

図 14 トレーサー試験の再現解析結果

(2) 有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験

有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験では、地下水中の元素が溶存有機物・微生物・コロイドと結合することにより、地下水中に溶けている元素の濃度（以下、溶存態濃度^{*}）が増加する影響を評価します。一方で、このような「元素－溶存有機物・微生物・コロイド」が共存する二元系に加えて、岩盤やその中に含まれる有機物に元素が収着して濃度が減少する影響についても評価するために、「元素－溶存有機物・微生物・コロイド－岩盤」が共存する三元系についてもデータを取得します。試験には、高レベル放射性廃棄物に含まれるアクチノイド^{*}のアナログ元素^{*}であり、既往の研究^(11, 12)などから有機物や微生物との相互作用が示唆される希土類元素などを用います。

令和 5 年度は、過年度に実施した、350m 調査坑道のボーリング孔内から採取した地下水に希土類元素を添加する室内試験の結果を整理しました。試験はボーリング孔から大気に接触させずに採取した地下水に対し、試験 A：地下水に含まれる溶存有機物・微生物・コロイドを除去するために 3 kDa^{*}のフィルターで限外ろ過^{*}してから、各希土類元素 10 μg/L を添加し、挙動を確認する試験⁽⁹⁾、ならびに試験 B：溶存有機物・微生物・コロイドを除去しない状態で各希土類元素 10 μg/L を添加し、挙動を確認する試験⁽¹³⁾、の 2 種類を実施しました。試験 A は地下水に希土類元素のみが存在する一元系、試験 B

は地下水中に希土類元素および溶存有機物・微生物・コロイドが共存する二元系での試験です。希土類元素のうち、ランタン (La)、ユウロピウム (Eu) およびルテチウム (Lu) に対する試験 A と試験 B の結果をそれぞれ図 15 および図 16 に示します。試験 A (図 15) では、希土類元素を添加した後の地下水の一部をそのまま分析に供した試料 (未ろ過試料) と、希土類元素の溶存態濃度を測定するために孔径 0.2 μm のフィルターでろ過した試料 (0.2 μm ろ過試料) とで、各希土類元素の濃度はほぼ同じ値を示しながら推移しました。一方、試験 B (図 16) では、試験 A と比較すると濃度減少が遅い傾向にあり、また質量数の小さい希土類元素 (質量数は $\text{La} < \text{Eu} < \text{Lu}$) ほど、未ろ過試料と 0.2 μm ろ過試料とで濃度差が大きいことが分かります。両者の結果の違いは、希土類元素と地下水中に含まれる溶存有機物・微生物・コロイドとの相互作用によるものと考えられます。

