

ボーリング孔での原位置地下水試料の採取法と留意点

関 陽児^{*}・内藤一樹^{*}・鈴木庸平^{**}・伊藤一誠^{*}・渡部芳夫^{*}

Some technical notes on high quality in-situ groundwater sampling in drill holes

By Yoji SEKI^{*}, Kazuki NAITO^{*}, Yohey SUZUKI^{**}, Kazumasa ITO^{*} and Yoshio WATANABE^{*}

Abstract: Some technical notes on methodology of high quality in-situ deep groundwater sampling in drill holes are described. It is essential to know deep groundwater chemistry to make safety assessment of geological isolation of high level radioactive wastes. Chemistry of sampled groundwater can be changed by artificial disturbances such as drilling water contamination, mix with groundwater in different aquifers, reaction with atmosphere, and degassing by pressure leak. Because of low permeability of hard rocks in deeper formation, it is necessary to find water paths like open-space fractures to obtain groundwater in situ in realistic time periods. Water seepage records in drilling log, well loggings such as precise flowmeter log and flowing electric conductivity log, and drilled core observation are effective to recognize water paths. Attention should be paid for sampling immediately after drilling (if possible), removal of contaminated water from wells and adjacent formation, suppression of hydrogeochemical disturbance in and around wells, and maintenance of physicochemical conditions during sampling, withdrawal and transportation.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分(核燃サイクル, 1999)に代表される地下深部の空間の工学的利用に際しては, 利用対象となる深部空間の物理的・化学的な環境を知る必要がある。我が国は降水量が多く地下深部は例外なく地下水に飽和しているため, その環境を把握するためには地下水の水質を正確に知ることが不可欠となる。そのためには調査孔井を掘削して地下深部にアクセスし, できるだけ人為的擾乱を与えずに地下水試料を採取する必要がある。孔井から地下水を採取するための方法としては, ベイラー(釣瓶)やエアリフトによる揚収, 水中ポンプによる圧送などが一般的だが, それでは酸化や混合, 脱ガスなどの人為的擾乱は避けられない。地下水が賦存している地下深部において掘削孔内から人為的擾乱を抑制しつつ地下水を採取する(以下「原位置地下水採取」と呼ぶ)ためには, 採水対象区間を水理的に隔離したり耐圧試料容器を用いて原位置圧力を保つなど, 一般的な地下水採取と比べてより複雑な装置・手順が必要とされる(例えば Bottomley et al, 1984; 岩月ほか,

1998 など)。それゆえ, 原位置地下水採取には相対的に大きな費用を要するが, 試料採取時は勿論のこと, 孔井の掘削から揚収後の分析に至るまでの一連の作業を通じて人為的擾乱を低減するための適切な配慮がなされないと, 投入した経費や時間に見合った品質の試料が取得できないおそれがある。

原位置地下水採取の成否は, 対象とする地下水への掘削水や他の地下水の混入を防ぐこと, および原位置で採取した地下水試料の揚収運搬過程で試料容器からの漏洩による圧力低下や大気雰囲気との接触に起因する物理的・化学的変化を防ぐことの双方が達成できるかどうかにかかっている。例えば, 掘削流体の混入や水質の異なる地下水相互の混合が起これば, 原位置地下水の水質は保存されない(例えば 嶋田, 1987; Kloppmann et al., 2001; 古江ほか, 2005)。また, 酸化還元電位を始めとする地下水の水質は, 自然状態での地下水の存在環境と測定を実施する場の物理的・化学的な環境に違いがあると大きく変化する。それに応じて酸化還元イオン種の濃度も変化するほか, pH-酸化還元電位条件で規定される溶存イオン種構成の変化ももたらす(例えば 関ほか, 2004; 古江

^{*} (独)産業技術総合研究所深部地質環境研究コア (Research Core for Deep Geological Environments, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

^{**} 東京大学大学院理学研究科, 元産総研 (School of Science, The University of Tokyo (Former member of RCDGE, AIST))

Keyword: in-situ groundwater sampling, water path, water seepage, well logging, artificial disturbance

ほか、2005；井岡ほか、2007a, b). さらに、地下水に一定量以上の溶存ガスが含まれる場合は、原位置での圧力を保持せずに地上へ揚収すると、溶存ガス成分の分離により液性の変化や沈殿生成が起こる可能性がある。

原位置地下水試料の重要性が認識されその採取機会が増えるとともに、様々な採取方法や器機の使用が試されるようになり、より高品質の試料採取に向けての改善が積み重ねられている。原位置地下水採取については、すでに岩月ほか(1998)、小出ほか(2001)、古江ほか(2003, 2005)などによりレビューされているが、その後の進展や筆者らによる経験も踏まえ、採取方法や器機の特徴および原位置地下水採取とそれに関連する作業全般における留意点等を改めて整理してみる。

以下では、まず孔井における原位置地下水採取において、自然状態における地下水の水質と採取された地下水の水質との同一性（以下「地下水の原位置性」と呼ぶ）を低下させる要因について述べる。ついで岩盤中での原位置地下水採取において避けて通れない水みちの捕捉方法についてまとめたうえで、実際に原位置地下水採取で用いられる代表的な器機や手法の特徴を紹介する。最後に高品質の原位置地下水試料を採取するための技術的な留意点を提示する。

2. 地下水の原位置性を低下させる要因

孔井から地下水を採取する際、その原位置性を低下させる要因として、①掘削水の混入、②異種の地下水相互の混合、③大気の影響による酸化、④減圧に伴う脱ガスによる液性の変化が指摘されている。

2.1. 掘削水の混入

孔井掘削に際して、掘管の下端に装着されている掘削用ビットには、基本的に掘管の長さすなわち掘削深度に相当する掘削水の水柱が載ることにより地表面を水頭とする静水圧または静水圧に泥水比重を乗じた圧力が加わっている。実際の掘削ではさらに、立ち上げた掘削槽の高さに相当する水柱重量や加圧ポンプにより付加された圧力が掘削水に加えられる。そのため、掘管内部やビット通過時の圧力損失が補われた上で、ビットノズルから孔内へ噴出する掘削水は静水圧よりも大きな圧力をもっている（新エネ財団、1995）。湿潤気候下の我が国の地下は、地表付近まで地下水で飽和しているため、地下水は地表面を水頭とする静水圧付近の圧力をもつことが多い。したがって、ビットから噴出した掘削水の圧力は地下水の圧力に勝る。このようにオーバーバランス状態（長縄、2006）かつ地表面よりも高い水頭のゆえに、掘削水は掘管と孔壁との間の空間（アニユラス）を上昇して地上に到達する（リターン）とともに掘削水中に浮遊して

いる掘削屑が地上に回収される。その一方、掘削先端が透水性の亀裂や破碎部すなわち水みちに遭遇すると、掘削水が水みちの中に圧入されて地層中の地下水と混合する。掘削水には、沢水や浅井戸の地下水をベースにしてベントナイトなどの泥剤を混ぜて比重や粘性を調整された泥水が用いられることが多いので、この擾乱により地下水の化学組成の変化、すなわち原位置性の低下が生じる（例えば Hama et al., 1994；核燃料サイクル機構、2003 など）。また、掘削屑に硫化鉱物や炭酸塩鉱物など反応性の高い鉱物片が含まれる場合、それらと地層水との化学反応により水質が変化する可能性もある。添加される泥剤自体による地下水への化学的擾乱がどの程度かについての詳細は、分かっていない（池田ほか、1998）。

掘削水の地層中への混入の程度は、掘削水の送排水量の管理記録に基づいて見積もることができる（小出ほか、2001）。掘削水の全量が飲み込まれる「全量逸水」では、コアリング掘削が行われる規模の調査孔井の場合、毎分100リッター単位の逸水が生じうる。毎分数十リッター規模の逸水であれば、送排水管理が正確になされていれば逸水として識別される（鶴山ほか、2009）。

2.2. 異種の地下水相互の混合

地下水は、それを胚胎する岩体の透水性分布に代表される水理特性、涵養から流出に至る広域的な地下水流動の場における位置、地下深部から上昇してくる流体（大澤ほか、2010）の関与等により規制された、さまざまな水質や全水頭（位置水頭と圧力水頭の和：管柱を立てたときの水位に相当。以下、全水頭を「水頭」と記す）を有する。このような共通した水質や水頭をもつ一連の地下水を地下水帯と呼ぶとすれば、ある地点において孔井を掘削していく場合、掘削の進行に伴って複数の地下水帯に遭遇することが普通である。そうした水頭の異なる複数の地下水帯を孔井が貫通した場合、孔井が通水管となって高水頭部の地下水が低水頭部へ流入することにより、低水頭側の水質が乱されてその原位置性が損なわれてしまう（例えば嶋田、1987；関ほか、2007；井岡ほか、2007a, b）。

