

(e) 埋め戻し材、吹付けコンクリート、岩盤の境界面のサンプリング結果
 図 9 人工バリア解体試験施工の解体状況（試験孔部）

令和 4 年度は、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件での試験を継続します。連成解析については、国際共同研究 DECOVALEX において令和 3 年度に実施した各国の解析結果の比較検証によって明らかになった課題を整理し、人工バリア性能確認試験で取得したデータを対象とした連成解析結果の比較検証を行います。

また、空気の移動などを考慮した熱－水理－力学連成挙動については、令和 3 年度に実施した室内試験や連成解析の検証結果を基に、連成現象の把握や解析コードの検証を行います。

令和 3 年度に実施した人工バリア解体試験施工の解体調査結果を整理し、人工バリア性能確認試験の解体調査計画に反映するために適用可能な手法や注意点などの取りまとめを行います。

4.2 物質移行試験

令和 2 年度以降は、掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立、有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化、割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立が課題となります。そのため、これまでに確立した物質移行特性評価手法の適用／高度化を図りつつ、掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を行うとともに、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を評価します。また、掘削損傷領域の物質移行特性に加え、有機物・微生物・コロイドの物質移行特性に与える影響を考慮した上で、割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数 m～100 m 規模）（図 10）における遅延性能評価手法の整備を行います。これらの成果は、処分事業で堆積岩を対象とする場合に、核種移行モデルを構築する際の基盤情報となるものです。

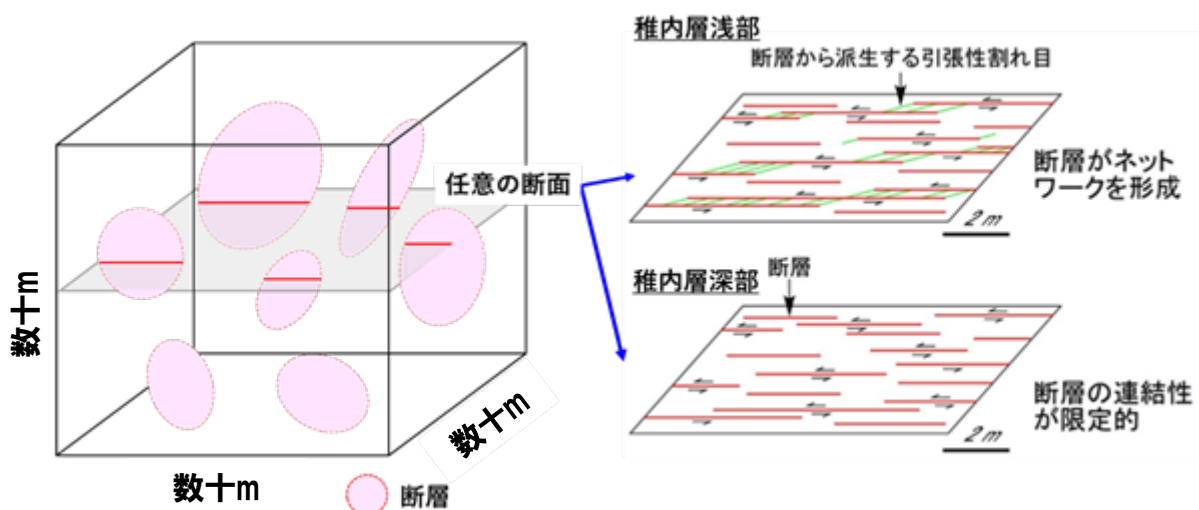


図 10 ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

令和3年度は、試験坑道3の既存孔を利用した追加のトレーサー（非収着性）試験を行い、掘削損傷領域の物質移行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のデータを拡充しました。その結果、トレーサー試験場所の周辺では、掘削損傷領域の割れ目だけではなく、試験坑道4の力学プラグと岩盤の境界、底盤コンクリートと岩盤の境界などの経路も介して、トレーサーが移行している可能性が示唆されました。

有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響の評価については、350m調査坑道において原位置試験を実施するためのボーリング孔の掘削ならびに試験装置の設置を行い、地下水の水圧や水質、微生物群集などの基礎的なデータを取得しました。

