

ルがプラグを貫通している部分) からの漏水が認められたため、埋め戻し材への注水を停止していましたが、シーリング材により漏水処置を実施した後、平成28年10月からは300 mL/minで注水を再開し、令和元年度も同流量で注水を継続しています。

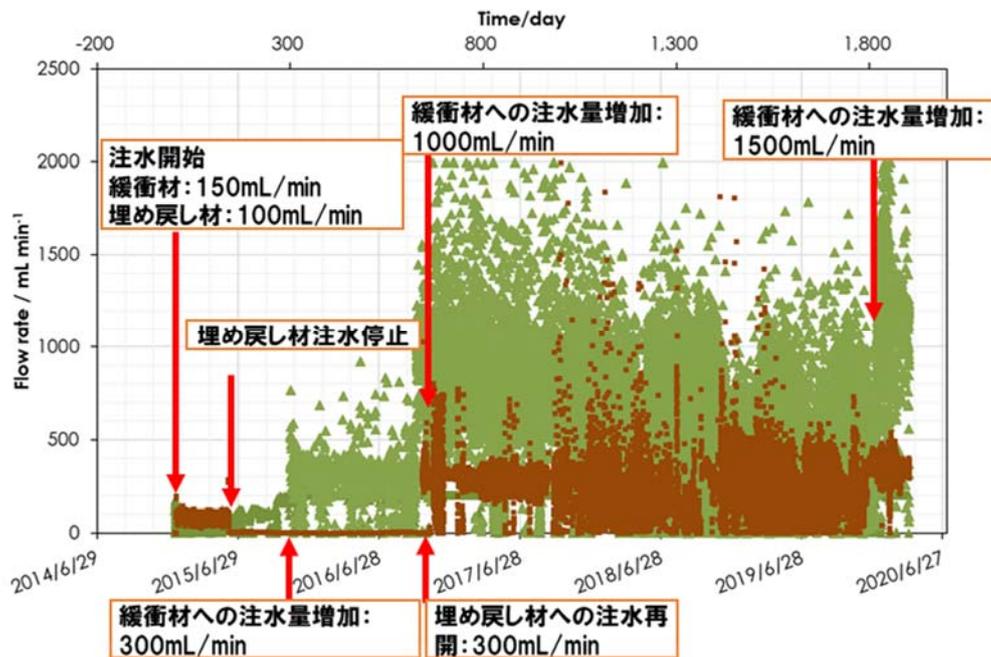


図 58 緩衝材および埋め戻し材への注水量の経時変化

また、試験エリア周辺の逸水を抑制するためにコンクリートプラグ手前の試験坑道周辺領域について、東周回坑道側からB断面（12区間）を、試験坑道3側からA断面（56区間）のグラウトを実施しました（図 59）。グラウト注入前に水押し試験により改良範囲の透水性を確認したところ、A断面の底部に高透水の領域が確認されましたが、グラウト注入後の水押し試験では透水性は下がっており、グラウトにより高透水性の領域が改良されたことを確認しました。図 60に緩衝材外周のケイ砂部の間隙水圧の経時変化を示します。図より、令和元年8月頃からグラウトの効果により間隙水圧が上昇していることが確認できます。また、令和2年1月14日に注水量を増加させたことにより、約0.3 MPaまで間隙水圧が上昇しました。

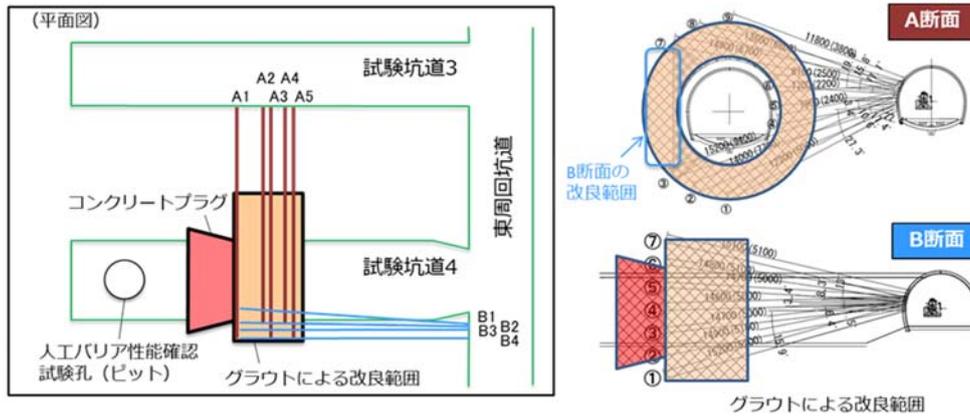


図 59 グラウトの施工箇所

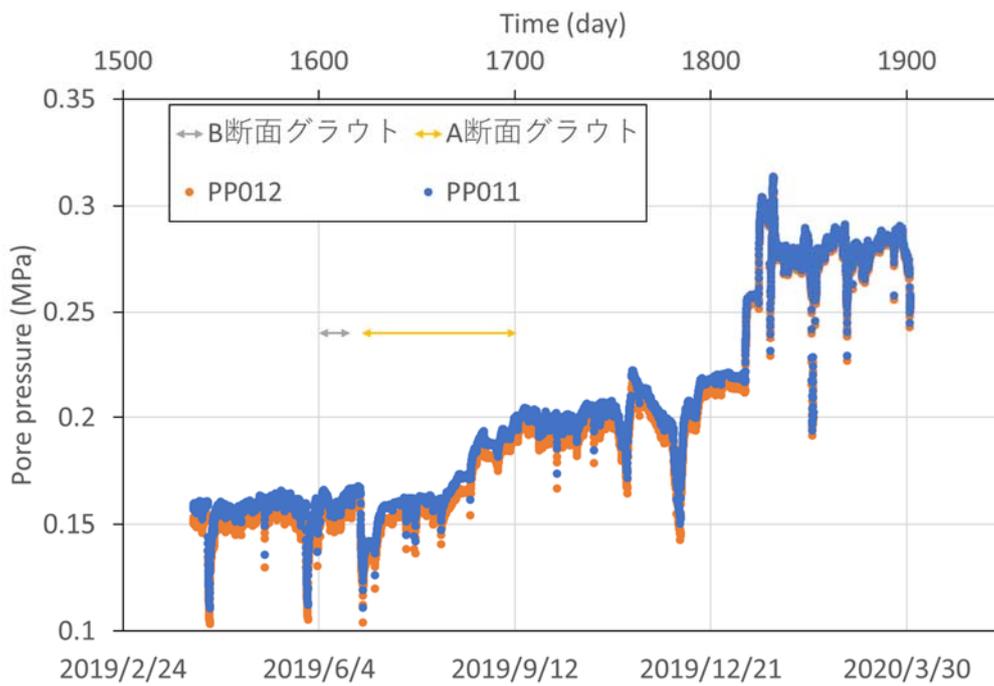


図 60 緩衝材外周のケイ砂部の間隙水圧変化

人工バリア性能確認試験においては、今後ヒーターの電源をOFFにした減熱試験を実施する予定です。そこで令和元年度は、減熱試験を開始した場合に、緩衝材内部の温度や水分量がどのように変化するかを連成解析により予測し、今後の計画立案の参考としました。図 61に温度の、図 62に緩衝材内部の水分の飽和度の結果を示します。約2000日までは現在実施中の加熱試験で取得した計測値と解析結果の比較を、2000日以降は減熱試験を仮定した解析結果を示しています。図 62の計測値（外側）に示す外側の飽和度の計測値では、約1500日付近でばらつきが見られます。このセンサーは測定原理上、冷却するための電流を流しており、この電流の

値は正常動作の範囲が決められています。約1500日以降の外側センサーでは、この冷却電流の値が正常動作の範囲外を示したことから、実際に飽和度が増加しているのではなく、センサーの故障が原因であると考えられるため以降のデータは欠損としています。一方、中央の計測値においても所々ではばらつきが見られますが、中央センサーの冷却電流の値は正常動作の範囲内であることから、一時的な計測データ取得の不具合であると考えられます。計測データと解析結果を比較すると、温度と緩衝材外側の飽和度については良好な一致が見られるものの、緩衝材中央部の飽和度については、計測データと解析結果に開きが見られます。これは、温度勾配による緩衝材中の水分移動現象を正確に再現できていないことが要因として挙げられます。減熱試験を仮定した解析では、緩衝材中の温度は減熱試験を開始後、比較的早い時間で温度が低下することが推定されました。また、緩衝材内側の飽和度については、2000日以降から上昇していることが推定できます。これは、緩衝材中の温度差によって生じる緩衝材外側方向への水分移動が、温度差がなくなることによって解消されるためです。

