

放射線グラフト重合法により作製した捕集材を用いた
瑞浪超深地層研究所における湧水処理の検討
(2006年度成果報告書)
(共同研究)

Estimation of Groundwater Treatment Using Radiation-induced Graft Polymerization
Adsorbent at the Mizunami Underground Research Laboratory
(Annual Report on 2006 Fiscal Year)
(Joint Research)

弥富 洋介 尾方 伸久 杉原 弘造 瀬古 典明
保科 宏行 岡田 健治* 玉田 正男
Yosuke IYATOMI, Nobuhisa OGATA, Kozo SUGIHARA, Noriaki SEKO
Hiroyuki HOSHINA, Kenji OKADA* and Masao TAMADA

地層処分研究開発部門
結晶質岩工学技術開発グループ
Crystalline Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

放射線グラフト重合法により作製した捕集材を用いた
瑞浪超深地層研究所における湧水処理の検討
(2006年度成果報告書)
(共同研究)

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
弥富 洋介、尾方 伸久、杉原 弘造
瀬古 典明⁺、保科 宏行[※]、岡田 健治^{*}、玉田 正男⁺

(2008年5月16日 受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）では、研究坑道掘削工事に伴う湧水に含まれる天然由来のふつ素（濃度：7.2～9.5mg/L）、ほう素（濃度：0.8～1.5mg/L）について、排水処理設備における凝集沈殿処理（ふつ素除去）およびイオン交換処理（ほう素除去）によって環境基準値（ふつ素：0.8mg/L、ほう素：1mg/L）以下の濃度まで除去した後、湧水を河川に放流している。一方、量子ビーム応用研究部門 環境・産業応用研究開発ユニットでは、放射線グラフト重合法で作製した捕集材により、海水や温泉水などに含まれる低濃度の希少金属捕集の実績があることから、地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニットと量子ビーム応用研究部門 環境・産業応用研究開発ユニットが共同で効率的な湧水中のふつ素・ほう素除去方法について検討することとなった。

捕集材を用いた通水試験では、湧水を連続して捕集材に通水し、通水後のふつ素及びほう素の濃度を測定した。通水後のふつ素及びほう素濃度は、湧水濃度に比べて捕集材に吸着された濃度分だけ低くなるが、捕集材の吸着能力を超えると、ふつ素及びほう素は吸着されずに通水する。

ほう素については、室内試験では捕集材体積の760倍の湧水量に対して、95%以上の除去が可能であった。また、スケールアップした現場試験においても、同様の結果が得られた。

ふつ素については、湧水を放流するためには、湧水中濃度と比較して90%以上除去する必要がある。現場試験結果では、捕集材体積の320倍の湧水量に対して95%以上の除去が可能であったが、今回作製した捕集材は、濃度が高い物質を低い濃度まで吸着する場合は本来の吸着性能が十分に発揮されていない。ふつ素除去の効率化、つまり湧水中濃度の90%以上を除去可能な湧水量の増加を図るために、今後も検討が必要であることが分かった。

今後は、ふつ素除去の効率化とともに、カラム試験からスケールアップした試験装置を用いた試験の継続により、捕集材の耐久性の評価や再生利用試験を行う予定である。

本研究は、地層処分研究開発部門と量子ビーム応用研究部門との共同研究に基づいて実施したものである。

東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

+ 量子ビーム応用研究部門 環境・産業応用研究開発ユニット

※ 技術開発協力員

* チツソ（株）

Estimation of Groundwater Treatment Using Radiation-induced Graft Polymerization
Adsorbent at the Mizunami Underground Research Laboratory
(Annual Report on 2006 Fiscal Year)
(Joint Research)

Yosuke IYATOMI, Nobuhisa OGATA, Kozo SUGIHARA
Noriaki SEKO⁺, Hiroyuki HOSHINA[※], Kenji OKADA^{*} and Masao TAMADA⁺

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

(Received May 16, 2008)

The concentrations of fluorine (7.2~9.5mg/L) and boron (0.8~1.5mg/L) dissolved in groundwater pumped from shafts during excavation at the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU), Tono Geoscience Centre, are reduced to the levels below the environmental standards (fluorine:0.8mg/L, boron:1mg/L) at a water treatment facility. Coagulation treatment and ion exchange treatment are applied for fluorine and boron respectively. On the other hand, the Quantum Beam Science Directorate in JAEA has applied a groundwater treatment method using radiation-induced graft polymerization adsorbent to remove rare metals dissolved in hot springs and sea water. Consequently, the Environment and Industrial Materials Research Division, Quantum Beam Science Directorate and the Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate have started collaborative research on groundwater treatment for fluorine and boron. Regarding the treatment for boron, over 95% of boron has been removed from groundwater volume of 760 times greater than the volume of the adsorbent. With respect to the fluorine removal, 95% of fluorine has been removed from groundwater volume of 320 times greater than the volume of the adsorbent. When the high concentration material, fluorine in groundwater, has been removed by low concentration, the adsorbent did not work enough the ability of removal. We'll need further improvement that the treatment method for fluorine using radiation-induced graft polymerization adsorbent is more efficient than coagulation treatment at a water treatment facility.

Therefore, we are planning to perform a durability evaluation and recycling test of adsorbent using improved testing equipment for enhancing the efficiency.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU), Fluorine, Boron, Radiation-induced Graft Polymerization Adsorbent

This work has been performed in Geological Isolation Research and Development Directorate as a joint research with Quantum Beam Science Directorate.

+ Environment and Industrial Materials Research Division, Quantum Beam Science Directorate

※ Collaborating Engineer

* Chisso Corporation

目次

1. はじめに	1
2. 放射線グラフト重合法について	2
3. 湧水の水質に関するこれまでの知見	3
3.1 研究所における湧水の状況	3
3.2 研究所の排水処理設備におけるふつ素・ほう素の処理	4
3.3 今後予想される濃度推移	5
4. 捕集材を用いた湧水処理の検討	6
4.1 本研究の最終目標	6
4.2 2006 年度の目標及び試験内容	7
4.2.1 捕集材	7
4.2.2 試験条件	7
4.2.3 試験手順	8
4.3 試験結果	10
5. 今後の予定	11
参考文献	12

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Outline of radiation-induced graft polymerization adsorbent	2
3. Groundwater properties	3
3.1 Groundwater inflow to the MIU shafts and research galleries	3
3.2 Fluorine and boron treatment at the water treatment facility of the MIU	4
3.3 Predicted concentrations of fluorine and boron in future	5
4. Estimation of the groundwater treatment method using radiation-induced graft polymerization adsorbent	6
4.1 Goals	6
4.2 Aimes of this fisical year and methods	7
4.2.1 Adsorbent	7
4.2.2 Test conditions	7
4.2.3 Test procedure	8
4.3 Results	10
5. Future plan	11
References	12

