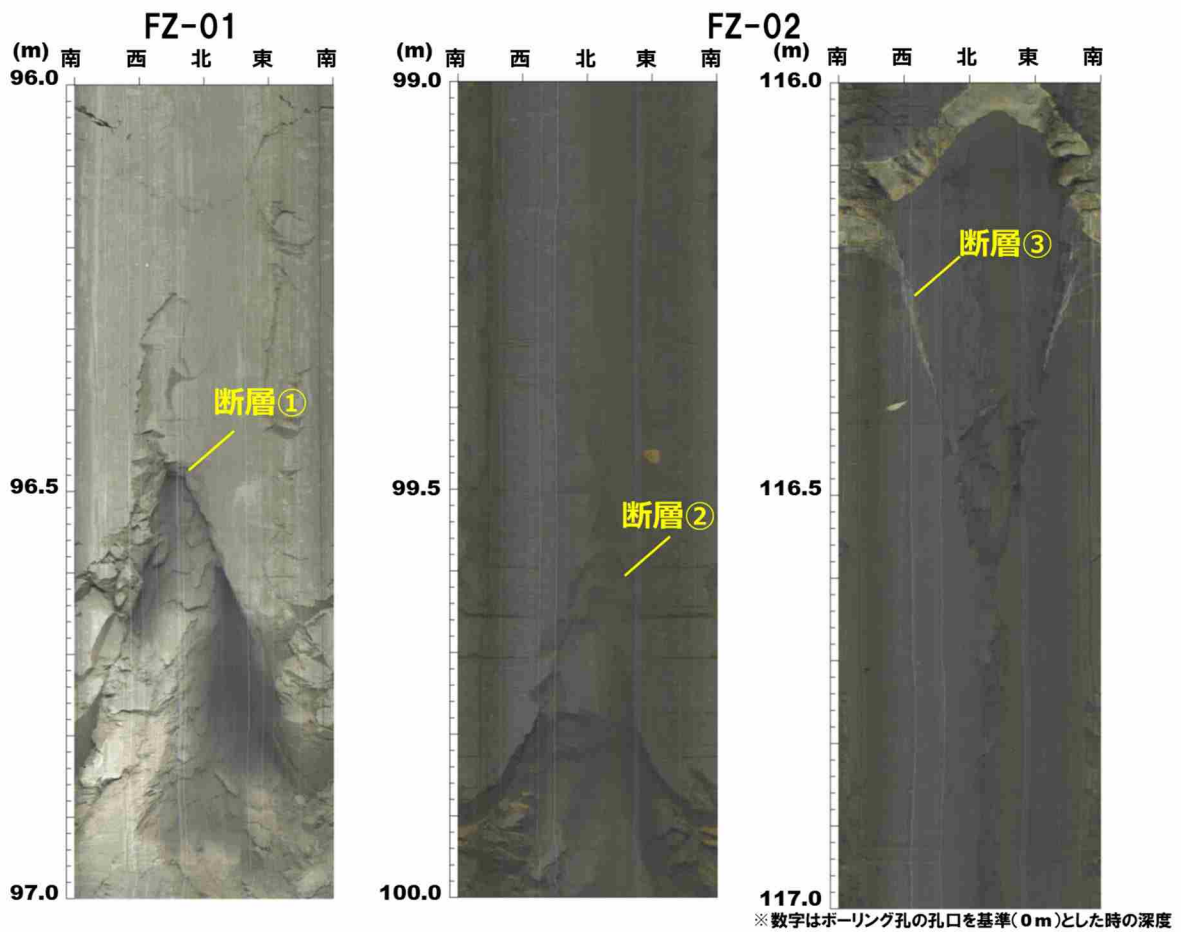


(a) 物質移行試験装置の設置状況



(b) 断層の孔壁画像

図 14 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験

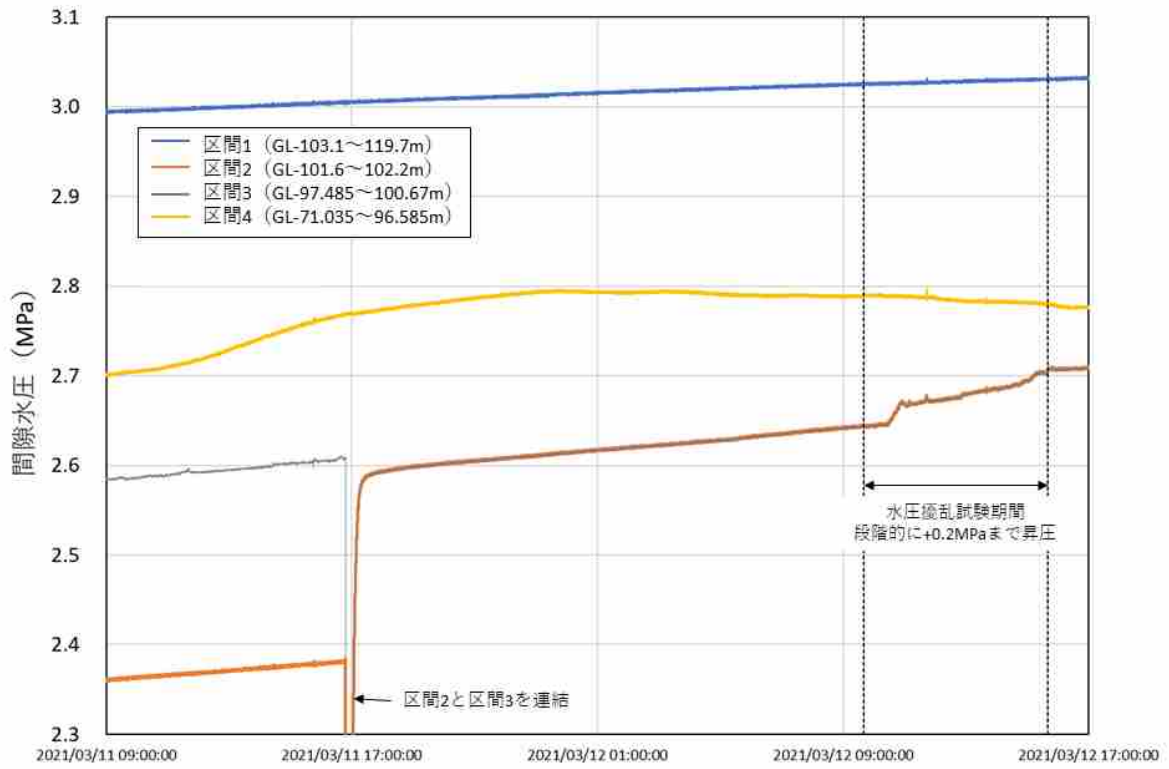


図 15 水圧擾乱試験時の間隙水圧観測結果

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な緩衝材膨出抑制機能の把握
- ③ 掘削損傷領域を遮断するための施工技術の実証
- ④ 掘削損傷領域調査技術の高度化
- 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。

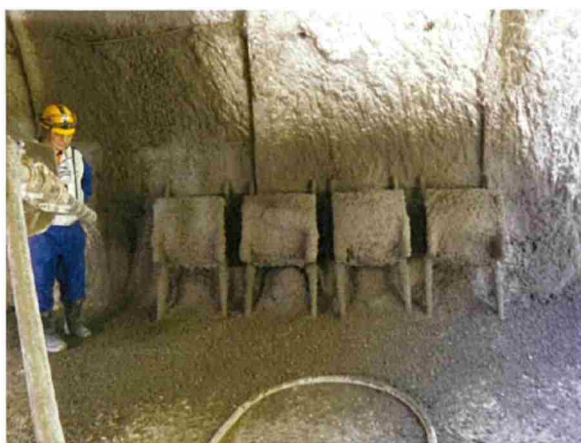
(1) 搬送定置・回収技術の実証

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、およびより合理的に人工バリアを回収するための手法の提示については、4.1の人工バリア性能確認試験などのデータを利用して、人工バリアの豎置きブロック方式における回収作業において考慮すべき条件の整理を行いました。加熱試験開始（平成27年1月）から約6年が経過した人工バリア性能確認試験では、緩衝材の外周部はほぼ飽和しているものの、模擬オーバーパック近傍の緩衝材内側では廃棄体の発熱を模擬したヒーターの加熱により、定置時から飽和度が低下していることが確認されています。実際の処分場においても廃棄体定置後には、廃棄体の発熱の影響を受けることが想定されます。これにより、例えばオーバーパック近傍では緩衝材の飽和度が低く、この結果緩衝材とオーバーパックの密着性は小さくなるため、廃棄体を回収するうえで必要となる緩衝材とオーバーパックとの密着部の除去が比較的容易となる可能性があります。このように、回収作業においては解析などにより緩衝材の状態を予測した上で、適した回収技術を選定することが必要であると考えられます。

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：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について、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。そこで、支保部材として利用されてい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の準備を行いました。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試験体を作製し（図 16）、地下坑道の吹付けコンクリートと同等の物理的特性（空隙率、弾性波速度）および力学的特性（一軸圧縮強度、静弾性係数、圧裂強度）を有することを確認しました。図 17には一例として、一軸圧縮強度の試験結果を示します。コンクリート試験体は2回作製しましたが、どちらのコンクリート試験体も地下施設内で使用されているコンクリートと同様の強度特性を有していることを確認できました。また、試験体は、坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置しました（図 18）。これら2つの条件は、坑道内において吹付けコンクリートが置かれうる両極端な条件であり、この2つの条件において取得されるデータを内挿することで、坑道内において考えられる様々な条件下における吹付けコンクリートの変化を把握できると考えられます。今後、約4年間にわたり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。