解析モデルの高度化においては、特に高温環境下における緩衝材の力学特性、水分特性に係るパラメータ取得や間隙空気の影響などが課題として残されているため、今後も継続して各種室内試験や解析モデルの改良を実施していく予定です。

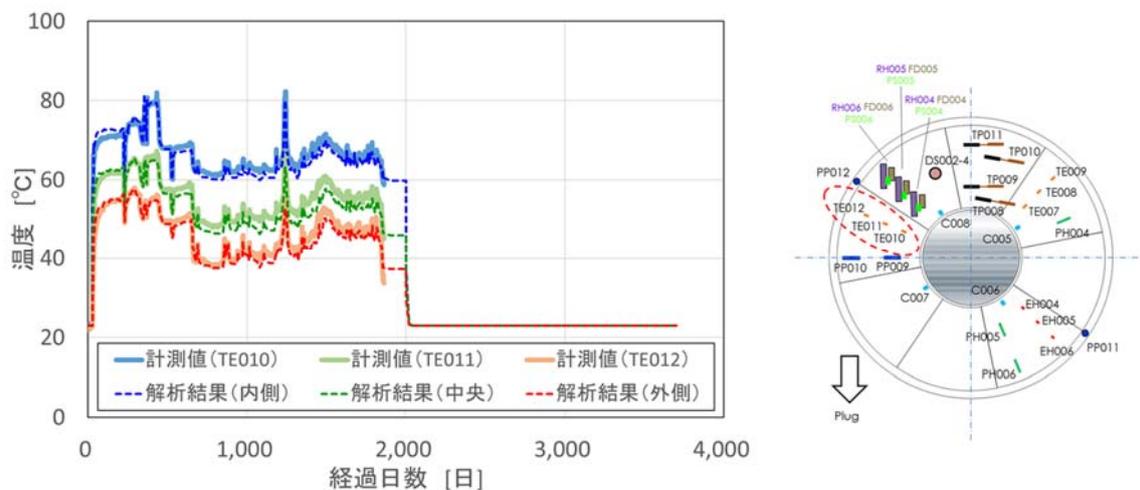


図 61 緩衝材内部の温度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定）

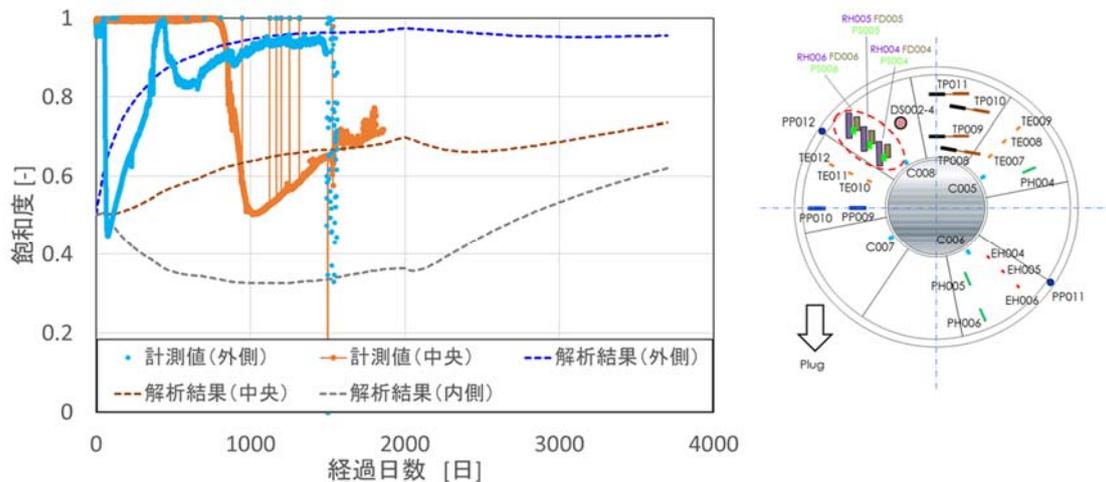


図 62 緩衝材内部の水分飽和度解析結果と計測値の比較（2000 日から減熱試験を仮定）

4.1.2 オーバーパック腐食試験

深度350m調査坑道の試験坑道3におけるオーバーパック腐食試験は、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^{*38}や腐食モニタリング手法の適用性を確認することを目的として実施するものです。本試験では、オーバーパックの耐食性を中心に、コンクリート支保の影響についても検討するため、実物よりも縮小した模擬オーバーパックおよび緩衝材を低アルカリ性のコンクリート材料の中に設置し（図 63）、平成26年度に加熱・注水と腐食モニタリング等の計測を開始しました。試験では、緩衝材の下から2段目、6段目、10段目に設置した炭素鋼腐食センサーにより交流^{*39}インピーダンス^{*40}を測定し、腐食の速度などを評価します。また、計測終了後に試験体を回収し、模擬オーバーパックの表面の実際の腐食状況や緩衝材への地下水の浸潤状況などを確認します。

*38：金属の腐食（さび）に対する抵抗性のことです。耐食性の高い合金として、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。

*39：電流には、直流と交流があり、交流は電流の流れる向きが周期的に変化している電流のことです。

*40：インピーダンス (Z) とは、電気回路のうち、交流回路における電圧 (V) と電流 (I) の比で表される値で、単位は Ω (オーム) です。直流回路における抵抗に相当します。

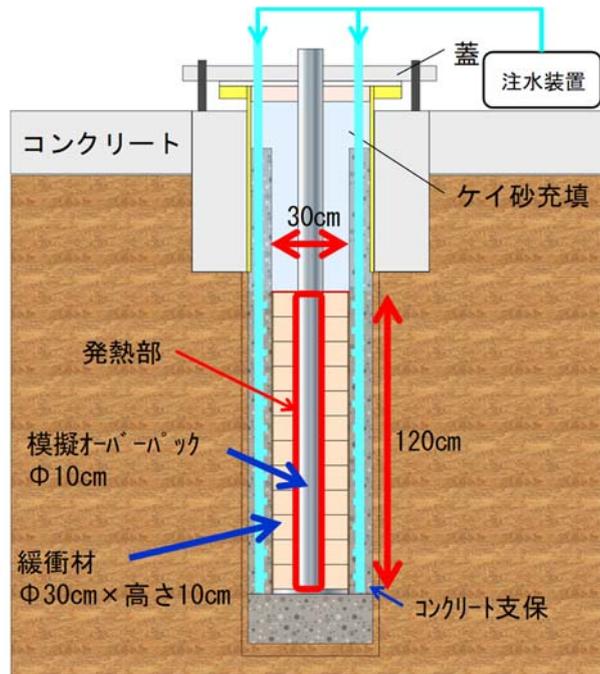


図 63 オーバーパック腐食試験の概念図

令和元年度は、平成 30 年 5 月に計測を終了して回収した腐食センサーについて、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成 31 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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、センサーに埋め込まれた炭素鋼電極（模擬オーバーパックと同じ材料で製作）に生じた腐食生成物の分析を実施しました。腐食センサーは模擬オーバーパック近傍の緩衝材中に設置されていたため、模擬オーバーパックと類似した環境で腐食が進展していたものとして扱うことができます。図 64 に腐食センサー内の炭素鋼電極の外観写真とスケッチを示します。炭素鋼電極表面の腐食生成物は一様ではなく、色調や凹凸具合など場所によって異なっていることから環境条件や腐食の進展も一様ではないことが推察されます。炭素鋼電極表面を X 線回折により分析すると、図 65 に示すようにシデライト（ FeCO_3 ：菱鉄鉱と呼ばれる炭酸塩鉱物）のピークが確認されました。これは平成 30 年度に実施した模擬オーバーパック表面の腐食生成物の X 線回折結果と整合します。X 線回折に加えて、図 64（右）のスケッチ中に示した A～E の各部分でラマン分光法^{*41}による分析を行いました。

*41：ラマン分光法：物質に光を入射すると、光は分子と衝突して一部は散乱します。その散乱した光には入射した光とは異なる波長の光が含まれています。この散乱した光を読み解くことで物質の構造や種類などを知ることができます。

