

幌延深地層研究計画  
平成29年度調査研究成果報告

平成30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29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.....     | 54  |
| 3.3 地質環境の長期安定性に関する研究.....       | 61  |
| 4. 地層処分研究開発.....                | 71  |
| 4.1 処分技術の信頼性向上.....             | 71  |
| 4.2 安全評価手法の高度化.....             | 92  |
| 5. 地下施設の維持管理.....               | 102 |
| 5.1 地下施設の維持管理.....              | 102 |
| 5.2 掘削土(ズリ)の管理.....             | 103 |
| 5.3 排水の管理.....                  | 104 |
| 6. 環境モニタリング.....                | 105 |
| 6.1 排水量および水質調査結果.....           | 105 |
| 6.2 幌延深地層研究センター周辺の環境影響調査結果..... | 117 |
| 7. 安全確保の取組み.....                | 120 |
| 8. 開かれた研究.....                  | 121 |
| 8.1 国内機関との研究協力.....             | 121 |
| 8.2 国外機関との研究協力.....             | 129 |
| 引用文献.....                       | 130 |
| 参考資料.....                       | 134 |

## 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 29 年度の主な調査研究                                    | 4  |
| 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  | モデル領域の設定と亀裂モデルの一例                                  | 10 |
| 図 7  | 割れ目の半径分布の模式図                                       | 11 |
| 図 8  | 解析結果と実測値の比較の一例と誤差 (RMSE) の算出方法                     | 11 |
| 図 9  | 半径分布のパラメータ値と誤差 (RMSE) の関係                          | 11 |
| 図 10 | HDB-3 孔における地下水の間隙水圧の測定結果                           | 12 |
| 図 11 | HDB-7 孔における地下水の間隙水圧の測定結果                           | 13 |
| 図 12 | 試験孔のレイアウト (水平断面)                                   | 14 |
| 図 13 | 試験孔のレイアウト (鉛直断面)                                   | 15 |
| 図 14 | 水圧・水温観測と透水試験の結果                                    | 16 |
| 図 15 | H4-1~H4-3 の区間 2 (掘削影響領域) の水圧観測結果                   | 17 |
| 図 16 | DI とせん断性の割れ目がとり得る透水性の上限値との関係性                      | 18 |
| 図 17 | 水圧擾乱試験に用いたボーリング孔の位置 (a) と水圧上昇によって誘発される断層のせん断変形 (b) | 20 |
| 図 18 | 水圧擾乱試験を行った深度 497.8m 付近の断層部のコア写真、電気伝導度検層結果、および孔壁画像  | 20 |
| 図 19 | 水圧擾乱試験時における注入流量と試験区間の水圧との関係                        | 21 |
| 図 20 | 水圧擾乱試験時の断層面の応力状態 (1 回目の試験)                         | 21 |
| 図 21 | DI の経験式と今回実施した水圧擾乱試験結果との比較                         | 22 |
| 図 22 | 坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化                              | 25 |
| 図 23 | 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺における地下水の塩分濃度の経時変化                | 26 |
| 図 24 | 階層的クラスター分析および主成分分析の結果                              | 28 |
| 図 25 | 主成分分析の結果に基づいたデータの変動例                               | 28 |
| 図 26 | 主成分分析による WR-V-133.8 における変動の詳細                      | 29 |
| 図 27 | 13-350-C06 孔の区間 4 における遊離ガスの組成                      | 30 |
| 図 28 | (a) 遊離ガス組成の対比図と (b) 採取方法の概念図                       | 32 |
| 図 29 | スメクタイトコロイドの臨界凝集濃度と地下水中の Ca, Na 濃度および pH との関係       | 34 |
| 図 30 | 幌延の地表水・地下水中腐植物質の蛍光特性の測定結果                          | 35 |
| 図 31 | 壁面観察により得られた割れ目や断層の分布に基づく数値解析モデルの設定                 | 37 |
| 図 32 | 内空変位の計測結果と解析結果の比較                                  | 37 |
| 図 33 | 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                        | 38 |
| 図 34 | 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             | 40 |
| 図 35 | C05 における水圧モニタリング結果                                 | 40 |
| 図 36 | C06 における水圧モニタリング結果                                 | 41 |
| 図 37 | C07 における水圧モニタリング結果                                 | 41 |

|      |                                           |    |
|------|-------------------------------------------|----|
| 図 38 | C08 における水圧モニタリング結果                        | 42 |
| 図 39 | C09 における水圧モニタリング結果                        | 42 |
| 図 40 | 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<br>継続可能区間 | 44 |
| 図 41 | C05 の区間 2 における水質モニタリング結果                  | 45 |
| 図 42 | 傾斜計データの一例                                 | 47 |
| 図 43 | 調査レイアウト                                   | 48 |
| 図 44 | 受発振点配置と弾性波伝播経路                            | 48 |
| 図 45 | 弾性波トモグラフィ調査結果                             | 49 |
| 図 46 | 人工バリア性能確認試験における緩衝材の膨潤圧の経時変化               | 50 |
| 図 47 | 浜里における採水結果とその解釈                           | 53 |
| 図 48 | 岩石侵食段丘の概念図と分析手法の例                         | 53 |
| 図 49 | 地震計設置位置                                   | 54 |
| 図 50 | 震央分布                                      | 54 |
| 図 51 | Vs 同定結果と PS 検層による速度層の比較                   | 56 |
| 図 52 | 最適地盤モデルと観測記録による平均フーリエスペクトル比の比較            | 57 |
| 図 53 | メルトインクルージョンの顕微鏡写真                         | 58 |
| 図 54 | 幌延深地層研究センター地下施設周辺の (A) 地質図 (B) 地質断面図      | 58 |
| 図 55 | 溶液型グラウトの配合と海水条件での適用性                      | 60 |
| 図 56 | 溶液型グラウトの固化試験結果                            | 60 |
| 図 57 | 二酸化炭素分圧と地下水の pH の関係                       | 62 |
| 図 58 | 長期的な自然現象の変化を連続的に考慮した解析のイメージ               | 64 |
| 図 59 | 塩分濃度の長期的な変動性を推定するためのアプローチ                 | 65 |
| 図 60 | 数値解析の結果                                   | 65 |
| 図 61 | 地下施設に設置した地震計                              | 66 |
| 図 62 | 全地震計のデータを用いた相関解析結果                        | 68 |
| 図 63 | 全地震計のデータを用いた相関解析結果                        | 70 |
| 図 64 | 人工バリア性能確認試験の概念図                           | 71 |
| 図 65 | 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<br>相関関係    | 72 |
| 図 66 | 緩衝材への注水量の経時変化                             | 73 |
| 図 67 | 緩衝材 (5 段目) の温度分布                          | 74 |
| 図 68 | 解析結果との比較の例                                | 76 |
| 図 69 | オーバーパック腐食試験の概念図                           | 77 |
| 図 70 | オーバーパック腐食試験における注水状況                       | 78 |
| 図 71 | 緩衝材 6 段目の計測センサー配置                         | 78 |
| 図 72 | 手動測定結果の解析値                                | 80 |
| 図 73 | 緩衝材定置試験設備のイメージ                            | 81 |
| 図 74 | オーバーパック溶接部腐食試験の概要                         | 85 |
| 図 75 | 模擬オーバーパックの腐食速度の測定値                        | 85 |
| 図 76 | 酸洗処理後の模擬オーバーパック外表面のスキャン画像                 | 86 |
| 図 77 | 透水性測定区間                                   | 88 |
| 図 78 | 緩衝材流出試験の試験体                               | 89 |
| 図 79 | 緩衝材流出試験後に引き上げた試験体                         | 89 |

|      |                           |     |
|------|---------------------------|-----|
| 図 80 | 地中無線伝送システムの装置構成イメージ       | 90  |
| 図 81 | 地中無線による計測データの例            | 91  |
| 図 82 | H28 拡散試験結果（セシウム、重水、ヨウ素）   | 93  |
| 図 83 | H29 拡散試験結果（セシウム、重水、ヨウ素）   | 95  |
| 図 84 | 収着性トレーサー試験結果              | 97  |
| 図 85 | 試験孔周辺の岩石試料採取結果に基づく割れ目分布   | 98  |
| 図 86 | 割れ目表面のトレーサー濃度分析結果         | 99  |
| 図 87 | 一次元平行平板モデルの概要             | 100 |
| 図 88 | SW-46 孔周辺の岩石試料            | 100 |
| 図 89 | パルス入力条件における解析結果           | 101 |
| 図 90 | 定常入力条件における解析結果            | 101 |
| 図 91 | 掘削土（ズリ）置場の構造              | 103 |
| 図 92 | 排水系統と各水質分析の調査地点           | 105 |
| 図 93 | 地下施設からの排水の調査地点            | 107 |
| 図 94 | 天塩川の調査地点                  | 109 |
| 図 95 | 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の調査地点      | 111 |
| 図 96 | 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の調査地点 | 114 |
| 図 97 | 環境調査実施場所                  | 117 |

## 表目次

|      |                                |     |
|------|--------------------------------|-----|
| 表 1  | 解析に用いた割れ目特性データ一覧               | 10  |
| 表 2  | 平成 29 年度に実施した PB-V01 での透水試験の結果 | 23  |
| 表 3  | 幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震          | 54  |
| 表 4  | 地震諸元と幌延で取得された地震データ（最大加速度）      | 55  |
| 表 5  | 同定された地盤物性値（S 波速度(Vs)・減衰率 h）    | 56  |
| 表 6  | pH に対する二酸化炭素の脱ガス影響の計算手順        | 62  |
| 表 7  | 波形の類似性の解析から得られたイベント時刻          | 69  |
| 表 8  | 透水性測定試験結果                      | 87  |
| 表 9  | H29 拡散試験条件                     | 95  |
| 表 10 | 天塩川への排水量                       | 106 |
| 表 11 | 地下施設からの排水にかかる水質調査結果            | 108 |
| 表 12 | 天塩川の水質調査結果                     | 110 |
| 表 13 | 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果         | 113 |
| 表 14 | 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    | 115 |
| 表 15 | 浄化槽排水の水質調査結果                   | 116 |
| 表 16 | 清水川の水質調査結果                     | 118 |
| 表 17 | 確認された重要種（魚類）                   | 119 |

## 写真目次

|       |                                         |     |
|-------|-----------------------------------------|-----|
| 写真 1  | コントロールボーリング孔内に設置されていたモニタリングシステムの回収作業の様子 | 51  |
| 写真 2  | 緩衝材定置試験の公開の様子                           | 81  |
| 写真 3  | 緩衝材可視化試験の状況                             | 82  |
| 写真 4  | 試験坑道 2 で実施した要素試験の様子                     | 83  |
| 写真 5  | 模擬 PEM の設置状況(試験坑道 2)                    | 83  |
| 写真 6  | 坑内換気用主要ファン・集塵機(1 号機)の整備                 | 102 |
| 写真 7  | 人キブル(工事用エレベータ)のワイヤロープ交換                 | 102 |
| 写真 8  | 掘削土(ズリ)置場                               | 103 |
| 写真 9  | 排水処理設備                                  | 104 |
| 写真 10 | 天塩川の採水状況                                | 109 |
| 写真 11 | 掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の採水状況                    | 112 |
| 写真 12 | 清水川の採水状況                                | 114 |
| 写真 13 | 清水川の水質調査                                | 118 |
| 写真 14 | 生息魚類調査                                  | 119 |
| 写真 15 | 安全パトロールの状況                              | 120 |
| 写真 16 | 安全行事の状況(安全大会)                           | 120 |



## 1. はじめに

国立研究開発法人<sup>\*1</sup>日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、平成13年3月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めています。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）<sup>\*2</sup>」（以下、第3期中長期目標<sup>\*3</sup>）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～平成34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、

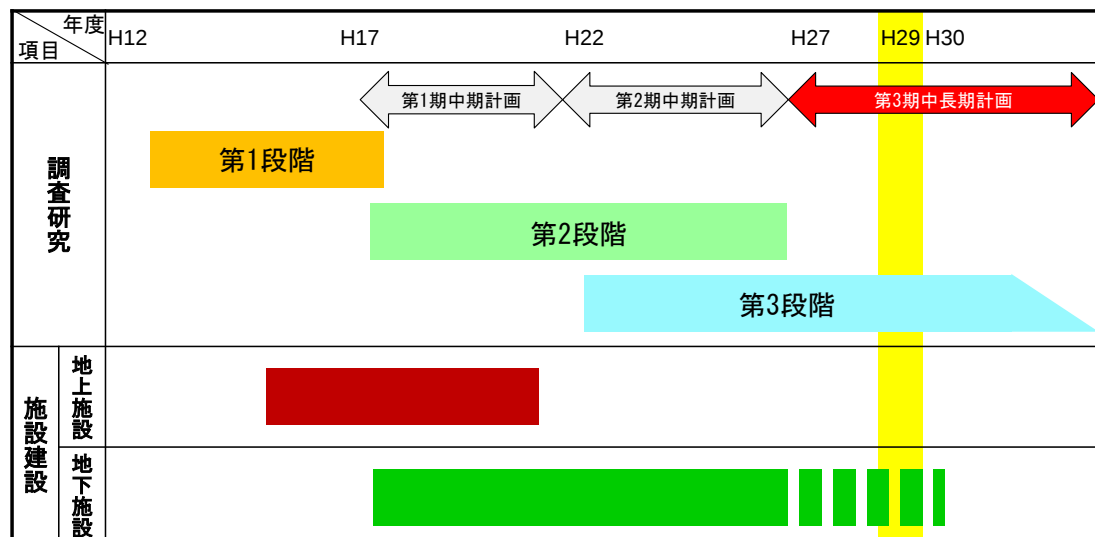
---

<sup>\*1</sup>：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。

<sup>\*2</sup>：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。

<sup>\*3</sup>：第3期中長期目標の期間は、平成27年4月1日～平成34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。



**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 29 年度の主な調査研究の成果

平成29年度は、「幌延深地層研究計画 平成29年度調査研究計画」<sup>(1)</sup>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等を実施しました。

調査研究は、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において基礎情報となる、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。

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<sup>\*5</sup>や物質の移行挙動などを計測・評価する技術の適用性を確認し、地層処分事業における精密調査段階の後半に必要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<sup>\*6</sup>試験を実施しています。平成 29 年度は、人工バリア性能確認試験およびオーバーパック腐食試験において、地下水の浸潤状況、オーバーパックの腐食状況、温度、応力、化学特性等に関する計測を継続しました。また、原位置トレーサー試験では、岩盤中の亀裂の有無の違いを考慮しながら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<sup>\*7</sup>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を整備します。平成 29 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

---

\*5：地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤では、廃棄体からの熱、地下水の流れ、緩衝材や岩盤に作用する応力、地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化、などの現象が予想されます。実際の処分環境では、これらの現象が複合的に生じ相互に影響すると考えられます。その挙動を、熱－水理－力学－化学連成挙動と呼んでいます。

\*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トレーサー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。

ンター)\*<sup>8</sup>との共同研究において、地下環境での搬送定置・回収技術の実証試験に向けた準備作業を継続しました。また、これまでのグラウト施工実績に基づき、グラウト効果の予測シミュレーション技術の開発を継続しました。

地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証については、堆積岩が有する地震・断層活動などの地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を評価し、堆積岩地域における処分場の立地選定や設計を、より科学的・合理的に行うための技術と知見を整備します。平成 29 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。

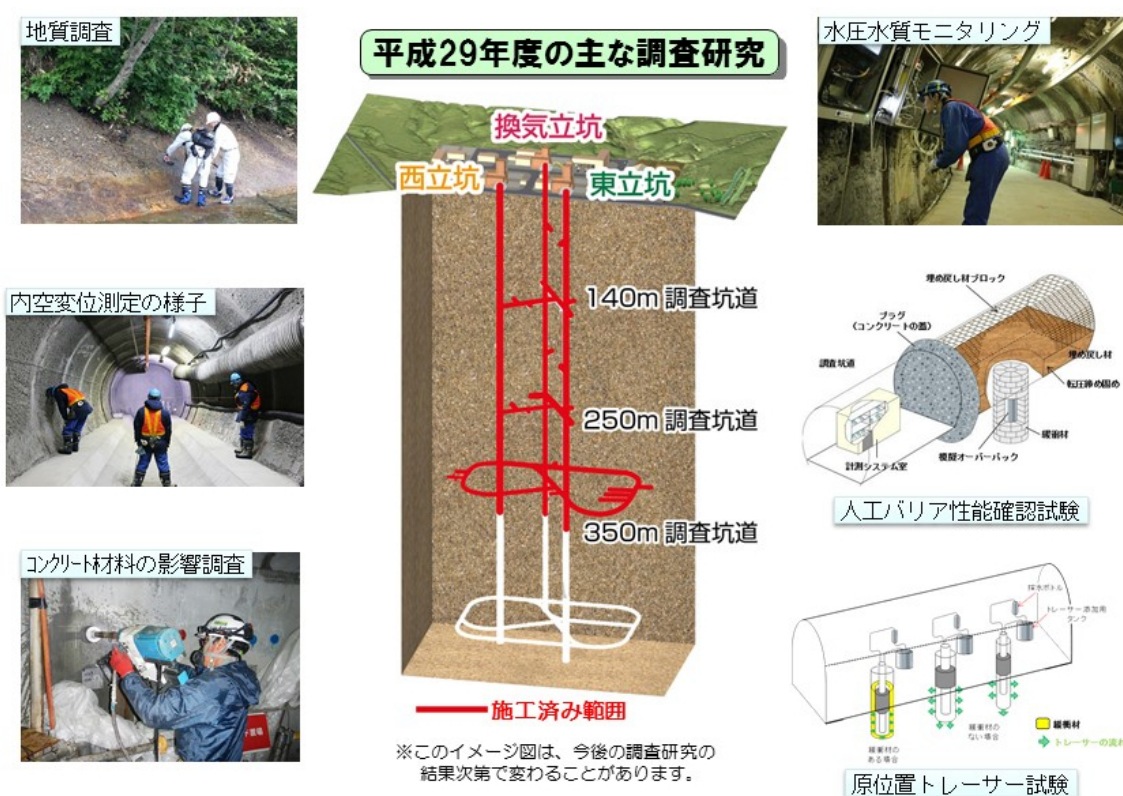


図 2 平成 29 年度の主な調査研究

\*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。

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等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の信頼性を向上させました。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

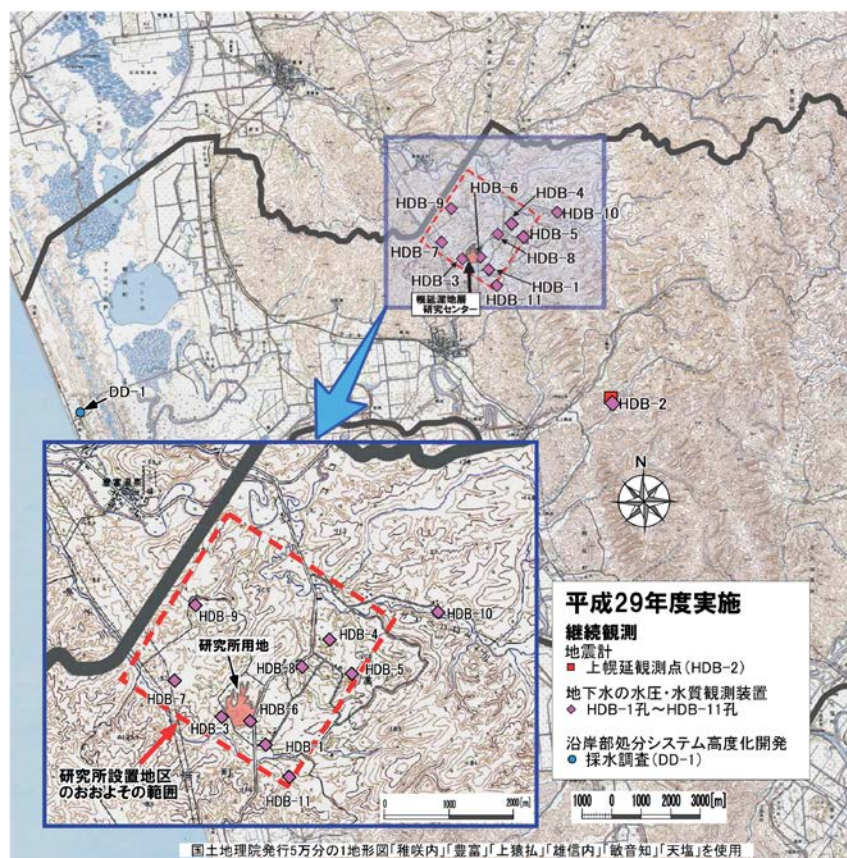


図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

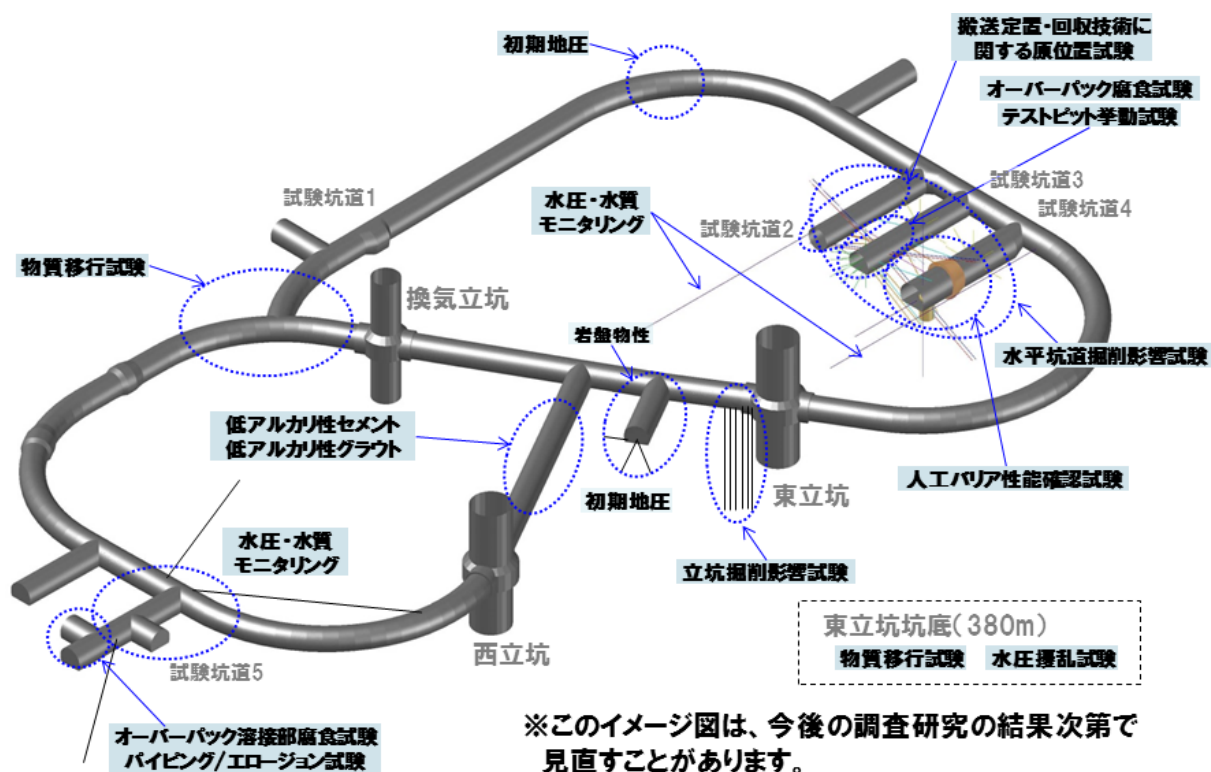


図 5 深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

地下施設の維持管理などについては、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）置場の浸出水は、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での成果とあわせて、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、国内外の研究機関との連携を図り、大学などの専門家の協力を得つつ、本計画を着実かつ効率的に進めました。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 29 年度の外部発表実績を掲載しました。

### 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

坑道掘削時の壁面観察や地下施設および周辺のボーリング調査によって取得したデータに基づき地層の分布や割れ目特性に関する解析を行うとともに、地質構造概念や坑道周辺の地質構造モデル<sup>\*9</sup>の更新を進めています。また、地下施設や研究所設置地区およびその周辺の地表での地質観察、および地下施設や地表で取得した岩石の顕微鏡観察や分析などを行っています。

地下施設周辺の稚内層には、層理面に平行な断層（以下、「層面断層」）とそれに斜交する断層（以下、「斜交断層」）が分布しています<sup>(2)(3)</sup>。斜交断層は水みちとして機能することが示唆されており、稚内層は多孔質媒体のみならず亀裂性媒体としての特性も有しています<sup>(4)(5)</sup>。そのため、稚内層を対象として地質構造モデルを構築する場合、亀裂ネットワークモデル（以下、「亀裂モデル」）も選択肢のひとつです。亀裂モデルとは、地質データから同定された割れ目特性データの統計的分布に基づき、岩盤中の個別の亀裂を確率論的に表現するモデルのことをいいます。構築する亀裂モデルにおいて、亀裂の空間分布がランダムであり、亀裂の形状が一様かつ亀裂同士の切断関係を考慮しない場合、亀裂モデルの構築に必要な割れ目特性データは、方位分布、三次元密度および半径分布です。これらの割れ目特性データのうち、方位分布と三次元密度は、ボーリング調査や坑道壁面の地質観察により取得される地質データを用いて直接的に設定することが可能ですが、半径分布を直接的に設定できるデータを調査により取得することは困難です。そこで平成29年度は、稚内層に分布する斜交断層を対象として、半径分布を設定するための解析を実施しました。

解析では、米国Golder社が開発したFracMan®を使用して、方位分布および三次元密度を固定値、半径分布を変動値として繰り返し亀裂モデルを構築しました。そして、坑道壁面の地質観察により取得した換気立坑壁面

---

\*9：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。

上における斜交断層のトレース長分布を参照データとして、それと解析結果を比較し、最も誤差が小さくなる半径分布を探し出すことを行いました。図 6に、亀裂モデルを構築する領域と繰り返し構築する亀裂モデルの一例を示します。解析結果は、実測のトレース長分布と比較するため、モデル領域には、実際の掘削径と同じ大きさの換気立坑を配置しました。表 1に、今回の解析における割れ目方位分布、三次元密度および半径分布の設定を示します。変動値である半径分布の分布形として、べき乗分布と指数分布の2つを検討しました。図 7には、べき乗分布と指数分布のそれぞれを模式的に示しています。分布形とは、図 7に示すとおり、割れ目の半径と累積割れ目頻度の関係を両対数のプロット図において示した場合の関数形のことです。べき乗分布の場合、割れ目の半径と累積割れ目頻度は直線的な関係にあり、具体的に設定するパラメータは、最小半径と直線の傾き（べき乗数）です。今回の解析では、最小半径は1.0 mとし、べき乗数を2.5から3.5の範囲を0.1間隔で変動させました。一方、指数分布の場合、割れ目の頻度がある特定の割れ目の半径にピークがあるような分布形になっており、具体的に設定するパラメータは、半径の平均値です。今回の解析では、2.0 mから5.0 mまでの範囲では0.1 m間隔、5.0 mから10.0 mまでの範囲では1.0 m間隔で変動させました。また、亀裂モデルは確率論的なモデルであるため、ひとつの半径分布に対して100通りの亀裂モデルを構築し、解析結果として出力するトレース長分布は、それらのモデルの平均としました。

図 8には、換気立坑壁面における斜交断層のトレース長の累積頻度分布を示しており、解析結果と実測値を比較した一例を示しています。べき乗分布と指数分布のそれぞれにおいて、最も実測値を再現する半径分布を探し出す際には、誤差の二乗平均平方根（Root Mean Square Error: RMSE）を用いており、その算出方法も図 8に示しています。図 9は、半径分布のそれぞれの分布形におけるパラメータと誤差（RMSE）の関係を示しています。べき乗分布ではべき乗数が2.8の場合、指数分布では半径の平均値が2.5 mの場合に最も誤差（RMSE）が小さくなりました。べき乗分布と指数分布の最小の誤差（RMSE）を比較すると、指数分布の方が小さく、換気立坑壁面を対象とした場合は、指数分布を採用する方が再現性の高

い亀裂モデルを構築できることがわかりました。

今回の解析が示すとおり、坑道壁面の地質観察により取得する割れ目のトレスマップは、ボーリング調査の取得データから直接的に設定できない割れ目の半径分布を設定する際に必要なデータとなります。今後は、他の坑道壁面のトレース長分布を対象とした同様の解析を実施し、今回の解析の結果との整合性を確認します。また、割れ目特性の設定に必要な地質構造概念の検討や亀裂ネットワークを構築するための割れ目特性の検討を継続します。

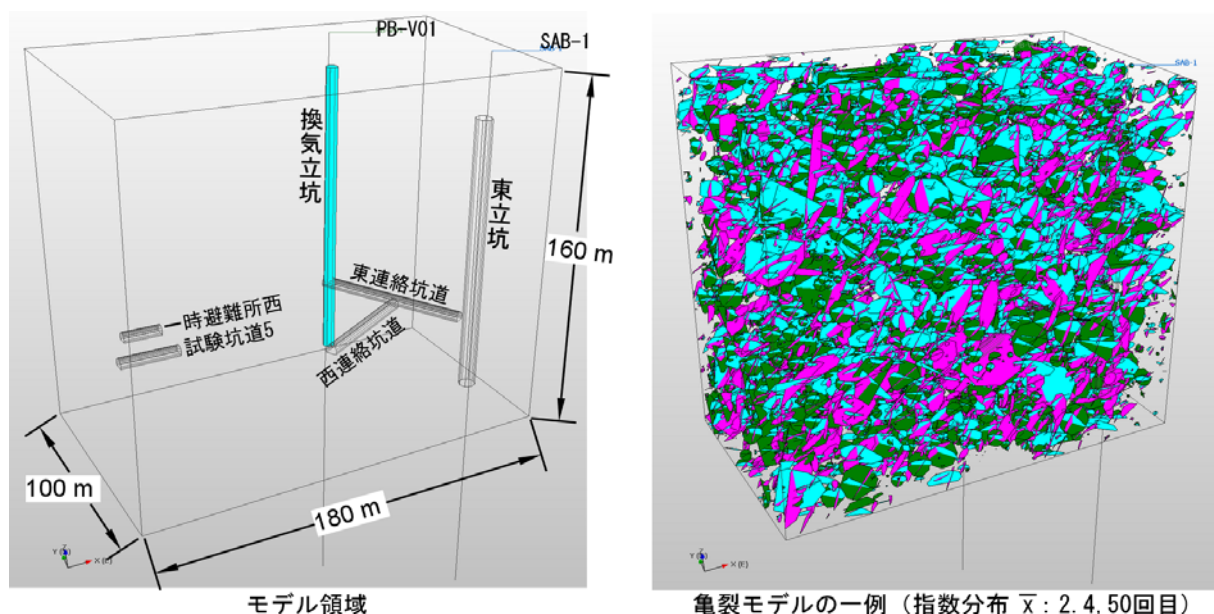


図 6 モデル領域の設定と亀裂モデルの一例

表 1 解析に用いた割れ目特性データ一覧

| セット  | 方位分布             |                 |              | 頻度・密度          |              |                                            |              | 半径分布        |                      |                                          |
|------|------------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|--------------------------------------------|--------------|-------------|----------------------|------------------------------------------|
|      | Fisher分布         |                 |              | 一次元頻度<br>(1/m) |              | 三次元密度<br>(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) |              | べき乗分布の場合    |                      | 指数分布の場合                                  |
|      | 方位角<br>(0 - 360) | 偏向角<br>(0 - 90) | Fisher<br>定数 |                |              |                                            |              | 最小半径<br>(m) | べき乗数<br>(-)          | 平均値<br>(m)                               |
| セット1 | 195.8            | 40.6            | 23.7         | 0.0360         | 合計<br>0.0863 | 0.0589                                     | 合計<br>0.1581 | 1.0         | 2.5 - 3.5<br>(0.1間隔) | 2.0 - 5.0 (0.1間隔)<br>5.0 - 10.0 (1.0 間隔) |
| セット2 | 131.0            | 36.5            | 10.5         | 0.0389         |              | 0.0757                                     |              |             |                      |                                          |
| セット3 | 353.6            | 40.0            | 13.4         | 0.0115         |              | 0.0234                                     |              |             |                      |                                          |

※方位分布および頻度・密度は、PB-V01 孔、SAB-1 孔、HDB-1、3、6、11 孔（図 3、図 4 参照）のデータを用いて設定しました。

※今回の解析で対象とした換気立坑の深度 250m から 380m の範囲は、岩石強度と応力状態を定量化する指標であるダクティリティインデックス<sup>(6)</sup>が 2 以下である稚内層浅部に相当することから、割れ目特性の設定には、その範囲のデータを使用しました。

※Fisher 分布は球面座標系における正規分布に相当する分布系であり、Fisher 定数は方位のバラツキを表す定数です。この値が小さいほどバラツキが大きいことを示します。

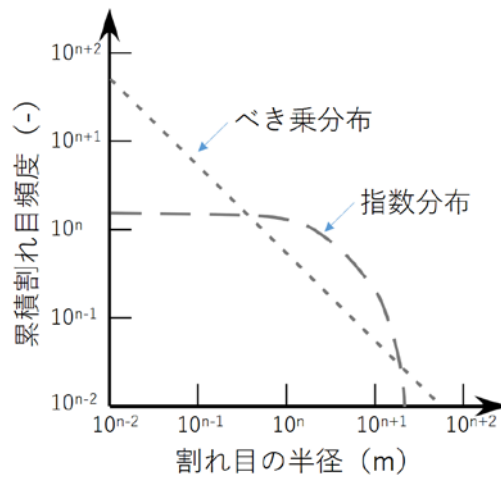


図 7 割れ目の半径分布の模式図

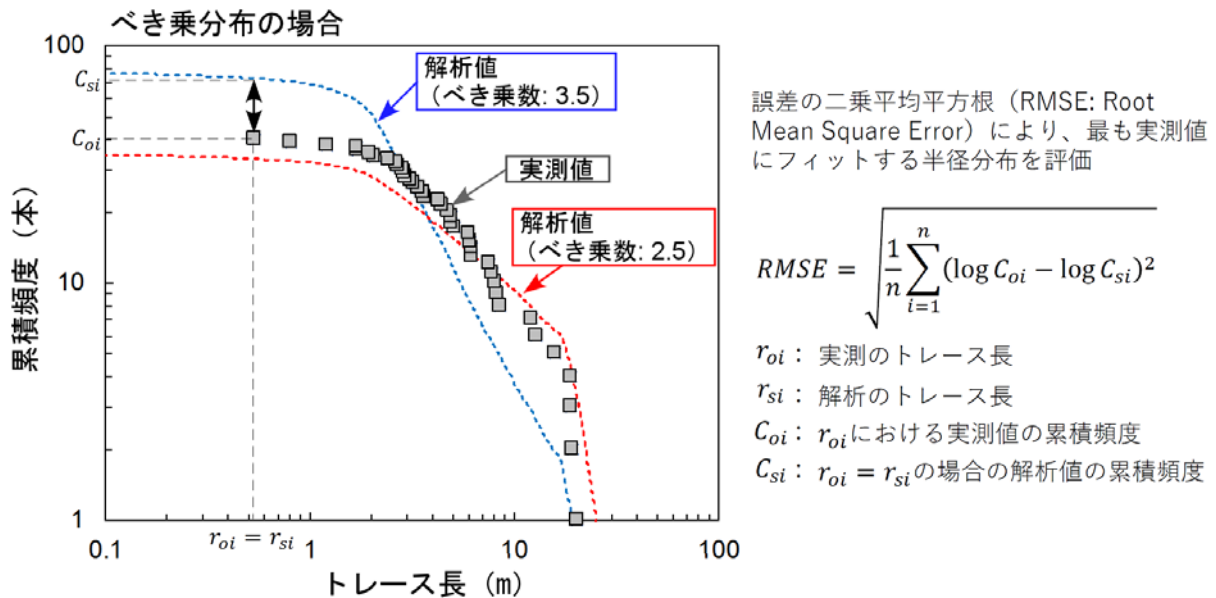


図 8 解析結果と実測値の比較の一例と誤差 (RMSE) の算出方法

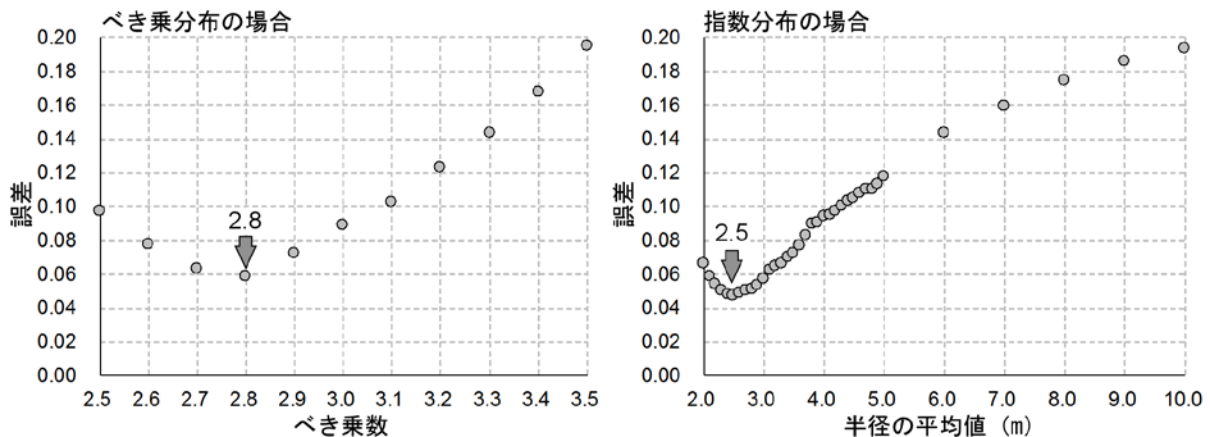


図 9 半径分布のパラメータ値と誤差 (RMSE) の関係

## (2) 岩盤の水理

地下施設の建設に伴う周辺岩盤への水圧の影響を把握するために、HDB各孔およびPB-V01孔に設置したモニタリング装置による地下水の間隙水圧の観測を行いました。地下施設近傍のボーリング孔（HDB-1、3、6孔、PB-V01孔）では、これまでと同様に地下施設の建設の影響と考えられる水圧低下が認められました（図 10は換気立坑から201m離れたHDB-3孔の例）。地下施設から離れたボーリング孔（HDB-5、7、9孔）では間隙水圧の低下は認められていません（図 11は西立坑から約1,200m離れたHDB-7孔の例）。水圧低下が認められない理由としては、地層の透水性の低さや地下施設からの距離の遠さが考えられます。今後も引き続き、水圧モニタリングを継続し、得られた結果を用いて、岩盤の水理特性を地上からの調査により予測する手法などの高度化を進めていく予定です<sup>(7)</sup>。

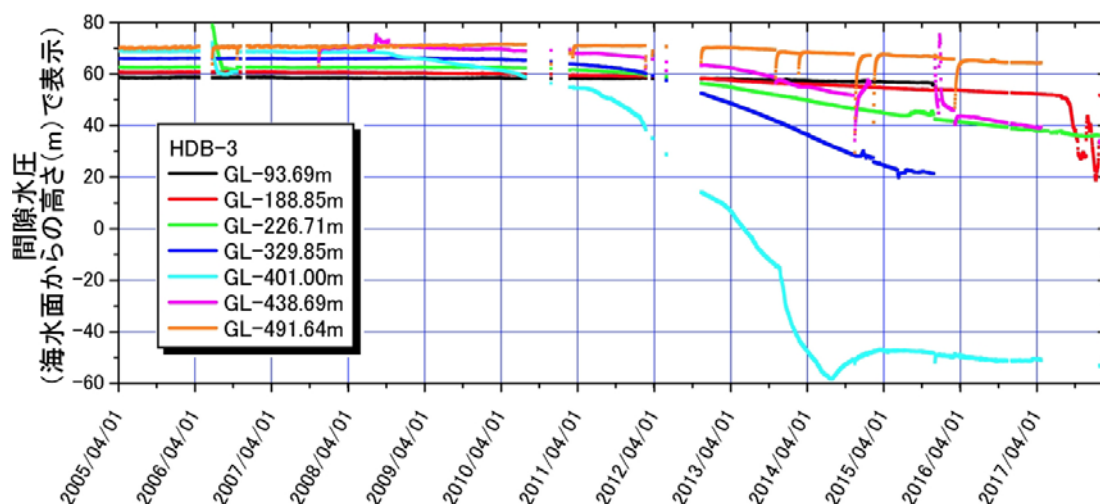


図 10 HDB-3 孔における地下水の間隙水圧の測定結果

図中で急激に水圧が変化している箇所は、装置の不具合による変動です（メンテナンス後は変動前の水圧を示します）。GL-401.00mは断層部に相当するため、他の区間より水圧が大きく低下しています<sup>(8)</sup>。

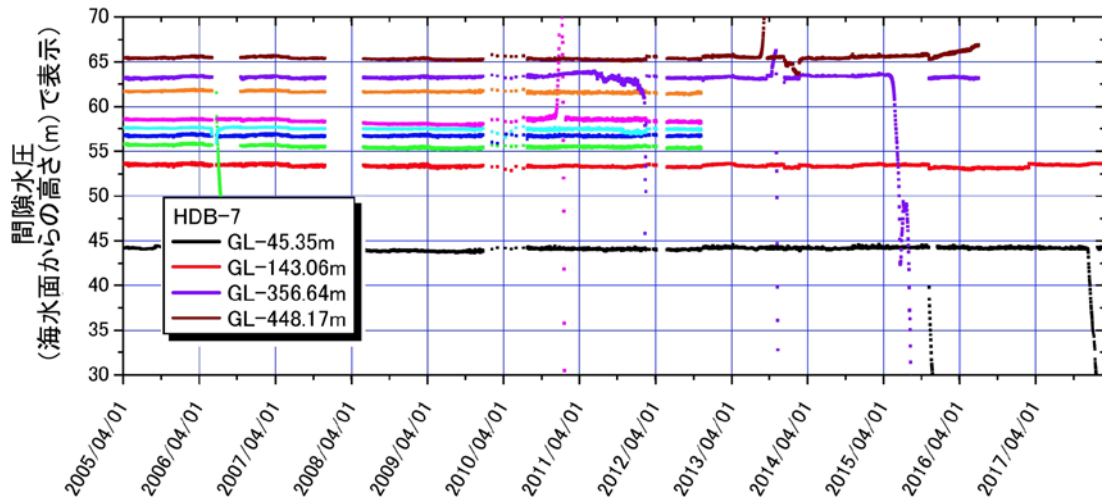


図 11 HDB-7 孔における地下水の間隙水圧の測定結果

図中で急激に水圧が変化している箇所は、装置の不具合による変動です（メンテナンス後は変動前の水圧を示します）。

坑道掘削の影響を受けた周辺岩盤の透水性を把握するために、原位置透水試験を深度350m調査坑道の試験坑道2～4周辺のボーリング孔にて行いました。図 12、図 13にそれらのボーリング孔のレイアウトを、図 14にこれまでに実施した水圧・水温観測と透水試験の結果を示します。試験坑道3、4の掘削および試験坑道4内の試験孔の掘削に伴って形成されたと考えられる割れ目の発達領域（掘削損傷領域）<sup>(8)(9)</sup>の水圧はほぼ大気圧の値を示す一方で、同領域外の割れ目の発達しない領域では坑道掘削直後で最大2.0MPa程度、その後、低下し、現在の値で最大0.6MPa程度のやや高い水圧が観測されています。一部の観測区間で水圧が変動を繰り返していますが（例えばH4-1の区間4）、このような現象は閉鎖的な環境下で溶存ガスの遊離・溶解が繰り返し起こることにより現れると考えられます<sup>(10)</sup>。水温は掘削直後で20℃程度でしたが、その後増加し、現在では地下施設建設前の水温である24℃程度<sup>(10)</sup>で安定しています。透水性は掘削損傷領域で $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{m/s}$ の高い値を示し、同領域外の割れ目の発達しない領域では $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{m/s}$ の基質部に近い透水性を示します。これらの透水性に有意な時間変化は現在のところ確認されていません。今後、水圧・水温観測と透水試験を継続するとともに、掘削損傷領域の透水性を地上からの調査により予測する手法などの高度化を進めていく予定です<sup>(11)</sup>。