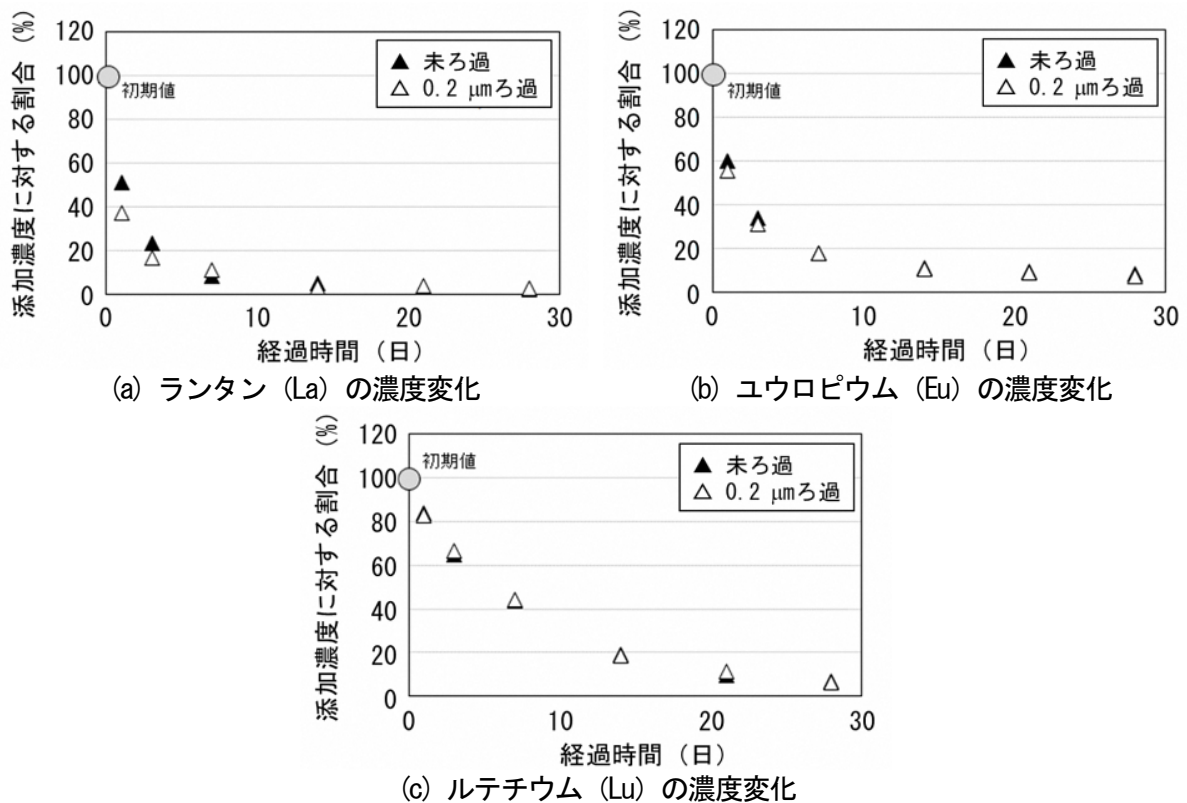


図 15 試験 A : 溶存有機物・微生物・コロイドを除去した場合の希土類元素の濃度変化

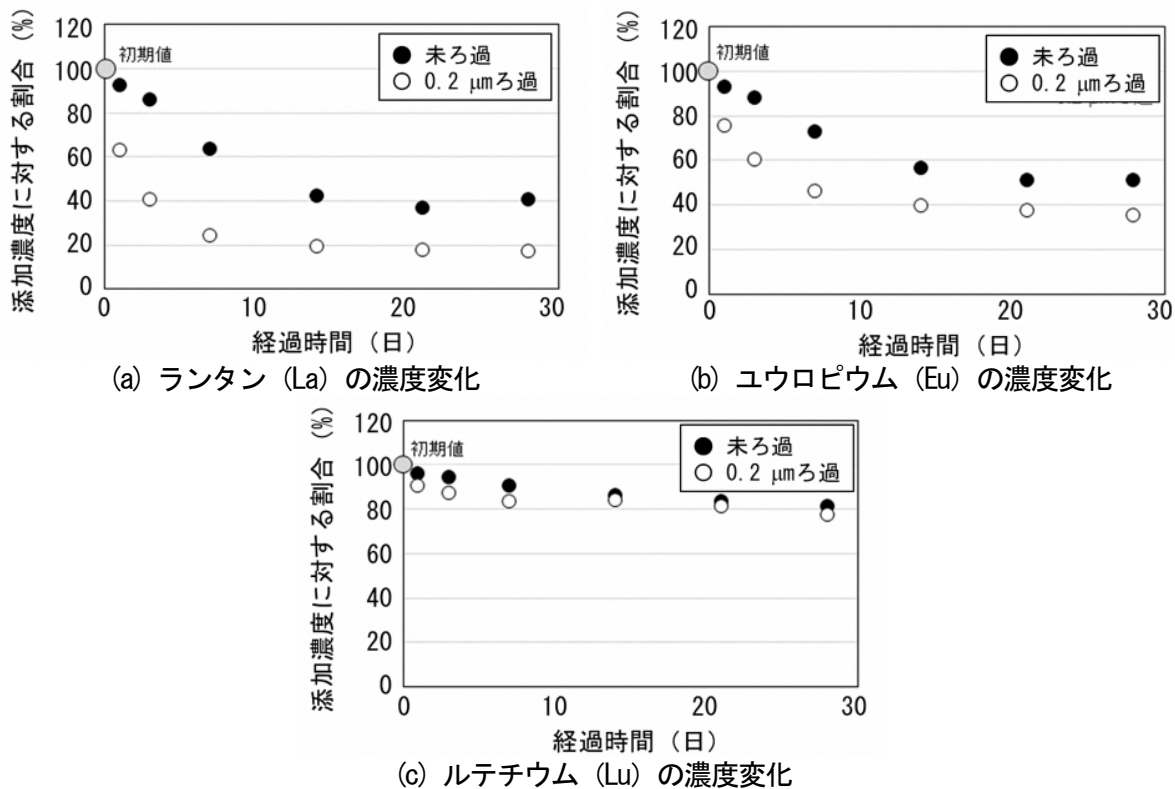


図 16 試験 B：溶存有機物・微生物・コロイドが存在する場合の希土類元素の濃度変化

令和 5 年度は、350m 調査坑道に掘削したボーリング孔^⑧の内部に設けた試験区間にトレーサー（各希土類元素 50 μg/L など）を循環させ、その濃度の変化を観察するとともに、二元系と三元系でトレーサーの挙動の違いを比較するための原位置試験を実施しました。試験方法を図 17 に示します。試験に先立ち、地下の試験区間と坑道上の経路との間で地下水を循環させ、水質を均質化しました（図 17 の①）。循環を一旦停止し、坑道上の経路のみで循環するように経路を変換してから、坑道上の経路内の地下水にトレーサーを添加し、坑道上の経路のみで循環させてトレーサーと地下水を混合しました（図 17 の②）。次に、坑道上の経路に設置したボトルの一部を経路から取り外して保管しました（図 17 の③）。そして、地下の試験区間を経由するように循環経路を変換して、上記のトレーサーを添加した地下水を試験区間に循環させました（図 17 の④）。一定の期間経過後に坑道上で保管したボトル（図 17 の③）と地下の試験区間を循環している経路上のボトル（図 17 の④）から同時に採水し、各ボトル内の地下水のトレーサー濃度を測定しました。坑道上で保管した地下水（図 17 の③）は二元系、地下の試験区間を循環した

