

(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

— RI 製造に関する照射技術 (STC No.2-II) に関する共同実験報告書—
(共同研究)

^{99}Mo Adsorption and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Elution Characteristics of
Molybdenum Adsorbents for (n, γ) Method
- Joint Experiment Report on Irradiation Technology of
RI Production (STC No.2-II) -
(Joint Research)

木村 明博 出雲 寛互 土谷 邦彦 堀 直彦

石原 正博 Valentina Bannykh Natalia Gluschenko

Yelena Chakrova Petr Chakrov

Akihiro KIMURA, Hironobu IZUMO, Kunihiro TSUCHIYA, Naohiko HORI
Masahiro ISHIHARA, Valentina Bannykh, Natalia Gluschenko, Yelena Chakrova
and Petr Chakrov

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

February 2010

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, 2010

(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
—RI 製造に関する照射技術 (STC No. 2-II) に関する共同実験報告書—
(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、出雲 寛互、土谷 邦彦、堀 直彦⁺、石原 正博
Valentina Bannykh^{*}、Natalia Gluschenko^{*}、Yelena Chakrova^{*}、Petr Chakrov^{*}

(2009 年 12 月 18 日受理)

日本原子力研究開発機構の材料試験炉 (JMTR) では、医療診断用 RI である $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の親核種 ^{99}Mo の (n, γ) 法による製造が計画されている。(n, γ) 法で得られる ^{99}Mo の比放射能は低いため、モリブデン吸着材の ^{99}Mo 吸着及び $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離特性を評価する必要がある。そこで、カザフスタン国立原子力センターとの協力研究により、日本が提案している高分子ジルコニウム化合物 (PZC) 及びカザフスタンが提案しているモリブデン酸ジルコニウムゲルの ^{99}Mo 吸着及び $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験を行った。この結果、PZC 及びモリブデン酸ジルコニウムゲルの ^{99}Mo 吸着性能に関しては従来の研究と同等であったが、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離性能に関しては従来の研究よりも低くなった。今後、さらにモリブデン吸着材の ^{99}Mo 吸着及び $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離性能を調べていく予定である。

本報告書は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) とカザフスタン国立原子力センター (NNC) 間の特定協力課題「RI 製造に関する照射技術 (STC No. 2-II)」に関するものである。

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

＋：原子炉施設管理部

＊：カザフスタン国立原子力センター 核物理研究所

⁹⁹Mo Adsorption and ^{99m}Tc Elution Characteristics
of Molybdenum Adsorbents for (n, γ) Method
–Joint Experiment Report on Irradiation Technology of RI Production (STC No. 2-II)–
(Joint Research)

Akihiro KIMURA, Hironobu IZUMO, Kunihiro TSUCHIYA, Naohiko HORI⁺,
Masahiro ISHIHARA,
Valentina Bannykh^{*}, Natalia Gluschenko^{*}, Yelena Chakrova^{*} and Petr Chakrov^{*}

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

(Received December 18, 2009)

Japan Materials Testing Reactor (JMTR) of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has a plan to produce ⁹⁹Mo, which is the parent nuclide of radiopharmaceutical ^{99m}Tc, by (n, γ) method. The ⁹⁹Mo adsorption and ^{99m}Tc elution characteristics of molybdenum adsorbents should be evaluated since the specific activity of ⁹⁹Mo obtained by (n, γ) method is low. Therefore, ⁹⁹Mo adsorption and ^{99m}Tc elution tests with molybdenum adsorbents for the (n, γ) method such as poly-zirconium compound (PZC) and Molybdate Zirconium Gel were carried out under cooperation with the Kazakhstan National Nuclear Energy Center (NNC). As a result, the ⁹⁹Mo adsorption performance of the adsorbents was the same level as conventional data, whereas the ^{99m}Tc elution performance of the adsorbents was lower than conventional data. The ⁹⁹Mo adsorption and ^{99m}Tc elution performance will be investigated again in future.

Keywords: (n, γ) Method, ⁹⁹Mo, ^{99m}Tc, Adsorption, Elution, PZC,
Molybdate Zirconium Gel, JAEA, NNC

This joint experiment was performed as the special cooperation topic between JAEA and NNC "STC No.2- II: Irradiation technology of RI Production".

+ : Department of JMTR Operation

* : National Nuclear Center (NNC), Institute of Nuclear Physics (INP)

目 次

1. はじめに	1
2. 原理	1
2.1 PZC 吸着法	1
2.2 Zr ゲル化法	2
3. 試験方法	2
3.1 PZC 吸着法	2
3.2 Zr ゲル化法	3
4. 試験結果	4
4.1 ^{99}Mo (Mo) 吸着特性	4
4.2 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離特性	4
5. 結論	7
謝辞	7
参考文献	8

Contents

1.Introduction	1
2.Principle	1
2.1. PZC method	1
2.2. Principle of ^{99}Mo (Mo) and elution of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ with Mo-Zr gel	2
3. Test Method	2
3.1. PZC method	2
3.2. Content of ^{99}Mo (Mo) and elution of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ with Mo-Zr gel	3
4.Rusults	4
4.1. Adsorption properties of ^{99}Mo (Mo)	4
4.2. Elution properties of $^{99\text{m}}\text{Tc}$	4
5.Conclusion	7
Acknowledgment	7
References	8

This is a blank page.

1. はじめに

(独) 日本原子力研究開発機構 (JAEA) 大洗研究開発センターの材料試験炉 (JMTR) は、現在改修中である。新たな照射ニーズに応えるための照射設備を整備し、平成 23 年度から再稼働の予定である^[1-2]。JMTR では、再稼働後における産業利用の拡大を目的として、放射性診断薬であるテクネチウム-99m (^{99m}Tc : 半減期 6.01 時間) の親核種であるモリブデン-99 (^{99}Mo : 半減期 65.9 時間) の製造に関する検討を行っている。現在、医療分野において、放射線やラジオアイソトープ (RI) は病気の診断 (放射性診断薬) や治療 (放射性治療薬) に欠かすことができないものとなっているが、特に ^{99m}Tc は放射性診断薬として核医学の分野で最も多く用いられる。さらに、 ^{99m}Tc の需要は年々増加しており、今後もその伸びが予想されている。しかしながら、その供給は現状ではすべて輸入に依存しており、海外製造施設の老朽化問題等から、国内生産による安定的な供給が望まれている^[3]。

^{99m}Tc の唯一の原料である親核種の ^{99}Mo の製造には、濃縮ウランを核分裂させる (n, f) 法と ^{98}Mo をターゲットとした (n, γ) 法 $\{^{98}\text{Mo} (n, \gamma) ^{99}\text{Mo} (\beta^- \text{崩壊}) \rightarrow ^{99m}\text{Tc}\}$ がある^[4]。JMTR においては、(n, f) 法よりも簡便な (n, γ) 法による ^{99}Mo の製造について検討を行っている^[4]。(n, f) 法に比べ、(n, γ) 法によって得られる ^{99}Mo の比放射能は低いため、(n, γ) 法により製造された ^{99}Mo を効率良く吸着できる吸着材が必要となる。そこで今回、日本で提案している ^{99}Mo 吸着材 PZC (Polyzirconium Compound: 高分子ジルコニウム化合物) を用いた ^{99}Mo (Mo) 吸着・ ^{99m}Tc 溶離方法 (以降、PZC 吸着法と記述) 及びカザフスタンで提案している ^{99}Mo 吸着材モリブデン酸ジルコニウムゲルを用いた ^{99}Mo (Mo) 吸着・ ^{99m}Tc 溶離方法 (以降、Zr ゲル化法と記述) による ^{99}Mo (Mo) 吸着・ ^{99m}Tc 溶離試験を行い、試験経験を蓄積するとともに、2 つの方法による ^{99}Mo 吸着・ ^{99m}Tc 溶離特性を調べた。

なお、本試験は、「日本原子力研究開発機構とカザフスタン原子力センター (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」に基づき 2009 年 6 月に調印された「試験研究炉に関する原子力技術」に係る特定協力課題「STC No. 2-II: RI 製造に関する照射技術」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) において NNC と共同で実施した。

2. 原理

2.1 PZC 吸着法

PZC は、(n, γ) ^{99}Mo - ^{99m}Tc ジェネレータ用の高性能 Mo 吸着剤として、当時の日本原子力研究所と (株) 化研の共同開発によって 1995 年に開発^[5]されたものであり、Fig. 1 に示すようなジルコニウム、酸素及び塩素を主成分とする無機高分子体である^[6]。

PZC の特徴としては、Mo もしくは W に対して選択的で高い吸着性能を有することが挙げられ、(n, γ) 法による ^{99}Mo - ^{99m}Tc , ^{188}W - ^{188}Re ジェネレータとしての利用が期待されている。また、ジェネレータとして使用した後には使い捨てが可能であるとともに、吸着において活性

化処理などの前処理を必要とせず、直接使用可能であることなどが特徴として挙げられる。PZC を用いる ^{99}Mo の吸着は、照射済 $^{99}\text{MoO}_3$ を NaOH により溶解した調製液に PZC を直接添加することで反応する。

^{99}Mo 吸着と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離の原理図を Fig. 2 に示す。 ^{99}Mo 吸着反応では、ジルコニウムと塩素の結合の一部が加水分解により外れる。その結果、結合の外れた部分に溶液中の $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ が結合される。この結合は強い化学結合で、非常に安定である。吸着した ^{99}Mo が β^- 崩壊して $^{99\text{m}}\text{Tc}$ となる。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離反応では、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は酸素との結合力が非常に弱いために、溶離液により加水分解をおこし $^{99\text{m}}\text{Tc}$ が選択的かつ容易に溶離される。

2. 2 Zr ゲル化法

Zr ゲルの作製方法を Fig. 3 に示す^[7]。照射済 $^{99}\text{MoO}_3$ を水酸化ナトリウム及び過酸化水素により溶解した調製液に、硝酸を加えナトリウムポリマーを合成する。そこへ、酸塩化ジルコニウムを加えジルコニウムポリマーを合成する。さらに洗浄、乾燥及び粉碎を行い $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})\text{-Zr}$ ゲルとする。こちらも PZC 吸着法と同様に生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は溶離液により容易に溶離される。

3. 試験方法

PZC 吸着法と Zr ゲル化法の実験手順を Fig. 4 に示す。PZC 吸着法と Zr ゲル化法による ^{99}Mo 吸着・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験として、 $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 吸着からカラム充填までの時間、 $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 吸着量、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離率、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離特性及び $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離液中の不純物測定を行った。以下に各方法における試験手順を示す。

3. 1 PZC 吸着法

PZC 吸着法による $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 吸着・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験の手順を Fig. 5 に示す。PZC 吸着法による $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 吸着・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験の試験マトリックスを Table 1 に示す。

