



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
(2008 年度成果報告書)

(共同研究)

Development of Groundwater Treatment Methods Using Radiation-induced Graft
Polymerization Adsorbent at the Mizunami Underground Research Laboratory
(Annual Report for 2008 Fiscal Year)
(Joint Research)

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

Yosuke IYATOMI, Hiroyuki HOSHINA, Noriaki SEKO, Akiomi SHIMADA
Nobuhisa OGATA, Kozo SUGIHARA, Noboru KASAI, 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

February 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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, 2011

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
(2008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、保科 宏行[※]、瀬古 典明⁺、島田 顕臣、尾方 伸久、
杉原 弘造、笠井 昇⁺、植木 悠二⁺、玉田 正男⁺

(2010年11月29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って発生する湧水(地下水)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、河川に放流している。いずれも排水処理方法としては一般的な方法であるが、施設規模が大きく、沈殿処理やイオン交換処理に要する薬剤反応時間やろ過時間が必要であることから、高速処理が難しい。

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、排水中のフッ素・ホウ素の効率的な除去方法について検討を行ってきた。

これまでの研究によって、以下の成果が得られている。

- ・捕集材を用いて排水中のフッ素・ホウ素の除去が可能である。
- ・ホウ素除去については、イオン交換樹脂よりも高速処理が可能である。
- ・吸着性能は排水のpHに大きく影響される。

上記を踏まえ、2008年度は、ホウ素除去について中性域の排水を用いた捕集材の再生利用試験を行い、吸着性能を把握した。その結果、昨年度行った再生利用試験結果よりも吸着性能が向上したが、再生利用時の性能は低下した。その理由として、フッ素除去後の排水を用いたため、フッ素除去のために添加された薬剤成分がホウ素とともに捕集材に吸着され、ホウ素を溶離する際の希塩酸を通液する過程において捕集材に影響を与えた可能性が考えられる。

さらに、本研究を実施するにあたって設定した目標と、これまで得られた成果との比較および研究所の排水処理を取り巻く状況について考察し、本研究の取りまとめを行った。

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 Methods Using Radiation-induced Graft Polymerization

Adsorbent at the Mizunami Underground Research Laboratory

(Annual Report for 2008 Fiscal Year)

(Joint Research)

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

Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received November 29, 2010)

The concentrations of fluorine (7.2-10mg/L) and boron (0.8-1.5mg/L) dissolved in groundwater pumped from the shafts during excavation of the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU), Tono Geoscience Center, shall be reduced to levels below the environmental standards for fluorine: 0.8mg/L and boron: 1mg/L. Coagulation and ion exchange methods are being applied for fluorine and boron, respectively, at the operating water treatment facility at the MIU. As well, collaborative research on groundwater treatment started in 2006 between the Environmental and Industrial Materials Research Division, Quantum Beam Science Directorate and the Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate on a novel method to remove the fluorine and boron.

The Quantum Beam Directorate has synthesized fibrous adsorbents with radiation-induced graft polymerization and applied the adsorbents to collect rare metals dissolved in hot springs and sea water.

The results of previous testing indicated that the adsorbent was able to remove more than 95% of the boron and fluorine and that performance of adsorbent for boron removal was better than the performance using ion-exchange resin. It was also apparent that the pH of groundwater had an influence on the performance of the adsorbent with respect to boron removal.

Therefore we reran the recycling tests using groundwater from the neutralization tank at the groundwater treatment facility were repeated. The results indicated that the performance of the adsorbent using neutral groundwater for boron removal was higher than using uncontrolled groundwater. However the bed volume (BV) with recycled adsorbent decreased compared to first use. It is thought that sulfur added at the groundwater treatment facility was retained by the adsorbent despite elution, and affected the performance such that repeat usage resulted in decreased efficiency.

In addition, it is considered that the goals established in the first year compared to the results obtained to date, including the status of waste water treatment at the MIU, and summarized the results in this development.

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.

