

放射線グラフト重合装置を用いたセシウム吸着材の 作製とフィールド試験

Pilot-scale Synthesis for Radioactive Cesium Adsorbents
by Radiation Graft Polymerization and Their Field Tests

笠井 昇 岩撫 暁生 植木 悠二 佐伯 誠一
保科 宏行 瀬古 典明

Noboru KASAI, Akio IWANADE, Yuji UEKI, Seiichi SAIKI
Hiroyuki HOSHINA and Noriaki SEKO

量子ビーム応用研究部門
環境・産業応用量子ビーム技術研究ユニット
Environment and Industrial Materials Research Division
Quantum Beam Science Directorate

February 2014

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, 2014

放射線グラフト重合装置を用いたセシウム吸着材の作製とフィールド試験

日本原子力研究開発機構

量子ビーム応用研究部門 環境・産業応用量子ビーム技術研究ユニット

笠井 昇、岩撫 暁生^{※1}、植木 悠二、佐伯 誠一

保科 宏行^{※2}、瀬古 典明

(2013年11月8日 受理)

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性セシウムについては、半減期が長く、早期の除染が必要である。我々は、放射線グラフト重合法を適用して、セシウムに対して親和性が高い、リンモリブデン酸アンモニウムを担持した吸着材を開発した。

実験室レベルで最適化した吸着材の作製条件をもとに150倍程度スケールアップしたベンチスケール規模の重合装置により、実験室規模の1,000倍量に相当する吸着材を作製し、実験室で作製したものと性能を比較評価した。また、作製した吸着材を用いて環境水中に溶存している放射性セシウムの吸着性能評価を福島県内でフィールド試験により行った。重合装置により得られた吸着材は、1 ppmの安定性セシウムの水溶液を用いた吸着試験で、90%以上の吸着率を示した。また、吸着材を筒状のカラムに充填した吸着容量評価試験より、吸着材体積の3,000倍量の汚染水中のセシウムを吸着できることがわかった。さらに、福島県内で実施したフィールド試験では、水中に溶存する放射性セシウムを検出限界値以下まで除去できることを明らかにした。

高崎量子応用研究所（駐在）：〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

※1：博士研究員

※2：技術開発協力員

Pilot-scale Synthesis for Radioactive Cesium Adsorbents by Radiation Graft Polymerization and Their Field Tests

Noboru KASAI, Akio IWANADE^{*1}, Yuji UEKI, Seiichi SAIKI, Hiroyuki HOSHINA^{*2}
and Noriaki SEKO

Environment and Industrial Materials Research Division
Quantum Beam Science Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received November 8, 2013)

On March 11th, 2011, the accidents of Fukushima Dai-ichi nuclear power plants were occurred by the Great East Japan Earthquake, and the large amount of radioactive species were spread on their circumstances. To remove their radioactive species which have long radioactive half-life from the circumstances as rapidly as possible, we developed novel radioactive cesium adsorbents containing ammonium 12-molybdophosphate, which had adsorption selectivity for cesium ion, by radiation grafting method. The bench-scale equipment 150 times as large volume as laboratory scale was established for graft polymerization. The radioactive cesium adsorbents 1,000 times as large as laboratory scale were successfully synthesized with the bench-scale equipment. At batch adsorption test for 1 ppm non-radioactive cesium aqueous solution, more than 90% cesium ion could be removed by the developed adsorbent, and at column adsorption test for the same cesium solution with up to 3,000 times as much volume as the adsorbent volume, the cesium concentration could be reduced below 1%. Moreover, the adsorption performance with radioactive cesium in environmental water was evaluated at field tests in Fukushima Prefecture. As a result, the adsorbents could successfully remove radioactive cesium dissolved in environmental water below the detection limit of radioactivity concentration.

Keywords: Cesium Adsorbent, Radiation Graft Polymerization, Adsorption Test, Ammonium 12-Molybdophosphate, Field Test, Radioactive Cesium

※ 1 Post-Doctoral Fellow
※ 2 Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. セシウム (Cs) 吸着材の作製	2
2.1 Cs 吸着材の作製方法	2
2.2 放射線グラフト重合装置による Cs 吸着材の作製	2
2.2.1 基材の調整	4
2.2.2 照射方法	5
2.2.3 モノマー溶液の調整	5
2.2.4 グラフト重合方法	6
3. Cs 吸着材の吸着性能評価	10
3.1 バッチ試験での評価	10
3.2 カラム試験での評価	12
4. Cs 吸着材を用いたフィールド試験	14
4.1 伊達市立富成小学校プール水の放射性 Cs の吸着試験	14
4.2 福島大学附属幼稚園プール水の除染	16
4.3 飯舘村での池の水を用いた放射性 Cs の吸着試験	18
4.3.1 バッチ試験での評価	19
4.3.2 カラム試験での評価	20
5. まとめ	23
謝辞	24
参考文献	25

Contents

1. Introduction	1
2. Production of Cesium (Cs) Adsorbent	2
2.1 Production Method of Cs Adsorbent	2
2.2 Production of Cs Adsorbent by Graft Polymerization Equipment	2
2.2.1 Preparation of Base Material	4
2.2.2 Irradiation Method	5
2.2.3 Preparation of Monomer Solution	5
2.2.4 Graft Polymerization by Equipment	6
3. Performance Evaluation of Cs Adsorbent	10
3.1 Evaluation by Batch Experiment	10
3.2 Evaluation by Column Test	12
4. Field tests in Fukushima Using Cs Adsorbent	14
4.1 Adsorption Test of Radioactive Cs to Swimming Pool Water of Tominari Elementary School in Date-shi	14
4.2 Decontamination to Swimming Pool Water of Kindergarten Attached to Fukushima University	16
4.3 Adsorption Test of Radioactive Cs Using Water of Pond in Iitate-mura	18
4.3.1 Evaluation by Batch Experiment	19
4.3.2 Evaluation by Column Test	20
5. Conclusion	23
Acknowledgements	24
References	25

1. はじめに

量子ビーム応用研究部門 環境機能高分子材料研究グループでは、放射線グラフト重合法を活用して、水中に溶存する金属イオンを選択的に、効率よく吸着させることが可能な材料開発を行っている。放射線グラフト重合は、高エネルギーの放射線を照射し、基材となる高分子材料中に活性種（ラジカル）を生成させた後、ラジカルとモノマーを反応させる手法である。この重合により、高分子基材から枝のように伸びたグラフト鎖が導入される。この方法は、反応開始時に触媒を使用しないため、環境に優しく、触媒に起因する有害物質が残存しないことや、基材の形状や性質を保持したまま新たな機能を導入出来る優れた手法である。例えば、基材に不織布のような繊維状の基材を使用すると、接触面積が大きい利点から、液体の通過が良好で、水中の金属イオンの吸着に優れた特性を有する金属吸着材料の製作が可能となる。また、作製した金属吸着材は、特に低濃度の金属イオンに対して高い効果があり、海水中からのウランの捕集⁽¹⁾⁽²⁾や温泉水中からのスカンジウムの捕集⁽³⁾⁽⁴⁾など有用金属の回収、および水中からのホウ素⁽⁵⁾、ヒ素⁽⁶⁾⁽⁷⁾、カドミウム⁽⁸⁾などの有害金属の除去技術に適応されている。

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故において、環境中へヨウ素やセシウム（Cs）などの放射性物質が放出され、重大な問題となった。中でも放射性Csの半減期は、Cs-134で2.1年、Cs-137で30.1年と長く、環境の負荷低減には、早期の除染が必要である。我々は、放射線グラフト重合法を適用して、セシウムに対して親和性が高い、リンモリブデン酸基⁽⁹⁾を不織布基材に導入した繊維状の吸着材を開発⁽¹⁰⁾し、飛散した放射性物質の除染材料として活用するため、Cs吸着材の量産化を試みた。本稿では、実験室での重合条件を反映させてベンチスケール規模（30L槽）の重合装置により、Cs吸着材のバッチ方式による作製試験を行い、実験室規模の1,000倍量に相当するCs吸着材の作製方法および作製した吸着材の特性について報告する。また福島県内でのフィールド試験により、作製したCs吸着材による放射性Csの吸着性能評価を行った結果についても報告する。

2. セシウム (Cs) 吸着材の作製

2.1 Cs 吸着材の作製方法

放射線グラフト重合法による Cs 吸着材の作製方法は、Fig.1 に示すように、高分子基材に γ 線を照射してラジカルを生成させた後、リンモリブデン酸アンモニウム (AMP) を混ぜたモノマーと反応させ、グラフト鎖 (モノマーの重合体) を成長させる。反応終了後に洗浄を行い、担持されていない AMP を除去し、乾燥させて Cs 吸着材を得る。今回、モノマーとしてアクリロニトリル (AN) とグリシジルメタクリレート (GMA) を用い、2 種類の AMP を担持した繊維状吸着材を作製した。