まず、INP にある WWR-K で照射した MoO_3 粉末 10g に 1cm^3 の H_2O_2 を加え、2M の NaOH で溶解し 100cm^3 に定容した液 0.3cm^3 と、 MoO_3 粉末 3.7g、2M- NaOH を 40cm^3 加え、純水で 100cm^3 に定容し、 $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 溶液を調整した。 $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 溶液中の Mo 濃度は、 $25\text{mg-}^{99}\text{Mo}(\text{Mo})/\text{cm}^3$ とした。この濃度は、使用する PZC 量及び PZC の Mo 吸着量より決定した。

次に、PZC に Mo を吸着させる $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 吸着試験を行った。室温にて、 $25\text{mg-}^{99}\text{Mo}(\text{Mo})/\text{cm}^3$ に調製した溶液 10cm^3 をガラス製三角フラスコに入れ、その中に 1g の PZC を添加し、十分に攪拌した。その後、恒温乾燥器中で 2 時間、 90°C で保温した。その際、30 分毎に PZC と $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ 溶液が均一に馴染むようにゆっくりと攪拌を行った。2 時間後、恒温乾燥器から三角フラスコを取出し、室温まで放冷した。

室温まで放冷した後、PZC 表面から未吸着の $^{99}\text{Mo}(\text{Mo})$ を洗浄するために、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 加え、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 4 回繰返し行った。上澄み液を含めた全洗浄液は 50cm^3 であつ

た。洗浄液は、フランス製 Ge 半導体検出器 (Eurisis measures) を用いて、ガンマ線エネルギースペクトルを測定し、 ^{99}Mo の放射エネルギーを求めた。この放射エネルギーは、PZC に吸着する ^{99}Mo (Mo) 吸着量を算出するために必要な測定である。

洗浄後、 ^{99}Mo (Mo) を吸着させた PZC は、ポリプロピレン製カラムに充填した (以降、PZC 充填カラムと呼ぶ)。本試験では、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離液として、生理食塩水もしくは純水を用いることにしたため、PZC 充填カラムを 4 本準備し、2 本を各々の溶離液を用いた試験に供した。ここで、純水を溶離液として選択した理由は、今後溶離液中の $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射能濃度を濃縮により高める必要が出てくる可能性があるためである。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離試験の前準備として、PZC 充填カラムに溶離液と同じ液体を 50cm^3 通液した。PZC 充填カラムに通液した通過液は、Ge 半導体検出器によりガンマ線エネルギースペクトルを測定し、 ^{99}Mo の放射エネルギーを求めた。この値は ^{99}Mo (Mo) の吸着量を求める際に使用した。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験として行った PZC 充填カラムのミルク操作を Fig. 6 の上段に示す。ミルク操作は、1 つの PZC 充填カラムに対して、溶離液 (生理食塩水もしくは純水) を $2\text{cm}^3 \times 10$ 回通液・サンプリングし、生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離した。このミルク操作を最初の 3 回は 24 時間毎に、次の 1 回は 72 時間後、さらに次の 2 回は 48 時間毎に、合計 6 回行った。サンプリングした $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離液は、Ge 半導体検出器によりガンマ線エネルギースペクトルを測定し、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の放射エネルギーを求めた。また、放射能が減衰後、誘導プラズマ発光分光分析 (Perkin Elmer 社製、ICP) により溶離液中に含まれる金属不純物の分析を、また pH 測定器により溶離液の pH 測定を行った。

3. 2 Zr ゲル化法

Zr ゲル化法による ^{99}Mo (Mo) 吸着・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験の手順を Fig. 7 に示す。Zr ゲル化法による ^{99}Mo (Mo) 吸着・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験の試験マトリックスを Table 2 に示す。

まず、INP にある WWR-K で照射した MoO_3 粉末 10g に 1cm^3 の H_2O_2 を加え 2M の NaOH で溶解し 100cm^3 に定容し ^{99}Mo (Mo) 溶液を調整した。

次に、 ^{99}Mo (Mo) 溶液に 3M- HNO_3 を添加し攪拌を行い、ナトリウムポリマー (PMNa) を合成した。合成した PMNa に 5~7% の ZrOCl_2 を添加し攪拌を行い、ジルコニウムポリマー (PMZr) を合成した。その後、30 分間静置し、生成した PMZr を沈降させ、得られた PMZr を真空ろ過し固液分離を行った。その後、 100°C 程度の圧空を吹きかけ PMZr を乾燥させた。

乾燥させた PMZr を $3\sim 10^\circ\text{C}$ の冷水 150cm^3 及び生理食塩水 150cm^3 で 3 回洗浄を行った。これらの洗浄を行うことにより PMZr が粉砕した。粉砕した PMZr に 100°C 程度の圧空を吹きかけ PMZr を乾燥させた。

乾燥後 Mo-Zr ゲルをポリエチレン製カラムに充填した (以降、Zr ゲル充填カラムと呼ぶ)。本試験では、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の溶離液として、生理食塩水もしくは純水を用いることにしたため、Zr ゲル充填カラムを 4 本準備し、2 本を各々の溶離液を用いた試験に供した。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験として行った Zr ゲル充填カラムのミルク操作を Fig. 6 の下段に示す。ミルク操作は、1 つの Zr ゲル充填カラムに対して、溶離液 (生理食塩水もしくは純水) を $2\text{cm}^3 \times 10$ 回通液・サンプリングし、生成した $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離した。このミルク操

作を最初の 3 回は 24 時間毎に、次の 1 回は 264 時間後に、合計 4 回行った。サンプリングした ^{99m}Tc 溶離液は、Ge 半導体検出器によりガンマ線エネルギースペクトルを測定し、 ^{99m}Tc の放射エネルギーを求めた。また、INP で開発したスポット反応分析により、溶離液中に含まれる金属不純物 (Zr 及び Mo) の分析を、また pH 測定器により溶離液の pH 測定を行った。

4. 試験結果

4.1 ^{99}Mo (Mo) 吸着特性

PZC 吸着法による、PZC への ^{99}Mo (Mo) 吸着から、PZC 充填カラムの作製までに要した時間は、4.2 時間であった。PZC 吸着法では、PZC 充填カラムの作製まで複雑な工程はなく容易であった。一般的に 1g オーダーでの PZC 吸着法によるカラム作製時間は、3 時間以内であるが、本試験では 4 本の PZC 充填カラムを別々に作製したため、多くの時間を要したこと、試験環境 (実験器具等の相違、言語の違いなど) の相違などにより影響があったものと考えられ、本実験による作製時間は短縮できる可能性がある。

Zr ゲル化法では、Zr ゲルを製作し、Zr ゲル充填カラムの作製時間までは 6.0 時間であった。参考文献等から、Zr ゲルの作製は、加熱、乾燥、篩分け等の複雑な工程が含まれているため、Zr ゲルの調整は困難であるとともに、PZC 吸着法よりも作製時間が長く要するものと考えられる。

Table 3 に PZC 吸着法及び Zr ゲル化法における各々の ^{99}Mo (Mo) 吸着量を示す。PZC 吸着法では、 ^{99}Mo (Mo) 吸着量は、4 回の試験で 1g の PZC あたり 207~225mg と偏差の少ない値であった。この結果は、日本で事前に実施した ^{99}Mo (Mo) 吸着量 (>200mg) とほぼ同等であった。これは、前述したように PZC 充填カラムの作製まで複雑な工程はないため、吸着操作における ^{99}Mo (Mo) 吸着量の差異は少ないことを明らかにした。一方、Zr ゲル化法では ^{99}Mo (Mo) 吸着量は、Zr ゲル 1g あたり 280mg であった。 ^{99}Mo (Mo) 吸着量は文献値^[8]の約 300mg と同等の値であり、本実験における合成には問題が無かったことを明らかにした。合成した Zr ゲルは 4 本のカラムに 1g ずつ充填した。

4.2 ^{99m}Tc 溶離特性

(1) 充填カラム

PZC 及び Zr ゲルの粒子径の違いを Table 4 に示す。PZC の粒子径は、300~710 μm であった。一方、Zr ゲル化法では、 ^{99}Mo (Mo) 吸着した Zr ゲルを篩分けにより、粒子を揃えることから、本試験では <200~700 μm の大きさのものを使用した。PZC 充填カラム及び Zr ゲル充填カラムの写真を Fig. 8 に示す。PZC 充填カラムの PZC 充填高さは $39 \pm 1\text{mm}$ であり、充填密度は $0.7\text{g}/\text{cm}^3$ であった。一方、Zr ゲル充填カラムの Zr ゲル充填高さは $17 \pm 2\text{mm}$ であり、充填密度は $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ であった。なお、これらの充填密度は、充填カラムに流れる溶離液の通液時間に影響するため、 ^{99m}Tc 溶離時間に影響するものと考えられる。

(2) PZC 充填カラムからの溶離試験

Table 5 に PZC 吸着法における ^{99m}Tc 溶離率を示す。溶離液として、生理食塩水及び純水を用いているため、生理食塩水及び純水に分けて、試験結果をまとめた。

生理食塩水を用いた場合の PZC 吸着法における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率の経時変化を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、生理食塩水を用いた 2 本の PZC 充填カラムの内、PZC 充填カラム No. 1 では、Run 1 溶離試験を行っている最中にコックの脱落があり全量計測できなかったため、全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 40%以下であった。一方、PZC 充填カラム No. 2 では、Run 1 溶離試験を行っている最中に溶離液の採取に不備があり、全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 50%以下であった。これらの事象に対して、Run 2 溶離試験以降の試験においては、コックの代わりにキャップを使用することにより改善を図った。これにより、Run 2～Run 6 溶離試験における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 45～60%程度の結果を得た。しかしながら、参考文献^[5]では、全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 70%以上であり、今回行った溶離試験はそれよりも低い値を示した。PZC 吸着法における ^{99m}Tc 溶離曲線を Fig. 10 及び Fig. 11 に示す。この結果より、PZC からの ^{99m}Tc の溶離は、生理食塩水 20cm^3 で 45%以上、 ^{99m}Tc を溶離できることが分かった。本結果により、 ^{99m}Tc を溶離するための溶離液量を 6cm^3 にすることにより溶離液中の ^{99m}Tc の放射能濃度を高くすることができる可能性があるものと考えられる。

PZC 充填カラム No. 2 の Run 2 溶離試験で得られた溶離液を用いて、 ^{99m}Tc が減衰した後に ICP により溶離液中の不純物分析 (Mo 及び Zr) を行った。その結果を Table 6 及び Fig. 12 に示す。この結果、生理食塩水を溶離液として用いた場合、Mo 溶出量は $6\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 、Zr 溶出量は $0.8\text{ng}/\text{cm}^3$ 以下であり、放薬基準^[9]を下回り、PZC の利用の有効性を確認することができた。実際にジェネレータとして使用する場合には、PZC 充填カラムの下にアルミナカラムを装着することとなっているため、さらに不純物濃度を下げることが可能である。