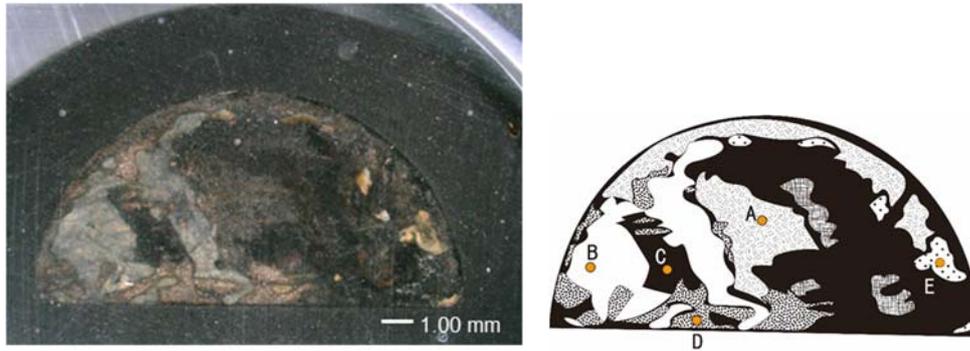


図 64 腐食センサー（6 段目、135°）の炭素鋼電極表面の外観（左）とスケッチ（右）および、顕微ラマン分光分析箇所（右図 A～E）

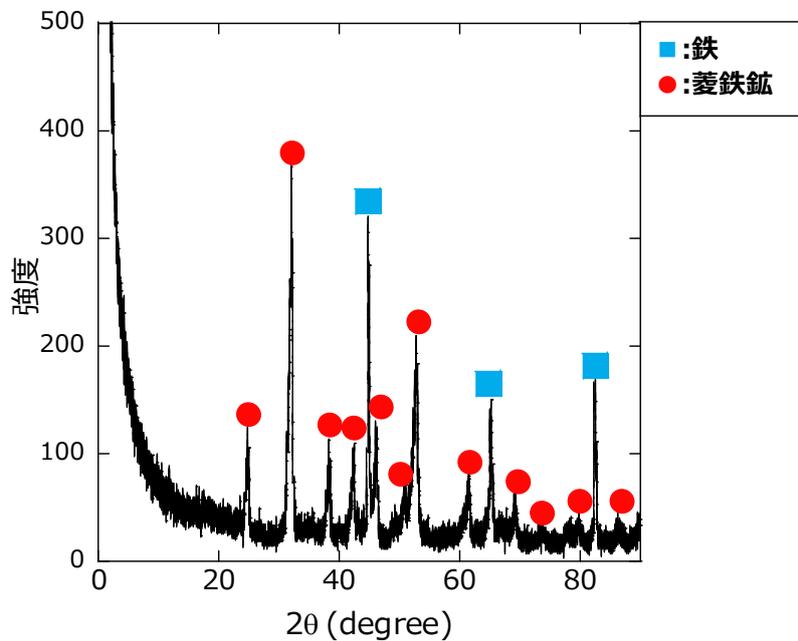


図 65 腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の X 線回折結果

分析では、分析操作中に腐食生成物が大気中の酸素や水分によって変質しないように表面を透明な樹脂で固めてその樹脂を通してレーザー光を照射しました。分析結果の一例としてラマン分光法による分析結果を図 66 に示します。X 線回折で確認されたシデライト (FeCO_3 : 菱鉄鉱と呼ばれる炭酸塩鉱物) に加えて、マグネタイト (Fe_3O_4 : 磁鉄鉱と呼ばれる酸化鉱物) とゲーサイト (FeOOH : 針鉄鉱と呼ばれる水酸化鉱物) とと思われるピークが観察されました。これらのうち、シデライトは酸素濃度の低い

環境で、ゲーサイトは比較的酸素が豊富な環境で安定な腐食生成物であることが分かっています。また、マグネタイトはその中間的な条件で安定な腐食生成物です。これらの腐食生成物が同時に確認されたことから、炭素鋼表面は試験開始時の酸化性の状態から低酸素の状態に遷移していったことが示唆されました。平成30年度に腐食センサーを用いた腐食モニタリングの結果として、約250日までは腐食速度が時間とともに低下してそれ以降はほぼ一定となる傾向があることを示しました。この約250日までの腐食速度の変化は酸化性の状態から低酸素濃度の状態への変化に概ね対応しているものと考えられます。

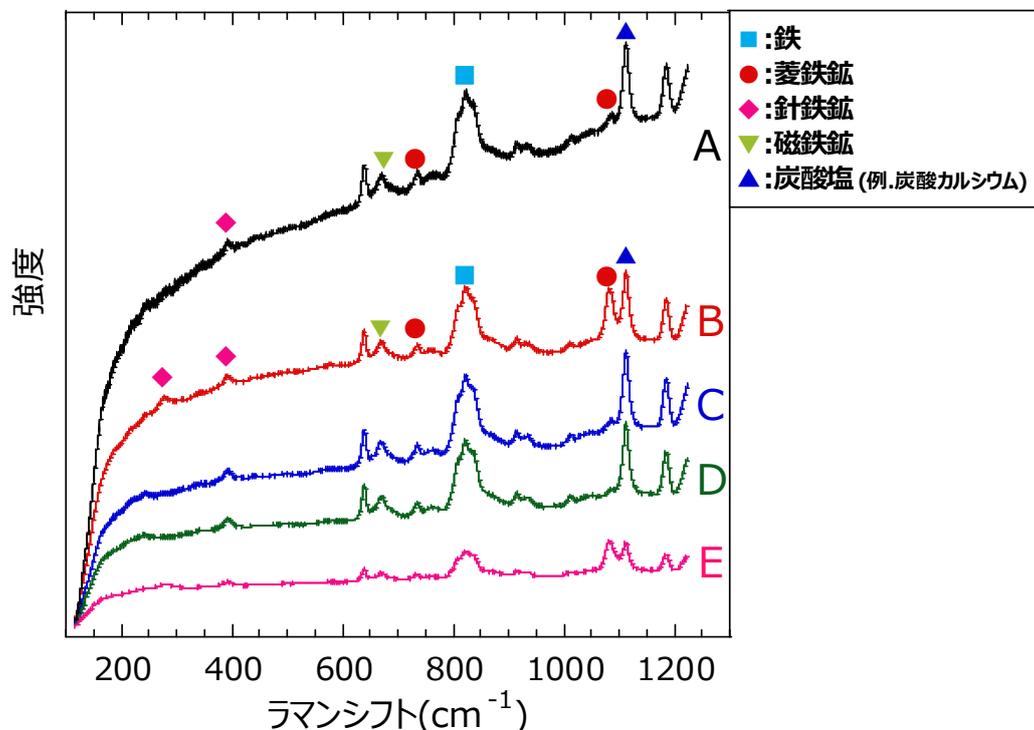


図 66 腐食センサーの炭素鋼電極表面に付着していた腐食生成物の顕微ラマン分光分析結果
(図中 A~E は図 63 右図の記号に対応)

環境条件が変遷した状態では腐食の進展も不均一化しやすく、図 64 に示した炭素鋼電極の観察結果や平成30年度に示した模擬オーバーパックの腐食深さ測定結果からも不均一な腐食の進展が認められています。不均一な腐食では、腐食の進展が確率的にばらつくため、そのばらつきを考慮して最大値を推定する必要があります。そこで、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成31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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発)の一環として、平成30年度に得られた模擬オーバーパックの腐食深さ測定データを活用して統計的な解析を行い、今回のオーバーパック腐食試験の環境条件を想定した場合の実際のオーバーパックで推定される不均一な腐食による最大腐食深さの推定を試みました。図67に示すように平成30年度に得られた模擬オーバーパックの腐食深さ分布から下段部の約1/3の領域で腐食量が比較的大きかったことから(最大約0.09 mm)、まず全体を上段、中断、下段の3領域に分割しました。次にそれぞれの領域を12区画に分割して各区画の最大腐食深さを抽出しました。この1領域あたり12個のデータを用いて極値統計解析*42と呼ばれる解析手法を用いて実寸大のオーバーパックで観察される最大腐食深さを推定しました。従来、環境条件が酸化性から低酸素濃度条件に変化する期間のオーバーパックの最大腐食深さは、種々の模擬地下水中の室内試験データに基づいて平均腐食深さ(X_m)の関数として経験的な評価式から評価するとともに、幌延の地下水条件を想定した室内試験データの極値統計解析結果との比較等から具体的な地下水条件等に対する評価式の妥当性、保守性を確認してきました⁽³⁴⁾。今回、オーバーパック腐食試験で得られた実際のオーバーパック最大腐食深さの推定値(P_{max})について既往の評価式と比較しました。図68に示すように腐食量の大きかった下段の領域で P_{max} が約0.26 mmと最も大きな値を示していますが、いずれの領域の推定値も従来の評価式を下回ることが確認されました。したがって、今回の工学的規模でのオーバーパック腐食試験において観察された不均一腐食に対しても既往の評価式によって保守的な評価が可能であることが示されました。