昼方だけの掘削のように周期的に掘削と休止が繰り返される場合は、掘削休止後の一定時間経過後における回復水位の観測値を比べていくことにより、掘進先端が異なる水頭の地下水帯へ進入したことを識別できる可能性が高い。24時間連続掘削のように深度ごとの平衡水位を推定できるデータを得ることが難しい場合、できれば掘削期間中に定期的に孔内検層を実施して、水頭の異なる水みちの有無を調べることが望ましい。有効な検層手法としては流体電気伝導度検層や微流速検層などがあり、それらについては「3. 2」で詳述する。高水頭部から低水頭部に流入する水量は、水みちの水頭差や透水性

に依存する。仮に孔内へ流入する高水頭部と地層中へ流出する低水頭部がひとつずつあった場合、孔内水位はそれぞれの透水性の相対的な大きさにより決定される。例えば、高水頭部の透水性が低水頭部の透水性に勝っていれば、孔内水位は高水頭部の水位に近いものとなる。このことは、掘削期間を通じて孔内水位に大きな変化が無かったとしても、水頭の異なる地下水帯間での混合問題がないとは必ずしも言えないことを意味する。水頭が異なる地下水相互の混合状況を推定するためには、悉皆的な水理試験（例えば藪内ほか, 2008 など）を実施して個々の水みちや深度区間ごとの水頭や透水性を把握する必要がある。

2.3. 大気の影響による酸化

我が国の放射性廃棄物地層処分事業において廃棄体の埋設が予定されている地下 300m 以深のような深部地下の環境は、大気と隔絶されていることが普通であり、多くの場合地下水は還元状態にある。そのような地下水が大気雰囲気に触れると、酸化還元電位をはじめとする物理化学パラメータや溶存成分組成の原位置性が損なわれる。特に酸化還元電位は、僅かな酸素との反応により大幅に変化する (Grenthe et al., 1992)。酸化還元電位の変化は、それを規定する主要な酸化還元イオン種の濃度に変化することを意味するとともに、pH-酸化還元電位条件で規定される溶存イオン種構成の変化 (Stefansson et al., 2005) をもたらして、試料の原位置性が低下していく。

酸化は、大気自体の混入は勿論として、採水ラインや容器に大気成分を溶存する水分が付着している場合などにも生じうる。また、試料容器に僅かでも気体透過性 (新井・中村, 2004) があると、試料採取後に徐々に酸化が進行する (例えば里見, 1998)。大気に飽和した掘削水中の溶存酸素が原位置の地下水中へ拡散する可能性も考えられる。

採取された地下水試料の酸化還元電位に関する原位置性は、孔内の原位置深度に降下させた水質プローブにより測定された酸化還元電位と、回収された試料水の酸化還元イオン種の分析値から算出される酸化還元電位とを比較することにより、一定の評価ができる (Grenthe et al., 1992)。ただし、電極による測定では、反応速度の異なる複数の酸化還元反応が存在して溶液系内の酸化還元反応が非平衡状態である場合には、測定値の代表性が損なわれる (例えば井岡ほか, 2007b)。そのため、正確な酸化還元電位を知るためには、電位を規定している可能性のある酸化還元イオン種の化学分析値から酸化還元電位を熱力学的に求め、電極による測定結果と比較検討する必要がある。また、電極表面の劣化による測定誤差を生じさせないため、できるだけ頻繁に電極を研磨する必要がある (井岡ほか, 2006a)。

2.4. 減圧に伴う脱ガス

地下深部の高圧下で地下水中に溶存していたガス成分が、試料の採取・揚収過程での減圧に起因して液相から分離した場合、pH や酸化還元電位などの物理化学指標が大きく変化することがある (岩月ほか, 2009)。加えて、液性の変化に伴う沈殿の発生により一部の溶存成分が除去されて溶存成分組成が変化する可能性もある (例えば彌榮ほか, 2004; 古江ほか, 2005 など)。

ガスに飽和した地下水を対象として原位置地下水採取を行った場合は、採取に伴ってほぼ不可避免的に発生する僅かな減圧により、ガスが分離して発生する。また、地下水の圧力が低下してガスの飽和度が上昇すれば、気液分離は試料容器やケーシングの内部に限らず岩盤中にまで及びうる。透水性の低い水みちから溶存ガスに富む地下水を採取する場合、揚水に伴う圧力低下が特に発生しやすいため、採水容器や採水ライン内での気液分離の発生のみならず、地層内部への拡大の可能性もある。気液分離が試料容器よりも上流 (地層) 側に及んでいるかどうかは、得られた原位置試料のガス水比を原位置の温度圧力にもどした場合にガスの全量が溶存できるか否かを算出することにより判断できる。気液分離が地層中にまで及んだ場合、透水性が小さな水みちでは地下水の揚水を停止しても気液分離状態がすぐには解消しないことがある。

3. 水みちの捕捉と深度の特定

原位置地下水採取では、一定の作業期間に対象とする水理区間から必要量の地下水を取り出せることが、実務上必要な条件となる。原位置地下水採取の対象となることが多い固結した岩盤では、一般にその透水性は極めて小さい。そのため、実質的に地下水をくみ出せる箇所は開放割れ目や破砕部などの局所的に高い透水性をもつ場所、すなわち水みちに限定される。つまり、岩盤中で原位置地下水を採取するためには、まず始めに水みちを捕捉してその深度を特定する必要がある。水みちの捕捉法は、掘削中の逸水に基づく方法と、掘削後に実施される孔内検層を活用する方法に大別される。また、コアが採取される掘削では、コアの観察結果も重要な判断材料となる。

3.1. 掘削中の逸水に基づく水みちの識別

通常の掘削環境では、掘削孔が水みちを貫通するとオーバーバランス状態の掘削水の水みちへの流入、すなわち逸水が発生する (図 1)。逸水は、掘削ビットが水みちに到達したタイミングと同期して発生することが多い (田中, 1988) が、時間差をおいてからの逸水開始、発

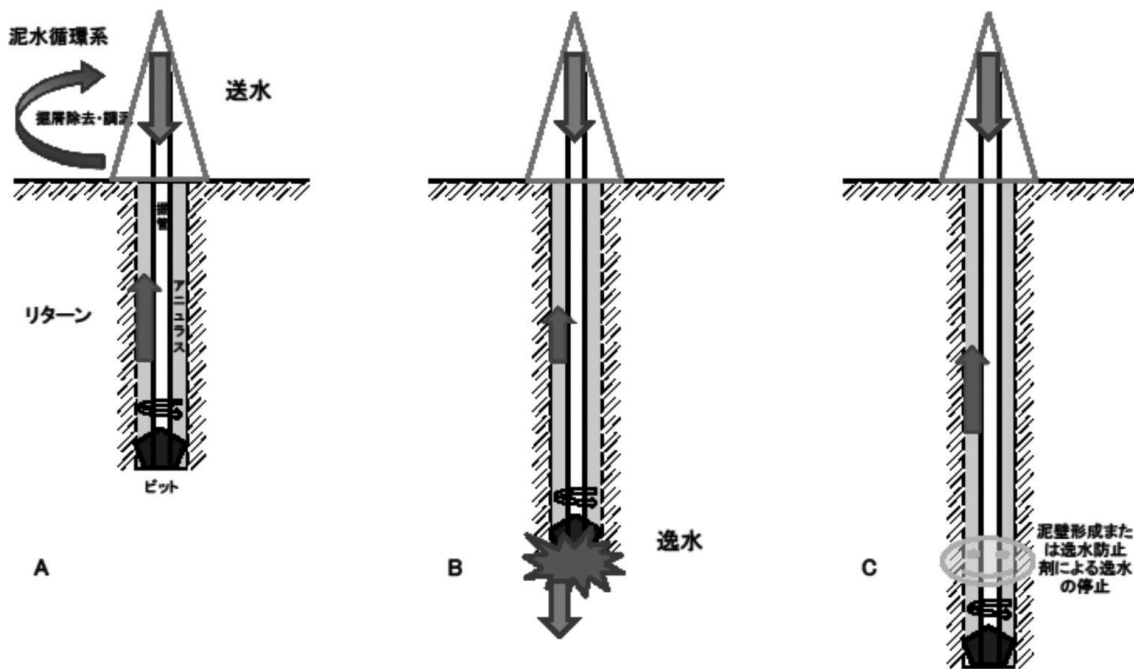


図1 逸水の前後的掘削水挙動の基本的な推移。

A: 正常な掘削状況では、掘管を通じて降下した掘削水はビットから孔内に噴出したのち、アニュラス（掘管と孔壁の間のドーナツ状の空間）を通じて上昇し地上に回収（リターン）される。地上で掘屑の除去や調泥ののち、再び掘管を通じて孔内へ送られ、泥水の循環系が成立する。B: オーバーバランス状態で水みちに遭遇すると逸水が発生して掘削水の一部が水みち内部に侵入していく一方、リターン水量は逸水量分だけ少なくなる。C: 逸水管所が泥壁形成や逸水防止剤の充填などで閉塞されると、Aの状態に戻る。

