幌延深地層研究計画
令和6年度調査研究成果報告

令和7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

3. 令和6年度の主な調査研究の成果 8

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認 16
4.1 人工バリア性能確認試験 16
4.2 物質移行試験 18

5. 処分概念オプションの実証 32
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 32
5.1.1 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 32
5.1.2 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 46
5.2 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 67

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 75
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 75
6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 75
6.1.2 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 80

7. 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 86

8. 地下施設の建設・維持管理 96

9. 環境調査 101
9.1 排水量および水質調査結果 101
9.2 掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果 111
9.3 研究所用地周辺の環境影響調査結果 112

10. 安全確保の取り組み 116

11. 開かれた研究 117
11.1 国内機関との研究協力 117
11.2 国外機関との研究協力 122

12. 用語集 127

参考資料 136

参考文献 145

付録 156

図目次

図 1　令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題 5
図 2　地下施設イメージ図 7
図 3　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 13
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　研究所用地における主な施設と観測装置の配置 14
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　研究所用地周辺の地質断面図（図 8 の A-A’ 断面） 15
図 10　緩衝材温度の出力点とその経時変化 16
図 11　人工バリア性能確認試験の概念図 17
図 12　人工バリア性能確認試験の計測データの一例 18
図 13　膨潤圧試験結果を活用した解析検討の一例 18
図 14　ブロックスケールにおける物質移行のイメージ 19
図 15　EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト 20
図 16　解析モデル 20
図 17　トレーサー試験の再現解析結果 21
図 18　縦方向分散長と評価スケールの関係性 21
図 19　本課題で対象とする各成分のサイズの関係性 23
図 20　室内試験における希土類元素添加後の 0.2 μm ろ過試料中の希土類元素濃度の時間変化 24
図 21　原位置試験の装置概念図および試験手順 25
図 22　原位置試験における希土類元素濃度の時間変化 26
図 23　トレーサー試験装置概要 29
図 24　トレーサー試験結果（循環区間のみ） 30
図 25　DI=2 の深度に対する相対深度と水みちのつながり方の次元の関係 31
図 26　ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の再現解析 31
図 27　坑道壁面からの HFSC 吹付けコンクリート採取の概念図 34
図 28　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の変質領域 34
図 29　坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の中性化深さと経過時間の関係 35
図 30　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料における坑道側（中性化領域）の SO_3 濃度分布（坑道表面：上側） 36
図 31　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の空隙径分布 36
図 32　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の岩盤側の元素濃度分布（坑道壁面：上側） 37
図 33　EDZ シーリング試験の試験領域内の透水係数の経時変化 40
図 34　吹付けコンクリートの影響を考慮しない既存の解析手法と改良手法による弾性波速度分布の推定結果 41
図 35　閉鎖技術に関する設計フロー（止水プラグ） 43
図 36　埋め戻し材ブロックの製作 44
図 37　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） 46
図 38　トレーサー試験のレイアウト 47

図 39　トレーサー試験結果 48
図 40　処分場の閉鎖段階のイメージ図 49
図 41　350m 試験坑道 3 と 500m 試験坑道 9 における EDZ の広がりの予測結果 50
図 42　500m 試験坑道 8・9 における原位置調査のイメージ図 51
図 43　先行ボーリング調査の様子 51
図 44　坑道の埋め戻し材と止水プラグの施工試験の概略図 52
図 45　透水試験の試験区間と透水係数分布 53
図 46　埋め戻し材の地上吹付け試験の様子 54
図 47　坑内湧水量の実測値と解析値の比較 56
図 48　350m 試験坑道 4 で掘削した試験孔周辺の EDZ の解析結果 57
図 49　弾性波トモグラフィ調査実施断面における EDZ の広がりの比較 58
図 50　試験孔周辺の EDZ 割れ目の発達とその開口幅が緩衝材の膨潤圧によって変化するイメージ 59
図 51　緩衝材の膨潤に伴う EDZ 割れ目の開きにくさの検討結果 59
図 52　割れ目の開口幅の最大値と DI の関係 62
図 53　緩衝材膨潤時のピット周辺に存在する割れ目の開口幅増大の概念図 63
図 54　割れ目の開口幅と割れ目に垂直にかかる力の関係 63
図 55　稚内層中の割れ目の代表的な透水性と DI の関係 66
図 56　緩衝材ブロックの積み上げ順 68
図 57　試験体の設置概略図 68
図 58　緩衝材中の温度の計測結果 69
図 59　試験体の解体状況 69
図 60　緩衝材ブロック内での含水比の分布 70
図 61　緩衝材ブロック内の乾燥密度と含水比の関係 70
図 62　緩衝材ブロック内の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係 71
図 63　緩衝材ブロック内の透水係数と乾燥密度の関係 71
図 64　試験体周辺および 350m 試験坑道 5 の解析モデル 72
図 65　熱電対による温度の計測結果と再現解析の一例 72
図 66　X 線 CT を活用した緩衝材試料の湿潤に関する室内試験結果（幌延地下水と同程度の塩濃度の水を浸潤させた場合） 73
図 67　水圧擾乱試験および透水試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係 76
図 68　水圧擾乱試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と断層のずれの関係 76
図 69　仮想の割れ目の透水試験により得られた割れ目内の水みちのつながり方の次元と割れ目内の主要な流路面積の割合の関係 77
図 70　割れ目内の隙間の開閉現象に関する理論的な計算により導出される割れ目内の主要な流路面積の割合と DI の関係 78
図 71　水圧擾乱試験を行った断層 79
図 72　ボーリング孔における岩石コアの間隙水の Cl^- 濃度と酸素同位体比（$\delta^{18}O$）の関係と解析結果 82
図 73　HDB-5 孔、HDB-6 孔および HDB-9 孔付近の地下水移行時間の深度分布 84
図 74　地下水移行時間の解析結果の例 84
図 75　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 7 年 3 月のデータ） 87
図 76　令和 6 年度の地下水の採取位置 88
図 77　令和 6 年度の水質分析結果の例 88
図 78　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 90
図 79　C08 における水圧モニタリング結果 90
図 80　地中変位計設置状況 91
図 81　鋼製支保工応力計設置例 91
図 82　計測器設置位置図 92
図 83　光ファイバー式地中変位計による計測結果 93
図 84　鋼製支保工応力計の計測結果 93
図 85　幌延深地層研究センター周辺で起きた地震の震央分布 94
図 86　幌延町（宮園）で観測された地震の震央図 95
図 87　地下施設での観測波形 95
図 88　西立坑の掘削状況 97
図 89　500m 調査坑道の掘削状況 97
図 90　地下施設の維持管理状況 98
図 91　二重遮水シートの構造 99
図 92　掘削土（ズリ）置場への掘削土（ズリ）搬入の様子 99
図 93　排水処理設備 100
図 94　排水系統と各水質調査の採水地点 101
図 95　地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点 103
図 96　天塩川の採水地点 105
図 97　天塩川での採水状況（令和 6 年 4 月 4 日） 105
図 98　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点 107
図 99　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況 107
図 100　清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点 109
図 101　清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況 109
図 102　環境調査実施場所 113
図 103　清水川からの採水状況（令和 6 年 9 月 3 日） 113
図 104　生息魚類調査（令和 6 年 6 月 3 日） 114
図 105　安全パトロールの状況（令和 6 年 4 月 25 日） 116
図 106　安全行事の実施（安全大会：令和 6 年 7 月 1 日） 116

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..... 6
表 2　使用したトレーサー..... 48
表 3　地上吹付け試験の条件..... 54
表 4　割れ目の閉塞/充填状況に応じた地層の分類と割れ目の開口幅の調査・評価手法.. 61
表 5　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..... 65
表 6　幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震..... 94
表 7　地下施設整備の実績工程表（令和 6 年度）..... 97
表 8　天塩川への排水量..... 102
表 9　地下施設からの排水に関わる水質調査結果..... 104
表 10　天塩川の水質調査結果..... 106
表 11　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果..... 108
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..... 110
表 13　浄化槽排水の調査結果..... 111
表 14　掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果..... 112
表 15　清水川の水質調査結果..... 114
表 16　確認された重要種（魚類）..... 115
表 17　HIP 参加機関（フェーズ 1）..... 126

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）と最終処分候補地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、12. 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原子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）。

⑴ 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。

⑵ 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、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。

⑶ 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。

なお、令和 6 年度は、東立坑および換気立坑の掘削を継続するとともに、西立坑および 500m 調査坑道の掘削を開始しました。立坑は各深度の調査坑道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*7（図 2)。500m 調査坑道では、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関する試験を行う計画です。

幌延深地層研究センターの地下施設で研究対象としている地層は、声問層（こえといそう）と稚内層であり（図 3)、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[1、2、3]。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[2]してできた鉱物を主成分としており、声問層より硬いのが特徴です。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[1、2、3]。

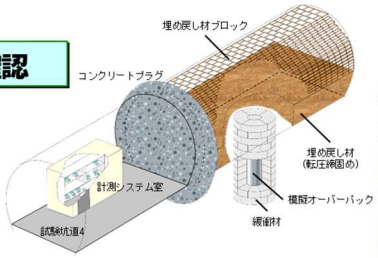
---

*7：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、地上まで避難することを想定しているためです。

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
- 物質移行試験

［概要］実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での特に減熱時における熱－水－応力－化学連成挙動や、物質移行現象などを計測・評価する技術の高度化を行う。



人工バリア性能確認試験の概要

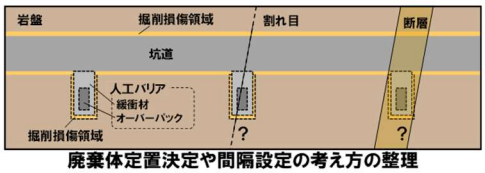
人工バリア性能確認試験の解体試験のイメージ

②処分概念オプションの実証

- 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
  - ・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
  - ・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
- 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

［概要］定置・回収技術や閉鎖技術も含めた、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。廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報を整理する。

閉鎖技術オプションの整理



廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

- 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
  - ・地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握
  - ・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
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

［概要］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を定量的に検証するとともに、化石海水※の三次元分布に係る調査・評価手法を高度化し、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。

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		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	浸潤時・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								
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 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					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 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理、等				
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ていきます。
坑道掘削の工程は今後の施工計画策定や工事進捗に応じて見直していきます。

- 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。

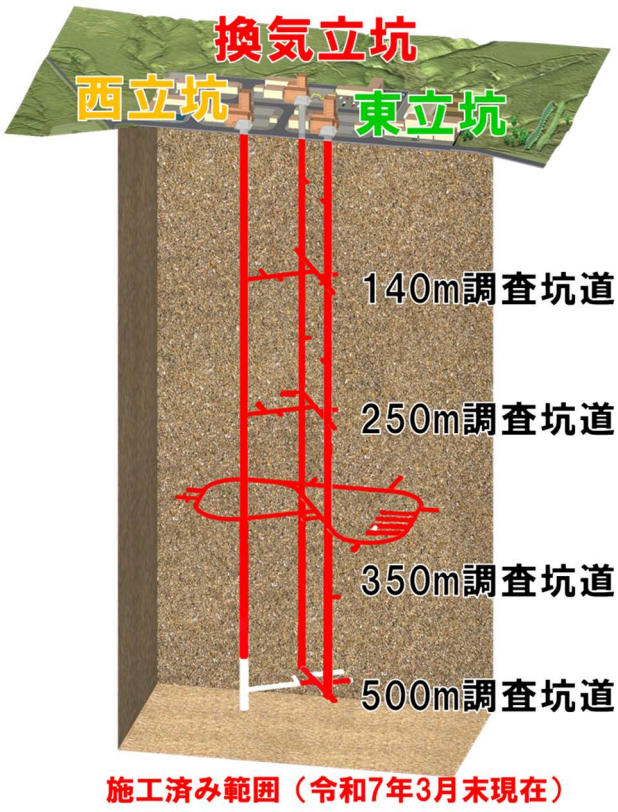


図 2　地下施設イメージ図

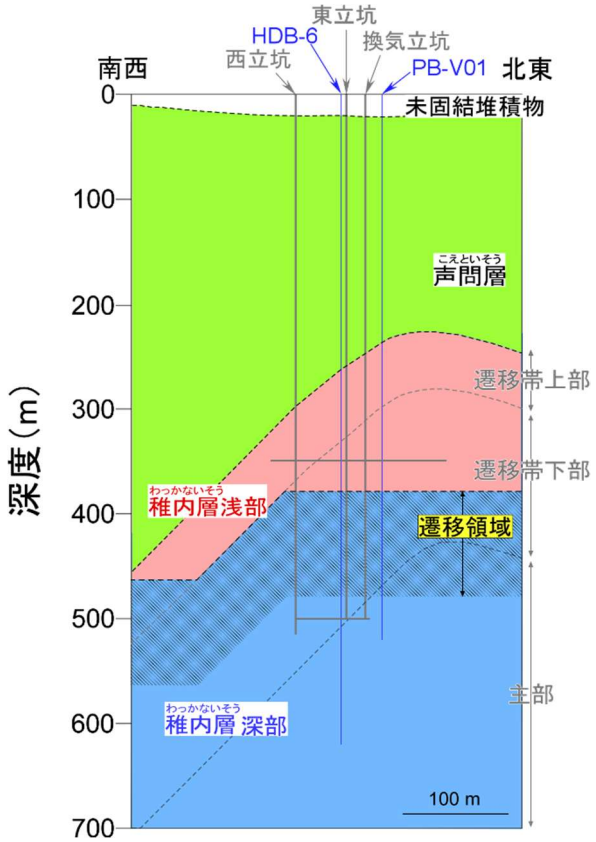


図 3　地下施設周辺の地質断面図

3. 令和 6 年度の主な調査研究の成果

令和 6 年度は、「幌延深地層研究計画　令和 6 年度調査研究計画」[4]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に重点的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に既設の自動計測機器でのデータ取得を継続しました。

物質移行試験では、過年度に実施した掘削損傷領域の割れ目を対象としたトレーサー試験結果の詳細解析を行い、一次元的に連続する移行経路を仮定した解析手法で評価することで、掘削損傷領域の割れ目中の物質の移行挙動を評価する上で重要なパラメータを適切に評価できました。有機物・微生物・コロイド※の影響を考慮した物質移行試験では、溶存有機物・微生物・コロイドと希土類元素※の相互作用について室内試験および原位置試験※の結果を整理し、地下深部の環境における希土類元素の挙動の変化を定量的に評価することができました。また、地下水中の有機物・微生物・コロイドの特性に関する知見やその評価手法を、幌延の地下水を事例としたこれまでの試験・分析により整備することができました。さらに、ブロックスケール（数 m～100 m 規模）を対象とした物質移行試験については、循環機能を備えた試験区間を設けた試験装置を用いることで、複数の経路を移動したトレーサーの挙動を評価することが可能となりました。また、稚内層深部のような断層や割れ目の水理学的連結性※が低い堆積岩では、一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続した移行経路を仮定することにより物質の移行経路を適切にモデル化できることが確認できました。

(2) 処分概念オプションの実証

人工バリアの搬送定置・回収技術の実証に関しては、安全な回収作業の実施に向けて処分坑道内の空間の安定性を評価するために、坑道の支保※に用

いられる低アルカリ性コンクリートについて、350m 調査坑道に定置した試験体および 350m 調査坑道の壁面から採取した吹付けコンクリートに対して実施してきた試験・分析の結果を取りまとめました。その結果、中性化※および地下水による溶出が生じた領域では空隙構造が粗くなるなどの変化が認められるものの、約 10 年間の坑道開放期間ではこの変化に伴う強度の低下は生じていないことなどが分かり、低アルカリ性コンクリート支保の長期的な物性変化の評価に必要な知見を得て、調査手法を整備することができました。また、坑道開放条件下におけるコンクリート支保に隣接する坑道周辺岩盤の長期変化の評価について、坑道掘削から坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析手法を整備することができました。

閉鎖技術の実証については、止水プラグの一部を模擬した粘土止水壁について、構築後 5 年が経過した時点においても、構築直後と同等に透水係数が低く保たれていることを確認しました。また、掘削損傷領域の調査技術の高度化について、弾性波※トモグラフィ※や比抵抗※トモグラフィの解析手法を止水プラグの施工試験を予定している試験坑道周辺の調査に適用し、周辺岩盤の調査手法としての適用性を検討しました。さらに、坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証で実施してきたベントナイト※ブロックの設置方法について、これまでの調査試験結果を整理し、技術的な課題などの観点で取りまとめました。

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※の構築については、埋め戻し材の施工方法として、施工効率の向上が期待できるスクリュー工法※などの要素試験を実施しました。それぞれの工法に適用可能な材料の配合の範囲や施工品質などに関するデータを取得し、各工法の施工方法としての見込みを示すことができました。また、竪置き処分孔に設置した緩衝材の流出挙動について、緩衝材の総流出量を評価できるベースモデルを整備するとともに、過年度に実施した原位置試験の結果を用いて、整備したベースモデルの適用性を確認することができました。

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ついて、以下の①～④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

250m 調査坑道から掘削されたボーリング孔において、声問層中で割れ目の

水理学的連結性が確認された試験区間を対象にトレーサー試験を実施し、良好な試験結果を取得することができました。

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

500m 調査坑道における原位置調査に先立ち、坑道周辺の掘削損傷領域の広がりや坑道・ピットへの湧水量を予測しました。その結果、掘削損傷領域の広がりは、深度 350 m と比べて大きく、また、湧水量の自然低下量は、深度 350 m と比べて、さらに大きいことが予測されました。350m 調査坑道における実規模スケールの坑道の埋め戻しと止水プラグの施工試験に先立ち、埋め戻し材や止水プラグの設計に必要となる坑道周辺の掘削損傷領域の広がりや水理特性について、ボーリング調査による割れ目の観察や透水試験による坑道周辺の透水係数の評価を行いました。また、吹付け工法による埋め戻し材の施工性を確認するために地上吹付け試験を実施して、施工後の乾燥密度※や施工性へ及ぼす影響を確認しました。

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

地下水圧や湧水量の観測データを用いて、地下施設からの定常的な湧水量に関する予測手法を整備するとともに、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を予察的に評価しました。また、350m 調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験で掘削した試験孔周辺の掘削損傷領域の広がりを解析と原位置試験により確認するとともに、緩衝材の膨潤※に伴って掘削損傷領域の割れ目が開きにくくなることを示しました。

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理

過年度に実施した試験結果などを用いて、ピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法の整理を進めました。

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に関しては、令和 5 年度に開始した原位置試験のモニタリングを継続するとともに、一組の試験体を解体しました。その結果、緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じるものの、緩衝材の鉱物組成などには顕著な変化は認められないことを確認しました。この原位置試験の結果、ならびにひび割れが

生じた緩衝材に対する浸潤挙動を確認する室内試験の結果などから、短期的に 100℃を超えた場合に緩衝材に生じる変質や、人工バリアおよびその周辺に発生する現象を評価する手法について整備することができました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性※に与える影響の把握手法の整備、およびダクティリティインデックス（DI）※を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、過年度に実施した断層の水圧擾乱試験※の結果の詳細な解析や、割れ目の水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元※と DI の関係を理解するための数値シミュレーションなどを行いました。その結果、稚内層に類似する地層の場合、地殻変動が地層の透水性に与える影響は、断層や割れ目の水理学的特性と DI との関係により評価できることが分かりました。また、水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性評価手法の整備を目的として、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の詳細な解析を行いました。その結果、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断※変形のしにくさを水圧擾乱試験により原位置で適切に評価できることが確認できました。

地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・評価する技術の高度化においては、広域スケール（十数 km×十数 km）の領域を対象に地下水移行時間を解析し、割れ目に沿って地下水が流れている場合の堆積岩の水理学的有効間隙率※の適切な与え方を示すことができました。そして、これまでに得られた成果に基づき、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取りまとめました。

(4) 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、地下施設での調査研究で使用するための調査技術や調査機器の開発を継続し、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。

⑸ 地下施設の建設・維持管理、環境調査

令和 6 年度は、東立坑および換気立坑の掘削が完了するとともに、西立坑および 500m 調査坑道の掘削を開始しました。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。

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ないことを確認しています。

⑹ 開かれた研究・成果の発信

令和 6 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、本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、北海道科学大学や東京大学などの大学、幌延地圏環境研究所[*8]および電力中央研究所[*9]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として、令和 4 年度に開始した幌延国際共同プロジェクト※（Horonobe International Project：以下、HIP）を継続しました。HIP では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、250m 調査坑道でトレーサー試験を実施するとともに、試験計画の検討や、過去に取得したデータに基づく数値解析を行いました。タスク B（処分技術の実証と体系化）では 500m 調査坑道の試験坑道の掘削前における地質状況や掘削損傷領域、湧水量の予測解析と原位置調査の計画検討を実施しました。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しました。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

---

*8：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。

*9：一般財団法人電力中央研究所：CRIEPI（Central Research Institute of Electric Power Industry）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。

論しました。さらに、令和 6 年 6 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、坑道の整備状況や試験の準備状況について確認しました。なお、HIP は令和 4 年度後半から令和 6 年度までをフェーズ 1、令和 7 年度から令和 10 年度までをフェーズ 2 に分けて実施することとしており、令和 6 年度はフェーズ 1 の研究成果を取りまとめました。フェーズ 1 には原子力機構を含めて国内外の 11 機関[*10]が参加しました。

研究開発業務の透明性・客観性を確保する観点から、研究計画から成果までの情報を国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開するとともに、ホームページや SNS などを活用した情報発信を継続しました[*11]。なお、令和 6 年度に公開した論文や学会発表の実績については、巻末に付録として掲載しています。

以上のように、令和 6 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 6 年度に地下施設で実施した主な調査研究の位置を図 4、図 5 および図 6 に示します。また、研究所用地内の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。

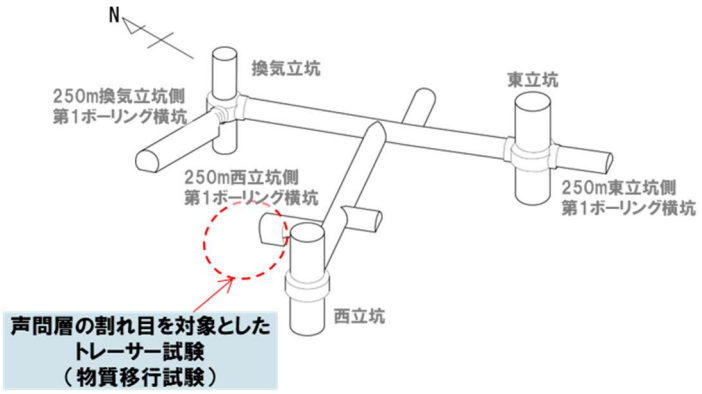


図 4　250m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

*10：原子力機構の他、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）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO、オーストラリア）、工業技術研究院（ITRI、台湾）、韓国原子力研究所（KAERI、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（RWMC、日本）、国営放射性廃棄物会社（SERAW、ブルガリア）です。

*11：幌延深地層研究センターホームページ；https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/、原子力機構X；https://x.com/jaea_japan

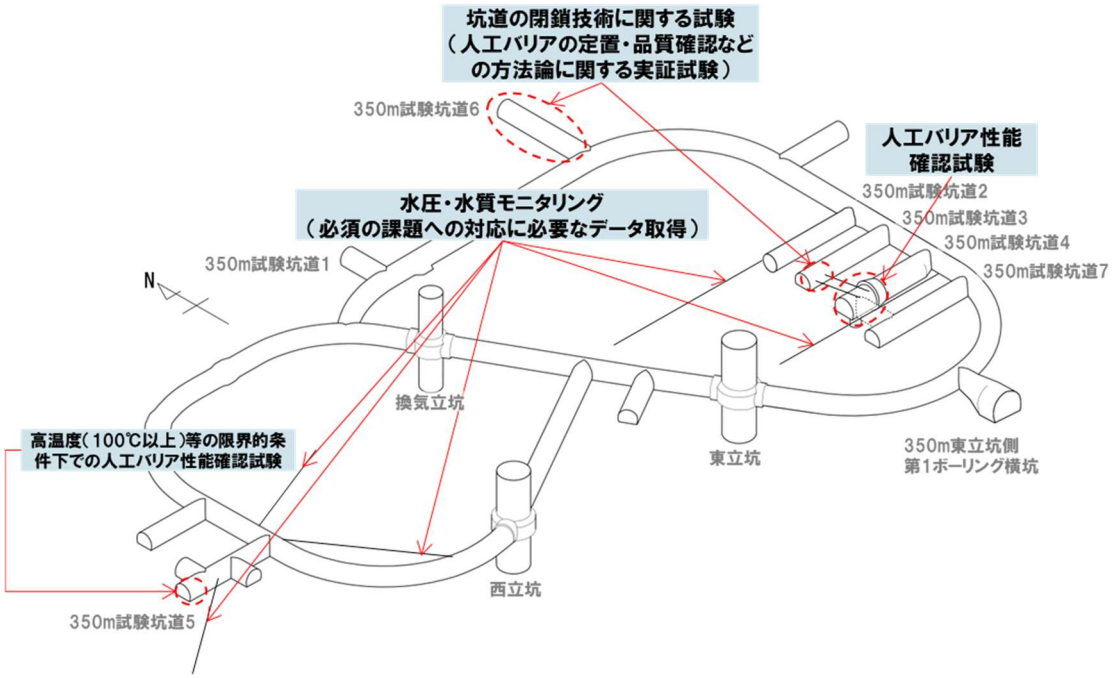


図 5　350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

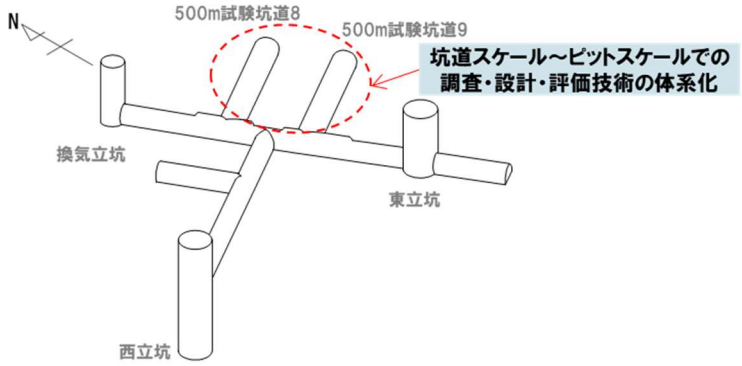


図 6　500m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

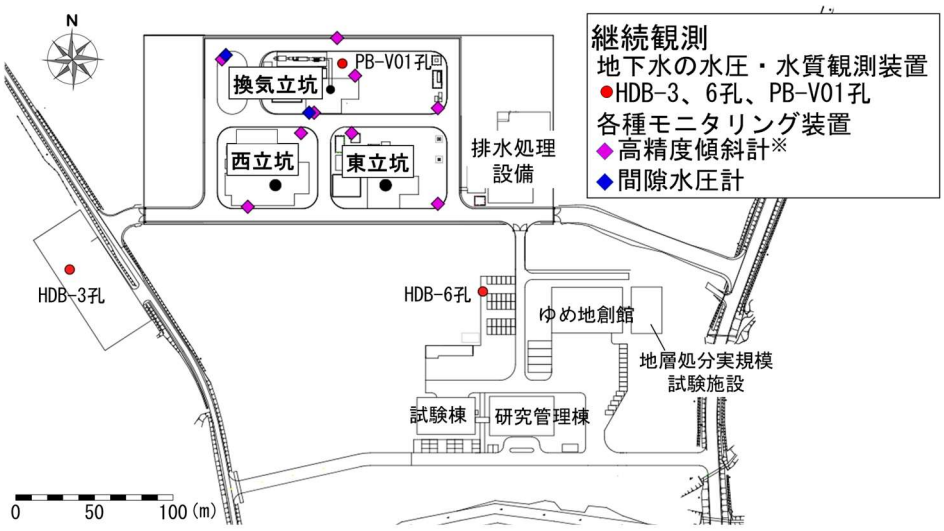
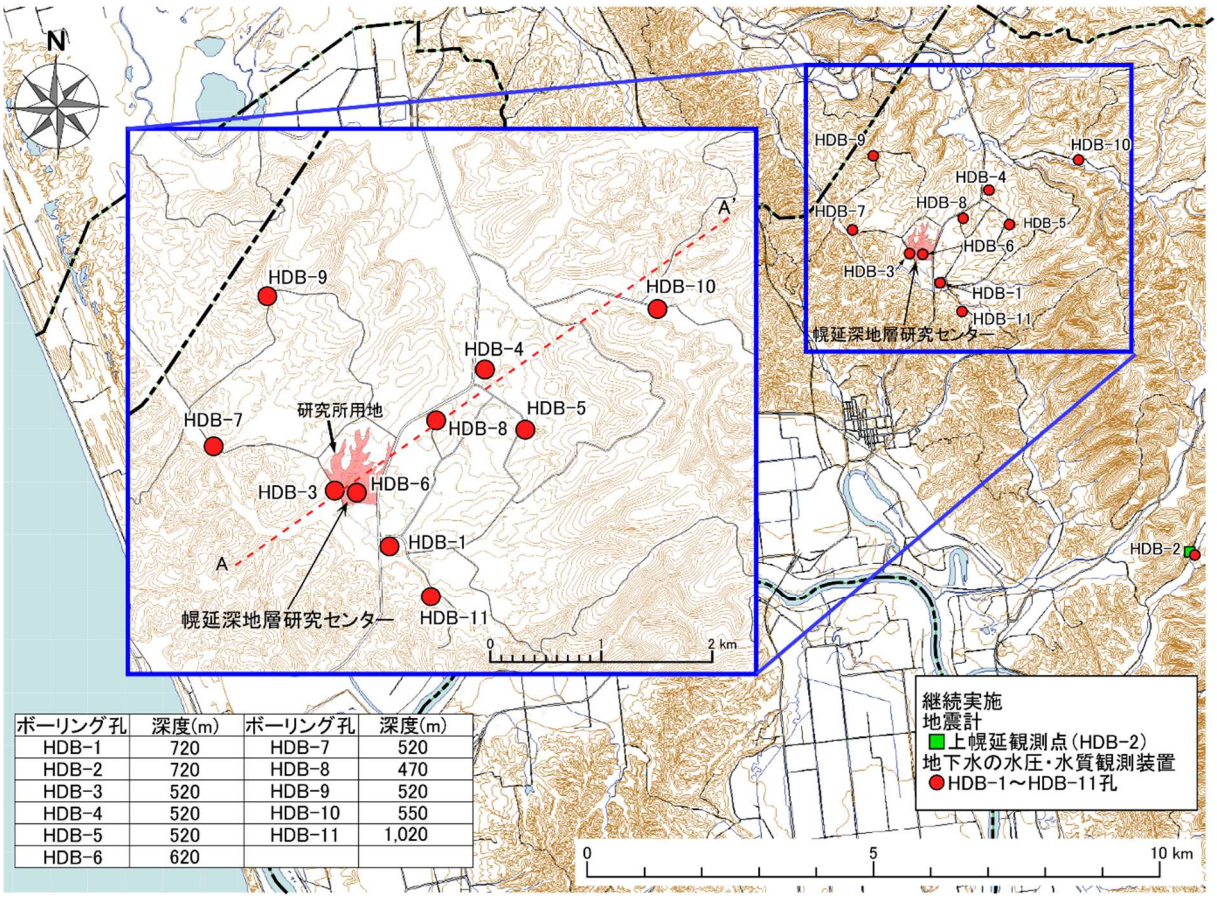


図 7　研究所用地における主な施設と観測装置の配置



ボーリング孔	深度(m)	ボーリング孔	深度(m)
HDB-1	720	HDB-7	520
HDB-2	720	HDB-8	470
HDB-3	520	HDB-9	520
HDB-4	520	HDB-10	550
HDB-5	520	HDB-11	1,020
HDB-6	620		

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

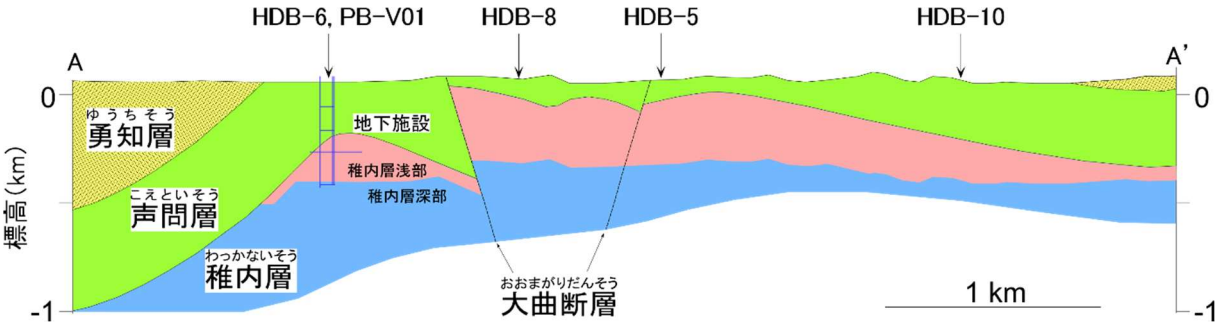


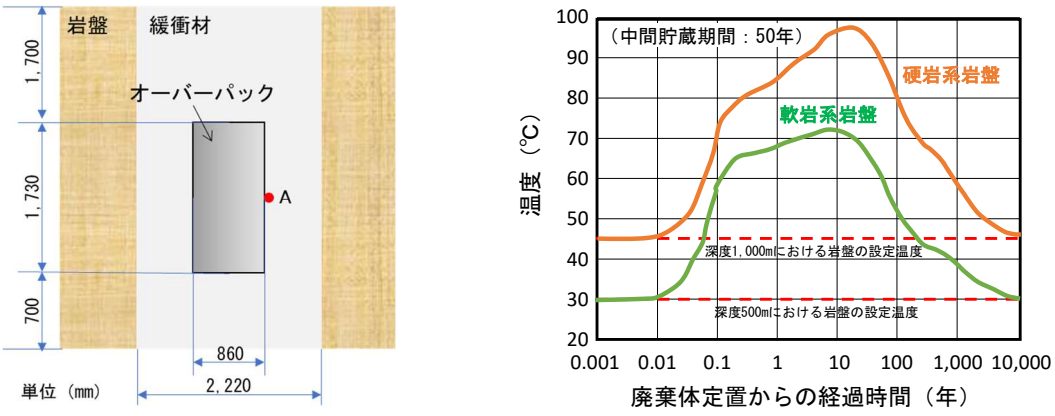
図 9　研究所用地周辺の地質断面図（図 8 の A-A’ 断面）

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ー水理ー力学ー化学連成現象※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、熱ー水理ー力学ー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、模擬オーバーパック※、緩衝材、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、熱ー水理ー力学ー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）[5]。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⑸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 6 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を図 12 に示します。緩衝材中の温度分布は周辺岩盤の温度（約 23℃）で一定であり、緩衝材内側の全応力は地下水の浸潤に伴い緩衝材が膨潤することで、緩やかに増加しており、令和 5 年度と同様の傾向が継続していることが確認できました。これらの計測データから、解体試験時の緩衝材や埋め戻し材の温度、水分量、応力などの分布を把握することができます。

また、幌延国際共同プロジェクト（HIP）のタスク C（実規模の人工バリアシステム解体試験）においても、解体試験や解体試験のデータを使用した解析検討に向けた準備を行いました。具体的には、参加機関の間で試験計画の具体化に向けた議論や、これまでの室内試験で得られた緩衝材中の浸潤挙動や膨潤挙動などのデータを活用した解析検討を実施しました。図 13 に緩衝材の膨潤圧試験結果を活用した解析検討の一例[6]を示します。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験の解析検討を実施する際に役立ちます。

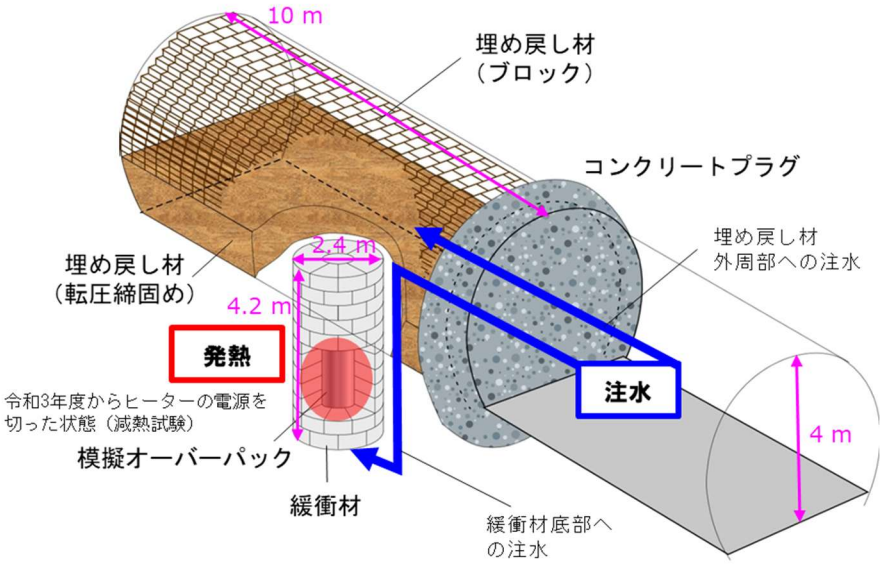
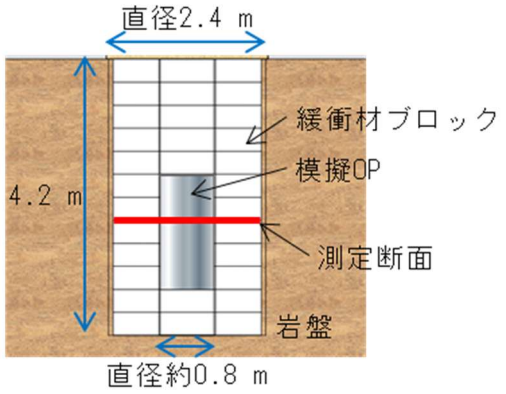
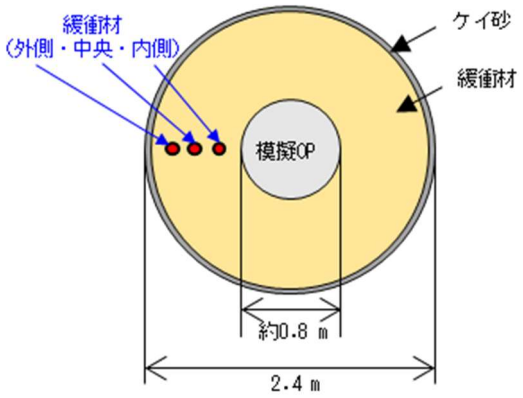


図 11　人工バリア性能確認試験の概念図

模擬オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材などの詳細は参考文献⑺、⑻で公開しています。

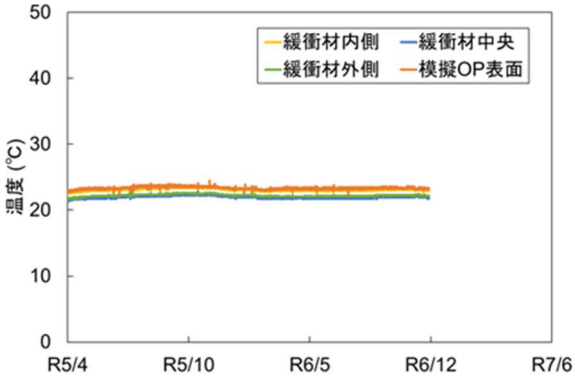


鉛直断面図

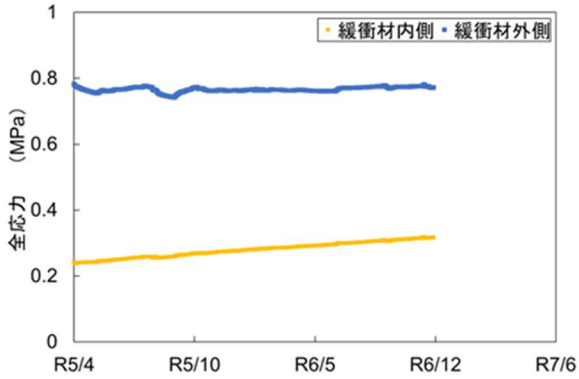


水平断面図（左図の赤線部分）

(a) 測定断面（緩衝材の下から 5 段目の上面）

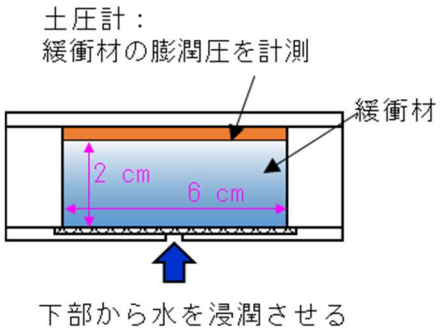


(b) 温度

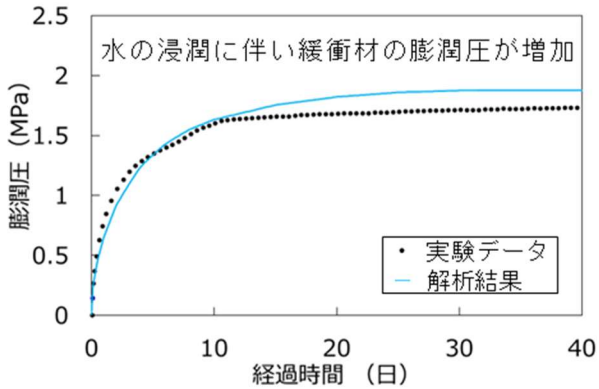


(c) 全応力

図 12　人工バリア性能確認試験の計測データの一例



(a) 膨潤圧試験のイメージ図



(b) 膨潤圧試験結果と解析結果の一例

図 13　膨潤圧試験結果を活用した解析検討の一例[6]

4.2　物質移行試験

令和 2 年度以降は、掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立、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、割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立が課題となります。そのため、これまでに確立した物質移行特性評価手法の適用/高度化を図

りつつ、掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を行うとともに、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を評価します。また、掘削損傷領域の物質移行特性に加え、有機物・微生物・コロイドの物質移行特性に与える影響を考慮した上で、割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数ｍ～100 ｍ規模）（図 14）における遅延性能評価手法の整備を行います。これらの成果は、処分事業で堆積岩を対象とする場合に、核種移行モデルを構築する際の基盤情報となるものです。

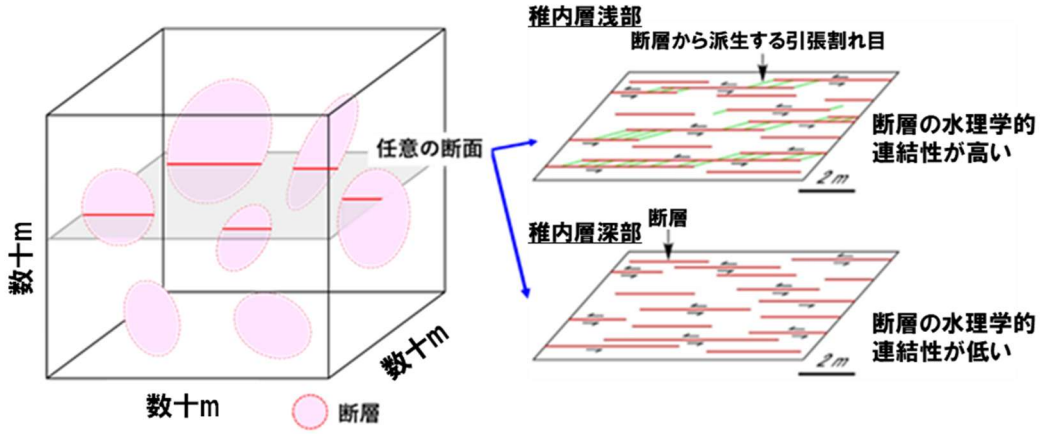


図 14　ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

(1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

令和６年度は、掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone、以下 EDZ）の物質移行特性のうち、これまでに知見の得られていない重要な特性である EDZ の割れ目中の縦方向分散長※の評価手法の整備を目的に、過年度に実施した 350m 試験坑道４周辺の EDZ を対象としたトレーサー試験結果[9、10、11]（図 15）の詳細な解析を行いました。解析では、従来の解析手法である一次元移流※分散※モデルを適用しました。具体的には、H4-1 孔の区間２と P 孔の区間２とを水理学的に連結させる EDZ の割れ目を一次元のチューブ（長さ：L＝4.2 m）で仮定するとともに、注水流量（20 mL/min）のうち、トレーサー回収率※（R）に相当する割合の流量（Q）のみが H4-1 孔の区間２から P 孔の区間２につながる EDZ の割れ目に流れる条件を仮定しています（図 16）。解析の結果、観測結果を適切に再現することができ、従来の手法でも EDZ の割れ目中の縦方向分散長を適切に評価できることが確認できました[10、11]（図 17）。さらに、EDZ の割れ目以外の天然の割れ目や健岩部において評価された縦方向分散長と比

