

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  
(2007年度成果報告書)

(共同研究)

Development of Groundwater Treatment Method Using Radiation-induced Graft  
Polymerization Adsorbent at the Mizunami Underground Research Laboratory  
(Annual Report on 2007 Fiscal Year)  
(Joint Research)

弥富 洋介 島田 顕臣 尾方 伸久 杉原 弘造  
瀬古 典明 笠井 昇 保科 宏行 植木 悠二  
玉田 正男

Yosuke IYATOMI, Akiomi SHIMADA, Nobuhisa OGATA, Kozo SUGIHARA  
Noriaki SEKO, Noboru KASAI, Hiroyuki HOSHINA, Yuji UEKI  
and Masao TAMADA

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

November 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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>)  
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 +81-29-282-5901, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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  
(2007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、島田 顕臣、尾方 伸久、杉原 弘造  
瀬古 典明<sup>+</sup>、笠井 昇<sup>+</sup>、保科 宏行<sup>+\*</sup>、植木 悠二<sup>+</sup>、玉田 正男<sup>+</sup>

(2009年8月28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フッ素（濃度：7.2～10mg/L）、ホウ素（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（フッ素除去）及びイオン交換処理（ホウ素除去）によって環境基準値（フッ素：0.8mg/L、ホウ素：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、2006年度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フッ素・ホウ素除去方法について検討を行っている。

2006年度の研究によって、捕集材を用いて湧水中のフッ素・ホウ素の除去が可能であること、イオン交換樹脂よりも高速処理が可能であること、を確認した。また、研究所の湧水ではフッ素濃度が高く、除去しなければならない割合が高いため、フッ素除去の効率化のためには今後も検討が必要であることが分かった。

2007年度は、ホウ素吸着に特化して、捕集材の耐久性や繰り返し利用試験を行うこととした。具体的に、スケールアップした試験を行うための排水処理試験装置を製作するとともに、その試験装置を用いて、ホウ素除去用捕集材の通液速度の違いによるホウ素の吸着性能評価試験や、捕集材の繰り返し利用時における耐久性や吸着性能を把握する再生利用試験を行った。

その結果、吸着性能評価試験では通液速度を  $SV\ 50h^{-1}$  から  $100h^{-1}$  へ 2 倍に速めても、吸着性能が変わらないこと、捕集材の繰り返し利用に対する耐久性があること、湧水の pH が捕集材の吸着性能に影響を与えることが明らかになった。

---

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

Development of Groundwater Treatment Method Using Radiation-induced Graft  
Polymerization Adsorbent at the Mizunami Underground Research Laboratory  
(Annual Report on 2007 Fiscal Year)  
(Joint Research)

Yosuke IYATOMI, Akiomi SHIMADA, Nobuhisa OGATA, Kozo SUGIHARA  
Noriaki SEKO<sup>+</sup>, Noboru KASAI<sup>+</sup>, Hiroyuki HOSHINA<sup>+\*</sup>, Yuji UEKI<sup>+</sup> and Masao TAMADA<sup>+</sup>

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

(Received August 28, 2009)

The concentrations of fluorine (7.2-10mg/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, must be reduced to the levels below the environmental standards (fluorine:0.8mg/L, boron:1mg/L). Coagulation treatment and ion exchange treatment are applied for fluorine and boron at a current water treatment facility in MIU, respectively. A collaborative research on groundwater treatment for fluorine and boron was started by the Environment and Industrial Materials Research Division, Quantum Beam Science Directorate and the Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate in 2006. This is because the Quantum Beam Science Directorate has synthesized fibrous adsorbents with radiation-induced graft polymerization and applied them to collect rare metals dissolved in hot springs and sea water.

Boron adsorbent synthesized by grafting showed higher removal rate than that of the ion-exchange resin. Additionally, the durability and the repetitive use of the boron adsorbent were evaluated to estimate the capacity of the boron adsorption. Therefore we produced a test equipment to do scale-up test of the adsorbent. Effects of flow rate and the repetitive use on the adsorption capacity of boron were investigated.

As a result, it concluded that the adsorption capacity of the boron adsorbent did not change even when the flow rate increased from SV 50h<sup>-1</sup> to 100h<sup>-1</sup>. In addition, enough durability was confirmed for the repetitive use of the adsorbent. The adsorption capacity of the adsorbent was affected by pH of the groundwater especially in high alkaline range above a pH of 10.

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.