生じた逸水の継続、複数の水みちの関与による逸水の重複、送水量や泥水濃度調整など掘削水管理により起因する逸水量の増減、それらの中のいくつかが複合する場合など、様々なタイミングと様式で起こりうる。

水みちに起因する逸水と掘進とのタイミングとして最も多いケースである、水みちとなっている岩盤中の開放空間に掘削ビットが到達すると同時に逸水が始まる場合、逸水の発生したときの孔底深度が水みちの存在深度になる。逸水は、循環掘削水の一部が失われる部分逸水から全量が戻らない全量逸水までの範囲で起こりうる。強度の逸水が続く場合、泥剤の消費だけでなく孔壁の崩壊や掘削ツールの孔内抑留など重度の掘削障害が懸念されるため、逸水防止剤が投入されることが普通である（新エネ財団，1996b）。掘削を続けながら逸水防止処置を行った場合、掘削深度と逸水との関係は、水みちの存在深度に逸水量のピークをもち深部に向けてテールをひくプロファイルを示すことになる（図2A）。逸水が激しい場合、掘削を一時停止して逸水防止剤を投入することがある。その後に逸水の停止を確認してから掘削を再開した場合、掘削深度－逸水量プロファイル上には逸水深度でのスパイクが記録される（図2B）。全量逸水に対して、逸水抑制が十分にできずリターン水量が全く得られ

ない状態で掘削を継続すること（逸水掘り）がある。その場合、逸水開始深度において一気に増加した逸水量が減少せずに継続するテーブル状のプロファイルを示す（図2C）。

一方、掘進の先端部が水みちに到達しても直ちには逸水せず、ある程度掘削が進捗した後に逸水が始まるケースもある。これは、粘土鉱物などで部分的に閉塞されていた水みちが孔井貫通後に掘削水と地下水との差圧により開通する場合（新エネ財団，1996a）、あるいは掘削孔に近接並走する急傾斜割目との間でごく薄く保持されていた孔壁が孔井掘削後に崩壊する場合などに対応する。この場合、水みちの存在深度は、掘削深度－逸水量プロファイル上での逸水量増加深度よりも浅部になる（図2D）。

水みちへの掘削水の逸水は、掘削孔が水みちを貫通した瞬間だけでなく、掘削水の送水量、オーバーバランスの程度、泥壁や逸水防止剤による通水抵抗などの変化に応じて一定の期間にわたって継続することが普通である。水みちが近接して複数存在することは珍しい現象ではないが、その場合の掘削深度－逸水量プロファイルは深度とともに段階的に増加するパターンを示す。同様のパターンは水みち内部に存在していた岩片や粘土鉱物が掘削

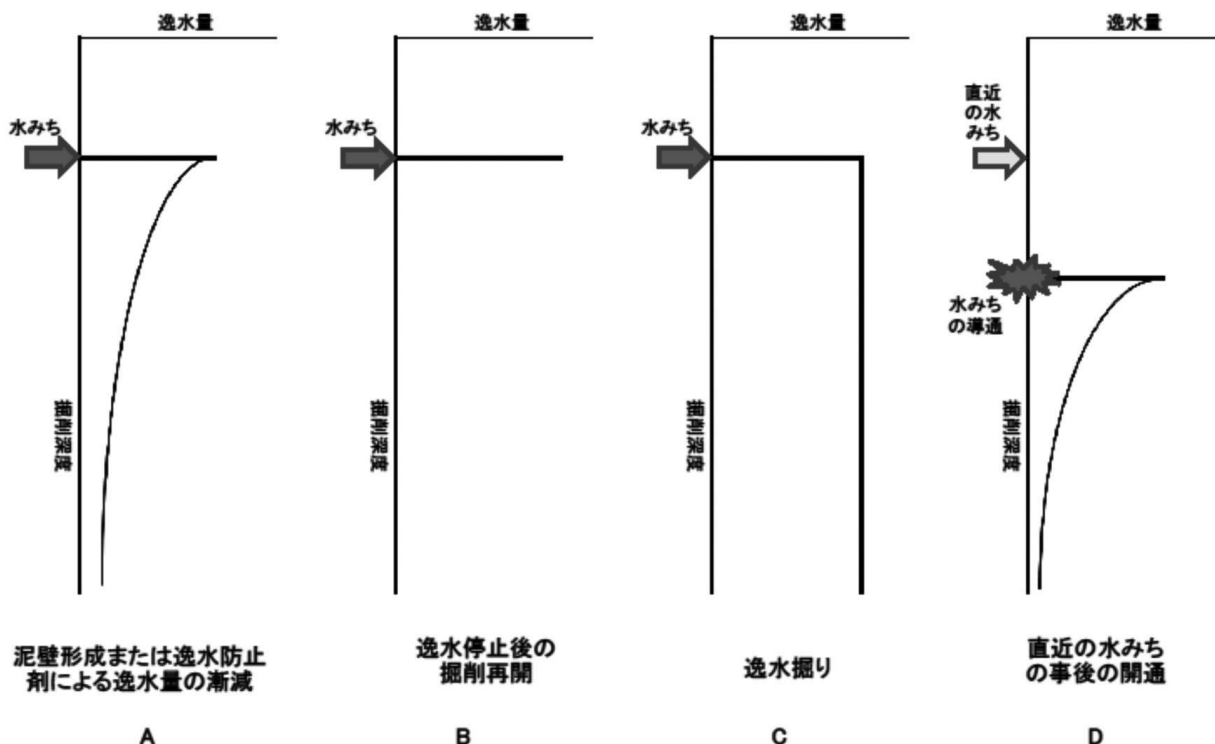


図2 逸水量と掘削深度のプロファイル。

逸水が発生および継続する深度区間と水みちの位置との関係を示す。オーバーバランス状態の掘削が水みちに遭遇した際の逸水には、さまざまなパターンが生じる。A: 水みちに遭遇してから逸水防止剤を投入しつつあるいは泥壁形成を待ちながら掘削を継続するケース。B: 逸水発生時に掘削を中断し、逸水防止剤を投入して逸水の停止を確認後に掘削再開するケース。C: 発生した優勢な逸水に対して有効な抑制措置がとれないまま掘削を続けるケース。D: 掘削孔に並走する急傾斜割れ目のような近接する水みちとの間に薄く保持されていた孔壁が、事後に崩壊して逸水が発生するケース。実際の掘削ではこれらのいくつかが重複するケースも少なくない。

流体により洗い流されて通水抵抗が徐々に減少していく状況（新エネ財団，1996b）でも発生すると考えられる。

逸水が激しい場合に用いられる逸水防止剤は、雲母鉱物、綿実、胡桃殻、合成無機物などからなり、繊維状、フレーク状、粒状の形をしている（高杉，1993）。逸水防止剤は、逸水の規模や継続時間に応じて単独あるいは種々組み合わせて掘削泥水に添加され、逸水が生じている水みち内部に侵入しつつそれを閉塞することで逸水を停止させる。したがって、逸水防止剤が投入された場合、最初に遭遇した水みちは認識できても、投入された防止剤が効果を発揮している間は以降に遭遇した水みちの透水性を低下させ、その識別が困難になる可能性がある。掘削ログには逸水防止剤の使用実績を詳細に記載して、その影響範囲を評価できるようにする必要がある。