地下水（図 17 の④）は三元系の試料となります。図 18 に示すように、岩盤内の試験区間を循環しない地下水（図 17 の③）と比べて岩盤内の試験区間を循環させた地下水（図 17 の④）の方が、未ろ過試料中の希土類元素の濃度減少が速いことが分かりました。また、試験区間を循環させた地下水における希土類元素の未ろ過試料および 0.2 μm ろ過試料の濃度減少は、地下施設から採取した地下水に希土類元素を添加する室内試験（前述の試験 B）の結果よりも速いことも分かりました。トレーサー添加前には試験区間を経由するように地下水を循環させており、坑道上で保管した地下水と地下の試験区間を循環した地下水に含まれる有機物・微生物・コロイドの濃度や組成には大きな差はないと考えられることから、主に 0.2 μm よりも大きい粒子と結合した希土類元素が、試験区間を経由することにより岩盤に収着し、地下水から除去されたことが示唆されます。以上のように、元素－有機物・微生物・コロイドの相互作用を明らかにするための室内試験および原位置試験の手法を確立するとともに、原位置環境下で「元素－有機物・微生物・コロイド」が共存する二元系と「元素－有機物・微生物・コロイド－岩盤」が共存する三元系の試験データを取得することができました。

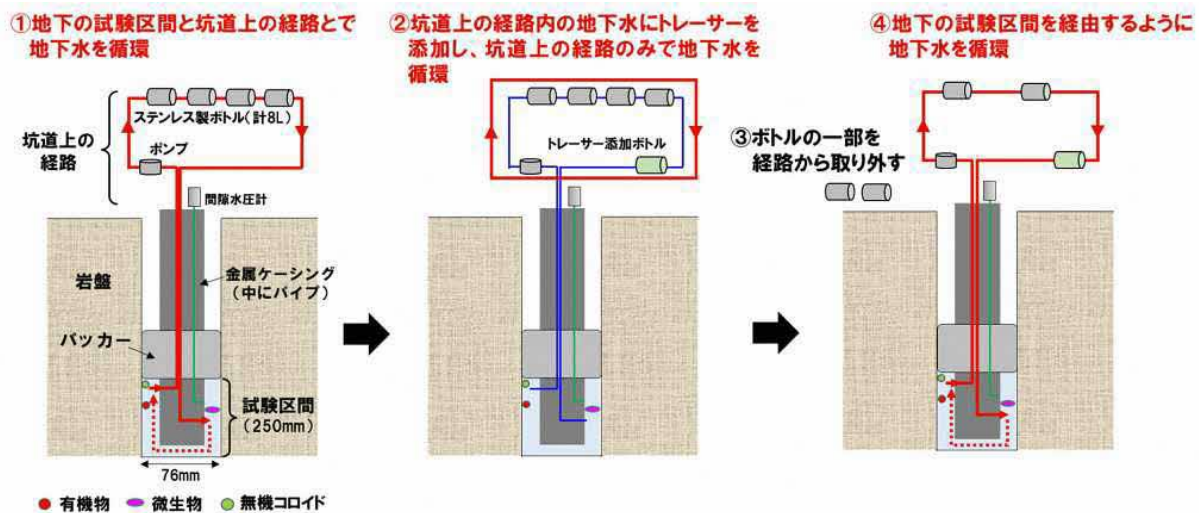


図 17 希土類元素添加試験の装置概念図および試験手順

③はトレーサーと地下水中の有機物・微生物・コロイドとの反応を調べるための試料（二元系）、④はトレーサーと地下水中の有機物・微生物・コロイドとの反応に加えて、それらと岩盤との反応を調べるための試料（三元系）です。