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

* 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. 中性域の排水を用いた捕集材の通液・再生利用試験 | 4 |
| 3.1 中性域の排水を用いた捕集材の通液試験 | 4 |
| 3.1.1 試験条件 | 4 |
| 3.1.2 試験結果 | 5 |
| 3.2 中性域の排水を用いた捕集材の再生利用試験 | 6 |
| 3.2.1 試験条件 | 6 |
| 3.2.2 試験結果 | 6 |
| 4. これまでの研究の取りまとめ | 7 |
| 参考文献 | 9 |

CONTENTS

| | |
|--|---|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of radiation-induced graft polymerization adsorbent | 3 |
| 3. Test of the first use and repetition use adsorbent using neutral groundwater | 4 |
| 3.1 Test of the adsorption performance of the adsorbent using neutral groundwater | 4 |
| 3.1.1 Test conditions | 4 |
| 3.1.2 Test results | 5 |
| 3.2 Test of the adsorption performance of the repetition use adsorbent using neutral groundwater | 6 |
| 3.2.1 Test conditions | 6 |
| 3.2.2 Test results | 6 |
| 4. Summary in this development | 7 |
| References | 9 |

図表目次

| | | |
|-------|----------------------------------|---|
| 図 2.1 | 捕集材の製作工程と物質捕集のイメージ..... | 3 |
| 図 3.1 | 排水処理設備の処理フロー..... | 4 |
| 図 3.2 | 用いた試験装置(左)とカラム(右、内径 100mm) | 5 |
| 図 3.3 | 捕集材とスぺーサー..... | 5 |
| 図 3.4 | 通液試験の破過曲線 | 5 |
| 図 3.5 | 再生利用試験 (pH7) の破過曲線 | 6 |
| 表 4.1 | ホウ素除去用捕集材と吸着樹脂の比較 | 7 |

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」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)には、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。いずれも排水処理方法としては一般的な方法であるが、今後、増加していくと予測される湧水を処理する場合、より大きな施設規模が求められる。また、沈殿処理やイオン交換処理に要する薬剤反応時間やろ過時間が必要であることから、高速処理が難しい。

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(現 環境機能高分子材料研究グループ。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保全・資源確保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⁴⁻⁷⁾。

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排水処理の効率化に関する研究を 2006 年度から開始した。

これまでの通液試験結果より、以下の知見を得ている⁸⁾。

- ①捕集材を用いて、排水中のフッ素・ホウ素を 95%吸着可能である。ホウ素については、市販の吸着樹脂による処理に比べて高速に除去が可能である。フッ素については、排水中のフッ素濃度(濃度:7.2~10mg/L)がホウ素(濃度:0.8~1.5mg/L)と比べて高いため、適用したフッ素除去用捕集材では吸着量が不足、破過時間が短くなってしまうことが明らかになった。
- ②通液速度の速さによるホウ素吸着性能試験において、単位時間当たりの通液量を SV(Space velocity: 通液速度) 50 h⁻¹ から SV100 h⁻¹ に 2 倍としても、BV(Bed Volume: 通液倍率)はいずれも約 1,000 となり、吸着性能が変わらないことが明らかになった。
- ③ホウ素吸着用捕集材の再生利用試験により、捕集材が吸着したホウ素を溶離した後、再度利用してもホウ素を吸着可能であり、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、排水の pH が高いため、捕集材の吸着性能が十分に発揮できないことも明らかになった。その理由として、捕集材の吸着効率は、溶液の pH が 10 を超えると極端に低下してしまうことが挙げられる⁹⁾。また、ホウ酸の酸解離定数(pKa)が 9.24 であり、これより低 pH 側では H₃BO₃ が優勢となるが、pH が 10 となると化学形態が変

化して、 $B(OH)_4^-$ と OH^- が競合して吸着効率が低下することが考えられる¹⁰⁾。

これらの知見を踏まえ、2008年度は、実用化に向けた検討として、ホウ素除去について、pH調整後の中性域の排水を利用して通液速度を変えて吸着効率を把握する試験と、捕集材の再生利用試験によってpHと再生利用における吸着性能の検討を行った。さらに、本研究を実施するにあたって2006年度に設定した目標¹¹⁾と、これまで得られた成果との比較および研究所の排水処理を取り巻く状況について考察し、本研究の取りまとめを行った。

