

**幌延深地層研究計画
平成27年度調査研究成果報告
(概要版)**

平成28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**

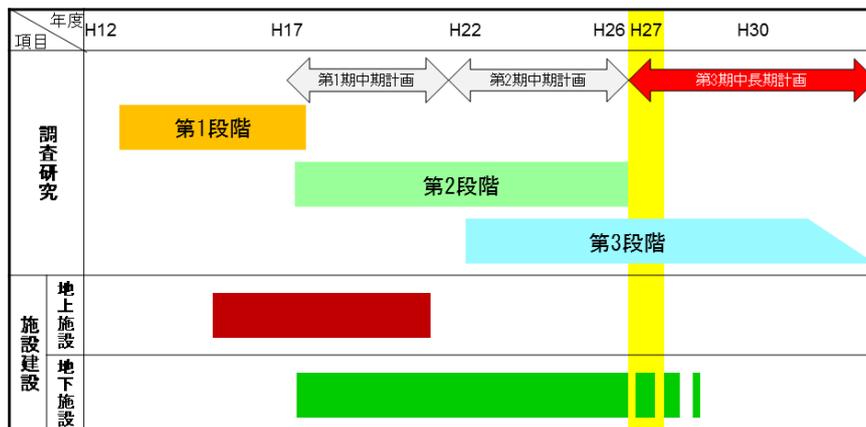
1. はじめに

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27年度は、地下施設での調査研究段階（第3段階）を継続しながら、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。

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}や物質の移動現象などを計測・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物質移行試験を継続しました。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では、計測データから、地下水の浸潤状況を確認しています。また、物質移行試験では、試験孔の孔径、緩衝材の有無、注水流量などの試験条件の違いによるトレーサー^{*3}の移行挙動の違いを確認しました。

○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計画の検討を行いました。

○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するとともに、それに伴う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実施する、通常よりも高い注入圧を用いた透水試験（水圧擾乱試験）の準備を進めました。

*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

平成27年度は断層帯の長期的な透水性を岩石の力学的指標から予測する手法を構築するために、地山強度比*4とダクティリティインデックス (DI) *5の適用性を検討しました。地山強度比はその値が高いほど、DIはその値が低いほど、断層運動に伴って断層帯の割れ目が開きやすいことを示します。図 14にこれらの指標と断層帯の透水性との関係を示します。両指標とも割れ目が開きやすい領域 (高DIあるいは低地山強度比) では断層帯の透水性が高いことがわかります。しかし、地山強度比は透水性との関係性がDIと比べてやや低いことがわかります (図中に示すP値は関係性の高さを示しており、0.05以下だと関係性が低いことが示唆されます)。今回の結果より、DIは断層帯の長期的な透水性を予測する上で一つの有効な力学的指標であると考えられます。

