



^{99}Mo 製造におけるMoリサイクル技術の予備試験(1)

—Mo吸着剤の再利用評価—

(共同研究)

Preliminary Test for Mo Recycling System in ^{99}Mo Manufacturing Process (1)

- Reusability Evaluation of Mo Absorbent -

(Joint Research)

木村 明博 新関 智丈 掛井 貞紀 Yelena Chakrova
西方 香緒里 長谷川 良雄 吉永 英雄 Petr Chakrov
土谷 邦彦

Akihiro KIMURA, Tomotake NIIZEKI, Sadanori KAKEI, Yelena CHAKROVA
Kaori NISHIKATA, Yoshio HASEGAWA, Hideo YOSHINAGA, Petr CHAKROV
and Kunihiro TSUCHIYA

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

Oarai Research and Development Center

October 2013

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

⁹⁹Mo 製造における Mo リサイクル技術の予備試験(1)

—Mo 吸着剤の再利用評価—

(共同研究)

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター

照射試験炉センター

木村 明博、新関 智丈^{*1}、掛井 貞紀^{*2}、Yelena Chakrova^{*3}、西方 香緒里、

長谷川 良雄^{*1}、吉永 英雄^{*2}、Petr Chakrov^{*3}、土谷 邦彦

(2013 年 5 月 9 日受理)

照射試験炉センターでは、JMTR を用いた (n, γ) 法による ⁹⁹Mo 製造に関する技術開発を行っている。(n, γ) 法は簡便な反面、製造される ⁹⁹Mo の比放射能は低く、そこから得られる ^{99m}Tc 製品の放射能濃度も低下する欠点がある。そこで、効率よく Mo を吸着するための吸着剤として、無機高分子ジルコニウム化合物 (Polyzirconium Compound : PZC) 及び無機高分子チタニウム化合物 (Polytitanium Compound : PTC) を開発した。一方、これら吸着剤は使用した後、放射性廃棄物として廃棄されるため、再利用による放射性廃棄物の低減化を実用化するとともに、希少資源である Mo 原料をリサイクルする必要がある。

本報告書は、試作した再利用可能な PZC 及び PTC の合成方法並びに Mo 吸着/溶離特性、⁹⁹Mo 吸着/^{99m}Tc 溶離特性及びリサイクル性等を調査するために行ったコールド試験及びホット試験についてまとめたものである。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

*1：株式会社 アート科学

*2：太陽鋳工 株式会社

*3：カザフスタン国立原子力センター 核物理研究所

Preliminary Test for Mo Recycling System in ^{99}Mo Manufacturing Process (1)
- Reusability Evaluation of Mo Absorbent -
(Joint Research)

Akihiro KIMURA, Tomotake NIIZEKI^{*1}, Sadanori KAKEI^{*2},
Yelena CHAKROVA^{*3}, Kaori NISHIKATA, Yoshio HASEGAWA^{*1},
Hideo YOSHINAGA^{*2}, Petr CHAKROV^{*3} and Kunihiko TSUCHIYA

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 9, 2013)

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center has developed the production of a medical isotope of ^{99}Mo , the parent nuclide of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ by the (n, γ) method using JMTR. The (n, γ) method has an advantage of easy manufacturing process and low radioactive wastes generation. However, the low radioactivity concentration of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is remaining as an issue. Therefore, Polyzirconium Compound (PZC) and Polytitanium Compound (PTC) have been developed as adsorbent of molybdenum. Meanwhile, it is necessary to recycle the adsorbent and Mo for the reduction of the radioactive waste of used-adsorbent and the effective use of limited resources, respectively.

This report summarizes results of the synthesis of Mo adsorbents such as PZC and PTC, and the performance tests (Characteristic of Mo adsorption/elution and Characteristic of ^{99}Mo adsorption/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution and Characteristic of Mo recycling) with un-irradiated Mo sample and irradiated Mo sample.

Keywords: (n, γ) Method, ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, Adsorbent of Molybdenum, Polyzirconium Compound (PZC), Polytitanium Compound (PTC), Recycling

*1 : ART KAGAKU Co., Ltd.

*2 : TAIYO KOKO Co., Ltd.

*3 : Institute of Nuclear Physics (INP) of the National Nuclear Center of the the Republic of Kazakhstan (NNC)

目 次

1. はじめに	1
2. 未照射 Mo を用いた吸着剤の特性試験方法	1
2.1 PZC の特性試験方法	1
2.1.1 PZC の Mo 吸着/溶離メカニズム	1
2.1.2 PZC の合成方法	2
2.1.3 PZC の Mo 吸着/溶離試験方法	2
2.1.4 PZC の pH 影響確認試験方法	3
2.1.5 PZC のリサイクル性確認試験方法	3
2.2 PTC の特性試験方法	4
2.2.1 PTC の Mo 吸着/溶離メカニズム	4
2.2.2 PTC の合成方法	5
2.2.3 PTC の Mo 吸着/溶離試験方法	5
2.2.4 PTC のリサイクル性確認試験方法	6
3. 照射済 Mo を用いた吸着剤のホット試験方法	7
3.1 PZC のホット試験方法	7
3.1.1 PZC の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験方法	7
3.1.2 PZC のリサイクル試験方法	8
3.2 PTC のホット試験方法	9
3.2.1 PTC の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験方法	9
3.2.2 PTC のリサイクル試験方法	10
4. 未照射 Mo を用いた吸着剤の特性試験結果	11
4.1 PZC の特性試験結果	11
4.1.1 PZC の Mo 吸着/溶離試験結果	11
4.1.2 PZC の pH 影響確認試験結果	11
4.1.3 PZC のリサイクル性確認試験結果	12
4.2 PTC の特性試験結果	12
4.2.1 PTC の Mo 吸着/溶離試験結果	12
4.2.2 PTC のリサイクル性確認試験結果	12
5. 照射済 Mo を用いた吸着剤のホット試験結果	12
5.1 PZC のホット試験結果	12
5.1.1 PZC の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験結果	12
5.1.2 PZC のリサイクル試験結果	13
5.2 PTC のホット試験結果	14
5.2.1 PTC の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験結果	14
5.2.2 PTC のリサイクル試験結果	15

6. 結論	15
謝辞	17
参考文献	18

Contents

1. Introduction	1
2. Characteristic test method of Mo adsorbent with un-irradiated Mo	1
2.1 Characteristic test method of PZC	1
2.1.1 Mo adsorption/elution mechanism of PZC	1
2.1.2 Synthetic method of PZC	2
2.1.3 Mo adsorption/elution test method with PZC	2
2.1.4 Confirmation test method of influence of pH on PZC	3
2.1.5 Confirmation test method of recyclability of PZC	3
2.2 Characteristic test method of PTC	4
2.2.1 Mo adsorption/elution mechanism of PTC	4
2.2.2 Synthetic method of PTC	5
2.2.3 Mo adsorption/elution test method with PTC	5
2.2.4 Confirmation test of recyclability of PTC	6
3. Hot test method of Mo adsorbent with irradiated Mo	7
3.1 Hot test method with PZC	7
3.1.1 ^{99}Mo adsorption/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution test method with PZC	7
3.1.2 Recycling test method with PZC	8
3.2 Hot test method with PTC	9
3.2.1 ^{99}Mo adsorption/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution test method with PTC	9
3.2.2 Recycling test method with PTC	10
4. Characteristic test result of Mo adsorbent with un-irradiated Mo	11
4.1 Characteristic test result of PZC	11
4.1.1 Mo adsorption/elution test result with PZC	11
4.1.2 Confirmation test result of influence of pH on PZC	11
4.1.3 Confirmation test result of recyclability of PZC	12
4.2 Characteristic test result of PTC	12
4.2.1 Mo adsorption/elution test result with PTC	12
4.2.2 Confirmation test result of influence of pH on PTC	12
5. Hot test result of Mo adsorbent with irradiated Mo	12
5.1 Hot test result with PZC	12
5.1.1 ^{99}Mo adsorption/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution test result with PZC	12
5.1.2 Recycling test result with PZC	13
5.2 Hot test result with PTC	14
5.2.1 ^{99}Mo adsorption/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution test result with PTC	14
5.2.2 Recycling test result with PTC	15

6. Conclusion	15
Acknowledgment	17
References	18

1. はじめに

核医学の分野において、 ^{99m}Tc は放射性診断薬として最も多く用いられる RI の一つである。 ^{99m}Tc は、親核種である ^{99}Mo を唯一の原料として生成される。日本で使用している ^{99}Mo はすべて輸入に依存しており、海外 ^{99}Mo 製造用原子炉のトラブル及びアイスランドの火山噴火による空路輸送障害等による ^{99}Mo の供給不安が起きている。そのため、 ^{99}Mo の国産化が重要な課題となっている^{1,2)}。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センターの照射試験炉センターでは、JMTR を用いた (n, γ) 法による ^{99}Mo 製造に関する技術開発を行っている³⁾。(n, γ) 法による ^{99}Mo 製造は、放射性廃棄物が少なく、簡便な製造工程である。しかし、製造された ^{99}Mo の比放射能は低く、そこから得られる ^{99m}Tc 製品の放射能濃度も低下する欠点がある。そのため、 ^{99}Mo を効率良く吸着できる吸着剤を開発することが必要不可欠である。これまで、無機高分子ジルコニウム化合物 (Polyzirconium Compound: PZC) と呼ばれる吸着剤が開発され⁴⁾、その吸着剤の性能確認試験が行われてきた^{5, 6, 7, 8)}。その結果、PZC には再利用が難しい等いくつかの欠点があることが判明したため、新たな無機高分子吸着剤として高分子チタニウム化合物 (Polytitanium Compound: PTC) を開発し⁹⁾、その吸着剤の性能確認試験を開始した¹⁰⁾。

一方、研究開発の進展により、使用済みの PZC を水中で保管することで、PZC についても再利用できる見通しを得た。

本研究では、試作した再利用が可能な PZC 及び PTC の Mo 吸着/溶離特性、 ^{99}Mo 吸着/ ^{99m}Tc 溶離特性及びリサイクル性等を調査するため、未照射 Mo 試料を用いたコールド試験及び照射済 Mo 試料を用いたホット試験を行った。

2. 未照射 Mo を用いた吸着剤の特性試験方法

2.1 PZC の特性試験方法

2.1.1 PZC の Mo 吸着/溶離メカニズム

PZC は、ジルコニウム、酸素及び塩素を主成分とする無機高分子体である。PZC の構造を Fig. 1 に示す。

Mo の吸着操作は、Mo 溶液に PZC を直接添加し行われる。PZC の Mo 吸着反応は、ジルコニウムと塩素の結合の一部が加水分解により Zr-OH となり、Zr-OH のヒドロキシル基と MoO_4^{2-} が置換することにより起こる。一方、PZC に吸着した Mo は、NaOH 溶液により溶離することができる。Zr-MoO₄ 結合が、NaOH により Zr-OH 結合に置換され、 MoO_4^{2-} が PZC から溶離する。PZC への Mo 吸着メカニズムを Fig. 2 に、PZC からの Mo 溶離メカニズムを Fig. 3 に示す。

PZC の Mo 吸着サイトは Cl であるため、Mo 溶離後の Zr-OH 結合を再び Zr-Cl 結合に再生する必要がある。しかし、この再生は難しいため、PZC は再利用ができないと考えられてきた。そこで、Zr-OH 結合を Zr-Cl 結合に再生することなく PZC を再利用する方法を検討した。その結果、Mo 溶離後に吸着剤を水中保存することで、再利用できることが判明した。

再生した PZC への Mo 再吸着では、Fig. 4 に示すように、Zr-OH が吸着サイトになると考えられる。Zr-OH は乾燥することで、脱水縮合による Zr-O-Zr 結合が増加する。その結果、吸着サイトとなる Zr-OH が減少してしまう。そこで、Mo 溶離済みの吸着剤の乾燥を避け、Mo 吸着サイトとなる Zr-OH を保存することで、Mo の再吸着が可能となる。また、再吸着の際に用いる Mo 溶液の pH も重要な条件である。

PZC への Mo 吸着は、酸性条件下で起こると考えられる。Fig. 2 に示す通り、PZC は初めに加水分解され、HCl が生成される。その結果 Mo 溶液は酸性となり、Mo 吸着が開始する。このことは、再生した PZC への Mo 再吸着においても同様である。

リサイクルする PZC には、Mo を溶離・回収した際に使用し、除去しきれなかった NaOH が付着している可能性がある。そのため、Mo の再吸着時において、中性の Mo 溶液を用いて吸着操作を行うと溶液の pH がアルカリ性となる可能性がある。Mo の吸着反応は酸性溶液下で起こることから、この場合、反応が進まないと考えられる。そこで、Mo 再吸着の際には Mo 溶液自体の pH を酸性に調整しておく必要がある。