<sup>+</sup> Environment and Industrial Materials Research Division, Quantum Beam Science Directorate

<sup>+\*</sup> Collaborating Engineer

目次

1. はじめに .....	1
2. 放射線グラフト重合法について .....	3
3. スケールアップした排水処理試験装置の製作 .....	4
4. 通液速度の違いによる吸着性能評価試験 .....	5
4.1 試験条件 .....	5
4.2 試験結果 .....	5
5. 捕集材の再生利用試験 .....	7
5.1 試験装置の改良 .....	7
5.2 試験条件 .....	7
5.3 試験結果 .....	7
6. 結論 .....	9
参考文献 .....	10

CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Outline of radiation-induced graft polymerization adsorbent .....	3
3. Produce of the adsorbent test equipment .....	4
4. Test of the adsorption performance of the adsorbent by the difference of flow speed .....	5
4.1 Test conditions .....	5
4.2 Test results .....	5
5. Test of the adsorption performance of the repetition use adsorbent .....	7
5.1 Improvement of the adsorbent test equipment .....	7
5.2 Test conditions .....	7
5.3 Test results .....	7
6. Conclusion .....	9
References .....	10

図目次

図 2.1 捕集材による物質捕集のイメージ.....	3
図 3.1 排水処理試験装置の概要.....	4
図 4.1 吸着性能評価試験の破過曲線.....	6
図 5.1 排水処理試験装置の改良の状況.....	7
図 5.2 再生利用試験の破過曲線.....	8

This is a blank page.

## 1. はじめに

独立行政法人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（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」<sup>1)</sup>及び「原子力政策大綱」<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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、及び深度 300m、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、天然由来のフッ素、ホウ素が含まれているため、放流先河川における環境基準に適合するように、排水処理設備において凝集沈殿処理及びイオン交換処理によってフッ素、ホウ素を除去している。

一方、高崎量子応用研究所に駐在している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（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及び海水中の希少金属の捕集材の開発を行っていた<sup>4)7)</sup>。

これらの状況から、金属捕集・生分解性高分子研究グループと東濃地科学研究ユニットでは、両者による部門間融合研究として、フッ素、ホウ素を除去する捕集材の研究開発や研究所の湧水処理に関する研究を 2006 年度から開始した。

2006 年度においては研究所の湧水を利用した捕集材の通液試験より、湧水中のフッ素・ホウ素とも吸着可能であること、従来のイオン交換樹脂による処理に比べて高速に除去できることが明らかになった。一方、フッ素については、湧水中のフッ素濃度が高いため（7.2～10mg/L）、適用したフッ素除去用捕集材では吸着量が不足し、破過時間が短くなってしまふことから、実用化するためには検討をさらに行う必要があることがわかった<sup>8)</sup>。

この結果を踏まえ、2007 年度は、実用化に向けた検討として、ホウ素除去について先行して取り組むこととし、以下を実施した。

### ①スケールアップした排水処理試験装置の製作

2006 年度に実施した小規模な現場試験から、さらに規模を大きくし、通液量や捕集材量を増加した通液試験を行うため、新たな排水処理試験装置を製作し、研究所の排水処理設備横に仮設置して試験を行った。

### ②通液速度の違いによる吸着性能評価試験

処理の効率化が望めるホウ素の吸着について、捕集材の高速処理の可能性を検討するため、試

験装置を用いて通液速度の違いによる吸着性能試験を実施した。

③捕集材の再生利用試験

捕集材を用いた排水処理の利点として、捕集材の再生利用によるコスト低減が可能であることが挙げられる<sup>7)</sup>。そこで、通液試験後に吸着したホウ素を捕集材から除去し、再度湧水を通液することで、捕集材の再生利用による吸着性能や耐久性を把握する試験を実施した。

以上3点について、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<sup>4)</sup>。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<sup>4)</sup>。

放射線グラフト重合法には同時照射法と前照射法があるが<sup>4)</sup>、本試験では同時照射法と比べてモノマーの単独重合体（モノポリマー）の生成が少なく、照射工程と重合工程とを分離する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、以下の3工程による<sup>4)</sup>（図2.1）。

