

アルミナ吸着剤の Mo 吸着 / 溶離に関する予備試験

Preliminary Tests on Adsorption / Desorption of Alumina Adsorbents

鈴木 善貴 石田 卓也 鈴木 祐未 松倉 実
黒崎 文雄 西方 香緒里 三村 均 土谷 邦彦

Yoshitaka SUZUKI, Takuya ISHIDA, Yumi SUZUKI, Minoru MATSUKURA
Fumio KUROSAKI, Kaori NISHIKATA, Hitoshi MIMURA and Kunihiko TSUCHIYA

原子力科学研究部門
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
Sector of Nuclear Science Research

December 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2016

アルミナ吸着剤の Mo 吸着/溶離に関する予備試験

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
大洗研究開発センター 照射試験炉センター

鈴木 善貴、石田 卓也*¹、鈴木 祐未*²、松倉 実*³、
黒崎 文雄*³、西方 香緒里、三村 均*³、土谷 邦彦

(2016 年 10 月 6 日受理)

照射試験炉センターでは、(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) 反応による ⁹⁹Mo 製造は簡便な方法であり、核不拡散や廃棄物管理の観点からも有利である。しかしながら、本方法による ⁹⁹Mo の比放射能が低いことから、高い放射能濃度を有する ^{99m}Tc 製品の製造が困難である。これまで、高い Mo 吸着効率を持つ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) のような Mo 吸着剤の開発が進められている。これらの Mo 吸着剤の医療用 ⁹⁹Mo/^{99m}Tc ジェネレータへの利用のためには、Mo 吸着剤に含まれる構成元素の影響を評価し、^{99m}Tc 製品の品質を保証することが必要である。

本報告書において、まず、Mo 吸着剤の開発の現状調査を行った。次に、医療用 ⁹⁹Mo/^{99m}Tc ジェネレータに使用されているアルミナ吸着剤に着目し、結晶構造や比表面積のような異なった特性を持つ 3 種類のアルミナの Mo 吸着/溶離特性を調べた。その結果、アルミナの結晶構造及び比表面積の違いにより、Mo 吸着/溶離特性に差異が見られることを明らかにした。

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 原子力エンジニアリング株式会社 (平成 27 年度まで技術開発協力員)

*2 株式会社 化研 (平成 27 年度まで外来研究員)

*3 ユニオン昭和株式会社

Preliminary Tests on Adsorption / Desorption of Alumina Adsorbents

Yoshitaka SUZUKI, Takuya ISHIDA*¹, Yumi SUZUKI*², Minoru MATSUKURA*³,
Fumio KUROSAKI*³, Kaori NISHIKATA, Hitoshi MIMURA*³ and Kunihiko TSUCHIYA

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

(Received October 6, 2016)

The research and development (R&D) on the production of ⁹⁹Mo/^{99m}Tc by (n, γ) method has been carried out in the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center of the Japan Atomic Energy Agency. The ⁹⁹Mo production by (n, γ) reaction is a simple and easy method, and it also is advantageous from the viewpoints of nuclear proliferation resistance and waste management. However, it is difficult to produce the ^{99m}Tc solution with high radioactive concentration because the specific radioactivity of ⁹⁹Mo by this method is extremely low. Up to now, various Mo adsorbents with high Mo adsorption efficiency such as Polyzirconium Compound (PZC) and Polytitanium Compound (PTC) have been developed. It is necessary for the utilization of these adsorbents to medical ⁹⁹Mo/^{99m}Tc generators to evaluate the effect of elements included in these adsorbents and to assure the quality of ^{99m}Tc solution.

In this report, the status of R&D of the Mo adsorbents was investigated first, and then focusing on the alumina as a Mo adsorbent, which is used in the medical ⁹⁹Mo/^{99m}Tc generators, the Mo adsorption/desorption properties of three kinds of alumina with different properties such as crystal structure and specific surface were evaluated. As a result, it was found that the difference in crystal structure and specific surface of the alumina causes differences in Mo adsorption/desorption characteristics.

Keywords: (n,γ) Method, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc Generator, Alumina, Mo Adsorption, Mo Desorption

* 1 Nuclear Engineering Co., Ltd. (Collaborating Engineer until fiscal 2015)

* 2 KAKEN Co., Ltd. (Visiting Researcher until fiscal 2015)

* 3 UNION SHOWA K.K.

目 次

1. 序 論	1
2. Mo 吸着剤の調査	1
2.1 アルミナ (Al ₂ O ₃)	1
2.2 高分子化合物	2
2.3 新規材料	3
3. 試験方法	3
3.1 アルミナ試料	3
3.2 アルミナの単体特性試験	3
3.3 Mo 吸着/溶離試験	4
4. 試験結果及び考察	9
4.1 アルミナ試料の基本的特性評価	9
4.2 アルミナ試料の Mo 吸着特性	10
4.3 アルミナ試料の Mo 溶離特性	11
5. 結 論	21
謝 辞	21
参考文献	22
付 録 アルミナ試料の固液比依存性	23

Contents

1. Introduction	1
2. Investigation of Mo adsorbents	1
2.1 Alumina (Al ₂ O ₃)	1
2.2 Polymer	2
2.3 New material	3
3. Experiment method	3
3.1 Alumina sample	3
3.2 Single characteristic test of alumina	3
3.3 Mo adsorption / desorption experiments	4
4. Results and Discussion	9
4.1 Characterization of alumina	9
4.2 Mo adsorption properties	10
4.3 Mo desorption properties	11
5. Conclusions	21
Acknowledgment	21
References	22
Appendix Solid-liquid ratio dependence	23

1. 序 論

テクネチウム-99m (^{99m}Tc : 半減期 6.01 時間) は放射性診断薬として用いられるラジオアイソトープ (RI) の一つである。 ^{99m}Tc の唯一の原料として親核種であるモリブデン-99 (^{99}Mo : 半減期 65.9 時間) がある。日本では ^{99}Mo をすべて輸入に依存しているため、国内生産による安定的な供給が望まれている¹⁻²⁾。現在、 ^{99}Mo 製造は、ウラン-235 (^{235}U : 半減期 7.04×10^8 年) の核分裂を利用した (n, f) 法により行われている。しかしながら、世界的な動きとして、 ^{99}Mo 製造メーカは原料である高濃縮ウラン (HEU) から低濃縮ウラン (LEU) への転換を図っており、これに伴い、核燃料サイクルの再処理工程と類似の技術が必要となり、核不拡散、核分裂性廃棄物の処理・処分等の問題 (核セキュリティ) も重要な課題の一つとなっている。

日本原子力研究開発機構 (原子力機構) 原子力科学研究部門 大洗研究開発センター 照射試験炉センターでは、少ない放射性廃棄物及び簡便な製造工程の観点から、ウランを用いない (n, γ) 法による製造を提案し、材料試験炉 (JMTR) を用いた放射化法 ((n, γ) 法) による ^{99}Mo の製造に関する技術開発を行っている³⁻⁴⁾。しかしながら、(n, γ) 法では、生成する ^{99}Mo の比放射能が低いことから、得られる ^{99m}Tc の放射能濃度も低いという欠点があり、多くの Mo を高効率で吸着できる吸着剤が必要となる。これまで、高分子ジルコニウム化合物 (Polyzirconium Compound: PZC)⁵⁾ や高分子チタニウム化合物 (Polytitanium Compound: PTC)⁶⁻⁷⁾ と呼ばれる吸着剤が開発されているが、医療機器である $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレータへの適用にあたっては、これらの構成元素である Zr や Ti に対する人体影響を評価する必要がある。

本報告書は、Mo 吸着剤の開発の現状調査を行うと共に、医療用 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレータに使用されている Mo 吸着剤であるアルミナに着目し、アルミナの特長 (結晶構造、比表面積、など) が Mo 吸着/溶離特性に与える影響を調べた。

2. Mo 吸着剤の調査

2.1 アルミナ (Al_2O_3)

既存の $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレータに使用されている吸着剤には、造粒した水酸化アルミニウムを $500 \sim 800^\circ\text{C}$ で焙焼・脱水した多孔質の粒子である活性アルミナ ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) が使用されている。 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ の成分は酸化アルミニウムで、結晶構造は γ 型で、 $0.001 \sim 0.1 \mu\text{m}$ の細孔 (容積は $0.4\text{-}1 \text{ m}^2/\text{g}$) を有し、比表面積は $120 \sim 350 \text{ m}^2/\text{g}$ である。 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ は、吸着元素に対し選択性があり、極性の高い物質を優先的に吸着する特性がある。飽和に達したら、酸またはアルカリ溶液で再生することもできる。

このように、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ は吸着機能とイオン交換機能を有するが、 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレータに使用されているアルミナの Mo 吸着量は最大約 10 mg/g であり、ジェネレータとして必要な約 500 mCi の (n, γ) 法で生成された ^{99}Mo を確保するためには、アルミナが約 25 g 以上必要とされている。また、仮に ^{98}Mo が 100% 濃縮されたモリブデンを (n, γ) 法で用いてもアルミナは約 5 g 以上必要となる。このため、従来のジェネレータのアルミナ量 (約 2 g) に比べて多く、溶離に必要な生理

食塩水量が増え、得られる ^{99m}Tc 溶液の比放射能が小さくなることから、実用的ではない。そのために、核分裂 (n,f) 法で製造した比放射能の高い ^{99}Mo を用い、ジェネレータの小型軽量化をはかり、扱い易さ、価格及び輸送の問題を解決し製品化されているのが現状である。

一方、アルミナの吸着性能を向上するための研究も行われている。例えば、韓国では、 Al_2O_3 を硫酸で表面処理することにより、 ^{188}W 吸着量の向上を図った研究(WはMoと同族元素であり、吸着性能等の化学的挙動はほぼ同じ性質を有する)が行われ、静的状態で従来の約100倍の吸着能を有することが確認されている。しかしながら、表面状態の変化により吸着量減少も確認されており⁸⁾、表面処理による吸着性能の向上には、さらなる改良が必要であると考えられる。また、インドにおいて、硝酸アルミニウム ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$) と炭酸アンモニウム ($(\text{NH}_4)\text{CO}_3$) の固相反応により、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ を得る研究が行われ、高分子化合物と同等の吸着量を有することが確認されている。この $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ を用いて、 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ 吸着/溶離特性も調べられた⁹⁾。この結果、Mo 吸着量は1gの Al_2O_3 に対し205mgを達成している。また、ミルクング試験においても、 ^{99m}Tc 溶離率が約85%、 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ の比が $3 \times 10^{-3}\%$ の ^{99m}Tc 溶液が得られている。この $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ の比表面積は約250 m^2/g であり、工業製品として販売されているアルミナとほぼ同程度であることから、この $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ の表面状態及び吸着メカニズムを解明することにより、高性能の Mo 吸着量を有するアルミナの開発が可能と考えられる。

