

**幌延深地層研究計画  
平成30年度調査研究成果報告  
(概要版)**

**令和元年7月**

**日本原子力研究開発機構  
幌延深地層研究センター**

# 1. はじめに

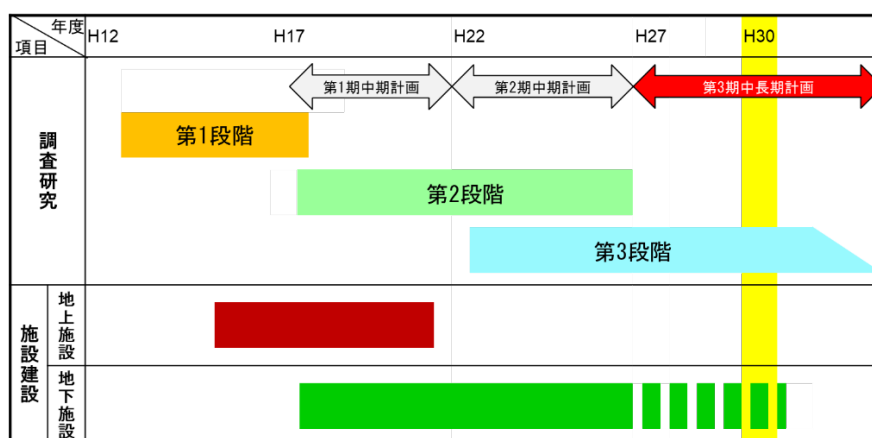
幌延深地層研究計画は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が、堆積岩を対象とした深地層の研究を北海道幌延町で実施しているものです。

「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（平成27年4月1日～令和4年3月31日）」（以下、第3期中長期計画）では、幌延深地層研究計画における研究開発として、「実際の地質環境における人工バリア\*1の適用性確認」、「処分概念オプションの実証」、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」の3つの課題（以下、「必須の課題」）を重点的に取り組むこととしています。

幌延深地層研究計画は、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの段階に分けて実施しています（図 1）。

平成30年度は、地下施設での調査研究段階（第3段階）として、第3期中長期計画に掲げた必須の課題を達成していくための調査研究を実施しました。

幌延深地層研究計画の全体スケジュール



第1段階：地上からの調査研究段階  
 第2段階：坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階  
 第3段階：地下施設での調査研究段階  
※平成31年度末（令和2年3月末）までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。

図 1 幌延深地層研究計画の全体スケジュール

※本概要版中の図表番号については、報告書本体と同じ番号としています。

\*1：ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる地層処分システムの構成要素のことで、高レベル放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁として、工学的に形成するものです。

## 2. 平成 30 年度の主な調査研究の成果

平成30年度は、「幌延深地層研究計画 平成30年度調査研究計画」にしたがって、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。

調査研究では、必須の課題に取り組むとともに、必須の課題に関わる調査研究の基礎情報となる坑道周辺の掘削影響領域を含む地質環境特性の長期的な変化や地質環境情報に関するデータの取得などを継続しました(図 2)。

地下施設の維持管理等では、安全パトロールによる現場の安全確保の徹底、機械設備等の点検保守・修繕などの維持管理および当センター周辺の環境調査などを継続しました。

3. 以降に、平成30年度に実施した主な調査研究の成果の一例を示します。また、地下施設の維持管理や環境調査などの概要を示します。

### 平成30年度の調査研究



図 2 平成30年度の主な調査研究

## 必須の課題

### ○実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

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>2</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するため、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>3</sup>試験を継続しました。人工バリア性能確認試験 (p. 8～10) では、地下水の浸潤状況、温度、応力、化学特性等に関する計測を継続しました。オーバーパック腐食試験では、計測を終了し、試験体の取り出しおよび分析調査を行いました (p. 11～12)。また、原位置トレーサー試験では、健岩部、割れ目および断層を対象として非放射性トレーサーを利用して実施し、物質の移行挙動に関する特性を把握しました (p. 15～16)。

### ○処分概念オプションの実証

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通じて、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、提供するため、人工バリアの定置・品質確認などの実証試験を行っています。その一環として、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究で実施している地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究において、平成 30 年度は人工バリアと坑道との隙間を粘土系材料で充填する試験を実施しました (p. 13～14)。

### ○地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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するため、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) を継続しました (p. 4～5)。

---

\*2: 地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤には、廃棄体からの熱、地下水との反応、岩盤から (または岩盤へ) 作用する応力、化学的な変化 (緩衝材中の間隙水の水質の変化) などによる影響が想定されています。実際の処分環境では、これらの影響が複合的に発生すると考えられ、その挙動を、熱－水理－力学－化学連成挙動と呼んでいます。

\*3: 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物質を利用したトレーサー試験を行うことはありません。

# 3. 地層科学研究

## ○地質環境調査技術開発

### 岩盤の水理

断層の透水性と岩石の強度・応力状態との関係の解明を目指した研究として、断層のせん断\*4変形が断層の水理特性に与える影響を確認することを目的として、東立坑の坑底より掘削したボーリング孔を用いて通常よりも高い注入圧を用いた透水試験（水圧擾乱試験）を継続しました。平成30年度は、同ボーリング孔の深度99.6m付近に出現した断層を対象とした試験を実施しました（図 10、図 11）。

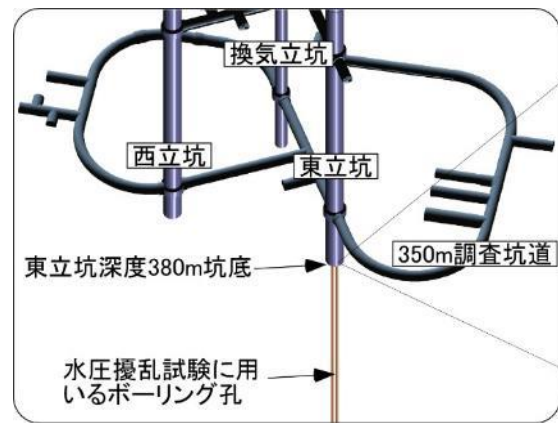
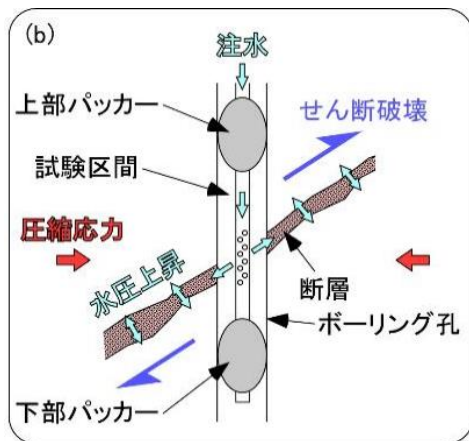


