JAEA-Review
2020-042
DOI:10.11484/jaea-review-2020-042

幌延深地層研究計画　令和元年度調査研究成果報告

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Report for the 2019 Fiscal Year

（編）中山 雅　雑賀 敦

(Eds.) Masashi NAKAYAMA and Atsushi SAIGA

核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター
深地層研究部

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

January 2021

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。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

JAEA-Review 2020-042

幌延深地層研究計画　令和元年度調査研究成果報告

日本原子力研究開発機構　核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター　深地層研究部

（編）中山　雅、雑賀　敦

（2020 年 10 月 19 日受理）

幌延深地層研究計画は、「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 つの段階に分けて実施している。

令和元年度は、「幌延深地層研究計画　平成 31 年度調査研究計画」に従って、調査研究および地下施設の建設を進めた。研究開発は従来通り、「地層科学研究」と「地層処分研究開発」に区分して行った。具体的には、「地層科学研究」では、地質環境調査技術開発、地質環境モニタリング技術開発、深地層における工学的技術の基礎の開発、地質環境の長期安定性に関する研究、という研究課題を設定し、「地層処分研究開発」では、人工バリアなどの工学技術の検証、設計手法の適用性確認、安全評価モデルの高度化および安全評価手法の適用性確認、という研究課題を設定している。

幌延深地層研究計画の成果は、日本原子力研究開発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。

幌延深地層研究センター：〒098-3224　北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2

JAEA-Review 2020-042

Horonobe Underground Research Laboratory Project Investigation Report for the 2019 Fiscal Year

(Eds.) Masashi NAKAYAMA and Atsushi SAIGA

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received October 19, 2020)

The Horonobe Underground Research Laboratory Project will be conducted in three phases, namely "Phase 1: Surface-based investigations", "Phase 2: Construction Phase" (investigations during construction of the underground facilities) and "Phase 3: Operation phase" (research in the underground facilities). This report summarizes the results of the investigations for the 2019 fiscal year (2019/2020).

The investigations, which are composed of "Geoscientific research" and "R&D on geological disposal technology", were carried out according to "Horonobe Underground Research Laboratory Project Investigation Program for the 2019 fiscal year".

The results of these investigations, along with the results which were obtained in other departments of Japan Atomic Energy Agency (JAEA), are properly offered to the implementations and the safety regulations. For the sake of this, JAEA has proceeded with the project in collaboration with experts from domestic and overseas research organizations.

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

目次

1. はじめに 1
2. 令和元年度の主な調査研究の成果 3
3. 地層科学研究 7
3.1 地質環境調査技術開発 7
3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発. 42
3.3 地質環境の長期安定性に関する研究 49
4. 地層処分研究開発 53
4.1 処分技術の信頼性向上 53
4.2 安全評価手法の高度化 81
5. 地下施設の維持管理 86
5.1 地下施設の維持管理 86
5.2 掘削土(ズリ)の管理 86
5.3 排水の管理 87
6. 環境調査 89
6.1 排水量および水質調査結果 89
6.2 研究所用地周辺の環境影響調査結果 100
7. 安全確保の取組み 103
8. 開かれた研究 104
8.1 国内機関との研究協力 104
8.2 国外機関との研究協力 107
参考文献 108
付録 112

Contents

1. Introduction 1

2. Outline of the investigation program for the 2019 fiscal year 3

3. Geoscientific research 7

3.1 Development of techniques for investigating the geological environment 7
3.2 Development of engineering techniques for use in deep geological environment 42
3.3 Studies on the long-term stability of the geological environment 49

4. Research and development on geological disposal technology 53

4.1 Improving the reliability of disposal technologies 53
4.2 Enhancement of safety assessment methodologies 81

5. Maintenance of the underground facilities 86

5.1 Maintenance of the underground facilities 86
5.2 Management of drilling material 86
5.3 Management of drainage 87

6. Environmental monitoring 89

6.1 Amount of drainage and water analysis 89
6.2 Environmental monitoring around the Horonobe Underground Research Center 100

7. Security effort 103

8. Collaboration with other research organizations 104

8.1 Collaboration with domestic research organizations 104
8.2 Collaboration with overseas research organizations 107

References 108

Appendixes 112

図目次

図 1　令和元年度の主な調査研究 ･･･ 3
図 2　研究所用地における主な施設と観測装置の配置 ･･･ 5
図 3　ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所 ･･･ 5
図 4　深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所 ･･･ 6
図 5　亀裂ネットワークモデルを用いた水理解析の概要 ･･･ 8
図 6　実測値と解析値の比較 ･･･ 9
図 7　実測値と解析値との誤差（RMSE）一覧 ･･･ 9
図 8　断層帯中の割れ目（もしくは単独のせん断割れ目）がとり得る透水性の上限値と DI の関係 ･･･ 11
図 9　試験孔の位置（左図）と水圧擾乱試験の概念（右図） ･･･ 11
図 10　水圧擾乱試験中の試験区間の短縮量（上図）と水圧および注入流量（下図） ･･･ 12
図 11　水圧擾乱試験中の区間水圧と断層のせん断変位量（上図）および水理開口幅（下図） ･･･ 12
図 12　水圧擾乱試験中の断層の透水量係数と DI ･･･ 13
図 13　地下施設からの湧水量（上図）と HDB-6 孔の稚内層における断層区間の水圧観測結果（下図）（2006/11/19～2020/3/24 のデータ） ･･･ 14
図 14　地下施設からの湧水に伴う HDB-6 孔の水圧変化の解析結果 ･･･ 14
図 15　坑道内で採取した地下水の塩分の経時変化 ･･･ 16
図 16　深度 350m 調査坑道のボーリング孔における地下水の塩分の経時変化 ･･･ 17
図 17　地下水中の有機物の構成割合 ･･･ 18
図 18　岩石溶出試料および深度 350m 地下水の蛍光特性 ･･･ 18
図 19　解析モデル ･･･ 20
図 20　水平面内の主応力に関する解析結果と既存調査結果との比較 ･･･ 20
図 21　内空変位の計測結果と解析結果の比較 ･･･ 21
図 22　水圧擾乱試験における試験区間の伸縮量とパッカー圧の変化の関係性を把握するために行った実験（a～c）とその結果（d～g） ･･･ 22
図 23　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 ･･･ 24
図 24　C05 における水圧モニタリング結果 ･･･ 24
図 25　C06 における水圧モニタリング結果 ･･･ 25
図 26　C07 における水圧モニタリング結果 ･･･ 25
図 27　C08 における水圧モニタリング結果 ･･･ 26
図 28　C09 における水圧モニタリング結果 ･･･ 26
図 29　試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水質モニタリング継続可能区間 ･･･ 28
図 30　C05 の区間 2 における水質モニタリング結果 ･･･ 29
図 31　人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺の水圧分布 ･･･ 30
図 32　解析領域と解析条件 ･･･ 31
図 33　140m 調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中の飽和度の変化例 ･･･ 32
図 34　岩盤内部における酸素の流れ (a)拡散による酸素の流れ、(b)移流と拡散を合わせた酸素の流れ ･･･ 33
図 35　岩盤内部におけるガスおよび地下水中の酸素濃度 ･･･ 33
図 36　傾斜計データの一例 ･･･ 34
図 37　樹脂注入試験の概要 ･･･ 35
図 38　樹脂浸透状況の観察 ･･･ 36
図 39　割れ目への樹脂浸透状況の例 ･･･ 36
図 40　割れ目開口幅の分布 ･･･ 37
図 41　地下深部の低流動域の空間分布を推定する手順 ･･･ 39
図 42　塩濃度および酸素・水素同位体比の空間分布の推定結果 ･･･ 40
図 43　酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度の関係 ･･･ 40
図 44　地下水流動解析から推定した地下水移行時間および動水勾配の空間分布の一例 ･･･ 41
図 45　地震計設置位置 ･･･ 42

図 46　北海道地域の震央分布 ･･････ 43
図 47　幌延深地層研究センター周辺の震央分布 ･･････ 43
図 48　令和元年 12 月 12 日の地震波の周波数別の振幅 ･･････ 44
図 49　ボーリングコアで観察される粘土質断層（左図）と稚内層中の粘土質断層の分析結果（右図） ･･････ 46
図 50　計測器ごとの計測不良割合の経時変化 ･･････ 47
図 51　光ファイバー式地中変位計計測結果 ･･････ 48
図 52　地下施設に設置した地震計 ･･････ 49
図 53　抽出したイベントと各成分・各観測点での波形 ･･････ 50
図 54　表 2 のイベント No.7 と No.8 の波形図 ･･････ 51
図 55　声問層・稚内層から得られた岩石中のセレンの分析結果 ･･････ 52
図 56　人工バリア性能確認試験の概念図 ･･････ 53
図 57　人工バリア性能確認試験で生じる熱－水理－力学－化学プロセスの相関関係 ･･････ 54
図 58　緩衝材および埋め戻し材への注水量の経時変化 ･･････ 55
図 59　グラウトの施工箇所 ･･････ 55
図 60　緩衝材外周のケイ砂部の間隙水圧変化 ･･････ 56
図 61　緩衝材内部の温度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定） ･･････ 57
図 62　緩衝材内部の水分の飽和度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定） ･･ 57
図 63　オーバーパック腐食試験の概念図 ･･････ 58
図 64　腐食センサー（6 段目、135°）の炭素鋼電極表面の外観（左）とスケッチ（右）および、顕微ラマン分光分析箇所（右図 A～E） ･･････ 59
図 65　腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の X 線回折結果 ･･････ 59
図 66　腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の顕微ラマン分光分析結果 ･ 60
図 67　模擬オーバーパックの腐食深さ分布の展開図（赤色ほど腐食量大）と極値統計解析における領域、区画の分割 ･･････ 61
図 68　オーバーパック腐食試験データの極値統計解析に基づく実際のオーバーパックの最大腐食深さ推定値と既往の評価式の比較 ･･････ 61
図 69　試験設備の概要 ･･････ 68
図 70　隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果（1/2） ･･････ 68
図 71　隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果（2/2） ･･････ 69
図 72　坑道が卓越した移行経路となり得るシナリオ例 ･･････ 71
図 73　縮尺模型試験の概念図 ･･････ 72
図 74　縮尺模型試験における膨潤変形率と注水量の経時変化 ･･････ 73
図 75　緩衝材と埋め戻し材の境界面における膨潤変形挙動計測 ･･････ 73
図 76　EDZ シーリング試験の試験領域概略図 ･･････ 74
図 77　粘土止水壁周辺の上面図および断面図 ･･････ 75
図 78　粘土止水壁の施工作業の状況 ･･････ 76
図 79　トモグラフィ調査の断面位置 ･･････ 77
図 80　弾性波トモグラフィ調査の速度分布図 ･･････ 78
図 81　比抵抗トモグラフィ調査の比抵抗分布図 ･･････ 78
図 82　三次元解析の速度分布図 ･･････ 79
図 83　地中無線伝送システムの装置構成イメージ ･･････ 80
図 84　地中無線装置による計測データの例 ･･････ 80
図 85　層理面に対する異方性に着目した原位置拡散試験 ･･････ 81
図 86　解析モデルの概要 ･･････ 83
図 87　2 つの移行経路を考慮した解析モデルを用いた解析結果 ･･････ 84
図 88　フロー・スタグナント領域を考慮した解析モデルを用いた割れ目中トレーサー試験のウラニンおよび Cs の解析結果 ･･････ 85
図 89　掘削土（ズリ）置場の構造 ･･････ 87
図 90　排水系統と各水質分析用試料の採取地点 ･･････ 89
図 91　地下施設からの排水の処理フローと試料採取点 ･･････ 91

図 92　天塩川の調査地点 ····· 93
図 93　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点 ····· 95
図 94　清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点 ····· 97
図 95　環境調査実施場所 ····· 100

表目次

表 1　幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震 ····· 44
表 2　10 月 29 日 10:00～14:20 の間で抽出されたイベントの時刻 ····· 50
表 3　天塩川への排水量 ····· 90
表 4　地下施設からの排水にかかる水質調査結果 ····· 92
表 5　天塩川の水質調査結果 ····· 94
表 6　掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果 ····· 96
表 7　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 ····· 98
表 8　浄化槽排水の水質調査結果 ····· 99
表 9　清水川の水質調査結果 ····· 101
表 10　確認された重要種（魚類） ····· 102

写真目次

写真 1　緩衝材定置試験の公開の様子 ····· 62
写真 2　緩衝材可視化試験の状況 ····· 63
写真 3　オーガ方式の除去装置の外観 ····· 64
写真 4　オーガ方式で除去した充填部の様子 ····· 64
写真 5　吸引機の外観と、捕集した充填材 ····· 64
写真 6　ウォータジェット方式の装置とノズル ····· 65
写真 7　除去試験の様子と、除去後の隙間 ····· 65
写真 8　模擬 PEM の回収試験の様子 ····· 66
写真 9　設備の点検および更新状況 ····· 86
写真 10　掘削土（ズリ）置場 ····· 87
写真 11　排水処理設備 ····· 88
写真 12　天塩川の採水状況 ····· 93
写真 13　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況（A1～A4） ····· 95
写真 14　清水川の採水状況 ····· 97
写真 15　清水川の水質調査 ····· 100
写真 16　生息魚類調査 ····· 101
写真 17　安全パトロールの状況 ····· 103
写真 18　安全行事の状況（安全大会） ····· 103

This is a blank page.

1. はじめに

国立研究開発法人[*1]日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、平成 13 年 3 月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めています。幌延深地層研究計画は、実際の地層処分事業とは明確に区別することを前提に、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）を行うものです。また、本計画では、「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進めることとしています。

平成 26 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、「高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある」との考え方が示され、そのために「地層処分の技術的信頼性について最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映する」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）[*2]」（以下、第 3 期中長期目標[*3]）が定められ、この第 3 期中長期目標を達成するために、「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）（平成 27 年 4 月 1 日～令和 4 年 3 月 31 日）」（以下、第 3 期中長期計画）を策定しました。第 3 期中長期計画中の幌延深地層研究計画における研究開発としては、「実際の地質環境における人工バリア[*4]の適用性確認、処分概念オプションの実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証に重点的に取り組む。また、平成 31 年度末（令和 2 年 3 月末）までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。」としていました。

これに基づき、幌延深地層研究センターでは、平成 27 年度以降、第 3 期中長期計画で重点的に取り組むとした 3 つの課題（以下、必須の課題）に重点を置いた研究開発を進めてきました。平成 30 年度には、研究開発成果の取りまとめに着手するとともに、研究開発の進捗状況等について外部専門家による評価を受け、必須の課題の成果について取りまとめた報告書[(1)]を公開しました。そして、これまでの研究の成果や外部委員会の評価、国内外の状況を踏まえて検討した結果、研究の継続が必要となったことから、令和元年 8 月 2 日に「幌延町における深地層の研究に関する協定書」（以下、三者協定）に基づき、北海道および幌延町に「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画（案）」について協議の申し入れを行いました。その後、三者協定に基づき北

---

*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：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、我が国における原子力の研究、開発および利用を計画的に遂行するために原子力委員会が定める基本的考え方に則り、その業務を総合的、計画的かつ効率的に行うことが定められています。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29条の規定に基づき定めた目標です。

*3：第3期中長期目標の期間は、平成27年4月1日～令和4年3月31日の7年間です。

*4：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、工学的に形成するものです。

海道および幌延町により設置された「幌延深地層研究の確認会議」(以下、確認会議) において、研究の必要性や妥当性、三者協定との整合性を論点とした内容の精査が行われ、北海道および幌延町により「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画 (案)」が受け入れられ、原子力機構は「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」を策定しました。原子力機構は、これらの研究課題については、令和 2 年度以降、第 3 期および第 4 期中長期目標期間を目途に取り組みます[*5]。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、埋め戻しを行うことを具体的工程として示します。また、これまでと同様に三者協定の遵守を大前提に、放射性廃棄物を持ちこむことや使用することなく、また最終処分場とはせずに、安全を最優先に研究を進めます。さらに、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、国内外の資金や人材を活用することを検討します。

なお、その後に行われた第 3 期中長期計画の改定において、「令和 2 年度以降においては、研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて定めた「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」に基づき、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および地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証を進める。」と追記しています。

*5：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)。

2. 令和元年度の主な調査研究の成果

令和元年度は、「幌延深地層研究計画　平成 31 年度調査研究計画」[(2)]にしたがって、第 3 期中長期計画に掲げた必須の課題に関わる調査研究および地下施設の維持管理などを実施しました。

調査研究では、必須の課題に重点的に取り組むとともに、必須の課題に関わる調査研究の基礎情報となる坑道周辺の掘削影響領域を含む地質環境特性の長期的な変化や地質環境情報に関するデータの取得などを継続しました（図 1）。以下に調査研究の概要を示します。

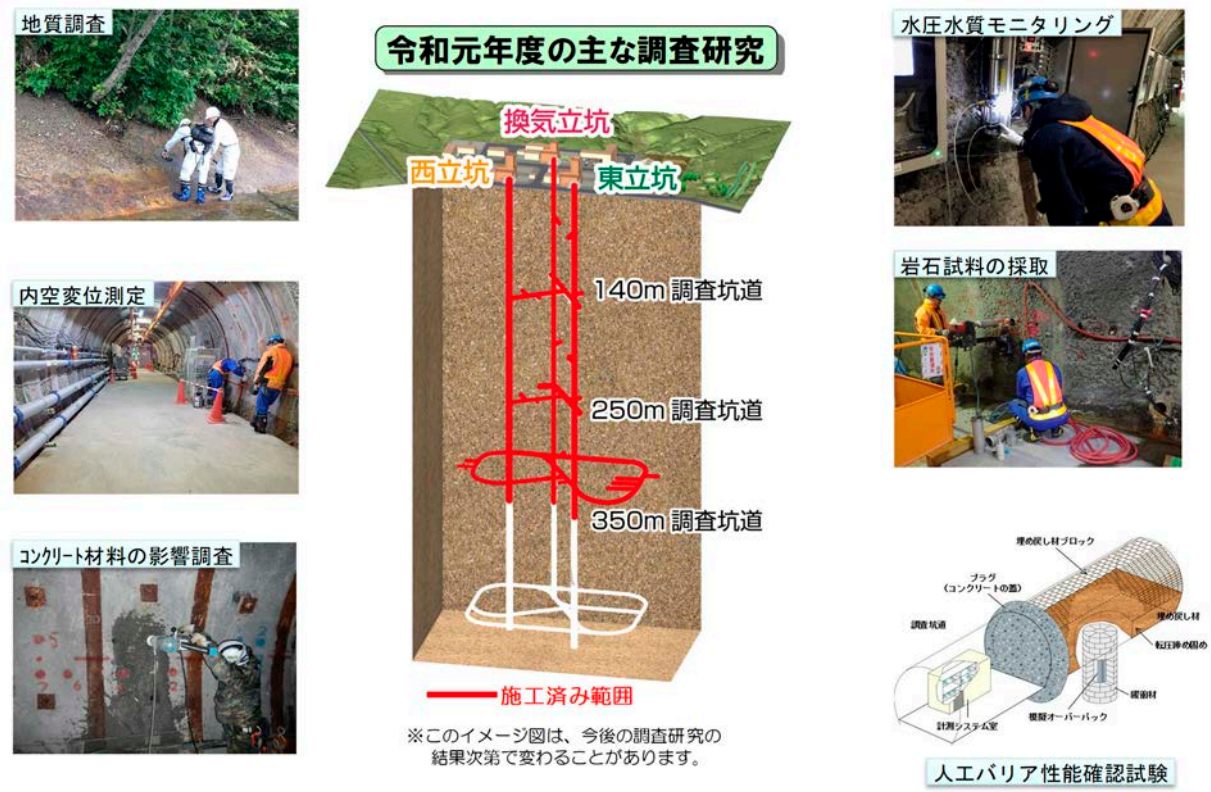


図 1　令和元年度の主な調査研究

実際の地質環境における人工バリアの適用性確認については、実際の地質環境において人工バリアや周辺岩盤中での熱－水理－力学－化学連成挙動[*6]や物質の移行挙動などを計測・評価する技術の適用性を確認し、地層処分事業における精密調査段階の後半に必要となる技術基盤の確立を目的として、深度 350m 調査坑道での人工バリア性能確認試験を継続し、オーバーパック腐食試験および原位置トレーサー[*7]試験を実施しています。令和元年度は、人工バリア性能確認試験において、地下水の浸潤状況、温度、応力、化学特性などに関する計測を継続するとともに、

*6：地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤には、廃棄体からの熱、地下水との反応、岩盤から（または岩盤へ）作用する応力、化学的な変化（緩衝材中の間隙水の水質の変化）などによる影響が想定されています。実際の処分環境では、これらの影響が複合的に発生すると考えられ、その挙動を、熱－水理－力学－化学連成挙動と呼んでいます。

*7：地下水の流れの方向や流れる時間などを調べるために、地下水に目印として混ぜる染料やその他の薬品を指します。重水や蛍光染料（ウラニンなど）、非放射性セシウムやユウロピウムなど、多種のトレーサーがあります。幌延深地層研究計画では放射性物質を利用したトレーサー試験を行うことはありません。

試験エリアの逸水を抑制するためグラウトを実施しました。また、減熱試験を開始した場合の緩衝材の状態に関して連成解析を実施しました。オーバーパック腐食試験については、試験体から回収した腐食センサーの腐食生成物の分析を実施しました。また、健岩部および割れ目を対象として実施したトレーサー試験について、モデル化/解析手法の検討を継続しました。

処分概念オプションの実証については、人工バリアの設置環境の地質環境条件や深度依存性*8を考慮しつつ、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証することを目的として、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションの整備を進めています。令和元年度は、人工バリアの定置・品質確認などの実証試験の 1 つとして、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）*9との共同研究で進めている地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究において、隙間充填材の除去技術および模擬廃棄体の回収技術の実証試験を実施しました。

地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証については、堆積岩が有する地震・断層活動などの地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を評価し、堆積岩地域における処分場の立地選定や設計を、より科学的・合理的に行うための技術と知見を整備しています。令和元年度は、断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係の解明を目指した研究を継続しました。

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。さらに、坑道を掘削した後の岩盤と支保の長期挙動の把握や地下施設の耐震安定性に関する評価を行い、地下施設設計の妥当性の検証を継続しました。

研究所用地内の主な施設と観測装置の配置を図 2 に示します。また、幌延町内で実施している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 3 に、深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所を図 4 に示します。

*8：ここでは、深さによって地質環境条件などが変化していくことを意味しています。一般的に地下深くなるほど温度が高くなり、地圧や水圧が高くなるなどの変化が認められています。

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

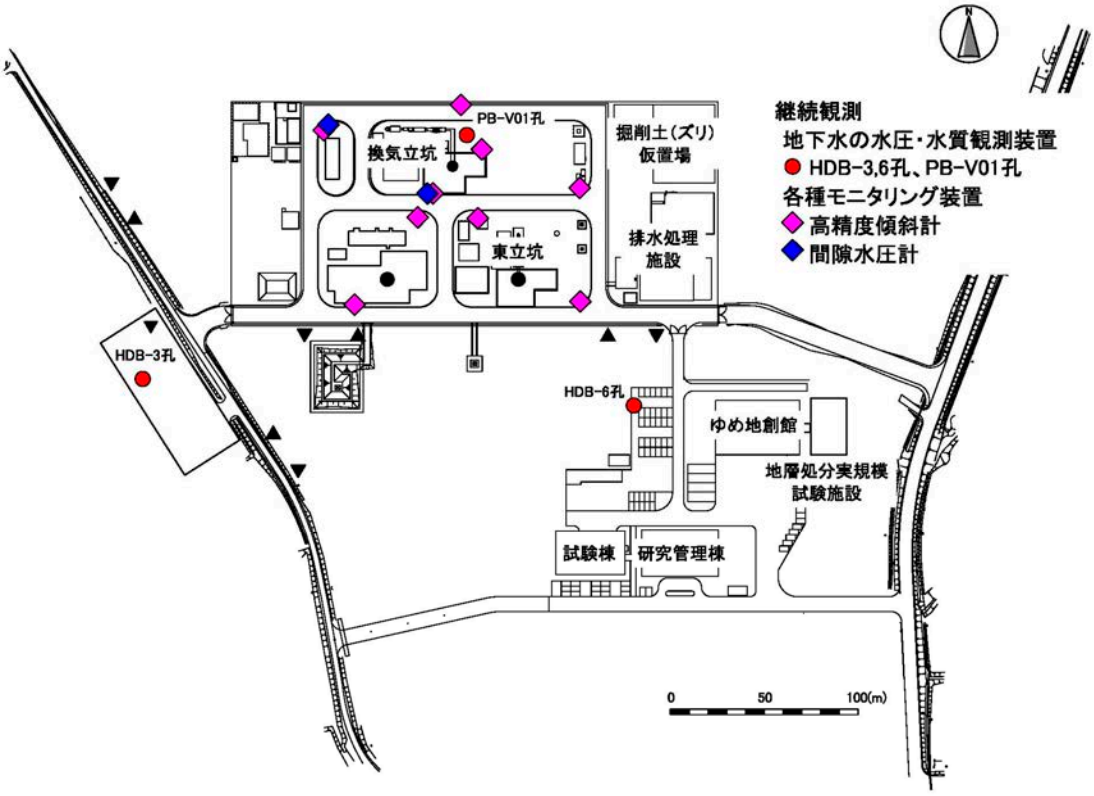


図 2　研究所用地における主な施設と観測装置の配置

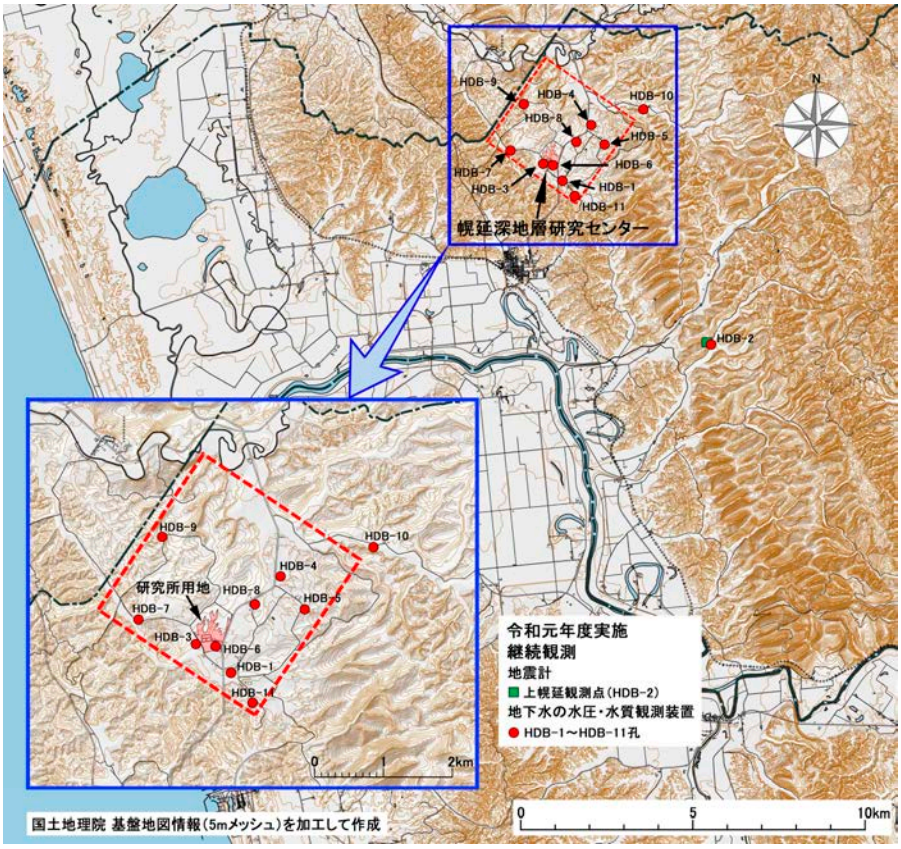


図 3　ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

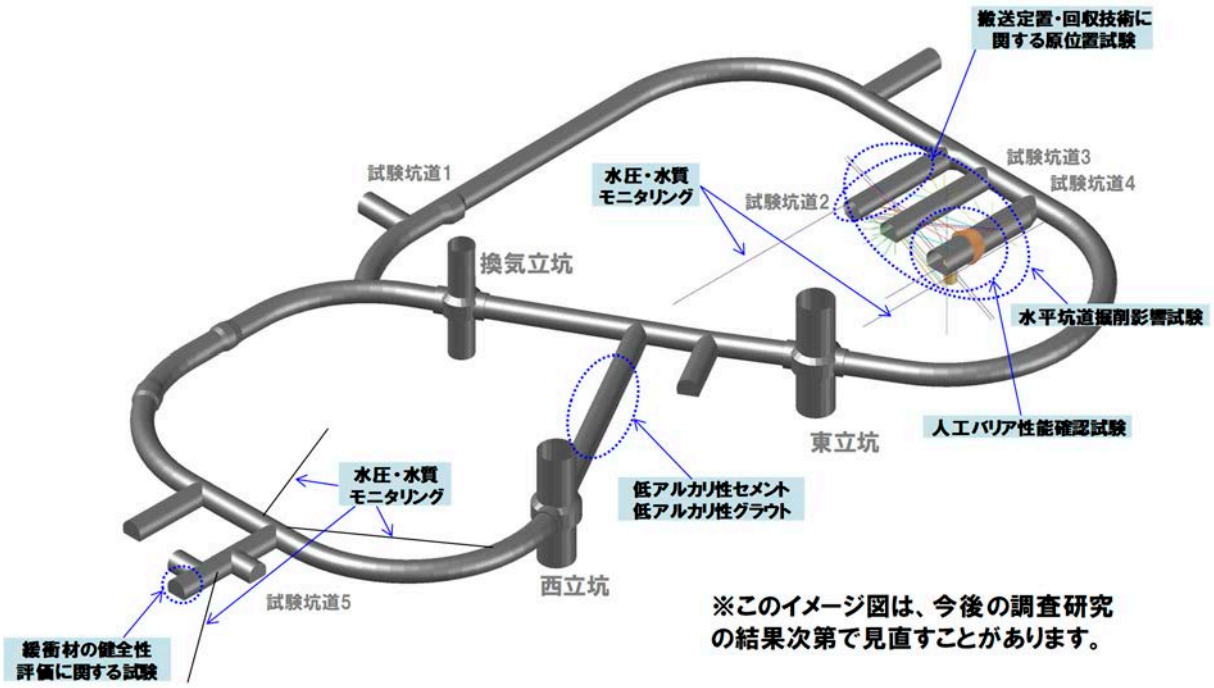


図 4　深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

地下施設の維持管理としては、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理業務（保守点検や修繕など）を引き続き実施するとともに、地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水を、排水処理設備において適切に処理したうえで天塩川に放流しています。また、平成 31 年 4 月 9 日に発生した火災について原因究明を行い、再発防止策として設備の改造とともに点検項目の追加等の対策を行いました。

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あわせて、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きます。そのため、令和元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、本計画を着実かつ効率的に進めました。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*10などを活用した情報発信を継続しました。参考資料として、巻末に令和元年度の外部発表実績を掲載しました。

*10：http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/

3. 地層科学研究

3.1 地質環境調査技術開発

3.1.1 地質環境モデルに関する調査・解析技術の開発

(1) 地質構造

ボーリング調査や坑道掘削時の壁面観察において取得した地質データに基づき、地層および断層・割れ目の空間的な分布に関する特徴を整理して、地質構造の概念や坑道周辺の地質構造モデルの更新を進めています。

地下施設周辺の稚内層には、層理面に平行な断層（以下、層面断層）とそれに斜交する断層（以下、斜交断層）が分布しています[(3),(4)]。そのうち斜交断層は水みちとして機能することが示唆されており、稚内層の水理学的特性は多孔質媒体のみならず亀裂性媒体としての特性も有しています[(5),(6)]。すなわち、水みちとなる断層の分布が地層の透水不均質性に影響しており、そのような場をモデル化する場合、亀裂ネットワークモデル（以下、亀裂モデル）も選択肢の 1 つとなります。亀裂モデルにおける個別の亀裂の空間分布は、調査データから同定された割れ目特性データの統計的分布に基づき確率論的に表現することもできます。亀裂の空間分布がランダムであり、亀裂の形状が一様かつ亀裂同士の切断関係を考慮しないと仮定すると、亀裂の空間分布のモデル構築に必要となるのは、方位分布、亀裂の三次元密度および半径分布であり、これまでボーリング調査や坑道壁面の地質観察により取得される地質データに基づき検討されてきました[(7)]。また、亀裂モデルを水理解析に用いる場合には、亀裂の水理特性を設定する必要があります。そこで令和元年度は、稚内層浅部に分布する斜交断層を対象として、亀裂の透水量係数分布を検討しました。

図 5 に、検討の際に実施した亀裂モデルでの水理解析の概念を示します。解析には、米国 Golder 社が開発したソフトウェアである FracMan®を使用しました。一辺 200 m の立方体内に亀裂モデルを構築するとともに、その中心に長さ 100 m の鉛直の試験区間（ボーリング孔）を配置し、試験区間を注入区間、また、モデル領域の外側の 6 面を流出面とした仮想水理試験を行いました。そして、仮想水理試験の結果として、鉛直の試験区間と交差するそれぞれの亀裂の透水量係数を求めました。亀裂モデルは、平成 29 年度に検討した亀裂特性(方位分布、亀裂の三次元密度、半径分布)[(7)]を用い、亀裂の透水量係数分布は変動値として構築しました。稚内層浅部に分布するそれぞれの斜交断層の透水量係数にはばらつきがあり、本検討の亀裂モデルでは、そのばらつきが対数正規分布に従うと仮定しています。その場合、亀裂の透水量係数分布として対数平均値と対数標準偏差を設定します。今回の仮想水理試験では、対数平均値を 5.1 から 6.2、対数標準偏差を 0.5 から 2.0 の範囲でそれぞれ 0.1 間隔で変動させ、合計 192 通りの亀裂の透水量係数分布を設定しました。亀裂モデルは、確率論的に構築されるモデルであるため、サイコロを振って異なる数字が出ることと同様に、同じ亀裂の透水量係数分布であっても構築毎に異なる亀裂配置のモデルが構築されます。そのため、1 つの亀裂の透水量係数分布に対して 100 リアライゼーションの亀裂モデルを構築し、100 回の仮想水理試験を実施しました。解析結果としては、試験区間において透水に寄与する亀裂が交差する箇所（流出点）の透水量係数が得られます。図 6 に実測値と解析値の比較を示します。実測値としては、地上からのボーリング調査において実施された流体電気伝導度検層（Flowing Fluid Electric Conductivity logging：FFEC 検層）（HDB-11[(8)]、PB-V01[(9)]、SAB-2[(10)]）において取得されたボーリング孔内における流入

出点の透水量係数を用いることとし、3 つのボーリング孔で 35 箇所の流入出点が観測されています。比較には、透水量係数が高い方からカウントした累積頻度を用いており、100 回分の仮想水理試験の累積頻度を、実測である 3 孔の FFEC 検層における稚内層浅部の区間長の合計に合うように正規化しました。そして、比較の結果、最も誤差が小さくなる亀裂の透水量係数分布を抽出しました。なお、FFEC 検層から取得された流入出点が仮想水理試験の試験区間と交差する個々の斜交断層に対応すると仮定しました。一方、解析値については、100 回分の仮想水理試験の結果をプロットしていますが、図 6 の（A）には、同じ対数標準偏差 1.5 の場合における対数平均値-5.1、-5.5、-5.9 の 3 つの解析値をプロットしています。一方、図 6 の（B）には、同じ対数平均値-5.5 の場合における対数標準偏差 1.0、1.5、2.0 の 3 つの解析値をプロットしています。対数標準偏差は透水量係数のばらつきの大小を表しており、その値が小さいほど、ばらつきは小さくなります。すなわち、対数標準偏差が小さいほど、透水量係数の分布の範囲が狭くなるので、解析値のプロットは対数標準偏差が小さいほど傾きが大きくなっています。実測値と解析値の比較の際には、実測値がプロットされる透水量係数の範囲において比較することとし、実測値の回帰直線と解析値の差の二乗平均平方根（Root Mean Square Error: RMSE）を算出し、その値が最も小さくなる時、実測である FFEC 検層の結果を最も再現する亀裂の透水量係数分布とすることにしました。図 7 に、仮想水理試験を実施した対数平均値と対数標準偏差の組合せと、その場合の RMSE の一覧を示します。すべての組合せの仮想水理試験を実施した結果、対数平均値が-5.5、対数標準偏差 1.5 の時に最も RMSE が小さくなりました。

上記のように、本検討では、亀裂モデルにおいて表現される個々の亀裂に対して水理特性をどのように設定するのかを、稚内層浅部に分布する斜交断層を対象として検討しました。その結果、水理特性として実測データである FFEC 検層の結果を再現できる亀裂の透水量係数分布を設定することができました。

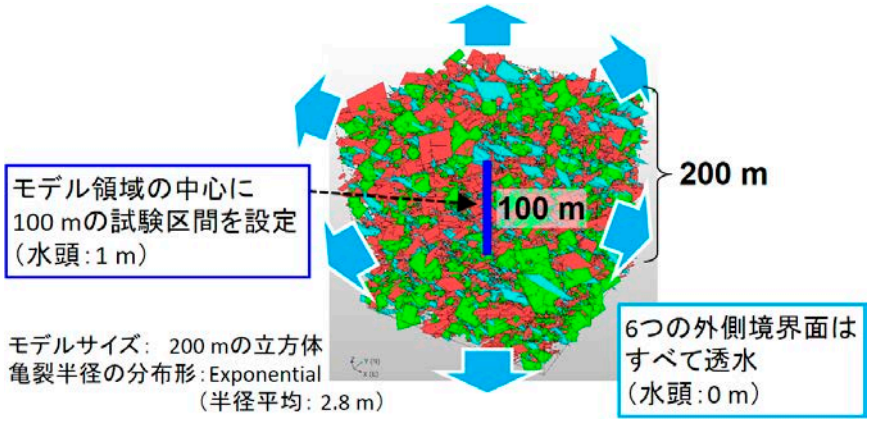


図 5　亀裂ネットワークモデルを用いた水理解析の概要

一辺 200 m の立方体をモデル領域とし、その中心に 100 m の鉛直の試験区間（ボーリング孔）が配置されています。この解析は、フローログ検層の解析的なシミュレーションです。試験区間を注入区間（水頭 1 m）として、6 つの外側境界面（水頭 0 m）に向けて地下水を流し、試験区間と亀裂が交差する位置すなわち流出点の個々の流量を取得します。その流量から個々の流出点の透水量係数を算出します。

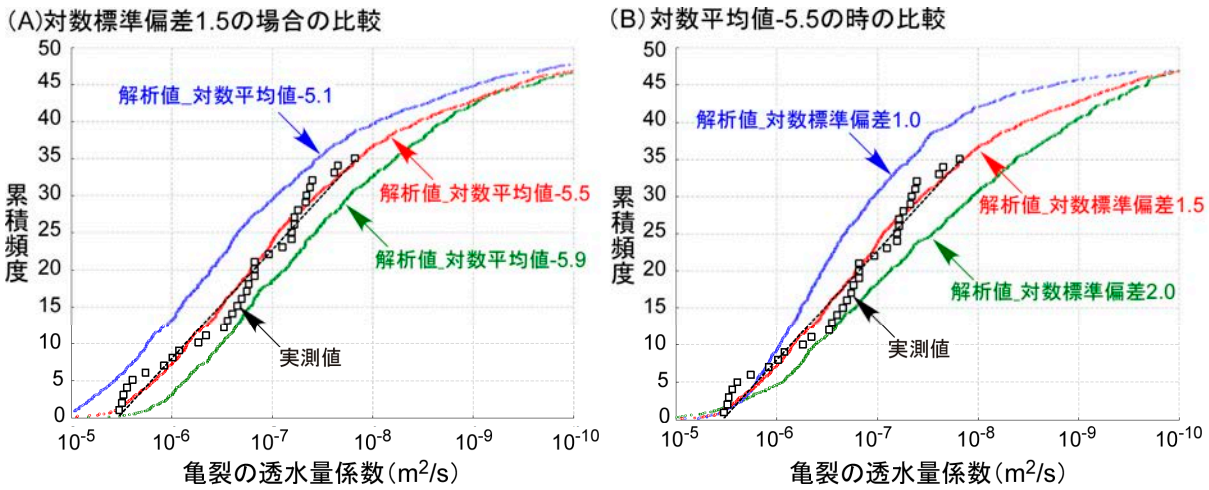


図 6　実測値と解析値の比較

(A) と (B) ともに、横軸は亀裂の透水量係数であり、大小を反転させています。また、黒い四角のプロットは、3 つのボーリング孔（HDB-11、PB-V01、SAB-2）の FFEC 検層の結果を示しています。(A) の図では、いずれも対数標準偏差が 1.5 の場合に、3 つの異なる対数平均値の解析値をプロットしています。(B) の図では、いずれも対数平均値が-5.5 の場合に、3 つの異なる対数標準偏差の解析値をプロットしています。

対数平均値 \ 対数標準偏差	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
-5.1	17.02	16.49	16.98	15.56	13.22	11.43	11.65	10.44	6.71	6.64	5.91	4.81	3.53	3.96	3.78	1.49
-5.2	14.31	14.34	15.21	12.01	10.89	9.64	10.49	7.74	6.89	4.61	5.50	4.16	2.13	1.23	1.43	1.87
-5.3	13.69	12.99	13.60	12.20	10.07	8.27	8.59	7.41	3.83	3.76	3.06	2.16	1.47	1.59	1.46	2.08
-5.4	11.15	11.30	11.97	8.97	7.86	6.68	7.51	4.76	4.06	1.78	2.68	1.55	0.97	2.39	1.81	1.73
-5.5	10.87	10.17	10.75	9.27	7.14	5.47	5.72	4.62	1.24	0.99	0.69	0.93	2.35	1.83	2.01	4.48
-5.6	9.61	8.91	9.47	8.01	5.89	4.26	4.43	3.45	1.16	0.98	1.51	2.18	3.52	3.00	3.24	5.69
-5.7	7.53	7.61	7.93	5.20	4.19	3.16	3.83	1.79	2.22	2.66	1.76	2.78	4.94	6.18	5.64	5.37
-5.8	7.52	6.76	7.26	5.85	3.93	2.94	2.76	2.69	3.71	3.73	4.31	4.95	6.02	5.64	5.78	8.33
-5.9	5.91	5.95	5.91	4.05	3.55	3.20	3.45	3.73	4.54	5.54	4.61	5.57	7.69	8.85	8.39	8.07
-6.0	6.25	5.45	5.89	4.82	4.09	4.32	3.91	4.91	6.65	6.73	7.27	7.75	8.62	8.31	8.53	11.00
-6.1	6.09	5.45	5.78	5.09	5.08	5.59	5.18	6.39	8.14	8.25	8.76	9.17	9.91	9.71	9.89	12.30
-6.2	6.33	5.92	6.13	5.85	6.40	7.04	6.65	7.97	9.68	9.75	10.29	10.60	11.27	11.12	11.29	13.59

0　5　10

誤差(RMSE)

図 7　実測値と解析値との誤差（RMSE）一覧

亀裂ネットワークモデルの亀裂の透水量係数分布は正規分布を仮定し、対数平均と標準偏差が設定されており、それらの組合せとそれぞれの誤差（RMSE）を示しています。

(2) 岩盤の水理

必須の課題の 1 つである「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の一環として、断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係性の解明を目指した研究を行うとともに、断層のせん断*11変形が断層の水理特性に与える影響を確認することを目的とした、通常よりも高い注入圧を用いた透水試験（水圧擾乱試験）を行っています。断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係性については、これまでにダクティリティインデックス（DI）*12という岩石の強度・応力状態を表す指標を用いた検討を行ってきており、断層帯中の割れ目がとり得る透水性の上限値は DI を用いた経験式によって予測可能であることが様々な地域の岩種を対象とした検討により明らかとなってきています(11)（図 8）。このような経験式は、地殻変動（断層運動や隆起侵食）を考慮した断層の透水性の将来予測に直接活かすことが期待できるため、この経験式の信頼性をさらに高めておく必要があります。水圧擾乱試験はこの経験式の妥当性の検証も兼ねて行うものであり、断層内の水圧を人工的に上昇させることによって断層内にせん断変形を誘発させ（図 9 右図）、それによる透水性の変化を計測することにより、断層のずれによって透水性がどの程度上昇し得るかを確認するものです。しかし、試験中の断層のずれをどのように計測するかが技術的な課題となっています。

令和元年度は、平成 30 年度に東立坑底盤ボーリング孔（図 9 左図）にて実施した水圧擾乱試験（深度約 500 m）の結果を用いて、今回新たに開発した水圧擾乱試験中の断層変位量の算出方法（3.1.2(1)参照）の適用性を確認しました(12)。同試験では、高圧注水中に急激な水圧低下をもたらすせん断破壊が断層沿いに生じたことがこれまでの検討で把握できていましたが（図 10 下図）、このせん断破壊時に、試験区間が数 cm ほど短縮したことが今回の検討により明らかになりました（図 10 上図）。この試験区間の短縮は断層の上盤側が下方にずれたことにより発生したものであり（断層面の傾斜角は水平面から 71 度）、上記のせん断破壊のイベントを境に、小さな水圧変化でも断層が敏感に動くようになりました（図 10）。このせん断破壊のイベントの前後で、試験区間の水圧と断層のせん断変位量および水理開口幅*13との関係性を整理すると、図 11 のように示されます。図 11 上図から、区間水圧が 4.4～5.1 MPa の低圧時*14に、せん断破壊の前はせん断変位量が 0 mm でしたが、せん断破壊後は数 mm 以上のせん断変位が生じていた（残っていた）ことが確認できます。この時に、水理開口幅はせん断破壊の前後で変化しなかった、あるいはせん断破壊後の方がわずかに小さくなったことが図 11 下図から確認できます。したがって、数 mm 以上のせん断変位によって断層の水理開口幅が増加しなかったことが示されます。数 mm のせん断変位は、今回試験を行った断層の水理開口幅が数十μm である（図 11 下図）ことを考慮すると、せん断変位による水理開口幅の変化を議論する上では十分に大きな変位量であると言えます。

せん断変位によって断層の水理開口幅が増加しなかった（透水性が上昇しなかった）結果は、同断層の試験開始時の透水性（図 12 の初期状態）が既に DI の経験式が示す上限の範囲に達し

---

*11：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いいます。

*12：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。

*13：亀裂の透水性を実際に支配する開口幅であり、亀裂面が平坦であると仮定して算出します。

*14：亀裂の開口幅は水圧が上昇するとせん断変位に関係なく開口し始めるので、この影響を除くため、水圧の低い段階に着目して検討を行っています。

ていた（図 12）ことと整合的であり、既に過去の断層変位によって十分に透水性が上昇しきっていたことが考えられます。また、試験中、水圧上昇に伴って、有意な水理開口幅の増加が認められましたが（図 11 下図）、これは水圧上昇に伴って通常起こり得る断層の垂直的な開口変位を示しており、これによる透水性の上昇も DI の経験式が示す上限の範囲内に収まっていることが確認できます（図 12）。

今回の試験で与えた水圧上昇量は、隆起侵食に伴う封圧低下量に換算すると*15、概ね 150 m～200 m の隆起侵食量に相当します。すなわち、深度 500 m から深度 300 m に隆起すると図 12 に示すような断層の透水性の上昇が生じ得る可能性が指摘できるとともに、断層運動や隆起侵食が起こっても断層の透水性が DI の経験式の範囲を超えて有意に上昇することはないことが指摘できます。