*42：極値統計解析：最大値や最小値のデータを対象として統計的な性質を調べたり、予測する手法です。腐食の分野では、例えば小面積の区画から得られた最大腐食データから大きな面積の装置や構造物等の最大腐食深さを推定する場合などに用いられます。

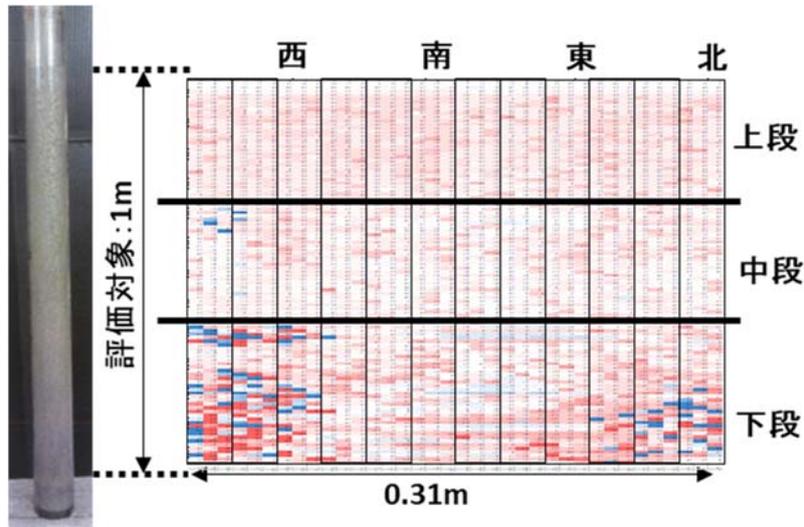


図 67 模擬オーバーパックスの腐食深さ分布の展開図（赤色ほど腐食量大）と極値統計解析における領域、区画の分割

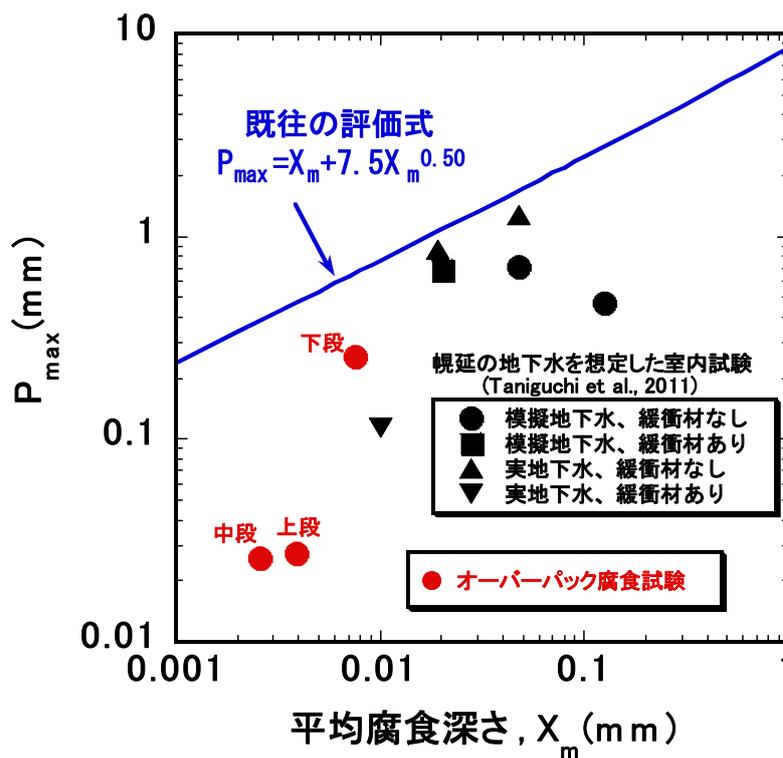


図 68 オーバーパックス腐食試験データの極値統計解析に基づく実際のオーバーパックスの最大腐食深さ推定値と既往の評価式の比較（図中には幌延の地下水を想定した条件での室内試験データもプロット）

4.1.3 搬送定置・回収技術に関する研究

原環センターとの共同研究として、搬送定置・回収技術に関する研究を実施しています。令和元年度は、原環センターが受託した経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成31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：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発）の一環として、地上の施設（地層処分実規模試験施設）において緩衝材定置試験および緩衝材中に水が浸潤して隙間が閉塞される過程を観察できる可視化装置を用いた浸潤試験を継続し、その様子を公開しました。また、深度350m調査坑道にて、模擬PEM（Prefabricated Engineered barrier system Module）*43の回収技術の実証試験を行いました⁽³⁵⁾。

(1) 緩衝材定置装置の運転公開

緩衝材定置試験設備を使用した緩衝材定置試験を実施しました。なお、この試験は「おもしろ科学館2019 in ほろのべ」（令和元年7月開催）で一般公開しました（写真 1）。令和元年度は緩衝材定置装置に設置されている状態監視用カメラの映像を、プロジェクターを用いてスクリーンに投影し、試験装置の機能・役割、緩衝材の定置方法等の説明を行いながら、緩衝材の定置動作を公開しました。



写真 1 緩衝材定置試験の公開の様子

(2) 緩衝材の浸潤挙動に関する試験

緩衝材ブロックを積み上げた際にできるブロック同士の隙間については、緩衝材の膨潤特性により、地下水の浸潤に伴い閉塞されます。この過

*43：鋼製容器の中に、人工バリアであるオーバーパックや緩衝材を設置し、一体化したものです。

程の再現・視認を可能とするために可視化試験を行いました。小型の色付き緩衝材ブロックを実際の人工バリアと同じ積み方で透明なアクリル製の試験容器内に組立て、水の浸潤により隙間が閉塞する様子を観察しました（写真 2）。色付き緩衝材ブロックを使用したことで、緩衝材ブロックがほぼ均一に浸潤・膨潤し、隙間を閉塞している様子が観察されました。なお、この試験の様子は地層処分実規模試験施設にて公開しました。

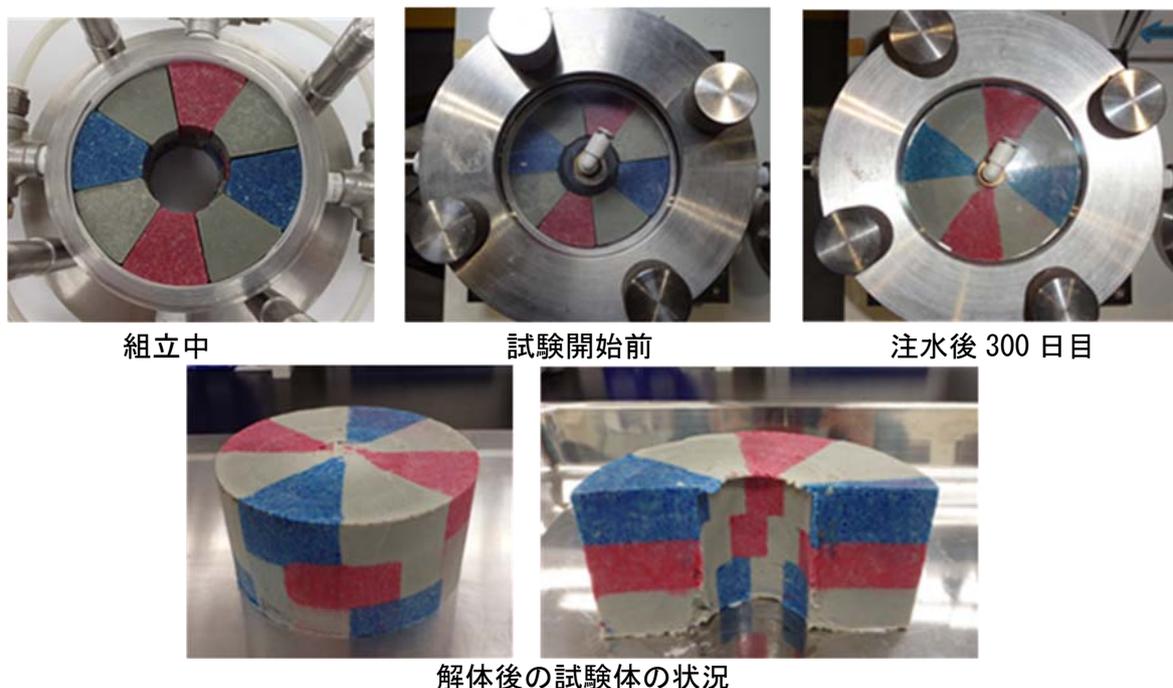


写真 2 緩衝材可視化試験の状況

(3) 地下環境での搬送定置・回収技術に関する研究

原環センターとの共同研究として、処分坑道横置き・PEM方式での地下環境での人工バリアの搬送定置・回収技術に関する研究を継続しました。この試験は、平成26年度までに同センターとの共同研究として実施してきた地層処分実規模試験施設を活用した工学技術に関する研究で計画していたものです⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾。