2.2 高分子化合物

Al_2O_3 に代わる吸着能の高い Mo 吸着剤として、これまで原子力機構において、PZC と呼ばれる吸着剤が開発され、性能確認試験が行われてきた⁵⁻⁷⁾。この結果、PZC では1gあたりの Mo 吸着量は200~250 mg であり、目標値の Mo 吸着能を有していることが分かっている。しかし、PZC に関しては、塩素を含有することによる腐食性ガスの発生、Mo 吸着反応時の粉化、pH の急激な変化によるゲル化、などの欠点も確認されている。これらの欠点を改善するため、新たな吸着剤として、塩素を含まない構造を有する PZC やジルコニウム (Zr) の代わりにチタン (Ti) を構成物質とした PTC の開発⁶⁾ も進められている。

PZC 及び PTC の吸着剤への Mo 吸着/ ^{99m}Tc 溶離メカニズムは、以下のとおりである。高分子中に含まれるアルコキシ基や有機配位子が加水分解され、Zr もしくは Ti 原子には水酸基が生成する。この水酸基は化学的に不安定であり、その近傍に $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ イオンが存在すると直ちに化学反応が起こり、Zr (Ti) -O-Mo 結合を生成する。吸着した ^{99}Mo は、 β -崩壊して ^{99m}Tc となるが、 ^{99m}Tc 溶離反応は化学的に結合した ^{99}Mo が ^{99m}Tc に転換することにより、一価の過テクネチウム酸イオン ($^{99m}\text{TcO}_4^-$) になり易い構造であるため、結合が弱くなり、生理食塩水で容易に溶離される。

開発した PZC 及び PTC について、中性子照射した MoO_3 を溶解させた溶解液を用いて $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ 吸着/溶離特性も調べられている。この結果、両者の Mo 吸着剤とも1gあたりの Mo 吸着量は200 mg 以上と目標値を達成し、Mo 吸着剤や Mo 原料のリサイクルも可能である見通しが得られている⁷⁾。一方、Zr や Ti 元素を用いた高分子化合物が、抽出した ^{99m}Tc 溶液中に全く溶離しないことやこれらの元素に対する人体への影響を解明することが、医療機器である $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレータへの実用化に欠かせない課題となっている。

2.3 新規材料

最近、キトサンをベースとした Mo 吸着剤の開発が進められている。キトサンとは、キチンをアルカリ処理して得られる高分子化合物で、重金属の吸着剤及び酸性物質の除去剤として利用されている。米国の Perma-Fix 社において、キトサンを基体として、架橋キトサン誘導体を合成し、Mo の吸着特性を飛躍的に向上した Mo 吸着剤 (Micro-Porous Composite Resin : MPCM) の報告がなされている¹⁰⁾。MPCM は、1 g あたりの Mo 吸着量が 700 mg 程度であり、開発目標値の 3 倍以上の Mo 吸着能がある。また、キトサンを基体としているため人体への影響も少なく、画期的な Mo 吸着剤の候補材であるとされている。これまで、 γ 線照射試験により、500 kGy までの積算線量で MPCM は安定であることが確認され、今後、米国ミズーリー大学の MURR 炉やポーランド原子力研究所の MARIA 炉での実証試験も計画されている。

3. 試験方法

3.1 アルミナ試料

本試験に供するアルミナ試料は、市販されているユニオン昭和 (株) 製アルミナの 3 種類 (以下、Al₂O₃-1、Al₂O₃-2 及び Al₂O₃-3 と記載) である。本試験で使用するアルミナ試料の基本的特性を Table 3-1 に、アルミナ試料の外観写真を Fig. 3-1 に示す。なお、市販の ⁹⁹Mo/^{99m}Tc ジェネレータに使用されているアルミナ (以下、医療用 Al₂O₃ と記載) を比較試料とした。

3.2 アルミナの単体特性試験

試験にあたり、準備したアルミナ試料について、X 線回折測定、比表面積測定、表面観察及び元素分析を行い、基本的特性を調べた。

まず、アルミナ試料の結晶構造は、リガク社製 XRD (Ultima IV 285) を用いて同定した。測定用試料は、Mo 吸着試験前の各アルミナ試料をメノウ乳鉢により細かく粉碎し、X 線回折用ガラスホルダーに充填し、製作した。

アルミナ試料の比表面積は、島津製作所社製自動比表面積測定装置 (ジェミニ VII2390) を用いて測定した。測定用試料は、試料表面の吸着水を除去するため、島津製作所社製前処理装置 (バキュプレップ 061) により真空中で数時間 150°C の加熱処理を行った後、測定に供した。

アルミナ試料の表面観察は、日本電子社製 FE-EPMA (JXA-8530F) を用い、同時に同装置に設置されている電子プローブマイクロアナライザー (EPMA : Electron Probe Micro Analyzer) を用いて試料表面の元素分析も行った。表面観察用試料は、Mo 吸着試験前の各アルミナ試料を EPOXY 樹脂 (BUEHLER 社製) に貼り付けたカーボンテープ上に散布し、日本電子社製真空蒸着装置 (JEE-420) を用いて炭素蒸着し、製作した。

次に、Mo 吸着試験後のアルミナ試料について、X 線回折測定、表面観察及び表面の元素分布測定を行った。X 線回折測定では、Mo 吸着試験後の各アルミナ試料をメノウ乳鉢により細かく粉碎し、X 線回折用ガラスホルダーに充填し、XRD を用いて測定した。表面観察及び元素分布測定で

は、Mo 吸着試験後のアルミナ試料を EPOXY 樹脂（BUEHLER 社製）に埋込み、耐水研磨紙で研磨した後、真空蒸着装置により金（Au）を蒸着し、FE-EPMA を用いて測定した。

3.3 Mo 吸着/溶離試験

準備したアルミナ試料の Mo 吸着/溶離試験方法を Fig. 3-2 に示す。

まず、Mo 吸着/溶離試験に用いるモリブデン酸ナトリウム溶液（Mo 溶液）を調整した。天然同位体比を有する三酸化モリブデン（MoO₃）粉末を、MoO₃ 粉末質量に対して 2.5 倍の体積の 6 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液で溶解した後、精製水を加え、アルミナへの Mo 吸着量が安定する 10 mg-Mo/mL になるように調整した。調整した Mo 溶液中の Mo 濃度は、（株）パーキンエルマー ジャパン製 ICP-AES（OPTIMA7300DV）を用いて測定した。

次に、Mo 吸着試験として、調整した Mo 溶液中に 2 mol/L の塩酸を適量加え pH 4 とし、各アルミナ試料を所定の量だけ添加した 50 mL バイアル瓶へ分取した。吸着操作として、Mo 溶液が蒸発しない温度範囲（各 室温、60°C 及び 90°C）で 3 時間静置させたが、試験中 Mo 溶液とアルミナがなじむように約 30 分ごとに攪拌を行った。なお、60°C 及び 90°C の試料については、各温度に保持された恒温槽内に静置した。3 時間の静置後、未吸着の Mo を回収するため、バイアル瓶内の Mo 溶液をマイクロピペットにより 100 mL メスフラスコへ分取した。また、Mo 溶液を回収した後、アルミナ試料を洗浄するため、バイアル瓶に精製水を添加・攪拌し、その精製水を 100 mL メスフラスコに分取する操作を繰り返し、回収 Mo 溶液と精製水の総量を 100 mL とした。100 mL メスフラスコに分取した溶液は ICP-AES を用いて Mo 濃度を測定し、得られた Mo 濃度の測定結果から、各アルミナ試料に吸着した Mo 量を算出した。Mo 吸着試験条件を Table 3-2 に示す。

最後に、上記の吸着及び洗浄操作を行った Mo 吸着アルミナ試料を用いて、Mo 溶離試験を行った。Mo 溶離試験に用いるアルミナ試料の Mo 吸着条件を Table 3-3 に示す。この Mo 溶離試験では、吸着平衡に達したアルミナ試料からの Mo 溶離量を測定するため、より平衡状態に達しやすいと推測される吸着温度 90°C で Mo 吸着させたアルミナ試料を使用した。まず、アルミナ試料に精製水を添加し、マイクロピペットによりポリプロピレン製カラムにアルミナ試料を充填した（アルミナ充填カラム）。Mo 溶離試験の前準備として、溶離液に用いる 0.9% 生理食塩水 10 mL をアルミナ充填カラムに通液した。これは、実際のミルクキング方法に基づき行ったものであり、カラム充填までに生成した ^{99m}Tc 及び未吸着 Mo を除去しコンディショニングするための操作である。コンディショニング操作により分取した生理食塩水は、ICP-AES を用いて Mo 濃度を測定し、アルミナ試料に吸着している Mo 量の初期値を決定した。

約 1 日経過後、ミルクキング操作として、アルミナ充填カラムに生理食塩水を 5 mL 通液した。この操作は 1 日毎に合計 2 回行った。ミルクキング操作により採取した生理食塩水は、ICP-AES を用いて Mo 濃度を測定し、Mo 溶離量を算出した。

