



JAEA-Review

2024-042

DOI:10.11484/jaea-review-2024-042

## 幌延深地層研究計画 令和5年度調査研究成果報告

Horonobe Underground Research Laboratory Project  
Investigation Report for the 2023 Fiscal Year

(編) 中山 雅

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

幌延深地層研究センター

Horonobe Underground Research Center

November 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).  
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.  
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

幌延深地層研究計画 令和 5 年度調査研究成果報告

日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

(編) 中山 雅

(2024 年 8 月 2 日受理)

幌延深地層研究計画は、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が堆積岩を対象に北海道幌延町で実施しているプロジェクトである。

令和 5 年度は、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」で示した、「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」の 3 つの研究課題を対象に調査研究を実施した。具体的には、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」では、人工バリア性能確認試験および物質移行試験を、「処分概念オプションの実証」では、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および高温等限界的条件下での人工バリア性能確認試験を実施した。また、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」では、ダクティリティインデックスを用いた透水性評価手法の検証および水圧擾乱試験から原位置の地圧の状態を推定する手法の検討などを実施した。

地下施設整備を再開し、350m 調査坑道に新たに 3 本の坑道を掘削するとともに、東立坑および換気立坑の掘削を実施した。令和 5 年度末現在、350m 調査坑道の拡張（坑道延長 66 m）を終了し、立坑の掘削深度は、東立坑で深度 424 m、換気立坑で深度 393 m である。

また、令和 5 年 2 月から開始した幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : HIP）では、管理委員会やタスク会合を通じて参加機関との議論を行い、原位置試験や解析など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、議論を行った。令和 5 年度末現在、原子力機構を含め、8 つの国と地域から 11 の組織が参加している。

幌延深地層研究計画の成果は、原子力機構における他の研究開発拠点での成果と合わせて一連の地層処分技術として、処分事業や安全規制に適宜反映していく。そのため、国内外の研究機関との連携を図り、大学などの専門家の協力を得つつ、本計画を着実かつ効率的に進めていく。また、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の策定から成果までの情報を積極的に公表し、特に研究成果については国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開していく。

Horonobe Underground Research Laboratory Project  
Investigation Report for the 2023 Fiscal Year

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

Horonobe Underground Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received August 2, 2024)

The Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to enhance the reliability of relevant technologies for geological disposal of high-level radioactive waste through investigating the deep geological environment within the host sedimentary rocks at Horonobe Town in Hokkaido, north Japan.

In the fiscal year 2023, we continued R&D on “Study on near-field system performance in geological environment”, “Demonstration of repository design options”, and “Understanding of buffering behaviour of sedimentary rock to natural perturbations”. These are identified as key R&D on challenges to be tackled in the Horonobe underground research plan for the fiscal year 2020 onwards.

Specifically, ‘full-scale engineered barrier system (EBS) performance experiment’ and ‘solute transport experiment with model testing’ were carried out as part of “Study on nearfield system performance in geological environment”. ‘Demonstration of engineering feasibility of repository technology’ and ‘evaluation of EBS behaviour over 100°C’ were addressed for “Demonstration of repository design options”. The validation of a method for assessing permeability using the Ductility Index and a method for estimating the state of in-situ ground pressure from hydraulic perturbation tests were investigated as part of the study “Understanding of buffering behaviour of sedimentary rock to natural perturbations”.

In FY2023, we resumed construction of the subsurface facilities, 3 new tunnels in the 350 m gallery and resumed excavation of the East Access Shaft and the Ventilation Shaft. By the end of FY2023, the 350 m gallery extension (tunnel extension 66 m) had been completed, and the depths of the East Access Shaft and Ventilation Shaft were GL-424 m and GL-393 m respectively.

In the Horonobe International Project (HIP), which started in February 2023, discussions were held with the participating organisations through the Management Board and Task Meetings to review the implementation plan for in-situ testing and analysis, and to confirm and discuss the progress of the research. The progress of the research was reviewed and discussed. As of the end of FY2023, 11 organisations from eight countries and regions, including JAEA, were participating.

The results of the R&D, along with those obtained in other departments of JAEA, will reinforce the technical basis for both repository implementation and safety regulation. For the sake of this, we will steadily proceed with this project in collaboration with relevant organizations and universities both domestically and internationally and also widely publish the plans and results of the R&D to ensure their transparency and technical reliability.

Keywords: Horonobe URL Project, High-level Radioactive Waste, Geological Disposal Technology, Geoscientific Research, Sedimentary Rock, Horonobe International Project, HIP

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5年度の主な調査研究の成果 .....	6
4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認 .....	12
4.1 人工バリア性能確認試験 .....	12
4.2 物質移行試験 .....	16
5. 処分概念オプションの実証 .....	25
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 .....	25
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 .....	42
6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 .....	45
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 .....	45
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 .....	52
8. 地下施設の建設・維持管理 .....	61
9. 環境調査 .....	65
9.1 排水量および水質調査結果 .....	65
9.2 掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果 .....	75
9.3 研究所用地周辺の環境影響調査結果 .....	76
10. 安全確保の取り組み .....	80
11. 開かれた研究 .....	81
11.1 国内機関との研究協力 .....	81
11.2 国外機関との研究協力 .....	84
12. 用語集 .....	87
参考文献 .....	95
付録 .....	99

Contents

1. Introduction .....	1
2. Key R&D challenges identified in Horonobe Underground Research Plan for fiscal year 2020 onwards .....	3
3. Overview of fiscal year 2023 R&D results .....	6
4. Study on near-field system performance in geological environment .....	12
4.1 Full-scale EBS performance experiment.....	12
4.2 Solute transport experiment with model testing.....	16
5. Demonstration of repository design options.....	25
5.1 Demonstration of engineering feasibility of repository technology .....	25
5.2 Evaluation of EBS behaviour over 100°C.....	42
6. Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations.....	45
6.1 Evaluation of intrinsic buffering against endogenic and exogenic processes.....	45
7. Acquisition of data necessary for addressing key R&D challenges .....	52
8. Construction and management of the subsurface facilities .....	61
9. Environmental study .....	65
9.1 Monitoring of drainage water and water property.....	65
9.2 Monitoring of excavated soil leaching study.....	75
9.3 Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center.....	76
10. Safety measures.....	80
11. Collaboration with other research organizations .....	81
11.1 Domestic collaborations .....	81
11.2 International collaborations .....	84
12. Glossary.....	87
References .....	95
Appendix.....	99

図リスト

図 1	令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題 .....	4
図 2	令和 5 年度の地下施設における主な調査研究の実施場所 .....	9
図 3	研究所用地における主な施設と観測装置の配置 .....	10
図 4	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所 .....	10
図 5	地質断面図 .....	11
図 6	人工バリア性能確認試験の概念図 .....	12
図 7	緩衝材温度の出力点とその経時変化 .....	13
図 8	試験坑道 7 の掘削 .....	13
図 9	人工バリア性能確認試験の計測データの例 .....	14
図 10	緩衝材中の飽和度変化 .....	15
図 11	比抵抗トモグラフィ測定により算出された緩衝材中の飽和度分布の経時変化 .....	16
図 12	EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト .....	17
図 13	一次元の解析モデル .....	17
図 14	トレーサー試験の再現解析結果 .....	17
図 15	試験 A : 溶存有機物・微生物・コロイドを除去した場合の希土類元素の濃度変化 .....	18
図 16	試験 B : 溶存有機物・微生物・コロイドが存在する場合の希土類元素の濃度変化 .....	19
図 17	希土類元素添加試験の装置概念図および試験手順 .....	20
図 18	地下水に希土類元素を添加した原位置試験の結果 .....	20
図 19	深度による溶存有機物の特徴と希土類元素 ( $\text{Eu}^{3+}$ ) との親和性の違い .....	21
図 20	ボーリング孔レイアウト .....	22
図 21	透水試験時における間隙水圧観測区間 .....	22
図 22	透水試験時の水圧変化量の例 (250-MIG1-4 孔) .....	23
図 23	孔間透水試験の解析結果 .....	23
図 24	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析例 .....	24
図 25	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の変質領域 .....	26
図 26	中性化深さと経過時間の関係 .....	26
図 27	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の空隙率分布 .....	27
図 28	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料における坑道側の $\text{SO}_3$ 濃度分布 (坑道壁面 : 上側) .....	27
図 29	坑道壁面から採取した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) .....	28
図 30	浸潤条件下で定置したコンクリート試験体の $\text{CaO}$ 濃度 .....	28
図 31	コンクリート試料の一軸圧縮強度の時間変化 .....	29
図 32	異なる飽和度の岩石試料を用いて実施した載荷速度を様々に変えた一軸圧縮試験結果 .....	30
図 33	「立坑・水平坑道が卓越した核種の移行経路となる」シナリオを回避するための対策の整理 .....	31
図 34	幌延泥岩 (掘削土 (ズリ)) の粉碎状況 .....	32
図 35	MB 吸着量の測定結果 .....	32
図 36	埋め戻し材の透水性と膨潤特性 .....	33
図 37	上方膨潤率の経時変化 .....	33
図 38	試験終了時の緩衝材の乾燥密度と飽和度の分布 .....	34
図 39	EDZ シーリング試験の概要図 .....	35
図 40	試験領域の透水係数の経時変化 .....	36
図 41	坑道床面で実施した弾性波トモグラフィ調査の結果 .....	36
図 42	ベントナイトブロックを用いた室内試験の模式図 (断面図) .....	37
図 43	膨潤後のベントナイトブロックの状況 .....	38
図 44	X 線 CT 測定より作成した CT 画像 (模擬地下水条件) .....	38
図 45	施工効率の向上が期待できる埋め戻し材の施工技術 .....	39
図 46	静的締固め試験後の供試体の外観 (成型圧力 : 20 MPa) .....	40
図 47	斜め転圧工法による要素試験 .....	40

図 48	スクリー工法による埋め戻し材の充填後の外観	41
図 49	ケーブル TDR 法の計測限界長把握のための要素試験	41
図 50	緩衝材ブロックの積み上げ順	42
図 51	試験体の設置概略図	42
図 52	熱電対の計測結果 (温度)	43
図 53	土圧計での計測結果	43
図 54	140°Cでの加熱および蒸留水浸潤過程での緩衝材試料の浸潤密度の変化	44
図 55	水みちのつながり方の次元の解析例	45
図 56	地下施設周辺の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	46
図 57	割れ目の水理学的連結性と DI の関係	46
図 58	人工バリア性能確認試験の試験孔周辺の透水試験の概念図と透水試験結果	47
図 59	割れ目に垂直に作用する有効応力と割れ目の開口幅の関係	47
図 60	断層に注水した際に生じた断層沿いのずれの方向	48
図 61	化石海水の三次元分布を推定するための電磁探査およびボーリング調査の手順	49
図 62	数十 km 四方の調査における二次元側線の MT 法電磁探査の結果の例	50
図 63	割れ目水と間隙水の水質の違いと地下水の <sup>14</sup> C 年代に基づき解釈した地下水流動概念	51
図 64	HDB-6 孔の水圧観測結果 (平成 31 年 4 月～令和 6 年 3 月)	52
図 65	地下水の採取箇所	53
図 66	地下水の塩化物イオン濃度の経時変化の一例	53
図 67	試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所	54
図 68	C08 における水圧モニタリング結果	55
図 69	C08 の区間 2 における水質モニタリング結果	56
図 70	計測器設置位置図	56
図 71	光ファイバー式地中変位計による計測結果	57
図 72	鋼製支保工応力計の計測結果	57
図 73	立坑の掘削工程と傾斜量の比較	58
図 74	幌延深地層研究センター周辺で起きた地震の震央分布	59
図 75	幌延町宮園で震度 1 以上を観測した地震の震央図	60
図 76	地表および地下施設で観測された地震の波形の例	60
図 77	350m 調査坑道整備完了状況 (試験坑道 6)	62
図 78	東立坑の掘削状況	62
図 79	地下施設の維持管理状況	62
図 80	二重遮水シートの構造	63
図 81	掘削土 (ズリ) 置場搬入用道路の造成工事の様子	63
図 82	排水処理設備	64
図 83	排水系統と各水質調査の採水地点	65
図 84	地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点	67
図 85	天塩川の採水地点	69
図 86	天塩川での採水状況 (令和 5 年 4 月 5 日)	69
図 87	掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の採水地点	71
図 88	掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の採水状況	71
図 89	清水川および掘削土 (ズリ) 置場雨水調整池の採水地点	73
図 90	清水川および掘削土 (ズリ) 置場雨水調整池の採水状況	73
図 91	環境調査実施場所	77
図 92	清水川からの採水状況 (令和 5 年 6 月 1 日)	77
図 93	生息魚類調査 (令和 5 年 8 月 31 日)	78
図 94	安全パトロールの状況 (令和 5 年 6 月 16 日)	80
図 95	安全行事の実施 (安全大会: 令和 5 年 7 月 3 日)	80



表リスト

表 1	幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール .....	5
表 2	緩衝材および埋め戻し材の設計要件の例 .....	39
表 3	試験エリア（図 60）周辺で推定された地圧の状態 .....	48
表 4	幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震 .....	59
表 5	地下施設整備の実績工程表（令和 5 年度） .....	61
表 6	天塩川への排水量 .....	66
表 7	地下施設からの排水に係る水質調査結果 .....	68
表 8	天塩川の水質調査結果 .....	70
表 9	掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果 .....	72
表 10	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 .....	74
表 11	浄化槽排水の水質調査結果 .....	75
表 12	掘削土（ズリ）の土壌溶出量調査結果 .....	76
表 13	清水川の水質調査結果 .....	78
表 14	確認された重要種（魚類） .....	79
表 15	HIP 参加機関 .....	85

This is a blank page.

## 1. はじめに

国立研究開発法人<sup>\*1</sup>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<sup>\*</sup>の適用性確認、処分概念オプション<sup>\*</sup>の実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力<sup>\*</sup>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<sup>\*2</sup>を目途に取り組むこととしました<sup>\*3</sup>。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3年10月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、引き続き、「高レベル放射性廃棄物については、国が前面に立って最終処分に向けた取組を進める」との考え方が示され、「国、NUMO<sup>\*4</sup>、JAEA<sup>\*5</sup>等の関係機関が、全体を俯瞰して、総合的、計画的かつ効率的に技術開発を着実に進める。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。これを踏まえて、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）<sup>\*6</sup>」（以下、第4期中長期目標）が定められ、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500m）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

※ 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、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7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](https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html)）。

\*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わっ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の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に基づき、原子力に関する基礎的および応用の研究なら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。

進めます。研究開発を進めるにあたっては、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。

## 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<sup>\*</sup>）に取り組んでいます（図1、表1、付録1）。

### (1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

令和元年度までの人工バリア性能確認試験では、実際の地下環境におけるヒーターの加熱過程のデータを取得しましたが、減熱過程<sup>\*</sup>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<sup>\*</sup>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<sup>\*</sup>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<sup>\*</sup>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<sup>\*</sup>での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物の影響を確認するためのトレーサー試験を実施します。

### (2) 処分概念オプションの実証

令和元年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方法の違い（締固め、ブロック方式など）による埋め戻し材<sup>\*</sup>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<sup>\*</sup>の有無など）・回収方法<sup>\*</sup>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、坑道スケール<sup>\*</sup>～ピットスケール<sup>\*</sup>での調査・設計・評価技術の体系化を行います。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°C超になった状態を想定した解析手法の開発を行うとともに、人工バリアとその周辺岩盤の領域における上限温度設定の考え方を提示します。

### (3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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

なお、令和5年度は、350m 調査坑道の拡張および500m 調査坑道の整備に向け、東立坑および換気立坑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<sup>\*7</sup>。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、声問層と稚内層であり、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

<sup>\*7</sup>：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。

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<sup>(1, 2, 3)</sup>。一方、稚内層は、声問層中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、新たな鉱物として再沈殿<sup>(2)</sup>してできた、声問層より硬い岩石（珪質泥岩）からなる地層です。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<sup>(1, 2, 3)</sup>。



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)





### 3. 令和5年度の主な調査研究の成果

令和5年度は、「幌延深地層研究計画 令和5年度調査研究計画」<sup>(4)</sup>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、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件でのデータ取得を継続するとともに、解体試験に向けた準備として試験坑道7を掘削しました。試験坑道7の掘削による計測データへの影響はなく、これまでと同様、緩衝材内側の全応力が地下水の浸潤に伴って緩やかに増加していることが確認できました。国際共同研究 DECOVALEX<sup>\*</sup>では、人工バリア性能確認試験のデータを対象に熱-水理-力学-化学連成現象<sup>\*</sup>のうち、熱-水理-力学の連成現象を対象とした解析を実施し、室内試験および原位置試験<sup>\*</sup>を対象とした各機関の解析結果を比較しました。その結果、等温環境下での緩衝材への地下水浸潤挙動は計測結果と解析結果が良く一致する結果が得られました。一方、温度勾配環境下での地下水の浸潤挙動については計測結果と解析結果が異なる場合があることを確認しました。また、緩衝材の膨潤<sup>\*</sup>によって引き起こされる応力変化や変形などの力学挙動についても解析を行った結果、力学モデルの違いによって緩衝材の変形挙動の解析結果が異なることを確認しました。

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の解析評価を行いました。その結果、一次元の解析モデルを掘削損傷領域の割れ目に適用することにより、堆積岩（泥岩）中の掘削損傷領域の割れ目の移流<sup>\*</sup>分散<sup>\*</sup>効果を評価できることが確認できました。また、有機物・微生物・コロイド<sup>\*</sup>の影響を考慮した原位置物質移行試験を実施し、地下水に添加した希土類元素<sup>\*</sup>の濃度変化を観察しました。その結果、原位置環境下で「元素-有機物・微生物・コロイド」が共存する二元系と「元素-有機物・微生物・コロイド-岩盤」が共存する三元系とで希土類元素の濃度変化に差異が生じることを確認することができました。さらに、ブロックスケール（数m～100m規模）を対象とした物質移行試験については、稚内層深部の断層を対象としたトレーサー試験の解析評価を行った結果、水理学的連結性<sup>\*</sup>が限定的な場に対して、曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定することによって、物質の移行経路を表現できることが分かりました。

#### (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、350m調査坑道の壁面から低アルカリ性の吹付けコンクリートを採取して分析を行いました。その結果、坑道表面から厚さ数cm、岩盤との接触部から厚さ数mmにおいて中性化<sup>\*</sup>が進行していることなどが分かり、低アルカリ性コンクリート支保工<sup>\*</sup>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、令和4年度までに実際の坑道周辺環境に即したモデルを作成し、解析を行ってきましたが、令和5年度は、これまで不足していた岩盤の長期的な変形挙動の飽和度依存性に関する検討を行いました。その結果、岩石の飽和度が低い方がクリープ<sup>\*</sup>変形による破壊までの時間が長くなることが推察され、令和4年度までに実施してきた坑道周辺岩盤の飽和度が掘削直後の高い状態から変化しない条件での長期変形解析は、処分場の安全評価上は安全側の評価であることを示すことができました。

閉鎖技術の実証に関しては、埋め戻し材および止水プラグに関する室内試験などを実施するとともに、これまでに得られた試験結果から材料仕様の設定や施工方法の検討などの設計に対する考え方をまとめて設計フローとして整備しました。掘削損傷領域の調査技術の高度化について、令和4年度までの結果に基づき、弾性波<sup>\*</sup>トモグラフィ<sup>\*</sup>を用いた掘削損傷領域調査のための最適な観測点配置を検討し、令和5年度に掘削した試験坑道6において、その観測点配置を適用した弾性波トモグラフィおよび比抵抗<sup>\*</sup>トモグラフィを実施しました。また、坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証については、令和4年度に実施した原位置試験の結果を整理する



とともに、ベントナイト\*ブロックが膨潤してボーリング孔を閉塞する過程を理解するための室内試験を実施し、ボーリング孔内で膨潤したベントナイトブロックの乾燥密度\*の分布を確認しました。

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\*の構築における坑道の埋め戻しに関しては、施工効率の向上が期待できるスクリー工法\*などの要素試験を実施し、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ました。また、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光ファイバーセンサーの設置方法の検討などを行いました。

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、緩衝材の温度が 100℃を超えた場合に生じ得る現象のうち、主としてひび割れの発生が緩衝材の特性に与える影響を確認するための原位置試験を開始しました。令和 4 年度に構築した原位置試験概念に基づき、試験坑道 5 の既存孔にヒーター、緩衝材ブロックおよび温度や水分分布などを測定するセンサーからなる試験体を 2 組設置し、ヒーターでの加熱を開始しました。

### (3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

ダクティリティインデックス (DI) \*を用いた透水性\*評価手法の信頼性向上および隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、断層の水理学的連結性と DI の関係に関する解析を行いました。断層の水理学的連結性は断層内の水みちのつながり方の次元\*として数値化することができ、次元の値が小さいほど、水理学的連結性が低いことを表します。解析の結果、地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI が相関していることが分かりました。このような情報は、断層/割れ目の水理学的連結性と DI の関係を定量的に理解する上で重要となります。また、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、水圧擾乱試験の結果から原位置の地圧の状態を推定する方法を検討しました。その結果、既往の地圧試験と整合する推定結果を得ることができ、水圧擾乱試験により原位置の地圧の状態を推定できることが分かりました。

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、これまでに得られた成果を踏まえた調査手順の整理を行いました。また、これまでに取得したデータの一部を研究開発報告書類として公表するとともに、地下水の水質や年代を利用した地下水流動の評価手法を構築し、論文として取りまとめました。産業技術総合研究所\*8との共同研究として、これまで把握が困難であった浅海域の地下構造を対象に海上から物理探査を行った結果、探査に用いる音波（弾性波）の発振源を調整することで、より詳細な構造を把握できることが確認できました。また、既存の調査孔を用いた地下温度測定を実施した結果から、当該地域の地下深部の地下水の流れが非常に遅いことを確認することができました。この結果は地下水流動解析の結果と整合しています。

### (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。

### (5) 地下施設の建設・維持管理、環境調査

令和 5 年度は、地下施設整備を再開し、350m 調査坑道の拡張（総延長 66 m）および立坑の掘削を実施しました。なお、換気立坑で実施した先行ボーリング調査の結果から、湧水抑制対策の改良範囲を拡充することとし、全体工程の更新を行いました（令和 5 年 8 月公表）。立坑の掘削順序の変更や施工方法などの見直しを行うことで、今後の工程への影響が最小限となるようにし、施設整備の完了時期に影響は生じない予定です。

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

\*8：特定国立研究開発法人産業技術総合研究所：AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) は、産業技術の広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている研究組織です。

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。

## (6) 開かれた研究・成果の発信

令和 5 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、京都大学などの大学、幌延地圏環境研究所<sup>\*9</sup>、産業技術総合研究所および電力中央研究所<sup>\*10</sup>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 年度から、OECD/NEA<sup>\*11</sup>の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project : 以下、HIP) <sup>\*12</sup>を開始しています。令和 5 年度は、管理委員会やタスク会合を通じて参加機関との議論を行い、原位置試験や解析など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。なお、協定書の内容に基本合意していた国内外の 11 機関<sup>\*13</sup>全ての署名が令和 5 年 7 月 21 日に確認されました。また、これまでに引き続き、人工バリア性能確認試験をタスクのひとつとする国際共同研究 DECOVALEX などに参加し、情報共有を図りました。

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<sup>\*14</sup>。なお、令和 5 年度に公開した論文や学会発表の実績については、巻末の付録 2 に掲載しています。

以上のように、令和 5 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 5 年度に地下施設で実施した主な調査研究の位置を図 2 に示します。また、研究用地内の主な施設と観測装置の配置を図 3 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 4 に、それぞれ示します。さらに、図 4 に示した A-A'断面および地下施設近傍の地質断面図を図 5 に示します。

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

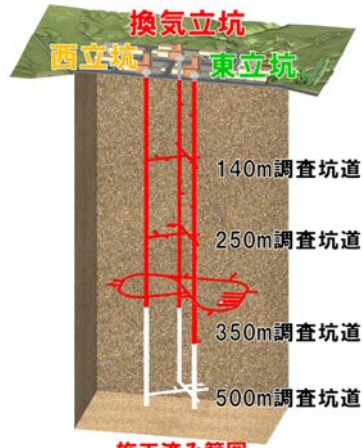
\*10：一般財団法人電力中央研究所：CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry) は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を実施しています。

\*11：OECD/NEA (経済協力開発機構/原子力機関) は、安全かつ環境的にも受け入れられる経済的なエネルギー資源としての原子力エネルギーの発展に貢献することを目的として、原子力政策、技術に関する情報・意見交換、行政上・規制上の問題の検討、各国法の調査および経済的側面の研究などを実施しています。

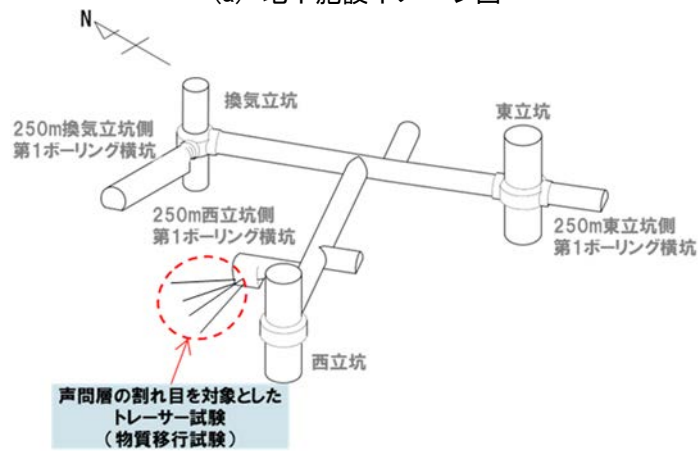
\*12：HIPは、アジア地域の地層処分に関わる国際研究開発拠点として、幌延深地層研究センターの地下施設を利用した研究開発を国内外の機関で協力しながら推進し、我が国のみならず参加国における先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発の成果を最大化することを目的としています。  
([https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project\\_hip.html](https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project_hip.html))

\*13：HIPの参加機関は、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。

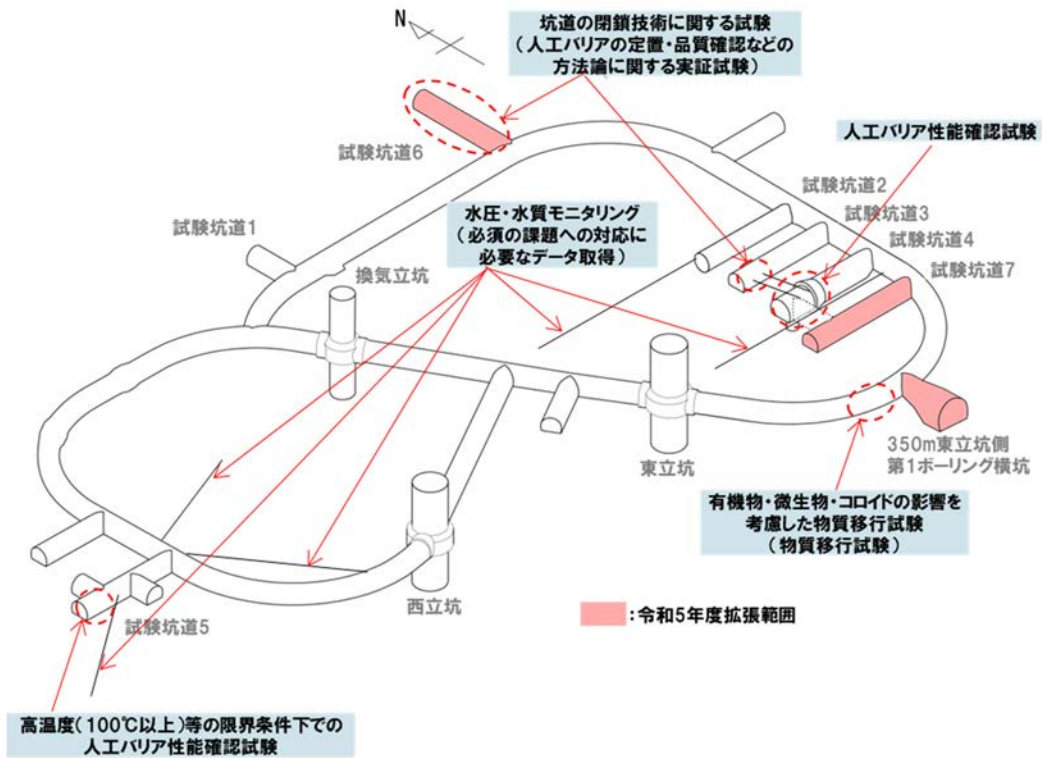
\*14：幌延深地層研究センターホームページ；<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>、原子力機構X (旧ツイッター)；[https://x.com/jaea\\_japan](https://x.com/jaea_japan)



(a) 地下施設イメージ図



(b) 250m 調査坑道



(c) 350m 調査坑道

図 2 令和5年度の地下施設における主な調査研究の実施場所





図 3 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

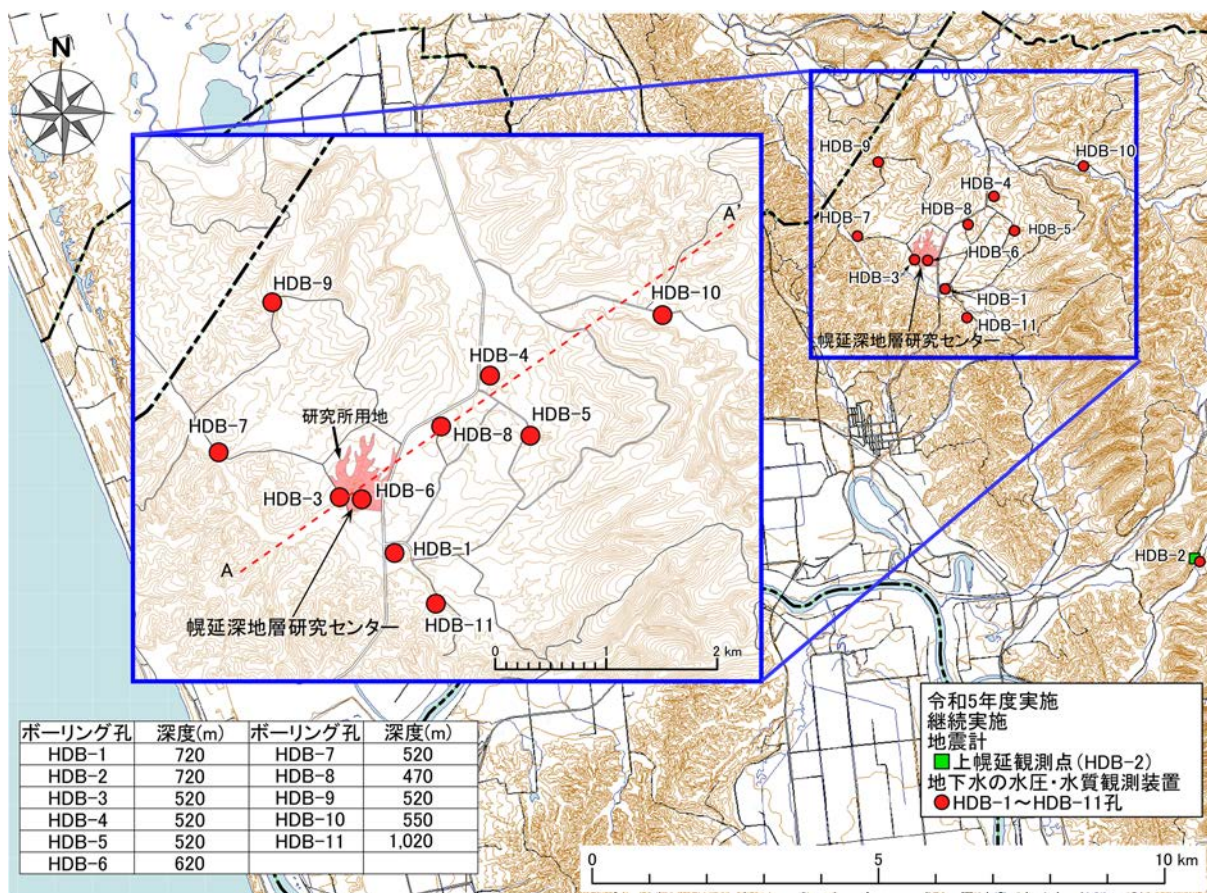
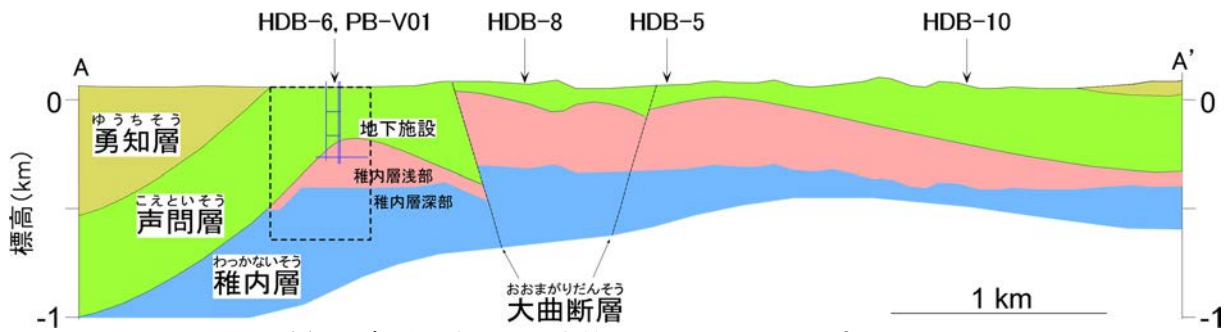
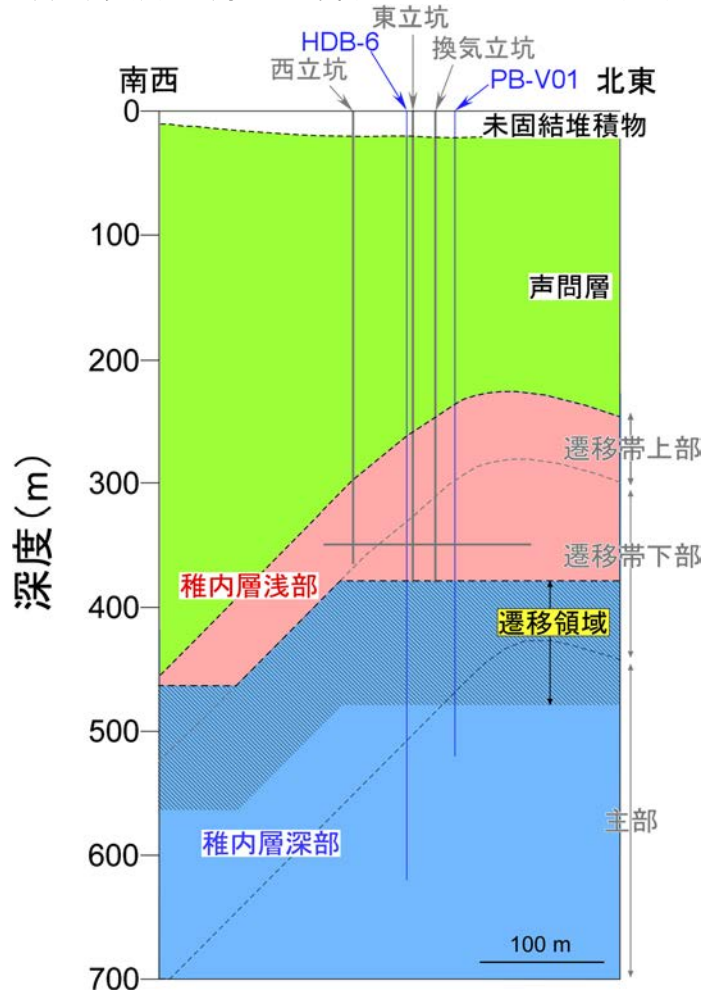


図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所  
 国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



(a) 研究所用地周辺の地質断面図 (図 4 の A-A' 断面)



(b) 地下施設周辺の地質断面図 ((a) の点線枠部分の拡大)

図 5 地質断面図

## 4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

### 4.1 人工バリア性能確認試験

令和2年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体試験により得られる、より詳細なデータに基づく熱-水理-力学-化学連成現象の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱-水理-力学-化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体試験により、模擬オーバーパック<sup>\*</sup>、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-水理-力学-化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の安全評価における初期状態の把握やオーバーパック（以下、OP）の寿命を評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定に役立ちます。

令和5年度は、人工バリア性能確認試験（図6）について、令和2年度から開始した減熱過程を模擬した試験のうち、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件（ヒーターの電源を切るにより再現）における既設の自動計測機器でのデータ取得を継続しました。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7）<sup>(5)</sup>。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。また、解体試験に向けた準備として、試験坑道4の隣に試験坑道7を掘削しました（図8）。取得データの一例として、緩衝材5段目上面（図9(a)）での温度および全応力の結果を示します（図9(b)、(c)）。緩衝材中の計測データは、試験坑道7の掘削による影響はなく、温度分布は地下環境下の温度（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し、緩やかに増加していることが確認できました（図9(b)、(c)）。

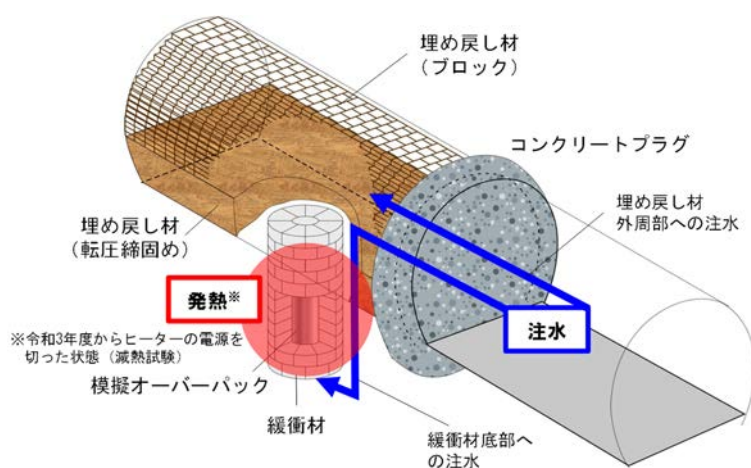
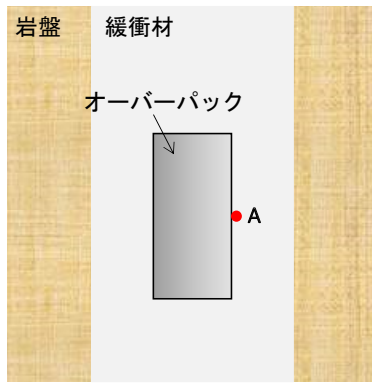


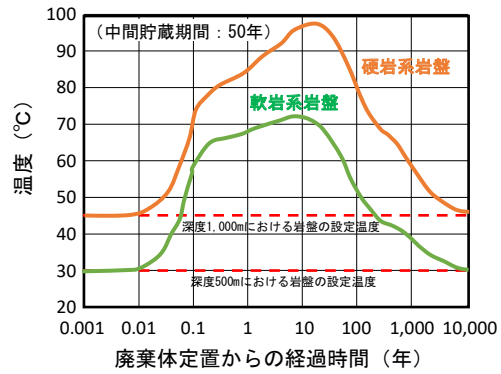
図6 人工バリア性能確認試験の概念図

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(6)、(7)で公開しています。





(a) 緩衝材温度の出力点 (点 A)



