

超深地層研究所における地下水の 地球化学に関する調査研究

—地下水の地球化学環境を保持したろ過手法に関する技術開発—

Groundwater Geochemistry Study at the Mizunami Underground
Research Laboratory
- Development of Groundwater Filtration Techniques While Maintaining
In-situ Hydrochemical Conditions -

青才 大介 吉田 治生 水野 崇

Daisuke AOSAI, Haruo YOSHIDA and Takashi MIZUNO

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

October 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

超深地層研究所における地下水の地球化学に関する調査研究
-地下水の地球化学環境を保持したろ過手法に関する技術開発-

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

青才 大介*, 吉田 治生*, 水野 崇

(2009年8月7日受理)

本報告では、地下水中において、物質の挙動に影響を与える微小粒子（有機物、無機物、微生物等）の物理的、化学的特性及び他の元素との吸着や錯形成等の相互作用を把握するための調査手法開発の一環として、地下水のろ過手法に関する検討結果についてとりまとめた。具体的には、地下水の被圧・嫌気状態を保持した原位置でのろ過方法及びポンプ揚水した地下水の嫌気状態を維持した実験室でのろ過方法について検討を行った。

検討の結果、被圧・嫌気状態を維持した閉鎖系の維持に関する品質管理を厳密に行うことで、原位置の地球化学環境を保持した地下水のろ過が可能であることがわかった。ただし、ステンレス製機材から、微量の金属元素の溶出が確認された試料も認められた。そのため、今後は機材からの溶出を防ぐためにテフロン製機材の開発を進める。

Groundwater Geochemical Study
at the Mizunami Underground Research Laboratory
-Development of Groundwater Filtration Techniques While Maintaining
In-situ Hydrochemical Conditions-

Daisuke AOSAI[※], Haruo YOSHIDA^{*} and Takashi MIZUNO

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received August 7, 2009)

In this report, we summarize groundwater filtration techniques developed and employed at the Mizunami Underground Research Laboratory. The methods are useful for the physical and chemical characterization of minute particles in contaminated groundwater (including organic and inorganic particles, microbes, etc.), which can effect migration behavior. It is also useful for investigating the adsorption and complexation of particles and elements in groundwater. We performed the filtration of groundwater on-site while maintaining in-situ pressure and anaerobic conditions and in the laboratory under controlled anaerobic conditions. The results indicate the viability of groundwater filtration under in situ geochemical conditions, if the filtration is performed at the controlled pressure and anaerobic conditions and with strict quality control. However, sample contamination occurs if stainless steel equipment is used. Therefore, we intend to develop Teflon equipment to avoid the contamination.

Keywords: Groundwater Filtration Technique, In-situ Geochemical Environment, QC

※ Collaborating Engineer

* Kobelco Research Institute Inc

目次

| | |
|---|----|
| 1. はじめに..... | 1 |
| 2. アプローチ..... | 1 |
| 3. 地下水の湧水圧を利用した被圧・嫌気状態を保持したろ過採水手法 （原位置でのろ過採水手法）..... | 2 |
| 3.1 原位置ろ過採水システム..... | 2 |
| 3.2 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水手法..... | 7 |
| 3.3 原位置ろ過採水システムの洗浄..... | 11 |
| 4. ステンレス製容器を利用した地下水の嫌気状態でのろ過採水手法 （実験室でのろ過採水手法）..... | 13 |
| 4.1 実験室ろ過採水システム..... | 13 |
| 4.2 実験室ろ過採水システムの機材内部の嫌気状態への移行..... | 16 |
| 4.3 実験室ろ過採水システムの採水手法..... | 18 |
| 4.4 実験室ろ過採水システムを用いたろ過採水手法..... | 18 |
| 4.5 実験室ろ過採水システムの洗浄..... | 19 |
| 5. 品質管理方法に関する検討..... | 21 |
| 5.1 ステンレス製機材からの溶出物の確認..... | 21 |
| 5.2 嫌気状態の維持..... | 23 |
| 5.3 原位置及び実験室でのろ過採水に使用する機材の洗浄..... | 23 |
| 6. まとめ..... | 26 |
| 参考文献..... | 27 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Approaches..... | 1 |
| 3. On-site groundwater filtration method using hydraulic pressure under original, in-situ pressure and anaerobic conditions (On-site groundwater filtration method) | 2 |
| 3.1 On-site filtration system | 2 |
| 3.2 Filtration method used for the on-site filtration system..... | 7 |
| 3.3 On-site filtration system cleaning..... | 11 |
| 4. Laboratory groundwater filtration method using stainless-steel equipment under original, in-situ anaerobic conditions (Laboratory groundwater filtration method)..... | 13 |
| 4.1 Laboratory filtration system | 13 |
| 4.2 Establishment of anaerobic conditions inside the laboratory filtration system | 16 |
| 4.3 Sampling method used for the laboratory filtration system..... | 18 |
| 4.4 Filtration method used for the laboratory filtration system..... | 18 |
| 4.5 Laboratory filtration system cleaning..... | 19 |
| 5. Quality control | 21 |
| 5.1 Sample contamination related to use of stainless-steel equipment | 21 |
| 5.2 Maintenance of anaerobic conditions..... | 23 |
| 5.3 Equipment cleaning used for on-site and laboratory filtration systems | 23 |
| 6. Summary | 26 |
| References | 27 |

図目次

| | | |
|-----|-----------------------------|----|
| 図 1 | 原位置ろ過採水システムの構成 | 3 |
| 図 2 | 原位置ろ過採水システム通水洗浄時の機器構成 | 5 |
| 図 3 | 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水の概略図 | 8 |
| 図 4 | 実験室ろ過採水システムの構成 | 14 |
| 図 5 | 代表的なステンレス（316 ステンレス鋼）の含有元素 | 22 |
| 図 6 | クロムのろ過時間とろ液中濃度の関係 | 22 |
| 図 7 | ステンレス製容器の保存期間による元素のろ液中濃度の比較 | 23 |

表目次

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 表 1 | 原位置でのろ過採水における技術課題とその解決策 | 2 |
| 表 2 | 原位置ろ過採水システムの機材 | 4 |
| 表 3 | 原位置ろ過採水システムの通水洗浄で使用する機材 | 6 |
| 表 4 | 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水における注意事項 | 8 |
| 表 5 | 原位置ろ過採水システムからのろ過膜の回収における注意事項 | 10 |
| 表 6 | 実験室でのろ過採水における技術課題とその解決策 | 13 |
| 表 7 | 実験室ろ過採水システムの機材 | 15 |
| 表 8 | 使用した代表的なろ過膜 | 23 |

写真目次

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 写真 1 | 原位置ろ過採水システムの構成 | 3 |
| 写真 2 | クイックコネクツ | 3 |
| 写真 3 | 原位置ろ過採水システム通水洗浄時の機器構成 | 5 |
| 写真 4 | モニタリング装置に接続したクイックコネクツボディ（カバー内） | 8 |
| 写真 5 | 滅菌シャーレを真空保存した状態 | 10 |
| 写真 6 | 減圧レギュレーターの分解写真 | 11 |
| 写真 7 | フィルターホルダー乾燥時の状態 | 12 |
| 写真 8 | チューブアダプターの O-リングの装着状態 | 12 |
| 写真 9 | フィルターホルダーの O-リングの装着状態 | 12 |
| 写真 10 | 実験室ろ過採水システムの構成 | 15 |
| 写真 11 | リザーバー | 17 |
| 写真 12 | アルゴンガスボンベとリザーバーとステンレス製容器を接続した状態 | 17 |
| 写真 13 | アルゴンガスボンベとウルトラホルダーを接続した状態 | 18 |
| 写真 14 | ウルトラホルダー | 18 |
| 写真 15 | ウルトラホルダーの解体写真 | 20 |
| 写真 16 | ステンレス製容器の解体写真 | 20 |
| 写真 17 | バルクヘッドユニオンとテフロンボトルの蓋を開孔した状態 | 24 |
| 写真 18 | テフロンボトルの蓋を装着した状態 | 24 |

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下深部に放射性核種を含むガラス固化体を埋設し、人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性核種を生物環境より長期的に隔離することとしている。人工バリアではオーバーパックやベントナイトによりガラス固化体から放射性核種が溶出することを防ぐことが期待され、天然バリアでは岩盤の持つ特性（緩慢な地下水流速や還元的な地下水の化学特性等）により放射性核種が生物環境に到達しない、もしくは十分に遅延されることが期待されている。地下水中における放射性核種の挙動を支配する主要な要因は、一般的に岩盤との反応（吸着やマトリクス拡散等）や地下水流動状態、地下水の地球化学特性であると考えられている。さらに、これまでの研究によって、これらの要因以外にも地下水中のコロイドが地層中の核種移行に影響を及ぼす事例が報告されている¹⁾。そのため、コロイドが核種移行に与える影響の形態や程度を検討する必要があるが生じている^{2), 3)}。しかしながら、コロイドは地下水中に低濃度で存在していることや、コロイドと元素の結合状態は地下水の地球化学特性（酸化還元環境、pH等）により変化することから⁴⁾、原位置の地球化学特性を保持した状態で分析する必要があるが、試料採取時や分析過程での品質管理が難しく、研究開発課題があるのが現状である。

本研究では、地下水中にコロイドとして存在していると考えられる無機、有機物の微小粒子を、大気との接触や圧力解放による地球化学特性の変化をさせることなく採取する手法について検討した。

2. アプローチ

コロイド等の地下水中の粒子が存在する分画分子量を把握するための技術として、これまでに複数の手法が検討されてきている⁵⁾。従来のろ過や遠心分離による手法に加え、近年では、地下水試料を直接分析機器に導入し、装置の閉鎖系内において分画および分析を同時に実施する手法としてサイズ排除クロマトグラフィー（Size-Exclusion Chromatography: 以下、SEC と略す）⁶⁾や作用場流動分別（Field-Flow Fractionation: 以下、FFF と略す）⁷⁾が開発されている。SEC および FFF のいずれの手法においても天然の地下水中を対象とした研究が行われてきており^{8), 9)}、天然試料への適用性は高いと考えられる。しかし、SEC では充填剤（シリカゲルや多孔性ポリマー）のイオン強度が高く、充填剤と試料との反応が懸念され⁸⁾、FFF においても装置から溶出する元素が検出感度を低下させるなどの問題が指摘されている¹⁰⁾。さらに、これらの手法に共通する課題として、試料採取時の大気との接触や圧力解放に伴う脱ガスにより、地下水の化学的特性が変化してしまうことが挙げられる。