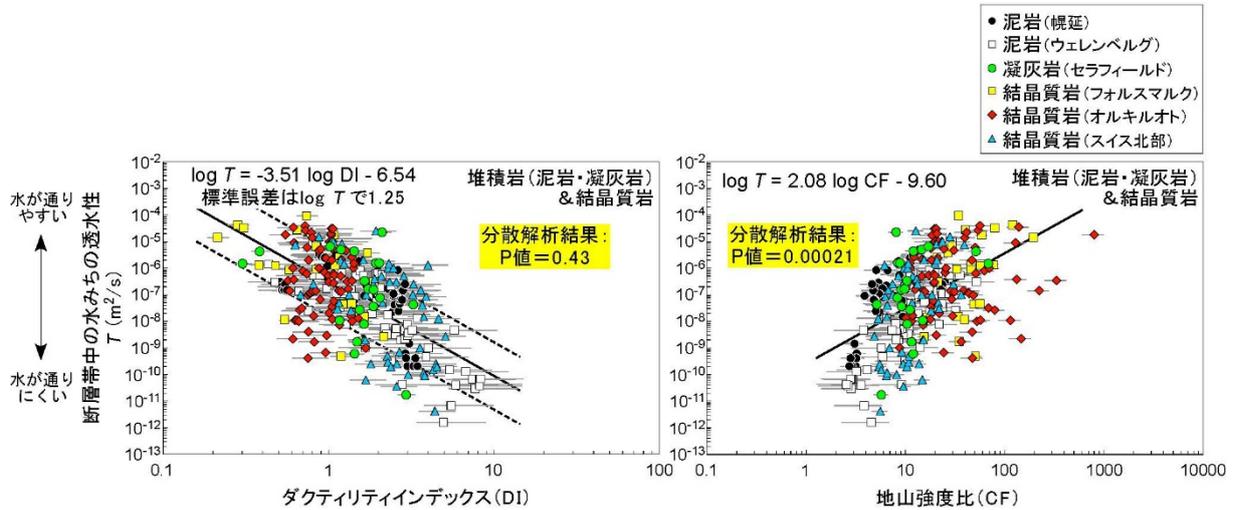


図 14 ダクティリティインデックスと地山強度比の比較

*4 : トンネル工事などで地下空洞の力学的安定性を表す指標としてしばしば用いられる値です。

*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す。

○深地層における工学的技術の基礎の開発

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継続実施しています。以下に、幌延町で震度 1 の地震となった、平成 27 年 8 月 29 日 15 時 0 分にごく浅い深度で発生した地震の観測データを示します。

地下（深度 350m 調査坑道）と地上（西立坑アクセスルーム）の深度の異なる地震波形を比べると、地上の地震波の振幅に比べて、地下の地震波の振幅は小さいことがわかります（図 34）。また、地震波はいろいろな周波数の波の重なりからなっており、その周波数別の波の振幅でみると地下で観測される地震波（図 34 右図）は振幅の最大が 0.2 cm/s 程度でピークが 4~7Hz と高周波数側に寄っているのに対し、地上で観測される地震波の振幅が最大 0.8 cm/s 程度で 2~4Hz にピークがあることがわかります（図 34 左図）。このように、地震波は深部岩盤で周波数が高く振幅の小さい波が、地上付近で周波数が低く振幅の大きな波に変わっていることがわかります。

