

**幌延深地層研究計画
平成29年度調査研究成果報告
(概要版)**

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**

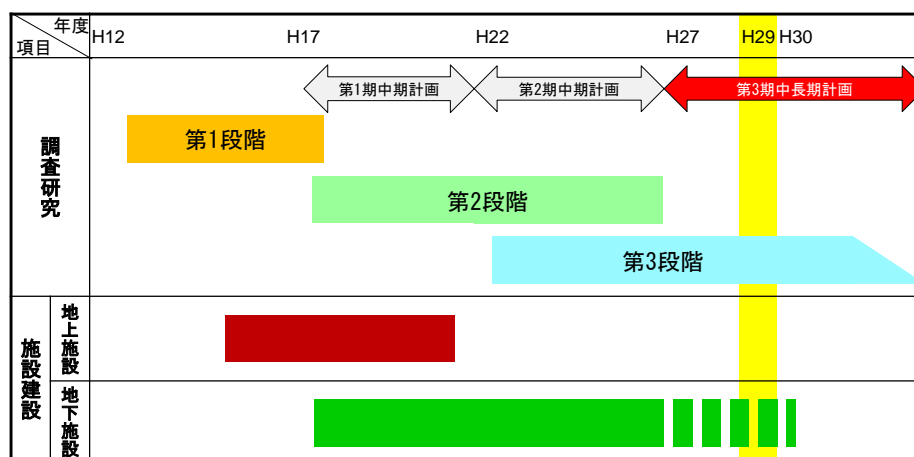
1. はじめに

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～平成34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29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。



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

※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 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」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。

調査研究は、必須の課題を重点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。

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29年度に実施した主な調査研究（図2）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モニタリングなどの概要を示します。