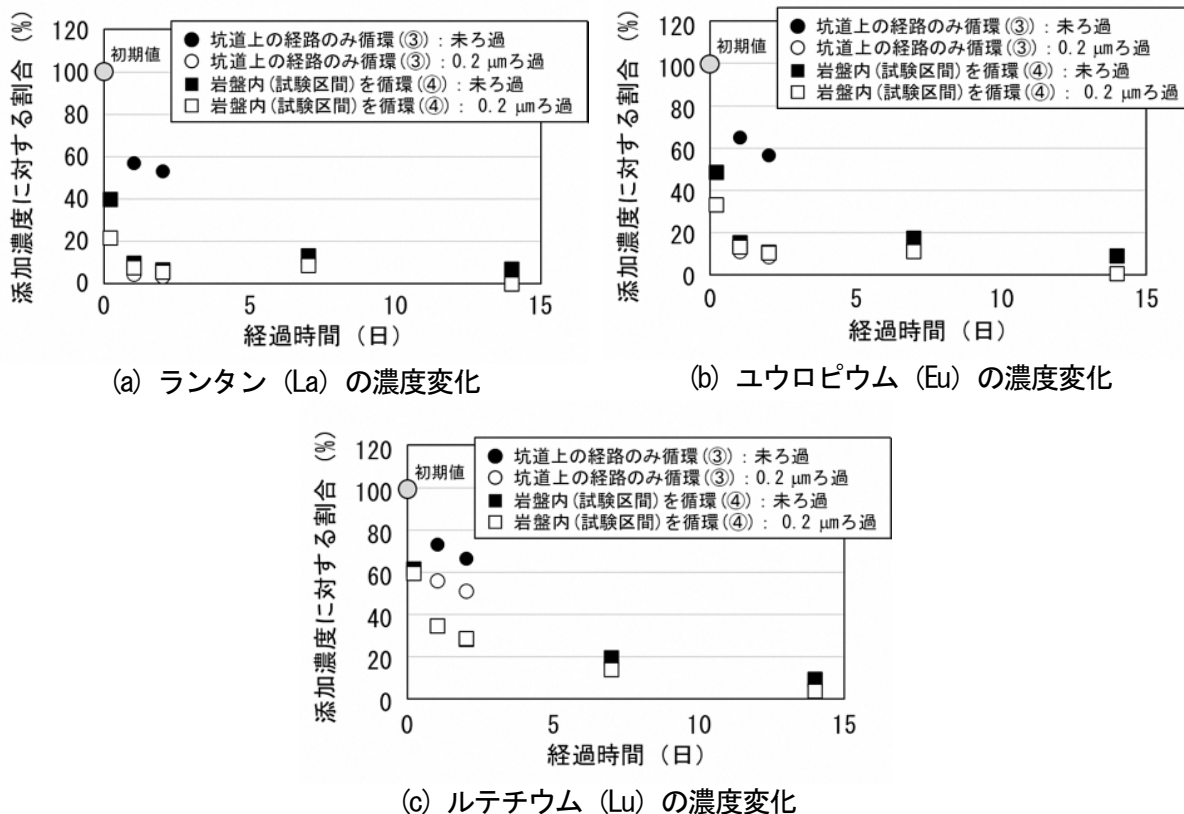


図 18 地下水に希土類元素を添加した原位置試験の結果

さらに、このような希土類元素の収着挙動を規定する要因を明らかにするために、140m 調査坑道～350m 調査坑道から採取した地下水に希土類元素のひとつであるユウロピウムの 3 価の陽イオン (Eu^{3+}) を添加し、地下水中の溶存有機物との親和性を調べました。 Eu^{3+} との結合による溶存有機物の蛍光強度の低下を調べ、地下水の水質や微生物群集の分析結果と合わせて多変量解析を実施することで、異なる蛍光特性を示す有機物の起源を推定しました。その結果、 Eu^{3+} は浅部地下水に見られる陸性腐植物質の特徴を示す溶存有機物と高い親和性を示す一方で、深部の化石海水中に見られる海洋性腐植物質の特徴を示す溶存有機物とは低い親和性を示すことが分かりました (図 19) ⁽¹⁴⁾。このことは、化石海水と天水との混合の程度や微生物による有機物分解の程度により、溶存有機物への希土類元素の収着挙動が影響を受けることを示唆しています。なお、本研究は東京大学との共同研究として実施しています。

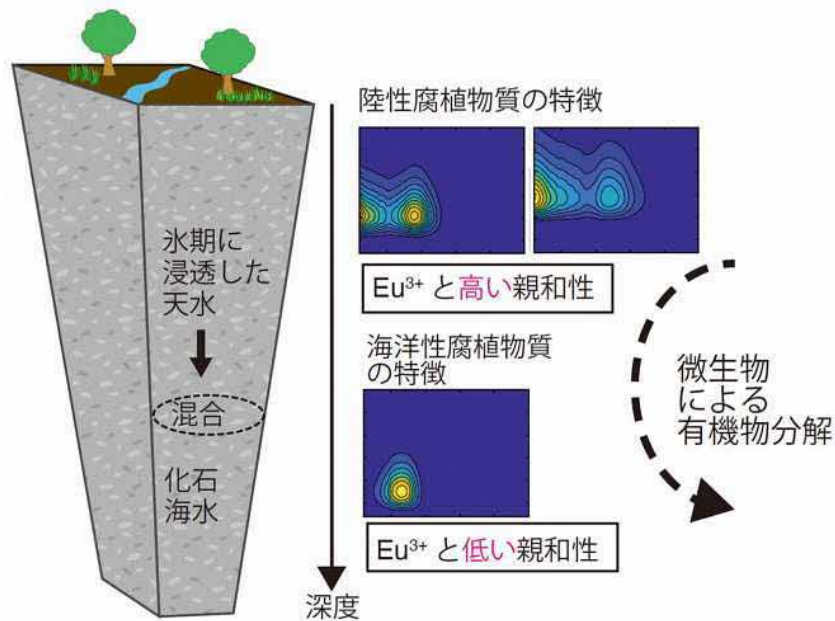


図 19 深度による溶存有機物の特徴と希土類元素 (Eu^{3+}) との親和性の違い
 右の図は励起蛍光マトリクスです。励起蛍光マトリクスとは、有機物の特徴を表す指標で、異なる起源の有機物ごとに特有の蛍光特性を表すことを利用したものです。横軸に蛍光を励起させる光の波長 (260 nm~500 nm)、縦軸に蛍光波長 (320 nm~600 nm) を取り、黄色ほど強い蛍光強度を示し、青色ほど弱い蛍光強度を示しています。 Eu^{3+} を添加した際の蛍光強度の変化から、地下水中の溶存有機物のうち陸性腐植物質の特徴を示すものは Eu^{3+} との親和性が高く、海洋性腐植物質の特徴を示すものは Eu^{3+} との親和性が低いことが分かりました。図は参考文献(14)を一部改変しています。

