

図 70 EDZの割れ目で計測された開口幅とせん断変位量の関係

7. 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

令和2年度以降、人工バリア性能確認試験や物質移行試験などの処分システムの設計・施工や安全評価に関わる基礎情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや岩石の鉱物組成や化学組成、地下水のpHや酸化還元電位^{*44}、化学組成などのデータの取得などについては、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なことから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システムの設計・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることとなります。なお、処分システムの設計・施工手法や安全評価手法の信頼性を確認するために必要となるデータが取得できているかを含めて評価することが必要であるため、計測手法の妥当性を確認し、必要に応じて調査技術・機器の改良を行います。

(1) 岩盤の水理

岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行っています。令和2年度は、これまでに得られた水圧観測データの解析を行い、必須の課題「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」における稚内層中の割れ目の水理的連結性に関する検討に供しました（6.1.1参照）。

(2) 地下水と岩石の地球化学

地下施設の建設に伴う坑道周辺の地下水の水質の時間的な変化を把握することを目的として、坑道内で採取した地下水のpHや電気伝導度^{*45}、酸化還元電位などの物理化学パラメータを測定するとともに、採取した地下水の水質を分析し、その変化をモニタリングしています。令和2年度は、令和元年度に引き続き、地下施設の3本の立坑に設置された集水リング^{*46}や140m、250mおよび350m調査坑道から掘削されたボーリング孔などから約40試料の地下水を採取し、水質を分析しました⁽²³⁾。図 71と図 72に、

*44：地下水の酸化還元状態を表します。酸化還元電位が低い地下水ほど、含まれる酸素が少なく還元状態であることを表します。

*45：電気の通しやすさを表す値で、電気伝導度が大きい（電気を通しやすい）ほど地下水に溶けているイオンの量が多いことを表します。

*46：立坑内で、坑壁から染み出した地下水を回収・採取するために、立坑壁面に30～40mごとに設置されている設備です。

集水リングとボーリング孔の位置をそれぞれ示します。図 73に塩化物イオン (Cl⁻) 濃度の分析結果を示します。集水リングから得られた地下水のCl⁻濃度 (図 73(a)～(c)) は、坑道内から掘削されたボーリング孔から得られた地下水のCl⁻濃度 (図 73(d)～(f)) と比べると変化が大きいことが分かります。これは、主に集水リングとボーリング孔とでの地下水の採取方法の違いによるものと考えられます。Cl⁻は反応性に乏しいため、Cl⁻濃度の変化は異なる水質の地下水の混合が生じたことを示していると考えられます。集水リングの試料に見られる変化は、Cl⁻濃度の異なる地下水が立坑を通じて下方に移動し、混合した結果と考えられます。一方で、令和2年度は地下水試料中にトリチウム^{*47}は、ほぼ検出されませんでした。このことから、集水リングの試料に見られる変化は、現在の天水などの地表水が立坑を通じて地下に浸透した結果ではなく、異なる深度の地下水の混合であることが考えられます。

人工バリア性能確認試験が実施されている350m調査坑道の試験坑道4は、平成25年度に掘削され、平成26年度に人工バリアを定置し、坑道の一部を埋め戻したのちに試験が開始されています。平成28年度より試験箇所に対する注水量が増加され、令和元年度は試験坑道4周辺にグラウトが実施されました。しかしながら、試験箇所周辺のボーリング孔 (13-350-C05孔、13-350-C08孔および13-350-C09孔) から得られた地下水のCl⁻濃度については、目立った変化は見られていません (図 73(f))。令和2年度に、試験箇所への注水試料と試験坑道4の壁面からわずかに染み出している地下水 (図 74) の水質を分析した結果、Cl⁻濃度はそれぞれ約4,100 mg/Lと約3,900 mg/Lとなり、ほぼ同じ水質でした。これらの注入水と浸み出している地下水のCl⁻濃度は、試験箇所周辺の地下水とほぼ同じですが、酸素同位体比および水素同位体比がわずかに異なりました。このことから、試験坑道4の壁面からわずかに浸み出している地下水は、試験箇所周辺のボーリング孔で観察されるような地下水ではなく、試験箇所に注入した注入水が主な成分であると考えられます。また、350m調査坑道の他のボーリング孔 (12-P350-M02孔、13-350LGE-M01孔、13-350-C01孔、13-350-C06孔、14-350-C04孔および14-350-GAS01孔) に関しても、令和2年度までCl⁻

^{*47}：質量数が3である水素の放射性同位体です。地球上で実施された過去の核実験の影響などにより環境中に微量に存在しますが、幌延地域の地下深部の地下水のような古い地下水には含まれていません。

