

ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした 原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討

武田匡樹*1 石井英一*1 大野宏和*1 川手訓*2

泥岩中における断層帯および掘削影響領域 (EDZ) に発達する割れ目は、主要な水みちとして機能することがあるため、これらの構造における物質移行特性を評価することは、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価において重要である。しかし、泥岩中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験の適用事例は国内外含めて非常に少ない。そこで、日本原子力研究開発機構では、稚内層と呼ばれる珪質泥岩中の割れ目を対象に、非吸着性であるウラニウムを用いた原位置トレーサー試験を実施した。原位置トレーサー試験を行う際は、事前調査を行い、割れ目中の地下水流れを評価した。また、稚内層を流れる地下水には被圧状態においてメタンや二酸化炭素などが溶存し、これらが坑道/ボーリング掘削により圧力解放されることで脱ガスするため、これらの条件も踏まえた上でトレーサー試験の試験条件を決定した。トレーサー試験は試験条件を変化させ、合計 18 回実施し、トレーサー回収率は概ね 60% から 80% となった。トレーサー試験の結果から、注水流量を揚水流量より大きくした場合に脱ガスの影響を低減することができる一方で、同様の条件ではトレーサー回収率が低くなったことから、本稿で報告したトレーサー試験においては、注水流量を揚水流量よりもやや高く設定することが適切な試験条件であることが分かった。ガスが溶存した地下水を含む岩盤を対象に注水および揚水を伴う原位置トレーサー試験を実施する際は、注水と揚水の流量比が①脱ガスの発生に与える影響、②トレーサー回収率に与える影響の双方を評価することが、脱ガスを抑制しつつトレーサー回収率を高めるための適切な試験条件を見出すことに有効である。

Keywords: 地層処分, 珪質泥岩, 割れ目, 物質移行, 原位置, トレーサー試験, ダイポール試験, 溶存ガス

Fault zones and excavation damaged zones have the potential to act as flow paths, and the characterization of solute transport in such zones in mudstones is important for the safe geological disposal of radioactive waste. However, few in situ tracer migration tests have been conducted on fractures in mudstones. The Japan Atomic Energy Agency has conducted in situ tracer migration experiments using uranine, which is a non-sorbing tracer, for fractures in siliceous mudstone of the Wakkanai Formation. In the tests, preliminary hydrogeological investigations were performed to evaluate in situ groundwater flow in fractures, taking into account the presence of dissolved methane and carbon dioxide in the pressurized environment. These gases are degassed by pressure release due to tunnel excavation and borehole drilling. Subsequently, the test conditions were evaluated, and 18 experiments were conducted under various conditions, which resulted in tracer recovery ratios of ca. 60 % to 80%. Large injection flow rates as compared with pumping flow rates were utilized to reduce the effects of degassing in the groundwater, which is a common problem in mudstone formations. However, these large injection flow rates sometimes led to multiple peaks in the breakthrough curves and generally reduced the recovery ratios. Therefore, an injection flow rate that is slightly higher than the pumping flow rate is ideal for tracer migration experiments involving injection and pumping, as conducted in this study. In situ tracer migration experiments involving injection and pumping conducted in a groundwater environment with dissolved gases allow empirical evaluation of the relationship of the tracer recovery ratio and the groundwater degassing with the injection and pumping flow rate ratio. This evaluation is effective for the design of experimental conditions that account for degassing and ensure high levels of tracer recovery.

Keywords: geological disposal, siliceous mudstone, fracture, solute transport, in-situ, tracer migration test, dipole test, dissolved gas

1 はじめに

一般的に、泥岩は低透水性であり、泥岩中の核種移行は間隙中の拡散が支配的であることから、高レベル放射性廃棄物の地層処分の候補母岩の一つとして考えられている[1, 2]。一方で、泥岩に構造的な割れ目が発達する場合はそれらの割れ目が移行経路となることがあり、特に断層帯中の割れ目や坑道に沿って発達する掘削影響領域 (EDZ) 内に形成される割れ目が主要な移行経路になり得ることが知られている[3-7] (Fig. 1)。このような背景から、泥岩中の断層帯や EDZ 中の割れ目の移行メカニズムを把握することは、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価において、物質の移行経路をモデル化する際に重要な知見となる。

岩盤中の移行特性を評価する手法として、岩石試料を用

いた室内実験や原位置におけるトレーサー試験が広く行われており、このうち、原位置トレーサー試験は、岩盤中の移行挙動を原位置の環境下 (地下水流動場や地下水水質) で直接測定できるメリットがある。しかし、花崗岩などの結晶質岩系の岩盤を対象とした原位置トレーサー試験は国内外で広く行われてきているものの[8-10]、堆積岩系の岩盤においては、岩盤中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験は国内外を含めて適用事例が非常に少ない[11]。このため、堆積岩系の岩盤中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験手法を確立すれば、堆積岩系の岩盤中の移行メカニズムを把握するための調査や解析を行う上での貴重なデータを取得することが可能となる。

このため、日本原子力研究開発機構では、北海道幌延町に地下研究施設 (以下、地下施設) を建設し、この地下施設を利用して、周辺に分布する泥岩中の断層帯を構成する割れ目や坑道沿いの EDZ に発達する割れ目を対象とした原位置トレーサー試験を進めている。幌延地域に分布する泥岩中の地下水の特徴として、被圧状態において、主にメタンや二酸化炭素が多量に溶存している[12]ことがあげられ、これら溶存ガスは坑道掘削時またはボーリング孔掘削時に圧力解放された際に脱ガスすることがわかっている。このためボーリング孔からの注水および揚水を伴うトレー

Evaluating test conditions for in situ tracer migration test in fractured siliceous mudstone involving groundwater with dissolved gas by Masaki TAKEDA (takeda.masaki@jaea.go.jp), Eiichi ISHII, Hirokazu OHNO, Satoshi KAWATE

*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

*2 株式会社環境総合テクノス

KANSO CO.,LTD

〒541-0052 大阪府大阪市中央区安土町 1-3-5

(Received 12 December 2017; accepted 11 May 2018)

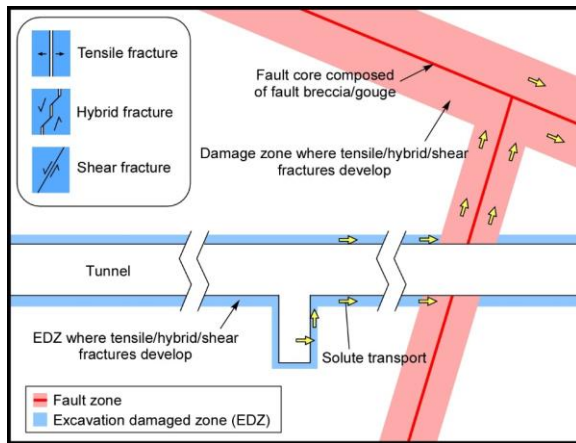


Fig. 1 Schematic diagram of solute transport through excavation damaged zones (EDZs) and fault zones

サー試験を実施した場合、特に揚水孔周辺の間隙水圧の低下によって溶存ガスの脱ガスが生じ、移行経路が飽和状態から不飽和状態に変化する可能性がある。したがって、間隙水圧の低下に伴う移行経路内の擾乱を回避するには、脱ガスを生じさせないような試験条件で試験を実施する必要がある。一方で、トレーサー試験条件はトレーサー回収率に大きく影響することが知られており、Hoehn ら[13]は、ダイポール試験（1 本のボーリング孔で注水、もう一方のボーリング孔で揚水を行い、2 孔間で形成された強制的な流動場におけるトレーサーの移行挙動を評価する試験）において注水流量よりも揚水流量を大きくすることで高いトレーサー回収率を達成できることを指摘している。定量的な基準はないもののトレーサー回収率はトレーサー試験結果の品質に関する指標として、可能な限り高い回収率で試験を行うことが好ましいことから、トレーサー試験の試験条件の設定においては、トレーサー回収率も考慮する必要がある。以上のことから、本稿では地下 350m の調査坑道にて実施した原位置トレーサー試験結果から、試験条件が脱ガスやトレーサー回収率に与える影響を評価することで、ガスが溶存した地下水を含む泥岩を対象とした原位置トレーサー試験の適切な試験条件設定に関する知見を整備することを目的とする。