(b) 緩衝材温度の経時変化

図 7 緩衝材温度の出力点とその経時変化<sup>(5)</sup>



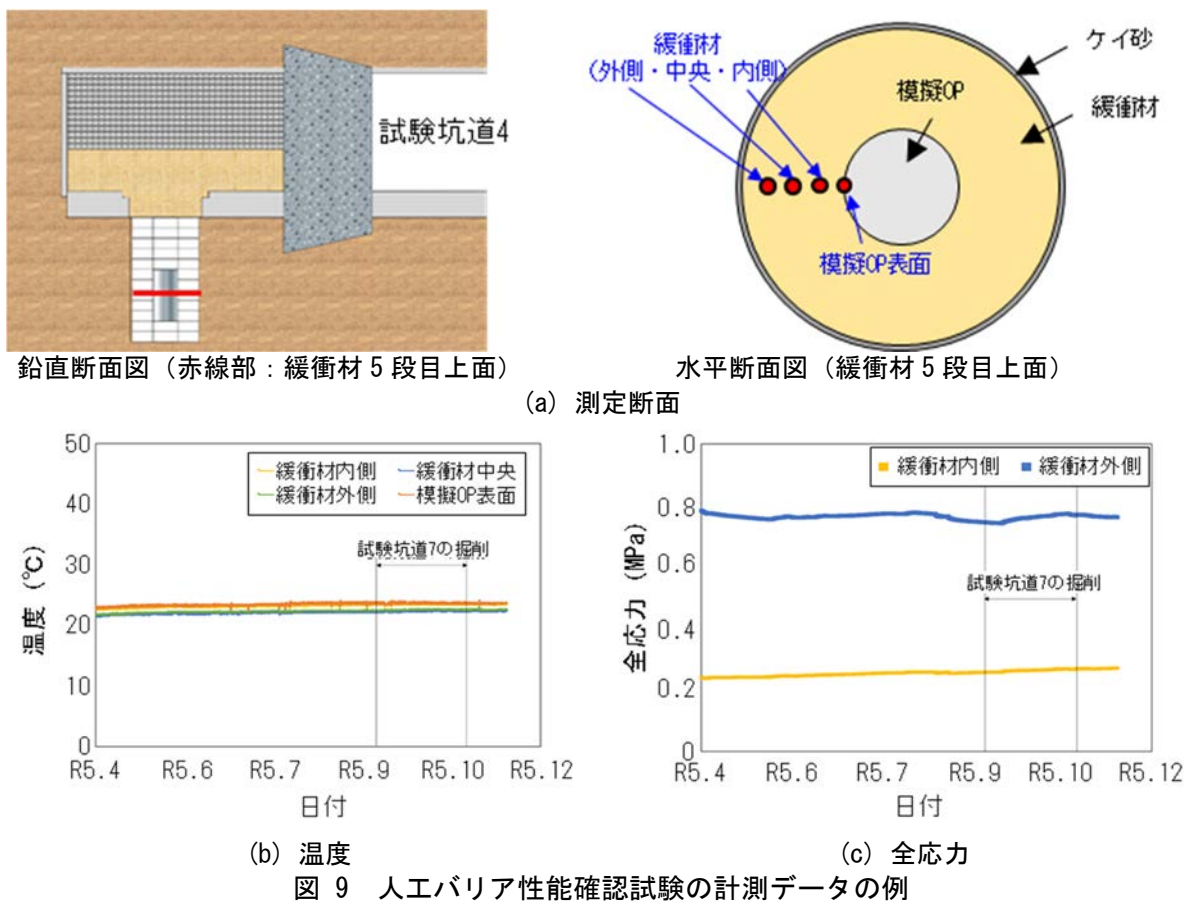
(a) 坑道掘削のイメージ



(b) 掘削の様子

図 8 試験坑道 7 の掘削

試験坑道 7 は人工バリア性能確認試験の試験孔部や埋め戻し部に設置した材料を解体試験で取り出すために使用します。なお、試験坑道 4-7 連絡坑道は解体試験直前に掘削する予定です。



熱－水理－力学－化学連成現象に関する解析について、国際共同研究 DECOVALEX では、室内試験などから求められたパラメータを使用し、人工バリア性能確認試験の計測データ（温度、飽和度、全応力、変位）を対象とした熱－水理－力学連成解析を実施しました。緩衝材中の浸潤挙動を対象とした検討のうち室内試験結果を対象とした検討では、各機関の解析結果は良く一致し、室内試験結果を良好に再現する結果が得られました。一方、人工バリア性能確認試験で取得した緩衝材中の飽和度分布を対象とした検討では、緩衝材外側の飽和度変化の解析結果は各機関とも計測値と一致しましたが、ヒーター近傍の飽和度変化の解析結果は各機関で異なる場合があることを確認しました。また、飽和度変化に伴う緩衝材の膨潤によって引き起こされる応力変化や変形などの力学挙動についても、室内試験結果や人工バリア性能確認試験の計測データを対象に解析を行った結果、力学モデルの違い（弾性\*体モデル、弾塑性\*体モデル）によって、緩衝材の変形挙動の解析結果が異なることを確認しました。例えば、弾性体モデルでは緩衝材の膨潤変形挙動を過小に評価する傾向がありましたが、弾塑性体モデルでは試験結果を良好に再現することが出来ました。しかし、弾塑性体モデルでは、解析に使用するパラメータが多いため、室内試験結果から適切なパラメータを設定することが重要となります。

ここでは、ヒーター近傍の飽和度変化に大きな影響を与えていると想定される温度勾配水分拡散係数に着目した検討の一例を示します。室内試験から推定された温度勾配水分拡散係数が人工バリア性能確認試験における緩衝材中の飽和度の解析結果にどの程度影響を及ぼすかを確認するために、基準となる係数 $D_{T_0}$ を変化させた解析を行いました。解析では、基本ケースとして室内試験結果から推定された値を用い、基本ケースを2倍、0.5倍したケースを比較対象としました。図10の水分計計測値と解析結果は、図9(a)の計測位置と同じ位置を示します。緩衝材外側の解析結果は、どのケースにおいても大きな差は見られず、水分計計測値とほぼ一致しました(図10(a))。また、緩衝材中央の解析結果も、 $D_{T_0}$ が大きいケースで少し開きが見られますが、水分計計測値と同様な傾向を示すことが確認できました(図10(b))。これらの結果は、加熱している模擬OPから距離が離れるほど温度変化が小さくなるため、温度勾配水分拡散係数のパラメータを変化させても飽和度変化へ与える影響は小さいことを示しています。しかし、緩衝材内側の解析結果は、



外側や中央と傾向が大きく異なり、加熱開始とともに飽和度が低下する結果となり、 $D_{T_0}$ の大きさによって飽和度の低下量が大きく異なることが確認できます(図 10(c))。緩衝材内側の水分計の計測値は得られていませんが、比抵抗トモグラフィ測定により算出された緩衝材中の飽和度分布は、緩衝材外側の飽和度は高い一方で、模擬 OP 近傍の緩衝材内側の飽和度は低いことが示されており<sup>(9)</sup>、解析結果の傾向と整合することが確認できます(図 11)。これらの結果から、温度が高い模擬 OP 近傍では、温度勾配による水分移動の影響が大きく、温度勾配水分拡散係数などのパラメータの設定などが重要であることが確認できました。

温度勾配による緩衝材中の水分移動については、温度、初期飽和度、試験期間などの条件を変えた室内試験によって検証データを拡充し、温度勾配水分拡散係数のパラメータ検討を実施することが必要であると考えられます。また、力学挙動の検証については、人工バリア性能確認試験において緩衝材中のセンサーで計測されたデータ(膨潤に伴う応力変化や局所的な変位)に加えて、解体試験で取得する予定である緩衝材の乾燥密度分布や緩衝材全体の変形挙動などのデータを含めた解析を実施することで、力学モデルのより詳細な検証が可能となります。

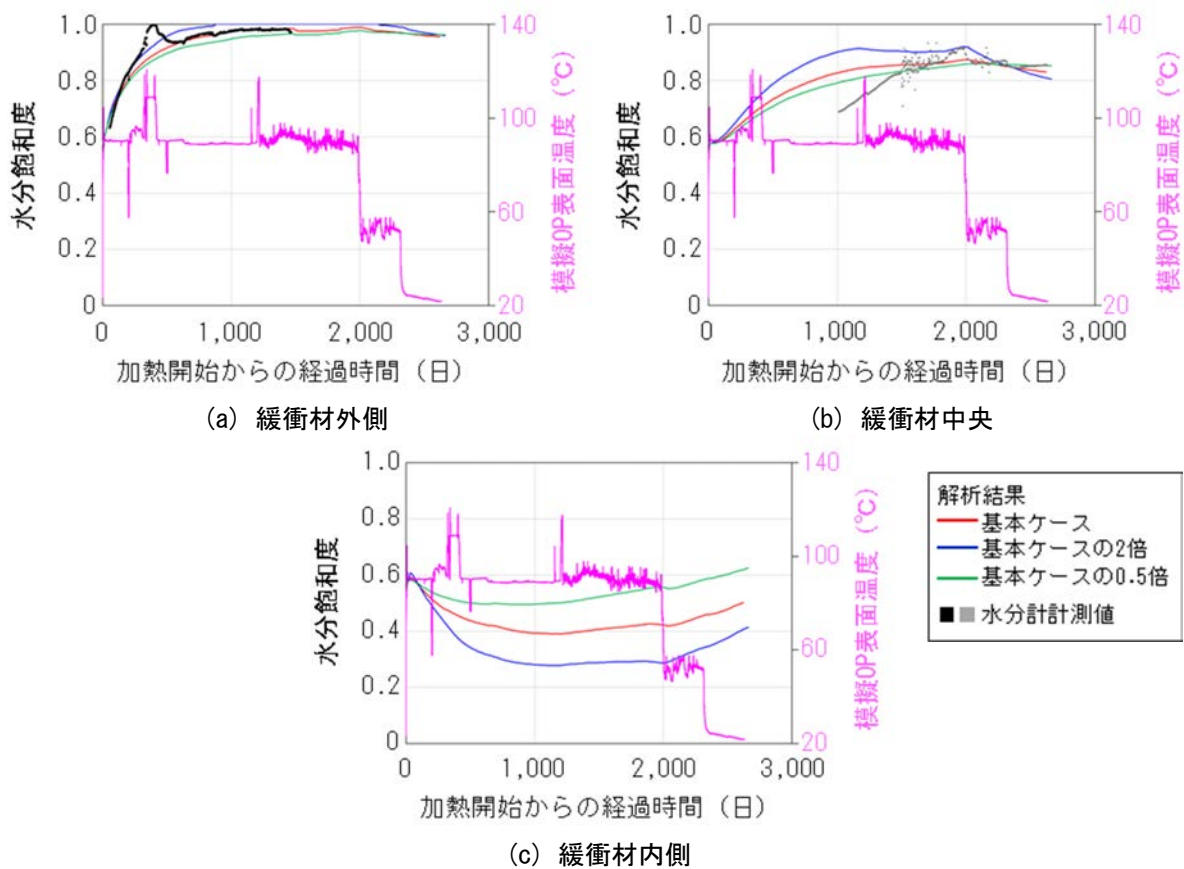


図 10 緩衝材中の飽和度変化

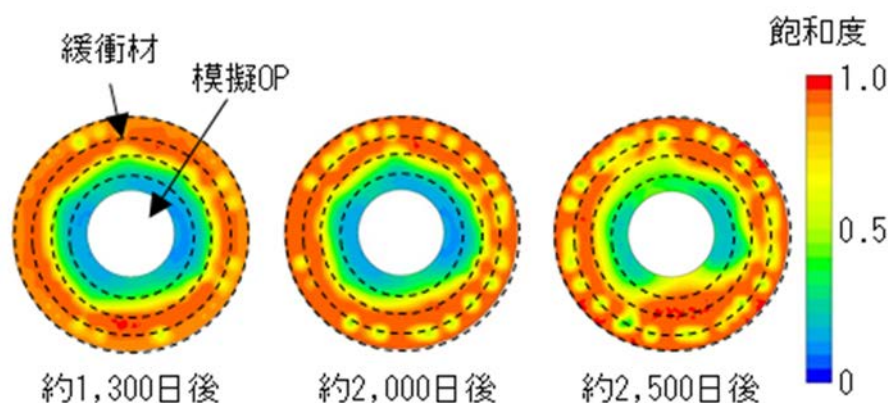


図 11 比抵抗トモグラフィ測定により算出された緩衝材中の飽和度分布の経時変化

## 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）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。

なお、本課題については、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 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]：核種移行総合評価技術開発」）を一部活用しました。

### (1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

令和 3 年度に 350m 調査坑道の試験坑道 4（図 2 参照）の掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone、以下、EDZ）を対象に実施したトレーサー試験<sup>(8, 9)</sup>（図 12）に基づき、EDZ の割れ目の分散効果を解析により評価しました。解析モデルは、EDZ の割れ目を介したトレーサー（非吸着性のウラン<sup>(\*)</sup>）の移動経路を一次元のチューブ（長さ： $L=4.2$  m）で表現し（図 13）、EDZ の割れ目内の移流および分散のみを考慮しました。本解析モデルでは境界条件として、トレーサー試験時の注水流量（20 mL/min）のうち、トレーサー回収率<sup>(\*)</sup>に応じた流量のみが H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 につながる EDZ の割れ目内の流路を流れるという設定をしました。また、トレーサー試験時の注水流量（20 mL/min）と流量（図 13 の Q）の差分は他の EDZ の割れ目に流れるとともに、揚水流量（150 mL/min）と Q の差分は他の EDZ の割れ目から P 孔の区間 2 に流れることを仮定しています。解析モデルに入力するパラメータのうち、縦方向分散長<sup>(\*)</sup>（ $\alpha_L$ ）と断面積（A）については未知パラメータとし、最小二乗法により解析結果と観測結果との誤差が最小となる値を探索して設定しました。解析コードは GoldSim<sup>(10)</sup>を使用しました。解析結果を図 14 に示します。図 14 には解析結果に対する縦方向分散長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（ $\alpha_L$ ）の値を 0.5 倍、2 倍とした場合の解析結果も同時に示しています。解析結果（図 14 中の青線）は観測結果を良く再現できることが確認できました。なお、推定された縦方向分散長は 0.12 m であり、移行経路（4.2 m）に対して約 3%の縦方向分散が生じていることが分かりました。

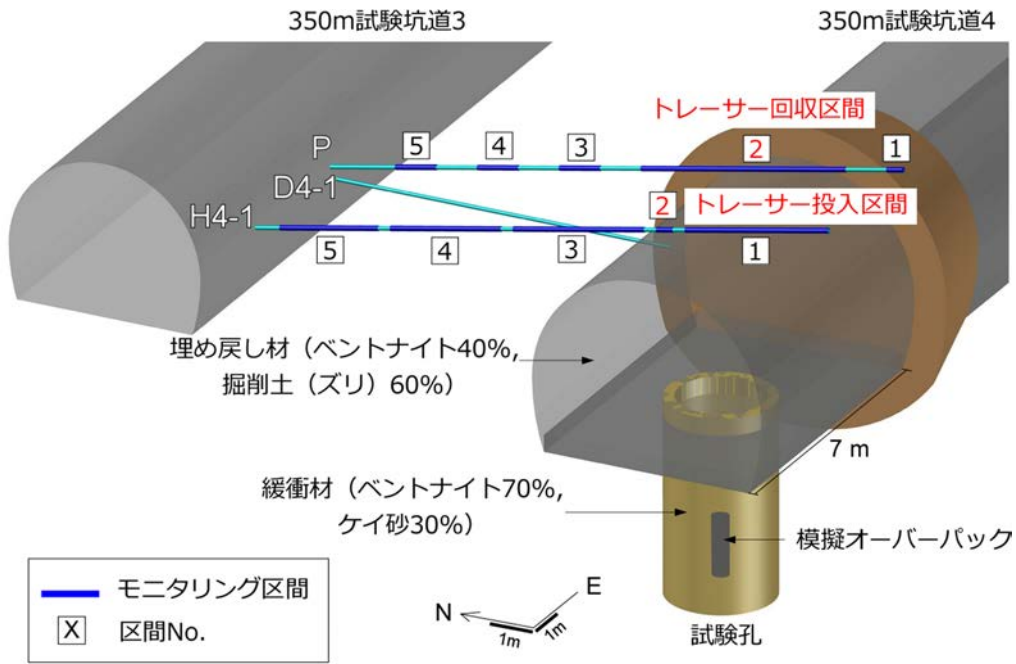


図 12 EDZ を対象としたトレーサー試験のレイアウト

H4-1 孔と P 孔は試験坑道 3 の南側壁面から試験坑道 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 をトレーサー投入区間、P 孔の区間 2 をトレーサー回収区間としています。

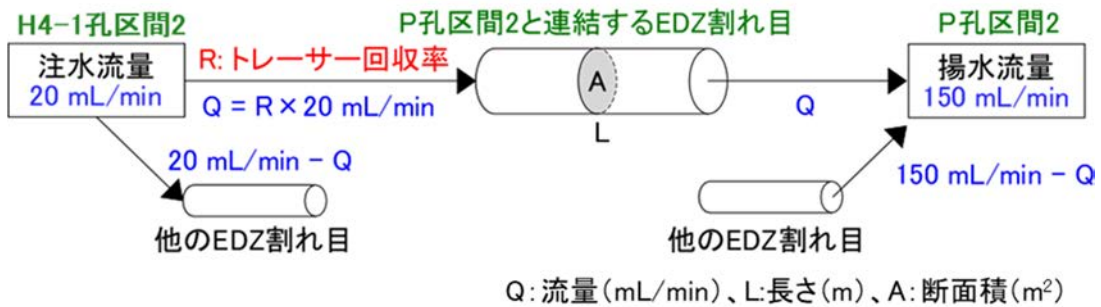


図 13 一次元の解析モデル

H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 につながる EDZ の割れ目内の流路を一次元のチューブで仮定しています。解析モデルでは H4-1 孔の区間 2 の中心と P 孔の区間 2 の中心の直線距離 (4.2 m) をチューブの長さ (L) と仮定しています。

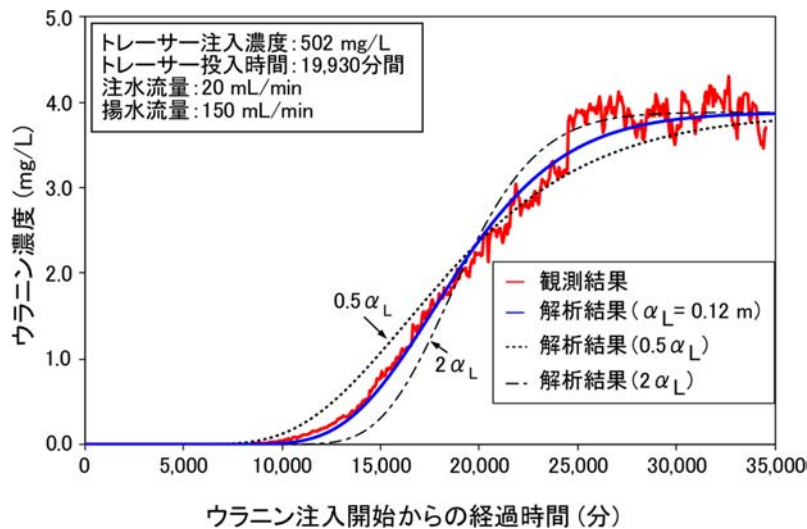


図 14 トレーサー試験の再現解析結果

(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・コロイドと結合することにより、地下水中に溶けている元素の濃度（以下、溶存態濃度<sup>\*</sup>）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吸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－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<sup>\*</sup>のアナログ元素<sup>\*</sup>であり、既往の研究<sup>(11, 12)</sup>など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。

令和 5 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。試験はボーリング孔から大気に接触させずに採取した地下水に対し、試験 A：地下水に含まれる溶存有機物・微生物・コロイドを除去するために 3 kDa<sup>\*</sup>のフィルターで限外ろ過<sup>\*</sup>してから、各希土類元素 10 μg/L を添加し、挙動を確認する試験<sup>(9)</sup>ならびに試験 B：溶存有機物・微生物・コロイドを除去しない状態で各希土類元素 10 μg/L を添加し、挙動を確認する試験<sup>(13)</sup>、の 2 種類を実施しました。試験 A は地下水中に希土類元素のみが存在する一元系、試験 B は地下水中に希土類元素および溶存有機物・微生物・コロイドが共存する二元系での試験です。希土類元素のうち、ランタン (La)、ユウロピウム (Eu) およびルテチウム (Lu) に対する試験 A と試験 B の結果をそれぞれ図 15 および図 16 に示します。試験 A (図 15) では、希土類元素を添加した後の地下水の一部をそのまま分析に供した試料（未ろ過試料）と、希土類元素の溶存態濃度を測定するために孔径 0.2 μm のフィルターでろ過した試料（0.2 μm ろ過試料）とで、各希土類元素の濃度はほぼ同じ値を示しながら推移しました。一方、試験 B (図 16) では、試験 A と比較すると濃度減少が遅い傾向にあり、また質量数の小さい希土類元素（質量数は La < Eu < Lu）ほど、未ろ過試料と 0.2 μm ろ過試料とで濃度差が大きいことが分かります。両者の結果の違いは、希土類元素と地下水に含まれる溶存有機物・微生物・コロイドとの相互作用によるものと考えられます。

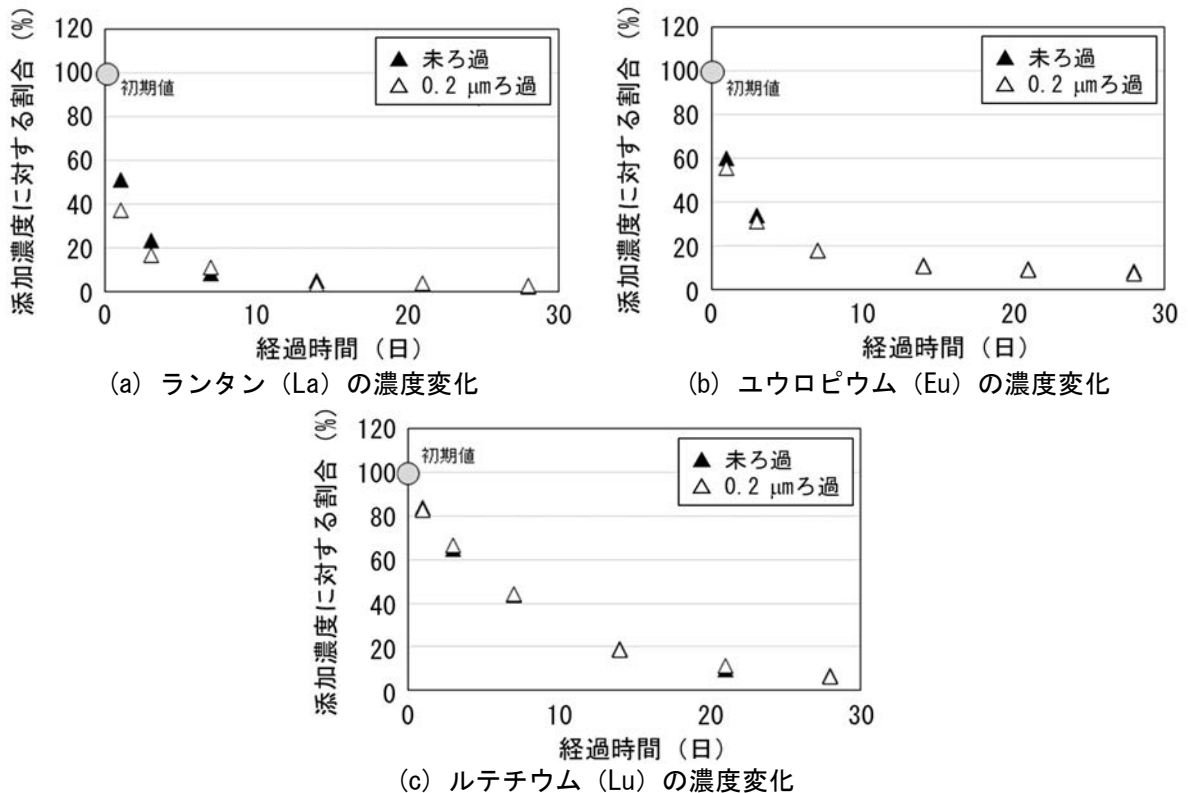


図 15 試験 A：溶存有機物・微生物・コロイドを除去した場合の希土類元素の濃度変化



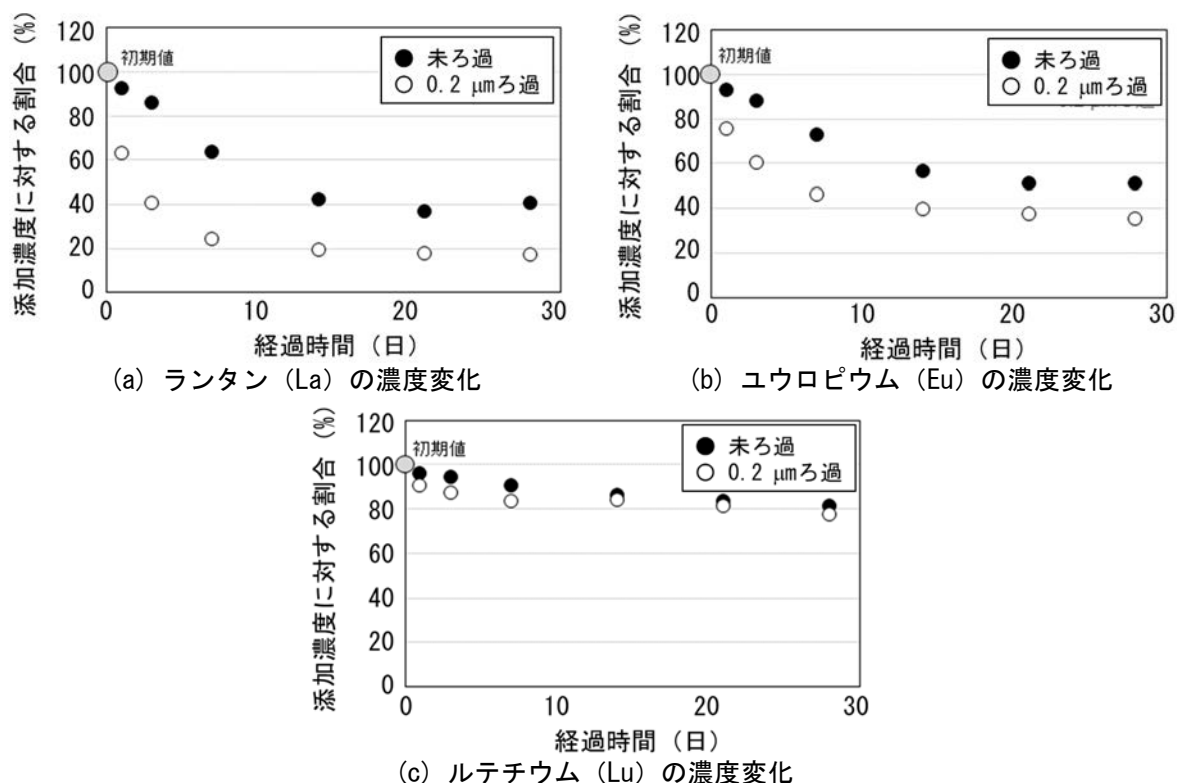


図 16 試験 B：溶存有機物・微生物・コロイドが存在する場合の希土類元素の濃度変化

令和 5 年度は、350m 調査坑道に掘削したボーリング孔<sup>(8)</sup>の内部に設けた試験区間にトレーサー（各希土類元素 50 μg/L など）を循環させ、その濃度の変化を観察するとともに、二元系と三元系でトレーサーの挙動の違いを比較するための原位置試験を実施しました。試験方法を図 17 に示します。試験に先立ち、地下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 17 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 17 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 17 の③）。そして、地下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 17 の④）。一定の期間経過後に坑道上で保管したボトル（図 17 の③）と地下の試験区間を循環している経路上のボトル（図 17 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。坑道上で保管した地下水（図 17 の③）は二元系、地下の試験区間を循環した地下水（図 17 の④）は三元系の試料となります。図 18 に示すように、岩盤内の試験区間を循環しない地下水（図 17 の③）と比べて岩盤内の試験区間を循環させた地下水（図 17 の④）の方が、未ろ過試料中の希土類元素の濃度減少が速いことが分かりました。また、試験区間を循環させた地下水における希土類元素の未ろ過試料および 0.2 μm ろ過試料の濃度減少は、地下施設から採取した地下水に希土類元素を添加する室内試験（前述の試験 B）の結果よりも速いことも分かりました。トレーサー添加前には試験区間を経由するように地下水を循環させており、坑道上で保管した地下水と地下の試験区間を循環した地下水に含まれる有機物・微生物・コロイドの濃度や組成には大きな差はないと考えられることから、主に 0.2 μm よりも大きい粒子と結合した希土類元素が、試験区間を経由することにより岩盤に収着し、地下水から除去されたことが示唆されます。以上のように、元素－有機物・微生物・コロイドの相互作用を明らかにするための室内試験および原位置試験の手法を確立するとともに、原位置環境下で「元素－有機物・微生物・コロイド」が共存する二元系と「元素－有機物・微生物・コロイド－岩盤」が共存する三元系の試験データを取得することができました。

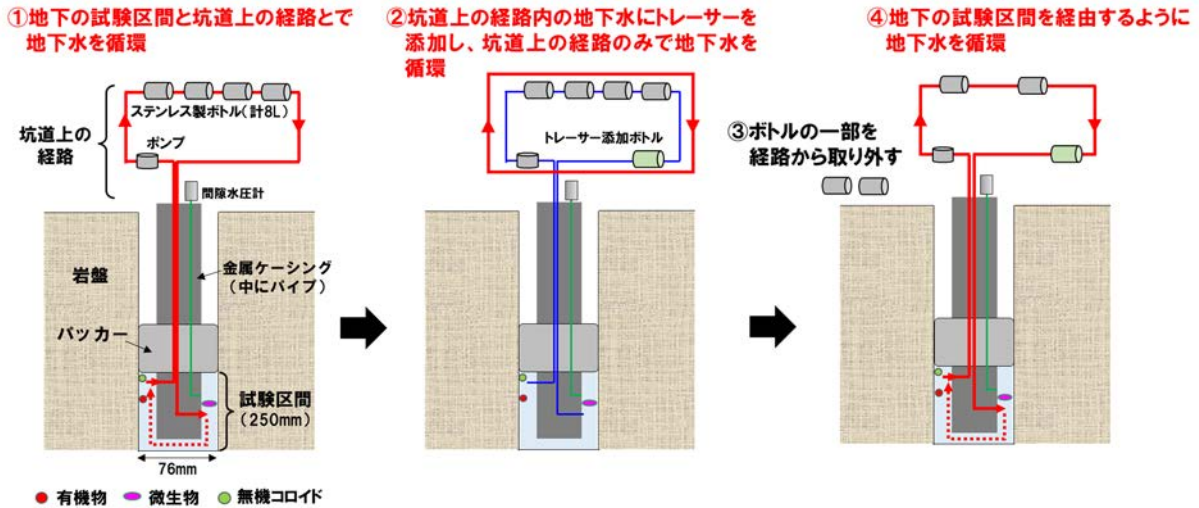


図 17 希土類元素添加試験の装置概念図および試験手順

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（二元系）、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（三元系）です。

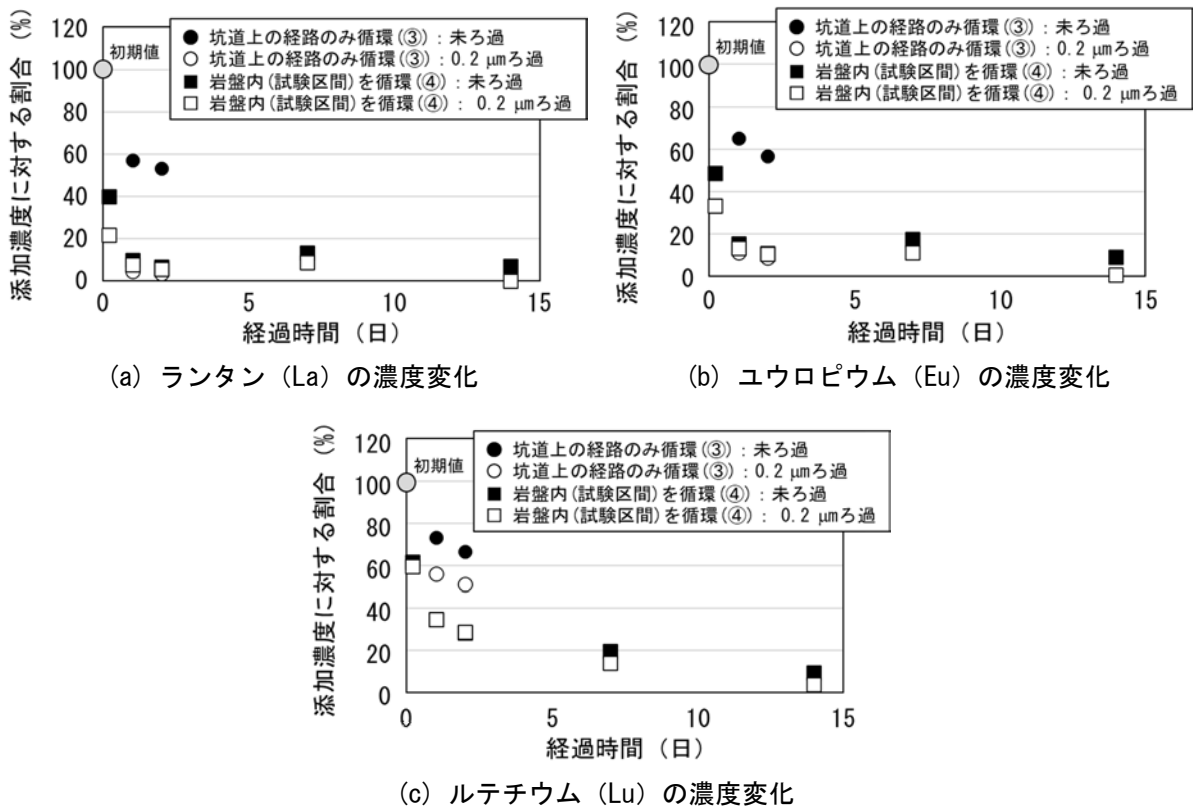


図 18 地下水に希土類元素を添加した原位置試験の結果

さらに、このような希土類元素の収着挙動を規定する要因を明らかにするために、140m 調査坑道～350m 調査坑道から採取した地下水に希土類元素のひとつであるユウロピウムの 3 価の陽イオン ( $\text{Eu}^{3+}$ ) を添加し、地下水中の溶存有機物との親和性を調べました。 $\text{Eu}^{3+}$ との結合による溶存有機物の蛍光強度の低下を調べ、地下水の水質や微生物群集の分析結果と合わせて多変量解析を実施することで、異なる蛍光特性を示す有機物の起源を推定しました。その結果、 $\text{Eu}^{3+}$ は浅部地下水に見られる陸性腐植物質の特徴を示す溶存有機物と高い親和性を示す一方で、深部の化石海水中に見られる海洋性腐植物質の特徴を示す溶存有機物とは低い親和性を示すことが分か

りました（図 19）<sup>(14)</sup>。このことは、化石海水と天水との混合の程度や微生物による有機物分解の程度により、溶存有機物への希土類元素の収着挙動が影響を受けることを示唆しています。なお、本研究は東京大学との共同研究として実施しています。

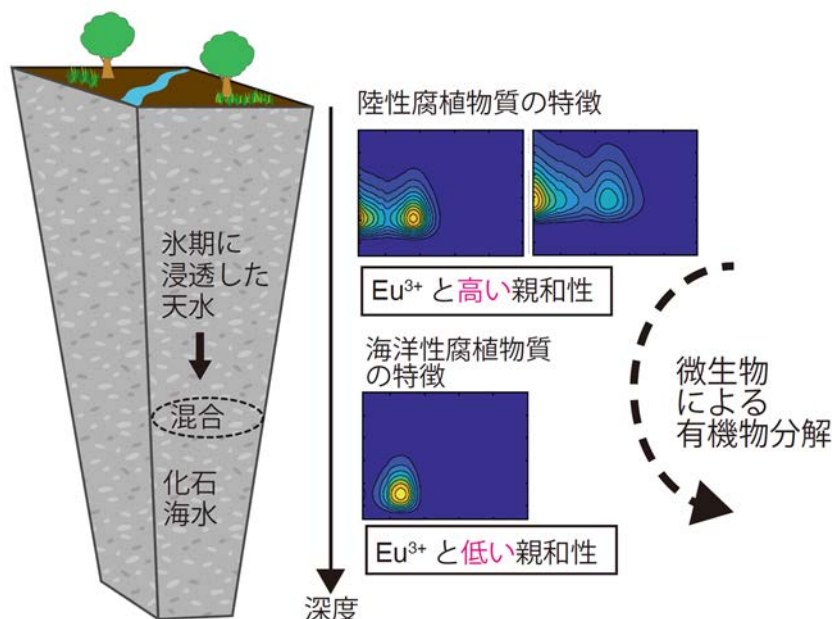


図 19 深度による溶存有機物の特徴と希土類元素 (Eu<sup>3+</sup>) との親和性の違い

右の図は励起蛍光マトリクスです。励起蛍光マトリクスとは、有機物の特徴を表す指標で、異なる起源の有機物ごとに特有の蛍光特性を表すことを利用したものです。横軸に蛍光を励起させる光の波長（260 nm～500 nm）、縦軸に蛍光波長（320 nm～600 nm）を取り、黄色ほど強い蛍光強度を示し、青色ほど弱い蛍光強度を示しています。Eu<sup>3+</sup>を添加した際の蛍光強度の変化から、地下水中の溶存有機物のうち陸性腐植物質の特徴を示すものは Eu<sup>3+</sup>との親和性が高く、海洋性腐植物質の特徴を示すものは Eu<sup>3+</sup>との親和性が低いことが分かりました。図は参考文献(14)を一部改変しています。

### (3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

ブロックスケールを対象とした物質移行試験では、声問層に見られる、検討例に乏しいせん断性の割れ目（数十 cm～数 m 程度の長さの“ずれて”できた割れ目）については、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑から掘削した 4 本のボーリング孔<sup>(9)</sup>（図 20）を対象に、BTV（ボアホールテレビューア）<sup>\*</sup> 検層を行い、ボーリング孔の孔壁画像を取得し、各ボーリング孔に交差する割れ目の走向傾斜のデータを取得しました。その結果、NW 走向および NNE 走向の 2 方向の割れ目が多く見られ、これまでに立坑あるいは水平坑道で実施された壁面観察結果<sup>(9)</sup>と整合的であることが確認できました。次に、割れ目を含む、合計 19 区間（図 21）に対して定流量注水による透水試験を行いました。250-MIG1-1 孔については、区間 5 と区間 6 が岩盤もしくはボーリング孔内を介して連通している可能性が推定されたことから、当該区間については、No.5 のパッカーを収縮し、新たに区間 5-6 を構築して透水試験を実施しました。また、250-MIG1-3 孔の区間 5 については、注水直後に同孔の孔口付近の壁面から漏水することが確認されたことから、当該区間の透水試験は実施しませんでした。透水試験の結果、各区間の水の流れやすさを表す透水係数および透水量係数の値がそれぞれ  $3.4 \times 10^{-10}$  m/s～ $3.5 \times 10^{-8}$  m/s および  $4.6 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s～ $5.8 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s であり、既存の研究成果<sup>(15)</sup>と概ね整合的であることが確認できました。また、透水試験時における注水を行った区間の水圧変化量を評価しました。一例として、250-MIG1-4 孔の評価結果を図 22 に示します。既往の透水試験結果から、対象としたせん断性の割れ目については中～後半の時間帯の水圧変化量が一定あるいは低下傾向を示し、割れ目の水理学的連結性が良いことが分かっています<sup>(16, 17)</sup>。250-MIG1-4 孔の透水試験時の水圧変化量は中～後半（図 22 中の 1,000 秒～10,000 秒）の時間帯で一定あるいは低下傾向を示すことが確認でき、既往の研究成果と整合的であることが確認できました。