(a) 吹付けコンクリート施工状況



(b) コアサンプリング

図 16 吹付けコンクリート試験体作製状況

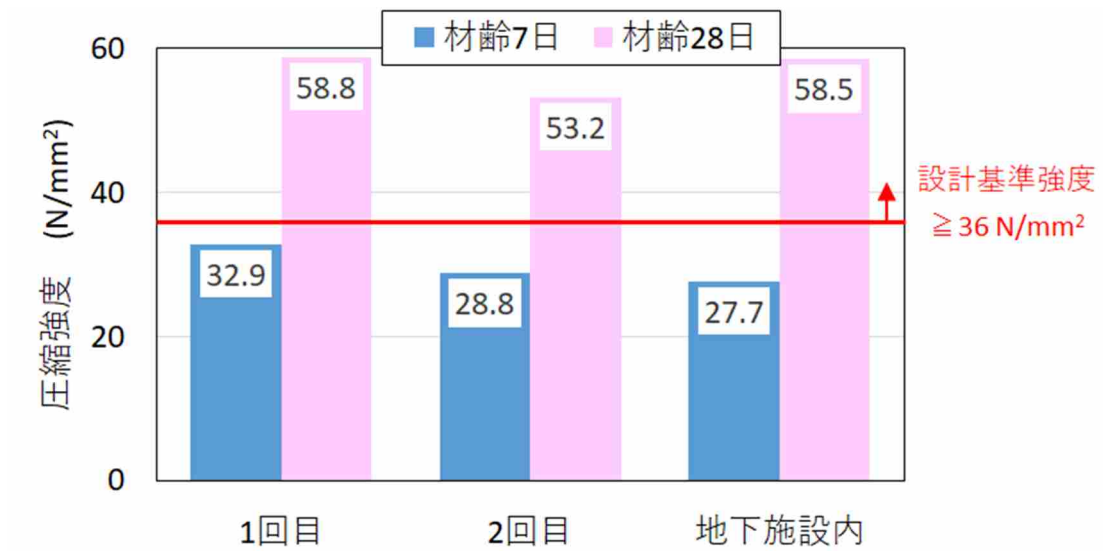


図 17 試験体の一軸圧縮強度の確認



(a) 定置装置全体



(b) 大気条件下での定置試料



(c) 湿潤条件下での定置試料

図 18 坑道内における試験体の定置状況

②実際の地下深部の坑道で生じる事象の整理については、幌延で見られる岩盤の変形挙動や脱ガス現象に着目し、坑道開放条件下において岩盤内部で生じうる事象を整理・モデル化しました。既往の研究成果を整理すると、坑道周辺の地質環境に関する仮想的な力学的および水理的概念モデルとして、それぞれ図 19および図 20が構築されました。さらに、構築されたモデルに基づき、坑道の周辺地質環境の長期変化に関する力学的および水理的な数値計算を実施しました。坑道周辺の地質環境の力学的および水理的な長期変化に影響を与える因子として周辺岩盤のクリープ変形に、水理的な長期変化に影響を与える因子として支保工の有無、掘削損傷領域（EDZ）の透水性の変化、脱ガス現象の有無に着目し、これらの因子を組み合わせて解析ケースを設定しました（表 3）。解析期間は、処分事業における処分場閉鎖までの回収可能性維持期間が明確に設定されていないことから、廃棄体の設置後十分に長い期間として、1,000年を設定しました。

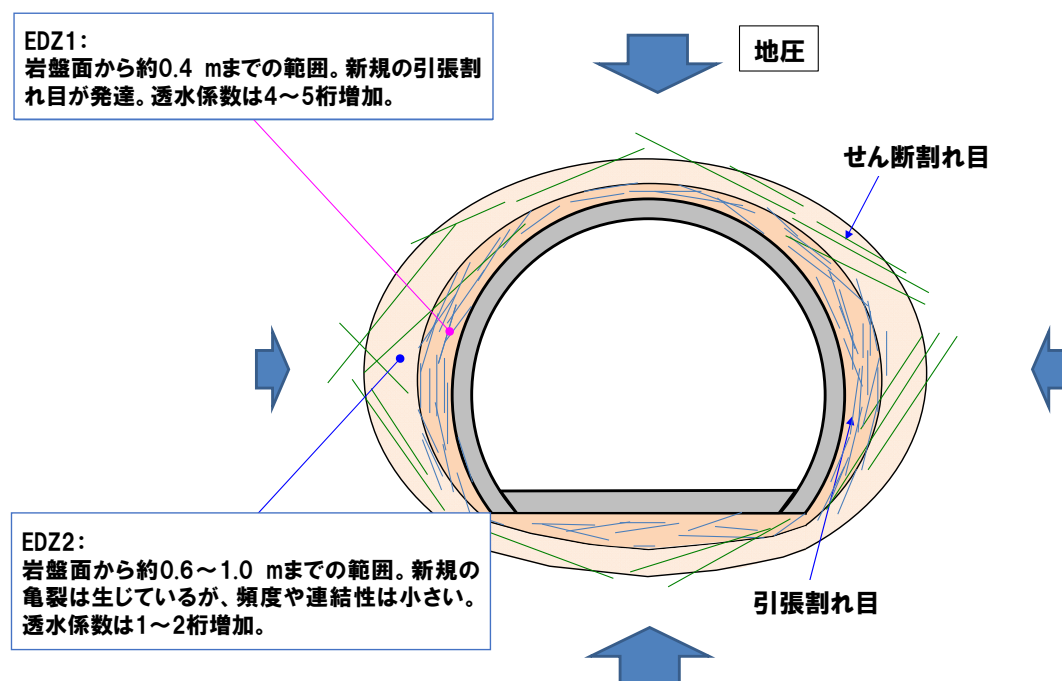


図 19 坑道周辺の地質環境に関する力学的概念モデル

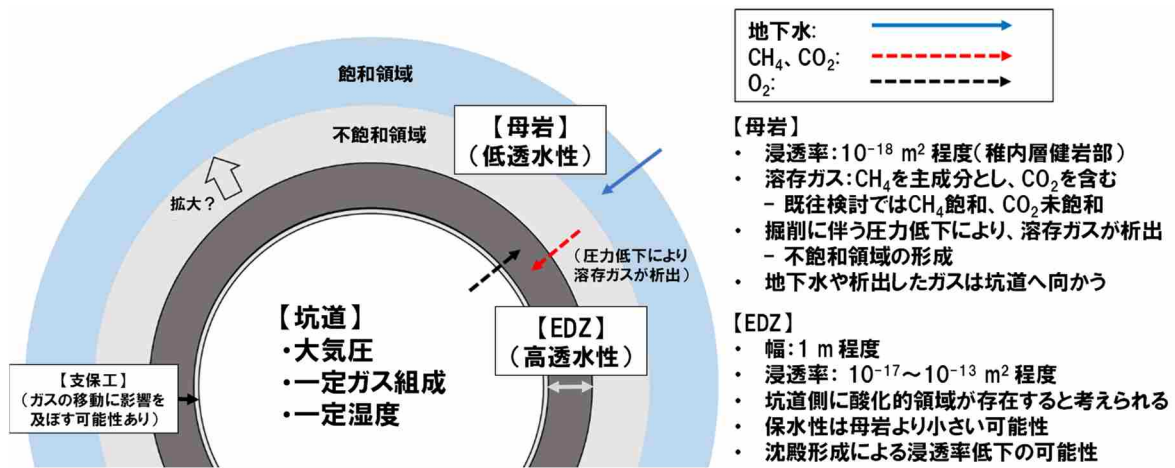


図 20 坑道周辺の地質環境に関する水理的概念モデル

表 3 予察的解析の解析ケース

	力学的長期変化解析		水理学的長期変化解析		備考
	力学的因子: クリープ変形		水理学的因子: 支保工の有無・EDZの考慮		
Case1	支保工あり	標準的な場合 (n ₀ =30、m=20)	支保工なし	EDZ1 省略、EDZ2 は母岩 と同一	クリープ変形が標準的なケース
	支保工あり		支保工なし	EDZ1 省略、EDZ2 考慮	
Case2	支保工あり	クリープ変形が速い場合 (n ₀ =18、m=18)	支保工なし	EDZ1 省略、EDZ2 考慮	クリープ変形が速いケース
Case3	支保工あり	標準的な場合 (n ₀ =30、m=20)	支保工あり	EDZ1、EDZ2 共に考慮	支保工の効果を検討したケース (一次元解析)

