

# (n, γ)法による<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc製造用照射ターゲットの 製造技術開発と特性評価

Fabrication Technology Development and Characterization of Irradiation Targets for  $^{99}$ Mo/ $^{99m}$ Tc Production by (n,  $\gamma$ ) Method

西方 香緒里 木村 明博 石田 卓也 椎名 孝行 太田 朗生 棚瀬 正和 土谷 邦彦

Kaori NISHIKATA, Akihiro KIMURA, Takuya ISHIDA, Takayuki SHIINA Akio OHTA, Masakazu TANASE 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

October 2014

**Japan Atomic Energy Agency** 

日本原子力研究開発機構



本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<a href="http://www.jaea.go.jp">http://www.jaea.go.jp</a>) 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 研究連携成果展開部 研究成果管理課T319-1195 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2014

#### (n, γ)法による 99Mo/99mTc 製造用照射ターゲットの製造技術開発と特性評価

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

西方 香緒里、木村 明博、石田 卓也、椎名 孝行\*1、 太田 朗生\*1、棚瀬 正和\*1、土谷 邦彦

(2014年8月20日受理)

JMTR 再稼働後の利用拡大の一環として、照射試験炉センターでは、医療用ラジオアイソトープ (RI) として用いられるモリブデン-99 ( $^{99}$ Mo) /テクネチウム-99m ( $^{99}$ mTc) の材料試験炉 (JMTR) を用いた放射化法 ( $(n, \gamma)$ 法) による製造に関する要素技術開発を行っている。

 $^{99}$ Mo は、一般的に核分裂法((n, f)法)で製造されているが、放射性廃棄物量及びコストの低減化や核不拡散上の観点から、 $(n, \gamma)$ 法による $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc 製造に着目した。しかしながら、 $(n, \gamma)$ 法による $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc 製造では、(n, f)法に比べ単位体積当たりの比放射能が低いという欠点がある。このため、照射ターゲットとして用いる三酸化モリブデン $(MoO_3)$ 試料に対して、(n, f)2  $(moO_3)$ 3  $(moO_3)$ 4  $(moO_3)$ 5  $(moO_3)$ 6  $(moO_3)$ 8  $(moO_3)$ 9  $(moO_3)$ 8  $(moO_3)$ 9  $(moO_3)$ 8  $(moO_3)$ 8  $(moO_3)$ 9  $(moO_3$ 

本報告書は、照射ターゲットの単位体積当たりの  $^{98}$ Mo 含有量を増加させるため、高密度  $MoO_3$  ペレットの製造方法を確立し、得られた高密度  $MoO_3$  ペレットの特性試験結果をまとめたものである。

本報告書は、平成23年度原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブに基づき実施した研究成果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

\*1:株式会社 千代田テクノル

i

# Fabrication Technology Development and Characterization of Irradiation Targets for $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTe Production by (n, $\gamma$ ) Method

Kaori NISHIKATA, Akihiro KIMURA, Takuya ISHIDA, Takayuki SHIINA\*<sup>1</sup> Akio OHTA\*<sup>1</sup>, Masakazu TANASE\*<sup>1</sup> 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 August 20, 2014)

As a part of utilization expansion after the Japan Material Testing Reactor (JMTR) re-start, research and development (R&D) on the production of medical radioisotope <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc by (n, γ) method using JMTR has been carried out in the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center of the Japan Atomic Energy Agency.

<sup>99</sup>Mo is usually produced by fission method. On the other hand, <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc production by the  $(n, \gamma)$  method has advantages for radioactive waste, cost reduction and non-proliferation. However, the specific radioactivity per unit volume by the  $(n, \gamma)$  method is low compared with the fission method, and that is the weak point of the  $(n, \gamma)$  method. Thus, MoO<sub>3</sub> used as irradiation targets should increase <sup>98</sup>Mo contents per unit volume and be <sup>98</sup>Mo-enriched one.

This report summarizes the investigation of raw materials, the fabrication tests of high-density MoO<sub>3</sub> pellets by the plasma sintering method for increasing of <sup>98</sup>Mo contents and the characterization of sintered high-density MoO<sub>3</sub> pellets.

Keywords: 99Mo/99mTc, (n, γ) Method, Plasma Sintering Method, High-density MoO<sub>3</sub> Pellets, JMTR

The present study was performed as part of the program commissioned by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT).

\*1: Chiyoda Technol Co., Ltd.

# 目 次

1. 序 論	1
2. モリブデン資源及び MoO <sub>3</sub> ペレット製造方法の調査	2
2.1 モリブデン資源の調査	2
2.2 MoO <sub>3</sub> ペレットの製造方法の調査	3
3. 高密度 MoO <sub>3</sub> ペレット製造試験	4
3.1 MoO <sub>3</sub> ペレットの試作	4
3.2 MoO <sub>3</sub> ペレットの溶解性試験	5
3.3 MoO <sub>3</sub> ペレットの予備製作	5
3.4 MoO <sub>3</sub> ペレットの特性試験	5
3.4.1 物理的特性	6
3.4.2 化学的特性	6
3.4.3 熱的特性	6
3.4.4 MoO <sub>3</sub> ペレットとキャプセル部材との両立性	7
3.5 結果及び考察	8
3.5.1 高密度 MoO <sub>3</sub> ペレット製作性	8
3.5.2 物理的特性	8
3.5.3 化学的特性	9
3.5.4 熱的特性	9
3.5.5 両立性	10
4. 照射試験用高密度 MoO <sub>3</sub> ペレットの準備	25
4.1 MoO <sub>3</sub> ペレットの製作及び試験検査方法	25
4.2 MoO <sub>3</sub> ペレットの特性評価	25
5. 結論 5	33
謝 辞 :	33
参考文献	33

# Contents

1.	In	troduction	1
2.	In	vestigation of Molybdenum resource and fabrication method of $\mathrm{MoO_3}$ pellets	2
	2.1	Investigation of Molybdenum as raw material	2
	2.2	Investigation of fabrication method of $MoO_3$ pellets	3
3.	Fa	abrication tests of high density MoO3 pellets	4
	3.1	Trial fabrication of MoO3 pellets	4
	3.2	Solubility tests of MoO <sub>3</sub> pellets	5
	3.3	Fabrication tests of high-density MoO <sub>3</sub> pellets	5
	3.4	Examination of high-density MoO <sub>3</sub> pellets	5
	3.4.	.1 Physical properties	6
	3.4.	.2 Chemical properties	6
	3.4.	.3 Thermal properties	6
	3.4.	.4 Compatibility between MoO <sub>3</sub> pellets and capsule material	7
	3.5	Results and discussion	8
	3.5.	.1 Fabrication results of high-density MoO <sub>3</sub> pellets	8
	3.5.	.2 Physical properties	8
	3.5.	.3 Chemical properties	9
	3.5.	.4 Thermal properties	9
	3.5.	.5 Compatibility between $MoO_3$ pellets and capsule material	0
4.	Pr	reparation of high-density ${ m MoO_3}$ pellets for irradiation tests	5
	4.1	Fabrication and inspection methods of MoO <sub>3</sub> pellets	5
	4.2	Characterization of MoO <sub>3</sub> pellets	5
5.	Co	onclusion	3
Ac	knov	wledgments	3
Re	efere	ences	3

## 1. 序論

核医学診断に使用されている  $^{99\text{m}}$ Tc (半減期: 6.01h) は、その親核種である  $^{99}$ Mo (半減期: 65.9h) が唯一の原料である。 $^{99}$ Mo はウラン $-235(^{235}$ U) を原料にして、原子炉内で核分裂を起こさせ、生成された多くの核分裂生成物(FP) 中から  $^{99}$ Mo を分離・抽出して製造する核分裂法((n, f)法)と、天然に存在している安定元素  $^{98}$ Mo (天然のモリブデン(Mo) で存在比が約 24%)に中性子を照射し、 $^{98}$ Mo (n,  $\gamma$ )  $^{99}$ Mo 反応により  $^{99}$ Mo を製造する中性子放射化法((n,  $\gamma$ ) 法) がある。

現在、99Mo は主に(n, f)法で製造されており、カナダ、オランダ、ベルギー、南アフリカ等の数ヶ国から世界各国に供給されている。特に、世界の生産量の約40%を占めるカナダや約30%を占めるオランダの原子炉1)が2007年から2009年にかけて数回トラブルで停止した際は、世界的に99Moの不足問題が起きている。また、半減期が約66時間と、医薬品原料としての寿命が短いため、2010年にアイスランドで起きた火山噴火では欧州便の空輸が止まり、その供給に影響が出たことも記憶に新しい。医療大国である日本は、99Moの消費量では米国、欧州に次ぐ世界第3位の消費国であるにもかかわらず、99Moの全量を輸入に頼っていることから、これら原子炉の停止や空路輸送障害の影響を大きく受けた。こうした99Mo不足への対応策として国内生産の要望が強まり、OECD/NEAでの緊急時対策の検討20、内閣府での安定供給に向けた官民による検討30等の結果、独立行政法人日本原子力研究開発機構(原子力機構)の材料試験炉(JMTR)を用いた99Mo国産化の具体的な技術的な検討が進められた。

