

図 93 各ケースの電磁探査解析結果の比較（水平断面）
 深度は幌延深地層研究センター地下施設を基準としています。

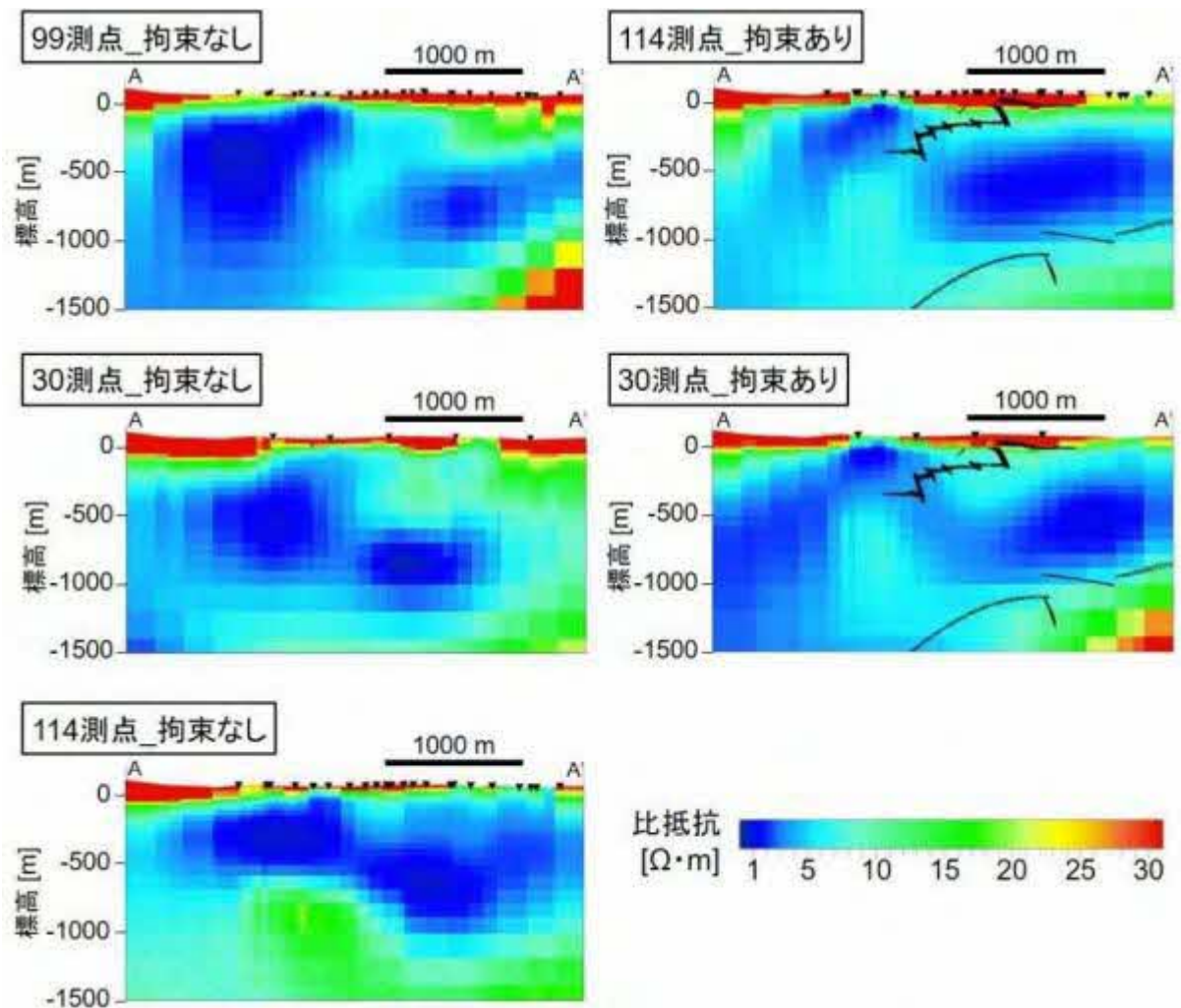


図 94 各ケースの電磁探査解析結果の比較（鉛直断面）

③ 広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

広域スケールの地下水流動解析を実施する上で考慮すべき化石海水領域に影響する古水理地質学的変遷に関する因子を抽出するために、地形や海水準（陸地に対する海面の相対的な高さ）、涵養量（降水や地表水が地下に浸透して地下水として加わる水の量）などの長期的時間変化を考慮した感度解析を実施しました。令和 3 年度の数値解析において対象とした解析領域を図 95 に示します。令和 3 年度は、図 95 の黄色枠で示される領域を数値解析の対象とし、さらに、内陸部の地下深部における地下水流動に着目する観点から、解析結果の着目範囲は、図 95 に示される幌延深地層研究センター近傍を通る A-A' 断面としました。地下水流動解析

には、三次元地下水解析コード「オイリアン・ラグランジアン飽和・不飽和浸透流—移流・分散解析プログラム (Dtransu3D・EL)」を使用しました。Dtransu3D・EL は、三次元モデルにおける密度勾配を考慮した飽和・不飽和浸透流解析および移流・分散問題を対象とした有限要素法^{*76}を用いた解析コードです。本解析に使用した解析モデルを図 96 に示します。本解析では、100 万年前、33 万年前および現在、の 3 つの時間のモデルを構築し、これらを使用しました。

図 97 に隆起・侵食による古地形変化の影響についての感度解析の結果として、幌延深地層研究センター近傍を通る A-A' 断面 (図 95) における動水勾配および地下水年代の分布を示します。100 万年前の地形モデルを用いた解析結果は、33 万年前および現在の地形モデルと比較して明らかに動水勾配が小さく、地表部まで地下水年代が大きい値を示すことから、着目範囲全体が流出域になっている可能性が分かります。一方で、33 万年前および現在の地形モデルを用いた場合、表層部に局所的に涵養域が形成されていることが分かります。また、33 万年前と現在の地形モデルを用いた解析結果を比較すると、現在の地形モデルの方が、おおよそ稚内層深部以深において明らかに動水勾配が小さく、地下水年代が大きいことが分かります。これらの解析結果は、非常にゆっくりとした超長期的な地下水流動においても地形の影響は大きく、現在の地形は地下深部において浅部と比較して地下水が動きにくいことを示しています。図 98 に海水準変動の影響についての感度解析の結果を示します。海水準が標高 0 m の場合の結果 (図 98(a)) と海水準が標高-120 m の場合の結果 (図 98(b)) を比較すると、100 万年前の地形モデルを用いた場合、動水勾配については全体的に大きくなり、地下水年代については大曲断層西側において小さくなっていることが分かります。一方、33 万年前と現在の地形モデルを用いた場合では、海水準が標高 0 m の場合の結果と比較して動水勾配と地下水年代ともに大きな違いは認められません。これらの解析結果は、地形が比較的なだらかな 100 万年前の地形モデルでは海水準の低下の影響が内陸部の地下水流動に影響を及ぼす可能性があるものの、33 万年以降の地形モデルについては海水準の低下の影響が無いことを示していま

*76：数値解析手法の 1 つで、対象を微小で単純な要素の集合体とみなして、それぞれの要素に分割して解析を行い、全体の挙動を求める方法です。

す。

今後は、既存のボーリング調査などから得られた塩濃度分布あるいは酸素水素同位体比分布と比較することにより、解析手法の妥当性の確認を行うことで、地上からの物理探査やボーリング調査により得られた情報を基に、化石海水を指標とした地下水の流れが非常に遅い領域の分布の推定に対し、水理解析の面からアプローチを図る際の技術の高度化を図ります。

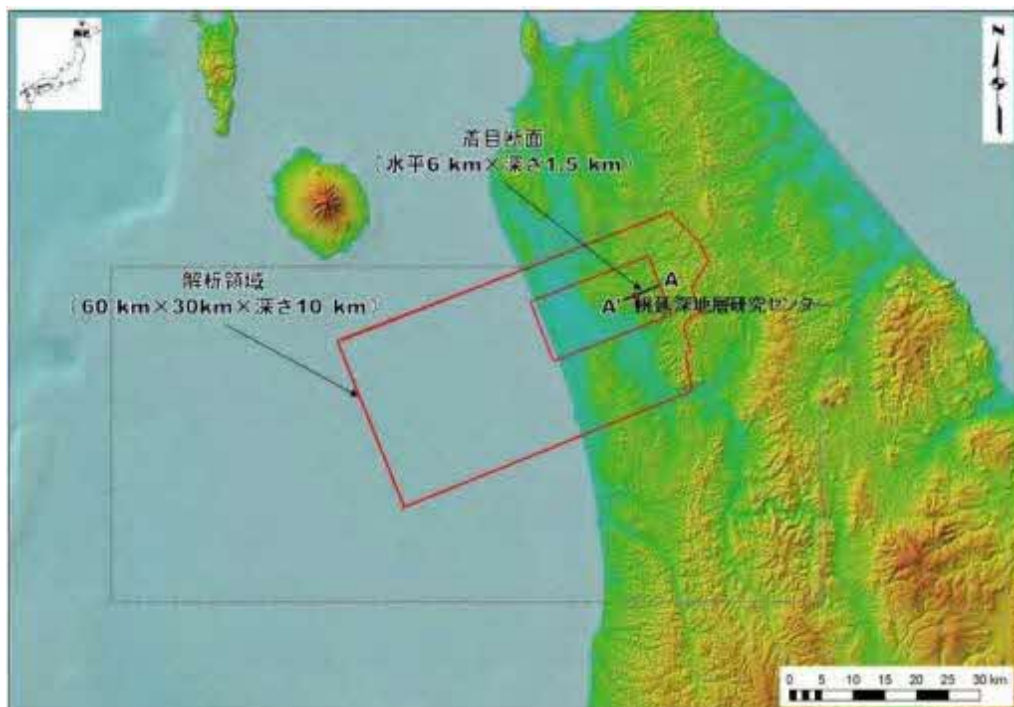


図 95 解析領域と着目断面位置 (A-A')

国土地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工し、解析領域などを追記

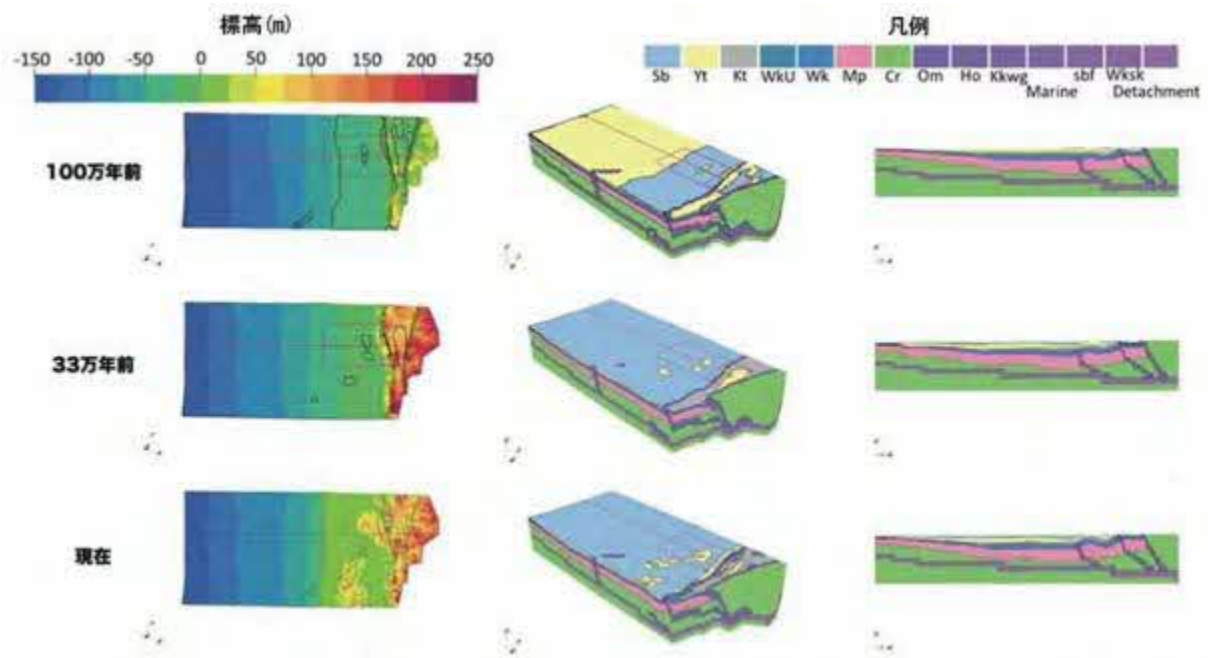


図 96 解析モデル

左は地形、右は水理地質区分を示します。地層名などの略称は次の通りです。Sb: 更別層、Yt: 勇知層、Kt: 声問層、WkU: 稚内層浅部、Wk: 稚内層深部、Mp: 増幌層～古第三系、Cr: 白亜系、Om: 大曲断層、Ho: 幌延断層、Kkwg: 北川口断層、Marine: 海岸断層、sbf: サロベツ断層、Wksk: 稚咲内断層、Detachment: デタッチメント