較すると、今回評価された縦方向分散長は評価スケール（トレーサーの移行経路の長さ）の 100 分の 1 から 10 分の 1 の回帰式の間にプロットされることから（図 18)、EDZ の割れ目においても天然の割れ目や健岩部と同程度の縦方向分散が生じることが分かりました[11]。

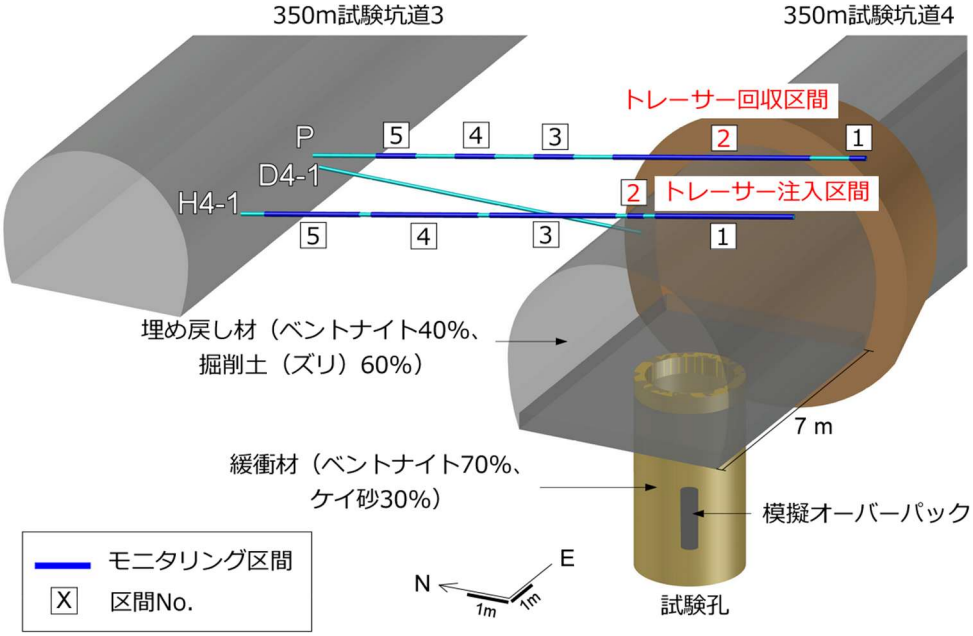
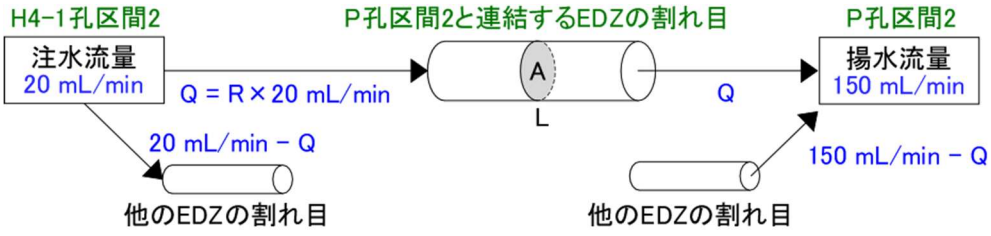


図 15　EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト

H4-1 孔と P 孔は 350m 試験坑道 3 の南側壁面から 350m 試験坑道 4 に向かって斜め上向きに掘削されています。H4-1 孔の区間 2 をトレーサー注入区間、P 孔の区間 2 をトレーサー回収区間としています。



R:トレーサー回収率(−)、Q:流量(mL/min)、L:移行経路の長さ、A:断面積(m^2)

図 16　解析モデル

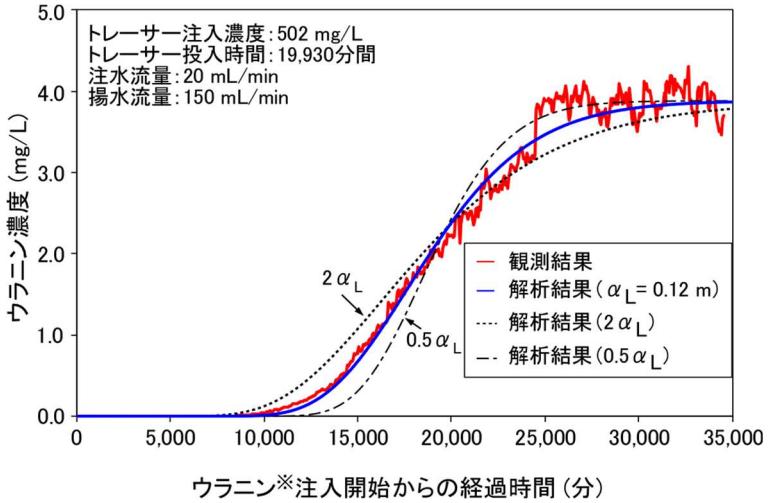


図 17　トレーサー試験の再現解析結果

解析結果には、縦方向分散長と解析結果との感度を示すために、観測結果の再現性が最も良い縦方向分散長（α_L）の値を 0.5 倍、2 倍とした解析結果も示しています。

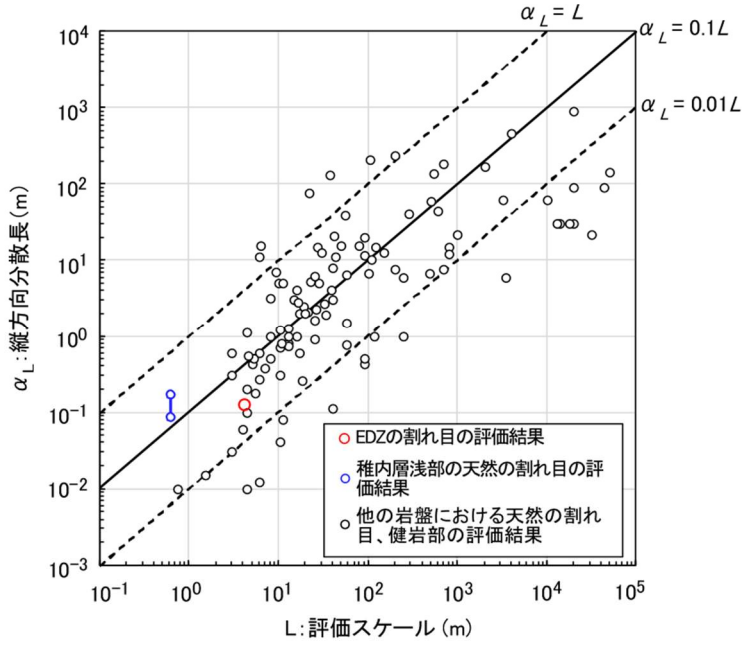


図 18　縦方向分散長と評価スケールの関係性

○は EDZ の割れ目の評価結果、○は稚内層浅部（深度 350 m）の天然の割れ目の評価結果[12]（評価された縦方向分散長の最大値と最小値の範囲を示しています。）、○は他の岩盤における天然の割れ目、健岩部での評価結果[13]をプロットしています。本検討で評価した EDZ の割れ目の縦方向分散長（α_L ＝0.12 m）は評価スケール（トレーサーの移行経路の長さ：L）に対して 100 分の 1 から 10 分の 1 の回帰式の間にプロットされます。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から令和 6 年度にかけて EDZ の割れ目を対象にトレーサー試験を実施し、EDZ の物質移行特性を評価するためのデータを取得するとともに、これらの結果について解析評価を行ってきました。その結果、従来の試験・

解析手法を適用することにより EDZ の割れ目中の縦方向分散長を適切に評価できることが確認できました。これにより、EDZ における物質移行のモデル化・解析手法を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は参考資料の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

(2) 有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験

有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験では、地下水中の元素が溶存有機物・微生物・コロイド（地下水コロイド）と結合することにより擬似コロイドを形成し、地下水中に溶けている元素の濃度が増加する影響を評価します。一方で、このような「元素－溶存有機物・微生物・コロイド」が共存する二元系に加えて、岩盤やその中に含まれる有機物に元素が収着※して濃度が減少する影響についても評価するために、「元素－溶存有機物・微生物・コロイドー岩盤」が共存する三元系についてもデータを取得します。試験には、高レベル放射性廃棄物に含まれるアクチノイド※のアナログ元素※であり、既往の研究[14]から有機物や微生物との相互作用が示唆される希土類元素などを用います。なお、コロイドのサイズは一般的に 1 nm～1 μm または 1 nm～0.2 μm と考えられており[15]、幌延の地下水中では数 nm～0.5 μm 程度（最頻値が約 120 nm）であることが分かっています[16]。また、幌延の地下水中の有機物からなるコロイドや腐植物質※のサイズは数 nm であることが分かっています[17、18]。微生物のサイズは一般的に 0.2 μm よりも大きいと考えられています[19]。10 kDa※限外ろ過※フィルターを通過する大きさの成分は大部分が溶存態と想定されますが、幌延の地下水中に含まれる腐植物質などからなるコロイドを一部含むと考えられます。ここでは、3 kDa 限外ろ過でフィルターを通過する大きさの成分（数 nm 未満）を溶存態、1 μm 以下のサイズのフィルターを通過し溶存態より大きい成分をコロイドと見なします。上記のサイズの関係性を、図 19 に示します。また、本課題の一部は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である令和 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]核種移行総合評価技術開発」を活用して

実施しました。

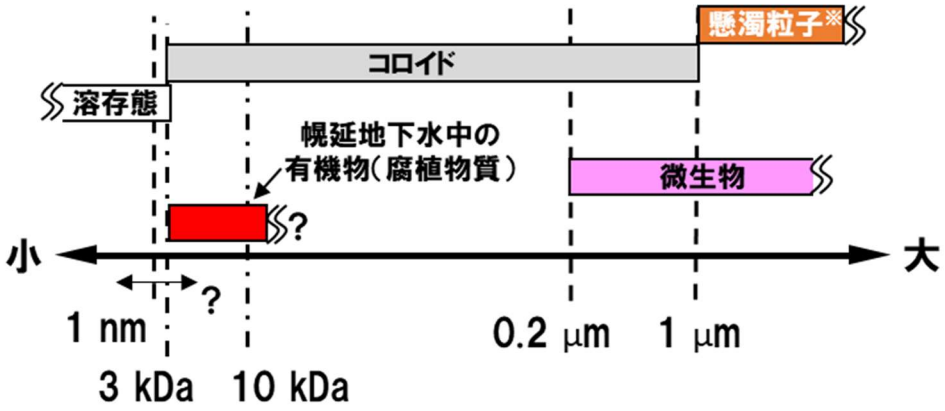
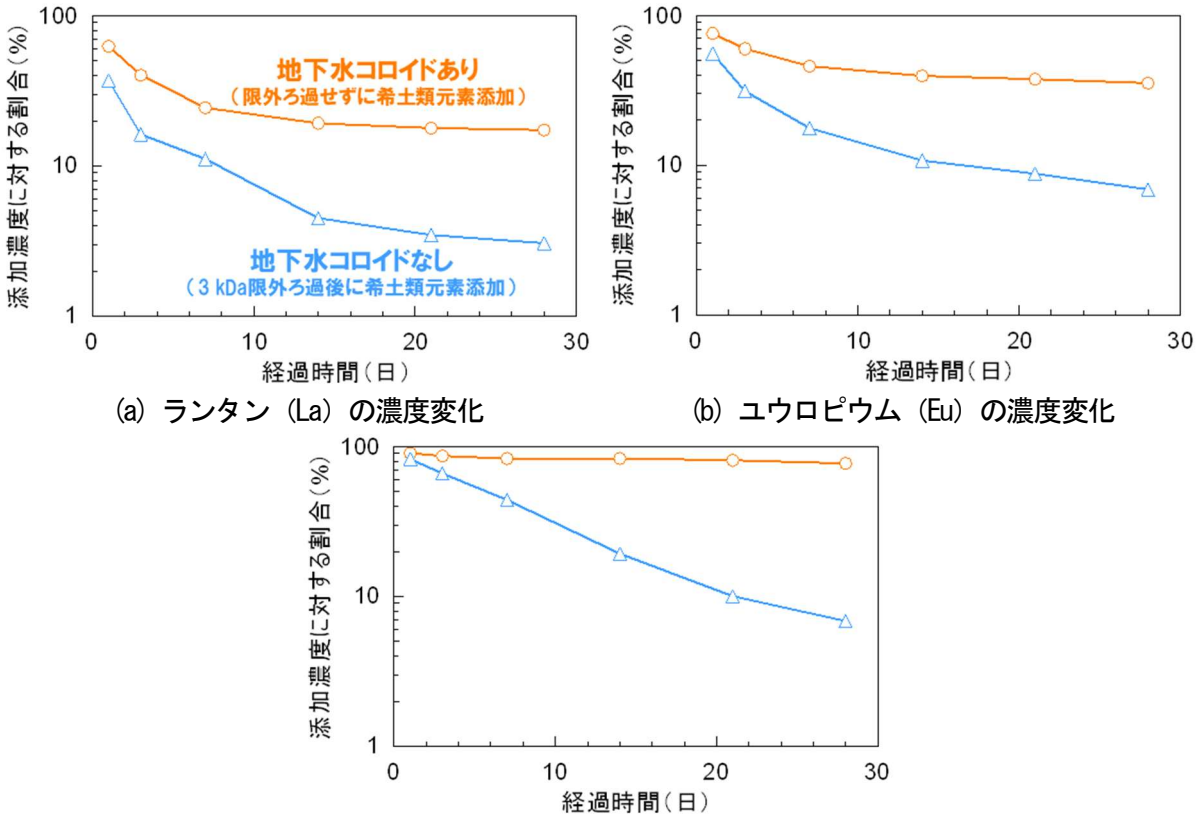


図 19　本課題で対象とする各成分のサイズの関係性

令和 6 年度は、過年度に実施した、350m 調査坑道のボーリング孔内から採取した地下水に希土類元素を添加する室内試験の結果を整理しました。原位置の地下水中に含まれる地下水コロイドを除去するために 3 kDa のフィルターで限外ろ過してから希土類元素を添加した場合（地下水コロイドなし）の最終的な希土類元素濃度は、限外ろ過をせずに添加した場合（地下水コロイドあり）よりも約 1 桁程度低いという結果が得られました（図 20)。この結果は、地下水コロイドが含まれる場合、それらとの相互作用のために、添加した希土類元素の沈殿量や試験容器への吸着量が少なくなり、より高い濃度で地下水中に存在するようになったことを示唆しています。しかしながら、実際の地下環境には岩盤が存在するため、元素や地下水コロイドと岩盤との相互作用についても考慮する必要があります。



(a) ランタン（La）の濃度変化　　(b) ユウロピウム（Eu）の濃度変化

(c) ルテチウム（Lu）の濃度変化

図 20　室内試験における希土類元素添加後の 0.2 μm ろ過試料中の希土類元素濃度の時間変化

縦軸は、希土類元素を添加した直後の未ろ過試料中の濃度を 100%とし、その値に対する各試料の濃度の割合を示しています。

岩盤が存在する系での物質移行評価に必要な基盤データとして、幌延地下水中の主要な天然有機物のひとつであるフミン酸※の岩石への収着挙動を室内試験により調べました。幌延地下水と同程度のイオン強度の塩化ナトリウム溶液中に、幌延の地下水から抽出されたフミン酸と稚内層の岩石粉末を入れ、定期的に振とうした後、溶液中のフミン酸濃度を測定しました。試験開始から 14 日後の結果では、岩石に対するフミン酸の収着分配係数※は、地下水と同じ中性の pH 領域において 10^{-3} m^3/kg～10^{-2} m^3/kg 程度であり、岩盤に対して弱い収着性を示すことが示唆されました。

また、元素、地下水コロイド、岩盤の三種類の要素が存在する条件下での原位置試験として、令和 5 年度には、350m 調査坑道に掘削したボーリング孔内の地下水に希土類元素などのトレーサーを添加し、その濃度変化を最長 2 週間まで観察する試験[20]を実施しました。令和 6 年度は、より長期的な挙動を観察するために、試験期間を約 4 か月間に延長して同様の原位置試験を行

いました。

試験方法を図 21 に示します。試験に先立ち、岩盤内の試験区間と坑道上の経路との間で地下水を循環させ、水質を均質化しました（図 21 の①）。循環を一旦停止し、坑道上の経路のみで循環するように経路を変換してから、坑道上の経路内の地下水にトレーサーを添加し、坑道上の経路のみで循環させてトレーサーと地下水を混合しました（図 21 の②）。次に、坑道上の経路に設置したボトルの一部を経路から取り外して保管しました（図 21 の③）。そして、岩盤内の試験区間を経由するように循環経路を変換して、上記のトレーサーを添加した地下水を試験区間に循環させました（図 21 の④）。一定の期間経過後に坑道上で保管したボトル（図 21 の③）と岩盤内の試験区間を循環している経路上のボトル（図 21 の④）から同時に採水し、各ボトル内の地下水のトレーサー濃度を測定しました。

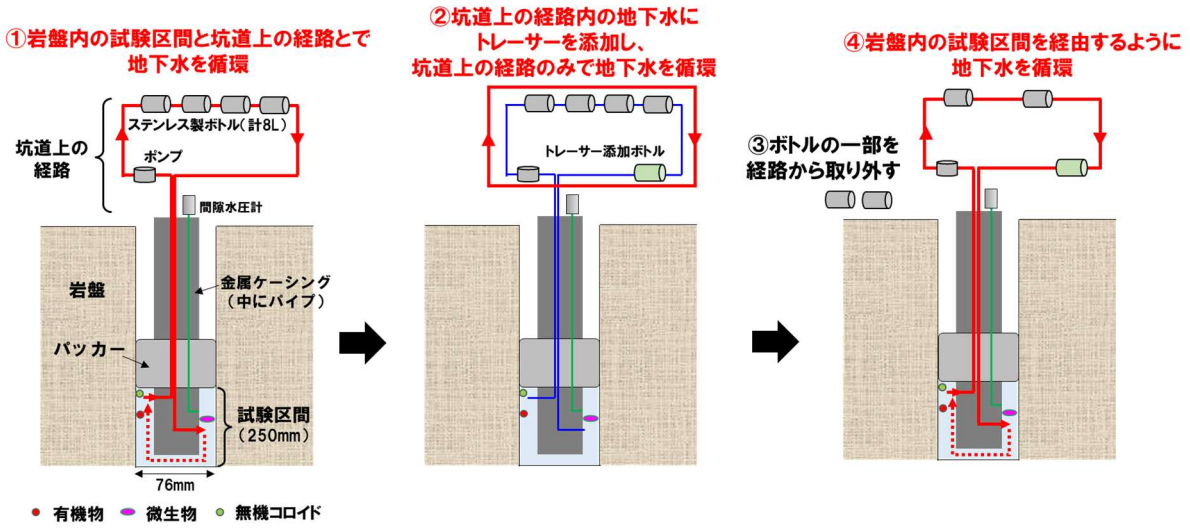


図 21　原位置試験の装置概念図および試験手順

③はトレーサーと地下水中の有機物・微生物・コロイドとの反応を調べるための試料、④はトレーサーと地下水中の有機物・微生物・コロイドとの反応に加えて、それらと岩盤との反応を調べるための試料です。

結果を図 22 に示します。添加した希土類元素の濃度はおおむね時間とともに減少し、この濃度減少の程度は、原子量の小さい希土類元素ほど大きい（La＞Eu＞Lu）ことが分かりました。これは、添加した希土類元素の一部が、幌延の地下水中に含まれるリン酸イオンと錯体※を形成して沈殿したためと考えられ、原子量の小さい希土類元素の方がリン酸イオンと結合しやすいこ

とを反映していると考えられます[21、22]。

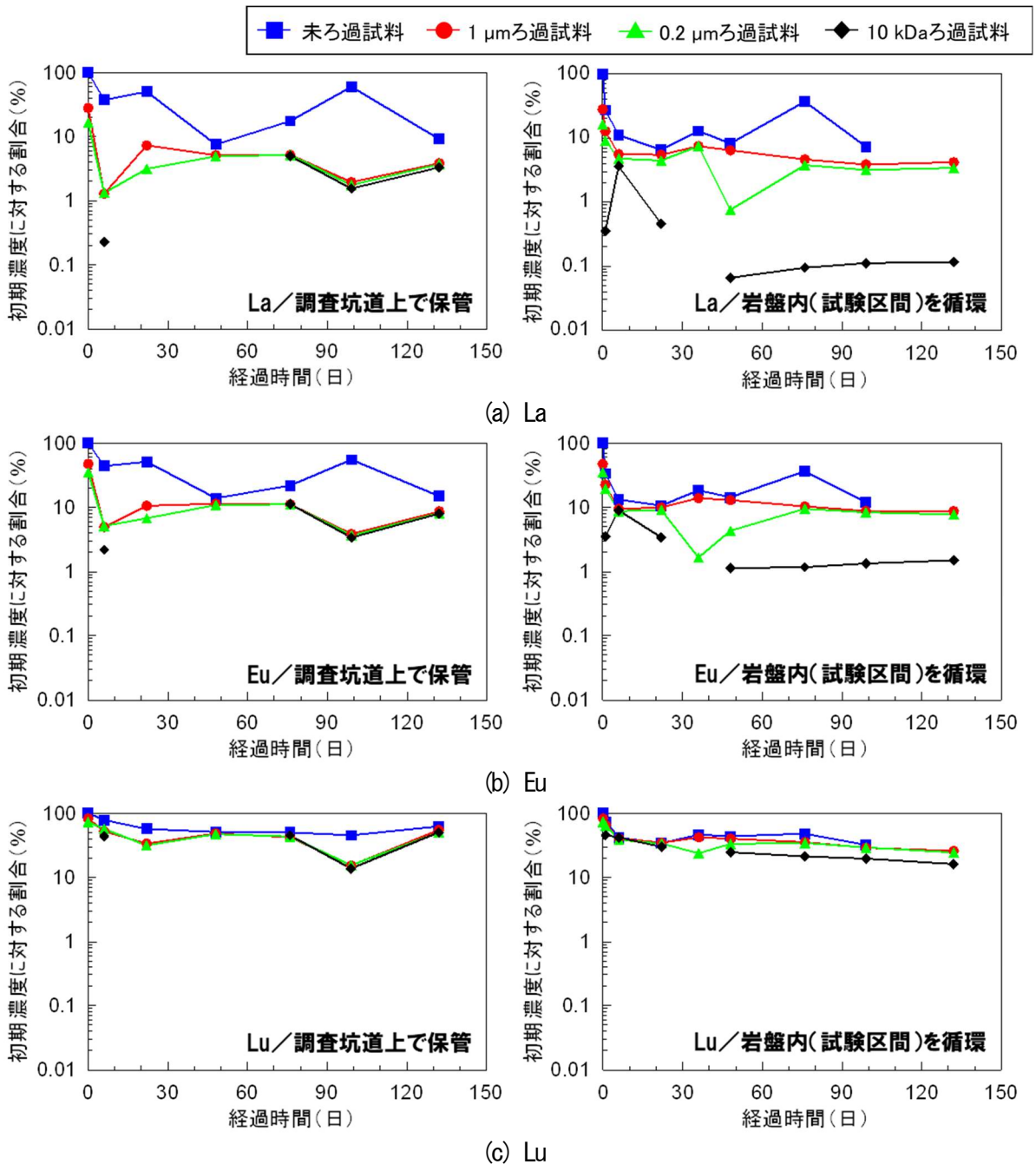


図 22　原位置試験における希土類元素濃度の時間変化

縦軸は、希土類元素を添加した直後の未ろ過試料中の濃度を 100%とし、その値に対する各試料の濃度の割合を示しています。

岩盤内の試験区間を循環させずに調査坑道上で保管した地下水と、岩盤内の試験区間を循環させた地下水のいずれにおいても、希土類元素濃度は、未ろ過試料＞1 μm ろ過試料≒0.2 μm ろ過試料の関係にありました。この結果か

ら、添加した希土類元素の一部がコロイドよりも大きいサイズの粒子（懸濁粒子など）に収着（またはコロイドよりも大きいサイズの粒子を形成）していること、および0.2 μm～1 μmのサイズの地下水コロイドと希土類元素との相互作用は小さいことが示唆されます。

0.2 μmろ過試料と10 kDa限外ろ過試料の希土類元素濃度に着目すると、希土類元素を添加して数十日が経過し濃度変化が落ち着いた時点で、調査坑道上で保管した地下水では0.2 μmろ過試料≒10 kDa限外ろ過試料の関係が認められました。一方、岩盤内の試験区間を循環させた地下水では0.2 μmろ過試料＞10 kDa限外ろ過試料の関係が認められました。調査坑道上で保管した地下水では希土類元素が10 kDa～0.2 μmのサイズの地下水コロイドに収着していないのに対し、岩盤内の試験区間を循環させた地下水中では、10 kDa～0.2 μmのサイズの地下水コロイドに収着していたことが示唆されます。試験区間を循環させた地下水中で10 kDaより小さいサイズに含まれる希土類元素濃度の割合が低いのは、地下水中の溶存態の希土類元素、または希土類元素を収着した10 kDa～0.2 μmのサイズの溶存有機物が試験区間内の岩盤に収着されたことによると考えられます。後者の考えは、10 kDaより小さいサイズに含まれる溶存有機物（腐植物質）が幌延の岩石に対して弱い収着挙動を示すという上述の室内試験の結果とも整合的です。以上の結果は、仮に元素が地下水中のコロイドと相互作用したとしても（図 20)、実際の地下環境中ではその一部が岩盤に収着する可能性があることを示唆しています。

また、地下に存在する微生物が物質移行に及ぼす影響を明らかにするために、調査坑道から掘削されたボーリング孔を用いて、深度350 mまでの地下水中の微生物群集組成とそれらの代謝機能について詳細な調査を行いました[23]。地下環境には未だかつて培養されたことのない未知の微生物が豊富に存在しており、地下でのはたらきは未解明な部分が多く残されているため、環境中のすべての遺伝子を網羅的に解析する手法（メタゲノム解析）によって、地下水中の微生物のモニタリングを行いました。その結果、幌延の地下環境では、未知微生物も含めて、水素代謝、炭酸固定、メタン代謝、硫黄代謝反応などが主な微生物代謝反応であることが分かりました。また、深度の異なる地下空間であっても、ほぼ同一のゲノムが全体の約3分の1の割合で検出されました（同一のゲノムは海を隔てた米国の地下環境からも検出され

ています)。このことは、幌延の地下浅部では、最終氷期の比較的水の流れが速かった時代[24、25]に水の流れとともに移動・分散した微生物が、最終氷期から現在までの水の流れが緩慢な環境下[24、25]で長期にわたって動きが制限された可能性を示唆しています。

令和6年度までの成果の概要

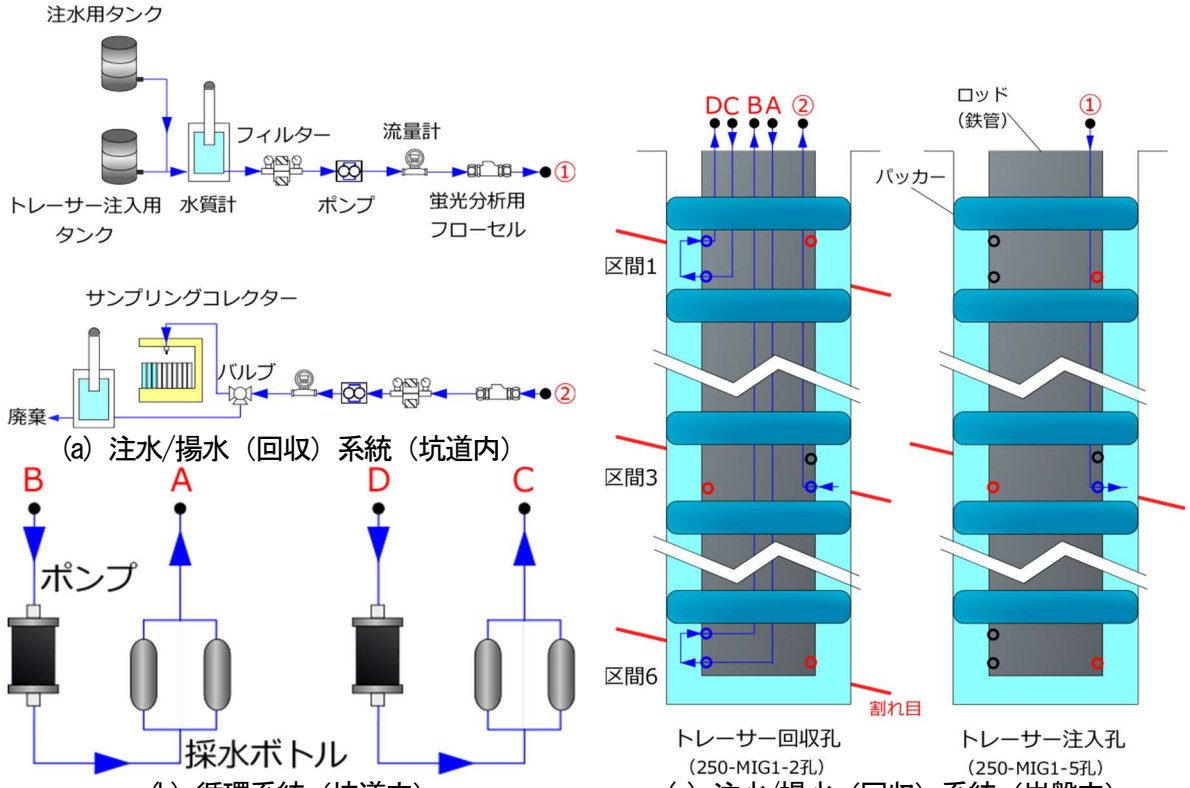
令和2年度から5年間にわたり、地下水中の有機物・微生物・コロイド（地下水コロイド）との相互作用が物質移行に与える影響を評価するために、主として希土類元素をトレーサーに用いた室内試験および原位置試験を行ってきました。その結果、室内試験により地下水コロイドとの相互作用による希土類元素の挙動の変化を（図 20）[20]、原位置試験により希土類元素と地下水コロイドに加えて地下深部の岩盤が存在する環境下での挙動の変化を（図22)、それぞれ定量的に見積もることができました。また、地下水コロイドの影響評価において必要となり得る、地下水中の有機物・微生物・コロイドの特性に関する知見やその評価手法について、幌延を事例とした試験・分析[22、23、26、27、28、29、30]により整備することができました。これらにより、地下水中の有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を定量的に評価する手法を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は、参考資料の令和2年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

(3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

令和 6 年度は、ブロックスケールを対象とした原位置トレーサー試験装置の高度化を目的に、250m 西立坑側第1ボーリング横坑（図 4参照）から掘削した2本のボーリング孔（250-MIG1-2 孔および 250-MIG1-5 孔）で、新たに製作したトレーサー試験装置の適用性を確認しました。本試験装置は、従来の試験装置[13]と同様にトレーサーの注入区間と回収区間でトレーサー濃度の経時変化が観測可能なだけでなく、他の区間でも区間内の流体を循環させることでトレーサー濃度の経時変化が観測可能な構造を有するのが特徴です（図23)。適用試験を行った結果、循環区間（図 23 の区間 1 および区間 6）にお

いてもトレーサー濃度の経時変化を観測できることが確認でき（図 24)、2 本のボーリング孔を用いたトレーサー試験において、多区間でのトレーサー濃度の経時変化の観測が可能なことが確認できました。これにより、2 本のボーリング孔を用いたトレーサー試験を実施する際に、循環機能を備えたトレーサー回収区間を設けることで、複数の経路を移動するトレーサーの挙動を評価可能な試験装置を構築できることが確認できました。



(a) 注水/揚水（回収）系統（坑道内）

(b) 循環系統（坑道内）

(c) 注水/揚水（回収）系統（岩盤内）

図 23　トレーサー試験装置概要

トレーサー試験は 250-MIG1-5 孔をトレーサー注入孔、250-MIG1-2 孔をトレーサー回収孔として実施しました。トレーサー回収孔では、揚水区間（250-MIG1-2 の区間 3）の他に、循環区間（250-MIG1-2 の区間 1 および区間 6）でも任意の頻度でトレーサーの濃度を観測することができます。トレーサー回収孔およびトレーサー注入孔には(c)に示す試験装置が挿入されており、(→) の向きに水やトレーサーが流れます。各区間には 3 か所ずつ穴（ポート）が空いており、それぞれのポートが(a)、(b)に示す系統とチューブでつながっています。ポートのうち、〇は注水、揚水もしくは循環用のポート、〇は間隙水圧測定用のポート、〇は今回のトレーサー試験では使用していないポートです。

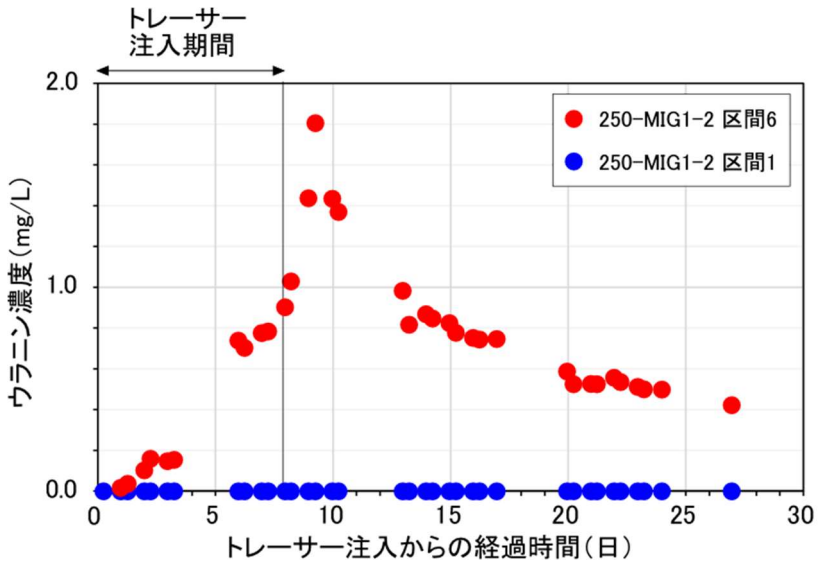


図 24　トレーサー試験結果（循環区間のみ）

250-MIG1-2 孔の区間 1 では試験期間中を通してウラニンが検出されませんでしたが、250-MIG1-2 孔の区間 6 ではウラニンの濃度上昇（0～9 日）とウラニンの注入を停止したことによる濃度低下（9 日以降）が確認できます

ブロックスケールにおける割れ目中の移行経路の特性として、これまでに知見に乏しい深部堆積岩中の割れ目中の移行経路のモデル化手法の整備を目的に、過年度に実施した稚内層深部の断層を対象とした孔間透水試験およびトレーサー試験[9]の詳細な解析を実施しました。その結果、孔間透水試験の水理解析から断層内の水みちのつながり方の次元が 1 に近い（断層の水理学的連結性が低い）ことが分かり、断層内の水みちが一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続していると仮定した解析を行うことにより試験結果を再現できることが分かりました[31]。この結果は、既往研究[32]により、本試験を実施した深度の水みちのつながり方の次元が 1 に近いことが推定されていることと整合します（図 25）。また、孔間透水試験の水理解析の結果に従い、一次元的に連続する非常に長い物質移行経路を仮定してトレーサー試験結果の再現解析を行った結果、トレーサー試験で観測されたトレーサーの濃度変化をよく再現できることが分かりました[31]（図 26）。これらにより、稚内層深部のような断層や割れ目の水理学的連結性が低い堆積岩（5.1.2(4)で後述する表 5 の分類 I-a の堆積岩のダクティリティインデックス（DI）>2 の領域）では、一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続した移行経路を仮定することにより物質の移行経路を適切にモデル化できることが確認できました。

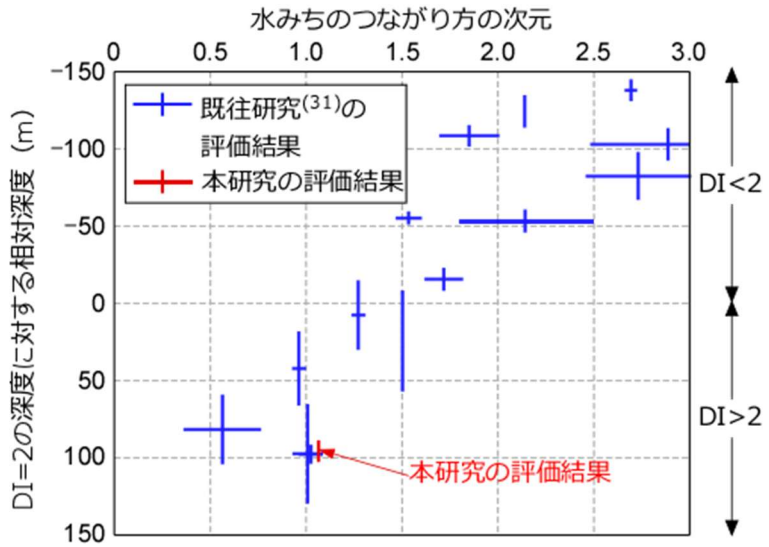


図 25　DI=2 の深度に対する相対深度と水みちのつながり方の次元の関係

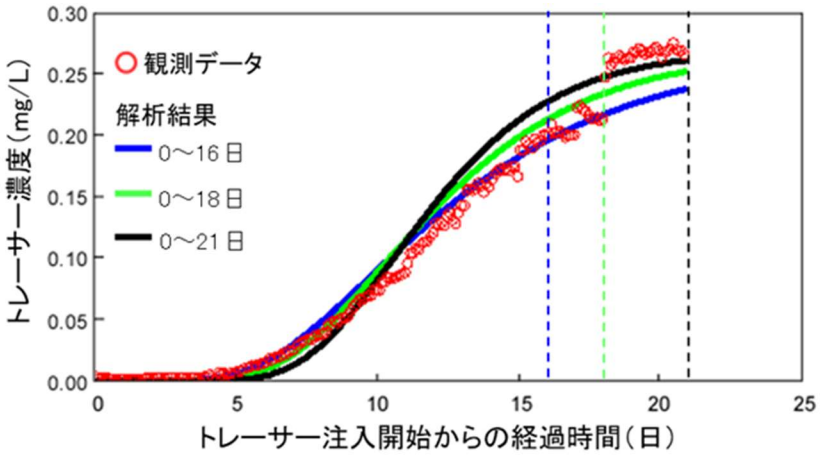


図 26　ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の再現解析

トレーサーが移行する経路の半径などについて、試験中の濃度変化を最も良く再現できる条件を観測値と解析値をフィッティングさせることにより検討しました。図中○は観測データを示します。解析結果はそれぞれ、試験開始から 16 日後まで（青線）、試験開始から 18 日後まで（緑線）、試験開始から 21 日後まで（黒線）の観測データを対象とした場合の解析結果を示します。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度以降の検討から、稚内層深部を対象としたブロックスケールでの原位置トレーサー試験によるデータ取得、その結果のモデル化/解析手法の整備を通じて、ブロックスケールの物質移行特性を把握するための一連の手法を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は参考資料の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

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 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

令和 2 年度以降は、操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証が課題となります。そこで、具体的には以下の 3 つの項目に取り組んでいきます。

(1) 搬送定置・回収技術の実証

(2) 閉鎖技術の実証

(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

「搬送定置・回収技術の実証」としては、緩衝材や埋め戻し材の状態に応じたこれらの除去技術の技術オプションの整理、より合理的に人工バリアを回収するための手法の提示、回収可能性※を維持した場合の処分場の安全性への影響に関する品質評価手法の提示を行います。

「閉鎖技術の実証」としては、将来の処分場閉鎖後に、坑道や掘削損傷領域が地上まで直結する移行経路となることを防ぐために、地下施設および周辺岩盤の長期的な変遷を考慮しつつ、埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を図ります。また、埋め戻し材やプラグなどの施工方法の原位置環境への適用性・実現性について確認します。

「人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築」については、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で得られる情報などに基づき、埋め戻し材の施工方法（締固め、ブロック方式など）に応じた緩衝材の品質の違いを把握します。また、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把握します。緩衝材への水の浸潤挙動を把握するための試験として、緩衝材流出試験を継続します。

これらの成果は、将来的に処分場を閉鎖する際に適用される閉鎖技術に求める性能を設定する際やその性能を担保するために必要となる設計・施工技術を選択する際の基盤情報となります。

(1) 搬送定置・回収技術の実証

回収可能性を維持した場合の処分場の安全性への影響に関する品質評価手法の提示については、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 2 年度から令和 4 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]：回収可能性技術高度化開発」ならびに令和 5 年度および令和 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]：ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発」）を活用して、①実際の地下環境における支保部材の状態把握および②実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理に関する試験・分析ならびに数値解析を実施しました。

① 実際の地下環境における支保部材の状態把握

処分場に定置された廃棄体を安全に回収するためには、処分坑道内の空間が保たれていることが必要となります。この評価のために、令和 2 年度より、処分坑道に施工される低アルカリ性セメント（HFSC※）を用いた吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的としたコンクリート試験体の暴露試験※を継続してきました。具体的には、地下坑道の吹付けコンクリートと同様の成分および施工方法で作製した HFSC コンクリートの試験体を、坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置し、その物性や化学状態の経時変化に関する分析を実施しました[33、34]。また、令和 5 年度には、地下施設に施工後約 10 年が経過した HFSC 吹付けコンクリートを坑道壁面から採取して、定置試験体と同様の分析を行いました（図 27）[20、34]。令和 6 年度は、これらの結果ならびに過去に実施された HFSC および普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を用いた吹付けコンクリートの分析結果[35]を踏まえて、坑道表面および岩盤接触部で生じている吹付けコンクリートの変質を評価しました。

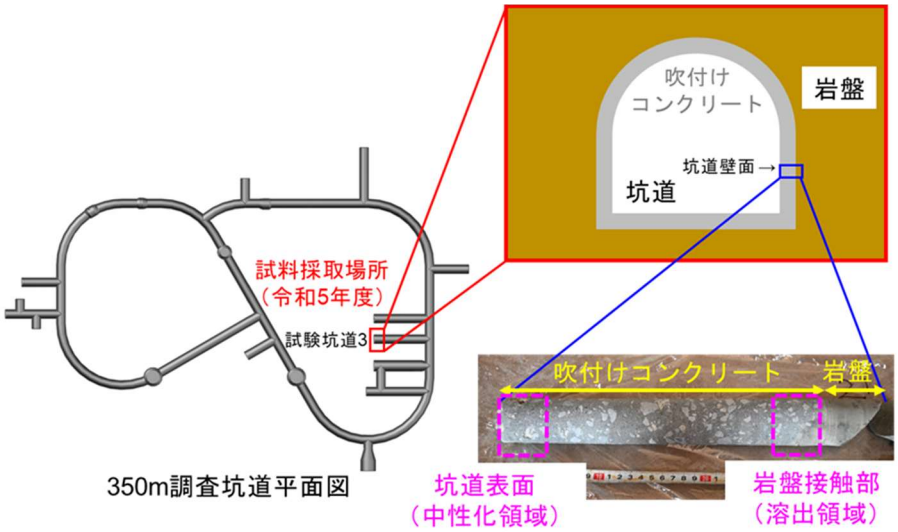


図 27　坑道壁面からの HFSC 吹付けコンクリート採取の概念図

定置試験体と坑道壁面から採取した試料のいずれにおいても、大気との接触部においては、大気中の二酸化炭素が拡散※によりコンクリート内に侵入することによる中性化が進行しており（図 28）、その度合いは、中性化の進行に関する一般的な関係式（式 1）とおおむね整合的でした。

$$x = A\sqrt{t} \qquad \text{式 1}$$

ここで、x：中性化深さ（㎜）、A：定数（㎜/$\sqrt{年}$）、t：経過時間（年）です。

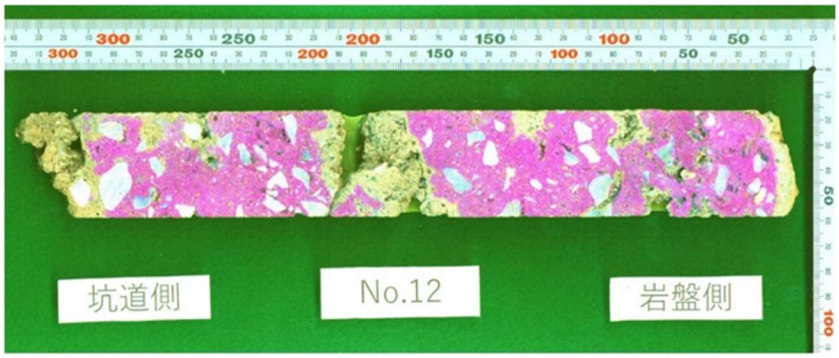


図 28　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の変質領域

写真は、坑道壁面から採取した吹付けコンクリートの半割面にフェノールフタレインを塗布し、色の変化が見やすいように色調を変化させています。フェノールフタレインは pH がおよそ 8～12 の範囲で赤色を呈する試薬であり、中性化やセメント成分の溶脱が進行して pH が低下した領域では、呈色が見られなくなります。