(n₀およびmは、岩盤のクリープ挙動を支配する物性値を意味する。)

力学的な長期変化に関して、坑道開放条件での周辺岩盤の上端部における1,000年後の変位は、標準的なクリープ変形を考慮した場合 (Case1) で 3.5×10^{-5} m、より速いクリープ変形を考慮した場合 (Case2) で 8.9×10^{-4} mとなり、いずれの場合も非常に小さいという解析結果が得られました。坑道周辺に生じるひずみは小さく、EDZの拡大も生じず、側壁下部の隅角部を除いて透水係数の増加率にも変化は見られませんでした (図 21)。

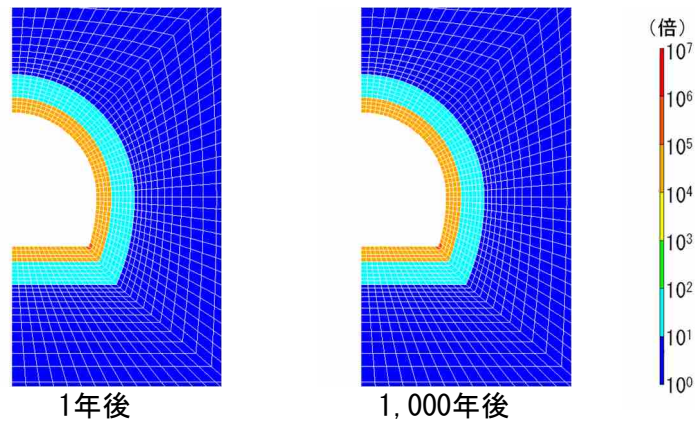


図 21 透水係数の増加率 (Case1)

水理的な長期変化に関して、坑道上方の圧力が長期にわたって低下し続けるという解析結果が得られました (図 22)。一方で、不飽和領域は坑道掘削後から100年程度後までは坑道周辺に同心円状に拡大するものの、その後、地下水が下方から供給され続けることにより、下端から側方に向かって不飽和領域が飽和する解析結果も得られました (図 23)。また、支保工の有無の影響に関してCase1とCase3の結果を比較すると、支保工がある場合には坑道側に水が抜けにくくなるために水圧の低下が緩慢になること、および圧力低下により遊離したガスが捕捉されるために坑道近傍のEDZでの飽和度が低下することも確認されました。ただし、これらの結果は数値計算に用いたモデルの領域の大きさなどの計算条件の影響を受けている可能性があるため、今後、計算精度の検証などが課題です。