以上の結果により、生理食塩水を用いた場合の PZC からの ^{99m}Tc 溶離特性を把握することができた。しかしながら、本試験で行った ^{99m}Tc 溶離率がこれまでの試験結果や文献値と比較して低い値であった。このため、本試験で用いた試薬、ミルキング操作、 ^{99m}Tc のガンマ線エネルギースペクトル測定などについて今後、再検討する予定である。

次に、純水を用いた場合の PZC 吸着法における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率の経時変化を Fig. 13 に示す。Fig. 13 より、純水を用いた 2 本の PZC 充填カラムの内、PZC 充填カラム No. 4 では、Run 1 溶離試験を行っている最中にバイアル瓶表面を汚染させたため、 ^{99m}Tc 溶離率が他の Run よりも高い溶離率を示した。これらの事象に対して、Run 2 溶離試験以降の試験においては、バイアル表面を汚染させないように注意して試験を行った。これにより、Run 2～Run 6 溶離試験における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 10～20%程度と生理食塩水と比べ非常に低いことが分かった。しかしながら、溶離メカニズムを考えると生理食塩水と純水での溶離率が大きくことなることは考えにくい。PZC 吸着法における ^{99m}Tc 溶離曲線を Fig. 14 及び Fig. 15 に示す。この結果より、純水での ^{99m}Tc の溶離は生理食塩水と同様に溶離液を 6cm^3 にすることにより溶離液中の ^{99m}Tc の放射能濃度を高くすることが可能と考えられる。

PZC 充填カラム No. 3 の Run 2 溶離試験で得られた溶離液を用いて、 ^{99m}Tc が減衰した後に ICP により溶離液中の不純物分析 (Mo 及び Zr) を行った。この結果を Table 7 及び Fig. 16 に示す。この結果、純水を溶離液として用いた場合、Mo 溶出量は最初の 2cm^3 の溶離液中には $108\ \mu\text{g}/\text{cm}^3$ 、Zr 溶出量は最初の 2cm^3 の溶離液中には $18.5\ \mu\text{g}/\text{cm}^3$ であった。どちらも溶離量が増加するにつれて溶出量が減少したが、 20cm^3 通液時において、Mo 溶出量は放薬基準を満たすまでの減少はみられなかった。実際にジェネレータとして使用する場合には PZC 充填カラムの下にアルミナカラムを装着するため、純水を溶離液に使用したとしても、アルミナカラムで不純物を除去することが可能と考えられる。今後、純水を用いた場合の溶離率の向上について検討する必要がある。

(3) Zr ゲル充填カラムからの溶離試験

Table 8 に Zr ゲル化法における ^{99m}Tc 溶離率を示す。溶離液として、生理食塩水及び純水を用いているため、生理食塩水及び純水に分けて、試験結果をまとめた。

生理食塩水を用いた場合の Zr ゲル化法における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率の経時変化を Fig. 17 に示す。Fig. 17 より、生理食塩水を用いた 2 本の Zr ゲル充填カラムは、Run 1 溶離試験を行っている最中にコックの脱落があったため、バイアルの汚染及び溶離液の回収不備があり、全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率が正確ではない。この事象に対して、Run 2 溶離試験以降の試験においては、PZC 吸着法と同様の対処を行い改善を図った。これにより、Run 2～Run 6 溶離試験における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 60～75% 程度であった。しかしながら、参考文献^[8]では、全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 80% 以上であり、今回行った溶離試験では低い値となった。Zr ゲル化法における ^{99m}Tc 溶離曲線を Fig. 18 及び Fig. 19 に示す。この結果より、Zr ゲルからの ^{99m}Tc の溶離は、生理食塩水 20cm^3 で 55% 以上、 ^{99m}Tc を溶離できることが分かった。本結果により、溶離液量を 4cm^3 にすることにより溶離液中の ^{99m}Tc の放射能濃度を高くすることができる可能性があるものと考えられる。

Zr ゲル充填カラム No. 1 の Run 1 溶離試験で得られた溶離液を用いて、スポット反応分析により溶離液中の不純物分析 (Mo 及び Zr) を行った。その結果を Table 9 及び Fig. 20 に示す。この結果、生理食塩水を溶離液として用いた場合、溶離液中の Mo 溶出量は $5\sim 7\ \mu\text{g}/\text{cm}^3$ 、Zr 溶出量は $5\ \mu\text{g}/\text{cm}^3$ 以下であり、不純物濃度は放薬基準以下であり、Zr ゲルの利用の有効性を確認することができた。

以上の結果により、生理食塩水を用いた場合の Zr ゲルからの ^{99m}Tc 溶離特性を把握することができた。しかしながら、PZC 吸着法同様、本試験で行った ^{99m}Tc 溶離率が文献値と比較して低い値であった。このため、本試験で用いた試薬、ミルキング操作、 ^{99m}Tc のガンマ線エネルギースペクトル測定などについて今後、再検討する予定である。

次に、純水を用いた場合の Zr ゲル化法における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率の経時変化を Fig. 21 に示す。Fig. 21 より、純水を用いた 2 本の Zr ゲル充填カラムのうち No. 4 カラムは、Run 1 溶離試験を行っている最中にコックの脱落があったため、溶離液の回収不備があり、全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率が正確ではない。この事象に対して、Run 2 溶離試験以降の試験においては、PZC 吸着法と同様の対処を行い改善を図った。これにより、Run 2

～Run 6 溶離試験における全溶離液に対する ^{99m}Tc 溶離率は 45～75%程度とばらつきはあるものの、生理食塩水と同等の溶離率であることが分かった。Zr ゲル化法における ^{99m}Tc 溶離曲線を Fig. 22 及び Fig. 23 に示す。この結果より、純水での ^{99m}Tc の溶離は生理食塩水と同様に溶離液を 4cm^3 にすることにより溶離液中の ^{99m}Tc の放射能濃度を高くすることができる可能性があるものと考えられる。

Zr ゲル充填カラム No. 3 の Run 1 溶離試験で得られた溶離液を用いて、スポット反応分析により溶離液中の不純物分析 (Mo 及び Zr) を行った。その結果を Table 10 及び Fig. 24 に示す。この結果、純水を溶離液として用いた場合、溶離液中の Mo 溶出量は最初の 2cm^3 の溶離液中には $10\sim 15\ \mu\text{g}/\text{cm}^3$ であり、溶離量が増加しても減少することはなかった。また、Zr 溶出量も最初の 2cm^3 は $5\ \mu\text{g}/\text{cm}^3$ であり、溶離量が増加しても減少することはなかった。しかしながら、実際にジェネレータとして使用する場合には Zr 充填カラムの下にアルミナカラムを装着する。このことから、純水を溶離液としても、法律で規定されている放薬基準以下であり、Zr ゲルの利用の有効性を確認することができた。

5. 結 論

共同実験の結果を Table 11 に示す。今回の共同実験における ^{99}Mo (Mo) 吸着試験では、PZC 吸着法で $207\sim 225\text{mg}$ 、Zr ゲル化法で 280mg となり両者とも文献値と同等の値を示した。この結果から、 ^{99}Mo (Mo) の吸着操作に関して吸着操作及び合成操作に問題はなかった。操作性を考える上では、PZC 吸着法は Zr ゲル化法に比べ、操作工程も少なく単純であり操作時間が 2 時間程度少ないというメリットがある。 ^{99m}Tc 溶離試験では、生理食塩水での ^{99m}Tc の溶離率は、PZC 吸着法で $37.0\sim 60.7\%$ 、Zr ゲル化法で $40.7\sim 80.9\%$ となった。これらの値は文献値よりも低い値となった。一方、純水での ^{99m}Tc の溶離率は Zr ゲル化法では生理食塩水と同等の値である $46.6\sim 82.2\%$ を示したものの、PZC 吸着法においては $9.2\sim 22.0\%$ と低い溶離率を示した。さらに不純物についても大量溶出されていた。この結果から、PZC が何らかの原因により破壊されたのではないかと推測できる。これについては、不明な点が多いため今後、再検討する予定である。

謝 辞

本共同実験の実施にあたり、照射試験炉センター 河村弘センター長、原子炉施設管理部 新見素二部長及び神永雅紀次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上で照射試験炉センター 石塚悦男研究主幹、照射試験開発課 稲葉良知氏のご助言を頂きました。さらに、照射試験炉センター及び原子炉施設管理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] 照射試験炉センター編、「照射試験炉センターの活動報告（2007 年度）」，JAEA-Review 2008-081，（2009）.
- [2] 石原 正博；河村 弘；新見 素二，“Refurbishment status and future program of Japan Materials Testing Reactor (JMTR) ”，Proceedings of 12th International Group on Research Reactors (12th IGORR)，2009/10.
- [3] 提言「我が国における放射性同位元素の安定供給体制について」日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会（2008）.
- [4] 飯村 光一；他，JMTR を用いた ^{99}Mo 製造設備の概念検討，JAEA-Technology 2008-035. (2008)
- [5] 長谷川良雄，西野瑞香，竹内剛敏，蓼沼克嘉，棚瀬正和，黒沢清行，「 ^{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 2857349 号.
- [6] M. Tanase, et al., Appl. Radiat. Isot., 48 (1997) PP.607-611.
- [7] Sarawathy Padmanabhan. Proceeding of the Nuclear and Radiochemistry Symposium (NUCAR-2007).
- [8] Duong. Van. Dong, “Development of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generators Basing on The Gel Technology in Vietnam” , Development of PZC-based Tc-99m Generator, Issue 2, Forum for Nuclear Cooperation in Asia, March 2007.
- [9] Truc Phuong Huynh et al., “Study on ^{99}Mo Production by Mo-solution Irradiation Method, 3; Activation Analysis of Irradiation Target” JAEA-Technology 2009-039, (2009).