上記の式 1 に基づくと、坑道表面の吹付けコンクリートの中性化は、OPC よりも HFSC の方が速く進行していることが分かりました（図 29）。この違いは、セメント水和物（ケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）※、エトリンガイト※な

ど）の組成が OPC と HFSC とで異なることによるものと考えられます。すなわち、OPC が中性化した場合には主に水酸化カルシウムが分解され、より径の大きな炭酸カルシウムに変化するために、空隙率が減少[36]して空隙構造が密になります。これに対し、HFSC は水酸化カルシウムがほぼ含まれていないために中性化により C-S-H が分解され、空隙構造が粗くなり[36]、二酸化炭素がコンクリート内に侵入しやすくなるためと考えられます。また、HFSC 間で比較すると、140m 調査坑道に施工した HFSC よりも 250m および 350m 調査坑道に施工した HFSC の方が、中性化が速く進行していることが分かります（図 29）。水/セメント比（W/C）の大きいセメントの方が一般的に中性化が進行しやすいことが知られており[37、38]、250m および 350m 調査坑道の HFSC の W/C（0.35）が 140m 調査坑道（0.30）よりも大きいことに関係していると考えられます。

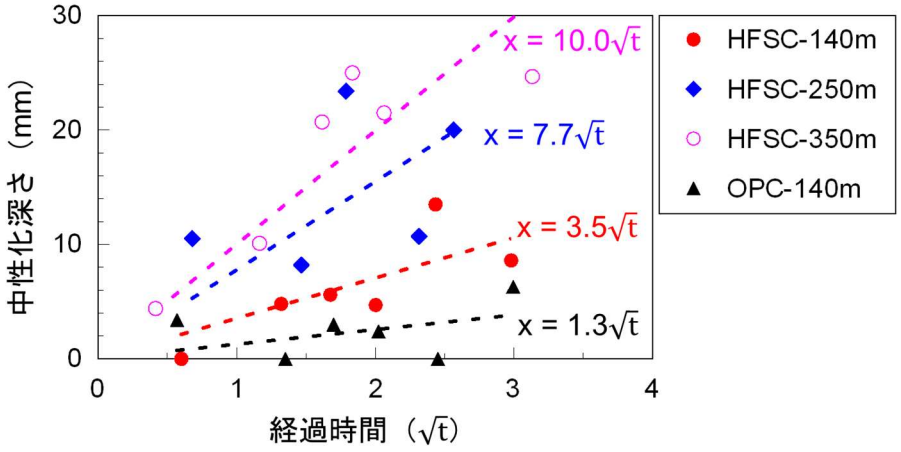
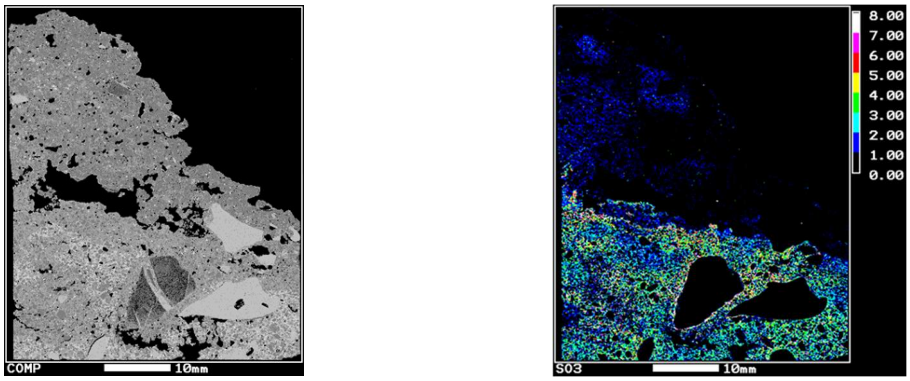


図 29　坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の中性化深さと経過時間の関係

式 1（$x = A\sqrt{t}$）と同様、x：中性化深さ（㎜）、t：経過時間（年）です。

定置試験体と坑道壁面から採取した試料のいずれにおいても、HFSC の中性化領域では、中性化していない領域と比べてカルシウムや硫黄の濃度が減少していること（図 30）、直径 0.2 μm 以下の空隙の割合が増加していることが分かりました（図 31）。以上の結果は、大気中の二酸化炭素との反応により、C-S-H、エトリンガイトなどのカルシウムや硫黄を含むセメント水和物が分解し、空隙径が大きくなったと解釈されます。しかしながら、過年度に報告しているように[20]、施工後約 10 年が経過し中性化が進行した坑道壁面からの採取試料と坑道に約 3 年間定置した試験体のいずれにおいても、一軸圧縮強度

の顕著な低下は認められず、空隙径の増加が強度に与える影響は小さいと考えられます。



(a) 反射電子像　　(b) SO_3濃度

図 30　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料における坑道側（中性化領域）の SO_3 濃度分布（坑道表面：上側）[20、34]

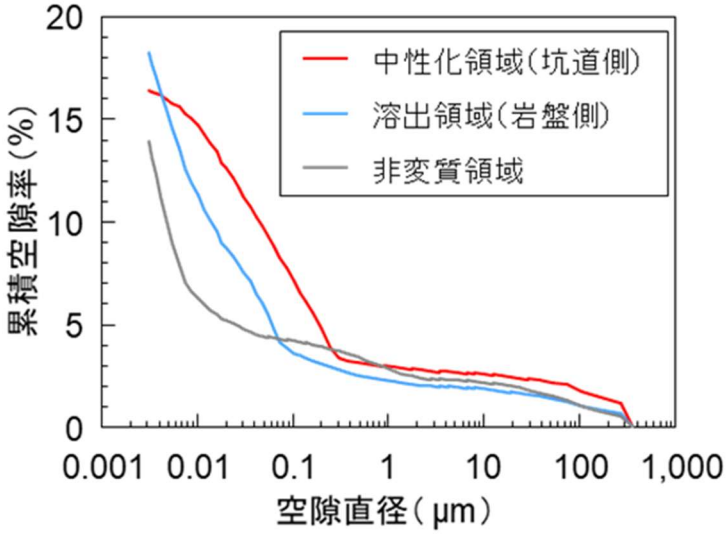
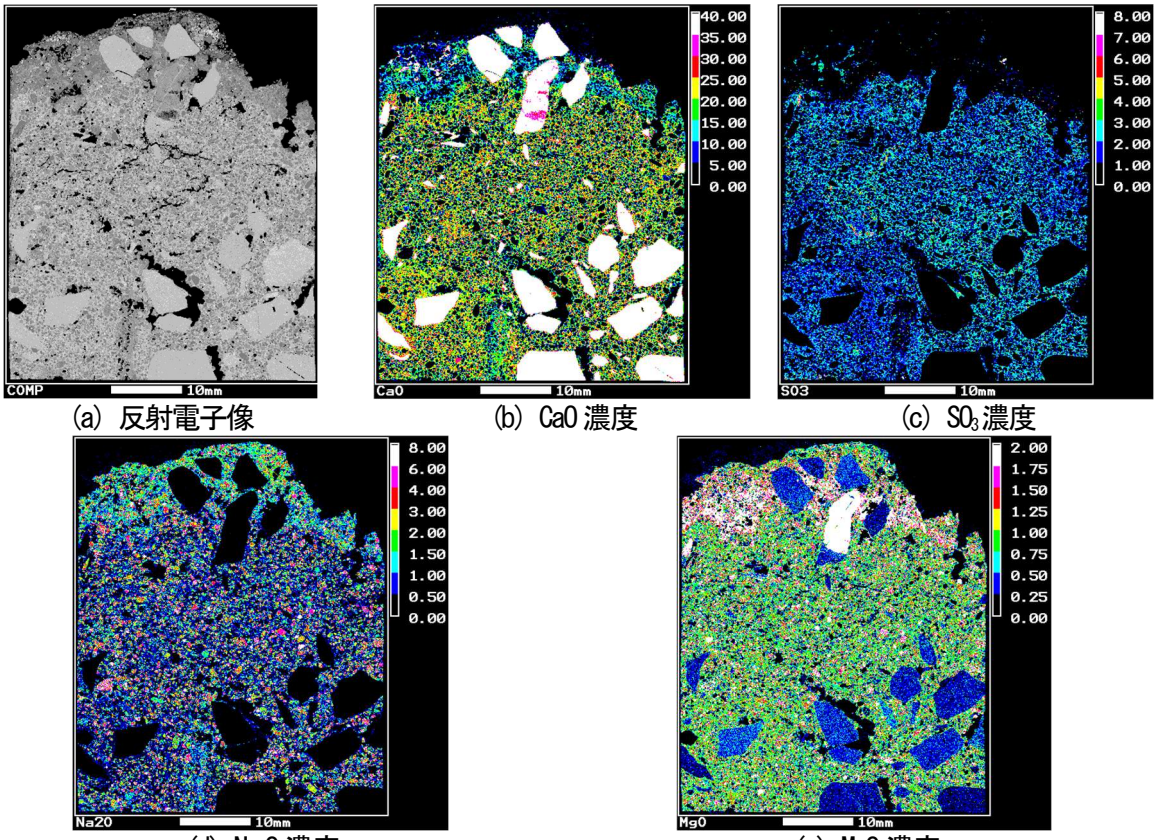


図 31　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の空隙径分布[20、34]

HFSC 吹付けコンクリートの岩盤接触部から約 6 mm の領域においては、非変質領域と比べて直径 0.07 μm 以下の空隙の割合が増加しており（図 31）、カルシウム・硫黄濃度の減少ならびにナトリウム・マグネシウム濃度の増加が認められました（図 32）。岩盤から供給された地下水により C-S-H やエトリンガイトなどのセメント水和物が溶解して空隙径が増加するとともに、地下水中に高濃度で含まれるナトリウムやマグネシウムの濃度が増加していると解釈されます。



(a) 反射電子像　(b) CaO 濃度　(c) SO_3 濃度

(d) Na_2O 濃度　(e) MgO 濃度

図 32　坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の岩盤側の元素濃度分布（坑道壁面：上側）

また、過年度に報告しているように[20]、坑道壁面から採取した HFSC コンクリートに対してアウトプット法※および変水位法[39]を適用したところ、中性化領域を含む坑道側ではいずれの方法でも 10^{-13} m/s～10^{-11} m/s 程度、溶出領域を含む岩盤側では変水位法で 10^{-13} m/s～10^{-12} m/s 程度の透水係数が得られました。中性化領域を含む試料でやや透水性が高い傾向にあるものの、いずれの値も中性化の進行していない定置試験体の透水係数の平均値（10^{-10} m/s 程度）より低く、中性化によるコンクリートの透水性の増加は生じていないことが示唆されました。

以上に示すように、坑道内でのコンクリート試験体の暴露試験と坑道壁面から採取した吹付けコンクリートの分析の両面から、坑道壁面の大気接触条件と、岩盤との接触界面の湿潤条件での挙動を整合的に把握できました。HFSC 吹付けコンクリートは、OPC 吹付けコンクリートに比べて中性化がより速く進行し（図 29）、中性化および地下水による溶出が生じた領域ではセメント水和物の分解により空隙構造が粗くなる（図 31）と考えられます。しか

しながら、約 10 年間の坑道開放期間では、中性化に起因するコンクリートの透水性の増加や強度の低下は生じていないことが示唆されました。さらに、中性化の進行速度は HFSC においても OPC と同様に中性化深さと経過時間との一般的な関係（図 29）から予測可能であり、このような関係式から長期的な変質の影響範囲を見積もることが可能であると考えられます。

② 実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理に関する試験・分析、数値解析

令和 2 年度から令和 4 年度にかけて、コンクリート支保について、安全な回収作業が可能な条件の確認を目的として、坑道開放条件下における坑道周辺岩盤の長期的な力学的変化やそれに伴う透水性の変化を考慮した坑道周辺の二次元多相流解析※を実施しました。加えて、坑道開放条件下における解析結果に基づいた坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析を実施し、坑道の開放期間が坑道の埋め戻し後の再飽和過程に及ぼす影響の評価を行いました。解析による予測では、坑道掘削後の 300 年間程度を坑道開放期間とした条件において、周辺岩盤の透水性や飽和度分布が変化するものの、これらが顕著に変化する領域は坑道壁面から 1 m～2 m 程度の範囲であることが示されました。また、坑道埋め戻しから 100 年経過後にはこの領域を除いた周辺岩盤は、ほぼ飽和状態に戻ることが分かりました[33]。

また、既存の研究では岩石の飽和度は岩盤の長期的力学特性であるクリープ※特性に影響することが確認されています[40]。令和 5 年度および令和 6 年度は、飽和度が異なる岩石試料を用いて、載荷速度を変化させた一軸圧縮試験および多段階クリープ試験を実施しました。得られたデータを基に解析を行い、飽和度の異なる岩石試料の相対的なクリープ寿命を評価したところ、岩石の飽和度が低い場合には飽和度が高い場合と比較してクリープ寿命が延びる結果が得られました。この結果から、坑道周辺岩盤の飽和度が掘削直後の高い状態から変化をしていない条件での長期的な力学変化の解析による評価は、坑道開放条件下において坑道の変形が過小評価されない安全側の結果であることを確認しました。

令和 6 年度までの成果の概要

回収可能性を考慮することにより処分坑道内の空間が長期間にわたって開放された場合に生じ得る、吹付けコンクリート支保の化学状態や空隙構造の変化、およびそれらに伴う長期的な物性変化の評価に必要な知見と調査手法を整備することができました。また、コンクリート支保に隣接する坑道周辺岩盤について、坑道掘削から坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析手法を整備することができました。さらに、緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術オプションの整理については、過去に実施した機械的除去方式および流体式除去方式[41]などの技術開発の整備や要素試験に基づくそれら技術の高度化[33]により、現実的な時間内で一連の回収・除去作業が実現可能な見通しが得られています。より合理的に人工バリアを回収するための手法の提示についても、1 体の廃棄体を対象とした一連の回収・除去の作業時間の試算方法を整備するとともに、その短縮に資する技術的方策なども提示されています[33]。これらの結果により、搬送定置・回収技術の実証について、各手法を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は、参考資料の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

⑵ 閉鎖技術の実証

将来の処分場の閉鎖後に掘削した坑道やその周辺の岩盤が放射性物質の移行経路となることを防ぐための埋め戻し材や止水プラグについて、期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を目的とした数値解析や室内試験、原位置での実証的な試験を実施するとともに、これまでの成果を取りまとめました。

掘削損傷領域（EDZ）の連続性を遮断するための施工技術の実証について、350m 試験坑道 3（図 5 参照）の底盤に坑道拡幅部における止水プラグを縮小して模擬した粘土止水壁を構築し、EDZ を含むように設定した試験領域を対象に、透水係数を指標として地下水移行抑制機能を評価してきました[20]。令和 6 年度は、透水試験を継続し、粘土止水壁の構築後に試験領域の透水係数が時間の経過とともにどのように変化するか調査しました。図 33 にこれまで

の試験で得られた試験領域内の透水係数を示します。粘土止水壁の構築前後に実施した透水試験において、構築前の透水係数は約 2×10^{-6} m/s の値を、構築後の透水係数は約 3×10^{-9} m/s の値を示し、粘土止水壁を構築することで試験領域内の透水性が低下することを確認しています。また、粘土止水壁を構築して 5 年が経過した時点においても試験領域の透水係数は 10^{-9} m/s 以下の値を示し、試験領域の透水係数は構築直後と同等に低く保たれていることを確認しました。

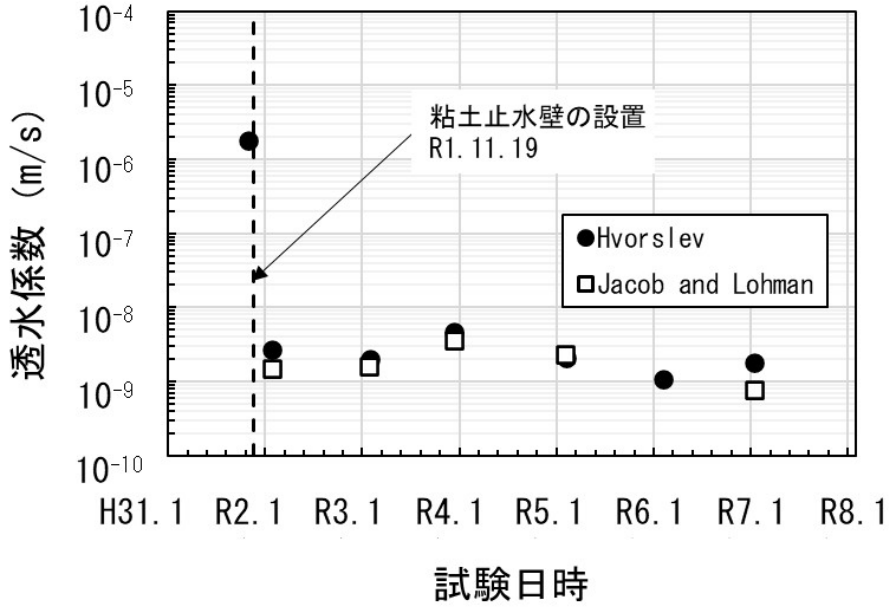


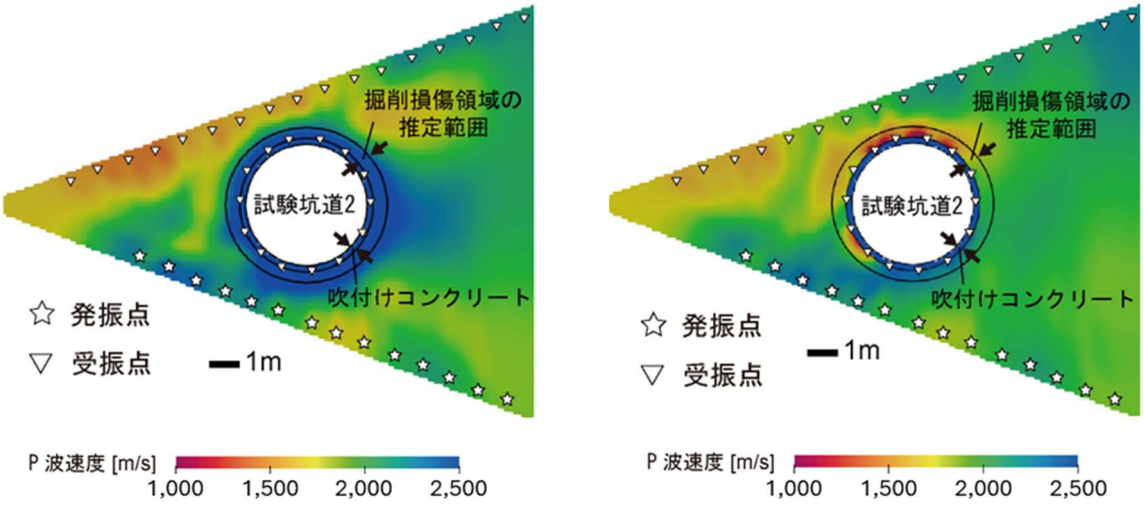
図 33　EDZ シーリング試験の試験領域内の透水係数の経時変化

透水試験では、EDZ を含むように設定した EDZ-1 孔の区間（令和 3 年度まで：深度 0.31 m～深度 1.70 m、令和 4 年度以降：深度 0.22 m～深度 1.61 m）から注水して粘土止水壁で区切られた内側の領域を対象としました。透水試験で得られたデータは定常解析（Hvorslev の式[42]）と非定常解析（Jacob and Lohman の方法[43]）により評価しました。

止水プラグの構造を設計する上では、坑道周辺の EDZ の広がりを把握することが必要となります。EDZ の調査技術の高度化について、令和 4 年度までに調査手法や解析技術の開発を目的として、350m 東周回坑道や 350m 試験坑道 2 および 350m 試験坑道 4（図 5 参照）周辺で弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィ調査を実施するとともに解析手法の改良を行いました[44、45、46]。

坑道内で弾性波トモグラフィによる弾性波速度の測定を実施し、既存の手法を適用して解析した場合、泥岩のように弾性波速度が遅い岩盤では、弾性波速度の速い坑道壁面や底盤のコンクリートによる弾性波の屈折の影響によ

り、岩盤の物性値を適切に推定できない場合がありました。この問題を解決するために、解析時にコンクリートの存在を設定条件として入力可能な解析コードを開発しました。図 34 は、350m 試験坑道 2 で測定した弾性波トモグラフィの解析結果です。図 34(a)に示すとおり、既存の解析手法ではコンクリートによる影響で弾性波速度が速い領域が坑道周辺に広く推定されてしまいますが、開発した手法では、EDZ の存在が想定される領域に弾性波速度が遅い領域を検出することができました（図 34(b)）。さらに、解析時に時系列情報を付与することでモニタリングにも利用できるタイムラプス解析※に拡張しました。



(a) 吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合　(b) 吹付けコンクリートの影響を考慮した場合

図 34　吹付けコンクリートの影響を考慮しない既存の解析手法と改良手法による弾性波速度分布の推定結果

令和 6 年度は令和 4 年度までに開発した弾性波トモグラフィや比抵抗トモグラフィの解析手法を、止水プラグの施工試験の実施を予定している 350m 試験坑道 6（図 5 参照）周辺の調査において適用することにより、止水プラグの周辺の岩盤の調査手法としての適用可能性を検討しました。

また、令和 5 年度までに得られた埋め戻し材と止水プラグに関する成果と合わせて整理して、閉鎖技術に関する取りまとめを行いました。埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出※抑制機能の把握について、竪置き処分孔に設置される緩衝材と埋め戻し材との相互作用の影響の把握を目的とした縮尺模型試験を実施してきました[9、10、20]。それらの結果より、埋め戻し材を

設置した場合には、設置しない場合と比較して、緩衝材の上方への変形が1/10 以下に抑制されていることが確認できました[10]。また、乾燥密度は埋め戻し材に近い緩衝材上部が低くなるような不均一な分布を示しており、埋め戻し材に近い緩衝材の上部で膨潤による変形が生じている可能性が示唆されました[10]。

埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示について、これまで着目してきたコンクリート系材料の溶脱成分に起因して埋め戻し材が変質し、水平坑道や立坑が放射性物質の主要な移行経路となるシナリオ（以下、本シナリオ）に関し、想定されるプロセスが将来的に生じる可能性や、仮に生じた場合の安全機能への影響を評価してきました[47、48]。その結果、核種の閉じ込め性能に及ぼす影響は限定的であるとともに[46]、現時点で取得可能な情報に基づくと、本シナリオは想定しにくいシナリオであると評価できました。

これらの埋め戻し材と止水プラグに関する個別要素の技術開発で得られた成果を整理して図 35 に示す設計フローへ反映しました。設計フローは埋め戻し材とプラグ（力学プラグおよび止水プラグ）の設計の流れを示しており、例えば、プラグの設計にはプラグに作用する埋め戻し材の膨潤圧の情報が必要となることを示しているなど、設計フローが埋め戻し材とプラグの関係をより具体的に表したものとなっています。また、埋め戻し材の要求性能を設定する上で「設置される人工バリアと埋め戻し材との相互作用の影響」を考慮する必要があることや移行抑制に効果的な止水プラグの形状検討を行う上で必要となる「EDZ の範囲や物性（経時変化も含む）」の調査手法として適用可能な技術など設計項目とそれに関連する情報について、個別要素の技術開発の成果の設計フローへの反映先を整理しました[46]。

さらに、処分場の閉鎖段階では、調査で利用したボーリング孔自体の閉鎖も求められる可能性があり、ここでは、坑道内から水平に近い向きに掘削されるボーリング孔の閉塞技術について、ベントナイトブロックを用いる手法を対象に室内実規模試験および原位置試験を実施しました[10、49]。その結果、ベントナイトブロックをボーリング孔の任意の深度に設置することが可能であること、また、設置したベントナイトブロックにより閉塞が可能となる見通しを得ることができました。一方で、ボーリング孔内の地下水の流入状況

によってはベントナイトブロックの膨潤が進まないことも明らかとなり、今後の技術開発に必要となる知見として整理することができました。

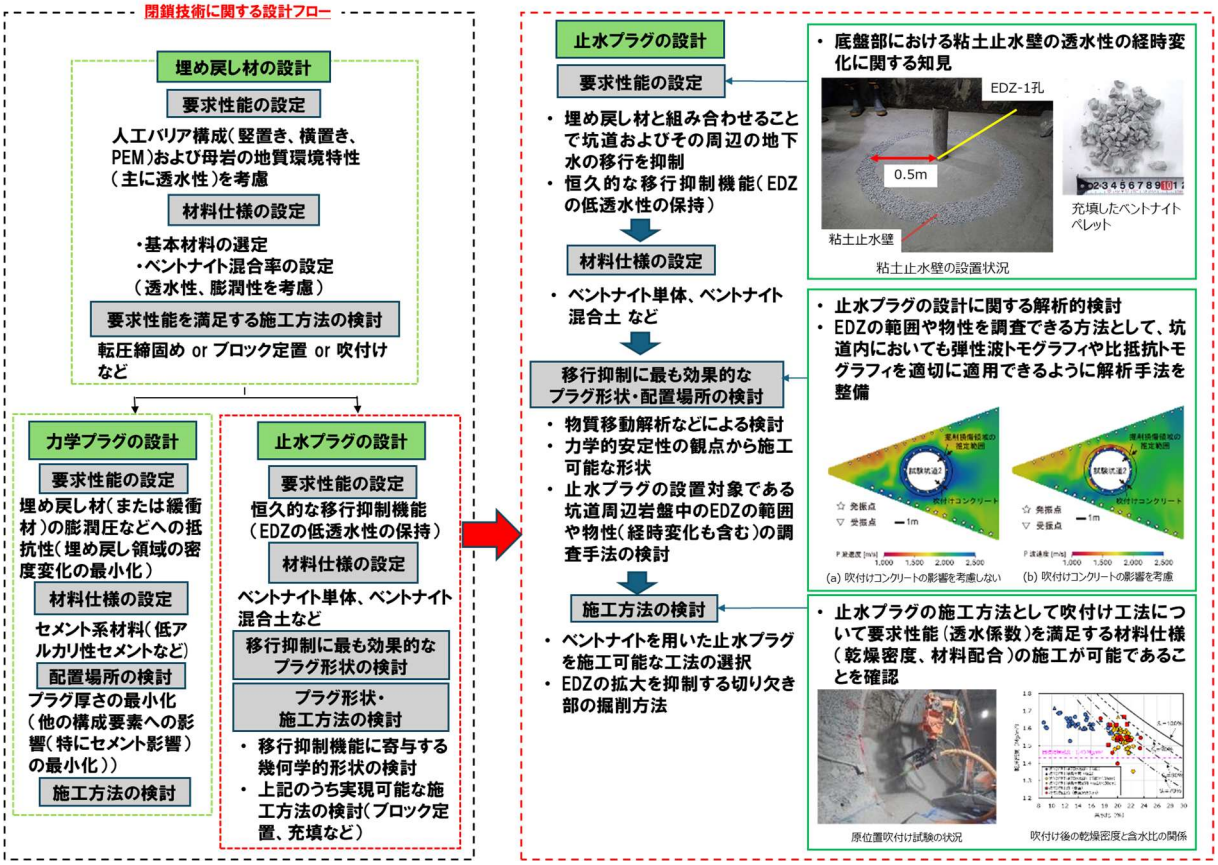


図 35　閉鎖技術に関する設計フロー（止水プラグ）

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から令和 6 年度にかけて「閉鎖技術の実証」として、埋め戻し材や止水プラグについて、期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を目的とした数値解析や室内試験、原位置での実証的な試験を通じて、埋め戻し材や止水プラグの施工方法の原位置環境への適用性・実現性を確認するとともに、個別の技術開発で得られた成果を実際の設計・検討に活用できる設計フローとして提示することができ、「埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化」という所期の目標を達成することができました。

今後は、参考資料の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

⑶ 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

埋め戻し材の施工方法については、既存の施工機械を用いた撒き出し・転圧工法や吹付け工法では、施工に時間がかかるという課題があります。そこで、原子力環境整備促進・資金管理センター*12（以下、原環センター）との協力の下で、埋め戻し材の施工効率の向上が期待できるブロック工法、斜め転圧工法およびスクリュー工法について地上の研究施設を利用した要素試験などを実施して適用可能な材料の配合の範囲や施工品質など品質保証体系の構築に必要となるデータを取得しています[20]。

令和 6 年度は、ブロック工法について、ベントナイト混合率と成型圧力をパラメータとした静的締固め試験により成型可能な材料の範囲を把握した上で[20]、スケールアップした埋め戻し材ブロックを試作し、製作性に関する知見やデータを取得しました。埋め戻し材ブロックの製作状況および試作した埋め戻し材ブロックの外観を図 36 に示します。埋め戻し材ブロックは模擬掘削土として最大粒径 20 mm の砕石・砕砂を使用しており、ベントナイト混合率は 30%です。1 m 規模の埋め戻し材ブロック（縦 1 m×横 1 m×高さ 60 cm）でも想定していた成型圧力内で目標とする有効粘土密度※1.4 Mg/m^3 以上の品質を満足できることが確認できました。

(a) 製作状況　　(b) 埋め戻し材ブロックの外観

図 36　埋め戻し材ブロックの製作

*12：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等に関する調査研究開発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。

斜め転圧工法では、材料仕様および撒き出し角度を設定するための予備試験方法（案）を整備するとともに[20]、予備試験により設定した材料・施工仕様（最大粒径 20 ㎜ の砕石・砕砂、ベントナイト混合率 15%、撒き出し角度 35°）で施工試験を実施し、施工性や施工品質に関するデータを取得しました。施工試験の結果、空間的制約のない坑道部分（既存の転圧機械における施工可能範囲）であれば、水平転圧と同等の施工品質（乾燥密度、ばらつきなど）を達成できることが分かりました。スクリュー工法では、埋め戻し材に含まれる砕石・砕砂の最大粒径、ベントナイト混合率およびスクリューの設置位置をパラメータとした充填試験を実施し、適用可能な材料・施工仕様を検討するためのデータを取得しました。さらに、埋め戻し材の施工品質を確認するための計測技術について、乾燥密度や水の浸潤状況の把握のために、光ファイバーなどを用いた技術の適用性についての検討も進めました。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度以降の検討により、ブロック工法、斜め転圧工法およびスクリュー工法について、要素試験および施工試験の結果より、各工法の埋め戻し材の施工方法としての見込みを示すことができました。また、転圧工法と吹付け工法の実証試験[46]で得られたデータと併せて埋め戻し材の施工方法として 5 つの工法の適用範囲および施工品質などの項目について、埋め戻し材の施工方法を選択する際の基盤情報として整備することができました。さらに、緩衝材の定置方法として、圧縮成型したブロックを廃棄体の周りに定置する施工方法を対象に、原環センターと協力して、350m 試験坑道 5（図 5 参照）の試験孔において緩衝材流出試験を実施してきました[9、10、50]。その結果より、竪置き処分孔に設置した緩衝材の「隙間未充填」と「ケイ砂充填」の施工方法の違う 2 つの技術オプションについて、原位置で把握が可能なパラメータ（試験孔内外水頭差、試験孔内湧水量）を評価項目とした判断指標の考え方を整理して緩衝材の総流出量を評価できるベースモデルを整備することで、より現実的に総流出量が評価できる見通しが得られました[51、52]。

以上の結果から、坑道閉鎖および緩衝材の施工方法に関する技術オプションの実証について、所期の目標を達成することができました。今後は、参考資料の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

5.1.2 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

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 37)。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、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。

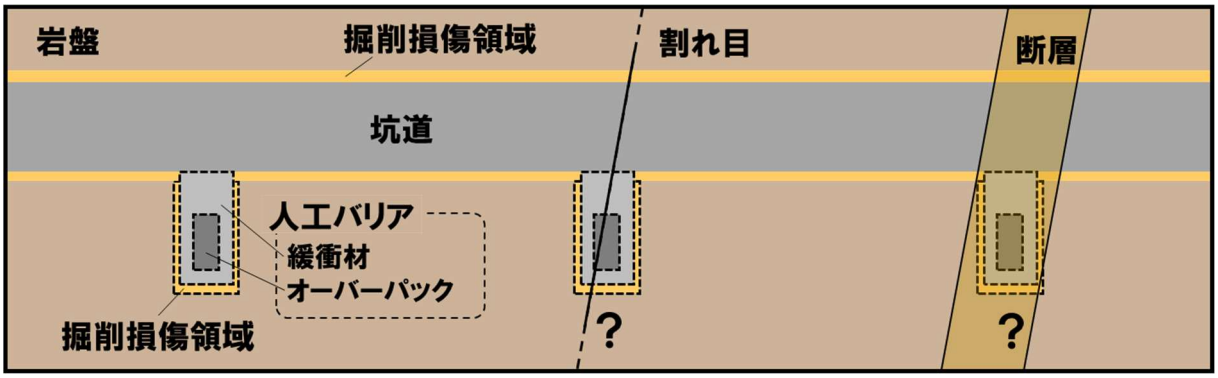


図 37　人工バリアやそれを定置する坑道の周辺において想定される地質構造の特徴を示すイメージ図（鉛直断面）

(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、緩衝材やオーバーパック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。本研究項目では、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(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。

令和 6 年度は、堆積岩の閉じ込め性能の評価手法に関する体系化に向け、物質移行のデータに乏しい声問層に位置する 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 4 参照）から掘削した 2 本のボーリング孔 250-MIG1-2 孔および 250-MIG1-5 孔[9]を対象にトレーサー試験を実施しました。トレーサー試験前の調査により水理学的連結性が確認された 250-MIG1-5 孔の区間 3 および 250-MIG1-2 孔の区間 3 をそれぞれ注水区間および揚水区間とし、2 回のトレーサー試験を実施しました（図 38）。表 2 に使用したトレーサーを示します。図 39 に示すように、ウラニンについては、2 回の試験ともに試験条件に応じた良好な試験結果を取得することができました。なお、本トレーサー試験は幌延国際共同プロジェクト（HIP）のタスク A（物質移行試験）の実施項目として設定しています。

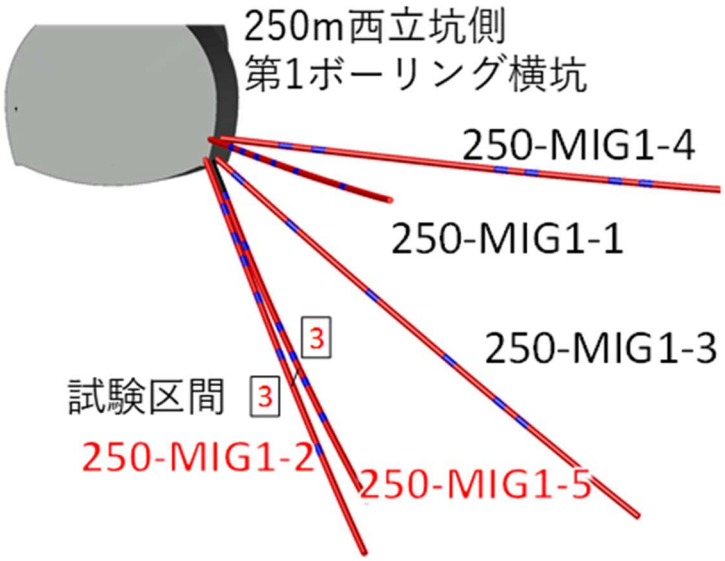
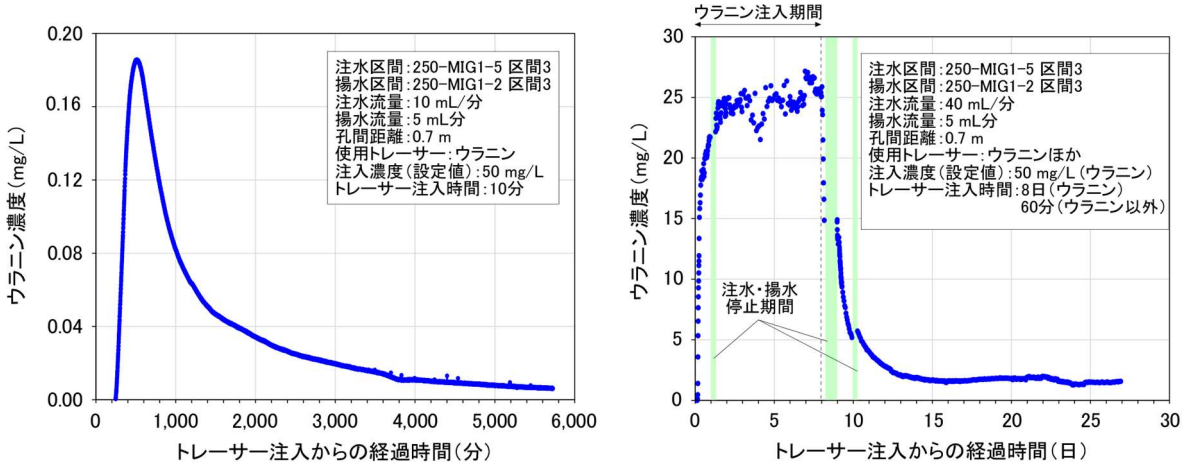


図 38　トレーサー試験のレイアウト

表 2　使用したトレーサー

	トレーサー	注入濃度
ケース 1	ウラニン	50 mg/L
ケース 2	ウラニン、アミノ G 酸、モリブデン、コバルト、ニッケル	50 mg/L
	重水	30 vol%
	ヨウ素、臭素	5,000 mg/L
	セシウム	1,500 mg/L
	ストロンチウム	50,000 mg/L
	ユウロピウム	10 mg/L



(a) ケース 1（ウラニン注入時間：10 分）　(b) ケース 2（ウラニン注入時間：8 日間）

図 39　トレーサー試験結果

(a)注入開始から 600 分程度でウラニン濃度がピークに達し、その後徐々に濃度が低下していることが確認できます。(b)ウラニンの注入開始から 8 日程度でおおむね濃度が一定となり、注入を停止した後は、急激に濃度が低下し、15 日頃からほぼ一定濃度で推移していることが確認できます。なお、割れ目内を流れるトレーサーが健岩部の方向にどの程度拡散するかを評価するために、本試験中に 3 回、注水・揚水を停止しています。

(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

ピットの掘削、人工バリアや埋め戻し材の施工の観点から、坑道あるいはピット内への湧水が多い条件や、断層や割れ目の密集により局所的に岩盤の力学的強度が低下する条件を把握し、その条件での施工の成立性を判断する必要があります。幌延深地層研究センターの坑道周辺の岩盤には断層や割れ目が分布し、坑道の周囲には掘削損傷領域（EDZ）が形成され、これらが湧水量や坑道の安定性に影響します。本研究では、令和 7 年度に整備される 500m

試験坑道８および500m試験坑道９（図 6参照、以下、500m試験坑道８・9）において、先行ボーリング調査、物理探査といった原位置調査を行います。これらの調査結果を受け、(3)で必要に応じて実施する湧水抑制対策、ピットの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の間隔を設計するために必要な情報とその情報の取得方法を整理します。加えて、坑道の埋め戻し、止水プラグの設置などについて 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の施工試験を実施することにより、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を確認します（図 40)。

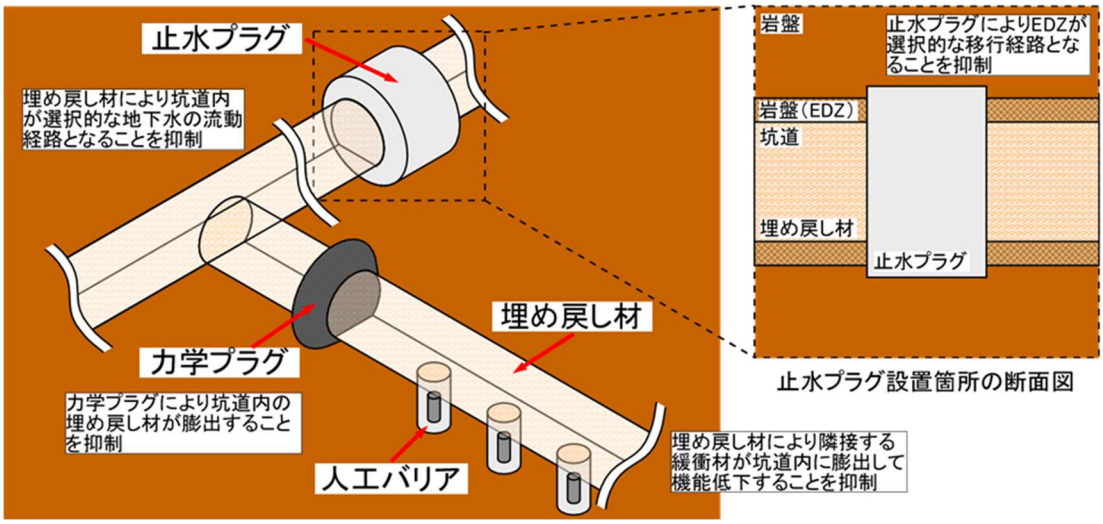
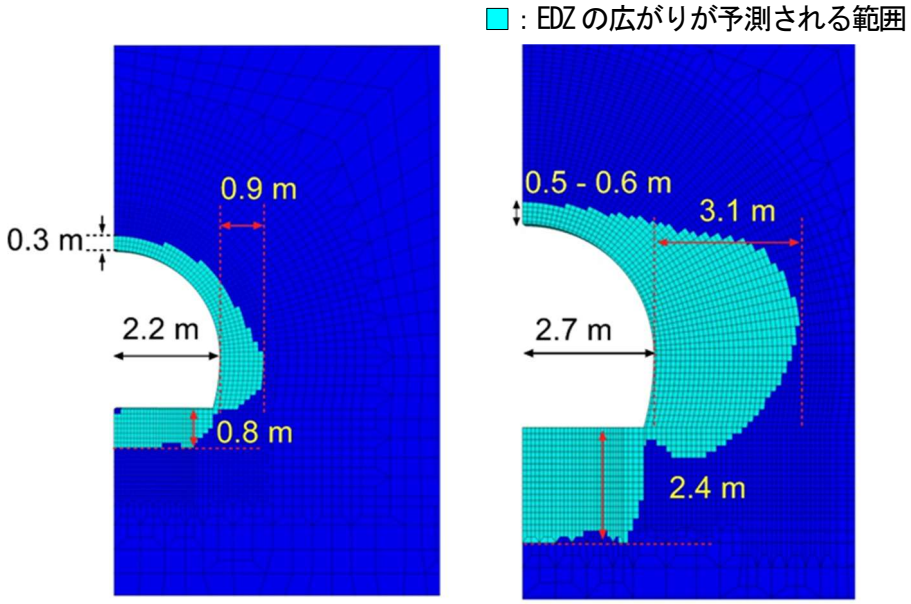


図 40　処分場の閉鎖段階のイメージ図

令和６年度は、500m試験坑道８・9における原位置調査に先立ち、坑道の配置や人工バリアを定置するピットの配置を設計する際に考慮する必要がある坑道周辺の EDZ の広がりや坑道・ピットへの湧水量を予測しました。その際、350m 調査坑道における調査において妥当性が確認された手法や概念を適用し、深度 350 m の特徴との違いを確認しました。

EDZ の広がりの予測に先立ち、350m試験坑道３（図 5参照）を対象とした解析を実施した結果、EDZ の広がりが最も大きいのは側壁で、0.9 m程度でした。この結果は、坑道周辺のボーリング調査や割れ目観察の結果とも整合していました（図 41(a)）[53]。これを踏まえて、500m試験坑道９（図 6参照）における EDZ の広がりを予測する解析を実施した結果、側壁で 3.1 m、底盤で 2.4 mと、350m試験坑道３よりも EDZ が大きく広がることが予測されました。これ

は、深度 500 m および深度 350 m で岩盤の強度に大きな差がないものの、深度 500 m は深度 350 m と比較して坑道周辺に作用する地圧や間隙水圧が大きいことや、坑道の径の違いや岩盤の応力状態に対する坑道の掘削方向の違いなどに起因するものと考えられます(54)。



(a) 350m 試験坑道 3　　(b) 500m 試験坑道 9

図 41　350m 試験坑道 3 と 500m 試験坑道 9 における EDZ の広がりの予測結果

湧水量の予測に関して、坑道掘削後の湧水量の自然低下量は、水みちのつながり方の次元を利用して予測できると考えられます(32)。地上からのボーリング調査結果に基づくと、深度 500 m 付近における水みちのつながり方の次元は 1.0 に近いと推定されます(55)。このことから、深度 500 m は、深度 350 m と比較して水みちの連結性がさらに低く、坑道掘削後の湧水量の自然低下量がさらに大きくなると予測しました。