2 本研究で対象とした水理地質構造

Fig. 2 に地下施設のレイアウトを示す。今回トレーサー試験を実施した深度 350m 調査坑道は、主に珪藻遺骸（opal-A）が埋没続成作用によって再結晶化した opal-CT からなる珪質泥岩を主体とした稚内層が分布している。稚内層は地下施設周辺の深度 300m～400m 付近において、引張亀裂を伴った高透水性の断層帯が数メートル以上の連続性を有して発達するのに対し、深度 500m 以深の稚内層はこのような断層帯が発達しないことが指摘されている[4, 14, 15]。このうち、深度 350m の稚内層に発達する断層帯は断層角礫から成る断層コアを有し、その周辺に引張、ハイブリット（引張とせん断の両方の特徴を有する）、せん断割れ目から構成されるダメージゾーンが発達する（Fig. 1）[4, 16]。断層コアの厚さは数十センチメートル以下、ダ

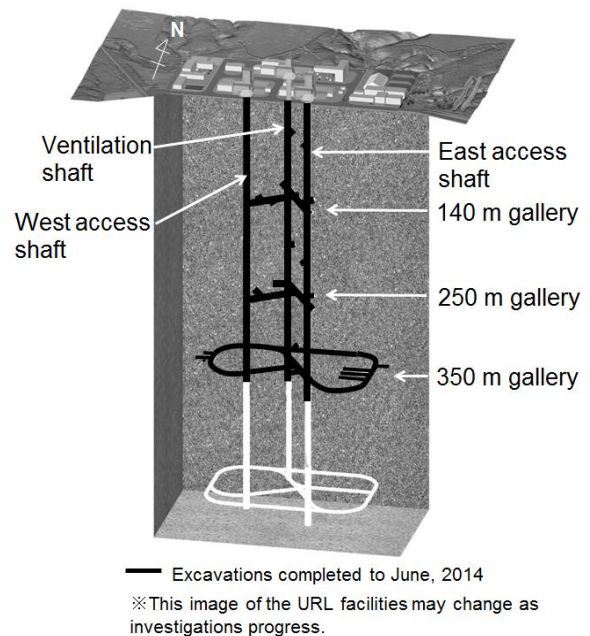


Fig. 2 Layout of the Horonobe URL

メージゾーンの幅は数メートル以下である[4]。一方、坑道周辺の岩盤には、引張、ハイブリッドまたはせん断割れ目が発達する EDZ が坑道壁面から数十センチメートル程度の範囲にわたって形成され、その透水性が稚内層の健岩部より数オーダー高いことが確認されている[7]。これら既存の調査結果を踏まえると、Fig. 1 のように深度 350m に分布する稚内層の主要な物質移行経路は坑道沿いに発達する EDZ や断層帯を構成する引張、ハイブリッド、せん断割れ目であると考えられる。このうち、本研究では断層帯を構成する引張、ハイブリッド、せん断割れ目のうち、後述するトレーサー試験箇所での水理学的連続／連結性が確認されたハイブリッド、せん断割れ目を対象とすることとした。

3 事前調査

3.1 調査概要

トレーサー試験結果から分散長や物質移行開口幅などの物質移行パラメータを適切に取得するためには、試験実施箇所周辺の場の特性を把握しておくことが重要である。岩手県釜石鉱山のトレーサー試験事例では、数十メートル程度の領域を対象に、複数のボーリング孔を利用した間隙水圧測定や孔間水理試験を行い、試験箇所周辺の地下水流動場や対象割れ目の水理学的連続性について詳細な評価を行っている[10]。

Fig. 3 にボーリング孔の配置を示す。深度 350m 周回坑道（西）の北部には、水平坑道掘削時における坑道切羽の壁面観察から比較的連続性の良い高角なハイブリッド割れ目が確認されていたため、その延長部を目がけて坑道壁面から水平なボーリング孔を掘削することとした。水平坑道には周囲に数十センチメートル程度の EDZ が形成されることが想定されるとともに[7]、空洞壁面の剥離を抑えるためのロックボルトが壁面から 2m 程度に打設されている。このロックボルトが試験時に水みちとなる可能性が考えら

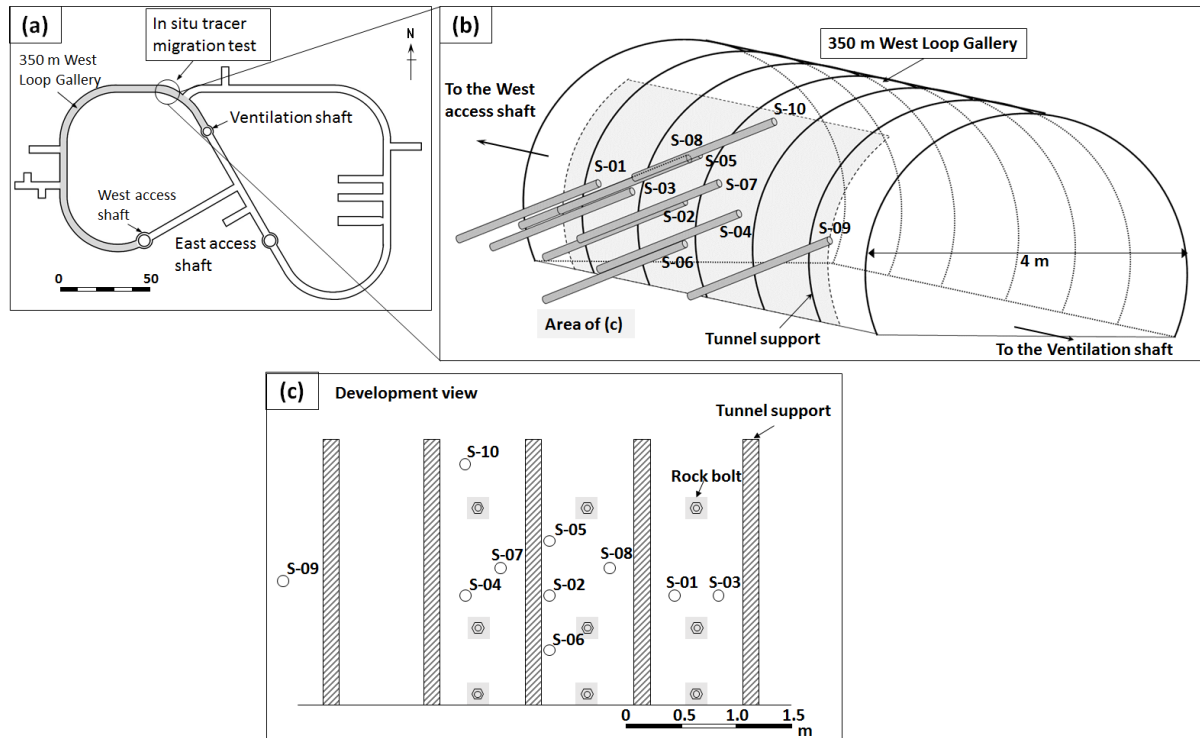


Fig. 3 Locations of boreholes. Lengths of the boreholes are about 3 m except for S-03 (about 2 m).