(3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

ブロックスケールを対象とした物質移行試験では、声間層に見られる、検討例に乏しいせん断^{*}性の割れ目 (数十cm~数m程度の長さの“ずれて”できた割れ目) については、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑から掘削した 4 本のボーリング孔^⑨ (図 20) を対象に、BTV (ボアホールテレビユーア) ^{*} 検層を行い、ボーリング孔の孔壁画像を取得し、各ボーリング孔に交差する割れ目の走向傾斜のデータを取得しました。その結果、NW 走向、および NNE 走向の 2 方向の割れ目が多く見られ、これまでに立坑あるいは水平坑道で実施された壁面観察結果^⑨ と整合的であることが確認できました。次に、割れ目を含む、合計 19 区間 (図 21) に対して定流量注水による透水試験を行いました。250-MIG1-1 孔については、区間 5 と区間 6 が岩盤もしくはボーリング孔内を介して連通している可能性が推定されたことから、当該区間については、No. 5 のパッカーを収縮し、新たに区間 5-6 を構築して透水試験を実施しました。また、250-MIG1-3 孔の区間 5 については、注水直後に同孔の孔口付近の壁面から漏水することが確認されたことから、当該区間の透水試験は実施し

ませんでした。透水試験の結果、各区間の水の流れやすさを表す透水係数および透水量係数の値がそれぞれ 3.4×10^{-10} m/s \sim 3.5×10^{-8} m/s および 4.6×10^{-10} m²/s \sim 5.8×10^{-8} m²/s であり、既存の研究成果⁽¹⁵⁾と概ね整合的であることが確認できました。また、透水試験時における注水を行った区間の水圧変化量を評価しました。一例として、250-MIG1-4 孔の評価結果を図 22 に示します。既往の透水試験結果から、対象としたせん断性の割れ目については中～後半の時間帯の水圧変化量が一定あるいは低下傾向を示し、割れ目の水理的連結性が良いことが分かっています^(16, 17)。250-MIG1-4 孔の透水試験時の水圧変化量は中～後半（図 22 中の 1,000 秒～10,000 秒）の時間帯で一定あるいは低下傾向を示すことが確認でき、既往の研究成果と整合的であることが確認できました。

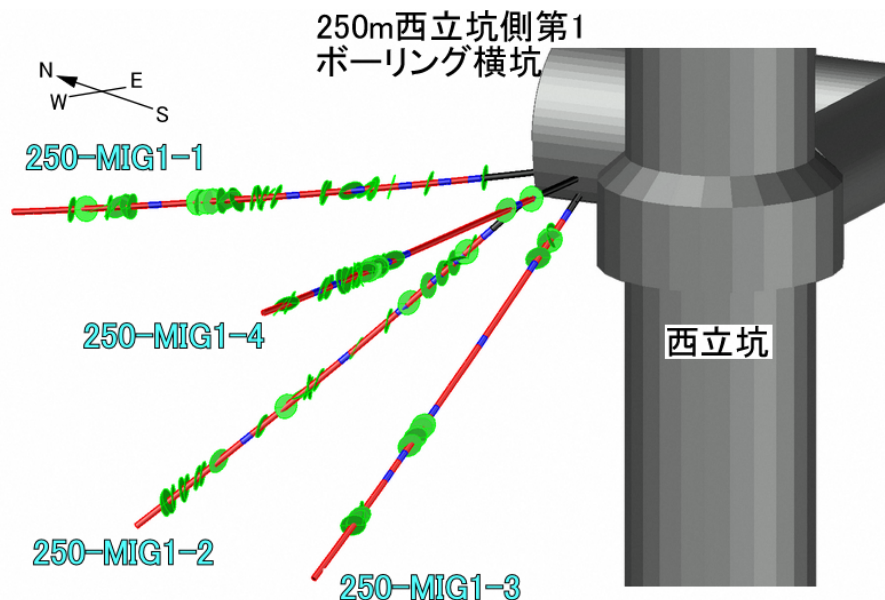


図 20 ボーリング孔レイアウト

各ボーリング孔（250-MIG1-1 孔～250-MIG1-4 孔）の長さはいずれも 21 m であり、孔口から 1.8 m まではケーシング（金属製の管）で保護されています。また、図中の青線はパッカー（試験区間を区切るゴム製の用具）の位置を示しており、パッカーで仕切られた赤線部分が間隙水圧測定区間を示しています。緑色の円盤は BTV で検出された割れ目を半径 0.5 m の円盤と仮定して示しています。

