

幌延深地層研究計画
平成 30 年度調査研究成果報告

令和元年 7 月

日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

目 次

| | |
|---------------------------------|-----|
| 1. はじめに..... | 1 |
| 2. 平成 30 年度の主な調査研究の成果..... | 3 |
| 3. 地層科学研究..... | 8 |
| 3.1 地質環境調査技術開発 | 8 |
| 3.2 深地層における工学的技術の基礎の開発..... | 58 |
| 3.3 地質環境の長期安定性に関する研究..... | 66 |
| 4. 地層処分研究開発..... | 72 |
| 4.1 処分技術の信頼性向上 | 72 |
| 4.2 安全評価手法の高度化 | 112 |
| 5. 地下施設の維持管理..... | 122 |
| 5.1 地下施設の維持管理 | 122 |
| 5.2 掘削土(ズリ)の管理 | 123 |
| 5.3 排水の管理 | 124 |
| 6. 環境調査..... | 125 |
| 6.1 排水量および水質調査結果..... | 125 |
| 6.2 幌延深地層研究センター周辺の環境影響調査結果..... | 136 |
| 7. 安全確保の取組み..... | 140 |
| 8. 開かれた研究..... | 141 |
| 8.1 国内機関との研究協力 | 141 |
| 8.2 国外機関との研究協力 | 148 |
| 引用文献..... | 149 |

図目次

| | | |
|------|--|----|
| 図 1 | 幌延深地層研究計画の全体スケジュール | 2 |
| 図 2 | 平成 30 年度の主な調査研究 | 3 |
| 図 3 | 研究所用地における主な施設と観測装置の配置 | 5 |
| 図 4 | ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所 | 6 |
| 図 5 | 深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所 | 6 |
| 図 6 | 解析モデルと解析ステップ | 10 |
| 図 7 | 褶曲形成後の最大主応力の分布 | 10 |
| 図 8 | 褶曲形成後のトレスカ応力の分布 | 11 |
| 図 9 | 断層帯中の亀裂がとりうる透水性の上限値と DI の関係 | 13 |
| 図 10 | 水圧上昇によって誘発される断層のせん断変形（逆断層の例） | 13 |
| 図 11 | 水圧擾乱試験に用いたボーリング孔の位置 | 13 |
| 図 12 | 水圧擾乱試験を行った正断層の孔壁画像 (a) とコア写真 (b) ~ (d) | 14 |
| 図 13 | 水圧擾乱試験中の水圧、パッカー圧および注入流量 | 14 |
| 図 14 | せん断破壊前後における断層の透水性の比較 | 15 |
| 図 15 | 地下施設からの湧水量と HDB-6 孔の稚内層における地下水圧の観測結果 | 16 |
| 図 16 | 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 | 17 |
| 図 17 | 試験坑道 3 掘削直後の坑道周辺の有効応力分布 | 18 |
| 図 18 | 試験坑道 3 における透水試験のレイアウト | 19 |
| 図 19 | 掘削影響領域において計測された透水係数と、解析により予測された透水係数の上限値の範囲 | 19 |
| 図 20 | 坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化 | 21 |
| 図 21 | WR-V-98.0 および WR-V-168.0 の地下水における塩分濃度と酸素同位体比の関係 | 22 |
| 図 22 | 幌延地域の水の酸素同位体比 ($\delta^{18}O$) と水素同位体比 (δ^2H) | 24 |
| 図 23 | 坑壁からの酸素の拡散に関するモデル計算結果 | 25 |
| 図 24 | 13-350-C06 孔のレイアウト（水平断面） | 26 |
| 図 25 | EDZ（掘削により損傷した領域）の化学環境に関する概念モデル | 26 |
| 図 26 | 0.45 μm のフィルター上に観察された粒子などの例 | 28 |
| 図 27 | 0.1 μm のフィルター上に観察された粒子 | 29 |
| 図 28 | 幌延の地表水・地下水中腐植物質の蛍光特性の測定結果 | 30 |
| 図 29 | 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 | 32 |
| 図 30 | 内空変位の計測結果と解析結果の比較 | 32 |
| 図 31 | 水圧擾乱試験における試験区間の短縮と孔口側パッカー圧の低下の関係性を確かめるために行った実験 (a) とその結果 (b) | 34 |
| 図 32 | 単孔のボーリング調査により亀裂の連結性を評価する方法論 | 35 |
| 図 33 | 透水試験時に認められる水圧挙動の例 | 35 |
| 図 34 | 稚内層深部に推定される亀裂の連結性が限定的な領域 | 36 |
| 図 35 | 亀裂の連結性と地下水の水圧・水質データとの比較 | 36 |
| 図 36 | 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 | 37 |
| 図 37 | C05 における水圧モニタリング結果 | 38 |
| 図 38 | C06 における水圧モニタリング結果 | 38 |
| 図 39 | C07 における水圧モニタリング結果 | 39 |

| | | |
|------|---------------------------------------|----|
| 図 40 | C08 における水圧モニタリング結果 | 39 |
| 図 41 | C09 における水圧モニタリング結果 | 40 |
| 図 42 | 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 | 41 |
| 図 43 | C05 の区間 2 における水質モニタリング結果 | 42 |
| 図 44 | 地下水の pH-Eh ダイアグラム | 44 |
| 図 45 | 地中変位計設置状況写真 | 45 |
| 図 46 | 鋼製支保工応力計設置例 | 46 |
| 図 47 | 計測器設置位置図 | 46 |
| 図 48 | 地中変位計の計測結果 | 47 |
| 図 49 | 鋼製支保工応力計の計測結果 | 48 |
| 図 50 | マルチ光計測プローブ設置レイアウト | 49 |
| 図 51 | 割れ目の発生に関連した AE の発生分布図 | 50 |
| 図 52 | 浜里における採水結果とその解釈 | 51 |
| 図 53 | 岩石侵食段丘の概念図と分析手法の例 | 52 |
| 図 54 | 長期注水試験における水頭変化の実測値と浸透流解析による解析値 | 54 |
| 図 55 | 大曲断層の透水性および海水準の違いによる解析結果の比較例 | 55 |
| 図 56 | 幌延での広域地下水流動概念の変遷に係る知見の整理例 | 57 |
| 図 57 | 地震計設置位置 | 58 |
| 図 58 | 北海道地域の震央分布 | 59 |
| 図 59 | 幌延深地層研究センター周辺の震央分布 | 59 |
| 図 60 | 平成 30 年 6 月 20 日の地震波における周波数別の振幅 | 60 |
| 図 61 | 溶液型グラウトの配合 | 61 |
| 図 62 | 一軸圧縮強度と養生時間の関係 | 62 |
| 図 63 | 養生水中のシリカイオン溶出量の経時変化の比較 | 63 |
| 図 64 | 東立坑深度 310～346m で採用した支保パターンの断面図 | 64 |
| 図 65 | 東立坑深度 310～346m における弾性波速度の分布 | 65 |
| 図 66 | 解析の対象領域 | 66 |
| 図 67 | 大曲断層の運動に伴う地表面の変位量 | 68 |
| 図 68 | 地下施設に設置した地震計 | 69 |
| 図 69 | 抽出したイベントと各成分・各観測点での波形 | 70 |
| 図 70 | 表 2 のイベント No. 6 の波形図 | 71 |
| 図 71 | 人工バリア性能確認試験の概念図 | 72 |
| 図 72 | 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 | 73 |
| 図 73 | 緩衝材および埋め戻し材への注水量の経時変化 | 74 |
| 図 74 | 解析結果との比較の例（緩衝材） | 76 |
| 図 75 | 解析結果との比較の例（緩衝材：比抵抗トモグラフィ） | 77 |
| 図 76 | 解析結果との比較の例（埋め戻し材） | 77 |
| 図 77 | 解析モデルと出力位置 | 78 |
| 図 78 | CODE_BRIGHT による解析結果 | 79 |
| 図 79 | オーバーパック腐食試験の概念図 | 80 |
| 図 80 | オーバーパック腐食試験における注水状況 | 81 |
| 図 81 | 緩衝材 6 段目の計測センサー配置 | 81 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 図 82 | 分極抵抗・液抵抗の解析値 | 82 |
| 図 83 | オーバーパック腐食試験解体フロー | 83 |
| 図 84 | 試験体取り出し状況と緩衝材の解体作業状況 | 83 |
| 図 85 | 腐食生成物の採取 | 84 |
| 図 86 | 酸洗処理後の模擬オーバーパック | 85 |
| 図 87 | 腐食量の 3 次元計測結果 | 85 |
| 図 88 | 計算モデル | 89 |
| 図 89 | 解析により求めた緩衝材中の吸収線量 | 90 |
| 図 90 | 140m 調査坑道の採水装置から採取した地下水の pH の経時変化 | 92 |
| 図 91 | 140m 調査坑道から採取したコア試料中の Ca 含有率 | 93 |
| 図 92 | コアサンプリングの位置と各部位の密度 | 97 |
| 図 93 | 試験孔の配置 | 100 |
| 図 94 | 原位置の環境条件の確認状況（試験孔の湧水量測定） | 100 |
| 図 95 | 試験孔の湧水量測定結果 | 101 |
| 図 96 | 緩衝材と埋め戻し材の相互作用の整理 | 105 |
| 図 97 | 膨潤変形試験における緩衝材の膨潤率の測定結果 | 106 |
| 図 98 | 膨潤挙動小規模試験の装置概要図 | 106 |
| 図 99 | 膨潤挙動小規模試験の注水量および変位量 | 107 |
| 図 100 | EDZ シーリング試験のレイアウト図 | 108 |
| 図 101 | パイロット孔ボーリングコアの写真 | 108 |
| 図 102 | 試験坑道 3 の底盤下の構造 | 109 |
| 図 103 | 膨潤状況確認試験の実施状況 | 110 |
| 図 104 | 地中無線伝送システムの装置構成イメージ | 111 |
| 図 105 | 地中無線装置による計測データの例 | 112 |
| 図 106 | 原位置拡散試験における (a) 濃度減衰データ、(b) 濃度プロファイルデータ | 113 |
| 図 107 | 割れ目の有無によるトレーサー濃度の減衰傾向の比較 | 115 |
| 図 108 | トレーサーの移行に関与した割れ目分布 (a)、割れ目表面のトレーサー濃度分析結果の一例 (b) | 116 |
| 図 109 | トレーサー移行経路の概念 | 117 |
| 図 110 | モデル概念、支配方程式および境界条件 | 118 |
| 図 111 | (a) セシウムの定常入力条件における解析結果、(b) 割れ目表面のセシウム濃度分布に対する解析結果 | 119 |
| 図 112 | ダイポール試験中の注水孔と揚水孔の間隙水圧差 | 120 |
| 図 113 | 揚水孔で観測されたウラニンの濃度比 | 121 |
| 図 114 | 最短経路を移行するトレーサーのイメージ図の例 | 121 |
| 図 115 | 掘削土（ズリ）置場の構造 | 123 |
| 図 116 | 排水系統と各水質分析用試料の採取地点 | 125 |
| 図 117 | 地下施設からの排水の処理フローと試料採取点 | 127 |
| 図 118 | 天塩川の調査地点 | 129 |
| 図 119 | 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の調査地点 | 131 |
| 図 120 | 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の調査地点 | 133 |
| 図 121 | 環境調査実施場所 | 136 |

表目次

| | | |
|------|---------------------------------------|-----|
| 表 1 | 幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震 | 60 |
| 表 2 | 1 月 26 日 11:30~12:30 の間で抽出されたイベント | 70 |
| 表 3 | 物質組成 (ガラス) | 87 |
| 表 4 | 物質組成 (空気) | 87 |
| 表 5 | 物質組成 (オーバーパック) | 87 |
| 表 6 | 物質組成 (緩衝材) | 88 |
| 表 7 | 本検討で対象とした計測機器で使用されている材料対放射線性の検討結果 | 91 |
| 表 8 | 隙間充填試験の目標値 | 95 |
| 表 9 | シーリングシステムに求める安全機能の整理 | 102 |
| 表 10 | シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼすと考えられるプロセスと因子の関係 | 104 |
| 表 11 | 割れ目表面におけるトレーサーの最大検出濃度 | 116 |
| 表 12 | トレーサー到達までの時間 | 121 |
| 表 13 | 天塩川への排水量 | 126 |
| 表 14 | 地下施設からの排水にかかる水質調査結果 | 128 |
| 表 15 | 天塩川の水質調査結果 | 130 |
| 表 16 | 掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果 | 132 |
| 表 17 | 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 | 134 |
| 表 18 | 浄化槽排水の水質調査結果 | 135 |
| 表 19 | 清水川の水質調査結果 | 137 |
| 表 20 | 確認された重要種 (魚類) | 139 |

写真目次

| | | |
|-------|----------------------------------|-----|
| 写真 1 | 緩衝材定置試験の公開の様子 | 94 |
| 写真 2 | 緩衝材可視化試験の状況 | 95 |
| 写真 3 | 下部狭隘部に充填したペレット (左) とスクリュコンベア (右) | 96 |
| 写真 4 | スクリュコンベアの設置状況 (左) と充填後の隙間 (右) | 96 |
| 写真 5 | 吹付け試験の様子 (左) とコアサンプリング (右) | 97 |
| 写真 6 | 隙間充填試験前後の様子 (試験坑道 2) | 97 |
| 写真 7 | スカフォード (吊り足場) 巻き上げ機の点検 | 122 |
| 写真 8 | 消火器置場のメンテナンス (錆落とし) | 122 |
| 写真 9 | 掘削土 (ズリ) 置場 | 123 |
| 写真 10 | 排水処理設備 | 124 |
| 写真 11 | 天塩川の採水状況 | 129 |
| 写真 12 | 掘削土 (ズリ) 置場周辺の地下水の採水状況 (A1~A4) | 131 |
| 写真 13 | 清水川の採水状況 | 133 |
| 写真 14 | 清水川の水質調査 | 137 |
| 写真 15 | 生息魚類調査 | 138 |
| 写真 16 | 安全パトロールの状況 | 140 |
| 写真 17 | 安全行事の状況 (安全大会) | 140 |

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（図1）に分けて進めることとしており、全体の期間は20年程度を考えています。

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、

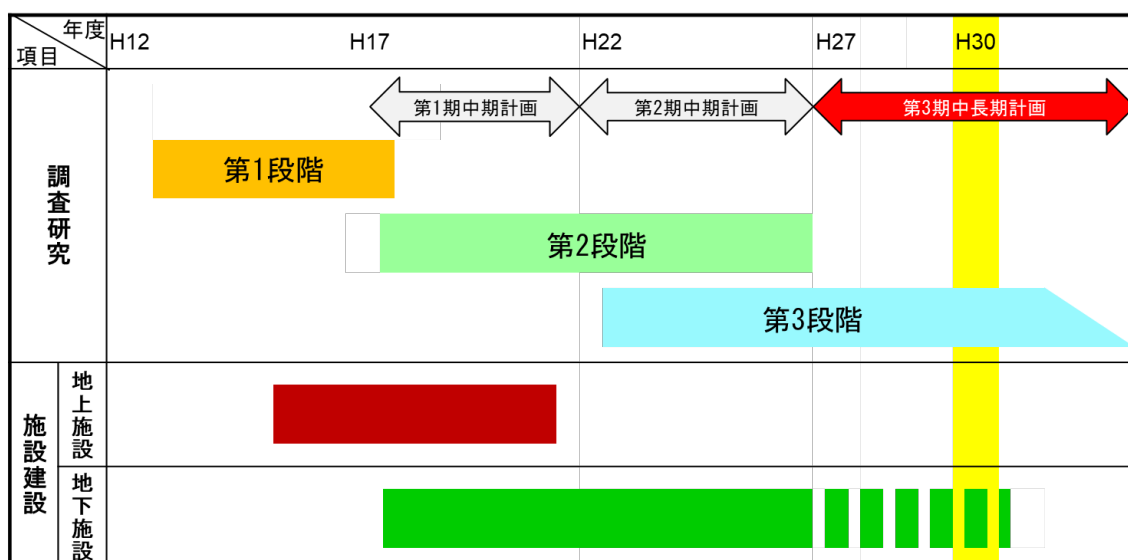
*1：独立行政法人通則法の改正（平成27年4月1日施行）により新たに設定された分類のひとつで、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7年）な目標・計画に基づき行うことにより、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

*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。

「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」および「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の3つの課題(以下、必須の課題)に重点的に取り組むこととしています。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こととしています。

幌延深地層研究計画の全体スケジュール



第1段階：地上からの調査研究段階

第2段階：坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階

第3段階：地下施設での調査研究段階

※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。

図 1 幌延深地層研究計画の全体スケジュール

*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。

2. 平成 30 年度の主な調査研究の成果

平成30年度は、「幌延深地層研究計画 平成30年度調査研究計画」⁽¹⁾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 2）。以下に調査研究の概要を示します。

平成30年度の調査研究



図 2 平成 30 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^{*5}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、

*5：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。

地層処分事業における精密調査段階の後半に必要な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、オーバーパック腐食試験および原位置トレーサー^{*6}試験を実施しています。平成 30 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、熱-水理-力学連成現象の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、計測を終了し、試験体の取り出しおよび分析調査を行いました。また、原位置トレーサー試験では、健岩部、割れ目および断層を対象としてトレーサーを利用した試験を実施し、物質の移行挙動に関する特性を把握しました。

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^{*7}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。平成 30 年度は、人工バリアの定置・品質確認などの実証試験のひとつとして、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）^{*8}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、隙間の充填技術の実証試験を実施しました。また、これまでのグラウト施工実績に基づき、グラウト材の浸透評価手法の検討結果を取りまとめるとともに、海水条件下で使用可能な溶液型グラウト材料の開発を進めました。

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。平成 30 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。また、一時的な水圧上昇が割れ目の水理特性に与える影響を確認

*6：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。

*7：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。

*8：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。

するために、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、東立坑の坑底より掘削したボーリング孔で実施しました。

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 3 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 4 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 5 に示します。

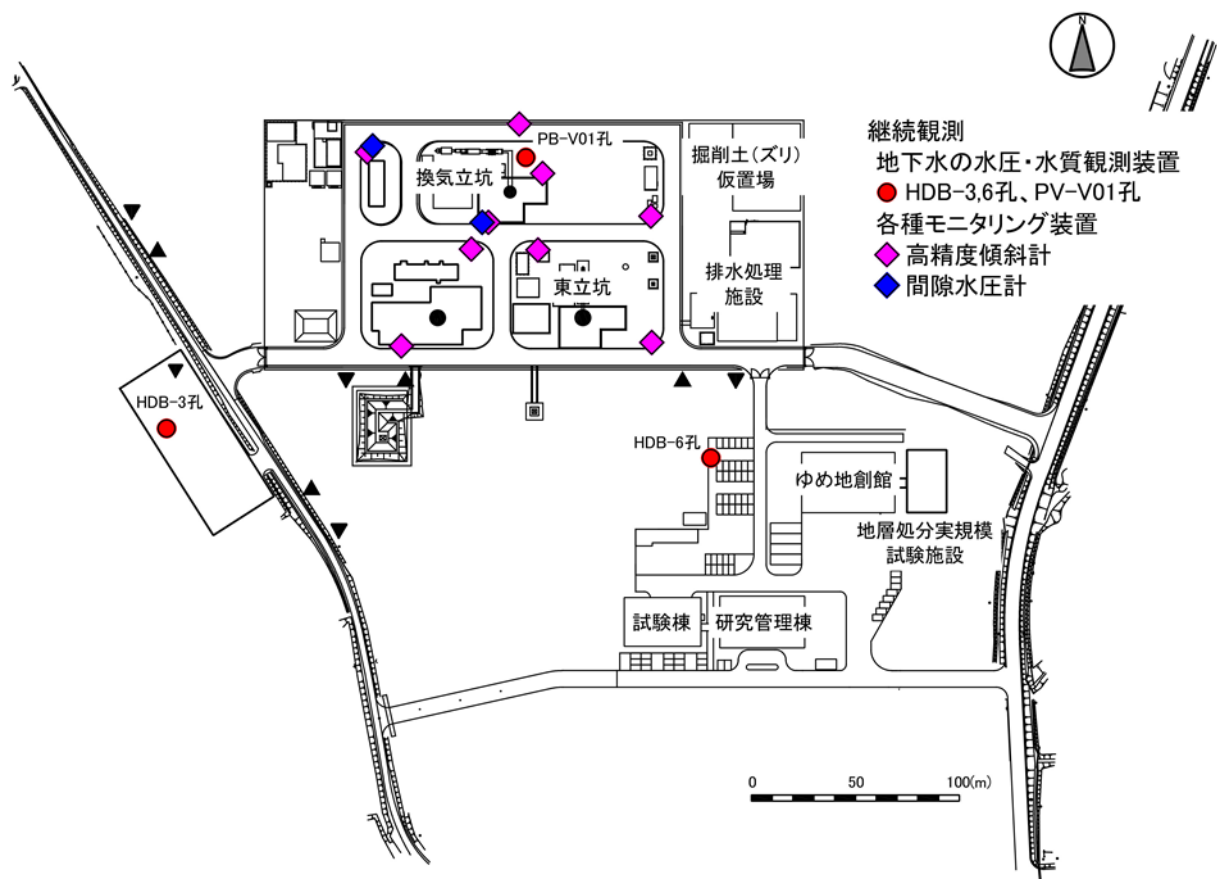


図 3 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

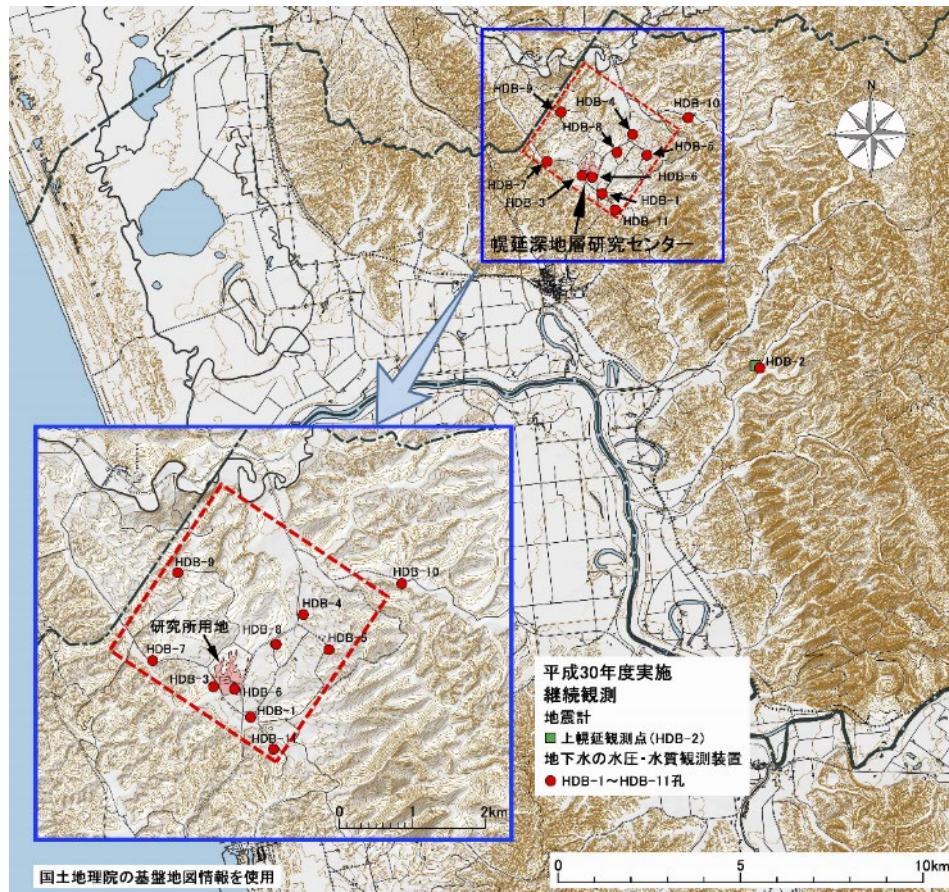


図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

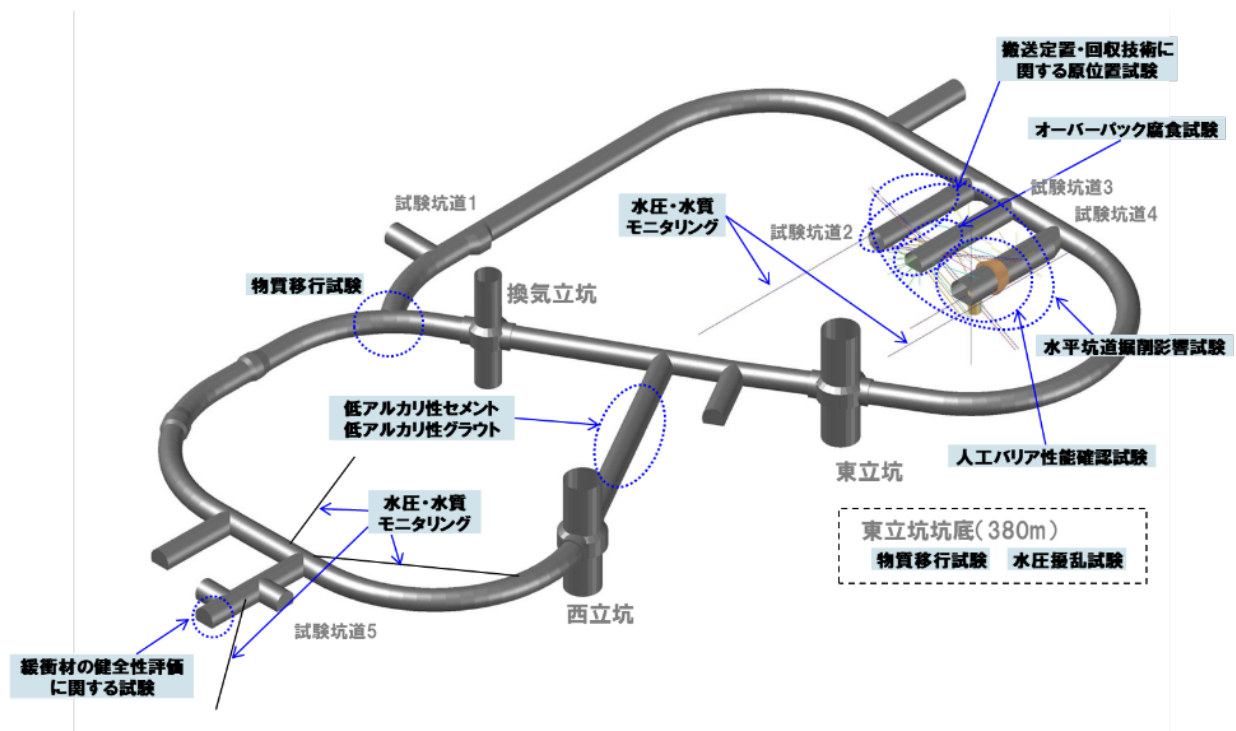


図 5 深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

地下施設の維持管理などとしては、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。

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、平成30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^{*9}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、巻末に平成30年度の外部発表実績を掲載しました。

*9 : <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*10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）とそれに斜行する断層（以下、斜行断層）が分布しています⁽²⁾。層面断層は、褶曲が発達する過程において生じた層面すべりによって形成されたと考えられており⁽³⁾、いくつかの層面断層は厚さ30cm以下の粘土質の介在物を伴っています⁽⁴⁾⁽⁵⁾。地下施設周辺では、4つの明瞭な粘土質の介在物を伴う層面断層が確認されており、坑道壁面の地質観察と坑内でのボーリング調査によって確認された層面断層の位置と方向性に基づき対比させた結果、ひとつの層面断層は少なくとも数十m以上の広がりをも有しており、層面断層同士の間隔は狭いところで20m程度であることが分かっています⁽⁶⁾⁽⁷⁾。一方、主に断層角礫を介在する斜行断層は、層面断層を常に変位させていることから、層面断層に後続して形成されたと解釈されています⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。斜行断層は稚内層中の主要な水みちであるため⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、坑道周辺の地質構造モデルの構築においては、それを対象とした亀裂ネットワークモデルの構築が重要となります。亀裂ネットワークモデルの構築に必要なパラメータの設定において堆積岩を対象とする場合、褶曲の形成やその時に生じた層面すべりが影響する可能性があります。

平成30年度は、褶曲形成時における力学的特性の理解のために数値解析を行いました。ここでは、その結果の一例を紹介します。具体的には、稚内層を対象として褶曲と層面すべりを二次元有限要素でモデル化して弾性解析を行い、褶曲形成後の応力の分布をシミュレーションしました。初期状態のモデル（図 6の上）では、水平な稚内層（厚さ450m）と声間層（厚さ300m）と、それらの地層の下に最終的な褶曲の形状である曲線状剛

*10：岩相や断層などの地質構造の分布や形状を図や数式などを用いて表現したものです。

体を配置しました。さらに、モデル化しなかった上位の地層の重さを表現するため上載荷重を設定しました。シミュレーションでは、水平な地層の下に配置した曲線状剛体を150万年かけて上昇させることで褶曲の形成を表現しました。その際、本来褶曲は水平短縮により形成される構造であることから、同時に地層を水平短縮させました（図 6の下）。隆起量と水平短縮量は、既往研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を参考にして設定しました。シミュレーションでは、例えば、地層中の層面断層の有無を変えることにより、その影響を調べることができます。稚内層中に層面断層が分布しない場合、褶曲の背斜上部では引張応力場、下部では圧縮応力場といったように、明瞭に応力場が分かります（図 7のA）。一方、層面断層が稚内層全域にわたり等間隔で分布し、その間隔が確認されている範囲で最も狭い20m間隔であると仮定した場合は、引張応力場と圧縮応力場の明瞭なコントラストはなくなり、地層全体として圧縮応力場が優勢になります（図 7のB）。また、層面断層が分布しない場合、トレスカ応力^{*11}が全体的に高くなりますが（図 8のA）、層面断層が分布する場合は、トレスカ応力は全体的に低くなり、応力が集中する傾向は見られません（図 8のB）。このことは、層面断層が分布することによって、褶曲の形成によって生じる地層内の応力集中を分散させる効果があることを示唆しています。今後は、この解析結果の詳細な分析として、これまでのボーリング調査や坑道壁面地質観察により明らかにしてきた断層の分布の特徴⁽⁶⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾と照らし合わせることで、稚内層を対象として亀裂ネットワークモデルを構築する際の留意点を整理します。

*11：トレスカ応力とは、応力の強さを表す指標であり、二次元では、最大主応力と最小主応力の差から求められます。

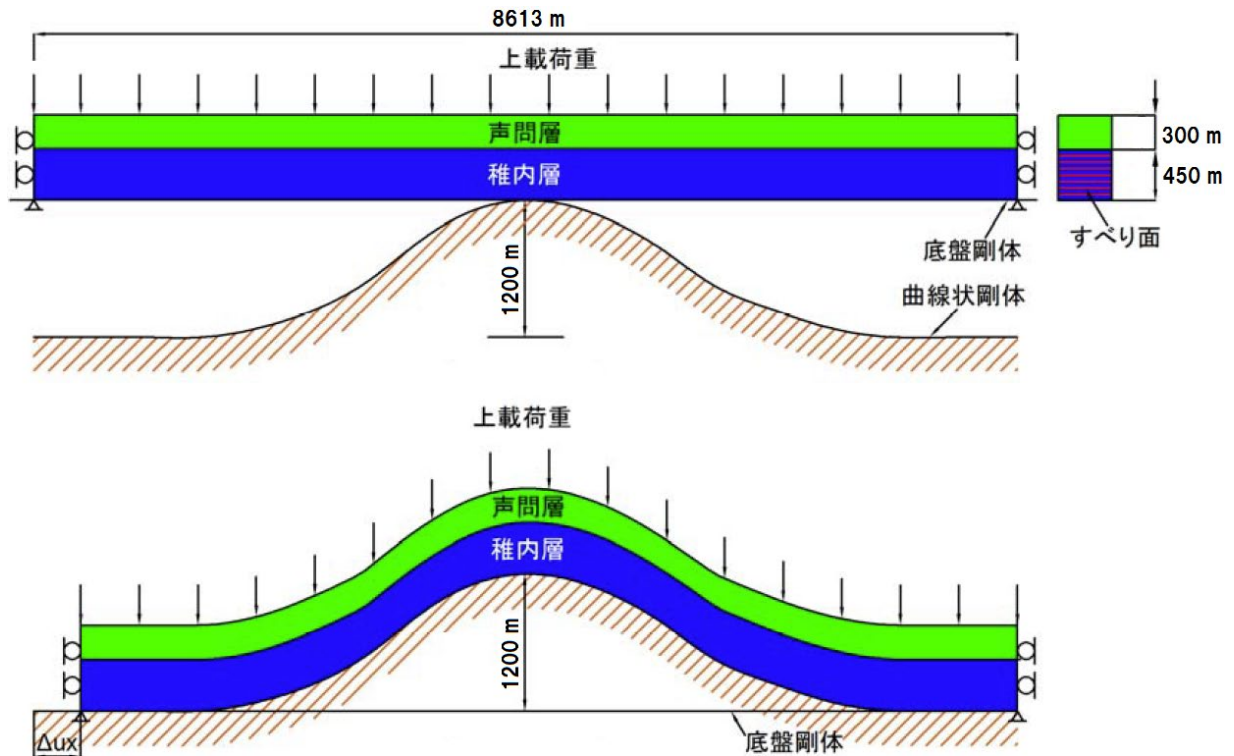
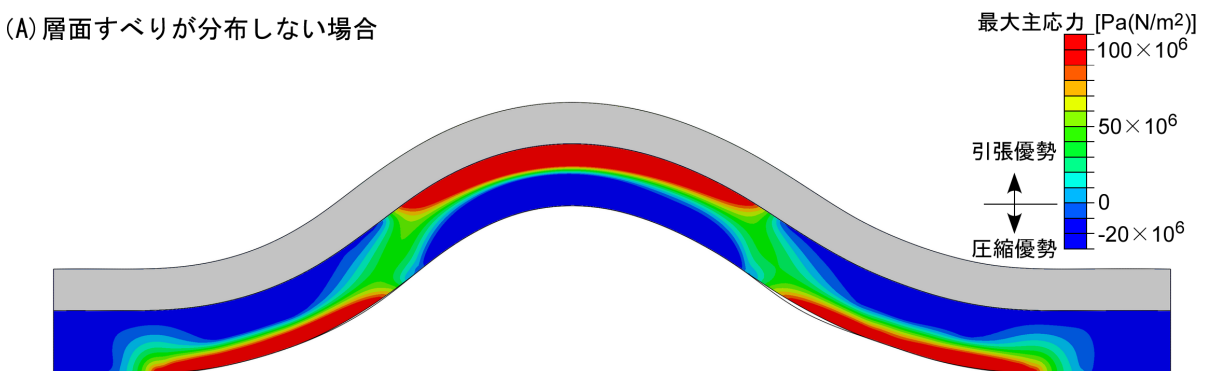


図 6 解析モデルと解析ステップ

上の図は初期状態、下の図は 150 万年かけて短縮と隆起が生じた後の状態を示しています。

(A) 層面すべりが分布しない場合



(B) 層面すべりが20m間隔で分布する場合

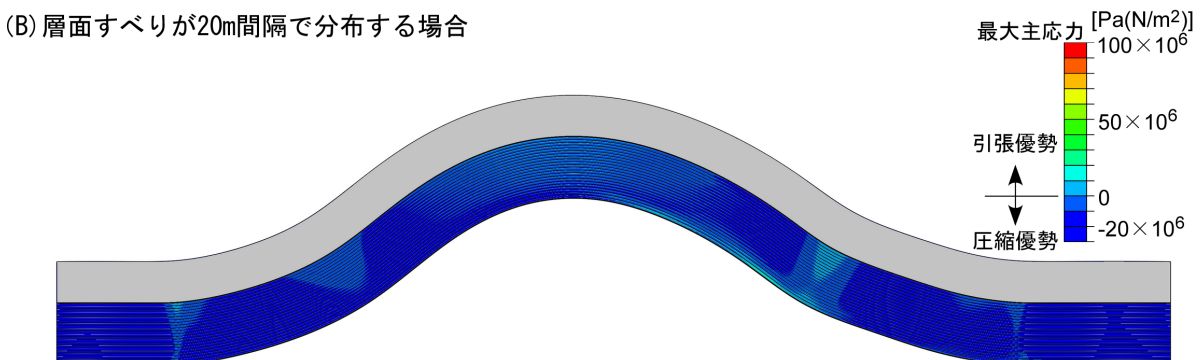
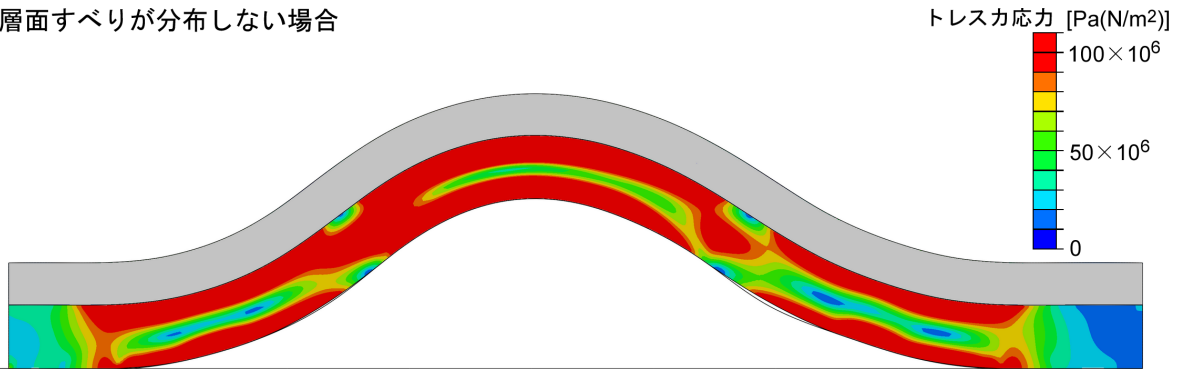


図 7 褶曲形成後の最大主応力の分布

(A) は層面すべりが分布しない場合、(B) は層面すべりが 20m 間隔で分布する場合の結果を示しています。(A) と (B) とともに、稚内層の結果のみ表示しています。

(A) 層面すべりが分布しない場合



(B) 層面すべりが20m間隔で分布する場合

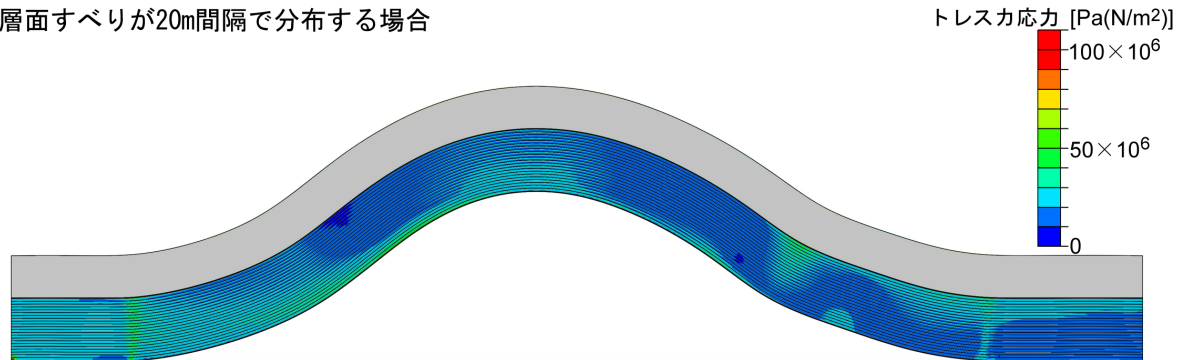


図 8 褶曲形成後のトレスカ応力の分布

(A) は層面すべりが分布しない場合、(B) は層面すべりが 20m 間隔で分布する場合の結果を示しています。(A) と (B) とともに、稚内層の結果のみ表示しています。トレスカ応力は最大せん断ひずみの破壊基準に対応した応力不変量であり、最大主応力と最小主応力の差から求められます。

(2) 岩盤の水理

必須の課題のひとつである「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・応力状態との関係の解明を目指した研究として、断層のせん断^{*12}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）を実施しています。断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係については、これまでにダクティリティインデックス (DI) ^{*13} 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、断層帯中の亀裂がとりう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研究により明らかとなってきています⁽⁹⁾ (図 9)。水圧擾乱試験では、この経験式

*12：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。

*13：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。

が、将来的な断層運動に伴う断層の透水性の変化予測に適用可能かどうかを検証するために、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 10）、その前後の透水性の変化を計測しています。これまで、東立坑の坑底より掘削した鉛直ボーリング孔（図 11）に出現したせん断割れ目や断層を対象に単一のパッカーを用いた水圧擾乱試験を行ってきましたが（図 10(a)）、試験区間の上下にパッカーを設置する方法（図 10(b)）で試験を実施することにより、試験中のパッカー圧の変化を詳細に観測することで試験区間の伸縮量を間接的に推定でき（3.1.2(1)参照）、断層の鉛直成分のずれ（すなわち正断層もしくは逆断層の変位成分）を推定することが可能になります。

平成30年度は、同ボーリング孔の深度99.6m付近に出現した正断層（図 12）を対象にパッカーを二つを設置する方法（図 10(b)）による水圧擾乱試験を行いました。同断層を対象に水圧を段階的に上昇させる注入試験を複数回、連続して実施した結果、高圧注入中に、急激な水圧低下とともに、断層内に不可逆的なせん断破壊（正断層変位）を誘発させることができました（図 13）。この不可逆的なせん断破壊の発生は、上部パッカー圧のみが有意に低下し（図 13）、試験終了後にこの低下分に相当する不可逆的なパッカー圧の変化を確認できたことから判断することができます。この不可逆的なせん断変位量を、パッカー圧の不可逆的な低下量（0.07MPa）と断層の傾斜角から試算すると、数百 μm 以上と推定されます*14。このせん断破壊の前後において、通常の水圧条件で測定した断層の透水性を比較すると、両者に有意な違いは認められず、ともにDIの経験式から推定される透水性の範囲に概ね収まっていることが確認できました（図 14）。この結果は、断層が再活動しても、断層中の亀裂の透水性がDIの経験式を有意に超えて不可逆的に上昇しないとするDIのモデルを支持するものであり、DIの経験式が将来的な断層運動に伴う断層の透水性の変化予測に適用できることを示唆しています。今後は今回得られた結果のより詳細な解析を行う予定です。

*14：一般に、亀裂にせん断変位を与えて亀裂の透水性が上昇する場合、初期の僅かな変位（mm以下）で透水性が有意に上昇することが既往の室内実験により知られており（その後は変位を加えても透水性がほとんど上昇しなくなる）、海外の地下研究所における原位置試験（水圧擾乱試験と類似）では、数十～数百 μm の僅かなせん断変位で断層の透水性が数オーダー上昇する事例が報告されています。

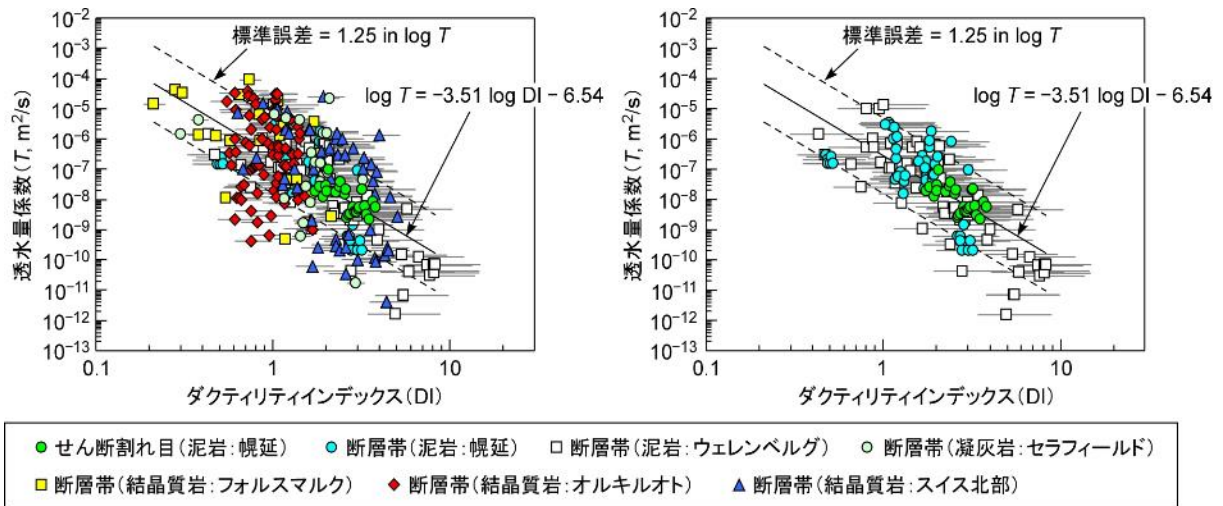


図 9 断層帯中の亀裂（もしくは単独のせん断割れ目）がとりうる透水性の上限値と DI の関係⁽¹⁵⁾

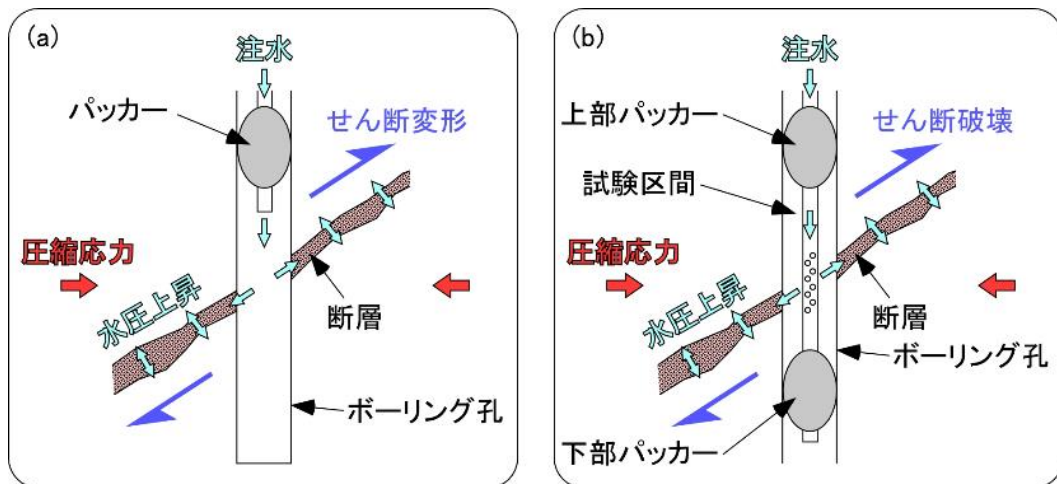


図 10 水圧上昇によって誘発される断層のせん断変形（逆断層の例）
（(a)は単一のパッカー、(b)はダブルパッカーを使用）

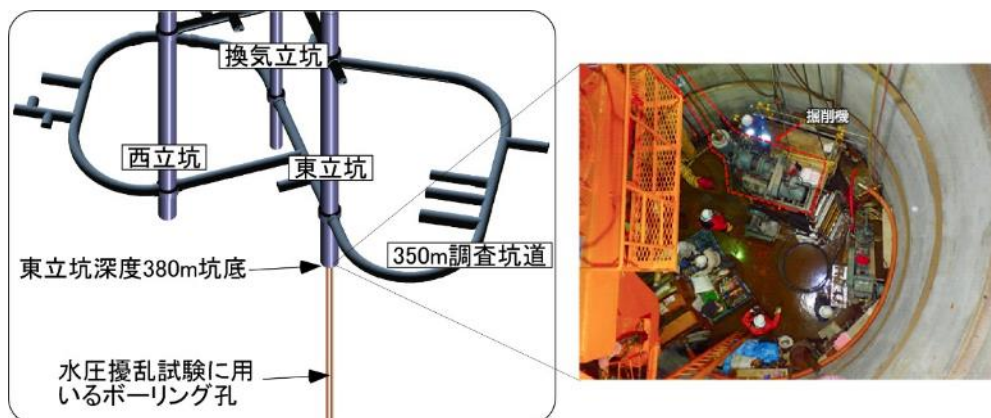


図 11 水圧擾乱試験に用いたボーリング孔の位置

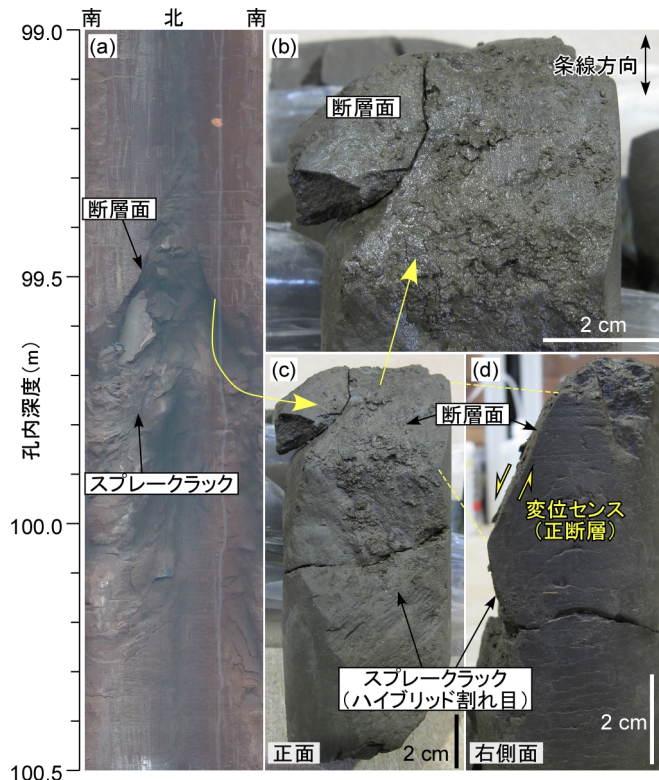


図 12 水圧擾乱試験を行った正断層の孔壁画像(a)とコア写真(b)～(d)

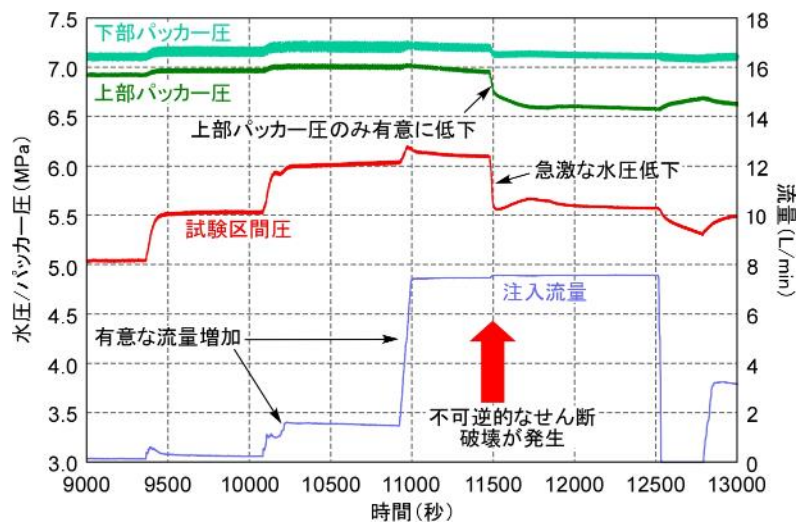


図 13 水圧擾乱試験中の水圧、パッカー圧および注入流量

試験中の注水は流量制御で行っており、図中に示す「急激な水圧低下」以外の水圧変化は基本的に人為的な操作によるもの。

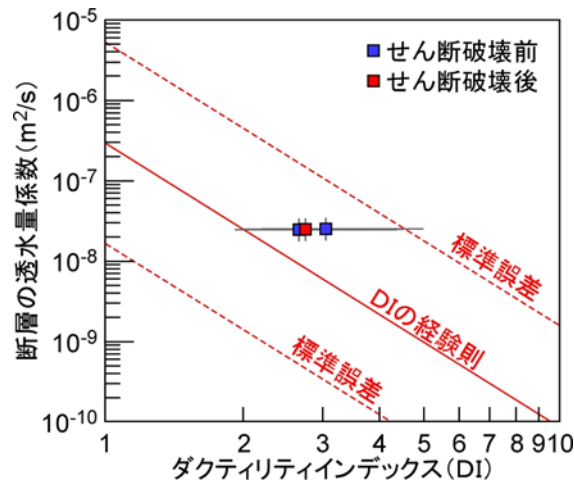


図 14 せん断破壊前後における断層の透水性の比較

断層の DI は透水試験時の初期水圧と周辺の HDB-1, 3, 6 孔の水圧破碎試験より得られた平均応力⁽¹⁵⁾を用いて算出。せん断破壊前は透水試験を 2 回実施しており、計 3 回の試験は異なる初期水圧条件下で実施。

地下施設からの湧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 (図 3、図 4) 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。

平成30年度は、換気立坑から 160.5m 離れた HDB-6 孔の稚内層中の水圧観測データを用いて、地層の水理特性の検討を行いました。図 15 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降、深度 450m 以浅の観測点で有意な水圧低下が認められるのに対し、深度 450m 以深の観測点では、一部データに乱れがあるものの、依然として有意な水圧低下が認められません。むしろ、深度 450m 以深の観測点では、換気立坑が稚内層に到達した付近で、僅かながら水圧が上昇する傾向も示しています (図 15)。このような稚内層深部に認められる水圧変化が、地下水の揚水に伴って発生する周辺地層の弾性的な変形と透水性の低さに起因する可能性があることから、地層の変形特性を考慮した浸透流解析を行いました。既報の稚内層の変形特性⁽¹⁶⁾と単純な地質モデル (声間層、稚内層浅部、稚内層深部の三層を水平と仮定) を用いて、換気立坑の深度 250m からの湧水 (揚水) に伴う HDB-6 孔の水圧変化を解析で求めた結果、深度 450m 以浅の稚内層浅部では湧水開始とともに有意な水圧低下が再現される一方で、深度 450m 以深の稚内層深部では僅かながら水圧

が上昇する現象を再現することができました（図 16上段）。後者のような水圧上昇は、地層の変形を無視した浸透流解析では認められません（図 16下段）。これらのことから、HDB-6孔の稚内層深部で観測された僅かな水圧上昇（図 15）は、地層の変形によるものと考えられ、このような地層の変形に伴う水圧変化は地層の透水性が非常に低い場合に発生しうることが知られています。さらに解析では、稚内層深部の透水係数を $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ と設定した時に、深部の水圧が浅部と同様に有意に低下していく現象が示されるのに対し、稚内層深部の透水係数を $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ あるいは $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ と非常に低く設定すると、同深部の水圧があまり変化しないことが示されます。このような結果も考え合わせると、稚内層深部の透水性は非常に低いことが推定され、これは、同深部領域では断層や亀裂の水理学的連結性が限定的であることが別途推定されている⁽¹⁷⁾ことと整合します。今後は、今回行った解析のより詳細な検討を行う予定です。