2. 1. 2 PZC の合成方法

PZC の合成は、ロータリーエバポレータを用いて行った。合成装置写真を Fig. 5 に、PZC の合成フローを Fig. 6 に示す。はじめに、四塩化ジルコニウム 120g をなす型フラスコに量り取った。窒素雰囲気下で、ガス導入管からジ-n-ブチルエーテル 48g と 2-プロパノール 62.4g の混合溶液を 20～30 分かけてなす型フラスコに滴下した。これにより、四塩化ジルコニウム中の塩素基の一部がイソプロポキシ基に置換される。本操作後、なす型フラスコをオイルバス中で 50℃に加熱し 1 時間保持した。次に、ガス導入管の途中からジ-n-ブチルエーテル 24g と純水 9.1g の混合溶液を 5～10 分かけてなす型フラスコに滴下した。これにより、イソプロポキシ基に置換された部分を加水分解して縮合させる。本操作後、なす型フラスコをオイルバス中で 50～150℃まで加熱した。加熱は 20℃間隔で行い、各温度において 1 時間保持した。150℃において、なす型フラスコ内を減圧し残っている溶媒を除去した。合成した PZC 前駆体は、セパラブルフラスコに移し、窒素雰囲気下で加熱処理した。得られた PZC は、粉碎後、24～48 メッシュの粒度に篩分けした。篩分け後の PZC の収量は、約 50 g となった。合成後の PZC 写真を Fig. 7 に示す。

2. 1. 3 PZC の Mo 吸着/溶離試験方法

合成した PZC の性能を確認するため、Mo 吸着/溶離試験を行った。PZC を用いた Mo 吸着/溶離試験マトリクスを Table 1 に示す。

Mo 吸着試験は、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を純水に溶解し、 $\text{Mo}-15\text{mg}/\text{cm}^3$ に調製した溶液を用いて行った。このとき、Mo 溶液の pH が 7 となるよう 12M-HCl を添加し調整した。この Mo 溶液 10cm^3 をバイアルへ分取し、その中へ PZC 0.5g を添加し攪拌した。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器（ヤマト科学製 DX41）中で 3 時間保温した。その際、Mo 溶液と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、PZC に未吸着の Mo を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 10cm^3 程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。

この操作を全液量が 50cm³になるまで繰返し行った。PZC に吸着した Mo 吸着量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES（堀場製作所製 ULTIMA2）で測定した。

Mo 溶離試験では、Mo 吸着済み PZC の入ったバイアルに、Mo 溶離液である 1 M NaOH 10 cm³ を添加して行った。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 1 時間保温した。その際、NaOH と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。1 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、デカンテーションにより吸着剤と溶液を固液分離した。さらに、純水を 10cm³程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³になるまで繰返し行った。PZC から溶離した Mo 吸着量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

2. 1. 4 PZC の pH 影響確認試験方法

PZC の Mo 再吸着時における pH の影響を確認するため、pH 影響確認試験を行った。PZC の pH 影響確認試験マトリクスを Table 2 に示す。

Mo 吸着/溶離済みの PZC を 9 種類準備した。これまでの検討から、Mo を再吸着させる際、Mo 吸着量が Mo 溶液の pH に依存することが分かっている。そこで、適切な pH を決定するため、pH を 1～9 まで変化させた Mo 溶液を用いて試験を行った。また、繰返し吸着/溶離を行う際の pH の影響を確認するため、吸着/溶離操作を 4 回繰返し行った。

まず、Mo 濃度が 15mg/cm³、pH が 1～9 までの Mo 溶液を 9 種調製した。これらの Mo 溶液 10cm³ を Mo 吸着/溶離済 PZC の入ったバイアルへ分取し、攪拌した。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、Mo 溶液と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、PZC に未吸着の Mo を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 10cm³程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³になるまで繰返し行った。PZC に吸着した Mo 再吸着量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

次に Mo の溶離量を確認するため、Mo 再吸着済みの PZC の入ったバイアルに、Mo 溶離液である 1 M NaOH 10cm³ を添加した。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 1 時間保温した。その際、NaOH と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。1 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、デカンテーションにより吸着剤と溶液を固液分離した。さらに、純水を 10cm³程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³になるまで繰返し行った。PZC から回収した Mo 量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

上記操作を 4 回繰返し行い、pH の影響を調査した。

2. 1. 5 PZC のリサイクル性確認試験方法

pH 影響確認試験の結果を受けて、初期吸着用は pH 7、再吸着用は pH 2 の Mo 溶液を用い、PZC のリサイクル性確認試験を行った。PZC を用いたリサイクル性確認試験マトリクスを Table 3 に示す。

pH 7 及び Mo 濃度が $15\text{mg}/\text{cm}^3$ の Mo 溶液を調製した。この Mo 溶液 10cm^3 をバイアルへ分取し、その中へ PZC 0.5g を添加し攪拌した。このバイアルを 90°C に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、Mo 溶液と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温 (25°C) まで放冷した。放冷後、PZC に未吸着の Mo を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 10cm^3 程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。PZC に再吸着した Mo 量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

次に Mo の溶離及び再吸着を行った。まず、Mo を溶離させるため、Mo 吸着済みの PZC が入ったバイアルに、Mo 溶離液である $1\text{M NaOH } 10\text{ cm}^3$ を添加した。このバイアルを 90°C に設定した恒温乾燥器中で 1 時間保温した。その際、NaOH と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。1 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温 (25°C) まで放冷した。放冷後、デカンテーションにより吸着剤と溶液を固液分離した。さらに、純水を 10cm^3 程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。PZC から回収した Mo 量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。続いて、再吸着操作として、pH が 2 及び Mo 濃度が $15\text{mg}/\text{cm}^3$ の Mo 溶液を調製した。この Mo 溶液 10cm^3 を Mo 吸着/溶離済 PZC の入ったバイアルへ分取し、攪拌した。このバイアルを 90°C に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、Mo 溶液と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温 (25°C) まで放冷した。放冷後、PZC に未吸着の Mo を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 10cm^3 程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。PZC に再吸着した Mo 量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

上記の Mo 溶離・再吸着操作を 11 回繰返し行い、リサイクル性を確認した。

2.2 PTC の特性試験方法

2.2.1 PTC の Mo 吸着/溶離メカニズム

PTC は、チタンをベースとした構造であり、このチタンに結合しているヒドロキシル基が Mo 吸着サイトとなっている。PTC の構造を Fig. 8 に示す。

Mo の吸着操作は、pH を 4 程度に調製した Mo 溶液に PTC を直接添加し行われる。Mo 吸着反応は、始めに、PTC 中のアルコキシ基や有機配位子が加水分解され、チタン原子上にはヒドロキシル基が生成する。次に、生成したヒドロキシル基が MoO_4^{2-} に置換されることにより Mo が結合する。PTC に吸着した Mo は、NaOH 溶液により溶離することができる。Ti-MoO₄ 結合が NaOH により Ti-OH 結合に置き換わることにより、 MoO_4^{2-} が溶離する。PTC への Mo 吸着メカニズムを Fig. 9 に、PTC からの Mo 溶離メカニズムを Fig. 10 に示す。

PTC も PZC 同様に、Mo 溶離後に吸着剤を水中保存することにより、安定的に Ti-OH 結合が保持される。再吸着する際の Mo 溶液の pH を酸性条件にすることで Mo を再吸着が可能となる。

再生した PTC への Mo 再吸着では、Fig. 11 に示すように、Ti-OH が吸着サイトになると考えられる。そこで、Mo 溶離済みの吸着剤の乾燥を避け、Mo 吸着サイトとなる Ti-OH を保存することで、Mo の再吸着が可能となる。

PTC の Mo 吸着反応過程は PZC と同様である。そのため、PTC も Mo 吸着は、酸性条件下で起こると考えられる。Fig. 9 に示す通り、PTC は、加水分解されても Mo 溶液は酸性とはならない。そのため、事前に Mo 溶液を酸性にしておく必要がある。このことは、再生した PTC への Mo 再吸着においても同様である。

再吸着時において、弱酸性の Mo 溶液を用いて吸着操作を行うと溶液の pH がアルカリ性となる。これは、使用済みの PTC から Mo を溶離する際に使用し、除去しきれなかった NaOH が PTC 付着しているためである。そのため、再吸着の際には未使用 PTC への吸着時よりも Mo 溶液の pH をさらに酸性に調整しておく必要がある。

2.2.2 PTC の合成方法

PTC の合成は、ロータリーエバポレータを用いて行った。PTC の合成フローを Fig. 12 に示す。はじめに、原料となるチタニウムテトライソプロポキシド 142.11g をなす型フラスコに量りとり、続けて 1-ブタノール 66.71g 添加した。これにより、イソプロポキシ基の一部がブトキシ基に置換される。次に、純水 9.0g とプロパノール 78.13g 及び塩酸 1.82g を混合したものをなす型フラスコにゆっくり添加する。これにより、反応速度は小さくなり、急激な加水分解を防ぐことができ、易加水分解性の有機基を選択的に加水分解できる。ここで、純水は加水分解縮合するために添加しているが、純水のみを添加すると急激に加水分解が起こってしまう。そこで、純水とプロパノールと混和し、さらに、塩酸を加えることで反応速度を小さくし、急激な加水分解を防いでいる。さらに、純水 6.3g と 2-プロパノール 30.05g の混合物を添加し加水分解縮合を行った。減圧下で 90℃まで加熱して縮合を促進させつつ溶媒を除去した。得られた PTC は、粉碎後、24～48 メッシュの粒度に篩分けした。篩分け後の PTC の収量は約 60g となった。合成後の PTC 写真を Fig. 13 に示す。

2.2.3 PTC の Mo 吸着/溶離試験方法

合成した PTC の性能を確認するため、Mo 吸着/溶離試験を行った。PTC を用いた Mo 吸着/溶離試験マトリクスを Table 4 に示す。

Mo 吸着試験は、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を純水に溶解し、 $\text{Mo}-15\text{mg}/\text{cm}^3$ に調製した溶液を用いて行った。このとき、Mo 溶液の pH が 4 となるよう 12M-HCl を添加し調整した。この Mo 溶液 10cm^3 をバイアルへ分取し、その中へ PTC 0.5g を添加し攪拌した。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、Mo 溶液と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、PTC に未吸着の Mo を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 10cm^3 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。PTC に吸着した Mo 吸着量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

Mo 溶離試験では、Mo 吸着済みの PTC の入ったバイアルに、Mo 溶離液である 1 M NaOH 10cm³ を添加して行った。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 1 時間保温した。その際、NaOH と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。1 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、デカンテーションにより吸着剤と溶液を固液分離した。さらに、純水を 10cm³ 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³ になるまで繰返し行った。PTC から回収した Mo 吸着量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

2.2.4 PTC のリサイクル性確認試験方法

初期吸着用は pH 4、再吸着用は pH 2 の Mo 溶液を用いたリサイクル性確認試験を行った。PTC を用いたリサイクル性確認試験マトリクスを Table 5 に示す。再吸着用の Mo 溶液の pH は、PTC が PZC と同様の挙動を示すと考え、pH 2 とした。

pH 4 及び Mo 濃度が 15mg/cm³ の Mo 溶液 10cm³ をバイアルへ分取し、その中へ PTC 0.5g を添加し攪拌した。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、Mo 溶液と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、PTC に未吸着の Mo を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 10cm³ 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³ になるまで繰返し行った。PTC に吸着した Mo 量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

次に Mo の溶離及び再吸着を行った。まず、Mo を溶離させるため、Mo 吸着済みの PTC の入ったバイアルに、Mo 溶離液である 1 M NaOH 10cm³ を添加した。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 1 時間保温した。その際、NaOH と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。1 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、デカンテーションにより吸着剤と溶液を固液分離した。さらに、純水を 10cm³ 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³ になるまで繰返し行った。PTC から回収した Mo 量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。再吸着操作として、pH が 2 及び Mo 濃度が 15mg/cm³ の Mo 溶液を調製した。この Mo 溶液 10 cm³ を Mo 吸着/溶離済 PTC の入ったバイアルへ分取し、攪拌した。このバイアルを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、Mo 溶液と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器からバイアルを取出し、室温（25℃）まで放冷した。放冷後、PTC 未吸着の Mo を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 10cm³ 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³ になるまで繰返し行った。PTC に吸着した Mo 量を算出するため、洗浄液中の Mo 量を ICP-AES で測定した。

上記の Mo 脱吸着操作を 11 回繰返し行い、リサイクル性を確認した。

3. 照射済 Mo を用いた吸着剤のホット試験方法

照射済 Mo 試料を用いたホット試験として、Mo 吸着剤の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離特性及びリサイクル性を調べるための試験を行った。Mo 吸着剤の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験フローを Fig. 14 に、Mo 吸着剤のリサイクル性確認試験フローを Fig. 15 に示す。