図 10 水圧上昇によって誘発される断層のせん断変形（逆断層の例） 図 11 水圧擾乱試験に用いたボーリング孔の位置

同断層を対象に水圧を段階的に上昇させる注入試験を複数回、連続して実施した結果、高压注入中に、急激な水圧低下とともに、断層内に不可逆的なせん断破壊を誘発させることができました（図 13）。この不可逆的なせん断破壊の発生は、上部パッカー圧のみが有意に低下し（図 13）、試験終了後にこの低下分に相当する不可逆的なパッカー圧の変化を確認できたことから判断することができます。この不可逆的なせん断変位量は、パッカー圧の不可逆的な低下量（0.07MPa）と断層の傾斜角から試算すると、数百 $\mu\text{m}$ 以上と推定されます。このせん断破壊の前後において、通常の

\*4：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。

水圧条件で測定した断層の透水性を比較すると、両者に有意な違いは認められず、ともにダクティリティインデックス (DI) <sup>\*5</sup>の経験式から推定される透水性の範囲に概ね収まっていることが確認できました (図 14)。この結果は、断層が再活動しても、断層中の亀裂の透水性がDIの経験式を有意に超えて不可逆的に上昇しないとするDIのモデルを支持するものであり、DIの経験式が将来的な断層運動に伴う断層の透水性の変化予測に適用できることを示唆しています。

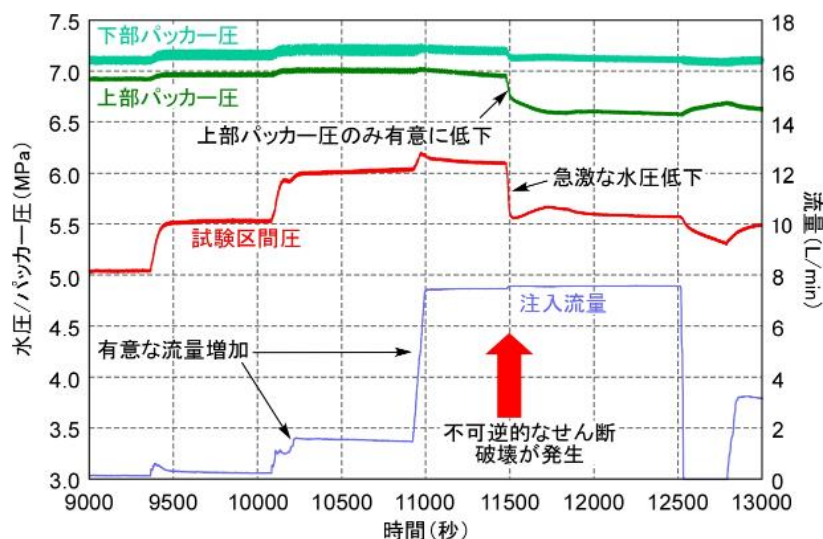


図 13 水圧擾乱試験中の水圧、パッカー圧および注入流量

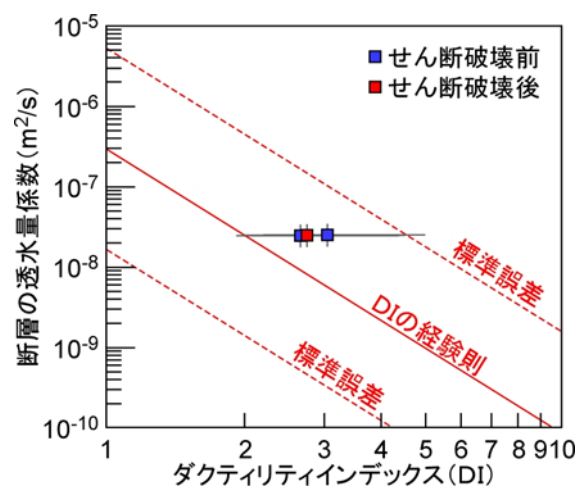


図 14 せん断破壊前後における断層の透水性の比較

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

\*5: 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）をその健全部の引張強度（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。

## 地下水の地球化学

坑道周辺の掘削影響領域では、坑道内の大気が坑道掘削に伴い生じた割れ目などを通じて岩盤中に拡散し、坑道周辺の岩盤や地下水が還元状態から酸化状態に変化すると考えられています。平成30年度は、坑道内の大気に含まれる酸素が坑道周辺の岩盤に拡散する様子を、簡易モデルを用いて計算しました。その結果、深度140m、250mおよび350m調査坑道では、坑道内の酸素は坑壁から約1mまで拡散しうると計算されました。

しかし、平成29年度までに実施した調査では、深度140m、250mおよび350m調査坑道の壁面から岩盤内部に向かって採取した長さ約1mの岩石試料において、酸化の指標となりうる色調や鉱物組成の変化は認められませんでした。また、350m調査坑道に掘削されたボーリング孔のうち地下水が涸渇している区間において、区間内を満たしているガスを採取・分析したところ、ガスの主成分はメタンと二酸化炭素であり、大気の主成分である窒素や酸素の割合は非常に低いことがわかっています。これらのことから、幌延では、地下水中に多量に溶けているメタンや二酸化炭素などのガスが水圧の低下に伴って地下水から遊離し、坑道周辺に形成される割れ目や不飽和領域\*6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（図 25）。