図表目次

図 2.1 捕集材による物質捕集のイメージ.....	2
図 3.1 立坑内における裏面排水材の設置状況.....	3
図 3.2 立坑における裏面排水材、集水リングの設置状況.....	3
図 3.3 排水処理設備の処理フロー.....	4
図 3.4 研究所周辺のボーリング及び研究坑道坑底からのパイロットボーリングにおける地下水 水質分布と今後の水質予測.....	5
図 4.1 放射線グラフト重合法により作成した捕集材.....	7
表 4.1 試験条件.....	7
図 4.2 室内試験の状況.....	8
図 4.3 現場（排水処理設備前）での試験の状況.....	9
図 4.4 各試験条件におけるカラム出口濃度の時間変化.....	10
図 5.1 試験装置のフロー図.....	11

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構） 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット（以下、東濃地科学研究ユニット）では、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」¹⁾及び「原子力政策大綱」²⁾に示された深地層の研究施設計画のひとつである超深地層研究所計画³⁾を進めている。

超深地層研究所計画は、結晶質岩（花崗岩）を対象として、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」及び「深地層における工学技術の基盤の整備」を目標としており、その調査研究のため瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）において、2003年より研究坑道の掘削工事を行っている。研究坑道は、主立坑（直径 6.5m）と換気立坑（直径 4.5m）、深度 100m ごとに主立坑と換気立坑を連絡する水平坑道、および深度 500m と 1000m に設置される調査研究ステージから成る。

掘削工事に伴って発生する湧水（地下水）は、排水処理設備において濁水処理を行い、水質汚濁防止法の排水基準を満足していることを確認したうえで河川に放流し、河川の水質の環境基準項目について自主的に測定していた。しかし 2005 年 10 月に放流先河川の水質のうち 2 項目（ふつ素、ほう素）が環境基準値を超過しており、その原因が湧水中に含まれる天然由来のふつ素、ほう素であることが判明した。そのため、関係自治体と協議を行い、排水を停止した上で（排水停止時：主立坑深度 172.6m、換気立坑深度 191.0m まで進捗）、環境基準に適合するように、排水処理設備にふつ素、ほう素を除去するための設備を増設した。

一方、量子ビーム応用研究部門 環境・産業応用研究開発ユニット 金属捕集・生分解性高分子研究グループ（高崎量子応用研究所駐在、以下、金属捕集・生分解性高分子研究グループ）では、放射線を利用した環境・資源に役立つ材料の開発として、ポリエチレンなどの布材料に放射線を照射した後、薬剤によって特定の物質を除去するための捕集機能を付与する方法（放射線グラフト重合法）による捕集材の開発を進めている。これまで漁業廃棄物の有害金属吸着除去材や温泉水および海水中の希少金属の捕集材の開発を行っていた⁴⁾。

以上のような状況を踏まえ、放射線グラフト重合法による捕集材を用いた湧水中のふつ素・ほう素除去の効率化を目標として、2006 年度より金属捕集・生分解性高分子研究グループと地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニットで連携して技術開発を進めることとなった。

本報告書では、2006 年度に行った捕集材のふつ素・ほう素除去の適用性の確認、試験装置の製作および通水試験の結果について報告する。

2. 放射線グラフト重合法について

放射線グラフト重合法は、高分子の機能向上のために用いられる重合（反応）方法である。

高分子に高エネルギーの放射線を照射すると、高分子材料中の炭素と水素の結合が切れて活性種（ラジカル）が生成される。連鎖的に反応（重合）しやすいモノマー（基質、基になる薬品）を、ラジカル状態で反応させると重合が開始し、高分子鎖（グラフト鎖）が導入される。この方法が放射線グラフト重合法である。グラフトとは接木の意味であり、樹木の接木と類似している。

放射線グラフト重合法には同時照射法と前照射法があり、本試験では前照射法により捕集材の作製を行っている。作製工程としては、イメージを図2.1に示すが、以下の3工程による。

- ①ラジカル生成のための高分子材料（基材）への照射
- ②モノマーのグラフト重合によるグラフト鎖の形成
- ③使用目的に応じたグラフト鎖中の官能基（各物質に対して選択性を有するキレート形成基）の化学処理

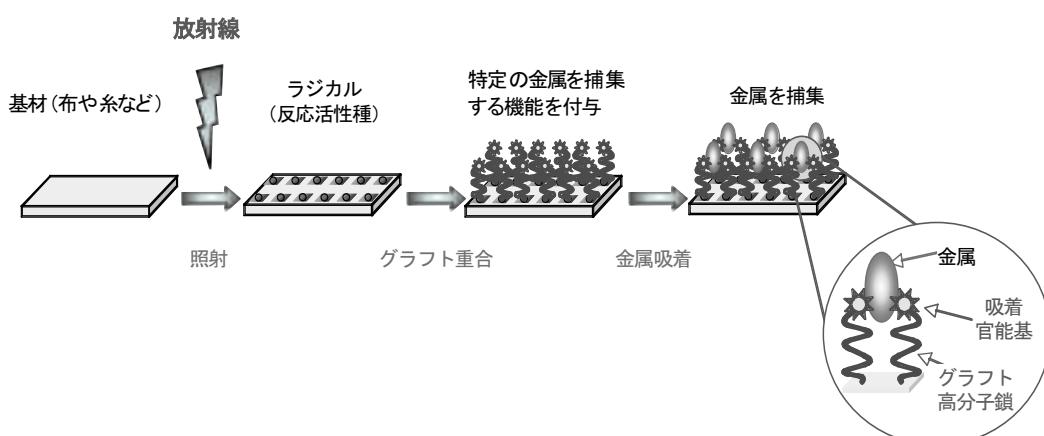


図2.1 捕集材による物質捕集のイメージ

グラフト重合による高分子材料加工の特徴は、基材の形状や性質を保持したまま、新たな機能を導入できることである。基材はフィルム、纖維、布など多様な形状が利用可能である。不織布を基材にすると、ガスや液体の通過が良好なため、有害ガスや金属イオンの吸着除去性能に優れた材料が作製可能である。これまでアンモニア除去フィルタや純水製造装置に用いられている。この場合、有害ガスや金属イオンは化学吸着されるため、活性炭のような物理吸着と異なって、温度変化により吸着物質が脱離することはない。また、グラフト重合法で作製した金属捕集材は、低濃度の金属イオンも高い効率で吸着できるため、日本で採掘できない金属資源の回収にも応用可能である⁴⁾。

これまでの捕集材による実験例としては、海水中のウランを捕集するプロジェクトや、ホタテ貝に含まれるカドミウムを除去して貝殻を肥料として有効利用するための適用実験を行っている。特に海水中のウラン捕集では、長期間の海水への浸漬試験で実用に利用可能な吸着性能を達成している。また温泉中に含まれている希少金属の捕集試験も行っている^{4,5,6)}。