3.1 PZC のホット試験方法

3.1.1 PZC の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験方法

試験に使用する Mo 吸着剤を 2 種類準備した。PZC 及び Mo を吸着/溶離させたリサイクル型 PZC (以降 Re-PZC と呼ぶ) である。

試験に先立ち、カザフスタン原子力センター (以下、「NNC」という。) にて ^{99}Mo (Mo) 溶液を準備した。この溶液の Mo 濃度は $20\text{mg}/\text{cm}^3$ 、放射能濃度は $1.2\text{MBq}/\text{cm}^3$ 及び pH は 7 であった。この ^{99}Mo (Mo) 溶液の pH を使用する Mo 吸着剤に合わせて調整し、試験を行った。PZC 及び Re-PZC を用いた ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験マトリクスを Table 6 に示す。

(1) PZC

NNC にて調製した ^{99}Mo (Mo) 溶液 15cm^3 をガラス製三角フラスコへ分取し、その中へ PZC 1g を添加し攪拌した。この三角フラスコを 90°C に設定した恒温乾燥器 (Fisher Scientific 製 Isotemp) 中で 3 時間保温した。その際、 ^{99}Mo (Mo) 溶液と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、PZC に未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm^3 程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。PZC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、洗浄液の ^{99}Mo 放射能濃度を測定した。洗浄後、 ^{99}Mo (Mo) を吸着させた PZC を、純水を使用して、ポリプロピレン製カラムに充填した (以降、PZC カラムと呼ぶ)。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離の前準備として、カラムに溶離液と同じ 0.9% 生理食塩水 12cm^3 程度を通液した。これは、カラム充填までに生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及び未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去しコンディショニングを整えるための操作である。これら操作において発生したカラム充填液及び生理食塩水を含めた全溶液が 50cm^3 になるよう調整した。PZC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。カラム作製から一昼夜経過した後、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離を行った。溶離操作は、PZC カラムに対して、溶離液を $3\text{cm}^3 \times 4$ 回通液し、生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離した。この溶離操作をさらに 3 回、約 24 時間毎に行った。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離率を求めるため、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶出液の一部をサンプリングし放射能濃度を測定した。

放射能濃度の測定として、Ge 半導体検出器 (Eurysis measures 社製 EGPC30-185-R) を用いたガンマ線スペクトル測定を行った。

(2) Re-PZC

NNC にて調製した ^{99}Mo (Mo) 溶液 15cm^3 及び 1M HCl 4.0cm^3 をガラス製三角フラスコへ分取し、pH 2 の ^{99}Mo (Mo) 溶液を調製した。この ^{99}Mo (Mo) 溶液を Re-PZC が入ったバイアル瓶に添加

しスラリー化させる。このスラリーを三角フラスコへ添加した。この三角フラスコを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、 ^{99}Mo 溶液と Re-PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、Re-PZC に未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm³ 程度加え Re-PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50 cm³ になるまで繰返し行った。Re-PZC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、洗浄液の放射能濃度を測定した。洗浄後、 ^{99}Mo (Mo) を吸着させた Re-PZC を、純水を使用して、ポリプロピレン製カラムに充填した（以降、Re-PZC カラムと呼ぶ）。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離の前準備として、カラムに溶離液と同じ 0.9%生理食塩水 12cm³ 程度を通液した。これは、カラム充填までに生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及び未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去しコンディショニングを整えるための操作である。これら操作において発生したカラム充填液及び生理食塩水を含めた全溶液が 50 cm³ になるよう調整した。Re-PZC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 吸着量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。カラム作製から一昼夜経過した後、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離を行った。溶離操作は、Re-PZC カラムに対して、溶離液を 3cm³×4 回通液し、生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離した。この溶離操作をさらに 3 回、約 24 時間毎に行った。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離率を求めるため、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶出液の一部をサンプリングし放射能濃度を測定した。

3. 1. 2 PZC のリサイクル試験方法

PZC を用いて、リサイクル試験を行った。

まず、 ^{99}Mo (Mo) 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離を行い、その後 PZC から、 ^{99}Mo (Mo) を溶離・回収した。次に、 ^{99}Mo (Mo) が溶離した PZC を用いて再度 ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離を行い、さらに、 ^{99}Mo (Mo) を溶離・回収した。PZC を用いたリサイクル試験マトリクスを Table 7 に示す。

NNC にて調製した ^{99}Mo (Mo) 溶液 15cm³ をガラス製三角フラスコへ分取し、その中へ PZC 1g を添加し攪拌した。この三角フラスコを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、 ^{99}Mo (Mo) 溶液と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、PZC に未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm³ 程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³ になるまで繰返し行った。PZC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、洗浄液の放射能濃度を測定した。洗浄後、 ^{99}Mo (Mo) を吸着させた PZC を、純水を使用して、ポリプロピレン製カラムに充填した。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離前準備として、カラムに溶離液と同じ 0.9%生理食塩水 12cm³ 程度を通液した。これは、カラム充填までに生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及び未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去しコンディショニングを整えるための操作である。これら操作において発生したカラム充填液及び生理食塩水を含めた全溶液が 50 cm³ になるよう調整した。PZC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。カラム作製から一昼夜経過した後、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離を行った。溶離操作は、PZC カラムに対して、溶離液を 12cm³ 通液し、生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離した。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離率を求めるため、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶出液の一部をサンプリングし放射能濃度を測定した。

^{99m}Tc 溶離後の PZC カラムより 1M NaOH 溶液 20 cm³ を用いて三角フラスコに PZC を回収した。この三角フラスコを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、1M NaOH 溶液と PZC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、PZC から溶離した ^{99}Mo (Mo) を回収するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm³ 程度加え PZC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm³ になるまで繰返し行った。PZC から溶離した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。

リサイクル性を確認するため、 ^{99}Mo (Mo) 溶離後の PZC (以降、Used-PZC と呼ぶ) を用いて、上記方法により再度 ^{99}Mo 吸着/ ^{99m}Tc 溶離及び ^{99}Mo (Mo) 溶離・回収を行った。試験を行うまでの間、乾燥を防ぐため、Used-PTC はウェットの状態にし、三角フラスコ内で保管した。

3. 2 PTC のホット試験方法

3. 2. 1 PTC の ^{99}Mo 吸着/ ^{99m}Tc 溶離試験方法

試験に使用する Mo 吸着剤を 2 種類準備した。PTC 及び Mo を吸着/溶離させたリサイクル型 PTC (以降 Re-PTC と呼ぶ) である。

試験に先立ち、NNC において ^{99}Mo (Mo) 溶液を準備した。この溶液の Mo 濃度は 20mg/cm³、放射能濃度は 1.2MBq/cm³ 及び pH は 7 であった。この ^{99}Mo (Mo) 溶液の pH を使用する Mo 吸着剤に合わせて調整し、試験を行った。PTC 及び Re-PZC を用いた ^{99}Mo 吸着/ ^{99m}Tc 溶離試験マトリクスを Table 8 に示す。

(1) PTC

NNC にて調製した ^{99}Mo (Mo) 溶液 15cm³ 及び 1M HCl 3.3cm³ をガラス製三角フラスコへ分取し、pH 4 の ^{99}Mo (Mo) 溶液を調製した。その中へ PTC 1g を添加し攪拌した。この三角フラスコを 90℃に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、 ^{99}Mo (Mo) 溶液と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、PTC に未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm³ 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50 cm³ になるまで繰返し行った。PTC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、洗浄液の放射能濃度を測定した。洗浄後、 ^{99}Mo (Mo) を吸着させた PTC を、純水を使用して、ポリプロピレン製カラムに充填した (以降、PTC カラムと呼ぶ)。 ^{99m}Tc の溶離の前準備として、カラムに溶離液と同じ 0.9%生理食塩水 12cm³ 程度を通液した。これは、カラム充填までに生成した ^{99m}Tc 及び未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去しコンディションを整えるための操作である。これら操作において発生したカラム充填液及び生理食塩水を含めた全溶液が 50 cm³ になるよう調整した。PTC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。カラム作製から一昼夜経過した後、 ^{99m}Tc の溶離を行った。溶離操作は、PTC カラムに対して、溶離液を 3cm³×4 回通液し、生成した ^{99m}Tc を溶離した。この溶離操作をさらに 3 回、約 24 時間毎に行った。 ^{99m}Tc 溶離率を求めるため、 ^{99m}Tc 溶出液の一部をサンプリングし放射能濃度を測定した。

(2) Re-PTC

NNC にて調製した ^{99}Mo (Mo) 溶液 15cm^3 及び 1M HCl 4.0cm^3 をガラス製三角フラスコへ分取し、 pH 2 の ^{99}Mo (Mo) 溶液を調製した。この ^{99}Mo (Mo) 溶液を Re-PTC が入ったバイアル瓶に添加しスラリー化させる。このスラリーを三角フラスコへ添加した。この三角フラスコを 90°C に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、 ^{99}Mo (Mo) 溶液と Re-PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、Re-PTC に未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm^3 程度加え Re-PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。Re-PTC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、洗浄液の放射能濃度を測定した。洗浄後、 ^{99}Mo (Mo) を吸着させた Re-PTC を、純水を使用して、ポリプロピレン製カラムに充填した（以降、Re-PTC カラムと呼ぶ）。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離の前準備として、カラムに溶離液と同じ 0.9% 生理食塩水 12cm^3 程度を通液した。これは、カラム充填までに生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及び未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去しコンディショニングを整えるための操作である。これら操作において発生したカラム充填液及び生理食塩水を含めた全溶液が 50cm^3 になるよう調整した。Re-PTC に吸着した Mo 量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。カラム作製から一昼夜経過した後、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離を行った。溶離操作は、Re-PTC カラムに対して、溶離液を $3\text{cm}^3 \times 4$ 回通液し、生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離した。この溶離操作をさらに 3 回、約 24 時間毎に行った。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離率を求めるため、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶出液の一部をサンプリングし放射能濃度を測定した。

3.2.2 PTC のリサイクル試験方法

PTC を用いて、リサイクル試験を行った。

まず、 ^{99}Mo (Mo) 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離を行い、その後 PTC から、 ^{99}Mo (Mo) を溶離・回収した。次に、 ^{99}Mo (Mo) が溶離した PTC を用いて再度 ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離を行い、さらに、 ^{99}Mo (Mo) を溶離・回収した。PTC を用いたリサイクル試験マトリクスを Table 9 に示す。

NNC にて調製した ^{99}Mo (Mo) 溶液 15cm^3 及び 1M HCl 3.3cm^3 をガラス製三角フラスコへ分取し、 pH 4 の ^{99}Mo (Mo) 溶液を調製した。その中へ PTC 1g を添加し攪拌した。この三角フラスコを 90°C に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、 ^{99}Mo (Mo) 溶液と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、PTC に未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm^3 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。PTC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、洗浄液の放射能濃度を測定した。洗浄後、 ^{99}Mo (Mo) を吸着させた PTC は、純水を使用して、ポリプロピレン製カラムに充填した。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離の前準備として、カラムに溶離液と同じ 0.9% 生理食塩水 12cm^3 程度を通液した。これは、カラム充填までに生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及び未吸着の ^{99}Mo (Mo) を除去しコンディショニングを整えるための操作である。これら操作において発生したカラム充填液及び生理食塩水を含めた全溶液が 50cm^3 になるよう調整した。PTC に吸着した ^{99}Mo (Mo) 吸着量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。カラム作製から一昼夜経過した後、

^{99m}Tc の溶離を行った。溶離操作は、PTC カラムに対して、溶離液を 12cm^3 通液し、生成した ^{99m}Tc を溶離した。 ^{99m}Tc 溶離率を求めるため、 ^{99m}Tc 溶出液の一部をサンプリングし放射能濃度を測定した。

^{99m}Tc 溶離後の PTC カラムより 1M NaOH 溶液 20cm^3 を用いて三角フラスコに PTC を回収した。この三角フラスコを 90°C に設定した恒温乾燥器中で 3 時間保温した。その際、 1M NaOH 溶液と PTC が十分接触するように 30 分毎に攪拌した。3 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、5 分間放冷した。放冷後、PTC から溶離した ^{99}Mo (Mo) を回収するために、デカンテーションを行い、上澄み液を除去した。さらに、純水を 5cm^3 程度加え PTC を洗浄し、その上澄み液をデカンテーションにより除去した。この操作を全液量が 50cm^3 になるまで繰返し行った。PTC から溶離した ^{99}Mo (Mo) 量を算出するため、この溶液の放射能濃度を測定した。