3.2. 孔内検層による水みちの捕捉

掘削中の逸水記録は水みちの存在を示す有力な手がかりとなるが、それだけでは掘削孔が貫通した全ての水みちの深度を正確に特定できるとは限らない。原位置地下

水の採取対象とする水みちを選定するためには、地層と孔内との水の出入りを直接間接に指示する流体電気伝導度検層や孔内微流速検層、水みちがもつ物理的性質を示すハイドロフォン VSP 検層、孔壁の画像情報等も活用したうえで、それぞれの地下水帯を代表するできるだけ透水性の高い水みちを特定しその深度を確定する必要がある。

流体電気伝導度検層は、孔内を清水で置換した後、水みちから孔内に流入する地下水により孔内水の電気伝導度プロファイルが変化する様子を観察し、孔内に地下水が出入りしている水みちを探索する方法である（Tsang and Doughty, 2003；関ほか，2006；藪内ほか，2008 など）。この検層を適用する際の前提は、検層を始める段階の坑内水の電気伝導度と検層実施中に孔内へ流入する地下水の電気伝導度が異なること、および孔内水の水頭と水みち内の地下水の水頭に差があることである。深部の地層中の地下水は表流水と比べて溶存成分に富んでおり電気伝導度が高いことが多いので、孔内水を地表水等の電気伝導度の低い水に入れ替えて検層を始めることが

多い。また、地下水と孔内水との圧力がバランスすることにより水みちでの水の出入りがゼロになり捕捉できなくなる（マスク効果）を防ぐため、異なる孔内水位の下で複数セットの検層を行う必要がある。それぞれのセットで対照水の置換直後から検層を行い、地下水の出入りする深度が明瞭になるまで複数回の検層を行う例が多い。なお、対象とする地下水の電気伝導度が低い場合には、塩化ナトリウム等の電解質を溶解した電気伝導度の高い水による置換もありうる。

孔内微流速検層は、孔内に地下水が出入りすることにより発生する鉛直方向の孔内水流を測定して、その速度分布から水が出入りしている水みちを捕捉する方法である（宮川ほか，1997；東，2000；関ほか，2005）。流入点と流出点がひとつずつの最も単純なケースでは、流入点から流出点に向かう流速一定の流れが観測されることになる。使用する流速計には超音波、電磁式、ヒートパルス式などがあり、孔内環境や必要な感度に応じて使い分ける。この検層も、孔内水の水頭と水みち内の地下水の水頭に差があることを適用の前提としているので、流体電気伝導度検層と同様、異なる孔内水位の下で複数セットの検層を行う必要がある。

流体電気伝導度検層や孔内微流速検層では孔内水位を人為的に設定することが多いが、その際は水みちへの孔内水の侵入を抑制するために、水位を低下させる方向での揚水操作を活用することが推奨される（竹内ほか，2007）。

ハイドロフォン VSP 検層は、人工的に発生させた振動を受けて開口割れ目から二次的に発生するチューブ波と呼ばれる特徴的な圧力波に注目して水みちを探索する方法である（木口ほか，1995，1996；藪内，1999；関ほか，2006）。この方法では、波源から到達する P 波の進行方向と水みちとのなす角が大きいほど、発生するチューブ波のエネルギーが大きくなる。したがって、例えば鉛直孔井の孔口付近に震源を設置した場合は、急傾斜の水みちは捕捉されない可能性があることに留意する必要がある。

孔内カメラ（兵藤ほか，1990；田中・宮川，1992；田中ほか，1996）と孔内テレビュアー（伊藤，1995；山崎ほか，2001）は、いずれも孔壁の連続画像情報であり、逸水情報や孔内検層で水みちの可能性が考えられた箇所を画像で確認できるため、捕捉の確度が一層高くなる。光学カメラが清水中でのみ使用できるのに対して、超音波を使用するテレビュアーは泥水中でも使用が可能であるが、孔径（反射経路距離）や泥水濃度に応じて周波数や強度が異なる超音波源を選ぶ必要がある。また、コアの観察結果と併せて、検層深度の深度合わせを行う必要がある。

3.3. コア観察

水みちの探索を目的とした掘削では連続コアを採取することが多い。連続コアが得られている場合は、割れ目や空隙に注目したコアの観察が水みちの同定に直接に役立つ（関ほか，2005，2006）。回収したコアを速やかに観察して水みちに関する情報を得ることは、掘削調査と同時期に実施する原位置地下水採取（「4. 1」で詳述）で特に重要となる。

コア観察では、開放割れ目の同定が最も重要な作業となるが、その判定に際してワイヤーライン工法によるコアチューブの引き抜きにより生じた割れ目、原位置では密閉していたヘアクラックが応力開放に伴って開いた割れ目等を、水みちとして振る舞う開放割れ目と誤認しないよう注意が必要である。割れ目が透水性かどうかを推定する際に、割れ目の表面に成長する鉱物に注目する方法がある（例えば吉田，2012）。開放割れ目が水みちである可能性は高いが、そこに連続性や連結性が伴ってはじめて水みちとして機能する（例えば小坂，1998）ので、開放割れ目すなわち水みちではないことに留意する必要がある。

4. 原位置地下水採取に用いられる手法

原位置地下水採取は、その実施のタイミングから、孔井の掘削調査と同時期に水理試験等と併せて行なわれる場合と、掘削終了後に孔井内部に据え置き型の装置を建て込んだのちに比較的長期にわたり繰り返して実施される場合とに大別できる（井岡ほか，2006b）。孔井の掘削調査と同時期に実施する場合、作業の流れの面からは孔内検層、特に水理試験を拡張した形で実施されることが多く、採水区間は任意に決められる。一方、据え置き型の専用装置を用いる場合は、始めに独立した作業として仕様に従った採水区間をもつ孔内装置が建て込まれ、その後の原位置地下水採取では孔内装置に設定された採水区間でのみ採水が可能となる。掘削調査時に実施した原位置地下水採取で長期観測対象とする水みちを選び、それに基づいて長期観測用の据え置き型の装置を建て込むことが多い。

4.1. 掘削調査と同時期に行なう方法

掘削調査と同時期に行われる原位置地下水採取は、掘り止め深度までの掘削と所要の検層を実施した後に、原位置採水のために定められた工期の間、優勢な水みちが存在すると判断された深度区間の採水を順次実施する（以下「掘削後の」一括採水」と呼ぶ）ことが多い。一方、採取試料の原位置性の高さを最優先にする場合は、掘削中に優勢な水みちに遭遇した都度掘削を中断して採水作

業を行う（以下「（掘削中の）逐次採水」と呼ぶ）ことがある。

一括採水では、逸水記録を始めとする掘削ログやコア観察だけでなく、「3.」に述べた各種の検層結果も判断材料に加えて原位置地下水の採取深度を決めることができる。これらの情報を活用すれば、当該孔井全体の水みちの概要を把握したうえで合理的な採水プログラムを組むことができる。また、採水の時期を工程上の一つの期間に集約できるため段取りや孔内機材の設置昇降の効率が大きく、採水チームや機材の待機時間を最小にした経済的な採水が可能となる。しかし、一括採水では掘削中に優勢な水みちを貫通した場合、「2.1.」で述べたようにその水みちへの掘削流体の流入が継続したり、逸水防止剤を使用せざるを得ない状況になることもある。その結果、その水みちと通じている地下水帯へ多量の掘削水が混合して原位置性を低下させたり、逸水防止剤により透水性を損なったりする可能性が生じる。また、複数の水みちを貫通した場合、「2.2.」で述べたように異種の地下水の混合を引き起こす可能性がある。

逐次採水では、対象とする地下水への掘削水や異種地下水の混入による汚染が最小限ですむという決定的な利点がある。しかし、逐次採水での水みちの捕捉は、掘削水収支の追跡を主とする掘削ログとコアの観察結果のみを根拠に行なわざるをえないため、明瞭な逸水を伴う優勢な水みち以外はその認定が簡単ではない。また、いつ遭遇するか予測困難な水みちを対象に捕捉次第速やかに採水するためには、採水チームや機材を待機させておく必要がある。既存の地下データの少ない地点での掘削の場合、その不確実性は工程管理上の負担になるだけでなく、相応の経費が追加的に必要となる。

孔底深度が大きく水みちの探索区間長が大きな調査では、一括採水のもつ経済性・確実性と、最も高い品質の試料が期待できる逐次採水の双方の利点を汲んで、掘削が一定の深度区間を経るごとに水みち探索と原位置地下水採取を実施する「尺取り虫」方式の選択肢もある。