一方、米国が提唱する地球的規模脅威削減イニシアティブ(GTRI)において、各国に対して研究炉用の燃料として提供された HEU がテロリストの手に渡ることを防ぐため、全ての国における民生用研究炉用燃料の HEU から低濃縮ウラン(LEU、 $^{235}$ U 濃縮度 20%未満)への転換が要請されている。特に、GTRI の下で活動している RERTR (試験研究炉濃縮度低減化)プログラムでは、HEU の利用を限定するために  $^{99}$ Mo 製造に関しても、照射ターゲットを LEU に移行させることが検討されており、IAEA も本プログラムを推奨している  $^{41}$ 。現在、(n, f)法を用いた  $^{99}$ Mo 製造では、照射ターゲットとして LEU を用いる方法に移行されつつあり、その  $^{99}$ Mo 製造はオーストラリアの  $^{99}$ Mo 製造でする SAFARI-1  $^{51}$  の例がある。しかしながら、LEU は HEU に比べて、ウラン-238 ( $^{238}$ U) が多く含まれることから、毒性の強いプルトニウム-239 ( $^{239}$ Pu) の生成が HEU と比較して約 24 倍  $^{61}$  になるとの試算があり、危惧すべき課題点もある。

そのような状況から、日本における  $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc 製造は、国民の健康維持、すなわち「健康の安全保障」、かつ核不拡散及びテロの脅威低減、すなわち「国家の安全保障」に重点をおいて進めていくことが求められている。 $(n,\gamma)$ 法による  $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc 製造の課題は比放射能(単位体積あたりの放射能)が低いことであり、原子力機構は効率よく  $^{99}$ Mo を製造するための要素技術開発に取組んできた。なお、 $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc 製造技術の開発に関しては、1970 年頃から日本原子力研究所(現:原子力機構)の独自研究として開発が行われてきたが、製造用原子炉の運転条件により、安定製造ができないこと等を理由に一時中止されている。一方、2010 年頃から上記の通り、 $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc 国産化に関する検討が進み、 $(n,\gamma)$ 法による  $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc 製造技術にかかる要素試験として、「原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ」を活用しながら、技術的検討を重点的に実施している。

本研究では、照射試料として選定した三酸化モリブデン( $MoO_3$ )に関する調査、高密度  $MoO_3$ ペレットの焼結方法及び製作条件の選定、製作した  $MoO_3$ ペレットの特性評価(物理的特性、化学的特性及び熱特性)を行い、JMTR で照射するための高密度  $MoO_3$ ペレットの製作を行った。

# 2. モリブデン資源及び MoO<sub>3</sub>ペレット製造方法の調査

#### 2.1 モリブデン資源の調査

 $(n, \gamma)$  法による  $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc の製造技術開発の開始にあたり、モリブデン(Mo) 資源及び照射ターゲットとなる  $^{60}$ Mo $^{60}$ の調査のため、金属資源レポート等  $^{70,80}$  による文献調査を行った。

Mo は、地殻中の平均存在量は 13ppm で、鉱物としては輝水鉛鉱 (Molybdenite、 $MoS_2$ )、パウエル鉱 (Powellite、Ca (Mo, W)  $O_4$ )、水鉛華 (Ferrimolybdite、 $Fe_2O_3 \cdot 3MoO_3 + 8H_2O$ )、藍水鉛鉱 (Ilsemannite、 $MoO_3 \cdot nH_2O$ )、黄鉛鉱 (Wulfenite、 $PbMoO_4$ ) 等があるが、現在主に採掘されているのは、輝水鉛鉱である。輝水鉛鉱の品位は、モリブデン・プライマリー鉱山の鉱床で  $0.2\% \sim 0.5\%$ 、銅バイプロ鉱山の鉱床で  $0.02\% \sim 0.08\%$ である。Mo 鉱床は斑岩型、スカルン型、石英脈型、ペグマタイト型、堆積型等に分類されるが、大部分は斑岩型鉱床からの産出である。

2008 年の世界における Mo 供給量は、約 161.8 千 t で前年比約 5.9%の減であった。2009 年にはさらに約 8.5%減少して約 148.1 千 t となる予想であった。なお、供給の寡占状況を表す世界の生産国上位 5 か国の集中度は、1999 年の 89.0%から 2008 年は 72.1%と下落しており、寡占度は緩和される傾向にある。一方、需要も、供給面と同様に、2007 年までは順調に増加してきたが、2008 年は総需要量約 158.8 千 t で前年比約 7.0%減となった。2009 年も、鉄鋼特殊鋼用途での日米欧の Mo 需要量の回復は遅れ、総需要量は約 13.2%も減少して約 137.9 千 t となる予想となった。

Mo は、世界生産の 8 割以上(中国を除く)が銅生産の副産物として生産されるため、Mo そのものの需給・市況ではなく銅の需給・市況により生産量が左右されることもあり、必ずしも安定した供給体制にあるとは言えない。また、処理過程で鉱石の焙焼を行うが、環境問題から焙焼設備の新設・増設が困難となってきている。この焙焼能力の不足と偏在の問題は、2007 年及び 2008 年の設備拡張により今のところ解消しているが、将来、需給量がさらに伸びていく場合、供給面でマイナスの影響を及ぼす1つの要素となる可能性がある。表 2-1 に過去の Mo の供給障害事例を示す。銅鉱山でのストライキ・事故・銅減産等による減産、ステンレス鋼等の生産増に伴う需要増が認められる。近年では、他の鉱種と同様、政策動向も含めて、中国の影響が大きくなっている。

日本は、Mo 全量を、Mo 鉱、フェロモリブデン(FeMo: 鉄とモリブデンの合金)、酸化物、水酸化物、金属製品等の形態で輸入している。なお、国内の大半の中間製品(FeMo等)生産企業は、長期にわたり価格が低迷している間(1982年から2002年半ばまでの間)に国際競争力を喪失して操業を中止しており、現在国内で輸入Mo 鉱を原料にして生産を行っているのは、太陽鉱工(株)、他1社のみである。

表 2-1 過去のモリブデン供給障害事例 7)

時期	事例	障害状況
1967. 7-12	米国:産銅大手 Climax のストライキ	供給減少
1987	米国:Amax 及び Cyprus の減産	国際価格が高騰 世界の Mo 生産量の約 10%減 (推計)
1994-1995	世界:ステンレス鋼生産急増による供給不足	国際価格が約5倍に高騰 入手困難
1996	北米:Climax 鉱山の減産	世界の Mo 生産量の約 20%減
2002	世界的な銅バイプロ鉱山の減産	国際価格が約2.5倍に高騰
2003. 10-2004. 4	中国:遼寧省鉱山事故による生産休止	国際価格が約2.5倍に高騰
2004. 7-2005. 1	鉄鋼向け需要の増大に加え、焙焼能力不足に よる精鉱供給の遅れにより原料が不足	国際価格が約2倍に高騰 (2002年までの約10倍)
2006. 1-2007. 5	南米:銅バイプロ鉱山の減産による供給不足 傾向	国際価格が約 1.5 倍に高騰 (穏やかに値を戻した)

#### 2.2 Mo0<sub>3</sub>ペレットの製造方法の調査

 ${
m MoO_3}$ は、淡黄緑色から灰白色の外観を持つ固体である。物理的性質として、分子量:  $143.95{
m g/mo1}$ 、融点:  $795{
m C}$ 、沸点;  $1155{
m C}$ 、比重:  $4.692{
m g/cm^3}(20{
m C})$ となっている。水には難溶であるが、アルカリ溶液及び濃塩酸には溶解する。主に、触媒等の原料及び各種添加剤として使用されている。  ${
m Mo-0}$  の状態図  ${
m 9}$  を図 2-1 に示す。 ${
m MoO_3}$  は  $700{
m C} \sim 800{
m C}$ で昇華するため、 ${
m MoO_3} \sim {
m C} \sim {
m Supple}$  際の焼結温度はこの温度よりも低くすることが必要である。

 $^{98}$ Mo を原料として、中性子照射により  $^{99}$ Mo を生成する  $(n,\gamma)$  法では、 $^{99}$ Mo 生成量を増加させるために、高密度の  $^{10}$ Moの $^{10}$ 3ペレットを照射ターゲットとして使用することが求められている。一般的にセラミックス焼結体の製造方法には、常温で粉末にバインダーを添加し、ペレット状にしてから焼結する一軸加圧成型・焼結法  $^{10}$ 0、原料粉末を加圧しながら焼結するホットプレス  $^{11}$ 0、原料粉末を高温でガス圧を等方的に加えて焼結させる熱間静水圧焼結  $^{10}$ 1、機械的な加圧とパルス通電加熱により原料粉末を焼結させるプラズマ焼結法  $^{13}$ 1、等が用いられている。さらに、プラズマ焼結法には、放電プラズマ焼結  $^{13}$ 1、パルス通電加圧焼結  $^{13}$ 1、接板でプラズマ活性化焼結  $^{13}$ 1、水の製作を行うにあたり、製造方法の検討を行った。

