

2本(21-350-TRA孔および21-350-TRB孔)掘削し、パッカー<sup>\*48</sup>や流量計、間隙水圧計などの物質移行試験装置を設置しました(図24)。ここでは、21-350-TRA孔の結果を示します。21-350-TRA孔において、パッカーによって区切られた試験区間(区間長250mm)の水圧を継続的にモニタリングしました。その結果、採水などに伴う試験区間の開放により水圧は低下するものの速やかに回復し、最大でも2週間程度で安定することを確認しました(図25)。また、パッカー設置から約3か月後に試験区間から採取した地下水中の元素濃度を分析し、350m調査坑道の他のボーリング孔から採取した地下水と同様にナトリウムイオン(Na<sup>+</sup>)と塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)がそれぞれ主要な陽イオンおよび陰イオンであることを確認しました(表2)。さらに、試験区間内の地下水の物理化学パラメータを連続観測し、掘削による水質への影響の程度や原位置の地下水水質への回復挙動を確認しました(図26)。pH、ECおよびDOは、これまでに350m調査坑道のボーリング孔で得られた測定値(表3)とおおむね同程度の値を示しました。Ehが時間経過とともに徐々に低下しており、ボーリング孔掘削時の掘削水による酸化の影響が低減されていると考えられます。今後は、21-350-TRA孔および21-350-TRB孔において物理化学パラメータの観測を継続し、Ehなどのパラメータの傾向や値を確認します。その上で、高レベル放射性廃棄物に含まれるアクチノイド<sup>\*49</sup>のアナログ元素<sup>\*50</sup>であり、既往の研究<sup>(9)</sup>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<sup>\*51</sup>などの非放射性トレーサーをタンクに添加し、経路内を循環させ(図24の循環経路)、物質移行試験を開始する予定です。

---

\*48: ボーリング孔の中を試験区間あるいは地下水やガスの採取区間として区切るために設置する装置の1つです。ゴム製のもので用いられることが多く、水や空気などで膨らませてボーリング孔壁に密着させることで区間を区切ります。複数のパッカーを使うことでボーリング孔内に複数の試験区間・採取区間を作ることができます。

\*49: アクチノイドは、原子番号89のアクチニウム(Ac)から103のローレンシウム(Lr)までの15元素の総称です。

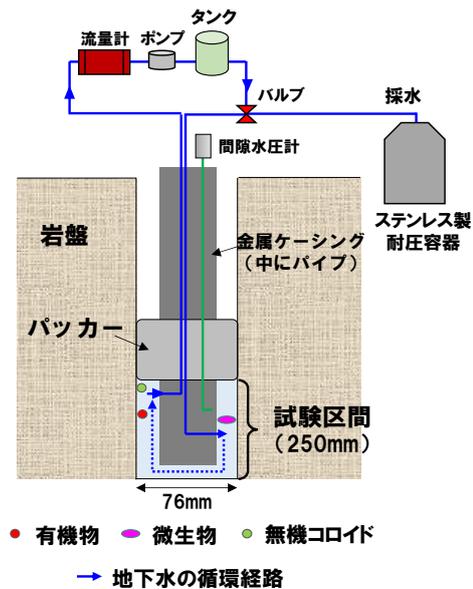
\*50: 高レベル放射性廃棄物に含まれる元素と同様の化学的性質を示す元素のことをいいます。アナログ元素を使った調査や試験を行うことで、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素の移行挙動などを知ることができます。

\*51: 希土類元素は、原子番号21のスカンジウム(Sc)と39のイットリウム(Y)に、原子番号57のランタン(La)から71のルテチウム(Lu)までの15元素を合わせた17元素の総称です。レアアースとも呼ばれます。



21-350-TRB孔                      21-350-TRA孔

(a) 装置の設置状況



(b) 装置の概念図

図 24 350m 調査坑道に設置した物質移行試験装置および概念図

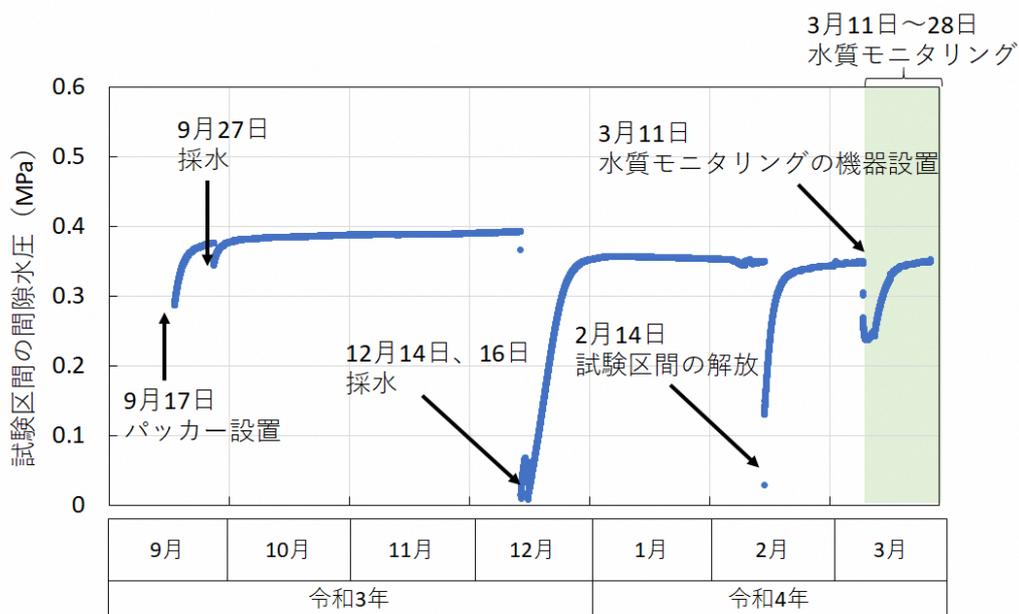


図 25 21-350-TRA 孔の試験区間の間隙水圧の推移

表 2 21-350-TRA 孔の試験区間から採取した地下水中の元素濃度

元素	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	全無機炭素	全有機炭素
濃度 (mg/L)	2,810	68.0	56.8	151	5,030	33.4	413	16

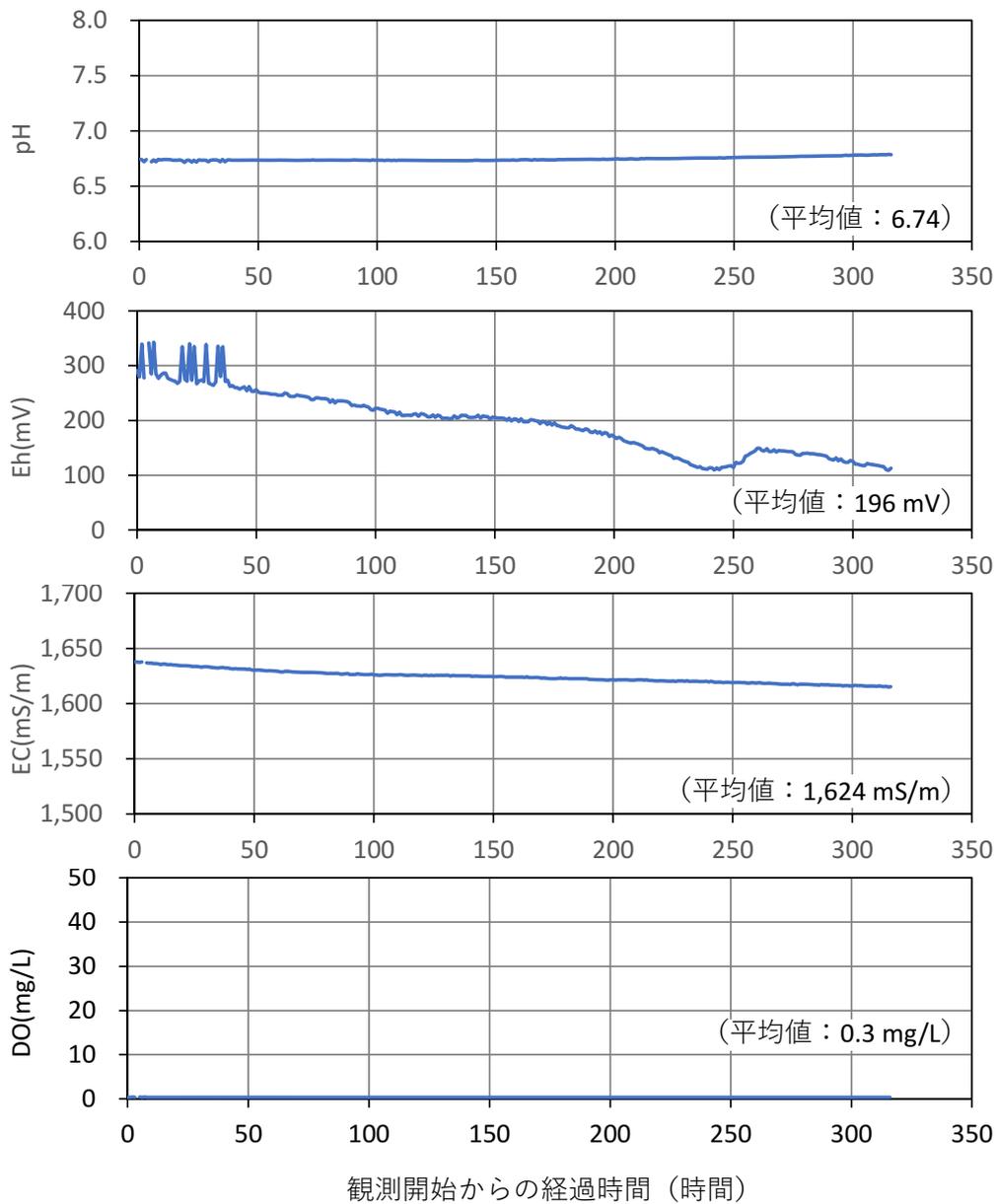


図 26 21-350-TRA 孔の試験区間における水質の連続モニタリング結果

表 3 350m 調査坑道の 13-350-C05 孔における水質モニタリング結果の  
 平均値<sup>(10)</sup>（平成 29 年度～令和元年度）

	単位	平均値 （平成 29 年度～令和元年度）
pH	-	6.9
酸化還元電位 (Eh)	mV	-246
電気伝導度 (EC)	mS/m	1,605
溶存酸素濃度 (DO)	mg/L	0.45

※13-350-C05 孔の位置は図 107 を参照。

また、堆積岩の地下水中に一般的に存在する有機物（特に、元素と結合しやすいと考えられるフミン酸<sup>\*52</sup>）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室内試験を、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の希土類元素（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 (0.2  $\mu\text{m}$ 、10 kDa<sup>\*53</sup>、3 kDa) のフィルターで限外ろ過<sup>\*54</sup>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 10 mg/L 添加（試験区間の地下水中の全有機炭素濃度は 16 mg/L : 表 2）した場合を比較したところ、10 kDa のろ過サイズまでは、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 27)。この結果から、希土類元素は地下水に添加したフミン酸と結合して 3 kDa のろ過サイズよりも大きなコロイドを形成し、地下水により存在しやすい状態となった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結合状態が重要であることが確認できました。

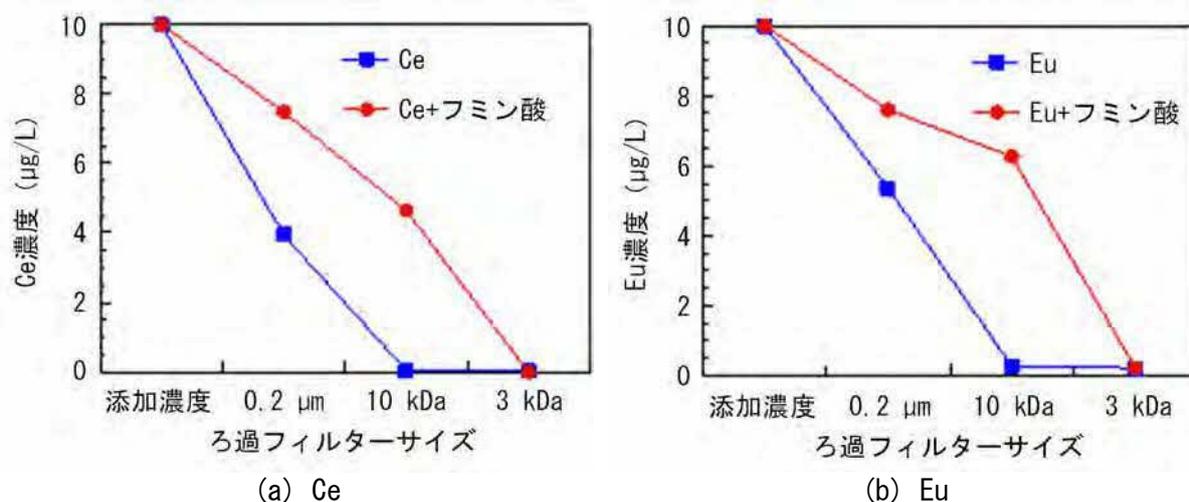


図 27 幌延の地下水（深度 350 m）に対する希土類元素およびフミン酸の添加試験

\*52：植物などが微生物により分解される最終生成物のうち、酸性である無定形高分子物質のことで、腐植酸とも呼ばれます。

\*53：質量を表す単位であり、質量数 12 の炭素原子の質量の 1/12 と定義されていますが、限外ろ過に用いられるフィルターサイズの指標としても用いられます。10 kDa（キロダルトン）のろ過フィルターサイズとは、10 kDa（10,000 Da）より小さな質量の分子が通ることのできる孔径の指標を意味します。

\*54：コロイド粒子などの、通常のろ過方法では分離できない微細な粒子をろ過する方法で、約 1 kDa～1,000 kDa の分子を分離することができます。

### (3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

令和3年度は、東立坑底盤（深度 380 m）から掘削した2本のボーリング孔（FZ-01孔およびFZ-02孔<sup>(8)</sup>）を利用し、孔間のトレーサー試験を実施しました（図 28）。トレーサー試験は揚水区間となるFZ-01孔の区間2のトレーサー濃度の観測状況を見ながら、注水/揚水流量、トレーサー濃度およびトレーサー注入濃度を変えながら実施しました。表 4 に一連のトレーサー試験の試験条件を示します。トレーサー試験（パルス）およびトレーサー試験（定常①）では揚水区間でトレーサーが確認されなかったため、添加するウラン濃度を高くして再度トレーサー試験（定常②）を実施しています。

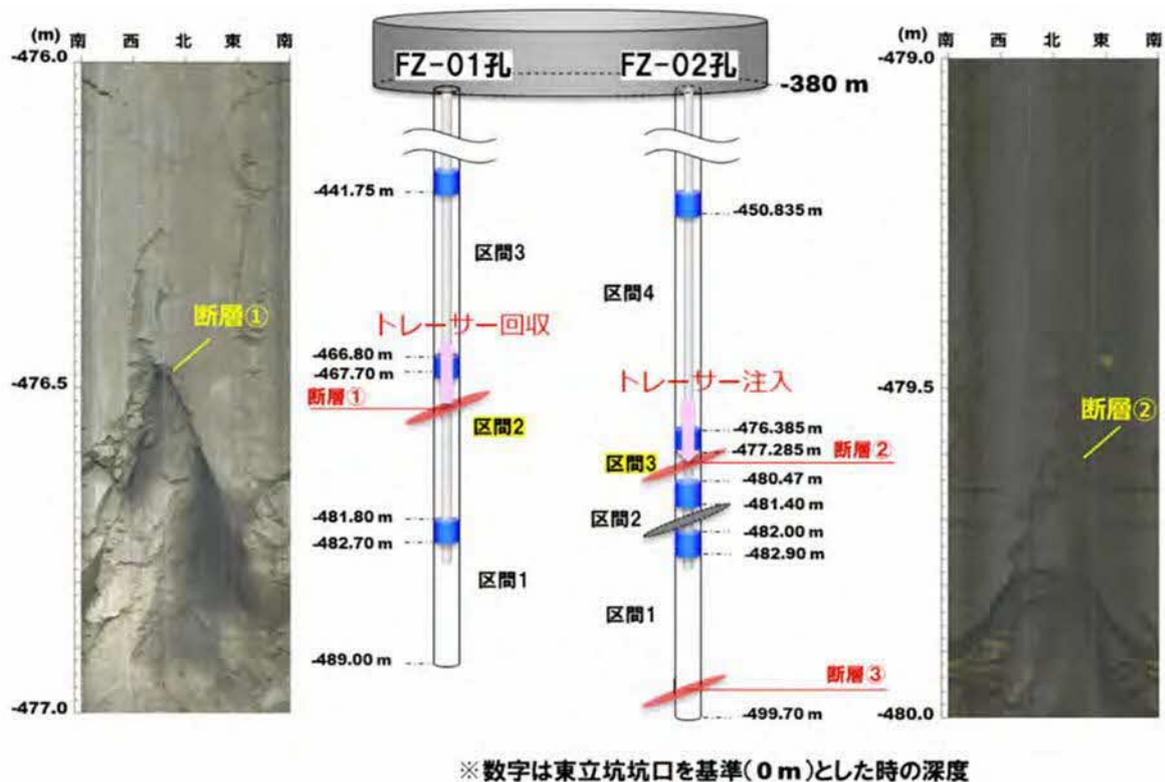


図 28 ブロックスケールを対象とした物質移行試験の概念図

表 4 トレーサー試験条件

時間	イベント	試験条件			
		トレーサー		揚水流量 (mL/min)	注水流量 (mL/min)
		種類	濃度 (mg/L)		
R3/11/1	トレーサー試験 (パルス) 開始	ウラニン	100	200	10
R3/11/6	トレーサー試験 (定常①) 開始	ウラニン	10	200	100
		ヨウ化ナトリウム	1,000		
		塩化モリブデン	30		
R3/11/12	揚水流量変更	—	—	500	10
R3/11/12	トレーサー注入停止	—	—	500	10
R3/11/15	トレーサー試験 (定常②) 開始	ウラニン	100	500	10
		ヨウ化ナトリウム	1,000		
R3/12/6	トレーサー試験 (定常) 終了	—	—	—	—