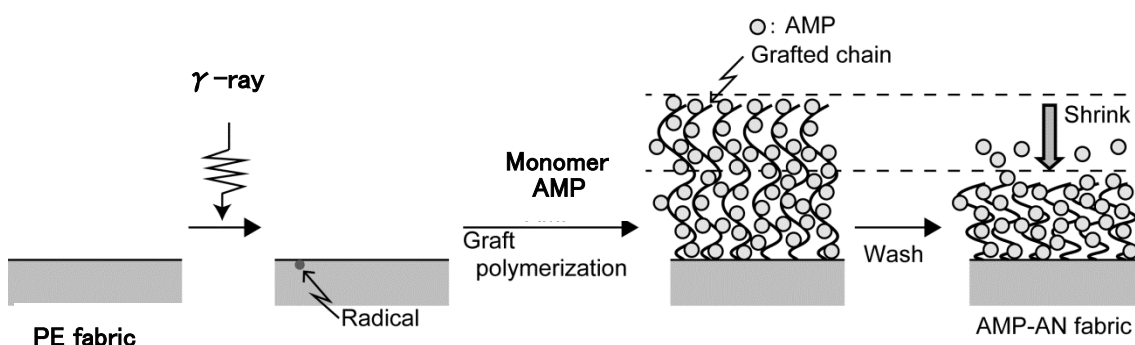


Fig.1 Preparation scheme for nonwoven fabric impregnated with an inorganic ion exchanger (AMP)

2.2 放射線グラフト重合装置による Cs 吸着材の作製

重合装置による吸着材の作製においては、Fig.2 に示す手順により行った。

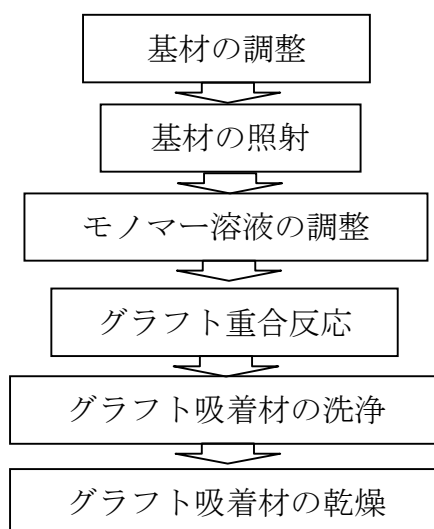


Fig.2 Production procedure of Cs adsorbent

使用した重合装置の反応槽（30 L）を Fig.3 に示す。外側が網状で中心部が穴の空いたパイプ（上部は反応時に蓋をする）の反応治具（Fig.4-a）が Fig.4-b に示すように反応槽に取り付けられている。反応液は Fig.5 に示すように穴の空いた反応治具の中心から外側に所定時間吹き出された後、循環ポンプの回転を逆転させることで反応溶液は所定時間反応治具に吸い込まれる。この循環と反応槽の下部からの窒素ガスのバブリングによる攪拌効果により基材を均一に反応させる。また、反応槽は、ヒーターにより加熱して槽内のモノマー溶液を加温する方式のため冷却機能を有しない。このため、温度調節器の設定温度を調節することにより目標の温度を得る方式である。

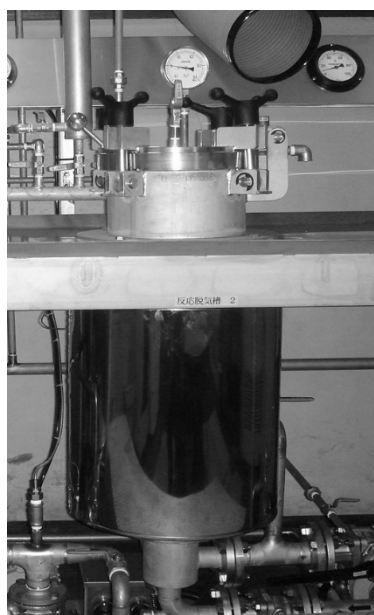


Fig. 3 Reaction vessel



Fig. 4-a Jig for reaction vessel

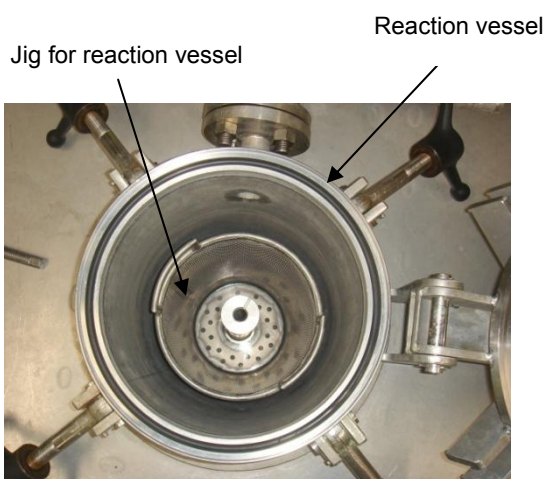


Fig.4-b Inside of a reaction vessel

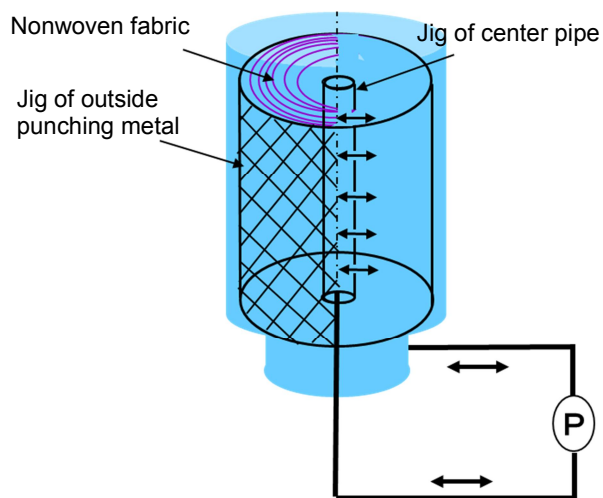


Fig.5 Circulation of monomer solution in reaction vessel

2.2.1 基材の調整

吸着材の基材はポリエチレン製不織布（倉敷繊維加工(株)製、EX-02：繊維径約 13 μm ）を用いた。幅 30 cm で 100 m 巻きの基材を 10 m の長さに切り出し、ポリエステル製メッシュ型ネット（(株)セミテック製、TB-15）をシート状の不織布と交互に挟み込むようにロール状に巻き、インシュロックにより固定した(Fig.6)。ネットを不織布の間に挟み込むことにより、不織布の重合時の変形や重合による基材同士の接着を防止できる。

実験室規模の試験では、グラフト重合反応率を評価するために、切り出した基材の反応前後の重量増加によりグラフト率として算出している。本スケールにおける反応率は、巻物状の基材に一定間隔で不織布の小片を挟み込み、重合前後の重量変化からグラフト率を算出した。概略を Fig.7 に、作業風景を Fig.8 及び 9 に示す。巻物状にした基材はポリエチレン製の袋に入れ、窒素置換により脱酸素化を行った。

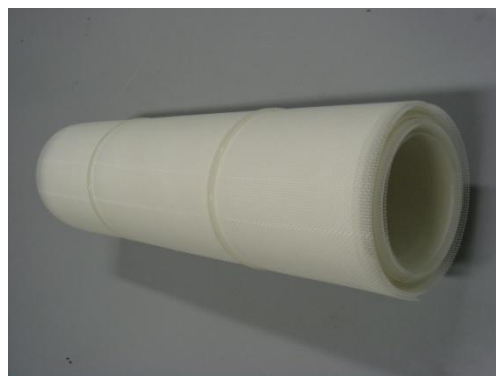


Fig.6 Roll of nonwoven fabric

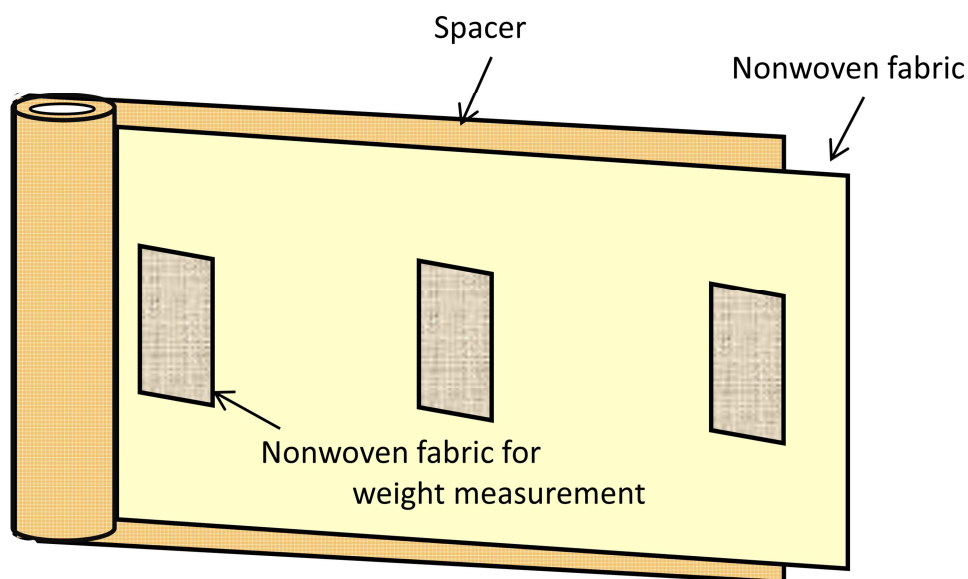
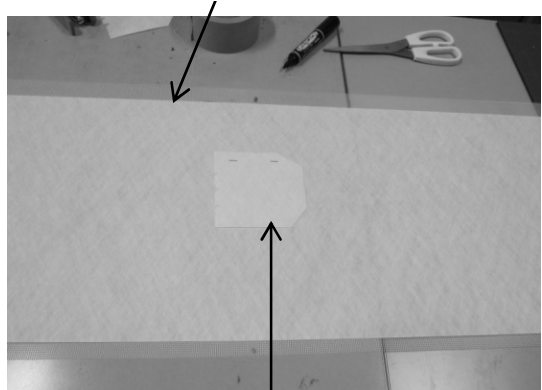