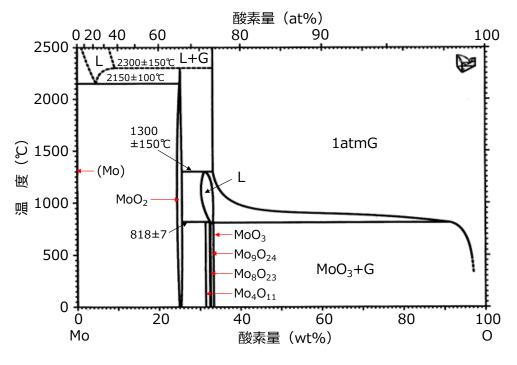


図 2-1 Mo-0 状態図

#### 3. 高密度 MoO<sub>3</sub> ペレットの製造試験

#### 3.1 MoO<sub>3</sub>ペレットの試作

 $MoO_3$ ペレットの試作には、始発粉末として  $MoO_3$ 粉末(太陽鉱工社製、純度:4N)を準備した。 $MoO_3$ ペレットの形状は、JMTR にあるラビット照射設備(HR-1等)を用いた照射試験を想定し、ラビットに装荷可能な  $\phi$  20×10mm とした。

前述の焼結方法の内、HP 法や HIP 法により  $MoO_3$ ペレットを大量に製造するためには、大型の製造装置が必要であり、適応が困難であることが分かった。このため、一軸加圧成型・焼結法及び SPS 法に着目し、 $MoO_3$ ペレットの製造性に関する研究開発を進めてきた  $^{14)}$ 。

各種製造法による  $MoO_3$ ペレットの焼結密度の関係を図 3-1 に示す。この結果、 $MoO_3$ の融点及び 昇華点が低く、焼結温度を 650℃以上にすることができないことより、一軸加圧成型・焼結法で は、目標としている 90%T. D. 以上の高密度  $MoO_3$ ペレットを製造することは困難であることが分かった。そこで、プラズマ焼結法である SPS 法による  $MoO_3$ ペレットの試作を行った。SPS 法の基本 原理を図 3-2 に示す。焼結型 (パンチ及びダイ)には、黒鉛材料を用いた。試作は、焼結温度 (500℃ ~650℃)、焼結圧力 (31.8 MPa 及び 66.8 MPa) 及び雰囲気 (真空及び大気中) の条件を変更して行った。

試作の際に調べた MoO<sub>3</sub>ペレットの焼結温度と焼結密度の関係を図 3-3 に示す。この結果、焼結 圧力 31.8 MPa では、焼結温度の焼結密度への影響は大きかったが、焼結圧力 66.8 MPa では、焼 結温度が 500℃以上による密度変化への影響は小さく、目標焼結密度である 90%T. D. 以上を満足し た。また、焼結圧力 66.8 MPa において、焼結時の雰囲気の影響を調べた結果、ほぼ同じ焼結特性であることが分かり、雰囲気による影響は小さいものと考えられる。

#### 3.2 MoO<sub>3</sub>ペレットの溶解性試験

 $^{99}$ Mo から  $^{99}$ Tc を抽出するために重要となる  $^{100}$ Mo $^{100$ 

以上の結果に基づいて、MoO<sub>3</sub>ペレットの製造性に関する試作結果を表 3-1 に示す。本試作により、プラズマ焼結法である SPS 法による高密度 MoO<sub>3</sub>ペレットの製作に明るい見通しが得られた。

#### 3.3 MoO<sub>3</sub>ペレットの予備製作

前節(3.1及び3.2)の試作結果より、 $MoO_3$ ペレットの製作方法は、SPS 法(大気中)を選定した。本節では、JMTRでの照射用高密度  $MoO_3$ ペレットを製作する条件を決定するための予備試験について述べる。本予備試験では、治具構成及び $MoO_3$ ペレットの溶解特性についても、試作した  $MoO_3$ ペレットと同様に調べた。予備製作で実施した  $MoO_3$ ペレットの製作条件を表 3-2 に示す。

まず、予備試験にあたり、治具の構成部材を検討した。治具構成を図 3-4 に示す。治具は、黒鉛スペーサ、黒鉛パンチ、黒鉛ダイス及び黒鉛フェルトからなる。MoO<sub>3</sub> 粉末試料を黒鉛ダイス及び黒鉛パンチで固定し、さらに上下を黒鉛スペーサ 3 段で固定する。これを圧縮し、パルス電流を印加することにより短時間で MoO<sub>2</sub> 粉末試料を焼結した。

予備試験では、黒鉛ダイスのサイズ及び焼結温度をパラメータとして、 $MoO_3$ ペレットを製作した。黒鉛ダイスは、 $\phi$ 20及び $\phi$ 22mmを準備し、焼結温度は500°C及び550°Cとした。予備試験で行った焼結条件の一例を図 3-5 に示す。次に、 $MoO_3$ ペレットを酸化するため、オゾンガスを用いた酸化処理を行った。酸化処理はオゾン雰囲気中で80°C、2時間処理した。

#### 3.4 MoO<sub>3</sub>ペレットの特性試験

前節において、 $^{99}$ Mo 生成量を増加させる一環として、照射ターゲットである高密度  $MoO_3$ ペレット製作の検討を行い、照射用  $MoO_3$ ペレットの製作条件決定及び製作を行った。本節では、試作した  $MoO_3$ ペレット及び照射用  $MoO_3$ ペレットの特性試験について述べる。特性試験では、SEM 観察による  $MoO_3$ ペレットの粒子径測定、X 線回折による結晶構造解析等の物理的特性、 $MoO_3$ ペレットの粒子径測定、 $MoO_3$ ペレットの粒子径測定、 $MoO_3$ ペレットの物理的特性、熱伝導率等の熱的特性について調べた。また、 $MoO_3$ ペレットはアルミニウム  $MoO_3$ ペレットに装荷することから、その  $MoO_3$ ペレットとラビットの構成部材である  $MoO_3$ ペレットとラビットの構成部材である  $MoO_3$ ペレットとラビットの構成部材である  $MoO_3$ ペレットでも評価した。

#### 3.4.1 物理的特性

高密度  $MoO_3$ ペレット試作試験用  $MoO_3$ ペレットについて、日本電子社製 FE-EPMA (JXA-8530F)及び リガク社製 XRD (Geigerflex) を用いて、結晶粒径の観察及び結晶構造の同定を行った。

結晶粒径観察用試料は、 $MoO_3$ ペレットを適当なサイズに破砕後、平らな欠片を選出し、EPOXY 樹脂 (BUEHLER 社製)に張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器 (JEE-420) により炭素蒸着を行い製作した。結晶構造解析用試料は、残りの  $MoO_3$ ペレット片をメノウ乳鉢を用いて粉砕し、X 線回折用試料ホルダーに充填し製作した。

#### 3.4.2 化学的特性

 $^{99}$ Mo の半減期は 66 時間と短いため、製作する  $^{MO}$ 3ペレットは短時間で 6M-NaOH 溶液に溶解可能であること、 $^{99}$ Mo の崩壊により生成する  $^{99}$ mTc は医薬品として使用するため、溶液に含まれる不純物元素はできるだけ少ないことを確認する必要がある。

予備試験で製作した  $MoO_3$ ペレットを 6M-NaOH 溶液に溶解したところ、得られた溶液は黒色となった。そこで、 $MoO_3$ ペレットを製作後、オゾンガスを用いた酸化処理工程を追加した。酸化処理前後の  $MoO_3$ ペレットについて、アズワン社製超音波洗浄機を使用し、6M-NaOH 溶液への溶解特性を調べた。使用した溶解装置を図 3-6 に、溶解特性に用いた  $MoO_3$ ペレットを表 3-3 に示す。

また、酸化処理前後の  $MoO_3$ ペレット表面の酸素、炭素及びモリブデン測定並びに  $MoO_3$ ペレットの不純物測定も行った。測定には、アルバック・ファイ社製の X 線光電子分光装置 (PHI Quantera II) を用い、これら 3 元素の組成割合の変化を調べた。

#### 3.4.3 熱的特性

熱拡散率と熱伝導率は、熱物性値の中で熱膨張係数と並んで重要な物性値である。特に熱伝導率は、照射試料である $MoO_3$ ペレットの照射中における照射温度を評価する上で重要な物性値である。熱伝導率は、熱拡散率に比熱と密度を掛けた値である。実際、比熱と密度を掛けた値は、単位体積あたりの熱容量となり、体積あたりの比熱に相当する。従って、この値は、物質によらずほぼ一定の値となる。このことから、熱拡散率に定数を掛けた値が熱伝導率となる。このため、 $MoO_3$ ペレットの熱拡散率を測定することで熱伝導率を算出できる。熱拡散率の測定法で最も広く普及している方法が、レーザフラッシュ法である。以下に、レーザフラッシュ法の原理を示す  $^{15}$  。