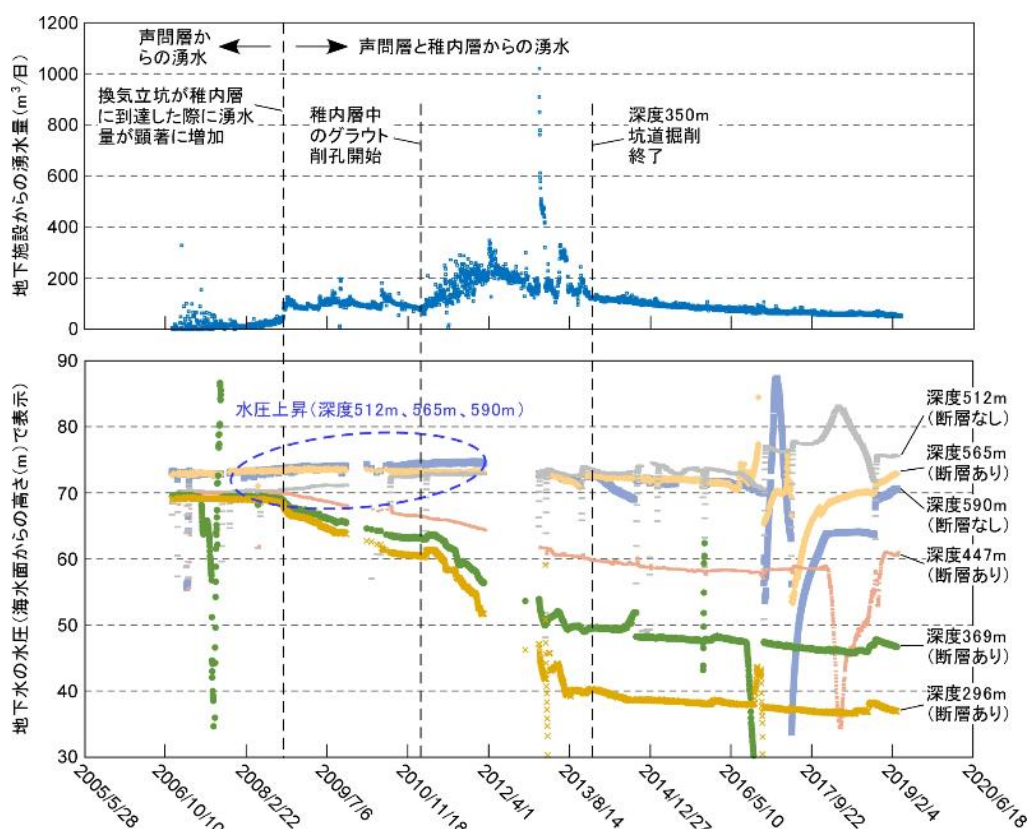


図 15 地下施設からの湧水量（上図）と HDB-6 孔の稚内層における地下水圧の観測結果（下図）（2006/11/19～2019/3/4 のデータ）

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。

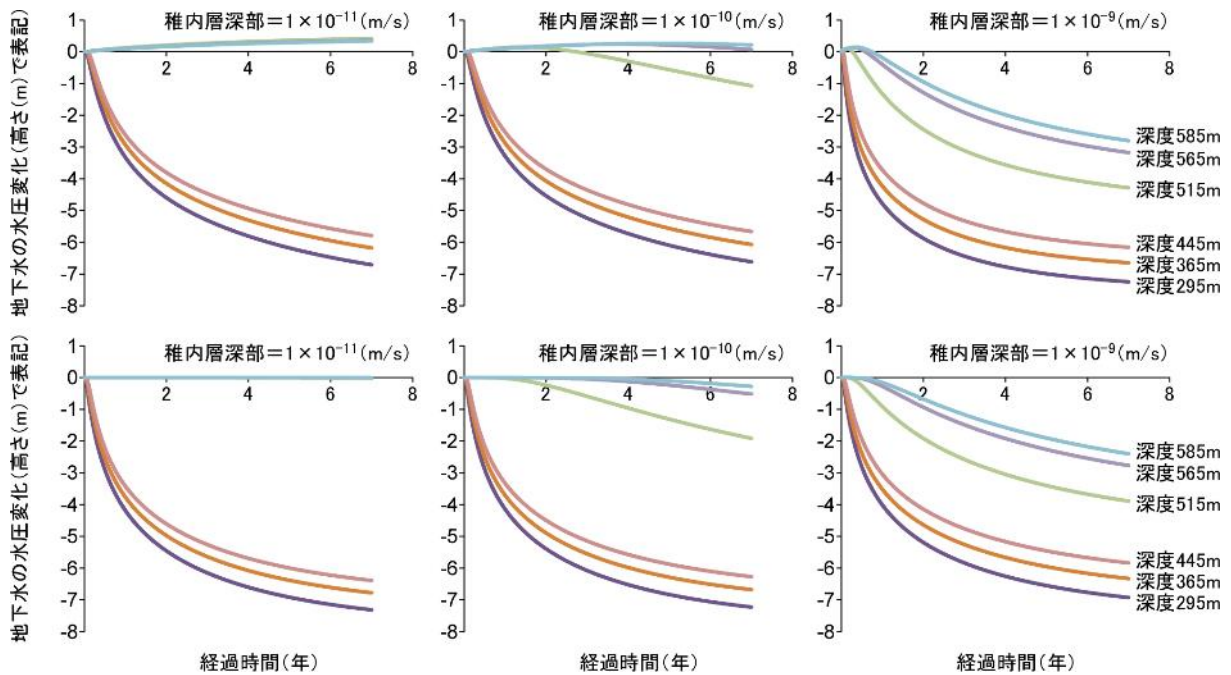


図 16 地下施設からの湧水に伴う HDB-6 孔の水圧変化の解析結果（上段：地層の変形あり；下段：地層の変形なし）

湧水（揚水）箇所は換気立坑の深度250m（稚内層の初出深度）のみとし、湧水（揚水）量は70m³/日とやや少なめに仮定。声問層および稚内層浅部の透水係数は 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。

さらに、坑道掘削時に周辺岩盤（掘削影響領域）に生じる割れ目の透水性の予測手法を検討しました。これまで、解析的に掘削影響領域の透水性を求める手法が開発されてきていますが、坑道周辺の割れ目の発達による岩盤の透水係数の増大を地上からの調査で得られるデータによって予測できるモデルは構築されていません。そこで、上述のように断層帯中の亀裂に対して、透水性の上限値を地上からの調査で得られるデータによって予測できるDIのモデルを、掘削影響領域の割れ目の透水性の上限値の予測にも適用可能かどうかを、深度350mの試験坑道3を対象として検証しました。

試験坑道3の寸法および形状を再現した解析モデルを作成し、実際に坑道周辺に作用する地圧と間隙水圧値を設定し、水理・力学連成解析により坑道の掘削を再現しました。解析の結果、掘削後の有効応力分布が図 17 のように得られました。さらに、この有効応力値と岩盤の引張強度を基に、坑道周辺のDIの分布を予測し、経験式に基づき透水係数の取りうる上限

値の範囲を予測しました。

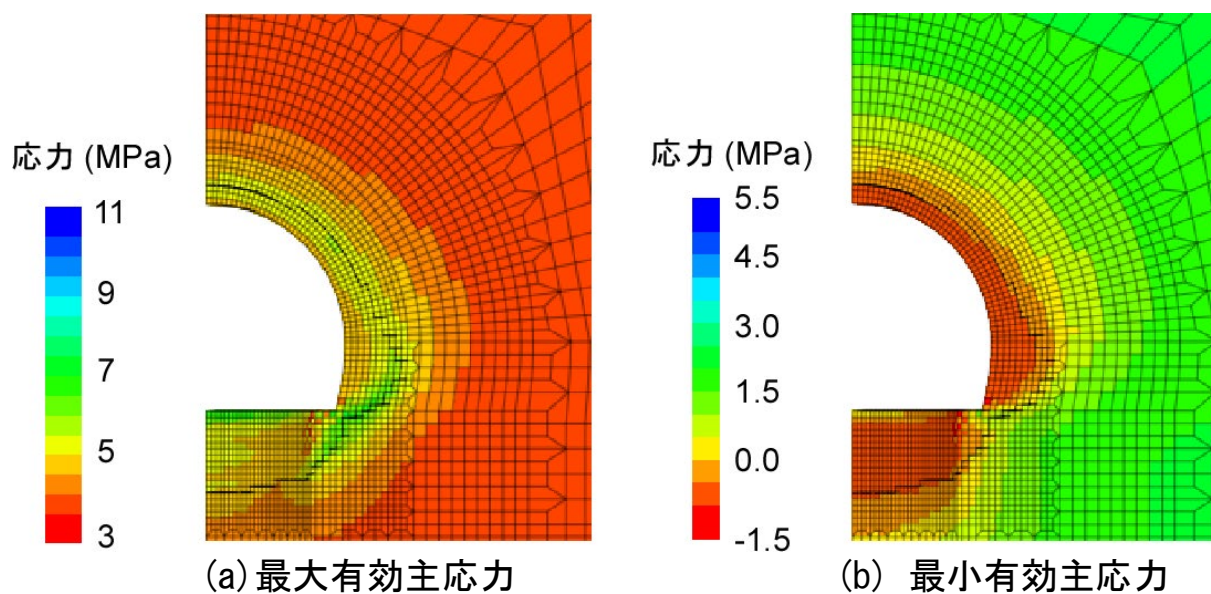


図 17 試験坑道 3 掘削直後の坑道周辺の有効応力分布

一方、試験坑道3から試験坑道2～4の周辺にボーリング孔を掘削し、多くの区間において透水試験が継続的に行われています⁽¹⁴⁾。代表的なレイアウトを図 18に示します。これらの透水試験区間のうち、掘削影響領域を対象としたものは、側壁面についてはH2-1孔の区間5およびH4-2孔の区間5、底盤部についてはH3-2孔の区間3および区間4です。

平成30年度は、この4区間において試験坑道3の掘削直後に測定された透水係数と、解析により予測された透水係数の上限値の範囲とを比較しました。図 19に比較の結果を示します。解析による予測の結果は、岩盤中の割れ目部の透水性の不均質性の影響を考慮しているため、2.5オーダーの幅を持った値として示しています。図 19で示すように、側壁面および底盤部において実際に測定された透水係数は、解析により予測される透水係数の上限値の範囲に内包される結果となりました。このことから、DIを用いることで掘削影響領域の透水係数の上限値を予測することが可能であることが示されました⁽¹⁸⁾。

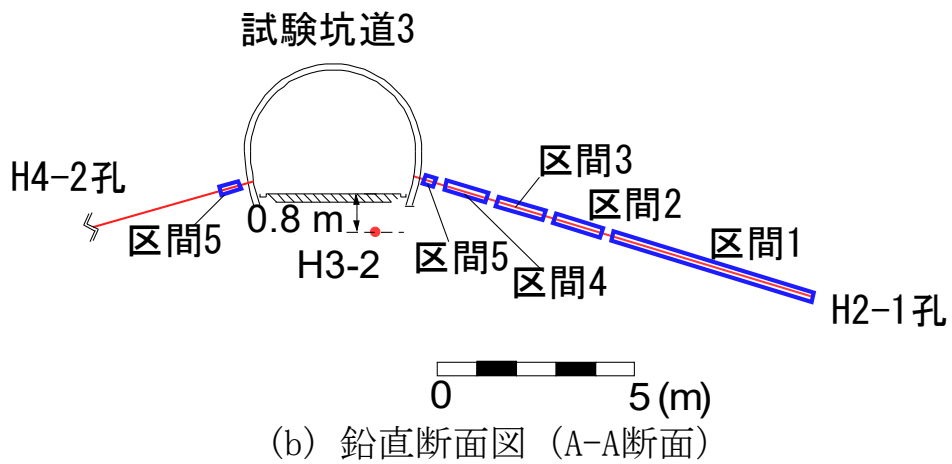
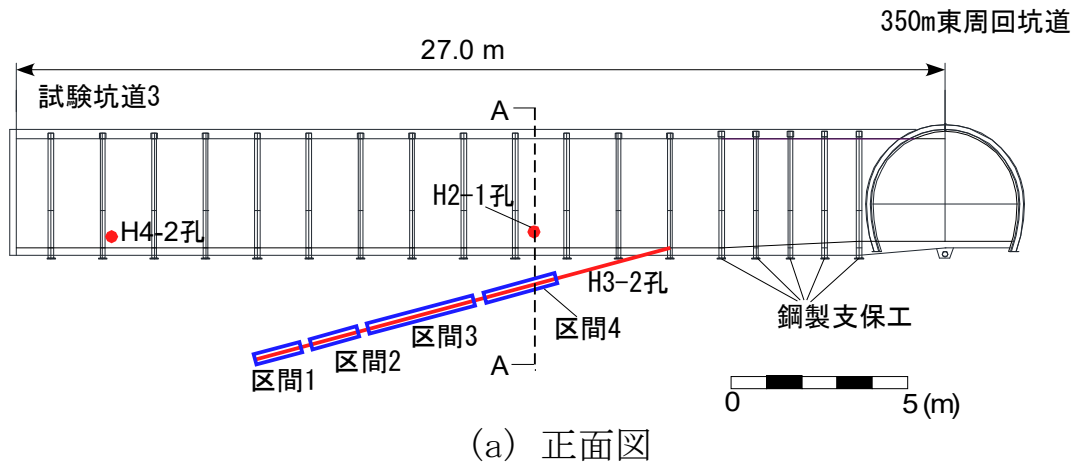


図 18 試験坑道 3 における透水試験のレイアウト

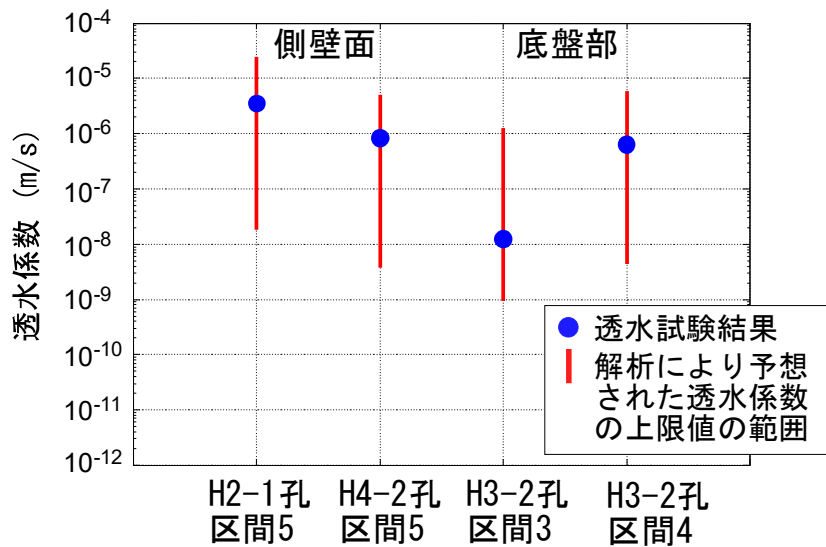


図 19 掘削影響領域において計測された透水係数と、解析により予測された透水係数の上限値の範囲

(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。具体的には、坑道内で採取した地下水のpHや電気伝導度^{*15}、酸化還元電位^{*16}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。

平成30年度は、平成29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^{*17}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 20に、これらの地点から採取した地下水の塩分濃度^{*18}の経時変化を示します。集水リング（図中に黄色あるいは青色の曲線で表示）で採取された地下水（グラフの凡例は○印）について、深度100m～200m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-168.0、WR-V-202.0、WR-E-169.0、WR-E-202.0）は、他の深度で採取された地下水と比べると相対的に塩分濃度の変動が大きい傾向があります。また、坑道内から掘削されたボーリング孔（図中に桃色または薄紫色の線で表示）から採取された地下水（グラフの凡例は□印）では、集水リングで採取された地下水に比べて塩分濃度の変動が小さいことがわかりました。このような傾向は、平成29年度と同様でした。なお、集水リングとボーリング孔で採取された地下水での塩分濃度の変動幅の違いは、主に採水方法の違いによるものと考えられます。

WR-V-98.0およびWR-V-168.0では、平成26年度の調査時以降、塩分濃度が低下していく傾向が認められます。これらの地下水からはトリチウム^{*19}が検出され、塩分濃度と水の酸素同位体比 $\delta^{18}O$ ^{*20} とが相関を示すこ

*15：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。

*16：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。

*17：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30～40mごとに設置されている設備です。

*18：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。

*19：質量数が3である水素の同位体を差します。天然で微量に生成するほか、過去の核実験で大気中に放出されました。半減期が12.3年と短いため、地下水においては表層水の混合を推定する指標となります。

*20：質量数16の酸素に対する質量数18の酸素の割合を差します。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わかっています。

とから（図 21）、立坑からの排水などのために塩分濃度が低く $\delta^{18}O$ が小さい浅部地下水の引き込みが生じ、深部に位置する塩分濃度が高く $\delta^{18}O$ が大きい地下水と混合していると考えられます。

今後も地下水の採水・分析を継続し、水質変化の傾向やプロセスについて検討します。また、坑道周辺の地質・地質構造や地下水の流れ方に関する検討とあわせて、地球化学モデル*21の更新に反映していきます。

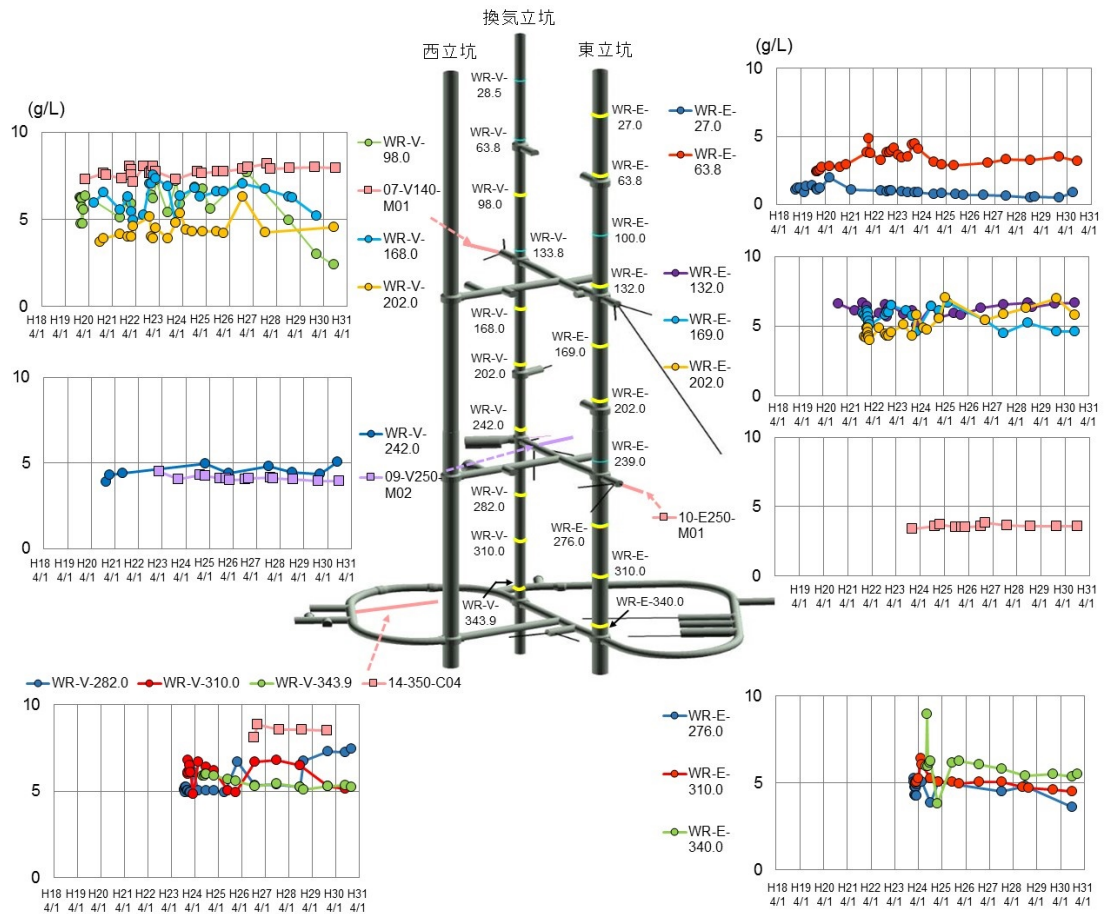


図 20 坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化

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。

*21：地下水の水質が地下環境でどのように分布しているのかを、図や数式などを用いて表現したものです。

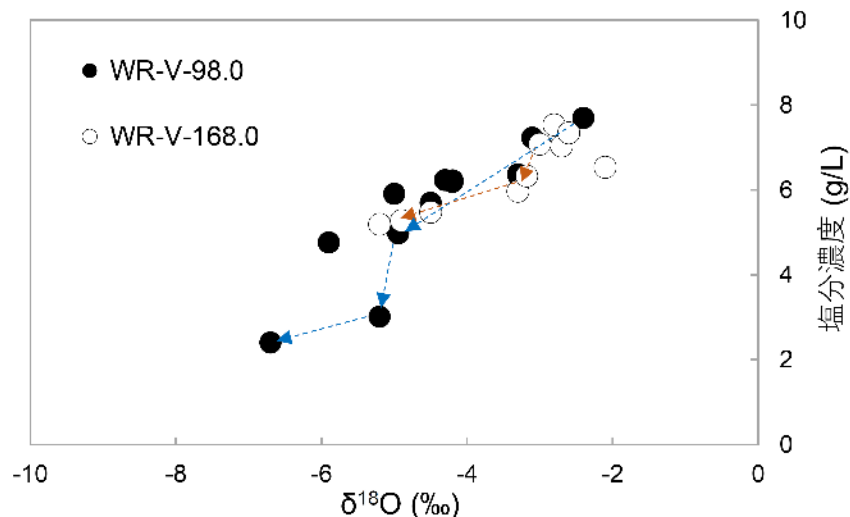


図 21 WR-V-98.0 および WR-V-168.0 の地下水における塩分濃度と酸素同位体比の関係

青色およびオレンジ色の矢印は、それぞれWR-V-98.0およびWR-V-168.0における平成26年度以降の値の変化を示しています。

水の酸素・水素同位体^{*22}比は、主に水の起源によって異なります。このことから、これら同位体比の情報は、水の起源の判別に用いられます。例えば、図 22 に示されるように、幌延地域の地下深部の地下水（図 22 の青丸と緑丸）は、河川水などの天水（図 22 の赤丸）と上幌延泥火山の湧水で表されるような変質した海水（化石海水）（図 22 の黒三角）の混合により形成されていることがこれまでの調査により分かっています。図 22 の天水線と呼ばれる直線は、水蒸気から水滴が形成される際に同位体比が変化することから、天水の同位体比が季節や場所により直線的に変化することを示したものです。図 22 の回帰直線は、地上からのボーリング調査時に得られた地下水の同位体比から得られた直線になります。寺本ほか⁽¹⁹⁾は、地下水の同位体比が化石海水と河川水の混合を示す一方で、回帰直線は、河川水とは異なる値（ $\delta^{18}\text{O} = -13.1\text{‰}$ 、 $\delta^2\text{H} = -85.3\text{‰}$ ）で天水線と交わることを示し、この値が氷期の天水であった可能性を報告しています。一方で、雪氷などの氷期の天水の値や海水を変質させたと考えられている鉱物や有機物中に含まれる水の値について、実測例が不足していました。平成 30 年度は、これらのデータについて、新たに取得あ

*22 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 $\delta^2\text{H}$ （または δD ）と表記されます。

るいは既存データを整理することで、地下水の水質形成機構の理解を進めました。

幌延地域の地層中にはオパール A やオパール CT などの水を含むケイ酸塩鉱物が多く含まれています。過去に地層が堆積し、埋没する過程で、地下深部の熱により、鉱物中の水が脱水し、海水起源の地下水を希釈したと考えられています⁽²⁰⁾。平成 30 年度は、地上からのボーリング調査時に得られたコア試料を化学処理し、ケイ酸塩鉱物に含まれる水と有機物の酸素・水素同位体比を分析しました（それぞれ、図 22 の黄色と水色の○印）。また、地上からの調査研究により得られた雪の酸素・水素同位体比の分析結果⁽²¹⁾を整理しました（図 22 の白色の○印）。その結果、化石海水の形成にはケイ酸塩鉱物に含まれる水が寄与し（図 22 の赤色の太矢印）、有機物からの脱水はあまり影響していないことが分かりました。また、雪の値は、寺本ほか⁽¹⁹⁾により推定される氷期の天水の値と一致することが分かりました。このことは、地下水が主に氷期の天水との混合により形成されていることを支持するものと考えられます（図 22 の青色の太矢印）。一方で、一部の試料については、現在の河川水との混合の影響も見られています（図 22）。以上のことから、幌延の地下水は、地層の堆積時に間隙中に含まれていた海水が、地層の埋没時に含水鉱物からの脱水により希釈され、引き続く地層の隆起の後に、主に氷期の天水との混合により形成されたと解釈されます。平成 30 年度の調査研究により、これまでに考えられていた幌延の地下水水質形成機構に係わる解釈が妥当であることを再確認することができました。

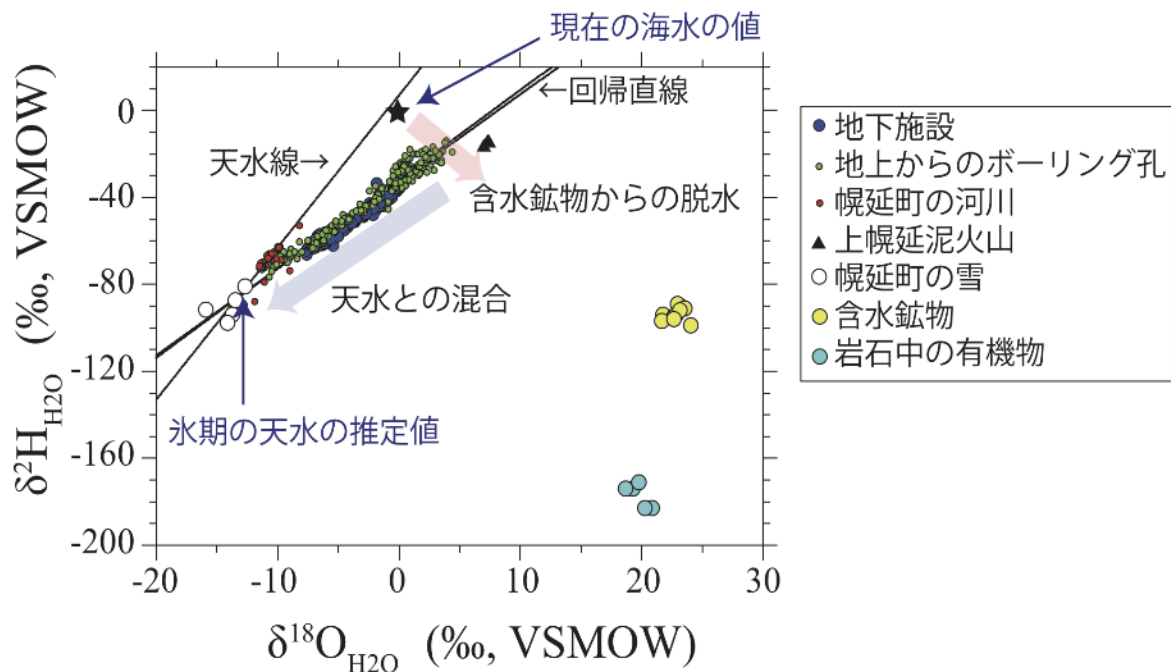


図 22 幌延地域の水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と水素同位体比 ($\delta^2\text{H}$)

必須の課題への取組みにあたっては、基礎情報となる地質環境に関するデータ取得が必要になります。このうち、地球化学に関する調査としては、坑道周辺の掘削影響領域を含む地質環境における岩盤の地球化学的特性や地下水の水質、微生物、ガス、コロイドおよび有機物に関するデータ取得を行っています。

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中に拡散し、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と考えられています。

平成30年度は、坑道内の大気に含まれる酸素が坑道周辺の岩盤に拡散する様子を、簡易モデルを用いて計算しました。深度140m、250mおよび350m調査坑道は、掘削からそれぞれおよそ9年、7年、5年が経過していることから、坑道内の酸素は坑壁から約1mまで拡散しうると計算されました(図 23)。

しかし、昨年度までに実施した調査では、深度140m、250mおよび350m調査坑道の壁面から岩盤内部に向かって採取した長さ約1mの岩石試料において、酸化の指標となりうる色調や鉱物組成の変化は認められませんでした。また、試験坑道2から0.6mの距離に掘削された13-350-C06孔(図 24)のうち地下水が涸渇している区間4において、区間内を満たしているガス

を採取・分析したところ、ガスの主成分はメタンと二酸化炭素であり、大気の主成分である窒素や酸素の割合は非常に低いことがわかっています。このように、坑道周辺の掘削影響領域において酸化の明瞭な兆候が見られない理由として、図 25 のようなメカニズムが示唆されました。これらのことから、幌延では、地下水中に多量に溶けているメタンや二酸化炭素などのガスが水圧の低下に伴って地下水から遊離し、坑道周辺に形成される割れ目や不飽和領域*23を満たすため、坑道周辺岩盤への大気の侵入・拡散が抑制される可能性が考えられます。

今回のモデルでは、坑道周辺における不飽和領域の形成や岩盤から坑道方向へのガス・地下水の移行については考慮していません。今後はこれらの点についても考慮するなど、実際の坑道周辺の環境により即した解析・評価の改良・見直しを行う予定です。

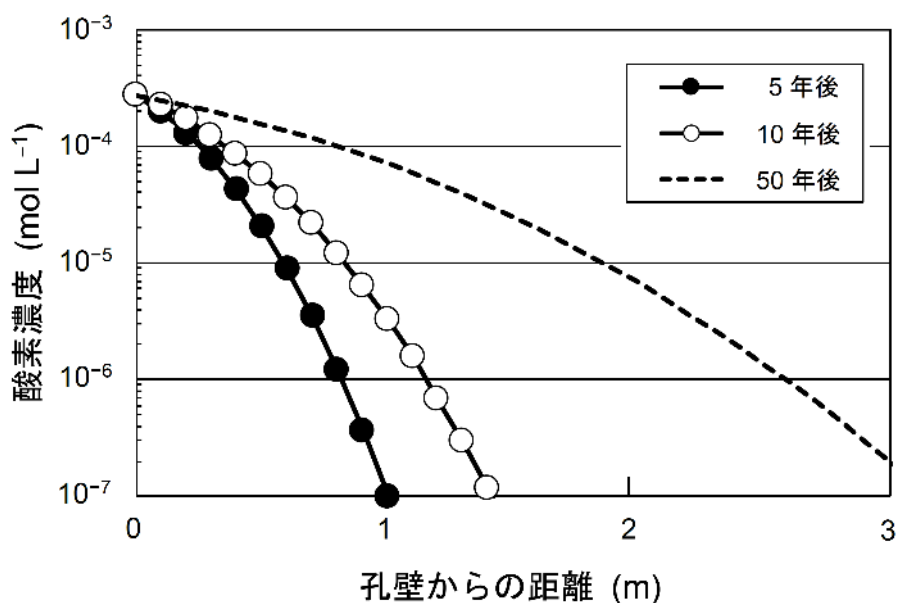


図 23 坑壁からの酸素の拡散に関するモデル計算結果

*23：不飽和領域とは、掘削などによって地下水が飽和している地下の岩盤の圧力が開放され、岩盤中に大気や遊離ガスが含まれるようになった領域のことです。

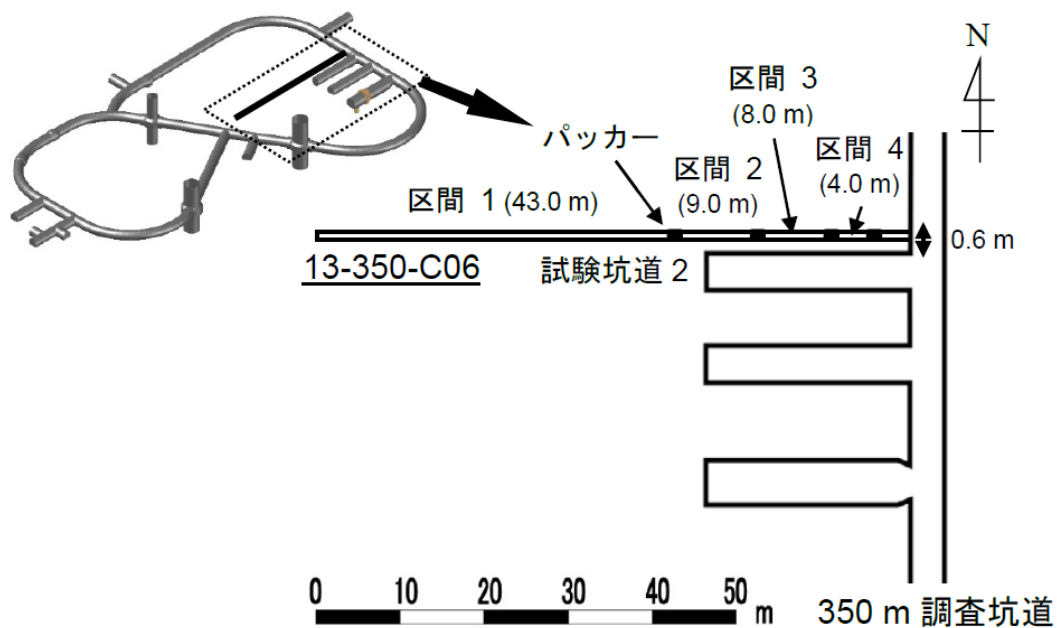


図 24 13-350-C06 孔のレイアウト（水平断面）

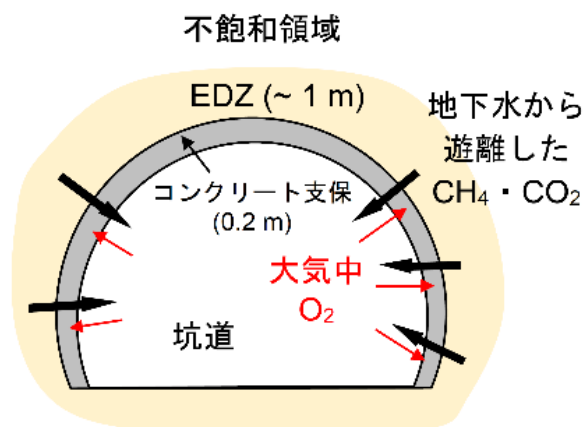


図 25 EDZ（掘削により損傷した領域）の化学環境に関する概念モデル

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^{*24}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。

平成30年度は、平成29年度に引き続き、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-

*24：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。

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。遺伝子解析手法^{*25}を用いた解析により、調査坑道壁面近傍と坑道壁面から離れた領域で群集組成が大きく異なり、これらの組成は平成29年度の調査結果と同様の傾向を示すことがわかりました。坑道壁面近傍の領域では、いずれの深度においても比較的同様の群集組成となっており、バイオフィーム（微生物により形成される構造体）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が優占種^{*26}として継続して存在することが示されました。一方で、坑道壁面から離れた領域では、硫黄をエネルギー源とする微生物が優占して存在することがわかりました。これらの優占種の地下環境中での働きや、微生物分布の不均一性が物質の移動反応に及ぼす影響について、今後も調査を継続し、坑道周辺の地球化学環境と微生物代謝活性の関連性を調査するための技術開発を進める予定です。

地下水中にはイオンとして溶存している成分のほかに、粒子径が1nm～1000nm (1 μm) 程度のコロイドが存在します。平成29年度までの調査では、レーザー散乱法^{*27}を応用した装置を用い、水中に浮遊するコロイドのサイズや粒子数を直接測定する手法の検討を進めてきました。平成30年度は、従来から行われているろ過法による地下水中のコロイド調査を行い、レーザー散乱法による測定結果との比較を試みました。ろ過法による調査では、深度250mに位置するボーリング孔 (09-V250-M02) の地下水を対象に、孔径の異なるフィルター (0.45 μm、0.22 μm、0.1 μm、10 kDa^{*28}、5 kDa) を用いた段階的なる過を行った後、ろ紙上の残渣を走査型電子顕微鏡 (SEM)^{*29}で観察し、コロイドのサイズを調べました。また、SEMに付随するエネルギー分散型X線分光器 (EDS)^{*30}により、コロイドの化学成分も調べました。

調査の結果、幌延の地下水は比較的塩分濃度が高いため、フィルター

*25：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。

*26：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。

*27：溶液中に分散する粒子にレーザー光を当て、散乱・回折したレーザー光の強度パターンを観測し、粒子の大きさ（サイズ）や数を測定する方法です。

*28：Da（ダルトン）とは、質量を表す単位であり、質量数12の炭素原子の質量の1/12と定義されています。この場合、10kDa（10,000Da）より小さな分子量の粒子が通ることのできる孔径の指標を意味します。

*29：電子顕微鏡の一種であり、ナノメートル（nm）程度までの大きさの表面観察が可能です。

*30：電子線を照射した際に発生する特性X線のエネルギーを測定し、物質を構成する元素を調べる機器です。

上には、地下水から沈殿したと推定されるNaおよびClを主成分とする粒子が多数観察されました。また、 $0.22\mu\text{m}$ 以上の孔径のフィルター上には、比較的粒径の大きい粒子が多く認められ、コロイドとして定義される粒子径を超える粒子も散在していました。これらの粒子には、主に岩石由来の岩片と推定される粒子（Si、Ca、Mg、Cなどを含む）に加え、微生物と推定されるものも含まれていました（図 26）。一方、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の孔径のフィルター上には、 $20\sim 60\text{nm}$ 程度の微粒子が凝集した集合体が観察されました（図 27）。これらの微粒子の集合体は、地下水で各々分散していたものや地下水である程度の大きさにまで凝集していたものがろ過の過程で凝集して生じたと推定されます。なお、レーザー散乱法による水中でのコロイド測定では、 $100\sim 200\text{nm}$ 程度の微粒子が多く、今回実施したろ過法による調査よりも粒子径がやや大きい結果でした。今後は、測定方法や測定条件の違いによるコロイド調査・評価への影響についても検討を進めていく予定です。

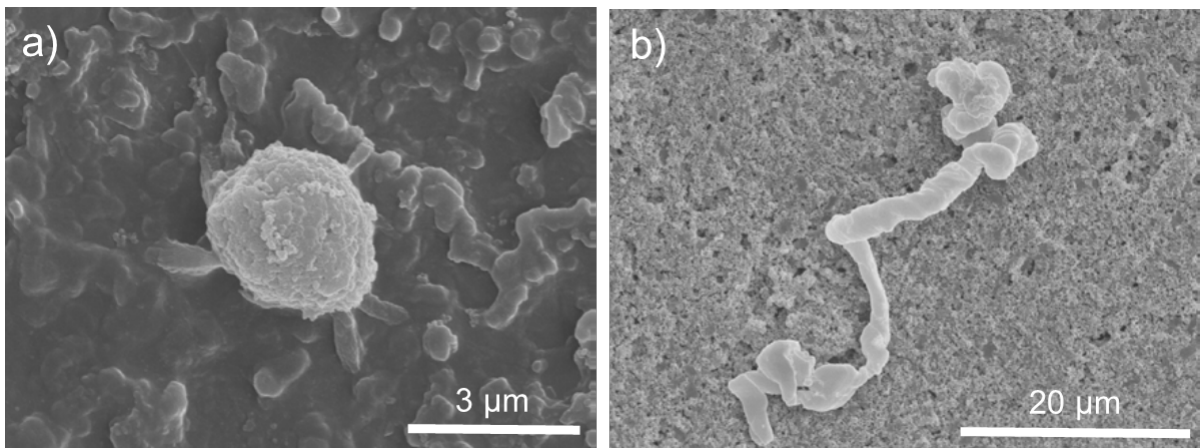


図 26 $0.45\mu\text{m}$ のフィルター上に観察された粒子などの例

(a : 岩石由来の岩片と推定される粒子、b : 微生物)

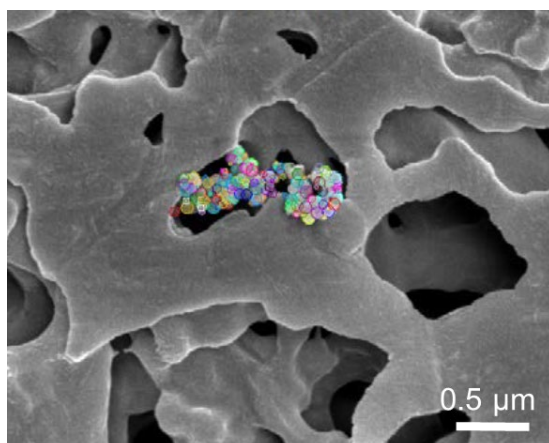


図 27 0.1 μm のフィルター上に観察された粒子
(粒子形状を把握するため画像処理で着色。実際の色とは異なる)

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と考えられる腐植物質の特性を評価することが必要です。平成29年度の調査では、地表水および地下水に溶存する腐植物質の蛍光特性^{*31}を比較し、深度140m調査坑道 (WR-V-133.8および07-V140-M01) と深度350m調査坑道 (13-350-C01) で採取した地下水では深度の違いによらず蛍光特性が類似していること、地表水 (清水川A7地点; 図 116参照) と地下水とでは溶存する腐植物質の蛍光特性が異なることが明らかになりました。

平成30年度は、採水深度の異なる地下水間での蛍光特性の違いの有無についてさらに詳しく調査するために、深度250m調査坑道 (09-V250-M02) および深度350m調査坑道 (13-350-C06) で採水された地下水を対象に、腐植物質の蛍光特性の違いを調査しました。測定結果を、平成29年度に実施した地表水および地下水の測定結果とあわせて図 28に示します。

測定時の試料希釈倍率などの違いのため、ピークの蛍光強度 (相対強度) は平成 29 年度と平成 30 年度とで異なっていますが、ピーク的位置は採水深度の異なる地下水間で類似しています。すなわち、地下水には励起波長 (Ex) / 蛍光波長 (Em) ^{*32}が 315nm / 380nm 付近および 230nm / 380nm 付近の 2 つのピークが認められ、250nm / 452nm 付近のピークが 1 つのみで

*31: 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。腐植物質の分子は、蛍光を発する特徴があります。腐植物質の蛍光特性は、分子構造の違いにより異なるため、腐植物質を比較する場合に用いられます。

*32: 励起波長とは、蛍光体が蛍光を発する時に必要な照射光の波長です。蛍光波長は、その時の蛍光の波長です (蛍光体の種類によって、励起波長と蛍光波長の組み合わせが異なります)。

ある地表水とは異なっています。このことから、地下水に溶存する腐植物質の分子構造は深度によらず類似していること、および地表水と地下水とでは腐植物質の分子構造が異なることが示唆されました。今後は、地下水中の腐植物質の特性をより詳細に把握・評価するため、含まれる有機物をその性質に応じて分離する手法の検討を行う予定です。

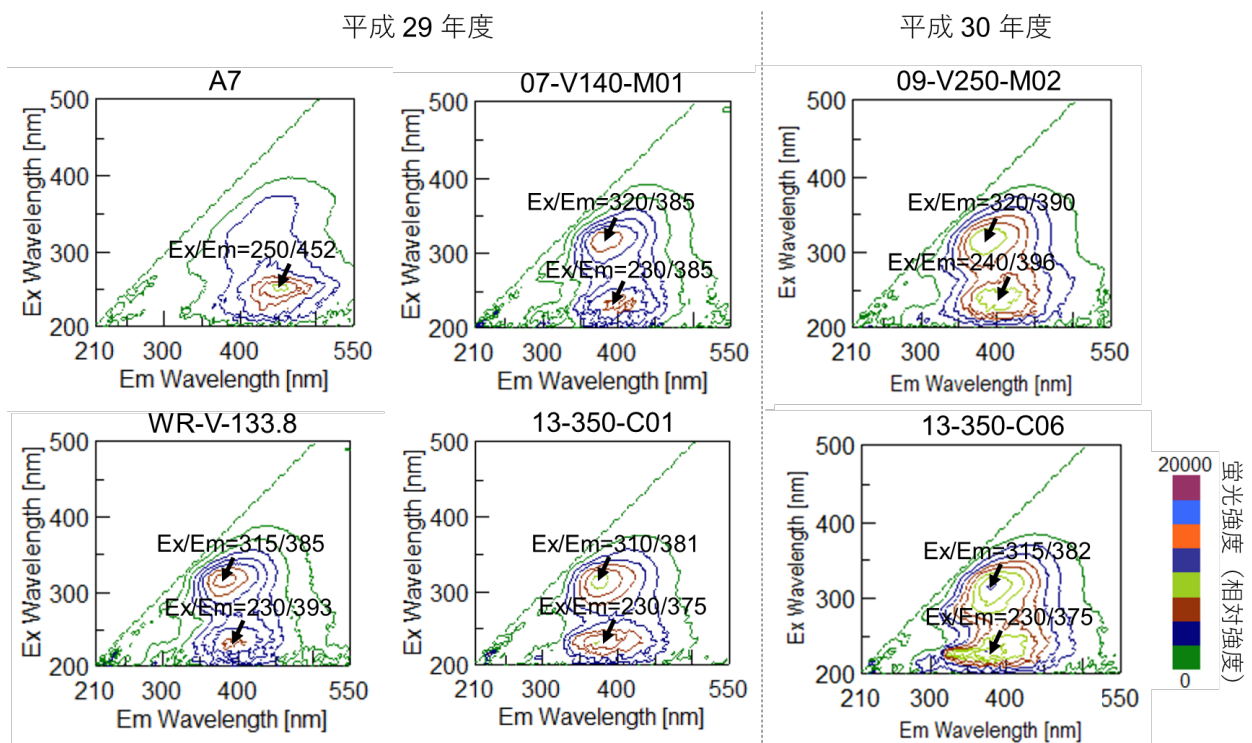


図 28 幌延の地表水・地下水中腐植物質の蛍光特性の測定結果

(4) 岩盤力学

第1段階で構築した岩盤力学モデル^{*33}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の調査坑道で取得した内空変位^{*34}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。これまでに開発してきた手法では、初期応力状態は、鉛直方向、東西方向、南北方向の比率で出力されていたため、実際の応力値として出力されない点において、信頼性に対する課題が残っていました。

*33： 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。

*34： 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。

平成30年度は、出力される初期応力の比率に土被り圧を乗じた応力値を数値解析モデルに載荷して、350m調査坑道の掘削時に生じる内空変位値を再度計算し、実測値との比較を行うことで、解析により予測した応力状態の妥当性を検討しました。

図 29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の範囲に内包されますが、比較的高い値として予測されたことがわかります。

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 30に示します。比較対象とした計測結果は、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・西連絡坑道であることから、坑道掘削方位と内空変位の関係を示しています。解析結果に関しては、実際の岩盤での挙動を再現するために、坑道周辺に発生する掘削影響領域の有無、すなわち岩盤の破壊の有無を考慮した解析結果を示しています。破壊を考慮しない計算結果は、全掘削方位において、変位が比較的小さい結果については概ね再現できています。一方、破壊を考慮した解析では、計測結果よりも大きな変位が出力された箇所が多く見受けられました。このことから、予測した初期応力状態の妥当性を評価するうえで、内空変位計測値を適切に評価することが課題として残りました。今後、内空変位計測値をさらに正確に再現するために、350m調査坑道の施工順に徐々に掘削を進める三次元逐次掘削解析を行い、信頼性の高い初期応力状態を推定する手法の構築を図ります。

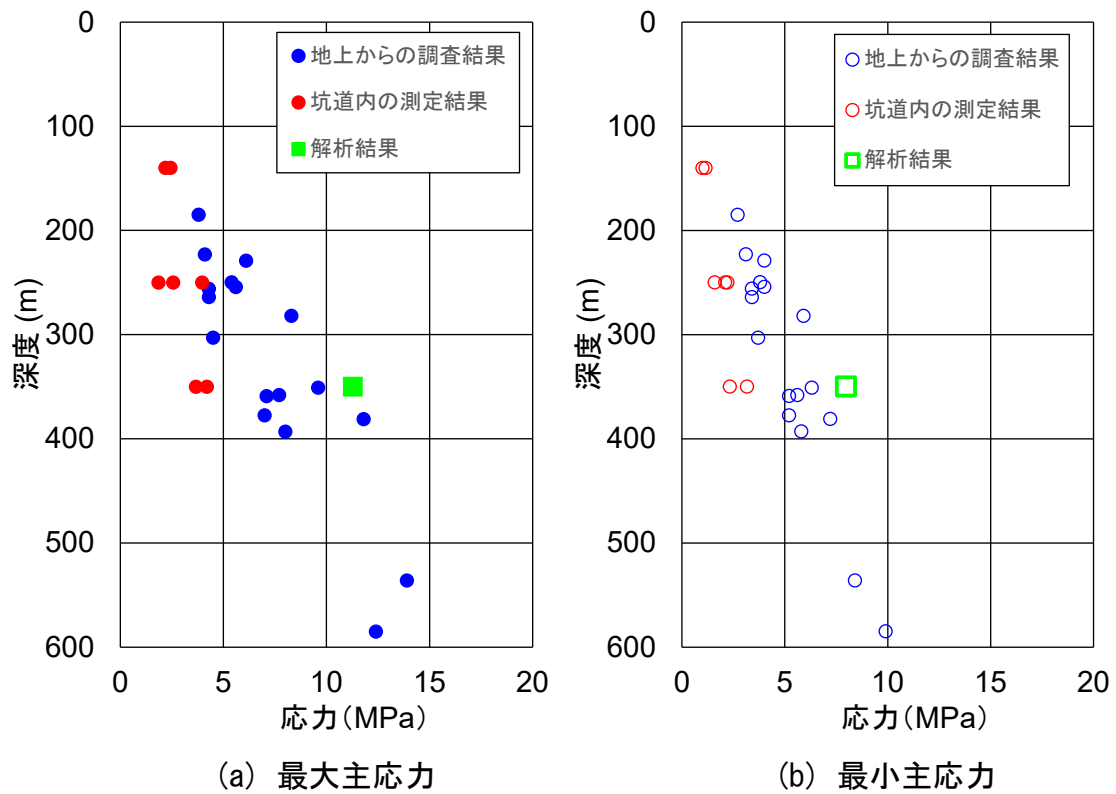


図 29 水平面内の主応力に関する解析結果と既存調査結果との比較

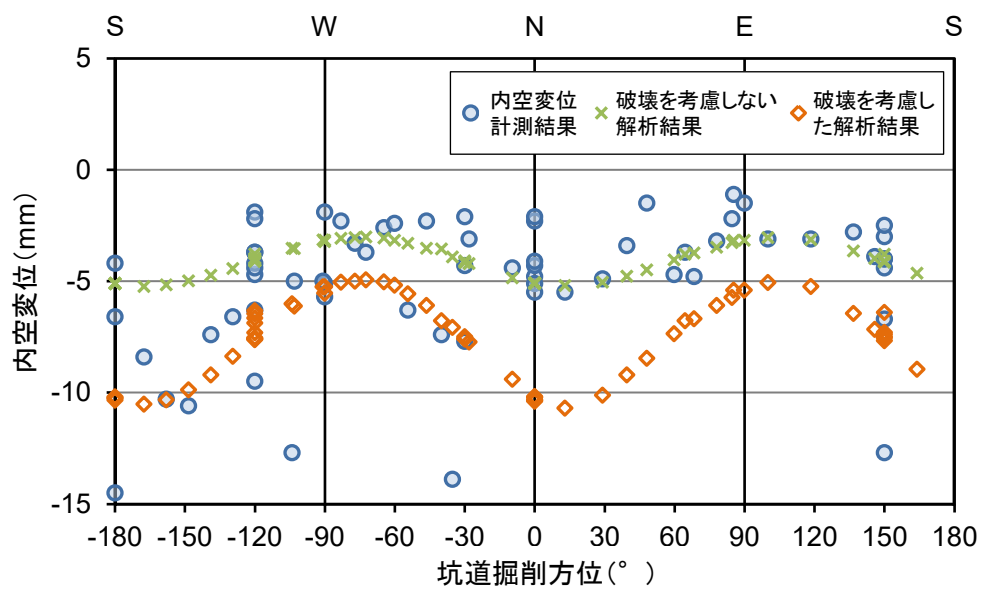


図 30 内空変位の計測結果と解析結果の比較

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、沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発、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

3.1.1(2)で述べたように、平成30年度に行ったボーリング孔における水圧擾乱試験では、試験区間の両端にパッカーを設置して試験を行いました。使用したパッカーはスライド式と呼ばれるもので、孔底側のパッカー加締め部がスライドすることによりパッカーが膨らむ仕組みとなっています。このようなパッカーを試験区間の両端に設置する場合、試験区間が短縮すると、孔口側のパッカーの孔口側加締め部（固定式）がパッカーラバーを孔口側に引っ張る形となり、その結果、パッカー内の容積が一時的に増加し、パッカー圧が低下することが想定されます。このことを確かめるために、今回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地上部において実験を行いました（図31(a)）。その結果、試験区間が短縮すると（ロッドを孔口側に引っ張ると）、パッカー圧が有意に低下する現象を確認することができました（図31(b)）。このような現象は、水圧擾乱試験中の断層の挙動をモニタリングするのに有効であり、今後、更なる実験データの拡充を図る予定です。

