

原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価

武田匡樹*1 石井英一*1

割れ目の自己閉塞が期待できない岩盤においては、地下施設の建設時に立坑や坑道沿いに掘削損傷領域と呼ばれる高透水性領域が形成され物質の移行経路となる可能性がある。そのため、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価では、処分坑道やアクセス坑道における掘削損傷領域内の核種移行特性の把握が重要な課題となる。岩盤中の核種移行特性を評価する上でトレーサー試験が有効であるものの、堆積岩中の掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の事例は著者らの知る限りではない。著者らは幌延深地層研究センターの地下施設（幌延 URL）において珩質泥岩中の掘削損傷領域の割れ目を対象とした孔間トレーサー試験を実施した。孔間トレーサー試験は幌延 URL の深度 350 m に並走する 2 本の水平坑道の一方からもう一方の掘削損傷領域に向けて掘削された 2 本のボーリング孔（H4-1 孔および P 孔）で実施し、トレーサーにはウラニウムを用いた。注入孔（H4-1 孔）から注入したトレーサーは揚水孔（P 孔）以外の場所においても観測されたものの、揚水孔では、疑似的な定常注入に応じた破過曲線が取得できた。トレーサー試験データに基づき、注水区間と揚水区間の直線距離（4.2 m）を移行経路長とした、一次元移流分散解析を行った。その結果、破過曲線を概ね再現でき、移行経路の断面積（ $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ）および移行経路中の平均流速（ $2.3 \times 10^{-4} \text{ m/min}$ ）が推定されるとともに、上記の移行経路長に対する縦方向分散長として 0.12 m が導出された。掘削損傷領域の割れ目がネットワークを形成し、割れ目内の移行経路が屈曲している可能性を考慮すると、移行経路の断面積はさらに小さく見積もられる。移行経路長に対する縦方向分散長の割合は 3% で、天然の割れ目や岩盤基質部で経験的に知られる移行経路長と縦方向分散長の関係と同様であった。今回の試験により、天然の割れ目や岩盤基質部と同様な移流分散効果が堆積岩中の掘削損傷領域内でも期待できることが示された。

Keywords: 地層処分, 珩質泥岩, 掘削損傷領域, 孔間トレーサー試験, 縦方向分散長

In rock masses where self-healing is not expected, a highly permeable zone called an excavation damaged zone (EDZ) possibly forms along shafts and tunnels during a facility construction in deep underground. Therefore, understanding nuclide transport characteristics in the EDZ of disposal and access tunnels is an essential issue in the safety assessment of geological disposal of high-level radioactive waste. Tracer tests are effective in evaluating the transport of nuclides in rock masses, but the transport properties of EDZ in sedimentary rock, to our best knowledge, have not been investigated by in situ tracer tests. The authors conducted cross-hole tracer tests on EDZ fractures at the Horonobe Underground Research Laboratory (URL). The tracer tests used two boreholes (H4-1 and P) drilled from one horizontal tunnel to the EDZ that formed above the crown of another tunnel running parallel to the former tunnel at the depth of 350 m in Horonobe URL. The tracer (uranine) injected into the borehole of H4-1 was observed not only in the pumped borehole of P but also in other observation points, whereas we could properly obtain the breakthrough curve under the quasi-steady state injection in the pumped borehole. Based on the breakthrough curve, we performed one-dimensional advection-dispersion analyses, assuming flow path length as a linear distance of 4.2 m between the injection and pumping sections. The results showed the cross-sectional area of flow path and the mean velocity to be $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ and $2.3 \times 10^{-4} \text{ m/min}$, respectively, and the longitudinal dispersivity was estimated to be 0.12 m to the flow path length of 4.2 m. Assuming the flow path to be tortuous in the EDZ fracture network further reduces the estimated cross-sectional area. The longitudinal dispersivity normalized to the assumed flow path length was 3% and consistent with the empirical relationship between flow path length and longitudinal dispersivity for natural fractures and rock matrices in the literature. The series of tracer tests and analyses applied in this study demonstrated that the effects of dispersion can be expected also within EDZ fractures, similar to the level in natural fractures and rock matrices.

Keywords: Geological disposal, Siliceous mudstone, Excavation damaged zone, Cross-hole tracer test, Longitudinal dispersivity

1 はじめに

地下深部に立坑やトンネルなどの構造物を建設する場合、これら構造物近傍の局所的な応力状態の変化によって、近傍の岩盤に割れ目が発達する領域が形成されることが知られている。このような領域は掘削損傷領域 (EDZ; excavation damaged zone) と呼ばれ[1], 岩盤基質部と比べ有意に透水性が高いことが知られている。粘土質岩では、割れ目の”self-healing”あるいは”self-sealing”といった現象によって、透水性が元の状態に戻る可能性が指摘されているものの[2], このような現象が期待できない岩盤においては、坑道沿いの EDZ が水みちとして機能する可能性がある[1–6]. そのため、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価では、EDZ における核種の移行特性を把握することが重要である。

EDZ の核種移行評価については、これまで、廃棄体から漏洩した核種が EDZ 内を流れる地下水と瞬時に混合すると仮定して、EDZ の割れ目内の移流分散、割れ目表面への吸着、岩盤基質部への拡散といった現象を考慮しない概念[3,6]や、EDZ 内の割れ目を平行平板と仮定して、上記のような割れ目内の移流分散などの現象を考慮する概念[7]などが提案されている。割れ目表面への吸着や岩盤基質部への拡散は実験室スケールで確認できる現象であり、室内実験によりその効果を評価することができる。一方、移流に伴う分散は核種の溶存濃度を低下させる現象として重要であるが[8], 数メートル以上にわたって連結する EDZ の割れ目内の分散効果を室内実験で確認することは難しく、原位置試験により確認する必要がある。これまでに、天然の割れ目や岩盤基質部を対象とした原位置トレーサー試験により、様々な空間スケールの移流に伴う分散長が評価されており、空間スケールに応じた分散長の経験式が提案されている[9,10]. しかしながら、堆積岩中の EDZ の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験は著者らの知る限りこれまでに例がなく、天然の割れ目や岩盤基質部で指摘されているような分散効果を EDZ でも想定可能かは確認でき

Assessment of advection dispersion through excavation damaged zone in sedimentary rock by in situ tracer tests by Masaki TAKEDA (takeda.masaki@jaea.go.jp), Eiichi ISHII

*1 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

Horonobe Underground Research Center, Japan Atomic Energy Agency
〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432-2

(Received 7 December 2023; accepted 22 May 2024)

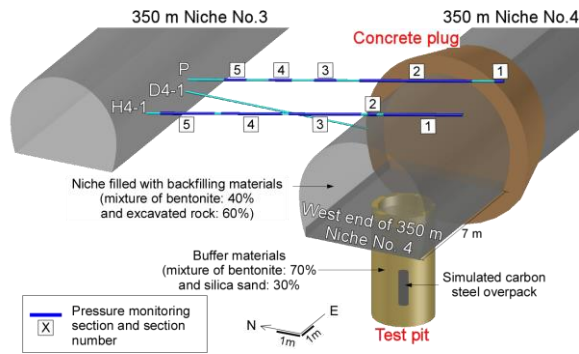


Fig.1 Layout of boreholes H4-1, P and D4-1 at 350 m Niches No.3 and No.4.