Fig.7 Structure outline of a roll

Nonwoven fabric



Nonwoven fabric for weight measurement

Fig.8 Attachment of nonwoven fabric for weight measurement



Fig. 9 Roll up of nonwoven fabric

2.2.2 照射方法

巻物状にした基材は、発泡スチロール製の照射容器にドライアイスとともに入れ、高崎量子応用研究所コバルト 60 ガンマ線照射施設において Fig.10 に示すようにガンマ線照射を行った。

なお、巻物全体が均等な線量になるように照射の途中で前面と後面を 180° 回転させた。

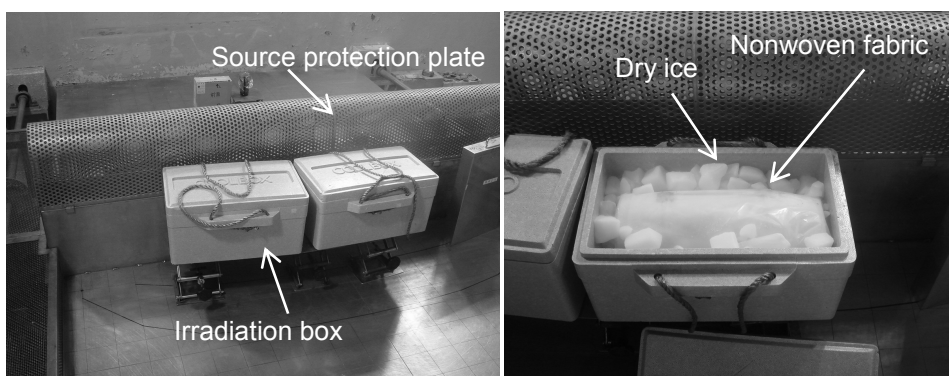


Fig.10 Irradiation of nonwoven fabric by γ -ray

今回の線量 200 kGy に対しては、便宜上 10

kGy/h の線量率の位置で 8 時間照射した後、反転させて更に 12 時間照射した。照射後の巻物状基材は -70 °C の冷凍庫で保存した。

2.2.3 モノマー溶液の調整

グラフト重合におけるモノマー溶液は下記組成に調合したものをポリ容器に入れ、AMP を均一に分散させるためホモジナイザーで 10 分間攪拌した後、用いた。この操作を 2 回行い、合計反応溶液を 26 L とした。

<モノマー組成>

Fig.1 に示したグラフト重合により基材にグラフト鎖を形成する方法として、AN と GMA の2種類のモノマーを別々に用いた。グラフト鎖の形成に AN を用いたものを AN タイプ、GMA を用いたものを GMA タイプとし、2タイプの Cs 吸着材を作製した。実験室規模では、いずれのタイプもモノマー、溶媒、界面活性剤、AMP の組成を 50:50:0.8:2.5 で合成を行った。今回の試験でも同じ組成を用いたが反応槽のモノマー溶液量を 26L で反応させるため、モノマーと溶媒は重量を容積に換算して調合した。

(1) AN タイプ

- ・ AN : 15 L
- ・ ジメチルスルホキシド (DMSO) : 11 L
- ・ 界面活性剤 (Tween80) : 200 g
- ・ AMP : 600 g

(2)GMA タイプ

- ・ GMA : 13 L
- ・ DMSO : 13 L
- ・ Tween80 : 220 g
- ・ AMP : 700 g

2.2.4 グラフト重合方法

(1) 巻物基材の反応槽への装填

冷却下で保管していた照射済みの巻物状基材を取り出し、巻物を固定したインシュロックを切断した後、反応治具の中心(穴あきパイプ)に巻物状基材を差し込み装填した(Fig.11)。



Fig. 11 Installation of irradiated nonwoven fabric to reaction vessel

(2) グラフト重合条件

反応槽にモノマー溶液を注入した後、窒素ガスで1時間バブリングを行い、モノマー中の脱酸素化を行った。酸素濃度計（新コスモス電機(株)製：XP-3180E）で反応槽の排気口の酸素濃度が0 vol%であることを確認後、照射基材を反応槽に装填した。重合中は、窒素ガスを4 L/minで反応槽に流通した状態でモノマーを加温させて行った。重合は、ANタイプとGMAタイプともに温度50~60℃の範囲で、ANタイプで4時間、GMAタイプで1時間反応を行った。重合時の温度変化の一例をFig.12に示す。加温開始前のモノマー溶液温度が27℃に対して温度調節器の設定温度を40℃にした時に10分で50℃に達し、最大59℃になった。その後徐々に温度が低下したため、途中で設定温度を49℃に再設定し、30分から4時間の反応時間中の温度を49~55℃に保持することができた。

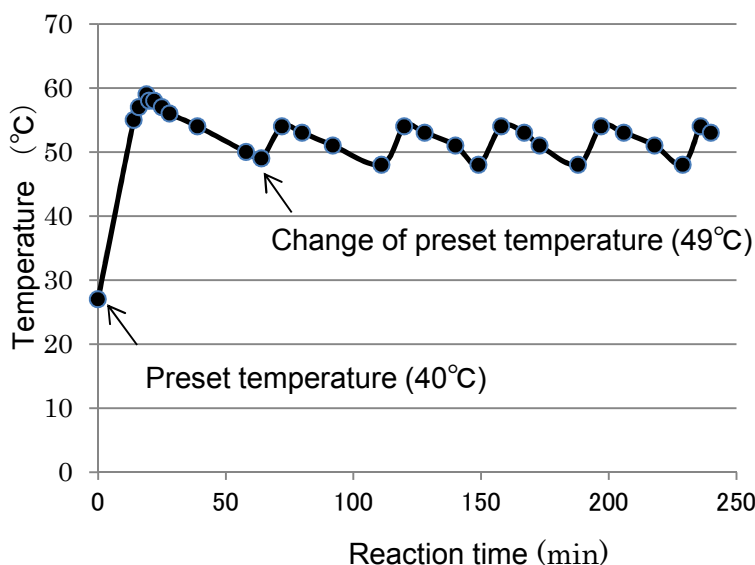


Fig.12 Temperature change in a reaction vessel

(3) 吸着材の洗浄・乾燥

ANタイプについては、グラフト重合後の吸着材（グラフト重合後の基材が吸着機能を有するため、以降吸着材と記載する）を反応槽から取り出した後、担持したAMPが脱離しにくいようにトルエンにより洗浄し、グラフト鎖を収縮させた後、40℃の乾燥器により乾燥させた。GMAタイプについては、グラフト重合後の吸着材を反応槽から取り出し、水により洗浄し担持していないAMPを洗い落とした後、40℃の乾燥器により乾燥させた。乾燥後のCs吸着材の一巻き（ANタイプ）をFig.13に示す。



Fig. 13 Produced Cs adsorbent

(4) グラフト率の分布

2.2.1 の基材の調整で記載したように、10 m 長の基材を巻物にしてグラフト重合を行った。基材の長さ方向のグラフト率を測定するため所定の位置に 10 cm 角の不織布基材を取り付けて、重量管理を行うことで取り付け部分近傍のグラフト率を概算して、基材長さ方向のグラフト率の分布を求めた。なお、グラフト率は下記の式から求めた。

$$\text{グラフト率(\%)} = \frac{\text{重合後の乾燥重量} - \text{重合前の重量}}{\text{重合前の重量}} \times 100 \quad \dots \dots (1)$$

① AN タイプ

Fig. 14 に巻物状の基材をグラフト重合して得られた AN タイプの吸着材のグラフト率分布を示す。バッチ No.1、バッチ No.2 とともに 10 m 内でのグラフト率の分布は小さく、比較的均一な吸着材を得ることができた。また、バッチによるグラフト率の差も小さく再現性も良かった。これらのことから、基材を巻物状にして照射後、重合装置のバスケット治具に装填してグラフト重合することで、均一なグラフト率の吸着材を作製出来ることが分かった。

通常実験室では 200 ml 程度のガラスサンプルを用いて 5 cm 角程度の大きさで吸着材を合成している。今回の重合装置を用いることで 1 回の重合で実験室規模の約 1,000 倍量に相当する 30 cm 幅で 10 m の長尺吸着材を作製することができた。