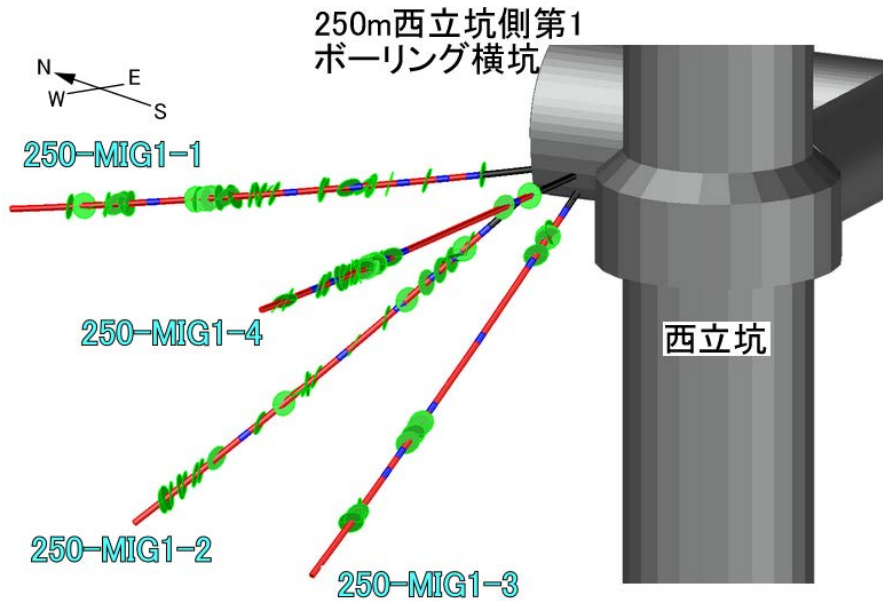


図 20 ボーリング孔レイアウト

各ボーリング孔（250-MIG1-1 孔～250-MIG1-4 孔）の長さはいずれも 21 m であり、孔口から 1.8 m まではケーシング（金属製の管）で保護されています。また、図中の青線はパッカー（試験区間を区切るゴム製の用具）の位置を示しており、パッカーで仕切られた赤線部分が間隙水圧測定区間を示しています。緑色の円盤は BTV で検出された割れ目を半径 0.5 m の円盤と仮定して示しています。

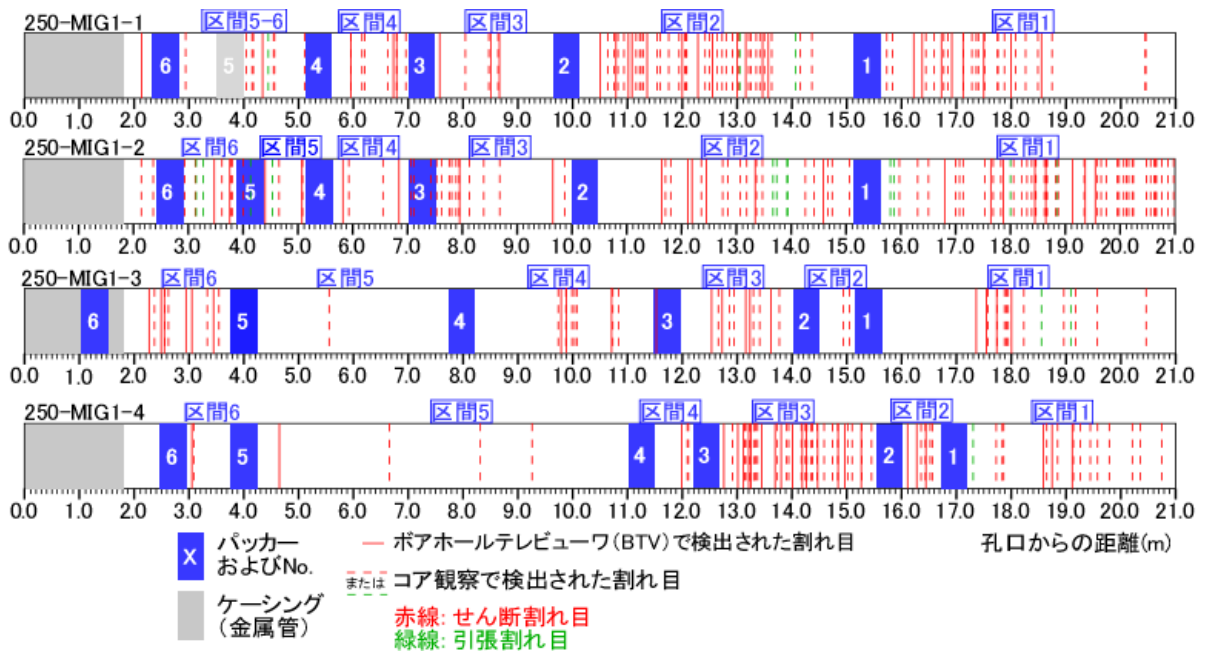


図 21 透水試験時における間隙水圧観測区間

四角で囲まれた区間が透水試験区間（定流量注水を行った区間）です。注水時は各区間で間隙水圧測定を行い注水による水圧応答の有無を観測しています。250-MIG1-1 孔の No. 5 のパッカーは区間 5-6 の透水試験時に収縮させ、他の区間の透水試験時はパッカーを拡張し、その上下の区間（区間 6 および区間 5）で間隙水圧測定を行いました。



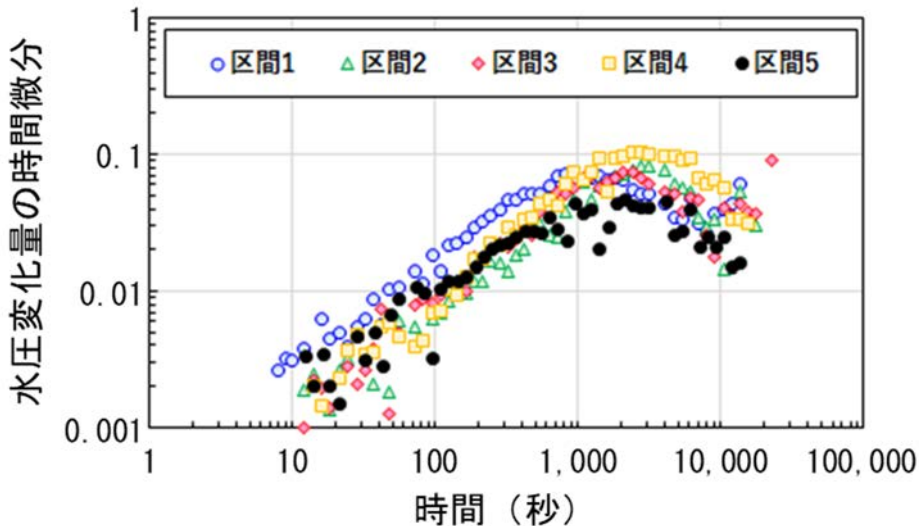
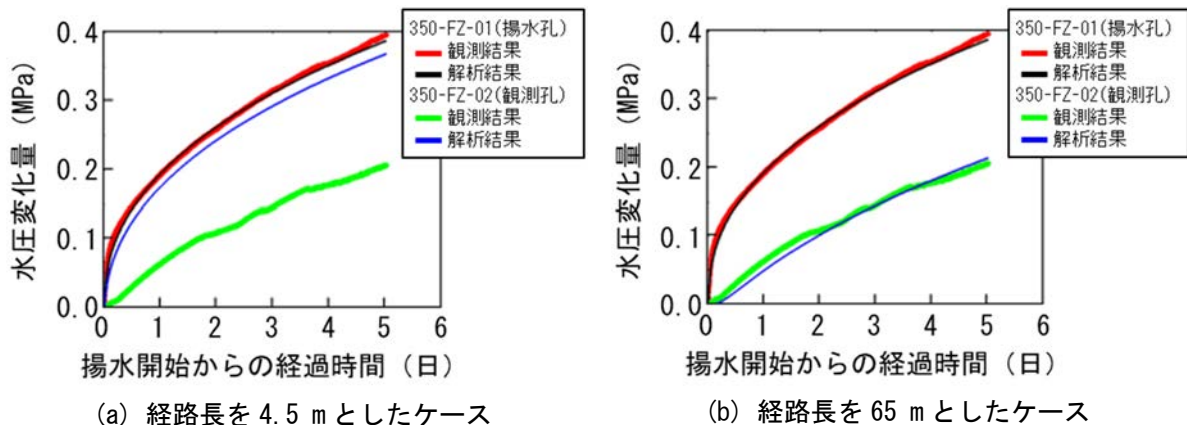


図 22 透水試験時の水圧変化量の例 (250-MIG1-4 孔)

稚内層深部については、令和 3 年度に東立坑の坑底（深度 380 m）から掘削した 2 本のボーリング孔（350-FZ-01 孔および 350-FZ-02 孔）を利用して実施した稚内層深部の断層を対象としたトレーサー試験<sup>(8)</sup>の解析評価を行いました。350-FZ-01 孔を揚水孔、350-FZ-02 孔を観測孔とした孔間透水試験の解析結果から、孔間距離（4.5 m）を仮定した場合に比べ、孔間距離の約 10 倍～100 倍の非常に長い経路を仮定した場合の方が、試験結果の再現性が良いことが分かりました（図 23）。この解析結果から導出された経路を一次元のチューブで仮定し、トレーサー試験の観測データを対象とした物質移行解析を実施しました。解析では、トレーサー試験の観測データに見られる急激な濃度変化が物質移行解析結果へ及ぼす影響についても確認しました。その結果、解析結果の曲線は急激な濃度変化の影響を考慮して設定した複数のケース間で差が見られましたが（図 24）、推定された流動経路の半径はほとんど変化せず、孔間透水試験で推定された流動経路の半径（数百  $\mu\text{m}$ ）の数倍～数十倍（数 mm～数十 mm）であることが推定されました。孔間透水試験とトレーサー試験から推定された半径の違いは、一般的に指摘されている関係と整合しており、水理学的連結性が限定的な場に対して、曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定することによって、物質の移行経路を表現できることが分かりました。



(a) 経路長を 4.5 m としたケース

(b) 経路長を 65 m としたケース

図 23 孔間透水試験の解析結果

350-FZ-01 孔からの揚水（1.0 L/min）に対する揚水区間の水圧の変化量と 350-FZ-02 孔の観測区間の水圧の変化量を再現する解析を行いました。経路長を長くした (b) のケースの方が揚水孔および観測孔の観測結果の再現性が良いことが分かります。

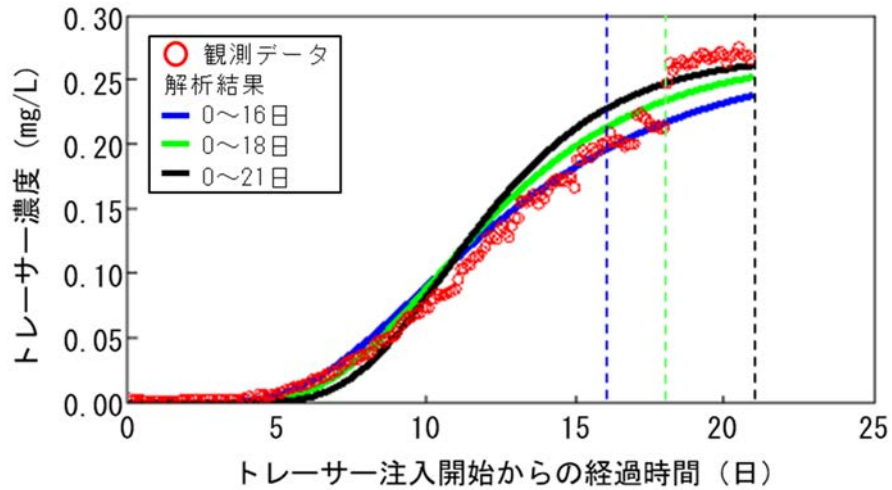


図 24 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析例

トレーサーが移行する流動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。

## 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<sup>\*</sup>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「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、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、処分坑道に施工される吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的とした試験を実施しています。具体的には、幌延深地層研究センターの地下施設で施工した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低アルカリ性コンクリートの試験体を、令和2年度から350m調査坑道の気象条件下および浸潤条件下に定置しています（暴露試験<sup>\*</sup>）<sup>(18)</sup>。令和5年度は定置から約2年9か月が経過した時点で一部の試験体を回収し、物性や化学状態を把握するための分析を行いました。さらに、地下施設に施工して約10年が経過した低アルカリ性の吹付けコンクリート試料を坑道壁面から採取して、暴露試験の試験体と同様の分析を実施しました。以上の結果と、暴露試験の令和4年度までの分析結果<sup>(8, 9, 18)</sup>から、低アルカリ性コンクリート材料を用いた支保工の長期的な物性変化について整理しました。

令和5年度に坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料は、坑道壁面から約24mmの厚さまで中性化が進行していることが分かりました（図25）。図25の坑道側の試料および気象条件下で坑道に定置した暴露試験の試験体の中性化深さは、中性化の進行に関する一般的な関係式（式1）と概ね整合的でした（図26）。

$$x = A\sqrt{t}$$

式 1

ここで、 $x$ : 中性化深さ (mm)、 $A$ : 定数 (mm/年<sup>0.5</sup>)、 $t$ : 経過時間 (年) です。

また、中性化が進行している領域では、中性化の生じていない領域に比べて空隙径 0.003 mm～0.2 mm の空隙の割合が増加しており (図 27)、大気条件下に定置した試験体の結果<sup>(8, 9)</sup>に比べてサイズの大きな空隙の割合が増加していることが分かりました。電子プローブマイクロアナライザー<sup>\*</sup>による観察から、中性化が進行している領域では、SO<sub>3</sub> 濃度が減少していることも分かりました (図 28)。以上の結果は、大気中の二酸化炭素との反応により、SO<sub>3</sub> を含むセメント水和物 (エトリンガイト<sup>\*</sup>など) が分解し、空隙径が大きくなったと解釈されます。

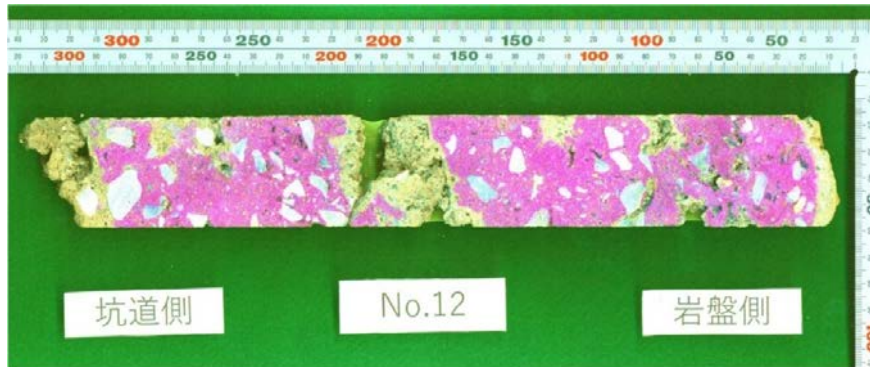


図 25 坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の変質領域

写真は、坑道壁面から採取した吹付けコンクリートの半断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。

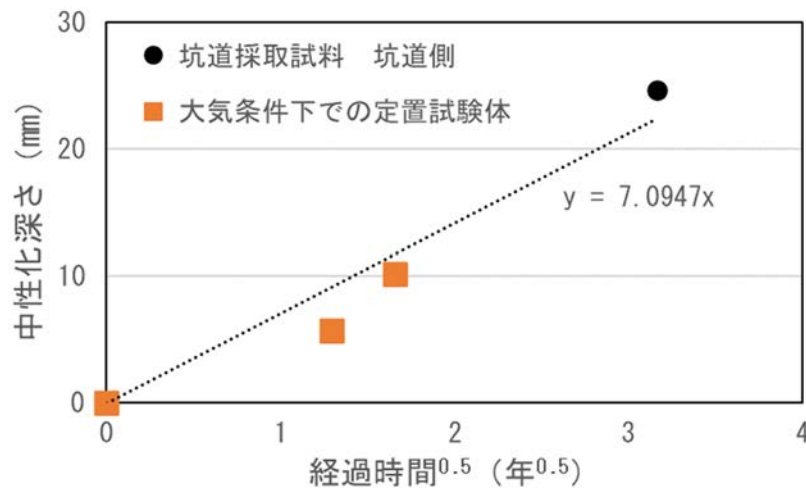


図 26 中性化深さと経過時間の関係



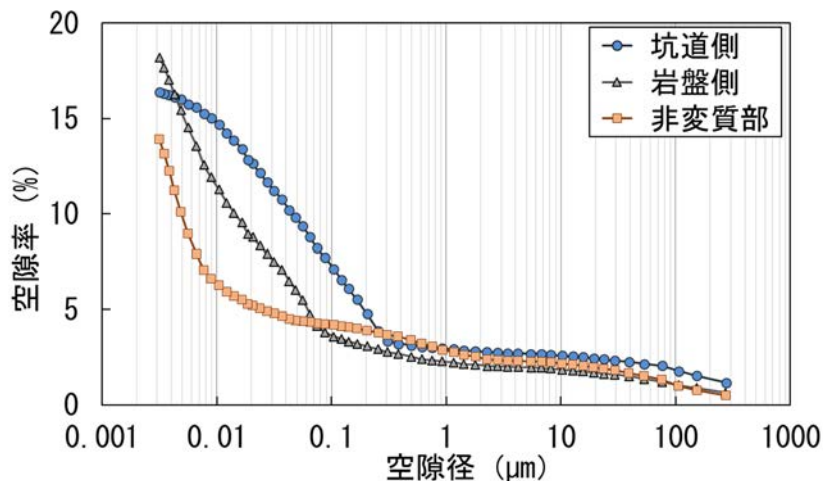


図 27 坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の空隙率分布

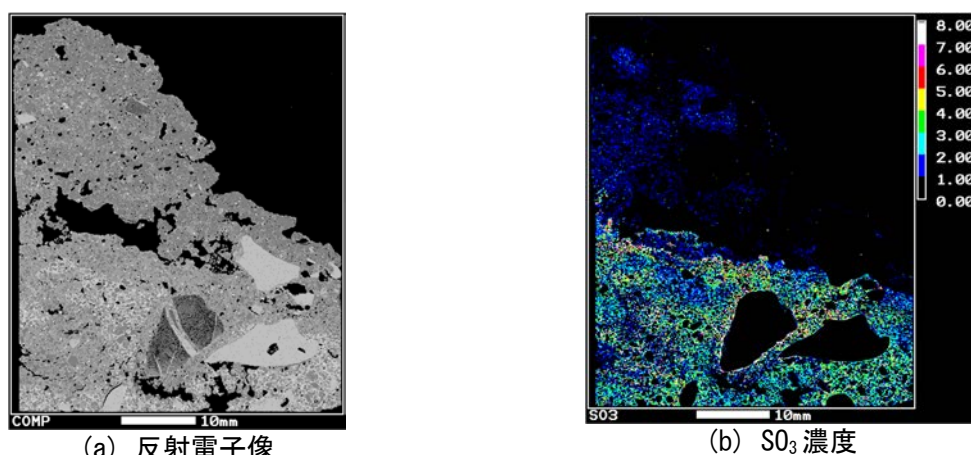


図 28 坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料における坑道側の SO<sub>3</sub> 濃度分布 (坑道壁面：上側)

一方、坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料では、岩盤接触面から約 6 mm の厚さにおいてもフェノールフタレインの呈色が認められませんでした (図 25)。この領域では 0.003 μm ~ 0.07 μm の空隙の割合が増加しており (図 27)、また CaO・SO<sub>3</sub> 濃度の減少ならびに Na<sub>2</sub>O・MgO 濃度の増加が確認されました (図 29)。以上の結果は、岩盤から供給された地下水によりセメント水和物 (C-S-H<sup>\*</sup>、エトリンガイトなど) 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一部のイオンの濃度が増加していると解釈されます。なお、岩盤接触面においてこのようなセメント成分の溶脱が生じている領域は、施工後の経過年数の違いを考慮しても、湿潤条件下で坑道に定置した暴露試験の試験体 (試料表面から 1 mm 未満<sup>(8, 9)</sup>) よりも広いことが分かりました。湿潤条件下で定置した暴露試験の試験体の表面には炭酸カルシウムが沈殿していることが確認され (図 30)、定置した試験体ではこのような沈殿の形成が地下水の侵入を抑制している可能性が考えられます。

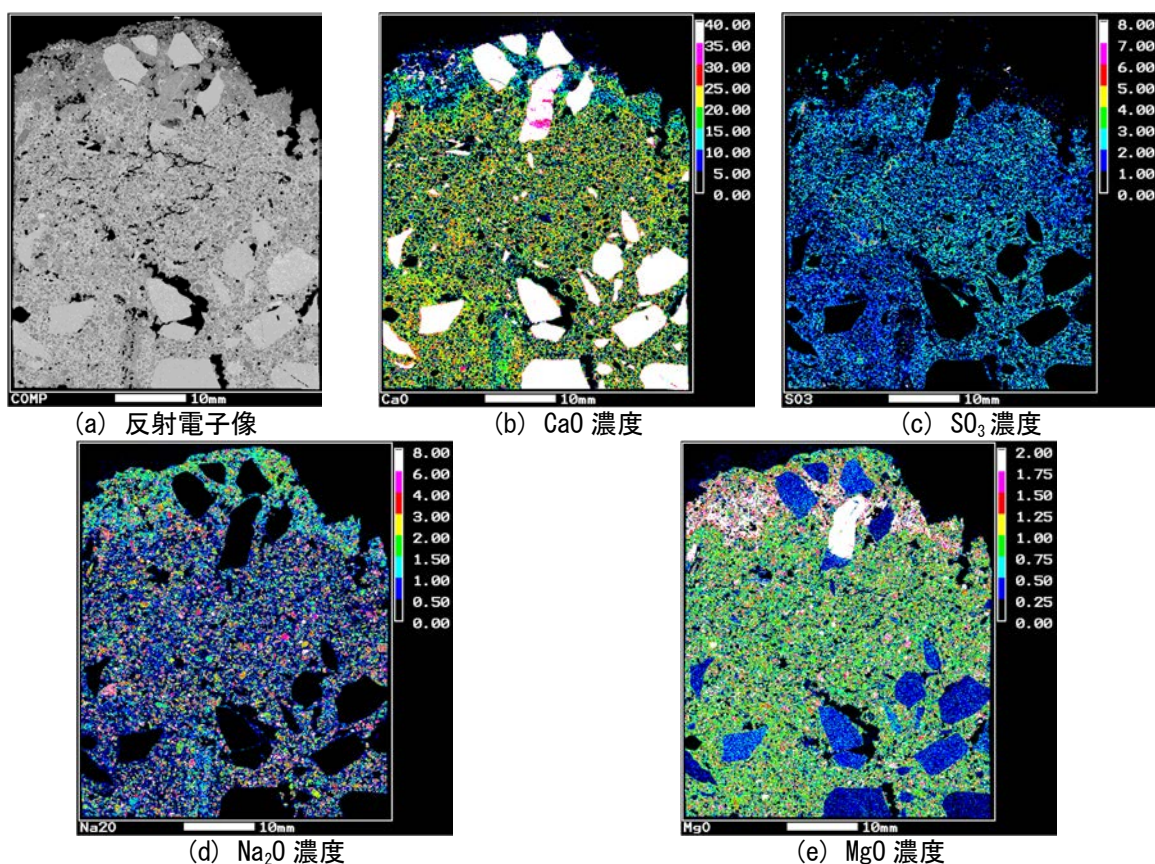


図 29 坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の岩盤側の元素濃度分布 (坑道壁面：上側)

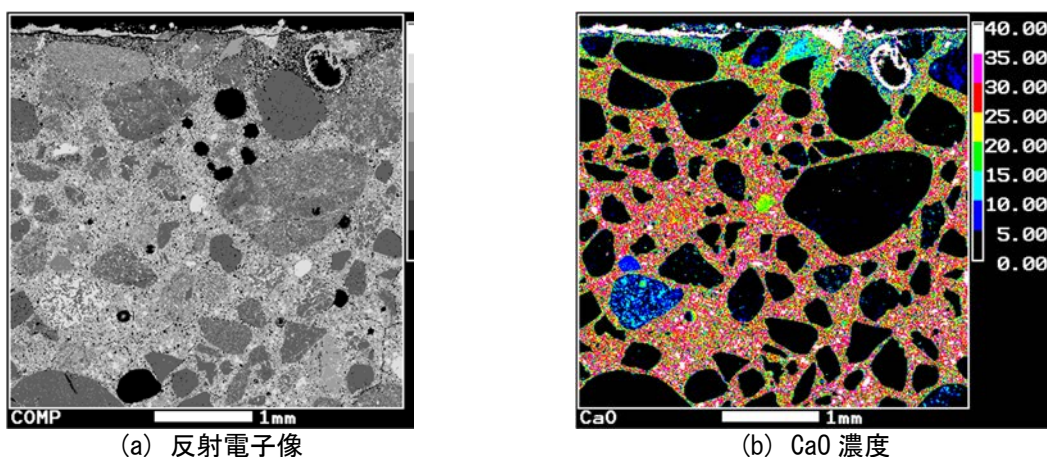


図 30 浸潤条件下で定置したコンクリート試験体の CaO 濃度

試料表面（上側：地下水と接触していた面）に CaO 濃度の高い領域が認められ、炭酸カルシウムの沈殿が形成していると考えられます。

また、暴露試験の試験体および坑道壁面から採取したコンクリート試料の透水性を測定しました。大気条件下で坑道に定置した暴露試験の試験体および坑道壁面から採取した試料の坑道側では、アウトプット法<sup>\*</sup>および令和 4 年度にも適用した地盤工学会の基準にしたがった変水位法<sup>(19)</sup>のいずれの方法でも  $10^{-13}$  m/s $\sim$  $10^{-11}$  m/s オーダーの透水係数が得られました。一方、湿潤条件下で坑道に定置した試験体および坑道壁面から採取した試料の岩盤側では、地盤工学会の基準にしたがった方法で  $10^{-13}$  m/s $\sim$  $10^{-12}$  m/s オーダーの透水係数が得られたものの、アウトプット法では圧入した水の通過が確認されませんでした。以上の結果から、大気との接触による変質が生じていた試料では、相対的に透水性が高い傾向にあるものの、全体的には低透水性が維持されている



ことが分かりました。

さらに、コンクリート試料の強度に関する指標として、過年度の結果<sup>(18, 20)</sup>ならびに施工時の測定結果<sup>(21, 22, 23)</sup>も含めた一軸圧縮強度の時間変化を整理しました(図 31)。坑道壁面から採取した試料では、ばらつきが大きいものの、施工後約 10 年が経過しても一軸圧縮強度に顕著な変化は認められませんでした(図 31(a))。一方、坑道に定置した暴露試験の試験体では、定置後約 2 年後から、湿潤条件下に定置した試験体で一軸圧縮強度が有意に高くなることが分かりました(図 31(b))。この理由として、湿潤条件下での定置によりセメントの水和反応がより早く進行し、構造が緻密化したことが考えられ、過年度の結果<sup>(9)</sup>とも整合しています。

以上のことから、コンクリート支保工が置かれる環境条件、特に水分量の違いに起因するコンクリートの化学状態や空隙構造の変化およびそれらに伴うコンクリートの物理・力学・水理特性への影響ならびに低アルカリ性コンクリート支保工の長期的な物性変化の評価に必要な知見ならびに調査手法を整備することができました。

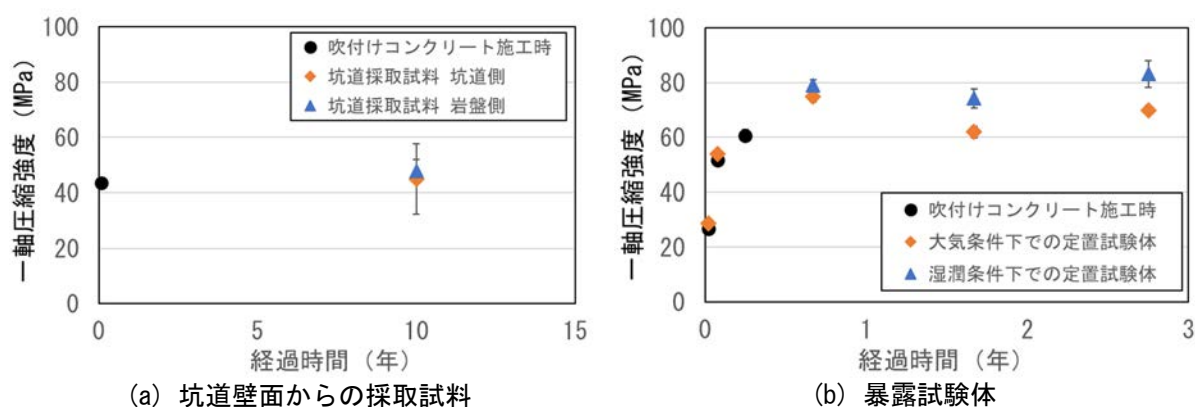


図 31 コンクリート試料の一軸圧縮強度の時間変化

## 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

回収可能性を考慮した場合、長期間にわたり坑道が大気開放条件下に置かれることが想定されます。処分坑道内の空間の長期間の安全性を地質環境の観点から評価することや、長期にわたって坑道が大気に開放されることが坑道周辺の地質環境へ及ぼす影響、また、坑道の大気への開放期間が坑道閉鎖後の坑道周辺の地質環境回復過程に及ぼす影響を評価することを目的として、数値解析を実施しました。具体的には、力学的な長期地質環境の変化の観点では、クリープ変形挙動を伴う長期変形挙動の予測解析を、水理学的な観点では、地下水中に含まれる二酸化炭素やメタンおよび坑道内の大気中に存在する酸素や窒素の影響を考慮した地下水やガスの流動解析である多相流解析<sup>\*</sup>を実施しました。令和 4 年度までの研究により計算精度の向上を目的とした境界条件や初期条件の設定手法を確立するとともに、実際の坑道周辺環境に則したモデルを作成し、解析を実施してきました<sup>(9)</sup>。

令和 5 年度は、短期・長期的な環境変化に及ぼす解析条件の違いを検討する中で、これまで不足していた岩盤の長期的な変形挙動の飽和度依存性に関する検討を行いました。具体的には、飽和度が異なる岩石試料を用いて、異なる載荷速度で一軸圧縮試験を実施し、その結果からクリープ変形挙動に関するパラメータを取得しました(図 32)。得られた結果では、飽和度が 70%の場合、岩石試料の含水状態の違いに起因すると考えられるばらつきが認められるものの、得られたデータを基に、飽和度が 100%の場合と 70%の場合のクリープ寿命の違いを既存の研究結果による計算式に基づいて算出したところ、飽和度が 70%の場合には飽和度が 100%の場合と比較してクリープ変形による岩石の破壊までの時間が 130 倍程度長くなることが推察され、令和 4 年度までに実施してきた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変形解析は、処分場の安全評価上は、安全側の結果であることを示すことができました。

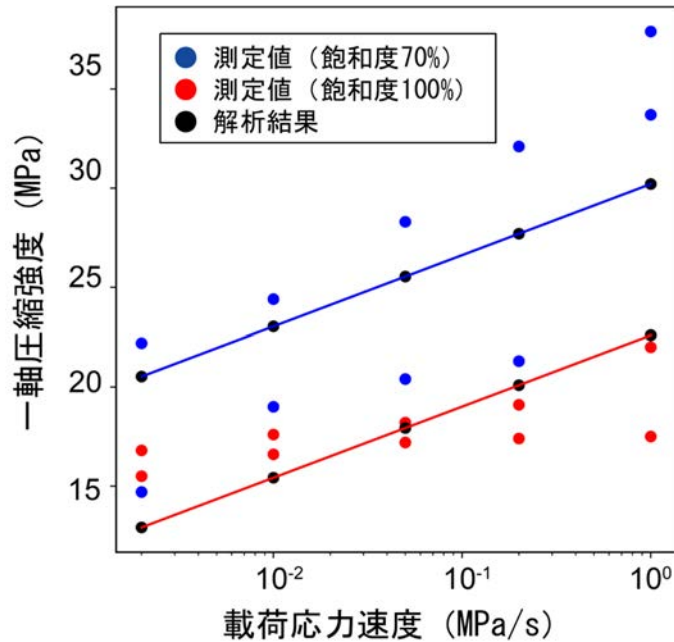


図 32 異なる飽和度の岩石試料を用いて実施した荷速度を様々に変えた一軸圧縮試験結果

(2) 閉鎖技術の実証

閉鎖技術の実証については、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 4 年度「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業[JPJ007597]：地層処分施設閉鎖技術確認試験」ならびに令和 5 年度「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業[JPJ007597]：地層処分施設施工・操業技術確認試験」）を一部活用して実施しました。

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、令和 5 年度は、これまで先行研究<sup>(24)</sup>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）について、このシナリオを生じさせないための対策を分野（設計・工学技術、安全評価）間、構成要素（坑道、埋め戻し材、支保工、プラグ）間の関連性に着目し図 33 のように整理しました。先行研究<sup>(25)</sup>において言及されているように、現時点で取得可能な情報に基づく ESL<sup>\*</sup>（証拠に基づく意思決定支援理論）の評価から、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す。一方で、地層処分場の長期の安全性を確保する観点から、本シナリオが生じない、あるいは考慮する必要がないことを示す必要が生じることも考えられます。このとき、図 33 のように、本シナリオで着目すべきプロセス（例えば、埋め戻し材の膨潤や変質に伴う二次鉱物層の形成：図 33 中の赤枠に関連するプロセス）や評価すべき事項（例えば、図 33 中の青矢印で示す一連の評価：埋め戻し材の変質を起点とした立坑・水平坑道を横断する流れを回避するための方策とその効果の評価）の整理は、将来的に本シナリオを想定する必要が生じた場合に、有効に活用され得ると考えられます。



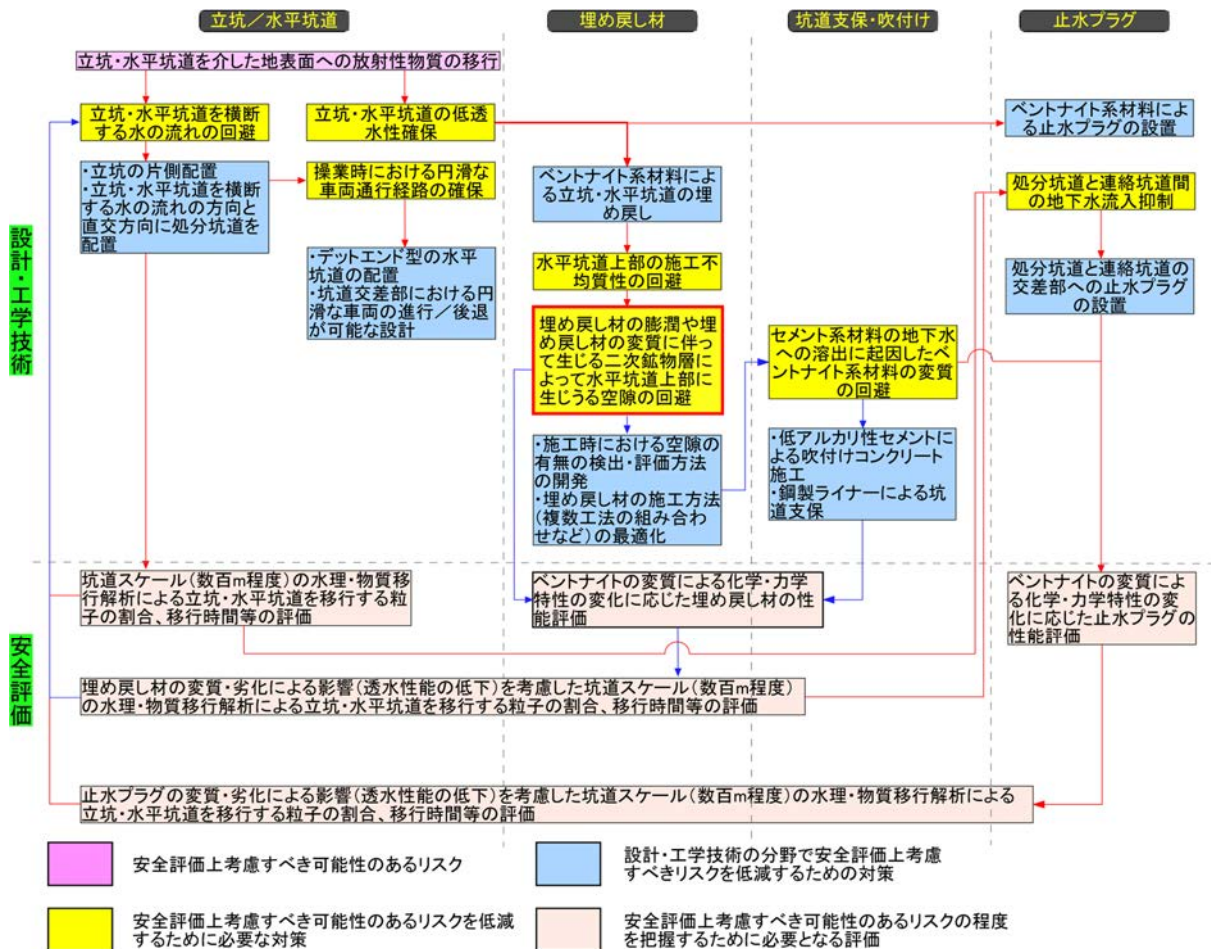


図 33 「立坑・水平坑道が卓越した核種の移行経路となる」シナリオを回避するための対策の整理

原位置での坑道の埋め戻しに関連し、吹付け工法を想定した埋め戻し材の最適な施工含水比、配合設計および施工管理の検討に必要な材料の基本的な特性を把握するため、使用するベントナイト(クニゲル V1)、幌延泥岩、それらを混合した材料を対象に室内試験を実施しました。具体的には、クニゲル V1 と幌延泥岩を対象とした試験で土粒子密度、含水比、粒度分布、メチレンブルー(以下、MB)吸着量などの基本特性を確認し、それらを混合した埋め戻し材については、材料の混合率をパラメータとした MB 吸着量、締固め特性、透水特性、膨潤特性を調べる室内試験を実施しました。