Table 3-1 準備したアルミナ試料の基本的特性

アルミナ試料	形状	粒子径	アルミナ試料の特徴	主な吸着物質	用途
Al ₂ O ₃ -1	粉碎品	8×14 mesh (1.2 mm ~ 2.4 mm)	高性能活性アルミナ	HF, HCl, H ₂ O	各種ガス・液体の乾燥・精製 (例：計装用空気の脱水や LPG, 代替フロン冷媒の脱水・ 精製)
Al ₂ O ₃ -2	球状	7×12 mesh (1.4 mm ~ 2.8 mm)	Na ドープした活性アルミナ	HCl, CO ₂ , TBC, H ₂ O	エチレン、プロピレン等 オレフィンの精製
Al ₂ O ₃ -3	球状	7×14 mesh (1.2 mm ~ 2.8 mm)	合成ゼオライトとアルミナ (Al ₂ O ₃ -2) のハイブリット ゼオライト：主に物理吸着 Al ₂ O ₃ -2：主に化学吸着	(ゼオライト) H ₂ O, アセトン, エタノール, メタノール, メルカプタン, メチルメルカプタンなど (Al ₂ O ₃ -2) HCl, CO ₂ , TBC, H ₂ S, COS など	Mix C4 オレフィンの異性化 原料の精製
医療用 Al ₂ O ₃	粉末状	0.06 mm ~ 0.2 mm	現行の ^{99m} Tcジェネレータ に用いられているアルミナ	—	—

Table 3-2 アルミナ試料の Mo 吸着試験条件

アルミナ 試料	Mo 濃度 (mg/mL)	溶液量 (mL)	Al ₂ O ₃ 重量 (g)	pH	吸着温度 (°C)	吸着時間 (h)
Al ₂ O ₃ -1	10	20	0.5	4	室温	3
					60	
					90	
Al ₂ O ₃ -2	10	20	0.5	4	室温	3
					60	
					90	
Al ₂ O ₃ -3	10	20	0.5	4	室温	3
					60	
					90	
医療用 Al ₂ O ₃	10	30	0.3	4	室温	3
					60	
					90	

Table 3-3 Mo 溶離試験に用いるアルミナ試料の Mo 吸着条件

アルミナ 試料	Mo 濃度 (mg/mL)	溶液量 (mL)	Al ₂ O ₃ 重量 (g)	pH	吸着温度 (°C)	吸着時間 (h)
Al ₂ O ₃ -1	10	40	1.0	4	90	3
Al ₂ O ₃ -2						
Al ₂ O ₃ -3						

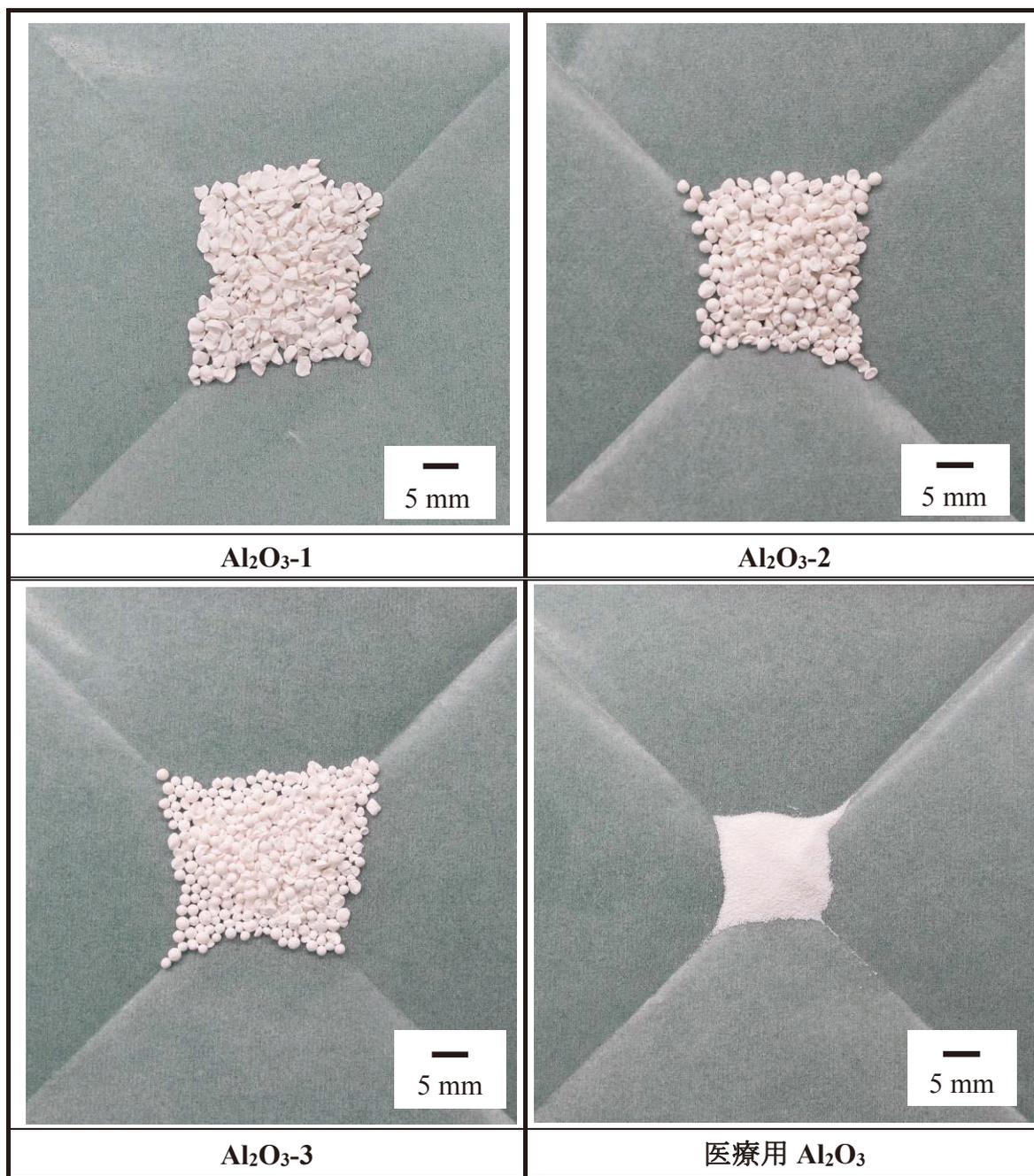


Fig. 3-1 準備したアルミナ試料の外観写真

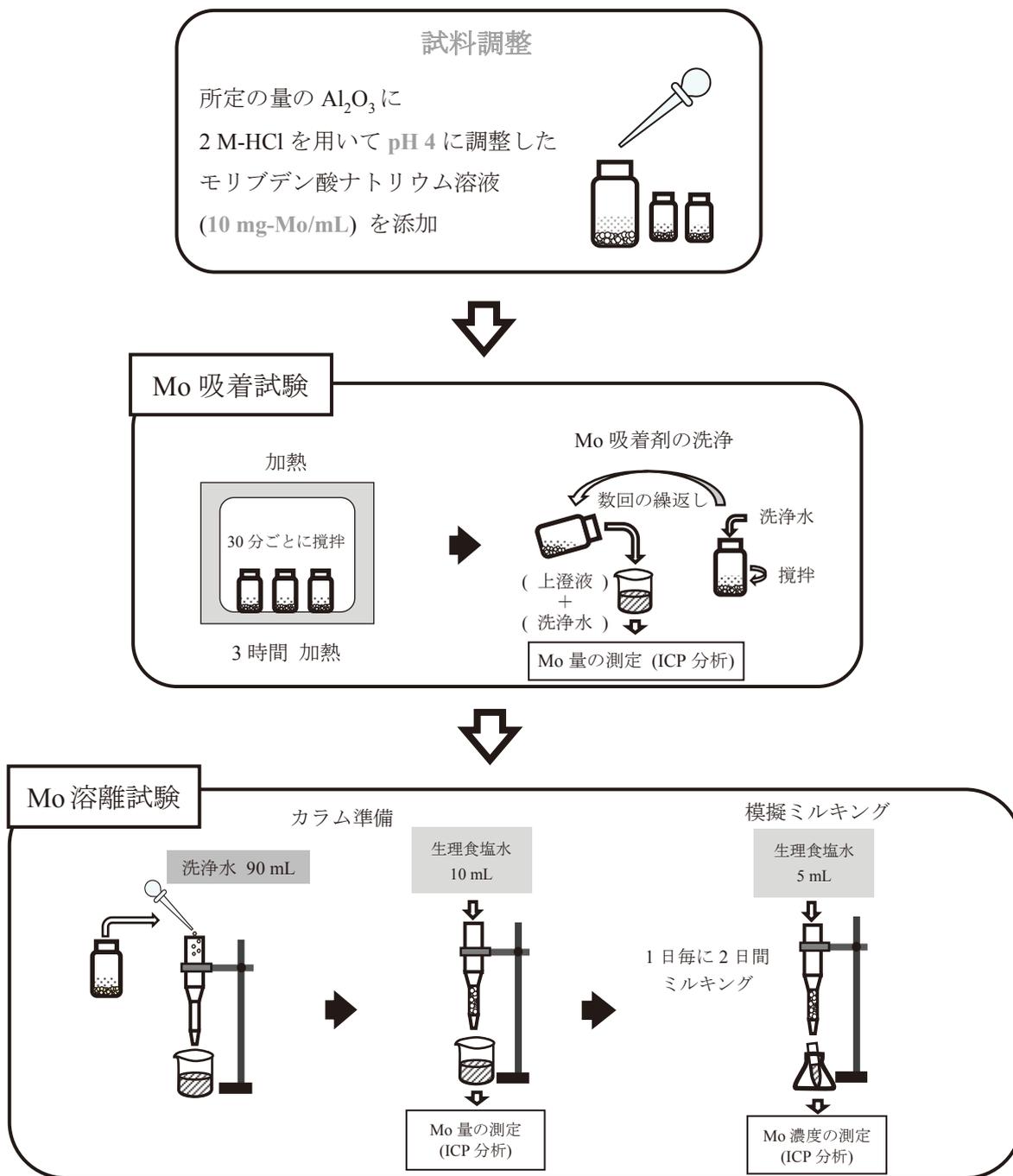


Fig. 3-2 Mo 吸着/Mo 溶離試験方法の概略図

4. 試験結果及び考察

4.1 アルミナ試料の基本的特性評価

各アルミナ試料表面の元素分析結果を Table 4-1 に示す。EPMA による元素分析の結果、 Al_2O_3 -1 では Al と O がそれぞれ観測された。一方、 Al_2O_3 -2 では Al_2O_3 -1 表面に Na 処理を施しているため Na が、 Al_2O_3 -3 では Na に加えゼオライトを含有するためゼオライトの構成元素である Si も観測された。また、医療用 Al_2O_3 については Al と O のみが観測されたことから、他の元素を含まない純粋な Al_2O_3 であった。