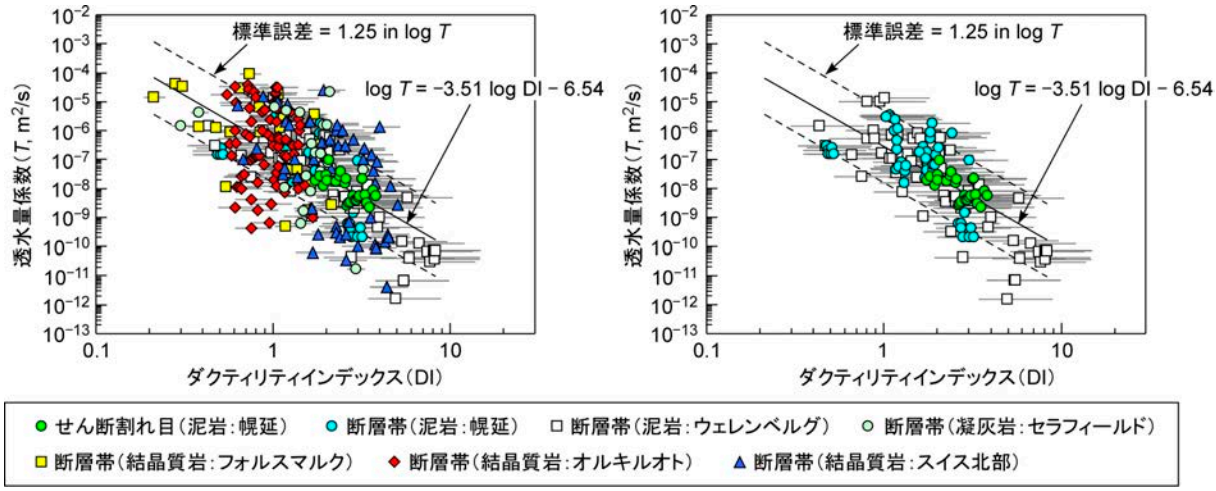


図 8　断層帯中の割れ目（もしくは単独のせん断割れ目）がとり得る透水性の上限値と DI の関係 (13)

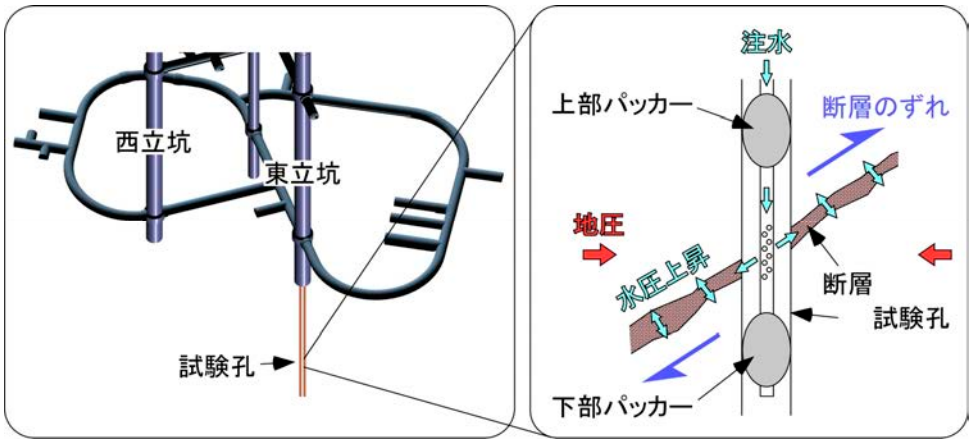


図 9　試験孔の位置（左図）と水圧擾乱試験の概念（右図）

*15：断層面には周囲の地圧によりその面を閉じようとする力が常に掛かっており、隆起侵食に伴う上載物の除去によって周囲の地圧が低下すると、その面を閉じようとする力も弱まり、断層面は徐々に開き始めます。この断層面を閉じようとする力が弱まる現象は、断層内の水圧を上昇させることによっても再現することができ、両者は力学的に等価な現象と考えられています。

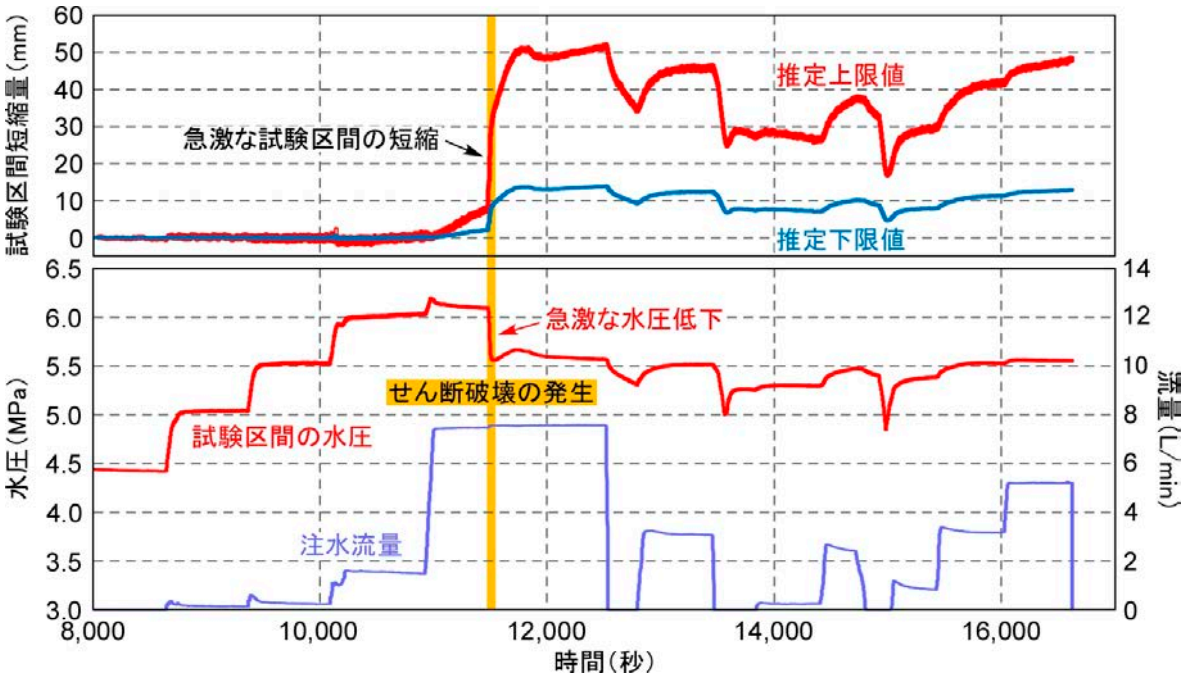


図 10　水圧擾乱試験中の試験区間の短縮量（上図）と水圧および注入流量（下図）[12]

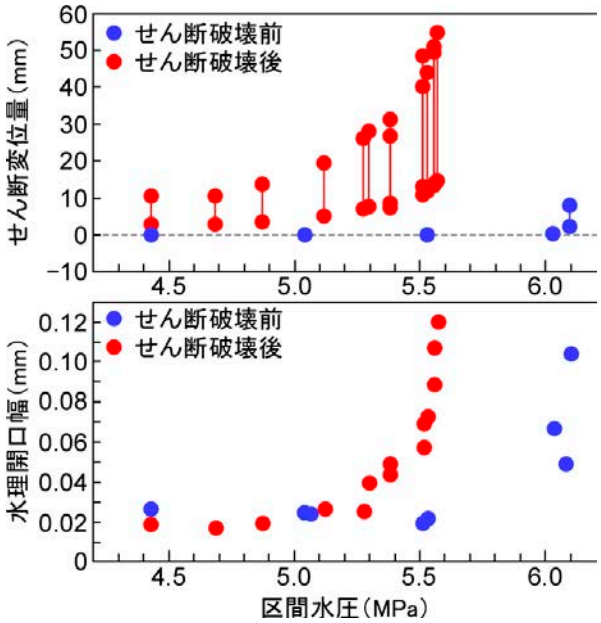


図 11　水圧擾乱試験中の区間水圧と断層のせん断変位量（上図）および水理開口幅（下図）[12]

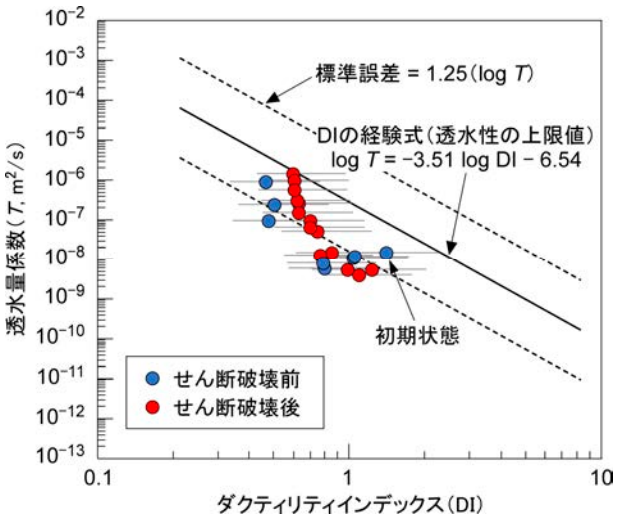


図 12　水圧擾乱試験中の断層の透水量係数と DI

地下施設からの湧水（排水）に伴う周辺地層の水圧変化を把握するために、HDB 孔および PB-V01 孔に設置したモニタリング装置による地下水の間隙水圧の観測を行っています。令和元年度は平成 30 年度に引き続き、換気立坑から 160.5 m 離れた HDB-6 孔の稚内層中の断層区間の水圧観測データを用いて、地層の巨視的な透水性の検討を行いました。図 13 に示すように、同孔では、換気立坑が稚内層に到達した際に発生した顕著な湧水量増加以来、稚内層の浅部の観測点（深度 296 m、369 m、447 m）で有意な水圧低下が認められています。一方で、稚内層の深部の観測点（深度 565 m）では、浅部に認められるような有意な水圧低下は認められていません[*16]。なお、平成 28～30 年度までの一部のデータの乱れについては、平成 30 年度に孔内モニタリング装置内の地層の水圧とは直接関係のない部分の水の入れ替えを実施したところ、データの乱れは解消され[*17]、令和元年度においては同年 12 月に発生した宗谷地方北部で起こった地震の影響による水圧上昇が観測されたものの、1 年以上にわたって水圧低下が発生していないことを確認することができました（図 13 下図）。

図 13 に示される稚内層の浅部と深部の水圧応答の違いを透水試験の結果や水圧・水質分布の検討から推定されている既存の水理地質構造モデル[(14)]と比較すると、両者は整合的であることが指摘できます。すなわち、坑道周辺の稚内層浅部は断層同士が水理学的に連結しているために水圧応答が良い一方で、稚内層深部は断層同士の水理学的連結性が限定的であるために水圧応答が悪いと解釈することができます。このことを解析的に検証するために、令和元年度は平成 30 年度に引き続き、地下水の浸透流解析（地下水の流れのシミュレーション）を行いました。その結果、稚内層深部の透水係数が 1×10^{-10} m/s 以上だと深部でも水圧低下が起こり、透水係数が 1×10^{-11} m/s 以下だと水圧低下が起こらない結果が得られました（図 14）。この結果は、稚内層深部の巨視的な透水性が非常に低いことを示唆しており（健岩部と同程度）、これまでの検討により構築した、地上からのボーリング調査により水理学的に閉鎖的な環境領域を特定する方法[(14)]の妥当性を支持すると言えます。

*16：断層のない区間でも同様の傾向が認められています。
*17：部品を交換しても不具合が解消されない状態が続いていましたが、平成 30 年度に孔内モニタリング装置内に残っていた塩分濃度の高い地下水を清水に入れ替えたところ、不具合が解消されました。

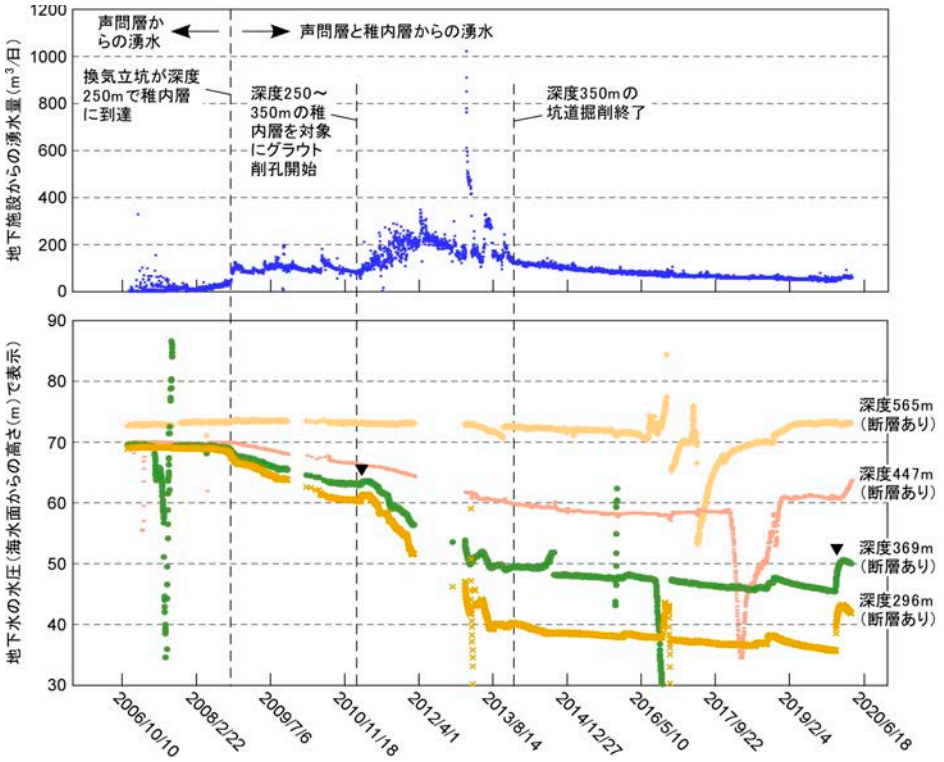


図 13　地下施設からの湧水量（上図）と HDB-6 孔の稚内層における断層区間の水圧観測結果（下図）（2006/11/19～2020/3/24 のデータ）

下図で水圧が急激に変化している箇所は装置の不具合による変動と考えられます。2019 年 12 月 12 日に深度 296 m および深度 369 m にて急激な水圧上昇が観測されていますが、これらは同日の宗谷地方北部で起こった地震の影響によるものと考えられ、類似する水圧上昇が 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震でも確認されています（図中の▼）。このような水圧上昇は、観測区間周辺で地下水の流れが何らかの原因で一時的に滞ると発生し得ます。

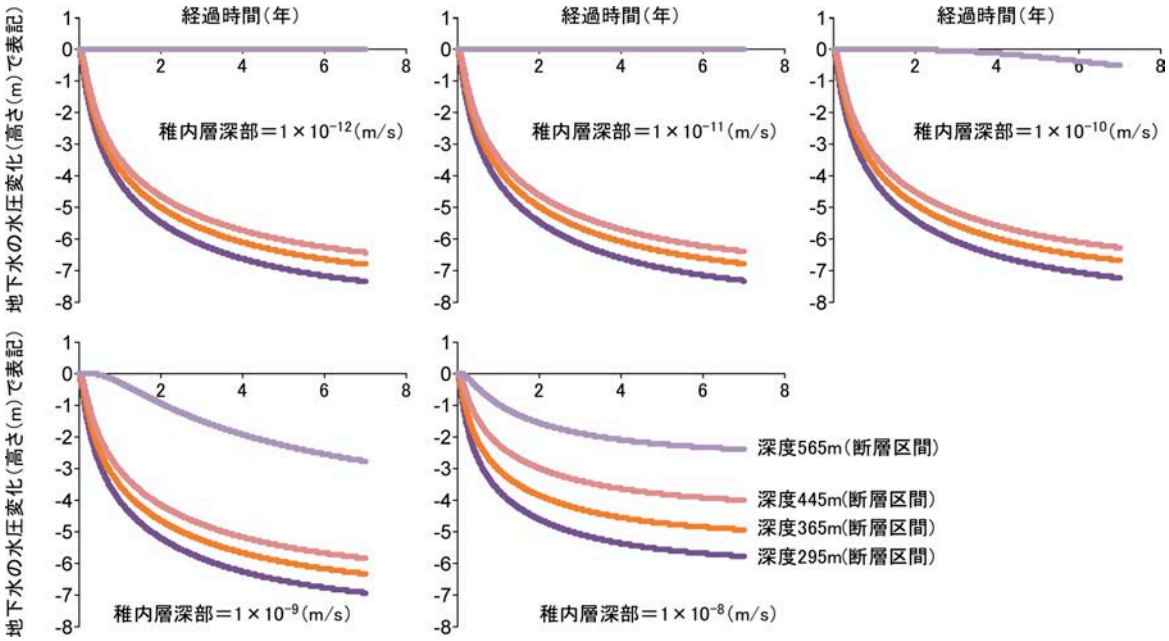


図 14　地下施設からの湧水に伴う HDB-6 孔の水圧変化の解析結果

湧水（揚水）箇所は換気立坑の深度 250 m（稚内層の初出深度）とし、湧水（揚水）量は 70 m^3/日で一定と仮定しています。声問層および稚内層浅部の透水係数はそれぞれ 5×10^{-9}（m/s）および 2×10^{-8}（m/s）と設定し、稚内層深部の透水係数の設定は図中に示す通りです。貯留性は健岩部と同程度に設定しています。

地下施設の深度 350m 調査坑道において、坑道掘削によって周辺岩盤に形成される掘削損傷領域の割れ目の透水性を予測するためのモデル開発を行っています。令和元年度は、掘削損傷領域の割れ目の開口幅を把握するために、低圧・低粘性で樹脂を注入した掘削損傷領域から採取したボーリングコアの詳細な観察を行いました[15]。予め樹脂（蛍光剤添加）を割れ目内に浸透させ、割れ目を固化させた状態でコア採取することにより、原位置での開口幅を保った割れ目を観察することが可能となります。樹脂が浸透した割れ目の開口幅を紫外線照射下で計測した結果、孔口から 0.3 m の範囲では割れ目の開口幅が 1 mm に及ぶ一方、孔口から 0.3 m 以深では最大でも 0.2 mm 程度であることが分かりました（3.1.2(4)参照）。

(3) 地下水の地球化学

第 1 段階の調査結果から推定した坑道周辺の地下水の水質分布とその形成プロセスを確認するとともに、地下施設の建設に伴う坑道周辺の地下水の水質変化を把握するための調査・解析技術の開発を行っています。このため、坑道内で採取した地下水の pH や電気伝導度*18、酸化還元電位*19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分析を実施し、その変化をモニタリングしています。

令和元年度は、平成 30 年度に引き続き、換気立坑および東立坑の壁面に設置した集水リング*20や、坑道内で掘削したボーリング孔から採取した地下水の水質分析を行いました。図 15 に、これらの地点から採取した地下水の塩分*21の経時変化を示します。集水リングで採取された地下水（図中で○印のデータに相当）では、坑道内から掘削されたボーリング孔から採取された地下水（図中で□印のデータに相当）に比べて塩分の変動が大きいことが分かります。これは、主に集水リングとボーリング孔とでの地下水の採取方法の違いによるものと考えられます。また、集水リングで採取された地下水の中では、深度 100 m～200 m 程度の位置で採取された地下水の多く（例えば、WR-V-98.0、WR-V-133.8、WR-V-168.0、WR-E-169.0、WR-E-202.0）で、相対的に塩分の変動が大きい傾向が認められます。このうち WR-V-98.0、WR-V-133.8、WR-V-168.0 では、平成 26 年度以降、塩分が低下する傾向が認められます。これは、平成 30 年度にも検討したように、立坑を通じて塩分が低い浅部地下水の引き込みが生じ、相対的に深部に位置する塩分の高い地下水と混合していることによると考えられます。

また、深度 350m 調査坑道で行われている人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔から採取した地下水の水質分析結果を、図 16 に整理しました。試験坑道 4 は平成 25 年度に掘削され、平成 26 年度に人工バリアを埋め戻したのちに人工バリア性能確認試験が開始されています。平成 28 年度より試験箇所に対する注水量が増加され、また令和元年度は、試験坑道 4 周辺にグラウトが実施されました。しかし、試験坑道 4 周辺のボーリング孔（13-350-C05、13-350-C09）では、これらに関連するような塩分の変化は認められませんでした。また、深度 350m

---

*18：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。

*19：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。

*20：立坑内で、坑壁から染み出した地下水を回収・採取するために、立坑壁面に 30～40 m ごとに設置されている設備です。

*21：ここでは、地下水 1L に溶けているナトリウムイオン、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオン、塩化物イオン、硫酸イオンの総重量を差します。

調査坑道の他のボーリング孔（13-350-C06、14-350-C04）に関しても、令和元年度まで塩分の大きな変化は認められていません。

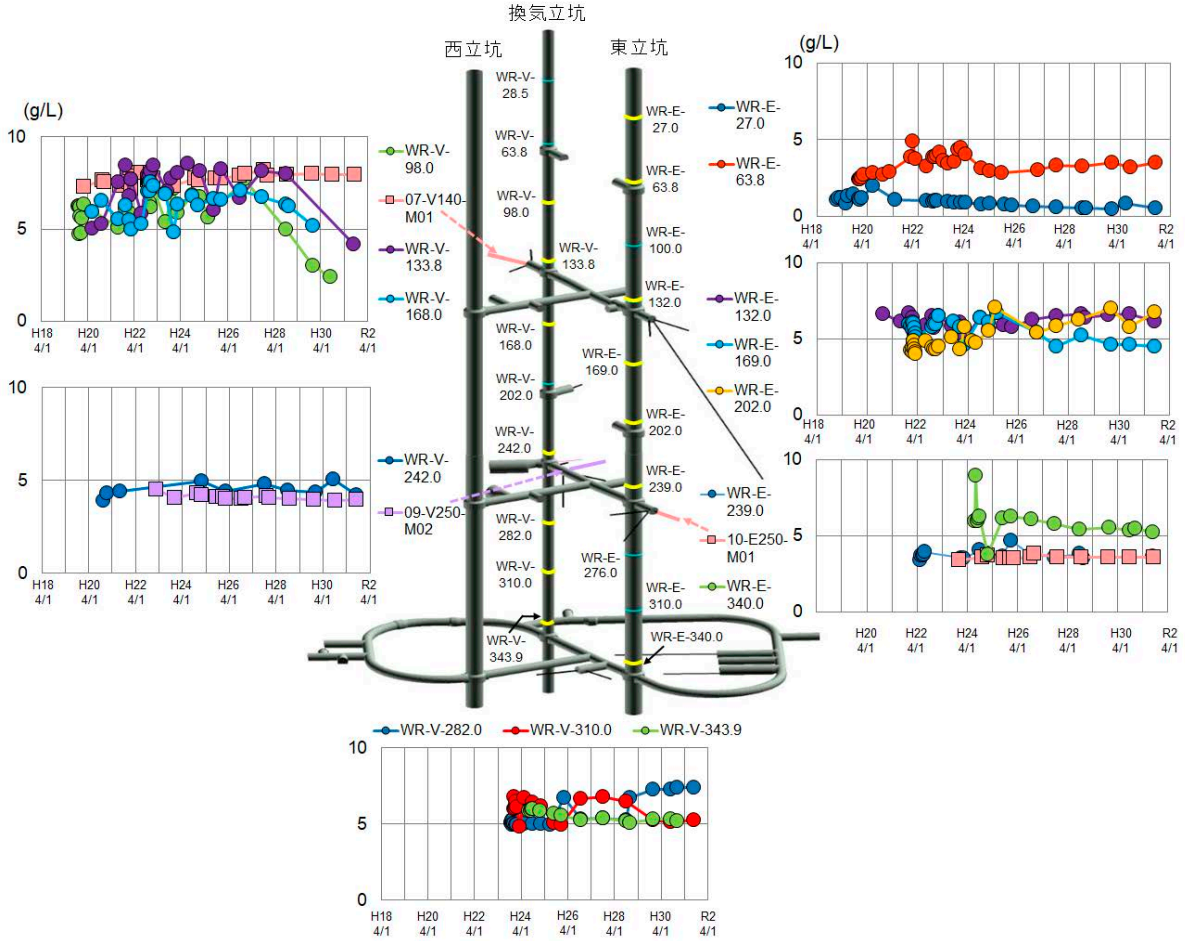


図 15　坑道内で採取した地下水の塩分の経時変化

図中の“V”および“E”はそれぞれ“換気立坑”と“東立坑”を、“WR”は集水リングを表しています。V または E のうしろの数字は深度(m)を表しています。また、○は集水リング、□は坑道内で掘削したボーリング孔から採取した地下水のデータを表しています。

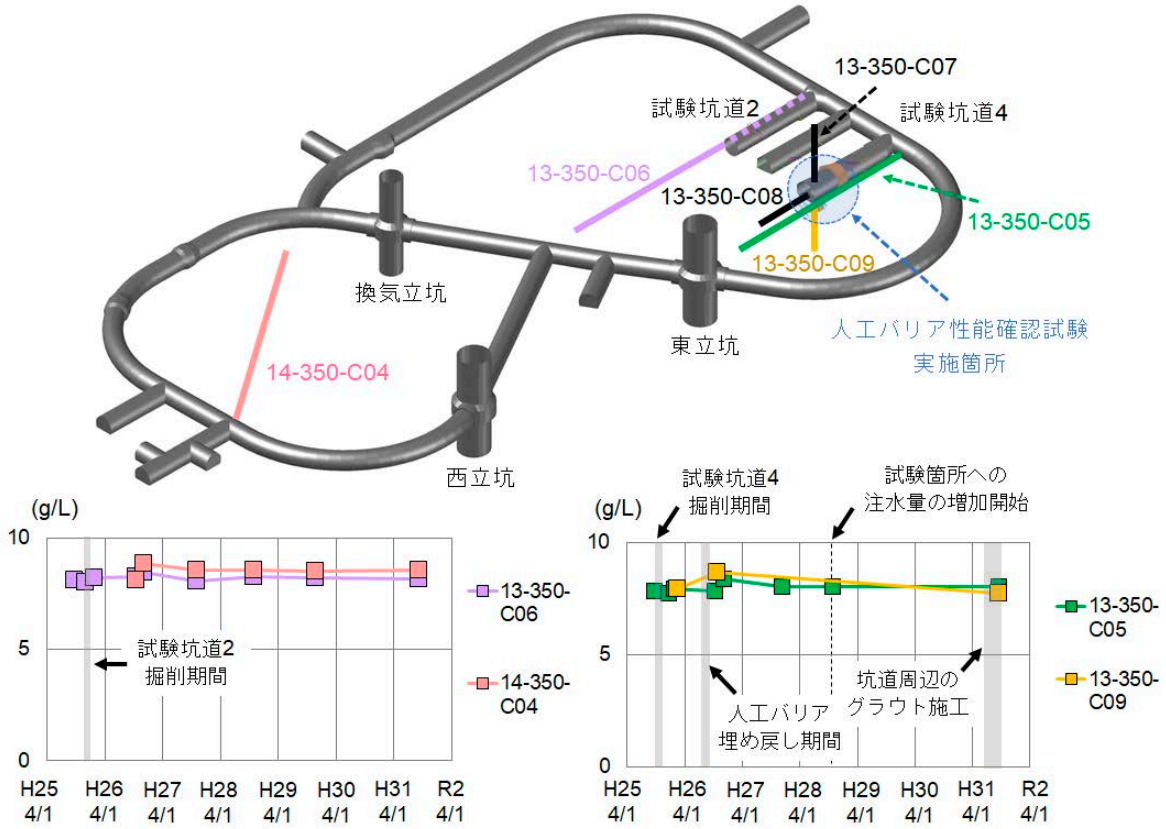


図 16　深度 350m 調査坑道のボーリング孔における地下水の塩分の経時変化

幌延の地下水には比較的多くの有機物が溶存しており、元素の移動性に影響を与える可能性があるため、その特性を評価するための研究を行っています。令和元年度は、樹脂に対する吸着しやすさの違いを利用して有機物を分画する手法を、幌延の地下水に適用しました。その結果、図 17 に示すように、深度 140m 調査坑道（08-E140-C01）および深度 250m 調査坑道（09-V250-M02）から採取した地下水では、有機物の約 60 %が腐植物質*22、約 10 %が疎水性中性物質*23、約 30 %が親水性物質*24から構成されることが分かりました。また、深度 350m 調査坑道（13-350-C06）から採取した地下水では約 50 %が腐植物質、約 10 %が疎水性中性物質、約 40 %が親水性物質からなり、腐植物質の割合がやや低いことも明らかになりました。各深度の地下水中の腐植物質の割合については、既往の研究結果(16)ともおおむね整合することが確認されました。なお、以上の成果は、国立環境研究所との共同研究により得られたものです。

*22：ある条件下で樹脂に吸着した物質のうち、アルカリ性溶液で溶出される物質群です。特定の化学構造をもちません。
*23：ある条件下で樹脂に吸着した物質のうち、アルカリ性溶液で溶出されなかった物質群です。炭化水素や脂質などを含みます。
*24：ある条件下で樹脂に吸着しなかった物質群です。多糖類、タンパク質などを含みます。

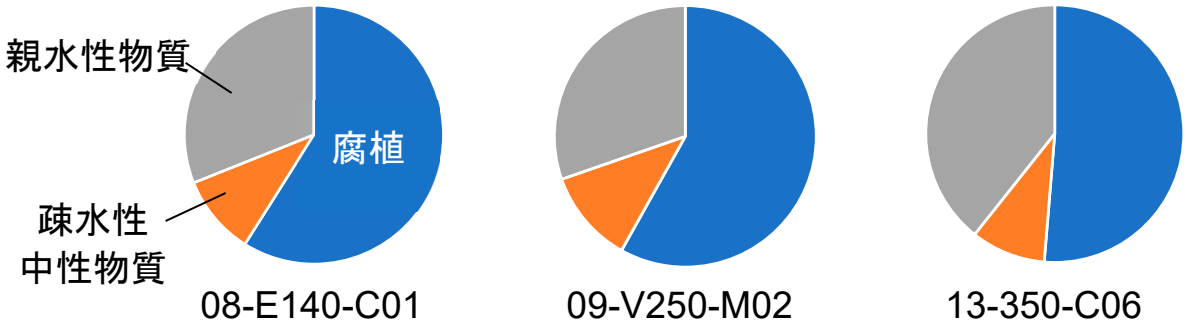


図 17　地下水中の有機物の構成割合

これまでの幌延深地層研究計画における有機物の研究は、大部分が地下水中に溶存している有機物に着目したものでした。しかし、国外の堆積岩地域では、岩石中の空隙に捕捉されていたり、岩石の表面に吸着していたりする有機物に着目した研究も行われています。このような有機物は、たとえば地下水の水質が変化したり、岩石中の地下水の流れが変化したりすることで地下水に溶存し、元素の移動性に影響を与える可能性が考えられます。また、地層処分研究において必要となる有機物－放射性核種－岩石の相互作用に関するモデル構築にあたっても、このような岩石から溶出し得る有機物の特性評価は重要です。

令和元年度は、岩石から溶出し得る有機物の特性評価に関する予察的な検討を行いました。深度 350m 調査坑道から採取した岩石を超純水に入れて振り混ぜ、ろ過した溶液の蛍光特性*25を、平成 30 年度までに分析した地下水の蛍光特性(17)と比較しました。その結果、両者は形状が類似するもののピーク位置にわずかな違いが見られることから、含まれる有機物の分子構造がやや異なることが示唆されました（図 18）。一方、岩石から溶出する有機物の分子量分布を測定したところ、分子量のピークは深度 350 m の地下水の測定値(17)と同程度であることが分かりました。

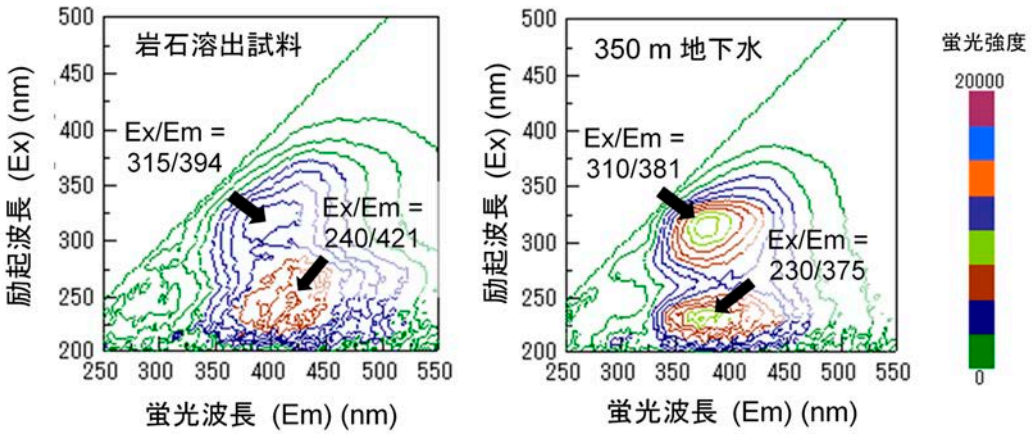


図 18　岩石溶出試料および深度 350 m 地下水の蛍光特性

*25：蛍光とは、ある物質がある波長の光を吸収し、それとは異なる波長の光（蛍光）を発する現象のことです。地下水中の有機物、特に腐植物質の分子は蛍光を発する特徴をもち、その蛍光特性は分子構造の違いにより異なります。

地下環境には多くの微生物が存在しており、幌延の地下環境にも他の環境と同様に様々な種類の微生物が豊富に存在しています。これまでに地下施設の建設に伴う坑道周辺の地球化学環境の変化と微生物代謝活性[*26]の関連性を調査するため、微生物の現存量や群集組成の変化をモニタリングしています。令和元年度は、平成30年度に引き続き、深度140m、250m、350m調査坑道から掘削されたボーリング孔（08-E140-C01、07-V140-M03、09-V250-M02、13-350-C01、14-350-C04）から採取した地下水中の微生物数と群集組成の調査を行いました。令和元年度の調査結果から、遺伝子解析手法[*27]を用いた解析により、優占種[*28]として存在する微生物の種類は、調査坑道壁面近傍において群集組成が大きく変化していることが示されました。坑道壁面近傍の領域では、バイオフィルムを形成する種として知られるAltiarchaeales目に属する古細菌に近縁な未知微生物、Atribacteria、*Deltaproteobacteria*などの絶対嫌気性微生物が優占種として存在することを確認していましたが、ここ1、2年の調査結果では、*Betaproteobacteria*や*Gammaproteobacteria*などのやや酸化還元電位の高い環境でも生息可能な微生物に近縁な種の割合が増加していることが明らかになってきました。このような微生物の群集組成の変化は、坑道壁面近傍の領域において、坑道掘削後に岩盤中に拡散した大気中の酸素などの酸化物が微生物の働きにより消費され、還元環境が維持されている可能性を示唆しています。

(4) 岩盤力学

第1段階で構築した岩盤力学モデル[*29]の妥当性を評価することを目的とした広範囲な応力状態を把握するための手法として、深度350m調査坑道で取得した内空変位[*30]計測結果に基づいて地下施設規模の広域的な初期応力状態を推定する解析の開発を進めています。これまで、断層の分布を考慮した解析や、実際に逆解析により得られた応力値を入力することで適切に坑道で取得した内空変位値を説明できるかどうか、検討を進めてきました。しかしながら、より信頼性の高い初期応力状態を推定するためには、深度350 mの周回坑道の掘削の順序を正確に再現した解析を実施することが課題として残っていました。そこで、図19に示すモデルを構築し、実際の坑道掘削の順序で掘削を再現し、実際に内空変位を計測した断面に相当する箇所における掘削時の変位量を解析的に求め、地下施設で取得した内空変位値を説明できる応力状態を推定しました。

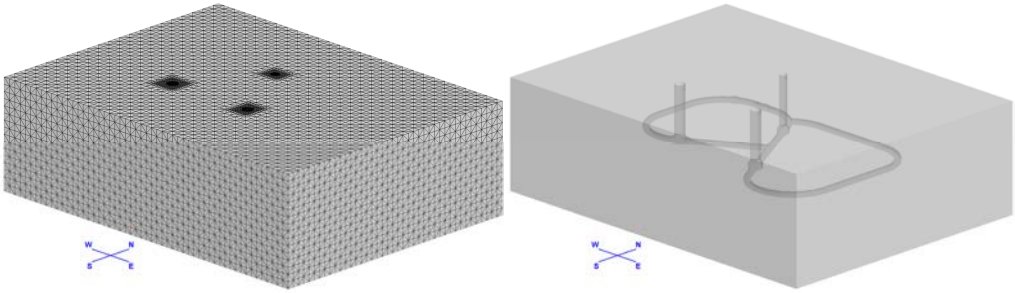
図20に地上からのボーリング調査、および坑道内での測定で得られた応力測定結果および最大主応力の方位と、解析により推定された結果を示します。この図から、解析により推定された応力値は、既存の計測により得られた応力値よりも高い値となることが分かります。また、最大主応力の方位に関しては、地上からの調査で得られた結果にほぼ整合する結果となりました。

次に、解析により得られた内空変位の値と、実際の内空変位の計測値との比較結果を図21に示します。比較対象とした計測結果は、深度350m調査坑道のうち様々な方位で掘削が行われた東・西周回坑道および東・西連絡坑道での計測結果を、坑道掘削方位と内空変位の関係で示して

---

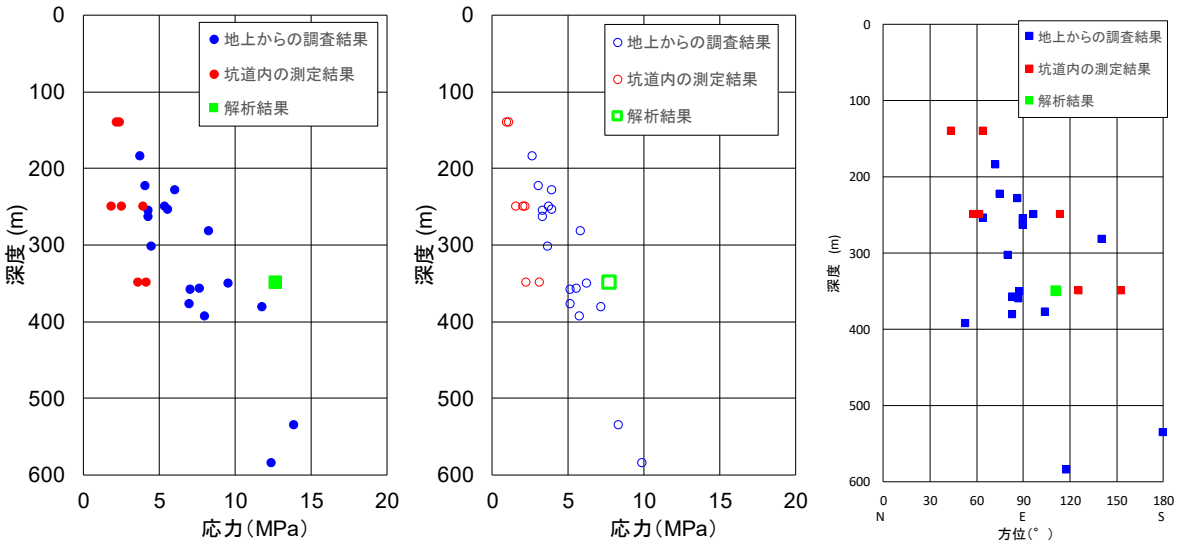
*26：微生物が生きるために周辺環境から有機物や無機物を取り込んで化学反応を行ったり、物質を生成したりする活動の程度のことです。
*27：環境中に存在する遺伝子を解析することにより、環境中の微生物の種類や特定の性質を調べることです。
*28：生物群集である種の量が特に多く、その群集を特徴付けていることです。
*29：割れ目などの性質を含めた岩盤の強度・変形などに関する特性を図や数式などを用いて表現したものです。
*30：坑道内で吹付コンクリート内側の断面の相対変位量を計測することです。

います。本解析では、岩盤は均質と仮定して解析しているため、割れ目卓越部や断層部では、解析結果よりも実測値の方が大きな値を示す傾向がみられましたが、割れ目の発達がそれほど顕著ではなかった一般部の計測結果に関しては、解析結果と計測結果が良い一致を示しました。このことから、より信頼性の高い初期応力状態を推定することができました。



(a) モデル全体図　　(b) モデル透過図

図 19　解析モデル



(a) 最大主応力　　(b) 最小主応力　　(c) 最大主応力の方位

図 20　水平面内の主応力に関する解析結果と既存調査結果との比較

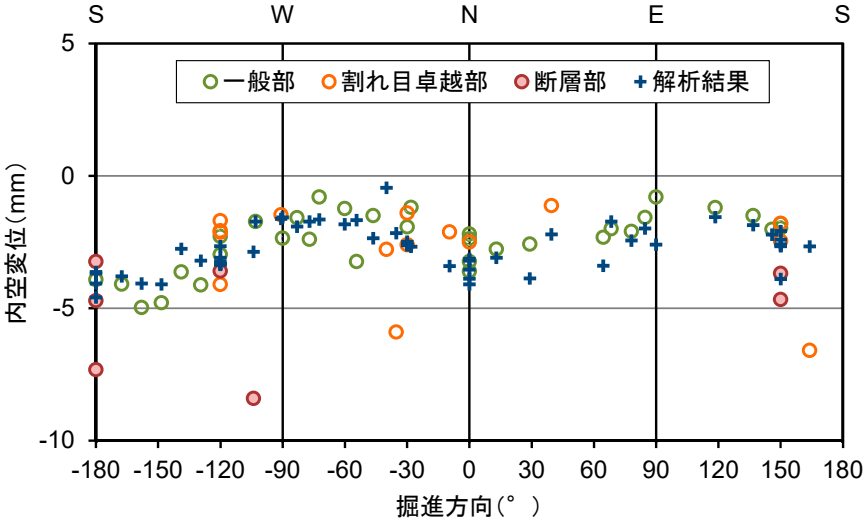


図 21　内空変位の計測結果と解析結果の比較

3.1.2 調査技術・調査機器開発

調査技術・調査機器開発として、岩盤の水理特性に関する調査技術、坑道周辺岩盤の地下水の地球化学特性、坑道掘削の影響、岩盤の力学に関する調査技術のほか、地下水の流れが非常に遅い領域の分布を評価する技術の高度化開発を実施しました。

(1) 岩盤の水理特性に関する調査技術の開発

必須の課題の 1 つである「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の一環として、水圧擾乱試験方法（3.1.1(2)参照）の開発を行っています。水圧擾乱試験では、ボーリング孔の試験区間の両端にスライド式パッカーを設置して試験を行います。このパッカーは、パッカーチューブ内への注水により膨らむ構造となっており、パッカーチューブが膨らむ際に、チューブの下部加締め部のみがスライドしてパッカーが膨らみます（上部加締め部は不動；図 22(a)）。このようなパッカーを試験区間の両端に設置すると、試験区間が短縮した場合、上端パッカーの上部加締め部が上位に引っ張られ、その結果、パッカーチューブ内の容積が増えることによりパッカー圧が低下します（図 22(b)）。反対に、下端パッカーの上部加締め部は下位に引っ張られ、その結果、パッカー内の容積が減少し、パッカー圧が上昇します。しかし、孔壁が柔らかい場合は、パッカーチューブが孔壁を押し広げ、パッカー内の容積が増加し、パッカー圧が低下します（図 22(c)）。

平成 30 年度は、上記の現象を確認するために、水圧擾乱試験を行ったボーリング孔と同じ孔径の鋼管と、同じパッカー圧を用いて室内実験を行いました。しかし、鋼管の固さは実際に試験を行った孔壁の固さよりも固いため、令和元年度は、両者の固さも同じになるように、鋼管の代わりにアクリルパイプとアルミパイプを用いた実験を行いました（図 22(b)(c)）[12]。実際に試験を行った孔壁の固さは、アクリルパイプとアルミパイプのちょうど中間くらいの固さに相当します。また、令和元年度は実験中の上部加締め部を引っ張る力（ロッドの軸力）も併せて計測しました（図 22(b)(c)）。室内実験の結果、パッカー圧、軸力および変位量の関係が図 22(d)～(g)の灰色で塗られた範囲内に収まることが分かりました。これらの関係性を用いることにより、

水圧擾乱試験中に観測されたパッカー圧の変化から、試験中の区間長の伸縮量をある一定の幅をもって見積もることが可能となりました（3.1.1(2)参照）。

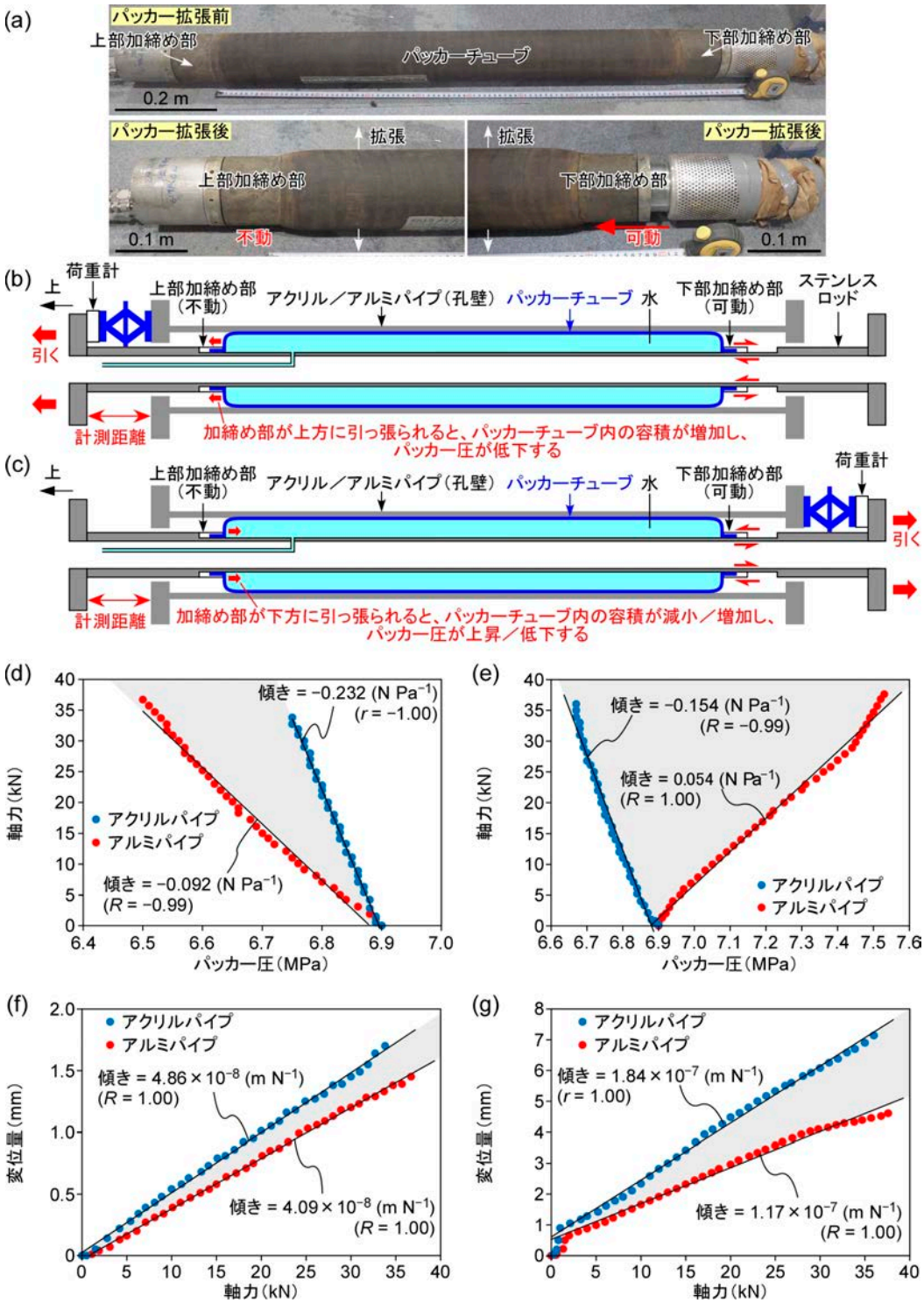


図 22　水圧擾乱試験における試験区間の伸縮量とパッカー圧の変化の関係性を把握するために行った実験（a～c）とその結果（d～g）[12]

この実験結果は、試験区間の両端に設置する両パッカーに等しく適用されます。

(2) 地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発

地下施設の建設が施設周辺の地下水の水圧や水質に与える影響を観測する技術の整備を目的とした調査技術の開発を行っています。調査技術の開発の中で得られたデータは、岩盤の水理地質構造モデル*31や地下水の地球化学モデルの構築、構築したモデルや解析結果の妥当性を確認するために利用します。また、得られたデータは、人工バリア性能確認試験における熱－水理－力学－化学連成挙動に関わる解析において、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も反映します。