先行研究で実施された埋め戻し材の吹付け工法の実規模施工試験<sup>(25)</sup>において、岩石の最大粒径を 5 mm 以下とすることで施工性が向上することが報告されていることから、本検討で使用する幌延泥岩の最大粒径も 5 mm 以下となるようにハンマーや粉砕機で粉砕しました(図 34)。なお、本検討で使用した幌延泥岩は、令和 5 年度に地下施設の 350m 調査坑道を拡張した際に発生した掘削土(ズリ)を使用しました。



図 34 幌延泥岩（掘削土（ズリ））の粉碎状況

図 35 に幌延泥岩、クニゲル V1 とそれらの混合率を変化させた 3 種類の埋め戻し材の MB 吸着量の結果を示します。幌延泥岩の MB 吸着量は岩石試料としては高い 28 mmol/100g を示し、クニゲル V1 の混合率に応じて MB 吸着量は高くなります。図 35 に示す点線は、クニゲル V1 と幌延泥岩の MB 吸着量と材料の混合率から予測される MB 吸着量を示しており、埋め戻し材混合土の測定結果と一致することが確認できました。これらの結果は、幌延泥岩のように MB 吸着量が 0 よりも優位に高い値を示す場合、使用するベントナイトと岩石自体の MB 吸着量の測定結果に基づく予測式により、混合土の MB 吸着量や混合率を推定できることを意味しており、施工後の埋め戻し材の品質を確認する上で重要な知見となります。

図 36 には、材料の混合率と有効粘土密度<sup>\*</sup>を変化させた埋め戻し材の透水試験および膨潤圧試験結果を示します。試験水は幌延深地層研究センターの地下施設の深度 350 m 周辺の地下水と同程度の NaCl 濃度 (0.2 mol/L) の溶液を使用しました。試験結果から、有効粘土密度の増加にしたがって透水係数は低くなる傾向を示し (図 36(a))、平衡時の膨潤圧は大きくなる傾向を示す (図 36(b)) ことが確認できます。しかし、埋め戻し材 B と埋め戻し材 C の平衡膨潤圧を比較すると、有効粘土密度 0.9 Mg/m<sup>3</sup> 付近ではクニゲル V1 の混合率が少ない埋め戻し材 B の方が平衡膨潤圧は大きくなる結果を示しています (図 36(b))。これらの結果は、幌延泥岩を使用した埋め戻し材の膨潤特性は、有効粘土密度だけではなく、幌延泥岩の混合率にも注意して膨潤特性を整理する必要があることを示しています。

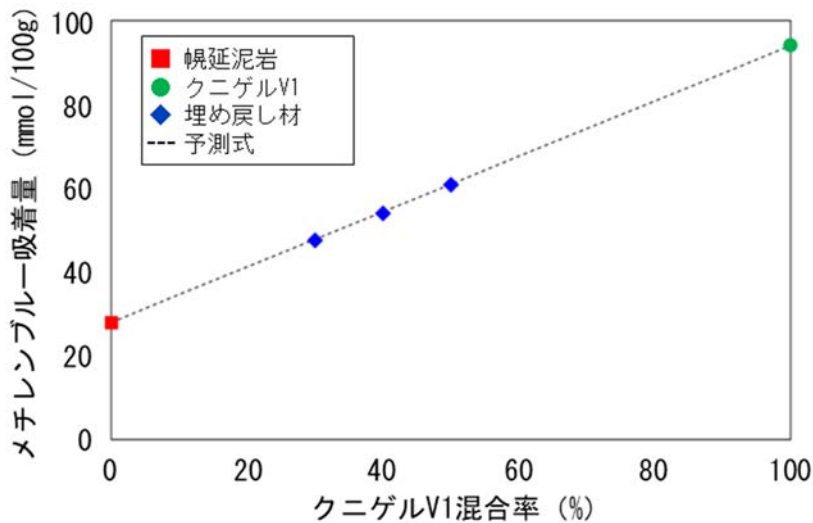


図 35 MB 吸着量の測定結果

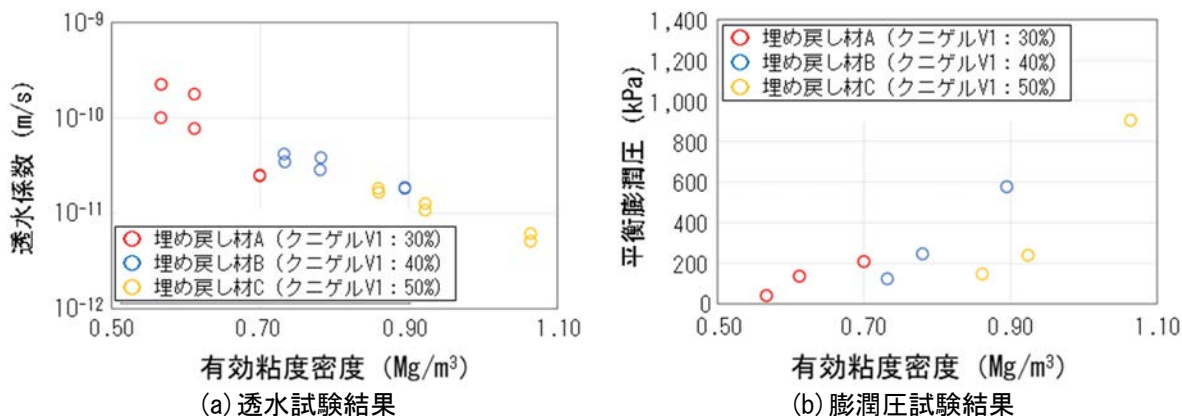


図 36 埋め戻し材の透水性と膨潤特性

人工バリア定置の概念のひとつである処分孔竖置き方式では、処分孔に定置した緩衝材が坑道側へ膨出<sup>\*</sup>し、乾燥密度が低下することを防ぐために埋め戻し材を坑道に充填します。この緩衝材と埋め戻し材の境界面では、緩衝材の膨潤圧と処分孔直上の埋め戻し材の自重相当の荷重が相互に作用しており、緩衝材の膨潤挙動はこれらの力学的な相互作用の影響を受けています。

これまで、埋め戻し材の持つ緩衝材膨出抑制機能を評価するためのデータ取得を目的として、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験を実施してきました<sup>(9)</sup>。令和 5 年度は、埋め戻し材を設置しない条件の緩衝材の膨潤挙動について、試験水の水質の違いが膨潤挙動に及ぼす影響について整理を行いました。イオン交換水および 0.2 mol/L の NaCl 水溶液（以下、0.2M-NaCl）の 2 種類の塩濃度の異なる試験水を用いて試験を実施しています。緩衝材はベントナイト（クニゲル V1）とケイ砂を 70:30 の割合で混合した材料を乾燥密度が 1.80 Mg/m<sup>3</sup> となるように締め固めることにより作製しました。緩衝材の初期高さは 210 mm、初期直径は 113 mm とし、緩衝材の底部に設置したポーラスメタル（多孔質金属）から注水し、ケイ砂層を通じて緩衝材の外周から浸潤する構造としました。緩衝材の吸水膨潤により生じる上部への変形量は試験装置頂部に設置した変位計により計測しました。

試験で得られた結果として、図 37 に上方膨潤率の経時変化を示します。上方膨潤率は変位計で測定した変形量を緩衝材の初期高さで除して算出しました。イオン交換水の場合には試験を終了した 34 日を経過した時点においても上方膨潤率は増加の傾向を示しており、試験終了時点での上方膨潤率は 61.74% でした。一方 0.2M-NaCl の場合には、55 日まで試験を継続しており、上方膨潤率は増加の傾向を示しているものの、試験終了時の上方膨潤率は 18.11% でした。埋め戻し材を設置した条件での結果<sup>(8)</sup>と同様に、埋め戻し材を設置しない場合においてもイオン交換水で緩衝材の膨潤による変形が大きいことが確認できました。

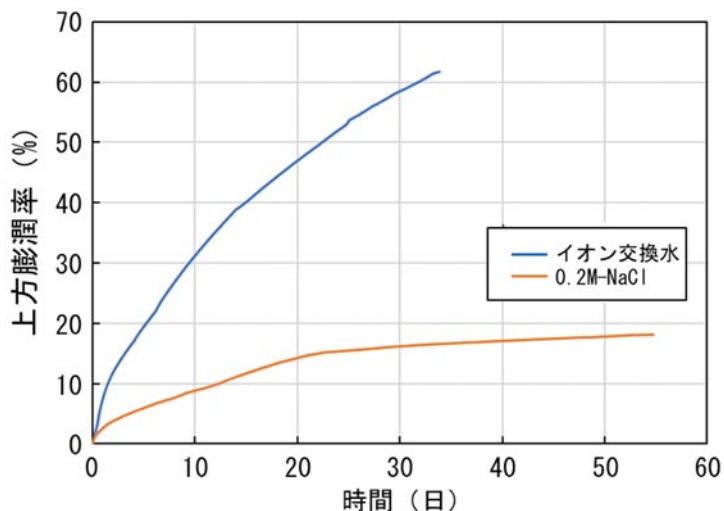


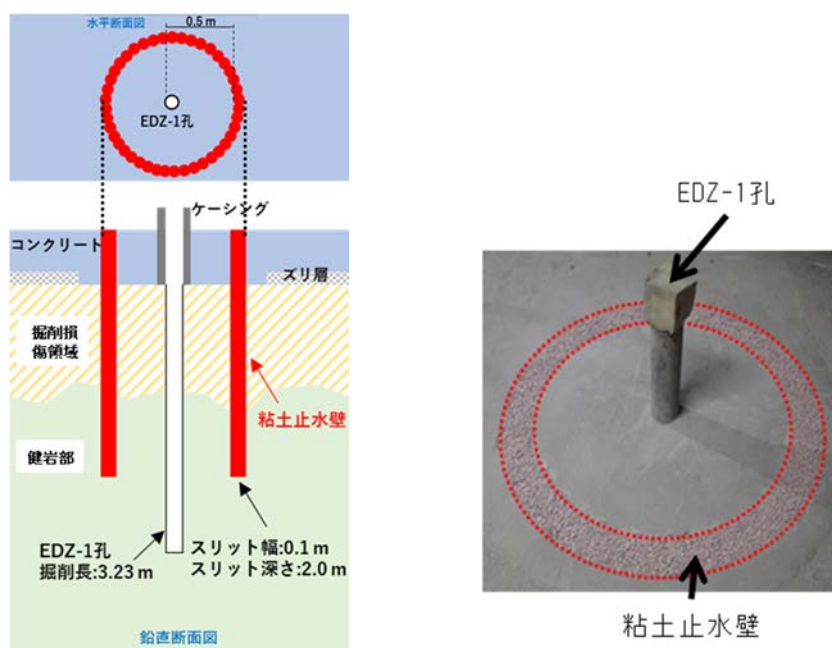
図 37 上方膨潤率の経時変化





トナイトのペレットを充填して粘土止水壁を構築しています。令和 5 年度は、粘土止水壁を構築して約 4 年が経過した時点で透水試験を実施しました。透水試験では、EDZ の領域を含むように設定した EDZ-1 孔の深度 0.22 m～1.61 m の区間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。図 40 にこれまでの試験で得られた透水係数を示します。これまで透水試験で得られたデータは定常解析 (Hvorslev の式<sup>(26)</sup>) と非定常解析 (Jacob and Lohman の方法<sup>(27)</sup>) により評価しました。粘土止水壁の構築前後に実施した同じ注水区間における透水試験において、構築前の透水係数は約  $2 \times 10^{-6}$  m/s の値を、構築後の透水係数は約  $3 \times 10^{-9}$  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。令和 5 年度の透水試験の結果、試験領域の透水係数は約  $1 \times 10^{-9}$  m/s の値を示しました。また、EDZ の領域よりも深いところにある健岩部を対象とした試験を EDZ-1 孔の深度 2.16 m～2.80 m の区間で実施しました。その結果、健岩部を対象とした試験領域の透水係数は約  $4 \times 10^{-9}$  m/s の値を示しました。さらに、同じ試験坑道 3 の底盤から鉛直下向きに掘削したボーリング孔 (EDZ-2 孔) の健岩部を対象とした透水試験を実施しました。EDZ-2 孔には粘土止水壁は設置しておらず、健岩部と考えられる 2.05 m～3.80 m の区間を対象に試験を行いました。その結果、EDZ-2 孔の健岩部を対象とした試験領域の透水係数は約  $8 \times 10^{-9}$  m/s の値を示しました。

これらの結果より、粘土止水壁の施工により、EDZ を含む領域の透水係数が試験坑道 3 底盤の健岩部と同程度まで低くなることが分かりました。加えて、粘土止水壁を構築して約 4 年が経過した時点においても、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。



(a) 試験概念図 (b) 試験場所の状況

図 39 EDZ シーリング試験の概要図

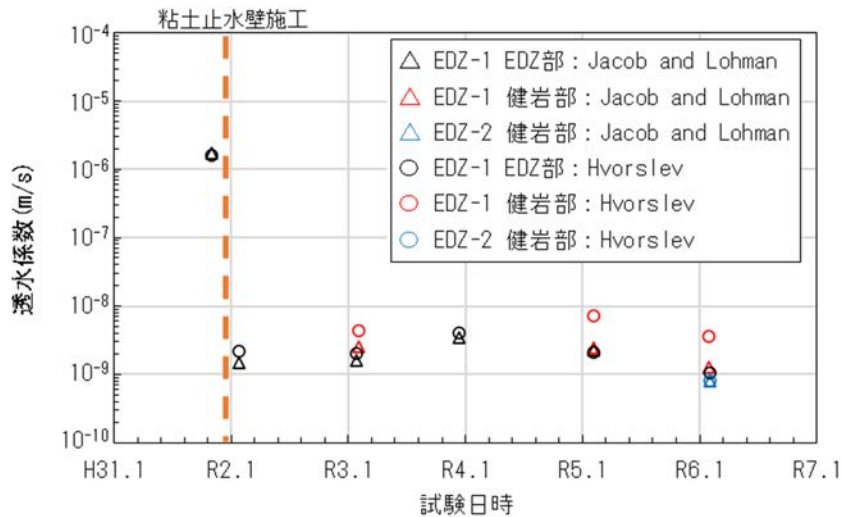


図 40 試験領域の透水性係数の経時変化

プラグの設計・施工に際して必要な EDZ の範囲を評価するために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しました。坑道内における弾性波トモグラフィ調査では、これまでの研究から坑道内部の人工物が探査結果に影響を与える可能性があることが明らかになっていたため、調査に先立ち、これらの影響の有無を考慮した数値解析を実施して最適な観測点配置を検討しました。この結果、坑道壁面や坑道床面に発生した EDZ をボーリング孔を利用して調査する場合、全てのボーリング孔を鉛直に掘削するのではなく、一部の孔を斜めに掘削し、調査範囲を取り囲むように観測点を配置することにより、坑道内部の人工物の影響の有無に関わらず信頼性の高い調査が可能となることが推定されました。この解析結果に基づき、原位置における測線を設定し、試験坑道 6 (図 2 参照) で弾性波トモグラフィ調査および比抵抗トモグラフィ調査を実施しました。調査の結果、弾性波トモグラフィでは坑道周辺に広がる低速度領域の範囲を特定することに成功し、その低速度領域は BTV で確認された亀裂の多い領域の深度と整合的でした (図 41)。

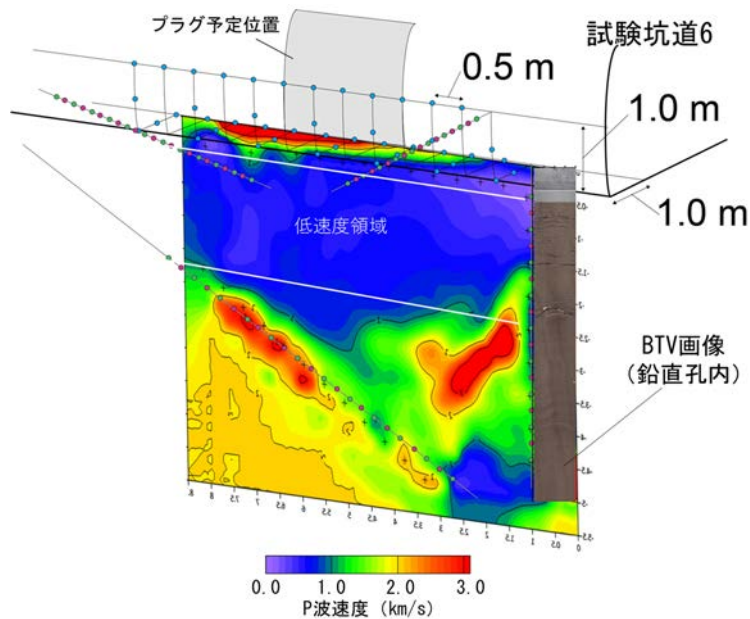


図 41 坑道床面で実施した弾性波トモグラフィ調査の結果

処分場を埋め戻す際には、地下施設の建設のために地上から掘削された調査ボーリング孔が地上へ直結する卓越した水みちにならないよう適切な方法で閉塞することが求められています。ま



た、地下施設の建設時には坑道内からボーリング孔が掘削される場合もあり、これらのボーリング孔が割れ目などと連結して放射性物質の移行の短絡経路となることや、地層処分システムの長期安全性に影響を及ぼすことのないように、適切な方法で閉塞することが求められています。

坑道内から掘削された水平に近いボーリング孔の閉塞について、ボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法<sup>9)</sup>を検討しています。これまでの検討で、ボーリング孔へ流入する地下水の流量がある程度多い場合には、設置したベントナイトブロックを短期間で膨潤させる工夫が必要となることが課題として挙げられました。そこで、令和 5 年度はボーリング孔でベントナイトブロックが膨潤する過程を理解するための室内試験を実施しました。試験では、直径 75 mm、高さ 100 mm、乾燥密度が 1.6 Mg/m<sup>3</sup> となるように締め固めて作製したベントナイトブロックを内径 100 mm、長さ 110 mm 程度の横向きのアクリル容器内に設置して (図 42(a))、試験水に浸水させました。試験水には、イオン交換水および幌延の地下水の水質を模擬した溶液 (以下、模擬地下水) の 2 種類を用いました。浸水したベントナイトブロックは、試験開始直後から徐々に膨潤していき、試験終了時には容器の断面方向から見ると断面全体を塞ぐようにベントナイトブロックが膨潤している様子が確認されました (図 42(b)および図 43)。また、イオン交換水と模擬地下水で比較すると、イオン交換水の方が膨潤が進むのが早く、容器の断面全体を塞ぐまでに要する時間が短いことが確認できました。

試験終了後には、図 42(b)および図 43 に赤丸で示したベントナイトブロックの 3 箇所 (上部、中部、下部) からサンプリングし、その湿潤密度を測定しました。湿潤密度の測定結果は、イオン交換水で上部が 1.35 Mg/m<sup>3</sup>、中部が 1.64 Mg/m<sup>3</sup>、下部が 1.64 Mg/m<sup>3</sup> となり、模擬地下水では上部が 1.32 Mg/m<sup>3</sup>、中部が 1.66 Mg/m<sup>3</sup>、下部が 1.68 Mg/m<sup>3</sup> となり、膨潤前に隙間が存在していた上部において湿潤密度が低いことが確認できました。また、膨潤後の湿潤密度の分布には、試験水の水質の違いによる差がほとんどないことが分かりました。

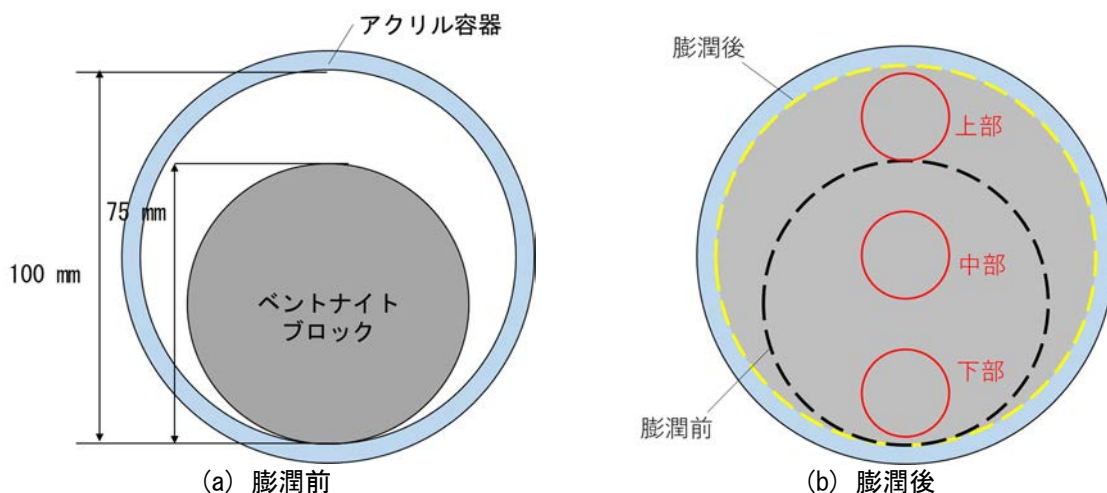


図 42 ベントナイトブロックを用いた室内試験の模式図 (断面図)

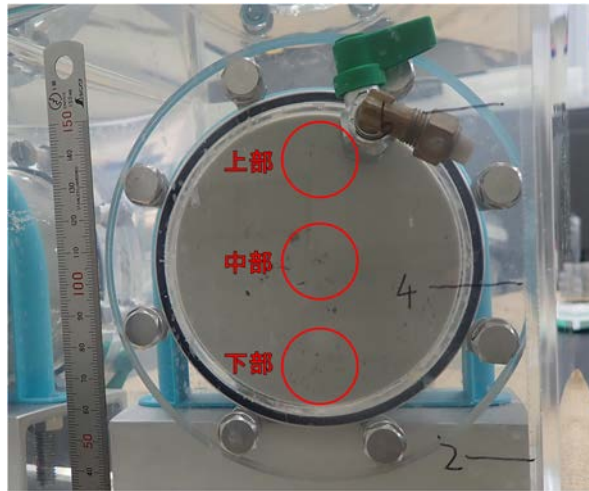


図 43 膨潤後のベントナイトブロックの状況

図 44 に、模擬地下水を浸水した試験の終了後に X 線 CT 測定を行い、ベントナイトブロックの内部の状況を非破壊で観察した結果を示します。図 44 には X 線 CT 測定で得られた CT 値の分布を示しており、CT 値が高いほど密度が高いことを表しています。膨潤前のベントナイトブロックの部分（図 44 の黒い破線の内側）で CT 値が高く、膨潤前に隙間だった部分の CT 値が低いことが分かります。サンプリングにより測定した湿潤密度と X 線 CT 測定で得られた CT 値の大小関係が良く一致しており、ベントナイトブロックの膨潤により隙間が塞がった部分では湿潤密度が低い傾向にあることが確認できました。

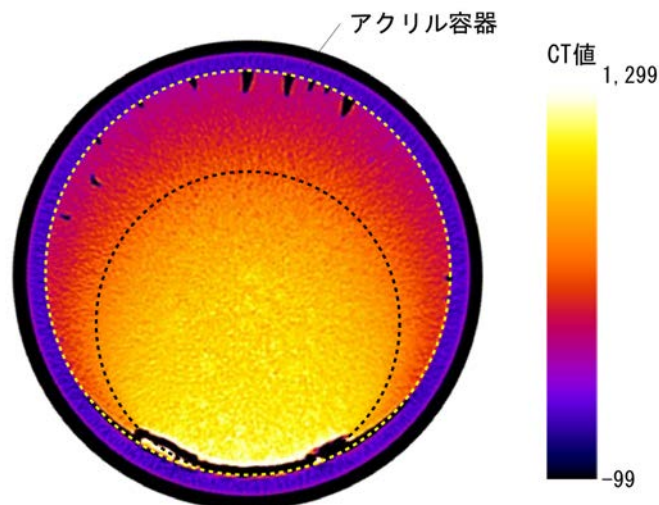


図 44 X 線 CT 測定より作成した CT 画像（模擬地下水条件）

### (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

緩衝材や埋め戻し材に対して、表 2 に示すような設計要件が示されています<sup>(28)</sup>。本課題では、表 2 に示されたような設計要件に対して、緩衝材や埋め戻し材の施工方法による品質の違いなどについて検討を行っています。

令和 5 年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（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」）を活用して、原子力環境整備促進・資金管理センター<sup>\*15</sup>との協力のもとで、埋め戻し材の施工効率の向

\*15：公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：RWM（Radioactive Waste Management Funding and Research Center）は、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構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。

上が期待できる 3 つの工法について要素試験などを地上の研究施設などを利用して実施しました。具体的には、ブロック工法、斜め転圧工法およびスクリー工法（図 45）について、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ました。

表 2 緩衝材および埋め戻し材の設計要件の例<sup>(28)</sup>

	設計要件	内容	設計項目
緩衝材	低透水性	緩衝材中の地下水の流れを抑制し、放射性物質の移行を遅延すること	材料、有効粘土密度
	自己シール性	オーバーパックや岩盤との隙間など、施工時にできる隙間を充填可能な膨潤性を有すること	材料、有効粘土密度、厚さ
	製作施工性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作施工が可能であること	材料、有効粘土密度、材料の混合率
	物理的緩衝性	オーバーパックの腐食膨張による力学的な影響を緩和して、オーバーパックを保護するように物理的な緩衝性を有すること	材料、有効粘土密度、厚さ
埋め戻し材	低透水性	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと	材料、有効粘土密度
	製作施工性	既存の技術または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	乾燥密度、有効粘土密度、材料の混合率



(a) ブロック工法



(b) 斜め転圧工法



(c) スクリー工法

図 45 施工効率の向上が期待できる埋め戻し材の施工技術

廃棄体を定置した後の処分坑道や処分場の閉鎖段階における、アクセス坑道や連絡坑道は、適切な材料で埋め戻されます。埋め戻し材には掘削土を用いることが合理的であり、低透水性を確保するために掘削土にベントナイトを混合した混合土を用いることが検討されています<sup>(28)</sup>。処分場の地層ごとに透水性が異なる場合には、その透水性に応じて埋め戻し材の仕様は決定されることになります。また、埋め戻し材の仕様などに応じて異なる施工方法を用いることも考えられます。埋め戻し材の品質を保証するためには、埋め戻した坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないように、適切な乾燥密度で埋め戻されていることを確認する必要があります。

埋め戻し材の施工方法としては、これまで主に撒き出し・転圧工法と吹付け工法について、実寸大の模擬坑道を活用した実証的な試験などを実施して、施工技術としての成立性が確認されています<sup>(25)</sup>。しかし、既存の施工機械を用いたこれらの工法では、施工に時間がかかるという課題があるため、施工効率の向上が期待できる図 45 に示した 3 つの工法の研究開発に取り組んでいます。なお、本研究開発では、掘削土の代わりにコンクリート用砕石・砕砂（砕石：最大粒径 20 mm、砕砂：最大粒径 5 mm）、ベントナイトはクニゲル V1 を使用して埋め戻し材を作製しました。



ブロック工法では、埋め戻し材ブロックとして成型可能な材料の範囲を把握するために、ベントナイト混合率と成型圧力をパラメータとして静的締固め試験を実施しました。供試体の直径は100 mm、高さは約100 mmです。試験結果の例を図46に示します。最大粒径20 mmの砕石を含む埋め戻し材では、ベントナイト混合率15%の場合には供試体の表面に多少の凹凸が見られましたが、30%以上では外観に大きな欠けや崩れなどは見られませんでした。また、これらの供試体の有効粘土密度は $1.0 \text{ Mg/m}^3$ 以上でした。これらのことから、今後、スケールアップした埋め戻し材ブロックを作製するための条件を把握することができました。



(a) ベントナイト混合率：15% (b) ベントナイト混合率：30% (c) ベントナイト混合率：40%  
 図46 静的締固め試験後の供試体の外観（成型圧力：20 MPa）

斜め転圧工法については、撒き出し・転圧時に埋め戻し材が斜面を滑落して材料分離が生じる可能性があるため、適切な撒き出し角度を把握するための斜め撒き出し試験（図47(a)）を実施しました。また、設定した撒き出し角度で斜め転圧試験を実施して、施工後の品質を確認するための施工試験（図47(b)）を実施しました。斜め撒き出し試験の結果、撒き出し角度 $35^\circ$ ならば埋め戻し材（最大粒径20 mm、含水比11%）の滑落は少なく、斜面の上部と下部で埋め戻し材の粒度のばらつきも小さいことが分かりました。また、撒き出し角度 $35^\circ$ で実施した施工試験の結果、空間的制約のない坑道下半部の施工であれば、既存の転圧機械を用いた水平方向の撒き出し・転圧工法と同等の乾燥密度が得られることが分かりました。



(a) 斜め撒き出し試験 (b) 施工試験

図47 斜め転圧工法による要素試験

スクリー工法については、自然含水比程度の埋め戻し材を用いた充填方法について検討しているため、粒径の大きな砕石・砕砂とベントナイトが充填中に分離してしまうことが考えられます。そのため、充填後の埋め戻し材の均質性に影響を及ぼす主要因である掘削土（砕石・砕砂）の最大粒径とスクリーの高さの関係を把握するために、1本のスクリーを用いた充填試験を実施しました。充填試験後の埋め戻し材の外観の例を図48に示します。充填後の埋め戻し材から複数の試料を採取して、粒度試験を実施した結果から、埋め戻し材に含まれる掘削土（砕石・砕砂）の最大粒径が大きく、スクリーの設置位置が高いほど、充填後の埋め戻し材の不均質性が大きくなることが分かりました。

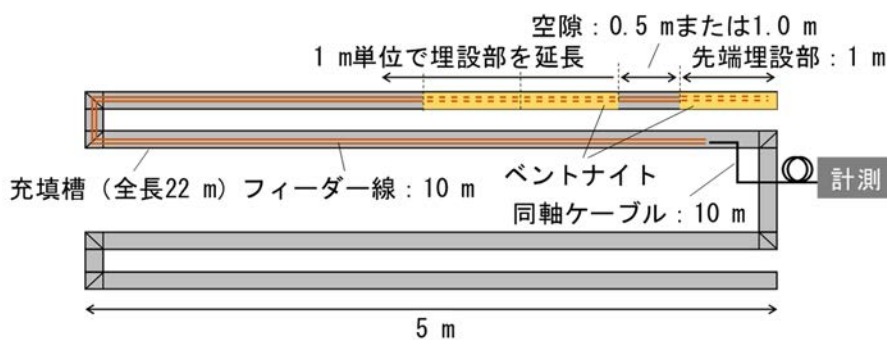




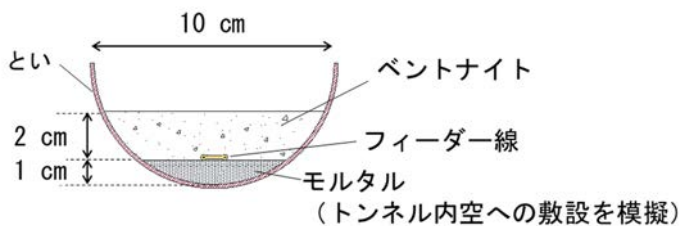
図 48 スクリュー工法による埋め戻し材の充填後の外観

また、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の研究開発にも取り組んでいます。埋め戻し材の乾燥密度と熱伝導率には相関関係があるため、加熱と温度測定が可能な光ファイバーケーブルを埋め戻し材中に設置（例えば、転圧施工した埋め戻し材の上に光ファイバーケーブルを敷設し、その上に再度、埋め戻し材を転圧施工するなど）して、加熱中の埋め戻し材の温度変化量から熱伝導率を算出し、ケーブルに沿った埋め戻し材の乾燥密度の分布を推定することができます。これまでに測定距離の分解能が小さく測定可能距離が短い（最大で 15 m～18 m 程度）OFDR 方式※を用いてきましたが、温度測定結果にばらつきが大きいことが課題でした<sup>(25)</sup>。そのため、光ファイバーケーブルに作用するひずみの影響を受けないラマン散乱※を用いた OTDR 方式※を用いて、光ファイバーケーブルの曲げ半径を変化させた試験を実施しました。その結果、OFDR 方式に比べて OTDR 方式では、温度測定結果のばらつきが小さいことが確認できたことから、今後の埋め戻し材の施工などの実証試験では、ひずみの影響を受けずに km オーダーの測定が可能な OTDR 方式が有効であると考えられます。

さらに、フィーダー線（アンテナケーブル）を用いた TDR 法※により、埋め戻し材と坑道壁面間に生じる可能性のある隙間を検知するための試験を実施しました（図 49）。試験では、0.5 m と 1.0 m の空隙の長さに対して、1 m ずつ埋設部を延長して測定値を確認しました。その結果、今回の試験条件では、空隙サイズ 0.5 m と 1.0 m の場合、ケーブル長さがそれぞれ 6 m と 8 m 以下ならば空隙が検知できることが分かりました。



(a) 要素試験の概略図（平面）



(b) 要素試験の概略図（断面）



(c) フィーダー線の敷設状況

図 49 ケーブル TDR 法の計測限界長把握のための要素試験

## 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。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-水理-力学-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。

令和5年度は、令和4年度に策定した原位置試験の計画<sup>9)</sup>を基に、後述する室内試験の状況も踏まえ、試験坑道5（図2参照）の2つの既存孔に、それぞれ緩衝材ブロック、ヒーターおよび計測センサーからなる試験体を設置し、100℃を超える温度での加熱を開始しました。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50cm、内径11cm、高さ10cm、目標乾燥密度約1.8Mg/m<sup>3</sup>（膨潤時の密度約1.6Mg/m<sup>3</sup>）で加圧成形しました。また、初期含水比（10.5%および15%）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50に示す順番で積み上げました。試験体は炭素鋼製の円筒の中にカートリッジヒーターを設置するとともに、円筒に固定した蓋状の構造物で緩衝材ブロックを上下から固定する構造としました。これは、緩衝材ブロックの鉛直方向の膨潤変位を抑制し、試験体の解体や試料採取を容易にするためです。計測センサーは、試験体のスケールが比較的小さいことから、試験に大きな影響を及ぼさないと考えられる程度の種類および数量としました。試験体の設置概略図を図51に示します。

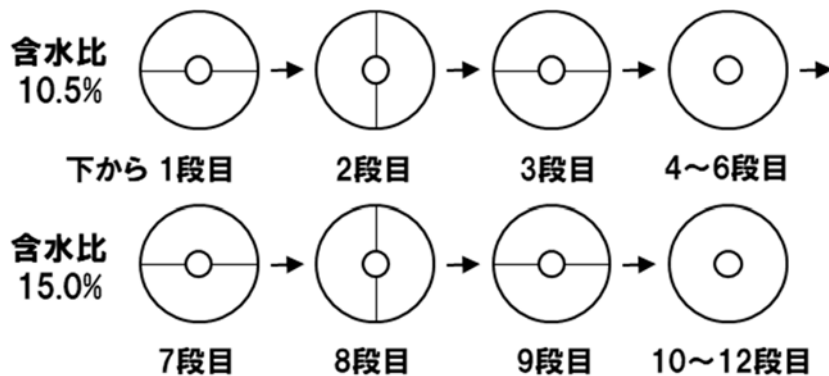


図 50 緩衝材ブロックの積み上げ順

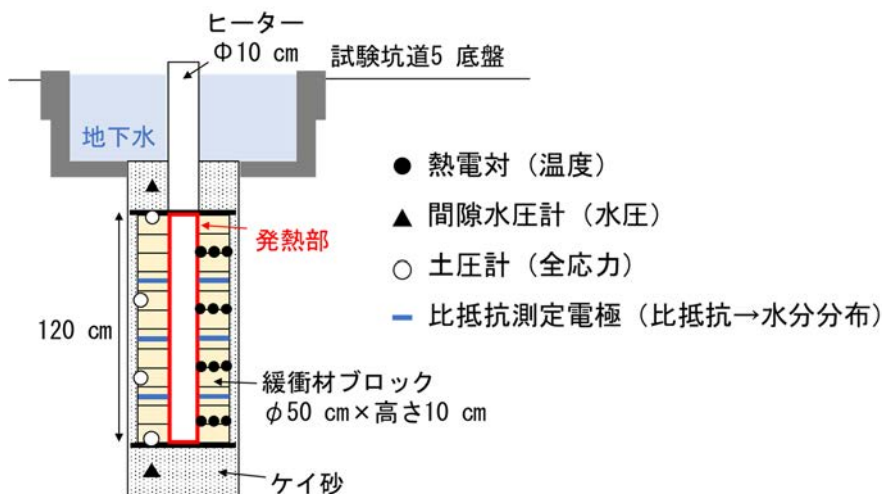
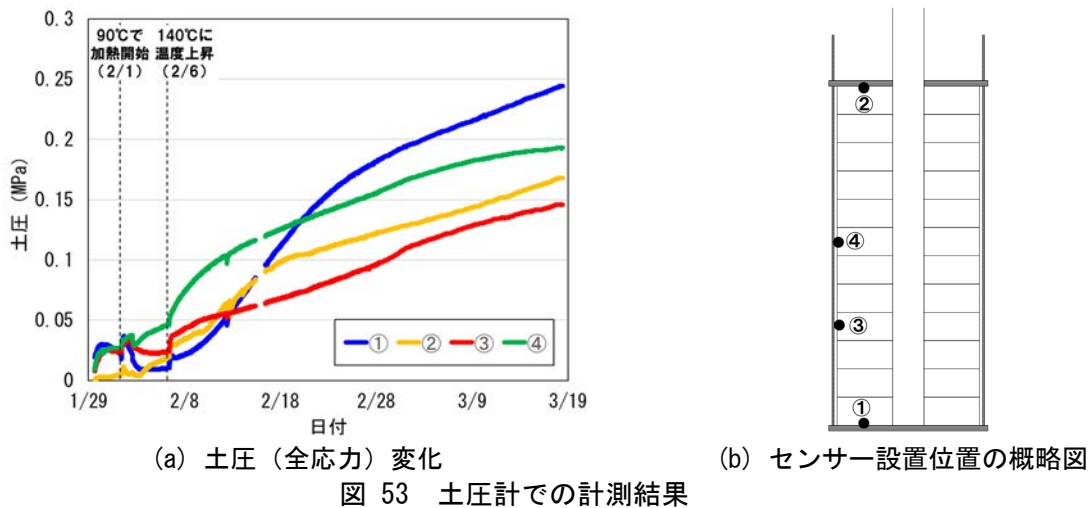
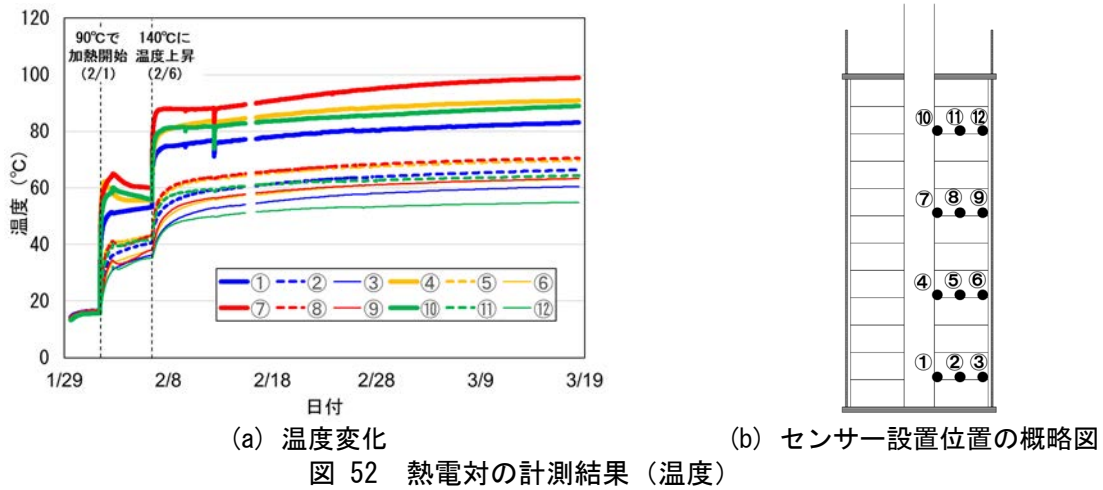