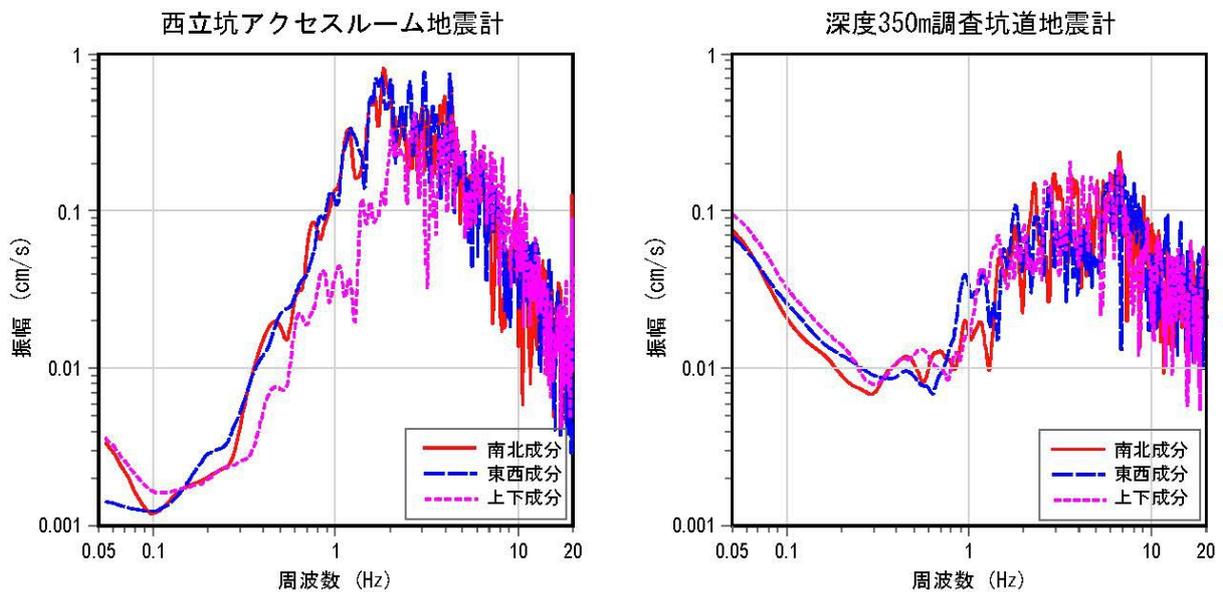


図 34 平成27年8月29日の地震の振幅と周波数の関係

○地質環境の長期安定性に関する研究

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ための解析手法の開発として、地形地質構造の変遷や気候・海水準変動を考慮した地下水流動解析に必要な三次元の地質構造モデルを構築しました。モデルの構築に際しては、隆起・侵食に伴う断層の発達様式や水の通りやすさとの関係に関する知見などをもとに、現在の三次元地質構造モデルを構築するとともに、地形・地質の発達史や幌延地域を対象に整理した隆起・沈降史などの既存文献などから、約 100 万年前と約 33 万年前の三次元地質構造モデルを構築しました（図 41）。また、これらのモデルをベースに三次元の水理地質構造モデルを構築し、地下水の流れに影響を及ぼす可能性のある因子として、地形変化、気候変動（海水準変動など）および氷期における不連続永久凍土の形成などに着目した地下水流動の評価を行い、氷期における不連続永久凍土の影響は、地形変化や気候変動の影響と比べて小さいことを確認しました。

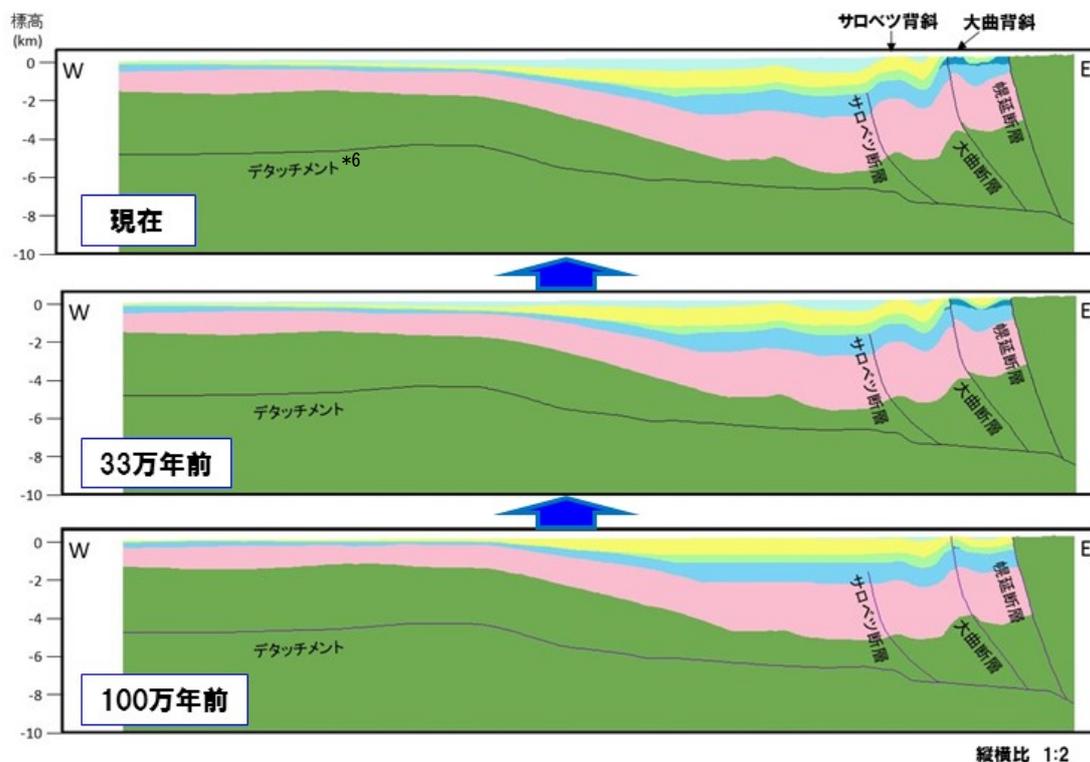


図 41 構築した各時間スケールの地質構造モデル

*6：断層・褶曲で変形した上盤と、変形を被っていない下盤との境界をなす低角度の断層のことをいいます。

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44）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27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45に緩衝材5段目の温度分布を示します。青色のプロットは模擬オーバーパックの加熱開始後半日程度の値です。加熱直後はほぼ一定だった温度が、時間の経過とともに上昇し、約1年後には定常状態となり、模擬オーバーパック表面から遠ざかるにつれて緩やかな温度勾配を示すことがわかります。また、図46に比抵抗トモグラフィ^{*7}を用いて測定した緩衝材の水分飽和度を示します。加熱が開始された後、徐々に中心（模擬オーバーパック）付近の飽和度が低下するとともに周辺の飽和度が増加しており、382日後（平成28年2月1日）の段階で緩衝材のほぼ中間にまで地下水が浸潤してきていると考えられます。