図 29 にトレーサー試験 (定常②) のウラニンについての試験結果を示します。ウラニンの注入から約 3 日程度で揚水区間へのウラニンの到達が確認できました。その後、18 日程度までウラニン濃度が上昇を続け、18 日以降に約 0.27 mg/L 程度で落ち着く結果となりました。一方で、注入したウラニンの量に対する揚水孔で回収したウラニンの量の比 (累積回収率) は非常に小さく、試験終了時点での累積回収率は約 0.004% でした。なお、トレーサー試験 (パルス) およびトレーサー試験 (定常①) で投入したウラニンの量はトレーサー試験 (定常②) と比べ無視できるほど少ないため、累積回収率の計算からは除外しています。

一連のトレーサー試験において、揚水および注水は常に継続しているため、トレーサー試験 (定常②) の開始から 4 日後に到達したウラニンはトレーサー試験 (定常①) までに投入したウラニンが揚水流量を変更 (200 mL/min→500 mL/min) したことにより、孔間の地下水の流れが変わり、それまで非常に遅い流速で流れる移行経路もしくは新たに形成された移行経路を介して到達した可能性が考えられます。揚水流量を変更した時点から起算した場合、揚水区間に到達するまでの時間は約 6 日程度となります。

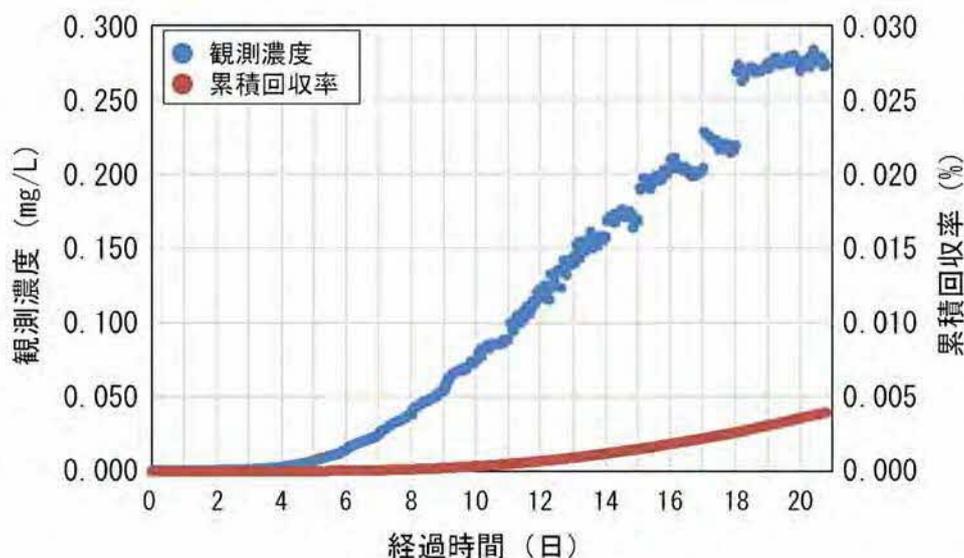


図 29 トレーサー試験（定常②）結果  
経過時間はトレーサー試験（定常②）の開始時間から起算しています。

図 30 に示すように、見かけの動水勾配<sup>\*55</sup>とトレーサー回収点にトレーサーが到達した時間との関係について、割れ目や断層間の水理学的連続性が良い稚内層浅部で実施した、ウラニンをトレーサーとした試験結果と比較しました。図 30 のプロットの基となるトレーサー試験は、使用したボーリング孔孔間の距離や試験中の注水区間および揚水区間の間隙水圧がそれぞれ異なり、トレーサーを注入してから回収されるまでの時間（割れ目などにおける物質の移行のしやすさ）は単純に比較することができないため、注水区間と揚水区間の間の移行経路が 1 経路のみであり、ウラニンの移行挙動が動水勾配のみに支配されることを仮定（見かけの動水勾配）し、この時のトレーサーの到達時間との比較を行いました。稚内層浅部においては見かけの動水勾配によらず、0.1 日以内にトレーサーが到達する傾向にある一方で、今回のトレーサー試験はトレーサーの到達時間が非常に遅い傾向が確認できます。

以上のことから、稚内層深部の断層は水理学的連続性が限定的であるとともに、物質移行の観点からもその移行経路は限定的であることが示唆されました。

今後は、ヨウ化ナトリウムや塩化モリブデンの試験結果の分析を進め

\*55：地下水の動きを決める要因の 1 つで、地下水が流れる方向の単位距離当たりの水圧の差を言います。地下水は、水圧の高い方から低い方へ移動します。

るとともに、解析などにより稚内層深部の断層の移行経路としての特性を評価する予定です。

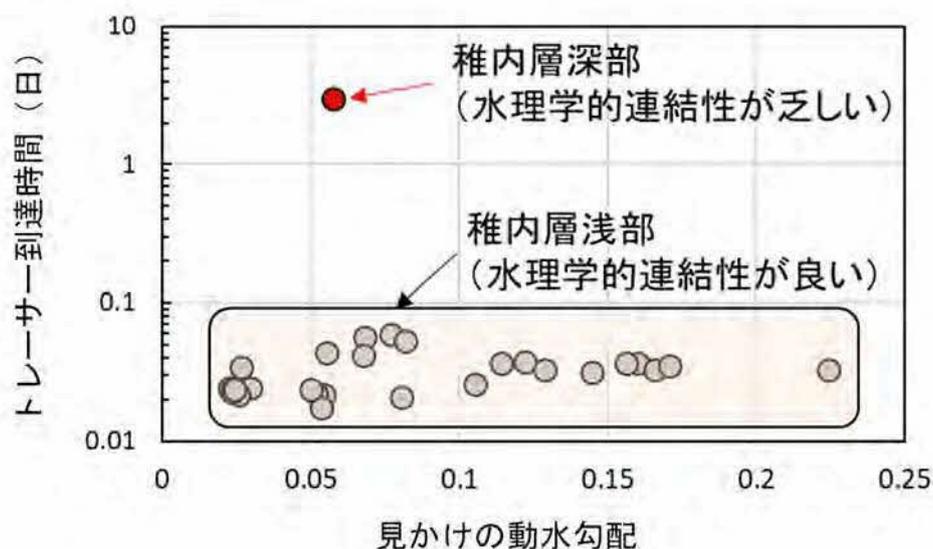


図 30 見かけの動水勾配に応じたトレーサーの到達時間

#### (4) 物質移行試験に関わる基礎的な調査研究

堆積岩における主要な水みちは、岩盤中の割れ目であると考えられますが、非常にゆっくりとした地下水流動系では割れ目の少ない健岩部も水みちとして重要になる可能性があります。健岩部における地下水の移動は、岩盤中の物質移行に対して大きな遅延効果をもたらすため、健岩部の寄与を評価する手法の開発が重要になります。声問層と稚内層の岩石中の空隙率と透水係数には相関性が見られる一方で<sup>(11)</sup>、周囲の間隙水とは水質が明らかに異なる閉塞された空隙も存在することが分かっています<sup>(12)</sup>。地下水の流れに寄与しない閉塞された空隙中では微生物の活動に必要な栄養が枯渇する可能性が考えられることから、そこには微生物が存在しないことが予想されます。本研究では、岩石中において生きた微生物が存在する箇所は、わずかながらも地下水を介した物質移行が進行する場所であると考えられることに着目し、微生物を指標とした岩盤中の水みちの評価手法の開発に取り組んでいます。

令和2年度は、地下施設の350m調査坑道から得られた岩石試料を用いて薄片試料を作成し、微生物の細胞を染色することで岩石中の微生物分布を取得しました。350m調査坑道から得られた岩石試料は珪質泥岩の稚

内層であり、そこでは微生物は観察領域内において均質に存在するのではなく、微小空隙の中に密集して存在することが分かりました。一方で、蛍光顕微鏡による観察領域が限られていたため、岩石試料全体に占める微生物の存在箇所の割合が不明でした。また、微生物の密度が低い場合、染色剤による微生物細胞からの発色が岩石中に含まれる微生物以外の有機物などからの発色と区別することが難しくなるという課題がありました。

令和3年度は、自動で連続的に観察することが可能な蛍光顕微鏡を用いて岩石試料全体の微生物分布画像を取得するとともに、微生物細胞を識別可能な空間分解能<sup>\*56</sup>を有するナノ赤外分光分析システムを用いて、染色された物質が微生物であるか確認しました。個別の赤外吸収スペクトル<sup>\*57</sup>の例として図31に、微生物細胞とベントナイト、蛍光染色剤、樹脂の分析結果を示します。微生物細胞の分析結果には、アミド基（炭素原子と窒素原子や酸素原子の結合や、窒素原子と水素原子の結合）などのアミノ酸に特徴的な吸収スペクトルが見られ、ケイ酸塩鉱物（ベントナイト）や蛍光染色剤、樹脂と区別できることが分かります。また、ベントナイトの分析結果には、ケイ酸塩に特徴的なケイ素原子と酸素原子の結合に由来する吸収スペクトルが見られ、有機物と鉱物とを区別することができます。これらの特徴に着目した薄片試料の赤外吸収画像を図32に示します。蛍光の発色が強い箇所において波数  $1,530\text{ cm}^{-1}$  における比較的強い赤外吸収が見られることから、微生物の存在を確認することができます。また、微生物は、健岩部全体に均質に存在するのではなく、限られた微小空隙に存在することが分かりました。このことから、稚内層の健岩部における物質移行は、岩石全体において均質に進行するのではなく、限られた微小空隙を介して行われることが推察されます。

今後は、稚内層深部や稚内層と比較して空隙構造の異なる声間層も含めた観察事例を拡充するとともに、微生物の存在する微小空隙と存在しない箇所における鉱物などの元素組成の違いを調べる予定です。なお、本

---

\*56：分解能とは、器械・装置などで物理量を識別できる能力のことを指します。顕微鏡では、見分けられる2点間の最小距離を指し、解像度に相当します。

\*57：光や電磁波などが物質に当たったときに、その物質特有の波長の範囲が吸収されます。その強度を波長の順に並べた強度分布のことを、吸収スペクトルといいます。図31では、横軸を波長の逆数である波数で表しています。

研究は、東京大学との共同研究として実施しています。

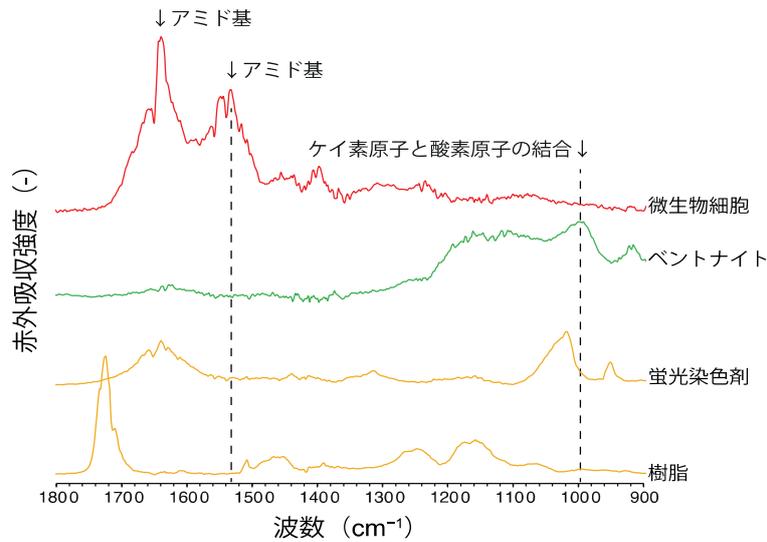


図 31 赤外吸収スペクトルによる微生物の識別

ベントナイトは、ボーリング掘削時に孔壁を保護するために添加しています。蛍光染色剤は、微生物細胞を染色して識別しやすくするためのものです。樹脂は、岩石試料から薄片を作成する際に試料を固定するためのものです。

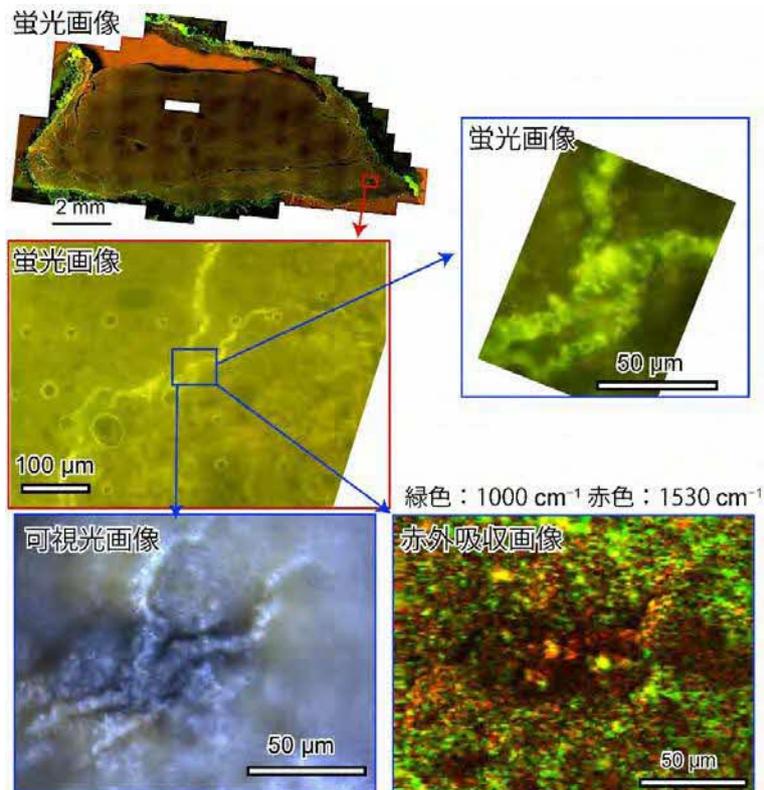


図 32 350m 調査坑道から得られた岩石試料（稚内層）中の微生物分布  
 蛍光画像における濃い黄緑色の箇所は、微生物細胞（有機物）を示しています。赤外吸収画像の緑色と赤色はそれぞれ、鉱物と微生物細胞の指標になり、図 31 の波数  $1,000 \text{ cm}^{-1}$  と波数  $1,530 \text{ cm}^{-1}$  における吸収強度に相当します。

物質移行特性評価手法の高度化のためには、溶存形態が複雑な元素の収着特性を考慮した物質移行解析が必要になります。これらの元素の収着特性については、個別の反応を考慮した室内試験が多数実施されており、今後は、深部地下環境における複雑な反応系の中で、どのような収着反応が支配的であるか評価し、原位置における物質移行試験のデータ解釈に活用していく必要があります。

そのため、溶存形態が複雑な元素の深部地下環境中における岩盤への収着特性を明らかにすることを目的として、堆積岩中の微量元素の化学形態や濃集挙動に関する分析を実施しました。令和 2 年度に引き続き、令和 3 年度は、室内試験が多数実施されているセレン (Se) に着目した分析を実施しました。令和 3 年度は、岩層の違いによる存在形態の違いを明らかにするために水理特性が異なる声問層および稚内層の 2 つの岩層を対象としてセレンの存在固相・収着形態に着目した分析を実施しました。