- 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

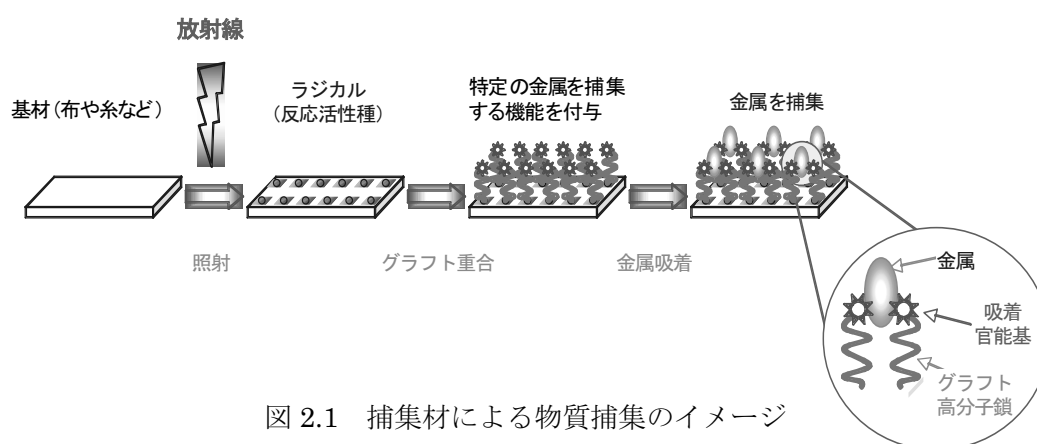


図 2.1 捕集材による物質捕集のイメージ

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、繊維、布等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ー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り、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<sup>4)</sup>。

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試験等がある。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的に利用可能な吸着性能を達成している<sup>4)6)</sup>。また温泉中に含まれている希少金属を選択的に捕集する実証試験も行っており、吸着効果を確認している<sup>7)</sup>。

### 3. スケールアップした排水処理試験装置の製作

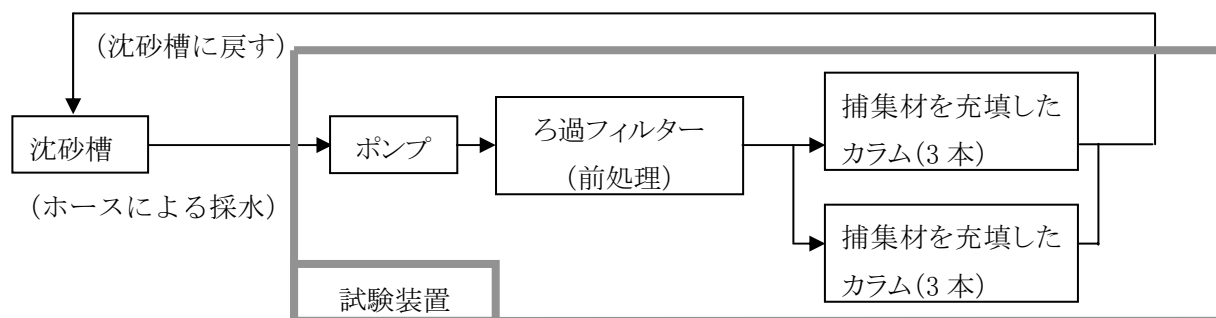
実用化に向けて、これまでの適用試験よりも規模をスケールアップし、通液量及び捕集材量を増量して、高速通液試験や捕集材の耐久性試験における捕集材の吸着性能を把握するための排水処理試験装置を製作した。図 3.1 に試験装置を示す

試験装置は、幅 4.4m、高さ 2m、奥行き 1m であり、送液ポンプ、ろ過フィルター、捕集材を充填するカラム（内径：42mm）を備えている。処理能力は 0.2m<sup>3</sup>/h（ポンプの送液流量）である。

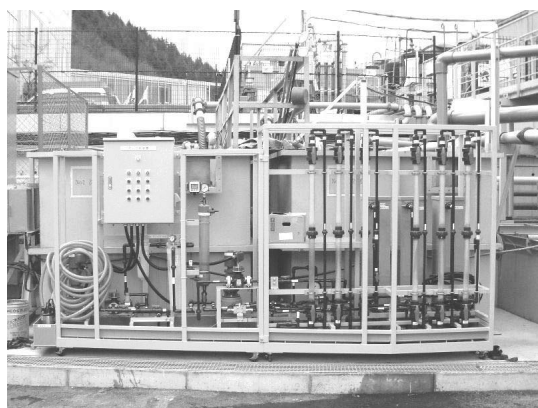
通液試験を行う場合は、排水処理設備の沈砂槽からホースにより採水し、ろ過フィルターによって粒子等を除去した後、湧水を上向流で捕集材に通液して沈砂槽に戻すフローとなっている。カラムは 2 系統に分かれており、1 系統で 3 本のカラムに連続して通液することが可能である。また、捕集材を洗浄して吸着した物質を溶出させるための洗浄ラインも確保しているが、洗浄用の薬剤が排水処理設備に流れると、排水処理設備における処理に影響を与えることが予想されるため、洗浄ラインは使用していない。