リサイクル性を確認するため、 ^{99}Mo (Mo) 溶離後の PTC (以降、Used-PTC と呼ぶ) を用いて、上記方法により再度 ^{99}Mo 吸着/ ^{99m}Tc 溶離及び ^{99}Mo (Mo) 溶離・回収を行った。試験を行うまでの間、乾燥を防ぐため、Used-PTC はウェットの状態にし、三角フラスコ内で保管した。

4. 未照射 Mo を用いた吸着剤の特性試験結果

4. 1 PZC の特性試験結果

4. 1. 1 PZC の Mo 吸着/溶離試験結果

PZC を用いた Mo 吸着試験結果を Table 10 に示す。今回合成した PZC 0.5g に対する Mo の吸着量は 111.3mg であった。吸着剤 1g 当たり換算すると、Mo 吸着量は 222.6mg である。

PZC を用いた Mo 溶離試験結果を Table 11 に示す。吸着した Mo 111.3mg に対し、溶離回収した Mo は 101.2mg であり、 90.9% の回収率となった。この結果から、 1M NaOH を添加し加熱処理することにより、効率的に溶離できることが明らかとなった。

4. 1. 2 PZC の pH 影響確認試験結果

PZC の pH 影響確認試験結果を Fig. 16 に、再吸着時の Mo 溶液の pH 変化を Table 12 に示す。Fig. 16 に示す通り、Mo 溶液の pH が 6 以上の場合、殆ど Mo が再吸着しないことを確認した。また、pH 2 以下では PZC 1g 当たり 200mg 以上再吸着し、初期の吸着量に近い値となった。Table 12 に示す通り、再吸着中の溶液 (PZC+Mo 溶液) の pH を測定すると、準備した Mo 溶液の pH が 6 以上でアルカリ性となる。このことから、PZC への Mo 再吸着を行う際は、Mo 溶液を酸性にする必要があることを確認した。また、再吸着量は、溶離と再吸着を繰り返してもほとんど変化がないことが明らかとなった。しかし、pH 1 では、溶液添加後に溶液が青色に変化することから Mo ポリイオンが形成されていると考えられる。

4.1.3 PZC のリサイクル性確認試験結果

PZC を用いたリサイクル性確認試験結果を Fig. 17 及び Table 13 に示す。未使用の PZC 1g 当たり 200mg 前後の Mo が吸着した。溶離/吸着操作を繰り返した行ったが、Mo 吸着量は大きく減少することもなく、200 mg前後で推移した。Mo 回収量は 7 サイクル目までは 170 mg前後で推移しているが、8 サイクル目以降で低下が見られた。今後は、この原因について調査する必要がある。また、吸着剤の構造自体は、繰り返しの吸着/溶離操作による著しい粉化は見られず、健全性を保っていた。

4.2 PTC の特性試験結果

4.2.1 PTC の Mo 吸着/溶離試験結果

PTC を用いた Mo 吸着試験結果を Table 14 に示す。今回合成した PTC 0.5g に対する Mo の吸着量は 104.5 mgであった。吸着剤 1g 当たりに換算すると、Mo 吸着量は 209.0mg である。

PTC を用いた Mo 溶離試験結果を Table 15 に示す。吸着した Mo 104.5mg に対し、溶離回収した Mo は 94.3mg であり、90.2%の回収率となった。この結果から、1 M NaOH を添加し加熱処理することにより、効率的に溶離できることが明らかとなった。

4.2.2 PTC のリサイクル性確認試験結果

PTC を用いたリサイクル性確認試験結果を Fig. 18 及び Table 16 に示す。未使用の PTC 1g 当たり 140～200mg 程度の Mo が吸着した。溶離/吸着操作を繰り返した行ったが、Mo 吸着量は、各サイクルで変動が観られたが、リサイクル回数の増加による減少は無かった。Mo 回収量は 10 サイクル目までは 130 mg前後で推移しているが、11 サイクル目で低下が見られた。12 サイクル以降の操作を行っていないため、一過性の物なのか、継続して低下していくのかが判断できなかった。今後はリサイクル回数を増やすことにより状況を確認する必要がある。また、繰り返しの吸着/溶離による嵩の減少は見られるが PTC の著しい粉化は見られず、健全性を保っていた。

5. 照射済 Mo を用いた吸着剤のホット試験結果

5.1 PZC ホット試験結果

5.1.1 PZC の ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験結果

PZC 及び Re-PZC を用いた ^{99}Mo (Mo) 吸着試験結果を Table 17 に示す。

(1) PZC

^{99}Mo (Mo) 溶液中の ^{99}Mo (Mo) 量が 300mg で放射能は 18.2MBq であり、洗浄液及び充填液の放射能が 3.7MBq 及び 0.4MBq であったことから、 ^{99}Mo (Mo) 吸着量は 231.4mg/g-PZC であった。

PZC を用いた $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離率を Table 18 に、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離液中の ^{99}Mo を Table 19 に、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離プロファイルを図 19 に示す。本試験において溶離率は 25.2～32.4%と低い値を示した。溶離特性としては、溶離プロファイルから分かるように第 1 フラクション (0～3cm³) に極大ピー

クがあり、第2フラクション (3~6cm³) 以降でのピークは低くなった。⁹⁹Mo (Mo) が不純物として3回目のミルキングの第3フラクション (6~9cm³) に^{99m}Tcの放射能に対し8.63%混入していた。これらの結果から、各ミルキングにおいて第1及び第2フラクションを回収することにより高純度の^{99m}Tc溶液を得られることを確認した。

(2) Re-PZC

⁹⁹Mo (Mo) 溶液中の⁹⁹Mo (Mo) 量が300mgで放射能は18.2MBqであり、洗浄液及び充填液の放射能が9.3MBq及び0.5MBqであったことから、⁹⁹Mo (Mo) 吸着量は139.7mg/Re-PZCであった。

Re-PZCを用いた^{99m}Tc溶離率をTable 20に、^{99m}Tc溶離液中の⁹⁹MoをTable 21に、^{99m}Tc溶離プロファイルを図20に示す。本試験において溶離率が63.8~83.0%を示した。溶離特性としては、溶離プロファイルから分かるように第1フラクションに極大ピークがあり、第2フラクション以降でのピークは低くなった。⁹⁹Mo (Mo) が不純物として2回目のミルキングの第1フラクションに^{99m}Tcの放射能に対し0.1%混入していた。これらの結果から、各ミルキングにおいて第1及び第2フラクションのみを回収することにより純度の高い^{99m}Tc溶液を得られることを確認した。しかしながら、一部第1フラクションで⁹⁹Moの混入が見られたことから、PZCを⁹⁹Mo-^{99m}Tcジェネレータとして実用化し、繰り返し使用する場合は、ジェネレータの下部にアルミナカラムを装着する必要があることが確認できた。

5.1.2 PZCのリサイクル試験結果

PZCを用いたリサイクル試験結果をTable 22に示す。1回目の⁹⁹Mo (Mo) 吸着/^{99m}Tc溶離として以下の結果が得られた。⁹⁹Mo (Mo) 溶液中の⁹⁹Mo (Mo) 量が300.0mgで放射能は14.4MBqであり、洗浄液及び充填液の放射能が2.6MBq及び0.27MBqであったことから、⁹⁹Mo (Mo) 吸着量は238.4mg/g-PZCであった。このことから、Mo吸着量に関して⁹⁹Mo吸着/^{99m}Tc溶離試験同様、これまでの実験結果と同程度値であることが確認できた。溶離率は、26.2%で、⁹⁹Mo吸着/^{99m}Tc溶離試験と同様に非常に低い値を示した。このことから、今回使用したPZCは、^{99m}Tcが溶離し難いものである可能性がある。1回目の⁹⁹Mo (Mo) 回収として以下の結果が得られた。PZCへの⁹⁹Mo (Mo) 吸着量が11.6MBqであり、回収液の放射能が9.1MBqであったことから、⁹⁹Mo (Mo) 回収率は78.3%であった。

Used-PZCを用いた2回目の⁹⁹Mo (Mo) 吸着/^{99m}Tc溶離として以下の結果が得られた。

⁹⁹Mo (Mo) 溶液中の⁹⁹Mo (Mo) 量が300.0mgで放射能は8.7MBqであり、洗浄液及び充填液の放射能が3.74MBq及び0.21MBqであったことから、⁹⁹Mo (Mo) 吸着は164.0mg/Used-PZCであった。このことから、Moの吸着量に関してこれまでの実験結果と同程度の値であることが確認できた。溶離率は54.3%と、ここでも低い値を示した。2回目の⁹⁹Mo (Mo) 回収として以下の結果が得られた。Used-PZCへの⁹⁹Mo (Mo) 吸着量が4.8MBqであり、回収液の放射能が3.3MBqであったことから、⁹⁹Mo (Mo) 回収率は68.1%であった。

5.2 PTCのホット試験結果

5.2.1 PTCの ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験結果

PTC及びRe-PTCを用いた ^{99}Mo (Mo) 吸着試験結果をTable 23に示す。

(1) PTC

^{99}Mo (Mo) 溶液中の ^{99}Mo (Mo) 量が300mgで放射能は18.2MBqであり、洗浄液及び充填液の放射能が4.8MBq及び0.2MBqであったことから、 ^{99}Mo (Mo) 吸着量は215.3mg/g-PTCであった。

PTCを用いた $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離率をTable 24に、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離液中の ^{99}Mo をTable 25に、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離プロファイルをFig. 21に示す。本試験において溶離率は69.1～85.9%を示した。溶離特性としては、溶離プロファイルから分かるように第1フラクションに極大ピークがあり、第2フラクション以降でのピークは低くなった。 ^{99}Mo (Mo) が不純物として殆どのフラクションに混入していた。混入量は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能に対し0.4～28.0%となった。第1フラクションでは、1%未満と低い不純物の混入率であった。高い不純物の混入率を示したのは、フラクションが進むにつれて $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能は大きく低下していくが、 ^{99}Mo の放射能はそれほど大きく低下していかなかったためである。これらの結果から、各ミルキングにおいて第1フラクションのみを回収することにより、PZCよりも高濃度 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶液を得られることが確認できた。純度を高めるために、PTCを ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータとして実用化した場合、必ずジェネレータの下部にアルミナカラムを装着する必要があることが確認できた。

(2) Re-PTC

^{99}Mo (Mo) 溶液中の ^{99}Mo (Mo) 量が300mgで放射能は18.2MBqであり、洗浄液及び充填液の放射能が7.7MBq及び0.3MBqであったことから、 ^{99}Mo (Mo) 吸着量は167.5mg/Re-PTCであった。

Re-PTCを用いた $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離率をTable 26に、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離液中の ^{99}Mo をTable 27に、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離プロファイルをFig. 22に示す。本試験において溶離率は55.5～68.6%を示した。溶離特性としては、溶離プロファイルから分かるように第1フラクションに極大ピークがあり、第2フラクション以降でのピークは低くなった。 ^{99}Mo (Mo) が不純物として2回目のミルキング以降の大部分のフラクションに混入していた。混入量は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能に対し0.6～66.0%となった。第1フラクションでは、1%未満と低い不純物の混入率であった。高い不純物の混入率を示したのは、PTC同様フラクションが進むにつれて $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能は大きく低下していくが、 ^{99}Mo の放射能はそれほど大きく低下していかなかったためである。これらの結果から、各ミルキングにおいて第1フラクションのみを回収することにより、PZCほどではないが純度の高い $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶液を得られることが確認できた。また、PTCを ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータとして実用化した場合、ジェネレータの下部にアルミナカラムを装着する必要があることから、繰り返し使用する場合でも必ず装着する必要がある。

5. 2. 2 PTC のリサイクル試験結果

PTC を用いたリサイクル試験結果を Table 28 に示す。1 回目の ^{99}Mo (Mo) 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離として以下の結果が得られた。 ^{99}Mo (Mo) 溶液中の ^{99}Mo (Mo) 量が 300.0mg で放射能は 14.4MBq であり、洗浄液及び充填液の放射能が 3.2MBq 及び 0.15MBq であったことから、 ^{99}Mo (Mo) 吸着量は 227.9mg/g-PTC であった。このことから、Mo 吸着量に関して ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験同様、これまでの実験結果と同程度値であることが確認できた。溶離率は、81.2%で、 ^{99}Mo 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験と同様の値を示し、良好な値であると考ええる。1 回目の ^{99}Mo (Mo) 回収として以下の結果が得られた。PTC への ^{99}Mo (Mo) 吸着量が 11.0MBq であり、回収液の放射能が 8.2MBq であったことから、 ^{99}Mo (Mo) 回収率は 74.1%であった。

Used-PTC を用いた 2 回目の ^{99}Mo (Mo) 吸着/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離として以下の結果が得られた。