図 51 試験体の設置概略図

試験体の設置後、設置した計測センサーでの連続計測およびヒーターでの加熱を開始しました。はじめに 90℃で 5 日間加熱し、試験体や計測結果に異状がないことを確認してからヒーター設定温度を 140℃に上昇させました。140℃の加熱温度はオーバパックの耐食性への影響に関する試験データ<sup>(29)</sup>や令和 3 年度に実施した緩衝材の変質に関する研究事例の調査結果<sup>(8)</sup>に基づいて設定しました。2 つの試験体のうち、ひとつの試験体における熱電対および土圧計での計測結果をそれぞれ図 52 および図 53 に示します。



また、高温条件下での緩衝材へ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 つの供試体を 140℃で加熱した後、供試体の下端から蒸留水を浸潤させ、一定時間ごとに X 線 CT 撮影を行いました。撮影結果から換算した緩衝材の密度の経時変化を図 54 に示します。図から、140℃で加熱すると緩衝材にひび割れが生じること、緩衝材の初期含水比に応じてひび割れの発生状況は異なるものの、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、生じたひび割れは最長でも 2,280 時間 (95 日) 前後で閉塞されることが分かりました。

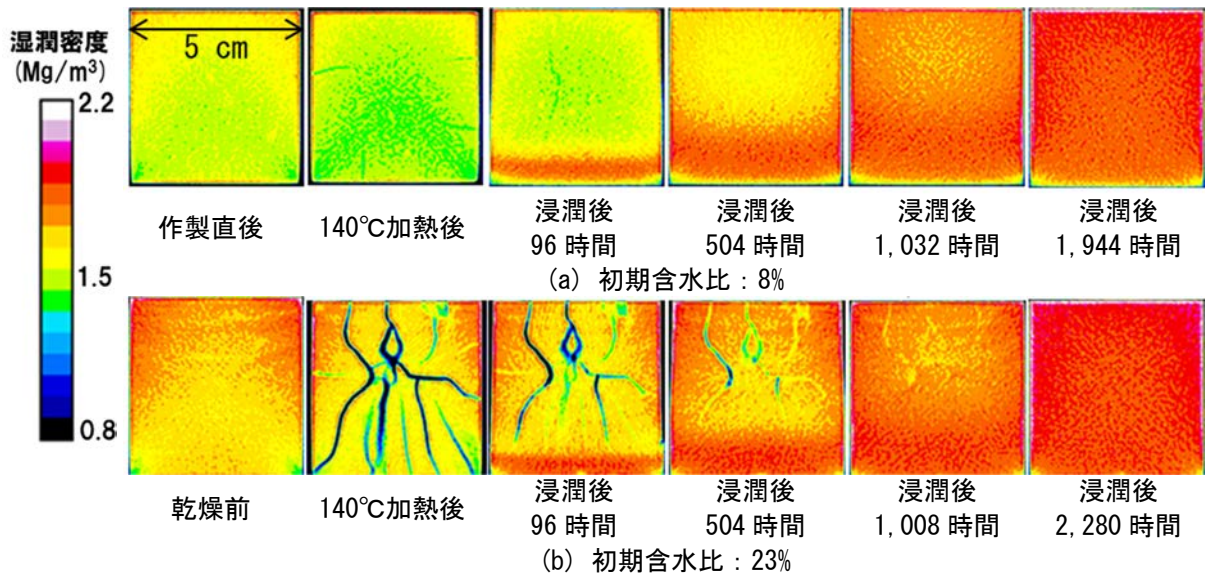


図 54 140°Cでの加熱および蒸留水浸潤過程での緩衝材試料の浸潤密度の変化



## 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）、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5年度は、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、断層の水理学的連結性と DI の関係に関する解析を行いました。断層の水理学的連結性は断層内の水みちのつながり方の次元として数値化することができ、次元の値が小さいほど、水理学的連結性が低いことを表します。これまで定性的に判定していた水みちのつながり方の次元について解析を実施し、定量的に次元を決定しました。例えば、水みちのつながり方の次元が3に近いと、水みち同士につながりが多いのに対し、次元が1に近いと、水みち同士につながりが少ない状態が想定されます。図55に、ボーリング調査における断層を対象とした透水試験時の水圧変化や坑道掘削時に遭遇した断層からの湧水量変化から、断層内の水みちのつながり方の次元を決定した例を示します。解析では水みちの中を水圧がどのように伝搬したかをシミュレーションにより検討しました。解析の結果、地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元はDIの増加とともに低下する傾向があることが分かり、DIが2以上になると、水みちのつながり方の次元が1.5以下まで小さくなることが分かりました（図56）。このような情報は、図57に示すような断層/割れ目の水理学的連結性とDIの関係を定量的に理解する上で重要となります。

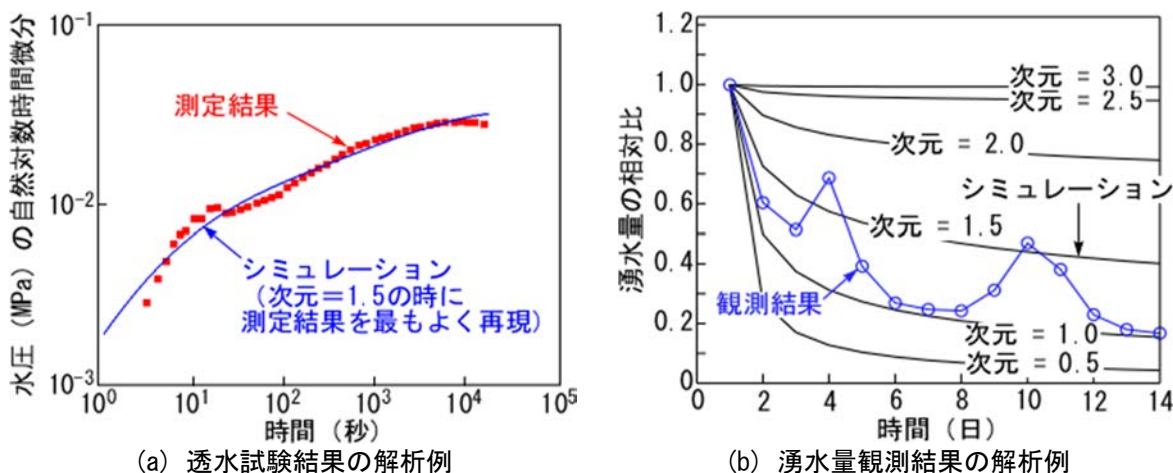


図 55 水みちのつながり方の次元の解析例<sup>(30)</sup>

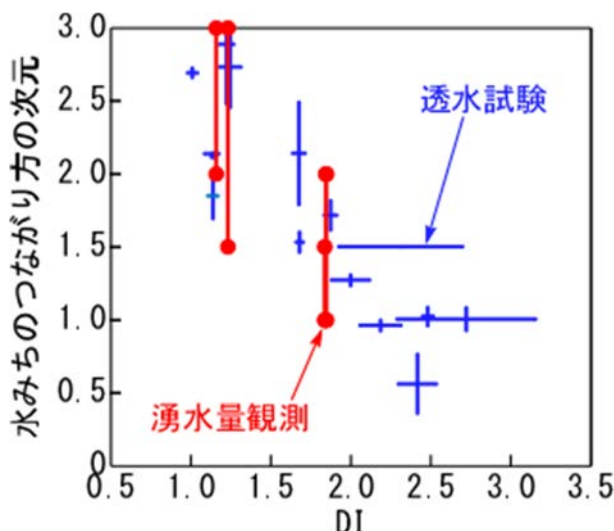


図 56 地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係<sup>(30)</sup>

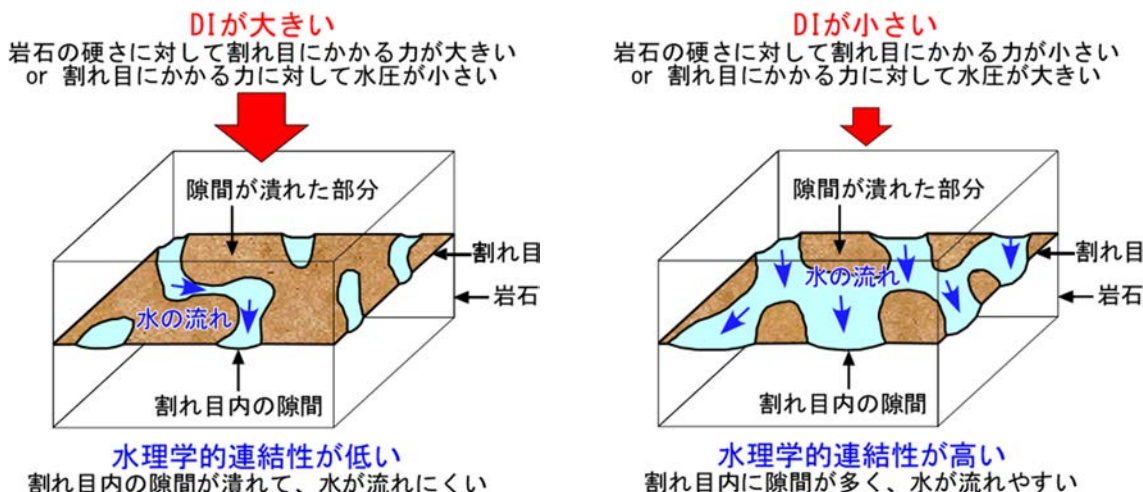


図 57 割れ目の水理学的連結性と DI の関係<sup>(31)</sup>

割れ目内の局所的な水の流れやすさに関して、既往研究により得られた知見の再検証を行いました。既往研究により、割れ目内の局所的な水の流れやすさは、割れ目に作用する力、割れ目のかみ合わせの程度、そして岩石の硬さによって決まり、これらの関係が数式で表せることが提案されています<sup>(32, 33)</sup>。このモデルの信頼性を検証するために、過年度に行った人工バリア性能確認試験の試験孔周辺の掘削損傷割れ目を対象とした透水試験の結果を検討しました。具体的には、試験孔に設置した緩衝材の膨潤圧の発生に伴う試験孔周辺の掘削損傷割れ目の水の流れやすさ（透水量係数）の変化（図 58）を上述のモデルで再現できるかを確認しました。その結果、図 59 に示すように、膨潤圧の発生によって掘削損傷割れ目に作用する力が増大し、割れ目の開口幅（透水量係数）が低下する現象をモデルで良く再現することができました。このことから、既存のモデルの信頼性を確認することができました。

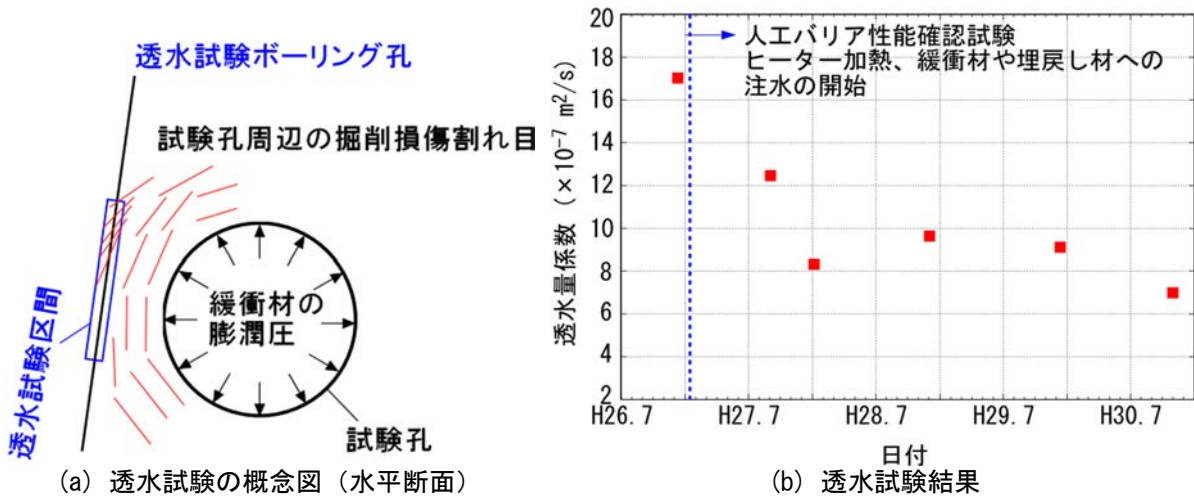


図 58 人工バリア性能確認試験の試験孔周辺の透水試験の概念図と透水試験結果

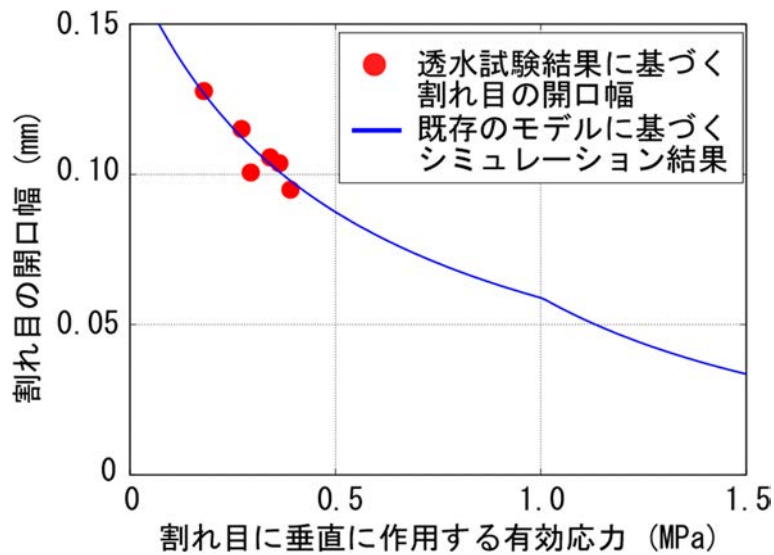


図 59 割れ目に垂直に作用する有効応力と割れ目の開口幅の関係

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解析を行いました。解析では断層の力学的な安定性を評価する上で重要となる原位置の地圧の状態を水圧擾乱試験の結果から推定する方法を検討しました。いくつかの仮定のもと（鉛直方向の地圧＝土被り圧、など）、水圧擾乱試験において発生した断層のずれの方向（図 60）を再現するような原位置の地圧の状態を求めた結果、鉛直方向の地圧、水平方向の最大地圧および水平方向の最小地圧の大ききの比が、1.0:0.8:0.7 もしくは 1.0:0.9:0.7 であることが推定されました。断層がずれる方向と岩盤にかかる力の方向と大ききは密接に関連し、今回のケースに関して言えば、例えば鉛直方向の地圧が最も大きいと、試験中に確認された断層のずれを再現できることが分かりました。推定された地圧の状態は、近傍のボーリング孔で行われた既往の地圧試験の結果と良く一致しており（表 3）、水圧擾乱試験でも原位置の地圧の状態が推定できることが分かりました。

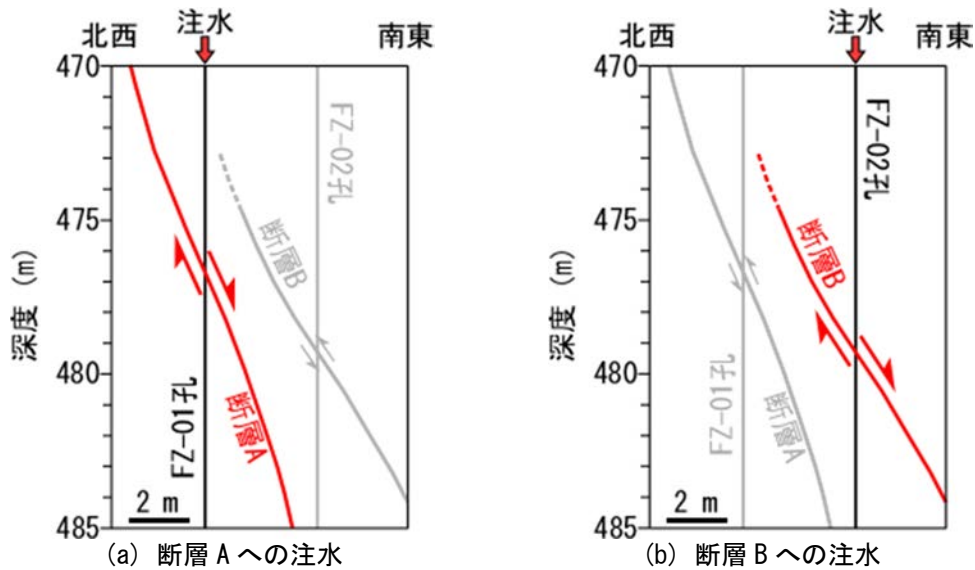


図 60 断層に注水した際に生じた断層沿いのずれの方向

断層 A は南東に、断層 B は南に傾斜しており、それぞれの断層に注水した際に断層の上盤側が下方にずれることが水圧擾乱試験で確認できました。

表 3 試験エリア（図 60）周辺で推定された地圧の状態

手法	鉛直方向の地圧、水平方向の最大および最小地圧の大きさの比
水圧擾乱試験	1.0 : 0.8 : 0.7 もしくは 1.0 : 0.9 : 0.7
地圧試験	1.0 : 0.9 : 0.7

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、このような領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。処分事業のサイト選定において、地層処分における閉鎖後長期の地質環境に求められる要件は、水理場の観点では、「地下水流動に伴う放射性物質の移行時間を増大させ、その間の放射性崩壊により移行率を低減させるため、動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことにより「地下水流動が緩慢である」とされており<sup>(28)</sup>、この研究課題で整備される技術は、これを評価する際に役立ちます。本研究課題においては、化石海水が存在するような地下水の動きが非常に遅い環境（以下、低流動域）を調査してモデル化する技術（三次元の分布図として示す技術）を実証することを目的としています。

本研究課題は、令和 4 年度まで、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<sup>(34)</sup>」を活用して取り組みました。その結果、幌延地域の地質環境を事例として、地上からの調査である物理探査とボーリング調査により低流動域の三次元分布を推定する手順を示しました。さらに、低流動域を総合的に理解する際に考慮すべき古水理地質学的変遷<sup>\*</sup>に関する因子を抽出するために、そのモデル化・解析手法の事例を示しました。

令和 5 年度は、これまでの成果に基づき、地層処分事業のサイト調査を踏まえて、低流動域の分布を推定する際の地上からの調査の進め方を検討しました<sup>(35)</sup>。化石海水は海水に由来することから、塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) 濃度が化石海水の存在を確認するひとつの指標として用いることが可能です。幌延地域の地質環境では、Cl<sup>-</sup>濃度は地下の比抵抗と強く相関するため<sup>(36)</sup>、電磁探査が化石海水の広がりやを推定する際の有効な調査です。地下水の Cl<sup>-</sup>濃度は、ボーリング調査における地下水採水とその化学分析によって取得されます。これら電磁探査とボーリング調査のデータを用いたクリギング（地球統計学的手法）により Cl<sup>-</sup>濃度の空間分布を予測することが可能であり、他の指標（例えば水の安定同位体比<sup>(37)</sup>）も考慮することにより、低流動域の分布を推定することが可能です。図 61 は既存情報に基づく数十 km 四方の調査範囲の設定から、数 km 四方の低流動域の三次元分布の推定までの手順を示しています<sup>(35)</sup>。数十 km 四方の調査に関しては、空中電磁探査<sup>\*</sup>によって、その探査深度は地下施設設置の深度に比べて浅い（約 150 m 程度）もの



の、調査範囲全域の三次元比抵抗分布を取得します。さらに、二次元側線の MT 法\*電磁探査で得られる深部の比抵抗分布により、深部の比抵抗分布を補足することができます (図 62)。これらの結果に基づき低流動域として推定できる低比抵抗領域が浅い深度に分布している範囲を抽出することで、調査範囲を数 km 四方に絞り込みます。数 km 四方の調査に関しては、AMT 法\*と MT 法を併用した高密度電磁探査<sup>(20)</sup>により取得される深度 1,500 m 程度までの三次元比抵抗分布に基づき、化石海水の広がり方を推定します。この妥当性をボーリング調査によって確認します。そして、これらの調査の取得データに基づく地球統計学的解析により低流動域の三次元分布を推定します。幌延地域の場合、数 km 四方の範囲に最低 2 地点のボーリング調査を実施することで、低流動域の三次元分布を推定可能です<sup>(9)</sup>。以上の検討には、令和 3 年度および令和 4 年度に幌延深地層研究センター周辺において実施した HFB-1 孔のボーリング調査のデータを用いており、これを研究開発報告書類としてまとめました<sup>(38)</sup>。

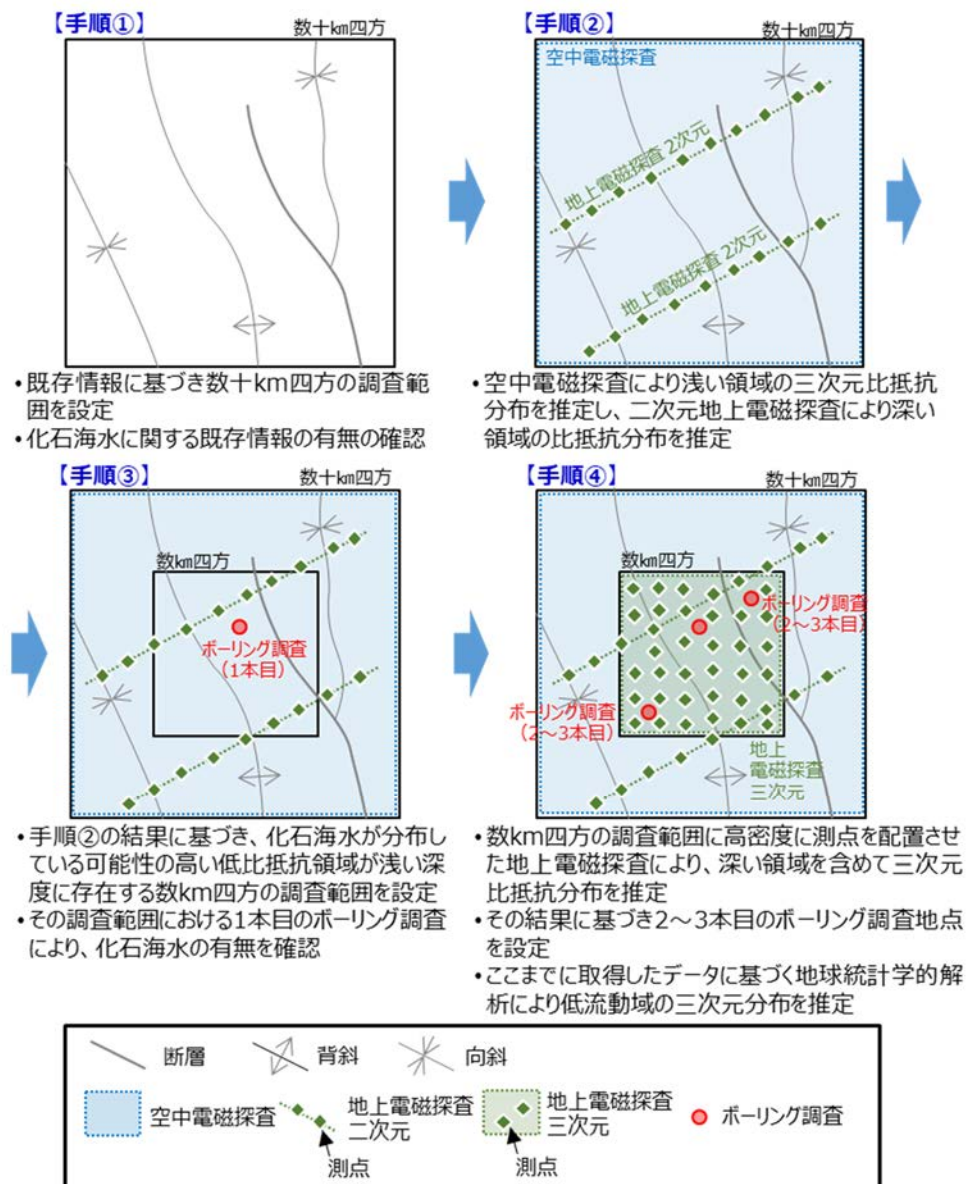


図 61 化石海水の三次元分布を推定するための電磁探査およびボーリング調査の手順<sup>(35)</sup>

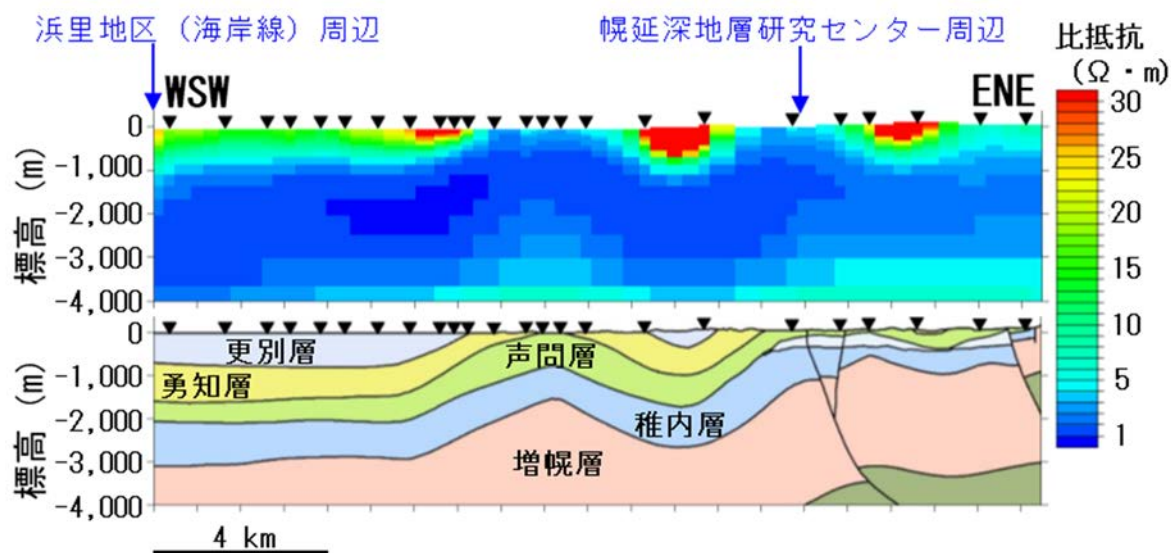


図 62 数十 km 四方の調査における二次元側線の MT 法電磁探査の結果の例  
 浜里地区と幌延深地層研究センター周辺を通過する西南西-東北東方向の二次元断面における比抵抗分布（上）と地質断面（下）を示しています。二次元比抵抗分布を求める解析には既存のデータ<sup>(39, 40)</sup>を使用しました。図中の黒三角は測点の位置を示しています。低比抵抗の領域を低流動域である可能性が高い領域として読み取ることにより、声問層や稚内層が地表付近に分布する褶曲の背斜周辺を数 km 四方の調査範囲として絞り込むことができます。

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すが、この調査の前提として、ボーリング調査では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非常に遅いことを確認する必要があります。令和 5 年度は、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する既往研究<sup>(41, 42, 43)</sup>に地下水の放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 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、論文として取りまとめました<sup>(44)</sup>。その結果によれば、天水が浸透した領域のうち浅部では最終氷期以降（後氷期：約 1 万年前以降）に浸透した天水が流動していること、深部では最終氷期に浸透した天水が現在は滞留していることが分かり、両者の流動状態の違いは最終氷期と後氷期での鉛直方向の動水勾配（地下水を動かす駆動力）の違いに起因すると考えられます（図 63）。

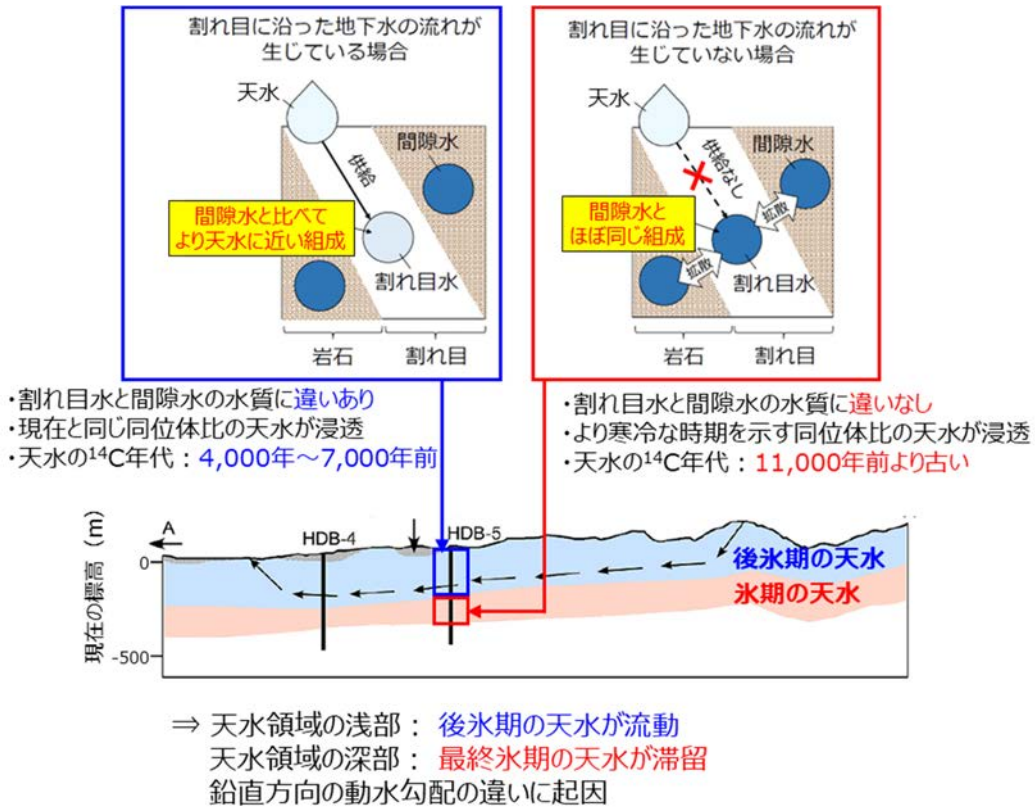


図 63 割れ目水と間隙水の水質の違いと地下水の<sup>14</sup>C年代に基づき解釈した地下水流動概念<sup>(44)</sup>

また、産業技術総合研究所との共同研究として、令和4年度に引き続き、海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証を目的とした海上からの物理探査と、調査孔を用いた地下温度測定を行いました。海上からの物理探査については令和4年度の実績に基づき探査手法を見直した上で、幌延町沿岸部の浅海域において令和4年度と同じ測線を中心に調査を実施しました。その結果、探査に用いる音波（弾性波）の発振源を調整することで、より深い領域である海底下約1,000 mまでの地下構造を把握することができました。これにより、これまで探査が困難であった浅海域の地下構造のより詳細な情報を入手することが可能となりました。また、深部の地下水流動解析結果の検証データを取得するために、浜里地区に設置されている調査孔の深度350 mまでの地下温度を測定しました。その結果、本測定により得られた地下温度プロファイルから、当該地域の地下深部の地下水の流れが非常に遅いことを確認することができました。この結果は、地下水流動解析の結果と整合しており、このことから、原位置データである地下温度プロファイルにより解析結果が妥当であることを確認できました。



## 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<sup>\*</sup>、化学組成などのデータの取得などについては、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要であることから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システムの設計・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることとなります。なお、処分システムの設計・施工手法や安全評価手法の信頼性を確認するために必要となるデータが取得できているかを含めて評価することが必要であるため、計測手法の妥当性を確認し、必要に応じて調査技術・機器の改良を行います。

### (1) 岩盤の水理

岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行っています（図4参照）。令和5年度は、地下施設近傍のHDB-6孔（図3参照）における水圧観測を継続しました。図64に、平成31年4月から令和6年3月までの水圧観測結果を示します。深度369mの観測区間における水圧の一時的な上昇（図64の①と②）は、令和4年度にも報告したように<sup>(9)</sup>、宗谷地方北部を震源とする地震（どちらも幌延町は震度4）に伴う水圧上昇です。令和元年の水圧上昇（図64の①）は約2年半で元の水圧に戻りましたが、令和4年の水圧上昇（図64の②）は約2年が経過した現在も低下を続けています。

令和5年度は、9月に東立坑の深度380m以深の掘削が再開されました（図64の③）が、深度380m以深は岩盤の透水性が低いため、この深度に坑道を掘削しても坑道内への地下水の湧水量は大きく増加しないと想定されます<sup>(45)</sup>。この想定に基づくと、HDB-6孔の各観測区間の水圧は、深度380m以深の坑道掘削の影響をほとんど受けないと予測されます<sup>(45)</sup>。令和5年度までの観測結果は、この予測と調和的です。今後も、坑道掘削による地質環境の変化を把握するため、水圧観測を継続します。

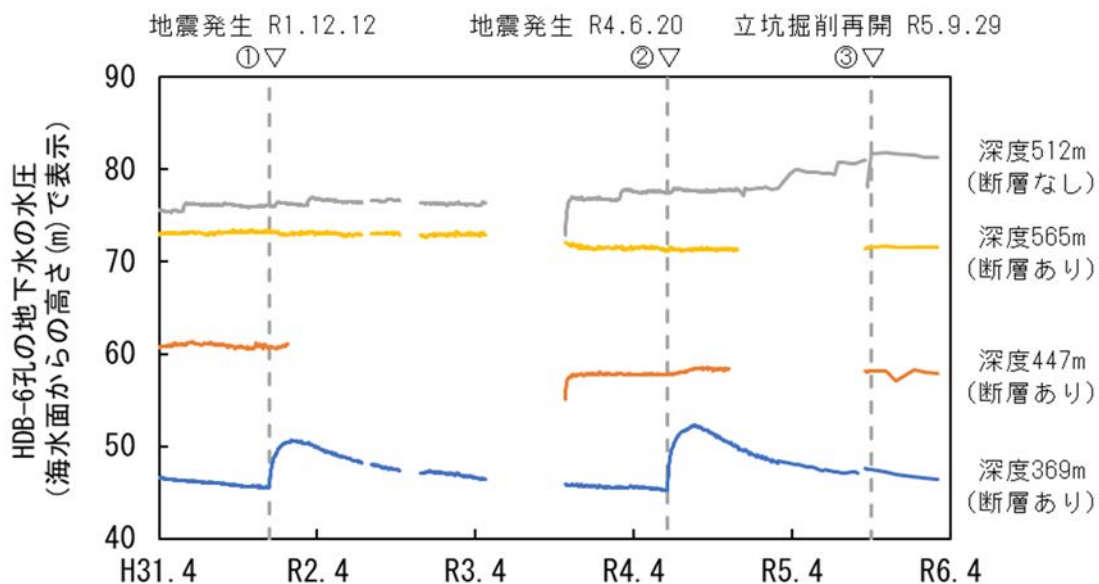


図 64 HDB-6 孔の水圧観測結果（平成 31 年 4 月～令和 6 年 3 月）  
水圧データが途切れている期間は、センサーの不具合によるデータの欠測期間です。

### (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、坑道内で採取した地下水の pH や電気伝導度<sup>\*</sup>、酸化還元電位などの物理化学パラメータ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 5 年度は、令和 4 年度に引き続き、地下施設の 3 本の立坑に設置された声問層および稚内層に位置する集水リング※や 140m、250m および 350m 調査坑道から掘削されたボーリング孔などから採取した地下水の溶存成分を分析しました。また、試験坑道 4（図 2 参照）にて実施している人工バリア性能確認試験で使用した注水試料と試験坑道 4 の壁面からわずかに染み出している地下水も分析しました。図 65 に集水リングとボーリング孔の位置を、図 66 に一例として 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔の塩化物イオン濃度の分析結果を示します。

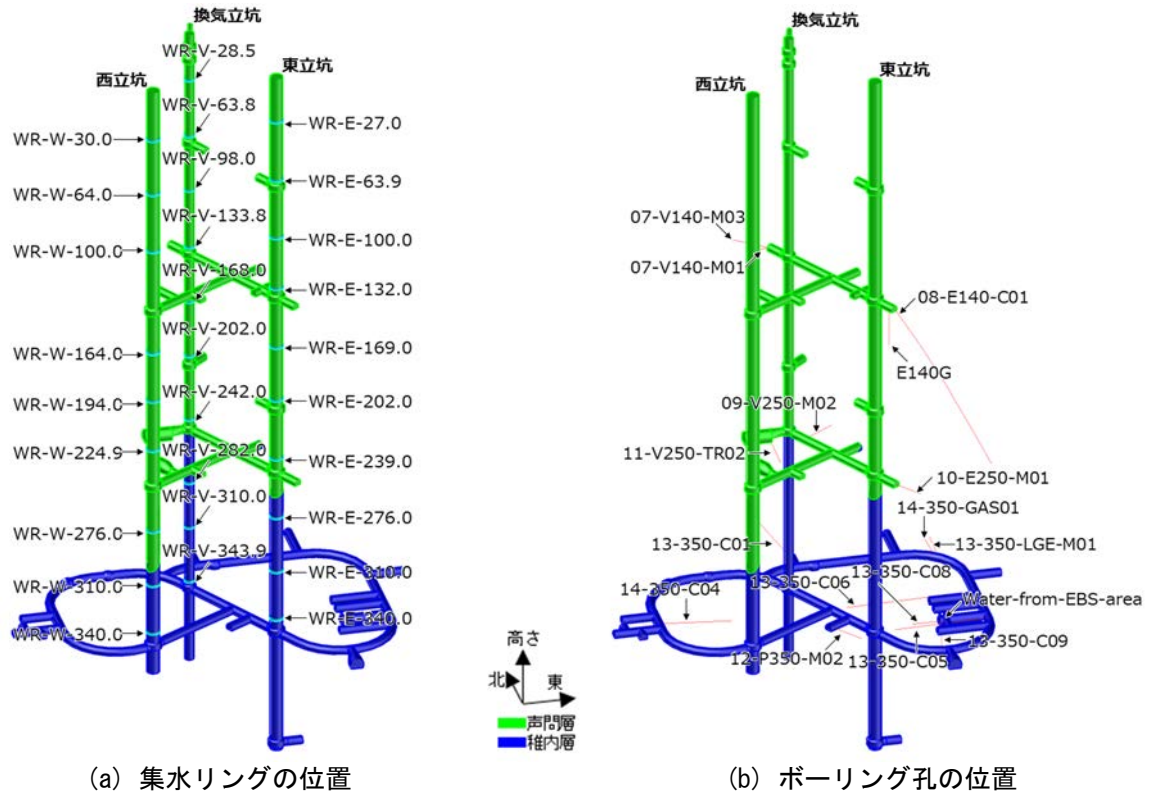


図 65 地下水の採取箇所

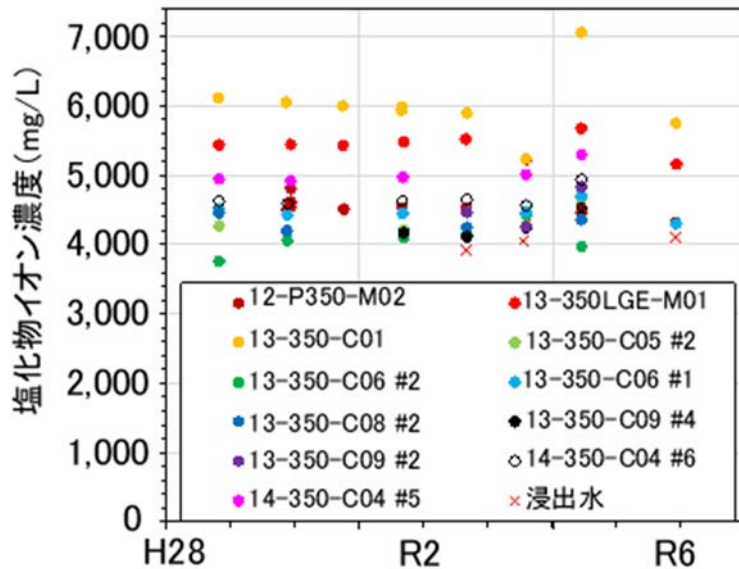


図 66 地下水の塩化物イオン濃度の経時変化の一例

350m 調査坑道のボーリング孔に関しては、試験坑道 1（図 2 参照）に位置する 13-350-C01 孔の地下水の塩化物イオン濃度が令和 3 年度と令和 4 年度に大きな増減があったものの、令和 5 年度には令和 2 年度より前に示していた濃度に近い値を示しました。試験坑道 1 では、令和 3 年度に人工バリアやプラグ、埋め戻し部の解体工事を行った<sup>(8)</sup>ことから、この工事による何らかの影響で水質変化が生じたものの、令和 5 年度にはその影響が小さくなった可能性があります。一方で、350m 調査坑道に位置する他のボーリング孔は、観測開始（平成 24 年度～平成 26 年度）から令和 5 年度まで塩化物イオン濃度の大きな変化は認められていません。