れたため、各ボーリング孔はロックボルトを超える掘削長とした。また、ボーリング孔の掘削長を長くすることで、装置内分散（孔口から試験区間までの流路長に起因する縦分散）が大きくなる可能性が考えられた。装置内分散については、トレーサー投入地点から試験区間までの長さを考慮することで推定することが可能であるものの、今回の原位置試験では流路長に起因する縦分散を可能な限り低減することとした。上記2つの観点から、各ボーリング孔の掘削長を3m程度とした。ボーリング掘削後は、掘削時に得られたボーリングコアに対してIshiiの記載方法[15]にしたがって割れ目の観察を行った。

3.2 事前調査結果：割れ目の水理学的連続／連結性と透水性の評価

ボーリング掘削毎に深度2～3m程度に位置する割れ目を包含するようにシングルパッカーで区切って間隙水圧観測区間を設け、後続孔の掘削進捗に伴う水圧応答の確認を行った。初めに掘削を行ったS-01孔において、深度1.97mから2.24mにかけて複数のせん断およびハイブリッド割れ目が確認されたが、前述のとおり、ロックボルトの打設深度と近いため、試験対象としては不適と判断した。S-02孔を掘削した結果、ロックボルト打設深度より深い位置にせん断およびハイブリッド割れ目が確認されたため、同割れ目の水理学的連続／連結性を追跡するために、周辺に網羅的にボーリング孔を掘削し、掘削毎の各孔の水圧応答を確認した。このうち、掘削時に複数の間隙水圧観測孔が設置されているS-05、S-07およびS-08孔を掘削時の水圧応答をFig. 4に示す。Fig. 4(a)から、S-05孔が深度3.01mに到達直後に、S-02孔およびS-06孔において有意な水圧応答

が確認できる。このことから、S-02、S-05およびS-06孔の孔間はS-05孔の深度2.85mのせん断割れ目を介して、水理学的に連続／連結していると考えられる。なお、S-02孔の間隙水圧観測区間には、2本の割れ目が含まれているため、どちらの割れ目かあるいは両方の割れ目が水みちとして寄与していると考えられる。Fig. 5(b)から、S-07孔が深度2.70mおよび深度2.95mに到達直後に、S-02、S-04、S-05およびS-06孔において明瞭な水圧応答が確認できる。これらの水圧応答に寄与していると考えられるS-07孔の割れ目はハイブリッド割れ目であるのに対し、S-05とS-06孔の間隙水圧観測区間には、せん断割れ目のみ存在している(Fig. 5(a))。これらの割れ目に関して、ボーリングコアで認められる層理面の走向・傾斜に基づき定方位化し、目視観察により割れ目の走向・傾斜の判読を行った。その結果、S-07孔の深度2.94mに出現するハイブリッド割れ目の走向・傾斜はN70W75N、S-05孔の間隙水圧観測区間内の2本のせん断割れ目（深度2.85mおよび深度3.12m）はそれぞれEW80NおよびN70W90、S-06孔の深度2.44mに出現するせん断割れ目はEW50Nであった。これらの割れ目の方向の類似性と位置関係も考慮すると、S-07孔とS-05およびS-06孔においては、ハイブリッド割れ目とせん断割れ目とその孔間において連結している可能性が考えられる(Fig. 5(b))。あるいは、ハイブリッド割れ目の判定は割れ目の観察スケールに依存するため[15]、同一の割れ目面を巨視的にとらえた場合、その割れ目面内にせん断割れ目の特徴とハイブリッド割れ目の特徴が混在することもあると考えられる。したがって、S-07孔のハイブリッド割れ目とS-05およびS-06孔のせん断割れ目は同一の割れ目面で連続している可能性もある(Fig. 5(c))。Fig. 4(c)から、S-08孔の掘

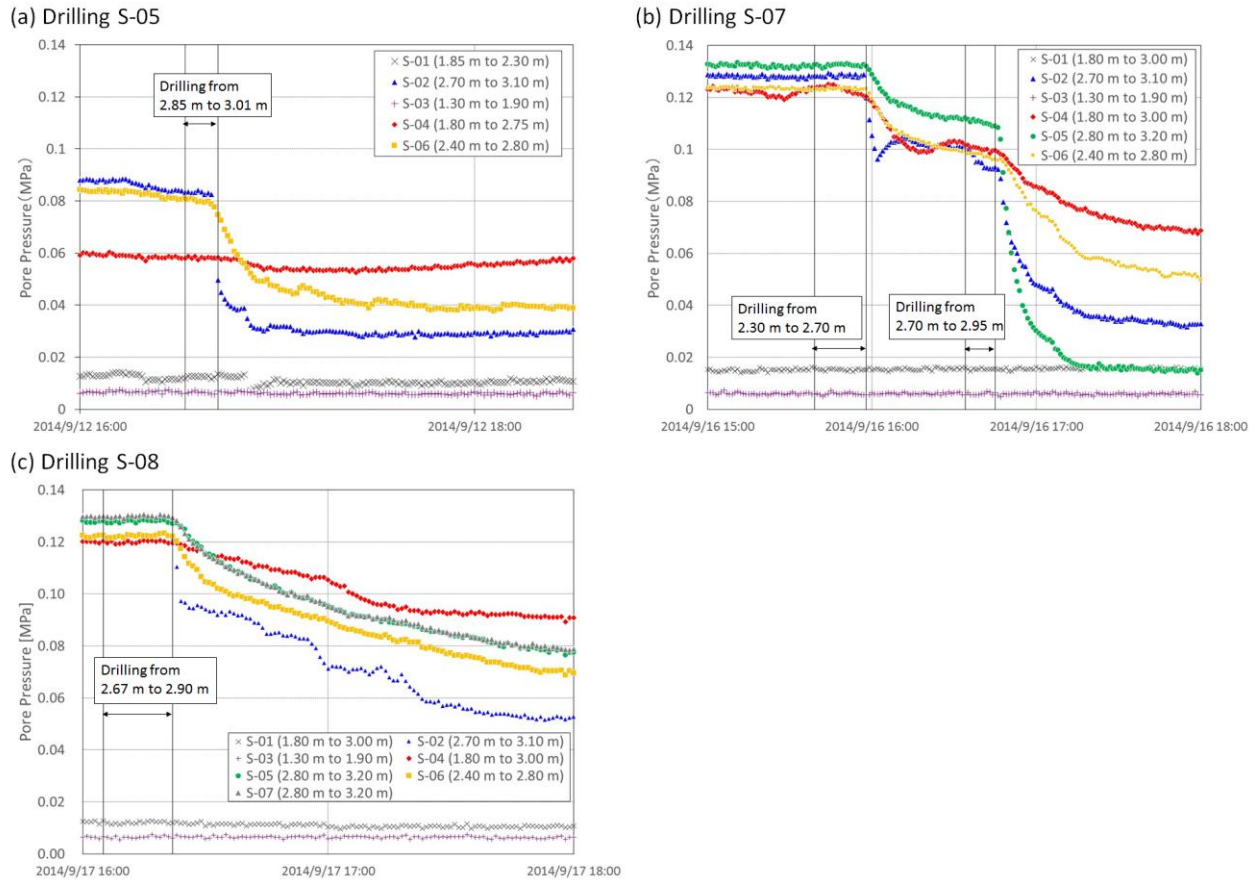


Fig. 4 Results of pore pressure monitoring during drilling at (a) S-05, (b) S-07 and (c) S-08. The numbers in parentheses indicate monitoring intervals in each borehole.

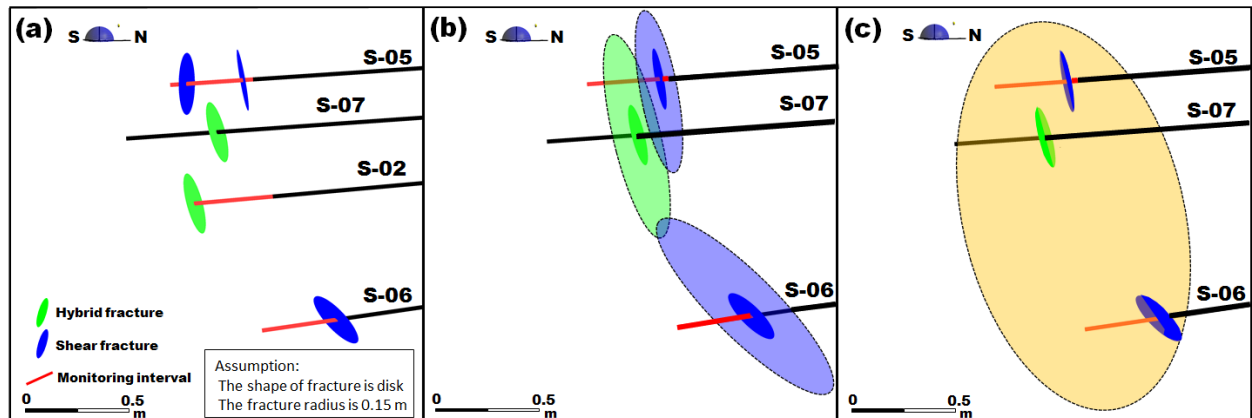


Fig. 5 Evaluation of hydraulic connectivity between S-05, S-06 and S-07 based on pore pressure monitoring during drilling at S-07 and the fracture distribution. (a) Fractures contributing to pressure response during drilling at S-07. (b) Hybrid fracture at S-07 connected with shear fractures at S-05 and S-06 between the boreholes. (c) Hybrid fracture at S-07 connected with shear fractures at S-05 and S-06, which are parts of the same fracture plane. The sizes of the fracture plane with dashed line in panels (b) and (c) are assumed.