500m 試験坑道 8・9 の原位置調査では、これらの予測結果の妥当性を確認するために、各ボーリング調査、坑道内での地質観察、物理探査（トモグラフィ調査)、湧水量計測を含む原位置調査を計画しました（図 42)。そして、令和 7 年 2 月に、最初の原位置調査として、500m 試験坑道 8・9 の掘削に先立つボーリング調査(先行ボーリング調査)を実施しました（図 43)。先行ボーリング調査では、岩石コアの採取や、掘削されたボーリング孔を利用した透水試験を行い、岩石の強度や岩盤の透水性などのデータを取得するとともに、

先行ボーリング孔を利用した地下水圧のモニタリングを開始しました。

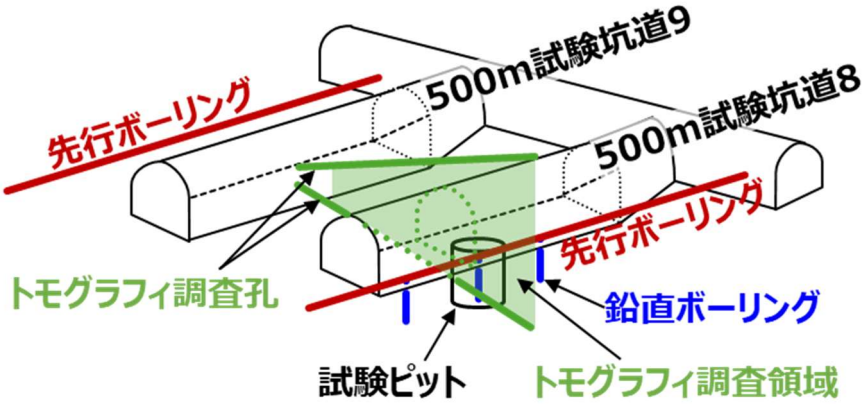


図 42　500m 試験坑道 8・9 における原位置調査のイメージ図

先行ボーリング調査では、岩石の強度や岩盤の透水性などのデータを取得します。500m 試験坑道 9 を先に掘削した後、500m試験坑道 8 の掘削前後でトモグラフィ調査を行い、坑道掘削による EDZ の広がりを把握します。坑道掘削後の坑道湧水量をモニタリングし、湧水量の経時変化データを取得します。これらの調査結果を用いて予測結果を適宜更新し、調査開始前の予測結果と比較することで、予測手法の妥当性を検証します。なお、鉛直ボーリングおよび試験ピットの位置は、先行ボーリングなどの結果に基づき決定するため、最終的なレイアウトはこのイメージ図と異なる可能性があります。

(a) ボーリング孔の掘削

(b) ボーリングコアの観察

図 43　先行ボーリング調査の様子

処分場の閉鎖段階において「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」を確保するために検討されている坑道の埋め戻しと止水プラグの設置[56]では、周辺岩盤と坑道周辺の EDZ の透水性を考慮して設計することや、実現性の見通しのある技術で製作施工が可能であることが重要となります。坑道の埋め戻しと止水プラグの設計から施工に至るまで

の一連の技術を確認するために 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の施工試験（図 44）（以下、原位置施工試験）を計画しています。令和 6 年度は、埋め戻し材や止水プラグの設計に必要な情報である坑道周辺の EDZ の広がりや水理特性を把握するために、350m 試験坑道 6 においてボーリング調査を実施しました。また、埋め戻し材や止水プラグの材料特性とその施工性を把握するための地上吹付け試験を実施しました。

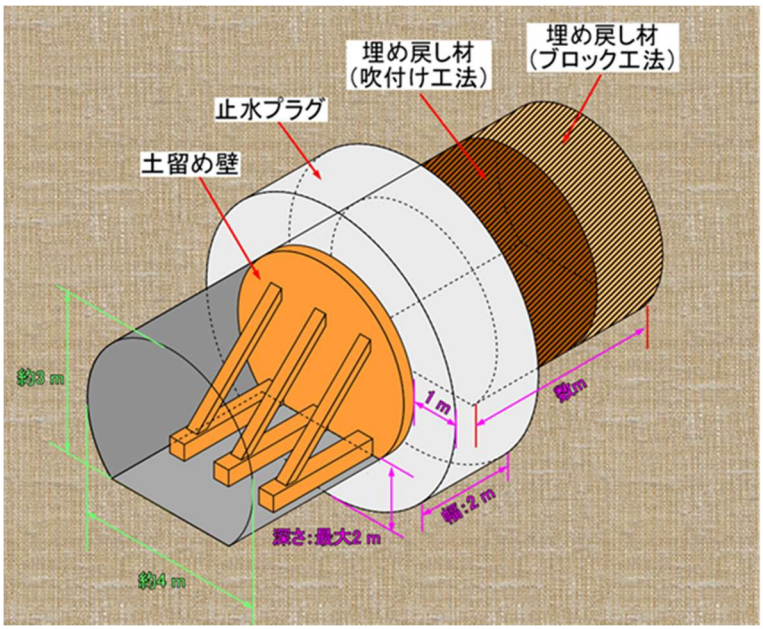


図 44　坑道の埋め戻し材と止水プラグの施工試験の概略図

350m 試験坑道 6 の奥から数 m 程度を埋め戻した後、坑道の一部を拡幅して止水プラグを設置することを計画しています。坑道の埋め戻しの範囲や止水プラグの位置は、ボーリング調査や水理試験、施工方法の検討結果などを踏まえて、今後決定する予定です。図は参考文献(57)を一部改変しています。

350m 試験坑道 6 のボーリング調査では、坑道の底盤から 2 本のボーリング孔（B1 孔および B2 孔）を掘削して、コア観察と BTV※観察を実施しました。B1 孔では底盤から深度 1.2 m 区間に引張割れ目が集中しており、2.0 m～4.4 m の区間ではいくつかのせん断割れ目が確認されました。B2 孔では、底盤から深度 1.5 m の区間で引張割れ目が集中していました。このように 350m 試験坑道 6 の底盤部では、底盤から深度 1.5 m までの範囲で EDZ の特徴である引張割れ目の頻度が高いことが分かりました(57)。また、ボーリング孔内をパッカーでいくつかの試験区間に区切り、透水試験を実施しました。図 45 に B1 孔と

B2 孔の透水試験の試験区間と透水試験で観測された透水係数を示します。透水試験の結果、B2 孔では引張割れ目の頻度が高い底盤から深度 1.5 m までの範囲（区間 3、4）の透水係数は 10^{-8} m/s～10^{-6} m/s の値を示しており、この範囲の透水係数は稚内層の健岩部と比較して高い値であることが分かりました[58]。B1 孔の区間 2、3 の透水係数が B2 孔の区間 1、2 と比べて高いのは、2.0 m～4.4 m で確認されたせん断割れ目の影響であると考えられます。なお、透水試験終了後は、B1 孔と B2 孔の試験区間における間隙水圧をモニタリングしています。

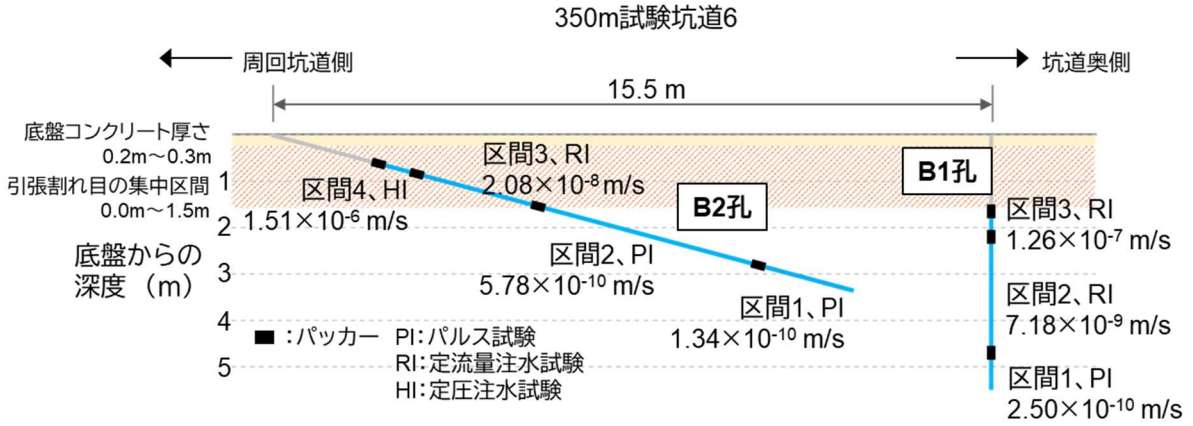


図 45　透水試験の試験区間と透水係数分布

図中に示す底盤からの深度には底盤コンクリートの厚さを含んでいます。止水プラグの設置位置はボーリング調査や水理試験などの結果や施工方法の検討結果などを踏まえて、今後決定する予定です。図は参考文献(58)を一部改変しています。

坑道の埋め戻しと止水プラグの施工においては、地下水移行抑制機能などの要求性能を満たすために、要求される品質（乾燥密度など）で確実に施工できる方法の整備が必要となります。原位置施工試験を計画するなかで、埋め戻し材の施工方法のひとつとして吹付け工法に着目し、幌延の泥岩を使用した埋め戻し材の材料仕様を検討しています。令和 6 年度は、幌延の泥岩とベントナイトを混合した埋め戻し材の特性を把握するために透水試験と膨潤圧試験を実施しました。室内試験にはケース A（ベントナイト 30%、幌延の泥岩 70%）とケース B（ベントナイト 40%、幌延の泥岩 60%）の 2 種類の配合の埋め戻し材を使用し、乾燥密度に応じた透水係数と平衡膨潤圧の値を取得できました。

また、幌延の泥岩を使用した埋め戻し材が吹付け工法で施工できるかを確

認するために地上吹付け試験を実施しました。地上吹付け試験では、室内試験で使用したケースA、Bの2種類の埋め戻し材に対して、施工含水比や吹付け空気量を変化させて（表 3）、それぞれの施工特性を確認しました（図 46）。試験後は、吹付け箱内に吹付けられた埋め戻し材の乾燥密度やリバウンド材の量などを調査しました。室内試験の結果より、埋め戻し材の乾燥密度が高いほど透水係数は小さくなるため、地下水移行抑制機能が求められる埋め戻し材にとっては、施工後の乾燥密度が高いほど良い結果となります。また、リバウンド材の量は少ないほど施工に必要となる材料の量が少なくなるので、施工後のリバウンド材の量は少ないほど良い結果となります。それらの観点で各試験ケースの結果を評価したところ、試験ケース B-1 の条件が最適であることが確認できました。これらの結果は、今後計画している原位置施工試験（図 44）の材料配合や施工条件の検討に反映することができます。

表 3　地上吹付け試験の条件

試験ケース		埋め戻し材の配合（%）	施工含水比（wt%）	吹付け空気量（m^3/min）
A	A-1	ベントナイト：30 幌延の泥岩：70	32.0	12
	A-2		35.0	12
	A-3		32.0	8.5
B	B-1	ベントナイト：40 幌延の泥岩：60	32.5	12
	B-2		34.5	12
	B-3		32.5	8.5

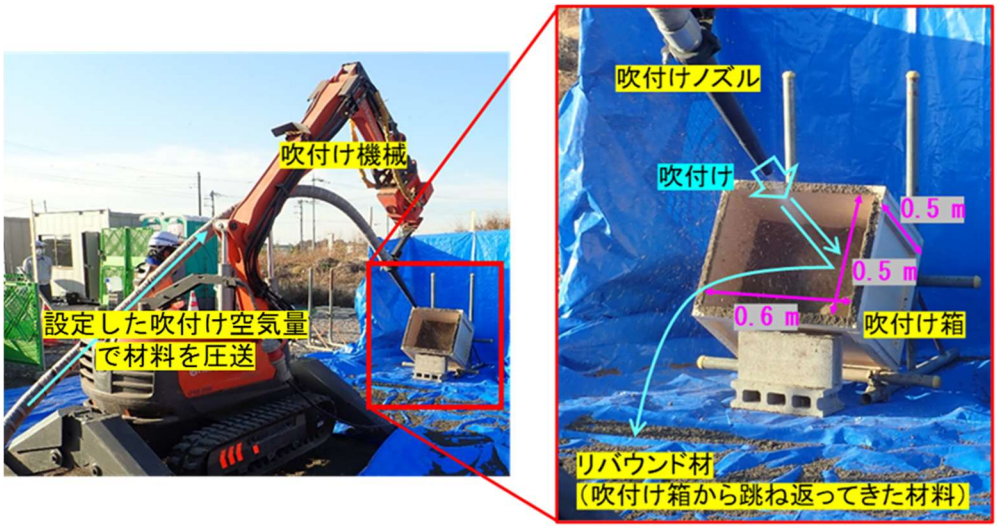


図 46　埋め戻し材の地上吹付け試験の様子

⑶ 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

地層処分事業では、断層や割れ目からの湧水が少ないことや岩盤の力学的強度が高いことが緩衝材設置の観点から重要となります。本研究では、多連接坑道のピットに人工バリアを設置する場合を想定し、原位置調査で得られたデータを用いて、以下のことを実施します。

① 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術として、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

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

令和 6 年度は、①および③に関して、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量を予測するため、約 14 年間にわたって観測された地下施設全体の湧水量（以下、坑内湧水量）と地下施設周辺のボーリング孔の地下水圧の経時変化を再現するシミュレーションを行いました。その結果、岩盤の代表的な透水性の分布を断層の水理学的連結性を考慮して設定し、定常的な坑内湧水量に寄与する湧水箇所を換気立坑の稚内層浅部の深度 255 m～深度 300 m と仮定することで、立坑/坑道掘削に伴う定常的な坑内湧水量や地下施設周辺の地下水圧の変化を再現できました（図 47）[55]。また、断層の局所的な透水性と水理学的連結性の深度変化を考慮して、断層の代表的な透水性を導出した結果、その深度変化の傾向は岩盤の代表的な透水性のそれとよく一致するとともに、深度 400 m 以深では代表的な透水性が低い断層のみに遭遇し、断層からの湧水量は既存の坑内湧水量と比べてわずかであると推定されました。これらの解析結果から、深度 380 m から深度 500 m まで坑道を掘削しても、坑内湧水量は大きく増加しないと予測されました[55]。

一方で、解析結果とは異なり、実際には地上から深度 380 m までの立坑および調査坑道を掘削する間に、換気立坑の深度 255 m～深度 300 m 以外からも地下水が坑道内に流入し、坑内湧水量は一時的に大きく増加しました（図 47）。しかし、この流入は数年で無視できるレベルまで減少しており、最終的には換気立坑の深度 255 m～深度 300 m までの坑内湧水量で説明できる湧水量に落ち着いています。このような湧水量の減少は、時間の経過とともに隣接する湧水箇所同士の水圧干渉が発生し始めたことによると考えられます[55]。

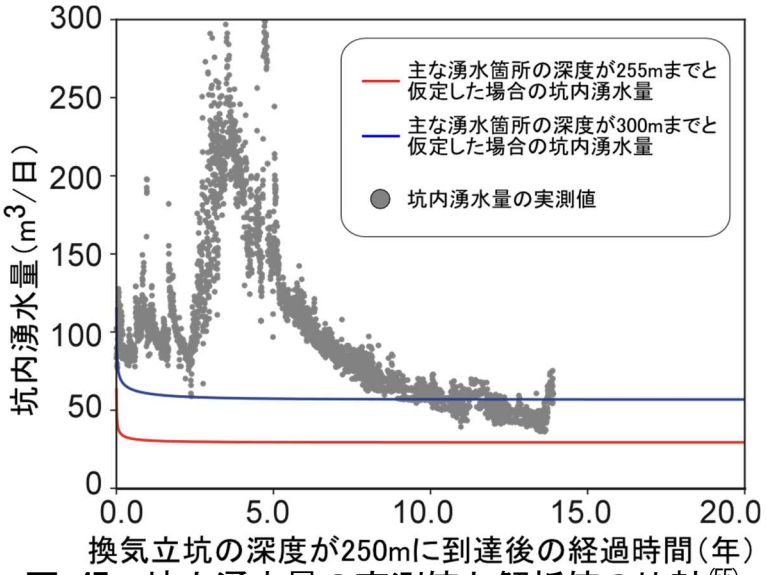


図 47　坑内湧水量の実測値と解析値の比較[55]

シミュレーションでは、換気立坑の深度 250 m～深度 300 m にある湧水点が稚内層の坑内湧水量の大部分を占めると仮定して、換気立坑が深度 0 m～深度 255 m まで掘削された条件と、換気立坑が深度 0 m～深度 300 m まで掘削された条件の 2 ケースで湧水量を計算しました。

②のピット周辺の掘削損傷領域（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、350m 試験坑道 4（図 5 参照）で実施している人工バリア性能確認試験で掘削した試験孔周辺の EDZ を評価するために、数値解析で試験坑道、試験孔およびプラグ拡幅部の掘削を三次元で再現し、EDZ の広がりを検討しました。解析の結果、図 48 に示すように、試験孔周辺の坑道底盤から 3 m 以内の範囲では、試験坑道の掘削による EDZ に加えて、試験孔の掘削によって、孔周辺に EDZ が広がったため、EDZ の広がりが大きくなることが分かりました。しかし、坑道底盤から 3 m～4 m 付近では、EDZ の広がりは試験孔壁面から約 0.3 m～0.6 m の範囲までにとどまり、深度の増大とともに試験孔周辺の EDZ の広がりが小さくなることが示されました。

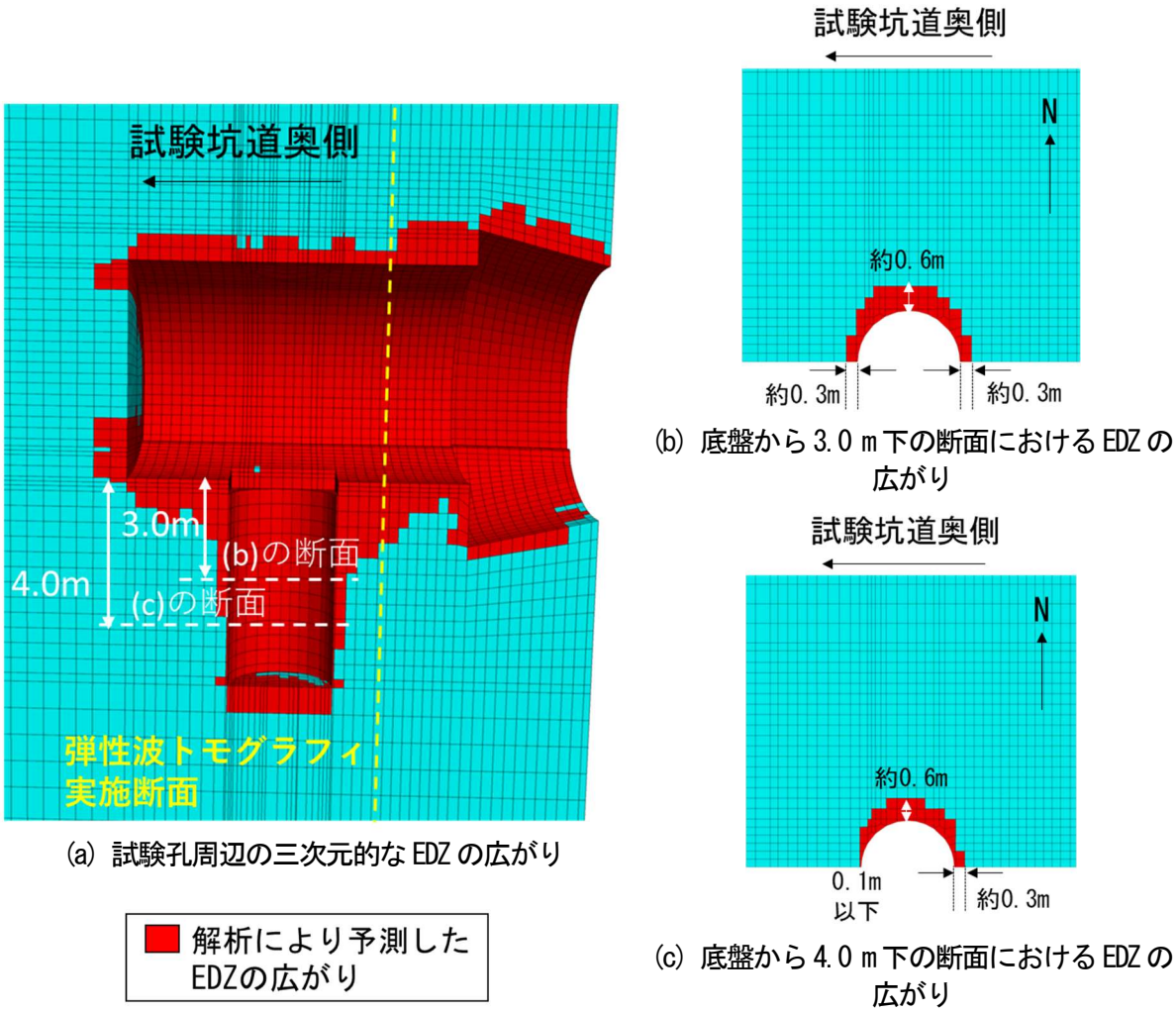
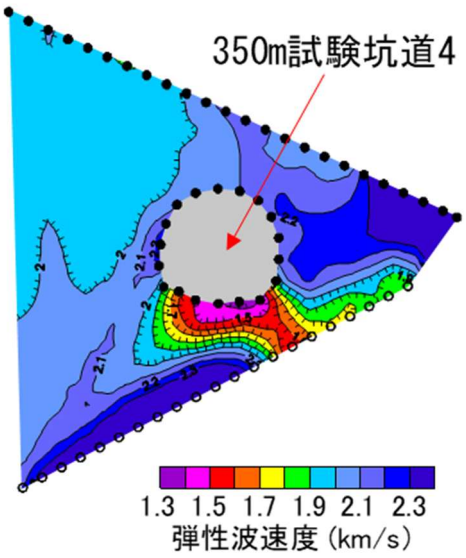
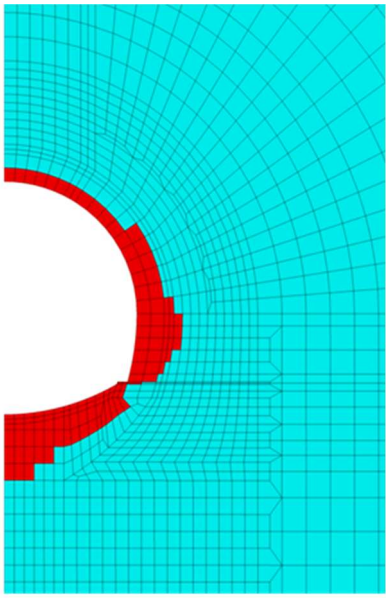


図 48　350m 試験坑道 4 で掘削した試験孔周辺の EDZ の解析結果[59]

図 48(a)の黄色点線で示す試験孔近傍の断面において、試験孔掘削後に 350m 試験坑道 4 を取り囲む領域を設定して弾性波トモグラフィ調査を実施しました。その結果、坑道底盤から約 1.4 m 程度の範囲で坑道および試験孔掘削の影響で岩盤に割れ目が発達したことを示唆する弾性波速度の低下を確認しました（図 49)。さらに、試験孔掘削後に試験孔壁面から 0.25 m～0.75 m の範囲で 3 本の鉛直ボーリング孔を掘削して割れ目を観察した結果、壁面から 0.75 m の範囲までは EDZ 割れ目が認められるものの、その発達範囲は深度が増大するとともに小さくなることを確認しました。これらの調査結果は、解析により推定した EDZ の広がりと良い一致を示します。以上の結果から、解析的に試験孔（ピット）周辺の EDZ の広がりを予測できることを示しました[59]。



(a) 弾性波トモグラフィ調査により得られた坑道周辺の弾性波速度構造



(b) 試験坑道周辺の EDZ の広がり

図 49　弾性波トモグラフィ調査実施断面における EDZ の広がりの比較

(a)から、割れ目のない岩石の弾性波速度は 2.1 km/s 程度であり、それよりも小さい値（黄色から赤色で示される領域）は割れ目の発達による速度低下領域と考えられます。坑道底盤部の低速度領域は、(b)に示す解析結果とも比較的良い一致を示します。

④のピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と侵入抑制対策への反映方法の整備に関しては、図 50 に示すように、試験孔近傍に向けて掘削したボーリング孔において確認した試験孔周辺の EDZ 割れ目を対象として、緩衝材の膨潤による開口幅の変化を検討しました。図 50 に示すように、緩衝材の膨潤により試験孔周辺の EDZ 割れ目に垂直に作用する力が増大することにより割れ目が閉じていくことが想定されます。この時の割れ目の開口幅の変化量に対する力の変化量の大きさが割れ目の閉じにくさ、あるいは割れ目の開きにくさを表し、力の変化量が大きいほど、割れ目が閉じにくい、あるいは開きにくいことを表します。この割れ目の開きにくさを、長期的に試験孔周辺の EDZ 割れ目を対象として実施した透水試験結果に基づいて分析しました。図 51 に、緩衝材の膨潤によって引き起こされる割れ目に垂直に作用する力の変化と割れ目の開口幅の変化の関係を示します。図 51 より、緩衝材の膨潤により割れ目に垂直に作用する力が 0.2 MPa 程度増大すると、それによって割れ目の開口幅が 0.13 mm から 0.09 mm まで小さくなることが示されました[60]。この関係は、試験を行った割れ目の開きにくさを表しており、図 51 の曲線で

示すような両者の関係を用いることにより、将来的に緩衝材のさらなる膨潤や、隆起侵食などの影響により割れ目に作用する応力が変わったとしても、割れ目の開口幅を定量的に予測できる可能性があることを示しました。

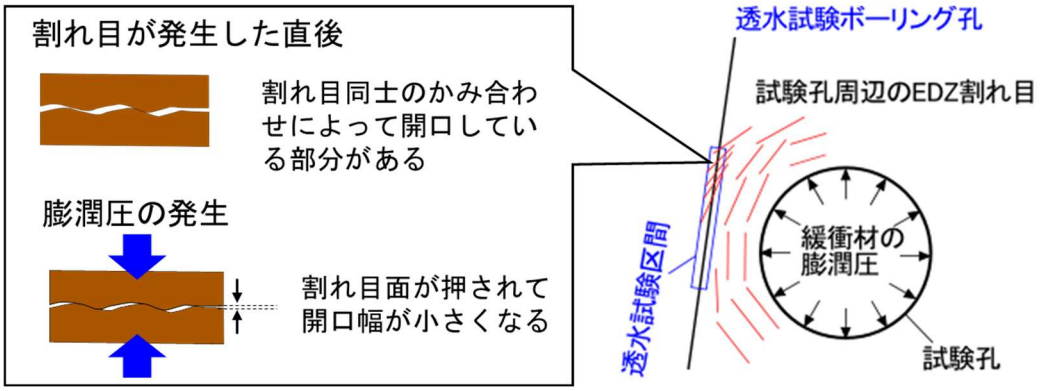


図 50　試験孔周辺の EDZ 割れ目の発達とその開口幅が緩衝材の膨潤圧によって変化するイメージ

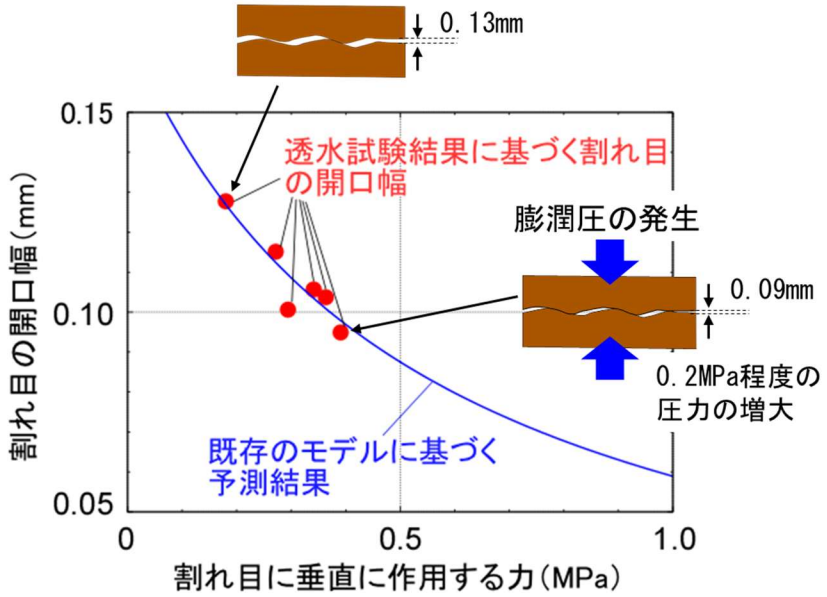


図 51　緩衝材の膨潤に伴う EDZ 割れ目の開きにくさの検討結果

(4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理

廃棄体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、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、ピット周辺の地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）、ピットの掘削損傷領

域の広がりなどの情報を取得することが重要となります。本研究項目では、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の調査・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。

令和 6 年度は、ピット周辺に存在する割れ目の開口幅とその開きにくさ、およびピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法の整理を進めました。ピット周辺に存在する割れ目の開口幅は、緩衝材の長期的な健全性を評価する上で重要な情報です。緩衝材は岩盤の割れ目と接していると、膨潤に伴って割れ目内に侵入し、その先端部から水の流れや重力により失われることで、ピット内の緩衝材の量が徐々に減少し、密度低下とともに緩衝材の透水性が増加する可能性があります[61]。このような現象はこれまでに多くの研究が行われており[62、63、64、65]、ピット内の緩衝材の損失速度は割れ目の開口幅が大きいほど速くなることが指摘されています[65]。

そこで、割れ目の開口幅の調査・評価手法を整理するために、割れ目の発達する堆積岩をいくつかの地質学的な情報に基づいて分類しました。堆積岩中に存在する割れ目の開口幅は、岩石中に含まれている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、および割れ目に充填された鉱物の溶解に影響を受けます[66、67]。これらの自己閉塞や溶解の情報に基づいて堆積岩をⅠ～Ⅳの 4 つに分類しました（表 4)。稚内層および声問層の泥岩は自己閉塞や溶解がほとんど認められないため、表 4 のうち分類Ⅰに区分されます。したがって、稚内層や声問層を対象とした既存の割れ目の開口幅に関する検討結果は、分類 Ⅰ の堆積岩に主に反映可能と考えられます。

表 4　割れ目の閉塞/充填状況に応じた地層の分類と割れ目の開口幅の調査・評価手法[66、67]

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	地層例	割れ目の開口幅[g]の最大値と岩石の強度・応力状態との相関性	割れ目の開口幅[g]の最大値	割れ目の開口幅[g]の調査・評価手法
I	限定的	限定的	限定的	稚内層[a]（珪質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）、声問層[b]（珪藻質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）、パルフリス層[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]	大～小	水理試験などから得られる原位置データに加えて、ダクティリティインデックス（DI）との関係性やバートン－バンディスのモデルから推定可能[a、b、c]
II			強い	セントビーズ砂岩層[d]（砂岩/先新第三紀堆積岩類；英セラフィールド）		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]
III		強い	－	トアキアン－ドメリアン頁岩層[e]（石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類；仏トゥルヌミール）	弱い	小	
IV	強い	－		オパリナス粘土層[f]（粘土質泥岩/先新第三紀堆積岩類；スイスモンテリ）			

a：参考文献(53、60、67、68、69、70、71)に基づく
b：参考文献(71、72)に基づく
c：参考文献(67、73、74、75)に基づく
d：参考文献(66、76、77、78)に基づく
e：参考文献(79、80、81、82、83、84、85、86)に基づく
f：参考文献(82、84、87、88、89、90)に基づく
g：水理学的な開口幅と仮定
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[91]で再現可能

これまでに稚内層、声問層および他の分類 I の堆積岩から得られた試験結果に基づくと、割れ目の開口幅が場所によって大きく変化することが考えられます。一方で、割れ目の開口幅の最大値は岩石の強度・応力状態、つまり DI に依存することが分かっています。DI の空間分布と割れ目の開口幅の最大値との関係は、地層ごとに原位置データから構築することも、既存の経験式※（図 52 の曲線）を用いることも可能と考えられます[67]。したがって、DI の

空間分布と割れ目の開口幅の最大値との関係を利用することにより、ピット周辺の割れ目の開口幅の推定の信頼性向上が可能と考えられます[53、67]。

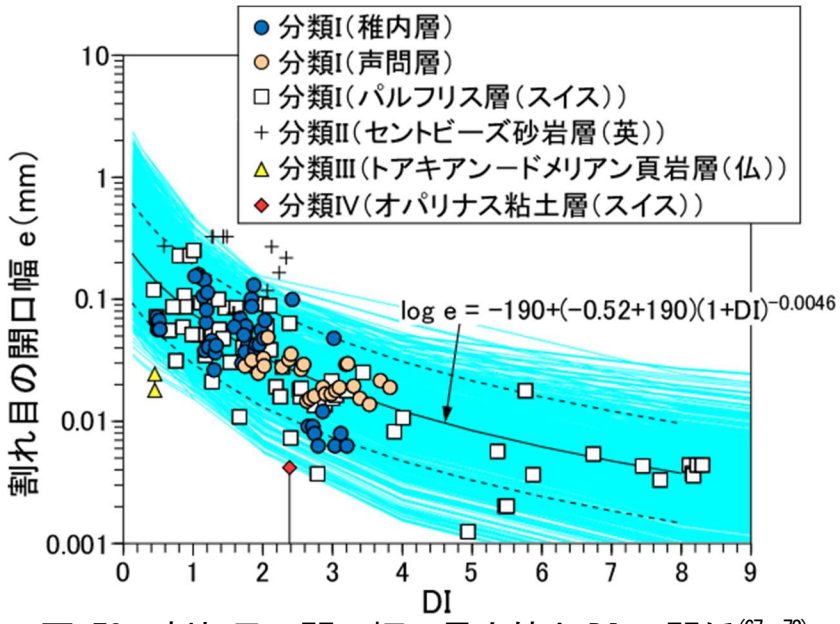


図 52　割れ目の開口幅の最大値と DI の関係[67、72]

割れ目の開口幅はボーリング孔で検出される岩盤中の主要な水みち割れ目の透水性から算出した値を用いています。図中の黒色の曲線は分類 I の堆積岩に適用可能な既存の経験式を示しており、実線が推定値、破線がその誤差（常用対数で±0.408）を表しています。水色の曲線はバートンーバンディスのモデル[91]を用いたシミュレーションの結果を表しており、DI に対する割れ目の開口幅の変化傾向が経験式の曲線とよく一致することから、経験式の信頼性が高いことが示唆されます。一方で、分類 II～IV の堆積岩は経験式の値から大きく外れていることが確認できます。

ピット周辺の割れ目の開口幅は、図 53 に示すように、緩衝材の膨潤圧の増大によって割れ目の一部に割れ目が開く力がはたらく場合に増加する可能性があります。この増加量は割れ目の開きにくさに依存し、その開きにくさは DI との関係（図 52 の曲線）から評価することも[67]、割れ目に垂直にかかる力を人為的に低下させる原位置試験から評価することも可能です[60、69、70]（図 54)。図 54 の例では、割れ目の開口幅が 2 倍になるためには割れ目に垂直にかかる力が 0.2 MPa～1.0 MPa 低下する、すなわち割れ目に対して 0.2 MPa～1.0 MPa の開く力が加わる必要があることが分かります。また、割れ目に沿ってずれが発生した場合も、開口幅が増加する可能性があります。この可能性については既存の解析方法[91]により評価することも、坑道近傍の割れ目に対する樹脂注入試験により評価することも可能です[68]。以上のような方法により、割れ目の開きにくさを考慮したピット周辺の割れ目の開口幅を評価する

ことが可能と考えられます。これにより緩衝材の損失速度を概算することが可能と考えられます[65]。

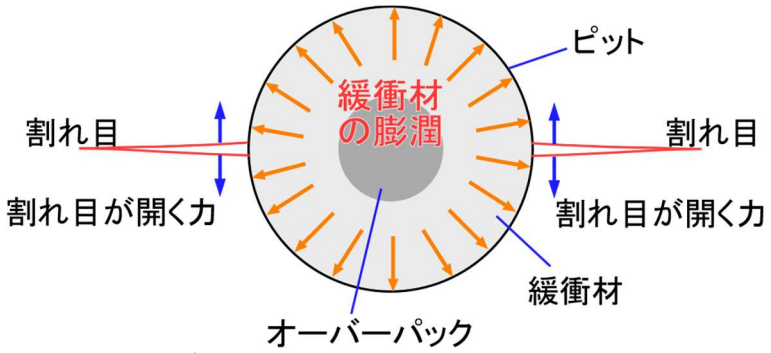


図 53　緩衝材膨潤時のピット周辺に存在する割れ目の開口幅増大の概念図

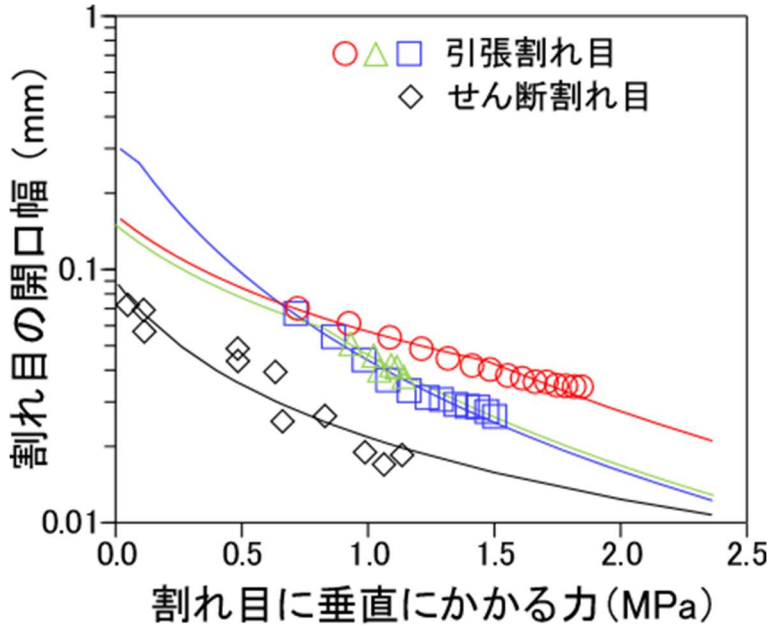


図 54　割れ目の開口幅と割れ目に垂直にかかる力の関係[60、69、70]

引張割れ目はボーリング孔を用いた定圧段階注水試験（割れ目内の水圧を注水により段階的に増加させる試験）および人工バリア性能確認試験孔エリアにおけるボーリング孔を用いた長期透水試験の結果、せん断割れ目はボーリング孔を用いた水圧擾乱試験の結果に基づいています。図中の曲線はバートンーバンディスのモデル[91]を用いたシミュレーションの結果を表しています。

次に、ピット周辺の地下水の流れにくさは、ピット周辺の岩盤の閉じ込め性能を評価する上で重要な情報です。地下水の流れにくさは、岩盤中の地質構造に依存し、割れ目が発達する堆積岩の場合は、割れ目の透水性に支配されます[74]。しかし、割れ目内の隙間が不均質に存在する場合、原位置試験で得られる割れ目内の局所的な透水性は必ずしも割れ目の代表的な透水性を表すとは限らず、地下水の流れにくさを正しく評価するためには、割れ目の代

表的な透水性を推定する必要があります[55、75]。

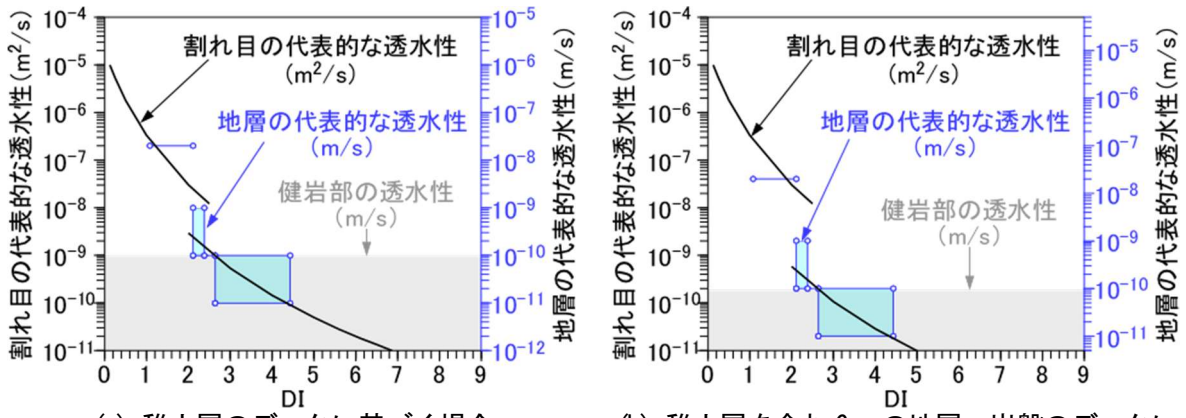
そこで、割れ目の代表的な透水性の調査・評価手法を整理するために、割れ目の発達する堆積岩をいくつかの地質学的な情報に基づいて分類しました。堆積岩中に存在する割れ目の代表的な透水性は、割れ目の局所的な透水性と割れ目の水理学的連結性に依存し、割れ目の局所的な透水性については表 4 と同じ 3 つの要素に、割れ目の水理学的連結性については岩石の透水性に影響を受けます[55、67、92]。これらの 4 つの要素に基づいて、地層を I-a～IV の 5 つに分類しました（表 5）。稚内層は分類 I-a に、声問層は分類 I-b に区分されます。したがって、稚内層および声問層で得られた試験結果はそれぞれの分類の堆積岩に主に反映可能と考えられます。

表 5　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[55、66、67、92]

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[b]（珪質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）、パルフリス層[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]	声問層[d]（珪藻質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）		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]
II			強い	ー	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			
III		強い	ー	ー	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）			小	
IV	強い	ー	ー	ー	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[93]
b：参考文献(24、25、55、67、71、92、94、95、96、97)に基づく
c：参考文献(67、73、74、75、94、98、99、100)に基づく
d：参考文献(32、55、71、72、92、93、94、95、97、101、102、103)に基づく
e：参考文献(66、76、77、78、104、105)に基づく
f：参考文献(79、80、81、82、83、84、85、86、106、107)に基づく
g：参考文献(82、84、87、88、89、90、108、109、110)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[91]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）[92、94]

これまでに稚内層および他の同分類の堆積岩から得られた試験結果に基づくと、割れ目の開口幅と同様に、表 5 の分類 I-a の堆積岩は割れ目の代表的な透水性が場所により大きく変化することが考えられます。一方で、割れ目の代表的な透水性はDI に依存し、DI は空間分布の推定が可能であることが分かっています。したがって、DI の空間分布と、割れ目の代表的な透水性との関係を利用してピット周辺の割れ目の代表的な透水性を推定することにより、推定の信頼性を向上させることが可能と考えられます[55、67、92]。DI と割れ目の代表的な透水性の関係は地層ごとに原位置データから構築することも（図 55(a)の曲線）、既存の関係式（図 55(b)の曲線）を用いることも可能です。推定した割れ目の代表的な透水性は、地下水の水圧や水質、年代、あるいは坑道掘削時における坑道周辺の水圧の変化によりさらに検証することが可能です[24、25、74、94、95、97、98、100]。ピット周辺の DI は坑道埋め戻し後の水圧の変化や地層の隆起侵食などによって変化しますが、その際の割れ目の代表的な透水性の変化量は DI との関係（図 55 の曲線）や水圧擾乱試験により評価することが可能です[67、92]。水圧変化や地殻変動に伴って割れ目のずれが生じる場合の割れ目の透水性の変化量についても、DI との関係（図 55 の曲線）や水圧擾乱試験により評価することが可能です[67、69、92、96]。



(a) 稚内層のデータに基づく場合　　(b) 稚内層を含む 6 つの地層・岩盤のデータに基づく場合

図 55　稚内層中の割れ目の代表的な透水性と DI の関係[55、67、92]

割れ目の代表的な透水性を表す曲線は、割れ目の局所的な透水性と DI の関係[67]、割れ目の水理学的連結性と DI の関係[92、97]、割れ目の局所的な透水性と水理学的連結性、および代表的な透水性の関係[55]から導出したものです。同曲線の DI に対する透水性の変化傾向は、別のデータから推定される実際の地層の代表的な透水性[55、75]の変化傾向とよく一致することから、同曲線の信頼性は高いと考えられます。DI が 2 よりも大きくなると、地層の透水性は健岩部相当の透水性（10^{-11} m/s 以下）まで低下します。