図 3-7(a) 示す通り、均質な円板試料の片面にパルスレーザを均一照射して瞬間加熱すると、裏面の温度変化は一次元の熱伝導方程式により表され解析解が得られ、次式で示される。

$$T(t) = T_m \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left[ (-n)^2 \cdot t \cdot (\pi^2 \alpha) / L^2 \right] \right\} \quad \cdots \qquad (3-1)$$

ここで、

$$T_{m} = Q/(L \cdot C \cdot \rho) \cdot \dots \cdot (3-2)$$

Q: 試料表面の単位面積が吸収したレーザパルスのエネルギー

L: 試料の厚さ

C: 試料の比熱

ρ: 試料の密度

α:試料の熱拡散率

T: 温度

t:パルス照射の瞬間からの時間

(3-1)式の $(T/T_m)$ を縦軸に、tを横軸にとると図 3-7(b)が得られ、最大温度上昇  $T_m$ の半分  $T_m/2$ に到達するのに要する時間  $t_{1/2}$ を求めると、(3-3)式より試料の熱拡散率を求めることができる (解析方法:ハーフタイム法)。

$$\alpha = 1.370 \cdot L^2 / (\pi^2 \cdot t_{1/2}) \quad \cdots \qquad (3-3)$$

(3-2)式で Qが正確に測定できれば、 $(C \cdot \rho)$  が得られ、次の(3-4)式から試料の熱伝導率 Kが求められる。

$$K = \alpha \cdot (C \cdot \rho) \cdot \cdots \cdot (3-4)$$

実際にQの正確な測定は困難なため、他の方法によりC及び $\rho$ を測定し、(3-4)式より熱伝導率を求める。

熱拡散率の測定に用いた  $MoO_3$ ペレットは、焼結密度が 96.7%T.D.、形状が $\phi$ 10×1mm のディスク状のものを用いた。熱定数測定装置は、アルバック理工社製 TC-7000 型装置を用いた (図 3-8)。 測定は、真空中で室温~400℃(室温、150℃、200℃、250℃、300℃、350℃及び 400℃)で行った。 測定は、各測定温度で 5 回行い、熱拡散率はその平均値とした。また、昇温/降温を 3 回繰返すことで、熱拡散率の変化も確認した。

## 3.4.4 MoO<sub>3</sub>ペレットとキャプセル部材との両立性

水力ラビット照射装置で中性子照射するラビットは、MoO<sub>3</sub> ペレットと試料容器から構成されている。試料容器の構造材はアルミニウム(A1)またはSUS316が使用されている。そこで、これら構造材とMoO<sub>3</sub> ペレットとの両立性を調べる必要がある。

両立性試験を行うにあたり、まず、ラビットでの状態を模擬した試験体を製作した。加熱前の試験片  $(MoO_3 \sim V \vee V)$ 、A1 及び SUS316) の外観写真を図 3-9 に示す。SPS 法及び一軸加圧法により製作された  $MoO_3 \sim V \vee V$  (SPS 法: $\phi 10 \times 3$  mm、一軸加圧法: $\phi 8 \times 3$  mm) の両端を、鏡面研磨した A1 及び SUS316 ディスクで挟み、ステンレスワイヤーを用いて固縛した。次に、これらの試験体をガラス容器に封入し、ガラス封入試験体を製作した。ガラス封入試験体写真を図 3-10 に示す。ガラス容器は、耐熱ガラスで、容器内側の両端には緩衝材としてガラスウールを入れ、中央に固

縛した試験体を配置した。その後、ガラス容器内をヘリウムガスで3回置換し、約0.5気圧まで減圧した。ガラス封入試験体は、SPS法と一軸加圧法によるものをそれぞれ2個ずつ製作した。

#### 3.5 結果及び考察

#### 3.5.1 高密度 MoO<sub>3</sub>ペレット製作性

 $MoO_3$ ペレットの予備試験結果を表 3-5 に示す。この結果より、使用したダイスと同じサイズの  $MoO_3$ ペレットを製作できることが分かった。また、焼結温度と焼結密度の関係は、500℃で約 89% T. D.、550℃で約 97%T. D. であった。本製作を行うにあたり、焼結密度を 95%T. D. 付近とすること から、この関係に基づき、今後の焼結温度を 525℃に決定した。なお、本予備試験により、焼結 時のペレットの直径及び厚さにほとんど影響なく、同一の条件で高密度  $MoO_3$ ペレットの製作が可能であることが分かった。

予備試験で製作した  $MoO_3$ ペレットの外観写真を図 3–11 に示す。この結果、全ての  $MoO_3$ ペレットの外観が黒色となった。これは、前述した通り、浸炭あるいは  $MoO_3$  が還元されて  $Mo_nO_{3n-m}$  となったことによるものと考えられる。そこで、オゾンガスによる酸化処理を行った結果、 $MoO_3$  ペレットは白色となった。本酸化処理により、還元した  $MoO_3$  ペレットをほぼ単一の  $MoO_3$  にできる見通しを得た。

以上から、SPS 法と酸化処理を組合せた製作方法を採用することにより、良好な高密度 MoO<sub>3</sub> ペレットが製作でき、JMTR で照射するための製作仕様の決定ができた。

#### 3.5.2 物理的特性

始発粉末及び予備試験で製作した  $MoO_3$ ペレットの SEM 観察結果を図 3-12 に、定性分析結果を表 3-6 に、X 線回折結果を図 3-13 に示す。

SEM 観察の結果、焼結温度 520  $^{\circ}$   $^{\circ}$  では、粒成長はなく、始発粉末とほぼ同程度の粒子径であることが分かった。一方、 $MoO_3$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$  たが分かった。一方、 $MoO_3$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$   $^{\circ}$  たが高温になるとともに成長し、550  $^{\circ}$  の焼結温度では始発粉末と比べ 4 倍程度の粒子径となっていること、600  $^{\circ}$  の焼結温度では針状組織となっていることが観察された。

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  $MoO_3$  ペレットの定性分析を行った結果、主に検出された元素は酸素とモリブデンであったが、一部、ホウ素及びリンが観測された。これらの元素は、購入元より送付された始発粉末の  $MoO_3$  の分析表には存在していないことから、今後、 $MoO_3$  ペレットの製作工程、EPMA の測定方法などを確認していく。

XRD による結晶構造解析の結果、焼結温度 520  $\mathbb{C}$  000

#### 3.5.3 化学的特性

 $MoO_3$ ペレットの溶解試験結果を表 3-7 に示す。オゾンガスによる酸化処理前の  $MoO_3$ ペレットを溶解したところ、大量の不溶解性黒色残渣が発生した。そこで、この残渣を、濾紙(型番: No. 5C)を用いて除去した。この際得られた濾液は、茶色であった。一方、オゾンガスで酸化処理( $80^{\circ}$ C×2時間)後の  $MoO_3$ ペレットの溶液は、無色透明であり、不溶解性の残渣もなかった。SPS 法による焼結では、一部の  $MoO_3$ が還元され  $Mo_nO_{3n-m}$  となると考えられる。 $Mo_nO_{3n-m}$  は、アルカリ溶液である 6M-NaOH 溶液に対して溶解が困難であることから、不溶解性の残渣が生じたものと考えられる。一方、オゾンガスで酸化処理を行った  $MoO_3$ ペレットは、 $Mo_nO_{3n-m}$ が元の  $MoO_3$ に酸化され、残渣もなく 6M-NaOH 溶液に完全に溶解できたと考えられる。

XPS による酸化処理前後の MoO<sub>3</sub>ペレット表面組成割合の測定結果を表 3-8 に示す。酸化前に比べ、酸化後では酸素の割合が増加し、モリブデンとの割合が理論値である Mo:0=1:3 に近づいたことから、前述の考察が実証された。

酸化処理前後における  $MoO_3$  ペレットの不純物測定結果を表 3-9 に示す。この結果、酸化処理前後の  $MoO_3$  ペレット中に含有する不純物元素は、始発粉末のミルシートと比べ、CaO や  $PO_4$  がわずかに増加する傾向が観測されたものの、他の元素については始発粉末と同等の値であり、 $MoO_3$  ペレットの製造工程及び酸化工程において問題となるような不純物元素の混入はないことも明らかになった。

#### 3.5.4 熱的特性

 $MoO_3$ ペレットの熱拡散率測定データ(例)を図 3-14 に示す。この結果、得られた測定値は、繰返し測定にかかわらず、ほぼ一定であった。一方、繰返し測定において、 $MoO_3$ ペレットの重量変化が観測されている。これは、 $MoO_3$ の昇華温度が低いことより、測定中に昇華したためと考えられる。

次に、 $MoO_3$ の比熱について、文献調査を行った。比熱と温度との依存性を図 3-15 に示す。熱拡散率の測定結果及び比熱の文献調査  $^{16)}$  により、(3-4)式で算出した  $MoO_3$ ペレットの熱伝導率結果を図 3-16 に示す。ペレットの焼結密度の違いにより、熱伝導率が異なっている。得られた結果を用いて、ラビットの熱設計を行うこととした。