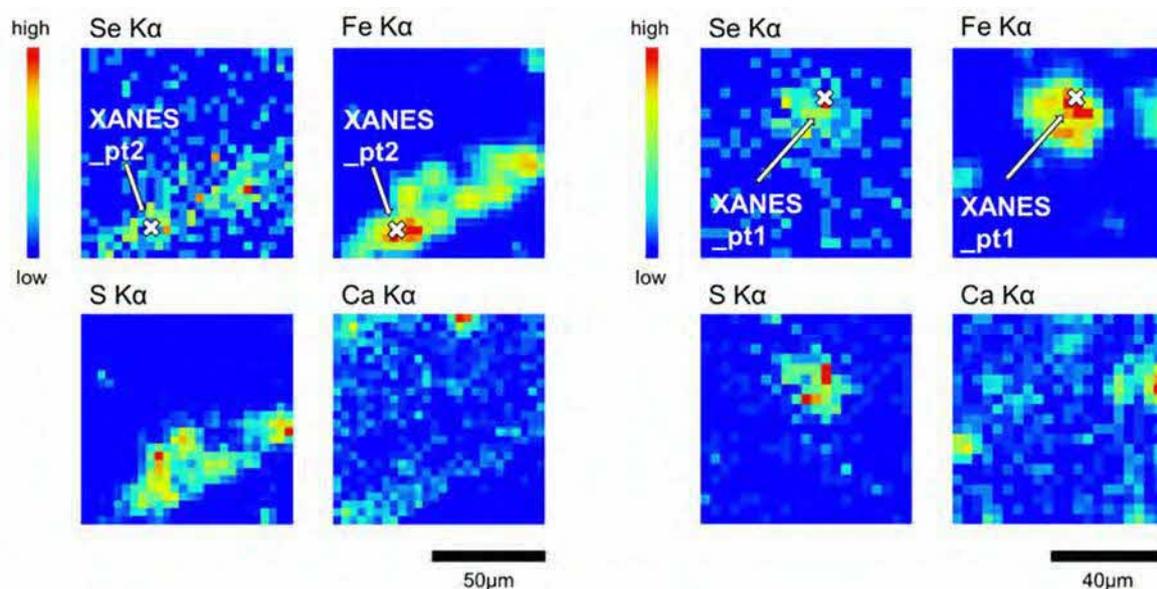
堆積岩試料を薄片加工し、数十  $\mu\text{m}$  スケールにて  $\mu\text{-XRF}$  法<sup>\*58</sup>による元素のマッピング分析および  $\mu\text{-XAFS}$  法<sup>\*59</sup>によるセレンの化学形態分析を行った結果、セレンは岩層の違いによらず、鉄 (Fe) や硫黄 (S) のカウントが高い部分にスポット的に存在し、パイライト ( $\text{FeS}_2$ ) に濃集していることが明らかになりました (図 33)。また、声問層および稚内層のどちらの岩層においても、セレン濃集部におけるセレンの化学形態 (価数) は、0 価または -I 価であり、動きにくい化学形態として保持されていることが明らかになりました (図 34)。セレンが濃集している状態について、局所的な構造を明らかにするため、結晶構造が既知の鉱物のデータを用いて解析を実施しました。その結果、セレンはパイライトの中の硫黄と一部置換した結合状態で存在し、セレンがパイライトの結晶構造に取り込まれていることが明らかになりました (表 5)。また、解析の対象としたパイライトは、微生物反応によって生成すると考えられているフランボイダル (木苺) 状 (図 35) であり、セレンの収着において微生物反応が重要な役割を担う可能性が示唆されました。今後、硫黄の同位体分析などを行

---

\*58 : ビーム径が数  $\mu\text{m}$  の X 線を分析試料に照射し、発生する蛍光 X 線をエネルギーによって分光することで、分析点に含有されている元素の種類を調べる分析手法です。

\*59 : ビーム径が数  $\mu\text{m}$  の X 線を分析試料に照射し、X 線が吸収されたスペクトルを解析することで、元素の化学形態や結合状態について明らかにする分析手法です。

うことで、セレンの収着における微生物反応の関与の有無を評価していきます。



(a) 声問層の試料（試料番号：HDB-11-16） (b) 稚内層の試料（試料番号：HDB-11-25）  
 図 33 μ-XRF 分析で取得されたセレン (Se)、鉄 (Fe)、硫黄 (S)、カルシウム (Ca) の元素マッピングの結果の例

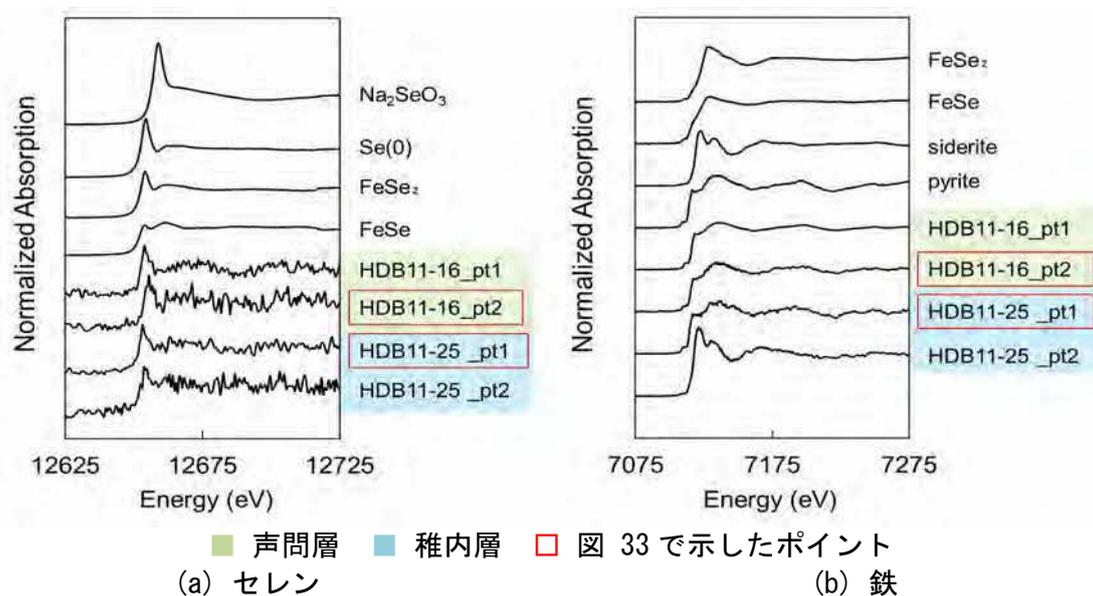


図 34 セレンの濃集が確認された部分の μ-XAFS 測定結果

表 5 セレンの結合状態（近傍元素、配位数、原子間距離）に関する解析結果

(a) パイライトの結晶構造中の硫黄を一部セレンに置換した場合の結合状態

セレンの近接原子	配位数	原子間距離 (nm)
Se-S	1	0.2156
Se-Fe	3	0.2264
Se-S	6	0.3078
Se-S	6	0.3321
Se-Fe	3	0.3445

(b) 幌延の岩石中のセレンの結合状態

セレンの近接原子	配位数	原子間距離 (nm)
Se-S	1	0.223±0.002
Se-Fe	3	0.229±0.001
Se-S	6	0.306±0.001
Se-S	6	0.332±0.002
Se-Fe	3	0.347±0.002

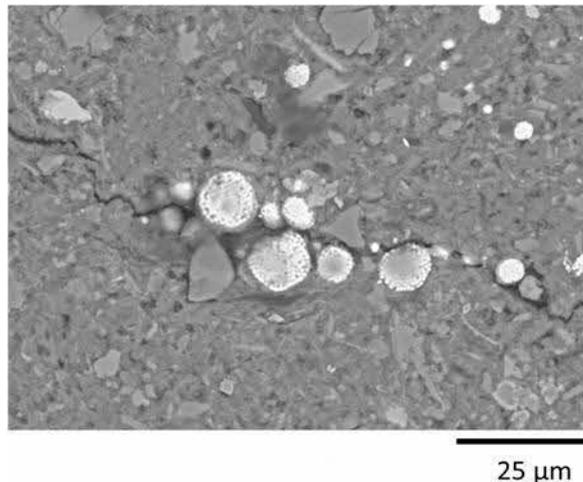


図 35 幌延の岩石試料でセレンの濃集が確認されたパイライトの反射電子像

このような微量元素の化学形態や収着メカニズムに関する詳細な分析手法については、セレンと化学的特性の類似した元素のみならず、他の溶存形態が複雑な収着特性を持つ元素（ニッケル (Ni)、コバルト (Co)、ユウロピウム (Eu) など）にも適応することができるため、これまでの物質移行試験において得られた結果を評価する際に有用な手法です。物質移行特性評価手法の高度化のため、今後も継続して溶存形態が複雑な元素の収着特性に関する評価手法の開発を進めていく予定です。

## 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。

- ・ 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。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3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)の一環として、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

安全に回収作業を行うためには、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コンクリート試験体の暴露試験を実施しています。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36)。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・分析に供しました。

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が分かりました(図37)。試験体の表面から約4mmまでの深さを対象として電子プローブマイクロアナライザー<sup>\*60</sup>により元素分布を観察すると、中性化が生じている領域ではCaOおよびSO<sub>3</sub>の濃度が減少していることが確認できました(図38)。また、試験体中の空隙率

---

\*60: 電子プローブマイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA) は、電子ビームを測定対象に照射したときに、電子と対象を構成する元素の相互作用によって発生する元素に特有なX線(特性X線)を検出することで、対象を構成する元素を分析する装置です。

の分布を水銀圧入法により測定すると、大気条件下に定置した試験体の中性化が生じている領域では、中性化の生じていない領域に比べて空隙径  $0.01 \mu\text{m} \sim 0.1 \mu\text{m}$  の空隙の割合が増加していることが分かりました (図 39)。これらの結果から、大気条件下に定置した試験体の表面から約 3 mm までの深さで  $\text{CaO}$  や  $\text{SO}_3$  を含むセメント生成物 (C-S-H<sup>\*61</sup>、エトリンガイト<sup>\*62</sup>など) が分解し、空隙径  $0.01 \mu\text{m} \sim 0.1 \mu\text{m}$  の空隙が増加していると考えられます。一方、湿潤条件下に定置した試験体における空隙径  $0.01 \mu\text{m} \sim 0.1 \mu\text{m}$  の空隙の割合は大気条件下に定置した試験体と比べて低く、中性化が生じていない領域でより低いことが分かりました (図 39)。湿潤条件下で定置した場合の方が間隙により多くの水が含まれ、セメントの水和反応がより速く進行したために、緻密な構造が形成されたと考えられます。

以上のように、大気条件と浸潤条件下での約 1 年間の定置によって試験体に生じた物性や化学状態の変化を観測することができました。令和 4 年度も、コンクリート試験体の暴露試験を継続するとともに、定期的に試験体の分析を行い、地下環境でのコンクリートの劣化挙動に係るデータの取得を進めます。

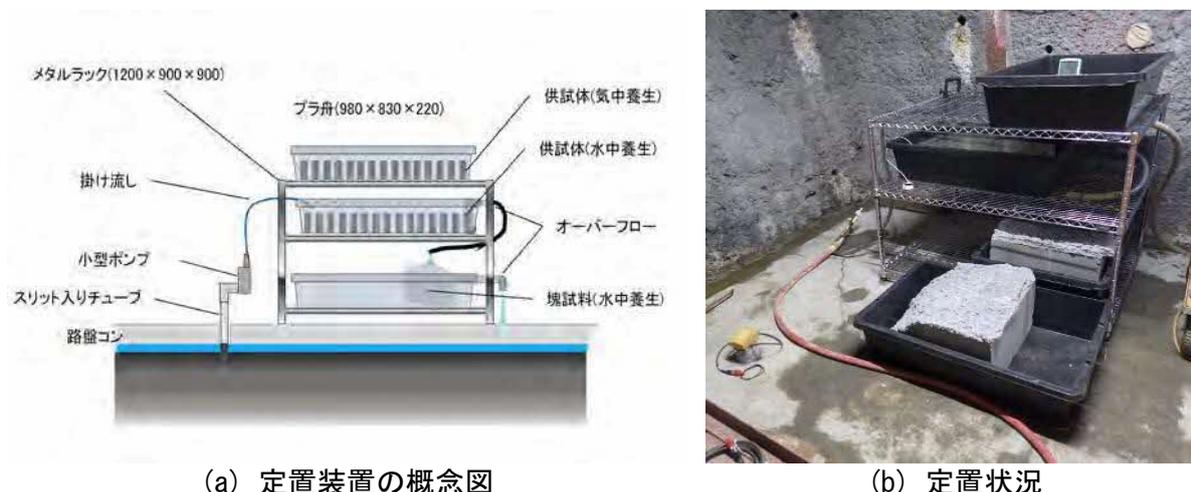
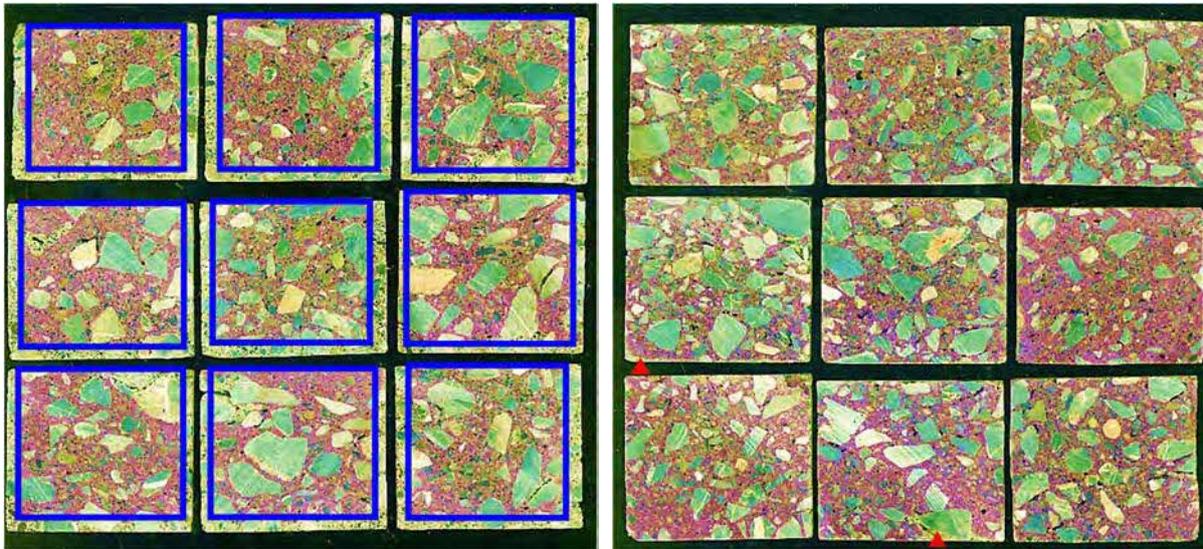


図 36 コンクリート試験体の暴露試験

\*61：ケイ酸カルシウム水和物 (Calcium Silicate Hydrate) と呼ばれ、コンクリートに含まれる主要な水和物の 1 つであり、カルシウムやシリカを含みます。含まれるカルシウムやシリカの物質量の比によって組成や性質が異なります。

\*62：セメント水和物の 1 つで、化学式  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  で表される化合物の鉱物です。