濃度の大きな変化は認められていません (図 73(f))。

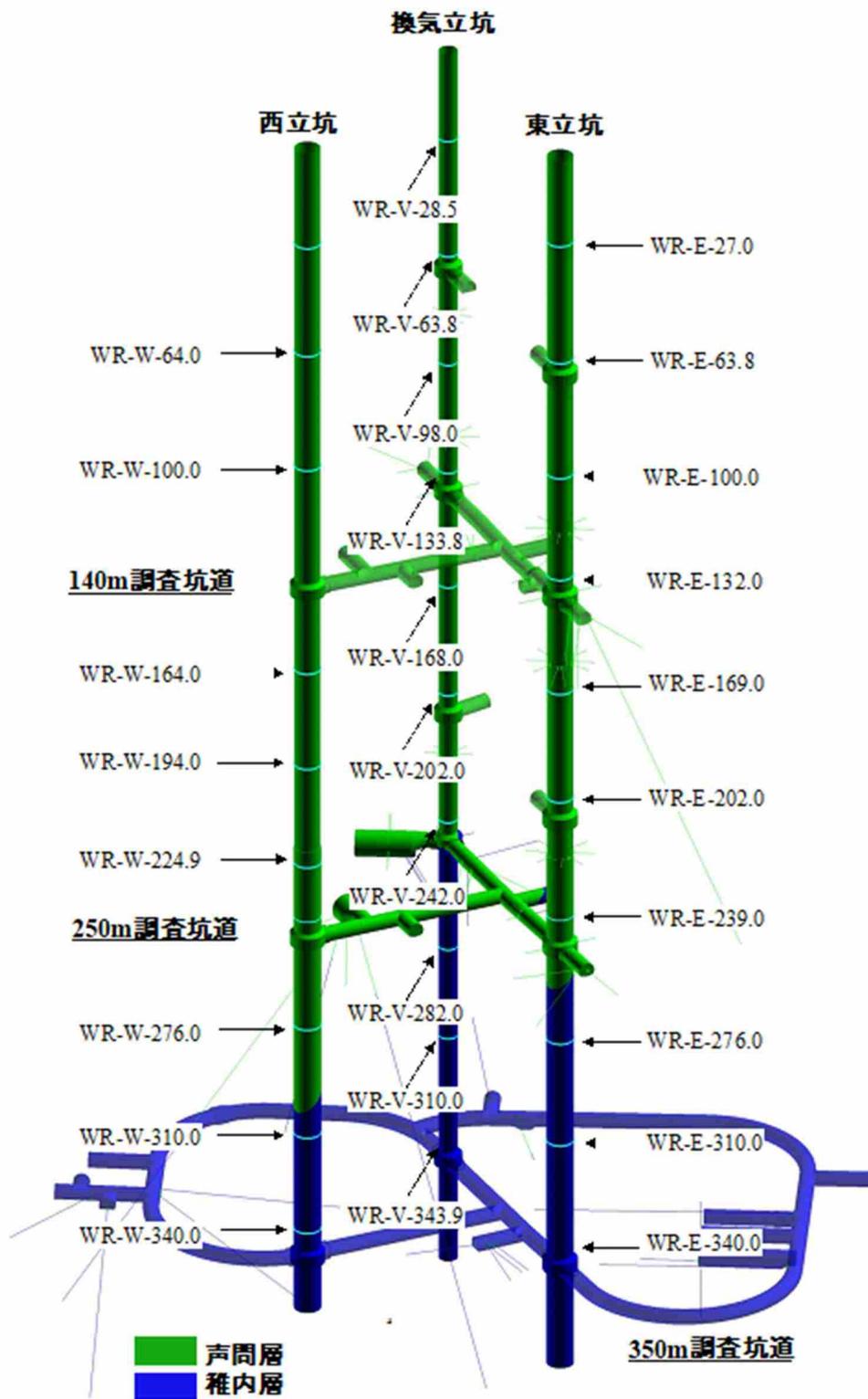


図 71 地下水の採取箇所 (集水リング)