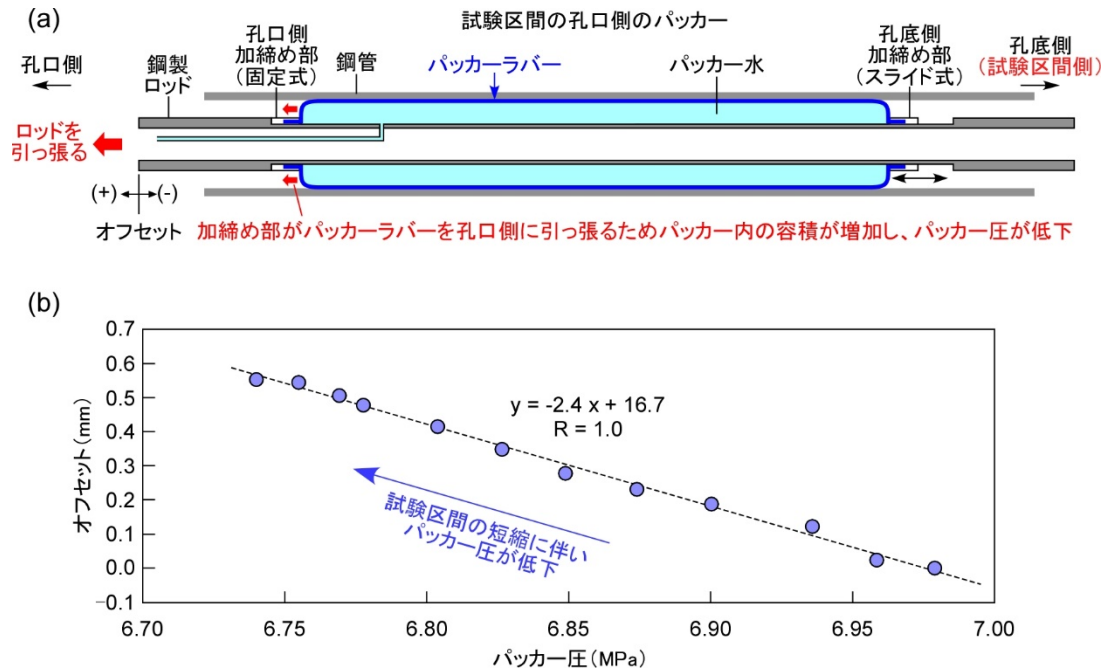


図 31 水圧擾乱試験における試験区間の短縮と孔口側パッカー圧の低下の関係性を確かめるために行った実験 (a) とその結果 (b)

地層処分では、地下深部における、水を通しにくい地層領域を地上から効率的に把握することが重要になります。地層が水を通しにくい状態であるためには、地層中に亀裂が全くないことが理想的ですが、そのような地層が自然界に存在することは稀であり、わが国のような変動帯では断層のような連続性のある亀裂が地層中には存在します。しかし、たとえ地層中にそのような断層があったとしても、それらの連結性が限定的であれば、巨視的には水を通しにくいことが考えられます。

これまで、地下水の水圧分布（異常間隙水圧）や水質・年代（化石海水）といったデータから、地下深部において、長期に渡って水を通しにくい地層領域が存在しうることが指摘されていますが、それらの領域の亀裂の連結性は限定的であることが想定されるものの、その直接的な証拠については十分な検討がなされていませんでした。その原因として、単孔のボーリング調査では亀裂の連結性を直接的に評価しにくいという点が挙げられます。そこで幌延深地層研究センターでは、図 32に示すような、単孔のボーリング調査でも亀裂の連結性をより直接的に評価できる方法論を新たに考案しました⁽¹⁷⁾。同方法論ではまず、地層を力学的な解析に基づいて、断層が連結しやすい深度領域とそうでない深度領域とに区分し、

次いで、これらの区分した各領域において透水試験で得られる水圧挙動を解析することにより、各領域の亀裂の連結性を評価します。評価では、図 33に示すような水圧挙動と亀裂の連結性との関係性に着目し、評価した結果の妥当性については、地下水の水圧分布や水質・年代データを用いて検証します。

上記の方法論を地下施設周辺の稚内層および声問層に適用した結果、稚内層の深部領域の亀裂の連結性が限定的であることが推定され（図 34）、同深部領域は異常間隙水圧と化石海水が認められる領域とほぼ一致することが分かりました（図 35）。同方法論を他の海外の堆積岩地域にも適用した結果、同様の結果を得ることができ、今回考案した方法論は、地質図などの地層の分布情報と合わせることで、地下深部において、水を通しにくい地層領域の拡がりや地上から効率的に把握する際に役立つことが期待できます⁽¹⁷⁾。

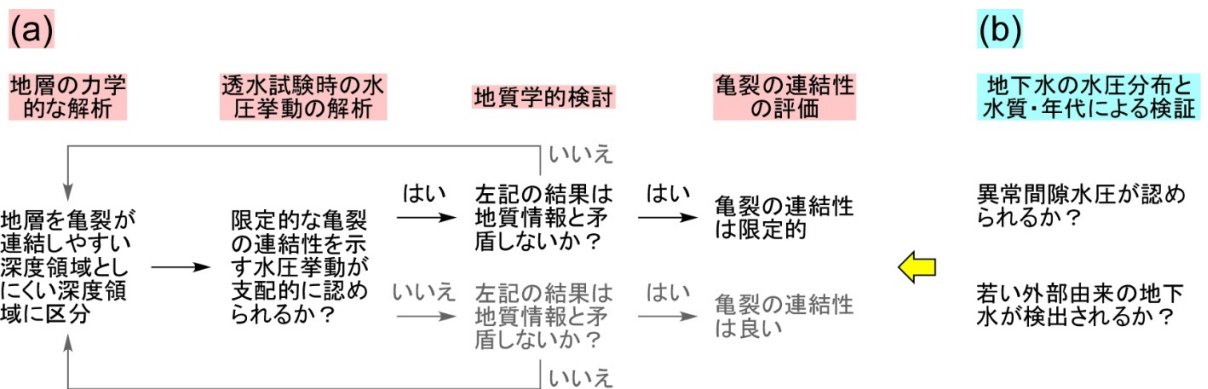


図 32 単孔のボーリング調査により亀裂の連結性を評価する方法論⁽¹⁷⁾

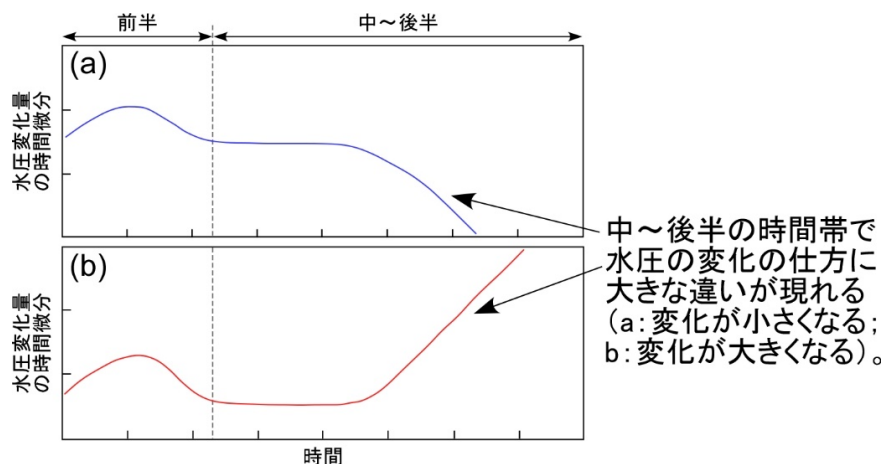


図 33 透水試験時に認められる水圧挙動の例⁽¹⁷⁾

(a) 亀裂の連結性がよい場合 (b) 亀裂の連結性が限定的な場合

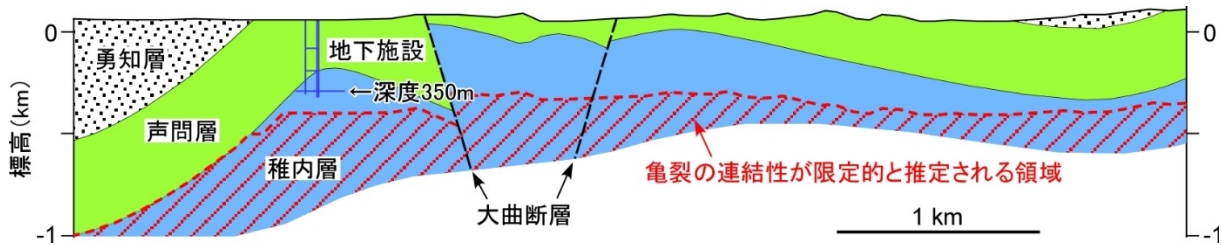


図 34 稚内層深部に推定される亀裂の連結性が限定的な領域^{*35}

力学解析と透水試験による領域区分

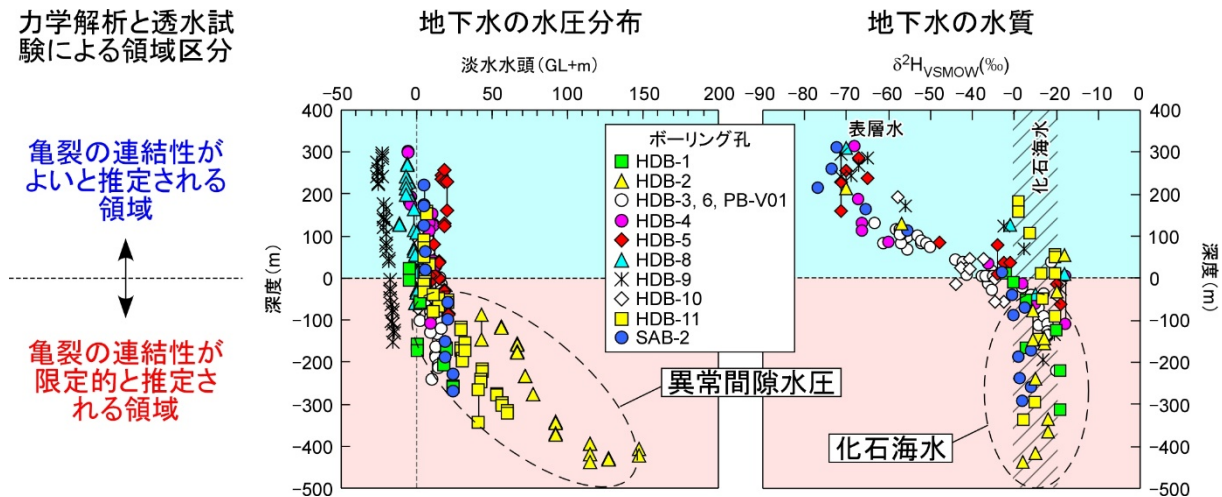


図 35 亀裂の連結性と地下水の水圧・水質データとの比較⁽¹⁷⁾ *36

(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^{*37}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

*35：亀裂の連結性が限定的な領域では、亀裂がある部分で地層の透水性が局所的に高くなるものの、それら亀裂の連結性が限定的であることから、地層の巨視的な透水性は一樣に低いことが推定され、その低さは健岩部の透水性に匹敵することが推定されます（3.1.2 (6) 1) 参照）。

*36：力学解析と透水試験により亀裂の連結性が限定的であると推定される領域において、異常間隙水圧や化石海水が認められることは、亀裂の連結性が限定的であることの強い傍証となります。しかし、異常間隙水圧や化石海水が認められなくても、亀裂の連結性が限定的である場合もあり得ます⁽¹⁷⁾。また、亀裂の連結性がよいと推定される領域であっても、地史や地下水の流れる方向・駆動力の大きさによって、化石海水が認められる場合もあり得ます⁽¹⁷⁾。

*37：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。

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、平成 30 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 36 に示します。

平成 30 年度は、平成 29 年度に引き続き、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 37、図 38、図 39、図 40 および図 41 に各々示します。連続観測のデータは 5 分毎に取得されていますが、長期観測によりデータ数が増えてきたため、図では 1 日毎のデータで表現しています。図中で急激に水圧が変化（低下）している箇所は、採水やメンテナンスによる一時的な影響によるものです。観測の結果、試験坑道の掘削以降、徐々に水圧が低下する傾向が認められます。

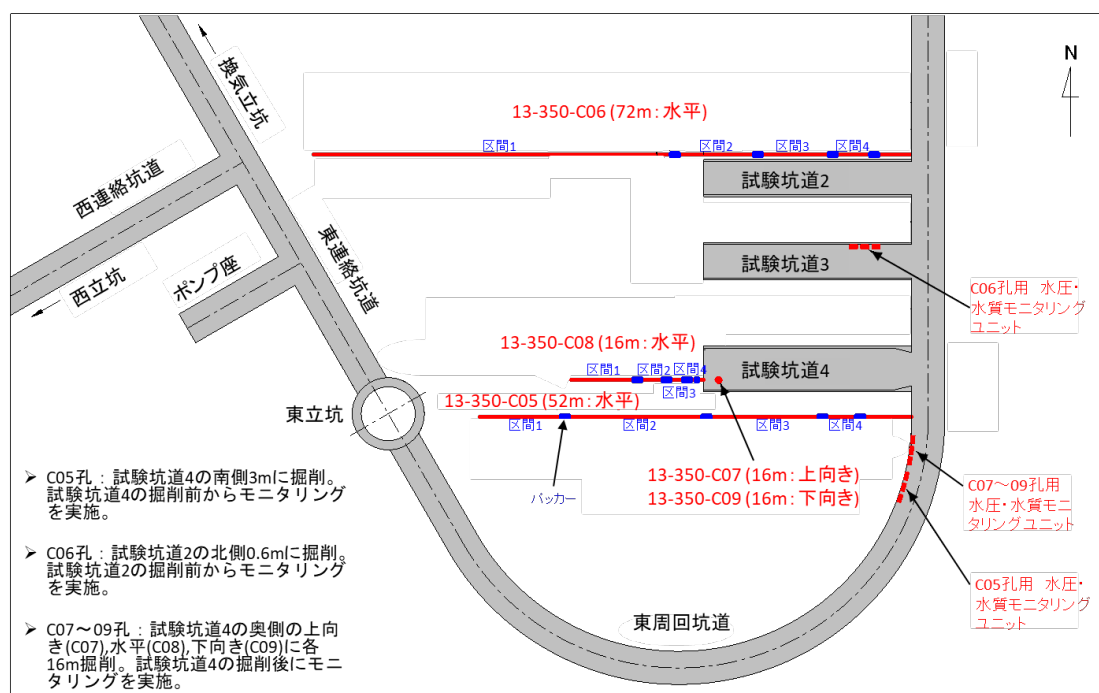


図 36 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

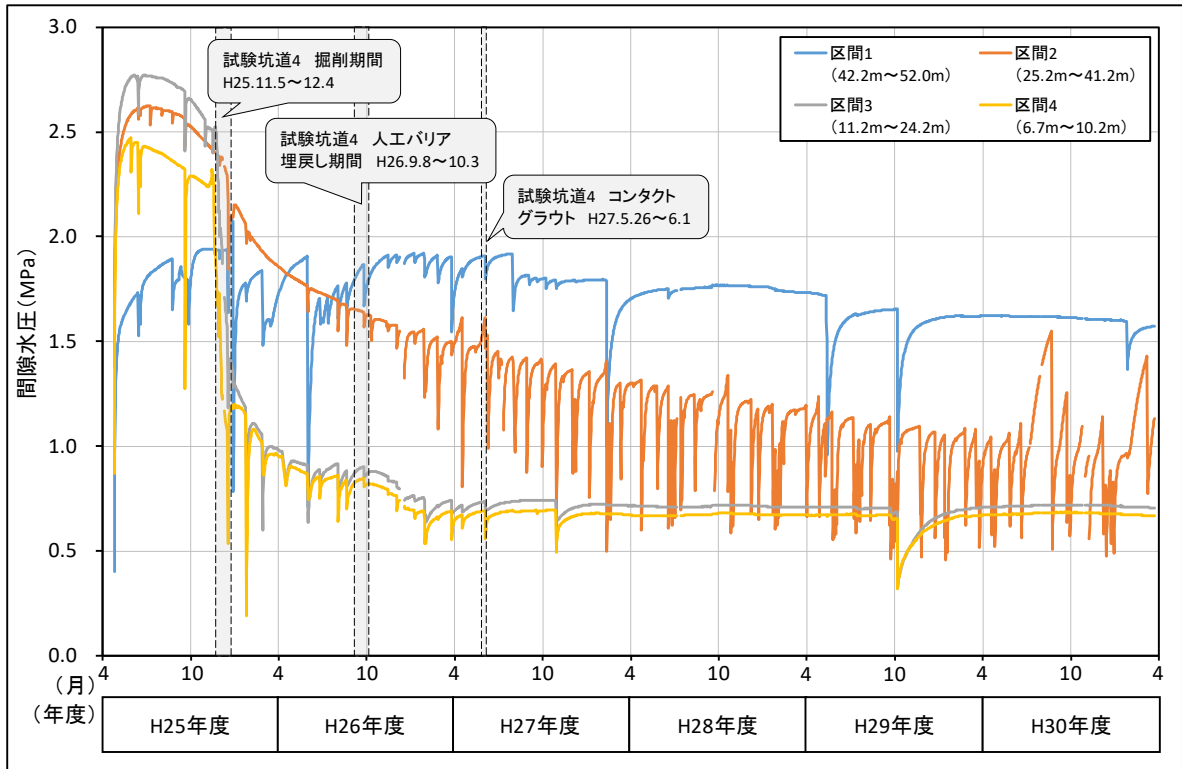


図 37 C05 における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

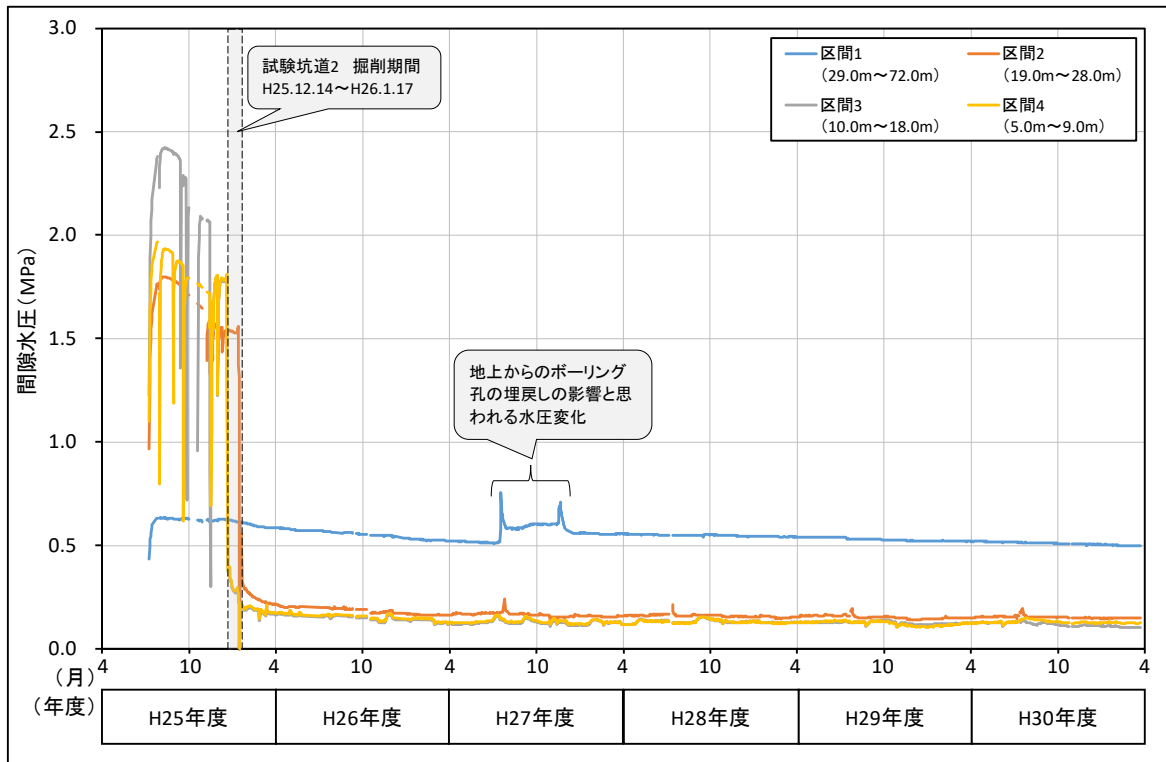


図 38 C06 における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

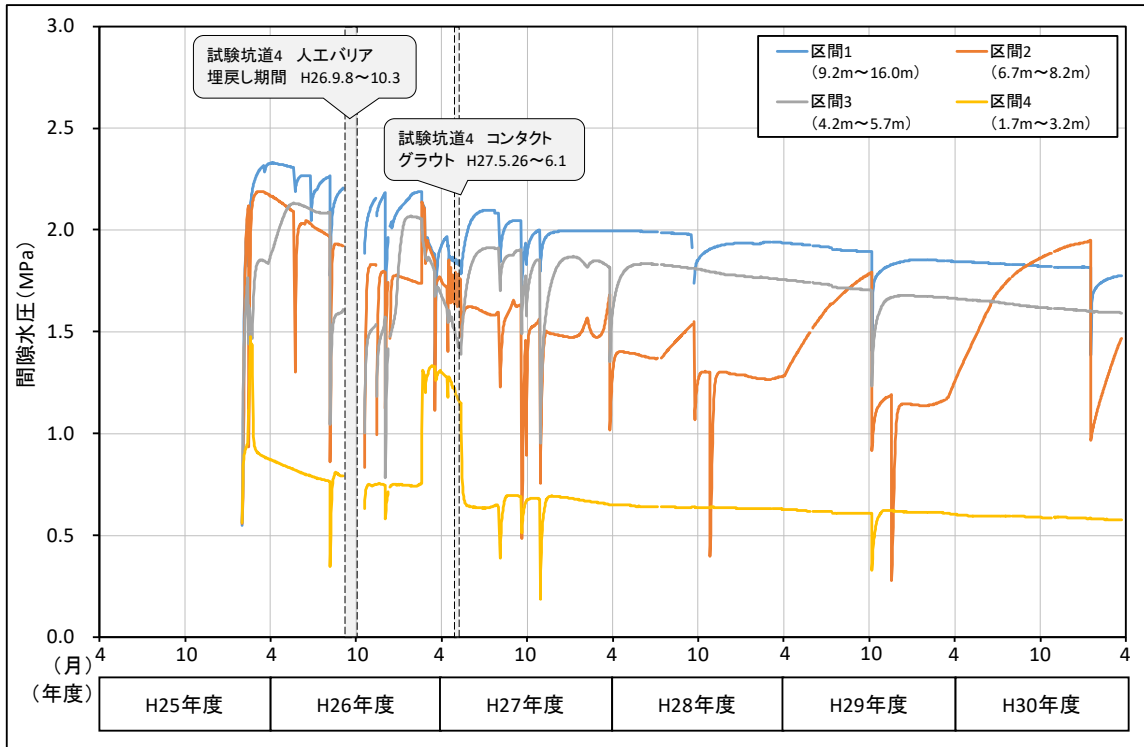


図 39 C07における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

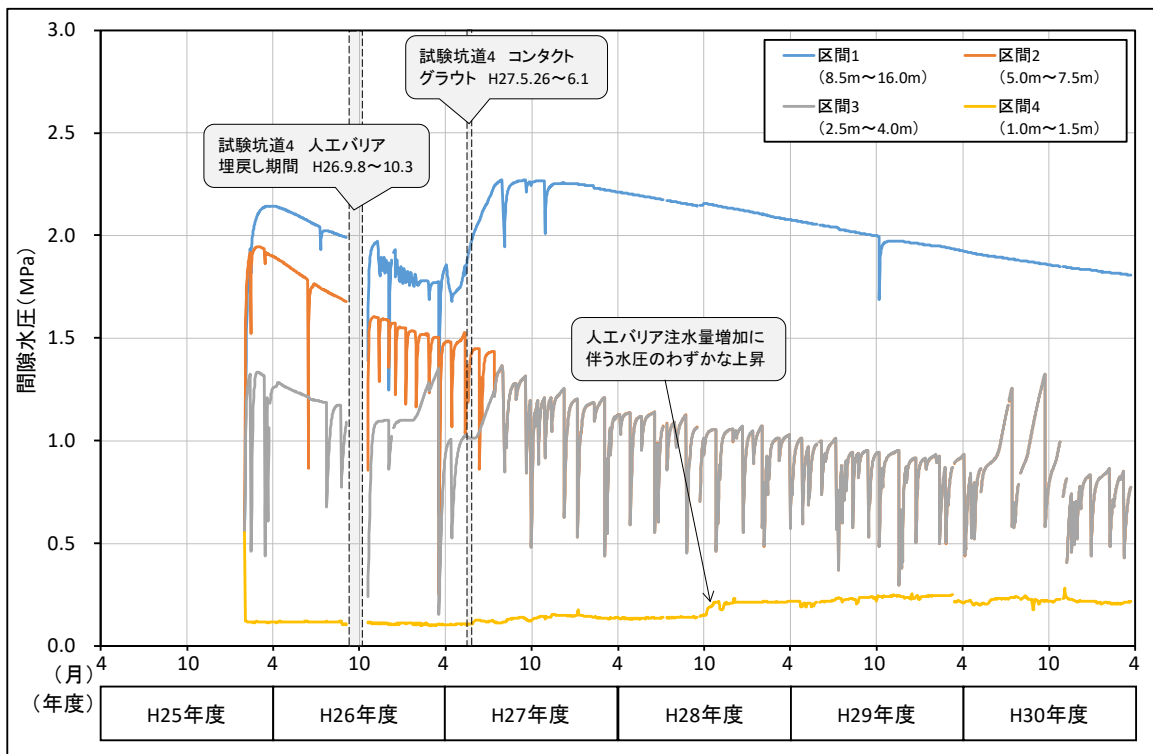


図 40 C08における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

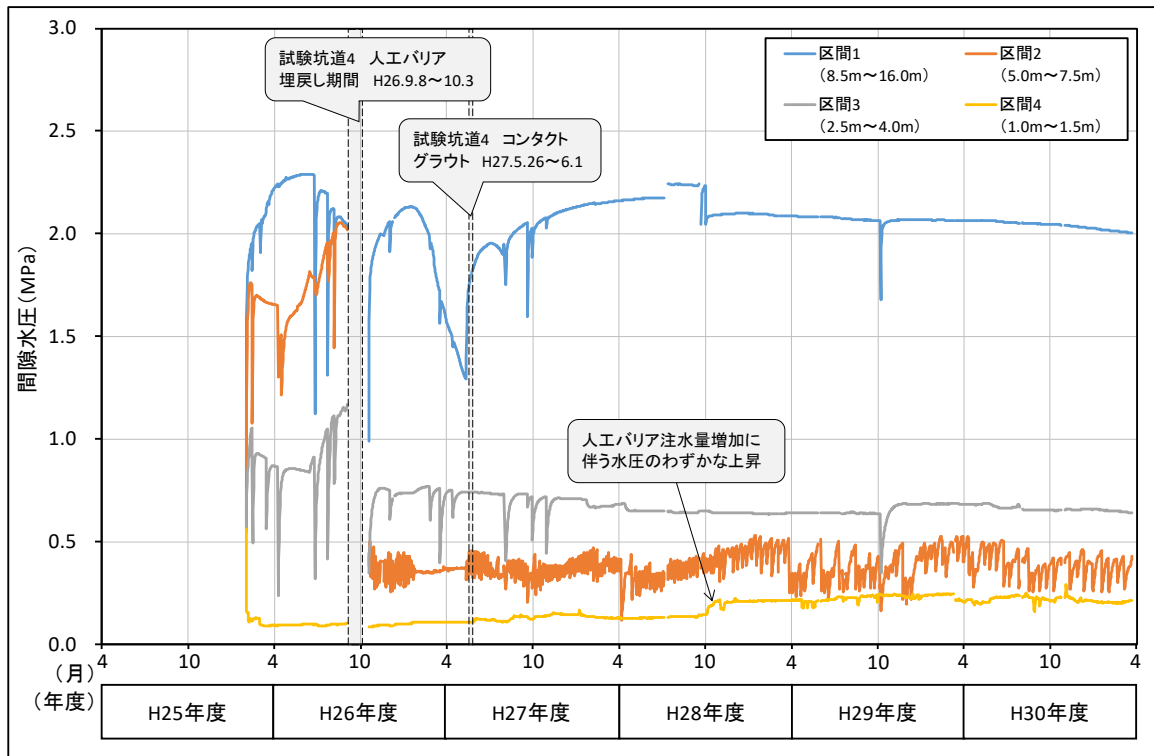


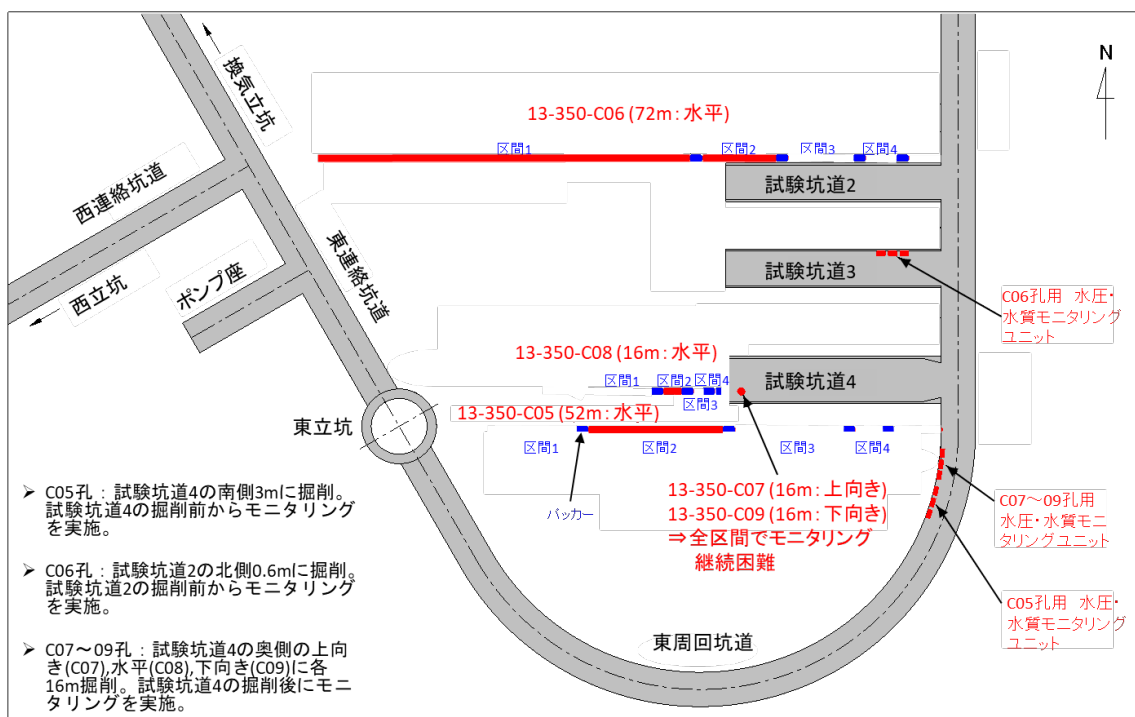
図 41 C09 における水圧モニタリング結果

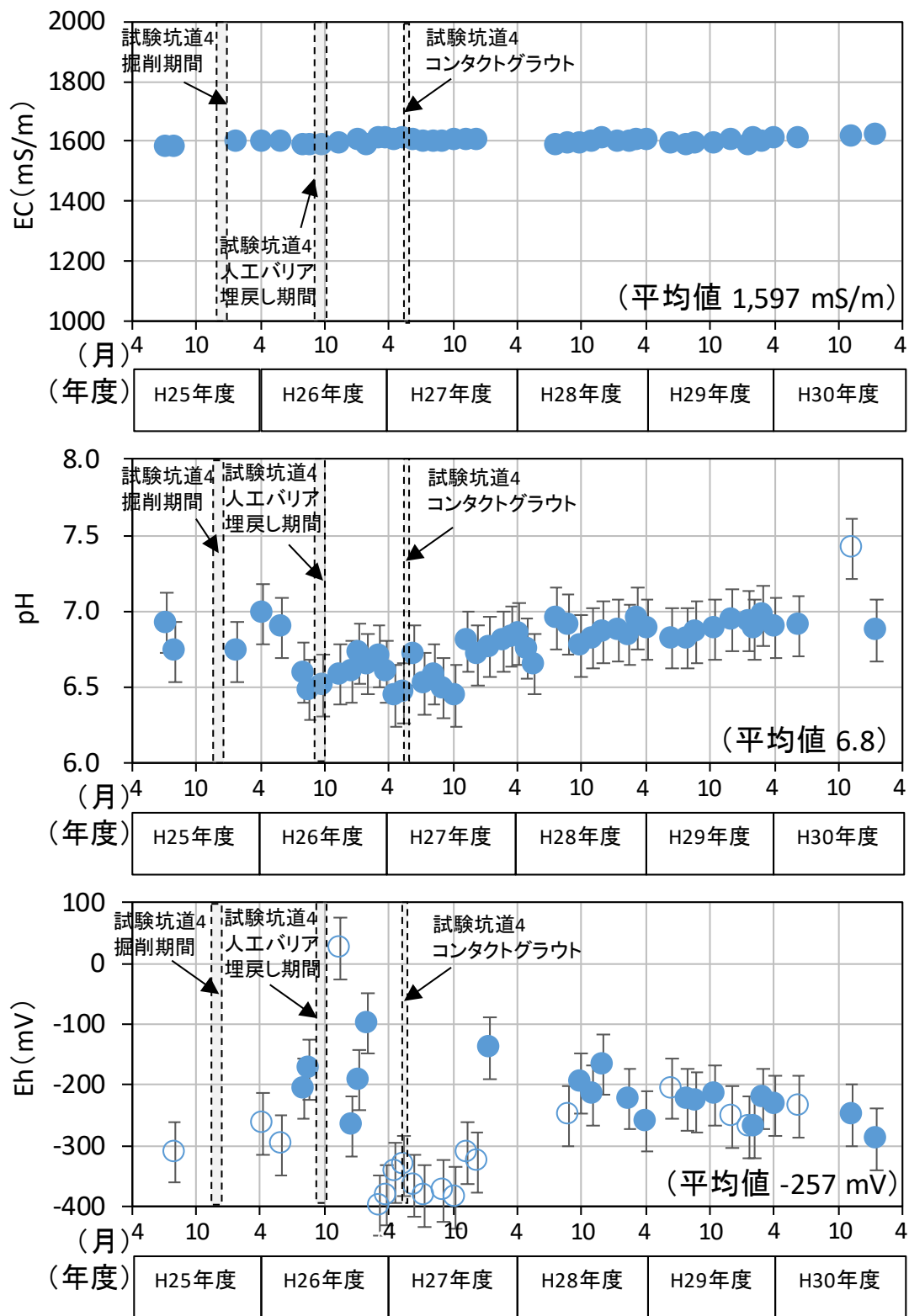
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

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 (図 73 参照)。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、水圧がわずかに上昇しており、この傾向は平成 30 年度も継続しています (図 40 および図 41)。一方、試験坑道 4 の南側約 3m 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。

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 42)。図 43 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

1600mS/m程度、pHは7程度、Ehは-220~-290mV程度であり、平成29年度の測定値と同様でした。このような継続的な観測から、試験坑道周辺に分布する地下水のECやpHには試験坑道掘削の影響と考えられる顕著な変化は生じておらず、Ehは値にバラツキ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ています。また、信頼性の高いデータを取得するためには、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）が必要であり、平成30年度はこれらのメンテナンスも継続して行いました。なお、pHのモニタリング結果において、平成30年11月にやや高い値が観測されています。他のパラメータに大きな変化が見られないことや、その前後のpH観測値は従来と同程度の値を示していることから、電極表面への汚れや遊離ガスの付着、校正の不具合などが原因と考えられます。また、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などの影響が示唆されました。これらのデータは、「信頼性が劣る可能性のあるデータ」として示しています。





白抜きデータのデータ(O)は、信頼性が劣る可能性のあるデータ

図 43 C05 の区間 2 における水質モニタリング結果

平成 30 年度は水圧・水質の継続的なモニタリングに加えて、地下水の酸化還元状態を支配する化学反応および Eh 測定値の不確かさに関する検

証を行いました⁽²²⁾。図 44 では、これまでの水質モニタリングから取得された pH・Eh の値を黒丸で、幌延地下水中の酸化還元状態を支配すると考えられる反応を(1)～(3)の直線で示しています。これらの直線はそれぞれ、 $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{SO}_4^{2-}$ と FeS_2 、 SO_4^{2-} と HS^- 、 $\text{CO}_2(\text{aq})$ と $\text{CH}_4(\text{aq})$ の酸化還元反応の平衡電位を表しており、赤、青、緑の領域は、水温や化学成分濃度などの変化に伴って各反応の平衡電位がとりうる範囲を示しています。図からわかるように、地下水中の Eh はこれらの直線の近傍にプロットされ、その不確かさを±50mV とすることで、いくつかのデータを除いて、測定値と平衡電位との差を説明することができました。このことから、幌延の地下水に対しては Eh 測定値の不確かさを±50mV と設定することが適切であると考えられます。なお、主に 13-350-C06 孔で観測されている、Eh が相対的に高く平衡電位との差が±50mV を超えるデータについては、より平衡電位の高い酸化還元反応に支配されている可能性や、Eh 測定値の時間変動が大きく地下水が酸化還元反応に関して平衡状態にない可能性が示唆されます。

今後も水圧・水質モニタリングを継続するとともに、幌延の地下水におけるモニタリングで課題となっている遊離ガスの影響を軽減する方法についても検討していく予定です。

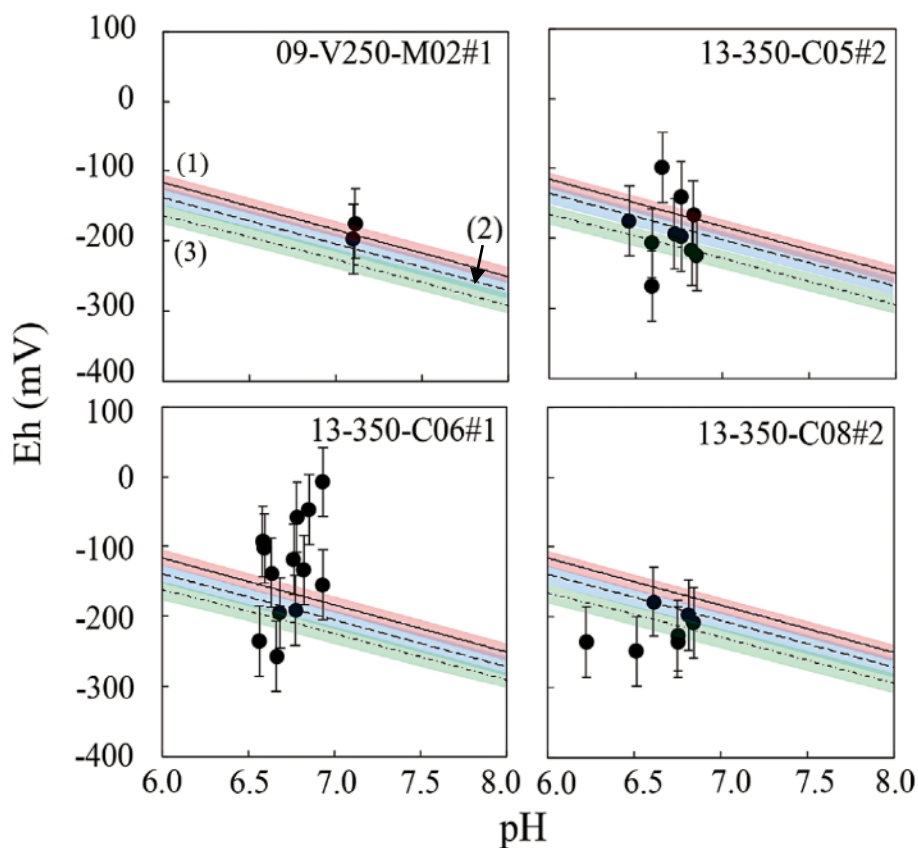


図 44 地下水の pH-Eh ダイアグラム

(1) $\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 14\text{e}^- = \text{FeS}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$ 、(2) $\text{SO}_4^{2-} + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$ 、(3) $\text{CO}_2(\text{aq}) + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{CH}_4(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}$ の反応の平衡電位を意味し、赤、青、緑の領域は、各反応の平衡電位がとりうる範囲を示しています。

(3) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

平成21年度に東立坑の深度160mに設置した光ファイバー式地中変位計を用いて、岩盤変位の長期モニタリング性能を検証しています。計測結果の妥当性を検証するため、隣接する位置に、既に技術が確立されている電気式地中変位計を設置しています(図 45)。また、同時に支保工の安定性も確認するため、電気式の鋼製支保工応力計を設置しています(図 46)。設置した計測器の配置を図 47に示します。

図 48は地中変位計の計測結果です。光ファイバー式変位計は、計測値が逸脱せず、安定した計測値が得られていますが、電気式変位計は設置後3年程度で計測値が逸脱しはじめ、現時点では正常な計測ができなくなっています。これは、岩盤中の地下水がセンサー部に浸透することにより絶

縁抵抗不良を起こすためと考えられます。次に、鋼製支保工応力計の計測結果を参照すると、季節変動と考えられる10MPa程度の応力変化が計測されているものの、大きな計測値の逸脱はなく、安定した計測データが得られています(図 49)。このことから、長期的に岩盤や支保工のモニタリングを行う上では、地中の計測では光ファイバー式に優位性がありますが、鋼製支保工など、地下水が浸潤しないような構造物内では、電気式でも問題ないことがわかります。

掘削後約10年間の変位は、地中変位計で立坑壁面に最も近い区間No. 1で約4.9mm縮む挙動を示しており、他区間に比べ変位量が大きいことがわかります。また、他区間においても、No. 3を除き変位量は小さいが縮む挙動を示しており、平成27年度以降の変位は収束傾向にあることがわかります。このことから、立坑掘削後は、約5年間かけて徐々に圧縮方向に岩盤が1mm程度変形し、その後変形が収束していくことがわかります。鋼製支保工応力計では、北側に位置するSS1において約155MPaの応力を示しており、他計測点に比べ応力が大きいことがわかります。しかしながら、特段対策を施すほどの応力状態には達していないことが確認されています。また、掘削後もSS2の計測点を除き、全計測点で応力が増大傾向にあります。

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

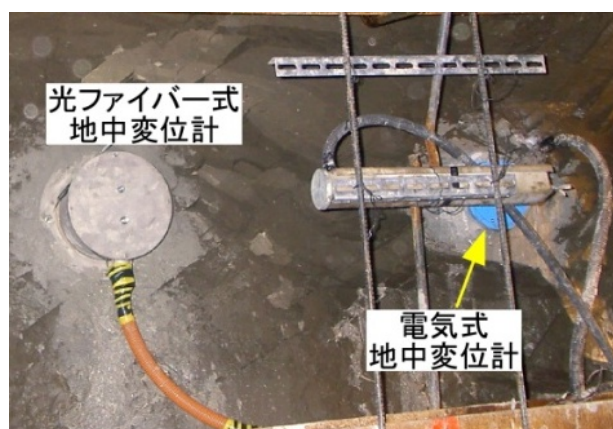


図 45 地中変位計設置状況写真



図 46 鋼製支保工応力計設置例

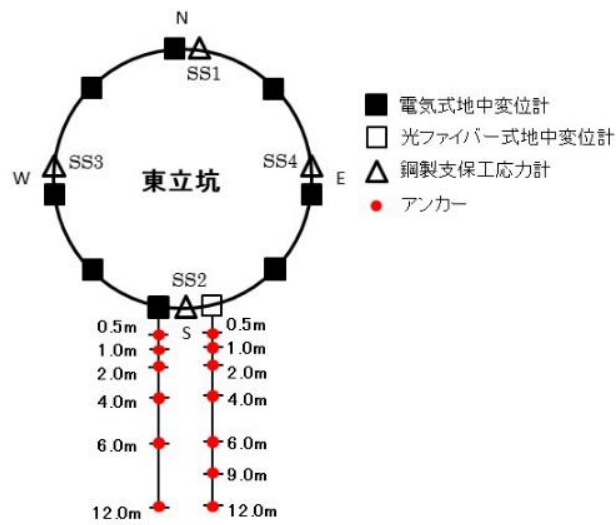
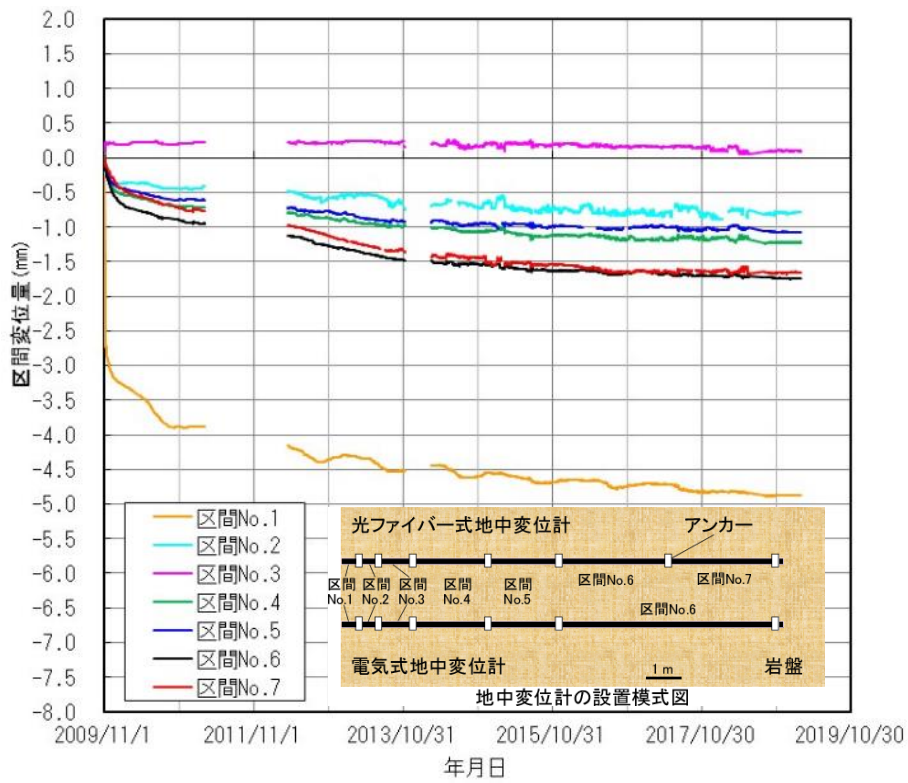
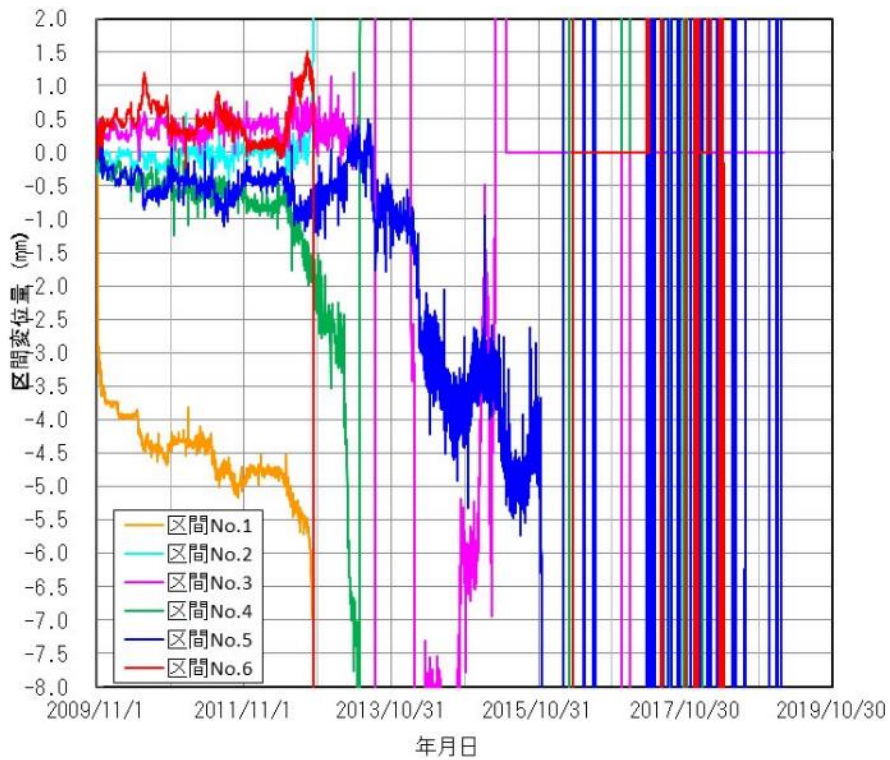


図 47 計測器設置位置図



(a) 光ファイバー式



(b) 電気式

図 48 地中変位計の計測結果

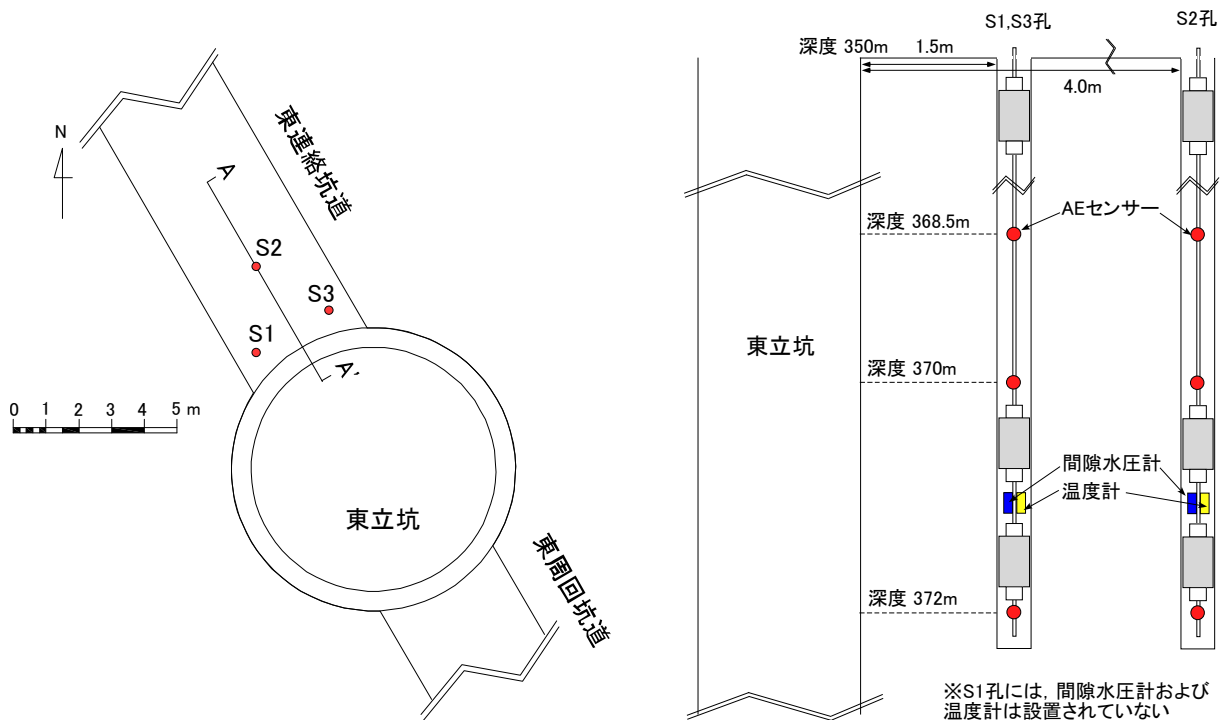


図 49 鋼製支保工応力計の計測結果

(4) 岩盤の力学特性に関する調査技術の開発

(株)大林組との共同研究として、1本のボーリング孔内で微小振動（アコースティックエミッション（以下、AE^{*38}））、間隙水圧、温度を計測する3種の光ファイバー式のセンサーで構成されるマルチ光計測プローブを開発し、図 50に示すレイアウトで東立坑周辺に設置しました⁽⁶⁾。

*38：AE：固体材料が変形・破壊する時に、ひずみが解放されて発生する微小な音波。これを分析することにより、割れ目の発生位置などを推定することができるため、立坑周辺岩盤の破壊現象をより詳細に把握することが可能となります。



(a) 平面図 (b) 断面図 (A-A' 断面)
図 50 マルチ光計測プローブ設置レイアウト

これまで、東立坑の深度350～380mの掘削中、および掘削後に発生したAEの発生位置を特定し、掘削影響領域の発達範囲を推定しました。平成30年度は、掘削影響領域内で発生したAEの発生エネルギーを分析することで、岩盤中の割れ目発生に起因するAEを特定しました。

図 51に、立坑掘削時に生じたAEのうち、岩盤中の割れ目の発生に起因するAEの発生分布図を示します。図 51から、壁面から約1.5mの範囲で多くのAEが発生していることがわかりました。これまでにマルチ光計測プローブ設置位置付近で実施した透水試験では、壁面から約1.2mの範囲で掘削により透水係数が増大することを確認しました⁽²³⁾。また、数値解析的な検討により、壁面から最大1.5mの範囲まで掘削影響領域が生じることを予測しました⁽²³⁾。以上から、割れ目の発生に起因するAEの発生位置は、透水試験や数値解析の結果に整合的なものでした。

今後は、AE測定結果に加え、既存の透水試験結果、間隙水圧計測結果、数値解析結果などを統合し、立坑掘削により生じる掘削影響領域の水理・力学特性を簡潔に示す概念モデルを構築する予定です。

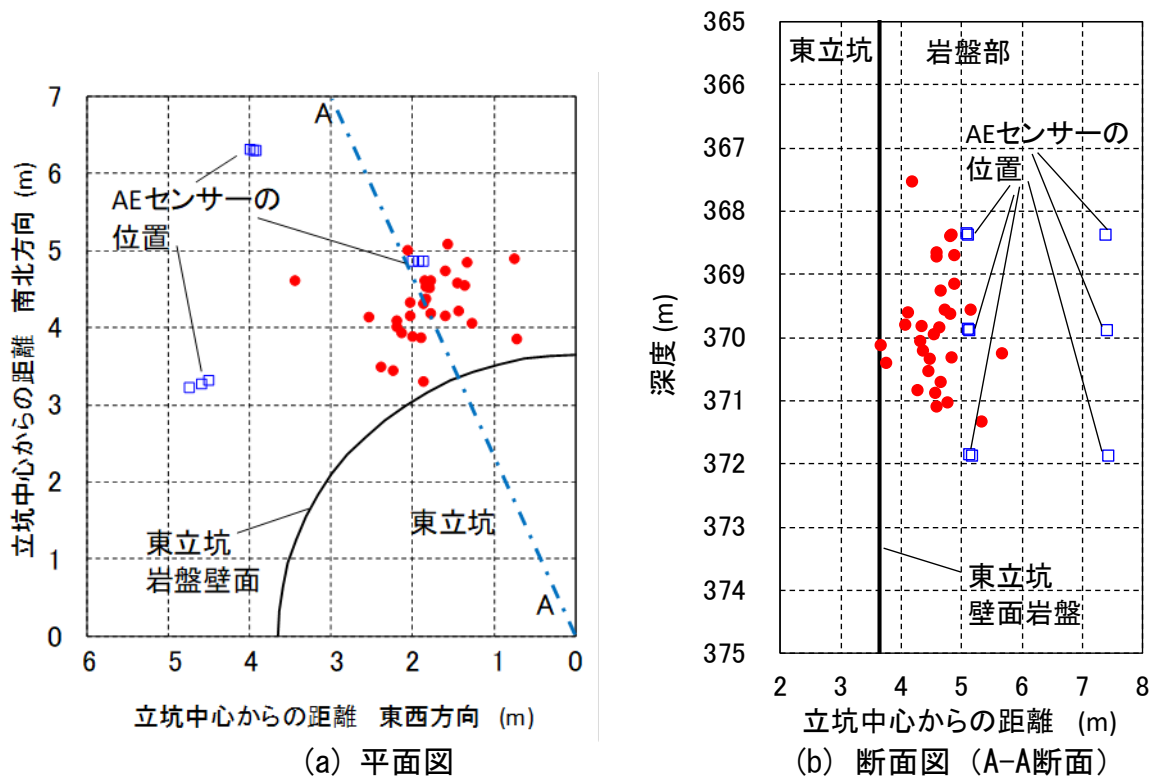


図 51 割れ目の発生に関連した AE の発生分布図

(5) 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成30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：沿岸部処分システム高度化開発）の一環として、平成21年度から24年度にかけて幌延町の沿岸域に位置する浜里地区において掘削されたボーリング孔（DD-1：孔長約1,200m）^{*39}と、新たに掘削したボーリング孔（DD-4：孔長約360m）において、国立研究開発法人産業技術総合研究所^{*40}が主体となって採水調査を実施しました。この調査は、日本全国の沿岸部を、地質、地形および地下水流動の様式に基づいて区分して、代表的な地域の深部地下水の地球化学特性や年代を把握することを目的としており、浜里地区はその一例になります。平成30年度は、DD-1孔の深度約1140mと940m、DD-4孔の深度約350mから原位置の地下水を採水しました。