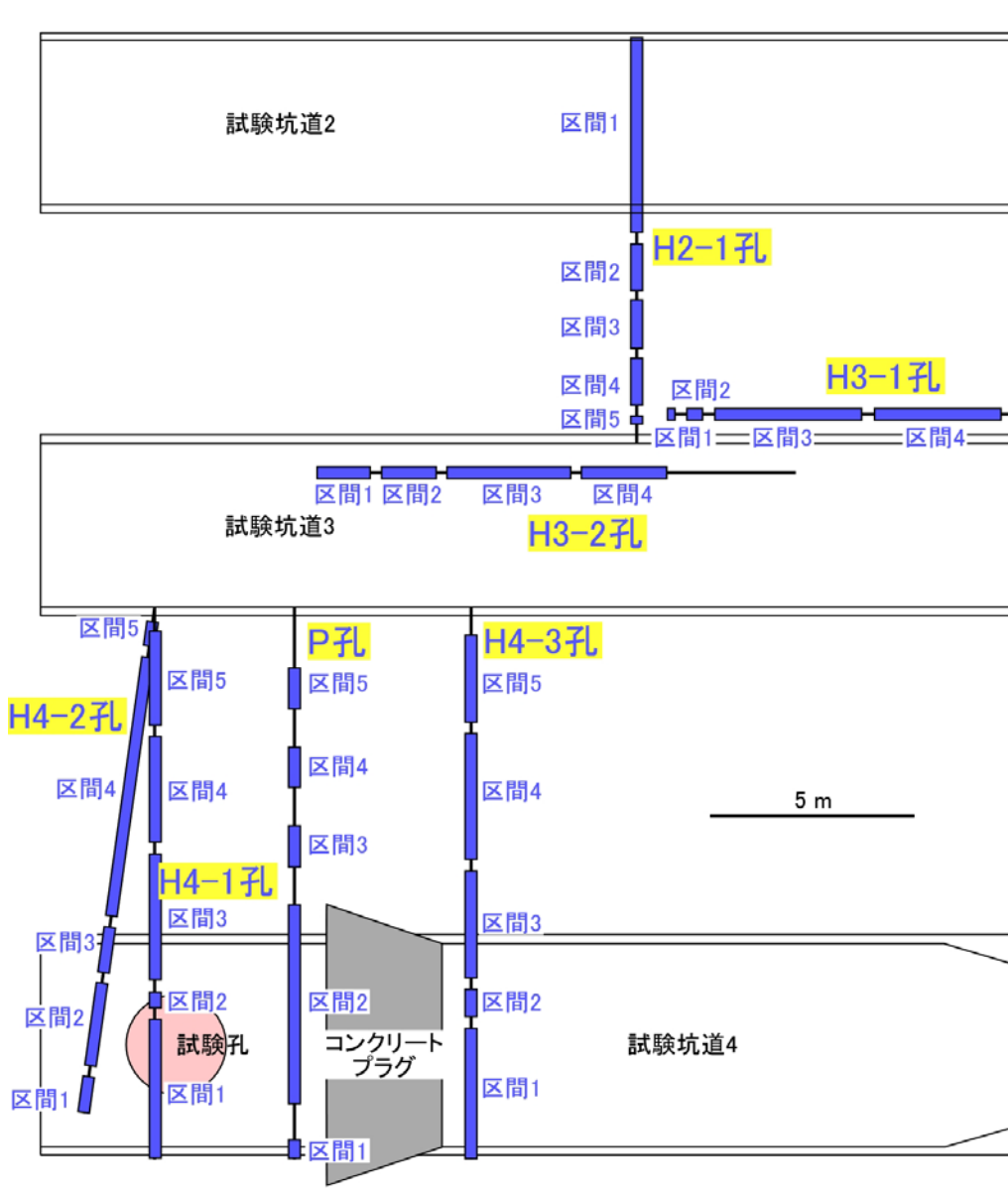


図 12 試験孔のレイアウト（水平断面）

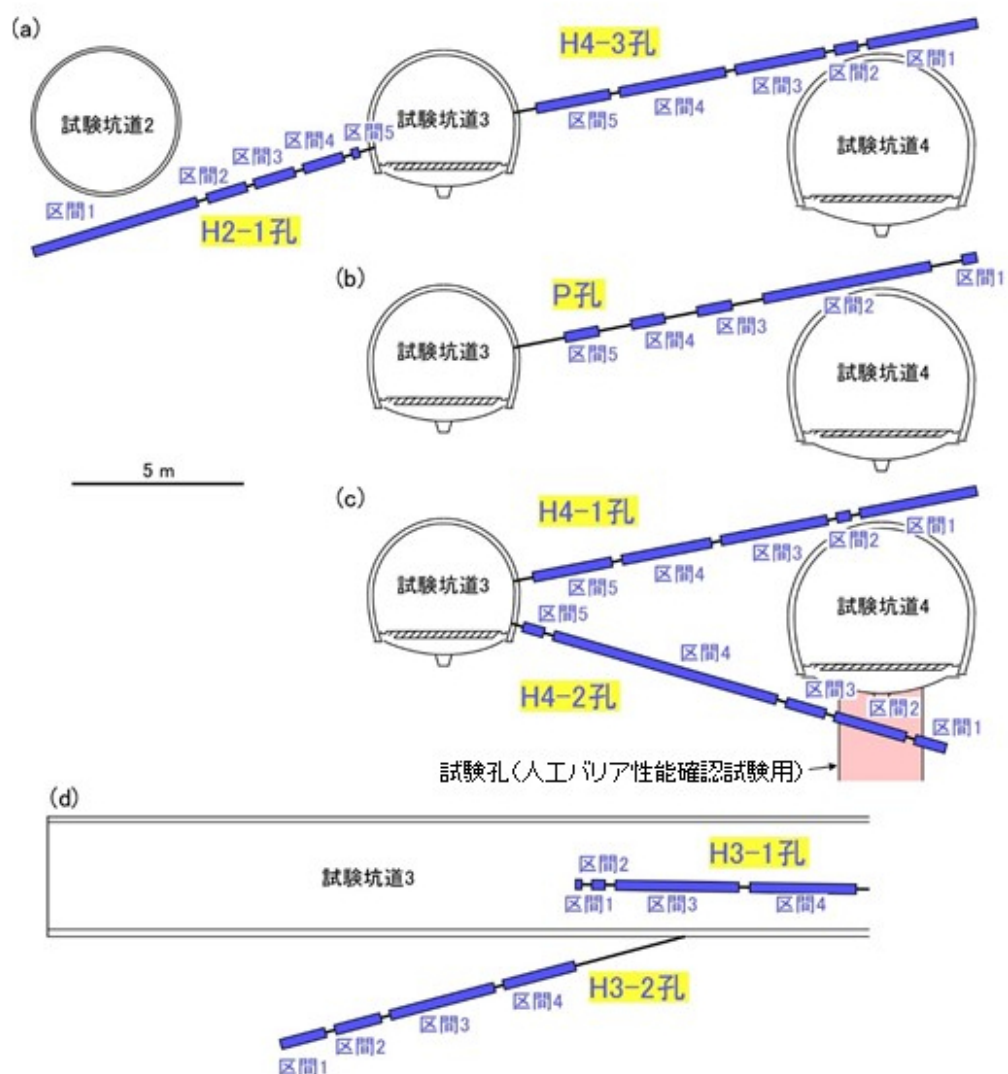


図 13 試験孔のレイアウト（鉛直断面）

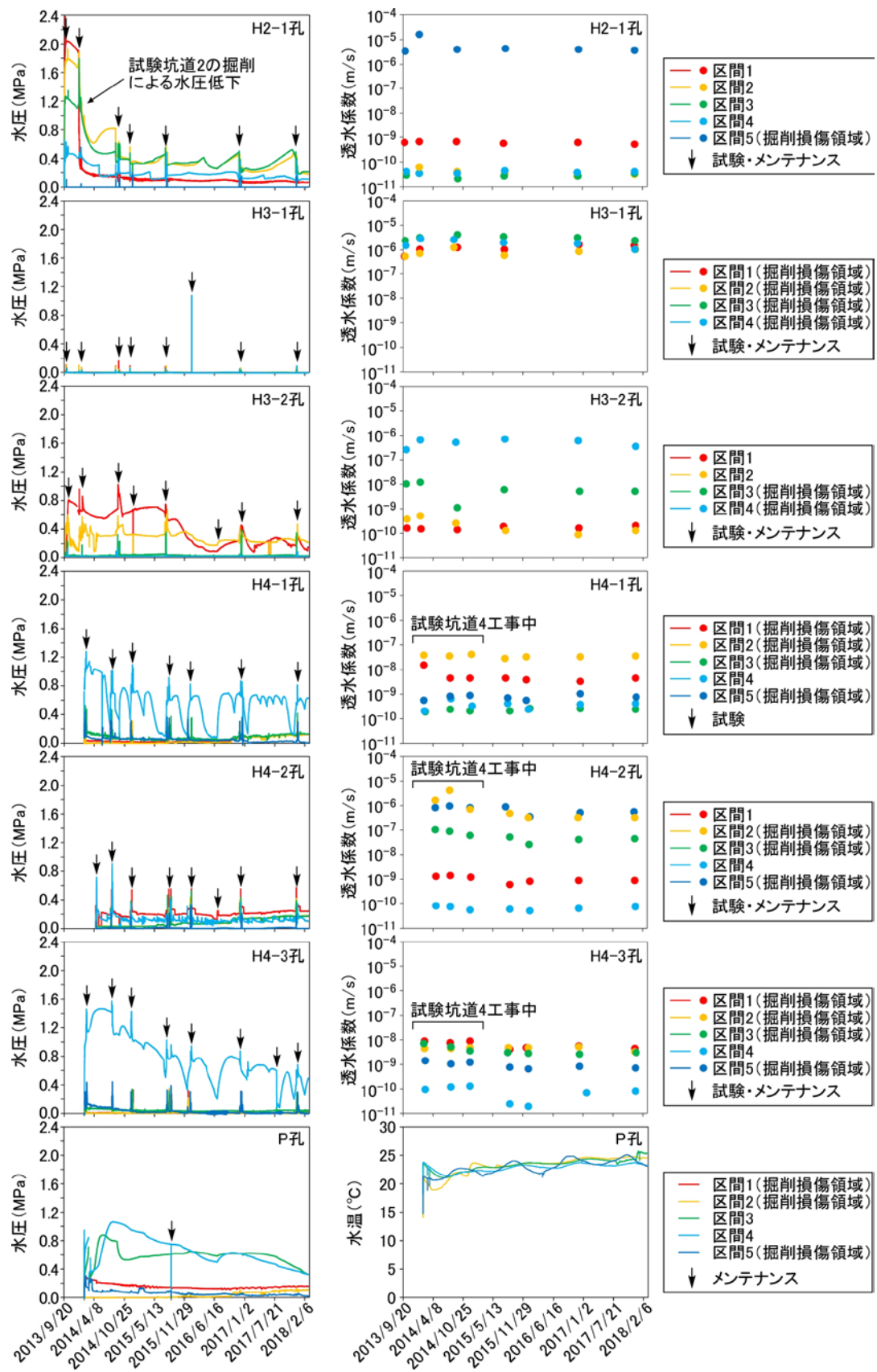


図 14 水圧・水温観測と透水試験の結果

試験孔近傍の水温については4. 1. 1を参照。

人工バリア性能確認試験を実施している試験坑道4周辺の水圧を把握するため、前述のボーリング孔を用いた水圧観測を行いました。平成27年1月より開始した試験坑道4および同坑内試験孔への注水、および同年5～6月に実施した試験孔東側近傍のコンクリートプラグ周辺のグラウト施工に伴い、注水による緩やかな水圧上昇がコンクリートプラグ内側のH4-1およびH4-2の区間2（図 12、図 13）で観測されています（図 15）。コンクリートプラグ外側のH4-3の区間2でそのような水圧上昇は観測されていません（図 15）。今後も水圧観測を継続し、人工バリア性能確認試験における周辺岩盤の水理状態を把握していく予定です。

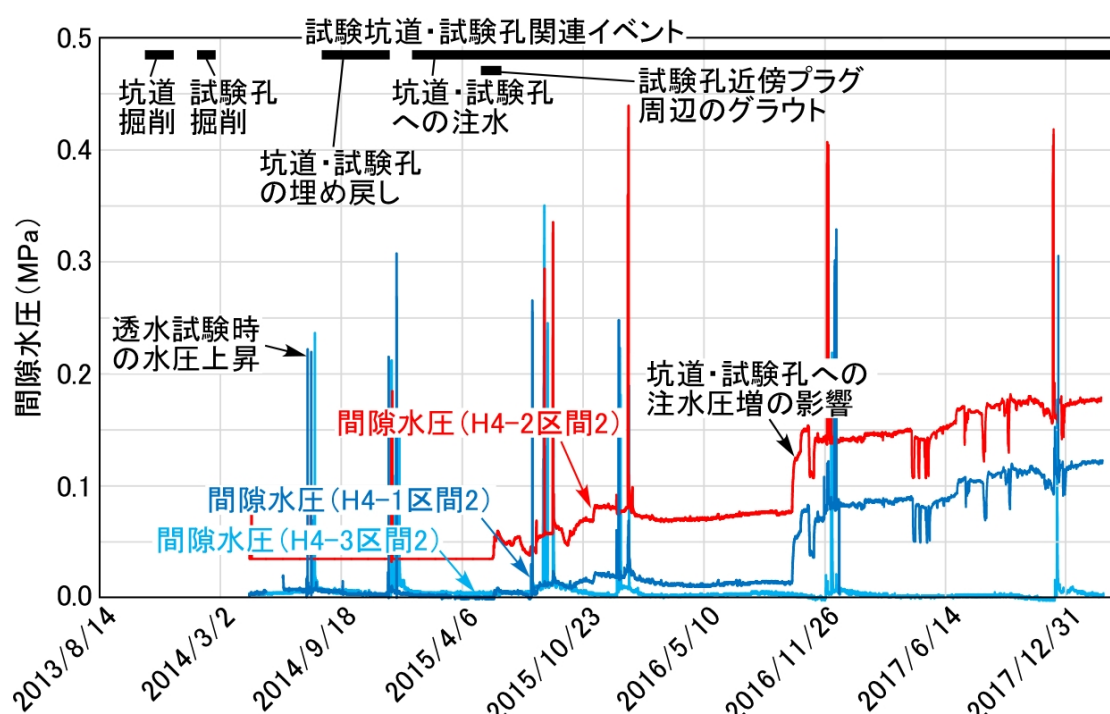


図 15 H4-1～H4-3 の区間 2（掘削影響領域）の水圧観測結果

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を行うとともに、断層のせん断<sup>\*10</sup>変形や隆起・侵食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）を実施しました。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

\*10：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。

インデックス (DI) \*<sup>11</sup>という岩石の強度・応力状態を表す指標を用いた検討を行ってきており、断層帯中の割れ目がとり得る透水性の上限値はDIを用いた経験式によって予測可能であることが様々な地域の岩種を対象とした研究により明らかとなってきました<sup>(6)</sup> (図 16(a))。平成29年度は、この経験式が単一のせん断割れ目にも適用可能かどうかを検証するために、地下施設周辺の深度250m以浅に分布する声問層中のせん断割れ目を対象とした地質・水理・力学的な検討を行いました。その結果、同経験式が単一のせん断割れ目にも適用可能であり、せん断性の割れ目を対象に幅広く適用可能であることがわかりました<sup>(12)</sup> (図 16(b))。

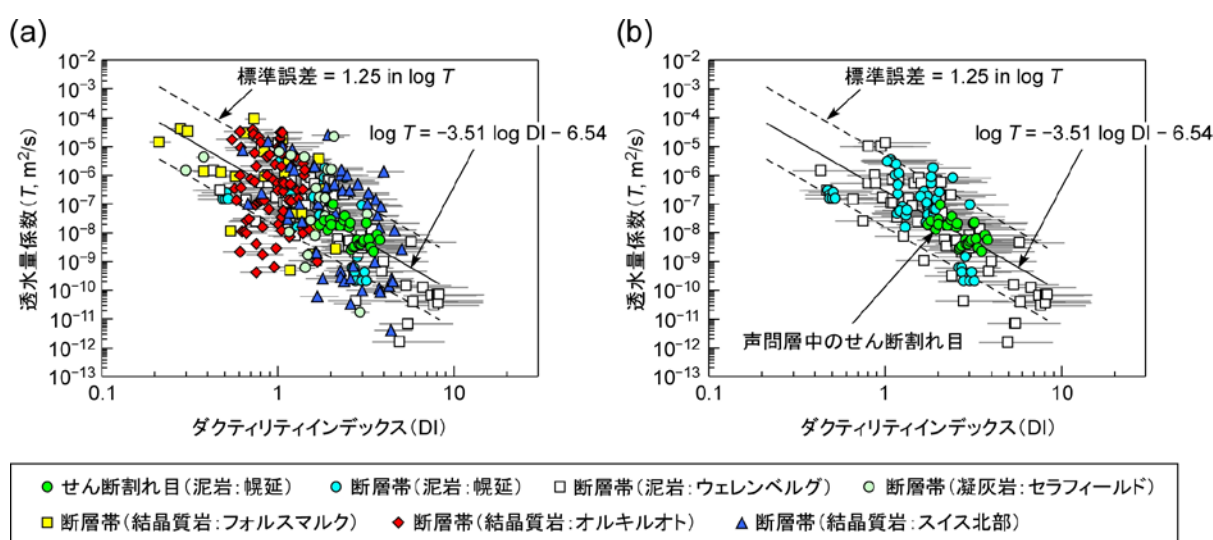


図 16 DI とせん断性の割れ目がとり得る透水性の上限値との関係性<sup>(12)</sup>

(a) 泥岩、凝灰岩、結晶質岩のデータ、(b) 泥岩のデータ

東立坑の坑底より掘削したボーリング孔 (図 17(a)) を用いて水圧擾乱試験を行いました。水圧擾乱試験では、図 16に示す経験式が、将来的な断層運動や隆起・侵食に伴う断層の透水性の変化の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 17(b))、それに伴う断層の透水性の変化を観測します。水圧を上昇させることは、隆起・侵食によって断層の深度が浅化する (DIが低下する) 現象を応力的に模擬することにもな

\*11: 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。

ります。平成29年度は深度497.8m付近に出現した断層（図 18）を対象に水圧擾乱試験を実施しました。同断層は電気伝導度検層と呼ばれる地下水の電気伝導度に着目した検層によって地下水の主要な水みちとなりうることが示唆される断層であり、断層の最大変位量は数cm以上であることが孔壁画像の観察により確認できます（図 18）。同断層を対象に水圧を段階的に上昇させる注入試験を2回連続して実施した結果、2回とも試験区間の水圧が7MPaを超えた段階で注入流量が有意に上昇することが確認できました（図 19）。この時の断層面にかかる応力状態を解析すると、断層面に沿ってせん断破壊が起こった可能性が高いことが原位置の応力と断層の摩擦強度の関係から推定されます（図 20）。したがって、上述の注入流量の有意な上昇は、水圧擾乱試験時に水圧が7MPaを超えた段階で断層内にせん断破壊が発生し、それに伴って断層の透水性が一時的に有意に上昇したことが原因と考えられます。本試験中の断層の透水性の変化は、概ね、DIの経験式から推定される透水性の範囲に収まることがわかります（図 21）。この結果は、断層の透水性の上限値は、たとえ将来的に断層運動や隆起・侵食が生じたとしても同経験式により推定される透水性の範囲を有意に超えることはないことを示唆しています。今後、今回水圧擾乱試験を実施した箇所の孔壁観察などを行い、試験後の状況を詳細に確認するとともに、信頼性の向上を図るため、試験点数を増やしていく予定です。

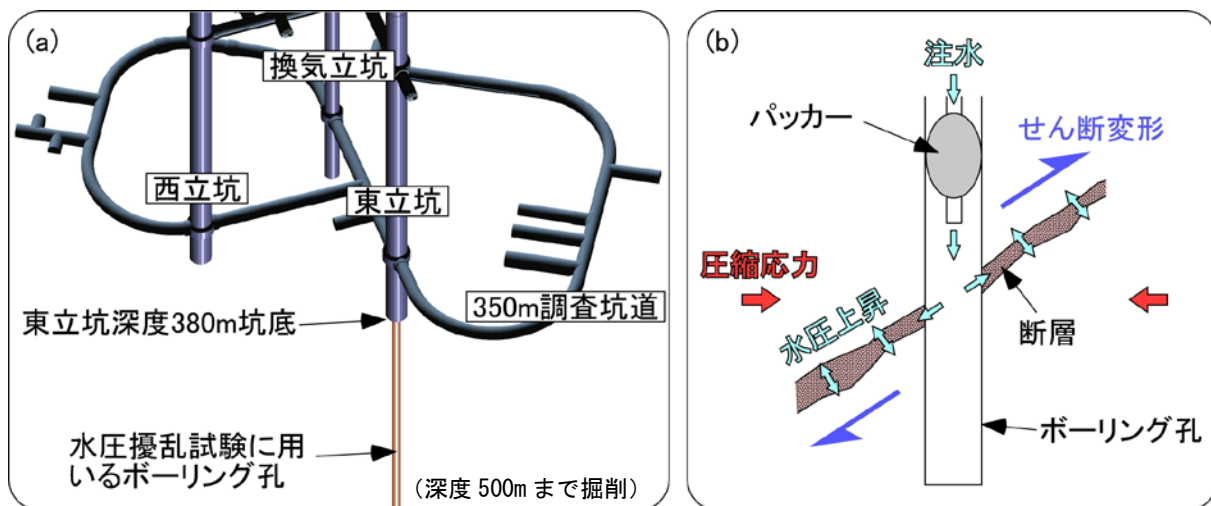


図 17 水圧擾乱試験に用いたボーリング孔の位置(a)と水圧上昇によって誘発される断層のせん断変形(b)

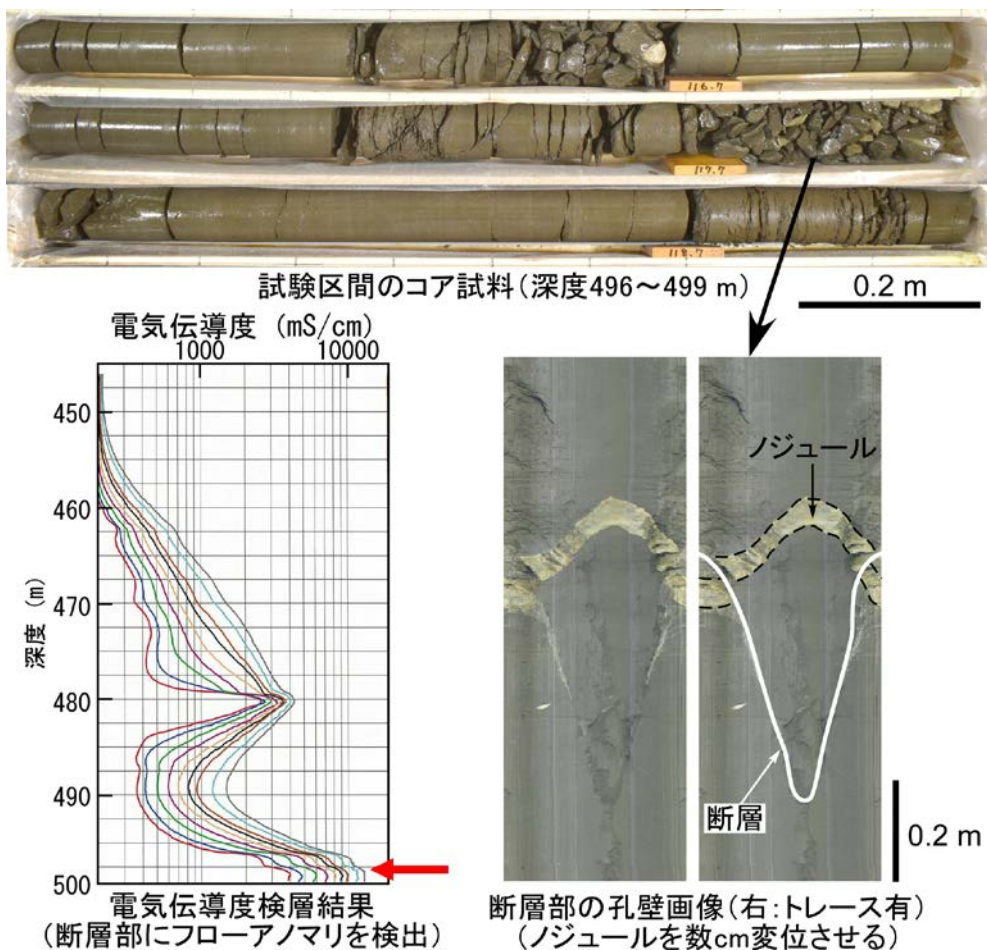


図 18 水圧擾乱試験を行った深度 497.8m 付近の断層部のコア写真、電気伝導度検層結果、および孔壁画像

電気伝導度検層では深度 480m の断層部でもフロー anomalies を検出しています。

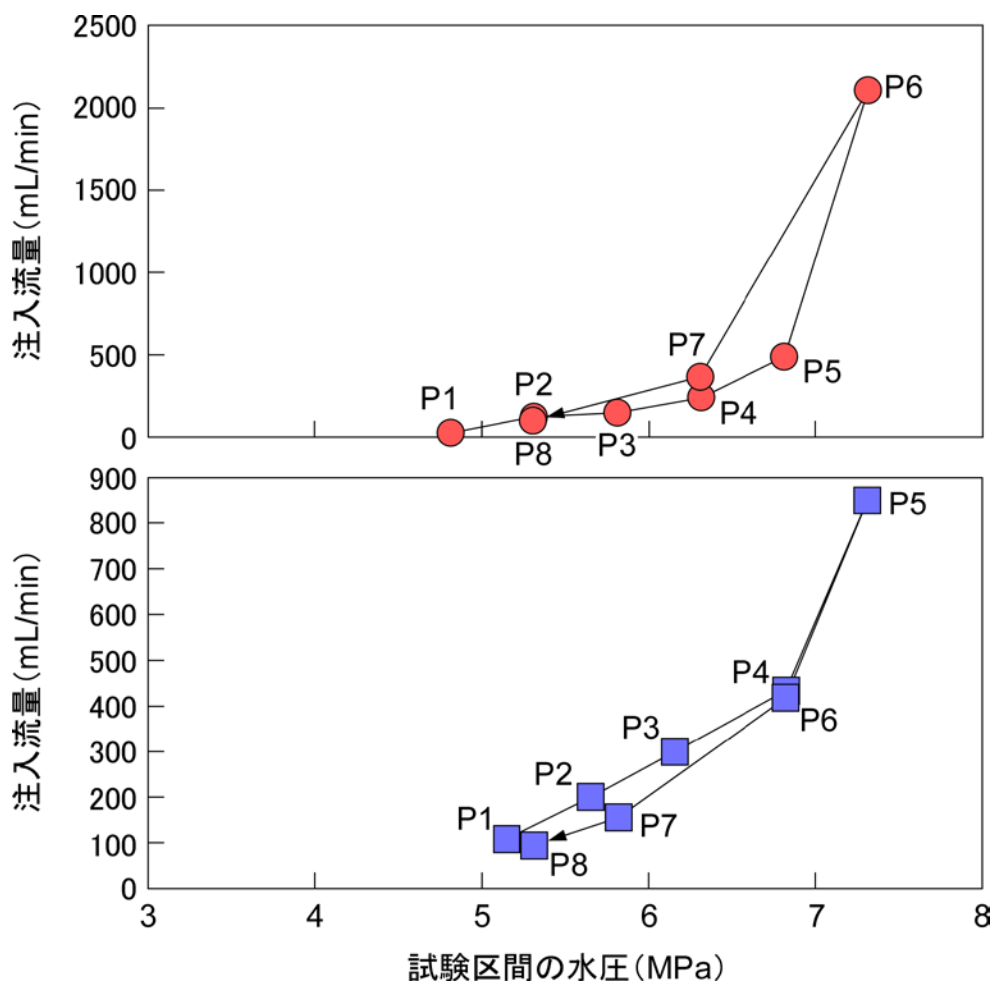


図 19 水圧擾乱試験時における注入流量と試験区間の水圧との関係  
上段は 1 回目、下段は 2 回目の試験結果

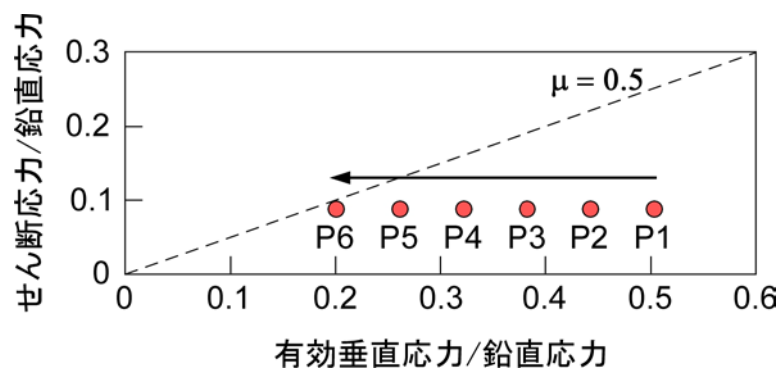


図 20 水圧擾乱試験時の断層面の応力状態（1 回目の試験）

図中のプロットは試験対象とした断層面にかかる応力状態を表し、P1～P6は図 19（上段）に示す水圧条件を表します。水圧が上昇すると（P1→P6）、断層面にかかる応力は図のように変化します。プロットが図中の破線に近づくとき断層面に沿ってせん断変形が生じます。 $\mu$ は断層面の摩擦に関するパラメータ（摩擦係数）を表し、本解析では $\mu \cong 0.5$ を仮定しています。

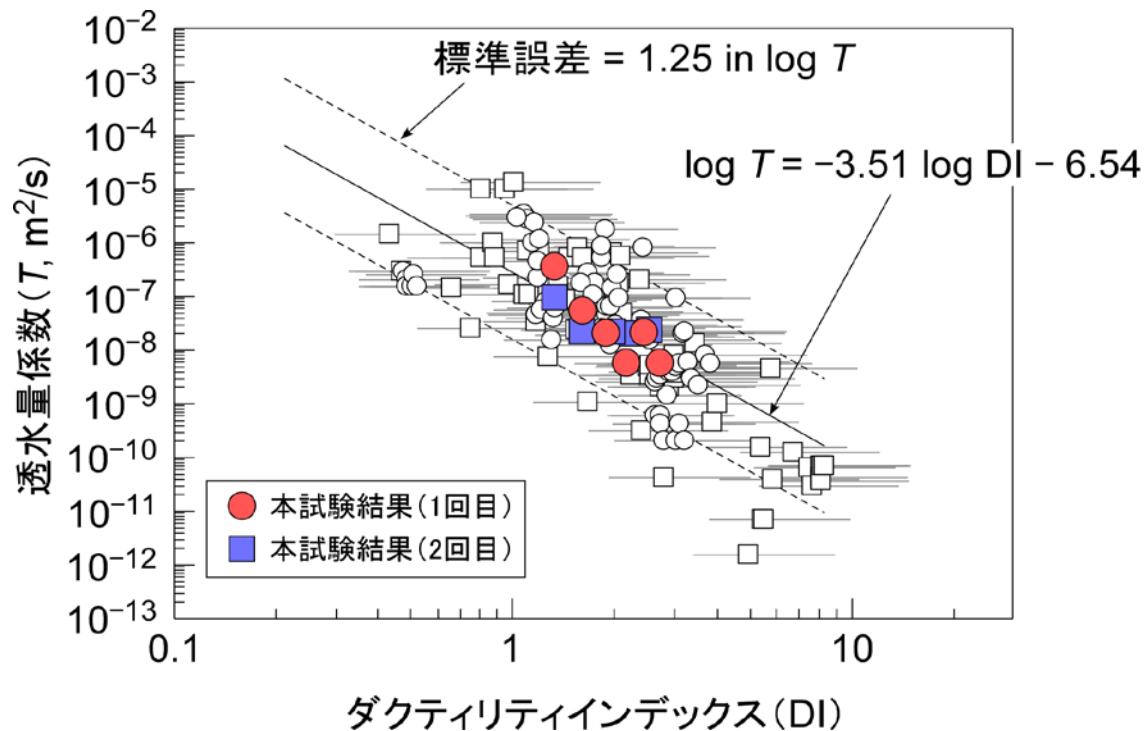


図 21 DI の経験式と今回実施した水圧擾乱試験結果との比較

図中の白抜きのプロットは図 16(b)のデータを表します。

平成29年度はDIとせん断性割れ目の透水性との関係性をさらに検証するために、水圧の低下（DIの増加）がせん断性割れ目の透水性に及ぼす影響を調べました。地下施設近傍に位置するボーリング孔PB-V01は、地下施設の建設に伴う湧水によって水圧が大きく低下しています。地下施設の建設により水圧が1.35MPa低下した同孔の深度142～233m区間（声問層）と水圧が0.49MPa低下した同孔の深度461～478m区間（稚内層）を対象に透水試験を実施しました。その結果、前者の区間では水圧低下前に計測した透水性の値<sup>(13)</sup>の0.2倍程度、後者の区間では水圧低下前の値と同程度の透水性が得られました（表 2）。それぞれの水圧低下量と図 16に示す経験式を用いた応力解析を行うと、前者の区間では0.3～0.4倍程度、後者の区間では0.8倍程度、透水性が低下することが計算上、予測されます。この予測値は、今回の透水試験により得られた実測値と概ね整合しているといえます。より確かな評価を行うためには、より大きな透水性のコントラストが必要となりますが、図 16に示す経験式は埋没沈降などによりDIが増加するケースを想定した場合のせん断性割れ目の透水性の変化予測にも

適用できることが示唆されます。今後も引き続き原位置試験などを通じて、将来的な地殻変動を考慮した安全評価（場の状態設定）に資する基盤情報を整備していく予定です。

表 2 平成 29 年度に実施した PB-V01 での透水試験の結果

| 水圧低下後（平成 29 年度） |                       | 水圧低下前（平成 19 年度） |                       |
|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| 深度（m）           | 透水係数（m/s）             | 深度（m）           | 透水係数（m/s）             |
| 141.76～232.51   | $1.53 \times 10^{-9}$ | 167.78～232.23   | $6.54 \times 10^{-9}$ |
| 461.01～478.47   | $5.48 \times 10^{-8}$ | 461.00～476.05   | $3.67 \times 10^{-8}$ |

### (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。また、深度350m調査坑道では、必須の課題のひとつである「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」として人工バリア性能確認試験が行われており、試験箇所周辺の地下水の水質変化を把握するための調査・解析技術の開発も行っています。このため、坑道内で採取した地下水のpHや電気伝導度<sup>\*12</sup>、酸化還元電位<sup>\*13</sup>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29年度は、平成28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<sup>\*14</sup>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 22に、これらの地点から採取した地下水の塩分濃度<sup>\*15</sup>の経時変化を示します。集水リングで採取された地下水（図中で○印のデータに相当）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-133.8、WR-E-100.0、WR-V-168.0、WR-V-202.0、WR-E-169.0、WR-E-202.0）は、他の深度で採取

\*12：電気の通しやすさを表す値で、電気伝導度が高い（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。

\*13：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。

\*14：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。

\*15：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。

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。このうち、WR-V-98.0およびWR-V-168.0では、平成26年度から平成29年度にかけて塩分濃度が低下する傾向が見られます。また、坑道内から掘削されたボーリング孔から採取された地下水（図中で□印のデータに相当）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す。このような傾向は、平成28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ためと考えられます。

また、深度350m調査坑道で行われている人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔から採取した地下水の水質分析の結果についても整理しました。

図 23に、試験坑道2および試験坑道4周辺のボーリング孔から採取した地下水の塩分濃度の経時変化を示します。両試験坑道は、いずれも平成25年度に掘削され、試験坑道4では平成26年度より人工バリア性能確認試験が実施されています。平成29年度までの分析結果では、これらのボーリング孔において試験坑道の掘削および人工バリア性能確認試験と関連するような塩分濃度の変化は認められませんでした。

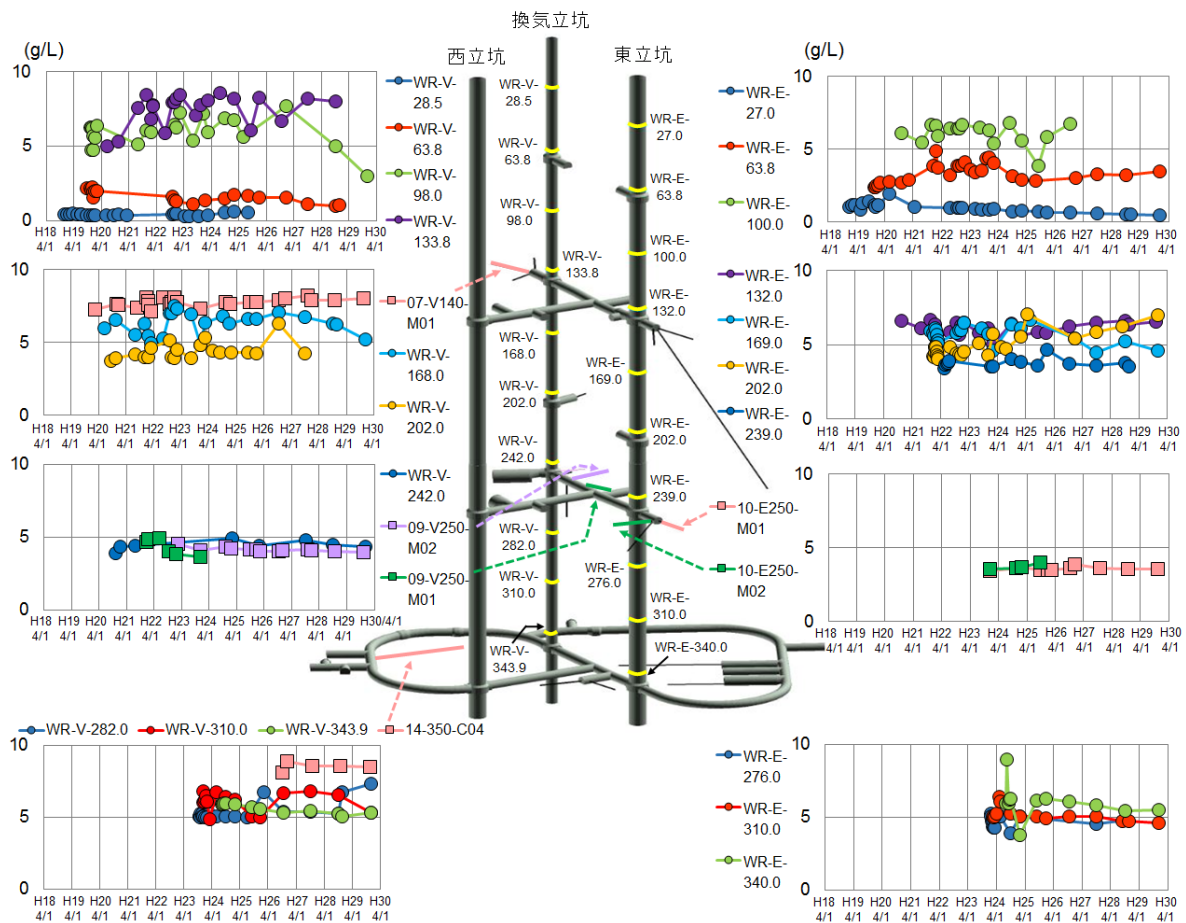


図 22 坑道内で採取した地下水の塩分濃度の経時変化

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。

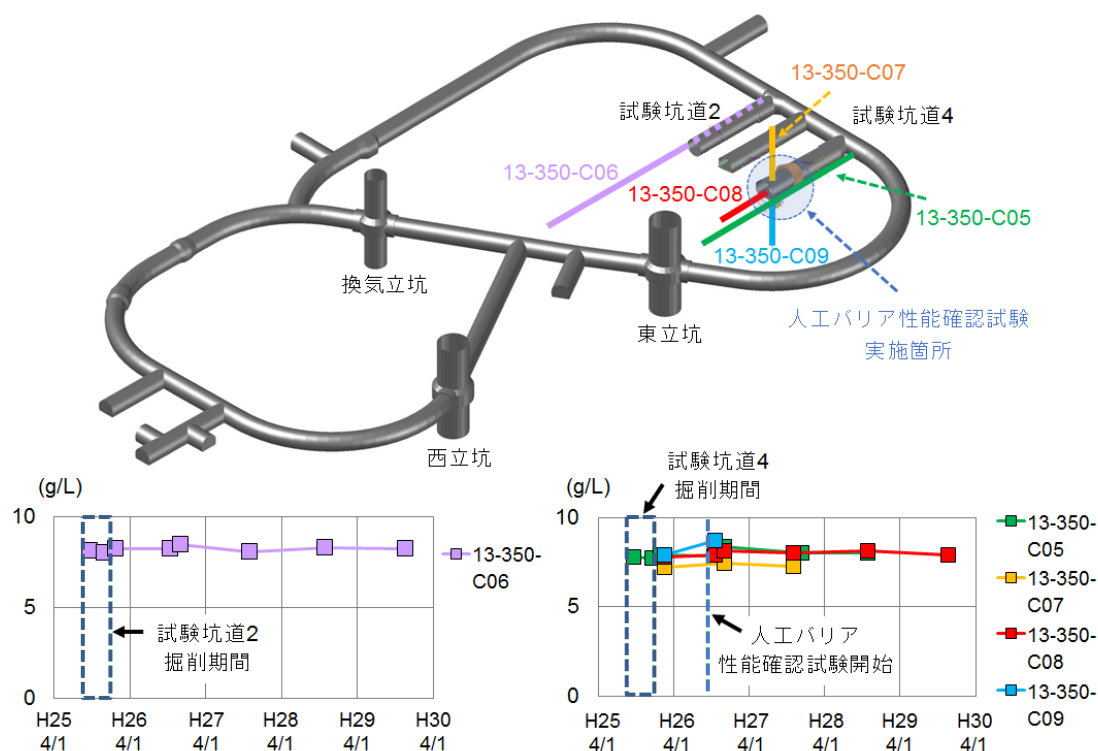


図 23 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺における  
地下水の塩分濃度の経時変化

前述した図 22および図 23では、地下水の塩分濃度を指標に経時変化について整理しましたが、平成29年度は、このような整理に加え水質データの多変量解析も予察的に行い、水質データの特徴に基づく分類を試みるとともに、データの変動の傾向について塩分濃度の経時変化と照合しつつ考察しました。

多変量解析は、平成28年度までに地下施設内で採取・分析された水質データについて、主要7成分（Na、K、Ca、Mg、Cl、SO<sub>4</sub>およびHCO<sub>3</sub>）を対象に行いました。解析では、階層的クラスター分析（HCA）<sup>\*16</sup>と主成分分析（PCA）<sup>\*17</sup>を組み合わせで検討しました（図 24）。HCAによる結果では、類

\*16：階層的クラスター分析では、データ間の距離（多変量距離）を求め、各距離を比較することでデータの類似性を調べます。類似したデータでは、距離が短くなります。結果は樹形図で示され、データの類似性をもとに分類ができます。

\*17：主成分分析では、多変量のデータに対し、データの変量数を減らしてデータの特徴を分析します。分析では、元の多変量のデータをできるだけよく表示している主成分（第1主成分や第2主成分）に基づき行なわれます。

似値<sup>\*18</sup>=0.63とした場合、水質データは6つのグループに分類されました。また、PCAを行い、HCAでの分類を踏まえ、第1主成分と第2主成分を軸に各グループの水質データの特徴を整理しました。その結果、第1主成分は、主にNa・Cl濃度で代表される指標、第2主成分は、主にCa・HCO<sub>3</sub>濃度で代表される指標となり、6つのグループは各々、以下のように特徴づけられました。グループ1および2：全水質データの中でNa・Cl濃度が中間的でHCO<sub>3</sub>濃度の高いデータ（グループ1の方が相対的にNa・Cl濃度が高い）、グループ3：グループ5のデータに類似するものの相対的にCa・SO<sub>4</sub>濃度の高いデータ（1点のみ）、グループ4：Na・Cl濃度およびHCO<sub>3</sub>濃度の低いデータ、グループ5および6：Na・Cl濃度の高いデータ（グループ6の方が相対的にHCO<sub>3</sub>濃度が高い）。このうち、グループ3は、14-350-C04孔の区間2の地下水に相当し、同孔の区間1で施工されたセメントグラウトの影響が示唆されました。

次に、PCAの結果をもとに、各々のデータの変動について調べました（図 25）。例えば、図 22の塩分濃度の経時変化で変動の大きい傾向が認められたWR-V-133.8については、PCAではグループ1・5・6の3つにまたがり変動していることがわかります。一方、図 23の塩分濃度の経時変化の小さい人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔（13-350-C05～C09孔）では、グループ5・6（大部分はグループ5）のみで変動が小さいことがわかります。また、相対的に変動の大きいWR-V-133.8について、変動の様子を詳細に調べると、時間の経過とともに第1主成分の値が大きくなり（Na・Cl濃度の増加）、平成22年～平成23年頃にかけて第2主成分の値も大きくなる（Ca濃度の増加）ような変化をしています（図 26）。その後、平成28年にかけては、第2主成分の値が小さくなる傾向があります。このように、多変量解析は多数の水質データの統計的分類やデータの変動の様子を視覚的に捉えるうえでも有効な方法と考えられます。

今後も地下水の採水・分析を継続するとともに、多変量解析も活用しつつ水質変化の傾向やプロセスについて検討します。また、地下水の水質形成に関わる地球化学モデル<sup>\*19</sup>としては、初期の続成過程における鉱物-

\*18：多変量距離は、データの種類により異なるため、相互に比較可能な距離（標準化したスケール：類似値）に変換されます。類似値は0～1で示され、0の場合は最も離れたデータ、1の場合は最も類似したデータとなります。

\*19：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。

水－有機物－微生物の相互反応とその後の長期的な有機物の熟成を伴う  
 鉱物－水－微生物－ガスの相互反応、さらに約1.3～1.0 Ma以降の隆起・  
 侵食に伴う浅部から涵養する淡水との混合が考えられています<sup>(14)</sup>。平成  
 29年度は、地下水中のNH<sub>4</sub>イオンを例に鉱物－水相互反応による水質形成  
 の解釈を試み、Kを含有する粘土鉱物とNH<sub>4</sub>イオンとのイオン交換反応が支  
 配的であることを推定しました<sup>(15)</sup>。今後も上述したような相互反応によ  
 る水質形成の理解や解釈を進めるとともに、淡水との混合といった水理  
 学的プロセスの寄与と水質との関係についても検討し、地球化学モデル  
 の更新に反映していきます。

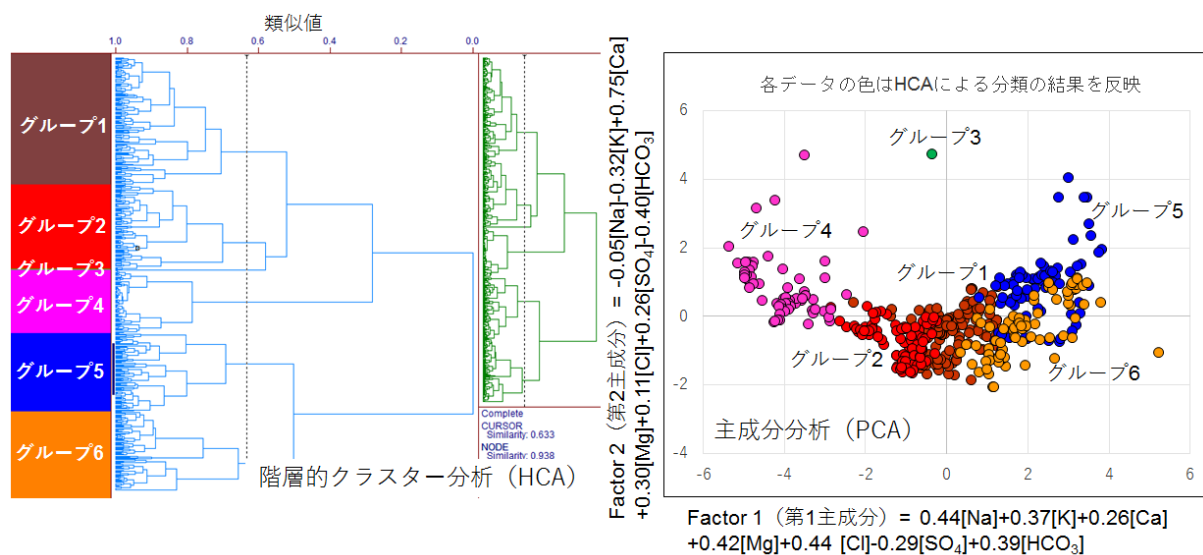


図 24 階層的クラスター分析および主成分分析の結果

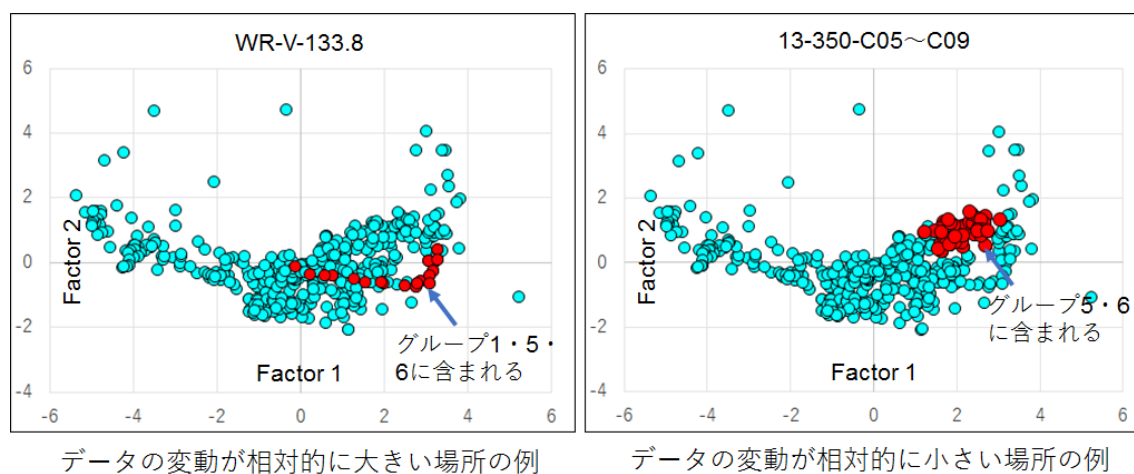


図 25 主成分分析の結果に基づいたデータの変動例

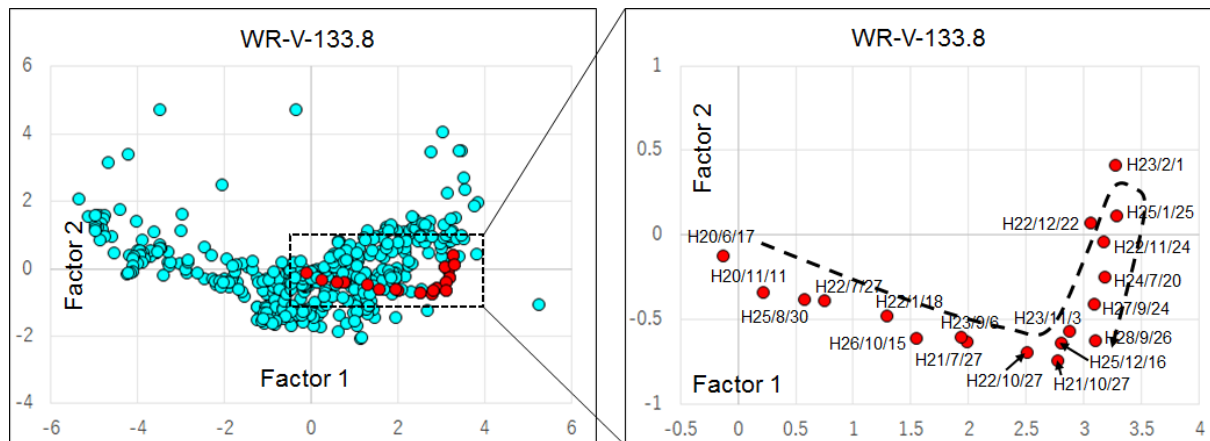


図 26 主成分分析によるWR-V-133. 8における変動の詳細

さらに、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わ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わ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。しかし、平成28年度に深度140m、250mおよび350m調査坑道から長さ約1mの岩石試料を採取し、酸化の程度の指標となりうる色調や鉱物組成を分析した結果、調査対象とした岩盤においては酸化がほとんど生じていないことが示唆されました。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 23）では、地下水のpHが7前後、酸化還元電位（Eh）が-100～-250mVと還元的な状態にあり、地下水中の硫酸イオン濃度<sup>\*20</sup>も概ね0.1mg/L未満と極めて低いことが確認されています。