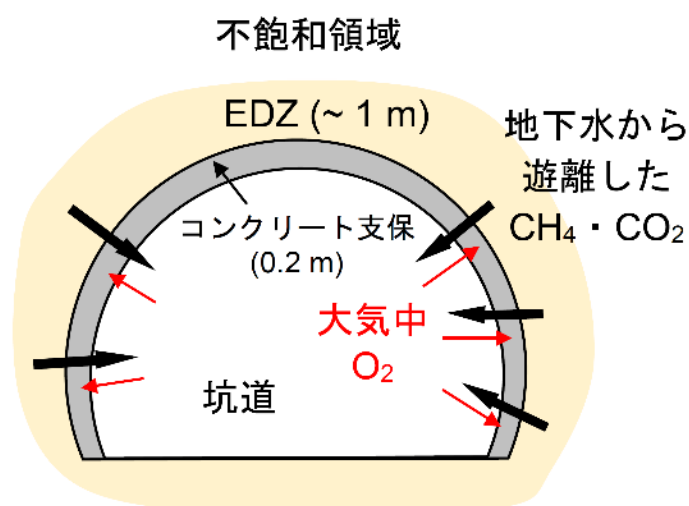


図 25 EDZ（掘削により損傷した領域）の化学環境に関する概念モデル

\*6：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。

## ○深地層における工学的技術の基礎の開発

### 地下施設における湧水対策技術の開発

スウェーデンやフィンランドでは、処分坑道や処分孔周辺において湧水量を大幅に少なくするために、浸透性が高く、耐久性の高い活性シリカコロイドを用いた溶液型グラウトの研究が行われており、沿岸域に位置する地下施設において実証試験および実際の施工が行われています。ただし、海水条件下での溶液型グラウトの固化のメカニズムは良くわかっておらず、施工方法も確立されていません。そこで、溶液型グラウトの海水条件下での長期挙動の現象理解を目的として、グラウト材の強度を一軸圧縮試験で測定するとともに、人工海水（養生水）に浸漬した際のシリカイオンの溶出量の経時変化を分析しました。試験対象とした配合は、主成分となるシリカに pH 調整剤と硬化促進剤を添加して、人工海水で練り混ぜた海水適応グラウト（S-60）と、硬化促進剤を添加しない海水硬化促進グラウト（Si-45, Si-60）の 3 種類を採用しました。

過去の検討結果から、注入後にゲル化した後、0.5m 以上の浸透距離を確保し、なおかつ 30kPa 程度の一軸圧縮強度の発現があれば、グラウト材は流出せずに所定の割れ目の中にとどまると予測されています。今回の一軸圧縮試験では、3 種類の配合とも 30kPa 以上の一軸圧縮強度の発現が見られることから（図 62）、止水要件を満たすと推定されます。また、いずれの配合も、90 日以降は養生水中のシリカイオンの溶出が収束する傾向にあることが確認されました（図 63）。

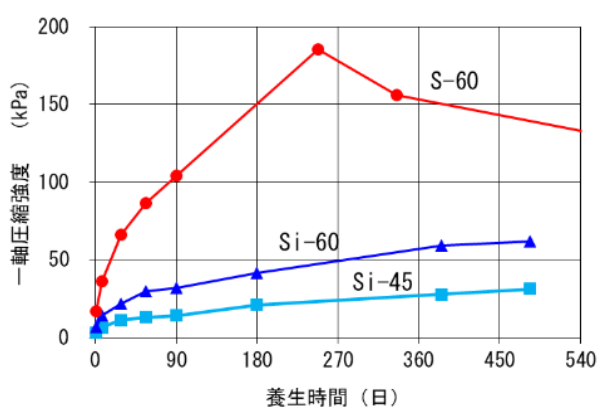


図 62 一軸圧縮強度と養生時間の関係

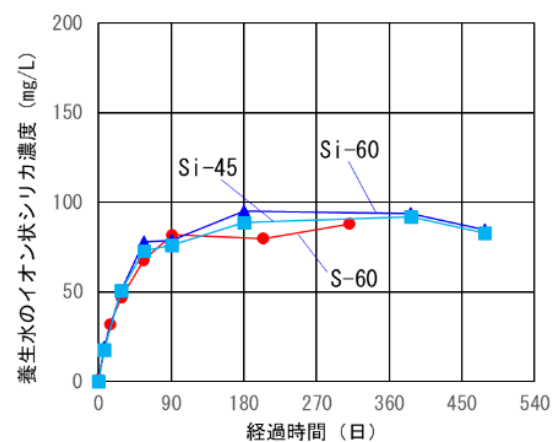


図 63 養生水中のシリカイオン溶出量の経時変化の比較



## 4. 地層処分研究開発

### ○処分技術の信頼性向上

#### 人工バリア性能確認試験

深度350m調査坑道の試験坑道4における人工バリア性能確認試験（図71）は、幌延を事例として、①地層処分研究開発の第2次取りまとめ報告書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、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。