安全対策として、配管に一定以上の圧力がかかると、入口側と出口側を短絡させて圧力を抜く安全弁を設置するとともに、配管からの水漏れに備えて、装置下部にドレインパンや排水するためのポンプを設置した。

捕集材通液後の湧水は、配管にあるコックから採水可能な仕組みとなっている。なお、捕集材の充填方法は、特許「水中金属成分の吸着装置及び回収装置」（特許公開 2005-238093）を用いており、カラムの内径の大きさに切った捕集材を重ねた層にスペーサーを挟むことで若干の空間を確保し、通液時の圧力損失を減少させている。



試験装置のフロー図



排水処理試験装置  
（幅 4.4m×高さ 2m×奥行き 1m）

図 3.1 排水処理試験装置の概要

#### 4. 通液速度の違いによる吸着性能評価試験

##### 4.1 試験条件

2006年度に行った現場試験結果から、ホウ素吸着については、イオン交換樹脂よりも高速処理が可能であることが明らかになっており、実用化の面から捕集材の耐久性や繰り返し利用試験を行って詳細な吸着性能を把握して、処理の効率化のための検討を行うことが重要である。したがって、2007年度はホウ素吸着に特化して試験を行うこととした。

3.で製作した試験装置を用いて、ホウ素吸着捕集材を用いた吸着性能評価試験を行った。捕集材は、不織布に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、ホウ素に対して親和性の高いグルカミン基を導入した<sup>9)</sup>。

捕集材の吸着性能を示す指標として、空間速度 (Space Velocity: SV) と通液倍率 (Bed Volume: BV) がある。空間速度 (SV) は、ある時間内における捕集材体積に対する通液量の比を表しており、式 1 のように求める。SV 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。

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

通液倍率 (BV) は、捕集材に通液する前の濃度（吸着前、湧水中濃度と等しい）を  $C_0$  とし、通液後の濃度（吸着後）を  $C$  とし、目標とする  $C/C_0$  における捕集材体積に対する通液量の比を表しており、式 2 のように求める。

$$BV(-) = \frac{\text{処理流量}(m^3)}{\text{捕集材体積}(m^3)} \quad (2)$$

本研究では、捕集材通過後の湧水中の濃度が原水中濃度の 5% を超えた時、つまり捕集材が原水中濃度の 95% を吸着した時を破過（捕集材の吸着能力の限界）として、破過した時 ( $C/C_0$  が 0.05 の時) の BV によって、吸着性能を把握した。

試験条件として、通液流量は 12L/h とし、カラムに充てんする捕集材量を変化させることで、SV を 50 h<sup>-1</sup>、100 h<sup>-1</sup>、200 h<sup>-1</sup>、500 h<sup>-1</sup> と変化させ、捕集材通液後と湧水中のホウ素濃度を ICP-AES によって測定した。

##### 4.2 試験結果

吸着性能評価試験の破過曲線を図 4.1 に示す。この時の湧水の pH は 9.5 でホウ素濃度は 1.3mg/L であった。

この結果より、SV が 50 h<sup>-1</sup>、100 h<sup>-1</sup> においては、捕集材体積に対して BV が約 1000 で破過することが明らかになった。また、SV が 200 h<sup>-1</sup> では BV が約 500、SV が 500 h<sup>-1</sup> では BV が約 50 で破過することが分かった<sup>9)</sup>。

前述 3. の通液試験では、SV が  $50 \text{ h}^{-1}$  において、BV は約 760 で破過することから、単位時間当たりの通液量を 2 倍の  $SV100 \text{ h}^{-1}$  としても、吸着性能が低下しないことが明らかになった。

また、SV が  $200 \text{ h}^{-1}$  以上では、BV は大幅に減少したことから、これ以上の高速通液では捕集材による吸着が追い付かず、湧水中物質がそのまま捕集材を通過してしまい、吸着性能が十分に発揮されないことが分かった。