本研究では、以上のような現状を踏まえ、ボーリング孔を利用して、大気との接触や圧力解放による地球化学特性の変化をさせることなく地下水をろ過する手法について検討した。ボーリング孔を利用した地下水の採水では、利用するボーリング孔が湧水状態か否かにより、採水方法が異なるため、それぞれの状態のボーリング孔を利用して検討した。湧水状態のボーリング孔においては、湧水圧を利用したろ過手法について検討した。この手法では、バッカー等によって閉鎖したボーリング孔内からの湧水圧を利用してボーリング孔の口元でろ過するため、大気との接触や圧力解放などの課題が解決できるほか、複数の分画でろ過を実施することにより、各分画に存在する微小粒子をろ過膜上で確認できる利点がある。また、湧水状態ではないボーリング孔を対象とした調査手法として、ポンプ揚水した地下水を嫌気状態で採取・保管し、嫌気状態を保持してろ過する手法についても検討を行った。

3. 地下水の湧水圧を利用した被圧・嫌気状態を保持したろ過採水手法
(原位置でのろ過採水手法)

3.1 原位置ろ過採水システム

(1)原位置ろ過採水システム作製にあたっての技術課題とその解決策の整理

原位置での地下水のろ過採水を被圧・嫌気状態を保持した条件で行うためには、いくつかの技術課題があり、今回、それらを解決する方策を整理するとともに、それらの条件を満たす原位置ろ過採水システムを考案した(表1)。

表1 原位置でのろ過採水における技術課題とその解決策

| | 技術課題 | 解決策 |
|---|---------------------------------|-----------------------|
| 1 | 圧力開放、大気との接触を防止すること。 | 機材を耐圧・密閉式にする。 |
| 2 | 採水深度が深くなると、湧水圧が上昇すること(最大約1MPa)。 | 機材を耐圧構造にする。 |
| 3 | ろ過膜に耐圧制限があること(0.39MPa以内)。 | ろ過膜の前後の圧力を制御できる構成にする。 |
| 4 | 原位置(坑内)への搬入出を人力で行うこと。 | 人力で接続・分離が可能な構成にする。 |

(2)原位置ろ過採水システムの構成

原位置ろ過採水システム(写真1)は大きく三つの部材から構成される(図1)。三つの構成部は、ろ過膜を挟みこむフィルターホルダー部、フィルターホルダー前部の減圧レギュレーター部、フィルターホルダー後部の背圧レギュレーター部である。フィルターホルダー、減圧レギュレーター、背圧レギュレーターは地下水の湧水圧(約1MPa)に対して、耐圧・気密性を有するステンレス製(規格:316ステンレス鋼)とした。減圧レギュレーターは、機材内部の圧力調整スプリングの力と一次側圧力および二次側圧力(図1)による力とのバランスをハンドルで調整することにより、二次側圧力の制御が可能である。他方、背圧レギュレーターは、機材内部の圧力調整スプリングの力と一次側圧力および二次側圧力による力とのバランスをハンドルで調整することにより、二次側圧力の制御が可能である。

フィルターホルダー部と前後のレギュレーター部はクイックコネクツ^{注1)}を装着しており、人力で容易に接続・分離が可能である。孔径の異なるろ過膜を装着したホルダーを交換することでろ過膜の孔径の変更が可能である。

また、フィルターホルダー前部の減圧レギュレーターはろ過膜にかかる湧水圧力を制御することが可能であり、フィルターホルダー後部の背圧レギュレーターはろ過膜を抜ける湧水圧力を制御することが可能である。これにより、ろ過膜上流部の原位置湧水圧を保持した状態で、下流部との間に圧力差をつけて採水することが可能となる。

作製した原位置ろ過採水システムの構成を機材番号を付して図1に示す。

注1) ステムとボディ(写真2)から構成されるチューブ状の継ぎ手であり、人力で接続・分離が可能である。接続時に解放状態、分離時に密閉状態となる。

(3) 原位置ろ過採水システムの機材

作製した原位置ろ過採水システムの機材を表 2 に示す。

表 2 原位置ろ過採水システムの機材

| 機材 番号 | 名称 | 仕様または型番 | 超音波洗浄の 可否 *1) | 酸洗浄または不動態化 処理の可否 *2) |
|----------|---------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------|
| ① | コネクタ | Swagelok®社製 SS-400-1-2 | 可 | 可 |
| ② | 圧力計 | Swagelok®社製 PGI-63B-MG2. 5-LAQX-A | 否 | 否 |
| ③ | 減圧レギュレーター | Swagelok®社製 KCP1JRB2A2P20000 | 否 | 否 |
| ④ | 背圧レギュレーター | Swagelok®社製 KCB1H0G2A5P20000 | 否 | 否 |
| ⑤ | チューブアダプター | Swagelok®社製 SS-4-TA-1-2 | 可 | 可 |
| ⑥ | クイックコネクツボディ | Swagelok®社製 SS-QC4-B-400 | 可 | 否 |
| ⑦ | クイックコネクツシステム | Swagelok®社製 SS-QC4-D-400 | 可 | 否 |
| ⑧ | チューブアダプター (o-リング付き) | Swagelok®社製 SS-4-TA-1-OR | 可 | 可 |
| ⑨ | フィルターホルダー *3) | MILLIPORE 社製 XX4504700 | 可 | 可 |
| ⑩ | テフロンチューブ | 外径 6mm | 可 | 可 |

*1) 機材全体が耐水性のものを可とした。

*2) 機材全体が 50%硝酸水溶液に対して耐酸性のあるものを可とした。

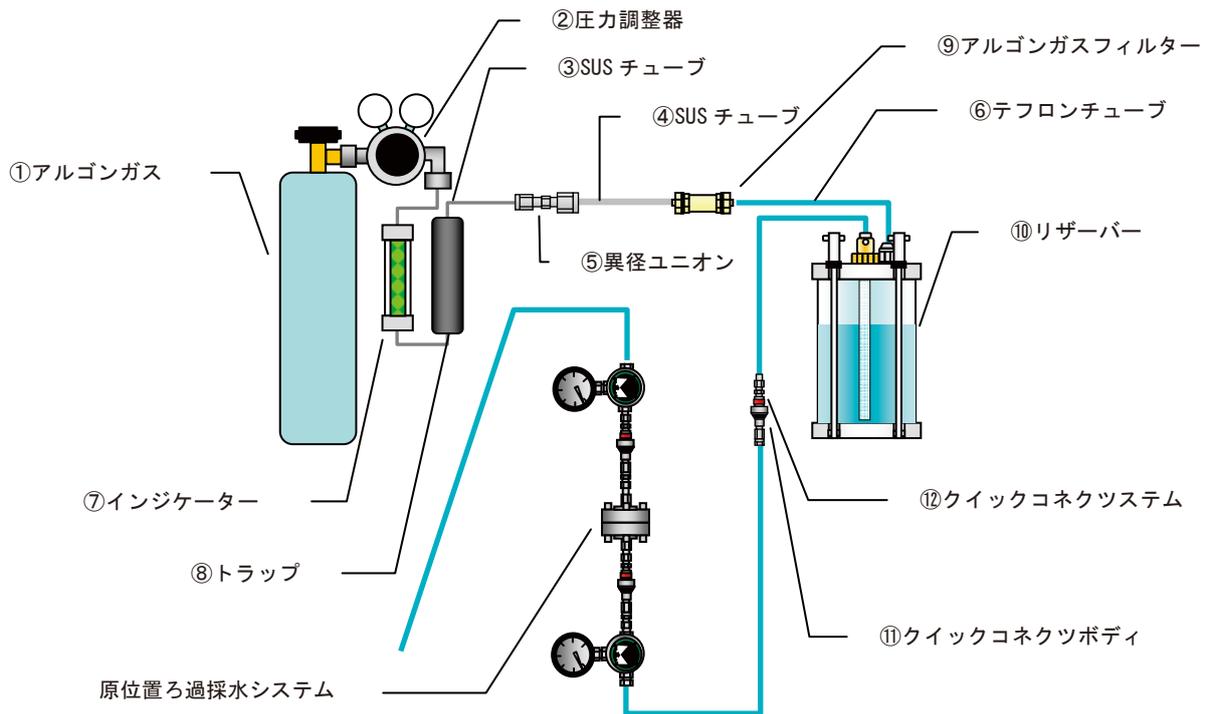
*3) ろ過膜を挟み込んで固定する機材。

(4) 原位置ろ過採水システムの通水洗浄

1) 原位置ろ過採水システムの通水洗浄時の機器構成

原位置ろ過採水システムを使用して採水を行う場合、各機材を組み立てた後、通水洗浄を行う。原位置ろ過採水システムの地下水流入口に ADVANTEC®社製超純水製造装置（型番：RFD250NB GE25A-0403）で製造した電気伝導率 6 μ S/m 以下の水（以下、超純水と記す）を満たしたリザーバー^{注2)}を接続して、アルゴンガスの圧力によりリザーバー内の超純水を原位置ろ過採水システムに通水して洗浄を行う。原位置ろ過採水システム通水洗浄の構成を図 2 に示す。