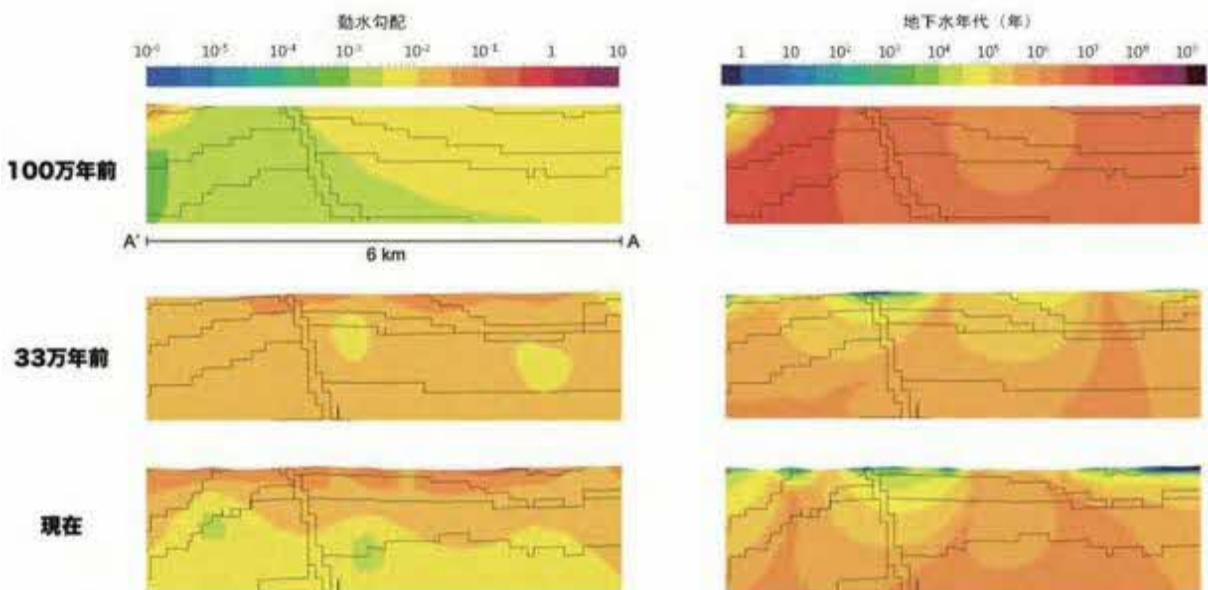
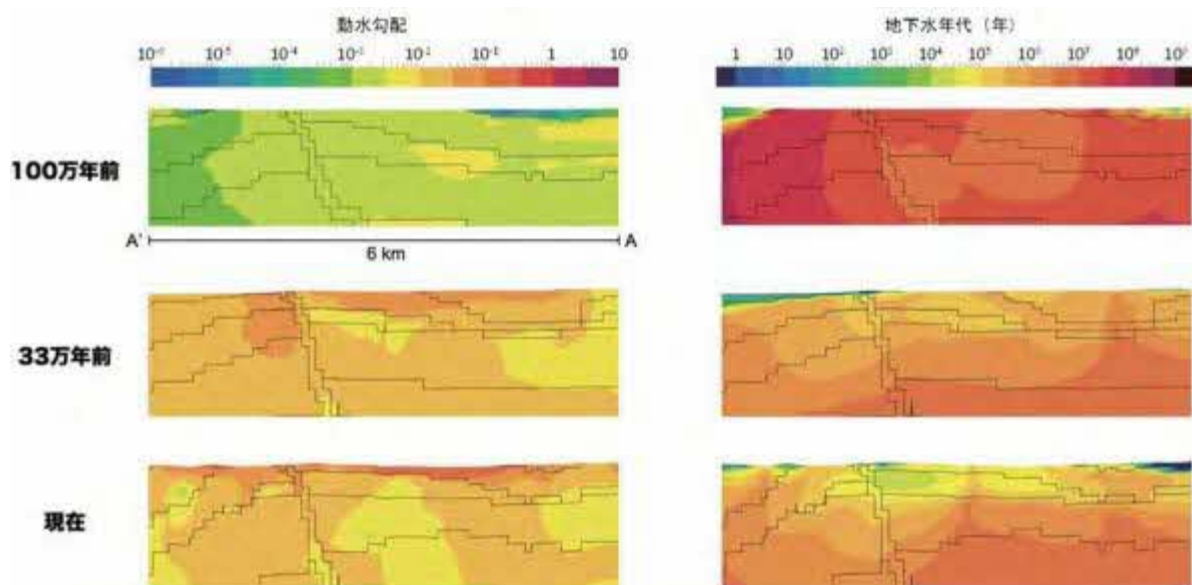
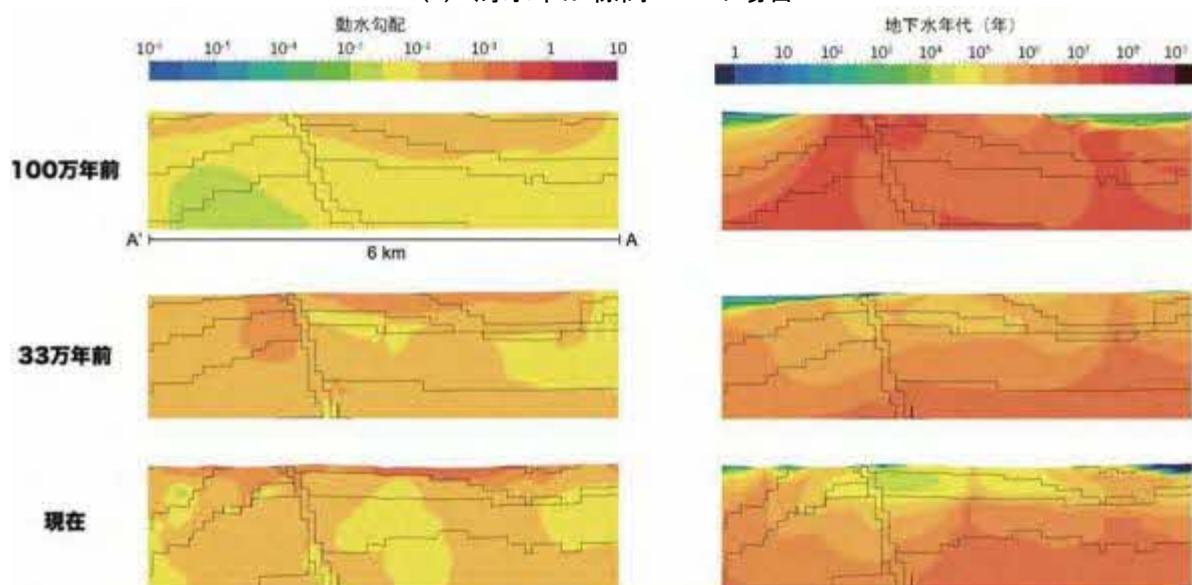


図 97 隆起・侵食による古地形変化の影響についての感度解析の結果



(a) 海水準が標高 0 m の場合



(b) 海水準が標高-120 m の場合

図 98 海水準変動の影響についての感度解析の結果

6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

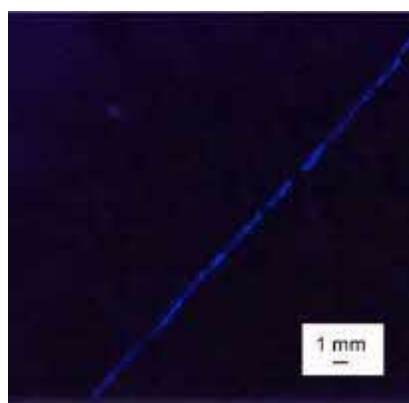
令和 2 年度以降は、地殻変動による緩衝材や埋め戻し材の掘削損傷領域 (EDZ) への自己治癒能力の実証が課題となります。そのため、EDZ のひび割れに対する自己治癒能力の実証を行います。具体的には、緩衝材や埋め戻し材が EDZ の力学的・水理学的な緩衝能力 (自己治癒能力) に与える影響を把握する解析手法の開発を行います。本課題においては、6.1.1 で述べたダクティリティインデックス (DI) などを活用して検討します。

令和 3 年度は、令和 2 年度に実施した樹脂注入後の EDZ の割れ目試料

(図 99) の観察により得られた開口幅とせん断変位の関係性について、その妥当性を確認するためにシミュレーションを行いました。令和 2 年度の観察により、割れ目の開口幅とせん断変位量には相関性がほとんどないことが確認されました(図 100 の●)が、割れ目面にかかる力を 3.2 MPa (試料を採取した深度 350 m の EDZ に作用する圧力に基づく) として割れ目の開口幅とせん断変位量の関係を Asadollahi and Tonon のモデル⁽⁸⁰⁾を用いてシミュレーションすると、上記の観察結果(開口幅とせん断変位量がほとんど相関しない結果)を良く再現できることが分かりました(図 100(f))。一方、割れ目面にかかる力を原位置相当の圧力の 1/4 ~1/32 と見積もってシミュレーションを行うと、上記の観察結果をよく再現できない(開口幅とせん断変位量がよく相関する)ことが分かりました(図 100(a)~(d))。これらの結果から、地下の原位置相当の圧力条件では、EDZ の割れ目が緩衝材や埋め戻し材の膨潤などの影響によって坑道閉鎖後にずれたとしても、圧力が大きく(1/4 程度まで)低下しない限り^{*77}、EDZ の割れ目の開口幅(透水性)はほとんど増加しないことが分かりました。また、行った樹脂注入試験とシミュレーションの結果が整合的であることから、樹脂注入試験やシミュレーションが有効であることが確認できました⁽⁸¹⁾。



(a) 自然光下



(b) 紫外線照射下(樹脂が青色に発光)

図 99 樹脂注入後の EDZ の割れ目試料(ボーリングコア試料)の拡大写真

*77: EDZ 割れ目にかかる力が地表でゼロで、深度の減少とともに一定の割合で線形的に低下すると仮定した場合、今回の結果からは、深度が 1/4 程度まで減少する(上昇する)と、観察結果をうまく再現できなくなる(割れ目がずれると開口幅が大きく増加するようになる)ことが分かります。仮想的に、侵食速度を高めめの 0.5 mm/年、初期深度を 300 m 以深として、今回の結果を用いて計算すると、10 万年後に深度が 1/4 程度まで減少(上昇)することはないため(隆起・侵食量は 50 m)、この程度の隆起・侵食量であれば、EDZ 割れ目のせん断変位と開口幅の関係に顕著な変化は生じないことが考えられます。

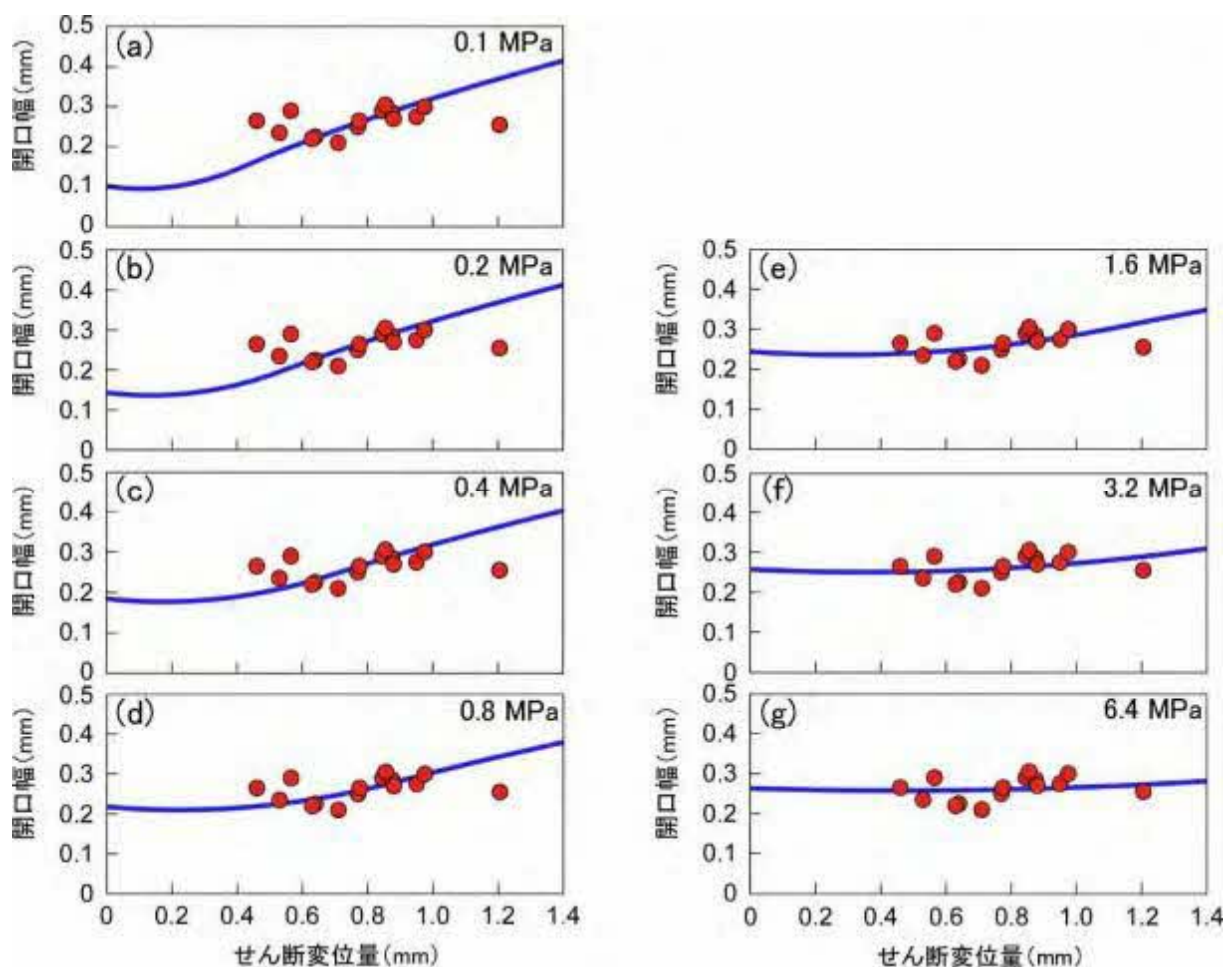
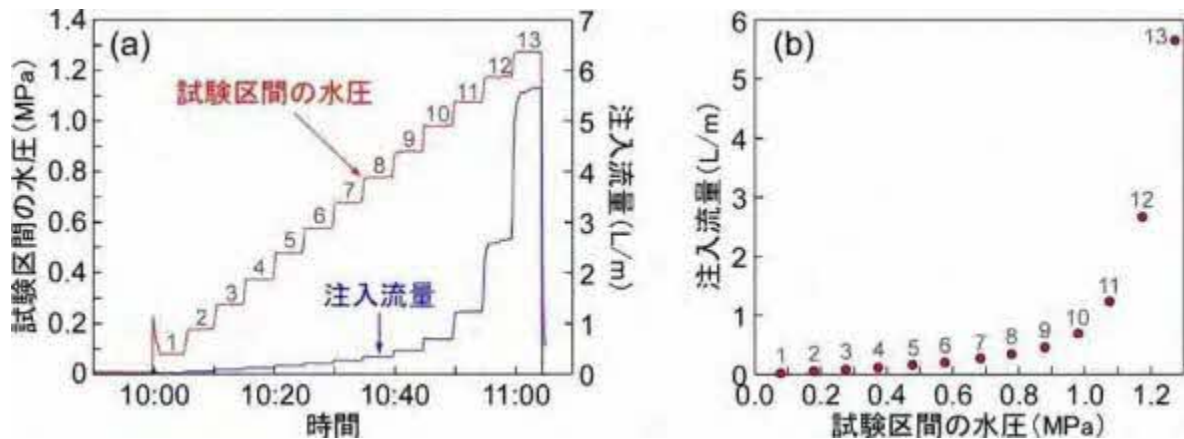


図 100 樹脂注入後の EDZ の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係（赤丸）とシミュレーション結果（青線）⁽⁸¹⁾

各グラフの右上の数値は、各シミュレーションで想定した割れ目面にかかる力の大きさを示しています。シミュレーションでは、Asadolahi and Tonon のモデル⁽⁸⁰⁾を用いて、せん断変位量に応じた開口幅の変化を計算しています。

令和 3 年度はさらに、EDZ の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータについて、以下のような検討を行いました。同試験では段階的に注水圧（試験区間の水圧）を増加させ、そのときの注入流量の変化を計測しました（図 101(a)はその結果の例）。試験中の試験区間の水圧と注入流量の関係を調べると、試験区間の水圧の増加に伴う注入流量の増加量は、試験区間の水圧の増加とともに徐々に大きくなることが分かりました（図 101(b)）。これは一般的な水理学・岩盤力学の知見に基づくと、水圧の増加に伴って割れ目の開口幅が増加していることを示唆しており、このようなデータは割れ目面にかかる力に応じて割れ目の開口幅がどのように変化するかを調べるのに有用な情報を提供します。今後、令和 3 年

度に再検証した DI モデル (6.1.1 を参照) も活用して詳細な解析を行うとともに、先述した樹脂注入試験の検討結果と合わせて、緩衝材や埋め戻し材の膨潤が EDZ の割れ目の開口幅 (透水性) に与える影響の評価手法を取りまとめる予定です。



(a) 注水試験中の試験区間の水圧と注入流量の推移

(b) 水圧と注入流量の関係

図 101 EDZ の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータの例
 図中の 1~13 の番号は試験中のステップの番号を表します。

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、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であることから、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3年度は、令和3年4月27日以降にセンサー不良のため水圧が計測できていなかった HDB-6 孔のセンサーを交換しました（図 102 の▼）。その後、正常にデータを取得できるようになりました。また、令和元年12月12日の宗谷地方北部を震源とする地震に伴い上昇した HDB-6 孔の深度 369 m の水圧（図 102 の▲）は、2年以上が経過した令和4年3月30日時点で、ほぼ元の水圧に戻っていることが確認できました。このような一時的な水圧上昇は、大規模な地下水の排水を行っている地下施設の近傍に位置する HDB-6 孔（東立坑から 92 m）のみで認められることも考慮すると、以下のような発生原因が考えられます。すなわち、地震の揺れに伴い地下水中のメタンガスの脱ガス・気泡の発生や目詰まりが地下施設近傍の割れ目内で生じ、それにより地下水が一時的に流れにくくなる領域が地下施設と HDB-6 孔の間に発生したことが考えられます（発生した気泡や目詰まりは時間の経過とともに消滅）。同孔の深度 369 m より深い深度ではこのような水圧上昇が認められませんが、その理由として、これらの深い深度は深度 369 m 周辺と異なり、地下施設へ向かう地下水の流れ

がそもそも発生していないことが考えられます。このようなコントラストは、6章において検討している地下施設周辺の稚内層における割れ目の水理的連結性の深度変化（深度 400 m 以浅は割れ目の水理的連結性が高く、深度 500 m 以深は低い）⁽⁸⁾と整合的と言えます。