平成30年度は、平成26年度に開始した加熱および注水を継続し、データの取得を継続しました。

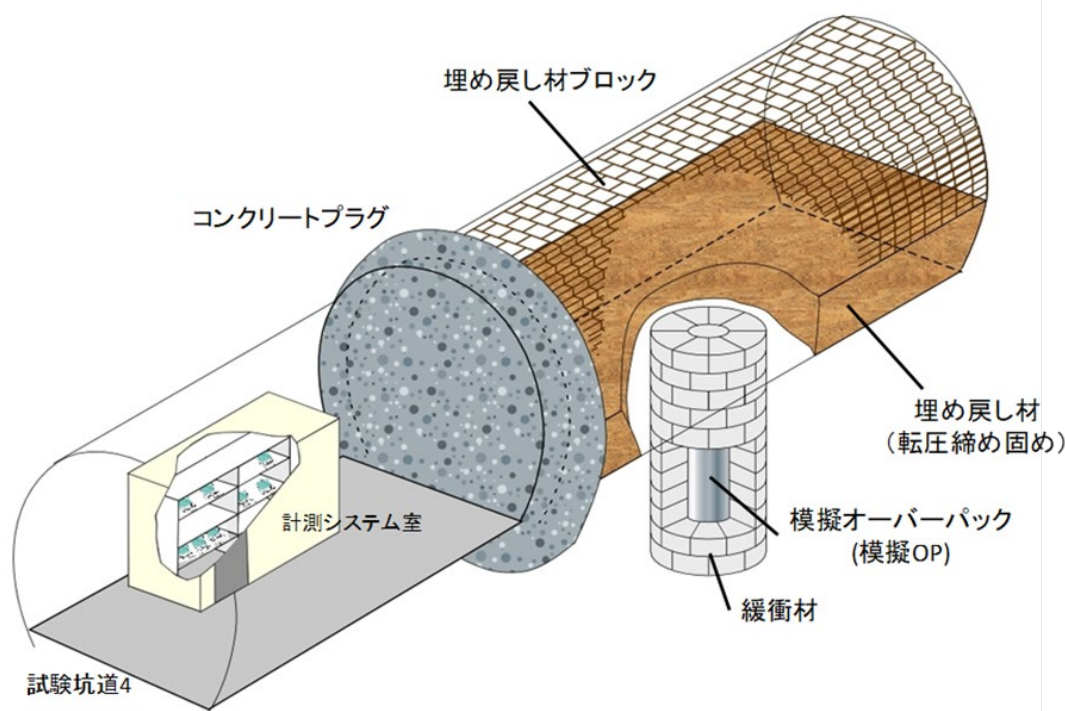


図 71 人工バリア性能確認試験の概念図

また、データの取得と並行して、熱－水理－力学連成現象の解析を実施しています。平成30年度は解析モデルに埋め戻し材を追加し、緩衝材の膨潤応力\*7を見直し、試験開始から1200日後までの解析を実施しました。図74(c)に示す土圧計により計測された全応力は、原位置地下水の塩分濃度

\*7：緩衝材中のベントナイトが水を吸収し、体積が膨張することによって発生する応力のことです。

を考慮した緩衝材の膨潤応力を用いたことにより、計測値の再現性が向上しました。

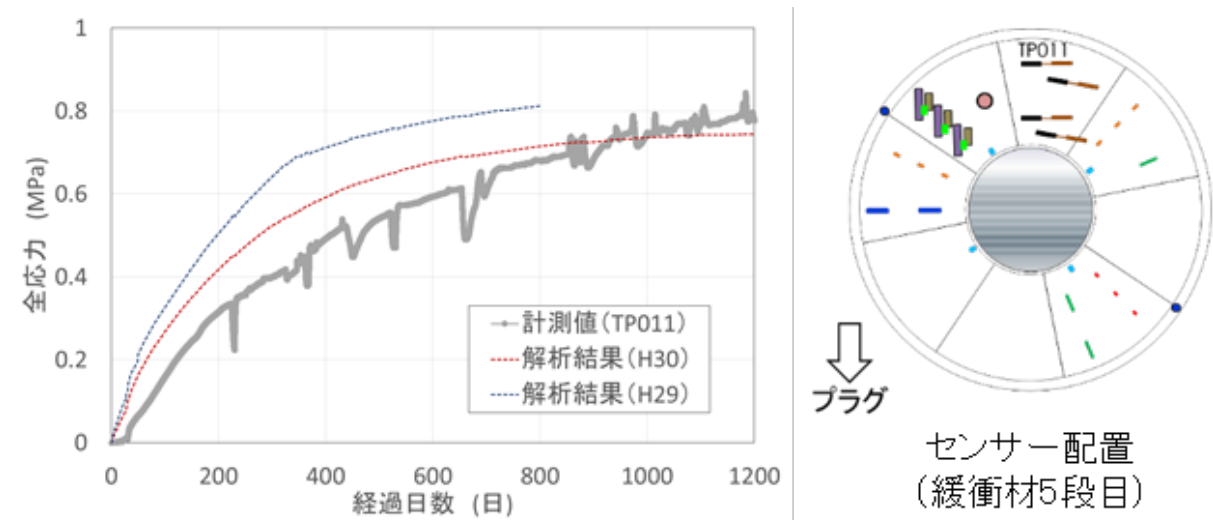


図 74(c) 解析結果との比較例（緩衝材：土圧計）

図 75は比抵抗トモグラフィの結果で、1200日後の計測値を飽和度に換算したものです。計測結果のばらつきはあるものの、両者とも緩衝材の外周部は地下水の浸潤により飽和度が上昇し、内側ではヒーターの加熱により飽和度が低下しており、全体的な傾向は一致していることがわかります。

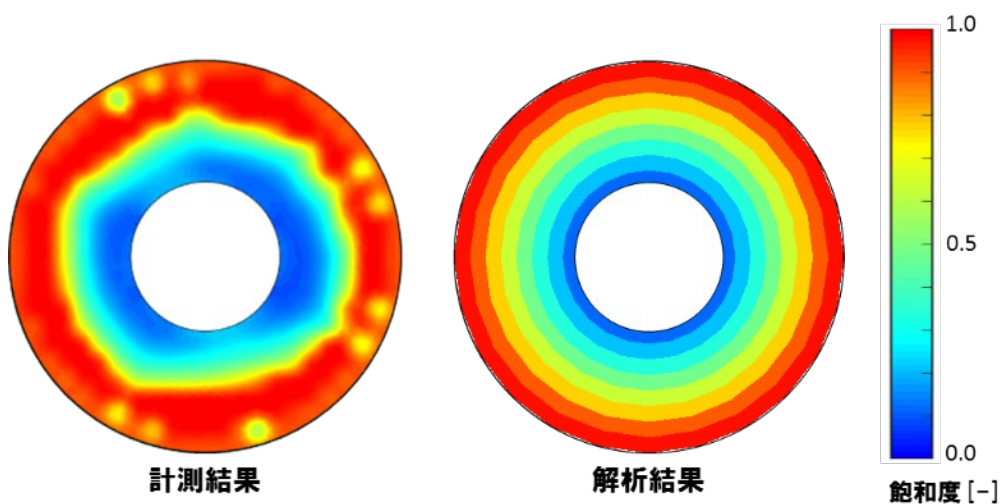


図 75 解析結果との比較の例（緩衝材：比抵抗トモグラフィ）

図 76の計測値は埋め戻し材(転圧部)に設置したFDR-V(Frequency Domain Reflectometry with Vector network analyzer)により計測された比誘電率を体積含水率に換算した値です。500日付近までは良好な一致が見られますが、500日以降では計測値のみが上昇しています。これは、緩衝材や埋め戻し材が膨潤し密度が変化した影響などが推測されますが、詳細については引き続き検討していく予定です。