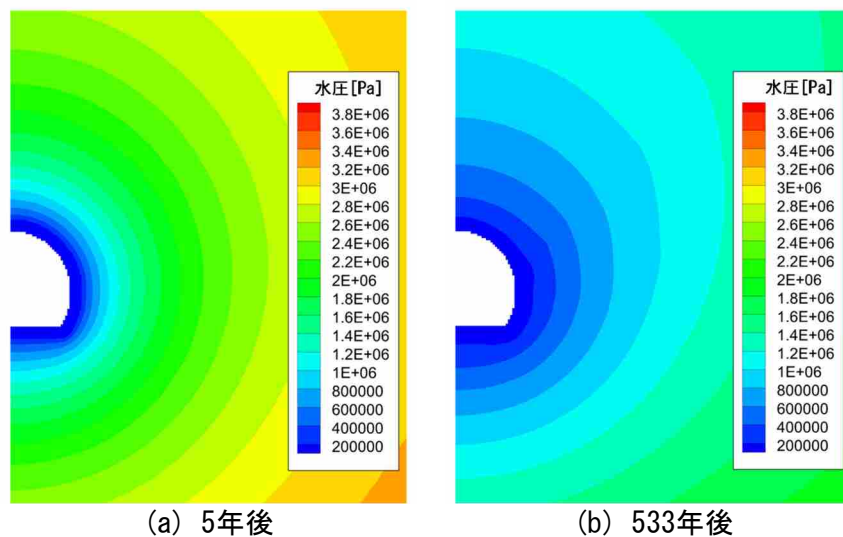


図 22 圧力分布の時間変化

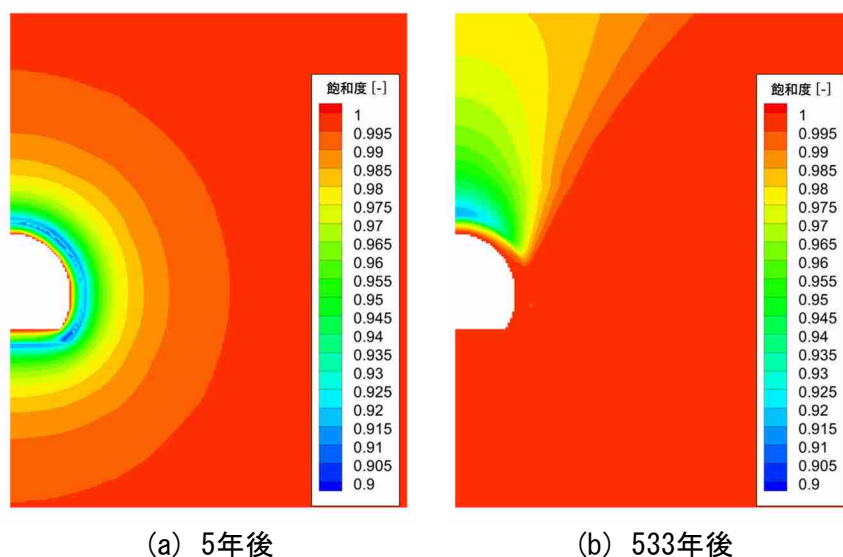


図 23 飽和度の時間変化

(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2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：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^{*29}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、これらの性能が変化する可能性が考えられます。例えば、コンクリート成分が溶出した比較的高いpHを有する地下水が埋め戻し材やプラグと接触することで、ベントナイト中のモンモリロナイトが変質あるいは溶出し、膨潤性や透水性が低下する可能性があります。一方で、このようなベントナイト成分を含む地下水が埋め戻し部や岩盤中の割れ目を流れる過程で別の鉱物として沈殿し、結果として地下水が流れる間隙を閉塞する可能性も考えられます。このような長期的に生じ

*29：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。

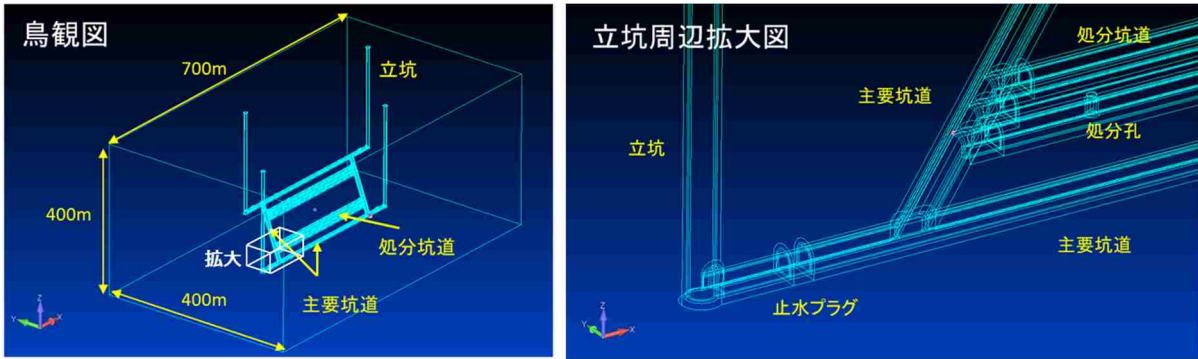
うる現象が埋め戻し材やプラグの安全機能^{*30}に与える影響を評価することは、将来的に処分場の安全性評価を行う上で、重要な知見となります。令和2年度は、令和元年度に設定したシナリオのうちコンクリート材料の地下水への溶出に起因した埋め戻し材の変質が核種移行に与える影響を把握するための水理解析および物質移行解析を実施しました。

物質移行解析では、埋め戻し材やプラグが長期間かかって変質し透水性が上昇した場合の地下施設内および周辺岩盤中の核種移行へ与える影響について確認するために、あえて保守的に解析初期から長期にわたって埋め戻し材やプラグの透水性が高い状態を仮定した解析を行いました。図 24に示すように、処分坑道（連絡坑道、処分坑道および処分孔を含む）と立坑をモデル化し、放射性核種に見立てた非収着性の粒子の移行を解析しました。水理条件としては、地表面の最上流部から最下流部にかけて0.05 mの動水勾配がかかるように設定し、残りの境界部は不透水境界を設定しました。岩盤は亀裂性媒体を仮定し、透水量係数分布として対数平均値 $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、対数標準偏差2.0を設定しました。この解析条件における解析モデル内の間隙水圧分布を図 25に示します。物質移行解析ケースとしては、埋め戻し材やプラグの透水性が変わらないケース（埋め戻し材の安全機能が維持する場合）と埋め戻し材やプラグの透水性が変化するケース（埋め戻し材の安全機能が喪失する場合）の2ケースを実施しました。透水係数の主な設定値を表 4に示します。図 26に下流側立坑に最も近い処分孔（処分孔①）から粒子を發した場合、図 27に上流側立坑に最も近い処分孔（処分孔⑥）から粒子を發した場合の解析結果を示します。

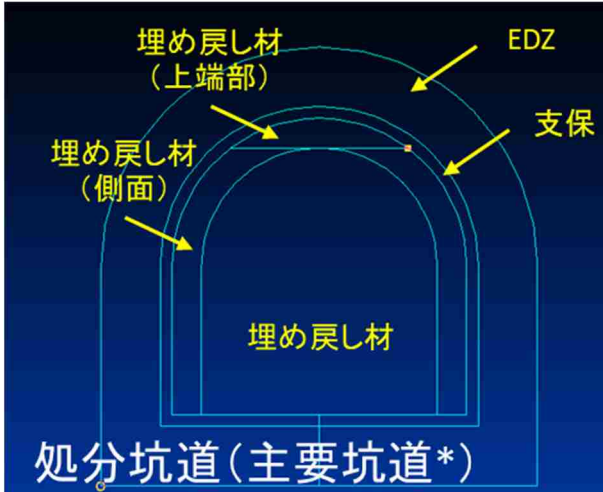
埋め戻し材の安全機能が維持する場合を想定した解析においては、粒子の發生位置にかかわらず、岩盤を介して地上まで移行しています（図 26(a)および図 27(a)）。すなわち、坑道や立坑を移行する粒子はほとんど確認されません。一方、埋め戻し材の安全機能が喪失する場合を想定した解析においては、基本的に岩盤中を粒子が移行するものの、その後、透水性が高い下流側立坑に集水され、一部の粒子が下流側立坑の地表面に到達しています（図 26(b)および図 27(b)）。本解析結果から、下流側立坑の地表面に到達する粒子の割合を算出したものを表 5に示します。埋