Table.1 PZC 吸着法による ^{99}Mo (Mo) 吸着・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験の試験マトリックス

Column No.	Eluted Solution	Amount of Eluted Solution
1	Saline	2cm ³ ×10
2		
3	Pure water	
4		

Table 2 Zr ゲル化法による ^{99}Mo (Mo) 吸着・ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 溶離試験の試験マトリックス

Column No.	Eluted Solution	Amount of Eluted Solution
1	Saline	$2\text{cm}^3\times 10$
2		
3	Pure water	
4		

Table 3 PZC 吸着法及び Zr-ゲル化法での ^{99}Mo (Mo) 吸着量

Column No.	PZC method	Zr-gel method
1	220	280
2	225	
3	209	
4	207	
Average	215	—
Standard deviation	7.6	

Table 4 PZC 及び Zr ゲルの粒子径の違い

PZC method	Zr-gel method
300~710 μm	<200 μm 65.1%
	200~500 μm 32.6%
	500~700 μm 1.8%
	>700 μm 0.5%

Table 5 PZC 吸着法での ^{99m}Tc 溶離率

Run No.	Column No. 1	Column No. 2	Column No. 3	Column No. 4
Run1	37.0 ※	49.5 ※	22.0	16.9 ※
Run2	48.4	55.2	19.0	10.1
Run3	47.3	55.5	18.8	10.1
Run4	51.4	60.7	20.5	12.0
Run5	45.8	58.2	20.9	11.8
Run6	54.2	60.1	20.4	9.2

(%)

※ : 試験の誤操作

Table 6 PZC 充填カラム No. 2-Run 2 溶離液中の不純物濃度

Impurity Elements	PZC method
Mo	5.6-6.0 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)
Zr	<0.8 (ng/cm^3)

Table 7 PZC 充填カラム No. 3-Run 2 溶離液中の不純物濃度

Impurity Elements	PZC method
Mo	41-108 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)
Zr	18-18500 (ng/cm^3)

Table 8 Zr ゲル化法での ^{99m}Tc 溶離率

Run No.	Column No. 1	Column No. 2	Column No. 3	Column No. 4
Run1	40.7 ※	81.9 ※	46.6	54.0 ※
Run2	59.2	62.2	54.7	57.9
Run3	68.4	72.8	82.2	45.4
Run4	71.3	63.5	72.3	77.0

(%)

※ : 試験の誤操作

Table 9 Zr-ゲル充填カラム No.1-Run 2 溶離液中の不純物濃度

Impurity Elements	Zr-gel method
Mo	5.0-7.0 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)
Zr	<5 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)

Table 10 Zr-ゲル充填カラム No.3-Run 3 溶離液中の不純物濃度

Impurity Elements	Zr-gel method
Mo	10-15 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)
Zr	<10 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)

Table 11 PZC 吸着法及び Zr ゲル化法の比較

		PZC method	Zr-gel method
Grain size of generator ($\mu\text{ m}$)		300-710	<200 65.0%
			200-500 35.7%
			500-700 1.8%
			>700 0.8%
Time from adsorption of Mo to package in the column		4.2 (h)	6.0 (h)
Adsorption of Mo (mg/1g-generator)		215±7.6	280
pH of Eluted solution	Before	5.5(Saline)	5.5(Saline)
	After	3.2±0.2(Saline)	3.7±0.3(Saline)
Elution of ^{99m} Tc (%)	Saline	37.0-60.7	40.7-81.9
	Pure water	9.2-22.0	45.4-82.2
Impurity	Mo	5.6-6.0 ($\mu\text{ g/cm}^3$) (Column No.2-Run 2)	5-7 ($\mu\text{ g/cm}^3$) (Column No.1-Run 2)
		41-108 ($\mu\text{ g/cm}^3$) (Column No.3-Run 2)	10-15 ($\mu\text{ g/cm}^3$) (Column No.3-Run 3)
	Zr	<0.8 (ng/cm ³) (Column No.2-Run 2)	<5 ($\mu\text{ g/cm}^3$) (Column No.1-Run 2)
		18-18500 (n g/cm ³) (Column No.3-Run 2)	<10 ($\mu\text{ g/cm}^3$) (Column No.3-Run 3)