5.2　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

令和2年度以降は、人工バリアの構成要素である緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態での人工バリアとその周辺岩盤の領域（ニアフィールド）において発生する現象の整理、人工バリア性能に係る試験データの整備、解析手法の開発を行うとともに、ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示します。これらの目標が達成されることにより、地層処分場において想定外の要因により緩衝材の温度が 100℃を超えた状態となった場合の人工バリアの挙動を検討できるとともに、高温条件下での人工バリアの安全裕度を評価できます。なお、本課題と関連する「4.1 人工バリア性能確認試験」では、100℃以下での温度条件下において熱ー水理ー力学ー化学連成現象に係るデータを取得していますが、ここでは、100℃超になった際に、これらの連成現象の熱に関わる部分においてどのような現象が生じるかを把握することになります。また、本課題は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である令和 5 年度および令和 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]：ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発」）を活用して実施しました。

原位置試験の実施にあたり、令和5年度に、350m 試験坑道 5（図 5 参照）に掘削されている 2 つの既存孔に、形状（ドーナツ型および 2 分割の扇形）および初期含水比（10.5%および 15.0%）の異なる緩衝材ブロック、温度や孔内水位などが測定可能な計測センサー、ならびに緩衝材を加熱するためのヒーターを設置しました（図 56、図 57）[20、34]。緩衝材ブロックは、ベントナイト（クニゲル®V1）とケイ砂（3 号と 5 号を 1:1 で混合）を 70:30 の割合で混合し、外径50 cm、内径11 cm、高さ10 cm、目標乾燥密度約1.8 Mg/m^{3}で加圧成形したものです。また、初期含水比（10.5%および 15.0%）および形状（ドーナツ型および2分割の扇形）を変えて作製し、図 56 に示す順番で積み上げました。以上の設置工程の後、ヒーター温度 140℃での加熱を開始しました[20、34]。

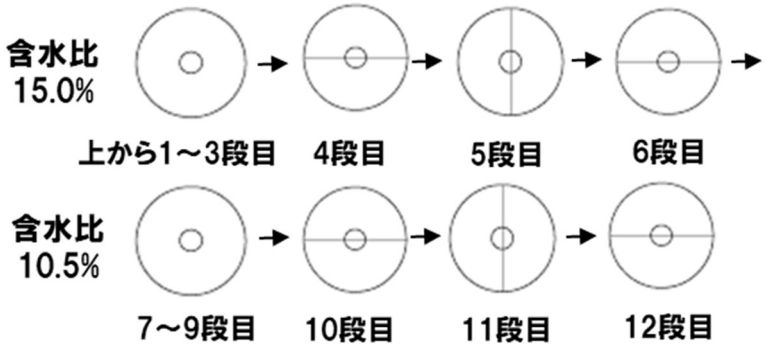


図 56　緩衝材ブロックの積み上げ順

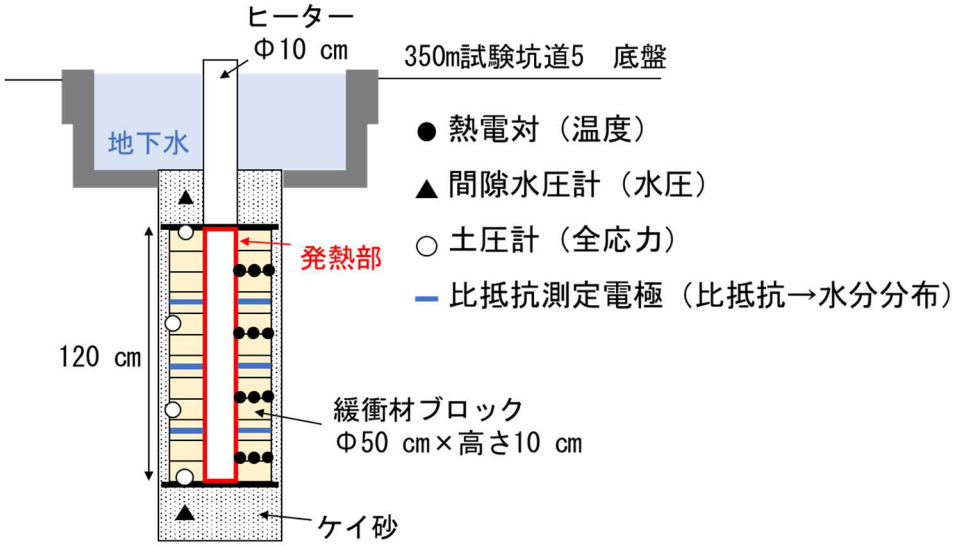
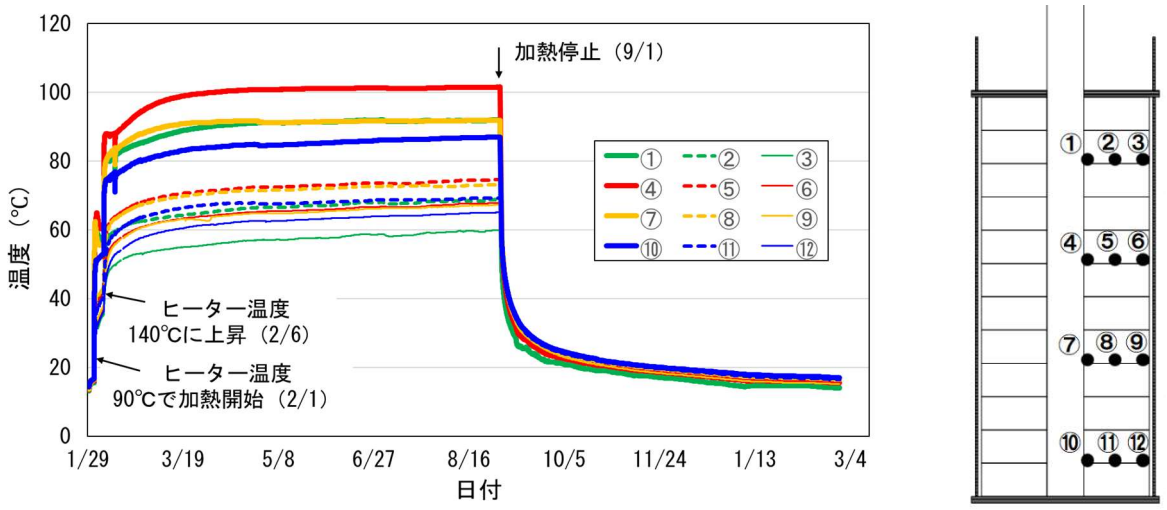


図 57　試験体の設置概略図

令和 6 年度は、令和 5 年度に加熱を開始した二組の試験体に対して加熱期間中の温度などの変化をモニタリングしました（図 58)。温度の時間変化が小さくなったことを確認したのち加熱を停止し、その後直ちに、一組の試験体を取り出して解体しました。解体時に試験体を観察した結果、12 段の緩衝材ブロックのうち上から 3 段目～12 段目のヒーター接触部において、厚さ 1 cm 程度のひび割れが認められました（図 59(a))。また、緩衝材ブロックのヒーター接触部から外側に向かって約 8 cm 程度までの距離において色調の変化が認められました（図 59(b))。これらは、ヒーターでの加熱による水分移動により生じたものと考えられます。なお、残りの一組の試験体については、「4.1 人工バリア性能確認試験」において、熱－水理－力学－化学連成現象の評価のための参考情報として既設の自動計測機器でのデータ取得を継続します。



(a) 温度変化　　(b) センサー位置

図 58　緩衝材中の温度の計測結果

(a) ヒーター接触部に認められた緩衝材ブロックのひび割れ　　(b) 緩衝材ブロック内側の色調変化

図 59　試験体の解体状況

解体により採取した緩衝材ブロックに対して、その特性に関する分析を行いました。緩衝材ブロックの含水比は、ヒーター接触部から中心位置までの距離が 2 cm の試料で約 5%～10%であり、それより外側に向かうにつれて増加し、接触部から 13 cm～17 cm で 20%前後の値を示しました（図 60)。この結果は、上記の色調変化の観察結果とも整合的であり、緩衝材外側からの地下水の浸潤とヒーターの加熱による水分の移動により、緩衝材内側の水分量が相対的に低くなったことによるものと考えられます。また、各採取試料の乾燥密度と含水比をプロットすると、含水比が高い緩衝材外側ほど乾燥密度が小さい傾向が認められました（図 61)。初期含水比 15%で製作した上から 1～6 段目の緩衝材ブロックでは、14 点の試料が温度履歴を受けていない試料（15%

リファレンス）よりも低い含水比を示し、うち 12 点が緩衝材ブロックの初期乾燥密度である 1.8 Mg/m^3 より高い乾燥密度を示しました。これらの試料は、1 点を除いてヒーター接触部から中心位置までの距離が 4 cm～8 cm であり、相対的にヒーターに近い試料でした。一方、初期含水比 10.5%で製作した上から 7～12 段目の緩衝材ブロックでは、温度履歴を受けていない試料（10.5%リファレンス）より低い含水比を示す試料も、乾燥密度が初期値の 1.8 Mg/m^3 を上回る試料も、相対的に少ない傾向にありました。以上の結果から、加熱により緩衝材ブロックの内側から外側へ水分が移動して含水比が変化するとともに、緩衝材の内側の収縮および外側の膨潤により乾燥密度も変化したと考えられ、初期含水比の大きい上から 1～6 段目の方が、このような水分の移動に伴う影響が大きかったと考えられます。

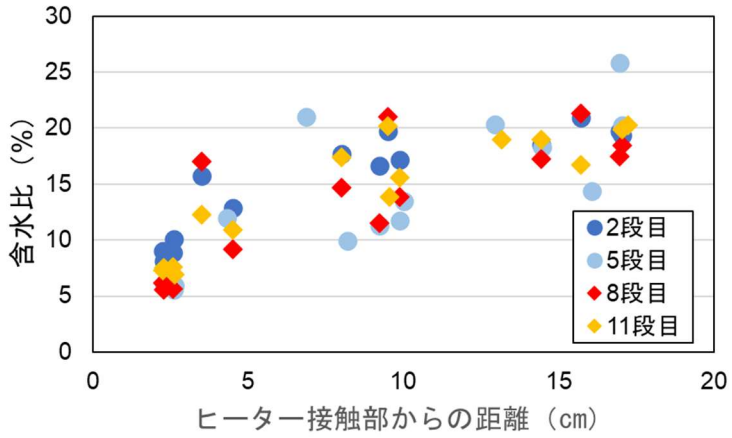


図 60　緩衝材ブロック内での含水比の分布

緩衝材ブロックから採取した直径 3 cm～5 cm の円柱状の試料を使用して飽和度を測定しました。図の各点は採取した試料の中心を示しています。

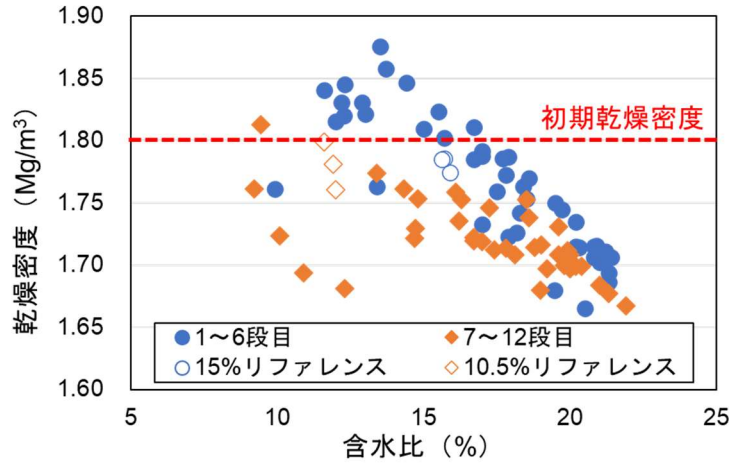


図 61　緩衝材ブロック内の乾燥密度と含水比の関係

ヒーター接触部から中心位置までの距離が 5 cm～8 cm で採取した試料の一部は、同じ飽和度（約 50%）と乾燥密度（1.7 Mg/m^3～1.8 Mg/m^3）で温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が半分程度に低下していること（図 62）が分かりました。また、約 4 cm～6 cm の位置で採取した試料の一部は、同じ乾燥密度で温度履歴を受けていない緩衝材と比べて透水係数が 1 桁程度高いこと（図 63）が分かりました。一方、膨潤圧や、緩衝材中に含まれるモンモリロナイト※の鉱物組成には、加熱の有無による顕著な違いはないことが分かりました。

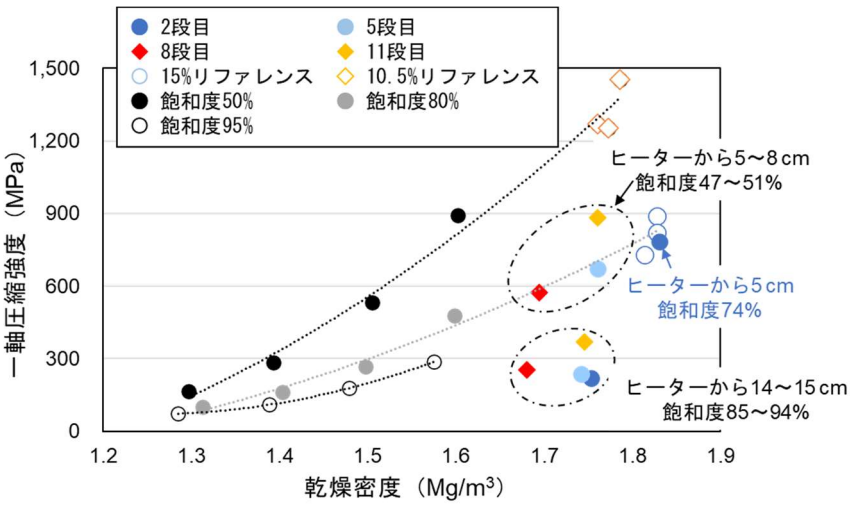


図 62　緩衝材ブロック内の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

「飽和度 50%」「飽和度 80%」および「飽和度 95%」の各データは、原位置試験と同配合の緩衝材を用いて実施された室内試験の結果[111]に基づきます。

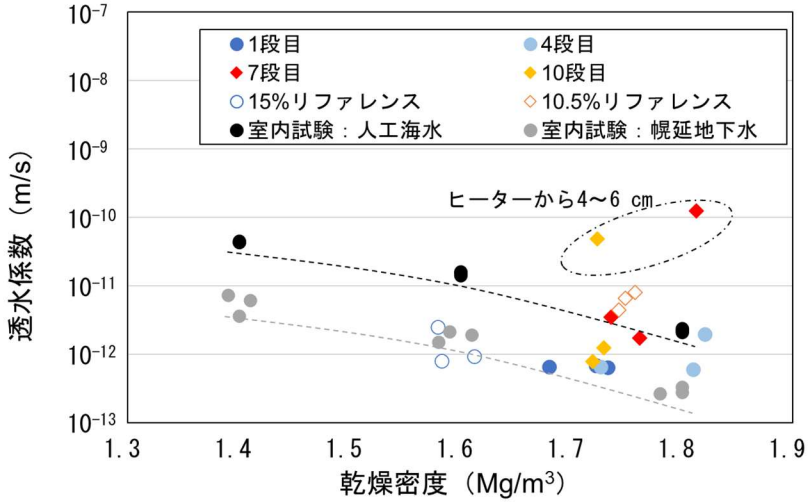


図 63　緩衝材ブロック内の透水係数と乾燥密度の関係

「室内試験：人工海水」および「室内試験：幌延地下水」の各データは、原位置試験と同配合の緩衝材を用いて実施された室内試験の結果[112、113]に基づきます。

図 58 に示した温度の計測結果は、試験の設計段階で実施した予測解析結果[10]よりも 20℃～30℃ほど低かったため、この違いを検討するための再現解析を実施しました。再現解析では、予測解析では考慮していなかったヒーターと緩衝材ブロックの間の数 mm の隙間、350m 試験坑道 5 の坑道換気、周辺岩盤からの地下水流入による冷却効果を追加し、緩衝材中の温度分布へ与える影響を調査しました（図 64）。その結果、ヒーターと緩衝材ブロック間の隙間の有無が緩衝材の最高温度に及ぼす影響が最も大きいことが分かりました。再現解析では、隙間の影響に加えて 350m 試験坑道 5 の坑道換気、周辺岩盤からの地下水流入による冷却効果を追加することで、緩衝材中の温度分布を再現できることが分かりました（図 65）。

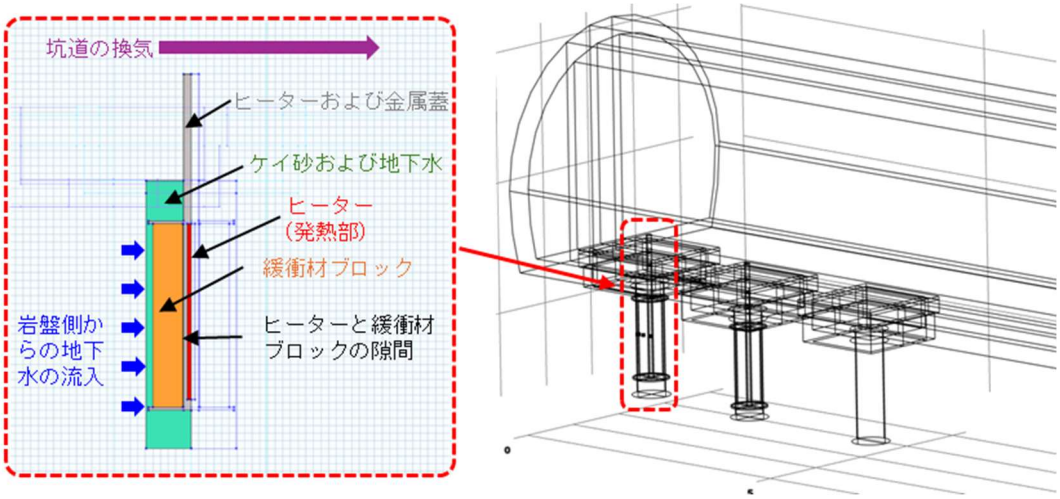


図 64　試験体周辺および 350m 試験坑道 5 の解析モデル

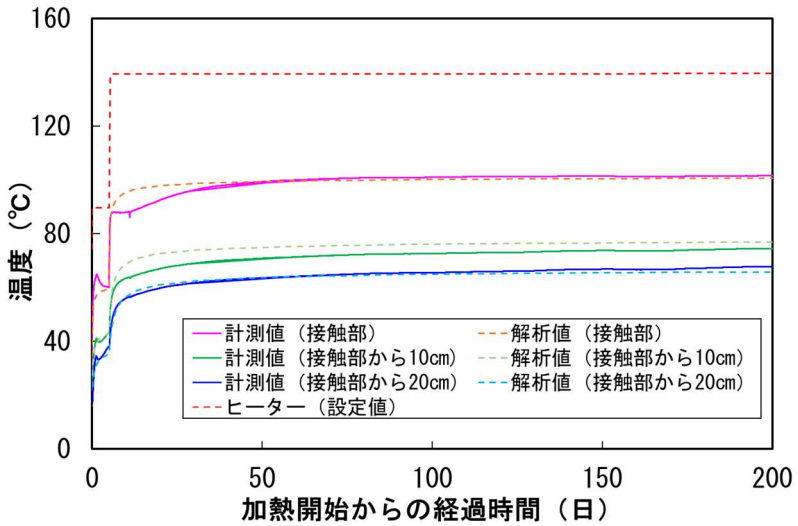


図 65　熱電対による温度の計測結果と再現解析の一例

また、高温条件下での緩衝材のひび割れの発生ならびに閉塞挙動を確認するための室内試験を実施しました。試験は、初期含水比の異なる直径 5 cm、高さ 5 cm の円柱形の 2 つの試験体（加熱前の乾燥密度 1.4 Mg/m^3）を 140℃で加熱した後、試験体の下端から水を浸潤させ、一定時間ごとに X 線 CT 撮影を行いました。令和 5 年度は、加熱後に蒸留水を浸潤させた場合、ひび割れが優先的な水みちとなるような浸潤挙動は確認されないこと、生じたひび割れが蒸留水の浸潤により閉塞されることを明らかにしました[20]。令和 6 年度は、蒸留水の代わりに 350m 調査坑道で採取される地下水と同程度の塩濃度の水（1.5%の NaCl 溶液）を浸潤させましたが、その場合の水の浸潤やひび割れの閉塞の挙動（図 66）は、蒸留水の場合と同様であることが分かりました。

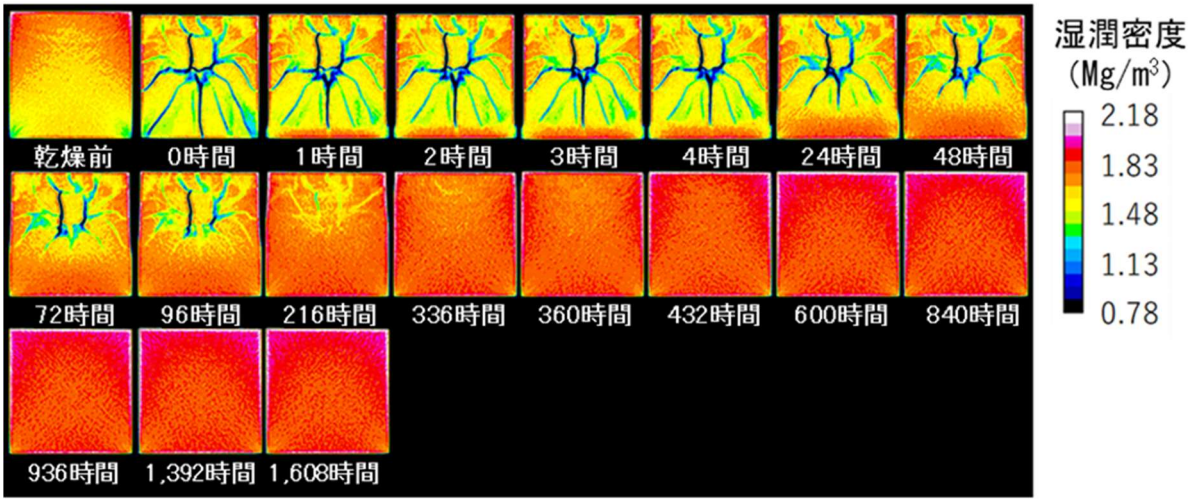


図 66　X 線 CT を活用した緩衝材試料の湿潤に関する室内試験結果（幌延地下水と同程度の塩濃度の水を浸潤させた場合）

ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方の一例として、以下の知見に基づき、原位置試験のヒーター温度を決定しました。令和 2 年度ならびに令和 3 年度に整理した、高温状態で緩衝材に生じ得る現象の事例調査に基づくと、諸外国では、おおむね 150℃までは緩衝材に顕著な変質が生じないとの見解が得られています[114、115]。また、比較的長期間で緩衝材特性に影響を及ぼし得ると考えられるイライト（雲母鉱物）化に関して、令和 3 年度ならびに令和 4 年度に机上検討を行い、より現実的な温度履歴や反応速度式・地下水の化学組成などの不確かさを考慮しつつ、スメクタイトのイライト化※割合と時間との関係を見積もりました[9、10]。さらに、緩衝材以外の人工バリ

アの構成要素への高温影響として、オーバーパックの耐食性への影響に関する室内試験から、おおむね 140℃を超える温度では炭素鋼の局部腐食が顕在化する可能性が示唆されています[116]。以上の知見に基づき、今回実施した原位置試験ではヒーター温度を 140℃に設定しており、同様の考え方が上限温度の設定に適用できると考えられます。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から 5 年間にわたり、高温条件において人工バリア周辺で生じる現象の整理と課題の抽出、抽出された課題に基づく室内試験ならびに原位置試験を行ってきました。原位置試験の解体調査の結果から、ヒーターを用いた 100℃を超える温度での加熱により緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じることが確認され（図 59(a)）、その近傍の緩衝材では、温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が低く透水係数が高い傾向が確認されました。一方で、室内試験の結果から、高温度での加熱により緩衝材にひび割れが生じてもそれらが優先的な水みちとなるような浸潤挙動は確認されず、生じたひび割れは、蒸留水を浸潤させた場合および塩水を浸潤させた場合（図 66）のいずれも閉塞することが示されました[20]。さらに、比較的長期間で緩衝材特性に影響を及ぼし得ると考えられるイライト（雲母鉱物）化に関して令和 3 年度ならびに令和 4 年度に机上検討を行い、緩衝材に許容される上限温度について、より現実的な温度履歴や反応速度式・地下水の化学組成などの不確かさを反映して見積もることができました[9、10]。これらにより、実際の岩盤中で、短期的に 100℃を超えた場合に緩衝材に生じる変質や人工バリアおよびその周辺に発生する現象を把握するとともに、人工バリア周辺における上限温度設定の考え方を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は、参考資料の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1　水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和 2 年度以降は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握が課題となります。そのため、断層沿いに亀裂の発達する幅が数十 cm 程度のより大型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）の評価手法の確認を行います。具体的には、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)、ダクティリティインデックス（DI）を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備、水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備を行います。

令和 6 年度は地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握手法の整備を目的として、過年度に実施した断層の水圧擾乱試験の結果を用いて断層の水理学的連結性を詳細に解析しました。地層中に断層が発達する場合、地層の透水性を理解するためには断層の水理学的連結性を把握することが重要となります。断層の水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元が水圧擾乱試験中にどのように変化したかを調べた結果、水みちのつながり方の次元は DI と連動して変化し、その両者の関係は透水試験により地層中に広く認められる水みちのつながり方の次元と DI の関係とよく一致することが分かりました（図 67)。DI が変化しない状態で断層のずれが水みちのつながり方の次元に与える影響についても調べた結果、断層のずれは水みちのつながり方の次元にほとんど影響を与えないことが確認できました（図 68)。これらのことから、地殻変動によって断層にかかる力が変化したり断層がずれたりしても、断層の水理学的連結性の変化は常に DI との関係により推定することができ、その関係は水圧擾乱試験により検証できることが確認できました[92、96]。この結果と、断層内の隙間の大きさと DI の関係に関する既存の研究成果（図 52）を踏まえると、稚内層に類似する地層（表 5 の分類 I-a）の場合、地殻変動が地層の透水性に与える影響は、断層の水理学的特性と DI との関係により評価できることが分かりました[67、69、92、96]。

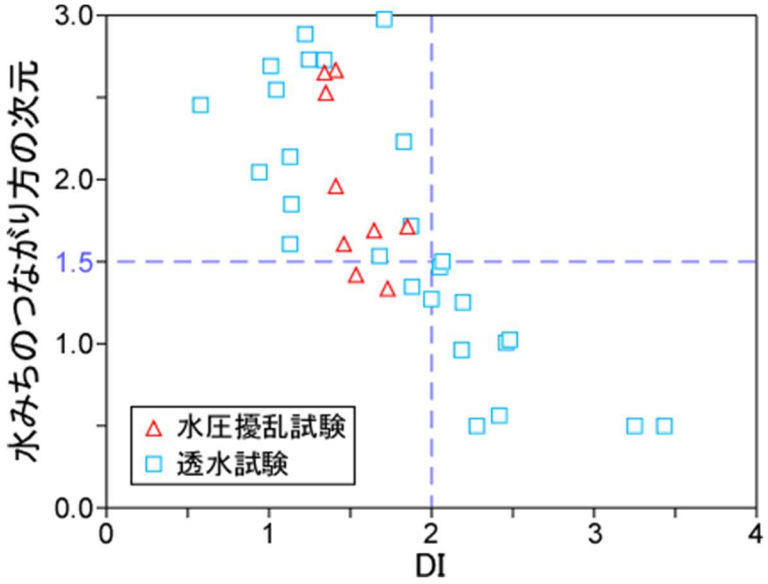


図 67　水圧擾乱試験および透水試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係[92]

水圧擾乱試験は断層沿いの割れ目の発達幅が数 cm 程度の規模の断層の試験結果を、透水試験は様々な規模の断層の試験結果を示しています。

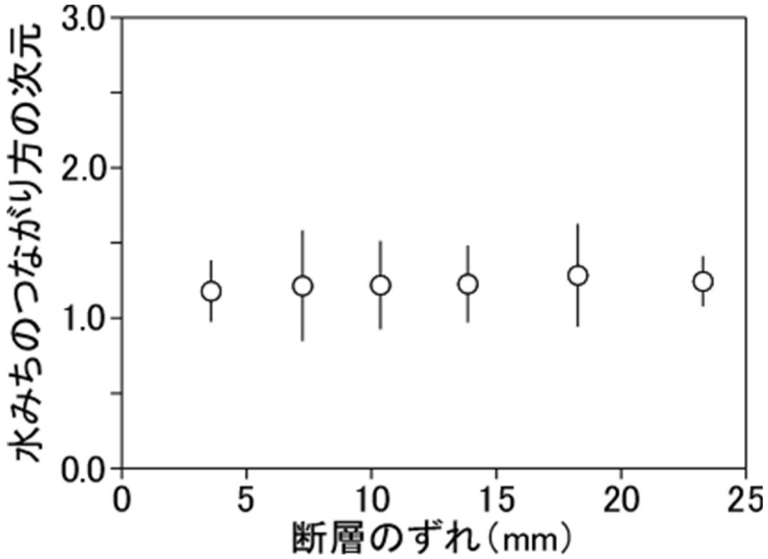


図 68　水圧擾乱試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と断層のずれの関係[92]

断層沿いの割れ目の発達幅が数十 cm 程度の規模の断層の試験結果を示しています。

DI を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、割れ目の水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元と DI の関係を理解するための数値シミュレーションと理論的な計算を行いました。数値シミュレーションでは、仮想の割れ目をコンピュータ上で作成し、割れ目内の流路面積の割合を変化させて仮想の透水試験を行い、割れ目内の

流路面積の変化が水みちのつながり方の次元に与える影響を調べました。その結果、割れ目内の主要な流路面積の割合が 0.2 未満の場合、水みちのつながり方の次元が 1.5 以下になることが分かりました（図 69)。また、割れ目内の主要な流路面積の割合と DI の関係を割れ目内の隙間の開閉現象と関連付けて理論的な計算を行った結果、DI が 2 より大きいと割れ目内の隙間の閉口現象により主要な流路面積の割合が 0.2 未満になることが分かりました（図 70)。これらのことから、これまで稚内層や類似の地層（表 5 の分類 I-a）で経験的に認められていた関係、すなわち DI が 2 より大きくなると水みちのつながり方の次元がおおむね 1.5 以下になる関係（図 67）は DI の変化に伴う割れ目内の隙間の開閉（流路面積の変化）により説明できることが分かりました[92]。さらに、この関係が地層の透水性に与える影響についても検討した結果、地層内の割れ目の代表的な透水性と DI の関係は理論的な計算により図 55 の曲線のように表すことができ、同曲線の DI に対する透水性の変化傾向は、別のデータから推定される地層の代表的な透水性の変化傾向とよく一致することが分かりました（図 55)。これらのことから、稚内層に類似する地層（表 5 の分類 I-a）の場合、割れ目の代表的な透水性や隆起侵食などの地殻変動に伴う透水性の変化量は、図 55 の曲線で表されるような透水性と DI の関係を用いて評価できることが分かりました[55、67、92]。このような手法を適用することにより、透水性の推定の信頼性を向上させることが可能と考えられます。

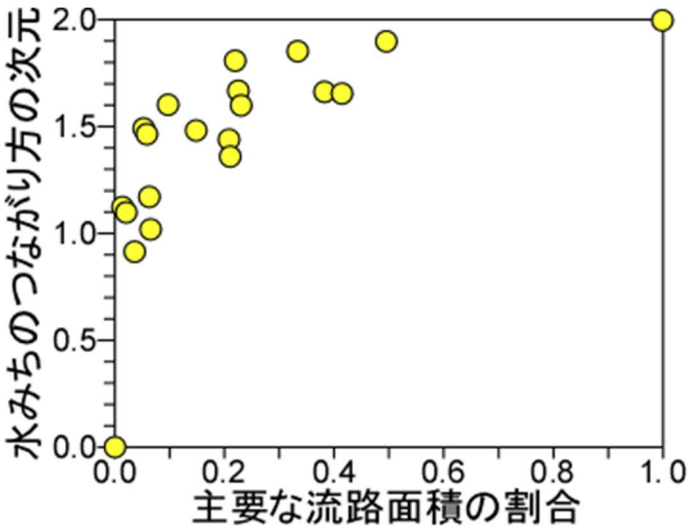


図 69　仮想の割れ目の透水試験により得られた割れ目内の水みちのつながり方の次元と割れ目内の主要な流路面積の割合の関係[92]

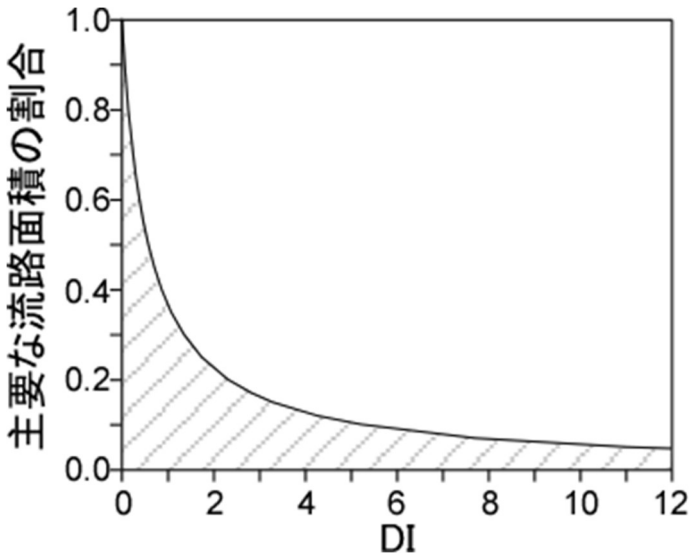


図 70　割れ目内の隙間の開閉現象に関する理論的な計算により導出される割れ目内の主要な流路面積の割合と DI の関係[92]

水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備を目的として、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の詳細な解析を行いました。その結果、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断剛性（せん断変形のしにくさ）が比較的規模の大きな断層（割れ目の発達幅が数十 cm 程度：図 71 の断層 A）では 0.1 MPa/mm 以下の低い値が算出されるのに対し、小規模な断層（割れ目の発達幅が数 cm 程度：図 71 の断層 B）では 1 MPa/mm 以上の高い値が算出されました[117]。断層 A のせん断剛性は既往の室内実験で示される断層や割れ目のせん断剛性（10^{-3} MPa/mm～0.1 MPa/mm）と同程度で、断層 B は断層内の一部が固結した状態にあったことが確認されています。したがって、いずれのせん断剛性も妥当な値と考えられます。これらのことから、水圧擾乱試験により断層や割れ目のせん断剛性を原位置で適切に評価できることが確認できました[117]。

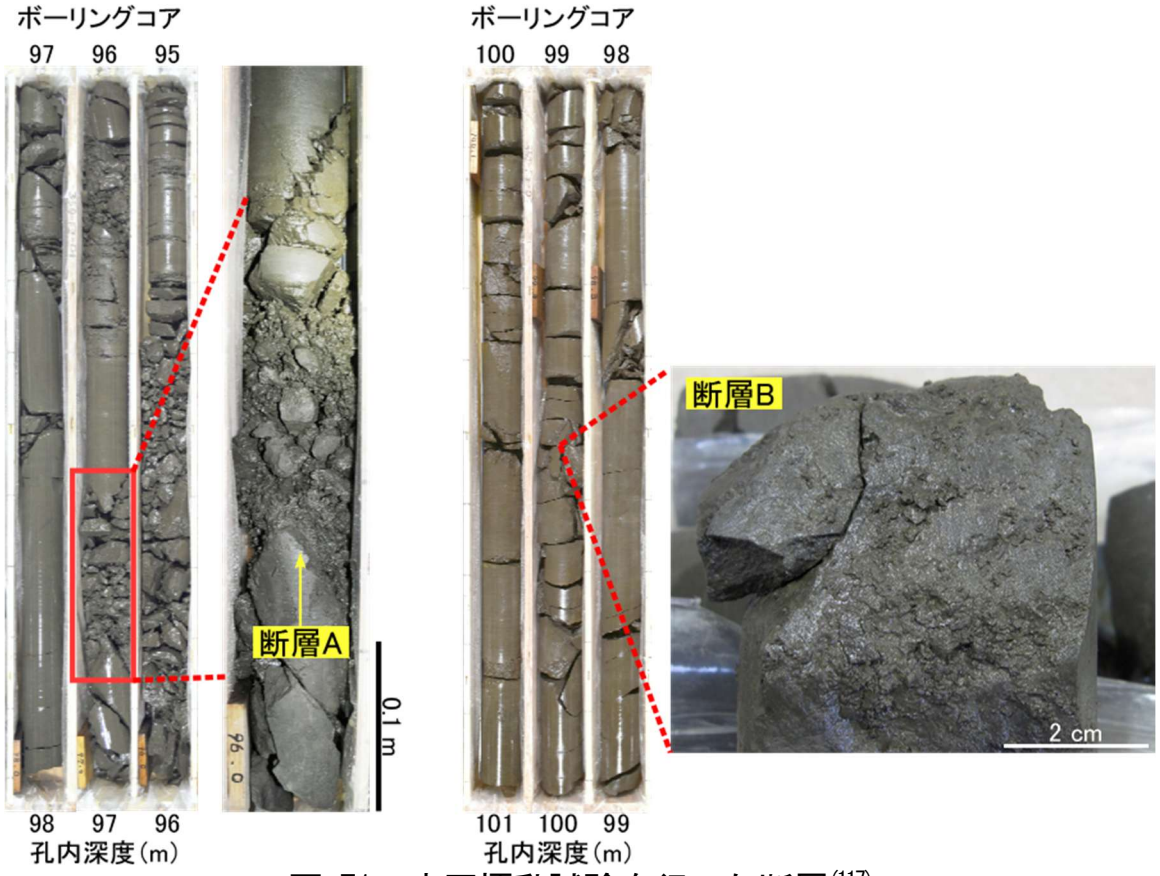


図 71　水圧擾乱試験を行った断層[117]

断層 A は割れ目の発達幅が数十 cm 程度で、厚さ数 cm の断層破砕物を伴います。断層 B は割れ目の発達幅が数 cm 程度で、厚さ数 mm 以下の断層破砕物を伴います。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から 5 年間にわたり、①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握手法の整備、②DI 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、および③水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備を目的に、断層の水圧擾乱試験などを行ってきました。その結果、①および②については、稚内層と類似する地層（表 5 分類 I-a）の場合、断層や割れ目の代表的な透水性と DI の関係（図 55 の曲線）や水圧擾乱試験を適用することにより、地殻変動の影響を考慮した地層の長期的な透水性を評価できることが分かりました[55、67、69、、92、96]。③については、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断剛性を水圧擾乱試験により原位置で適切に評価できることが確認できました[117]。以上のように、上記 3 点について手法を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は参考資料の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

6.1.2 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

令和 2 年度以降は、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が課題であり、このような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の実証を行います。具体的には、化石海水領域の三次元分布に関わる調査・評価手法の検証、広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした水理・物質移行評価手法の検証（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・物質移行解析を行います。

この研究課題で整備される技術は、処分事業のサイト選定において、地質環境に求められる要件のひとつとして挙げられている「放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場であること」[56、118]を評価する際に役立ちます。

なお、本研究課題では、令和 2 年度から令和 4 年度にかけて実施した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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]：岩盤中地下水流動評価技術高度化開発」の成果の一部を活用しました。

地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の三次元分布を推定する手法の検討のために、幌延深地層研究センターを含む約 3 km 四方を調査範囲として、令和 2 年度に高密度電磁探査※[50、119]を実施し、令和 3 年度から令和 4 年度にかけてボーリング調査（HFB-1 孔）を実施しました[120、121、122]。そして、これらの調査結果だけでなく幌延地域における既存の調査結果を基に、数十 km 四方の調査範囲から調査し、その結果に基づいて数 km 四方に調査範囲を絞り込み、その範囲における化石海水の三次元分布を推定する手法を構築しました[122、123]。化石海水は海水に由来するため、塩化物イオン濃度（Cl^-濃度）はその有無を確認するひとつの指標となります。幌延地域では、地下水の Cl^- 濃度と地下の比抵抗が強く相関しており[124]、検討した手法では、広範囲で地下の比抵抗分布を推定できる電磁探査が有効な調査となります。また、地下水の水質データから化石海水の有無を確認する必要があるため、ボーリング調査では、地下水採水と化学分析により地下水の Cl^- 濃度だけでなく他の指標（例えば水の安定同位体※比）も取得します。ボーリング調査により取得さ

れたこれらの指標は、電磁探査で推定された比抵抗分布と組み合わせて地球統計学的解析を用いることにより、空間分布を推定することができます。この手法により酸素同位体比※の三次元分布を推定し、最適なボーリング調査地点の位置と数を検討した結果、化石海水の三次元分布を把握する際、電磁探査の結果に基づきボーリング調査地点を選定することが重要であることを示すことができました[10、122]。

また、化石海水の理解を深めるために、幌延地域に分布する化石海水の水質形成機構を明らかにするための数値解析を実施しました[125]。具体的には、地層の埋没続成作用※に伴う間隙率の減少による上昇流と、生物起源シリカ※および粘土鉱物の相変化に伴う脱水を考慮した数値モデルを構築し解析しました。その結果、地表水との混合がなくても、海水と比べて最大で約 80%低い値の Cl^-濃度の地下水が形成され得ることを示すことができました（図 72)。幌延地域では、水の安定同位体比を指標とした場合に化石海水と判別できる地下水であっても、海水と比べて最大で約 80%低い値の Cl^-濃度の地下水が存在しています[126、127]。この解析結果は、このような地下水が現在の地質環境下での地表水との混合ではなく、100 万年単位の長い時間をかけて起こった埋没続成作用による変質によって形成された可能性を示唆しています。すなわち、幌延地域の化石海水が分布する領域が地下水の流れが非常に遅い地域であるという解釈と整合しています。

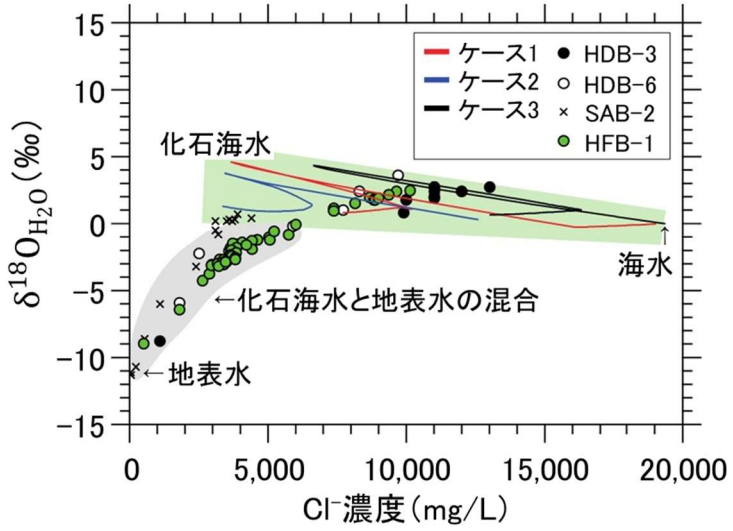


図 72　ボーリング孔における岩石コアの間隙水の Cl^- 濃度と酸素同位体比（$\delta^{18}O$）の関係と解析結果[122、125]

HDB-3 孔、HDB-6 孔、SAB-2 孔および HFB-1 孔における岩石コアの間隙水の Cl^- 濃度と $\delta^{18}O$ の関係をプロットしています。緑色の領域は化石海水の推定範囲を示し、灰色の領域は地表水と化石海水の混合領域を示しています。3 つの実線は、水質形成機構の数値解析[122、125]において求められた 3 つのケースの Cl^- 濃度と $\delta^{18}O$ の範囲を示しています。これら 3 つのケースは、スメクタイトからイライトへの相変化が開始される温度およびスメクタイトの含水率の違いを考慮して設定しました。具体的には、ケース 1 は 40℃および含水率 10wt%、ケース 2 は 40℃および含水率 15wt%、ケース 3 は 104℃および含水率 10wt%の条件で設定されています。