^{99}Mo (Mo) 溶液中の ^{99}Mo (Mo) 量が 300.0mg で放射能は 8.7MBq であり、洗浄液及び充填液の放射能が 4.82MBq 及び 0.11MBq であったことから、 ^{99}Mo (Mo) 吸着は 130.6mg/Used-PTC であった。このことから、Mo の吸着量に関してこれまでの実験結果と同程度の値であることが確認できた。溶離率は 61.5%と、1 回目よりも低い値を示した。2 回目の ^{99}Mo (Mo) 回収として以下の結果が得られた。Used-PTC への ^{99}Mo (Mo) 吸着量が 3.8MBq であり、回収液の放射能が 2.1MBq であったことから、 ^{99}Mo (Mo) 回収率は 55.0%であった。

6. 結 論

PTC は再利用することを前提とし開発された吸着剤であったが、PZC は再利用することが困難であると考えられていた。しかし、使用済みの PZC を水中で保管することで再利用できることが確認できた。どちらの吸着剤も、最終的に Mo 吸着サイトとなるのが M-OH (M: Zr または Ti) である。この M-OH のヒドロキシル基 (OH^-) と MoO_4^{2-} が置換することにより吸着反応が起こると考えられる。したがって、Mo の溶離時において Mo-OH が再生できるか否かがこれら吸着剤のリサイクル性に係る重要なポイントとだと考える。本試験では、使用済吸着剤から NaOH により Mo を溶離回収した。その結果、Mo は Na_2MoO_4 の形で回収され、Mo の抜けた M^+ -サイトには OH が吸着することになる。これにより Mo-OH が再生され、吸着剤が再利用可能となる。しかしながら、M-OH は乾燥することで、脱水縮合による M-O-M 結合が増加する。その結果、吸着サイトとなる M-OH が減少してしまう。そこで、Mo 溶離済みの吸着剤の乾燥を避け、Mo 吸着サイトとなる M-OH を維持するためウェットの状態で保管することにより吸着剤が再利用できることを証明した。

未照射 Mo を用いた吸着剤の特性試験により、最適な Mo 吸着/溶離条件を見つけることができた。未使用吸着剤の Mo 吸着量は、各吸着剤あたり約 220 mg/g-PZC 及び約 210 mg/g-PTC であることが確認できた。本結果は、これまでの研究結果と同様であり、妥当と考えられる。使用済みの吸着剤からは、1M NaOH により、1 時間で 90%以上の Mo を回収できることが明らかとなり、本方法の妥当性を確認した。再生された吸着剤への Mo 再吸着については、未使用吸着剤への吸着時よりも Mo 溶液を酸性にすることによって十分な結果が得られることが確認できた。pH の適正值としては、2 程度であり、これより低下すると、Mo のポリイオンが形成されることが確認できた。最

適条件において繰り返し Mo の吸着/溶離を行った結果、ばらつきはあるものの、著しい減少もなく吸着できることを確認した。

照射済 Mo を用いた吸着剤のホット試験により、有用な試験データを蓄積することができた。⁹⁹Mo (Mo) 吸着量に関し、Re-PZC の Mo 吸着量が若干少ないものの、概ね良好な結果が得られた。^{99m}Tc 溶離率に関して、PZC において非常に低い値となった。この原因については、今後の課題として、調査する必要がある。一つの可能性としては、以下が考えられる。MoO₃ を NaOH 溶液に溶解させると、通常 MoO₄²⁻ が生じる。この溶液の pH が低下するにつれ、多数個のモリブデン原子をもったアニオンが生成される (Ex; Mo₈O₂₆⁴⁻)¹¹⁾。これにより ^{99m}Tc が ^{99m}TcO₄⁻ 以外の形となり溶離しなかった可能性がある。PTC は構造上 Cl を含まないため、溶液の pH 低下がないため、安定した溶離率を示したと考えられる。^{99m}Tc 溶液中の ⁹⁹Mo に関して、PZC 及び Re-PZC では一部フラクションに ⁹⁹Mo の混入が見られた。PTC 及び Re-PTC では大部分のフラクションに ⁹⁹Mo の混入が見られた。

(n, f) 法により製造された ⁹⁹Mo を吸着した ⁹⁹Mo-^{99m}Tc ジェネレータから得られる過テクネチウム酸ナトリウム注射液中の ⁹⁹Mo 混入量は 0.015% 以下となっている。このことから、各吸着を使用し作製した ⁹⁹Mo-^{99m}Tc ジェネレータには、アルミナカラム等を装着することにより最終製品への ⁹⁹Mo の混入を防止する必要がある。再生した PZC 及び PTC における ⁹⁹Mo (Mo) 吸着量は、これまでの研究結果よりも若干低めであったが大きな問題ではないと考える。しかしながら、^{99m}Tc 溶離率に関して、⁹⁹Mo 吸着/^{99m}Tc 溶離試験同様 PZC で非常に低い値となった。⁹⁹Mo (Mo) の回収率は、これまでの研究結果よりも低い値を示した。さらに、1 回目よりも 2 回目の方が低下している。この結果から、リサイクル回数が増加するごとに Mo 吸着量、^{99m}Tc 溶離率及び回収率等が低下する可能性があるため、試行回数を増加しデータ収集する必要がある。

本試験により、PZC 及び PTC のリサイクル性について見通しが得られた。しかしながら、ワールド試験びホット試験間での試験データの差異が見受けられた。Ge 半導体検出器での放射能濃度測定を行ったが、ジオメトリが点線源のみしかなかったため、測定誤差が大きいと考えられる。

今後は、分析・測定方法を改善することにより、より正確なデータを取得する必要がある。

謝 辞

本研究開発は、独立行政法人科学技術振興機構(JST)の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)の「本格研究開発ステージ ハイリスク挑戦タイプ」の「放射化法を用いた医療診断用⁹⁹Mo 製造サイクルの実用化(課題番号: AS2314099C)」の一環として実施した成果である。また、ホット試験は、「日本原子力研究開発機構とカザフスタン国立原子力センター(NNC)との間の原子力科学分野における研究開発協力のための実施取決め」に係る特定協力課題「STC No. 2-II: RI 製造に関する照射技術」の一環として、カザフスタン共和国の国立原子力センター(NNC)核物理研究所(INP)との共同実験の成果である。

本研究開発の実施にあたり、大洗研究開発センター 照射試験炉センター 荒木 政則 センター長及び材料試験炉部 石原 正博 部長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本報告書をまとめるにあたり、梅田 幹 福島技術開発試験部分析技術課長及び照射試験炉センター 照射試験開発課 石田 卓也氏に有意義なご助言をいただきました。さらに、照射試験炉センター及び材料試験炉部諸氏には多大なご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 会議報告 第2回シンポジウム「RI 国内製造に向けての開発研究」日本原子力学会誌 アトモス Vol. 52、 No. 12、 P. 61 (2010).
- 2) 中村 吉秀、「テクネチウム-99m 放射性医薬品の安定供給の現状と課題」、(オンライン)
<http://www.com-info.org/ima/ima_20100721_nakamurayoshihide.html>
- 3) 照射試験炉センター、「照射試験炉センターの活動報告(2007 年度)」JAEA-Review 2008-081 (2009).
- 4) 長谷川 良雄、西野 瑞香、石川 幸治 他、「 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータ用 Mo 吸着剤およびその製造方法」、特許第 2857394 号.
- 5) M. Tanase, et al., 「A $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator using a New Inorganic Polymer Adsorbent for (n, γ) ^{99}Mo 」Appl. Radiat. Isot., 48 (1997) PP. 607-611.
- 6) FNCA : FNCA 2006 研究炉利用ワークショップ、(オンライン)
<http://www.fnca.mext.go.jp/rru/ws_2006.html>
- 7) 木村 明博、出雲 寛互、土谷 邦彦 他、「(n, γ)法用モリブデン吸着材の ^{99}Mo 吸着及び $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離特性」JAEA-Technology 2009-075 (2009).
- 8) 木村 明博、出雲 寛互、土谷 邦彦 他、「(n, γ)法用モリブデン吸着材の ^{99}Mo 吸着及び $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離特性の再確認試験」JAEA-Testing 2010-002 (2010).
- 9) 長谷川 良雄、木村 明博、谷本 政隆 他、「無機高分子系モリブデン吸着剤及びその製造方法」、特願 2010-263801 .
- 10) 木村 明博、谷本 政隆、石田 卓也 他、「塩素フリー無機高分子系 Mo 吸着剤の開発」JAEA-Technology 2011-012 (2011).
- 11) H. Arino, H. H. Kramer、「Fission product $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator」 Int. J. Appl. Radiat. Isot., 26, PP. 301-303 (1975).

Table 1 Mo adsorption/elution test matrix with PZC

Adsorption test	Volume of Mo solution (cm ³)	10
	Concentration of Mo in Mo solution (mg/cm ³)	15
	pH	7
	PZC weight (g)	0.5
	Adsorption time (h)	3
	Adsorption temperature (°C)	90
Elution test	Recovery solution	1M NaOH
	Volume of recovery solution (cm ³)	10
	Recovery time (h)	1
	Recovery temperature (°C)	90

Table 2 Confirmation test matrix of influence of pH on PZC

Re-adsorption test	Volume of Mo solution (cm ³)	10
	Concentration of Mo in Mo solution (mg/cm ³)	15
	pH	1-9
	Adsorption time (h)	1
	Adsorption temperature (°C)	90
	Cycle (Times)	4
Elution test	Recovery solution	1M NaOH
	Volume of recovery solution (cm ³)	10
	Recovery time (h)	1
	Recovery temperature (°C)	90

Table 3 Confirmation test matrix of recyclability of PZC

Adsorption test	Volume of Mo solution (cm ³)	10
	Concentration of Mo in Mo solution (mg/cm ³)	15
	pH	7
	PZC weight (g)	0.5
	Adsorption time (h)	3
	Adsorption temperature (°C)	90
Elution test	Recovery solution	1M NaOH
	Volume of recovery solution (cm ³)	10
	Recovery time (h)	1
	Recovery temperature (°C)	90
Re-adsorption test	Volume of Mo solution (cm ³)	10
	Concentration of Mo in Mo solution (mg/cm ³)	15
	pH	2
	Adsorption time (h)	3
	Adsorption temperature (°C)	90
	Cycle (Times)	11

Table 4 Mo adsorption/elution test matrix with PTC

Adsorption test	Volume of Mo solution (cm ³)	10
	Concentration of Mo in Mo solution (mg/cm ³)	15
	pH	4
	PTC weight (g)	0.5
	Adsorption time (h)	3
	Adsorption temperature (°C)	90

Table 5 Confirmation test matrix of recyclability of PTC

Adsorption test	Volume of Mo solution (cm ³)	10
	Concentration of Mo in Mo solution (mg/cm ³)	15
	pH	4
	PTC weight (g)	0.5
	Adsorption time (h)	3
	Adsorption temperature (°C)	90
Desorption test	Recovery solution	1M NaOH
	Volume of recovery solution (cm ³)	10
	Recovery time (h)	1
	Recovery temperature (°C)	90
Re-adsorption test	Volume of Mo solution (cm ³)	10
	Concentration of Mo in Mo solution (mg/cm ³)	15
	pH	2
	Adsorption time (h)	3
	Adsorption temperature (°C)	90
	Cycle (Times)	11

Table 6 ⁹⁹Mo adsorption/^{99m}Tc elution test matrix with PZC and Re-PZC

Adsorbent	PZC	Re-PZC
Adsorbent weight (g)	1.0	-
Volume of ⁹⁹ Mo(Mo) solution (cm ³)	15	
Activity (MBq)	18	
Mo weight (mg)	300	
pH of ⁹⁹ Mo(Mo) solution	7	2
Volume of 1M HCl (cm ³)	-	4.0
Adsorption time (h)	3	
Adsorption temperature (°C)	90	
Eluate	Saline	
Fraction of eluate	3 (cm ³) x 4	
Milking repetition	4	

Table 7 Recycling test matrix with PZC

Adsorbent	PZC	Used-PZC
Adsorbent weight (g)	1.0	-
Volume of $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution (cm^3)	15	
Activity (MBq)	18	
Mo weight (mg)	300	
pH of $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution	7	2
Volume of 1M HCl (cm^3)	-	4.0
Adsorption time (h)	3	
Adsorption temperature ($^{\circ}\text{C}$)	90	
Eluate	Saline	
Volume of eluate (cm^3)	12	
Recovery solution	1M NaOH	
Volume of recovery solution (cm^3)	20	
Recovery time (h)	2	
Recovery temperature ($^{\circ}\text{C}$)	90	

Table 8 ^{99}Mo adsorption/ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution test matrix with PTC and Re-PTC