また、有機物（特に、元素と結合しやすいと考えられるフミン酸^{*}）の存在が地下水中の元素の存在状態に与える影響を評価するための試験を、原位置の試料を利用して実施しました。350m調査坑道から採取した地下水に複数の非放射性的希土類元素^{*}（セリウム（Ce）、ネオジム（Nd）、ユウロピウム（Eu）およびホルミウム（Ho））を添加し、その後、異なるサイズのフィルターで限外ろ過^{*}を行いました。希土類元素のみを添加した場合と、希土類元素に加えて地下水から抽出したフミン酸を添加した場合を比較したところ、10 kDa^{*}のろ過フィルターサイズまでは、フミン酸を添加した場合の方がろ過後の希土類元素濃度が高くなりました（図11）。この結果から、フミン酸との錯形成により希土類元素の溶解度が上昇したこと、およびフミン酸と錯形成した希土類元素はコロイドとして存在していることが示唆されます。物質移行を検討する上で、有機物およびそのコロイドと元素との錯形成が重要であることが確認できました。

さらに、令和2年度に物質移行試験装置を設置した、東立坑底盤（深度380 m）からのボーリング孔を利用し、ブロックスケールにおける物質移行特性を評価するためのトレーサー試験を実施しました。その結果、揚水孔で観測されたトレーサー濃度は投入濃度に対して最大でも0.3%と非常にわずかでした（図12）。これは稚内層深部の断層における移行経路の水理的連結性は限定的である可能性を示唆します。この成果は稚内層深部の物質移行概念モデルを検討する上で有益な情報となります。