*30：地層処分において、放射性廃棄物を物理的に「隔離」し、長期にわたって処分場周辺に「閉じ込め」るために、処分場がどのようにして安全性を提供するかを役割として表現したものです。

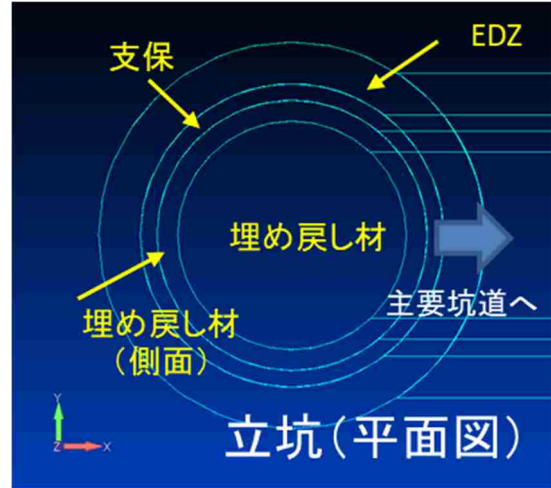
め戻し材の安全機能が喪失する場合において、処分孔（処分孔④）から発生した粒子の40%程度が下流側立坑に到達するものの、ほとんどの粒子は岩盤中を移行する傾向にあることが分かります。なお、埋め戻し材の変質の有無やその程度を解析にて評価した結果、埋め戻し材中のモンモリロナイトの変質が生じるのは坑道の上流側端部や岩盤中の割れ目交差部など、限定的である可能性が示されていることから⁽³⁾、埋め戻し材の安全機能が喪失するという仮定は、保守的であることが分かります。一方で、先に述べたように、一部の粒子は坑道や立坑を介して立坑地表面に到達しているとともに、部分的に主要坑道や処分坑道を移行した後に岩盤中へ移行する粒子も確認されています。このような経路をたどる粒子の移行時間が、埋め戻し材の安全機能が維持する場合と比較して顕著に速い場合、埋め戻し材の安全機能が喪失することが、結果として、処分場全体としての岩盤中や坑道を介した核種移行を促進させる可能性が考えられます。したがって、粒子のたどる経路や移行時間などを分析するとともに、粒子の発生位置などに着目し、埋め戻し材の安全機能が喪失した場合の核種移行への影響を評価することが今後必要になります。このような検討も含め、シーリングシステムが卓越した移行経路となるシナリオが生じにくいことを示すとともに、仮にこのようなシナリオを考慮した場合に、安全評価の観点からの核種移行を低減可能な工学的対策、シーリングシステムや処分場の設計要件に対する留意点の整理を行っていく予定です。



(a) 解析モデルの鳥観図および立坑周辺のモデル詳細

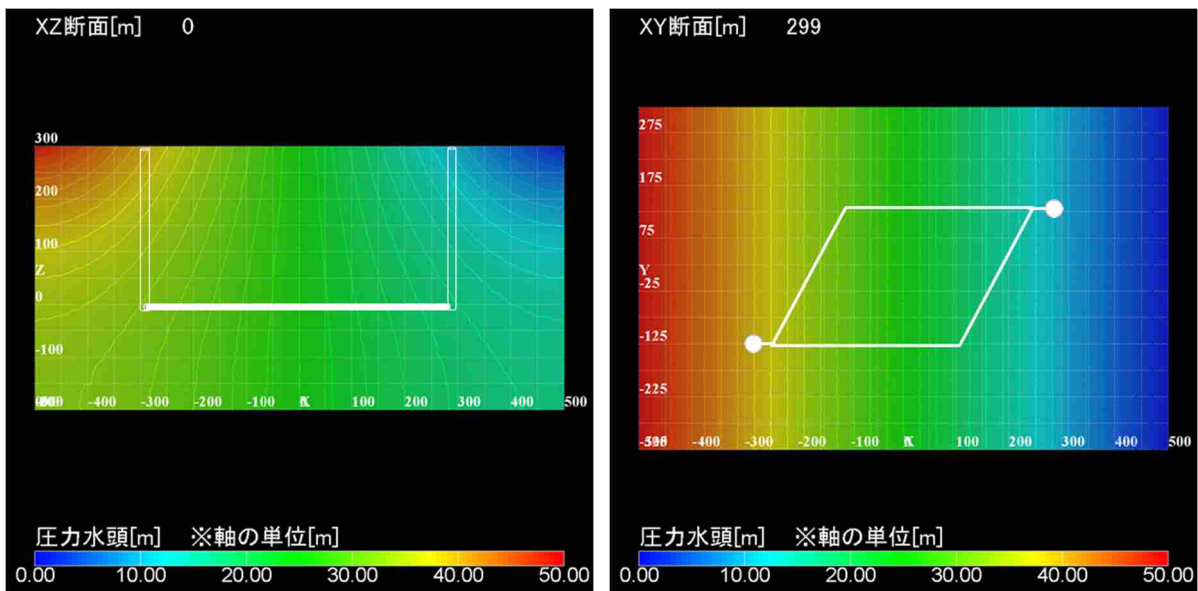


(b) 処分坑道（主要坑道）のモデル詳細
(処分坑道と主要坑道で支保の厚みが異なります。)