地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発では、平成 26 年度までに深度 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、令和元年度もモニタリングを継続しました。装置の設置箇所を図 23 に示します。平成 30 年度に引き続き、令和元年度も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、13-350-C06、13-350-C07、13-350-C08 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。C05、C06、C07、C08 および C09 における水圧モニタリングの結果を図 24、図 25、図 26、図 27 および図 28 に各々示します。図中での急激な水圧の低下は、採水やメンテナンスの際に孔内のガスや地下水が放出されたことによるものです。

試験坑道の掘削以降、多くの区間で徐々に水圧が低下する傾向が認められます。一方、C07 の区間 2 では平成 28 年度、C05 および C08 の区間 2 では平成 30 年度より、数ヵ月規模での継続的な水圧の上昇が複数回認められます。この現象について詳細に理解するために、C08 の区間 2 において、孔内を大気開放せずに水圧モニタリングを継続しました。その結果、水圧は令和元年 10 月から約 5 ヵ月の間継続的に上昇し、令和 2 年 3 月現在も上昇し続けています（図 27）。この圧力上昇は、地下水から遊離するガスの影響によるものと推測されます。

*31：地質構造の分布や形状にあわせて透水係数などの水理学的なデータを与えて、岩盤の水理特性を二次元的または三次元的な図や数式などを用いて表現したものです。

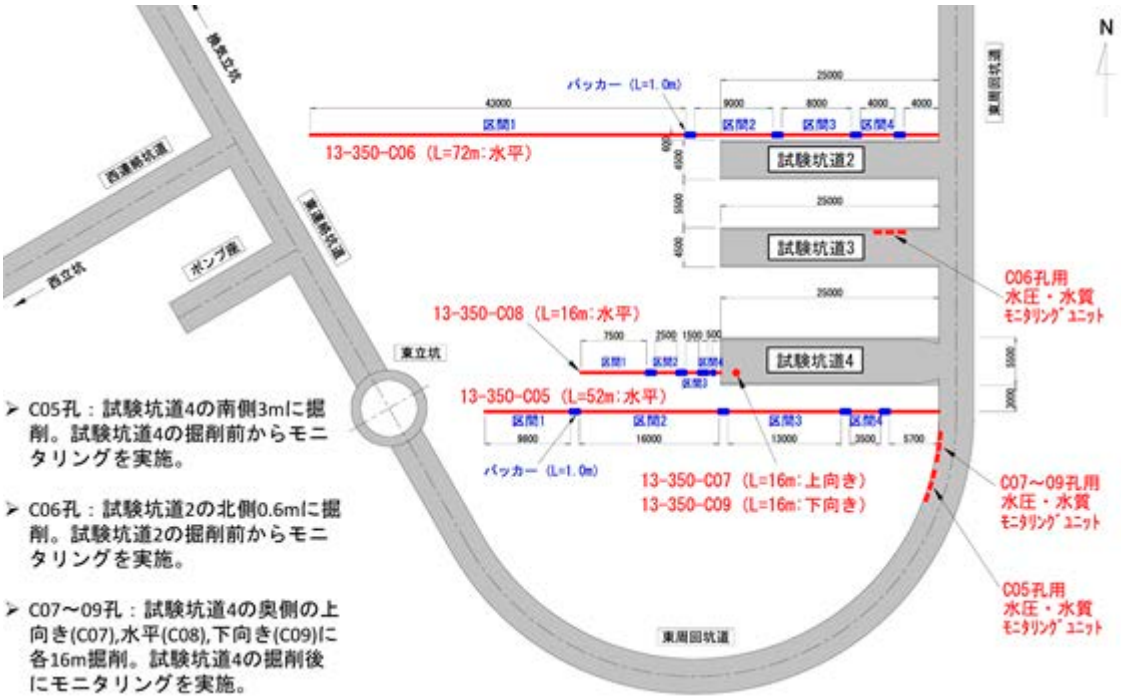


図 23　試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

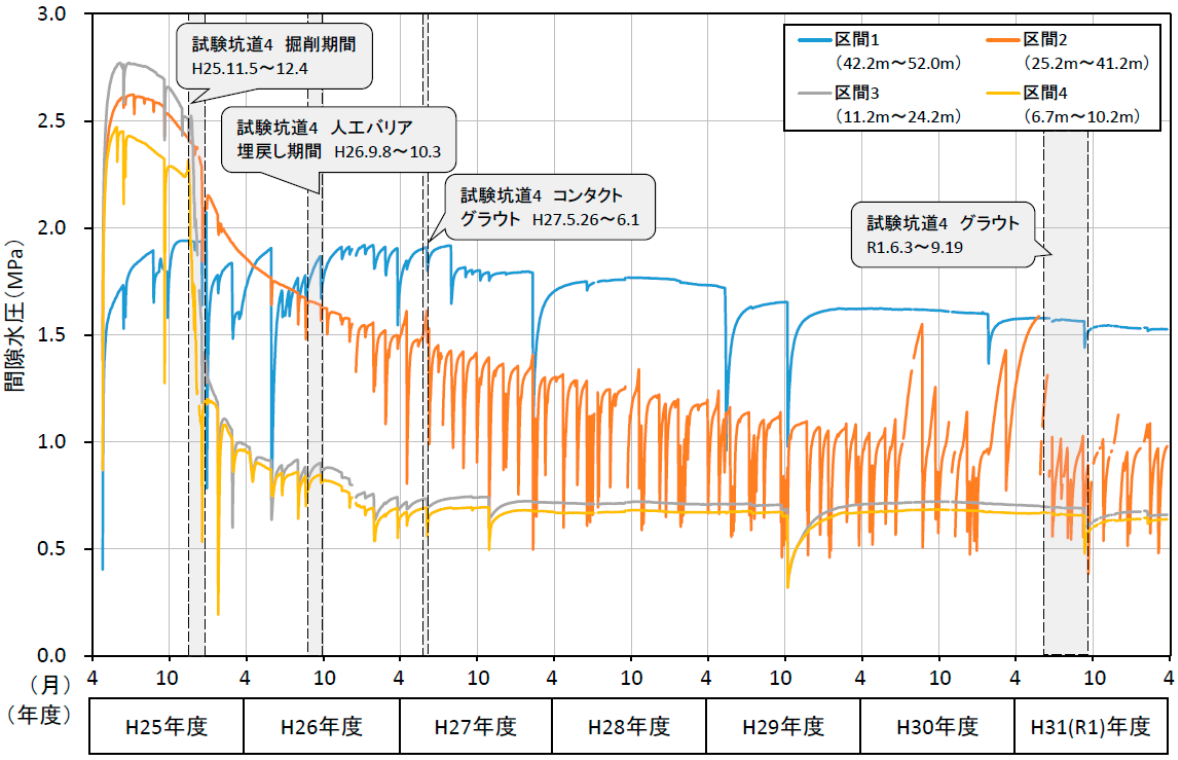


図 24　C05 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

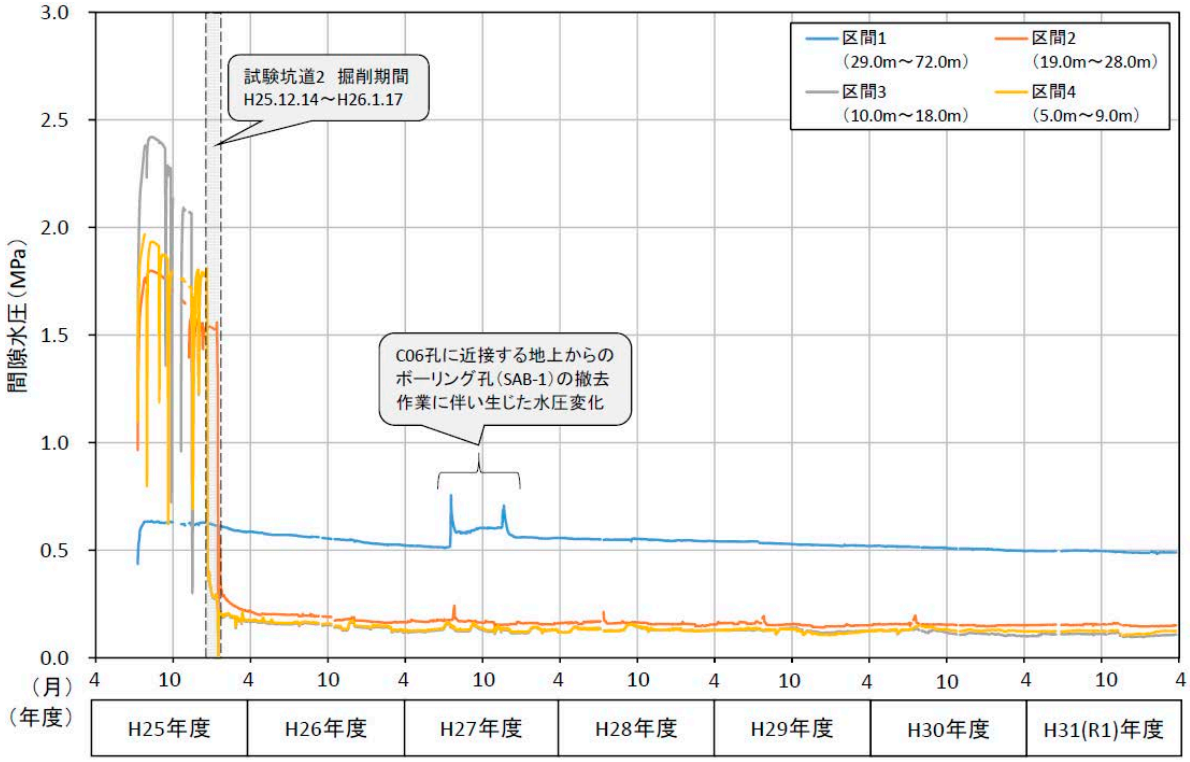


図 25　C06 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

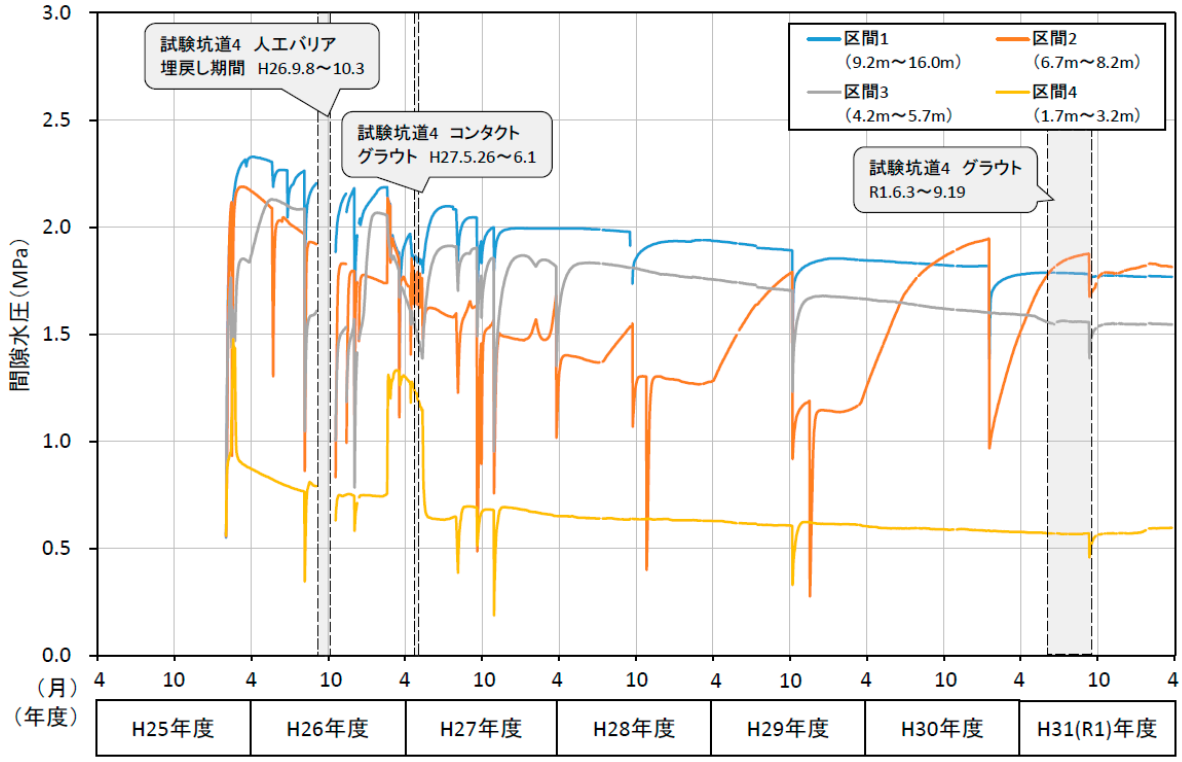


図 26　C07 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

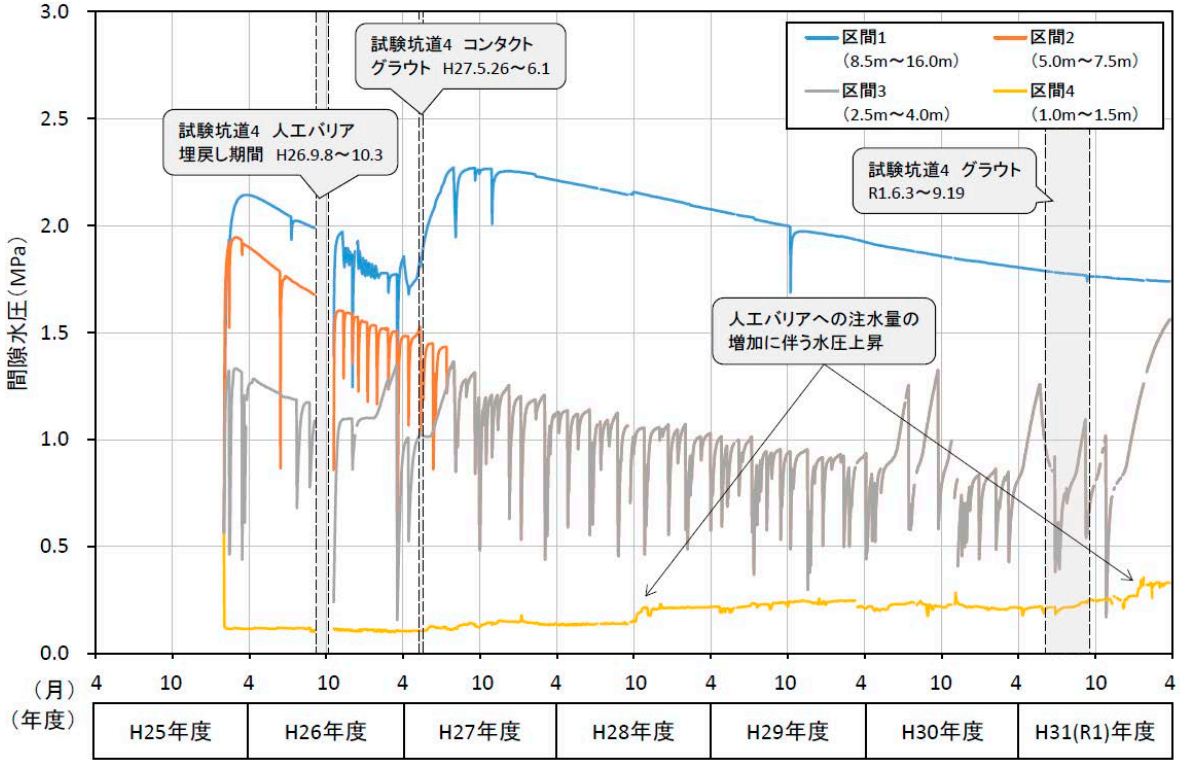


図 27 C08 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

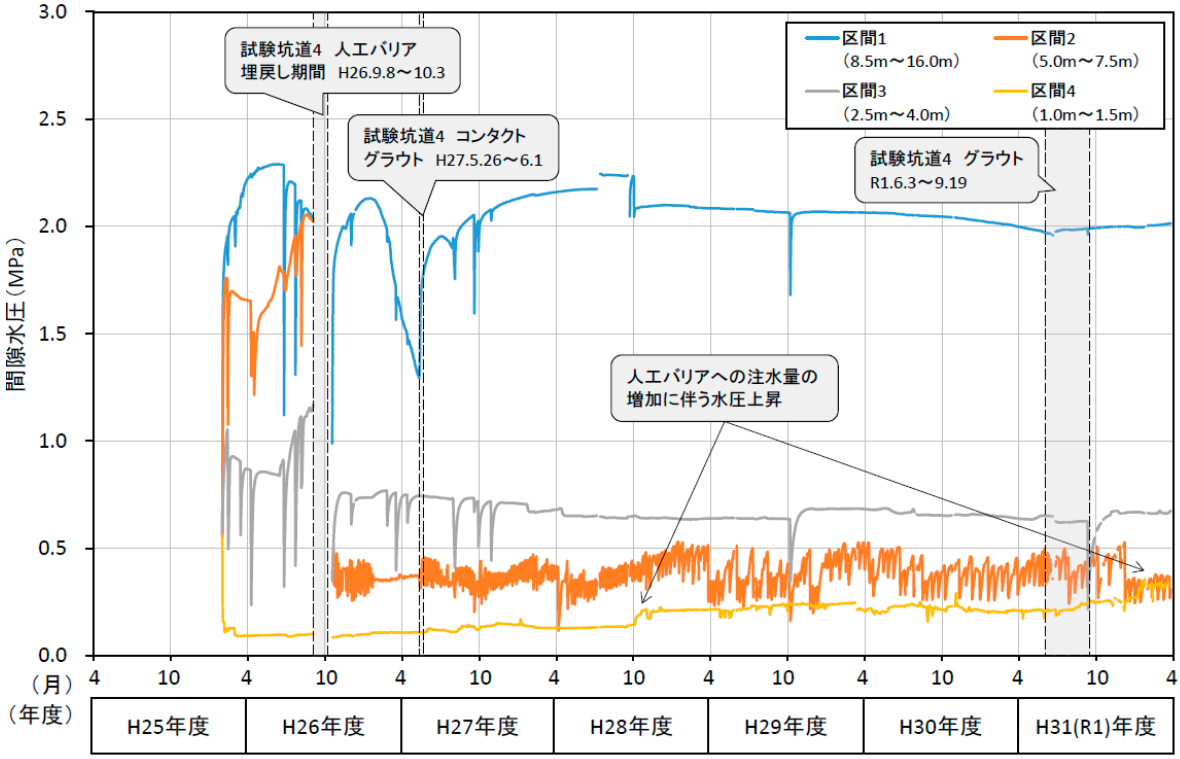


図 28 C09 における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

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埋め戻しが行われ、平成 27 年度に同坑道においてコンクリートプラグ外周の地山に放射状にグラウト注入を行うコンタクトグラウト注入作業が実施されました。坑道の埋め戻し部分を冠水させるため、平成 27 年 1 月から人工バリア内への注水が行われており、急激な注水による緩衝材の流出現象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 において水圧が上昇しており、令和元年 12 月に、注水量の増加に伴う比較的大きな水圧の上昇が認められました（図 27 および図 28）。一方、試験坑道 4 の南側約 3 m に位置する C05 では、注水量の増加に伴う水圧への影響は確認されていません。また、令和元年 6～9 月には、試験坑道 4 の人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺において、緩衝材に十分に水を浸潤させることを目的としたグラウトを行いましたが、これに関連すると考えられる水圧変化も確認されていません（図 24、図 26、図 27、図 28）。

試験坑道掘削後、水圧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 29）。図 30 には一例として、C05 の区間 2 における電気伝導度（EC）、pH、酸化還元電位（Eh）の観測結果を示します。C05 では、地下水の EC は 1600 mS/m 程度、pH は 7 程度、Eh は-140～-300 mV 程度でした。これらの結果は平成 30 年度の測定値とおおむね同様であり[18]、試験坑道周辺に分布する地下水の EC や pH には顕著な変化は生じていません。Eh は、令和 2 年 3 月の測定値がやや高いなどバラつきがあるものの、還元状態が維持されていることが示唆されます。なお、Eh のモニタリング結果においては、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等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。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（年 2 回のセンサーの検定・校正および 1 回／月程度のセンサーの異常有無の確認）も継続して行いました。

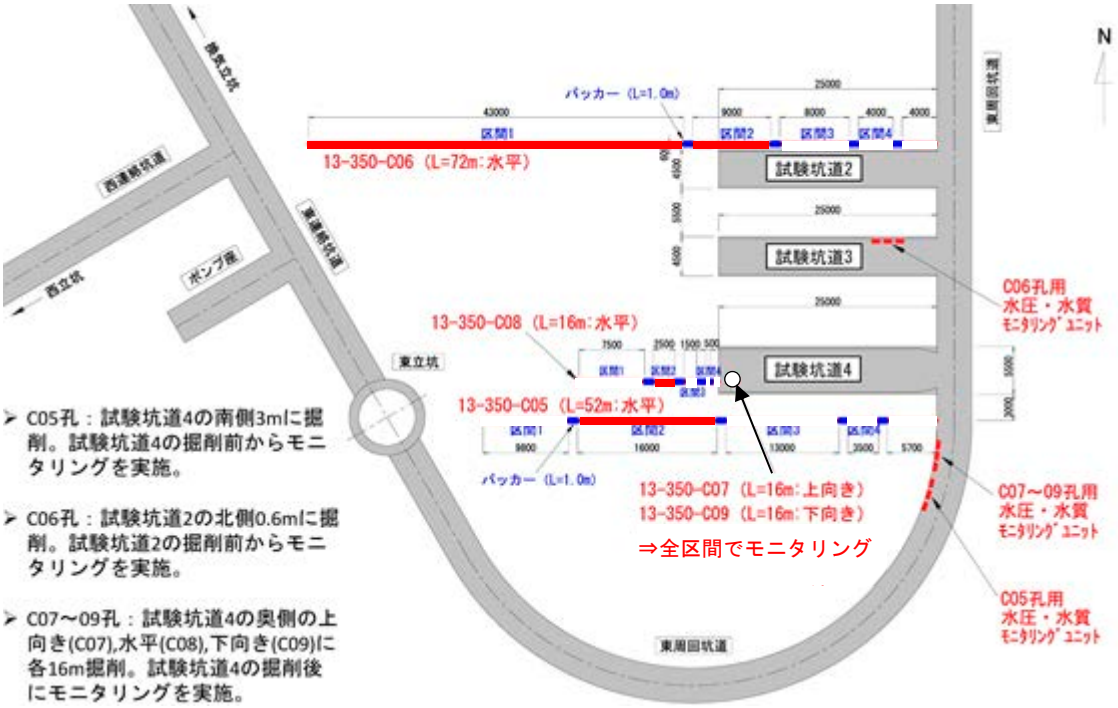
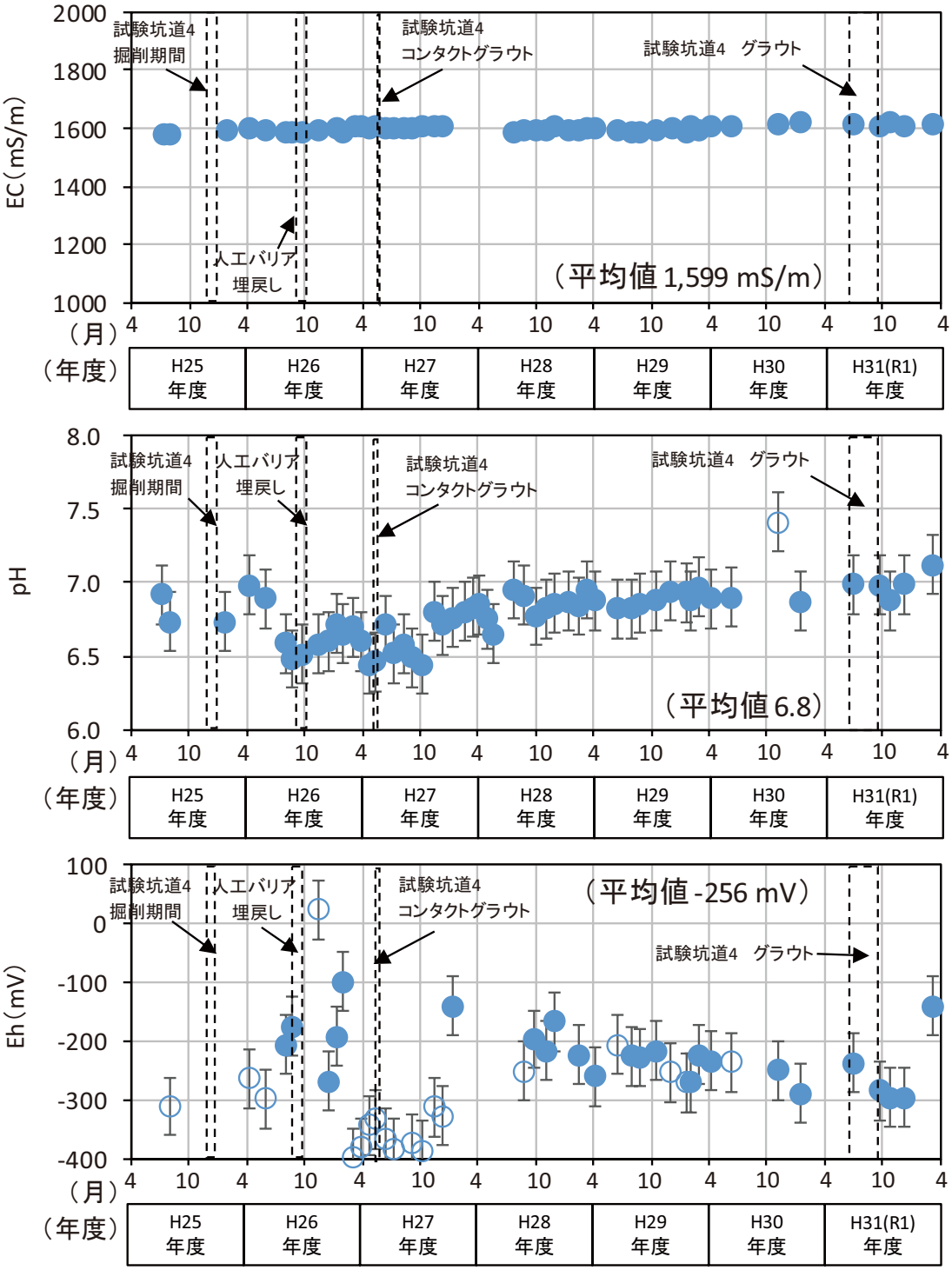


図 29　試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水質モニタリング継続可能区間
各ボーリング孔のうち、水質モニタリングが継続可能な区間のみを赤色で示しています。



白抜きのデータ（○）は，信頼性が劣る可能性のあるデータ

図 30　C05 の区間 2 における水質モニタリング結果

また、令和元年度は、平成 28 年度から平成 30 年度までの水圧モニタリングの結果をとりまとめるとともに、C05 および C07～C09 におけるモニタリング結果をもとに、人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺における水圧分布を可視化しました[19]（図 31）。このような情報は、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において、人工バリアの外側境界条件である周辺岩盤中の水圧条件の設定にも役立ちます。なお、この図では水圧・水質モニタリング以外のボーリング孔による観測結果は含まれていません。

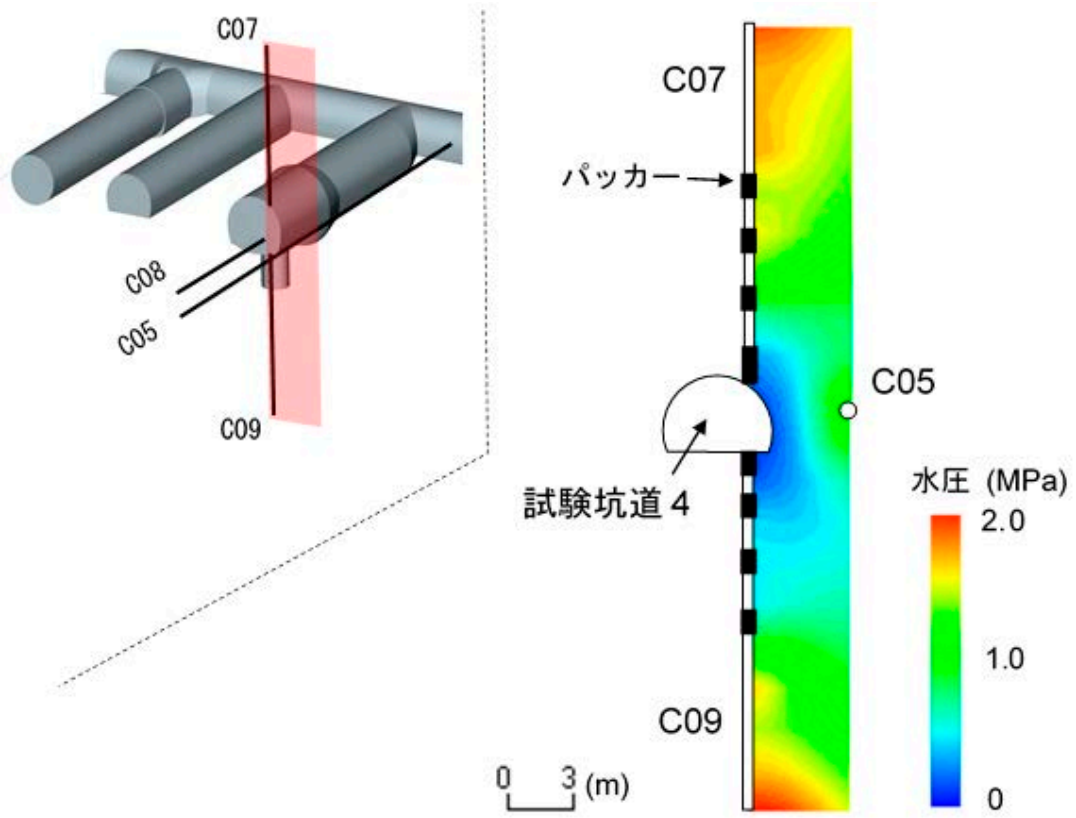


図 31　人工バリア性能確認試験の実施箇所周辺の水圧分布

(3) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

地下施設建設時には、坑道周辺の岩盤の損傷などによる掘削損傷領域や溶存ガスの発生などによる不飽和領域の形成といった掘削擾乱領域が生じます。そこでは、岩盤の透水性の増大や、地下水の水質変化といった地層が有する放射性核種の移行を遅延させる機能に影響を与えることが考えられます。そのため、地下施設の建設・操業・閉鎖に伴う地質環境の変化過程をモデル化するための技術開発を進めています。幌延地域の地下深部の地下水には、多量のメタンや二酸化炭素などの溶存ガスが含まれているため、令和元年度は、地下水中の溶存ガスが岩盤中の不飽和領域の形成に与える影響を調べるために、地下施設の調査坑道の条件を模擬した数値・感度解析を実施しました。図 32 に示すように、坑道壁面、掘削損傷領域および健岩部を準一次元的に模擬し、数値解析コード TMVOC[20]を用いて、坑道掘削から 50 年間の地下水と溶存ガスの流れについて計算しました。その結果、地下水に溶存ガスが含まれる場合、岩盤中の飽和度が低下し、不飽和領域の広がりが大きくなることが分かりました（図 33）。一方で、岩盤の透水性を変化させた場合は、主に不飽和領域の広がりのみに影響することが分かりました。なお、本研究は、電力中央研究所との共同研究の一環として実施しています。

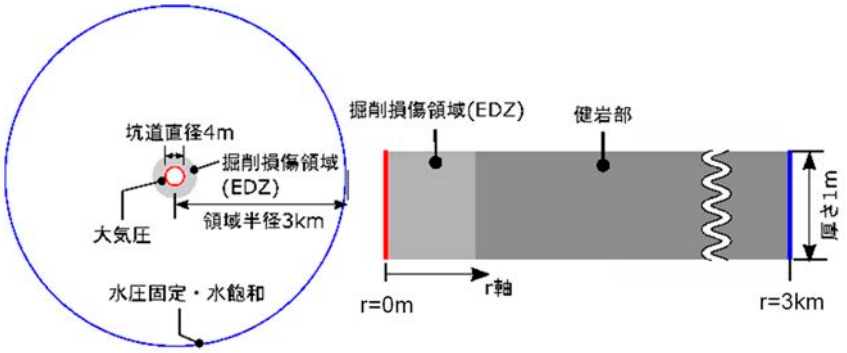


図 32　解析領域と解析条件

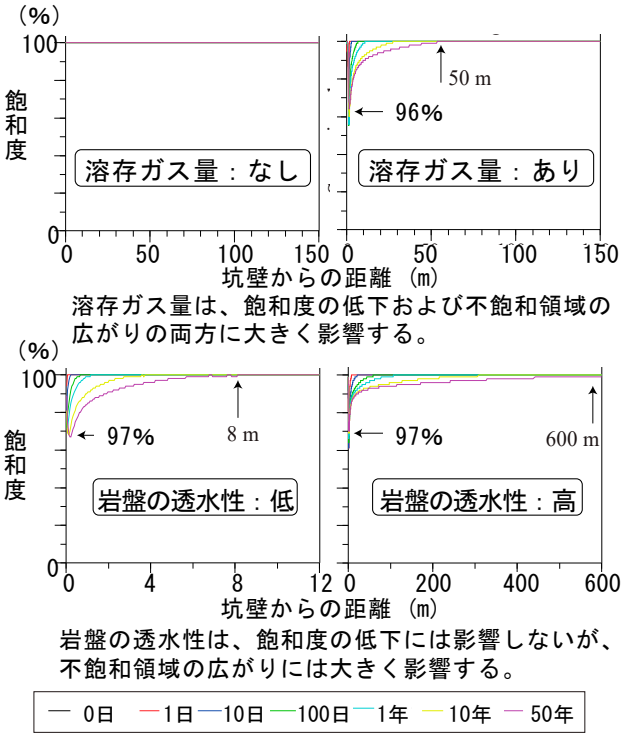


図 33　140m 調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中の飽和度の変化例[21]

坑道周辺の掘削影響領域では、坑道内の大気が坑道掘削に伴い生じた割れ目などを通じて岩盤内に侵入し、坑道周辺の岩盤や地下水が還元状態から酸化状態に変化する可能性が考えられています。平成 30 年度は、簡易モデルによる岩盤内への酸素の拡散を計算し、坑道壁面から約 1 m の酸素の侵入が予測されましたが、ボーリング孔を利用したガス組成の分析やコア試料の観察などからは、坑道周辺の掘削影響領域における酸化の兆候は確認されなかったことを報告しました[22]。その理由として、地下水中に多量に溶存しているメタンや二酸化炭素などのガスが遊離することで、岩盤内への酸素の拡散を抑制している可能性が指摘されていました。

令和元年度は、図 32 の解析モデルを用いて、メタンや二酸化炭素などのガスや地下水の流れを考慮した気液二相流解析を実施し、岩盤中への酸素の侵入について再考しました。坑道の掘削を模擬し、坑道の掘削から 50 年間の地下水とガスの流れを計算しました。ただし、この解析では坑道壁面を覆うコンクリートの影響を考慮していません。解析結果のうち酸素の流れについて、拡散成分の結果と、移流成分と拡散成分を合わせた結果とを図 34 に示します。坑道壁面から約 0.1 m 程度の岩盤内部まで拡散による定常的な酸素の移動が生じていますが（図 34(a)）、移流により岩盤内部から坑道へ押し戻されていることが分かります（図 34(b)）。図 35 に、岩盤中のガスおよび地下水の酸素濃度の解析結果を示します。坑道壁面から岩盤内に約 10 cm 程度の深さまで、定常的に酸素が存在していることが分かります。地下施設におけるこれまでの観測結果から、調査坑道内のコンクリートで覆われていない岩盤では、坑道壁面から岩盤内部へ約 10 cm 程度の深さまで酸化や風化の影響が及んでいることが報告されていますが[23]、令和元年度の解析では、これまでの観測結果と整合的な結果が得られていることを確認できました。一方で、既存の観測結果[22]のように、坑道壁面の岩盤がコンクリートで覆われている場合は、岩盤内部への酸素の侵入が抑えられていると理解されます。

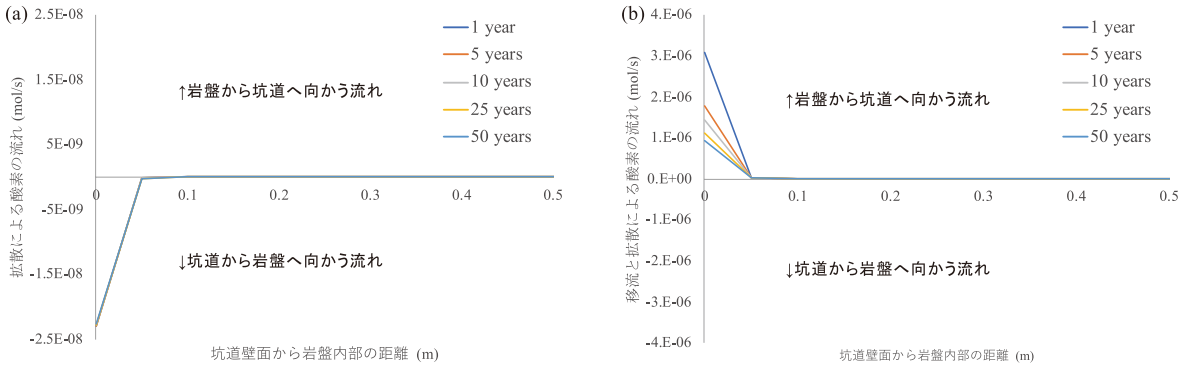


図 34　岩盤内部における酸素の流れ（(a)拡散による酸素の流れ、(b)移流と拡散を合わせた酸素の流れ

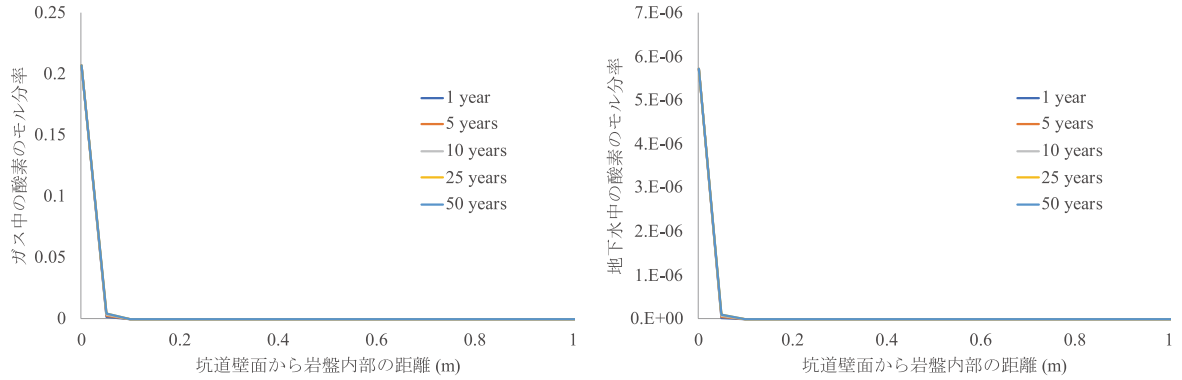


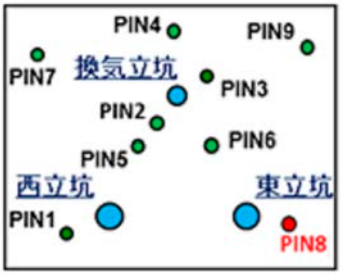
図 35　岩盤内部におけるガスおよび地下水中の酸素濃度

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、東立坑の深度 140 m の連接部付近に 1 台、立坑周辺から 1 km 程度離れた HDB-8 孔近傍に 1 台の高精度傾斜計*32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。令和元年度も、過年度までと同様の方法(24)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。令和元年度は坑道掘削工事はなく、得られた傾斜データの全体的な傾向として、傾斜量の変化は少ないことが確認されました。坑道掘削の影響を示すため、東立坑近傍にある PIN8 の傾斜量と傾斜方向および西立坑から北東方向へ約 1　km離れた HDB-8 孔近傍の PIN10 の傾斜量を図　36 に示します。PIN8 では坑道掘削時に顕著な傾斜が計測されました。傾斜方向は、掘削を実施した東および西立坑の方向でした。また、掘削が終了した後は、傾斜変化はほぼありませんでした（図 36(a)、(b)）。一方、PIN10（図 36(c)）では、坑道掘削中および掘削終了後も、地表の傾斜はほとんど観測されませんでした。

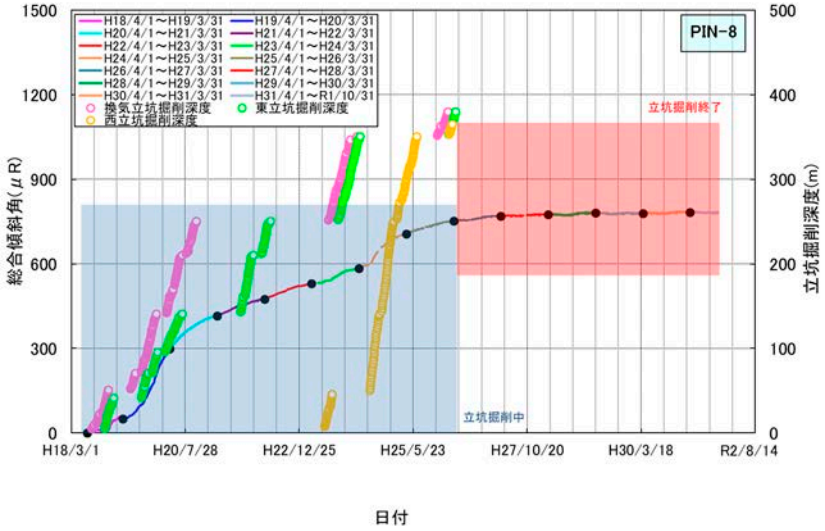
これまでの計測データにより、高精度傾斜計によって地下深部の坑道の掘削に伴う地表付近での傾斜量やその傾斜方向が検知できることを確認しました。

---

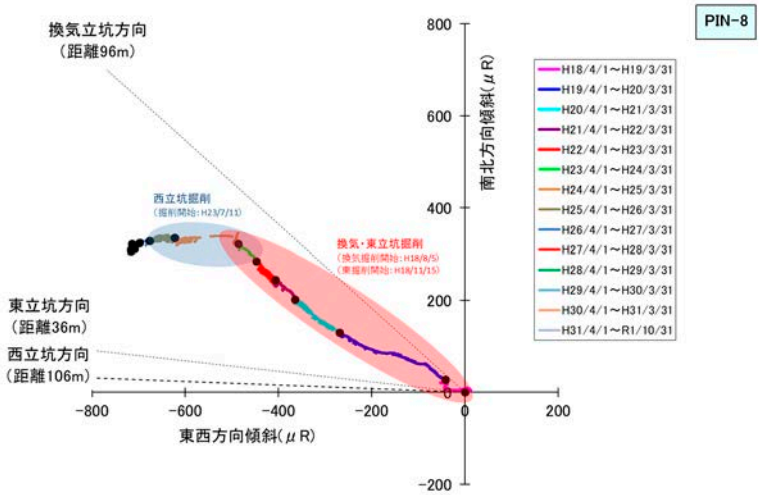
*32：通常の傾斜計が計測できる角度は約 3,600 分の 1 度であるのに対し、約 1 億分の 6 度の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。



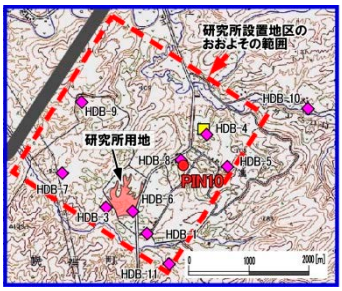
高精度傾斜計の配置



(a) PIN8（傾斜量）

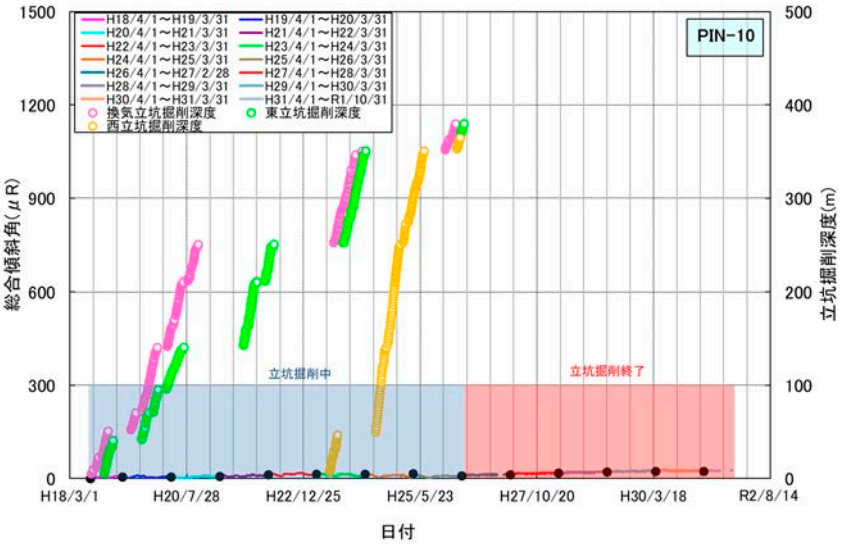


(b) PIN8（傾斜方向）



高精度傾斜計の配置

国土地理院発行５万分の１地形図を使用



(c) PIN10（傾斜量）

図 36　傾斜計データの一例

グラフの縦軸の単位 μR(マイクロラジアン)は角度の単位で、1,000 μR が約 0.06° に相当します。

(4) 岩盤の力学特性に関する調査技術の開発

深度 350m 調査坑道のうち試験坑道 3 を対象として、掘削影響領域に発達した割れ目を可視化する試験を実施しました。具体的には、坑道周辺に長さ 1 m のボーリング孔（注入孔）を掘削して樹脂を注入し、割れ目を固定する試験を実施しました（図 37)。実験に使用した樹脂は、紫外線を照射すると発光する塗料が混合されているため、紫外線照射下で割れ目の分布を容易に観察することができます。また、粘性も水の 7 倍程度と低いため、割れ目を乱すことなく注入することが期待できます。図 37 の概念図に示す通り、シリンジポンプにより圧力容器内のピストンを押し出すことにより樹脂を岩盤内に注入しました。樹脂が固化した後、注入孔周辺でオーバーコアリングを行って岩石試料を採取し、割れ目への樹脂の充填状況を観察しました（図 38(a)、(b))。

得られた岩石試料を半割した断面を紫外線照射下で観察し、割れ目分布図を作成しました（図 38(c))。図 38(c)に示す割れ目のうち、緑枠で示す(a)～(c)の部分の拡大写真を図 39 に示します。なお、樹脂の浸透状況としては、樹脂が浸透して割れ目が完全に固定された割れ目（図 39(a)の右側の割れ目，図 39(b)、(c)および図 38(c)で赤色直線で示した割れ目)、樹脂が割れ目の一部に浸透したが、割れ目が完全に固定されておらず、剥離した状態にあるもの（図 39(a)の左側の割れ目および図 38(c)で青色直線で示した割れ目）の 2 種類の樹脂充填状況が確認されました。また、孔口から約 0.4 m までは割れ目の発達が顕著であり、それ以降は割れ目本数が少ないことが分かりました。特に孔口付近において、割れ目同士が連結している様子が確認されました。