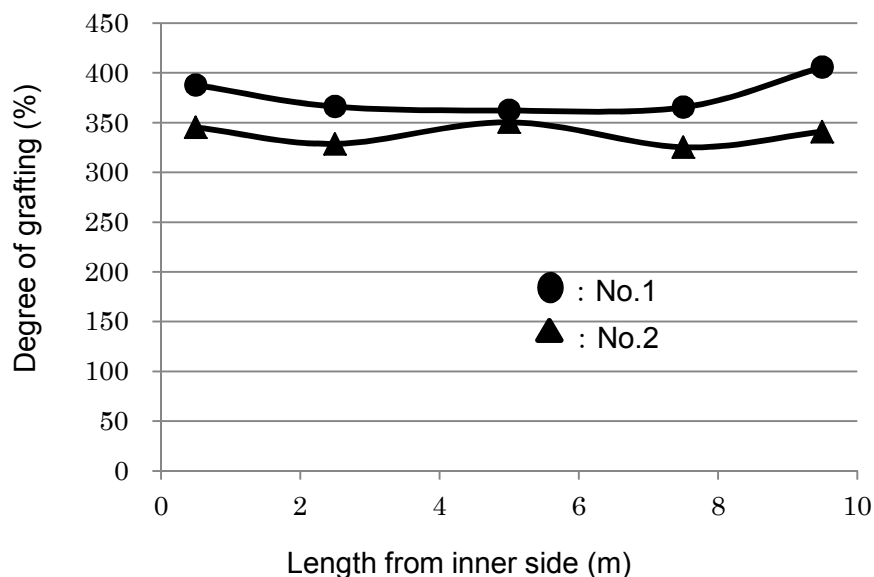


Fig.14 Relationship between length from inner side and degree of grafting

② GMA タイプ

Fig. 15 に GMA タイプのグラフト率の分布を示す。バッチ No.1、バッチ No.2 ともに AN タイプと同じように 10 m 内でのグラフト率の分布は小さく均一な吸着材が得られ、バッチによるグラフト率の差も小さく再現性の良い結果が得られた。反応温度は GMA タイプと AN タイプともに 50~60 °C と同じであるが、反応時間は GMA タイプが 1 時間と AN タイプの 4 時間に比べて短時間であるにも関わらずグラフト率が非常に高くなった。グラフト率が高すぎると乾燥後の吸着材が硬く、もろくなる。今後、最適なグラフト率と最適な重合条件を探索する必要がある。

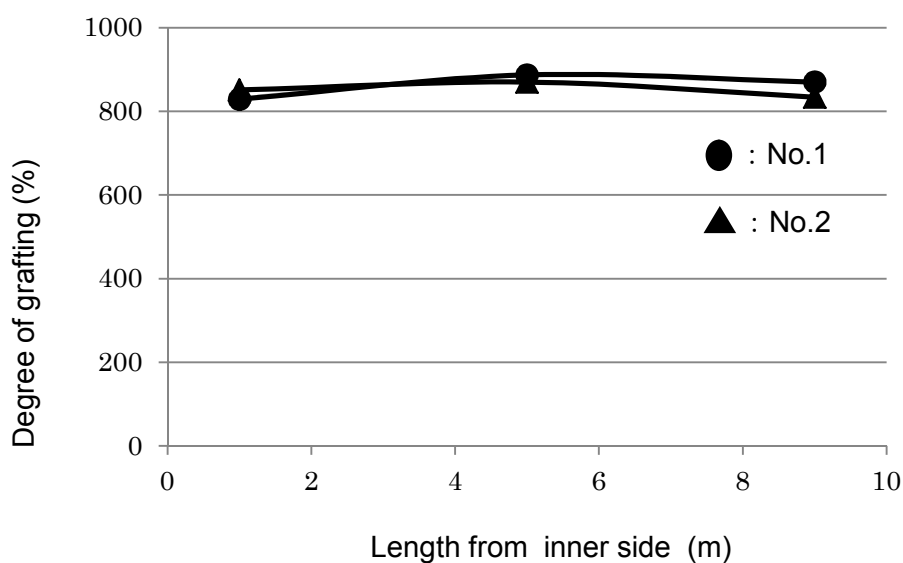


Fig.15 Relationship between length from inner side and degree of grafting

3. Cs 吸着材の吸着性能評価

3.1 バッチ試験での評価

重合装置により作製した吸着材の性能を評価するため、安定性 Cs 溶液と吸着材を入れてスターラーで攪拌して Fig.16 のような吸着試験を行った。

1 mg/L (1 ppm) の Cs 溶液 50 ml に 1 cm 角の吸着材を入れ、24 時間浸漬・攪拌したときの Cs の吸着率を調べた。なお、吸着率は初期濃度と溶液濃度を誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) で定量し、下式により算出した。

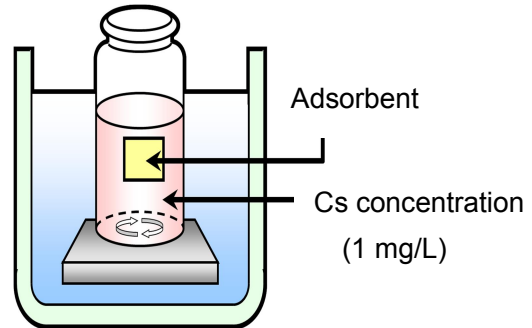


Fig.16 Batch adsorption test in a beaker

$$\text{吸着率 (\%)} = \frac{\text{初期濃度 (ppm)} - \text{溶液濃度 (ppm)}}{\text{初期濃度 (ppm)}} \times 100 \quad \dots \dots (2)$$

(1) AN タイプ

吸着材長さ方向の各位置で得られた Cs 吸着率を Fig.17 に示す。吸着材の巻物の内側から 5 m と 9.5 m の部分で 90 % と高い吸着率が得られた。しかし、2.5 m と 7.5 m の部分で Cs の吸着率が低かった。この吸着材のグラフト率を Fig.18 に示す。吸着材中のグラフ

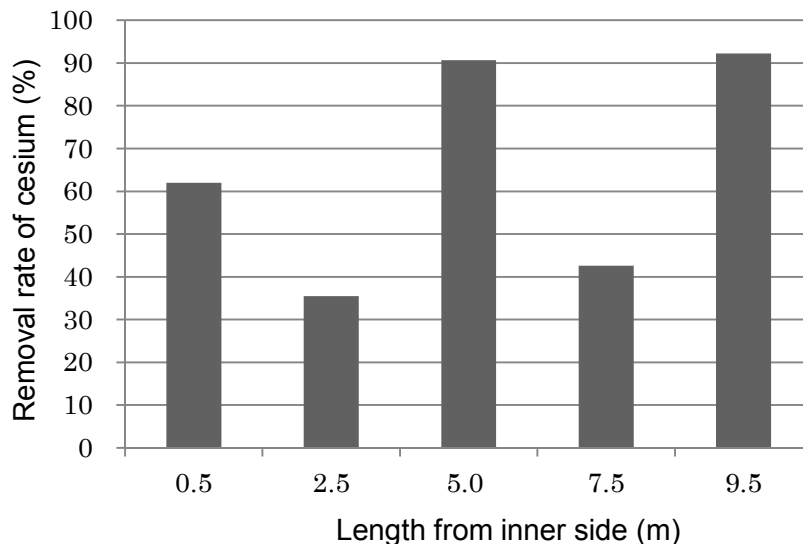


Fig.17 Distribution of removal rate of cesium in adsorbent

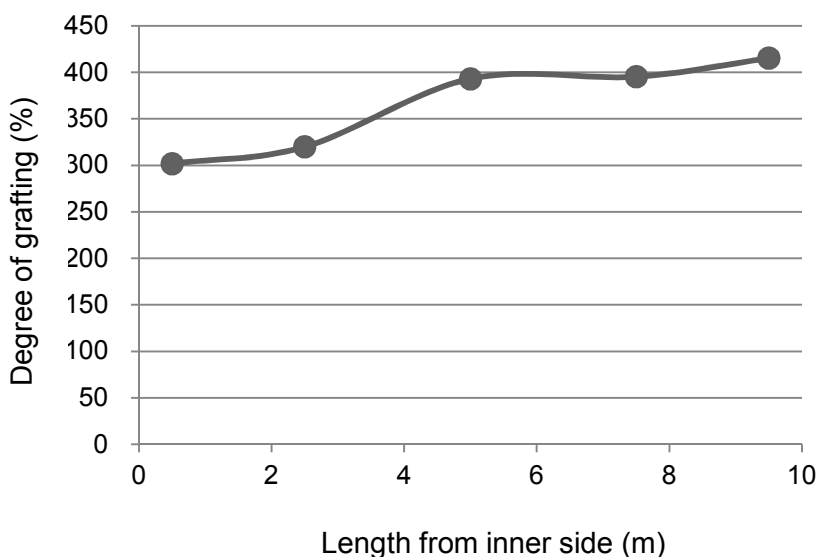


Fig. 18 Relationship between length from inner side and degree of grafting

ト率は、内側部分で少し低い傾向にあるが 300~400 %の範囲で、吸着率との相関が明確に見られない結果となった。この理由として、AMP をモノマーに均一に分散させてグラフト重合を行っているが、微粒子化した AMP が反応時に巻物状の基材内に均一に攪拌されて供給されていないため、グラフト率が同程度でも AMP の担持量に分布が生じているものと考えられる。基材内に均一に AMP を担持させるために、巻物状基材内部まで AMP が均一に供給されるようバブリングしている窒素の流量を多くして攪拌効果を高めることや反応槽の下部に攪拌装置を取り付けるなどの対策をとることが今後の課題である。