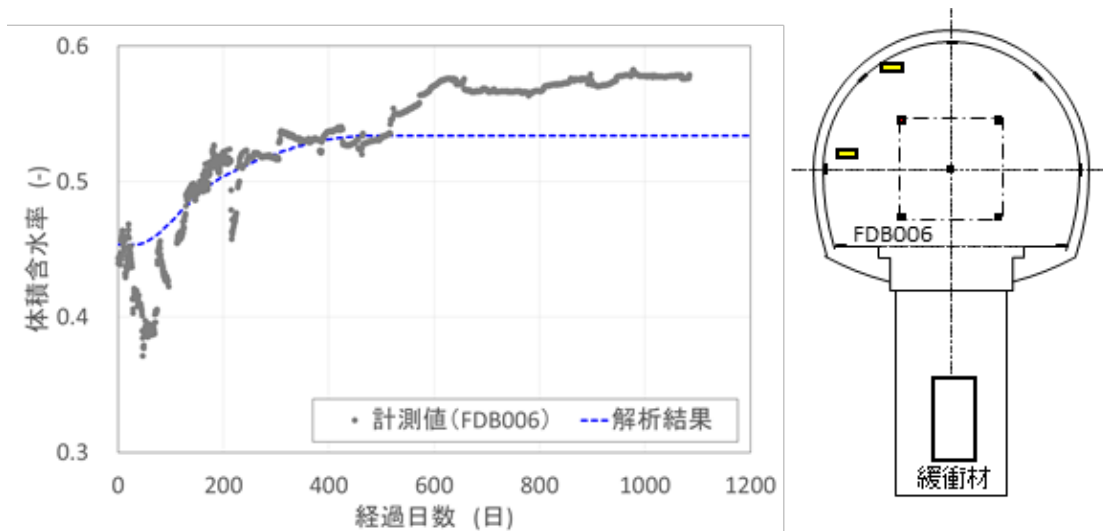


図 76 解析結果との比較の例 (埋め戻し材転圧部 : FDR-V)

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

## オーバーパック腐食試験

深度350m調査坑道の試験坑道3におけるオーバーパック腐食試験は、幌延を事例として、塩水系地下水環境におけるオーバーパックの耐食性<sup>\*8</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、平成26年度に試験を開始しました。

平成30年度は、5月に計測を終了し試験体（模擬オーバーパックと緩衝材）を回収しました（図84）。また、緩衝材の解体後に、腐食メカニズムの解明等に資するため、模擬オーバーパックから腐食生成物を採取しました（図85）。その後、模擬オーバーパックに対して酸洗処理<sup>\*9</sup>にて腐食生成物を除去し（図86）、模擬オーバーパック表面の3次元計測により腐食量を評価しました。

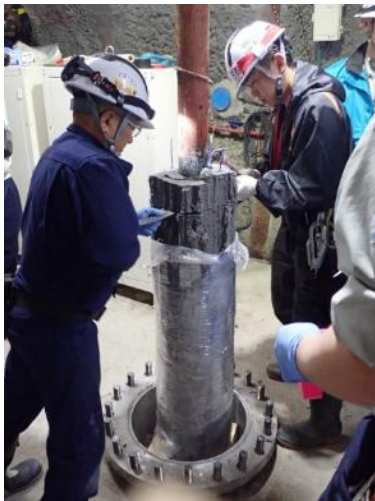


図 84 緩衝材の解体作業状況



図 85 腐食生成物の採取



図 86 酸洗処理後の模擬オーバーパック

\*8: 金属の腐食(さび)に対する抵抗性のことです。耐食性の高い合金として、一般的にはステンレス鋼やアルミニウム系合金など、オーバーパックの候補材料としては銅やチタン合金などがあります。

\*9: 金属製品を酸性溶液に漬けることで、表面に付着している酸化物を洗浄・除去する化学的洗浄処理方法のことです。

腐食量は模擬オーバーパック下部の方が上部に比べて相対的に大きい傾向を示しました（図 87）。図 87 において、腐食深さの平均は 4.5 年間で約 5 $\mu\text{m}$  であり、計測期間中にモニタリングにより得られた長期的な腐食速度（約 1~5 $\mu\text{m}/\text{年}$ ）と概ね整合する結果が得られました。なお、基準径との差分がプラス（凸部）部分（青系統）は、酸洗処理にて除去しきれなかった固着物であると考えられます。