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⁴⁾。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るが、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⁴⁾。作製工程としては、以下の3工程による(図2.1)。

- ①ラジカル生成のための高分子材料(基材)への放射線照射
- 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持つキレート形成基)の化学処理

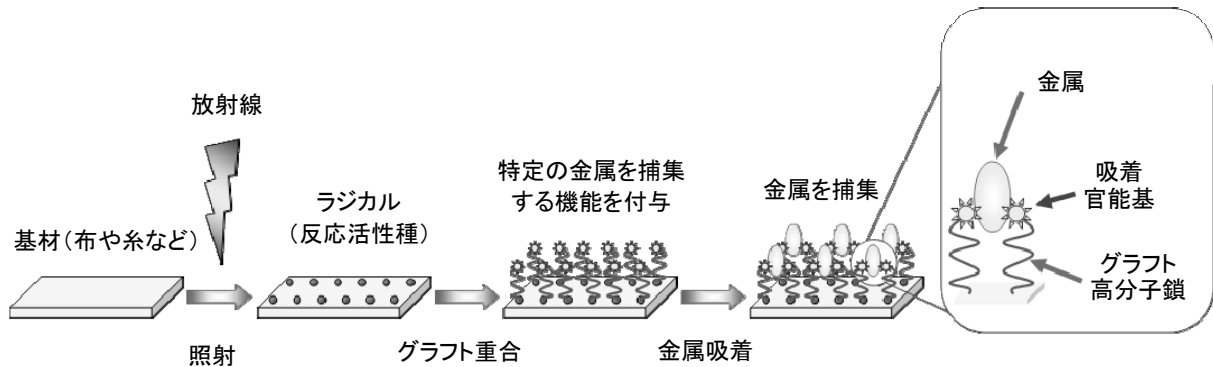


図 2.1 捕集材の製作工程と物質捕集のイメージ⁴⁾

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⁴⁻⁶⁾。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⁷⁾。

3. 中性域の排水を用いた捕集材の通液・再生利用試験

3.1 中性域の排水を用いた捕集材の通液試験

3.1.1 試験条件

ホウ素除去については、これまでの試験結果⁸⁾を踏まえ、はじめにpH調整後の中性域の排水を用いて捕集材の通液試験を実施した。通液試験用の水は、これまで排水処理設備の最初の工程である沈砂槽から採水していた(図 3.1)。しかし沈砂槽中の排水の pH は 8.9~12 と高いため¹²⁾、pH による吸着効率の低下を避ける意味から、今回は排水処理設備の工程の中で排水が中性になっている中和槽から採水することとした。

排水処理設備の工程を図 3.1 に示す。排水は、凝集沈殿処理における硫酸バンド等の添加により pH が低下した後、後工程のイオン交換処理のためにさらに炭酸ガスを注入して、pH が 7 付近となるように管理されている。