(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

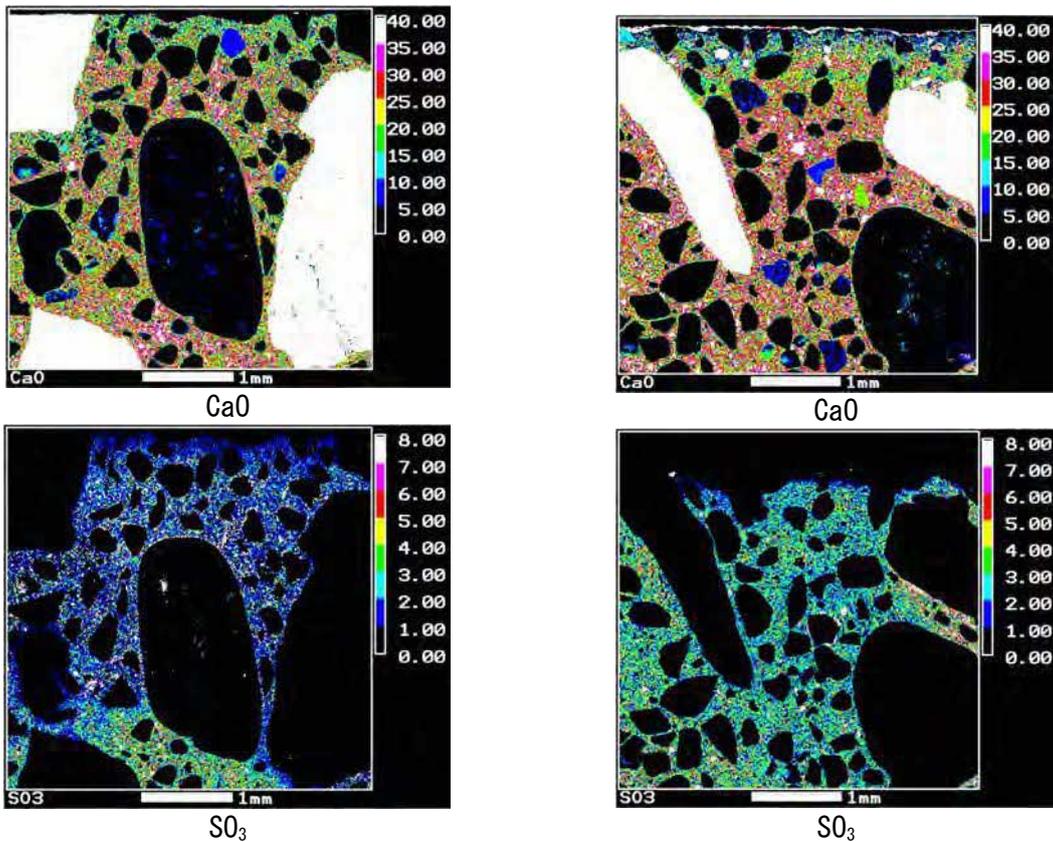
(b) 湿潤条件下

呈色のみられない領域（▲）

：ごく一部に限定

図 37 コンクリート試験体の変質領域

試験体（1辺 5 cm）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) 大気条件下

(b) 湿潤条件下

図 38 コンクリート試験体中の元素分布

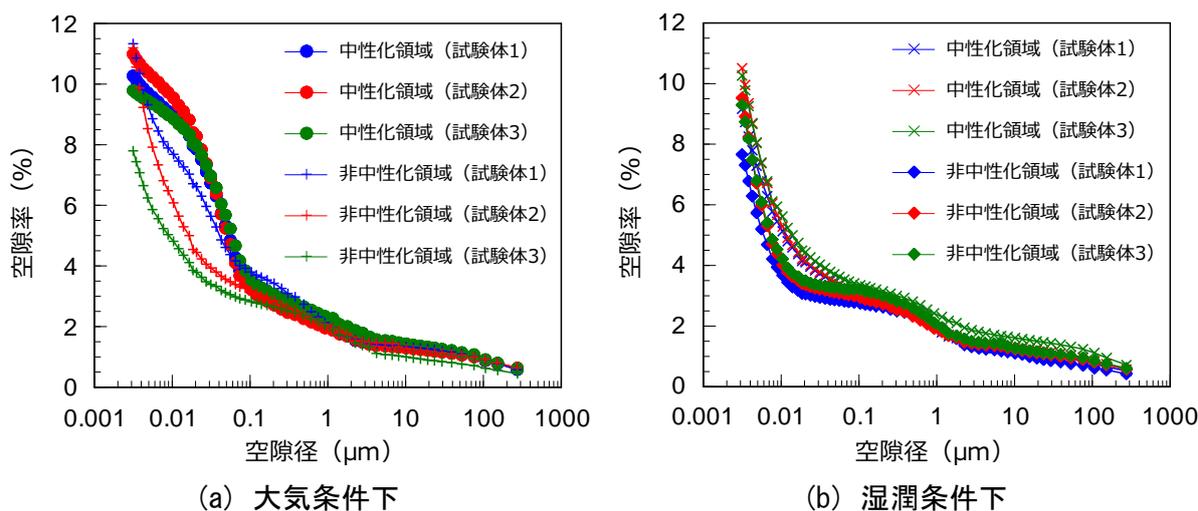


図 39 コンクリート試験体中の空隙率分布

## 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、数値解析

回収可能性を考慮した場合、長期間にわたり坑道が大気開放条件下に置かれることが想定されます。処分坑道内の空間の長期間の安全性を地質環境の観点から評価することや、長期にわたる坑道の大気への暴露が坑道閉塞後の地質環境の回復過程に及ぼす影響を評価することを目的として、解析に必要なデータを室内試験などにより取得しています。具体的には、令和 2 年度から力学的な観点でクリープ変形挙動を伴う長期変形挙動の予測解析を、水理学的な観点で大気や地下水中に含まれる二酸化炭素やメタン、酸素の影響を考慮した地下水流動である多相流解析<sup>\*63</sup>を実施しています。令和 3 年度は、精度の向上を目的とした解析や実際の現場での状況により則した解析を実施するために必要なデータを取得しました。

長期に及ぶ解析を実施する場合、解析する現象が伝わる領域が広がることが想定されます。したがって、十分な解析領域を設定し解析領域の境界からの影響を低減する必要があります。図 40 は、令和 2 年度に実施した多相流解析結果と令和 3 年度に解析領域を広くして解析をした結果を比較したもので、坑道掘削から 1,000 年後の坑道周辺の飽和度分布を示しています。令和 2 年度の結果では、解析領域が十分な広さを有して

\*63 岩盤中を流れる流体の流動シミュレーションにおいて、水の流れだけでなく、空気や蒸気などの気相の流動も考慮した解析のことです。

おらず、解析領域の境界の影響により 1,000 年後の坑道周辺の飽和度が過大評価されている傾向が見られましたが、令和 3 年度の解析では適切な設定により影響が低減しました。

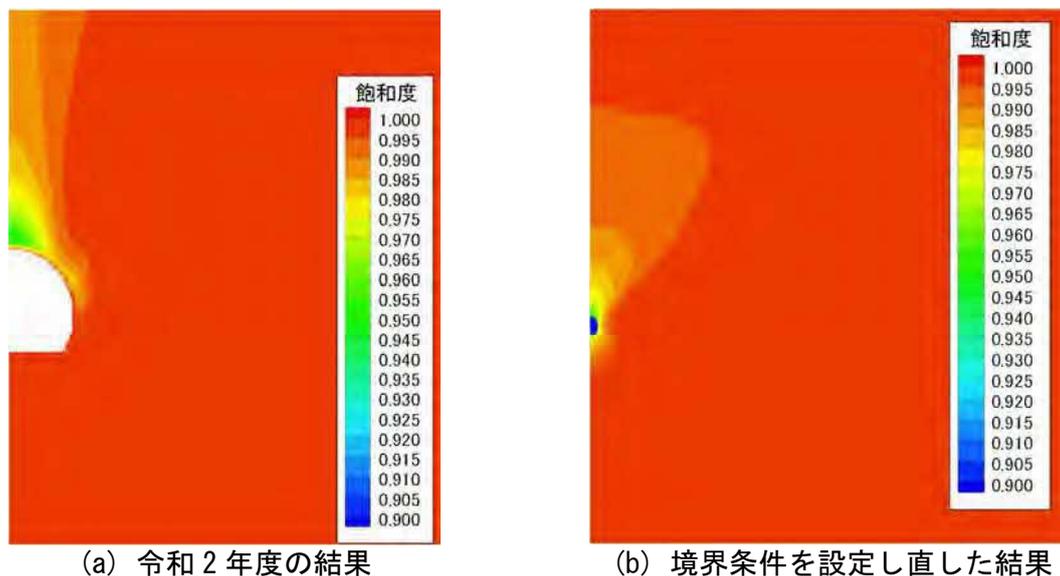
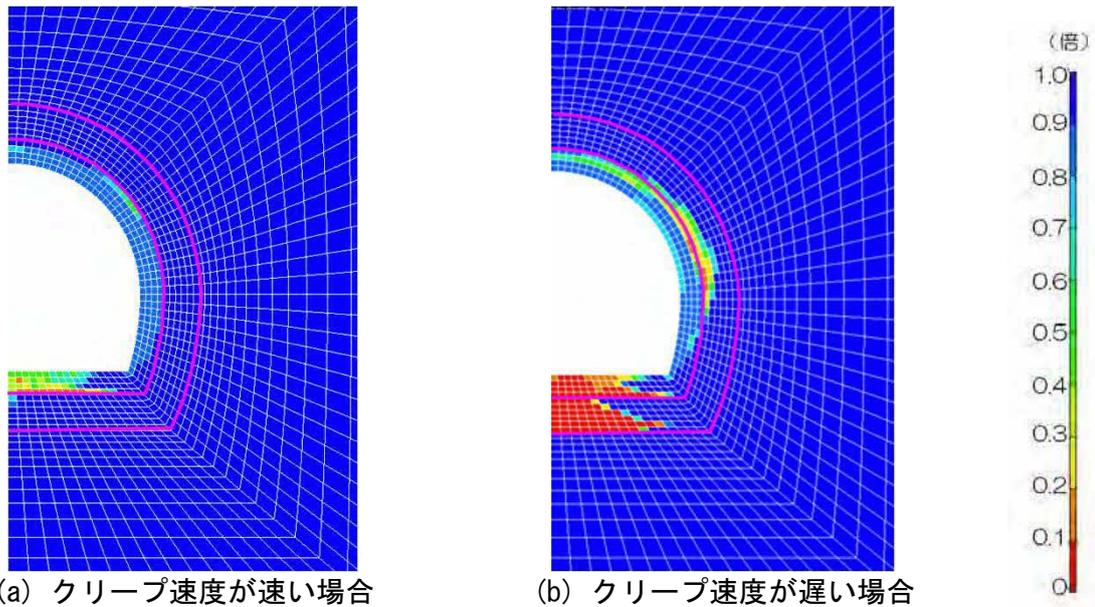


図 40 境界条件の影響による坑道周辺における飽和度分布の予測結果の比較

長期クリープ変形挙動解析では、過去のクリープ試験の結果に基づき、クリープ速度が速い場合と遅い場合の坑道周辺の長期変形挙動解析を実施しました。弾性波速度分布の結果を参考に掘削直後に発生した掘削損傷領域 (EDZ) と健岩部から構成されるモデルを初期モデルとして解析を実施しました。解析の結果、変形量はクリープ速度が速い場合も遅い場合も、天端部および側壁部で mm オーダーの変位量が発生しました。図 41 は、解析により推定された坑道開放 1,000 年後のヤング率<sup>\*64</sup>の掘削直後からの変化率になります。クリープ速度が速い場合には、クリープ速度が遅い場合と比較してヤング率が低下する範囲が広がるものの、その影響は EDZ 内に限定され、坑道壁面から 1 m 程度の範囲に限られる結果が得られました。

\*64：ヤング率とは、縦弾性係数ともいい、一方向に引っ張ったり圧縮したときの伸びと力の関係から求められる定数です。ヤング率の大きいほど硬い物質であるといえます。応力（単位面積あたりの力）とひずみ（伸び）の関係は、「応力＝ヤング率×ひずみ」です。

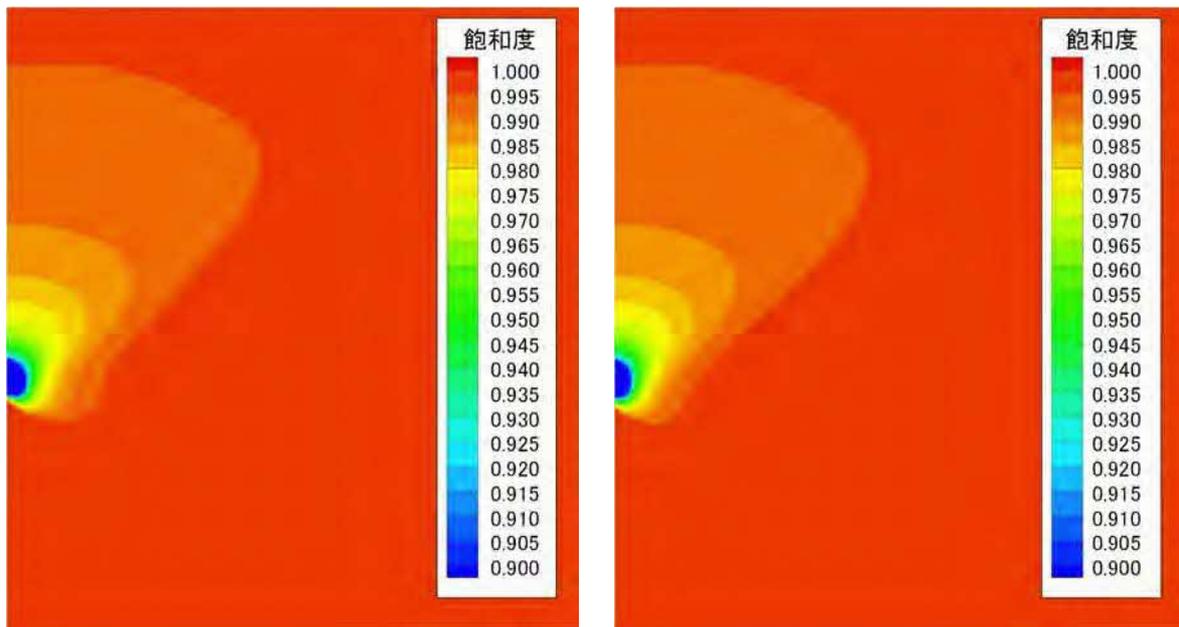


(a) クリープ速度が速い場合 (b) クリープ速度が遅い場合  
 図 41 長期クリープ変形挙動解析による 1,000 年後のヤング率の初期状態からの変化率

図中の赤線は、解析に際して、掘削直後に発生した EDZ として健岩部とは異なる物性値を与えた領域です。

図 42 は、長期クリープ変形挙動解析および令和 3 年度に実施した亀裂を含む岩石コアを用いた透水試験結果から、長期クリープ変形に伴う坑道周辺の透水性の変化を考慮した場合の坑道周辺の 1,000 年後の飽和度分布の予測結果になります。飽和度は、坑道周辺で低下する領域が広がるものの、1,000 年後も飽和度は 90%以上であり、クリープ速度の違いによる透水性の変化の違いの影響は大きくないことが推定されました。

令和 4 年度は、今回得られた結果を初期条件として、埋め戻し後の坑道周辺の地質環境の変化の数値解析を実施する予定です。



(a) クリープ速度が速い場合 (b) クリープ速度が遅い場合  
 図 42 長期クリープ変形挙動に伴う透水性の変化を考慮した場合の  
 1,000 年後の飽和度分布

## (2) 閉鎖技術の実証

閉鎖技術の実証としては、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 [JPJ007597]：地層処分施設閉鎖技術確証試験）の一環として、シーリングシステム<sup>\*65</sup>の成立性の確認を目的に、先に示した 5 項目についての室内試験や原位置試験、数値解析などを実施しました。以下に各項目についての成果を示します。

### 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

処分場閉鎖後は長期にわたって岩盤や地下水、あるいは支保工やグラウトといったコンクリート系材料との相互作用を受けることで、埋め戻し材やプラグが変質し、結果として期待する性能（核種の遅延や止水性能）が変化する可能性が考えられます。一方で、このような埋め戻し材やプラグが変質するシナリオが生起する要因として、岩盤、支保工、埋め戻し材の個々の状態や、個々の状態に起因したプロセスが連続的に生じることが条件になると考えられます。このような背景から、令和 2 年度の検討に加えて、岩盤と支保工との間で生じる現象も考慮し、コンクリート系材

<sup>\*65</sup>：将来の地層処分場を閉鎖した際に、坑道や掘削影響領域が地下水の移行経路とならないようにするための対策のことです。

料と地下水の接触に起因した埋め戻し材の変質がどのような状態、プロセスを経て生じ得るかを網羅的に整理し、本シナリオが生起する条件の詳細化を図りました。また、本シナリオの埋め戻し材と支保工の境界部の初期状態に影響を及ぼし得る、埋め戻し材の施工初期の流出現象に着目し、同現象が発生し得る条件を確認するための室内試験に着手しました。

令和 2 年度の検討から、埋め戻し材が変質する要因の 1 つとして支保工と埋め戻し材の境界部の地下水流れが移流支配である条件が挙げられました。移流支配であるには境界部に間隙が生じるなどして透水性が高くなる必要があります。一方、岩盤も考慮した場合、地下水は岩盤→支保工→埋め戻し材の順に流れることが想定されるため、岩盤と支保工境界の高 pH 地下水中でカルシウムイオンなどの過飽和によって再沈殿が生じ、岩盤と支保工の境界あるいは支保工内の間隙が閉塞する可能性があります。その場合、結果として支保工と埋め戻し材の境界への流れが抑制され、埋め戻し材の変質への影響も低減されることが想定されます。しかしながら、一度閉塞した間隙が地震動などの力学的な作用によって再度開口することも想定され、このような場合は、支保工と埋め戻し材の境界への地下水流入が抑制されない可能性が考えられます。上記を踏まえると、コンクリート系材料の溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質が生じるまでの変遷は図 43 および表 6 のように整理されます。なお、状態 1-A は坑道が埋め戻された初期状態を示していますが、埋め戻し材の自重沈下などによって上部の埋め戻し材の密度が低下するあるいは、間隙が生じることも想定されます。このような状態を初期状態として考えた場合は、埋め戻し材の施工初期から間隙もしくは密度低下によって透水性が相対的に高い部分に地下水が流れることで、状態 1-A から状態 2-A に遷移することも考えられます。