今後は各種センサーによる計測を継続し、データの拡充および計測センサーの長期性能の確認を行います。

*7: 配置された電極に電流を流し、その時の電圧分布から地下の比抵抗の分布を解析によって推定する技術で、地下水の分布や地質構造を推定する技術として利用されています。

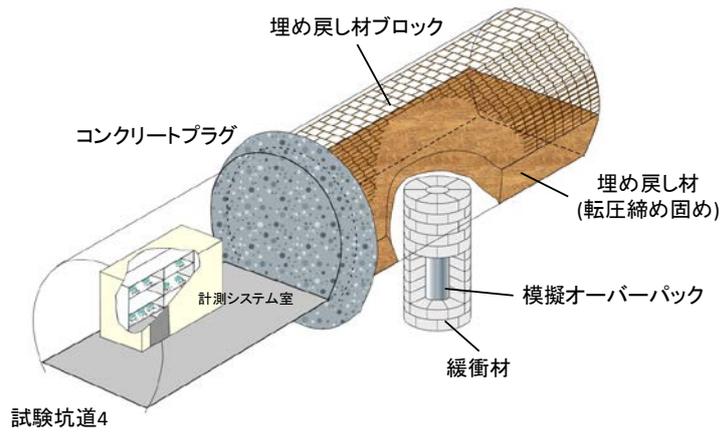
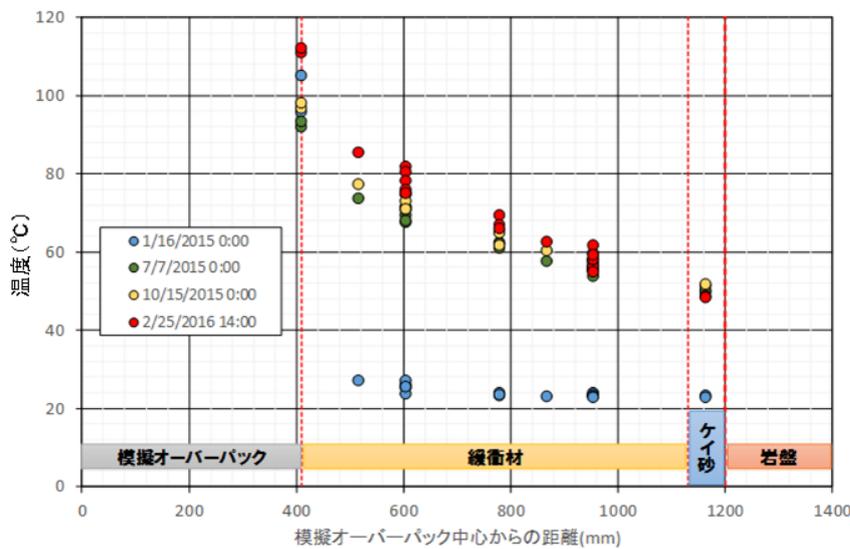
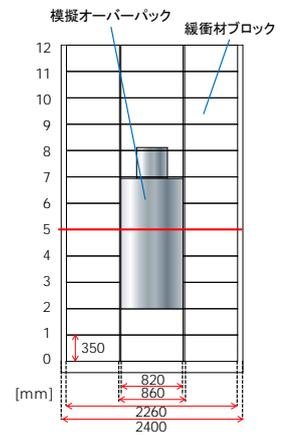


図 44 人工バリア性能確認試験の概念図

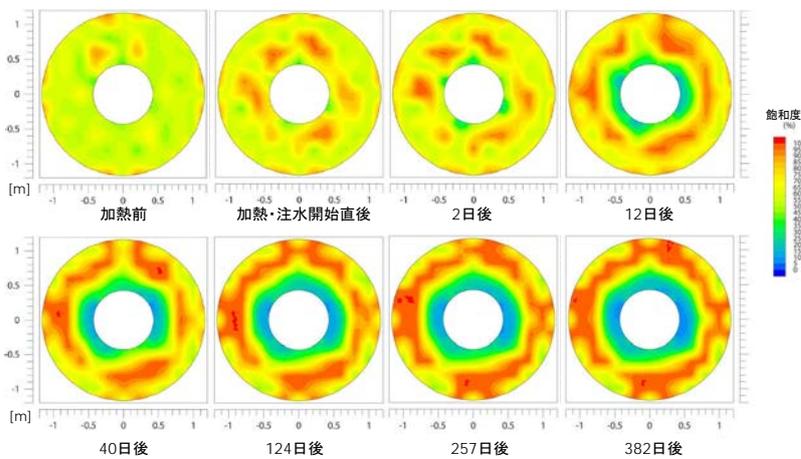


温度分布

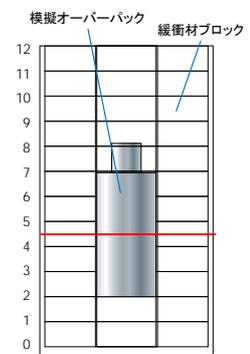


測定断面 (赤線)