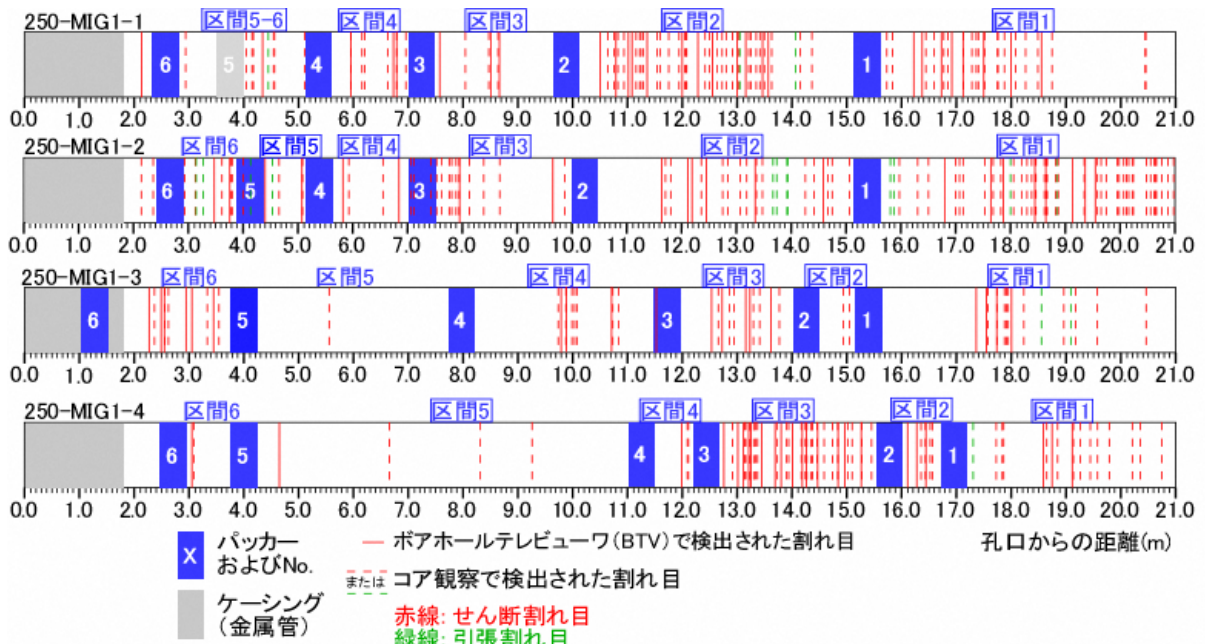


図 21 透水試験時における間隙水圧観測区間

四角で囲まれた区間が透水試験区間（定流量注水を行った区間）です。注水時は各区間で間隙水圧測定を行い注水による水圧応答の有無を観測しています。250-MIG1-1 孔の No. 5 のパッカーは区間 5-6 の透水試験時に収縮させ、他の区間の透水試験時はパッカーを拡張し、その上下の区間（区間 6 および区間 5）で間隙水圧測定を行いました。

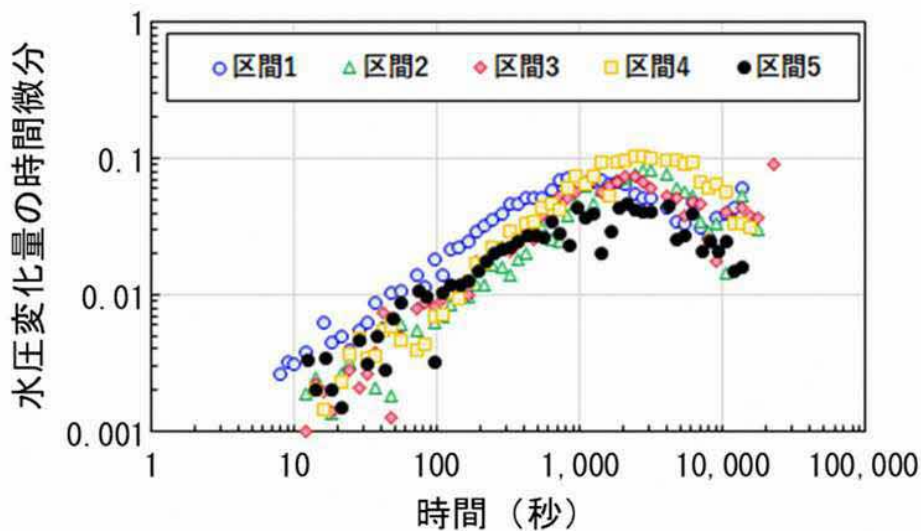


図 22 透水試験時の水圧変化量の例（250-MIG1-4 孔）

稚内層深部については、令和 3 年度に東立坑の坑底（深度 380 m）から掘削した 2 本のボーリング孔（350-FZ-01 孔および 350-FZ-02 孔）を利用して実施した稚内層深部の断層を対象としたトレーサー試験⁽⁸⁾の解析評価を行いました。350-FZ-01 孔を揚水孔、350-FZ-02 孔を観測孔とした孔間透水試験の解析結果から、孔間距離（4.5 m）を仮定した場合に比べ、孔間距離の約 10 倍～

100 倍の非常に長い経路を仮定した場合の方が、試験結果の再現性が良いことが分かりました (図 23)。この解析結果から導出された経路を一次元のチューブで仮定し、トレーサー試験の観測データを対象とした物質移行解析を実施しました。解析では、トレーサー試験の観測データに見られる急激な濃度変化が物質移行解析結果へ及ぼす影響についても確認しました。その結果、解析結果の曲線は急激な濃度変化の影響を考慮して設定した複数のケース間で差が見られましたが (図 24)、推定された流動経路の半径はほとんど変化せず、孔間透水試験で推定された流動経路の半径 (数百 μm) の数倍~数十倍 (数 mm ~数十 mm) であることが推定されました。孔間透水試験とトレーサー試験から推定された半径の違いは、一般的に指摘されている関係と整合しており、水理的連結性が限定的な場に対して、曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定することによって、物質の移行経路を表現できることが分かりました。