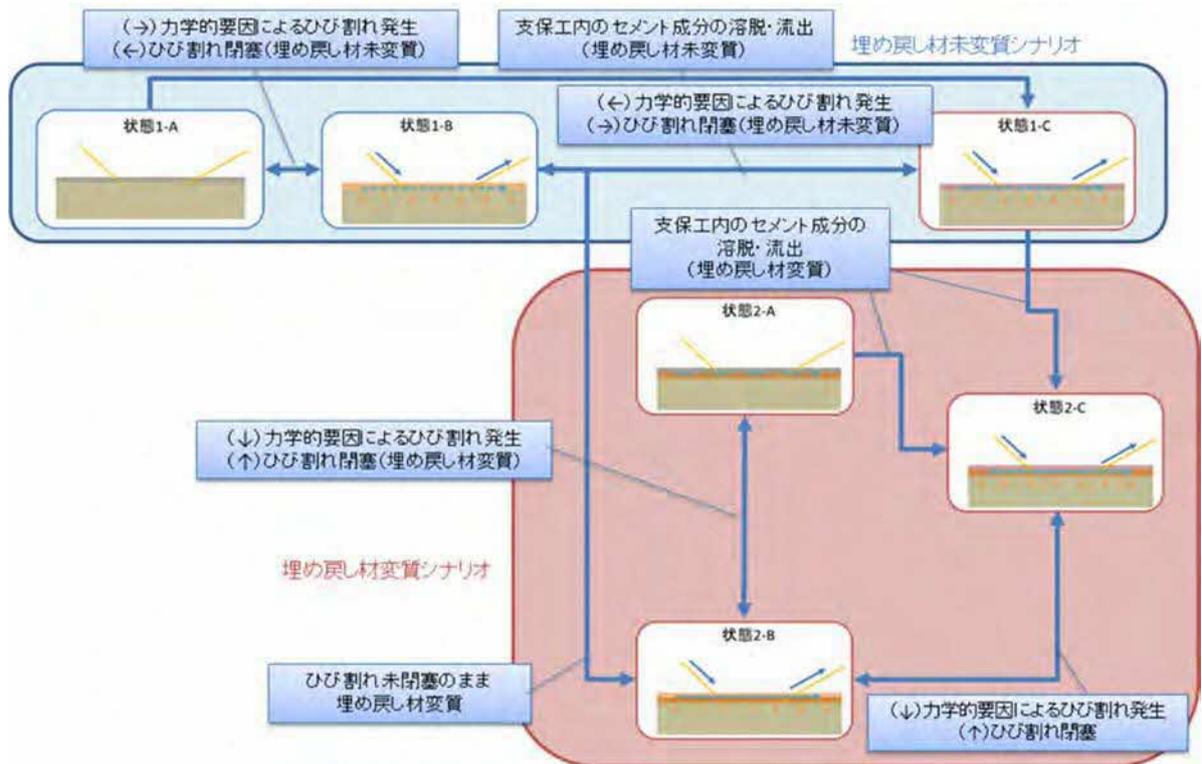


図 43 コンクリートの溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質に至る変遷<sup>(13)</sup>

表 6 コンクリートの溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質に関わる状態の整理

シナリオ	状態	
埋め戻し材未変質	1-A	坑道が埋め戻された初期状態
	1-B	支保工内に生じた割れ目などの間隙を介して地下水が流入し、コンクリート系材料と反応した地下水が埋め戻し材と接触する状態
	1-C	埋め戻し材は変質せずに、鉱物の沈殿により支保工内に生じた割れ目などの間隙が閉塞した状態
埋め戻し材変質	2-A	埋め戻し材の上部が変質するものの、鉱物の沈殿により間隙が閉塞した状態
	2-B	支保工および埋め戻し材の境界に間隙が生じ、この間隙を介して地下水が流入する状態
	2-C	支保工内のコンクリート系材料がすべて溶脱し、支保工と埋め戻し材の境界部に残された間隙に地下水が流入する状態

次に、図 43 に示す変遷のうち、状態 1-B から状態 2-B への遷移の可能性あるいは、状態 2-B から状態 2-A ないし状態 2-C への遷移の可能性があるかについて解析的な検討を行いました。岩盤、支保工および埋め戻し材をモデル化し一度に解析を行うのは計算負荷の観点で現実的ではない

ため、①岩盤と支保工間における水理－化学プロセスを解析し、主に境界部での間隙の閉塞の有無を評価した後に、解析結果を②支保工と埋め戻し材における水理－化学プロセスを解析する際の入力情報として解析を行うこととしました。①の解析の結果、岩盤と支保工境界は解析初期に主にC-S-H（ケイ酸カルシウム水和物）の沈殿によって間隙が閉塞することが分かりました。したがって、②の解析は参考文献(13)で示された解析モデルに基づき、支保工と埋め戻し材の境界の透水性が低い条件、すなわち、境界部の地下水流速が遅い条件（ $1.0 \times 10^{-9}$  m/s）を模擬した解析を行いました。

図 44 に支保工と埋め戻し材における水理－化学連成解析結果を示します。1,000年後の埋め戻し材と支保工境界部の間隙率の変化は地下水の流入箇所付近の近傍1 m程度にとどまり、これよりも下流側では間隙率が高くなることはありませんでした。一方、埋め戻し材中のモンモリロナイトの残存率は地下水流入箇所付近と下流側で低下する傾向が確認されました。下流側でモンモリロナイトの残存率が変化したのは、本解析条件では保守的に埋め戻し材と支保工境界を流れる地下水は支保工内のコンクリートと反応後、平衡状態となった組成の地下水が常に流れることを仮定しているため、このような高pHの地下水が埋め戻し材と反応することにより徐々に埋め戻し材中のモンモリロナイトが溶出したためと考えられます。

以上の結果から、埋め戻し材と支保工境界に一定の地下水流速で地下水が流れる状態であっても、埋め戻し材の変質は限定的であることが示唆されました。すなわち、図 43 中における状態 1-B から状態 2-B への遷移あるいは、状態 2-B から状態 2-A ないし状態 2-C への遷移は限定的であり、埋め戻し材の性能への影響は少ない可能性が示唆されました。

今後は支保工内の間隙が閉塞されたのち、地震動などの力学的な作用によって再開口するプロセスが継続的に生じ、結果として岩盤から埋め戻し材への地下水の流れが断続的に生じた場合、このようなプロセスが埋め戻し材の変質に与える影響を評価することで、コンクリート溶脱成分に起因した埋め戻し材の変質というシナリオが、埋め戻し材の長期性能に対して重要なシナリオとなり得るかを検討する予定です。

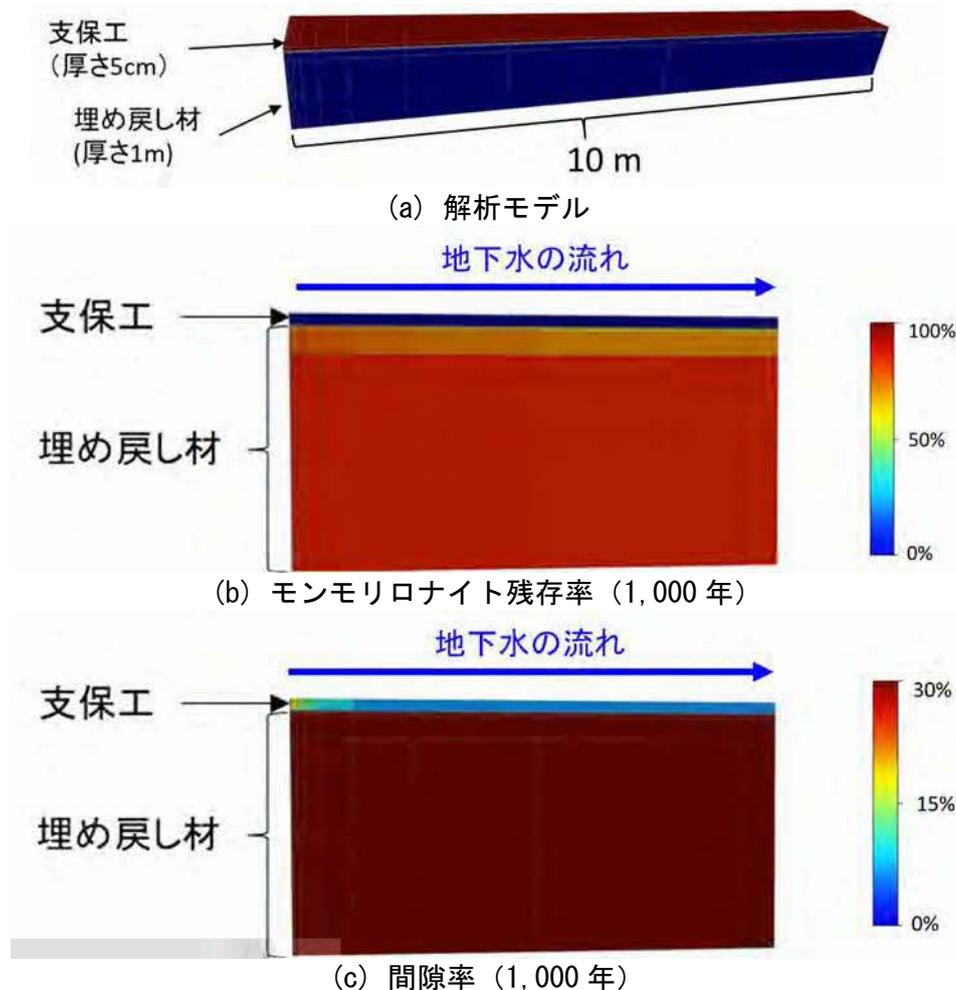


図 44 埋め戻し材中のモンモリロナイトの残存率および間隙率の変化  
参考文献(13)に一部追記しています。

埋め戻し材と支保工境界の初期状態に影響を及ぼし得るベントナイトの流出現象の発生条件を確認するための室内試験を実施しました。具体的には、既往の研究<sup>(14)</sup>を基に、流出現象の発生条件として重要となる埋め戻し材中の間隙状態、水圧、水質を変化させた試験を実施しました。また、地下水の流入の仕方についても条件を変えて試験を実施しました。

図 45 に試験装置を示します。図 45 中のアクリルチューブに粒径の異なるベントナイトペレット (粒状に成形したベントナイト) もしくはベントナイトブロックを挿入してベントナイト供試体内の間隙状態を変化させました。また、注水タンク内に塩濃度の異なる水を準備し、水質を変化させるとともに、注水タンク内の水位を変化させることで、供試体に負荷する水圧を変えた条件で試験を行いました。水の注水箇所として 2 系統

構築し、アクリルチューブに面的に注水する場合と、アクリルチューブの頂部から点で注入（地下深部に分布する割れ目からの地下水流入の状態を模擬）可能な装置としました。試験中のアクリルチューブ内のベントナイトの膨潤の様子を目視観察するとともに、アクリルチューブ前後で流量を計測し、最下流側に排水される水に含まれるベントナイト濃度を分析することで、各条件に応じた、ベントナイトの流出の有無や程度を評価しました。

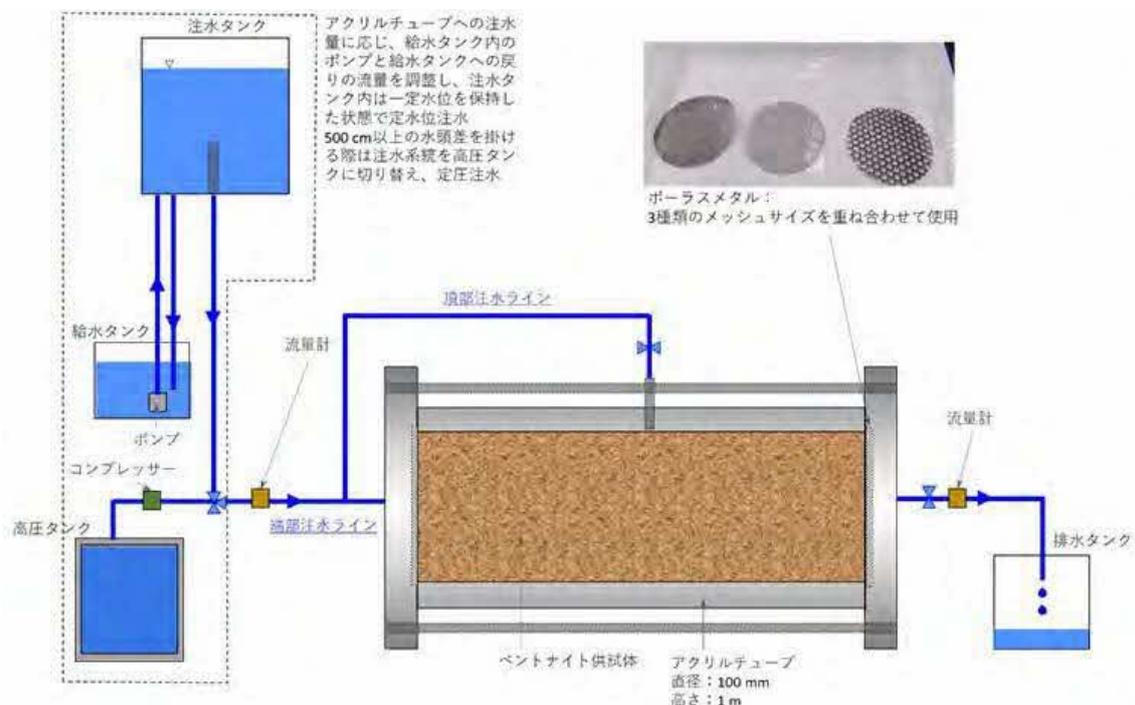


図 45 試験装置の概要<sup>(13)</sup>

図 46 に試験ケースの一例を示します。本ケースはベントナイト供試体として粒径 15 mm のペレット、水質は人工地下水、注水方法は頂部注水という条件で実施しました。図 46 に示すように 50 cm 水頭差を負荷した後に、注水箇所から下流側に向かって、選択的な流路が形成されたことが確認できました。また、この流路形成に伴い、下流側に流出する流量が一時的に上昇し（図 47）、流出水中のベントナイト濃度も高くなることが確認されました（図 48）。その後、試験終了まで流路が閉塞することなく、水頭差を 500 cm に上昇させた時点で、急激に流出水の流量が増加し、これに対応してベントナイト濃度が上昇しました。

以上の結果から、本ケースの試験条件においては、選択的な流路を通じてベントナイトの流出が生じることが確認されました。一方で、50 cm 水頭を1時間継続した後、水の流出が止まっているのに加え、500 cm 水頭差までは流出が再開することはなかったことから、埋め戻し材に負荷する水圧の条件によっては、時間に応じて流路の端部もしくは途中が閉塞し、水の流れが止まることで埋め戻し材の膨潤が進行し、結果として形成された流路が閉塞する可能性が示唆されました。

このような可能性を検証するために、今後は条件を絞った試験により、流路の閉塞の有無や閉塞しない場合の条件を整理するとともに、ベントナイト流出量との比較を通じ、仮に埋め戻し材の流出現象が生じた場合に、埋め戻し材の性能に及ぼす影響を評価する予定です。