採水した地下水を分析した結果、DD-1孔の最深部（深度約1140m）では、

*39：経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（地層処分技術調査等事業：沿岸部塩淡水境界・断層評価技術高度化開発）に関連して、国立研究開発法人産業技術総合研究所との共同研究として実施しました。

*40：国立研究開発法人産業技術総合研究所は、産業技術の広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている研究組織です。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が現海水とは異なり原位置平衡値に近いこと、 ^4He が十分に蓄積していることなどから、地下水は堆積時に取り込まれた化石海水であると考えられ、昨年度までの採水結果と整合的でした(図 52)。DD-4孔の深度約350mでは、温暖期に涵養した1万年程度前の地下水と推定され、これまでのDD-1孔での結果と整合的でした。この深度付近では現海水が混入しており、下位に若い地下水が存在することが、新たなボーリングを掘削しての採水調査でも確認されました。このような地下水の分布のメカニズムの解明は今後の課題と考えられます。

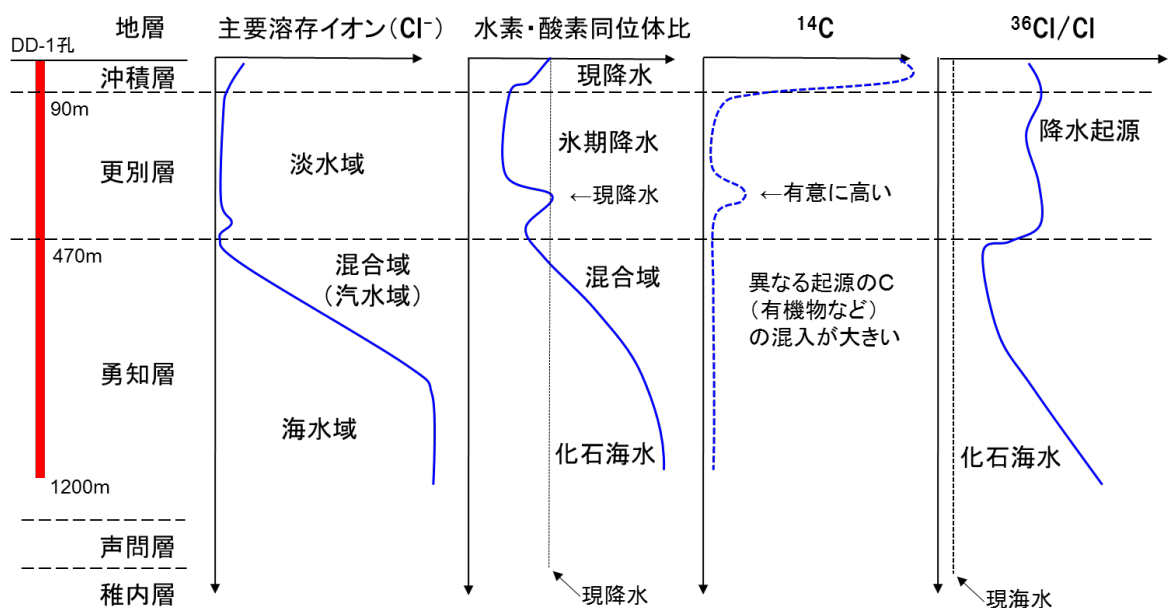


図 52 浜里における採水結果とその解釈

沿岸部において評価すべき自然現象のひとつとして、隆起・侵食があります。隆起・侵食によって段丘が形成されるため、段丘を調べることによって(図 53)、その地域の隆起・侵食を評価することができますが、形成時期や形成環境が不明な段丘もあります。そのような段丘を調査するために、局所的に残された堆積物の年代から隆起量や侵食量を算出する方法を検討しています。幌延地域には形成時期や形成環境が明らかな段丘が存在しているため、そのような段丘に対して新たな手法を適用することで、その有効性を評価することが可能となります。本検討も上述の経済産業省資源エネルギー庁の委託事業の一環として実施してきました。平成30年度は、下沼地区や開進地区からサンプリングした土壌について有

機炭素や硫黄などの化学分析を行いました。その結果と過去に実施した微化石分析などの結果とを比較することにより、これらの化学組成が陸成か海成かといった堆積環境の指標となり、段丘の形成環境の復元にも有効な場合があることを確認しました。

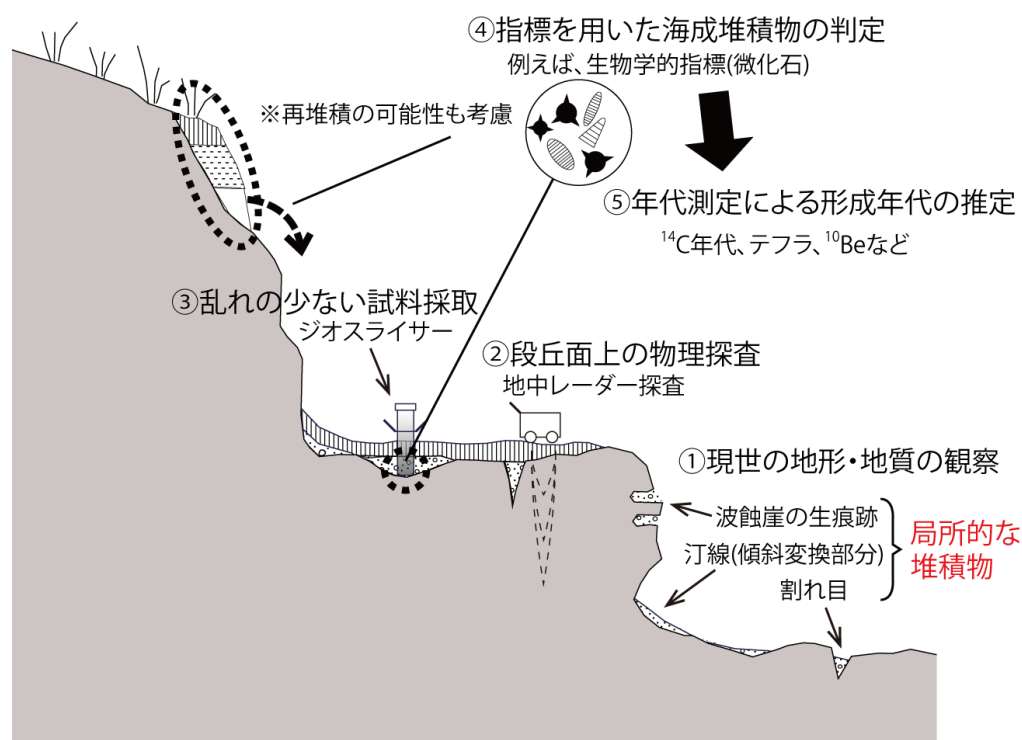


図 53 岩石侵食段丘の概念図と分析手法の例

(6) 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 30 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分布する地下水がほとんど流れていない領域（低透水領域）の三次元分布を把握する調査手法の整備、低透水領域の三次元分布を把握する解析手法の整備および調査・解析手法の体系化のための整理を実施しました⁽²⁴⁾。なお、本委託事業は平成 30 年度～平成 31 年度の 2 ヶ年計画であり、平成 30 年度は初年度にあたります。

1) 低透水領域の三次元分布を把握する調査手法の整備

地下深部の低透水領域はボーリング調査を行うことにより抽出することが可能であり、その領域の拡がり、地層と透水性を対応付けることにより、地質図などを用いて推定することができます。処分場のスケールを考えた場合、地層中には幾らかの断層・亀裂が存在することが一般的です。したがって、低透水領域の抽出にあたっては、断層・亀裂が存在していても、それらの水理学的連結性が限定的であり、巨視的には低透水である領域を抽出することが肝要です。そのような領域はボーリング調査において通常の短期的な透水試験などを行うことにより抽出することが可能と考えられますが（3.1.2(1)、図 32 参照）、そのような方法に基づいて抽出される領域の巨視的な透水性が健岩部に匹敵するほど低透水かどうかはまだ十分な検討がなされておらず、これについては、より広範囲の水理特性の評価が可能な長期の透水試験のデータを用いて確認しておく必要があります。平成 30 年度は、幌延地域の既存ボーリング孔（HDB-11）を用いて、既往の試験により亀裂の水理学的連結性が限定的と推定されている稚内層深部に分布する断層を対象に長期透水試験を実施し、同断層の水理学的な不連続性を確認するとともに、健岩部相当の巨視的な透水性が得られるかどうかの検討をケーススタディとして実施しました。

試験の結果、健岩部相当の非常に低い透水性の岩盤によって同断層が囲まれていることが試験で得られた水頭変化の実測値と浸透流解析で得られる解析値とのフィッティングにより推定され（図 54）、同断層の水理学的連結性が限定的であるとともに、地層の巨視的な透水性が健岩部に匹敵するほど低いことを示唆するデータを得ることができました。したがって、上述した短期的な透水試験に基づく方法は、地下深部の低透水領域の抽出に有効と考えられます。

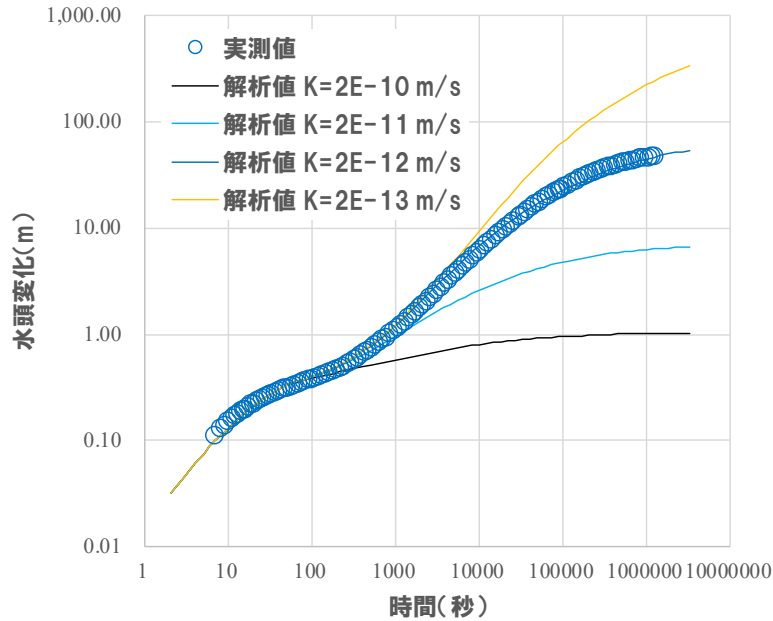


図 54 長期注水試験における水頭変化の実測値と浸透流解析による解析値（断層周囲の岩盤の透水係数を $2 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-10} \text{m/s}$ とした解析結果）

2) 低透水領域の三次元分布を把握する解析手法の整備

幌延地域では、浅部には地表から浸透した天水を起源とする地下水と塩分濃度の高い地下水が混合した地下水が分布し、それ以深では天水の浸透影響の小さい塩分濃度の高い地下水が分布していると推定されています。一方、このような地下深部に分布する、天水の浸透影響が小さく地下水の流れが非常に遅い領域（低透水領域）の三次元分布を把握するための解析手法は、十分には整備されていません。平成 30 年度は、断層と地層の透水性、海水準および塩水密度の違いに着目した地下水流動解析により、これらの要因が地表からの天水の浸透に与える影響を感度解析的に評価し、低透水領域の三次元分布を把握するための解析手法の整備に着手しました。

図 55 に、断層の透水性および海水準を変化させた場合の地下水の塩分濃度分布に関する解析結果を示します。それぞれの図の中央付近に位置する大曲断層において、透水係数を小さくした場合（ケース 3、4： $2.7 \times 10^{-10} \text{m/s}$ ）には、天水浸透は深度 500m 以浅にとどまりますが、透水係数を高くした場合（ケース 1、2： $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ）には、最大で深度 1,000m 以深まで天水浸透が進む結果となりました。また、現在の海水準（ケース 1、

3) に比べて、氷期の海水準（ケース 2、4：現海水準より-150m）のほうが、大曲断層やその西側部分における天水浸透がより深部まで達する結果となりました。このほかに、地層の透水性や塩水密度を変化させた解析も実施し、これらの要因に係る設定条件の違いが解析結果に及ぼす影響やその程度を確認しました。このような解析により、地表からの天水浸透の影響範囲（深さや広がり）を評価することができます。言い換えると、天水の浸透影響の小さい領域（塩分濃度の高い領域）の評価も可能であり、低透水領域の三次元分布を把握するための解析手法として有効であると考えられます。今後は、解析手法の改良を図ると共に、塩分濃度の実測値や地下水年代の推定値などとの比較による解析結果の確からしさの検討も進めていく予定です。

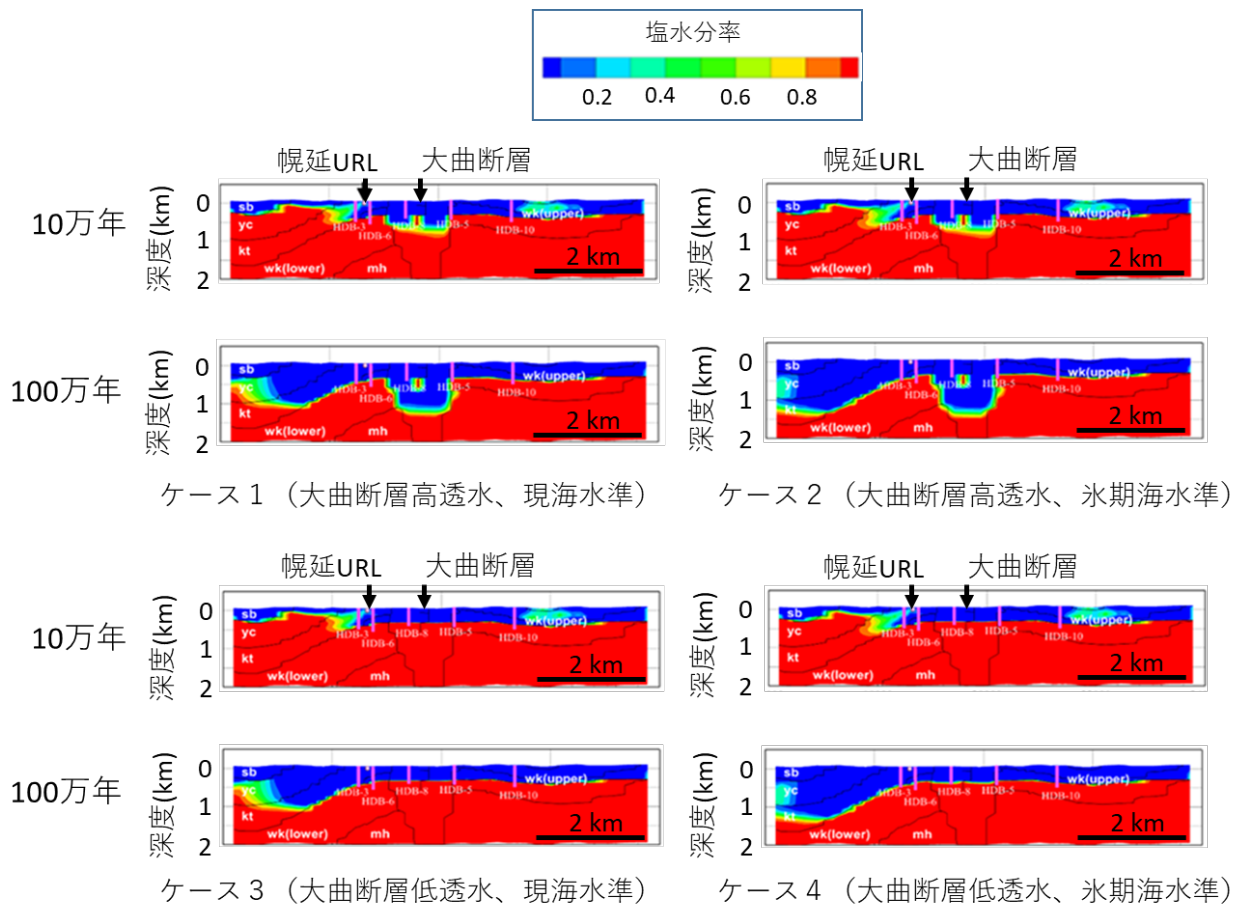


図 55 大曲断層の透水性および海水準の違いによる解析結果の比較例

3) 調査・解析手法の体系化のための整理

堆積岩地域の地下深部には、化石海水と呼ばれる変質した古海水がしばしば認められます。化石海水が存在する場所は、天水の浸透影響が小さく地下水の流れが非常に遅い領域（低透水領域）であると考えられ、このような場の三次元分布を地表から評価するための調査・モデル化・解析の方法論を検討する必要があります。平成 30 年度は、低透水領域の三次元分布に関する調査・解析技術の体系化の観点から、化石海水の存在が認められる幌延地域を対象として、広域地下水流動に関する既存の研究成果を再整理しました。

幌延での広域地下水流動概念の変遷を図 56 に示します。幌延深地層研究計画における地上からの調査段階である第 1 段階では、稚内層深部も含め、地表から浸透した天水を起源とする地下水と塩分濃度の高い地下水との混合を考慮した流動場の概念が考えられていました。その後、第 1 段階の調査以降に報じられた地史や水質形成機構に係る知見を踏まえた再検討により、地層の隆起以降、稚内層深部では地下水がほとんど動いておらず、その水質形成において天水浸透の影響は非常に小さいことが示唆されました。このように、地下深部の低透水領域の調査において、地層の埋没や隆起などの地史や含水鉱物からの脱水による化石海水の希釈などの水質形成機構を考慮した解釈を行うことが重要であることが示されました。今後も引き続き、幌延における既存の研究成果の整理を行うとともに、化石海水が存在する領域の調査・モデル化・解析に係る方法論や留意点を整理する予定です。

幌延での広域地下水流動概念の見直しに係る背景・経緯

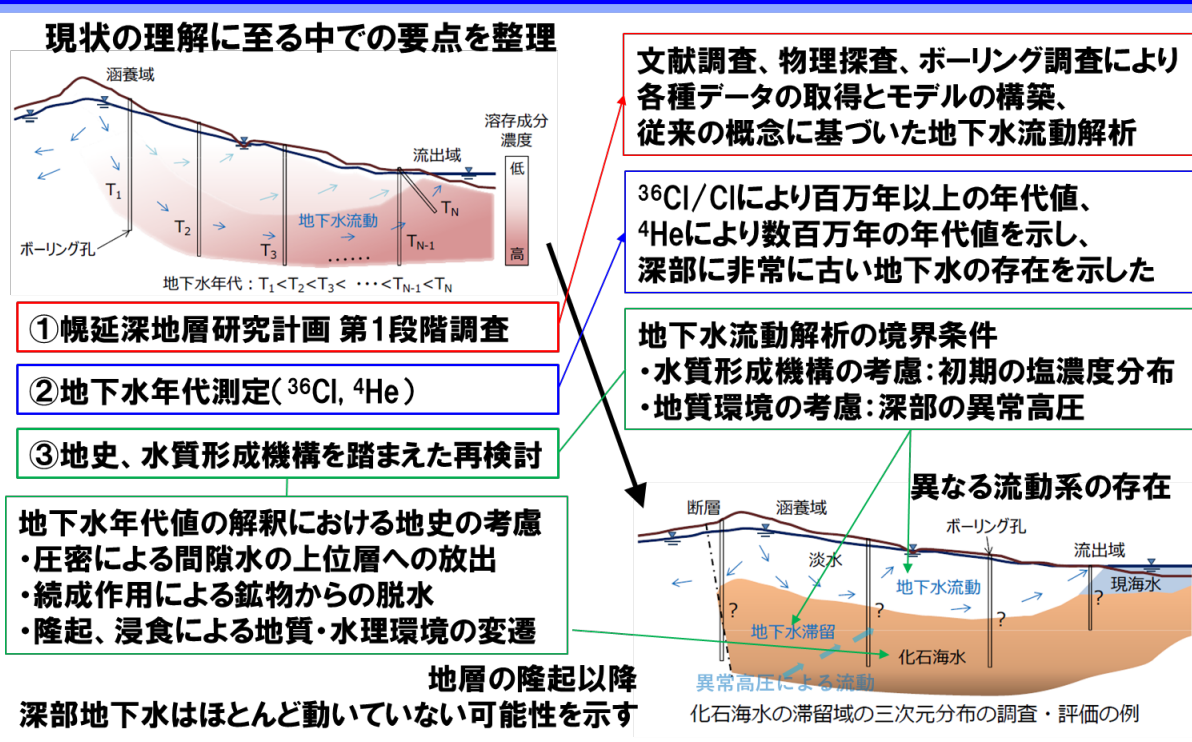
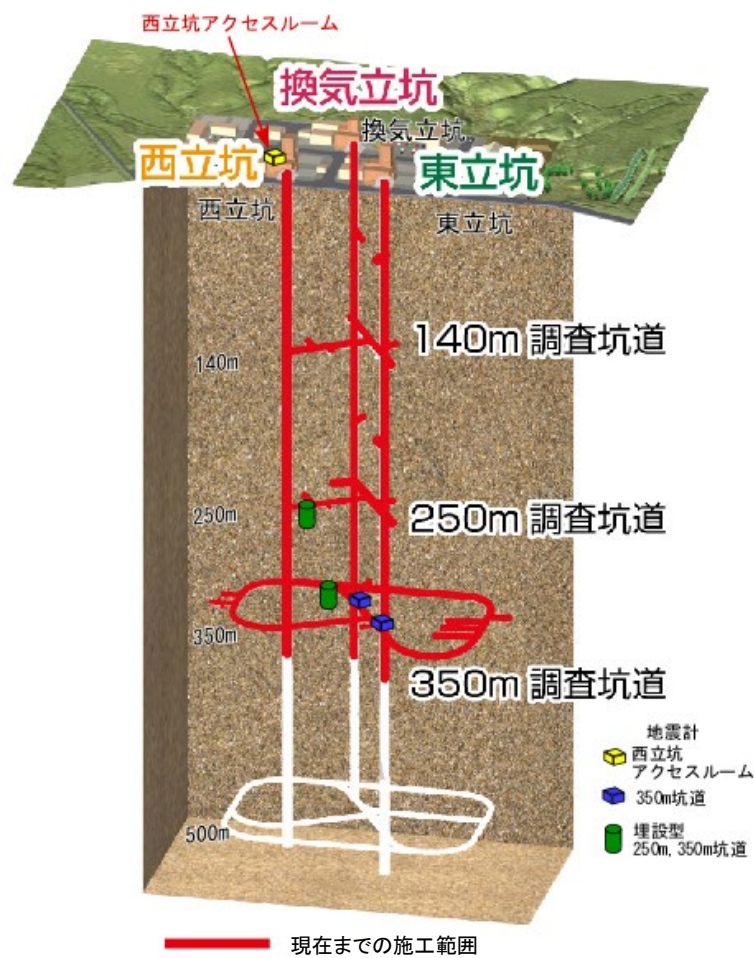


図 56 幌延での広域地下水流動概念の変遷に係る知見の整理例

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3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 57）。気象庁一元化震源データより作成した平成30年4月1日から平成31年3月31日までの北海道地域の震央分布を図 58に、幌延深地層研究センター周辺の震央分布を図 59に示します。この期間中、気象庁の発表によれば、幌延町宮園で震度1以上の体を感じられる地震は2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 57 地震計設置位置

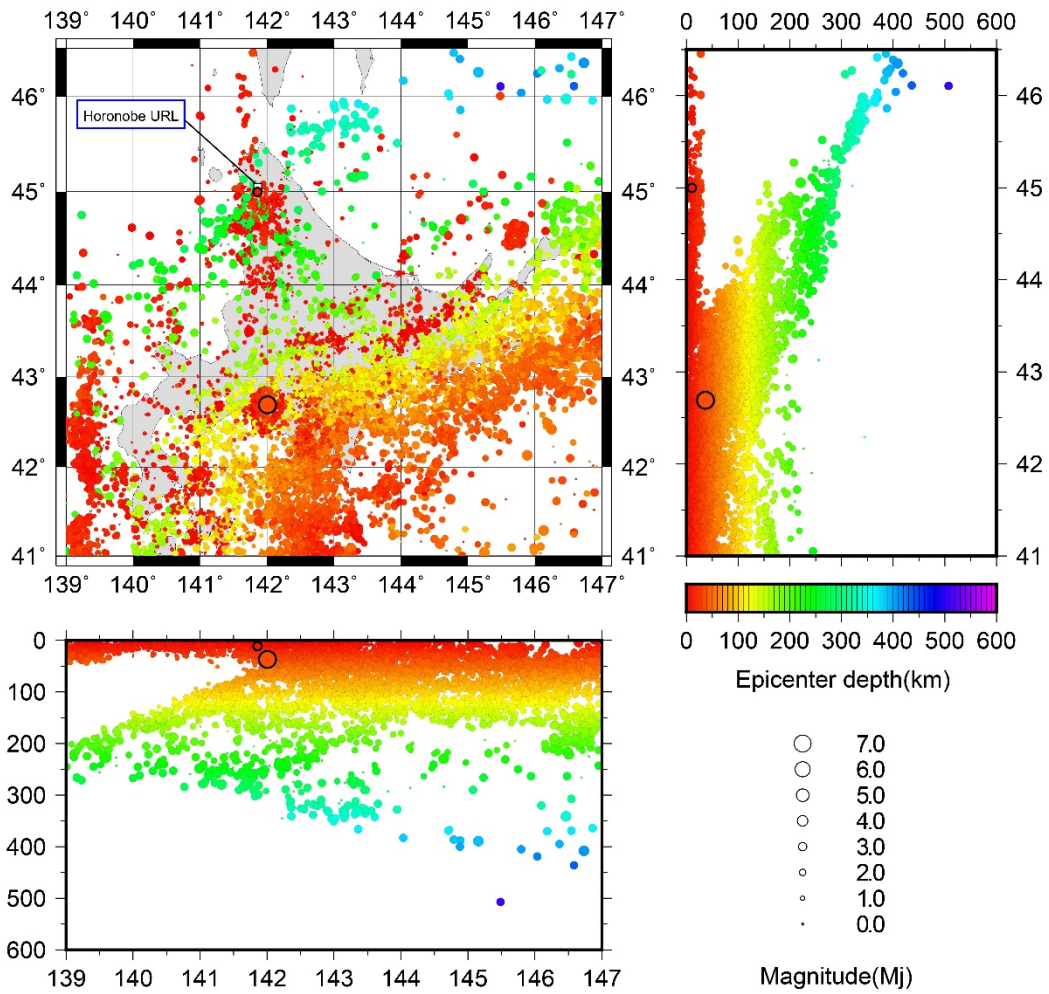


図 58 北海道地域の震央分布

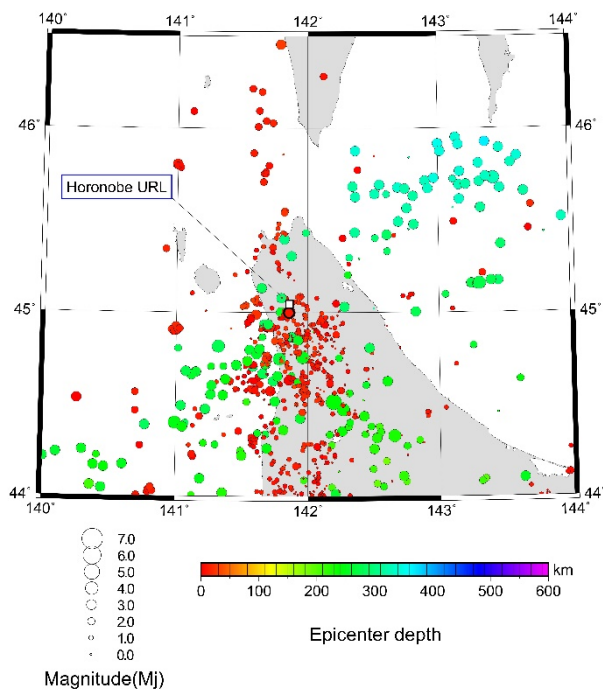


図 59 幌延深地層研究センター周辺の震央分布

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 ^{*41} | 震度 | |
|--------------------------|---------|-----------|------------|------|-------------------|-------|------|
| | | | | | | 幌延町宮園 | 最大震度 |
| 平成30年6月20日 5時28分44.5秒 | 留萌地方中北部 | 44° 59.9′ | 141° 51.4′ | 11km | 4.1 | 3 | 3 |
| 平成30年9月6日 3時7分59.3秒 | 胆振地方中東部 | 42° 41.4′ | 142° 00.4′ | 37km | 6.7 | 2 | 7 |

(これらの地震の震央は図 58、図 59に黒丸で示しています。)

このうち、平成30年6月20日に幌延町内で発生した地震（宗谷地方北部、深さ11km、Mj=4.1）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 60に示します。この図から、地表（点線波形）の振幅が大きく、地下（実線）の振幅は小さいことがわかります。また、地震波にはいろいろな周波数の波が含まれています。これで見ると地表（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3.2cm/s（黒丸）で1～5Hz程度に対し、地下（深度350m調査坑道）の地震計の地震波は振幅の最大が1.33cm/s（赤丸）でピークが3～10数Hzとやや高周波数側に寄っていることがわかります。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⁽⁶⁾、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。

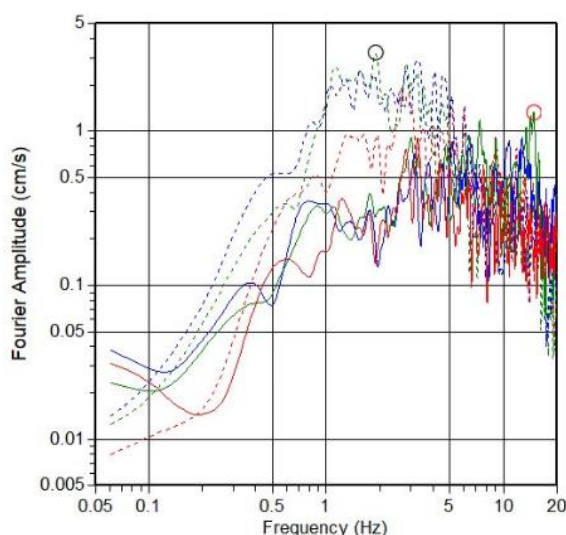


図 60 平成 30 年 6 月 20 日の地震波における周波数別の振幅

*41：気象庁マグニチュード（地震の規模を表す数値）

3.2.2 地下施設における湧水対策技術の開発

スウェーデンやフィンランドでは、処分坑道や処分孔周辺において湧水量を大幅に少なくするために、浸透性が高く、耐久性の高い活性シリカコロイドを用いた溶液型グラウトの研究が行われており、沿岸域に位置する地下施設において実証試験および実際の施工が行われています。ただし、海水条件下での溶液型グラウトの固化のメカニズムは良くわかっておらず、施工方法も確立されていません。このような状況を踏まえて、以下の課題を設定し、溶液型グラウトに関する研究を平成 28 年度から実施しています*42。

- ・海水条件下におけるグラウト材の特性データの拡充
- ・長期挙動の現象理解・モデル化・数値解析
- ・グラウト設計技術、影響評価技術の更新・適用性確認

長期挙動の現象理解を目的として、グラウト材の強度を一軸圧縮試験で測定するとともに、人工海水（養生水）に浸漬した際のシリカイオンの溶出量の経時変化を分析しました。試験対象とした配合は、主成分となるシリカに pH 調整剤と硬化促進剤を添加して人工海水で練り混ぜた海水適応グラウトと、硬化促進剤を添加しない海水硬化促進グラウトを採用しました（図 61）。海水適応グラウトは、シリカ濃度を 80%とし、練り混ぜ水に人工海水を使用したもの（S-60）、海水硬化促進グラウトは、シリカ濃度を 45%、60%としたもの（Si-45、Si-60）の 3 種類の配合の供試体を作成し、一軸圧縮強度と養生水中のシリカイオン溶出濃度の経時変化を検討しました。

| | | | |
|---|-------|------------|------------|
| 【従来型グラウト】 海水条件下では 適用不可 （海水条件下での白濁懸念） | | | |
| Hi シリカ | | 硬化促進剤 | 練混ぜ水（淡水） |
| 【海水適応グラウト】 海水条件下で 適用可 | | | |
| Hi シリカ | pH調整剤 | 硬化促進剤 | 練混ぜ水（人工海水） |
| 【海水硬化促進グラウト】 海水条件下で 適用可 | | | |
| Hi シリカ | pH調整剤 | 練混ぜ水（人工海水） | |

図 61 溶液型グラウトの配合

*42：本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 30 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：沿岸部処分システム高度化開発）の一環として実施しました。

それぞれの配合の一軸圧縮強度の経時変化を図 62 に示します。海水硬化促進グラウトの一軸圧縮強度は、海水適応グラウトに比べて低いことがわかります。このことから、グラウト中のシリカ含有率が高いほど一軸圧縮強度が高いことが示唆されます。一軸圧縮強度の経時変化については、海水適応型グラウトは 250 日をピークに強度が低下し始めましたが、海水硬化促進グラウトの強度は、養生期間 480 日を経過しても増加する傾向にあります。グラウト材の割れ目中での長期的な安定性を議論するためには、水圧に対する耐久性について議論する必要があります。過去に開口幅が 0.1mm の平行平板モデル中にグラウト材を固化させ、水圧を作用させた試験を実施していますが⁽²⁵⁾、安全側の評価で、注入後にゲル化した後、0.5m 以上の浸透距離を確保し、なおかつ 30kPa 程度の一軸圧縮強度の発現があれば、グラウト材は流出せずに所定の割れ目中にとどまると予測されています。今回の一軸圧縮試験では、3 種類ともに 30kPa 以上の一軸圧縮強度の発現が見られることから、止水要件を満たすと推定されます。

次に、図 63 に 3 種類の配合の溶液型グラウトに関して、養生水中のシリカイオン溶出濃度の経時変化を示します。いずれの配合も、90 日以降は養生水中のシリカイオンの溶出が収束する傾向にあることが確認されました。以上のように、一軸圧縮強度の経時変化から長期的な止水要件を満たすと推定されることや、シリカイオンの溶出挙動が経時的に収束することから、今回採用した 3 種類の配合は、長期的に安定した挙動を示すことが予測されます。

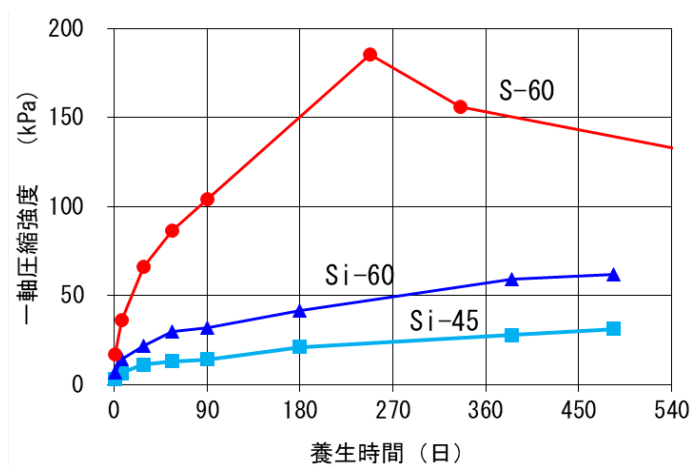


図 62 一軸圧縮強度と養生時間の関係

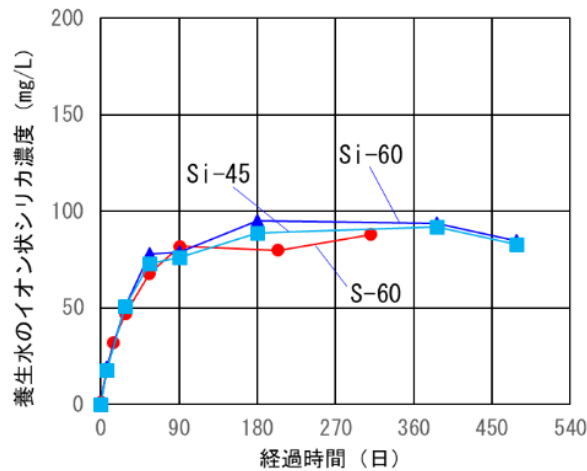


図 63 養生水中のシリカイオン溶出量の経時変化の比較

上記の試験の他に、溶液型グラウトの浸透実験を行い、海水条件下におけるグラウト浸透距離を推定する手法を検討しました。さらに、北欧の専門家を含めたワークショップを開催し、平成28年度から実施してきた溶液型グラウトの長期挙動を取りまとめた結果について評価を受けるとともに、今後の研究課題について意見交換を行いました。

3.2.3 地下施設設計の妥当性の検証

発破掘削により施工された東立坑の深度 310～350m を対象として、岩盤の安定性を担保した支保パターンの妥当性の検証を行いました。

立坑掘削時は、岩盤の崩落による支保の安定性を担保するために、崩落の程度に応じて支保パターンを適宜変更して施工しました。東立坑の深度 310～346m では、図 64 に示す 3 つの支保パターンを採用しました。深度 310～318m (図 64(a)) は、覆工コンクリートの打設長が 2m でロックボルトを水平に施工する一般的な支保パターンを採用し、深度 318～332m (図 64(b)) では、壁面に出現すると予測された断層による岩盤の不安定化の影響を考慮し、1m の打設長で覆工コンクリートを打設しました。また、深度 332～346m (図 64(c)) では、崩落の増大を防止することを目的として、ロックボルトを斜め下向きに打設することとしました。

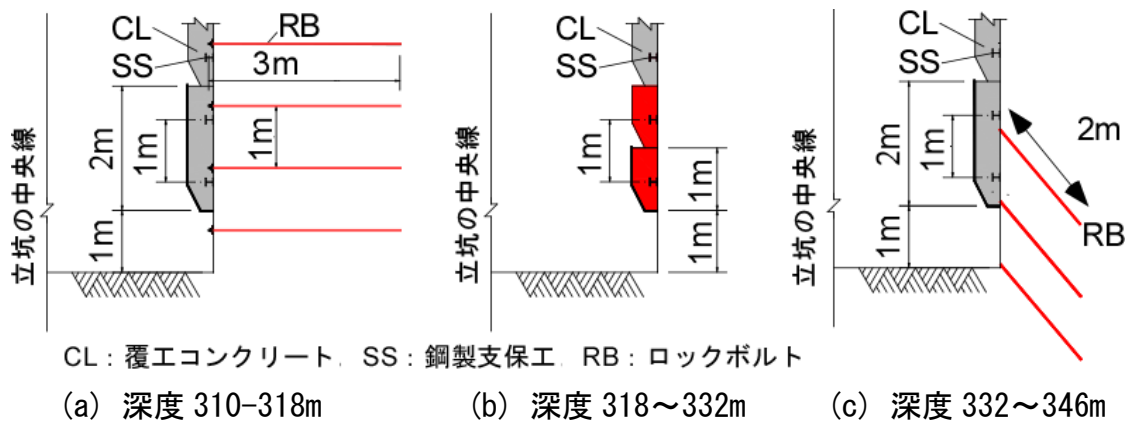


図 64 東立坑深度 310~346m で採用した支保パターンの断面図

岩盤の安定性を調べるための手段として、支保工の打設前に、岩盤壁面において 1.5m の長さで鉛直方向に測線を這わせ、弾性波速度の測定^{*43}を行いました。東立坑の深度 310~346m を対象として実施した結果を支保のパターンと併せて図 65 に示します。また、掘削の影響を受けていない弾性波速度として、立坑掘削前のボーリング調査で実施した音波検層^{*44}により得られた結果を黒色の実線で示します。

東立坑掘削時に壁面で測定した弾性波速度の値は、いずれの深度においても掘削の影響を受けていない値よりも低いことから、発破の衝撃や掘削時の応力開放による割れ目の発達の影響を受けていることがわかります。測定結果に着目すると、図 64(b)の支保パターンを採用した深度 318~332m では、弾性波速度の値は図 64(a)に示す一般的な支保パターンを採用した深度 310~318m と比較して低い値を示しています。これは、ロックボルトによる補強がない影響や、出現した断層の影響を反映していると考えられます。一方、斜め下向きのロックボルトを打設した深度 332m 以深では、岩盤の強度が局所的に小さかった深度 338m の測定結果を除き、弾性波速度が増大する傾向を示しています。斜め下向きにロックボルトを打設することにより掘削前に岩盤が補強されることから、深度 330m 以浅と比較して岩盤が安定した状態にあることが推定されます。

*43 : 立坑壁面の岩盤に打撃を与え、その時に生じる振動（弾性波）を受振器により受振し、振動の速度を計測する調査のことです。一般に、割れ目などの損傷が岩盤に加わると、弾性波速度が低下することが知られていることから、弾性波速度の低下の度合いを見ることにより、損傷の進展を評価することができます。

*44 : 超音波を発生させる装置とそれを受振する装置を組み込んだ機器（ゾンデ）をボーリング孔内に挿入しながら、深度方向の弾性波速度の分布を取得する手法です。

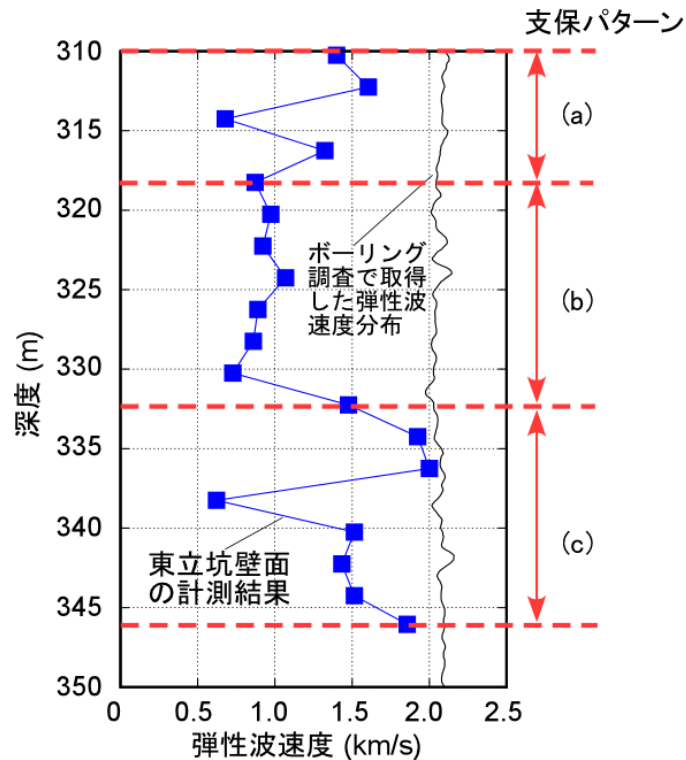


図 65 東立坑深度 310～346m における弾性波速度の分布
 (支保パターンの(a)～(c)はそれぞれ図 64(a)～(c)に対応しています)

ロックボルトの打設に際しては、ロックボルトが断層を貫くと大量湧水の発生原因となるため、断層が出現する深度付近では適した方法ではありませんが、比較的均質な岩盤で発破掘削を実施する際は、斜め下向きにロックボルトを施工する支保パターンの採用により、壁面の岩盤の安定性を担保した状態で安全に施工できることを示しました。

3.3 地質環境の長期安定性に関する研究

本研究では、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います。

幌延深地層研究センター周辺には北北西-南南東方向～南北方向に断層や褶曲構造（図 66 の大曲断層や背斜軸、向斜軸として示した箇所）が分布していることが確認できます。このように現在確認される地形や地質の分布について、過去からの発達過程を理解することは、現在から将来への変化を予測するうえで重要となります。

平成 30 年度は、断層活動が地質環境に与える影響を把握するために、図 66 に示す領域を対象として断層運動に伴う地形や褶曲構造の発達に関する数値解析を行いました。

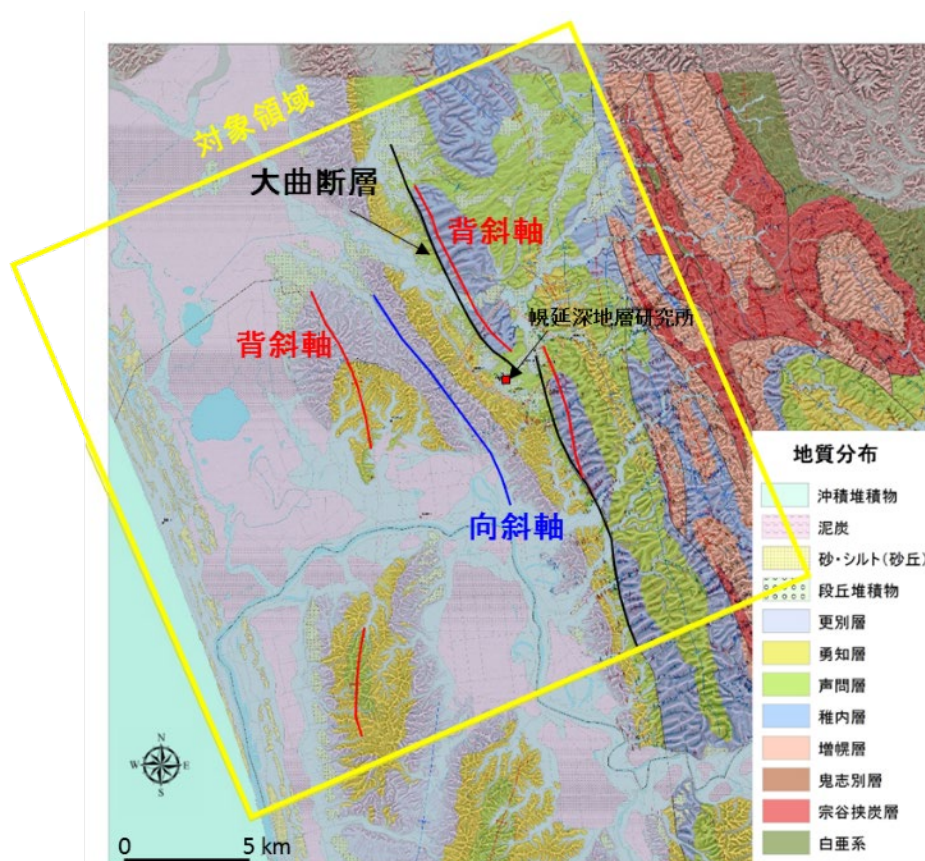


図 66 解析の対象領域（酒井・松岡，2015⁽²⁶⁾に加筆）

これまでの研究で得られた情報を統合的に解釈して構築した三次元地形・地質モデル⁽¹¹⁾を踏まえて、解析の対象領域に分布する大曲断層に着目して、断層の運動に伴う地形・地質への影響を解析しました。

図 67 は大曲断層の運動（変位量 1m）による地表面の応答（レシーバ）変位量を示したものです。なお、大曲断層の変位は、断層面に対して直交方向 90 度（逆断層）、75 度および 60 度（左横ずれ逆断層）の 3 つの方向で与えています。

X 軸（東西）方向の変位量を見ると、各図の中央部において北北西-南南東方向に走る大曲断層を境として西側（下盤側）は正（東向き）、東側（上盤側）は負（西向き）に変位していることがわかります。また、変位量は、逆断層の場合は断層面にほぼ平行に分布しますが、75 度、60 度と左横ずれの程度が大きくなるにしたがって変位量のコンターの長軸が断層面に対して斜交するようになります。Y 軸（南北）方向の変位量を見ると、上段の逆断層のケースでは断層面に直交する方向に変位するため、断層面より西側（下盤側）では少し北寄りに、断層面より東側（上盤側）では少し南寄りに移動しますが、75 度～60 度と左横ずれの成分が増加するにしたがって、断層より東側（上盤側）が北寄りに、西側（下盤側）が南寄りに変位するようになります。Z 軸（鉛直）方向の変位量は、逆断層のケースでは、断層面より東側（上盤側）に断層に沿って一様に隆起するゾーンが形成され、左横ずれ成分が多くなると（75 度～60 度）、隆起量は小さくなり、隆起するゾーンは一様ではなく、南北方向に複数に分かれて分布するようになることがわかります。一方、断層面より西側（下盤側）においては断層に沿って緩やかに沈降するゾーンが形成されています。地表で確認される地質構造（図 66）では、大曲断層の東側（上盤側）には背斜構造が認められ、声問層よりも下位の稚内層が大曲断層に沿って南北方向に断続的に分布しており、また大曲断層の西側（下盤側）では大曲断層に沿って向斜構造が認められ、年代の新しい地層（更別層）が向斜の軸部に分布しています。したがって、解析結果と地表の地質構造の特徴を比較すると、現在確認される地質構造は、左横ずれ逆断層の運動によって形成されたものと推定され、広域的な応力場として、東西あるいは東南東-西北西の方向からの圧縮場が関与したものと考えられます。このこと

は、これまでの研究で得られた、広域応力場や地震のメカニズム解^{*45}とも整合しており⁽²⁷⁾、解析による推定がおおむね妥当であったと考えられます。

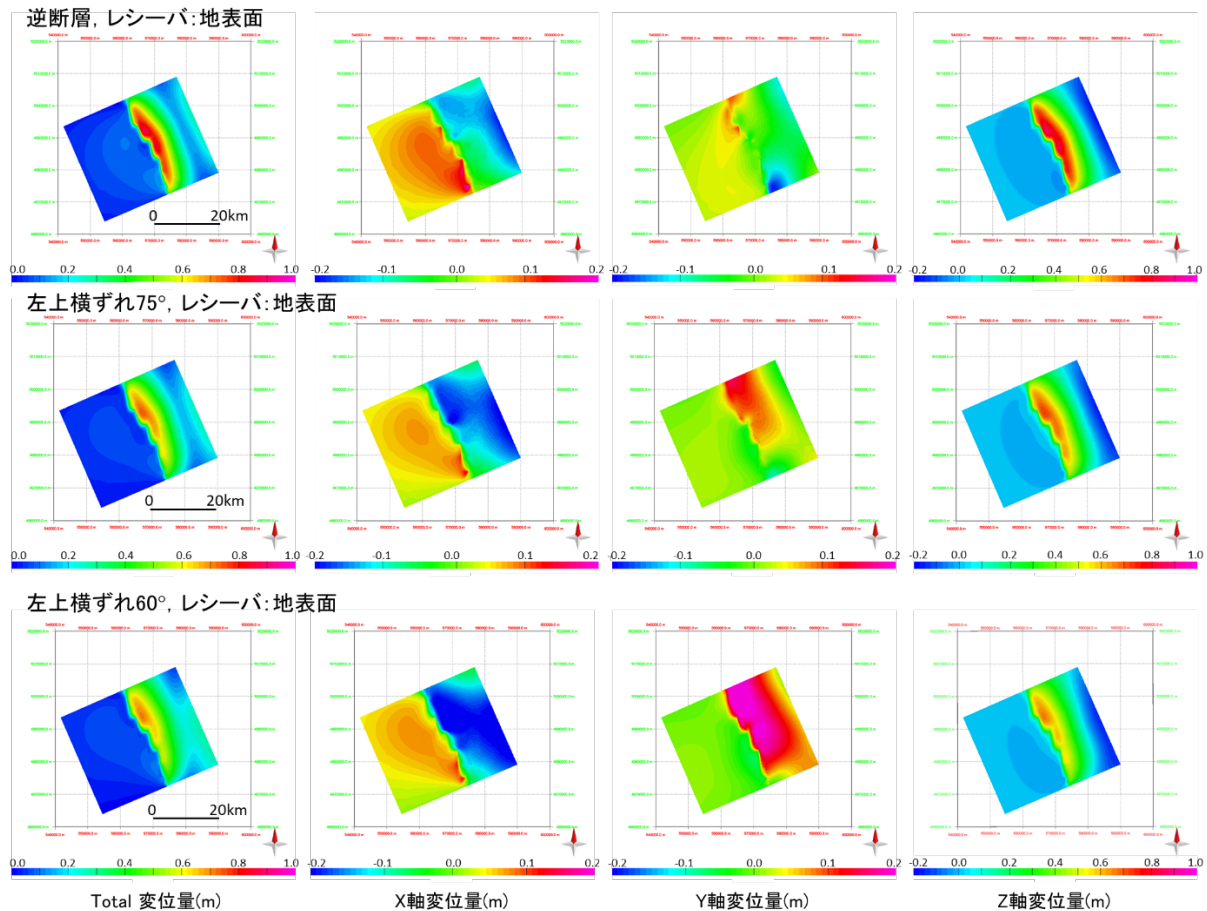


図 67 大曲断層の運動に伴う地表面の変位量

左から Total 変位量、X 軸（東西）方向変位量、Y 軸（南北）変位量、Z 軸（上下）変位量を示しています。上段は逆断層（90 度）、中段は 75 度方向の左横ずれ逆断層、下段は 60 度の左横ずれ逆断層の結果です。

また、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29年度に引き続き上幌延観測点（図 4）において地震観測を行いました。平成30年度中、震度1以上に相当する地震を観測した回数は2回あり、そのうち最も大きいものは震度3に相当しました（表 1参照）。

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

*45：メカニズム解は、地震を発生させた断層がどの方向を向き、どのように動いたか、および地震がどのような力によって発生したかを示すものです。

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、平成27年度から深度350m調査坑道と3つの立坑の坑底に設置した地震計（14台）で微小地震の観測を行っています（図 68）。