ていない。検討事例がない理由として、EDZは立坑や坑道のごく近傍に発達し、掘削後の時間経過とともに不飽和領域が進展しやすいため、トレーサー試験自体が困難であることが、その要因として考えられる。

本研究では、堆積岩中のEDZ内における移流分散効果を確認することを目的として、幌延深地層研究センターの地下施設（以下、幌延URL）の坑道沿いに形成されたEDZの割れ目を対象に孔間トレーサー試験を行った。本稿ではその結果について報告する。

2 試験場所および地質概要

幌延URLの周辺には新第三紀堆積岩が分布しており、深度350mには主に珪藻遺骸（opal-A）が埋没結成作用によって再結晶化したopal-CTからなる珪質泥岩（稚内層）が分布している。同深度の珪質泥岩中には水平坑道が建設されており、350m試験坑道3（350m Niche No.3）と350m試験坑道4（350m Niche No.4）と呼ばれる水平坑道が東西方向に並走している（Fig.1）。Fig.1に示すように、350m試験坑道3の南側壁面から350m試験坑道4の上位に向かって2本のボーリング孔（H4-1孔およびP孔）が掘削されている[11]。また、350m試験坑道3の南側壁面から350m試験坑道4の北側壁面に向かってD4-1孔が掘削されている（同ボーリング孔はセメント系材料で埋孔されている）。さらに、350m試験坑道4は人工バリア性能確認試験[12]に伴い、コンクリートプラグ（Concrete plug）から同試験坑道の西端（Fig.1）までの7m区間がベントナイト系材料で埋め戻されており、埋戻し部中央の下位に設けた試験孔（Test pit）には模擬オーバーパックおよび緩衝材が埋設されている（Fig.1）。埋め戻された7m区間および試験孔（Test pit）には原位置地下水の注水が継続的に行われており、坑道内およびその周辺岩盤の不飽和領域の形成が抑制されている。

トレーサー試験に利用したボーリング孔はH4-1孔およびP孔であり、それぞれ5つの間隙水圧モニタリング区間が設定されている（Fig.1）。Fig.2(a)およびFig.3(a)に、コア観察と孔壁画像（ボアホールテレビューワ；BTV）観察の両方で認められた各孔内の割れ目の位置を示す。H4-1孔の孔口から2.0mまでの範囲と9.6m~10.0mの範囲には割れ目の密集部が確認でき（Fig.2(a)）、P孔では8.0m~8.3mの範囲と12.6m~13.4mの範囲に割れ目の密集部が確認で

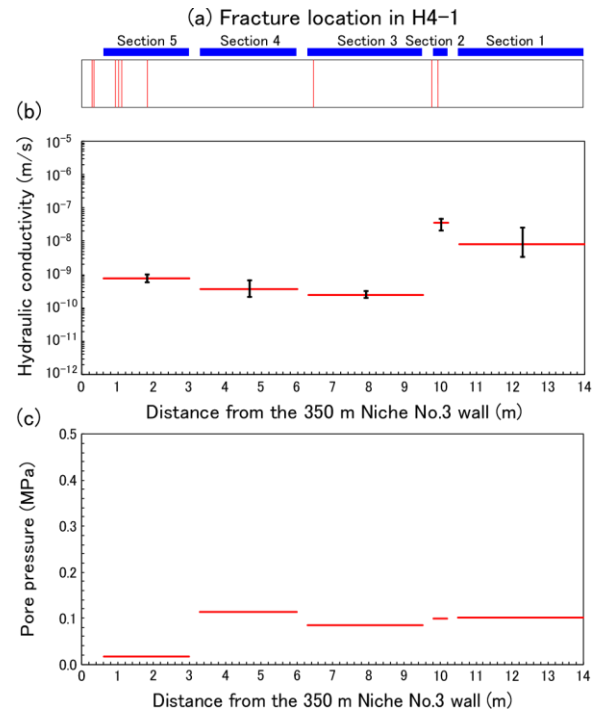


Fig.2 Fracture location (a), hydraulic conductivity (b), and pore pressure in November 2021 (c) on each monitoring section of H4-1. The diagram of (b) shows mean hydraulic conductivity and the range of maximum and minimum values based on Yoshino et al. [11], Samata and Ishii [13] and the preliminary hydraulic tests in this study.

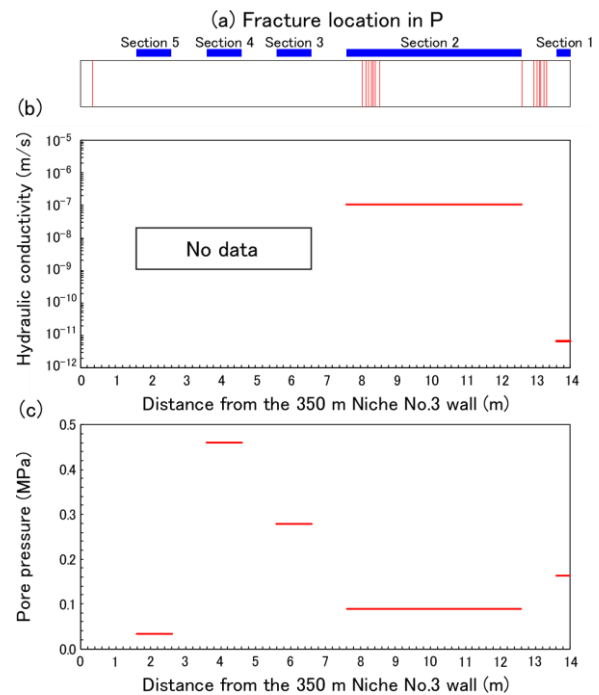


Fig.3 Fracture location (a), pore pressure in November 2021 (b), and hydraulic conductivity derived from the preliminary hydraulic test in this study (c) on each monitoring section of borehole P.