注 2) サイホン式の樹脂製容器で、内圧を最大 0.39MPa まで加圧することが可能である。



* 各番号は表 3 を参照

図 2 原位置ろ過採水システム通水洗浄時の機器構成



写真 3 原位置ろ過採水システム通水洗浄時の機器構成

2) 原位置ろ過採水システムの通水洗浄で使用する機材

原位置ろ過採水システムの通水洗浄で使用する機材を表3に示す。

表3 原位置ろ過採水システムの通水洗浄で使用する機材

| 機材番号 | 通水洗浄に使用する機材 | 仕様または型番 | 超音波洗浄の可否 | 酸洗浄または不動態化処理の可否 | |
|------|---------------------|--------------------------|--|---------------------------|---|
| ① | アルゴンガス | 高純度 (99.999%) | 否 | 否 | |
| ② | アルゴンガスライン | 圧力調整器 | GL Sciences 社製 PPB-1 3002-84021 | 否 | 否 |
| ③ | | SUS チューブ | Swagelok®社製 1/8inch (3.175mm) | 可 | 可 |
| ④ | | SUS チューブ | Swagelok®社製 1/4inch (6.35mm) | 可 | 可 |
| ⑤ | | 異径ユニオン ^{*1)} | Swagelok®社製 SS-6M0-6-2 1/8inch(3.175mm)→1/4inch(6.35mm) | 可 | 可 |
| ⑥ | | テフロンチューブ | 外径 6mm | 可 | 可 |
| ⑦ | | 高感度インジケータークット | インジケータ ^{*2)} | GL Sciences 社製 3001-17919 | 否 |
| ⑧ | トラップ ^{*3)} | | 否 | | 否 |
| ⑨ | アルゴンガスフィルター | GL Sciences 社製 1-6280-02 | 否 | 否 | |
| ⑩ | リザーバー | ADVANTEC®社製 RP-2 | 可 | 否 | |
| ⑪ | クイックコネクツボディ | Swagelok®社製 SS-QC4-B-400 | 可 | 否 | |
| ⑫ | クイックコネクツシステム | Swagelok®社製 SS-QC4-D-400 | 可 | 否 | |

*1) 外径の異なるチューブを接続する継ぎ手。

*2) 酸素除去管。

*3) ハイドロカーボン除去管。

3) 原位置ろ過採水システムの通水洗浄の手順

原位置ろ過採水システムの通水洗浄手順は以下のとおりである。

- ①使用するろ過膜をテフロン製のピンセットを用いてホルダーに装填し、O-リングで確実に押える（金属製のピンセットからは、金属元素の溶出が懸念されるため、ろ過膜の装填は、酸洗浄を行ったテフロン製のピンセットを使用すること）。
- ②フィルターホルダーのねじを締め、クイックコネクツを装着する。
- ③フィルターホルダー部、減圧レギュレーター部、背圧レギュレーター部をクイックコネクツで接続する。
- ④アルゴンガス流路部及び原位置ろ過採水システムを、超純水を満水に満たしたりザーバーに接続する（図2）。
- ⑤減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターが閉鎖されていることをハンドルを回して確認し、アルゴンガスの供給圧力をリザーバーとろ過膜の耐圧限界以内（0.39MPa 以内）に調整してガスを通気させる。
- ⑥減圧レギュレーターを徐々に開放し、アルゴンガスの供給圧力と同じ圧力になるまで開放する。
- ⑦背圧レギュレーターがアルゴンガスの供給圧力と同じ圧力になったことを確認する。
- ⑧背圧レギュレーターを徐々に開放し、減圧レギュレーターとの間に差圧を生じさせることにより、超純水を流出させる。

- ⑨1L^{注3)}の超純水を通水して洗浄する。
- ⑩1Lの通水が終了したら、背圧レギュレーターを閉鎖して、超純水の流出を停止する。
- ⑪減圧レギュレーターを閉鎖し、クイックコネクツの接続を分離する。
- ⑫ホルダー内部及び、減圧レギュレーターと背圧レギュレーターの内部の超純水を排水せずに、陽圧状態（内部圧力は、アルゴンガスの供給圧力と同じ圧力になっている）で保管する（クイックコネクツシステムの先端を押すと中の水が噴出するので注意すること）。

注3) 採水システム内流路体積（約 50ml）に対して、十分に容量が大きいと考えられる 1Lの通水洗浄を行った。その結果、ブランク試験では、汚染物質が検出されなかった。ただし、使用する機材やろ過膜によっては、再度ブランク試験を実施し、通水液量を検討する必要がある。

3.2 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水手法

(1) 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水

原位置ろ過採水システムの地下水流入口（減圧レギュレーター部）に装着されているクイックコネクツシステムと、原位置の地下水流出口（モニタリング装置）に装着されているクイックコネクツボディ（写真 4）を接続することによってろ過採水を行う。原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水の概略図を図 3 に示す。原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水手順は以下のとおりである。原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水における注意事項を表 4 に示す。

- ①原位置ろ過採水システムの減圧レギュレーター部、ホルダー部、背圧レギュレーター部を接続する。
- ②減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターが閉鎖されていることをハンドルを回して確認し、モニタリング装置の地下水の流出口に原位置ろ過採水システムの地下水流入口（減圧レギュレーター部）を接続する。
- ③ろ過採水システムをクランプ（固定台）に固定する。
- ④バルクヘッドユニオン^{注4)}（写真 17）を取り付けた蓋とろ液流出口（背圧レギュレーター部）を接続する。
- ⑤バルクヘッドユニオンを取り付けた蓋にろ液採水ボトルを取り付ける（写真 18）。
- ⑥減圧レギュレーターを徐々に開放し、ろ過採水システム内の圧力が原位置の圧力を保持できているかを確認するため、減圧レギュレーター及び、背圧レギュレーターがモニタリング装置の表示圧力と同じ圧力になっていることを確認する。
- ⑦背圧レギュレーターを徐々に開放してろ液を流出させる。
- ⑧採水システムに残存している超純水（採水システム内流路体積：約 50ml）を排水するため、100ml 以上のろ液をボトルに採水後、背圧レギュレーターを閉鎖してボトルを一回共洗いする。
- ⑨背圧レギュレーターを徐々に開放してろ液を流出させる。
- ⑩目的量の採水が終了したら、背圧レギュレーターを閉鎖する。
- ⑪減圧レギュレーターを閉鎖する。
- ⑫ボトルをバルクヘッドユニオンを取り付けた蓋から取り外して回収する。

注4) フッ素系樹脂製のチューブ用継ぎ手。



写真4 モニタリング装置に接続したクイックコネクツボディ（カバー内）

表4 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水における注意事項

| 操作番号 | 注意事項 |
|------|--|
| ③ | ろ過膜を通過した地下水中の溶存ガスが脱ガスし、ガス溜まりができる。ガス溜まりによって、ろ過速度が低下するため、原位置ろ過採水システムの地下水流入入口（減圧レギュレーター部）を下向きにしてガスが抜け易くすること。 |
| ⑤ | ボトルが密閉状態の場合、ろ液の流出に伴ってボトルの内圧が高くなり、流出速度が遅くなる。このため、蓋とボトルとの接続は、空気が抜けるように接続すること（採水ボトルを蓋で密栓しないこと）。 |
| ⑥ | 限外ろ過膜を使用する場合は、膜を通過する地下水の流速が遅く、限外ろ過膜前後の地下水圧力が平衡に達するまでに時間を要する場合がある。 |
| ⑦ | 減圧レギュレーターと背圧レギュレーターの圧力差は、ろ過膜の圧力限界以内（0.39MPa 以内）になるように注意する。急激なバルブの開放は大きな圧力差が生じてろ過膜が破れる可能性があるため、急激なバルブの開放を避ける。 |

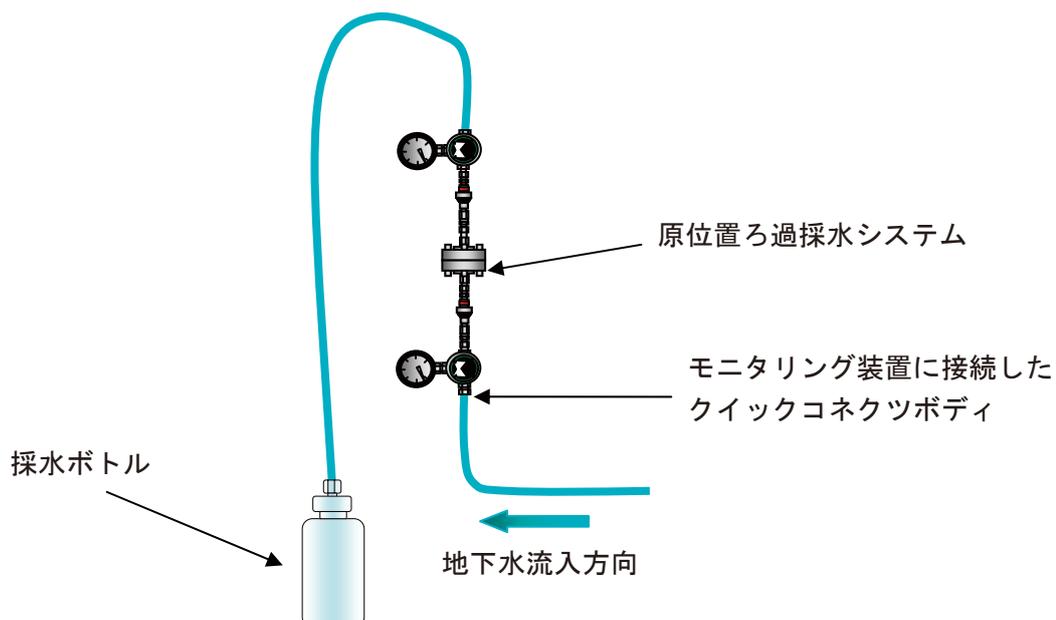


図3 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水の概略図

(2) 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水のホルダーの変更

同一区間のろ過採水において、ろ過膜の孔径を変更する場合は、必要なる過膜を、各々、ホルダーに装填して坑内に搬入し、減圧レギュレーターと背圧レギュレーターの変更は行わずに、孔径が小さいものから順に行う。減圧レギュレーター（ろ過膜の前部）に流入する地下水は同一であるため、減圧レギュレーターを変更する必要はなく、また、孔径が小さいものから順に行うこと及び、共洗いを行うことにより、背圧レギュレーター（ろ過膜の後部）に残存しているろ液による汚染を解消できるため、背圧レギュレーターも変更する必要はない。同一区間のろ過採水においてろ過膜の孔径を変更する場合のフィルターホルダー（ろ過膜の孔径サイズ）変更手順は以下のとおりである。