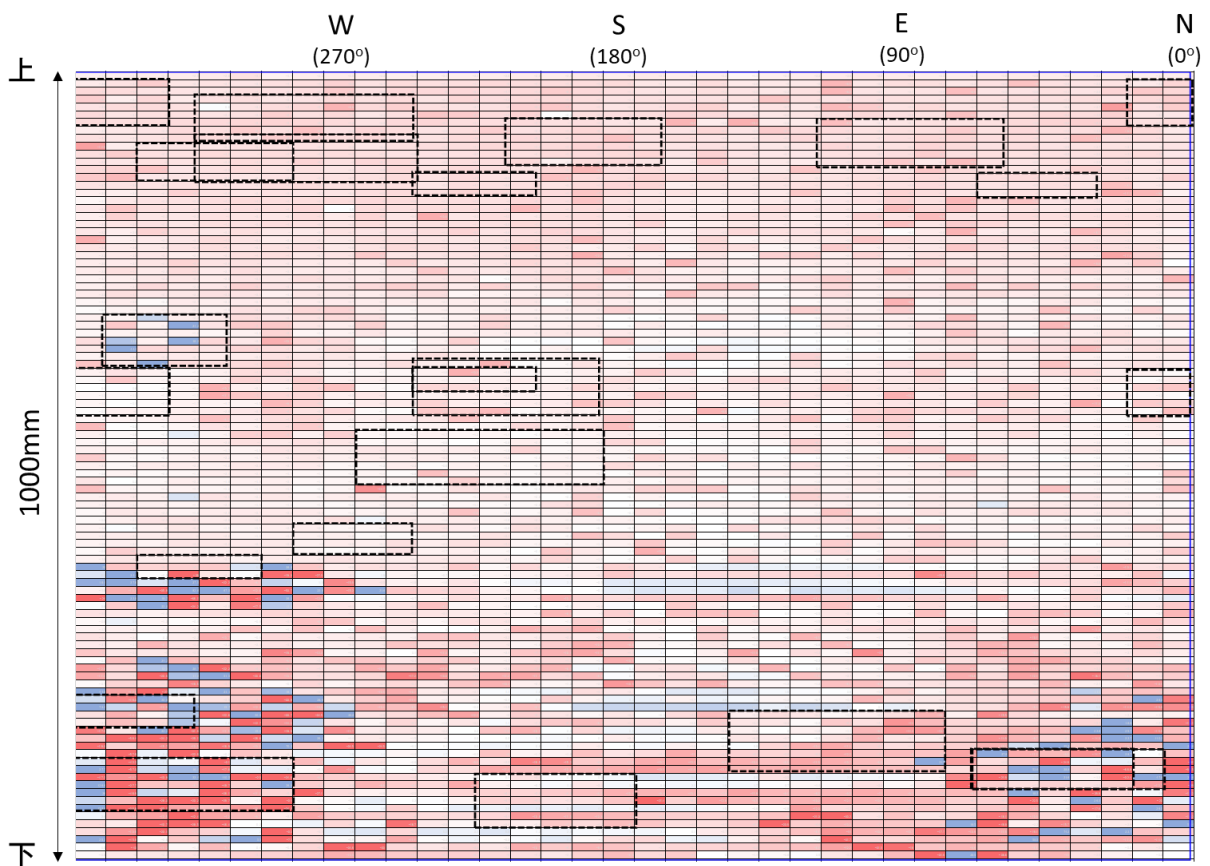


図 87 腐食量の 3次元計測結果

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

## 地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究

原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究として、処分坑道横置き・PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) \*10方式による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。

平成30年度は、深度350m調査坑道の試験坑道2において平成29年度に設置した模擬PEM\*11と坑道との隙間で、粘土系材料の充填材を用いた充填試験を行いました。模擬PEM下部の坑道との間の狭い隙間には、ベントナイトを圧縮して2.0Mg/m<sup>3</sup>程度の密度にしたものを破碎し粒度分布を調整したペレットをスクリーコンベアで隙間内に送り込みました（写真 3、写真 4）。模擬PEM上の広い隙間には、ベントナイトにケイ砂を50%:50%で混ぜたものを吹付けました（写真 5、写真 6）。試験後に充填した部分の密度を測定し、どちらの隙間も目標の密度になっていることを確認しました（図 92）。今回充填した部分は、今後充填材の除去試験を行う予定です。



写真 3 下部狭隘部に充填したペレット（左）とスクリーコンベア（右）

\*10：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。

\*11：本試験で用いる模擬 PEM は、緩衝材などの人工バリアを封入せず、実物と寸法（直径約 2.5m、長さ約 3.5m）および重量（約 36t）を模擬したものを使用しています。



写真 4 スクリューコンベアの設置状況（左）と充填後の隙間（右）

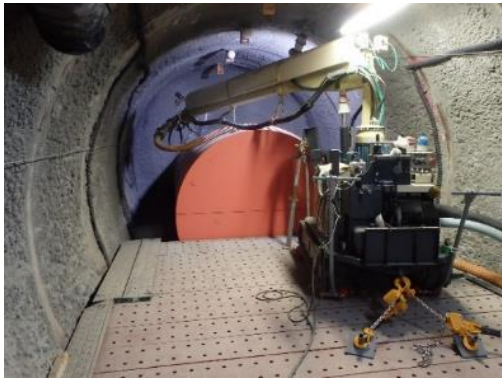


写真 5 吹付け試験の様子（左）とコアサンプリング（右）

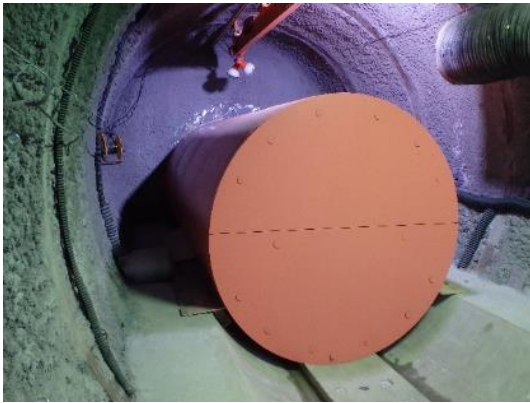


写真 6 隙間充填試験前後の様子（試験坑道 2）

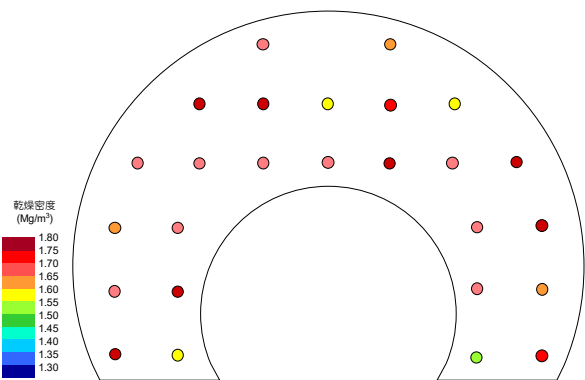


図 92 コアサンプリングの位置と各部位の密度

## ○安全評価手法の高度化

### 健岩部を対象とした物質移行試験

平成 30 年度は、多様な液性条件での原位置拡散試験<sup>\*12</sup>手法と評価に用いる拡散・収着<sup>\*13</sup>モデルの適用性を確認する観点から、地下水中の塩分濃度が拡散・収着挙動に及ぼす影響を評価しました。図 106 には、塩分濃度の影響が比較的明瞭に確認されたセシウムを対象に、拡散試験で取得したトレーサー濃度減衰データおよびトレーサー濃度プロファイルの分析を行った結果を示します。

結果として、塩分濃度の増加に伴いセシウムの濃度減衰が小さくなる傾向にあるとともに（図 106(a)）、塩分濃度の増加に伴い岩石中のセシウム濃度が低下し、より深くまで拡散する傾向が確認されました（図 106(b)）。また両データに関し、1次元拡散方程式の解析解によるフィッティングを行った結果、上記の傾向性を含め、実測値を概ね再現できました。