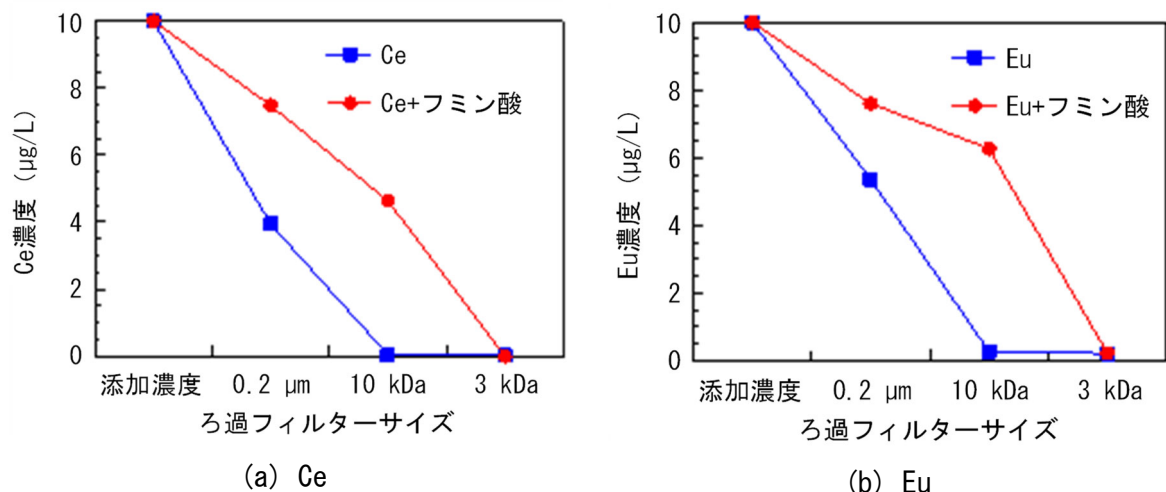


図 11 幌延の地下水（深度 350 m）に対する希土類元素およびフミン酸の添加試験

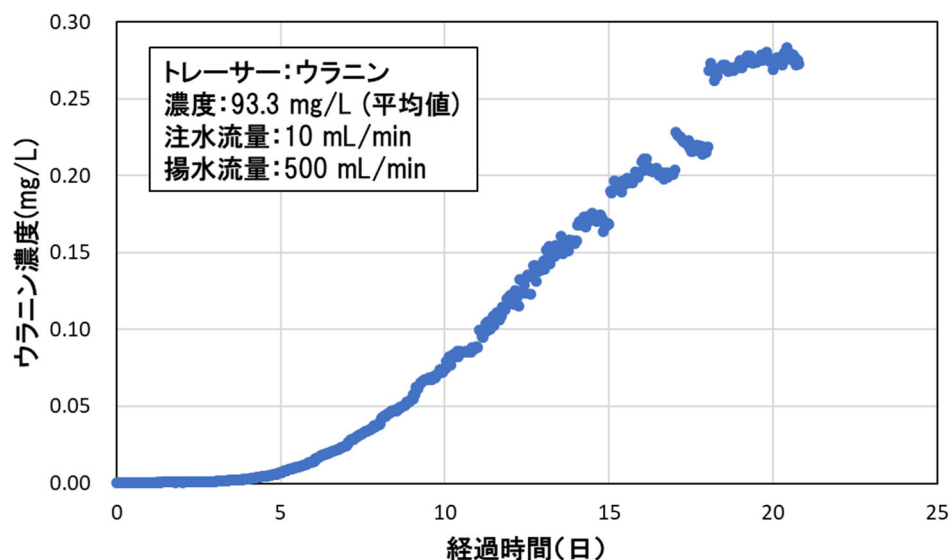


図 12 ウラニン*を用いたトレーサー試験結果

令和 4 年度は、令和 3 年度に実施したトレーサー試験結果に基づき、掘削損傷領域に分布する割れ目を介した物質の移行挙動のモデル化/解析手法の検討を行うとともに、必要に応じて水理・物質移行に関する追加の情報を取得します。また、令和 3 年度に 350m 調査坑道に掘削したボーリング孔などを利用して、有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験に着手します（図 13）。ブロックスケールにおける遅延性能評価手法の整備に関しては、稚内層深部に分布する断層を介した物質の移行経路の水理的連結性を検証するために、令和 3 年度に実施したブ

ロックスケールのトレーサー試験の結果について解析評価を行います。また、稚内層深部で整備する遅延性能評価手法の比較検証の観点から、声間層に分布する割れ目を対象とした物質移行特性を評価するためのボーリング調査に着手します。