- ①減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターが閉鎖していることをハンドルを回して確認する。
- ②フィルターホルダー前後のクイックコネクツを分離する。
- ③フィルターホルダーをポリエチレン製チャック付袋（以下、チャック袋と略す）に入れてフィルターホルダー収納箱に入れる（フィルターホルダー内は、地下水圧と同圧になっているので、クイックコネクツの先端を押して中の水が噴出しないように注意すること）。
- ④減圧レギュレーター及び、背圧レギュレーターに排水用のクイックコネクツを接続して流路内の地下水を排水する。
- ⑤排水終了後、フィルターホルダーを変更して3.2 (1)原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水に従って採水を行う。

(3) 原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水の終了

原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水の終了手順は以下のとおりである。

- ①ボトルを回収した後、減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターが閉鎖されていることをハンドルを回して確認する。
- ②フィルターホルダー前後のクイックコネクツを分離する。
- ③フィルターホルダーをチャック袋に入れてホルダー収納箱に入れる。
- ④背圧レギュレーターのクイックコネクツをモニタリング装置から分離する。
- ⑤減圧レギュレーターと背圧レギュレーターをチャック袋に収納する。
- ⑥フィルターホルダー、減圧レギュレーター、背圧レギュレーター、ボトルを搬出する（各機材内部は、地下水圧と同圧になっているので、クイックコネクツの先端を押して、機材内部の水が噴出しないように注意すること）。

(4) 原位置ろ過採水システムからのろ過膜の回収

ろ過膜の回収は、フィルターホルダー内の水抜きを行った後に行う。水抜きは原位置ろ過採水システムの通水洗浄に使用したリザーバー（3.1 (4)参照）を用いて実験室で行う。ろ過膜回収手順は以下のとおりである。原位置ろ過採水システムからのろ過膜の回収における注意事項を表5に示す。

- ①減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターが閉鎖されていることをハンドルを回して確認する。
- ②ろ過ホルダー部、減圧レギュレーター部、背圧レギュレーター部をクイックコネクツで接続

- する。
- ③原位置ろ過採水システムをアルゴンガス流路部に接続する。
 - ④ろ過採水システムをクランプ（固定台）に固定する。
 - ⑤アルゴンガスの供給圧力をろ過膜の耐圧限界以内（最大約 0.39MPa）に調整してガスを通気させる。
 - ⑥減圧レギュレーターを徐々に開放し、アルゴンガスの供給圧力と同じ圧力になるまで開放する。
 - ⑦背圧レギュレーターがアルゴンガスの供給圧力と同じ圧力になっていることを確認する。
 - ⑧背圧レギュレーターを徐々に開放し、減圧レギュレーターとの間に圧力差を生じさせることにより、機材内部の地下水を排水させる。
 - ⑨内部の地下水が流出しなくなるまで水抜きを行う。
 - ⑩背圧レギュレーターを閉鎖する。
 - ⑪減圧レギュレーターを閉鎖し、クイックコネクツの接続を分離する。
 - ⑫フィルターホルダーの上部と下部を分離し、ろ過膜をテフロン製のピンセットを使用して回収する。
 - ⑬ろ過膜を滅菌シャーレに入れ、蓋の円周をビニールテープで巻く。
 - ⑭滅菌シャーレ全体を真空で冷蔵保存する（写真 5）。

表 5 原位置ろ過採水システムからのろ過膜の回収における注意事項

| 操作番号 | 注意事項 |
|------|---|
| ④ | ガス圧によって地下水が排水され易くなるように、原位置ろ過採水システムの地下水流入口（減圧レギュレーター部）を上向きにすること。（3.2 (1)原位置ろ過採水システムを用いたろ過採水と逆にする）。 |
| ⑬ | ろ過膜上に、塵埃が堆積しないように可能な限り迅速に行うこと。ろ過膜表面が蓋に接触しないようにすること。 |
| ⑭ | ろ過膜上の粒子の酸素暴露及び揮発等による変質を可能な限り防ぐために冷蔵保存としたが、実施する分析手法によっては、凍結乾燥等、保存方法の変更を検討する必要がある。 |



写真 5 滅菌シャーレを真空保存した状態

3.3 原位置ろ過採水システムの洗浄

(1) 減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターの洗浄

減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターには、地下水の流入口、流出口、圧力計測口がある。減圧レギュレーター及び背圧レギュレーターの洗浄手順は以下のとおりである。

- ①地下水の流入口、流出口、圧力計測口に接続しているアダプターとコネクターを分解する（写真6）。
- ②ねじとねじ穴に付着しているテフロンシールを取り除く。
- ③減圧レギュレーター、背圧レギュレーター、圧力計各々の流路及び、アダプター、コネクター、クイックコネクツ（ボディとステムを接続して解放状態にする）を超純水を用いて、目視で汚れが確認されなくなるまで流水洗浄する。
- ④アダプター、コネクター、クイックコネクツを 55℃の超純水で 10 分間超音波洗浄^{注5)}を行う。
- ⑤乾燥後、アダプターとコネクターのおすねじにテフロンシールを巻く。^{注6)}
- ⑥減圧レギュレーターと背圧レギュレーターにアダプターとコネクターを接続する。
- ⑦チャック袋に入れて保管する。

注5) 水温については、高温であるほど付着物質の水への溶解度が増加し、洗浄効果が上昇すると推定されるが、取扱い易さを考慮して 55℃とした。超音波照射時間については、長時間であるほど、洗浄効果が上昇すると推定されるが、作業効率を考慮して 10 分間とした。その結果、ブランク試験では、汚染物質が検出されなかった。ただし、システム内を流れる地下水の含有成分の種類や濃度が大きく異なる場合は、再度ブランク試験を実施し、水温、超音波照射時間を再検討する必要がある。

後述する水温、超音波照射時間、洗浄時間についても、ブランク試験によって、汚染物質が検出されないことを確認し、決定した。

注6) 洗浄等で頻繁に分解する継ぎ手部分は、締め付けの際の摩耗や、摩耗屑の混入を防ぐためにテフロンシールを巻く。ねじを締めつける方向と同一方向に巻くこと。

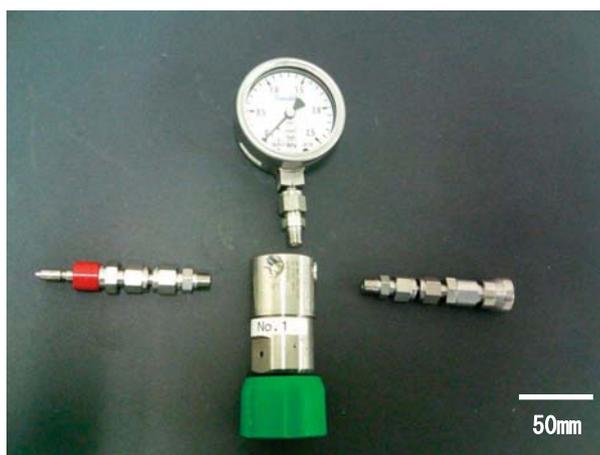


写真6 減圧レギュレーターの分解写真

(2) フィルターホルダーの洗浄

フィルターホルダーの洗浄手順は以下のとおりである。

- ① フィルターホルダーからクイックコネクツを分離する。
- ② フィルターホルダーの上部と下部を分離し、O-リングを外してからフィルターホルダー及びクイックコネクツを、超純水を用いて、目視で汚れが確認されなくなるまで流水洗浄する（フィルターホルダー内部の地下水接触面は、水の濡れ状態を確認する。水を弾き水滴が残るようであれば洗剤を使用して指でこすりながら洗浄する。スポンジは傷が付くので使用しない）。
- ③ フィルターホルダー、クイックコネクツ、O-リングを 55℃の超純水で 10 分間超音波洗浄を行う。
- ④ 目視で水滴が確認されない状態になるまで乾燥する（写真 7）。
- ⑤ 乾燥後、チューブアダプターの O-リング（写真 8）、フィルターホルダーの O-リング（写真 9）を脱落しないように装着する。
- ⑥ チャック袋に入れてフィルターホルダー収納箱に入れる。



写真7 フィルターホルダー乾燥時の状態

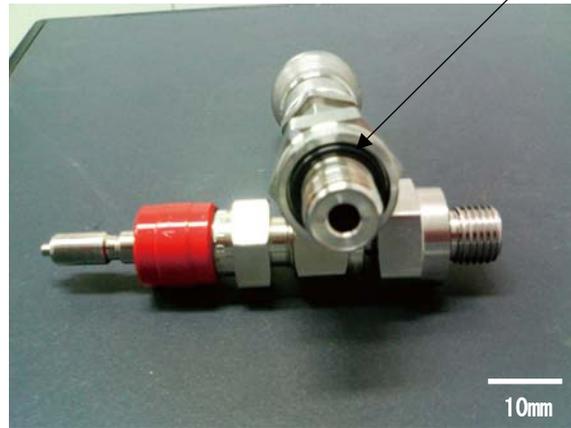


写真8 チューブアダプターのO-リングの装着状態



写真9 フィルターホルダーのO-リングの装着状態

4. ステンレス製容器を利用した地下水の嫌気状態でのろ過採水手法
(実験室でのろ過採水手法)

4.1 実験室ろ過採水システム

(1) 実験室ろ過採水システム作製にあたっての技術課題とその解決策の整理

原位置において、十分な湧水圧力を得ることができない、もしくは、地下水が湧水しないなどの場合、地下水を可能な限り擾乱させずに採水し、実験室でろ過採水を行う必要が生じる。実験室での地下水のろ過採水を行うためには、いくつかの技術課題があり、今回、それらを解決する方策を整理するとともに、それらの条件を満たす実験室ろ過採水システムを考案した(表6)。この場合、原位置でのろ過採水とは異なり、圧力開放による脱ガスと圧力低下は防ぐことができない。

表6 実験室でのろ過採水における技術課題とその解決策

| | 技術課題 | 解決策 |
|---|--------------------------------|---------------------|
| 1 | 採水容器及びろ過機内を不活性ガスに置換すること。 | 機材を耐圧・密閉式にする。 |
| 2 | 原位置(坑内)への搬入出を人力で行うこと。 | 人力で接続・分離が可能な構成にする。 |
| 3 | 採水容器内の地下水を嫌気状態を保持してろ過機に移送すること。 | 耐圧・機密式の接続が可能な構成にする。 |