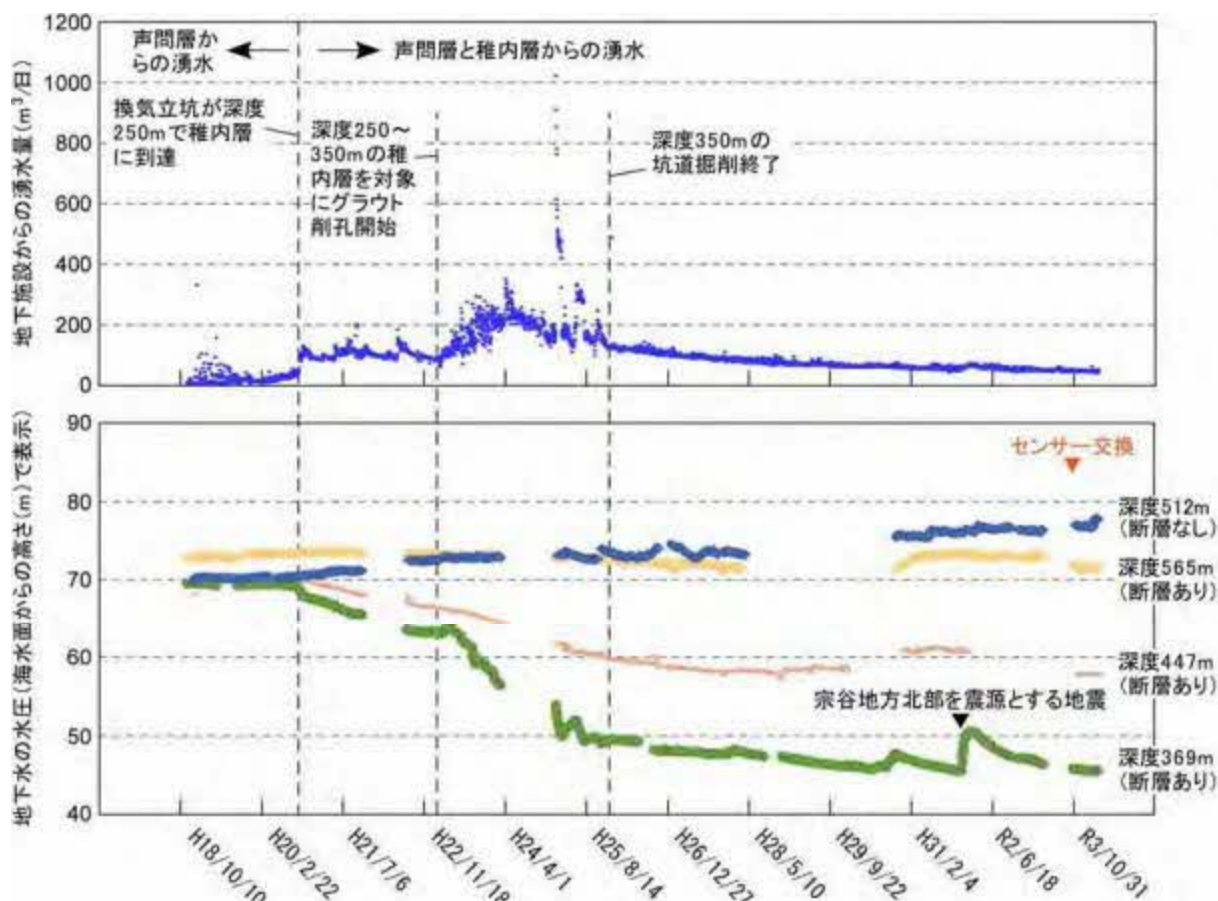


図 102 地下施設からの湧水量（上）と HDB-6 孔の稚内層における断層区間の水圧観測結果（下）

（平成 18 年 11 月 19 日～令和 4 年 3 月 30 日のデータ）

令和元年 12 月 12 日の宗谷地方北部を震源とする地震の際には、地震の揺れに伴い地下水が一時的に流れにくくなる領域が地下施設と HDB-6 孔の間に発生し、それにより HDB-6 孔の水圧が上昇したことが考えられます（水が流れにくい領域が発生すると、その上流側の水圧は増加します）。水が流れにくくなる領域が発生した原因としては、揺れに伴って割れ目内に生じた瞬間的な減圧が地下水中のメタンガスの脱ガス・気泡を発生させた可能性や、揺れに伴って何らかの目詰まりが割れ目内に発生した可能性が考えられます（割れ目内に気泡や目詰まりが発生すると水が流れにくくなります）。地下施設近傍で水の流れにくい領域が発生したとすれば、地下施設からの湧水量がその分、減少するはずですが、そのようなことを示唆する有意な減少は認められませんでした。したがって、一時的に水が流れにくくなった箇所が発生領域は HDB-6 孔近傍などのごく限られた範囲であったと考えられます。

(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、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 3 年度は、令和 2 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^{*78}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 54 試料の地下水を採取し、水質を分析しました⁽⁸²⁾。図 103 に集水リングとボーリング孔の位置を示します。塩化物イオン濃度の分析結果を図 104 に、酸素同位体比の分析結果を図 105 に示します。集水リングから得られた地下水の塩化物イオン濃度および酸素同位体比（図 104(a)～(c)、図 105(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塩化物イオン濃度および酸素同位体比（図 104(d)～(f)、図 105(a)～(c)）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。塩化物イオンは反応性に乏しいため、塩化物イオン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、塩化物イオン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。令和 3 年度は集水リングから採取された地下水試料中にわずかにトリチウム^{*79}が検出されました（ <0.04 Bq/L \sim 0.2 Bq/L）⁽⁸²⁾。一方で、ボーリング孔から採取された地下水試料中には、トリチウムは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、異なる深度の地下水の混合であるとともに、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。

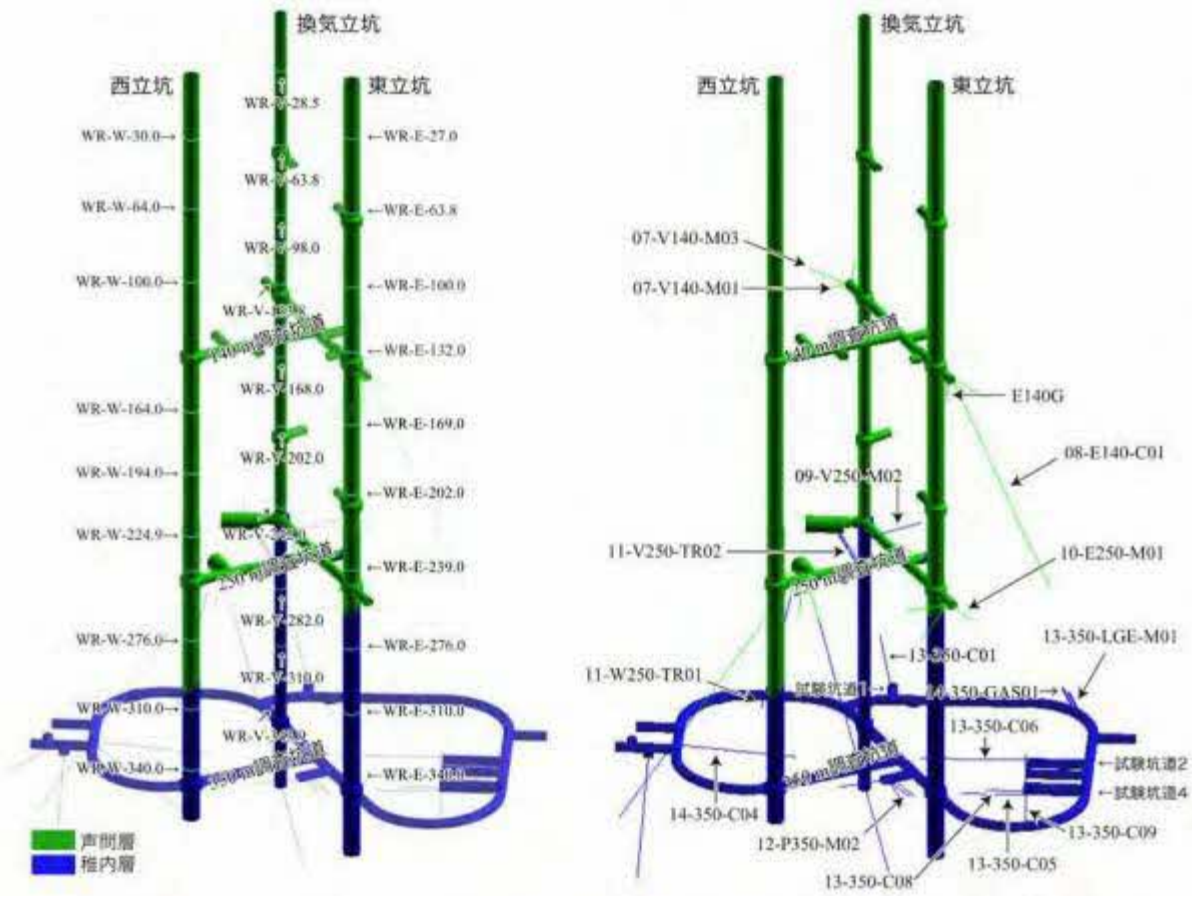
人工バリア性能確認試験が実施されている 350m 調査坑道の試験坑道 4（図 5 参照）は、平成 25 年度に掘削され、平成 26 年度に人工バリアを定置し、坑道の一部を埋め戻したのちに試験が開始されています。平成 28

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

*79：質量数が 3 である水素の放射性同位体（半減期：12.3 年）で、三重水素とも呼ばれます。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。

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塩化物イオン濃度については、目立った変化は見られていません(図104(f))。令和3年度は、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106)の水質を分析した結果、塩化物イオン濃度はそれぞれ約4,100 mg/Lと約4,000 mg/L、酸素同位体比は両試料とも-3.1‰となり、ほぼ同じ水質でした⁽⁸²⁾。これらの注入水と浸み出している地下水の塩化物イオン濃度は、試験箇所周辺の地下水とほぼ同じですが、酸素同位体比がわずかに異なりました(図104(f)、図105(f))。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。

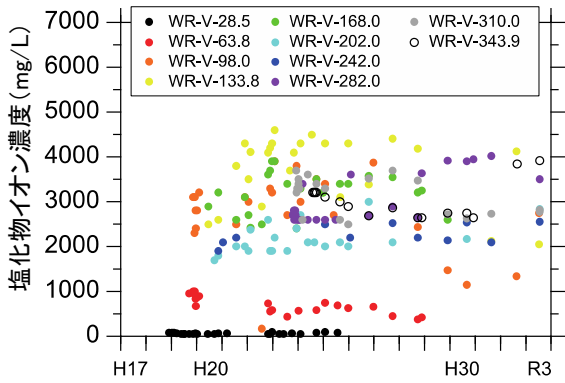
350m調査坑道の試験坑道1(図5参照)では人工バリアの試験体を取り出すための試験施工の解体調査を実施しました。試験坑道1に位置する13-350-C01孔の地下水の塩化物イオン濃度は、令和3年度に低下していることから(図104(f))、試験施工および解体調査による何らかの影響が考えられます。一方で、350m調査坑道の他のボーリング孔(12-P350-M02孔、13-350LGE-M01孔、13-350-C06孔、14-350-C04孔および14-350-GAS01孔)に関しては、令和3年度まで塩化物イオン濃度の大きな変化は認められていません(図104(f))。



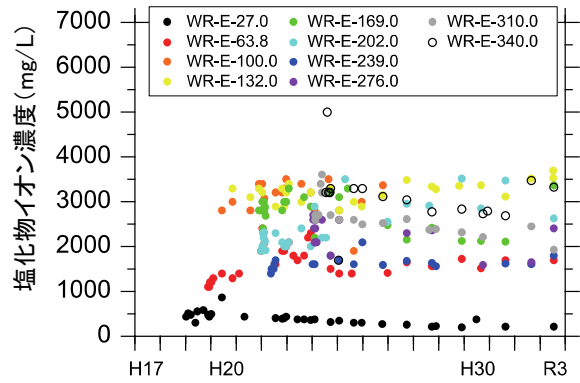
(a) 集水リング

(b) ボーリング孔

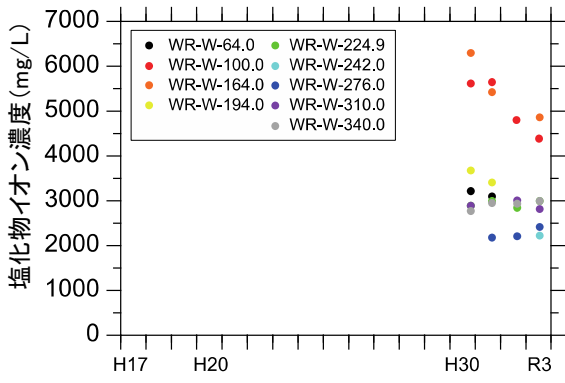
図 103 地下水の採取箇所



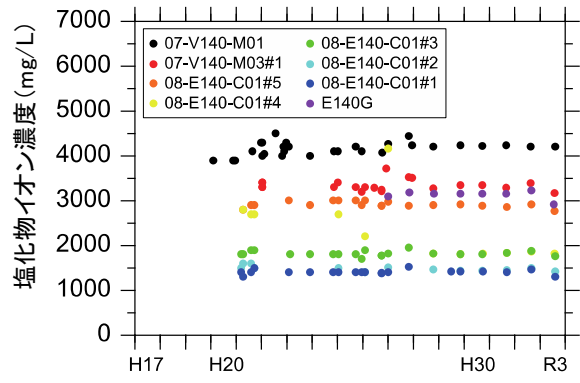
(a) 集水リング (換気立坑)



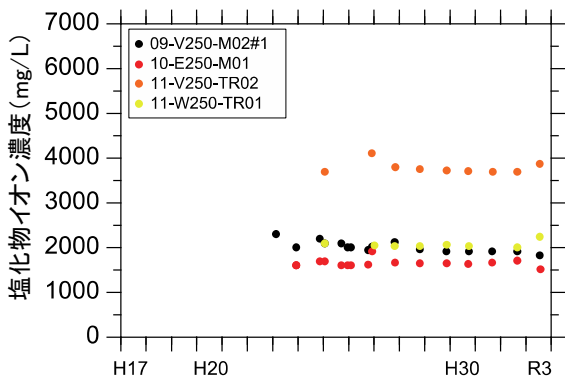
(b) 集水リング (東立坑)



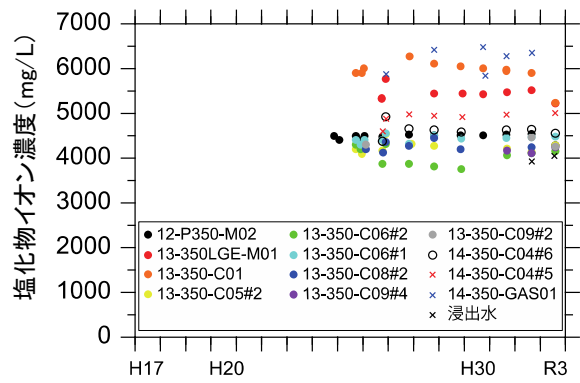
(c) 集水リング (西立坑)