削深度が 2.90m に到達直後に、S-02、S-04、S-05、S-06 および S-07 孔において明瞭な水圧応答が確認できる。S-08 孔の深度 2.93m 付近にはハイブリッド割れ目が確認されていることから、この割れ目を介して、水圧応答が確認された区間の割れ目と連続／連結していると考えられる。

次に、定流量注水試験により、孔間の透水性の評価を行った。ここでは掘削時の水圧応答結果から水理学的に連続

／連結していることが認められる孔および区間を対象に S-02 (試験区間：2.70m～3.10m)、S-04 (2.30m～3.30m)、S-05 (2.80m～3.20m)、S-06 (2.40m～2.80m)、S-07 (2.80m～3.20m)、S-08 (2.90m～3.30m) 孔のそれぞれを注水孔とした定流量注水試験を実施した。Fig. 6 に各孔および孔間における透水量係数を示す。透水量係数の算出は Cooper-Jacob の式[17]を用いて行った。Cooper-Jacob の式で

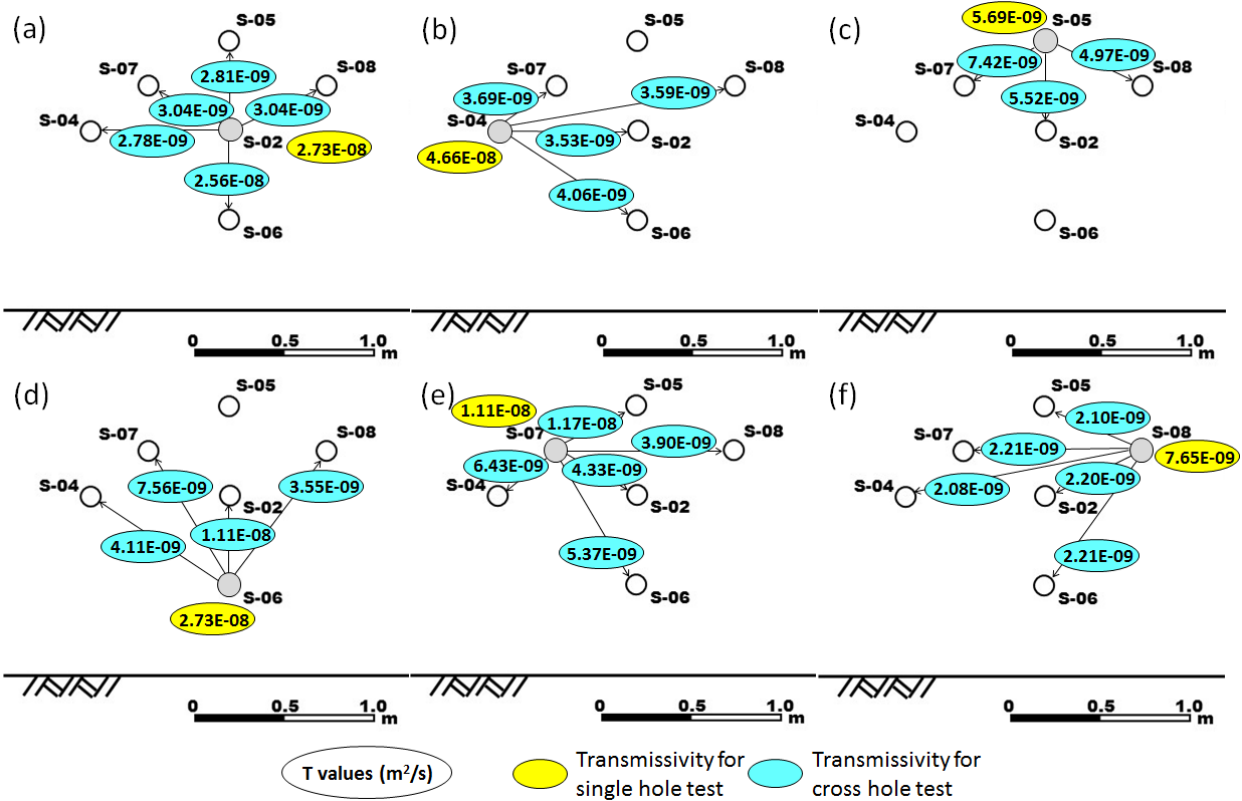


Fig. 6 Transmissivity distribution based on water injection tests

は、放射状流を仮定しているため、Horne[18]に従い、Infinite Acting Radial Flow と呼ばれる放射状の均質な流れが仮定できる時間帯（水圧の変化量と経過時間の対数が線形の関係にある時間帯）の試験データに基づき、透水量係数の算出を行っている。なお、注水孔に対し複数の観測孔が一直線上に配置されている場合（例えば、Fig. 6(c)の S-06, S-02 および S-05 孔）は、間のボーリング孔が試験結果に及ぼす影響を考慮し注水孔から最も近い孔との孔間の透水性のみを評価した。S-08 孔, S-05 孔および S-04 孔を注水孔とした場合、他孔との孔間の透水量係数については、概ね 10^{-9} (m^2/s) オーダーである (Fig. 6(a), (d), (e))。S-07 孔を注水孔とした場合、S-05 孔との孔間の透水量係数が 10^{-8} (m^2/s) オーダーであり、他の孔間の透水量係数 (10^{-9} (m^2/s) オーダー) より一桁程度高い (Fig. 6(b))。S-06, S-02 孔における孔間の定流量注水試験では、どちらを注水孔にしても孔間の透水量係数が他孔との孔間の透水量係数と比べて一桁程度高い。したがって、少なくとも S-07 孔と S-05 孔, S-06 と S-02 孔の孔間において優先的な水みちが存在すると考えられる。

4 トレーサー試験手法

代表的なトレーサー試験手法として、自然動水勾配試験 (natural gradient test), 放射状発散試験 (radially diverging test), 放射状収束試験 (radially converging test) およびダイポール試験 (dipole test) が知られる[19]。本研究で対象とする試験箇所は、坑道からの距離が数 m 程度と近いことか

ら、坑道掘削に伴い、岩盤から坑道の壁面方向へ向かう地下水の流れが大きいことが想定された。したがって、自然状態の動水勾配を駆動力として利用する自然動水勾配試験の場合、投入したトレーサーが坑道周辺方向に流出してしまう可能性が考えられた。また、放射状発散試験の場合、注入したトレーサーがバックグラウンドの流れの影響を受け、放射状にトレーサーが広がらず、自然動水勾配試験と同様に、トレーサーが坑道周辺方向に流出してしまう可能性が考えられた。また、放射状発散試験の場合、注入したトレーサーがバックグラウンドの流れの影響を受け、放射状にトレーサーが広がらず、自然動水勾配試験と同様に、トレーサーが坑道周辺方向に流出してしまう可能性が考えられた。放射状収束試験やダイポール試験は、揚水を行うことで、観測孔への選択的な流れを形成することが可能となるものの、注水と揚水の両方を伴うダイポール試験の方が、よりバックグラウンドの流れの影響を受けにくいと考えられる。以上のことから、今回のトレーサー試験においては、ダイポール試験を採用することとした。トレーサーは、蛍光染料であるウラニンを使用した。ダイポール試験を実施する注水孔・揚水孔については、3.2 節で述べたボーリング孔で確認された割れ目の水理学的連続/連結性の評価結果を踏まえ、孔間に優先的な水みちが存在すると考えられる S-02 孔, S-05 孔, S-06 孔および S-07 孔を選定した。また、透水性や孔間距離の違い、さらに同一孔間におけるトレーサー移行経路の可逆性を評価することを考慮し、試験レイアウトを策定した。試験レイアウトを Fig. 7 に示す。今回使用するトレーサーは蛍光染料（ウラニン）であるた