各アルミナ試料の X 線回折測定結果を Fig. 4-1 に示す。XRD による結晶構造解析の結果、 Al_2O_3 -1 はベーマイト (α - AlOOH) と χ - Al_2O_3 の混合物と同定された。一方、 Al_2O_3 -2 と医療用 Al_2O_3 については、XRD パターンが近似しており、共に χ - Al_2O_3 と γ - Al_2O_3 の混合物で、ほぼ同じ結晶構造を有するアルミナと考えられる。 Al_2O_3 -3 では、ゼオライトと Al_2O_3 -2 の混合物であるため、 $\text{Na}_{88}(\text{Al}_{88}\text{Si}_{104}\text{O}_{384})$ 及び χ - Al_2O_3 、 γ - Al_2O_3 のピークが観測された。

アルミナは水酸化アルミニウムを始発物質とし、任意の温度で焼成することにより、多様な結晶構造を示すことが知られている。一方、原料となる水酸化アルミニウムにもいくつかの結晶構造が存在し、その種類によってもアルミナが温度変化により採り得る結晶構造に違いが生じる。Fig. 4-2 は、焼成温度とアルミナの結晶構造との相関を示した図である¹¹⁾。

ベーマイト (Boehmite) は、ギブサイト (Gibbsite) またはバイヤライト (Bayerite) を始発物質として水蒸気雰囲気またはアルカリ性雰囲気、結晶粒が粗い (100 μm) 場合に採り得る水酸化アルミニウムの結晶構造である。本試験で用いた Al_2O_3 -1 の結晶構造は、ベーマイトと χ - Al_2O_3 の混合物であった。したがって、Fig. 4-2 を参照すると、 Al_2O_3 -1 はギブサイトを始発物質として焼成温度 250°C~400°C 程度で製造され、大小様々な粒子径を持つギブサイトが焼成によりベーマイトと χ - Al_2O_3 に分岐したと推測される。

一方、 Al_2O_3 -2 では、 Al_2O_3 -1 の表面へ Na 処理を施す際に、 Al_2O_3 -1 をより高い温度で焼成することで、ベーマイトが γ - Al_2O_3 へ変化したものと予想される。この場合、焼成温度は 450°C~600°C 程度である。また、 Al_2O_3 -2 と医療用 Al_2O_3 がほぼ同じ結晶構造であったことから、医療用 Al_2O_3 についても同様な条件で製造されたと考えられる。

各アルミナ試料の比表面積測定結果及び表面観察画像を Fig. 4-3 にまとめた。比表面積の値は、Fig. 4-4 の BET 法における各アルミナ試料の吸着等温線図を基に算出した。この結果、 Al_2O_3 -1、 Al_2O_3 -2 の比表面積は医療用 Al_2O_3 の約 2.5 倍、 Al_2O_3 -3 の比表面積は医療用 Al_2O_3 の約 3 倍であることが観測された。また、粒子径は医療用 Al_2O_3 が最も小さいが、拡大した粒子表面を比較すると、医療用 Al_2O_3 では粒子表面がほぼ平坦であるのに対して、 Al_2O_3 -1、 Al_2O_3 -2 及び Al_2O_3 -3 では非常に多くの凹凸が観測された。このことから、 Al_2O_3 -1、 Al_2O_3 -2 及び Al_2O_3 -3 の比表面積は、微細な細孔の存在に大きな影響を受けていることが考えられる。一方、 Al_2O_3 -1 及び Al_2O_3 -2 では、ほぼ同じ比表面積であった。

4.2 アルミナ試料の Mo 吸着特性

Table 4-2 は各アルミナ試料における基本的特性（結晶構造及び比表面積）、単位重量並びに面積あたりの Mo 吸着量をまとめたものである。単位面積あたりの Mo 吸着量は、各アルミナの Mo 吸着量を比表面積で除することによって算出した。

まず、各アルミナ試料の Mo 吸着量に対する吸着温度の影響を評価した。その依存性を Fig. 4-5 に示す。この結果、 Al_2O_3 -1、 Al_2O_3 -2 及び Al_2O_3 -3 については、吸着温度の上昇とともに、Mo 吸着量は増加しているが、医療用 Al_2O_3 は、吸着温度に対してほぼ同じ Mo 吸着量であった。これは、本試験で準備した Al_2O_3 -1、 Al_2O_3 -2 及び Al_2O_3 -3 の粒子径の大きさが医療用 Al_2O_3 より大きく、またこれらのアルミナ試料の比表面積も大きかったことによるものだと考えられる。すなわち、吸着温度が低いほど Mo の拡散速度も遅くなるため、比表面積の影響を顕著に受け Mo が粒子内部に浸透するまで時間が掛かり、平衡状態に達していなかったと推測される。したがって、吸着温度による Mo 吸着量への影響をできるだけ小さくするためには、ほぼ同じ粒子径のアルミナ試料を準備して行うことが望ましいと考えられる。

次に、各アルミナ試料の最大 Mo 吸着量を比較した。Table 4-2 より、各アルミナ試料の最大 Mo 吸着量は、それぞれ Al_2O_3 -1 が 66.2 mg-Mo/g、 Al_2O_3 -2 が 55.9 mg-Mo/g、 Al_2O_3 -3 が 31.5 mg-Mo/g、医療用 Al_2O_3 が 15.5 mg-Mo/g であった。この結果、 Al_2O_3 -1 及び Al_2O_3 -2 は、医療用 Al_2O_3 に比べて約 4 倍の Mo を吸着することが分かった。

Al_2O_3 -1 と Al_2O_3 -2 の Mo 吸着量を比較すると、 Al_2O_3 -1 の方がより多くの Mo を吸着する結果であった。これは、 Al_2O_3 -1 と Al_2O_3 -2 の比表面積がほぼ同じであったことから、結晶構造の違いに起因するものと推測される。一方、 Al_2O_3 -2 と医療用 Al_2O_3 の Mo 吸着量を比較すると、 Al_2O_3 -2 の方がより多くの Mo 吸着をした。これは、 Al_2O_3 -2 と医療用 Al_2O_3 の結晶構造がほぼ同じであったことから、比表面積の違いによるものと推測される。

Al_2O_3 -3 では、他より大きな比表面積を有するにも関わらず、 Al_2O_3 -1 及び Al_2O_3 -2 と比較して Mo 吸着量が少なかった。これは、 Al_2O_3 -3 はゼオライトを含有しており、ゼオライトがほとんど Mo を吸着していないためだと考えられる。

Fig. 4-6 に、各アルミナの Mo 吸着前後で比較した X 線回折測定結果を示す。この結果、全てのアルミナ試料で、Mo 吸着前後の結晶構造の変化は見られなかった。すなわち、Mo 溶液とアルミナは化学反応を生じることなく、Mo 吸着剤として安定して使用可能であることが示唆された。一方、構造変化が見られなかったことから、アルミナは結晶構造中に Mo を結合せず、結晶表面のみに Mo を吸着していると考えられる。

Fig. 4-7 に、Mo 吸着後の Al_2O_3 -1 の元素分布を示す。Mo 分布に着目すると、粒子内部に Mo が多く分布しており、粒子表面に存在する Mo は少ないことが観測された。すなわち、 Al_2O_3 -1 は主に粒子内部に Mo を吸着し、粒子表面に吸着した Mo は洗浄工程でほぼ溶離したものと考えられる。このことから、アルミナが Mo を吸着する現象は、吸着力が弱いファンデルワールス力による物理吸着であると推測される。

Al_2O_3 -1 の表面観察画像で粒子表面が非常に粗いことが確認されたが、これは比表面積が大きいことと良い一致を示している。ゆえに、 Al_2O_3 -1 は粒子内部に多くの界面を保有するため医療用

Al₂O₃に比べてMo吸着量が格段に多く、さらには粒子内部に吸着したMoは洗浄水からの影響を受けにくくMoの溶離が防止されると考えられる。

4.3 アルミナ試料のMo溶離特性

ミルク工程では、高純度の^{99m}Tc溶液として抽出する必要があるため、Mo溶離量ができるだけ少ないことが望まれる。Table 3-2の条件でMoを吸着させた各アルミナ試料について、生理食塩水を通液した時（ミルク）のMo溶離試験結果をTable 4-3に示す。その結果、1回のミルクでは、3種類の試料とも溶液中に0.004%～0.005%のMoが溶離することが確認された。

Al₂O₃-1とAl₂O₃-2のMo溶離量を比べると、より多くのMoを吸着したAl₂O₃-1の方がMo溶離量も多い。このことから、Mo吸着量が多くなるに従い、Mo溶離量も増加する傾向があるものと考えられる。

^{99m}Tc溶液の品質目標として、放射性医薬品基準に放射核的純度0.15 μCi-⁹⁹Mo/mCi-^{99m}Tc以下(<0.015%)¹²⁾と設定されている。今回の結果が、この条件を満たしているかどうかを検討した。天然同位体比のMoO₃をJMTRで6日間照射すると直後に比放射能6.0 Ci/g-Moの⁹⁹Moが生成されると報告されている¹³⁾。実際にはラビットが3段装荷されることから、⁹⁹Moの平均生成量は、その値の65%と予想され、得られる平均の比放射能は3.9 Ci/g-Moとなる。このことから、検定時までの時間を考慮すると、2半減期後には1.0 Ci/g-Moとなる。この値を用いて、今回最もMo吸着量の多かったAl₂O₃-1のMo溶離量を評価すると、Mo吸着量は74.4 mgであるから、得られる⁹⁹Moの放射能は74.4 mCiである。この時、⁹⁹Moが^{99m}Tcへ崩壊する分岐比は0.877であるから得られる^{99m}Tcの放射能は65.0 mCiとなり、アルミナからの^{99m}Tcの溶出率を80%と仮定するとミルク溶液中に溶出する^{99m}Tcの放射能は52.2 mCiである。次に、1回目ミルクで溶離した⁹⁹Moの放射能を評価する。Mo溶離量0.0044%の時、ミルク溶液5 mL中のMo量は0.22 mgであり、1.0 Ci/g-Moとして換算すると⁹⁹Moの放射能は0.22 mCiとなる。したがって、Al₂O₃-1の1回目ミルク溶液中の⁹⁹Mo/^{99m}Tcは0.42%と評価された。本仮定による各アルミナ試料の放射核的純度への換算結果をTable 4-4に示す。この結果、今回行った3種類のアルミナ試料とも放射核的純度は目標よりも大きくなった。一方、アルミナ材質の異なるAl₂O₃-1とAl₂O₃-2はほぼ同じ放射核的純度と評価でき、Naの表面処理による影響は観測されなかった。ゼオライトを含むAl₂O₃-3では他の2種類に比べ約2倍と大きいことから、生理食塩水による溶離もしやすいことが分かった。