4. 2. 掘削終了後に専用機材を建て込んで行なう方法

長期間にわたり同じ水みちを対象に繰り返して原位置地下水採取を行おうとする場合、専用の機材を孔井に建て込むことがある。それにより「2.2.」で述べた異種地下水の混合問題を回避できるだけでなく、採取が簡便かつ確実に行えるようになる。専用機材を建て込んだ孔井では、孔内側の装置に対応した特定の孔内ツールを用いて原位置地下水採取を実施することが普通である。また、間隙水圧の長期連続観測が実施されることも多い。

最も単純な構造としては、対象とする水みちの開口深度を含む深度区間にスクリーンをもつケーシングを建て込み、スクリーン区間を透水性材料で、上下のアニュラ

ス部分を遮水性材料で充填する方法がある。この方法では複数の地下水帯の水を混合することなく採取することは困難なため、ひとつの孔井で原位置性を保持した地下水を採取できるのは単一の深度のみとなる。大深度の地下空間利用に関する調査研究では孔井が複数の地下水帯を貫通することが多く、それに適用するためには複数の孔井が必要となるため、この方法が用いられることは少ない。また、バッカーを用いる方式が再設置や撤去に対応できるのに対して、この方式はいずれにも対応できない。

現在主流になっている方法は、単一の孔井から複数の地下水帯の水をそれぞれ独立に採取する手法であり、国内外で複数のシステムが商業化されている（例えば岩月・ほか、1998；狩野ほか、2011）。いずれも対象とする複数の水みちをバッカー群で隔離したうえで、通常時は地下水の孔内への流入を遮断し、採水時にのみ任意の地下水を採水用のスタンドパイプに導入する点で共通している。構造上、地下水の間隙水圧モニタリング装置として機能させる際に必要となる圧力計測用スタンドパイプを独立に設けるか、採水用のスタンドパイプと共用するかで大別できる。

圧力計測用のスタンドパイプを計測区間毎に独立して設けるタイプ（例えば SPMP (Brownlie et al., 2003)：図 3）や PIEZO (細谷ほか、2000)）では、各水圧観測区間から圧力計測管が独立に立ち上げられる。個々の圧力計測管と採水用スタンドパイプが独立しているため、原位置地下水採取作業が圧力モニタリングと同時に平行で実施できる。圧力センサーを浅所に設置することによりメンテナンス対応性が高いなどの利点がある。その反面、図 3 に示すように圧力計測管の本数に応じて孔内断面が占有されるため、孔径により圧力計測できる区間数には上限がある。例えば SPMP の場合、孔径 76mm で 4 本、130mm で 10 本とされている。

一方、圧力計測と採水用のスタンドパイプを共用するタイプ（例えば MP (Black et al., 1986；石井ほか、1998)：図 4）では、孔内に建て込むパイプは 1 本のみでありその断面構造が単純で占有断面積が小さい。そのため、小孔径の孔井にも適用できる。設置時の地上設備がコンパクト、採水区間の設定数に上限がないなどの利点がある。その反面、連続して圧力モニタリングを行う場合には 1 本の共用スタンドパイプの内部に圧力モニタリングツールがつるし柿状に展開されるため、原位置地下水採取に先立っていったんそれらを揚収する必要がある。採取期間中は当該区間以外の測定区間の圧力モニタリングは実施できない。

これらの多深度を対象とした長期観測用の専用装置の設置に際しては、バッカー設置深度や採水区間など孔内装置の仕様を予め決定する必要がある。そのためには、

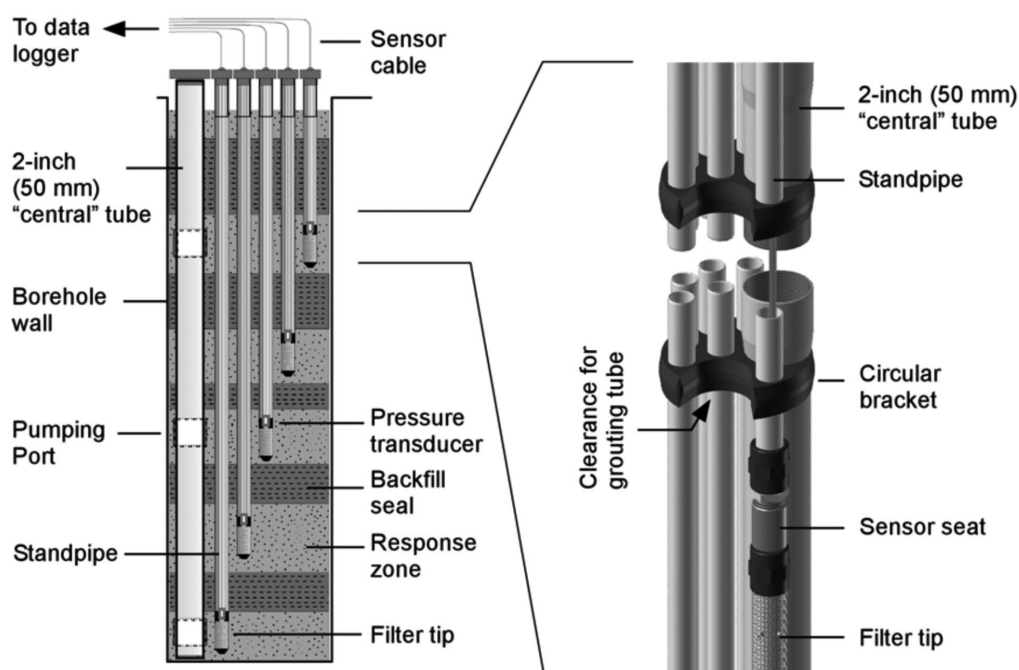


図3 原位置地下水採取システム（建て込み型）のうち圧力計測用と試料採取用のスタンドパイプが独立しているタイプの一例。

この例では、各水理区間はパッカーではなくシール材とフィルター材の充填により仕上げられている。

当該孔井が貫いた個々の水みちの深度の特定を始めとして、それぞれの水みちが実際に採水可能な透水性をもつかどうかの判断、複数の地下水帯を貫通する場合はそれぞれの地下水帯の代表とみなせる水みちの特定と深度区間の設定、それぞれの水理区間を隔離するパッカーの適切な位置選定が必要である。パッカーの設置場所としては、地下水帯を隔てる一定の連続性をもつ低透水性区間内であって、キャリパー検層等により孔径や孔壁形状の大きな乱れの無い場所を選定する。また、掘削終了から装置を設置するまでの間は、孔井を通じて高水頭部の地下水が低水頭部へ流入する状態が続くことになるので、それによる擾乱の程度を評価する必要が生じる。

5. 高品質の試料を採取するための留意点

高品質の原位置地下水試料を採取するためには、擾乱が進行する前の掘削直後に採水を行うことが最善だが、実際の調査ではそれができないことも多い。その場合、原位置性が低下した地下水を十分に排除することが重要になる。またどちらにしても、原位置環境の擾乱の抑制と試料採取から分析に至る過程を通じての原位置物理化学条件の保持が必要である。

5. 1. 迅速な採取

自然状態に近い原位置地下水の採取を最優先するならば、前述のとおり、掘削水や異種地下水の混入による汚染が最も少ない状態での採水が期待できる逐次採水が、最善の方法である。水みちに遭遇することなく掘進が経過した後遂に優勢な水みちに遭遇した場合は、それを採水候補とする決断が容易にできる。しかし、水みちには遭遇するもののどれもさほど優勢ではない場合、どの水みちで採水すべきかの判断が難しい。そうした場合は、掘進ログとコア観察結果が主要な判断材料となる。そのため、逐次採水を行う場合は、掘削水の送水流量とリターン流量を正確に計測して逸水量の算出精度を高くするとともに、一定規模以上の逸水の発生周知を含めた計測システムの自動化を図るなどして掘削水管理をリアルタイムで正確に行うとともに（鶴山ほか，2009）、回収後のコアの速やかな観察を行い、水みちの規模、性状、位置を遅滞なく把握することが重要である。

逐次採水には「3.1.」で述べたような様々な制約があるため、実施したくてもできないことがある。逐次採水が実施できない場合であっても、例えば当該孔井の掘削が全て終了する時を待つのではなく、「4.1.」で述べたように全体をいくつかの掘削段階に分割して各段階の終了