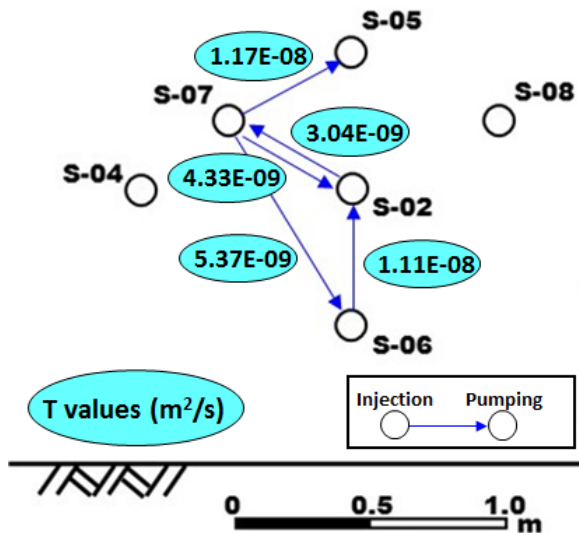


Fig. 7 Layout of tracer migration test. The blue arrows show the flow directions of the solute tracer.

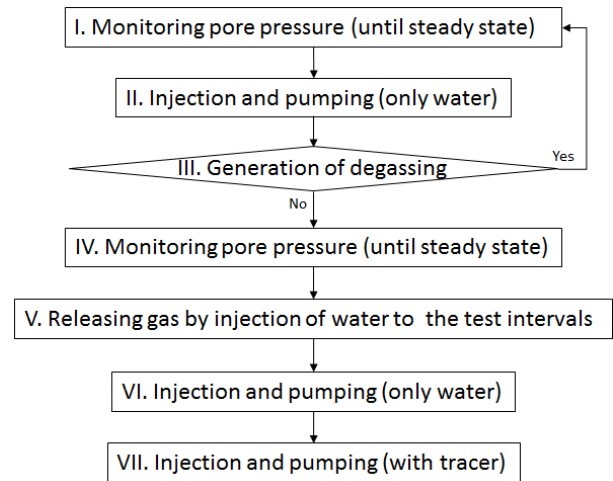


Fig. 9 Sequence of tracer migration tests. If degassing was confirmed at step III, the test returned to step I and the injection and pumping rates were changed when step III was reached again.

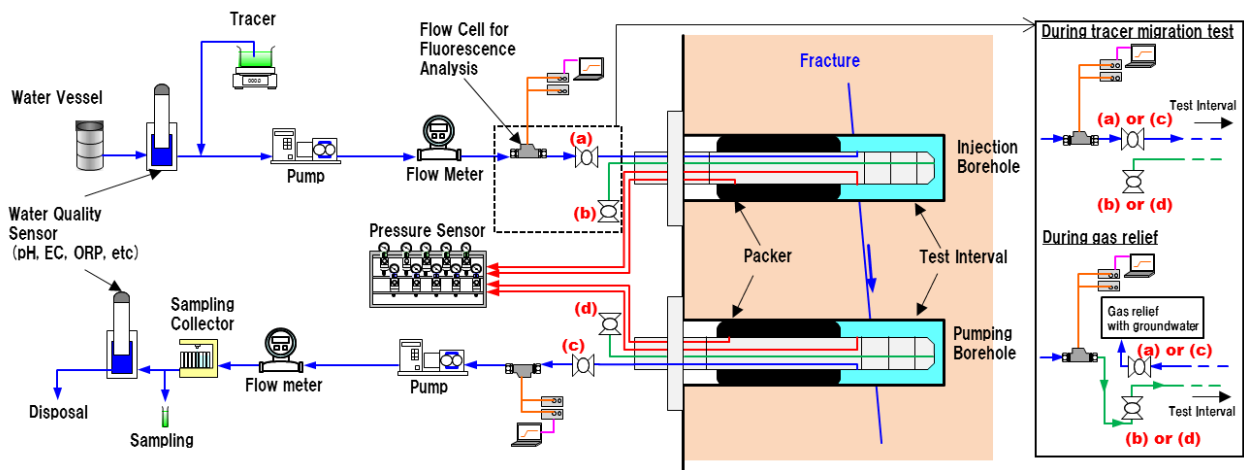


Fig. 8 Experimental set up of the tracer migration test

め、トレーサー試験の破過曲線の形状を現場にて直ちに把握できるよう、注水孔側および揚水孔側に蛍光分析用のフローセルおよび分光光度計を設置しているとともに、注水側と揚水側それぞれにコリオリ式の質量流量計を設置し、トレーサー試験中の注水流量および揚水流量を計測している。

トレーサー試験は Fig. 9 に示す手順にしたがって実施することとした。Fig. 9 に示すように、初めに注水孔および揚水孔の間隙水圧が定常状態になることを確認したのち、トレーサー試験時に設定する注水流量および揚水流量の条件での脱ガスの発生状況を試験開始前に確認するために、トレーサーを投入せずに注水および揚水を行う予備試験を行うこととした。また、トレーサー試験開始前に、ガス排除用のライン (Fig. 8 の緑のライン) から試験区間へ注水を行い、孔口直上のバルブ (Fig. 8 中のバルブ(a)もしくはバルブ(c)) からガスの排除を行うこととした。さらにトレーサー試験実施中は注水流量および揚水流量における脱ガスの影響をグラフ上で把握し、物質移行試験装置系内に接続するチューブ内を流れるガスの目視観察も合わせて行う

こととした。上記の手順に従い、注水流量および揚水流量や注水孔および揚水孔の組み合わせを変化させ、合計で 19 回の試験を実施し、予備試験結果も踏まえ、注水および揚水の流量比が①脱ガスの発生に与える影響、②トレーサー回収率に与える影響について検討することとした。なお、トレーサー回収率は注水孔および揚水孔に設置したフローセルの分析値に基づき算出している。

5 結果・考察

Fig. 10 に、S-07 孔を注水孔、S-05 孔を揚水孔とした予備試験結果を示す。注水流量に対して、揚水流量が大きい場合は、試験開始初期から脱ガスの影響と考えられる流量の乱れが確認でき、この時の揚水孔の間隙水圧は 0.153MPa であった (Fig. 10(a), (b))。一方、注水流量を揚水流量よりも大きく設定した場合は、脱ガスの影響と考えられる流量の乱れが低減され、概ね安定した流量が保持されていた (Fig. 10(c))。また、その予備試験期間中の間隙水圧は、0.176MPa 以上であり、注水流量に対して、揚水流量を大き

ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした
原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討