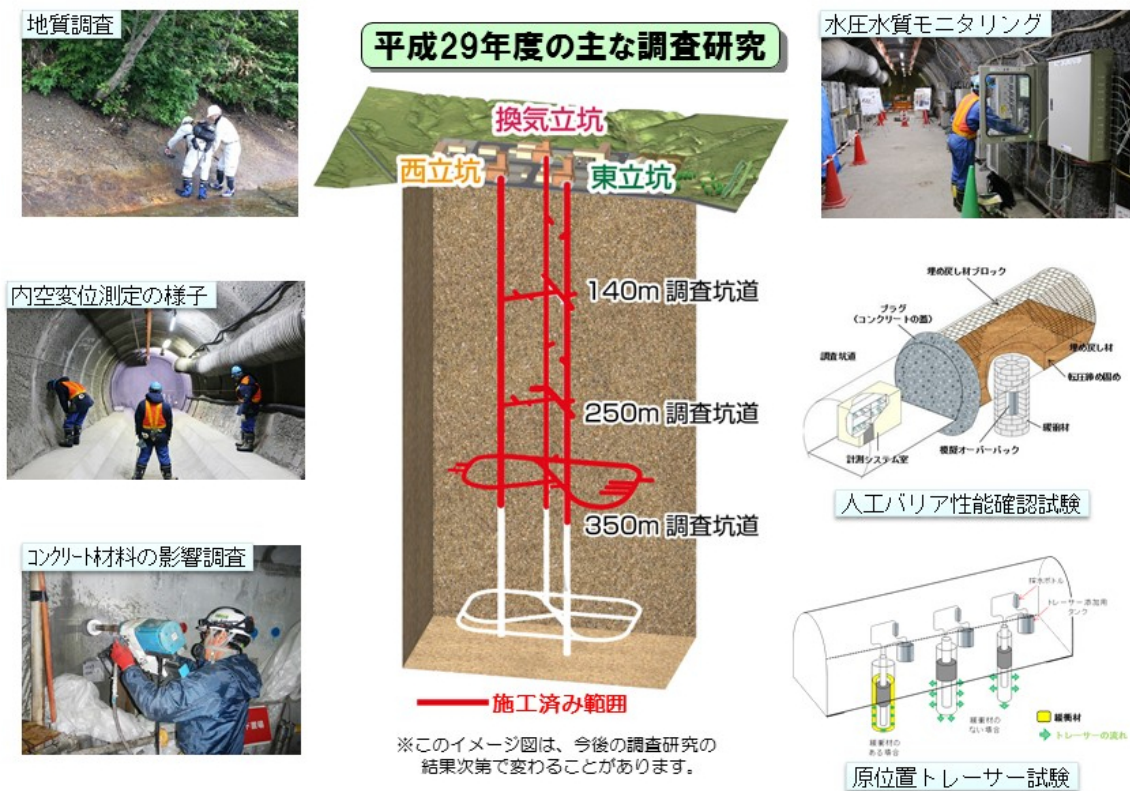


図 2 平成29年度の主な調査研究

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*²や物質の移動挙動などを計測・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*³試験を継続しました。人工バリア性能確認試験 (p. 8～9) およびオーバーパック腐食試験 (p. 10～11) では、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 (p. 13～14)。

○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 (p. 12)。

○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) を実施しました (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) などによる影響が懸念されています。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。

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を継続し、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）を実施しました。深度497.8m付近に出現した断層を対象に実施した試験では、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。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、ダクティリティインデックス (DI) ^{*5}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。

