変位計により、岩盤変位の長期的モニタリング性能を検証しています（図 62）。また、長期間にわたる支保工のモニタリングの結果、地下水の浸潤が生じにくい支保工の変形挙動の確認に当たっては、電気式のセンサーも十分活用できることが分かっていることから⁽⁸⁶⁾、光ファイバー式地中変位計の設置箇所付近に

設置した電気式の鋼製支保工応力計による計測データも活用しています（図 63）。それぞれの計測器の設置レイアウトを図 64 に示します。

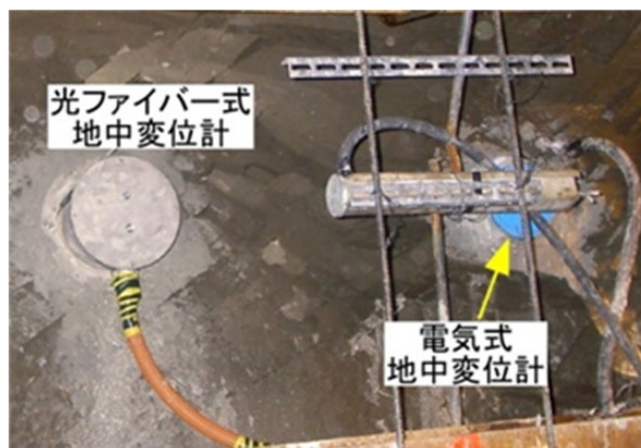


図 62 地中変位計設置状況



図 63 鋼製支保工応力計設置例

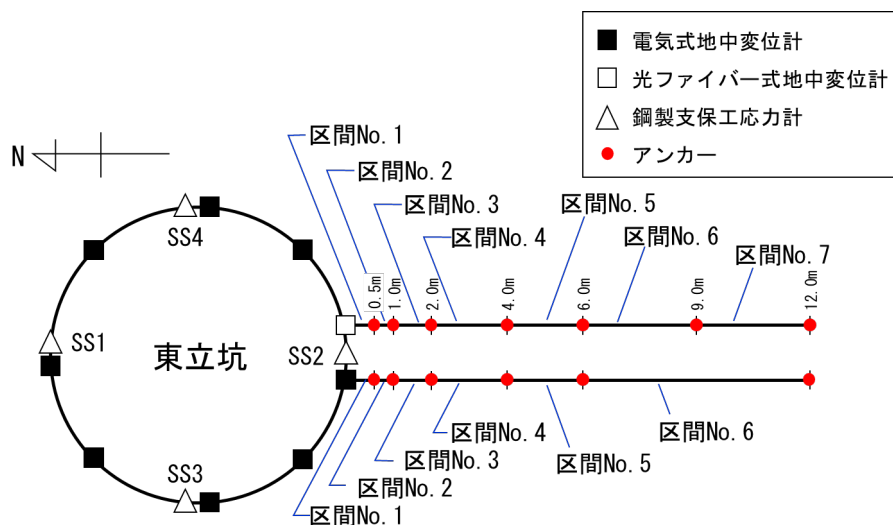


図 64 計測器設置位置図

図 65 は、鋼製支保工応力計において計測された応力の経時変化を示しています。計測結果から約 17 年間にわたり正常に計測ができていることが確認できます。計測された応力は、北側に位置する SS1 において約 155 MPa を示しており、他の計測点に比べ周方向に大きな圧縮の力が作用していることが分かります。しかし、既存の支保工以上に追加の工学的対策を施すほどの応力状態には達していません。また、立坑掘削直後は応力の増加が大きいものの、その後は値が収束する傾向にあります。

今後もデータの蓄積を進め、立坑掘削による周辺岩盤および支保工の長期的な変形挙動をモニタリングするとともに、装置の健全性の確認を継続し、計測手法の信頼性を高めていく予定です。

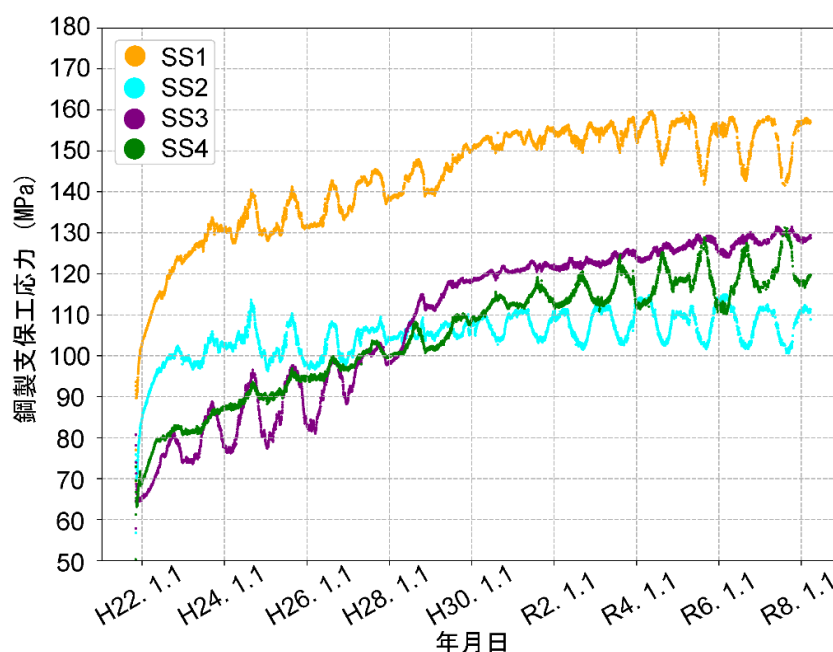


図 65 鋼製支保工応力計の計測結果

(4) 地震観測

地下施設内の 4 台の地震計と地表の 1 台の地震計で地震観測を実施しています。令和 7 年 4 月 1 日から令和 8 年 3 月 16 日までの期間中に、気象庁の発表では、幌延町宮園において震度 1 以上を観測した地震は 20 回あり、観測された最大震度は 3 でした（表 5）。図 66 は、これら地震のうち青森県東方沖を震源とする地震を除いた震央の分布を示しています。また、図 67 に令和 8 年 1 月 13 日 1 時 58 分頃に発生した地震の際に、地表および地下施設で観測された地震波形を示します。図 67 から、震度および最大加速度のいずれにお

いても、地表に比べて地下の方が小さくなっていることが確認できます。

表 5 幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震

地震の発生日時		震央地名	緯度	経度	深さ (km)	M _j ※	震度	
日付	時刻						幌延町 宮園	最大 震度
令和 7 年 7 月 19 日	7:35:17	留萌地方中北部	44° 56.6' N	141° 44.3' E	25	3.6	2	2
令和 7 年 12 月 8 日	23:15:10	青森県東方沖	40° 58.1' N	142° 17.3' E	54	7.5	2	6 強
令和 8 年 1 月 12 日	9:48:38	宗谷地方南部	45° 02.5' N	142° 11.3' E	0	4.4	1	2
	9:50:15	宗谷地方南部	45° 02.1' N	142° 11.5' E	0	5.1	3	3
	9:58:37	宗谷地方北部	45° 02.2' N	142° 10.5' E	0	4.4	2	2
	11:52:19	宗谷地方南部	45° 01.7' N	142° 10.6' E	0	4.3	1	2
	11:57:58	宗谷地方北部	45° 01.7' N	142° 09.8' E	0	4.4	1	2
	14:57:42	宗谷地方南部	45° 02.6' N	142° 11.5' E	0	3.7	1	2
	15:47:52	宗谷地方北部	45° 02.4' N	142° 10.3' E	0	3.1	1	1
令和 8 年 1 月 13 日	1:10:14	宗谷地方北部	45° 02.5' N	142° 09.5' E	0	4.7	2	2
	1:58:54	宗谷地方北部	45° 03.0' N	142° 10.0' E	0	5.2	3	3
令和 8 年 1 月 16 日	10:56:20	宗谷地方北部	45° 01.7' N	142° 09.5' E	0	3.6	1	2
令和 8 年 1 月 20 日	17:36:27	宗谷地方南部	45° 03.6' N	142° 12.6' E	0	4.2	1	2
	18:17:31	宗谷地方南部	45° 03.4' N	142° 11.6' E	0	3.7	1	2
令和 8 年 1 月 21 日	4:40:35	宗谷地方北部	45° 01.9' N	142° 09.9' E	0	4.4	2	2
	9:34:01	宗谷地方南部	45° 03.7' N	142° 12.1' E	0	4.1	1	3
	9:44:34	宗谷地方北部	45° 01.9' N	142° 09.2' E	0	3.4	1	1
令和 8 年 1 月 28 日	10:53:47	宗谷地方北部	45° 04.3' N	142° 10.7' E	0	4.4	1	3
	15:34:02	宗谷地方北部	45° 03.8' N	142° 10.9' E	0	4.8	2	3
令和 8 年 1 月 29 日	0:42:15	宗谷地方北部	45° 03.4' N	142° 10.8' E	0	4.1	1	2

震源の緯度・経度は気象庁一元化震源データより、その他は気象庁震度データベース検索より。

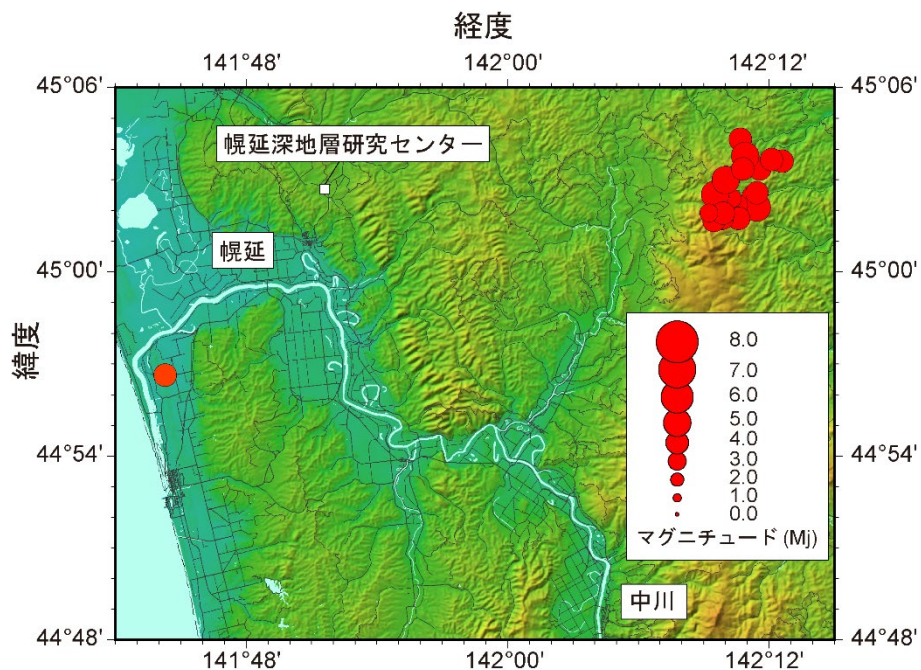


図 66 幌延町（宮園）で観測された地震の震央図

令和 7 年 12 月 8 日に発生した青森県東方沖を震源とする地震以外の震央を示します。作図には、気象庁一元化震源データと GMT および地理院地図の色別標高図を使用しました。

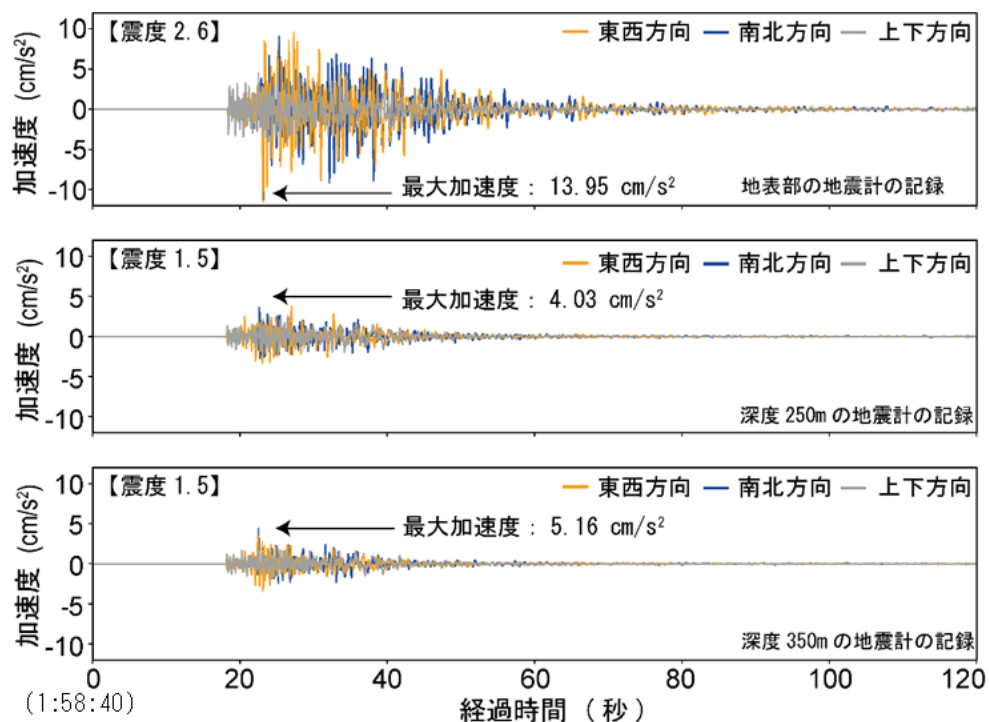


図 67 令和 8 年 1 月 13 日 1 時 58 分頃に発生した地震による地上および地下施設で観測された地震波形

7. 地下施設の建設・維持管理

令和7年度は、令和6年度の工事实績を反映した施設整備業務の計画工程（表6）にしたがい、西立坑および500m調査坑道の掘削を継続（図68）し、西立坑については、令和7年6月に深度510 mの掘削が完了、500m調査坑道については、令和7年9月に総延長208.1 mの掘削が完了しました。

500m調査坑道の掘削完了後は、路盤整備（図69(a)）などの仕上げ作業を実施し、令和7年12月に作業が完了しました（表6参照）。作業完了後、令和8年1月に完成検査・セレモニー（図69(b)）を実施し、令和5年度から再開した掘削工事などの施設整備業務が完了しました（図69(c)および図69(d)）。

表6 地下施設整備の実績工程表（令和7年度）

	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
西立坑	掘削			
500m調査坑道	掘削			仕上

■ 令和7年度施設整備業務計画工程（令和7年3月公表） ■ 令和7年度実績



(a) 西立坑の掘削状況



(b) 500m調査坑道の掘削状況

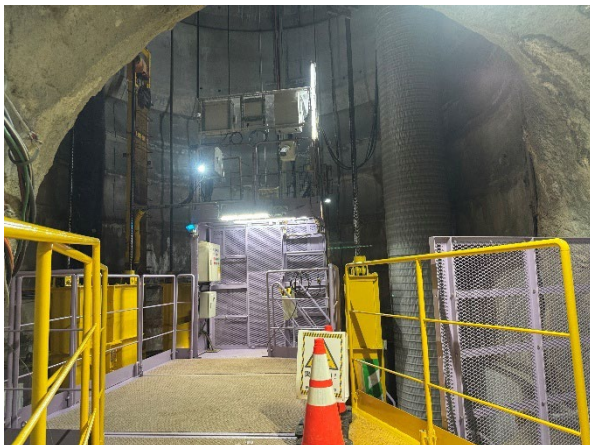
図68 地下施設整備の状況



(a) 仕上げ（路盤整備）作業状況



(b) 施設整備完成セレモニー状況



(c) 西立坑の完成状況



(d) 500m 調査坑道の完成状況

図 69 地下施設整備の仕上げ・完成状況

(1) 地下施設整備（令和 5 年度～令和 7 年度）の総括

令和 5 年度に施設整備業務を再開し、まずは 350m 調査坑道の拡張工事として、350m 試験坑道 6 の掘削に着手しました。その後、350m 試験坑道 7、350m 東立坑側第 1 ボーリング横坑と順次掘削を行い、令和 6 年 1 月に予定していた総延長 66 m の坑道整備を完了しました（表 7）。