(2) GMA タイプ

得られた吸着材の長さ方向に対する Cs 吸着率を Fig.19 に示す。バッチ No.1 で得られた

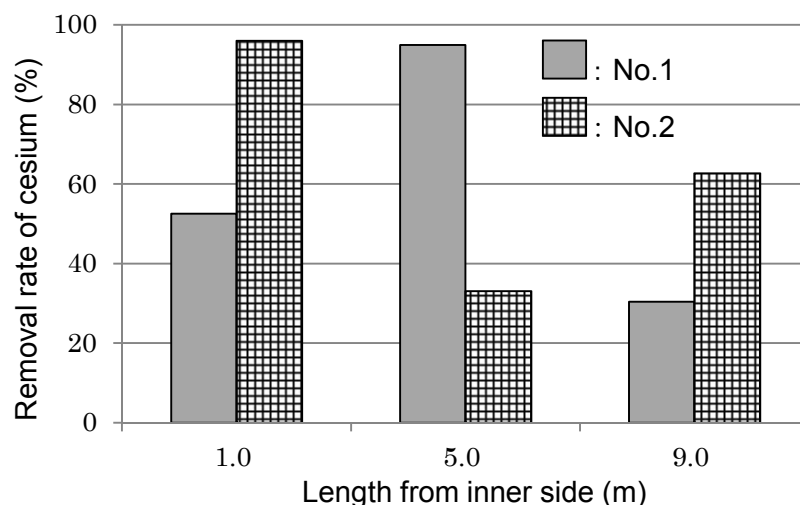


Fig.19 Distribution of removal rate of cesium in adsorbent

吸着材では、巻物中心部（5 m の位置）で 95 % の高い吸着率が得られたが巻物内側や外側で吸着率が低かった。しかし、バッチ No.2 では逆に巻物内側が 95 % と高く、巻物中心部が低かった。これらの吸着材のグラフト率は Fig.15 に示したようにバッチ No.1、バッチ No.2 とともに長さ方向のグラフト率で分布が見られない均一なものである。このように、GMA タイプの Cs の吸着においても AN タイプと同じようにグラフト率との相関が見られなかったことから、(1) AN タイプで考察したように AMP の攪拌をよくするために、反応槽の改良が今後の課題であることが分かった。

AN タイプと GMA タイプの Cs 吸着率を比較すると巻物長さ方向で分布があるものの高い部分で 90～95 %、低い部分でも 30 % 程度であり、AN タイプと GMA タイプで Cs の吸着率において特異的な違いが見られず、どちらのタイプの Cs 吸着材を用いても Cs の吸着において差異が無いことが分かった。

3.2 カラム試験での評価

バッチ試験により Cs の吸着率が 90 % 程度と高かった吸着材の部位を切り出し、カラムによる連続通液試験で評価を行った。内径 7mm に吸着材を切り出し、カラムに充填して Cs 濃度を約 0.9 mg/L (0.9 ppm) に調整した溶液をポンプにより 1 mL/min の流速で通液させた。吸着材通過後の溶液は所定時間ごとにフラクシオンコレクターで分取し、溶液中の Cs 濃度を ICP-MS により定量した。試験の方法を Fig.20 に示す。

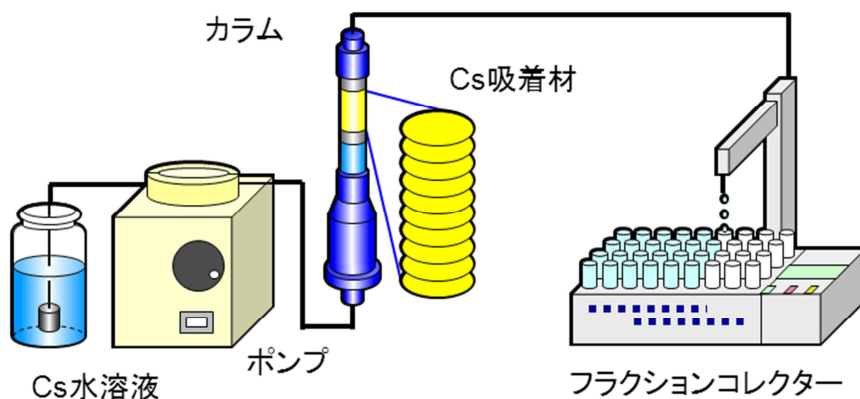


Fig.20 Column adsorption test by Cs adsorbent

カラムによる連続通液試験においては、溶液の流速（供給量）と吸着材量の関係で結果が大きく左右される。そのため、下記の式のように吸着材体積に対する供給液流量の割合で示す空間速度（Space Velocity：SV）を統一して評価した。

$$SV [h^{-1}] = (\text{供給液流量 [mL/h]}) / (\text{吸着材体積 [mL]}) \quad \dots (3)$$

今回の試験では、SV が 310h^{-1} の条件で行った結果である。なお、吸着材の体積は、カラムに充填する前に重ね合わせて圧縮した状態で厚みを測定して求めた。

Cs 吸着試験結果を Fig.21 に示す。図中横軸の BV (Bed volume) は通液倍率を意味しており吸着材体積に対して何倍量の溶液を通液したかを示すもので

$$BV = (\text{通液量 [mL]} / \text{吸着材体積 [mL]}) \quad \dots (4)$$

で表される。また、縦軸の C/C_0 は吸着材通過前の溶液中の Cs 濃度 (C_0) に対して吸着材通過後の溶液中の Cs 濃度 (C) との比を示すもので、

$$C/C_0[-] = (\text{吸着材通過後の Cs 濃度 [mg/L]} / \text{吸着材通過前の Cs 濃度 [mg/L]}) \quad \dots (5)$$

で表され、溶液中の Cs を全て吸着材で吸着すれば 0 (ゼロ)、全く吸着しない場合は 1 となる。結果として Fig.21 に示すように、BV が 3,000 程度まで C/C_0 が 0 となり、Cs が吸着材中に全量吸着されているが、その後徐々に増加 (Cs が吸着されずに漏洩) した。このことから、今回の実験においては 0.9 ppm の Cs 溶液から吸着材の 3,000 倍量まで Cs を吸着除去出来ることが分かった。この数値は通常のグラフト吸着材による金属吸着量と比較しても、非常に高い値であり、Cs 吸着材の性能が高いことが明らかになった。

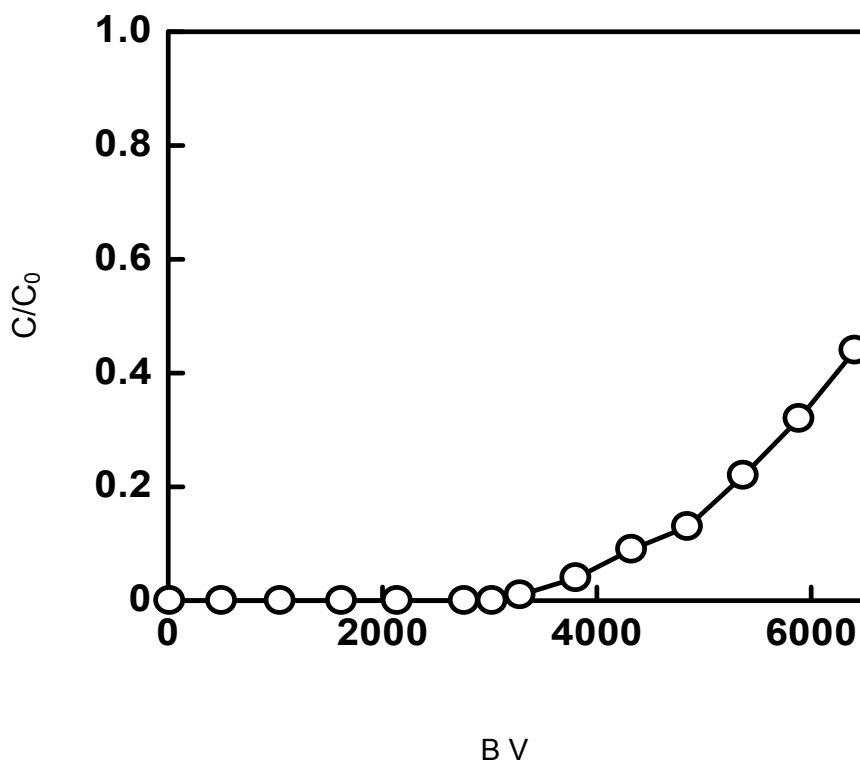


Fig.21 Breakthrough curve for Cs adsorption by a column charged with adsorbent

4. Cs 吸着材を用いたフィールド試験

重合装置 (Fig.3) により作製した Cs 吸着材 (Fig.13) を用いて、福島県内において放射性 Cs を対象とした吸着材のフィールド試験を行った。なお、AN タイプの吸着材と GMA タイプの吸着材については、吸着特性に大きな差異が見られなかったことから、以下では特に両者を区別しないで結果を記載する。