350m 調査坑道に設置した水圧・水質モニタリング装置を用いたモニタリングを、令和 5 年度も継続しました。装置の設置箇所を図 67 に示します。試験坑道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 における水圧モニタリングの結果を図 68 に示します。試験坑道 4 では、平成 26 年度に人工バリア性能確認試験における坑道の一部を埋め戻すとともにコンクリートプラグを設置し、平成 27 年度にコンクリートプラグ外周の岩盤に放射状にグラウトを注入しました（コンタクトグラウト）。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外周に注水を開始しており、急激な注水による緩衝材の流出現象<sup>\*</sup>などを避けるために、段階的に注水量を増加させています。これに伴い、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）の最浅部である区間 4（試験坑道 4 に最も近い区間）において水圧が上昇する傾向が確認されています。C08 の区間 4 では、注水量を大幅に増加させた平成 28 年 11 月と令和元年 12 月には、0.05 MPa 程度の水圧の上昇が確認されています。一方で、令和 2 年 7 月に、注水量を減少させた際には、同区間において、0.05 MPa 程度の水圧の減少が確認されています。令和 5 年度は、4 月から 5 月および 8 月から 9 月にかけて人工バリア内への注水圧を一時的に低下させており、同期間において区間 4 の水圧の変化が確認されました。

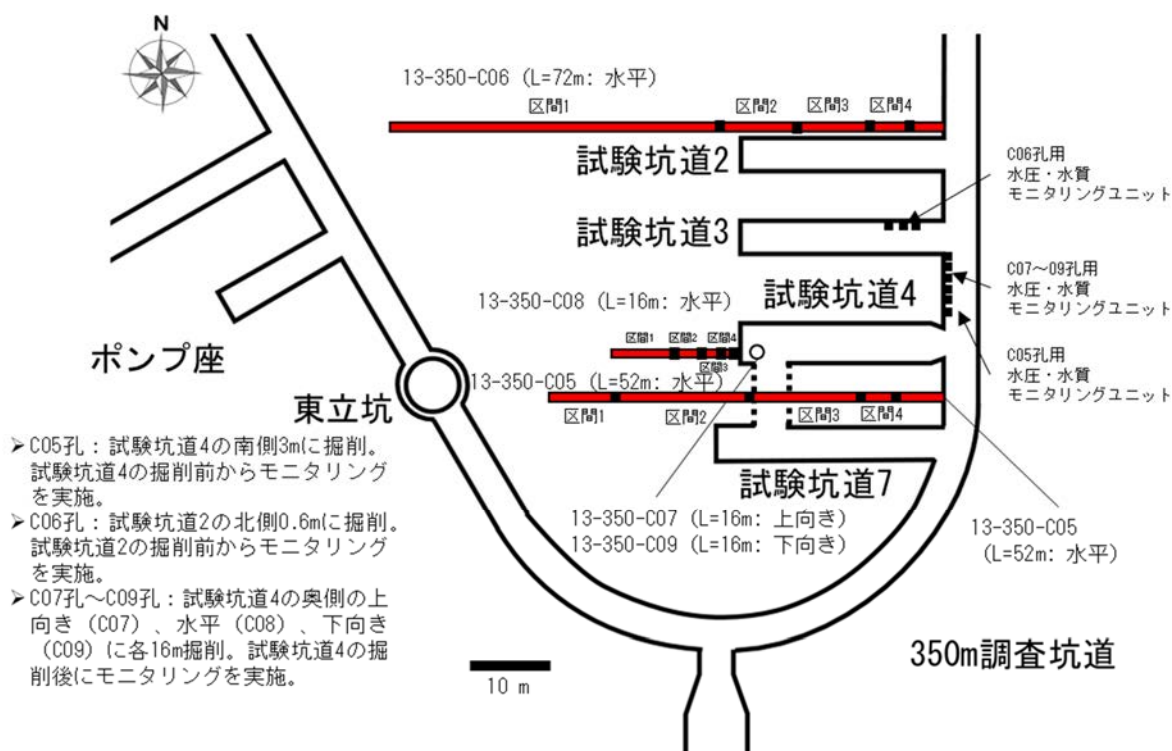


図 67 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

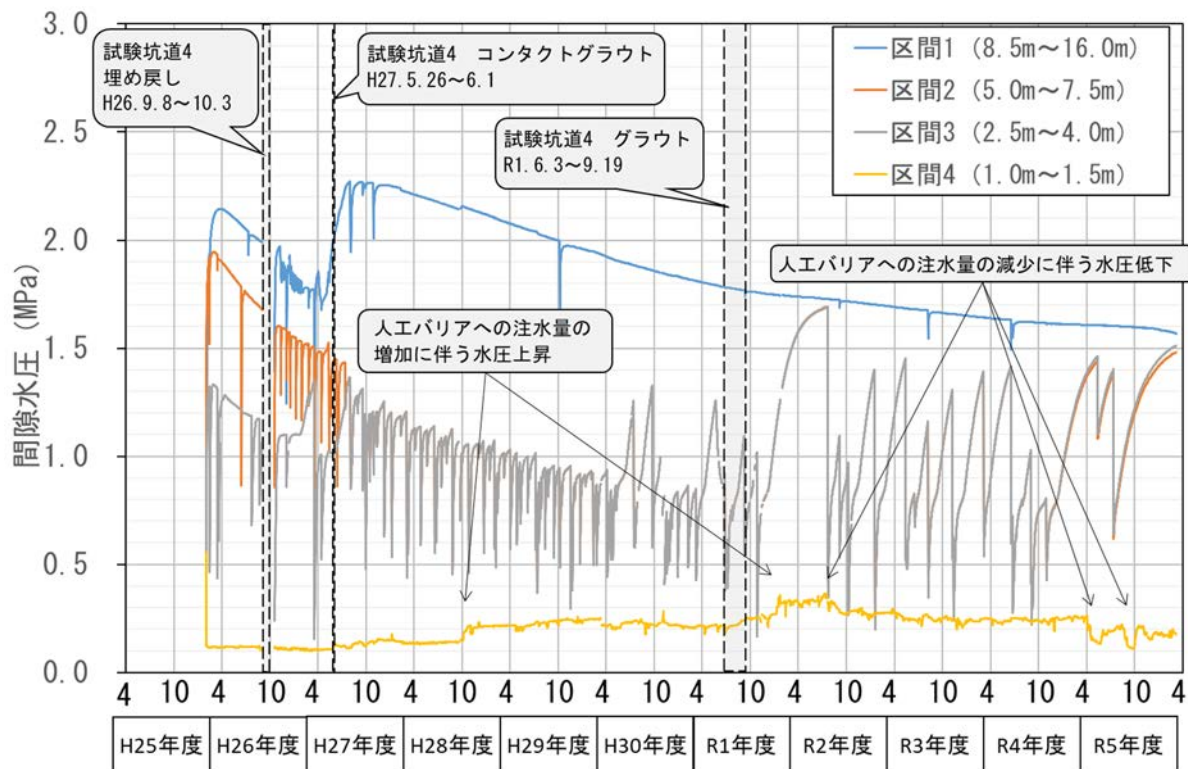
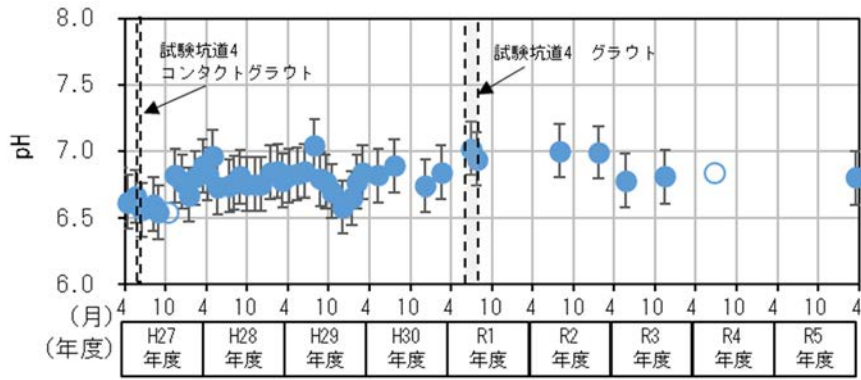


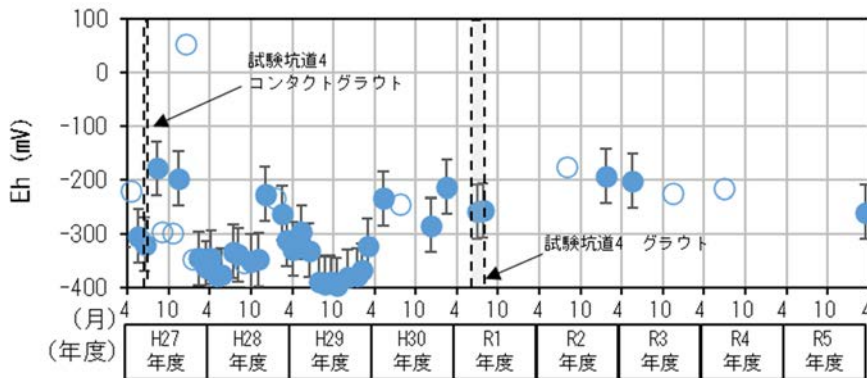
図 68 C08 における水圧モニタリング結果  
 水圧が急激に低下している箇所は、採水およびメンテナンスによる影響です。

試験坑道の掘削後、水圧の低下に伴い地下水中の溶存ガスが遊離した影響により、水質モニタリングの継続可能な箇所は限定されつつあります。図 69 に一例として、C08 の区間 2 における pH および酸化還元電位 (Eh) の観測結果を示します。C08 では、地下水の pH は 7 程度 (図 69(a))、酸化還元電位は -300 mV ~ -200 mV 程度でした (図 69(b))。これらの結果は、これまでの測定値と概ね同様の傾向を示しており<sup>(46)</sup>、試験坑道 4 周辺に分布する地下水の水質には顕著な変化は生じていません。なお、一部のデータで電極の劣化や表面への汚れ・気泡の付着、遊離ガスによる地下水循環の停止などの影響が示唆されました。これらのデータは、「信頼性が劣る可能性のあるデータ」として示しています (図 69 の○)。信頼性の高いデータを取得するために必要な観測装置の定期的なメンテナンスも継続して行いました。

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されます。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。



(a) pH



(b) 酸化還元電位

図 69 C08 の区間 2 における水質モニタリング結果

白抜きのデータ (○) は信頼性が劣る可能性のあるデータを示しています。

### (3) 岩盤力学

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、岩盤変位の長期モニタリング性能を検証しています。また、幌延の長期的な支保工の変形挙動の確認にあたっては、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<sup>(47)</sup>、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。それぞれの計測器の設置レイアウトを図 70 に示します。

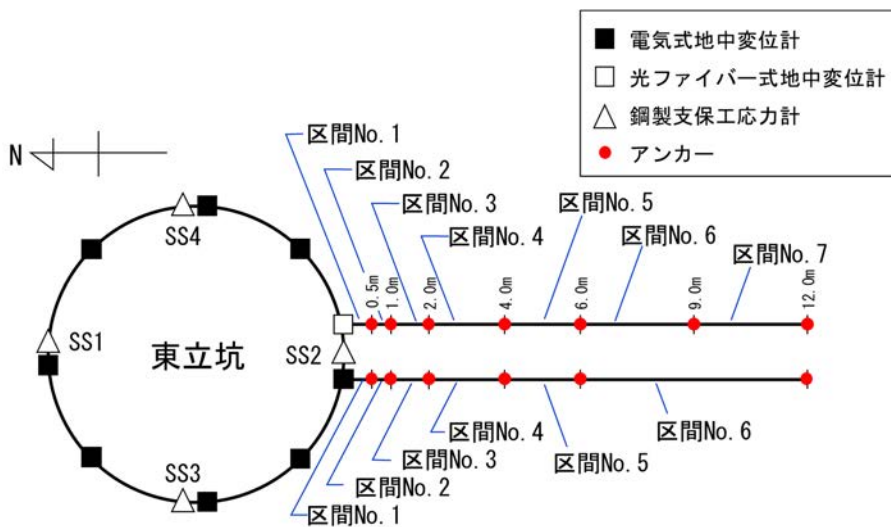


図 70 計測器設置位置図



地中変位の計測結果を図 71 に示します。計測器設置後約 15 年間の変位は、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、他の区間に比べて変位量が大きいことが分かります。また、区間 No.3 を除き変位量は小さいものの、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 程度変形した後、変位が収束していくことが分かります。図 72 に示す鋼製支保工応力計では、北側に位置する SS1 において約 155 MPa の値を示しており、他の計測点に比べ応力が大きいことが分かります。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、掘削後も SS2 の観測点を除き、全計測点で時間とともに応力が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。

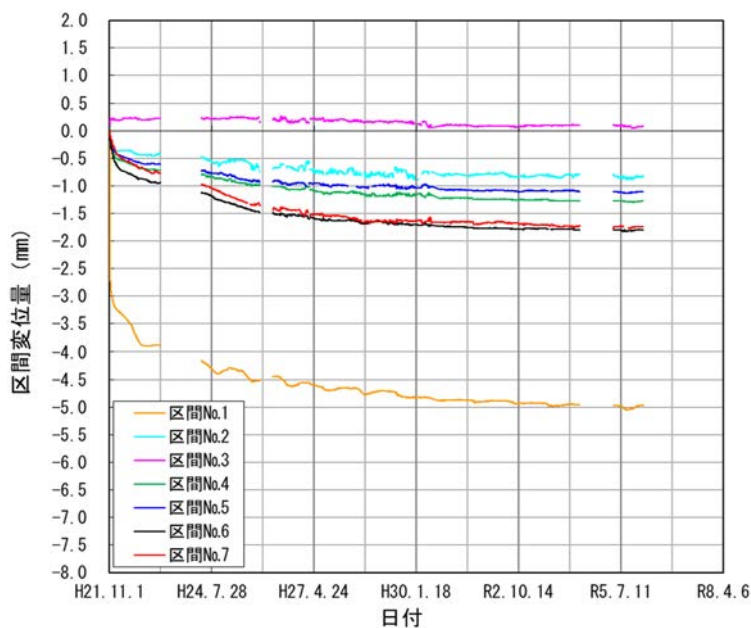


図 71 光ファイバー式地中変位計による計測結果

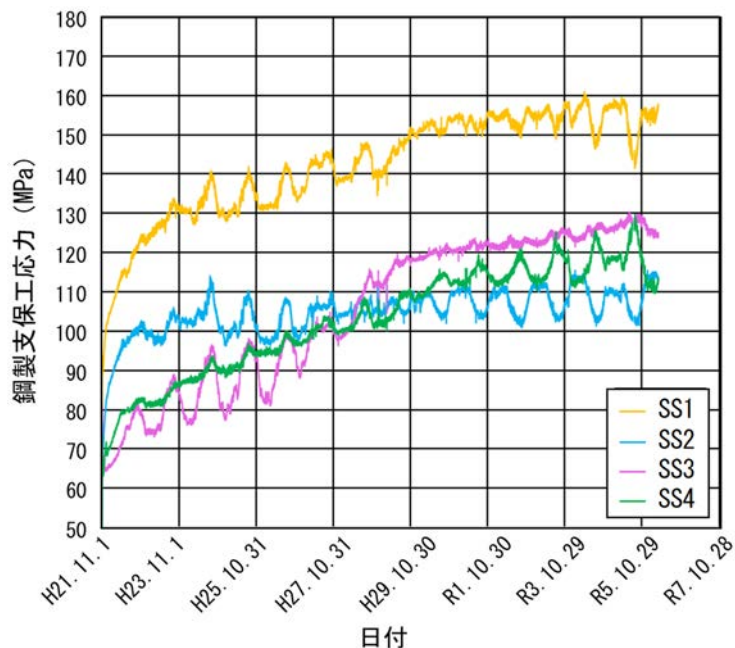


図 72 鋼製支保工応力計の計測結果

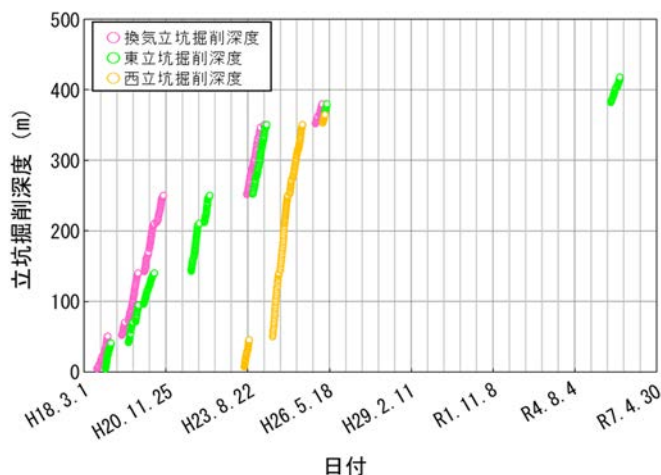
(4) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

地表面から坑道掘削時の地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺（換気立坑から半径 100 m 以内）に 9 台（図 3 参照）、東立坑の深度 140 m の接続部付近に 1 台、立坑周辺から 1 km 程度離れた HDB-8 孔近傍（図 4 参照）に 1 台の高精度傾斜計を配置し、坑道掘削に伴う地表付近における岩盤の傾斜の変化を計測しています。令和 5 年度も、過年度までと同様の方法<sup>(48)</sup>で計測データ（直交する 2 方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと坑道掘削時の工程との対比を行いました。

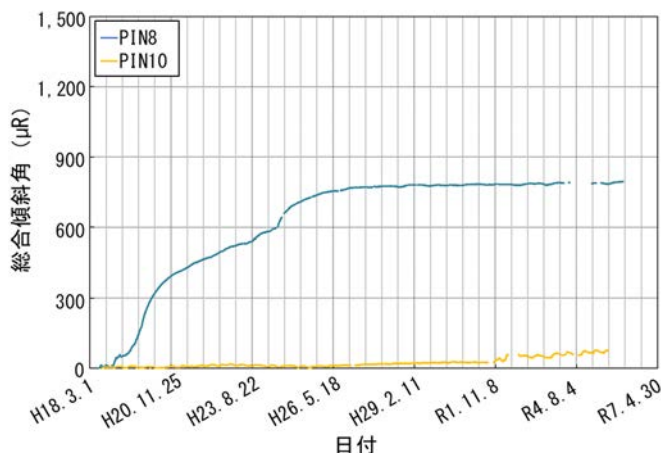
令和 5 年度は、350m 調査坑道の拡張および深度 500 m に向けた掘削工事が再開されましたが、全体的な傾向として、傾斜量は深度 350 m までの掘削時と比較してほとんど変化していないことが確認されました。立坑の掘削工程および PIN8（東立坑近傍）、PIN10（HDB-8 孔近傍）の傾斜量を図 73 に示します。

図 73(b)から、PIN8 では、令和 4 年度までの坑道掘削を行っていない維持管理期間に傾斜変化はほぼありませんでした。一方、PIN10 では、坑道掘削の有無に関わらず過去から現在に至るまで地表の傾斜はほとんど観測されていません。

これまでの計測データにより、掘削地点の近傍にある高精度傾斜計によって地下深部の坑道の掘削に伴う地表付近での微小な傾斜量やその傾斜方向が検知できることを確認しました。また、立坑から遠い場所や立坑の掘削深度が深くなると地表面近くの傾斜がほぼ生じない傾向も捉えられました。今後も引き続き傾斜量および傾斜方向のモニタリングを継続するとともに、地下深部の岩盤の挙動との関係性を詳細に検討していきます。



(a) 立坑の掘削工程



(b) PIN8 および PIN10 の傾斜量

縦軸の単位  $\mu R$ （マイクロラジアン）は角度の単位で、1,000  $\mu R$  が約  $0.06^\circ$  に相当します。

図 73 立坑の掘削工程と傾斜量の比較

(5) 地震観測

地下施設内の 4 台の地震計および地表の 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 5 年 4 月 1 日から令和 6 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 74 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 以上の地震は 6 回発生しました (表 4)。これらの地震は、全て宗谷地方北部を震源とする地震であり、幌延町では最大震度 2 を記録しました。図 75 にこれらの地震の震央を示し、地震の地下施設での観測波形を図 76 に示します。地震の波形データからは、地表に比べて地下では揺れ (震度) が小さくなっていることが分かります。

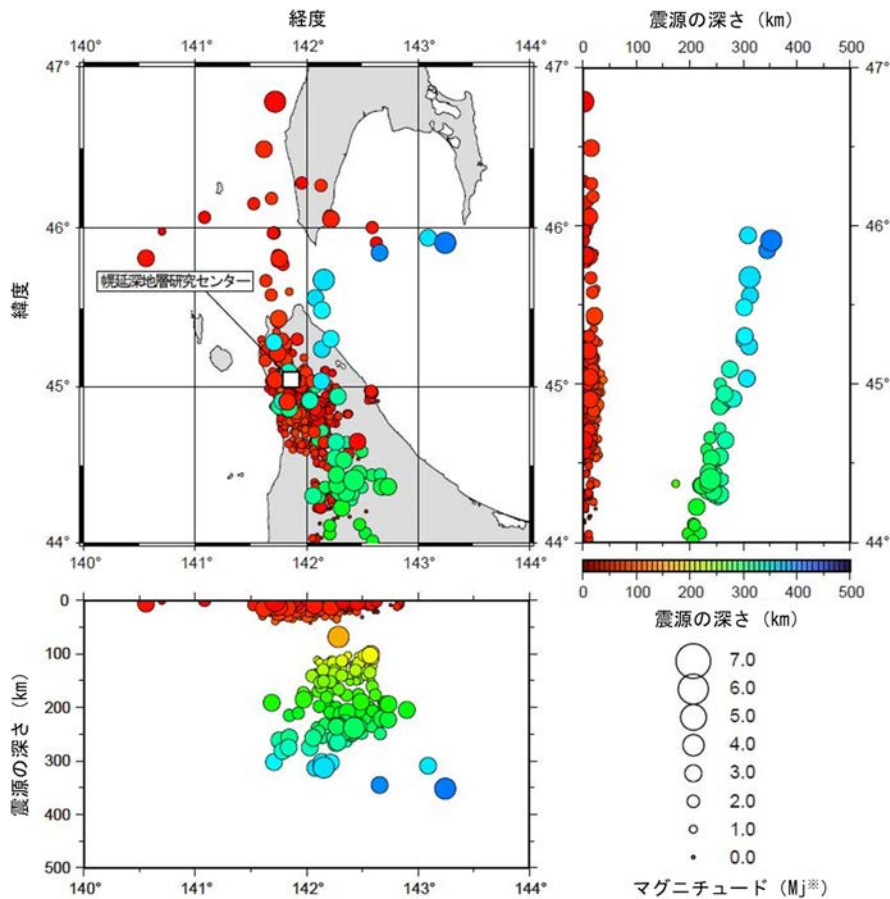


図 74 幌延深地層研究センター周辺で起きた地震の震央分布  
作図には GMT (Generic Mapping Tools) を使用しました。

表 4 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 5 年 8 月 12 日	23:30:28.1	宗谷地方北部	45° 03.3' N	141° 52.4' E	0	3.0	2	2
令和 5 年 8 月 13 日	09:38:24.2	宗谷地方北部	45° 03.2' N	141° 52.5' E	0	2.6	2	2
令和 5 年 8 月 24 日	10:59:44.1	宗谷地方北部	45° 02.8' N	141° 52.3' E	0	1.6	1	1
令和 5 年 11 月 5 日	07:15:47.5	宗谷地方北部	45° 00.0' N	141° 57.0' E	9	2.0	1	1
令和 6 年 1 月 11 日	17:31:47.7	宗谷地方北部	45° 02.2' N	141° 56.5' E	12	2.4	2	2
令和 6 年 1 月 16 日	20:13:49.3	宗谷地方北部	45° 02.6' N	141° 43.2' E	13	2.6	1	1

気象庁震度データベース検索より

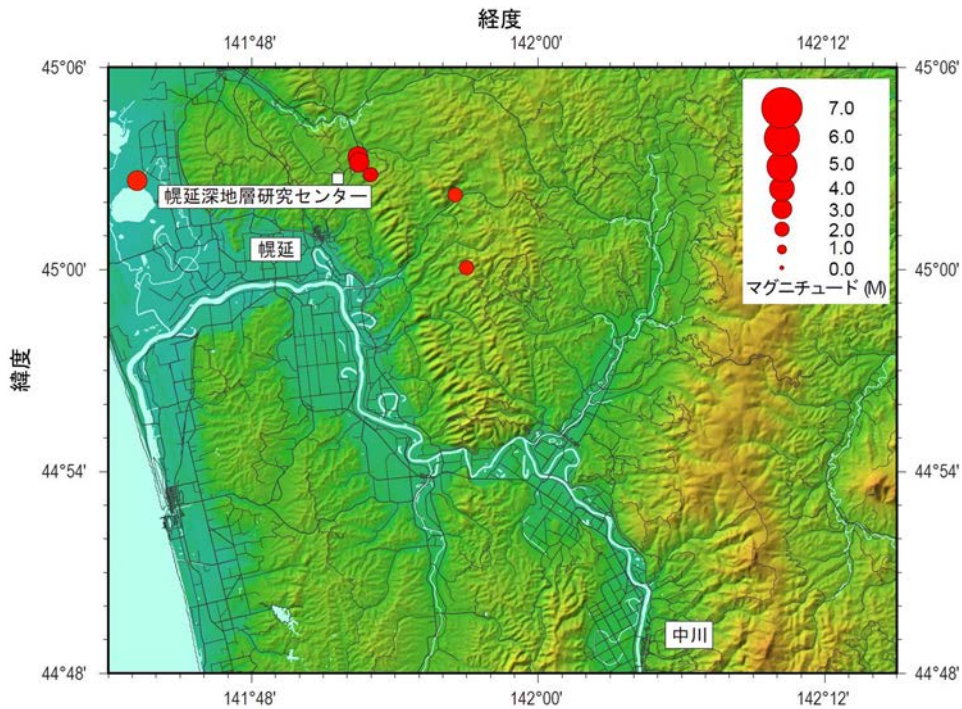


図 75 幌延町宮園で震度 1 以上を観測した地震の震央図

令和 5 年 4 月 1 日から令和 6 年 3 月 31 日までに発生した宗谷地方北部（幌延深地層研究センター周辺）の震央を示します。作図には GMT および地理院地図の識別標高図を使用しました。

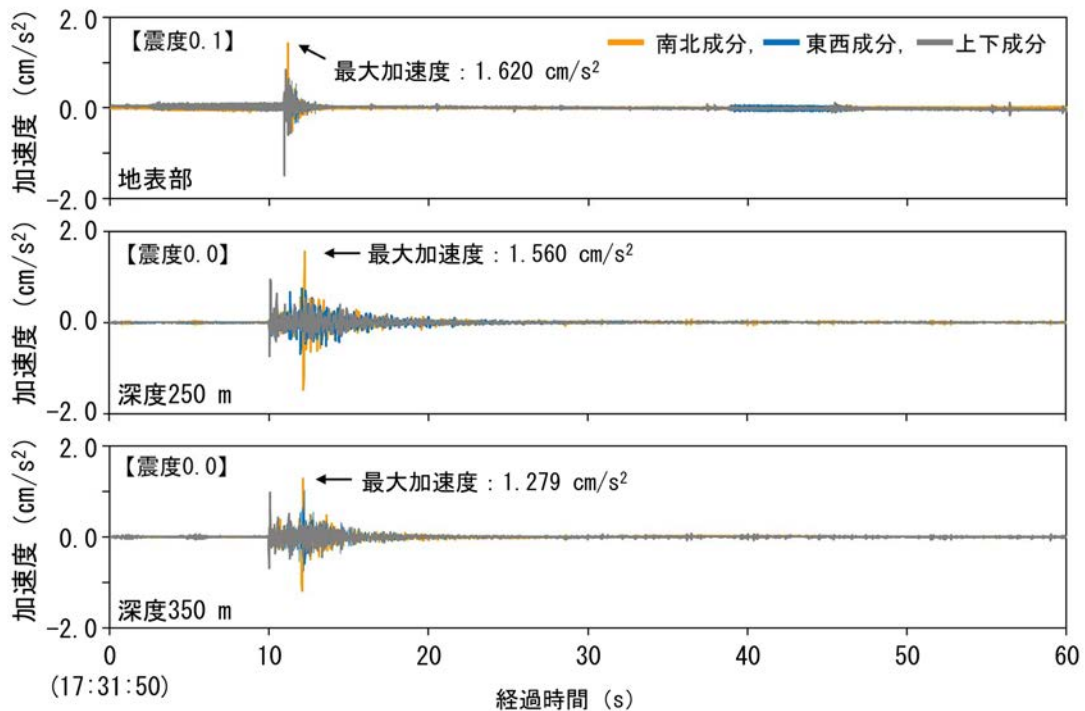


図 76 地表および地下施設で観測された地震の波形の例

令和 6 年 1 月 11 日 17:31:50 から 60 秒間の観測波形を示します。図中に記載の震度は気象庁の計測深度算出法により算出しました。



### 8. 地下施設の建設・維持管理

#### (1) 地下施設の整備

令和5年度は、PFI<sup>※</sup>契約による地下施設整備を再開し、表5に示すとおり、350m調査坑道の掘削、立坑の湧水対策および掘削を実施しました。350m調査坑道については、試験坑道6から掘削を開始し、試験坑道7、350m東立坑側第1ボーリング横坑と順次掘削を行い（図2参照）、予定した総延長66mの坑道整備を令和6年1月に完了しました。図77に試験坑道6（坑道延長25m）の整備完了の状況を示します。立坑については、掘削前に湧水を抑制するための湧水抑制対策を実施した後、排気管延長などの掘削準備を行い、深度500mに向け、東立坑および換気立坑の掘削に着手しました（図78）。令和6年3月31日現在の立坑の掘削深度は、東立坑で深度424m、換気立坑で深度393mです。なお、換気立坑の湧水抑制対策における先行ボーリング調査の結果、湧水や岩盤の割れ目などが新たに確認されたことから、全体工程の更新を行い（令和5年8月公表）、湧水抑制対策による改良範囲を拡充しました。更新後の工程については、改良範囲の拡充が必要となった換気立坑に替わり、東立坑から掘削を開始することとし、併せて施工方法などの見直しを行うことで、今後の工程への影響が最小限となるようにしました。また、東立坑掘削において、覆工コンクリートの打設高さを2mで計画しましたが、落石などに対する予防処置として1mごとにしたため、当初の工程から遅れが生じていますが、今後の工程での調整が可能であることから、施設整備の完了時期に影響は生じない予定です。

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（掘削箇所では岩盤が露出している部分）での防爆仕様<sup>※</sup>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5 地下施設整備の実績工程表（令和5年度）

	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
350m調査坑道	準備 掘削			仕上
換気立坑	湧水抑制対策			準備 掘削
東立坑	湧水抑制対策		準備 掘削	
西立坑				湧水抑制対策

■ 当初の工程（令和5年4月）、■ 更新後の工程（令和5年8月公表）、■ 実績



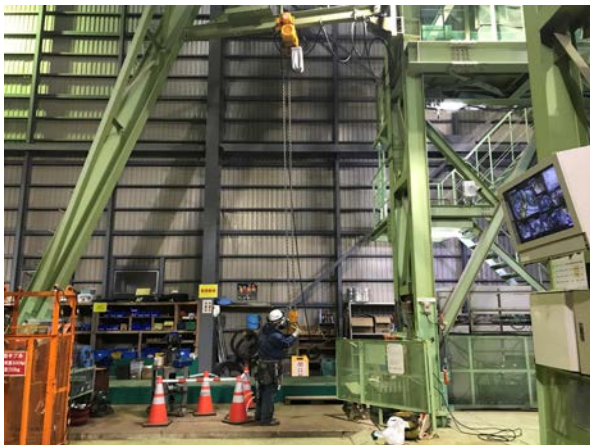
図 77 350m 調査坑道整備完了状況（試験坑道 6）



図 78 東立坑の掘削状況

## (2) 地下施設の維持管理

令和 5 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（濁水処理設備など）の更新を行いました（図 79）。



(a) 櫓設備の点検



(b) 濁水処理設備の更新

図 79 地下施設の維持管理状況

### (3) 掘削土（ズリ）の管理

坑道の掘削により発生する掘削土（ズリ）には、重金属などが含まれていますが、自然由来であることから土壤汚染対策法の適用外となっています。しかし、幌延深地層研究センターでは、周辺環境の保全に万全を期すため、土壤汚染対策法に準拠した管理を行っています。具体的には、掘削土（ズリ）の土壤溶出量が土壤汚染対策法に定める第2溶出量基準値を超過していないことを確認（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80）とした掘削土（ズリ）置場に搬入し、保管しています。

また、令和5年度は、掘削再開に伴う掘削土（ズリ）の増加に備え、搬入用道路の造成工事を併せて実施しました（図81）。

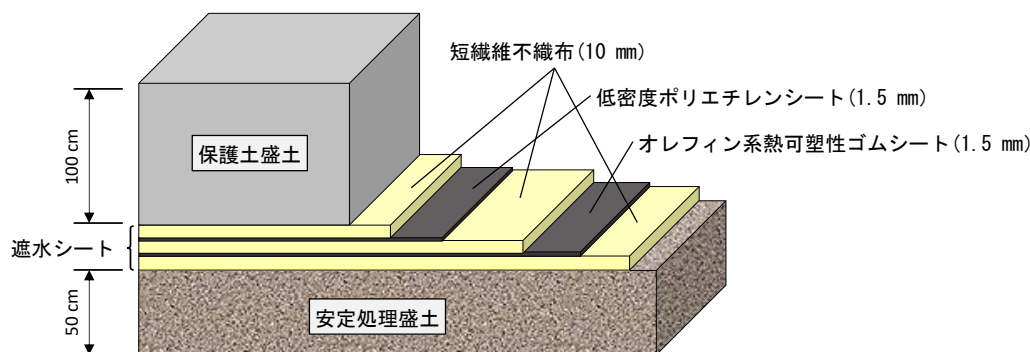


図 80 二重遮水シートの構造

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 81 掘削土（ズリ）置場搬入用道路の造成工事の様子

### (4) 排水の管理

地下施設からの排水と掘削土（ズリ）置場に設置している浸出水調整池の浸出水については、硝酸性窒素処理設備、濁水処理設備、脱ホウ素設備、脱窒素設備および揚水設備から構成される排水処理設備（図82）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 82 排水処理設備



## 9. 環境調査

令和 4 年度に引き続き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実施しました。

また、地下施設整備の再開に伴い、掘削土（ズリ）の土壌溶出量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 83 に示します。

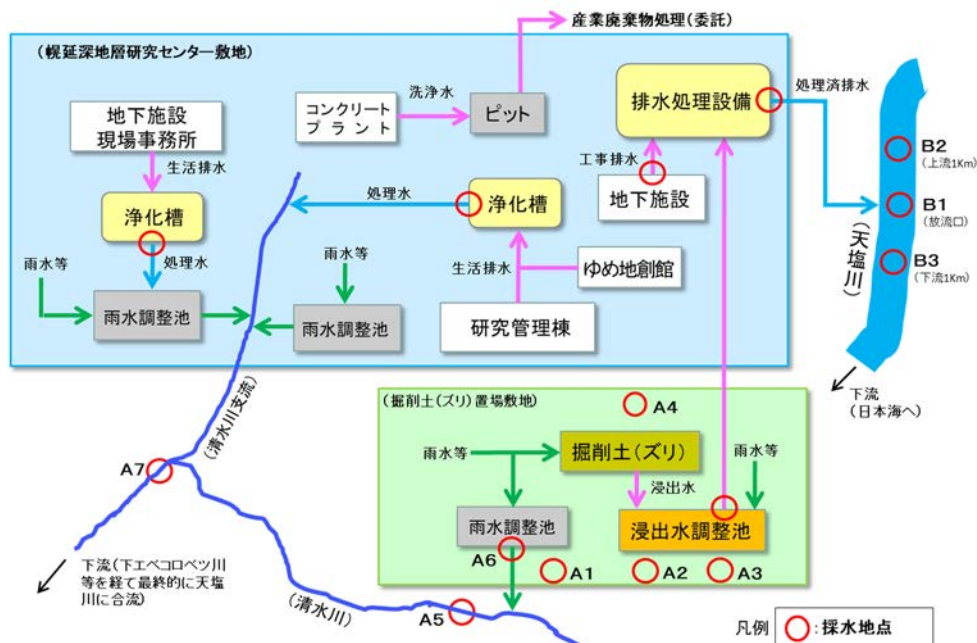


図 83 排水系統と各水質調査の採水地点

#### (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 5 年度における天塩川への排水量は表 6 に示すとおりです。合計排水量は、掘削工事再開に伴う工事用水の増加や降雨などの影響により、63,060 m<sup>3</sup> と前年度同時期（51,262 m<sup>3</sup>）の約 123%でした。日最大排水量は、降雨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 8 月の 502 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 8 月が最大であり、月排水量が 7,150 m<sup>3</sup>、日平均排水量が 230.6 m<sup>3</sup> でした。