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<sup>\*21</sup>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。そこで平成29年度は、13-350-C06孔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・分析しました。

\*20：岩石中に含まれる黄鉄鉱（FeS<sub>2</sub>）という鉱物が酸素と反応することで、硫酸イオンが生成します。

\*21 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。

その結果、ガスの主成分はメタン ( $\text{CH}_4$ ) と二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) であり、大気の主成分である窒素 ( $\text{N}_2$ ) や酸素の割合は非常に低いことがわかりました (図 27)。このことは、試験坑道から0.6mの距離に位置し掘削損傷領域に該当すると考えられる岩盤においても、大気の侵入・拡散が生じていないことを示唆しています。今後は、ガスの移流拡散に関する計算や解析を行い、掘削損傷領域における酸化還元状態の形成プロセスについて評価を進める予定です。

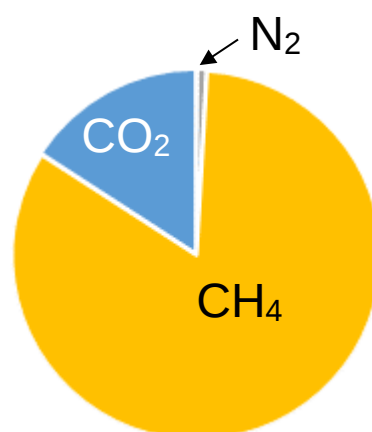


図 27 13-350-C06 孔の区間 4 における遊離ガスの組成

幌延の地下環境には多くの微生物が存在しています。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<sup>\*22</sup>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29年度は、平成28年度に引き続き、深度140m、250m、350m調査坑道から掘削されたボーリング孔 (08-E140-C01、07-V140-M03、09-V250-M02、13-350-C01、14-350-C04) から採取した地下水中の微生物数と群集組成の調査を行いました。遺伝子解析手法<sup>\*23</sup>を用いた調査の結果、メタンの生成や酸化、水素の生成や酸化、硫黄還元、鉄還元、有機物発酵、炭酸固定などの反応を行う微生物が優占種<sup>\*24</sup>として継続的に活動していることがわかりました。優占する微生物種は採水箇所によって異なっており、例えば、08-E140-C01の区間3および5では硫黄還元やメタン

\*22：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。

\*23：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。

\*24：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。

生成反応を行う微生物種が優占しているのに対して、同じボーリング孔の比較的鉄濃度が高い区間1では、嫌氣的なメタン酸化と鉄還元を同時に行うメタン生成菌が優占することが明らかになりました。このことは、微生物種の分布が不均一であるとともに、微生物の代謝反応が水質形成に影響を及ぼしていることを示唆しています。これらの酸化還元に関与する微生物の代謝反応は、物質の移動反応にも影響を及ぼす可能性があることから、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。

幌延の地下水には多くの溶存ガスが存在します。このため、地下水中の溶存ガス分析に関する手法開発も行っています。平成29年度は、これまでに幌延深地層研究計画に関連して得られたガス組成データを整理し<sup>(16)</sup>、地上からのボーリング調査と地下施設を用いて得られたそれぞれのデータの比較を行いました。例として、地上からの調査と地下施設での調査で得られた遊離ガス組成の平均値と採取方法の概念図を図 28に示します。遊離ガスとは、地下水中に溶存しているガスが、地下水圧の低下に伴い溶けきれなくなり、気泡となったものです。地上からのボーリング調査で得られたデータでは、窒素( $N_2$ )や酸素( $O_2$ )が多く含まれており、試料中への大気の混入が示唆されるデータが多くありました。一方、地下施設での調査で得られたデータは、メタン( $CH_4$ )と二酸化炭素( $CO_2$ )が主成分であり、試料中への大気の混入は、ほとんど認められませんでした。このように、第3段階である地下施設での調査により、第1段階である地上からのボーリング調査では取得することが難しかった大気の混入を抑制した遊離ガスデータを取得できるようになりました。

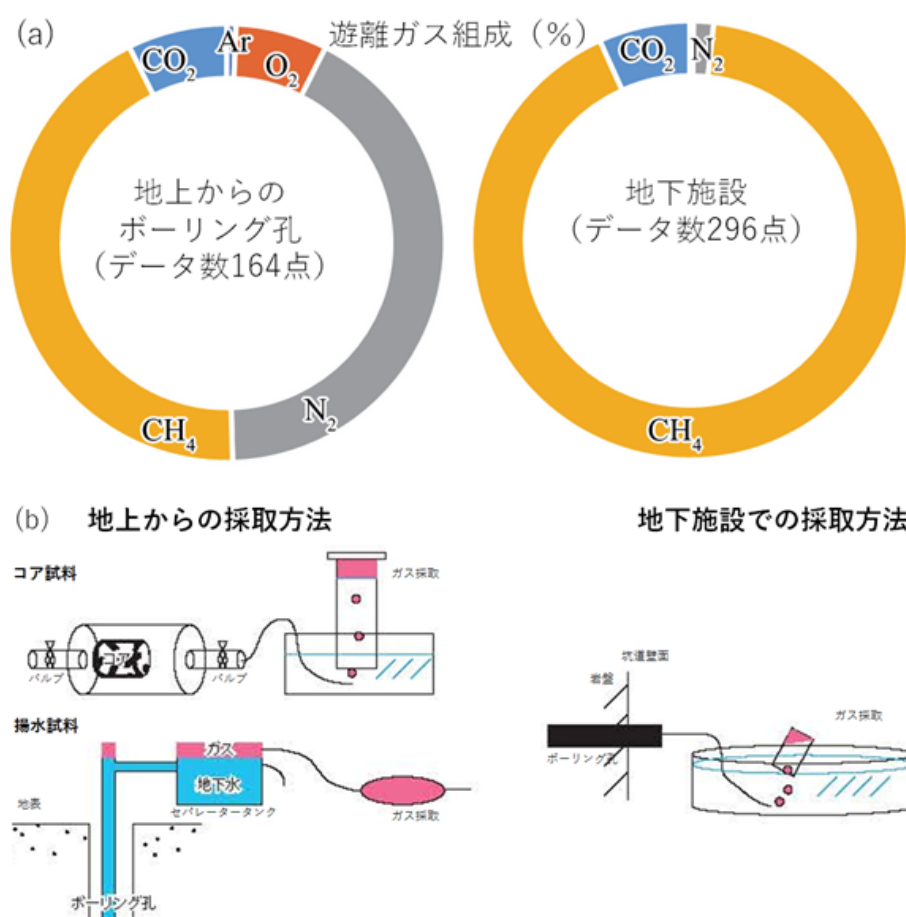


図 28 (a) 遊離ガス組成の対比図と (b) 採取方法の概念図

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程度のコロイドが存在します。平成28年度は、透過型電子顕微鏡<sup>\*25</sup>を用いてコロイドの観察を行い、地下水中のコロイドは、概ね20nm～300nm程度のサイズで、シリカ・カルシウム・マグネシウムなどを含む球状の粒子であることがわかりました。平成29年度は、これらコロイド粒子間に作用する引力と斥力（反発力）の関係をDLVO理論<sup>\*26</sup>に基づき試算し、地下水中でのコロイドの分散・安定性について評価しました。評価の結果、粒子径が100nmより大きい粒子の方が小さい粒子よりも分散・安定性が高いことが示唆されました。なお、今回の試算では粒子の表面電荷をシリカ鉱物で代表させていますが、粒子表面に他の物質（例えば、有機物など）

\*25：観察対象に電子線を当て、対象物を透かして観察するタイプの電子顕微鏡のことです。

\*26：粒子間に働くファンデルワールス引力と電気二重層による反発力を考慮し、粒子の安定性を評価する考え方のことです。この考え方を導出したDerjaguin、Landau、Verwey、Overbeekの4名の名前からDLVO理論と呼ばれています。

が付着していると表面電荷も変わり、コロイドの分散・安定性も変わる可能性があります。今後は、コロイド粒子の表面状態についても詳細な観察・分析を行う予定です。

コロイドとしては、天然の地下水中に存在するものに加え、人工バリアに由来するコロイドも想定されます。例えば、人工バリア材のひとつである緩衝材は、スメクタイトと呼ばれる粘土鉱物と石英などの鉱物から構成されます。地下水の流れが速く、緩衝材の流出現象が起きた場合、スメクタイトがコロイドとして水中に浮遊する可能性も考えられます。そこで、コロイド粒子が凝集を起こし始める臨界凝集濃度<sup>\*27</sup>と地下水中のCaおよびNa濃度との関係から、コロイドとしてのスメクタイトの分散・安定性について予察的に検討しました（図 29）。図 29は、海外産の緩衝材などを対象とし、CaCl<sub>2</sub>およびNaCl溶液を用いてスメクタイトコロイドの臨界凝集濃度について実験的に評価されたものです<sup>(17)</sup>。この図に、幌延の地下施設における深度140m、250mおよび350m調査坑道で採取された声問層・稚内層中の地下水のCaおよびNaの濃度範囲を追記しました。声問層・稚内層中の地下水のCaおよびNa濃度は、スイスのオパリナス粘土質岩やフランスのカロボ・オックスフォーディアン粘土質岩中の地下水と同様に、臨界凝集濃度よりも高いため、水中でのスメクタイトコロイドの分散・安定性は低く、凝集する可能性が示唆されます。なお、この評価では、地下水の流れのない条件を想定しています。今後は、海外と日本の緩衝材に含まれるスメクタイトの表面電荷の違いなども考慮しつつ評価を進めていく予定です。

---

<sup>\*27</sup>：粒子が凝集を起こし始める電解質濃度を臨界凝集濃度と呼びます。水中の粒子は表面電荷を帯びています。粒子の凝集は、粒子の表面電荷と反対符号のイオン（対イオン）の原子価に敏感で、対イオンの原子価が大きくなると臨界凝集濃度は減少します。

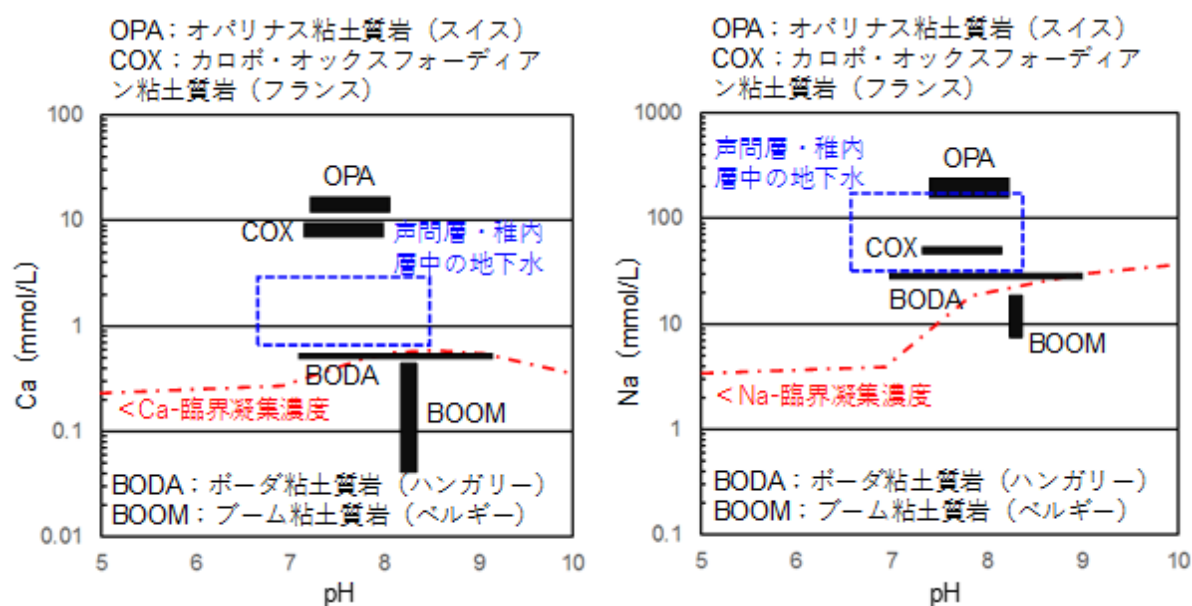


図 29 スメクタイトコロイドの臨界凝集濃度と  
地下水中のCa, Na濃度およびpHとの関係

(Schäferら<sup>(17)</sup>の図をもとに加筆修正)

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28年度の調査により、幌延の地下水中の有機物の大部分は溶存態であると推定されました。平成29年度は、溶存有機物のうち、腐植物質を対象に地表水と地下水での蛍光特性<sup>\*28</sup>を比較するとともに、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も調査しました。調査は、清水川（A7地点；6.1で後述する水質調査地点（図 96参照））で採水された地表水、深度140m調査坑道（WR-V-133.8および07-V140-M01）および深度350m調査坑道（13-350-C01）で採水された地下水を対象にしました。これらの地表水および地下水に溶存する腐植物質の蛍光特性の測定結果を図 30に示します。

\*28：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。

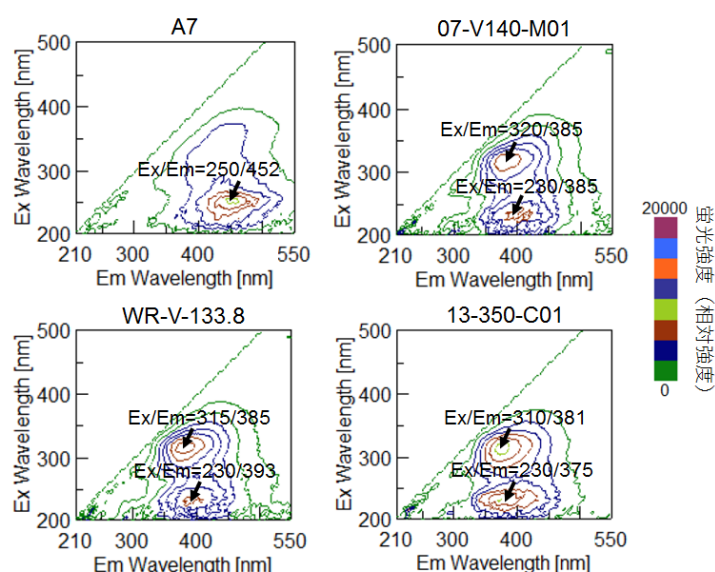


図 30 幌延の地表水・地下水中腐植物質の蛍光特性の測定結果

地表水と地下水の励起波長 (Ex) / 蛍光波長 (Em) \*<sup>29</sup>のピークを比較すると、地表水は250nm / 452nm付近のピークが1つのみですが、地下水は315nm / 380nm付近および230nm / 380nm付近のピークが2つ認められます。このことから、地表水と地下水とでは溶存する腐植物質の分子構造が異なる可能性が示唆されます。一方、深度140mおよび350m調査坑道で採水された地下水では、励起波長 / 蛍光波長のピークの違いは小さく、類似した分子構造であると推察されます。今後は、深度250m調査坑道の地下水についても測定を行い、他深度の地下水中の腐植物質との比較を行う予定です。また、地表と地下水中の腐植物質の比較として、前述した蛍光特性のほかに、分子量や構成成分についても調査しました。地表の腐植物質としては、土壌などから分離・精製された市販されているものを用い、地下水中の腐植物質としては、深度350m調査坑道で採水された地下水から分離・精製されたものを用いました。調査の結果、地表の腐植物質と比べると、地下水中の腐植物質には相対的に分子量が小さいもの（分子量3000より小さいもの）が多いことがわかりました。構成成分については、地表の腐植物質と比べると、地下水中の腐植物質の方が単純な分子構造の有機物からなることも示唆されました。これらの成果は、京都大学・東北大学との共同研究により得られたものです<sup>(18)</sup>。

\*29：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）。

#### (4) 岩盤力学

第1段階で構築した岩盤力学モデル<sup>\*30</sup>の妥当性を評価することを目的として、広範囲な応力状態を把握するための手法の確立、およびこれまでに得られた初期応力状態の妥当性を検討しました。その評価の手法のひとつとして、深度350mの調査坑道で取得した内空変位<sup>\*31</sup>計測結果に基づいて広域的な初期応力状態を推定する手法の信頼性の向上のための検討を行いました。これまでは岩盤中に亀裂は存在しないことを仮定したモデル（均質モデル）をもとに解析を実施しましたが、実際の坑道掘削時には、断層や割れ目などが確認されており、それらの影響を考慮したモデルを作成したうえで（不均質モデル）、初期応力状態を推定することが課題となっていました。そこで、図 31に示すように、これまでの壁面観察により得られた断層や割れ目の分布をもとに、断層を数値解析のモデルに取り込んだうえで、内空変位計測結果に基づく初期応力比の推定を行いました。

図 32に、実際の内空変位の計測値と、不均質モデル、均質モデルの解析により得られた内空変位の値を比較して示します。内空変位計測結果は、割れ目の影響の少ない一般部、割れ目卓越部、断層部の3つに区分して示しています。図 32に示すように、不均質モデルでは、断層部や割れ目卓越部で確認された内空変位の計測値のバラツキを、均質モデルよりも適切に再現できています。次に、図 33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、均質モデル、不均質モデルを用いた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ることから、既存計測結果に調和的であるといえます。

今後は、今回開発した初期応力を推定する手法を坑道の情報化施工へ反映させるための手法について検討を行うとともに、設計時に設定した初期応力状態の妥当性の評価も進めていきます。

---

\*30：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。

\*31：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。

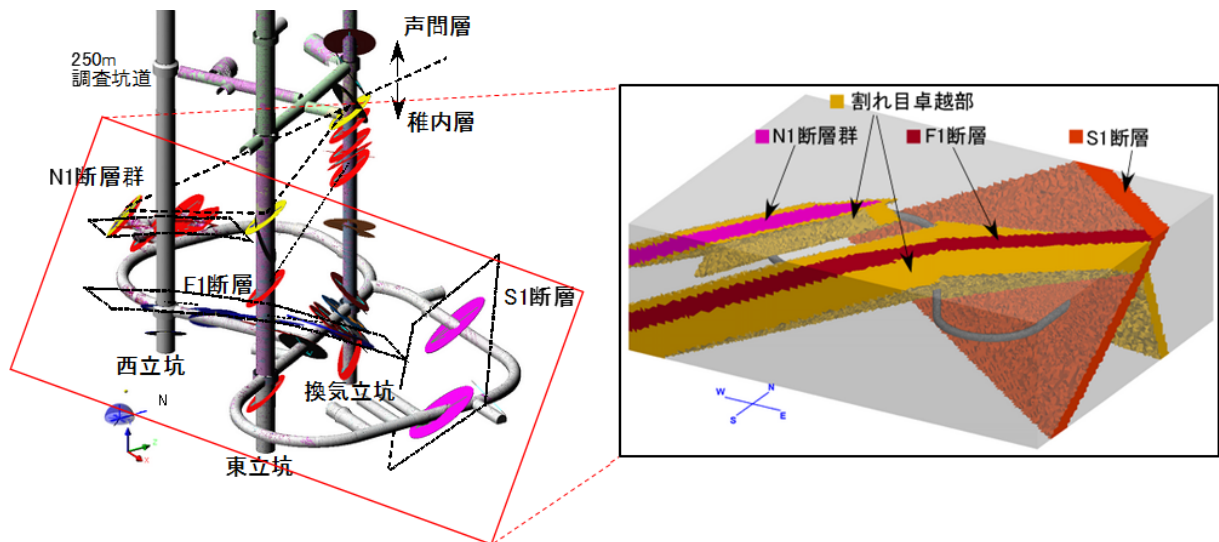


図 31 壁面観察により得られた割れ目や断層の分布に基づく  
数値解析モデルの設定

図左側の円盤は、観察により得られた断層を示します。

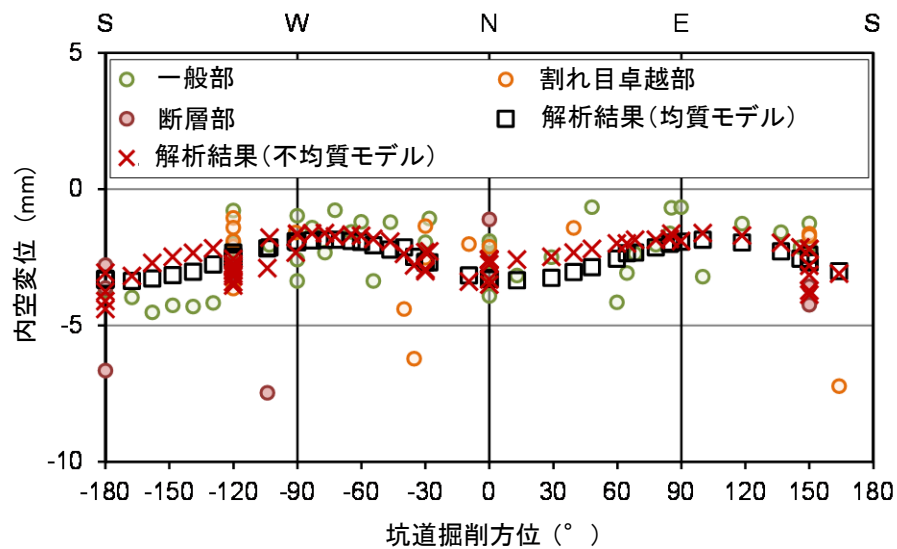
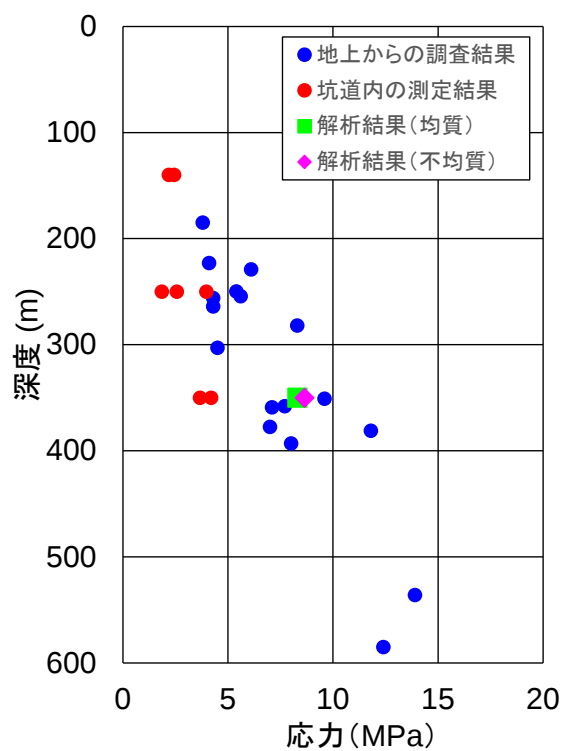
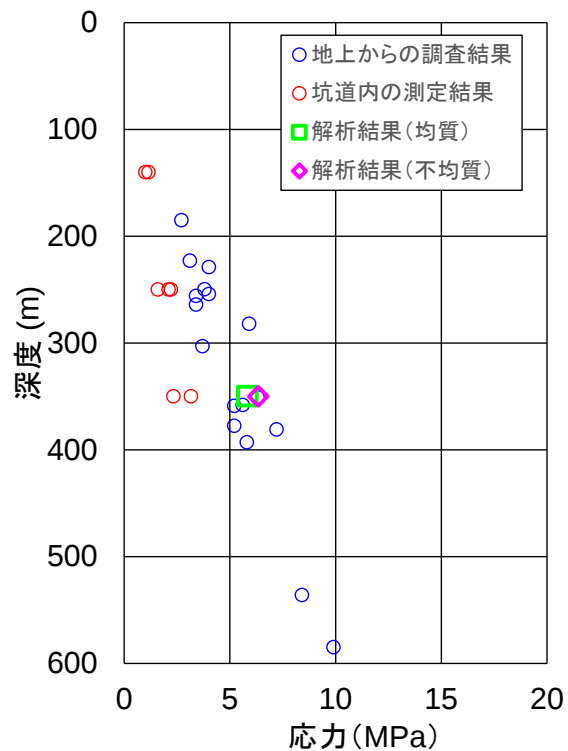


図 32 内空変位の計測結果と解析結果の比較



(a) 最大主応力



(b) 最小主応力

図 33 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

### 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、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、コントロールボーリング<sup>\*32</sup>孔を利用したモニタリング技術の開発、沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発を実施しました。

#### (1) 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<sup>\*33</sup>や地下水の地球化学モデルの構築、構築したモデルや解析結果の妥当性を確認するために利用します。また、得られたデータは、人工バリア性能確認試験における熱－水理－力学－化学連成挙動に関わる解析において、人工バリアの外側境界条件となる周辺岩盤中の水圧や水質条件の設定にも反映します。

地下水の地球化学特性に関する調査技術の開発では、平成 26 年度までに深度 350m 調査坑道に設置した水圧・水質モニタリング装置を用い、平成 29 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 34 に示します。平成 28 年度に引き続き、平成 29 年度も試験坑道掘削後の経時変化の把握や観測装置の長期的な性能確認の一環として 13-350-C05、13-350-C06、13-350-C07、13-350-C08 および 13-350-C09 孔（以下、C05、C06、C07、C08 および C09）の 5 孔を用い、水圧・水質モニタリングを継続しました。C05、C06、C07、C08 および C09 における水圧モニタリングの結果を図 35、図 36、図 37、図 38 および図 39 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。

\*32：ボーリング孔の角度や方向を制御しながら掘削する技術のことをいいます。

\*33：地質構造の分布や形状にあわせて透水係数などの水理学的なデータを与えて、岩盤の水理特性を二次元的または三次元的な図や数式などを用いて表現したものです。

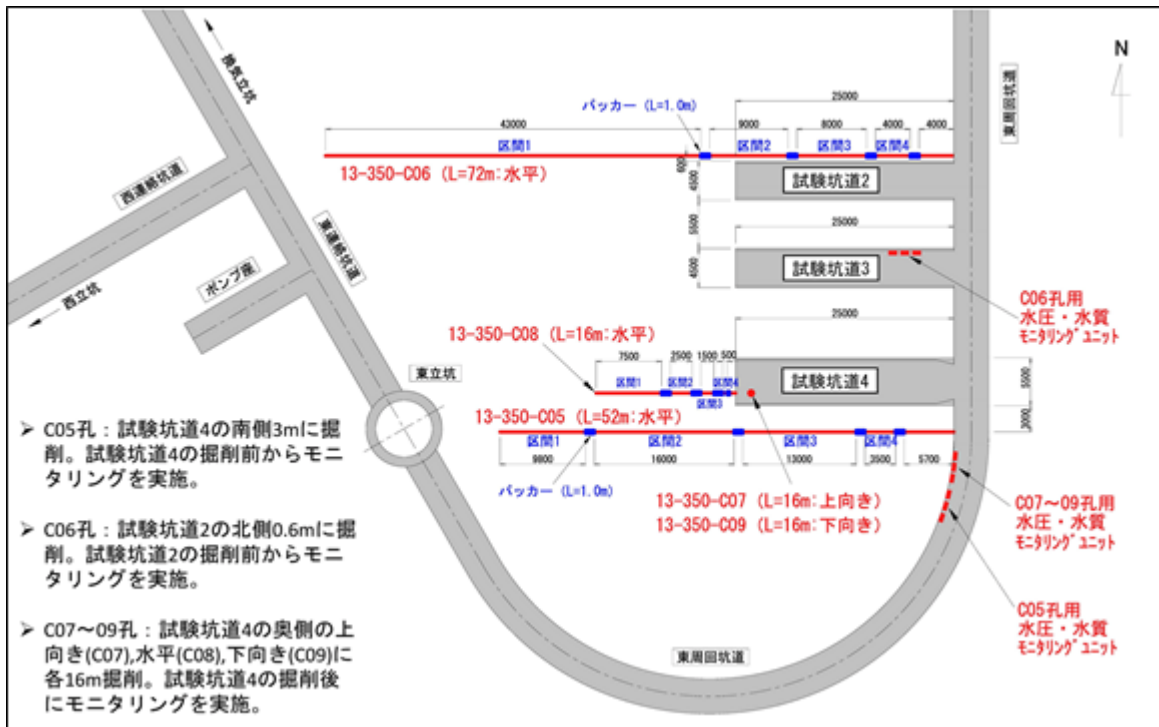
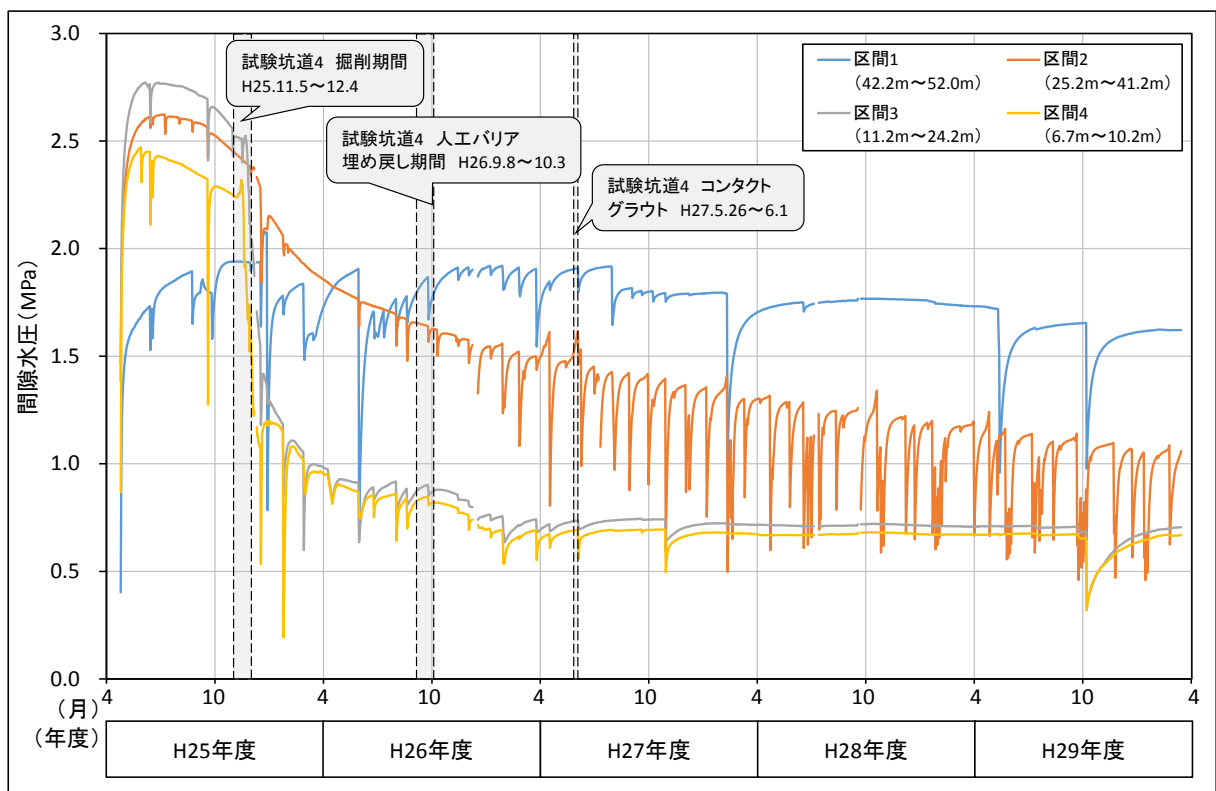


図 34 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所



図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

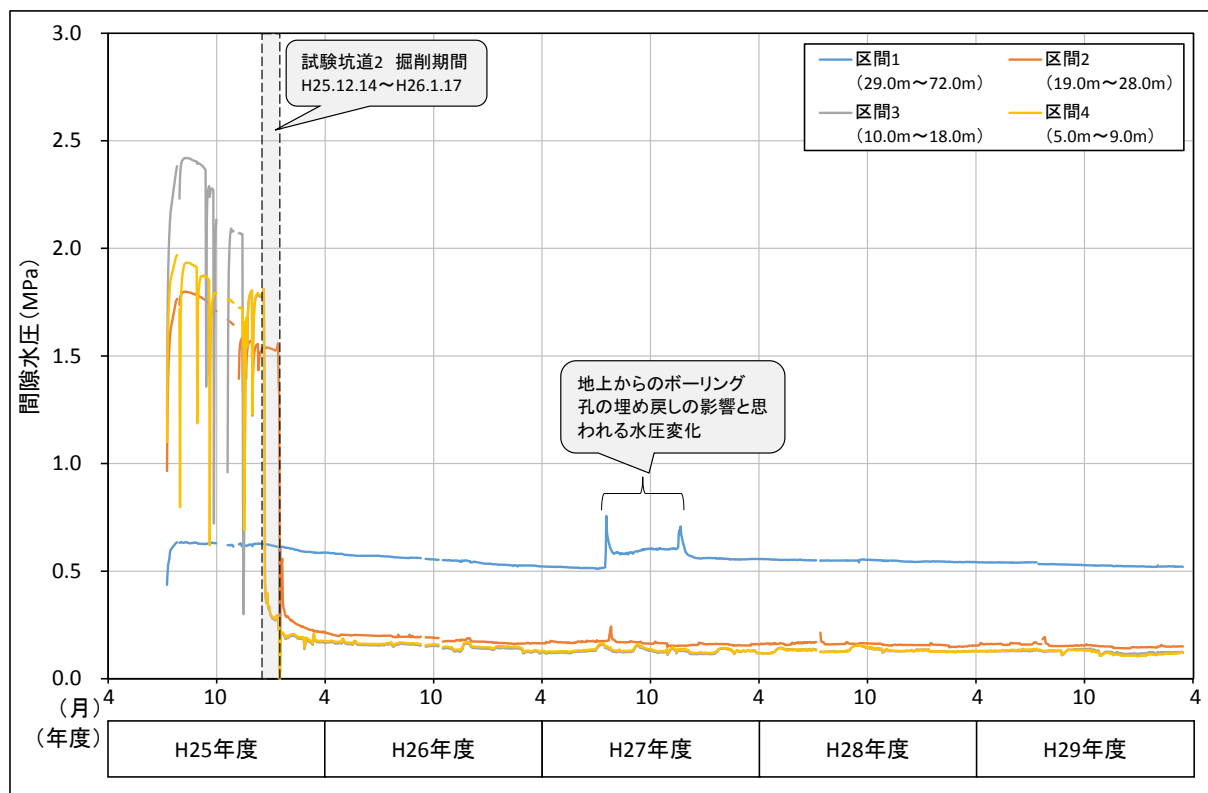


図 36 C06 における水圧モニタリング結果

図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

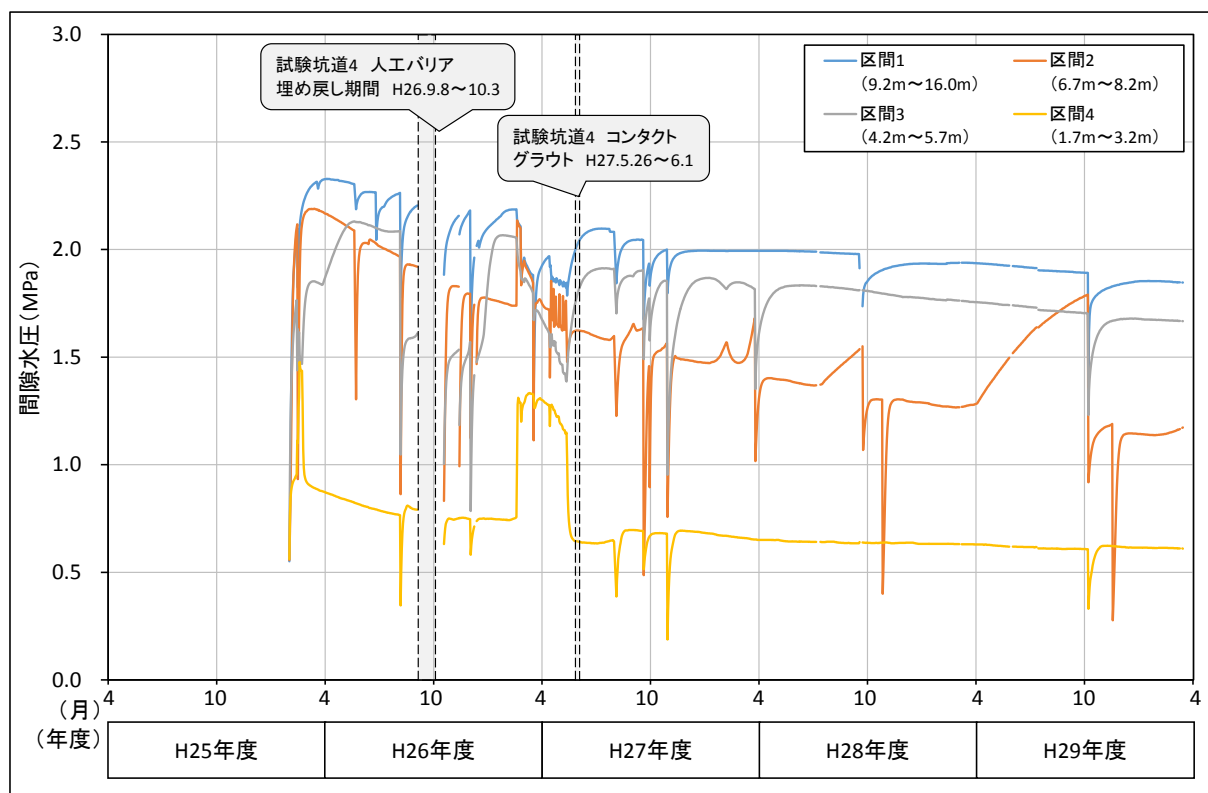


図 37 C07 における水圧モニタリング結果

図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

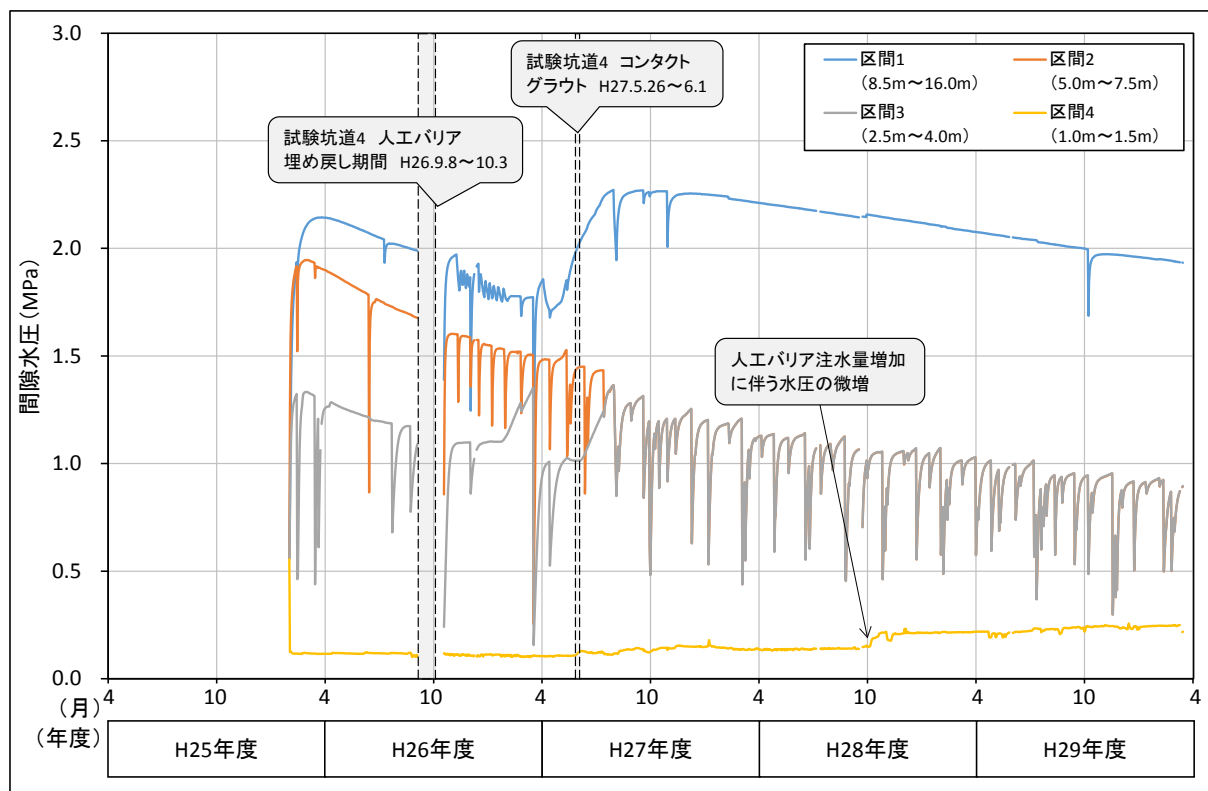


図 38 C08 における水圧モニタリング結果

図中で急激に水圧が変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

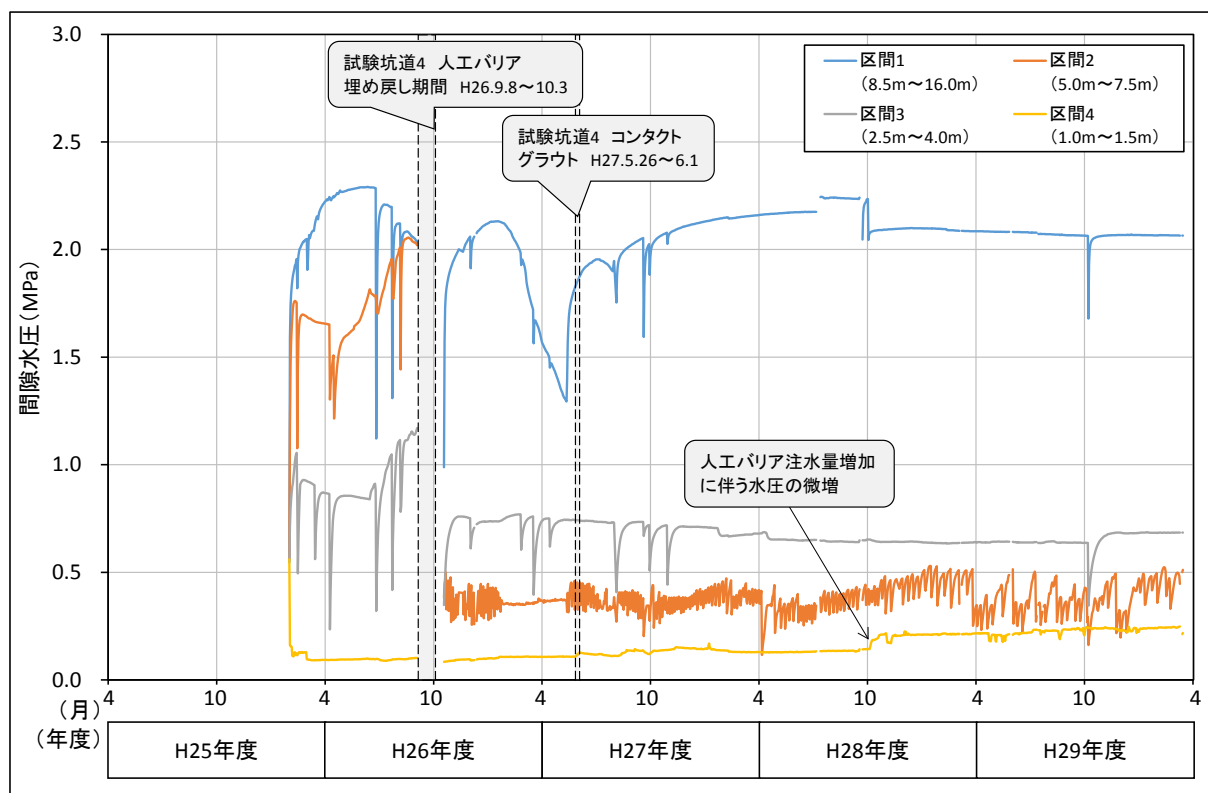


図 39 C09 における水圧モニタリング結果

図中で急激に水圧が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(4.1.1 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) の最浅部となる区間 4 において、水圧の微増が生じており、この傾向は平成 29 年度も継続しています(図 38 および図 39)。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 40)。図 41 には一例として C05 の区間 2 における電気伝導度 (EC)、pH、酸化還元電位 (Eh) の観測結果を示します。C05 では、地下水の EC は 1600 mS/m 程度、pH は 7 程度、Eh は -200~-270mV 程度と平成 28 年度の測定値と同様でした<sup>(19)</sup>。なお、図中の Eh のモニタリング結果において、やや信頼性が劣る可能性のあるデータは、電極表面の汚れや劣化の影響、地下水から遊離したガスの影響等が示唆されたデータになります。