#### 3.5.5 両立性

加熱前後における重量変化結果を表 3-10 に、加熱後の試験片 ( $MoO_3$ ペレット、A1 及び SUS316) の外観写真を図 3-17 に示す。 $200^{\circ}$ C×500 時間では、A1 及び SUS316 ディスクの重量変化はほとんどなかったが、 $MoO_3$ ペレットの重量は僅かに減少した。加熱後の  $MoO_3$ ペレットは変色していたが、A1 及び SUS316 ディスクの金属光沢は僅かに残っていた。一方、 $400^{\circ}$ C×500 時間では、A1 及び SUS316 ディスク重量は増加し、 $MoO_3$ ペレットは各ディスク重量の増加分よりも減少していた。加熱後の  $MoO_3$ ペレットは黒茶色に変色し、A1 及び SUS316 ディスクの金属光沢が失われ、特に SUS316 ディスクは黒茶色に変色していた。 $MoO_3$ ペレットは無酸素状態で加熱されることにより、酸素が脱離したため、 $MoO_3$ ペレットが黒色化したと考えられる。特に  $400^{\circ}$ C×500 時間では、 $MoO_3$ ペレットの重量の減少(酸素の脱離)が大きいことから、よりペレットが黒色化したと考えられる。A1 及び SUS316 ディスクの変色はペレットの一部が付着したことが原因であると考えられる。

加熱後の A1 及び SUS316 ディスクの X 線回折結果を図 3-18 及び図 3-19 に示す。この結果、殆どの測定試料で、 $MoO_3$  または  $MoO_2$  が付着していることが確認できた。 $MoO_3$  の付着量は、SPS 法で製作した  $MoO_3$  ペレットの方が一軸加圧法のものより小さかった。 $MoO_3$  ペレットの X 線回折結果を図 3-20 及び図 3-21 に示す。この結果、図に示されるように、 $MoO_3$  ペレットの表面には、A1 及び SUS316 のピークは見られなかった。しかしながら、 $MoO_2$  のピークが観測され、照射中に  $MoO_3$  の還元が起こることが予想される。 $MoO_2$  は 6M-NaOH で溶解した際、不溶解性の残渣として溶液中に残ることから、照射済  $MoO_3$  ペレットの溶解方法について検討する必要がある。

方法 一軸加圧 SPS 項目 可 大量製造 良 製造時間 可 良 製造コスト 優 良 密度制御 不可 優 製品純度 可 良

表 3-1 MoO<sub>3</sub>ペレットの製造法に関する試作結果

表 3-2 MoO<sub>3</sub>ペレットの製作条件

No.	測定試料	製作条件
1	SPS 焼結ペレット	600℃×31.8Pa×真空中
2	SPS 焼結ペレット	650℃×31.8Pa×真空中
3	SPS 焼結ペレット	520℃×66.8 MPa×大気中

# 表 3-3 溶解特性試験に用いた $MoO_3$ ペレットの概要

測定試料	製作条件	酸化処理 の有無	溶解試験	結晶 粒径	結晶 構造
SPS 焼結ペレット	520℃×66.8MPa×大気中	無	0	0	0
SPS 焼結ペレット	520℃×66.8MPa×大気中	有	0	0	0

表 3-4 両立性試験の試験条件

試料 No.	MoO <sub>3</sub> ペレット製造方法	加熱温度(℃)	加熱時間(h)
1	SPS 法	200	
2	SPS 法	400	500
3	一軸加圧法	200	500
4	一軸加圧法	400	

表 3-5 MoO<sub>3</sub>ペレットの予備試験結果

ダイスサイズ	焼結温度	500℃	550℃
4.20mm	焼結密度(%T.D.)	89. 2	96. 6
φ 20mm	直径(mm)	φ 20. 06	φ 20. 06
4 99mm	焼結密度(%T.D.)	84. 6	97. 3
φ 22mm	直径(mm)	φ 22. 06	φ 22. 08

表 3-6 MoO<sub>3</sub>ペレットの FE-EPMA による定性分析結果

製造方法	密度 (T.D.%)	測定箇所	形状	検出元素名				
		外表面-1	Ш	Мо	0	_	_	
		外表面-2	凸	Мо	0	_	_	
	92	92	外表面-3	回	Мо	0	_	_
SPS			外表面-4	凸	Мо	0	Р	_
Srs			ペレット内部-1	_	Мо	0	_	_
		ペレット内部-2	_	Мо	0	_	_	
		ペレット内部-3	_	Мо	0	_	В	
		ペレット内部-4	_	Мо	0	_	_	

表 3-7 MoO<sub>3</sub>ペレット溶解試験結果

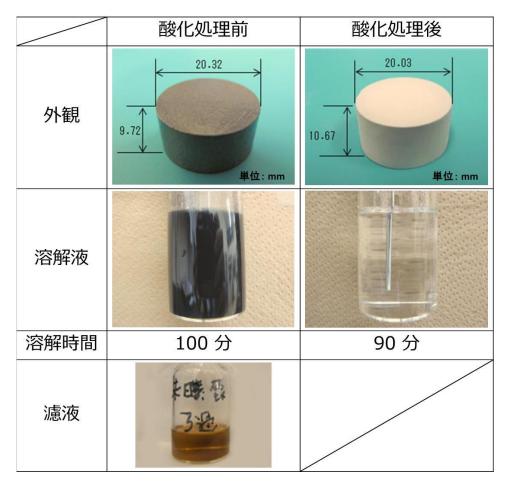


表 3-8 酸化処理前後におけるペレットの主組成割合

	モリブデン	酸素	炭素	Mo:0
酸化処理前	25.6 %	55.3 %	19.1 %	1:2.2
酸化処理後	22.6 %	57.3 %	20.2 %	1:2.5

表 3-9 始発粉末及び酸化処理前後におけるペレットの不純物測定結果 (wt%)

	Ig-loss	Na	К	MgO	Ca0	W	Fe
始発粉末	0.10	<0.0005	<0.0005	<0.0001	<0.0001	0.002	<0.0001
処理前	<0.01	<0.0005	<0.0005	0.0003	<0.0001	0.003	<0.0001
処理後	0.01	<0.0005	<0.0005	0.0002	0.0003	0.002	<0.0001
	Cu	$A1_2O_3$	Si	Pb	$PO_4$	S	C1
始発粉末	<0.0001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0005	<0.001	<0.002
処理前	<0.0001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0006	0.002	<0.002
処理後	0.0001	0.001	<0.001	<0.001	0.0010	0.002	<0.002

表 3-10 加熱前後における重量変化結果(g)

試料 No.	アルミニウム	MoO <sub>3</sub> ペレット	SUS 316	備考
1	0.0000	-0.0007	0.0000	
2	0.0003	-0.0040	0.0002	
3	0.0001	-0.0002	0.0000	
4	0.0004	-0. 0020	0.0002	

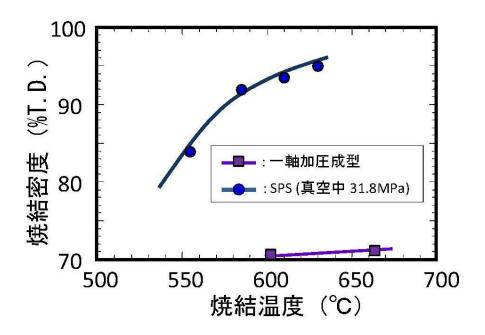


図 3-1 MoO<sub>3</sub>ペレットの製造法による焼結密度

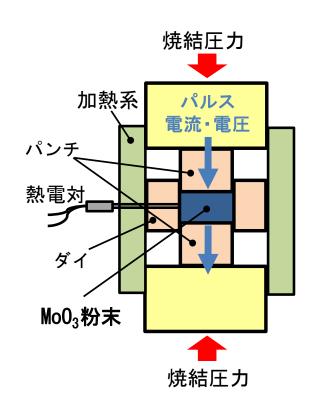


図 3-2 放電プラズマ焼結 (SPS) 法の基本原理

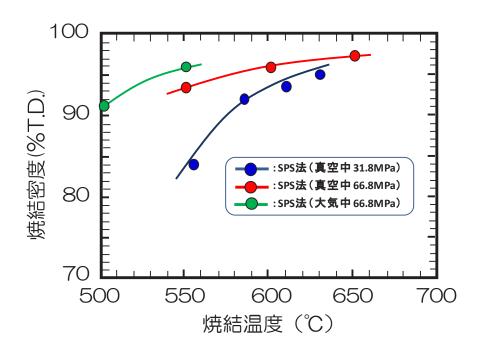


図 3-3 MoO<sub>3</sub>ペレットの焼結温度と焼結密度の関係

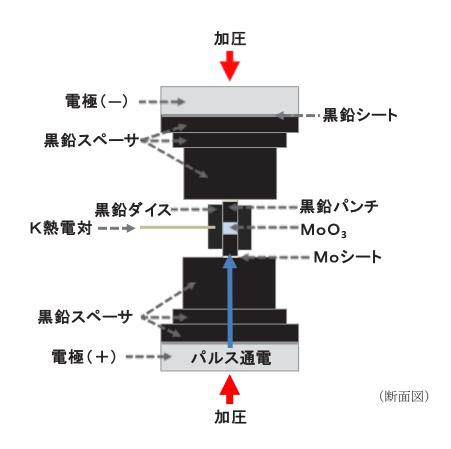


図 3-4 治具構成図

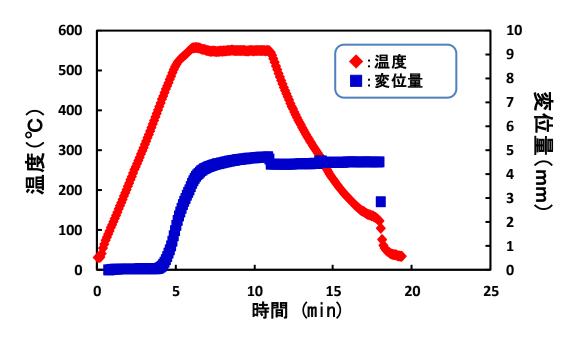
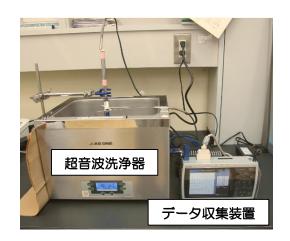