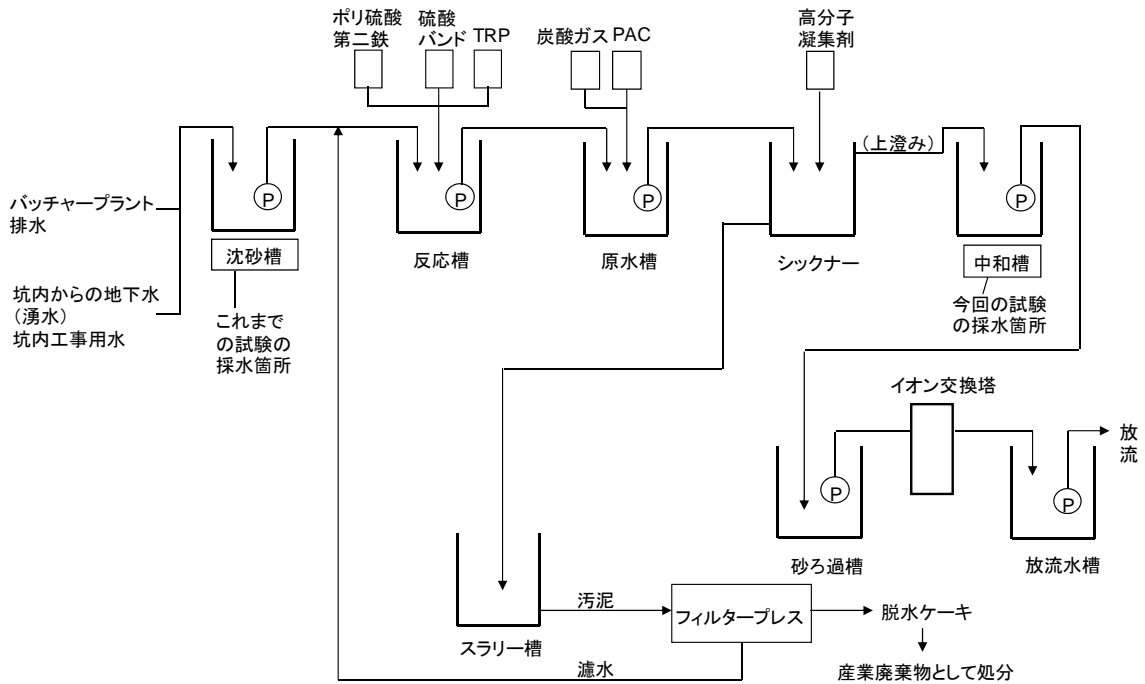


図 3.1 排水処理設備の処理フロー¹¹⁾

図 3.2 に示すように、内径 100mm のカラムを設置した試験装置¹¹⁾にホウ素吸着用捕集材を充填して排水を通液した。通液速度を示す指標として、空間速度 (Space Velocity:SV)を用いた。SVは式 1 によって示される。

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

SV が 30 h⁻¹、50 h⁻¹、100h⁻¹ の条件でフラクシオンコレクターによって通液後の排水を採水した。その後、高崎量子応用研究所において通液後の排水中ホウ素濃度を ICP-AES を用いて測定した。

また、これまでの試験では、捕集材をカラムに充填するときに、捕集材の間にスペーサーを挿入していたが¹³⁾(図 3.3 参照)、SV30 h⁻¹と 50 h⁻¹の試験では、カラムに捕集材のみを充填して通液試験を行い、スペーサーの有無による吸着効率についても把握することとした。

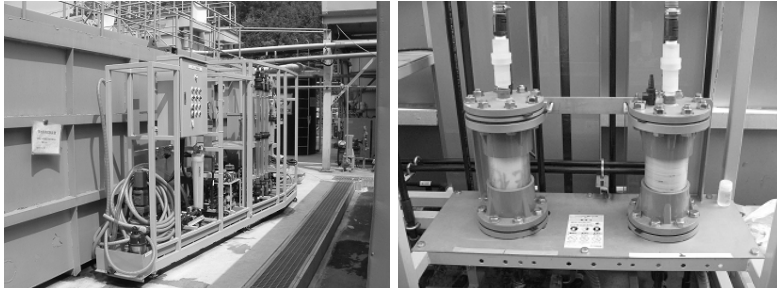


図 3.2 用いた試験装置(左)とカラム(右、内径 100mm)



図 3.3 捕集材とスペーサー
(以前の通液試験の時の写真、白丸内の網目状のものがスペーサー)

3.1.2 試験結果

通液試験の破過曲線を図 3.4 に示す。捕集材の吸着効率を示すために、通液倍率(BV)という指標を用いた。これは、捕集材に通液する前の濃度(吸着前、排水中濃度と等しい)を C_0 とし、通液後の濃度(吸着後)を C として、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。

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

本研究では、捕集材通過後の排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。

本試験結果では、SV が 100h⁻¹の時に BV が 1,250 となった。これは、pH7の排水を用いたためであり、捕集材の吸着効率が大きく発揮できたためと考えられる。

一方、SV30 h⁻¹と 50 h⁻¹では、BV が 500 程度となった。その理由として、捕集材充填においてスペーサーがなかったため、圧力損失によって捕集材を通らずに流路ができてしまったことが考えられる。したがって、スペーサーは送水圧(約 0.4MPa)に対する緩衝材として働き、滑らかな通液に大きく貢献していることが明らかになった。