*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。

*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。

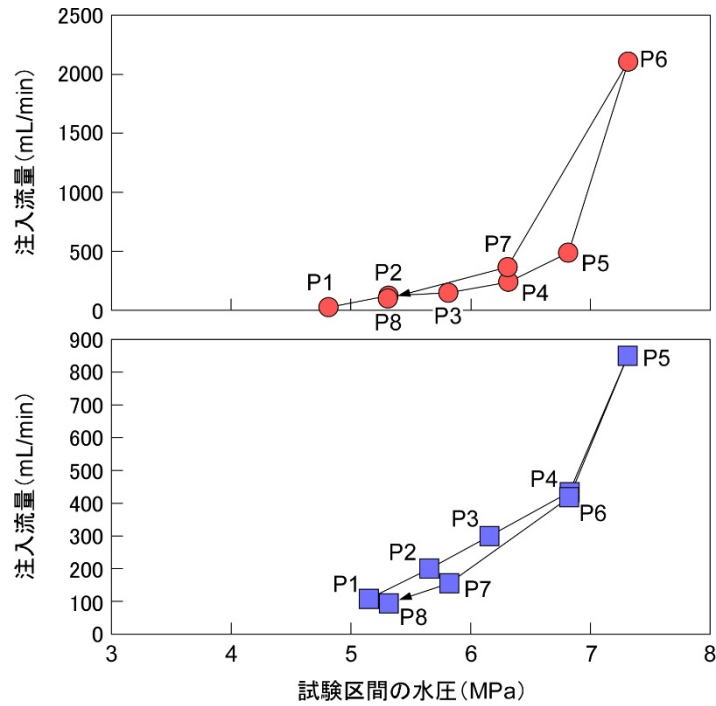


図 19 水圧擾乱試験時における注入流量と試験区間の水圧との関係
 上段は1回目、下段は2回目の試験結果

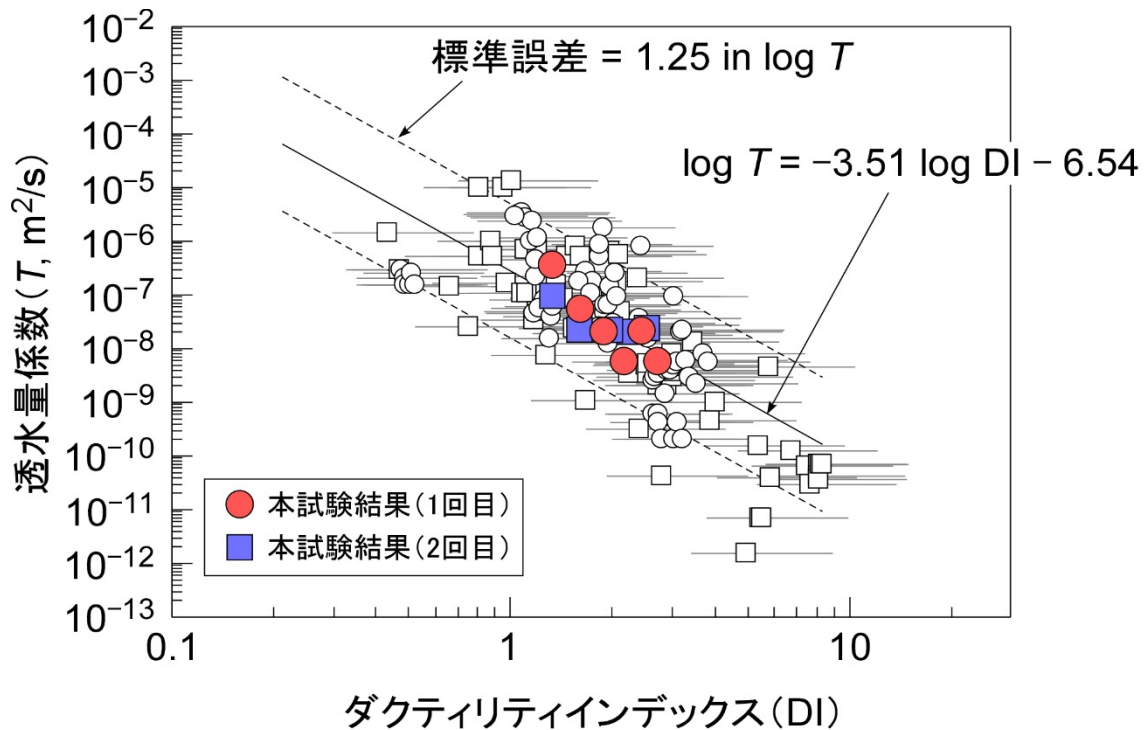


図 21 DIの経験式と今回実施した水圧擾乱試験結果との比較

地下水の地球化学

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*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。そこで平成29年度は、350m調査坑道で掘削されたボーリング孔である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。その結果、ガスの主成分はメタン (CH_4) と二酸化炭素 (CO_2) であり、大気の主成分である窒素 (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) 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。

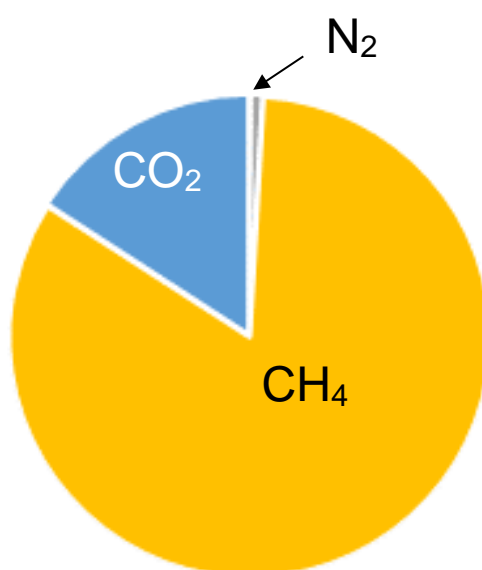


図 27 13-350-C06 孔の区間 4 における遊離ガスの組成

*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

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。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。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。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。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。

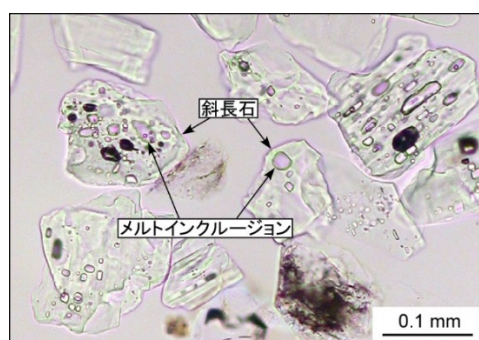


図 53 メルトインクルージョンの顕微鏡写真

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、緩衝材への注水量は1,000mL/minで実施しています。