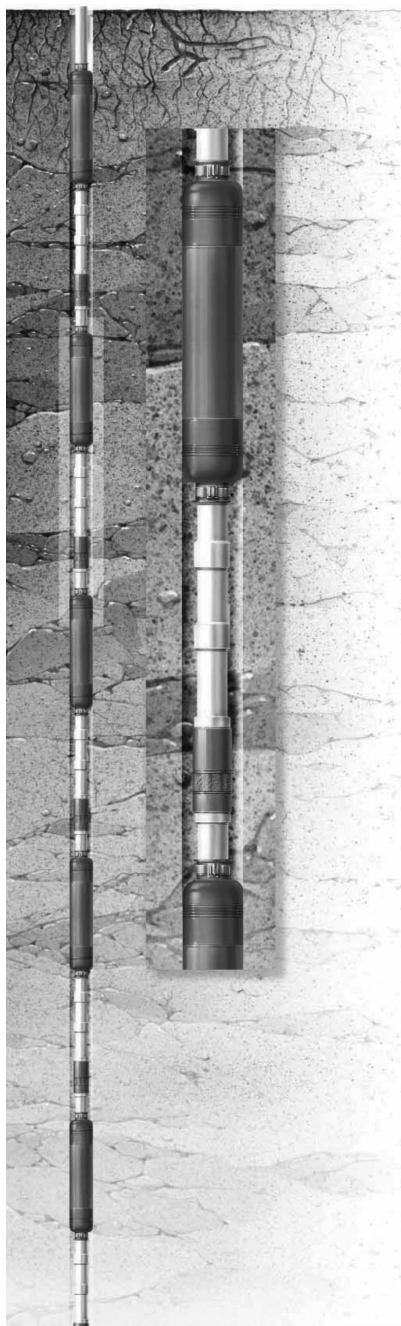


図4 原位置地下水採取システム（建て込み型）のうち圧力計測用と試料採取用のスタンドパイプを1本で共用するタイプの一例。

時点で採水するなどの現実的な選択肢もありうる。

水みちの中で水頭の低いものほど掘削水や高水頭の地下水の浸入を受けやすいため、その原位置性が損なわれやすい。そのため、採水候補の水みちの水頭が既知で水みち相互の水理的隔離がなされていない場合は、低水頭部の採取を優先させることが望ましい。また、長期観測装置を設置する場合、「4.2.」で述べたように異種地下水

相互の混合を防止するために、掘削完了から建て込みまでの時間はできる限り短くする必要がある（古江ほか，2005）。

5.2. 原位置性が低下した地下水の排除

実際の原位置地下水採取では、程度の差こそあれ採取しようとする地下水に掘削水や高水頭部の地下水が混入し、その原位置性が低下していることが普通である。その場合、原位置地下水としての分析や測定に供する試料を採取する（以下「本採水」と呼ぶ）前に、水質が乱された孔井内外の水を排除するための排水作業（以下「予備排水」と呼ぶ）が必要となる（Hama et al., 1994）。予備排水では、水みちの中に残存する原位置性の低下した地下水だけでなく、採水区間の孔壁とパッカーとの間の空間、ツールズや採水管の内部空間などのデッドボリュームを満たす水も排除する必要がある（図5）。デッドボリューム分の水量は無条件に予備排水量に含まれてくるので、特に透水性の低く小さな流量でしか排水できない水みちを対象とした採水作業では、デッドボリュームを縮減することが原位置性の確保あるいは工期の短縮のために非常に重要な要素となる。デッドボリュームの縮減には、パッカー間隔の抑制やツールズのコンパクト化、スパーサーの活用などが効果的である。予備排水に際して、デッドボリュームを基準としてその何倍量を排水したかを参照することがある（例えば岩月ほか，1998）。デッドボリュームに対する予備排水量の倍率は、排水作業の進行状況の目安にはなるが試料の原位置性の担保に用いることはできない。その理由としては、第一に、デッドボリュームが同じであってもその形状や流入・流出ポイントの位置関係などから排水の効率が同じとは限らないこと、第二に、デッドボリュームは装置や採水区間ごとに異なるので地層側からの排水量が同じであっても用いる装置等により倍率は違ってくこと、第三に、地層側の汚染の程度や水理条件次第で原位置性が回復するパターンは違うので必要な排水量も異なることが挙げられる。

予備排水が十分に行なわれたかどうかの判断は、予備排水過程での水質の観察経過に基づいて行なわれる必要がある。排除すべき水が掘削水であれ異種地下水であれ、酸化還元電位や電気伝導度の経時変化を観察してそれらの安定を確認することが必要である。

掘削水の混入程度についての判断は掘削水にトレーサーが投入されていれば、予備排水期間中のトレーサー濃度の経時変化に基づいてなされうる（例えば Almen and Zellman, 1991；古江ほか，2005）。トレーサー濃度に基づく掘削水の混入程度の推定を正確に行うためには、掘削中の掘削水に含まれるトレーサーを常に一定の濃度に保つ管理が必要となる。また、トレーサーはその一部が掘り屑へ吸着されうるが、吸着の程度はトレーサーの種

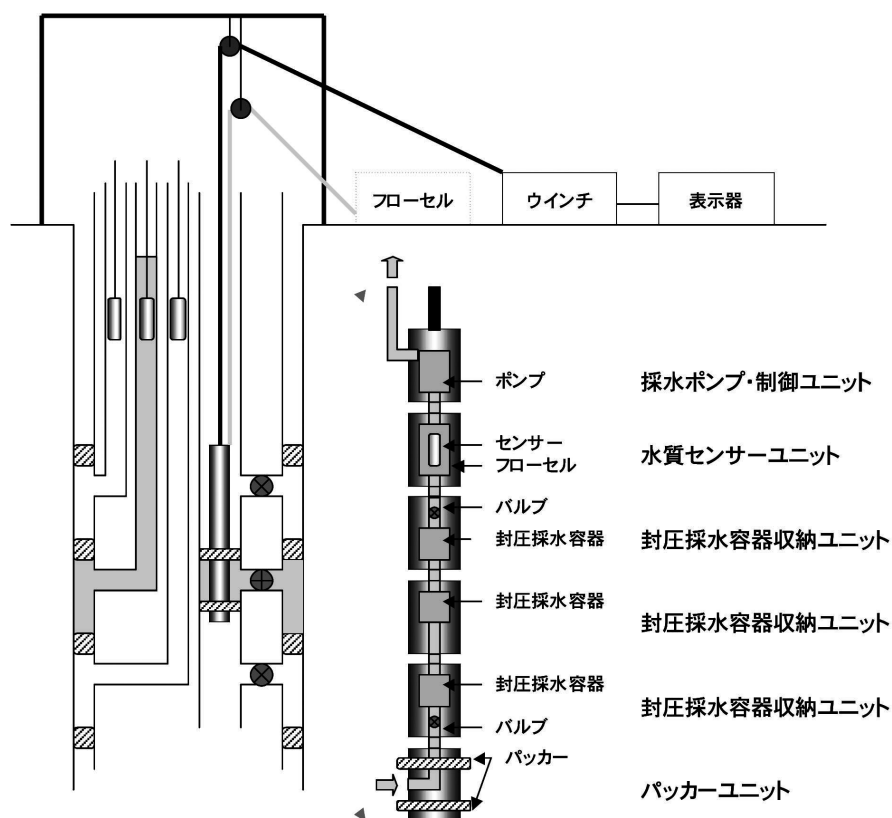


図5 原位置での水質をモニターしながら予備排水を行ったうえで原位置地下水を採取するシステムの一例。

類によって違いがある（たとえば亀海, 2009）。そのため、吸着による不確かさを軽減するため複数のトレーサーを併用することもある。

一方、混入した異種地下水の排除の程度を評価するためには、まず混入した掘削水の影響を差し引いた水質に注目する必要がある。異種地下水相互の水質のコントラストが明瞭な場合、例えば、深部の溶存成分量の多い地下水に浅部の希薄な地下水が混入する場合やその逆などでは、溶存電解質濃度の目安となる電気伝導度の経時変化の観察から比較的容易に排除の進行度合いを評価できる。しかし、よく似た主要成分をもち微量成分組成が異なる地下水相互の混合などの場合には、現場での物理化学パラメータの経時変化の追跡だけでは評価が難しい。そのような場合は、予備排水の期間中に経時的に地上ラインから試料を採取し、溶存成分組成や同位体組成の経時変化に基づいて異種地下水の排水状況を評価する必要がある。