(d) 140m 調査坑道から掘削したボーリング孔

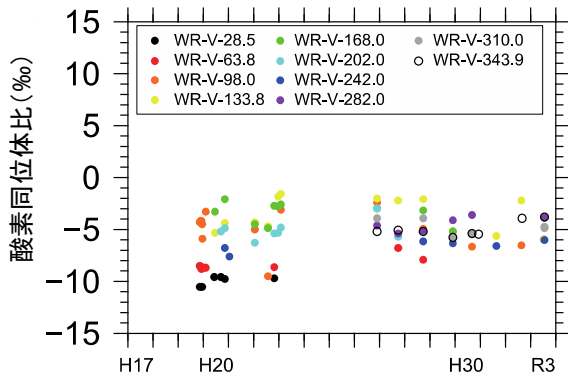


(e) 250m 調査坑道から掘削したボーリング孔

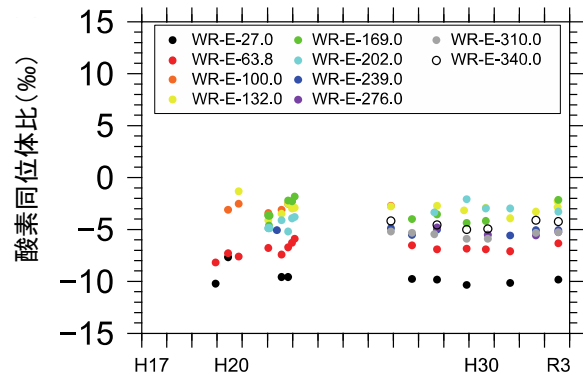


(f) 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔

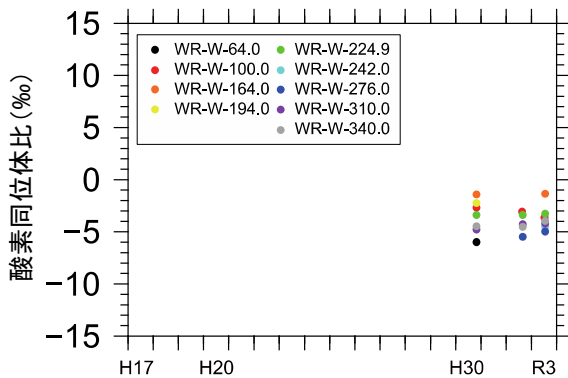
図 104 地下水の塩化物イオン濃度の経時変化



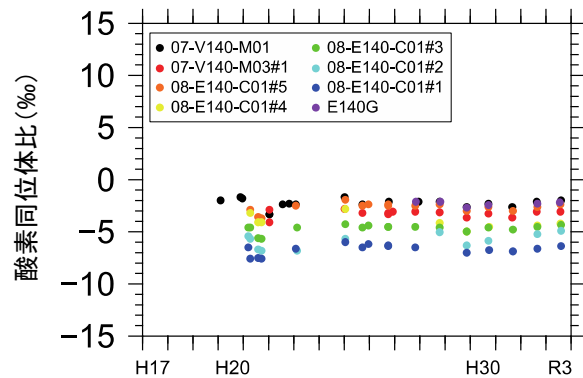
(a) 集水リング (換気立坑)



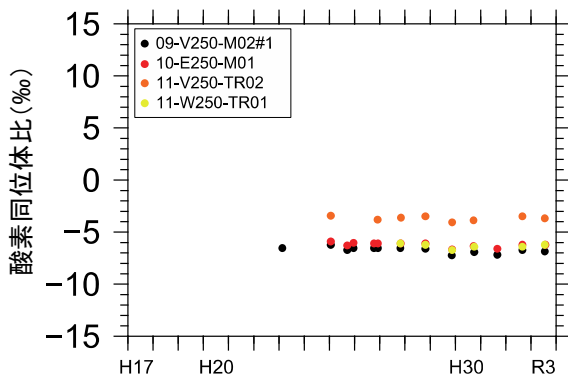
(b) 集水リング (東立坑)



(c) 集水リング (西立坑)



(d) 140m 調査坑道から掘削したボーリング孔



(e) 250m 調査坑道から掘削したボーリング孔 (f) 350m 調査坑道から掘削したボーリング孔

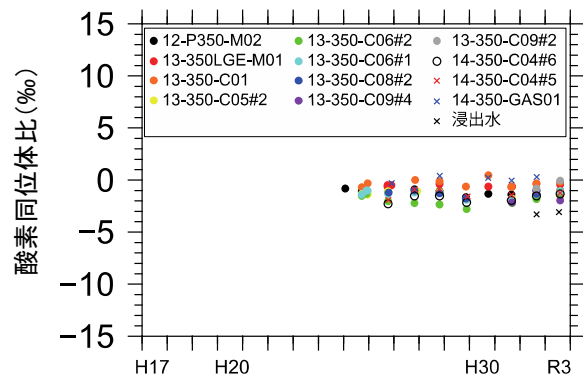


図 105 地下水の酸素同位体比の経時変化



図 106 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。写真の奥に見えるのは、人工バリア性能確認試験のコンクリートプラグです。

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 3 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 107 に示します。令和 2 年度に引き続き、令和 3 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 108、図 109、図 110、図 111 および図 112 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 において水圧が上

昇する傾向が確認されています（図 111 および図 112）。特に、注水量を大幅に増加させた平成 28 年 11 月と令和元年 12 月には、0.05 MPa 程度の水圧の上昇が確認されています。一方で、令和 2 年 7 月に、注水量を減少させた際には、同区間において、0.05 MPa 程度の水圧の減少が確認されています。令和 3 年度は、人工バリアへの注水量が一定であり、C08 および C09 の区間 4 の水圧は緩やかな上昇傾向にあります。