深度 350m 調査坑道 平面図

図 68 地下施設に設置した地震計

平成29年度末に実施した2回の水圧擾乱試験で観測された全ての地震計（3成分）のデータを用いて解析を行いました。

観測データについて、振動の相関指標を用いた方法により、全ての試験時間帯で高い相関指数値が認められましたが、複数の地震計に共通するイベントが見られないことから、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。加えて、イベントの到来方向や入射角の推定を行う解析を実施しました。観測された波形を図 69に、解析結果を表 2、図 70に示します。

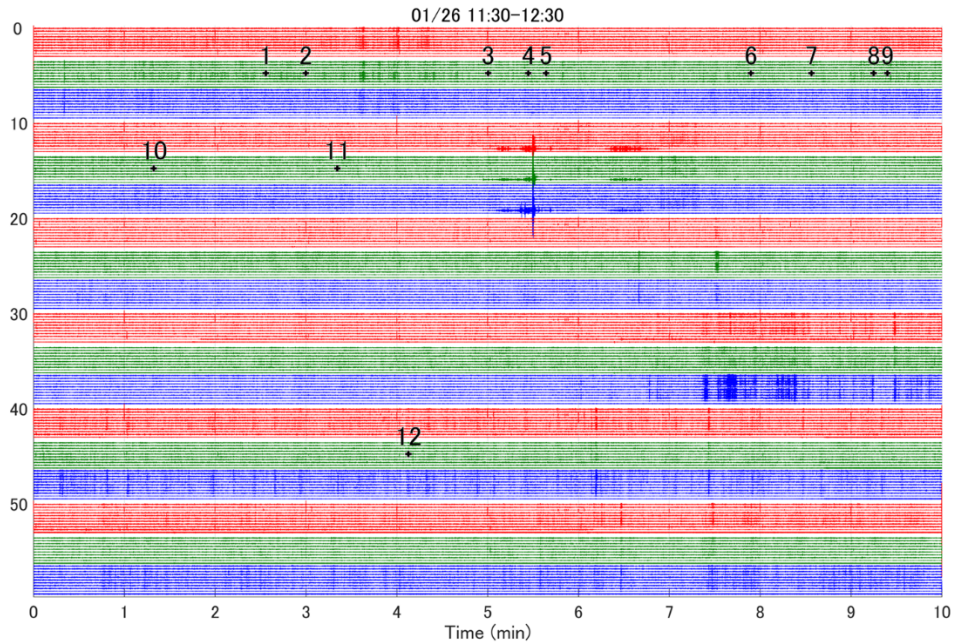


図 69 抽出したイベントと各成分・各観測点での波形

1/26 11:30~12:30 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 0~10 分の下側に 10~20 分を並べる、というようにして表示している。赤は南北動、緑は東西動、青は上下動を示し、それぞれ 14 観測点の波形を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 1 月 26 日 11:30~12:30 の間で抽出されたイベント

| No. | 時刻 | 見かけ速度 (km/s) | センブランス値 | 入射角(°) | 方位角(°) |
|----------|-------------------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|
| 1 | 2018/1/26 11:32:33.520 | 2.93 | 0.0572 | 22 | 75 |
| 2 | 2018/1/26 11:32:59.930 | 2.57 | 0.0413 | 25 | 43 |
| 3 | 2018/1/26 11:35:00.300 | 3.78 | 0.0425 | 17 | 45 |
| 4 | 2018/1/26 11:35:26.910 | 2.73 | 0.0404 | 23 | 74 |
| 5 | 2018/1/26 11:35:38.540 | 2.98 | 0.0491 | 21 | 49 |
| 6 | 2018/1/26 11:37:53.940 | 4.49 | 0.0524 | 14 | 57 |
| 7 | 2018/1/26 11:38:33.880 | 3.27 | 0.0419 | 19 | 30 |
| 8 | 2018/1/26 11:39:15.030 | 3.16 | 0.0353 | 20 | 70 |
| 9 | 2018/1/26 11:39:24.080 | 3.41 | 0.043 | 19 | 77 |
| 10 | 2018/1/26 11:41:19.410 | 2.58 | 0.0423 | 25 | 97 |
| 11 | 2018/1/26 11:43:20.730 | 3.21 | 0.0393 | 20 | 58 |
| 12 | 2018/1/26 12:14:07.700 | 4.13 | 0.0467 | 15 | -3 |

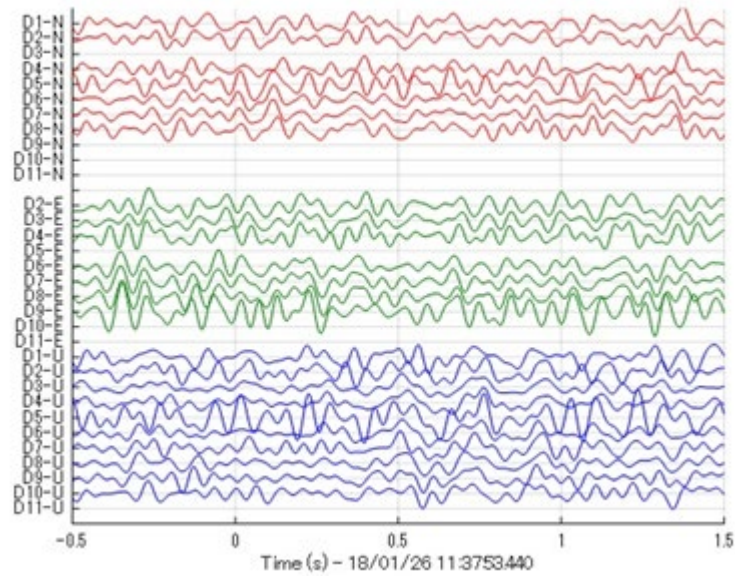


図 70 表 2 のイベント No. 6 の波形図

波形の赤色は南北 (N)、緑色は東西 (E)、青色は上下動 (U) を示す。

解析の結果から、水圧擾乱試験の注入圧最大時には複数の地震計に共通して記録されているイベントが存在することが分かりました。しかし、これらの多くは入射方向が水平に近く、観測点と水圧擾乱試験位置のジオメトリから想定される入射角の大きなイベントは、抽出したものよりさらに微小なものであることが分かりました。今後は、観測手法の妥当性や適用限界などについて検討していく予定です。

4. 地層処分研究開発

4.1 処分技術の信頼性向上

平成30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の計測を終了し試験体の取り出しおよび分析調査を行いました。また、モニタリング機器の放射線影響の検討、低アルカリ性セメント系材料の影響評価試験、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・回収技術の実証試験に向け、模擬PEMと坑道壁面の隙間の充填技術の実証試験を行いました。

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71）は、幌延を事例として、①地層処分研究開発の第2次取りまとめ報告書⁽²⁸⁾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72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するものです。

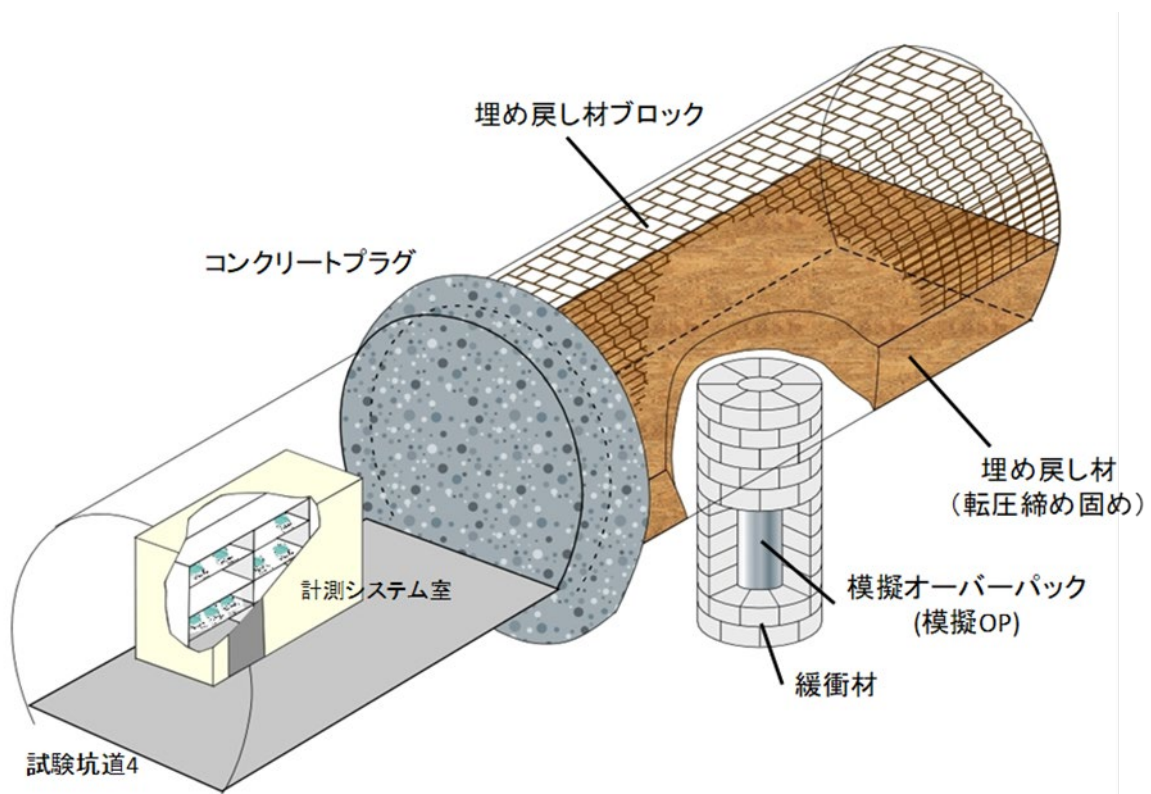


図 71 人工バリア性能確認試験の概念図

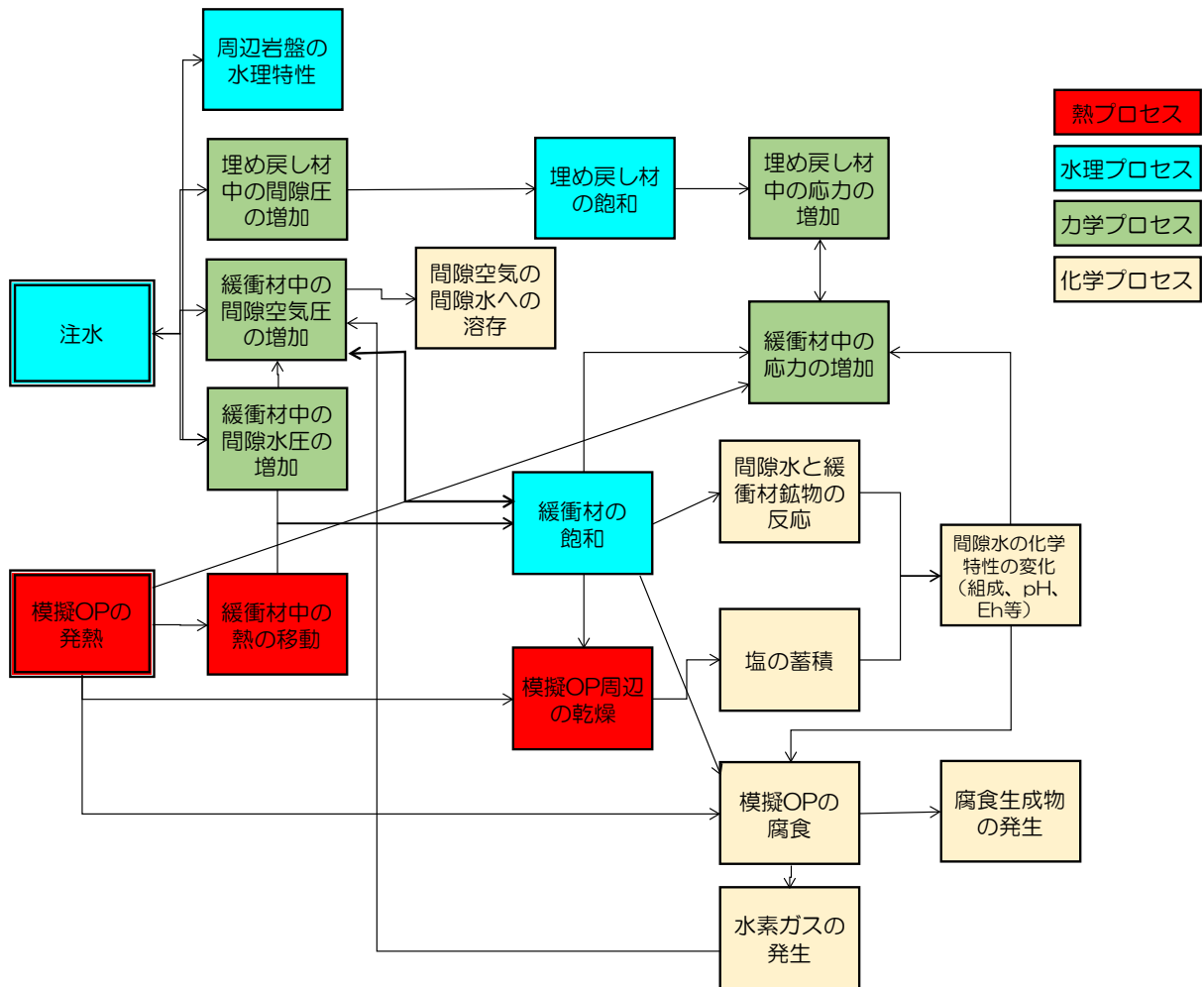


図 72 人工バリア性能確認試験で生じる熱－水理－力学－化学プロセスの相関関係

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。

平成30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 73に示します。なお、図 73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150mL/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1000mL/minに設定しています。また、埋め戻し材への注水は、緩衝材への注水と同時に100mL/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300mL/minで注水を再開しています。平成30年度も平成29年度に引き続き、注水量は変化させずに一定の条件で試験を継続しました。

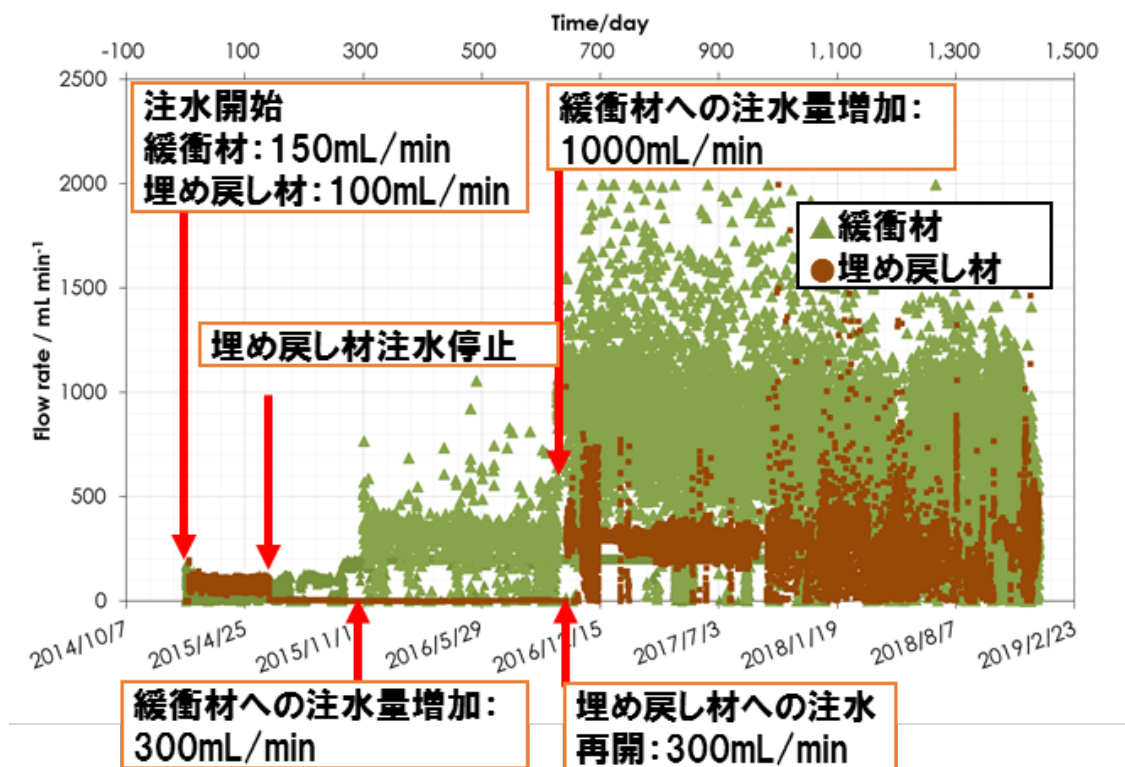
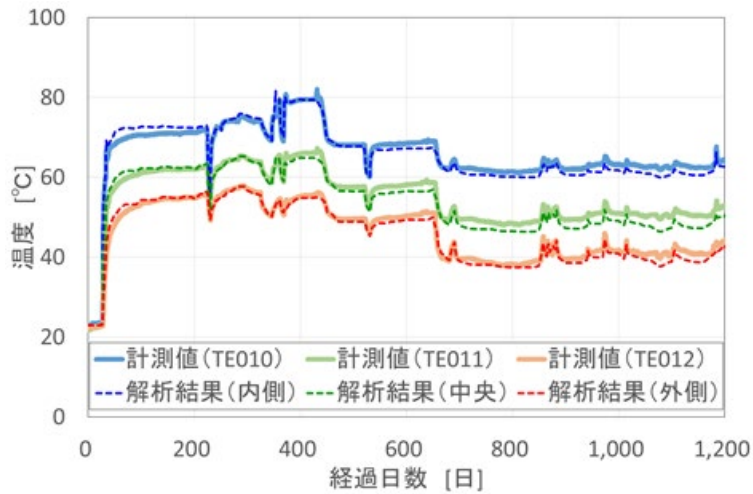


図 73 緩衝材および埋め戻し材への注水量の経時変化

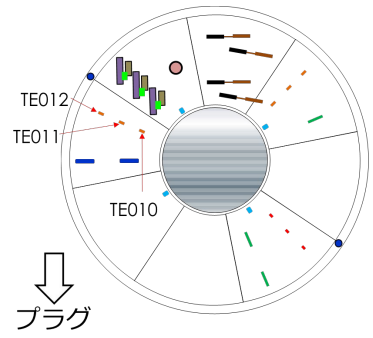
また、データの取得と並行して、熱－水理－力学連成現象の解析が可能な解析コードであるTHAMESを用いて、解析を実施しています。平成30年度は解析モデルに埋め戻し材を追加し、緩衝材の膨潤応力^{*46}を見直し、試験開始から1200日後までの解析を実施しました。一例として、図 74に緩衝材中に設置した温度計、水分計および土圧計の計測値との比較、図 75に比抵抗トモグラフィ結果との比較、図 76に埋め戻し材（転圧部）に設置したFDR-V (Frequency Domain Reflectometry with Vector network analyzer) との比較を示します。温度の境界条件には模擬オーバーパックの表面と緩衝材外周部に設置したケイ砂部の温度計の計測値を用い、水理の境界条件にはケイ砂部に設置した間隙圧計の計測値と埋め戻し材外周部の注水圧の計測値を用いました。図 74(a)の計測値は緩衝材5段目に

*46：緩衝材中のベントナイトが水を吸収し、体積が膨張することによって発生する応力のことです。

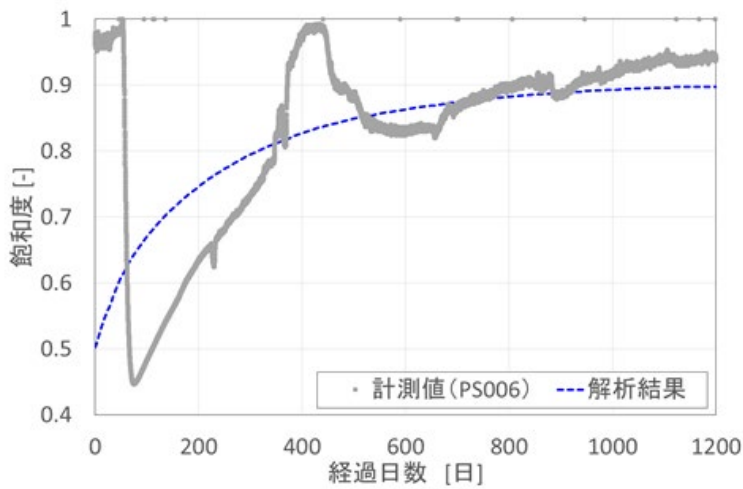
設置した温度計、図 74(b)の計測値は緩衝材5段目に設置した水分計から得られたデータを飽和度に換算した値です。飽和度は1になると緩衝材が完全に飽和したことを示します。温度については、平成29年度の結果と同様に計測値と比較的よく一致していることがわかります。飽和度については全体的な傾向は一致しているものの、400日付近や1200日付近で開きが見られます。今後は、不飽和中の透水係数や温度勾配による水分の移動のパラメータを見直す予定です。図 74(c)の計測値は緩衝材5段目に設置した土圧計のデータです。緩衝材の膨潤応力は塩分濃度により変化することが知られています。そこで平成30年度は、原位置地下水の塩分濃度を考慮した緩衝材の膨潤応力を用い、解析を実施しました。その結果、平成29年度の解析結果（蒸留水を想定した膨潤応力式を使用）と比較して計測値の再現性が向上しました。図 75は比抵抗トモグラフィの結果で、1200日後の計測値を飽和度に換算したものです。計測結果はばらつきはあるものの、両者とも緩衝材の外周部は地下水の浸潤により飽和度が上昇し、内側ではヒーターの加熱により飽和度が低下しており、全体的な傾向は一致していることがわかります。図 76の計測値は埋め戻し材（転圧部）に設置したFDR-Vにより計測された比誘電率を体積含水率に換算した値です。500日付近までは良好な一致が見られますが、500日以降では計測値のみが上昇しています。これは、緩衝材や埋め戻し材が膨潤し密度が変化した影響などが推測されますが、詳細については引き続き検討していく予定です。



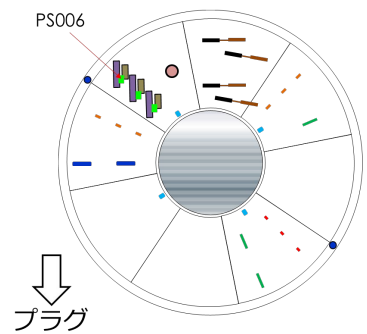
(a) 緩衝材中の温度



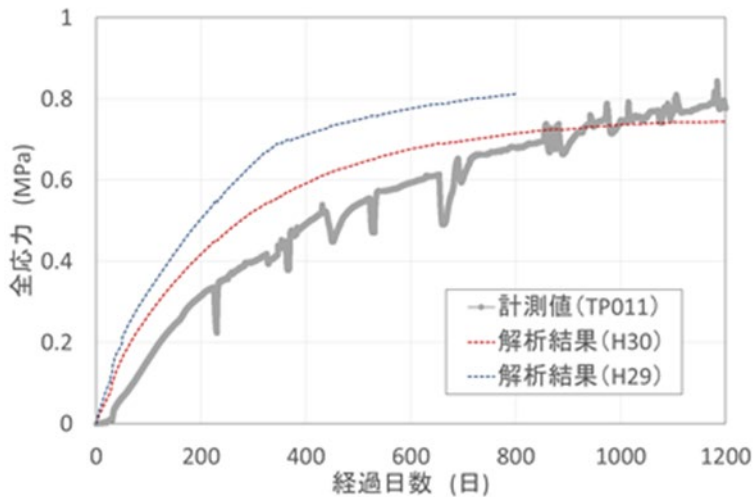
センサー配置
(緩衝材 5 段目)



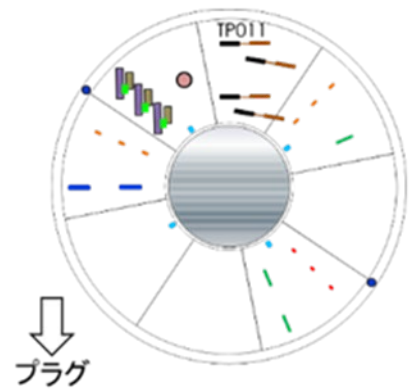
(b) 緩衝材中の飽和度



センサー配置
(緩衝材 5 段目)



(c) 緩衝材中の土圧



センサー配置
(緩衝材5段目)

図 74 解析結果との比較の例 (緩衝材)

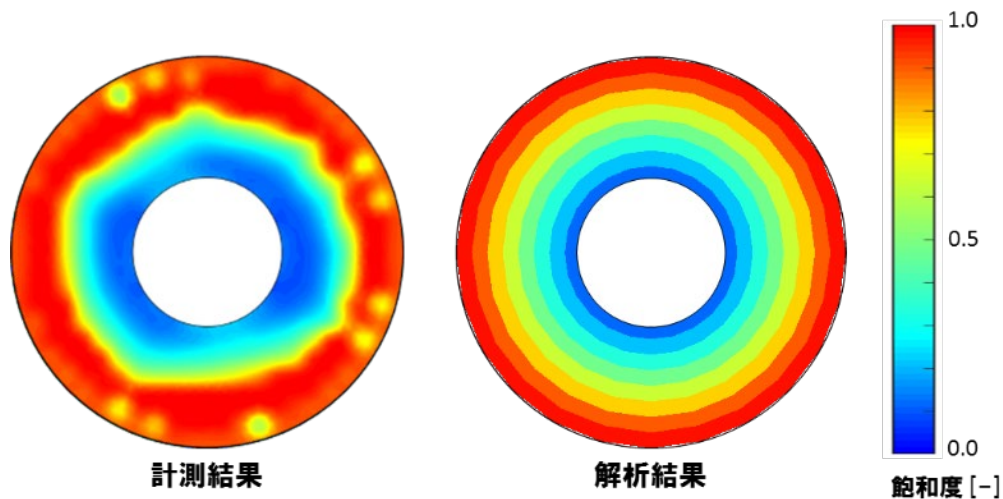


図 75 解析結果との比較の例（緩衝材：比抵抗トモグラフィ）

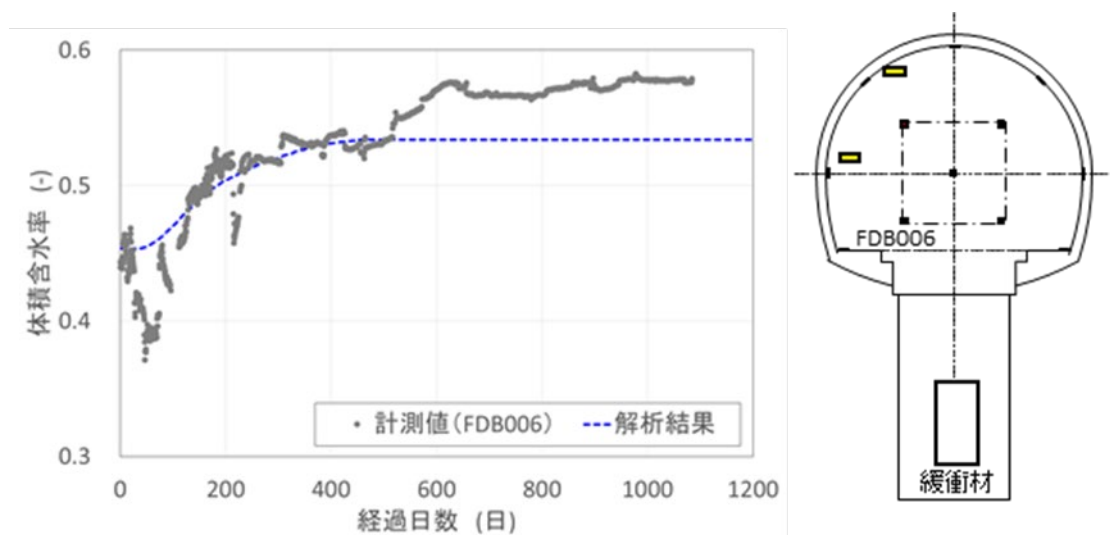


図 76 解析結果との比較の例（埋め戻し材）

平成30年度は、気相を考慮した熱－水理－力学連成解析を実施して気相が人工バリアで生じる挙動に及ぼす影響を調査しました。解析コードには水蒸気の発生、気相の圧力増加に伴う液相への溶解といった相変換を考慮可能なCODE_BRIGHT⁽²⁹⁾を用いました。また、比較のために気相を考慮しないケースについても解析を実施しました。図 77に解析モデルと出力位置、図 78に温度、飽和度、平均有効応力の解析結果を示します。図 78の(a)は気相を考慮したケース、(b)は気相を考慮しないケースです。温度の解析結果を比較すると両者に大きな違いは見られず、本モデルにおいては、気相による温度分布への影響は確認されませんでした。飽和度については、気相を考慮したケースではヒーター周辺の内側の飽和度が水

蒸気の発生により低下するのに対し、気相を考慮しないケースでは飽和度の低下は確認されませんでした。平均有効応力は、気相を考慮したケースではヒーター周辺で発生した水蒸気による間隙空気圧の上昇に伴う体積変化により、内側の有効応力が負（引張）になっていることがわかります。これらのことから、気相の考慮の有無によって、飽和度と平均有効応力に大きな違いが見られることがわかりました。本解析はヒーター周辺の間隙空気が外側へ動きにくい系を想定した解析であるため、内側の間隙空気圧が大きく上昇しましたが、人工バリア性能確認試験では大きな間隙圧の上昇は確認されておらず、内側の間隙空気は地下水の浸潤に伴い外側へ抜けている可能性があります。THAMESによる解析では、ヒーター周辺の水蒸気の発生による飽和度の低下は考慮しているものの、水蒸気の発生に伴う間隙空気圧の上昇は考慮していません。したがって、THAMESでは地下水の浸潤に伴い間隙空気が外側へ抜けているような場合において、飽和度の進展や膨潤圧の発現による応力状態の概略推定に適用できると考えられます。適用性の確認については継続して実施していく予定です。

今後も解析モデルの高度化や気相による影響評価を継続するとともに、化学的挙動を含めた連成現象の評価も実施していく予定です。

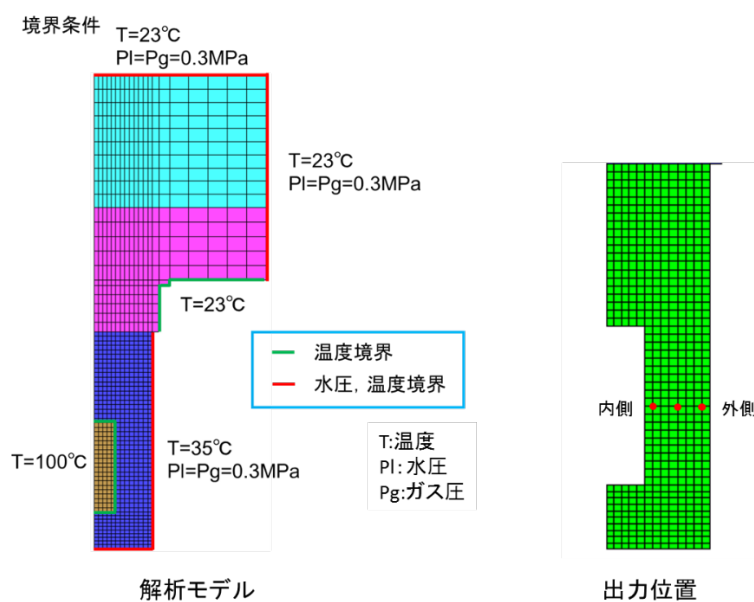


図 77 解析モデルと出力位置

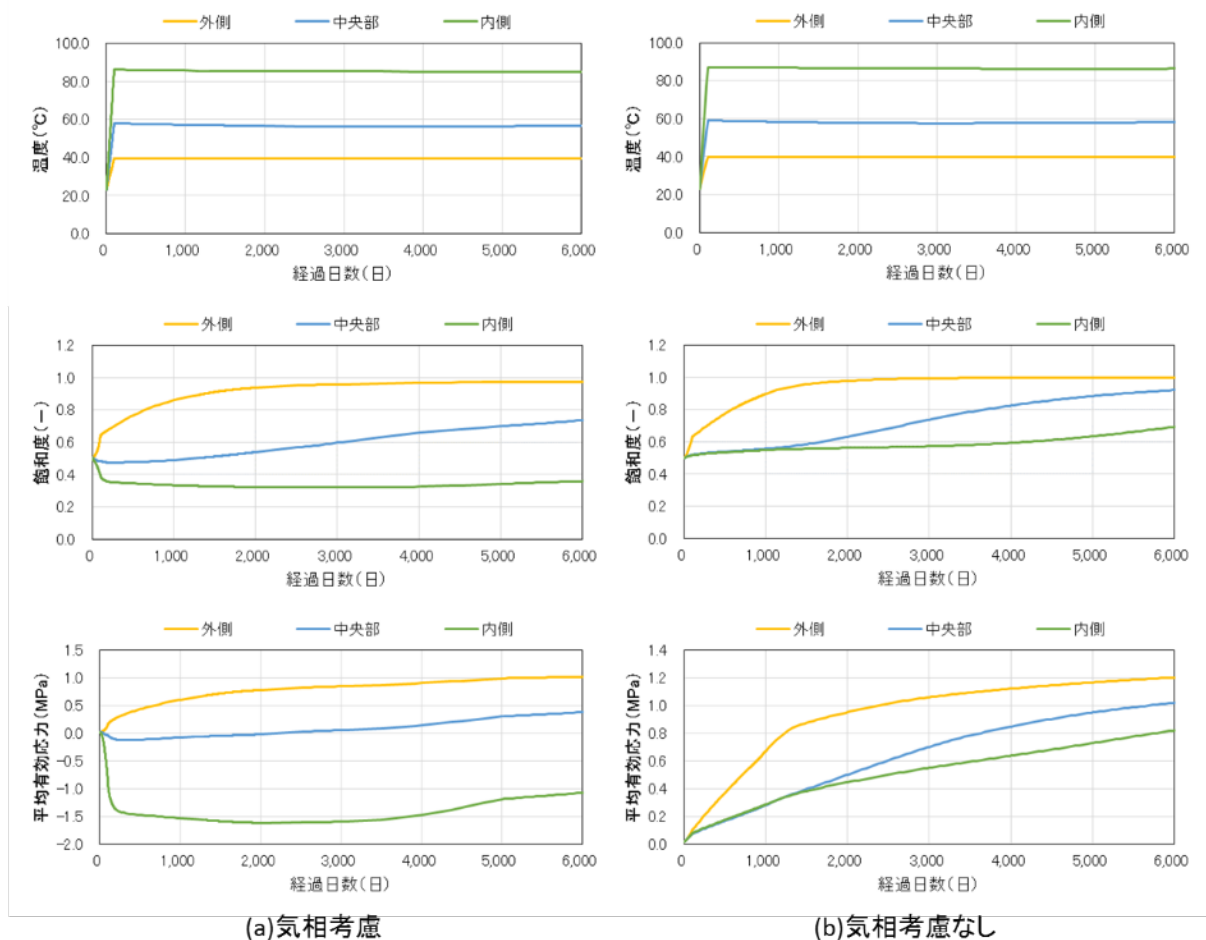


図 78 CODE_BRIGHT による解析結果

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（図 5）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^{*47}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 79）、平成26年度に試験を開始しました。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

*47：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。

より交流^{*48}インピーダンス^{*49}を測定し、腐食の速度などを評価します。また、計測終了後に試験体を回収し、模擬オーバーパックス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。

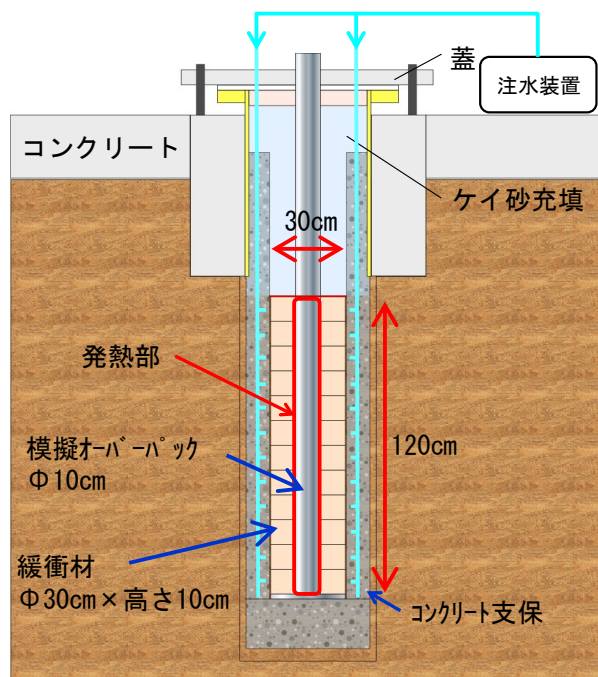


図 79 オーバーパック腐食試験の概念図

平成 30 年度は、5 月に計測を終了し試験体（模擬オーバーパックと緩衝材）を回収しました。図 80 に注水量と注水圧の経時変化を示します。注水は、コンクリート支保に設置した注水管を通して行い、コンクリートと反応した地下水が緩衝材に供給される仕組みになっています。注水圧をおよそ 1MPa で一定として試験を実施していましたが、1200 日を超えたところで、注水圧が 0.5MPa 程度に低下し、注水量がそれまでの 30mL/min 程度から数百～1,000mL/min 程度に増加しました。周辺岩盤へ地下水が流出した可能性が考えられます。

*48：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。

*49：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。

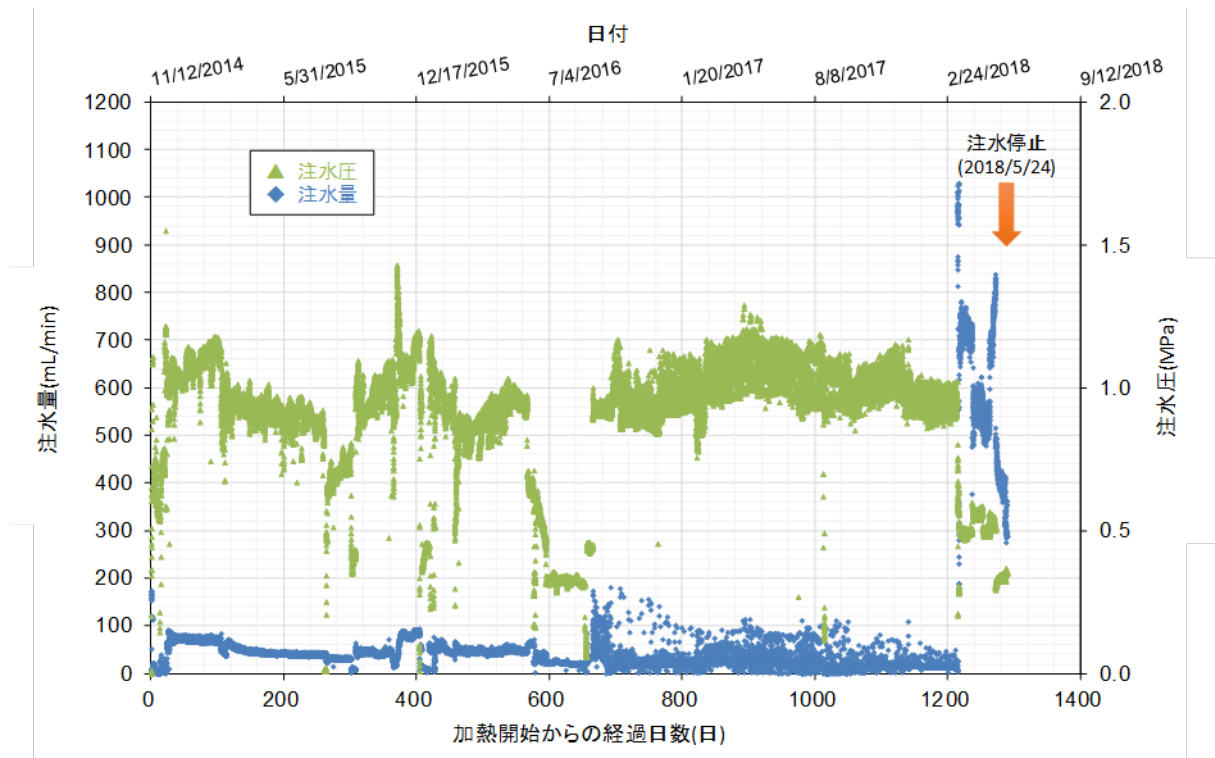
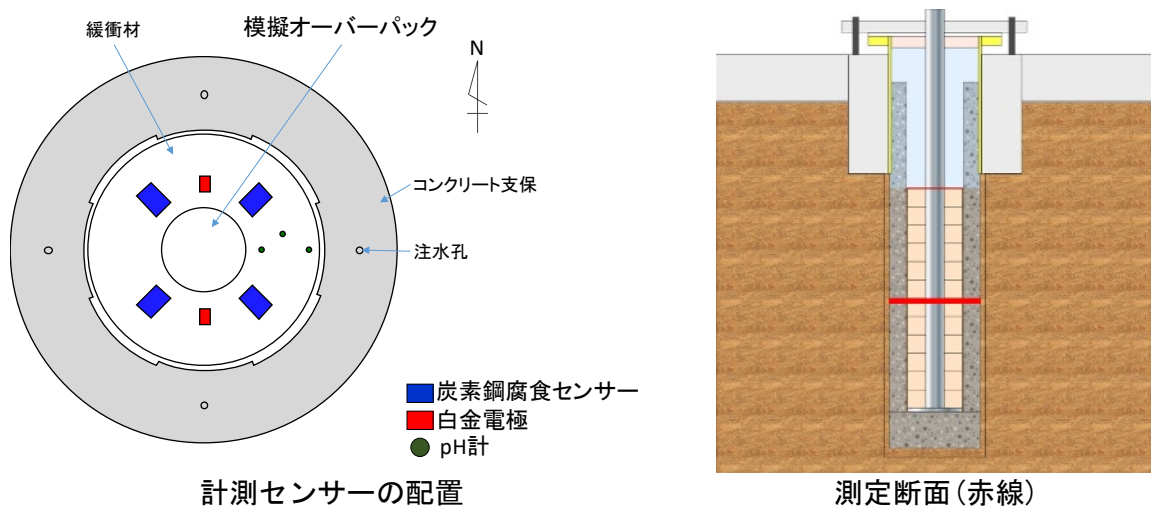


図 80 オーバーパック腐食試験における注水状況

オーバーパックの腐食状況の測定結果の例として、炭素鋼腐食センサーの結果を示します。炭素鋼腐食センサーは、緩衝材の2、6、10段目の北から右回りに45°、135°、225°、315°の位置です。例として、緩衝材6段目のセンサーの配置を図81に示します。



計測センサーの配置
図 81 緩衝材6段目の計測センサー配置

腐食速度は、分極抵抗 (R_p) から算出されます。この分極抵抗は理論的には周波数が十分小さい場合のインピーダンスとして求められますが、

計測に長時間を要することや、装置の設定上の限界などの制約もあるため、ここでは、周波数の範囲を 0.0001Hz~100,000Hz として連続的に測定したインピーダンスの値の傾向から、解析的に求めています。このようにして得られた分極抵抗 R_p の結果を図 82 に示します。図には液抵抗 R_s (周波数が十分大きい場合のインピーダンス) もあわせて示します。液抵抗 R_s は 10~20 $\Omega \text{ cm}^2$ の値を示しており、センサーの設置位置による違いや経時変化は小さく、ほぼ一定の値を示しました。このことから、炭素鋼腐食センサーの周辺では、地下水は十分に浸潤しており、その状況が変化していないことが示唆されます。一方、分極抵抗 R_p の値は、2 段目に設置したセンサーで多少のばらつきはあるものの、約 250 日以降はほぼ一定となる傾向を示しました。この分極抵抗 R_p から腐食速度を算出すると、250 日以降では、0.8~5 $\mu\text{m}/\text{年}$ となりました。

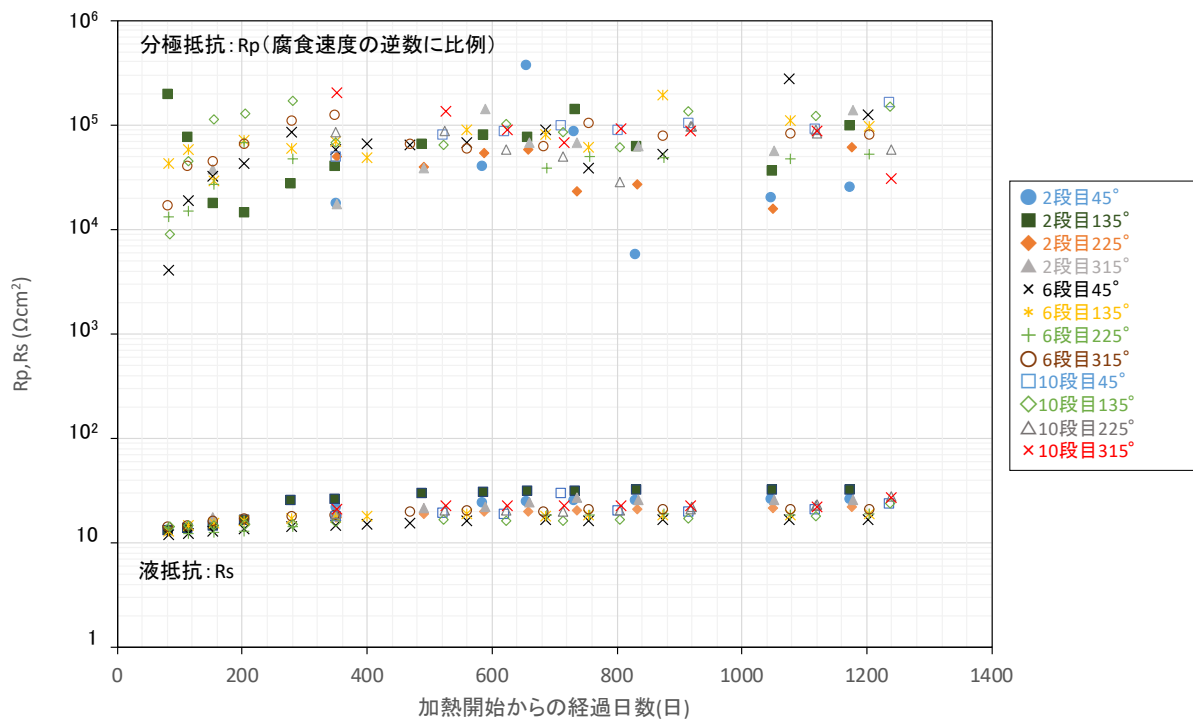


図 82 分極抵抗・液抵抗の解析値

試験体の回収では、模擬オーバーパックと緩衝材を一体として試験孔より取り出し、分析のために緩衝材の解体を実施しました。図 83 に解体作業のフローを示します。図 84 に試験体の取り出し状況と、緩衝材の解体作業の様子を示します。また、緩衝材の解体後に、腐食メカニズムの解

明等に資するため、模擬オーバーパックから腐食生成物を採取しました（図 85）。緩衝材への地下水の浸潤状況は、場所によって大きな違いはなく、全体的に 90%前後の飽和度でした。

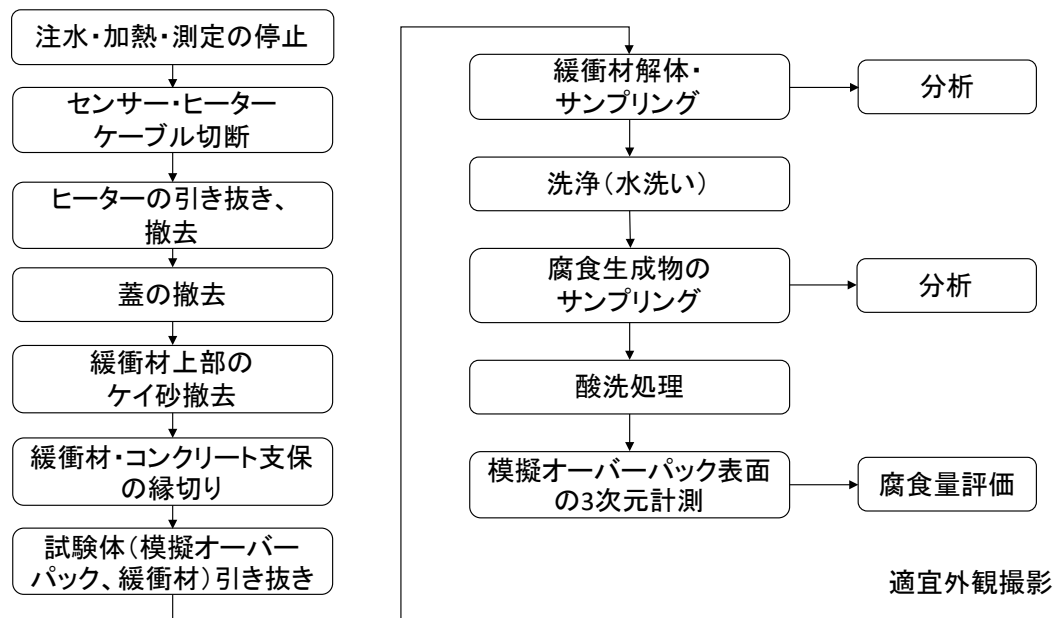


図 83 オーバーパック腐食試験解体フロー



図 84 試験体取り出し状況（左）と緩衝材の解体作業状況（右）



図 85 腐食生成物の採取

その後、模擬オーバーパックに対して酸洗処理^{*50}にて腐食生成物を除去し（図 86）、模擬オーバーパック表面の3次元計測により腐食量を評価しました。腐食量は模擬オーバーパック下部の方が上部に比べて相対的に大きい傾向を示しました（図 87）。模擬オーバーパックは長尺なため、例えば、緩衝材1段目が、5段目、9段目よりも温度が低く推移していること等、上部と下部で環境条件が必ずしも同一でなかったこと等によって、腐食量に違いが生じた可能性があり、腐食量の違いの原因については今後より詳細に調べる予定です。図 87において、腐食深さの平均は4.5年間で約5 μ mであり、前述の計測から得られた長期的な腐食速度（約1～5 μ m/年）⁽¹⁴⁾と概ね整合する結果が得られました。なお、基準径との差分がプラス（凸部）部分（青系統）は、酸洗処理にて除去しきれなかった固着物であると考えられます。また、模擬オーバーパック表面から採取した試料の分析結果から、主な腐食生成物は FeCO_3 であることが分かり、これは既往の室内試験の結果⁽³⁰⁾と整合しています。ベントナイト中には CaCO_3 （カルサイト）などの鉱物が含まれていることに加え、地下水中にも炭酸塩が溶存しており、それらに起因する炭酸/炭酸水素イオンにより FeCO_3 が生成したと考えられます。また、 FeCO_3 が確認されたことにより、地下水で飽和した圧縮ベントナイト中において炭素鋼の周囲が還元性であったことが推測されます。今後は、炭素鋼腐食センサーの腐食生成物・腐食量などの調査を行う予定であり、その結果と、計測データと実際の腐食量や既往の

*50：金属製品を酸性溶液に漬けることで、表面に付着している酸化物を洗浄・除去する化学的洗浄処理方法のことです。

室内試験の結果、平成29年度まで原環センターとの共同研究で実施したオーバーパック溶接部腐食試験の結果などと比較検討を行い、測定結果の妥当性などについて検証する予定です。



図 86 酸洗処理後の模擬オーバーパック

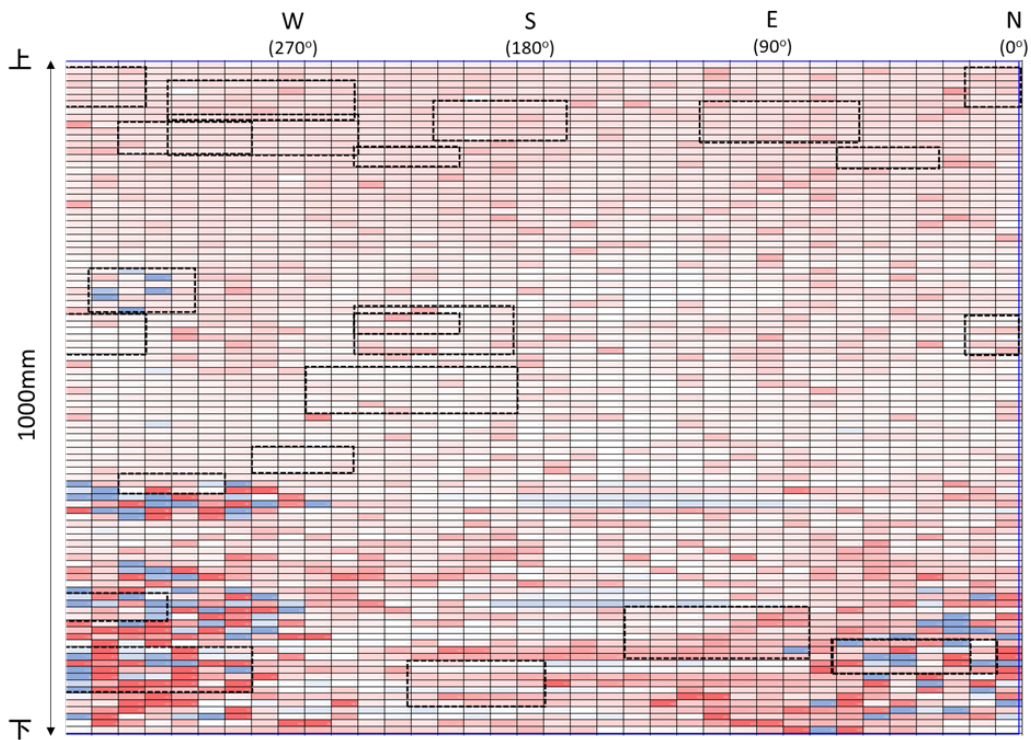


図 87 腐食量の3次元計測結果

基準径との差分。赤系統は凹部(マイナス)、青系統は凸部(プラス)を表す。値が大きいほど濃色で表現している。点線部は腐食生成物を採取した範囲。

4.1.3 モニタリング機器の放射線影響に関する検討

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングとしては、施工上の品質を確認するためのモニタリング、人工バリアの状態把握や処分施設周辺部における地質環境条件に関するモニタリング、建設・操業・閉鎖の各作業を安全かつ確実に進めるための作業安全のモニタリング、処分場敷地周辺部の環境に関するモニタリングなどの種々のモニタリングが想定されます。これらのモニタリングのうち人工バリアが設計で想定した状態を逸脱することなく性能が発揮されていることを確認し評価するための人工バリアの状態把握に関わるモニタリングに関しては、国際共同研究としてその考え方や具体的な方法等について検討が進められています⁽³¹⁾⁽³²⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾。