きる (Fig.3(a)). これらの割れ目は, 350 m 試験坑道 3 および 350 m 試験坑道 4 の掘削時の応力開放によって生じた引張性の EDZ 割れ目と考えられている[14, 15]. モニタリン

グ区間毎の引張性割れ目の本数は, H4-1 孔の孔口から 10.5 m~14.0 m の区間 1 で 0 本, 孔口から 9.8 m~10.2 m の区間 2 で 1 本, P 孔の孔口から 13.6 m~14.0 m の区間 1 で 0 本, そして孔口から 7.6 m~12.6 m の区間 2 で 7 本である (Fig.2(a), Fig.3(a)).

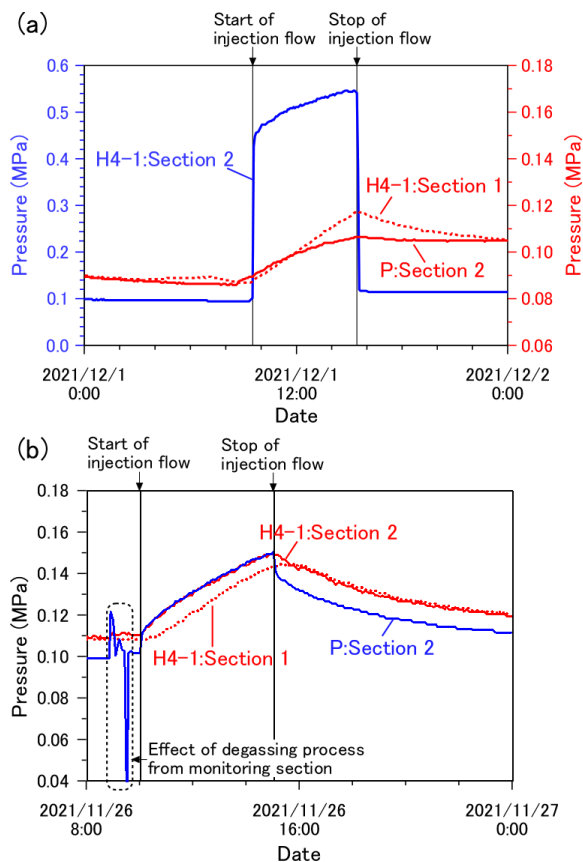


Fig.4 Hydraulic pressure responses (a) at section 2 of borehole P and section 1 of borehole H4-1 during a preliminary constant rate injection with 200 mL/min into section 2 of H4-1, and (b) at sections 1 and 2 of borehole H4-1 during a preliminary constant rate injection with 1,000 mL/min into section 2 of borehole P. The blue solid line denotes pressure in the injection section.

Fig.2(b), (c)および Fig.3(b), (c)に各モニタリング区間の透水係数と間隙水圧を示す. Fig.2(b)は, 吉野他[11]および佐俣・石井[13]で報告されている各モニタリング区間の透水係数の最大~最小値の範囲と平均値を示している (H4-1 孔の区間 2 は本研究の事前調査により計測した透水係数の値も含まれる). Fig.3(b)は本研究の事前調査により計測された P 孔の区間 1 および区間 2 の透水係数を示している. H4-1 孔の区間 1, 区間 2, および P 孔の区間 2 の透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m/s の範囲内にあり, 他の区間の透水係数と比べて有意に高い (Fig.2(b), Fig.3(b)). H4-1 孔および P 孔の間隙水圧は, P 孔の区間 3 および区間 4 を除き, 概ね 0.2 MPa 未満であり, そのうち EDZ の割れ目が存在すると判断される H4-1 孔の区間 1, 区間 2, および P 孔の区間 2 の間隙水圧は概ね 0.1 MPa である (Fig.2(c), Fig.3(c)).

事前調査において H4-1 孔の区間 2 から定流量注水 (200 mL/min) を行った結果, H4-1 孔の区間 1 および P 孔の区間 2 で明瞭な水圧応答が確認され, 注水開始時から注水終了時までの水圧上昇量は H4-1 孔の区間 2 で 0.45 MPa, H4-1 孔の区間 1 で 0.03 MPa, そして P 孔の区間 2 で 0.02 MPa であった (Fig.4(a)). 同様に, P 孔の区間 2 に定流量注水 (1,000 mL/min) を行った結果, H4-1 孔の区間 1 および区間 2 で明瞭な水圧応答が確認され, 注水開始時から注水終了時までの水圧上昇量は P 孔の区間 2 で 0.05 MPa, H4-1 孔の区間 1 および区間 2 ともに 0.04 MPa であった (Fig.4(b)). これらの水圧応答から, H4-1 孔の区間 1, 区間 2, および P 孔の区間 2 には水理的に互いに連結し合った EDZ の割れ目が存在すると判断できる. H4-1 孔の区間 1 では, 孔壁画像観察で割れ目が認められなかったものの, コア観察では割れ目が認められており, 孔壁画像観察で視認できないような微細な割れ目が同区間に存在することが考えられる.