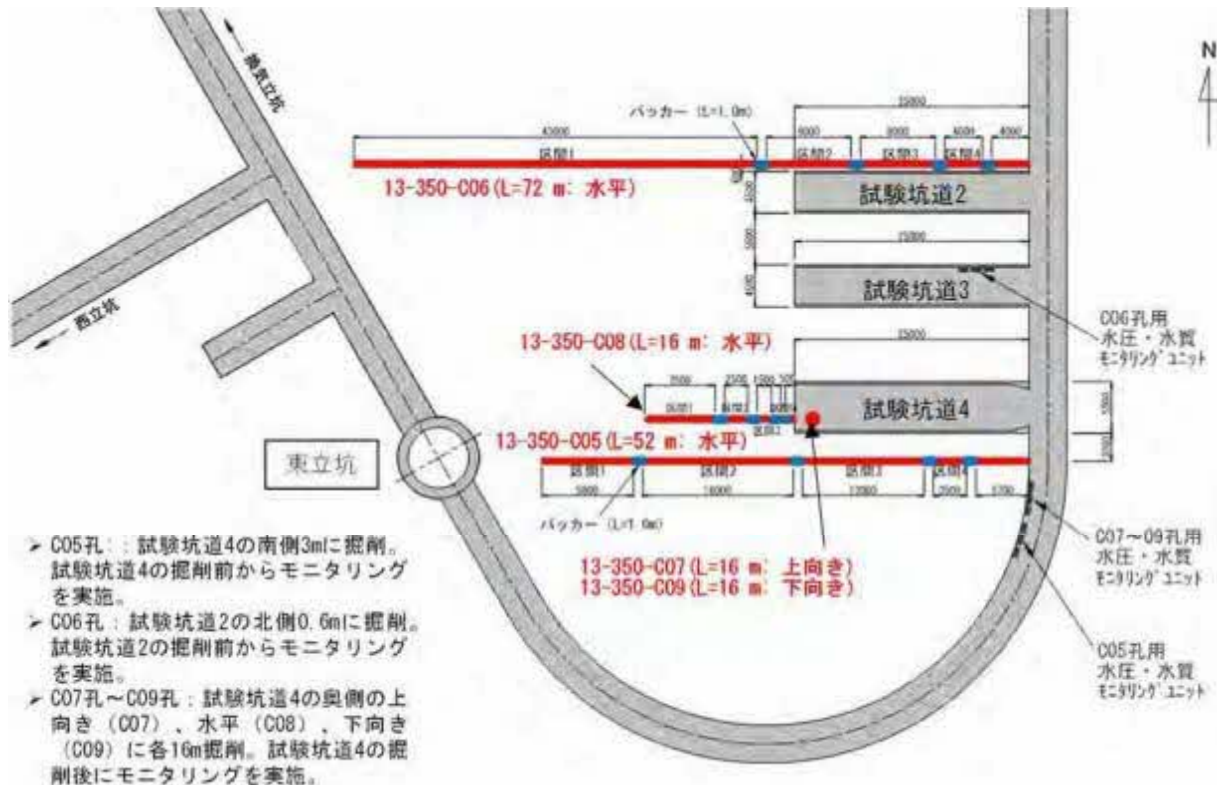


図 107 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施箇所

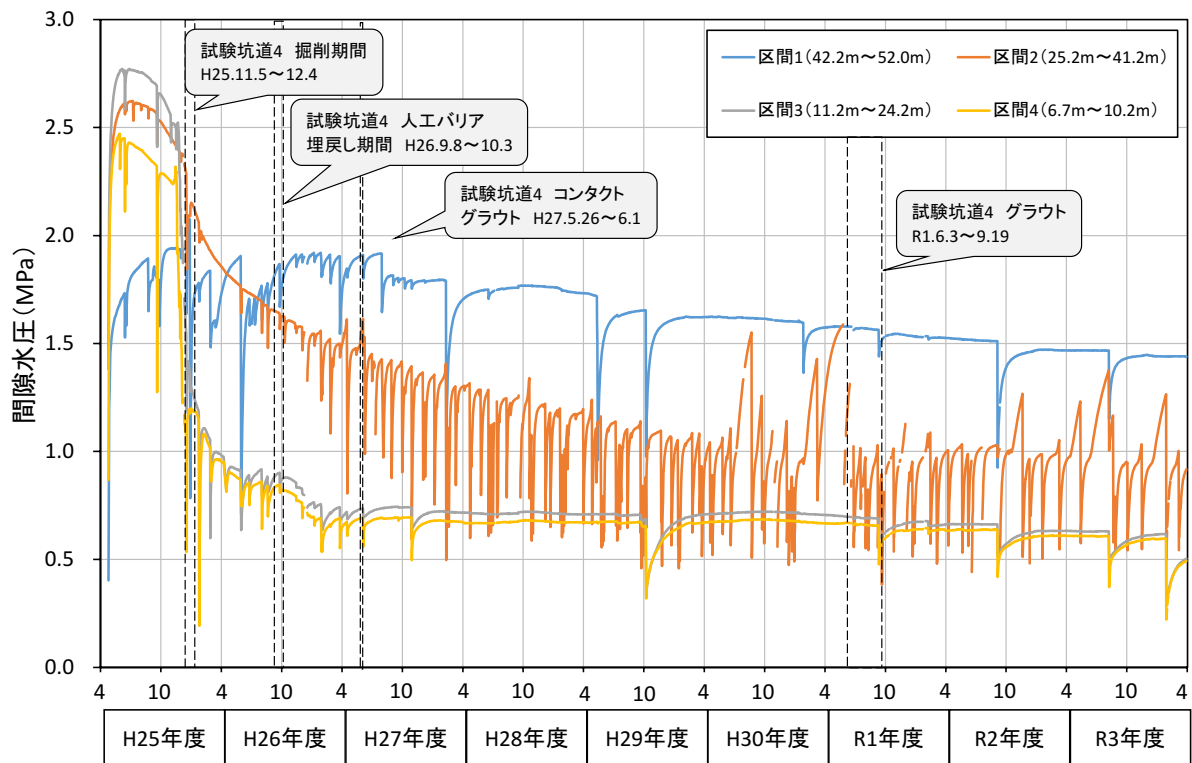


図 108 C05 における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

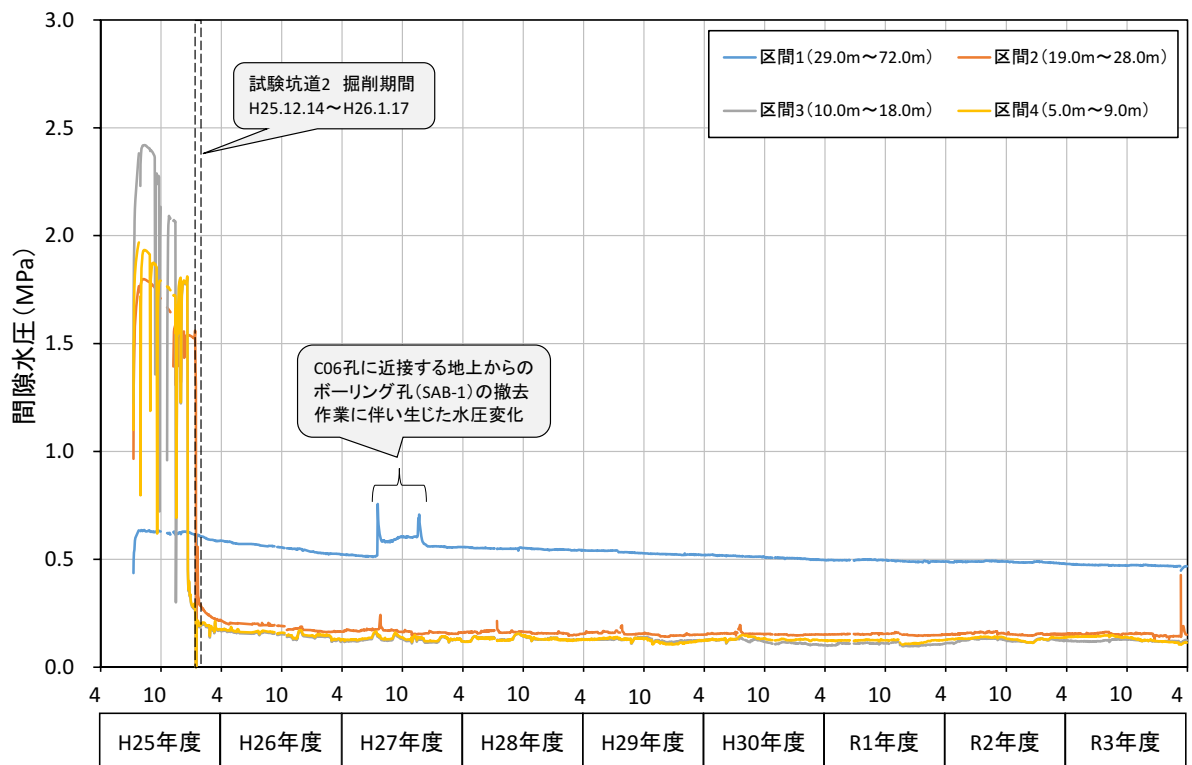


図 109 C06 における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

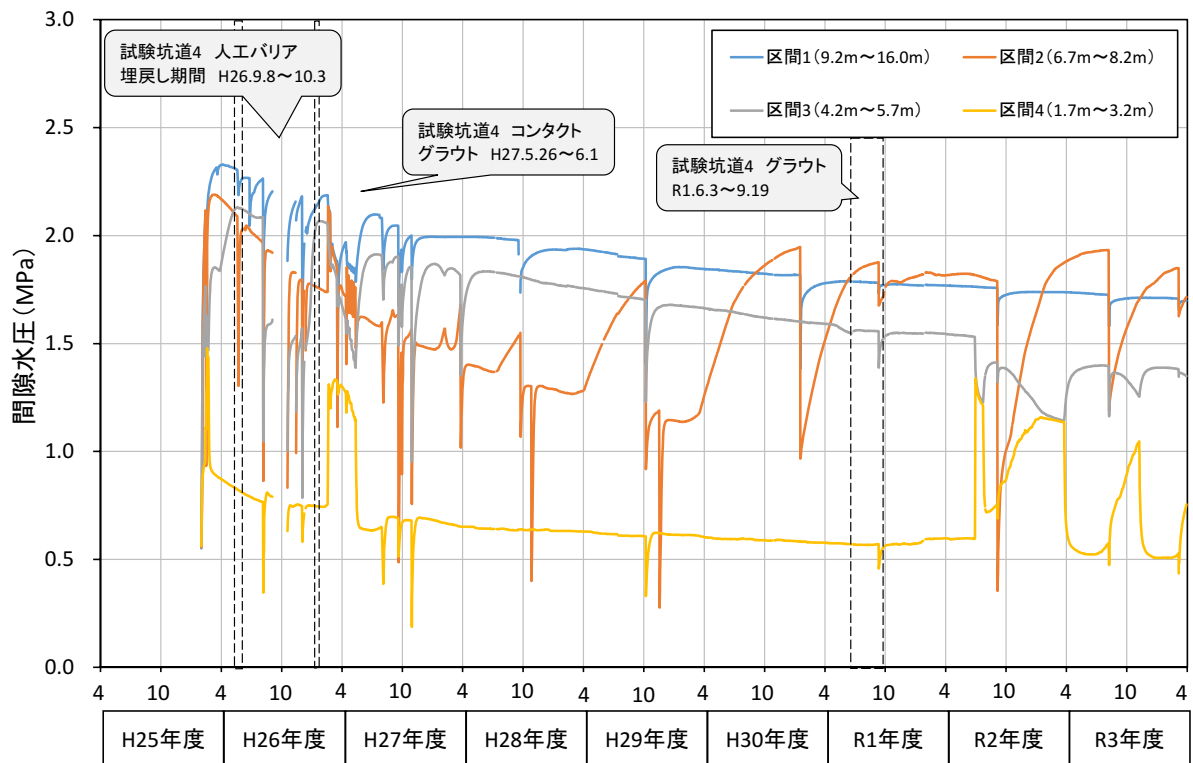


図 110 C07 における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

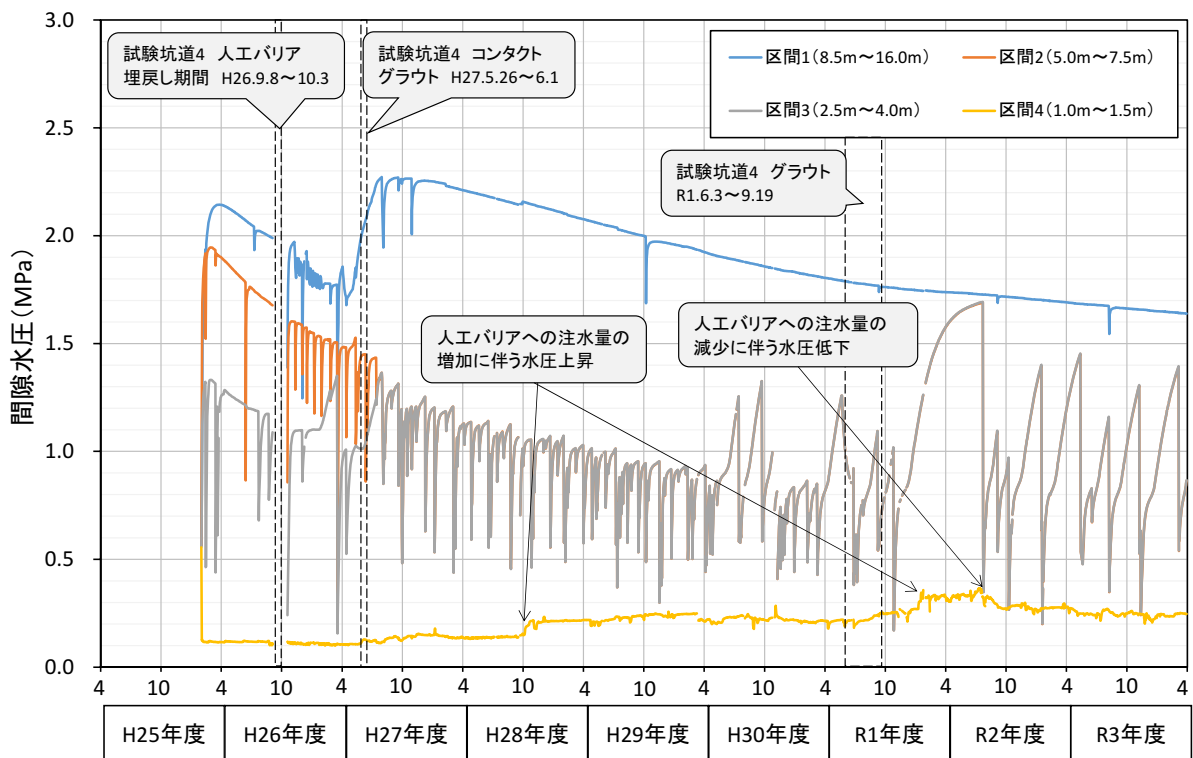


図 111 C08 における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

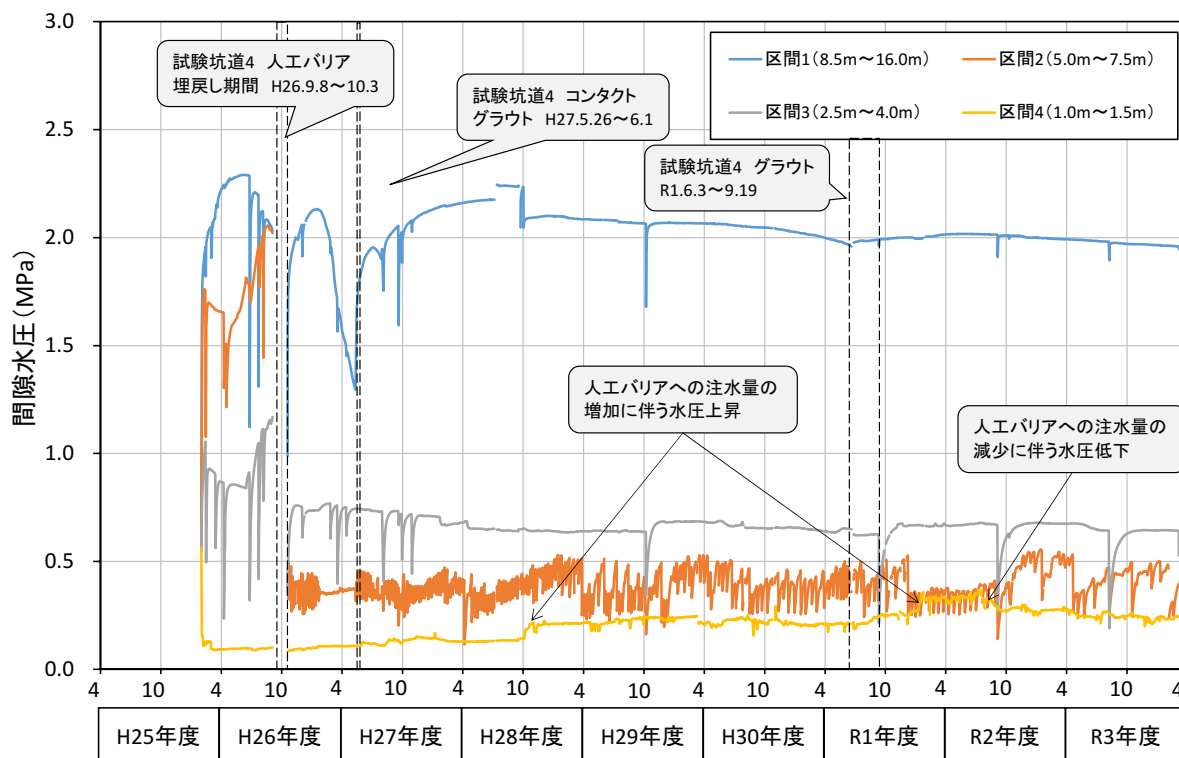


図 112 C09 における水圧モニタリング結果
 水圧が急激に変化している箇所は、メンテナンスによる影響です。

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 113)。図 114 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 2 年度までの測定値とおおむね同様の傾向を示しており⁽¹⁰⁾、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。

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。

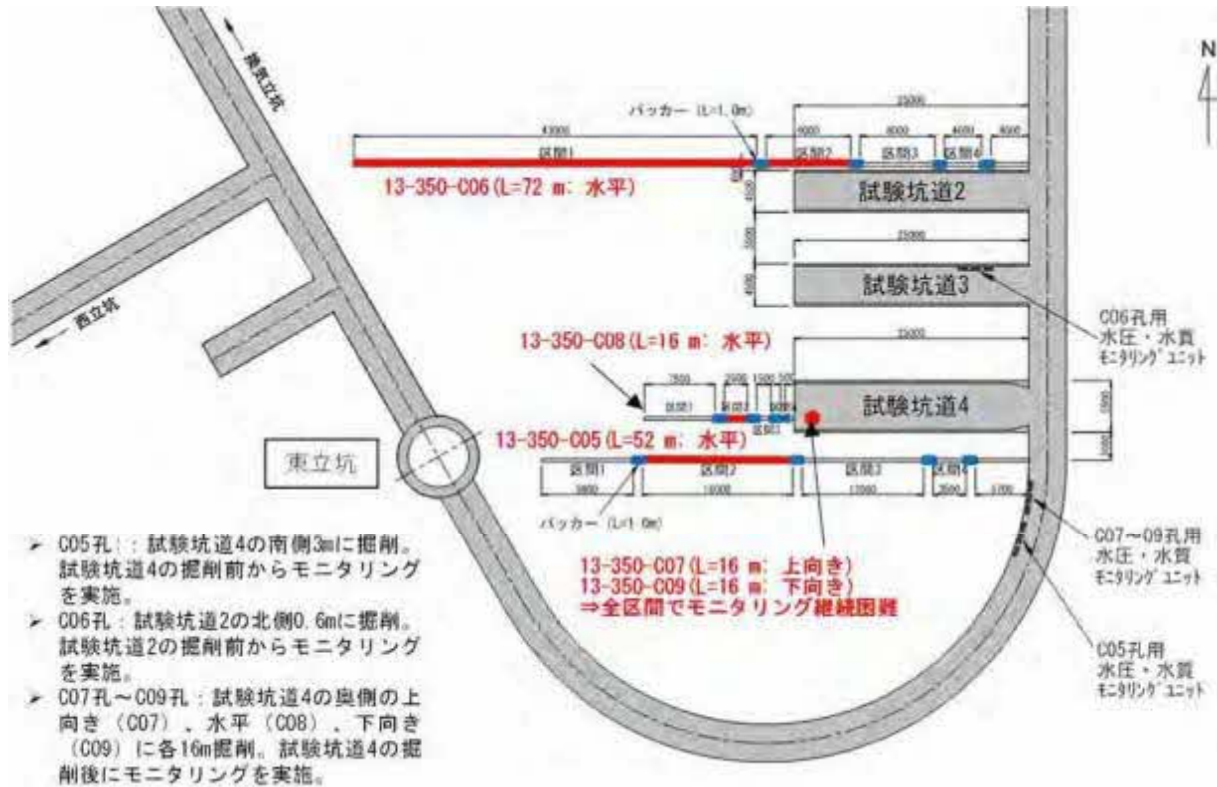


図 113 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水質モニタリング継続可能区間

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。

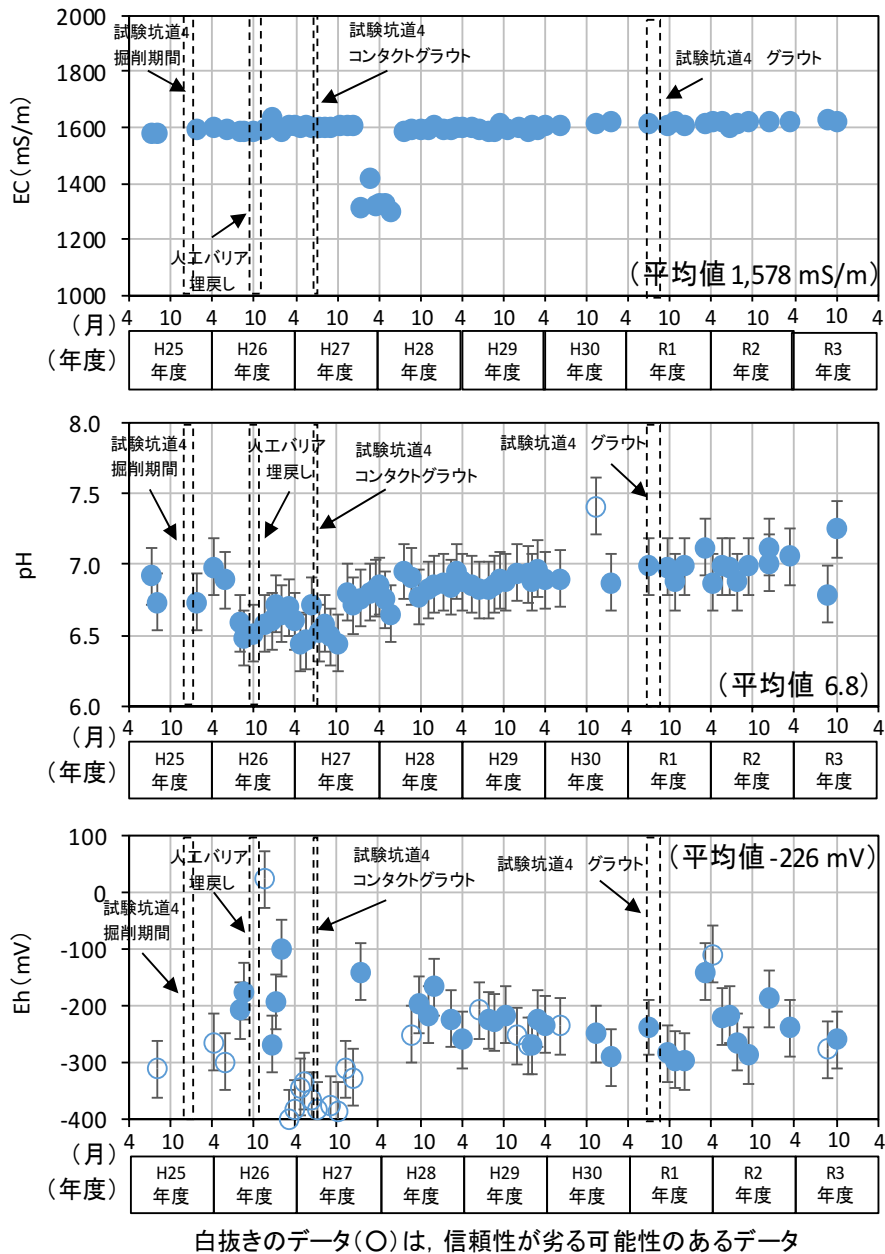


図 114 C05 の区間 2 における水質モニタリング結果

(3) 岩盤力学

平成 21 年度に東立坑の深度 160 m に設置した光ファイバー式地中変位計を用いて、岩盤変位の長期モニタリング性能を検証しています。計測結果の妥当性を検証するため、隣接する位置に、既に技術が確立されている電気式地中変位計を設置しています (図 115)。また、同時に支保工の安定性も確認するため、電気式の鋼製支保工応力計を設置しています (図 116)。地中変位計および鋼製支保応力計の設置位置を図 117 に示します。

地中変位計測結果を図 118 に示します。光ファイバー式変位計は、計測値が逸脱せず、安定した計測値が得られていますが、電気式変位計は設置後 3 年程度で計測値が乱れはじめ、現時点では正常な計測ができなくなっています。これは、岩盤中の地下水がセンサー部に浸透することにより絶縁抵抗不良を起こすためと考えられます。次に、鋼製支保工応力計の計測結果を参照すると、季節変動と考えられる 10 MPa 程度の応力変化が計測されているものの、大きな計測値の逸脱はなく、安定した計測データが得られています (図 119)。このことから、長期的に岩盤や支保工のモニタリングを行う上では、地中の計測では光ファイバー式に優位性がありますが、鋼製支保工など、地下水が浸潤しないような構造物内では、電気式でも問題ないことが分かります。

掘削後約13年間の変位は、地中変位計で立坑壁面に最も近い区間No. 1で約4.9 mm縮む挙動を示しており、他区間に比べ変位量が大きいことが分かります。また、他区間においても、No. 3を除き変位量は小さいが縮む挙動を示しており、平成27年度以降の変位は収束傾向にあることが分かります。このことから、立坑掘削後は、約5年間かけて徐々に圧縮方向に岩盤が1 mm程度変形し、その後変形が収束していくことが分かります。鋼製支保工応力計では、北側に位置するSS1において約155 MPaの応力を示しており、他の計測点に比べ応力が大きいことが分かります。しかしながら、特段対策を施すほどの応力状態には達していないことが確認されています。また、掘削後もSS2の計測点を除き、全計測点で応力が増大傾向にあります。

今後もデータの蓄積を進め、立坑掘削による周辺岩盤および支保工の長期的な変形挙動をモニタリングするとともに、装置の健全性の確認を継続し、計測手法の信頼性を高めていく予定です。