(c) 立坑のモデル詳細

図 24 物質移行解析におけるモデルの概要



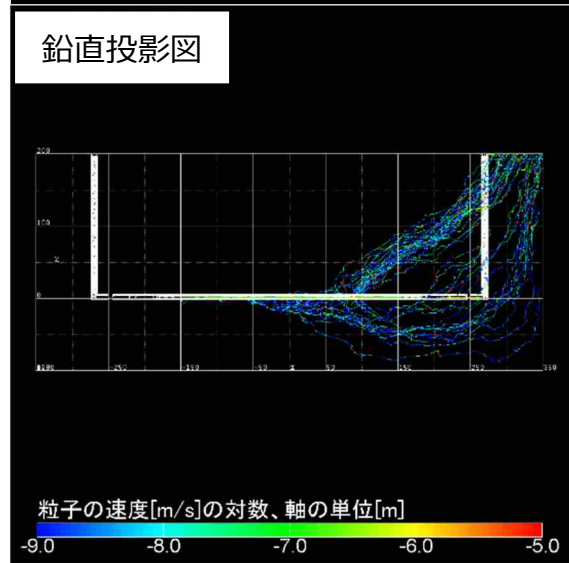
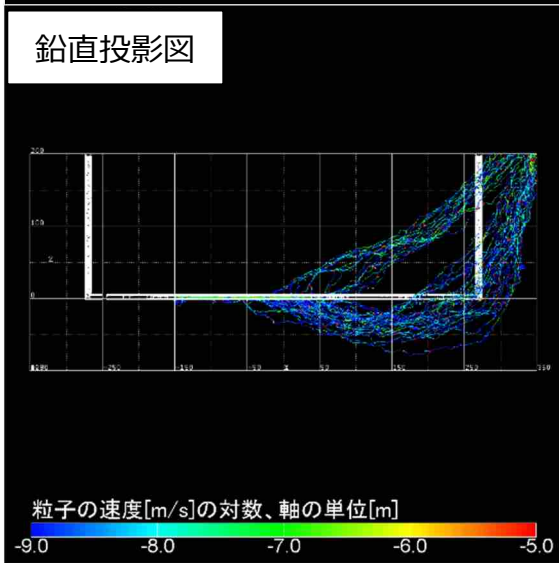
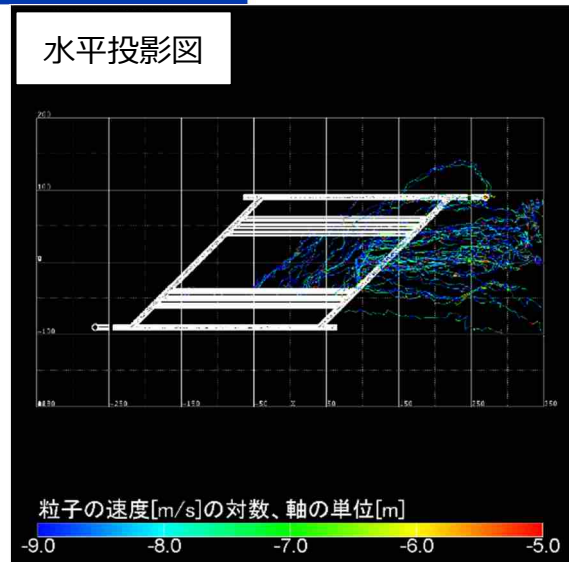
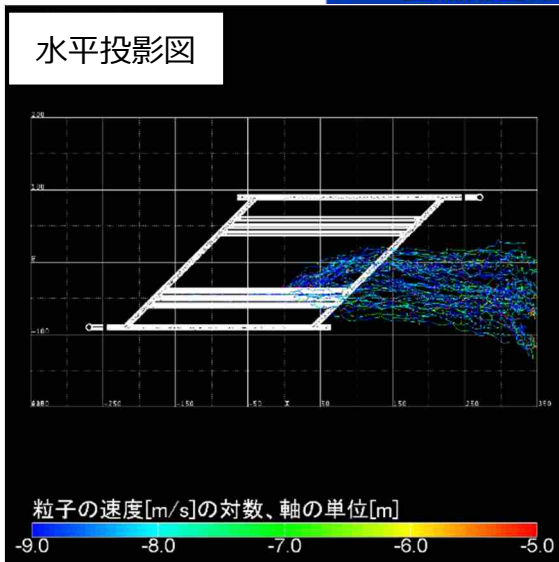
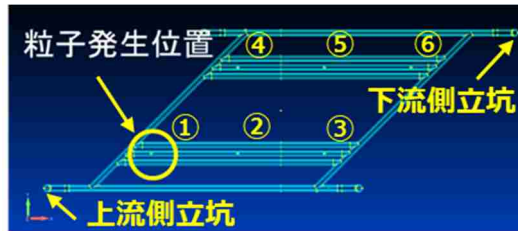
(a) 鉛直断面