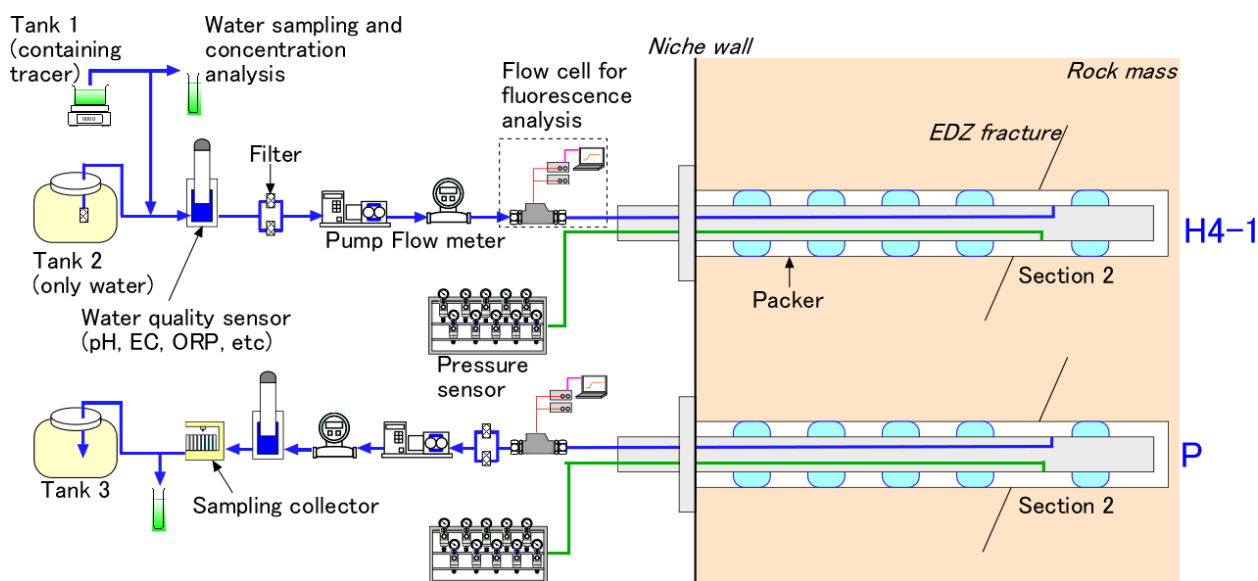


Fig.5 Schematic diagram of tracer test equipment.

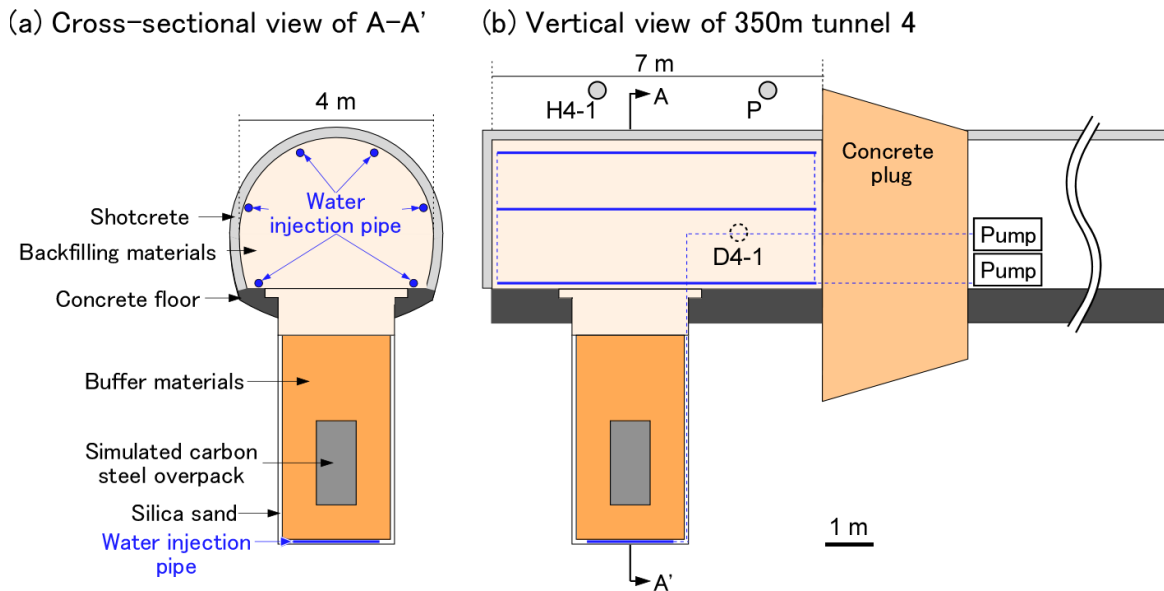


Fig.6 Schematic diagram of water injection method into the section of backfilling and test pit in 350 m tunnel 4. The diagram of (a) shows a cross-sectional view of A-A' in (b). The diagram of (b) shows a vertical view of 350 m tunnel No.4. Blue solid lines and blue-filled circles mean the screen pipes around which are wrapped a non-woven fabrics, and blue dashed lines mean the non-screen pipes. Injection water from the pump can flow out from only the screen pipes.

3 原位置トレーサー試験

3.1 試験概要

H4-1 孔と P 孔に設置した間隙水圧モニタリング装置を利用して孔間トレーサー試験を実施した (Fig.5)。水理学的に互いに連結し合った明瞭な割れ目が存在する H4-1 孔の区間 2 と P 孔の区間 2 を試験対象とし、注水区間を H4-1 孔の区間 2、揚水区間を P 孔の区間 2 とした。トレーサーには蛍光染料として知られるウラニウムを用いた。トレーサーの注入は 2 種類の方法で実施し、パルス注入による孔間トレーサー試験を約 4 日実施した後に、定常注入による孔間トレーサー試験を実施した。これらの孔間トレーサー試験期間中は H4-1 孔の区間 2 への注水 (20 mL/min) と P 孔の区間 2 からの揚水 (150 mL/min) を継続して行い、パルス注入から定常注入への切り替え時でもそれらを止めることなく継続した。パルス注入で用いた水は遊離したガスを多く含んだ原位置の地下水で、定常注入で用いた水はパルス注入時に用いた地下水と比べて遊離ガスの少ない工事用水 (幌延町内の浅層ボーリング孔から採取した地下水[16])

であった (事前調査で行った透水試験も工事用水を使用)。パルス注入時のトレーサーの注入時間と注入濃度はそれぞれ 20 分間および 500 mg/L で、定常注入時のそれらは約 14 日間および 500 mg/L であった。孔間トレーサー試験中は、350 m 試験坑道 4 の埋戻し部および試験孔 (Test pit) へ、試験坑道周辺で得られた原位置の地下水を継続的に注水し、トレーサー試験区間周辺の EDZ を水に飽和した状態に保った (Fig.6)。本稿では、定常注入時と比べパルス注入時に使用した原位置地下水の遊離ガスの影響が大きかったため、定常注入時における孔間トレーサー試験結果のみを取り扱うこととする。