3. 湧水の水質に関するこれまでの知見

3.1 研究所における湧水の状況

研究所からの湧水は、裏面排水材を通じて集水リングに導かれ、高揚程ポンプにより地上に排出した水と切羽湧水である。

図 3.1 に裏面排水材、集水リングの関係を示す。岩盤の掘削後は、壁面観察などの調査の後、岩盤に裏面排水材を設置する。その後、覆工コンクリートを打設し、湧水は裏面排水材の中を流れることとなる。裏面排水材は、円周方向では深度 100m の間で主立坑、換気立坑においてそれぞれ 4箇所、縦断方向では 90° 間隔に設置している。

集水リングは、湧水分析のための採水が可能であり、円周上に設置した裏面排水材に沿うように設置される。立坑における裏面排水材、集水リングの設置状況を図 3.2 に示す⁷⁾。

湧水は裏面排水材や集水リングを通るが、覆工コンクリートにも接触する。そのため、後述するパイロットボーリングにおける水質調査では、もともと地下に存在している地下水の pH は 8～9⁸⁾であるが、排水処理設備入口における湧水を採取して分析すると、pH は 9～12 に上昇している⁹⁾。

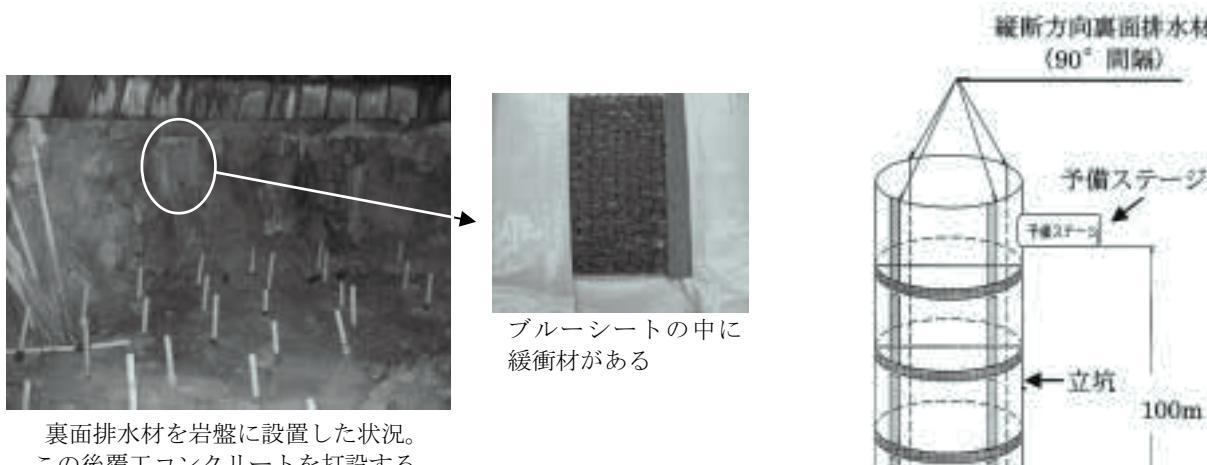


図 3.1 立坑内における裏面排水材の設置状況

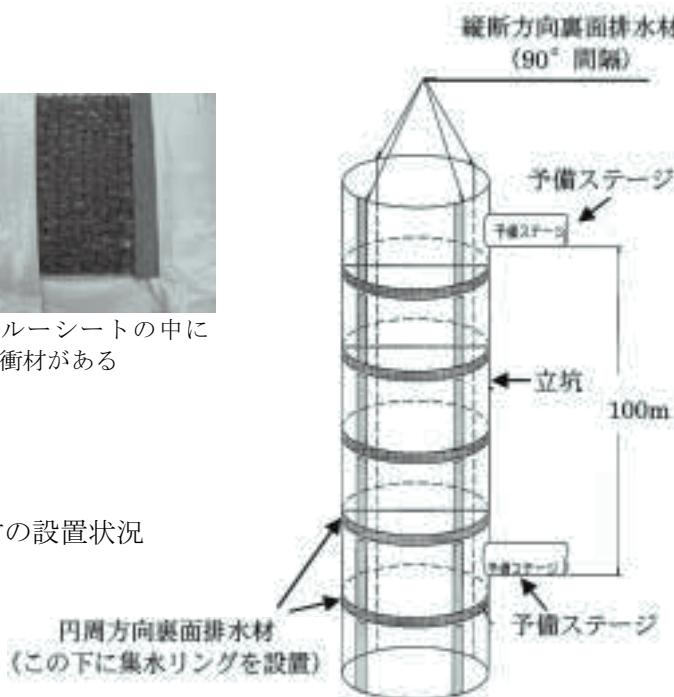


図 3.2 立坑における裏面排水材、集水リングの設置状況

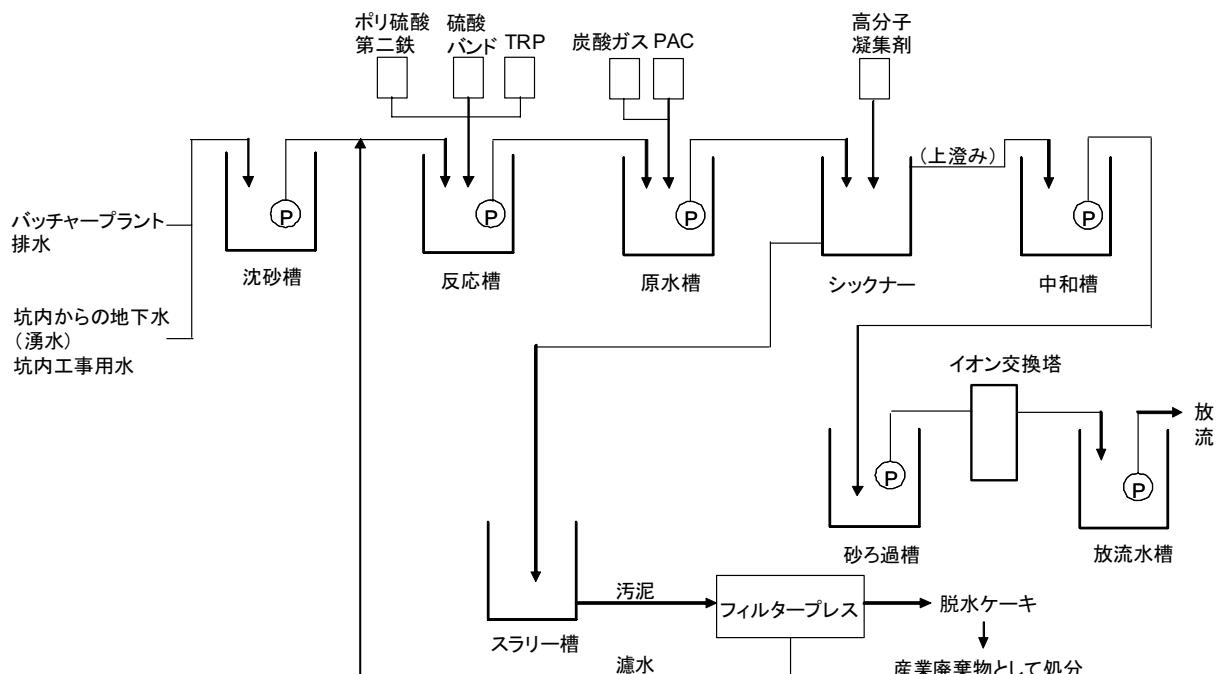
放流先河川におけるふつ素、ほう素濃度が環境基準値を超過していたことが判明した後は、毎月 1 回、地上に排出した湧水、排水処理設備による処理後の処理水、放流先河川の水質調査を実施している。この調査結果では、処理前の湧水中のふつ素濃度は 7.2～9.5mg/L、ほう素濃度は 0.8～1.5mg/L で推移している（2007 年 11 月末時点）⁹⁾。