このようなモニタリング機器が置かれる環境条件には、温度、湿度、圧力、放射線や水質などがあり、地質環境や埋設深度、埋設する廃棄物の種類によって変動するため、モニタリング機器の検討を行う際には、環境条件を考慮した整理が必要です。そこで、人工バリアの状態を把握する際、緩衝材やオーバーパック表面、あるいはその周囲に設置されるモニタリング機器がオーバーパックから放出される放射線に曝されることから、これらモニタリング機器の放射線による影響について検討を行いました。

具体的には、ガラス固化体の貯蔵期間（30年、50年）および緩衝材の飽和度（40%、70%、100%）の変化を考慮し、オーバーパック表面および緩衝材中の放射線量の解析を行うとともに、主なモニタリング機器に使用されている材質などの耐放射線性に関する文献調査などからその影響について検討を行いました。

放射線線量の解析に必要なとなるガラス固化体等のバリア材等の組成については、原子力発電環境整備機構の技術報告書⁽³⁶⁾および TRU 廃棄物処分技術検討書の根拠資料集分冊 2⁽³⁷⁾を基に設定しました（表 3～表 6）。また、ガラス固化体の線源強度や線源スペクトルのデータも、原子力発電環境整備機構の技術報告書⁽³⁶⁾をもとに設定しました。オーバーパックや緩衝材の形状や寸法については、第 2 次取りまとめ分冊 2⁽²⁸⁾に基づき、オーバーパック中のガラス固化体は、ガラスのみをモデル化し、保守的にキャニスタはモデルに含めず、図 88 に示す計算モデルを作成しました。

また、解析コードは、吸収線量率を算出するため、MCNP5^{*51}を用いました。

表 3 物質組成（ガラス）

| 元素または核種 | 密度[g/cc] |
|---------|-----------|
| Li-6 | 2.808E-03 |
| Li-7 | 3.468E-02 |
| B-10 | 2.343E-02 |
| B-11 | 9.425E-02 |
| O | 1.305E+00 |
| Na | 2.025E-01 |
| Al | 7.226E-02 |
| Si | 5.963E-01 |
| Ca | 5.801E-02 |
| Zr | 5.330E-02 |
| Mo | 8.453E-02 |
| Pd | 1.773E-02 |
| Cs | 2.049E-02 |
| Ba | 3.448E-02 |
| 合計 | 2.600E+00 |

表 4 物質組成（空気）

| 元素または核種 | 密度[g/cc] |
|---------|-----------|
| H | 1.205E-08 |
| C | 1.566E-07 |
| N-14 | 9.180E-04 |
| N-15 | 3.410E-06 |
| O | 2.834E-04 |
| 合計 | 1.205E-03 |

表 5 物質組成（オーバーパック）

| 元素または核種 | 密度[g/cc] |
|---------|-----------|
| Fe-54 | 4.516E-01 |
| Fe-56 | 7.021E+00 |
| Fe-57 | 1.608E-01 |
| Fe-58 | 2.145E-02 |
| C | 2.730E-02 |
| Si | 2.730E-02 |
| Mn | 8.580E-02 |
| P | 2.340E-03 |
| S | 2.340E-03 |
| 合計 | 7.800E+00 |

*51 : MCNP は、米国ロスアラモス国立研究所で開発されている汎用の中性子・光子・電子輸送モンテカルロコードであり、世界中でユーザー数が多く、様々な分野で用いられており、遮蔽計算のための機能も豊富で、現在の最新版が MCNP5 となります。

表 6 物質組成（緩衝材）

| 元素または核種 | 密度[g/cc] | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| | 飽和度 40% | 飽和度 70% | 飽和度 100% |
| H | 2.176E-02 | 3.526E-02 | 4.877E-02 |
| C | 6.758E-03 | 6.758E-03 | 6.758E-03 |
| O | 9.752E-01 | 1.082E+00 | 1.190E+00 |
| Na | 2.137E-02 | 2.137E-02 | 2.137E-02 |
| Mg | 1.534E-02 | 1.534E-02 | 1.534E-02 |
| Al | 8.219E-02 | 8.219E-02 | 8.219E-02 |
| Si | 5.963E-01 | 5.963E-01 | 5.963E-01 |
| S | 3.264E-03 | 3.264E-03 | 3.264E-03 |
| K | 3.083E-03 | 3.083E-03 | 3.083E-03 |
| Ca | 1.850E-02 | 1.850E-02 | 1.850E-02 |
| Fe | 1.715E-02 | 1.715E-02 | 1.715E-02 |
| 合計 | 1.761E+00 | 1.882E+00 | 2.002E+00 |

解析により求めたオーバーパック表面からの距離に対する緩衝材中の吸収線量を図 89 に示します。吸収線量は、キャニスタの貯蔵期間 30 年と比較して貯蔵期間 50 年の方が約 50%減衰する結果となっています。図より吸収線量が最も高い結果となるのは、貯蔵期間 30 年で緩衝材飽和度が 40%のケースで、オーバーパック表面から 5cm の位置で 52.3Gy/year となり、65cm の位置で 0.0766Gy/year となります。オーバーパック表面では、本結果を外挿すると 100 Gy/year 程度となります。これらの線量をもとにモニタリング機器への放射線の影響について、モニタリング機器で使用されている材料や電子機器などに関する情報を収集し、文献⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾などからそれら材料の耐放射線性と解析結果との比較により、放射線によるモニタリング機器への影響を定性的に検討しました。本検討において対象とした計測機器で使用されている材料とそれら材料の耐放射線性の調査結果を表 7 に示します。ここで無機材料については、放射線影響は無視できることから除外しました。有機材料については、アイソトープ便覧⁽³⁸⁾や高分子材料の耐放射線特性とデータ集⁽⁴⁰⁾に基づき推定しました。半導体等の電子部品については、CCD カメラの試験結果⁽³⁹⁾を参考に全て 1kGy としました。これら材料の耐放射線性の調査の結果、最も低い値で 1kGy となり、吸収線量に関する解析結果で最も高い数値である 52.3Gy/year との比較の結果、一般的なモニタリング機器の使用寿命に影響を及ぼす線量ではないことが推定されました。なお、電子部品を内

蔵するモニタリング機器の耐放射線性に対しては、今回の検討では CCD カメラにおける耐放射線性を参考にしましたが、信頼できるデータ取得の可否について検証するため、照射条件下での機器の作動試験を行い、計測データの妥当性について評価することが必要と考えられます。

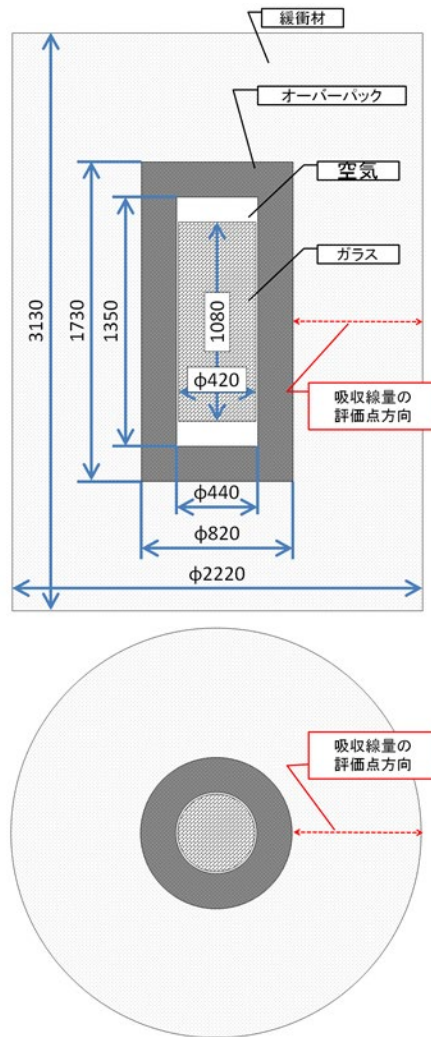


図 88 計算モデル (単位 : mm)

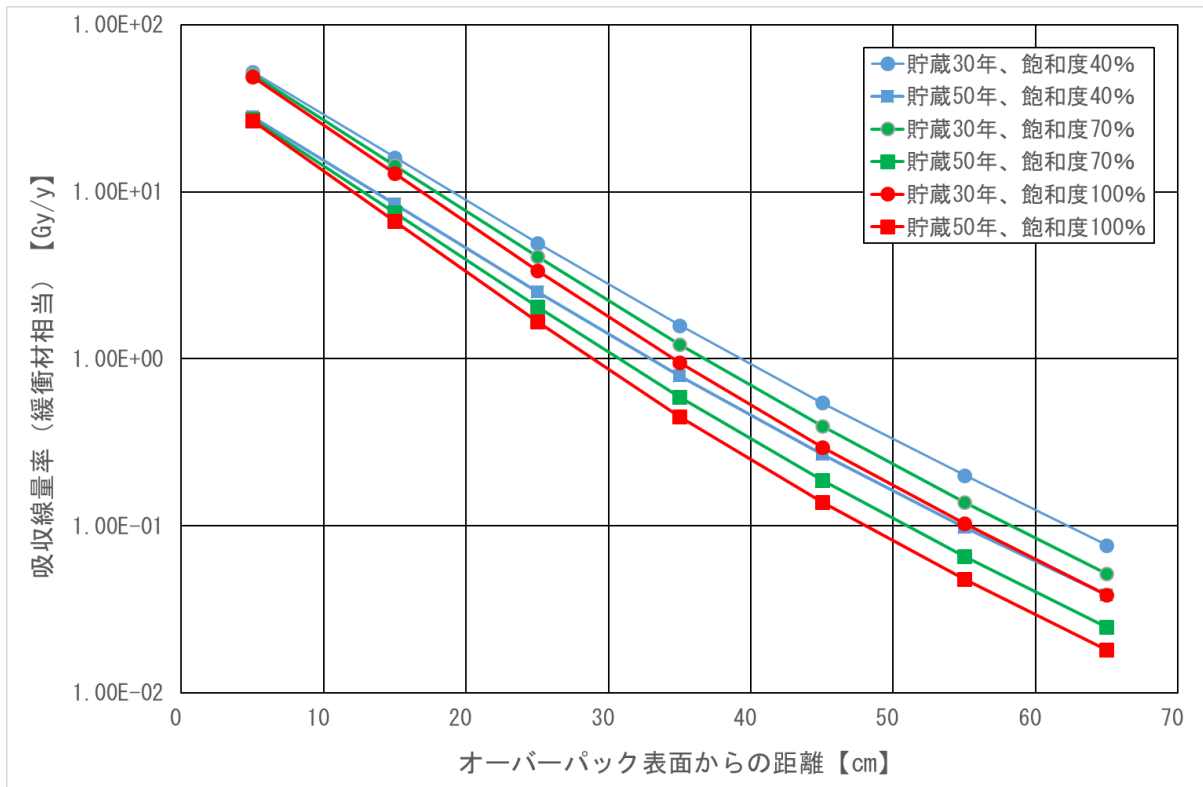


図 89 解析により求めた緩衝材中の吸収線量

表 7 本検討で対象とした計測機器で使用されている材料対放射線性の
検討結果

| 計測機器 | 部位 | 材質 | 耐放射線性 |
|-----------|------------------------|-------------------------------------|--------|
| 土圧計 | Cell 本体 | SUS316 | — |
| | Cell 内部 | 油充填 | 6MGy |
| | トランスデューサ | 金属製ハウジング, 内部は不明 | 1kGy |
| | ケーブル被覆 | PVC | 0.1MGy |
| 間隙水圧計 | Filter, Filter Housing | 金属製 | — |
| | O リング | NBR | 10kGy |
| | Bulkhead Seal | エポキシ系と推定 | 1MGy |
| | Waterproof Epoxy | エポキシ樹脂 (充填) | 1MGy |
| | 水圧計内部計器類 | サーミスタ、ダイヤフラム、コイル、振動ワイヤ等を収納 | 1kGy |
| | ケーブル被覆 | PVC | 0.1MGy |
| 変位計 | アンカー | 強化プラスチック | 0.1MGy |
| | | 銅 | — |
| | | ナイロン | 10kGy |
| | 計測ロッド | 金属 | — |
| | 変位計(トランスデューサ他) | 不明 | 1kGy |
| | ケーブル被覆 | PVC と推定 | 0.1MGy |
| 湿度計 | 本体ケーシング | SUS303 | — |
| | 内部集積回路 | 基盤、IC チップ | 1kGy |
| | フィルタ | テフロン | 2kGy |
| | ケーブル被覆 | ポリウレタン | 0.1MGy |
| サイクロメータ | 本体ケーシング | SUS316 | — |
| | 本体内部 | エポキシ樹脂充填 | 1MGy |
| | 本体内部シール材 (O リング) | ニトリルゴム | 10kGy |
| | 内部回路 | 不明 | 1kGy |
| pH 計 | 光ファイバー | 石英と想定 | — |
| | 本体・ボディ・外形 | トーロン(ポリアミドイミド) | 0.1MGy |
| | 指示薬染料 | 親水性ポリマー(ブロモクレゾールグリーン) | 不明 |
| | ケーブル被覆 | PVC ファイバージャケット, PEEK ポリマースリーブと推定 | 0.1MGy |
| 水分計 | 本体 | 不明 | 1kGy |
| | シールド | SUS | — |
| | ケーブル被覆 | PVC と推定 | 0.1MGy |
| 温度計 (熱電対) | 本体 | SUS, 酸化マグネシウム充填材及び熱電対素線(銅, 銅ニッケル合金) | — |
| | 補償導線 | PVC, テフロンと推定 | 0.1MGy |
| 白金電極 | センサー部 | 白金, 金属ケース, セラミックスと推定 | — |
| | ケーブル被覆 | テフロン | 2kGy |
| 炭素鋼電極 | センサー部 | 炭素鋼, 金属ケース, セラミックスと推定 | — |
| | ケーブル被覆 | テフロン | 2kGy |

4.1.4 低アルカリ性セメント系材料の影響評価試験

一般に坑道の支保工にはセメント系材料であるコンクリートが使用されます。通常のセメントを使用すると、地下水と反応して高アルカリ性 ($\text{pH}>12$) を示します。一方、人工バリアの一つである緩衝材に用いられるベントナイトは $\text{pH}>11.5$ 程度の環境に長期の間さらされる場合には変質し、膨潤性などが変化し、人工バリアとしての性能が低下することが懸念されます。そのような影響を避けるために、原子力機構では $\text{pH}<11$ を目標とした低アルカリ性セメント（以下、HFSC）を開発し、地下施設の140m、250m および 350m 調査坑道の一部を用いて施工確認試験を実施しました⁽⁴¹⁾。

施工後、HFSC を用いたコンクリートで施工した箇所からコンクリートおよび岩石のコアおよび地下水を採取し、HFSC が坑道周辺的环境に与える影響について調査を実施しています。平成 30 年度は、140m および 350m 調査坑道の壁面からコンクリートおよび岩石のコアを採取し、また、ボーリング孔に既設の採水装置より地下水を採取して、分析を行いました。以下に、140m 調査坑道からの試料の分析結果について示します。なお、140m 調査坑道の普通セメント（以下、OPC）での施工箇所からも同様にコアと地下水を採取して分析結果を比較しました。ボーリング孔口から深さ 60cm~120cm の区間から採取した地下水の pH の経時変化を図 90 に示します。140m 調査坑道は施工から約 9 年が経過していますが、地下水の pH は 7.5~8.5 程度でほぼ一定で、HFSC と OPC での違いも認められず、コンクリートの違いによる影響は見られませんでした。

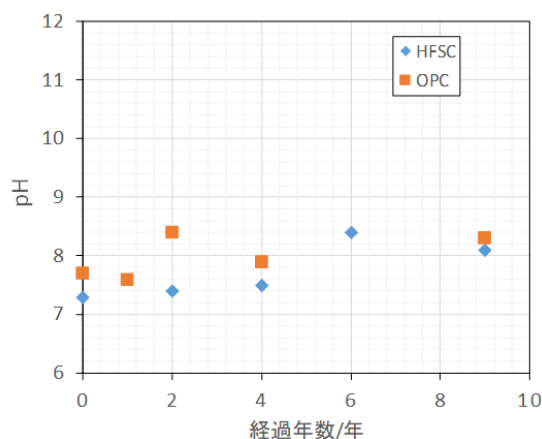
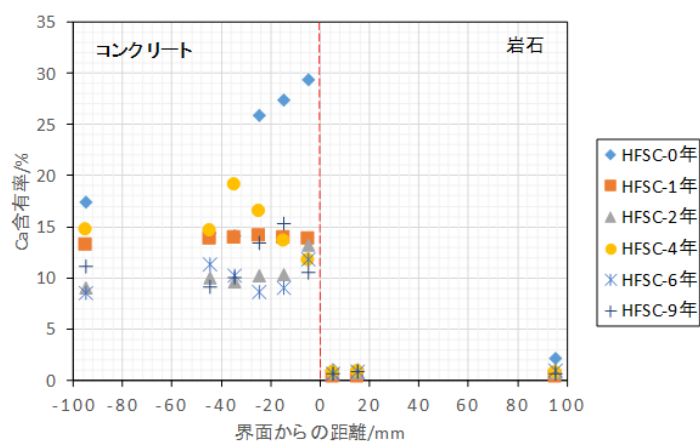


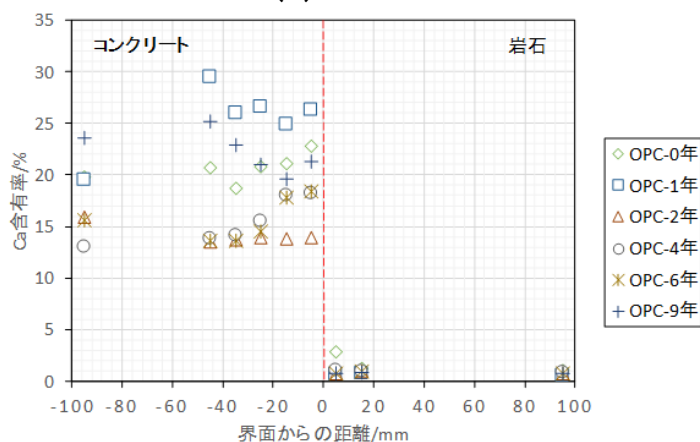
図 90 140m 調査坑道の採水装置から採取した地下水の pH の経時変化
HFSC の 2 年次および OPC の 6 年次は採水量が少なく分析出来なかった。

Ca はコンクリートに多く含まれ、岩石にはほとんど含まれていないことから、コンクリートと岩盤の相互作用の指標となると考えられます。図 91 にコンクリートおよび岩石コア中の Ca の含有量の変化を示します。横軸はコンクリートと岩石の接触面からの距離を示します。図 91 から、コンクリート中の Ca 含有率は 10~30%程度を示し、時間や界面からの距離に対するはっきりとした傾向は見られませんでした。分析時期によって値にばらつきが見られますが、これは、試料の採取位置による材料のばらつきを反映していると考えられます。一方、岩石中では境界面近傍でもほとんど観測されておらず、施工後 9 年程度において、コンクリートの影響をほとんど受けていないことが示唆されます。

350m 調査坑道から採取したコアおよび地下水（施工後約 4 年）の分析結果からも、上記と同様にセメント系材料の岩石への影響はほとんど観測されませんでした。



(a) HFSC



(b) OPC

図 91 140m 調査坑道から採取したコア試料中の Ca 含有率

4.1.5 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。

平成30年度は、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、平成29年度に模擬PEM（Prefabricated Engineered barrier system Module）^{*52}を整備した深度350m調査坑道の試験坑道2において、搬送定置・回収技術の実証試験に向け、模擬PEMと坑道壁面の隙間を粘土系材料で充填し、地下環境において充填に用いる装置、および手法の適用性を確認しました。

(1) 緩衝材定置試験

緩衝材定置試験設備を使用し、模擬緩衝材ブロックの1段分を一括して模擬処分孔に定置する試験を実施しました。なお、この試験は「おもしろ科学館2018 in ほろのべ」（平成30年7月開催）で一般公開しました（写真1）。今年度は定置作業に加えて、定置装置に取り付けたカメラの映像を投影し、実際の地層処分事業で想定される遠隔操作による定置作業について説明を行いました。

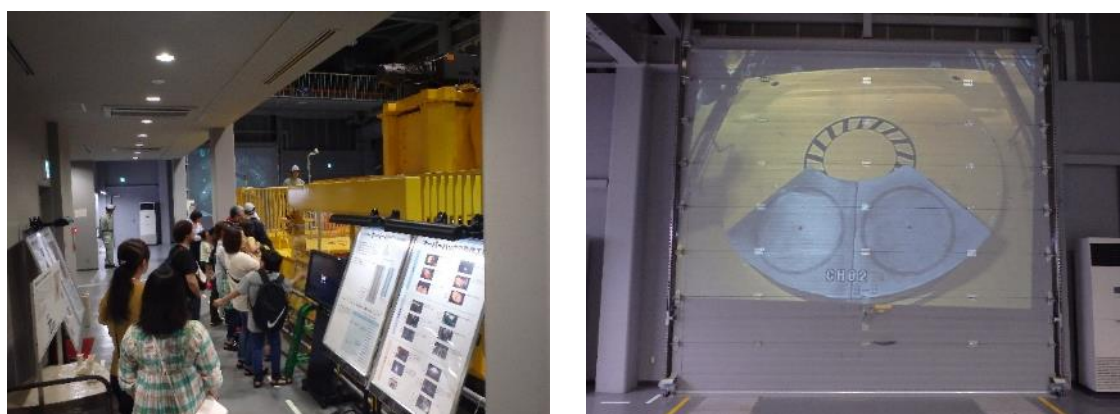


写真 1 緩衝材定置試験の公開の様子

*52：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。

(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、地下水の浸潤により閉塞されると考えられます。この過程を再現するために可視化試験を行いました。小型の緩衝材ブロックを実際の人工バリアと同じ積み方で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）。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。

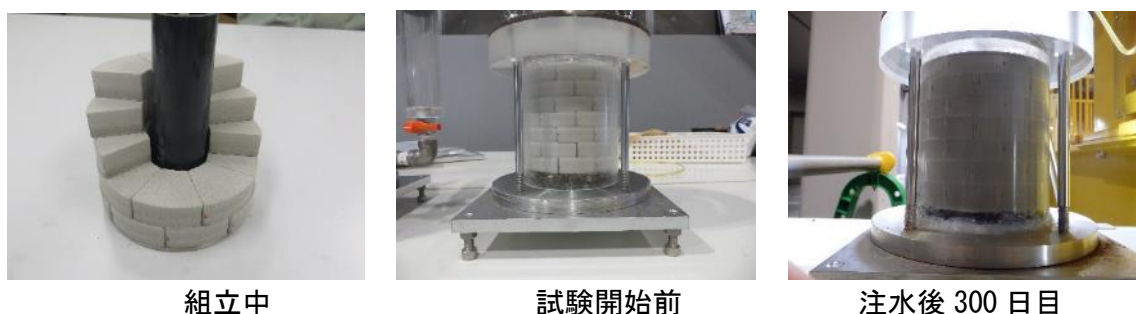


写真 2 緩衝材可視化試験の状況

(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⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾。

平成30年度は、深度350m調査坑道の試験坑道2において平成29年度に設置した模擬PEM^{*53}と坑道との隙間で、粘土系材料の充填材を用いた充填試験を行いました。表 8に充填する部位と充填材の種類、目標乾燥密度、試験後の計測値を示します。

表 8 隙間充填試験の目標値

| 充填する部位 | 充填方式 | 充填した材料 | 目標乾燥密度 | 計測結果 |
|--------|--------|------------------------|---------------------------|--|
| 上部開放部 | 吹付け | ケイ砂を50%混合した ベントナイト | 1.60 Mg/m ³ 以上 | 全体として 1.60 Mg/m ³ 以上 |
| 下部狭隘部 | ペレット充填 | 粒度調整をした純ベン トナイトペレット | 1.37 Mg/m ³ 以上 | 左 1.379 Mg/m ³ 右 1.402 Mg/m ³ |

*53：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 2.5m、長さ約 3.5m）および重量（約 36t）を模擬したものを使用しています。

模擬PEM下部の坑道との間の狭い隙間(下部狭隘部)にはベントナイト粉末を圧縮して $2.0\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度の密度にしたものを破碎し粒度分布を調整したペレットをスクリーコンベアで隙間内に送り込みました(写真3)。試験坑道2にスクリーコンベアを4本有する隙間充填装置を設置し、ペレットを充填しました。隙間の体積とペレットの重量から密度を計算した結果、左 $1.379\text{Mg}/\text{m}^3$ 、右 $1.402\text{Mg}/\text{m}^3$ となり、目標とした密度 $1.37\text{Mg}/\text{m}^3$ を達成したことを確認しました(写真4)。



写真3 下部狭隘部に充填したペレット(左)とスクリーコンベア(右)

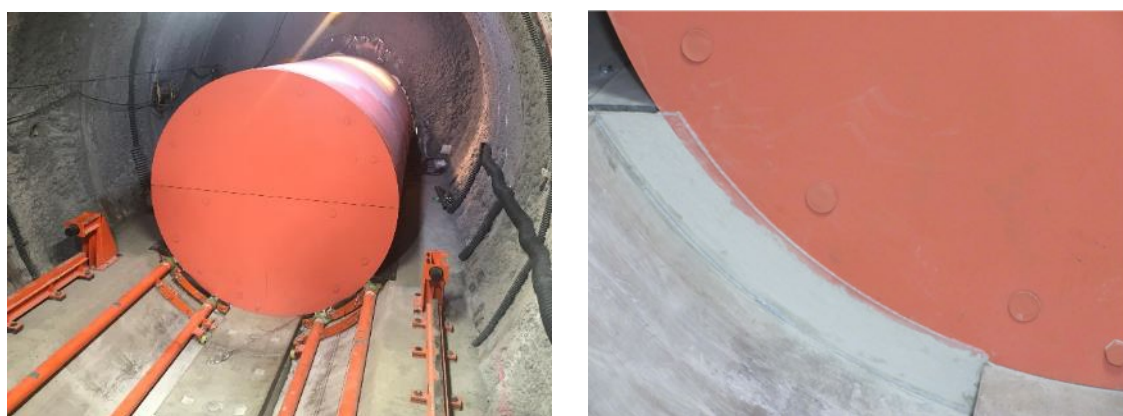


写真4 スクリューコンベアの設置状況(左)と充填後の隙間(右)

模擬PEM上の広い隙間(上部開放部)には、ベントナイトにケイ砂(3号と5号を等量混合)を50%:50%で混ぜたものを吹付けました(写真5)。試験後に充填した部分からコアサンプリングを行い、密度を測定しました。その結果、全体として目標とした密度 $1.60\text{Mg}/\text{m}^3$ を達成したことを確認しました。また、模擬PEMの横下など、部分的に目標密度が達成できなかった

部分もあることから、施工管理が難しい部位があることも確認し、今後の課題として整理しました（図 92）。

このようにどちらの隙間も目標の密度になっていることを確認しました（写真 6）。今回充填した部分は今後充填材の除去試験を行う予定です。

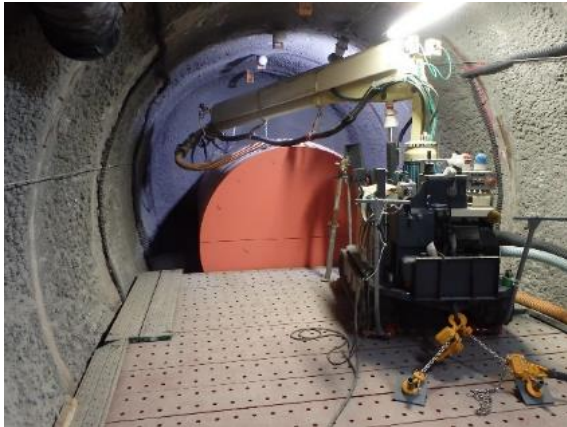


写真 5 吹付け試験の様子（左）とコアサンプリング（右）

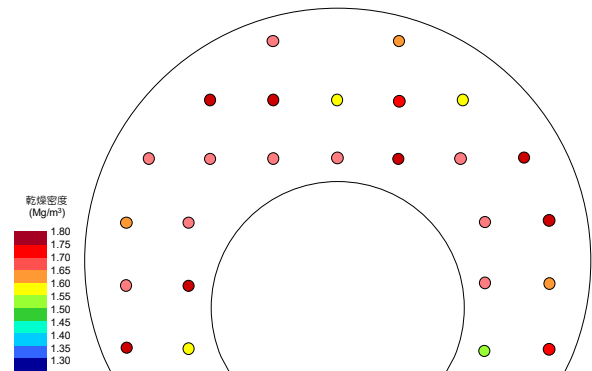


図 92 コアサンプリングの位置と各部位の密度

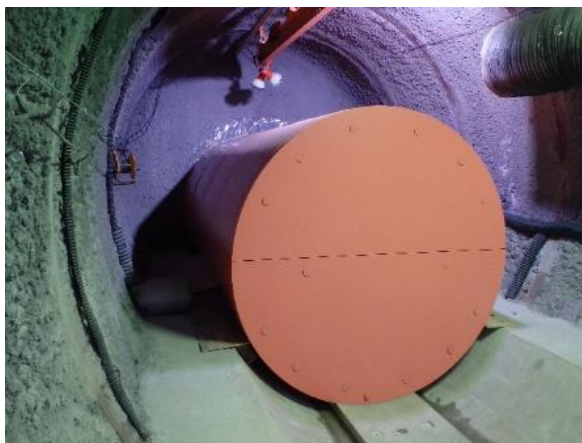


写真 6 隙間充填試験前後の様子（試験坑道 2）

4.1.6 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30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：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するため、平成30年度は深度350m調査坑道の試験坑道5において、原位置の環境条件の確認を行いました。

人工バリアの部材である緩衝材の主な成分はベントナイト^{*54}と呼ばれる粘土鉱物であり、水を吸収することにより膨潤します。そのため、地下に設置された緩衝材には、徐々に地下水を吸収し膨潤することで、岩盤やオーバーパックと緩衝材の間の隙間を埋め、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、日本の地下環境には、一般的に地下水が存在するため、廃棄体を処分孔へ定置した後に、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。

緩衝材流出が生じるかどうかは、処分孔周辺の湧水条件（岩盤の透水係数、処分孔の湧水圧、湧水量・流速、液種など）が大きく影響すると考えられます。

これまで地上の実験室において、流出現象を把握する試験は行われていますが、試験体の大きさや地下の複雑な環境条件を完全に模擬することは難しいことから、実際の地下環境による緩衝材の流出試験を行うことで、流出現象の把握を進めてきました。

これまでの緩衝材流出試験の結果などから、緩衝材の流出を引き起こす要因の一つに、湧水と接触する緩衝材表面付近の含水率が高くなることが考えられました。緩衝材の表面付近の含水率が内部と比べて高くなるということは、緩衝材の表面から水が浸潤することで、表面付近のみが膨潤し、表面付近の緩衝材の密度が内部と比較して低くなることを意味します。また、含水率が高くなるということは、緩衝材の主成分である、ベントナイトに水が浸潤していることを意味します。ベントナイトは層状の構造を持っており、その層間に水が入り込むことで膨潤し、しだいにゲル状になります。このゲル状になった部分に、孔壁からの湧水の流れに

*54：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。

よるせん断応力（表面を滑らせるように作用する力）が作用すると緩衝材が削られます。このせん断応力を発生させる水の流れは緩衝材と岩盤の隙間に生じますが、緩衝材が膨潤することで隙間が狭まり、水の流路が狭められるため、同じ水の量でも緩衝材に接する水の流速は早くなり、せん断応力が大きくなることが考えられます。緩衝材の密度が低いと、せん断応力に抵抗する力が小さくなるという実験結果も得られており、水の流れと直接接する緩衝材表面部分の含水率が高まる（密度が低くなる）と緩衝材は削られやすくなると考えられます。

したがって、緩衝材の流出抑制の対策の一つとして、緩衝材と孔壁の間の隙間を充填するなどの工学的対策が重要であると考えています。

緩衝材と孔壁の間の隙間に対する工学的対策を念頭に置いた地下での緩衝材流出試験を平成31年度に実施するために、平成30年度は原位置の環境条件の確認として、試験孔の湧水量測定と透水試験を行いました。試験の実施場所である試験坑道5の試験孔配置を図 93に示します。

湧水量測定の結果（図 94、図 95）、試験孔1の湧水量が回復する時間として、試験孔天端までの水位回復に6時間、コンクリートピット天端までの水位回復には、4日となりました。湧水量として、試験孔天端の水位では、1000mL/min、コンクリートピット天端の水位では、10mL/minとなりました。試験孔2の湧水量が回復する時間として、試験孔天端までの水位回復に13時間、コンクリートピット天端までの水位回復には、5日となりました。湧水量として、試験孔天端の水位では、300mL/min、コンクリートピット天端の水位では、20mL/minとなりました。

試験孔周辺岩盤の透水係数は、試験孔1、2ともに、 10^{-6} (m/s) オーダーとなりました。透水試験の結果（概ね 10^{-6} m/s）は、深度350mにおける掘削影響領域の透水係数⁽⁴⁸⁾と同等である結果となりました。

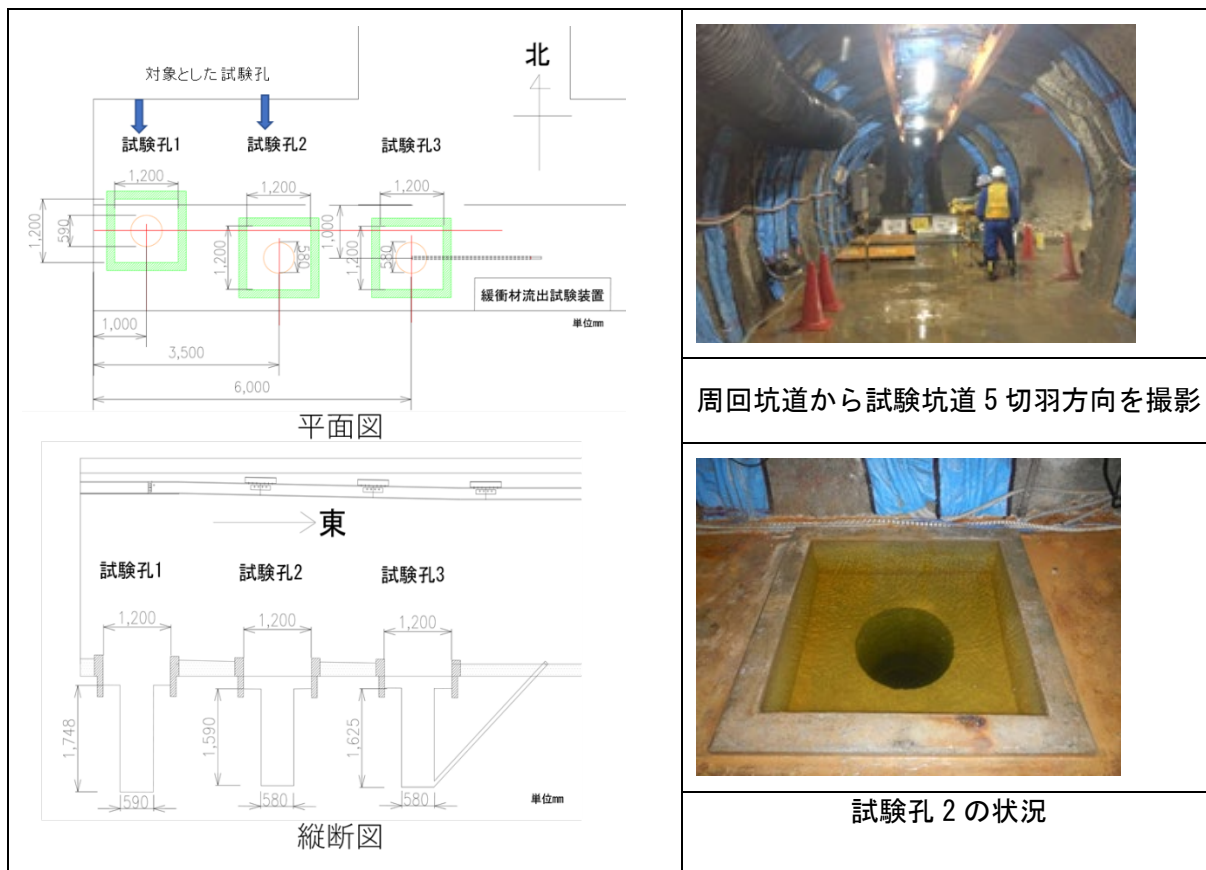


図 93 試験孔の配置

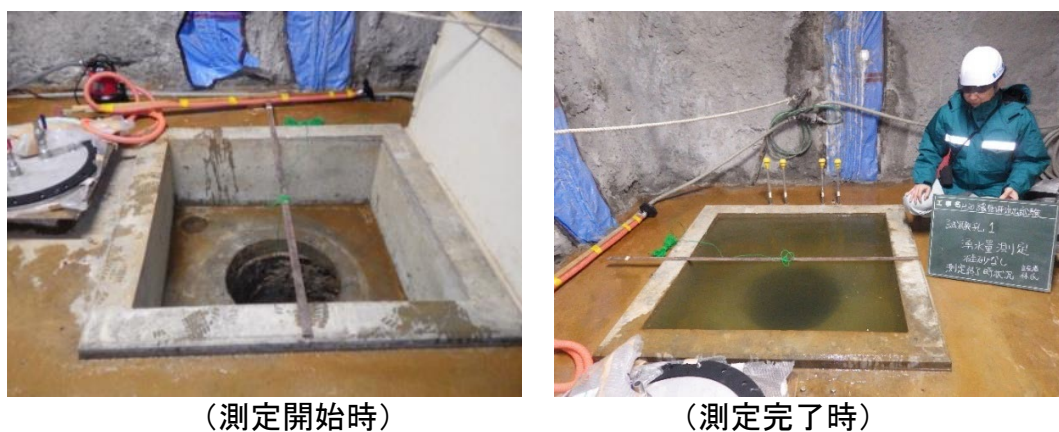


図 94 原位置の環境条件の確認状況 (試験孔の湧水量測定)

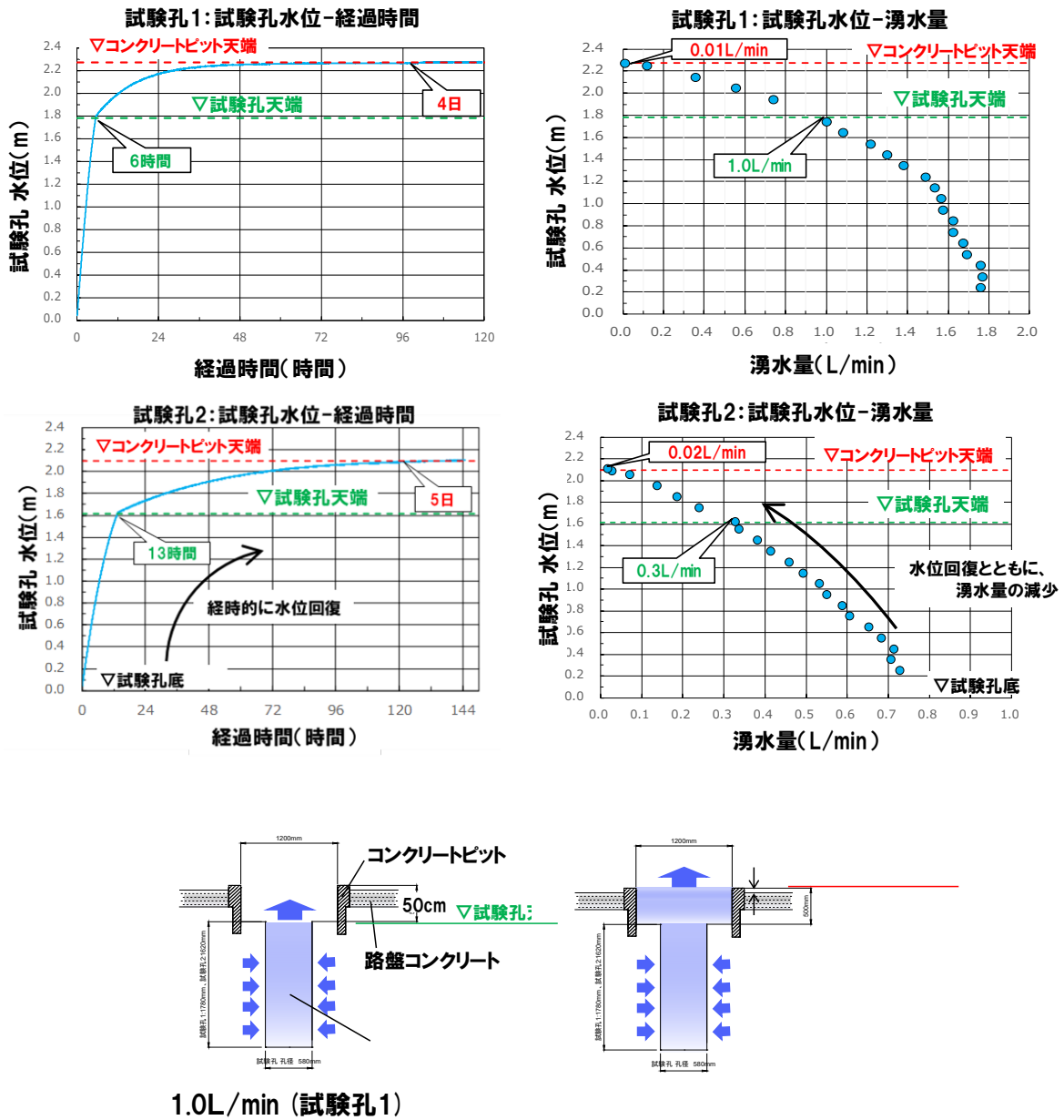


図 95 試験孔の湧水量測定結果

4.1.7 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30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認試験）の一環として、坑道や掘削影響領域が地下水の移行経路となることを防止するための埋め戻しやプラグ（以下、シーリングシステム）に関する設計概念の詳細化や施工技術の成立性を確認するために、シーリングシステムが処分場全体の閉じ込め性能に与える影響の評価や、湧水を伴

う断層などの様々な地質環境の特性を考慮した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

埋め戻し材やプラグに使用されるシーリング材の長期的な劣化に伴い、シーリングシステムが卓越した水みちとなった場合における、地層処分システムの長期安全性への影響を検討するために、諸外国における取り組み状況も参照しつつ、シーリングシステムに求める安全機能を設定し、設定した安全機能に影響を及ぼす可能性のある因子・プロセスの整理を行いました。処分場が建設される地質環境条件や処分概念に応じて、シーリングシステムに求める安全機能の考え方は異なるものの、諸外国においては、シーリングシステム自体が卓越した水みちとなることを抑制するために、移流を抑制することやシーリング材への放射性核種の収着などによる遅延性能を有することを、安全機能として設定していることがわかりました。したがって、本検討においてはシーリングシステムが卓越した移行経路となることを抑制するための安全機能として、「シーリング部において移流を抑制すること」および「シーリング部において遅延性能を有すること」の2つを設定することとしました（表 9）。

表 9 シーリングシステムに求める安全機能の整理⁽⁴⁹⁾

| 本事業で設定する安全機能 | 諸外国が設定する安全機能 | | | |
|----------------------|--|---|-----------------------------------|--|
| | スウェーデン | フィンランド | スイス | フランス+ |
| シーリング部において移流を抑制すること | 移流の抑制 ・Limit advective transport ¹⁾ | 放射性核種の放出制限 ・Limit and retard radionuclide release in the possible event of canister failure ²⁾ | シーリングシステムの構成要素に具体的な安全機能は設定されていない。 | 移流の抑制 ・Preventing water circulation ³⁾ |
| | | 放射性核種の放出制限 ・Limit release of radionuclides and immobilize them in the repository ³⁾ | | |
| シーリング部において遅延性能を有すること | 遅延 ・Sorb radionuclide ¹⁾ | 遅延 ・Limit and retard radionuclide release in the possible event of canister failure ²⁾ | | 遅延 ・Delay and attenuate migration of radionuclides ³⁾ |

+フランスはC廃棄物セルにおけるシーリングシステムに求める安全機能を記載

1) SKB (2011), TR-11-01,
 2) POSIVA (2012), 2012-09,
 3) Andra Dossier 2005 Argile

次に、シーリングシステムが卓越した水みちとなる場合のシナリオを構築するために、先に設定した安全機能に対して影響を及ぼす可能性の

ある因子・プロセスを、フィンランドの POSIVA やスウェーデンの SKB における検討事例を参考に、プロセステーブル（表 10）として整理を行いました。整理を行う際には、網羅性に重点を置き、熱－水理－力学－化学－核種移行の観点から安全機能への関連性について整理を行いました。また、埋め戻し材やプラグといった個々の要素に関わるもののみならず、岩盤との相互作用により安全機能へ影響を与える因子・プロセスも想定されることから、シーリングシステムと岩盤との相互作用も含めて整理を行いました。表 10 に示すように、シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼす可能性のある因子・プロセスは多様であるとともに、これらが顕在化するかどうかやその影響の幅については、シーリングシステムが設置される地質環境条件に依存すると考えられます。したがって、我が国のように、処分場が建設される場所が特定されていない状況でのジェネリックな検討においては、シーリングシステムの閉じ込め性能に影響を与える地質環境条件を類型化するとともに、類型化された地質環境条件において、最も影響度が大きい因子・プロセスの抽出などを通じて、表 10 に示すような因子・プロセスのスクリーニングを行い、地層処分システムの長期安全性に最も影響を及ぼすシナリオを設定することが必要になると考えられます。

今後は、上記に示す検討を行い、地層処分システムの長期安全性に最も影響を及ぼすシナリオに従った定量的な評価に基づき、シーリングシステムの長期性能の考え方も含め、これらの評価手法を整備していく予定です。

表 10 シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼすと考えられるプロセスと因子の関係⁽⁴⁹⁾

| 状態変数 プロセス | 埋め戻し材(処分孔) | | | | | 埋め戻し材 | | | | | プラグ(ベントナイト) | | | | | プラグ(コンクリート) | | | | | ベントナイト/母岩界面 | | | | | コンクリート/母岩界面 | | | | | | | | | |
|--------------|------------|-----|-----|----|----|-------|-----|-----|----|----|-------------|-----|-----|----|----|-------------|-----|-----|----|----|-------------|-----|-----|----|----|-------------|-----|-----|----|----|----|-----|-----|----|----|
| | 温度 | 間隙圧 | 飽和度 | 変位 | 応力 | 温度 | 間隙圧 | 飽和度 | 変位 | 応力 | 温度 | 間隙圧 | 飽和度 | 変位 | 応力 | 温度 | 間隙圧 | 飽和度 | 変位 | 応力 | 温度 | 間隙圧 | 飽和度 | 変位 | 応力 | 温度 | 間隙圧 | 飽和度 | 変位 | 応力 | 温度 | 間隙圧 | 飽和度 | 変位 | 応力 |
| T 温度 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| H 水理 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| M 力学 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| C 化学 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| R 放射性核種の移行 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

+ : シーリングシステムの安全機能に影響を及ぼすと考えられるプロセスと状態変数

(2) 膨潤挙動相互作用試験

処分孔縦置き方式における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た膨潤挙動相互作用試験を実施しています。深度350m調査坑道の試験坑道4で実施している人工バリア性能確認試験(図 71)の試験レイアウトを基に緩衝材と埋め戻し材の相互作用について整理しました。図 96に示すように、緩衝材は底部と外周部より水が浸潤することにより、埋め戻し材側へと膨潤します。一方、埋め戻し材は自重と剛性により緩衝材の膨潤を抑制します。すなわち、緩衝材と埋め戻し材の境界面においては、緩衝材の膨潤圧と処分孔直上の埋め戻し材の自重が作用していることとなります。また、水が緩衝材外周から浸潤する場合には、緩衝材の膨潤も外周部から始まり、緩衝材と埋め戻し材の境界面の形状は複雑になると想定されます。膨潤挙動相互作用試験では、このような緩衝材の膨潤挙動を把握するために人工バリア性能確認試験の状況を再現した室内試験を実施します。

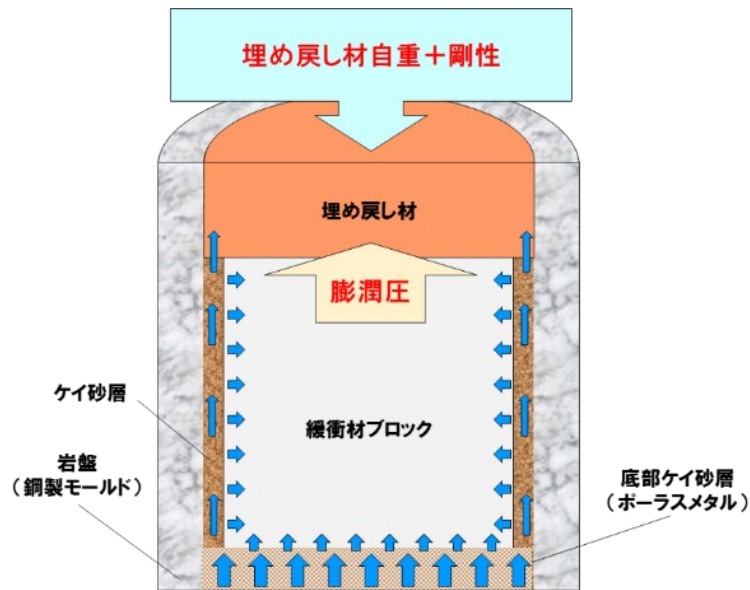


図 96 緩衝材と埋め戻し材の相互作用の整理⁽⁴⁹⁾

平成30年度は、緩衝材と埋め戻し材のそれぞれの膨潤挙動に係る特性データ（膨潤変形量、膨潤圧、密度変化など）の取得を目的として、一定の上載荷重を作用させた状態での膨潤変形量を測定する膨潤変形試験を開始しました。図 97には、膨潤変形試験の測定結果の一例として、緩衝材の膨潤率の測定結果を示します。上載荷重として0.5MPaを作用させたときの膨潤率は7%程度、0.125MPaを作用させたときの膨潤率は26%程度となり、上載荷重の大きさに応じた膨潤量が発生することを確認しました。

次に、図 96に示した緩衝材と埋め戻し材の相互作用を想定通り再現できるかを確認するために、実物を約1/20程度に縮小した膨潤挙動小規模試験を実施しました（図 98）。供試体への注水量と供試体の膨潤変形量を測定した結果、試験装置から漏水することなく緩衝材に注水ができており、注水量の増加に伴う膨潤変形量の増加を確認しました（図 99）。

今後は、膨潤変形試験において緩衝材と埋め戻し材ともに上載荷重の大きさを変えて試験を実施し、膨潤挙動に係る特性データの拡充を行います。また、膨潤挙動相互作用試験を実施し、緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を踏まえた緩衝材の膨潤挙動の評価手法を検討していく予定です。

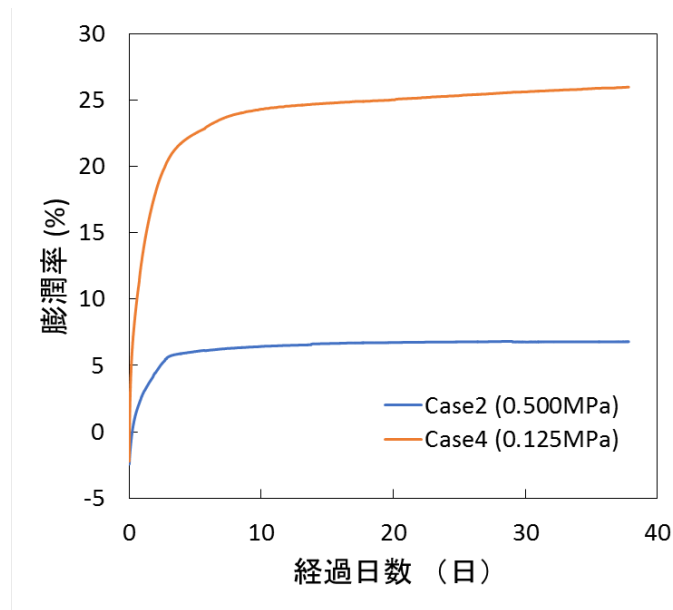


図 97 膨潤変形試験における緩衝材の膨潤率の測定結果⁽⁴⁹⁾

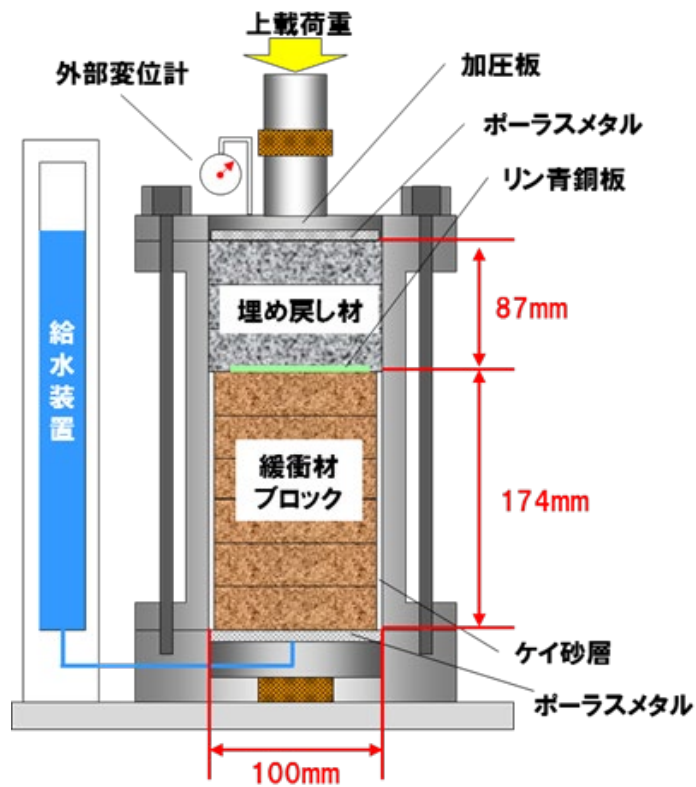


図 98 膨潤挙動小規模試験の装置概要図⁽⁴⁹⁾

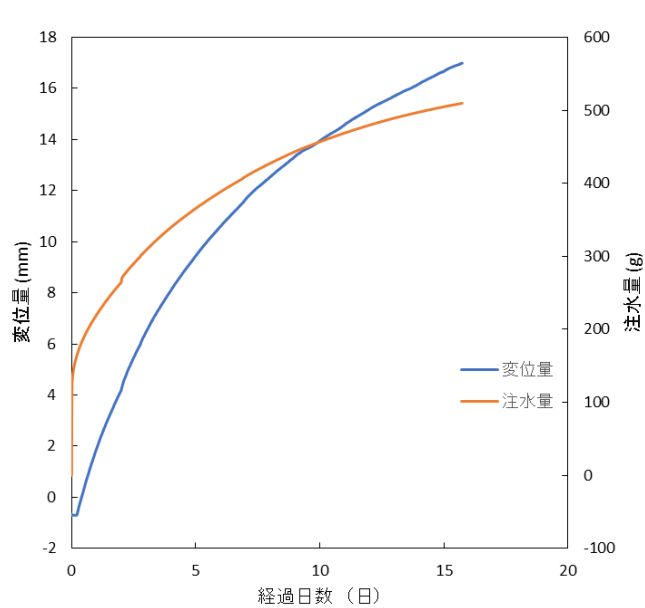


図 99 膨潤挙動小規模試験の注水量および変位量⁽⁴⁹⁾

(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し物質の移行経路になることが想定されています。EDZのシーリングについては、国内外においてこれまで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示されています。そこで、幌延を事例として塩水系地下水環境下におけるベントナイト系材料の地下水移行抑制機能を評価するために、深度350m調査坑道の試験坑道3において、EDZシーリング試験の実施を予定しています。EDZシーリング試験では、図 100に示すようにEDZを遮るように岩盤に深くスリットを切削し、スリットにベントナイト材料を充填した粘土止水壁で囲まれた試験領域を設定します。この試験領域中のボーリング孔を用いて単孔式での透水試験を実施して粘土止水壁の透水性能を評価する計画です。粘土止水壁の材料には、クニゲルV1（以下、粉体ベントナイト）を圧縮成型したペレット（以下、ペレット）と粒状のベントナイトであるクニゲルGX（以下、粒状ベントナイト）の2種類を検討しています。