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、これらのメンテナンスも継続して行いました。

これまでの継続的な観測により、試験坑道掘削に伴い、周辺岩盤中の地下水の EC や pH には、顕著な変化は生じておらず、また 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。今後は、水圧・水質モニタリングを継続するとともに、地下水の酸化還元状態を緩衝していると考えられる化学反応についても考察していく予定です。

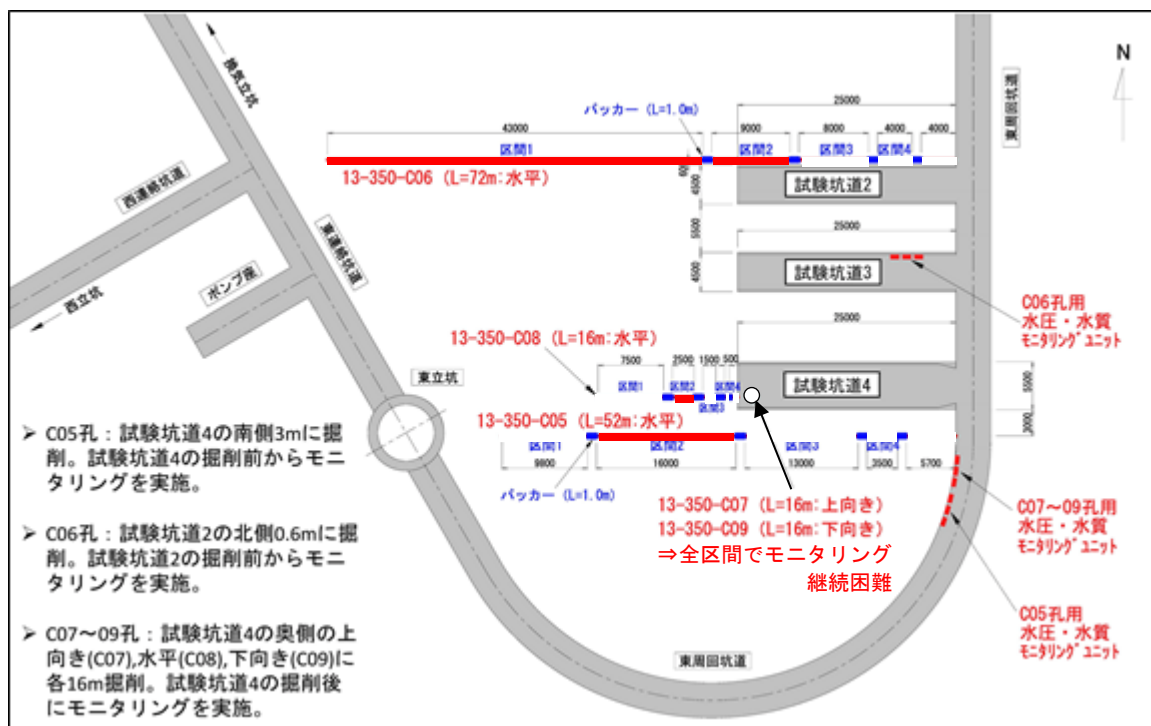
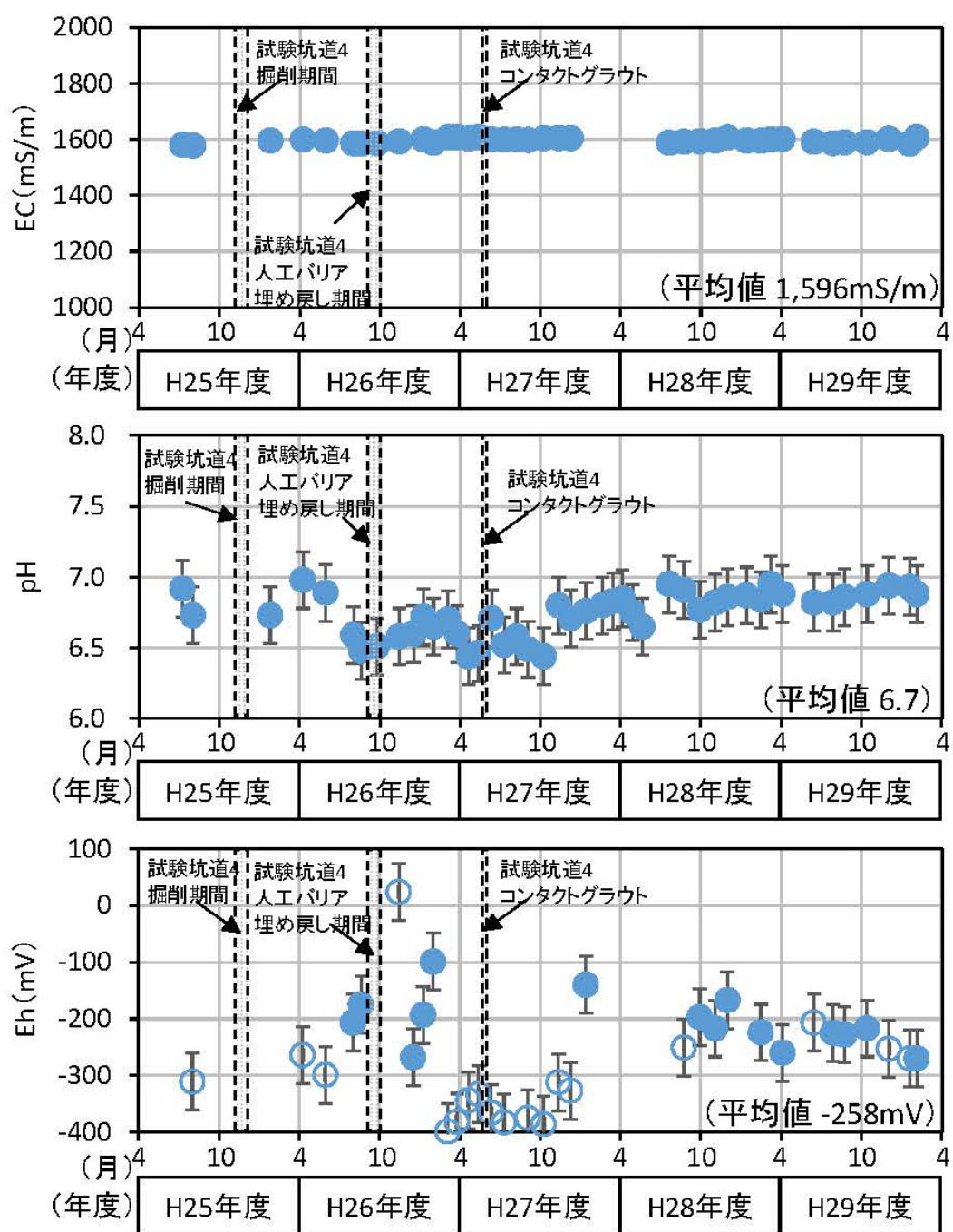


図 40 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における  
水質モニタリング継続可能区間

各ボーリング孔のうち、水質モニタリングが継続可能な区間のみを赤色で示しています。



白抜きのデータ(○)は、やや信頼性が劣る可能性のあるデータ

図 41 C05 の区間 2 における水質モニタリング結果

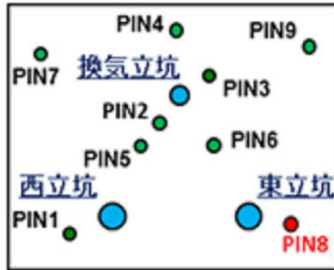
## (2) 坑道掘削の影響調査に関する調査技術の開発

地表面から坑道掘削時の地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺（換気立坑から半径100m以内）に9台、東立坑の深度140mの接続部付近に1台、立坑周辺から1km程度離れたHDB-8孔近傍に1台の高精度傾斜計<sup>\*34</sup>を配置し、坑道掘削に伴う地表付近における岩盤の傾斜の変化を計測しています。平成29年度も、過年度までと同様の方法<sup>(20)</sup>で計測データ（直交する2方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと坑道掘削時の工程との対比を行いました。平成29年度は主要な坑道掘削工事はなく、得られた傾斜データの全体的な傾向として、傾斜量の変化は少ないことが確認されました。坑道掘削の影響を示すため、東立坑近傍にあるPIN8の傾斜量と傾斜方向、および西立坑から北東方向へ約1km離れたHDB-8孔近傍のPIN10の傾斜量を図 42に示します。PIN8では坑道掘削時に顕著な傾斜が計測されました。傾斜方向は、掘削を実施している東および西立坑の方向でした。また、掘削が終了した後は、傾斜変化はほぼありませんでした（図 42(a), (b)）。一方、PIN10（図 42(c)）では、坑道掘削中および掘削終了後も、地表の傾斜はほとんど観測されませんでした。

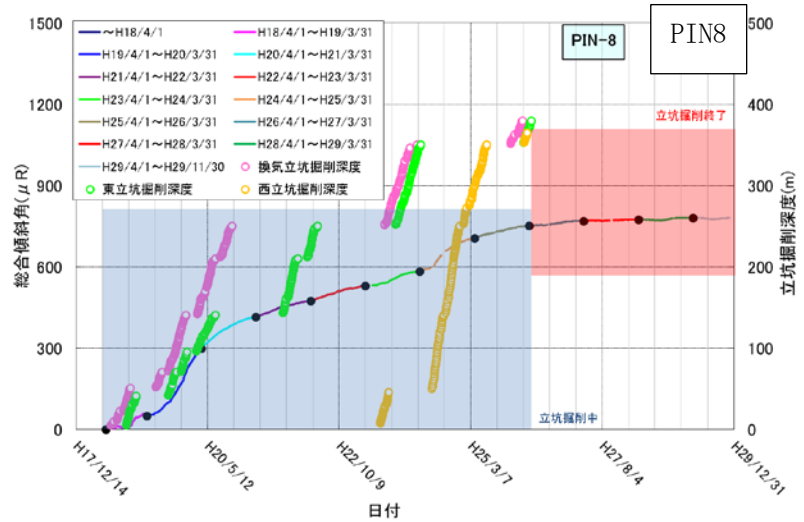
これまでの計測データにより、高精度傾斜計によって地下深部の坑道の掘削に伴う地表付近での傾斜量やその傾斜方向が検知できることを確認しました。今後も引き続き傾斜量および傾斜方向のモニタリングを継続するとともに、地下深部の岩盤の挙動との関係性を検討していきます。

---

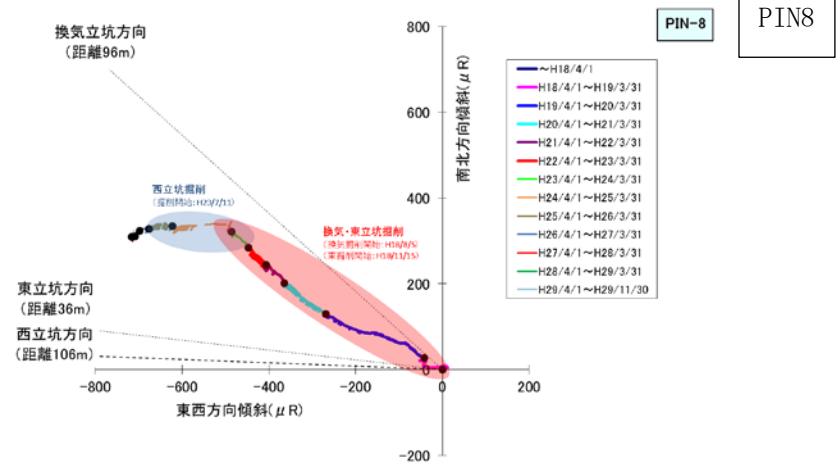
\*34：通常の傾斜計が計測できる角度は約 3,600 分の 1 度であるのに対し、約 1 億分の 6 度の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。



高精度傾斜計の配置



(a) PIN8 (傾斜量)

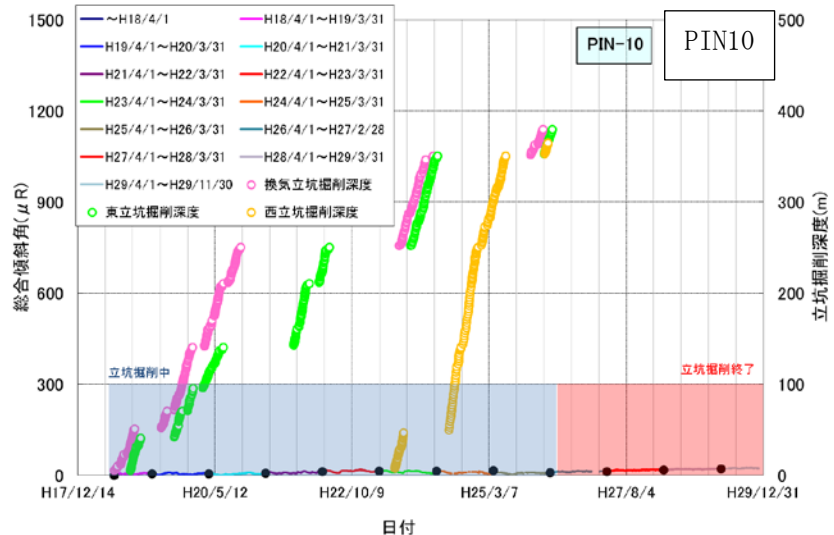


(b) PIN8 (傾斜方向)



高精度傾斜計の配置

国土地理院発行5万分の1地形図を使用



(c) PIN10 (傾斜量)

図 42 傾斜計データの一例

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

### (3) 岩盤の力学特性に関する調査技術の開発

地下坑道の安定性を議論するにあたっては、坑道掘削が岩盤に及ぼす影響やその程度を把握することが重要となります。また、地層処分の安全評価においては、人工バリアを定置する処分孔周辺の割れ目等の損傷の発達や、その経時的な回復挙動について検討する必要があります。このような背景の下、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で掘削した試験孔の周辺岩盤において、弾性波トモグラフィ調査<sup>\*35</sup>を実施しています。図 43に調査レイアウトを、図 44に受振点、発振点の配置と試験坑道4周辺の弾性波の伝播経路を示します。調査は、試験坑道4の掘削前、試験坑道4および試験孔掘削後は年2回継続的に実施しています。

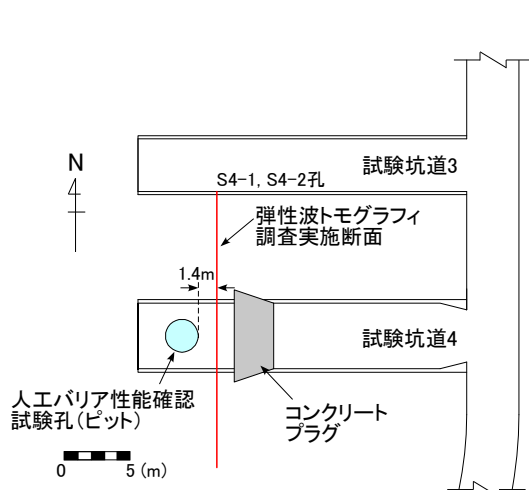


図 43 調査レイアウト

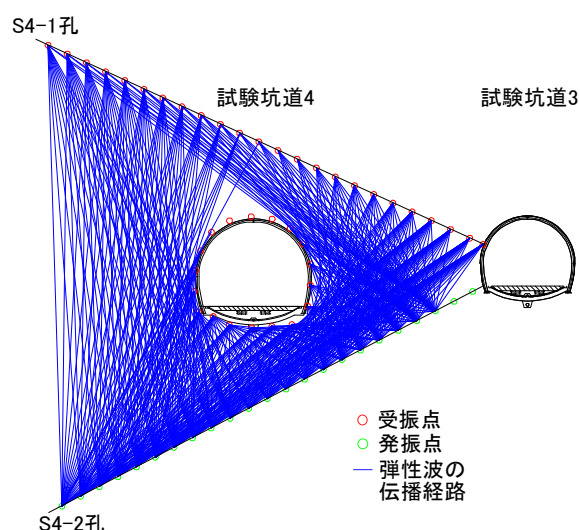


図 44 受発振点配置と弾性波伝播経路

図 45に、弾性波トモグラフィ調査により得られた速度分布の経時変化を示します。図 45(a)に示す試験坑道4の掘削前は、坑道周辺は約1.8～2.0km/sであり、概ね一定な速度分布を示しています。その後、試験坑道4とピットを掘削した後に相当する図 45(b)では、試験坑道4の底盤部およびピット側壁面に相当する領域の弾性波速度が顕著に低下しました。

<sup>\*35</sup>: 岩盤の決められた領域の周囲に発振点と受振器を設置し、発振点で人工的に振動を与えて波を発生させて（弾性波）、いろいろな経路で波が伝わる速度を計測することにより、領域内の岩盤の掘削による損傷範囲や、損傷の程度を確認する調査です。

人工バリア性能確認試験では、ピット内に緩衝材ブロックを設置、坑道部に埋め戻し材を施工した後、2015年1月16日より緩衝材および埋め戻し材へ注水を継続的に行っています<sup>(21)</sup>。注水から46日後から319日後にかけて、図 45(b)で弾性波速度の低下が顕著であった領域において、弾性波速度が徐々に増大する傾向が見られました(図 45(c)、(d))。さらに、注水から503日後、872日後にかけては、弾性波速度に大きな変化は見られなくなりました(図 45(e)、(f))。

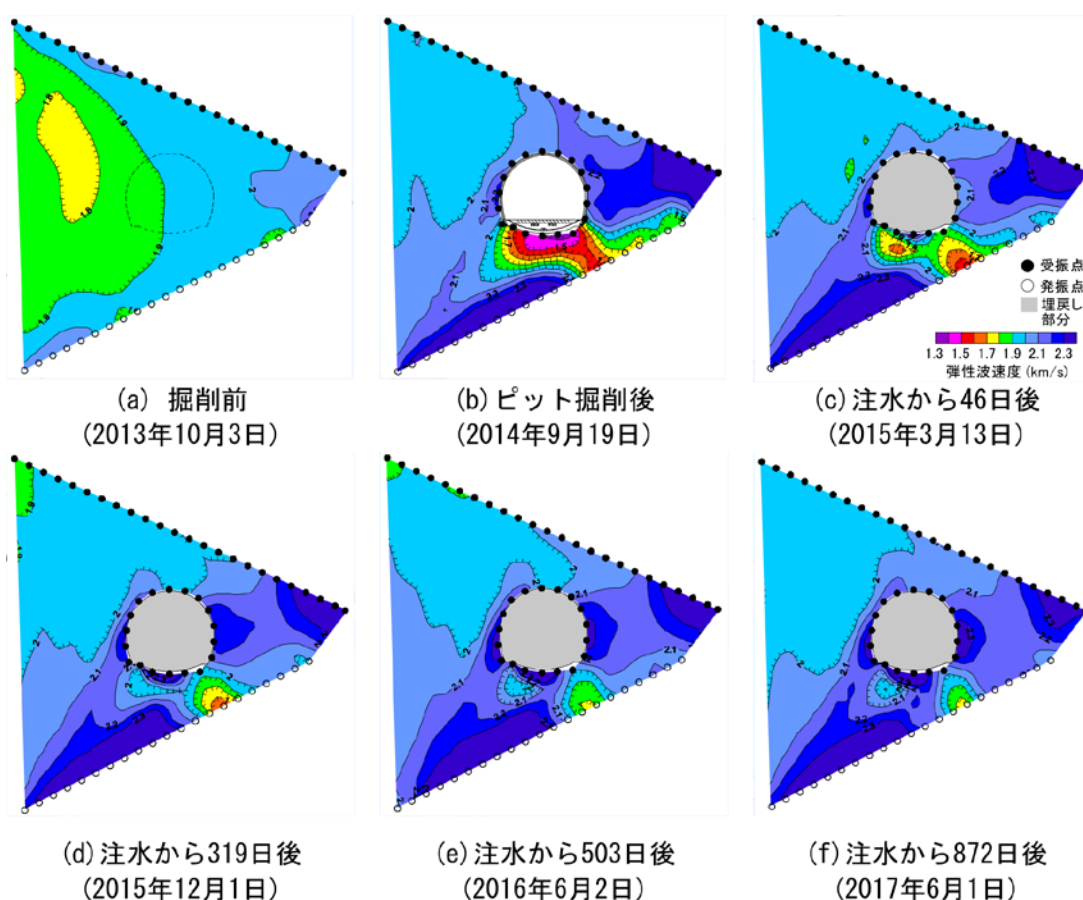


図 45 弾性波トモグラフィ調査結果

人工バリア性能確認試験において試験孔に設置された緩衝材では、注水に伴って経時的に膨潤圧が増大している傾向が捉えられています(図 46)。図 45に示すような底盤部の弾性波速度の回復の原因のひとつとして、掘削時に生じた割れ目が膨潤圧の発生とともに徐々に閉じていったことが推定されます<sup>(22)</sup>。今後、他の試験結果と弾性波トモグラフィ測定結果をあわせて検討し、掘削影響領域の水理・力学的な経時変化について

総合的な取りまとめを行っていきます。

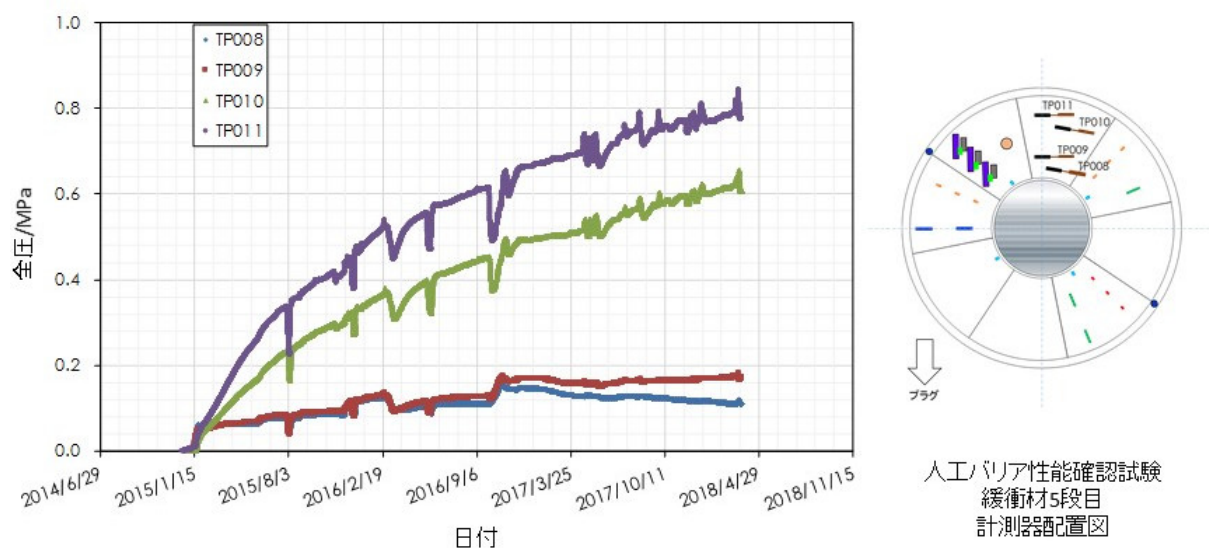


図 46 人工バリア性能確認試験における緩衝材の膨潤圧の経時変化

また、深度250m調査坑道では、平成28年度に引き続き、弾性波トモグラフィ調査および支保工の応力計測を継続して実施しており、岩盤の損傷の進展と支保工の健全性の評価を実施しています<sup>(23)</sup>。結果としては、掘削の損傷は進展しておらず、支保工応力も特段の対策が必要とされる基準値には達していないこと、すなわち、岩盤も支保工も安定した挙動を維持していることを確認しました。

#### (4) コントロールボーリング孔を利用したモニタリング技術の開発

平成29年度は、コントロールボーリング孔を用いたモニタリング技術の開発を終了し、観測設備の撤去作業を行いました（平成29年5月8日～6月30日）。撤去作業の内容としては、無人観測システム（太陽光や風力による自家発電機能を有し、地下水の水圧観測やデータ送信を無人で行える設備）の撤去、コントロールボーリング孔内に設置されていたモニタリングシステムの回収（写真 1）、セメントによるコントロールボーリング孔の埋め戻し、コンクリート基礎・アスファルト舗装の撤去および敷地内の整地を実施しました。これらは、一般財団法人電力中央研究所<sup>\*36</sup>（以下、

\*36：一般財団法人 電力中央研究所は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を実施しています。

電中研)との共同研究の一環として実施しました。また、電中研では、コントロールボーリング孔を利用した調査技術・調査機器開発の事例として、これまでの成果を踏まえたモニタリング技術に関わる内容を集約した手順書を作成しました。



写真 1 コントロールボーリング孔内に設置されていた  
モニタリングシステムの回収作業の様子

#### (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29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）<sup>\*37</sup>において、国立研究開発法人産業技術総合研究所<sup>\*38</sup>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28年度は、DD-1孔の深度約950m、720m、310m

<sup>\*37</sup>：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：沿岸域塩淡水境界・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。

<sup>\*38</sup>：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。

から原位置の地下水を採水しました。平成29年度は、深度約620m、480m、220mから採水し、主要な溶存イオンの分析や年代測定を実施しました。その結果、深度約90mから470mまで分布する更別層の地下水は氷期の降水を起源としていること、深度300m付近には現在の降水の流入が認められること、深度約620m以深の勇知層の地下水は地層の堆積当時に取り込まれた海水を起源とする化石海水であることが明らかとなりつつあります（図 47）。今後はデータを蓄積するとともに、他の地域のデータとあわせて沿岸部の地下水区分の妥当性を検証していく予定です。

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 48）、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います。平成29年度は、下沼地区や開進地区において堆積物の分析を行うための土壌や岩石のサンプリングを実施しました。開進地区からサンプリングした土壌について微化石の分析を行いました。堆積時期のみならず陸成・汽水成・海成の区別にも有効な珪藻の分析を重点的に行いました。分析の結果、全ての試料から豊富な珪藻が得られましたが、段丘の堆積物以外に由来する珪藻の割合が多く、堆積環境の推定が困難なため、他の手法の結果との組み合わせによる評価が必要であることがわかりました。

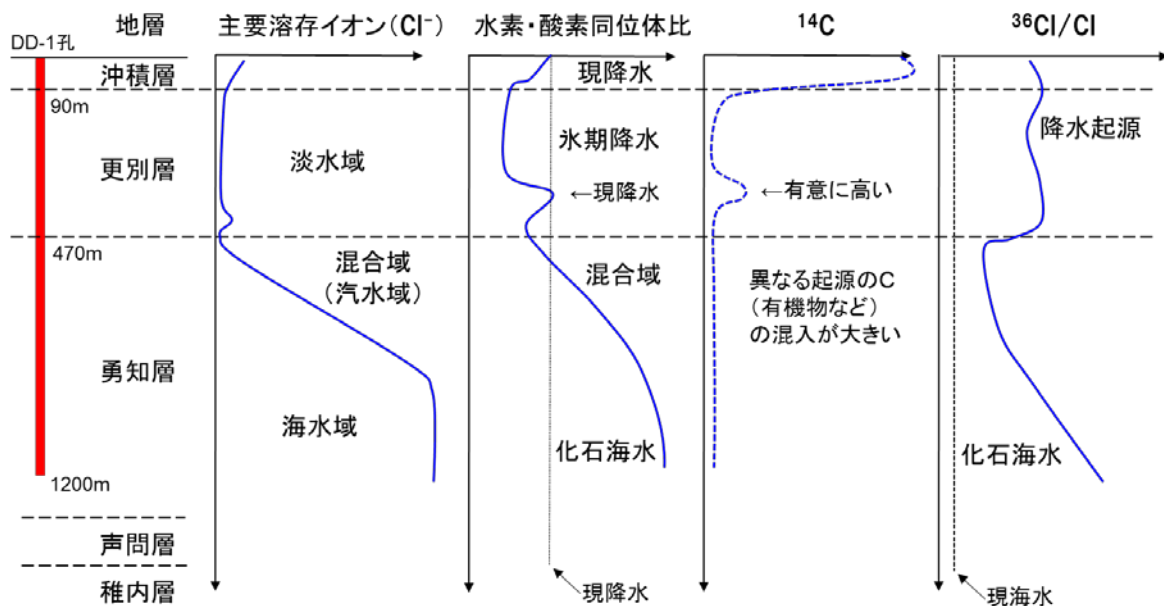
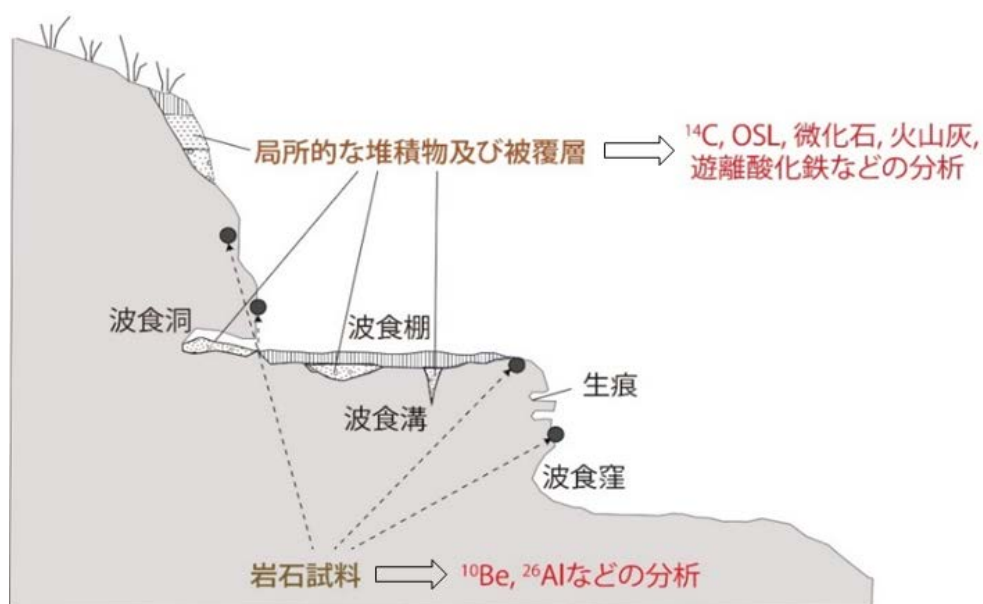


図 47 浜里における採水結果とその解釈



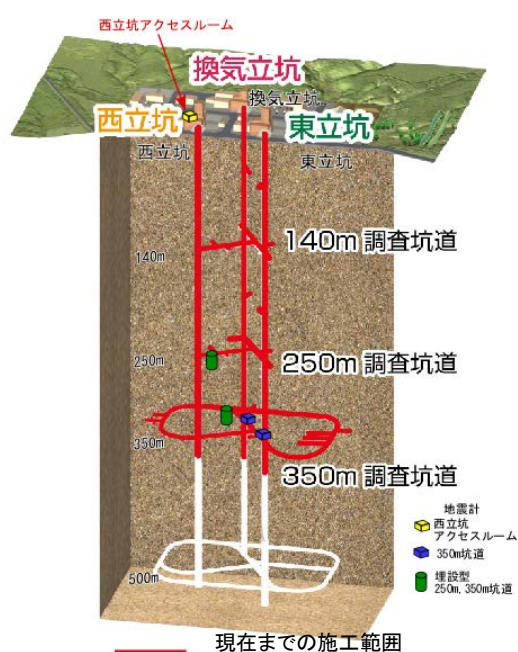
OSL: Optically-Stimulated-Luminescence (光励起ルミネッセンス)  
年代測定法の一つ。放射線照射により物質中に生成された電子の量を、  
可視光や赤外光を照射して光に変え計測して年代の測定を行う方法。

図 48 岩石侵食段丘の概念図と分析手法の例

## 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 49）。気象庁一元化震源データより作成した平成29年4月1日から平成30年3月31日までの幌延深地層研究センター周辺の震央分布を図 50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、表に示すとおり、2回ありました（表 3）。



※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 49 地震計設置位置

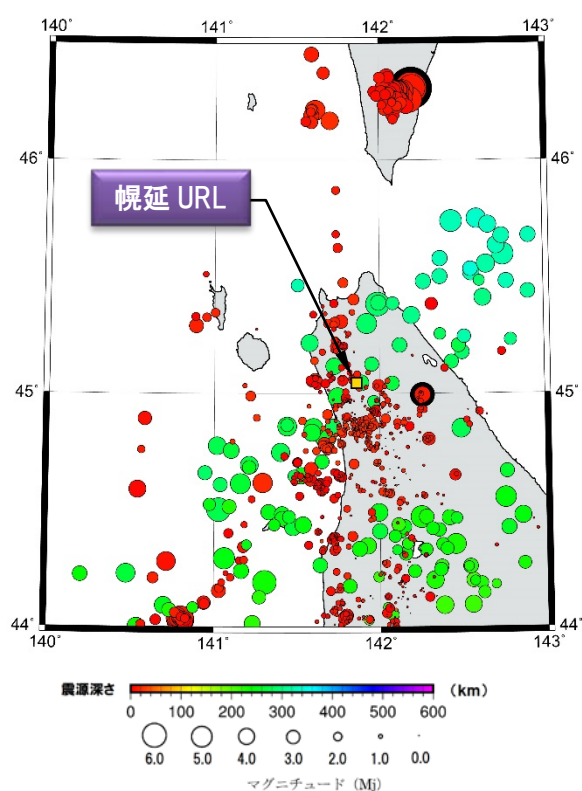


図 50 震央分布

表 3 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※1 | 震度    |      |
|-------------------------|----------|-----------|------------|------|------|-------|------|
|                         |          |           |            |      |      | 幌延町宮園 | 最大震度 |
| 平成29年4月23日 15時37分05.2秒  | サハリン南部付近 | 46° 18.4' | 142° 12.1' | 14km | 5.3  | 2     | 2    |
| 平成29年11月17日 17時43分05.0秒 | 宗谷地方南部   | 44° 59.6' | 142° 15.5' | 12km | 2.7  | 1     | 1    |

（これらの地震の震央は図 50に黒丸で示しています。）

※1：気象庁マグニチュード（地震の規模を表す数値）

### 3.2.2 地震動の振動特性に関する検討

地下施設の耐震設計には地盤物性値が重要な関わりを持っていることから、地下施設内と地表の地震観測データを用いた検討を行いました。

地下施設の地震計は地表から深度350mまでの深度方向に3箇所設置されています(図 49)。平成28年以降に観測された地震のうち、規模の小さい地震に比べ、長周期部分が含まれ、低周波数側の震動特性まで把握できる規模の大きな地震(Mj=5.0以上)の観測データ(表 4)を抽出し、周波数特性について検討した結果、S波(NSおよびEW成分)の平均フーリエスペクトル比(周波数特性の振幅比)のピーク周波数は、概ね0.5~2.0Hzおよび10Hz前後にあることがわかりました。また、既設ボーリング孔(HDB-6孔)で実施したPS検層の層厚と密度をもとに地震観測データを用いて近似解析を行い、地盤物性値のS波速度( $V_s$ )および減衰定数(率)と最適地盤モデルの同定(図 51、表 5)を行いました。この地盤モデルの周波数特性と前述の地震観測データの平均フーリエスペクトルを比較した結果、周波数のピークがほぼ同じ位置にあることがわかりました(図 52)。

地震観測データの振動特性とPS検層結果のS波の減衰定数は周波数特性が整合的なことから、地震動の観測データを検討することにより耐震設計の評価に重要な地盤物性を把握できることがわかりました。

表 4 地震諸元と幌延で取得された地震データ(最大加速度)

| 地震情報                              |        |     | 震源情報 |       |     |       | 最大加速度( $\text{cm/s}^2$ ) |       |       |           |       |       |           |       |       |
|-----------------------------------|--------|-----|------|-------|-----|-------|--------------------------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| 地震発生日時/名称                         | 深さ(km) | Mj  | 緯度   |       | 経度  |       | 地表                       |       |       | GL-250m埋設 |       |       | GL-350m埋設 |       |       |
|                                   |        |     | 度    | 分     | 度   | 分     | NS                       | EW    | UD    | NS        | EW    | UD    | NS        | EW    | UD    |
| 2016/01/12 02:08<br>北海道北西沖の地震     | 264.96 | 6.2 | 44   | 25.84 | 141 | 12.63 | 1.906                    | 1.812 | 1.495 | 0.538     | 0.551 | 1.020 | 0.434     | 0.380 | 0.679 |
| 2016/01/14 12:25<br>浦河沖の地震        | 51.51  | 6.7 | 41   | 58.21 | 142 | 48.07 | 1.534                    | 1.362 | 0.780 | 0.530     | 0.512 | 0.745 | 0.468     | 0.410 | 0.608 |
| 2016/01/30 12:25<br>カムチャッカ半島付近の地震 | 177.00 | 7.2 | 53   | 58.66 | 158 | 32.78 | 0.161                    | 0.138 | 0.138 | 0.027     | 0.034 | 0.057 | 0.050     | 0.029 | 0.055 |
| 2016/09/26 14:13<br>浦河沖の地震        | 29.50  | 5.4 | 41   | 39.10 | 142 | 59.60 | 0.108                    | 0.105 | 0.098 | 0.024     | 0.030 | 0.030 | 0.034     | 0.022 | 0.029 |
| 2017/04/23 15:37<br>サハリン南部の地震     | 14.00  | 5.3 | 46   | 18.48 | 142 | 12.18 | 2.432                    | 3.036 | 1.025 | 0.732     | 0.649 | 0.489 | 0.368     | 0.455 | 0.347 |
| 2017/09/10 17:44<br>青森県東沖の地震      | 47.80  | 5.6 | 41   | 43.26 | 142 | 54.30 | 0.236                    | 0.228 | 0.150 | 0.064     | 0.080 | 0.058 | 0.061     | 0.064 | 0.045 |
| 2017/09/21 01:37<br>三陸沖の地震        | 53.00  | 6.3 | 39   | 02.16 | 140 | 29.34 | 0.083                    | 0.128 | 0.079 | 0.022     | 0.021 | 0.036 | 0.042     | 0.022 | 0.039 |
| 2017/09/27 05:22<br>岩手県北東沖の地震     | 34.70  | 6.1 | 40   | 16.02 | 142 | 27.30 | 0.058                    | 0.060 | 0.070 | 0.041     | 0.040 | 0.036 | 0.041     | 0.033 | 0.035 |

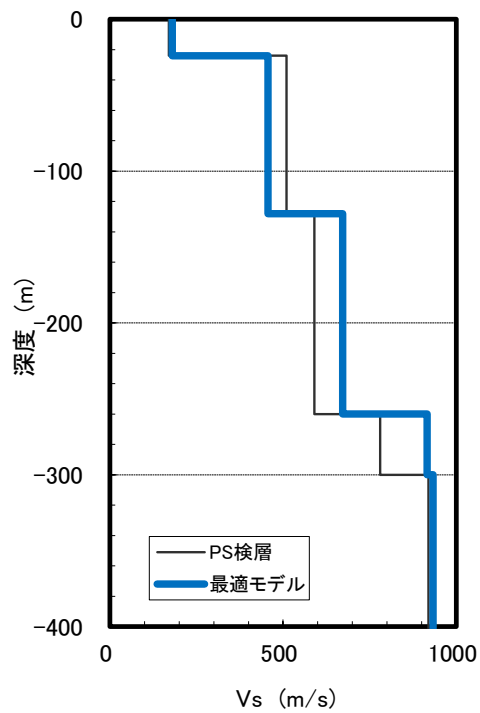


図 51 Vs 同定結果と PS 検層による速度層の比較

表 5 同定された地盤物性値 (S 波速度 (Vs) ・ 減衰率 h)

| 層番号 | 層厚<br>(m) | 密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | PS検層    | 同定結果 (NS・EW成分) |                   |
|-----|-----------|---------------------------|---------|----------------|-------------------|
|     |           |                           | Vs(m/s) | Vs(m/s)        | h                 |
| 1   | 24        | 1.6                       | 170     | 179.8          | $0.075f^{-0.673}$ |
| 2   | 104       | 1.8                       | 510     | 456.6          |                   |
| 3   | 132       | 1.8                       | 590     | 672.1          |                   |
| 4   | 40        | 2.0                       | 780     | 915.7          |                   |
| 5   | ∞         | 2.2                       | 920     | 932.7          |                   |

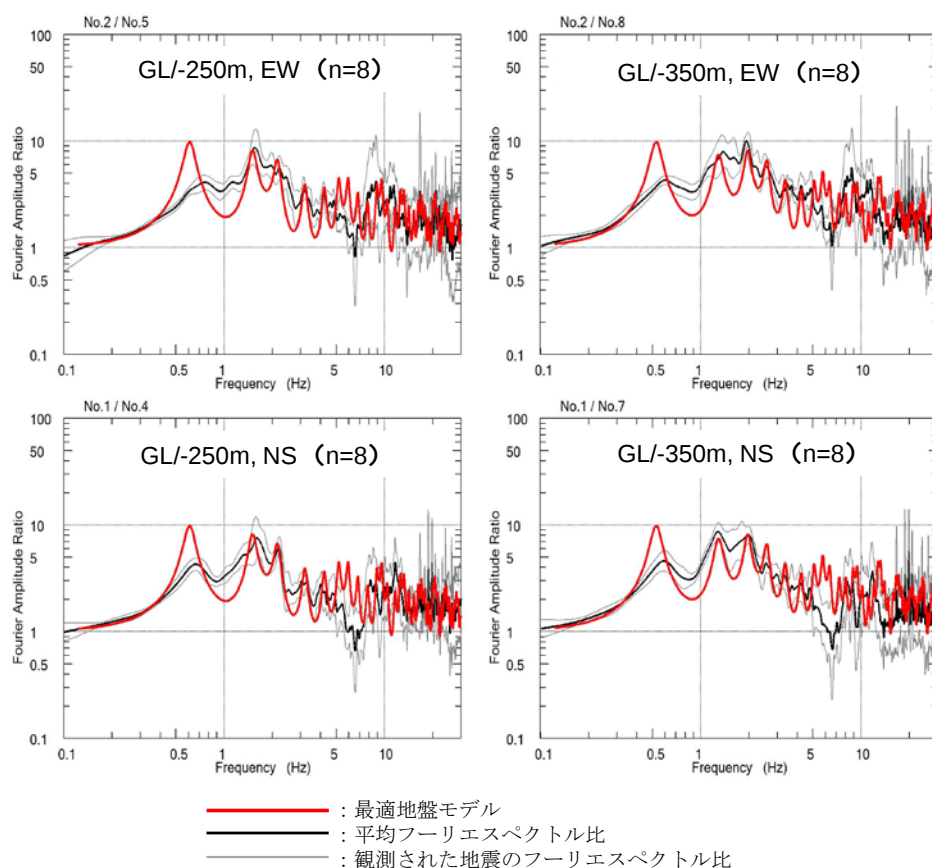


図 52 最適地盤モデルと観測記録による平均フーリエスペクトル比の比較

### 3.2.3 地下施設における湧水対策技術の開発

平成 25 年 2 月に地下施設の深度 350m で一時的な湧水をもたらした粘土質断層の詳細な鉱物学的分析を行いました。同断層は事前にセメント注入による湧水対策を施していましたが、断層内の多量の粘土物質が坑道掘削時に地下水とともに坑道内へと洗い流されてきたため新たな湧水が発生したと考えられています<sup>(24)</sup>。同粘土物質の詳細な顕微鏡観察を行った結果、同粘土物質にはマグマが噴火時に急冷してガラスとなった物質(メルトインクルージョン: 図 53)が多く含まれていることがわかり、それらの化学組成を分析すると、全てのメルトインクルージョンが同一の組成を持つことがわかりました<sup>(25)</sup>。さらに、幌延深地層研究センター周辺のボーリングコアに認められる粘土質断層を調べた結果、これと同一の組成を示すメルトインクルージョンがほかにも複数箇所で見出され、これらの粘土質断層(S1 断層と命名)は幌延深地層研究センター周辺に分布する既知の火山灰層面とほぼ一定の比高を保ちながら(同火山灰層

の 350m 下方)、周辺の数 km の範囲にわたって分布することがわかりました<sup>(25)</sup> (図 54)。これらのことから、このメルトインクルージョンを含む粘土物質は火山ガラスが変質したものであり、同粘土質断層は泥岩が破碎・変質して形成されたのではなく、泥岩中に挟在する火山灰層が変質・変形して形成されたものであることが推定されます<sup>(25)</sup>。今後、メルトインクルージョンに着目することにより、ボーリングコアなどを用いた火山灰層起源の粘土質断層の検出や分布推定が容易に行える可能性が増え、地下坑道の施工の際に注意すべき地質構造の存在や分布が事前に把握可能になることにより、地下坑道等の建設がより効率的になることが期待できます。

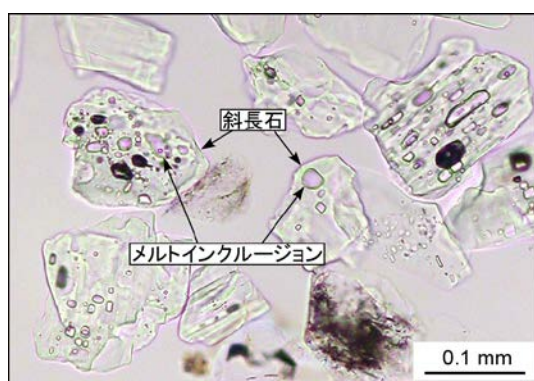


図 53 メルトインクルージョンの顕微鏡写真<sup>(25)</sup>

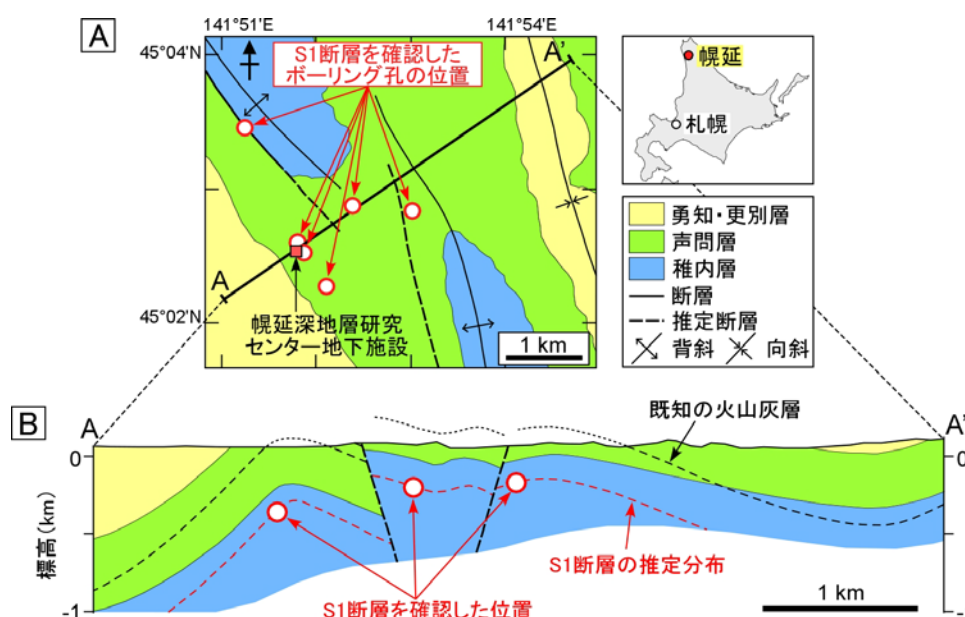


図 54 幌延深地層研究センター地下施設周辺の  
(A) 地質図 (B) 地質断面図<sup>(25)</sup>

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不明で、施工方法も未確立です。このような背景を踏まえて、以下の課題を設定し、溶液型グラウトに関する研究を実施しています<sup>\*39</sup>。