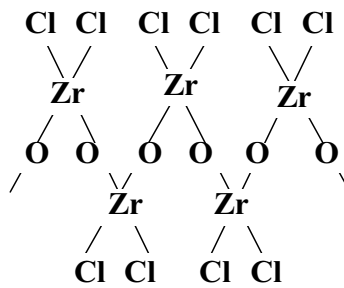


Fig. 1 PZC の化学構造

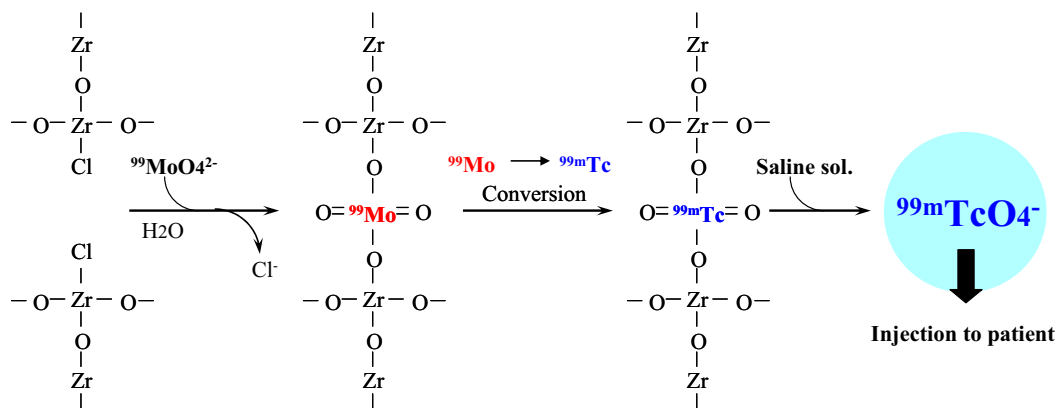


Fig. 2 PZC による Mo-99 吸着反応と溶離反応

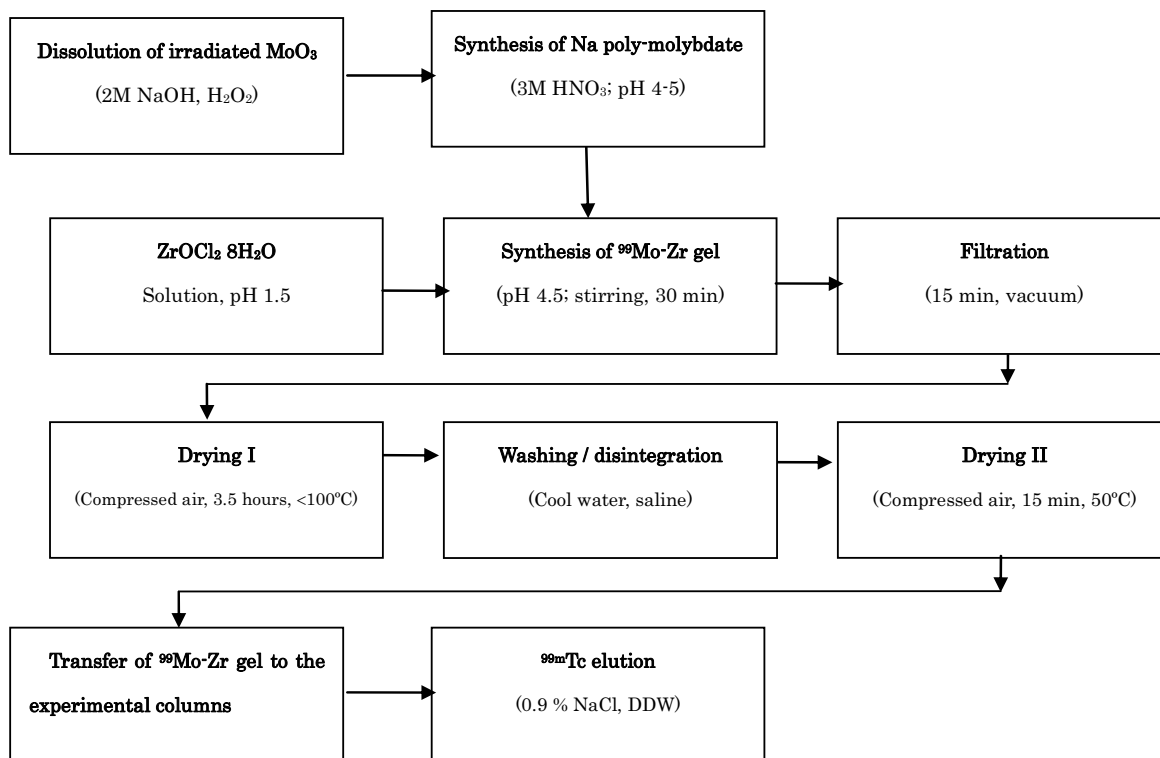


Fig. 3 Zr-ゲルの作製方法

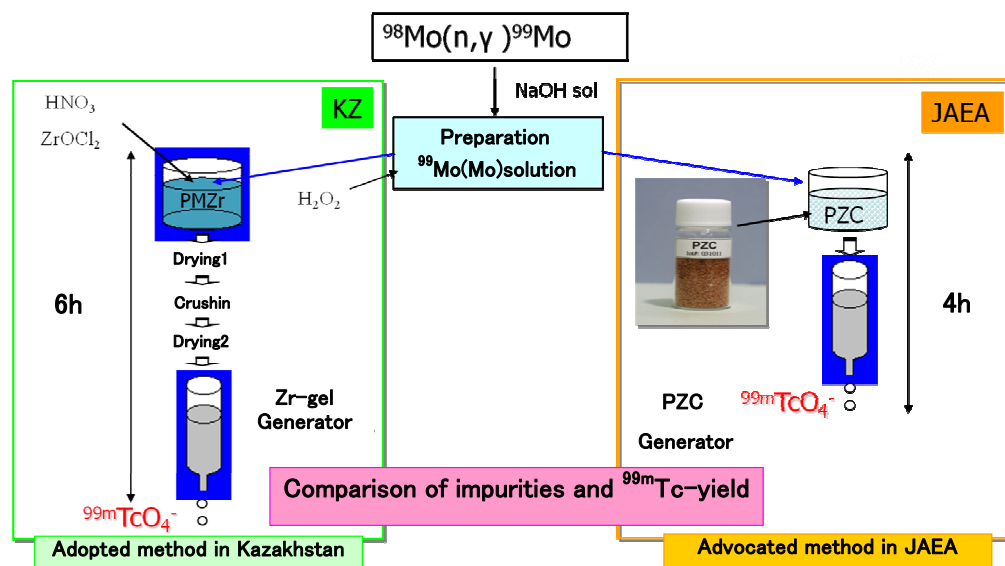


Fig. 4 PZC 吸着法と Zr ゲル化法の実験フローの比較

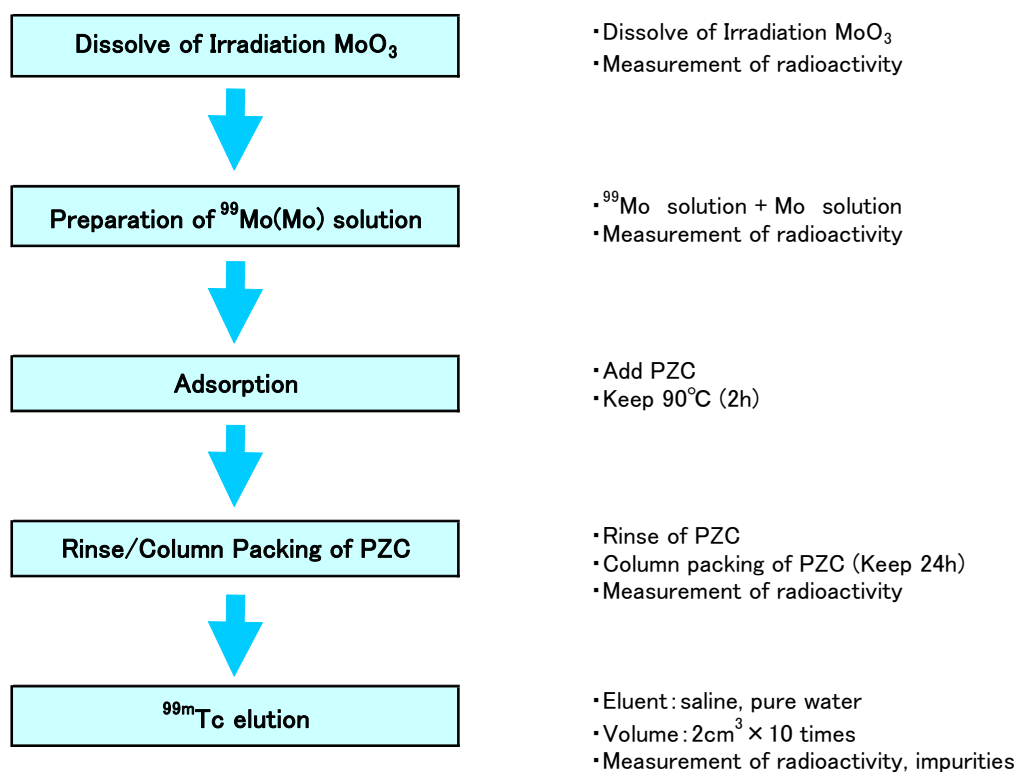


Fig. 5 PZC 吸着法を用いた試験フロー

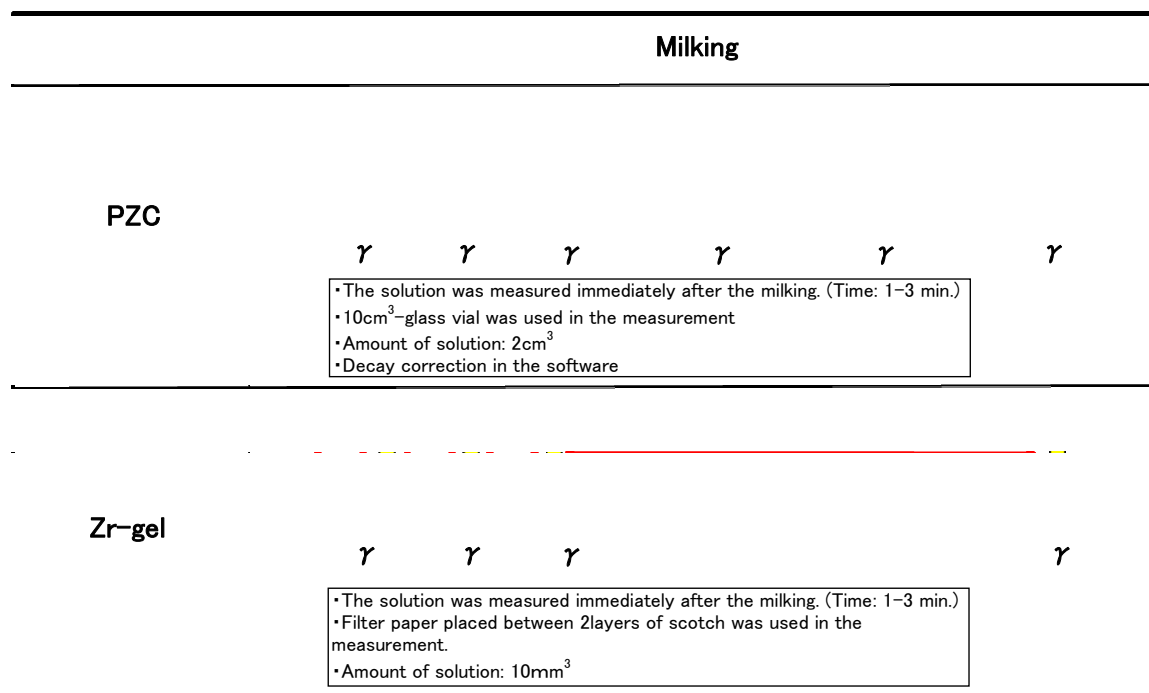


Fig. 6 ミルキング操作

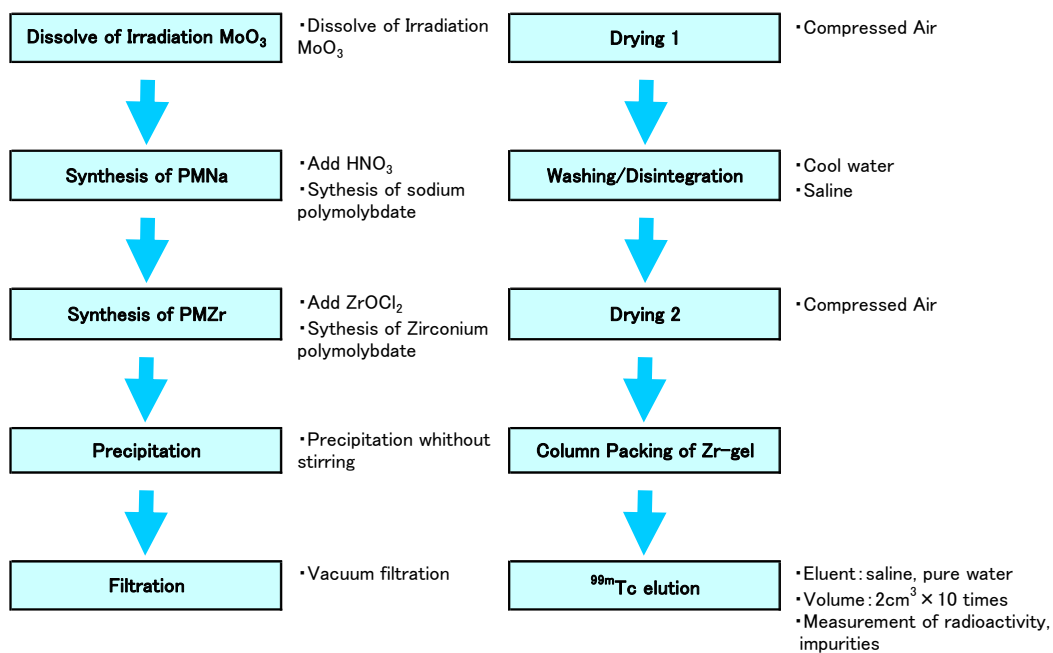


Fig. 7 Zr-ゲル化法を用いた試験フロー

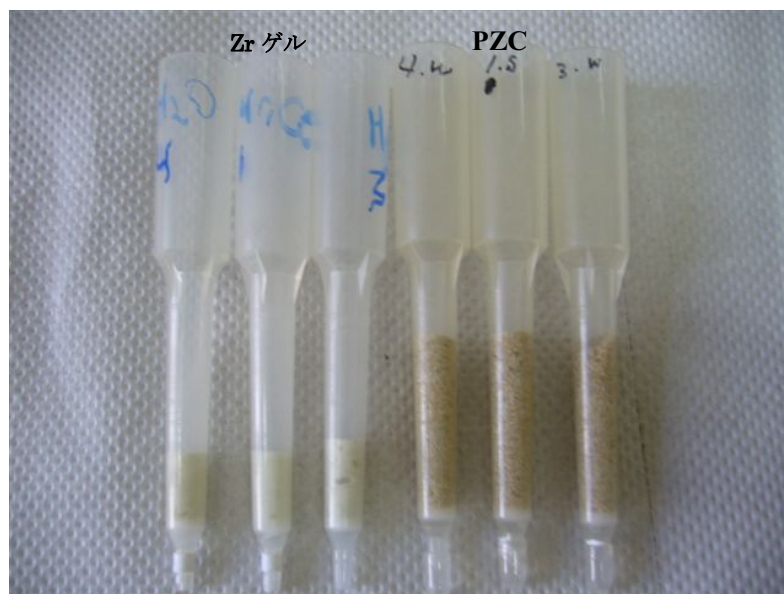
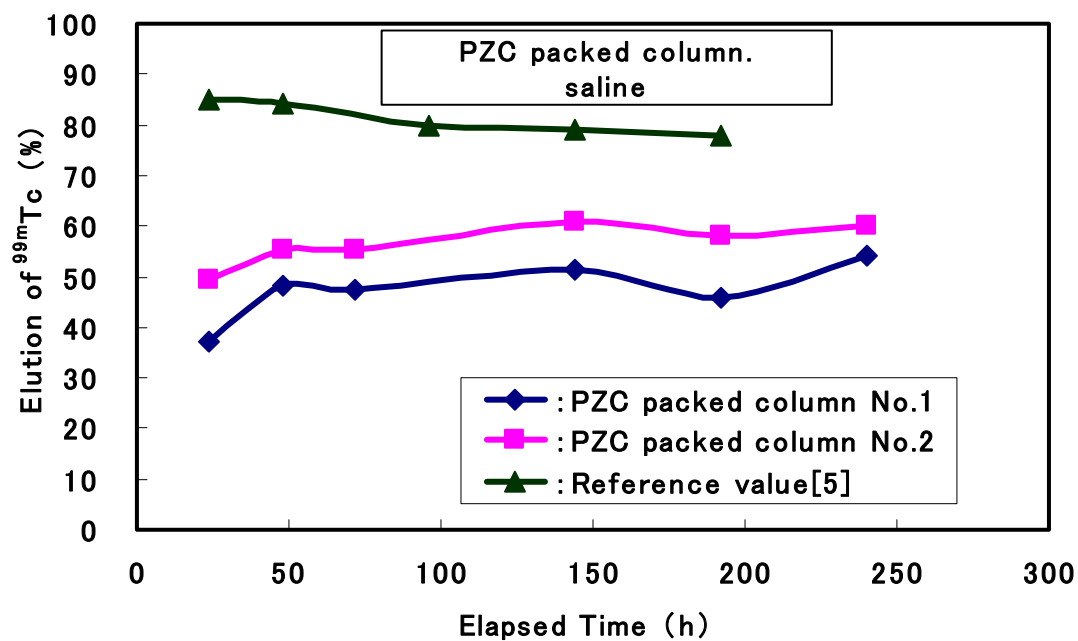
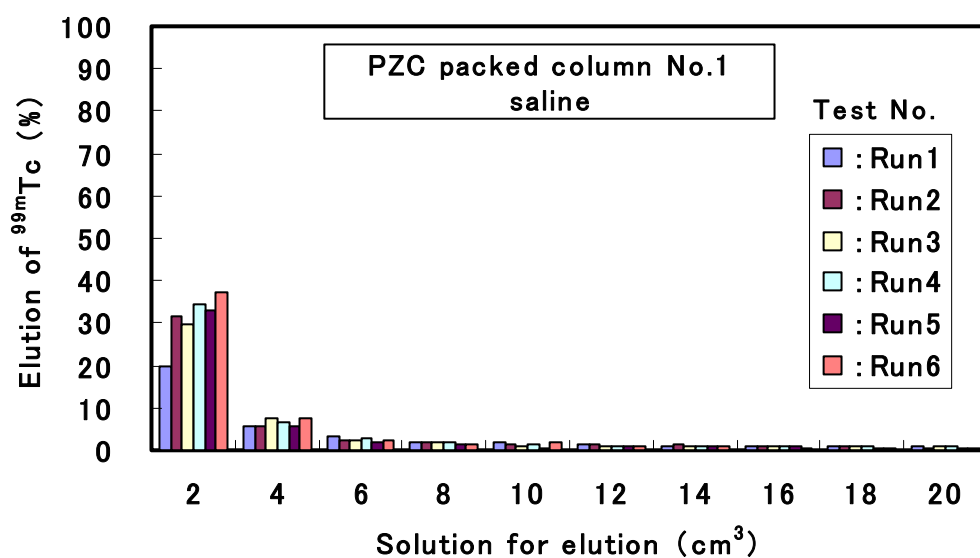