地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を調査する際には、電磁探査とボーリング調査を組み合わせた調査が有効であるとともに、ボーリング調査において地下水の水質や年代に基づく地球化学的な評価により地下水の流れが遅いことを確認することも重要です。そこで、割れ目と岩石間隙中の地下水の水質の違いから地下水の流れの有無を評価し[24]、地下水の放射性炭素（^{14}C）年代から得られた情報を組み合わせることで、地下水の流動状態の長期的な変遷を推定する手法を構築し、地表水が流れた履歴のある領域において、浅部では最終氷期以降（後氷期：約 1 万年前以降）に浸透した地表水が割れ目に沿って流動していること、深部では最終氷期に浸透した地表水が現在は滞留していることを明らかにしました[25]。

このような地下水の流れの概念は数値解析により定量的に確認することも重要です。令和 6 年度は、広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした水理・物質移行解析（地下水移行時間解析）手法の整備を目的として、地下水移行時間に対して感度の高いパラメータである岩盤の水理学的有効間隙率の与え方に着目した水理解析を行いました[95]。特に健岩部の間隙率が大きく、

割れ目に沿う地下水の流動が推定される堆積岩を対象に地下水移行時間を求める場合、水理学的有効間隙率として健岩部に相当する間隙率を与えるべきか、割れ目の開口幅から算出される間隙率を与えるべきかについては定まった基準がありませんでした。そこで、幌延深地層研究センター周辺の陸域から日本海の海域にかけてのおよそ 60 km（東西）×30 km（南北）×10 km（深さ）の広域スケールを対象に定常浸透流解析を実施し、得られた地下水移行時間と環境トレーサー（地下水の ^{14}C やトリチウム※）から推定される地下水移行時間とを比較しました。その結果、割れ目と岩石間隙中の水質に差があり、地表水が割れ目に沿って流動していることが示唆される地下浅部の領域では、健岩部の間隙率（声問層 0.5、稚内層 0.4）よりも小さい、割れ目の開口幅に対応する有効間隙率 0.0001～0.01 を与えると両者の移行時間が整合することが確認できました（図 73）。これらのことから、健岩部の間隙率が大きく、割れ目に沿う地下水の流動が推定される堆積岩では、割れ目の開口幅に基づいて算出した岩盤の有効間隙率を与えることが適切であることが分かりました。また、図 74 に示すとおり、割れ目に沿う地下水の流動が推定されない稚内層深部の地下水移行時間は、100 万年以上と非常に長い結果となりました。化石海水中の塩素やヘリウムの同位体（^{36}Cl や ^{4}He）を用いた地下水年代評価から、稚内層深部では 130 万年前～100 万年前から始まった地層の隆起侵食以降、停滞状態にあったことが示唆されています[126]。今回の定常浸透流解析では、数百年から数万年の比較的短い地下水移行時間が稚内層浅部の地表水が割れ目に沿って浸透している領域では得られていますが、稚内層深部では得られていません。この解析結果は、稚内層深部に存在する化石海水が滞留性の地下水であるという理解と整合しています。

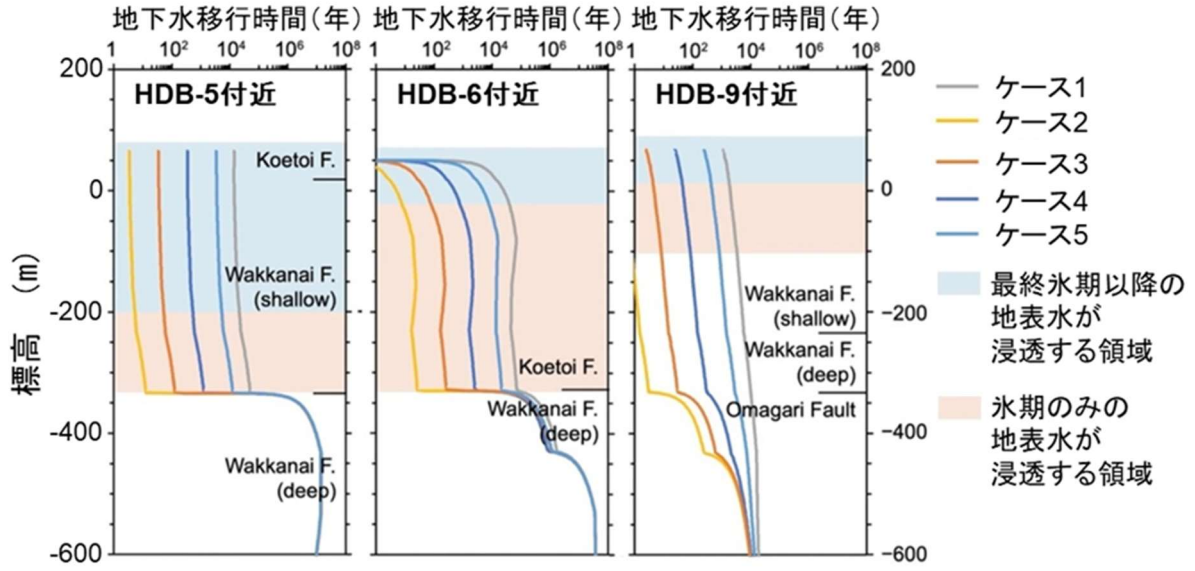


図 73　HDB-5 孔、HDB-6 孔および HDB-9 孔付近の地下水移行時間の深度分布[95]

ケース 1 は健岩部の間隙率（声問層 0.5、稚内層 0.4）、ケース 2～ケース 5 は稚内層浅部の間隙率のみを変えて、割れ目の開口幅に対応する有効間隙率（それぞれ 0.0001、0.001、0.01、0.1）を用いて解析しています。図中の地表水が浸透する領域の深度は、参考文献(24)に基づいており、最終氷期以降の地表水が浸透する領域（図中の水色領域）が現在、割れ目に沿って地下水が流動していると推定される領域に対応します。HDB-5 孔の同領域の割れ目水では、約 6,500 年前～約 4,400 年前の ^{14}C 年代が得られており[25]、HDB-9 孔の同領域の割れ目水では、10 年未満の地下水移行時間を示唆するトリチウム濃度と電気伝導度※が得られています[127]。これらの年代と解析結果を比較すると、HDB-5 孔付近の同領域における地下水移行時間の解析結果は、数百年～数万年のケース 1、4、5 が ^{14}C 年代と整合的です。HDB-9 孔付近の同領域における地下水移行時間の解析結果は、数十年以下のケース 2、3、4 がトリチウム年代と整合的です。HDB-5 孔の解析結果は別途行った水圧の再現性検討より不確実性が大きいことが示唆されるため、HDB-9 孔付近での解析結果を重視すると有効間隙率の与え方としてはケース 2、3、4 が適切であり、HDB-5 孔近傍の結果も考慮するとケース 4 が適切であったと考えられます。

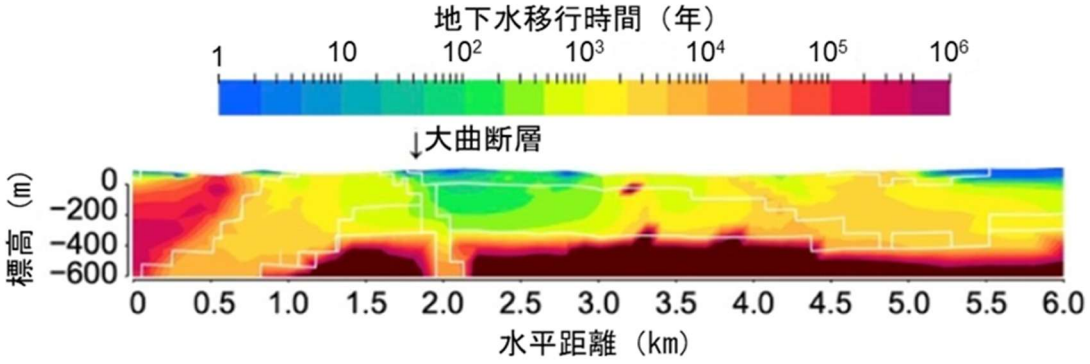


図 74　地下水移行時間の解析結果の例[95]

幌延深地層研究センター周辺の陸域から日本海の海域にかけてのおよそ 60 km（東西）×30 km（南北）×10 km（深さ）の広域スケールを対象に実施した定常浸透流解析の結果に基づき、幌延深地層研究センター周辺の 6 km(水平)×600 m（深さ）の鉛直断面に着目して地下水移行時間を求めました。断面上の白線は水理地質構造区分の境界を示しています。ここでは、環境トレーサー（地下水の ^{14}C やトリチウム）から推定される地下水移行時間と整合する結果として、稚内層浅部の有効間隙率を割れ目の開口幅に対応する 0.01 とした場合の結果を示しています。

令和6年度までの成果の概要

令和2年度からの5年間にわたり、新たな電磁探査およびボーリング調査を実施し、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の検討を進めてきました。その結果、地層処分事業における段階的なサイト調査の考え方を参考に、数十km四方の調査範囲を対象に調査を開始し、その結果を基に数km四方の範囲に絞り込み、その範囲の地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を推定する手法を構築しました。また、新たに実施した電磁探査とボーリング調査だけでなく既存調査のデータも用いた地球統計学的解析により、この手法における最適なボーリング調査地点の位置と数を示すことができました[122]。さらに、地層の埋没に伴う間隙率の減少による上昇流と生物起源シリカおよび粘土鉱物の相変化による脱水を考慮した水質形成機構のモデル構築と数値解析により、地表水との混合がなくても、海水と比べて最大で約80%低い値のCl^-濃度の地下水が形成され得ることを示すことができました[125]。加えて、ボーリング調査では、割れ目内の地下水と岩石基質内の間隙水の水質を比較することにより、割れ目に沿った地下水の流れの有無を判別する手法を構築しました[24、25]。さらに、広域スケールの領域を対象に定常浸透流解析により地下水移行時間を解析し、割れ目に沿って地下水が流れている場合の堆積岩の水理学的有効間隙率の適切な与え方を示すことができました[95]。これら一連の取り組みにより、所期の目標を達成することができました。

今後は、参考資料の令和2年度以降の研究工程に示すとおり、「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、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

7. 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になります。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 6 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 75 に、平成 31 年 4 月から令和 7 年 3 月までの観測結果を示します。深度 369 m の観測区間で認められていた令和 4 年 6 月 20 日の地震に伴う水圧上昇（図 75 の①）は、約 3 年間でおおむね消失し、水圧はほぼ元の値に戻っています。令和 5 年 9 月 29 日から立坑の掘削が再開されました（図 75 の②）。この掘削の影響を見ると、深度 369 m の観測区間は地震の影響により判断がまだ難しいですが、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ような水圧変化が認められません。これは既存のデータに基づく水圧変化の予測結果と整合しており、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変化がほとんど生じないことが予測されています[55]。同予測では、坑内湧水量も立坑掘削による大きな変化が生じないことが予測されていますが[52]、実際に観測された坑内湧水量はこれと整合し、立坑掘削による大きな変化は認められません（図 75）。今後も、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、水圧観測や、坑内湧水量の観測を継続します。

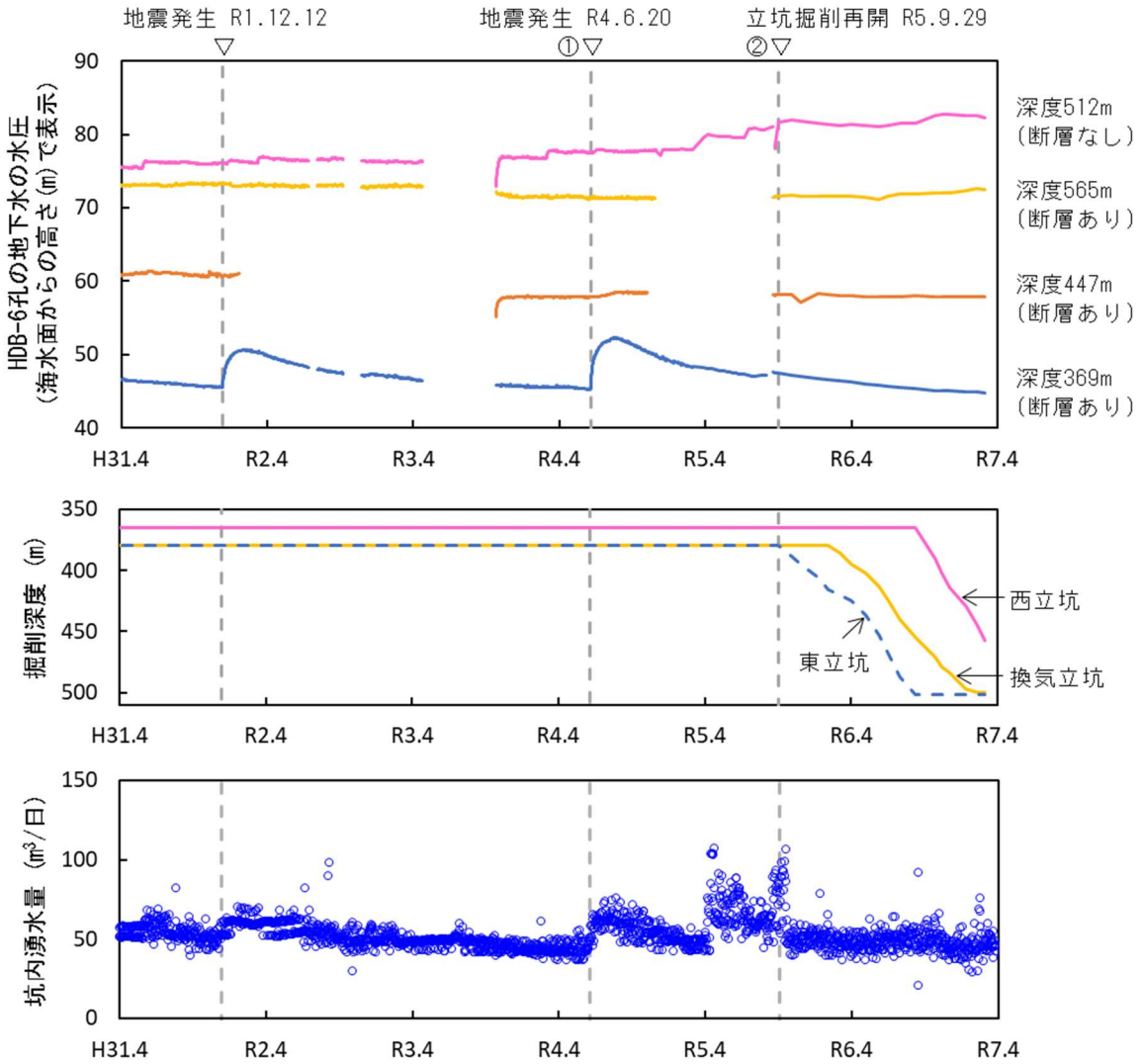


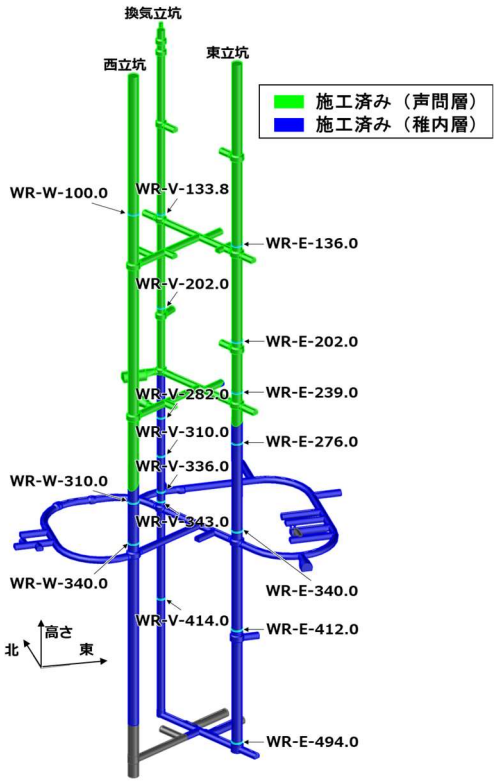
図 75　HDB-6 孔の水圧観測結果、各立坑の掘削深度および坑内湧水量の観測値（平成 31 年 4 月～令和 7 年 3 月のデータ）

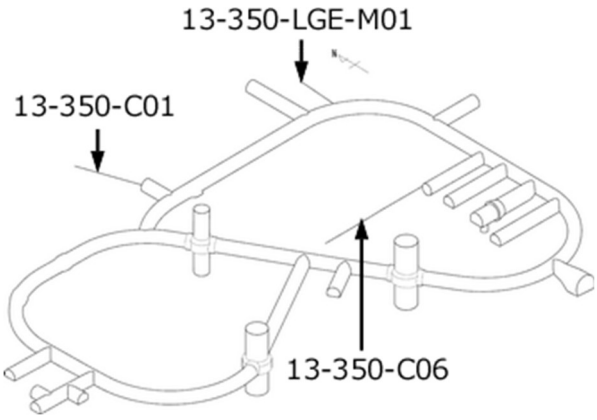
水圧データが途切れている期間は、センサーの不具合によるデータの欠測期間です。

(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。

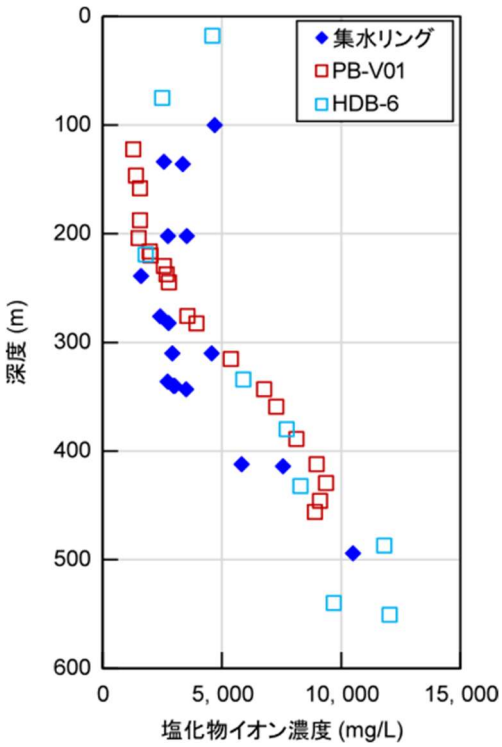
令和 6 年度は、令和 5 年度に引き続き、地下施設の 3 本の立坑に設置された集水リング※や、140m、250m および 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔などで採取した地下水の溶存成分を分析しました。図 76 に令和 6 年度の地下水の採取位置を、図 77 に一例として集水リングと 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔で採取した地下水の塩化物イオン濃度の分析結果を示します。



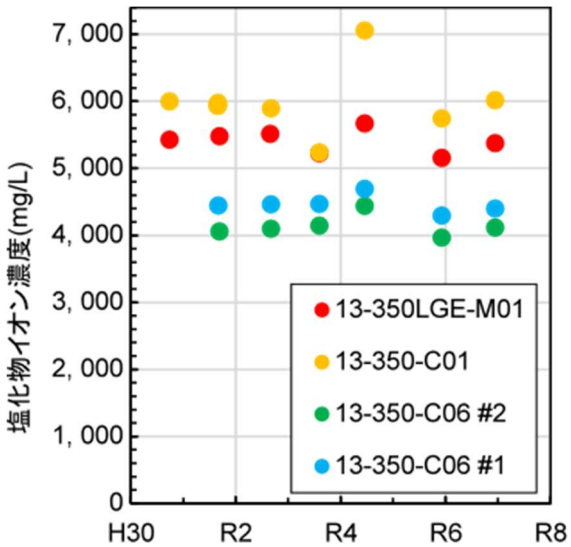


(a) 集水リング　　(b) 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔

図 76　令和 6 年度の地下水の採取位置



(a) 集水リングから得られた地下水の塩化物イオン濃度の深度分布と地下施設周辺の既存のボーリング調査結果（PB-V01 孔および HDB-6 孔）



(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 77　令和 6 年度の水質分析結果の例

集水リングから採取した地下水の塩化物イオン濃度の深度分布（図 77(a)）は、地下施設周辺の既存のボーリング調査（PB-V01 孔および HDB-6 孔、図 7 参照）から得られた結果とおおむね一致しました。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（図 77(b)）は、13-350-C01 孔（図 76 参照）の地下水の塩化物イオン濃度が、同孔近傍で実施した他の原位置試験の影響と考えられる大きな濃度変化を示した（令和 3 年度～令和 4 年度）ものの、全体として令和 6 年度までに大きな変化は認められませんでした。

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 6 年度も継続しました。装置の設置箇所を図 78 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 79 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。地下水の注水量は、注水に用いている給水孔からの自然湧水量に伴い不定期に変化しており、埋め戻し範囲に位置する C07、C08 および C09 のうち、C08（水平孔）および C09（鉛直下方孔）の 350m 試験坑道 4 に最も近い区間 4 では、注水量の変化に伴う水圧の変動が確認されています。令和 6 年度においても同様の水圧変動が確認され、それ以外に大きな水圧変動は認められませんでした。水質に関しても、これまでの測定値とおおむね同様の値が得られており、顕著な変化は認められませんでした。

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、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を評価していきます。

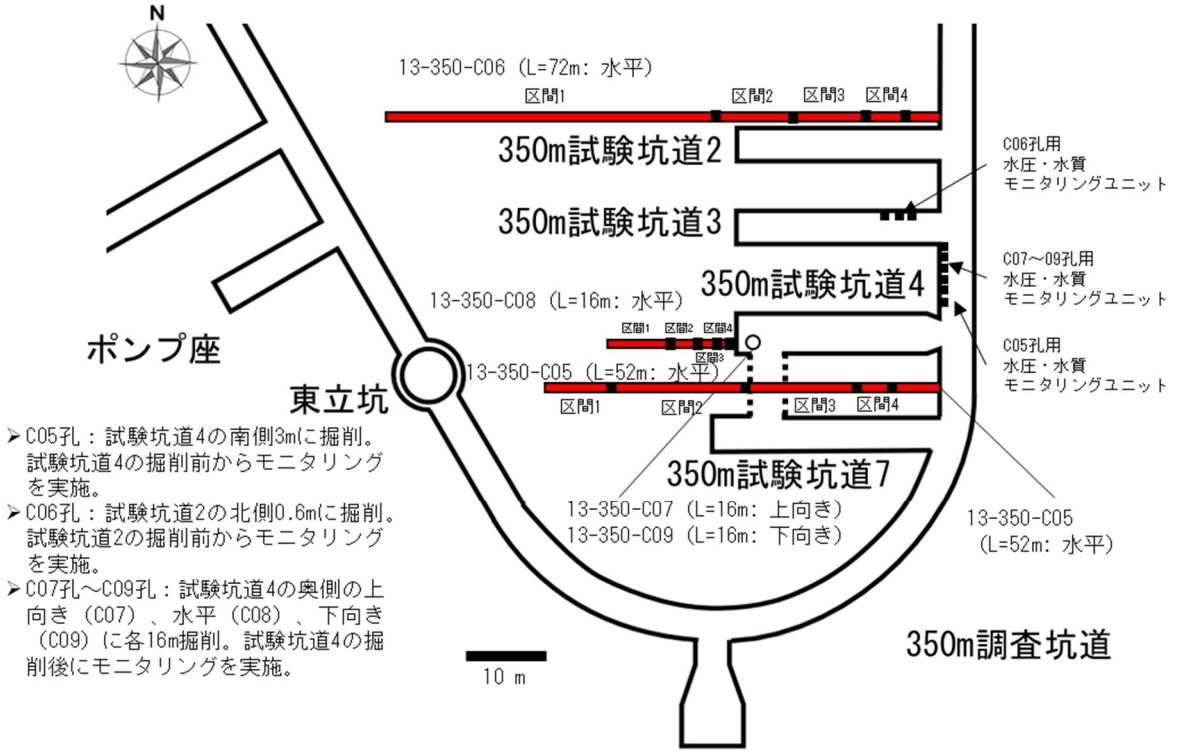


図 78　350m 試験坑道 2 および 350m 試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

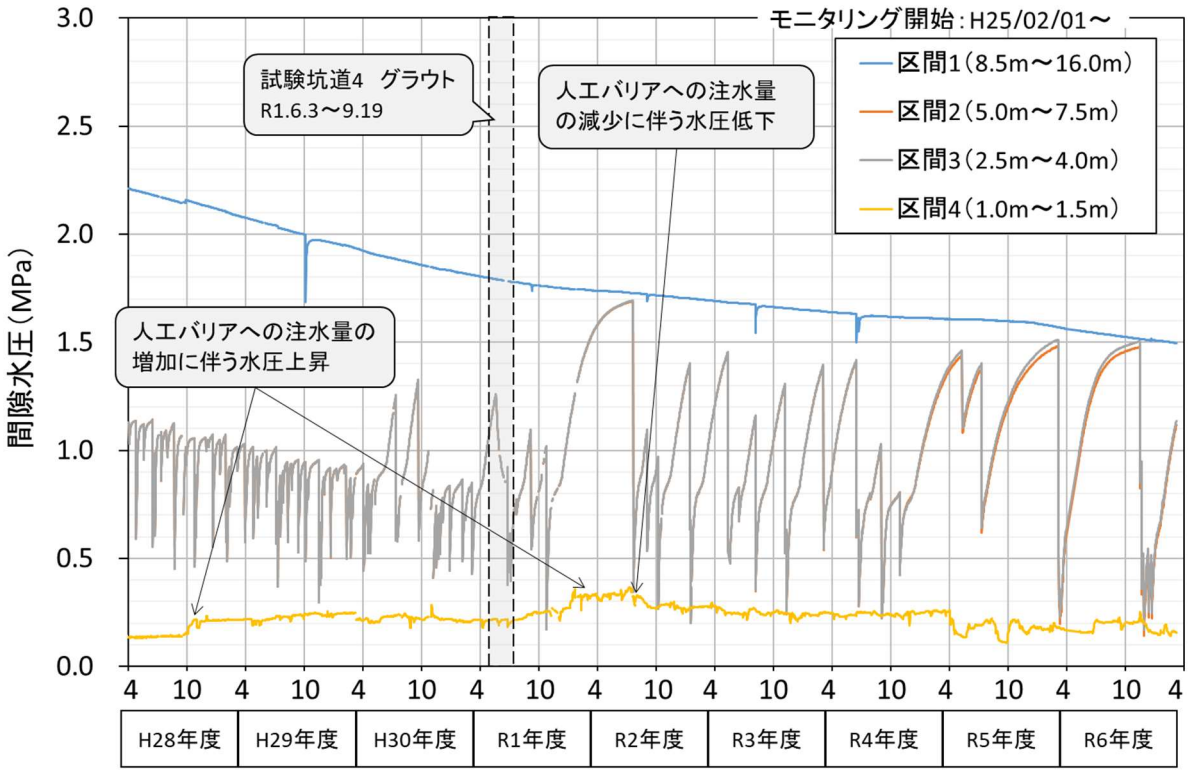


図 79　C08 における水圧モニタリング結果

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。

⑶ 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 80)。また、幌延の長期的な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[128]、光ファイバー式地中変位計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 81)。それぞれの計測器の設置レイアウトを図 82 に示します。

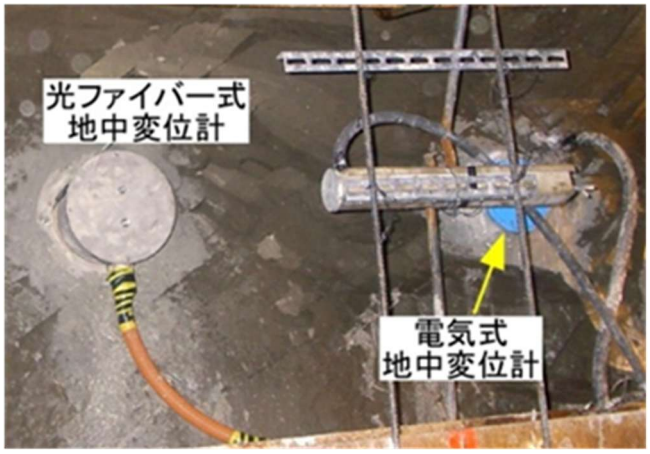


図 80　地中変位計設置状況

図 81　鋼製支保工応力計設置例

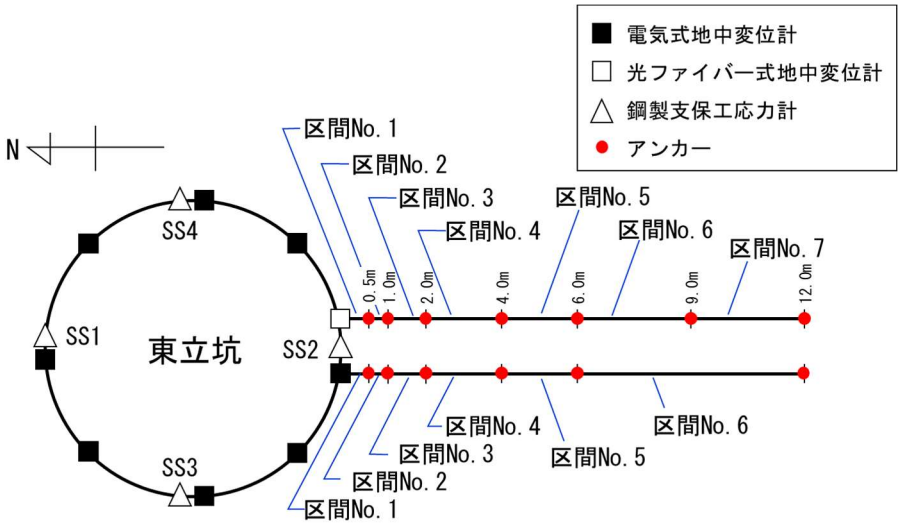


図 82　計測器設置位置図

地中変位の計測結果を図 83 に示します。計測器設置から約 16 年間が経過しましたが、特段問題なく正常な計測ができていることを確認しています。また、計測された変位は、地中変位計で立坑壁面に最も近い区間 No.1 で約 5.0 mm 縮む挙動を示しており、他区間に比べ変位量が大きいことが分かります。また、No.3 を除き変位量は小さいが縮む挙動を示しており、平成 27 年度以降の変位は収束傾向にあることが分かります。このことから、立坑掘削後は、約 5 年間かけて徐々に圧縮方向に岩盤が 1 mm 程度変形し、その後変形が収束していき、16 年経過した現時点においては、ほとんど変形が生じていないことも分かります。次に、図 84 に示す鋼製支保工応力計においても、約 16 年間正常な計測ができていることを確認しました。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、他の計測点に比べ大きな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。なお、応力については掘削後も SS2 の計測点を除き、全計測点で時間とともにわずかに増大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。

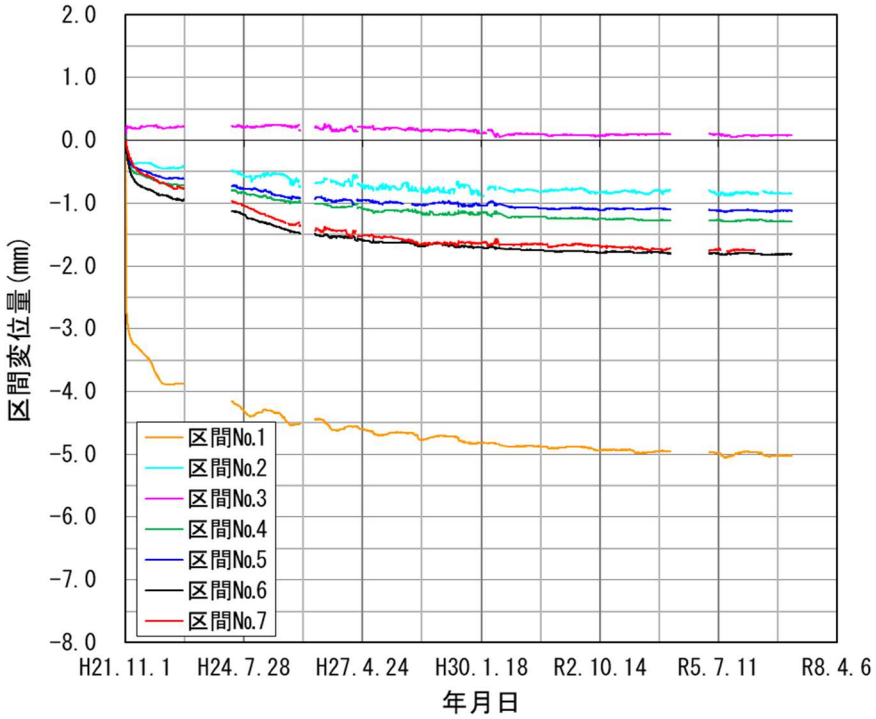


図 83　光ファイバー式地中変位計による計測結果

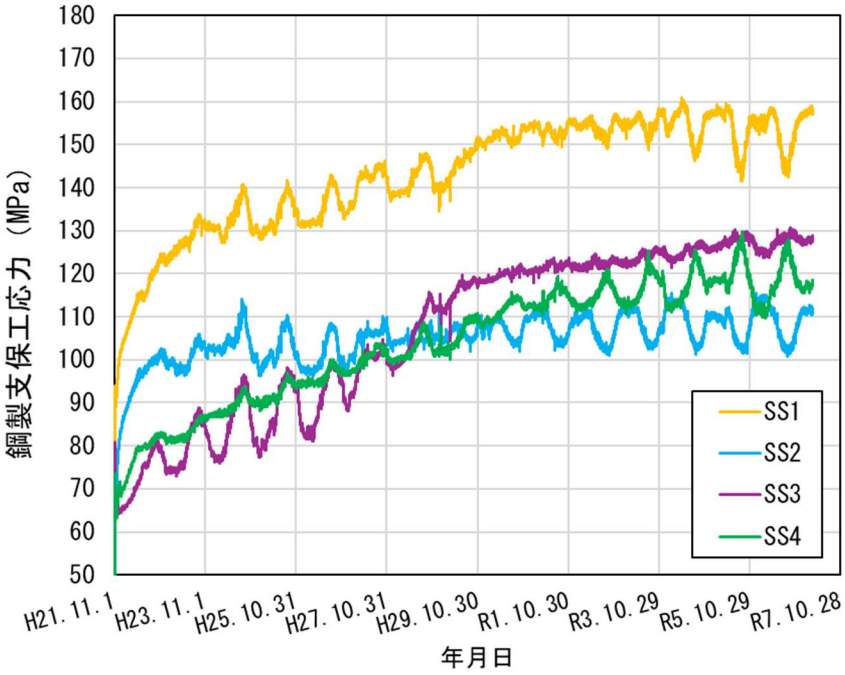


図 84　鋼製支保工応力計の計測結果

(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。気象庁一元化震源データより作成した令和 6 年 4 月 1 日から令和 7 年 3

月 31 日までの幌延深地層研究センター周辺の震央分布を図 85 に示します。この期間中、気象庁の発表では、幌延町宮園で震度１以上を観測した地震は１回でした。この地震の震源は留萌地方中北部、マグニチュード（Mj※）3.7、最大震度 4（天塩町川口）でした（表 6）。図 86 にこの地震の震央を示し、地震の地下施設での観測波形を図 87 に示します。図 87 から、最大加速度は地下の方がわずかに大きくなっていますが、震度（揺れ）は、地表に比べて地下の方が小さくなっていることが分かります。

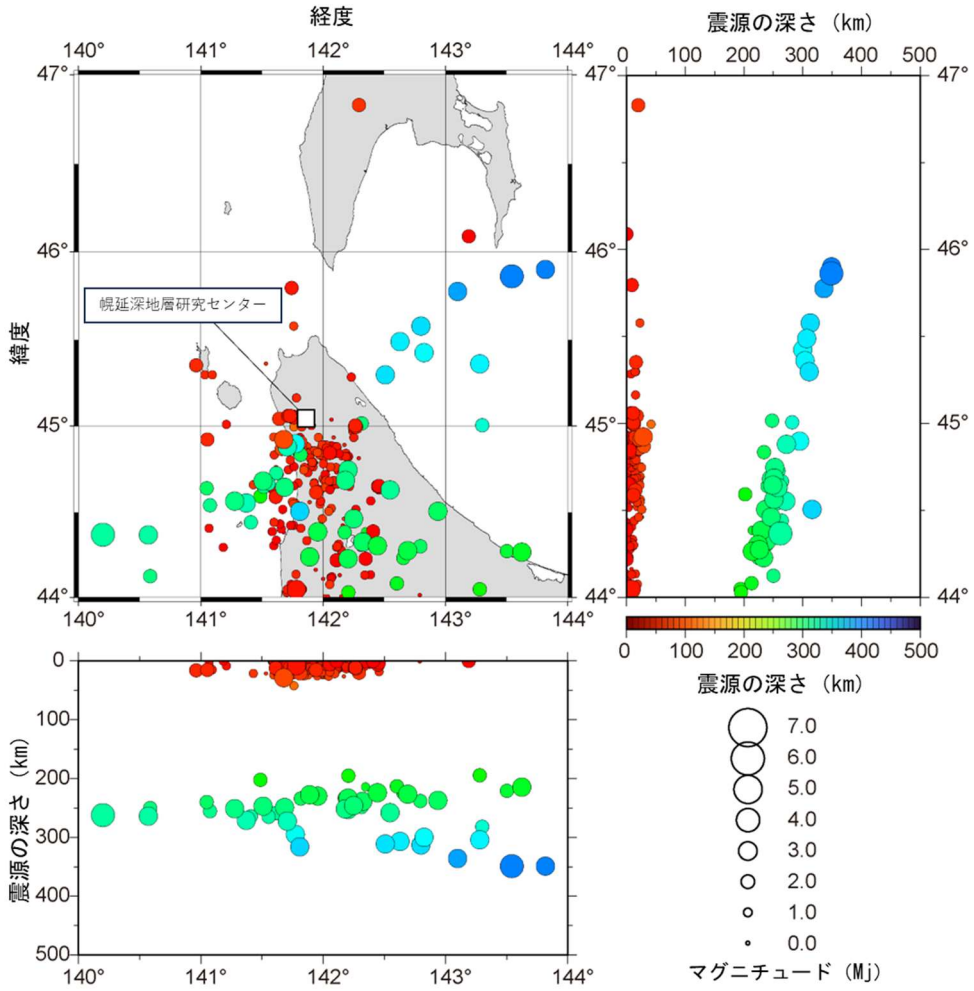


図 85　幌延深地層研究センター周辺で起きた地震の震央分布

作図には GMT（Generic Mapping Tools）を使用しました。

表 6　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)	Mj	震度	
日付	時刻						幌延町宮園	最大震度
令和 6 年 9 月 24 日	22:09:09	留萌地方中北部	44° 55.7′ N	141° 50.6′ E	14	3.7	2	4

気象庁震度データベース検索より。

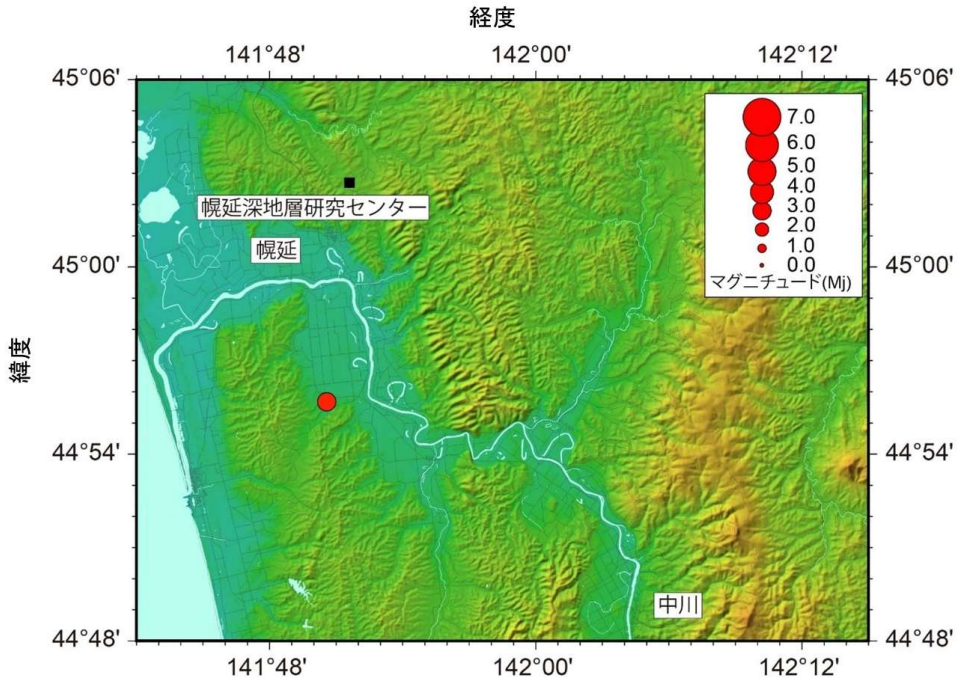


図 86　幌延町（宮園）で観測された地震の震央図

令和 6 年 9 月 24 日に発生した留萌地方中北部の地震の震央を示します。作図には GMT および地理院地図の色別標高図を使用しました。

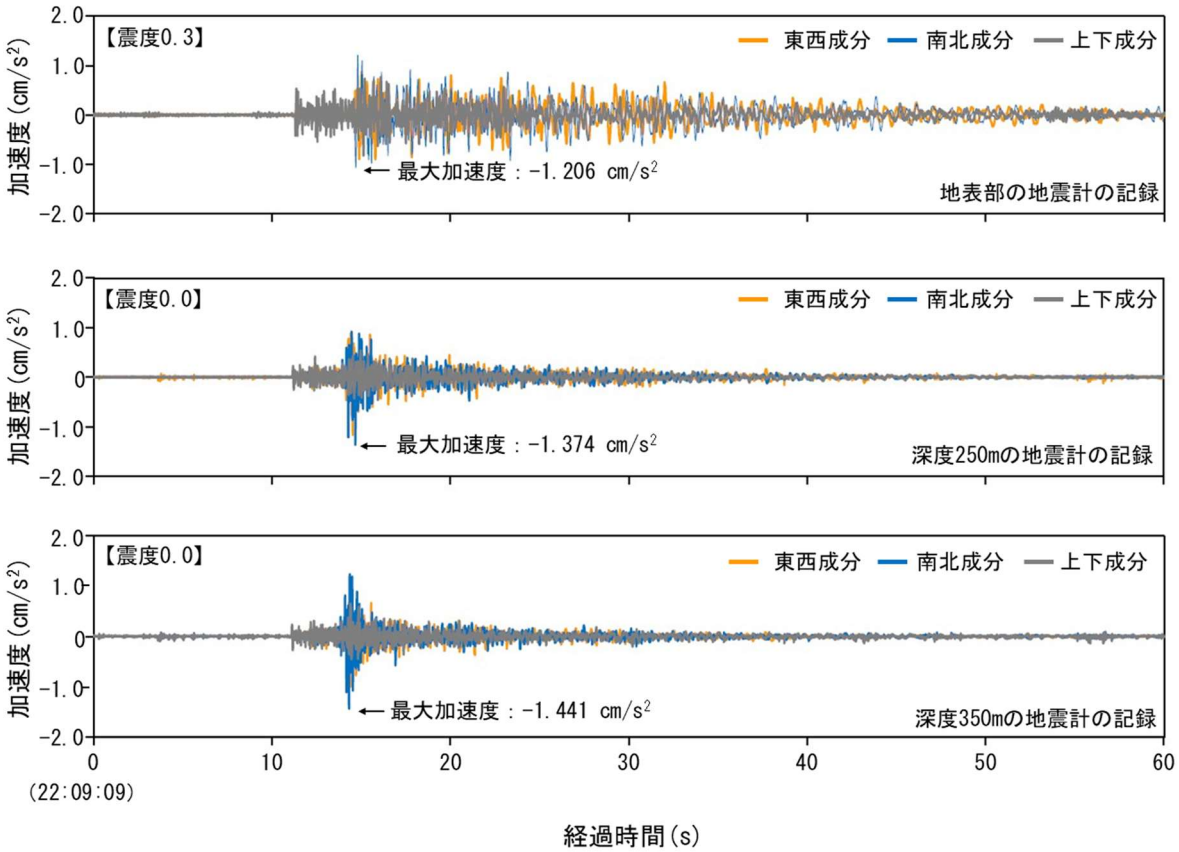


図 87　地下施設での観測波形

8. 地下施設の建設・維持管理

(1) 地下施設の整備

令和 6 年度は、令和 5 年度の工事実績を反映した施設整備業務の計画工程に従い、東立坑および換気立坑の掘削を完了するとともに、西立坑および500m 調査坑道の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の小規模な肌落ち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１ｍで施工してきました。掘削の進捗に応じて、東立坑は深度 435 ｍ付近、換気立坑は深度 398 m 付近より、掘削壁面の割れ目が少ない状態で、十分に自立し安定した地山となってきたため、東立坑は深度 440 ｍ、換気立坑は深度 400 ｍから打設長を２ｍに変更して施工を行いました。また、計画より若干の遅れが見られたことから、掘削作業員の増強を行い工程の回復に努めました。これらの変更に伴い掘削にかかる施工の流れが向上したことで、東立坑は計画より約２か月早い令和６年９月に掘削が完了し、換気立坑についても約１か月早い令和７年１月に掘削が完了しました（表 7)。