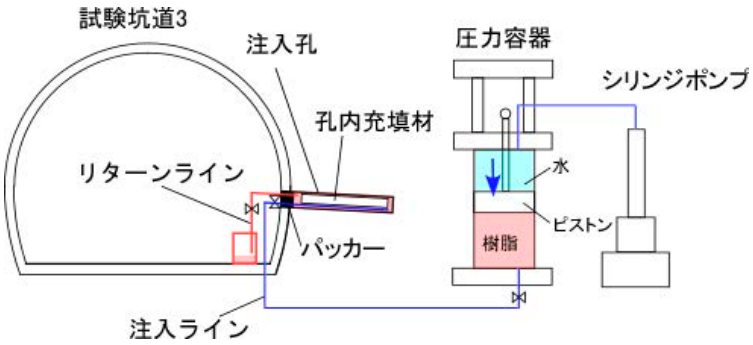


図 37　樹脂注入試験の概要

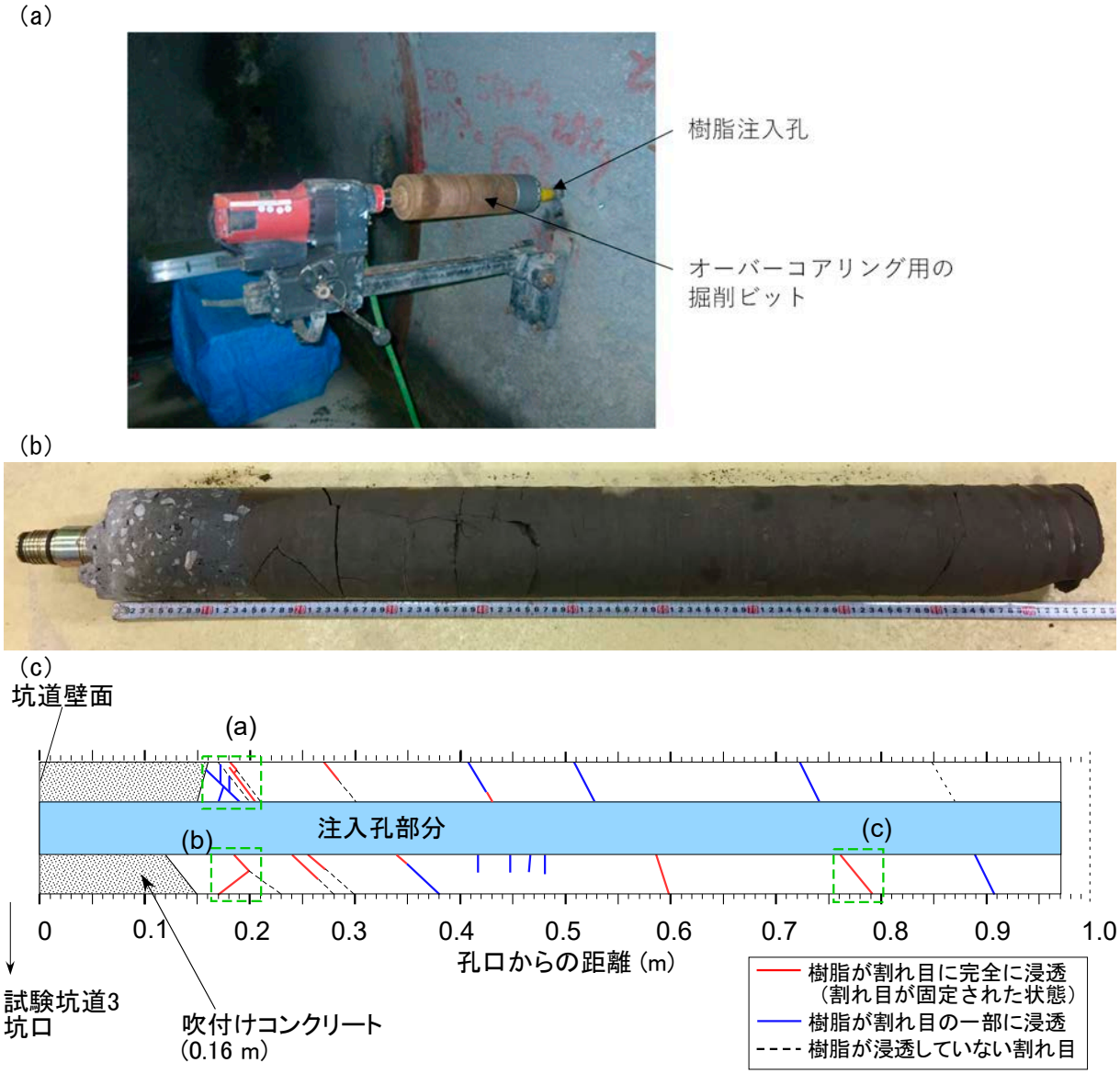


図 38　樹脂浸透状況の観察

(a) 岩石試料採取の様子、(b) オーバーコアリングにより採取した岩石試料、(c) 採取した岩石試料の樹脂が浸透した割れ目の分布（坑道を上から見た図）

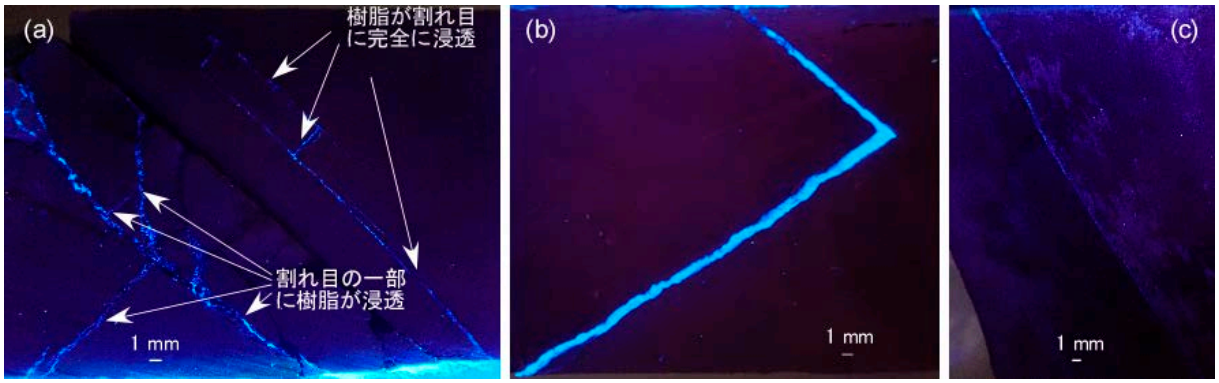


図 39　割れ目への樹脂浸透状況の例

次に、樹脂が浸透して割れ目が完全に固定された割れ目に対して、紫外線照射下でデジタルカメラにより割れ目の高解像度の画像を撮影し、割れ目の幅（開口幅）を測定しました。なお、測定間隔は 1 mm としました。図 40 に開口幅の分布を示します。孔口から約 0.3 m の範囲では、開口幅が最大で 1.02 mm の割れ目が存在していました。一方、孔口から 0.3 m 以深では、開口幅は 0.05～0.19 mm で分布していました。

以上のように、坑道周辺に形成された掘削影響割れ目に樹脂を注入することにより、割れ目の分布を可視化し、さらに開口幅の情報を得ることができました。

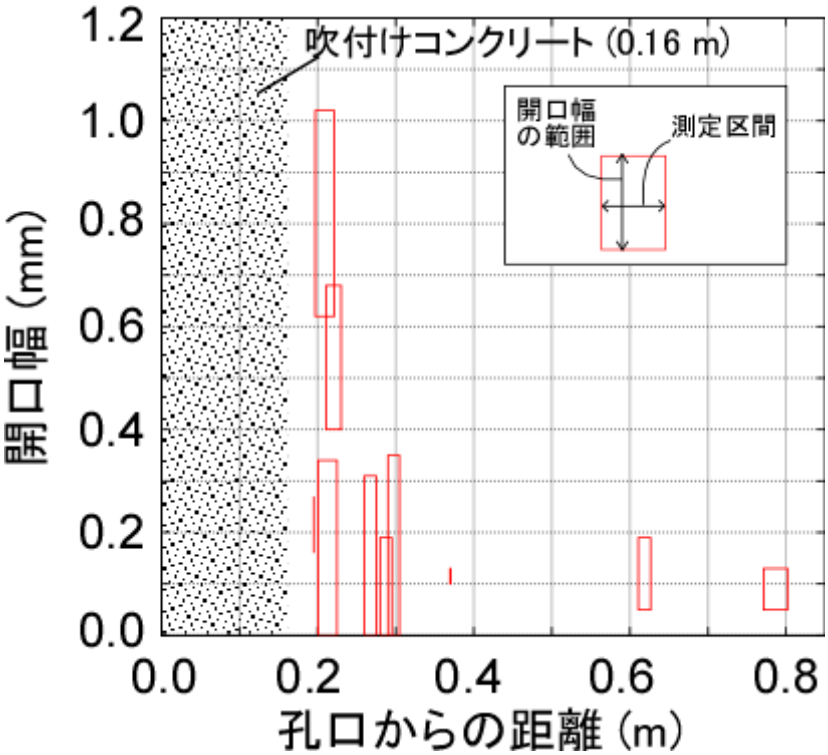


図 40　割れ目開口幅の分布

(5) 地下水の流れが非常に遅い領域の分布を評価する技術の高度化開発

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業：岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）の一環として、内陸部の地下深部に存在する水理学的に閉鎖的な環境が形成・維持されていると推定される領域（低流動域）の空間分布を地上からの調査で効率的に把握するための方法論の構築を実施しました[25]。低流動域の空間分布を地上からの調査で効率的に把握するための方法論の構築では、はじめに、地下深部の低流動域の空間分布を把握する手順を検討し、既存データに基づく試行により、その手順の適用性や課題を検討しました。

堆積岩中の地下深部には、堆積時の海水が埋没続成過程で変化し、その後、長期にわたり天水浸透の影響を受けずに残留していると推定される地下水の存在が確認されており[26]、[27]、このような地下水が存在する領域では、地下水流動が遅く、拡散による物質輸送が支配的である例が報告されています[28]。ここでは、このような地下水を化石海水と呼んでいます。化石海水の存在を確認するための指標としては、それが海水に由来していることから、地下水の塩濃度と

酸素・水素同位体比（$\delta^{18}O$*33およびδD*34）が有効であると考えられます。図 41 に、本事業で検討した地下深部の低流動域の空間分布を推定する手順を示します。この手順は大きく 2 つに分けられ、1 つは物理探査やボーリング調査といった地上からの各種調査により取得されるデータを統合して地球統計学的手法により化石海水に関連する指標の空間分布を推定し、その結果に基づき地下深部の低流動域を評価するアプローチです。もう 1 つは地上からの調査により構築された水理地質構造モデルに基づく広域スケールの地下水流動解析により低流動域を評価するアプローチです。

前者のアプローチの試行には、幌延深地層研究計画における地上からの調査段階（第 1 段階）で実施された調査であるボーリング調査と電気探査のデータを用いました。図 42 に、前者のアプローチにより推定した塩濃度および$\delta^{18}O$ およびδD の空間分布の推定結果を示します。(a) の塩化物イオン濃度の分布には、推定に使用したボーリング孔の位置（断面上にあるボーリング孔のみ表示）と電気探査の実施範囲を示していますが、データを取得した範囲から離れるほど推定結果に大きな誤差が含まれます。塩濃度については、おおむねナトリウムイオンと塩化物イオンにより占められていますが、反応性の低い塩化物イオン濃度が指標に適しており、その分布を示しています。図 43 に地上からのボーリング調査時に得られたコア試料からの圧縮抽出水の$\delta^{18}O$およびδDと塩化物イオン濃度と深度の関係図を示します。この図では、深度 0 m を稚内層と声問層の地層境界としています。化石海水の$\delta^{18}O$は、海水より重い値（$\delta^{18}O > 0$‰）を示すと考えられます。幌延の地質環境の場合、これに対応するδDは約-30～-20 ‰の範囲にあり、塩化物イオン濃度についてはおおよそ 3000 ppm 以上の範囲になります。図 42 (a) の塩化物イオン濃度の分布において 3000 ppm 以上となる領域は、青い点線より下であり、HDB-6 孔周辺では地表付近から、また、HDB-4 孔周辺では稚内層浅部と深部の境界よりも下にあるのに対し、図 42(b)、(c)の$\delta^{18}O$およびδDの分布において化石海水に相当する領域は、HDB-6 孔や HDB-4 孔周辺では、おおよそ 500 m よりも深い部分にあり、塩化物イオン濃度とは一致していません。この理由は、図 43 に示すように塩化物イオン濃度が高いほど$\delta^{18}O$およびδDは化石海水の範囲に限定されるようになりますが、化石海水の目安としている塩化物イオン濃度の下限である 3000 ppm では、$\delta^{18}O$およびδDが化石海水の範囲外になる地下水も多く含まれているからです。地上からの調査において地下の化石海水の分布を推定する場合、まずは、塩化物イオン濃度に相関性のある地下の比抵抗データを取得できる物理探査を実施することが、広く三次元分布を把握するという観点から効果的であると考えられますが、塩化物イオン濃度だけを用いて化石海水の分布を推定することは、その領域を過大に評価することにつながる可能性があります。そのため、次のステップの調査として深層ボーリング調査により、地下深部の$\delta^{18}O$およびδDを確認する必要があると考えられます。また、効果的に地下の化石海水の分布を推定するには、地層の違いや、地質断層や難透水層といった不連続構造と化石海水の分布との関係を明らかにすることも必要であると考えられます。

後者のアプローチの試行としては、既存調査により構築された水理地質構造モデル[29]、[30]に基づく地下水流動解析を実施し、センターを範囲内に含む 10×20 km の範囲を対象として、地

---

*33：酸素同位体比とは、質量数 16 の酸素に対する質量数 18 の酸素の割合を指します。幌延地域では、表層水で-10‰前後、深部地下水で 0‰前後の値を示すことが分かっています。

*34：酸素原子と同様に、水素原子（H）も安定同位体と呼ばれる質量の異なる原子を持っています（1H、2H）。安定同位体の割合を同位体比と呼び、水素は$\delta 2H$またはδDと表記されます。

下水移行時間や動水勾配といった水理学的特徴の空間分布の推定を試みました。その際、地形の発達（地形・地質モデルの変化）、気候の変化（海水準および涵養量の変化）および断層と地層の透水性の関係に着目し、これらのパラメータの違いによる地下水移行時間や動水勾配の空間分布への影響を感度解析的に検討しました。このように様々な条件で地下水流動解析を実施しましたが、図 44 には、地形・地質モデルを現在、気候を温暖期、大曲断層を低透水として設定した場合の解析結果として、地下水移行時間と動水勾配の空間分布を示します。前者のアプローチにおいて $\delta^{18}O$ および δD により推定された化石海水の分布範囲は、HDB-6 孔周辺では 500 m よりも深い範囲でしたが、その範囲の地下水流動解析の結果は、地下水移行時間が 10^{6} 年程度、動水勾配が 10^{-2}～10^{-3} です。これは、ある一つの条件での結果ですが、地下水流動解析の観点からも化石海水の分布域が低動水勾配・低流動性の場であることがわかります。このような前者のアプローチによって推定した化石海水の三次元分布との比較は、後者のアプローチによって構築したモデルすなわち広域スケールのモデルの妥当性確認のための方法になりうると考えられ、今後、この方法を具体化し、実例を示していくことが課題であると考えています。

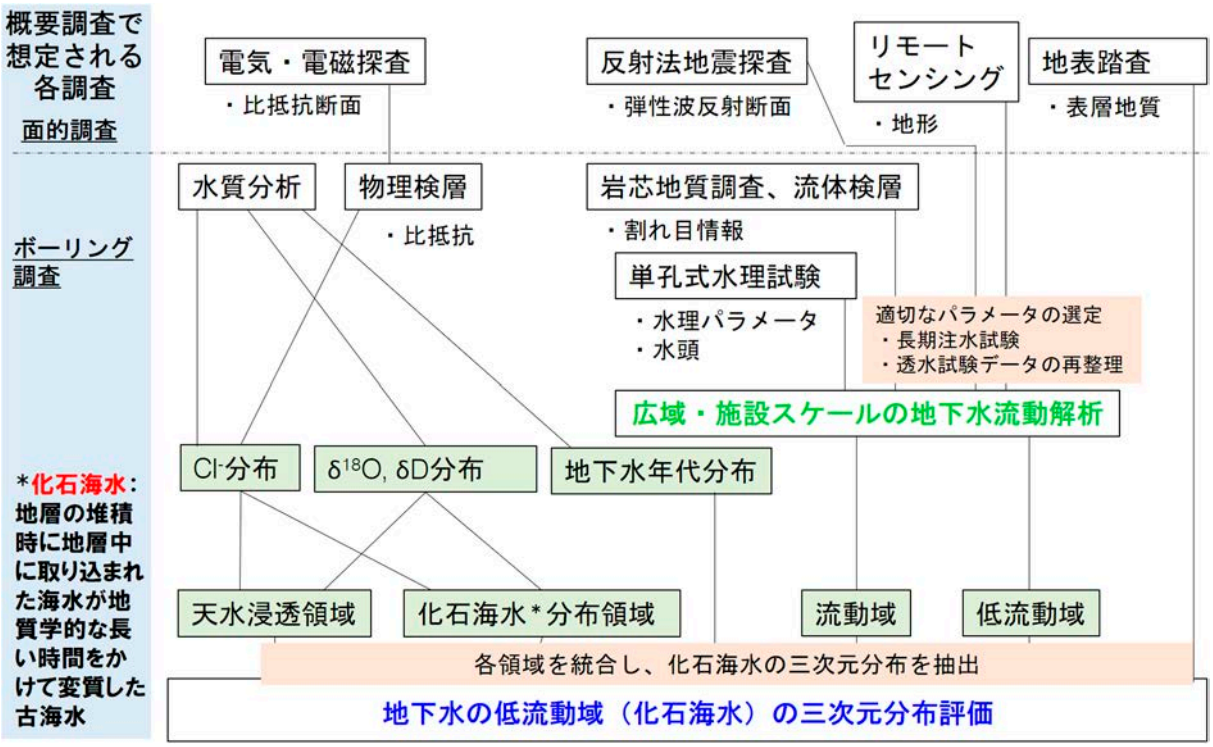


図 41　地下深部の低流動域の空間分布を推定する手順

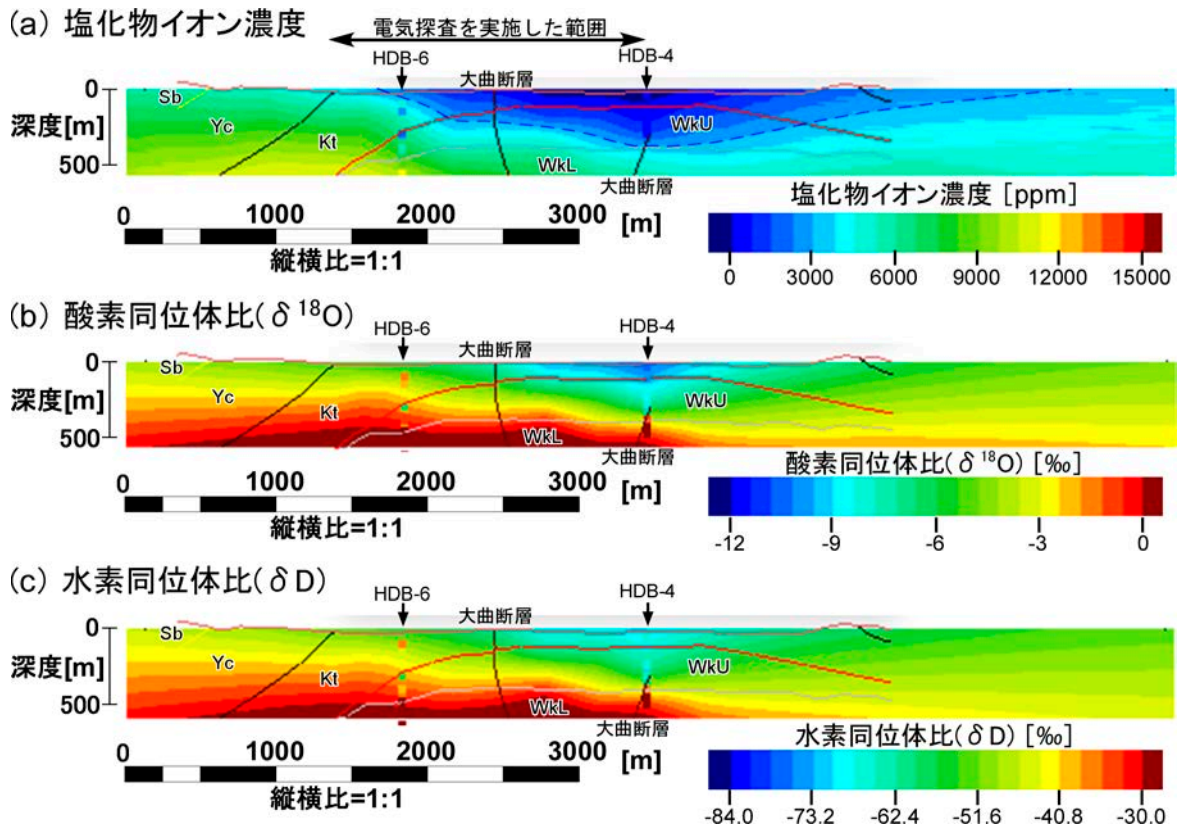
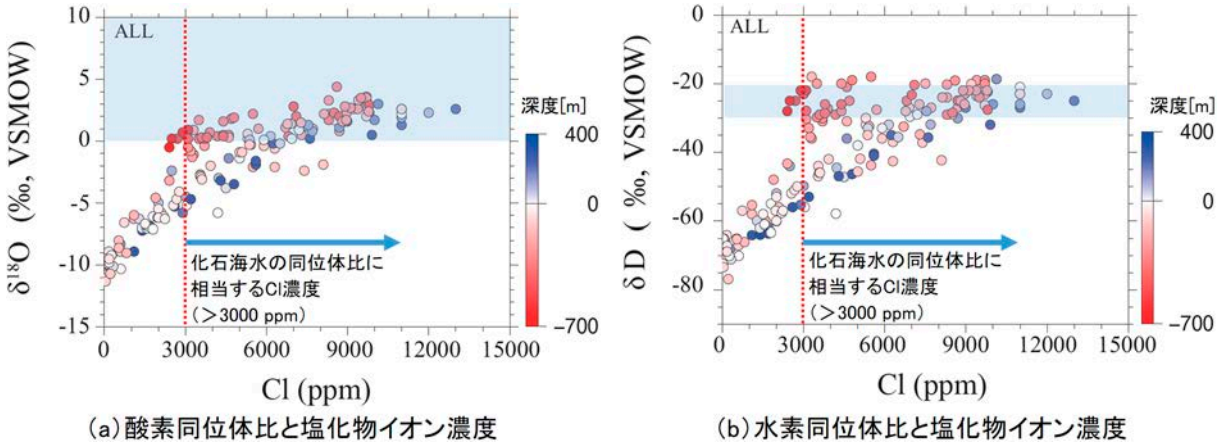


図 42　塩濃度および酸素・水素同位体比の空間分布の推定結果

地層名の略称は、Yc は勇知層、Kt は声問層、WkU は稚内層浅部、WkL は稚内層深部を表しています。(a)の塩化物イオン濃度の分布図の青色の点線は、3000 ppm の等濃度線を表しており、それより下方が 3000 ppm よりも濃度が高い領域になります。



(a)酸素同位体比と塩化物イオン濃度　　(b)水素同位体比と塩化物イオン濃度

図 43　酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度の関係

(a)は酸素同位体比と塩化物イオン濃度の関係、(b)は水素同位体比と塩化物イオン濃度の関係を示す。それぞれの図において、薄い青色の範囲は、幌延の地質環境における化石海水の範囲を示しています。深度については、稚内層と声問層の地層境界を 0 m とし、上位の声問層はプラス、下位の稚内層はマイナスで表記しています。

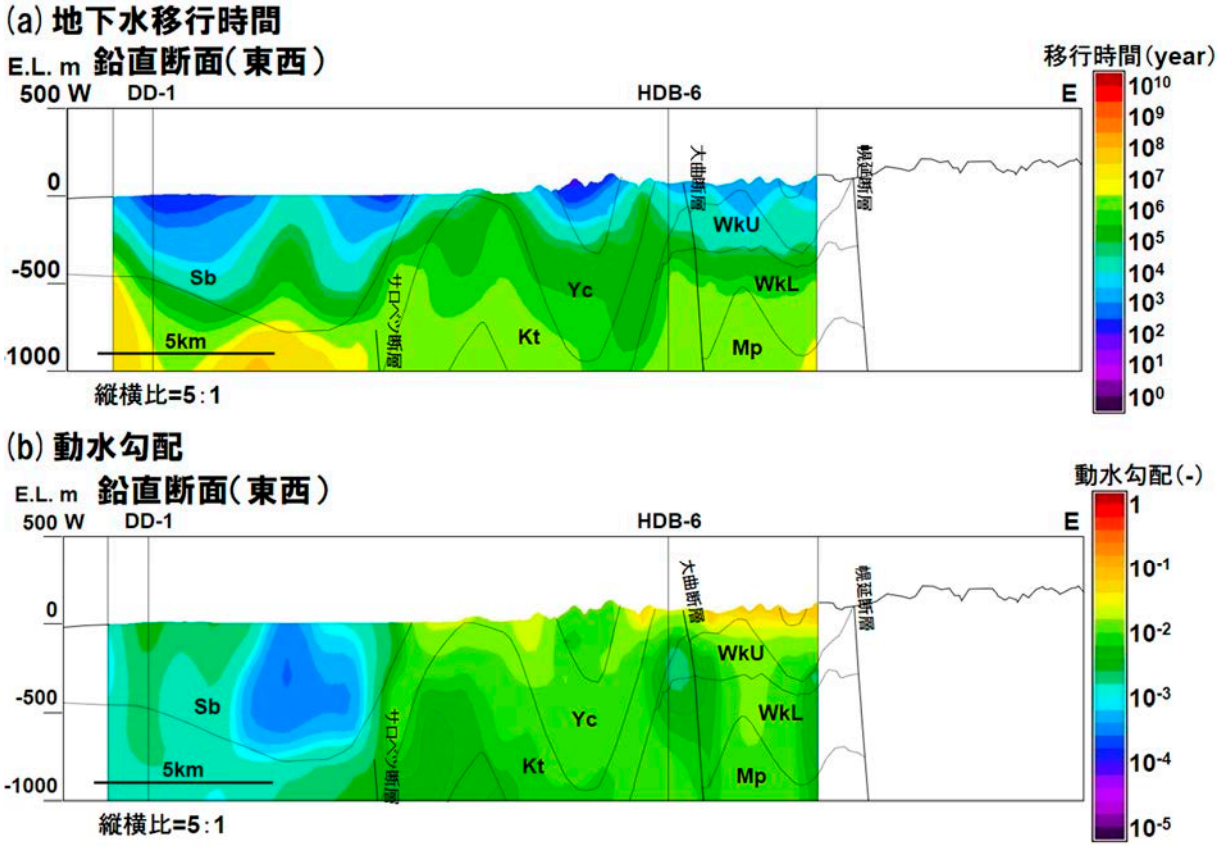


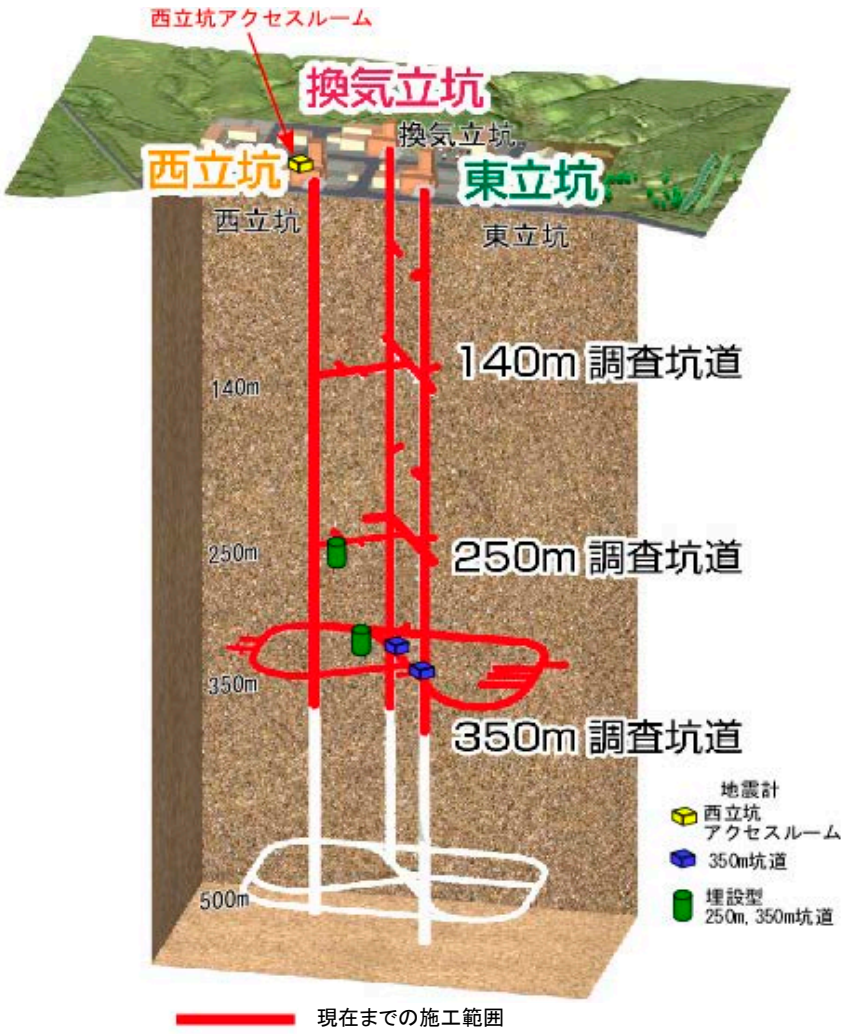
図 44　地下水流動解析から推定した地下水移行時間および動水勾配の空間分布の一例

この図は、地形・地質モデルを現在、気候を温暖期、大曲断層を低透水として設定した場合の解析結果であり、(a) は涵養域から評価点までの地下水移行時間、(b)は動水勾配を示しています。地層名の略称は、Yc は勇知層、Kt は声問層、WkU は稚内層浅部、WkL は稚内層深部を表しています。

3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発

3.2.1 地震観測

地下施設設計の妥当性検証の一環として、地下施設内の 4 台の地震計と地表の 1 台の地震計で地震観測を実施しています（図 45）。気象庁一元化震源データより作成した平成 31 年 4 月 1 日から令和 2 年 3 月 31 日までの北海道地域の震央分布を図 46 に、幌延深地層研究センター周辺の震央分布を図 47 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 以上の体に感じられる地震は 1 回発生しました（表 1）。



※このイメージ図は、今後の調査研究の
結果次第で変わることがあります。

図 45　地震計設置位置

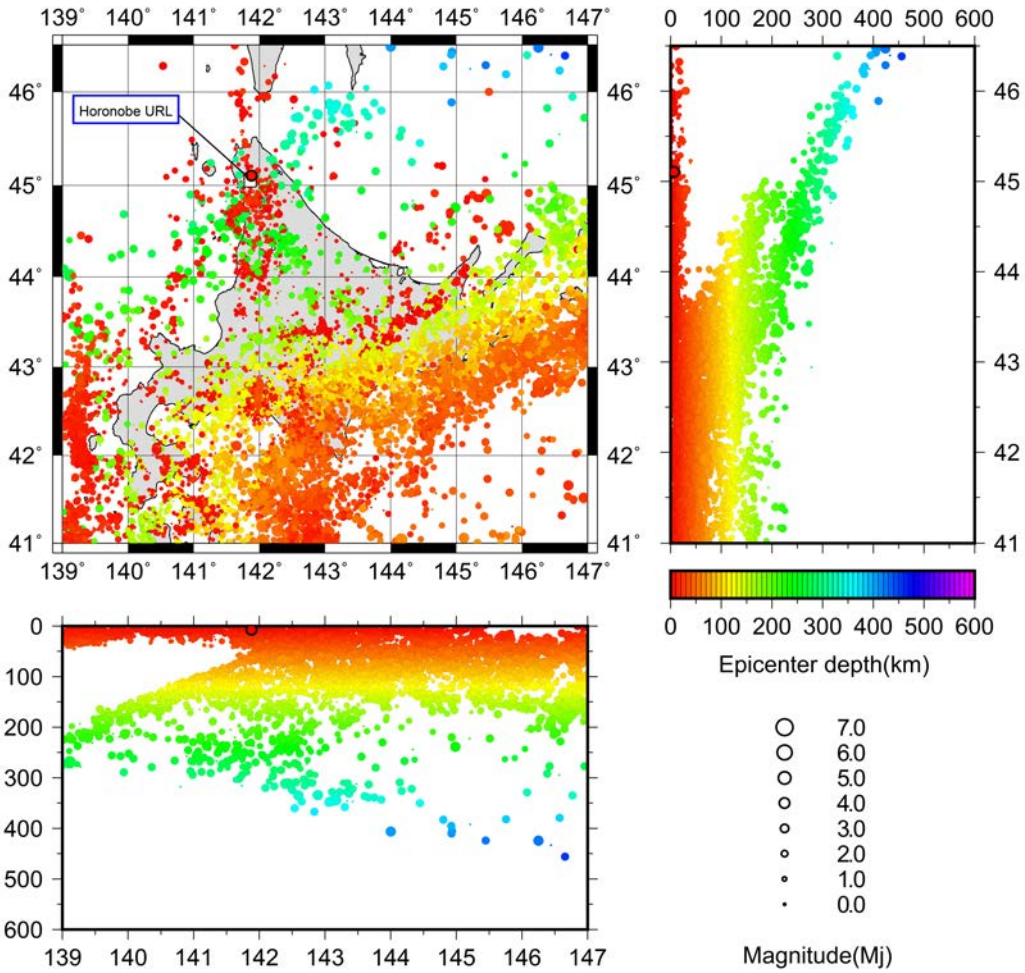


図 46　北海道地域の震央分布

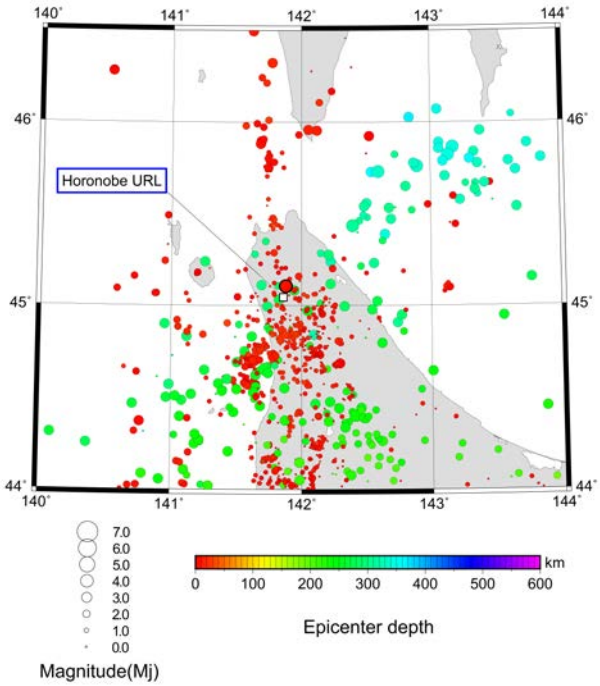


図 47　幌延深地層研究センター周辺の震央分布

表 1　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	Mj*35	震度	
						幌延町宮園	最大震度
令和元年 12 月 12 日 1 時 9 分 49.5 秒	宗谷地方北部	45° 06.3′ N	141° 52.7′ E	7km	4.2	4	5 弱

（これらの地震の震央は図 45、図 46 に黒丸で示しています。）

この地震（宗谷地方北部、深さ 7km、Mj=4.2）について地上と地下施設内の地震計の観測データから作成した周波数別の波の振幅を図 48 に示します。この図から、地震波にはいろいろな周波数の波が含まれています。地表（西立坑アクセスルーム）の地震計で観測した地震波の振幅が最大 18.8 cm/s（黒丸）で 1～5 Hz 程度に対し、深度 250m と 350m 調査坑道の地震計の地震波は振幅の最大が 6.4 cm/s、7.5 cm/s（黒丸）でピークが 3～10 数 Hz とやや高い周波数となり、地表の振幅が大きく、地下（実線）の振幅は小さいことが分かります。これまでに発生した規模や震源地の異なる地震波でも同様の傾向が確認されており[31]、地表に比べて、地下施設に対する地震の影響が小さいことが確認できました。

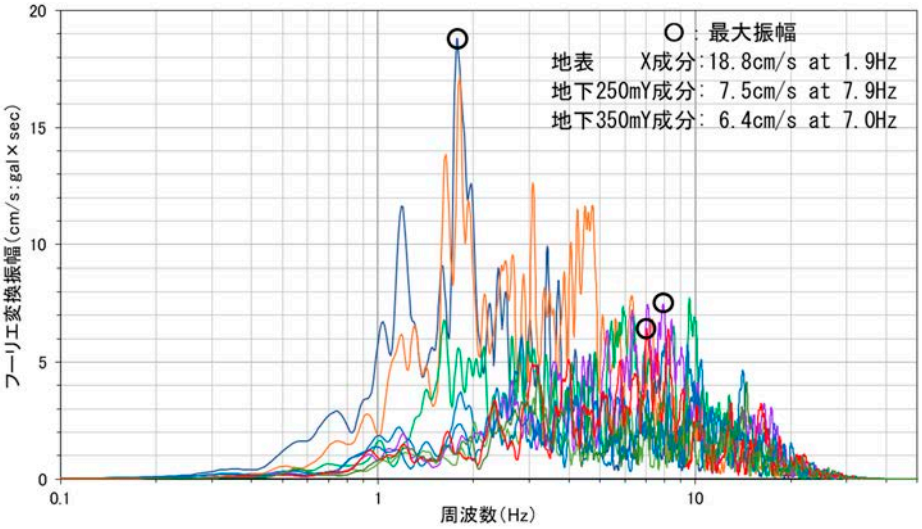


図 48　令和元年 12 月 12 日の地震波の周波数別の振幅

3.2.2 地下施設における湧水対策技術の開発

膨潤性の粘土物質を多量に含む断層（以下、粘土質断層）は、坑道掘削時に地下水とともに粘土物質が坑道内に流出し、新たな水みちが断層内にできることにより、湧水量増加を引き起こす可能性があります[32]。そのため、湧水対策の観点から、そのような構造の分布は先行ボーリングで把握しておくことが重要となります。粘土質断層は成因の観点から 2 つのタイプに分けられ、火山灰層が変質した粘土質断層（以下、火山灰層起源の断層）と岩石が変形・変質してできた粘土質断層（以下、岩石起源の断層）に分けられます。両者の特徴を比較すると、前者の火山灰層起源の断層は、連続性が非常に高い上、粘土部の厚さが空間的に変化しやすいことが挙げられます。したがって、坑道掘削前の先行ボーリングで数 mm 程度の厚さでしか確認されな

*35：気象庁マグニチュード（地震の規模を表す数値）

かった場合でも、その周辺では数十 cm の厚さで連続することもあり、火山灰層起源の断層は坑道掘削時における大規模な粘土流出と湧水量増加のリスクが特に高いことを十分に認識しておく必要があります[33]。しかし、ボーリングコア観察により火山灰層起源の断層と岩石起源の断層を見分けるのは困難です。

原子力機構では、火山灰層起源の断層をボーリングコアで同定するための方法として、平成 29 年度にマグマが噴火時に急冷してガラスとなった物質（メルトインクルージョン）を利用した検出方法を開発しました[34]。しかし、メルトインクルージョンは火山灰層起源の断層に常に含まれているとは限らないため、本方法も万能とは言えません。そこで令和元年度は、より汎用性の高い同定方法として、断層粘土部の非膨潤性鉱物（ここではイライトと呼ばれる粘土鉱物で代表；ill と表記）に対する膨潤性鉱物（スメクタイトと呼ばれる粘土鉱物；sm と表記）の存在割合（sm/(ill + sm)：wt%/wt%）と、断層粘土部に含まれる酸化チタン（TiO_2）に対する酸化アルミニウム（Al_2O_3）の含有量比（Al_2O_3/TiO_2：wt%/wt%）の、2 つの指標を組み合わせた同定方法を考案しました[33]。sm/(ill + sm)の値は周辺岩石の値よりも大きい場合、Al_2O_3/TiO_2の値は周辺岩石の値と異なる場合、火山灰層起源の証拠となります。しかし、周辺岩石と同じ sm/(ill + sm)あるいはAl_2O_3/TiO_2の値を示す火山灰層起源の断層も実際には存在し得るため、これらの指標も個別にみた場合には同定精度が低いと言えます。しかしながら、これらの指標を組み合わせることにより、火山灰層起源の断層の同定精度を大きく高めることができます。

図 49 に地下施設周辺の稚内層中の粘土質断層に適用した結果を示します。周辺の泥岩より高い sm/(ill + sm)の値（0.7 以上）を示す粘土質断層はAl_2O_3/TiO_2の値で見ても周辺の泥岩と異なった値を示すものが多く、これらの断層は火山灰層起源であると判断することができます。一方で、試料番号 HDB-6-458.4、HDB-9-104.5、HDB-10-434.6、PB-V01-285.5、および KMH-4（地表で採取した試料）の粘土質断層は岩石部の sm/(ill + sm)と同様な値を示すため、sm/(ill + sm)の値だけでは火山灰層起源かどうかの判断が困難です。しかし、HDB-10-434.6、PB-V01-285.5、および KMH-4 は、周辺の泥岩と異なるAl_2O_3/TiO_2を示すため（Al_2O_3/TiO_2の分析精度も考慮）、火山灰層起源の断層と判断することができます。したがって今回行った分析により、幌延の稚内層中の粘土質断層はほぼ全てが火山灰層起源の断層であることが分かり、今回適用した方法が有効であることが分かりました。sm/(ill + sm)およびAl_2O_3/TiO_2の分析は一般的な方法により容易であるため、今後、様々な地下施設における湧水対策技術の 1 つとして役立つことが期待できます。

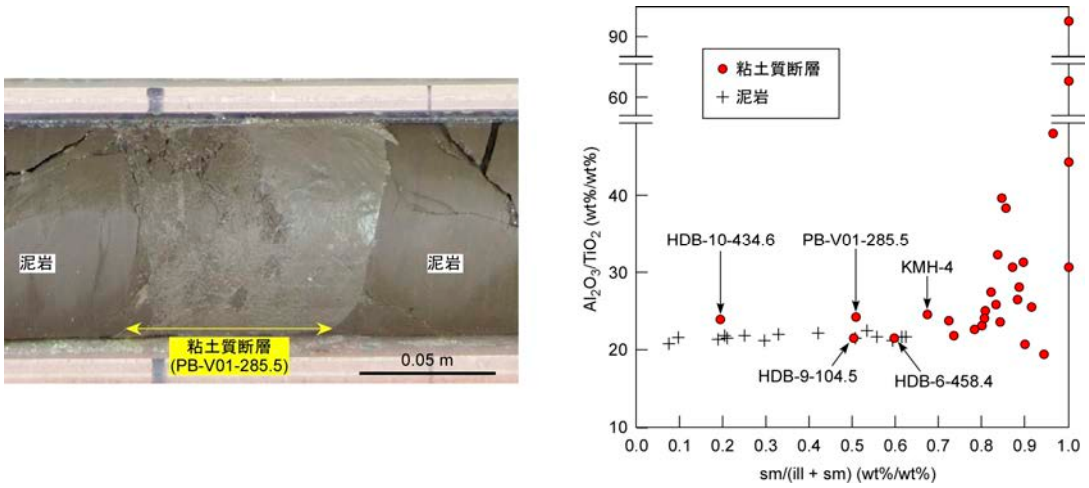


図 49　ボーリングコアで観察される粘土質断層（左図）と稚内層中の粘土質断層の分析結果（右図）[33]

3.2.3 長期的な坑道安定性のモニタリングのための技術開発

地下施設では、長期的な支保工や岩盤の安定性の検討を目的として、立坑と水平坑道の 39 断面に 4 種類の計測器（地中変位計、ロックボルト軸力計、覆工・吹付けコンクリート応力計、鋼製支保工応力計）を設置しています。今回は、長期的な岩盤や支保工のモニタリングに資する技術開発として、計測器の長期的な耐久性を検討しました。

図 50 に各計測器の計測不良割合の経時変化を示します。計測不良の割合が大きいものとしては、地中変位計で 66 %、ロックボルト軸力計で 68 %でした。これらは、岩盤中に設置するため、地下水との接触により絶縁抵抗不良が生じやすかったと考えられ、設置後 2～3 年で計測不良となる計測器が多く存在しました。また、東立坑の深度 160 m 地点において、光ファイバー式の地中変位計の適用性の確認を実施していますが、設置から約 10 年経過した令和 2 年 2 月末時点においても、すべての計測点で良好な計測が可能です(図 51)。そのため、岩盤の変位の長期的なモニタリングには、従来型の電気式よりも光ファイバー式のセンサーの方が優れていることが分かります。

一方、吹付けコンクリート応力計、覆工コンクリート応力計、鋼製支保工応力計の計測不良割合は、それぞれ 13 %、4 %、19 %でした。これらはコンクリート中に埋設された機器であるため、地下水との接触が生じにくいことから絶縁抵抗の低下が生じにくく、設置から 10 年程度経過しても正常に計測されるセンサーが多かったものと考えられます。したがって、支保工のうちコンクリート構造物の安定性を検討するうえでは、従来型の電気式の計測器でも耐久性を十分に有していることが分かりました。

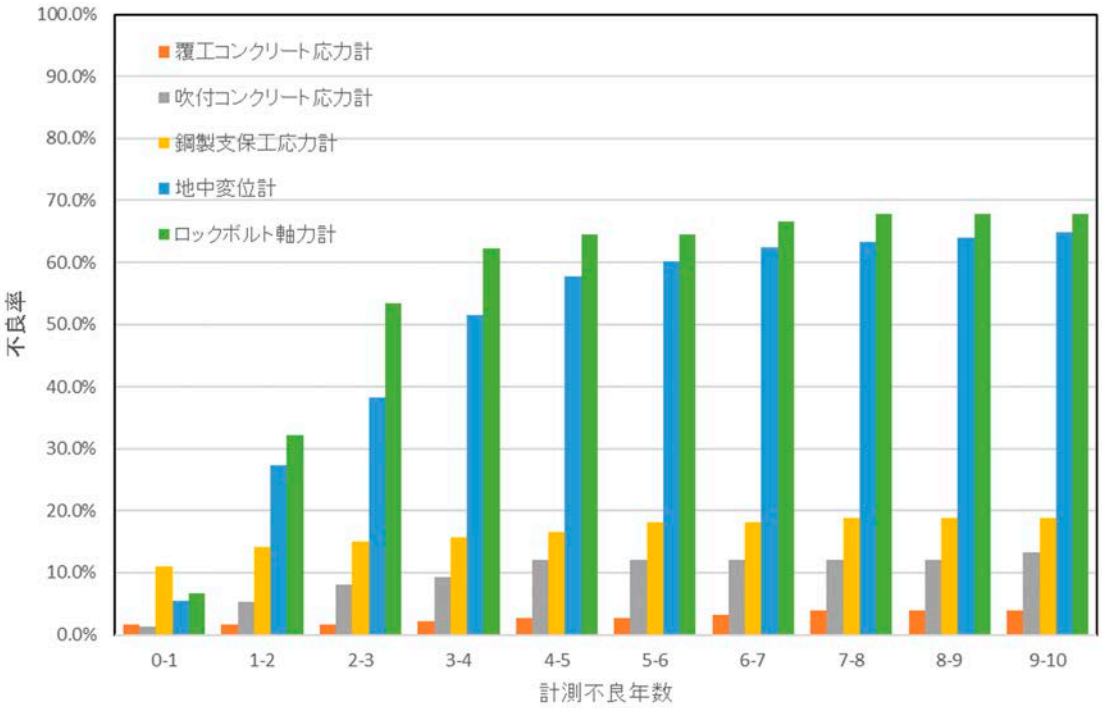


図 50　計測器ごとの計測不良割合の経時変化

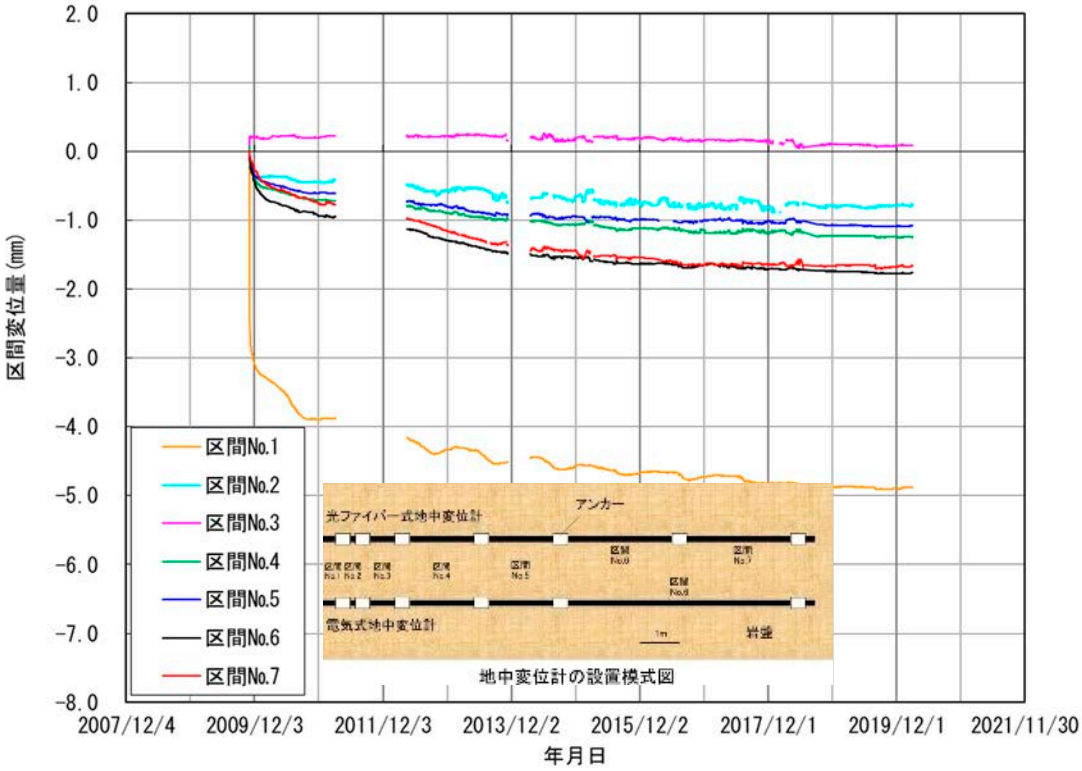


図 51　光ファイバー式地中変位計計測結果

3.3 地質環境の長期安定性に関する研究

地震や断層の動きによって生じる地質環境への影響の把握や推定手法を開発するための地震動データを取得することを目的として、平成 30 年度に引き続き上幌延観測点（図 3）において地震観測を行いました。令和元年度中、震度 1 以上に相当する地震を観測した回数は 1 回あり（表 1 参照）、震度 3 に相当しました。