- ・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

平成 29 年度は、平成 28 年度に引き続き室内試験（一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、せん断試験、白濁試験と粘性測定試験等）により溶液型グラウト材の特性データを取得しました。また、新たな配合を検討して、海水条件下での適用性を評価しました。具体的には、平成 28 年度は主成分となるシリカに pH 調整剤と固化促進剤を添加して練混ぜていたもの（海水適用グラウトと呼称）を、平成 29 年度の検討では、現場での施工性向上の観点から固化促進剤を添加せずに練混ぜ水の海水で固化させる配合（海水固化促進グラウトと呼称）を考案し、比較しました。白濁試験や固化時間（ゲルタイム）を設定する配合試験の結果、従来型の配合では海水を練混ぜ水に使用した場合は白濁してしまう可能性があること、海水適用グラウトおよび海水固化促進グラウトではいずれも海水条件で適用可能であることがわかりました（図 55）。試験結果の一例として、粒径の経時変化を測定した結果を図 56 に示します。(a)は海水適用グラウト（練混ぜ水が人工海水で、ゲルタイムが 60 分）、(b)(c)は海水固化促進グラウトの結果です。海水固化促進グラウトの粒径は海水適用グラウトと同様に 10～50 nm の範囲にあり、その状態がゲルタイムの半分の時間程度は継続することが明らかになりました。このことから、適切な条件を設定することによって、海水固化促進グラウトも実用性があるといえます。

---

\*39：本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 29 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。

【従来型グラウト】 海水条件化では適用不可（海水条件下での白濁懸念）

|        |       |          |
|--------|-------|----------|
| Hi シリカ | 固化促進剤 | 練混ぜ水（淡水） |
|--------|-------|----------|

【海水適用グラウト】 海水条件化で適用可

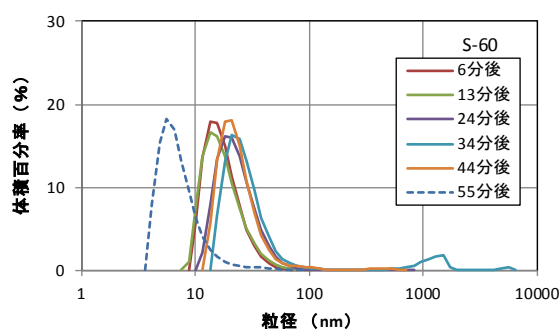
|        |       |       |            |
|--------|-------|-------|------------|
| Hi シリカ | pH調整剤 | 固化促進剤 | 練混ぜ水（人工海水） |
|--------|-------|-------|------------|

【海水固化促進グラウト】 海水条件化で適用可

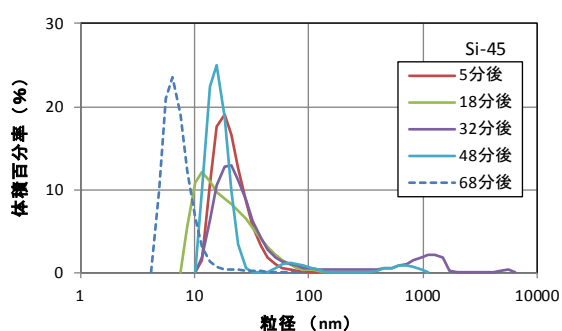
|        |       |            |
|--------|-------|------------|
| Hi シリカ | pH調整剤 | 練混ぜ水（人工海水） |
|--------|-------|------------|

※ Hi シリカ：強化土エンジニアリング社製のコロイダルシリカ

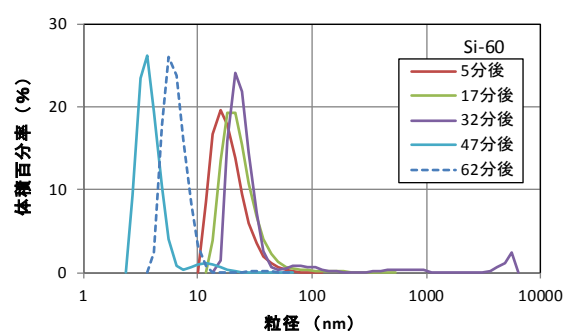
図 55 溶液型グラウトの配合と海水条件での適用性



(a) 海水適用グラウト：S-60（シリカ濃度 60%）



(b) 海水固化促進グラウト  
Si-45（シリカ濃度 45%）



(c) 海水固化促進グラウト  
Si-60（シリカ濃度 60%）

図 56 溶液型グラウトの固化試験結果

### 3.3 地質環境の長期安定性に関する研究

#### 3.3.1 地質環境の長期的変遷に関する研究

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。

平成 29 年度は、約 100 万年前の地層の最大埋没時における地下水の pH を推定し、現在の地下水の pH と比較することで、長期的な地質環境の変遷に伴う地下水の pH の変動幅について考察しました。

現在の地下水の pH は、地下施設の掘削による水圧低下に伴う二酸化炭素の脱ガスの影響を受けています。地下施設の掘削前の地下水圧における溶存二酸化炭素量を計算し、現在の地下水中の溶存二酸化炭素量との差から、脱ガスにより失われた二酸化炭素量を求め、これを地下水中に戻すことによる地下水の pH の変化を計算しました。計算手順を表 6 に示します。その結果、補正された pH は 6.6～7.2 程度となります（図 57）。地質環境の長期的変遷を考慮する場合、過去の地下水と現在の地下水では、地層の最大埋没時における温度や水圧などが異なるため、これらの影響を考慮しつつ、二酸化炭素の脱ガスの影響を評価することが必要です。稚内層と声問層の地層境界の最大埋没深度を 1000 m とした場合、温度や水圧は、各々、約 45℃および約 10 MPa と推定されます。これらに基づき、表 6 の計算手順にしたがい過去の地下水の pH を推定すると、6.5～7.1 程度となり（図 57）、二酸化炭素の脱ガスによる地下水の pH への影響は小さいことがわかりました。

今回の計算に用いたデータおよび計算結果の中で、現在の地下水の pH の最大値は 7.3 であり、最大埋没時における地下水の pH の最小値が 6.5 であったことから、長期的な地質環境の変遷に伴う地下水の pH の変動幅は、6.5～7.3 であると推定されました。このような手法は、地下水が溶存ガスで飽和している場合、将来の地質環境の変化に伴う地下水の pH の推定にも利用できると考えられます。

表 6 pH に対する二酸化炭素の脱ガス影響の計算手順

| 計算<br>ステップ | 計算内容                                | 計算に用いるデータ                                               |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| ①          | 地球化学モデリングソフトウェアによる脱ガス後の溶存二酸化炭素濃度の計算 | 脱ガス後の全炭酸濃度、<br>地下水データ (pH、Eh、水質、温度)                     |
| ②          | 脱ガス前後のヘンリー定数 (気体の溶解度) の計算           | 脱ガス前後の温度、<br>地下水の塩分濃度、<br>各ガス種の25℃の純水におけるヘンリー定数         |
| ③          | 脱ガス後の溶存ガス分圧、脱ガス前後の飽和水蒸気圧の計算         | 脱ガス後の各溶存ガス濃度、<br>各ガス種のヘンリー定数、<br>脱ガス前後の温度               |
| ④          | 脱ガス前の溶存二酸化炭素濃度、溶存メタン濃度の計算           | 脱ガス後の各溶存ガス濃度、<br>脱ガス前の各ガス種のヘンリー定数、<br>全ガス圧、脱ガス前後の飽和水蒸気圧 |
| ⑤          | 地球化学モデリングソフトウェアによる脱ガス前の地下水のpHの計算    | 脱ガス前の温度、<br>各溶存ガス濃度、<br>脱ガス後の地下水データ (pH、Eh、水質)          |

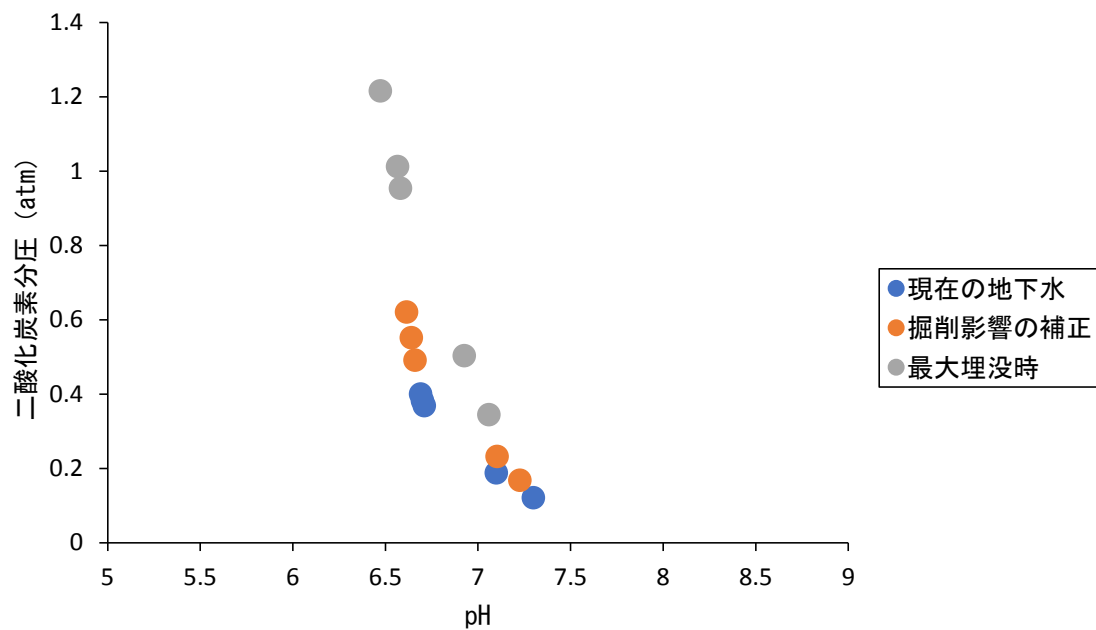


図 57 二酸化炭素分圧と地下水の pH の関係

また、地形、地質構造や地下水の流れ、水質などの長期的な変化を理解するための調査からモデル化解析・評価にいたる一連の方法論の体系化を進めました。平成28年度は、地質構造モデル（地形モデルおよび地質モデル）や水理地質構造モデルを構築し、幌延の沿岸域を含む広域での地下水流動解析を行い、地下水流動への影響が大きい（不確実性の大きい）要因を抽出しました。また、抽出された不確実性要因をもとに、長期的な地下水流動への影響についても解析的に評価しました。平成29年度は、平成28年度の結果も踏まえつつ、長期的な地下水流動の評価手法の妥当性について検討するため、地下水の水質（塩分濃度）分布に関わる実測値と解析結果との比較を試みました<sup>(26)</sup>。

塩分濃度の分布に関わるモデル化・解析は、これまでに構築した約100万年前（モデル化領域東部の宗谷丘陵が陸化）、約33万年前（宗谷丘陵の西方が陸化）および現在の三次元地形・地質モデル<sup>(27)</sup>をベースに、それらの時代間の地形・地質の変化を補間して約100万年前～現在までの三次元水理地質構造モデルを構築し、100万年スケールの気候・海水準変動（涵養量、海水準の変化）を考慮した数値解析により行いました（図 58）。

数値解析では、解析により推定された地下水の滞留時間とボーリング調査で得られた地下水中の<sup>36</sup>Cl濃度などに基づく地下水年代を比較して、その整合性を確認しました。また、解析で推定された塩分濃度分布と地下水中の塩化物イオン濃度を比較し、その整合性も確認しました。これら一連の手順を図式化したものを図 59に示します。

図 59に示すように、数値解析結果（地下水の滞留時間と塩分濃度分布）と地下水年代および塩化物イオン濃度に整合性が得られない場合、モデルの更新を繰り返し、地下水年代および塩化物イオン濃度と整合する条件を検討し、塩分濃度の長期的な変動性を推定しました。これら一連の検討の結果、地下施設周辺では、解析の開始時間（100万年前）の塩分濃度（初期濃度）を10,000ppmとした場合に、解析結果と実測値が整合することがわかりました（図 60）。この初期濃度は現在の海水の1/2の塩分濃度に相当し、既存の解釈（堆積初期から埋没時にシリカ鉱物からの脱水などにより塩分濃度が希釈）<sup>(28)(29)</sup>と整合します。このことから、地下水の塩分濃度分布の変動性の評価は、地質環境の長期的な変遷を考慮した地下

水流動の評価手法の妥当性を傍証するうえで有効であると考えられます。

今後も、引き続き、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整備を図っていきます。

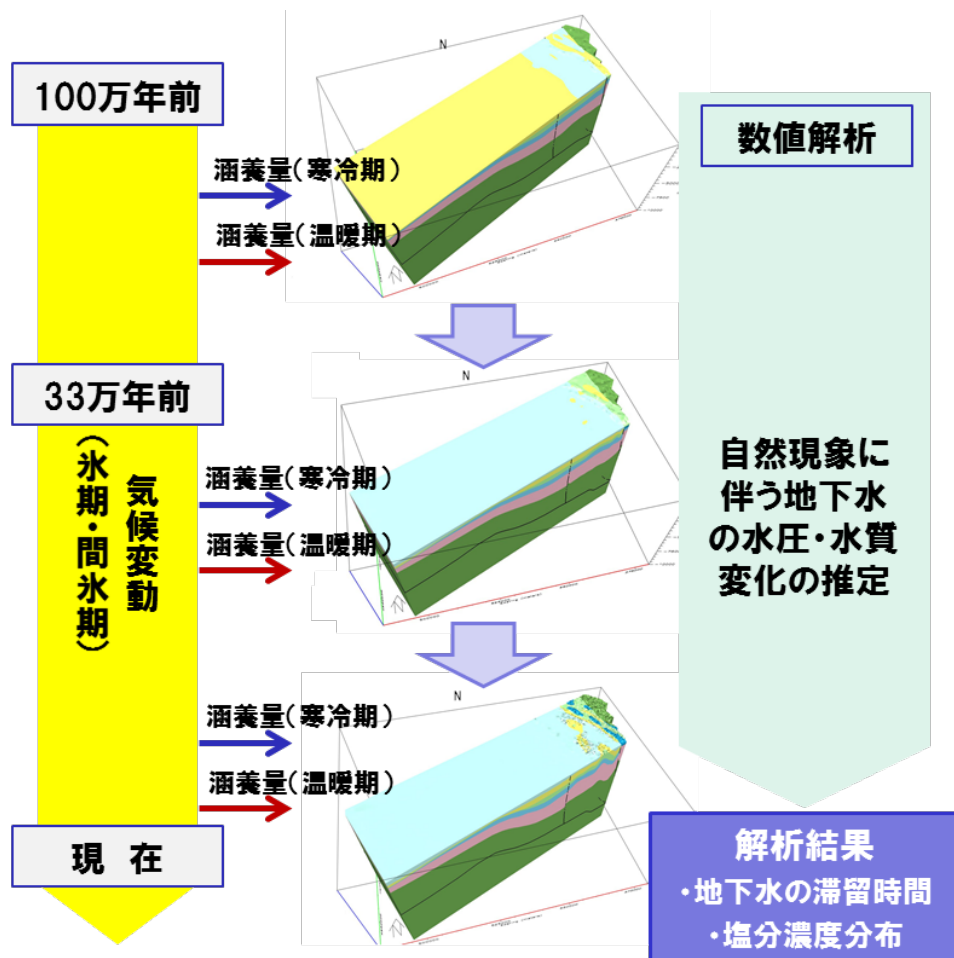


図 58 長期的な自然現象の変化を連続的に考慮した解析のイメージ

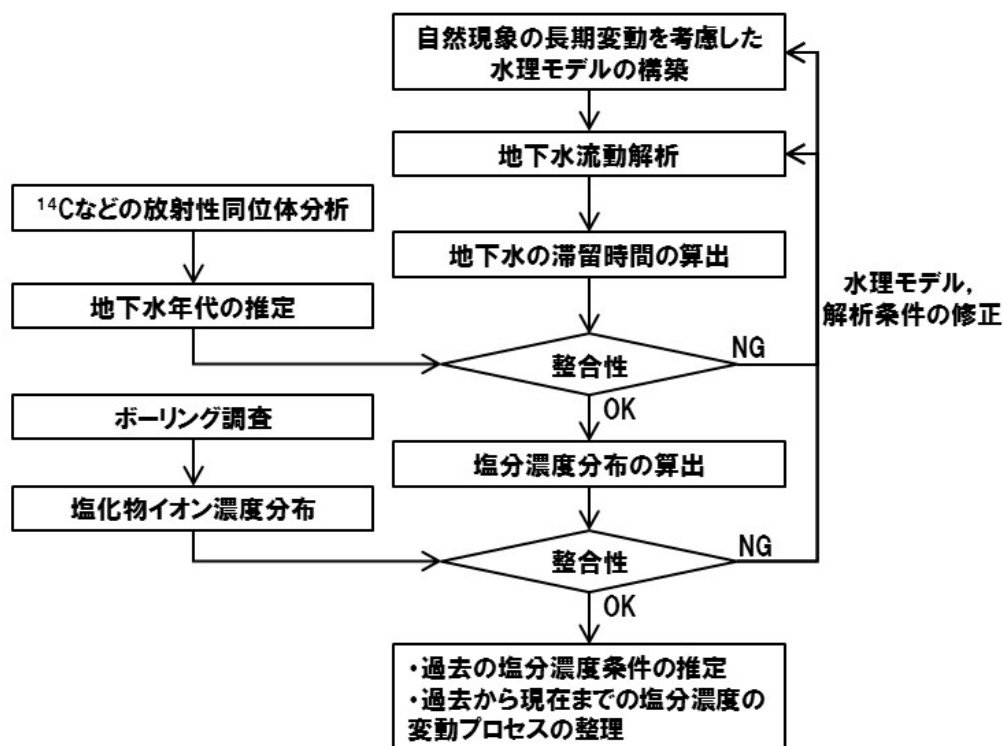
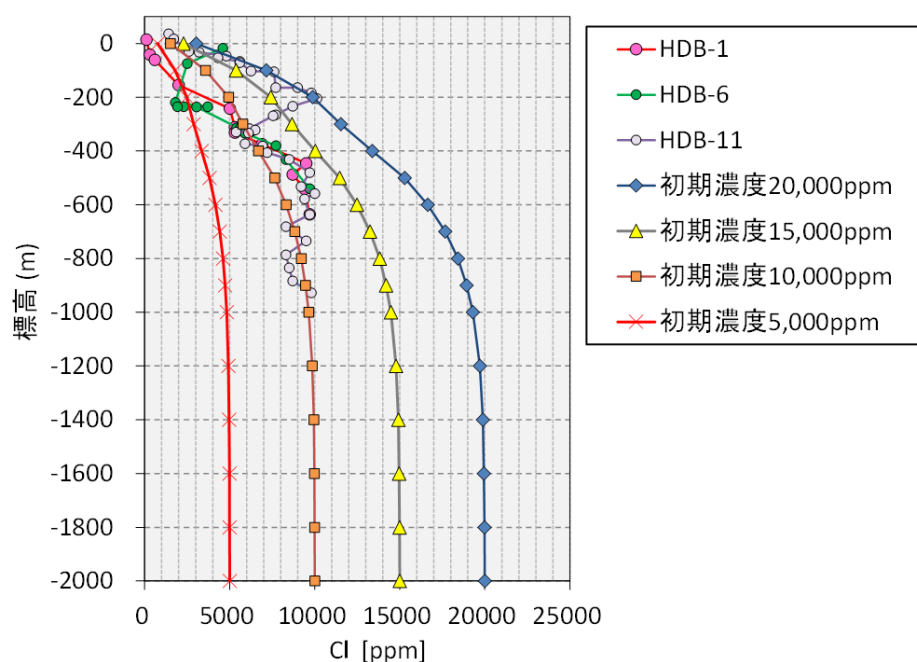


図 59 塩分濃度の長期的な変動性を推定するためのアプローチ



※初期濃度: 100万年前における地下水中の塩化物イオン濃度

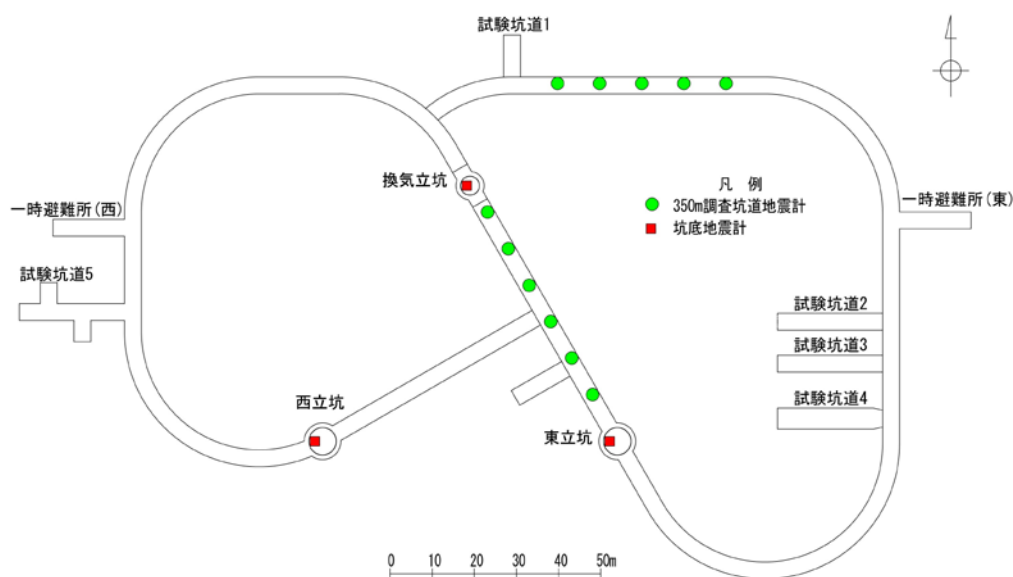
図 60 数値解析の結果

異なる初期濃度による解析結果とボーリング孔での塩化物イオン濃度の実測値の比較

### 3.3.2 地震研究

平成29年度は、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その長期的な変化の大きさや変化した時期の推定結果を検証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28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29年度中、震度1以上に相当する地震を観測した回数は3回(幌延町宮園では2回)あり、そのうち最も大きいものは震度2に相当しました(表 3 参照)。

また、地下施設では、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の一環として、断層や割れ目の位置、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 61)。

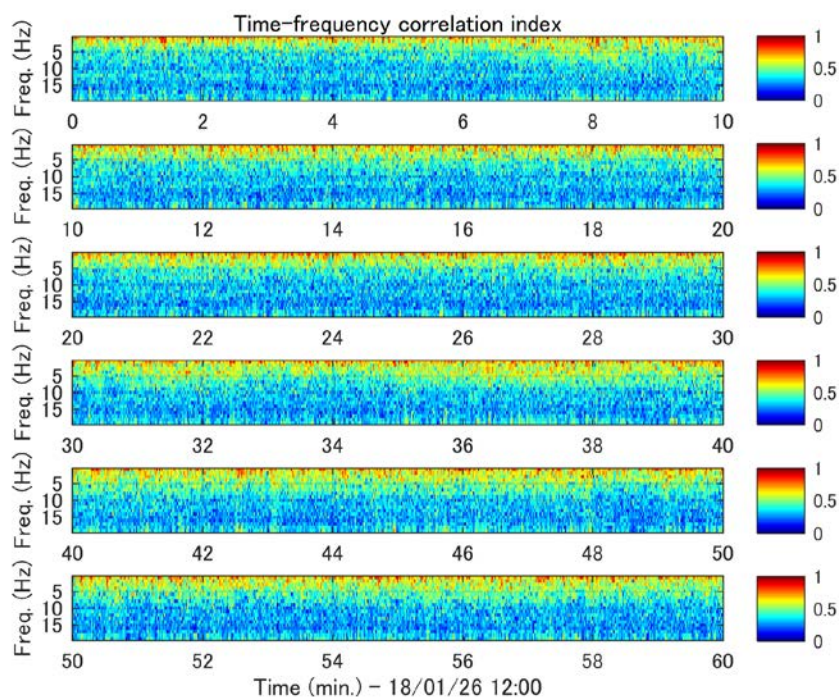


深度 350m 調査坑道 平面図

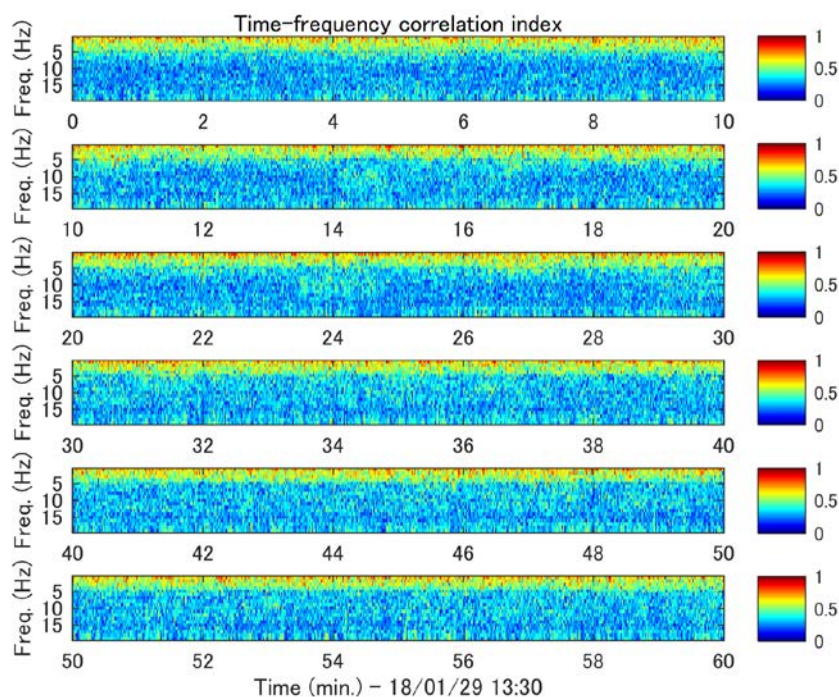
図 61 地下施設に設置した地震計

平成29年度末に水圧擾乱試験(3.1.1(2)参照)が2回実施されたことから、水圧擾乱試験によって発生するせん断変形の応答について、全ての地震計(3成分)の観測データを用いた予察的解析を行いました(図 62)。1回目と2回目の試験時間帯と試験が行われていない時間帯で振動の相関性に関する解析を行いました。試験時間帯(図 62(a)(b))では、全ての時間において低周波数帯域(～5Hz)で高い相関指数値を示し、試験が行

われていない時間帯（図 62(c)）では、試験時間帯と比べて相関指数値が低いことがわかります。

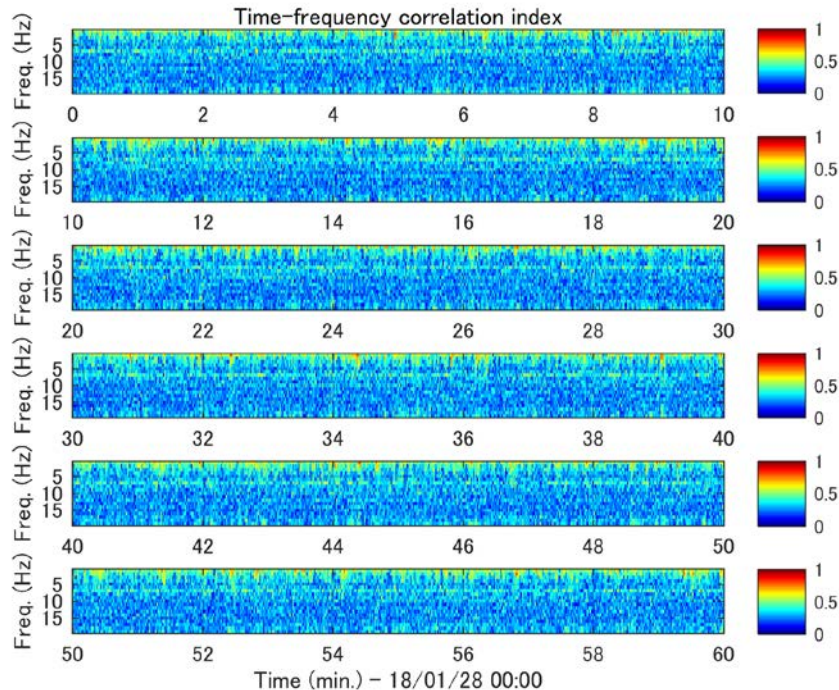


(a) 1回目の水圧擾乱試験中（1/26 12:00から1時間）の相関指標値



(b) 2回目の水圧擾乱試験中（1/29 13:30から1時間）の相関指標値

（次ページに続く）



(c) 水圧擾乱試験前（1/28 00:00から1時間）の相関指標値

縦軸：周波数 (Hz)、横軸：時間 (分)、カラーバー：相関指数値

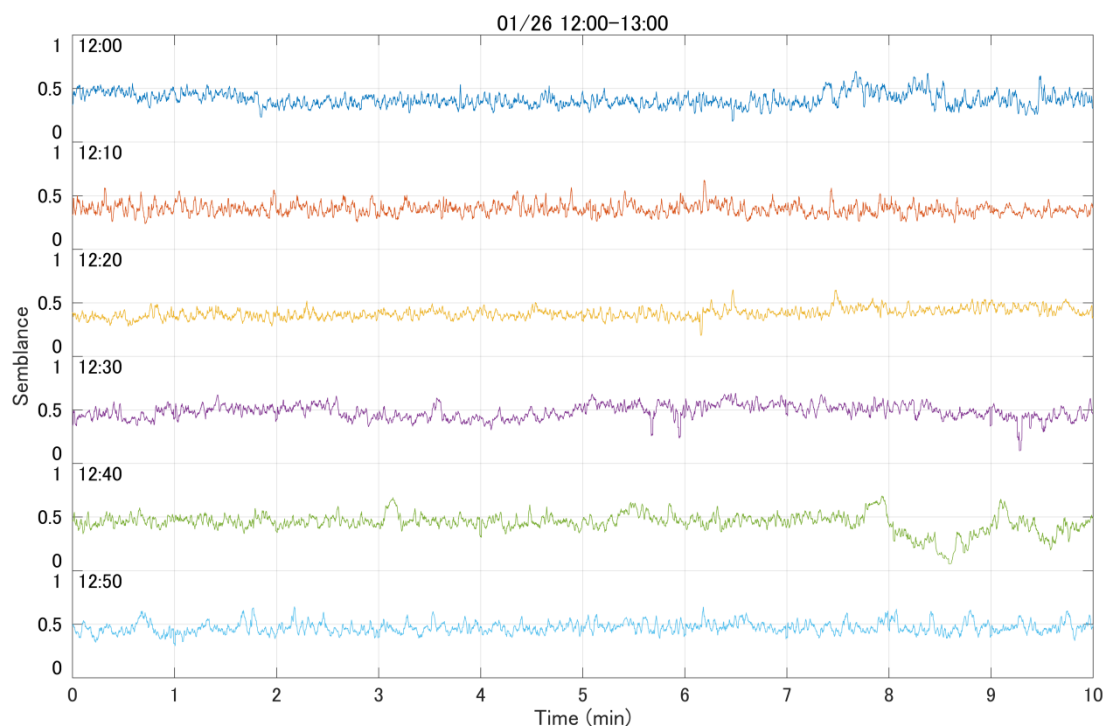
相関指数値は 0～1 の間の値をとり、全地震計の波形（スペクトル）が一致すると 1 となる

図 62 全地震計のデータを用いた相関解析結果

相関指標を用いた方法により全ての試験時間帯では、前述のとおり高い相関指数値が認められますが、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を行いました（図 63）。1回目と2回目の水圧擾乱試験中（図 63(a) (b)）では類似値が0.5以上を示す時間が多く見られますが、試験期間前（図 63(c)）ではほとんどの時間で類似値が0.5より低い値を示しています。ある程度振幅が大きく全ての地震計に共通することを基準としてイベントの抽出を行った結果、1回目の試験時間は2箇所、2回目の試験時間では8箇所イベントが含まれていることが確認できました（表 7）。今後は、これらのイベントに対して、イベントの到来方向などの詳細解析を実施するとともに、観測手法の妥当性や適用限界等について検討していく予定です。

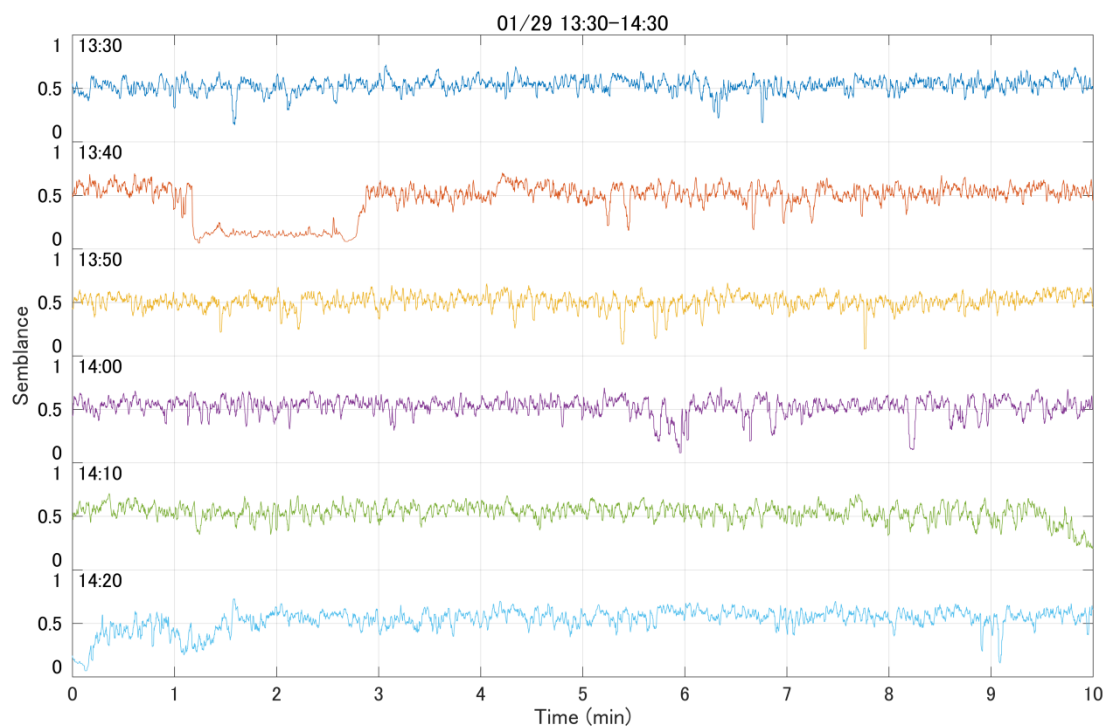
表 7 波形の類似性の解析から得られたイベント時刻

| 1 回目の水圧擾乱試験中<br>(1/26 12:00-13:00) |             | 2 回目の水圧擾乱試験中<br>(1/29 13:30-14:30) |             |
|------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| 番号                                 | イベント時刻      | 番号                                 | イベント時刻      |
| 1                                  | 12:47:55.70 | 1                                  | 13:33:03.90 |
| 2                                  | 12:47:56.40 | 2                                  | 13:44:13.95 |
|                                    |             | 3                                  | 14:17:42.40 |
|                                    |             | 4                                  | 14:21:34.80 |
|                                    |             | 5                                  | 14:21:34.90 |
|                                    |             | 6                                  | 14:24:11.40 |
|                                    |             | 7                                  | 14:24:40.00 |
|                                    |             | 8                                  | 14:25:09.30 |

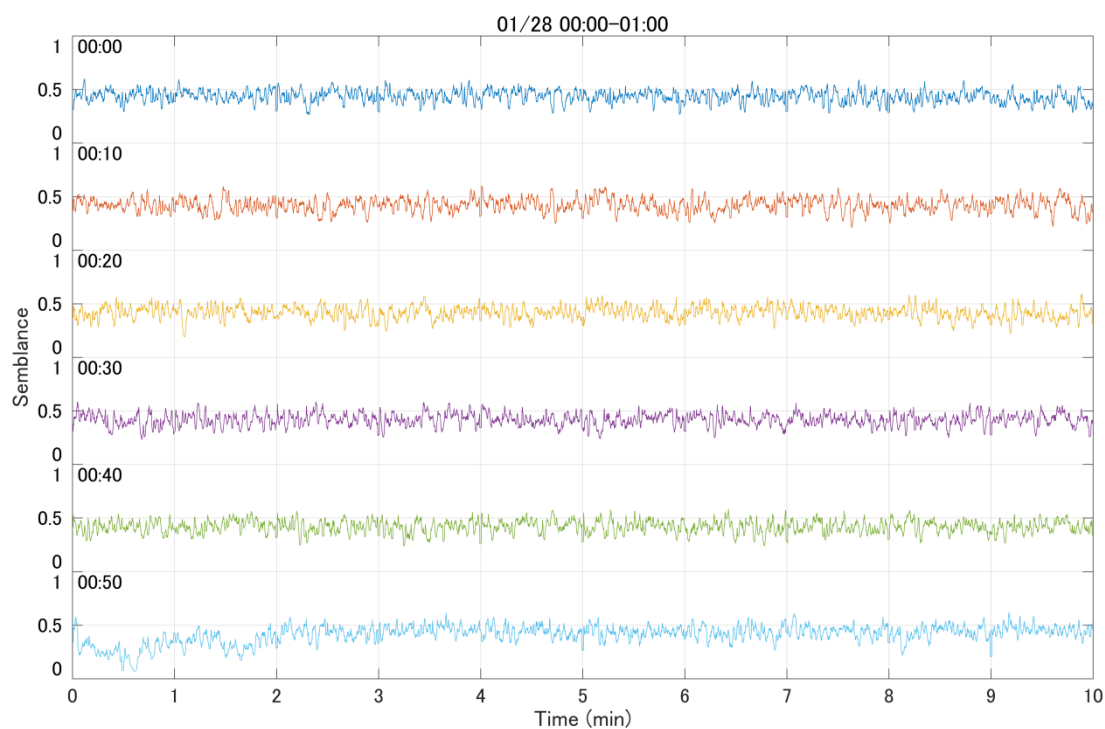


(a) 1 回目の水圧擾乱試験中（1/26 12:00から1時間）の類似値

（次ページに続く）



(b) 2回目の水圧擾乱試験中（1/29 13:30から1時間）の類似値



(c) 水圧擾乱試験前（1/28 00:00から1時間）の類似値

縦軸：類似値、横軸：時間(分)、  
類似値は0～1 の間の値をとり、全地震計の波形が一致すると1 となる

図 63 全地震計のデータを用いた相関解析結果

## 4. 地層処分研究開発

### 4.1 処分技術の信頼性向上

平成29年度は、人工バリア性能確認試験およびオーバーパック腐食試験を継続するとともに、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、オーバーパックの溶接部腐食試験、無線モニタリング装置の適用性確認などを実施しました。また、搬送定置・回収技術の実証試験に向け、装置の要素試験を行いました。

#### 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（図 5）における人工バリア性能確認試験（図 64）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<sup>(30)</sup>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 65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。

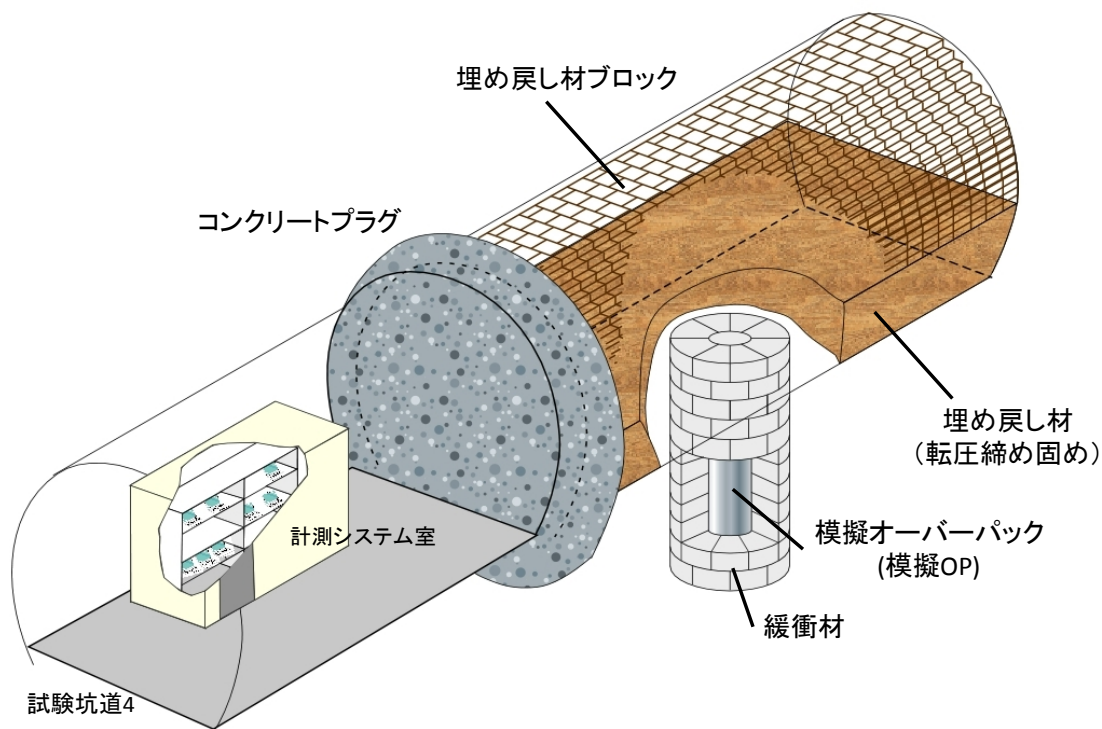


図 64 人工バリア性能確認試験の概念図

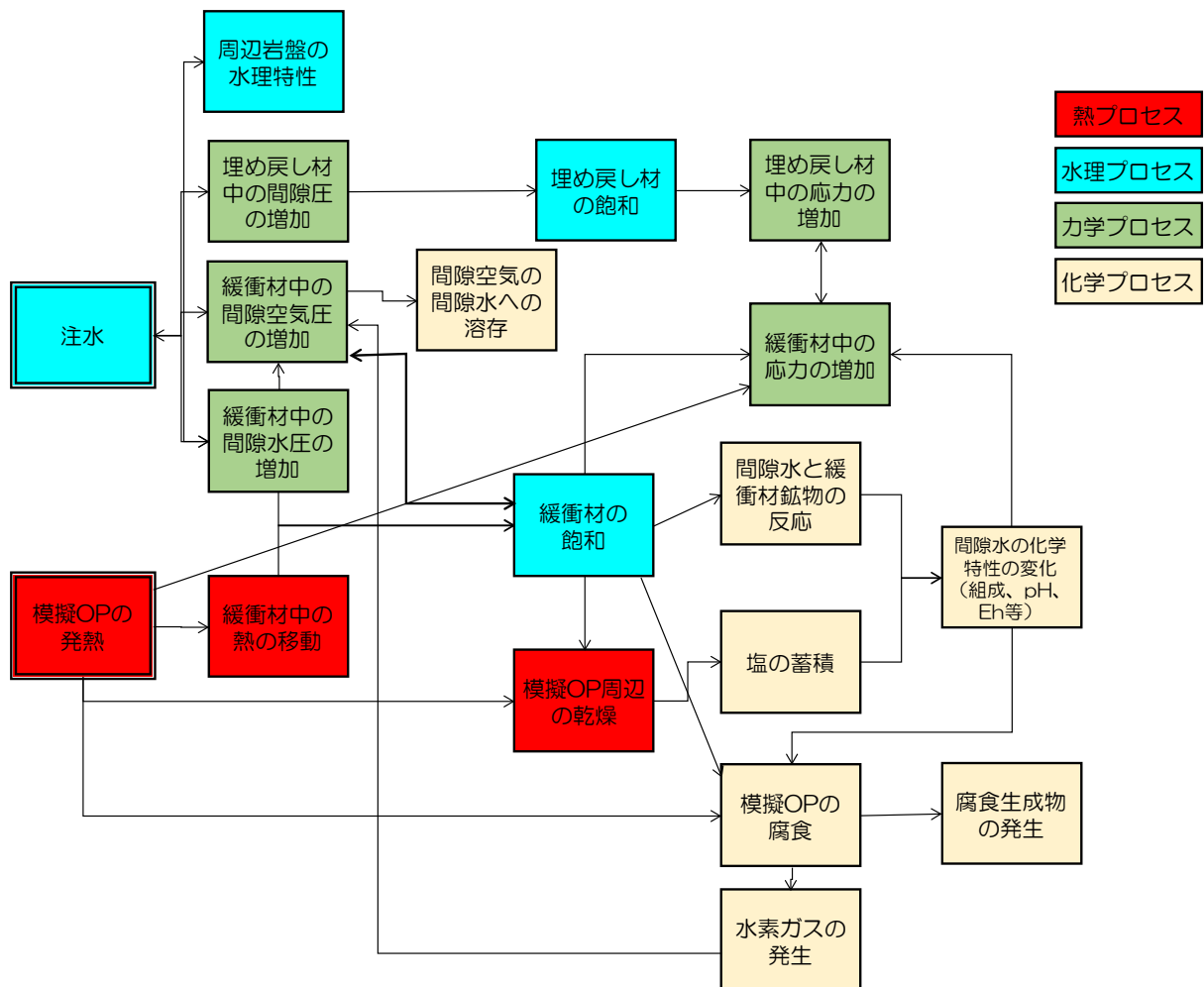


図 65 人工バリア性能確認試験で生じる  
熱－水理－力学－化学プロセスの相関関係

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29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。平成29年度は模擬オーバーパック中のヒーターの温度は100℃で一定としています。緩衝材および埋め戻し材への注水状況を図 66に示します。なお、図 66の横軸（上側）は、加熱開始（2015年1月15日）を0日として示しています。

緩衝材への注水は、加熱開始の翌日（2015年1月16日）から開始し、急激な注水による緩衝材の流出現象などを避けるために、最初は150 mL/minと設定し、段階的に注水量を増加させ、平成28年10月からは約1000 mL/minに設定しています。また、埋め戻し材への注水は、緩衝材への注水と同時に100 mL/minで開始しました。その後、平成27年6月にコンクリートプラグと周辺岩盤を一体化させるコンタクトグラウトを施工した後、ケーブル