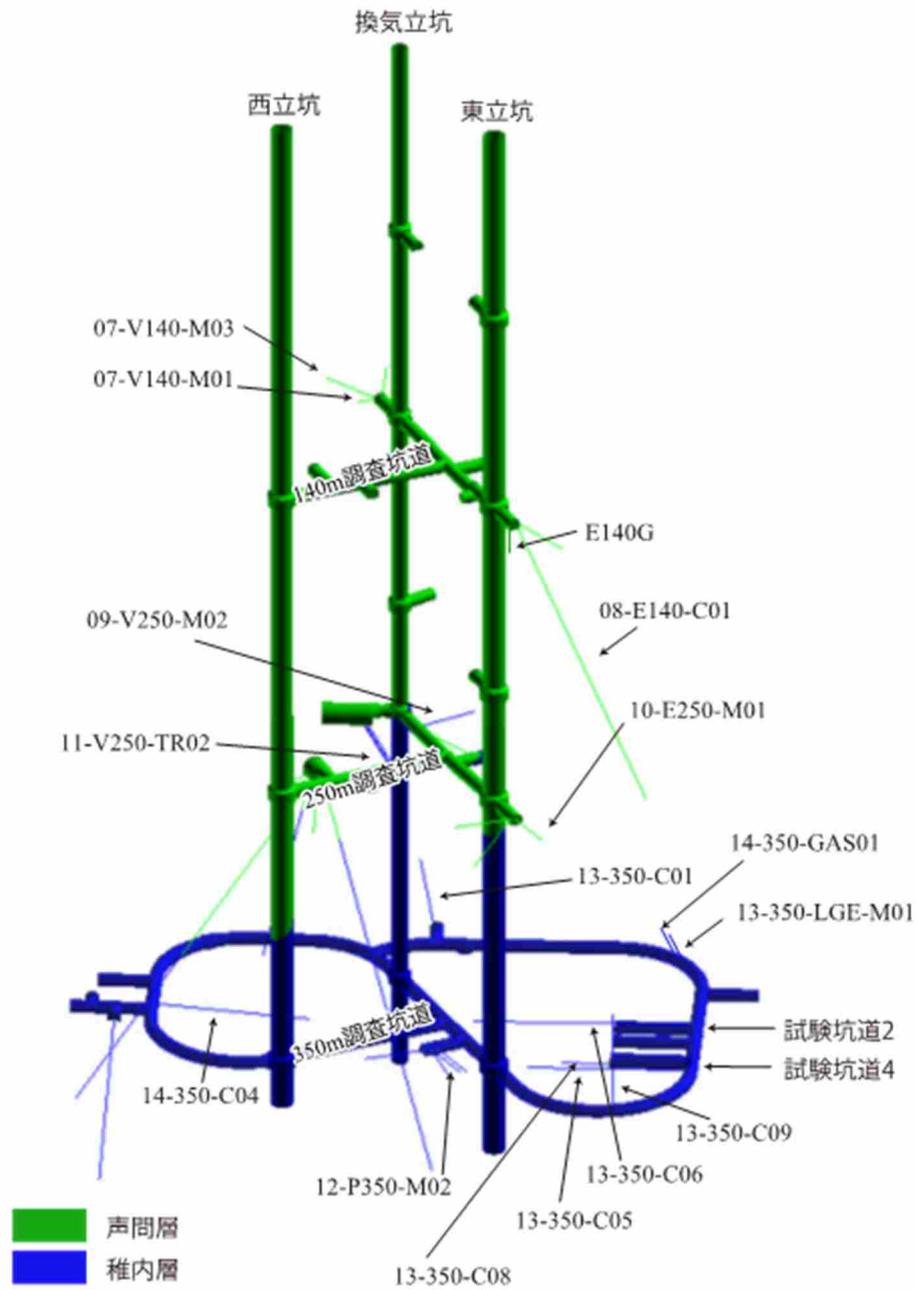


図 72 地下水の採取箇所（ボーリング孔）

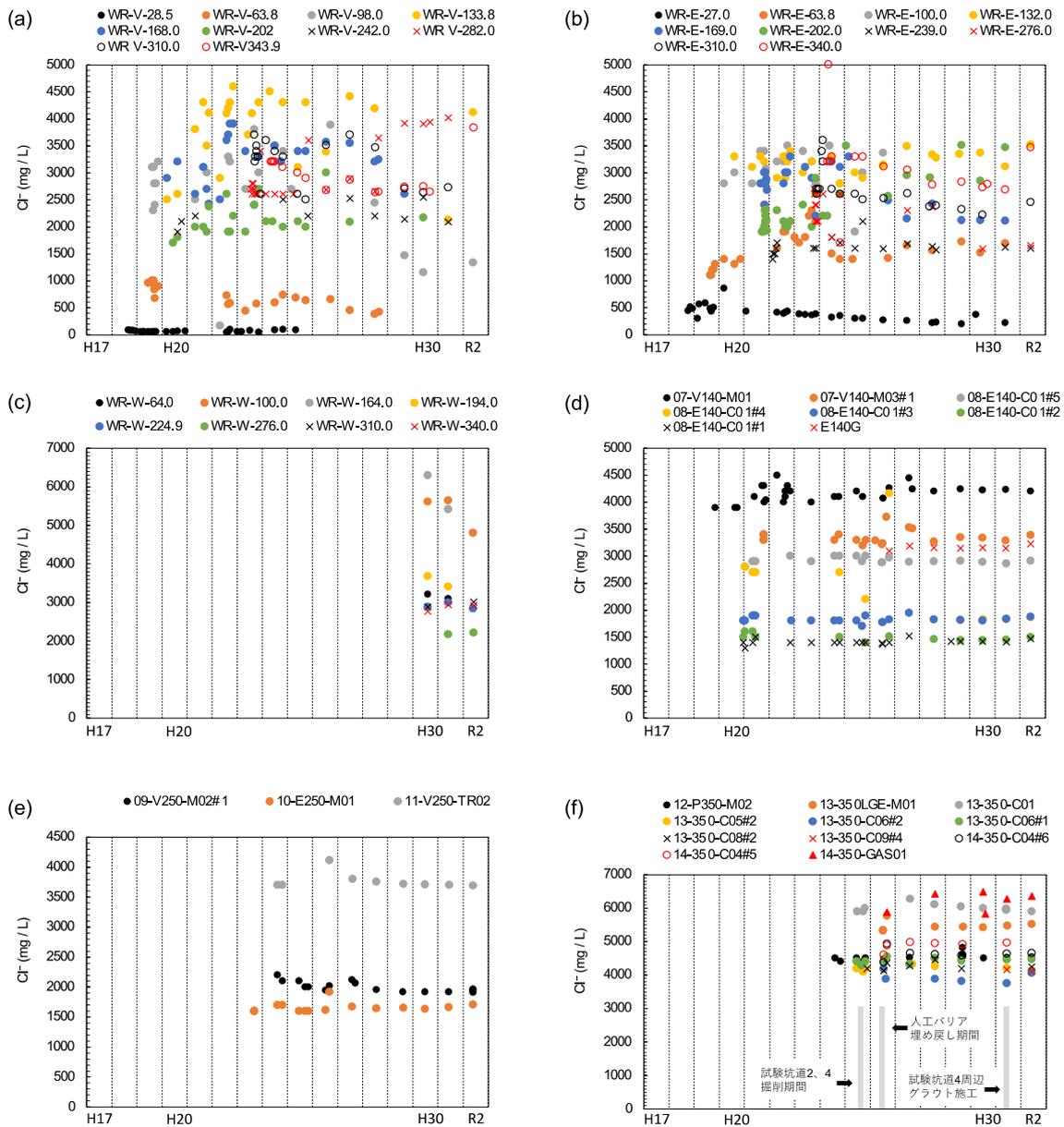


図 73 地下水のCl⁻濃度の経時変化

(a) 立坑の集水リング、(b)は東立坑の集水リング、(c)は西立坑の集水リング、(d)は140m調査坑道から掘削されたボーリング孔、(e)は250m調査坑道から掘削されたボーリング孔、(f)は350m調査坑道から掘削されたボーリング孔の分析結果をそれぞれ示しています。

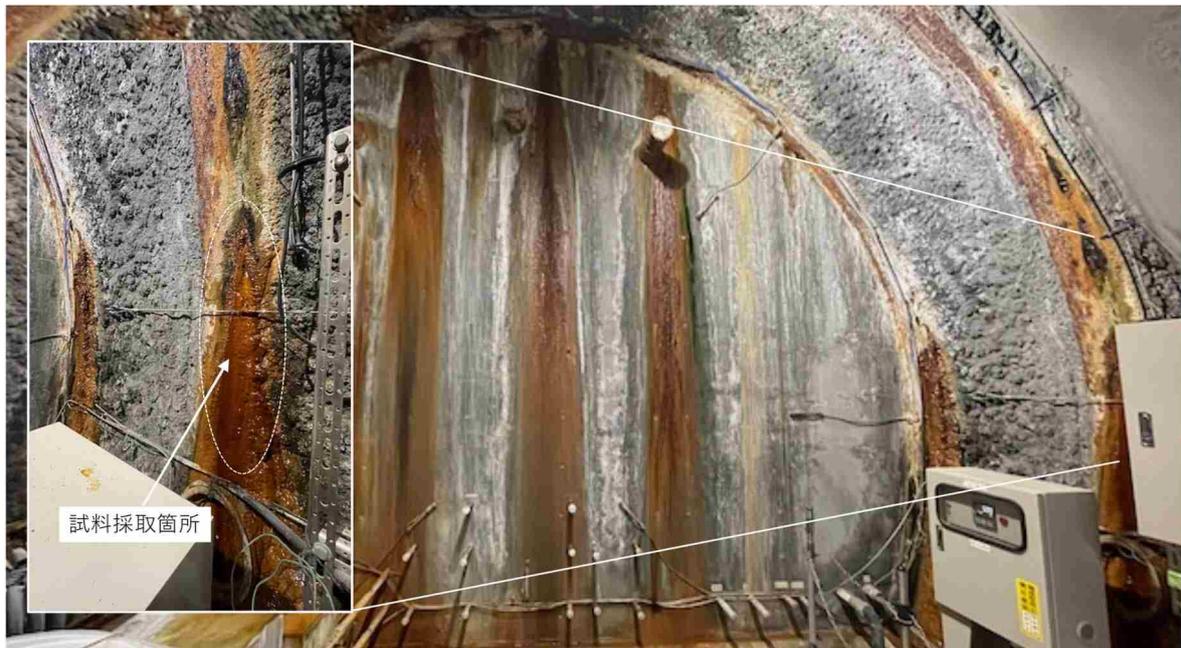


図 74 試験坑道4壁面からの浸出水の採取箇所

試験坑道4の入り口から奥を見て撮影した写真。写真の奥に見えるものは、人工バリア性能確認試験のコンクリートプラグになります。

平成26年度までに350m調査坑道に設置した水圧・水質モニタリング装置を用い、令和2年度もモニタリングを継続しました。装置の設置箇所を図 75に示します。令和元年度に引き続き、令和2年度も試験坑道掘削後の経時変化の把握や観測装置の長期的な性能確認の一環として13-350-C05孔、13-350-C06孔、13-350-C07孔、13-350-C08孔および13-350-C09孔（以下、C05、C06、C07、C08およびC09）の5孔を用い、水圧・水質モニタリングを継続しました。C05、C06、C07、C08およびC09における水圧モニタリングの結果を図 76、図 77、図 78、図 79および図 80にそれぞれ示します。図中での急激な水圧の低下は、採水やメンテナンスの際に孔内のガスや地下水が放出されたことによるものです。試験坑道4では、平成26年度に人工バリア性能確認試験における坑道の一部埋め戻しが行われ、平成27年度に同坑道においてコンクリートプラグ外周の地山に放射状にグラウト注入を行うコンタクトグラウト注入作業が実施されました。坑道の埋め戻し部分を冠水させるため、平成27年1月から人工バリア内への注水が行われており、急激な注水による緩衝材の流出現象などを避けるために、段階的に注水量を増加させています。これに伴い、埋め戻し範囲に位置するC07、C08およびC09のうち、C08（水平孔）およびC09（鉛直下