地下施設では、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の一環として、水圧擾乱試験によって断層や割れ目で発生したせん断変形について、その位置や特徴などを推定することを目的に、微小地震の観測を行っています。平成 30 年度に実施した水圧擾乱試験では、高周波の地震計（100 Hz）と圧力センサーを 3 箇所に設置し、観測したデータを用いて解析を行いました。（図 52）。

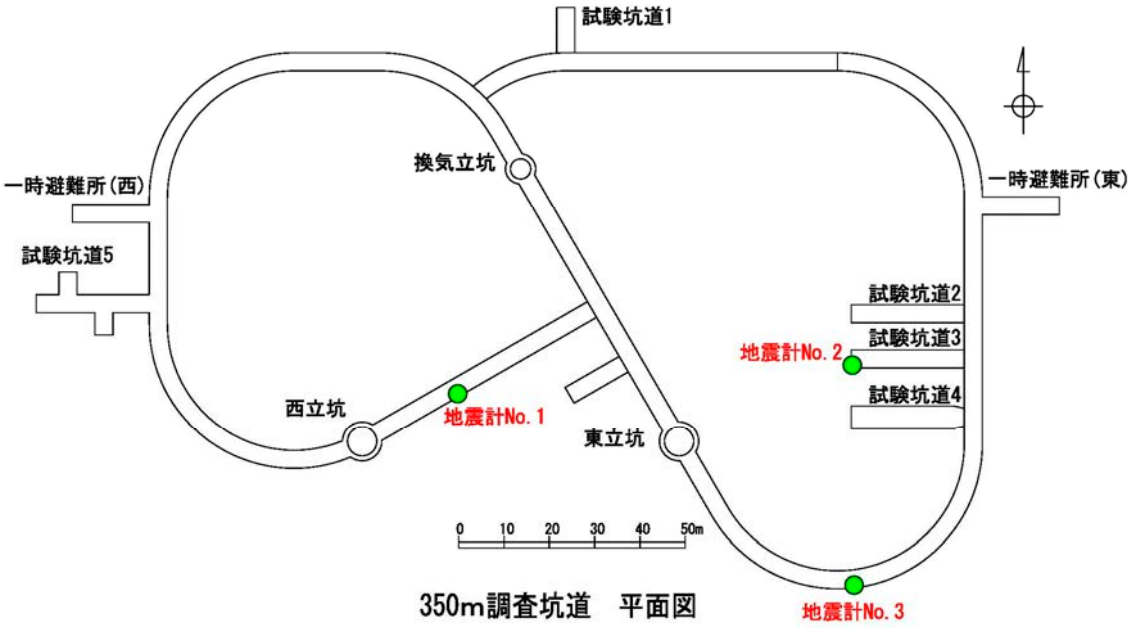


図 52　地下施設に設置した地震計

観測データから波形の共通性を指標として、これに平均振幅の情報をあわせた波形の類似性に関する解析によりイベントの抽出を行いました。観測した波形を図 53 に、解析結果を表 2、図 54 に示します。

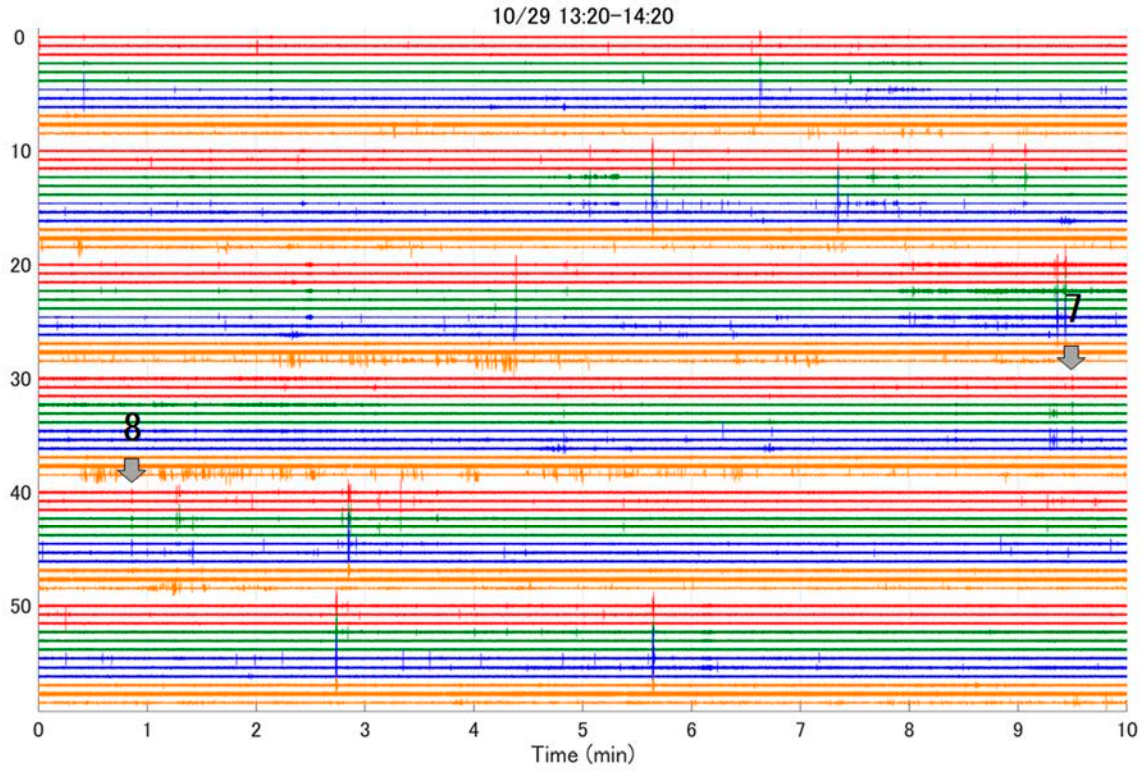


図 53　抽出したイベントと各成分・各観測点での波形

10/29 13:20～14:20 の 60 分間の観測データを、10 分間ずつに切り分け、横軸を 10 分間として縦に並べて表示している。地震計の 3 成分と（南北動（赤）、東西動（緑）、上下動（青））、圧力センサー（オレンジ）の波形を観測点順に並べて表示している。波形上の番号は解析により抽出したイベント。

表 2　10 月 29 日 10:00～14:20 の間で抽出されたイベントの時刻

No.	時刻
1	2018/10/29 10:20:43
2	2018/10/29 10:37:43
3	2018/10/29 10:47:43
4	2018/10/29 10:51:42
5	2018/10/29 12:49:46
6	2018/10/29 13:44:23
7	2018/10/29 13:59:29
8	2018/10/29 14:00:51

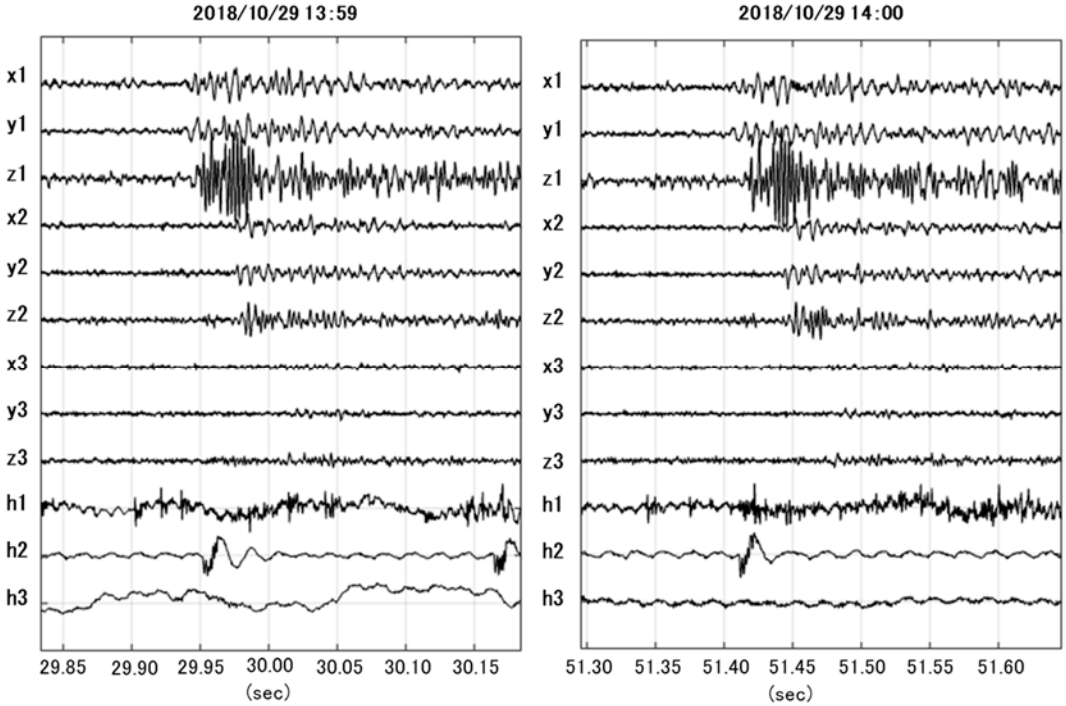


図 54　表 2 のイベント No.7 と No.8 の波形図

波形を観測点の順に並べ、ｘは南北動、ｙは東西動、ｚは上下動、ｈは圧力センサーを示す。

解析の結果から、抽出したイベントの中で No.7 と No.8 の波形には類似性があり、水圧擾乱試験の注入圧最大時に同じ震源で発生したイベントと考えられ、適切な観測手法を用いることで目的とするイベントを抽出できることが分かりました。しかし、抽出したイベント波形は多くの雑音を含み、観測点数も少ないことから震源を決定する解析には適用できないことも分かりました。

地下施設と地表で取得する地質のデータ、地下水のデータ、地形のデータなどを利用して、海水準変動や地殻変動による長期的な変化が地質環境に与える影響を評価する手法の開発を行ってきました。

令和元年度は、長期的な地質環境の変遷に伴う微量元素の移行性について理解するために、堆積岩中の微量元素の化学形態について調査を行いました。高レベル放射性廃棄物の処分で重要とされる微量元素の中でもセレン(Se)は地下水の酸化還元電位に応じて様々な化学形態をとるため、室内試験の結果から地下環境における移行性を予想することが難しい元素です。そのため、幌延の堆積岩について、逐次抽出試験*36および X 線吸収微細構造構造法(XAFS 法)分析*37を行い、地下環境におけるセレンの化学形態に関する分析を実施しました。

その結果、声問層・稚内層から得られた岩石（図 55(a)）には、1 ppm 程度のセレンが含まれていることが確認されました。また、これらの岩石試料に対して、6 種類の異なる溶液を用いたセレンの逐次抽出試験を実施したところ、どちらの地層でも金属セレン（Se(0)）が主な存在形

*36：岩石試料に対して複数の溶液を連続的に反応させることで、岩石中の重金属元素を化学的特性に基づいて抽出する試験手法です。

*37：岩石試料に X 線を照射した際に発生する固有のスペクトルから、対象元素の化学状態や結合状態など元素周辺の構造を明らかにする分析手法です。

態であることが明らかになりました(図 55(b))。さらに、XAFS 法による微小スケールでの分析でも、同様に幌延の岩石中のセレンは、金属セレンとして存在することが示唆されました(図 55(c))。一方で、セレンは酸化還元電位が 125 mV～-18 mV の条件において金属セレン、-18 mV～-292 mV の条件においてフェロセライト($FeSe_2$)という固相として存在するため、現在の地下水の酸化還元電位(-250 mV～-100 mV 程度)では、フェロセライトが安定固相であると推察されます。岩石試料に対する分析結果と地下水から予想される安定固相が異なる理由を明らかにするためには、逐次抽出試験の分画の精度について確認するとともに、マイクロスケールの XAFS 分析など、さらなる分析を実施する必要があります。以上の結果を踏まえると、岩石中においてセレンは吸着体ではなく固相として保持され、移行が抑制されていることが明らかになりました。これらの結果にセレン含有鉱物の生成メカニズムや地質環境の長期安定性に関するデータを追加することで、長期間にわたってセレンの移行が抑制されていたことを示すことができます。このように微量元素の存在形態を評価することで、長期的な物質移行特性について推測できます。

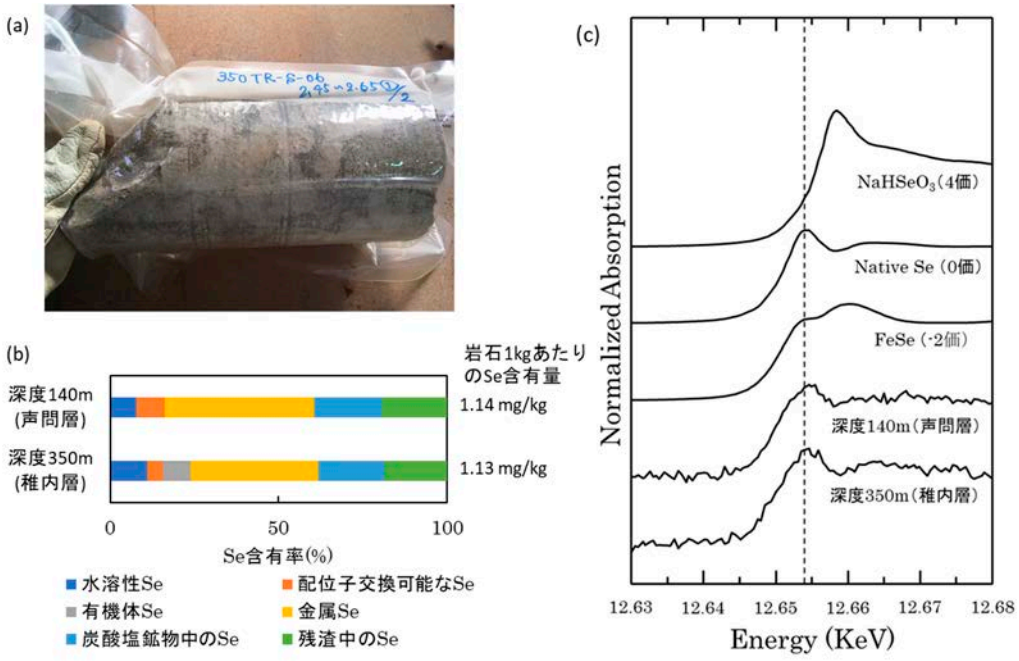


図 55　声問層・稚内層から得られた岩石中のセレンの分析結果
(a)使用した岩石試料(稚内層から採取)、(b)各抽出試験によって抽出されたセレンの存在形態の割合、(c)岩石試料中のセレンの XAFS スペクトル

4. 地層処分研究開発

4.1 処分技術の信頼性向上

令和元年度は、人工バリア性能確認試験を継続するとともに、オーバーパック腐食試験で回収した腐食センサーに生じた腐食生成物の分析を実施しました。また、緩衝材の定置試験、閉鎖技術の確証試験などを実施しました。さらに、搬送定置・回収技術の実証として、隙間充填材の除去技術および模擬 PEM の回収技術の検証を行いました。

4.1.1 人工バリア性能確認試験

深度 350m 調査坑道の試験坑道 4 における人工バリア性能確認試験（図 56）は、①地層処分研究開発の第 2 次取りまとめ報告書で示した処分概念が実際の地下で構築できることの実証、②人工バリアや埋め戻し材の設計手法の適用性確認、および図 57 に模式的に示すような非常に複雑な、③熱－水理－力学－化学連成挙動に係るデータの取得を目的として実施しているものです。③のデータ取得に当たっては、模擬オーバーパックに内蔵されたヒーターや緩衝材および埋め戻し材外周部への人工注水によって境界の温度や圧力を変化させることによって、各種条件下におけるデータを取得します。

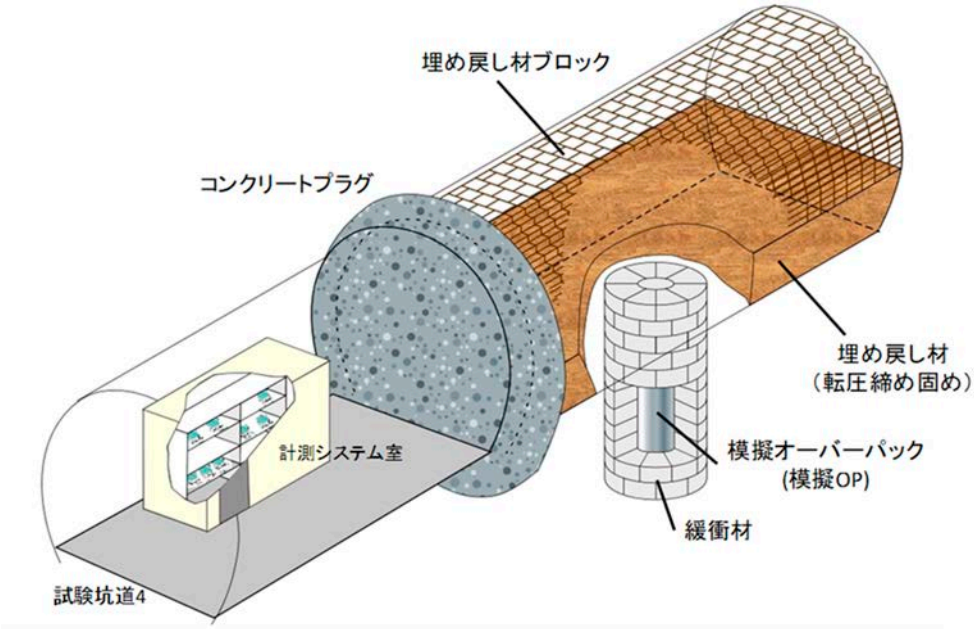


図 56　人工バリア性能確認試験の概念図

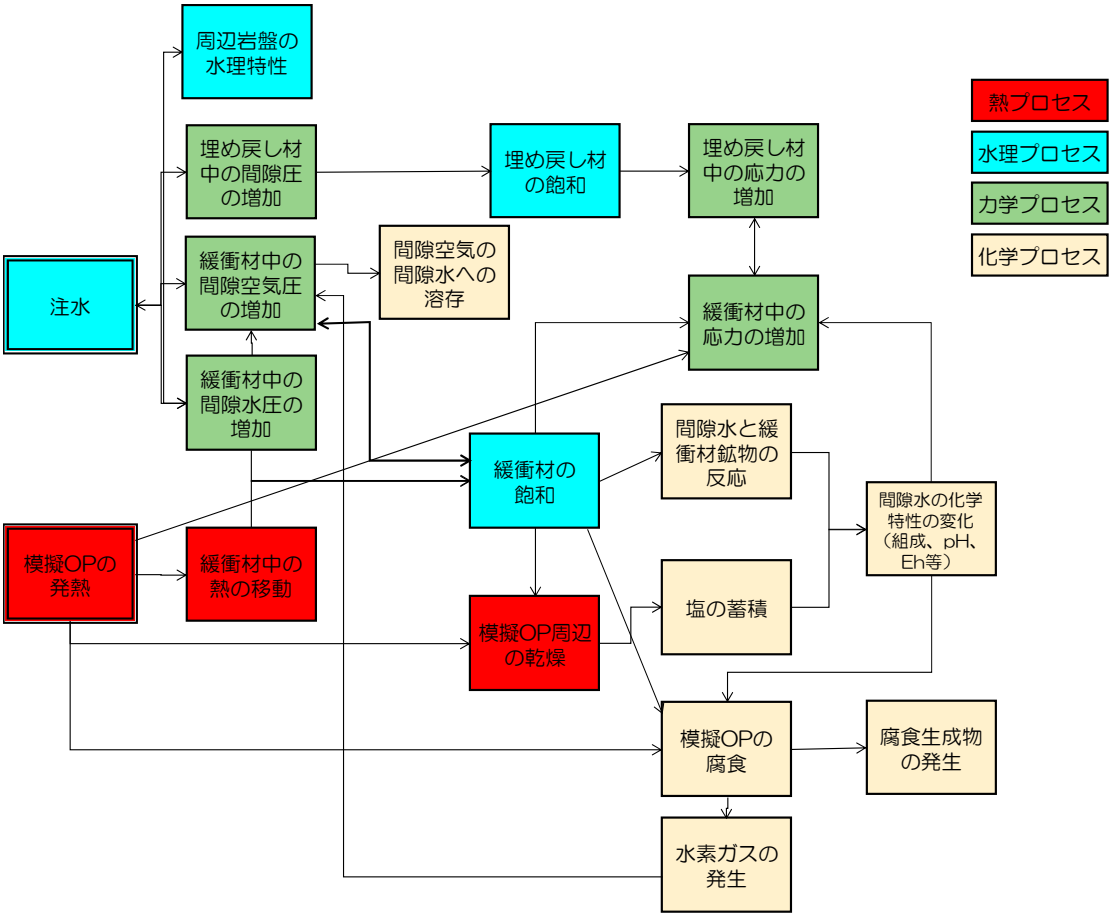


図 57　人工バリア性能確認試験で生じる熱－水理－力学－化学プロセスの相関関係
全ての相関関係を図示すると煩雑となるため、一部を抜粋して示しています。

令和元年度は、平成 26 年度に開始した加熱および注水を継続し、データの取得を継続しました。緩衝材および埋め戻し材への注水量の経時変化を図 58 に示します。なお、図 58 の横軸（上側）は、加熱開始（2015 年 1 月 15 日）を 0 日として示しています。緩衝材への注水は、加熱開始の翌日（2015 年 1 月 16 日）から開始し、急激な注水による緩衝材の流出現象などを避けるために、最初は 150 mL/min と設定し、段階的に注水量を増加させ、平成 28 年 10 月からは約 1000 mL/min に設定しています。令和元年度は注水に必要な地下水を確保するために新規のボーリング孔を掘削し、令和 2 年 1 月 14 日から注水流量を 1500 mL/min に増加させました。また、埋め戻し材への注水は、緩衝材への注水と同時に 100 mL/min で開始しました。その後、平成 27 年 6 月にコンクリートプラグと周辺岩盤を一体化させるコンタクトグラウトを施工した後、ケーブルダクト（計測センサーのケーブルがプラグを貫通している部分）からの漏水が認められたため、埋め戻し材への注水を停止していましたが、シーリング材により漏水処置を実施した後、平成 28 年 10 月からは 300 mL/min で注水を再開し、令和元年度も同流量で注水を継続しています。

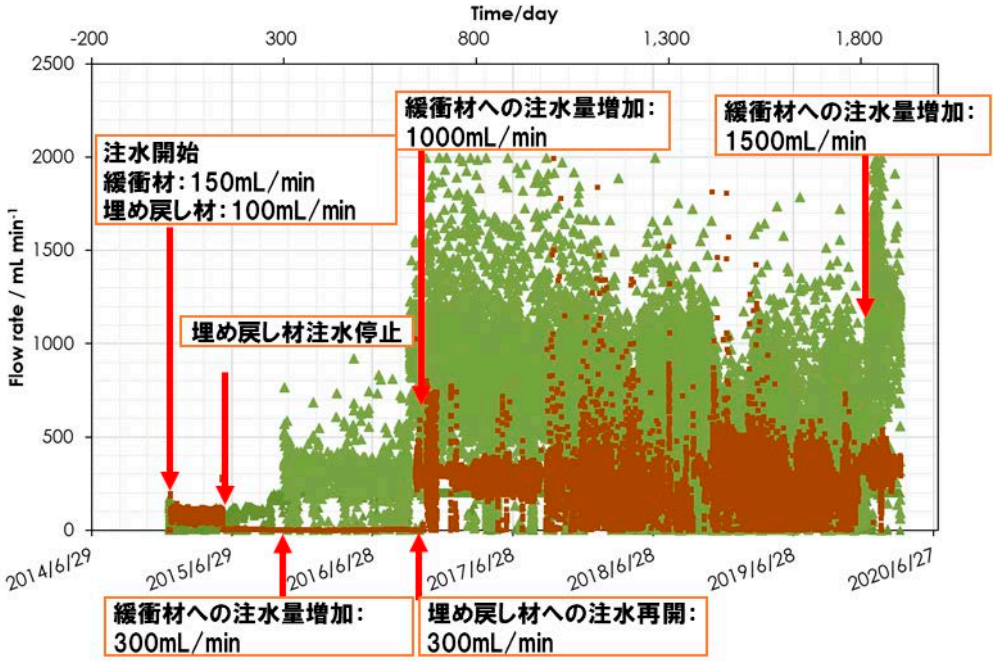


図 58　緩衝材および埋め戻し材への注水量の経時変化

また、試験エリア周辺の逸水を抑制するためにコンクリートプラグ手前の試験坑道周辺領域について、東周回坑道側から B 断面（12 区間）を、試験坑道 3 側から A 断面（56 区間）のグラウトを実施しました（図 59）。グラウト注入前に水押し試験により改良範囲の透水性を確認したところ、A 断面の底部に高透水の領域が確認されましたが、グラウト注入後の水押し試験では透水性は下がっており、グラウトにより高透水性の領域が改良されたことを確認しました。図 60 に緩衝材外周のケイ砂部の間隙水圧の経時変化を示します。図より、令和元年 8 月頃からグラウトの効果により間隙水圧が上昇していることが確認できます。また、令和 2 年 1 月 14 日に注水量を増加させたことにより、約 0.3 MPa まで間隙水圧が上昇しました。

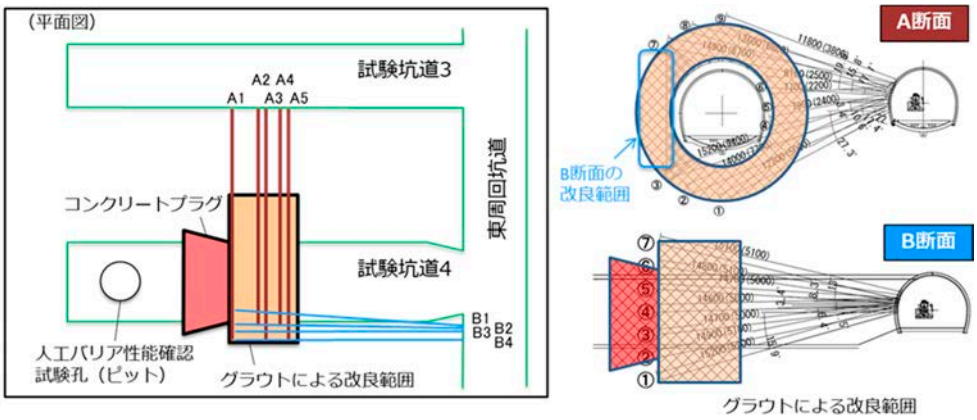


図 59　グラウトの施工箇所

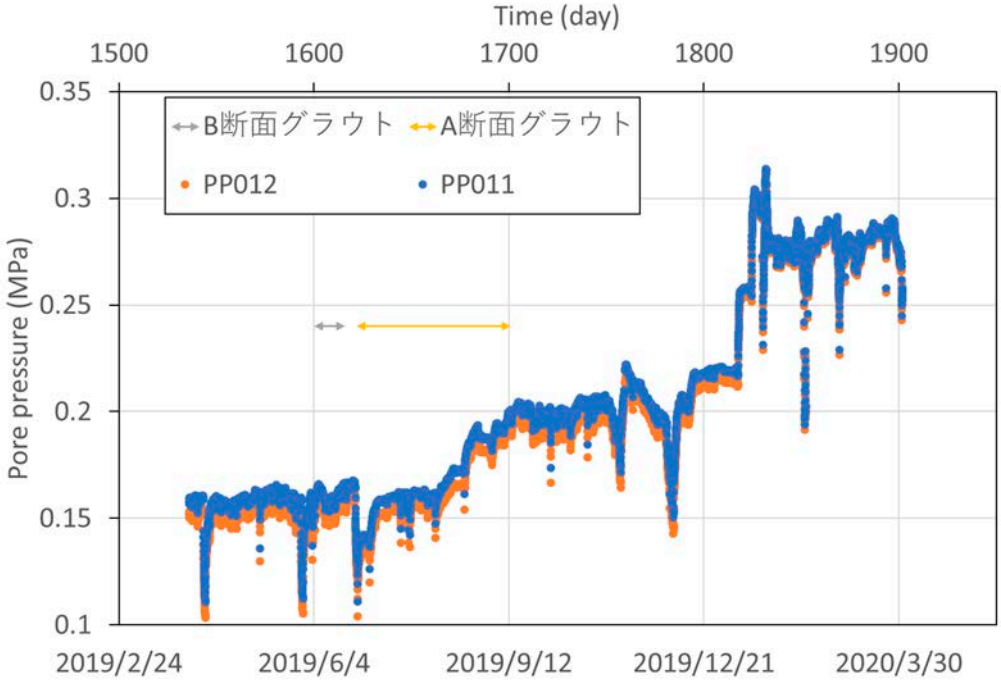


図 60　緩衝材外周のケイ砂部の間隙水圧変化

人工バリア性能確認試験においては、今後ヒーターの電源を OFF にした減熱試験を実施する予定です。そこで令和元年度は、減熱試験を開始した場合に、緩衝材内部の温度や水分量がどのように変化するかを連成解析により予測し、今後の計画立案の参考としました。図 61 に温度の、図 62 に緩衝材内部の水分の飽和度の結果を示します。約 2000 日までは現在実施中の加熱試験で取得した計測値と解析結果の比較を、2000 日以降は減熱試験を仮定した解析結果を示しています。図 62 の計測値（外側）に示す外側の飽和度の計測値では、約 1500 日付近でばらつきが見られます。このセンサーは測定原理上、冷却するための電流を流しており、この電流の値は正常動作の範囲が決められています。約 1500 日以降の外側センサーでは、この冷却電流の値が正常動作の範囲外を示したことから、実際に飽和度が変化しているのではなく、センサーの故障が原因であると考えられるため以降のデータは欠損としています。一方、中央の計測値においても所々でばらつきが見られますが、中央センサーの冷却電流の値は正常動作の範囲内であることから、一時的な計測データ取得の不具合であると考えられます。計測データと解析結果を比較すると、温度と緩衝材外側の飽和度については良好な一致が見られるものの、緩衝材中央部の飽和度については、計測データと解析結果に開きが見られます。これは、温度勾配による緩衝材中の水分移動現象を正確に再現できていないことが要因として挙げられます。減熱試験を仮定した解析では、緩衝材中の温度は減熱試験を開始後、比較的早い時間で温度が低下することが推定されました。また、緩衝材内側の飽和度については、2000 日以降から上昇していることが推定できます。これは、緩衝材中の温度差によって生じる緩衝材外側方向への水分移動が、温度差がなくなることによって解消されるためです。

解析モデルの高度化においては、特に高温環境下における緩衝材の力学特性、水分特性に係るパラメータ取得や間隙空気の影響などが課題として残されているため、今後も継続して各種室内試験や解析モデルの改良を実施していく予定です。

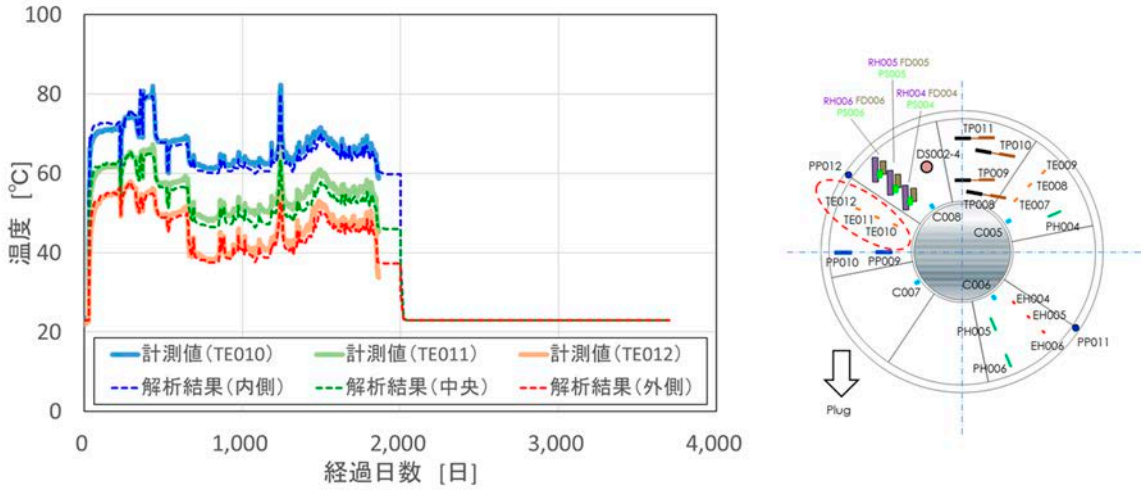


図 61　緩衝材内部の温度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定）

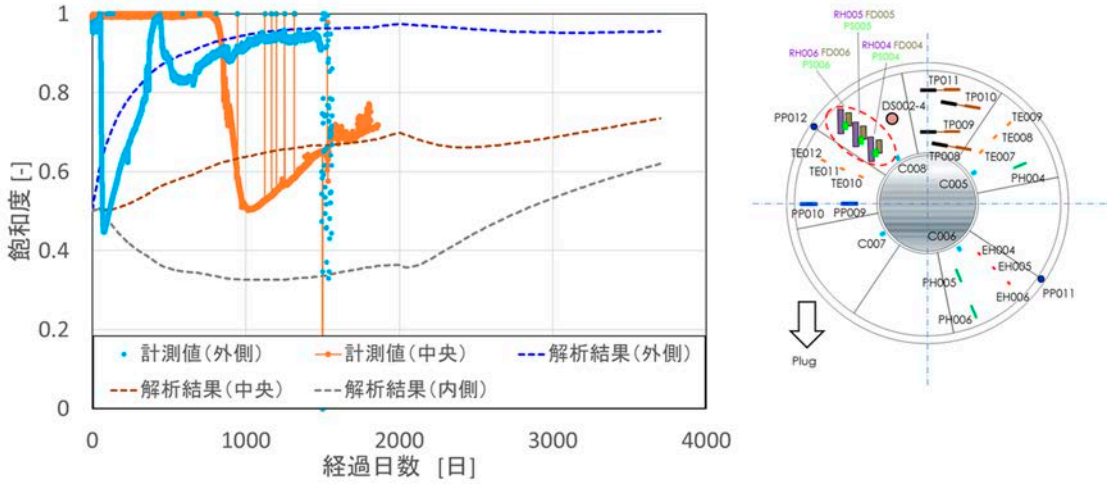


図 62　緩衝材内部の水分飽和度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定）

4.1.2 オーバーパック腐食試験

深度 350m 調査坑道の試験坑道 3 におけるオーバーパック腐食試験は、幌延を事例として、塩水系地下水環境におけるオーバーパックの耐食性[*38]や腐食モニタリング手法の適用性を確認することを目的として実施するものです。本試験では、オーバーパックの耐食性を中心に、コンクリート支保の影響についても検討するため、実物よりも縮小した模擬オーバーパックおよび緩衝材を低アルカリ性のコンクリート材料の中に設置し（図 63）、平成 26 年度に加熱・注水と腐食モニタリング等の計測を開始しました。試験では、緩衝材の下から 2 段目、6 段目、10 段目に設置した炭素鋼腐食センサーにより交流[*39]インピーダンス[*40]を測定し、腐食の速度などを評

*38：金属の腐食（さび）に対する抵抗性のことです。耐食性の高い合金として、一般的にはステンレス鋼やアルミニウム系合金など、オーバーパックの候補材料としては銅やチタン合金などがあります。
*39：電流には、直流と交流があり、交流は電流の流れる向きが周期的に変化している電流のことです。
*40：インピーダンス（Z）とは、電気回路のうち、交流回路における電圧（V）と電流（I）の比で表される値で、単位は Ω（オーム）です。直流回路における抵抗に相当します。

価します。また、計測終了後に試験体を回収し、模擬オーバーパックの表面の実際の腐食状況や緩衝材への地下水の浸潤状況などを確認します。

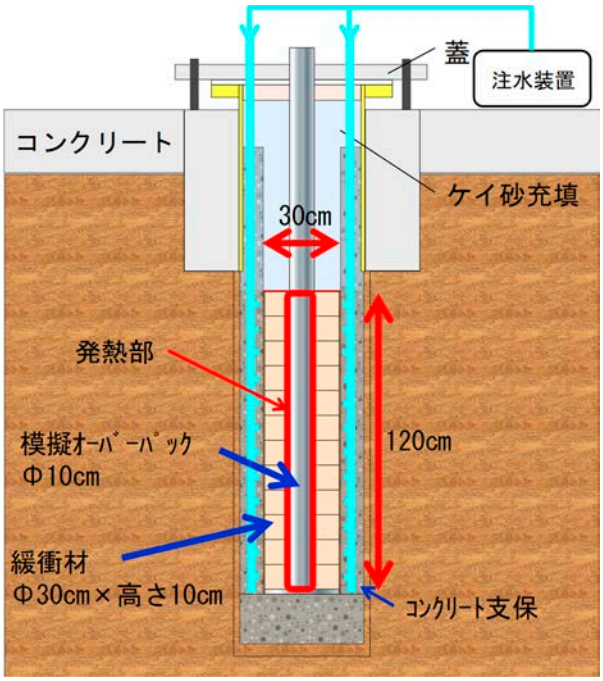


図 63　オーバーパック腐食試験の概念図

令和元年度は、平成 30 年 5 月に計測を終了して回収した腐食センサーについて、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、センサーに埋め込まれた炭素鋼電極（模擬オーバーパックと同じ材料で製作）に生じた腐食生成物の分析を実施しました。腐食センサーは模擬オーバーパック近傍の緩衝材中に設置されていたため、模擬オーバーパックと類似した環境で腐食が進展していたものとして扱うことができます。図 64 に腐食センサー内の炭素鋼電極の外観写真とスケッチを示します。炭素鋼電極表面の腐食生成物は一様ではなく、色調や凹凸具合など場所によって異なっていることから環境条件や腐食の進展も一様ではないことが推察されます。炭素鋼電極表面を X 線回折により分析すると、図 65 に示すようにシデライト（$FeCO_3$：菱鉄鉱と呼ばれる炭酸塩鉱物）のピークが確認されました。これは平成 30 年度に実施した模擬オーバーパック表面の腐食生成物の X 線回折結果と整合します。X 線回折に加えて、図 64（右）のスケッチ中に示した A～E の各部でラマン分光法[*41]による分析を行いました。

*41：ラマン分光法：物質に光を入射すると、光は分子と衝突して一部は散乱します。その散乱した光には入射した光とは異なる波長の光が含まれています。この散乱した光を読み解くことで物質の構造や種類などを知ることができます。

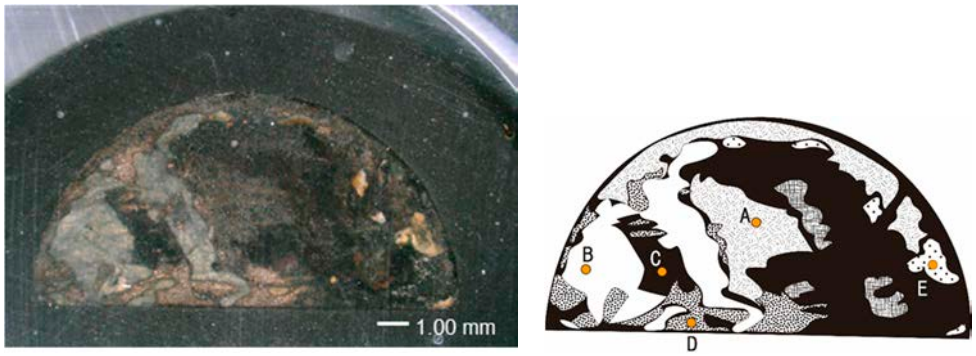


図 64　腐食センサー（6 段目、135°）の炭素鋼電極表面の外観（左）とスケッチ（右）および、顕微ラマン分光分析箇所（右図 A～E）

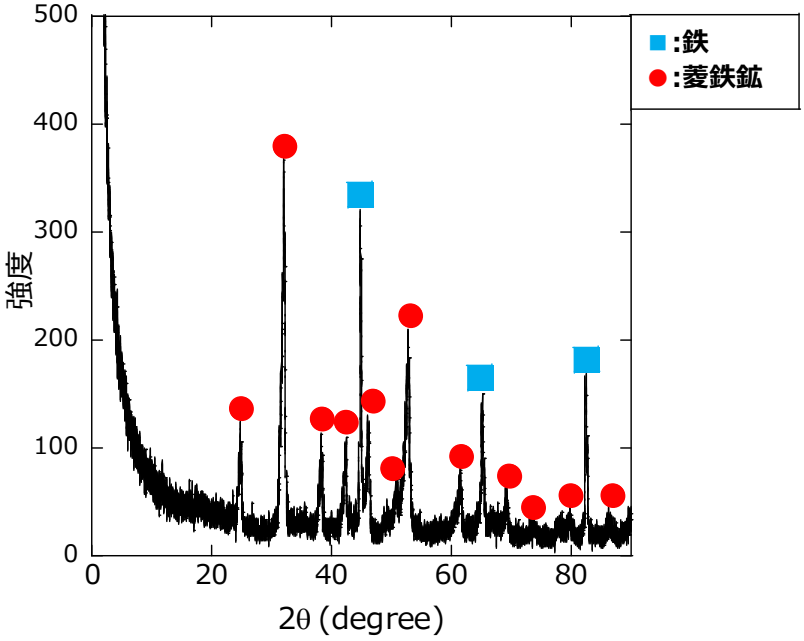


図 65　腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の X 線回折結果

分析では、分析操作中に腐食生成物が大気中の酸素や水分によって変質しないように表面を透明な樹脂で固めてその樹脂を通してレーザー光を照射しました。分析結果の一例としてラマン分光法による分析結果を図 66 に示します。X 線回折で確認されたシデライト（$FeCO_3$：菱鉄鉱と呼ばれる炭酸塩鉱物）に加えて、マグネタイト（Fe_3O_4：磁鉄鉱と呼ばれる酸化鉱物）とゲーサイト（FeOOH：針鉄鉱と呼ばれる水酸化鉱物）と思われるピークが観察されました。これらのうち、シデライトは酸素濃度の低い環境で、ゲーサイトは比較的酸素が豊富な環境で安定な腐食生成物であることが分かっています。また、マグネタイトはその中間的な条件で安定な腐食生成物です。これらの腐食生成物が同時に確認されたことから、炭素鋼表面は試験開始時の酸化性の状態から低酸素の状態に遷移していったことが示唆されました。平成 30 年度に腐食センサーを用いた腐食モニタリングの結果として、約 250 日までは腐食速度が時間とともに低下してそれ以降はほぼ一定となる傾向があることを示しました。この約 250 日までの腐食速度の変化は酸化性の状態から低酸素濃度の状態への変化に概ね対応しているものと考えられます。

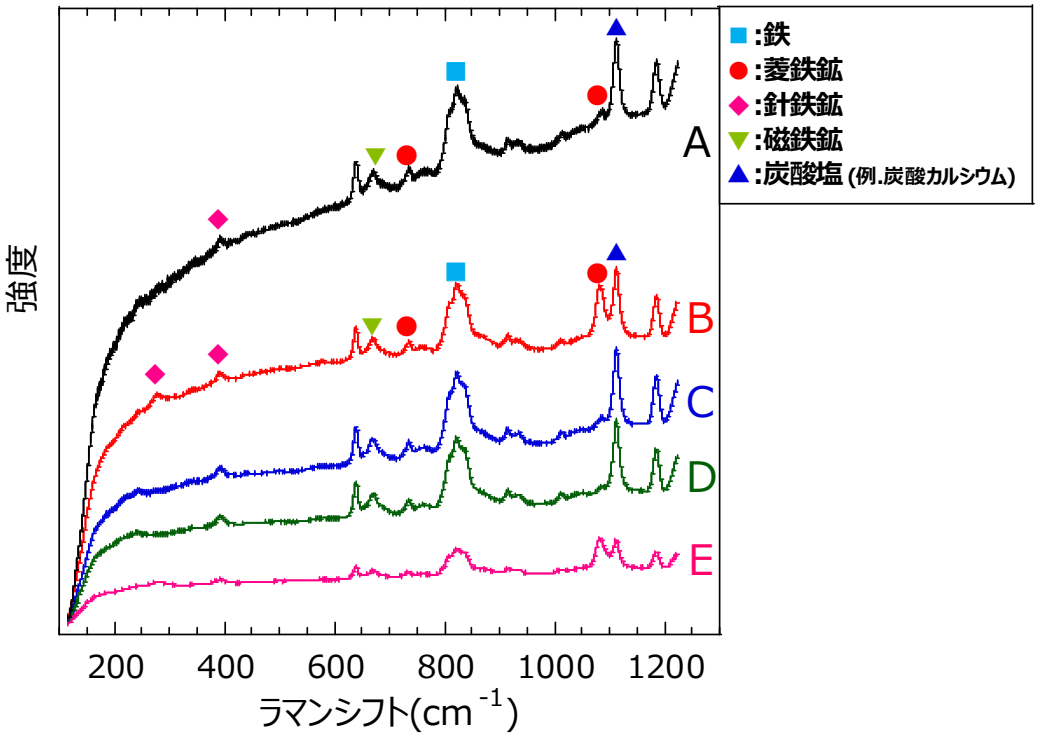


図 66　腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の顕微ラマン分光分析結果

（図中 A～E は図 63 右図の記号に対応）

環境条件が変遷した状態では腐食の進展も不均一化しやすく、図 64 に示した炭素鋼電極の観察結果や平成 30 年度に示した模擬オーバーパックの腐食深さ測定結果からも不均一な腐食の進展が認められています。不均一な腐食では、腐食の進展が確率的にばらつくため、そのばらつきを考慮して最大値を推定する必要があります。そこで、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、平成 30 年度に得られた模擬オーバーパックの腐食深さ測定データを活用して統計的な解析を行い、今回のオーバーパック腐食試験の環境条件を想定した場合の実際のオーバーパックで推定される不均一な腐食による最大腐食深さの推定を試みました。図 67 に示すように平成 30 年度に得られた模擬オーバーパックの腐食深さ分布から下段部の約 1/3 の領域で腐食量が比較的大きかったことから（最大約 0.09 mm）、まず全体を上段、中断、下段の 3 領域に分割しました。次にそれぞれの領域を 12 区画に分割して各区画の最大腐食深さを抽出しました。この 1 領域あたり 12 個のデータを用いて極値統計解析*42と呼ばれる解析手法を用いて実寸大のオーバーパックで観察される最大腐食深さを推定しました。従来、環境条件が酸化性から低酸素濃度条件に変化する期間のオーバーパックの最大腐食深さは、種々の模擬地下水中での室内試験データに基づいて平均腐食深さ（X_m）の関数として経験的な評価式から評価するとともに、幌延の地下水条件を想定した室内試験データの極値統計解析結果との比較等から具体的な地下水条件等に対する評価式の妥当性、保守性を確認してきました[35]。