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、緩衝材への注水量を増加させた平成28年10月からは300mL/minで注水を再開しています。平成29年度は、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。

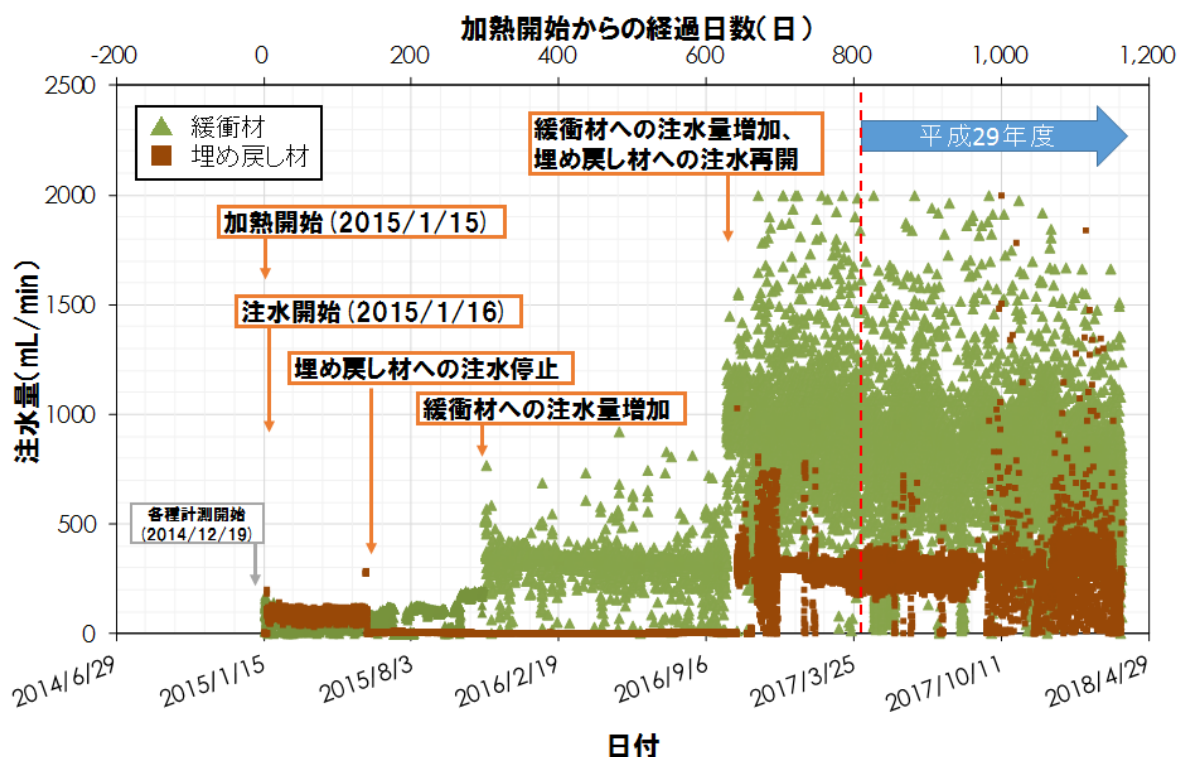


図 66 緩衝材への注水量の経時変化

図 67に緩衝材5段目の温度分布の経時変化を示します。加熱を始めてから徐々に上昇し、100日以降は概ね安定した温度を示していました。注水量を増加した後（約630日以降）に、やや下がる傾向が見られましたが、現在は安定した温度を示しています。

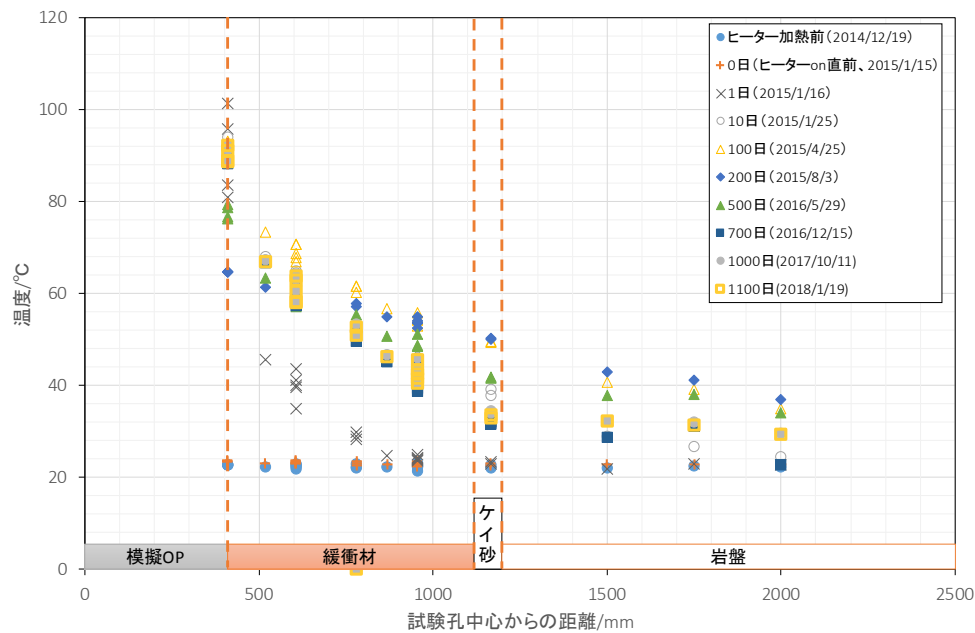
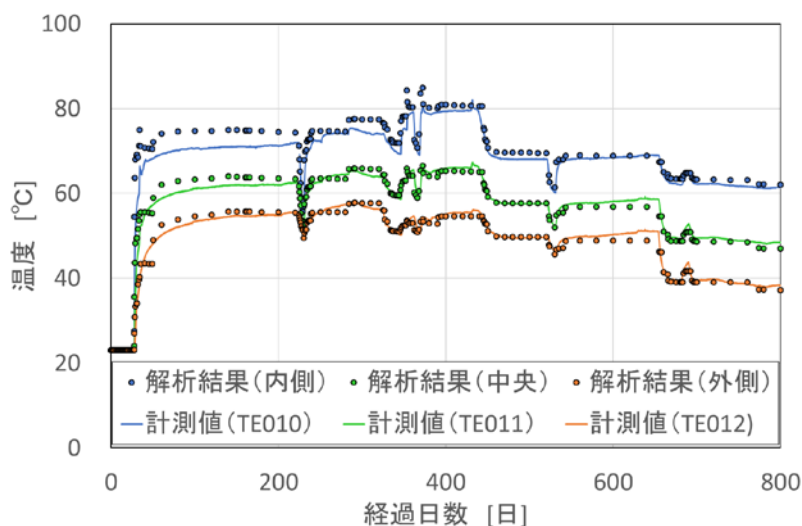


図 67 緩衝材（5 段目）の温度分布

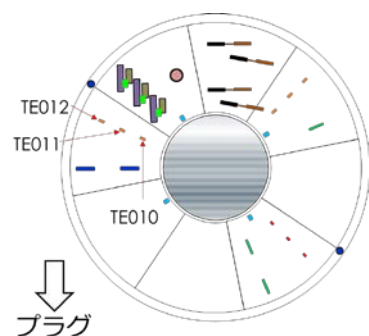
また、データの取得と並行して、再現解析を実施しています。一例として、図 68に緩衝材中の温度、飽和度および土圧について、計測値と解析結果の比較を示します。解析には熱－水理－応力連成現象の解析が可能な解析コードであるTHAMESを用いました。温度の境界条件には模擬オーバーパックの表面と緩衝材外周部に設置したケイ砂部の温度計の計測値を用い、水理の境界条件にはケイ砂部に設置した間隙圧計の計測値を用いました。図 68(a)の計測値は緩衝材5段目に設置した温度計（緩衝材内側からTE010、TE011、TE012）のデータです。緩衝材中の温度はヒーターの温度や注水量の変化に伴って変化していることがわかります。解析結果については温度上昇の初期段階で若干のずれが見られるものの、計測値と比較的良く一致していることがわかります。図 68(b) の計測値は緩衝材5段目に設置した水分計(PS006)から得られたデータを飽和度に換算した値と模擬オーバーパックの表面温度です。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。飽和度の計測値は約800日でおおよそ0.9を示し、外周部に設置したセンサー付近では緩衝材がほぼ飽和していることが示唆されました。解析結果については、約400日付近で解析結果とPS006の計測値が大きく離れていることがわかります。これは、模擬オーバーパックの表面温度を変化させたことによりセンサー付近に水が一時的に集中したことなどが推測されますが、詳細については検討中です。

図 65(c)の計測値は緩衝材5段目に設置した土圧計（TP011）のデータです。土圧計の計測値は徐々に増大する傾向を示しており、水の浸潤とともに膨潤応力が増加しているものと考えられます。解析結果については似たような傾向を示しているものの、計測値よりも大きく計算されています。これは、緩衝材の外側のケイ砂部分の間隙への緩衝材の侵入による密度変化により膨潤応力が低下した影響などが推測されますが、こちらについても引き続き検討していく予定です。

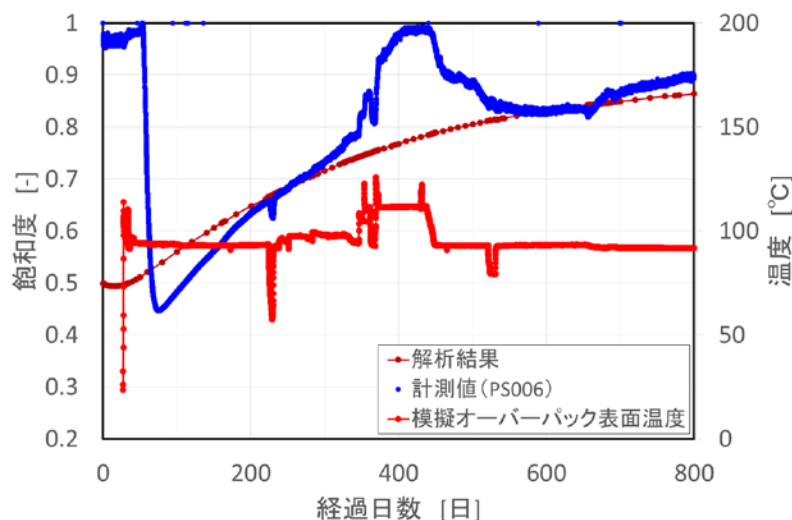
今後は解析パラメータの見直しや解析モデルの高度化を継続するとともに、化学を含めた連成現象の評価も実施していく予定です。



(a) 緩衝材中の温度

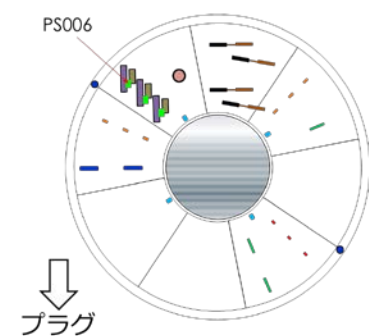


センサー配置  
(緩衝材 5 段目)

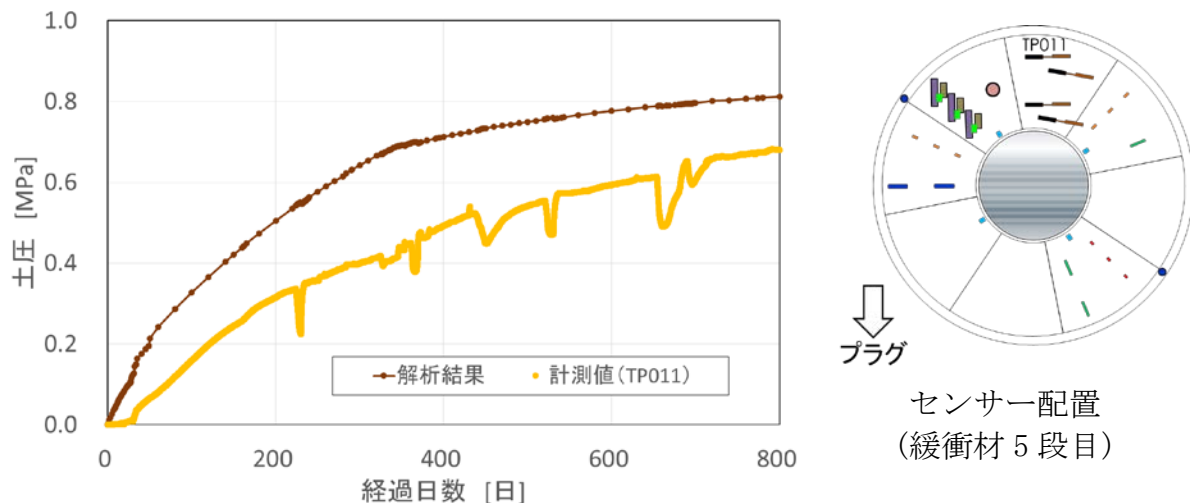


(b) 緩衝材中の飽和度

(次ページに続く)



センサー配置  
(緩衝材 5 段目)



(c) 緩衝材中の土圧

図 68 解析結果との比較の例

#### 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<sup>\*40</sup>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 69）、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より交流<sup>\*41</sup>インピーダンス<sup>\*42</sup>を測定し、腐食の速度などを評価します。

\*40：金属の腐食（さび）に対する抵抗性のことで、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。

\*41：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。

\*42：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  $\Omega$  (オーム) です。直流回路における抵抗に相当します。

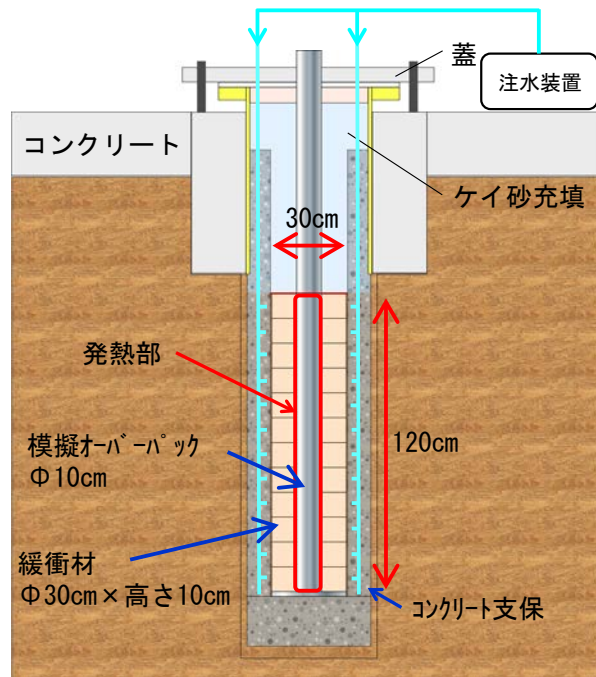


図 69 オーバーパック腐食試験の概念図

平成 29 年度は、平成 26 年度から引き続きヒーターの温度を 95℃に固定し、測定を継続しました。図 70 に注水圧と注水量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 1 MPa で一定として試験を実施しています。平成 28 年度以前は、ポンプのメンテナンスや交換などに伴う注水圧の変動が見られますが、平成 29 年度はほぼ一定圧力での注水を継続しました。注水量は、試験開始当初 70～80 mL/min 程度でしたが、平成 29 年度は 30～20 mL/min と徐々に低下する傾向が見られます。これは、緩衝材が徐々に飽和しているため、地下水が浸潤しづらくなっていることを示唆しています。

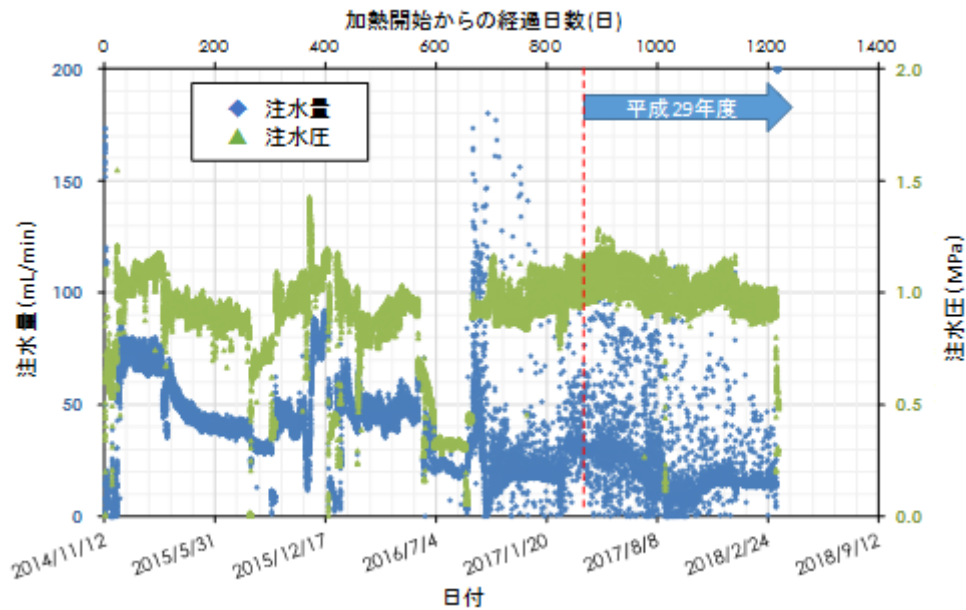


図 70 オーバーパック腐食試験における注水状況

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、2、6、10 段目の北から右回りに  $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$  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 71 に示します。

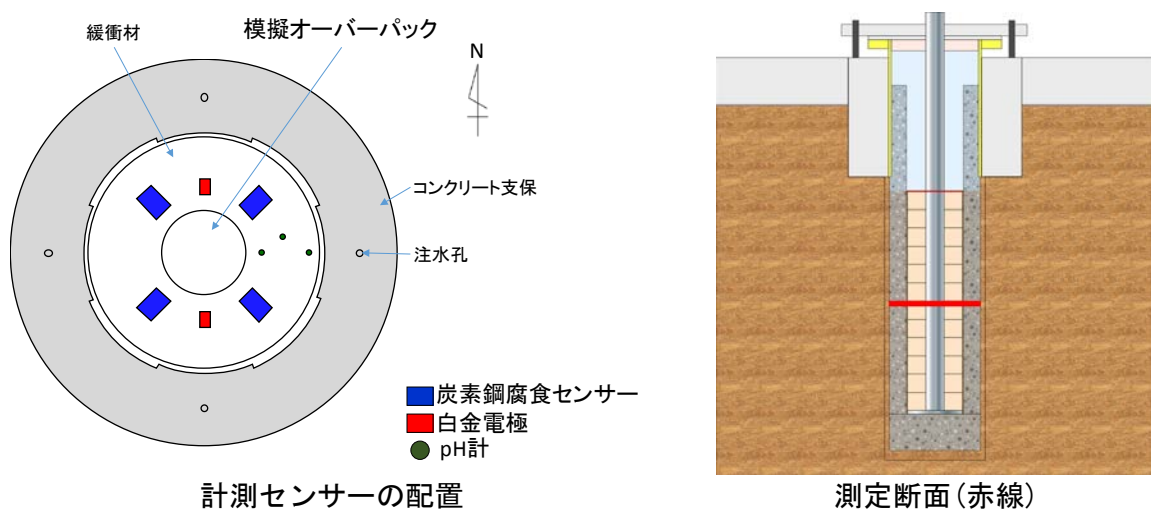


図 71 緩衝材 6 段目の計測センサー配置

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 72に示します。図には、液抵抗 $R_s$  (周波数が十分に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、平成29年度は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バラツキはあるものの、250日程度までは上昇傾向を示し、それ以降はほぼ一定となる傾向を示しました。平成29年度は、平成28年度と比較するとセンサーによってややバラツキが見られますが、概ね安定した値を示しました。この分極抵抗 $R_p$ から腐食速度を算出すると、初期 (約80日後まで) では6～60  $\mu \text{ m/年}$ 、250日以降では0.8～5  $\mu \text{ m/年}$ となり、既往の室内試験結果<sup>(31)</sup>と同様に、腐食速度が時間とともに低下する傾向を示しました。

以上の結果から、実際の地下環境においても炭素鋼腐食センサーによって概ね妥当な測定ができていることがわかります。また、原位置試験においても室内試験と同様に、センサー近傍の酸素濃度の低下や腐食生成物の被膜形成によって腐食の進行が抑制されていることが示唆されます<sup>(32)</sup>。

今後は、試験体の取り出しおよび解体・分析に向けた計画を検討するとともに、実際に解体・分析を行い、測定結果の妥当性について検証する予定です。

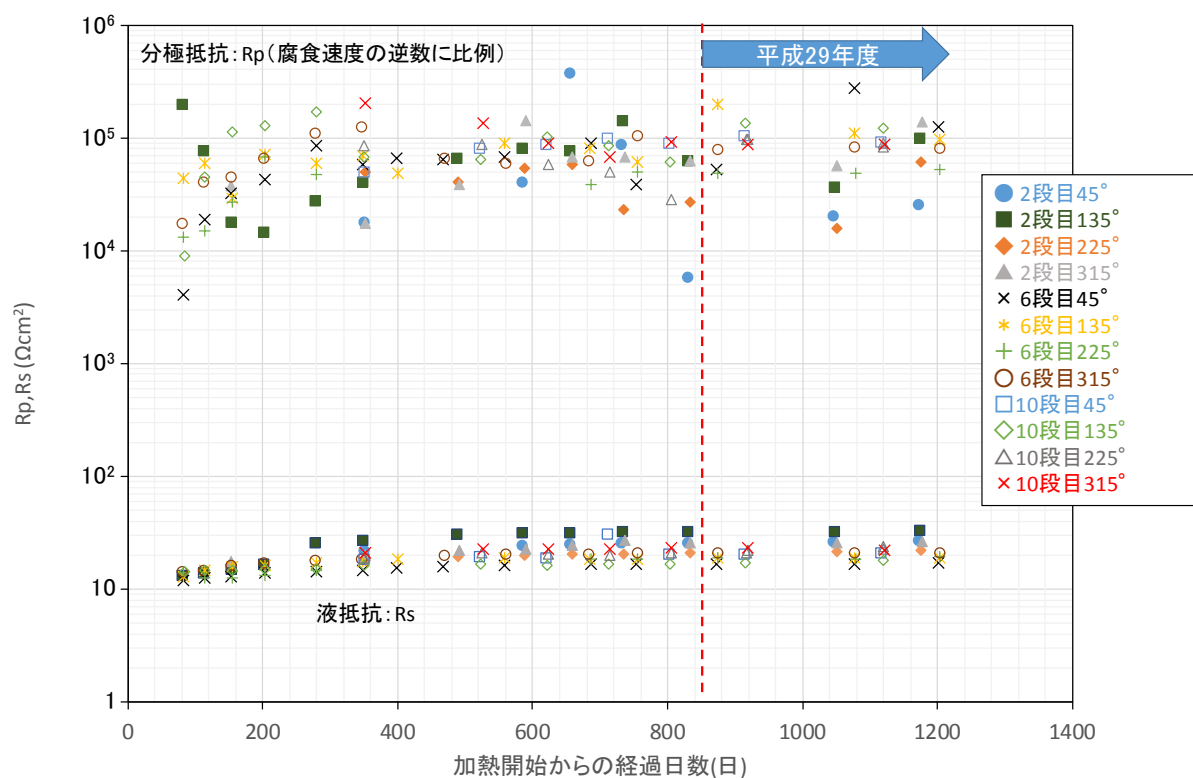


図 72 手動測定結果の解析値

#### 4.1.3 搬送定置・回収技術の実証的検討に関する研究

原環センターとの共同研究として、搬送定置・回収技術の実証的検討に関する研究を実施しました。

平成29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て公開しました。また、平成28年度に整備した試験坑道2において、搬送定置・回収技術の実証試験に向け、試験で用いる装置を簡略化した要素試験装置を使用した、実際の地下試験坑道における走行データを取得しました。

##### (1) 緩衝材定置試験

緩衝材定置試験設備（図 73）において、模擬緩衝材ブロック（以下、緩衝材ブロック）の1段分（8個または9個）を一括して模擬処分孔に搬送および定置し、その定置状態を確認しました。具体的には、4段目の緩衝材ブロック（8個）を模擬処分孔へ定置する作業を繰り返し実施し、作業の再現性、速度や精度（各緩衝材ブロック間のずれ）を確認しました。な

お、この試験は「おもしろ科学館2017 in ほろのべ」（平成29年7月開催）で一般公開しました（写真 2）。

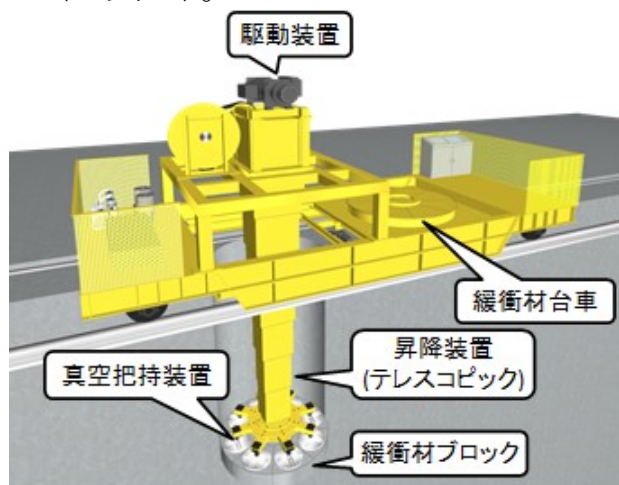


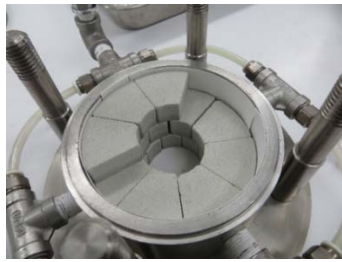
図 73 緩衝材定置試験設備のイメージ



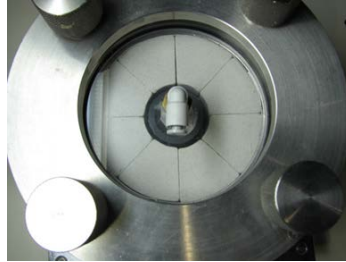
写真 2 緩衝材定置試験の公開の様子

## （2）緩衝材の浸潤挙動に関する試験

地層処分実規模試験施設では実規模実物の緩衝材ブロックを積み上げた人工バリアカットモデルを公開しています。この緩衝材ブロック同士の隙間が水の浸潤により閉塞される過程を来館者に体感してもらうための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、水の浸潤により閉塞する様子を公開しました（写真 3）。



組立中



試験開始前



注水後 128 日目

写真 3 緩衝材可視化試験の状況

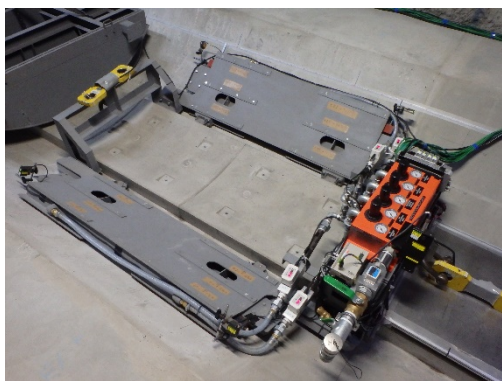
### (3) 地下環境での搬送定置・回収試験に向けた施設の整備

原環センターとの共同研究として、処分坑道横置き定置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<sup>(33) (34) (35) (36) (37) (38)</sup>。

平成29年度は、地下実証試験の実施場所として選定・整備した試験坑道2において、定置装置で用いるエアベアリング方式<sup>\*43</sup>の適用性および走行に関するデータを取得するための要素試験を実施しました。具体的には、実際の実証試験で使用する装置を簡略化した要素試験装置を使用し、平成28年度に試験坑道2に打設したコンクリート上での走行試験を行いました。そして、PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module)<sup>\*44</sup>相当の重量物を搬送する際に必要となる圧縮空気の供給量や牽引力などのデータを取得しました (写真 4)。また、試験で用いる模擬PEMを試験坑道2に設置しました (写真 5)。本試験で用いる模擬PEMは、緩衝材などの人工バリアを封入せず、実物と寸法 (直径約2.5 m、長さ約3.5 m) および重量 (約36 t) を模擬したものを使用しています。

\*43：圧縮空気を送り込み、床面との隙間にごく薄い空気の膜を形成することで摩擦を低減し、小さい力で重量物を搬送するための仕組みです

\*44：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。



要素試験装置



PEM相当の重量の搬送試験

写真 4 試験坑道2で実施した要素試験の様子



写真 5 模擬 PEM の設置状況(試験坑道 2)

#### 4.1.4 人工バリアなどの健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究

平成25年度から原環センターと実施している共同研究であるオーバーパックおよび緩衝材の健全性評価手法の構築および地中無線計測技術に関わる研究を平成29年度も継続して実施しました。

オーバーパックおよび緩衝材の健全性評価手法の構築に関しては、これまでの研究により、オーバーパックの溶接部分の腐食現象や、定置された緩衝材が地下水によって削られて流出する現象（パイピング/エロージョン）が、緩衝材の品質や長期健全性に影響を及ぼす要因のひとつであることがわかっています。人工バリアの健全性に対する信頼性を向上させるためには、地下の環境条件でのオーバーパックおよび緩衝材に生じるこれらの現象を調査することが重要です。一方、地中無線計測技術に関し

ては、実際の深部地下環境での適用性を確認し、これらの技術の信頼性を高めることが重要です。このような背景のもと、平成29年度は、試験坑道5において、オーバーパック溶接部の腐食試験装置を解体し、試験体の分析を実施するとともに緩衝材流出試験を実施しました。また、試験坑道4で行われている人工バリア性能確認試験の緩衝材および埋め戻し材中に設置した無線モニタリング装置による計測を継続しました。

### (1) オーバーパック溶接部腐食試験

地上の実験室で行われる溶接部の腐食試験では、試験体の大きさや地下の環境条件を完全に模擬することが難しいため、地下環境において実際にオーバーパック溶接部で生じる腐食現象を把握するための試験を実施しました。

平成26年度に溶接部付きの試験体（模擬オーバーパック）と緩衝材ブロックを試験孔に設置して、岩盤からの地下水を使用した腐食試験を開始しました（図 74）。平成27年度には、模擬オーバーパックの内部にヒーターを設置し、処分場におけるガラス固化体の発熱を考慮して、模擬オーバーパックの外表面の温度が80℃になるようにヒーターの出力を調節しています。

平成 29 年度は、継続して腐食速度などの試験データを取得するとともに、試験装置を解体し、模擬オーバーパック表面状態の観察や表面形状の分析などを実施しました。試験開始後の経過日数と腐食速度の関係を図 75 に示します。平成 29 年度は、これまで得られたデータについて、センサーから出力される電流と電圧の相関性を確認し、再評価を行いました。その結果、腐食速度はバラツキが見られるものの、平成 28 年度までに見られた試験開始後 350 日以降の腐食速度が概ね  $10 \mu\text{m}/\text{年}$  以下という傾向に変化はありませんでした。また、試験装置解体後に模擬オーバーパックの腐食生成物を除去するための酸洗処理<sup>\*45</sup>を実施し、外表面をスキャナで撮影した結果を図 76 に示します。模擬オーバーパックの表面では、ほぼ均一に腐食が進んでいることが確認されました。

---

\*45：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・除去する化学洗浄処理方法のことです。

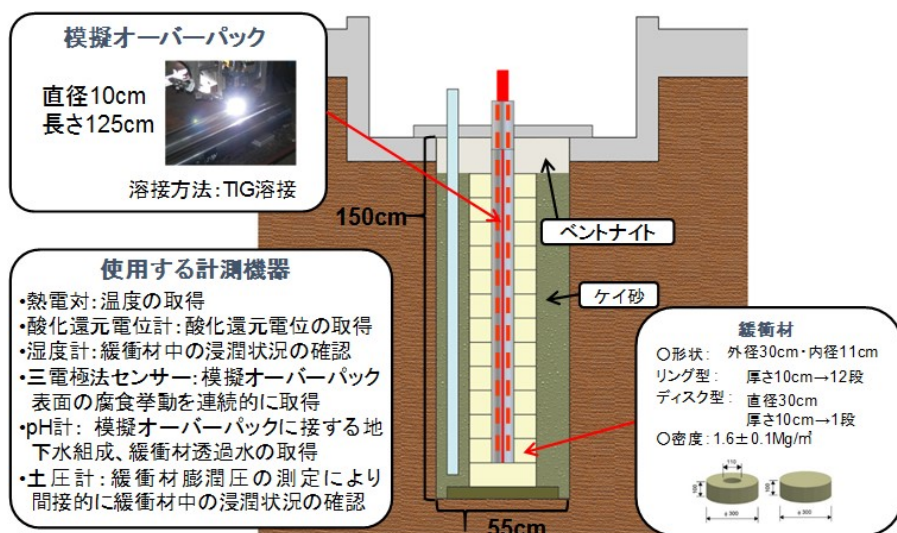


図 74 オーバーパック溶接部腐食試験の概要<sup>(26)</sup>

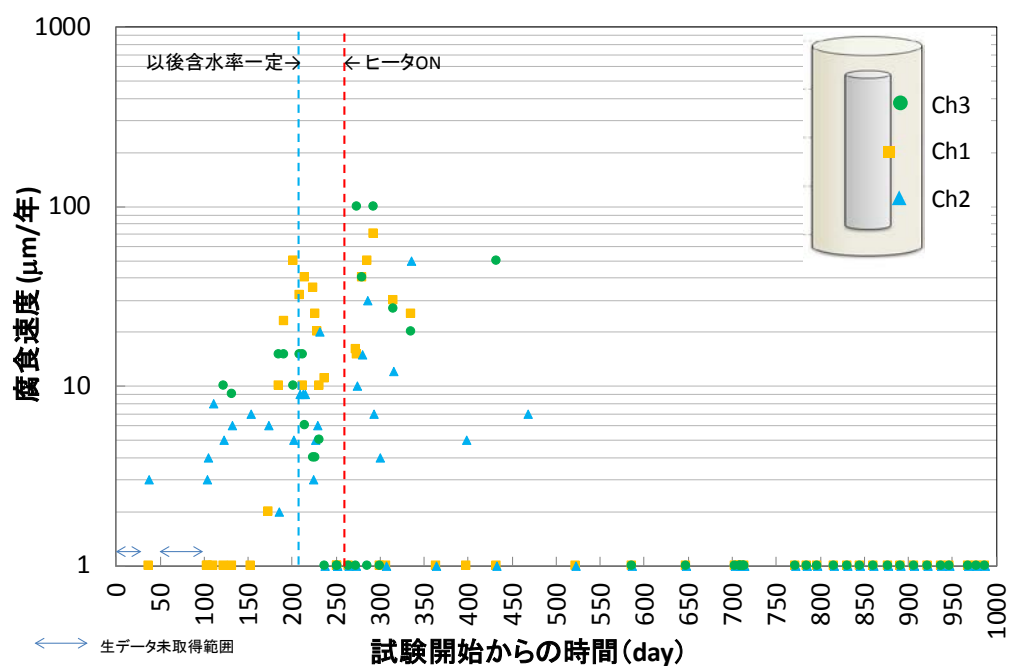


図 75 模擬オーバーパックの腐食速度の測定値



図 76 酸洗処理後の模擬オーバーパック外表面のスキャン画像

外周を撮影した画像を平面に展開して示しています。

## (2) 緩衝材流出試験

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<sup>\*46</sup>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、地下に設置された後に地下水を吸収することによって、岩盤やオーバーパックなどとの隙間を埋めて地下水の流動を非常に緩慢にする働きをします。ただし、地下水の流れが速いと緩衝材が膨潤する途中でできた、密度が低く、やわらかい表面部分のベントナイトが削られ、流出する可能性があります。実験室でも、この流出現象を把握する試験は行われていますが、地下の環境では複数の影響要因があるため、地下坑道に設置した試験孔を用いて流出現象を把握する試験を実施しています。

平成28年度までの地下での試験結果から、試験孔に緩衝材を定置し、岩盤の割れ目からの地下水を模擬した試験を行うと、緩衝材の上部が開放された状態では、実験室での試験と同じように、注水量によっては岩盤と緩衝材の界面に水みちが形成されることがわかりました。緩衝材の流出は、緩衝材の表面付近の密度が非常に低くなり、弱部ができたためと考え

---

<sup>\*46</sup>：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。

られました。一方、試験孔上部に蓋を設置し、緩衝材の定置後に処分坑道が埋め戻されて緩衝材の体積が拘束された状態を模擬した試験では、明確な水みちは確認できず、緩衝材の膨潤によって岩盤と緩衝材の隙間が塞がれ、岩盤の透水性と緩衝材の界面での透水性の関係によって、上部を開放した状態とは地下水の流路が変わっていることが示されました。

そこで、平成29年度は試験孔壁面の岩盤の水理試験を実施し、透水性を把握するとともに、緩衝材と岩盤の隙間が埋まった状態で緩衝材の流出が抑制されるかどうかについて確認するため、緩衝材をあらかじめ地下水で膨潤させ岩盤と緩衝材の隙間を塞いだあとに、割れ目からの地下水の流入を模擬した注水試験を行いました。

まず、岩盤の透水性を確認する試験では、直径約60cmの試験孔に大型の止水プラグを設置し、試験孔内を4区間に区切って各区間の透水係数を測定しました。測定結果から得られた透水係数を表 8に、試験区間を図 77に示します。得られた岩盤の透水係数は、緩衝材の透水係数より高いことがわかりました。

表 8 透水性測定試験結果

| ケース  | 透水係数<br>(m/sec)       | 試験区間 (mm)<br>(孔底からの距離) | 注水量<br>(mL/min) | 水位 (水頭)<br>変動量 (m) |
|------|-----------------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| 区間 1 | $3.58 \times 10^{-6}$ | 0～230                  | 796             | 0.992              |
| 区間 2 | $6.34 \times 10^{-6}$ | 0～430                  | 797             | 0.532              |
| 区間 3 | $7.45 \times 10^{-6}$ | 0～630                  | 797             | 0.424              |
| 区間 4 | $1.13 \times 10^{-5}$ | 0～746                  | 799             | 0.270              |

1,925

1,630

740

630

430

230

150

1,200

150

63

使用予定バッカー：止水ボールロングタイプ500-1000用  
(拡張前)

472

1,185

カバー

試験区画4

試験区画3

試験区画2

試験区画1

注水ボーリング孔

バッカー：出来る限り孔底側に設置

図 77 透水性測定区間

透水係数を測定した後、図 78 (a) に示す試験体を試験孔に設置し、流出試験を行いました。最初に地下水が試験孔に満水になる状態で試験体を2ヶ月間浸漬し、緩衝材に地下水を吸収させました。浸漬中は試験体の側部に設置した土圧計(図 78(b))により圧力を測定し、圧力が1MPaを超えて一定になり緩衝材が水を吸って岩盤との隙間が埋まったことを確認しました。その後、注水ボーリング孔から水を注入する試験を行い、緩衝材の流出の有無を確認しました。その結果、注水圧は高くなり、試験体下部から注水した水は試験体の上部に排出されることがわかりました。排出された試験体上部の水には緩衝材が含まれており、緩衝材の流出も確認されました。試験後に引き上げた緩衝材の表面に水みちの痕跡は見られましたが、明確に上部までつながった水みちは見られませんでした(図 79(a))。

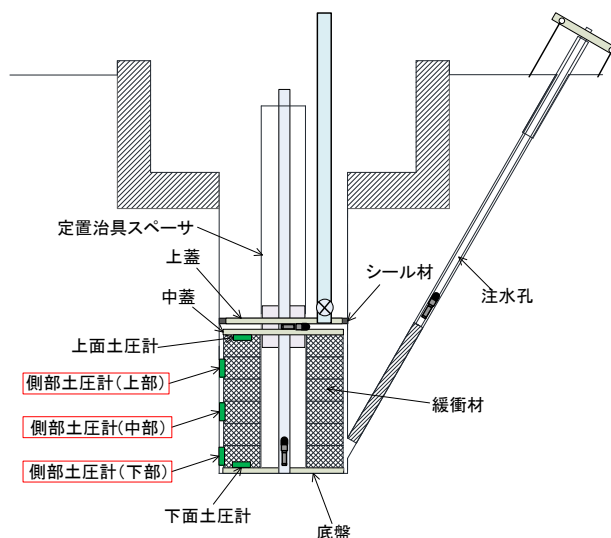
緩衝材を長期にわたり地下水中に浸漬したことにより、緩衝材が水を吸収しましたが、緩衝材の表面付近での吸収であり、内部まで浸透していなかったため（図 79(b)、濃い灰色の部分）、表面付近のベントナイトの含水率が高くなり、削られやすい状態になったことが推測されます。また、緩衝材の膨潤や流出には地下水の組成が影響することが実験室の試験で確認されており、地下水の組成により、透水性が影響を受けていることも

推測されます。

地下環境での緩衝材の流出現象に関しては、実際に見ることができないこともあり、現象を把握するためには、得られた情報をもとに実験室で確認することが必要です。今後、流出にいたる条件の把握のために、実験室の試験と地下での試験の双方により、緩衝材の流出が起こる条件を確認することを計画しています。



(a) 設置した試験体



(b) 土圧計の設置位置

図 78 緩衝材流出試験の試験体



(a) 引き上げた試験体



(b) 試験後のブロック

図 79 緩衝材流出試験後に引き上げた試験体

### (3) 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、様々なセンサーを使って人工バリアの挙動を計測・評価する人工バリア性能確認試験を行っています

(4.1.1参照)。センサーとデータの受信装置の間はケーブルで接続されているのが一般的ですが、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、ケーブルの本数が膨大になり、組立作業時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 80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。このセンサーにより間隙水圧や緩衝材の膨潤圧を測定し、送信器が無線でデータを送信します。一方、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は、受信アンテナと受信装置が設置されており、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。

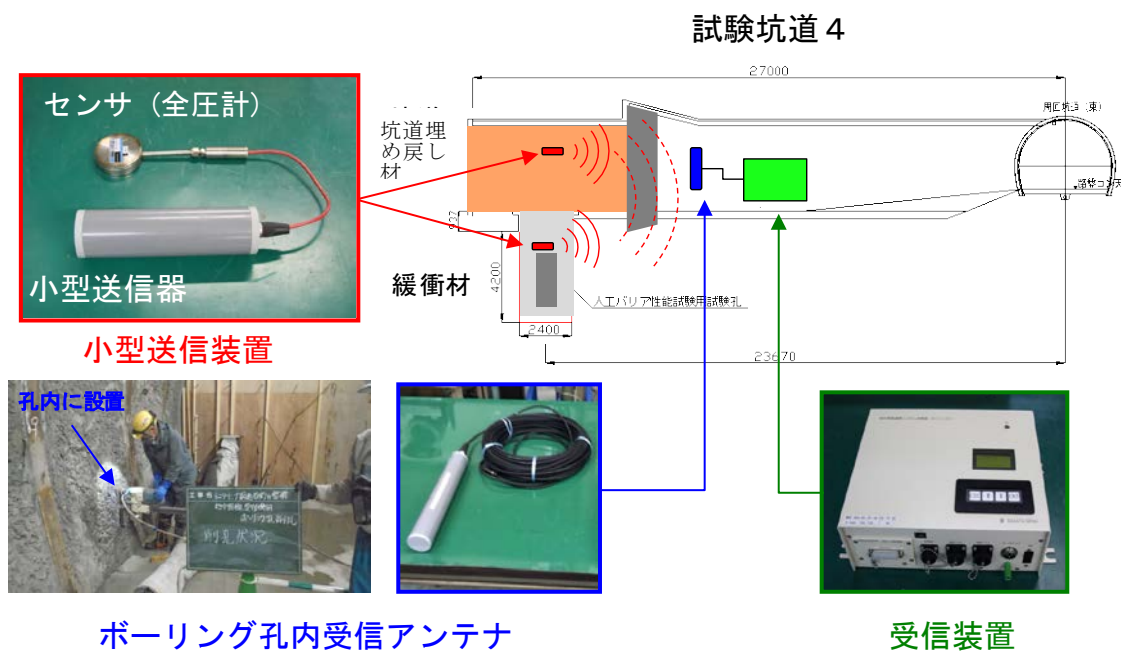


図 80 地中無線伝送システムの装置構成イメージ

平成26年度に人工バリア性能確認試験の緩衝材や埋め戻し材の土圧を計測するために全圧計と間隙水圧計を接続した7体の小型送信装置を設置しました<sup>(21)</sup>。設置後に土圧と間隙水圧の計測を開始しており、小型送信装置は、自動的に1日に1回の計測を行い、1週間分のデータを無線で送信しています。平成29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の計測データの例を図 81 に示します。図には比較のために、緩衝材5段目で取得している間隙水圧（有線センサー）のデータもあわせて示します。図から、有線センサーと同様に、注水量の増加（図 66参照）に伴い間隙水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 81 地中無線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<sup>\*47</sup>。平成29年度は、過年度に実施した健岩部<sup>\*48</sup>を対象とした原位置トレーサー試験（拡散試験<sup>\*49</sup>）<sup>(23)</sup>を継続するとともに、深度350m調査坑道において、新たに健岩部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）に着手しました。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（ダイポール試験<sup>\*50</sup>）<sup>(23)</sup>後に取得した岩石試料を用いた室内試験を行い、原位置試験および室内試験の双方で確認された物質移行挙動の比較検証を継続しました。

### 4.2.1 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験

平成29年度は、塩分濃度（イオン強度）の違いによる拡散／収着特性を評価するために、平成28年度に開始した拡散試験<sup>(23)</sup>（以下、H28 拡散試験）を継続するとともに、試験終了後に試験孔周囲の岩盤に拡散したトレーサーの濃度プロファイルを取得するための岩石試料を採取しました。また、新たに、地下水中の塩分濃度（イオン強度）の違いや割れ目の有無による拡散／収着<sup>\*51</sup>挙動の違いを評価するための拡散試験（以下、H29 拡散試験）を開始しました。

図 82 に H28 拡散試験のトレーサー濃度減衰のうち、セシウム（Cs）、ヨウ素（I）、重水（HD0）の結果を示します。既存の室内試験結果から、塩分濃度（イオン強度）に応じて溶存イオンの実効拡散係数が変化することが知られており、陽イオンは塩分濃度（イオン強度）が高いほど実効拡散係数が低くなり、陰イオンは塩分濃度（イオン強度）が高いほど実効拡散係数が高くなる傾向にあることがわかっています<sup>(39)</sup>。セシウムについては塩分濃度が高いほど濃度減衰が遅くなる傾向にあり、重水について

---

\*47：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。

\*48：割れ目や変質のない岩盤の部分を行います。

\*49：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。

\*50：ダイポール試験とは、トレーサー試験の一種で、2つのボーリング孔を用い、一方のボーリング孔からトレーサーを投入し、もう一方のボーリング孔で揚水しながらトレーサー濃度の変化を観測する試験です。