以上より、アルミナから溶離するMo量を低減する方法を検討する必要がある。

Table 4-1 アルミナ試料表面の元素分析結果

アルミナ試料	含有元素			
Al ₂ O ₃ -1	Al	O		
Al ₂ O ₃ -2	Al	O	Na	
Al ₂ O ₃ -3	Al	O	Na	Si
医療用 Al ₂ O ₃	Al	O		

Table 4-2 アルミナ試料における Mo 吸着量の結果

アルミナ 試料	基本的特性		Mo 吸着量					
	結晶構造	比表面積 (m ² /g)	単位重量あたり (mg-Mo/g)			単位面積あたり (mg-Mo/m ²)		
			室温	60℃	90℃	室温	60℃	90℃
Al ₂ O ₃ -1	AlO(OH) χ-Al ₂ O ₃	291.8	47.6	61.0	66.2	0.163	0.209	0.227
Al ₂ O ₃ -2	γ-Al ₂ O ₃ χ-Al ₂ O ₃	274.1	31.8	49.7	55.9	0.116	0.181	0.204
Al ₂ O ₃ -3	Na ₈₈ (Al ₈₈ Si ₁₀₄ O ₃₈₄) γ-Al ₂ O ₃ χ-Al ₂ O ₃	362.9	27.3	28.5	31.5	0.075	0.079	0.087
医療用 Al ₂ O ₃	γ-Al ₂ O ₃ χ-Al ₂ O ₃	115.0	13.5	15.5	15.2	0.117	0.135	0.132

Table 4-3 アルミナ試料の Mo 溶離試験結果

アルミナ試料	Mo 吸着量 (mg-Mo/g)	Mo 溶離量 (%)	
		1 回目ミルキング	2 回目ミルキング
Al ₂ O ₃ -1	74.4	0.0044	0.0052
Al ₂ O ₃ -2	65.0	0.0037	0.0039
Al ₂ O ₃ -3	41.4	0.0049	0.0047

Table 4-4 Mo 溶離試験結果に基づいた放射核的純度への換算値

アルミナ試料	放射核的純度 ⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc (%)	
	1 回目ミルキング	2 回目ミルキング
Al ₂ O ₃ -1	0.42	0.50
Al ₂ O ₃ -2	0.41	0.43
Al ₂ O ₃ -3	0.84	0.80

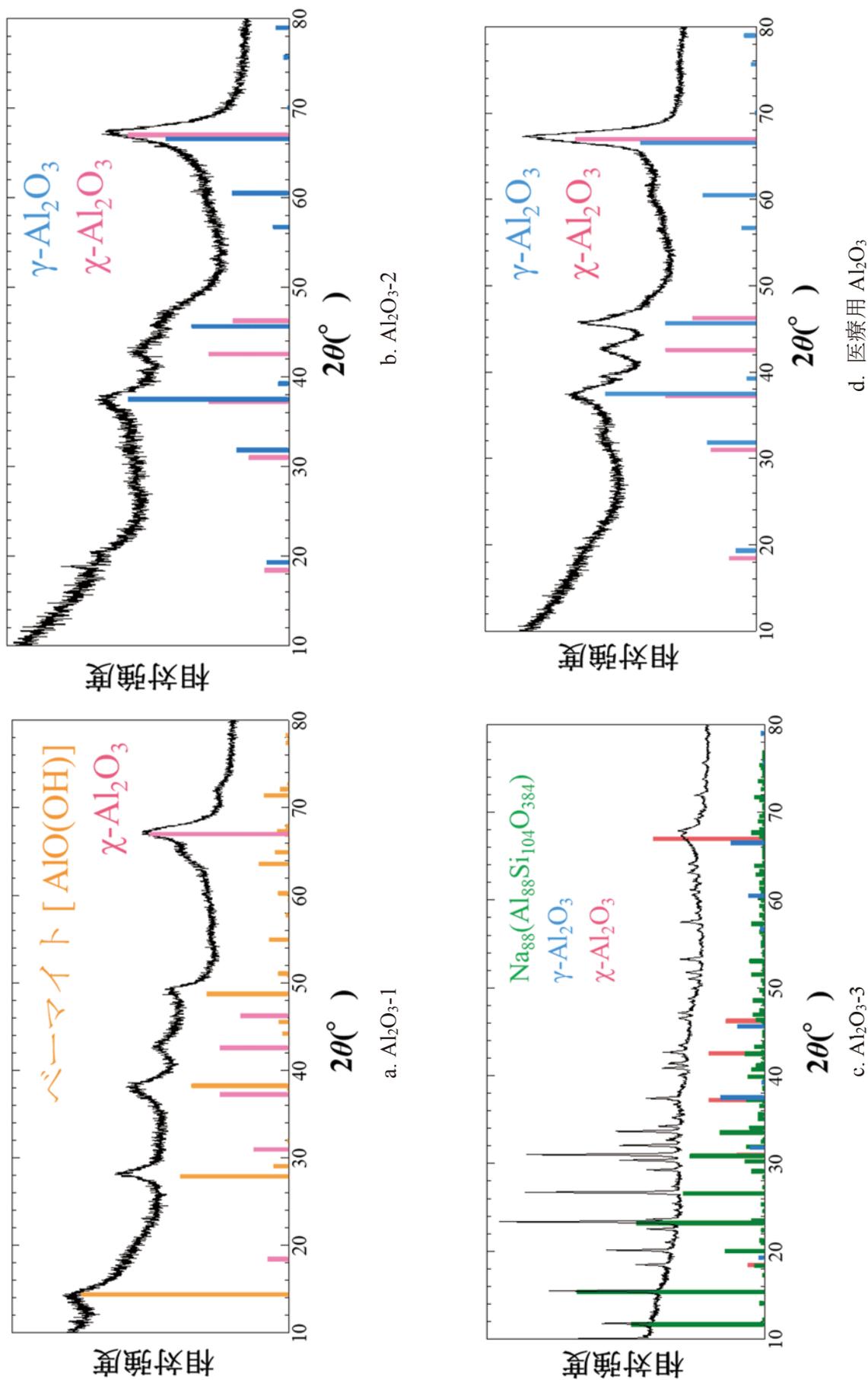
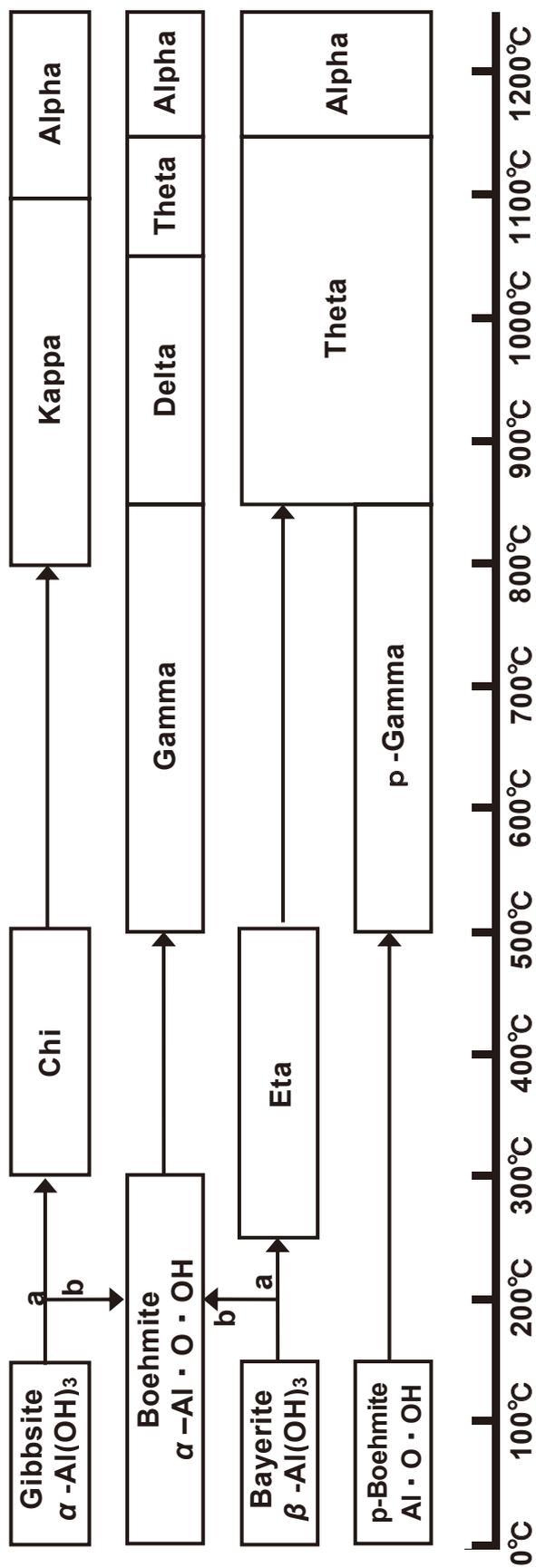


Fig. 4-1 アルミナ試料の X 線回折測定結果



経路 a : 結晶サイズが細かい(10μ 以下)場合

経路 b : 水蒸気、アルカリ性雰囲気、粒径が粗い(100μ)場合

出典 : Alumina as a Ceramic Material(ed.W.H.Giten),P17(1970,American Ceramic Society)