立坑については、換気立坑の掘削前の湧水抑制対策に伴う先行ボーリング結果により、湧水や岩盤の割れ目などが新たに確認されたことから、湧水抑制対策の改良範囲を拡充しました。この改良範囲の拡充に伴い、換気立坑からとしていた掘削順序を変更し、先行して湧水抑制対策が終了した東立坑から掘削を開始しました（表 7）。

東立坑および換気立坑については、先行ボーリングにおけるコアの性状や施工開始当初に掘削壁面からの小規模な岩石の落下が認められたことから、安全を最優先とし、覆工コンクリートの打設長（1 回でコンクリートを施工

する長さ)を1 mとして施工を開始しました。掘削の進捗に応じて、掘削壁面の割れ目が少なくなり、地山状況が安定したことから、東立坑は深度440 m、換気立坑は深度400 mから打設長を2 mに変更して施工を行いました。また、情報化施工として、覆工コンクリートにかかる応力などの計測結果に基づき、覆工の厚さを合理的に設定する手法を導入しました⁽⁸⁷⁾。更に計画より若干の遅れが見られたため、掘削作業員の増強を行い工程の回復に努めました。これらの変更により、施工サイクルが向上したことで、東立坑は令和6年9月、換気立坑は令和7年1月に掘削を完了することができました(表7)。

西立坑については、東立坑の早期の掘削完了に伴い、ほぼ計画どおり令和6年9月から掘削を開始しました。掘削当初より地山の状況が良く覆工コンクリートの打設長を2 mとして施工を進められたこと、東立坑および換気立坑と同様に情報化施工を導入したことなどから、計画より2か月半早い令和7年6月に掘削が完了しました(表7)。

500m調査坑道についても、西立坑同様、掘削開始を前倒しできたことから、計画より約3か月早い令和7年12月に仕上げ作業含め、全ての施設整備を完了することができました(表7)。

表7 地下施設整備の実績工程表(令和5年度から令和7年度)

	令和5年度	令和6年度	令和7年度
350m調査坑道			
換気立坑			
東立坑			
西立坑			
500m調査坑道			

■ 令和5年度当初工程 ■ 令和5年度～令和7年度実績

※本工程には、掘削以外の段取りや仕上げ作業を含みます

施設整備期間中の掘削実績と湧水量の推移（図 70）については、湧水抑制対策が最盛期であった令和 5 年 4 月から令和 5 年 10 月にかけて、湧水量が若干増加する傾向がありましたが、全体的に掘削に伴う湧水の増加は見られず、掘削前とほぼ同等の 50 m³/日前後で推移しています。なお、令和 7 年 8 月の局所的な湧水量増加（最大約 250 m³/日）は、宗谷地方北部の記録的な大雨による流入水の影響です。

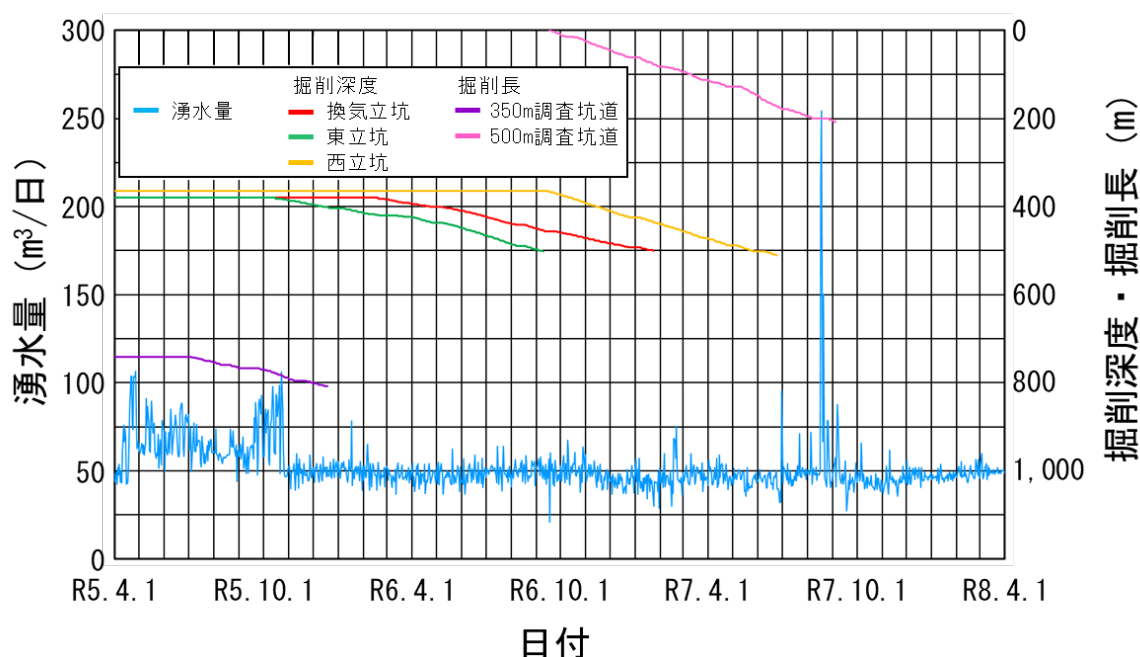


図 70 施設整備期間中の掘削実績と湧水量の推移

(2) 地下施設の維持管理

令和 7 年度は、地下施設の維持管理として、櫓設備や電気設備などの運転・点検保守および排水処理設備の運転・監視などを行いました（図 71）。



(a) 電気設備の点検保守



(b) 排水処理設備の運転・監視

図 71 地下施設の維持管理状況

(3) 掘削土（ズリ）の管理

坑道の掘削により発生する掘削土（ズリ）には、重金属などが含まれていますが、自然由来であることから土壤汚染対策法の適用外となっています。しかし、幌延深地層研究センターでは、周辺環境の保全に万全を期すため、土壤汚染対策法に準拠した管理を行っています。具体的には、掘削土（ズリ）の土壤溶出量が土壤汚染対策法に定める第 2 溶出量基準値を超過していないことを確認（8.2 参照）した後、同法の遮水工封じ込め型に準じた二重遮水シート*構造（図 72）とした掘削土（ズリ）置場に搬入し、保管しています。

令和 7 年度は、掘削完了に伴う掘削土（ズリ）搬入終了後、斜面を保護するためのコンクリートの吹付け作業を実施し、令和 7 年 10 月に作業が終了しました（図 73）。

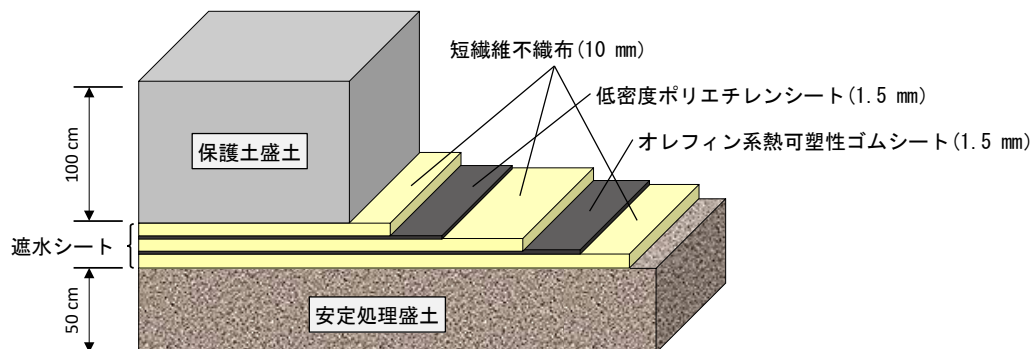


図 72 二重遮水シートの構造

遮水シートの上に保護土盛土を行い、その上に掘削土（ズリ）が保管されています。



図 73 掘削土（ズリ）置場の吹付け作業完了後の様子

(4) 排水の管理

地下施設からの排水と掘削土（ズリ）置場に設置している浸出水調整池の浸出水については、硝酸性窒素処理設備、濁水処理設備、脱ホウ素設備、脱窒素設備および揚水設備から構成される排水処理設備（図 74）で処理を行っています。処理済排水は、排水基準値を超過していないことを確認（8.1(2)参照）した後、排水管路を通じて天塩川へ放流しています。



(a) 硝酸性窒素処理設備



(b) 濁水処理設備



(c) 脱木ウ素設備 (1号機)



(d) 脱木ウ素設備 (2号機)



(e) 脱窒素設備



(f) 揚水設備

図 74 排水処理設備

8. 環境調査

令和7年度は、令和6年度に引き続き地下施設からの排水などの水質調査、掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査および研究所用地周辺の環境影響調査を実施しました。

8.1 排水量および水質調査

排水処理設備から天塩川へ放流している排水量について監視を行うとともに、排水処理前後の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質について、調査を行っています。また、掘削土（ズリ）置場の周辺環境への影響を監視するため、清水川および掘削土（ズリ）置場周辺の地下水についても水質調査を行っています。

なお、水質の分析については、公的な分析資格を持つ民間の会社に委託しています。本調査の対象となっている排水系統と各水質調査の採水地点を図75に示します。処理済排水については、塩濃度が高い状態であることから、生態系への影響を考慮し、天塩川の塩水が遡上する地点を放流口としています。

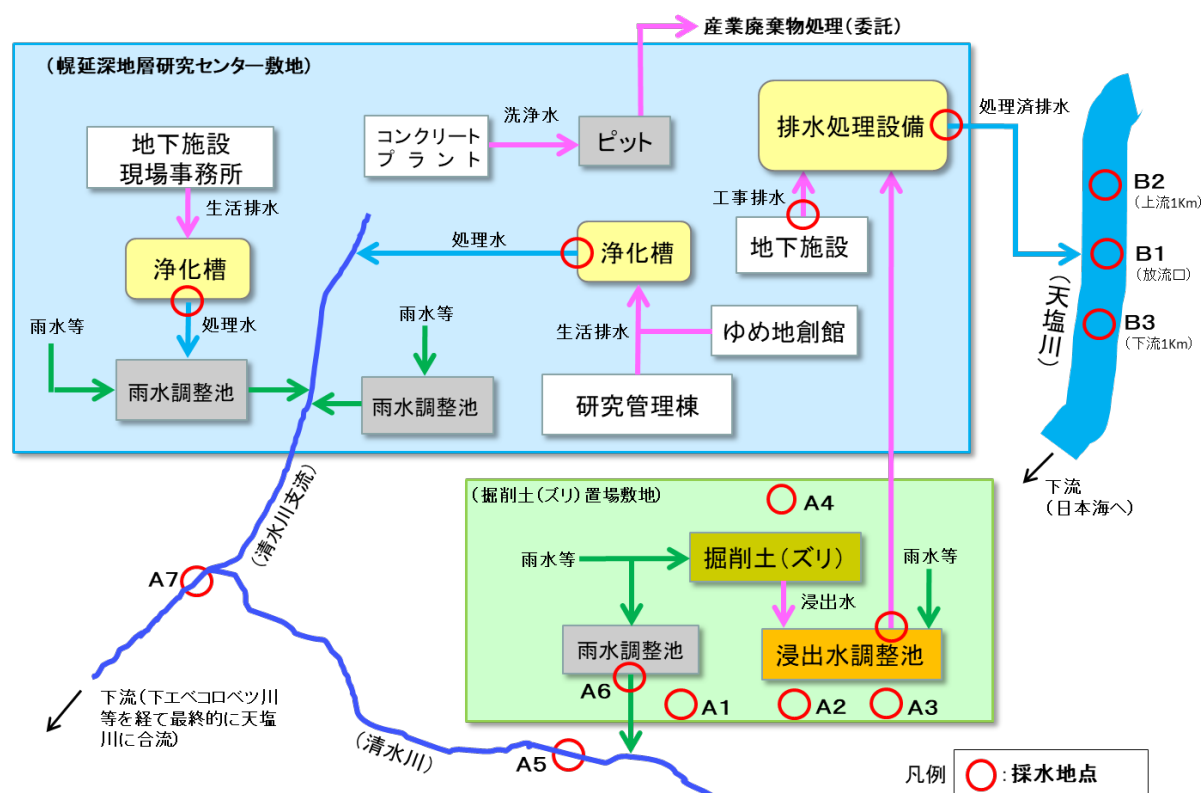


図 75 排水系統と各水質調査の採水地点

(1) 天塩川への排水量

地下施設からの排出水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、排水処理設備において処理を行った後、排水管路を通じて天塩川に放流しています。

令和7年度の天塩川への排水量は表8に示すとおりで、合計排水量は、令和6年度（55,384 m³）と同程度の56,991 m³でした。日最大排水量および月排水量は、記録的な大雨の影響を受けた8月が最大であり、月排水量が8,321 m³、日最大排水量が649 m³でした。なお、日最大排水量については、観測期間を通じて北るもい漁業協同組合との協定値（750 m³/日）を満足しています。日平均排水量については、降雨および融雪の影響を受けた4月が最大であり、日平均排水量は276 m³でした。また、記録的な大雨の影響を受けた8月も同程度の日平均排水量（268 m³）でした。

表8 天塩川への排水量

年月	月排水量 (m ³)	日最大排水量 (m ³) 注1	日平均排水量 (m ³) 注2
令和7年4月	8,280	460	276
令和7年5月	3,993	305	128
令和7年6月	3,215	267	107
令和7年7月	3,322	303	107
令和7年8月	8,321	649	268
令和7年9月	4,780	402	159
令和7年10月	4,272	280	137
令和7年11月	4,295	340	143
令和7年12月	4,094	358	132
令和8年1月	3,656	285	117
令和8年2月	3,359	334	119
令和8年3月	5,404	343	174
合計	56,991	—	—
最大値	8,321(8月)	649(8月)	276(4月)

注1：北るもい漁業協同組合との協定値は750 m³/日です。

注2：月排水量を各月の日数で除した値（小数点以下切捨て）を示しています。

(2) 地下施設からの排水の水質調査結果

地下施設から排出される「立坑の原水」および「掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水」については、図76に示すとおり、濁水処理、脱ホウ素処理、脱窒素処理（アンモニア性窒素）を行った後、「揚水設備における処理

「済排水」として排水管路を通じて天塩川に放流しています。また、「掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水」については、貯留時に硝化菌のはたらきによって生成される硝酸性窒素についても処理を行っています。これらの排水については、排水処理の前後で定期的（原則1回/月）に水質調査を実施しています。