\*51：地下水中にある元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

は塩分濃度に関わらず濃度減衰傾向が変わらず、既存の室内試験結果と整合的です。一方で、陰イオンであるヨウ素は試験期間中を通して、ほぼ一定の濃度で推移しており、室内試験で確認されたような、塩分濃度に応じた濃度減衰傾向の違いが確認されませんでした。この要因については、引き続き、後述する H29 拡散試験の D-13 孔 (NaCl 濃度を約 8%に設定して試験開始) の濃度減衰データの評価を含めて検討していく予定です。今後は、試験孔周辺の岩石試料中のトレーサー濃度プロファイルと今回報告した濃度減衰データから拡散／収着パラメータを取得し、既存の室内試験結果との整合性を検証することで、多様な地下水環境における拡散／収着挙動を表現可能なモデル化／解析手法の整備を行っていく予定です。

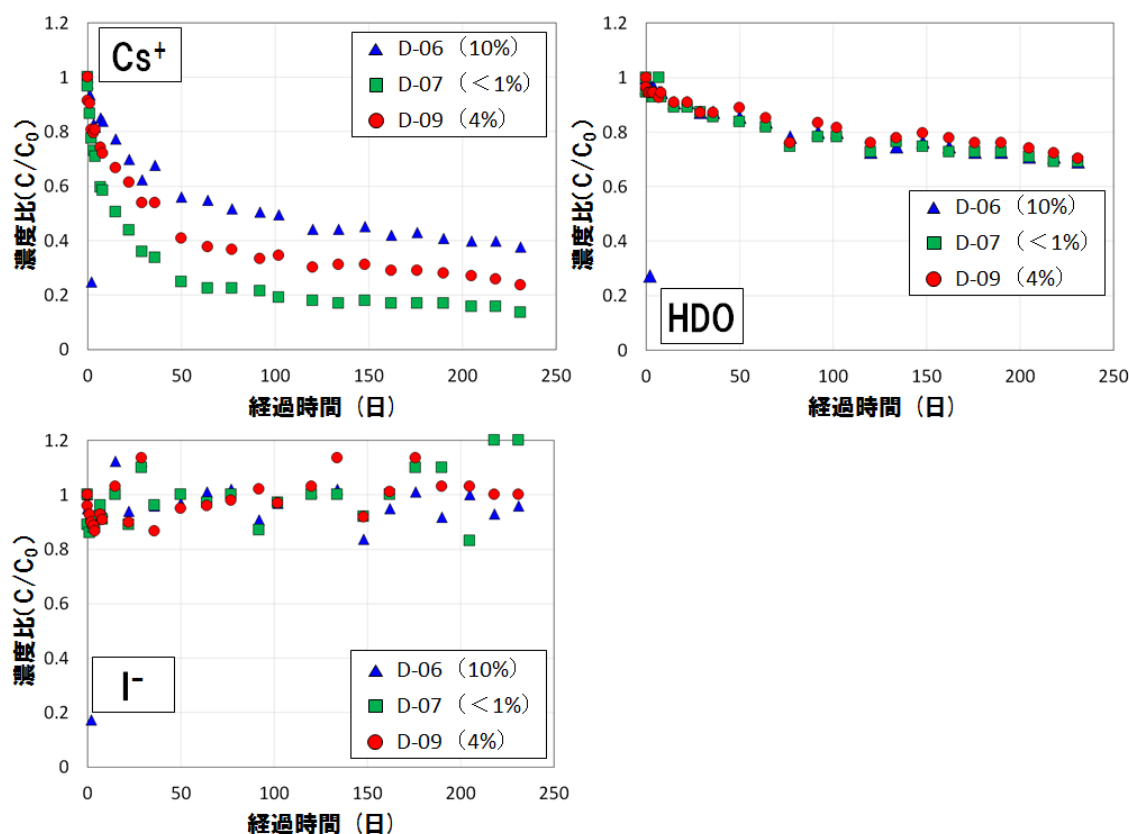


図 82 H28 拡散試験結果（セシウム、重水、ヨウ素）

濃度比は試験開始初期の濃度 ( $C_0$ ) に対する比率を表しています。また、凡例の括弧内の数字は各孔のトレーサー投入時の試験区間内の塩分濃度を示しています。

平成29年度に開始した拡散試験においては、深度350m調査坑道の底盤から4～5m程度のボーリング孔を鉛直方向に1本、斜め方向（層理面の傾斜方向）に2本掘削しました。試験孔それぞれの試験条件を表 9に示します。割れ目のない健岩部を試験条件とした2本については、水理試験の結果から、健岩部相当の透水性であると評価された区間を試験区間とし、割れ目のある区間を試験条件とした試験孔については、底盤から4～5mの区間で確認された割れ目のうち、一番深い区間を試験区間としました。

試験期間中は試料採取ユニットから定期的に採取した水のトレーサー濃度の分析を行うとともに、高塩濃度溶液を投入した試験孔については拡散試験中における試験孔内および試験孔周辺の地下水の塩分濃度の経時変化を推定するために、試験孔内の地下水の塩分濃度（主に、 $\text{Na}^+$ と $\text{Cl}^-$ 濃度）の分析を行いました。トレーサーは重水や蛍光染料（ウラニン<sup>\*52</sup>）などの非収着性の物質やセシウムやユウロピウムなどの収着性の物質を混合したものを使用しました。図 83に使用したトレーサーのうちセシウム、重水、ヨウ素の濃度の経時変化を示します。非収着性である重水の濃度減衰と比較すると、収着性のトレーサーであるセシウムが速い濃度減衰を示していることがわかります。塩分濃度の違いにおける濃度変化を比較すると、陽イオンであるセシウムは塩分濃度が高いほど濃度減衰が遅れる傾向が見られるとともに、重水については塩分濃度によらず濃度減衰が変わらない傾向が見られました。また、D-10孔（割れ目有）とD-11孔（割れ目無）を比較すると、セシウムおよび重水については、割れ目の有無による濃度減衰の傾向に顕著な違いは見られませんでした。

なお、ヨウ素については、現時点では、明瞭な濃度減衰が見られていないため、引き続きデータを蓄積したうえで、濃度減衰の評価を行っていく予定です。

今後は、拡散試験を継続し濃度減衰データを蓄積していくとともに、試験終了後に取得する岩石試料を用いて、試験区間周囲の岩盤基質部や割れ目中におけるトレーサーの内部プロファイルの取得を行い、地下水中の塩分濃度（イオン強度）の違いや割れ目の有無による拡散／収着挙動の違いを評価していく予定です。

---

\*52：黄緑色の蛍光染料で、フルオレセインナトリウムともいいます。化学式は  $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$  であらわされます。トレーサー試薬としての利用のほか、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

表 9 H29 拡散試験条件

| 試験孔名             | D-10                    | D-11                    | D-13      |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| ボーリング孔           | 斜行                      | 斜行                      | 鉛直        |
| 試験水<br>(NaCl 濃度) | 原位置地下水相当<br>(NaCl 1%未満) | 原位置地下水相当<br>(NaCl 1%未満) | NaCl 約 8% |
| 割れ目              | 有                       | 無                       | 無         |

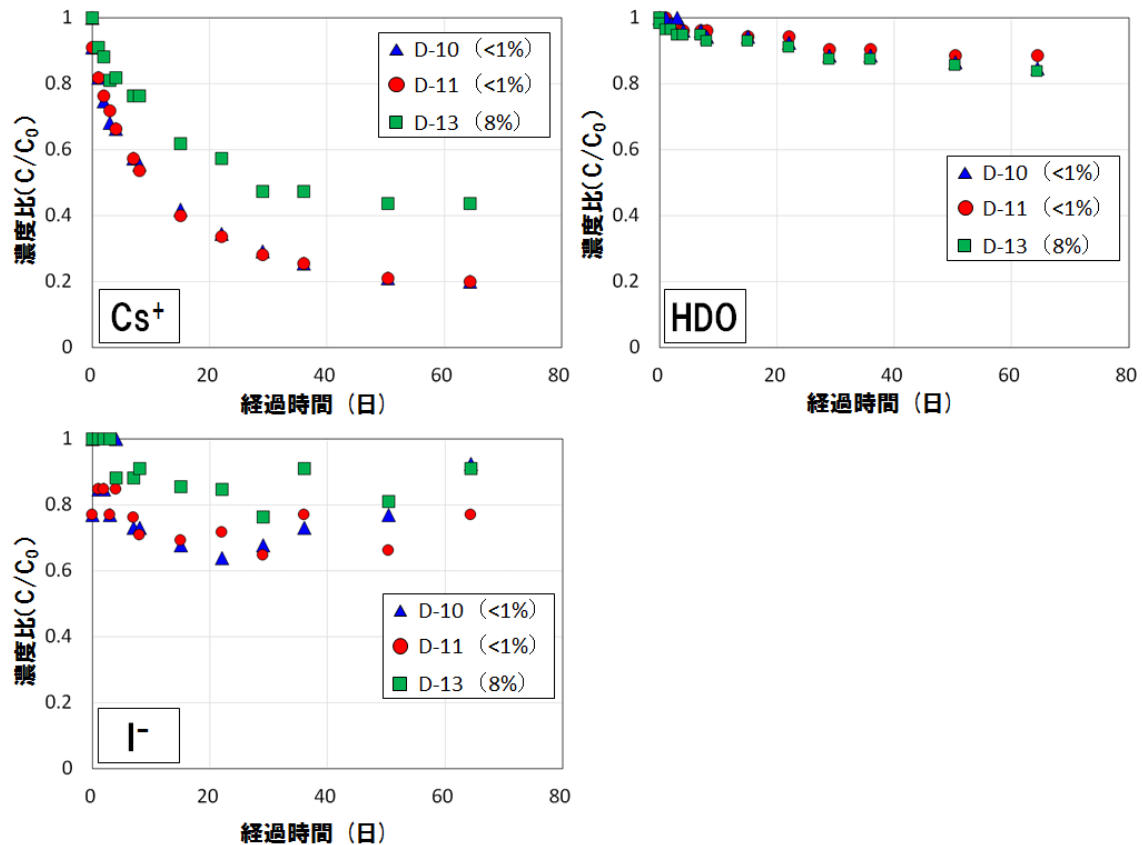


図 83 H29 拡散試験結果（セシウム、重水、ヨウ素）

濃度比は試験開始初期の濃度 (C<sub>0</sub>) に対する比率を表しています。また、凡例の括弧内の数字は各孔のトレーサー投入時の試験区間内の塩分濃度を示しています。

#### 4.2.2 割れ目<sup>\*53</sup>を対象とした原位置トレーサー試験

平成29年度は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、過年度に実施した収着性トレーサーを用いたダイポール試験（以下、収着性トレーサー試験）の評価を継続しました。また、収着性トレーサー試験後に試験孔周辺の岩盤から複数の岩石試料を採取し、割れ目の開口幅や割れ目表面に収着したトレーサーの濃度の分析を行いました。さらに、上記で得られた情報を踏まえ、簡易なモデルを用いた収着性トレーサー試験結果の試解析を行いました。

図 84に収着性トレーサー試験結果を示します。パルス入力条件の試験（図 84(a)）から、非収着性を有するウラニン、重水（HD0）、モリブデン（Mo）、ヨウ素（I）については、破過曲線のピーク濃度に違いが見られるものの、全体的に概ね同じ挙動を示していることがわかります。一方、収着性を有するコバルト（Co）、セシウム（Cs）については岩石表面への収着の影響を示唆する挙動が確認されました。特にセシウムの挙動については、セシウムの稚内層基質部に対する収着分配係数が重水やヨウ素の収着分配係数と比べて1オーダー以上高い<sup>(40)</sup>ことと整合しています。また、強収着性を有するユウロピウム（Eu）については、試験期間中を通してその濃度は検出限界以下でした。定常入力条件の試験についても、パルス入力条件の試験結果と同様に、非収着性のトレーサー（図 84(b)のウラニン、モリブデン）と収着性トレーサー（図 84(b)のセシウム、コバルト、ユウロピウム）において、収着特性に応じた挙動が破過曲線において確認できました。ウラニン、モリブデン、コバルトについては試験後半（図 84(b)の経過時間1400分付近）で濃度比がほぼ一定になる傾向が確認できる一方で、セシウムについては、試験期間を通して、濃度比がほぼ一定になる傾向は確認されませんでした。これは先述のとおり、セシウムの稚内層基質部に対する収着分配係数が大きいことに起因していると考えられます。なお、ユウロピウムについては、他のトレーサーと比較して非常に低濃度であったため、明瞭な挙動が破過曲線からは確認できませんでした。

---

\*53：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。

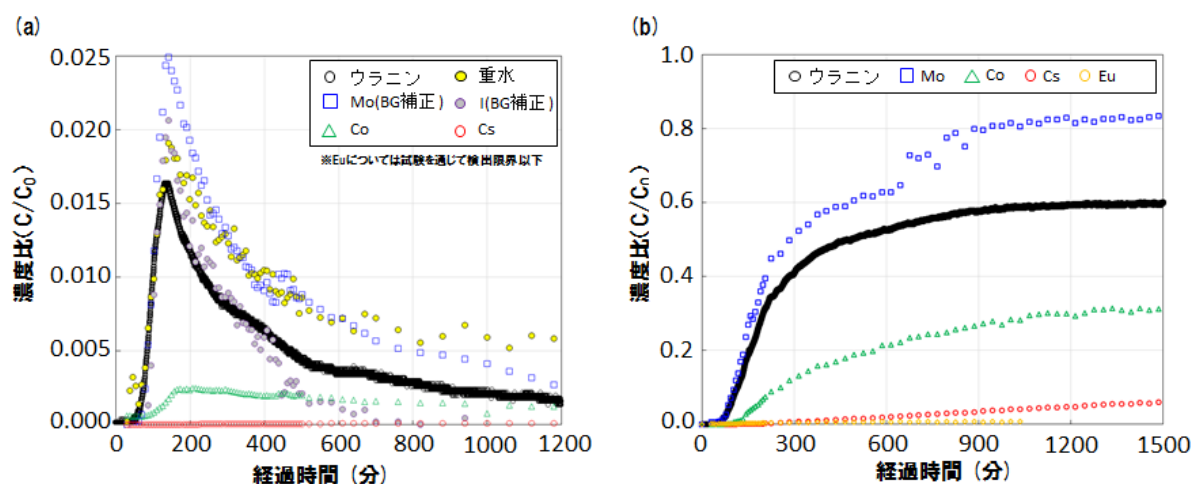


図 84 収着性トレーサー試験結果

(a) パルス入力条件、(b) 定常入力条件

濃度比は試験開始初期の濃度 ( $C_0$ ) に対する比率を表しています。

収着性トレーサー試験後に採取した岩石試料に含まれる割れ目の位置情報と走向・傾斜から、試験箇所周辺の割れ目の分布状況を明らかにしました。なお、割れ目の走向・傾斜は岩石試料に認められる層理面の走向・傾斜に基づき定方位化し、目視観察にて判読を行いました。図 85にボーリング掘削のレイアウト (図 85(a)) と割れ目の三次元分布 (図 85(b)) を示します。試験孔周辺には3孔 (S-30、S-31およびSW-32) で断層が確認されたとともに、その周囲には複数のせん断、引張およびハイブリッド割れ目が分布していることがわかりました。

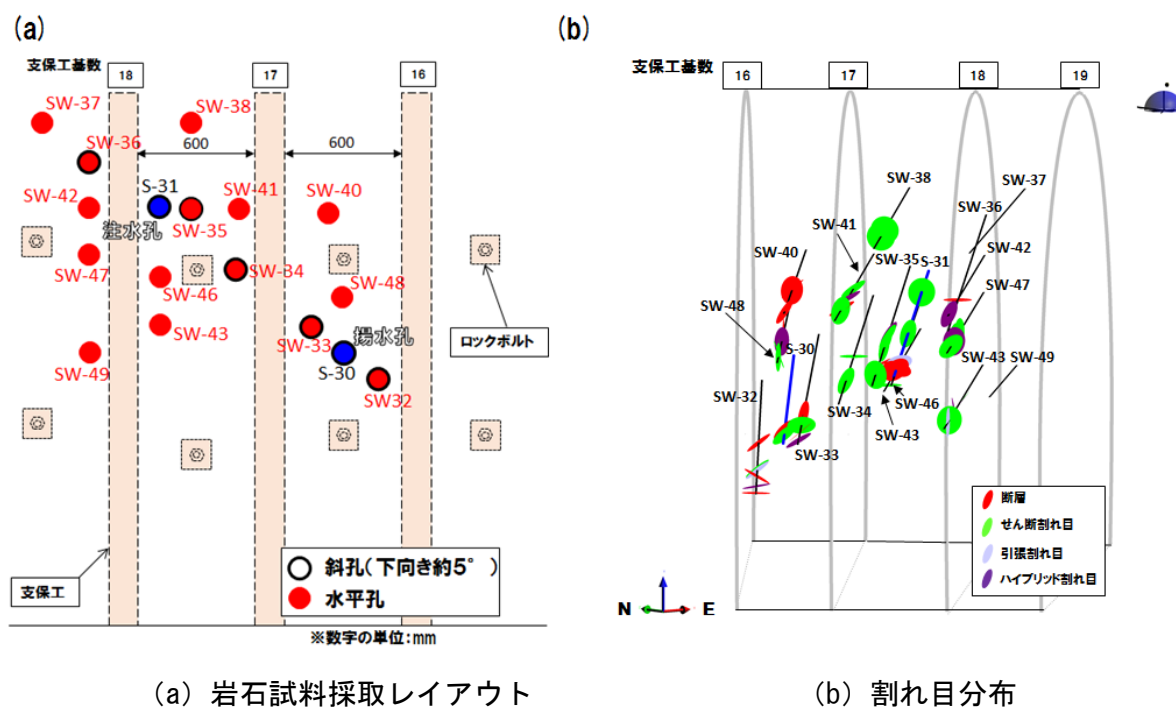


図 85 試験孔周辺の岩石試料採取結果に基づく割れ目分布

次に、分布している割れ目のうち、どの割れ目がトレーサーの移行に寄与しているかを確認するために、岩石試料中の割れ目表面を分析し、割れ目表面に収着したトレーサーの有無およびその程度を評価しました（図 86）。平成29年度は試験孔周辺で採取した岩石試料のうち、試験孔とした S-30 および S-31 孔の孔間（SW-33、SW-34 孔）と周辺の孔（SW-32、SW-35、SW-46 孔）で取得した岩石試料の分析を行いました。その結果、SW-34、SW-35 孔で確認された割れ目表面からは元々の岩石中に含まれる濃度（バックグラウンド濃度）と比べて有意なトレーサー濃度が検出されなかった一方で、SW-46 孔（トレーサー注入孔の直近）および SW-33（トレーサー回収孔の直近）で確認された割れ目の一部でバックグラウンド濃度よりも有意なセシウム、コバルト濃度を検出することができました。これにより、トレーサーは注入孔から回収孔へ単一の割れ目（断層含む）によって移行したのではなく、孔間に分布する複数の割れ目（例えば、SW-33 のせん断割れ目）のネットワークを介して移行したものと推定されます。

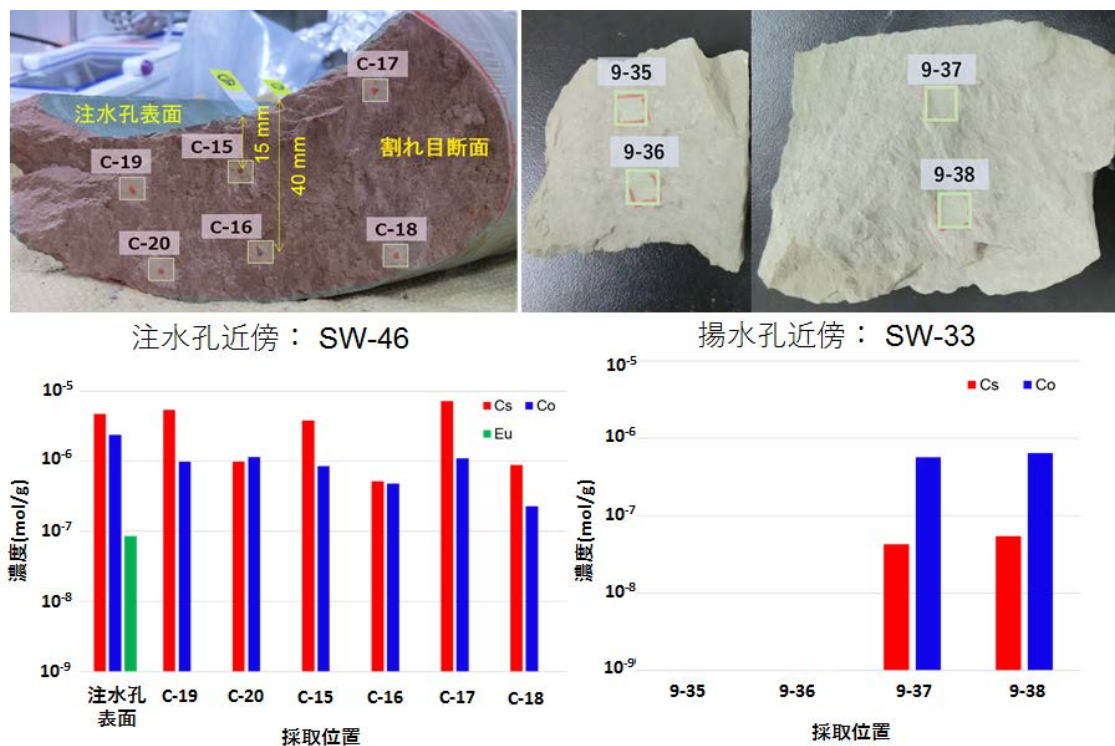


図 86 割れ目表面のトレーサー濃度分析結果<sup>(23)</sup>

上記の評価を踏まえ、収着性トレーサー試験結果の解析を行いました。前述のとおり、解析対象とする収着性トレーサー試験においては、複数の割れ目がトレーサーの移行に寄与していることが推定されるものの、それを裏付けるデータが十分に取得されていないことから、1枚の平行平板を仮定した簡易なモデル（図 87）を用い、移行経路の不均質性と収着分配係数の濃度依存性を考慮した感度解析を行いました。トレーサーが流れる流路長はトレーサー試験の孔間距離を考慮して1500mmとし、開口幅はSW-46の岩石試料（割れ目面を樹脂で充填させた後モルタルを充填・硬化させた状態で採取）に含まれる割れ目を対象にX線CT装置（東芝製、Alexion）で取得したCT画像（図 88）に基づき、1mmに設定しました。拡散／収着に関わるマトリクス拡散深さ、実効拡散係数、収着分配係数等のパラメータは、稚内層のマトリクス部を対象に得られた既存のデータを考慮して設定しました。

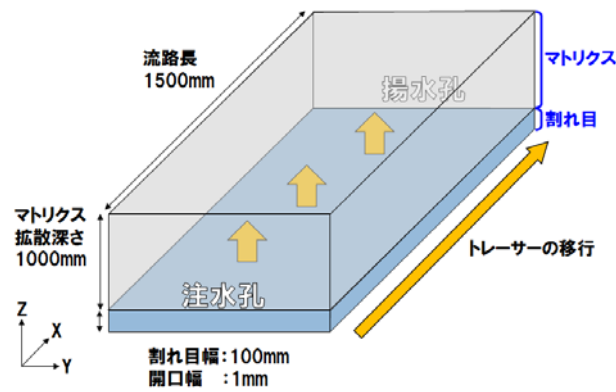


図 87 一次元平行平板モデルの概要

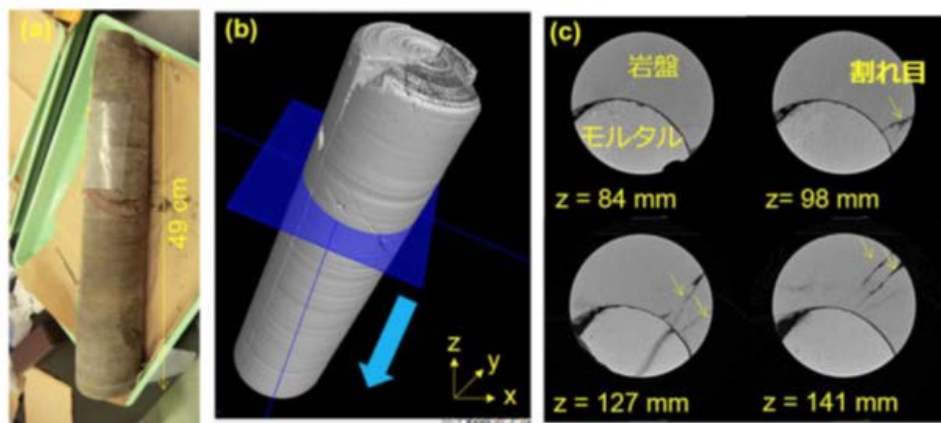


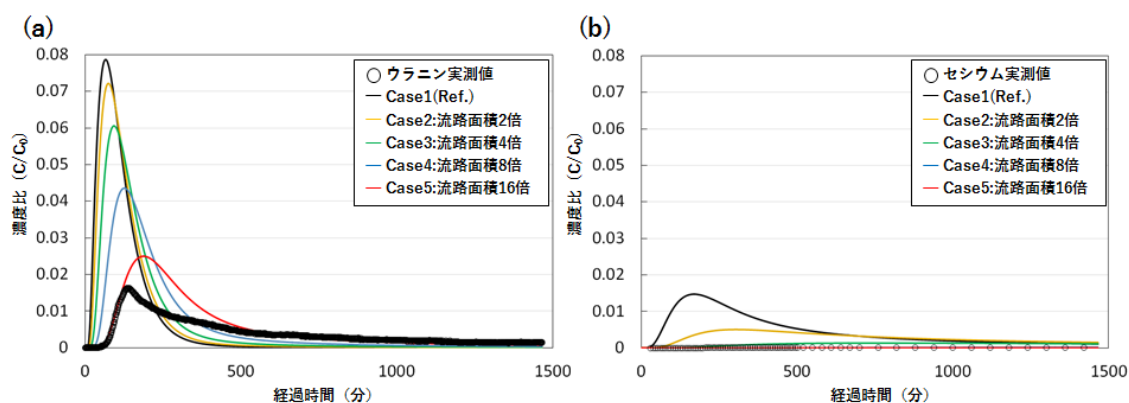
図 88 SW-46 孔周辺の岩石試料<sup>(23)</sup>

(a) 写真、(b) CT 画像（全体）、(c) CT 画像の断面図

まず、パルス入力条件でのトレーサー試験結果との比較を実施しました。ここでは、ウラニンとセシウムを対象に、割れ目幅（流路面積）を変化させた複数ケース（Case1～5）との比較を行いました。図 89 から、ウラニン（図 89(a)）、セシウム（図 89(b)）ともに Case5 の条件で最も実測値に近い傾向を示しました。次に、パルス入力条件での Case5 の条件に基づき、定常入力条件でのトレーサー試験結果との比較を行いました。図 90 に解析結果を示します。非収着性のモリブデンについては陰イオン排除効果によるマトリクス拡散の効果が小さいことに起因し、実測値の傾向と同様に、ウラニンより高い破過曲線を示しました（図 90(a)）。一方で、セシウム、コバルトについては実測値で確認されるような濃度の立ち上がりが確認できませんでした（図 90(a)）。セシウムの収着分配係数はその濃度によって変化する傾向（濃度依存性）があることが知られている<sup>(41)</sup>などため、この濃度依存性を考慮し収着分配係数を 1/2 および 1/10 に

設定した解析を実施しました。その結果、初期条件で設定した収着分配係数の1/10の条件で実測データと同程度の傾向が得られました（図 90(b)）。

今後は割れ目の分布や割れ目の連続／連結性、移行経路の不均質性などを考慮した、より現実的なモデルを構築するとともに、構築したモデルによる原位置試験結果の解析検討を通して、割れ目を対象とした物質移行挙動を評価するためのモデル化／解析手法の整備を行っていく予定です。



(a) ウラン、(b) セシウム

図 89 パルス入力条件における解析結果<sup>(23)</sup>

濃度比は試験開始初期の濃度 ( $C_0$ ) に対する比率を表しています。

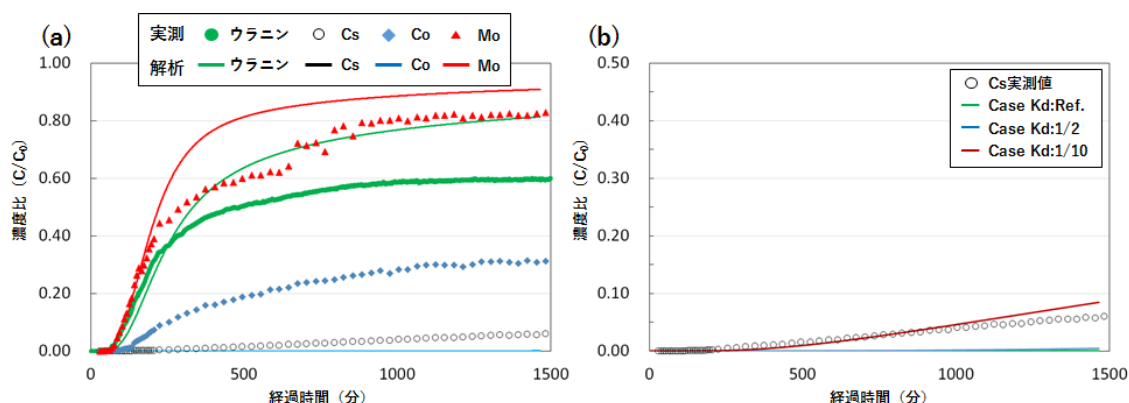


図 90 定常入力条件における解析結果<sup>(23)</sup>

(a) 全トレーサー、(b) Cs の解析結果に及ぼす収着分配係数 ( $K_d$ ) の影響  
濃度比は試験開始初期の濃度 ( $C_0$ ) に対する比率を表しています。

## 5. 地下施設の維持管理

### 5.1 地下施設の維持管理

平成29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。主な業務内容としては、坑内換気用主要ファン・集塵機(1号機)の整備、人キブル(工事用エレベータ)のワイヤロープ交換などを実施しています(写真 6、写真 7)。



写真 6 坑内換気用主要ファン・集塵機(1号機)の整備



写真 7 人キブル(工事用エレベータ)のワイヤロープ交換

## 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るため、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。）を定期的の実施し、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 8）。

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 91）となっています。



写真 8 掘削土（ズリ）置場

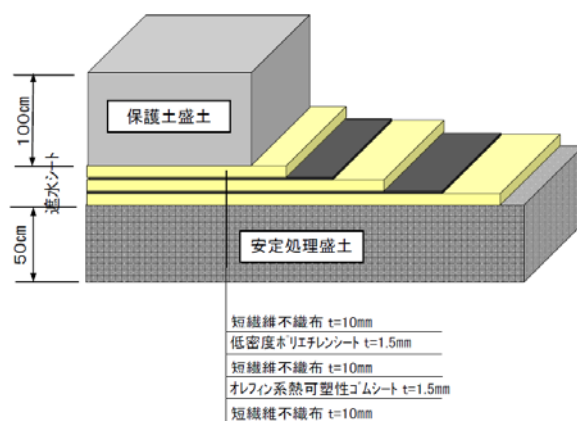


図 91 掘削土（ズリ）置場の構造

### 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、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 9）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。



濁水処理設備



脱ホウ素設備



脱窒素設備



揚水設備

写真 9 排水処理設備

## 6. 環境モニタリング

平成 29 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<sup>\*54</sup>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調査地点を図 92 に示します。

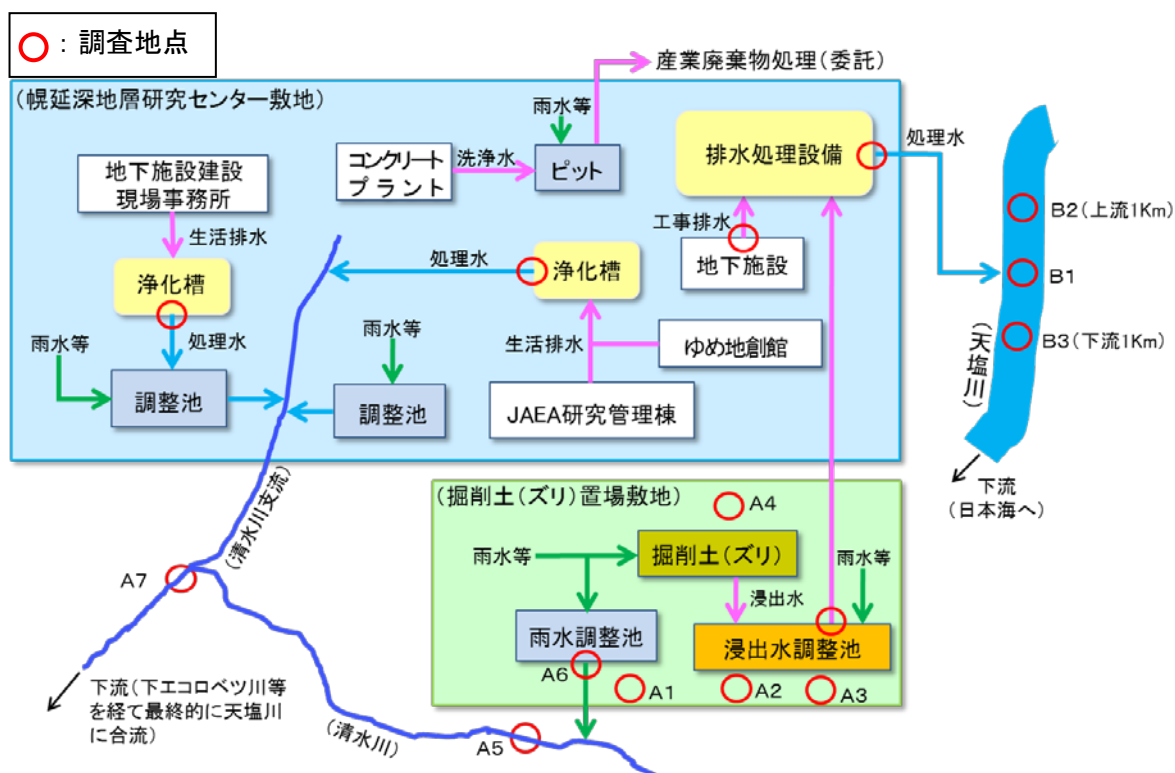


図 92 排水系統と各水質分析の調査地点

\*54 : <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 29 年度における天塩川への排水量は、表 10 に示すとおりです。合計排水量は、52,615m<sup>3</sup>であり、平成 28 年度（55,983m<sup>3</sup>）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 401m<sup>3</sup>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（750m<sup>3</sup>/日）を満足しています。また、月排水量および日平均排水量についても、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 6,446m<sup>3</sup>、日平均排水量が 214.9m<sup>3</sup>でした。

表 10 天塩川への排水量

| 年 月          | 月排水量 (m <sup>3</sup> )    | 日最大排水量 (m <sup>3</sup> ) ※1 | 日平均排水量 (m <sup>3</sup> ) ※2 |
|--------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 平成 29 年 4 月  | <b>6,446<sup>*3</sup></b> | <b>401<sup>*3</sup></b>     | <b>214.9<sup>*3</sup></b>   |
| 平成 29 年 5 月  | 3,255                     | 233                         | 105.0                       |
| 平成 29 年 6 月  | 4,203                     | 218                         | 140.1                       |
| 平成 29 年 7 月  | 5,372                     | 354                         | 173.3                       |
| 平成 29 年 8 月  | 4,237                     | 382                         | 136.7                       |
| 平成 29 年 9 月  | 4,456                     | 252                         | 148.5                       |
| 平成 29 年 10 月 | 4,449                     | 261                         | 143.5                       |
| 平成 29 年 11 月 | 5,231                     | 360                         | 174.4                       |
| 平成 29 年 12 月 | 4,071                     | 282                         | 131.3                       |
| 平成 30 年 1 月  | 3,229                     | 291                         | 104.2                       |
| 平成 30 年 2 月  | 2,499                     | 212                         | 89.3                        |
| 平成 30 年 3 月  | 5,167                     | 399                         | 166.7                       |
| 合 計          | 52,615                    | —                           | —                           |

※1：北るもい漁業協同組合との協定値は 750m<sup>3</sup>/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 93 に示すとおり、濁水処理や脱ホウ素、脱窒素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。

平成 29 年度における水質調査結果は、表 11 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。

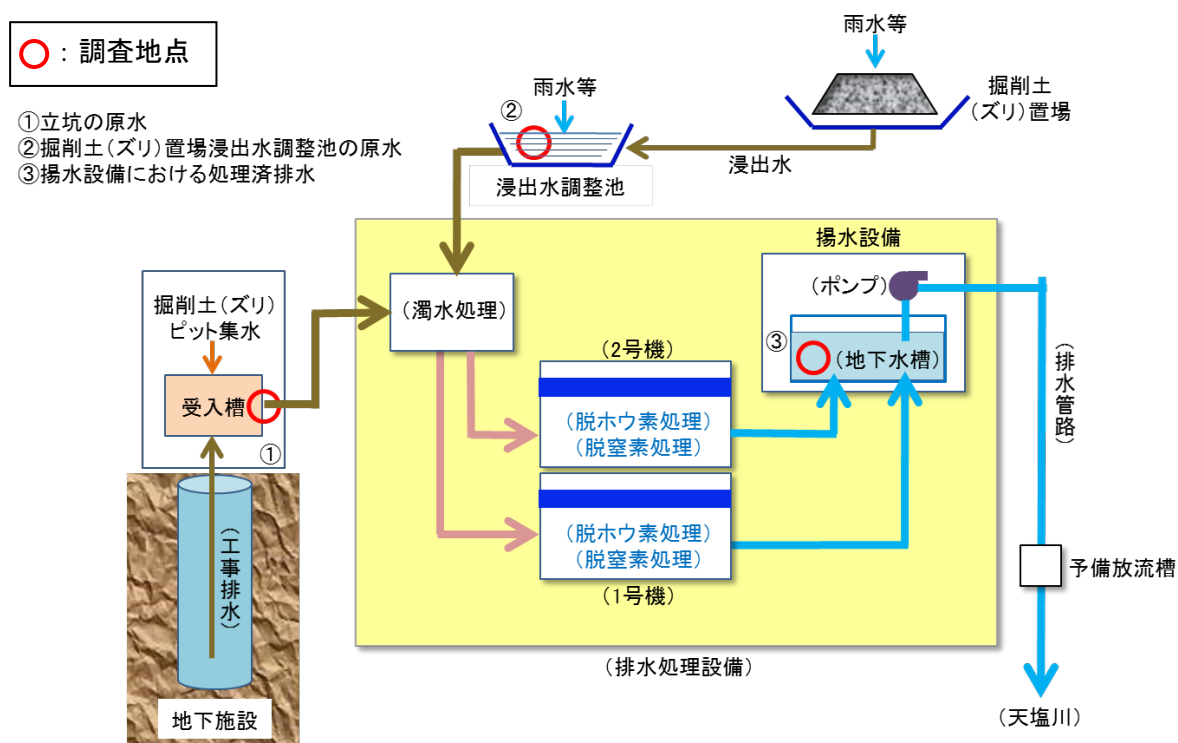


図 93 地下施設からの排水の調査地点

表 11 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29年度              | (参考値)<br>水質汚濁防止法<br>排水基準 |
|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
|                      |                    | 平成18年12月<br>～平成29年3月 | 平成29年4月<br>～平成30年3月 |                          |
| カドミウム<br>(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<br>(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<br>(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<br>(mg/L)        | 立坑の原水              | <0.8～3.5             | <0.8                | 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<br>(mg/L)        | 立坑の原水              | <0.1～160             | 70～92               | 10                       |
|                      | 掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水 | <0.1～37              | 0.1～7.0             |                          |
|                      | 揚水設備における処理済排水      | <0.1～3.0             | 0.2～1.2             |                          |
| 全窒素<br>(mg/L)        | 立坑の原水              | 0.41～117             | 74～83               | 120<br>(日間平均 60)         |
|                      | 掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水 | 6.79～150             | 3.5～39              |                          |
|                      | 揚水設備における処理済排水      | 0.60～48              | 12～28               |                          |
| 全アンモニア<br>(mg/L)     | 立坑の原水              | 0.12～110             | 42～65               | —                        |
|                      | 掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水 | 0.12～22              | 0.24～1.4            |                          |
|                      | 揚水設備における処理済排水      | <0.05～5.92           | <0.05～6.8           |                          |
| pH                   | 立坑の原水              | 7.5～9.5              | 8.1～8.2             | 5.8～8.6                  |
|                      | 掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水 | 6.7～8.7              | 7.0～7.5             |                          |
|                      | 揚水設備における処理済排水      | 6.9～8.6              | 7.3～8.4             |                          |
| 浮遊物質<br>(mg/L)       | 立坑の原水              | 4～580                | 7～70                | 200<br>(日間平均 150)        |
|                      | 掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水 | 5～170                | 4～10                |                          |
|                      | 揚水設備における処理済排水      | <1～9                 | <1～2                |                          |
| 塩化物<br>イオン<br>(mg/L) | 立坑の原水              | 20～4,300             | 3,500～4,000         | —                        |
|                      | 掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水 | 18.2～1,500           | 10～220              |                          |
|                      | 揚水設備における処理済排水      | 38～4,700             | 2,300～4,500         |                          |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 93 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 94）において、定期的（原則 1 回/月）に採水し（写真 10）、水質調査を実施しています。

平成 29 年度における調査結果は、表 12 に示すとおりです。浮遊物質量について、B1 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（融雪による増水：5 月、降雨による増水：12 月）がありましたが、放流口の上流側（B2）においても高い値を示しており、同日に採取した揚水設備における処理済排水の浮遊物質量は低い値（最大 1mg/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 94 天塩川の調査地点



写真 10 天塩川の採水状況

表 12 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29年度              | 北るもい<br>漁業協同組合<br>協定値 |
|------------------|--------|----|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|
|                  |        |    | 平成18年6月<br>～平成18年11月<br>(放流前) | 平成18年12月<br>～平成29年3月<br>(放流後) | 平成29年4月<br>～平成30年3月 |                       |
| ホウ素<br>(mg/L)    | B1     | 表層 | <0.02～0.04                    | <0.01～0.35                    | <0.01～0.14          | 5                     |
|                  |        | 中層 | —                             | <0.01～3.5                     | <0.01～0.97          |                       |
|                  |        | 深層 | <0.02～3.35                    | <0.01～4.9                     | <0.01～4.6           |                       |
|                  | B2     | 表層 | <0.02～0.04                    | <0.01～0.27                    | <0.01～0.05          |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | <0.01～3.7                     | <0.01～1.0           |                       |
|                  |        | 深層 | <0.02～3.28                    | <0.01～5.0                     | <0.01～4.4           |                       |
|                  | B3     | 表層 | <0.02～0.07                    | <0.01～0.26                    | <0.01～0.13          |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | <0.01～2.5                     | <0.01～1.2           |                       |
|                  |        | 深層 | <0.02～1.03                    | <0.01～4.5                     | <0.01～4.6           |                       |
| 全窒素<br>(mg/L)    | B1     | 表層 | 0.37～1.06                     | 0.11～2.2                      | 0.30～1.3            | 20                    |
|                  |        | 中層 | —                             | 0.15～2.1                      | 0.34～1.4            |                       |
|                  |        | 深層 | 0.42～1.50                     | 0.15～6.5                      | 0.35～1.4            |                       |
|                  | B2     | 表層 | 0.37～1.14                     | 0.14～2.2                      | 0.29～1.4            |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | 0.15～2.3                      | 0.32～1.4            |                       |
|                  |        | 深層 | 0.4～1.16                      | 0.16～2.3                      | 0.34～1.4            |                       |
|                  | B3     | 表層 | 0.4～1.31                      | 0.16～2.2                      | 0.31～1.4            |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | 0.11～2.3                      | 0.33～1.4            |                       |
|                  |        | 深層 | 0.49～1.24                     | 0.16～2.3                      | 0.34～1.4            |                       |
| 全アンモニア<br>(mg/L) | B1     | 表層 | —                             | <0.05～0.83                    | <0.05～0.09          | 2※3                   |
|                  |        | 中層 | —                             | <0.05～0.92                    | <0.05～0.08          |                       |
|                  |        | 深層 | —                             | <0.05～0.85                    | <0.05～0.08          |                       |
|                  | B2     | 表層 | <0.01～0.13                    | <0.05～0.89                    | <0.05～0.08          |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | <0.05～0.76                    | <0.05～0.09          |                       |
|                  |        | 深層 | 0.01～0.35                     | <0.05～0.85                    | <0.05～0.07          |                       |
|                  | B3     | 表層 | 0.01～0.21                     | <0.05～0.89                    | <0.05～0.09          |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | <0.05～0.90                    | <0.05～0.11          |                       |
|                  |        | 深層 | 0.02～0.17                     | <0.05～0.96                    | <0.05～0.09          |                       |
| pH               | B1     | 表層 | 7.1～7.4                       | 6.5～7.7                       | 6.4～7.3             | 5.8～8.6               |
|                  |        | 中層 | —                             | 6.5～7.6                       | 6.5～7.3             |                       |
|                  |        | 深層 | 7.0～7.6                       | 6.5～8.0                       | 6.5～7.3             |                       |
|                  | B2     | 表層 | 7.1～7.4                       | 6.6～7.9                       | 6.6～7.3             |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | 6.6～7.6                       | 6.5～7.3             |                       |
|                  |        | 深層 | 7.2～7.6                       | 6.6～8.0                       | 6.6～7.3             |                       |
|                  | B3     | 表層 | 7.0～7.6                       | 6.6～7.9                       | 6.6～7.3             |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | 6.6～7.6                       | 6.6～7.3             |                       |
|                  |        | 深層 | 7.1～7.4                       | 6.6～8.0                       | 6.6～7.5             |                       |
| 浮遊物質量<br>(mg/L)  | B1     | 表層 | 3～34                          | <1～360                        | 1～34                | 20                    |
|                  |        | 中層 | —                             | <1～390                        | <1～38               |                       |
|                  |        | 深層 | 6～86                          | <1～400                        | 1～35                |                       |
|                  | B2     | 表層 | 3～36                          | <1～390                        | <1～33               |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | <1～400                        | 1～38                |                       |
|                  |        | 深層 | 5～47                          | <1～460                        | <1～35               |                       |
|                  | B3     | 表層 | 3～35                          | <1～420                        | 1～35                |                       |
|                  |        | 中層 | —                             | <1～460                        | <1～36               |                       |
|                  |        | 深層 | 5～49                          | <1～650                        | <1～35               |                       |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 94 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 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 95 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 11）、水質調査を実施しています。

平成 29 年度における調査結果は、表 13 に示すとおりです。A1、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が、過去の変動範囲内をわずかに外れている程度であることから、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、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。

なお、平成 29 年度の調査から新設した観測井の運用を開始し、それに伴い旧観測井は廃止としています。各観測井の番号については、新観測井が旧観測井の番号を継承しています。