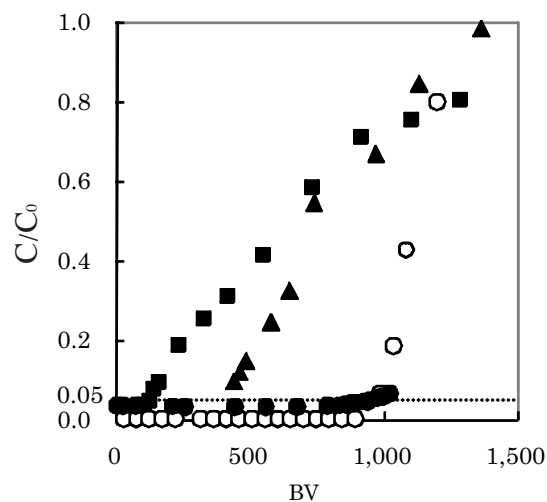


図 4.1 吸着性能評価試験の破過曲線  
 SV :  $50 \text{ h}^{-1}$  (●), SV :  $100 \text{ h}^{-1}$  (○), SV :  $200 \text{ h}^{-1}$  (▲), SV  $500 \text{ h}^{-1}$  (■)

## 5. 捕集材の再生利用試験

### 5.1 試験装置の改良

捕集材の実用化に向けた検討を進めるために、3. で述べた試験装置の捕集材カラムについて、内径 42mm から内径 100mm に拡大し、より実規模に近い条件で、捕集材の再生利用による吸着性能や耐久性を把握できるようにした。図 5.1 に改良内容を示す。

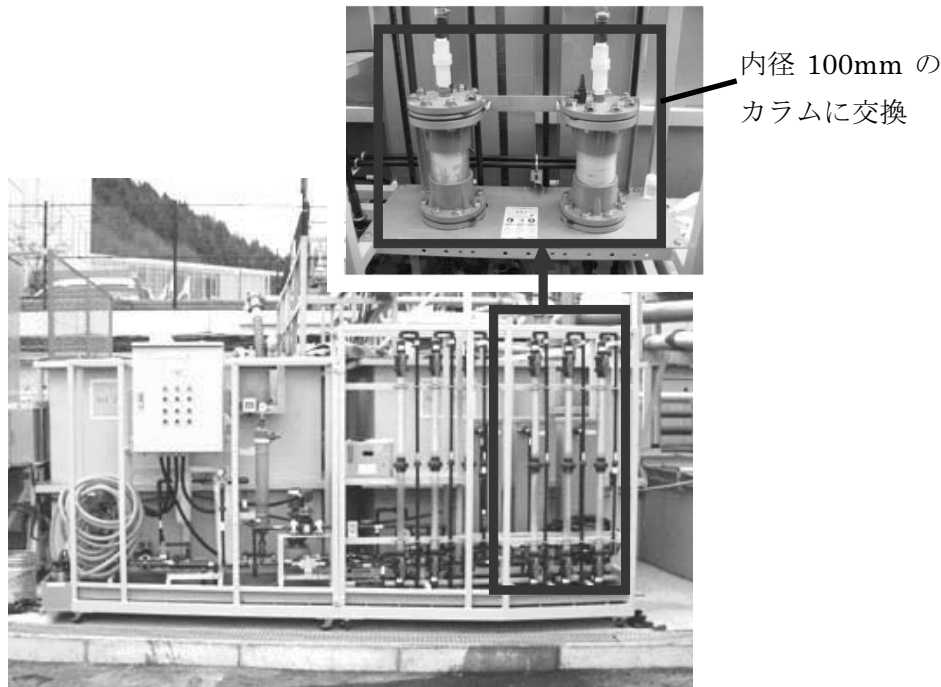


図 5.1 排水処理試験装置の改良の状況

### 5.2 試験条件

改良した試験装置に、ホウ素吸着用捕集材を充填し、1 回目の試験として通液量が 0.25L/min、SV が 20h<sup>-1</sup> の条件において、5 日間で計 56 時間断続的に通液した。その後、高崎量子応用研究所において吸着したホウ素を塩酸によって溶離し、同じ捕集材の 2 回目の試験として再度研究所の試験装置に充填して SV を 20h<sup>-1</sup> として、3 日間で計 50 時間断続的に通液した。いずれの試験においても、捕集材通液後と湧水中のホウ素濃度を ICP-AES によって測定した。

### 5.3 試験結果

再生利用試験の破過曲線を図 5.2 に示す。1 回目の通液試験では、BV が約 100 で破過する結果となった。2 回目の試験では、BV は約 400 となり、1 回目の試験の約 4 倍の湧水処理を行なうことができた。