令和7年度の調査結果は、表9に示すとおりで、天塩川に放流している「揚水設備における処理済排水」については、すべて排水基準の範囲内でした。

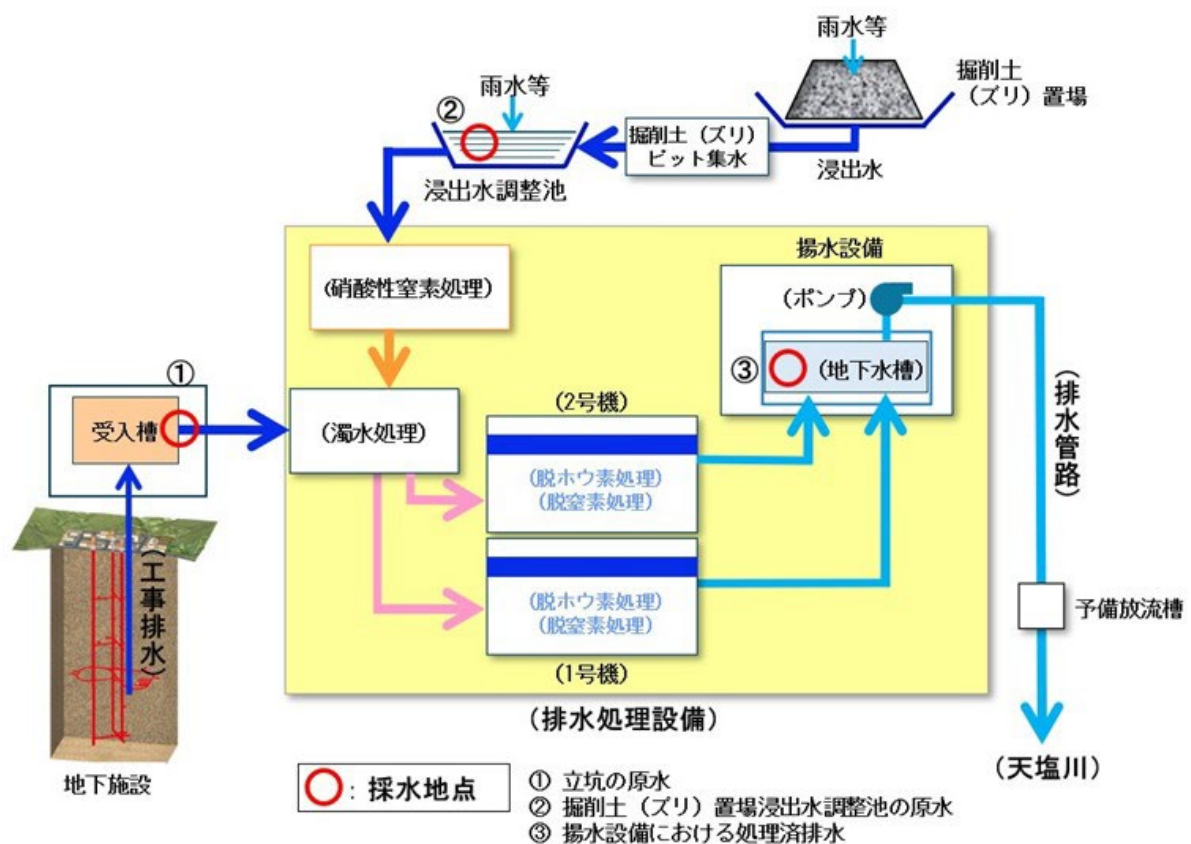


図 76 地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点

表 9 地下施設からの排水に関わる水質調査結果

主な分析項目	採水地点 (図 76参照)	過年度	令和6年度	令和7年度	(参考値) 水質汚濁防止法 排水基準
		平成18年12月 ～令和6年3月	令和6年4月 ～令和7年3月	令和7年4月 ～令和8年3月	
カドミウム ^{注1} (mg/L)	立坑の原水	<0.003	<0.003	<0.003	0.03
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.003～0.003	<0.003～0.005	<0.003～0.009	
	揚水設備における処理済排水	<0.003	<0.003	<0.003	
ヒ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.08	<0.01～0.01	<0.01～0.01	0.1
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
セレン (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	0.1
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.01～0.04	<0.01～0.03	0.02～0.06	
	揚水設備における処理済排水	<0.01～0.01	<0.01～0.02	<0.01～0.02	
フッ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.8～3.5	<0.8	<0.8	8
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8～0.9	<0.8～0.9	
	揚水設備における処理済排水	<0.8～1.6	<0.8	<0.8	
ホウ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.1～160	49～82	76～83	10
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.1～37	0.7～8.4	6.8～15	
	揚水設備における処理済排水	<0.1～3.0	<0.1～0.2	<0.1～0.4	
全窒素 (mg/L)	立坑の原水	0.41～117	53～80	64～75	120 (日間平均 60)
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	3.0～150	17～78	110～140	
	揚水設備における処理済排水	0.60～48	24～46	17～54	
全アンモニア (mg/L)	立坑の原水	0.12～110	32～54	26～49	—
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	0.11～22	0.36～0.89	0.29～1.4	
	揚水設備における処理済排水	<0.05～6.8	<0.05～1.0	<0.05	
pH	立坑の原水	7.5～9.5	8.1～8.3	8.1～8.2	5.8～8.6
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	6.7～8.7	6.9～7.9	7.1～7.9	
	揚水設備における処理済排水	6.7～8.6	7.2～7.6	7.4～7.9	
浮遊物質量 (mg/L)	立坑の原水	3～6400	26～140	6～64	200 (日間平均 150)
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	1～170	2～28	2～3	
	揚水設備における処理済排水	<1～9	<1	<1～1	
塩化物イオン (mg/L)	立坑の原水	20～4,300	2,400～4,300	3,600～5,000	—
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	10～1,500	36～290	290～850	
	揚水設備における処理済排水	38～4,700	1,400～2,800	560～3,400	

注1：カドミウムの定量下限値について、令和4年度より排水基準の1/10 (<0.003 mg/L)に見直しました。

(3) 天塩川の水質調査結果

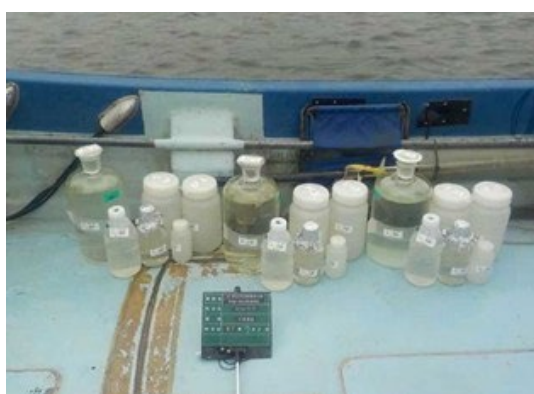
地下施設からの排水の放流先である天塩川の採水地点（図 77）において、定期的（原則1回/月）に採水し（図 78）、水質調査を実施しています。

令和7年度の調査結果は、表 10 に示すとおりです。浮遊物質質量について、北るもい漁業協同組合との協定値（20 mg/L）を超過した時期（5月、9月、11月）がありましたが、放流口の上流側（B2）でも同程度の高い値を示しており、同日に採取した揚水設備における処理済排水の浮遊物質質量は低い値（<1 mg/L、表 9 参照）であることから、地下施設からの排水の影響ではなく、融雪や降雨などの自然的な要因によるものであると考えられます。その他の調査項目については、協定値の範囲内であり、天塩川の水質に影響を与えていないものと判断しています。



図 77 天塩川の採水地点

地理院地図（<https://maps.gsi.go.jp/>）を加工し、採水地点などを追記しています。



(a) 採水試料



(b) 電気伝導度測定

図 78 天塩川での採水状況（令和7年7月1日）

表 10 天塩川の水質調査結果

主な分析項目	採水 地点 ^{注1}		過年度		令和7年度	北るもい 漁業協同組合 協定値
			放流前 平成18年6月 ～平成18年11月	放流後 平成18年12月 ～令和7年3月	令和7年4月 ～令和8年3月	
ホウ素 (mg/L)	B1	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.35	0.01～0.03	5
		中層	—	<0.01～3.5	0.01～1.1	
		深層	<0.02～3.35	<0.01～4.9	0.01～4.0	
	B2	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.27	0.01～0.03	
		中層	—	<0.01～3.7	0.01～1.2	
		深層	<0.02～3.28	<0.01～5.0	0.01～3.8	
	B3	表層	<0.02～0.07	<0.01～0.28	0.01～0.04	
		中層	—	<0.01～2.5	0.01～0.12	
		深層	<0.02～1.03	<0.01～5.0	0.01～0.17	
全窒素 (mg/L)	B1	表層	0.37～1.06	0.11～2.2	0.30～1.2	20
		中層	—	0.15～2.2	0.44～1.2	
		深層	0.42～1.50	0.15～6.5	0.41～1.2	
	B2	表層	0.37～1.14	0.14～2.2	0.33～1.2	
		中層	—	0.15～2.3	0.37～1.2	
		深層	0.4～1.16	0.16～2.3	0.38～1.2	
	B3	表層	0.4～1.31	0.16～2.2	0.29～1.1	
		中層	—	0.11～2.3	0.30～1.2	
		深層	0.49～1.24	0.16～2.3	0.30～1.1	
全アンモニア (mg/L)	B1	表層	—	<0.05～0.83	<0.05～0.07	2 ^{注2}
		中層	—	<0.05～0.92	<0.05～0.06	
		深層	—	<0.05～0.85	<0.05～0.07	
	B2	表層	<0.01～0.13	<0.05～0.89	<0.05～0.08	
		中層	—	<0.05～0.76	<0.05～0.08	
		深層	0.01～0.35	<0.05～0.85	<0.05～0.08	
	B3	表層	0.01～0.21	<0.05～0.89	<0.05～0.07	
		中層	—	<0.05～0.90	<0.05～0.08	
		深層	0.02～0.17	<0.05～0.96	<0.05～0.08	
pH	B1	表層	7.1～7.4	6.3～7.8	6.8～7.7	5.8～8.6
		中層	—	6.3～7.8	6.8～7.3	
		深層	7.0～7.6	6.5～8.0	6.8～7.3	
	B2	表層	7.1～7.4	6.3～7.9	6.8～7.4	
		中層	—	6.4～7.9	6.8～7.3	
		深層	7.2～7.6	6.5～8.0	6.9～7.3	
	B3	表層	7.0～7.6	6.6～7.9	6.8～7.8	
		中層	—	6.6～7.7	6.9～7.5	
		深層	7.1～7.4	6.6～8.1	6.8～7.4	
浮遊物質 (mg/L)	B1	表層	3～34	<1～360	<1～35	20
		中層	—	<1～390	<1～37	
		深層	6～86	<1～400	<1～39	
	B2	表層	3～36	<1～390	1～34	
		中層	—	<1～400	<1～36	
		深層	5～47	<1～460	<1～40	
	B3	表層	3～35	<1～420	<1～30	
		中層	—	<1～460	<1～38	
		深層	5～49	<1～650	<1～43	

注1：採水地点を図77に示します。表層：水面下0.1m付近、中層：塩水層と淡水層の間もしくは1/2深度、深層：河床上1m付近、です。

注2：北るもい漁業協同組合との確認により、B3地点（放流口下流1km）の値としています。

(4) 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）は、二重に遮水された掘削土（ズリ）置場で管理していますが、遮水された外側となる掘削土（ズリ）置場周辺への影響を監視するため、図 79 に示す採水地点において、観測用のボーリング孔から地下水を定期的（原則 4 回/年）に採水し（図 80）、水質調査を実施しています。

令和 7 年度の調査結果は、表 11 に示すとおり、これまでの調査結果と同等であり、掘削土（ズリ）置場が周辺環境に影響を与えていないものと判断しています。

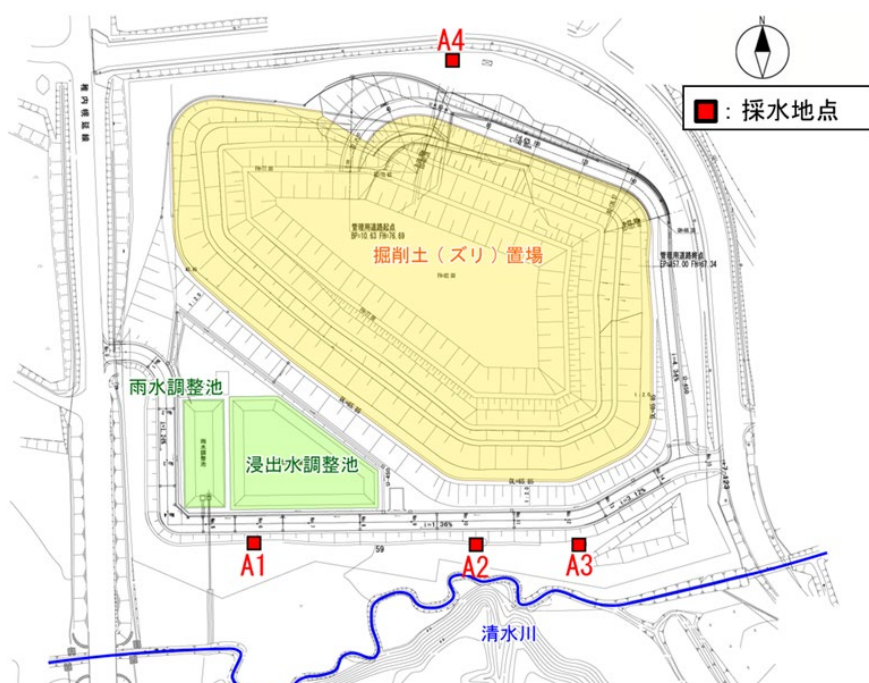


図 79 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点



(a) 採水状況



(b) 採水状況

図 80 掘削土（ズリ）置場周辺地下水の採水状況（令和 7 年 5 月 7 日）

表 11 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

主な分析項目	採水 地点 ^{注1}	過年度		令和7年度			
		掘削土（ズリ） 搬入前 平成18年6月 ～平成19年4月	掘削土（ズリ） 搬入後 平成19年5月 ～令和7年2月	令和7年			令和8年
				5月	8月	11月	
カドミウム ^{注2} (mg/L)	A1	<0.001～0.001	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
	A2	<0.001～0.004	<0.0003～0.002	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
	A3	<0.001～0.003	<0.0003～0.009	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
	A4	<0.001	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
鉛 (mg/L)	A1	<0.005～0.171	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A2	<0.005～0.006	<0.005～0.007	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A3	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A4	<0.005～0.022	<0.005～0.007	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
ヒ素 (mg/L)	A1	<0.005	<0.005～0.012	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A2	<0.005	<0.005～0.007	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A3	<0.005	<0.005～0.007	<0.005	<0.005	0.005	<0.005
	A4	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
セレン (mg/L)	A1	<0.002	<0.002～0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A2	<0.002	<0.002～0.003	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A3	<0.002	<0.002～0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A4	<0.002	<0.002～0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
フッ素 (mg/L)	A1	<0.1～0.3	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	0.3	0.2
	A2	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A3	<0.1～0.2	<0.1～0.3	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
	A4	<0.1	<0.1～0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A1	19.8～50.7	0.40～63.0	29	18	20	15
	A2	1.29～43.5	0.43～37.0	17	28	12	22
	A3	12.5～34.0	0.18～41.8	5.0	11	0.45	16
	A4	<0.02～0.06	<0.02～0.47	<0.02	0.03	<0.02	<0.02
pH	A1	6.9～7.2	6.1～7.9	7.1	6.7	6.6	6.5
	A2	4.6～6.3	3.7～7.0	6.9	6.9	6.6	6.8
	A3	6.8～7.3	4.2～7.4	6.6	6.7	6.4	6.8
	A4	5.4～6.6	5.0～6.7	5.4	5.4	5.2	5.3
塩化物イオン (mg/L)	A1	1,810～2,760	79～3,400	1,900	1,300	1,300	870
	A2	147～2,910	23～2,400	1,000	1,500	470	1,200
	A3	631～1,550	23～1,700	280	430	21	750
	A4	9.7～11.9	8.4～17.0	8.9	9.9	7.2	9.3

注1：採水地点を図79に示します。

注2：カドミウムの定量下限値について、令和4年度より環境基準の1/10（<0.0003 mg/L）に見直しました。

(5) 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果

掘削土（ズリ）置場による清水川への影響がないことを確認するため、図81に示す清水川の上流（A5）と下流（A7）の2地点および掘削土（ズリ）置

場からの流入元となる雨水調整池（A6）において、定期的（原則 1 回/月）に採水を行い（図 82）、水質調査を実施しています。

令和 7 年度の調査結果は、表 12 に示すとおり、これまでの調査結果と同等であることから、掘削土（ズリ）置場が周辺環境に影響を与えていないものと判断しています。