Fig. 4-2 アルミナの焼成温度と結晶構造の関係¹⁾

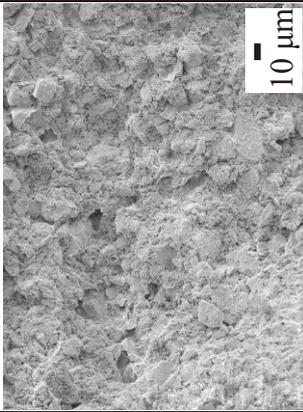
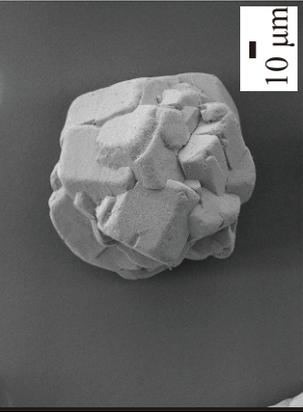
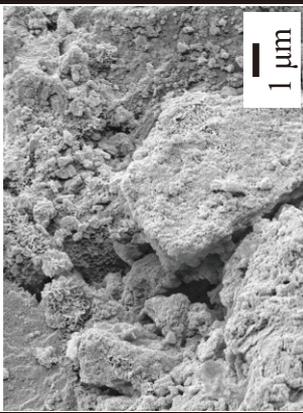
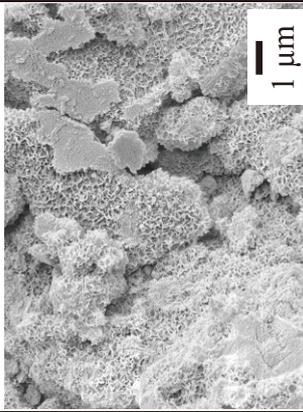
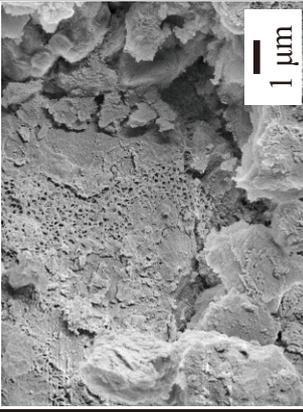
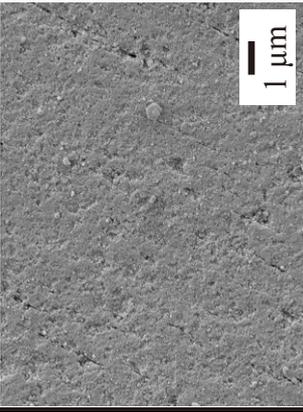
アルミナ	Al ₂ O ₃ -1	Al ₂ O ₃ -2	Al ₂ O ₃ -3	医療用 Al ₂ O ₃
表面観察 画像				
				
比表面積 (m ² /g)	291.8	274.1	362.9	115.0

Fig. 4-3 アルミナ試料の表面観察画像及び比表面積測定結果 (Mo₆ 吸着試験前)