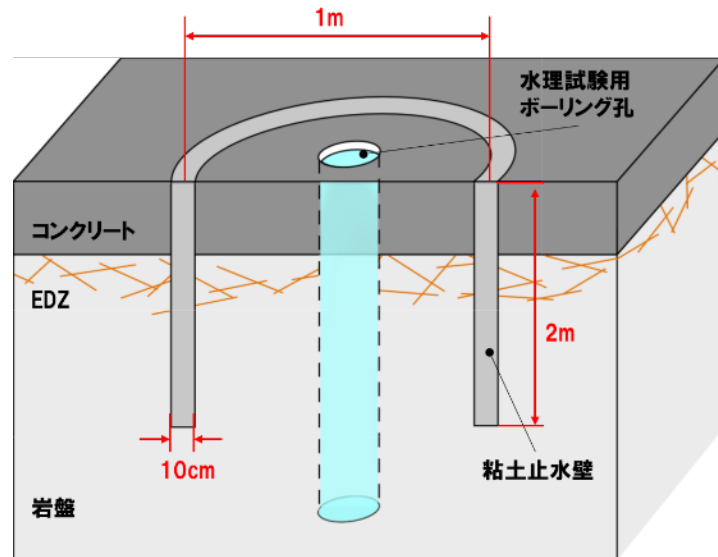
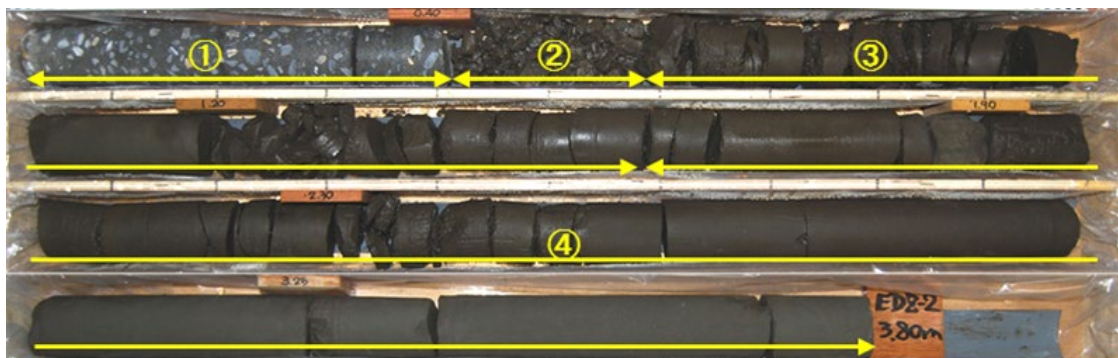


図 100 EDZ シーリング試験のレイアウト図

平成30年度は、EDZシーリング試験の実施予定場所のEDZの状況を把握するためにパイロット孔を掘削し、パイロット孔を掘削した際に回収したコアの観察（図 101）とBTV観察を実施しました。試験坑道3の底盤の下においては、EDZの割れ目が底盤のコンクリートから1.60m程度の深さまで観察されました（図 102）。また、このパイロット孔を用いて透水試験を実施し、試験坑道3の底盤の下（ズリ、EDZ、健岩部を含む範囲）の透水係数を算出しました。



①コンクリート②埋め戻し材③EDZ区間④健岩部

図 101 パイロット孔ボーリングコアの写真⁽⁴⁹⁾

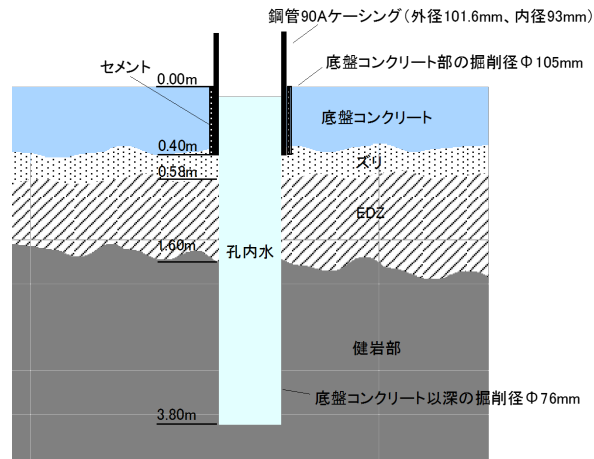


図 102 試験坑道 3 の底盤下の構造

次に、粘土止水壁の材料の膨潤の状況を確認する試験を行いました。試験では、上部を開放した円筒形の透明な試験容器にベントナイトの供試体を充填し、幌延の地下水組成を模擬した模擬地下水を通水しました。試験で用いた供試体は、①ペレットのみ、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）、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種類を作製しました。

図 103に通水開始から、通水1週間後までの各供試体の膨潤の変化の様子を示します。ペレットおよび混合土においては、試験開始時に目視で明確に視認できる程度に空隙が存在していることが確認できます。通水開始後にはこの空隙を通じて水が浸潤し、通水後数分で供試体上端部まで水が到達しました。通水30分後には、膨潤により空隙が埋まり通水量がほぼ0となりました。

粒状ベントナイトのみの供試体では、通水後に空隙部分を選択的に水が浸潤していく様子が観察されました。その後、通水後1日の時点においても、水の浸潤量は1cm以下でした。一方、粉体供試体ではほとんど隙間がなく密に充填されており、1日経過後においてもほとんど水の浸潤が認められませんでした。この結果より、地下水環境下で充填初期に空隙が存在する場合においても、水の浸潤に伴う膨潤によって空隙を閉塞することを確認しました。

今後は、ペレットと粒状ベントナイトを対象に地下水環境下における透水係数の測定を実施し、粘土止水壁に用いる材料の選定を行います。また、図 100に示すEDZシーリング試験を実施して実際の地下環境条件にお

ける粘土止水壁の止水性能を評価する予定です。

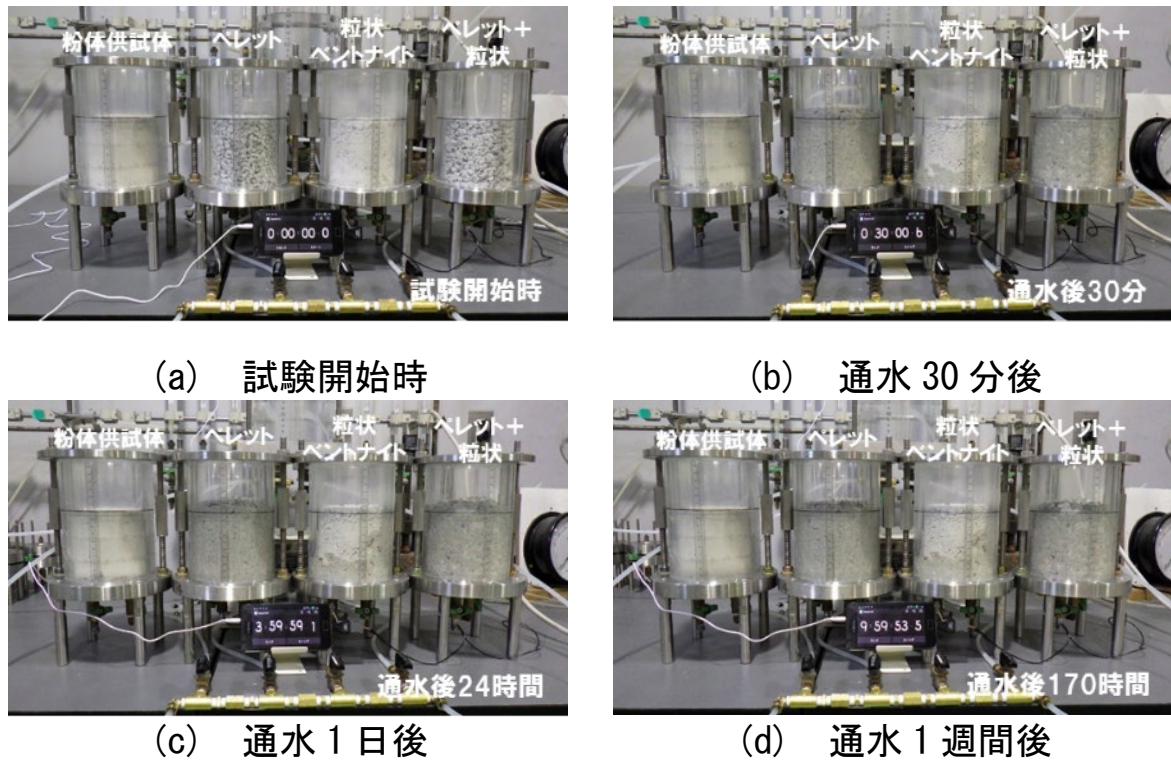


図 103 膨潤状況確認試験の実施状況⁽⁴⁹⁾

(4) 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 104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。

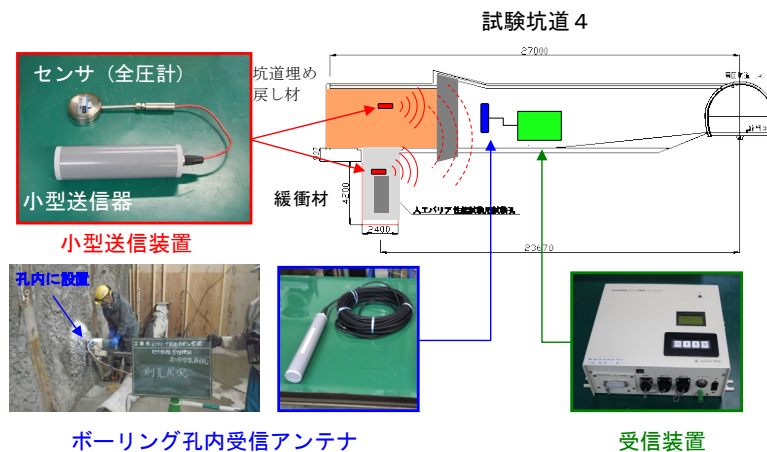


図 104 地中無線伝送システムの装置構成イメージ

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⁽⁵⁰⁾。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。平成30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。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 105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。

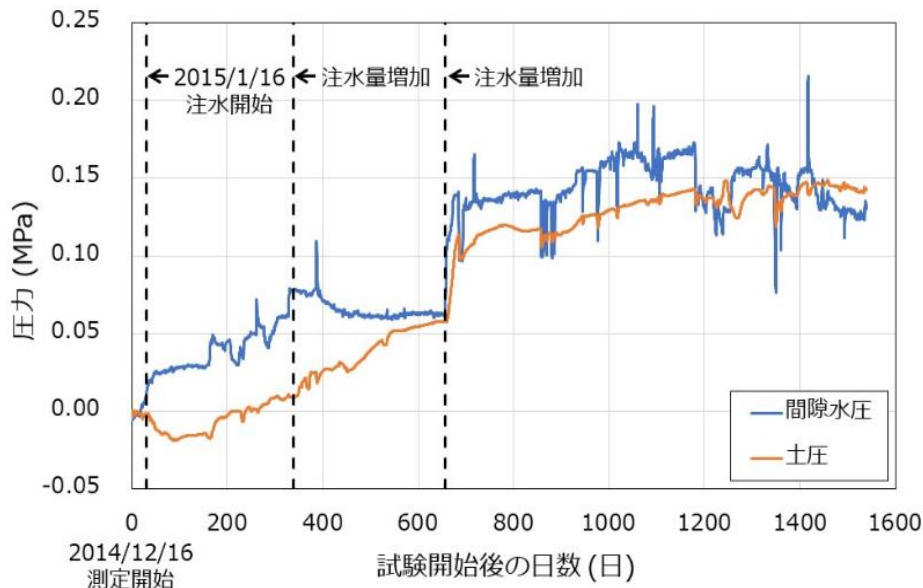


図 105 地中無線装置による計測データの例

4.2 安全評価手法の高度化

安全評価手法の高度化では、人工バリアや天然バリアにおける物質の移行挙動を解析・評価するための基礎データや知見を整備しています^{*55}。平成30年度は、昨年度に実施した健岩部^{*56}および割れ目を対象とした原位置トレーサー試験（拡散試験^{*57}）を継続するとともに、拡散試験終了後に試験区間周辺岩盤のコア採取作業を行いました。また、東立坑坑底から鉛直方向に掘削した2本のボーリング孔を利用し、断層を対象とした原位置トレーサー試験を水圧擾乱試験前後で実施するとともに、水圧擾乱試験前後における物質移行特性の変化の有無に関する検討を行いました。過年度に実施した原位置トレーサー試験の評価として、平成28年度～29年度にかけて実施した拡散試験について、塩分濃度の拡散・収着に及ぼす影響評価を行いました。また、平成28年度に実施した割れ目を対象とした原位置トレーサー試験⁽¹³⁾後に取得した岩石試料を用いた室内試験を行い、割れ目の連結／連続性の評価を行うとともに、平行平板モデルを仮定した、モデル解析を実施しました。

*55：岩盤を対象とした原位置トレーサー試験については、これまで調査技術開発として地層科学研究の項目に記載していましたが、人工バリアを対象とした原位置トレーサー試験とあわせて評価することから、安全評価手法の高度化の項目にまとめて記載しています。

*56：割れ目や変質のない岩盤の部分をいいます。

*57：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。

4.2.1 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験

これまでに得られた拡散試験の成果⁽⁴⁹⁾などを踏まえ、より多様な液性条件での原位置拡散試験手法と評価に用いる拡散・収着モデルの適用性を確認する観点から、地下水の塩分濃度条件に着目して実施した拡散試験⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾で取得した、試験区間内のトレーサー濃度減衰データと試験区間周辺のコア試料中のトレーサー濃度プロファイルデータに基づき、地下水中の塩分濃度が拡散・収着挙動に及ぼす影響を評価しました。拡散試験は試験孔内のシングルパッカーで区画された底部区間を試験区間とし、常時トレーサー溶液を循環させる方式⁽¹³⁾で実施し、各孔で所定の塩分濃度（D-06 孔：10%の NaCl 濃度、D-07 孔：1%未満の NaCl 濃度（深度 350m 原位置地下水相当）、D-09 孔：4%の NaCl 濃度（海水相当））の模擬地下水に調整した循環水を試験孔周辺の岩盤中に十分なじませた上で、セシウム、ストロンチウム、ヨウ素などの多様なトレーサーを循環させる方法で行いました。なお、トレーサーの循環を約 230 日間行った後、試験区間周辺をオーバーコアリングし、コア試料を採取、岩石中のトレーサー濃度プロファイルを取得しました。このうち、今年度は、塩分濃度の影響が比較的明瞭に確認されたセシウムを対象に、D-06 孔および D-09 孔の解析評価を行いました。図 106 にトレーサー濃度減衰データおよびトレーサー濃度プロファイルの結果を示します。

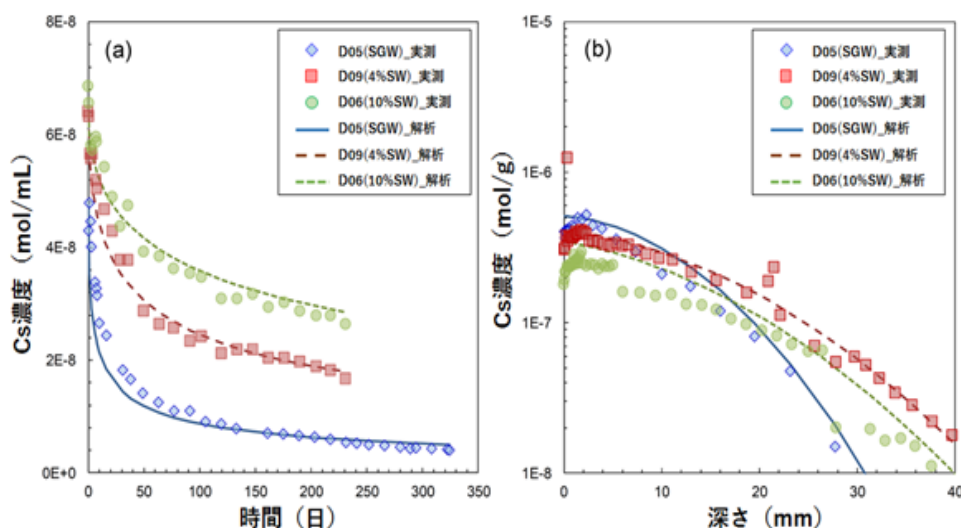


図 106 原位置拡散試験における(a)濃度減衰データ、(b)濃度プロファイルデータ

凡例の SGW (Saline Ground water) は塩水系地下水、SW (Saline water) は塩水を示します。数字は NaCl 濃度を示します。また、(b) 横軸の深さは試験孔壁面からの距離を示します。

塩分濃度の増加に伴いセシウムの濃度減衰が小さくなる傾向にあるとともに（図 106(a)）、塩分濃度の増加に伴い岩石中のセシウム濃度が低下し、より深くまで拡散する傾向が確認されました（図 106(b)）。また両データに関し、1次元拡散方程式の解析解によるフィッティングを行ったところ、上記の傾向性を含め、実測値を概ね再現できました。今後は、セシウム以外のトレーサーに関して同様の評価を行った上で、多様な地下水環境下における拡散・収着挙動の評価手法の検討を行っていく予定です。

平成 29 年度に開始した、割れ目および健岩部を対象とした原位置拡散試験⁽¹⁴⁾は約 230 日間、トレーサーを循環させた後、オーバーコアリングを行い、試験区間周辺の岩盤のコア試料を採取しました。取得されたトレーサー濃度減衰データのうち、セシウム（陽イオン）、重水（中性）およびヨウ素（陰イオン）に関し、D-10 孔（割れ目含む）と D-11 孔（割れ目無し）を比較すると（図 107）、いずれのトレーサーにおいても、割れ目の有無に関わらず濃度減衰の傾向は概ね一致していることがわかります。これは、今回対象とした割れ目を含む試験系においては、健岩部と同様に拡散支配によって岩盤基質中あるいは割れ目中をトレーサーが移行している可能性を示唆するとともに、室内トレーサー試験による稚内層中の割れ目（ハイブリッド割れ目）の実効拡散係数が稚内層の健岩部の実効拡散係数と同程度であるという既往の研究結果⁽⁵¹⁾と整合的です。なお、ヨウ素については、循環開始約 20 日後から 60 日後にかけて、濃度上昇の傾向が確認できます。稚内層中には、数 mg/L 程度のヨウ素が含まれており、岩石-水反応により、容易に溶出されることが知られています⁽⁵²⁾。したがって、拡散試験で確認された濃度上昇は、岩盤中のヨウ素が試験区間へ溶出した可能性が考えられます。今後は、採取したコア試料中のトレーサー濃度プロファイルを取得した上で、これまでに検討した原位置拡散試験結果の評価手法を適用しつつ、割れ目から健岩部にかけてのトレーサーの拡散・収着挙動の評価を行っていく予定です。

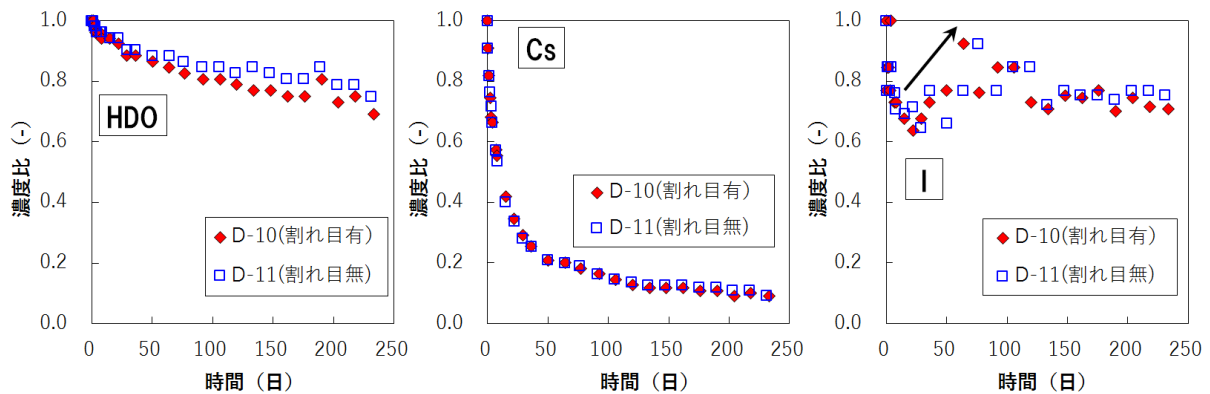


図 107 割れ目の有無によるトレーサー濃度の減衰傾向の比較

濃度比は試験開始初期の濃度に対する比率を表しています。

4.2.2 割れ目^{*58}を対象とした原位置トレーサー試験

平成29年度に引き続き、割れ目中の物質移行特性（主に収着／拡散特性）を評価するためのモデル化／解析手法を検討するために、試験孔周辺の三次元割れ目分布⁽⁵³⁾や割れ目表面に収着したトレーサー濃度およびその分布から、トレーサーの移行経路の推定を行うとともに、トレーサー試験結果を再現するモデル化手法の検討を継続しました。

今年度は、平成28年度にトレーサー試験を実施し、昨年度コア試料を採取したうち未分析のコア試料について、割れ目表面のトレーサー濃度分析を実施しました。平成29年度に実施したトレーサー濃度分析結果を含め、図 108にトレーサーの移行に関与した割れ目分布と、割れ目表面のトレーサー濃度分析結果の一例を示します。また、トレーサーが検出された割れ目のセシウムおよびコバルトの最大濃度を表 11に示します。注水孔や揚水孔に比較的近い孔（SW-33、SW-42、SW-43、SW-46、SW-47、SW49）に分布する多様な割れ目（せん断、引張、ハイブリッド）でトレーサーが検出されるとともに（図 108(a)、表 11）、試験区間内（注水孔）に出現する断層との直線距離がほぼ等しい位置に分布する割れ目（表 11中のe～i）における最大検出濃度が2桁程度異なりしました。このことから、注入されたトレーサーは注水孔および揚水孔間に分布する複数の割れ目のうち、選択的な経路（割れ目）を介して、移行している可能性が示唆されま

*58： 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わかってきたため、記載を改めました。

す。これらの結果と、既存の成果⁽⁵¹⁾を合わせると、注入されたトレーサーは、注入孔および揚水孔間に分布する異なる断層の周囲に分布するせん断割れ目やハイブリッド割れ目を介し、複数の経路を移行しているとともに、それぞれの移行経路の連続／連結性に応じて、流れるトレーサーの量も異なるものと考えられます (図 109)。

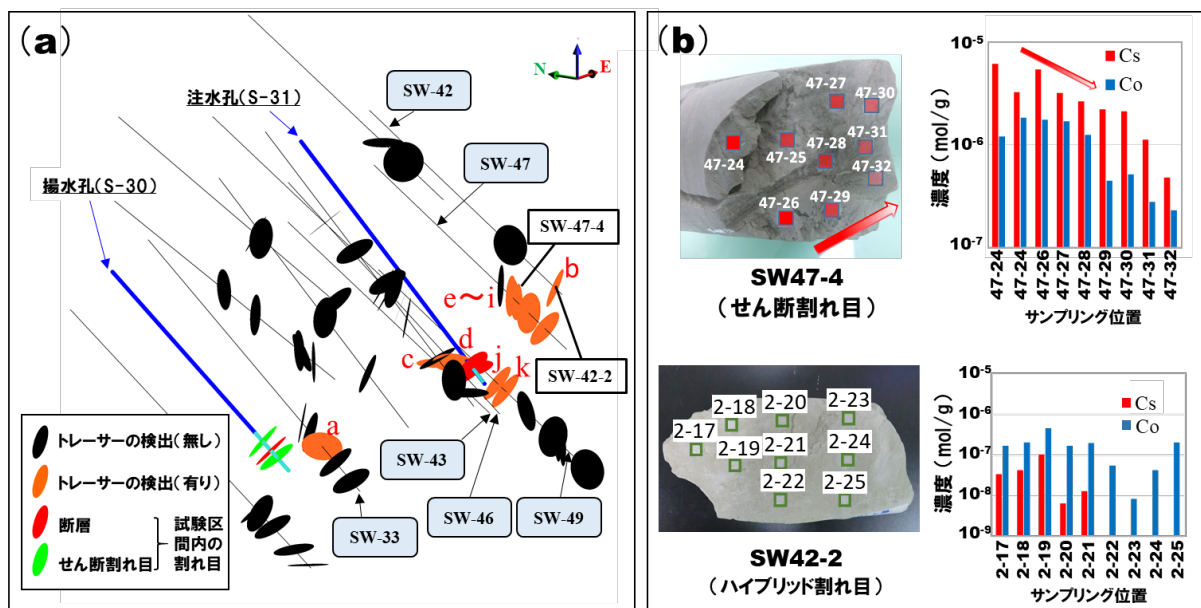


図 108 トレーサーの移行に関与した割れ目分布^{*59} (a)、割れ目表面のトレーサー濃度分析結果の一例 (b)

表 11 割れ目表面におけるトレーサーの最大検出濃度

| 孔名 | No. | 割れ目タイプ | 深度 (mabh) | 検出最大濃度 | |
|-------|-----|--------|-----------|----------|----------|
| | | | | Cs | Co |
| SW-33 | a | せん断 | 3.34 | 4.68E-08 | 6.11E-07 |
| SW-42 | b | ハイブリッド | 3.95 | 1.06E-07 | 4.60E-07 |
| SW-43 | c | 断層 | 3.14 | 2.38E-07 | 3.89E-07 |
| SW-46 | d | 断層 | 3.50 | 7.48E-06 | 2.39E-06 |
| SW-47 | e | 引張 | 2.92 | 6.15E-08 | 4.52E-07 |
| | f | せん断 | 3.00 | 4.19E-06 | 1.53E-06 |
| | g | せん断 | 3.10 | 6.08E-06 | 1.82E-06 |
| | h | ハイブリッド | 3.30 | 7.56E-06 | 2.29E-06 |
| | i | せん断 | 3.64 | 4.49E-08 | 2.76E-07 |
| SW-49 | j | ハイブリッド | 2.70 | 2.75E-07 | 2.25E-07 |
| | k | ハイブリッド | 3.15 | 3.92E-07 | 2.77E-07 |

*59：図中の割れ目は、ボーリング孔内で観察された割れ目を円盤と捉え、割れ目の方向や角度に合わせた状態で透過させたものを描写しています。

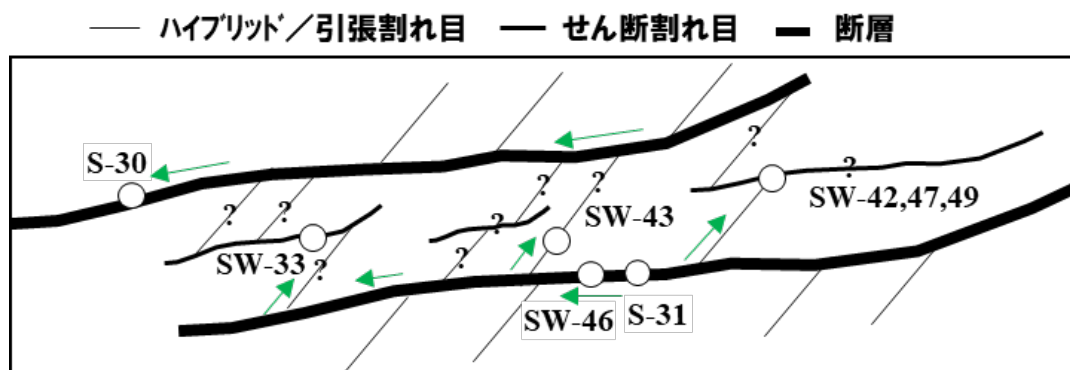
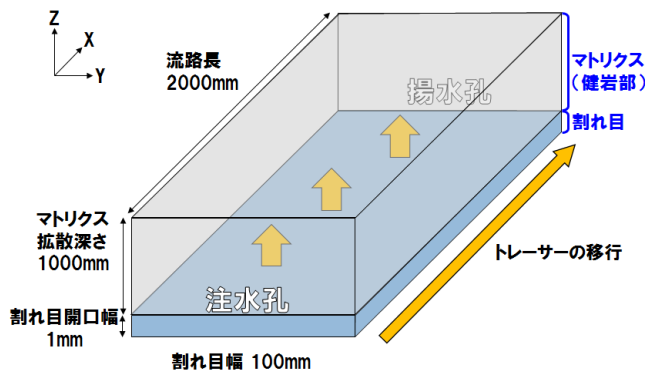


図 109 トレーサー移行経路の概念
(矢印は推定されるトレーサーの移行経路を示します。)

次に、昨年度に引き続き、当該トレーサー試験結果のモデル化／解析手法の検討を行いました。昨年度同様に、単純な平行平板モデルと均質な流れ場を仮定したモデルによる解析を行うこととし、図 110 に示すモデル概念、支配方程式、初期条件および境界条件に基づき、GoldSim コード (ver. 10.0) ⁽⁵⁴⁾ の PipePathway および Cellpathway オブジェクトを利用して、パルス入力条件および定常入力条件における破過データと割れ目表面に収着するトレーサー濃度分析結果との比較を行いました。割れ目の流路長については、実際の孔間距離（注水孔と揚水孔の直線距離）が約 1.3m であるのに対し、この直線上に位置するボーリング孔の割れ目表面においてトレーサーが未検出であり、図 108(a) でトレーサーが検出された割れ目を迂回する経路を移行している可能性を考慮し、2.0m としました。また、割れ目幅および割れ目開口幅については、ウラニンのパルス入力条件および定常入力条件における破過データに対して最適化を図り、それぞれ、1.5m、0.5mm を設定しました。さらに、マトリクス拡散や収着分配係数については、稚内層の健岩部を対象に取得された室内および原位置試験データに基づき設定しました。



割れ目中の核種移行に関する支配方程式 (GoldSim Pipe Pathway)

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \left[\left(\frac{Q}{A} \right) \frac{\partial C_i}{\partial x} - \left(\frac{AD_w + \alpha Q}{A} \right) \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \right] - \frac{1}{A} D_e P \frac{\partial C_i^m}{\partial z} \Big|_{z=0}$$

マトリクス中の核種移行に関する支配方程式

$$\frac{\partial C_i^m}{\partial t} = \frac{D_e}{\theta R_i^m} \frac{\partial^2 C_i^m}{\partial z^2} + \left(\frac{D_e}{\theta A^m R_i^m} \right) \frac{\partial A^m}{\partial z} \frac{\partial C_i^m}{\partial z}, \left(R_i^m = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta} \right)$$

初期条件: 初期濃度

割れ目中 $C_i(x, t) = 0$ ($t = 0$), マトリクス中 $C_i^m(x, y, z) = 0$ ($t = 0$)

パルス入力 $C_i(0, t) = C_0$ ($0 < t < 10 \text{ min}$)

定常入力 $C_i(0, t) = C_0$

境界条件

割れ目表面 $C_i(x, t) = C_i^m(x, 0, t)$ ($z = 0$)

拡散の最大深度 $\frac{\partial C_i^m}{\partial z} \Big|_{z=d} = 0$ ($z = d$)

| | | | | | |
|----------|------------------|------------------------|----------|--------------------|------------------------|
| Q | : 割れ目中の流量 | m^3/s | z | : 割れ目表面からの垂直方向への距離 | m |
| C_i | : 割れ目中の濃度 | kg/m^3 | C_i^m | : マトリクス中の濃度 | kg/m^3 |
| A | : 割れ目中の断面積 | m^2 | θ | : 空隙率 | - |
| D_w | : 自由水中の拡散係数 | m^2/s | R_i^m | : マトリクス中の遅延係数 | - |
| α | : 縦方向の分散長 | m | A^m | : 拡散領域/割れ目の長さ | m |
| D_e | : マトリクス中の実効拡散係数 | m^2/s | ρ | : マトリクスの乾燥密度 | kg/m^3 |
| P | : 割れ目の周囲長 (開口長さ) | m | K_d | : 吸着分配係数 | m^3/kg |

図 110 モデル概念、支配方程式および境界条件

図 111 にセシウムの定常入力条件における解析結果 (図 111(a)) および、割れ目表面のセシウム濃度分布に対する解析結果 (図 111(b)) を示します。なお、図 111(b) の実測値はトレーサーが検出された割れ目と注水孔との距離と割れ目内におけるトレーサー濃度の最大濃度をプロットしています。昨年度実施した解析ケースに、実効拡散係数を変更したケースを加え、感度解析を行ったところ、リファレンスケース (図 111 中の Ref.) に対し、実効拡散係数を $3/4$ 、吸着分配係数を $1/10$ にしたケースが最も実測値の再現性が高い結果となりました。一方で、同解析条件での結果と、割れ目表面のセシウム濃度分布との実測値を比較すると、解析結果のほうが 1 桁程度高いことがわかります。今回実施した解析では平行平板モデルおよび均質な流れ場を仮定している一方で、図 109 に示すように、実際は複数の経路を介してトレーサーが移行している可能性があるとともに、各経路を流れるトレーサーの量も異なることが推測されることから、今後はこれらトレーサーの経路分布の不均質性を考慮したより現実的な解析モデルを検討し、その適用性を確認していく予定です。

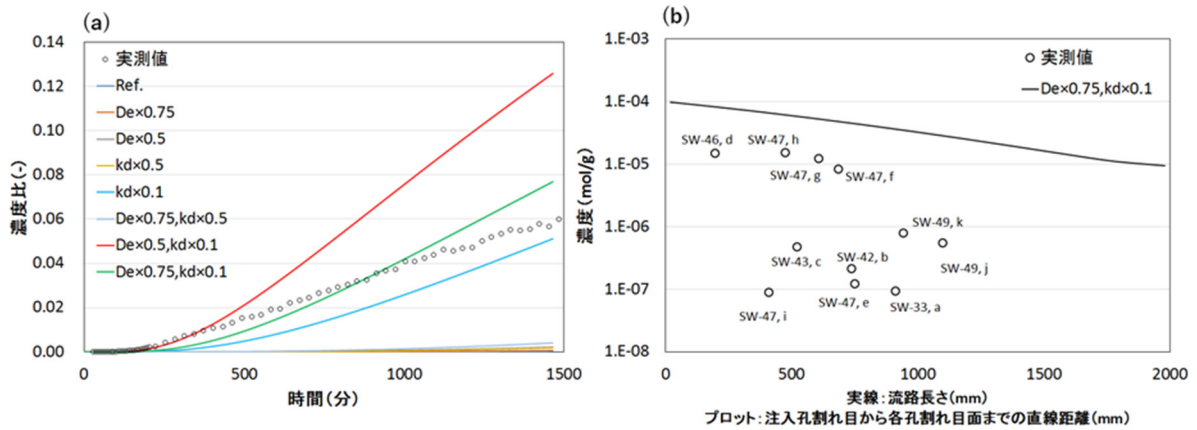


図 111 (a) セシウムの定常入力条件における解析結果、(b) 割れ目表面のセシウム濃度分布に対する解析結果

(b) 実測値はCsのマスバランスを考慮し、表 11の最大濃度を2倍にした値をプロットしています。

4.2.3 断層を対象とした原位置トレーサー試験

平成30年度は、東立坑坑底から鉛直方向に掘削している2本のボーリング孔を利用し、断層を対象としたダイポール試験を実施しました。対象とした断層は、事前の調査により地下水の主要な水みちとなりうることが示唆されている断層で、この深度は断層の水理学的連結性が限定的であることが力学的な検討から推定されている領域⁽¹⁷⁾です。このような断層の水理学的連結性が限定的な領域では、断層を介した物質の移行経路が健岩部(多孔質媒体)により遮断されるため、この多孔質媒体中での拡散現象が巨視的な物質移行を支配しうる可能性がある一方で、将来的な断層活動によりそのような巨視的な物質移行特性が変化する可能性もあります。本試験ではこの可能性を検討するために、3.1.1(2)に記述した水圧擾乱試験の前後でダイポール試験を実施し、水圧擾乱試験で発生した不可逆的なせん断破壊により、断層の水理学的連結性や物質移行特性に変化が認められるかを確認しました。

ダイポール試験中の注水孔と揚水孔の間隙水圧差(図 112)を水圧擾乱試験前後で比較すると、ともに流量設定は同じ(注水流量:20mL/min、揚水流量:200mL/min)であるにもかかわらず、水圧擾乱試験後の方が間隙水圧差が大きくなり、動水勾配が大きい状態にあることが確認できます。図 113に揚水孔で観測されたトレーサー(ウラニン)の濃度比を示します。試験開始時点でウラニンの濃度比がゼロではなく、開始直後から濃

度比が徐々に減少しているのは、検出されたウラニンの濃度が数ppbと低いことによる計測値のずれや、事前調査で使用したウラニンの残留分の影響を捉えていることが要因して考えられます。これらのことを考慮すると、本試験で注水したウラニン濃度の有意な立ち上がり（揚水孔にトレーサーが到達するまでの時間）は、試験開始から約3～4日後であることがわかります。一方で、過去に350m坑道で実施した単一割れ目および複数の割れ目におけるダイポール試験では、今回の試験と孔間距離や間隙水圧差がオーダーで異ならないにもかかわらず、試験開始から数十分程度で濃度の立ち上がりが確認されています（表 12）。このことから、本試験で対象とした断層は、孔間で割れ目の水理学的連結性が乏しく、孔間の最短経路においても一部の区間で健岩部（多孔質媒体中）をトレーサーが移行している可能性が推定されます。図 114に、これまでにダイポール試験を実施した試験対象構造毎の最短経路を移行するトレーサーのイメージ図の一例を示します。このような場において、水圧擾乱試験により不可逆的なせん断破壊を引き起こした前後でウラニンの濃度比を比較すると、動水勾配が大きくなったにも関わらず、トレーサー濃度の立ち上がりの時間が早まっていないことが確認されました。この結果は、将来的に断層が活動したとしても、断層が水理学的に連結しにくい力学条件の領域⁽¹⁷⁾では、堆積岩がもつ緩衝能力により、その巨視的な物質移行特性は多孔質媒体の特徴を保持しうる可能性を示唆しています。今後は、今回得られた試験結果のより詳細な解析を行う予定です。

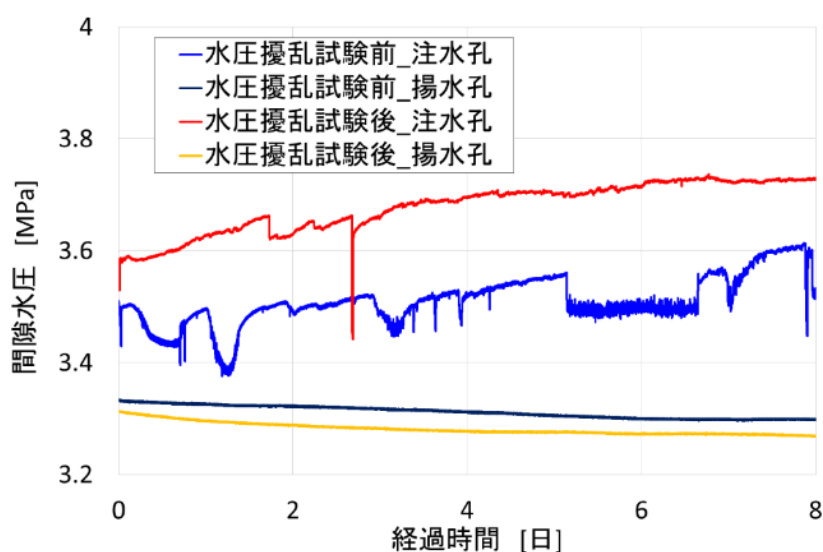


図 112 ダイポール試験中の注水孔と揚水孔の間隙水圧差

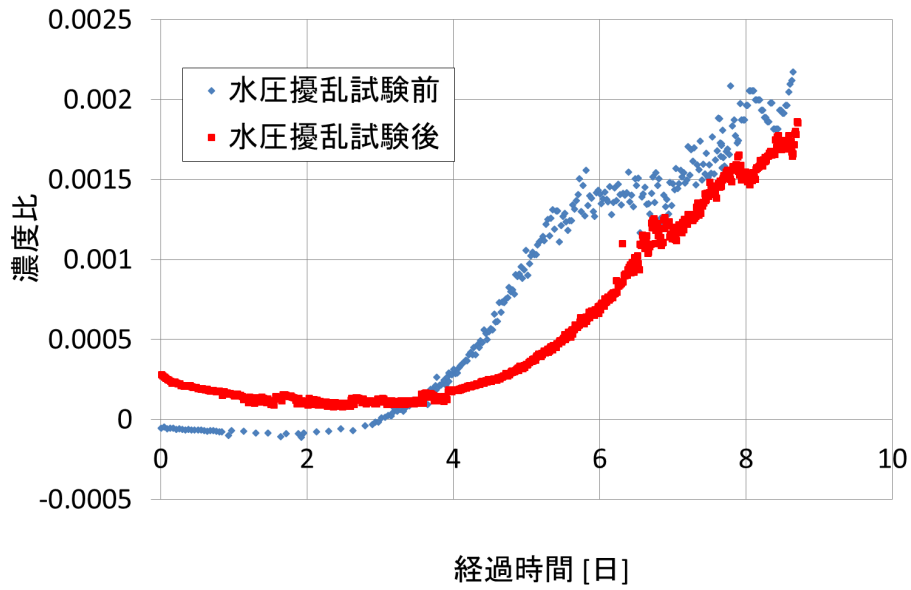


図 113 揚水孔で観測されたウラニンの濃度比

濃度比は試験開始初期の濃度に対する比率を表しています。

表 12 トレーサー到達までの時間

| 試験対象構造 | 孔間距離 (m) | 間隙水圧差 (MPa) | トレーサー到達までの時間 |
|--------|-------------|-------------|--------------|
| 単一割れ目 | 0.421~1.179 | 約 0.01~0.03 | 約 30~90 分 |
| 複数の割れ目 | 1.366 | 約 0.01~0.19 | 約 40~60 分 |
| 本試験 | 2.6 | 約 0.15~0.45 | 約 3~4 日 |

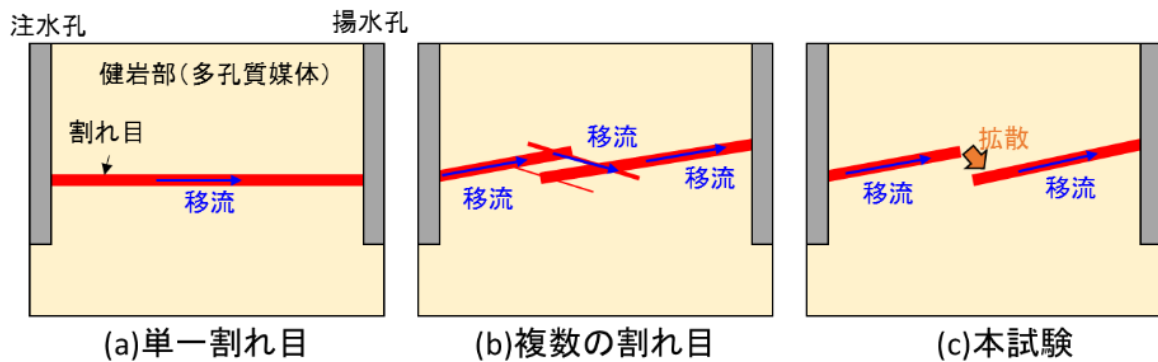


図 114 最短経路を移行するトレーサーのイメージ図の例

5. 地下施設の維持管理

5.1 地下施設の維持管理

平成30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・修繕などを行い、地下施設の安全性確保に努めました。
(写真 7、写真 8)。



写真 7 スカフォード（吊り足場）巻き上げ機の点検

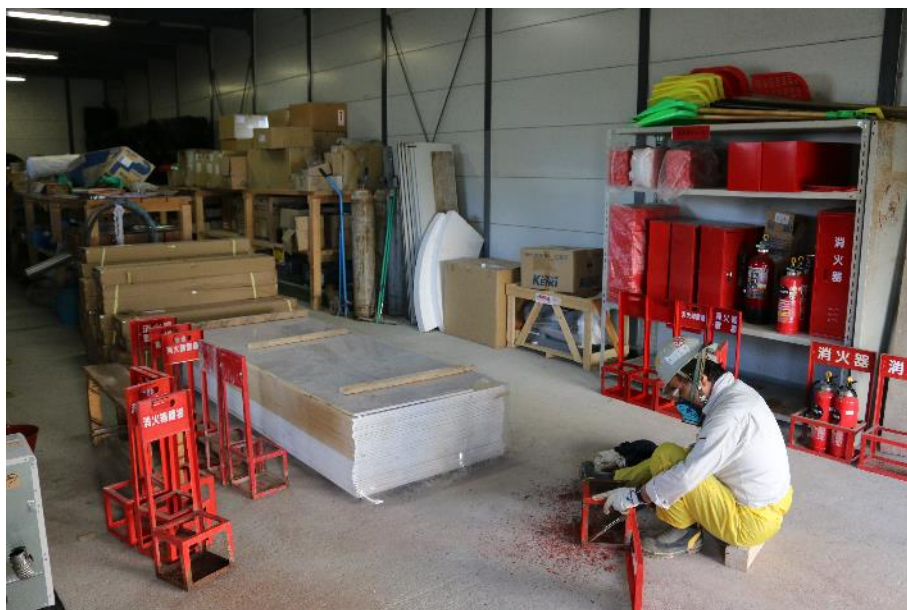


写真 8 消火器置場のメンテナンス（錆落とし）

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壤汚染対策法の適用外となっています。しかし、幌延深地層研究センターでは、周辺環境の保全に万全を期すため、土壤汚染対策法に準拠した管理を行っています。具体的には、対象となる物質が土壤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」という。)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9)。

掘削土(ズリ)置場は、土壤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115)となっています。



写真9 掘削土(ズリ)置場

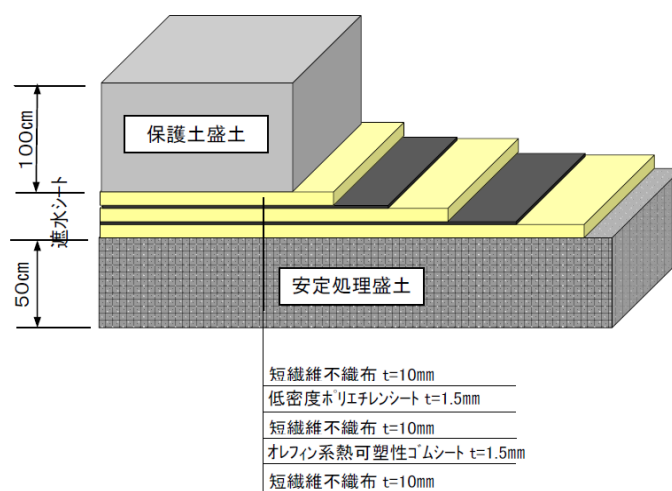


図115 掘削土(ズリ)置場の構造

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 10）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 10 排水処理設備

6. 環境調査

平成30年度は、引き続き、地下施設からの排水などの水質調査および幌延深地層研究センター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）置場の環境への影響を監視するため、近接する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。これらの分析結果の詳細については、幌延深地層研究センターのホームページ*60で公開しています。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分析用試料の採取地点を図116に示します。

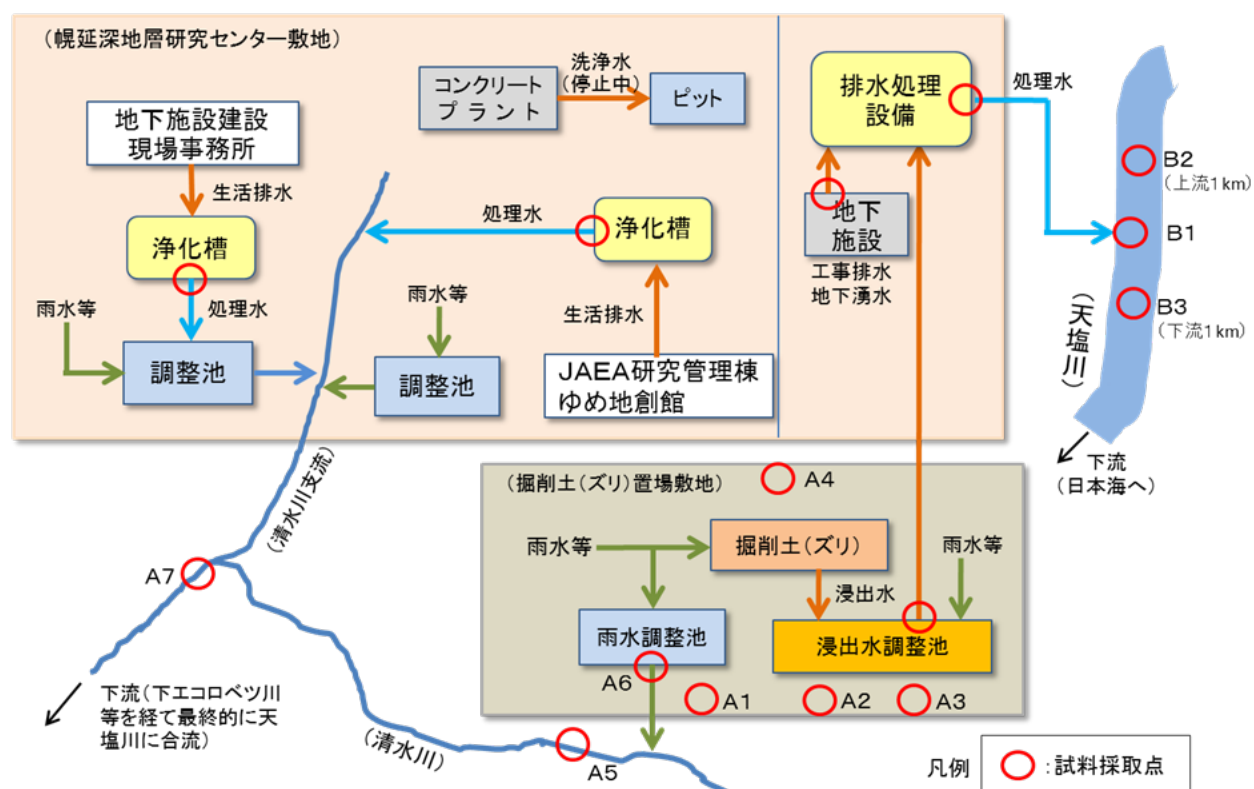


図 116 排水系統と各水質分析用試料の採取地点

*60 : <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/disclosure/suishitsu.html>

(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。

平成 30 年度における天塩川への排水量は、表 13 に示すとおりです。合計排水量は、49,548m³であり、平成 29 年度（52,615m³）の約 94%でした。日最大排水量は、融雪により増水した掘削土（ズリ）置場の浸出水を処理した 4 月の 500m³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（750m³/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、掘削土（ズリ）置場の融雪水を多く処理した 4 月が最大となっており、月排水量が 8,295m³、日平均排水量が 276.5m³でした。なお、当該排水管路の一部区間が「国道 40 号天塩防災事業」（北海道開発局稚内開発建設部、以下「稚内開建」という。）の工事範囲に該当したことから、稚内開建の施工にて、一部排水管の移設工事を実施しました。平成 29 年度は仮移設工事、本年度は本設工事を行っております。

表 13 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 30 年 4 月 | 8,295 ^{*3} | 500 ^{*3} | 276.5 ^{*3} |
| 平成 30 年 5 月 | 3,591 | 217 | 115.8 |
| 平成 30 年 6 月 | 3,875 | 277 | 129.2 |
| 平成 30 年 7 月 | 4,664 | 303 | 150.5 |
| 平成 30 年 8 月 | 4,392 | 319 | 141.7 |
| 平成 30 年 9 月 | 3,512 | 260 | 117.1 |
| 平成 30 年 10 月 | 4,461 | 268 | 143.9 |
| 平成 30 年 11 月 | 3,610 | 333 | 120.3 |
| 平成 30 年 12 月 | 3,691 | 303 | 119.1 |
| 平成 31 年 1 月 | 2,474 | 182 | 79.8 |
| 平成 31 年 2 月 | 2,653 | 228 | 94.8 |
| 平成 31 年 3 月 | 4,330 | 360 | 139.7 |
| 合 計 | 49,548 | — | — |

※1：北るもい漁業協同組合との協定値は 750m³/日

※2：月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）置場の浸出水調整池の原水」については、図 117 に示すとおり、硝酸性窒素処理、濁水処理、脱ホウ素処理、脱窒素処理の排水処理を行った後、「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。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。なお、浸出水が曝気されることで形態変化する硝酸性窒素を生物的に処理するための硝酸性窒素処理設備を新設し、平成30年5月より試運転、6月より本格稼働しています。