トレーサーの濃度の観測地点を Fig.7 に示す。コンクリートプラグ外側 (Fig.7) の壁面には継続して滲水が確認され、それらは側溝 (Trench) を流れて排水ピット (Drain pit : Fig.7 の M1) に集水される。コンクリートプラグ内側 (Fig.7) の北側壁面とつながる D4-1 孔の孔口付近 (Fig.7 の M2) にも継続して滲水が確認される。これらの滲水は前述した 350 m 試験坑道 4 の埋戻し部および試験孔 (Test pit) へ注水した地下水が流れ出ていると考えられる。したがって、トレーサー試験中の濃度観測は H4-1 孔の区間 2 および P 孔の区間 2 で行うとともに、上記の排水ピット内 (Fig.7 の M1) と D4-1 孔の孔口付近 (Fig.7 の M2) でも地下水を定期的に採取し、濃度分析を実施した。トレーサーの濃度分析は分光蛍光光度計 (日立社製 : F2500) を使用した。

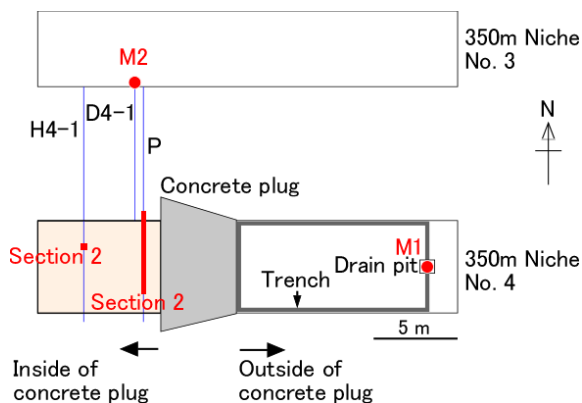


Fig.7 Four monitoring locations for tracer concentration.

3.2 トレーサー試験結果

Fig.8 に H4-1 孔および P 孔の区間 2 におけるトレーサー濃度の経時変化を示す。トレーサーの注入を開始してから、8,000 分~8,500 分 (6 日程度) 後に P 孔の区間 2 で有意なトレーサー濃度の上昇が確認された。試験開始から約 20,000 分 (約 14 日) 後にトレーサーの注入を停止しているが、その後も P 孔の区間 2 のトレーサー濃度は上昇し続け

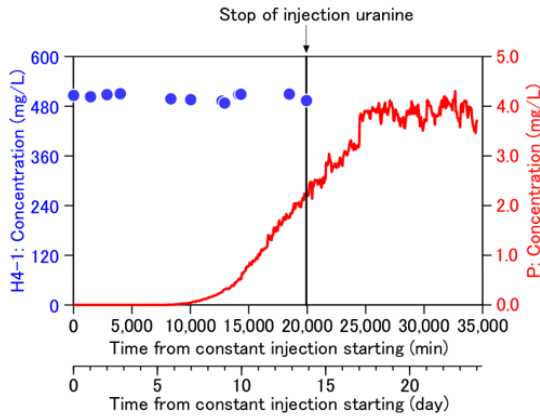


Fig.8 Tracer concentrations during the constant injection test at section 2 of boreholes H4-1 and P.

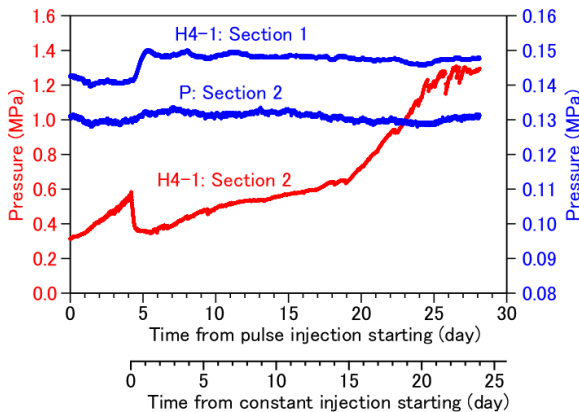


Fig.9 Hydraulic pressures at sections 1 and 2 of borehole H4-1 and section 2 of borehole P during the cross-hole tracer tests.

た。25,000分(約17日)後以降は、ばらつきが認められるものの、約4 mg/L程度で概ね濃度の安定が認められる。

Fig.9 にトレーサー試験中の試験区間の水圧観測結果を示す。同図から、H4-1 孔の区間1およびP 孔の区間2は概ね一定の間隙水圧であったことが確認できるが、H4-1 孔の区間2は、定常注入直後に間隙水圧が低下した(Fig.9)。この間隙水圧の一時的な低下の原因としては、以下のような可能性が考えられる。すなわち、パルス注入時に用いた地下水に含まれる遊離ガスが、H4-1 孔の区間2の周辺に滞留し続けることによってH4-1 孔の区間2近傍の透水性が低下し、パルス注入時に間隙水圧が比較的早い速度で上昇した。その後、定常注入時において、パルス注入時に用いた原位置地下水と比べて混入している遊離ガスの量が少ない工事用水を使用したことにより、H4-1 孔の区間2の周辺に滞留していた遊離ガスの一部がH4-1 孔の区間2の周辺から押し流され、その結果、H4-1 孔の区間2近傍の透水性が増加(回復)し、間隙水圧が一時的に低下した可能性が考えられる。

H4-1 孔の区間2の間隙水圧は定常注入直後の一時的な低下後、継続的に増加したが、最終的に水圧が一定な状態になるまでは確認できなかった(Fig.9)。定常注入によるトレーサー試験が成立するには、定流量での注水/揚水によって、その周辺岩盤の間隙水圧がほぼ一定になっているこ

とを確認する必要がある。したがって Fig.9 に示される H4-1 孔の区間2の間隙水圧はこの条件を直ちに満たさない。しかし、本研究は以下の理由により、H4-1 孔近傍の岩盤の間隙水圧は定常状態に達していたと仮定した。すなわち、2章で述べたように、H4-1 孔あるいはP 孔の区間2で注水した際に、H4-1 孔の区間1、区間2、およびP 孔の区間2に明瞭な水圧応答が確認できることから(Fig.4)、各区間の割れ目は水理的に連結していると考えられる。このうち、H4-1 孔の区間2の注水の際はH4-1 孔の区間1とP 孔の区間2の間隙水圧が即時に応答している(Fig.4(a))。一方、P 孔の区間2に注水した際のH4-1 孔の区間1の水圧応答は、H4-1 孔の区間2と比べ、約1時間遅れている(Fig.4(b))。したがって、P 孔の区間2で揚水を行っている際にH4-1 孔の区間1の水圧が定常状態に達している場合は、H4-1 孔の区間1よりも水圧応答が速いH4-1 孔の区間2直近の水圧も同様に定常状態に達していることが推察される。したがって、本孔間トレーサー試験では地下水から遊離したガスの影響を十分に排除できず、それによりH4-1 孔の区間2の間隙水圧が安定しなかった可能性を考えた。そして、H4-1 孔の区間1とP 孔の区間2の間隙水圧が安定していたことから、遊離ガスの影響はH4-1 孔の区間2の近傍に限定的であり、これを除き、注水孔および揚水孔近傍の岩盤の間隙水圧は定常状態に達していたと考えた。本研究ではこれらの解釈に基づき、本トレーサー試験は定常注入によるトレーサー試験が疑似的に成立していたと仮定した。