(b) 水平断面

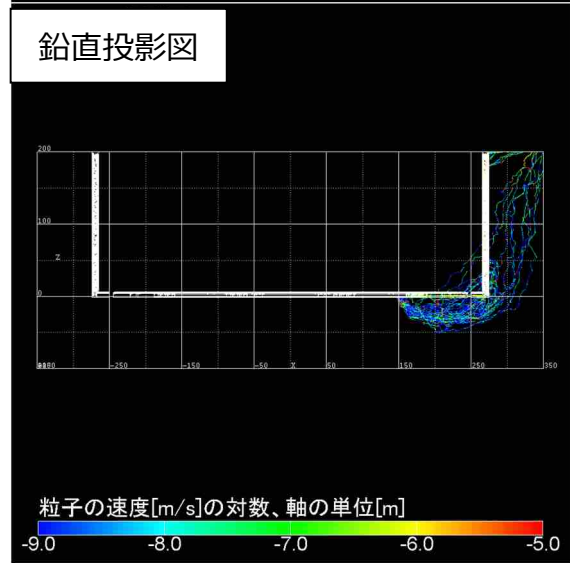
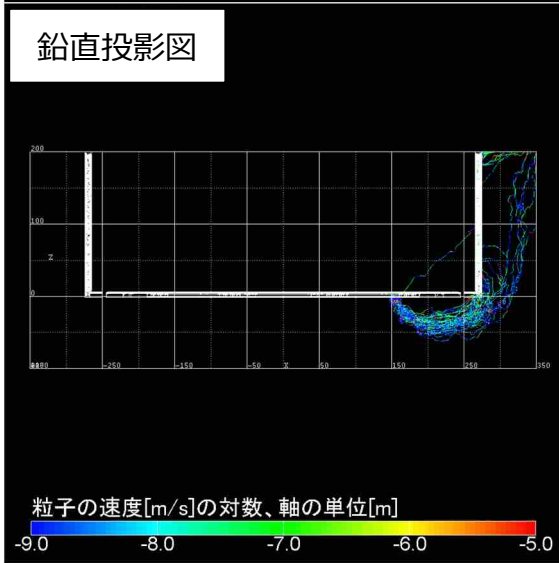
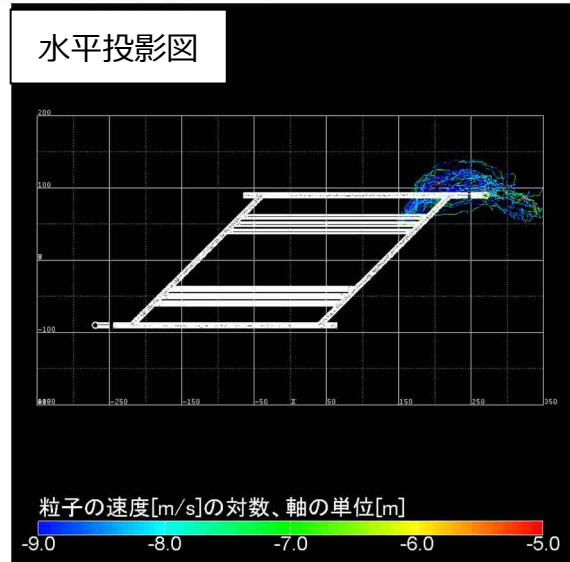
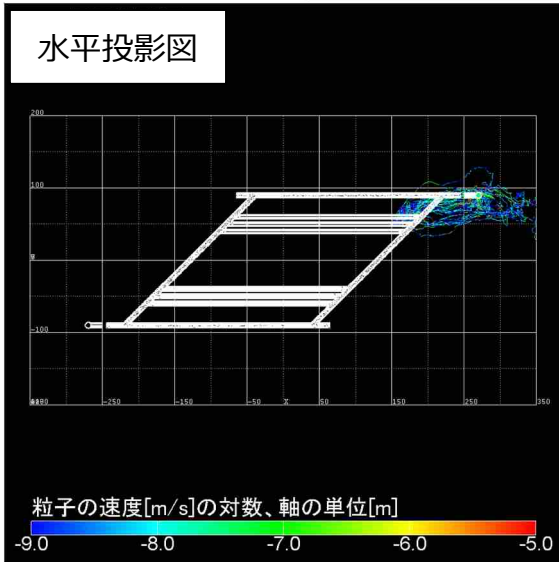
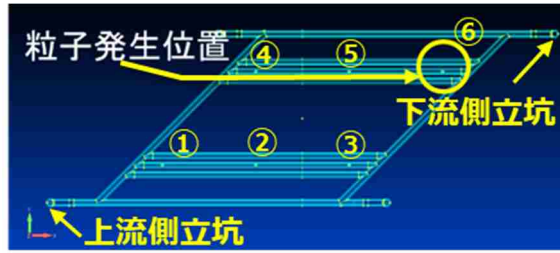
図 25 解析条件における間隙水圧分布

表 4 主な透水係数の設定値

	埋め戻し材の安全機能が維持する 場合 (m/s)	埋め戻し材の安全機能が喪失する 場合 (m/s)
吹付けコンクリート	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
埋め戻し材	5.0×10^{-12}	
EDZ	1.0×10^{-5}	
止水プラグ	4.0×10^{-13}	



(a) 埋め戻し材の安全機能が維持する場合 (b) 埋め戻し材の安全機能が喪失する場合
 図 26 埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い (粒子発生位置：処分孔①)



(a) 埋め戻し材の安全機能が維持する場合 (b) 埋め戻し材の安全機能が喪失する場合
 図 27 埋め戻し材の変質の程度に応じた核種移行の挙動の違い (粒子発生位置：処分孔⑥)

表 5 処分孔から発した粒子の下流側立坑地表面への到達割合

粒子発生位置	処分孔④	処分孔⑤	処分孔⑥
埋め戻し材の安全機能が維持する場合	0.0%	0.0%	0.0%
埋め戻し材の安全機能が喪失する場合	41.0%	23.0%	4.0%
粒子発生位置	処分孔①	処分孔②	処分孔③
埋め戻し材の安全機能が維持する場合	0.0%	0.0%	0.0%
埋め戻し材の安全機能が喪失する場合	0.0%	0.0%	0.0%

立坑地表面まで到達した粒子については、一度岩盤に移行した後に、立坑へ集積された粒子が含まれます。このような粒子は埋め戻し材の安全機能よりむしろ、天然バリアである岩盤の安全機能（ここでは粒子が岩盤中の複数の割れ目に分散する効果による核種の遅延性能）が発揮されることが期待されます。したがって、本検討では、第2次取りまとめ⁽⁴⁾における岩盤中の核種移行評価で用いられた移行距離である100 mを指標とし、岩盤中を100 m以上移行した粒子については計算から除外しています。

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

人工バリア定置の概念の一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^{*31}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 28(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 28(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加圧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

*31：乾燥密度とは、ある体積に含まれる土粒子のみの質量を考えた場合の密度のことを言います。