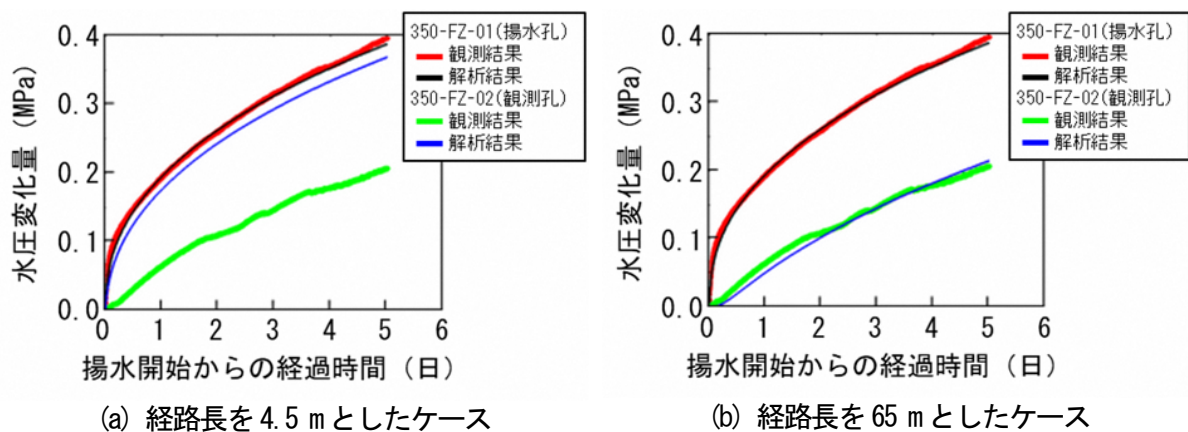


図 23 孔間透水試験の解析結果

350-FZ-01 孔からの揚水 (1.0 L/min) に対する揚水区間の水圧の変化量と 350-FZ-02 孔の観測区間の水圧の変化量を再現する解析を行いました。経路長を長くした (b) のケースの方が揚水孔および観測孔の観測結果の再現性が良いことが分かります。

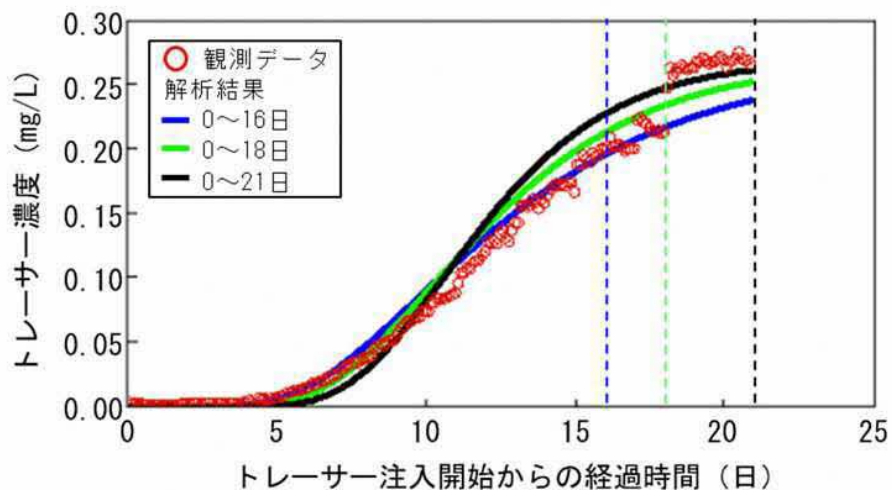


図 24 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析例

トレーサーが移行する流動経路の半径などについて、試験中の濃度変化を最も良く再現できる条件を観測値と解析値をフィッティングさせることにより検討しました。図中○は観測データを示します。解析結果はそれぞれ、試験開始から16日後まで（青線）、試験開始から18日後まで（緑線）、試験開始から21日後まで（黒線）の観測データを対象とした場合の解析結果を示します。

5. 処分概念オプションの実証

5.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

5.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

令和 2 年度以降は、操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証が課題となります。そこで、具体的には以下の 3 つの項目に取り組んでいきます。

(1) 搬送定置・回収技術の実証

(2) 閉鎖技術の実証

(3) 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いによる品質保証体系の構築

「搬送定置・回収技術の実証」としては、緩衝材や埋め戻し材の状態に応じたこれらの除去技術の技術オプションの整理、より合理的に人工バリアを回収するための手法の提示、回収可能性^{*}を維持した場合の処分場の安全性への影響に関する品質評価手法の提示を行います。

「閉鎖技術の実証」としては、将来の処分場閉鎖後に、坑道や掘削損傷領域が地上まで直結する移行経路となることを防ぐために、地下施設および周辺岩盤の長期的な変遷を考慮しつつ、埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を図ります。また、埋め戻し材やプラグなどの施工方法の原位置環境への適用性・実現性について確認します。

「人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築」については、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態で得られる情報などに基づき、埋め戻し材の施工方法（締固め、ブロック方式など）に応じた緩衝材の品質の違いを把握します。また、埋め戻し方法（プラグの有無など）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握します。緩衝材への水の浸潤挙動を把握するための試験として、緩衝材流出試験を継続します。

これらの成果は、将来的に処分場を閉鎖する際に適用される閉鎖技術に求める性能を設定する際やその性能を担保するために必要となる設計・施工技術を選択する際の基盤情報となります。

(1) 搬送定置・回収技術の実証

回収可能性を維持した場合の処分場の安全性への影響に関する品質評価手法の提示については、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 2 年度から令和 4 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 [JPJ007597]：回収可能性技術高度化開発」ならびに令和 5 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 [JPJ007597]：ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発」）を活用して、①実際の地下環境における支保部材の状態把握および②実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理に関する試験・分析ならびに数値解析を実施しました。