方孔)の最浅部である区間4において水圧が緩やかに上昇する傾向が確認されています。また、同区間では、人工バリア内への注水量の増加・減少に伴い、令和元年12月に約0.1 MPaの水圧の増加、令和2年7月に約0.1 MPaの水圧の減少が確認されています(図79および図80)。一方、試験坑道4の南側約3 mに位置するC05では、注水量の増加・減少に伴う水圧への影響は確認されていません(図76)。

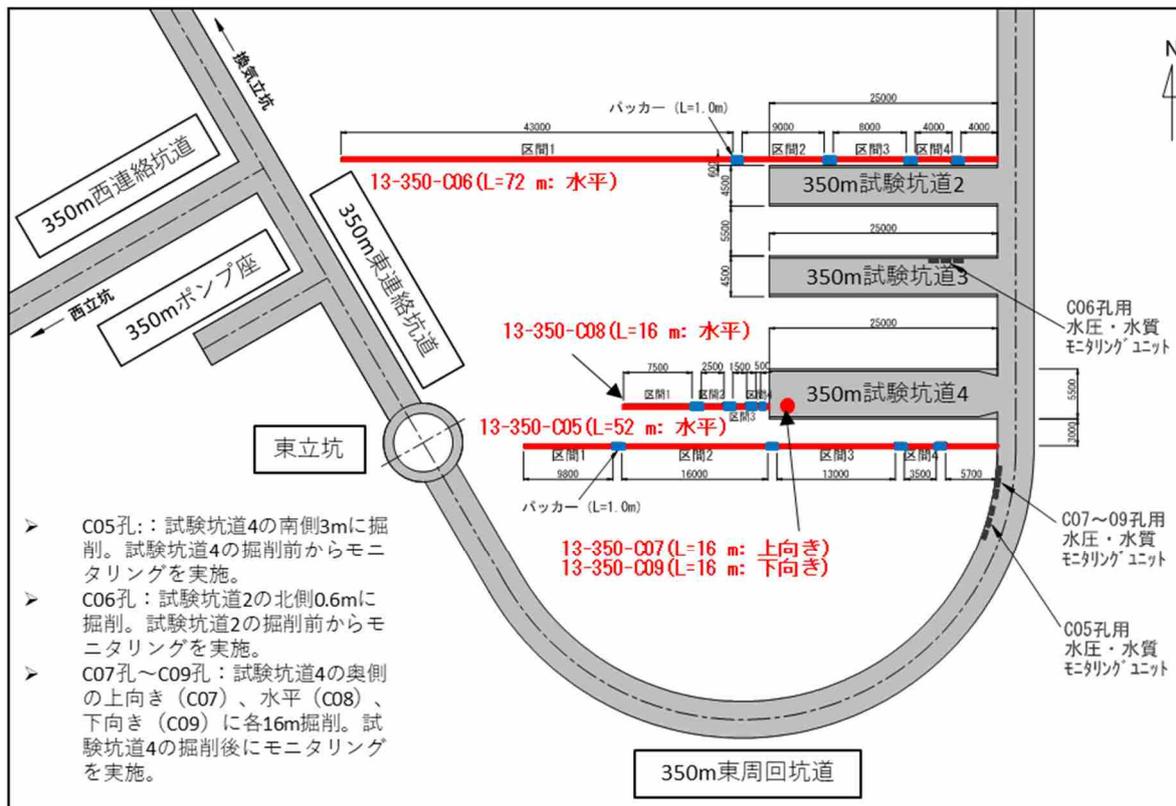


図75 試験坑道2および試験坑道4周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

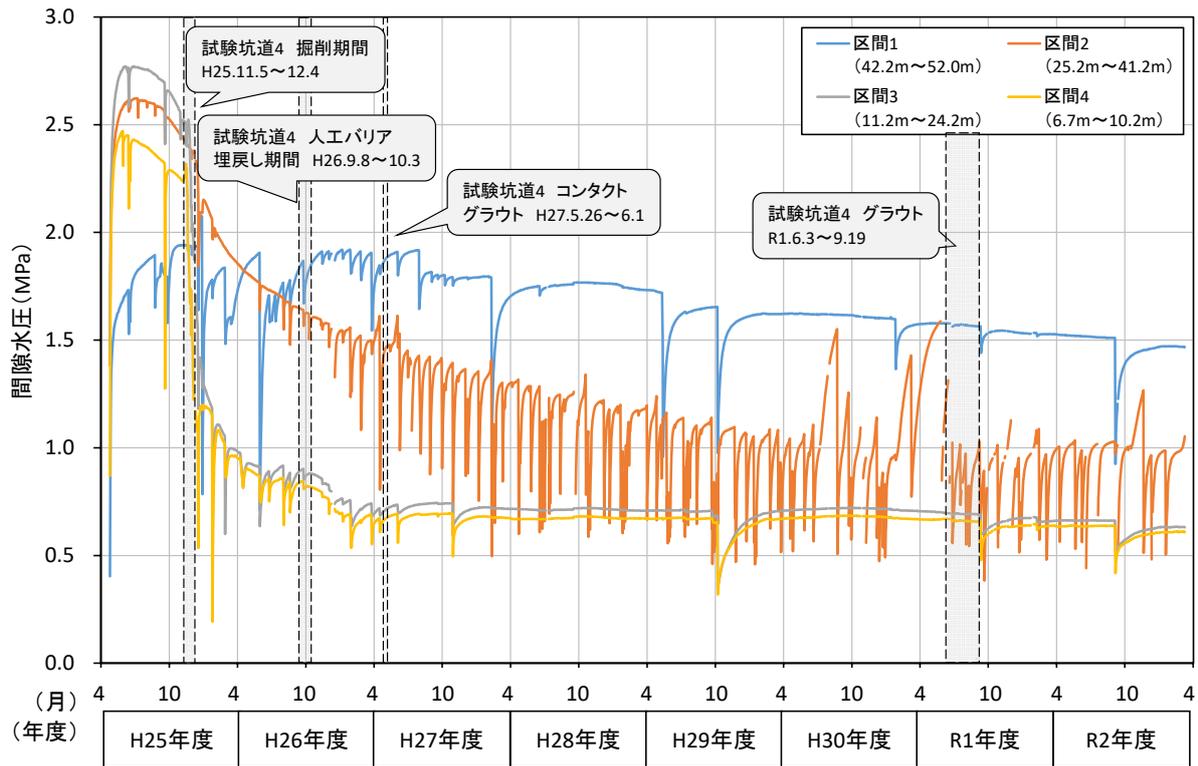


図 76 C05における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