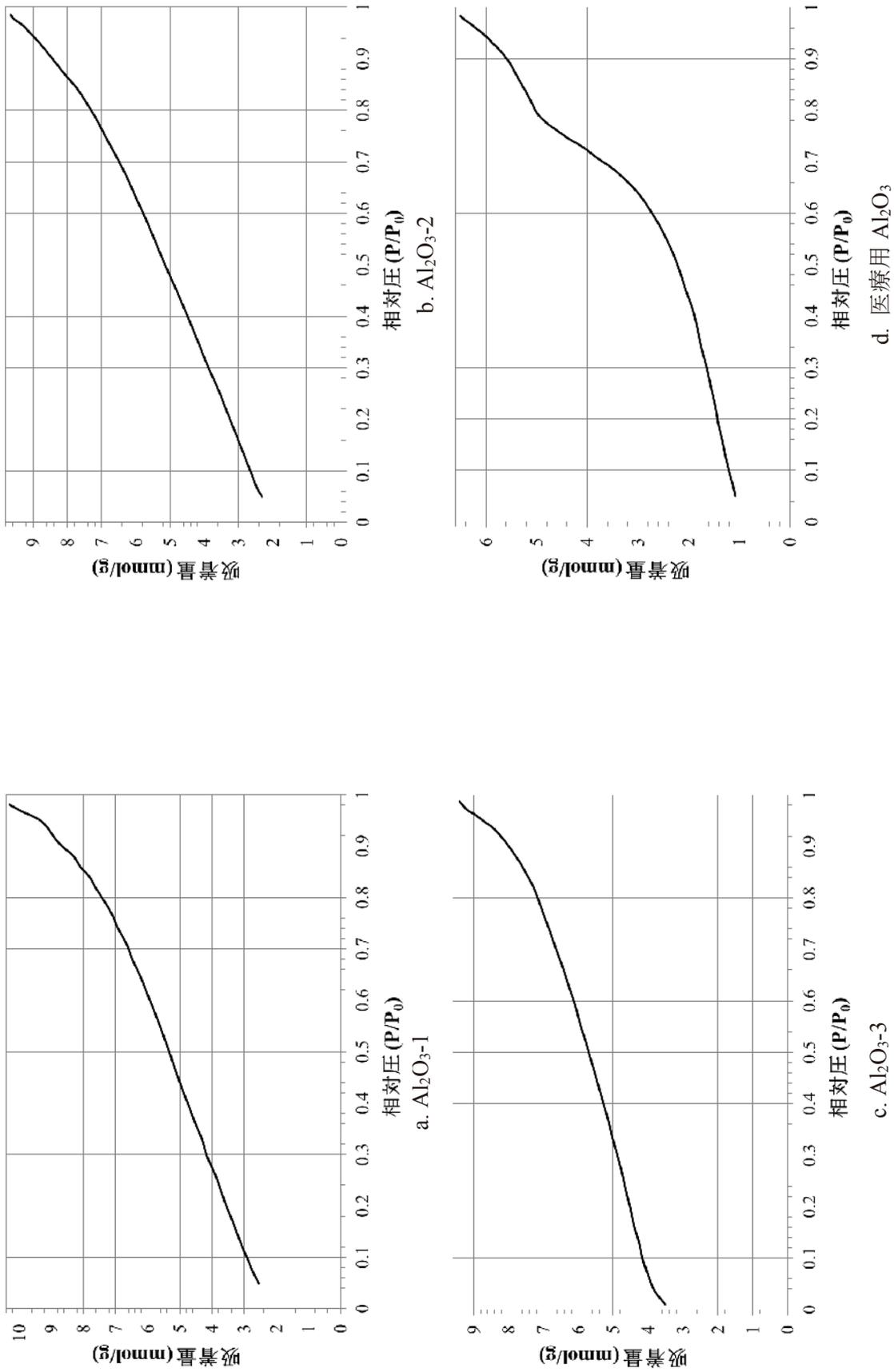


Fig. 4-4 BET 法におけるアルミナ試料の吸着等温線図

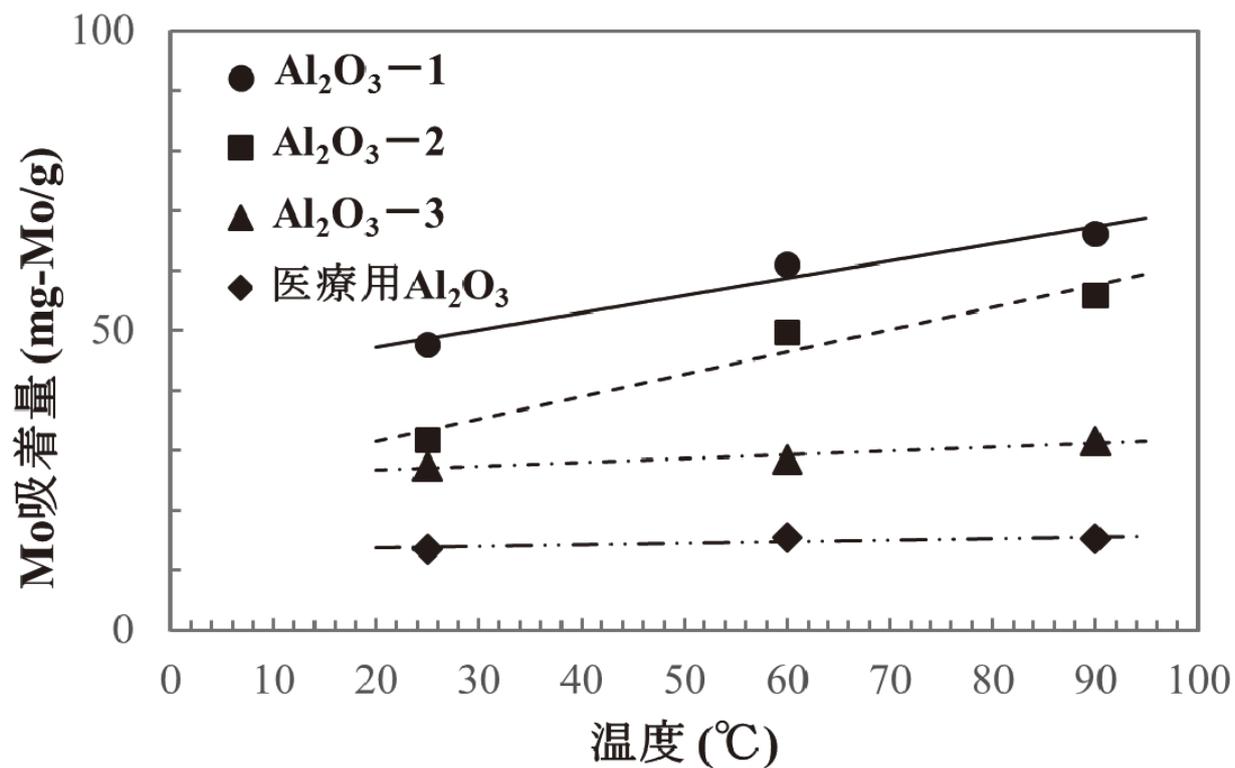
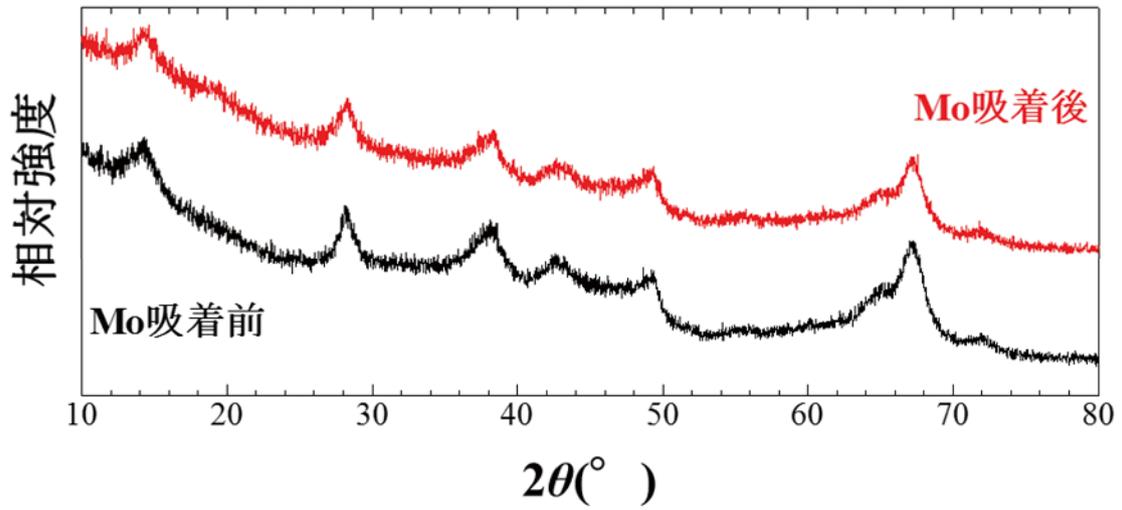
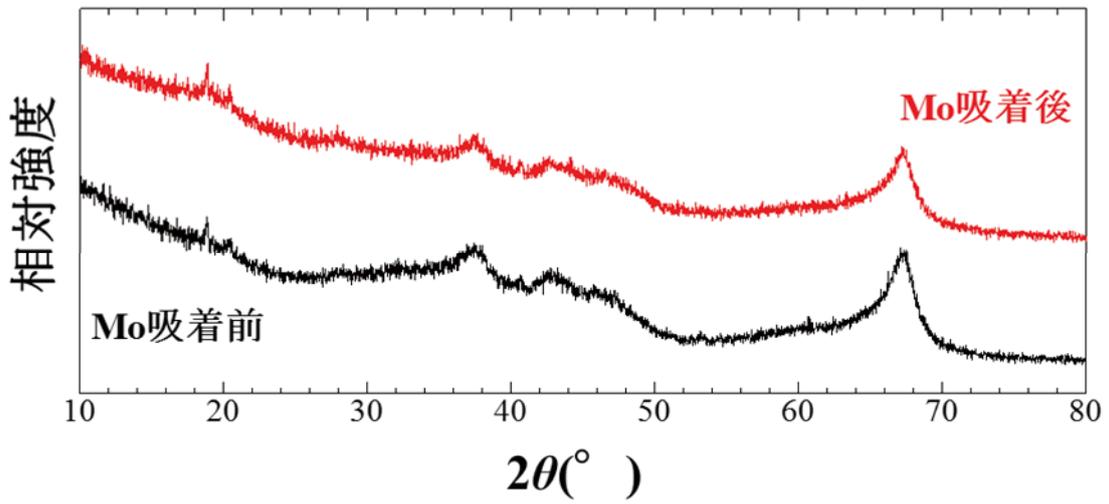


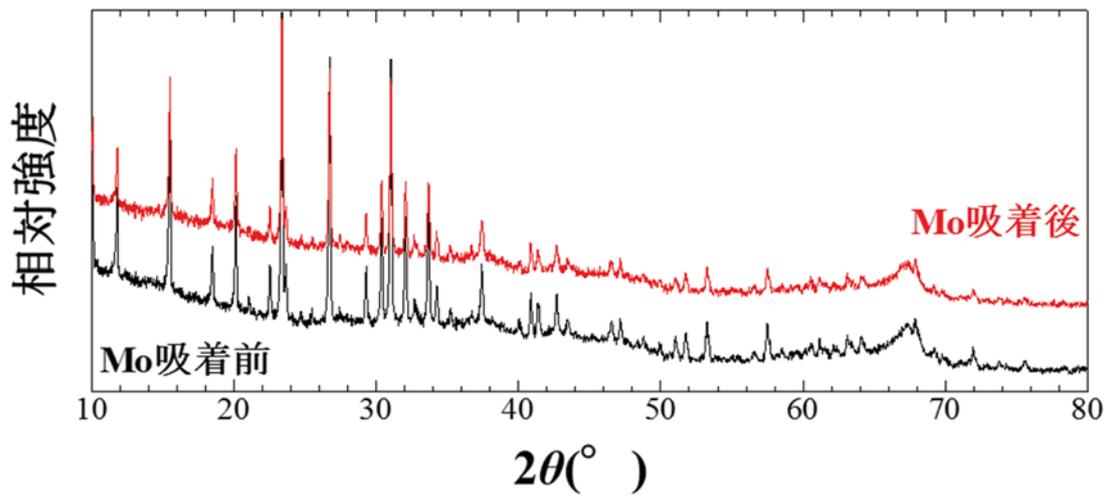
Fig. 4-5 アルミナ試料の吸着温度に対する Mo 吸着量の依存性



a. Al₂O₃-1



b. Al₂O₃-2



c. Al₂O₃-3

Fig. 4-6 アルミナ試料の Mo 吸着前後の X 線回折測定結果

測定箇所

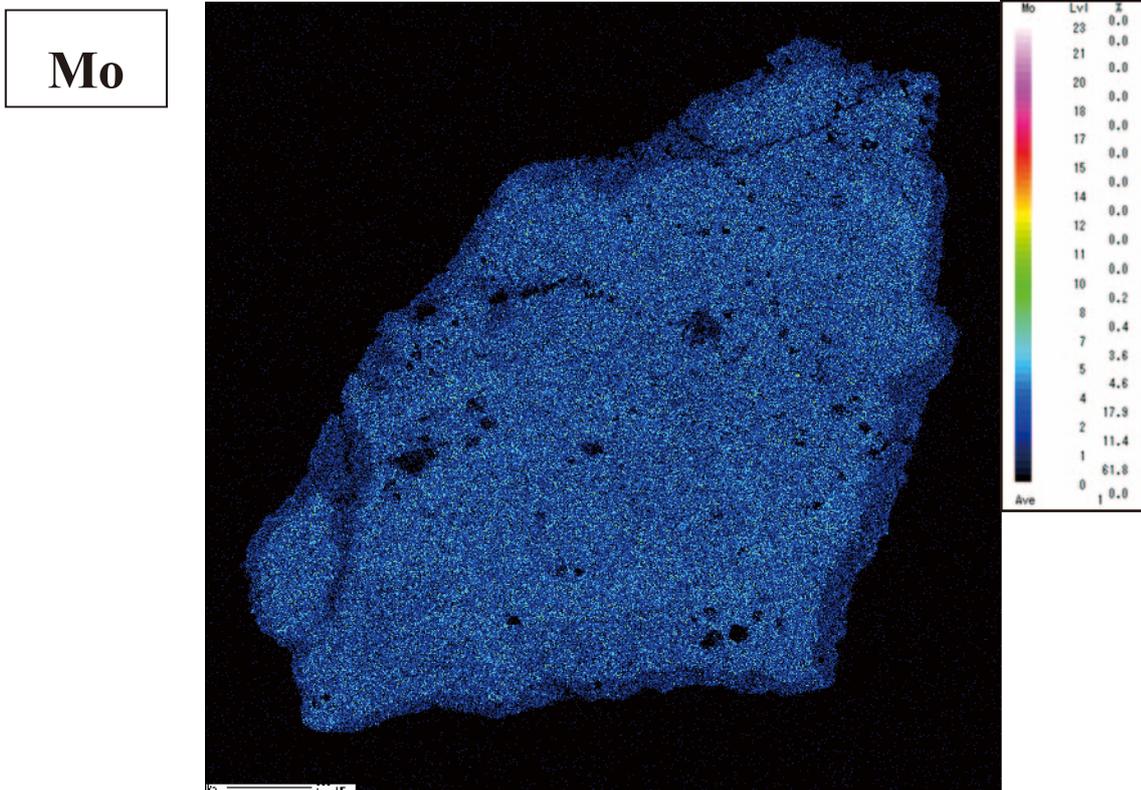
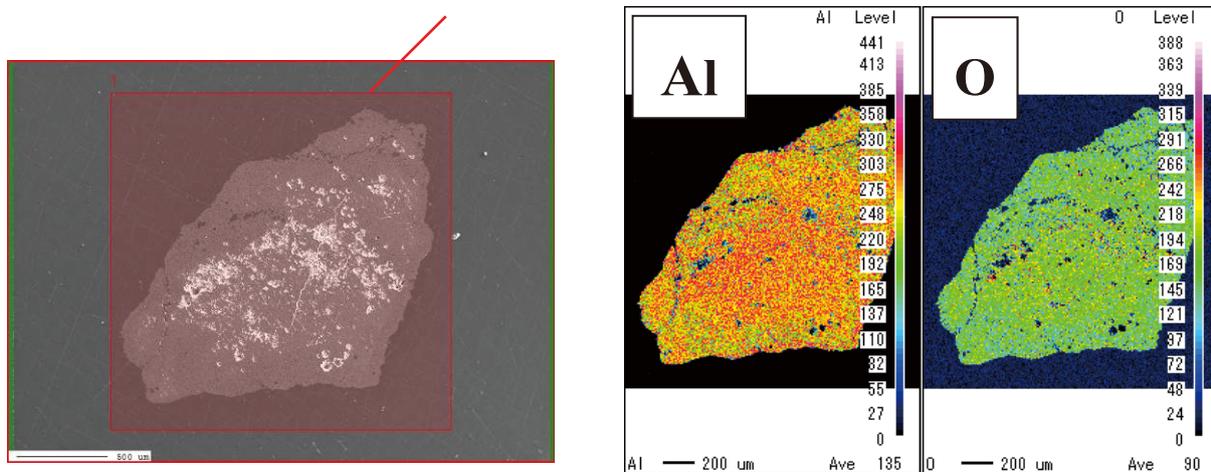