西立坑については、当初の予定より早く湧水抑制対策などの準備作業を終えており、東立坑の掘削も早めに完了したことから、計画より早い 9 月から掘削を開始しました（図 88)。覆工コンクリートの打設長については、先行ボーリング後のコア観察結果から、東・換気立坑と比べて割れ目が少ない状態で十分に自立し安定した地山と判断できたため、掘削当初より打設長を２ｍとして施工を進めています。

500m 調査坑道については、資機材などの準備を行い、東立坑の掘削完了に引き続き令和６年９月から掘削を開始しました（図 89)。

令和 7 年 3 月 31 日時点における掘削進捗は、東立坑および換気立坑が深度 500 m、西立坑が深度 472 m、500m 調査坑道が 112.9 m となっています。

掘削に際しては、可燃性ガスの存在を考慮し、作業の安全を確保するため、切羽（掘削箇所で岩盤が露出している部分）での防爆仕様※機器の使用やガス濃度測定などの対策を徹底して工事を進めています。

表 7　地下施設整備の実績工程表（令和 6 年度）

	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
換気立坑	掘削			
東立坑	掘削			
西立坑	湧水抑制対策			準備　掘削
500m調査坑道			準備　掘削	

■令和 6 年度施設整備業務計画工程（令和 6 年 3 月公表）
■令和 6 年度実績

図 88　西立坑の掘削状況

図 89　500m 調査坑道の掘削状況

⑵ 地下施設の維持管理

令和 6 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 90）。

ⓐ 櫓設備の点検

ⓑ 排水処理設備の運転・監視

図 90　地下施設の維持管理状況

⑶ 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壌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、土壌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）の土壌溶出量が土壌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（9.2 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 91）とした掘削土（ズリ）置場に搬入し、保管しています。

令和 6 年度は、令和 5 年度に引き続き、掘削土（ズリ）置場へ掘削土（ズリ）の搬入を実施しました（図 92）。

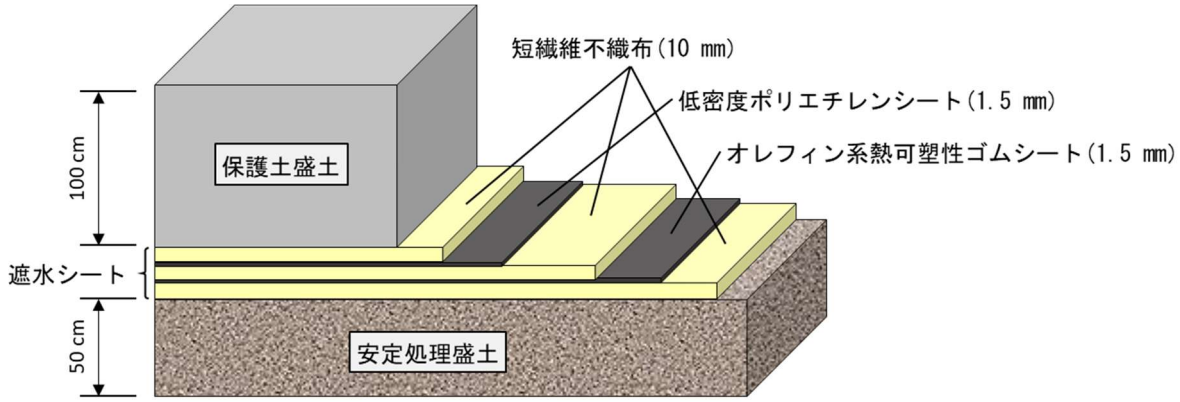


図 91　二重遮水シートの構造

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 92　掘削土（ズリ）置場への掘削土（ズリ）搬入の様子

(4) 排水の管理

地下施設からの排出水と掘削土（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 93）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（9.1(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) 脱ホウ素設備(1 号機)

(d) 脱ホウ素設備(2 号機)

(e) 脱窒素設備

(f) 揚水設備

図 93　排水処理設備

9. 環境調査

令和6年度は、令和5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。

9.1 排水量および水質調査結果

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94に示します。

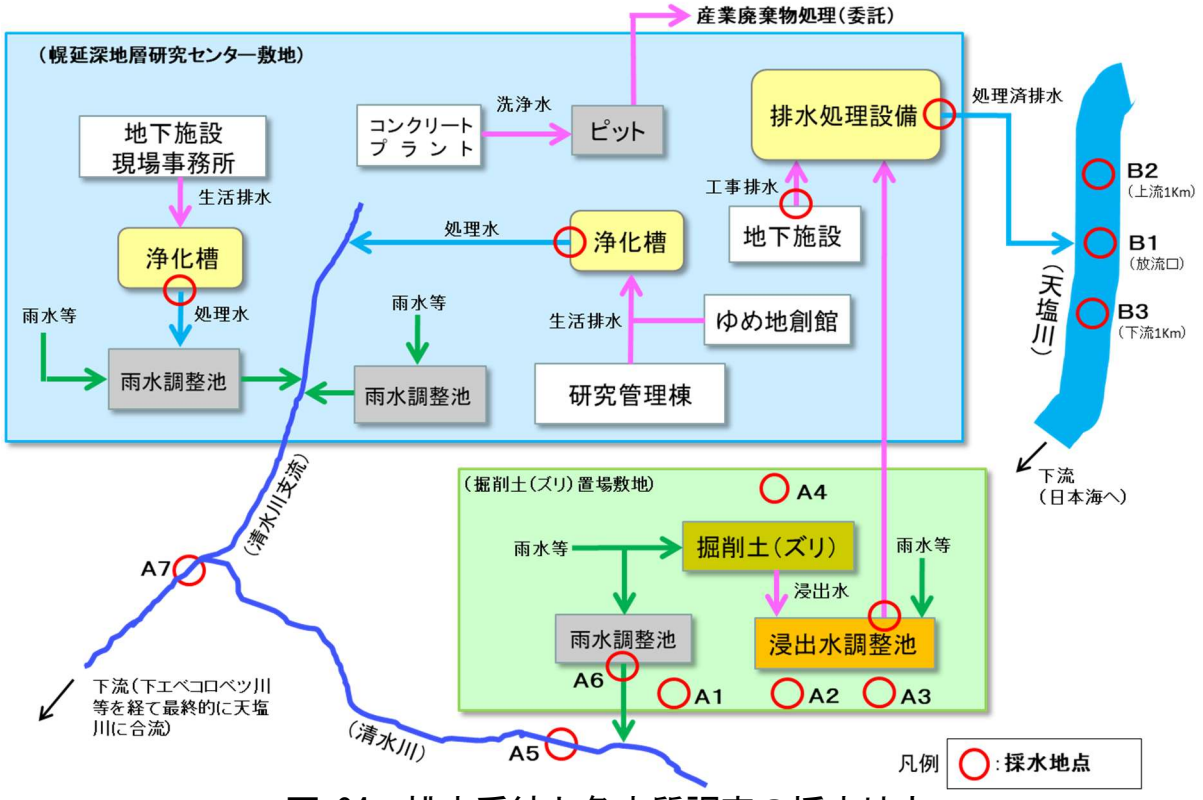


図 94　排水系統と各水質調査の採水地点

(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 6 年度における天塩川への排水量は表 8 に示すとおりです。合計排水量は、湧水抑制対策工事の完了に伴い、工事用水の使用量が減少したため、55,384 ㎥と前年度同時期（63,060 ㎥）の約 87.8%でした。日最大排水量は、融雪により増水した掘削土（ズリ）置場の浸出水を多く処理した 4 月の 419 ㎥が最大値となりましたが、観測期間を通じて北るもい漁業協同組合との協定値（750 ㎥/日）を満足しています。また、月排水量および日平均排水量についても 4 月が最大であり、月排水量が 6,516 ㎥、日平均排水量が 217 ㎥でした。

表 8　天塩川への排水量

年月	月排水量（㎥）	日最大排水量（㎥）注1	日平均排水量（㎥）注2
令和 6 年 4 月	6,516	419	217
令和 6 年 5 月	5,381	360	173
令和 6 年 6 月	4,779	267	159
令和 6 年 7 月	4,945	279	159
令和 6 年 8 月	5,046	373	162
令和 6 年 9 月	4,807	306	160
令和 6 年 10 月	4,001	254	129
令和 6 年 11 月	4,208	292	140
令和 6 年 12 月	3,687	296	118
令和 7 年 1 月	3,610	326	116
令和 7 年 2 月	3,258	255	116
令和 7 年 3 月	5,146	381	166
合計	55,384	―	―
最大値	6,516（4 月）	419（4 月）	217（4 月）

注 1：北るもい漁業協同組合との協定値は 750 ㎥/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 95 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、排水処理の前と後で定期的（原則１回/月）に水質調査を実施しています。

令和６年度における水質調査結果は、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排水」については、すべて排水基準の範囲内でした。

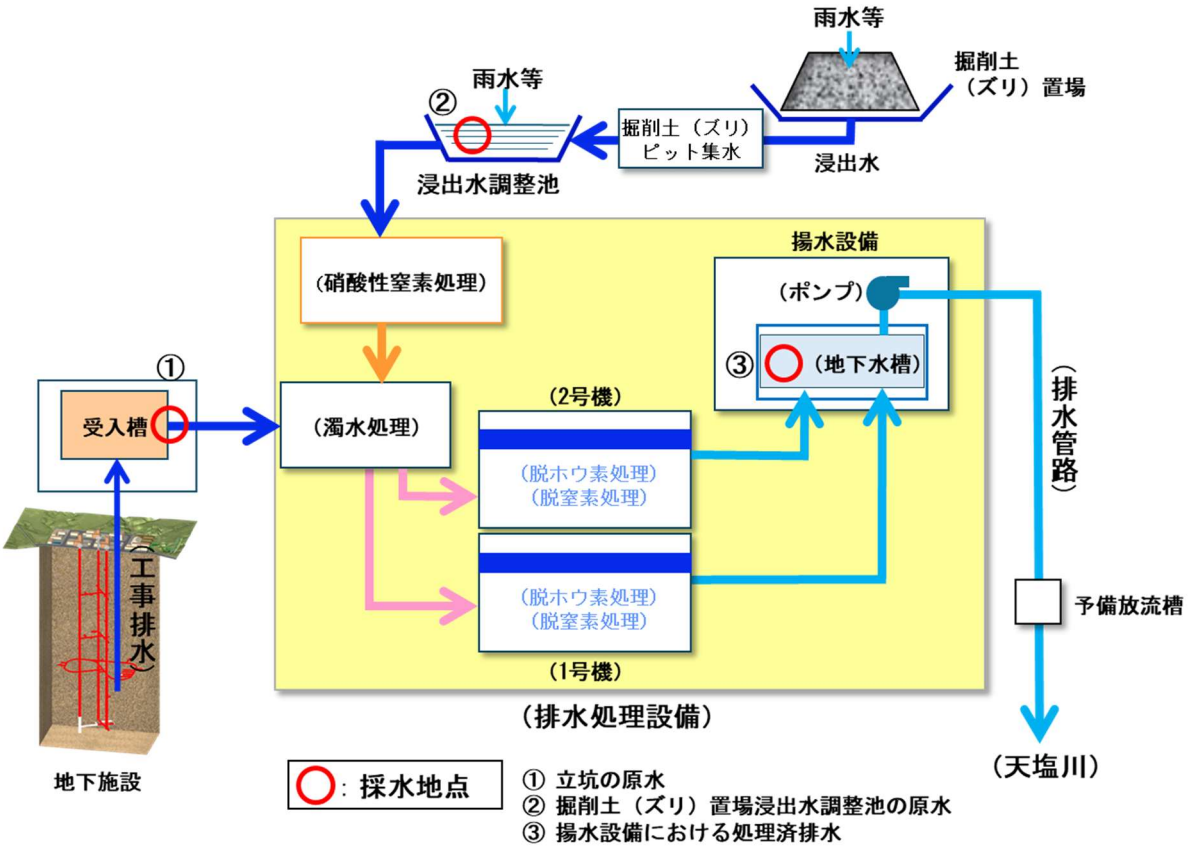


図 95　地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点

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 95参照）	過年度 平成18年12月～令和5年3月	令和5年度 令和5年4月～令和6年3月	令和6年度 令和6年4月～令和7年3月	（参考値） 水質汚濁防止法排水基準
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	<0.003～0.005	
	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	<0.01～0.08	<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	<0.01	0.1
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.04	<0.01～0.02	<0.01～0.03	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01～0.01	<0.01～0.02	
フッ素（mg/L）	立坑の原水	<0.8～3.5	<0.8～2.2	<0.8	8
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	<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	33～84	49～82	10
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.1～37	2.0～6.3	0.7～8.4	
	揚水設備における処理済排水	<0.1～3.0	<0.1～0.5	<0.1～0.2	
全窒素（mg/L）	立坑の原水	0.41～117	48～80	53～80	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	19～50	17～78	
	揚水設備における処理済排水	0.60～48	14～36	24～46	
全アンモニア（mg/L）	立坑の原水	0.12～110	22～63	32～54	—
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	0.12～22	0.11～1.3	0.36～0.89	
	揚水設備における処理済排水	<0.05～6.8	<0.05	<0.05～1.0	
pH	立坑の原水	7.5～9.5	8.1～8.8	8.1～8.3	5.8～8.6
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	6.7～8.7	7.2～7.9	6.9～7.9	
	揚水設備における処理済排水	6.9～8.6	6.7～7.8	7.2～7.6	
浮遊物質量（mg/L）	立坑の原水	3～580	430～6,400	26～140	200（日間平均 150）
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	1～170	3～10	2～28	
	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	1,700～4,000	2,400～4,300	—
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	10～1,500	48～170	36～290	
	揚水設備における処理済排水	38～4,700	1,200～2,800	1,400～2,800	

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。

⑶ 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 96）において、定期的（原則 1 回/月）に採水し（図 97）、水質調査を実施しています。

令和 6 年度における調査結果は、表 10 に示すとおりです。浮遊物質量について、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（4 月、5 月、7 月、9 月）がありましたが、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。

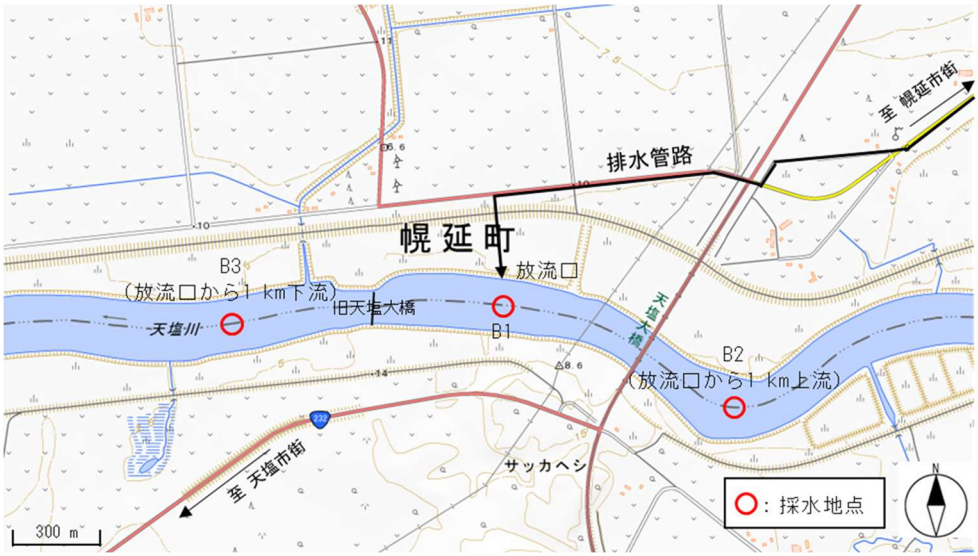


図 96　天塩川の採水地点

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) 採水状況

図 97　天塩川での採水状況（令和 6 年 4 月 4 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6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6年3月	令和6年4月 ～令和7年3月	
ホウ素 (mg/L)	B1	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.35	0.01～0.05	5
		中層	―	<0.01～3.5	0.01～1.2	
		深層	<0.02～3.35	<0.01～4.9	0.01～4.2	
	B2	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.27	<0.01～0.03	
		中層	―	<0.01～3.7	0.01～0.03	
		深層	<0.02～3.28	<0.01～5.0	<0.01～0.06	
	B3	表層	<0.02～0.07	<0.01～0.28	<0.01～0.06	
		中層	―	<0.01～2.5	<0.01～0.18	
		深層	<0.02～1.03	<0.01～5.0	<0.01～0.24	
全窒素 (mg/L)	B1	表層	0.37～1.06	0.11～2.2	0.30～1.1	20
		中層	―	0.15～2.2	0.67～1.1	
		深層	0.42～1.50	0.15～6.5	0.40～1.1	
	B2	表層	0.37～1.14	0.14～2.2	0.29～1.1	
		中層	―	0.15～2.3	0.28～1.1	
		深層	0.4～1.16	0.16～2.3	0.28～1.1	
	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	<0.05～0.13	2[注2]
		中層	―	<0.05～0.92	<0.05～0.09	
		深層	―	<0.05～0.85	<0.05～0.10	
	B2	表層	<0.01～0.13	<0.05～0.89	<0.05～0.11	
		中層	―	<0.05～0.76	<0.05～0.11	
		深層	0.01～0.35	<0.05～0.85	<0.05～0.11	
	B3	表層	0.01～0.21	<0.05～0.89	<0.05～0.12	
		中層	―	<0.05～0.90	<0.05～0.12	
		深層	0.02～0.17	<0.05～0.96	<0.05～0.12	
pH	B1	表層	7.1～7.4	6.3～7.8	7.0～7.6	5.8～8.6
		中層	―	6.3～7.8	6.9～7.6	
		深層	7.0～7.6	6.5～8.0	7.0～7.4	
	B2	表層	7.1～7.4	6.3～7.9	7.0～7.6	
		中層	―	6.4～7.9	7.0～7.6	
		深層	7.2～7.6	6.5～8.0	7.0～7.6	
	B3	表層	7.0～7.6	6.6～7.9	7.0～7.7	
		中層	―	6.6～7.7	7.0～7.7	
		深層	7.1～7.4	6.6～8.1	7.0～7.7	
浮遊物質量 (mg/L)	B1	表層	3～34	<1～360	<1～80	20
		中層	―	<1～390	<1～79	
		深層	6～86	<1～400	1～90	
	B2	表層	3～36	<1～390	<1～61	
		中層	―	<1～400	<1～91	
		深層	5～47	<1～460	<1～72	
	B3	表層	3～35	<1～420	<1～71	
		中層	―	<1～460	<1～86	
		深層	5～49	<1～650	<1～81	

注1：採水地点を図 96 に示します。表層：水面下 0.1 m 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 1 m 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 1 km）の値としています。

⑷ 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（8.⑶参照）、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 98 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 99）、水質調査を実施しています。

令和 6 年度における調査結果は、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。

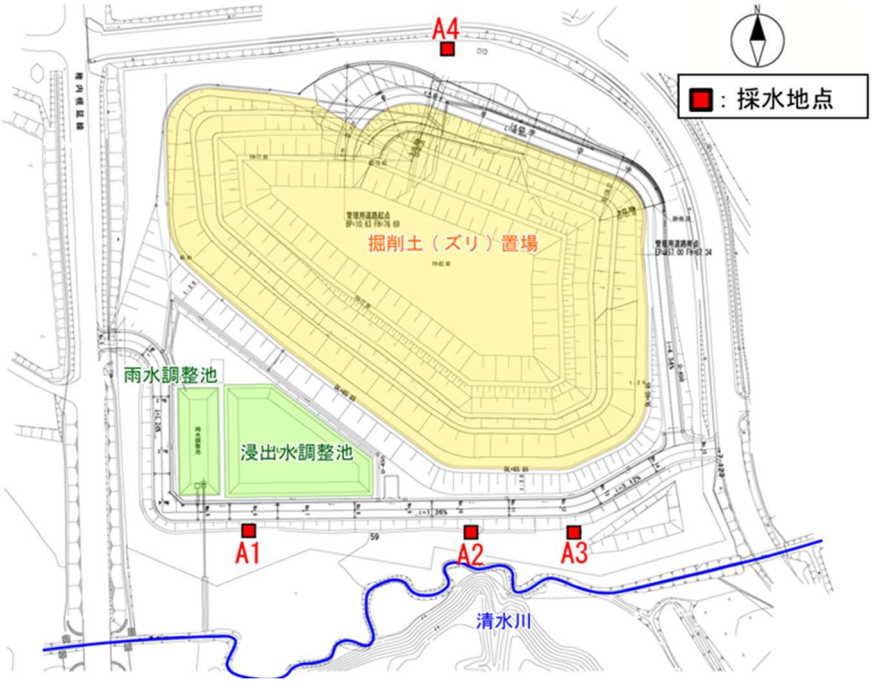


図 98　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点

⑻ 採水状況（令和 6 年 5 月 8 日）　⑼ 採水状況（令和 6 年 11 月 1 日）

図 99　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況

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6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6年2月	令和6年			令和7年
				5月	8月	11月	2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	0.007	<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	<0.1	<0.1
	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	<0.1～0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A1	19.8～50.7	0.40～63.0	20	27	18	21
	A2	1.29～43.5	0.43～37.0	8.4	25	11	22
	A3	12.5～34.0	0.18～41.8	0.40	15	0.46	13
	A4	<0.02～0.06	<0.02～0.47	<0.02	0.02	<0.02	0.02
pH	A1	6.9～7.2	6.1～7.9	6.6	6.7	6.5	6.7
	A2	4.6～6.3	3.7～6.9	6.5	7.0	6.7	6.9
	A3	6.8～7.3	4.2～7.4	6.5	6.7	6.4	6.6
	A4	5.4～6.6	5.0～6.7	5.1	5.2	5.1	5.5
塩化物イオン (mg/L)	A1	1,810～2,760	79～3,400	2,200	1,600	1,100	1,200
	A2	147～2,910	23～2,200	670	2,400	710	1,300
	A3	631～1,550	26～1,700	28	940	23	760
	A4	9.7～11.9	8.4～17.0	9.6	8.6	8.9	10

注1：採水地点を図 98 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 100 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 101）、水質調査を実施しています。

令和 6 年度における調査結果は、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 100　清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点

グーグルマップ航空写真（https://www.google.co.jp/maps/）を加工し、採水地点などを追記しています。

(a) 清水川（令和 6 年 9 月 3 日）

(b) 雨水調整池（令和 6 年 5 月 8 日）

図 101　清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況

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 100 参照）	過年度		令和 6 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 6 年 3 月	令和 6 年 4 月 ～令和 7 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
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	<0.1～0.2	<0.1～0.3
	A6	<0.1～0.7	<0.1～1.1	<0.1～0.2
	A7	<0.1	<0.1～0.3	<0.1～0.1
ホウ素 (mg/L)	A5	0.03～0.25	<0.02～0.56	0.04～0.25
	A6	<0.02～0.09	<0.02～0.64	0.03～0.17
	A7	0.03～0.30	<0.02～0.55	0.04～0.24
pH	A5	6.4～7.1	6.0～7.9	6.6～7.6
	A6	5.8～7.4	5.7～9.1	6.6～8.2
	A7	6.5～7.0	6.1～7.8	6.6～7.5
浮遊物質量 (mg/L)	A5	1～20	<1～130	1～9
	A6	12～173	<1～500	1～30
	A7	1～11	<1～270	1～13
塩化物イオン (mg/L)	A5	14.4～30.5	7.2～70	14～42
	A6	5.1～24.7	1.3～269	4.4～21
	A7	15.6～28.7	8.1～100	13～35

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 6 年度における水質調査結果は、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。

表 13　浄化槽排水の調査結果

分析項目	採水地点	過年度 平成 18 年 12 月 ～令和 6 年 3 月	令和 6 年度 令和 6 年 4 月 ～令和 7 年 3 月	北るもい漁業協同組合協定値
pH	研究管理棟	5.9～7.7	6.3～7.3	5.8～8.6
	地下施設現場事務所	6.8～8.0	7.4～7.8	
生物化学的酸素要求量 (mg/L)	研究管理棟	<0.5～17	1.3～3.4	20
	地下施設現場事務所	<0.2～28	<0.5～4.1	
浮遊物質量 (mg/L)	研究管理棟	<1～10	<1～4	20
	地下施設現場事務所	<0.5～8	<1～2	
全窒素 (mg/L)	研究管理棟	6.6～52	6.3～20	60
	地下施設現場事務所	0.2～45	0.2～1.8	
全リン (mg/L)	研究管理棟	0.5～5.0	1.4～2.7	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 (個/mL)	研究管理棟	0～1,400	0～230	3,000
	地下施設現場事務所	0～2,100	0～2,400	

9.2　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 6 年度に掘削を行った換気、東、西の各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（換気・東・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		
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		
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		
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		
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		
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		
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		
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		
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		
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		

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。

9.3　研究所用地周辺の環境影響調査結果

研究所用地周辺の環境影響調査として、図 102 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。

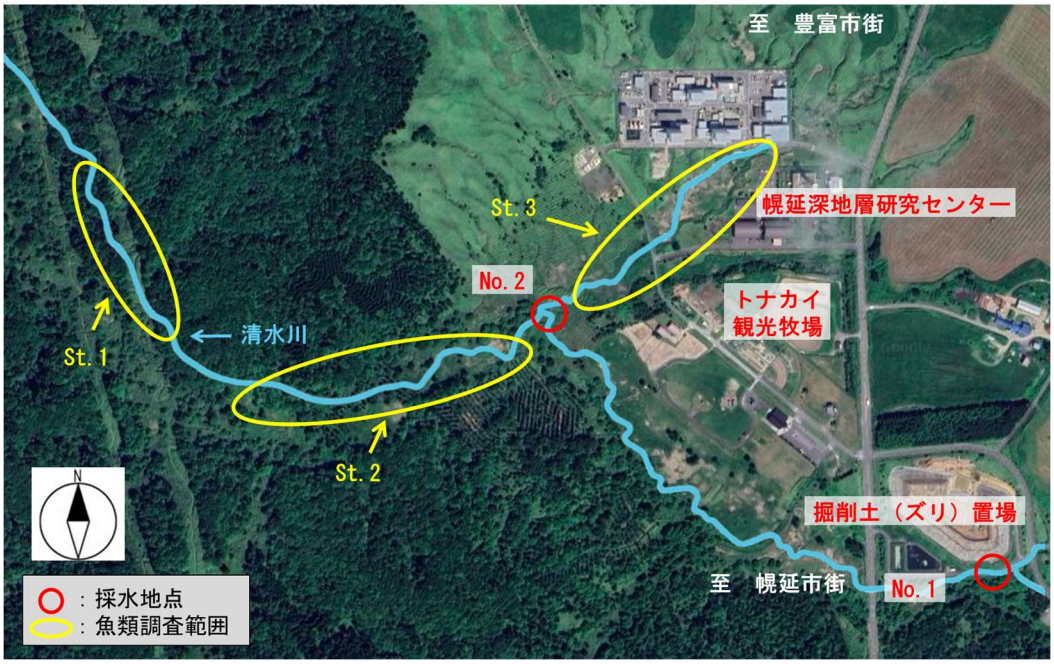


図 102　環境調査実施場所

グーグルマップ航空写真（https://www.google.co.jp/maps/）を加工し、採水地点などを追記しています。

(1) 清水川の水質調査結果

清水川の 2 地点（図 102 の No. 1、No. 2）において、定期的（原則 4 回/年）に採水を行い（図 103）、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 6 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 103　清水川からの採水状況（令和 6 年 9 月 3 日）

表 15　清水川の水質調査結果

主な分析項目	採水地点（図 102 参照）	過年度	令和 6 年度			
		平成 14 年 8 月～令和 6 年 2 月	令和 6 年			令和 7 年
			6 月	9 月	11 月	2 月
pH	No. 1	6.0～7.9	7.5	7.2	7.0	7.3
	No. 2	6.2～7.7	7.2	6.9	7.0	7.1
生物化学的酸素要求量（mg/L）	No. 1	<0.5～62	0.8	1.3	0.6	0.9
	No. 2	<0.5～10	2.3	1.9	2.4	1.4
浮遊物質量（mg/L）	No. 1	1～80	2	9	3	3
	No. 2	<1～110	2	7	6	2
溶存酸素量（mg/L）	No. 1	5.8～13.9	11.1	9.1	11.2	12.4
	No. 2	5.3～12.5	9.6	7.1	9.9	10.3

(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 104）。調査は、図 102 に示す St. 1、St. 2、St. 3 の 3 箇所で実施しています。

令和 6 年度における調査結果は、これまでと大きな変化は認められませんでした。重要種としては、表 16 に示すとおり、スナヤツメ北方種、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。

(a) 採捕状況　　(b) 採捕魚類の一例

図 104　生息魚類調査（令和 6 年 6 月 3 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	スナヤツメ北方種			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

10. 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 105）。

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 106）。

図 105　安全パトロールの状況（令和 6 年 4 月 25 日）

図 106　安全行事の実施（安全大会：令和 6 年 7 月 1 日）

11. 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 6 年度に実施した主な研究協力は以下のとおりです。

11.1　国内機関との研究協力

北海道科学大学

立坑掘削時の壁面の地質観察における作業の省力化および取得データ品質の平準化を可能にする手法整備を目的として、深層学習による画像処理技術のひとつである pix2pix[129]を用いて立坑壁面の画像（坑壁画像）から割れ目を判読する方法を検討しています。これまで、割れ目の判読精度を向上させるために、学習データの作成・改良と坑壁画像の画像処理を繰り返し試行しました。その結果、坑壁画像から地質技術者が作成する割れ目スケッチと同等の画像を出力することは難しい一方、小断層のような比較的トレース長の長い割れ目については、それらを判読できる可能性があることが分かりました。そこで、令和６年度は、主に小断層に着目し、学習データを再構築した上で、その判読を試みました。その結果、着目した小断層のトレースの一部を判読可能でしたが、その全体を正確に判読するまでには至りませんでした。割れ目判読の精度を改善するためには、坑壁画像よりも割れ目を判読しやすい画像を用意する必要があると考えています。今後、深度 380 m 以深の立坑を対象に割れ目判読を試みる予定であり、その際、深度 380 m 以深の立坑の坑壁を対象に取得されている坑道壁面形状データを使用して新たな画像を生成し、それを学習データとして使用します。

東京大学

① 地下研究施設原位置における核種移行への有機物影響に関する研究

地下水中に存在する天然有機物は、放射性核種と結合することで、その移行挙動を大きく変えることが分かっています。表層環境の天然有機物については、金属イオンとの結合に関するモデルが提案されていますが、地層処分の安全評価においては、深部地下環境の天然有機物と核種との結合反応を評

価し、表層環境の天然有機物と比較することで、両者の類似点や相違点を理解することが必要になります。そこで、天然有機物の蛍光が金属イオンと結合することで消光されることに着目し、天然有機物が核種移行に与える影響に関する研究を実施しています。堆積岩系の深部地下水中の天然有機物を対象として、3 価アクチノイドのアナログ元素であるユウロピウム（Eu）や、ウラニルイオン（UO_2^{2+}）を添加する消光実験を行ってきており、令和6年度はこれまでの成果を取りまとめました。さらに、高分解能質量分析計による質量分析のデータと蛍光のデータとを併せて解析することで、天然有機物の蛍光成分に対応した天然有機物分子の特徴を明らかにできるようになりました。その結果、Eu および UO_2^{2+}は陸性腐植物質の特徴を示す溶存有機物と結合しやすい性質を示す一方で、海洋性腐植物質の特徴を示す溶存有機物とは結合しにくい性質を示すことが分かりました。今回開発された手法は、これまでの手法と比べて短時間かつ少量で地下水中の天然有機物と核種の結合のしやすさを評価する手法として有効である結果が得られました。

② 微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

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 6 年度は、地上から掘削されたボーリング孔の深度約 500 m から採取した稚内層のコア試料に対して、これまでに整備した岩石試料中の微生物分布の一連の観察手法を適用しました。その結果、コア試料内部の健岩部に見られる微細な割れ目表面にメタン生成古細菌などの微生物が確認されました。一方で、掘削水による汚染が認められたコア試料外縁部では酸素を好む硫黄菌属が確認されたことから、健岩部から検出された古細菌は掘削に伴い外部からもたらされたものではなく、地下深部に土着の微生物であることが分かりました。このように、これまで有効性を示すことが困難であった地上からの掘削時における地下深部の低透水性岩盤に対する微生物を指標とした汚染評価手法を、本研究により実証することができました[130]。

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。このような、自然環境下での自発的コンクリーション化現象は、坑道周辺の水みちに対する長期的なバリア機能を有すると期待されます。

令和 6 年度は、掘削損傷領域ならびに水みち割れ目となる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 5 年度よりも低下していることが確認されました。さらに、過年度に実施してきた原位置試験の結果として、①コンクリーション化剤の充填により掘削損傷領域の水みち割れ目に炭酸カルシウムが形成され透水係数が時間とともに低下すること、②地下施設周辺を震源とする地震により透水係数が一時的に上昇するものの再度低下し、炭酸カルシウムの継続的な形成による割れ目の再閉塞が示唆されることなどを論文にとりまとめ、公表しました[131]。

さらに、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、強酸性化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）の中性化と透水性の低下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 6 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から掘削した既存のボーリング孔内に設置し、地下水の pH や混合物の元素分布などの変化を観測する原位置試験を実施しました。その結果、コンクリーション化剤を混合した掘削土（ズリ）では最大 2 cm 程度の凝集物が確認され、X 線回折分析の結果、$CaCO_3$ の結晶であるカルサイトが形成されていることが分かりました。

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6年度は、地下施設の250m調査坑道から掘削された既存のボーリング孔から採取した地下水試料から新規微生物を単離し、その特徴付けを行いました。単離した新規微生物はチオ硫酸塩※酸化細菌であることが分かり、二酸化炭素とチオ硫酸塩を用いた化学合成から栄養を得ていることが分かりました[132]。また、令和6年11月13日に開催した第32回研究交流会において原子力機構から、地下環境における有機物・微生物特性に関する研究発表を行い、地下施設を活用した両機関の研究協力を進めていくことについて議論しました。

電力中央研究所

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を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6年度は、過去の共同研究で取得した稚内層の岩石を用いて予備試験を実施した結果、ラドン濃度を測定できる見通しを得ました。また、今後、室内試験を本格的に実施するにあたり、500m調査坑道掘削前に実施した先行ボーリング調査により得られた岩石コアを採取しました。

また、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 6 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。また、地下水中の微生物が圧縮ベントナイト中に埋設した炭素鋼片の腐食挙動に及ぼす影響を調べるため、令和 5 年度にボーリング孔内に設置した、一般的な微生物が通過できないような孔径の小さいフィルター（孔径 0.1 μm）を比較的密度の低い圧縮ベントナイト（乾燥密度 1.0 Mg/m^3）の地下水との接液部に設置した試験体も回収し、分析を行いました。その結果、フィルターを設置した場合に腐食速度が小さくなる傾向が認められ、圧縮ベントナイトの密度が低い場合には、地下水中の微生物が炭素鋼片の腐食に影響を及ぼす可能性が示唆されました。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。

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）

掘削損傷領域内の割れ目ネットワークは物質の移行経路となるとともに、空間と栄養を微生物に提供する場となる可能性があります。本研究では、地下施設の 350m 調査坑道で掘削したボーリング孔を用いて、掘削損傷領域内の割れ目上の微生物バイオフィルムを調査しました。その結果、掘削損傷領域内の割れ目において、微生物が利用可能な酸素が原位置で生成されている可能性があることが明らかになりました[30]。この結果は、掘削損傷領域における酸化還元状態の変化に微生物が寄与していることを示唆します。

地層科学研究所

深度 500 m における坑道掘削時の岩盤の安定性や掘削損傷領域の予測のための基盤情報を整理することを目的として研究を進めています。令和 6 年度は、地下施設周辺の地表面に設置した高精度傾斜計により計測された傾斜挙動は、立坑や水平坑道の掘削の進展と、それによる地下水位の変動により説明できることを解析的に示すことができました。このことから、傾斜挙動の計測が、地下施設掘削による広範囲な影響評価において有意義であることが分かりました。

大林組

東立坑の深度370 m付近の掘削損傷領域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 6 年度は、計測を開始してから約 9 年間に幌延深地層研究センター周辺で発生した震度 1～4 の地震と掘削損傷領域の広がりの関係を、これまでの計測データの分析により検討しました。検討の結果、地震によって掘削損傷領域が広がる可能性はほとんどないことが分かりました。

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、掘削損傷領域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 6 年度は 350m 調査坑道に掘削したボーリング孔において原位置試験を実施しました。今後は、既存データとの比較や解析検討を通じて本手法の適用性を評価していく予定です。

11.2　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 年度末までを限度に令和 4 年度後半から令和 6 年度末までをフェーズ 1、令和 7 年度から令和 10 年度末までをフェーズ 2 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 6 年度は、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 6 年 6 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、坑道の整備状況や試験の準備状況について確認しました。さらに、各タスクの原位置試験の進捗に合わせて現地会合を実施し、現場を確認しながら今後の試験計画や成果取りまとめに関して議論しました。

これまでに得られた成果は、国内外の学会や日本国内の学術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ました。この報告書は、OECD/NEA のホームページにて令和 7 年度内に公開される予定です。

報告書では、プロジェクトの新規性や実施意義として、深度 250 m で実施する原位置試験により得られる成果と、これまで実施してきた深度 350 m および深度 500 m における成果を体系的に取りまとめることにより、割れ目発達状況や水みちの条件が異なる条件における物質移行モデルを検討したり、廃棄体設置や坑道・ピットの配置の設定に必要となる情報を整理するなど、処分技術を体系的に実証できることを記載しています。さらに、参加機関と連携して予測解析から原位置試験を経て、予測結果の検証を実施することによって、現象の理解を深めたり、構築したモデルの信頼性向上を効率的に実施できる点も実施意義が高いと記載しています。これらの特徴は、他国の地下研究施設を活用した国際共同プロジェクトにはない新規的かつ挑戦的な内容であることもあわせて記載しています。これらの内容に加え、各タスクの成果として原位置試験結果の詳細や、各参加機関が実施した数値解析や室内試験結果、各参加機関の研究開発状況を踏まえたプロジェクトに対する期待などについて取りまとめました。

以下に各タスクの実施項目毎にフェーズ 1 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

250m 調査坑道におけるトレーサー試験の実施にあたり、各参加機関が所有する知見や意見を試験に取り入れる形で試験計画をタスク会合で議論して立案しました。

・ 試験の実施

250m 調査坑道から掘削したボーリング孔に対する調査により、割れ目の発

達状況を把握して水理的な連結性を確認した上で、試験区間を設定してトレーサー試験を実施し、トレーサー注入時の岩盤中のトレーサー濃度の時間変化に関する情報を取得しました。

また、250m 調査坑道で取得した岩石試料を用いて、岩盤中の物質の拡散や収着に関するパラメータを取得し、物質移行挙動を検討しました。さらに、得られた結果を踏まえ、トレーサー試験の解析に用いるパラメータを整理しました。

・ 解析による検証

過去に 350m 調査坑道で行ったトレーサー試験結果の解析を実施し、それぞれの参加機関が有する解析コードの特徴を理解するとともに、妥当性を検証しました。それらの解析コードを用いて 250m 調査坑道で実施したトレーサー試験の再現解析を行いました。その結果を踏まえ、周辺の声問層における物質移行特性の理解と解析モデルの構築を進めました。

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指標やその考え方について、国内外の事例調査だけでなく参加機関からの情報提供により関連情報を収集し、タスク会合で議論しました。その結果として、500m 調査坑道で対象とする評価項目として、断層や割れ目の分布や、坑道掘削時の湧水量、掘削損傷領域（EDZ）の広がりに着目することとしました。また、それらの予測解析結果を踏まえて 500m の調査坑道で実施する原位置試験計画について議論した上で、計画を策定しました。

・ 試験の実施

過去に取得したボーリングコアを用いた分析や、立坑や水平坑道掘削中に実施した観察結果に基づき、断層分布などの地質状況を予測しました。また、原位置試験を実施する 500m 試験坑道 8・9（図 6 参照）の掘削に先立ち、先行ボーリングを実施し、岩石の強度や岩盤の透水性に関するデータを取得するとともに、先行ボーリング孔を利用した地下水圧のモニタリングを開始しました。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、事前に坑道周辺の透水係数や EDZ の広がりを原位置で

評価しました。その結果、割れ目のない領域と比較して、坑道底盤から 1.5 m の範囲では、透水係数が高いことを確認しました。また、埋め戻し材の材料特性に関して室内試験により乾燥密度と透水性、膨潤圧に関するデータを取得するとともに、地上での吹付け試験により、施工性を考慮した最適な埋め戻し材の配合を確認しました。

・ 解析による検証

500m 調査坑道の掘削を対象として、断層や割れ目の分布の事前予測や、坑道掘削時の EDZ の広がりや湧水量に関する予測解析を実施しました。その結果を踏まえ、500m 調査坑道では、350m 調査坑道と比較して EDZ の広がりが大きいことや、水みちの連結性が低いことから掘削後の湧水量の低下量が大きくなると予想しました。

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や参加機関の要望などについて議論・集約し、解体方法や分析項目、サンプリング位置などの計画案を提示しました。

・ 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、参加機関が保有する解析コードの特徴を共有するとともに、過去に実施した室内試験結果を使用した解析に着手しました。

表 17　HIP 参加機関（フェーズ 1）

参加機関	参加タスク								
	A			B			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
連邦放射性廃棄物機関（BGE、ドイツ）*13	○	－	－	○	－	－	○	／	－
英国地質調査所（BGS、英国）*14	○	－	－	○	○	－	○	／	－
電力中央研究所（CRIEPI、日本）	○	○	－	－			○	／	○
オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO、オーストラリア）*15	○	－	○	○	－	－	○	／	－
工業技術研究院（ITRI、台湾）*16	○	－	○	－			－		
日本原子力研究開発機構（JAEA、日本）	○	○	○	○	○	○	○	／	○
韓国原子力研究所（KAERI、韓国）*17	○	－	○	○	○	○	○	／	○
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）*18	○	○	－	－			－		
原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC、日本）	－			○	○	－	○	／	－
国営放射性廃棄物会社（SERAW、ブルガリア）*19	○	－	－	○	－	－	○	／	－

タスク C における試験（人工バリア性能確認試験の解体試験）は令和 8 年度～令和 9 年度に実施予定のため、フェーズ 1 では実施していません。

---

*13：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。

*14：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。

*15：オーストラリア連邦科学産業研究機構：CSIRO（Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation）は、オーストラリアにおける産業支援、社会利益促進、国家的・国際的責任の遂行に貢献するための科学研究を目的として設立された国立機関であり、研究者トレーニング、研究成果出版、技術移転、科学技術に関する情報普及などを行っています。

*16：工業技術研究院：ITRI（Industrial Technology Research Institute）は、台湾における応用研究と技術サービスを行う非営利の研究開発機関です。日本の様々な企業、大学と複数の国際共同研究などを行っています。

*17：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。

*18：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。

*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。

12. 用語集

【英数字】

AE

Acoustic Emission 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（ボアホールテレビューア）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。

Da

Da は質量を表す単位であり、質量数 12 の炭素原子の質量の 1/12 と定義されていますが、限外ろ過に用いられるフィルターサイズの指標としても用いられます。10 kDa（キロダルトン）のろ過フィルターサイズとは、10 kDa（10,000 Da）より小さな質量の分子が通ることのできる孔径（数 nm 程度）の指標を意味します。

HFSC

原子力機構が開発した低アルカリ性セメント：Highly Fly-ash contained Silica fume Cement の略で、通常のセメントに、微細なシリカなどを加えて、間隙水の pH を低下させたセメントのことです。

Mj

地震の規模を示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で示しています。

【あ行】

アウトプット法

コンクリート材料の透水性を調べる方法のひとつで、試験体に水を圧入し、試験体を通過した水の量から透水係数を求める方法です。

アクチノイド

アクチノイドは、原子番号 89 のアクチニウム（Ac）から 103 のローレンシウム（Lr）までの 15 元素の総称です。

アナログ元素

高レベル放射性廃棄物に含まれる元素と同様の化学的性質を示す元素のことを言います。アナログ元素を使った調査や試験を行うことで、高レベル放射性廃棄物を使わないで、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素の移行挙動などを知ることができます。

移流

本報告書では、物質が地下水の流れによって移動する現象を指します。

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。

ウラニン

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。

エトリンガイト

セメント水和物のひとつで、化学式 $3CaO・Al_2O_3・3CaSO_4・32H_2O$ で表される鉱物です。

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】

回収可能性

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、処分場の閉鎖までの間に何らかの理由でその取り出しが望まれた場合に、それを取り出し、搬出する一連の行為が実現可能であることを言います。