定常注入開始後35,000分(約24日)までにP 孔の区間2、M1、およびM2で回収されたトレーサーの量は、各観測地点で計測される流量(mL/min)とトレーサー濃度(mg/L)の経時変化に基づくと、それぞれ 0.9×10^4 mg、 3.6×10^4 mg、および 1.0×10^4 mgと算出される。これらの回収量は定常注入によって注入されたトレーサーの総量(2.0×10^5 mg)の5%、18%、および5%にそれぞれ相当する(合計28%)。

定常注入開始後35,000分の時点までにP 孔の区間2、M1、およびM2で回収されなかった残りの72%のトレーサーについては以下のことが考えられる。350 m試験坑道4のコンクリートプラグ内側の埋戻し部周辺の岩盤には、EDZ以外の割れ目がほとんど確認されないことから[17]、注入されたトレーサーがEDZの外側の岩盤に移行する可能性は低いと考えられる。このことは以下の情報からも支持される。すなわち、トレーサー試験期間中の350 m試験坑道4の埋戻し部および試験孔(Test pit)への平均注水量はそれぞれ336 mL/minおよび232 mL/minで、H4-1 孔の区間2への平均注水量は20 mL/minであった。これに対し、コンクリートプラグ外側の排水ピット(M1)に流れる地下水の平均流量は396 mL/min、そしてP 孔の区間2からの平均揚水量は150 mL/minであり、コンクリートプラグ内側への総注水量と、P 孔およびコンクリートプラグ外側で観測される地下水流量は概ね一致している。これらのことは、定常注入開始後35,000分の時点において、注入されたトレーサーの残りの約72%はコンクリートプラグ内側の坑道内に残留していたことを示唆する。

揚水区間であるP 孔の区間2のみならず、M1およびM2でもトレーサーが回収された点については、コンクリート

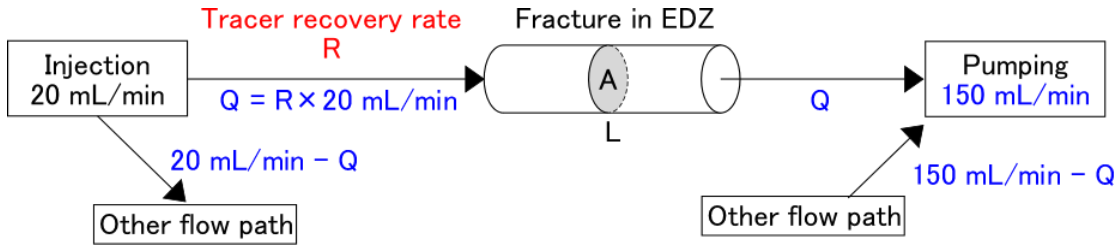


Fig.10 Hydro-geometrical setting assumed for the advection-dispersion simulation.

プラグおよび D4-1 孔の埋孔の止水性がともに十分ではなく（セメント系材料を用いているため）、いずれの箇所も大気の影響によって低い水圧条件が保たれたことなどがその要因として考えられる。揚水流量を高くし、P 孔の区間 2 の水圧をさらに低くすることで P 孔の区間 2 の回収量を上げることは、同区間の減圧による脱ガスを防ぐ観点から困難であった。

4 分散長の解析評価

4.1 解析手法

本試験区間周辺の EDZ の幅は概ね 1 m 以内であることが先行研究により示されており [14, 15]、坑道の半径方向の岩盤内への水の流れは限定される。したがって、注入区間に注入されたトレーサーは EDZ 内の坑道の円周方向の流れと坑道の掘削方向の流れを組み合わせた二次元的な流れによって移行することが考えられる。3.2 章で述べたように、実際に注入されたトレーサーは P 孔の区間 2（トレーサーの回収量：5%）のみならず、M1（トレーサーの回収量：18%）でも回収されている。M1 で回収されたトレーサーの回収量が P 孔の区間 2 と比べて大きいことは、H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 へは坑道の掘削方向の流れが卓越しているのに対し、H4-1 孔の区間 2 からコンクリートプラグ外側の壁面へは、坑道の掘削方向に加え、坑道の円周方向の流れも有意に発生している可能性を示唆する。

本稿では、P 孔で回収されたトレーサーのみに着目することとした。具体的には、P 孔で回収されたトレーサーが注入区間から揚水区間まで 100%の回収率で移行したと仮定することにより、その移行経路内の流れを一次元の流れとして扱うこととした。解析では H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 の間の移流分散現象を一次元の移流分散問題として取り扱い、汎用のシミュレーターである GoldSim[18]を用いた。

一次元の移流分散方程式は以下のように表現される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 t : 時間、 c : トレーサー濃度、 D_L : 縦方向（流れの方向）の分散係数、 v : 平均流速である。この時、縦方向の分散係数は、以下のように表現される。