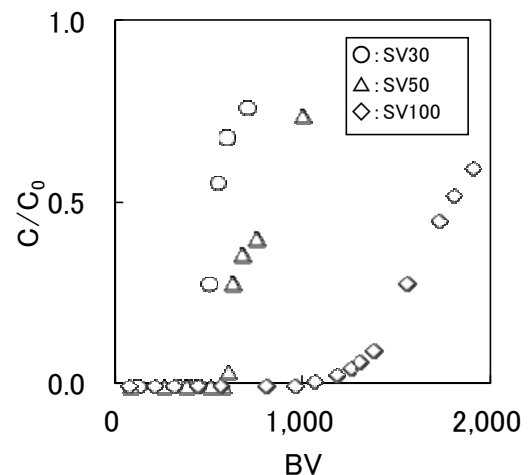


図 3.4 通液試験の破過曲線

3.2 中性域の排水を用いた捕集材の再生利用試験

3.2.1 試験条件

3.1 の試験結果を受け、捕集材とスパーサーをカラムに充填し、SV が 50 h^{-1} 、 100 h^{-1} 、 200 h^{-1} の条件で通液試験を行った。ただし、 $SV100 \text{ h}^{-1}$ の条件では、3.1 の $SV100 \text{ h}^{-1}$ で使用した捕集材を再生利用して捕集材の吸着効率を把握した。この試験には、金属捕集・生分解性高分子研究グループが作成した溶離装置¹⁴⁾によって希塩酸を通液して吸着したホウ素を溶離した捕集材を使用した。

3.2.2 試験結果

通液試験の破過曲線を図 3.5 に示す。

まず、 $SV100 \text{ h}^{-1}$ で前述 3.1 の通液試験(1 回目の使用)と再生利用試験(2 回目の使用)とを比較してみると、1 回目は BV1,250 であったが、2 回目の使用は BV が 600 となり、再生利用後は吸着性能が落ちる結果となった。

2007 年度にも捕集材の再生利用試験を行っているが、この時は排水処理設備の沈砂層から pH 未調整の排水を採水した。1 回目の試験の際の排水の pH は 10.6 であり、2 回目の再生利用の際の pH は 9.6 であった。その結果、捕集材の吸着効率としては、2 回目の使用時の BV が 1 回目よりも高く、排水の pH 低下が吸着効率に影響した可能性はあるものの、捕集材の再生利用による吸着効率の低下は見られないと考えられる¹⁵⁾。

したがって今回の試験において吸着効率が落ちた原因としては、凝集沈殿処理を経た pH 調整済みの排水を採水したため、ホウ素とともに捕集材に吸着された硫酸バンドや高分子凝集剤等の薬剤成分が、ホウ素を溶離する際の希塩酸を通液する過程において捕集材に影響を与えた可能性が考えられる¹⁶⁾。

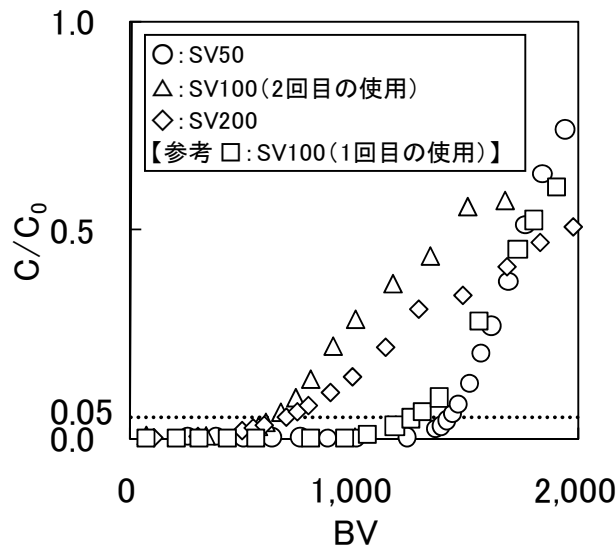


図 3.5 再生利用試験 (pH7) の破過曲線

4. これまでの研究の取りまとめ

本研究を実施するにあたって設定した目標¹¹⁾と、これまで得られた成果との比較及び研究所の排水処理を取り巻く状況について考察する。

まず、捕集材による処理水中の濃度として、フッ素は 0.4~0.5mg/L 程度、ホウ素は 0.5mg/L 程度を目標として設定した。捕集材の吸着性能を把握した通液試験を実施してきた結果、ホウ素除去については、排水中濃度の 95%が除去可能であり、本年度の試験において SV が 100h⁻¹の時に BV1,500 という結果が得られた。