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、機械的方法や高水圧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。

拡散

拡散とは、物質の濃度の違いによって物質が散らばり広がる現象を言います。拡散試験はトレーサー試験の一種で、物質（トレーサー）の濃度変化から岩盤の拡散係数などのパラメータを調べる試験です。

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、地下水の流れや物質の移動が非常に遅いと考えられます。

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。

希土類元素

希土類元素は、原子番号 21 のスカンジウム（Sc）と 39 のイットリウム（Y）に、原子番号 57 のランタン（La）から 71 のルテチウム（Lu）までの 15 元素を合わせた 17 元素の総称で、レアアースとも呼ばれます。希土類元素は、高レベル放射性廃棄物に含まれるウランなどと同様の化学的性質を示すことから、希土類元素を用いた試験を行うことにより、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素の移行挙動などを把握することができます。

掘削損傷領域

本報告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。

クリープ

一般に、一定加重または応力が作用している状態で、時間の経過とともに材料の変形（ひずみ）が進行する現象を指します。

経験式

理論的根拠は明らかではないものの、実験や観測などによる実測値から導かれた関係を数式で表したものです。

ケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）

コンクリートに含まれる主要な水和物のひとつであり、カルシウムやシリカを含みます。含まれるカルシウムやシリカの物質量の比によって組成や性質が異なります。

原位置試験

本報告書では、実際の地下環境下で行う試験のことを指します。

限外ろ過

コロイド粒子などの、通常のろ過方法では分離できない微細な粒子をろ過する方法で、約 1 kDa～1,000 kDa の分子を分離することができます。

懸濁粒子

水中に浮遊して溶解しない粒子のうち、コロイドよりも大きいものの総称です。浮遊物質とも呼ばれます。

減熱過程

人工バリアを構成するガラス固化体は、処分孔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】

錯体

有機物と希土類元素や金属元素が配位結合や水素結合することで形成される化合物の総称です。

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。

酸素同位体比

酸素同位体比とは、質量数 16 の酸素に対する質量数 18 の酸素の割合のことです。酸素同位体比は一般に千分率（パーミル：‰）で表されます。幌延地域の水の酸素同位体比は、表層水で−10‰前後、深部地下水で 0‰前後の値を示すことが分かっています。

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。

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。

収着

地下水中にある元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

収着分配係数

岩盤中と地下水中における元素の濃度比を表す係数で、元素の岩盤への取り込まれやすさを表す係数です。拡散係数とともに、環境中における元素の移動の予測や放射性廃棄物の処分における安全評価などに使用される重要なパラメータのひとつです。

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、廃棄体を竪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。

シリカ

二酸化ケイ素とも呼ばれます。石英の主成分であり、地殻に最も豊富に含まれる物質のひとつです。

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。

水理学的有効間隙率

本報告書では、岩盤中の間隙部分のうち、水が通らないほど小さいか孤立した間隙を除いた部分の間隙の割合、すなわち水の移動に有効な間隙の割合のことです。

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ない場合は、水理学的連結性が低いと表現します。

スクリュー工法

本報告書では、スクリューコンベアを用いて埋め戻し材を充填する工法を指します。

スメクタイトのイライト化

スメクタイトおよびイライトはどちらも粘土鉱物の一種であり、スメクタイトは、一般に温度や圧力などの影響によってイライトに変化します。スメクタイトは人工バリアのひとつである緩衝材の材料であるベントナイトに含まれており、スメクタイトがイライトに変化することで、ベントナイトの透水性や核種の収着性などの特性が変化します。

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、その岩盤の力学特性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。

タイムラプス解析

異なる時期に取得された複数のデータから物性値の分布の時間変化を推定する場合に、隣接している時間における物性値は類似していると仮定して全てのデータを同時に解析する手法です。本報告書においては、約 10 年間の間に取得した 14 回の調査データから該当期間の弾性波速度分布の変化を推定する解析を実施しています。

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。

多相流解析

岩盤中を流れる流体の流動シミュレーションにおいて、水の流れだけではなく、空気や蒸気などの気相の流動も考慮した解析のことです。

縦方向分散長

本報告書では、「機械的分散」を単に分散と表現しています。分散は流れの速さに依存する形で表現することができ、簡単に一次元方向の流れのみを考慮する場合、以下の式で表現することが可能です。

$$D = \alpha \cdot u$$

ここで、D：分散係数（㎡/s）、α：分散長（m）、u：流速（m/s）を表します。分散係数は流れの方向に対して同じ方向、直行方向、垂直方向にそれぞれ定義することができ、流れの方向と同じ方向の分散係数は以下の式で表現することが可能です。

$$D_L = \alpha_L \cdot u$$

この時の分散長（α_L）を縦方向分散長と言います。

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人工的に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により坑道周辺の岩盤の状態を知ることができます。

チオ硫酸塩

硫黄と酸素からなるチオ硫酸イオン（$S_2O_3^{2-}$）を含む塩のことです。チオ硫酸塩は天然に存在し、いくつかの微生物はチオ硫酸塩をエネルギー源として活動することができます。

中性化

大気中の二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムなどの成分とが反応し、コンクリート中の細孔溶液の pH が低下する現象です。中性化が進むとコンクリート中の鉄筋が腐食しやすくなり、鉄筋が腐食することでコンクリートのひび割れなどが発生し、コンクリート構造物の劣化が進みます。

電気伝導度

電気の通しやすさを表す値です。水の場合、電気伝導度が大きい（電気を通しやすい）ほど水に溶けているイオンの量が多いことを表します。

電磁探査

電磁波を利用して対象となる岩盤などの電気的特性を観測し、その性質・状態を推定する調査手法です。

同位体

同じ種類の元素であっても重さ（質量数）が違うものがあり、これらのことを同位体と言います。また、ある物質に含まれる元素の同位体の割合のことを同位体比と言います。

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

トモグラフィ

トモグラフィ調査は、調査対象の範囲内の物性値（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

質量数が 3 である水素の同位体で、日本語では三重水素と呼ばれます。地球上で実施された過去の核実験の影響などにより環境中に微量に存在しますが、幌延地域の深部地下水のような古い地下水には含まれていません。

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。

トレーサー回収率

トレーサー回収率とは、「投入区間から注入したトレーサーの単位時間当たりの量」に対する「回収区間で観測されたトレーサー濃度がおおむね一定となった期間におけるトレーサーの単位時間当たりの量」の比を指します。

【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などが複合的に生じる現象です。さらに地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化を加えた、熱－水理－力学－化学連成現象が人工バリアの近傍で生じます。

【は行】

暴露試験

材料および製品を特定の環境に暴露し、その環境における材料や製品の化学的性質・物理的性質および性能の変化を調査する試験です。

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竪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、シルト岩などは比抵抗が低く（電気が流れやすく）、頁岩、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。

品質保証体系

本報告書では、緩衝材や埋め戻し材に要求される性能を満足することを示す方法を品質保証としており、その緩衝材や埋め戻し材を設計・施工する過程までを含めた品質保証の枠組みを品質保証体系としています。

腐植物質

土壌中の有機物が微生物により分解されてできる最終生成物のことで、特定の化学構造を持ちません。腐植物質の中にはフミン酸などが含まれます。

フミン酸

植物などが微生物により分解される最終生成物（腐植物質）のうち、酸性である無定形高分子物質のことで、腐植酸とも呼ばれます。

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、あるいは掘削の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。

分散

水の流れに乗って物質が媒体を移動する場合、その媒体の構成物質の不均質性と構成物質と水の間に生じる摩擦などによって、物質の移動速度に違いが生じます。その結果、物質が空間的に広がり、濃度が減少します。このようなプロセスは一般的に「機械的分散」と呼ばれますが、本報告書では単に「分散」と表現しています。

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収着されたりして、放射性核種の移行を抑制する効果があります。

膨出

緩衝材と埋め戻し材に含まれるベントナイトの割合は、緩衝材の方が大きいため、緩衝材の方が地下水と接触した際に膨らむ力が大きくなります。このため、緩衝材と埋め戻し材の境界面では緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいきます。この現象を本報告書では膨出と呼びます。緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいくことにより、部分的に緩衝材の密度が小さくなり、期待する性能が損なわれる可能性も想定されます。

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。

防爆仕様

可燃性ガスが存在または存在する恐れのある場所で電気設備を設置または使用する場合、電気設備が原因となって生ずる爆発や火災などを防止するために、火花などが発生してもガスに引火しないようになっている構造です。

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

幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project：HIP）は、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_hip2.html）

【ま行】

埋没続成作用

泥や砂などの堆積物は、長い年月をかけて厚く堆積し地下深くに埋没すると、圧力と地温上昇の影響によって、鉱物粒子の隙間が減少したり、粒子同士の結びつきが鉱物の溶解・沈殿により強くなったりして、堆積物が固結化していきます。このような埋没の過程で生じる物理・化学的な現象を埋没続成作用と総称します。

水みちのつながり方の次元

地下水の通り道となる隙間同士のつながり具合を表す指標です。隙間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、隙間同士のつながりが限定的で、一次元的なチャンネルを形成する場合は一次元となります。

モンモリロナイト

ベントナイトの主成分である粘土鉱物で、ノートのようなシート状の結晶構造を持っています。通常、それらが折り重なった状態（重層体や積層体などと呼ばれています）で存在しています。

【や行】

有効粘土密度

緩衝材や埋め戻し材中に含まれるケイ砂の体積を除いた、ベントナイトのみの乾燥密度を計算したものです。

【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	R6 の実施内容	研究期間
・実際の地質環境下における処分孔竪置き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確認するとともに、その予測技術を確立することで、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（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	R6 は実施しない	前半の 5 年程度で実施 ／ 後半：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 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に移行、緩衝材中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	R6 は実施しない	国際プロジェクトでの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 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対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	R6 は実施しない	④-2　人工バリアの解体作業、緩衝材の飽和度の確認 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クの取り出し手法を確認 ／ 解体試験計画案（解体作業の方針および施工手順・サンプリング方法）の決定 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	R6 の実施内容	研究期間 前半 R2	R3	R4	R5	R6	研究期間 後半 R7	R8	R9	R10
・幌延地域に分布する泥岩は断層等の構造性の割れ目が分布することが知られているため、岩盤基質部（＝健岩部）における拡散および割れ目（掘削損傷領域などの人為的な割れ目も含む）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	① 岩盤基質部（＝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 ② 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 ③ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証 ④ 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 ⑤ 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 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立				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			
		④ 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、物質移行評価手法の高度化するため以下を実施 ④ 確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	④ 掘削損傷領域におけるモデル化／解析評価手法の取りまとめ	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解釈	掘削損傷領域の物質移行特性について、解析手法の適用性を確認	掘削損傷領域の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 ○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	⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験	⑤ 有機物・微生物・コロイドが核種移行に及ぼす影響の現象理解の継続、原位置トレーサー試験の継続、評価方法の取りまとめ	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 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備	⑥ 声問層におけるトレーサー試験装置の適用性の確認および稚内層深部を事例としたブロックスケールの評価手法の取りまとめ	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	声問層の物質移行特性を取得するためのボーリング掘削に着手	声問層で関連データを取得。稚内層深部において、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。

凡例	
（黒）	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。
（灰色）	「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

2.1.1　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	R6 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）	① 支保部材の経年劣化および坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関する事象について取りまとめ	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で約 1 年間定置したコンクリートの中性化の程度の違いを確認	乾燥および湿潤条件で約 2 年間定置したコンクリートの中性化の程度の違い等を確認	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	② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験および原位置試験の継続、取りまとめ	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・原位置試験を実施	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・原位置試験を実施	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・原位置試験を実施	解析検討・室内試験・原位置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 埋め戻し材の施工技術オプションの整備に向けた要素試験などの実施および施工品質などに関するデータの取得、取りまとめ	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	流水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	R6 の実施内容	研究期間 前半	研究期間 後半
・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	ピット周辺の水みちの水理特性や物質の移行特性に関わる評価手法などの整理	―	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

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				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 [redacted] 声問層の水理・物質移行特性に関する情報取得				
				④-2　地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化 [redacted] 坑道周辺の掘削損傷領域の広がり、および湧水量の予測				
令和 10 年度までに得られる成果 ○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								
				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 [redacted] 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				
令和 10 年度までに得られる成果 ○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								
				④-4　廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理 [redacted] ピ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				
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								

R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
④-2　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技術を考慮した、地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化				500m 調査坑道における坑道への湧水量や掘削損傷領域の発達範囲の予測 埋め戻し材、プラグの設計に必要となる掘削損傷領域の広がりや水理特性の調査、材料特性を把握するための試験				
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				既存データや坑道の掘削過程で得られるデータを用いた湧水量やその減少速度の予測手法と湧水抑制対策や緩衝材の流出抑制対策への反映方法の整備				
④-4　廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理				既存の調査結果や研究成果に基づき、ピット周辺に存在する割れ目の開きやすさや、ピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法を整理				

※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。

[redacted]　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　高温度(100℃超)など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	R6 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、オーバーパックが 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 高温度（100℃以上）などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験による緩衝材が 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 ①-1 高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験	①-1 高温条件での人工バリアの挙動に関する原位置試験の計測および解体	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、手法など）を入手	先行研究事例の調査結果を踏まえた課題の抽出	調査事例を基に課題の抽出、原位置試験の概念検討・計画策定	高温条件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、試験体の解体・分析、結果の取りまとめ	令和 6 年度までに得られる成果 ○高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験データの収集			
			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	①-2 シナリオ整理の継続、ニアフィールド構成材料を対象とした試験、分析	①-2 100℃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					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）	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	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			
			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（国際プロジェクト情報を収集し、発生する現象を整理）	①-3 海外の原位置試験に関する情報ならびに高温条件下で生じ得る現象をふまえた温度設定の考え方の提示	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、手法など）を入手	海外での原位置試験の情報（試験開始時のデータなど）を入手	海外での原位置試験の情報（最高加熱時のデータなど）を入手	海外での原位置試験の情報（加熱継続に伴う水分量変化のデータなど）を入手	温度履歴等の不確かさを考慮した上限温度の見積もり、取りまとめ	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			

※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

3.1.1　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	R6 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
・岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なもののいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある ・断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する ・本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、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）	②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ	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	水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良	大型の断層の水圧擾乱試験結果と改良モデルの整合性を確認	断層内の水みちのつながり方の次元と DI の定量的な関係を確認	水圧擾乱試験による地殻変動の水理学的な影響評価手法を整備	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	②-2 断層/割れ目の水理学的連結性と DI の関係に関する解析と取りまとめ	②-2 DI を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備					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	水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良	割れ目の水理学的連結性と水圧観測結果の整合性を確認	断層内の水みちのつながり方の次元と DI の定量的な関係を確認	DI を用いた断層/割れ目の代表的な透水性の推定手法を整備	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	②-3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ	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	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	大型の断層の水圧擾乱試験に係るデータを整理	断層を対象とした水圧擾乱試験による原位置の地圧の推定手法を構築	水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法を整備	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			

※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	R6 の実施内容	研究期間
					前半
・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 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 ④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証 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）	③、④-1 R4までの成果に基づく、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的手法による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法の整理・取りまとめ ④-2 R4までに実施した水理・物質移動解析の結果に基づく古水理地質学的変遷が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理・取りまとめ	前半の5年程度で実施 R2：③ 地下水の流れが非常に遅い領域の調査・評価技術の検証 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 R3：電磁探査により推定した化石海水分布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 R4：R3に掘削したボーリング孔の延長による水質データ追加とR2に推定した化石海水分布の妥当性確認 R5：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 R6：これまでの成果の取りまとめ R2：④-1 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 R3：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 R4：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 R5：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 R6：これまでの成果の取りまとめ R2：④-2 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度・気候などが与える影響を整理 R3：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 R4：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 R5：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 R6：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	後半 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 R7〜R10：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 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 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 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	R6 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 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	R6 は実施しない	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 [redacted] 試料観察に基づき、EDZ の割れ目開口状況を定量的に把握	水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良	EDZ の透水性と改良モデルの整合性を確認		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 令和 4 年度までに得られる成果 ○DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証				
			✓坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を予測するモデルの構築	R6 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 [redacted] 試料観察に基づき、EDZ の割れ目開口状況を定量的に把握	坑道埋め戻し後の割れ目のずれが EDZ の透水性に与える影響を確認	埋め戻し材の膨潤圧が EDZ の透水性に与える影響の評価手法を構築		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 令和 4 年度までに得られる成果 ○坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を予測するモデルの構築				

※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) 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.

(2) 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.

(3) 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.

(4) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画　令和 6 年度調査研究計画，JAEA-Review 2024-033，2024，64p.

(5) 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 2　地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022，1999，703p.

(6) Ohno, H. and Takayama, Y.: Modeling of coupled processes in full-scale engineered barrier system performance experiment at Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Geomechanics for Energy and the Environment, vol.41, 2025, 100636.

(7) 中山雅，松崎達二，丹生屋純夫：幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験－大口径掘削機の開発、模擬オーバーパック、緩衝材および埋め戻し材の製作－，JAEA-Research 2016-010，2016，57p.

(8) 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.

(9) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画　令和 3 年度調査研究報告, JAEA-Review 2022-025, 2022, 164p.

(10) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画　令和 4 年度調査研究報告, JAEA-Review 2023-032, 2024, 159p.

(11) 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.

(12) 中山雅，雑賀敦，木村駿，望月陽人，青柳和平，大野宏和，宮川和也，武田匡樹，早野明，松岡稔幸，櫻井彰孝，宮良信勝，石井英一，杉田裕，笹本広，棚井憲治，佐藤稔紀，大澤英昭，北山彩水，谷口直樹：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：必須の課題 2015–2019 年度）研究成果報告書，JAEA-Research 2019-013，2020，276p.

(13) Gelhar, L. W., Welty, C. and Rehfeldt, K. R.: A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers, Water Resources Research, vol.28, no.7, 1992, pp.1955-1974.

(14) 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 2 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]ニアフィールドシステム評価確証技術開発 報告書，2021，533p.

(15) Stumm, W. amd Morgan, J. J.: Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, Third Edition, Wiley, 1996.

(16) Sasamoto, H. and Onda, S.: Preliminary results for natural groundwater colloids in sedimentary rocks of the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Geological Society, London, Special Publications, vol.482, 2018, pp.191-203.
(17) Kimuro, S., Kirishima, A., Nagao, S., Saito, T., Amano, Y., Miyakawa, K., Akiyama, D. and Sato, N.: Characterization and thermodynamic study of humic acid in deep groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.55, no.5, 2018, pp.503-515.
(18) Saito, T., Hamamoto, T., Mizuno, T., Iwatsuki, T. and Tanaka, S.: Comparative study of granitic and sedimentary groundwater colloids by flow-field flow fractionation coupled with ICP-MS, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, vol.30, no.6, 2015, pp.1229-1236.
(19) Knoll, A.: Overview, In Space Studies Board (ed.), Size Limits of Very Small Microorganisms; Proceedings of a Workshop. National Academy Press, Washington, D.C., 1999, pp. 1–3.
(20) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画　令和5年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2024-042, 2024, 111p.
(21) Kirishima, A., Kuno, A., Amamiya, H., Kubota, T., Kimuro, S., Amano, Y., Miyakawa, K., Iwatsuki, T., Mizuno, T., Sasaki, T. and Sato, N.: Interaction of rare earth elements and components of the Horonobe deep groundwater, Chemosphere, vol.168, 2017, pp.798-806.
(22) Kirishima, A., Terasaki, M., Miyakawa, K., Okamoto, Y. and Akiyama, D.: Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, Chemosphere, vol.289, 2022, 133181.
(23) Amano, Y., Sachdeva, R., Gittins, D., Anantharaman, K., Lei, S., Valentin-Alvarado, L. E., Diamond, S., Beppu, H., Iwatsuki, T., Mochizuki, A., Miyakawa, K., Ishii, E., Murakami, H., Jaffe, A. L., Castelle, C., Lavy, A., Suzuki, Y. and Banfield, J. F.: Diverse microbiome functions, limited temporal variation and substantial genomic conservation within sedimentary and granite rock deep underground research laboratories. Environmental Microbiome, vol.19, 2024, 105.
(24) 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.
(25) 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.
(26) Terashima, M., Endo, T. and Miyakawa, K.: Determination of humic substances in deep groundwater from sedimentary formations by the carbon concentration-based DAX-8 resin isolation technique, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.57, no.4, 2020, pp.380-387.

(27) 望月陽人，笹本広，馬場大哉，生垣加代子：少量試料に適用可能な簡易分析法に基づく深部地下水中の溶存有機物の特性評価，陸水学雑誌，vol.81，no.2，2020，pp. 153-166.
(28) Saito, T., Nishi, S., Amano, Y., Beppu, H. and Miyakawa, K.: Origin of dissolved organic matter in deep groundwater of marine deposits and its implication for metal binding, ES&T Water, vol.3, no.12, 2023, pp.4103-4112.
(29) Nishimura, H., Kouduka, M., Fukuda, A., Ishimura, T., Amano, Y., Beppu, H., Miyakawa, K. and Suzuki, Y.: Anaerobic methane-oxidizing activity in a deep underground borehole dominantly colonized by *Ca*. Methanoperedenaceae, Environmental Microbiology Reports, vol.15, no.3, 2023, pp.197-205.
(30) Hirota, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E. and Suzuki, Y.: Biofilm formation on excavation damaged zone fractures in deep neogene sedimentary rock, Microbial Ecology, vol.87, 2024, 132.
(31) 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.
(32) 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.
(33) 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 4 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]回収可能性技術高度化開発 3 ヵ年取りまとめ報告書，2023.
(34) 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，電力中央研究所：令和 5 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]地層処分安全評価確証技術開発ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発報告書，2024.
(35) 中山雅：幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の劣化および周辺環境への影響調査，JAEA-Data/Code 2020-009，2020，98p.
(36) Ngala, V. T. and Page, C. L. : Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, Cement and Concrete Research, vol.27, no.7, 1997, pp.995-1007.
（37）Leeman, A., Nygaard, P., Kaufmann, J., Loser, R.: Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and cncrete, Cement and Concrete Composites, vol.62, 2015, pp.33-43.
(38) von Greve-Dierfeld, S. and Gehlen, C.: Performance-based durability design, carbonation part 2 – Classification of concrete, Structural Concrete, vol.17, 2016, pp.523-532.
(39) 地盤工学会：低透水性材料の透水試験方法，JGS0312-2018，2018，30p.
(40) Hashiba, K., Fukui, K., Kataoka, M. and Chu, S. Y.: Effect of water on the strength and creep lifetime of andesite, International journal of rock mechanics and mining sciences, vol.108, 2018, pp.37-42.

(41) 中山雅，雑賀敦（編）：幌延深地層研究計画　令和元年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2020-042，2021，116p.
(42) Hvorslev, M. T.: Time lag and soil permeability in ground-water observations, U.S. Army Waterways Experiment Station, Bull no.36, 1951, 50p.
(43) Jacob, C. J. and Lohman, S. W.: Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. American geophysical Union, vol.33, no.4, 1952, pp.559-569.
(44) Ozaki, Y.: First-arrival traveltime tomography for monitoring the excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Rock Mechanics Bulletin, vol.2, no.3, 2023, 100057.
(45) Ozaki, Y., Aoyagi, K., Ohno, H. and Kimura, S.: Variation of electrical resistivity distribution around the opened and backfilled tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of CouFrac2024, - The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, 2024.
(46) 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 4 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 5 ヵ年取りまとめ報告書，2023.
(47) 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 4 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，2023.
(48) 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 2 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，2021.
(49) 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.
(50) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画　令和 2 年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2021-053, 2022，133p.
(51) 菊池広人，宇田俊秋，林大介，江守稔，木村駿：竪置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討，原子力バックエンド研究，vol.31，no.1, 2024, pp.11-20.
(52) 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 4 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]ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書，2022.
(53) 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, 2019, pp.385-401.
(54) 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 CouFrac 2024 - The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, 2024.

(55) 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.

(56) 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.

(57) 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 5 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，2024.

(58) 木村駿，早野明，佐藤菜央美，田村友識，八木啓介：幌延の堆積岩における止水プラグの原位置施工試験の概要（1）全体概要と坑道周辺の水理条件の把握，日本原子力学会 2024 年秋の大会，2024.

(59) 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，2025，pp.294-299.

(60) 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.

(61) Posiva and SKB: Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository, Posiva SKB Report 01, 2017.

(62) 石川博久，菅野毅，松本一浩：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（I），PNC TN8410 97-313，1997，32p.

(63) Birgersson, M., Börgesson, L., Hedström, M., Karnland, O. and Nilsson, U.: Bentonite erosion. Final report, SKB Technical Report TR-09-34, 2009, 171p.

(64) Neretnieks, I., Moreno, L. and Liu, L.: Clay erosion - impact of flocculation and gravitation, SKB Technical Report TR-16-11, 2017, 81p.

(65) Neretnieks, I. and Moreno, L.: Revisiting bentonite erosion understanding and modelling based on the BELBaR project findings, SKB Technical Report TR-17-12, 2018, 52p.

(66) 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.

(67) 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.

(68) 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.

(69) Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, Engineering Geology, vol.275, 2020, 105748.

(70) 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.

(71) 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.

(72) 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.

(73) 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.

(74) 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.

(75) NAGRA: Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, Nagra NTB 96-01, 1997, 511p.

(76) 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 volcaniclastic rocks at Sellafield, north-west England, Proceedings of the Yorkshire Geological Society, vol.52, 1998, pp.159-175.

(77) 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.

(78) 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.

(79) 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.

(80) 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.
(81) 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.
(82) 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 CO_2 sequestration, International Journal of Greenhouse Gas Control, vol.111, 2021, 103471.
(83) 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.
(84) OECD/NEA: Clay club catalogue of characteristics of argillaceous rocks: 2022 update, NEA No. 7249, 2022, 242p.
(85) 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.
(86) 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.
(87) 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.
(88) 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.
(89) 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.
(90) 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.
(91) 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.

(92) 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.
(93) 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.
(94) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, Water Resources Research, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
(95) 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問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.
(96) 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.
(97) 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.
(98) 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.
(99) Neuzil, C. E.: Interpreting fluid pressure anomalies in shallow intraplate argillaceous formations, Geophysical Research Letters, vol.42, 2015, pp.4801-4808.
(100) 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.
(101) 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.
(102) 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.
(103) 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 & Mining Sciences, vol.70, 2014, pp.332-342.
(104) 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.

(105) 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.

(106) 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.

(107) Tremosa, J., Gonçalvès, J. and Matray, J.-M.: Natural conditions for more limited osmotic abnormal fluid pressures in sedimentary basins, Water Resources Research, vol.48, 2012, W04530.

(108) Gonçalvès, 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.

(109) 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.

(110) Yu, C., Matray, J.-M., Gonçalvès, 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.

(111) 鈴木英明，高山裕介：ニアフィールドにおける過渡期の熱–水–応力連成挙動に及ぼす緩衝材の密度変化の影響評価（受託研究），JAEA-Research 2020-015，2020，52p.

(112) 菊池広人，棚井憲治，松本一浩，上野健一，佐藤治夫，鐵剛志：緩衝材の飽和透水特性-II; －海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響－，JNC TN 8430 2003-002，2003，47p.

(113) 菊池広人，棚井憲治：幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験，JNC TN 8430 2004-005，2004，96p.

(114) Wersin, P., Johnson, L. H. and McKinley, I. G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C, Physics and Chemistry of the Earth, vol.32, 2007, pp.780-788.

(115) Leupin, O. X., Birgersson, M., Karnland, O., Korkeakoski, P., Sellin, P., Mäder, U. and Wersin, P.: Montmorillonite stability under near-field conditions, NAGRA Technical Report NTB-14-12, 2014, 120p.

(116) 日本原子力研究開発機構：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発－６ヶ年研究成果の取りまとめ－, 2013.

(117) Ishii, E.: Constant-head step-injection tests using a conventional straddle-sliding-packer system for investigating the shear capabilities of minor faults, Rock Mechanics and Rock

Engineering, vol.57, 2024, pp.8861-8878.
(118) 総合資源エネルギー調査会：最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性についてー，総合資源エネルギー調査会　電力・ガス事業分科会　原子力小委員会　地層処分技術 WG，2014.
(119) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所：令和 2 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]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書，2021.
(120) 宮川和也，早野明，佐藤菜央美，中田弘太郎，長谷川琢磨：HFB-1 孔調査データ集，JAEA-Data/Code 2023-009，103p.
(121) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所：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]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書，2022.
(122) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所：令和 4 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]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書，2023.
(123) 早野明，佐藤菜央美：地下水の流れが非常に遅い領域の分布を推定するための調査手順の検討，日本原子力学会北海道支部第 41 回研究発表会，2024.
(124) 水野崇，岩月輝希，松崎達二：ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水質の推定方法に関する検討，応用地質, vol.58, no.3, 2017, pp.178-187.
(125) Miyakawa, K., Kashiwaya, K., Komura, Y., and Nakata, K.: Evolution of porewater in a Neogene sedimentary formation in the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Modeling of burial diagenesis, GEOCHEMICAL JOURNAL, vol. 57, no.5, 2023, pp.155-175.
(126) Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H.: An evaluation of the long-term stagnancy of porewater in the Neogene sedimentary rocks in northern Japan, Geofluids 2018, 7823195.
(127) 天野由記，山本陽一，南條功，村上裕晃，横田秀晴，山崎雅則，國丸貴紀，大山隆弘，岩月輝希：幌延深地層研究計画における地下水，河川水および降水の水質データ（2001～2010 年度），JAEA-Data/Code 2011-023，2012，312p.
(128) 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.
(129) 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.
(130) 吉田晶，幸塚麻里子，宮川和也，別部光里，天野由記，鈴木庸平：陸域地下深部で化石海水が残存する珪質泥岩亀裂で優先する *Altiarchaeota*，日本地球惑星科学連合 2025 年大会，2025.
(131) Yoshida, H., Yamamoto, K., Asahara, Y., Maruyama, I., Karukaya, K., Saito, A., Matsui, H., Mochizuki, A., Jo, M., Katsuta, N., Umemura, A. and Metcalfe, R.: Post-earthquake rapid resealing of bedrock flow-paths by concretion-forming resin, Communications Engineering, vol.3, 2024, 67.
(132) Ueno, A., Sato, K., Tamamura, S., Murakami, T., Inomata, H., Tamazawa, S., Amano, Y.,

Miyakawa, K., Naganuma, T. and Igarashi, T.: Complete genome sequence of *Thiomicrospira* sp. strain V2501 isolated from 250 m below the ground level in Horonobe, Hokkaido, Japan, Microbiology Resource Announcements, vol.13, no.11, 2024, e00108-24.

付録

（令和 6 年度外部発表）

著者アルファベット順に記載

相澤穂高，大野宏和，川久保昌平，加藤猛士，大泉涼，知念千佳：ボアホールジャッキ試験を用いた岩盤応力測定手法，令和 6 年度日本応用地質学会研究発表会，2024.

Amano, Y., Sachdeva, R., Gittins, D., Anantharaman, K., Lei, S., Beppu, H., Mochizuki, A., Thomas, B. C., Suzuki, Y. and Benfield, J. F.: Genomic conservation in diverse, distinct but functionally similar microbiomes in deep subsurface sedimentary and granitic environments, 19th International Symposium on Microbial Ecology (ISME19), 2024.

Amano, Y., Sachdeva, R., Gittins, D., Anantharaman, K., Lei, S., Valentin-Alvarado, L. E., Diamond, S., Beppu, H., Iwatsuki, T., Mochizuki, A., Miyakawa, K., Ishii, E., Murakami, H., Jaffe, A. L., Castelle, C., Lavy, A., Suzuki, Y. and Banfield, J. F.: Diverse microbiome functions, limited temporal variation and substantial genomic conservation within sedimentary and granite rock deep underground research laboratories. Environmental Microbiome, vol.19, 2024, 105.

Aoyagi, K.: Overview of the Horonobe International Project (HIP), Seventh International Conference on Geological Repositories (ICGR-7); Empowering Progress in Developing Deep Geological Repositories, 2024.

Aoyagi, K. and Ohno, H.: Monitoring system and technologies for emplacing engineered barrier in the Horonobe Underground Research Laboratory, Webinar series on robotics and remote system for the nuclear back-end: Robotic work at deep geological repositories and other underground nuclear applications, 2025.

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，2025，pp.269-274.

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.

Aoyagi, K., Sugawara, K., Kamemura, K., and Nago, M.: Estimation stress state using measured tunnel convergence in loop galleries excavated in mudstone, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 178, 105776.

青柳和平，舘幸男：講演再録　幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（1）幌延深地層研究計画における国際共同プロジェクトの重要性, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, 2024, pp.124-127.

青柳和平，舘幸男：幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（1）幌延深地層研究計画における国際共同プロジェクトの重要性，日本原子力学会 2024 年秋の大会バックエンド部会セッション，2024.

蝶野浩平，小林大志，佐々木隆之，江口綾乃，天野由記：核種の岩石への収着に及ぼす有機物影響（1）ガンマ線照射した幌延フミン酸の化学的特性，日本原子力学会 2024 年秋の大会，2024.

出井俊太郎，天野由記，杉浦佑樹，柴田真仁，根岸久美，横山立憲，鏡味沙耶，武田匡樹，望月陽人，櫻井彰孝，舘幸男：幌延 URL における泥岩とセメントの原位置での相互作用と変質挙動：普通ポルトランドセメントと低アルカリセメントの比較, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会, 2024.

Fairat, K., 武田匡樹, 尾崎裕介 : Parameter Optimisation of the Solute Transport Equations from In Situ Tracer Test of the Excavation Damaged Zone，日本原子力学会 2024 年秋の大会，2024.

Fairat, K., Takeda, M., Ozaki, Y., Mochizuki, A. and Dei, S.: Applicability of the mobile-immobile model for describing the in-situ tracer test in the mudstone at Horonobe Underground Research Laboratory, 日本原子力学会北海道支部第 42 回研究発表会/プラズマ・核融合学会

北海道地区研究連絡会第 28 回研究会, 2025.
Hata, K., Niunoya, S. and Aoyagi, K.: Evaluation of excavation damaged zone (EDZ) in Horonobe Underground Research Laboratory (URL), International Journal of the JSRM (Internet), vol.20, no.1, 2024, 240104.
早野明：講演再録　幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（3）タスク B：処分技術の実証と体系化，原子力バックエンド研究，vol.31，no.2，2024，pp.134-139.
早野明：幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（3）タスク B：処分技術の実証と体系化，日本原子力学会 2024 年秋の大会バックエンド部会セッション，2024.
平野伸一，長岡亨，小鯖巧，天野由記，望月陽人：地下環境から分離した腐食性メタン菌の特性解析，材料と環境 2024，2024.
廣岡真一，前野克治，押野善之，藤枝大吾，菜花良平：メタンガス含有地山におけるトンネル掘削作業に関する安全対策について，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
Hirota, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E. and Suzuki, Y.: Biofilm Formation on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock, Microbial Ecology, 87, 2024, 132.
市田雄行，前野克治，石井祥旭，長田翔平，大塚勇，藤枝大吾，菜花良平：大深度立坑の支保設計に関する検討（2），令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
Ishii, E.: Constant-head step-injection tests using a conventional straddle-sliding-packer system for investigating the shear capabilities of minor faults, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.57, no.10, 2024, pp.8861-8878.
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.
石井祥旭，長田翔平，大塚勇，市田雄行，前野克治，藤枝大吾，菜花良平：大深度立坑の支保設計に関する検討（1），令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
伊藤歩夢，千々松正和，木村駿：ベントナイト材料の X 線 CT 測定による密度評価に向けたデータ取得 2，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
伊藤真司，清水浩之，大野進太郎，高山裕介：幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験を対象とした再冠水時の熱的/水理的状態変遷を反映した弾塑性力学解析，土木学会論文集（インターネット），vol.80，no.8，2024，24-00030.
菊池広人，宇田俊秋，林大介，江守稔，木村駿：竪置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討，vol.31，no.1，2024，pp.11-20.
Kim, m., Lee, C., Sugita, Y., Kim, J.-S. and Jeon, M.-K.: Comparative analysis of primary variables selection in modeling non-isothermal two-phase flow; Insights from EBS experiment at Horonobe URL, Geomechanics for Energy and the Environment, vol.41, 2025, 100628.
木村駿，千々松正和，伊藤歩夢：ベントナイト材料の X 線 CT 測定による密度評価に向けたデータ取得 1，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
木村駿，早野明，佐藤菜央美，田村友識，八木啓介：幌延の堆積岩における止水プラグの原位置施工試験の概要（1）全体概要と坑道周辺の水理条件の把握，日本原子力学会 2024 年秋の大会，2024.
Kuribayashi, C., Miyakawa, K., Ito, A. and Tanimizu, M.: Large disequilibrium of $^{234}U/^{238}U$ isotope ratios in deep groundwater and its potential application as a groundwater mixing indicator, Geochemical Journal, vol.59, no.2, 2025, pp.35-44.
Kuribayashi, C., Miyakawa, K., Ito, A. and Tanimizu, M.: Variation of $^{234}U/^{238}U$ isotope ratios in groundwater under different redox environments measured by mass spectrometry, International Mass Spectrometry Convention 2024 (IMSC2024), 2024.
栗林千佳，宮川和也，伊藤茜，谷水雅治：珪質・珪藻質泥岩中の深部地下水の $^{234}U/^{238}U$ 同位体比の変動把握，第 61 回アイソトープ・放射線研究発表会，2024.
前野克治，市田雄行，長田翔平，藤枝大吾，菜花良平：大深度立坑拡幅部における支保設計と施工実績，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
Metcalfe, R., Benbow, S. J., Kawama, D and Tachi, Y.: Evolution of radionuclide transport and retardation processes in uplifting granitic rocks, Part 2; Modelling coupled processes in

uplift scenarios, Science of the Total Environment, 958, 2025, 177690.
Metcalfe, R., Tachi, Y., Sasao, E. and Kawama, D.: Evolution of radionuclide transport and retardation processes in uplifting granitic rocks, Part 1; Key processes, conceptual models and scenario, Science of the Total Environment, 957, 2025, 177375.
三代雅崇，白祥志，木村駿：光学式孔径計測技術の傾斜孔への適用，全国地質調査業協会連合会「技術フォーラム 2024」新潟，2024.
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問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.
望月陽人：水質調査；基本的な水質の状態を知る，地下水の事典，日本地下水学会，2024，pp.239-240.
望月陽人，天野由記，出井俊太郎，別部光里：深部地下水中の粒子と元素との相互作用：希土類元素を用いた室内試験，日本陸水学会第 88 回熊本大会，2024.
望月陽人，佐藤稔紀，和田純一：高温条件下での稚内層珪質泥岩の一軸圧縮試験，JAEA-Research 2024-003，2024，86p.
長岡亨，平野伸一，小鯖匠，天野由記，望月陽人：地下環境における圧縮ベントナイト中の微生物腐食活性に関する検討，材料と環境 2024.
中山雅(編)：幌延深地層研究計画　令和 5 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2024-042, 2024, 111p.
中山雅（編）：幌延深地層研究計画　令和 6 年度調査研究計画，JAEA-Review 2024-033，2024，64p.
Nishimura, H., Urai, A., Ishikawa, N., Matsui, Y., Imachi, H., Ogawara, M., Ogawa, N., Miyakawa, K., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., Okouchi, N. and Takano, Y.: Producer vs. consumer; Ammonium assimilation by DPANN in deep subsurface habitats, Astrobiology Science Conference (AbSciCon 2024), 2024.
丹生屋純夫，畑浩二，青柳和平，松井裕哉：幌延深地層研究センター周辺で発生した地震による立坑掘削損傷領域への影響，トンネル工学報告集，vol.34，2024，IV-1.
大泉涼，加藤猛士，荒井良祐，木村駿，武田匡樹，八木啓介：EDZ 調査における評価の観点と地質データの有効性，令和 6 年度日本応用地質学会研究発表会，2024.
大野宏和：講演再録　幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（4）タスク C：実規模の人工バリアシステムの解体試験，原子力バックエンド研究，vol.31，no.2，2024，pp.140-143.
大野宏和：幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（4）タスク C：実規模の人工バリアシステムの解体試験，日本原子力学会 2024 年秋の大会バックエンド部会セッション，2024.
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, 2024, geoenergy2023-047.
Ohno, H. and Takayama, Y.: Modeling of coupled processes in full-scale engineered barrier system performance experiment at Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Geomechanics for Energy and the Environment, Volume 41, 2025, 100636.
小野誠，城まゆみ，八木啓介，木村駿，武田匡樹：堆積岩環境における止水プラグの設計に関する諸検討の実施，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
尾崎裕介：講演再録　幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（2）タスク A：物質移行試験，原子力バックエンド研究，vol.31，no.2，2024，pp.128-133.
尾崎裕介：幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開（2）タスク A：物質移行試験，日本原子力学会 2024 年秋の大会バックエンド部会セッション，2024.
Ozaki, Y., Aoyagi, K., Ohno, H. and Kimura, S.: Variation of electrical resistivity distribution around the opened and backfilled tunnel in 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.
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 (Internet), vol.2, 2024,

geoenergy2023-056.
櫻井彰孝，青柳和平，村上裕晃，田村友識，藤枝大吾，戸賀瀬和輝：幌延深地層研究計画 350m 調査坑道の拡張工事を対象とした地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2024-005，2024，48p.
三田隆義，前野克治，佐ノ木哲，藤枝大吾，菜花良平：大深度立坑・水平坑道における通気網解析を用いた通気計画の策定，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
Sato, H., Toda, K., Beppu, H., Amano, Y., Miyakawa, K. and Saito, T.: Molecular characterization of reactive deep underground dissolved organic matters for metal ion using fluorescence spectroscopy and high-resolution mass spectrometry, Interfaces Against Pollution 2024 (IAP 2024), 2024.
Sato, N., Murakami, H., Aoyagi, K., Tamura, T. and Hayano, A.: Prediction of geological characteristics around the experimental galleries at a depth of 500 m in the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan; Overview of a part of Horonobe International Project, Seventh International Conference on Geological Repositories (ICGR-7); Empowering Progress in Developing Deep Geological Repositories, 2024.
Shimizu, M.: JAEA R&D related geological disposal of HLW, International Seminar for HLW Geological Disposal Programs of China and Japan, 2024.
末武航弥，緒方奨，安原英明，青柳和平，乾徹，岸田潔：大規模三次元連成解析に基づく幌延深地層研究センター350m 調査坑道での掘削～長期透水試験に対する再現シミュレーション, 第 16 回岩の力学国内シンポジウム講演集，2025，pp.304-309.
舘幸男：幌延深地層研究計画と国際共同プロジェクトの現状と今後の展開，2024 年度第 1 回日本原子力学会北海道支部・特別学術講演会，2024.
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.
田村友識，石井英一：水圧変化に応答する小規模断層の弾性的な剪断変位量を示す地質学的証拠：幌延の地下研究施設の例，日本地球惑星科学連合 2024 年大会，2024.
Ueno, A., Sato, K., Tamamura, S., Murakami, T., Inomata, H., Tamazawa, S., Amano, Y., Miyakawa, K., Naganuma, T. and Igarashi, T.: Complete genome sequence of *Thiomicrospira* sp. strain V2501 isolated from 250 m below the ground level in Horonobe, Hokkaido, Japan, Microbiology Resource Announcements (Internet), vol.13, no,11, 2024, e00108-24.
八木啓介，佐ノ木哲，早野明，藤枝大吾，菜花良平：立坑壁面を対象とした点群データによる割れ目の可視化，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，2024.
吉田英一，山本鋼志，淺原良浩，刈茅孝一，齊藤朱音，松井裕哉，望月陽人：コンクリーション化による岩盤亀裂および断層のシーリング実証試験研究（3），令和 6 年度日本応用地質学会研究発表会，2024.
Yoshida, H., Yamamoto, K., Asahara, Y., Maruyama, I., Karukaya, K., Saito, A., Matsui, H., Mochizuki, A., Katsuta, N. and Metcalfe, R.: Rapid and long-lasting bedrock flow-path sealing by a “concretion-forming resin”; Results from in-situ evaluation tests in an Underground Research Laboratory, Horonobe, Japan, Powering the Energy Transition through Subsurface Collaboration; Proceedings of the 1st Energy Geoscience Conference (Energy Geoscience Conference Series, 1), 2024, 20p.
Yoshida, H., Yamamoto, K., Asahara, Y., Maruyama, I., Karukaya, K., Saito, A., Matsui, H., Mochizuki, A., Jo, M., Katsuta, N., Umemura, A. and Metcalfe, R.: Post-earthquake rapid resealing of bedrock flow-paths by concretion-forming resin, Communications Engineering, vol.3, 2024, 67.