Fig. 4-7 Mo 吸着試験後の Al₂O₃-1 の元素分布

5. 結 論

医療用 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータに使用されている Mo 吸着剤であるアルミナに着目し、アルミナ特性（結晶構造、比表面積、など）に与える Mo 吸着/溶離特性を調べた。その結果、下記のことになった。

- (1) 各アルミナ試料の Mo 吸着量に対する吸着温度の影響を比較したところ、結晶粒及び比表面積の大きいアルミナでは吸着温度により Mo 吸着量が増加することが分かった。これは、吸着温度に対する Mo の拡散速度の違いがアルミナの粒子内部に浸透するまでの時間に大きく影響を与えるためと推察される。今後、吸着温度による Mo 吸着量への影響をできるだけ小さくするため、ほぼ同じ粒子径のアルミナ試料を用いることが望ましい。
- (2) ほぼ同じ比表面積のアルミナの比較より、アルミナの結晶構造は Mo 吸着量に影響することが分かった。アルミナの Mo 吸着量を向上させるためには、アルミナの結晶構造による Mo 吸着量への影響を調べる必要がある。
- (3) ほぼ同じ結晶構造のアルミナの比較より、アルミナの比表面積が大きいほど Mo 吸着量も増加することが確認できた。アルミナの Mo 吸着量を向上させるためには、高い比表面積を有するアルミナの製造技術を開発する必要がある。

今後、アルミナの結晶構造や比表面積を制御するために、始発原料及び焼結条件を変更し、特性の異なるアルミナ試料を試作し、これらのアルミナ試料の Mo 吸着特性に与える影響を詳細に調べる。

謝 辞

本研究開発の実施にあたり、原子力科学研究部門 大洗研究開発センター 石原 正博 副所長（兼 照射試験炉センター長）に有意義なご指導及びご助言を頂きました。本報告書をまとめるにあたり、高温ガス炉水素・熱利用研究センター 小型高温ガス炉研究開発ユニット 国際共同試験グループ 稲葉 良知 研究副主幹に有意義なご助言をいただきました。さらに、棚瀬 正和氏（原子力機構 OB）並びに照射試験炉センター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) 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、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、平成 20 年 7 月 24 日。
- 2) モリブデン-99/テクネチウム-99m の安定供給のための官民検討会、「我が国のテクネチウム製剤の安定供給」に向けてのアクションプラン、第 28 回原子力委員会 資料第 2-1 号、平成 23 年 7 月 7 日。
- 3) 谷本政隆、土谷邦彦、医療用モリブデン—供給側から見た国産化への取り組み—、エネルギーレビュー、Vol.32、no.5、pp.7-10 (2012)。
- 4) K. Tsuchiya, K. Nishikata, M. Tanase, et al., "⁹⁹Mo-^{99m}Tc Production Process by (n, γ) Reaction with Irradiated High-density MoO₃ Pellets ", Proceedings of the 6th International Symposium on Material Testing Reactors, Bariloche, Argentina,
<http://www.invap.com.ar/ismtr/images/stories/trabajos/Tsuchiya-Paper.pdf> (2013).
- 5) M. Tanase, et al., A ^{99m}Tc Generator using a New Inorganic Polymer Adsorbent for (n, γ) ⁹⁹Mo, Appl. Radiat. Isot., 48, 5, pp.607-611 (1997).
- 6) 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)、17p.
- 7) 木村 明博、新関 智丈、掛井 貞紀、他、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)、JAEA-Technology 2013-025 (2013)、40p.
- 8) Lee JS, et al., Development of a High Performance ¹⁸⁸W/¹⁸⁸Re Generator by Using a Synthetic Alumina, Appl. Radiat. Isot., 67, pp.1162-1166 (2009).
- 9) Chakravarty R, et al., Preparation of Clinical-scale ⁹⁹Mo/^{99m}Tc Column Generator Using Neutron Activated Low Specific Activity ⁹⁹Mo and noncrystalline γ -Al₂O₃ as Column Matrix, Nucl. Med. Biol., 39, pp.916-922 (2012).
- 10) Hasan S., Preparation of Chitosan-Based Microporous Composite Material and Its Applications, US Patent PTC/US2012/029629 (2012).
- 11) ユニオン昭和株式会社、「アルミナ水和物の脱水反応系列」、
<http://www.uskk.co.jp/assets/files/PDF/alumina01.pdf>.
- 12) 厚生労働省、「放射性医薬品基準」、平成 25 年 3 月 29 日、厚生労働省告示第 83 号 (2013)。
- 13) 飯村 光一、細川 甚作、菅野 勝、他、JMTR を用いた ⁹⁹Mo 製造設備の概念検討、JAEA-Technology 2008-035 (2008)、47p.

付録 アルミナ試料の固液比依存性

Mo 吸着試験において、アルミナ重量と Mo 溶液量の比による Mo 吸着量への影響を調べるために、固液比依存性試験を実施した。固液比依存性試験条件を Table A に示す。なお、試験方法は本文に記載した Mo 吸着試験方法と同様である。また、本試験ではアルミナの Mo 吸着量を正確に得るために、アルミナを酸分解し、吸着した Mo 量を直接的に測定する方法での分析も行った。酸分解は、Mo 吸着後のアルミナに塩酸と硝酸を 1:1 で混合した混酸を添加後、加熱分解させた。

ここでは、本文で用いられている Mo 吸着前後の溶液濃度の差分により Mo 吸着量を算出する方法を「濃度差し引き法」、アルミナの酸分解により Mo 吸着量を測定する方法を「酸分解法」と呼ぶ。

固液比依存性試験結果を Fig. A に示す。その結果、濃度差し引き法では固液比の増大に伴い、大きく Mo 吸着量が増加することが確認された。一方、酸分解法では、同様に固液比の増大に伴う Mo 吸着量の増加が確認されたが、濃度差し引き法に比べるとその上昇率は小さく、固液比が大きくなるとともに濃度差し引き法と酸分解法で Mo 吸着量に大きく差が見られる結果となった。この結果から、固液比を大きくするに従い Mo 吸着量が増えることが示唆されたが、濃度差し引き法と酸分解法でどちらの測定方法が正確かは判別できず、より正確な Mo 吸着量を得ることは今後の課題である。

Table A 固液比依存性試験に用いるアルミナ試料の Mo 吸着条件

アルミナ	Mo 濃度 (mg/mL)	溶液量 (mL)	アルミナ重量 (g)	固液比	pH	吸着温度 (°C)	吸着時間 (h)
Al ₂ O ₃	10	30	0.6	1 : 50	4	90	3
			0.3	1 : 100			
			0.2	1 : 150			

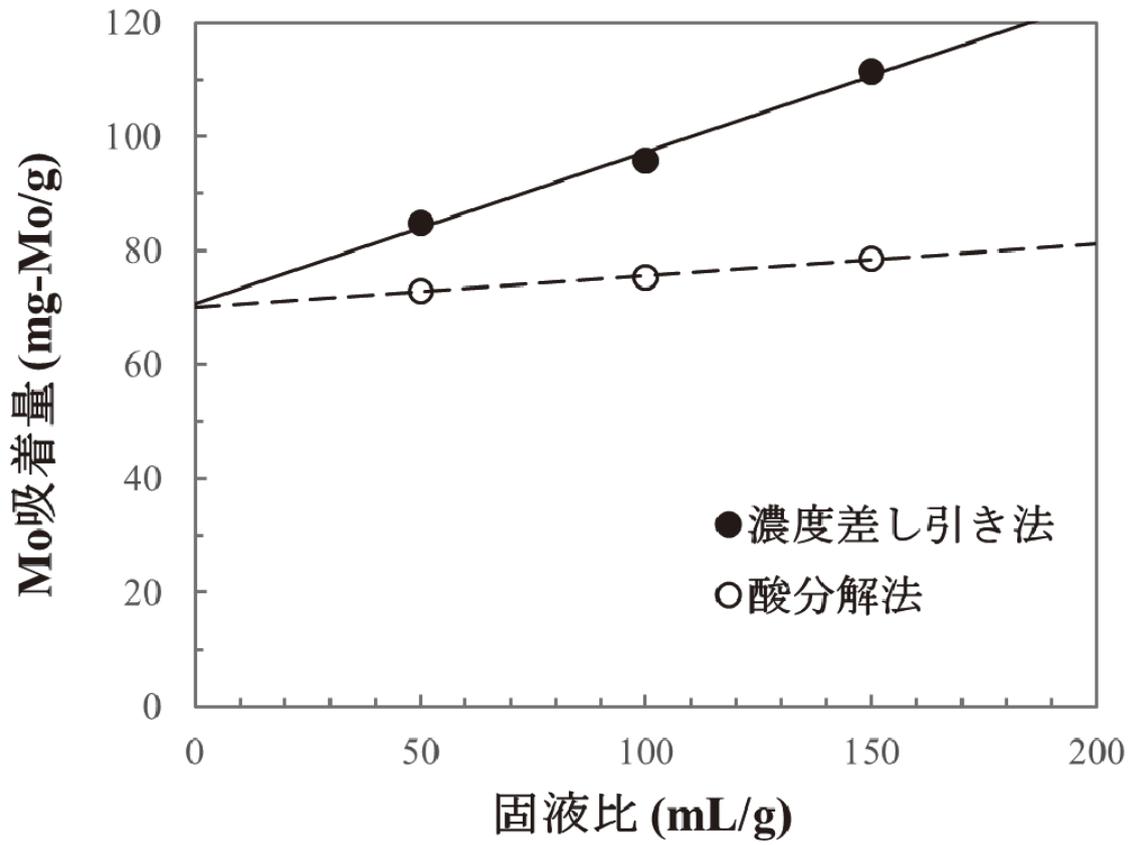


Fig. A アルミナ試料の固液比に対する Mo 吸着量の依存性

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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	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
光路長	メートル	lm	cd sr ^(e)	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
電表面積	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	名称	記号	乗数	名称	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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) 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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=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) 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。
ベレル	B	
デシベル	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 =0.1Pa 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 ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 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=0.2 g=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=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