令和元年度は、深度350m調査坑道の試験坑道2において模擬PEM^{*44}の回収技術の実証試験を行いました。模擬PEMは平成30年度に実施した充填試験により、粘土系材料の充填材で埋められた状態になっています。模擬

*44：本試験で用いる模擬PEMは、緩衝材などの人工バリアを封入せず、実物と寸法（直径約2.5m、長さ約3.5m）および重量（約36t）を模擬したものを使用しています。

PEMの回収試験は、充填材を除去する技術および模擬PEMを定置場所から引き出す技術の2つを対象として順次試験を行いました。充填材の除去は模擬PEMに損傷を与えないことを前提に、その距離に応じて機械的除去技術と流体的除去技術を組み合わせて行いました。

模擬PEMから離れた部分の充填材の除去には、機械的除去技術であるオーガ方式を採用しました。これは充填材を回転する刃で削りながら、吸引機(大型の掃除機のようなもの)で連続的に取り除くものです(写真3)。

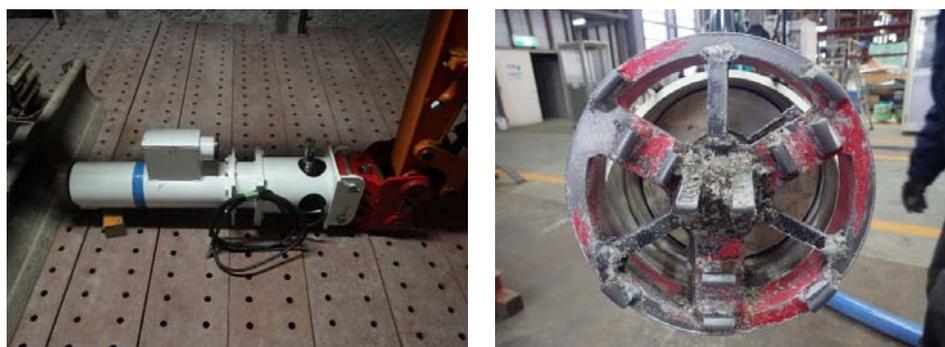
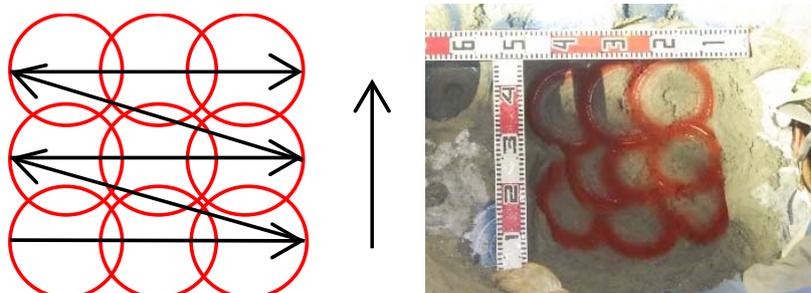


写真3 オーガ方式の除去装置の外観

この装置を用いて除去した充填部の例を写真4に示します。この装置では充填材を直径20 cm、深さ約30 cmの円柱型にくり抜くことができます。くり抜く順序を変えながら切削や吸引のし易さを調べました。また、吸引機により削った充填材を捕集できることを確認しました(写真5)。

除去技術の適用性やより効率よく除去する装置の開発に資するデータを取得するとともに、更なる効率化に向けて、充填材の含水比の変化が切削や吸引に与える影響についてのデータの拡充など、今後の高度化のポイントなどを確認しました。



下段(左→右)⇒中層(左→右)⇒上段(左→右)の場合

写真4 オーガ方式で除去した充填部の様子



写真 5 吸引機の外観と、捕集した充填材

模擬PEM近傍の充填材の除去には、模擬PEMへの物理的な影響が少ないと考えられる流体的除去技術であるウォータジェット方式を採用しました。これは高圧の水で充填材を削り、スラリー状になったものを吸引機で連続的に取り除くものです。写真 6に示す試験装置は高圧水を噴射するノズルと、ノズルを円筒形状の模擬PEMの外周に沿って動かす部分から構成されており、ノズルの形状を変えることで水の出方を変えることができます。



写真 6 ウォータジェット方式の装置とノズル

平成30年度までの試験で取得した作動条件を適用し、模擬PEM下部の充填材の除去試験を行いました。写真 7のように高圧水で隙間の充填材を削り、スラリー化したものを吸引しながら除去しました。トルネードノズル⇒配管洗浄ノズルの順番で行うことで、模擬PEM下部の充填材を除去できることを確認しました。除去後の坑道面は、模擬PEMの回収作業に使用

するエアベアリング方式の回収装置が走行可能な坑道面の性状（要求される状態）を満足するものとなっています。

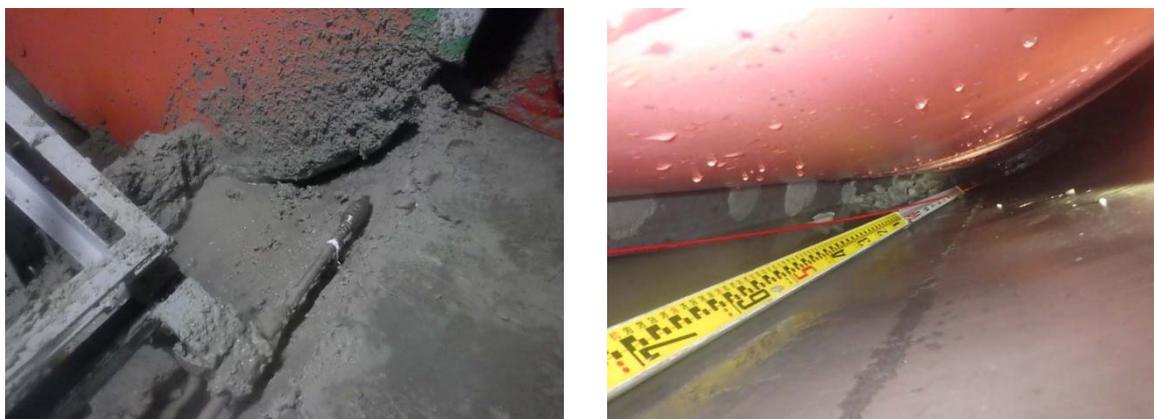


写真 7 除去試験の様子と、除去後の隙間

隙間充填材を除去した後、模擬PEMの回収試験を行いました。回収試験にはエアベアリング方式の搬送定置装置を使用し、平成29年度に試験坑道2での要素試験で取得したデータに基づく設定条件で装置を運転しました。写真 8に模擬PEMの回収試験の様子を示します。実際の地下環境で重量36.5 tの模擬PEMを回収できることを確認しました。



回収前

回収後

写真 8 模擬PEMの回収試験の様子

平成30年度に実施した模擬PEM-坑道間への隙間充填材の施工試験、令和元年度に実施した隙間充填材の除去試験および回収試験を通して、処分坑道横置き・PEM方式の操業に係る技術を実際の地下環境で実規模スケールで実証することができました。これにより、地層処分実規模試験施設

で公開中の処分孔豎置き・ブロック方式に係る技術と合わせ、わが国で有望とされている2つの定置概念に対して、定置から回収までの一連の操業技術の実現性の見通しを得ました。