3.2 研究所の排水処理設備におけるふつ素・ほう素の処理

一般的に、ふつ素処理はカルシウム塩を添加して難溶性のフッ化カルシウムを生成させて沈殿分離する凝集沈殿法が用いられており、この他に高度処理方法（さらに除去する方法）として、アルミニウム塩又はマグネシウム塩を添加する水酸化物共沈法、選択吸着樹脂を用いた吸着法などがある。また、ほう素処理としては、アルミニウム塩と水酸化カルシウムの併用による凝集沈殿法やほう素選択吸着樹脂を用いた吸着法がある¹⁰⁾。

研究所の排水処理設備においては、ふつ素除去のため、薬剤（硫酸アルミニウム（硫酸バンド）、ポリ塩化アルミニウム（PAC）、ポリ硫酸第二鉄、天然ミネラル水処理剤（TRP））によって凝集沈殿処理を行った後、ほう素はイオン交換処理によって除去している。

図3.3に2007年12月現在の排水処理設備の処理フローを示す。



(P): ポンプ

図3.3 排水処理設備の処理フロー

3.3 今後予想される濃度推移

研究所周辺のボーリング孔および研究坑道の坑底からのパイロットボーリング孔における地下水水質測定結果から、ふつ素、ほう素については図3.4に示すように濃度推移すると予想される⁸⁾。

ふつ素については、深度200m以深では、深度が深くなるにつれて減少する傾向にあり、パイロットボーリング孔における地下水水質測定結果では、深度500mにおいて約5mg/Lとなっている。

ほう素については、深度が深くなるにつれて若干増加する傾向があり、パイロットボーリング孔における地下水水質測定結果では、深度500mにおいて約2mg/Lとなっている。

湧水量については、主立坑の地質は透水性が低いことから、顕著な湧水が発生する可能性は低いと見られている。また、換気立坑については、低角度傾斜を有する割れ目が特に集中する領域が深度200~250mにあり、また透水性の高い領域が深度400~460mに確認されていることから、これらの付近で大量湧水が予測される⁸⁾。

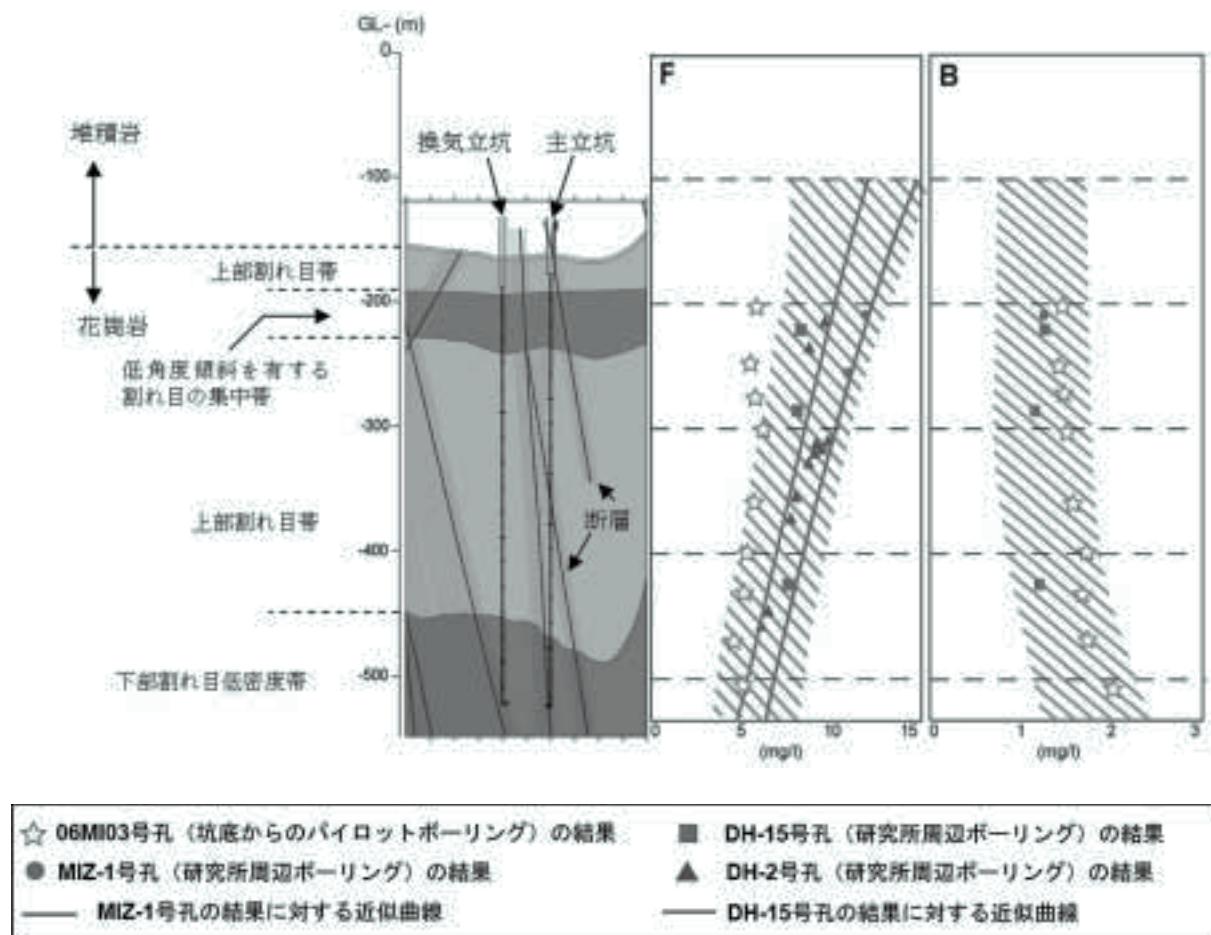


図3.4 研究所周辺のボーリング及び研究坑道坑底からのパイロットボーリングにおける地下水水質分布と今後の水質予測⁸⁾

4. 捕集材を用いた湧水処理の検討

4.1 本研究の最終目標

研究坑道から排出される湧水を用いて、ふつ素、ほう素濃度をより経済的に環境基準以下まで吸着できる性能を持つ捕集剤の開発を行うにあたって、捕集材が具備すべき性能（捕集材の吸着性能（排水中の濃度）、最終的に想定される処理装置の処理能力、設置面積、コスト）の条件を下記のように設定した。