表 6 天塩川への排水量

年月	月排水量 (m <sup>3</sup> )	日最大排水量 (m <sup>3</sup> ) 注1	日平均排水量 (m <sup>3</sup> ) 注2
令和5年4月	5,058	278	168.6
令和5年5月	3,992	248	128.8
令和5年6月	4,403	250	146.8
令和5年7月	5,181	349	167.1
令和5年8月	7,150	502	230.6
令和5年9月	6,692	361	223.1
令和5年10月	6,287	323	202.8
令和5年11月	5,910	375	197.0
令和5年12月	5,175	371	166.9
令和6年1月	3,899	345	125.8
令和6年2月	4,470	302	154.1
令和6年3月	4,843	304	156.2
合計	63,060	—	—
最大値	7,150 (8月)	502 (8月)	230.6 (8月)

注1：北るもい漁業協同組合との協定値は750 m<sup>3</sup>/日です。

注2：月排水量を各月の日数で除した値を示しています。

(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 84 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、貯留時に硝化菌の働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5年度における水質調査結果は、表7に示すとおりで、排水基準を超える処理済排水はありませんでした。また、「立坑の原水」における浮遊物質量が、過去最大となりましたが、掘削工事再開に伴う濁水の発生によるものであり、濁水処理設備において適切に処理が行われています。なお、「掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水」については、これまでの調査結果と同等でした。

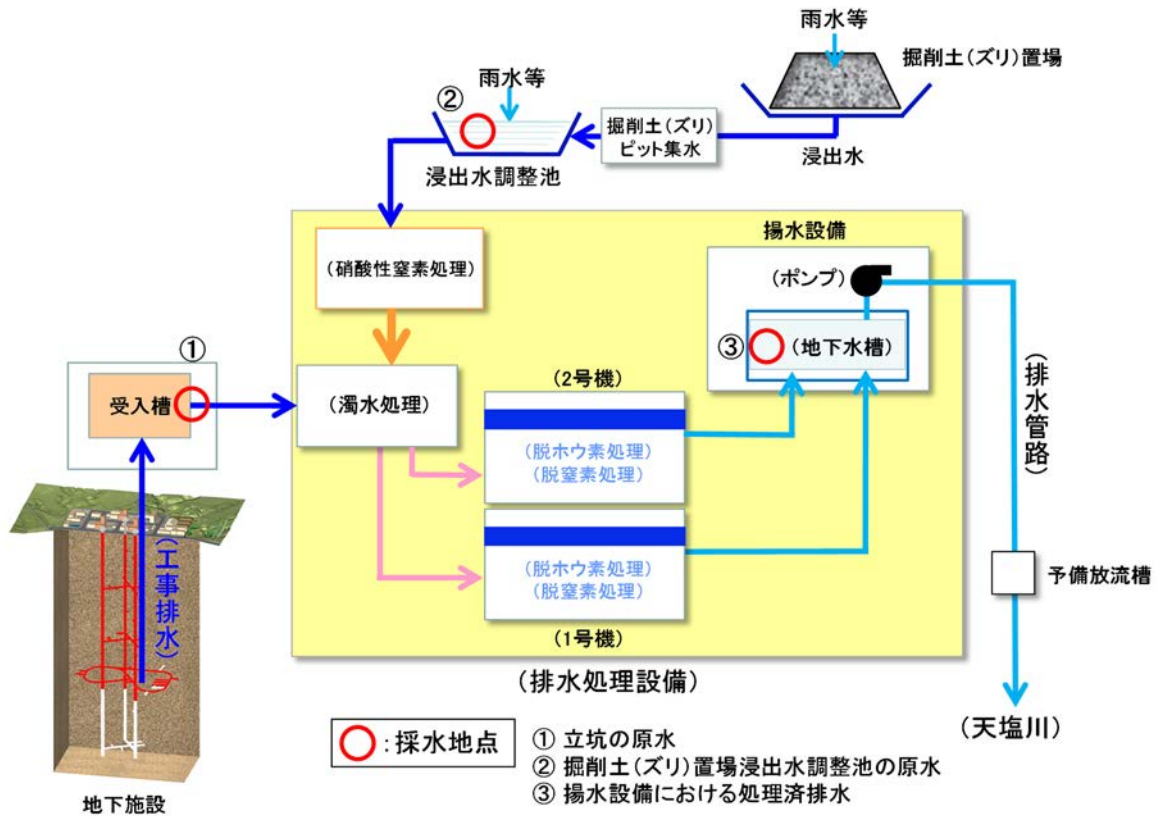


図 84 地下施設からの排水処理フローと水質調査の採水地点

表 7 地下施設からの排水に係る水質調査結果

分析項目 <sup>注1</sup>	採水地点 <sup>注2</sup>	過年度	令和4年度	令和5年度	(参考値) 水質汚濁防止法 排水基準
		平成18年12月 ～令和4年3月	令和4年4月 ～令和5年3月	令和5年4月 ～令和6年3月	
カドミウム <sup>注3</sup> (mg/L)	立坑の原水	<0.01	<0.003	<0.003	0.03
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.01	<0.003	<0.003～0.003	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.003	<0.003	
ヒ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.08	<0.01	<0.01～0.08	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	<0.01～0.01	<0.01～0.02	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01～0.01	
フッ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.8～3.5	<0.8	<0.8～2.2	8
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	<0.8	
	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	65～81	33～84	10
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	<0.1～37	2.3～5.8	2.0～6.3	
	揚水設備における処理済排水	<0.1～3.0	<0.1～0.8	<0.1～0.5	
全窒素 (mg/L)	立坑の原水	0.41～117	55～71	48～80	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	19～33	19～50	
	揚水設備における処理済排水	0.60～48	10～21	14～36	
全アンモニア (mg/L)	立坑の原水	0.12～110	38～60	22～63	—
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	0.12～22	0.14～1.1	0.11～1.3	
	揚水設備における処理済排水	<0.05～6.8	<0.05	<0.05	
pH	立坑の原水	7.5～9.5	8.1～8.3	8.1～8.8	5.8～8.6
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	6.7～8.7	7.3～8.3	7.2～7.9	
	揚水設備における処理済排水	6.9～8.6	7.4～8.0	6.7～7.8	
浮遊物質 (mg/L)	立坑の原水	4～580	3～78	430～6,400	200 (日間平均 150)
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	1～170	3～6	3～10	
	揚水設備における処理済排水	<1～9	<1	<1～1	
塩化物イオン (mg/L)	立坑の原水	20～4,300	2,900～3,700	1,700～4,000	—
	掘削土(ズリ)置場 浸出水調整池の原水	10～1,500	60～170	48～170	
	揚水設備における処理済排水	38～4,700	1,700～3,100	1,200～2,800	

注1：主な分析項目を抜粋しています。

注2：採水地点を図 84 に示します。

注3：カドミウムの定量下限値について、令和4年度より排水基準の1/10 (<0.003 mg/L) に見直しました。



(3) 天塩川の水質調査結果

地下施設からの排水の放流先である天塩川の採水地点（図 85）において、定期的（原則 1 回/月）に採水し（図 86）、水質調査を実施しています。

令和 5 年度における調査結果は、表 8 に示すとおりです。浮遊物質質について、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）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質は低い値（<1 mg/L）であり、放流口の上流側（B2）でも同程度の高い値を示していたことから、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 85 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 86 天塩川での採水状況（令和 5 年 4 月 5 日）

表 8 天塩川の水質調査結果

分析項目 <sup>注1</sup>	採水地点 <sup>注2</sup>		過年度		令和5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5年3月	令和5年4月 ～令和6年3月	
ホウ素 (mg/L)	B1	表層	<0.02~0.04	<0.01~0.35	0.01~0.08	5
		中層	—	<0.01~3.5	0.01~0.95	
		深層	<0.02~3.35	<0.01~4.9	0.01~4.5	
	B2	表層	<0.02~0.04	<0.01~0.27	0.01~0.03	
		中層	—	<0.01~3.7	0.01~1.1	
		深層	<0.02~3.28	<0.01~5.0	0.01~4.4	
	B3	表層	<0.02~0.07	<0.01~0.28	0.01~0.10	
		中層	—	<0.01~2.5	0.01~0.95	
		深層	<0.02~1.03	<0.01~5.0	0.01~3.8	
全窒素 (mg/L)	B1	表層	0.37~1.06	0.11~2.2	0.32~1.7	20
		中層	—	0.15~2.2	0.31~1.4	
		深層	0.42~1.50	0.15~6.5	0.30~0.78	
	B2	表層	0.37~1.14	0.14~2.2	0.32~1.8	
		中層	—	0.15~2.3	0.33~1.5	
		深層	0.4~1.16	0.16~2.3	0.31~0.78	
	B3	表層	0.4~1.31	0.16~2.2	0.30~1.7	
		中層	—	0.11~2.3	0.32~1.4	
		深層	0.49~1.24	0.16~2.3	0.32~0.76	
全アンモニア (mg/L)	B1	表層	—	<0.05~0.83	<0.05~0.08	2 <sup>注3</sup>
		中層	—	<0.05~0.92	<0.05~0.08	
		深層	—	<0.05~0.85	<0.05~0.07	
	B2	表層	<0.01~0.13	<0.05~0.89	<0.05~0.09	
		中層	—	<0.05~0.76	<0.05~0.09	
		深層	0.01~0.35	<0.05~0.85	<0.05~0.08	
	B3	表層	0.01~0.21	<0.05~0.89	<0.05~0.09	
		中層	—	<0.05~0.90	<0.05~0.09	
		深層	0.02~0.17	<0.05~0.96	<0.05~0.09	
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	6.9~7.5	
		深層	7.0~7.6	6.5~8.0	6.8~7.7	
	B2	表層	7.1~7.4	6.3~7.9	6.9~7.6	
		中層	—	6.4~7.9	6.9~7.6	
		深層	7.2~7.6	6.5~8.0	6.9~7.7	
	B3	表層	7.0~7.6	6.6~7.9	7.0~7.7	
		中層	—	6.6~7.7	7.0~7.4	
		深層	7.1~7.4	6.6~8.1	7.0~7.7	
浮遊物質 (mg/L)	B1	表層	3~34	<1~360	<1~110	20
		中層	—	<1~390	<1~110	
		深層	6~86	<1~400	<1~110	
	B2	表層	3~36	<1~390	1~110	
		中層	—	<1~400	<1~110	
		深層	5~47	<1~460	<1~120	
	B3	表層	3~35	<1~420	<1~110	
		中層	—	<1~460	<1~130	
		深層	5~49	<1~650	<1~130	

注1：主な分析項目を抜粋しています。

注2：採水地点を図 85 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：川床上 1 m 付近、です。

注3：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。

(4) 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）は、二重に遮水された掘削土（ズリ）置場で管理していますが（8.(3)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 87 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 88）、水質調査を実施しています。

令和 5 年度における調査結果は、表 9 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。

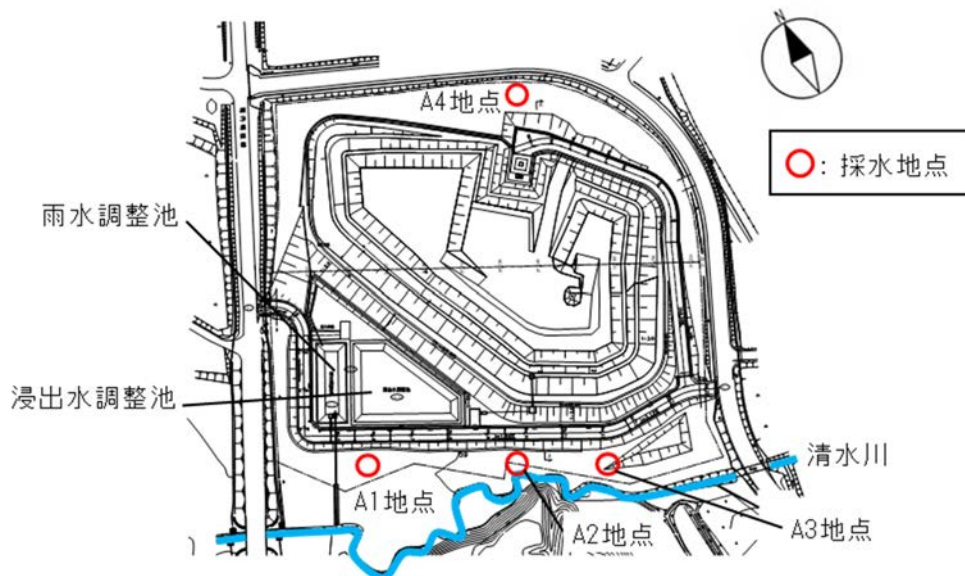


図 87 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点



(a) 採水状況（令和 5 年 5 月 8 日）



(b) 採水状況（令和 5 年 7 月 31 日）

図 88 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況

表 9 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

分析項目 <sup>注1</sup>	採水地点 <sup>注2</sup>	過年度		令和5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5年2月	令和5年			令和6年
				5月	8月	11月	2月
カドミウム <sup>注3</sup> (mg/L)	A1	<0.001～0.001	<0.001	<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	<0.001	<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	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	A4	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
セレン (mg/L)	A1	<0.002	<0.002～0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A2	<0.002	<0.002～0.003	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A3	<0.002	<0.002～0.005	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
	A4	<0.002	<0.002～0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
フッ素 (mg/L)	A1	<0.1～0.3	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	0.2	0.2
	A2	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A3	<0.1～0.2	<0.1～0.3	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
	A4	<0.1	<0.1～0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A1	19.8～50.7	0.40～63.0	20	7.1	18	18
	A2	1.29～43.5	0.43～37.0	20	8.3	26	18
	A3	12.5～34.0	0.18～41.8	11	4.0	8.6	11
	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	6.8	6.6	6.5
	A2	4.6～6.3	3.7～6.9	6.7	6.9	6.9	6.9
	A3	6.8～7.3	4.2～7.4	6.6	6.7	6.5	6.7
	A4	5.4～6.6	5.0～6.7	5.1	5.2	5.2	5.1
塩化物イオン (mg/L)	A1	1,810～2,760	79～3,400	1,200	1,700	1,200	1,000
	A2	147～2,910	23～2,200	1,000	1,500	1,400	1,400
	A3	631～1,550	26～1,700	470	610	450	680
	A4	9.7～11.9	8.4～17.0	12	10	9.8	10

注1：主な分析項目を抜粋しています。

注2：採水地点を図 87 に示します。

注3：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）置場雨水調整池による清水川への影響がないことを確認するため、図 89 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 90）、水質調査を実施しています。

令和5年度における調査結果は、表 10 に示すとおりです。清水川上流（A5）の浮遊物質質量が、



これまでに比べて高い値（9月：130 mg/L）でしたが、同日における掘削土（ズリ）置場雨水調整池（A6）の値は18 mg/Lであり、降雨などの自然要因と考えられます。その他の調査項目については、これまでの調査結果の範囲内であり、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 89 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点



(a) 採水状況（令和5年4月4日）



(b) 採水状況（令和5年5月9日）

図 90 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水状況

表 10 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

分析項目 <sup>注1</sup>	採水地点 <sup>注2</sup>	過年度		令和5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5年3月	令和5年4月 ～令和6年3月
カドミウム <sup>注3</sup> (mg/L)	A5	<0.001	<0.001	<0.0003
	A6	<0.001～0.001	<0.0003～0.002	<0.0003
	A7	<0.001	<0.001	<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
	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	<0.1～0.2
	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	0.03～0.38
	A6	<0.02～0.09	<0.02～0.64	0.02～0.41
	A7	0.03～0.30	<0.02～0.55	0.04～0.38
pH	A5	6.4～7.1	6.0～7.9	6.0～7.4
	A6	5.8～7.4	5.7～9.1	6.6～8.9
	A7	6.5～7.0	6.1～7.8	6.3～7.3
浮遊物質量 (mg/L)	A5	1～20	<1～66	1～130
	A6	12～173	<1～500	<1～38
	A7	1～11	<1～270	1～100
塩化物イオン (mg/L)	A5	14.4～30.5	7.2～70	10～43
	A6	5.1～24.7	1.3～269	3.6～29
	A7	15.6～28.7	8.1～100	9.8～40

注1：主な分析項目を抜粋しています。

注2：採水地点を図 89 に示します。

注3：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5年度における水質調査結果は、表11に示すとおり、全ての項目において協定値の範囲内でした。

表 11 浄化槽排水の水質調査結果

分析項目	採水地点	過年度	令和5年度	北るもい 漁業協同組合 協定値
		平成18年12月 ～令和5年3月	令和5年4月 ～令和6年3月	
pH	研究管理棟	5.9～7.7	6.2～7.4	5.8～8.6
	地下施設現場事務所	6.8～8.0	7.5～7.9	
生物化学的 酸素要求量 (mg/L)	研究管理棟	<0.5～17	0.7～11	20
	地下施設現場事務所	<0.2～28	0.8～11	
浮遊物質量 (mg/L)	研究管理棟	<1～10	<1～7	20
	地下施設現場事務所	<0.5～8	<1～7	
全窒素 (mg/L)	研究管理棟	6.6～52	8.7～42	60
	地下施設現場事務所	0.2～45	0.3～7.8	
全リン (mg/L)	研究管理棟	0.5～5.0	0.8～3.7	8
	地下施設現場事務所	<0.1～7.8	<0.1～0.7	
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	3,000
	地下施設現場事務所	0～2,100	0～1,000	

## 9.2 掘削土（ズリ）の土壤溶出量調査結果

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壤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壤溶出量が土壤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5年度に掘削を行った東立坑の分析結果は、表12に示すとおりであり、全ての項目において、土壤汚染対策法の第2溶出量基準値以下でした。

表 12 掘削土（ズリ）の土壤溶出量調査結果

分析項目	立坑	平成 18 年 3 月 ～ 平成 26 年 5 月	令和 5 年度 <sup>注1</sup> (東立坑)	参考値 <sup>注2</sup> (土壤汚染対策法)	
				溶出量 基準値	第2溶出量 基準値
ホウ素 (mg/L)	換気立坑	0.1～10	—	1	30
	東立坑	<0.1～10	4.4		
	西立坑	0.1～12	—		
ヒ素 (mg/L)	換気立坑	0.005～0.067	—	0.01	0.3
	東立坑	<0.001～0.058	0.045		
	西立坑	0.004～0.055	—		
フッ素 (mg/L)	換気立坑	<0.08～0.41	—	0.8	24
	東立坑	<0.08～0.19	0.18		
	西立坑	<0.08～0.38	—		
セレン (mg/L)	換気立坑	0.004～0.031	—	0.01	0.3
	東立坑	<0.001～0.027	0.011		
	西立坑	0.004～0.027	—		
カドミウム <sup>注3</sup> (mg/L)	換気立坑	<0.001	—	0.003	0.09
	東立坑	<0.001	<0.0003		
	西立坑	<0.001～0.10	—		
鉛 (mg/L)	換気立坑	<0.001～0.006	—	0.01	0.3
	東立坑	<0.001～0.007	0.001		
	西立坑	0.002～0.014	—		
シアン (mg/L)	換気立坑	<0.1	—	検出され ないこと	1
	東立坑	<0.1	<0.1		
	西立坑	<0.1	—		
六価クロム (mg/L)	換気立坑	<0.005	—	0.05	1.5
	東立坑	<0.005	<0.05		
	西立坑	<0.005	—		
水銀 (mg/L)	換気立坑	<0.0005	—	0.0005	0.005
	東立坑	<0.0005	<0.0005		
	西立坑	<0.0005	—		
アルキル 水銀(mg/L)	換気立坑	<0.0005	—	検出され ないこと	検出され ないこと
	東立坑	<0.0005	<0.0005		
	西立坑	<0.0005	—		

注 1：令和 5 年度については掘削工事を行った東立坑の掘削土（ズリ）について実施しました。

注 2：土壤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 3：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。

### 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 91 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。



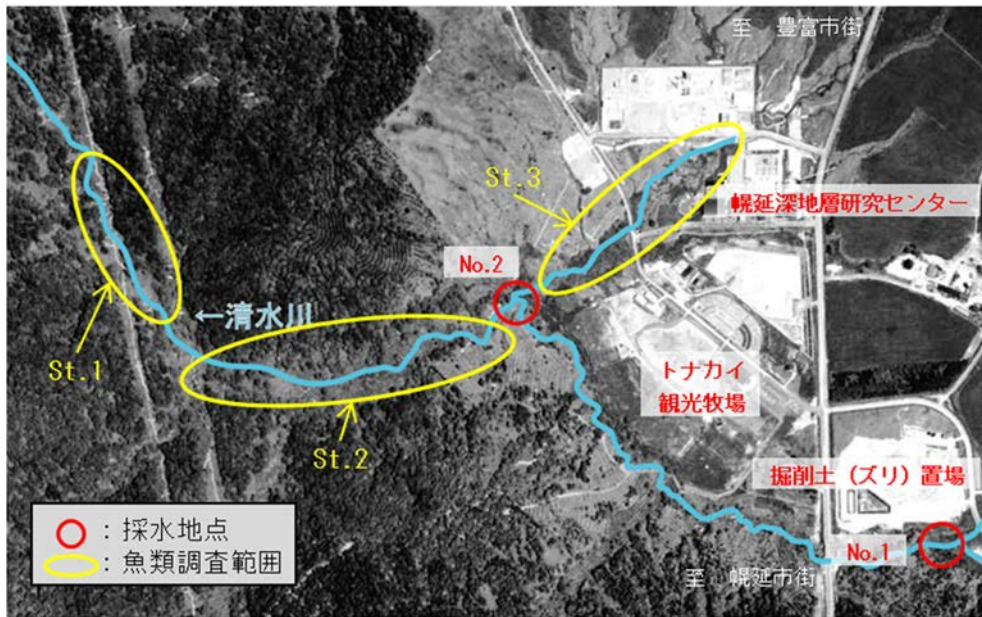


図 91 環境調査実施場所

(1) 清水川の水質調査結果

清水川の 2 地点 (図 91 の No.1、No.2) において、定期的 (原則 4 回/年) に採水を行い (図 92)、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 5 年度における調査結果は、表 13 に示すとおりです。9 月の浮遊物質量について、これまでに比べて高い値 (No.1 : 80 mg/L、No.2 : 110 mg/L) となりましたが、降雨などの自然要因と考えられます。



図 92 清水川からの採水状況 (令和 5 年 6 月 1 日)

表 13 清水川の水質調査結果

分析項目 <sup>注1</sup>	採水地点 <sup>注2</sup>	過年度	令和5年度			
		平成14年8月 ～令和5年2月	令和5年			令和6年
			6月	9月	11月	2月
pH	No.1	6.3～7.9	7.8	6.0	7.2	7.3
	No.2	6.4～7.7	7.3	6.2	7.2	7.1
生物化学的酸素要求量 (mg/L)	No.1	<0.5～62	1.5	1.8	1.2	0.8
	No.2	<0.5～10	6.1	5.3	4.9	4.1
浮遊物質量 (mg/L)	No.1	1～70	3	80	3	3
	No.2	<1～69	2	110	5	5
溶存酸素量 (mg/L)	No.1	5.8～13.9	8.7	7.0	10.2	12.6
	No.2	5.3～12.5	5.7	7.1	8.1	9.8

注1：主な分析項目を抜粋しています。

注2：採水地点を図91に示します。

(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93）。調査は、図91に示すSt.1、St.2、St.3の3箇所で行っています。

令和5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14に示すとおり、スナヤツメ北方種、ヤチウグイ、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7種が確認されました。



(a) 採捕状況



(b) 採捕魚類の一例

図93 生息魚類調査（令和5年8月31日）

表 14 確認された重要種（魚類）

目	科	種	選定根拠 <sup>注</sup>						
			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	ヤチウグイ			NT	Nt			
		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
- 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

## 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評価を実施し、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 94）。

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、安全意識の高揚に努めました（図 95）。



図 94 安全パトロールの状況（令和 5 年 6 月 16 日）



図 95 安全行事の実施（安全大会：令和 5 年 7 月 3 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5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

坑道壁面における地質観察の効率化を目的として、人工知能による画像処理技術を適用して坑道壁面画像から地質情報を取得する方法について検討しました。令和4年度には、過年度に換気立坑で取得した坑道壁面画像（写真）と壁面観察による割れ目スケッチを用いて、坑道壁面の画像から割れ目スケッチを生成する方法として pix2pix<sup>(49)</sup>の適用を試み、その問題点を整理しました。令和5年度は、坑道壁面画像から割れ目スケッチへの生成精度を向上させるために、その問題点を踏まえて学習データを拡充・改良しました。その結果、坑道壁面で観察される小断層やトレース長の長い割れ目について、スケッチの生成精度を向上させることができました。一方、坑道壁面画像だけから、トレース長の短い割れ目も含め、全ての割れ目のスケッチを生成することには限界があることも分かりました。今後は学習データの改良だけでなく、坑道壁面画像以外のデータの活用も視野に、スケッチの生成精度の向上のための検討を継続します。

#### 東京大学

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ロピウム（Eu）を添加する消光実験を行ってきており、令和5年度はこれまでの成果を取りまとめました。得られた実験結果を用いた多変量解析により、Euは浅部地下水に見られる陸性腐植物質の特徴を示す溶存有機物と高い親和性を示す一方で、深部の化石海中に見られる海洋性腐植物質の特徴を示す溶存有機物とは低い親和性を示すことが分かりました<sup>(44, 50, 51)</sup>。さらに高分解能質量分析計を用いて、地下水から抽出された天然有機物の質量分布を取得し、これまでに得られたEuとの結合性の知見と合わせて、結合反応に寄与する天然有機物の分子的特徴を明らかにすることに取り組みました<sup>(52)</sup>。

また、非常にゆっくりとした地下水の流動を考える場合には、割れ目のみでなく健岩部も水みちとして重要になる可能性があります。健岩部における地下水の移動は、岩盤中の物質移行に対する遅延効果が大きいと、健岩部の寄与を評価する手法の開発が重要となります。そこで、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3年度から令和4年度にかけて地上から深度500mまでボーリング孔を掘削する際に、粒径約1μm以下の蛍光染料を掘削水に添加することで、コア試料に対する掘削水の汚染評価に取り組んできました<sup>(34, 38)</sup>。令和5年度は、深度約500mから採取した、肉眼では割れ目の認められない稚内層のコア試料に対して、これまでに整備した薄片試料の作製方法や顕微鏡による自動連続観察手法、赤外顕微鏡による微生物存在度の判定手法などの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、掘削水による汚染はコア試料の微小亀裂部表面からコア試料内部に向かって約6mmの深さまでしか及んでおらず、観察のためのコア試料の切断箇所などの微小亀裂以外の箇所には掘削水による汚染は認められませんでした。このことから、掘削水により汚染されていないコア試料内部に認められた微小亀裂内に分布する微生物は、地下深部の原位置に存在する微生物であると判断されます。

## 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<sup>\*</sup>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 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) 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  $\text{Ca}^{2+}$  と、地下水中の  $\text{Ca}^{2+}$  および重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) との反応により形成される炭酸カルシウムが、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 5 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令和 4 年度よりも低下し、 $10^{-7}$  m/s 程度の値を示すことが確認されました。

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。中性化の機能を持たせたコンクリーション化剤と掘削土 (ズリ) の混合物を充填した容器に通水する室内試験を令和 4 年度に引き続いて実施しました。また、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に着手しました。

## 京都大学

水質形成機能のモデル構築および数値解析に関する共同研究を実施しました。高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全性を確保するためのひとつの要件として、長期的に地下水流動が緩慢であることを示すために、水理学的な指標のみではなく、化学的な指標から地下水水質の形成プロセスを把握し、それに基づいた地下水流動状態の理解が試みられています。幌延町には海成堆積岩が広く分布し、地下深部には海水が変質した化石海水が分布しています。本研究では、地層の堆積時の圧密排水による間隙水の上方移動や鉱物の相変化といった堆積過程を模擬した一次元のモデリングにより、地下水の塩化物イオン濃度と酸素同位体比および水素同位体比の時空間変化を推定することで、本地域に分布する化石海水の水質形成メカニズムについて検討してきました。令和 5 年度は、これまでの成果を取りまとめ学術雑誌に発表しました<sup>(53)</sup>。本地域の化石海水の水質は、地層の埋没に伴う温度上昇により生じる生物起源シリカや粘土鉱物の脱水反応による塩濃度の希釈や、圧密排水による間隙水の上方移動により形成されたものであることが分かりました。このことは、本地域の地下深部に分布する地下水が、海水と比較して塩濃度の低い場合であっても、天水浸透により希釈されたものではなく、地層の埋没時に取り込まれた海水が変質して形成された化石海水であることを示しており、地層の隆起以降はほとんど地下水が動いていないことを示す結果になります。

## 京都大学、東北大学

高レベル放射性廃棄物に含まれる長半減期核種であるマイナーアクチノイド<sup>\*</sup>は天然には存在しないため、堆積岩地域の地下深部におけるマイナーアクチノイドの挙動を理解するためには、マイナーアクチノイドと挙動が似ているランタノイド<sup>\*</sup>の挙動を調べるのが有効になります。本研究ではこれまでに、ランタノイドであるランタン、サマリウム、ユウロピウム、ホルミウムなど微量元素の地下水試料への添加試験を行ってきました。令和 5 年度は、原位置物質移行試験の結果に対して、マイナーアクチノイド元素と地下深部の岩石、地下水試料を用いた室内拡散試験の結果を組み合わせることで地下環境での核種移行を明らかにすることをねらいとした室内拡散試験に取り組みました。岩石試料には既存のボーリングから得られた稚内層のコア試料を用い、溶液試料には幌延の深部地下水組成を模擬して調製した試料溶液を用いました。本試験の初年度である令和 5 年度は、重水やリチウムといった比較的単純な化学挙動を取る物質の拡散試験を実施しました。これらの結果を積み重ね、次年度以降の室内試験ではランタノイドに加え、原位置試験では使用できないウラン、トリウム、ネプツニウム、アメリシウムなどのアクチノイドを用いて、還元雰囲気における堆積岩中のアクチノイドの拡散挙動に対する地下水のイオン強度や

pH、有機物濃度、溶存炭酸濃度の影響を明らかにすることに取り組みます。

#### 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として、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 5 年度は、250m 調査坑道の既存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グルコース（ブドウ糖）を炭素源として水素を生成することが分かりました。この結果から、地下水中に存在するメタン生成古細菌は、新規微生物が生成した水素もしくは低分子有機物を用いてメタンを生成している可能性が分かりました<sup>(54, 55)</sup>。また、2 回の研究交流会を実施し、深度 350 m とは異なる深度 500 m の岩盤における微生物特性や力学特性などの情報を得ることに両機関が協力していくことについて議論しました。

#### 産業技術総合研究所

海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化を目的として、令和 4 年度に引き続き、海上からの物理探査と、調査孔を用いた地下温度測定を行いました。海上からの物理探査については令和 4 年度の実績に基づき探査手法を見直した上で、幌延町沿岸部の浅海域において令和 4 年度と同じ測線を中心に調査を実施しました。その結果、探査に用いる音波（弾性波）の発振源を調整することで、より深い領域である海底下約 1,000 m までの地下構造を把握することができました。これにより、これまで探査が困難であった浅海域の地下構造のより詳細な情報を入手できることが確認できました。また、深部の地下水流動解析結果の検証データを取得するために、浜里地区に設置されている調査孔の深度 350 m までの地下温度を測定しました。その結果、本測定により得られた地下温度プロファイルから、当該地域の地下深部の地下水の流れが非常に遅いことを確認することができました。この結果は、地下水流動解析の結果と整合しており、解析結果が妥当であることを確認できました。

#### 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<sup>\*</sup>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 5 年度は、立坑掘削時に採取した試料を用いて、岩盤中のラドンの濃度を測定するための室内試験の準備を行いました。

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バック（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 5 年度は、250m 調査坑道から掘削され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。地下環境で 12 か月間反応させた結果、圧縮ベントナイトの乾燥密度が  $1.0 \text{ g/cm}^3$  の場合には炭素鋼片の重量の減少が最も大きく、乾燥密度  $1.4 \text{ g/cm}^3$  以上では腐食が抑制されていることが確認できました。また、腐食速度は時間とともに低下する傾向があることが示唆されました。今後も引き続き腐食影響試験を継続し、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。

#### 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 5 年度は、350m 調査坑道の掘削時に計測した坑道の変形（内空変位）のデータを用いて、地下施設を含む広域的な初期地圧の状態を逆解析的



に推定しました。推定結果は、地上からの調査により推定された地圧状態に整合的でした。この成果を、500m 調査坑道掘削前の応力状態の予測の更新や、地下施設の設計時に推定した初期地圧の信頼性向上に資する情報として整理しました。

原子力規制庁（原子力機構 安全研究センターが実施する共同研究への協力）

地下坑道掘削後の湧水量の自然低下速度について、350m 調査坑道沿いの流量計測結果を基に、岩盤中の割れ目の水理学的連結性を考慮した自然低下速度のシミュレーションが長期的な湧水量の自然低下速度の予測手法として適用可能か検証しました。その結果、掘削から 10 年が経過した現在の自然低下速度は、シミュレーション結果の値と同程度またはそれ以上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<sup>\*</sup>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 5 年度は、東立坑の深度 380 m 以深の掘削に伴う変化の有無について観測を行いました。深度 370 m 付近の立坑周辺の掘削損傷領域の拡大は生じていないことが分かりました。

深田地質研究所、東京大学（原子力機構 東濃地科学センターが実施する共同研究への協力）

断層の地表分布位置および物質移動経路に関する情報を取得する調査手法として、地表地質調査や物理探査に加えてガス濃度に関する情報を取得する調査手法があります。断層の地表部において微量なガスの湧出が見られることがあり、この湧出ガスを検出することにより、断層分布に関する情報が得られます。近年、ガス濃度測定技術の大幅な向上により、従来測定技術では検出することができなかった小さな変化まで迅速に検出することが可能になっています。本研究では、地表から特定することが困難な伏在断層や地下水の水みちの検出精度の向上を目的として、新たなガス濃度測定技術の適用性の検討を行っています。

令和 5 年度は、高精度メタン測定装置を用いて、これまでに高濃度メタンガスが検出された背斜軸上などの検出箇所における再現性を確認しました。また、地中レーダー探査と呼ばれる簡易な物理探査により、高濃度メタンガスが検出された地点における地下の地層の構造を明らかにすることで、背斜軸上でも限定された箇所でのみ高濃度メタンガスが検出されるメカニズムを検討しました。本研究は、日本学術振興会の運営する科学研究費助成事業、基盤研究(C)「高分解能ガス濃度マッピングによる亀裂・断層を移行する流体の新しい調査手法の構築」の助成を受けて実施しています。

## 11.2 国際機関との研究協力

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

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

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

タスク A：物質移行試験

タスク B：処分技術の実証と体系化

タスク C：実規模の人工バリアシステム解体試験

令和 5 年 7 月 21 日に、協定書の内容に基本合意していた国内外の 11 機関全ての署名が確認されました。令和 6 年 3 月 31 日現在の参加機関とその参加タスクを表 15 に示します。

令和 5 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、参加機関が原位置試験の状況を把握するために、幌延深地層研究センターで現地会合を実施しました。なお、令和 5 年度に実施した成果と参加機関との協力の概要は下記のとおりです。

令和 6 年 3 月 6 日に実施した第 2 回管理委員会では、これらのタスクの成果を報告し、令和 5 年 4 月の第 1 回管理委員会で承認された計画に基づいて適切に研究が進められたことが承認されました。



表 15 HIP 参加機関

参加機関（令和 6 年 3 月 31 日現在）	参加タスク		
	A	B	C
連邦放射性廃棄物機関（BGE、ドイツ） <sup>*16</sup>	○	○	○
英国地質調査所（BGS、英国） <sup>*17</sup>	○	○	○
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） <sup>*18</sup>	○	○	○
工業技術研究院（ITRI、台湾） <sup>*19</sup>	○	—	—
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） <sup>*20</sup>	○	○	○
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） <sup>*21</sup>	○	—	—
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） <sup>*22</sup>	○	○	○

タスク A：物質移行試験

250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 2 参照）で実施する、声間層に見られるせん断性の割れ目を対象とした物質移行試験の基本計画や試験実施場所の地質特性などの既存情報を整理しました。それを踏まえ、物質移行試験に使用するトレーサーの選定や、水理試験の計画について検討し、水理地質構造に関する情報を取得しました。また、物質移行試験の解析環境整備のために、過去の物質移行試験結果の解析に着手しました。さらに、試験実施場所から採取した岩石を用いた室内試験に向けて、試料の共有や室内試験の準備を行いました。

タスク B：処分技術の実証と体系化

500m 調査坑道において想定される割れ目や断層の分布や坑道掘削時の湧水量、掘削損傷領域の発達状況を予測に資するために、既存の調査結果や関連文献の情報収集、整理を行うとともに、湧水量や掘削損傷領域の予測解析に向けた準備を行いました。また、試験坑道 6（図 2 参照）において予定されている止水プラグの設置に先立ち、掘削損傷領域の発達状況や透水性の把握のための調査を実施するとともに、埋め戻し材の材料仕様選定に向けた室内試験を実施しました。

\*16：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。

\*17：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。

\*18：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。

\*19：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。

\*20：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。

\*21：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。

\*22：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。

タスク C：実規模の人工バリアシステム解体試験

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、取得したデータなどを基に解体試験の詳細化に向けた議論を実施しました。

DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments)

国際共同研究 DECOVALEX は、地層処分環境における熱－水理－力学－化学連成現象の理解および評価モデルの検証を目的に実施されています。令和 2 年度からは DECOVALEX-2023 (令和 2 年度～令和 5 年度) が実施されており、このフェーズではタスクのひとつとして、人工バリア性能確認試験を対象とした共同解析を実施しています。

モンテリ・プロジェクト<sup>\*23</sup> (スイス)

国際共同研究のモンテリ・プロジェクトで実施されている各種試験のうち、原子力機構は「オパリナス粘土<sup>\*</sup>の摩擦特性に関する室内試験」に参加してきましたが、当該試験が終了したことおよびその成果を活用した断層の動きの評価技術を整備できたこと<sup>(31)</sup>から、令和 5 年 6 月のフェーズの切り替え時をもって、モンテリ・プロジェクトへの参加を終了しました。

クレイクラブ (Clay Club) <sup>\*24</sup>

クレイクラブでは各国の参加機関との情報交換を通じて、国外における堆積岩類を対象とした調査研究や技術開発などに係る最新の情報を取得しました。

---

\*23：堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際的な原位置試験プロジェクトです。スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。

\*24：Clay Clubは、OECD/NEA (経済協力開発機構/原子力機関) の放射性廃棄物管理委員会の下に置かれたプロジェクトのひとつです。地層処分の実施・規制・研究機関を中心とした組織であり、様々な粘土質媒体の特性の比較や粘土の物性や挙動および地下施設で実施される試験に関する技術的かつ科学的情報の交換、さらには、サイト特性調査技術の詳細な評価を実施しています。

## 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。

## AMT 法

AMT (Audio-frequency Magnetotelluric) 法は、太陽の黒点活動や雷放電といった自然の電磁波に応答して地球内部から生じる自然電磁場のうち高い周波数帯を測定し、地下の比抵抗分布を推定する電磁探査法です。

## BTV (ボアホールテレビューア)

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、孔内状況を目視する方法です。

## C-S-H

ケイ酸カルシウム水和物 (Calcium Silicate Hydrate) と呼ばれ、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。