図 45 緩衝材5段目の温度分布



飽和度の経時変化



測定断面 (赤線)

図 46 緩衝材の飽和度の経時変化

オーバーパック腐食試験

オーバーパック腐食試験（図 47）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*⁸や腐食モニタリング手法の適用性を例示することを目的として実施するものです。平成27年度は、ヒーターの温度を95℃に固定し、測定を継続しました。測定結果の例として、6段目の炭素鋼腐食センサーによる自然電位*⁹を図 48に示します。試験開始から約80日以降に自然電位の値のばらつきが収まっていることから、地下水がセンサー近傍に到達したものと考えられます。

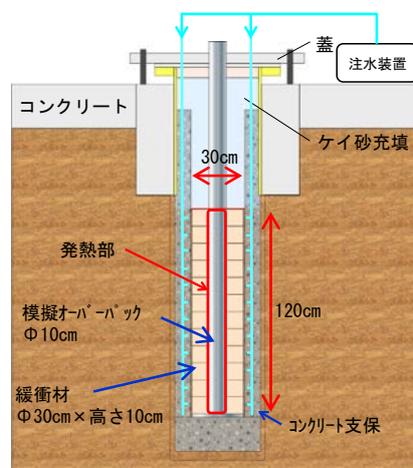


図 47 オーバーパック腐食試験の概念図

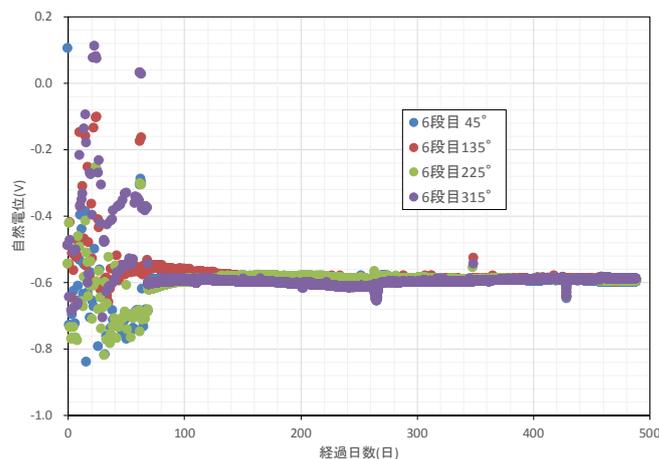


図 48 炭素鋼自然電位

縦軸はAg/AgCl (KCl飽和) 参照電極に対する値を示します。

*8: 金属の腐食(さび)に対する抵抗性のことで、耐食性のある合金として、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: 地下水が流れることにより電位が変化します。

○安全評価手法の高度化

健岩部^{*10}を対象とした物質移行試験

平成 27 年度は平成 26 年度に開始した健岩部を対象とした物質移行試験を継続しました。具体的には、図 61 に示す原位置トレーサー試験装置を用いて、試験区間にトレーサーを循環させ、一定期間毎に試料採取ユニットから採取した水のトレーサー濃度の分析を行いました。なお、トレーサーは重水や蛍光染料（ウラニン^{*11}など）などの非収着性の物質や、非放射性セシウムやユウロピウムなどの収着^{*12}性の物質を混合したものを使用しました。各孔の非放射性セシウム濃度の経時変化（図 62）から、試験孔の孔径の違いや緩衝材の有無による、岩盤中での拡散^{*13}や収着といった移行挙動の違いを原位置の試験にて確認することができました。