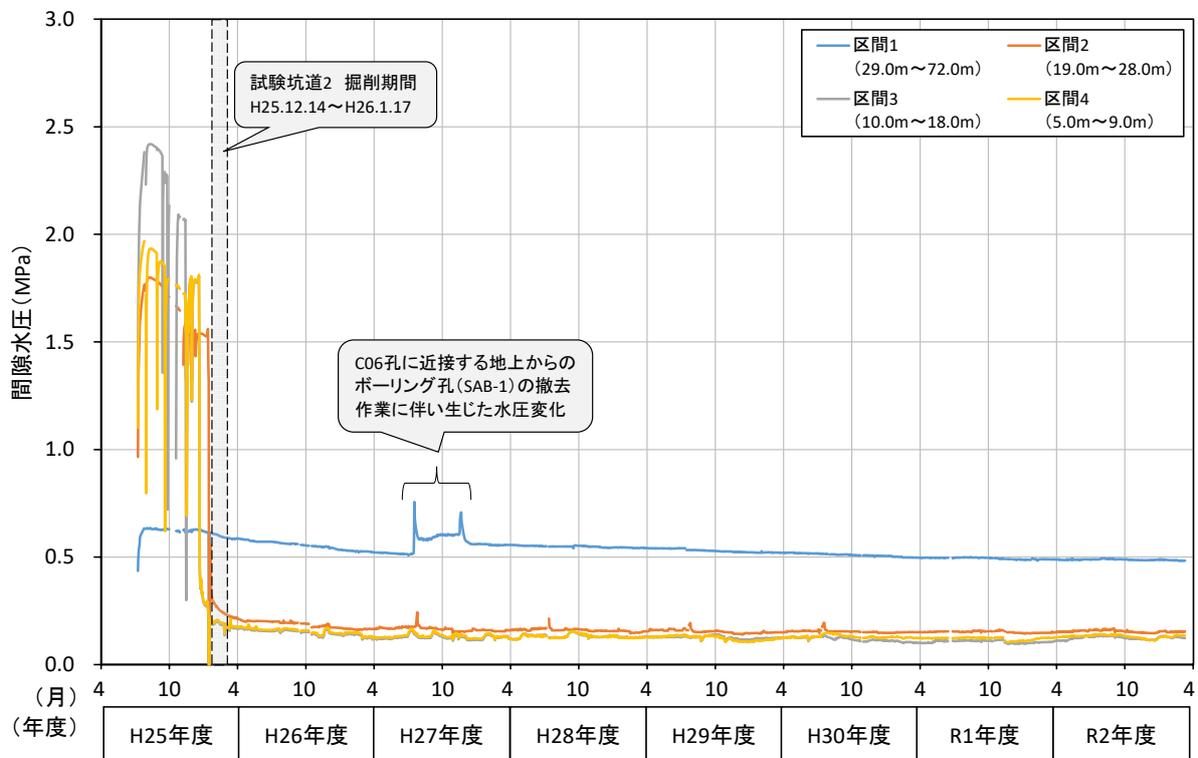


図 77 C06における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

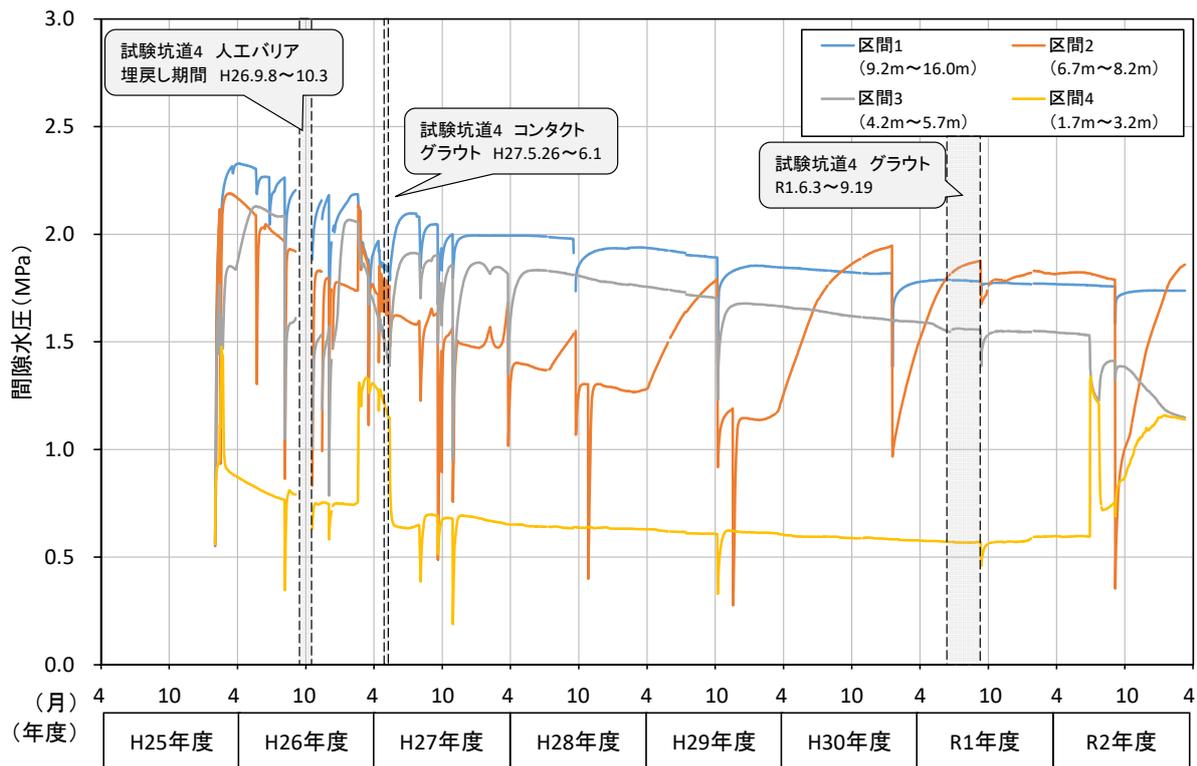


図 78 C07における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

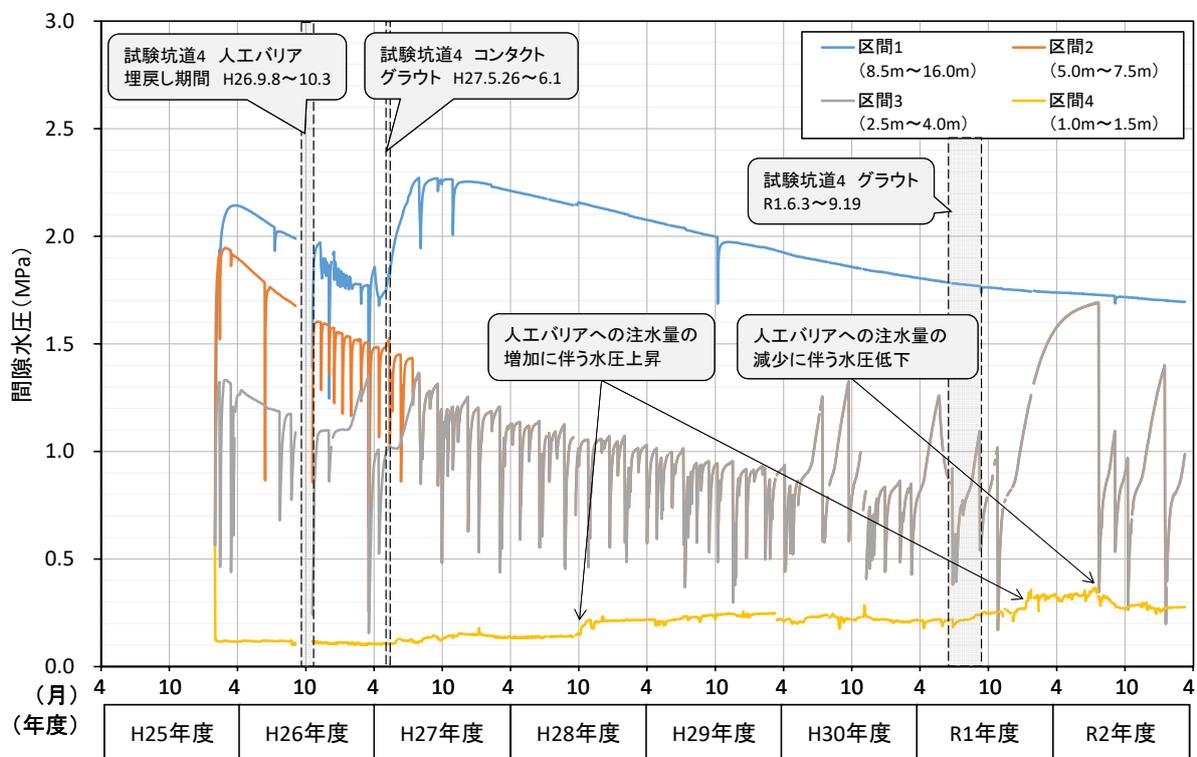


図 79 C08における水圧モニタリング結果
水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

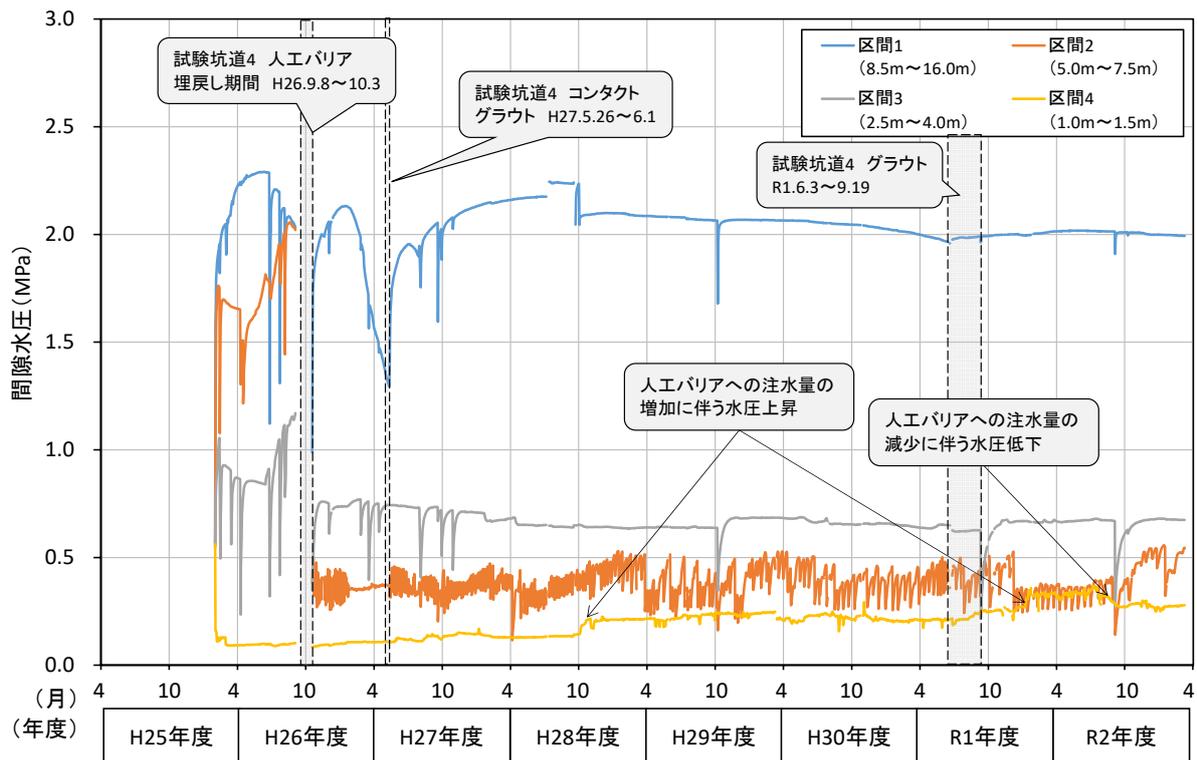


図 80 C09における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

試験坑道の掘削後、水圧の低下に伴い地下水中の溶存ガスが遊離した影響により、水質モニタリングの継続可能な箇所は限定されつつあります(図 81)。図 82には一例として、C05の区間2における電気伝導度(EC)、pH、酸化還元電位(Eh)の観測結果を示します。C05では、地下水のECは1,600 mS/m程度、pHは7程度、Ehは-140 mV~-300 mV程度でした。これらの結果は令和元年度の測定値と概ね同様の傾向を示しており⁽¹⁴⁾、試験坑道周辺に分布する地下水のECやpHには顕著な変化は生じていません。なお、Ehのモニタリング結果においては、一部のデータで電極の劣化や表面への汚れ・気泡の付着、遊離ガスによる地下水循環の停止などの影響が示唆されました。これらのデータは、「信頼性が劣る可能性のあるデータ」として示しています。信頼性の高いデータを取得するために必要な観測装置の定期的なメンテナンス(月1回程度のセンサーの異常有無の確認)も継続して行いました。