図 3-5 試作試験での焼結条件の一例



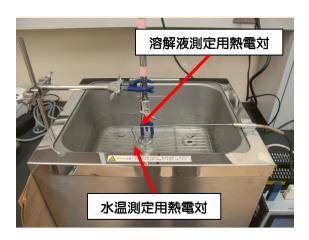


図 3-6 MoO<sub>3</sub>ペレットの溶解試験方法

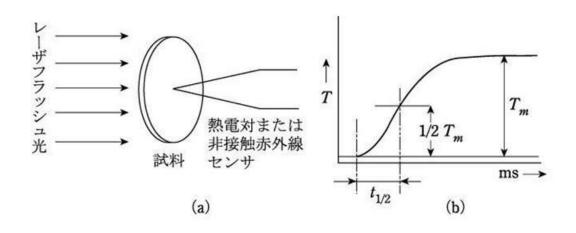


図 3-7 レーザフラッシュ法の測定原理



図 3-8 熱定数測定装置 (アルバック理工社製 TC-7000型)

試料 No.	アルミニウム	MoO <sub>3</sub> ペレット	SUS316	固縛状態
1	0	0		
2		0		
3	0	0		
4				

図 3-9 加熱前の試験片(MoO<sub>3</sub>ペレット、A1 及び SUS316)の外観写真

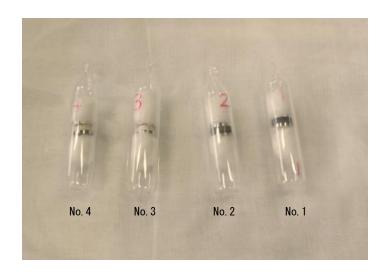


図 3-10 ガラス封入試験体の外観写真(加熱前)

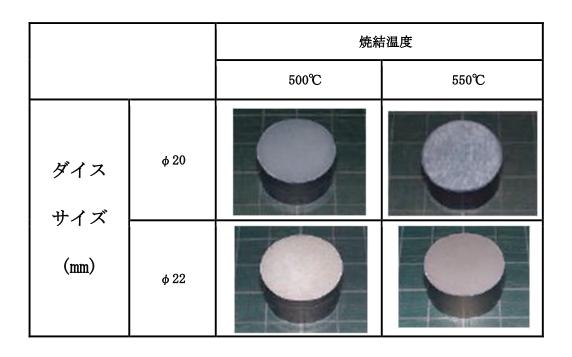


図 3-11 製作したペレット外観写真

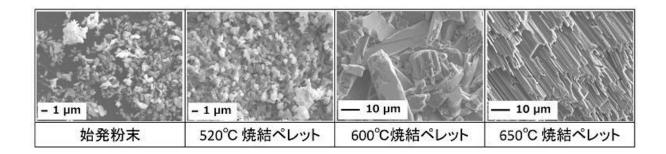


図 3-12 MoO<sub>3</sub>ペレットの SEM 観察結果

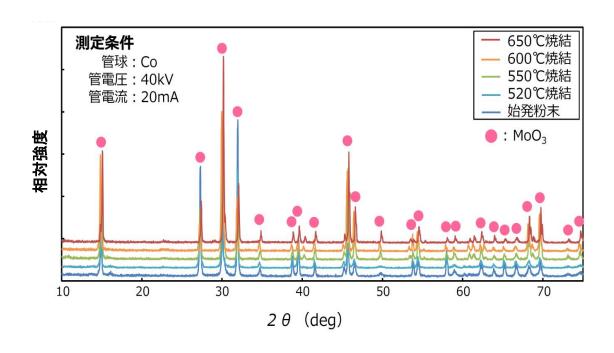


図 3-13 始発粉末及び MoO<sub>3</sub> ペレットの X 線回折結果 (焼結温度による比較)

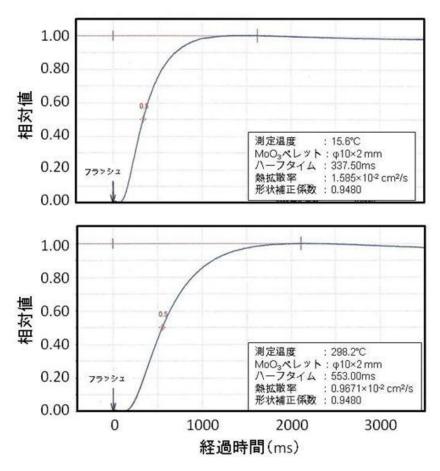


図 3-14 MoO<sub>3</sub>ペレットの熱拡散率測定データ(例)

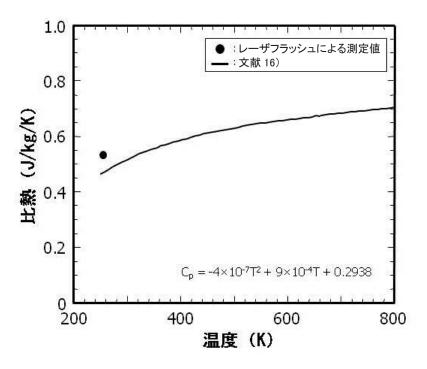


図 3-15 MoO<sub>3</sub>の比熱と温度との依存性

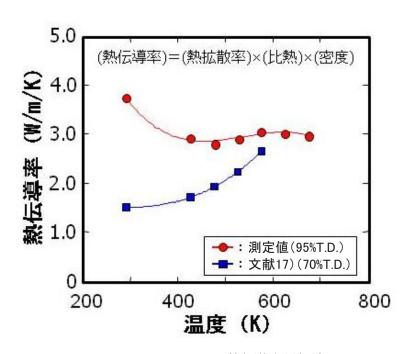


図 3-16 MoO<sub>3</sub>ペレットの熱伝導率評価結果

54×1 M. マルシーウ)		$MoO_3$ $\sim$	CUCOLC	
試料 No.	o. アルミニウム -	アルミニウム側	SUS316 側	SUS316
1	0	0	0	
2	0	•	•	0
3				
4		0	0	0