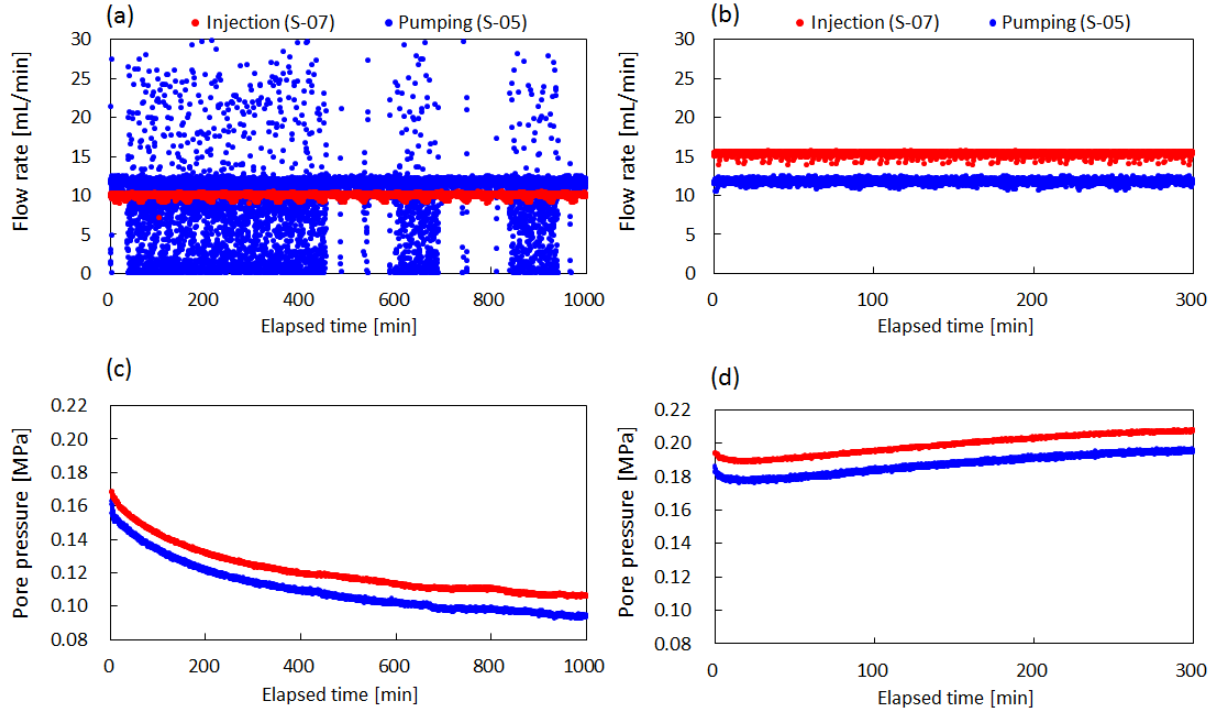


Fig. 10 Flow rate and pore pressure during injection and pumping using water without uranine. The elapsed time is relative to when injection and pumping with water was started. (a) and (c) Flow rate and pore pressure, respectively, for an injection flow rate of 10 mL/min, pumping flow rate of 12 mL/min and degassing. (b) and (d) Flow rate and pore pressure, respectively, for an injection flow rate of 15 mL/min and reduced degassing.

Table 1 Results of tracer migration tests using uranine.

Run number	Injection borehole	Pumping borehole	Injection flow rate (mL/min)	Pumping flow rate (mL/min)	Tracer concentration (mg/L)	Tracer recovery ratio (%)	Generation of dissolved gas
1P-2	S-07	S-02	10.0	11.4	10.29	80.3	Yes
1P-3			10.0	11.5	9.97	83.8	Yes
1P-4			10.0	11.2	5.54	71.8	Yes
1P-5			10.0	11.7	1.01	73.9	No
1P-6			15.3	11.7	5.54	73.5	No
1P-7			12.0	11.7	5.03	74.8	No
2P-1	S-07	S-05	15.3	11.5	4.68	64.6	No
2P-2			15.3	11.7	5.36	68.5	No
2P-3			17.8	11.6	4.99	61.6	No
3P-1	S-02	S-07	15.3	11.7	4.79	82.5	No
3P-2			17.9	11.7	5.29	58.6	No
3P-3			12.0	11.5	4.90	76.8	Yes
4P-1	S-06	S-02	12.0	11.5	5.12	58.8	Yes
4P-2			15.4	11.6	5.07	57.9	No
4P-3			10.0	11.1	5.10	74.0	Yes
5P-1	S-07	S-06	12.0	11.6	4.83	76.9	No
5P-2			10.0	11.5	5.31	64.6	Yes
5P-3			15.4	11.7	4.72	75.7	No

くした予備試験における脱ガス発生時の間隙水圧より高い間隙水圧が維持されていた (**Fig. 10(d)**)。Table 1 にウラニンをトレーサーとした全トレーサー試験の結果を示す。トレーサー試験は概ね60%から80%のトレーサー回収率であり、注水流量に対して揚水流量を大きくしたケースでは比較的高いトレーサー回収率となる傾向にある。

Fig. 11 にトレーサー試験から得られた破過曲線を示す。各試験ケースとも、揚水孔で観測されるトレーサー濃度が十分に低い濃度 (0.011mg/L) まで低下することを確認している (後半の時間帯のデータは **Fig. 11** では非表示)。また、前後の濃度プロットを比べて有意に低い濃度を示すプロットが確認できるが (**Fig. 11(a), (c), (d), (e)**)、これは、脱

ガスしたガスがフローセル内に混入し、蛍光が散乱することで蛍光強度が低下したことによるものである。したがって、Table. 1 および **Fig. 11** 中のトレーサー回収率は、このようなプロットを除外して算定している。今回実施したトレーサー試験から得られた破過曲線において、単一のピークを有する場合と、複数のピークを有する場合が確認された。このような破過曲線の形状の違いは、主にトレーサーの移行経路の違いを反映していると考えられ、トレーサー回収率に影響を与える可能性が考えられる。そこで、破過曲線に単一のピークが確認されたケースと複数のピークが確認されたケースとを比較し、トレーサー回収率との関連性を整理した。S-07 孔を注水孔、S-02 孔を揚水孔としたケ