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。

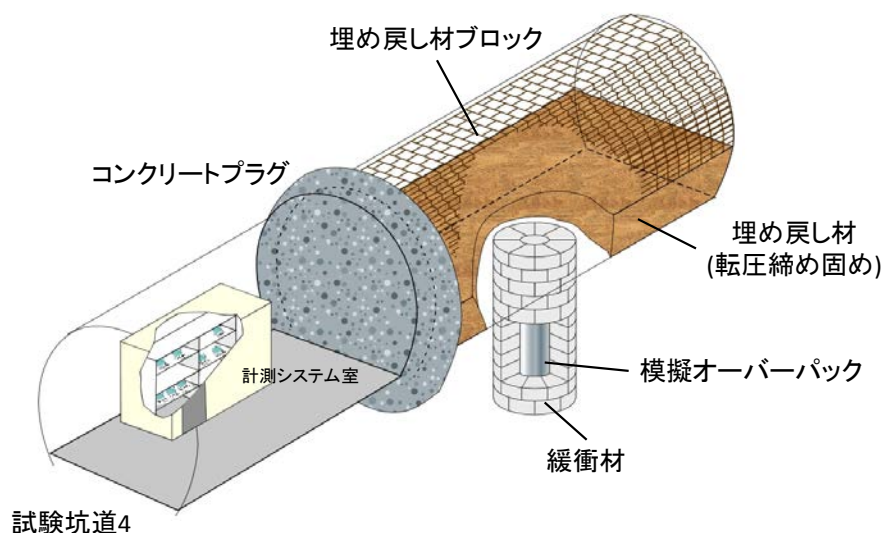


図 64 人工バリア性能確認試験の概念図

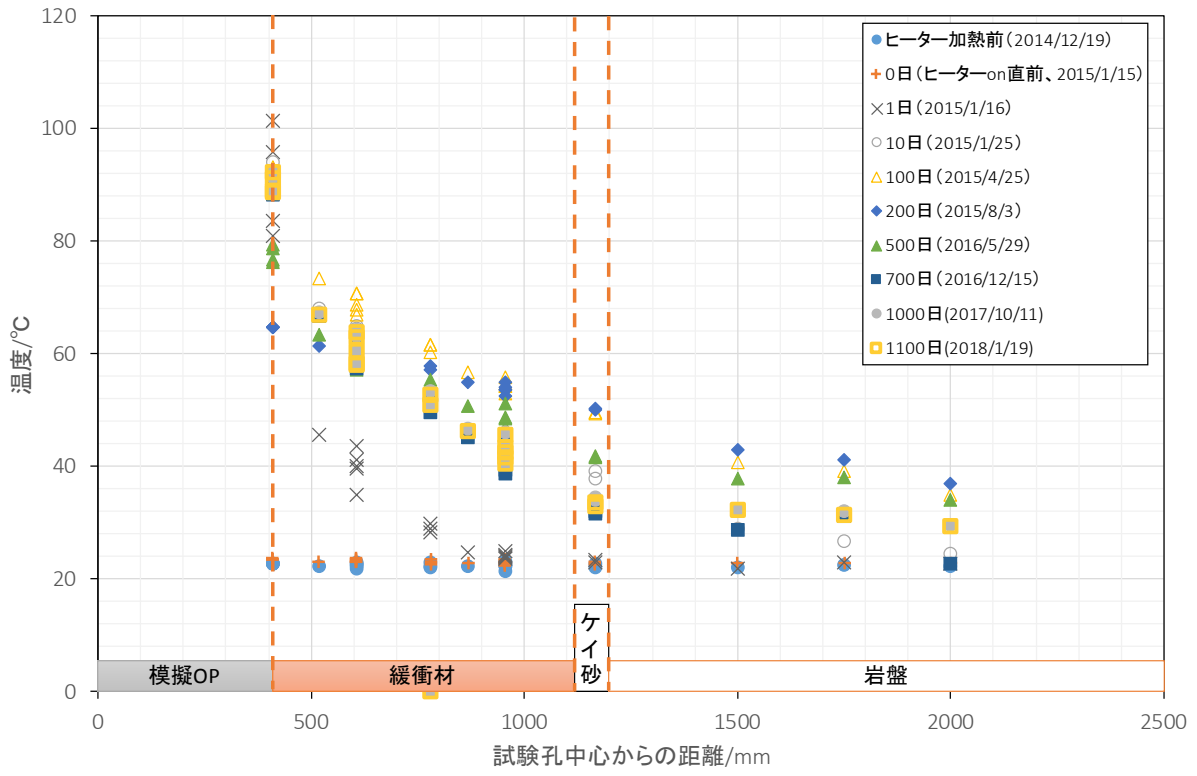


図 67 緩衝材（5 段目）の温度分布

オーバーパック腐食試験

深度350m調査坑道試験坑道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^{*7}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^{*8}インピーダンス^{*9}を測定し、腐食の速度などを評価します。

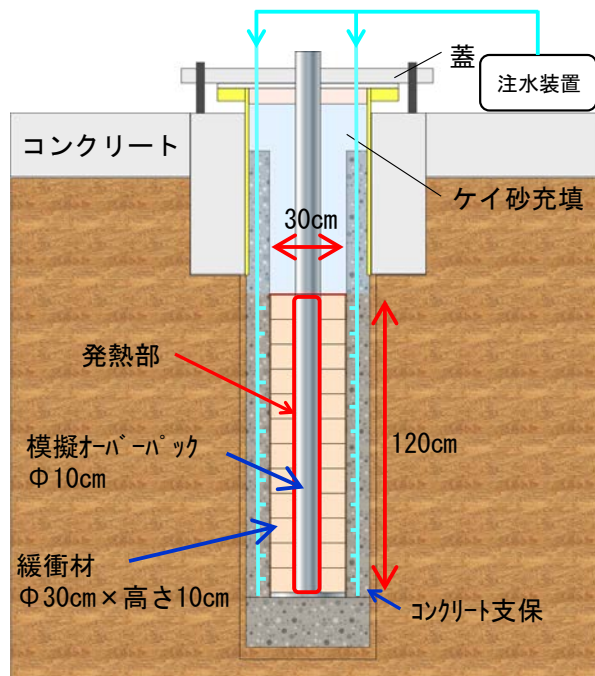


図 69 オーバーパック腐食試験の概念図

*7: 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。

*8: 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。

*9: インピーダンス(Z)とは、電気回路のうち、交流回路における電圧(V)と電流(I)の比で表される値で、単位はΩ(オーム)です。直流回路における抵抗に相当します。

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、ここでは、周波数の範囲を $0.0001\text{Hz}\sim 100,000\text{Hz}$ 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 $10\sim 20\ \Omega\ \text{cm}^2$ 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いことから、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。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 $6\sim 60\ \mu\text{m}/\text{年}$ 、250 日以降では $0.8\sim 5\ \mu\text{m}/\text{年}$ となり、既往の室内試験結果と同様に、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。