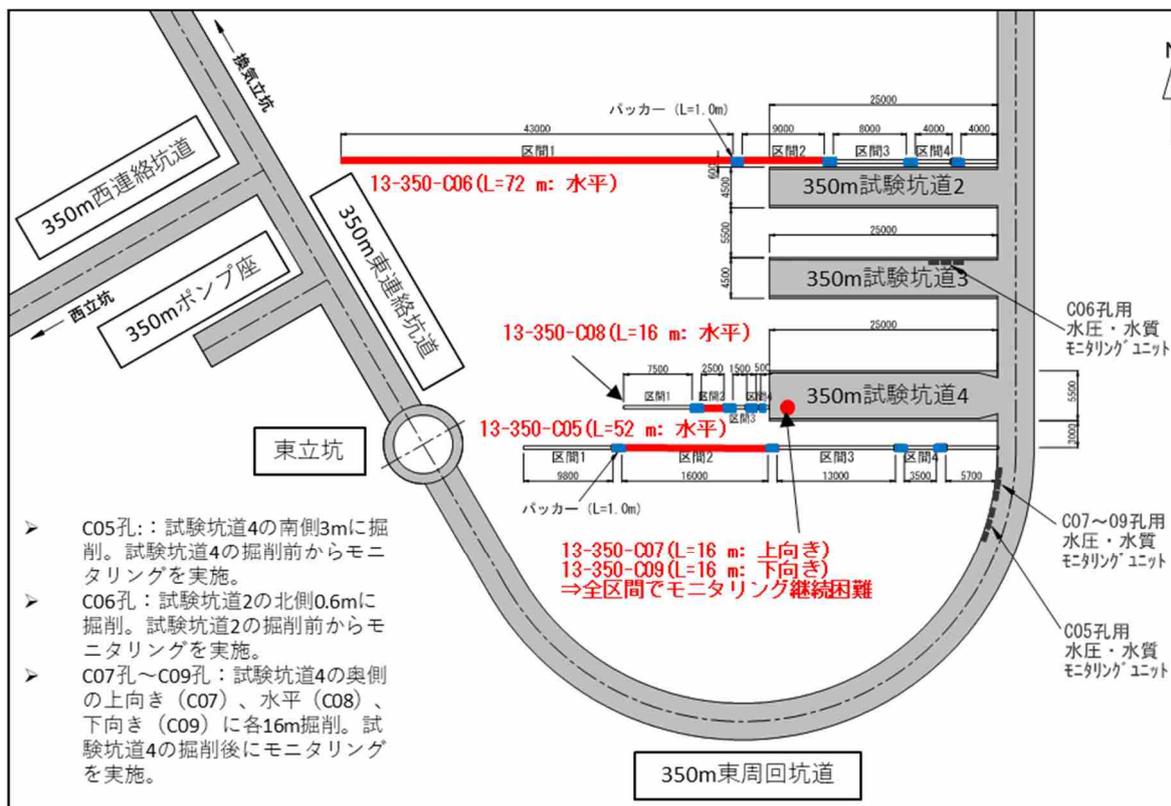
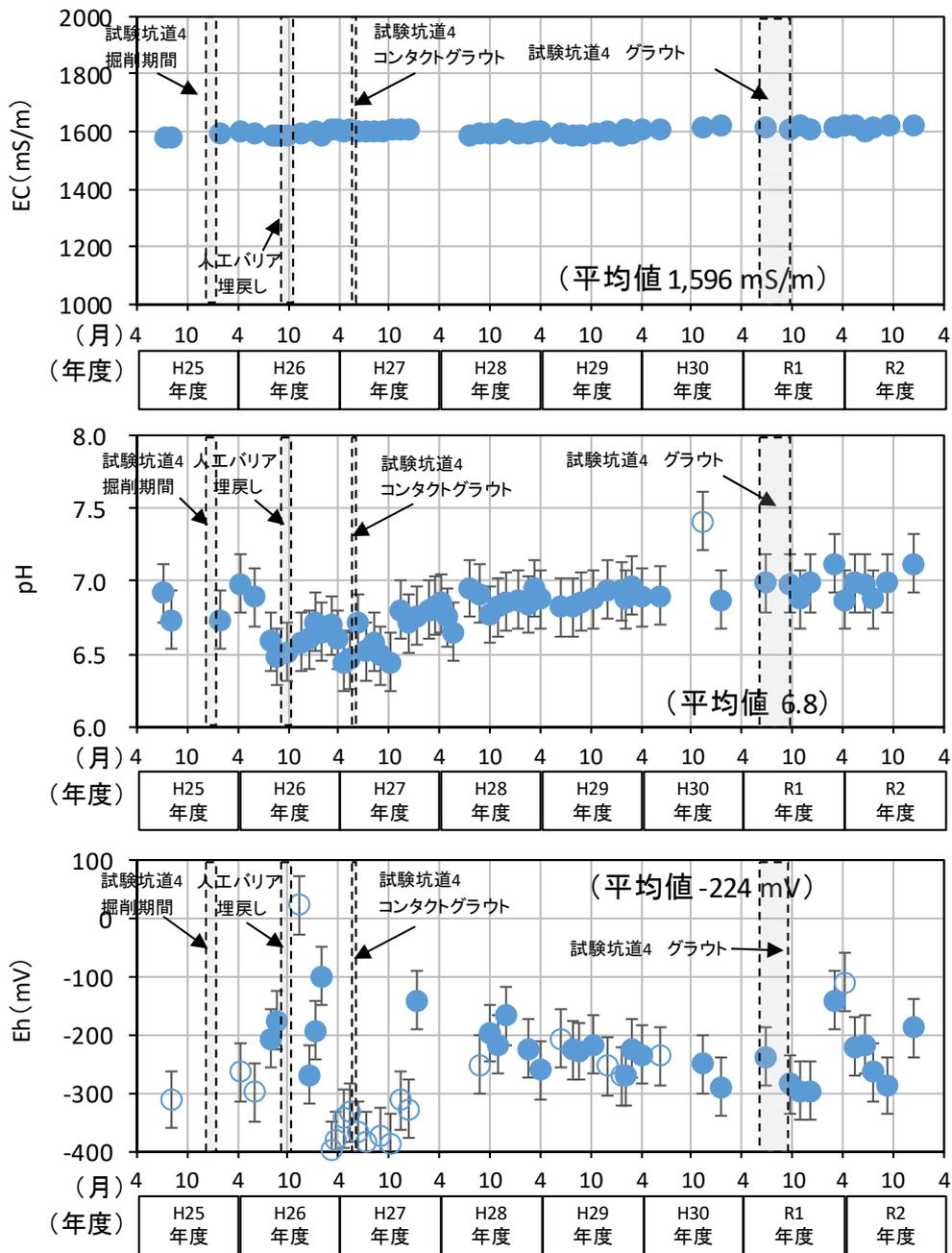


図 81 試験坑道2および試験坑道4周辺における水質モニタリング継続可能区間

各ボーリング孔のうち、水質モニタリングが継続可能な区間のみを赤色で示しています。



白抜きデータのデータ(○)は、信頼性が劣る可能性のあるデータ

図 82 C05の区間2における水質モニタリング結果

以上得られたデータは、令和2年度以降の必須の課題「人工バリア性能確認試験」における熱－水理－力学－化学 (THMC) 連成挙動の解析において、人工バリアの外側境界条件となる周辺岩盤中の水圧や水質条件の設定にも反映されます。今後も水圧・水質モニタリングを継続し、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を評価していきます。

令和2年度以降の必須の課題の一つである「物質移行試験」に関して、掘削影響領域（EdZ）の物質移行試験の評価手法の確立に必要な検討として、不飽和領域の形成メカニズムの検討や不飽和領域への酸素の侵入要因の検討を実施しています。

これまでに、坑道周辺の地下水の飽和度の違いに着目した気液二相流に関する数値解析を実施し、地下水の不飽和領域の形成要因について検討してきました⁽²⁴⁾。EdZでは、坑道内の大気がEdZに侵入し、坑道周辺の岩盤や地下水が還元状態から酸化状態に変化する可能性が考えられています。しかしながら、これまでに、坑道周辺のEdZにおける酸化の兆候は確認されておらず⁽²⁵⁾、その理由として、地下水中の溶存ガスが遊離することで、岩盤内への酸素の侵入を抑制している可能性が指摘されました。令和元年度は、坑道内の酸素がEdZへ侵入する要因について検討するために、350m調査坑道の条件を模擬した数値解析を実施してきました。