Fig. 8 PZC 充填カラム及び Zr ゲル充填カラムの写真

Fig. 9 PZC 充填カラムからの ^{99m}Tc 溶離率の経時変化Fig. 10 PZC 充填カラム No.1 からの ^{99m}Tc 溶離曲線

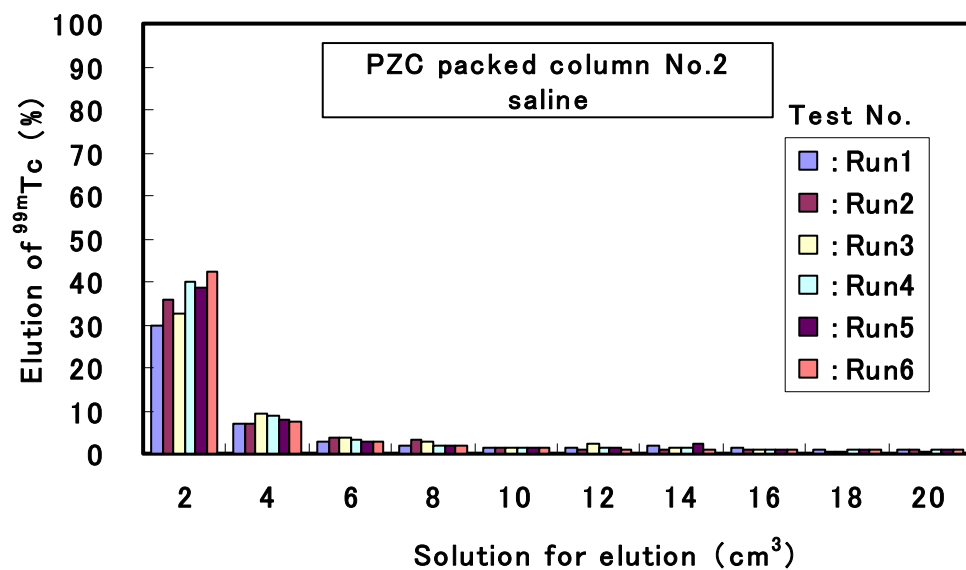
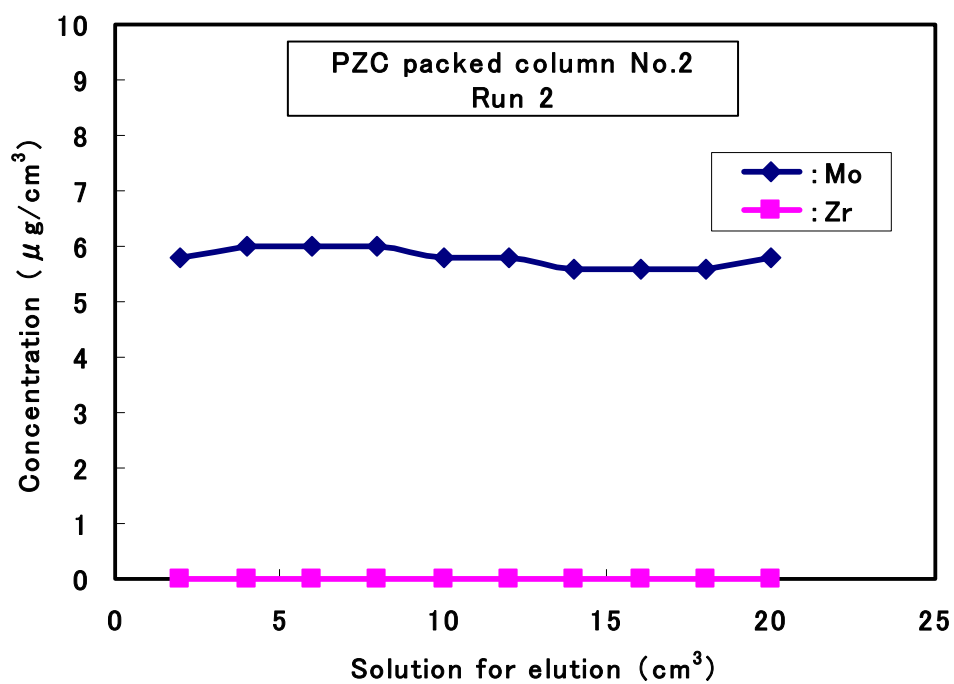
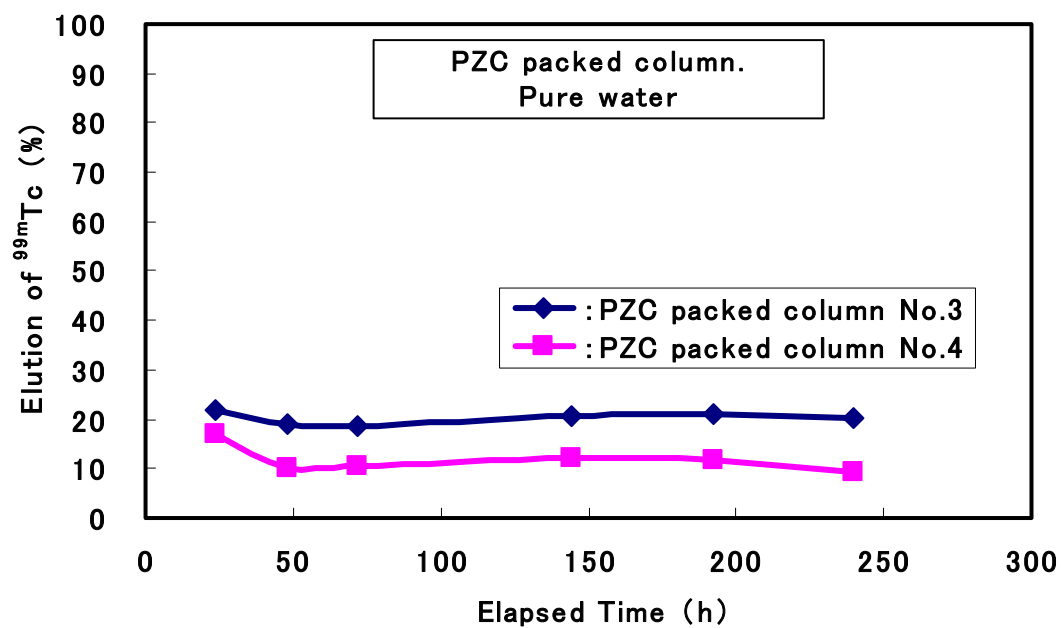
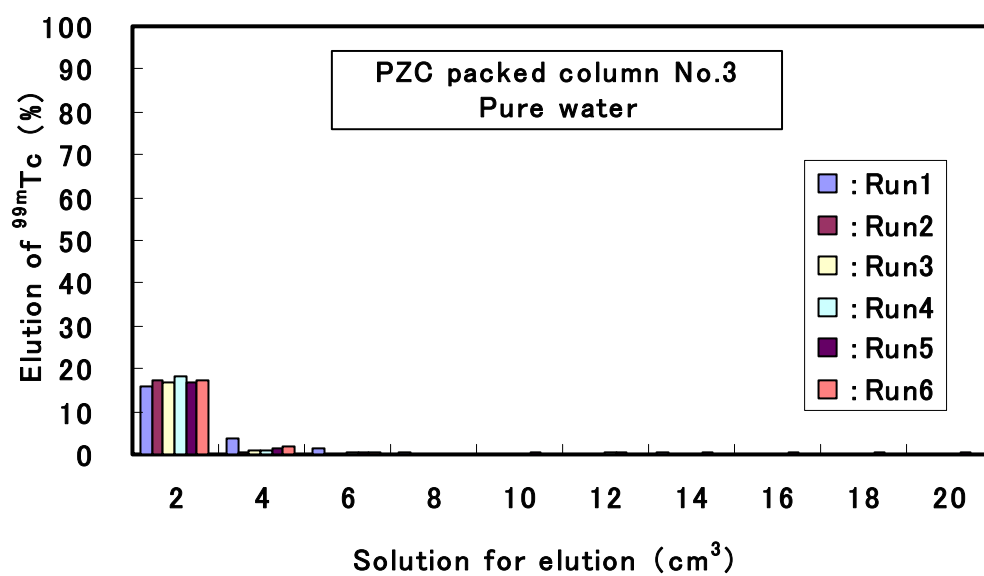
Fig. 11 PZC 充填カラム No.2 からの ^{99m}Tc 溶離曲線