ここで、ホウ素除去用捕集材の吸着容量と既往の研究¹⁷⁾における吸着樹脂の吸着容量との比較を表 4.1 に示す。この表における BV は、原水濃度の 95%を吸着して破過し、式(2)によって計算したものである。また、吸着容量は式(3)を用いた。

$$\text{単位体積当たりの吸着容量}[\text{mg/g}] = \frac{\text{流量}[\text{L}] \times \text{原水濃度}[\text{mg/L}] \times (1 - C/C_0)}{\text{吸着材重量}[\text{g}]} \quad (3)$$

表 4.1 ホウ素除去用捕集材と吸着樹脂の比較

| 種類 | | SV(h ⁻¹) | BV(-) | 単位体積当たりの吸着容量 (mg/g) | 条件 |
|---------------------|-----------------|----------------------|-------|---------------------|-------------------------------|
| 本研究で使用した捕集材 | | 100 | 1,251 | 4.90 | ホウ素濃度1.05~1.15mg/L、pH7に調整した湧水 |
| | | 50 | 1,408 | 6.94 | |
| 吸着樹脂 ¹⁷⁾ | Diaion CRB02 | 20 | 263 | 4.22 | ホウ素濃度5mg/L、pH 8.2の模擬海水 |
| | | 15 | 374 | 6.10 | |
| | | 10 | 383 | 6.27 | |
| | Dowex-XUS 43594 | 20 | 303 | 4.08 | |
| | | 15 | 454 | 5.82 | |
| | | 10 | 500 | 6.69 | |

表 4.1 より、捕集材の SV50h⁻¹での結果と吸着樹脂の結果を比較すると、原水の初期濃度の差はあるが、捕集材の方が高い吸着容量を示している。また、吸着樹脂は SV が 2 倍になると吸着容量は 33%~40% 減少するが、捕集材は吸着樹脂の SV の 5 倍の速さの 100 h⁻¹となっても 30%の減少にとどまっている。これより、環境基準(1mg/L)を考慮したときに、捕集材は吸着樹脂と比べて低濃度のホウ素含有排水を高速に処理することで、処理の効率化が可能であるといえる。

フッ素についても、SV が 36h⁻¹の時に BV320 という結果が得られた。排水中濃度の 95%を除去でき、ホウ素濃度の目標も達成可能であることが確認できた。

次に、排水処理設備の処理能力に関して、ホウ素については一般的なイオン交換処理の吸着性能よりも優位であることが確認できたことから、排水処理設備の処理能力の向上は可能である。一方、フッ素については、排水中のフッ素濃度がホウ素濃度と比べて高いため、放流先河川において環境基準値以下にするためには排水中のフッ素濃度を 1/10 程度まで低下させる必要がある。現行の捕集材では吸着容量が速く限界に達してしまうことから、現行の研究所における凝集沈殿処理と比較してコストの優位性は

見えにくい。また、捕集材の大量合成方法の確立の課題もあることから、当面は捕集材が研究所の排水処理に適用できる可能性は低い。これらのことから、研究所における現場試験などの部門間協力研究は2009年度をもって終了することとした。

なお、量子ビーム応用研究部門では、捕集材によるホウ素処理技術のニーズを広く探索し、大量合成方法の開発を継続して行い、産業利用の可能性について引き続き検討していく。