## Da (ダルトン)

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。3 kDa (キロダルトン) のろ過フィルターサイズとは、3 kDa (3,000 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。

## DECOVALEX (デコバレックス)

DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments (連成モデルの開発とその実験結果との検証) の略称で、地層処分システムの性能評価において重要な課題のひとつである熱-水理-力学-化学連成挙動モデルの開発・検証を目的とした国際共同研究です。

## ESL (証拠に基づく意思決定支援理論)

ESL (Evidential Support Logic) は対象とする事項の確からしさや真偽の程度を評価する階層分析手法のひとつであり、命題の形式で設定した評価の対象事項をその理論となる命題に細分して「論理の階層構造」を構築し、下位階層の命題の確からしさに基づいて評価の対象事項である最上位の命題 (主命題) の確からしさを評価する手法です。

## 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、ここ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。

## MT 法

MT (Magnetotelluric) 法は、AMT 法と原理は同じですが、AMT 法よりも低い周波数帯の自然電磁場を測定し、より深部の地下の比抵抗分布を推定することができます。

## OFDR 方式

光周波数領域反射測定 (Optical Frequency Domain Reflectometry) のことです。規則的な縞 (回折格子) を光ファイバーの中心部分に付与した光ファイバーを用いることで 1 mm 以下の間隔で連続的にひずみ量などを測定することができます。また、そのひずみ量から温度を求めることができます。

**OTDR 方式**

光時間領域反射率計（Optical Time Domain Reflectometer）のことです。光ファイバーケーブルの中心部のガラス分子の格子振動により変化するラマン散乱光の強度を測定することにより、光ファイバーの各部の温度を求めることができます。

**PFI**

Private Finance Initiative（民間資金等活用事業）の略称です。公共施設などの建設、維持管理、運営などを民間の資金、経営能力、技術的能力を活用することで、国や地方公共団体などが直接実施するよりも効率的かつ効果的に事業を実施するための方策です。

**TDR 法**

時間領域反射率測定（Time Domain Reflectometry）のことで、本研究では、ケーブルに負荷したパルス状の電圧の反射波がケーブルの周囲の物質の誘電率に応じて変化することを利用して隙間を検知します。

**【あ行】****アウトプット法**

コンクリート材料の透水係数を求める方法のひとつで、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類似した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、廃棄物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卓越した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いいます。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  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  で表される鉱物です。

**オーバーパック**

オーバーパックは、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。

**オパリナス粘土**

オパリナス粘土（オパリナスクレイ）は、1億7,500万年前（ジュラ紀）に形成された粘土鉱物です。スイスをはじめヨーロッパに広く分布しています。



## 【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。

### 化石海水

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

### 緩衝材

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

### 緩衝材の流出現象

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放射性核種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放射性核種の移行挙動などを推測することができます。

### 空中電磁探査

ヘリコプターや航空機を用いて、空中から地球磁場の測定や人工的に発生させた磁場によって誘導される電磁場の測定を行い、地層や断層の分布などを推定する調査手法で、広範囲にわたり地質構造を簡便に把握できる特徴があります。

### 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ます。掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、変化した地下水圧が元の状態に回復することが想定されます。掘削損傷領域と掘削擾乱領域は、広義に掘削影響領域と表現されます。

### クリープ

クリープとは、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)が進行する現象のことです。

### 原位置試験

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

## 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。

## 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

通常の傾斜計が計測できる角度は約 3,600 分の 1 度であるのに対し、約 1 億分の 6 度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。

## 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。

## 古水理地質学的変遷

地質環境中における過去から現在までの地下水の流動や化学的状態などの移り変わりのことです。

## コロイド

大きさが 1 nm～1 mm 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可能性が指摘されています。

## コンクリーション化

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

### 【さ行】

## 酸化還元電位

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

## 支保（工）

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。

## 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、立坑壁面に深さ 30 m～40 m ごとに設置されている設備です。

## 収着

収着とは、地下水中有る元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

## 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、廃棄体を縦置きにするのか横置きにするのか、人工バリアのひとつである緩衝材をブロックで積み上げるのか現場で固めるのか、といった処分方法、埋め戻し方法の違いおよび搬送定置・回収方法などについての選択肢のことを指します。

## 人工バリア

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

## 水圧擾乱試験

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

## 水理学的連結性

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

## スクリー工法

本報告書では、埋め戻し材をスクリーコンベアを用いて充填する工法を指します。

## 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。

## 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、やわらかくなります。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（岩石の引っ張り破壊に対する強度）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 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $\alpha$ ：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 ( $\alpha_L$ ) を縦方向分散長といいます。

## 弾性

弾性とは、力を加えたときに変形し、力を取り除くと元に戻る性質のことです。

## 弾塑性

弾塑性とは、弾性と塑性（力を加えて変形させたとき、変形したままの状態になる性質）をあわせ持った性質のことです。

## 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。

## 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。

## 電子プローブマイクロアナライザー

電子プローブマイクロアナライザー（Electron Probe Micro Analyzer：EPMA）は、電子ビームを測定対象に照射したときに、電子と対象を構成する元素の相互作用によって発生する元素に特有な X 線（特性 X 線）を検出することで、対象を構成する元素を分析する装置です。

## 電気伝導度

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

## 同位体比

同じ種類の原子であっても重さ（質量数）が違うものがあり、その割合のことを同位体比と言います。例えば、水は酸素原子および水素原子から構成されていますが、水素および酸素の中には重さの異なる原子（同位体）が存在します。重い酸素および軽い酸素の割合を酸素同位体比、重い水素および軽い水素の割合を水素同位体比と言います。

## 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： $k$  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（ $\text{m}^3/\text{s}$ ）、 $A$ ：断面積（ $\text{m}^2$ ）、 $h$ ：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概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】

**二重遮水シート**

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。

**熱－水理－力学－化学連成現象**

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

## 【は行】

**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竖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。

**プラグ**

ベントナイトやコンクリートなどが材料となって構成される、緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐため、あるいは掘削損傷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、本報告書で記載のある「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が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、濃度が低下します。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、ベントナイトの膨潤により緩衝材の透水性が低下し、放射性核種が緩衝材に吸着され、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、そ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。

### 【ま行】

#### マイナーアクチノイド

アクチノイドのうち、原子番号 93 のネプツニウム (Np) および原子番号 95 のアメリシウム (Am) から 100 のフェルミウム (Fm) の 7 元素のことを指します。

#### 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。隙間同士が互いに良くつながり、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、一次的なチャンネルを形成する場合は一次元となります。

### 【や行】

#### 有効粘土密度

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、粘土材料（ベントナイト）のみの乾燥密度を計算したものです。

#### 溶存態濃度

ここでは、0.2 mm のフィルターを通して分離できない状態の元素を「地下水に溶けている（溶存している）」と定義しています。

### 【ら行】

#### ラドン

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

#### ラマン散乱

物質に光を当てた時に、入射光と異なる波長に散乱される現象をラマン散乱と言います。

#### ランタノイド

ランタノイドは、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 元素の総称です。

## 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* 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 5 年度調査研究計画, JAEA-Review 2023-019, 2023, 70p.
- (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) 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.
- (7) 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.
- (8) 中山雅 (編): 幌延深地層研究計画 令和 3 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2022-025, 2022, 164p.
- (9) 中山雅 (編): 幌延深地層研究計画 令和 4 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2023-032, 2024, 159p.
- (10) GoldSim Technology Group, GoldSim user's guide, GoldSim version 10.1., 2010.
- (11) 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.
- (12) Kirishima, A., Terasaki, M., Miyakawa, K., Okamoto, Y. and Akiyama, D.: Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, *Chemosphere*, vol.289, 2022, 133181.
- (13) 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[JPI007587]ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2023, 616p.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- (17) 藪内聡, 國丸貴紀, 太田久仁雄, Bernhard, F.: 幌延深地層研究計画 地上からの調査における水理試験データの品質保証, *日本原子力学会 2009 年春の年会予稿集*, D46, 2009.
- (18) 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[JPI007587]回収可能性技術高度化開発報告書 3 ヶ年取りまとめ報告書, 2023, 107p.
- (19) 地盤工学会: 低透水性材料の透水試験方法, JGS0312-2018, 2018, 30p.
- (20) 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.
- (21) 中山雅, 佐藤治夫, 杉田裕, 野口聡: 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性—140m 調査坑道における原位置吹付け施工試験—, JAEA-Research 2010-055, 2011, 25p.
- (22) 中山雅, 澤田純之, 佐藤治夫, 杉田裕: 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント

- 系材料の適用性—250m 調査坑道における原位置吹付け施工試験—, JAEA-Research 2012-023, 2012, 65p.
- (23) 中山雅, 丹生屋純夫, 南出賢司: 幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の適用性確認, 原子力バックエンド研究, vol.23, no.1, 2016, pp.25-30.
- (24) 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[JPJ007587]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2023.
- (25) 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[JPJ007587]地層処分施設閉鎖技術確証試験 5 ヶ年取りまとめ報告書, 2023.
- (26) Hvorslev, M. T.: Time lag and soil permeability in ground-water observations, U.S. Army Waterways Experiment Station, Bull No.36, 1951, 50p.
- (27) 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.
- (28) 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.
- (29) 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.
- (30) 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.
- (31) 日本原子力研究開発機構: 割れ目がずれると割れ目内の隙間(地下水の通り道)はつながるか?—隙間のつながり具合を現場で簡単に調べる試験手法を開発—, 令和 4 年 10 月 26 日プレス発表, 2022, <https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22102601/> (参照: 2024 年 5 月 14 日).
- (32) Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: Reference values based on laboratory and in situ hydromechanical experimental data, Engineering Geology, vol.294, 2021, 106369.
- (33) 日本原子力研究開発機構: 地下深部の割れ目の水の流れやすさに関わる法則性を発見—地層処分における地下調査の効率性の向上などに役立つ新知見—, 令和 3 年 12 月 6 日プレス発表, 2021, <https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21120601/> (参照: 2024 年 5 月 14 日).
- (34) 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[JPJ007587]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書, 2023, 417p.
- (35) 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.
- (36) 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.
- (37) 寺本雅子, 嶋田純, 國丸貴紀: コア間隙水中の安定同位体比をもとにした低透水性堆積岩盤における地下水挙動の兆候, 応用地質, vol.47, no.2, 2006, pp.68-76.
- (38) 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, 2023, 103p.
- (39) 岸本宗丸, 高山純一, 横井浩一: 電磁法による地上物理探査, JNC TJ1420-036, 2001, 177p.
- (40) 産業技術総合研究所: 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発成果報告書 平成 19 年度, 2008, 256p.
- (41) 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.
- (42) 望月陽人, 石井英一: 地下深部の岩盤における地下水の流れの有無を水の安定同位体比から判別する, Isotope News, 784, 2022, pp.23-27.
- (43) 日本原子力研究開発機構: 地下水が流れていない場所を探す—地下水の動きを割れ目の水質で判断する方法を構築—, 令和 4 年 6 月 6 日プレス発表, 2022, <https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22060601/> (参照: 2024 年 5 月 14 日).



- (44) 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.
- (45) Ozaki, Y. and Ishii, E.: Verification of the existing hydrogeological model using hydraulic pressure monitoring data during long-term drainage from Horonobe URL and prediction of the hydraulic response to new excavation of up to a 500-m depth, *The 30th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE30)*, 2023.
- (46) 出井俊太郎, 望月陽人, 宮川和也, 笹本広: 幌延の地下施設における地下水の地球化学モニタリング装置を用いた物理化学パラメータ測定結果(2017年度~2019年度), *JAEA-Data/Code* 2021-005, 2021, 54p.
- (47) 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.
- (48) 中山雅, 佐野満昭, 真田祐幸, 杉田裕 (編): 幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究成果報告 *JAEA-Research* 2009-032, 2009, 68p.
- (49) Isola, P., Zhu, J.-Y., Zhou, T., 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>.
- (50) 斉藤拓巳, 西終作, 佐藤颯人, 宮川和也, 天野由記, 別部光里: 堆積岩系深部地下水中の天然有機物の起源と金属イオンとの反応性評価, *日本地球化学会第 70 回年会要旨集*, 2023.
- (51) Saito, T., Nishi, S., Sato, H. and Miyakawa, K. : Revealing the origin and ion-binding properties of dissolved organic matters in deep sedimentary groundwater, *Migration* 2023, 2023.
- (52) 佐藤颯人, 戸田賀奈子, 別部光里, 天野由記, 宮川和也, 斉藤拓巳: 高分解能質量分析を用いた金属イオンと結合する深部地下の溶存有機物の分子的特徴の評価, *日本原子力学会 2024 年春の年会要旨集*, 2024.
- (53) 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.
- (54) 上野晃生, 佐藤聖, 玉村修司, 村上拓馬, 猪股英紀, 玉澤聡, 天野由記, 宮川和也, 長沼毅, 五十嵐敏文: 新規の嫌気性微生物 *Mangrovibacterium* sp. Z1-71 株とメタン生成アーキアとの共培養によるメタン生成について, *日本微生物生態学会第 36 回大会*, 2023.
- (55) 上野晃生, 玉澤聡, 玉村修司, 村上拓馬, 猪股英紀, 天野由記, 宮川和也, 長沼毅, 五十嵐敏文: 陸域深部地下環境から取得した新規微生物 *Mangrovibacterium* sp. Z1-71 株のメタン生成アーキアとの共培養について, *第 46 回日本分子生物学会年会 2023*, 2023.

This is a blank page.

付録

付録 1 令和 2 年度以降の研究工程

This is a blank page.





## 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	R5の実施内容	研究期間
					前半 後半
<p>・ 堆積域に分布する泥岩は断層帯の構造性の割れ目が分布する等が知られているため、岩盤基質部（＝堆積部）における拡散の速さや人為的な割れ目を含む移動・分散が主要な移行経路や形態として考えられる</p> <p>・ 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</p> <p>・ 割れ目が有する堆積物や岩盤へのくっつきや、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</p> <p>・ そのために、断層帯の泥岩を事例として、岩盤基質部（＝堆積部）および割れ目の双方を対象とした原位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</p> <p>・ 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</p> <p>・ 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</p>	<p>① 岩盤基質部（＝堆積部）を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や割れ目のくっつきや等）の評価手法の検証</p> <p>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等）の評価手法の検証</p> <p>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</p> <p>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等）の評価手法の検証</p> <p>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</p> <p>⑥ 割れ目を有する堆積岩を含むブロックスケール（数m～100m規模）における運送性能評価手法の確立</p> <p>⑦ 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</p> <p>⑧ 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</p>	<p>④ 過年度の掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>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</p> <p>⑥ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑦ 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</p> <p>⑧ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑨ 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</p> <p>⑩ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑪ 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</p> <p>⑫ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑬ 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</p> <p>⑭ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑮ 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</p> <p>⑯ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑰ 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</p> <p>⑱ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑲ 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</p> <p>⑳ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉑ 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</p> <p>㉒ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉓ 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</p> <p>㉔ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉕ 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</p> <p>㉖ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉗ 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</p> <p>㉘ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉙ 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</p> <p>㉚ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉛ 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</p> <p>㉜ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉝ 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</p> <p>㉞ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉟ 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</p> <p>㊱ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊲ 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</p> <p>㊳ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊴ 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</p> <p>㊵ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊶ 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</p> <p>㊷ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊸ 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</p> <p>㊹ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊺ 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</p> <p>㊻ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊼ 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</p> <p>㊽ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊾ 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</p> <p>㊿ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p>	<p>④ 過年度の掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>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</p> <p>⑥ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑦ 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</p> <p>⑧ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑨ 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</p> <p>⑩ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑪ 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</p> <p>⑫ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑬ 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</p> <p>⑭ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑮ 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</p> <p>⑯ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑰ 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</p> <p>⑱ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>⑲ 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</p> <p>⑳ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉑ 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</p> <p>㉒ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉓ 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</p> <p>㉔ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉕ 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</p> <p>㉖ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉗ 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</p> <p>㉘ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉙ 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</p> <p>㉚ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉛ 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</p> <p>㉜ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉝ 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</p> <p>㉞ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㉟ 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</p> <p>㊱ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊲ 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</p> <p>㊳ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊴ 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</p> <p>㊵ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊶ 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</p> <p>㊷ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊸ 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</p> <p>㊹ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊺ 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</p> <p>㊻ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊼ 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</p> <p>㊽ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p> <p>㊾ 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</p> <p>㊿ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価</p>	<p>前半 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p> <p>④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑤ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑥ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑦ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑧ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑨ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑩ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑪ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑫ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑬ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑭ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑮ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑯ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑰ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑱ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑲ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑳ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉑ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉒ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉓ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉔ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉕ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉖ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉗ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉘ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉙ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉚ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉛ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉜ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉝ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉞ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㉟ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊱ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊲ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊳ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊴ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊵ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊶ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊷ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊸ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊹ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊺ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊻ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊼ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊽ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊾ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>㊿ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p>	<p>前半 後半</p> <p>体系化して取り進む課題（②）処分概念オプシヨンの実証のうち人工工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施</p> <p>前半の5年程度で実施</p> <p>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</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○ 原位試験データ（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○ EDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示</p> <p>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</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○ 原位試験データ（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○ 断層を事例としたブロックスケールの評価手法の提示</p>

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り進む課題（「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 2.1.1 操業・回収技術等の技術オプシヨンの実証、閉鎖技術の実証

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R5の実施内容		研究期間									
			R2以降の実施内容	R5の実施内容	前半	後半								
<p>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）に關わる人工バリアの搬送・定置・回収技術の実証、閉鎖技術の検証、回収技術の検証、人工バリアの閉鎖技術の検証、人工バリアの回収技術の検証、人工バリアの回収技術の検証</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・加工および品質管理手法の確立</p>	<p>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）に關わる人工バリアの搬送・定置・回収技術の実証、閉鎖技術の検証、回収技術の検証、人工バリアの閉鎖技術の検証、人工バリアの回収技術の検証</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・加工および品質管理手法の確立</p>	<p>① ②③ 操業・回収技術などの技術オプシヨンの実証、閉鎖技術の検証、回収技術の検証、人工バリアの閉鎖技術の検証、人工バリアの回収技術の検証</p> <p>② 閉鎖技術（埋め戻し材やプラグなど）に関する基礎情報（(1)章に提示した概念オプシヨンの提示）の提示</p> <p>③ 人工バリアの閉鎖技術と坑道の埋め戻し材の施工方法の検証に関する実証試験への着手と施工品質の確認するための計測技術の高度化</p>	<p>① 地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析の継続、実際の地下施設に施工されているコンクリートと支保工の劣化挙動等の評価</p> <p>② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基礎情報の整備を目的とした位置試験の継続</p> <p>③ 緩衝材の膨出挙動に関する調査・埋め戻し材の施工効果に関する実証試験への着手と施工品質の確認するための計測技術の高度化</p>	<p>R2</p> <p>R3</p> <p>R4</p> <p>R5</p> <p>R6</p> <p>R7</p> <p>R8</p> <p>R9</p> <p>R10</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>① 搬送定置・回収技術の実証</p> <p>地下環境で乾燥および湿潤条件下で実際の施工に關する試験、解析を実施</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 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</li> <li>○ 坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に關する事象の把握</li> </ul>	<p>後半</p> <p>② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証</p> <p>閉鎖システムに関する基礎情報の整備を目的とした解析とした解析・室内試験、工學規模試験を実施</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ シーリングシステムの長期性能評価に關する考え方の整理</li> <li>○ 緩衝材の膨出挙動に影響を与える事象の整理</li> <li>○ 止水プラグの施工に關する重要技術の抽出</li> <li>○ EDZ調査技術の評価・高度化</li> <li>○ 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</li> </ul>	<p>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検証に關する品質保証体系の構築</p> <p>自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 緩衝材の施工方法に關する技術オプシヨンの実証</li> <li>○ 坑道閉鎖に關する技術オプシヨンの実証</li> </ul>							

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。



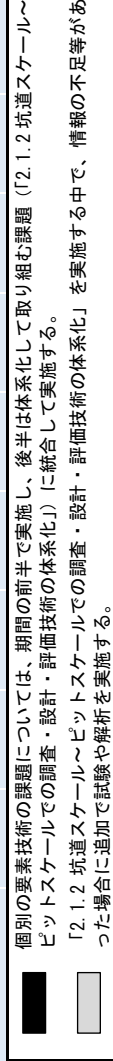


## 2.2 高温度(100°C超)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験

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	R5の実施内容	研究期間									
		前半	後半			前半	後半	前半	後半	前半	後半	前半	後半		
<p>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ヨンの工学的実現性を検証し、多様な実証環境設計に対して柔軟な処分環境設計を支援することを提供すること。</p> <p>実際の処分事業では、オーバーバックが100°C以下になつてから処分することが基本であるが、想定外の要因によつて100°C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精度を検証する。</p>	<p>① 100°C超の高温度環境での限界的条件下での人工バリア性能確認試験</p> <p>② 100°C超の高温度環境での限界的条件下での人工バリア性能確認試験</p>	<p>① 高温度(100°C以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験</p>	<p>人工バリアシステムの安全精度の検証に向けて、緩衝材が100°C超になつた状態を想定した解析手法を開発するため以下を実施</p> <p>①-1 高温度(100°C以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験</p>	<p>①-1 高温度条件下での人工バリア性能確認試験に関する原位置試験に着手</p> <p>①-2 100°C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</p> <p>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)</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p> <p>①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・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</p>	<p>後半</p> <p>体系化し取り組み課題(②)処分概念オプシヨ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</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○高温(100°C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取集</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○100°C超になつた際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</p> <p>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</p>									
	<p>①-2 100°C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</p> <p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>海外での原位置試験の例を踏まえ、抽出、原位置試験の概念を抽出し、手法などを入手</p> <p>先行研究事例を高温条件下での人工バリア性能確認試験の原位置試験の概念を抽出し、手法などを入手</p>	<p>①-1 高温度条件下での人工バリア性能確認試験の原位置試験の概念を抽出し、手法などを入手</p> <p>①-2 100°C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</p> <p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>①-1 高温度条件下での人工バリア性能確認試験に関する原位置試験に着手</p> <p>①-2 100°C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</p> <p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>前半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p> <p>①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・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</p>	<p>後半</p> <p>体系化し取り組み課題(②)処分概念オプシヨ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</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○高温(100°C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取集</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○100°C超になつた際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</p> <p>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</p>									
				<p>①-1 高温度条件下での人工バリア性能確認試験に関する原位置試験に着手</p> <p>①-2 100°C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</p> <p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>①-1 高温度条件下での人工バリア性能確認試験に関する原位置試験に着手</p> <p>①-2 100°C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</p> <p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>前半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p> <p>①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・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</p>	<p>後半</p> <p>体系化し取り組み課題(②)処分概念オプシヨ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</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○高温(100°C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取集</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○100°C超になつた際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</p> <p>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</p>								
				<p>①-1 高温度条件下での人工バリア性能確認試験に関する原位置試験に着手</p> <p>①-2 100°C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</p> <p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>①-1 高温度条件下での人工バリア性能確認試験に関する原位置試験に着手</p> <p>①-2 100°C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</p> <p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>前半</p> <p>R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10</p> <p>①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・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</p>	<p>後半</p> <p>体系化し取り組み課題(②)処分概念オプシヨ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</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○高温(100°C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取集</p> <p>令和6年度までに得られる成果 ○100°C超になつた際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</p> <p>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</p>								

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。



### 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	R5の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
・岩盤中には大小様々な断層が存するが、小規模なものはいくつかは如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。	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の断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における地下水の流れの变化に関する、堆積岩の緩衝能力(自己治癒能力)を要証するため、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) ②-2 DI (ダクティリティインデックス: 岩盤にかか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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1~3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析 ②-1~3 DI と断層/割れ目の水理学的連続性の関係に関する解析	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
					前半の5年程度で実施	体系化して取り組む課題(2)処分概念オプシヨ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	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備
・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。	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の断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における地下水の流れの变化に関する、堆積岩の緩衝能力(自己治癒能力)を要証するため、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) ②-2 DI (ダクティリティインデックス: 岩盤にかか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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1~3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析 ②-1~3 DI と断層/割れ目の水理学的連続性の関係に関する解析	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 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 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	

※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。

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

令和6年度までに得られる成果  
 ○ODIを用いた透水性評価手法の高度化

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評価手法の整備

### 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	R5の実施内容		研究期間									
				前半	後半	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
<p>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）は、処分施設の分布を把握することは、処分施設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</p>	<p>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</p> <p>④ 三次元分布を調査・解析・評価する手法の確立</p>	<p>③④ 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化</p> <p>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</p>	<p>③ R4までの成果に基づき、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まで得られた成果の論文投稿や研究開発報告書類の整備</p>	<p>前半の5年程度で実施</p>	<p>体系化して取り組む課題（2）処分概念オプシヨ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</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○化石海水領域の調査・評価技術の整備・高度化</li> </ul> </div>									
<p>④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証</p>	<p>④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした物理探査と地球統計学による化石海水の三次元分布の推定に関する調査・評価技術の検証</p>	<p>④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証</p>	<p>④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証</p>	<p>④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証</p>	<p>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</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○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</li> </ul> </div>									
<p>④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした物理探査と地球統計学による化石海水の三次元分布の推定に関する調査・評価技術の検証</p>	<p>④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした物理探査と地球統計学による化石海水の三次元分布の推定に関する調査・評価技術の検証</p>	<p>④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした物理探査と地球統計学による化石海水の三次元分布の推定に関する調査・評価技術の検証</p>	<p>④-2 R4までに実施した水理・物性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・解析手法の検証と、これまでに得られた成果の論文投稿や研究開発報告書類の整備</p>	<p>④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした物理探査と地球統計学による化石海水の三次元分布の推定に関する調査・評価技術の検証</p>	<p>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</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○広域スケールを対象とした水理・物性移動評価手法の整備</li> </ul> </div>									

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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

### 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	R5の実施内容		研究期間									
				前半	後半	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
<p>・地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的能力(自己治癒能力)を定量的に検証し、堆積岩領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</p>	<p>① 人工バリアの自己治癒能力を評価する手法の確立</p> <p>② 人工バリアの自己治癒能力(ひび割れの修復)を</p>	<p>② 地殻変動による人工バリアの自己治癒能力(ひび割れの修復)を評価する手法の確立</p> <p>③ 人工バリアの自己治癒能力(ひび割れの修復)を評価する手法の確立</p>	<p>人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を評価するため以下の机上検討を実施</p> <p>② 人工バリアの繊維材や坑道埋め戻し材が掘削擾乱領域(EDZ)の水理学的能力(自己治癒能力)に与える影響を把握する</p> <p>解析手法の開発</p> <p>DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証</p>	<p>R5は実施しない</p>	<p>前半</p> <p>前半の5年程度で実施</p> <p>R2 R3 R4 R5</p> <p>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</p> <p>試験観察に水圧擾乱試験に基づき、EDZの透水性と改良モジュールの割合シミュレーションの結果に基づきモデル的に把握</p>	<p>後半</p> <p>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)を実施</p> <p>R6 R7 R8 R9 R10</p> <p>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</p>	<p>令和4年度までに得られる成果</p> <p>○DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証</p>								
		<p>坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築</p>	<p>坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築</p> <p>試験観察に坑道埋め戻し材に基づき、EDZの割れ目、EDZの透水性を定量的に把握</p>	<p>R5は実施しない</p>	<p>後半</p> <p>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</p>	<p>令和4年度までに得られる成果</p> <p>○坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築</p>									

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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



## 付録 2 令和 5 年度外部発表

著者アルファベット順に記載

- 阿部健康, 飯田芳久, 笹本広, 石井英一: 海成堆積物中における陽イオン交換反応及び全岩化学組成変動に関する地球化学モデリング, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 2023.
- 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.3, 2024, pp.98\_1-98\_15.
- 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*, 155, 2023, 105707.
- 出井俊太郎: 幌延深地層研究センター調査坑道における地下水の地球化学モニタリング装置による地下水圧の連続観測結果 (2019 年度~2021 年度), JAEA-Data/Code 2023-008, 2023, 49p.
- Dei, S., Tachi, Y., Amano, Y., Francisco, P.C.M., Sugiura, Y. and Takahashi, Y.: Retention mechanisms of Selenium in deep subsurface sedimentary formations in Horonobe area, Hokkaido, Japan, 18<sup>th</sup> International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2023), 2023.
- Francisco, P.C.M., Shiwaku, H., Ishidera, T. and Tachi, Y.: Se immobilization in pyrite by reaction with Fe(II) and polysulfides; Impacts of aging conditions, *Water-Rock Interaction (WRI-17) / Applied Isotope Geochemistry (AIG-14)*, 2023.
- 深津勇太, 赤木洋介, 佐藤久夫, 村山翔太, 石寺孝充, 館幸男: 花崗閃緑岩の割れ目中のトレーサー移行挙動の評価 (1) 室内トレーサー移行試験, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 2023.
- 郷家光男, 沖原光信, 戸栗智仁, 松井裕哉, 尾崎裕介, 望月陽人, 前村庸之, 伊藤諒: 幌延を事例とした坑道周辺地質環境の長期挙動に関する解析 (1) 全体概要と力学的長期変化解析, 令和 5 年土木学会全国大会第 78 年次学術講演会, 2023.
- Hata, K., Niunoya, S., Aoyagi, K. and Miyara, N.: Evaluation of excavation-damaged zones (EDZs) in Horonobe Underground Research Laboratory (URL), *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol.16, Issue 2, 2024, pp.365-378.
- 早野明, 佐藤奈央美: 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.
- 堀口賢一, 本澤昌美, 野村佃生, 上村勇太, 本島貴之, 押野善之, 広島隆司, 岡部成行, 宮良正彦, 菜花良平: 大深度立坑のひび割れ点検の効率化に向けた撮影手法の開発, 令和 5 年土木学会全国大会第 78 年次学術講演会, 2023.
- 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*, 31, 2023, pp.893-911.
- 伊藤諒, 前村庸之, 松井裕哉, 尾崎裕介, 望月陽人, 郷家光男, 沖原光信, 戸栗智仁: 幌延を事例とした坑道周辺地質環境の長期挙動に関する解析 (2) 水理学的長期変化解析, 令和 5 年土木学会全国大会第 78 年次学術講演会, 2023.
- 木村駿, 武田匡樹, 本島貴之: 坑道の拡幅部の掘削に伴う掘削損傷領域の評価, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 2023.
- 木村駿, 武田匡樹, 沖原光信, 中島均, 千々松正和, 伊藤歩夢: 地層処分における坑道埋戻し材からのベントナイト流出現象に関する研究, 令和 5 年土木学会全国大会第 78 年次学術講演会, 2023.
- 窪田健二, 森藤遥平, 大山隆弘, 松井裕哉: 坑道掘削に伴う掘削損傷領域と不飽和領域の形成に関する検討 幌延深地層研究施設での調査 (その 2), 令和 5 年度日本応用地質学会研究発表会, 2023.
- 栗林千佳, 宮川和也, 伊藤茜, 谷水雅治:  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  同位体指標を用いた珪質泥岩を帯水層とする深層地下水におけるウランの起源推定, 2023 年度日本地球化学会第 70 回年会, 2023.
- Kuribayashi, C., Miyakawa, K., Ito, A. and Tanimizu, M.: Isotopic variation of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratios from deep groundwater in siliceous aquifer, *The 17th Congress of Water-Rock Interaction and the 14th Applied Isotope Geochemistry*, 2023.
- 松井裕哉, 本島貴之, 柴田真仁, 坂本亮, 望月陽人: 地盤工学会基準に基づく HFSC 吹付けコンクリート供試体の透水試験, 令和 5 年土木学会全国大会第 78 年次学術講演会, 2023.

- Mei, H., Aoyagi, N., Saito, T., Sugiura, Y., Ishidera, T., Tanaka, K. and Tachi, Y.: U(VI) sorption on illite in the presence of carbonate studied by cryogenic time-resolved laser fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis; Comparison with trivalent lanthanides, 18<sup>th</sup> International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2023), 2023.
- 見掛信一郎: 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削における湧水抑制対策, 地下水学会誌, vol.65, no.4, 2023, pp.323-331.
- 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, 2023, 103p.
- 宮川和也, 今井久, 平井哲, 大野宏和, 中田弘太郎, 長谷川琢磨: 古水理学的変遷を踏まえた広域地下水流動解析における影響因子の感度解析, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 2023.
- 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, 2023 年度日本地球化学会第 70 回年会, 2023.
- 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.
- 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*, 155, 2023, 105737.
- 村上裕晃, 石井英一: 流れの次元を用いたボーリング孔の湧水量の低下量予測—幌延深地層研究センターにおける事例—, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 2023.
- 村山翔太, 深津勇太, 石寺孝充, 館幸男: 花崗閃緑岩の割れ目中のトレーサー移行挙動の評価 (2) モデルによる解析, 日本原子力学会 2023 年秋の大会, 2023.
- 中山雅 (編): 幌延深地層研究計画 令和 4 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2023-032, 2024, 159p.
- 中山雅 (編): 幌延深地層研究計画 令和 5 年度調査研究計画, JAEA-Review 2023-019, 2023, 70p.
- 西村大樹, 幸塚麻里子, 福田朱里, 石村豊穂, 天野由記, 別部光里, 宮川和也, 鈴木庸平: 陸域地下深部におけるメタンに依存する巨大な微生物生態系の解明, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 2023.
- Ohno, H. and Takayama, Y.: Numerical simulation of deformation behavior of buffer material in full-scale EBS performance experiment, Horonobe, Japan, Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium, 2023.
- 大泉涼, 加藤猛士, 木方建造, 木村駿, 武田匡樹, 小野誠: 坑道シーリングにおける地質特性からの EDZ 評価: 令和 5 年度日本応用地質学会研究発表会, 2023.
- Ozaki, Y.: First-arrival travelttime tomography for monitoring the excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, *Rock Mechanics Bulletin*, 2, 3, 2023, p.100057\_1-100057\_12.
- Ozaki, Y. and Ishii, E.: Verification of the existing hydrogeological model using hydraulic pressure monitoring data during long-term drainage from Horonobe URL and prediction of the hydraulic response to new excavation up to a 500m depth, The 30<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering (ICONE30), 2023.
- 尾崎裕介, 大野宏和, 青柳和平: 人工バリア性能確認試験における人工バリアおよび周辺岩盤の熱・水・力学挙動の計測に関して, 2023 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2023.
- 斉藤拓巳, 西柁作, 佐藤颯人, 宮川和也, 天野由記, 別部光里: 堆積岩系深部地下水中の天然有機物の起源と金属イオンとの反応性評価, 2023 年度日本地球化学会第 70 回年会, 2023.
- 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, *ACS ES&T Water*, vol. 3, no. 12, 2023, pp. 4103-4112.
- Saito, T., Nishi, S., Sato, H. and Miyakawa, K.: Revealing the origin and ion-binding properties of dissolved organic matters in deep sedimentary groundwater, 18<sup>th</sup> International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2023), 2023.
- 佐久間圭佑, 石井英一, 村上裕晃, 本多典久: 岩盤の割れ目内の地下水流れの次元に基づく地下研究施設における湧水量の自然低下予測, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 2023.
- 佐藤颯人, 戸田賀奈子, 別部光里, 天野由記, 斉藤拓巳, 宮川和也: 高分解能質量分析を用いた金属イオンと結合する深部地下の溶存有機物の分子的特徴の評価, 日本原子力学会 2024 年春の年

- 会, 2024.
- 佐藤菜央美, 早野明, 柏原功治, 手島稔, 根木健之: 地球統計学的解析に基づく高塩濃度地下水の三次元分布測定とその結果に基づくボーリング調査地点の選定方法の検討, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, 2023.
- Shimo, M, Niwa, M., Miyakawa, K., Yasue, K., Tokunaga, T., Tonokura, K. and Birayd, S.: Precise trace gas measurements for identifying pathways around faults and anticlinal axis; A Field survey example at Horonobe, Hokkaido, Japan, American Geophysical Union 2023 Fall Meeting (AGU2023), 2023.
- Sugita, Y: Application of Horonobe Underground Research Laboratory and THMC coupling analysis for HLW disposal, 34<sup>th</sup> Sino-Japanese Modern Engineering and Technology Symposium, 2023.
- Sugita, Y., Ohno, H., Steffen, B., Pan, P., Kim, M., Lee, C., Carlos, JC., Carlos, ML. and Liang, S.: Numerical simulation of coupled THM behavior of full-scale EBS in backfilled experimental gallery, Horonobe, Japan, Second International DECOVALEX Coupled Processes Symposium, 2023.
- 舘幸男: 高レベル放射性廃棄物の地層処分と化学, 化学と教育, 71(10), 2023, pp.420-423.
- 竹内竜史, 見掛信一郎, 池田幸喜, 西尾和久, 国分陽子, 花室孝広: 瑞浪超深地層研究所の坑道埋め戻し及び原状回復業務に関する工事記録, JAEA-Review 2023-007, 2023, 114p.
- 谷口直樹, 北山彩水, 川崎学, 中山雅, 大野宏和, 三ツ井誠一郎, 鈴木宏幸: 幌延地下研究施設における炭素鋼オーバーパックスの腐食に関する原位置試験, 腐食防食学会第 70 回材料と環境討論会, 2023.
- 田村友識, 石井英一: 新第三紀堆積岩に発達する小規模なせん断面の解析, 日本地質学会第 130 年学術大会, 2023.
- 上野晃生, 佐藤聖, 玉村修司, 村上拓馬, 猪股英紀, 玉澤聡, 天野由記, 宮川和也, 長沼毅, 五十嵐敏文: 新規の嫌気性微生物 *Mangrovibacterium* sp. Z1-71 株とメタン生成アーキアとの共培養によるメタン生成について, 日本微生物生態学会第 36 回大会, 2023.
- 上野晃生, 玉澤聡, 玉村修司, 村上拓馬, 猪股英紀, 天野由記, 宮川和也, 長沼毅, 五十嵐敏文: 陸域深部地下環境から取得した新規微生物 *Mangrovibacterium* sp.Z1-71 株のメタン生成アーキアとの共培養について, 第 46 回日本分子生物学会年会, 2023.
- 臼井達哉, 渡部孝彦, 矢田勤, 押野義之, 菜花良平: 普通ポルトランドセメントをベースとした高強度コンクリートの配合選定, 令和 5 年土木学会全国大会第 78 年次学術講演会, 2023.
- 横井悟, 下茂道人, 宮川和也, 丹羽正和, 松岡俊文, 徳永朋祥: CRDS 微量ガス検知器の石油ガス探鉱への応用 (2) 北海道幌延地域の石油地質的考察, 石油技術協会令和 5 年度春季講演会, 2023.
- Yoshida, H., Yamamoto, K., Asahara, Y., Karukaya, K., Matsui, H. and Metcalfe, R.: Rapid sealing of bed rock flow paths by a synthetic concentration forming solvent, Energy Geoscience Conference 2023, 2023.
- 吉田英一, 山本鋼志, 浅原良浩, 刈茅孝一, 齋藤朱音, 松井裕哉, 望月陽人: コンクリーション化による EDZ および水みち割れ目の自己シーリング実証試験研究 2, 令和 5 年度日本応用地質学会研究発表会, 2023.
- 吉田英一, 山本鋼志, 浅原良浩, 刈茅孝一, 齋藤朱音, 松井裕哉, 望月陽人: コンクリーション化剤による地下岩盤亀裂シーリング実証試験: M5.4 直下型地震後の亀裂修復現象, 日本地質学会第 130 年学術大会, 2023.
- 湯口貴史, 笹尾英嗣, 火原諒子, 村上裕晃, 尾崎裕介: 土岐花崗岩における物質移行特性に関する研究: 鉱物の微小空隙がもたらす物質移動の遅延, 日本地質学会第 130 年学術大会, 2023.

This is a blank page.