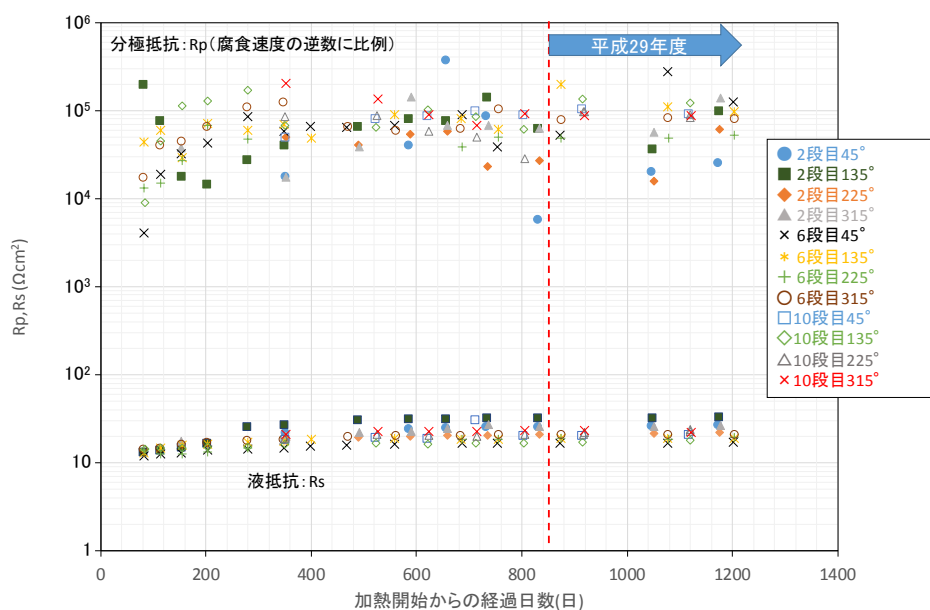
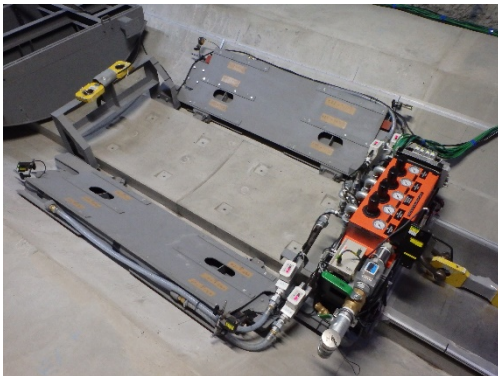


図 72 手動測定結果の解析値

地下環境での搬送定置・回収試験に向けた施設の整備

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、地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究を継続しました。地下環境での搬送定置・回収技術の実証試験は、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。

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^{*10}の適用性および走行にかかるデータを取得するための要素試験を実施しました（写真 4）。また、試験で用いる模擬PEM（Prefabricated Engineered barrier system Module）^{*11}を試験坑道2に設置しました（写真 5）。



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

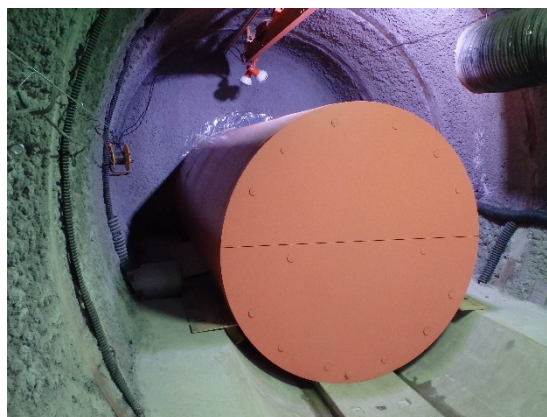


写真 5 模擬 PEM の設置状況（試験坑道 2）

*10：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

*11：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。

○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 29 年度は、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^{*12}挙動の違いを評価するための拡散試験^{*13}（以下、H29 拡散試験）を開始しました。

使用したトレーサーのうちセシウム（Cs⁺）、重水（HDO）、ヨウ素（I⁻）の濃度の経時変化を図 83 に示します。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。