(2) 実験室ろ過採水システムの構成

実験室ろ過採水システム(写真10)は大きく三つの部材から構成される。三つの構成部は、加圧するためのガス流路部、試料を採水するステンレス製容器部、ろ過を行うウルトラホルダー部^{注7)}である。

チューブについては、ガス流路を耐圧気密性の良いステンレス製(規格:316ステンレス鋼)とし、液流路については、ステンレスからの元素の溶出を避けるためにテフロンチューブとした。

三つの構成部は、ステンレス製容器前後にクイックコネクツを装着しており、採水した地下水が入ったステンレス製容器を簡便に交換できる。作製した実験室ろ過採水システムの構成図を図4に示す。

注7) ろ過膜を装填し、ガス圧によってろ過を行うことができる樹脂製の機材。

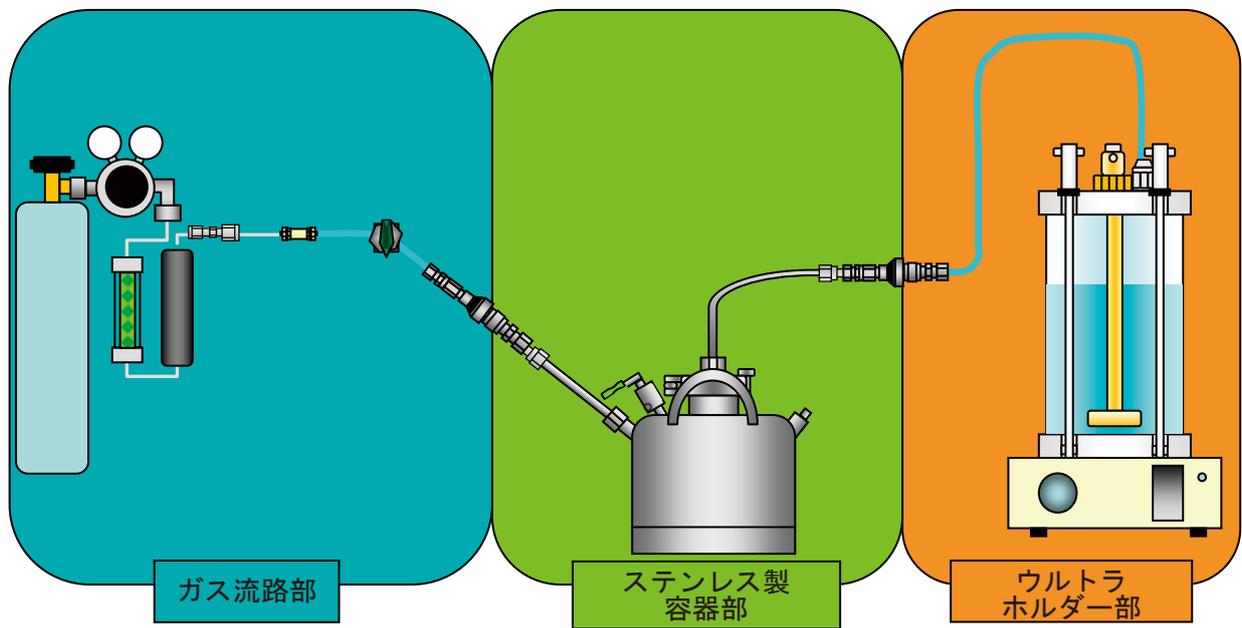
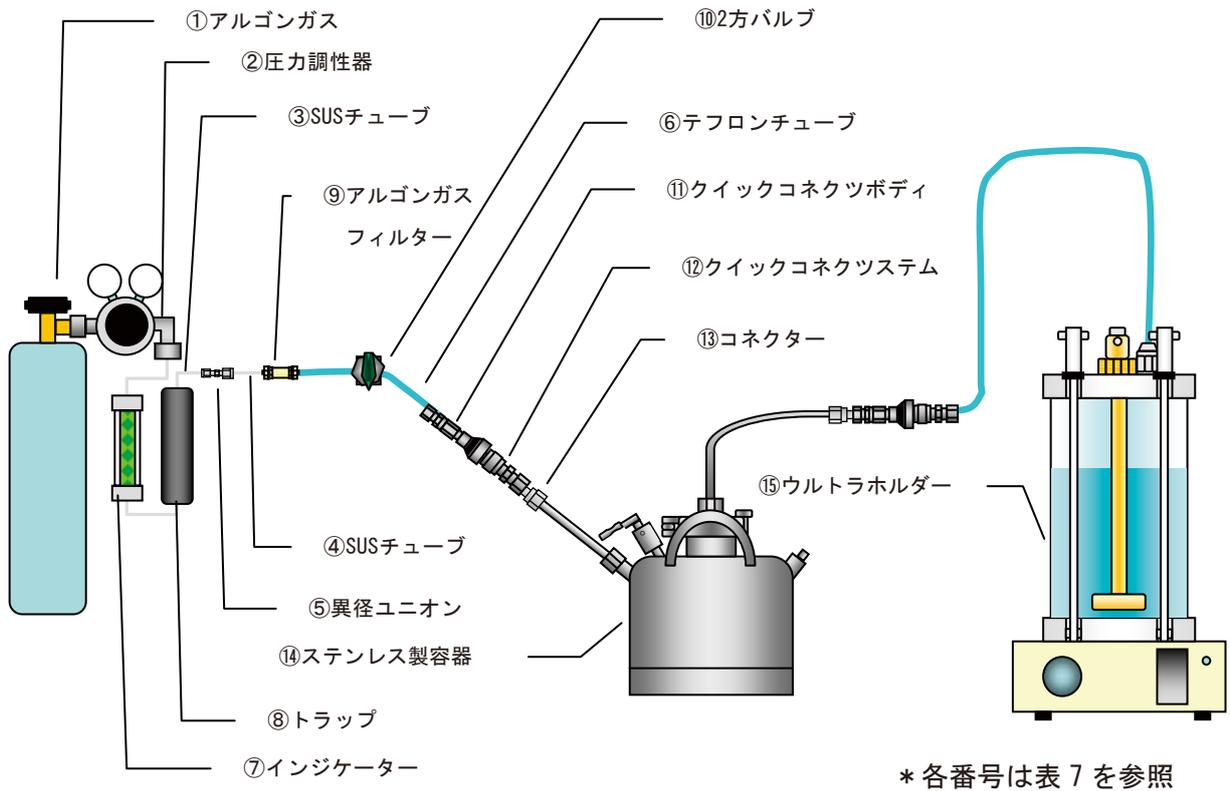


図 4 実験室ろ過採水システムの構成



写真 10 実験室ろ過採水システムの構成

(3) 実験室ろ過採水システムの機材

実験室ろ過採水システムの機材を表 7 に示す。

表 7 実験室ろ過採水システムの機材

| 機材 番号 | 名称 | 仕様または型番 | 超音波洗 浄の可否 | 酸洗浄また は不動態化 処理の可否 | |
|----------|---------------|----------------------------|--|-------------------------|---|
| ① | アルゴンガス | 高純度 (99.999%) | 否 | 否 | |
| ② | アルゴンガスライン | 圧力調性器 | GL Sciences 社製 PPB-1 3002-84201 | 否 | 否 |
| ③ | | SUS チューブ | Swagelok®社製 1/8inch (3.175mm) | 可 | 可 |
| ④ | | SUS チューブ | Swagelok®社製 1/4inch (6.35mm) | 可 | 可 |
| ⑤ | | 異径ユニオン | Swagelok®社製 SS-6M0-6-2 1/8inch (3.175mm) → 1/4inch (6.35mm) | 可 | 可 |
| ⑥ | | テフロンチューブ | 外径 6mm | 可 | 可 |
| ⑦ | 高感度インジケータークット | インジケータ | GL Sciences 社製 3001-17919 | 否 | 否 |
| ⑧ | | トラップ | | 否 | 否 |
| ⑨ | アルゴンガスフィルター | GL Sciences 社製 1-6280-02 | 否 | 否 | |
| ⑩ | 2 方バルブ | Swagelok®社製 SS-42GS6MM | 否 | 否 | |
| ⑪ | クイックコネクツボディ | Swagelok®社製 SS-QC4-B-6M0 | 可 | 否 | |
| ⑫ | クイックコネクツステム | Swagelok®社製 SS-QC4-D-6M0 | 可 | 否 | |
| ⑬ | コネクタ | Swagelok®社製 SS-6MTA-7-4-RT | 可 | 可 | |
| ⑭ | ステンレス製容器 | ADVANTEC®社製 DV-5U | 可 | 可 | |
| ⑮ | ウルトラホルダー | ADVANTEC®社製 UHP-90 | 可 | 否 | |

(4) 実験室ろ過採水システムの通水洗浄

実験室ろ過採水システムの通水洗浄は、各機材を組み立て、ステンレス製容器とウルトラホルダーを個別に行う。各々の通水洗浄手順は後述する 4.2 (1)ステンレス製容器内部の還元状態への移行 (①～⑧) 及び 4.2 (2)ウルトラホルダー内部の還元状態への移行 (①～⑦) に従って行う。

4.2 実験室ろ過採水システムの機材内部の嫌気状態への移行

ステンレス製容器内部及びウルトラホルダー内部は、地下水の嫌気状態を保持するために、採水時からろ過まで大気と接触しないように操作をしなければならない。ステンレス製容器内部及びウルトラホルダー内部に残存する大気を排気し、不活性ガスと置換することにより嫌気状態とする。