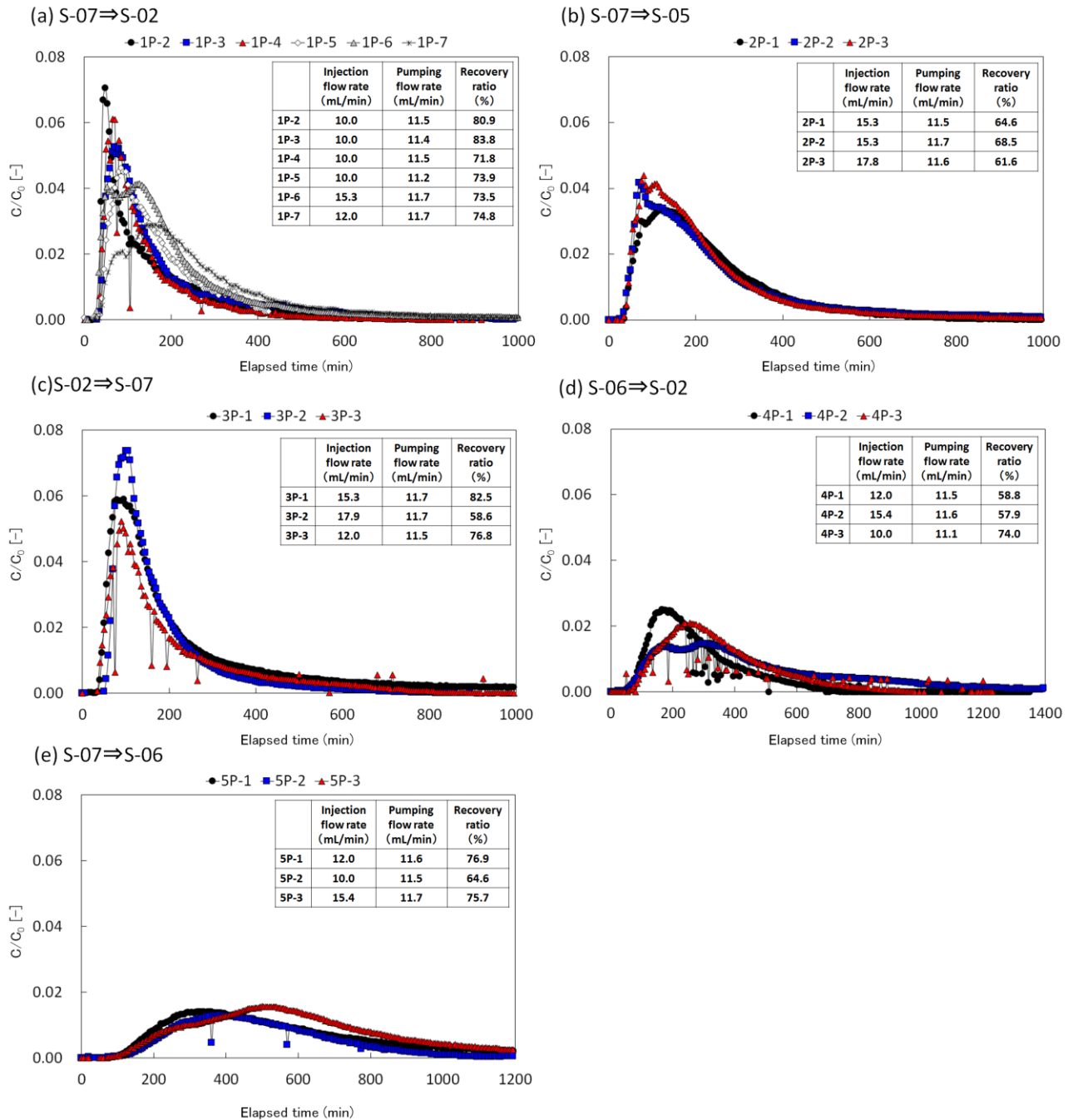


Fig. 11 Breakthrough curves for uranine. The concentration (C) was normalized to the initial concentration (C_0). The elapsed time is relative to the time of tracer injection.

ースにおいては、注水流量が揚水流量よりも小さい 10 mL/min の場合 (Fig. 11(a) の 1P-2 から 1P-5) に破過曲線が 1 つのピークを有するのに対し、注水流量が揚水流量より大きい 12 mL/min (Fig. 11(a) の 1P-7) および 15 mL/min (Fig. 11(a) の 1P-6) の場合は破過曲線が 2 つのピークを有している。また、トレーサー回収率を見ると、注水流量が揚水流量より小さい 10 mL/min に設定し、かつ破過曲線に 1 つのピークを有する 1P-2 および 1P-3 のトレーサー回収率が 80% を超えているのに対し、破過曲線に 2 つのピークが現れている 1P-6 および 1P-7 のトレーサー回収率はそれよりも低い結果となっている。S-06 孔を注水孔、S-02 孔を揚水孔としたケースにおいては、注水流量を揚水流量より大きい 15 mL/min に設定したケースにおいて破過曲線に 2 つのピークが現れており (Fig. 11(d) の 4P-2)、注水流量を揚水流量より小さい 10 mL/min に設定し、破過曲線に 1 つのピークが現れているケース (Fig. 11(d) の 4P-3) のトレーサー回収率と比べると低い結果となった。Hoehn ら[12]は高いトレーサー回収率を達成するためには揚水流量を注水流量よりも高く設定することを指摘しており、揚水流量を注水流量に対して 15 倍に設定した場合にトレーサー回収率が 100% となった一方で、揚水流量を注水流量に対して 3 倍に設定した場合において、トレーサー回収率が 100% より低くなったことを示している。また、Moreno ら[20]は割れ目の不均質な開口幅分布を表現した 2 次元モデルを用いて、注水流量の違いが破過曲線の形状に与える影響について検討を行っており、その中で、注水流量が大きいほど、注水孔周りの多くの水みちにトレーサーが移行し、その結果、破過曲線が複数のピークを有することを指摘している。これらの検討結果を踏まえると、注水流量を揚水流量よりも高く設定した場合は、注水流量を揚水流量よりも低く設定した場合に比べ、揚水孔へ到達しない移行経路に相対的に多くのトレーサーが流れ込み、その結果トレーサー回収率が低くなると考えられる。

今回実施したトレーサー試験において、試験中に脱ガスの発生が確認できるケースと脱ガスの発生が確認できないケースが確認された (Table 1)。そこで、注水流量および揚水流量に着目し、これらと脱ガスの発生の有無の関連性について整理した。注水流量が揚水流量より小さいケース (Table 1 中の 1P-2, 1P-3, 1P-4, 4P-3, 5P-2) において、脱ガスによる流量の乱れが確認されている。また、注水流量が揚水流量よりわずかに大きいケースにおいては、脱ガスによる流量の乱れが確認されるケース (Table 1 中の 3P-3, 4P-1) と、確認されないケース (Table 1 中の 1P-7, 5P-1) が認められた。さらに、注水流量が揚水流量よりも有意に大きいケース (Table 1 中の 1P-6, 2P-1, 2P-2, 2P-3, 3P-1, 3P-2, 4P-2, 5P-3) では、脱ガスの発生が確認できなかった。

次に、脱ガスの発生と間隙水圧の関連性について評価を行った。Fig. 12 に、各試験ケースの step V および step VI の期間 (Fig. 9 : 以下、注水・揚水期間) における注水孔と揚水孔の間隙水圧観測結果を示す。すべての試験ケースにおいて、注水孔よりも揚水孔の間隙水圧が低いことが確認

できることから、各ケースの揚水孔の間隙水圧を指標とすることとした。脱ガスの発生が認められた 1P-2, 1P-3, 1P-4, 3P-3, 4P-1, 4P-3 および 5P-2 における脱ガス発生時の揚水孔の間隙水圧は 5P-2 のケースで最も低く (0.039 MPa)、3P-3 のケースで最も高い間隙水圧 (0.130 MPa) を示しており、0.1 MPa 程度の幅をもっていることが確認された。一方で、1P-5, 1P-7, 5P-1 および 5P-3 のケースにおいては注水・揚水期間中の揚水孔の間隙水圧が上述する幅の範囲に入る期間があるものの、脱ガスの発生は確認できていない。したがって、脱ガスの発生の有無が揚水孔の試験区間の間隙水圧に一意的に支配されているわけではないと考えられる。この原因は不明だが、試験毎に溶存ガスの濃度が異なっていた可能性などが考えられる。

注水および揚水を伴う原位置トレーサー試験結果において、注水流量および揚水流量がトレーサー回収率や溶存ガスの脱ガスの発生に与える影響を評価した結果、注水流量を揚水流量よりも高く設定することで、トレーサー回収率が低くなる傾向にある一方で、同条件では、溶存ガスの脱ガスの発生が低減される傾向にあった。したがって、本稿で報告したトレーサー試験に関しては、注水流量を揚水流量よりもやや高く設定した条件が、脱ガスの影響を回避しつつ可能な限り高いトレーサー回収率を達成するための試験条件として最も適していると言える (例えば、1P-6, 3P-1, 5P-1, 5P-3)。

6 結論

本稿では、地下水中に溶存ガスが存在する環境下における堆積岩中に分布する割れ目を対象に実施した原位置トレーサー試験に基づき、試験条件のうち、注水流量と揚水流量に着目し、破過曲線の形状とトレーサー回収率との関連性や脱ガスの発生への影響について報告を行った。

応力解放された地下坑道近傍にてトレーサー試験を実施する場合、溶存ガスが遊離することにより、移行経路沿いに不飽和領域が形成される可能性があるため、脱ガスの発生を低減しつつ、注水および揚水を伴う原位置トレーサー試験を行うには、注水流量を揚水流量に対して、高く設定することが重要である。一方で、注水流量を揚水流量よりも大きく設定した場合には、トレーサー回収率が低くなる傾向にあるとともに、この条件においては破過曲線に複数のピークが出現する傾向があり、その場合のトレーサー回収率も、低くなる傾向にあることが分かった。今回報告したトレーサー試験に関しては、注水流量を揚水流量よりもやや高く設定した条件が、脱ガスの影響を回避しつつ可能な限り高いトレーサー回収率を達成するための試験条件として最も適していた。

地下水中の溶存ガスの脱ガスが想定される試験環境下において、注水および揚水を伴う原位置トレーサー試験を実施する際には、溶存ガスの脱ガスによる移行経路の不飽和領域の形成を回避するとともに、可能な限り高いトレーサー回収率を達成するための適切な試験条件の設定が必要である。本稿で報告したように、注水と揚水の流量比が