*42：極値統計解析：最大値や最小値のデータを対象として統計的な性質を調べたり、予測する手法です。腐食の分野では、例えば小面積の区画から得られた最大腐食データから大きな面積の装置や構造物等の最大腐食深さを推定する場合などに用いられます。

今回、オーバーパック腐食試験で得られた実際のオーバーパック最大腐食深さの推定値（P_{max}）について既往の評価式と比較しました。図 68 に示すように腐食量の大きかった下段の領域で P_{max} が約 0.26 mm と最も大きな値を示していますが、いずれの領域の推定値も従来の評価式を下回ることが確認されました。したがって、今回の工学的規模でのオーバーパック腐食試験において観察された不均一腐食に対しても既往の評価式によって保守的な評価が可能であることが示されました。

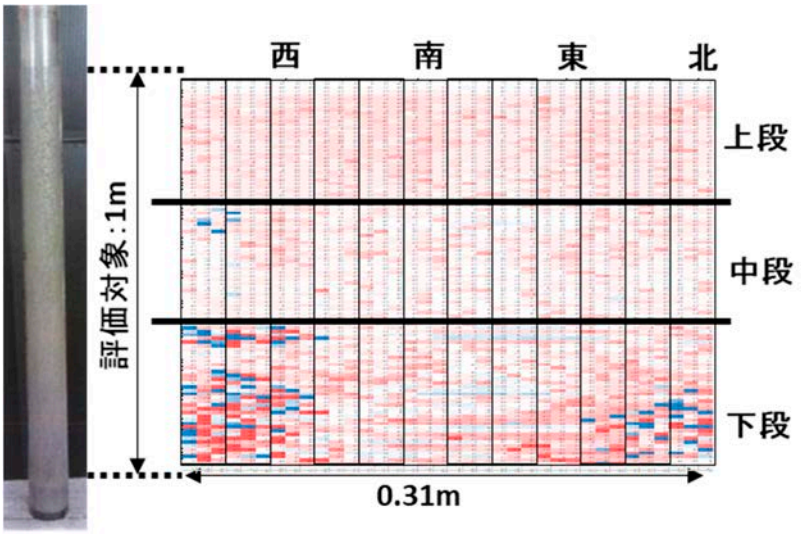


図 67　模擬オーバーパックの腐食深さ分布の展開図（赤色ほど腐食量大）と極値統計解析における領域、区画の分割

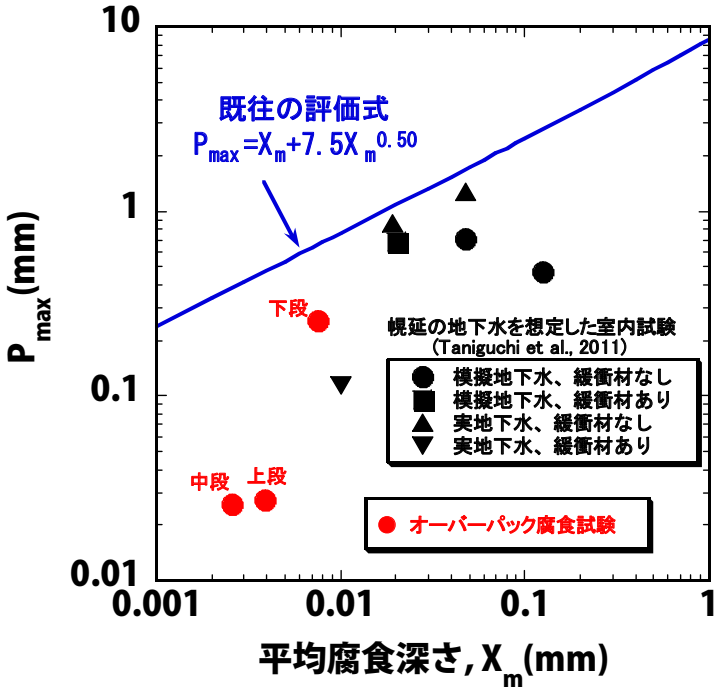


図 68　オーバーパック腐食試験データの極値統計解析に基づく実際のオーバーパックの最大腐食深さ推定値と既往の評価式の比較
（図中には幌延の地下水を想定した条件での室内試験データもプロット）

4.1.3 搬送定置・回収技術に関する研究

原環センターとの共同研究として、搬送定置・回収技術に関する研究を実施しています。令和元年度は、原環センターが受託した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 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：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）の一環として、地上の施設（地層処分実規模試験施設）において緩衝材定置試験および緩衝材中に水が浸潤して隙間が閉塞される過程を観察できる可視化装置を用いた浸潤試験を継続し、その様子を公開しました。また、深度 350m 調査坑道にて、模擬 PEM（Prefabricated Engineered barrier system Module）*43の回収技術の実証試験を行いました(36)。

(1) 緩衝材定置装置の運転公開

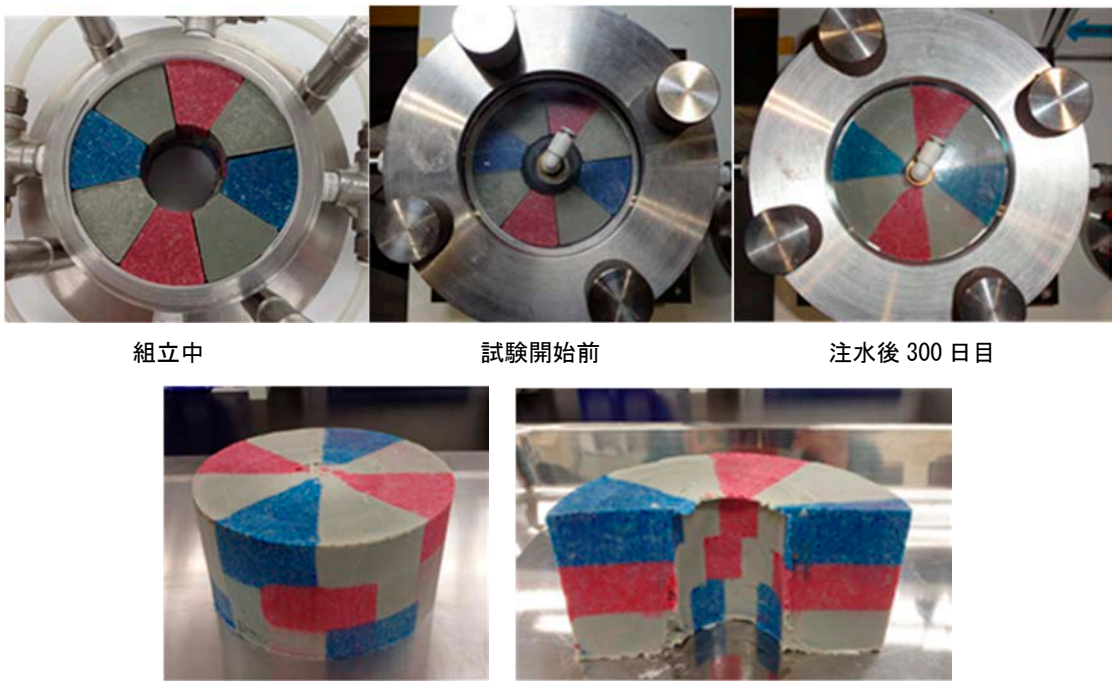
緩衝材定置試験設備を使用した緩衝材定置試験を実施しました。なお、この試験は「おもしろ科学館 2019 in ほろのべ」（令和元年 7 月開催）で一般公開しました（写真 1）。令和元年度は緩衝材定置装置に設置されている状態監視用カメラの映像を、プロジェクターを用いてスクリーンに投影し、試験装置の機能・役割、緩衝材の定置方法等の説明を行いながら、緩衝材の定置動作を公開しました。

写真 1　緩衝材定置試験の公開の様子

(2) 緩衝材の浸潤挙動に関する試験

緩衝材ブロックを積み上げた際にできるブロック同士の隙間については、緩衝材の膨潤特性により、地下水の浸潤に伴い閉塞されます。この過程の再現・視認を可能とするために可視化試験を行いました。小型の色付き緩衝材ブロックを実際の人工バリアと同じ積み方で透明なアクリル製の試験容器内に組立て、水の浸潤により隙間が閉塞する様子を観察しました（写真 2）。色付き緩衝材ブロックを使用したことで、緩衝材ブロックがほぼ均一に浸潤・膨潤し、隙間を閉塞している様子が観察されました。なお、この試験の様子は地層処分実規模試験施設にて公開しました。

*43：鋼製容器の中に、人工バリアであるオーバーパックや緩衝材を設置し、一体化したものです。



組立中　　試験開始前　　注水後 300 日目

解体後の試験体の状況

写真 2　緩衝材可視化試験の状況

(3) 地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究

原環センターとの共同研究として、処分坑道横置き・PEM 方式での地下環境での人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究を継続しました。この試験は、平成 26 年度までに同センターとの共同研究として実施してきた地層処分実規模試験施設を活用した工学技術に関する研究で計画していたものです[(37)(38)(39)(40)(41)(42)]。

令和元年度は、深度 350m 調査坑道の試験坑道 2 において模擬 PEM[*44]の回収技術の実証試験を行いました。模擬 PEM は平成 30 年度に実施した充填試験により、粘土系材料の充填材で埋められた状態になっています。模擬 PEM の回収試験は、充填材を除去する技術および模擬 PEM を定置場所から引き出す技術の 2 つを対象として順次試験を行いました。充填材の除去は模擬 PEM に損傷を与えないことを前提に、その距離に応じて機械的除去技術と流体的除去技術を組み合わせて行いました。

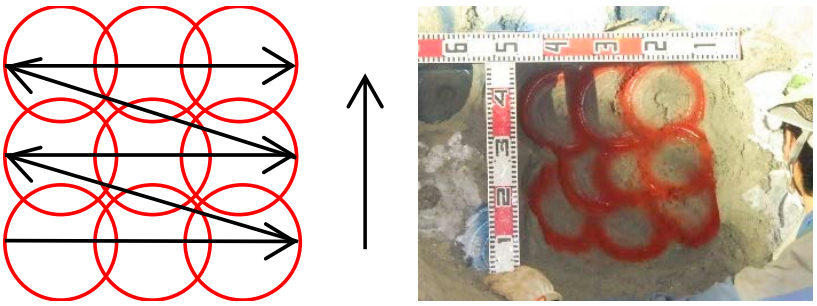
模擬 PEM から離れた部分の充填材の除去には、機械的除去技術であるオーガ方式を採用しました。これは充填材を回転する刃で削りながら、吸引機（大型の掃除機のようなもの）で連続的に取り除くものです（写真 3）。

*44：本試験で用いる模擬 PEM は、緩衝材などの人工バリアを封入せず、実物と寸法（直径約 2.5 m、長さ約 3.5 m）および重量（約 36 t）を模擬したものを使用しています。

写真 3　オーガ方式の除去装置の外観

この装置を用いて除去した充填部の例を写真 4 に示します。この装置では充填材を直径 20 cm、深さ約 30 cmの円柱型にくり抜くことができます。くり抜く順序を変えながら切削や吸引のし易さを調べました。また、吸引機により削った充填材を捕集できることを確認しました（写真 5）。

除去技術の適用性やより効率よく除去する装置の開発に資するデータを取得するとともに、更なる効率化に向けて、充填材の含水比の変化が切削や吸引に与える影響についてのデータの拡充など、今後の高度化のポイントなどを確認しました。



下段（左→右）⇒中断（左→右）⇒上段（左→右）の場合

写真 4　オーガ方式で除去した充填部の様子

写真 5　吸引機の外観と、捕集した充填材

模擬 PEM 近傍の充填材の除去には、模擬 PEM への物理的な影響が少ないと考えられる流体的除去技術であるウォータジェット方式を採用しました。これは高圧の水で充填材を削り、スラリー状になったものを吸引機で連続的に取り除くものです。写真 6 に示す試験装置は高圧水を噴射するノズルと、ノズルを円筒形状の模擬 PEM の外周に沿って動かす部分から構成されており、ノズルの形状を変えることで水の出方を変えることができます。

写真 6　ウォータジェット方式の装置とノズル

平成 30 年度までの試験で取得した作動条件を適用し、模擬 PEM 下部の充填材の除去試験を行いました。写真 7 のように高圧水で隙間の充填材を削り、スラリー化したものを吸引しながら除去しました。トルネードノズル⇒配管洗浄ノズルの順番で行うことで、模擬 PEM 下部の充填材を除去できることを確認しました。除去後の坑道面は、模擬 PEM の回収作業に使用するエアベアリング方式の回収装置が走行可能な坑道面の性状（要求される状態）を満足するものとなっています。

写真 7　除去試験の様子と、除去後の隙間

隙間充填材を除去した後、模擬 PEM の回収試験を行いました。回収試験にはエアベアリング方式の搬送定置装置を使用し、平成 29 年度に試験坑道 2 での要素試験で取得したデータに基づく設定条件で装置を運転しました。写真 8 に模擬 PEM の回収試験の様子を示します。実際の地下環境で重量 36.5 t の模擬 PEM を回収できることを確認しました。

回収前　　回収後

写真 8　模擬 PEM の回収試験の様子

平成 30 年度に実施した模擬 PEM-坑道間への隙間充填材の施工試験、令和元年度に実施した隙間充填材の除去試験および回収試験を通して、処分坑道横置き・PEM 方式の操業に係る技術を実際の地下環境で実規模スケールで実証することができました。これにより、地層処分実規模試験施設で公開中の処分孔竪置き・ブロック方式に係る技術と合わせ、わが国で有望とされている 2 つの定置概念に対して、定置から回収までの一連の操業技術の実現性の見通しを得ました。

4.1.4 人工バリアなどの健全性評価に関する研究

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、原環センターと協力して緩衝材流出試験を実施しました。

人工バリアの 1 つである緩衝材の主な成分はベントナイト*45と呼ばれる粘土鉱物です。地下の処分孔に定置された緩衝材は、徐々に地下水が浸潤することにより膨潤します。緩衝材が膨潤することによって、岩盤やオーバーパックと緩衝材の間の隙間が埋められ、地下水の流動を緩慢にする働きが期待されています。一方で、日本の地下環境では、地下施設を建設（坑道の掘削・維持）することによって母岩から湧水が生じることが予想され、そのような環境では、緩衝材を処分孔へ定置した後に、処分孔壁からの湧水により緩衝材と孔壁の境界に水みちが生じ、緩衝材が流出する可能性が指摘されています。

緩衝材の流出挙動は、処分孔周辺の湧水環境（岩盤の透水係数、水圧、湧水量・流速、液種など）が影響します。これまでに緩衝材の流出挙動を把握するための室内試験が行われていますが、実際の地下環境では上記の湧水条件等が複雑に影響し合っています。そのため、実際の地下環境において緩衝材の流出現象を把握するための試験を実施しています。また、これまでの緩衝材流出試験の結果などから、地下水が緩衝材の表面から浸潤し、緩衝材が処分孔との隙間に膨潤していく時に、表面付近の密度が低下し、ゲル状になることが緩衝材の流出が起こる要因の 1 つとして考えられています。このゲル状になった部分に、孔壁からの湧水の流れ（移流）および湧水の流れに伴うせん断応力（表面を滑らせるように作用する力）が作用することで、緩衝材が持ち去られると考えられます。

このような影響を抑制するための工学的対策の 1 つとして、緩衝材と岩盤の隙間にケイ砂を充填する方法に着目しました。ケイ砂を充填することで、隙間の体積を減少させ、緩衝材表面の膨潤による体積変化（密度の低下範囲）を抑制し、また、緩衝材周囲のケイ砂を充填した部分全体を湧水の流れる領域とすることで緩衝材表面の湧水の流速（せん断力）を低く抑えることが期待できます。令和元年度は、このような工学的対策の効果を確認するための緩衝材流出試験を行いました。試験装置の概要を図 69 に示します。試験は自然湧水の環境下で行いました。平成 30 年度に測定した試験孔の湧水量の測定結果では、試験孔天端の水位での湧水量は 300 mL/min でした。試験孔天端を上端として緩衝材を模擬した試験体を設置し、流出試験を行いました。試験体の寸法は、現在考えられている緩衝材の約 1/4 のスケールです。

---

*45：ベントナイトは粘土鉱物のスメクタイトと石英などの鉱物から構成され、地層処分における人工バリアシステムに用いる緩衝材の候補材料です。

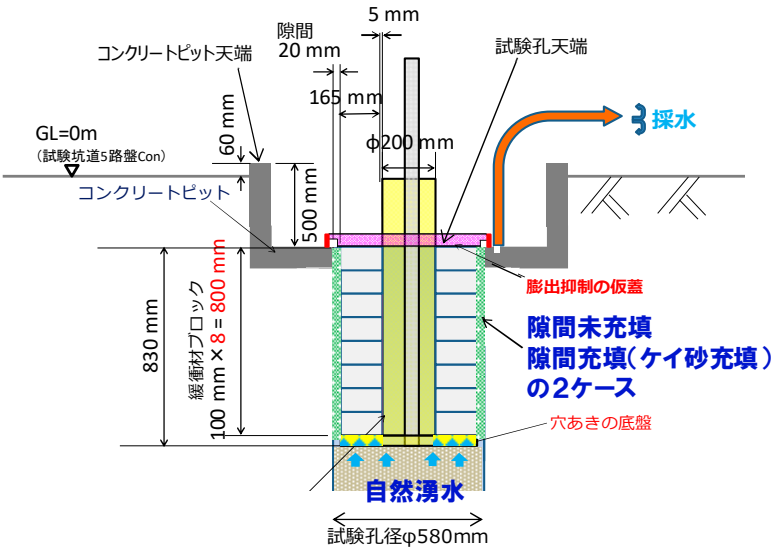


図 69　試験設備の概要

上述した工学的対策（隙間にケイ砂を充填する対策）を施した場合の流出試験と隙間に何も充填しない条件での流出試験の結果と比較しました。結果を図 70 と図 71 に示します。図 70 に示すように、ケイ砂を充填した場合の約 30 日までの測定結果（図中、●で表示）は未充填の場合（図中、■で表示）に比べると緩衝材の総流出量が少ないことが分かりました。ケイ砂を充填したケースの特徴として、総流出量の変化は試験初期から小さいものの、時間の経過とともに総流出量の変化量がわずかに大きくなる傾向が見られました。一方で、未充填のケースでは、試験の初期に流出量が急激に増えているものの、試験開始後 20 日程度を経過すると流出量は徐々に小さくなっています。

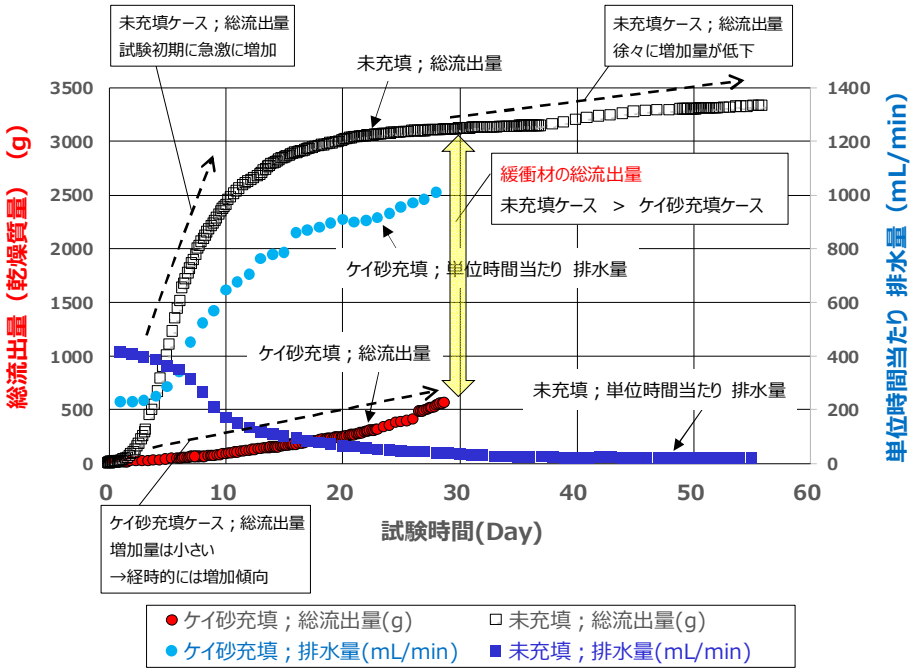


図 70　隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果（1/2）

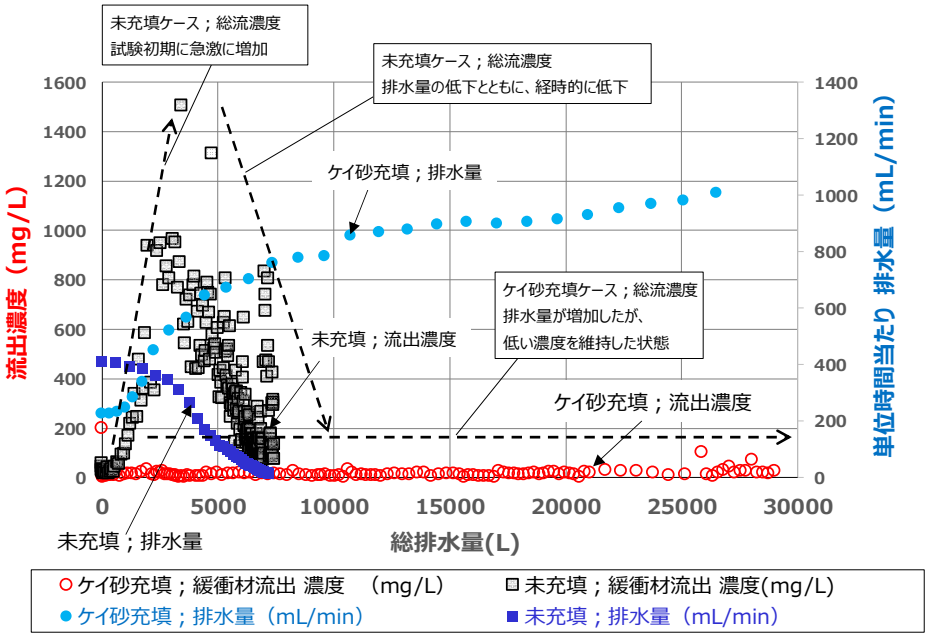


図 71　隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果（2/2）

上記の試験結果のように、総流出量の経時的な変化の傾向が 2 つの試験ケースで異なる理由の 1 つとして、ケイ砂を充填したことによる湧水量の変化が考えられます。未充填のケースでは試験開始時の孔内への湧水の排水量（■）は 400 mL/min でしたが、時間の経過とともに徐々に排水量は減少し、試験の後半では、約 20 mL/min で一定になりました。これは、緩衝材が膨潤して隙間がシール（閉塞）されたことにより湧水量が少なくなったためと考えられます。しかし、試験期間の終期においても排水が完全に止まることはありませんでした。流出試験の終了後に引き上げた緩衝材の表面の一部には水みちの跡が観察されており、試験体設置から 55 日程度の試験期間では緩衝材が膨潤してもシールされない部分があったと考えられます。

一方、ケイ砂を充填したケースでは、排水量（●）が時間の経過とともに増加したことに伴い、試験期間の後半において緩衝材の総流出量の変化量がわずかに大きくなったと考えられます。排水量（孔内への湧水量）が増加した原因については特定できていませんが、今回の試験では、ケイ砂の充填により隙間領域を小さくしたため、大きな膨潤圧が発生し、岩盤にひずみが生じたことで湧水量が増加した可能性が考えられます。

図 71 に示した総排水量と緩衝材の流出濃度（排水 1 L 当たりの流出量）の関係から、未充填ケースでは試験開始後に流出濃度が大きく増加し、その後減少しています。これは、上述した通り、時間の経過とともに、緩衝材の表面を流れる水の量とその流速が減ったために、緩衝材表面の削られる量（流出量）が減少したためと考えられます。これに対し、ケイ砂を充填したケースでは、緩衝材の流出濃度は低いレベルで維持されていました。試験期間の後半に緩衝材表面を流れる排水量（緩衝材表面の流速）が増加したにもかかわらず、流出濃度が低い状態を維持したことは、隙間にケイ砂を充填した効果であると考えることができます。

令和元年度に実施した地下での流出試験に関する以上のような結果から、緩衝材の流出量を抑制する工学的対策の 1 つである「隙間へのケイ砂の充填」に関して、その効果を次のように整理することができました。

・緩衝材の膨潤領域を小さくし、緩衝材界面の密度が低くなる領域を減らす効果
・湧水が緩衝材表面に接触する面積を減らす効果
・ケイ砂があることにより、湧水が緩衝材周囲を均等に流れることにより、緩衝材表面の流速（せん断応力）が抑制される効果

令和元年度の試験により、隙間にケイ砂を充填することによる緩衝材の流出抑制対策の効果があることの見通しを得ました。一方で、図 70 に示す試験期間 30 日における両ケースの比較結果から、より長い期間では、緩衝材の総流出量が逆転する可能性も示唆されています。また、上述したように、ケイ砂を充填したケースでは、緩衝材の膨潤に伴って処分孔内の湧水量が変化する可能性があることも分かっています。このような知見は、実際の処分場の操業手順（緩衝材設置後に上部空間が埋め戻されるまでの工期）に応じて、工学的対策を選択するうえでの基盤情報として活用することが期待できます。例えば、工期が短ければ、ケイ砂充填工法を、長ければ未充填工法が緩衝材の流出量の抑制の観点では有利と判断できます。ただし、このような将来の選択に資する基盤情報の整備に向けては、湧水量や緩衝材の流出量が長期的に（処分坑道の埋め戻し後の期間を含めて）どのように推移・変化するかについて、更なる試験をとおして確認していく必要があります。そのため、引き続き多様な条件による地下での流出試験に取り組むとともに、隙間にケイ砂を充填することによる緩衝材流出抑制効果のメカニズムなどを確認するための室内試験を実施してデータや知見を拡充していく予定です。

4.1.5 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業：地層処分施設閉鎖技術確証試験）の一環として、シーリングシステム*46の成立性の確認を目的として、シーリングシステムの劣化などが閉じ込め性能に与える影響の評価や、止水プラグや埋め戻し材の性能を確認するための室内試験および原位置試験を実施しました。

(1) シーリングシステム長期性能評価技術開発

本検討では、国内で想定され得る多様な地質環境条件を考慮した場合に、シーリングシステムの長期的な劣化によってこれらが地表へと直結する卓越した水みちとなることが、地層処分システムの長期安全性へ与える影響を検討してきています。令和元年度は、シーリングシステムに求める安全機能を軸としたシナリオ解析を実施し、埋め戻し部（坑道埋め戻し、プラグ等）やその周辺岩盤が卓越した移行経路となる可能性のあるシナリオを設定（図 72）しました。また、設定したシナリオが処分システムに及ぼす影響を物質移行解析等により評価しました。さらに、これら評価結果に基づき、設計・施工および安全評価の観点からのシーリングシステムの性能の考え方を整理しました。

*46：将来の地層処分場を閉鎖した際に、坑道や掘削影響領域が地下水の移行経路とならないようにするための対策のことです。

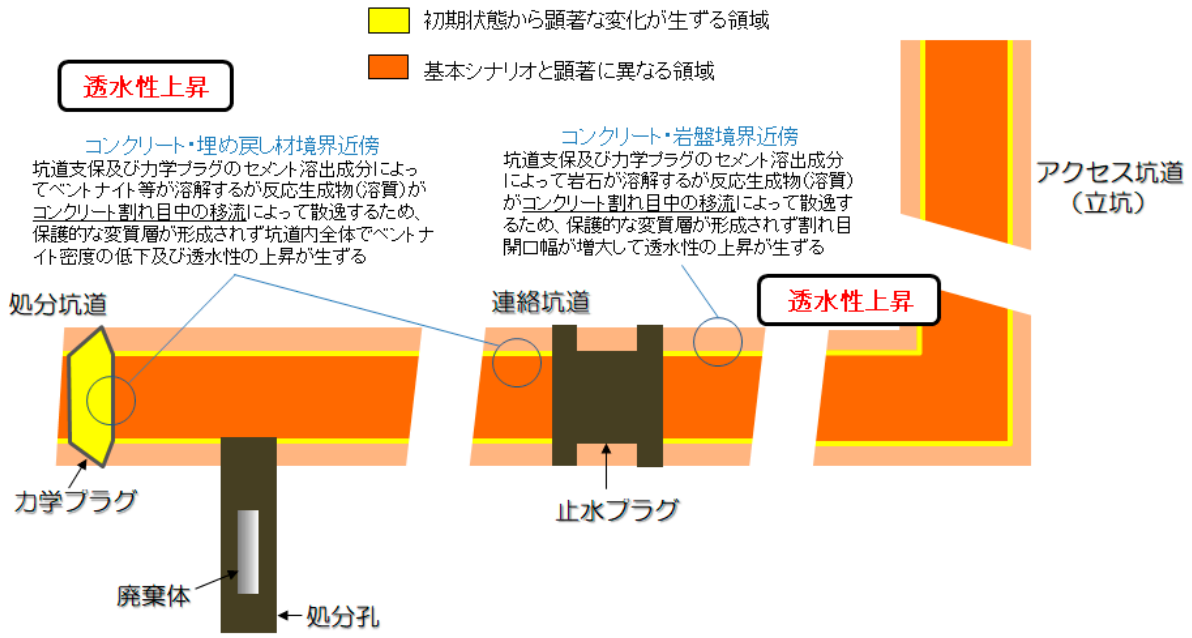


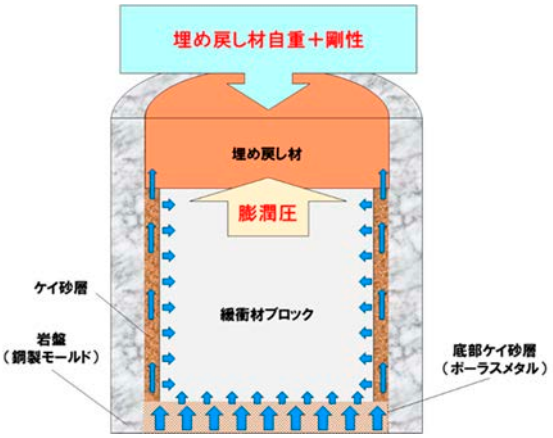
図 72　坑道が卓越した移行経路となり得るシナリオ例（セメント影響による劣化・変質）

設定したシナリオに対し、処分孔、処分坑道およびアクセス坑道をモデル化した物質移行解析を実施した結果、コンクリート材料の劣化・変質を想定したシナリオ（コンクリートの溶出成分によってベントナイトが溶解するが、この時生じる反応生成物（二次鉱物等）がコンクリート割れ目の間隙およびコンクリートー埋め戻し材界面に生じる間隙中の移流によって散逸することにより、ベントナイトの溶解が進展）では、粒子の配置した位置に応じてその挙動は異なるものの、ほぼすべての粒子が処分孔あるいは処分坑道に交差する割れ目へ進入することから、劣化・変質した坑道が地上まで直結するような卓越した移行経路にはならない可能性が示唆されました。一方で、主に埋め戻し材の施工不良（特に坑道上部の隙間）に伴い、埋め戻し材とコンクリート支保間の境界部付近で透水性が上昇すること想定したシナリオでは、処分孔を発した一部の粒子が処分坑道を移行し処分坑道端部まで到達し得る可能性が示唆されました。ただし、このようなシナリオが仮に生起することを想定した場合においても、低アルカリ性セメントを使用することによる埋め戻し材ーコンクリート相互作用による変質抑制対策や、アクセス坑道の集中配置、ならびに地下施設周辺の地下水流動と直交する方向に処分坑道を配置等の対策が、坑道が地上へと直結するような卓越した移行経路となることを回避する上で有効となり得る可能性があることが分かりました。

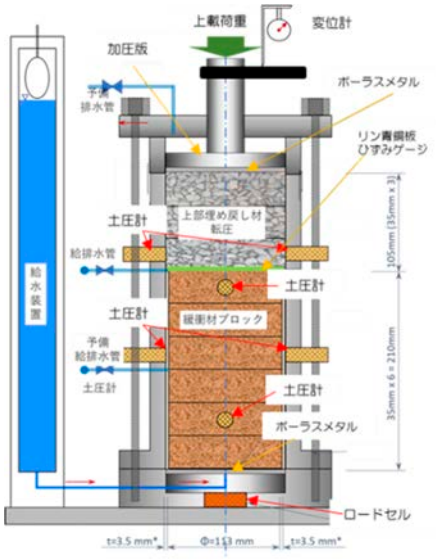
(2) 膨潤挙動相互作用試験

人工バリアの概念の 1 つである処分孔竪置き方式では、処分孔に定置した緩衝材が地下水を吸収して処分坑道側へ膨出し、その有効粘土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することにより埋め戻します。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（図 73(a)）。膨潤挙動相互作用試験では、緩衝材の埋め戻し材側への膨出挙動の評価手法を整備することを目的として、人工バリア性能確

認試験の試験レイアウトを基に、実際の 1/20 スケールの緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型（図 73(b)）を用いた試験を実施しました。



(a) 緩衝材の埋め戻し材の相互作用の整理



(b) 縮尺模型の概要図

図 73　縮尺模型試験の概念図

人工バリア性能確認試験の状況を模擬するために、縮尺模型試験では緩衝材の底部に設置したポーラスメタルから注水し、ケイ砂層を通じて緩衝材の外周から均等に浸潤させました。また、試験容器上部に設置した加圧版を介して埋め戻し材の上部から 0.087 MPa の荷重を作用させました。緩衝材の吸水膨潤により生じる上部への膨出変形量は試験装置頂部に設置した外部変位計により計測しました。さらに、試験容器側面に設置した土圧計や底部に設置したロードセルにより膨潤圧を計測するとともに、緩衝材と埋め戻し材の境界面にはリン青銅板やひずみゲージを設置して境界面付近の緩衝材の膨出挙動の把握を試みました。63 日間注水を継続した結果を図 74 に示します。緩衝材の膨出量は、外部変位計により計測した変位量を試験開始時の緩衝材の供試体の高さで除した膨潤変形率として評価しました。注水量の経時変化をみると試験開始後 20000 分（約 14 日）ごろから注水量は緩やかに増加する傾向となり、40000 分（約 28 日）ごろから試験終了までは注水量はほとんど変動していません。また、膨潤変形率については、30 日を過ぎたあたりから変化が緩やかになり 57600 分（40 日）ごろからはほとんど変動しませんでした。緩衝材と埋め戻し材の境界面における膨潤変形挙動計測の一例として、リン青銅板の計測結果を図 75 に示します。図 75(b)の横軸は、各計測位置を供試体の中心を原点とした時の計測位置までの距離で示してます。縦軸の鉛直方向の変形量は、リン青銅板の一番低い場所を基準とした相対的な高さとして示しました。この結果より、緩衝材の外周部が中心部に比べて上方へ大きく変形しており、最大で 3 mm の差が生じていることが確認できました。これは、水の浸潤により外周部から先に上方へと膨潤したためと考えられます。さらに、試験終了後には緩衝材の部分を高さ方向と直径方向にサンプリングを行い含水比を計測しました。その結果、高さ方向については緩衝材の中央部において、埋め戻し材との境界面に近い上部の含水比が高くなっていることが確認できました。水平方向については注水のために設けたケイ砂層と

接している緩衝材外周部で含水比が高い一方で、中央部では含水比が低くなっていました。サンプリングした試料の割れなどの影響により体積の測定が困難であり飽和度を算出することはできませんでしたが、含水比の値が不均質に分布していることから浸潤過程の途中であり緩衝材は飽和に達していないと考えられます。以上の試験結果より、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用下における飽和に至る途中までの緩衝材の膨出挙動を概略的に把握することができました。今後も、新たな縮尺模型試験を実施し、引き続き埋め戻し材のもつ緩衝材の膨出抑制機能の評価方法を整備していく予定です。

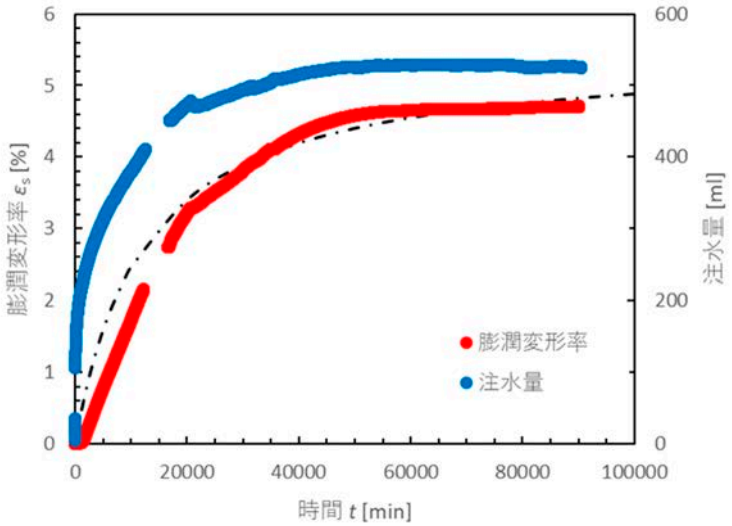
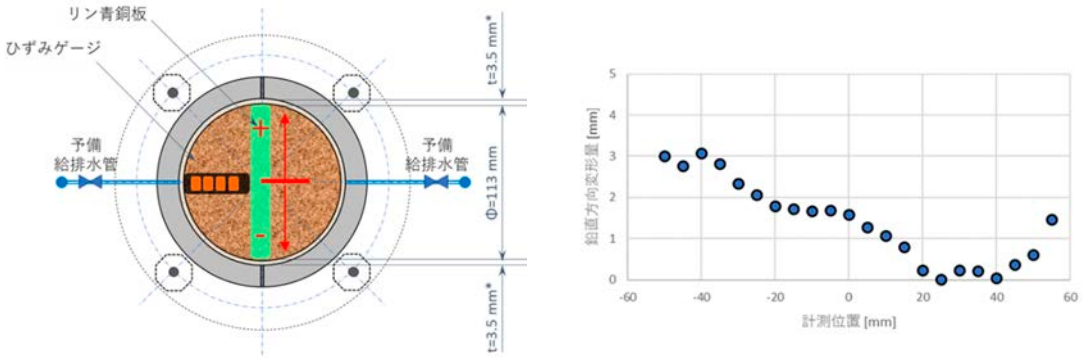


図 74　縮尺模型試験における膨潤変形率と注水量の経時変化（図中の破線は計測値を双曲線関数で近似した値をプロット）



(a) リン青銅板の設置位置　　(b) リン青銅板の計測結果

図 75　緩衝材と埋め戻し材の境界面における膨潤変形挙動計測

(3)EDZ シーリング試験

掘削影響領域（以下、EDZ）においては、割れ目の発達に伴い透水性が増大することで物質の移行経路になることが想定されており、この移行経路を遮断するために、低透水性材料であるベントナイト系材料を用いた止水プラグを設置する考え方が国内外において示されています。一方で、原位置環境下においてベントナイト系材料を用いた止水プラグがどの程度の地下水移行抑制機能を有するかを検証することは、止水プラグの設計・施工の考え方を提示する上で重

要となります。そこで、地下水移行抑制機能を評価するための指標の 1 つとして透水性に着目し、EDZ を遮る機能が期待される止水プラグの切り欠き部分を規模を縮小して模擬した EDZ シーリング試験（図 76）を行っています。

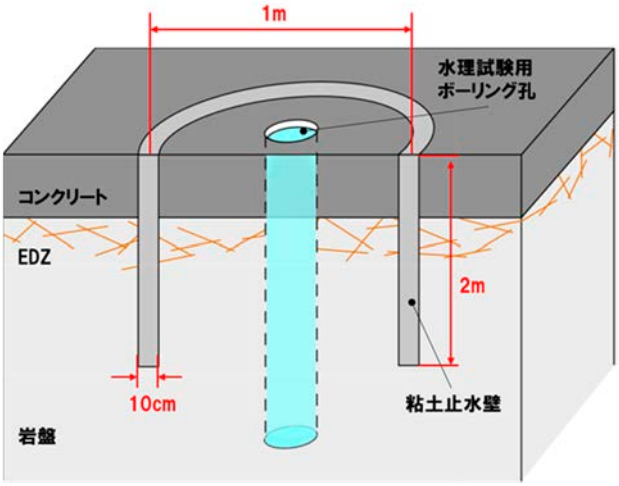


図 76　EDZ シーリング試験の試験領域概略図

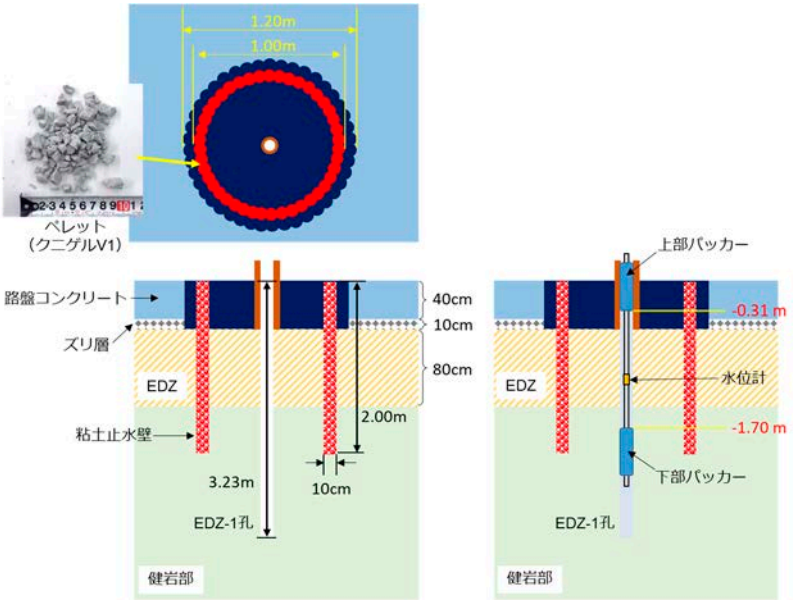
令和元年度は、スリットに充填するベントナイト系材料について幌延の地下水を模擬した模擬地下水を用いた室内透水試験を行い、その透水係数を確認しました。試験では平成 30 年度に実施した膨潤の状況を確認する試験と同様に、クニゲル V1（以下、粉体ベントナイト）とクニゲル GX（以下、粒状ベントナイト）の 2 種類の材料を用いて、①粉体ベントナイトのペレット（以下、ペレット）、②粒状ベントナイトのみ、③ペレットと粒状ベントナイトの混合土（以下、混合土）および④粉体ベントナイトを突き固めたもの（以下、粉体供試体）の 4 種類の供試体を作製しました。

EDZ シーリング試験における粘土止水壁の透水係数は、幌延の深度 350 m の健岩部の透水係数よりも低い 10^{-11} m/s 以下を目標値として設定しました。室内透水試験の結果、上記の 4 種類のいずれの材料においても供試体の乾燥密度を 1.2 Mg/m^3 とすることで透水係数は 10^{-12} m/s のオーダーを示しており、目標の透水係数より低い値であることを確認しました。この透水試験の結果と平成 30 年度の膨潤の状況確認試験の結果を踏まえて、スリットへの充填施工の観点からペレットを粘土止水壁の材料に選定しました。

次に、試験坑道 3 において粘土止水壁を施工しました。粘土止水壁の施工する場所は平成 30 年度に EDZ の調査のために掘削したパイロット孔（以下、EDZ-1 孔）の周辺としました。まず、EDZ-1 孔周辺の底盤と EDZ の間にあるズリ層を取り除き、改めて底盤のコンクリートを打設しました（図 77(a)中の濃紺部分）。その後、EDZ-1 孔を中心とした半径 0.45 m の円周上に幅 10 cm、深さ 2 m のスリットを掘削しました。この掘削したスリットに室内試験により選定したペレットを乾燥密度が 1.2 Mg/m^3 以上となるように充填して粘土止水壁を構築しました（図 78）。

粘土止水壁によって区切られた内側の領域を対象として、EDZ-1 孔から注水することにより透水試験を行いました。透水試験は、スリット掘削前（粘土止水壁施工前）と粘土止水壁施工後の 2 回実施し、試験時期は、1 回目を底盤のコンクリートの再打設が完了した後、2 回目を粘土止

水壁が十分に飽和したと考えられるペレットを充填して 2 か月が経過した後としました。2 回の透水試験ともに、図 77(b)に示すように EDZ-1 孔の深度 0.31 m～1.70 m を注水区間としました。粘土止水壁施工前の試験領域の透水係数は 2×10^{-6} m/s 程度であり、これまでの調査で得られていた試験坑道 3 周辺の EDZ の透水係数と同程度の値であることから、EDZ の透水係数を表していると考えられます。一方、粘土止水壁施工後の試験領域の透水係数は約 3×10^{-9} m/s となり、施工前に比べて 3 オーダーほど低い値を示しました。この値は、幌延の深度 350 m の健岩部の透水係数よりはやや高い値であるものの、EDZ を遮断するようにスリットを掘削しベントナイト系材料の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ました。今後は、定期的に透水試験を実施して時間の経過とともに試験領域の透水係数がどのように変化するか調査する予定です。



(a)粘土止水壁施工時　　(b)透水試験時

図 77　粘土止水壁周辺の上面図および断面図

(a) スリットの掘削

(b) ペレットの投入

(c) 人力による突き固め

(d) 底盤面まで充填完了

図 78　粘土止水壁の施工作業の状況

(4)EDZ の連続性等に関する調査

坑道や EDZ が地下水の移行経路となることを防止するための坑道シーリング技術の性能確認の一環として、令和元年度は、深度 350m 調査坑道の試験坑道 4 において、人工バリア性能確認試験で EDZ を介した地下水移行を抑制するためのポストグラウトが実施されました。試験坑道 4 および力学プラグ周囲の EDZ の連続性や経時変化を把握してポストグラウトの効果を評価することを目的として、弾性波および比抵抗トモグラフィ調査*47を実施しました。

調査は、試験坑道 4 の力学プラグ前方のグラウト注入範囲を対象とし、グラウト注入による物性値（弾性波速度、比抵抗値）の違いを計測するために、グラウト注入前、グラウト注入中、グラウト注入後に、試験坑道 3 の 2 孔のボーリング孔間（クロスホール法）で行いました。また、地山とグラウト材の物性値の違いを評価するため、ボーリング孔の検層（電気、速度）とボーリングコアおよびグラウト材の室内試験を行いました。トモグラフィ調査の断面位置を図 79 に示します。

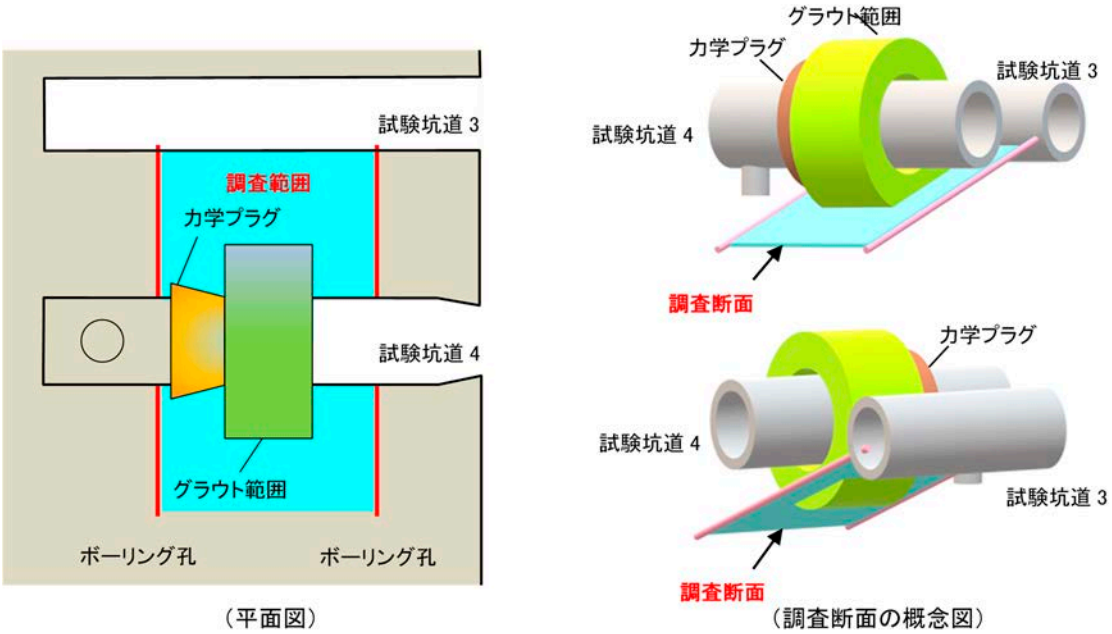


図 79　トモグラフィ調査の断面位置

弾性波トモグラフィ調査の結果を図 80 に示します。調査範囲の弾性波速度は、1.9～2.4 km/s を示し、グラウト範囲（図中の点線の範囲）は 2.1～2.2 km/s 以上を示しています。グラウト前後のスローネス（速度の遅さ）の変化量は-2.5 %でマイナスの変化量を示し弾性波速度の増加を示しています。また、ボーリングコアとグラウト試料の室内試験結果からも、グラウト試料が厚いほど弾性波速度が速い傾向を示すことが分かりました。