4.1.4 人工バリアなどの健全性評価に関する研究

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成31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：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、原環センターと協力して緩衝材流出試験を実施しました。

人工バリアの1つである緩衝材の主な成分はベントナイト^{*45}と呼ばれる粘土鉱物です。地下の処分孔に定置された緩衝材は、徐々に地下水が浸潤することにより膨潤します。緩衝材が膨潤することによって、岩盤やオーバーパックと緩衝材の間の隙間が埋められ、地下水の流動を緩慢にする働きが期待されています。一方で、日本の地下環境では、地下施設を建設（坑道の掘削・維持）することによって母岩から湧水が生じることが予想され、そのような環境では、緩衝材を処分孔へ定置した後に、処分孔壁からの湧水により緩衝材と孔壁の境界に水みちが生じ、緩衝材が流出する可能性が指摘されています。

緩衝材の流出挙動は、処分孔周辺の湧水環境（岩盤の透水係数、水圧、湧水量・流速、液種など）が影響します。これまでに緩衝材の流出挙動を把握するための室内試験が行われていますが、実際の地下環境では上記の湧水条件等が複雑に影響し合っています。そのため、実際の地下環境において緩衝材の流出現象を把握するための試験を実施しています。また、これまでの緩衝材流出試験の結果などから、地下水が緩衝材の表面から浸潤し、緩衝材が処分孔との隙間に膨潤していく時に、表面付近の密度が低下し、ゲル状になることが緩衝材の流出が起こる要因の1つとして考えられています。このゲル状になった部分に、孔壁からの湧水の流れ（移流）および湧水の流れに伴うせん断応力（表面を滑らせるように作用する力）が作用することで、緩衝材が持ち去られると考えられます。

このような影響を抑制するための工学的対策の1つとして、緩衝材と岩

*45：ベントナイトは粘土鉱物のスメクタイトと石英などの鉱物から構成され、地層処分における人工バリアシステムに用いる緩衝材の候補材料です。

盤の隙間にケイ砂を充填する方法に着目しました。ケイ砂を充填することで、隙間の体積を減少させ、緩衝材表面の膨潤による体積変化（密度の低下範囲）を抑制し、また、緩衝材周囲のケイ砂を充填した部分全体を湧水の流れる領域とすることで緩衝材表面の湧水の流速（せん断力）を低く抑えることが期待できます。令和元年度は、このような工学的対策の効果を確認するための緩衝材流出試験を行いました。試験装置の概要を図 69 に示します。試験は自然湧水の環境下で行いました。平成30年度に測定した試験孔の湧水量の測定結果では、試験孔天端の水位での湧水量は300 mL/minでした。試験孔天端を上端として緩衝材を模擬した試験体を設置し、流出試験を行いました。試験体の寸法は、現在考えられている緩衝材の約1/4のスケールです。

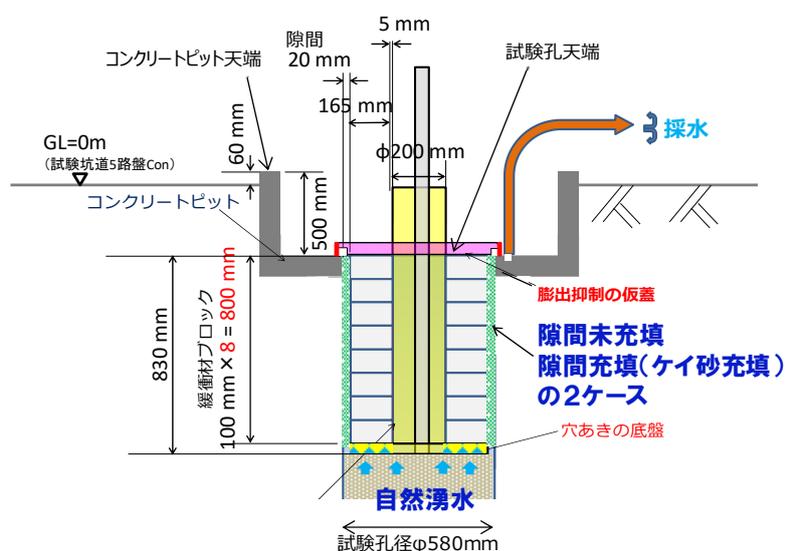


図 69 試験設備の概要

上述した工学的対策（隙間にケイ砂を充填する対策）を施した場合の流出試験と隙間に何も充填しない条件での流出試験の結果と比較しました。結果を図 70と図 71に示します。図 70に示すように、ケイ砂を充填した場合の約30日までの測定結果（図中、●で表示）は未充填の場合（図中、■で表示）に比べると緩衝材の総流出量が少ないことが分かりました。ケイ砂を充填したケースの特徴として、総流出量の変化は試験初期から小さいものの、時間の経過とともに総流出量の変化量がわずかに大きくなる傾向が見られました。一方で、未充填のケースでは、試験の初期に流出

量が急激に増えているものの、試験開始後20日程度を経過すると流出量は徐々に小さくなっていきます。

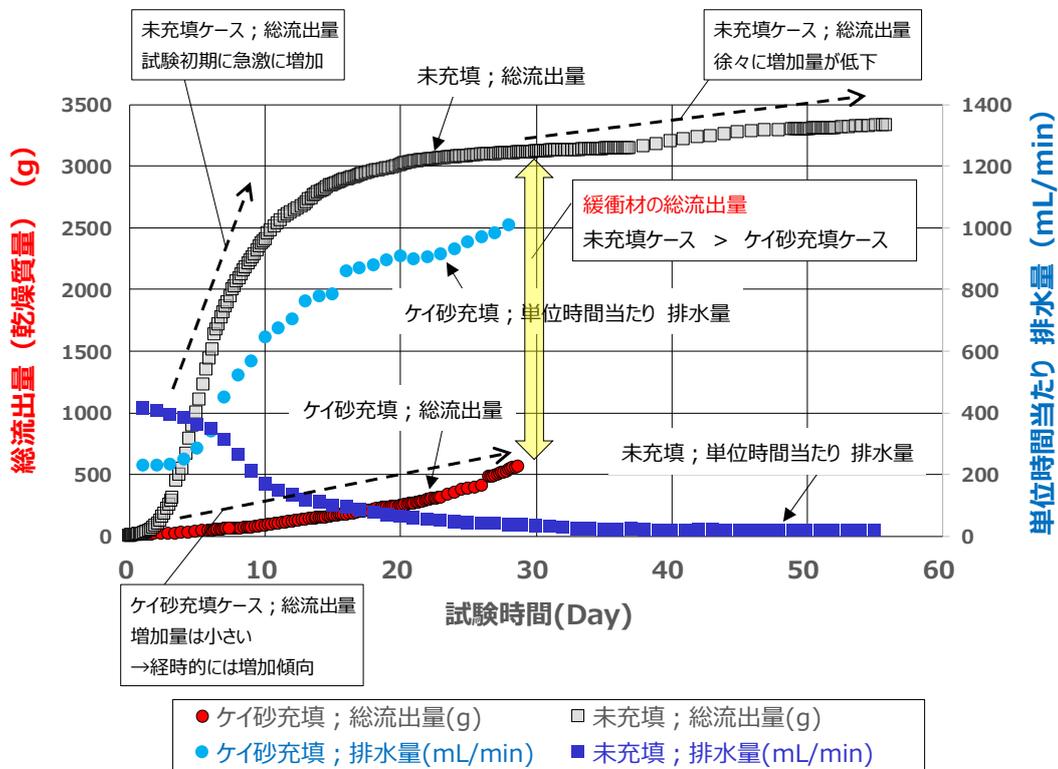


図 70 隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果 (1/2)