平成30年度における水質調査結果は、表14のとおりであり、排水基準値を超える処理済排水はありませんでした。

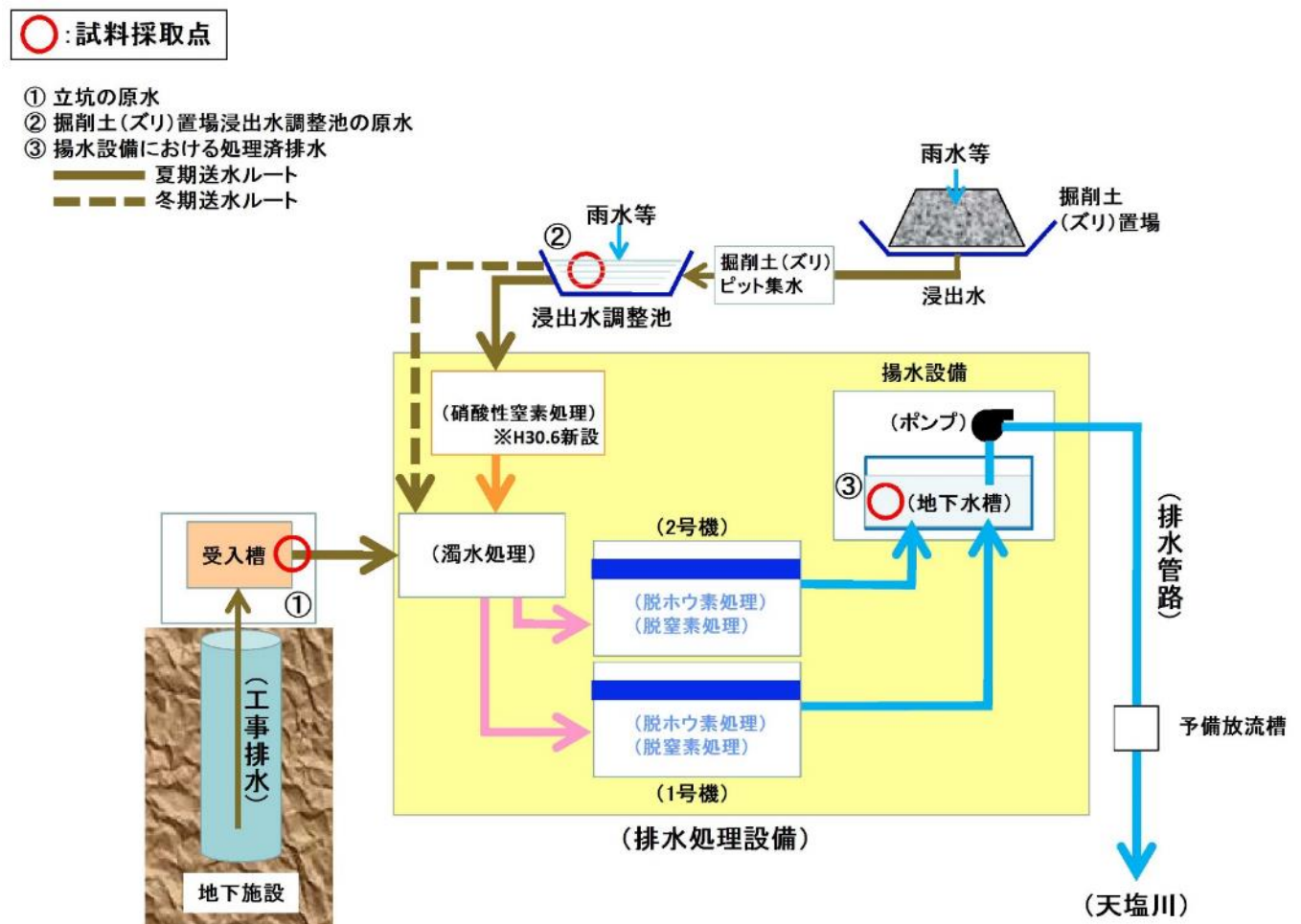


図 117 地下施設からの排水の処理フローと試料採取点

表 14 地下施設からの排水にかかる水質調査結果

| 分析項目※1 | 調査地点※2 | 過年度 | 平成30年度 | (参考値) 水質汚濁防止法 排水基準 |
|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| | | 平成18年12月 ～平成30年3月 | 平成30年4月 ～平成31年3月 | |
| カドミウム (mg/L) | 立坑の原水 | <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 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | <0.01 | <0.01 | |
| ヒ素 (mg/L) | 立坑の原水 | <0.01～0.08 | <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 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | <0.01～0.02 | <0.01 | |
| セレン (mg/L) | 立坑の原水 | <0.01～0.02 | <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 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | <0.01 | <0.01 | |
| フッ素 (mg/L) | 立坑の原水 | <0.8～3.5 | <0.8～1.5 | 8 |
| | 掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水 | <0.8 | <0.8 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | <0.8～1.6 | <0.8 | |
| ホウ素 (mg/L) | 立坑の原水 | <0.1～160 | 64～83 | 10 |
| | 掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水 | <0.1～37 | 0.3～6.2 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | <0.1～3.0 | 0.1～1.2 | |
| 全窒素 (mg/L) | 立坑の原水 | 0.41～117 | 59～79 | 120 (日間平均 60) |
| | 掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水 | 3.5～150 | 3.0～39 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | 0.60～48 | 8.9～21 | |
| 全アンモニア (mg/L) | 立坑の原水 | 0.12～110 | 44～62 | — |
| | 掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水 | 0.12～22 | 0.20～1.5 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | <0.05～6.8 | <0.05 | |
| pH | 立坑の原水 | 7.5～9.5 | 8.1～8.3 | 5.8～8.6 |
| | 掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水 | 6.7～8.7 | 7.0～8.4 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | 6.9～8.6 | 7.3～8.2 | |
| 浮遊物質 (mg/L) | 立坑の原水 | 4～580 | 6～290 | 200 (日間平均 150) |
| | 掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水 | 4～170 | 1～8 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | <1～9 | <1～2 | |
| 塩化物 イオン (mg/L) | 立坑の原水 | 20～4,300 | 3,300～4,200 | — |
| | 掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水 | 10～1,500 | 16～220 | |
| | 揚水設備における処理済排水 | 38～4,700 | 2,200～4,300 | |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 116 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調査地点（図 118）において、定期的（原則 1 回/月）に採水し（写真 11）、水質調査を実施しています。

平成 30 年度における調査結果は、表 15 に示すとおりです。浮遊物質について、各（B1～B3）地点では、北るもい漁業協同組合との協定値（20mg/L）を超過した時期（融雪と降雨により増水した時期：4 月、5 月、7 月、11 月）がありましたが、同日に採水した放流口の上流側（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は低い値（最大 2mg/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 118 天塩川の調査地点

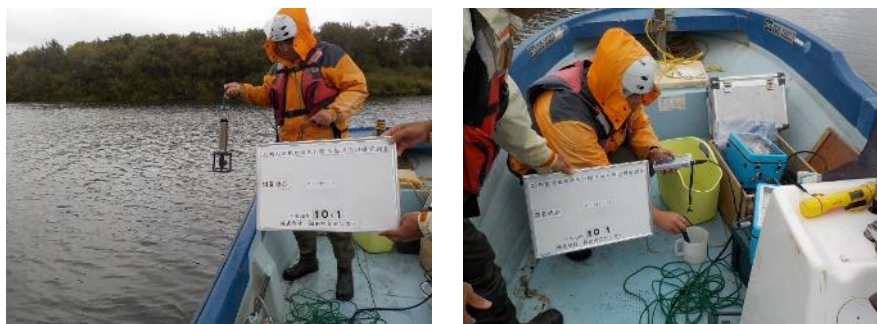


写真 11 天塩川の採水状況

表 15 天塩川の水質調査結果

| 分析項目※1 | 調査地点※2 | 過年度 | | 平成30年度 | 北るもい 漁業協同組合 協定値 | |
|------------------|--------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|---------|
| | | 平成18年6月 ～平成18年11月 (放流前) | 平成18年12月 ～平成30年3月 (放流後) | 平成30年4月 ～平成31年3月 | | |
| ホウ素 (mg/L) | B1 | 表層 | <0.02～0.04 | <0.01～0.35 | 0.01～0.13 | 5 |
| | | 中層 | — | <0.01～3.5 | 0.01～1.4 | |
| | | 深層 | <0.02～3.35 | <0.01～4.9 | 0.01～4.9 | |
| | B2 | 表層 | <0.02～0.04 | <0.01～0.27 | <0.01～0.10 | |
| | | 中層 | — | <0.01～3.7 | <0.01～1.0 | |
| | | 深層 | <0.02～3.28 | <0.01～5.0 | <0.01～4.8 | |
| | B3 | 表層 | <0.02～0.07 | <0.01～0.26 | 0.01～0.28 | |
| | | 中層 | — | <0.01～2.5 | <0.01～1.0 | |
| | | 深層 | <0.02～1.03 | <0.01～4.6 | <0.01～4.1 | |
| 全窒素 (mg/L) | B1 | 表層 | 0.37～1.06 | 0.11～2.2 | 0.21～1.2 | 20 |
| | | 中層 | — | 0.15～2.1 | 0.26～1.3 | |
| | | 深層 | 0.42～1.50 | 0.15～6.5 | 0.36～1.3 | |
| | B2 | 表層 | 0.37～1.14 | 0.14～2.2 | 0.20～1.2 | |
| | | 中層 | — | 0.15～2.3 | 0.21～1.3 | |
| | | 深層 | 0.4～1.16 | 0.16～2.3 | 0.21～1.3 | |
| | B3 | 表層 | 0.4～1.31 | 0.16～2.2 | 0.20～1.3 | |
| | | 中層 | — | 0.11～2.3 | 0.23～1.3 | |
| | | 深層 | 0.49～1.24 | 0.16～2.3 | 0.21～1.2 | |
| 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 | <0.05～0.06 | |
| | | 深層 | — | <0.05～0.85 | <0.05～0.05 | |
| | 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 | 6.9～7.4 | 5.8～8.6 |
| | | 中層 | — | 6.5～7.6 | 7.0～7.4 | |
| | | 深層 | 7.0～7.6 | 6.5～8.0 | 7.0～7.5 | |
| | B2 | 表層 | 7.1～7.4 | 6.6～7.9 | 6.8～7.4 | |
| | | 中層 | — | 6.5～7.6 | 6.8～7.4 | |
| | | 深層 | 7.2～7.6 | 6.6～8.0 | 6.8～7.5 | |
| | B3 | 表層 | 7.0～7.6 | 6.6～7.9 | 7.0～7.5 | |
| | | 中層 | — | 6.6～7.6 | 7.0～7.5 | |
| | | 深層 | 7.1～7.4 | 6.6～8.0 | 7.0～7.5 | |
| 浮遊物質 (mg/L) | B1 | 表層 | 3～34 | <1～360 | <1～150 | 20 |
| | | 中層 | — | <1～390 | <1～210 | |
| | | 深層 | 6～86 | <1～400 | <1～300 | |
| | B2 | 表層 | 3～36 | <1～390 | 1～170 | |
| | | 中層 | — | <1～400 | <1～260 | |
| | | 深層 | 5～47 | <1～460 | <1～270 | |
| | B3 | 表層 | 3～35 | <1～420 | <1～130 | |
| | | 中層 | — | <1～460 | <1～190 | |
| | | 深層 | 5～49 | <1～650 | <1～230 | |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 118 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) 地点の値としています。

(4) 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）は、二重に遮水された掘削土（ズリ）置場で管理していますが、遮水された外側となる掘削土（ズリ）置場周辺への影響を監視するため、図 119 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 12）、水質調査を実施しています。

平成 30 年度における調査結果は、表 16 に示すとおりです。A4 の水素イオン濃度（pH）が、これまでの結果と比べ低い値となっています。地下水の pH を決定する最も大きな要因としては、周辺地盤や土壌の成分が挙げられます。観測井 4 地点の傾向として、A1～A3 は pH6.5 前後、A4 は pH5～6 程度と、やや差異が見られますが、おそらく造成した際の盛土の成分による違いと考えられます。掘削土（ズリ）置場周辺の環境は平成 29 年度から変わっておらず、他の A1 から A3 地点はこれまでの変動範囲内であること、過去の変動範囲内を僅かに外れている程度であることから上述の要因によるものと考えられます。

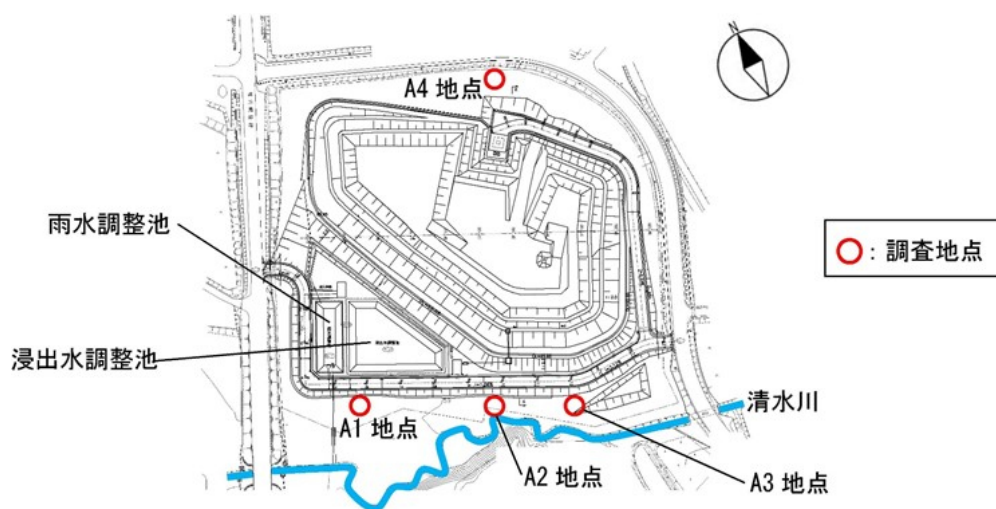


図 119 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の調査地点



写真 12 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況（A1～A4）

表 16 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 | 調査地点※2 | 過年度 | | 平成 30 年度 | | | |
|----------------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|--------|--------|---------|
| | | | | 平成 30 年 | | | 平成 31 年 |
| | | 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30年2月 掘削土(ズリ) 搬入後 | 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 | <0.005 | <0.005 | <0.005 |
| ヒ素 (mg/L) | A1 | <0.005 | <0.005～0.012 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 |
| | A2 | <0.005 | <0.005～0.007 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 |
| | A3 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 |
| | A4 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 |
| セレン (mg/L) | A1 | <0.002 | <0.002～0.005 | <0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 |
| | A2 | <0.002 | <0.002～0.003 | <0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 |
| | A3 | <0.002 | <0.002～0.005 | <0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 |
| | A4 | <0.002 | <0.002～0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 |
| フッ素 (mg/L) | A1 | <0.1～0.3 | <0.1～0.4 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <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 | 14 | 19 | 19 |
| | A2 | 1.29～43.5 | 0.43～17.0 | 2.5 | 19 | 6.4 | 10 |
| | A3 | 12.5～34.0 | 0.18～41.8 | 0.73 | 17 | 1.2 | 13 |
| | A4 | <0.02～0.06 | <0.02～0.47 | <0.02 | 0.09 | 0.22 | 0.02 |
| pH | A1 | 6.9～7.2 | 6.3～7.9 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.5 |
| | A2 | 4.6～6.3 | 3.7～6.9 | 6.4 | 6.7 | 6.5 | 6.8 |
| | A3 | 6.8～7.3 | 4.2～7.4 | 6.7 | 6.6 | 6.5 | 6.6 |
| | A4 | 5.4～6.6 | 5.1～6.7 | 5.5 | 5.1 | 5.0 | 5.1 |
| 塩化物 イオン (mg/L) | A1 | 1,810～2,760 | 79～3,400 | 950 | 1,800 | 1,200 | 1,500 |
| | A2 | 147～2,910 | 23～960 | 160 | 1,200 | 280 | 680 |
| | A3 | 631～1,550 | 27～1,700 | 42 | 960 | 49 | 790 |
| | A4 | 9.7～11.9 | 8.4～17.0 | 9.9 | 9.8 | 9.7 | 10 |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 119 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 120 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 13）、水質調査を実施しています。

平成 30 年度における調査結果は、表 17 に示すとおりです。雨水調整池（A6）において排水基準を超える pH 値（8.8）が 9 月・10 月に確認されましたが、これは過年度と同様の傾向です。要因としては、調整池に発生している藻類等の植生が光合成を行うことで水中の溶存二酸化炭素を消費しているため、アルカリ性に遷移していると考えられます。同日に採取した A5 では、pH6.9（9 月）、pH7.1（10 月）と排水基準値（pH5.8～8.6）内です。その他の調査項目については、これまでの調査結果の範囲内であることから、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 120 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の調査地点



写真 13 清水川の採水状況

表 17 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 | 調査地点※2 | 過年度 | | 平成30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30年3月 掘削土(ズリ) 搬入後 | 平成30年4月 ～平成31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 |
| | 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 |
| | A7 | <0.1 | <0.1～0.3 | <0.1 |
| ホウ素 (mg/L) | A5 | 0.03～0.25 | <0.02～0.44 | <0.02～0.38 |
| | A6 | <0.02～0.09 | 0.02～0.43 | <0.02～0.50 |
| | A7 | 0.03～0.30 | <0.02～0.42 | <0.02～0.26 |
| pH | A5 | 6.4～7.1 | 6.0～7.9 | 6.0～7.5 |
| | A6 | 5.8～7.4 | 5.7～9.1 | 6.2～8.8 |
| | A7 | 6.5～7.0 | 6.2～7.8 | 6.1～7.3 |
| 浮遊物質 (mg/L) | A5 | 1～20 | <1～66 | 2～51 |
| | A6 | 12～173 | <1～500 | <1～28 |
| | A7 | 1～11 | <1～270 | 1～28 |
| 塩化物イオン (mg/L) | A5 | 14.4～30.5 | 7.2～70 | 14～48 |
| | A6 | 5.1～24.7 | 2.9～269 | 2.7～72 |
| | A7 | 15.6～28.7 | 8.1～100 | 14～49 |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 120 参照

(6) 浄化槽排水の水質調査結果

幌延深地層研究センター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において、定期的（原則1回/4週）に水質調査を実施しています。

平成30年度における水質調査結果は、表18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 18 浄化槽排水の水質調査結果

| 分析項目 | 調査地点 | 過年度 | 平成30年度 | 北るもい 漁業協同組合 協定値 |
|--------------------------|---------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| | | 平成18年12月 ～平成30年3月 | 平成30年4月 ～平成31年3月 | |
| pH | 研究管理棟 | 5.9～7.5 | 6.2～7.3 | 5.8～8.6 |
| | 地下施設 現場事務所 | 6.8～7.9 | 7.3～7.8 | |
| 生物化学的 酸素要求量 (mg/L) | 研究管理棟 | <0.5～17 | 3.4～15 | 20 |
| | 地下施設 現場事務所 | <0.2～28 | 0.7～15 | |
| 浮遊物質 量 (mg/L) | 研究管理棟 | 0.5～10 | 2～4 | 20 |
| | 地下施設 現場事務所 | <1.0～7.0 | <1.0～8.0 | |
| 全窒素 (mg/L) | 研究管理棟 | 6.6～52 | 13～40 | 60 |
| | 地下施設 現場事務所 | 0.3～45 | 0.2～4.8 | |
| 全リン (mg/L) | 研究管理棟 | 0.5～4.5 | 1.8～5.0 | 8 |
| | 地下施設 現場事務所 | <0.1～7.8 | <0.1～2.5 | |
| 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 | 0～1,500 | 0～2,100 | |

6.2 幌延深地層研究センター周辺の環境影響調査結果

平成 29 年度に引き続き、幌延深地層研究センター周辺の環境影響調査として、図 121 に示す地点におい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。

平成 30 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はありませんでした。

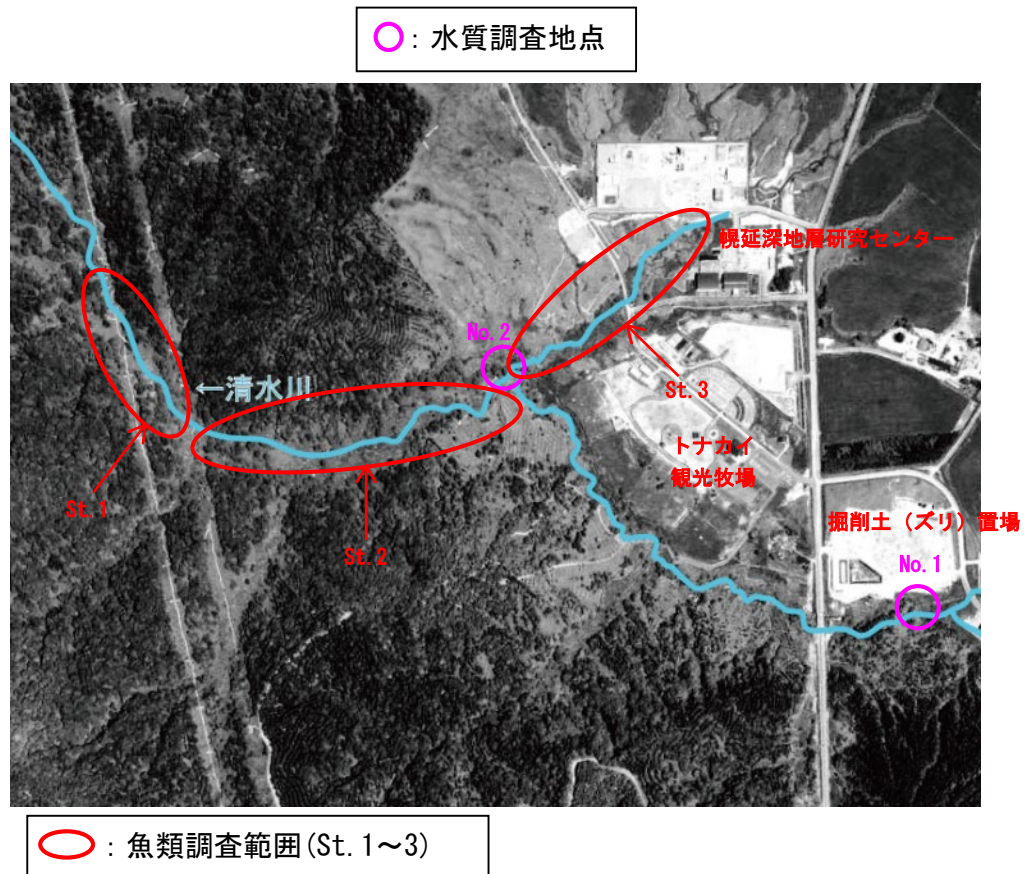


図 121 環境調査実施場所

(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14）、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。

平成30年度における調査結果は、表19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。

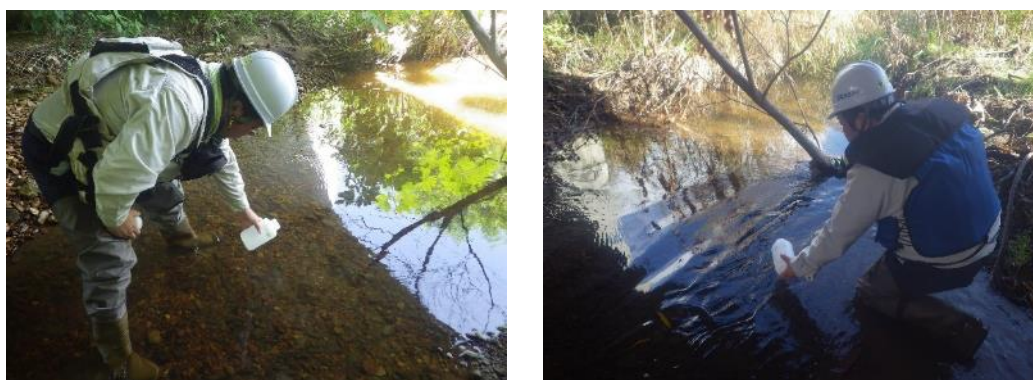


写真 14 清水川の水質調査

表 19 清水川の水質調査結果

| 分析項目※1 | 調査地点※2 | 過年度 | 平成30年度 | | | |
|--------------------------|--------|---------------------|--------|-----|------|-------|
| | | | 平成30年 | | | 平成31年 |
| | | 平成14年8月～ 平成30年2月 | 6月 | 9月 | 11月 | 2月 |
| pH | No. 1 | 6.3～7.9 | 7.3 | 7.0 | 6.9 | 7.6 |
| | No. 2 | 6.4～7.7 | 7.2 | 6.9 | 6.9 | 7.2 |
| 生物化学的 酸素要求量 (mg/L) | No. 1 | <0.5～62 | 1.1 | 4.5 | 3.4 | 1.3 |
| | No. 2 | <0.5～10.0 | 3.0 | 2.6 | 4.8 | 1.8 |
| 浮遊物質量 (mg/L) | No. 1 | 1～70 | 3 | 3 | 5 | 3 |
| | No. 2 | <1～69 | 3 | 1 | 2 | 2 |
| 溶存酸素量 (mg/L) | No. 1 | 6.6～13.9 | 10.6 | 8.9 | 10.7 | 11.9 |
| | No. 2 | 5.5～12.5 | 7.7 | 7.3 | 9.9 | 9.4 |

※1：主な分析項目のみを抜粋

※2：調査地点は図121参照

(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 15）。調査は、St. 1～St. 3 の3箇所で実施しています（図 121）。

平成 30 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 20 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 15 生息魚類調査

表 20 確認された重要種（魚類）

| 目 | 科 | 種 | 選定根拠*1 | | | | | | | 採取日 |
|--------|--------|------------|--------|---|----|----|---|---|---|-----------------------------------|
| | | | 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 | | | 秋季 (H30.10.1 ～ H30.10.2) |
| 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 2017 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
危：危急種 希：希少種 減：減少種
- ⑥：「緑の国勢調査－自然環境保全調査報告書－」（環境庁 昭和 51 年）に基づく選定種
- ⑦：「第 2 回自然環境保全基礎調査報告書（緑の国勢調査）」（環境庁 昭和 57 年）に基づく選定種
○：調査対象種

※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 16）。

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 17）。



写真 16 安全パトロールの状況



写真 17 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。平成30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

京都大学

坑道掘削に伴う岩盤の応力変化により周辺岩盤に生じる割れ目の連結性や三次元分布を可視化することを目的として、坑道周辺岩盤に樹脂を注入し、樹脂固化後に採取した岩石試料を顕微鏡や画像などで観察しました。

平成30年度は、深度350m調査坑道の試験坑道3において、樹脂注入箇所周辺で採取した試料を観察し、割れ目の発達範囲、割れ目密度、開口幅の測定を行いました。その結果、孔口から約25cmまでの範囲では多くの掘削影響割れ目が発達しており、割れ目同士が連結するように派生する割れ目もいくつか観察されました。また、当該区間の割れ目の開口幅は、最大で約1mmでした。このことから、坑道の掘削により壁面近傍に開口幅の大きな割れ目が発生し、さらにそれらが連結しあうことにより、掘削影響領域の透水性が増大することを定量的に示しました。

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理解の向上のため、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す。また、これまでの共同研究における成果として、微量元素と有機物の相互作用を評価する上での基礎情報となる地下水中の腐植物質の化学的特性について、論文として取りまとめました⁽⁵⁵⁾。

高炭酸イオン濃度の地下水中における堆積岩への微量元素の収着に係る現象理解の向上のため、深度350m調査坑道から掘削されたボーリング孔を利用して得られた地下水試料および岩石試料を用いた収着実験を行いました。実験は、京都大学の施設を利用し、溶液試料のpHや酸化還元電位を制御しながら行いました。その結果、炭酸イオン濃度が高い場合、微量元素が岩石に収着しにくくなる傾向が確認されました。今後も引き続き、実験条件を変えながら、基礎データを取得します。

信州大学

立坑掘削時に生じる岩盤壁面の割れ目情報の統計処理を行い、割れ目の密度や方位・傾斜の傾向を検討することを目的とした共同研究を実施しています。

平成30年度は、発破掘削を行った東立坑を対象として、統計処理により得られた割れ目の本数の深度分布と、壁面で計測された弾性波速度の結果を用いて、立坑の支保パターンと岩盤の安定性の関係を検討しました。結果として、斜め下向きにロックボルトを打設した区間では、掘削により生じる割れ目の発達は認められるものの、弾性波速度が他深度と比較して大きな値を示したことから、壁面の岩盤の安定性を担保した状態で安全に施工できることを示しました。今後は、これまでに実施した統計処理結果を基に、立坑周辺岩盤に発達した割れ目の概念モデルの構築を進めていきます。

東京大学

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。

東京工業大学・サンコーコンサルタント株式会社

250m 調査坑道において、坑道掘削後から定期的に年 4 回実施している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状況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っています。

平成 30 年度は、既存の調査結果の整理を行い、解析を行うための準備作業を行いました。今後、解析を進め、100 年程度経過した段階での坑道周辺の弾性波速度分布の変化を予測するとともに、掘削影響領域の将来予測に際しての留意点や考慮すべき因子等を抽出し、成果の取りまとめを行います。

8.1.2 その他の機関との研究協力

株式会社大林組

深度350m以深の東立坑掘削によって、立坑周辺岩盤に生じる掘削影響領域の長期挙動の概念モデル構築を目的として、岩盤に割れ目が発生した時に生じる微小振動（アコースティック・エミッション、AE）、間隙水圧、温度を計測する3種の光ファイバー式センサーで構成されるマルチ光プローブによる計測を継続しています。

平成30年度は、立坑掘削後の周辺岩盤の損傷や、それに伴う水の流れに関する測定を継続するとともに、掘削影響領域内で発生したAEの発生エネルギーを分析することで、岩盤中の割れ目発生に起因するAEを特定しました。その結果、壁面から約1.5mの範囲で、立坑掘削中に割れ目発達によるものと思われる波形が多く取得されており、立坑掘削後は、そのような波形がほとんど発生していないことを示しました。今後、これまでの共同研究で得られた成果を基に、立坑の掘削影響領域の発達範囲や水理・力学的挙動を分かりやすく示す概念モデルを構築する予定です。

原子力環境整備促進・資金管理センター

人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究および人工バリアの健

全性評価に関する研究開発について、共同研究を実施しています。

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。

平成30年度は、4.1.5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と坑道との隙間を粘土系材料で充填する試験を行い、その装置や手法の適用性を確認しました。

人工バリアの健全性評価に関する研究開発では、4.1.6でも述べたように、緩衝材の健全性に関する原位置試験として、緩衝材流出試験の実施に向けて、坑道環境の整備を行いました。

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開始しました。

平成30年度は、地下施設のボーリング孔などから採取した深部地下水に対して適用する有機物の分画方法や、特性評価のための分析方法などを検討しました。今後は、分画および分析を進めていくとともに、難分解性有機物の分画や評価のための室内試験も実施する予定です。

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ています。

平成30年度は、原子力機構の保有する深層ボーリング孔から得られた岩石試料を用いて、異常間隙水圧が地下水流動に及ぼす影響や超長期の水理境界条件として海水準変動などの影響について検討しました。その結果、地下深部で観測されている異常間隙水圧は化学的浸透現象から推

定される圧力と比較的近い値を示すことが分かりました。海水準変動の影響については主に水圧伝播を介して地下深部の地下水流動に影響してきたことが推察されました。今後は、応力や塩分濃度の異なる条件における化学的浸透に関するデータの取得などを進める予定です。また、これまでの共同研究成果として、応力変化および塩分の種類が珪質泥岩の水理特性と物質移行特性に与える影響について論文として取りまとめました⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁷⁾。

大成建設株式会社、株式会社地層科学研究所

立坑および水平坑道の掘削開始から掘削終了までの掘削進行に伴う高精度傾斜計による計測データ、湧水量データ、周辺ボーリング孔内での地下水位や間隙水圧計測データなどを比較し、地下施設掘削に伴う広域的な岩盤・地下水挙動を把握しています。

平成 30 年度は、立坑および水平坑道の掘削を再現した水理・力学連成解析を実施しました。その結果、実際に計測された岩盤の傾斜挙動は、解析結果と概ね整合するものであることが確認され、地下施設建設による地下水挙動および岩盤の力学的な挙動変化を傾斜計によりとらえられることを確認しました。今後、高精度傾斜計を用いた岩盤の変形挙動および地下水流動挙動のモニタリング技術の確立に向け、成果の取りまとめを行います。

大成建設株式会社、株式会社地層科学研究所

地下施設の建設が地下水流動に及ぼす影響を予測する際には、調査段階や評価するスケールに応じて、数十 km～百 m 四方程度の解析領域を対象とした水理地質構造モデルを構築するとともに、数 m 規模の坑道のレイアウトをモデル化する必要があります。このモデル化・解析による予測精度を高めるためには、段階的に取得される調査データに基づくモデルの更新、解析・評価を繰り返し行う繰り返しアプローチが有効ですが、一方、モデルを更新する度に、坑道の解析用メッシュ（要素）を再分割する必要があるため、逐次、数値解析を繰り返すことは多大な労力を必要とします。そこで、地下施設の建設が地下水流動に及ぼす影響を効率的かつ効

果的に予測する手法の整備を行っています。

平成30年度は、解析に使用するモデルを更新して、高透水性構造を含めた解析を実施するとともに、本手法の適用条件や利活用方法などについて検討しました。

大成建設株式会社、日鉄住金セメント株式会社

低アルカリ性セメントグラウトに関する研究として、農業残渣であるもみ殻由来シリカを用いた低アルカリ性セメント^{*61}を対象に原位置において周辺地下水への影響確認に関する研究を実施しています。

平成30年度は、平成28年度に施工した低アルカリ性グラウトの周辺地下水のpH計測を継続するとともに、施工箇所からコアを採取し、分析を実施しました。なお、比較のために普通ポルトランドセメントについても同様の分析を行いました。

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、継続して共同研究を実施しています。

平成30年度は、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および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。その結果、深度250mの調査坑道では、掘削から約8年経過した段階においても、掘削時に生じた損傷領域は広がることはなく、坑道周辺の岩盤もほぼ飽和状態にあることがわかりました。また、深度140mおよび250mの調査坑道内における吹き付けコンクリートの無い露岩部での継続的な観測結果から、乾燥や酸化などが坑道壁面から数cmの深さまで及んでいることもわかりました。このような観測を今後も継続し、データの取得を行います。また、こ

*61：大阪大学 接合科学研究所にて開発されたもので、もみ殻から得られるシリカ（二酸化ケイ素：SiO₂）を利用し、普通ポルトランドセメントよりも地層処分環境として望ましい低アルカリ性（pH<11）を早期に達成することが期待されるセメント材料です。シリカは食品の乾燥剤などとしても利用されています。

れまでの地下水年代測定に関する共同研究成果として、溶存ガスの脱ガス影響の補正法について論文として取りまとめました⁽⁵⁸⁾。

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、堆積岩の地下深部における微生物生態系の把握、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を目的とし、地下施設を利用した微生物に関するデータ取得を行っています。微生物の生態系の指標である微生物群集組成は、場所により異なるだけでなく、同じ場所においても時間により異なる群集組成を示すことがあります。これまでは、採取した地下水試料を用い、幌延地圏環境研究所内の実験室において遺伝子解析のため、微生物の濾紙への捕集や顕微鏡観察用の細胞固定などの処理を実施してきました。

平成30年度は、平成29年度までと同様の地下水採取・処理方法に加え、地下施設現場内にて上記作業を迅速に行うことで、可能な限り原位置の情報を正確に取得できるように試みしました。

試料は、これまでに引き続き、深度140m、250m、350m調査坑道から掘削されたボーリング孔（07-V140-M01、07-V140-M03、08-E140-C01、09-V250-M02、10-E250-M01、11-V250-TR02、14-350-C04、13-350-C01、13-350-C05、12-P350-M02）から地下水を採取し、微生物数と群集組成の調査を行いました。また、新規微生物探索も継続して行い、微生物による地下環境での物質循環機構の解明に関する研究を行いました。

今後は、得られた結果を比較することで、これまで蓄積されたデータに見られるバラツキの要因などを考察します。なお、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。

8.2 国外機関との研究協力

モンテリ・プロジェクト^{*62}

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。平成30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性を評価するための試験を継続しました。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) ^{*63}定例会合 (平成30年9月) に出席し、CLAYWATプロジェクト (粘土質媒体を対象とした間隙水の存在・結合状態に関わる調査) の結果について、諸外国の専門家らと議論しました。

*62: 堆積岩を対象とした地層処分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19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。

*63: 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。

引用文献

- (1) 花室孝広 (編) (2018) : 幌延深地層研究計画 平成 30 年度調査研究計画, JAEA-Review 2018-011, 20p.
- (2) 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, 370p.
- (3) 石井英一, 福島 龍朗 : 新第三紀珪質岩における断層の解析事例, 応用地質, 47 巻, 5 号, pp.280-291, <http://doi.org/10.5110/jjseg.47.280>
- (4) Ishii, E. (2016) : The role of bedding in the evolution of meso- and microstructural fabrics in fault zones, *Journal of Structural Geology*, 89, pp.130-143.
- (5) Ishii, E. and Furusawa, A. (2017) : Detection and correlation of tephra-derived smectite-rich shear zones by analyzing glass melt inclusions in mineral grains, *Engineering Geology*, 228, pp.158-166.
- (6) 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.
- (7) Hayano, A. and Ishii, E. (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*, 44, pp.022004_1-022004_8, DOI:10.1088/1755-1315/44/2/022004
- (8) Iijima, A. and Tada, R. (1981) : Silica diagenesis of Neogene diatomaceous and volcanoclastic sediments in northern Japan, *Sedimentology*, 28, pp.185-200.
- (9) Ishii, E. (2015) : Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: preliminary results, *Journal of Geophysical Research*, 120, pp.2220-2241.
- (10) Ishii, E. (2017) : Preliminary assessment of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones by core logging, *Engineering Geology*, 221, pp.124-132.
- (11) 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.
- (12) 亀村勝美, 青柳和平, 名合牧人, 菅原健太郎 (2018) : 周回坑道掘削時に取得された内空変位と切羽観察結果に基づく初期地圧評価手法の開発, 第 45 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.43-48.
- (13) 花室孝広 (編) (2018) : 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.
- (14) 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.

- (15) Ishii, E. (2017) : Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 100, pp.10-22.
- (16) 宮澤大輔, 真田祐幸, 木山保, 杉田裕, 石島洋二 (2011) : 幌延地域に分布する珪質岩を対象とした間隙弾性パラメータの取得と室内試験法の提案, *Journal of MMIJ*, 127, pp.132-138.
- (17) Ishii, E. (2018) : Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, 54, pp. 3335-3356.
- (18) Aoyagi, K. and Ishii, E. (2019) : A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, pp.385-401.
- (19) 寺本雅子, 嶋田純, 國丸貴紀 (2006) : コア間隙水中の安定同位体比をもとにした低透水性堆積岩盤における地下水挙動の兆候, *応用地質*, 47, pp.68-76.
- (20) 甲斐邦男, 前川恵輔 (2009) : 北海道幌延地域の新第三系珪藻質泥岩中の地下水の酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度, *石油技術協会誌*, 74, pp.96-106.
- (21) 天野由記, 山本陽一, 南條功, 村上裕晃, 横田秀晴, 山崎雅則, 國丸貴紀, 大山隆弘, 岩月輝希 (2012) : 幌延深地層研究計画における地下水, 河川水および降水の水質データ (2001~2010年度), *JAEA-Data/Code*, 2011-023, 312p.
- (22) 望月陽人, 笹本広, 女澤徹也, 宮川和也 (2019) : 深部地下水における酸化還元電位の不確かさ評価 : 北海道・幌延地域を事例として, *地下水学会誌*, 61(1), pp.3-20.
- (23) 青柳和平, 櫻井彰孝, 棚井憲治 (2019) : 幌延深地層研究センターの立坑掘削損傷領域の水理・力学的挙動に関する研究, 第46回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.142-147.
- (24) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所 (2019) : 平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業 岩盤中地下水流動評価技術高度化開発 報告書.
- (25) 日本原子力研究開発機構 (2009) : “平成20年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 地下坑道施工技術高度化開発 報告書” .
- (26) 酒井利啓, 松岡稔幸 (2015) : 幌延地域を対象とした地表踏査および地形データにもとづく地質分布の推定, *JAEA-Research* 2015-004, 109p.
- (27) 落合彰二, 浅森浩一, 常盤哲也, 野原壯, 松岡稔幸 (2014) : 幌延深地層研究計画における地震研究 - 地震観測データおよびそれらの解析結果 (2003~2012年度), *JAEA-Research* 2014-002, 69p.
- (28) 核燃料サイクル開発機構 (1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術, *JNC TN1400* 99-022, 703p.
- (29) Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. and Alonso, E.E. (1996) : Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media, *Engineering Computations*, 13, 7, pp.87-112.
- (30) 谷口直樹, 川崎学, 内藤守正 (2010) : 低酸素濃度下での模擬地下水の飽和した圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食挙動, *Zairyo-to-Kankyo*, 59, 11, pp.418-429.

- (31) MoDeRn (2013) : Monitoring Reference Framework report, MODERN DELIVERABLE (D-1.2), Final.
- (32) MoDeRn (2014) : The MoDeRn Project Synthesis, MODERN DELIVERABLE (D-6.1)
- (33) MODERN2020 (2017a) : Deliverable D2.1: Repository Monitoring Strategies and Screening Methodologies
- (34) MODERN2020 (2017b) : Deliverable D5.1 Monitoring the Underground: What role for repository monitoring in the governance of geological disposal for nuclear waste?
- (35) MODERN2020 (2018) : Deliverable D3.6 Reliability and qualification of components Work Package 3, Task 6
- (36) 原子力発電環境整備機構, 若杉圭一郎, 宮原要, 牧野仁史, 石黒勝彦, 澤村英範, 根山敦史, 西村和哉 (2003) : ガラス固化体からの放射線量に関する検討, JNC TN8400 2003-022.
- (37) 原子力発電環境整備機構(2018) : わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築— (レビュー版)、NUMO-TR-18-03.
- (38) 日本アイソトープ協会編(1984) : 改訂 3 版アイソトープ便覧, 丸善, 昭和 59 年 12 月 20 日発行.
- (39) Japan Atomic Energy Research Institute (1999) : High Gamma-rays irradiation tests of critical components for ITER (international thermonuclear experimental reactor) in-vessel remote handling system, JAERI-Tech 99-003.
- (40) 日本原子力研究所(2003) : 高分子材料の耐放射線特性とデータ集, JAERI-DATA/CODE 2003-015.
- (41) 中山雅, 丹生屋純夫, 南出賢至 (2016) : 幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の適用性確認, 原子力バックエンド研究, 23(1), pp. 25-30.
- (42) (公財)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.
- (43) (公財)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.
- (44) (公財)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.
- (45) (公財)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.
- (46) (公財)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.
- (47) (公財)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.
- (48) 佐藤稔紀, 笹本広, 石井英一, 松岡稔幸, 早野明, 宮川和也, 藤田朝雄, 棚井憲治, 中山雅, 武田匡樹, 横田秀晴, 青柳和平, 大野宏和, 茂田直孝, 花室孝広, 伊藤洋昭 (2016) : 幌延深地層研究計画における坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階(第 2 段階:深度 350m まで)研究成果報告書, JAEA-Research 2016-025, 313p.

- (49) 日本原子力研究開発機構 (2019) : 平成 30 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認試験 報告書.
- (50) 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.
- (51) 日本原子力研究開発機構 (2015) : 平成 26 年度地層処分技術等事業 処分システム評価確認技術開発 報告書, 504p.
- (52) Togo, Y., Takahashi, Y., Amano, Y., Matsuzaki, H., Suzuki, Y., Terada, Y., Muramatsu, Y., Ito, K. and Iwatsuki, T. (2016) : Age and speciation of iodine in groundwater and mudstones of the Horonbe area, Hokkaido, Japan: Implications for the origin and migration of iodine during basin evolution, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 191, pp.165-186.
- (53) 武田匡樹, 大野宏和, 石井英一, 舘幸男, 根本一昭 (2018) : 幌延 URL における物質移行特性評価: 泥岩中の断層帯を対象とした原位置トレーサー試験, 日本原子力学会 2018 年秋の大会, 2F24.
- (54) GoldSim Technology Group (2010) : GoldSim Version 10.1.
- (55) Kimuro, S., Kirishima, A., Kitatsuji, Y., Miyakawa, K., Akiyama, D., Sato, N. (2019) : Thermodynamic study of the complexation of humic acid by calorimetry, *Journal of Chemical Thermodynamics*, pp.352-362.
- (56) Takeda, M. and Manaka, M. (2018) : Effects of confining stress on the semipermeability of siliceous mudstones: Implications for identifying geologic membrane behaviors of argillaceous formations, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2018GL078591.
- (57) Manaka, M. and Takeda, M. (2018) : An experimental examination of the effect of the salt type on the chemo-osmotic, diffusive, and hydraulic parameters of Wakkanai mudstones, *Journal of Hydrology*, pp.1058-1073.
- (58) Nakata, K., Hasegawa, T., Solomon, D.K., Miyakawa, K., Tomioka, Y., Ohta, 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.

参考資料

(平成 30 年度外部発表)

著者アルファベット順に記載

- 天野由記, Anantharaman, K., Tomas, B. C., Olm, M., Burstein, D., Castelle, C. J., 別部光里, 宮川和也, 岩月輝希, 鈴木庸平, Banfield, J. F. (2018) : 深部地下環境において優占する Nitrospirae 門の硫黄および水素代謝と CO₂ 固定, 日本微生物生態学会第 32 回大会, P2-127.
- Amano, Y., Diamond, S., Lavy, A., Anantharaman, K., Miyakawa, K., Iwatsuki, T., Beppu, H., Suzuki, Y., Thomas, B. C. and Banfield, J. F. (2018) : Vast metabolic and phylogenetic diversity shared across deep subsurface environments, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (AGU 2018) , H21K-1798.
- Aoyagi, K. and Ishii, E. (2019) : A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(2), pp.385-401.
- 青柳和平, 櫻井彰孝, 棚井憲治 (2019) : 幌延深地層研究センターの立坑掘削損傷領域の水理・力学的挙動に関する研究, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM) , pp.142-147.
- 青柳和平, 亀村勝美, 菅原健太郎, 萩原 健司 (2018) : 坑道掘削時の内空変位計測結果に基づく初期応力状態の推定, 第 53 回地盤工学研究発表会発表講演集 (DVD-ROM) , pp.11-12.
- Aoyagi, K., Miyara, N., Ishii, E., Nakayama, M. and Kimura, S. (2018) : Evolution of the excavation damaged zone around a modelled disposal pit; Case study at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 13th SEGJ International Symposium (USB Flash Drive), 5p.
- 花室孝広 (編) (2018) : 幌延深地層研究計画 ; 平成 30 年度調査研究計画, JAEA-Review 2018-011, 20p.
- 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.
- 春木和人, 佐々木隆之, 桐島陽, 笹本広, 望月陽人, 宮川和也 (2019) : 炭酸存在下におけるウラン-新第三紀堆積岩の収着挙動, 日本原子力学会 2019 年春の年会, 2C04.
- Ishii, E. (2018) : Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, Water Resources Research, 54(5), pp.3335-3356.
- 石井英一 (2018) : 単孔式ボーリング調査による泥岩中の亀裂の水理学的連結性の評価, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 (JpGU 2018), HCG27-P04.

- Jo, M., Ono, M., Nakayama, M., Asano, H. and Ishii, T. (2018) : A Study of methods to prevent piping and erosion in buffer materials intended for a vertical deposition hole at the Horonobe Underground Research Laboratory, Geological Society Special Publications, 482, 16p.
- 加藤昌治, 奈良禎太, 岡崎勇樹, 河野勝宣, 佐藤稔紀, 佐藤努, 高橋学 (2018) : 粘土の透水係数測定へのトランジェントパルス法の適用, 材料, 67(3), pp.318-323.
- Kato, M., Nara, Y., Okazaki, Y., Kono, M., Sato, T., Sato, T. and Takahashi, M. (2018) : Application of the transient pulse method to measure clay permeability, Materials Transactions, 59(9), pp.1427-1432.
- 窪田健二, 青柳和平, 杉田裕 (2018) : 水平坑道掘削に伴う掘削影響領域の調査 ; 幌延深地層研究施設における検討, 公益社団法人物理探査学会第 138 回 (平成 30 年度春季) 学術講演会講演論文集, pp.51-54.
- 窪田健二, 大山隆弘, 末永弘, 野原慎太郎, 青柳和平, 杉田裕 (2018) : 坑道掘削に伴う掘削損傷領域と不飽和領域の形成に関する検討 ; 幌延深地層研究施設での調査, 日本応用地質学会平成 30 年度研究発表会講演論文集, pp.15-16.
- Miyakawa, K. and Okumura, F. (2018) : Improvements in drill-core headspace gas analysis for samples from microbially active depths, Geofluids, 11p.
- 宮川和也, 笹本広, 村上裕晃 (2018) : 地質環境の長期変遷に伴う地下水の pH への影響 ; 溶存ガスの脱ガス影響に着目した評価例, 2018 年度日本地球化学会第 65 回年会, 3P53.
- 望月陽人 (2018) : 地下水の放射性炭素分析における前処理法 ; 従来法の再評価と新規法の開拓, ぶんせき, 2018(10), p.461.
- 望月陽人, 笹本広, 女澤徹也, 宮川和也 (2018) : 深部地下水における酸化還元電位の不確かさ評価に関する事例研究, 日本地下水学会 2018 年秋季講演会講演要旨, pp.46-51.
- 望月陽人, 笹本広, 女澤徹也, 宮川和也 (2019) : 深部地下水における酸化還元電位の不確かさ評価 : 北海道・幌延地域を事例として, 地下水学会誌, 61(1), pp.3-20.
- 本島貴之, 小池真史, 萩原健司, 青柳和平 (2019) : 低強度・高地圧地山における大深度立坑支保設計手法の研究, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM), pp.208-213.
- 中島均, 齋藤亮, 辻正邦, 佐藤稔紀, 青柳和平, 榊永幸介 (2018) : 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得 (その 4) - 海水対応グラウトの基本特性 -, 土木学会平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会講演概要集 (DVD-ROM) .

Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T. and Miyakawa, K. (2018) : Evaluation of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of water in pores extracted by compression method; Effects of closed pores and comparison to direct vapor equilibration and laser spectrometry method, *Journal of Hydrology*, 561, pp.547-556.

中山雅 (2018) : 幌延深地層研究計画におけるオーバーパック腐食試験 ; 模擬オーバーパック、緩衝材およびヒーターの製作、設置, *JAEA-Technology* 2018-006, 43p.

中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人 (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 ; 計測データ集 (平成 29 年度), *JAEA-Data/Code* 2019-003, 57p.

Nara, Y., Kato, M., Niri, R., Kono, M., Sato, T., Fukuda, D., Sato, T. and Takahashi, M. (2018) : Permeability of granite including macro-fracture naturally filled with fine-grained minerals, *Pure and Applied Geophysics*, 175(3), pp.917-927.

奈良禎太, 桑谷隆太, 河野勝宣, 佐藤稔紀, 柏谷公希 (2018) : カルシウムイオン濃度が異なる水中に保存した岩石での鉱物析出, *材料*, 67(7), pp.730-737.

丹羽正和, 三箇智二, 小松哲也, 尾上博則, 松岡稔幸 (2018) : 復元古地形の妥当性確認としての地形変化シミュレーションの適用性, 日本応用地質学会平成 30 年度研究発表会.

能城悠, 森川佳太, 武田匡樹, 大野宏和, 小野誠 (2018) : 地下研究施設における原位置拡散試験装置の開発, 全国地質調査業協会連合会「技術フォーラム 2018」高松, 103.

大野宏和, 高山裕介, 中山雅 (2019) : 幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 ; 熱-水-応力連成解析検討, 日本原子力学会 2019 年春の年会, 1C13.

Otsuka, Y., Ishikawa, T., Tajima, K., Wada, T., Aydan, Ö., Tokashiki, N., Sato, T. and Aoyagi, K. (2018) : Rock mass property evaluation based on the borehole wall images taken by using an ultrasonic scanner (USS), *Journal of Nepal Geological Society*, 55, pp.1-6.

Sasamoto, H. and Onda, S. (2018) : Preliminary results for natural groundwater colloids in sedimentary rocks of the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan, *Geological Society Special Publications*, 482, 13p.

Sato, T., Aoyagi, K., Matsuzaki, Y., Miyara, N. and Miyakawa, K. (2018) : Status of Rock dynamics study in Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Proceedings of 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3)*, pp.575-580.

杉田裕, 青柳和平, 窪田健二, 中田英二, 大山隆弘 (2018) : 幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価 (その 1) - 深度 140m を対象とした試験 - (共同研究), *JAEA-Research* 2018-002, 72p.

- 武田匡樹, 石井英一, 大野宏和, 川手訓 (2018) : ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討, 原子力バックエンド研究 (インターネット), 25(1), pp.3-14.
- 武田匡樹, 大野宏和, 石井英一, 舘幸男, 根本一昭 (2018) : 幌延 URL における物質移行特性評価 ; 泥岩中の断層帯を対象とした原位置トレーサー試験, 日本原子力学会 2018 年秋の大会, 2F24.
- 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に生息する未培養 *Bacteroidetes* 門発酵性細菌の分離培養化と生理機能の解析, 日本農芸化学会 2019 年度大会, 1C3a13.
- 對馬正人, 武田匡樹, 大野宏和 (2018) : 幌延深地層研究計画における稚内層中の割れ目帯を対象とした物質移行試験ーボーリング調査および物質移行試験データ集ー, JAEA-Data/Code 2018-008, 78p.
- 寺島元基, 遠藤貴志, 紀室辰伍, 宮川和也 (2018) : 沿岸部の堆積岩地下水に溶存する腐植物質の定量評価, 日本腐植物質学会第 34 回講演会, P6.
- Tokiwa, T., Tsusaka, K. and Aoyagi, K. (2018) : Fracture characterization and rock mass damage induced by different excavation methods in the Horonobe URL of Japan, *International Journal of Civil Engineering*, 16(4), pp.371-381.
- 辻正邦, 沖原光信, 中島均, 佐藤稔紀, 梶永幸介 (2018) : 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得 (その 5) - 海水条件下でのモデル化・数値解析への適用性検討 -, 土木学会平成 30 年度全国大会第 73 回年次学術講演会 (DVD-ROM) .
- Tsuji, M., Nakashima, H., Saito, A., Okihara, M. and Sato, T. (2019) : Study on characterization of colloidal silica grout for rock excavation under saline groundwater, *Proc. of the WM2019 Conference*, March 3 - 7, 2019, Phoenix, Arizona, USA.
- 山崎一敏, 高尾肇, 菊池孝浩, 栗木良郎, 小林正人, 川久保政洋, 白瀬光泰, 岩田裕美子, 栃木善克, 中山元, 小野誠, 中山雅 (2018) : 炭素鋼オーバーパック溶接部の地下環境での腐食挙動に関する研究 その 2 工学規模の模擬オーバーパックの腐食挙動, 日本原子力学会 2018 年秋の大会, 1E14.
- 吉野浩光, 佐俣洋一, 丹生屋純夫, 石井英一 (2019) : 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 1), JAEA-Data/Code 2018-015, 169p.