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

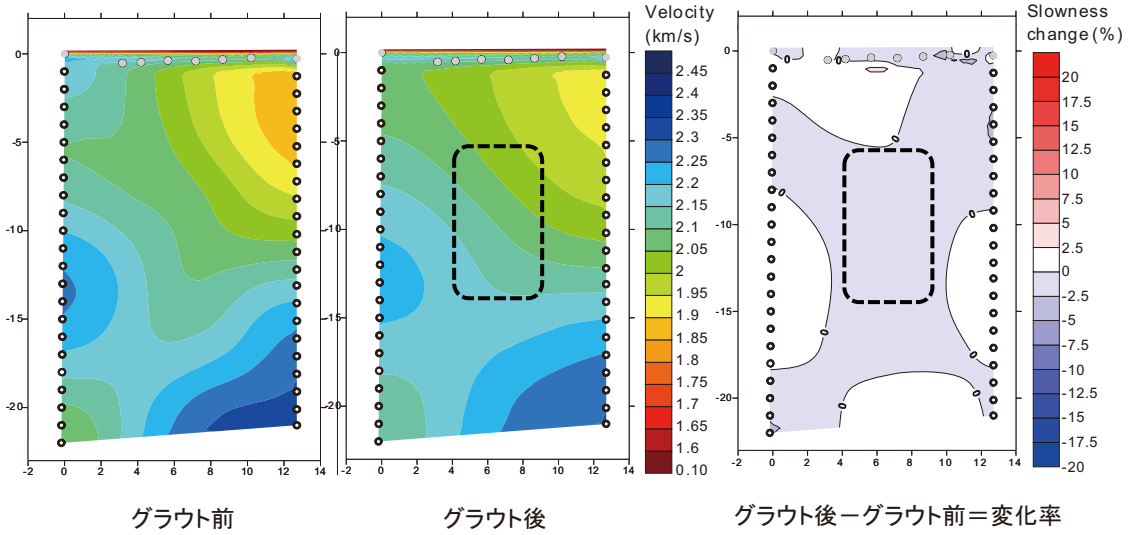


図 80　弾性波トモグラフィ調査の速度分布図

比抵抗トモグラフィ調査の結果を図 81 に示します。図の中央部のグラウト範囲は比抵抗値が 1.00～2.50 Ω-m で周囲より低比抵抗の領域となっています。グラウトの前後で比抵抗値の分布に明瞭な変化はありませんが、比抵抗の変化率は 2.0～4.0 %でプラスの変化量を示し比抵抗値が高くなっています。また、室内試験の結果もグラウト材は高比抵抗を示すことが分かりました。

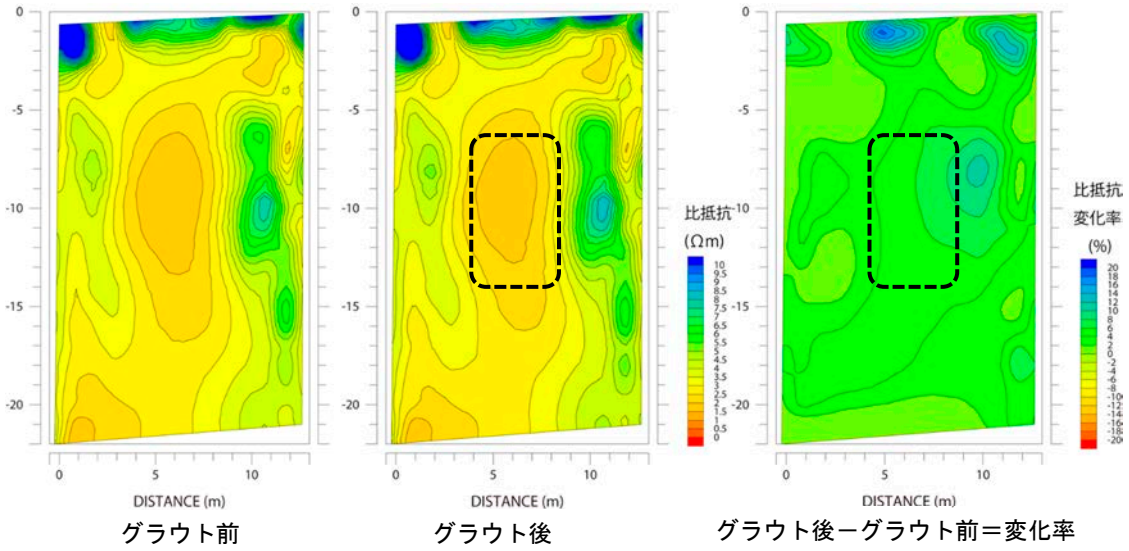


図 81　比抵抗トモグラフィ調査の比抵抗分布図

試験坑道および力学プラグ周囲の EDZ の連続性や経時変化を把握し、グラウトの効果を評価するため、グラウト後の速度分布断面で三次元の解析を行いました（図 82）。これらを比較すると表示の違いにより、二次元断面に比べ三次元断面の方が速度値の違う領域がよく可視化されています。2 孔の平行なボーリング孔を用いるトモグラフィ調査は対象範囲が二次元に限定されますが、三次元的にボーリング孔や受振、発振点を適切に配置し三次元解析を行うことで坑道周囲の EDZ の連続性や経時変化の把握に適用できると考えられます。

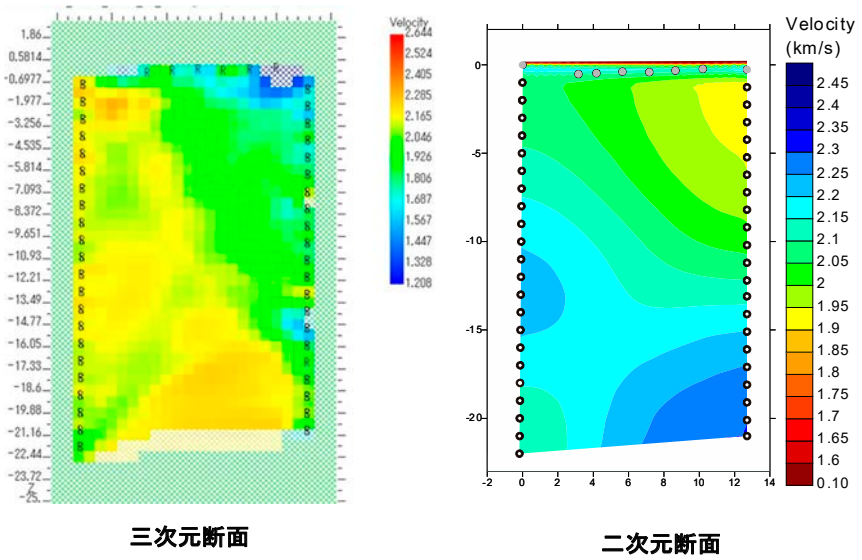


図 82　三次元解析の速度分布図

試験坑道および力学プラグ周囲の EDZ の連続性や経時変化を把握し、グラウトの効果を評価するために弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を行った結果、物性値の違いにより地山（堆積岩）とグラウト範囲を確認できることが分かりました。今後は、地質環境条件により適用する物理探査手法の検証と解析手法による精度の適用性を検証する予定です。

(5) 無線モニタリング装置の適用性確認

深度 350m 調査坑道の試験坑道 4 では、人工バリア性能確認試験において人工バリアの挙動を計測・評価するための様々なセンサーを設置しています（4.1.1 参照）。一般的に、センサーとデータを収集する記録計の間はケーブルで接続されています。しかし、このケーブルの周りが水みちとなって計測する環境を乱す要因となることがあります。また、多くのセンサーを使う場合にはケーブルの本数が膨大になり、センサー設置作業の煩雑さや断線などにより計測システムの信頼性に影響を及ぼすことも考えられます。このような課題を解決する方法として、ケーブルを使わずに電磁波を用いてデータを送信する方法があります。この地中無線技術を人工バリア性能確認試験に適用し、岩盤やコンクリートプラグなどを介した電磁波の減衰や、装置に内蔵された電池の寿命を評価する試験を実施しています。

本研究で開発した地中無線伝送システムの装置構成を図 83 に示します。人工バリア性能確認試験の緩衝材と埋め戻し材の中にセンサー付き小型送信器が埋め込まれています。これらのセンサーで間隙水圧や緩衝材の膨潤圧を測定し、送信器から無線でデータが送信されます。受信アンテナと受信装置は、試験坑道 4 に設置されたプラグの外側のボーリング孔内に設置されており、送信器から送信されたデータは、緩衝材、埋め戻し材、岩盤、プラグを通過して、ケーブルを介さずに受信装置へ届きます。

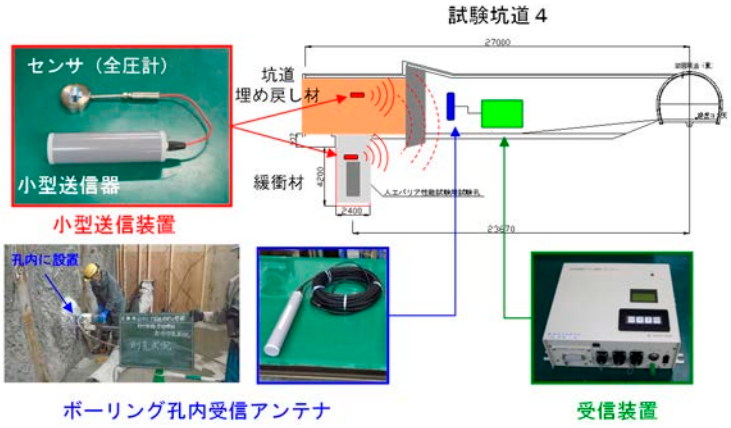


図 83　地中無線伝送システムの装置構成イメージ

平成 26 年度に人工バリア性能確認試験における緩衝材や埋め戻し材の土圧と間隙水圧を計測するために 7 体のセンサーと小型送信装置を設置しました[43]。センサーは、自動的に 1 日に 1 回の計測を行い、1 週間分のデータをまとめて小型送信装置から無線で送信しています。令和元年度は、引き続き計測と無線によるデータ送信を行っています[44]。測定期間中に測定データが地上の PC で正常に収録できない事象が発生しましたが、地下から地上に繋がる有線ケーブルが原因であり、地中無線伝送システムは正常に動作していることを確認しました。緩衝材 11 段目に設置した間隙水圧と土圧の計測データの例を図 84 に示します。図から、注水量の増加に伴い間隙水圧と土圧の値が上昇している傾向が見られました。このことから、センサーが正常に機能しており送信装置が所定の頻度で測定データを送信していることを確認しました。今後も、無線によるデータ送信技術の適用性を確認する試験を継続して実施していきます。

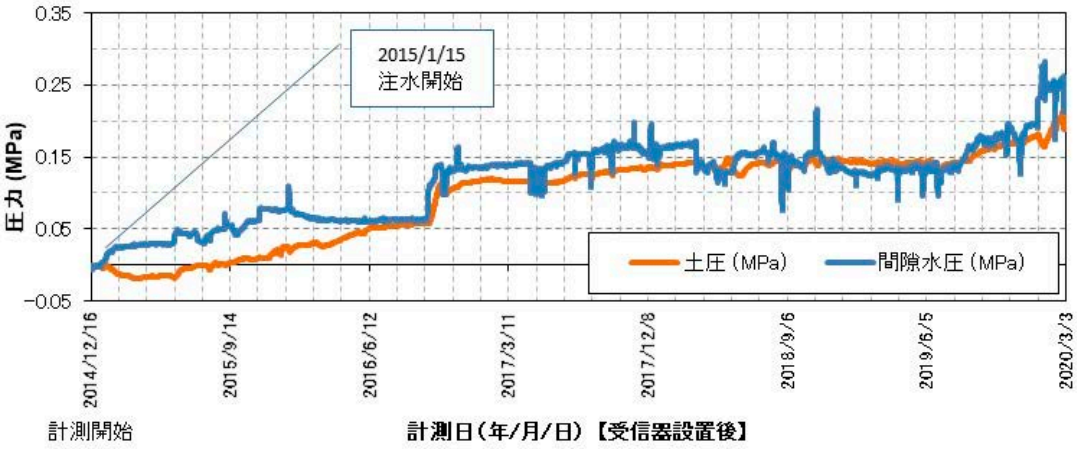


図 84　地中無線装置による計測データの例

4.2 安全評価手法の高度化

4.2.1 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験

岩盤基質部における拡散・収着挙動について、多様な地質環境条件や岩盤の不均質性に起因した拡散・収着パラメータを評価するためのモデル化・解析手法を整備することを目的に、健岩部を対象としたトレーサー試験を行ってきました。令和元年度は過年度に実施した、原位置拡散試験*48 (45)について、層理面に対する異方性が拡散挙動に及ぼす影響を評価しました。原位置拡散試験は、深度 350m 調査坑道の底盤から層理面の傾斜方向に掘削した斜孔のボーリング孔で行い、構造性の割れ目を含まない区間に HDO（重水）、I（ヨウ素）、Mo（モリブデン）、Cs（セシウム）、Sr（ストロンチウム）、Co（コバルト）、Eu（ユーロピウム）等の安定同位体トレーサーを含む模擬地下水（塩濃度 0.23 M）を循環させる方法で行いました。また、循環(約 8 か月程度)後に、オーバーコアリングを行い、層理面に対して平行および直交方向の岩石試料を採取しました。採取した岩石試料に対し、図 85(a)に示す位置から 1 mm 程度の間隔で研削を行い、岩石中に含まれるトレーサー濃度の検出を行いました。図 85(b)に示すように、層理面に対して直交方向に取得した Cs 濃度のプロファイル（2 カ所：D11w//_1-n1、n2）が同様の傾向を示しているとともに既存のデータ（D05-1）における濃度プロファイルの傾向と整合する結果となりました。層理面に対して平行方向の Cs の濃度プロファイル（D11w⊥-n_Cs）は直交方向の濃度プロファイルと同程度の減衰傾向を示す一方で、ボーリング孔の壁面の濃度（図 85(b)中の 0 mm の位置）が一桁程度低い結果となりました。トレーサー循環中の試験区間内のトレーサー濃度は均一であることが想定されるとともに、マトリクスの収着・拡散特性もほぼ同一であると考えられることから、ボーリング孔の壁面の Cs 濃度は水平方向、直交方向で同程度の濃度になることが想定されます。このような差異が生じた原因として、ボーリング孔の孔底部には掘削した際に生じる掘削泥等が沈積しており、掘削泥に Cs が吸着した結果、孔壁の Cs 濃度が低い結果となった可能性が考えられます。上記を考慮した上で、層理面に対する異方性が顕著ではない可能性があるものの、今後は孔底部の複数個所で濃度プロファイルを取得し、上記の原因について検討するとともに、層理面に対する異方性について検討していきます。

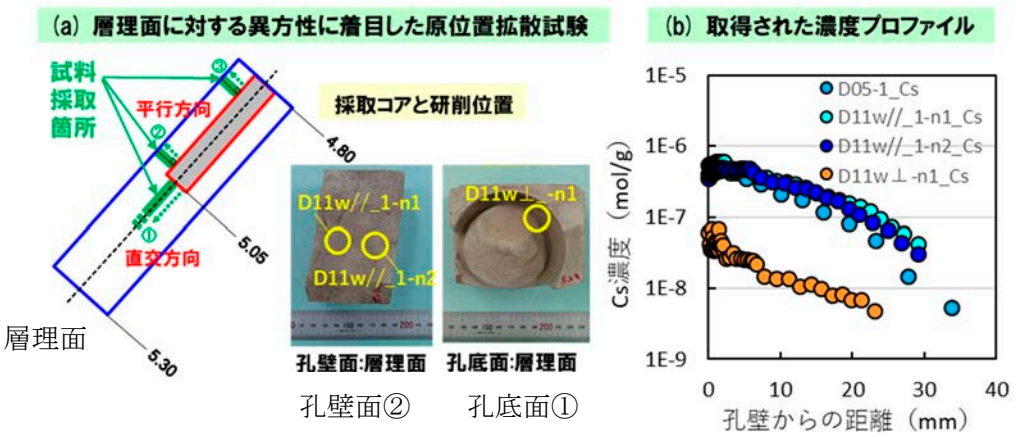


図 85　層理面に対する異方性に着目した原位置拡散試験
(a)試験体系と採取試料、(b)試験後の岩石中の Cs 濃度分布

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

4.2.2 割れ目[*49]を対象とした原位置トレーサー試験

泥岩中に不均質に分布する割れ目の物質移行特性（分散長、拡散係数、収着分配係数など）を評価可能なモデル化／解析手法を整備することを目的に、割れ目を対象とした原位置トレーサー試験を実施してきました。令和元年度は平成 30 年度に引き続き、深度 350m 調査坑道において実施した断層を対象としたダイポール試験[*50] (46)のモデル化／解析手法の検討を継続しました。ダイポール試験は、断層の周囲に複数の割れ目が存在する割れ目帯を対象に 2 種類のトレーサー注入条件（パルスソース[*51]、コンスタントソース[*52]）で実施された試験であり、トレーサーを注入した断層の開口幅、試験孔周辺の割れ目分布および割れ目表面のトレーサー濃度分布などの状況が確認されている(47)ことから、これらトレーサーの移行経路の不均質性に関する情報に基づいたモデル化／解析手法を検討するために、トレーサーの移行経路を 2 経路としたモデルと、平行平板モデルにフロー領域[*53]およびスタグナント領域[*54]を表現したモデルによる解析を行いました(48)。この成果については、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）により得られました。図 86 にそれぞれの解析モデルを示します。

2 つの移行経路を考慮した解析モデルは、平行平板モデルの結果を重ね合わせるもので、注水孔から揚水孔までの移行経路を 2 つ設定し、それぞれの流路長さ、割れ目幅、開口幅の条件を変動させることで、パルスソースおよびコンスタントソースの試験結果を同時に満たす条件の探索を行いました。一方、フロー・スタグナント領域を考慮した解析モデルは、割れ目表面の凹凸によって形成されたチャンネルに沿った流れが卓越する領域とそうでない領域を平行平板モデルに表現しています。

---

*49：これまでは、「単一の割れ目を対象とした物質移行試験」と記載していましたが、同試験結果の評価の中で、複数の割れ目がトレーサーの移行に関与していることが分かってきたため、記載を改めました。

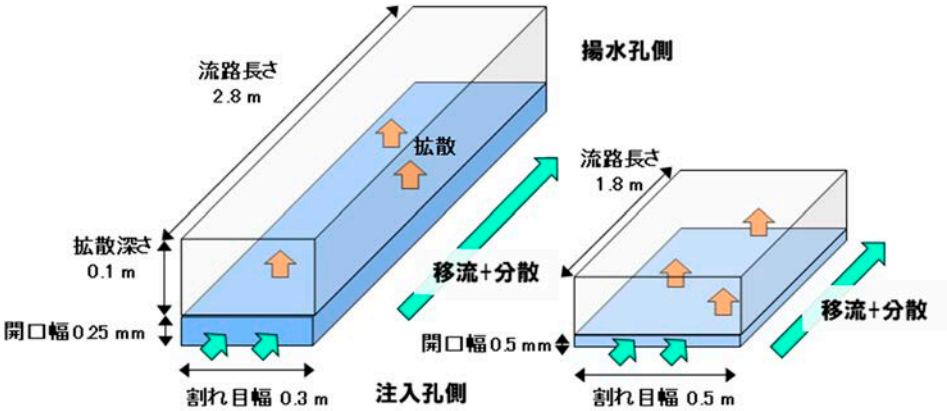
*50：ダイポール試験とは、トレーサー試験の一種で 2 つのボーリング孔を利用し、トレーサーの投入／回収を行うことで、孔間の分散係数などのパラメータを調べる試験です。

*51：トレーサーの投入方法の 1 つで、一定濃度のトレーサーを瞬間的に投入する方法です。

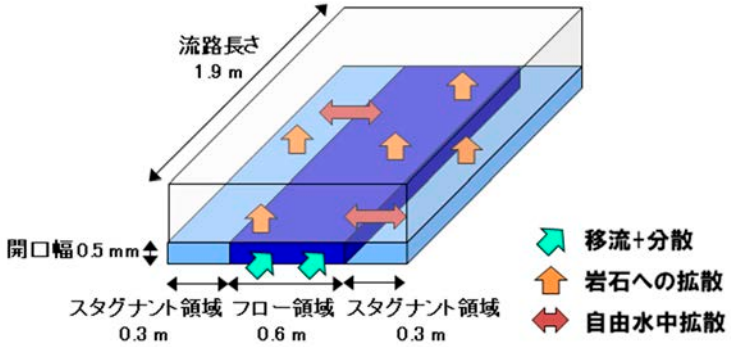
*52：トレーサーの投入方法の 1 つで、一定濃度のトレーサーを試験期間中にわたって投入し続ける方法です。

*53：フロー領域とは、地下水の流れが生じていることを仮定した領域のことで、地下水の流れによって物質が移動する「移流」現象と、主に物質が移行する媒体の幾何学形状に起因して物質が広がる「分散」現象を考慮しています。

*54：フロー領域とは逆に、地下水の流れが生じていないことを仮定した領域のことで、物質の濃度差によって散らばり、広がる「拡散」現象のみを考慮しています。



(a) 2 つの移行経路を考慮した解析モデル

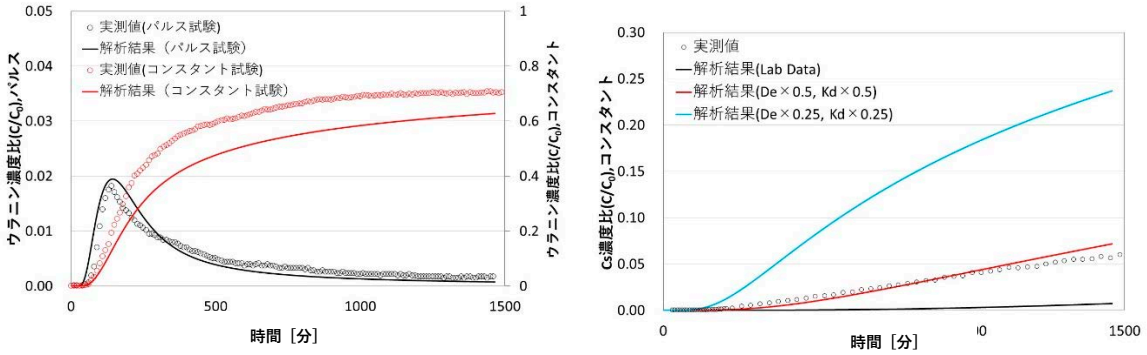


(b) フロー・スタグナント領域を考慮した解析モデル

図 86　解析モデルの概要[48]に追記

2 つの移行経路を考慮した解析モデルによる解析結果の例を図 86 に示します。図 87(a)に示すウラニンの破過曲線において、パルス試験のピーク傾向を 1 つの割れ目で再現しつつ、もう 1 つの割れ目で破過曲線*55のテール部の形状を含めて、破過曲線全体の再現を試みましたが、現時点でパスルソースとコンスタントソースの破過曲線を同時に再現するには至りませんでした。一方で、図 87(b)に示すコンスタントソース試験での Cs の破過曲線は、既存の室内試験に基づく Cs の実効拡散係数や収着分配係数を与えた場合には、平成 30 年度の結果と同様に Cs の遅延を過大評価する結果となりました。そこで、これら実効拡散係数と収着分配係数の室内試験と原位置試験における試験条件の差異を考慮し、それぞれのパラメータをさらに 2 分の 1 に設定した場合、Cs の破過曲線を概ね再現できることが分かりました。

*55：破過曲線とは、トレーサーの濃度の時間変化を示した図のことを言います。



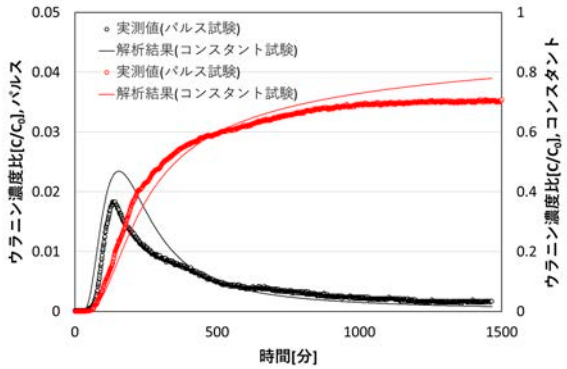
(a)ウラニンの破過曲線　　(b) Cs の破過曲線

図 87　2 つの移行経路を考慮した解析モデルを用いた解析結果[48]

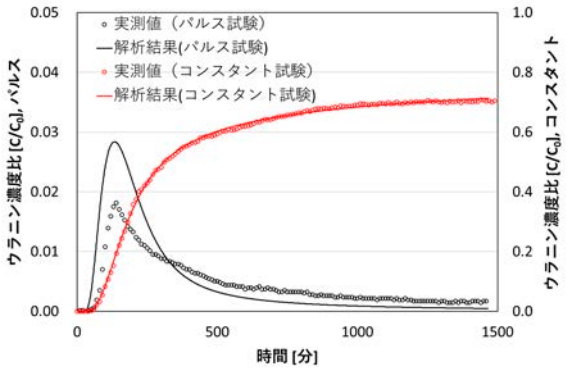
フロー・スタグナント領域を考慮した解析モデルによる解析結果の例を図 87 に示します。

平成 30 年度に実施した平行平板モデルでの解析結果[49]と比較するとパルス・コンスタントソースにおける破過曲線には大きな違いがない（図 88(a)、(b)の比較、および(c)、(d)の比較）ことがわかりました。一方、割れ目表面のトレーサー濃度分布については、すべての実測値がフロー領域における濃度分布とスタグナント領域の濃度分布の解析結果の間にプロットされていることがわかります（図 88(e)、(f)の比較）。今回試験対象とした割れ目中の移行は移流が支配的であるとともに、複雑な経路をたどってトレーサーが移行している可能性があります。今回の解析結果ではスタグナント領域の濃度分布よりも実測値の濃度が高いとともに、注水孔から濃度分析地点を結んだ最短距離をトレーサーが移流によって移行した場合の濃度分布よりも実測値が低いことから、フロー・スタグナント領域を考慮したモデルにより、トレーサーの移行経路の不均質性に起因するトレーサーの挙動を表現できる可能性が示唆されました。

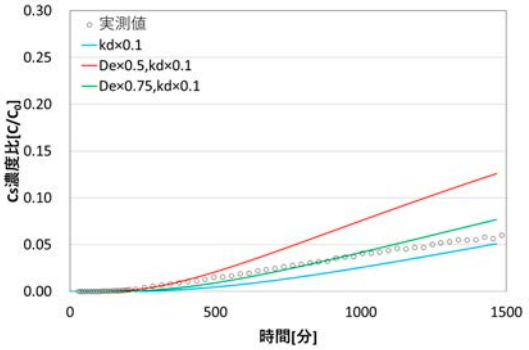
今後は、Cs 以外のトレーサーを含めたコンスタントソース試験およびパルスソース試験の破過曲線、各トレーサーの移行パラメータや回収率、割れ目表面の Cs 濃度分布の一連のデータセットに対し、モデル・パラメータの最適化とその妥当性の確認を行っていく予定です。



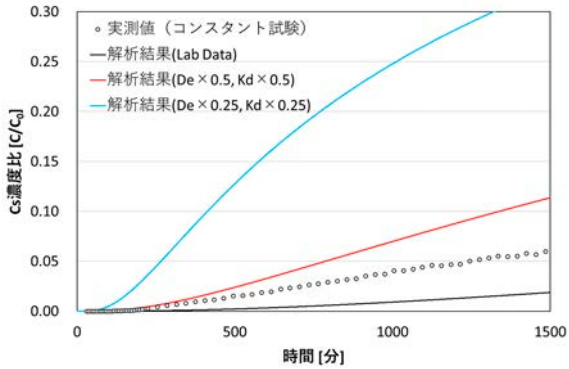
(a) ウラニン試験の破過曲線



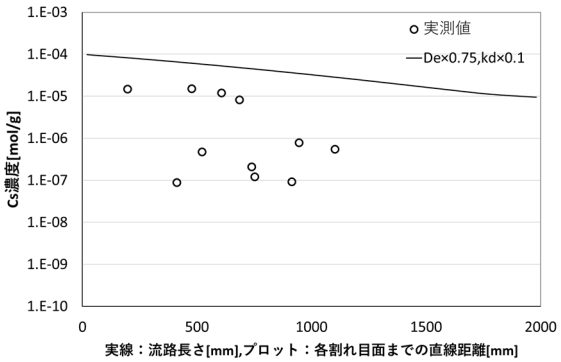
(b) ウラニン試験の破過曲線



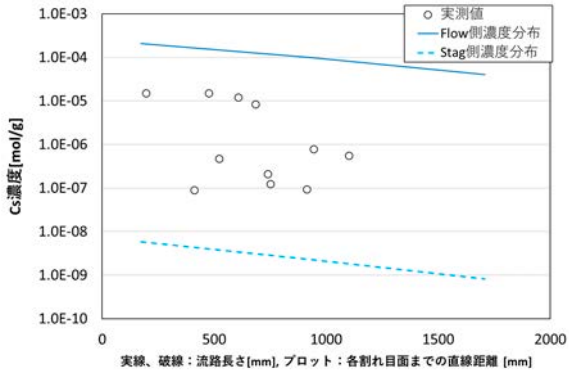
(c) Cs コンスタント試験の破過曲線



(d) Cs コンスタント試験の破過曲線



(e) Cs 濃度分布



(f) Cs 濃度分布

図 88　フロー・スタグナント領域を考慮した解析モデルを用いた割れ目中トレーサー試験のウラニンおよび Cs の解析結果[48] に追記
（左：平成 30 年度の解析結果、右：令和元年度の解析結果）

5. 地下施設の維持管理

5.1 地下施設の維持管理

令和元年度は、引き続き維持管理業務として、地下施設の機械設備や電気設備の点検保守および設備の更新（中央監視装置）などを行い、地下施設の安全確保に努めました（写真 9）。また、平成 31 年 4 月 9 日に発生した火災については、原因究明の結果、電気ケーブル巻上機の誤作動により接続端子が破断して火花が発生、プラスチック製端子ボックスに引火したものと判断されました。この再発防止策として、電気ケーブル巻上機が誤作動しないように、設備を改造するとともに点検項目の追加や頻度を上げる等の対策を行いました。

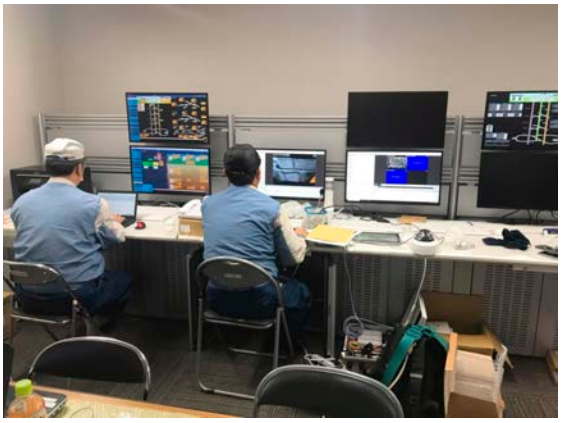


写真 9　設備の点検および更新状況

5.2 掘削土（ズリ）の管理

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）には重金属などが含まれていますが、自然由来であることから土壌汚染対策法の適用外となっています。しかし、幌延深地層研究センターでは、周辺環境の保全に万全を期すため、土壌汚染対策法に準拠した管理を行っています。具体的には、対象となる物質が土壌汚染対策法に定める範囲内であることを確認するため、掘削土（ズリ）について建設現場における簡易分析と公的機関による詳細な分析（以下、公定分析）を実施し、同法に準じた適切な管理のもと掘削土（ズリ）置場へ搬入し、保管しています（写真 10）。

掘削土（ズリ）置場は、土壌汚染対策法の遮水工封じ込め型に準じた二重遮水シート構造（図 89）となっています。

写真 10　掘削土（ズリ）置場

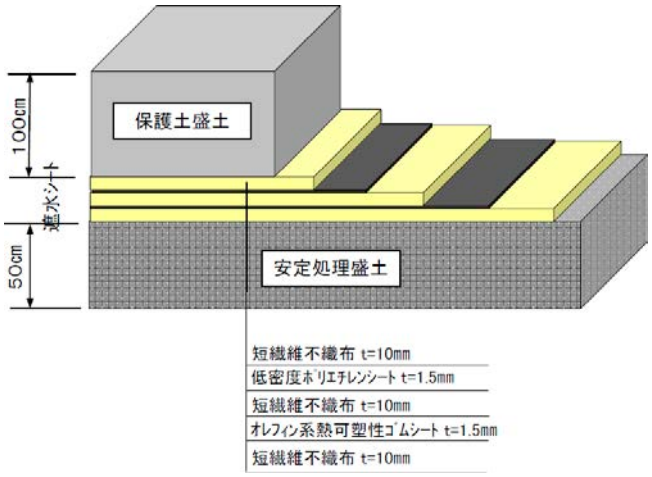


図 89　掘削土（ズリ）置場の構造

5.3 排水の管理

地下施設からの排出水と掘削土（ズリ）置場に設置している浸出水調整池の浸出水については、硝酸性窒素処理設備、濁水処理設備、脱ホウ素設備、脱窒素設備、揚水設備から構成される排水処理設備（写真 11）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した後、排水管路を通じて天塩川へ放流しています。

地下施設からの排水の公定分析結果については、「6.1（2）地下施設からの排水の水質調査結果」に示します。

硝酸性窒素処理設備

濁水処理設備

脱ホウ素設備(1 号機)

脱ホウ素設備(2 号機)

脱窒素設備

揚水設備

写真 11　排水処理設備

6. 環境調査

令和元年度は、平成 30 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。

6.1 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。幌延深地層研究センターにおける排水系統と各水質調査の採水地点を図 90 に示します。

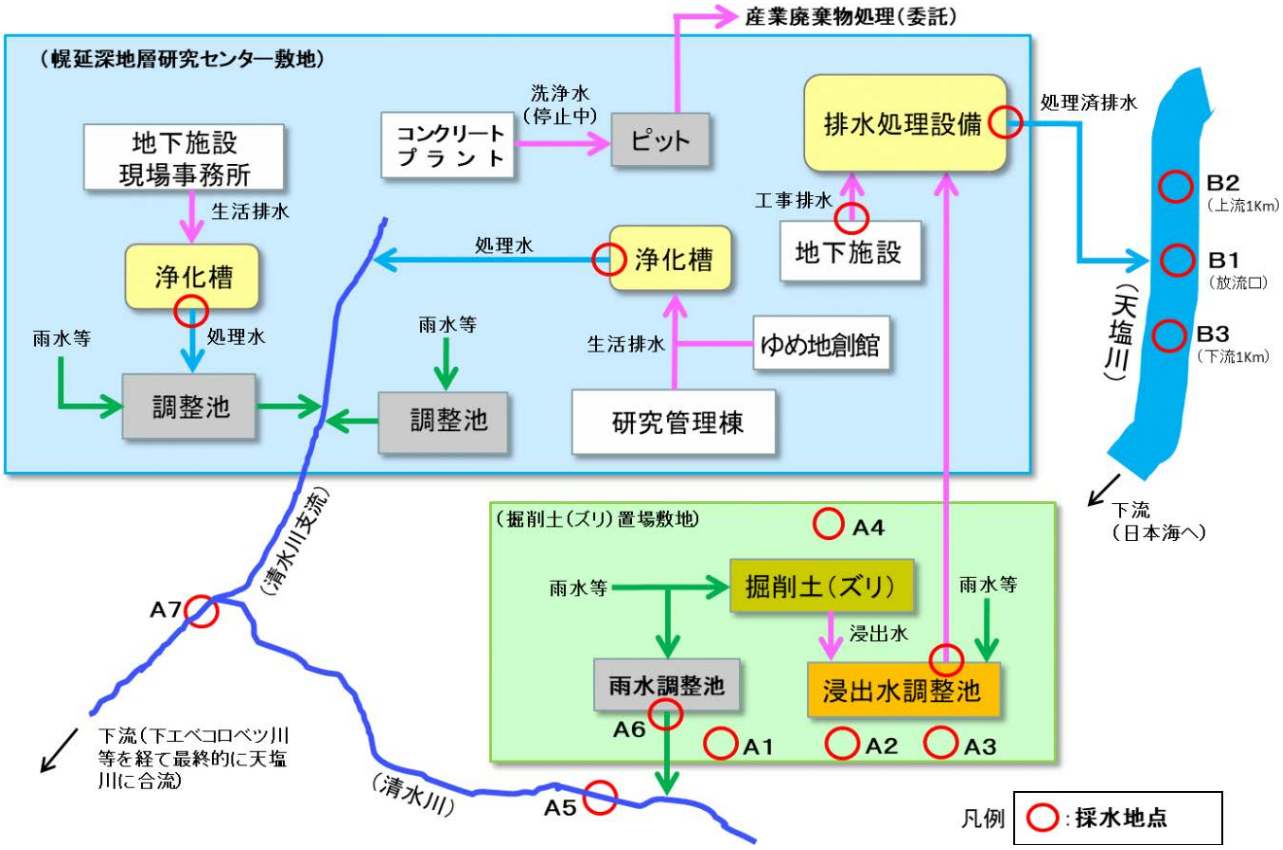


図 90　排水系統と各水質分析用試料の採取地点

(1) 天塩川への排水量

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

令和元年度における天塩川への排水量は、表 3 に示すとおりです。合計排水量は、44,956 m^3 であり、前年度同時期（49,548 m^3）の約 91 %でした。日最大排水量は、降雨により増水した掘削土（ズリ）置場の浸出水を処理した 8 月の 418 m^3 が最大値となっており、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^3/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、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 月が最大となっており、月排水量が 5,660 m^3、日平均排水量が 182.6 m^3 でした。

表 3　天塩川への排水量

年月	月排水量（m^3）	日最大排水量（m^3）*1	日平均排水量（m^3）*2
平成 31 年 4 月	4,473	359	149.1
令和元年 5 月	2,894	251	93.4
令和元年 6 月	2,827	257	94.2
令和元年 7 月	3,614	303	116.6
令和元年 8 月	5,660*3	418*3	182.6*3
令和元年 9 月	3,837	333	127.9
令和元年 10 月	3,208	302	103.5
令和元年 11 月	2,827	261	94.2
令和元年 12 月	4,384	283	141.4
令和 2 年 1 月	3,117	230	100.5
令和 2 年 2 月	2,928	312	101.0
令和 2 年 3 月	5,187	344	167.3
合　計	44,956	－	－
最大値	5,660	418	182.6

*1：北るもい漁業協同組合との協定値は 750 m^3/日
*2：排水量を月の日数で除した値
*3：各項目の最大値

(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 91 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。

令和元年度における水質調査結果は、表 4 に示すとおり、排水基準を超える処理済排水はありませんでした。

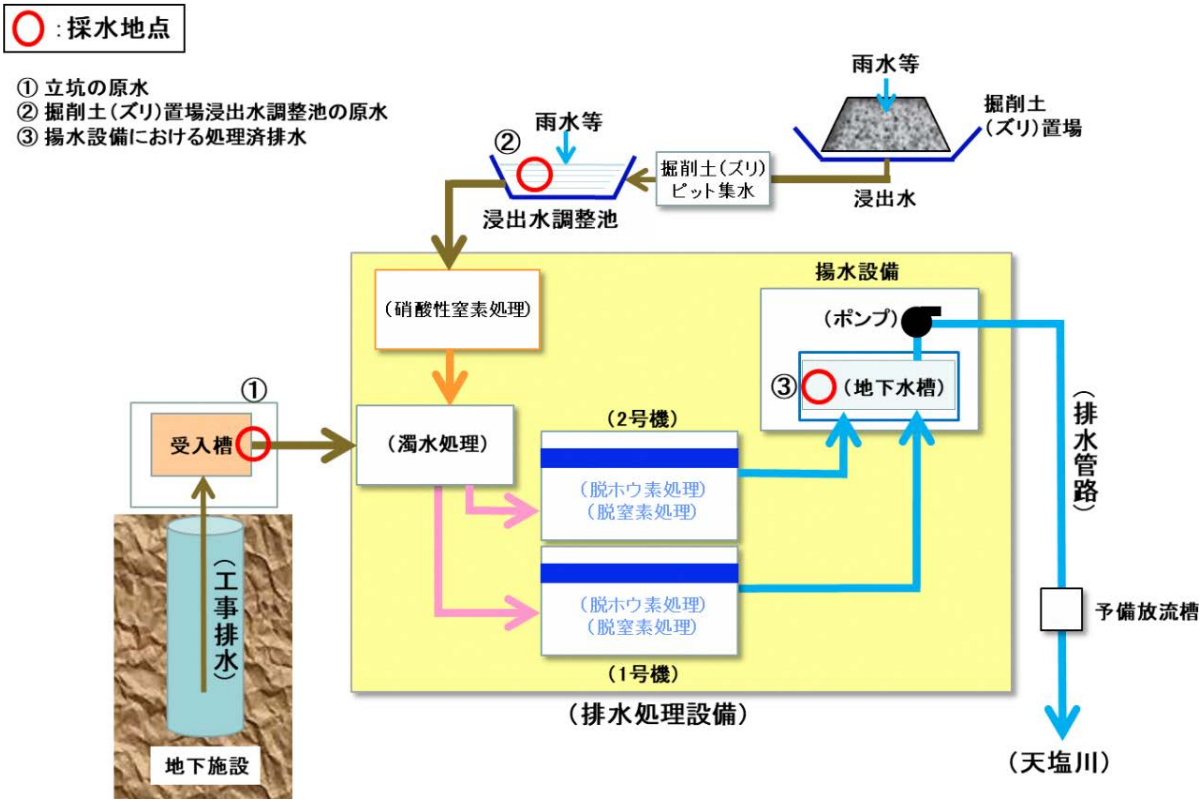


図 91　地下施設からの排水の処理フローと試料採取点

表 4　地下施設からの排水にかかる水質調査結果

分析項目*1	採水地点*2	過年度 平成18年12月～平成30年3月	前年度 平成30年4月～平成31年3月	令和元年度 平成31年4月～令和2年3月	(参考値) 水質汚濁防止法排水基準
カドミウム (mg/L)	立坑の原水	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.01	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01	
ヒ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.08	<0.01	<0.01	0.1
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
セレン (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	0.1
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.04	<0.01～0.01	<0.01～0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01	
フッ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.8～3.5	<0.8～1.5	<0.8	8
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	<0.8	
	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	64～83	57～80	10
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	<0.1～37	0.3～6.2	2.4～6.2	
	揚水設備における処理済排水	<0.1～3.0	0.1～1.2	0.2～2.2	
全窒素 (mg/L)	立坑の原水	0.41～117	59～79	55～90	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	3.0～39	18～35	
	揚水設備における処理済排水	0.60～48	8.9～21	6.2～21	
全アンモニア (mg/L)	立坑の原水	0.12～110	44～62	30～61	―
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	0.12～22	0.20～1.5	0.27～1.1	
	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	8.1～8.2	5.8～8.6
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	6.7～8.7	7.0～8.4	7.2～7.8	
	揚水設備における処理済排水	6.9～8.6	7.3～8.2	7.4～7.9	
浮遊物質量 (mg/L)	立坑の原水	4～580	6～290	6～130	200 (日間平均 150)
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	1～170	1～8	3～6	
	揚水設備における処理済排水	<1～9	<1～2	<1	
塩化物イオン (mg/L)	立坑の原水	20～4,300	3,300～4,200	2,500～3,900	―
	掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水	10～1,500	16～220	77～170	
	揚水設備における処理済排水	38～4,700	2,200～4,300	1,500～4,000	

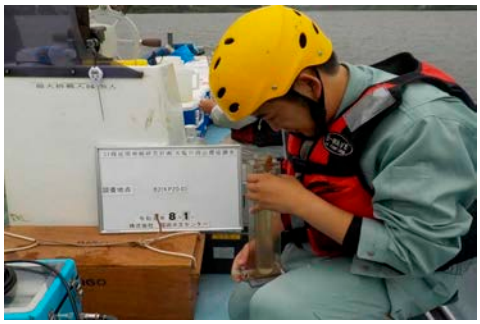
*1：主な分析項目を抜粋
*2：採水地点は図 91 参照

(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 92）において、定期的（原則 1 回/月）に採水し（写真 12）、水質調査を実施しています。

令和元年度における調査結果は、表 5 に示すとおりです。浮遊物質量について、北るもい漁業協同組合との協定値（20 mg/L）を超過した時期（5 月、9 月）がありましたが、放流口の上流側（B2）においても同程度の高い値を示しており、同日に採取した揚水設備における処理済排水の浮遊物質量は低い値（<1 mg/L）であることから、地下施設からの排水の影響ではなく、融雪や降雨などに伴う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ることから天塩川に影響を与えていないものと判断しています。

図 92　天塩川の調査地点



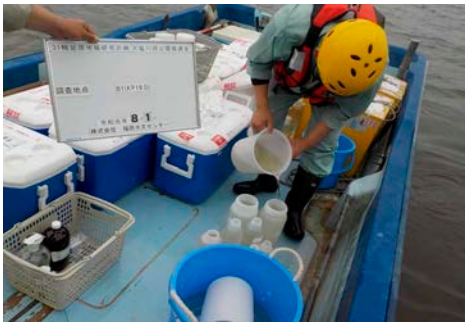


写真 12　天塩川の採水状況

表 5　天塩川の水質調査結果

分析項目*1	採水地点*2		過年度 平成 18 年 6 月～平成 18 年 11 月（放流前）	過年度 平成 18 年 12 月～平成 31 年 3 月（放流後）	令和元年度 平成 31 年 4 月～令和 2 年 3 月	北るもい漁業協同組合協定値
ホウ素（mg/L）	B1	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.35	<0.01～0.18	5
		中層	－	<0.01～3.5	<0.01～0.95	
		深層	<0.02～3.35	<0.01～4.9	<0.01～4.6	
	B2	表層	<0.02～0.04	<0.01～0.27	<0.01～0.14	
		中層	－	<0.01～3.7	<0.01～0.86	
		深層	<0.02～3.28	<0.01～5.0	<0.01～4.6	
	B3	表層	<0.02～0.07	<0.01～0.28	<0.01～0.18	
		中層	－	<0.01～2.5	<0.01～1.0	
		深層	<0.02～1.03	<0.01～4.6	0.01～4.7	
全窒素（mg/L）	B1	表層	0.37～1.06	0.11～2.2	0.33～1.0	20
		中層	－	0.15～2.1	0.40～0.97	
		深層	0.42～1.50	0.15～6.5	0.28～0.97	
	B2	表層	0.37～1.14	0.14～2.2	0.32～1.0	
		中層	－	0.15～2.3	0.32～1.0	
		深層	0.4～1.16	0.16～2.3	0.33～0.99	
	B3	表層	0.4～1.31	0.16～2.2	0.31～0.99	
		中層	－	0.11～2.3	0.33～0.99	
		深層	0.49～1.24	0.16～2.3	0.25～0.98	
全アンモニア（mg/L）	B1	表層	－	<0.05～0.83	<0.05～0.06	2*3
		中層	－	<0.05～0.92	<0.05～0.07	
		深層	－	<0.05～0.85	<0.05～0.17	
	B2	表層	<0.01～0.13	<0.05～0.89	<0.05～0.06	
		中層	－	<0.05～0.76	<0.05～0.05	
		深層	0.01～0.35	<0.05～0.85	<0.05～0.05	
	B3	表層	0.01～0.21	<0.05～0.89	<0.05～0.06	
		中層	－	<0.05～0.90	<0.05～0.05	
		深層	0.02～0.17	<0.05～0.96	<0.05～0.06	
pH	B1	表層	7.1～7.4	6.4～7.7	7.0～7.8	5.8～8.6
		中層	－	6.5～7.6	7.0～7.7	
		深層	7.0～7.6	6.5～8.0	7.1～7.8	
	B2	表層	7.1～7.4	6.6～7.9	6.8～7.9	
		中層	－	6.5～7.6	6.9～7.9	
		深層	7.2～7.6	6.6～8.0	7.0～7.8	
	B3	表層	7.0～7.6	6.6～7.9	7.2～7.7	
		中層	－	6.6～7.6	7.2～7.7	
		深層	7.1～7.4	6.6～8.0	7.2～7.9	
浮遊物質量（mg/L）	B1	表層	3～34	<1～360	<1～45	20
		中層	－	<1～390	<1～46	
		深層	6～86	<1～400	1～46	
	B2	表層	3～36	<1～390	<1～42	
		中層	－	<1～400	<1～50	
		深層	5～47	<1～460	<1～50	
	B3	表層	3～35	<1～420	<1～43	
		中層	－	<1～460	<1～56	
		深層	5～49	<1～650	<1～54	