図 46 水みちの発生状況<sup>(13)</sup>

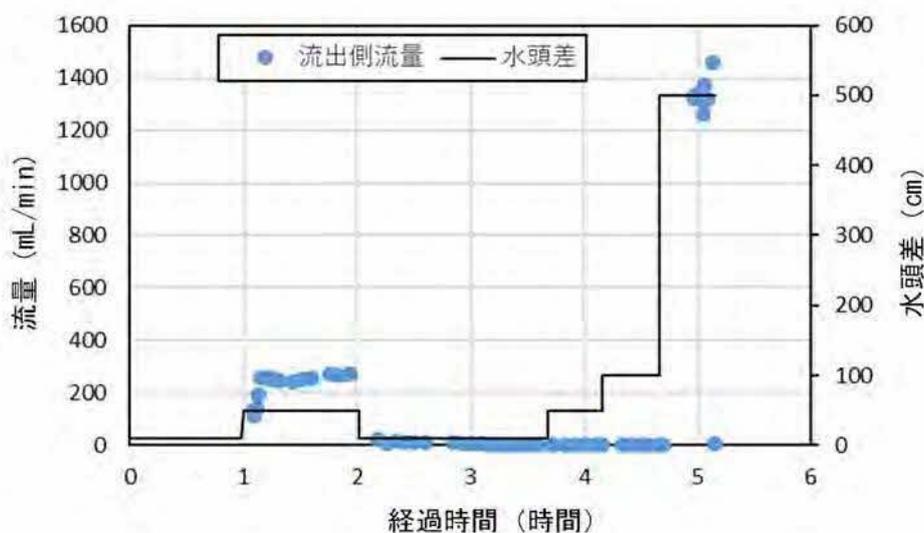


図 47 流量と水頭差の時間変化<sup>(13)</sup>

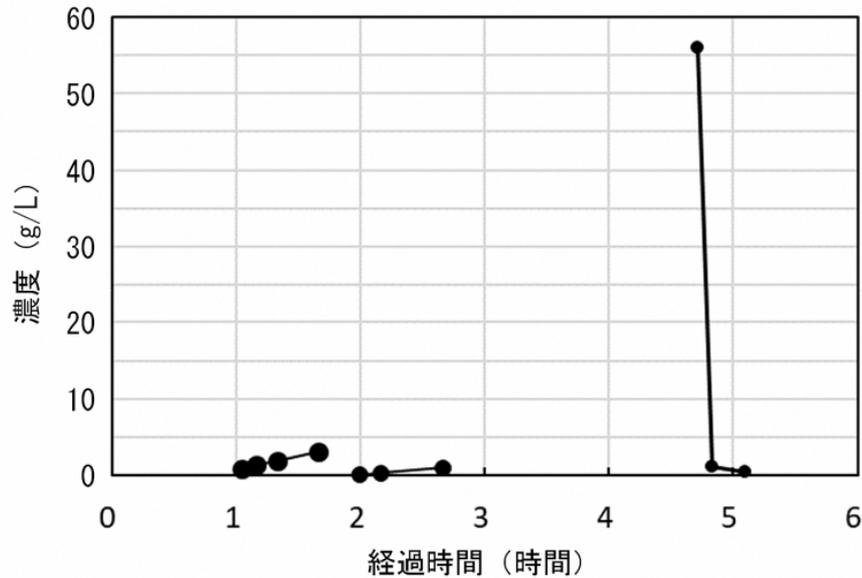


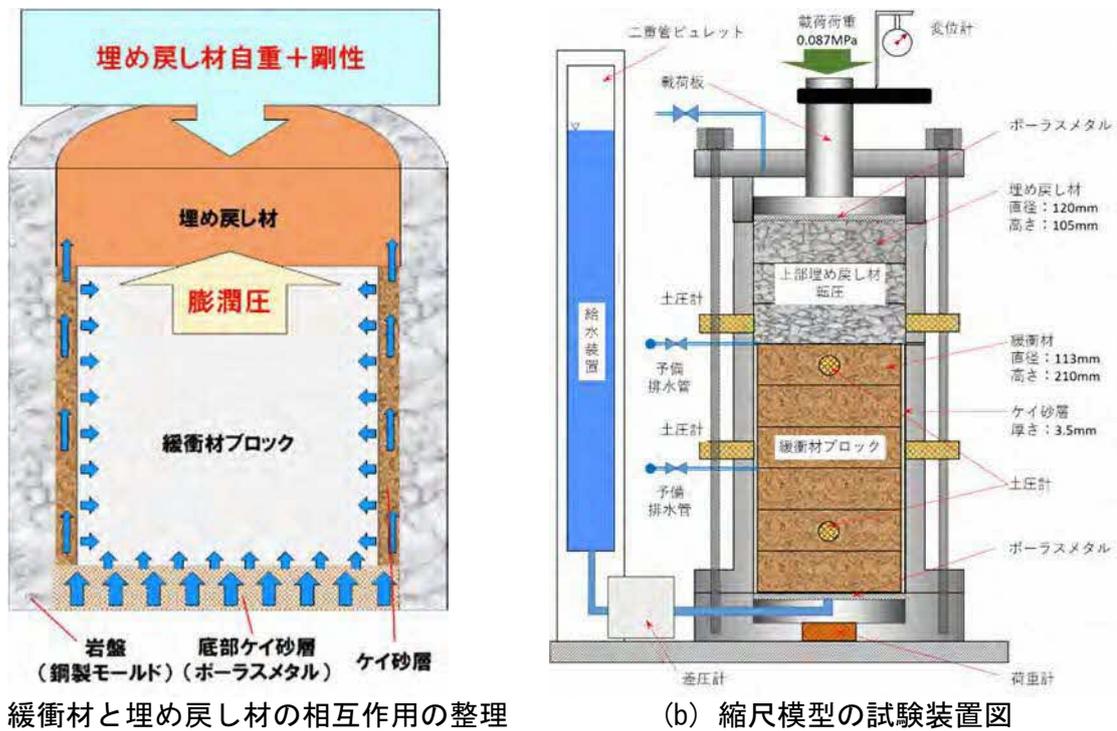
図 48 流出水中のベントナイト濃度の時間変化<sup>(13)</sup>

## 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

人工バリア定置の概念の 1 つである処分孔縦置き方式においては、処分孔に定置した緩衝材が坑道側へ膨出し乾燥密度が低下することを防ぐために埋め戻し材を坑道に充填します。この緩衝材と埋め戻し材の境界面では、緩衝材の膨潤圧と処分孔直上の埋め戻し材の自重相当の荷重が相互に作用しており、緩衝材の膨潤挙動はこれらの力学的な相互作用の影響を受けています (図 49(a))。

これまで、埋め戻し材の持つ緩衝材膨出抑制機能を評価するためのデータ取得を目的として、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験を実施しています。図 49(b)に試験装置の概要を示します。縮尺模型試験では、人工バリア性能確認試験の試験レイアウトを基に、実際の 1/20 スケールの緩衝材と埋め戻し材を用いています。緩衝材の底部に設置したポーラスメタル (多孔質金属) から注水し、ケイ砂層を通じて緩衝材の外周から浸潤する構造とし、注水量は差圧計により計測しました。また、試験装置上部に設置した載荷板を介して埋め戻し材の上部から人工バリア性能確認試験における埋め戻し材の自重に相当する 0.087 MPa の荷重を作用させました。緩衝材の吸水膨潤により生じる上部への変形量は試験装置頂部に設置した変位計により計測しました。さらに、試験容器側面に設置した土圧計や底部に設置した荷重計により膨潤圧を計測し、緩衝

材の膨出挙動の把握を試みています。



(a) 緩衝材と埋め戻し材の相互作用の整理

(b) 縮尺模型の試験装置図

図 49 縮尺模型試験の概念図

(a)は人工バリア性能確認試験の状況と緩衝材と埋め戻し材の相互作用を整理した図、(b)は整理した相互作用を模した縮尺模型の試験装置図

令和 3 年度は、試験用水の水質の違いが緩衝材と埋め戻し材の膨潤挙動に及ぼす影響を把握するために、試験用水として塩濃度が異なるイオン交換水と 0.2 mol/L の NaCl 水溶液（以下、0.2M-NaCl）を用いた場合の 2 条件で試験を実施しました。

変位計で計測した変形量は緩衝材の縮尺模型全体の高さで除して、緩衝材の膨潤変形率として整理しました。図 50 に緩衝材の膨潤変形率の経時変化を示します。試験開始後、9 日を経過するまではイオン交換水と 0.2M-NaCl で同じような膨潤変形率の増加の傾向を示しました。その後、0.2M-NaCl ではその増加が緩やかになる傾向を示し、30 日を経過したところから膨潤変形率は一定の値へと収束しました。一方、イオン交換水では 9 日を過ぎた後も膨潤変形率は増加しており、試験を終了した試験開始後 35 日経過の時点でも膨潤変形率は増加の傾向を示していました。試験終了時点での膨潤変形率の値はイオン交換水で 7.32%、0.2M-NaCl で 4.59% となり、イオン交換水で変形が大きい結果となりました。また、膨潤圧の

計測例として、図 51 に緩衝材の下段に設置した土圧計 1 と土圧計 2 および上段に設置した土圧計 5 と土圧計 6 で計測した圧力の経時変化を示します。試験開始直後に急激に圧力が増加した後、1 日～2 日を経過したころにピークを示し、減少傾向に転じました。その後は、0.2M-NaCl の土圧計 1 と土圧計 2 では 10 日を経過するころまで減少傾向を示してから緩やかな増加傾向に転じ、最終的に一定の値に収束する傾向を示しました。下段の土圧計 1 と土圧計 2 のピーク時の圧力は、イオン交換水で 0.71 MPa と 0.92 MPa、0.2M-NaCl で 1.19 MPa と 1.00 MPa でした。上段の土圧計 5 と土圧計 6 では、イオン交換水で 0.46 MPa と 0.44 MPa、0.2M-NaCl で 0.63 MPa と 0.53 MPa でした。いずれもイオン交換水の方が土圧が低い値を示しています。また、試験装置の同じ高さに設置してある土圧計 1 と土圧計 2 では、計測される土圧が最大で 0.2 MPa 程度異なっています。この理由としては、試験容器内に設置した緩衝材の位置や土圧計周辺のケイ砂の充填状況の違いにより、緩衝材が膨潤して土圧計に接触するまでの時間が異なることが理由の 1 つとして考えられます。

以上の結果より、イオン交換水と 0.2M-NaCl の緩衝材の膨潤挙動を比較すると、イオン交換水で、緩衝材の膨潤による変形が大きく、その場合に発生する圧力は低くなることを確認できました。今後も、引き続き縮尺模型試験を実施し、埋め戻し材の緩衝材膨出抑制機能を評価するためのデータの拡充を図るとともに、埋め戻し材の設計評価に資するデータとしての取りまとめを行います。

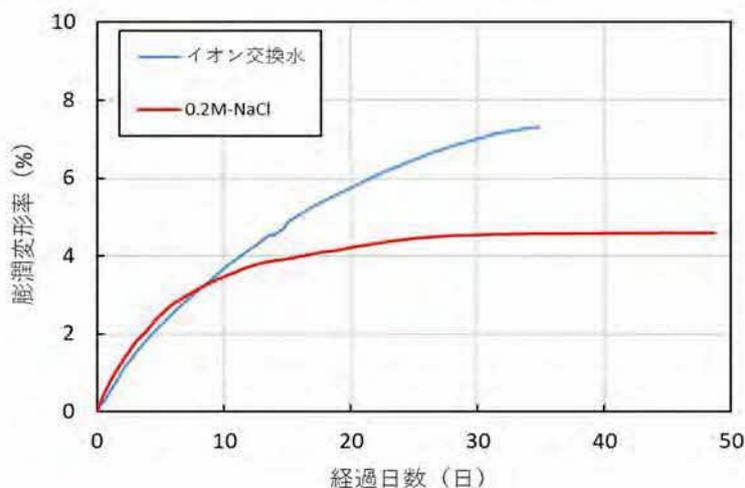
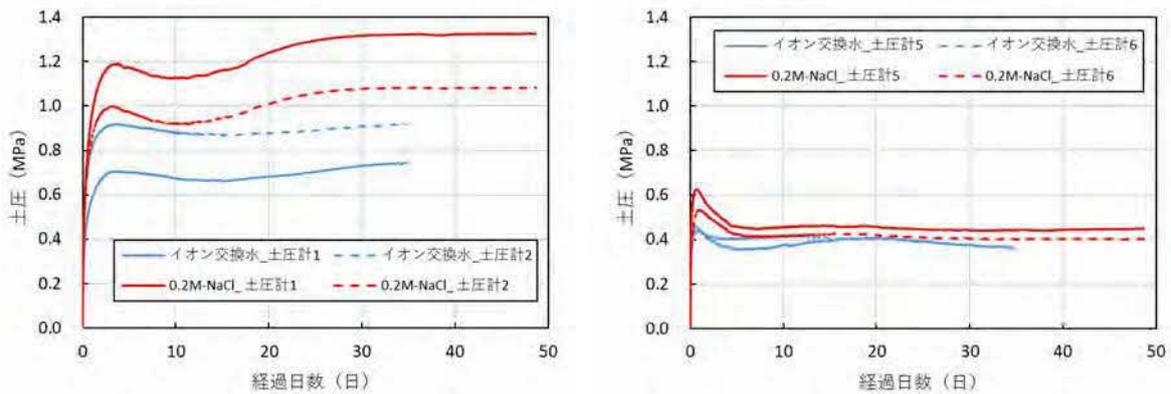


図 50 縮尺模型試験における緩衝材の膨潤変形率の経時変化



(a) 緩衝材下段 (土圧計 1 および土圧計 2) (b) 緩衝材上段 (土圧計 5 および土圧計 6)  
 図 51 縮尺模型試験における膨潤圧力の経時変化

### 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

坑道の掘削で生じた掘削損傷領域 (EDZ) においては、割れ目の発達に伴い透水性が増大することにより卓越した物質移行経路となることが想定されています。EDZ の連続性を遮断し卓越した移行経路となることを回避するための手法として、低透水性の材料であるベントナイト系材料を用いた止水プラグを設置する考え方が国内外で示されています。ベントナイト系材料を用いた止水プラグがどの程度の地下水移行抑制機能を持つかについて、透水係数を指標の1つとして評価することを目的として、止水プラグの切欠き部分を縮小して模擬した粘土止水壁を試験坑道 3 に構築し、EDZ シーリング試験を行っています。

令和 3 年度は、令和 2 年度に引き続き、止水プラグの切欠き部を模擬した粘土止水壁を対象とした透水試験を実施し、試験領域の透水係数が時間の経過とともにどのように変化するか調査しました。図 52 に試験を実施した場所の概要を示します。試験坑道 3 の底盤から鉛直下向きにボーリング孔 (以下、EDZ-1 孔) を掘削しています。この EDZ-1 孔を中心とした半径 0.5 m の円周上に幅 0.1 m、深さ 2.0 m のスリットを掘削し、ベントナイトのペレットを充填することで粘土止水壁を構築しています。令和 3 年度は、粘土止水壁を構築して約 2 年が経過した時点で透水試験を実施しました。透水試験では、EDZ の領域を含むように設定した EDZ-1 孔の深度 0.31 m～1.70 m の区間から注水して粘土止水壁で区切られた内側の領域を対象としました。図 53 にこれまでの試験で得られた試験領域内の透水係数を示します。粘土止水壁の構築前後に実施した同じ注水区

間における透水試験において、構築前の透水係数は約  $2 \times 10^{-6}$  m/s の値を、構築後の透水係数は約  $3 \times 10^{-9}$  m/s の値を示し、粘土止水壁を構築することで試験領域内の透水性が低下することを確認しています。令和 3 年度の透水試験の結果、試験領域の透水係数は約  $5 \times 10^{-9}$  m/s の値を示しました。この結果より、粘土止水壁を構築して 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。

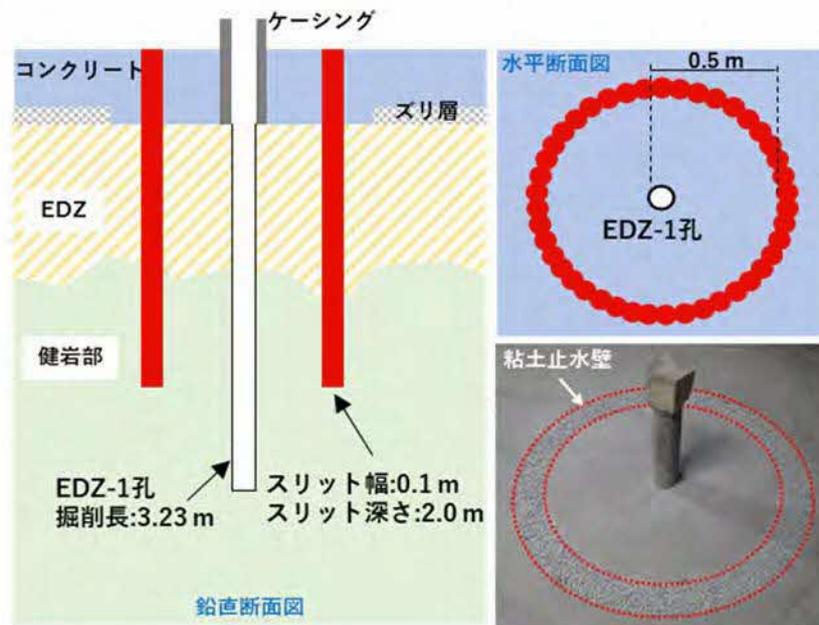


図 52 粘土止水壁周辺の概要図

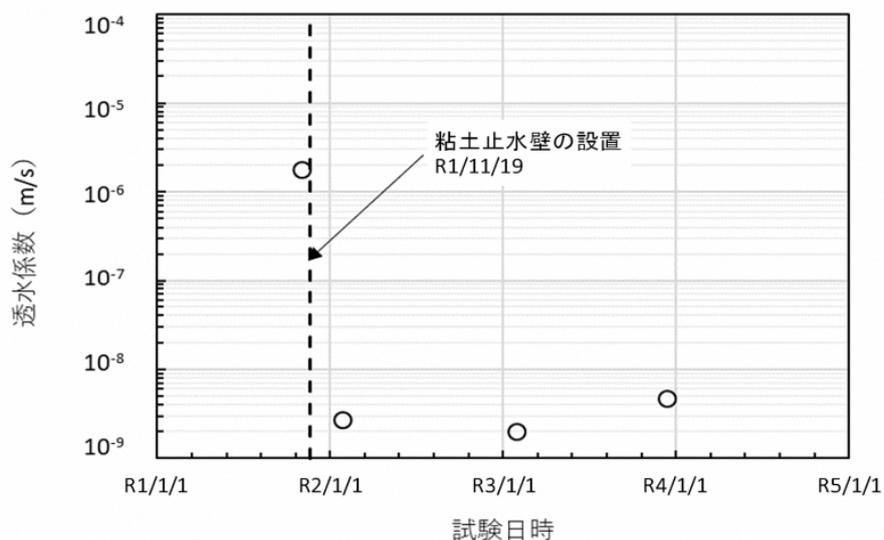


図 53 試験領域内の透水係数の経時変化

また、止水プラグが EDZ の連続性を遮断する構造物として成立するためには、要求する性能を発揮できる品質（例えば、乾燥密度など）を確保して施工できる方法が必要となります。例えば、締固め工法で施工する場合、坑道の側壁部や天端部の切欠き部では岩盤と止水プラグの境界面の近くは十分に締固められずに乾燥密度が低下する可能性があります。この止水プラグの切欠き部のように狭隘な空間に対するベントナイト系材料の施工方法として、吹付け工法の適用性を確認しています。