原発事故後の 2011 年 3 月 17 日に厚生労働省から食品の暫定規制値として飲料水については 200 Bq/kg と設定された。そのため、貯留している水についてもその規制値以下にして放流する必要があった。そこで、今回開発した Cs 吸着材により規制値以下に放射性 Cs を低減可能な通液方法についても評価を加えた。

なお、2012 年 4 月 1 日からより厳しい新基準が適用され、飲料水については 10 Bq/kg となった。

4.1 伊達市立富成小学校プール水の放射性 Cs 吸着試験

2011 年 7 月、作製した Cs 吸着材により放射性 Cs を規制値以下に低減できることを確認するため、基礎実験として富成小学校プール (Fig.22) 水を用いて吸着試験を行った。

試験方法はカラム方式とし、内径 4 cm のカラムと同じ径の治具で打ち抜いた Cs 吸着材 (Fig.23) を 10 枚充填 (積層) した。プール上澄み水を農業用タンクに一旦貯水し、50 μ m のフィルターでろ過した後、更に目の細かい 25 μ m のフィルターでろ過してカラムに通水し、連続的に Cs を吸着材に吸着させた。吸着試験で使用した機器の構成を Fig.24 に示す。カラムを通過して排出された水中の Cs の放射能濃度をゲルマニウム(Ge)半導体検出器 (セイコー・イーザーアンドジー社製: GEM 型) で測定した。なお、通水時の空間速度 SV ((3)式から) は 500 h⁻¹で行った。



Fig.22 The swimming pool of Tominari elementary school

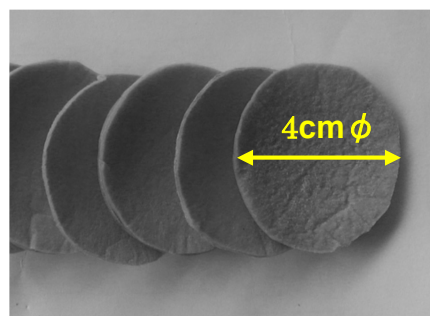


Fig.23 Cs adsorbent for column test

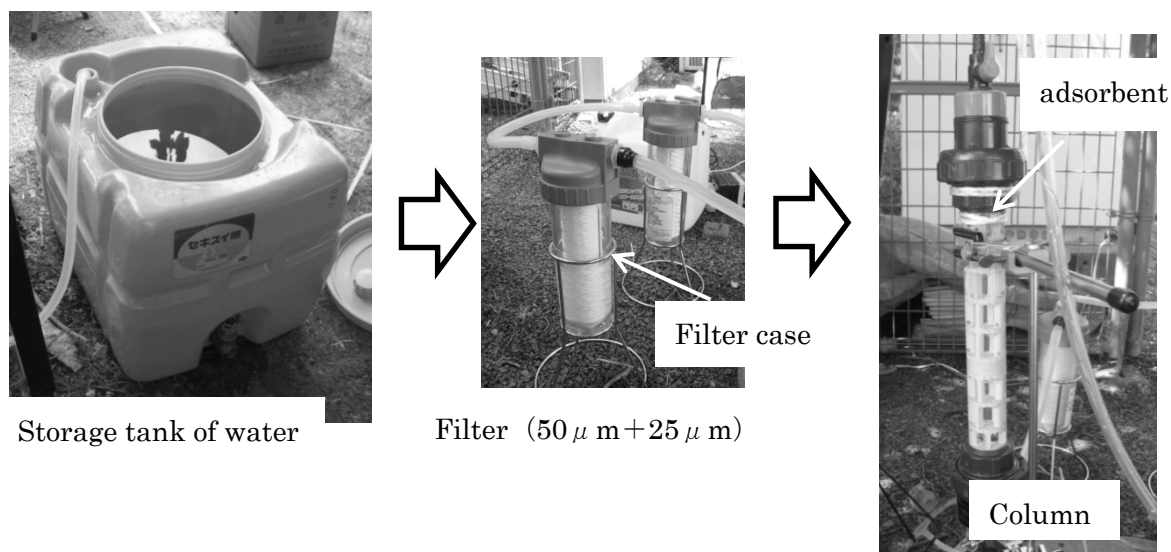


Fig.24 Field test apparatus with Cs adsorbent

試験結果を Table 1 に示す。放射性 Cs は半減期が約 2.1 年の Cs-134 と半減期が 30.1 年の Cs-137 が存在するが、規制の対象は両方の合算値である。プール水の上澄み中に存在する 274 Bq/L (水処理では一般的に Bq/kg より Bq/L で表示) の放射性 Cs は、50 μm のフィルターでろ過後、更に 25 μm のフィルターでろ過することで 213 Bq/L まで低下した。このことから、浮遊物などの不純物を取り除くことで水中の Cs の放射能濃度を 2 割程度低下出来ることが分かった。次いで、ろ過後のプール水をカラムに装填した吸着材中を通水させると Cs の放射能濃度は 213 Bq/L から 58 Bq/L に大きく低下し、ろ過後の値の 27% になり、Cs を 73% 除去できたことになる。SV を 500 h⁻¹ として通水後、4 時間経過後においても放射能濃度が 1 時間と同じで増加が見られなかったことから、BV ((4)式参照) は 2,000 となり、吸着材体積の 2,000 倍の水を流しても放射性 Cs の吸着能力が保たれていることが分かった。また、それ以上の水量を処理出来る可能性があることが示唆された。

Table 1 Result of Cs adsorption test in swimming pool

	Cs-134	Cs-137	All Cs
	(Bq/L)	(Bq/L)	(Bq/L)
Supernatant liquid	114	160	274
Filtration 50-25μm	94	119	213
Flow time to a column : 1h	24	34	58
Flow time to a column : 4h	25	34	59

4.2 福島大学附属幼稚園プール水の除染

伊達市立富成小での吸着試験により、作製した Cs 吸着材で水中の放射性 Cs の放射能濃度を大きく低減できたことから、2011 年 7 月に福島大学附属幼稚園のプール (Fig.25) 水を排出するための除染を行った。



Fig.25 The swimming pool of kindergarten attached to Fukushima University

(1) 放射性 Cs の吸着試験

プールの水面に浮遊する枯れ葉などの浮遊物とプール底に沈殿した枯れ葉や枝などの固形物を除去した後、内径 15 cm の大型カラム (伊達市立富成小学校では内径 4 cm のカラム) に

充填した Cs 吸着材にプール上澄み水をポンプにより汲み上げて通液し、放射性 Cs の吸着試験を行った。カラム内への吸着材の取り付けは、小さい径のカラムの場合についてはカラム内径と同じ大きさに吸着材を打ち抜いてカラムに充填 (積層) したが、今回は大きな径のため Fig.26(A)に示した穴の空いたパイプの治具に Fig.26(B)のように吸着材を巻き付け、カラム (Fig.27) に装填し、巻いた吸着材の内側から外側に通水して放射性 Cs を吸着する方式とした。



(A) Before roll up



(B) After roll up

Fig.26 Roll up jig for adsorbent

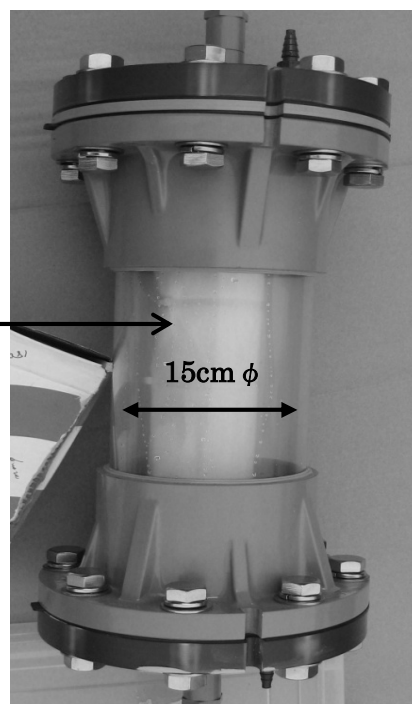


Fig.27 Big size column

この方式では、大きな径での吸着材の打ち抜きや切り出しが難しいことや、積層した吸着材の端部とカラム内壁に隙間が生じやすく、その部分を水が通過して積層した吸着材の中を通過しないなどの問題を抑制できる利点がある。

吸着試験結果を Table 2 に示す。プールの上澄み水は、初期の Cs-134 と Cs-137 の合計 387 Bq/L に対して、吸着材の通過後に 113 Bq/L と大きく低減し、飲料水の暫定規制値である 200 Bq/L を下回り、プールからの直接排出が可能になることが分かった。

Table 2 Result of Cs adsorption test in swimming pool

	Swimming pool water	After flowing water to adsorbent
Cs-134	169 (Bq/L)	48 (Bq/L)
Cs-137	218 (Bq/L)	65 (Bq/L)
Total	387 (Bq/L)	113 (Bq/L)