(1) ステンレス製容器内部の嫌気状態への移行

ステンレス製容器内部の嫌気状態への移行手順は以下のとおりである。

- ①ガス流路部にアルゴンガスを通気させ、ガス流路部をアルゴンガスに置換する（ガス流路部のクイックコネクツからアルゴンガスを 10 秒程度排気する）。
- ②洗浄したリザーバー（4.5.(1)ウルトラホルダーの洗浄と同様の手順で洗浄したもの）及びステンレス製容器に超純水を満水に満たす。
- ③ガス流路部にリザーバーを接続する。
- ④リザーバーのねじ式栓（写真 11）を緩めた状態（ガスを流した時にスーという音が聞こえる程度）でアルゴンガスの供給圧力をリザーバーとろ過膜の耐圧限界以内（0.39MPa）に調整してガスを通気させ、リザーバー内の水面と上蓋の接触面付近に残存する大気をアルゴンガスに置換する（リザーバーを傾ける等して、大気の気泡とアルゴンの気泡の入れ替わりを目視で確認する）。
- ⑤リザーバーのねじ式栓を締めて密栓し、アルゴンガスのバルブを閉鎖した後、リザーバーとステンレス製容器を接続する（写真 12）。
- ⑥アルゴンガスのバルブを徐々に解放して、リザーバー及びステンレス製容器内を加圧（アルゴンガス二次圧と同じ圧力）する。
- ⑦ステンレス製容器のリリース弁を開放してヘッドスペースに残存する大気を排気する（ステンレス容器を傾ける等しても、大気が排気されずに超純水が排水されるまで行う）。
- ⑧リリース弁を閉鎖し、ステンレス製容器出口に超純水排水用チューブを接続したクイックコネクツを接続して、超純水を排水する。
- ⑨超純水を全て排水してステンレス製容器内がアルゴンガスに置換された後（排水用チューブからアルゴンガスが排気されるまで行う）、クイックコネクツを分離する。
- ⑩陽圧状態（内部圧力は、アルゴンガス二次圧と同じ圧力になっている）で保管する（クイックコネクツの先端を押すと中の水が噴出するので注意すること）。



写真11 リザーバー



写真12 アルゴンガスボンベとリザーバーと
ステンレス製容器を接続した状態

(2) ウルトラホルダー内部の嫌気状態への移行

ウルトラホルダー内部の嫌気状態への移行手順は以下のとおりである。

- ①ガス流路部にアルゴンガスを通気させ、ガス流路部をアルゴンガスに置換する（ガス流路部のクイックコネクツからアルゴンガスを10秒程度排気する）。
- ②洗浄したウルトラホルダー（4.5.(1)）にろ過膜をテフロン製のピンセットを用いて装填する。
- ③ろ過膜を装填したウルトラホルダーに超純水を満水に満たす。
- ④ガス流路部にウルトラホルダーを接続する（写真13）。
- ⑤ウルトラホルダーのねじ式栓（写真14）を緩めた状態（ガスを流した時にスーという音が聞こえる程度）でアルゴンガスの供給圧力をウルトラホルダーとろ過膜の耐圧限界以内（0.39MPa以内）に調整してガスを通気させ、ウルトラホルダー内の水面と上蓋の接触面付近に残存する大気をアルゴンガスに置換する（ウルトラホルダーを傾ける等して、大気の気泡とアルゴンの気泡の入れ替わりを目視で確認する）。
- ⑥ウルトラホルダーのねじ式栓を締めて、アルゴンガスのバルブを閉鎖する。
- ⑦アルゴンガスのバルブを徐々に開放して、ウルトラホルダー内がアルゴンガスの供給圧力と同じになるまで加圧し、ウルトラホルダーの液排水口（写真14）を開放して超純水を排水する。
- ⑧超純水を全て排水してウルトラホルダー内をアルゴンガスに置換した後（液排水口からアルゴンガスが排気されるまで行う）、ウルトラホルダー排水口を密閉し、入口側のクイックコネクツを分離する。
- ⑨ろ過膜は、乾燥によって変形する可能性があることから、アルゴンガス置換後、速やかにろ過を実施すること。



写真13 アルゴンガスボンベとウルトラホルダーを接続した状態



写真14 ウルトラホルダー

4.3 実験室ろ過採水システムの採水手法

ステンレス製容器の地下水流入口に装着されているクイックコネクトシステムと、原位置でのモニタリング装置の地下水流出口に装着されているクイックコネクトボディ（写真4）を接続することによって採水を行う。ステンレス製容器への採水手順は以下のとおりである。

- ①モニタリング装置の地下水の流出口にステンレス製容器の地下水採水口を接続する。
- ②リリース弁を開放する。
- ③ステンレス製容器内のアルゴンガスをリリース弁から排気して地下水で満たす。（ステンレス製容器を傾ける等してもアルゴンガスが排気されずに地下水が排水されるまで行う）。
- ④リリース弁を閉じる。
- ⑤ステンレス容器出口に排水用のクイックコネクトを接続して排水する。
- ⑥25L^{注8)}の地下水を置換した後、ステンレス容器出口の排水用クイックコネクトを外す。
- ⑦ステンレス容器入口のクイックコネクトを外す。

注8) ステンレス製容器へ地下水を採水する場合、アルゴンガスが完全に排気されるまでの地下水はアルゴンガスと接触する。アルゴンガスと接触があった地下水を排水するため、ステンレス製容器の容量（5L）の5倍量を共洗い量とした。

4.4 実験室ろ過採水システムを用いたろ過採水手法

(1) 実験室ろ過採水システムを用いたろ過採水

実験室ろ過採水システムを用いたろ過手順は以下のとおりである。

- ①4.2.(2) ウルトラホルダー内部の還元状態への移行を実施する。
- ②アルゴンガス流路部とウルトラホルダーの接続を分離し、地下水を採水したステンレス製容器とウルトラホルダーをクイックコネクトで接続する。
- ③ステンレス製容器とアルゴンガス流路部をクイックコネクトで接続する（写真10）。
- ④アルゴンガスの供給圧力をリザーバーとろ過膜の耐圧限界以内（約0.39MPa以内）に調整して

ガスを通気させて、ステンレス製容器からウルトラホルダーへ地下水を分析に必要な量移送する（ろ過膜を回収するため、ウルトラホルダー内に地下水を残存させない）。

- ⑤ボトルをウルトラホルダーの液排出口に装着する。
- ⑥ウルトラホルダーの液排出口を開放して、ボトルにろ液を採水する（ろ液の流出速度が速い場合はアルゴンガス二次圧を低くする）。
- ⑦分析に応じた量のろ液をボトルに採取後、液排水口を密栓する。

(2) 実験室ろ過採水システムからのろ過膜の回収

実験室ろ過採水システムからのろ過膜の回収手順は以下のとおりである。

- ①ガス流路部とウルトラホルダーを接続し、ウルトラホルダー内部の地下水をアルゴンガス圧で排水する。
- ②リリース弁を開放してホルダー内部のアルゴンガスを排気する。
- ③上下のねじを外してウルトラホルダーを解体し、ろ過膜をテフロン製のピンセットで回収する。
- ④ろ過膜を滅菌シャーレに入れ蓋の円周をビニールテープで巻く。
- ⑤滅菌シャーレ全体を真空中で冷蔵保存する（写真5）。

4.5 実験室ろ過採水システムの洗浄

(1) ウルトラホルダーの洗浄

ウルトラホルダーは、使用後、直ちに洗浄する。ウルトラホルダー上部のねじを緩めて解体し、部品を個別に洗浄する。落ちない汚れがあれば中性洗剤を使用して指でこすり落とす。スポンジやブラシは傷の原因になるので使用しない。ウルトラホルダーの洗浄手順は以下のとおりである。

- ①ウルトラホルダーを解体した後（写真15）、55℃の超純水に浸漬して1時間超音波洗浄を行う。
- ②ウルトラホルダーを組み立てる（ウルトラホルダーは、円筒形の筒を上下の架台で締め付けて密閉状態を保持する構造になっているので、上下の架台で確実に締め付けられない場合、内部の流体の漏れが発生する）。
- ③3%硝酸水溶液（作製例：70%硝酸水溶液40ml + 超純水960ml）を作製する（硝酸を使用する場合はゴム手袋、安全めがねを着用する等の安全対策を講じること）。
- ④ウルトラホルダー内部に3%硝酸水溶液を満水に満たして、10分間放置し、回収する。
- ⑤硝酸と同様に超純水を満水に満たし、直ちに回収する。
- ⑥⑤の操作を3回以上繰り返し排水する。



写真 15 ウルトラホルダーの解体写真

(2) ステンレス製容器の洗浄

ステンレス製容器は、放置すると塩などが凝集付着して落ちなくなるため、使用后、直ちに洗浄すること。ステンレス製容器の洗浄手順は以下のとおりである。

- ①ステンレス製容器を解体した後（写真 16）、55℃の超純水に浸漬して1時間超音波洗浄を行う（汚れが確認された場合、30～40wt%硝酸水溶液で汚れを溶解する）。
- ②ステンレス製容器を組み立てる。
- ③ステンレス製容器に3%硝酸水溶液を満水に満たして、10分間超音波洗浄し、回収する。
- ④硝酸と同様に超純水を満水に満たし、直ちに回収する。
- ⑤④の操作を3回以上繰り返し排水する。



写真 16 ステンレス製容器の解体写真

5. 品質管理方法に関する検討

5.1 ステンレス製機材からの溶出物の確認

ステンレス製機材は、図5に示すような元素を含有しているため、地下水への元素の溶出が懸念される。そこで、不動態化処理が可能な機材について不動態化処理を行うことにより、元素の溶出の低減を試みた。不動態化処理とは、金属を酸化力の強い酸に浸漬させることにより、表面に薄い酸化皮膜を生成させ、金属の化学的あるいは電気的活性を抑制する処理である¹⁾。ステンレスの場合は、ステンレスの表面に数 nm のクロムの酸化皮膜を生成させ、内部を酸による腐食や、酸化などから保護する。今回は、このクロムの酸化皮膜の生成により、ステンレス含有元素の地下水への溶出が低減されるか否かを確認した。

原位置ろ過採水システムを使用した時のろ過時間とろ液中のクロム濃度の関係について、不動態化処理を行わずに作製した場合の結果と不動態化処理を行って作製した場合（処理直後と処理1年後）の結果をそれぞれ図6に示す。