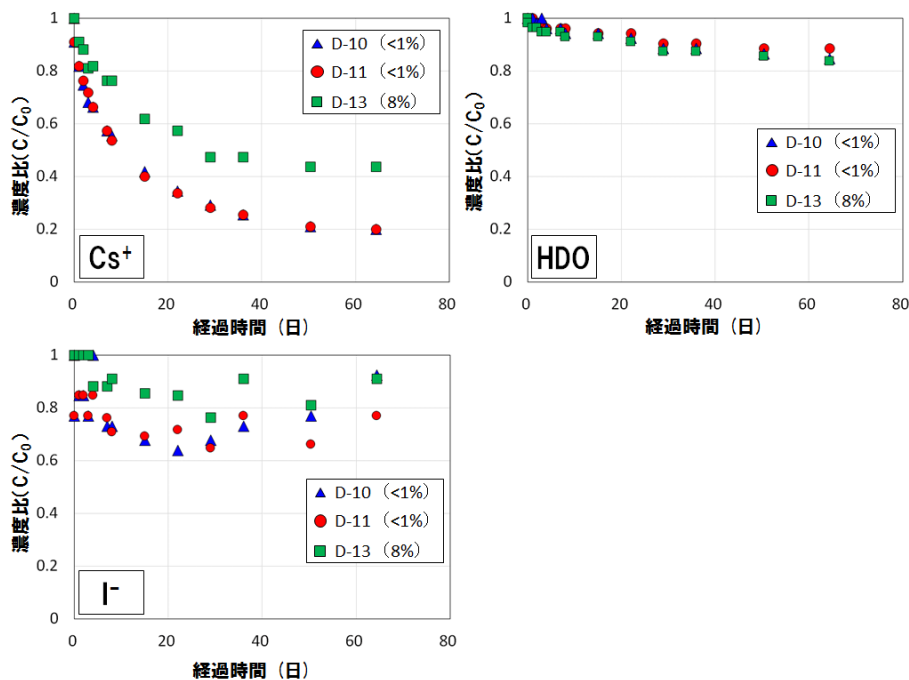


図 83 H29 拡散試験結果（セシウム、重水、ヨウ素）

濃度比は試験開始初期の濃度（C₀）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。

*12：地下水にある元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

*13：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。

割れ目*14を対象とした物質移行試験

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。

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ン、重水（H₂O）、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。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。

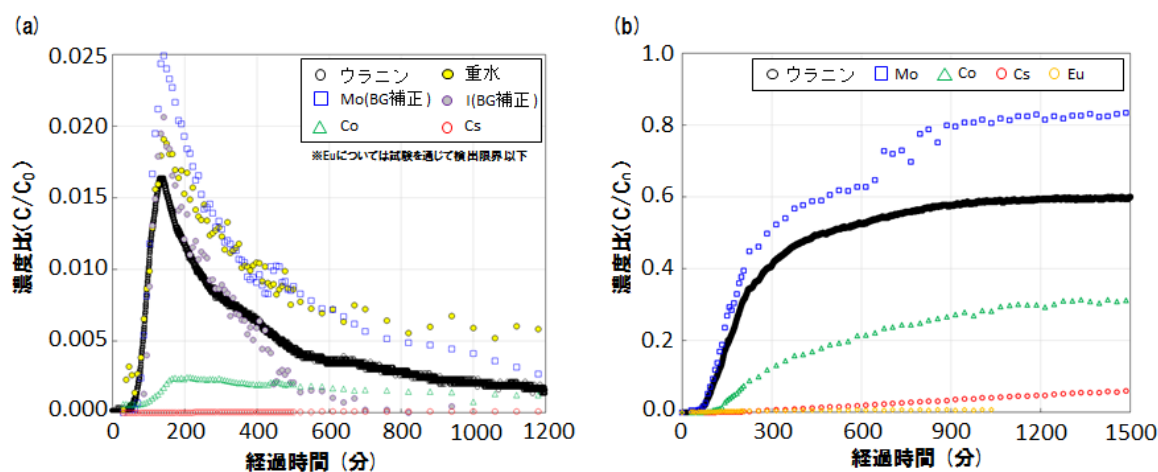


図 84 収着性トレーサー試験結果

(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。

*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。

5. 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 6 坑内換気用主要ファン・集塵機(1号機)の整備

6. 環境モニタリング

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。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*15で公開しています。水質モニタリング調査の結果、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。