(2) プール水の除染

(1)の放射性 Cs の吸着試験結果より、大型カラムを利用した吸着材を巻き付ける方式で、プール水の除染処理を行った。処理方法は Fig.28,29 に示すように、プールの上澄み水をポンプで汲み上げ、放射性 Cs を吸着材に吸着させた後 1 m³ (1 トン) のタンクに一時貯蔵させた。タンク内の放射性 Cs 濃度を Ge 半導体検出器で測定し、暫定規制値である 200 Bq/L を下回っていることを確認した後、排水溝に放流する方法で行った。この操作はプール水を 1 トン毎に 200 Bq/L を下回っていることを確認し、放流を行った。プール上澄み水を吸着処理後にタンク A~F の合計 6 タンクに貯水した。各タンクの Cs の濃度を Table 3 に示す。いずれの処理水も暫定規制値である 200 Bq/L を下回っていたため 6 タンク分の 6 ton のプール水を排水した。プール水などの除染については、小さな浮遊物などに付着した放射性 Cs が存在する場合、固形物の処理が主となり、水中に溶存する放射性 Cs を吸着する吸着材の適用が難しい。このため、今回のプール水の除染については、固形物の少ない上澄み水を用



Fig.28 Storage tank installation scenery

いて行い、上澄み水以外については、ゼオライトと PAC（凝集剤）を用いた処理によりプールの除染を完了した。

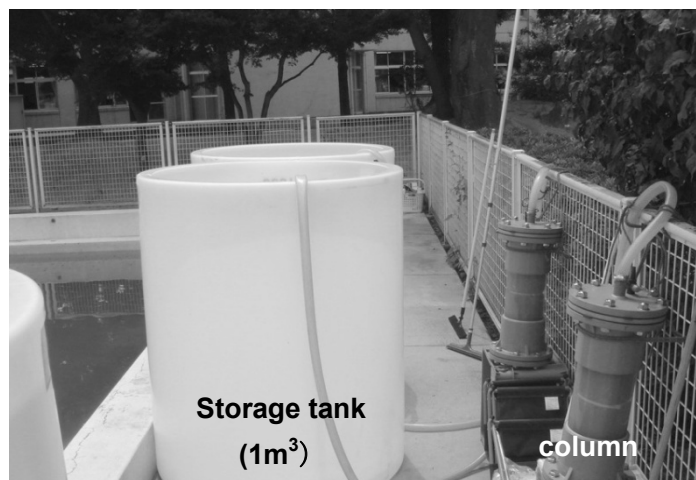


Fig.29 Decontamination scenery of the swimming pool water by an adsorption column

Table 3 Results of decontamination of each tank

Tank No.	Cs-134	Cs-137	Total
	(Bq/L)	(Bq/L)	(Bq/L)
A	90	108	198
B	68	83	151
C	69	92	161
D	70	96	166
E	66	101	167
F	74	86	160

4.3 飯舘村での池の水を用いた放射性 Cs の吸着試験

伊達市立富成小学校と福島大学付属幼稚園においては、プール水の早期除染、排出を考慮した放射性 Cs の吸着試験を行い、Cs 濃度を暫定規制値 200 Bq/L 以下に低減できることを明らかにした。2011 年 8 月、プール水以外の水の除染について知見を得るため、飯舘村において Fig.30 に示す「村民の森あいの沢」の池の水（環境水）を採取して Cs 吸着材による放射性 Cs の吸着試験を行った。以降、あいの沢で取水した水を環境水と記載する。



Fig.30 Sampling point of environment water in Iitate-mura (Ainosawa pond)

4.3.1 バッチ試験での評価

環境水を用いてバッチ試験を行った。ビーカーに自然水 50 mL と 1 cm 角に切りだした Cs 吸着材を入れスターラーで攪拌して、吸着試験を行った。なお、環境水は、上澄み部分をサンプリングしたものを使用した。

吸着材の浸漬時間と Cs の放射能濃度を Fig.31 に示す。浸漬時間 30 分と 3 時間で同じ濃度を示すことから、30 分以内で放射性 Cs を吸着できることが分かった。しかし、吸着率は 60 % 程度であり 3.1 項の吸着率 90 % を下回った。

この原因として以下のことが考えられる。

①水中に溶存している Cs が希薄

バッチ試験において 90 % の吸着率を示した時の Cs 濃度は 1 ppm (純水中に溶存) である。Cs の放射能濃度を 100 Bq/L と仮定すると、Cs の濃度は約 2×10^{-8} ppm に相当し、非常に低濃度である。

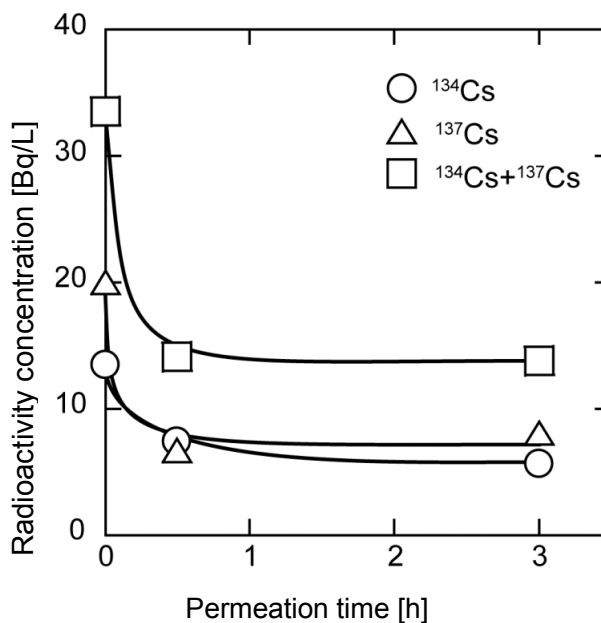


Fig.31 Performance of the developed adsorbent in the removal of radioactive Cs from environmental water

②他の元素による阻害効果

環境水には放射性 Cs 以外の他元素が多量に溶存しており、Cs 吸着を阻害する。

③不純物の影響

水中に微量の浮遊物などの粒子（固体）が混入しており、粒子に付着した放射性 Cs を吸着できない。

4.3.2 カラム試験での評価

カラムによる連続吸着試験は、飯舘村役場の敷地を試験場所に提供して頂き実施した。試験は Fig.32 に示すような内径 4 cm のカラムを用いて行った。環境水をタンクに一旦貯水し、所定流量に設定してポンプによりカラムに供給した。今回、吸着材体積を 48 mL、SV ((3)式参照) を 200 h⁻¹ として 100 L 通水した。試験の様子を Fig.33 に示す。

取水した環境水の中に放射性 Cs の付着した浮遊物などが混入していると吸着材による吸着に影響を与えることから、富成小学校や福島大付属幼稚園での吸着試験で用いた 50 μm、25 μm のフィルターより目の細かい 0.45 μm の目開きのフィルターでのろ過と

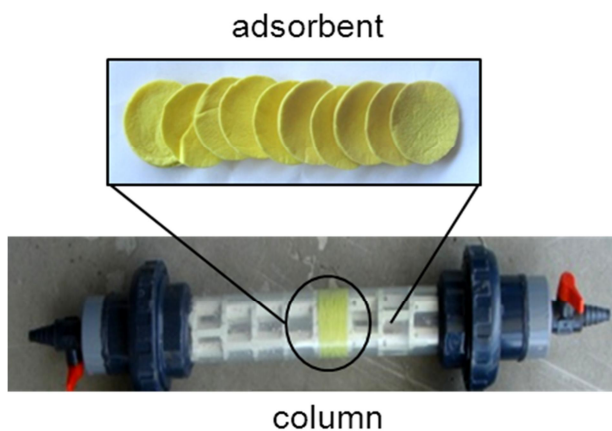


Fig.32 Column and adsorbent for Cs adsorption

の組み合わせにより、吸着材による吸着効果を確認した。

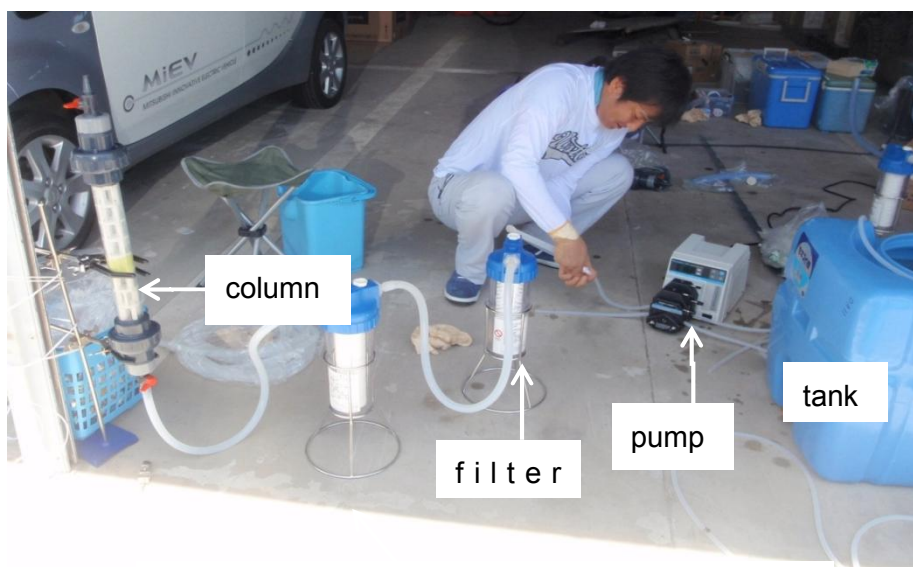


Fig.33 Examination scene of an adsorption test

吸着試験は、2 か所で採取した環境水を吸着材により水中に溶存する放射性 Cs を吸着する処理とろ過により浮遊物などに付着した放射性 Cs を除去する処理とを併用して行った。