$$D_L = \alpha_L \cdot v \quad (2)$$

ここで、 α_L は縦方向（流れの方向）分散長である。

一次元の均一な流れを仮定した場合、移行経路の断面積 (A) を通過する流量 (Q) は以下のように表現される。

$$Q = v \cdot A \quad (3)$$

また、距離 L の移行経路を単位時間に移行する際の流速は、平均流速として次式で算出される。

$$v = \frac{L}{t_e} \quad (4)$$

ここで、 t_e は平均移行時間である。式(3)および式(4)より、移行経路の断面積 (A) は次式で表現される。

$$Q = \frac{L}{t_e} \cdot A \quad (5)$$

本解析では移行経路の距離 (L) を H4-1 孔の区間 2 と P 孔の区間 2 の直線距離 (4.2 m) と仮定した。移行経路を流れる流量 (Q) は注水流量 (20 mL/min) のうち、トレーサー回収率 (Fig.10 の R) に応じた流量 (Fig.10 の Q) のみが流れると仮定した。このトレーサー回収率は、Fig.8 の 25,000 分 (約 17 日) 後以降に見られるトレーサー回収濃度の安定時のトレーサー回収レート (単位時間あたりの回収量) をトレーサー注入レート (単位時間あたりの注入量) で除した値で表せると考えた。具体的には、トレーサー回収レートをトレーサー回収濃度 (3.9 mg/L) と揚水流量 (150 mL/min) の積とし、トレーサー注入レートをトレーサー注入濃度 (502 mg/L) と注水流量 (20 mL/min) の積として、トレーサー回収率を 6% とした。したがって、1.2 mL/min の流量が一定の断面積の移行経路に流れると仮定した。移行経路を流れる流量については、揚水流量の 150 mL/min が流れる場合も考えられる。しかし、注水区間の H4-1 孔の区間 2 への注入流量は 20 mL/min であり、150 mL/min に比べて明らかに少ないことと、P 孔の区間 2 のトレーサー回収率 (6%) が低いことが矛盾するため、仮定した移行経路内に注入区間から 150 mL/min の流量が流れるという設定は適切ではないと判断した。本解析では縦方向分散長 (α_L) および移行経路の断面積 (A) を未知パラメータとし、最小二乗法によるフィッティングを行い、観測値と解析値との間の誤差が最小となるパラメータ値を導出した。

4.2 解析結果

Fig.11 に、移行経路の断面積 (A) と縦方向分散長 (α_L) を未知パラメータとしてフィッティングにより求めたシミュレーション結果 (図中の青色の破過曲線) を示す。また、本解析における縦方向分散長の感度を示すために、その縦方向分散長 (α_L) の推定値を 0.5 倍もしくは 2 倍とした場合のシミュレーション結果も同図に示す (図中の点線もしくは破線の破過曲線)。点線および破線の破過曲線と異なり、青色の破過曲線は観測値の破過曲線の立ち上がりから濃度が安定するまでの変化を良く再現できている (Fig.11)。移行経路の断面積 (A) は、 $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ と推定され、移行経

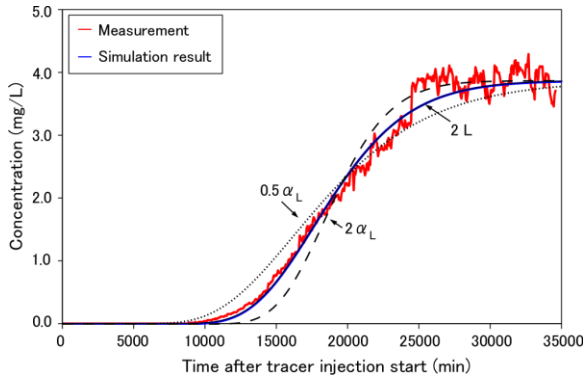


Fig.11 Measurement (red line) and simulation (blue line) results. The dotted and broken lines show the simulation cases when the α_L of the blue line was changed into $0.5 \alpha_L$ or $2 \alpha_L$, respectively. The black line, overlapping with the blue line, shows the simulation case when the L of the blue line was changed into $2 L$.

Table 1 Flow length L (m) and flow rate Q (L/min) inputted for advection-dispersion analysis, cross-sectional area A (m²) and longitudinal dispersivity α_L (m) estimated by the simulation result, and effective time t_e (min) and mean velocity v (m/min) obtained from Eqs. (4) and (5).

Parameter	Symbol	Value	
Flow path length (m)	L	4.2	8.4
Flow rate (mL/min)	Q	1.2	
Cross sectional area (m ²)	A	5.2×10^{-3}	2.6×10^{-3}
Longitudinal dispersivity (m)	α_L	0.12	0.24
Effective time (min)	t_e	18261	
Mean velocity (m/min)	v	2.3×10^{-4}	4.6×10^{-4}

路の平均流速 (v) は式(4)および式(5)より 2.3×10^{-4} m/min と算出された (Table 1). また, 推定された縦方向分散長 (α_L) は 0.12 m (Table 1) であり, 仮定した移行経路長 4.2 m の 3%に相当する縦方向分散長が得られた.

推定された移行経路の断面積 (5.2×10^{-3} m²) の妥当性については以下のことが考えられる. 本解析のように注水区間から揚水区間への移行経路を一次元の経路として仮定する場合, 移行経路の断面積は少なくとも H4-1 孔の区間 2 (注水区間) の断面積 (0.13 m²) よりも小さいと考えられる. したがって, 本解析によって推定された移行経路の断面積 (5.2×10^{-3} m²) はこれと矛盾しない. 一方, 割れ目を含まない岩盤基質部の透水係数は割れ目を含む区間の透水係数に比べて有意に小さい (Fig.2(b), Fig.3(b)). したがって, EDZ の主たる移行経路は割れ目であると考えられる. しかし, 推定された移行経路の断面積 (5.2×10^{-3} m²) は割

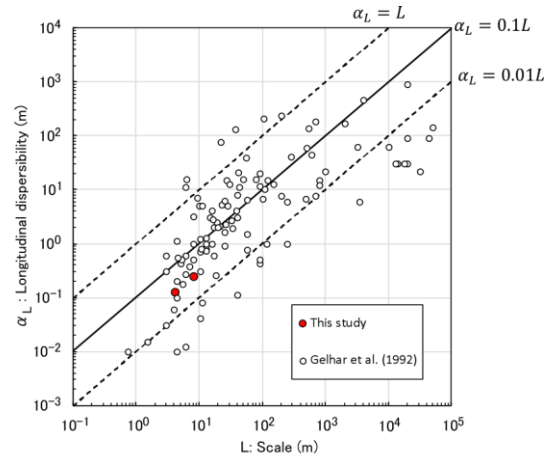


Fig.12 Longitudinal dispersivity vs scale of observation based on Gelhar, L. et al. (1992) [9].