令和 3 年度は、令和 2 年度に切欠き部を模擬した型枠を対象に実施した地上での吹付け試験（以下、地上試験）の結果を踏まえて、試験坑道 2 の側壁部の岩盤を掘削して設けた切欠き部に対するベントナイトの吹付け工法の適用性を確認するための工学規模試験を実施しました。地上試験では、吹付け材料に粉末ベントナイトを用いた場合に吹付け後の乾燥密度が目標乾燥密度を下回ったことが課題でした。

そこで、工学規模試験の実施に先立って吹付けの手順と吹付け後の品質を確認するための予備試験を実施しました。ベントナイトに粉末ベントナイト（クニゲル V1）を用いて、吹付け材料としてクニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で混合した材料（以下、混合材料）を作製しました。混合材料の製作時に加える水の量は、事前の締固め試験の結果から最も乾燥密度が大きくなる時の値を設定しました。また、混合材料の品質のばらつきを少なくするために、混合前のクニゲル V1 とケイ砂の含水比を測定して混合する際に加える水の量を管理するとともに、練り混ぜを行う時間を一定にしました。

予備試験では、口径が 30 mm のノズルを用いて幅 1 m、高さ 50 cm、奥行き 50 cm の木製型枠に対して混合材料の吹付けを行いました。混合材料の吹付けによる乾燥密度の目標値は、有効粘土密度<sup>\*66</sup>が  $1.20 \text{ Mg/m}^3$  を確保できる値として  $1.43 \text{ Mg/m}^3$  に設定しました。吹付け後には 9 箇所でのサンプリングを行い、含水比と乾燥密度を測定しました。図 54 に 2 度の予備試験を実施してそれぞれで測定した含水比と乾燥密度の関係を示します。図 54 には、含水比と乾燥密度から求められる混合材料の飽和度 ( $S_r$ ) が 70%~100%のときの曲線も示しています。また、加える水の量を

---

\*66: 緩衝材や埋め戻し材中に含まれるケイ砂の体積を除いた、ベントナイトのみの乾燥密度を計算したものです。

決めるために実施した締固め試験のうち、 $2E_c$  (約  $1,100 \text{ kJ/m}^3$ ) のエネルギーで締固めたときの含水比と乾燥密度の関係も示しています。1度目に実施した V1-70\_A では、目標乾燥密度である  $1.43 \text{ Mg/m}^3$  を下回るサンプリング箇所もあったものの、9箇所の平均乾燥密度は  $1.45 \text{ Mg/m}^3$  と目標値を上回る値となりました。また、含水比は  $20.6\% \sim 26.3\%$  の値を示しました。2度目に実施した V1-70\_B では、全てのサンプリング箇所乾燥密度の値は目標乾燥密度である  $1.43 \text{ Mg/m}^3$  を上回り、9箇所の平均乾燥密度は  $1.51 \text{ Mg/m}^3$  と目標値を上回りました。含水比は  $21.4\% \sim 23.7\%$  とばらつきが少なく、その平均値は  $21.7\%$  でした。飽和度も  $70\% \sim 80\%$  の範囲におさまっており、ほとんど同じ状態で吹付けられていると考えられます。これらの予備試験の結果より、粉末ベントナイトであるクニゲル V1 を用いた吹付け材料でも目標乾燥密度を上回る乾燥密度で吹付けられることを確認し、試験坑道 2 で実施する工学規模試験においても同じ材料を用いることとしました。

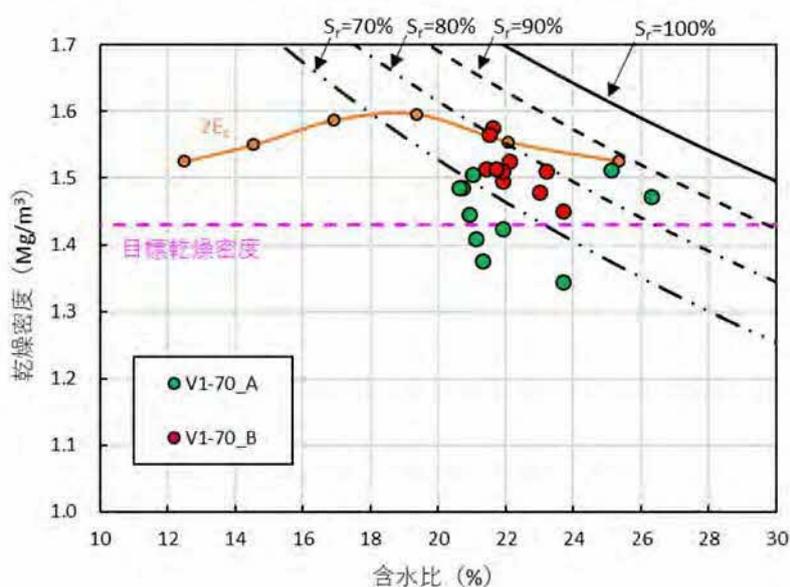


図 54 予備試験における含水比と乾燥密度の関係

工学規模試験では、試験坑道 2 の側壁面に切欠き部を掘削しました。試験坑道 2 の切欠き部掘削の様子を図 55 に示します。図 55(a) に示すように、試験坑道 2 は直径約  $4.0 \text{ m}$  の円形断面を有しており、坑道壁面は鋼製支保工が約  $1.5 \text{ m}$  間隔で設置されるとともに、表面は吹付けコン

クリートで覆われています。切欠き部は、試験坑道 2 の鋼製支保工の間の側壁部分（図 55(a)）を電動バックホウに取り付けたブレーカ（削岩機）により掘削しました（図 55(b)）。掘削した切欠き部（図 55(c)）の寸法は、幅が約 1.3 m、奥行が最大で約 1.3 m、高さが約 3.0 m でした。

吹付け材料は、予備試験と同様にクニゲル V1 とケイ砂を 70:30 の割合で作製した混合材料を用いました。吹付け後の乾燥密度の目標値は、有効粘土密度が  $1.20 \text{ Mg/m}^3$  を確保できる値として  $1.43 \text{ Mg/m}^3$  に設定しました。

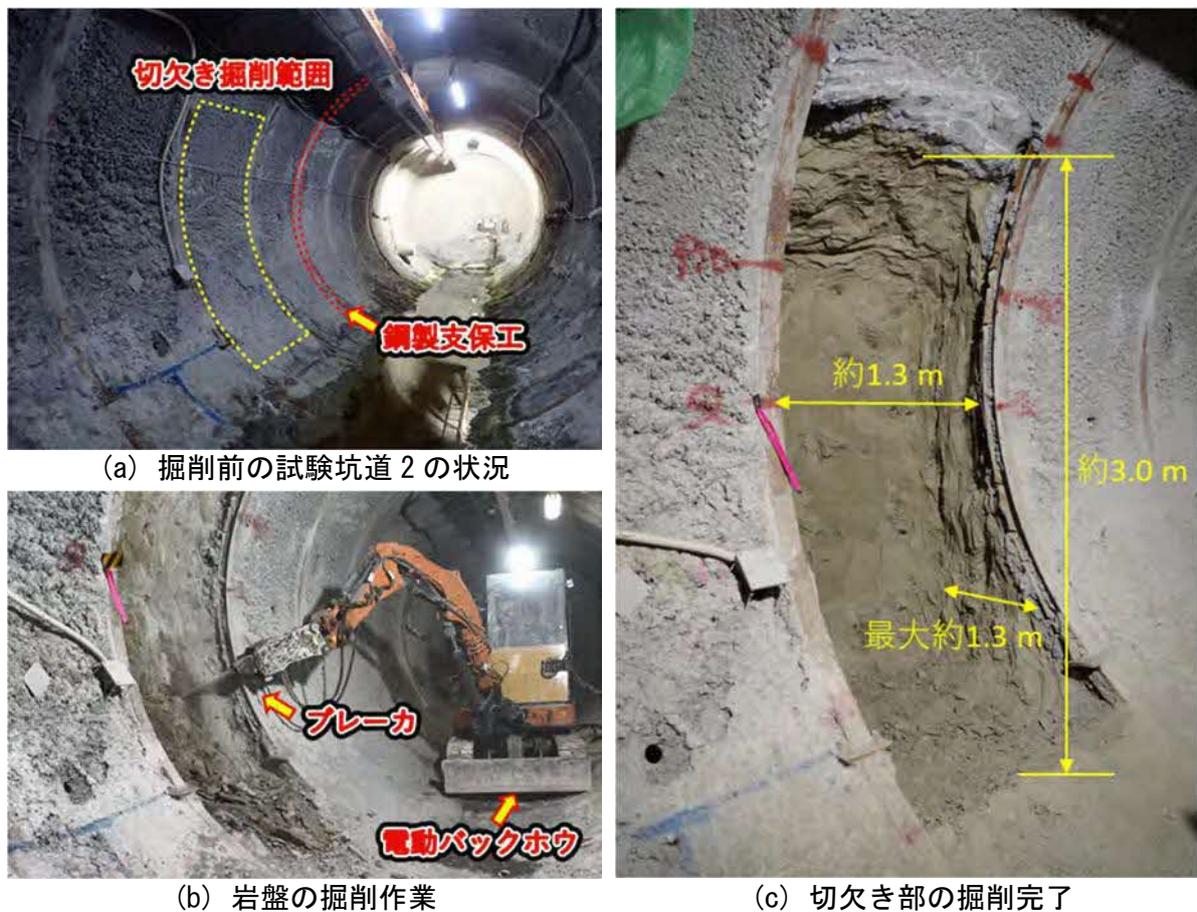


図 55 試験坑道 2 の切欠き部掘削の様子

切欠き部への吹付けの状況を図 56 に示します。吹付け作業では、口径 30 mm のノズルを取り付けた吹付け機械をオペレータが操作して行いました（図 56(a)）。オペレータは吹付けノズルを一定の距離を保ちながら吹付け面に対して直角となるように、吹付けの状況を目視で確認しながら吹付け機械を操作しました。実際の試験における吹付け手順としては、切欠き部の下部から上部に向かって吹付けを形成していき（図 56(b)）、

切欠き部の奥行方向の深さ約 1.3 m の半分程度まで吹付けを行いました。その時点で、含水比と乾燥密度を測定するためのサンプリングを 9 箇所で行いました。その後、坑道壁面の吹付けコンクリート付近まで吹付けを完了し（図 56(c)）、再び含水比と乾燥密度を測定するためのサンプリングを 9 箇所で行いました。

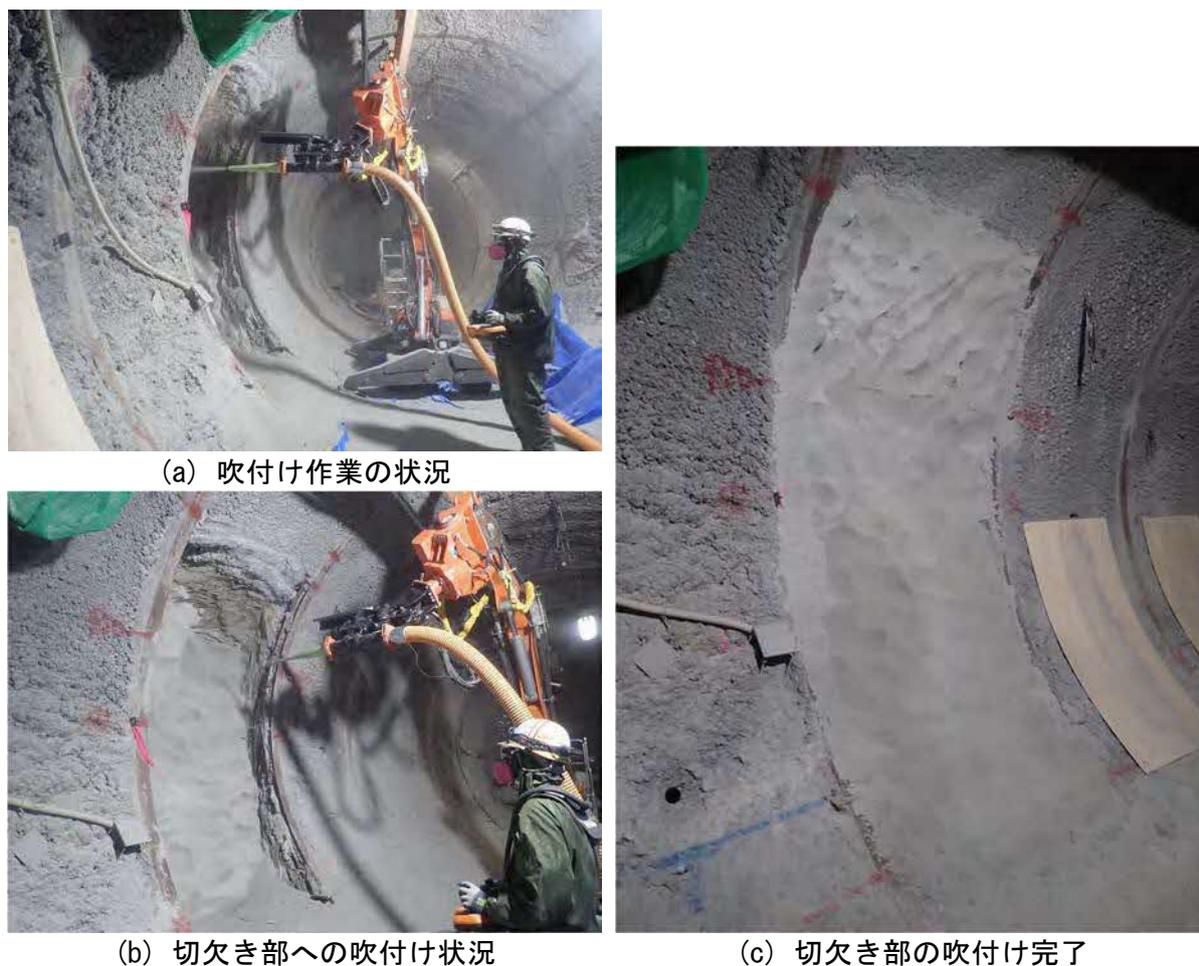


図 56 切欠き部への吹付けの状況

図 57 に工学規模試験における含水比と乾燥密度の関係を示します。図 57 には、混合材料の飽和度 ( $S_r$ ) が 70%~100%のときと、 $2E_c$  のエネルギーで締固めたときの試験結果に加えて、令和 2 年度に実施した地上試験の結果も示しています。地上試験では、サンプリング試料全体の乾燥密度の平均値が  $1.41 \text{ Mg/m}^3$  と目標乾燥密度を下回っており、含水比も 19.3%~29.6%の範囲でばらついていました。工学規模試験では、目標乾燥密度である  $1.43 \text{ Mg/m}^3$  を下回ったサンプリング試料は 1 試料のみで、サンプ