Adsorbent	PTC	Re-PTC
Adsorbent weight (g)	1.0	-
Volume of $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution (cm^3)	15	
Activity (MBq)	18	
Mo weight (mg)	300	
pH of $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution	4	2
Volume of 1M HCl (cm^3)	3.3	4.0
Adsorption time (h)	3	
Adsorption temperature ($^{\circ}\text{C}$)	90	
Eluate	Saline	
Fraction of eluate	3 (cm^3) x 4	
Milking repetition	4	

Table 9 Recycling test matrix with PTC

Adsorbent	PTC	Used-PTC
Adsorbent weight (g)	1.0	-
Volume of $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution (cm^3)	15	
Activity (MBq)	15	
Mo weight (mg)	300	
pH of $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution	4	2
Volume of 1M HCl (cm^3)	3.3	4.0
Adsorption time (h)	3	
Adsorption temperature ($^{\circ}\text{C}$)	90	
Eluate	Saline	
Volume of eluate (cm^3)	12	
Recovery solution	1M NaOH	
Volume of recovery solution (cm^3)	20	
Recovery time (h)	2	
Recovery temperature ($^{\circ}\text{C}$)	90	

Table 10 Mo adsorption test result with PZC

PZC weight (g)	Weight of Mo in Mo solution (mg)	Weight of Mo in washing solution (mg)	Weight of adsorption Mo (mg)	Weight of adsorption Mo (mg/g-PZC)
0.5	150 $\pm$ 1.6	38.7 $\pm$ 0.6	111.3	222.6

Table 11 Mo elution test result with PZC

Weight of adsorption Mo (mg)	Weight of recovered Mo (mg)	Recovery rate (%)
111.3	101.2 $\pm$ 0.4	90.9

Table 12 Confirmation test result of influence of pH on PZC

pH in Mo solution	Conversion of pH		
	1st	3rd	4th
pH 1	1.55	1.43	1.45
pH 2	5.05	5.24	5.11
pH 3	-	5.32	5.32
pH 4	-	5.41	5.44
pH 5	-	5.61	5.67
pH 6	11.10	11.56	10.42
pH 7	11.39	11.86	11.29
pH 8	11.42	11.86	11.35
pH 9	11.45	-	11.36

Table 13 Confirmation test result of recyclability of PZC

	Weight of adsorbed Mo (mg/g-PZC)	Weight of recovered Mo (mg/g-PZC)	Recovery rate (%)
1st	195.1±0.3	171.4±1.2	87.8
2nd	199.4±0.3	170.1±0.1	85.3
3rd	215.7±5.5	175.8±2.4	81.5
4th	207.3±6.1	165.9±2.3	80.0
5th	196.1±4.5	168.1±2.3	85.7
6th	188.1±2.0	168.0±0.9	89.3
7th	198.0±0.5	168.6±0.8	85.1
8th	215.9±3.8	129.1±0.9	49.8
9th	204.9±0.8	124.8±0.5	60.9
10th	220.0±1.7	134.2±1.4	61.0
11th	201.6±1.7	146.1±1.1	72.4

Table 14 Mo adsorption test result with PTC

PTC weight (g)	Weight of Mo in Mo solution (mg)	Weight of Mo in washing solution (mg)	Weight of adsorbed Mo (mg)	Weight of adsorption Mo (mg/g-PTC)
0.5	150±0.3	45.5±0.2	104.5	209.0

Table 15 Mo elution test result with PTC

Weight of adsorbed Mo (mg)	Weight of recovered Mo (mg)	Recovery rate (%)
104.5	94.3±1.5	90.2

Table 16 Confirm test of recyclability result with PTC

	Weight of adsorbed Mo (mg/g-PTC)	Weight of recovered Mo (mg/g-PTC)	Recovery rate (%)
1st	163.1±1.3	139.9±0.4	85.8
2nd	172.8±1.3	139.6±1.2	80.7
3rd	154.1±2.1	136.7±0.5	88.7
4th	146.2±1.8	127.5±0.4	87.2
5th	144.2±0.4	126.1±1.4	87.4
6th	149.3±1.4	127.1±0.4	85.1
7th	201.0±1.9	127.0±1.1	63.2
8th	204.4±1.6	134.8±1.1	66.0
9th	203.2±1.8	126.6±1.6	62.3
10th	168.9±3.5	133.6±0.8	79.1
11th	146.0±0.9	111.7±0.6	76.5

Table 17 ^{99}Mo adsorption test result with PZC and Re-PZC

		PZC	Re-PZC
Adsorbent weight (g)		1.01	-
$^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution	Radioactivity (MBq)	18.2	18.2
	Mo weight (mg)	300	300
Washing solution	Radioactivity (MBq)	3.68	9.27
	Mo weight (mg)	60.6	152.9
Packing solution	Radioactivity (MBq)	0.39	0.45
	Mo weight (mg)	6.5	7.5
Column	Radioactivity (MBq)	14.2	8.47
	Mo weight (mg)	232.9	139.7
Adsorption weight		231.4 (mg/g-PZC)	139.7 (mg/Re-PZC)

Table 18 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution rate with PZC

	1st Milking		2nd Milking		3rd Milking		4th Milking	
cm^3	Radioactivity (Bq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)
0-3	2.7×10^6	28.3	2.3×10^6	27.5	1.9×10^6	28.5	1.1×10^6	22.2
3-6	2.8×10^5	2.9	2.6×10^5	3.2	2.2×10^5	3.4	1.3×10^5	2.7
6-9	3.0×10^4	0.3	2.4×10^4	0.3	2.4×10^4	0.4	1.3×10^4	0.3
9-12	1.3×10^3	0.0	8.7×10^3	0.1	6.5×10^3	0.1	4.7×10^3	0.1
SUM	3.0×10^6	31.4	2.6×10^6	31.1	2.1×10^6	32.4	1.3×10^6	25.2

Table 19 Amount of ^{99}Mo in $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eluate (PZC)

	1st Milking	2nd Milking	3rd Milking	4th Milking
cm^3	Radioactivity rate (Bq /Bq- $^{99\text{m}}\text{Tc}$, %)			
0-3	N.D	N.D	N.D	N.D
3-6	N.D	N.D	N.D	N.D
6-9	N.D	N.D	8.6	N.D
9-12	N.D	N.D	N.D	N.D

Table 20 ^{99m}Tc elution rate with Re-PZC

	1st Milking		2nd Milking		3rd Milking		4th Milking	
cm^3	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)
0-3	4.4×10^6	76.3	2.8×10^6	57.6	2.6×10^6	69.7	1.9×10^6	63.6
3-6	3.3×10^5	5.8	2.6×10^5	5.4	1.9×10^5	5.0	1.4×10^5	4.6
6-9	3.5×10^4	0.6	2.4×10^4	0.5	1.8×10^4	0.5	1.3×10^4	0.4
9-12	1.9×10^4	0.3	1.2×10^4	0.3	8.5×10^3	0.2	6.5×10^3	0.2
SUM	4.8×10^6	83.0	3.1×10^6	63.8	2.9×10^6	75.4	2.0×10^6	68.8

Table 21 Amount of ^{99}Mo in ^{99m}Tc eluate (Re-PZC)

	1st Milking	2nd Milking	3rd Milking	4th Milking
cm^3	Radioactivity rate (Bq /Bq- ^{99m}Tc , %)			
0-3	N.D	0.1	N.D	N.D
3-6	N.D	N.D	N.D	N.D
6-9	N.D	N.D	N.D	N.D
9-12	N.D	N.D	N.D	N.D

Table 22 Recycling test result with PZC

		1st	2nd (Used-PZC)
Adsorbed $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$		238.4 mg/g-PZC	164.0 mg/Used-PZC
Milking	^{99m}Tc yield (%)	26.2	54.3
	^{99}Mo in ^{99m}Tc solution (Bq /Bq- ^{99m}Tc , %)	-	-
Recovered $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ (%)		78.3	68.1

Table 23 ^{99}Mo adsorption test result with PTC and Re-PTC

		PTC	Re-PTC
Adsorbent weight (g)		1.01	-
$^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ solution	Radioactivity (MBq)	18.2	18.2
	Mo weight (mg)	300	300
Washing solution	Radioactivity (MBq)	4.8	7.72
	Mo weight (mg)	79.0	127.4
Packing solution	Radioactivity (MBq)	0.21	0.31
	Mo weight (mg)	3.4	5.1
Column	Radioactivity (MBq)	13.2	10.1
	Mo weight (mg)	217.6	167.5
Adsorption weight		215.3 (mg/g-PTC)	167.5 (mg/Re-PTC)

Table 24 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution rate with PTC

	1st Milking		2nd Milking		3rd Milking		4th Milking	
cm^3	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)
0-3	7.4×10^6	81.6	5.6×10^6	75.0	4.9×10^6	84.0	3.1×10^6	67.7
3-6	1.3×10^5	1.4	1.0×10^5	1.4	8.0×10^4	1.4	4.5×10^4	1.0
6-9	3.3×10^4	0.4	2.7×10^4	0.4	1.6×10^4	0.3	9.7×10^3	0.2
9-12	2.4×10^4	0.3	2.2×10^4	0.3	1.2×10^4	0.2	9.9×10^3	0.2
SUM	7.6×10^6	83.7	5.8×10^6	77.1	5.0×10^6	85.9	3.1×10^6	69.1

Table 25 Amount of ^{99}Mo in $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eluate (PTC)

	1st Milking	2nd Milking	3rd Milking	4th Milking
cm^3	Radioactivity rate (Bq /Bq- $^{99\text{m}}\text{Tc}$, %)			
0-3	0.6	0.4	0.4	-
3-6	18.7	12.2	6.4	8.5
6-9	N.D	28.0	22.3	N.D
9-12	N.D	N.D	26.1	N.D

Table 26 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ elution rate with Re-PTC

	1st Milking		2nd Milking		3rd Milking		4th Milking	
cm^3	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)	Radioactivity (MBq)	Yield (%)
0-3	4.6×10^6	66.3	3.3×10^6	56.7	2.7×10^6	58.8	1.9×10^6	54.0
3-6	1.0×10^5	1.5	7.5×10^4	1.3	6.1×10^4	1.3	4.3×10^4	1.2
6-9	2.8×10^4	0.4	1.8×10^4	0.3	1.3×10^4	0.3	6.3×10^3	0.2
9-12	2.4×10^4	0.4	1.3×10^4	0.2	9.0×10^3	0.2	5.3×10^3	0.1
SUM	4.8×10^6	68.6	3.4×10^6	58.5	2.8×10^6	60.6	2.0×10^6	55.5

Table 27 Amount of ^{99}Mo in $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eluate (Re-PTC)

	1st Milking	2nd Milking	3rd Milking	4th Milking
cm^3	Radioactivity rate (Bq /Bq- $^{99\text{m}}\text{Tc}$, %)			
0-3	N.D	0.6	0.8	N.D
3-6	N.D	16.3	15.3	12.9
6-9	N.D	60.9	48.6	N.D
9-12	N.D	66.0	56.1	N.D

Table 28 Recycling test result with PTC

		1st	2nd (Used-PTC)
Adsorbed $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$		227.9 mg/g-PTC	130.6 mg/Used-PTC
Milking	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ yield (%)	81.2	61.5
	^{99}Mo in $^{99\text{m}}\text{Tc}$ solution (Bq /Bq- $^{99\text{m}}\text{Tc}$, %)	0.5	1.5
Recovered $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ (%)		74.1	55.0