Fig. 12 PZC 充填カラム No.2-Run 2 溶離液中の 不純物濃度

Fig. 13 PZC 充填カラムからの ^{99m}Tc 溶離率の経時変化Fig. 14 PZC 充填カラム No.3 ^{99m}Tc 溶離曲線

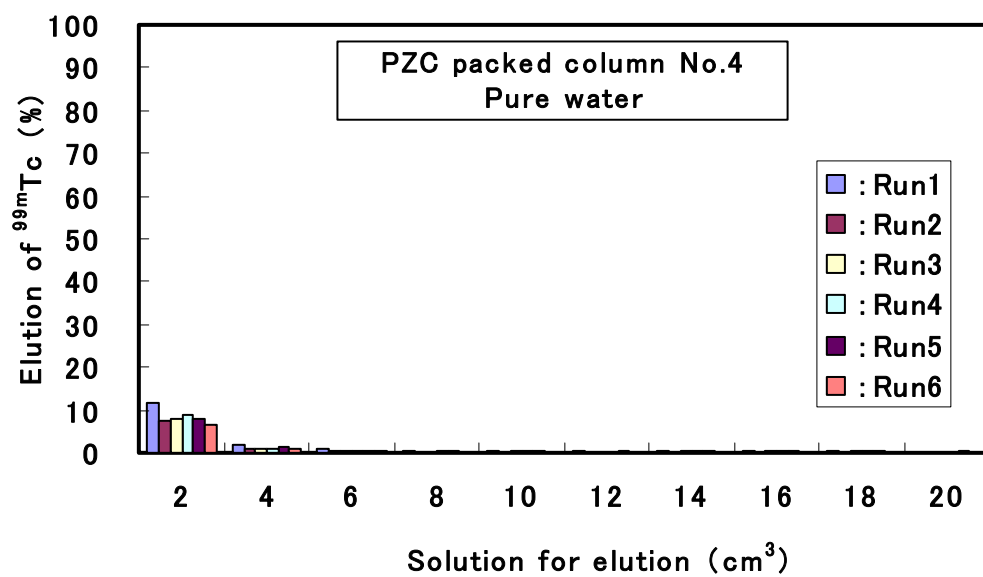
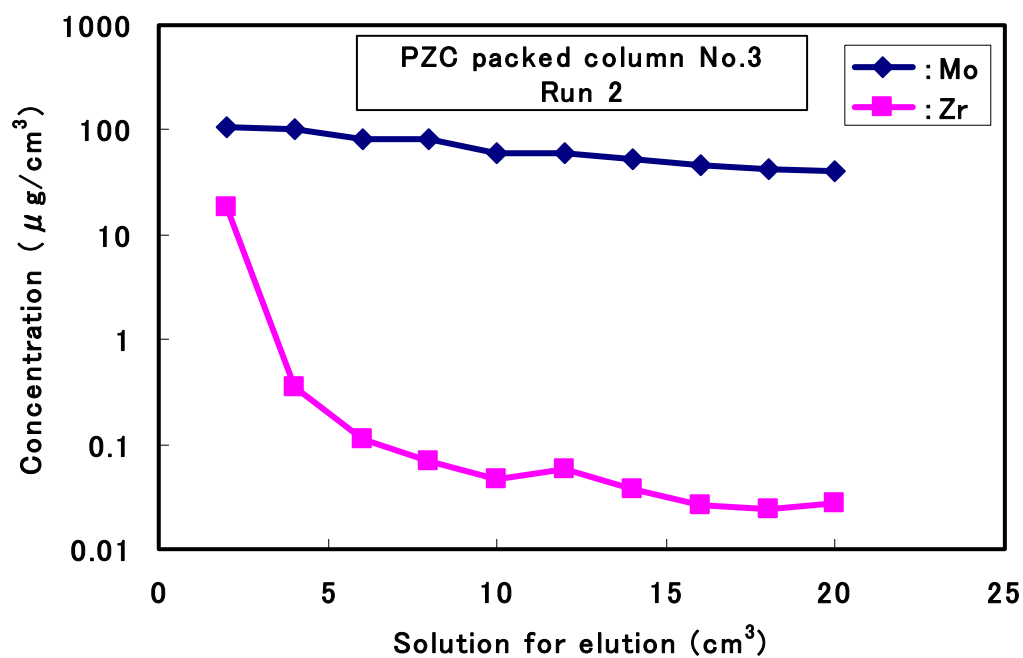
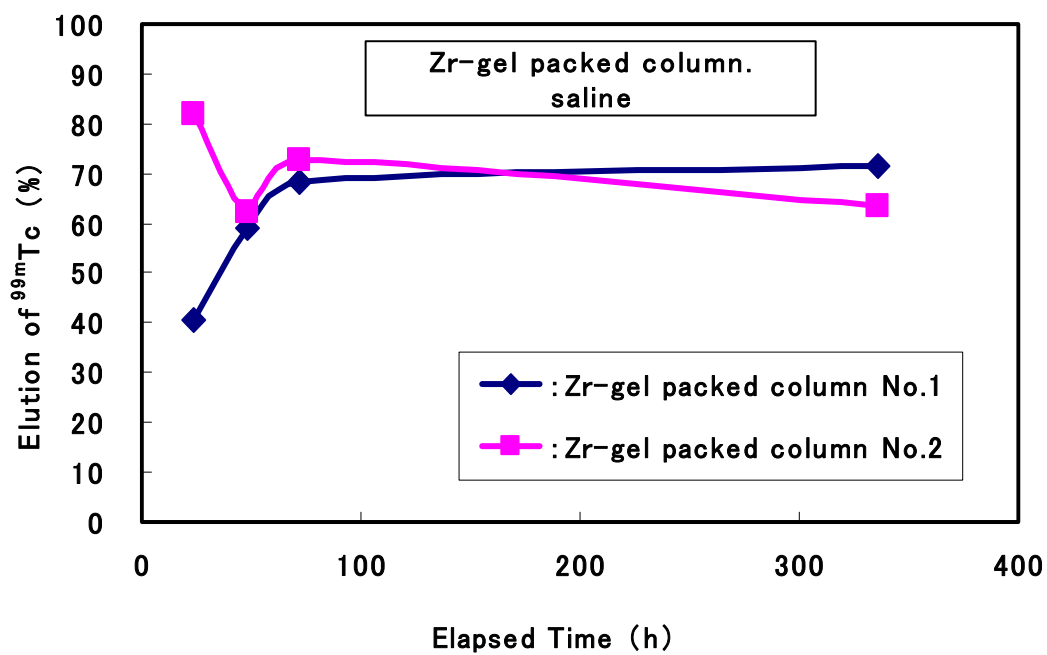
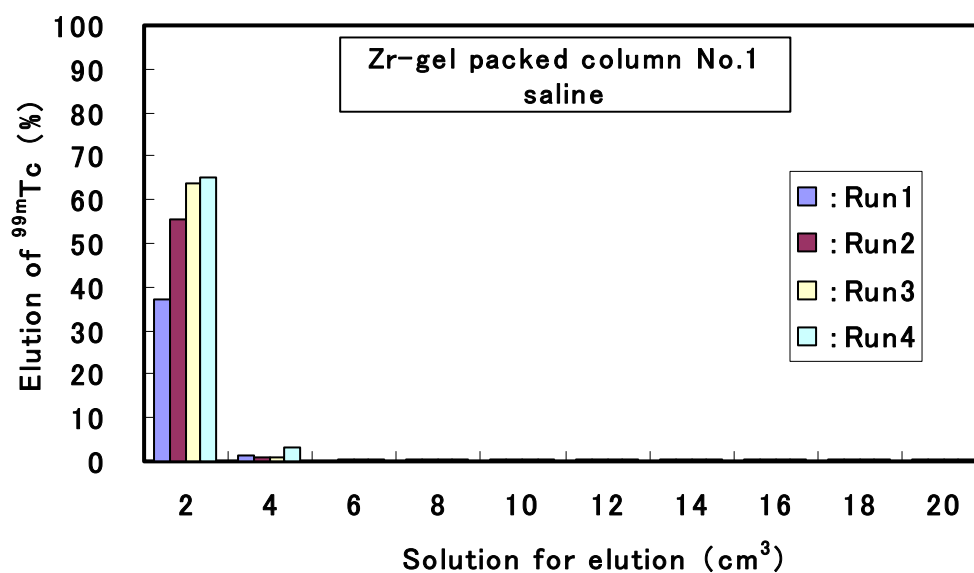
Fig. 15 PZC 充填カラム No. 4 ^{99m}Tc 溶離曲線