図 81 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点



(a) 採水状況



(b) 採水状況

図 82 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況
(令和 7 年 7 月 1 日)

表 12 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果

主な分析項目	採水地点 (図 81 参照)	過年度		令和 7 年度
		掘削土（ズリ）搬入前 平成 18 年 6 月 ～平成 19 年 4 月	掘削土（ズリ）搬入後 平成 19 年 5 月 ～令和 7 年 3 月	令和 7 年 4 月 ～令和 8 年 3 月
カドミウム ^{注1} (mg/L)	A5	<0.001	<0.0003～0.0005	<0.0003
	A6	<0.001～0.001	<0.0003～0.002	<0.0003
	A7	<0.001	<0.0003～0.0007	<0.0003
鉛 (mg/L)	A5	<0.005	<0.005	<0.005
	A6	<0.005	<0.005～0.007	<0.005
	A7	<0.005	<0.005～0.008	<0.005～0.005
ヒ素 (mg/L)	A5	<0.005	<0.005～0.006	<0.005
	A6	<0.005～0.011	<0.005～0.015	<0.005～0.006
	A7	<0.005	<0.005～0.009	<0.005
セレン (mg/L)	A5	<0.002	<0.002～0.002	<0.002
	A6	<0.002	<0.002～0.003	<0.002
	A7	<0.002	<0.002	<0.002
フッ素 (mg/L)	A5	<0.1～0.1	<0.1～0.3	<0.1～0.2
	A6	<0.1～0.7	<0.1～1.1	<0.1～0.2
	A7	<0.1	<0.1～0.3	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A5	0.03～0.25	<0.02～0.56	0.05～0.41
	A6	<0.02～0.09	<0.02～0.64	0.03～0.22
	A7	0.03～0.30	<0.02～0.55	0.05～0.40
pH	A5	6.4～7.1	6.0～7.9	6.6～7.4
	A6	5.8～7.4	5.7～9.1	6.8～8.2
	A7	6.5～7.0	6.1～7.8	6.7～7.4
浮遊物質 (mg/L)	A5	1～20	<1～130	1～7
	A6	12～173	<1～500	<1～57
	A7	1～11	<1～270	1～12
塩化物イオン (mg/L)	A5	14.4～30.5	7.2～70	13～58
	A6	5.1～24.7	1.3～269	4.7～24
	A7	15.6～28.7	8.1～100	14～44

注1：カドミウムの定量下限値について、令和4年度より環境基準の1/10（<0.0003 mg/L）に見直しました。

(6) 浄化槽排水の水質調査結果

研究所用地から排出される生活排水による環境への影響を監視するため、研究管理棟および地下施設現場事務所の浄化槽排水について、定期的（原則1回/4週）に水質調査を実施しています。

令和7年度の調査結果は、表13に示すとおりで、すべての項目において協定値の範囲内でした。

また、「大腸菌群数」については、令和3年10月7日環境省告示6号（令和7年4月1日施行）にて、水質汚濁に係る環境基準が改正され、「大腸菌数」

に分析項目が変更となりました。これは、基準設定当時は大腸菌のみを簡便に検出する技術が確立しておらず、異なる細菌を含む「大腸菌群数」を指標としていましたが、近年、大腸菌のみを検出する技術が確立されたことから、指標が変更されたためです。この変更を受けて、北るもい漁業協同組合と締結している「幌延深地層研究所の放流水等に関する確認書」および「幌延深地層研究所の放流水等に関する確認書の変更について」を令和7年3月10日付で、変更した上で、令和7年度より、「大腸菌数」に分析項目を変更しました。なお、「大腸菌群数」と「大腸菌数」は分析方法や単位も異なるため、単純な比較は行えませんが、過年度の結果として、「大腸菌群数」の記載も残しています。

表 13 浄化槽排水の調査結果

分析項目	採水地点	過年度	令和7年度	北るもい 漁業協同組合 協定値
		平成18年12月 ～令和7年3月	令和7年4月 ～令和8年3月	
pH	研究管理棟	5.9～7.7	6.1～7.3	5.8～8.6
	地下施設現場事務所	6.8～8.0	7.5～8.0	
生物化学的酸素要求量 (mg/L)	研究管理棟	<0.5～17	1.4～8.1	20
	地下施設現場事務所	<0.2～28	<0.5～2.5	
浮遊物質 (mg/L)	研究管理棟	<1～10	<1～8	20
	地下施設現場事務所	<0.5～8	<1	
全窒素 (mg/L)	研究管理棟	6.3～52	9.8～20	60
	地下施設現場事務所	0.2～45	0.3～2.2	
全リン (mg/L)	研究管理棟	0.5～5.0	1.7～3.4	8
	地下施設現場事務所	<0.1～7.8	<0.1～0.2	
透視度 (cm)	研究管理棟	30	30	30
	地下施設現場事務所	30	30	
大腸菌群数 ^{注1} (個/mL)	研究管理棟	0～1,400	—	3,000
	地下施設現場事務所	0～2,400	—	
大腸菌数 ^{注1} (CFU/mL)	研究管理棟	—	<1～12	800
	地下施設現場事務所	—	<1～51	

注1：令和3年10月7日環境省告示6号（令和7年4月1日施行）にて、水質汚濁に係る環境基準が改正されたため、令和7年度から「大腸菌数」に分析項目を変更しました。なお、過年度の結果として、「大腸菌群数」についても記載を残しています。

8.2 掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果

地下施設工事により発生する掘削土（ズリ）は、自然由来であることから

土壌汚染対策法の適用外となっていますが、周辺環境の保全に万全を期するため、同法に準拠した管理を行っています。具体的には、対象となる物質の土壌溶出量が土壌汚染対策法の範囲内であることを確認するため、定期的に分

析を行っています。

令和7年度に掘削を行った西立坑における分析結果は、表14に示すとおりで、すべての項目において、土壌汚染対策法の第2溶出量基準値以下でした。

表14 掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果

分析項目	立坑	平成18年3月 ～ 平成26年5月	令和5年度 (東立坑)	令和6年度 (東・西・換気立坑)	令和7年度 (西立坑)	参考値 ^{注1} (土壌汚染対策法)	
						溶出量 基準値	第2溶出量 基準値
ホウ素 (mg/L)	換気	0.1～10	—	3.6～5.3	—	1	30
	東	<0.1～10	4.4	3.9～4.8	—		
	西	0.1～12	—	4.3～4.8	4.4～6.7		
ヒ素 (mg/L)	換気	0.005～0.067	—	0.033～0.047	—	0.01	0.3
	東	<0.001～0.058	0.045	0.020～0.047	—		
	西	0.004～0.055	—	0.035～0.047	0.017～0.046		
フッ素 (mg/L)	換気	<0.08～0.41	—	0.12～0.18	—	0.8	24
	東	<0.08～0.19	0.18	0.13～0.20	—		
	西	<0.08～0.38	—	0.11～0.15	0.12～0.15		
セレン (mg/L)	換気	0.004～0.031	—	0.007～0.014	—	0.01	0.3
	東	<0.001～0.027	0.011	0.008～0.013	—		
	西	0.004～0.027	—	0.007～0.010	0.007～0.012		
カドミウム ^{注2} (mg/L)	換気	<0.001	—	<0.0003	—	0.003	0.09
	東	<0.001	<0.0003	<0.0003	—		
	西	<0.001～0.10	—	<0.0003	<0.0003		
鉛 (mg/L)	換気	<0.001～0.006	—	<0.001～0.002	—	0.01	0.3
	東	<0.001～0.007	0.001	<0.001～0.002	—		
	西	0.002～0.014	—	<0.001	<0.001～0.001		
シアン (mg/L)	換気	<0.1	—	<0.1	—	検出され ないこと	1
	東	<0.1	<0.1	<0.1	—		
	西	<0.1	—	<0.1	<0.1		
六価クロム ^{注3} (mg/L)	換気	<0.005	—	<0.005	—	0.05	1.5
	東	<0.005	<0.05	<0.005	—		
	西	<0.005	—	<0.005	<0.005		
水銀 (mg/L)	換気	<0.0005	—	<0.0005	—	0.0005	0.005
	東	<0.0005	<0.0005	<0.0005	—		
	西	<0.0005	—	<0.0005	<0.0005		
アルキル水銀 (mg/L)	換気	<0.0005	—	<0.0005	—	検出され ないこと	検出され ないこと
	東	<0.0005	<0.0005	<0.0005	—		
	西	<0.0005	—	<0.0005	<0.0005		

注1：土壌汚染対策法の基準値であり、溶出量基準値を超え、第2溶出量基準値以下のものが、同法に定められた遮水型などの方法で保管が可能（第2溶出量基準値を超えたものは別途処理が必要）となります。

注2：カドミウムの溶出量基準値および第2溶出量基準値は令和2年に改定されました（溶出量基準値0.01 mg/L→0.003 mg/L、第2溶出量基準値0.3 mg/L→0.09 mg/L）。これに伴い、カドミウムの定量下限値を、溶出量基準値の1/10（<0.0003 mg/L）に見直しました。

注3：六価クロムの定量下限値は令和5年度は<0.05 mg/Lとしていましたが、令和6年度は溶出量基準値の1/10（<0.005 mg/L）に見直しました。

8.3 研究所用地周辺の環境影響調査

研究所用地周辺の環境影響調査として、図 83 に示す地点にて清水川の水質および生息魚類を対象に調査を実施しています。



図 83 環境調査実施場所

(1) 清水川の水質調査結果

清水川の2地点（図 83 の No. 1、No. 2）において、定期的（原則4回/年）に採水を行い（図 84）、水質調査を実施しています。本調査は、清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の水質調査結果と別に、「水質汚濁に係る環境基準」に準拠して実施しているものです。

令和7年度における調査結果は、表 15 に示すとおりで、これまでと比較して大きな変化がないことを確認しています。



図 84 清水川からの採水状況（令和 7 年 9 月 2 日）

表 15 清水川の水質調査結果

主な分析項目	採水地点 (図 83 参照)	過年度	令和 7 年度			
		平成 14 年 8 月 ～令和 7 年 2 月	令和 7 年			令和 8 年
			6 月	9 月	11 月	2 月
pH	No. 1	6.0～7.9	7.4	7.0	7.1	7.1
	No. 2	6.2～7.7	7.2	6.8	6.8	7.0
生物化学的酸素要求量 (mg/L)	No. 1	<0.5～62	3.0	1.5	1.2	1.6
	No. 2	<0.5～10	5.4	3.5	2.7	4.0
浮遊物質量 (mg/L)	No. 1	1～80	3	4	8	2
	No. 2	<1～110	2	7	11	3
溶存酸素量 (mg/L)	No. 1	5.8～13.9	10.6	9.1	10.8	13.9
	No. 2	5.3～12.5	8.0	6.8	9.7	9.2

(2) 魚類の調査結果

清水川において、定期的（原則 3 回/年（春・夏・秋））に生息魚類の調査を行っています（図 85）。調査は、図 83 に示す St. 1、St. 2、St. 3 の 3 箇所で行っています。

調査の結果、全期においてそれぞれ 6 科 8 種の魚類を確認しました。また、重要種としては、表 16 に示すとおり、キタスナヤツメ、エゾウグイ、エゾホトケドジョウ、サクラマス（ヤマメ）、エゾトミヨ、ハナカジカの 6 種が確認されました。各魚類の出現状況については、過年度と比較して、大きな変化は認められていません。



(a) 採捕状況



(b) 採捕魚類の一例

図 85 生息魚類調査（令和 7 年 9 月 1 日）

表 16 確認された重要種（魚類）

目	科	種	選定根拠 ^注						
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ヤツメウナギ	ヤツメウナギ	キタスナヤツメ			VU		希		
コイ	コイ	エゾウグイ				N			
	フクドジョウ	エゾホトケドジョウ			EN	En			
サケ	サケ	サクラマス（ヤマメ）			NT	N	減		
トゲウオ	トゲウオ	エゾトミヨ			VU	Nt			○
カサゴ	カジカ	ハナカジカ				N			

注：重要種の選定根拠

- ①「文化財保護法」（昭和 25 年法律第 214 号）に基づく天然記念物および特別天然記念物
- ②「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」（平成 4 年法律第 75 号）に基づく野生動物種
- ③「環境省レッドリスト 2020【汽水・淡水魚類】」（環境省 2020 年）の記載種
EN：絶滅危惧 IB 類、VU：絶滅危惧 II 類、NT：準絶滅危惧
- ④「北海道レッドリスト【魚類編（淡水・汽水）】改訂版（2018 年）」（北海道平成 30 年）の記載種
En：絶滅危惧 IB 類、Nt：準絶滅危惧、N：留意
- ⑤「日本の希少な野生水生生物に関するデータブック（水産庁編）」（日本水産資源保護協会 1998 年）の記載種
希：希少種 減：減少種
- ⑥「緑の国勢調査—自然環境保全調査報告書—」（環境庁昭和 51 年）に基づく選定種
- ⑦「第 2 回自然環境保全基礎調査報告書（緑の国勢調査）」（環境庁昭和 57 年）に基づく選定種
○：調査対象種

9. 安全確保の取り組み

安全確保の取り組みとして、直営作業、請負作業、共同研究作業においては、作業の計画段階からリスクアセスメントを実施し、安全対策の妥当性の確認や改善に努めました。

その他、所長や保安・建設課などによる定期的な安全パトロールを実施し、現場の安全確認や改善などに努めました（図 86）。

さらに、新規配属者や請負作業・共同研究作業の責任者などに対して安全教育を実施した他、全国安全週間などの機会を捉えて、従業員のみならず請負企業も含めた安全行事に積極的に取り組むなど、安全意識の向上に努めました（図 87）。



図 86 安全パトロールの状況（令和 7 年 5 月 20 日）



図 87 安全行事の実施（安全大会：令和 7 年 7 月 1 日）

10. 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部を対象とした研究は、国内外の大学・研究機関との共同研究や研究協力をはじめ、広く関連する専門家の参加を得て進めています。令和 7 年度に実施した主な研究協力は以下のとおりです。

10.1 国内機関との研究協力

北海道科学大学

立坑掘削時における壁面の地質観察については、作業の省力化と取得データの品質のばらつきの抑制を図る手法の整備を目的として、これまで検討を進めてきました。具体的には、深層学習による画像処理手法のひとつである pix2pix⁽⁸⁸⁾ を用い、幌延深地層研究センターの地下施設において深度 380 m までの立坑掘削時に取得した割れ目スケッチと立坑壁面画像（以下、坑壁画像）を学習データとして、坑壁画像から割れ目スケッチを生成する方法を検討してきました。その結果、トレースが長く、人の目でも容易に判読可能な割れ目に限られるが、生成した割れ目スケッチ上でそのトレースを表現できる見通しが得られました。一方で、地質技術者が作成する割れ目スケッチと同等の精度で、すべての割れ目を表現するには至りませんでした。そこで、令和7年度は、三次元レーザスキャナによって取得した坑道壁面の形状データ（点群データ）の活用方法について検討しました。具体的には、点群データに基づいて立坑壁面の凹凸を表現した画像（以下、形状画像）を生成する方法を検討するとともに、これらの形状画像と対応する坑壁画像を学習データとして、深度 380 m 以浅を対象に、坑壁画像から形状画像を深層学習により生成する方法の検証に取り組んでいます。あわせて、深層学習とは別の方法として、点群データに基づいて割れ目トレース図を作成し、あわせて割れ目の走向・傾斜データを出力する手法についても検討しました。これらの検討は、令和 8 年度も引き続き進める予定です。

東京大学

微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発について共同研究を実施しました。非常にゆっくりとした地下水の移動を考える場合には割れ目