1 回目と 2 回目の試験の BV が 4 倍も異なった理由としては、湧水の pH がそれぞれ 10.6、9.6 であったことが原因と考えられる。今回の試験は、排水処理設備の最初の工程である沈砂槽の前

に試験装置を仮設置し、沈砂層から湧水を採水して実施したが、試験装置仮設置後に、金属捕集・生分解性高分子研究グループが行った室内試験によって、pH が 10 を超えると吸着性能が急激に低下することが分かった<sup>10)</sup>。これまでの通液試験の pH は、いずれも 10 以下であったが、今回 1 回目の通液試験での pH が 10 を超えたため、捕集材の吸着性能が急激に低下したと考えられる。

再生利用試験によって、湧水の pH の差による吸着性能への影響はあるものの、捕集材を繰り返し利用しても吸着が可能であることは確認できた。しかし、湧水の pH 変動が捕集材の吸着性能に影響を与えることが明らかになった。その対策として、排水処理設備において湧水の pH 調整がなされた後の中性域の湧水を採水するように、試験装置の採水場所を検討する必要がある。そして、中性域の湧水を通液して、捕集材の耐久性や繰り返し利用時の吸着性能を把握するとともに、研究所の湧水のように高 pH の湧水を対象とする場合の処理方法を検討する必要がある。

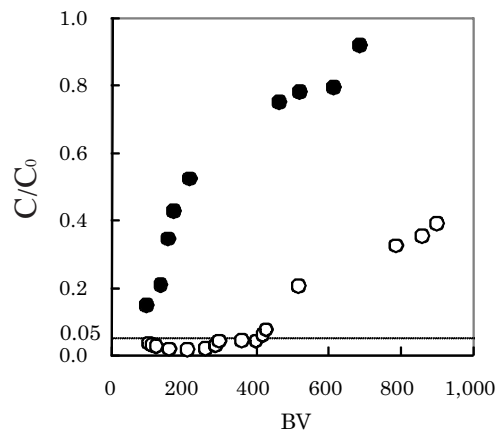


図 5.2 再生利用試験の破過曲線

- : 1 回目の通液試験
- : 2 回目の通液試験

## 6. 結論

放射線グラフト重合法により作成した捕集材を用いて、研究所の湧水中のホウ素除去に関する試験及び検討を行い、以下の結論を得た。

- ・通液速度の速さによる吸着性能試験において、単位時間当たりの通液量を  $SV50 \text{ h}^{-1}$  から  $SV100 \text{ h}^{-1}$  に 2 倍としても、 $BV$  はいずれも約 1000 となり、吸着性能が変わらないことが明らかになった。また、 $SV$  が  $200 \text{ h}^{-1}$  以上では、 $BV$  は大幅に減少したことから、これ以上の流量では捕集材による吸着が追い付かず、吸着性能が十分に発揮されないことが分かった。
- ・捕集材の再生利用試験により、湧水の  $pH$  の差による吸着性能への影響はあるものの、捕集材の再生利用が可能であることが確認できた。しかし、湧水の  $pH$  が捕集材の吸着性能に大きな影響を与えることも明らかになった。今後は、中性域の湧水を用いて通液試験を行うことで、捕集材の耐久性や繰り返し利用時の吸着性能を把握するとともに、研究所の湧水のように高  $pH$  の湧水を対象とする場合の処理方法を検討する必要がある。

さらに、再生利用回数を増やした通液試験を行い、捕集材の耐久性や吸着性能に関するデータの蓄積を進め、実用化に向けた検討を行う予定である。

## 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 地層科学研究基本計画書、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－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) 日本原子力研究開発機構プレス発表「草津温泉から希少金属の回収に成功－放射線グラフト重合で開発した金属捕集布でスカンジウム回収を実証－」（2008年10月7日）  
日本原子力研究開発機構ホームページ  
<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08100703/index.html>
- 8) 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：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）、JAEA-Technology 2008-056（2008）
- 9) 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）
- 10) H.Hoshina, N.Seko, Y.Ueki, M.Tamada, “Synthesis of graft adsorbent with N-methyl-D-glucamine for boron adsorption,” J. Ion Exchange, Vol.18,p 236, (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
物質の量	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 <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
質量濃度 <sup>(a)</sup> 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K	K
光束密度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd s <sup>-1</sup>
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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つ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) ヘルツは周波数に関するみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程に関するみ使用される。  
 (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
粘り度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デカ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	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	1 h=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	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=11.1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=エルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリー)、4.1868 J (「IT」カロリー)、4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