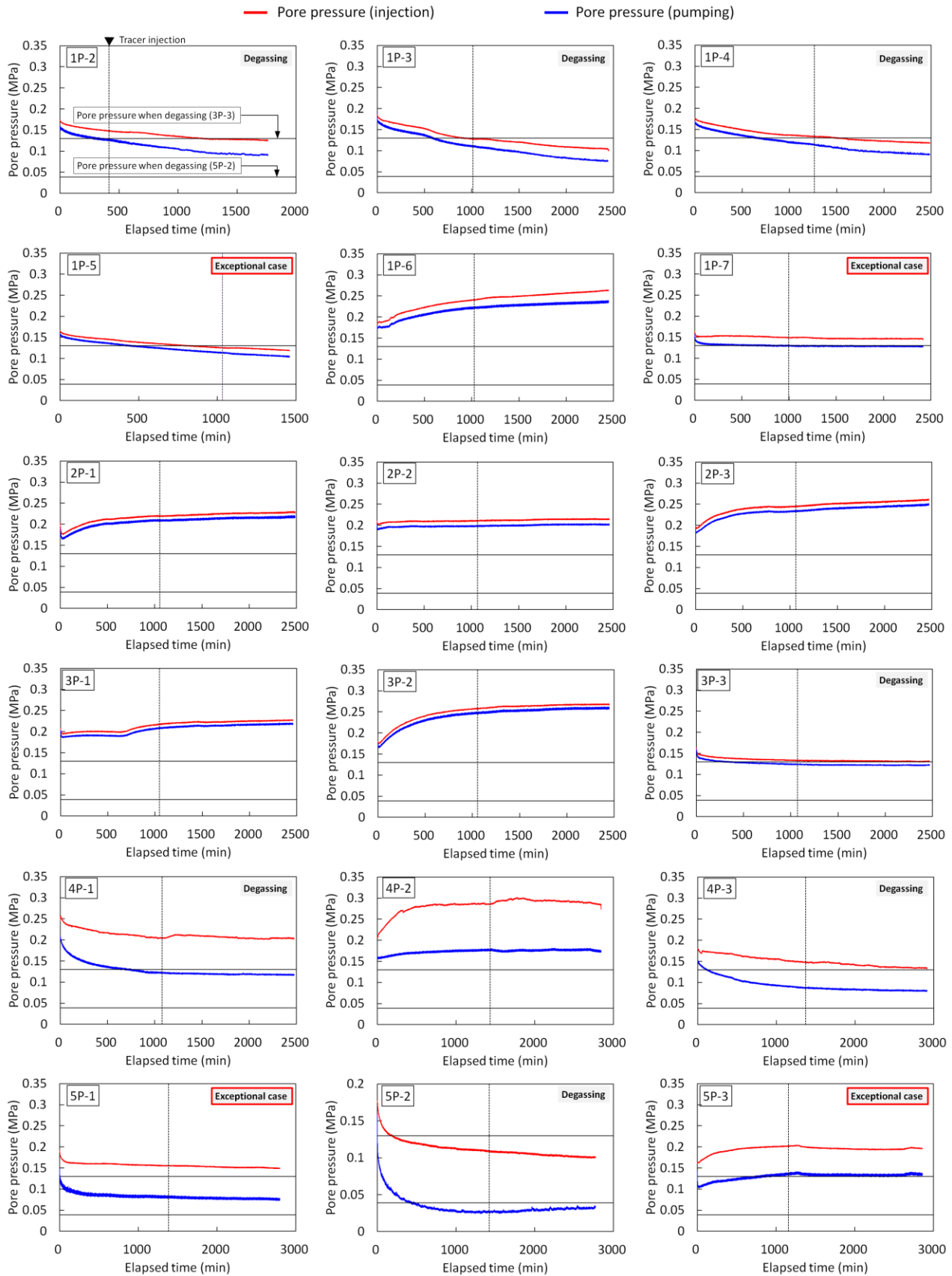


Fig. 12 Results of pore pressure measurements from the start of injection and pumping using water without uranine (step V in Fig. 9) to the end of the tracer migration tests using water with uranine. The elapsed time is relative to the start of injection and pumping with water, and the black lines in each figure show the pore pressures at the time of the onset of degassing in the pumping boreholes (3P-3 and 5P-2). Exceptional case (1P-5, 1P-7, 5P-1 and 5P-3) arose when degassing did not occur, even though the pore pressures in these pumping boreholes were in the range of that which produced degassing in 3P-3 and 5P-2.

①脱ガスの発生に与える影響, ②トレーサー回収率に与える影響の双方を評価することが, 適切なトレーサー試験条件(本稿においては注水流量を揚水流量よりもやや高く設定する条件)を見出すことに有効である。

今後は, 今回得られた溶存ガス環境下における原位置トレーサー試験手法に関する知見も踏まえ, 収着性を有する元素を用いたトレーサー試験を実施し, 岩盤への収着分配特性などを考慮した物質移行特性を評価するとともに, 割れ目内の開口幅分布とトレーサーの移行経路に関する評価を行う。併せて, トレーサー試験後に割れ目を含む岩盤試験料を採取し, 割れ目表面から岩盤マトリクスへのトレーサーの移行挙動に関する評価を行うことで, 堆積岩中の割れ目の物質移行特性に関する評価手法の確立に向けた検討を進める予定である。

参考文献

- [1] Bock, H. et al.: 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).
- [2] Mazurek, M. et al.: Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations, *Physics and Chemistry of the Earth*, **33**, 95-105 (2008).
- [3] Mazurek, M. et al.: Derivation and application of a geologic dataset for flow modelling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, **35**, 1-17 (1998).
- [4] Ishii, E.: Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **120**, 2220-2241 (2015).
- [5] Bossart, P. et al.: Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology*, **66**, 19-38 (2002).
- [6] Bossart, P. et al.: Structural and hydrogeological characterization of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland), *Applied Clay Science*, **26**, 429-448 (2004).
- [7] 青柳和平 他: 幌延深地層研究センターにおける人工バリア性能確認試験孔周辺の岩盤損傷の検討. 日本材料学会第 65 期通常総会・学術講演会論文集, pp. 19-20 (2016).
- [8] Winberg, A. et al.: Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments, TR 00-07, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, (2000).
- [9] Frick, U. et al.: The Radionuclide migration experiment – overview of investigations 1985-1990, NTB 91-04, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, (1992).
- [10] 下茂道人 他: 釜石鉱山における非収着性トレーサー試験研究. PNC-TJ1205-98-001 (1998).
- [11] Carleton, G. et al.: Design and analysis of tracer tests to determine effective porosity and dispersivity in fractured sedimentary rocks, Newark basin, New Jersey, USGS Water Resources Investigations Report 98-4126A (1998).
- [12] Miyakawa, K. et al.: The role of low-temperature organic matter diagenesis in carbonate precipitation within a marine deposit, *Applied Geochemistry*, **76**, 218-231 (2017).
- [13] Hoehn, E. et al.: The Grimsel Migration Experiment: field injection-withdrawal experiments in fractured rock with sorbing tracers, *Journal of Contaminant Hydrology*, **34**, 85-106 (1998).
- [14] Ishii, E. et al.: Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan, *Journal of Structural Geology*, **32**, 1792-1805 (2010).
- [15] Ishii, E.: Microstructure and origin of faults in siliceous mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory site, *Journal of Structural Geology*, **34**, 20-29 (2012).
- [16] Ishii, E.: Far-field stress dependency of the failure mode of damage-zone fractures in fault zones: Results from laboratory tests and field observations of siliceous mudstone, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 70-91 (2016).
- [17] Cooper, H. H, Jr. and Jacob, C. E.: A generalized graphic method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, Transactions, American Geophysical Union, **27**, No.4, 526-534 (1946).
- [18] Horne R. N.: Modern Well Analysis. A Computer-Aided Approach. Second Edition, Petroway, Inc, (1995).
- [19] 田中靖治, 細谷真一: 岩盤を対象とした原位置トレーサー試験の現状. *Journal of MMJ*, **124**, 601-610 (2008).
- [20] Moreno, L. and Tsang, C. F.: Multiple-Peak Response to Tracer Injection Tests in Single Fractures: A Numerical Study, *Water Resources Research*, **27**, 2134-2150 (1991).