①処理水中の濃度

現在、湧水の水質変動を考慮して排水処理設備の運転管理値を設定している。捕集材の性能についても、最低限必要な性能として環境基準値以下まで除去できる性能が必要であるが、湧水の水質変動を考慮して環境基準の半分まで除去することを目標とし、下記のとおりとした。ただし、ふつ素については、湧水中の濃度が高いことから、若干の裕度を持たせた。

- ・最低限必要な性能：捕集材による処理水中ふつ素濃度：0.8mg/L 以下

ほう素濃度：1.0 mg/L 以下

- ・目標とする性能：捕集材による処理水中ふつ素濃度：0.4～0.5mg/L 程度

ほう素濃度：0.5mg/L 程度

②処理能力

研究坑道への湧水量予測結果¹¹⁾に基づき、24時間連続運転が可能である設備を想定する。また、湧水は定常的に発生し、貯留のための設備を設けることが出来ないことから、機器ユニット等の増設によって最終的に 6000m³/日（掘削工事によって変化する湧水量に対応）に対応可能な設備を想定する。

③施設設置面積

研究所敷地面積の制約から、最大 300m² 程度（15m×20m）とする。ただし、沈砂槽、油水分離槽、シックナー、中和槽は既存の施設が利用できるため、除く。

④コスト

ランニングコストとして薬剤・捕集材等の消耗品費+汚泥処理費+捕集材再生費が、現状の排水処理設備のランニングコストよりも低くなることを目標とする。

4.2 2006 年度の目標及び試験内容

4.1 に示した目標を目指すため、2006 年度の目標としては、捕集材によるふつ素、ほう素の除去の可能性を確認する試験を行い、湧水処理の効率化についての検討を行うこととした。

試験内容として、カラムを用いた室内試験やスケールアップした現場試験を行った。

4.2.1 捕集材

本研究で使用する捕集材の作製は金属捕集・生分解性高分子研究グループで行い、放射線照射は高崎量子応用研究所にある電子線照射施設（電子加速器）において 20kGy の放射線（電子線）を照射した後、ふつ素除去用捕集材には、スルホン酸基を導入した母材に、ふつ素に対して親和性の高いジルコニウム基を担持させた。ほう素除去用の捕集材は、ふつ素除去用捕集材と同様に、放射線を照射後、ほう素に対して親和性の高いグルカミン基を導入している¹²⁾。

ふつ素、ほう素除去用捕集材は、金属捕集・生分解性高分子研究グループにおいてフェルト状のポリエチレン布基材を放射線グラフト重合法で処理して作製した。本試験に用いた捕集材を図 4.1 に示す。

ほう素除去用の捕集材は、ほう素に対して親和性の高いグルカミン基を導入している。また、ふつ素除去用捕集材は、グラフト重合によりスルホン酸基を導入した母材に、ふつ素に対して親和性の高いジルコニウム基を担持させた。

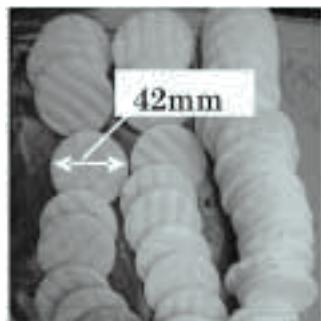


図 4.1 放射線グラフト重合法により作成した捕集材

4.2.2 試験条件

試験条件は、表 4.1 に示すように設定した。

表 4.1 試験条件

		試験方法	カラム径 (mm)	通液速度 (SV) (h ⁻¹)	捕集材体積 (cm ³)
ほう素	①	室内試験	30	50	10
	②	現場試験	42	120	90
ふつ素		現場試験	42	36	300

試験条件中の通液速度は、捕集材の吸着性能を示す指標であり、空間速度（Space Velocity、SV）と呼ばれており、式 1 のように求める。値が高ければ、ある単位時間における吸着性能が高

いと判断できるが、高すぎると十分な吸着処理ができなくなってしまう。

$$SV(h^{-1}) = \frac{\text{流量}(m^3/h)}{\text{吸着材体積}(m^3)} \quad (\text{式 } 1)$$

通常のほう素選択吸着樹脂では、 $SV 10 h^{-1}$ において、樹脂体積の 500 倍の湧水量について、95% 処理が可能というデータがある¹⁰⁾。これと比較すると、今回の通液速度は 5~12 倍であり、高い吸着性能を期待した設定としている。

4.2.3 試験手順

①カラムを用いた室内試験

最初の試験として、実験室にて小規模なカラムにほう素除去用捕集材を使用して、ほう素除去の可能性を確認した。試験の状況を図 4.2 に示す。

あらかじめ湧水を採取しておく、実験室にて内径 30mm、長さ 200mm のカラムに、捕集材を 10cm³ 充填し、採水装置（フラクションコネクター）を接続して湧水を上向流（下から上に向けて流す）で通水して、一定時間ごとに採水して捕集材通水後のほう素の濃度変化を把握した。このときの流量は、8.3mL/min ($SV=50 h^{-1}$) である。