(1) Cs 吸着材で吸着後にフィルターでろ過する方法

環境水を Cs 吸着材で吸着処理した後、浮遊物などの固形物をろ過処理により除去した。結果を Table 4-1 に示す。

吸着処理では、サンプリング場所 A の水で 59 %、サンプリング場所 B の水で 63 % の Cs 濃度を低減できた。その水を更にろ過処理することで、測定値が検出限界以下 (ND) となり環境水中の放射性 Cs を検出限界以下 (100 %) まで除去することができた。

Table 4-1 The decontamination result of radioactive Cs in environmental water by adsorption and filtration (1st:adsorption,2nd:filtration)

Sampling point	Cs-134 (Bq/L)	Cs-137 (Bq/L)	Total (Bq/L)	
A	14	20	34	
B	19	24	43	

↓ Adsorption

Sampling point	Cs-134 (Bq/L)	Cs-137 (Bq/L)	Total (Bq/L)	Removal (%)
A	5.7	8.1	13.8	59
B	7.0	9.1	16.1	63

↓ Filtration

Sampling point	Total (Bq/L)	Removal (%)
A	ND	100
B	ND	100

ND : Not detected

(2) フィルターろ過後に Cs 吸着材で吸着する方法

(1)の吸着処理とろ過の順番を変えて、フィルターによりろ過処理を行い浮遊物などの固形物を除去した後、Cs 吸着材により吸着処理をした。試験結果を Table 4-2 に示す。

水中の Cs をろ過することで、サンプリング場所 A の水で 85 %、サンプリング場所 B の水で 76 % の Cs 濃度を低減できた。その水を更に Cs 吸着材で吸着処理することで、測定値が ND となり、環境水中の放射性 Cs を 100 % 除去することができた。

Table 4-2 The decontamination result of radioactive Cs in environmental water by filtration and adsorption (1st: filtration, 2nd: adsorption)

Sampling point	Cs-134 (Bq/L)	Cs-137 (Bq/L)	Total (Bq/L)	
A	14	20	34	
B	19	24	43	

↓ Filtration

Sampling point	Cs-134 (Bq/L)	Cs-137 (Bq/L)	Total (Bq/L)	Removal (%)
A	2.3	2.7	5.0	85
B	4.5	6.0	10.5	76

↓ Adsorption

Sampling point	Total (Bq/L)	Removal (%)
A	ND	100
B	ND	100

(3) 飯舘村におけるフィールド試験結果

今回の飯舘村における「村民の森あいの沢」の水（環境水）を用いた吸着試験の結果、以下のことが分かった。

- ろ過による Cs の放射能濃度の除去率が吸着処理の除去率よりも高いことから、環境水中には溶存している放射性 Cs より、浮遊物などに付着している放射性 Cs の方が多いものと考えられる。
- ろ過後の放射性濃度が低い水からでも Cs 吸着材により放射性 Cs が吸着できることが分かった。
- ろ過処理と吸着処理の順番にかかわらず、両処理を行うことにより、環境水の放射性 Cs を 100 % 除去できることが明らかになった。
- 吸着材体積 48 mL で 100 L の水を吸着処理できたことから、吸着材の体積の約 2,000 倍量まで放射性 Cs を 100 % 除去できることが分かった。

5. まとめ

福島復興支援のため、放射線グラフト重合により放射性セシウム (Cs) を選択的に吸着できるリンモリブデン酸アンモニウム (AMP) を担持した吸着材を開発した。この吸着材を実験室での重合条件を適用して、ベンチスケール規模 (30 L 槽) の重合装置によりバッチ方式による作製を試み、実験室規模の約 1,000 倍の量 (幅 30 cm、長さ 10 m) を一度に作製することに成功した。得られた Cs 吸着材を用いた評価では、1 mg/L の Cs が溶存する純水中の安定性 Cs を 90 %以上除去できることが分かった。また、カラムによる連続吸着試験において 0.9 mg/L の Cs 水溶液を吸着材量の 3,000 倍の量まで処理出来ることが分かった。

ベンチスケール規模で作製した Cs 吸着材を用いて、福島県伊達市立富成小学校、福島大学付属幼稚園および飯舘村でフィールド試験を行い、以下のことが明らかになった。

(1) プール水

- ・水中の放射性 Cs は、水に溶存しているイオン状態ものと、浮遊物などに付着した固体状態のものがある。
- ・放射性 Cs はグラフト吸着材で排出基準値 (当時) まで吸着し、放流することができた。

(2) 池の水 (環境水)

- ・Cs 用グラフト吸着材は、環境水中に微量に存在する放射性 Cs を検出限界以下まで除去 (100 %) でき、環境水に含まれる他の共存イオンによる吸着阻害を受けずに選択的に放射性 Cs を吸着できることがわかった。
- ・水中に存在する放射性 Cs は、グラフト吸着材を用いる吸着処理と、ゴミなどに付着した固体状の放射性 Cs を除去する処理 (ろ過処理) を併用することで、検出限界以下まで除去 (100 %) できることがわかった。

謝 辞

福島大学付属幼稚園のプール除染では、作業に際し、先生方に多くの便宜を図って頂きました。ここに感謝の意を表します。

飯舘村における吸着試験においては、飯舘村役場関係者を始め様々な方々に協力して頂きました。お礼を申し上げます。

飯舘村での池の水を用いた放射性Csの吸着試験は平成23年度科学技術戦略推進費プロジェクト「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」の一環として、文部科学省からの委託を受けて実施したものです。

福島大学付属幼稚園のプール除染において、最終的な除染を完遂させた原子力機構 量子ビーム機能性分子解析技術研究ユニット 黒木ユニット長はじめ、参加された方々に深くお礼を申し上げます。

Cs吸着材の大量合成において、コバルトガンマ線照射で便宜を図って頂いた高崎量子応用研究所 照射施設管理課の方々にお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) N. Seko, A. Katakai, S. Hasegawa, M. Tamada, N. Kasai, H. Takeda, T. Sugo and K. Saito, "Aquaculture of Uranium in Seawater by a Fabric-Adsorbent Submerged System", *Nucl. Technol.* **144**, pp.274-278 (2003).
- (2) N. Seko, M. Tamada, N. Kasai, F. Yoshii and T. Shimizu, "Synthesis and evaluation of long braid adsorbent for recovery of uranium from seawater", *A. J. Civil. Engineer. Oceans*, **20**, pp.611-616 (2004).
- (3) F. Basuki, N. Seko and M. Tamada, "Recovery of Scandium with Phosphoric Chelating Adsorbent Prepared by Direct Radiation Graft Polymerization", *J. Ion Exchange*, **21**, pp.127-130 (2010).
- (4) N. Seko, H. Hoshina, N. Kasai, Y. Ueki, M. Tamada, T. Kiryu, K. Tanaka and M. Takahashi, "Novel System for Recovering Scandium from Hot Spring Water with Fibrous Graft Adsorbent", *J. Ion Exchange*, **21**, pp.117-122 (2010).
- (5) H. Hoshina, N. Seko, Y. Ueki and M. Tamada, "Synthesis of graft adsorbent with N-methyl-D-glucamine for boron adsorption", *J. Ion Exchange*, **18**, pp.236-239 (2007).
- (6) N. Seko, F. Basuki, M. Tamada and F. Yoshii, "Rapid removal of arsenic(V) by zirconium(IV) loaded phosphoric chelate adsorbent synthesized by radiation induced graft polymerization", *React. Funct. Polym.*, **59**, pp.235-241 (2004).
- (7) H. Hoshina, N. Kasai, N. Seko, T. Shibata, Y. Aketagawa, M. Takahashi, A. Yoshii and Y. Tsunoda, "Synthesis of arsenic graft adsorbent in pilot scale", *Radiat. Phys. Chem.*, **81**, pp.1033-1035 (2012).
- (8) T. Shiraishi, M. Tamada, K. Saito and T. Sugo, "Recovery of cadmium from waste of scallop processing with amidoxime adsorbent synthesized by graft-polymerization", *Radiat. Phys. Chem.*, **66**, pp.43-47 (2003).
- (9) T. A. Todd, N.R.Mann, T. J. Tranter, F. Šebesta, J. John and A. Motl, "Cesium sorption from concentrated acidic tank wastes using ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile composite sorbents", *J. Radioanal Nucl Chem.*, **254**, pp.47-52 (2002).
- (10) A. Iwanade, N. Kasai, H. Hoshina, Y. Ueki, S. Saiki and N. Seko, "Hybrid grafted ion exchanger for decontamination of radioactive cesium in Fukushima Prefecture and other contaminated areas", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **293**, pp.703-709 (2012).

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 ²
体積	立法メートル	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	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
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		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 ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷密度	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
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ 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 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単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	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	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
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	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 _e =(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 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	1 cal=4.1858 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