れ目の断面積としては大きい可能性がある. この原因の一つの可能性として, 移行経路の屈曲度 (tortuosity; 二点間の移行距離をその直線距離で除した値) の影響が考えられる. すなわち, 本解析では H4-1 孔の区間 2 と P 孔の区間 2 の直線距離 (4.2 m) を移行距離 (L) と仮定したが, EDZ の割れ目がネットワークを形成し, 割れ目内の移行経路の屈曲度が 1 より大きい可能性を考えると, 実際の移行距離は 4.2 m よりも長い可能性がある. 1 よりも大きい屈曲度として, 2 を仮定した場合 (移行距離を 2 倍; $L=8.4$ m), 破過曲線のシミュレーション結果 (Fig.11 の黒色の破過曲線) は屈曲度を 1 とした場合のそれと変わらない (Fig.11 の青色の破過曲線と重なる). しかし, 移行経路の断面積は 2.6×10^{-3} m² に半減する (Table 1). したがって, 移行経路が屈曲している可能性を考慮すると, 実際の移行経路の断面積はさらに小さい可能性が考えられる. 移行距離を 2 倍にした場合, 縦方向分散長の推定値は 0.24 m に倍増するが (Table 1), 移行距離に対する縦方向分散長の割合は 3%と変わらない.

推定された移行経路長と縦方向分散長の関係を, Gelhar 他[9]が示した, 評価スケールと縦方向分散長の関係のグラフ上にプロットしたものを Fig.12 に示す. 本稿において推定した EDZ の縦方向分散長は評価スケール (仮定する移行経路長) の 100 分の 1 から 10 分の 1 の回帰式の間プロットされる. Gelhar, L. et al [9]は天然の割れ目や岩盤基質部を対象としたトレーサー試験のデータを整理したものであるが, EDZ の割れ目でも同程度の縦方向分散が生じていることが今回の試験により確認できる.

5 結論

本研究では, 堆積岩中に発達した EDZ の割れ目を対象に原位置トレーサー試験を実施し, 一次元移流分散モデルの適用によって EDZ 割れ目内の縦方向分散長を評価した. 本研究で得られた成果は以下の通りである.

- EDZ の飽和にコンクリートプラグを用いる場合, その止水性には限界があることと, 溶存ガスが多い地下水環境の場合, 揚水流量を上げて揚水区間の水圧を下

げることが困難であることから、これらの条件では揚水区間のトレーサー回収率を上げることが難しく、揚水区間以外の地点にもトレーサーが移行することが確認された。しかし、このような条件でもプラグ内に継続して注水を行い、EDZの飽和を保った上で、既存の孔間トレーサー試験手法を適用することにより、EDZ割れ目の縦方向分散長を評価できることが確認できた。

- 導出された縦方向分散長 ($\alpha = 0.12 \text{ m}$) は天然の割れ目や岩盤基質部から報告されている値と同程度であり、堆積岩中のEDZにおいても、評価スケールの100分の1~10分の1に相当する分散効果に応じた濃度低下が期待できることが確認できた。

本検討では、トレーサー回収率が低い揚水孔の破過曲線に基づき、分散効果を評価したが、本トレーサー試験のように揚水孔以外の地点へもトレーサーが移行し得る場においては、それぞれの地点での破過曲線を取得し、移行特性を評価することが望ましいと考えられる。また、EDZにおける核種の遅延効果を評価する上では、今後、収着性のトレーサーを使用した原位置試験や解析評価の実施も必要であると考えられる。

謝辞

原位置トレーサー試験の実施に関してはアサノ大成基礎エンジニアリング株式会社の井原哲夫氏、牧野章也氏にご尽力いただいた。また、匿名の2名の査読者には、本稿の査読の過程で数多くの有益なご助言を頂いた。末筆ながら、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Tsang, C. F., Bernier, C. and Davies, C.: Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **42**, pp.109–125 (2005).
- [2] Bock, H. Dehandschutter, B. Martin, C. D. Mazurek, M. de Haller, A. Skoczylas, F. and Davy, C.: Self-sealing of Fractures in Argillaceous Formations in the Context of Geological Disposal of Radioactive Waste, Review and Synthesis Report. OECD NEA 6184, ISBN 978-92-64-99095-1, (2010).
- [3] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価. JNC TN1400 -99-023, 核燃料サイクル開発機構 (1999).
- [4] Andra: Dossier 2005 Argile Tome Safety evaluation of a geological repository, France. (2005).
- [5] Nuclear Waste Management Organization of Japan: Safety of the Geological Disposal Project 2010—Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies. Tech Rep NUMO-TR-13-05, Nuclear Waste Management Organization of Japan (2013).
- [6] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—本編. NUMO-TR-20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- [7] Poller, A., Smith, P., Mayer, G. and Hayek M.: Modelling of Radionuclide Transport along the Unerground Access Structures of Deep Geological Repositories. Nagra Technical Report 14-10, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (2014).
- [8] NEA: International Features, Events and Processes (IFEP) List for the deep Geological Disposal of Radioactive Waste, NEA/RWM/R(2019)1, (2019).
- [9] Gelhar, L. W., Welty, C. and Rehfeldt, K. R.: A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers. *Water Resources Research* **28**, 7, pp.1955–1974 (1992).
- [10] Neuman, S. P.: On advective transport in fractal permeability and velocity fields. *Water Resources Research* **31**, 6, pp.1455-1460 (1995).
- [11] 吉野浩光, 佐俣洋一, 丹生屋純夫, 石井英一: 幌延深地層研究計画における350m試験坑道掘削影響領域を対象とした透水試験(その1). JAEA-Data/Code 2018-015, (2018).
- [12] 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人: 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験; 計測データ集(平成27年度). JAEA-Data/Code 2016-005, 日本原子力研究開発機構 (2016).
- [13] 佐俣洋一, 石井英一: 幌延深地層研究計画における350m試験坑道掘削影響領域を対象とした透水試験(その2). JAEA-Data/Code 2019-020, 日本原子力研究開発機構 (2019).
- [14] Aoyagi, K. and Ishii, E.: A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone. *Rock Mechanics and Rock Engineering* **52**, pp.385–401 (2018).
- [15] Ishii, E.: Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: A case study from the Horonobe Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **159**, doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2022.p105229, (2022).
- [16] Miyakawa, K. and Nakata, K.: Data of Groundwater Chemistry Obtained in the Horonobe Underground Research Laboratory Project (FY2022). JAEA-Data/Code 2022-013, Japan Atomic Energy Agency (2023).
- [17] 青柳和平, 川手訓: 幌延深地層研究計画 平成25年度地下施設計測データ集. JAEA-Data/Code 2015-17, (2015).
- [18] GoldSim Technology Group, GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Version 14.0. (2021).