のみでなく健岩部の水みちとしての役割を把握することも重要になります。本研究では、岩石中において生きた微生物が存在する箇所は、わずかながらも地下水を介した物質移行が進行する場所であると考えられることに着目し、微生物を指標とした岩盤中の水みちの評価手法の開発に取り組んでいます。令和 7 年度は、深度 500 m の坑道で湧水が認められる地点で、亀裂を伴う稚内層の岩石試料を採取しました。これまでに地上から掘削されたボーリング孔の同深度のコア試料と同様に、亀裂の表面に微生物がバイオフィルムを形成していることが確認されました。亀裂面は平滑であり、坑道建設の応力開放により形成した亀裂に、微生物が新たに住み着いたことが分かりました。このように、地下深部の低透水性岩盤において微生物は亀裂に普遍的に生息するため、水みちを特定する上で重要な指標としての妥当性を示すことができました⁽⁸⁹⁾。

名古屋大学

炭酸カルシウムを主成分とするコンクリーション化[※]による、水みちとなる割れ目や透水性空隙の自己シーリングに関する研究を行いました。この研究は、新たに開発したカルシウムイオン (Ca^{2+}) を放出する樹脂（コンクリーション化剤）を岩盤中に充填し、コンクリーション化剤や坑道周辺に施工されたコンクリートから放出される Ca^{2+} と、地下水中の Ca^{2+} および重炭酸イオン (HCO_3^-) との反応により形成される炭酸カルシウム (CaCO_3) が、水みちとなる割れ目や透水性空隙を閉塞するプロセスについて調査・解析を行います。

令和 7 年度は、EDZ ならびに断層帯を対象とした原位置試験について、コンクリーション化剤を充填したボーリング孔の周辺岩盤における透水係数の測定を継続しました。その結果、周辺岩盤の透水係数は 10^{-7} m/s 程度であり、令和 6 年度までの測定結果と同程度であることを確認しました。

また、コンクリーション化剤にアルカリ性成分を放出する機能を持たせ、酸性を示す幌延の掘削土（ズリ）と混ぜ合わせることで、掘削土（ズリ）の中性化と炭酸カルシウムの形成によるシーリングを同時に達成する手法の開発にも取り組んでいます。令和 7 年度は、コンクリーション化剤と掘削土（ズリ）の混合物を地下施設内の既存のボーリング孔内に設置し、地下水の pH や鉱物変化などを観測する原位置試験を行い、過年度の試験よりも大きい

10 cm 程度の凝集物が形成されることを確認しました。さらに、過年度に実施してきた複数の原位置試験の結果を総合科学雑誌の記事にて紹介しました⁽⁹⁰⁾。

京都大学

掘削損傷割れ目の開きにくさやずれにくさを検討することを目的として、岩盤に樹脂を注入して割れ目を固定した上で、岩石試料を採取して可視化します。樹脂が浸透した割れ目を直接観察するとともに、その画像を解析することにより、割れ目の開口幅を計測します。また、割れ目がずれた量（せん断変位）に関しては、もともと割れ目がなかった状態（密着していた状態）からどの程度ずれたかを、画像解析により計測します⁽⁹¹⁾。令和 7 年度は、500m 試験坑道 8（図 6 参照）においてボーリング孔を掘削し、ボーリングコアの観察などにより掘削損傷割れ目の発達状況を確認しました。その後、当該ボーリング孔に樹脂を注入する試験を実施しました。

幌延地圏環境研究所

両機関の試験設備を活用した研究協力として、堆積岩の地下深部の微生物の生態系の把握および地下施設の建設に伴う微生物生態系への影響などの調査を目的に、これまでに地下施設を利用して微生物に関するデータを取得してきました。令和 7 年 7 月 11 日には、「北海道・道北の陸域深部地下環境から水素を発生する新種の微生物を発見」と題して、共同研究の成果をプレス発表しました⁽⁹²⁾。令和 7 年 12 月 4 日に開催した第 33 回研究交流会では、原子力機構から 500m 調査坑道での研究の現状に関して、幌延地圏環境研究所から地下深部の微生物を活用した研究トピックに関して研究発表が行われ、今後の地下施設を活用した研究協力などについて議論しました。また、翌日の令和 7 年 12 月 5 日には、地下施設で実施されている原位置試験の研究状況を把握するために、研究交流会参加者の地下施設の視察を行いました。

電力中央研究所

地下環境に存在する微生物の中には、鉄の酸化や還元反応を行う種が確認されており、これらの微生物は人工バリアのひとつであるオーバーパック（候補材料：炭素鋼）の腐食に影響を及ぼす可能性があります。そこで、微

生物腐食の影響を定量的に評価するために、地下施設で掘削したボーリング孔を利用して、地下環境における緩衝材中の微生物活性や金属腐食影響を把握する試験を行います。令和 7 年度も引き続き、250m 調査坑道に掘削したボーリング孔内に設置した圧縮ベントナイトおよび炭素鋼片の試験体の一部を回収し、炭素鋼片の腐食やベントナイト中の微生物特性について分析を行いました。その結果、3 か年経過した試験体においても、ベントナイトの密度が高い条件では、炭素鋼片の腐食や微生物の活動が抑制されていることが確認できました。今後も引き続き、詳細な分析を行い、ベントナイト中の微生物活性や炭素鋼の腐食挙動について検討を行います。

また、地下施設の掘削時に、周辺地質環境の初期状態と掘削に伴う変化を観測し、地下施設の建設に関わる影響領域の空間分布とその経時変化、変化のプロセスを把握・評価するための技術は、地下構造物の短期・長期的な安全性を検討する上で重要であることから、その技術の高度化を図ることを目的として、継続的に共同研究を実施しています。

岩盤中の割れ目の発生やその分布の広がり測定する手法のひとつとして、岩盤中で発生し地下水に溶け込んだラドン^{*}の濃度を測定する手法があります。この手法の堆積岩への適用性を確認することを目的として、令和 7 年度は、ラドン濃度の原位置計測に向けて、幌延の岩石を用いた室内試験を実施しました。その結果、原位置でラドンを測定する際には、孔内湿度の観測も必要であることや、ラドン濃度計測により水みちの変化を捉えるために必要な岩盤水分量の変化を評価できる可能性を示しました。

原子力規制庁（原子力機構 安全研究センターが実施する共同研究への協力）

地層処分において、地下水中での核種移行は、地下水中の移流・拡散と共に地下の岩盤や地下水中のコロイドなどと反応しながら輸送されと考えられます。コロイドは核種移行を促進させる可能性があると言われていたため、地下深部におけるコロイドの存在形態と核種の吸着挙動を理解することは重要です。令和 7 年度は、地下施設の 350m 調査坑道内の既存のボーリング孔を用いて、コロイド分析用の地下水試料を採水し、コロイド分析に必要な試料調整の手順の検討を進めました。

大林組

東立坑の深度 370 m 付近の EDZ の長期的なモニタリングのために、光ファイバー式の AE センサーを用いて、岩盤の微小変形や間隙水圧の変化を計測しています。令和 7 年度に得られたデータを解析したところ、取得した AE は、EDZ 割れ目の中を地下水やガスが移動したことに起因するものがほとんどであったことから、EDZ の広がりとは確認されませんでした。

安藤・間、川崎地質

本研究では、岩盤の初期応力と変形係数を同時に評価することが可能なボアホールジャッキ試験により、EDZ を含む岩盤の力学特性を評価することを目的としています。令和 7 年度は、様々な方向で変形係数を測定できるように改良した試験装置を用いて原位置試験を実施しました。また、方向によって変形係数が異なることを考慮した数値解析を実施した結果、EDZ 近傍の岩盤の変形係数の変化を、従来の方法よりも精度よく捉えることができました。このことから、ボアホールジャッキ試験によって精度よく岩盤の状態を把握できることが確認できました。

10.2 国外機関との研究協力

幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project : HIP)

幌延国際共同プロジェクト (HIP) は、先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発成果の最大化を目的に、国内外の機関で協力しながら、研究開発を進めるものです。

HIP では、令和 10 年度末までを限度として、令和 2 年度以降の必須の課題のうち、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わる以下の 3 つのタスクを設定しました。

タスク A : 物質移行試験

タスク B : 処分技術の実証と体系化

タスク C : 実規模の人工バリアシステム解体試験

令和 7 年度からフェーズ 2 の研究開発を開始しました。具体的には、管理委員会やタスク会合において参加機関との議論を行い、原位置試験、室内試験や解析の実施計画を検討するとともに、研究の進捗状況について確認、議

論しました。また、令和 7 年 12 月に合同タスク会合を幌延深地層研究センターで開催し、主にタスク A とタスク B において各深度で実施している原位置試験の進捗状況について確認しました(図 88)。さらに、得られた成果を国内外の学会や学術雑誌で発表するとともに、フェーズ 1 の成果を報告書として取りまとめ、OECD/NEA のホームページにて令和 7 年 11 月に公開しました^(7, 93)。



図 88 合同タスク会合での現地確認の様子(500m 調査坑道)

以下に各タスクの実施項目ごとに令和 7 年度の成果の概要を示すとともに、各タスクの参加機関を表 17 に示します。

タスク A：物質移行試験

○計画検討

現地の地質や地下水などの条件を踏まえながら、複数の条件下で原位置試験を実施するための計画検討を行いました。特に、声問層が分布する 250m 調査坑道は、地下水中にガスが多く含まれ、岩盤が軟らかく変形しやすいなど、試験の実施が難しい環境にあります。こうした制約条件を前提とした試験計画の検討を進めました。あわせて、今後予定されている物質移行試験や、試験実施場所付近での試料採取計画についても議論しました。

○試験の実施

声問層のように、試験の実施が難しい条件の下で、揚水区間、注水流量、

揚水流量、トレーサーの注入時間といった試験条件を変えながら、トレーサー試験を実施しました。なお、試験は、フェーズ 1 で実施した試験区間である 0.7 m よりも大きな区間である 1.7 m で実施しました。結果として、揚水区間におけるトレーサー濃度の時間変化を適切に捉えることができ、試験を成立させることができました。このように、今後の試験計画の検討において有用な知見が得られました。

○解析による検証

250m 調査坑道で実施したトレーサー試験により得られたデータをより適切に再現することを目的として、解析手法の改良を進めました。これまで主に用いてきた一次元モデルでは、観測されたトレーサーの挙動を十分に表現できない場合があったことから、データの補正や入力条件の見直し、二次元モデルの導入などを行いました。

タスク B：処分技術の実証と体系化

○計画検討

処分坑道や処分孔を配置するための調査・評価・施工技術に関して、令和7年度に得られた原位置試験結果について、タスク会合や現地での確認を通じて参加機関間で進捗を共有し、今後の試験ピット掘削に向けた計画について議論しました。また、350m 試験坑道 6（図 5 参照）で実施予定の埋め戻し実証試験に関して、事前の地上での試験により施工手順および施工品質の確認を行い、その結果を参加機関間で共有するとともに、当該結果を踏まえた原位置試験計画への反映について議論しました。

○試験の実施

500m 調査坑道掘削前の先行ボーリング調査結果に基づき、断層の分布を予測した結果、坑道に出現する断層の位置を捉えられることや、断層の走向・傾斜や分布頻度の傾向を把握できる可能性があることが分かりました。500m 試験坑道 8・9（図 6 参照）掘削時の湧水量については、坑道掘削前後において全坑道からの湧水量に大きな変化が認められなかったことから、当該坑道掘削に伴う湧水量は少なかったと推定しました。また、500m 試験坑道 9 で透水試験や弾性波トモグラフィ調査用のボーリング孔を掘削しましたが、得られたボーリングコアの観察や、ボーリング孔内にカメラを挿入した割れ目分

布の観察結果から、EDZ が壁面から約 3.1 m まで広がることを確認しました。さらに、350m 試験坑道 6（図 5 参照）で実施する坑道埋め戻しと止水プラグ設置に先立ち、埋め戻し材・止水プラグの施工手順や施工品質を地上試験で確認しました。

○解析による検証

500m 調査坑道掘削時の EDZ の広がりについて、複数の参加機関による予測を行ったところ、350m 調査坑道と比較して EDZ の広がりが大きくなる結果が得られました。また、湧水量については、水みちの連結性が低いことから、掘削後における湧水量の低下が大きくなることが予測されました。これらの予測結果は、上記の原位置で得られた EDZ の広がりおよび湧水量に関するデータと整合的であり、おおむね妥当な予測ができていたことを確認しました。

タスク C：実規模の人工バリアシステム解体試験

○計画検討

人工バリア性能確認試験のデータ取得を継続するとともに、解体試験で取得すべき情報、試料採取方法や分析方法などについて、参加機関の要望を集約し、計画の具体化を図った上で解体試験計画を策定しました。

○解析による検証

原位置試験を対象とした連成解析の実施に向けて、過去に実施した室内試験結果を使用した解析を各機関で連携して進めました。

表 17 HIP 参加機関（令和 8 年 3 月末現在）

参加機関名	タスク A			タスク B			タスク C		
	計画 検討	試験	解析 検証	計画 検討	試験	解析 検証	計画 検討	試験	解析 検証
オーストラリア放射性廃棄物機関 (ARWA、オーストラリア) *13	○	—	—	○	—	—	○	—	—
連邦放射性廃棄物機関 (BGE、ドイツ) *14	○	—	—	○	—	—	○	—	—
英国地質調査所 (BGS、英国) *15	○	—	—	○	○	—	○	—	—
電力中央研究所 (CRIEPI、日本)	○	○	—	—			○	—	○
韓国原子力研究所 (KAERI、韓国)	○	—	○	○	○	○	○	—	○
韓国原子力環境公団 (KORAD、韓国) *16	(調整中)								
原子力発電環境整備機構 (NUMO、日本)	○	—	○	○	—	○	○	—	○
原子力テクノロジー国営会社 (RATEN、ルーマニア) *17	○	○	—	—			—		
原子力環境整備促進・資金管理センター*18 (RMMC、日本)	—	○	○	—			○	—	—
国営放射性廃棄物会社 (SERAW、ブルガリア) *19	○	—	—	○	—	—	○	—	—
日本原子力研究開発機構 (JAEA、日本)	○	○	○	○	○	○	○	○	○

*13：オーストラリア放射性廃棄物機関：ARWA (Australian Radioactive Waste Agency) は、オーストラリアにおける放射性廃棄物処分の実施主体です。オーストラリアでは原子力発電を行っておらず、医療施設や産業施設から出される放射性廃棄物を対象としています。

*14：連邦放射性廃棄物機関：BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH) は、ドイツの連邦政府所有の組織であり、連邦政府の委託により放射性廃棄物の最終処分事業の実施主体として、高レベル放射性廃棄物処分場に係る三段階のサイト選定に加えて、建設および操業を行います。この他に、コンラッドおよびモルスレーベンの非発熱性放射性廃棄物処分場やゴアレーベン鉱山に係る業務も実施しています。

*15：英国地質調査所：BGS (British Geological Survey) は、英国政府の研究機関で、公共の利益に焦点を当てつつ、地球上で生じる様々なプロセスなどに関する地球科学的研究に加え、客観的な地球科学的データや情報の社会への提供などの活動を行っています。

*16：韓国原子力環境公団：KORAD (Korea Radioactive Waste Agency) は、韓国におけるすべての放射性廃棄物の管理事業の実施を担う唯一の管理公団です。2024年12月に、江原道太白市をジェネリックな地下研究施設サイトの立地自治体として決定し、今後建設を開始する予定です。

*17：原子力テクノロジー国営会社：RATEN (Regia Autonomă Tehnologii pentru Energia Nucleară) は、ルーマニアの原子力エネルギー分野の研究開発の調整および原子力エネルギー計画の科学的・技術的支援を行う国有企業の研究機関で、放射性廃棄物管理を含む原子力分野の幅広い研究開発を行っています。