図 3-17 加熱後の試験片(MoO<sub>3</sub>ペレット、A1 及び SUS316)の外観写真

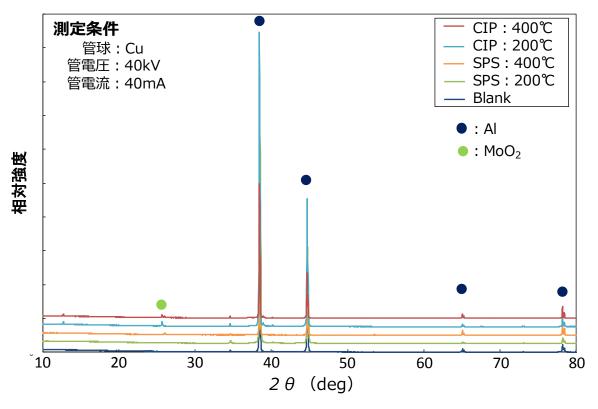


図 3-18 加熱後のアルミニウムディスク の X 線回折結果

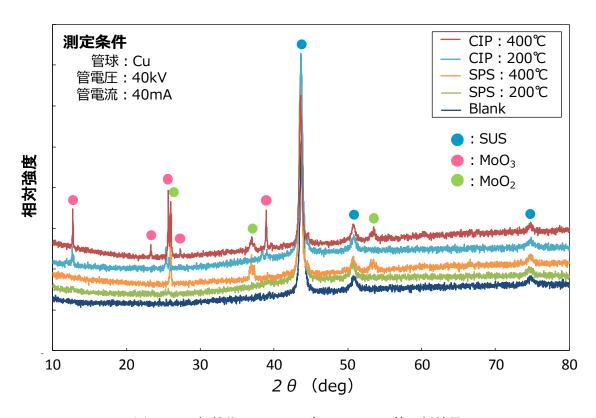


図 3-19 加熱後の SUS316 ディスク の X 線回折結果

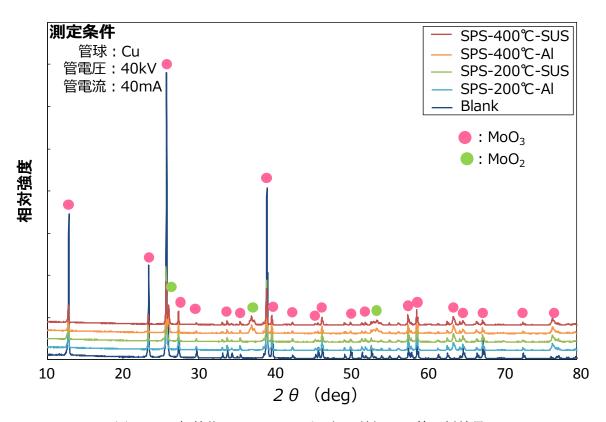


図 3-20 加熱後の MoO<sub>3</sub>ペレット (SPS 法) の X 線回折結果

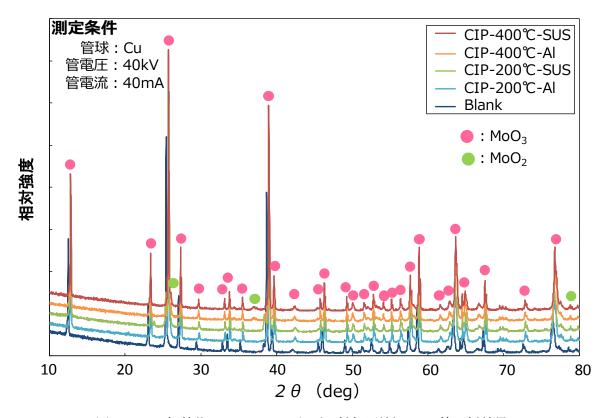


図 3-21 加熱後の MoO<sub>3</sub>ペレット (一軸加圧法)の X線回折結果

#### 4. 照射試験用高密度 MoO<sub>3</sub>ペレットの準備

これまでの試作及び予備試験結果に基づき決定した JMTR で照射する  $MoO_3$ ペレットの製作仕様を表 4-1 に示す。製作にあたっては、HR-1 用ラビットに装荷することから、形状を $\phi$ 20×10mm とした。なお、ラビット一体当たりの装荷数は 8 個であり、10 体分のラビット及び予備品を含め製作個数を 100 個とした。 $MoO_3$ ペレットの製作に用いる  $MoO_3$ 始発粉末は、太陽鉱工社製の天然同位体比を持つ  $MoO_3$ 粉末(純度: 4N)を用いた。 $MoO_3$ 始発粉末の不純物分析結果を表 4-2 に示す。また、焼結に影響する  $MoO_3$ 粉末の粒子径分布、SEM 写真及び X 線回折結果をそれぞれ図 4-1、図 4-2 及び図 4-3 に示す。これらの結果は、前章で記載した試作と同様な結果であった。

## 4.1 MoO<sub>3</sub>ペレットの製作及び試験検査方法

 $MoO_3$ ペレットの製作手順を図 4-4 に示す。製作にあたっては、 $MoO_3$ ペレットの大量製造も視野に入れ、1回の装置運転に対して、4 個の  $MoO_3$ ペレットが製作できるようなダイスを準備した。本試験で行った治具構成を図 4-5 に、焼結条件を図 4-6 に示す。治具には、黒鉛スペーサ、黒鉛パンチ、黒鉛ダイス及び黒鉛フェルトを用いた。試作及び予備試験と同様に、 $MoO_3$  粉末試料を黒鉛ダイス及び黒鉛パンチで固定し、さらに上下を黒鉛スペーサ 3 層で固定した。固定するダイス及びパンチは 4 対である。これを 66.8 MPa で加圧後、パルス電流を印加し、525℃まで 10 分かけて昇温した。焼結後は、ダイス及びパンチを取り出し、ダイスから  $MoO_3$ ペレットを押出し成型した。成型後の  $MoO_3$ ペレットは酸化処理を行い、最終製品として白灰色の  $MoO_3$ ペレットを得た。

製作した  $MoO_3$ ペレットの試験検査項目を表 4-3 に示す。不純物測定は、Mg、Ca、Fe、Cu、Al、Si 及び W に対して ICP 分析装置、Na、K 及び Pb に対して原子吸光分析装置、Cl に対してイオンクロマトグラフ、S に対して炭素・硫黄分析装置及び P に対して分光光度計によりそれぞれ行った。

これらの試験検査に合格した  $MoO_3$ ペレットは、JMTR の水力ラビット照射装置 HR-1 にて照射試験を行うため、ラビット容器に装荷された。

#### 4.2 MoO<sub>3</sub>ペレットの特性評価

表 4-4 に、 $MoO_3$ ペレットの寸法重量測定結果を示す。製作した  $MoO_3$ ペレットの形状は、直径が 19.55~19.76 mm、高さが 9.60~10.03 mm、重量が 12.76~13.61g 及び密度比が 92.2~95.2%T.D. の範囲であった。この結果から、製作した  $MoO_3$ ペレットの形状は仕様を満たしていることが確認 できた。図 4-7 に、 $MoO_3$ ペレットの外観写真を示す。酸化処理後の  $MoO_3$ ペレットの色は、処理前 に比べ白色であった。これは、酸化処理を行うことにより、還元されて生じた  $Mo_0O_{3n-m}$  が  $MoO_3$  に戻ったためと考えられる。

製作(525°C、66.8 MPa)した  $MoO_3$ ペレットは、オゾンガスを用いて表面酸化処理を行っているため、表面酸化処理の前後における粒子径と結晶構造も調べた。 $MoO_3$ ペレットの SEM 観察結果を図 4-8 に、X 線回折結果を図 4-9 に示す。これらの結果から、製作した  $MoO_3$ ペレットの粒成長は観察されず、始発粉末と同程度の粒子径であること、酸化処理前後についても、粒子径の変化は起こらないことが確認された。したがって、照射用ペレットの製作条件及び酸化処理過程での

粒成長はないことが分かった。また、結晶構造解析では、始発粉末と酸化処理の有無において、 大きな相違は確認されなかったことから、MoO<sub>3</sub>の組成は変化していないことが確認できた。

表 4-5 に、MoO3ペレットの不純物測定結果を示す。始発粉末中の不純物と比較して、大きな変 化はないことから、製作時に不純物の混入はなかったと考えられる。強熱減量(Ig-loss)は、強 熱減量試験による質量の減少率から算出した。MoO3ペレットは焼結体のため、始発粉末に比べ強 熱減量は低下していた。

図 4-10 に、MoO<sub>3</sub>ペレットの溶解試験結果を示す。半分に切断した MoO<sub>3</sub>ペレット 8.3g をペレッ ト重量の 2 倍量の 6N-NaOH(16.6mL)と共に 50mL バイアルに入れ、それを超音波洗浄器にセットし 溶解を行った。溶解初期は白色の溶液であったが、溶解の進行と共に透明の溶液となった。MoO<sub>3</sub> ペレットは55分で完全に溶解した。また、溶解後のpHは7.48であった。この結果から、本条件 (MoO<sub>3</sub>ペレット1g:6M-NaOH 2mL)では、超音波洗浄器を用いることにより、1時間以内でMoO<sub>3</sub>ペレ ットを溶解できることを確認した。

JMTR 照射試験用高密度 MoO。ペレットの製作仕様 数量 外径 高さ 平行度

焼結密度 (%T.D.) (mm)(mm)(-)(個)  $92 \sim 97$  $\phi 20 \pm 0.5$  $10 \pm 0.5$ < 0.2100

表 4-2 MoO<sub>3</sub>始発粉末の不純物分析結果

Ig-loss	Na	K	MgO	Ca0	W	Fe
0. 10	<0.0005	<0.0005	<0.0001	<0.0001	0.002	<0.0001
Cu	$A1_{2}0_{3}$	Si	Pb	$PO_4$	S	C1
<0.0001	<0.001	<0.001	<0.001	0. 0005	<0.001	<0.002

(wt%)