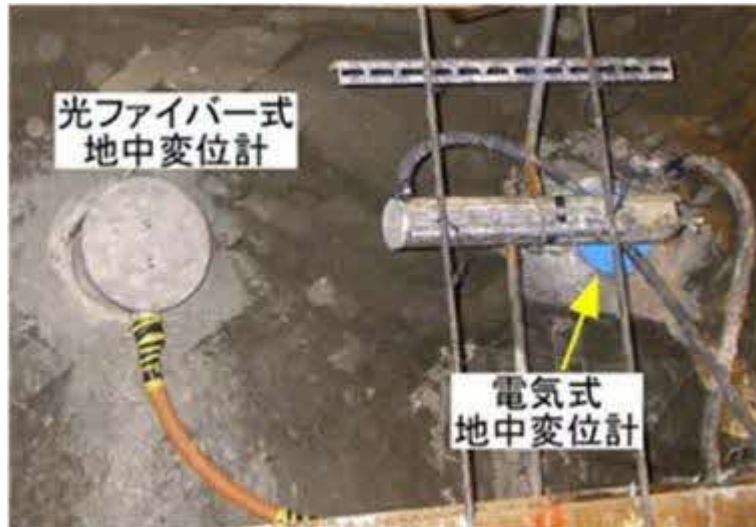


図 115 地中変位計設置状況写真



図 116 鋼製支保工応力計設置例

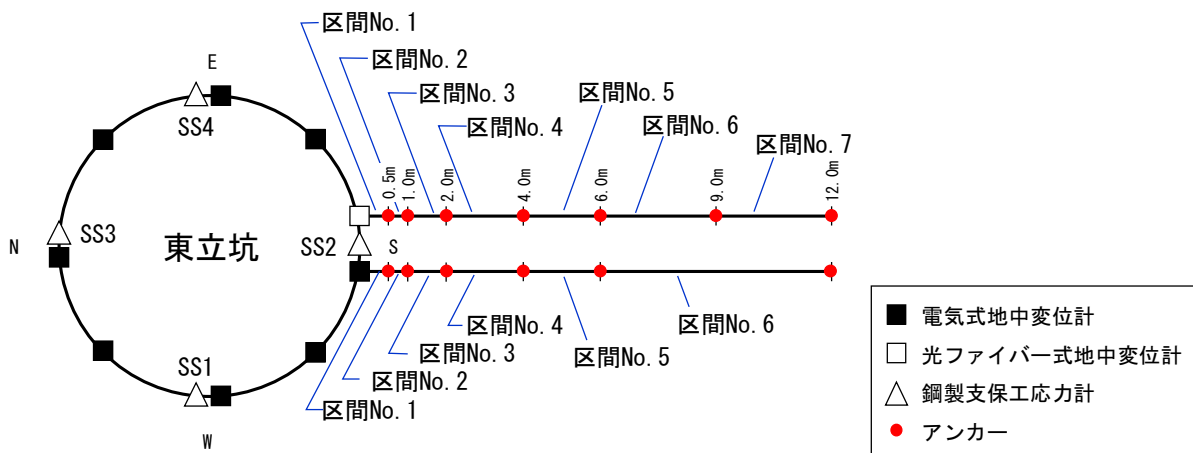
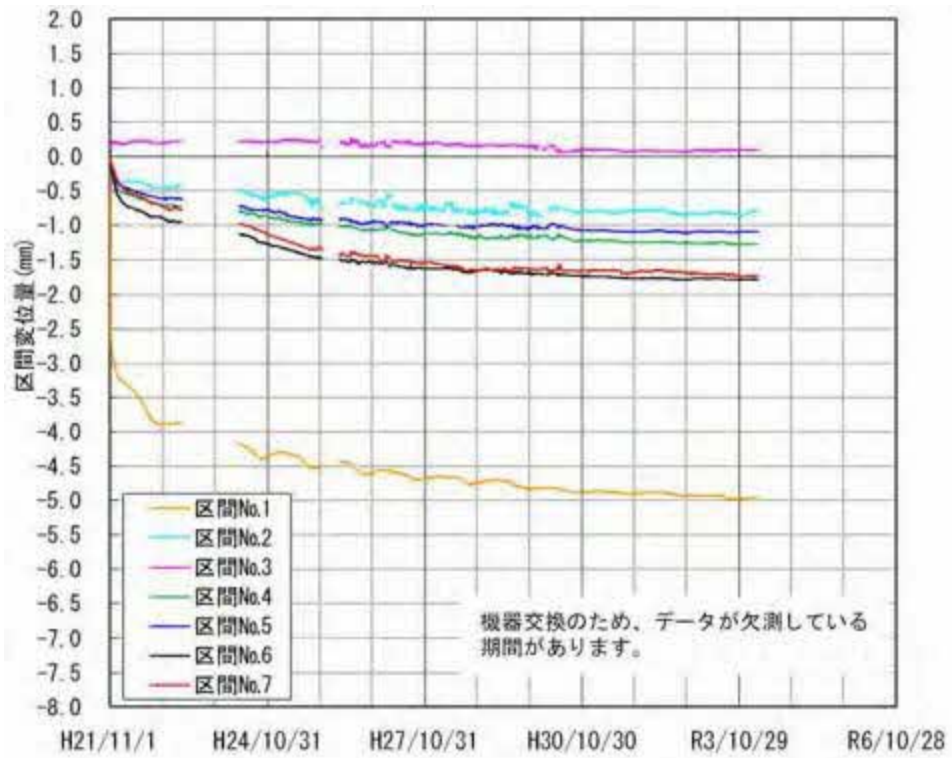
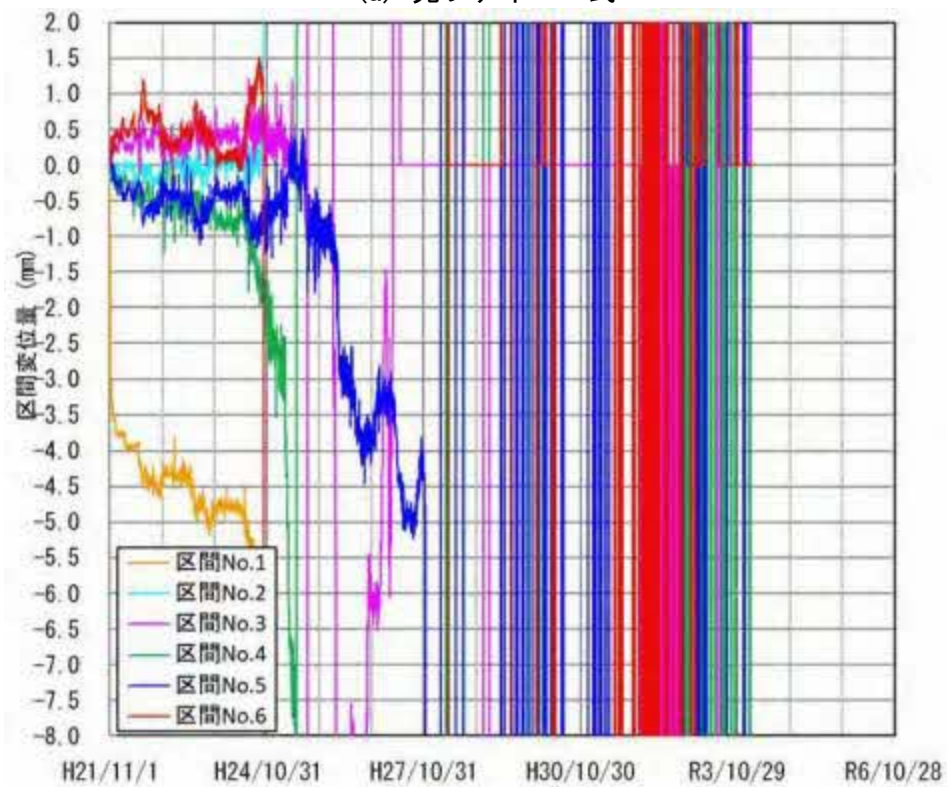


図 117 計測器設置位置図



(a) 光ファイバー式



(b) 電気式

図 118 地中変位計の計測結果

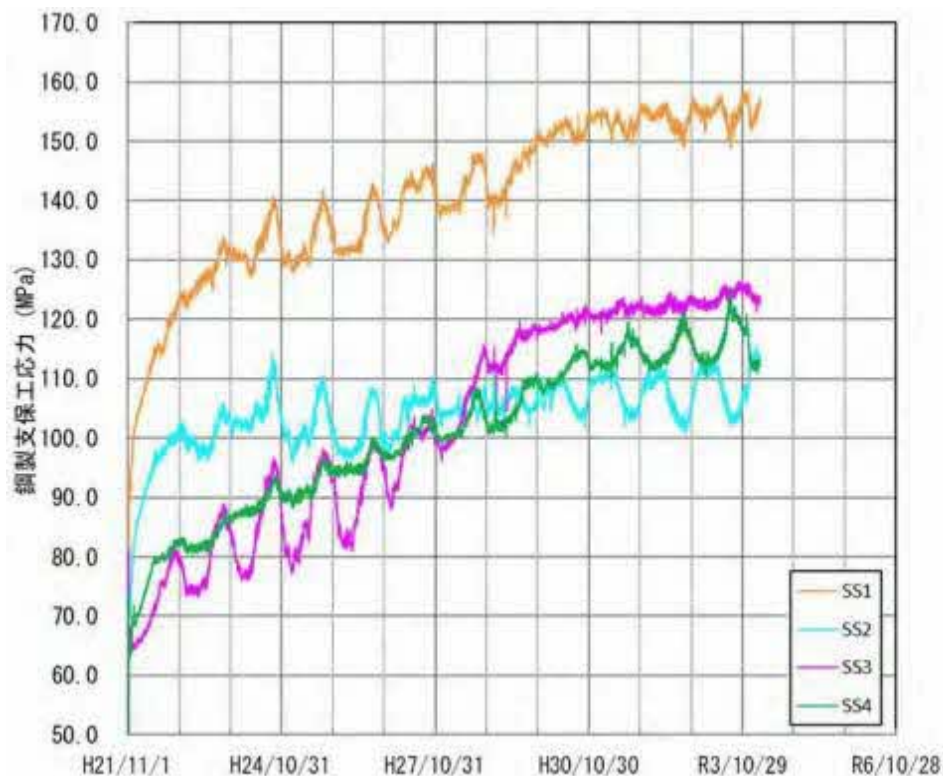


図 119 鋼製支保工応力計の計測結果

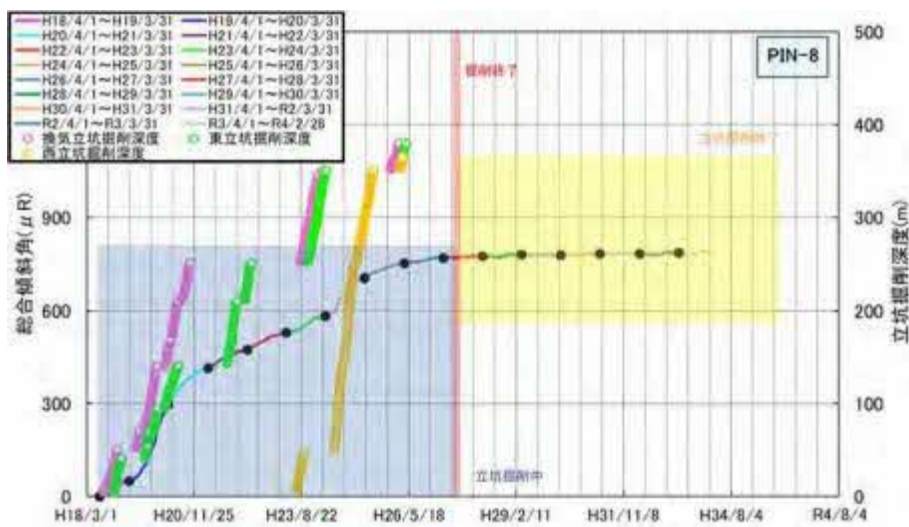
(4) 坑道掘削の影響に関する調査技術の開発

地表面から坑道掘削時の地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺（換気立坑から半径 100 m 以内）に 9 台、東立坑の深度 140 m の接続部付近に 1 台、立坑周辺から 1 km 程度離れた HDB-8 孔近傍に 1 台の高精度傾斜計*80を配置し、坑道掘削に伴う地表付近における岩盤の傾斜の変化を計測しています。令和 3 年度も、過年度までと同様の方法⁽⁸³⁾で計測データ（直交する 2 方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと坑道掘削時の工程との対比を行いました。令和 3 年度は坑道掘削工事がなかったことから、得られた傾斜データの全体的な傾向として、傾斜量の変化は少ないことが確認されました。坑道掘削の影響を示すため、東立坑近傍にある PIN8 の傾斜量と傾斜方向および西立坑から北東方向へ約 1 km 離れた HDB-8 孔近傍の PIN10 の傾斜量を図 120 および図 121 に示します。傾斜方向は、掘削を実施した東立坑および西立坑

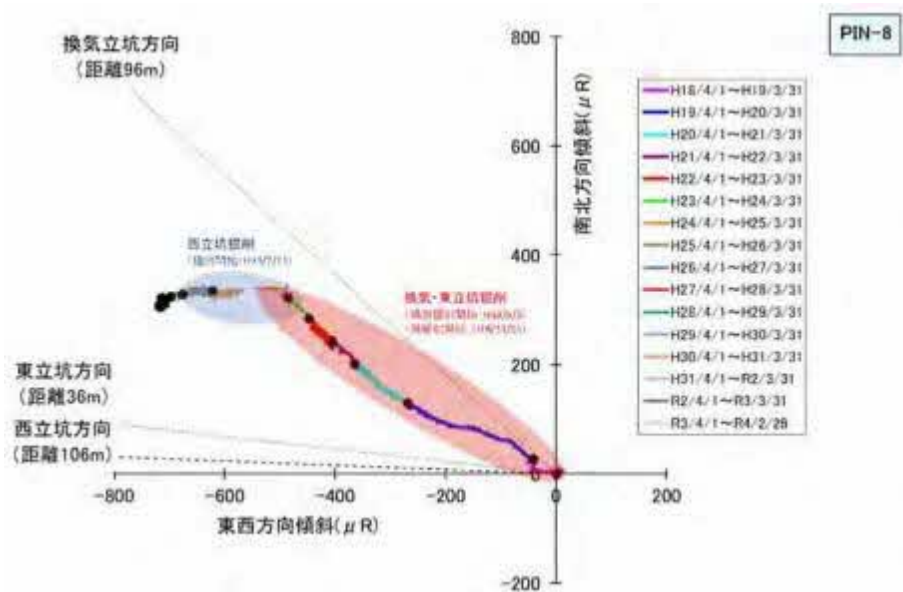
*80：通常の傾斜計が計測できる角度は約 3,600 分の 1 度であるのに対し、約 1 億分の 6 度の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。

の方向でした。また、掘削が終了した後は、傾斜変化はほぼありませんでした（図 120）。一方、PIN10（図 121）では、坑道掘削中および掘削終了後も、地表の傾斜はほとんど観測されませんでした。

これまでの計測データにより、高精度傾斜計によって地下深部の坑道の掘削に伴う地表付近での微小な傾斜量やその傾斜方向が検知できることを確認しました。今後も引き続き傾斜量および傾斜方向のモニタリングを継続するとともに、地下深部の岩盤の挙動との関係性を検討していきます。



(a) 傾斜量



(b) 傾斜方向

図 120 PIN8 の傾斜量および傾斜方向

グラフの縦軸の単位 μR (マイクロラジアン) は角度の単位で、 $1,000 \mu R$ が約 0.06° に相当します。

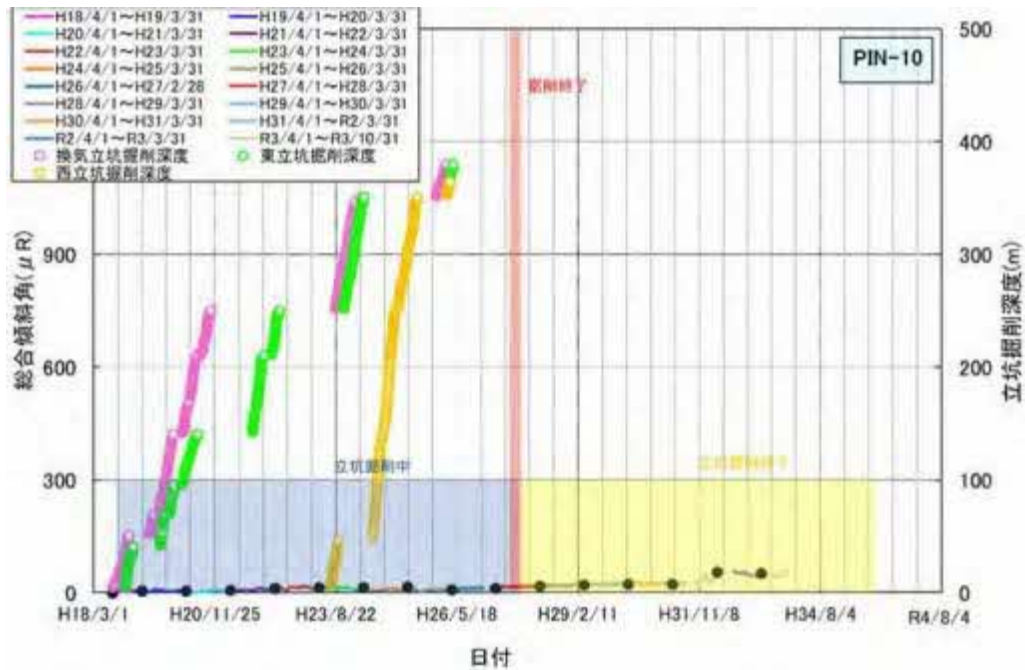


図 121 PIN10 の傾斜量

(5) 地震観測

施設設計の妥当性検証の一環として、地下施設内の 4 台の地震計と地表の 1 台の地震計で地震観測を実施しています。気象庁一元化震源データより作成した令和 3 年 4 月 1 日から令和 4 年 3 月 31 日までの幌延深地層研究センター周辺の震央分布を図 122 に示します。この期間中、気象庁の発表では、幌延町宮園で震度 1 以上の地震は 2 回発生しました（表 9）。これらの地震の地表および地下施設における観測波形を図 123 に示します。地下施設での揺れは地表に比べて小さいことが分かります。