① 実際の地下環境における支保部材の状態把握

処分場に定置された廃棄体を安全に回収するためには、処分坑道内の空間が保たれていることが必要となります。この評価のために、処分坑道に施工される吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的とした試験を実施しています。具体的には、幌延深地層研究センターの地下施設で施工した吹付けコンクリートと同様の成分および施工方法で作製した低アルカリ性コンクリートの試験体を、令和 2 年度から 350m 調査坑道の大気条件下および浸潤条件下に定置しています（暴露試験^{*}）⁽¹⁸⁾。令和 5 年度は定置から約 2 年 9 か月が経過した時点で一部の試験体を回収し、物性や化学状態を把握するための分析を行いました。さらに、地下施設に施工して約 10 年が経過した低アルカリ性の吹付けコンクリート試料を坑道壁面から採取して、暴露試験の試験体と同様の分析を実施しました。以上の結果と、暴露試験の令和 4 年度までの分析結果^(8, 9, 18)から、低アルカリ性コンクリート材料を用いた支保工の長期的な物性変化について整理しました。

令和 5 年度に坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料は、坑道壁面から約 24 mm の厚さまで中性化が進行していることが分かりました（図 25）。図 25 の坑道側の試料および大気条件下で坑道に定置した暴露試験の試験体の中性化深さは、中性化の進行に関する一般的な関係式（式 1）と概ね整合的でした（図 26）。

$$x = A\sqrt{t} \quad \text{式 1}$$

ここで、 x ：中性化深さ（mm）、 A ：定数（mm/年^{0.5}）、 t ：経過時間（年）です。

また、中性化が進行している領域では、中性化の生じていない領域に比べて空隙径 $0.003\ \mu\text{m}\sim 0.2\ \mu\text{m}$ の空隙の割合が増加しており（図 27）、大気条件下に定置した試験体の結果^(8, 9)に比べてサイズの大きな空隙の割合が増加していることが分かりました。電子プローブマイクロアナライザー*による観察から、中性化が進行している領域では、 SO_3 濃度が減少していることも分かりました（図 28）。以上の結果は、大気中の二酸化炭素との反応により、 SO_3 を含むセメント水和物（エトリンガイト*など）が分解し、空隙径が大きくなったと解釈されます。

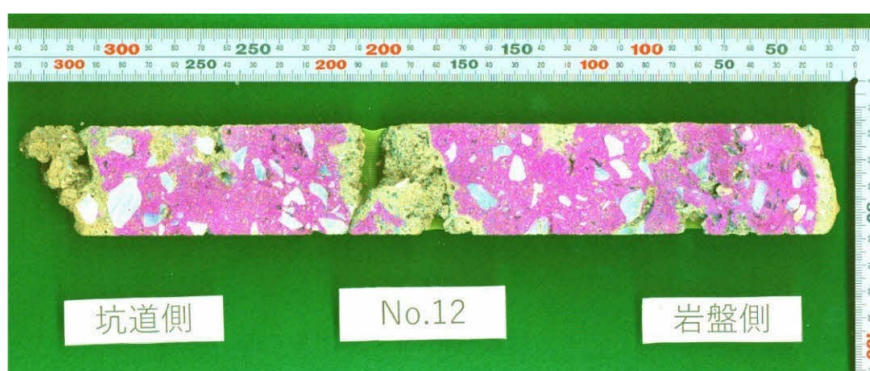


図 25 坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の変質領域

写真は、坑道壁面から採取した吹付けコンクリートの半断面にフェノールフタレインを塗布し、色の変化が見やすいように色調を変化させています。フェノールフタレインは pH がおよそ 8~12 の範囲で赤色を呈する試薬であり、中性化やセメント成分の溶脱が進行して pH が低下した領域では、呈色が見られなくなります。

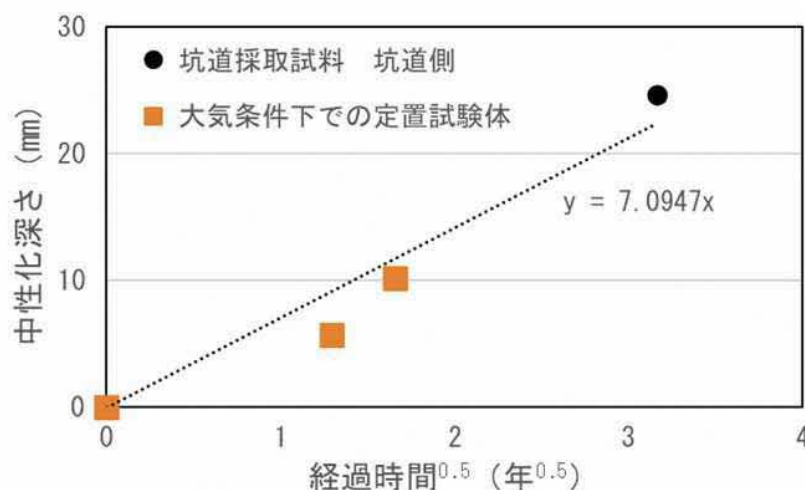


図 26 中性化深さと経過時間の関係