*18：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターは、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構 (NUMO) を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。

*19：国営放射性廃棄物会社：SERAW (State Enterprise Radioactive Waste) は、放射性廃棄物管理施設の運営や廃止措置を含む、放射性廃棄物の処理、保管、処分に関わるブルガリアの国立機関です。

11. 用語集

【英数字】

AE

Acoustic Emission（アコースティックエミッション）の略で、岩盤の内部で微小破壊が生じる際に出る音を意味しており、この破壊音の測定が、構造物や岩盤の破壊現象の監視や岩盤にかかっている力の測定に応用されています。

BTV

BTV（ボアホールテレビユーアー）は、ボーリング孔内にテレビカメラを内装した装置を挿入し、連続的に撮影することで、孔内の状況を視覚的に確認する方法です。

Mj

地震の規模を示すマグニチュードを示す記号です。マグニチュードは、計算に使用するデータや計算手法などに応じて多くの種類があり、国際的に統一された規格はありません。気象庁では、気象庁マグニチュード（Mj）とモーメントマグニチュード（Mw）を主に用いていますが、本報告書では過去に発生した地震との比較が可能な気象庁マグニチュードを使用しています。

【あ行】

埋め戻し材

処分場において、廃棄体を定置した後の処分坑道、アクセス坑道や連絡坑道を埋め戻す際に使用する材料です。埋め戻した後の坑道内が選択的な水みちとならないように、埋め戻し材に要求される性能のひとつとして、透水性が低いことが挙げられます。処分場の建設では、坑道の掘削に伴い、大量の掘削土が発生することから、埋め戻し材には掘削土を利用することが合理的であり、透水性を低くするために掘削土にベントナイトを混合して、埋め戻し材とすることが検討されています。

ウラン

黄緑色の蛍光染料で、フルオレセインナトリウムとも言います。化学式は $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ で表されます。トレーサー試薬としての利用の他、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

オーバーパック

人工バリアの構成要素のひとつです。ガラス固化体を包み込み、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力からガラス固化体を保護する容器のことを言います。候補材料は炭素鋼などの金属です。

【か行】

回収方法

地層処分において、処分坑道に放射性廃棄物を埋設した後においても、何らかの理由でその搬出が望まれた場合にそれを搬出することを回収と言います。その回収方法として、機械的方法や高水压などを利用して埋め戻し材を除去する方法が想定されています。

化石海水

地層の堆積時に地層中に取り込まれた海水が地質学的な長い時間をかけて変質した古海水のことです。化石海水が存在する場所は、地下水の流れが非常に遅いと考えられ、物質の移動が非常に遅く地層処分に適した場所と考えられます。

緩衝材

人工バリアの構成要素のひとつです。オーバーパックを包み込むように設置され、地下水の浸入と放射性物質の溶出・移動を抑制する機能が期待されています。さらに岩盤の変形を物理的に緩衝するクッションのはたらきや、地下水の水質の変化を化学的に緩衝して抑制するはたらきを持ちます。候補材料はベントナイトなどの粘土材料です。

緩衝材流出・侵入現象

緩衝材が地下水の流れによって流される現象を流出現象、緩衝材に含まれる粘土が膨潤することで割

れ目などの隙間に侵入する現象を侵入現象と呼びます。

乾燥密度

乾燥密度とは、ある体積に含まれる土粒子のみの質量を考えた場合の密度のことを言います。

亀裂ネットワークモデル

岩盤中の地下水の流れや物質の移動現象を評価するために、対象とする領域に亀裂を統計的に配置したモデルです。

屈曲度

物質が岩石などの媒体中を移動する場合、間隙中を屈曲しながら進むことになります。屈曲度は、この実際に移動した経路の長さ（経路長）と最短の経路の長さ（媒体の厚さに相当）の比で表され、経路の複雑さを表す指標として取扱われています。

掘削損傷領域

本計画書における掘削損傷領域とは、岩盤が掘削により損傷した領域のことで、坑道の周りに形成されます。具体的には、地下空洞掘削時の周辺岩盤に生じる応力集中の影響で坑道周辺岩盤に割れ目が発達することにより、岩盤の変形特性が変化したり透水性が増大したりします。また、空気の侵入により地下水の酸化などの化学的な変化が生じます。なお、掘削損傷領域を含むより広い領域で坑道への地下水排水などにより地下水の水圧や岩盤に作用する力が変化する領域のことを掘削擾乱領域と言い、掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、変化した地下水圧などが元の状態に回復すると想定されます。掘削損傷領域および掘削擾乱領域は、広義に掘削影響領域と表現されます。

グラウト

水みちとなる岩盤の割れ目の中にセメントなどの固化材を圧入し、充填することにより、湧水を止める技術のことです。

原位置試験

地下で採取された試料を用いて行う室内試験に対して、実際の地下環境下で行う試験のことです。

減熱過程

人工バリアを構成するガラス固化体は、ピットに設置した当初は発熱しており、時間の経過とともに発熱量が低下し、温度が下がっていきます。このような温度が下がっていく段階を、本報告書では減熱過程と言います。発熱している段階（加熱過程）では、緩衝材の外側は地下水の浸潤に伴って飽和度が上昇しますが、緩衝材の内側は発熱の影響により飽和度は低下します。減熱過程に入り、温度が下がれば地下水が緩衝材に入りやすくなり、時間の経過とともに緩衝材の内側まで地下水が浸潤します。このような熱と地下水の浸潤という同時並行的に生じる現象を原位置試験で再現するために、人工バリア性能確認試験では加熱過程、減熱過程の試験を行っています。

高精度傾斜計

通常の傾斜計が測定できるのは3,600分の1°程度であるのに対し、約1億分の6°の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。微小な地殻変動を捉えるために用います。

坑道スケール

実際の処分場では、地下深くに多数の坑道が掘削されます。これらの坑道の配置を検討するために必要な評価範囲（数百 m 程度）のことを指します。

コロイド

大きさが1 nm～1 μmの粒子が水などの液体中に浮遊し、容易に沈まない状態を指します。コロイドが地層中の放射性核種の移行に影響を及ぼすことが分かっています。

コンクリーション化

地層中の砂や泥の粒子の間に鉱物が急速に析出・沈殿して隙間を充填し、コンクリートのような硬い状態になることです。

【さ行】

酸化還元電位

地下水の酸化還元状態を表します。酸化還元電位が低い地下水ほど含まれる酸素が少なく還元状態であることを表します。

支保

地下空間の安定を保つために設ける、ロックボルト、鉄骨、コンクリートの壁などの構造物です。

遮水シート

有害物質を含む汚水が地中に漏出して、周辺の地下水を汚染することを防ぐために、掘削土（ズリ）置場の側面や底面に敷く、遮水能力のあるシートのことです。遮水材料としては合成樹脂系、合成ゴム系およびアスファルト系の物質が用いられます。

地山強度比

トンネルの設計に当たって、トンネル周辺岩盤のゆるみ（EDZ）の広がりや、吹付けコンクリートなどの支保にかかる力、トンネルの変形のしやすさを事前に評価するための指標です。地山強度比は、岩盤の強さを表す指標（岩盤の一軸圧縮強度）と、坑道を掘削する深さに応じて地山に作用する圧力（自重による鉛直応力）との比として表されます。

地山強度比＝（岩盤の一軸圧縮強度）／（坑道掘削深度に作用する鉛直応力）

この値が小さいほど、掘削に伴う岩盤のゆるみ（EDZ）が広がりやすくなり、トンネルの安定性を確保するための支保の重要性が高まる傾向があります。

重水

水分子を構成する2つの水素原子が2倍の質量数を持つ二重水素（D:重水素）で置換されている水を重水といい、D₂Oと表現します。また、片方の水素原子がDに置換されている場合、HDOと表現します。通常、濃度が薄い場合には、HDOになっています。

集水リング

立坑内に湧水する地下水を回収・採取するために、立坑壁面に30 m～40 mごとに設置されている設備です。

処分概念オプション

幌延深地層研究計画における処分概念オプションとは、地下深くの岩盤中に高レベル放射性廃棄物を埋設するという、地層処分の概念を実現するための色々な方法のことです。例えば、廃棄体や人工バリアを縦置きにするのか横置きにするのか、人工バリアのひとつである緩衝材をブロックで積み上げるのか現場で固めるのか、といった処分方法、埋め戻し方法の違いおよび搬送定置・回収方法などについての選択肢のことを指します。

人工バリア

ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる地層処分システムの構成要素のことで、高レベル放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁として、人工的に形成するものです。

水圧擾乱試験

注水により断層内の水圧を上昇させ、断層の剛性（変形しにくさ）や強度（破壊しにくさ）を低下させることにより、断層をずらす試験のことを指します。

水理学的連結性

地下水の流れを評価する上で、断層や割れ目の中の隙間のつながり具合を水理学的連結性と言います。岩盤の中には、大小さまざまな断層や割れ目が存在し、これらは独立して存在したり、他とつながって存在したりします。岩盤の中での地下水の流路は、断層や割れ目内の隙間が主なものですが、その隙間が二次元的あるいは三次元的に広くつながっている場合には、水理学的連結性が高いと表現します。一方、断層や割れ目内の隙間が一部でしかつながっていない場合は、水理学的連結性が低いと表現します。

せん断

岩盤などの内部の任意の面に対して平行方向に力が作用してずれが生じることを言います。

【た行】

堆積岩の緩衝能力

本報告書では、地殻変動（地震など）の影響により擾乱を受けた断層や割れ目の透水特性が、その岩盤の力学状態に応じて一定の範囲に留まろうとする能力、あるいは時間経過とともに元の状態に戻ろうとする能力のことを指します。

ダイポール試験

ダイポール試験とは、トレーサー試験の一種で2つのボーリング孔を利用し、トレーサーの投入／回収を行い、各種のパラメータを取得する試験です。

ダクティリティインデックス (DI)

岩石の強度・応力状態を示すために新たに定義した指標であり、この値が高いほど、岩石は見かけ上、軟らかくなります。岩盤にかかる平均有効応力（岩石に実際にかかる平均的な負荷応力）をその健岩部の引張強度（岩石の引張破壊に対する強度）で除した値で定義されます。

多連接坑道

互いに近接して平行に掘削される複数の坑道のことです。処分場では廃棄体を設置するための多数の坑道を平行に掘削する坑道配置が考えられています。

弾性波

岩盤の中を伝わる振動のことを指します。地震など自然に発生する振動や岩盤を叩くなどして人工的に与えた振動が伝わる速度を弾性波速度と呼び、これは岩盤の状態によって変化します。様々な場所での弾性波速度の分布を調べることで坑道周辺の岩盤の状態を知ることができます。

動水勾配

地下水の動きを決める要因のひとつで、地下水が流れる方向の水圧の差で表されます。地下水は、水圧の高い方から低い方へ移動します。動水勾配が大きいほど地下水が流れやすくなります。

透水性

岩盤の水の通しやすさのことです。透水性を表す指標として透水係数が用いられます。透水係数は、以下の式で定義され、単位は長さ/時間 (m/s) となります。

$$Q=KAh/l$$

ここで、Q：流量 (m³/s)、k：透水係数 (m/s)、A：断面積 (m²)、h：水圧差 (m)、l：長さ (m) を表します。

透水量係数

透水量係数はある厚さをもった地層や亀裂が、単位幅当たりどの程度の量の水を流すことができるのかを表す指標です。以下の式で定義され、単位は面積/時間 (m²/s) になります。

$$T=k \cdot d$$

ここで、T：透水量係数 (m²/s)、k：透水係数 (m/s)、d：地層や亀裂の厚さ (m) を表します。

トモグラフィ

トモグラフィ調査は、調査対象範囲内の物性値（速度、比抵抗など）の分布を断面として可視化する物理探査手法です。

トリチウム水

水分子 (H₂O) を構成する水素原子が通常の三倍の質量数を持つ三重水素 (T:トリチウム) で置換されている水をトリチウム水といいます。トリチウムは低いエネルギーのベータ線を放出するので、このベータ線を測定することにより水の動きを見ることができ、様々な研究に使用されています。

トレーサー

本報告書では、地下水中に溶存する物質が地層中を移行する際の経路や収着・拡散といった挙動などを調査するために、地下水に添加する物質をトレーサーと呼びます。幌延深地層研究計画では、トレーサーとしてウラニン（蛍光染料）やヨウ素などを用いています。これらは、いずれも放射性物質ではありません。なお、幌延深地層研究計画では放射性のトレーサーを用いた試験を行うことはありません。

【な行】

熱－水理－力学－化学連成現象

地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤で、廃棄体からの熱、地下水の流れ、緩衝材が膨潤することによって発生する応力や岩盤に作用する応力、地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化などが複合的に生じる現象です。

【は行】

破過曲線

本報告書において、破過曲線とは、トレーサの濃度の時間変化を示した図のことを言います。

ピットスケール

廃棄体および人工バリアを垂直に設置する堅置き方式の場合には、処分坑道に多数のピット（処分孔）が掘削されます。これらのピットの配置を検討するために必要な評価範囲（数十 m 程度）のことを指します。

比抵抗

岩石の電気の流れにくさを表すもので、一般的には、粘土やシルト岩などは比抵抗が低く（電気が流れやすく）、頁岩や泥岩などは特に低い比抵抗を示す傾向があります。また、砂・礫混じりの地層は比抵抗が高い（電気が流れにくい）傾向があります。

プラグ

ベントナイトなどを原料とする緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐ、あるいは掘削影響を受けた領域の地下水の移動を抑制するために、処分坑道の両端やその周辺に設けられる構造物です。なお、本計画書で記載のある「止水プラグ」は、掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するためにベントナイトを混ぜた材料で構築するものを指します。

ベントナイト

モンモリロナイトを主成分とする粘土の一種です。地層処分では、緩衝材や処分坑道の埋め戻し材の原料として用いられます。ベントナイトの膨潤により緩衝材や埋め戻し材の透水性が低下したり、ベントナイトに放射性核種が吸着されたりして、放射性核種の移行を抑制する効果があります。

膨潤

ベントナイトは水と接触すると水を吸って膨らむ性質があり、この現象を本報告書では膨潤と言います。膨潤しようとするベントナイトを膨らまないように拘束した時に発生する圧力を膨潤圧と言います。

飽和度

土や岩盤などの間隙に含まれる水の体積と間隙の体積との比を表す値です。

幌延国際共同プロジェクト（HIP : Horonobe International Project）

アジア地域の地層処分に関わる国際研究開発拠点として、幌延深地層研究センターの地下施設を利用した研究開発を国内外の機関で協力しながら推進し、我が国のみならず参加国における先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発の成果を最大化することを目的としています。
(https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project_hip.html)

【ま行】

水みちのつながり方の次元

地下水の通り道となる岩盤中の割れ目同士のつながり具合を表す指標です。割れ目同士が互いによくつながり、三次元的なネットワークを形成する場合は三次元、割れ目同士のつながりが限定的で、一次的なチャンネルを形成する場合は一次元となります。

【や行】

有効透水係数

岩盤の透水性は亀裂の有無により局所的に大きく変化しますが、有効透水係数はある着目する領域における平均的な透水性を表す指標です。

有効透水量係数

透水量係数は地層の違いや亀裂の有無などにより局所的に大きく変化するため、実際に水が流れる地層や亀裂の厚さに対する透水量係数を、有効透水量係数と呼びます。

【ら行】

ラドン

ラドン (Rn、原子番号86) は、地中に含まれるウランが放射線を出しながら変化していく過程で生じる元素です。

令和2年度以降の必須の課題

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」では、以下の3つを研究課題として取り組むこととしており、これらを「令和2年度以降の必須の課題」と呼んでいます。

- ・実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
- ・処分概念オプションの実証
- ・地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