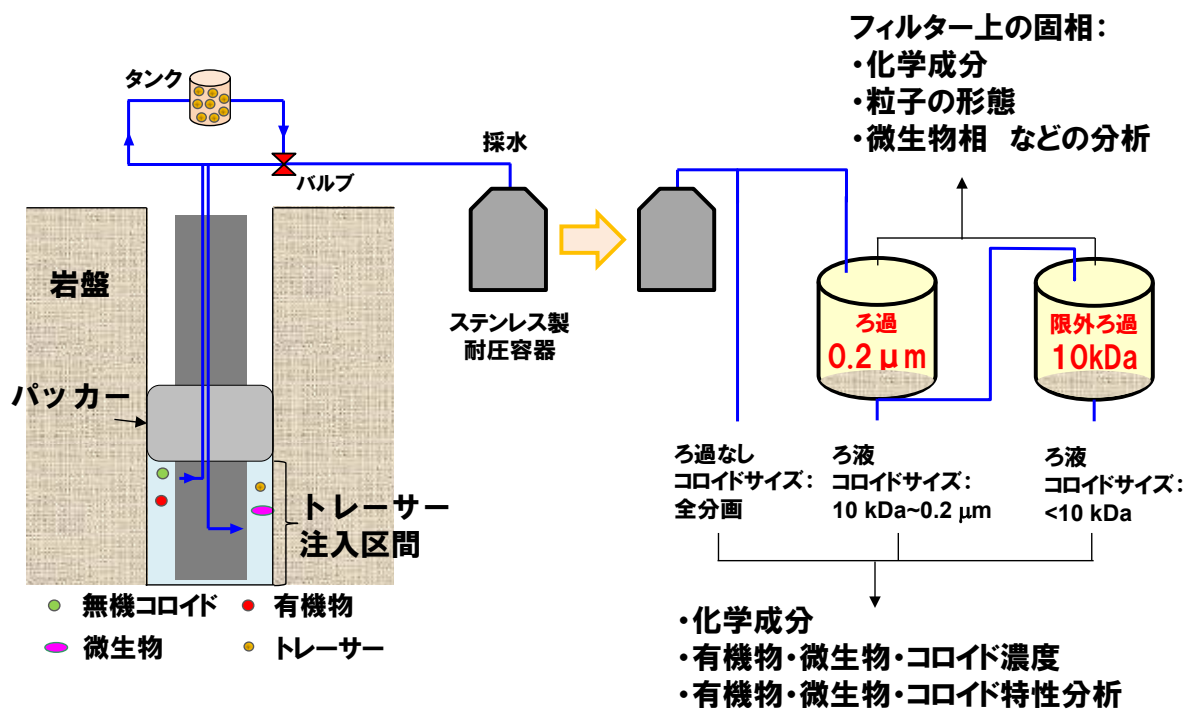


図 13 有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験の概念図

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。

- ・ 搬送定置・回収技術の実証
- ・ 閉鎖技術の実証
- ・ 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。具体的には、以下に示す5項目について室内試験や原位置試験、数値解析などを実施していきます。

- ① 埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示
- ② 埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握
- ③ 掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証
- ④ 掘削損傷領域の調査技術の高度化
- ⑤ 坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

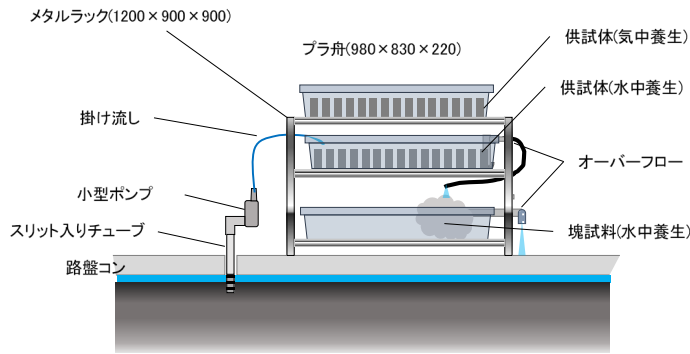
人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態で得

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。

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して利用されます。

令和3年度は、搬送定置・回収技術の実証として、安全に回収作業を行うための処分坑道内の空間の安定性を評価するために、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コンクリート試験体の暴露試験を継続しました。具体的には、地下坑道の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コンクリート試験体を、令和2年度より坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置しています（図14）。令和3年度は、定置から約8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試験・分析を実施しました。その結果、大気条件下に定置した試験体は表面から約3mmの深さまで中性化が進んでいるのに対し、湿潤条件下に定置した試験体では中性化の領域がごくわずかであることなどが分かりました（図15）。