掘削水の送排水管理などから、地層中に侵入した掘削水量を見積もれる場合は、それと予備排水時の原位置性の回復状況とを検討することにより、地層中の地下水の挙動の手がかりがつかめることがある。例えば、地層中へ侵入した水量に比べてさほど大きくない予備排水量で

対象とする地下水の原位置性が高まった場合、原位置性の低い地下水が移流により孔井から遠ざかった可能性が考えられる。このような現象は、対象の地下水を排水中の地下坑道の建設領域の近傍などで起こりうる（岩月ほか, 2007）。

5.3. 原位置環境の擾乱の防止

揚水中に原位置深度における物理化学パラメータをモニタリングすることは、取得しようとする地下水試料の原位置性を評価するためだけでなく、原位置環境の擾乱を防止する観点からも必要である。特に圧力のモニタリングを参照して、過度の圧力低下や地層内での気液分離の発生を防止することが肝要である。

原位置地下水採取にあたっては、試料採取だけでなくそれに先立つ予備排水も行う必要があるため、数日あるいはそれ以上の期間にわたり揚水を続けることが普通である（例えば藪内ほか, 2008）。その際、対象の水みちの透水性が低い場合は、一般的な揚水レートであっても原位置の間隙水圧が大きく低下することがある。過度の間隙水圧の低下は、気液分離を生じ発泡したガスの選択的移動などにより採取試料の原位置性を低下させるリスクをもたらすばかりでない。水みち内部の地下水の流

速を増大させて充填鉱物を剥がしたり母岩の脆弱部分を破壊して独立していた水みちを連結させるなどして、水みちの構造や分布を自然状態とは異なるものにし、地下水の水質分布を自然状態から変化させるリスクをも生じる。

溶存ガス成分が飽和に近い高い濃度で含まれる場合には、「2.3.」で述べたように、わずかな減圧であっても地層中での気液分離を引き起こして原位置の物理化学環境や水質を乱す可能性があるため、圧力低下に対して特に慎重になる必要がある。原位置における気液分離の発生状況を知るためには、圧力モニタリングだけでなく採水ラインの地上出口におけるガス水比実測値の経時変化のモニタリングが有効である。予備排水段階で孔内採水ライン中のガス水比が一定の限界を超えた場合、押さえとなる水柱重量が減少することより、噴発状態に移行するリスクがある。採水関連機器には、こうした場合に原位置での地下水の流入を迅速・確実に停止させる機能を与えておくことが必要である。

圧力以外の物理化学パラメーターについても、予備排水の期間中にその経時変化を観察し、不自然な挙動がないことを確かめておく必要がある。物理化学パラメータの急激な変化は、水みちの変容あるいは採水システムの不具合を反映している可能性が高い。

5.4. 試料採取・揚収・運搬過程での原位置条件の保持

原位置地下水を採取してその物理的・化学的性状を正確に知るためには、原位置における試料の採取、孔内から地表への揚収、孔井サイトから分析サイトまでの運搬、さらに成分によっては分析ラインへの導入口までの経路の全てで、大気雰囲気から遮断され原位置の圧力が保持されている必要がある。

孔内原位置における試料採取では様々なタイプの試料容器が用いられる。いずれも原位置での地下水の圧力を保持した状態（封圧）で地上へ揚収される構造になっているが、地下水試料の導入に際しての減圧局面の有無で大別することができる。

地下水の採水容器への導入に際して減圧局面を与えない採取容器の一例として、予備排水ラインと直列に編成された試料容器の両端に設けたバルブを採水時に密閉するタイプがある（國丸・細谷，2006）。このタイプは、採水時の減圧による不都合がない一方、試料容器と原位置水質センサー、予備排水用ポンプ等から編成される長さ数 m の孔内ツールを昇降する必要がある。

予め真空状態にした密閉容器の弁を開閉して吸引するタイプ（例えば Black et al, 1986）では、試料容器は予備排水のためのツールとは独立しているためコンパクトである。このタイプは、採水区間の透水性に応じた一定時間、採水中の地下水試料が一旦ほぼ真空状態まで低下

してから原位置の圧力へ回復することになる。そのため、ガス濃度の高い地下水の場合は減圧時にガスが分離し、その際に気相の選択的な移動により原位置性が低下する可能性がある。また、地下深部の高い圧力をもつ地下水の採取の際は、採水口付近で大きな圧力勾配により流体が激しく流動し、その際に固相の剥離混入などの可能性がある。このタイプの採取法では、予備排水は採水ツールとは別途の器具、段取りで行う必要がある。

原位置地下水採取時には、原位置での圧力が測定されることが望ましい。地上の分析ラインやその準備段階で試料容器の圧力を測定して原位置データと比較することにより、封圧試料容器が正しく原位置の圧力を保持していたかを評価できる。

原位置地下水採取に用いられる試料容器は、耐圧構造の必要性からほぼ例外なく金属製なので、器壁を酸素が透過する可能性は低い。しかし、分析場所への運搬に際して別の試料容器へ分取する場合には、使用するラインを不活性ガスでパージするなどして移し替え操作時の大気の混入防止対策を講じる必要がある。また、分取後に使用する容器材質の気体透過性（新井・中村，2004）についても予め確認して、アルミフィルムに代表される気体透過性の小さなものを使う必要がある。試料容器の外側をさらにガスバリア容器で包み、その間に脱酸素剤（柳原，2004）と酸素インジケーター（柳沼，2005）を封入することにより、試料容器が低酸素雰囲気中で運搬されたことを担保できる。

6. おわりに

原位置地下水採取において、採取試料の原位置性を損なう要因、器機や手法の概要、高品質の試料を取得するための留意点について整理した。とりまとめに先だって（株）大林組の安藤賢一氏、（株）ダイヤコンサルタントの細谷真一氏、（株）応用地質の菱田省一氏らと有益な意見交換をさせて頂いた。記して深謝申し上げる。

文 献

- Almen, K. and Zellman, O.(1991)Aspo Hard Rock Laboratory Field investigation methodology and instruments used in the pre-investigation phase, 1986–1990. SKB TR 91-21.
- 新井健司・中村文雄 (2004) プラスチックフィルム等からなる気密容器の酸素透過度. 関税中央分析書報, 44, 63–66.
- 東 宏幸 (2000) ヒートパルス型孔内微流速計. 資源と素材, 116, 222–223.
- Black, W.H., Barker, J.A. and Noy, D.J.(1986)Multiple