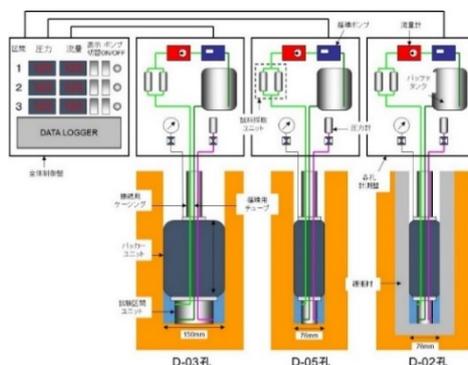


図 61 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験装置の概念図

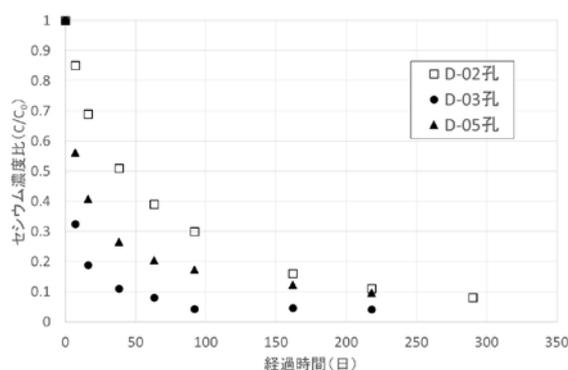


図 62 トレーサー試験結果（非放射性セシウム）
セシウム濃度比は試験開始初期の濃度に対する比率を表しています。

*10：割れ目や変質のない岩盤の部分を行います。

*11：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 $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ 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。

*12：地下水中有る元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

*13：岩盤などの中を元素が、濃度の高い方から低い方へ移動していく現象です。

単一割れ目を対象とした物質移行試験

平成 27 年度は平成 26 年度に開始した、単一割れ目を対象とした物質移行試験を継続しました。具体的には収着性、非収着性トレーサーを用いたトレーサー試験を実施するとともに、収着性トレーサー試験実施後に試験対象割れ目を包含するように、対象割れ目内に収着したトレーサー濃度を分析するためのボーリングコア試料を取得しました。図 66 に試験装置概要を、図 67 に注水流量と揚水流量をほぼ等しく設定した条件での試験結果を示します。4 つのケースとともに、試験開始から概ね 50 分～100 分の間にピークが生じ、その後、緩やかに濃度が低下していることから、割れ目の中をトレーサー（ウラン）が分散しながら移行していることが推察されました。

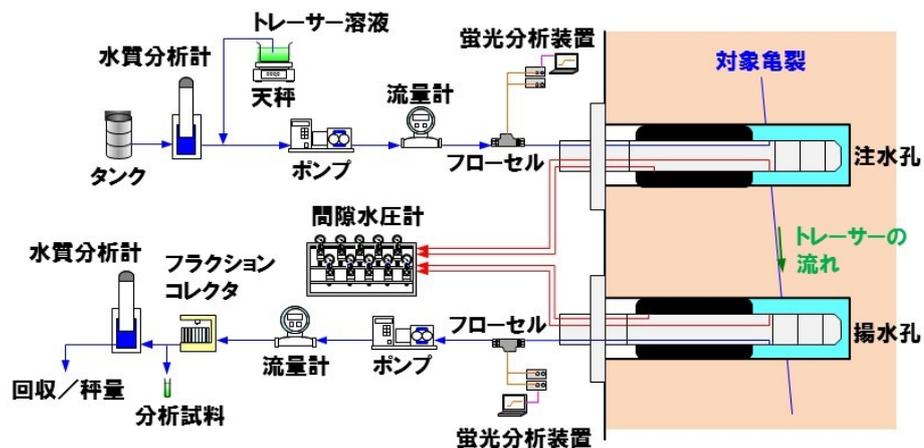


図 66 健岩部を対象とした原位置トレーサー試験装置の概念図

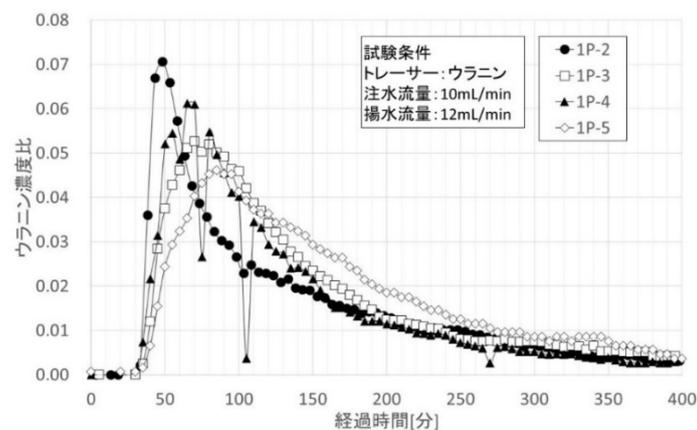


図 67 注水流量と揚水流量が同じ条件でのトレーサー試験結果

5. 地下施設の維持管理

平成27年度は、前年度に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、地下施設坑内に設置しているガス検知器の動作確認、工事用エレベータ設備の点検・整備などを実施しています（写真 6）。