参考資料

令和2年度以降の研究工程

1.1 人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R7の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・ 実際の地質環境下における処分孔設置方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時から浸潤時・減熱時を模擬した現象）に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認（人工バリアの解体試験および緩衝材の飽和度の確認を含む）、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 ・ これらをとおして、廃棄体埋設後において、廃棄体周辺で起こる現象の理解を深め、安全評価において前提としている環境条件が達成されることを確認するとともに、その予測技術を確認することで、人工バリアの設計に反映する	③④ 熱-水-応力-化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時から浸潤時・減熱時(③)から浸潤時・減熱時(④)を模擬した現象)の評価手法（モデル化・解析手法）の確立	④浸潤時・減熱時のデータを含め、ガラス固化体設置以降の加熱・注水時から浸潤時・減熱時を全て模擬したデータに基づく熱-水-応力-化学連成現象のモデルの高度化、及び浸潤時の実際の飽和度などの確認（解体試験による）	④-1 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（浸潤時・減熱時）を取得、連成モデルの適用性確認	R7は実施しない	④-1 浸潤時・減熱時のデータ取得・連成モデルの適用性確認									
					緩衝材中の温度の低下や緩衝材内側の間隙圧の低下を確認					発熱がおさまった条件での試験を継続、評価モデルを検証するためのデータ取得				
					令和4年度までに得られる成果 減熱過程における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱-水理-力学連成解析モデルの適用性の確認					令和9年度までに得られる成果 解体試験における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱-水理-力学連成解析モデルの適用性の確認				
					国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
			国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化	R7は実施しない	解析モデルや解析条件を設定					各解析コードによる解析結果の違いを把握				
					人工バリア性能確認試験を对象とした比較検証に移行					解析コード間の比較検証による評価結果を整理				
					令和5年度までに得られる成果 ○各国の解析コード間の比較検証を通じた解析コードの有効性の確認									
					④-2 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する					④-2 人工バリアの解体作業、緩衝材の飽和度の確認				
			④-2 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する	R7は実施しない	試験施工では、埋め戻し材、プラグ、試験孔、人工バリアを設置、注水開始					試験施工の解体を行い、緩衝材の解体方法や模擬オーバーパッキングの取り出し手法を確認				
					令和4年度までに得られる成果 ○人工バリアの解体作業の方針及び施工手順・方法の決定					令和9年度までに得られる成果 ○人工バリア周辺における連成現象の実データの取得				

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「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」）に統合して実施する。

「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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

1.2 物質移行試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2 以降の課題	R2 以降の実施内容	R7 の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の 5 年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2) 処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・幌延地域に分布する泥岩は断層等の構造的な割れ目が分布することが知られているため、岩盤基質部（＝健岩部）（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさな割れ目も含む）を介した移流・分散が主要な移行経路や形態として考えられる ・有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に影響を及ぼすことが考えられる ・したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行経路や形態と物質移行に与える要因（有機物・微生物・コロイド等）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（＝健岩部）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 ・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 ・あわせて、有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握することが重要	基質部（＝健岩部）を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等）の評価手法の検証 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の検証 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等）の評価手法の検証 中での割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等）の評価手法の検証 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握	掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立	確立した試験手法を用いて掘削損傷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で移動する影響が限定的であることを確認する。また、物質移行評価手法を高度化するため以下を実施 立したトレーサー試験手法を用いた掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	R7 は実施しない	④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施								
					掘削損傷領域の水理・物質移行特性を評価するためのデータを取得	掘削損傷領域の物質移行特性を評価するためのデータを拡充	掘削損傷領域の物質移行特性を評価するためのデータを解釈	掘削損傷領域の物質移行特性を評価するためのデータを適確に確認	掘削損傷領域の物質移行特性を評価するためのデータを整備	令和 6 年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非収着性/収着性トレーサー）の取得 ○EDZ におけるモデル化/解析評価手法の提示				
					⑤ 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	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施								
					室内試験データ（地下水中の有機物のサイズ分布等）を取得	原位置試験の準備として試験孔の掘削・装置を設置、基礎データを取得	室内試験データ（コロイドへの元素収着）を取得、原位置トレーサー試験に着手	原位置試験で地下水中に添加したトレーサーの濃度変化を確認	長期の原位置試験、有機物の分配係数の取得、室内・原位置試験結果の整理	令和 6 年度までに得られる成果 ○室内試験データの拡充 ○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の提示				
					⑥ ブロックスケール（数 m～100m 規模）における遅延性能評価手法の整備	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施								
					原位置試験の準備作業として、物質移行試験装置を設置	稚内層深部の断層の物質移行経路の連続性についてデータ取得	声間層の物質移行特性を得るためのボーリング掘削に着手	声間層の関連データを得るための層深部において、解析手法の適用性を確認	ブロックスケールにおける物質移行特性の評価手法を整備	令和 6 年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非収着性/収着性トレーサー）の取得 ○幌延を事例としたブロックスケールの評価手法の提示				

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「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」）に統合して実施する。

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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.1 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

2.1.1 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

目的・背景・必要性・意義	課題	R2 以降の課題	R2 以降の実施内容	R7 の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の 5 年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2) 処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・ 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）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・回収技術及び閉鎖技術を実証する	① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）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 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 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確立	①②③ 操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証	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。 また、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把握する。 ① 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） ② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証	R7 は実施しない	① 搬送定置・回収技術の実証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
				地下環境でのコンクリートの劣化に関する試験を開始	乾燥および湿潤条件下で約 1 年間定置したコンクリートの中中性化の程度の違いを確認	乾燥および湿潤条件下で約 2 年間定置したコンクリートの中中性化の程度の違いを確認	地下施設に実際に施工されている低アルカリ性吹付けコンクリートの物性・化学特性データを取得	R5 年度までに取得した定置コンクリートおよび吹付けコンクリートの物性・化学特性データの整理・取りまとめ	令和 6 年度までに得られる成果 ○実際の地下環境における支保部材の経年変化に係るデータ取得 ○坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関する事象の把握					
				② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施					
				閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討・室内試験、工学規模試験を実施	閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討・室内試験・原位試験を実施	閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討・室内試験・原位試験を実施	閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討・室内試験・原位試験を実施	解析検討・室内試験・原位試験の結果を整理し、適用した技術の有効性や技術的な課題を整理	令和 6 年度までに得られる成果 ○シーリングシステムの長期的性能評価に関する考え方の整理 ○緩衝材の膨潤挙動に影響を与える事象の整理 ○止水プラグの施工に関する重要技術の抽出 ○EDZ 調査技術の評価・高度化 ○坑道内からのボーリング孔に対するシーリング技術の整備・実証					
				③ 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よる品質保証体系の構築（(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認のうち、人工バリア性能確認試験とあわせて実施）					③ 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よる品質保証体系の構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施
					自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認	流量量による影響に着目した緩衝材の流出試験を実施	隙間へのケイ砂充填による緩衝材流出抑制の効果を確認	埋め戻し材の各工法に適用可能な材料範囲や施工品質に関するデータを取得	埋め戻し材の各工法に適用可能な材料範囲や施工品質に関するデータを取得・整理	令和 6 年度までに得られる成果 ○緩衝材の施工方法に関する技術オプションの実証 ○坑道閉鎖に関する技術オプションの実証				

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「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」）に統合して実施する。

「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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.1 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

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

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R7の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					—					他の研究課題を取り込んで体系化して取り組む課題として、後半の5年程度で実施				
・処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）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・回収技術及び閉鎖技術を実証する	① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）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 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 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確立	④ 廃棄体の設置方法等の実証試験を通じた、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	人工バリアの品質を踏まえて、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するため以下を実施 ④-1 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	ビット周辺の水みちの水利特性や物質の移行特性に関わる評価手法などの整理	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					令和10年度までに得られる成果 ○深度に応じた堆積岩の水利・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					④-1 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				
					声問層の水利・物質移行に関する情報取得					より長い離隔距離における物質移行に関する情報を取得				
										④-2 地下施設及び人工バリアの設計・評価技術の体系化				
					坑道周辺の掘削損傷領域の広がりと湧水状況の予測					掘削損傷領域の広がりと湧水状況を把握、原位置施工試験計画の具体化				
										④-3 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整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備				
					既存データに基づく湧水量、掘削損傷領域の発達等の評価					湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量の減少速度予測手法を整備				
					④-4 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10年度までに得られる成果 ○廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要なビ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					ビット周辺の割れ目の開きにくさ等の調査・評価手法を整理					掘削損傷領域の広がりなどの調査・評価手法を整理				

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「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」）に統合して実施する。

「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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.2 高温(100℃超)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R7の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・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、想定外の要因によって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	① 100℃超の高温での限界環境が人工バリアに与える影響と上限温度設定の考え方の整備、解析的な検討	① 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による緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法の開発	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するため以下を実施	R7は実施しない	①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・検討					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					海外での原位置試験の情報（試験条件、手法等）を入手					令和6年度までに得られる成果 ○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データの収集				
					先行研究事例の調査結果を踏まえた課題の抽出									
					調査事例に基づく課題の抽出、原位置試験の概念検討・計画策定									
					高温条件下での人工バリアの挙動に関する原位置試験を開始					モニタリング継続、試験体の分解、結果の取りまとめ				
					①-2 100℃超になった際にニアフィールド（人工バリアとその周辺岩盤の領域）において発生する現象の整理					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					シナリオの検討に着手（水分移動、物質移動特性）					令和6年度までに得られる成果 ○100℃超になった際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理				
					先行研究事例の調査（緩衝材の鉱物・性能変化）									
					100℃超での人工バリアの基本特性に係るシナリオ整理、ニアフィールドを対象とした熱解析					シナリオ整理、緩衝材の膨潤・浸潤挙動を確認するため試験の実施				
					シナリオ全体の膨潤・浸潤挙動を確認するための試験の実施					ひび割れが生じた緩衝材に対する塩水の膨潤、浸潤挙動の確認試験、結果の取りまとめ				
					①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					海外での原位置試験の情報（試験条件、手法等）を入手					令和6年度までに得られる成果 ○ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方の提示				
					海外での原位置試験の情報（試験開始時のデータ等）を入手									
					海外での原位置試験の情報（最高温度での加熱時のデータ等）を入手					海外での原位置試験の情報（加熱に伴う水分量変化のデータ等）を入手				
					海外での原位置試験の情報（加熱に伴う水分量変化のデータ等）を入手					温度履歴の不確かさを考慮した上限温度の見取りまとめ				

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。

「2.1.2 坑道スケール～ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R7の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
・岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものは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・応力状態を計測でき、かつマッピング（空間的な分布図を示すこと）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	①地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力を表現するパラメータ（指標）の提案 ②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証	② 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	断層の幅が数十 cm の断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を実証するために、以下の検討や試験を実施する ②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験）	R7は実施しない	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					より大型の断層を対象とした水圧擾乱試験を実施し、データを取得					令和6年度までに得られる成果 ○ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得				
					②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる平均応力を引張強度で割った値）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整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					割れ目の水理学的連結性の領域区分に遷移領域を追加					令和6年度までに得られる成果 ○DIを用いた透水性評価手法の高度化				
			②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備	R7は実施しない	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					より大型の断層を対象とした水圧擾乱試験を実施し、データを取得					令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備				
					断層の活動性（力学的な安定性）評価に係る既存情報を取得									

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「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」）に統合して実施する。

「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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R7の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
地下水の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	③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・解析・評価する手法の確立 ④ 三次元分布を調査・解析・評価する手法の確立	③④ 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化	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ため以下を実施		前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
			③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証	R7は実施しない	③ 地下水の流れが非常に遅い領域の調査・評価技術の検証	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
					化石海水領域を把握するための物理探査を実施し、比抵抗分布を推定	電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の妥当性を確認するためのボーリング調査を実施	R3に掘削したボーリング孔の延長による水質などのデータ追加とR2に推定した化石海水分布の妥当性確認	R4までの成果の整理と、地球化学的な観点も含めた方法論の検討	これまでの成果の取りまとめ	令和6年度までに得られる成果 ○化石海水領域の調査・評価技術の整備・高度化				
			④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証	R7は実施しない	④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証	化石海水分布の把握に必要なボーリングの位置・本数等を検討	物理探査とボーリング調査のデータの組み合わせにより化石海水分布を推定する方法の検討	地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布推定に係る一連の手法を整理	R4までの成果に基づく化石海水の三次元分布を調査・評価する一連の方法論の検討	これまでの成果の取りまとめ	令和6年度までに得られる成果 ○化石海水の三次元分布に係る調査・評価技術の整備・高度化			
			④-2 広域スケール(十数km×十数km)を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（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	R7は実施しない	④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証	広域スケールの地下水流動に深さ・気候などが与える影響を整理	化石海水領域に影響する古水理地質学的変遷に関する因子を抽出する感度解析を実施	地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布推定に係る一連の手法を整理	これまでの成果に基づく、古水理地質学的変遷を考慮した広域スケールの解析手法の整理	広域スケールの地下水移行時間解析の結果を基にパラメータ設定の考え方を整理	令和6年度までに得られる成果 ○広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の整備			

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「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」）に統合して実施する。

「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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R7の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）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	① 人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材による掘削損傷領域（EDZ）のひび割れの自己治癒能力を評価する手法の確立 ② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証	② 地殻変動による人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）への自己治癒能力の実証	人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を実証するため以下の机上検討を実施		②-1 DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
			② 人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削損傷領域（EDZ）の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発 ✓ DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証	R7は実施しない										
			坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築	R7は実施しない	②-2 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「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」）に統合して実施する。

「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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

参考文献

- (1) 中山雅, 石井英一, 青柳和平, 早野明, 大野宏和, 尾崎裕介, 望月陽人, 武田匡樹, 木村駿: 幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階(第3段階: 令和2年度以降の必須の課題 2020-2024年度) 研究成果報告書, JAEA-Research 2025-016, 2026, 140p.
- (2) 石井英一, 安江健一: 幌延町における鮮新世~前期更新世のテフラ層序と FT 年代, JNC TN5400 2005-006, 2005, 52p.
- (3) Ishii, E., Sanada, H., Iwatsuki, T., Sugita, Y. and Kurikami, H.: Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks. *Engineering Geology*, vol.122, 2011, pp.215-221.
- (4) 石井英一, 安江健一, 大平寛人, 古澤明, 長谷川健, 中川光弘: 北海道北部, 大曲断層近傍の背斜成長の開始時期, 地質学雑誌, vol.114, no.6, 2008, pp.286-299.
- (5) 中山雅, 石井英一, 早野明, 青柳和平, 村上裕晃, 大野宏和, 武田匡樹, 望月陽人, 尾崎裕介, 木村駿, 出井俊太郎, 佐久間圭佑, 田村友識, 岩井亮, 加藤祥成, 藤枝大吾: 幌延深地層研究計画 令和7年度調査研究計画, JAEA-Review 2025-027, 2025, 80p.
- (6) 土木学会: 2016年制定トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説, 丸善出版, 2016, 419p.
- (7) OECD/NEA: NEA Horonobe International Project – HIP Interim report for Phase 1 (February 2023 – March 2025), NEA/NE(2025)20, 2025, 118p.
- (8) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
- (9) 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021, 807p.
- (10) 尾崎裕介, 石井英一: Landau-Lifshitz-Matheron の式による亀裂内の不均質性を考慮した有効透水量係数と亀裂ネットワークモデルを用いた有効透水係数の推定, 材料, vol.75, no.3, 2026, pp.201-208.
- (11) Ozaki, Y. and Ishii, E.: 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, 2024, geoenergy2023-056.
- (12) 中山雅, 石井英一, 青柳和平, 早野明, 村上裕晃, 大野宏和, 武田匡樹, 深津勇太, 望月陽人, 尾崎裕介, 木村駿, 出井俊太郎, 佐久間圭佑, 田村友識, 岩井亮, 加藤祥成, 藤枝大吾: 幌延深地層研究計画 令和6年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2025-042, 2025, 136p.
- (13) Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Engineering Geology*, vol.294, 2021, 106369.
- (14) Ishii, E., Ozaki, Y., Aoyagi, K. and Sugawara, K.: 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, 2025, pp.63-85.
- (15) Matheron G.: *Éléments pour une théorie des milieux poreux*, 1967, Masson et Cie, 168p.
- (16) Ishii, E.: Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: preliminary results, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.2220-2241.
- (17) Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y., and Kurikami, H.: The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: an example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Journal of Geophysical Research*, vol.116, 2011, B09206.
- (18) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope