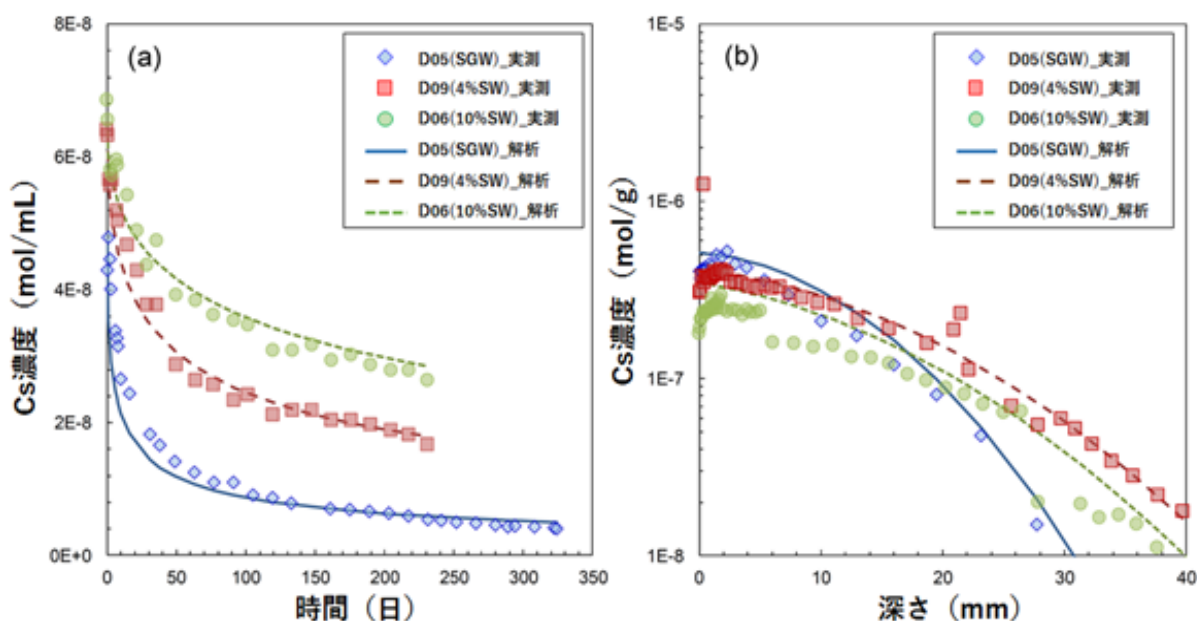


図 106 原位置拡散試験における(a)濃度減衰データ、(b)濃度プロファイルデータ

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

\*12：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。

\*13：地下水中有る元素が、岩盤などに取込まれる現象です。



## 割れ目\*14を対象とした物質移行試験

平成30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、平成28年度にトレーサー試験を実施し、平成29年度にコア試料を採取したうち未分析のコア試料について、割れ目表面のトレーサー濃度分析を実施しました。図 108(a)にトレーサーの移行に関与した割れ目分布を示します。

注水孔や揚水孔に比較的近い孔（SW-33、SW-42、SW-43、SW-46、SW-47、SW49）に分布する多様な割れ目（せん断、引張、ハイブリッド）でトレーサーが検出されるとともに（図 108(a)）、試験区間内（注水孔）に出現する断層との直線距離がほぼ等しい位置に分布する割れ目（図 108(a)のe～i）における最大検出濃度が大きく異なりました。このことから、注入されたトレーサーは注水孔および揚水孔間に分布する複数の割れ目のうち、選択的な経路（割れ目）を介して、移行している可能性が示唆されます。

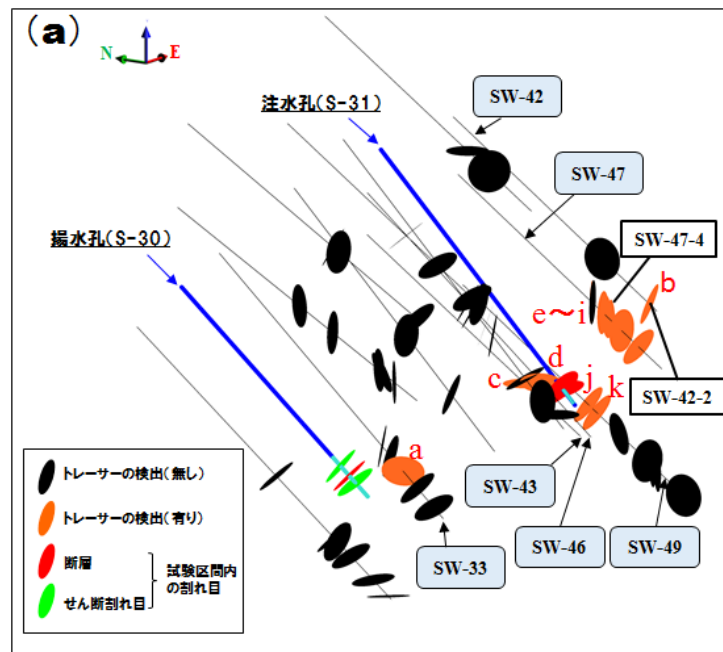


図 108(a) トレーサーの移行に関与した割れ目分布\*15

\*14： 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。

\*15： 図中の割れ目は、ボーリング孔内で観察された割れ目を円盤と捉え、割れ目の方向や角度に合わせた状態で透過させたものを描写しています。

## 5. 地下施設の維持管理

平成30年度は、引き続き維持管理業務として、地下施設の機械設備や電気設備の点検保守・修繕などを行い、地下施設の安全性確保に努めました（写真 7、写真 8）。



写真 7 スカフォード（吊り足場）巻き上げ機の点検

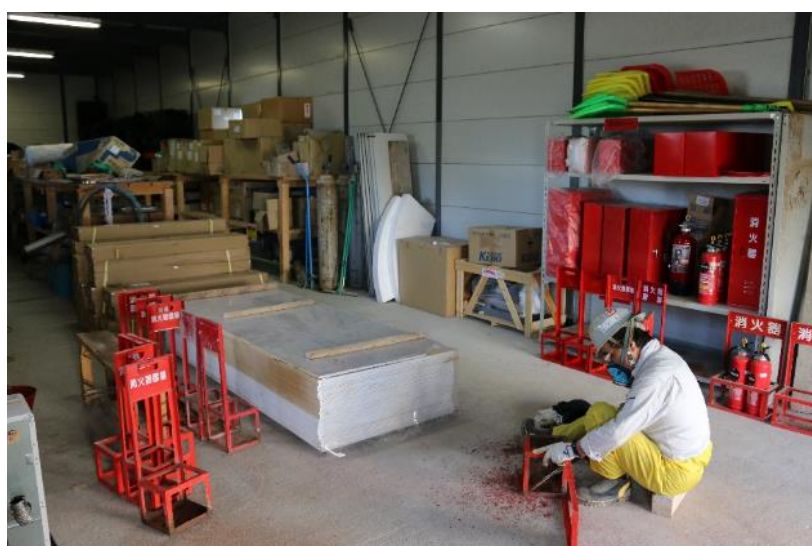


写真 8 消火器置場のメンテナンス（錆落とし）

## 6. 環境調査

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、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(図 116)。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\*16で公開しています。水質調査の結果、地下施設の建設による環境への影響は観測されませんでした。