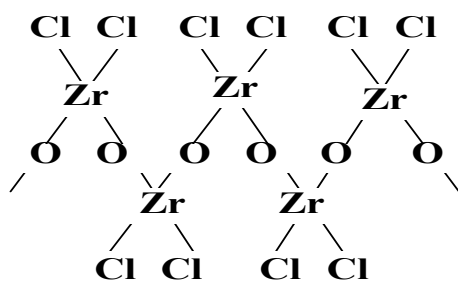


Fig. 1 Structure of PZC

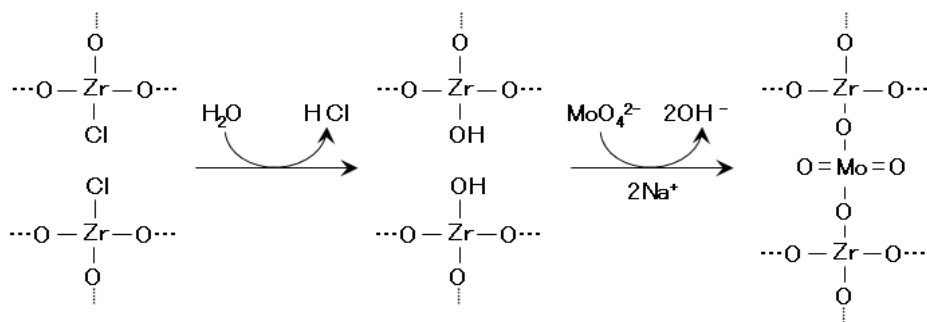


Fig. 2 Mo adsorption mechanism to PZC

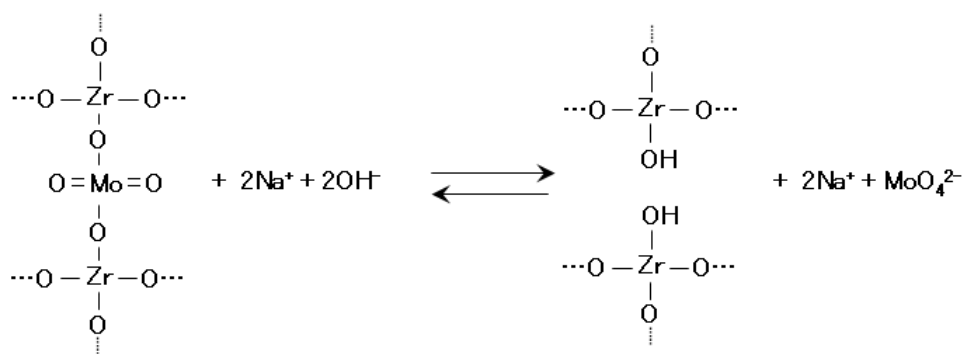


Fig. 3 Mo elution mechanism from PZC

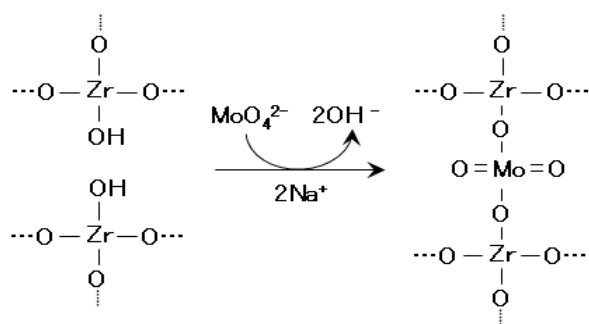


Fig. 4 Mo adsorption mechanism to recycled PZC



Fig. 5 Adsorbent synthesis device

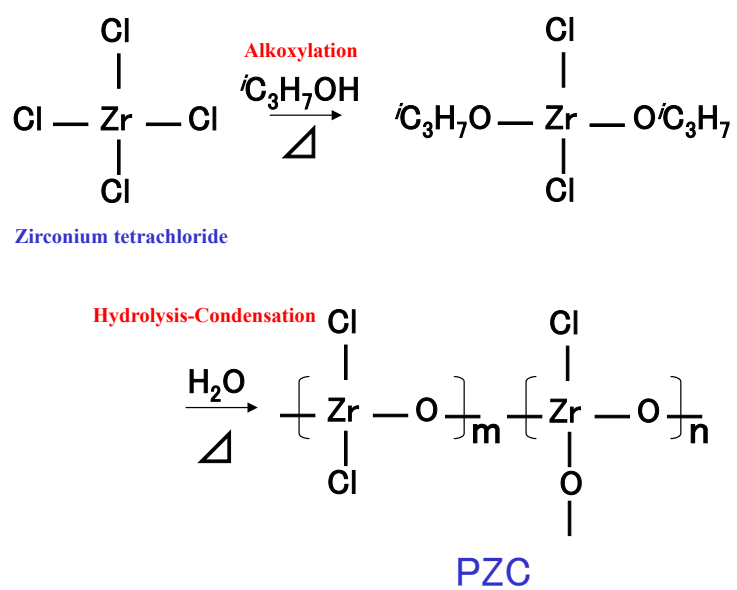


Fig. 6 Synthesis flow of PZC



Fig. 7 Visual photograph of PZC

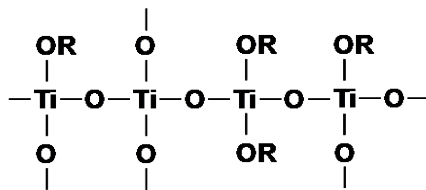


Fig. 8 Structure of PTC

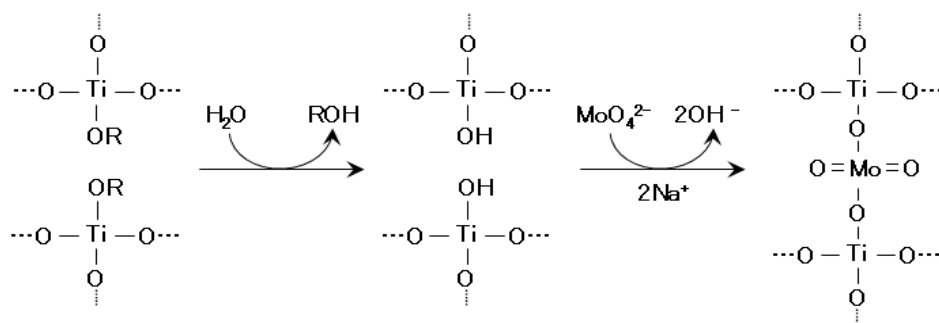


Fig. 9 Mo adsorption mechanism to PTC

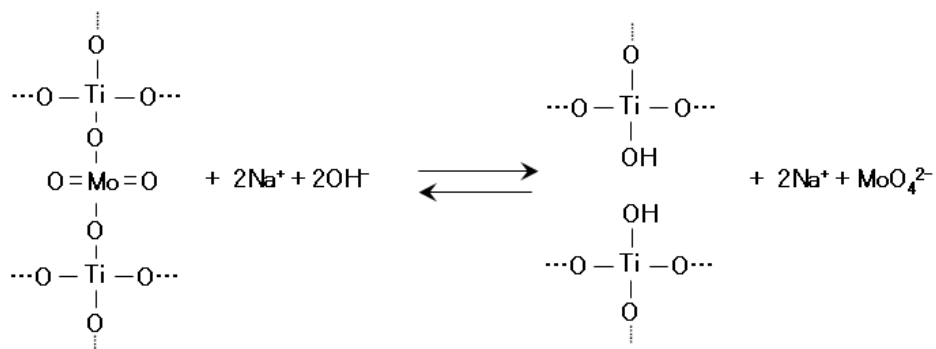


Fig. 10 Mo elution mechanism from PTC

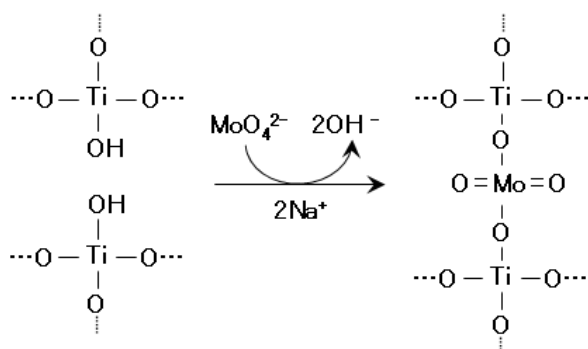


Fig. 11 Mo adsorption mechanism to regenerated PTC

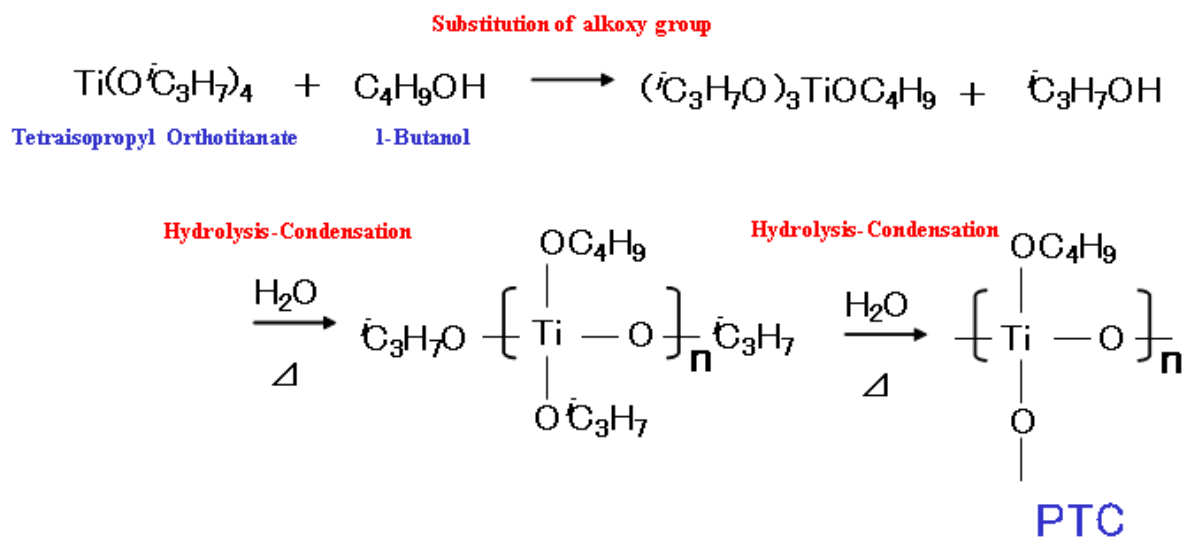


Fig.12 Synthesis flow of PTC



Fig. 13 Visual photograph of PTC

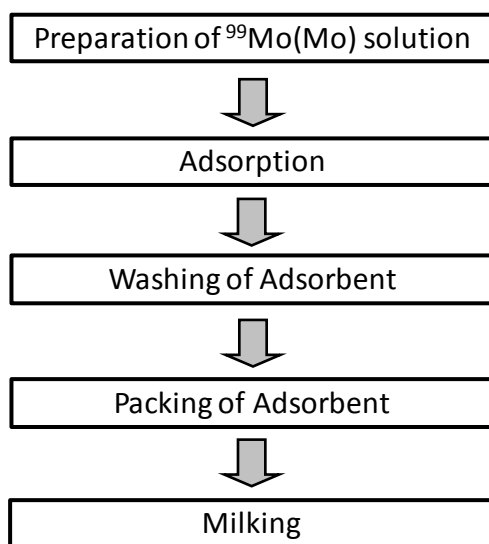


Fig.14 ⁹⁹Mo adsorption/^{99m}Tc elution test flow

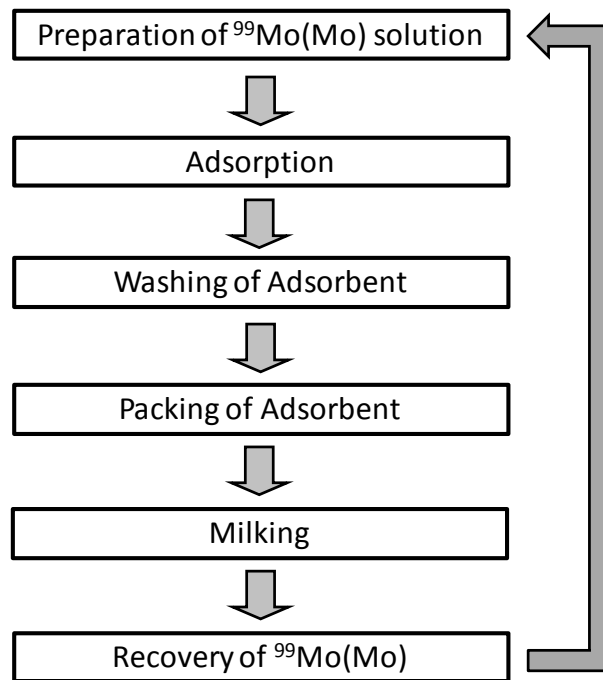


Fig.15 Recycling test flow

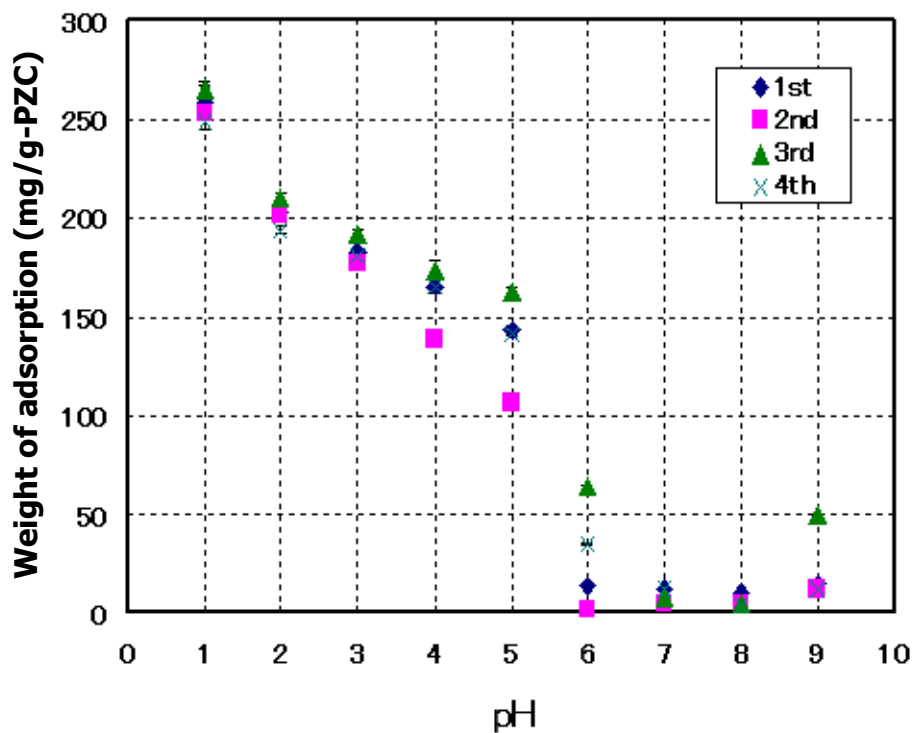


Fig. 16 Relation between pH and amount of Mo re-adsorption (PZC)