Fig. 16 PZC 充填カラム No. 3-Run 2 溶離液中の不純物濃度

Fig. 17 Zr ゲル充填カラムからの ^{99m}Tc 溶離率の経時変化Fig. 18 Zr ゲル充填カラム No.1 ^{99m}Tc 溶離曲線

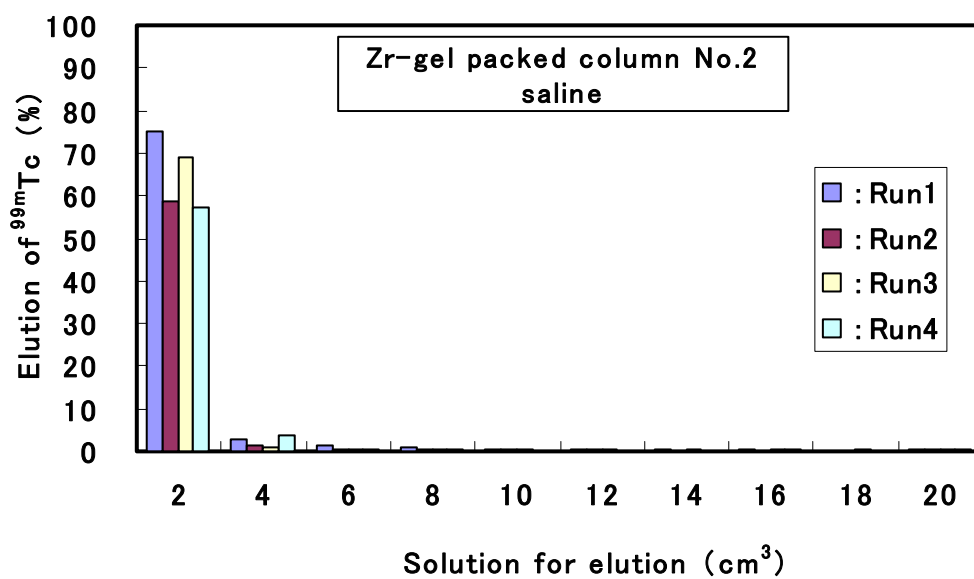
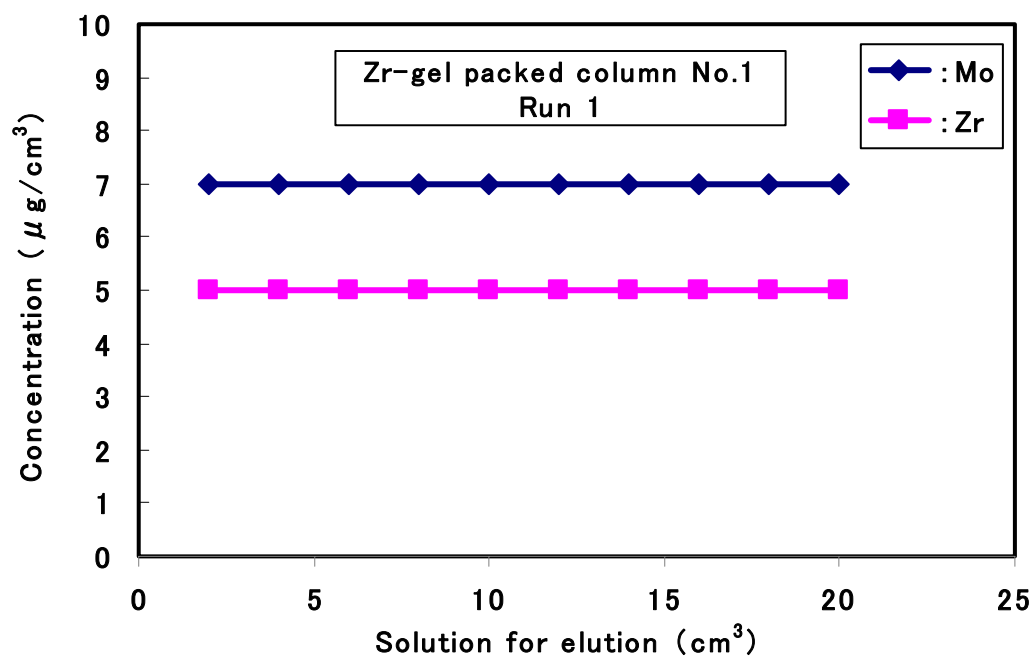
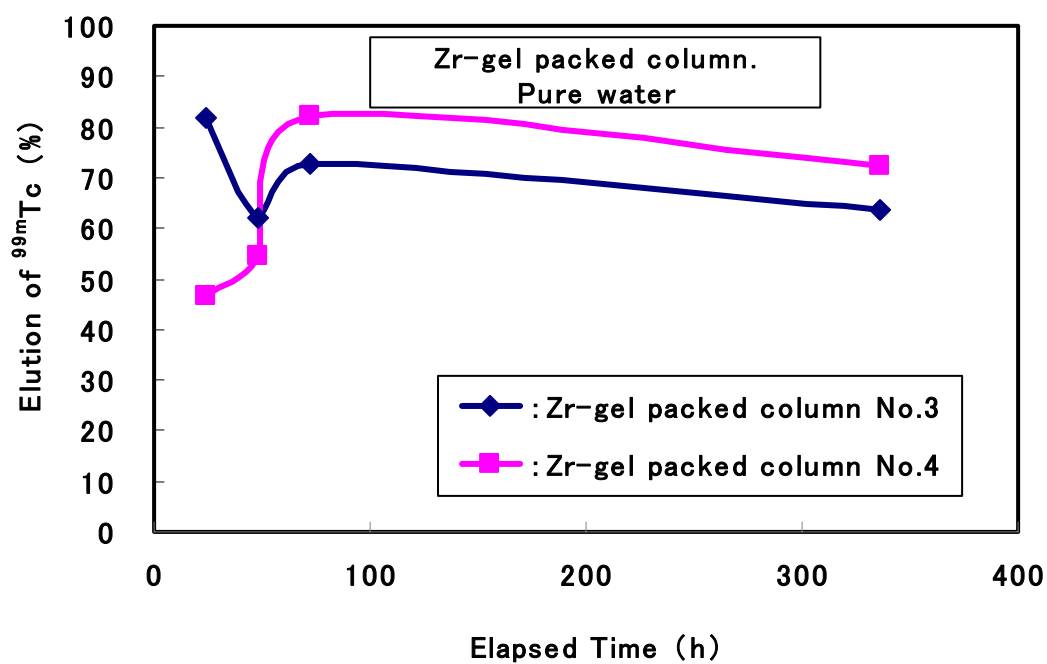
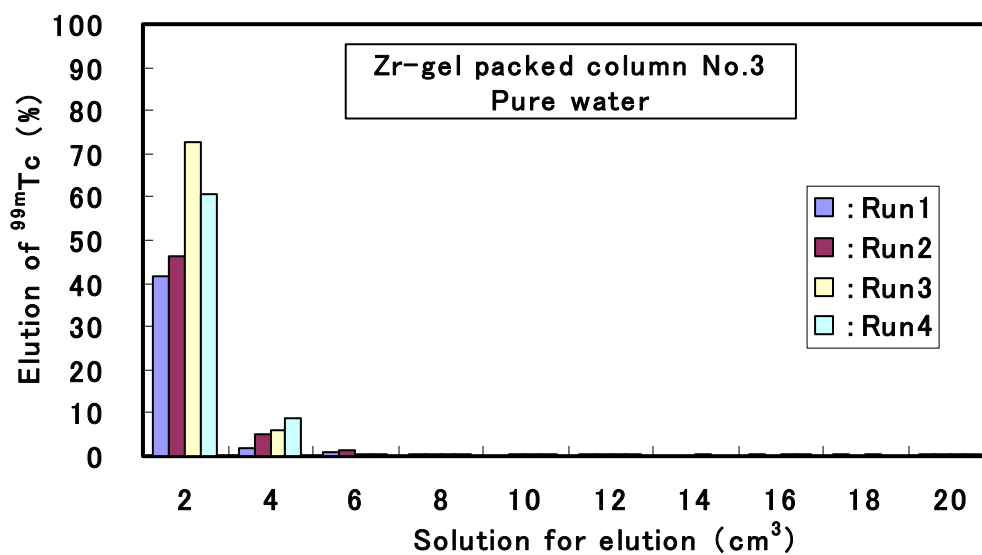
Fig. 19 Zr ゲル充填カラム No. 2 ^{99m}Tc 溶離曲線

Fig. 20 Zr ゲル充填カラム No. 1-Run 1 離液中の不純物濃度

Fig. 21 Zr ゲル充填カラムからの ^{99m}Tc 溶離率の経時変化Fig. 22 Zr ゲル充填カラム No.3 ^{99m}Tc 溶離曲線

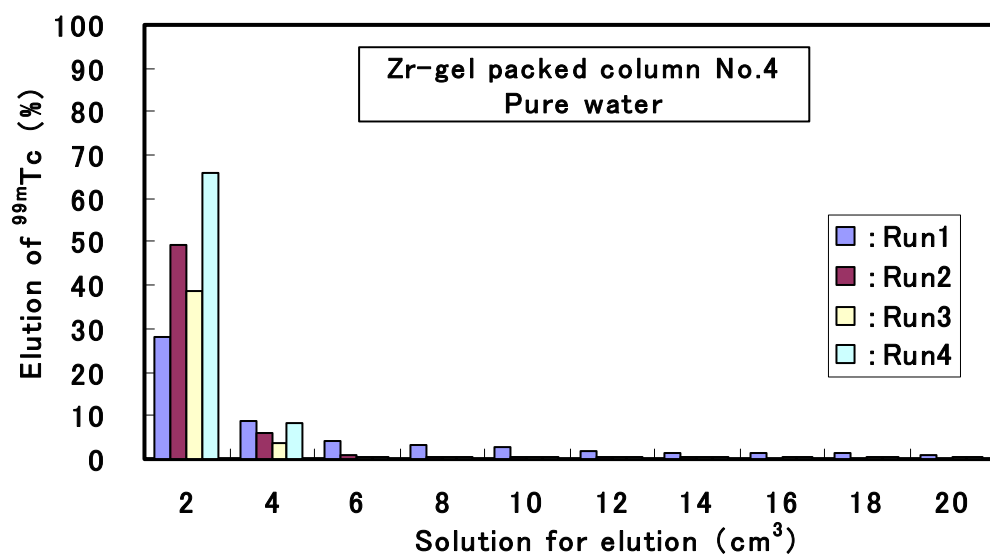
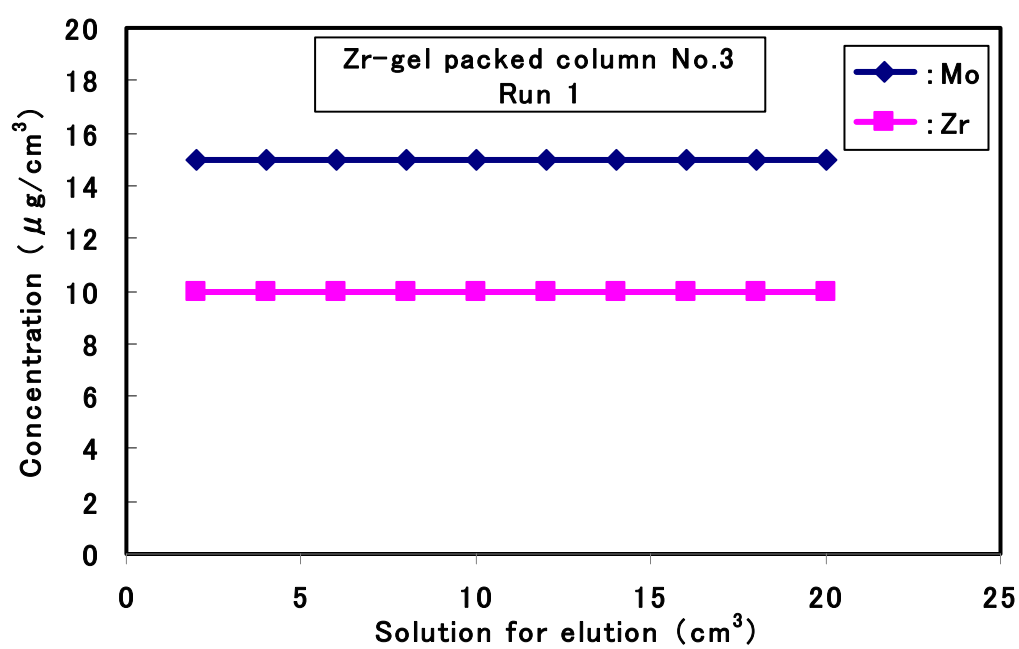
Fig. 23 Zr ゲル充填カラム No. 4 ^{99m}Tc 溶離曲線

Fig. 24 Zr ゲル充填カラム No. 3-Run 1 離液中の不純物濃度

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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	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	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	1	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
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束密度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
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
酵素活性濃度	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過程についてのみに使用される。
 (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	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
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=60 s
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 ≐ (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		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℃」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