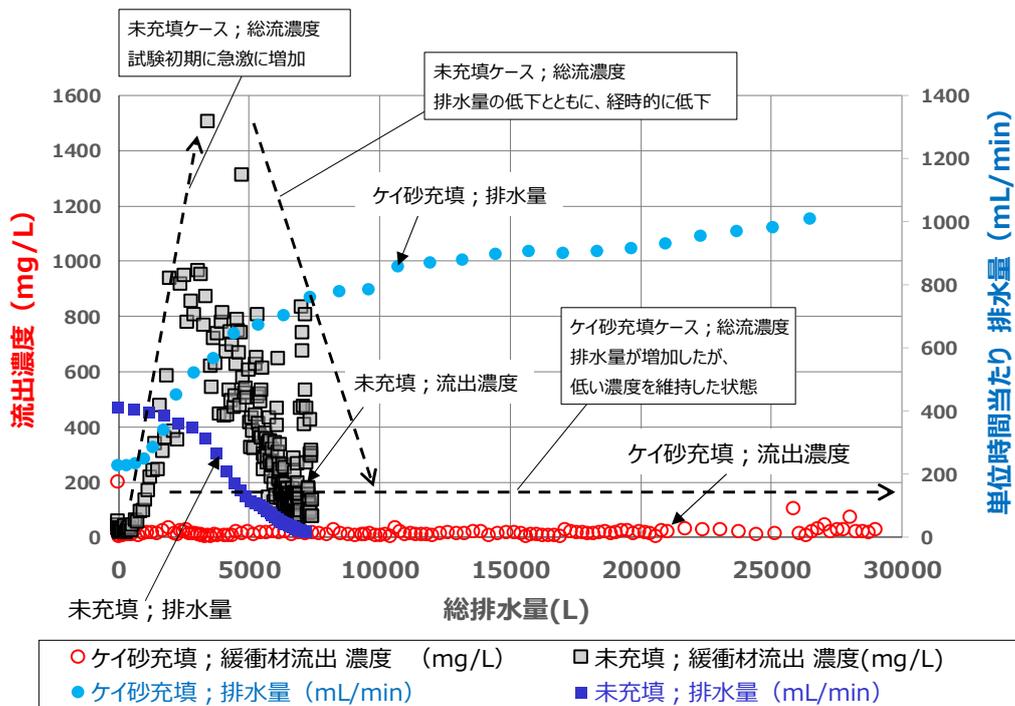


図 71 隙間にケイ砂を充填した場合と未充填の場合の試験結果 (2/2)

上記の試験結果のように、総流出量の経時的な変化の傾向が2つの試験ケースで異なる理由の1つとして、ケイ砂を充填したことによる湧水量の変化が考えられます。未充填のケースでは試験開始時の孔内への湧水の排水量(■)は400 mL/minでしたが、時間の経過とともに徐々に排水量は減少し、試験の後半では、約20 mL/minで一定になりました。これは、緩衝材が膨潤して隙間がシール(閉塞)されたことにより湧水量が少なくなったためと考えられます。しかし、試験期間の終期においても排水が完全に止まることはありませんでした。流出試験の終了後に引き上げた緩衝材の表面の一部には水みちの跡が観察されており、試験体設置から55日程度の試験期間では緩衝材が膨潤してもシールされない部分があったと考えられます。

一方、ケイ砂を充填したケースでは、排水量(●)が時間の経過とともに増加したことに伴い、試験期間の後半において緩衝材の総流出量の変化量がわずかに大きくなったと考えられます。排水量(孔内への湧水量)が増加した原因については特定できていませんが、今回の試験では、ケイ砂の充填により隙間領域を小さくしたため、大きな膨潤圧が発生し、岩盤にひずみが生じたことで湧水量が増加した可能性が考えられます。

図 71に示した総排水量と緩衝材の流出濃度(排水1 L当たりの流出量)の関係から、未充填ケースでは試験開始後に流出濃度が大きく増加し、その後減少しています。これは、上述した通り、時間の経過とともに、緩衝材の表面を流れる水の量とその流速が減ったために、緩衝材表面の削られる量(流出量)が減少したためと考えられます。これに対し、ケイ砂を充填したケースでは、緩衝材の流出濃度は低いレベルで維持されていました。試験期間の後半に緩衝材表面を流れる排水量(緩衝材表面の流速)が増加したにもかかわらず、流出濃度が低い状態を維持したことは、隙間にケイ砂を充填した効果であると考えられます。

令和元年度に実施した地下での流出試験に関する以上のような結果から、緩衝材の流出量を抑制する工学的対策の1つである「隙間へのケイ砂の充填」に関して、その効果を次のように整理することができました。

- ・緩衝材の膨潤領域を小さくし、緩衝材界面の密度が低くなる領域を減らす効果

- ・湧水が緩衝材表面に接触する面積を減らす効果
- ・ケイ砂があることにより、湧水が緩衝材周囲を均等に流れることにより、緩衝材表面の流速（せん断応力）が抑制される効果

令和元年度の試験により、隙間にケイ砂を充填することによる緩衝材の流出抑制対策の効果があることの見通しを得ました。一方で、図 70に示す試験期間30日における両ケースの比較結果から、より長い期間では、緩衝材の総流出量が逆転する可能性も示唆されています。また、上述したように、ケイ砂を充填したケースでは、緩衝材の膨潤に伴って処分孔内の湧水量が変化する可能性があることも分かっています。このような知見は、実際の処分場の作業手順（緩衝材設置後に上部空間が埋め戻されるまでの工期）に応じて、工学的対策を選択するうえでの基盤情報として活用することが期待できます。例えば、工期が短ければ、ケイ砂充填工法を、長ければ未充填工法が緩衝材の流出量の抑制の観点では有利と判断できます。ただし、このような将来の選択に資する基盤情報の整備に向けては、湧水量や緩衝材の流出量が長期的に（処分坑道の埋め戻し後の期間を含めて）どのように推移・変化するかについて、更なる試験をとおして確認していく必要があります。そのため、引き続き多様な条件による地下での流出試験に取り組むとともに、隙間にケイ砂を充填することによる緩衝材流出抑制効果のメカニズムなどを確認するための室内試験を実施してデータや知見を拡充していく予定です。

4.1.5 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発事業：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^{*46}の成立性の確認を目的として、シーリングシステムの劣化などが閉じ込め性能に与える影響の評価や、止水プラグや埋め戻し材の性能を確認するための室内試験および原位置試験を実施しました。

*46：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。

(1) シーリングシステム長期性能評価技術開発

本検討では、国内で想定され得る多様な地質環境条件を考慮した場合に、シーリングシステムの長期的な劣化によってこれらが地表へと直結する卓越した水みちとなることが、地層処分システムの長期安全性へ与える影響を検討してきました。令和元年度は、シーリングシステムに求める安全機能を軸としたシナリオ解析を実施し、埋め戻し部（坑道埋め戻し、プラグ等）やその周辺岩盤が卓越した移行経路となる可能性のあるシナリオを設定（図 72）しました。また、設定したシナリオが処分システムに及ぼす影響を物質移行解析等により評価しました。さらに、これら評価結果に基づき、設計・施工および安全評価の観点からのシーリングシステムの性能の考え方を整理しました。