不動態化処理を行わない場合は、クロムの溶出が認められ、不動態化処理直後はクロムの溶出が低減された。ただし、不動態化処理1年後は、クロムの溶出が認められていることから、不動態化処理を行うことによって、一時的にステンレス含有金属元素の溶出を低減させることが可能であったが、不動態化処理後の時間経過や使用回数の蓄積によって、再び含有金属元素が溶出してくることが判明した。従って、ステンレス含有元素の溶出対策としては、今後、テフロン製機材の開発等の検討が必要である。不動態化処理の手順は以下のとおりである。

- ①機材を 55°C の超純水で 10 分間超音波洗浄を行う。（不動態化前の予備洗浄）
- ②55°C の 30～40wt% 硝酸水溶液を入れた容器に、機材全体が硝酸水溶液に漬かるように浸漬させ、1 時間放置する（硝酸を入れた容器は、時計皿などで蓋をして溶液の蒸発や飛散防止の措置をすること）。
- ③硝酸水溶液から機材を取り出し、機材に付着した硝酸を超純水で洗い流す。
- ④目視で水滴が確認されなくなるまで乾燥する。
- ⑤空気中の塵や埃が付着しないようにサランラップ等で覆いをする。

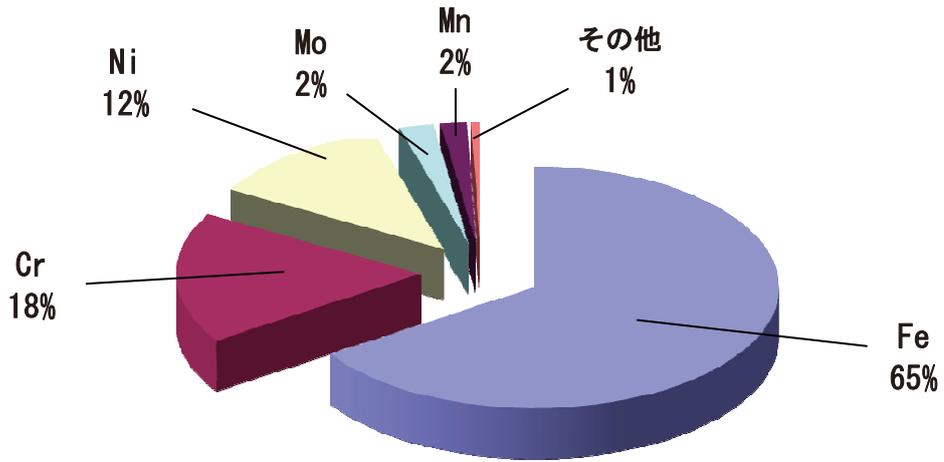
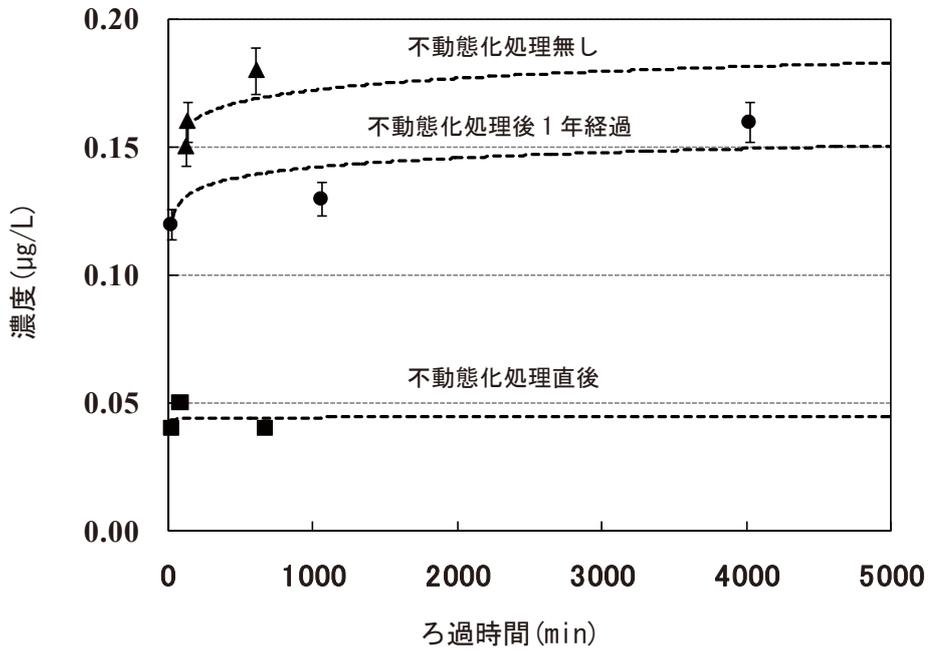


図5 代表的なステンレス（316 ステンレス鋼）の含有元素



(誤差は、ICP-MS 測定における 3 回繰り返し精度)

図6 クロムのろ過時間とろ溶液中濃度の関係

5.2 嫌気状態の維持

実験室でのろ過採水方法において、ステンレス製容器に地下水を採水した後、ろ過を実施するまでに輸送等の時間（保存期間）を要する場合がある。この間に、嫌気状態を維持できているか否かを確認するため、採水後直ちにろ過を行った場合と2ヶ月間保存した後にろ過を行った場合の元素のろ液中濃度の比較を原水（ろ過無し）と10,000の分画分子量（Molecular Weight Cut Off：以下、MWCOと略す）のろ液について行った（図7）。

原水（ろ過無し）とろ液（10,000MWCOのろ過膜でろ過）ともに、採水直後と採水2ヶ月後で、元素のろ液中濃度に差異が認められなかった。従って、ステンレスリザーバーに採水することにより嫌気状態を維持できることが示された。

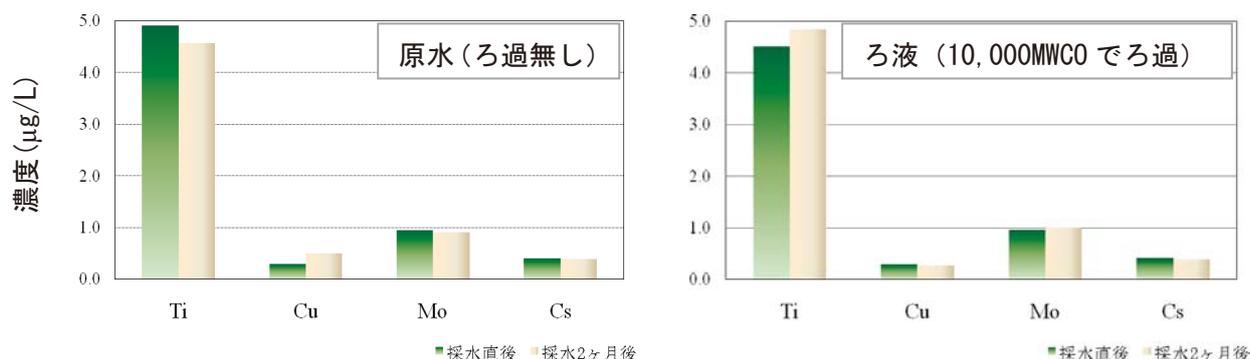


図7 ステンレス製容器の保存期間による元素のろ液中濃度の比較

5.3 原位置及び実験室でのろ過採水に使用する機材の洗浄

原位置及び実験室でのろ過採水に使用する機材は、微量分析において、汚染物質が確認されない程度に清浄しなければならない。機材の洗浄方法は以下のとおりである。

(1) ろ過膜の洗浄

ろ過に使用した代表的なろ過膜を表8に示す。

表8 使用した代表的なろ過膜

| 孔径および分画分子量 | 材質 | 仕様または型番 | 保存状態 |
|-------------|---------|--------------------------|---------------|
| 0.80 µm | PTFE | ADVANTEC®社製 H100A047A | - |
| 0.20 µm | PTFE | ADVANTEC®社製 T080A047A | - |
| 200,000MWCO | ポリサルホン | ADVANTEC®社製 30090004 | 20%エタノール水溶液浸漬 |
| 10,000MWCO | ポリサルホン | ADVANTEC®社製 30010004 | 20%エタノール水溶液浸漬 |
| 5,000MWCO | 再生セルロース | MILLIPORE 社製 PLCC 043 10 | グリセリン含浸 |
| 1,000MWCO | 再生セルロース | MILLIPORE 社製 PLAC 043 10 | グリセリン含浸 |

ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）製のろ紙は、3.1.(4) 原位置ろ過採水システムの通水洗浄に従って通水洗浄を行う。

ポリエーテルサルホン製の限外ろ過膜は、乾燥を防ぐために20%エタノール水溶液に浸漬されているので、超純水で流水洗浄してエタノールを除去した後、3.1.(4) 原位置ろ過採水システムの通水洗浄に従って通水洗浄を行う。

再生セルロース製の限外ろ過膜は孔径が非常に小さく、また、ろ過膜の乾燥を防ぐためにグリセリンが含浸させられている場合がある。このため、通水洗浄前に十分な洗浄が必要である。再生セルロース製の限外ろ過膜の洗浄手順は以下のとおりである。

- ①55°Cの 3%硝酸水溶液を入れた容器にガラスシャーレ全体が硝酸に浸かるように浸漬させ、1 時間超音波洗浄を行う。
- ②ガラスシャーレを硝酸水溶液から取り出し、超純水で硝酸を洗い流す。
- ③3%硝酸水溶液（室温）をガラスシャーレに満たす。
- ④テフロン製のピンセットでろ過膜の端部（装着時のパッキン接触部分）をつまみ、洗瓶を用いてろ過膜の表裏を超純水で流水洗浄する。
- ⑤流水洗浄したろ過膜をガラスシャーレに満たした 3%硝酸水溶液に浸漬させ 24 時間放置する。
- ⑥3%硝酸を超純水に入れ替え、ろ過膜を 5 分程度浸漬させる。
- ⑦超純水の pH が中性になるまで超純水を入れ替える。（2 回程度の入れ替えで中性になる。）
- ⑧別の洗浄済みガラスシャーレに超純水を満たし、浸漬した状態で保存する。