地震に伴う地質環境特性の変化に関わるデータ取得のため、上幌延観測点（HDB-2）と地下施設での地震観測を継続します。

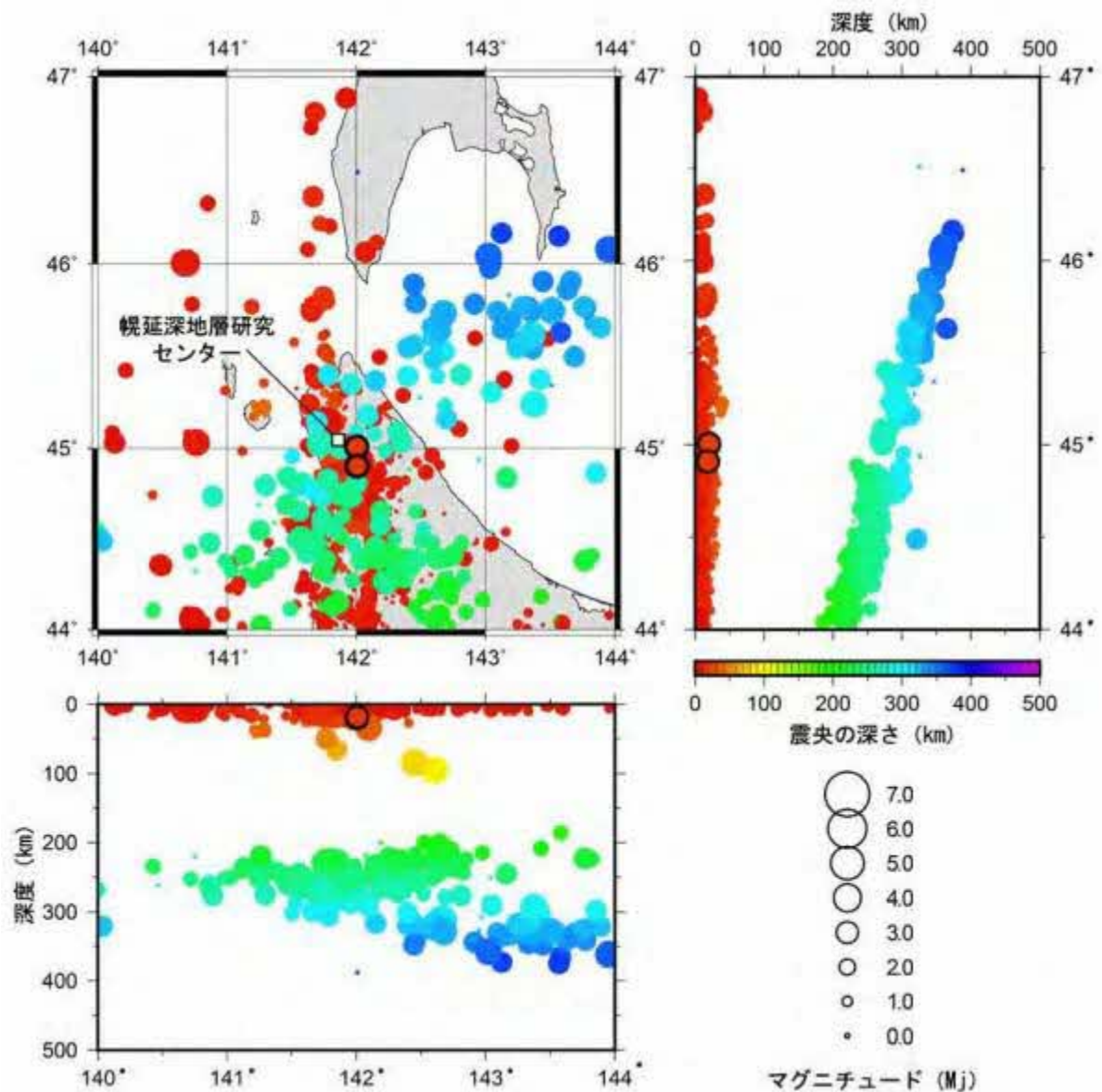


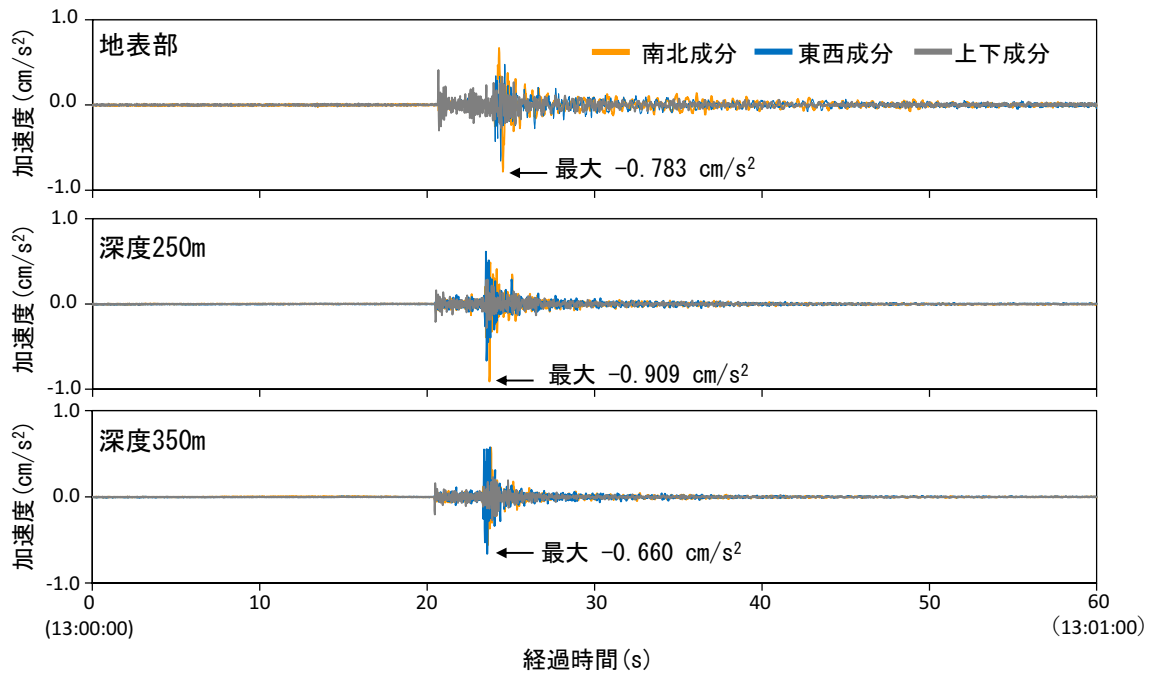
図 122 幌延深地層研究センター周辺の震央分布

表 9 幌延町宮園で観測された震度 1 以上の地震

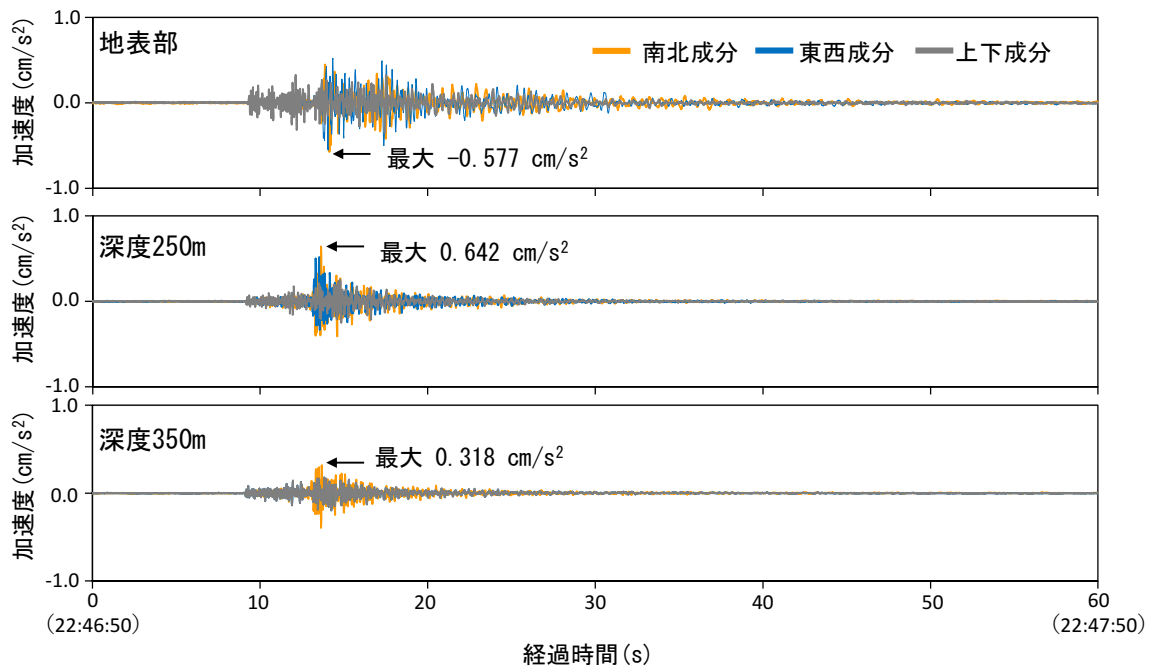
地震の発生日時	震央地名	緯度	経度	深さ	Mj ^{*81}	震度	
						幌延町宮園	最大震度
令和 4 年 1 月 25 日 13:00:17	宗谷地方 北部	45° 00.4' N	142° 00.3' E	20 km	2.6	1	1
令和 3 年 6 月 4 日 22:46:55	留萌地方 中北部	44° 54.0' N	142° 00.4' E	19 km	2.8	1	1

これらの地震の震央は図 122 に黒丸で示しています。

*81：気象庁マグニチュード（地震の規模を表す数値）です。



(a) 令和4年1月25日13:00:00から60秒間の観測波形



(b) 令和3年6月4日22:46:50から60秒間の観測波形

図 123 地表および地下施設で観測された地震の波形

8. 地下施設の管理

(1) 地下施設の整備

令和3年度は、試験坑道1（図5参照）において、人工バリア性能確認試験の解体調査のための試験施工（4.1参照）として、令和2年度に設置した試験体の取り出しおよびプラグの解体、撤去を行いました（図124）。



(a) 試験体の取り出し



(b) プラグの解体・撤去

図 124 地下施設の整備状況

(2) 地下施設の維持管理

令和2年度に引き続き、維持管理業務として、地下施設の機械設備や電気設備の運転、保守および設備の更新（櫓設備、換気設備など）を行い、地下施設の安全確保に努めました（図125）。



(a) 坑内換気設備の更新



(b) 東立坑スカフォードの更新

図 125 設備の点検および更新状況

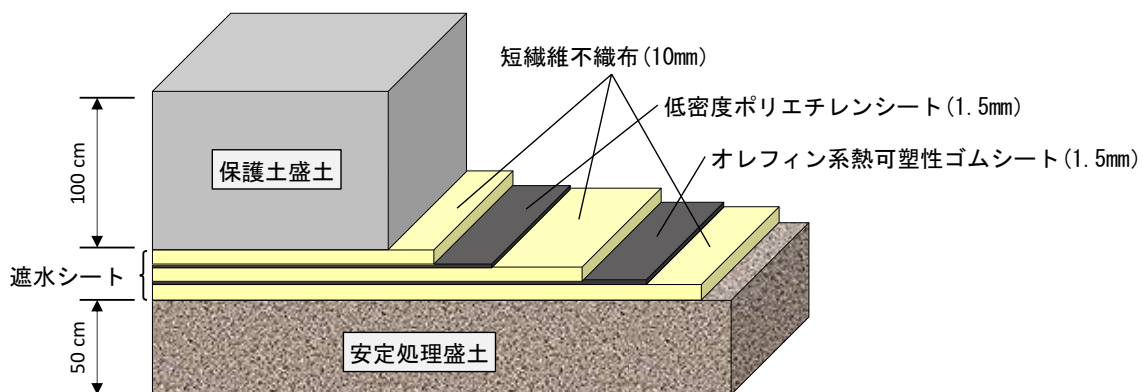
(3) 掘削土（ズリ）の管理

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）には重金属などが含まれていますが、自然由来であることから土壤汚染対策法の適用外となっています。しかし、幌延深地層研究センターでは、周辺環境の保全に万全を期すため、土壤汚染対策法に準拠した管理を行っています。具体的には、対象となる物質が土壤汚染対策法に定める範囲内であることを確認するため、掘削土（ズリ）について建設現場における簡易分析と公的機関による詳細な分析（以下、公定分析）を実施し、同法に準じた適切な管理のもと掘削土（ズリ）置場へ搬入し、保管しています（図 126）。

掘削土（ズリ）置場は、土壤汚染対策法の遮水工封じ込め型に準じた二重遮水シート構造（図 127）となっています。



図 126 掘削土（ズリ）置場



※遮水シートの上に保護土盛土を行い、その上に掘削土（ズリ）が保管されています。

図 127 二重遮水シートの構造

(4) 排水の管理

地下施設からの排出水と掘削土（ズリ）置場に設置している浸出水調整池の浸出水については、硝酸性窒素処理設備、濁水処理設備、脱ホウ素設備、脱窒素設備および揚水設備から構成される排水処理設備（図 128）で処理を行っています。処理済排水は、排水基準値を超過していないことを確認した後、排水管路を通じて天塩川へ放流しています。

地下施設からの排水の公定分析結果については、9.1(2)に示します。



(a) 硝酸性窒素処理設備



(b) 濁水処理設備



(c) 脱ホウ素設備(1号機)



(d) 脱ホウ素設備(2号機)



(e) 脱窒素設備



(f) 揚水設備

図 128 排水処理設備

9. 環境調査

令和 2 年度に引き続き地下施設からの排水などの水質調査および研究所用地周辺の環境影響調査を実施しました。

9.1 排水量および水質調査結果

排水処理設備から天塩川へ放流している排水量について監視を行うとともに、排水処理前後の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質について、調査を行っています。また、掘削土（ズリ）置場の周辺環境への影響を監視するため、清水川および掘削土（ズリ）置場周辺の地下水についても水質調査を行っています。