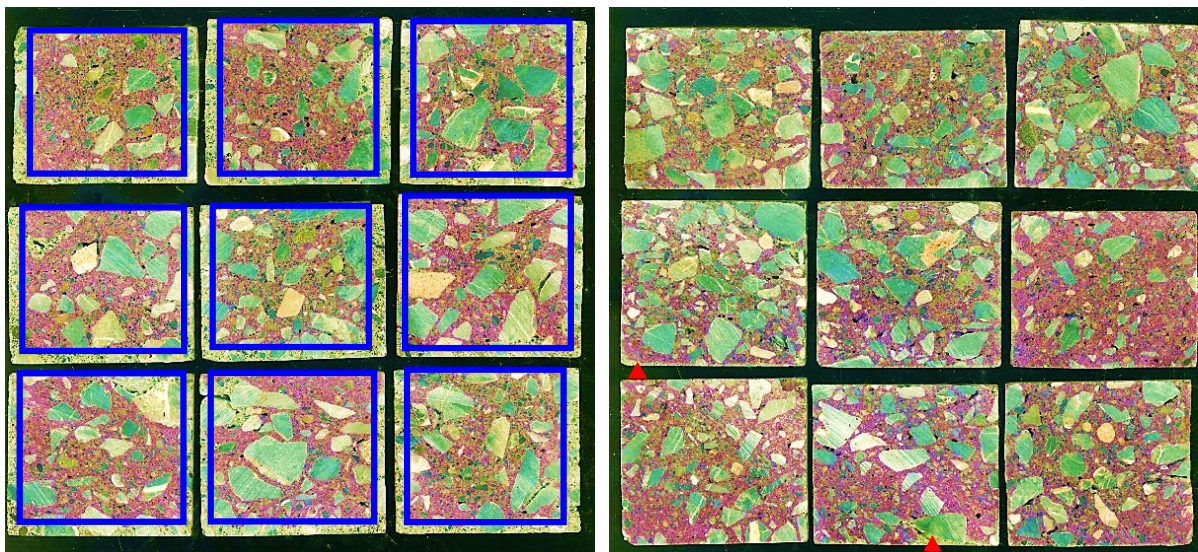
また、令和2年度から坑道開放条件下における坑道周辺岩盤における長期変化を評価するために、長期的な力学的変化やそれに伴う透水性の変化を考慮した坑道周辺の二次元多相流解析^{*}を実施しています。令和3年度は、これらの解析で使用する、岩盤の掘削損傷領域の応力状態の変化による透水性の変化に関するパラメータを取得するため、人工的に亀裂を発生させた岩石コアを用いて等方的に圧力を加えながら透水試験を実施しました。その結果、加える圧力が増加するにつれて亀裂を含む岩石コアの透水性が低下することを定量的に把握しました（図16）。また、解析条件の妥当性を評価するために、解析領域の広さを変化させた解析や坑道壁面からの水分の蒸発の有無を考慮した解析を実施し、境界条件の設定の違いによる影響を評価しました。その結果、坑道壁面からの水分の蒸発の有無は、岩盤内部の長期的な飽和度の変化への影響が小さいことが分かりました（図17）。



(a) 定置装置の概念図

(b) 定置状況

図 14 コンクリート試験体の暴露試験



(a) 大気条件下

呈色のみられない領域（青色線の外側）
：表面から約 3 mm

(b) 湿潤条件下

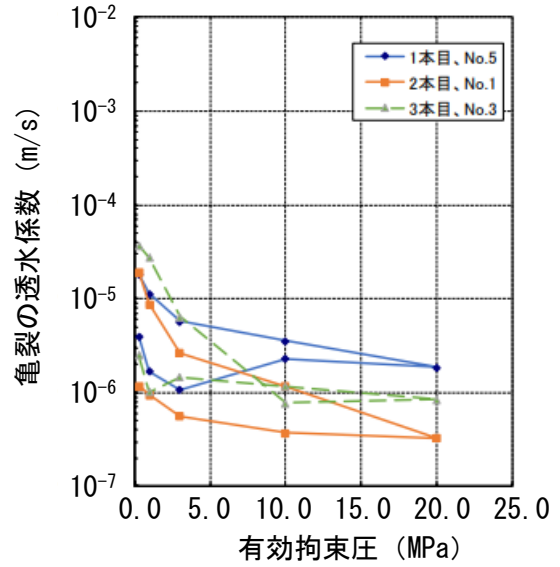
呈色のみられない領域（▲）
：ごく一部に限定

図 15 コンクリート試験体の変質領域

試験体の半割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た写真です。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、中性化が進行して pH が低下した領域では、フェノールフタレインの呈色が見られなくなります。