また、当センター周辺の環境影響について、清水川の水質および魚類を対象に調査を実施しています。平成30年度における各調査結果は、これまでと比較して大きな変化はありませんでした。

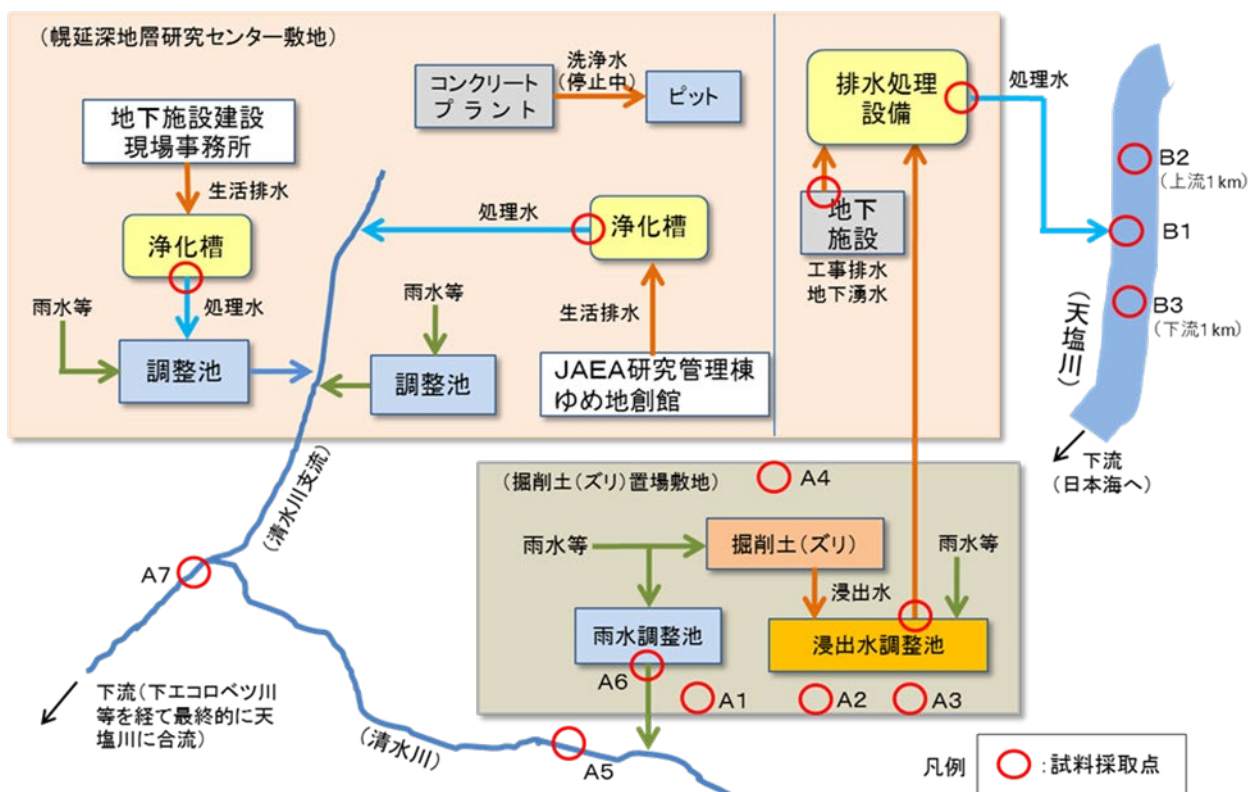


図 116 排水系統と各水質分析用試料の採取地点

\*16 : <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/disclosure/suishitsu.html>

## 7. 安全確保の取組み

安全確保の取組みとして、直営作業、請負作業、共同研究作業においては、作業の計画段階からリスクアセスメント評価を実施し、安全対策の妥当性の確認や改善に努めました。

そのほか、所長や保安・建設課などによる定期的な安全パトロールを実施し、現場の安全確認や改善などに努めました（写真 16）。

さらに、新規配属者や請負作業・共同研究作業の責任者などに対して安全教育を実施したほか、全国安全週間などの機会を捉えて、従業員のみならず請負企業も含めた安全行事に積極的に取り組むなど、安全意識の高揚に努めました（写真 17）。



写真 16 安全パトロールの状況



写真 17 安全行事の状況  
(安全大会)

## 8. 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部を対象とした研究は、以下に示す国内外の研究機関との共同研究や研究協力をはじめ、広く関連する専門家の参加を得て進めています。

### ○国内機関との研究協力

#### ◆ 大学などとの研究協力

##### ➤ 京都大学

坑道掘削に伴う周辺岩盤に生じる割れ目の連結性の評価や三次元分布の可視化

##### ➤ 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）との相互作用の評価

など

#### ◆ その他の国内研究機関との研究協力

##### ➤ 株式会社大林組

光計測技術による掘削影響領域の長期挙動計測とその評価

##### ➤ 原子力環境整備促進・資金管理センター

搬送定置・回収技術に関する研究、人工バリアなどの健全性評価

##### ➤ 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高度化

##### ➤ 幌延地圏環境研究所

岩石・地下水中の微生物特性・化学特性の評価

など

### ○国外機関との研究協力

##### ➤ モンテリ・プロジェクト<sup>\*17</sup>

粘土の摩擦特性に関する室内試験

など

---

\*17: 堆積岩を対象とした地層処分に関する国際共同研究です。原子力機構を含め9ヶ国から19機関が参加し、スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。