なお、水質の分析については、公的な分析資格を持つ民間の会社に委託しています。本調査の対象となっている排水系統と各水質調査の採水地点を図 129 に示します。

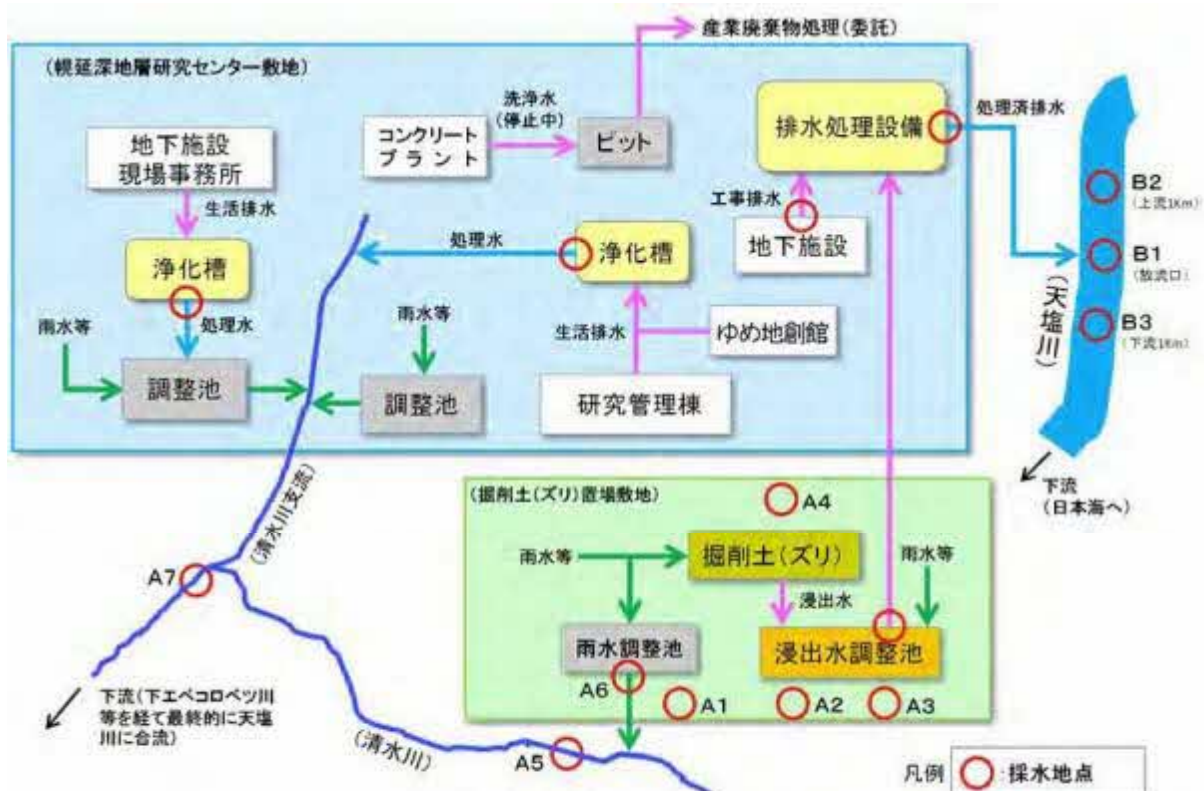


図 129 排水系統と各水質調査の採水地点

(1) 天塩川への排水量

地下施設からの排水水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、排水処理設備において処理を行った後、排水管路を通じて天塩川に放流しています。

令和3年度における天塩川への排水量は表10に示すとおりです。合計排水量は、43,891 m³であり、前年度同時期（52,301 m³）の約84%でした。日最大排水量は、融雪により増水した掘削土（ズリ）置場の浸出水を処理した4月の448 m³が最大値となっており、観測期間を通じて北るもい漁業協同組合との協定値（750 m³/日）を満足しています。また、月排水量および日平均排水量についても、掘削土（ズリ）置場の融雪水を多く処理した4月が最大となっており、月排水量が5,935 m³、日平均排水量が197.8 m³でした。

表 10 天塩川への排水量

年月	月排水量 (m ³)	日最大排水量 (m ³) ※1	日平均排水量 (m ³) ※2
令和3年4月	5,935*3	448*3	197.8*3
令和3年5月	3,436	282	110.8
令和3年6月	3,184	245	106.1
令和3年7月	2,545	220	82.1
令和3年8月	2,441	244	78.7
令和3年9月	2,865	246	95.5
令和3年10月	5,107	380	164.7
令和3年11月	4,315	345	143.8
令和3年12月	4,849	398	156.4
令和4年1月	2,472	249	79.7
令和4年2月	2,637	291	94.2
令和4年3月	4,105	357	132.4
合計	43,891	—	—
最大値	5,935	448	197.8

※1：北るもい漁業協同組合との協定値は750 m³/日

※2：月排水量を月の日数で除した値

※3：各項目の最大値

(2) 地下施設からの排水の水質調査結果

地下施設から排出される「立坑の原水」および「掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水」については、図130に示すとおり、濁水処理、脱ホ

ウ素処理および脱窒素処理（アンモニア性窒素）を行った後、「揚水設備における処理済排水」として排水管路を通じて天塩川に放流しています。また、「掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水」については、貯留時に硝化菌の働きによって生成される硝酸性窒素についても処理を行っています。これらの排水については、排水処理の前と後で定期的（原則1回/月）に水質調査を実施しています。

令和3年度における水質調査結果は、表11に示すとおり、排水基準を超える処理済排水はありませんでした。また、立坑および掘削土（ズリ）置場浸出水調整池の原水についても、これまでの調査結果と同等となっています。

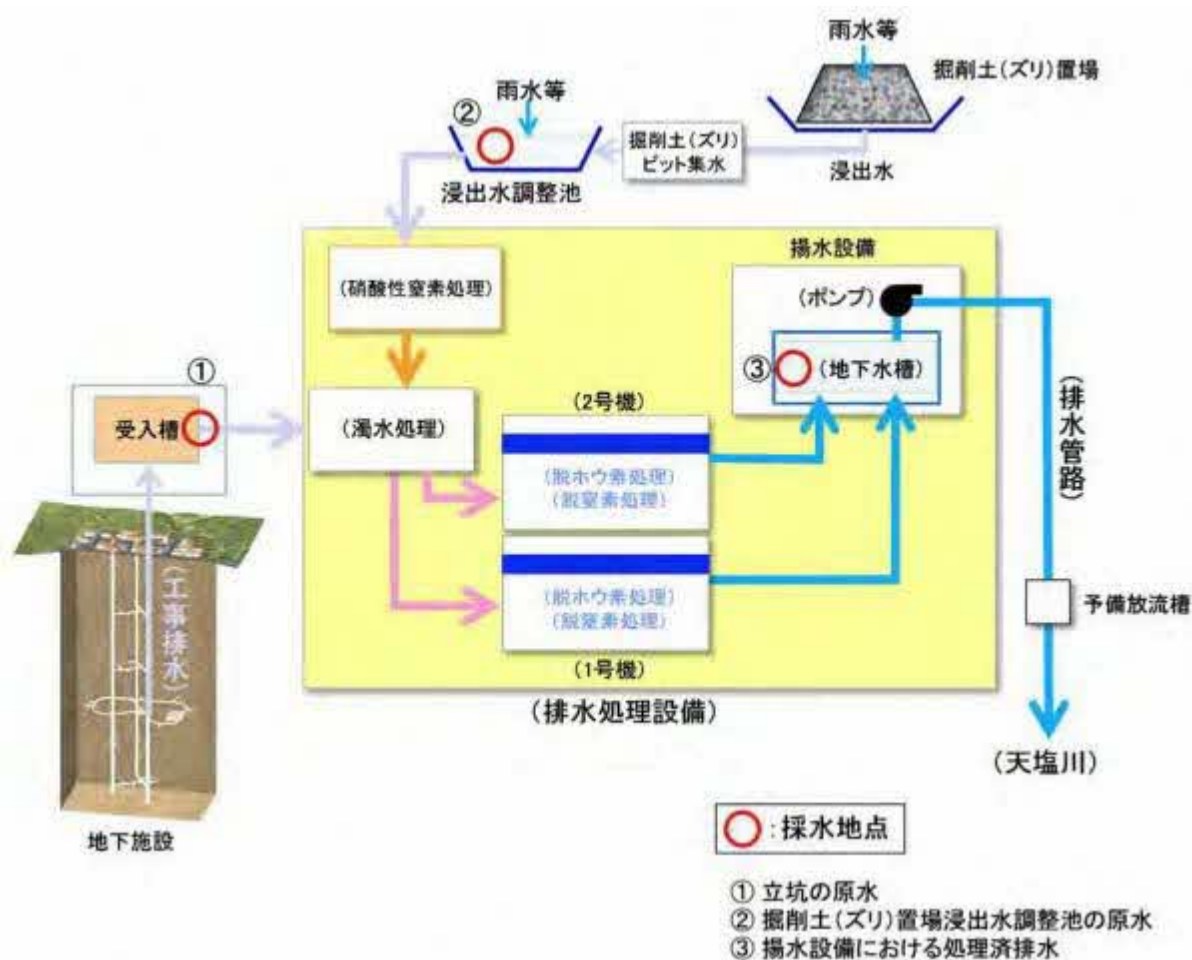


図 130 地下施設からの排水処理フローと採水地点

表 11 地下施設からの排水に係る水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2	過年度	令和2年度	令和3年度	(参考値) 水質汚濁防止法 排水基準
		平成18年12月 ～令和2年3月	令和2年4月 ～令和3年3月	令和3年4月 ～令和4年3月	
カドミウム (mg/L)	立坑の原水	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01	
ヒ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.08	<0.01	<0.01	0.1
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
	揚水設備における処理済排水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	
セレン (mg/L)	立坑の原水	<0.01～0.02	<0.01	<0.01	0.1
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.01～0.04	<0.01～0.01	<0.01～0.02	
	揚水設備における処理済排水	<0.01	<0.01	<0.01	
フッ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.8～3.5	<0.8	<0.8	8
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.8	<0.8	<0.8	
	揚水設備における処理済排水	<0.8～1.6	<0.8	<0.8	
ホウ素 (mg/L)	立坑の原水	<0.1～160	69～79	71～79	10
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	<0.1～37	0.9～5.9	1.5～7.3	
	揚水設備における処理済排水	<0.1～3.0	<0.1～1.9	<0.1～0.5	
全窒素 (mg/L)	立坑の原水	0.41～117	68～81	59～79	120 (日間平均 60)
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	3.0～150	4.0～32	20～28	
	揚水設備における処理済排水	0.60～48	9.6～20	9.6～22	
全アンモニア (mg/L)	立坑の原水	0.12～110	39～61	37～59	—
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	0.12～22	0.17～1.1	0.17～1.2	
	揚水設備における処理済排水	<0.05～6.8	<0.05～1.7	<0.05～0.28	
pH	立坑の原水	7.5～9.5	8.1～8.3	8.1～8.2	5.8～8.6
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	6.7～8.7	7.2～7.6	7.2～8.6	
	揚水設備における処理済排水	6.9～8.6	7.5～8.2	7.5～8.1	
浮遊物質 量 (mg/L)	立坑の原水	4～580	10～49	8～24	200 (日間平均 150)
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	1～170	1～21	3～9	
	揚水設備における処理済排水	<1～9	<1～1	<1～3	
塩化物イオン (mg/L)	立坑の原水	20～4,300	3,100～3,600	3,300～3,700	—
	掘削土(ズリ)置場浸出水調整池の原水	10～1,500	29～150	37～240	
	揚水設備における処理済排水	38～4,700	1,400～3,300	1,300～2,900	

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 130 参照

(3) 天塩川の水質調査結果

地下施設からの排水の放流先である天塩川の採水地点(図 131)において、定期的(原則1回/月)に採水し(図 132)、水質調査を実施しています。

令和3年度の調査結果は、表 12 に示すとおりです。浮遊物質について、北るもい漁業協同組合との協定値(20 mg/L)を超過した時期(4月、

5月、12月) がありました。放流口の上流側 (B2) においても同程度の高い値を示しており、同日に採取した揚水設備における処理済排水の浮遊物質量は低い値 (<1 mg/L) であることから、地下施設からの排水の影響ではなく、融雪などに伴う自然的な要因によるものと考えられます。その他の調査項目については、協定値の範囲内であることから天塩川に影響を与えていないものと判断しています。



図 131 天塩川の採水地点

国土地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を加工し、採水地点などを追記



(a) 採水状況



(b) 採水試料

図 132 天塩川での採水状況

令和3年6月1日の実施状況

表 12 天塩川の水質調査結果

分析項目※1	採水地点※2		過年度		令和3年度	北るもい 漁業協同組合 協定値
			平成18年6月 ～平成18年11月 (放流前)	平成18年12月 ～令和3年3月 (放流後)	令和3年4月 ～令和4年3月	
ホウ素 (mg/L)	B1	表層	<0.02~0.04	<0.01~0.35	0.01~0.20	5
		中層	—	<0.01~3.5	0.01~0.98	
		深層	<0.02~3.35	<0.01~4.9	0.01~4.9	
	B2	表層	<0.02~0.04	<0.01~0.27	0.01~0.15	
		中層	—	<0.01~3.7	0.01~1.0	
		深層	<0.02~3.28	<0.01~5.0	0.01~4.8	
	B3	表層	<0.02~0.07	<0.01~0.28	0.01~0.27	
		中層	—	<0.01~2.5	0.01~1.0	
		深層	<0.02~1.03	<0.01~4.7	0.01~5.0	
全窒素 (mg/L)	B1	表層	0.37~1.06	0.11~2.2	0.24~0.85	20
		中層	—	0.15~2.2	0.27~0.84	
		深層	0.42~1.50	0.15~6.5	0.22~0.87	
	B2	表層	0.37~1.14	0.14~2.2	0.23~0.87	
		中層	—	0.15~2.3	0.26~0.86	
		深層	0.4~1.16	0.16~2.3	0.24~0.87	
	B3	表層	0.4~1.31	0.16~2.2	0.23~0.84	
		中層	—	0.11~2.3	0.24~0.87	
		深層	0.49~1.24	0.16~2.3	0.21~0.87	
全アンモニア (mg/L)	B1	表層	—	<0.05~0.83	<0.05~0.05	2※3
		中層	—	<0.05~0.92	<0.05~0.11	
		深層	—	<0.05~0.85	<0.05~0.06	
	B2	表層	<0.01~0.13	<0.05~0.89	<0.05~0.05	
		中層	—	<0.05~0.76	<0.05~0.14	
		深層	0.01~0.35	<0.05~0.85	<0.05~0.11	
	B3	表層	0.01~0.21	<0.05~0.89	<0.05~0.05	
		中層	—	<0.05~0.90	<0.05~0.12	
		深層	0.02~0.17	<0.05~0.96	<0.05~0.15	
pH	B1	表層	7.1~7.4	6.4~7.8	6.8~7.7	5.8~8.6
		中層	—	6.5~7.7	6.8~7.4	
		深層	7.0~7.6	6.5~8.0	6.8~8.0	
	B2	表層	7.1~7.4	6.6~7.9	6.7~7.7	
		中層	—	6.5~7.9	6.8~7.4	
		深層	7.2~7.6	6.6~8.0	6.8~7.9	
	B3	表層	7.0~7.6	6.6~7.9	6.8~7.6	
		中層	—	6.6~7.7	6.8~7.5	
		深層	7.1~7.4	6.6~8.0	6.9~8.0	
浮遊物質 (mg/L)	B1	表層	3~34	<1~360	<1~67	20
		中層	—	<1~390	<1~76	
		深層	6~86	<1~400	<1~68	
	B2	表層	3~36	<1~390	1~62	
		中層	—	<1~400	<1~69	
		深層	5~47	<1~460	<1~75	
	B3	表層	3~35	<1~420	<1~63	
		中層	—	<1~460	<1~68	
		深層	5~49	<1~650	<1~75	

※1：主な分析項目を抜粋

※2：採水地点は図 131 参照、表層（水面下 0.1 m 付近）、中層（塩水層と淡水層の間もしくは 1/2 深度）、深層（川床上 1 m 付近）

※3：北るもい漁業協同組合との確認により、放流口下流 1 km (B3) 地点の値

(4) 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査結果

地下施設の建設により発生した掘削土（ズリ）は、二重に遮水された掘削土（ズリ）置場で管理していますが、遮水された外側となる掘削土（ズリ）置場周辺への影響を監視するため、図 133 に示す採水地点において、観測用のボーリング孔から地下水を定期的（原則 4 回/年）に採水し（図 134）、水質調査を実施しています。

令和 3 年度における調査結果は、表 13 に示すとおり、これまでの調査結果と同等であることから、掘削土（ズリ）置場が周辺環境に影響を与えていないものと判断しています。



図 133 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水地点



(a) 採水状況（A3 地点）



(b) 採水状況（A4 地点）

図 134 掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の採水

令和 3 年 5 月 11 日の実施状況