- compositions of fracture and pore waters, *Hydrogeology Journal*, vol.30, 2022, pp.813-827.
- (19) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water, *Applied Geochemistry*, vol.155, 2023, 105737.
 - (20) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創: 幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔), *JNC TJ1400* 2002-010, 2002, 921p.
 - (21) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
 - (22) 宮川和也, 石井英一, 今井久, 平井哲, 大野宏和, 中田弘太郎, 長谷川琢磨: 亀裂性堆積岩を対象とした地下水流動解析における有効間隙率の与え方: 北海道幌延に分布する声間層と稚内層浅部の事例, *原子力バックエンド研究*, vol.31, no.2, 2024, pp.82-95.
 - (23) Ohno, H. and Ishii, E.: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100317.
 - (24) Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K.: Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: an analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100311.
 - (25) Mazurek, M.: Evolution of gas and aqueous fluid in low-permeability argillaceous rocks during uplift and exhumation of the central Swiss Alps, *Applied Geochemistry*, vol.15, 1999, pp.211-234.
 - (26) Mazurek, M., Lanyon, G. W., Vomvoris, S. and Gautschi, A.: Derivation and application of a geologic dataset for flow modeling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.35, 1998, pp.1-17.
 - (27) NAGRA: Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, *Nagra NTB* 96-01, 1997, 511p.
 - (28) Mazurek, M.: Geological, hydrogeological and hydrochemical field evidence for fault sealing in marls from Wellenberg, Switzerland, *Proceedings of the self-healing topical session of the IGSC working group on measurement and physical understanding of groundwater flow through argillaceous media (Clay Club)*, OECD/NEA, 2001, pp.31-34.
 - (29) Neuzil, C. E.: Interpreting fluid pressure anomalies in shallow intraplate argillaceous formations, *Geophysical Research Letters*, vol.42, 2015, pp.4801-4808.
 - (30) Vomvoris, S., Scholtis, A., Waber, H. N., Pearson, F. J., Voborny, O., Schindler, S. and Vinard, P.: Lessons learned from the use of hydrochemical data for the evaluation of groundwater-flow models developed within the Swiss L/ILW programme, *Use of hydrogeochemical information in testing groundwater flow models*, OECD/NEA, 1999, pp.107-117.
 - (31) Ishii, E.: Effects of flow dimension in faulted or fractured rock on natural reductions of inflow during excavation: a case study of the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan, *Hydrogeology Journal*, vol.31, 2023, pp.893-911.
 - (32) Ishii, E.: Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.100, 2017, pp.10-22.
 - (33) Arthur, R., Sasamoto, H., Alt-Epping, P. and Tachi, Y.: Paleoclimatic controls on natural tracer profiles in biogenic sedimentary formations of the Horonobe area, Japan, *Applied Geochemistry*, vol.155, 2023, 105707.
 - (34) Kurikami, H., Takeuchi, R. and Yabuuchi, S.: Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, *Physics and Chemistry of the Earth* vol.33, 2008, pp.S37-S44.
 - (35) Miyakawa, K., Nohara, T., Tokiwa, T. and Yamazaki, M.: Seven-year history of vertical hydraulic diffusivity related to excavation around an underground facility, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.70, 2014, pp.332-342.
 - (36) Gutmanis, J. C., Lanyon, G. W., Wynn, T. J. and Watson, C. R.: Fluid flow in faults: a study

- of fault hydrogeology in Triassic sandstone and Ordovician volcanoclastic rocks at Sellafield, north-west England, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.159-175.
- (37) Medici, G., West, L. J., Mountney, N. P. and Welch, M.: Permeability of rock discontinuities and faults in the Triassic Sherwood Sandstone Group (UK): insights for management of fluvio-aeolian aquifers worldwide, *Hydrogeology Journal*, vol.27, 2019, pp.2835-2855.
- (38) Milodowski, A. E., Gillespie, M. R., Naden, J., Fortey, N. J., Shepherd, T. J., Pearce, J. M. and Metcalfe, R.: The petrology and paragenesis of fracture mineralization in the Sellafield area, west Cumbria, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.215-241.
- (39) Nirex: Sellafield geological and hydrogeological investigations: the derivation of freshwater and environmental heads, hydraulic conductivity and borehole chloride values with uncertainty limits for use in Nirex 97 groundwater modelling, Nirex report SA/97/065, 1997.
- (40) Streetly, M. J., Heathcote, J. A. and Degnan, P. J.: Estimation of vertical diffusivity from seasonal fluctuations in groundwater pressures in deep boreholes near Sellafield, NW England, *Geological Society Special Publication*, vol.263, 2006, pp.155-167.
- (41) Boisson, J.-Y., Bertrand, L., Heitz, J.-F. and Golvan, Y. M.-L.: In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France, *Hydrogeology Journal*, vol.9, 2001, pp.108-123.
- (42) Donzé, F.-V., Tsopela, A., Guglielmi, Y., Henry, P. and Gout, C.: Fluid migration in faulted shale rocks: channeling below active faulting threshold, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.27, 2023, pp.2587-2601.
- (43) Guglielmi, Y., Elsworth, D., Cappa, F., Henry, P., Gout, C., Dick, P. and Durand, J.: In situ observations on the coupling between hydraulic diffusivity and displacements during fault reactivation in shales, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.7729-7748.
- (44) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Cappa, F., De Barros, L., Rutqvist, J. and Birkholzer, J.: Field-scale fault reactivation experiments by fluid injection highlight aseismic leakage in caprock analogs: implications for CO₂ sequestration, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol.111, 2021, 103471.
- (45) Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P. and Gout, C.: Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France), *Journal of Structural Geology*, vol.83, 2016, pp.73-84.
- (46) OECD/NEA: Clay club catalogue of characteristics of argillaceous rocks: 2022 update, NEA No. 7249, 2022, 242p.
- (47) Savoye, S., Cabrera, J. and Matray, J.-M.: Different hydraulic properties of single fractures in argillaceous medium: the case of the IRSN Tournemire site (France), *Proceedings of the IAH Conference of Groundwaters in Fractured Rocks*, 2003, pp.383-384.
- (48) Su, X., Nguyen, S., Haghighat, E., Pietruszczak, S., Labrie, D., Barnichon, J.-D. and Abdi, H.: Characterizing the mechanical behaviour of the Tournemire argillite, *Geological Society, London, Special Publications*, vol.443, 2017, pp.97-113.
- (49) Savoye, S., Michelot, J.-L., Bensenouci, F., Matray, J.-M. and Cabrera, J.: Transfers through argillaceous rocks over large space and time scales: Insights given by water stable isotopes, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.33, 2008, pp.S67-S74.
- (50) Tremosa, J., Gonçalves, J. and Matray, J.-M.: Natural conditions for more limited osmotic abnormal fluid pressures in sedimentary basins, *Water Resources Research*, vol.48, 2012, W04530.
- (51) Gautschi, A.: Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence, *Grundwasser*, vol.22, 2017, pp.221-233.

- (52) Giger, S. and Marschall, P.: Geomechanical properties, rock models and in-situ stress conditions for Opalinus Clay in Northern Switzerland, Nagra NAB 14-01, 2014, 86p.
- (53) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Rutqvist, J., Cappa, F., Jeanne, P. and Birkholzer, J.: Estimating perturbed stress from 3-D borehole displacements induced by fluid injection in fractured or faulted shales, *Geophysical Journal International*, vol.221, 2020, pp.1684-1695.
- (54) Jeanne, P., Guglielmi, Y., Rutqvist, J., Nussbaum, C. and Birkholzer, J.: Permeability variations associated with fault reactivation in a claystone formation investigated by field experiments and numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.123, 2018, pp.1694-1710.
- (55) Gonçalves, J., Matray, J.-M. and Yu, C. J.: Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles, *Applied Clay Science*, vol.242, 2023, 107016.
- (56) Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Waber, H. N., Buschaert, S., De Cannière, P., De Craen, M., Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I. and Wouters, L.: Natural tracer profiles across argillaceous formations, *Applied Geochemistry*, vol.26, 2011, pp.1035-1064.
- (57) Yu, C., Matray, J.-M., Gonçalves, J., Jaeggi, D., Gräsle, W., Wieczorek, K., Vogt, T. and Sykes, E.: Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay (Switzerland), *Swiss Journal of Geosciences*, vol.110, 2017, pp.85-104.
- (58) Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K.: Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol.22, 1985, pp.121-140.
- (59) Ohno, H., Ishii, E. and Takeda, M.: Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, *Geoenergy*, vol.2, no.1, 2024, geoenergy2023-047.
- (60) Van Loon, L.R. and Mibus, J.: A modified version of Archie's law to estimate effective diffusion coefficients of radionuclides in argillaceous rocks and its application in safety analysis studies, *Applied Geochemistry*, vol.59, 2015, pp.85-94.
- (61) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業[JPF007597]ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2019.
- (62) Tachi, Y., Yotsuji, K., Seida, Y., Yui, M. Diffusion and sorption of Cs⁺, I⁻ and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta* vol.75, 2011, pp.6742-6759.
- (63) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999, 529p.
- (64) 武田匡樹, 石井英一: 原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.1, 2024, pp.3-10.
- (65) Aoyagi, K., Ozaki, Y., Tamura, T. and Ishii, E.: Transmissivity prediction of the Excavation Damaged Zone fracture around the gallery at 500 m at the Horonobe Underground Research Laboratory, *Proceedings of the 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application (CouFrac2024)*, 2024, 10p.
- (66) 望月陽人: 地表水および深部地下水におけるウランの動態と酸化還元環境, 陸水学雑誌, 印刷中.
- (67) Vinsot, A., Mettler, S., and Wechner, S.: In situ characterization of the Callovo-Oxfordian pore water composition. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol.33, 2008, pp.S75-S86.
- (68) Wersin, P., Leupin, O. X., Mettler, S., Gaucher, E. C., Mäder, U., De Cannière, P., Vinsot, A., Gäbler, H.E., Kunimaro, T. Kiho, K. and Eichinger, L.: Biogeochemical processes in a

- clay formation in situ experiment: Part A—Overview, experimental design and water data of an experiment in the Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. *Applied Geochemistry*, vol.26, no.6, 2011, pp.931-953.
- (69) 岩月輝希, 水野崇, 國丸貴紀, 天野由記, 松崎達二, 仙波毅: 地層処分事業に関わる地球化学分野の技術者が継承すべき知見のエキスパート化—文献調査から精密調査段階における地球化学解析手順について—, *原子力バックエンド研究*, vol.19, no.2, 2012, pp.51-64.
- (70) Svensk Kärnbränslehantering AB: Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report, PSAR version, SKB TR 21-01, 2022.
- (71) 石井英一, 福島龍朗: 新第三紀珪質岩における断層の解析事例, *応用地質*, vol.47, no.5, 2006, pp.280-291.
- (72) Ishii, E.: Preliminary assessment of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones by core logging, *Engineering Geology*, vol.221, 2017, pp.124-132.
- (73) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.52, no.2, 2019, pp.385-401.
- (74) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 日本原子力研究開発機構: 令和6年度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・操業技術確証試験報告書, 2025.
- (75) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和3年度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]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2022.
- (76) Sakuma, K., Ishii, E. and Murakami, H.: Predicting the long-term natural decay of inflow from faults or fractures encountered during excavation of deep underground tunnels using the flow dimension, *Environmental Earth Sciences*, vol.84, 2025, 663.
- (77) Mishra, S.: Methods for analyzing single-and multi-well hydraulic data. In: Vomvoris S, Freig B (eds) Grimsel test site: interpretation of crosshole hydraulic tests and a pilot fluid logging test for selected boreholes within the BK site. NAGRA technical report, NTB 91-09, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Wettingen, Switzerland, 1992, pp 8-27
- (78) 中山雅, 大野宏和: 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験—350m 調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し—, *JAEA-Research 2019-007*, 2019, 132p.
- (79) 青柳和平, 尾崎裕介, 大野宏和, 石井英一: 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), 2025, pp.269-274.
- (80) Aoyagi, K. and Ishii, E.: Evaluation of temporal changes in fracture transmissivity in an excavation damaged zone after backfilling a gallery excavated in mudstone, *Environmental Earth Sciences*, vol.83, no.98, 2024, s12665-023-11416-x.
- (81) Ishii, E.: Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: a case study from the Horonobe Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.159, 2022, 105229.
- (82) 佐久間圭佑, 石井英一, 青柳和平, 田村友識: スライド式パッカーを用いた孔内軸変位計測における室内校正実験方法の改善, *材料*, vol.75, no.3, 2026, pp.166-172.
- (83) 青柳和平, 津坂仁和, 窪田健二, 常盤哲也, 近藤桂二, 稲垣大介: 幌延深地層研究所の250m 調査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, vol.70, no.4, 2014, pp.412-423.
- (84) 青柳和平, 石井英一, 石田毅: 幌延深地層研究センターの350m 調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討, *Journal of MMIJ*, vol.133, no.2, 2017, pp.25-33.
- (85) Hata, K., Niunoya, S., Aoyagi, K. and Miyara, N.: Evaluation of excavation-damaged zones (EDZs) in Horonobe Underground Research Laboratory (URL), *Journal of Rock*

- Mechanics and Geotechnical Engineering, vol.16, no.2, 2024, pp.365-378.
- (86) 青柳和平, 櫻井彰孝, 宮良信勝, 杉田裕: 幌延深地層研究センターの地下施設における坑道安定性の長期モニタリング, JAEA-Research 2020-004, 2020, 68p.
 - (87) 西谷友幸, 萩原健司, 藤枝大吾, 青柳和平: 深度 500m に向けた立坑掘削における覆工コンクリートの仕様検討および情報化施工ー幌延深地層研究計画地下研究施設整備 (第 III 期) 等事業ー, トンネルと地下, vol.57, no.2, 2026, pp.135-145.
 - (88) Isola, I., Zhu, J.-Y., Zhou, T. and Efros, A. A.: Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, Submitted on 21 Nov 2016 (v1), last revised 26 Nov 2018 (v3), <https://arxiv.org/abs/1611.07004>.
 - (89) 下野谷涼子, 鈴木庸平: 特集: 地底世界に生命の起源 北海道で発見 太古の地下生態系, 日経サイエンス, 2025 年 9 月号, 2025, 7p..
 - (90) 望月陽人, 吉田英一: 化石のタイムカプセルーコンクリーションに学ぶ地層処分の新技術, エネルギーレビュー, vol.543, 2026, pp.42-44.
 - (91) Aoyagi, K., Ishii, E., Chen Y. and Ishida, T: Resin-Injection Testing and Measurement of the Shear Displacement and Aperture of Excavation-Damaged-Zone Fractures: A Case Study of Mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.55, 2022, pp.1855-1869.
 - (92) 北海道・道北の陸域深部地下環境から水素を発生する新種の微生物を発見(*Gaoshiqia hydrogeniformans* Z1-71T 株の発見), https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/r7/press_0711.html (2026 年 6 月 12 日確認) .
 - (93) 「幌延国際共同プロジェクト」のフェーズ 1 報告書を公表ー高レベル放射性廃棄物地層処分技術の信頼性向上と人材育成への国際貢献ー, https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/r7/press_1107.html (2026 年 6 月 12 日確認)