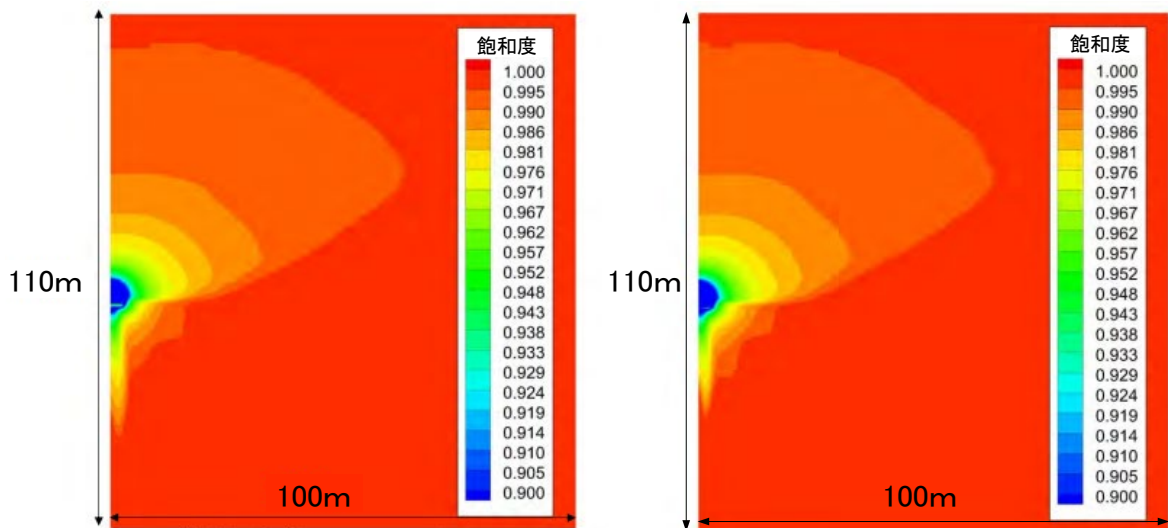


(a) 人工的に亀裂を発生させた岩石コア試料



(b) 透水係数

図 16 封圧条件下における透水試験



(a) 水分の蒸発を考慮していないケース

(b) 水分の蒸発を考慮したケース

図 17 坑道掘削後 1,000 年における飽和度分布

閉鎖技術の実証としては、①埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示については、コンクリート成分の溶出に起因する埋め戻し材の変質が、坑道周辺の岩盤（掘削損傷領域を含む）、坑道支保工および埋め戻し材との相互作用を考慮した上で、顕在化するかどうかについて水理・化学連成解析を行いました。その結果、岩盤中や坑道支保工内の間隙あるいは坑道埋め戻し部の間隙が、溶出したコンクリート成分に起因する二次鉱物の沈殿により早期に閉塞することから、埋め戻し材の変質を

引き起こす要因の 1 つである地下水の供給が抑制され、埋め戻し材が長期にわたって変質する可能性は小さいことが示唆されました。また、埋め戻し材の性能を変化させる要因となりうるベントナイトの流出挙動の発生条件を検討するための室内試験に着手しました。

②埋め戻し材の設計評価に必要な緩衝材膨出抑制機能の把握については、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた室内試験を継続して実施しました。その結果から、緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤変形挙動の評価に必要な膨潤変形量と膨潤圧のデータを整理しました。また、緩衝材と埋め戻し材に含まれるベントナイトに吸収される水の水質がこれらの膨潤変形挙動に及ぼす影響について検討を行い、塩分濃度の低い水の場合に緩衝材の膨潤変形量が大きくなることを確認しました。

③掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、試験坑道 3 の底盤に構築した粘土系材料を用いた止水壁を対象とした透水試験を継続して実施し、止水壁を含む領域の透水係数を評価しました。その結果、止水壁を構築して 2 年が経過した時点においても、試験領域内の透水係数を構築直後と同等に低く保っていることを確認しました。また、試験坑道 2 を用いて、ベントナイトの吹付けによる止水プラグの施工方法について工学規模試験を実施しました（図 18）。工学規模試験では、坑道側面の岩盤を掘削して設けた切欠き部に対してベントナイトの吹付けを行い、吹付けの手順や吹付け材料の管理方法を確認するとともに、吹付け後のベントナイトの乾燥密度に生じるばらつきなどの施工品質を整理しました。

④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、令和 3 年度までに 350m 調査坑道に整備した実験サイトにおいて、掘削損傷領域の物性値を調査するボーリングコア採取および室内試験を行いました。また、岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的として、グラウト注入前後の透水試験および開発した試験装置による高精度な計測を行い、その適用性を確認しました（図 19）。プラグを施工する際、掘削損傷領域中の割れ目の連続性や分布を把握することは、プラグの厚さや深さなどを設計する上で重要な知見となります。その他に、坑道周辺の掘削損傷領域の経時変化の理