平成28年度に引き続き、当センター周辺の環境影響調査として、図 97 に示す地点にて清水川の水質および魚類を対象に調査を実施しています。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。

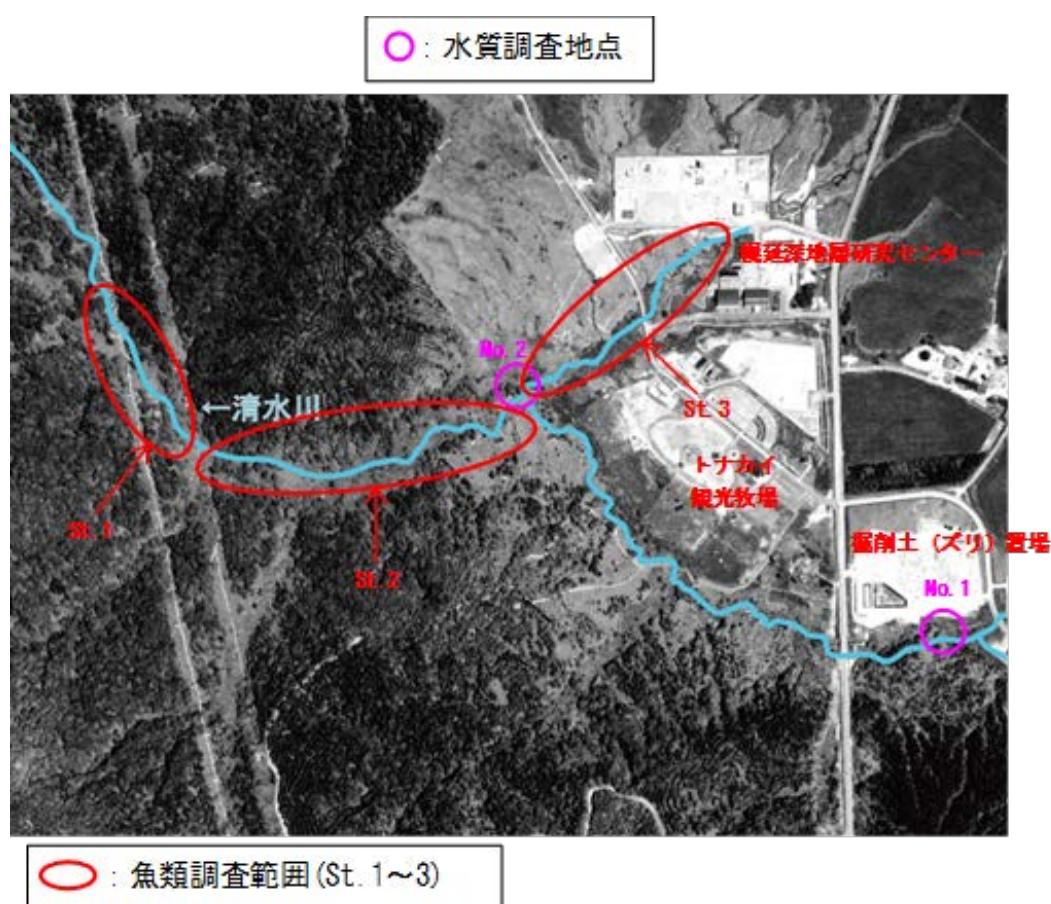


図 97 環境調査実施場所

*15 : <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、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、以下に示す研究機関との共同研究や研究協力をはじめ、広く関連する国内外の研究機関や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

- 北海道大学
堆積岩中における物質移行の評価に関する研究
- 室蘭工業大学
坑道壁面の地質観察に伴う三次元レーザスキャナデータの分析など

◆ 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・回収技術の実証的検討に関する研究
人工バリア等の健全性評価及び無線計測技術の適用性に関する研究
- 電力中央研究所
地質・地下水環境特性評価に関する研究
- 産業技術総合研究所
岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究
- 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
鉄材料の腐食に関する原位置試験など