(2)バルクヘッドユニオンの洗浄

微量元素分析用液の採水は、汚染を避けるために、テフロンボトルの蓋を開孔し、バルクヘッドユニオンを取り付けた蓋を装着して行う（写真 17、18）。



写真 17 バルクヘッドユニオンとテフロンボトルの蓋を開孔した状態



写真 18 テフロンボトルの蓋を装着した状態

バルクヘッドユニオンの洗浄手順は以下のとおりである。

- ①超純水を用いて、目視で汚れが確認されなくなるまで流水洗浄を行う。
- ②55℃の3%硝酸水溶液を満たした容器にバルクヘッドユニオンを入れ、10分間超音波洗浄を行う。
- ③②の操作を各々別の3%硝酸水溶液を使用して繰り返す。
- ④硝酸からバルクヘッドユニオンを取り出し、付着した硝酸を超純水で洗い流す。
- ⑤目視で水滴が確認されなくなるまで乾燥させた後、チャック袋に入れて保管する。

(3) テフロンボトルの洗浄

テフロンボトルの洗浄手順は以下のとおりである。

- ①超純水を用いて、30秒間振とう洗浄を行う。
- ②3%硝酸水溶液で30秒間振とう洗浄して回収する。
- ③②の操作を各々別の3%硝酸水溶液を使用して3回繰り返す（汚れが落ちない場合は濃硝酸を用いて溶解させる）。
- ④超純水で30秒間振とう洗浄して回収する。
- ⑤④の操作を3回繰り返す。
- ⑥目視で水滴が確認されなくなるまで乾燥した後、蓋を閉めチャック袋に入れて保管する。

(4) ポリエチレンボトルの洗浄

ポリエチレンボトルの洗浄手順は以下のとおりである。

- ①超純水で30秒間振とう洗浄する。
- ②①の操作を3回繰り返して排水する。
- ③目視で水滴が確認されなくなるまで乾燥する。

(5) ガラスバイアルボトルの洗浄

ガラスバイアルボトルの洗浄手順は以下のとおりである。

- ①超純水を用いて、30秒間振とう洗浄する。
- ②55℃の超純水をガラスバイアルボトルに満水に満たし、10分間超音波洗浄する。
- ③ガラスバイアルボトルを超音波洗浄器から取り出して超純水で流水洗浄する。
- ④乾燥機で乾燥させ、水滴の跡が残っていないことを確認して保管する。

6. まとめ

湧水状態のボーリング孔を対象とした原位置でのろ過採水方法は、原位置の湧水圧と嫌気状態を保持した状態でのろ過が可能であり、地下水の地球化学特性を保持した擾乱しない手法として有効であることがわかった。また、湧水状態ではないボーリング孔を対象とした実験室でのろ過採水方法は、嫌気状態を保持した状態で採水を行った後、実験室において、嫌気状態を保持した状態でのろ過が可能であることがわかった。但し、いずれの手法も、分析対象元素が微量である場合は、洗浄等の品質管理を厳密に行う必要がある。また、不動態化処理により、一時的にステンレス製機材含有元素の溶出を防止できたが、機材の長期間の使用等によって、再び溶出が確認された。今後は、ステンレス含有元素の溶出による汚染を防ぐため、テフロン製容器の開発等の検討が必要である。

参考文献

- 1) Moridis, G.J., Hu, Q., Wu, Y.-S. and Bodvarsson G.S.: “Preliminary 3-D site-scale studies of radioactive colloid transport in the unsaturated zone at Yucca Mountain, Nevada”, *Jour. Contam. Hydro.*, 60, pp.251-286 (2003)
- 2) 金井豊・鈴木正哉：“「HLW 地層処分とコロイド研究」特集に当たって”，地質ニュース，第 631 号，pp.4 (2007)
- 3) 吉田嵩宏：“なぜ地層処分にコロイド研究が必要か”，地質ニュース，第 631 号，pp.5 (2007)
- 4) Degueldre, C. and Bolek, M.: “Modelling colloid association with plutonium: The effect of pH and redox potential”, *Appl. Geochem.*, 24, pp.310-318 (2009)
- 5) 金井豊：“コロイドを観察・分離する分析方法について”，地質ニュース，第 631 号，pp.19-23 (2007)
- 6) S. Mori, Howard G. Barth: “Size Exclusion chromatography”, (1999)
- 7) Gidding, J.C.: “Field flow fractionation”, *Science*, 260, pp.1456-1465 (1993)
- 8) Ranville, J.F., Hendry, M.J., Reszat, T.N., Xie, Q. and Honeyman, B.D.: “Quantifying uranium complexation by groundwater dissolved organic carbon using asymmetrical flow field-flow fractionation”, *Jour. Contam. Hydro.*, vol.91, pp.233-246 (2007)
- 9) Specht, C. H., Kumke, M. U. and Frimmel, F. H.: “Characterization of NOM adsorption to clay minerals by size exclusion chromatography”, *Water res.*, vol.34, pp.4063-4069 (2000)
- 10) Geckeis, H., Manh, T.N., Boudy, M. and Kim, J.I.: “Aquatic colloid relevant to radionuclide migration: characterization by size fractionation and ICP-mass spectrometric detection”, *Coll. Surf. A*, 217, pp.101-108, (2003)
- 11) 東京化学同人：“化学大辞典”，pp.2018 (1989)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

| 基本量 | SI基本単位 | |
|-------|--------|-----|
| | 名称 | 記号 |
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質モル量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI基本単位 | |
|---------------------|--------------------|--------------------|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | m ² |
| | 立法メートル | m ³ |
| 速度 | メートル毎秒 | m/s |
| | メートル毎秒毎秒 | m/s ² |
| 波数 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| | キログラム毎立法メートル | kg/m ³ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | kg/m ² |
| | 立法メートル毎キログラム | m ³ /kg |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | A/m ² |
| | アンペア毎メートル | A/m |
| 濃度 ^(a) | モル毎立法メートル | mol/m ³ |
| | キログラム毎立法メートル | kg/m ³ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m ² |
| | 屈折率 ^(b) | 1 |
| 比透磁率 ^(b) | (数字の) | 1 |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI組立単位 | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|--|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン ^(b) | rad | 1 ^(b) | m/m |
| | ステラジアン ^(b) | sr ^(c) | 1 ^(b) | m ² /m ² |
| 周波数 | ヘルツ ^(d) | Hz | | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | | m kg s ⁻² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N m | m ² kg s ⁻² |
| 仕事率, 工率, 放射束 | ワット | W | J/s | m ² kg s ⁻³ |
| 電荷, 電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差 (電圧), 起電力 | ボルト | V | W/A | m ² kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V | m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A | m ² kg s ⁻³ A ⁻² |
| コンダクタンス | ジーメンズ | S | A/V | m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ² |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | Vs | m ² kg s ⁻² A ⁻¹ |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² | kg s ⁻² A ⁻¹ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | m ² kg s ⁻² A ⁻² |
| セルシウス温度 | セルシウス度 ^(e) | °C | | K |
| 光度 | ルーメン | lm | cd sr ^(c) | cd |
| 照射 | ルクス | lx | lm/m ² | m ⁻² cd |
| 放射性核種の放射能 ^(f) | ベクレル ^(d) | Bq | | s ⁻¹ |
| 吸収線量, ビエネギー一分与, カーマ | グレイ | Gy | J/kg | m ² s ⁻² |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト ^(g) | Sv | J/kg | m ² s ⁻² |
| 酸素活性化カタル | kat | | | s ⁻¹ mol |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報を付たえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で「radioactivity」と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI組立単位 | | |
|-----------------|-------------------|-----------------------|---|
| | 名称 | 記号 | SI基本単位による表し方 |
| 粘り | パスカル秒 | Pa s | m ⁻¹ kg s ⁻¹ |
| 力のモーメント | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ⁻² |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m s ⁻¹ s ⁻¹ |
| 角加速度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m s ⁻² s ⁻² |
| 熱流密度, 放射照度 | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 熱容量, エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 比熱容量, 比エントロピー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネギー | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 熱伝導率 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 体積エネギー | ジュール毎立法メートル | J/m ³ | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電荷密度 | クーロン毎立法メートル | C/m ³ | s ⁻¹ A |
| 表面電荷 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 電束密度, 電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 誘電率 | ファラド毎メートル | F/m | m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 透磁率 | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² |
| モルエネギー | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ s A |
| 吸収線量 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射強度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ³ kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m ² sr) | m ² kg s ⁻³ = kg s ⁻³ |
| 酵素活性化濃度 | カタール毎立法メートル | kat/m ³ | m ⁻³ s ⁻¹ mol |

表5. SI接頭語

| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 ²⁴ | ヨタ | Y | 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ²¹ | ゼタ | Z | 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ¹⁸ | エクサ | E | 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P | 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ¹² | テラ | T | 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁹ | ギガ | G | 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁶ | メガ | M | 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ³ | キロ | k | 10 ⁻¹⁸ | アト | a |
| 10 ² | ヘクト | h | 10 ⁻²¹ | ゼプト | z |
| 10 ¹ | デカ | da | 10 ⁻²⁴ | ヨクト | y |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI単位による値 |
|-------|------|--|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1h=60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ' | 1'=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | " | 1"=(1/60)'=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | 1ha=1hm ² =10 ⁴ m ² |
| リットル | L, l | 1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1t=10 ³ kg |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|----------|----|--|
| 電子ボルト | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J |
| ダルトン | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da |
| 天文単位 | ua | 1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------|------|---|
| バール | bar | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バイン | b | 1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ² |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。 |
| ベベル | B | |
| デジベル | dB | |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------------------|-----|--|
| エルグ | erg | 1 erg=10 ⁻⁷ J |
| ダイン | dyn | 1 dyn=10 ⁻⁵ N |
| ポアズ | P | 1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s |
| ストークス | St | 1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹ |
| スチルブ | sb | 1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻² |
| フオトル | ph | 1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx |
| ガリ | Gal | 1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² |
| マクスウェル | Mx | 1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb |
| ガウス | G | 1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁴ T |
| エルステッド ^(c) | Oe | 1 Oe = (10 ³ /4π)A m ⁻¹ |

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「=」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------|------|---|
| キュリー | Ci | 1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq |
| レントゲン | R | 1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg |
| ラド | rad | 1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy |
| レム | rem | 1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv |
| ガンマ | γ | 1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T |
| フェルミ | f | 1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg |
| トル | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリ | cal | 1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロン | μ | 1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m |