リング試料全体の乾燥密度の平均値は  $1.55 \text{ Mg/m}^3$  となり、地上試験に比べて高い乾燥密度で吹付けができました。また、含水比は 17.4%~23.5% の範囲にありその平均値は 20.5% でした。

工学規模試験で高い乾燥密度で吹付けができた理由としては、比較的低い含水比の材料を用いたこと、吹付け機に投入する材料の量を令和2年度の地上試験の約  $60 \text{ kg/min}$  から約  $30 \text{ kg/min}$  へと減らしたことが考えられます。

これらの結果から、実際の岩盤を掘削して設けた切欠き部に対して、粉末ベントナイトを用いた吹付け材料を目標乾燥密度よりも高く吹付けられることを確認しました。

今後は、工学規模試験で坑道側面の切欠き部に吹付けたベントナイトのサンプリング調査を実施し、吹付けベントナイトの乾燥密度や含水比のばらつきなどの施工品質をより詳細に確認します。

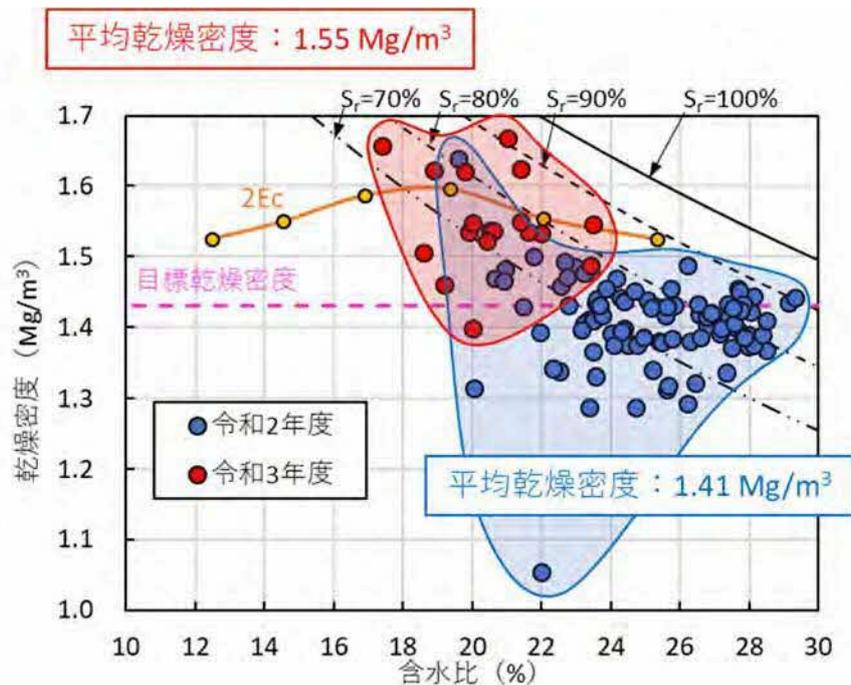


図 57 吹付け後の含水比と乾燥密度の関係

#### ④ 掘削損傷領域の調査技術の高度化

処分場の閉鎖後に坑道周辺の掘削損傷領域（EDZ）が、地上と地下を結ぶ水みちとなることを防ぐためのプラグや埋め戻しといった坑道シーリングにおいては、実際の処分場の設計や安全性評価の基盤情報となる、EDZ の特性および空間的な分布を定量的に把握する調査技術が重要となります。

令和 3 年度は、350m 調査坑道において、EDZ に伴う岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的として、ボーリングによるコア採取および検層、水理試験などを実施し、グラウト注入を行うとともに、令和 2 年度に製作した弾性波・比抵抗試験装置のプロトタイプを用いたデータ取得により、高精度な物理探査<sup>\*67</sup>技術の適用性を検討しました。また、EDZ の経時変化を考慮した、弾性波と比抵抗トモグラフィ<sup>\*68</sup>の同時逆解析のためのプログラム開発に向け、採取したコアを用いた室内試験により、飽和度と物性値のデータを取得しました。

試験では、ボーリング孔から EDZ に伴う割れ目へ超微粒子のセメント系グラウト材を注入し、その前後の弾性波速度や比抵抗の微小な変化領域を観察します。令和 2 年度は、グラウト注入前の試験として、弾性波速度と比抵抗の初期値となるデータを取得しました。

令和 3 年度は、岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的とした、ボーリング調査および水理試験、検層を行いました。試験孔の位置を図 58 に、ボーリング調査で判別した割れ目と初期値の弾性波速度の分布を図 59 に示します。

---

\*67：人工的に発生させた地震波や電磁波などを利用して、空中、地上、水上などから地下の状況を間接的に調査する方法のことです。

\*68：トモグラフィとは、調査対象の範囲内の物性値（速度、比抵抗など）の分布を断面として可視化する物理探査手法です。

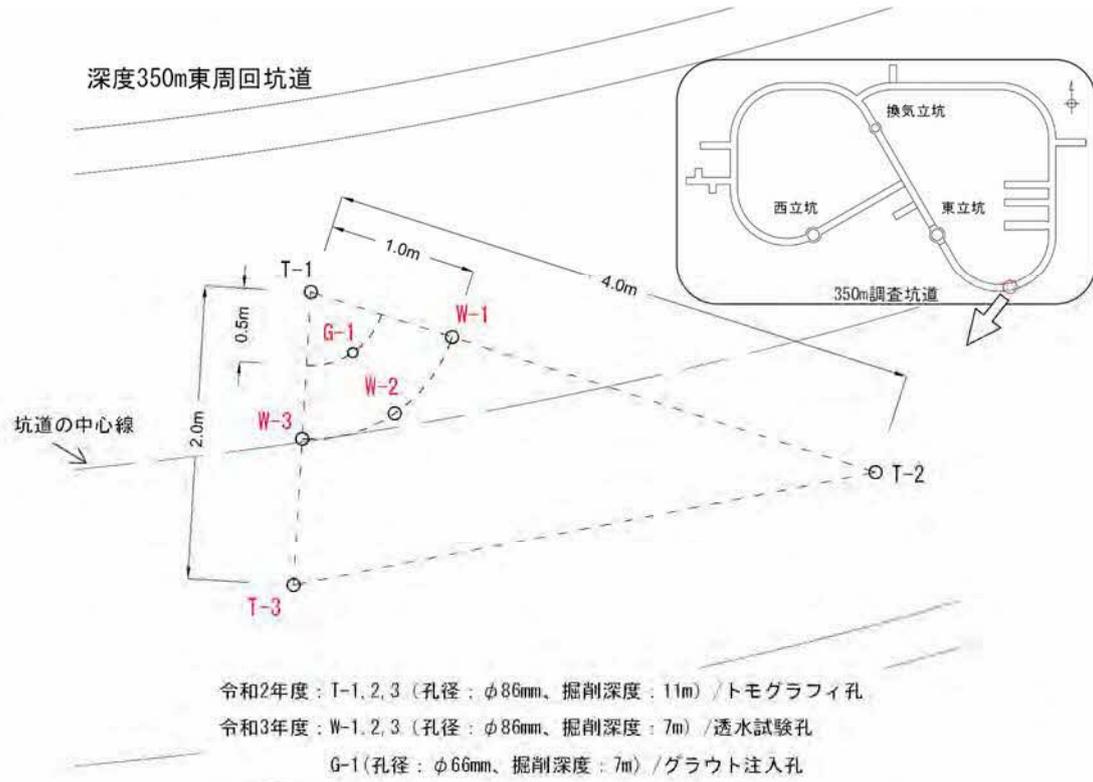


図 58 350m 調査坑道底盤における試験孔の配置

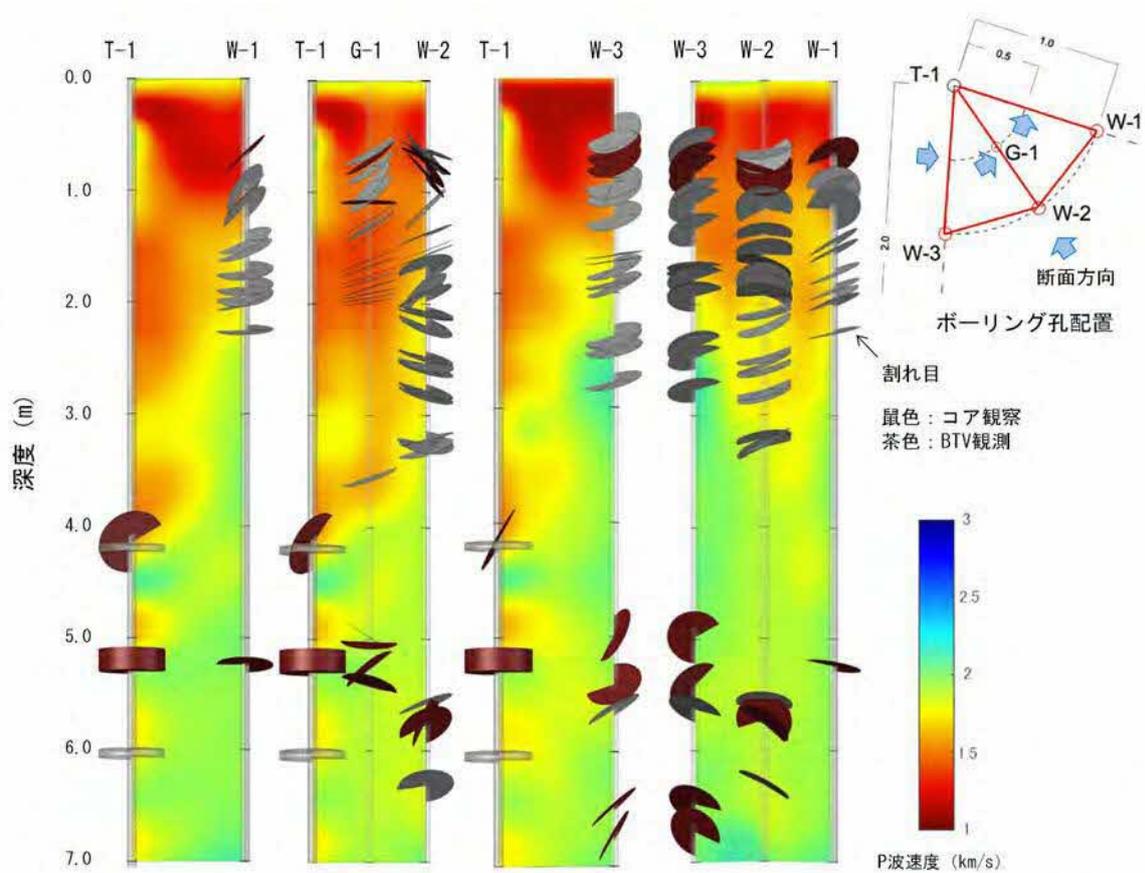


図 59 割れ目位置と弾性波速度分布

図 59 の各試験孔の深度 3 m 付近までの割れ目と、トモグラフィ調査による弾性波の低速度が分布する範囲（赤色部分）はおおむね整合しています。また、ボーリング中の水圧変化から、試験孔間で連結する割れ目を推定してグラウト注入を行い、グラウト注入による透水性の低減効果を透水試験により確認しています。今後は、グラウト注入後のトモグラフィ調査を行い、注入により弾性波速度や比抵抗などの物性が変化した領域を可視化します。

プロトタイプの試験装置を用いた試験は、EDZ の弾性波動と比抵抗の物性データにより、弾性波は屈折法および反射法地震探査の手法、比抵抗は二次元比抵抗法により解析を行い適用性を検討しました。W-1 孔の解析結果断面とトモグラフィの弾性波速度分布（P 波）および割れ目の位置の比較例を図 60 に示します。反射法解析では、地下の地層境界（割れ目）で反射した弾性波（地震波）を捉えて可視化します。反射法断面に連続する反射面がないことから、対応する割れ目が存在しないと考えられます。また、屈折法では、弾性波トモグラフィと同様に弾性波の初動の時間差から速度分布が得られます。今回は、波動の S/N 比（信号/雑音比）が低いことから、初動走時のグラフに屈曲点を捉えていません。初動走時の時間差を正確に捉え、走時曲線の屈曲点や傾きを解析することにより割れ目の検知が期待できます。図 60 の比抵抗分布の断面は、深度 2.3 m までの高比抵抗部分（黄色～緑）は割れ目と整合しますが、それ以深は整合しません。幌延の堆積岩の比抵抗は、地下の間隙水や岩盤中の粘土鉱物などの環境条件に影響されることから、これらを考慮した計測や解析手法の検討を行います。

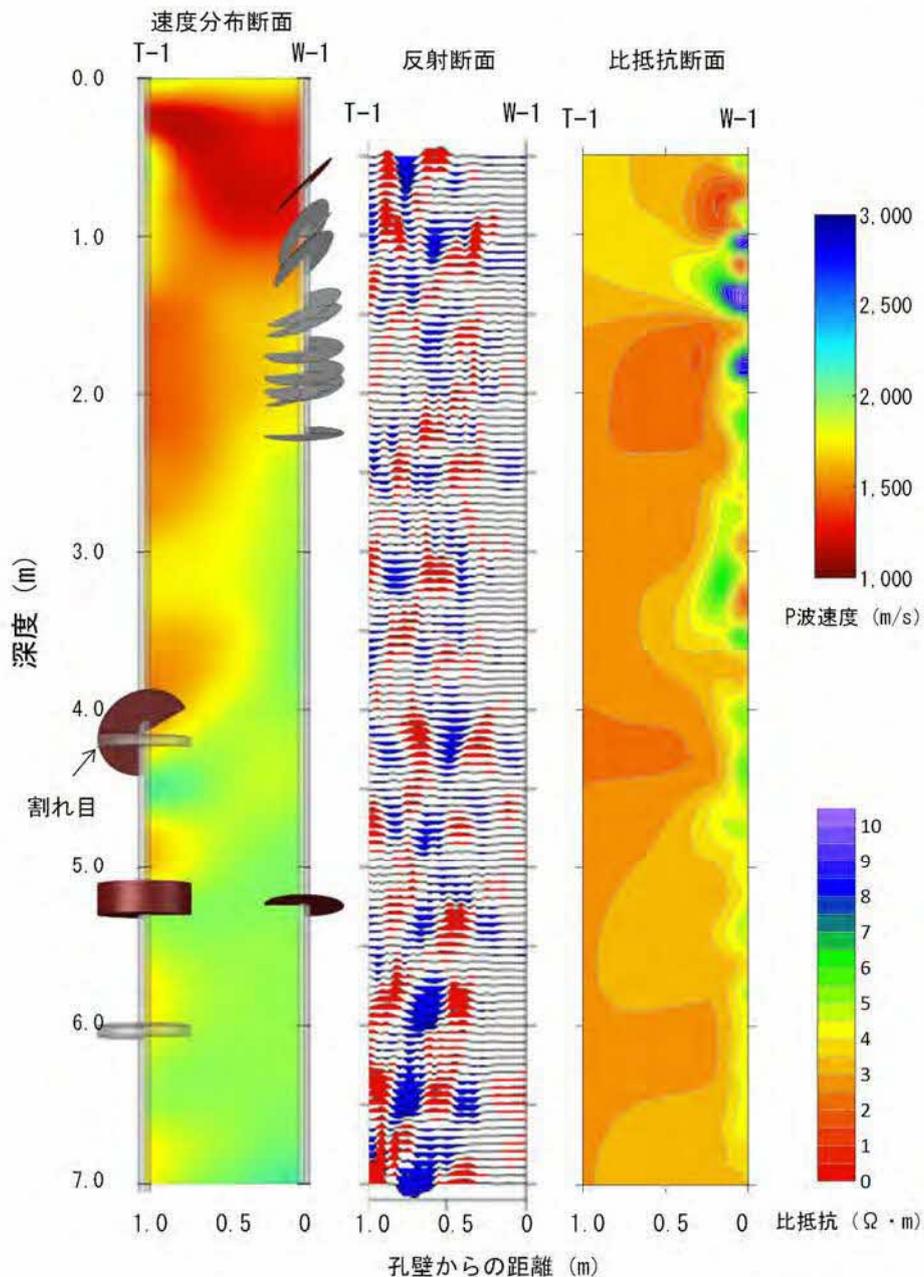


図 60 W-1 孔の解析結果と弾性波速度分布 (P 波) および割れ目の位置の比較例

物理探査で取得される結果の解釈や解析の高度化に使用するデータの取得を目的として、深度 350 m で採取した岩石試料の物性値計測を実施しました。EDZ を対象とした物理探査では、比抵抗トモグラフィおよび弾性波トモグラフィが継続的に実施されていることから、岩石の比抵抗および弾性波速度計測を実施しました。健岩部における比抵抗および弾性波速度の関係把握するため、岩石試料の飽和度を変化させながら比抵抗と弾性波速度を測定しました。図 61 は、測定した弾性波速度と比抵抗