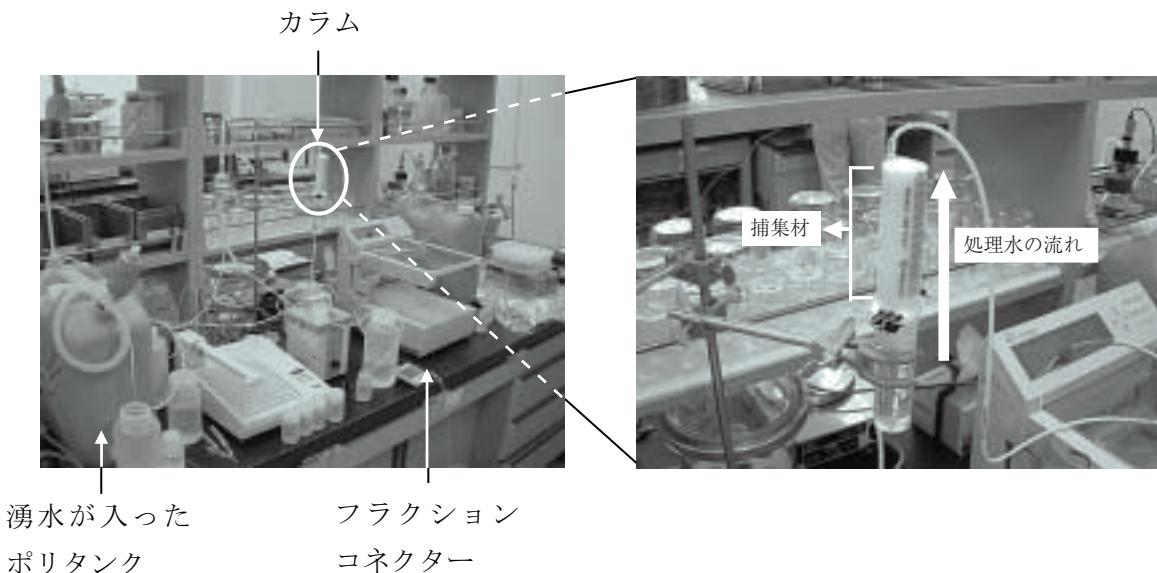


図 4.2 室内試験の状況

②スケールアップした現場試験

次に、カラムをスケールアップし、排水処理設備の沈砂槽前において、図 4.3 のように沈砂槽に送り込まれた湧水をポンプでくみ上げ、浮遊物除去カラムで細かい粒子状の掘削土を除去した後、内径 42mm、長さ 400mm のカラムを用いて上向流でほう素除去カラム及びふつ素除去カラムを連続で通水させた。このときの流量は 180mL/min であり、ほう素除去用捕集材は 90cm³を充填し、SV は 120h⁻¹とした。ふつ素除去用捕集材は 300cm³を充填し、SV は 36 h⁻¹とした。ふつ素については湧水中の濃度 7.2~9.6mg/L に対して環境基準値 0.8mg/L 以下まで除去する必要があることから、ほう素除去と比べて捕集材の充填量を多くしている。ほう素除去用カラムとふつ素除去用カラムは連続で接続しており、同じ流量で通水することになり、ふつ素に対する SV 値は小さくなる。

処理後の湧水は再度沈砂槽に戻し、排水処理設備による処理の後、排水した。

処理水中のほう素濃度の定量は、誘導結合プラズマ発光分光分析装置を用い、ふつ素濃度の定量は、イオンクロマトグラフィーを用いた。

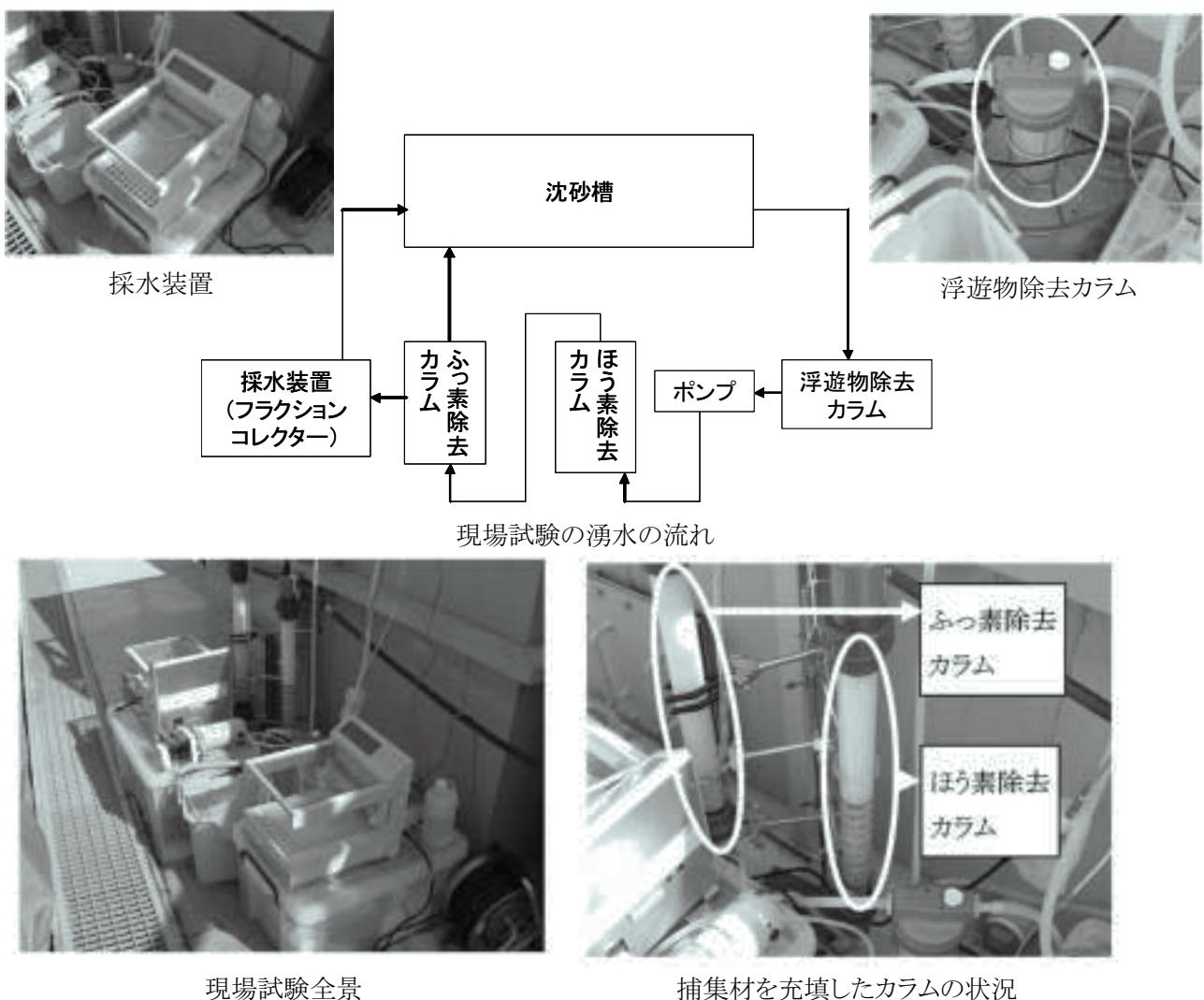


図 4.3 現場（排水処理設備前）での試験の状況

4.3 試験結果

4.2.2 の試験条件による捕集材のふつ素・ほう素吸着性能について、吸着性能つまりカラムの出口濃度の時間変化を示したグラフを図 4.4 に示す。

グラフでは、カラムの出口濃度（吸着後）と入口濃度（吸着前、湧水中濃度と等しい）との比を縦軸に、湧水処理量と捕集材体積の比である通液倍率(BV: Bed Volume)を横軸に示している。また、カラムの出口濃度が入口濃度の 5%、つまり 95%除去したときを破過（これ以上捕集できない状態）とした。

ほう素除去における試験条件①について、捕集材体積 10 cm^3 、SV が 50 h^{-1} のとき、捕集材体積の 760 倍の湧水について、ほう素を湧水中濃度の 95% を除去可能であった。さらに、捕集材体積を 90cm^3 にスケールアップさせた試験条件②で SV を試験条件①の 2.4 倍である 120 h^{-1} で通液させた場合でも、捕集材体積の 780 倍の湧水量について湧水中濃度の 95% を除去可能であり、スケールアップに伴う吸着効率の低下は認められなかった。

一方、ふつ素については、SV が 36h^{-1} の試験条件では捕集材体積 (300cm^3) の 320 倍まで湧水中濃度の 95% 除去が可能なことを確認した。