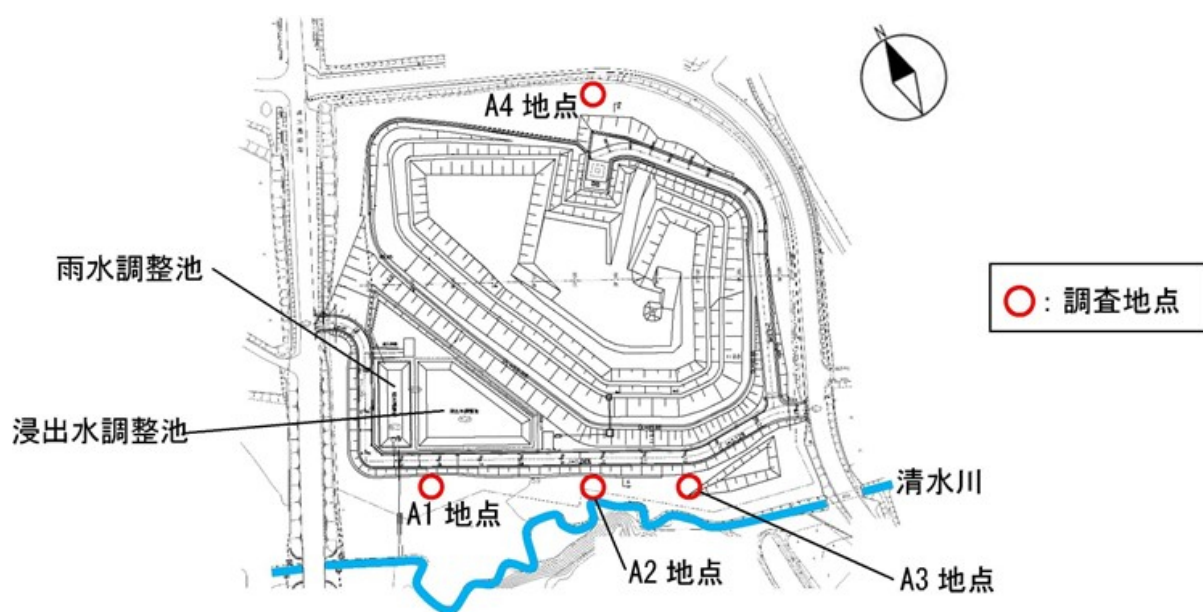


図 95 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の調査地点



写真 11 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水状況

表 13 掘削土(ズリ)置場周辺の地下水の水質調査結果

| 分析項目※ <sup>1</sup> | 調査地点※ <sup>2</sup> | 過年度                                   |                                       | 平成 29 年度 |        |        |         |
|--------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|--------|--------|---------|
|                    |                    |                                       |                                       | 平成 29 年  |        |        | 平成 30 年 |
|                    |                    | 平成18年6月<br>～平成19年4月<br>掘削土(ズリ)<br>搬入前 | 平成19年5月<br>～平成29年2月<br>掘削土(ズリ)<br>搬入後 | 5月       | 8月     | 11月    | 2月      |
| カドミウム<br>(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<br>(mg/L)        | A1                 | <0.005～0.171                          | <0.005                                | <0.005   | <0.005 | <0.005 | <0.005  |
|                    | A2                 | <0.005～0.006                          | <0.005                                | <0.005   | <0.005 | <0.005 | 0.007   |
|                    | A3                 | <0.005                                | <0.005                                | <0.005   | <0.005 | <0.005 | <0.005  |
|                    | A4                 | <0.005～0.022                          | <0.005～0.005                          | 0.005    | <0.005 | <0.005 | 0.006   |
| ヒ素<br>(mg/L)       | A1                 | <0.005                                | <0.005～0.012                          | 0.005    | <0.005 | <0.005 | <0.005  |
|                    | A2                 | <0.005                                | <0.005                                | <0.005   | <0.005 | <0.005 | 0.007   |
|                    | 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<br>(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<br>(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<br>(mg/L)      | A1                 | 19.8～50.7                             | 0.40～63.0                             | 16       | 22     | 13     | 18      |
|                    | A2                 | 1.29～43.5                             | 0.43～9.0                              | 5.9      | 5.3    | 5.6    | 17      |
|                    | A3                 | 12.5～34.0                             | 0.18～41.8                             | 6.6      | 13     | 1.4    | 15      |
|                    | A4                 | <0.02～0.06                            | <0.02～0.47                            | 0.03     | 0.04   | <0.02  | 0.06    |
| pH                 | A1                 | 6.9～7.2                               | 6.5～7.9                               | 6.5      | 6.6    | 6.3    | 6.6     |
|                    | A2                 | 4.6～6.3                               | 3.7～6.6                               | 6.5      | 6.3    | 6.5    | 6.9     |
|                    | A3                 | 6.8～7.3                               | 4.2～7.4                               | 6.5      | 6.6    | 6.4    | 6.7     |
|                    | A4                 | 5.4～6.6                               | 5.2～6.7                               | 5.4      | 5.2    | 5.1    | 5.5     |
| 塩化物イオン<br>(mg/L)   | A1                 | 1,810～2,760                           | 79～3,400                              | 1,000    | 1,400  | 1,000  | 1,000   |
|                    | A2                 | 147～2,910                             | 23～620                                | 370      | 270    | 280    | 960     |
|                    | A3                 | 631～1,550                             | 27～1,700                              | 370      | 660    | 73     | 870     |
|                    | A4                 | 9.7～11.9                              | 8.4～17.0                              | 11       | 10     | 10     | 12      |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 95 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 96 に示す清水川の上流と下流の 2 地点および掘削土（ズリ）置場雨水調整池において、定期的（原則 1 回/月）に採水を行い（写真 12）、水質調査を実施しています。

平成 29 年度における調査結果は、表 14 に示すとおりです。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。

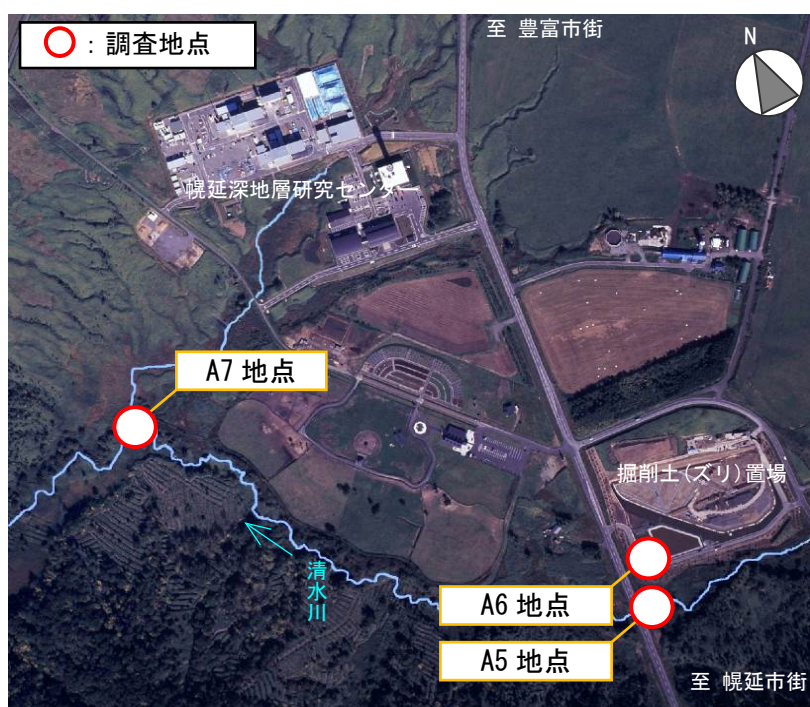


図 96 清水川および掘削土（ズリ）置場雨水調整池の調査地点



写真 12 清水川の採水状況

表 14 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29年度              |
|------------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
|                  |        | 平成18年6月<br>～平成19年4月<br>掘削土(ズリ)<br>搬入前 | 平成19年5月<br>～平成29年3月<br>掘削土(ズリ)<br>搬入後 | 平成29年4月<br>～平成30年3月 |
| カドミウム<br>(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<br>(mg/L)      | A5     | <0.005                                | <0.005                                | <0.005              |
|                  | A6     | <0.005                                | <0.005～0.006                          | <0.005～0.006        |
|                  | A7     | <0.005                                | <0.005～0.008                          | <0.005              |
| ヒ素<br>(mg/L)     | A5     | <0.005                                | <0.005～0.006                          | <0.005              |
|                  | A6     | <0.005～0.011                          | <0.005～0.015                          | <0.005～0.005        |
|                  | A7     | <0.005                                | <0.005～0.009                          | <0.005              |
| セレン<br>(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<br>(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<br>(mg/L)    | A5     | 0.03～0.25                             | <0.02～0.44                            | 0.04～0.27           |
|                  | A6     | <0.02～0.09                            | 0.02～0.43                             | 0.04～0.17           |
|                  | A7     | 0.03～0.30                             | <0.02～0.42                            | 0.04～0.28           |
| pH               | A5     | 6.4～7.1                               | 6.0～7.9                               | 6.7～7.5             |
|                  | A6     | 5.8～7.4                               | 5.7～9.1                               | 6.4～8.5             |
|                  | A7     | 6.5～7.0                               | 6.2～7.8                               | 6.7～7.2             |
| 浮遊物質<br>(mg/L)   | A5     | 1～20                                  | <1～66                                 | 1～16                |
|                  | A6     | 12～173                                | <1～500                                | 1～48                |
|                  | A7     | 1～11                                  | <1～270                                | <1～7                |
| 塩化物イオン<br>(mg/L) | A5     | 14.4～30.5                             | 7.2～70                                | 16～38               |
|                  | A6     | 5.1～24.7                              | 2.9～269                               | 3.6～33              |
|                  | A7     | 15.6～28.7                             | 8.1～100                               | 15～35               |

※1：主な分析項目を抜粋

※2：調査地点は図 96 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 29 年度における水質調査結果は、表 15 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 15 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 29 年度                    | 北るもい<br>漁業協同組合<br>協定値 |
|--------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
|                          |               | 平成 18 年 12 月<br>～平成 29 年 3 月 | 平成 29 年 4 月<br>～平成 30 年 3 月 |                       |
| pH                       | 研究管理棟         | 5.9～7.4                      | 6.1～7.5                     | 5.8～8.6               |
|                          | 地下施設<br>現場事務所 | 6.8～7.9                      | 7.5～7.9                     |                       |
| 生物化学的<br>酸素要求量<br>(mg/L) | 研究管理棟         | <0.5～17                      | 1.8～11                      | 20                    |
|                          | 地下施設<br>現場事務所 | <0.2～28                      | <0.5～11                     |                       |
| 浮遊物質<br>(mg/L)           | 研究管理棟         | 0.5～10                       | 1～5                         | 20                    |
|                          | 地下施設<br>現場事務所 | 0.5～7.0                      | <1.0～2.0                    |                       |
| 全窒素<br>(mg/L)            | 研究管理棟         | 6.6～52                       | 12～33                       | 60                    |
|                          | 地下施設<br>現場事務所 | 0.6～45                       | 0.3～2.1                     |                       |
| 全リン<br>(mg/L)            | 研究管理棟         | 0.5～4.5                      | 1.5～3.1                     | 8                     |
|                          | 地下施設<br>現場事務所 | <0.1～7.8                     | <0.1～0.5                    |                       |
| 透視度<br>(cm)              | 研究管理棟         | 30                           | 30                          | 30                    |
|                          | 地下施設<br>現場事務所 | 30                           | 30                          |                       |
| 大腸菌群数<br>(個/mL)          | 研究管理棟         | 0～30                         | 0                           | 3,000                 |
|                          | 地下施設<br>現場事務所 | 0～1,500                      | 0～180                       |                       |

## 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 28 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 97 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 29 年度における各調査結果は、これまでと比較して大きな変化がないことを確認しています。

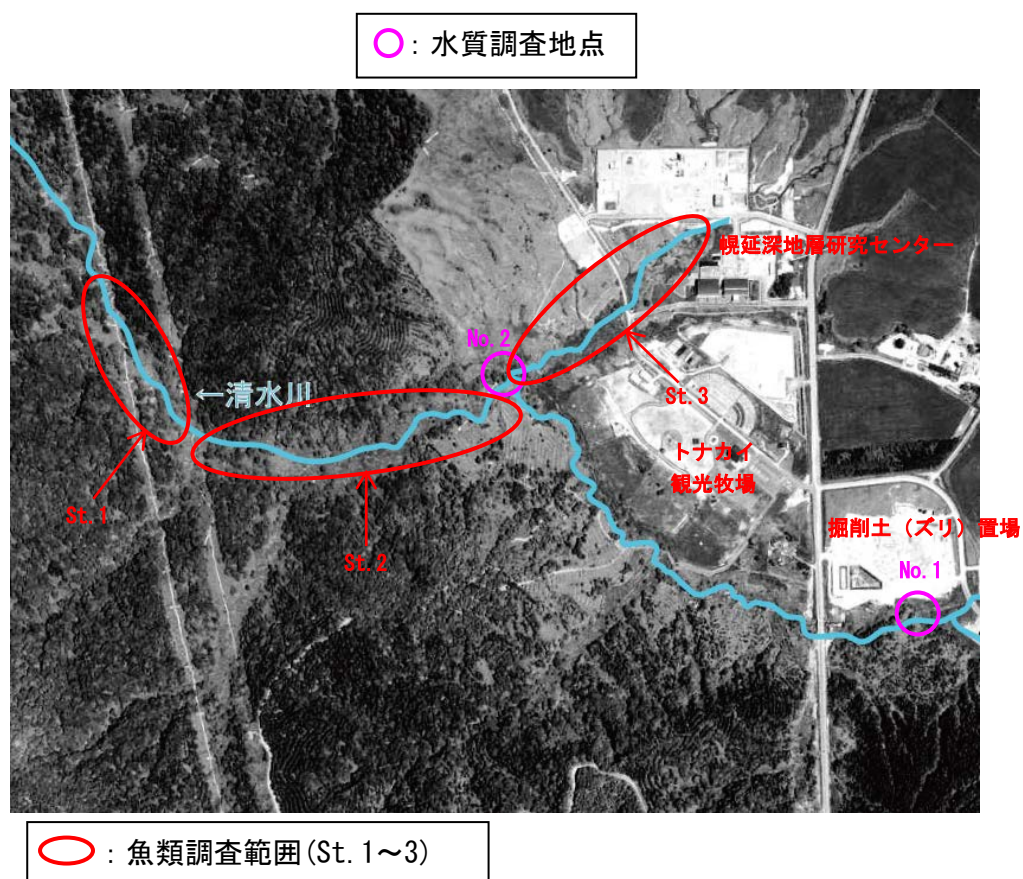


図 97 環境調査実施場所

## (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13）、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29年度における調査結果は、表16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 13 清水川の水質調査

表 16 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29年度 |     |      |       |
|--------------------------|--------|-----------------|--------|-----|------|-------|
|                          |        |                 | 平成29年  |     |      | 平成30年 |
|                          |        | 平成14年8月～平成29年2月 | 6月     | 9月  | 11月  | 2月    |
| pH                       | No. 1  | 6.3～7.9         | 7.6    | 6.8 | 7.1  | 7.5   |
|                          | No. 2  | 6.4～7.7         | 7.2    | 6.7 | 7.0  | 7.5   |
| 生物化学的<br>酸素要求量<br>(mg/L) | No. 1  | <0.5～62         | 1.4    | 1.7 | 3.7  | 1.5   |
|                          | No. 2  | <0.5～10.0       | 1.6    | 4.7 | 6.1  | 2.1   |
| 浮遊物質<br>量<br>(mg/L)      | No. 1  | 1～70            | 2      | 3   | 3    | 4     |
|                          | No. 2  | <1～69           | 5      | 5   | 5    | 2     |
| 溶存酸素量<br>(mg/L)          | No. 1  | 6.6～13.9        | 9.9    | 9.6 | 11.1 | 12.7  |
|                          | No. 2  | 5.5～12.5        | 6.9    | 7.4 | 7.7  | 10.4  |

※1：主な分析項目のみを抜粋

※2：調査地点は図97参照

## (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 14）。調査は、St.1～St.3 の 3 箇所で実施しています（図 97）。平成 29 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 17 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 14 生息魚類調査

表 17 確認された重要種（魚類）

| 目      | 科      | 種          | 選定根拠 <sup>*1</sup> |   |    |    |   |   |   |
|--------|--------|------------|--------------------|---|----|----|---|---|---|
|        |        |            | ①                  | ② | ③  | ④  | ⑤ | ⑥ | ⑦ |
| ヤツメウナギ | ヤツメウナギ | スナヤツメ北方種   |                    |   | VU |    | 希 |   |   |
| コイ     | コイ     | 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 | R  |   |   | ○ |
| 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：「レッドデータブック 2014-日本の絶滅のおそれのある野生生物-4 汽水・淡水魚類」（環境省 2015 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：「北海道の希少野生生物 北海道レッドデータブック 2001」（北海道 平成 13 年）の記載種  
Cr：絶滅危機種 En：絶滅危惧種 R：希少種 N：留意種
- 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

## 7. 安全確保の取組み

安全確保の取組みとして、請負作業や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の指導・助言を行いました。

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を指導・助言しました（写真 15）。

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するほか、全国安全週間などの機会を捉えて、従業員のみな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 16）。



写真 15 安全パトロールの状況



写真 16 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、共同研究や研究協力をはじめ、広く関連する国内外の研究機関や専門家の参加を得て進めています。平成29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などで観察する樹脂注入試験を実施しています。平成29年度は、深度350m調査坑道の試験坑道3における樹脂注入試験の樹脂注入箇所周辺で採取した試料を切断し、詳細な観察を進めました。今後、樹脂が充填された割れ目近傍の岩石の薄片作成による詳細な観察により、掘削損傷領域内部の割れ目の連結性や開口幅といった詳細な情報を明らかにし、割れ目の可視化に関する成果として取りまとめを行います。

##### 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、平成28年度に引き続き、幌延の地下水中に溶存する微量元素の濃度を支配する固相を推定するための分析手法や解析手法について検討しました。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うえ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<sup>(18)</sup>。

##### 信州大学

立坑および水平坑道の掘削に伴って坑道周辺岩盤に生じる損傷に関する詳細な知見を得ることを目的として、東立坑および換気立坑における

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・傾斜の傾向を明らかにしました。立坑壁面の方位別の分析結果から、最大水平圧縮方向に直交する南北方向では割れ目が発達し、最大水平圧縮方向に平行な東西方向では割れ目の発達が弱いことが明らかとなりました。また、割れ目の発達しているところでは、掘削に伴う割れ目の発達が弱いことが統計的に示されました。平成29年度は、割れ目を考慮した立坑掘削解析を実施し、力学的な観点から、原位置で確認された割れ目の発達性状について検討しました。今後、原位置での観察結果と数値解析の結果をあわせて、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等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28年度までの研究により、水分と関連付けた岩盤の特徴の解明の重要性がX線CTスキャナによる内部の観察結果も踏まえて明らかとなりました。そこで、これらの研究成果を踏まえた、今後の研究開発のアプローチを検討するための2年計画の共同研究を締結しました。具体的には、これまでに蓄積された知見を分析したうえで、さらに必要なデータを取得するための要素試験等を行い、これまでの知見とあわせて結果を取りまとめるとともに、今後の研究開発のアプローチを提示します。

また、化学的浸透現象が原位置地下環境に及ぼす影響を検証することを目的に、深度350m調査坑道のボーリング孔に高塩濃度溶液を投入し、濃度変化と間隙水圧変化の測定を実施しました。平成29年度は、平成28年度に実施した原位置試験により抽出された課題を整理し、試験条件および装置の改良を行いました。その結果、平成28年度よりも良好な間隙水圧変化が計測され、浸透圧現象により、原位置の圧力が変化している可能性が示唆されました。

## 名古屋大学

掘削影響領域における炭酸カルシウムによる自己シーリング<sup>\*55</sup>に関する研究を実施しました。この研究は、コンクリート材料から溶出するカルシウムイオンが地下水と反応して炭酸カルシウムが形成され、掘削影響領域において空隙構造を充填して閉塞する可能性について、試験坑道から試料を採取して検討するものです。平成29年度は、地下施設の坑道壁面から岩石試料を採取し、コンクリートと岩盤の境界面の分析を行いました。その結果、境界部に炭酸カルシウムの形成が確認され、岩盤中の微小空隙の自己シーリングを促進させる技術開発の可能性が示されました。

## 北海道大学

堆積岩中の物質移行挙動を評価することを目的として、稚内層のマトリクス部試料を使用した室内試験を実施しました。平成29年度は新たに $\text{Cl}^-$ と $\text{HTO}^{*56}$ の見かけの拡散係数および拡散の活性化エネルギーを取得しました。その結果、 $\text{Cl}^-$ の見かけの拡散係数は $\text{HTO}$ の見かけの拡散係数よりもわずかに小さい一方で、同じ陰イオンである $\text{I}^-$ の見かけの拡散係数よりも大きいことがわかりました。これは、 $\text{I}^-$ が稚内層に対してわずかに収着するというこれまでの研究成果と整合します。また、 $\text{Cl}^-$ と $\text{HTO}$ の拡散の活性化エネルギーは自由水中の活性化エネルギーとほぼ等しく、両元素のマトリクス部の移行は空隙水中の拡散が支配的であることがわかりました。今後は、過年度に取得した多様な元素の温度依存性に関するデータを整理し、成果を取りまとめる予定です。

## 北海道大学、大成建設株式会社、株式会社地層科学研究所

地下の坑道内におけるメタンの発生量や移行経路を評価するための手法開発として、これまでに三次元レーザースキャナとレーザメタンセンサーを組み合わせた技術を開発し、深度350m調査坑道内における坑道の形状の計測とあわせて坑道壁面におけるメタン濃度分布の測定を行ってきました。平成29年度は、これまでの成果をまとめ、国際会議において

---

<sup>\*55</sup>：炭酸カルシウムによる自己シーリングとは、コンクリート材料から溶出するカルシウムイオンが地下水と反応して炭酸カルシウムが形成され、坑道掘削によって生じる掘削影響領域の空隙構造を閉塞することにより、掘削影響領域を地下水が選択的に移動することを抑制する効果を指します。

<sup>\*56</sup>：水分子 $\text{H}_2\text{O}$ を構成する水素原子のうちの1つが三重水素で置換されたもの。

発表しました<sup>(42)</sup>。

## 室蘭工業大学

坑道壁面の地質観察手法の整備の一環として、三次元レーザースキャナ計測により取得される点群データから坑道壁面における地質情報を取得する手法を検討しています。点群データは、レーザ光の反射強度と計測対象物の表面形状を表す三次元座標から構成されます。レーザ光の反射強度は、岩石表面の特徴（例えば、粗さや構成物質の反射率など）に依存するため、坑道壁面に分布する岩石の種類や変質程度を分類することに活用できます。一方、掘削直後の坑道壁面の形状は、そこに分布する断層や節理といった割れ目に依存して形成されるため、三次元座標を用いた形状分析により割れ目の分布を把握することができます。本共同研究では、後者の方法を対象として、点群データを用いた形状分析により、割れ目が形成する平面を抽出する方法を検討してきました。これまでに、DiAnaアルゴリズム<sup>\*57</sup>を適用し点群データを可変サイズのブロックにより分割する手法、ArcGIS<sup>\*58</sup>の拡張機能である地形分析ツールを適用した手法を検討しました。さらに、平成29年度においては、DiAnaアルゴリズムのようにブロックによる点群データの分割を必要としない多次元粒子群最適化（MDPSO）を用いた平面推定方法を検討しました。

稚内層に対して掘削された坑道の壁面には、坑道掘削後に応力の再配分によって新たな割れ目（以下、「EDZ割れ目」）が発達しています。EDZ割れ目は坑道壁面に数多く発達し、鱗状に分布しており、坑道壁面の形状は、EDZ割れ目の露出面が支配的です。これまで検討した手法は、稚内層の坑道壁面に適用する場合、EDZ割れ目の分布状況や方位分析に適用することができます。

## 琉球大学、地殻工学防災研究所、アース・スキャニング研究会<sup>\*59</sup>

幌延深地層研究センターの地下に分布する稚内層のような、不連続性

---

\*57：DiAna アルゴリズムとは、三次元空間に置かれた点群をあるサイズの立方体ブロックで格子状に分割し、各立方体内に含まれる点に対して最小二乗法により面をフィッティングする手法のことです。

\*58：Esri 社の地理情報システムソフトウェアです。

\*59：アース・スキャニング研究会は、地質調査会社 10 社で構成される会員制の組織であり、ボーリング孔壁画像化装置の高度化研究や応用技術開発を行うことで、地盤工学の発展に貢献する活動を行っています。

岩盤の特徴を併せ持つ堆積軟岩の物性評価法を構築することを目的として研究を実施しています。平成29年度は、東立坑の坑底から掘削したボーリング孔における超音波式ボアホールカメラによる孔壁画像のデータとボーリング孔の岩石試料を用いた針貫入試験などの室内試験の結果を比較しました。その結果、ボアホールカメラで取得される反射強度のデータと室内試験による岩盤の硬軟のデータが良く整合することを明らかにしました。

### 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）、間隙水圧、温度を計測する3種の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29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、割れ目中の水流発生に伴い発生する波形の性状を室内試験で検討し、岩盤から発生する波形と地下水の流れに起因する波形の選別手法の高度化を図りました。

#### 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開発、人工バリアの健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究開発について、共同研究を実施しました。

地層処分実規模試験施設は、地層処分概念とその工学的な実現性や人工バリアの長期挙動を実感・体感できる地上設備を利用し、人工バリアの搬送・定置にかか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29年度は、4.1.3でも述べたように、地層処分実規模試験施設において緩衝材の定置試験を実施し、その様子を公開するとともに、緩衝材が膨潤して隙間が閉塞される過程を観察できる装置を用いた浸潤試験を継続しました。搬送定置・回収技術に関する研究開発では、地下での実証

試験に向けて、原環センターが開発した定置装置の要素試験を行い、実際の坑道における走行データの取得などを行いました。

人工バリアの健全性および無線計測技術の適用性に関する研究開発では、4.1.4でも述べたように、オーバーパックや緩衝材の健全性に関する原位置試験として、オーバーパック溶接部の腐食挙動に関わる試験について、計測を終了し試験体を解体し分析を実施するとともに、緩衝材の流出試験を実施しました。また、無線モニタリング装置の適用性確認として、人工バリア性能確認試験の緩衝材および埋め戻し材中に設置した無線計測装置によるデータ取得を継続しました。

## 産業技術総合研究所

地下深部における長期的な元素の移行挙動に関わる岩盤の水理特性および化学特性の調査解析技術の高度化を目的として、堆積岩地域における地下水流動・物質移行に関する研究を実施しました。平成 29 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、応力および塩分濃度の変化が珪質泥岩の水理特性と物質移行特性に与える影響を、化学的浸透実験により調査しました。その結果、深層ボーリング孔の岩石試料など、応力開放の影響を受けた岩石の特性を測定する場合、過去の深度における内部空隙の復元を考慮した応力条件を考える必要があることがわかりました。

## 大成建設株式会社

幌延深地層研究センターの地下施設周辺岩盤は軟岩に分類されますが、このような軟岩では、立坑掘削時に軟弱な部分に遭遇する場合なども想定されます。その際、効率的かつ効果的な立坑の支保設計を行うことが重要となります。そのため、地質状況や岩盤の強度物性等のデータを精査し、地山状況に応じた最適な支保パターンを決定することを目標とした支保の妥当性検証の高度化を目的とした研究を進めています。平成 29 年度は、これまでに得られた原位置のデータを精査し、物性を更新したうえで、応力状態や岩盤の強度に即した支保構造を解析的に検討しました。検討の

結果、大きな地圧が作用する場合でも成立する立坑の設計手法を例示することができました。

## 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 四方位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 29 年度は、三次元地質構造モデルを構築するとともに、坑道をメッシュとしてモデル化せずに浸透流解析を行う手法を用いて換気、東立坑の深度 250m までの掘削を対象とした試計算を行いました。その結果、試計算では高透水性構造をモデルに反映していないため、このような構造に遭遇した際の湧水量の増加傾向は再現できていないものの、それ以外の実測の湧水量の傾向については概ね再現できていることを確認しました。本手法は、このような高透水性構造の分布が把握された場合に、速やかに解析モデル更新して早期に解析結果を得ることを長所としていることから、今後は、このような実測との乖離を埋める方法についても検討するとともに、引き続き、幌延の掘削開始から深度 350m 調査坑道掘削完了までの坑道掘削を模擬した解析を行い、本手法の整備を図っていく予定です。

また、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ました。平成 29 年度は、断層内部の透水性の不均質性を考慮した数値解析により地下水位低下に伴う岩盤の傾斜挙動を検討しました。その結果、深度 350m 調査坑道の断層部を掘削

した際の地下水変動による岩盤の傾斜挙動は、実際に計測された傾斜挙動により整合するものであることが確認されました。今後も数値解析の継続により、詳細な岩盤の傾斜挙動を検討するとともに、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を図ります。

## 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<sup>\*60</sup>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ました。平成 29 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に pH の計測を継続しました。

## 電力中央研究所

地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術の開発、岩盤中の地下水移行評価技術の開発（地下水年代測定）およびコントロールボーリング孔を用いたモニタリング技術の開発について、共同研究を実施しました。

坑道掘削影響領域の調査技術の開発については、地下施設において、坑道掘削に伴う周辺岩盤の力学、地球化学特性への影響を把握するための調査（比抵抗トモグラフィや弾性波トモグラフィ、地下水の採水・分析など）を継続して行い、坑道掘削に伴う地質環境特性の変化に関するデータを蓄積しました。また、地下水年代測定については、主に地下施設を対象とし、採水の際の脱ガスを低減するための採水治具や容器の改良を行い、地下水およびガスのサンプリングを行いました。さらに、これまでの成果をもとに、稚内層深部の地下水は、隆起・侵食の影響をほとんど受けておらず、長期にわたり滞留している可能性が高いことを論文として発表しました<sup>(43)</sup>。

コントロールボーリング孔を用いたモニタリング技術の開発の内容に

---

<sup>\*60</sup>：大阪大学 接合科学研究所により開発されたもので、もみ殻から得られるシリカ（二酸化ケイ素：SiO<sub>2</sub>）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好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。

については、3.1.2(4)で述べたとおりです。

## 幌延地圏環境研究所

両機関の試験設備を活用した研究協力として、調査坑道において取得した地下水中の微生物に関するデータを取得しました。平成29年度は、これまでに引き続き、深度140m、250mおよび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、12-P350-M02）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。得られた結果は、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<sup>\*61</sup>

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「鉄材料の腐食に関する原位置試験」に参加しています。平成29年度は、本試験の取りまとめのため、平成28年度に引き続き全体報告書の作成を継続しました。これらの手法や原位置での試験に関する情報などは、幌延深地層研究計画における坑道内での調査研究に反映していきます。

上記のほか、クレイクラブ（Clay Club）<sup>\*62</sup>定例会合（平成29年9月）に出席し、クレイクラブカタログ（各機関が研究対象としている粘土質媒体の諸特性を相互に比較可能なデータセット）更新版の作成状況を確認するとともに、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）の今後の計画について、諸外国の専門家らと議論しました。

---

<sup>\*61</sup>: 堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際共同研究です。平成30年3月現在、原子力機構を含め8ヶ国から16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。

<sup>\*62</sup>: Clay Clubは、経済協力開発機構（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) (2016) : “幌延深地層研究計画 平成29年度調査研究計画”, JAEA-Review 2017-013, 22p.
- (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.
- (3) 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, Vol. 44, pp. 022004\_1 - 022004\_8, DOI:10.1088/1755-1315/44/2/022004
- (4) 石井英一、福島龍朗 (2006) : “新第三紀珪質岩における断層の解析事例”、応用地質、47巻、5号、pp. 280-291、 <http://doi.org/10.5110/jjseg.47.280>
- (5) 舟木泰智、石井英一、常盤哲也 (2009) : “新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?”、応用地質、50巻、4号、pp. 238-247、<https://doi.org/10.5110/jjseg.50.238>
- (6) Ishii, E. (2015): “Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results” , Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.120, pp. 2220-2241.
- (7) 細谷真一、石井英一、菱谷智幸 (2015) : “立坑掘削時の湧水に対する水圧応答を利用した水理特性の推定. —幌延深地層研究センターにおける適用事例—”, 日本地下水学会 2015 年秋季講演会講演要旨, pp. 96-101.
- (8) 花室孝広 (編) (2014) : “幌延深地層研究計画 平成 25 年度調査研究成果報告”, JAEA-Review 2014-039, 69p.
- (9) 花室孝広 (編) (2015) : “幌延深地層研究計画 平成 26 年度調査研究成果報告”, JAEA-Review 2015-017, 95p.
- (10) 藪内聡、操上広志、瀬尾昭治、原稔、國丸貴紀、竹内竜史 (2006) : “幌延深地層研究計画におけるボーリング孔を用いた地下水の水圧の長期モニタリング”, JAEA-Research 2006-056, 32p.
- (11) 青柳和平、石井英一 (2017) : “幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における掘削損傷領域の解析的評価”, 資源・素材講演集(インターネット), 4(2), 7P.

- (12) 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, 10–22.
- (13) 藪内聡、國丸貴紀、石井英一、羽出山吉裕、井尻裕二、松岡清幸、井原哲夫、松波伸次郎、牧野章也 (2008) : “幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリング (PB-V01 孔) 調査報告書－岩盤の水理特性調査－”, JAEA-Data/Code 2008-026, 62p.
- (14) 岩月輝希、石井英一、新里忠史 (2009) : “北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築”, *地学雑誌*, 700–716.
- (15) Sasamoto, H., Satoh, H. and Arthur, R.C. (2018) : “Characterization of mineralogical controls on ammonium concentrations in deep groundwaters of the Horonobe area, Hokkaido”, *Journal of Geochemical Exploration*, pp. 318–325.
- (16) 宮川和也、玉村修司、中田弘太郎、長谷川琢磨 (2017) : “幌延深地層研究計画に関わるガス組成データ” JAEA-Data/Code 2016-021, 60p.
- (17) Schäfer, T., Huber, F., Seher, H., Missana, T., Alonso, U., Kumke, M., Eidner, A., Claret, F., Enzmann, F. (2012) : “Nanoparticles and their influence on radionuclide mobility in deep geological formations”, *Applied Geochemistry*, 27, pp. 390–403.
- (18) Kimuro, S., Kirishima, A., Nagao, S., Saito, T., Amano, Y., Miyakawa, K., Akiyama, D., Sato, N. (2017) : “Characterization and thermodynamic study of humic acid in deep groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, in press.
- (19) 女澤徹也、望月陽人、宮川和也、笹本広 (2018) : “幌延の地下施設における地下水の地球化学モニタリング装置を用いた物理化学パラメータ測定結果”, JAEA-Data/Code 2018-001.
- (20) 中山雅、佐野満昭、真田祐幸、杉田裕 (編) (2009) : “幌延深地層研究計画 平成 20 年度調査研究成果報告”, JAEA-Research 2009-032.
- (21) 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.
- (22) 青柳和平、宮良信勝、石井英一、松崎嘉輝 (2018) : “幌延深地層研究センターの人工バリア性能確認試験孔周辺の掘削影響領域の経時変化に関する検討”, *資源・素材講演集 (インターネット)*, 5(1), 7P.
- (23) 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.

- (24) 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.
- (25) 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.
- (26) 日本原子力研究開発機構 (2018): “平成 29 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”.
- (27) 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”.
- (28) 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, vol. 74, pp. 96-106.
- (29) 岩月輝希、石井英一、新里忠史 (2009): “北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築”, 地学雑誌, vol. 118, pp. 700-716.
- (30) 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ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー 分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022.
- (31) 日本原子力研究開発機構 (2015): “平成 26 年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書”.
- (32) 日本原子力研究開発機構 (2018): “平成 29 年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書”.
- (33) (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”.
- (34) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター (2011): “平成 22 年度核燃料サイクル関係推進調整委託費 (地層処分実規模設備整備事業) 報告書”.
- (35) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター (2012): “平成 23 年度原子力発電施設広聴・広報等事業委託費 (地層処分実規模設備整備事業) 報告書”.
- (36) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター (2013): “平成 24 年度原子力施設立地推進調整事業等委託費 (地層処分実規模設備整備事業) 報告書”.
- (37) (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・広報等事業委託費 (地層処分実規模設備事業) 報告書”.
- (38) (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・広報等事業委託費 (地層処分実規模設備運営等事業) 報告書”.

- (39) Tachi, Y., Tadahiro, S., Kenji, Y., Yasuo I. and Hiroaki, T. (2016):  
 “Clay-based modeling approach to diffusion and sorption in the  
 argillaceous rock from the Horonobe URL: application to Ni(II), Am(III),  
 and Se(IV)”, Clay Minerals Society Workshop Lectures Series, vol.21  
 chapter19, 241-250.
- (40) 日本原子力研究開発機構 (2017) : ”平成 28 年度地層処分技術等事業 処分シス  
 テム評価確証技術開発 報告書”
- (41) Tachi, Y., Kenji, Y., Yoshimi, S. and Mikazu, Y. (2011): “Diffusion and  
 sorption of  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{I}^-$  and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai  
 Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling approach”,  
 Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.75 6742-6759.
- (42) Nago, M., Motoshima, T., Miyakawa, K., Kanie, S., Sanoki, S. (2017):  
 “Three-dimensional visualization of methane concentration distribution  
 in tunnels to increase underground safety”, Proceedings of the World  
 Tunnel Congress 2017, Bergen, Norway.
- (43) Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K., Sasamoto,  
 H (2018): “An evaluation of the long-term stagnancy of porewater in the  
 Neogene sedimentary rocks in northern Japan”, Geofluids, Volume 2018,  
 Article ID 7823195.

## 参考資料

(平成 29 年度外部発表)

著者アルファベット順に記載

青柳和平, 陳友晴, 櫻井彰孝, 石井英一, 石田毅 (2018): “幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の可視化手法の検討(共同研究)”, JAEA-Research 2017-014, pp. 49.

青柳和平, 石井英一 (2017): “幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における掘削損傷領域の解析的評価”, 資源・素材講演集, 4(2), pp. 7.

Aoyagi, K., Kamemura, K., Nago, M., Sugawara, K. and Matsubara, M. (2017): “Development of a back analysis method for the estimation of in situ stress based on the measured convergence in the Horonobe Underground Research Laboratory”, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2017 (WTC 2017) (USB Flash Drive), pp. 10.

青柳和平, 窪田健二, 中田英二, 末永弘, 野原慎太郎 (2017): “幌延深地層研究施設における掘削影響領域の評価; 深度 250m を対象とした試験(共同研究)”, JAEA-Research 2017-004, pp. 91.

青柳和平, 宮良信勝, 石井英一, 松崎嘉輝 (2018): “幌延深地層研究センターの人工バリア性能確認試験孔周辺の掘削影響領域の経時変化に関する検討”, 資源・素材講演集, 5(1), pp. 7.

青柳和平, 名合牧人 (2017): “幌延深地層研究センターにおける坑道掘削の情報化施工支援技術の開発”, 地盤工学会誌, 65(8), p. 12-15.

藤原利如, 星野雅人, 徳永博昭, 堀越秀彦 (2017): “幌延深地層研究センターゆめ地創館を活用したリスク・コミュニケーションについて; 2015 年度”, JAEA-Review 2017-008, pp. 128.

花室孝広 (2017): “幌延深地層研究計画 平成 29 年度調査研究計画”, JAEA-Review 2017-013, pp. 22.

花室孝広 (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, pp. 100.

早野明, 石井英一 (2018): “新第三紀塊状珪質泥岩に分布する断層を対象とした亀裂ネットワークモデル”, 資源・素材講演集, 5(1), pp. 7.

- 早野明, 板倉 賢一 (2017): “三次元レーザスキャナ計測の坑道壁面の割れ目観察への適用性”, *Journal of MMIJ*, 133(4), p. 76-86.
- 早野明, 齊藤陵子, 松川瞬, 板倉賢一, 鈴木幸司, 松岡稔幸, 佐藤稔紀 (2017): “三次元レーザスキャナデータに基づく立坑壁面に発達する掘削影響割れ目の方位分析”, *資源・素材講演集*, 4(2), pp. 7.
- 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, p. 10-22.
- Ishii, E. (2017): “Preliminary assessment of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones by core logging”, *Engineering Geology*, 221, p. 124-132.
- 石井英一 (2018): “断層のダメージゾーン亀裂の破壊モードが岩盤の巨視的な透水性に与える影響”, *日本地質学会第 124 年学術大会講演要旨*, p. 282.
- 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, p. 158-166.
- 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 (CD-ROM)*, p. 43-48.
- 榊永幸介, 佐藤稔紀, 沖原光信, 辻正邦, 中島均, 齋藤亮 (2017): “海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得 (その 1) - 研究の概要 -”, *土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術講演会講演概要集 (DVD-ROM)*.
- 松川瞬, 板倉賢一, 早野明, 鈴木幸司 (2017): “岩盤における不連続面の自動推定に向けた 3 次元点群データの可変格子分割法”, *Journal of MMIJ*, 133(11), p. 256-263.
- 女澤徹也, 望月陽人, 宮川和也, 笹本広 (2017): “幌延深地層研究センター調査坑道における地下水の地球化学モニタリング装置による地下水圧の連続観測結果”, *JAEA-Data/Code 2017-010*, pp. 63.
- 女澤徹也, 望月陽人, 宮川和也, 笹本広 (2018): “幌延の地下施設における地下水の地球化学モニタリング装置を用いた物理化学パラメータ測定結果”, *JAEA-Data/Code 2018-001*, pp. 55.

- 宮川和也, 石井英一 (2017): “海成堆積岩中の炭酸塩の形成に対する有機物の続成作用の役割”, 2017 年度日本地球化学会第 64 回年会講演要旨集, p. 176.
- 宮川和也, 女澤徹也, 望月陽人, 笹本広 (2017): “幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ 2014 年度～2016 年度”, JAEA-Data/Code 2017-012, pp. 60.
- Miyakawa, K. and Okumura, F. (2017): “Preliminary research on the effects of microbial methane oxidation on drill-core head-space gas analysis”, XIVth International Conference on Gas Geochemistry Book of Abstracts, p. 173-176.
- 宮川和也, 奥村文章 (2017): “ボーリングコア試料を用いたヘッドスペースガス分析法における微生物メタン酸化反応の影響”, 2017 年度日本地球化学会第 64 回年会講演要旨集, p. 100.
- 水野崇, 岩月輝希, 松崎達二 (2017): “ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水質の推定方法に関する検討”, 応用地質, 58(3), p. 178-187.
- 望月陽人, 宮川和也, 石井英一, 笹本広, 佐藤稔紀 (2017): “幌延深地層研究センター調査坑道の掘削損傷領域における岩盤の酸化還元状態”, 2017 年度日本地球化学会第 64 回年会講演要旨集, p. 175.
- Nago, M., Motoshima, T., Miyakawa, K., Kanie, S. and Sanoki, S. (2017): “Three-dimensional visualization of methane concentration distribution in tunnels to increase underground safety”, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2017 (WTC 2017) (USB Flash Drive), pp. 10.
- 中島均, 沖原光信, 辻正邦, 齋藤亮, 佐藤稔紀, 榊永幸介 (2017): “海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得 (その 3) - 基本物性試験結果 -”, 土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術講演会講演概要集 (DVD-ROM).
- Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H. (2018): “An Evaluation of the long-term stagnancy of porewater in the neogene sedimentary rocks in northern Japan”, Geofluids, p. 7823195\_1-7823195\_21.
- 中山雅, 丹生屋純夫, 三浦律彦, 竹田宣典 (2018): “幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験 プラグコンクリートの配合検討”, JAEA-Research 2017-016, pp. 62.
- 中山雅, 岡本礼子, 白瀬光泰 (2017): “幌延 URL における低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの周辺環境への影響に関する研究”, 日本原子力学会 2017 年秋の大会予稿集, 2H05.

- 丹生屋純夫，畑浩二，鷗山雅夫，青柳和平，若杉圭一郎（2018）：“大深度地下掘削時の AE 計測における波形分析手法に関する研究”，第 45 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集(CD-ROM)，p. 226-231.
- 野上利信，星野雅人，徳永博昭，堀越秀彦，川畑一樹（2018）：“幌延深地層研究センターゆめ地創館を活用したリスク・コミュニケーションについて；2016 年度”，JAEA-Review 2018-003，pp.151.
- 荻野正貴，大脇英司，白瀬光泰，中山雅（2017）：“非定常電気泳動と EPMA によるコンクリート中の塩化物イオン拡散係数の迅速測定”，コンクリート工学年次大会 2017 論文集(DVD-ROM)，39(1)，p. 703-708.
- 大野宏和，武田匡樹，石井英一，舘幸男（2017）：“幌延 URL における物質移行特性評価（2）原位置トレーサー試験に基づく割れ目中の物質移行特性評価”，日本原子力学会 2017 年秋の大会予稿集，1H15.
- Ootsuka, Y., Ishikawa, T., Tajima, K., Wada, T., Aydan, Ö., Tokashiki, N., Sato, T. and Aoyagi, K. (2017): “Rock mass property evaluation based on the borehole wall images taken by using an ultrasonic scanner (USS)”, Proceedings of the 11th Asian Regional Conference of IAEG (ARC-11).
- 白瀬光泰，安部章正，名合牧人，石井英一，青柳和平，若杉圭一郎（2017）：“堆積軟岩における割れ目帯を対象とした物質移行試験に極超微粒子セメントを適用した深層調査ボーリングの施工事例”，土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術講演会講演概要集(DVD-ROM)，p. 1795-1796.
- 高橋忠男，佐藤稔紀，榎永幸介（2018）：“沿岸部海底下地質環境調査に係わる知識集約のためのシステム管理”，JAEA-Review 2017-030，pp. 60.
- 武田匡樹，大野宏和，石井英一，舘幸男（2017）：“幌延 URL における物質移行特性評価：（1）泥岩中の割れ目およびマトリクスを対象とした原位置トレーサー試験”，日本原子力学会 2017 年秋の大会予稿集，1H14.
- 伊藤剛志，舘幸男，根本一昭，佐藤智文，武田匡樹，大野宏和（2017）：“幌延 URL における物質移行特性評価：（3）マトリクス中の原位置トレーサー試験”，日本原子力学会 2017 年秋の大会予稿集，1H16.
- Tamamura, S., Miyakawa, K., Aramaki, N., Igarashi, T. and Kaneko, K. (2018): “A Proposed method to estimate in situ dissolved gas concentrations in gas-saturated groundwater”, Groundwater, 56(1), p.118-130.

戸栗智仁, 沖原光信, 辻正邦, 中島均, 杉山博一, 齋藤亮, 佐藤稔紀, 青柳和平, 榎永幸介 (2018) : “海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得”, JAEA-Research 2017-013, pp. 131.

辻正邦, 沖原光信, 中島均, 齋藤亮, 佐藤稔紀, 青柳和平 (2017) : “海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得 (その2) – 海外の地層処分のためのグラウト技術に関する最新動向 –”, 土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術講演会講演概要集 (DVD-ROM).

Tsuji, M., Okihara, M., Nakashima, H., Sato, T. and Aoyagi, K. (2017) : “Latest rock grouting technologies under sea water in Nordic countries and Japan”, Proceedings of 6th East Asia Forum on Radwaste Management Conference (EAFORM 2017) (Internet), pp. 6.