*1：主な分析項目を抜粋
*2：採水地点は図 92 参照、表層（水面下 0.1m 付近）、中層（塩水層と淡水層の間もしくは 1/2 深度）、深層（川床上 1m 付近）
*3：北るもい漁業協同組合との確認により、放流口下流 1km（B3）地点の値

(4) 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）は、二重に遮水された掘削土（ズリ）置場で管理していますが、遮水された外側となる掘削土（ズリ）置場周辺への影響を監視するため、図 93 に示す調査地点において、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（写真 13）、水質調査を実施しています。

令和元年度における調査結果は、表 6 に示すとおり、これまでの調査結果と同等であることから、掘削土（ズリ）置場が周辺環境に影響を与えていないものと判断しています。

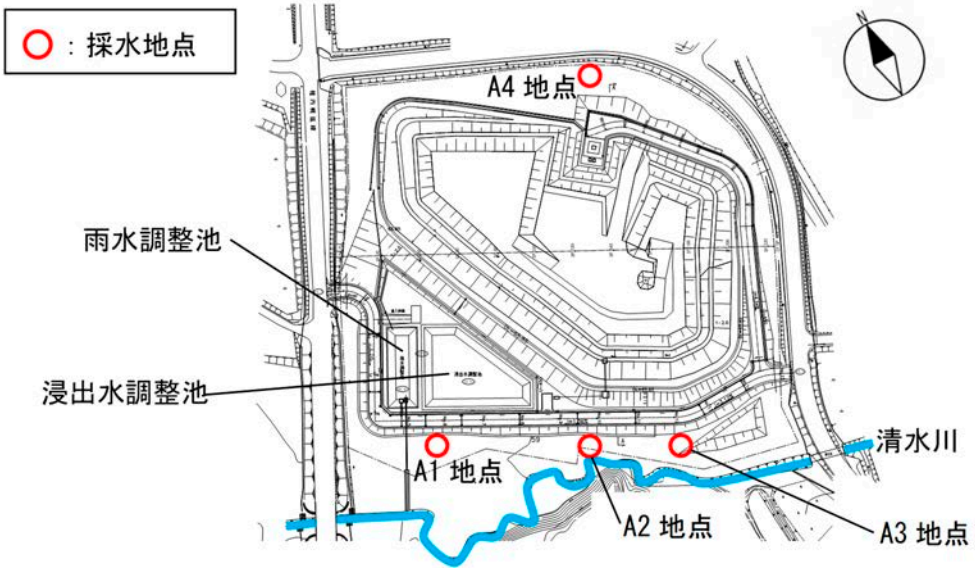


図 93　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点

写真 13　掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況（A1～A4）

表 6　掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果

分析項目*1	採水地点*2	過年度		令和元年度			
		平成 18 年 6 月～平成 19 年 4 月 掘削土(ズリ)搬入前	平成 19 年 5 月～平成 31 年 2 月 掘削土(ズリ)搬入後	令和元年			令和 2 年
				5 月	8 月	11 月	2 月
カドミウム (mg/L)	A1	<0.001～0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A2	<0.001～0.004	<0.001～0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A3	<0.001～0.003	<0.001～0.009	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A4	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
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	<0.005～0.006	<0.005	0.007	<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	<0.1	<0.1
	A2	<0.1～0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A3	<0.1～0.2	<0.1～0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	A4	<0.1	<0.1～0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A1	19.8～50.7	0.40～63.0	11	11	16	24
	A2	1.29～43.5	0.43～19.0	11	6.2	6.4	14
	A3	12.5～34.0	0.18～41.8	0.55	0.48	2.7	24
	A4	<0.02～0.06	<0.02～0.47	<0.02	0.02	0.40	0.04
pH	A1	6.9～7.2	6.3～7.9	6.2	6.1	6.3	6.5
	A2	4.6～6.3	3.7～6.9	6.6	6.3	6.5	6.6
	A3	6.8～7.3	4.2～7.4	6.4	6.2	6.5	6.7
	A4	5.4～6.6	5.0～6.7	5.0	5.0	5.0	5.1
塩化物イオン (mg/L)	A1	1,810～2,760	79～3,400	950	900	1,000	1700
	A2	147～2,910	23～1,200	680	280	370	890
	A3	631～1,550	27～1,700	32	26	130	940
	A4	9.7～11.9	8.4～17.0	8.8	10	10	14

*1：主な分析項目を抜粋
*2：採水地点は図 93 参照

(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 94 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（写真 14）、水質調査を実施しています。

令和元年度における調査結果は、表 7 に示すとおりです。雨水調整池（A6）において、微量の鉛（0.007 mg/L）が検出されましたが、過去の調査においても清水川（A7）を含め、同程度の値を検出しており、排水基準（0.1 mg/L）と比べても小さな値であることから、周辺環境への影響はないものと判断しています。

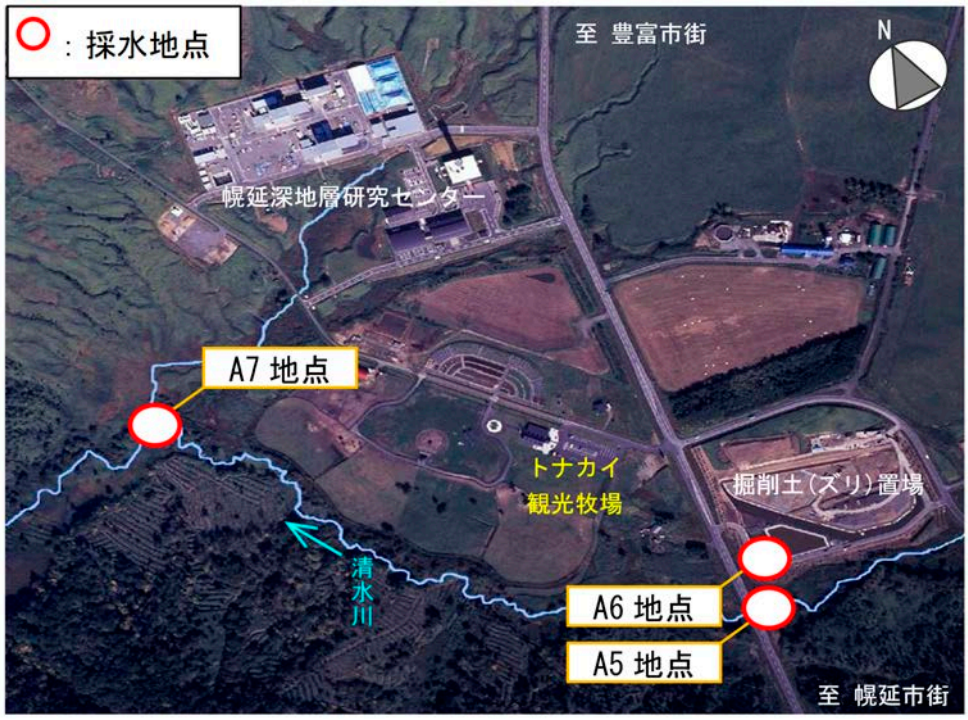


図 94　清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の採水地点

写真 14　清水川の採水状況

表 7　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*1	採水地点*2	過年度		令和元年度
		平成18年6月～平成19年4月 掘削土（ズリ）搬入前	平成 19 年 5 月～平成 31 年 3 月 掘削土（ズリ）搬入後	平成 31 年 4 月～令和 2 年 3 月
カドミウム (mg/L)	A5	<0.001	<0.001	<0.001
	A6	<0.001～0.001	<0.001～0.002	<0.001
	A7	<0.001	<0.001	<0.001
鉛 (mg/L)	A5	<0.005	<0.005	<0.005
	A6	<0.005	<0.005～0.006	<0.005～0.007
	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
	A6	<0.1～0.7	<0.1～1.1	<0.1～0.1
	A7	<0.1	<0.1～0.3	<0.1
ホウ素 (mg/L)	A5	0.03～0.25	<0.02～0.44	0.08～0.38
	A6	<0.02～0.09	<0.02～0.43	<0.02～0.21
	A7	0.03～0.30	<0.02～0.42	0.09～0.39
pH	A5	6.4～7.1	6.0～7.9	6.3～7.5
	A6	5.8～7.4	5.7～9.1	6.3～8.6
	A7	6.5～7.0	6.1～7.8	6.6～7.1
浮遊物質量 (mg/L)	A5	1～20	<1～66	1～7
	A6	12～173	<1～500	1～50
	A7	1～11	<1～270	1～9
塩化物イオン (mg/L)	A5	14.4～30.5	7.2～70	11～43
	A6	5.1～24.7	2.7～269	1.7～37
	A7	15.6～28.7	8.1～100	16～49

*1：主な分析項目を抜粋
*2：採水地点は図 94 参照

(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の排水について、定期的（原則 1 回/4 週）に水質調査を実施しています。

令和元年度における水質調査結果は、表 8 に示すとおり、全ての項目において協定値を満足しています。

表 8　浄化槽排水の水質調査結果

分析項目	採水地点	過年度 平成 18 年 12 月 ～平成 31 年 3 月	令和元年度 平成 31 年 4 月 ～令和 2 年 3 月	北るもい 漁業協同組合 協定値
pH	研究管理棟	5.9～7.5	6.1～7.7	5.8～8.6
	地下施設 現場事務所	6.8～7.9	7.1～7.9	
生物化学的 酸素要求量 (mg/L)	研究管理棟	<0.5～17	2.8～10	20
	地下施設 現場事務所	<0.2～28	1.1～11	
浮遊物質量 (mg/L)	研究管理棟	0.5～10	<1.0～4	20
	地下施設 現場事務所	<1.0～8.0	<1.0～2	
全窒素 (mg/L)	研究管理棟	6.6～52	10～29	60
	地下施設 現場事務所	0.2～45	0.3～2.4	
全リン (mg/L)	研究管理棟	0.5～5.0	1.5～3.3	8
	地下施設 現場事務所	<0.1～7.8	<0.1～0.5	
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	0～30	0	3,000
	地下施設 現場事務所	0～2,100	0～130	

6.2 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 95 に示す地点にて清水川の水質および魚類を対象に調査を実施しています。令和元年度における各調査結果は、これまでと比較して大きな変化がないことを確認しています。

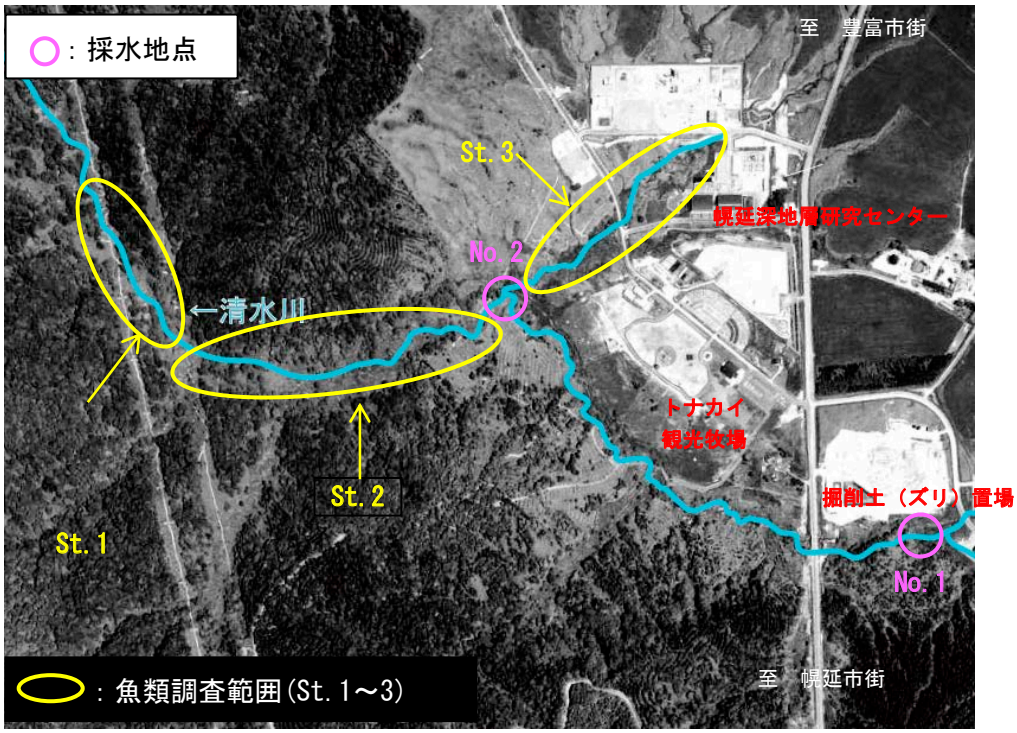


図 95　環境調査実施場所

(1) 清水川の水質調査結果

清水川の 2 地点において、定期的（原則 4 回/年）に採水を行い（写真 15)、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。

令和元年度における調査結果は、表 9 に示すとおりです。これまでと比較して大きな変化がないことを確認しています。

写真 15　清水川の水質調査

表 9　清水川の水質調査結果

分析項目*1	採水地点*2	過年度	令和元年度			
		平成14年8月～平成31年2月	令和元年			令和2年
			6月	9月	11月	2月
pH	No.1	6.3～7.9	7.4	6.6	7.1	6.8
	No.2	6.4～7.7	7.0	6.8	6.9	6.7
生物化学的酸素要求量(mg/L)	No.1	<0.5～62	7.3	0.8	3.7	0.8
	No.2	<0.5～10.0	2.1	1.5	5.9	1.9
浮遊物質量(mg/L)	No.1	1～70	2	2	6	1
	No.2	<1～69	2	4	9	2
溶存酸素量(mg/L)	No.1	6.6～13.9	8.4	9.8	9.5	12.8
	No.2	5.5～12.5	8.0	8.5	7.5	8.6

*1：主な分析項目のみを抜粋
*2：採水地点は図 95 参照

(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（写真 16）。調査は、St.1～St.3の3箇所で実施しています。

令和元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 10に示すとおり、スナヤツメ、エゾウグイ、エゾホトケドジョウ、サクラマス（ヤマメ）、エゾトミヨ、ハナカジカの6種が確認されました。

写真 16　生息魚類調査

表 10　確認された重要種（魚類）

目	科	種	選定根拠*1						
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ヤツメウナギ	ヤツメウナギ	スナヤツメ北方種			VU		希		
コイ	コイ	エゾウグイ				N			
〃	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			

*1: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)に基づく野生動植物種

③:「環境省レッドリスト 2017【汽水・淡水魚類】」(環境省 2019 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

○:調査対象種

※③、④については、レッドリストの更新に伴い出典が変更となっている。

7. 安全確保の取組み

安全確保の取組みとして、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。

そのほか、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（写真 17）。

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ほか、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（写真 18）。

写真 17　安全パトロールの状況

写真 18　安全行事の状況（安全大会）

8. 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。令和元年度に実施した主な研究協力は以下のとおりです。

8.1 国内機関との研究協力

8.1.1 大学との研究協力

東京大学

地下深部に生息するメタン酸化機能を有する微生物生態系が地下水や岩石などの性質に与える影響を評価する手法開発を目的として、地下施設の深度 140m 調査坑道から掘削されたボーリング孔を用いて地下水中の微生物を採取しました。採取した試料を用いて、東京大学において地下深部の環境を模擬した高圧培養実験を実施し、微生物によるメタン酸化速度を測定しました。今後は、実験を継続し、メタン酸化微生物による酸化剤の利用選択性や代謝速度を調べ、メタン酸化機能を有する微生物生態系が地下深部環境における放射性核種の物質移行に与える影響について考察していきます。

また、地下深部の原位置における微生物生態系の生息環境を詳細に調べるため、冷凍保存された岩石コア試料を用いて薄片を作成し、蛍光染料を用いて微生物細胞を染色することで、岩石中のどのような箇所で微生物が活動しているのかを調べました。今後は、微生物の存在箇所における岩石の元素組成や鉱物組成を調べていきます。

また、堆積軟岩の坑道掘削時や長期的な変形挙動、岩盤内部の水分状態変化による強度・剛性変化および変形挙動などの評価手法の確立を目的とした共同研究を実施しています。

平成 29 年度と平成 30 年度の 2 年間の共同研究において、これまでに得られている過去の研究成果を改めて分析・評価し、堆積軟岩に特有な特性を明らかにするための研究アプローチを提示しました。具体的には、平成 28 年度に実施した X 線 CT スキャナによる内部の観察結果を踏まえて、これまで解釈が困難であった、堆積軟岩に特徴的な時間依存性や水分依存性の挙動を解明するための研究アプローチを提示しました。

京都大学、東北大学

地下水中の微量元素と微小な物質（コロイド・有機物・微生物）との相互作用に関わる現象の理解の向上のため、平成 30 年度に、深度 250m および 350m 調査坑道から得られた地下水試料に微量元素を添加する実験を実施しました。添加後の地下水試料をフィルタでろ過し、ろ液およびフィルタを分析することで、地下水中に微量に存在する有機物などとの相互作用を調べました。令和元年度は、同様の追試を実施し、実験結果の確からしさを確認しました。その結果、希土類元素は原子番号が大きくなるほど地下水中の濃度が減少する結果が得られました。幌延の地下水中では、添加した希土類元素はリン酸塩などの鉱物を形成している可能性が分かりました。また、これまでの共同研究成果を基に、日本学術振興会の運営する科学研究費助成事業に応募・採択され、基盤研究（B）として「深部地下水環境での長半減期核種の移行を支配する物質の解明」に取り組んでいます。

高レベル放射性廃棄物に含まれる長半減期核種である 3 価アクチニドは、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 3 価アクチニドの挙動の理解をするためには、3 価アクチニドと挙動が似ている希土類元素の挙動を調べることが有効になります。そこで、深度 250m および 350m 調査坑道から掘削されたボーリング孔を利用して、地下水試料および岩石試料を採取しました。地下施設内においてボーリング孔から直接、酸素と触れることなく地下水をろ過し、また、実験室に設置してあるグローブボックスを用いて、酸素と触れることなく岩石試料を粉砕しました。今後は、これらの試料を用いて希土類元素濃度の測定や、溶出試験などを実施する予定です。

東京工業大学、サンコーコンサルタント

深度 250m 調査坑道において、坑道掘削後から定期的に実施してきた弾性波トモグラフィ調査のデータを活用して、坑道周辺の詳細な速度分布の把握と長期間にわたる弾性波速度の変化から将来の掘削影響領域の挙動の把握を目標とした解析技術の開発を行いました。

令和元年度は、統計科学や機械学習の分野で発達してきたスパースモデリングという手法を弾性波トモグラフィ調査結果の解析に応用し、従来の手法よりも高解像度な速度構造を求める技術の開発を行いました。

関西学院大学

幌延地域の地下深部で想定される地下水の流れが非常に遅い場を対象に、岩石や地下水中に存在する天然ウランの放射平衡/非平衡の関係を基に、長期（～100 万年程度）にわたる地下水流動評価の可能性の検討を目的として、試料中に含まれる極微量のウランの放射能比の測定法の確立を行いました。また、確立した測定法を用いて、地下施設を利用して採取した地下水や、地下施設掘削時に得られた炭酸塩脈中の $^{234}U/^{238}U$ 放射能比の測定を試みました。その結果、地下水中の $^{234}U/^{238}U$ 放射能比は平衡に達していない一方で、炭酸塩脈中の $^{234}U/^{238}U$ 放射能比は平衡に近い値を示すことが分かりました。今後は、得られた結果について、本地域の地史を考慮しながら考察を行う予定です。

山口大学、地層科学研究所

これまで、坑道掘削時の支保工の応力変化に対しては、実施設計や坑道掘削を想定した解析的検討などによって、定量的な評価がなされてきたものの、岩盤挙動に関する定量的評価までには至っていませんでした。その要因の 1 つは、掘削に伴う地下水挙動の変化が岩盤の変形挙動に及ぼす影響を無視できないためと考えられていました。そこで本共同研究では、立坑および水平坑道の掘削時に取得した計測データに基づき水理－力学連成解析による数値シミュレーションを実施し、掘削時の岩盤・地下水挙動の予測への適用性を評価することを目的としました。令和元年度は、立坑および水平坑道掘削時に取得した支保工応力や岩盤変位の計測結果、湧水量のデータ、幌延深地層研究センター周辺のボーリング孔で取得された間隙水圧計測結果、水理試験結果等を整理し、立坑の掘削を模擬した三次元的な試解析を実施しました。

8.1.2 その他の機関との研究協力

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生態系への影響などの調査、および新規微生物の探索や取得等を目的として、これまでに地下施設を利用して微生物に関するデータを取得してきました。平成 30 年度は、地下施設のボーリング孔から大気に触れることなく地下水中の微生物をろ紙上にろ過採取しました。令和元年度は、平成 30 年度に採取した微生物試料を用いて発酵性微生物を分離培養し、その機能を解析しました。その結果、新規発酵性微生物の単離に成功し、その新規発酵性微生物が、現在も地下環境で生息しており、炭素および鉄循環に寄与している可能性が示唆されました[50]。

今後は、同一の新規発酵性微生物の生息深度を調べるとともに、地質環境などとの関連性について考察していきます。また、ここで得られた成果は、主に幌延地圏環境研究所が実施する地下深部における微生物の活動に関する調査研究に活用しています。

原子力環境整備促進・資金管理センター

地下環境での人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究について共同研究を実施しました。

地層処分実規模試験施設は、地層処分概念とその工学的な実現性や人工バリアの長期挙動を実感・体感できる地上設備を利用し、人工バリアの搬送・定置に係る操業技術や長期挙動などの工学技術に関する研究を行うものです。

令和元年度は、4.1.3 でも述べたように、地層処分実規模試験施設において緩衝材の定置試験を実施し、その様子を公開するとともに、緩衝材が膨潤して隙間が閉塞される過程を観察できる装置を用いた浸潤試験を継続しました。搬送定置・回収技術に関する研究では、地下での実証試験として、模擬 PEM と坑道との隙間を充填した粘土系材料を除去し、模擬 PEM を回収する試験を行い、その装置や手法の適用性を確認しました。

産業技術総合研究所

地下深部における長期的な放射性核種の移行挙動に関わる岩盤の水理特性および化学特性の調査解析技術の高度化を目的として、堆積岩地域における地下水流動・物質移行に関する研究を実施しました。令和元年度は、岩盤力学モデルと水理モデルの連成モデルを構築するために、力学特性および水理特性の評価における知見を取得することを目的とした坑道掘削による応力解放と水理特性変化を模擬した試験を実施しました。また、モデル化にあたり、掘削影響による応力再配分や既存の割れ目などが水理特性変化に与える影響について検討し、課題の抽出・整理を行いました。今後は、力学・水理連成モデルに必要な物性を室内岩石実験によって拡充し、より高度なモデル化を実施する予定です。

また、沿岸域の帯水層の特性や深部地下水の挙動を把握するための調査・解析技術の高度化を目的として、幌延町浜里地区に掘削されたボーリング孔（DD-2 孔：100 m）の最深部において、高精度の注揚水試験システムによる試験（プッシュプル試験）を実施しました。試験区間の帯水層は被圧しており、透水係数は $1.3 \sim 3.3 \times 10^{-5}$ m/s でした。試験結果より、深度 100 m 程度と

浅層の領域の地下水の流速が年間 0.05 m 以下と極めて遅いことが推定されました。また、この地下水は氷期の降水を起源としており、浜里海底下の地下水が長期的に滞留状態にあったことが示唆されます。今後は得られた結果に対して詳細な解析を進めるとともに、より深層の領域や亀裂性岩盤などを対象とした注揚水試験の実施を検討中です。

電力中央研究所

地下施設建設時に周辺地質環境の初期状態と建設に伴う変化を観測し、施設建設に関わる影響領域の空間分布とその経時変化、変化のプロセスに関わる基礎的知見を得ることが重要であることから、地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査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きています。令和元年度は平成 30 年度までに引き続き、坑道掘削に伴う周辺岩盤への力学的な影響を把握するための調査として、深度 140m、250m の調査坑道において比抵抗トモグラフィや弾性波トモグラフィを継続して行いました。また、3.1.2(3)で述べたように、物理探査で得られた坑道周辺の地下水の飽和度の違いに着目し、気液二相流に関する数値解析による地下水の不飽和領域の形成要因について検討しました[21]。今後も、実測データの拡充および数値解析を活用した解釈などを通して、坑道周辺の不飽和領域の形成メカニズムの解明に取り組みます。

国立環境研究所

深部地下水中に溶存する有機物の特性評価ならびに調査解析手法の開発を目的として、国立環境研究所との共同研究を実施しました。令和元年度は、地下水中の有機物をその性質に応じて分画しました。また、地下水中に含まれる、微生物によって分解されにくい有機物（難分解性有機物）の特性を評価するための室内試験にも着手しました。今後は、分離された各有機物成分の特性評価を進めていくとともに、室内試験の結果の評価や試験方法の改良も実施する予定です。

8.2 国外機関との研究協力

モンテリ・プロジェクト*56

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「オパリナス粘土の摩擦特性に関する室内試験」に参加しています。令和元年度は、断層すべり、間隙水圧、流体化学および流体移動間の複合的な関係を評価するための試験が継続されました。これらの試験で得られた成果は、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証などに反映していきます。

上記のほか、クレイクラブ（Clay Club）*57定例会合（令和元年 9 月）に出席し、諸外国や日本における堆積岩を対象とした研究の進捗状況について情報交換を行いました。

---

*56:堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際共同研究です。原子力機構を含め9ヶ国から21機関が参加し、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。

*57：Clay Clubは、経済協力開発機構 原子力機関（OECD/NEA）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。

参考文献

(1) 中山雅，雑賀敦，木村駿，望月陽人，青柳和平，大野宏和，宮川和也，武田匡樹，早野明，松岡稔幸，櫻井彰孝，宮良信勝，石井英一，杉田裕，笹本広，棚井憲治，佐藤稔紀，大澤英昭，北山彩水，谷口直樹（2020）：幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階（第 3 段階：必須の課題 2015-2019 年度)研究成果報告書，JAEA-Research 2019-013，276p.

(2) 青柳和平(編)(2019)：幌延深地層研究計画　平成 31 年度調査研究計画，JAEA-Review 2019-008，20p.

(3) 太田久仁雄，阿部寛信，山口雄大，國丸貴紀，石井英一，操上広志，戸村豪治，柴野一則，濱克宏，松井裕哉，新里忠史，高橋一晴，丹生屋純夫，大原英史，浅森浩一，森岡宏之，舟木泰智，茂田直孝，福島龍朗（2007）：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」”、JAEA-Research 2007-044，434p.

(4) A. Hayano, and E. Ishii(2016)：“Relationship between faults oriented parallel and oblique to bedding in Neogene massive siliceous mudstones at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan”, IOP Conference Series; Earth and Environmental Science, Vol. 44, pp.022004_1 - 022004_8, doi:10.1088/1755-1315/44/2/022004

(5) 石井英一，福島龍朗（2006）：“新第三紀珪質岩における断層の解析事例”，応用地質，47 巻，5 号，pp.280-291，　doi:10.5110/jjseg.47.280.

(6) 舟木泰智，石井英一，常盤哲也（2009）：“新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?”，応用地質，50 巻，4 号，pp.238-247，　doi:10.5110/jjseg.50.238.

(7) 早野明，石井英一（2018）：新第三紀塊状珪質泥岩に分布する断層を対象とした亀裂ネットワークモデル，平成 30 年度(2018 年)資源・素材学会春季大会資源・素材講演集(インターネット)，5 巻，1 号，9p.

(8) C. Doughty, C.-F. Tsang, K. Hatanaka, S. Yabuuchi, and H. Kurikami (2008), Application of direct-fitting, mass integral, and multirate methods to analysis of flowing fluid electric conductivity logs from Horonobe, Japan, Water Resour. Res., vol.44, W08403, doi:10.1029/2007WR006441.

(9) C. Doughty, C.-F. Tsang, S. Yabuuchi, and T. Kunimaru (2013):Flowing fluid electric conductivity logging for a deep artesian well in fractured rock with regional flow, J. Hydrol., vol.482, pp.1–13.

(10) P. Bruines, S. Niunoya, M. Munakata, H. Kimura, and H. Kawamura (2013):FEC analysis carried out in SAB-2 borehole located near Horonobe, in Proceedings of the 13th Japan Symposium on Rock Mechanics & the 6th Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, pp. 893–898, Japanese Committee for Rock Mechanics, Tokyo.

(11) E. Ishii (2015)：Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.120, pp.2220-2241.

(12) E. Ishii(2020): A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, Engineering Geology, vol.275, pp.105748_1 - 105748_12.

(13) E. Ishii (2017)：Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.100, pp.10-22.

(14) E. Ishii (2018)：Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, Water Resources Research, vol.54, pp.3335-3356.
(15) 青柳和平，陳友晴，石井英一，櫻井彰孝，宮良信勝，石田毅（2020）：幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の可視化手法の検討（その2）（共同研究），JAEA-Research 2019-011，50p.
(16) M. Terashima, T. Endo and K. Miyakawa(2019)：Determination of humic substances in deep groundwater from sedimentary formations by the carbon concentration-based DAX-8 resin isolation technique, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.57, pp.380-387.
(17) 望月陽人，笹本広，馬場大哉，生垣加代子（2020）：少量試料に適用可能な簡易分析法に基づく深部地下水中の溶存有機物の特性評価，陸水学雑誌，81巻，pp.153-166.
(18) 雑賀敦（2020）：幌延深地層研究計画 平成30年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2019-018, 122p.
(19) 望月陽人，宮川和也，笹本広（2020）：幌延深地層研究センター350 m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（2016～2018 年度），JAEA-Data/Code 2019-014，56p.
(20) K. Pruess, A. Battistelli(2002)：TMVOC, a numerical simulator for three-phase non-isothermal flows of multicomponent hydrocarbon mixtures in saturated-unsaturated heterogeneous media, LBNL-49375, Lawrence Berkeley National Lab., Berkeley, CA.
(21) K. Miyakawa, K. Aoyagi, H. Sasamoto, T. Akaki, H. Yamamoto(2019)：The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations, The Extended Abstract of the ISRM 2019 Specialized Conference, 6p.
(22) A. Mochizuki, E. Ishii, K. Miyakawa, H. Sasamoto(2020)：Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift excavation, Engineering Geology, vol.267, 105496.
(23) 大山隆弘，窪田健二（2018）堆積性軟岩地域のトンネル坑壁表面の掘削後の変化−幌延深地層研究施設での調査−，応用地質学会平成30年度研究発表会，札幌市.
(24) 中山雅，佐野満昭，真田祐幸，杉田裕（編）（2009）：“幌延深地層研究計画　平成20年度調査研究成果報告”，JAEA-Research 2009-032，68p.
(25) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所（2020）：平成31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 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発 報告書.
(26) F.J. Pearson, D. Arcos, A. Bath, J.Y. Boisson, A.M. Fernandez, H.E. Gäbler, E. Gaucher, A. Gautschi, L. Griffault, P. Hernan and H.N. Waber.(2003)：Mont Terri project − Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Federal Office for Water and Geology Report 5, Bern, Switzerland.
(27) 馬原保典，中田英二，大山隆弘，宮川公雄，五十嵐敏文，市原義久，松本裕之(2006)：化石海水の同定法の提案－太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価－，地下水学会誌，48巻，1号，pp.17-33.
(28) M. Mazurek, P. Alt-Epping, A. Bath, T. Gimmi, and H.N. Waber (2009)：Natural tracer profiles across argillaceous formations: The CLAYTRAC project. OECD/NEA Report 6253, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
(29) 日本原子力研究開発機構（2016）：平成27年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書，265p.
(30) 日本原子力研究開発機構（2017）：平成28年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書，230p.

(31) 花室孝広(編)(2016):幌延深地層研究計画　平成27年度調査研究成果報告,JAEA-Review 2016-022, 92p.
(32) E. Ishii, Y. Hashimoto and D. Inagaki(2015):Washout of clay-rich gouge in a pre-grouted fault zone and increase in groundwater inflow during tunnel excavation in Neogene siliceous mudstone (Horonobe, Japan), Proceedings of 10th Asian Regional Conference of IAEG, Tp3-P02.
(33) E. Ishii(2019):Protolith identification of bedding-parallel, smectite-bearing shear zones in argillaceous and siliceous marine sediments: Discriminating between tephra-derived shear zones and host-rock-derived fault gouges, Engineering Geology, vol.259, 105203.
(34) E. Ishii and A. Furusawa(2017):"Detection and correlation of tephra-derived smectite-rich shear zones by analyzing glass melt inclusions in mineral grains", Engineering Geology, vol.228, pp.158-166.
(35) N. Taniguchi, H. Suzuki, M. Kawasaki, M. Naito, M. Kobayashi, R. Takahashi and H. Asano (2011):Propagation behaviour of general and localised corrosion of carbon steel in simulated groundwater under aerobic conditions, Corrosion Engineering Science and Technology, Vol. 46, No. 2, pp. 117-123.
(36) 原子力環境整備促進・資金管理センター(2020):平成31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 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発報告書.
(37) 原子力環境整備促進・資金管理センター(2010):平成21年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書, 53p.
(38) 原子力環境整備促進・資金管理センター(2011):平成 22 年度原子力施設立地推進調整委託費(地層処分実規模設備整備事業)報告書, 75p.
(39) 原子力環境整備促進・資金管理センター(2012):平成23年度原子力施設立地推進調整事業(地層処分実規模設備整備事業)報告書, 87p.
(40) 原子力環境整備促進・資金管理センター(2013):平成24年度原子力発電施設広聴・広報等事業(地層処分実規模設備整備事業)報告書, 98p.
(41) 原子力環境整備促進・資金管理センター(2014):平成25年度原子力発電施設広聴・広報等事業(地層処分実規模設備事業)報告書, 79p.
(42) 原子力環境整備促進・資金管理センター(2015):平成26年度原子力発電施設広聴・広報等事業(地層処分実規模設備運営等事業)報告書, 41p.
(43) 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人(2016):幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験計測データ集(平成27年度), JAEA-Data/Code 2016-005, 55p.
(44) 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(2020):平成31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(地層処分施設閉鎖技術確証試験)報告書, 24p.
(45) 花室孝広, 雑賀敦(編)(2019):幌延深地層研究計画　平成29年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2018-027, 125p.
(46) 花室孝広(編)(2017):幌延深地層研究計画　平成28年度調査研究成果報告,JAEA-Review 2017-025, 100p.
(47) M. Takeda, E. Ishii, H. Ohno, Y. Tachi, T. Ito, and K. Nemoto: Evaluating the Mass Transport Characteristics for Fault Zone in Mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, 17th International Conference on the Chemistry and Migration

Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, Japan, PB-5-2, 2019.
(48) 日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター（2020）：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　ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書，3-33p-3-38p
(49) 雑賀敦（編）（2020）：幌延深地層研究計画　平成30年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2019-018，122p.
(50) 玉澤聡，上野晃生，玉木秀幸，玉村修司，村上拓馬，木山保，猪股英紀，宮川和也，長沼毅，金子勝比古（2019）：陸域深部地下珪藻質泥岩層から単離した鉄還元能を有する新規Bacteroidetes門発酵性細菌の機能解析，日本微生物生態学会 第33回大会，02-12.

付録

（令和元年度外部発表）

著者アルファベット順に記載

青柳和平（編）（2019）：幌延深地層研究計画　平成 31 年度調査研究計画，JAEA-Review 2019-008, 20p.

Aoyagi, K., Chen, Y., Ishii, E., Sakurai, A. and Ishida, T. (2019): Visualization of fractures induced around the gallery wall in Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM 2019 and REIF 2019) (USB Flash Drive), 6p.

青柳和平，陳友晴，石井英一，櫻井彰孝，宮良信勝，石田毅（2020）：幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の可視化手法の検討（その 2）（共同研究），JAEA-Research 2019-011, 50p.

青柳和平，櫻井彰孝，宮良信勝，杉田裕，棚井憲治（2019）：坑道掘削後の岩盤や支保工の長期挙動計測手法の検討；幌延深地層研究センターにおける事例，資源・素材講演集（インターネット），6(2), 7p.

Aoyagi, K., Tokiwa, T., Sato, T. and Hayano, A. (2019): Fracture characterization and rock mass behavior induced by blasting and mechanical excavation of shafts in Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, pp.682-687.

飯野麻里，大沼進，広瀬幸雄，大澤英昭，大友章司（2019）：NIMBY 施設の受容に対する補償の交換フレームの効果と Taboo trade-offs：高レベル放射性廃棄物地層処分場のシナリオ実験，日本リスク研究学会誌, 29(2), pp.95-102.

Ishii, E. (2019): Protolith identification of bedding-parallel, smectite-bearing shear zones in argillaceous and siliceous marine sediments: Discriminating between tephra-derived shear zones and host-rock-derived fault gouges, Engineering Geology, 259, 105203.

石井英一（2019）：従来のパッカーシステムを用いた注入試験による断層帯亀裂の潜在的最大透水量係数の検証と水理力学応答の解析，日本地質学会第 126 年学術大会.

磯さち恵，本島貴之，白瀬光泰，小林正人，中山雅（2019）：幌延地下 URL におけるベントナイト混合土の原位置機械吹付け施工試験，土木学会 2019 年度全国大会第 74 回年次学術講演会.

Iwatsuki, T. and Ishii, E. (2019): Comprehensive study of the migration property in representative rock of Japan at underground research laboratories, Migration 2019, B5-1.

木村駿，木野田君公，杉田裕，森岩寛稀，丹生屋純夫，志村友行（2020）：埋め戻し材との力学的相互作用を考慮した緩衝材の膨潤挙動に関する検討，日本原子力学会 2020 年春の年会.

木村駿，中山雅，木野田君公，棚井憲治，丹生屋純夫，志村友行，深谷正明（2019）：人工バリ

ア性能確認試験における緩衝材膨出センサーを用いた膨出量評価，日本原子力学会 2019 年秋の大会.

Kubota, K., Aoyagi, K. and Sugita, Y. (2019): Evaluation of the excavation disturbed zone of sedimentary rock in the Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa (USB Flash Drive), pp.729-733.

Martikainen, J., Tsuji, M., Nakashima, H., Okihara, M., Aoyagi, K. and Sato, T. (2019): Characterisation of colloidal silica grout under saline groundwater - Penetration theory and injection tests a frnture test system, Nordic Grouting Symposium 2019.

松岡稔幸，宮川和也，早野明，中安昭夫，笹本広，増岡健太郎，山本肇（2019）：幌延地域を事例とした天水浸透領域評価のための予察解析，日本地質学会第 126 年学術大会.

Matsuura, Y., Hayano, A., Itakura, K. and Suzuki, Y. (2019): Estimation of planes of a rock mass in a gallery wall from point cloud data based on MD PSO, Applied Soft Computing, 84, pp.105737_1 - 105737_9.

Miyakawa, K., Aoyagi, K., Sasamoto, H., Akaki, T. and Yamamoto, H. (2019): The effect of dissolved gas on rock desaturation in artificial openings in geological formations， Proceedings of 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM 2019 and REIF 2019) (USB Flash Drive), 6p.

宮川和也，女澤徹也，望月陽人，笹本広（2020）：幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ（2017 年度～2019 年度），JAEA-Data/Code 2020-001, 41p.

宮良信勝，松岡稔幸（2020）：幌延深地層研究計画（第 2 段階）における地震観測データ集，JAEA-Data/Code 2019-013, 8p.

Mochizuki, A., Ishii, E., Miyakawa, K.and Sasamoto, H. (2020): Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift excavation, Engineering Geology, 267, 105496.

望月陽人，宮川和也，笹本広（2020）：幌延深地層研究センター350m 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（2016～2018 年度），JAEA-Data/Code 2019-014, 56p.

望月陽人，笹本広，生垣加代子（2019）：深部地下水中の溶存有機物の簡易特性評価，日本陸水学会第 84 回大会.

望月陽人，笹本広，生垣加代子（2020）：深部地下水中の溶存有機物の簡易特性評価; 北海道幌延地域の事例，日本原子力学会北海道支部第 37 回研究発表会.

森拓雄，丹生屋純夫，小林正人，西村政展，中山雅（2019）：ベントナイトペレットによる PEM 隙間充填技術の実規模実証試験，土木学会 2019 年度全国大会第 74 回年次学術講演会.

Nakata, K., Hasegawa, T., Solomon, D.K., Miyakawa, K., Tomioka, Y., Ota, T., Matsumoto, T., Hama, K. Iwatsuki, T., Ono, M. and Marui, A. (2019): Degassing behavior of noble gases from groundwater

during groundwater sampling, Applied Geochemistry, 104, pp.60-70.

中山雅，大野宏和（2019）: 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, 132p.

中山雅，雑賀敦，木村駿，望月陽人，青柳和平，大野宏和，宮川和也，武田匡樹，早野明，松岡稔幸，櫻井彰孝，宮良信勝，石井英一，杉田裕，笹本広，棚井憲治，佐藤稔紀，大澤英昭，北山彩水，谷口直樹（2020）: 幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階（第 3 段階: 必須の課題 2015-2019 年度）研究成果報告書，JAEA-Research 2019-013, 276p.

中山雅，棚井憲治（2020）: モニタリング機器の放射線影響に関する検討，JAEA-Review 2019-032, 32p.

Nara, Y., Kato, M., Sato, T., Kono, M. and Sato, T. (2019): Permeability Measurement for Macro-Fractured Granite Using Water Including Clay，The 5th ISRM Young Scholar's Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future.

西柊作，斉藤拓巳，渡辺勇輔，宮川和也（2020）: 蛍光分光測定と多変量解析を用いた深部地下天然有機物の分類，日本原子力学会 2020 年春の年会.

丹生屋純夫，畑浩二，鵜山雅夫，青柳和平，棚井憲治（2020）: 気液二相流実験による AE 発生メカニズムの解明, 第 47 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集（インターネット）, pp.92-97.

野上利信，星野雅人，徳永博昭，堀越秀彦（2019）: 幌延深地層研究センターゆめ地創館を活用したリスク・コミュニケーションについて（2017 年度），JAEA-Review 2019-004, 116p.

Ogata, S., Yasuhara, H., Aoyagi, K. and Kishida, K. (2019): Coupled THMC analysis for predicting hydro-mechanical evolution in siliceous mudstone, Proceedings of 53rd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (USB Flash Drive), 6p.

大野宏和，武田匡樹，石井英一（2019）: 幌延 URL における稚内層深部領域の断層を対象とした原位置物質移行試験, 日本原子力学会バックエンド部会第 35 回バックエンド夏期セミナー.

大沼進，横山実紀，広瀬幸雄，大澤英昭，大友章司（2019）: 無知のヴェールによる手続きの公平さが社会的受容に及ぼす効果，第 60 回日本社会心理学会.

大沼進，横山実紀，広瀬幸雄，大澤英昭，大友章司（2019）: 無知のヴェールを用いた手続的公正に基づく社会的決定：日本おける高レベル放射性廃棄物地層処分候補地選定を題材とした仮想シナリオ実験，日本リスク研究学会第 32 回年次大会.

大澤英昭，野上利信，星野雅人，徳永博昭，堀越秀彦（2019）: 幌延深地層研究センターゆめ地創館および地下研究施設を活用したリスク・コミュニケーション, 原子力バックエンド研究（CD-ROM），26(1), pp.45-55.

大澤英昭，大友章司，広瀬幸雄，大沼進（2019）: 高レベル放射性廃棄物地層処分施設の立地調査受容に信頼と手続き的公正が及ぼす影響，人間環境学研究，17(1), pp.59-64.

Okazaki, Y., Hayashi, H., Aoyagi, K., Morimoto, S. and Shinji, M. (2019): Effects of Heterogeneity of Geomechanical Properties Tunnel Support Stress during Tunnel Excavation, Proceedings of 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM 2019 and REIF 2019) (USB Flash Drive), 6p.

雑賀敦（編）（2020）：幌延深地層研究計画; 平成 30 年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2019-018, 122p.

酒井利啓，松岡稔幸（2019）：幌延深地層研究計画における広域スケールを対象とした地質構造モデルの構築データ集，JAEA-Data/Code 2019-007, 29p.

佐俣洋一，石井英一（2020）：幌延深地層研究計画における 350m 試験坑道掘削影響領域を対象とした透水試験（その 2），JAEA-Data/Code 2019-020, 69p.

佐俣洋一，岩田樹哉，石井英一（2019）：幌延深地層研究計画における PB-V01 孔を利用した原位置透水試験，JAEA-Data/Code 2019-008, 19p.

佐藤伸，大野宏和，棚井憲治，山本修一，深谷正明，志村友行，丹生屋純夫（2019）：熱・流体・応力連成解析による水蒸気が及ぼす再冠水時のバリア性能への影響，第 13 回環境地盤工学シンポジウム.

Sato, S., Ohno, H., Tanai, K., Yamamoto, S., Fukaya, M., Simura, T. and Niunoya, S. (2019): Influence of pore water vaporization on saturation process in the buffer material coupled Thermo Hydro Mechanical analysis, DECOVALEX 2019 Symposium on Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal and Subsurface Engineering Applications.

Sato, T., Aoyagi, K., Miyara, N., Aydan, Ö., Tomiyama, J. and Morita, T. (2019): The dynamic response of Horonobe Underground Research Center during the 2018 June 20 earthquake, Proceedings of 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, 7-11 May, 2019, Okinawa, JAPAN, pp.640-645.

Savage, D., Wilson, J., Benbow, S., Sasamoto, H., Oda, C., Walker, C., Kawama, D. and Tachi, Y. (2019): Natural systems evidence for the effects of temperature and the activity of aqueous silica upon montmorillonite stability in clay barriers for the disposal of radioactive wastes, Applied Clay Science, 179, pp.105146_1-105146_10.

Tachi, Y., Takeda, M., Ohno, H., Ito, T., Sato, T. and Nemoto, K. (2019): In situ diffusion experiment in mudstone at the Horonobe URL: Comparative study between in situ and laboratory tests, 17th International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, Japan, PB-5-3.

Takeda, M., Ishii, E., Ohno, H., Tachi, Y., Ito, T. and Nemoto, K. (2019): Evaluating the mass transport characteristics for fault zone in mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, 17th International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, Japan, PB-5-2.

玉澤聡，上野晃生，玉木秀幸，玉村修司，村上拓馬，木山保，猪俣英紀，宮川和也，長沼毅，金子勝比呂（2019）：陸域深部地下珪藻質泥岩層から単離した鉄還元能を有する新規 Bacteroidetes 門発酵性細菌の機能解析，日本微生物生態学会第 33 回大会.

Tsuji, M., Aoyagi, K., Nakajima, H., Okihara, M. and Sato, T. (2019): Characterisation of colloidal silica grout under saline groundwater - Overrall results for 3-year research project, Nordic Grouting Symposium 2019.

辻正邦，沖原光信，中島均，齋藤亮，青柳和平，佐藤稔紀（2020）：海水条件下の岩盤亀裂に適した溶液型グラウトの特性取得，第 47 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集（インターネット），pp.266-271.

八尋英恵，本島貴之，佐ノ木哲，宮川和也（2019）：トモグラフィによるメタンガス濃度分布の評価，土木学会 2019 年度全国大会第 74 回年次学術講演会.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）