解析では、図 83に示すように、坑道壁面、掘削損傷領域（EDZ）および健全岩部を準一次元的に模擬し、数値解析コードTMVOC⁽²⁶⁾を用いて、坑道掘削から50年間の地下水と溶存ガスの流れおよび岩盤中への酸素の流れについて計算しました。令和2年度は、これまでに実施してきた数値解析の結果を取りまとめました^{(27)、(28)}。その結果、地下水中の溶存ガス量が減少したり、岩盤の透水性が低くなると不飽和領域における気相拡散を介して酸素の侵入量が大きくなり、坑道壁面における湿度が低下した場合も不飽和領域の形成が促進されることで、これを介した酸素の侵入が促進されることが分かりました（図 84）。なお、本研究は、電力中央研究所*48との共同研究の一環として実施しています。

*48：一般財団法人電力中央研究所は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を実施しています。

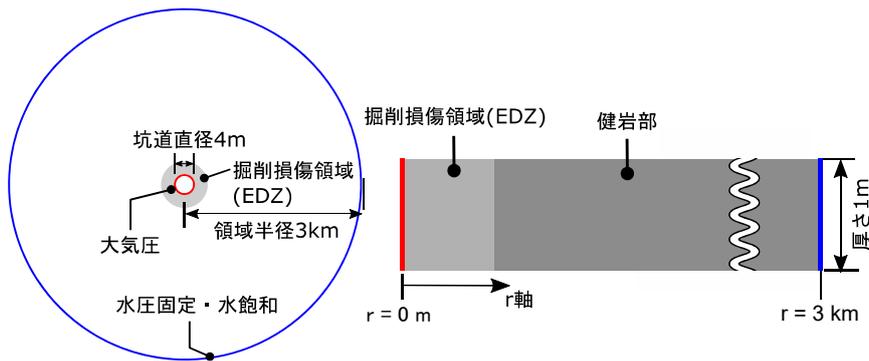
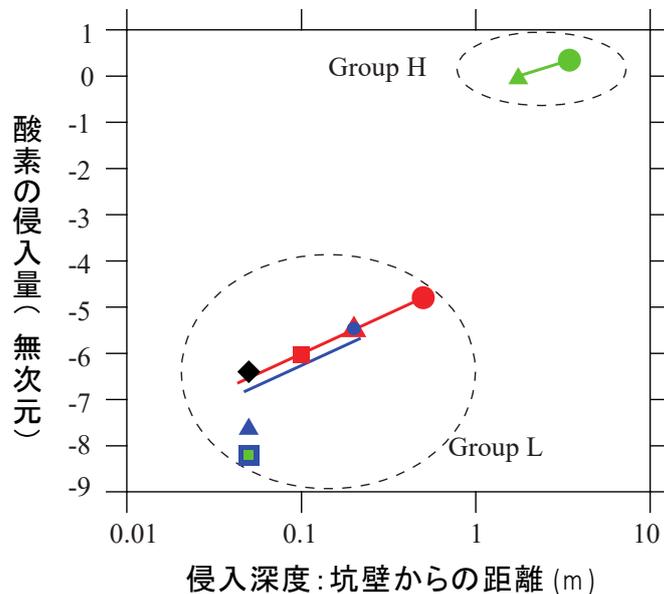


図 83 解析領域と解析条件



- ・Group L: 坑壁における湿度を100%で固定
- ・Group H: 坑壁における湿度を50%で固定
- ・溶存ガス量: ◆ = ■ = ▲ = ● > ■ > ▲ > ●
- ・岩盤の透水性: ■ > ■ > ▲ > ◆ = ▲ > ● > ●

図 84 350m調査坑道を模擬した感度解析による岩盤中への酸素の侵入量と侵入深度の関係性

令和2年度以降の必須の課題である「物質移行試験」では、微生物の影響を考慮したモデル化手法の高度化が進められています。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健岩部もまた、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。微生物が活動するためには水が必要であることから、岩石中の生きた微生物が存在する箇所には地下水が存在することになります。この関係性に着目し、微生物を指標とした岩盤中の水みちの評価に取り組んでいます。

令和2年度は、地下施設の140mおよび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。140m調査坑道から得られた岩石試料は珪藻質泥岩の声問層であり、そこでは微生物は割れ目とその周囲の健岩部に多く見られることが分かりました（図 85）。一方で、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、そこでは微生物は割れ目の中に密集していることが分かりました（図 86）。微生物の密集部を拡大して観察すると、微生物の存在する箇所には粘土鉱物も存在することが分かりました。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。

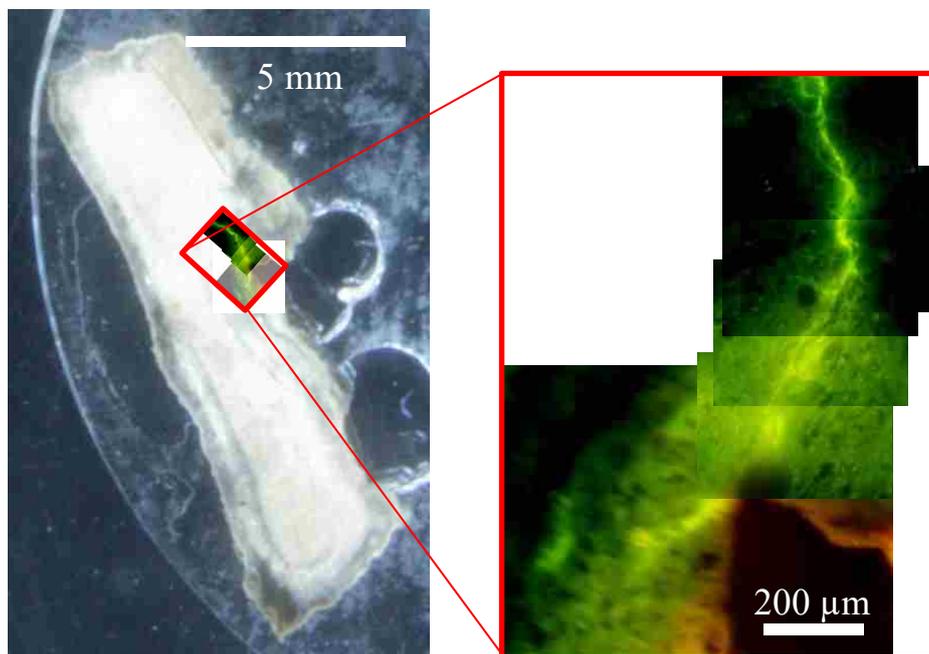


図 85 140m調査坑道から得られた岩石試料（声問層）中の微生物分布
左図は、実体顕微鏡写真の上に、蛍光顕微鏡写真を重ね合わせたもので、右図は、左図の蛍光顕微鏡写真部を拡大したものになります。蛍光顕微鏡写真で黄緑色が強い部分ほど、微生物が密集していることを示しています。