写真 6 地下施設の維持管理状況（機械設備の点検・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*14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26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 77 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27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。

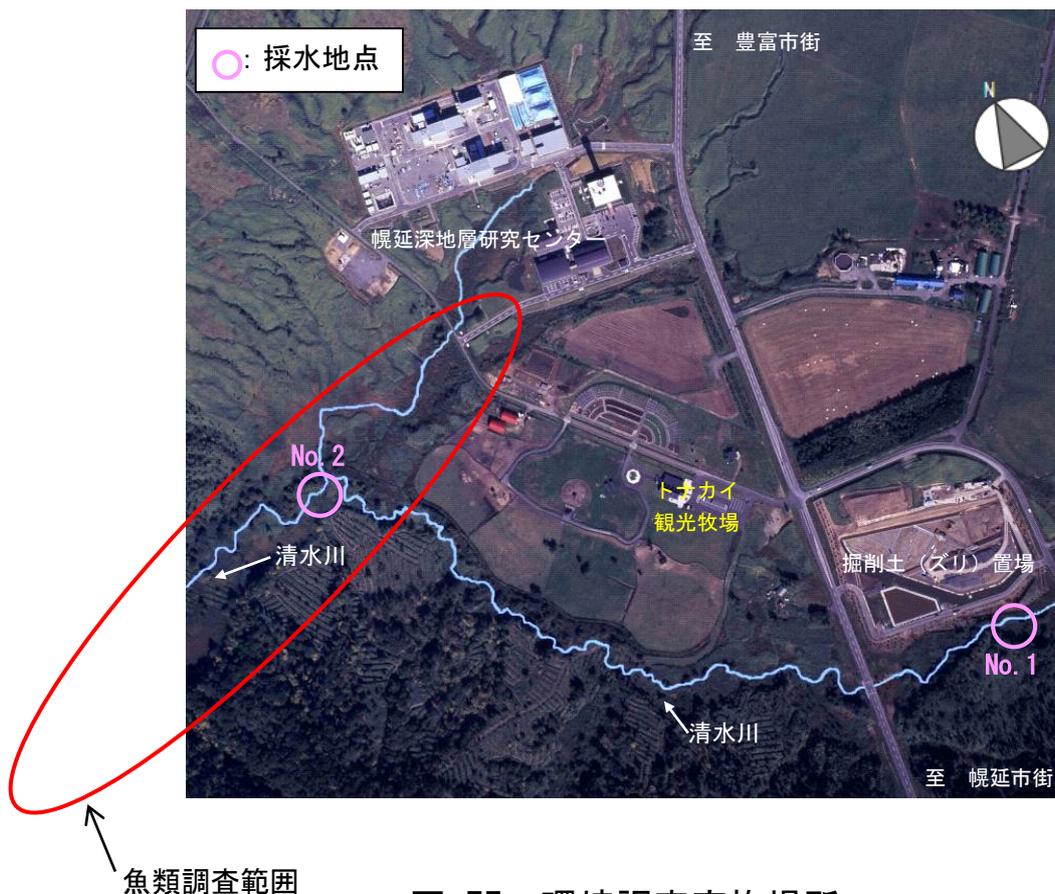


図 77 環境調査実施場所

*9 : <http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/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、継続的に現場の安全確認や改善などを指導しました（写真 14）。

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参加し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 15）。



写真 14 安全パトロールの状況



写真 15 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

- 信州大学
坑道周辺岩盤に生じる掘削損傷に関する研究
- 室蘭工業大学
三次元レーザスキャナを用いた壁面地質観察手法の開発など

◆ その他の国内研究機関との研究協力

- 株式会社大林組
マルチ光計測プローブによる岩盤挙動モニタリング
- 原子力環境整備促進・資金管理センター
地層処分実規模試験施設を利用した研究開発
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
- 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など
過去の地下水の化学的環境の推定に関する研究
- 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