研究所における湧水中ふつ素濃度は $7.2\sim9.5\text{mg/L}$ であり、河川に放流するためには環境基準値 (0.8mg/L) 以下、すなわち 90% 以上ふつ素を除去する必要がある。今回の試験結果から、90% 以上のふつ素除去が可能であることは確認できたが、溶液中に溶存している高濃度の物質を低濃度まで吸着する場合は、本来の吸着効果が発揮できておらず、現行の排水処理設備における薬剤を用いた凝集沈殿処理方法と比較してコスト的にメリットが判断しにくい状況である。現行の処理方法との併用など、処理効率の向上について検討を進める予定である。

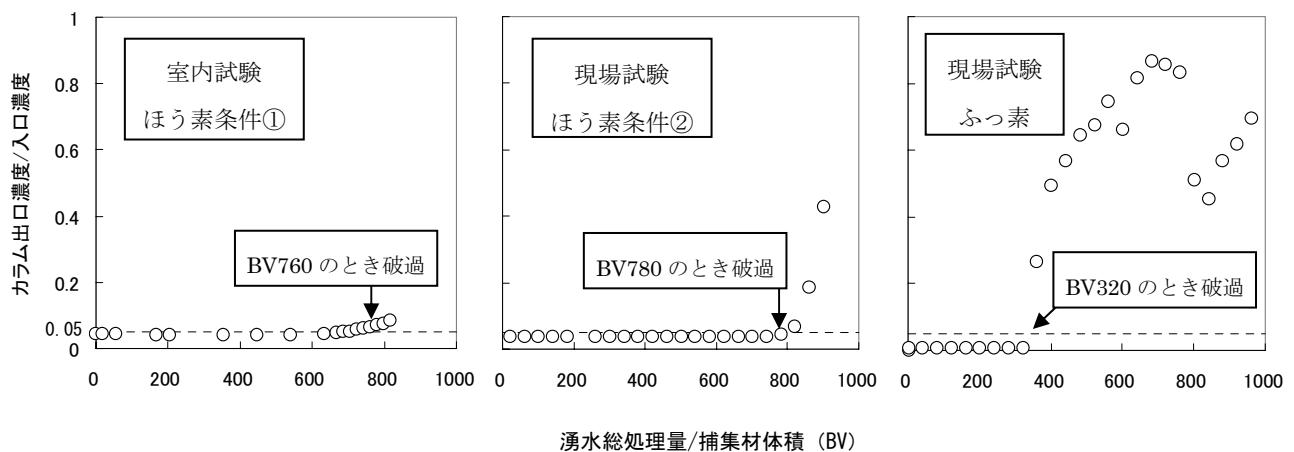


図 4.4 各試験条件におけるカラム出口濃度の時間変化

5. 今後の予定

カラム試験を基に、さらに捕集材の耐久性などを把握するため、規模をスケールアップした試験を行うにあたり、図 5.1 に示すような試験装置を製作した。この試験装置は、処理能力 $0.2\text{m}^3/\text{h}$ （ポンプの能力）であり、洗浄液タンクも設置していることから、捕集材が吸着したふつ素・ほう素を溶離（捕集材から脱着）して再生し、再度吸着試験を行うことが可能である。

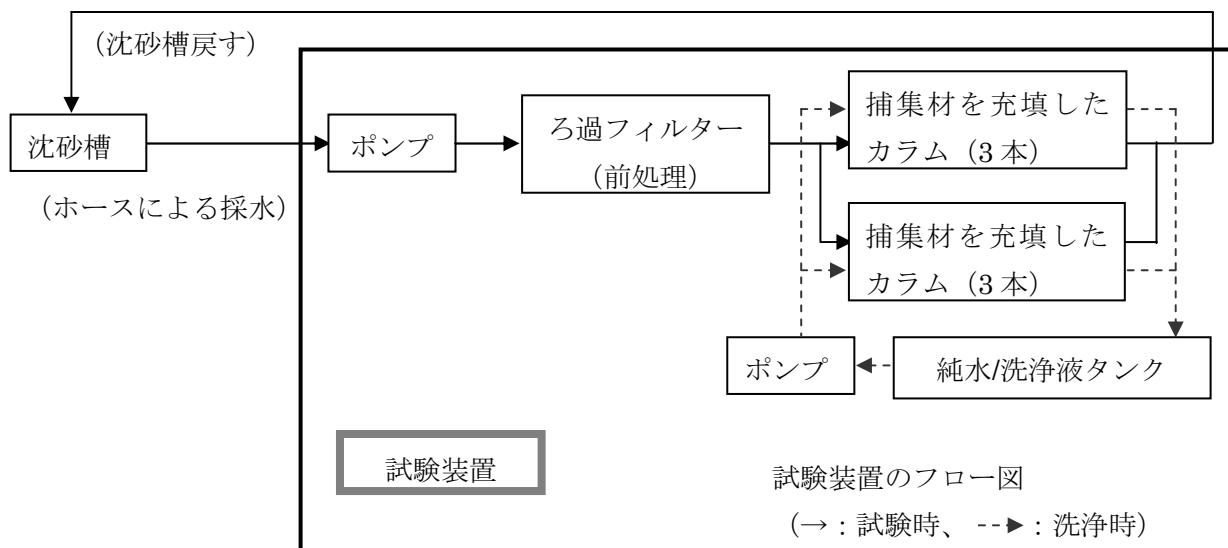


図 5.1 試験装置のフロー図

この試験装置を用いて、今後は以下の 3 点について検討を行っていく予定である。

①捕集材の耐久性の評価

これまでの試験は最大で一昼夜程度であったが、試験期間をさらに長くを行い、処理量の増加による捕集材の耐久性、吸着性能を把握する。

②捕集材の再生利用試験

捕集したふつ素、ほう素を分離して捕集材を再利用することで、資源の有効活用及び捕集材のコスト削減が可能である。再生利用によって吸着性能がどのように変化するか、どの程度まで再生利用が可能かを把握する。