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(2000)
- 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 p.9-12(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 p.78-82(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, 保科宏行, 瀬古典明, 島田顕臣, 尾方伸久, 杉原弘造, 笠井昇, 植木悠二, 玉田正男:放射線グラフト捕集材を用いた湧水中フッ素・ホウ素除去効率化の検討, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.9, No.3, p.330-338(2010)
- 9) H.Hoshina, N.Seko, Y.Ueki, M.Tamada, “Synthesis of graft adsorbent with N-methyl-D-glucamine for boron adsorption”, J. Ion Exchange, 18, p.236-239 (2007)
- 10) 大山聖一, 阿部圭子, 大隅仁, 排水中微量元素の吸着処理プロセスの開発(その2)-多孔質ジルコニウム吸着剤の吸脱着特性評価-, 電力中央研究所報告 V04013(2005)
- 11) 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)
- 12) 「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定書」に基づく排水等の測定結果, 日本原子力研究開発機構東濃地科学センターホームページ
URL:http://www.jaea.go.jp/04/tono/an_miuwater/an_miuwater.html
- 13) 特許「水中金属成分の吸着装置および回収装置」, 特許公開 2005-238093(2005)
- 14) Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Preliminary Evaluation of Fibrous Boron Adsorbent with Groundwater, JAEA Takasaki Annual Report 2007, JAEA-Review 2008-055 p.40, Japan Atomic Energy Agency(2008)
- 15) 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: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), JAEA-Technology 2009-054(2009)
- 16) Yosuke Iyatomi, Hiroyuki Hoshina, Noriaki Seko, Noboru Kasai, Yuji Ueki, Masao Tamada, Removal of Fluorine and boron from groundwater using radiation-induced graft polymerization adsorbent at Mizunami underground research laboratory, Proceedings of The 13th International Conference on

- Environmental Remediation and Radioactive Waste Management(ICEM2010), in press (2010)
- 17)N.Kabay, S.Sarp, M.Yuksel, O.Arar, M.Bryjak, “Removal of boron from seawater by selective ion exchange resins”, Reactive and Functional Polymers, 67, p.1643–1650 (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 |
| 物質的量 | 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 |
| 体積 | 立方メートル | m ³ |
| 速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | m/s ² |
| 波数 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| 密度, 質量密度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | kg/m ² |
| 比体積 | 立方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 |
| 磁界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量濃度 ^(a) , 濃度 | モル毎立方メートル | mol/m ³ |
| 質量濃度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m ² |
| 屈折率 ^(b) | (数字の) | 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) ともよばれる。
 (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 |
| 立体角 | 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, 電流量 | 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 | ウエーバ | 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 |
| 光照度 | ルーメン | lm | | cd sr ^(c) |
| 放射線量 | ルクス | lx | | lm/m ² |
| 放射線種の放射能 ^(f) | ベクレル ^(d) | Bq | | m ² cd s ⁻¹ |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, 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 | カタール | 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) ヘルツは周期現象についての、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 |
| 粘力のモーメント | パスカル秒 | Pa s | m ⁻¹ kg s ⁻¹ |
| 表面張力 | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ⁻² |
| 角速度 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角加速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹ |
| 熱流密度, 放射照度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻² |
| 熱容量, エントロピー | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 比熱容量, 比エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 熱伝導率 | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 体積エネルギー | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 電界の強さ | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ³ kg s ⁻² |
| 電荷密度 | ボルト毎メートル | V/m | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 表面電荷 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ³ 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 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ² s A |
| 透磁率 | ファラド毎メートル | F/m | m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| モルエネルギー | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹ |
| 吸収線量率 | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ s A |
| 放射線強度 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射線輝度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m ² sr) | m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³ |
| | カタール毎立方メートル | 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 | 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 ² =10 ⁴ m ² |
| リットル | L, l | 1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1 t=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 | 1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J |
| ダルトン | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ 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 ⁻¹⁰ m |
| 海里 | M | 1 M=1852 m |
| バイン | b | 1 b=100 fm 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 =0.1 Pa s |
| ストークス | St | 1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹ |
| スチルブ | sb | 1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻² |
| ファ | ph | 1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx |
| ガル | Gal | 1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² |
| マクスウェル | Mx | 1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb |
| ガウス | G | 1 G=1 Mx 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=1 cGy=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 f=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 | 1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロン | μ | 1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m |