- level groundwater monitoring with the MP system. Proc. NWWA-AGU Conf. On surface and borehole geophysical methods and groundwater instrumentation, 41-61.
- Bottomley, D.J., Ross, J.D. and Graham, B.W.(1984) A borehole methodology for hydrogeochemical investigations in fractured rock. Water Resources Research, **20**, 1277-1300.
- Brownlie, N., Epps, R., Edmonds, H., Harris, D. and Fisch, H.R.(2003) New multilevel groundwater monitoring systems for use in heterogeneous rock and soils. Proc. of the 6th Internat. Sympo. on Field Measurements in Geomechanics, Oslo.
- 古江良治・岩月輝希・濱 克宏 (2005) 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対する試み. 応用地質, **46**, 232-236
- 古江良治・岩月輝希・水野 崇・彌榮英樹 (2003) 試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理. JNC TN7520 2003-001.
- Grenthe, I., Stumm, W., Laaksuharju, M., Nilsson, A.-C. and Wikberg, P.(1992) Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems. Chemical Geol., **98**, 131-150.
- Hama, K., Seo, T. and Yusa, Y.(1994) A sampling procedure of formation water and its application to geochemical investigation of groundwater in the Tono area, Japan. Proc. of the Workshop "Hydraulic and hydrochemical characterization of argillaceous rocks" OECD/NEA, 213-226.
- 細谷真一・中田充彦・二口克人 (2000) 多連式連続間隙水圧モニタリングシステム (PIEZO) の開発と測定例. 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集 第 1 部, 258-259.
- 兵藤正美・高杉真司・村松茂樹 (1990) PTS 検層および BHTV (カメラ) 検層による逸水層の確認. 日本地熱学会学術講演会要旨, 26.
- 池田則生・佐々木伸幸・大島和夫・山口耕平・斎藤茂幸・阿部則之・片野 孝 (1998) 試錐泥材の水理学的・地球化学的影響調査. JNC TJ7440 2005-071.
- 井岡聖一郎・岩月輝希・加藤 修・今北 毅 (2006a) 電極表面連続研磨器具付き白金電極を用いる水溶液酸化還元電位の安定測定. 分析化学, **55**, 793-797.
- 井岡聖一郎・古江良治・岩月輝希 (2006b) 深層ボーリング孔を用いた岩盤中の地下水の採取法ー地下水の酸化還元状態の把握のためにー. 日本水文科学会誌, **36**, 181-190.
- 井岡聖一郎・岩月輝希・天野由記・古江良治 (2007a) 地下水の流動経路における原位置の酸化還元緩衝能力の評価ー特に硫酸還元緩衝能力についてー. 日本水文科学会誌, **37**, 3-8.
- 井岡聖一郎・岩月輝希・酒井利彰・石島洋二 (2007b) 深層地下水の酸化還元状態ー現状と今後の課題ー. 日本水文科学会誌, **37**, 287-293.
- 石井 卓・中島 均・穂刈利之・堀田政國・菅原 宏・間瀬貴久 (1998) 多段パッカー方式地下水観測装置を用いた地盤の微小透水係数の原位置測定. FAPIG, **149**, 46-53.
- 伊藤久夫 (1995) ボアホールテレビュア・デジタル記録システムの開発と丹那盆地での孔井内亀裂測定. 地調報告, **282**, 297-309.
- 岩月輝希・豊嶋賢治・吉田英一 (1998) 深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状. 原子力バックエンド研究, **4**, 73-81.
- 岩月輝希・天野由記・井岡聖一郎・三枝博光・竹内竜二 (2007) 大規模地下施設の建設に伴う周辺地下水環境の変化. 日本原子力学会和文論文誌, **6**, 73-84.
- 岩月輝希・森川佳太・細谷真一・吉川英樹 (2009) 深部地下水の物理化学パラメータ (pH, 酸化還元電位) の測定とその留意点. 地下水学会誌, **51**, 205-214.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) 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ー地層処分研究開発第 2 次とりまとめー.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003) 試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理. JNC TN7520 2003-001.
- 亀海泰子 (2009) トレーサー物質. 地下水のトレーサー試験 (日本地下水学会原位置トレーサー試験に関する WG 編), 技報堂出版, 89-119.
- 狩野智之・毛屋博道・竹内竜史 (2011) 超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング (2009 年度). JAEA-Data/Code, 2011-002.
- 木口 努・伊藤久男・桑原保人・中尾信典・大湊隆雄 (1995) マルチオフセットハイドロフォン VSP による透水性亀裂の評価. 地質調査所報告, **282**, 205-225.
- 木口 努・伊藤久男・桑原保人・中尾信典・大湊隆雄 (1996) ハイドロフォン VSP による透水性亀裂の検出と透水係数の推定. 物理探査, **49**, 258-296.
- Kloppmann, W., Matray, J.M. and Aranyossy, J.F.(2001) Contamination of deep formation waters by drilling fluids: correction of the chemical and isotopic composition and evaluation of errors. Applied Geochem., **16**, 1083-1096.
- 小出 馨・造杉原弘・長谷川健・武田精悦 (2001) 花崗岩を対象とした深部地質環境の調査技術開発の課題と現状ー測定データの品質保証の観点で構築した地下水調査法の提案ー. 資源と素材, **117**, 785-793.
- 小坂和夫 (1998) 水みちとしての断層と節理ー構造地質学から応用構造地質学へー. 地質学論集, **50**, 251-

- 263.
- 國丸貴紀・細谷真一 (2006) 採水深度における間隙水圧測定と水質の同時モニタリングを可能としたモニタリングシステムとその適用性. 日本地下水学会秋季講演会講演要旨, 322-327.
- 彌榮英樹・岩月輝希・古江良治・水野 崇 (2004) 超深地層研究所計画 (第一段階) における地下水の地球化学特性調査. サイクル機構技報, **23**, 41-49.
- 宮川公雄・田中和広・後藤和幸・井原哲夫・河野 愛 (1997) みずみち評価のための超音波フローメーターの開発と適用性について. 第32回地盤工学研究発表会, 1949-1950.
- 長縄成実 (2006) 最新の孔井掘削技術 (その3). 石油開発時報, **150**, 3-11.
- 大沢信二・網田和宏・山田 誠・三島壮智・風早康平 (2010) 宮崎平野の大深度温泉井から流出する温泉水の地化学特性と成因-温泉起源流体としての続成脱水流体-. 温泉化学, **59**, 295-319.
- 榊原好久 (2004) 脱酸素剤の現状と今後の動向. 日本包装学会誌, **13**, 149-156.
- 里見弘治 (1998) 包装による食品の化学的・物理的劣化防止. マテリアルライフ, **10**, 181-185.
- 関 陽児・中嶋輝允・上岡 晃・金井 豊・間中光雄・月村勝宏 (2004) 関東地方東部における大深度温泉の特徴-水質と地質との関係-. 温泉科学, **54**, 1-24.
- 関 陽児・菱田省一・小西千里・内藤一樹・渡部芳夫 (2005) 高感度ヒートパルス式孔内流速計の現場適用例-みずみちの捕捉と低透水性岩盤への浸透流の検出-. 応用地質, **46**, 190-197.
- 関 陽児・上岡 晃・金井 豊・内藤一樹・奥澤康一・月村勝宏・中嶋輝允 (2006) 孔内検層による亀裂の探索と亀裂地下水の採試-茨城県稲田花崗岩の例-. 資源地質, **56**, 169-184.
- 関 陽児・内藤一樹・奥澤康一 (2007) 掘削された孔井により引き起こされる地下水流動-水理水頭の鉛直不均一分布への配慮は十分か?-. 地下水技術, **49**, 1-8.
- 嶋田 純 (1987) 岩盤中の地下水挙動把握のための地下水サンプリング方法. 地下水学会誌, **29**, 137-141.
- 新エネルギー財団地熱本部 (1995) 地熱井掘削における泥水の使用法 (1). 地熱エネルギー, **20**, 154-168.
- 新エネルギー財団地熱本部 (1996a) 地熱井掘削における泥水の使用法 (2). 地熱エネルギー, **21**, 65-79.
- 新エネルギー財団地熱本部 (1996b) 地熱井掘削における泥水の使用法 (3). 地熱エネルギー, **21**, 169-179.
- Stefansson, A., Arnorsson, S. and Sveinbjornsdottir, A.E. (2005) Redox reactions and potentials in natural waters at disequilibrium. Chemical Geol., **221**, 289-311.
- 高杉真司 (1993) 地熱エネルギーの新技术開発-掘削逸水対策-. 日本地熱学会誌, **15**, 126-129.
- 竹内真司・中野勝志・平田洋一・進士喜英・西垣 誠 (2007) 深層岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験方法の開発と適用. 地下水学会誌, **49**, 17-32.
- 田中彰一 (1988) 掘削技術 I 掘削流体技術. 地熱, **24**, 489-498.
- 田中和広・宮川公雄 (1992) 地下深部におけるボアホールテレビジョン装置の活用. 応用地質, **32**, 289-303.
- 田中和広・田中靖治・宮川公雄・馬原保典・安池慎治・本莊静光 (1996) 割れ目系岩盤における水理地質構造の調査手法の提案と適用. 応用地質, **36**, 414-426.
- 田中彰一 (1988) 掘削技術 I 掘削流体技術. 地熱, **24**, 489-498.
- Tsang, C-F and Doughty, C. (2003) Multirate flowing fluid electric conductivity logging method. Water Resources Research, **39**, SBH12-1-12-9.
- 嶋山雅夫・渡辺和哉・安藤賢一・関 陽児・山元孝広 (2009) 掘削モニタリングにおける湧水・逸水管理の最適化について. 第64回土木学会年次学術講演会要旨.
- 藪内 聡 (1999) 花崗岩中の透水性割れ目検出を目的としたハイドロフォン VSP 調査法の適用性研究. サイクル機構技報, **2**, 1-8.
- 藪内 聡・國丸貴紀・石井英一・羽出山吉裕・井尻裕二・松岡清幸・井原哲夫・松波伸次朗・牧野章也 (2008) 幌延深地層計画換気立坑先行ボーリング (PB-V01 孔) 調査報告書-岩盤の水理特性調査-. 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2008-026.
- 柳沼清一 (2005) 食品包装の最近の傾向. 包装技術, **43**, 374-376.
- 山崎 勉・山崎孝成・橋本 純 (2001) 地すべりにおける BHTV の活用. 地すべり学会誌, **38**, 14-19.
- 吉田英一 (2012) 岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動-現状と今後の課題-. 地学雑誌, **121**, 68-95.