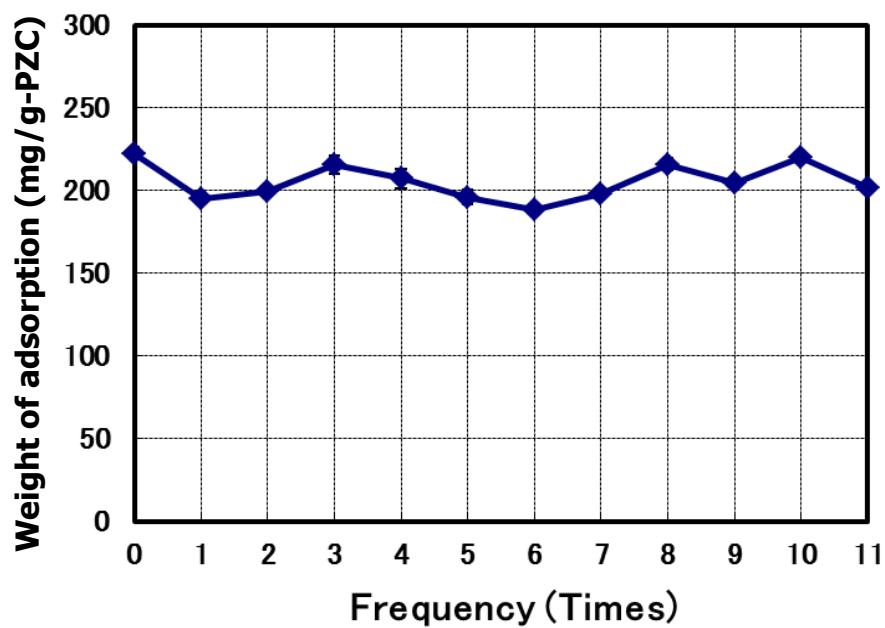


Fig. 17 Confirmation test result of recyclability of PZC

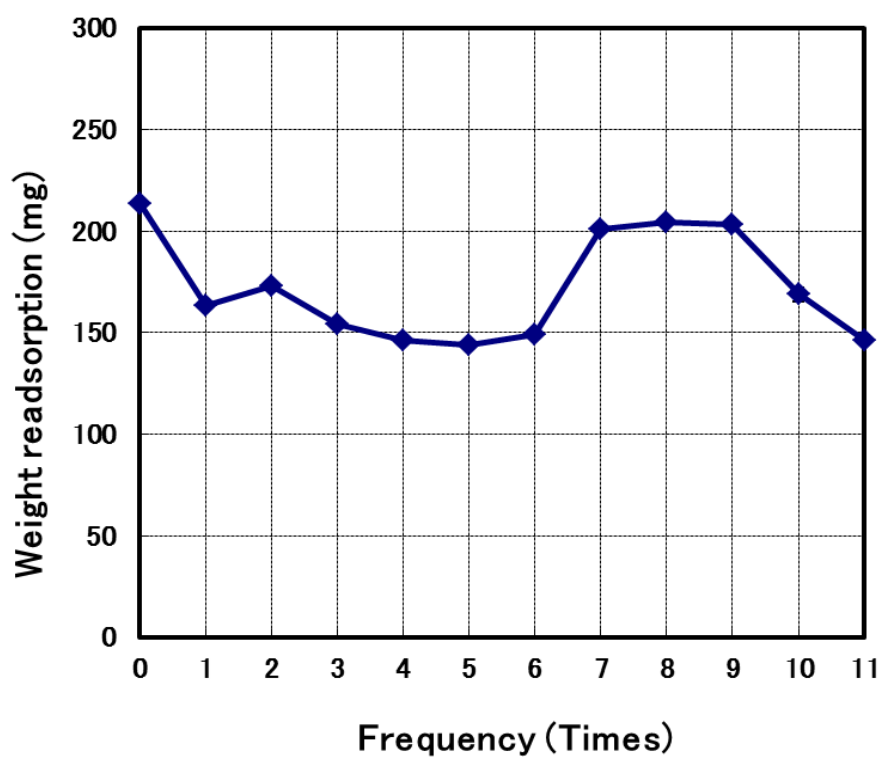


Fig. 18 Confirmation test result of recyclability of PTC

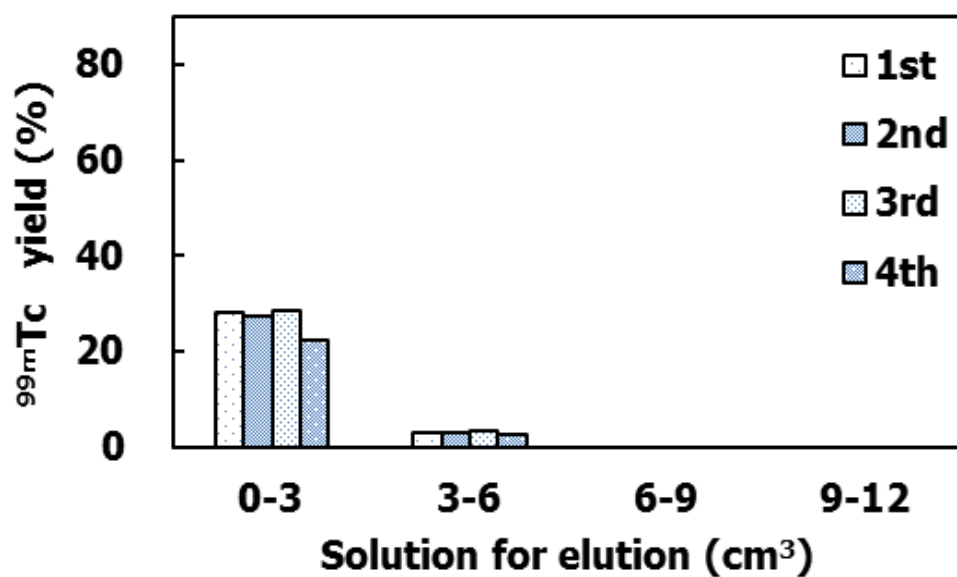


Fig.19 ^{99m}Tc elution profile (PZC)

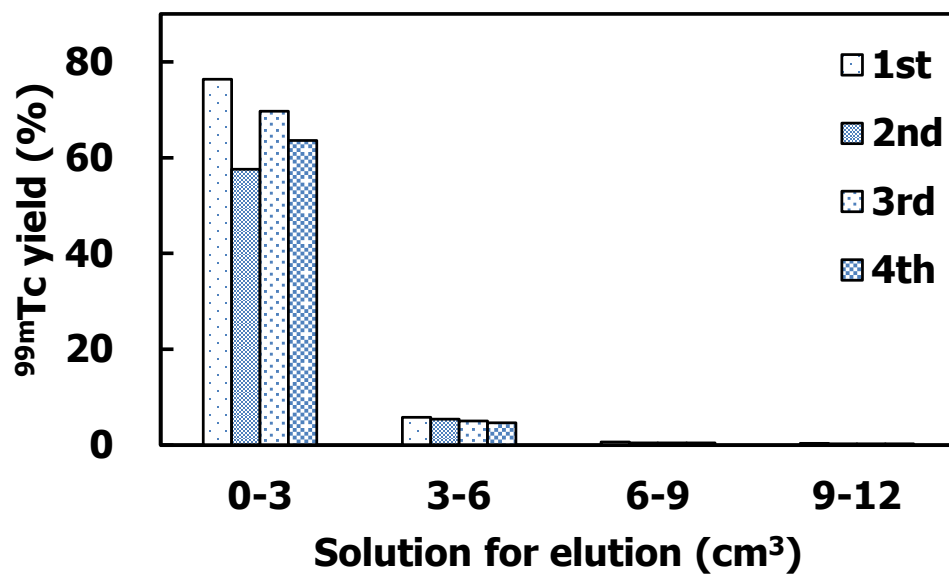


Fig.20 ^{99m}Tc elution profile (Re-PZC)

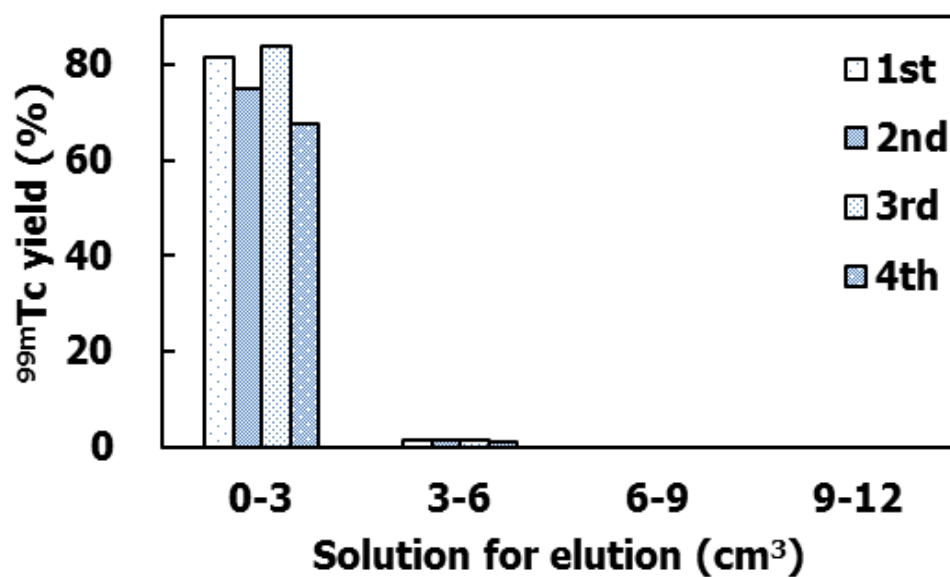


Fig.21 ^{99m}Tc elution profile (PTC)

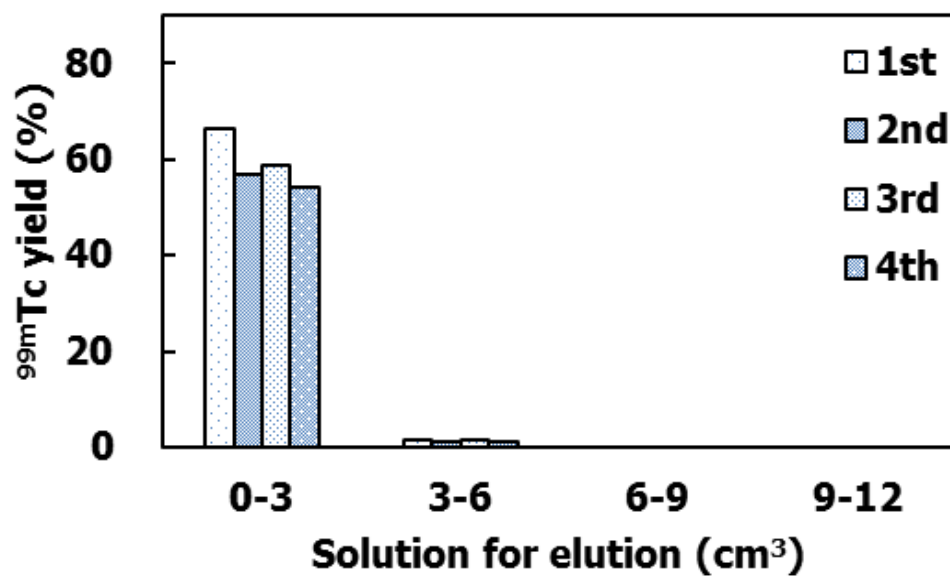


Fig.22 ^{99m}Tc elution profile (Re-PTC)

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량	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	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(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
粘着力のモーメント	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	ジュール毎平方メートル	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	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

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

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

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベール	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 =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

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