③ふつ素除去の効率化

カラムへの捕集材充填方法の変更による、湧水と捕集材接触面積の増加など、ふつ素除去の効率化の検討を行う。

参考文献

- 1) 原子力委員会：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（1994）
- 2) 原子力委員会：原子力政策大綱（2005）
- 3) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所 地層科学基本計画書、核燃料サイクル開発機構技術報告書、JNC TN7410 2001-018(2002)
- 4) 玉田正男：高分子の放射線加工、原子力 eye Vol.53 No.1 P9～12 (2007)
- 5) 玉田正男：海水からウラン、温泉からスカンジウムーグラフト捕集材による有用金属の回収、原子力 eye Vol.53 No.4 P68～71 (2007)
- 6) 玉田正男：海水中の希少金属の回収、土木施工 2007年3月号 P78～82 (2007)
- 7) 今津雅紀、佐藤稔紀、見掛信一郎、玉井猛、瑞浪超深地層研究所立坑の湧水とその排水方法、地盤工学会第39回地盤工学研究発表会 (2004)
- 8) 竹内真司、鶴田忠彦、竹内竜史、中俣公徳、水野崇、瑞浪超深地層研究所における研究と建設の現状と課題（その2）—パイロットボーリング調査結果の概要—、土木学会平成19年度全国大会第52回年次学術講演会
- 9) 東濃地科学センターホームページ「『瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定書』に基づく排出水等の測定結果」
URL http://www.jaea.go.jp/04/tono/an_miuwater/an_miuwater.html
- 10) 社団法人産業環境管理協会発行、新・公害防止の技術と法規 2006 水質編 (2006)
- 11) 大山卓也、三枝博光、尾上博則、竹内竜史、下茂道人、熊本創、瑞浪超深地層研究所における研究と建設の現状と課題（その3）—パイロットボーリング調査に基づく湧水量予測解析—、土木学会平成19年度全国大会第52回年次学術講演会
- 12) 保科宏行、瀬古典明、笠井昇、岡田健治、植木悠二、玉田正男、弥富洋介、尾方伸久：放射線グラフト吸着材を用いた地下湧水中のホウ素除去特性、日本放射線化学会第50回放射線科学討論会 (2007)

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 質 時 間	メートル キログラム 秒	m kg s
電 流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物 質 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 体 速 度 加 速 波 数	積 平 方 積 立 法 一 メ ト ル 每 秒	$\text{m}^2 \text{m}^{-1} \text{s}$
時 間	度	$\text{m}^{-1} \text{s}$
電 流	度	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$
熱力学温度	度	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-2}$
物 質 量	度	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-3}$
光 度	度	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-4}$
	(物質量の) 濃度	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-5}$
	輝 度	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-6}$
	屈 折 率 (数の)	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-7}$
	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨ	Y	10^{-1}	デ	d
10^{21}	ゼ	Z	10^{-2}	セ	c
10^{18}	エ	E	10^{-3}	ミ	m
10^{15}	ベ	P	10^{-6}	マイ	μ
10^{12}	テ	T	10^{-9}	ク	n
10^9	ギ	G	10^{-12}	ノ	p
10^6	メ	M	10^{-15}	ビ	f
10^3	キ	k	10^{-18}	ア	a
10^2	ヘ	h	10^{-21}	ゼ	z
10^1	デ	da	10^{-24}	ブ	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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
平 周	面 角	ラジアン [a] sr [c]	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} = 1$ [b]
立 波	角		$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = 1$ [b]
周 数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$\text{N} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
圧 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー , 仕事 , 熱量	ジユール	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s
電 荷 , 電 気 量	クーロン	C	$\text{s} \cdot \text{A}$
電位差 (電圧) , 起電力	ボルト	V	W/A
静 電 容	フアラード	F	C/V
電 気 抵 抗	オーム	Ω	V/A
コ ン ダ ク タ ン ス	ジーメンス	S	A/V
磁 束 密 度	ターン	T	Wb/m^2
イ ン ダ ク タ ン ス	ヘンリイ	H	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
セ ル シ ウ ス 温 度	セルシウス度	°C	$\text{cd} \cdot \text{sr} [c]$
光 照 度	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr} [c]$
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2
吸 収 線 量 , 質 量 工 ネ ル ギ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量 , 周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量 , 個人線量当量			$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 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“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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 力 の 度	パスカル	Pa	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
モ ー メ ン ト	ニュートンメートル	N·m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
面 張 力	ニュートン每メートル	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
角 速 度	ラジアン每秒	rad/s	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
加 速 度	ラジアン每平方秒	rad/s ²	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
熱 流 密 度 , 放 射 照 度	ワット每平方メートル	W/m ²	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
熱 容 量 , エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質 量 热 容 量 (比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg·K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質 量 エ ネ ル ギ (比工ネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
熱 伝 導 率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
体 積 工 ネ ル ギ	ジュール每立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電 界 の 強 さ	ボルト每メートル	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
体 積 電 荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
電 気 变 位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘 透 磁 率	ファラド每メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
モ ル エ ネ ル ギ	ヘンリー每メートル	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
モ ル エ ネ ル ギ	ジュール每モル	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
モ ル エ ネ ル ギ	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol·K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
モ ル 热 容 量	クーロン每キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
照射線量 (X線及びγ線)	グレイ每秒	Gy/s	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$
吸 収 線 量 率	ワット每ステラジアン	W/sr	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
放 射 强 度	ワット每平方メートル	W/(m ² ·sr)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
放 射 輝 度	ワット每ステラジアン		

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	$1 \text{B} = (1/2) \ln 10 \text{ (Np)}$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1 \text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{J}$
統一原子質量単位	u	$1 \text{u}=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{kg}$
天文単位	ua	$1 \text{ua}=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{m}$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海 里	里	1 海里=1852m
ノ ッ ト	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
ア ー ル	a	$1 \text{a}=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{m}^2$
ヘ ク タ ー ル	ha	$1 \text{ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$
バ ー ル	bar	$1 \text{bar}=0.1 \text{MPa}=100 \text{kPa}=1000 \text{hPa}=10^5 \text{Pa}$
オ ン グ ス ト ロ ー ム	Å	$1 \text{\AA}=0.1 \text{nm}=10^{-10} \text{m}$
バ ー イ ン	b	$1 \text{b}=100 \text{fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エ ル グ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダ イ ン	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボ ア ズ	P	$1 \text{ P}=1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2=0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
ス ト ー ク	St	$1 \text{ St}=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガ ウ ス	G	$1 \text{ G}=\pm 10^{-4} \text{ T}$
エ ル ス テ ッ ド	Oe	$1 \text{ Oe}=\pm (1000/4\pi) \text{ A/m}$
マ ク ス ウ ェ ル	Mx	$1 \text{ Mx}=\pm 10^{-8} \text{ Wb}$
ス チ ル ブ	sb	$1 \text{ sb}=1 \text{ cd/cm}^2=10^4 \text{ cd/m}^2$
ホ ト フ	ph	$1 \text{ ph}=10^4 \text{ lx}$
ガ ル ル	Gal	$1 \text{ Gal}=1 \text{ cm/s}^2=10^{-2} \text{ m/s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キ ュ リ ー	Ci	$1 \text{ Ci}=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レ ン ト ゲ ン	R	$1 \text{ R}=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラ ド	rad	$1 \text{ rad}=1 \text{ cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レ ム	rem	$1 \text{ rem}=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X 線 単 位	IX unit	$1 \text{ IX unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガ ン マ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジ ャ ン ス キ	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フ エ ル ミ	1 fermi	$1 \text{ fermi}=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メ ト ル 系 カ ラ ッ ツ	1 metric carat	$200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
ト ル ル	Torr	$1 \text{ Torr}=(101325/760) \text{ Pa}$
標 準 大 気 圧	atm	$1 \text{ atm}=101325 \text{ Pa}$
カ ロ リ ー	cal	$1 \text{ cal}=4.184 \text{ J}$
ミ ク ロ ン	μ	$1 \mu=1 \mu\text{m}=10^{-6} \text{ m}$