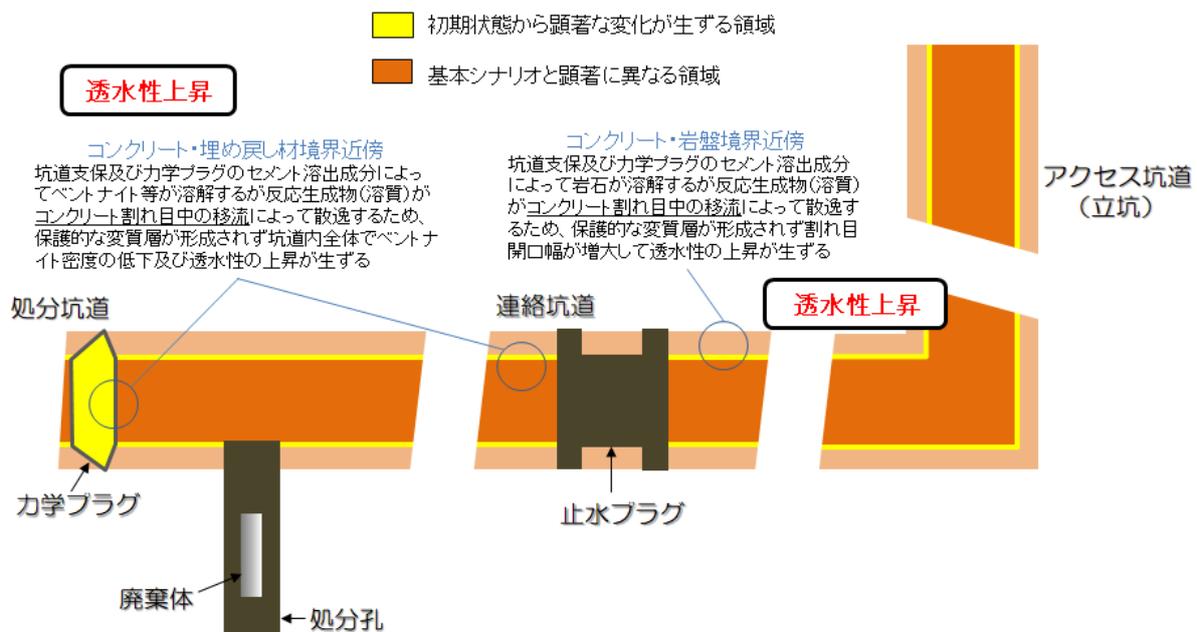


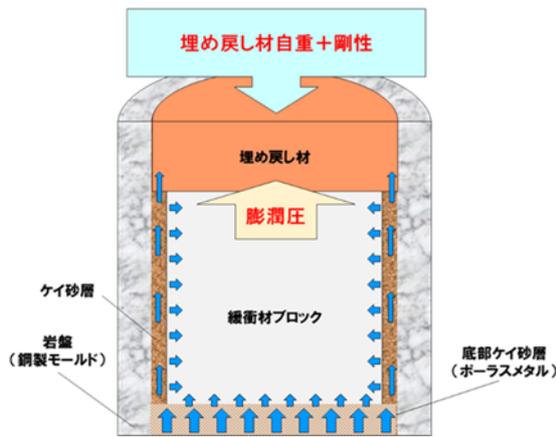
図 72 坑道が卓越した移行経路となり得るシナリオ例（セメント影響による劣化・変質）

設定したシナリオに対し、処分孔、処分坑道およびアクセス坑道をモデル化した物質移行解析を実施した結果、コンクリート材料の劣化・変質を想定したシナリオ（コンクリートの溶出成分によってベントナイトが溶解するが、この時生じる反応生成物（二次鉱物等）がコンクリート割れ目の間隙およびコンクリート-埋め戻し材界面に生じる間隙中の移流によって散逸することにより、ベントナイトの溶解が進展）では、粒子の配置

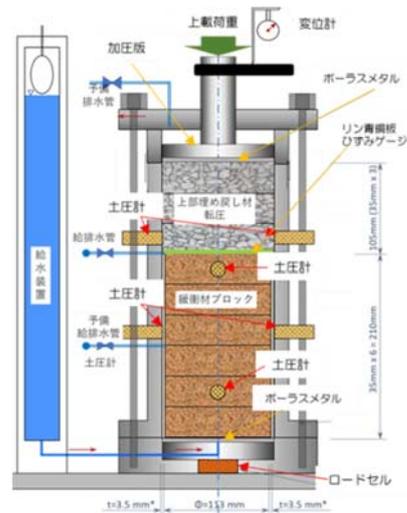
した位置に応じてその挙動は異なるものの、ほぼすべての粒子が処分孔あるいは処分坑道に交差する割れ目へ進入することから、劣化・変質した坑道が地上まで直結するような卓越した移行経路にはならない可能性が示唆されました。一方で、主に埋め戻し材の施工不良（特に坑道上部の隙間）に伴い、埋め戻し材とコンクリート支保間の境界部付近で透水性が上昇すること想定したシナリオでは、処分孔を発した一部の粒子が処分坑道に移行し処分坑道端部まで到達し得る可能性が示唆されました。ただし、このようなシナリオが仮に生起することを想定した場合においても、低アルカリ性セメントを使用することによる埋め戻し材－コンクリート相互作用による変質抑制対策や、アクセス坑道の集中配置、ならびに地下施設周辺の地下水流動と直交する方向に処分坑道を配置等の対策が、坑道が地上へと直結するような卓越した移行経路となることを回避する上で有効となり得る可能性があることが分かりました。

(2) 膨潤挙動相互作用試験

人工バリアの概念の1つである処分孔堅置き方式では、処分孔に定置した緩衝材が地下水を吸収して処分坑道側へ膨出し、その有効粘土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することにより埋め戻します。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 73(a)）。膨潤挙動相互作用試験では、緩衝材の埋め戻し材側への膨出挙動の評価手法を整備することを目的として、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組み合わせた縮尺模型（図 73(b)）を用いた試験を実施しました。



(a) 緩衝材の埋め戻し材の相互作用の整理



(b) 縮尺模型の概要図

図 73 縮尺模型試験の概念図

人工バリア性能確認試験の状況を模擬するために、縮尺模型試験では緩衝材の底部に設置したポーラスメタルから注水し、ケイ砂層を通じて緩衝材の外周から均等に浸潤させました。また、試験容器上部に設置した加圧版を介して埋め戻し材の上部から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膨出変形量は試験装置頂部に設置した外部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ロードセルにより膨潤圧を計測するとともに、緩衝材と埋め戻し材の境界面にはリン青銅板やひずみゲージを設置して境界面付近の緩衝材の膨出挙動の把握を試みました。63日間注水を継続した結果を図 74に示します。緩衝材の膨出量は、外部変位計により計測した変位量を試験開始時の緩衝材の供試体の高さで除した膨潤変形率として評価しました。注水量の経時変化をみると試験開始後20000分(約14日)ごろから注水量は緩やかに増加する傾向となり、40000分(約28日)ごろから試験終了までは注水量はほとんど変動していません。また、膨潤変形率については、30日を過ぎたあたりから変化が緩やかになり57600分(40日)ごろからはほとんど変動しませんでした。緩衝材と埋め戻し材の境界面における膨潤変形挙動計測の一例として、リン青銅板の計測結果を図 75に示します。図 75(b)の横軸は、各計測位置を供試体の中心を原点とした時の計測位置までの距離で示しています。縦軸の鉛直方向の変形

量は、リン青銅板の一番低い場所を基準とした相対的な高さとして示しました。この結果より、緩衝材の外周部が中心部に比べて上方へ大きく変形しており、最大で3 mmの差が生じていることが確認できました。これは、水の浸潤により外周部から先に上方へと膨潤したためと考えられます。さらに、試験終了後には緩衝材の部分を高さ方向と直径方向にサンプリングを行い含水比を計測しました。その結果、高さ方向については緩衝材の中央部において、埋め戻し材との境界面に近い上部の含水比が高くなっていることが確認できました。水平方向については注水のために設けたケイ砂層と接している緩衝材外周部で含水比が高い一方で、中央部では含水比が低くなっていました。サンプリングした試料の割れなどの影響により体積の測定が困難であり飽和度を算出することはできませんでしたが、含水比の値が不均質に分布していることから浸潤過程の途中であり緩衝材は飽和に達していないと考えられます。以上の試験結果より、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用下における飽和に至る途中までの緩衝材の膨出挙動を概略的に把握することができました。今後も、新たな縮尺模型試験を実施し、引き続き埋め戻し材のもつ緩衝材の膨出抑制機能の評価方法を整備していく予定です。

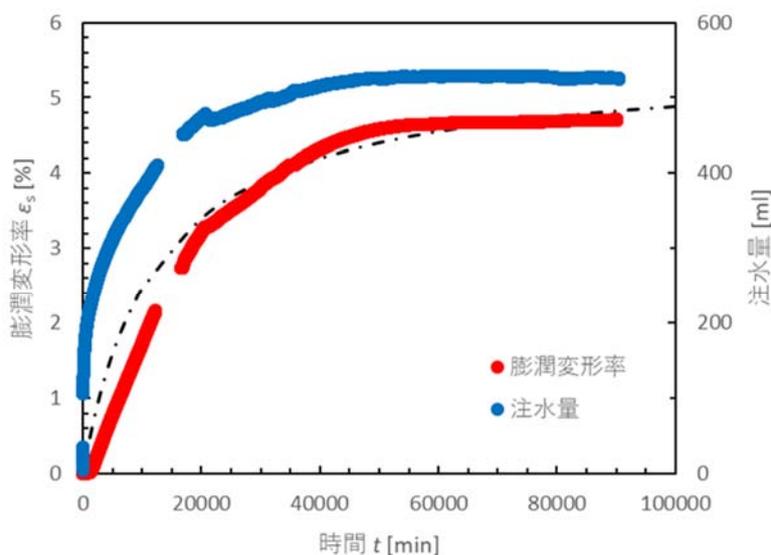


図 74 縮尺模型試験における膨潤変形率と注水量の経時変化（図中の破線は計測値を双曲線関数で近似した値をプロット）