表 4-3 MoO<sub>3</sub>ペレットの試験検査項目及び方法

No.	項目	試験検査方法	備考
1	外観検査	製作した全ての MoO <sub>3</sub> ペレットについて、自然光又 は白色光の下で目視により、外観に有害な欠陥及 び損傷が無いことを確認する。	
2	寸法検査	製作した全ての MoO <sub>3</sub> ペレットについて、マイクロメータ又はノギス等を用いて寸法を測定する。平行度は、計算により算出する。	H= (t <sup>max</sup> -t <sup>min</sup> ) /D H: 平行度 t <sup>max</sup> : 厚さtの最大値 t <sup>min</sup> : 厚さtの最小値 D: 外径Dの平均値
3	重量·密度 測定	重量:製作した全ての MoO3ペレットについて、電子 天秤等を用いて測定する。 密度:寸法及び重量測定結果から算出する。	$92\sim97\%$ T.D. 100%T.D. = 4.692 g/cm <sup>3</sup>
4	X 線回折	製作した MoO <sub>3</sub> ペレットについて、X線回折を行い、 MoO <sub>3</sub> の結晶構造であることを確認する。	
5	SEM 観察	製作した MoO <sub>3</sub> ペレットについて、SEM 観察を行い、 結晶粒径を測定する。	
6	不純物 分析	製作した MoO <sub>3</sub> ペレットについて、ICP 発光分光分析 装置等を用いて不純物を測定する。	
7	酸化処理 確認検査	MoO <sub>3</sub> ペレット全数温度 80℃オゾンガス約 100 g/Nm <sup>3</sup> (入口) にて 2 時間酸化処理を実施する。	
8	溶解試験	オゾン酸化処理した MoO <sub>3</sub> ペレットの溶解性を確認する。	

# 表 4-4 MoO<sub>3</sub>ペレットの寸法重量測定結果

寸法 (mm)				焼結密度	
平均直径	平均厚さ	平行度	重量(g)	然和省及 (%T.D.)	
19.55~	9.60∼	0.00050~	12.76~	92.2~	
19. 76	10.03	0.00152	13. 61	95. 2	

表 4-5 MoO<sub>3</sub>ペレットの不純物測定結果

Ig-loss	Na	K	Mg0	Ca0	W	Fe
0.01	<0.0005	<0.0005	0.0002	0.0003	0.002	<0.0001
Cu	$A1_2O_3$	Si	Pb	$PO_4$	S	C1
0.0001	0. 001	<0.001	<0.001	0.0010	0.002	<0.002

(wt%)

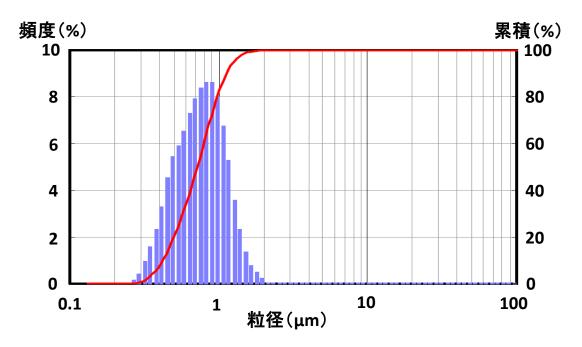


図 4-1 MoO<sub>3</sub>粉末の粒子径分布の測定結果

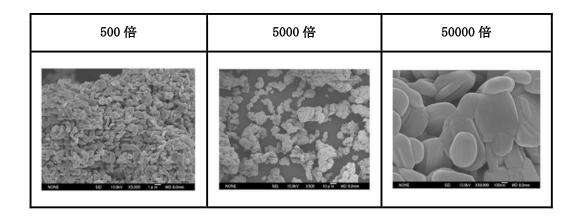


図 4-2 MoO<sub>3</sub>粉末の SEM 写真

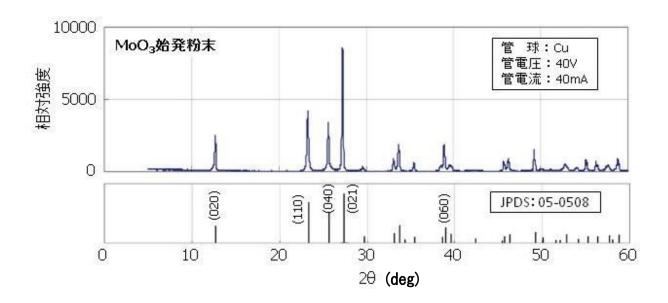


図 4-3 MoO<sub>3</sub>粉末の X 線回折結果

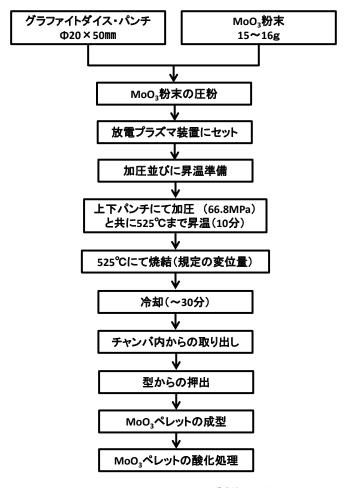


図 4-4 MoO<sub>3</sub>ペレット製作手順

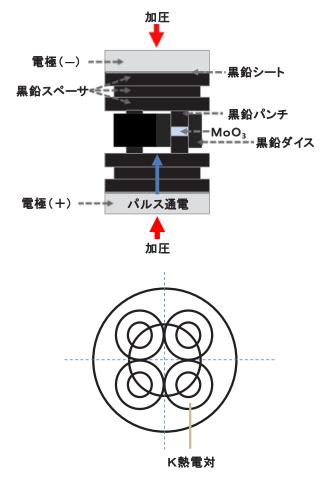


図 4-5 治具構成図

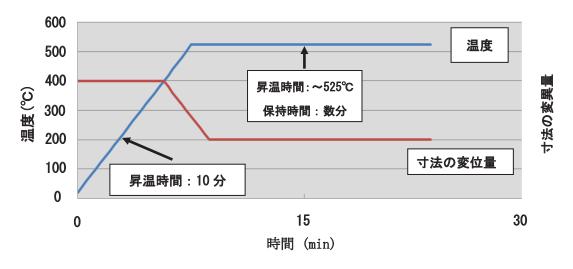


図 4-6 SPS 法による MoO<sub>3</sub> ペレットの焼結条件図

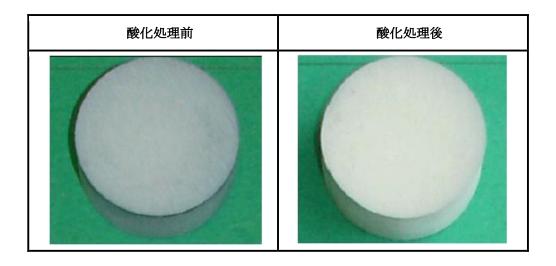


図 4-7 MoO<sub>3</sub>ペレットの外観写真

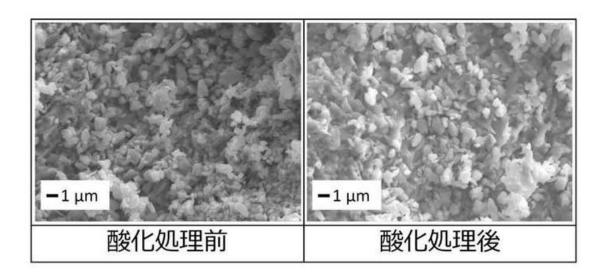


図 4-8 酸化処理前後における MoO<sub>3</sub>ペレットの粒子径観察

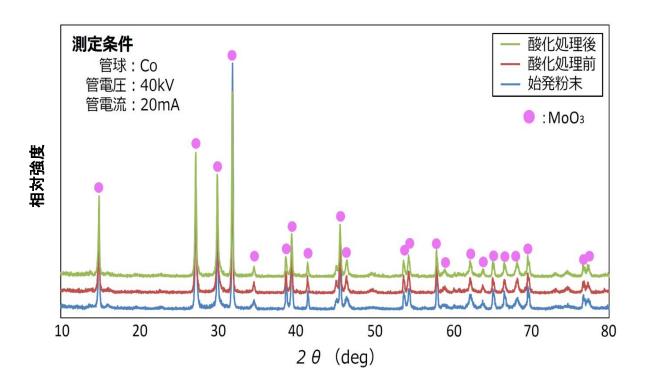


図 4-9 X線回折結果(酸化処理前後による比較)

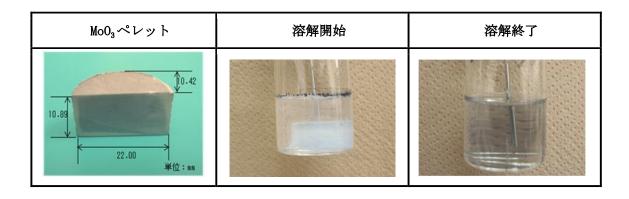


図 4-10 MoO<sub>3</sub>ペレットの溶解試験結果

#### 5. 結論

医療用診断薬である  $^{99}$ Mo/ $^{99}$ mTc の製造における照射ターゲットを製作するため、天然同位体比を持つ  $^{10}$ Mo $^{10}$ 3 粉末を使用した高密度ペレット(目標焼結密度: $^{10}$ 90%T. D.)の製造技術開発を行った。また、製作した  $^{10}$ Mo $^{10}$ 3 ペレットの特性評価(製作性、化学的特性、熱的特性、溶解特性など)を行った。以下に、得られた知見を示す。

- (1)  $MoO_3$ ペレットは焼結温度が 550℃以上となることで、 $MoO_3$ の粒子が成長し針状結晶に変化するため、焼結温度は 550℃以下とする必要があること。
- (2) 決定した焼結条件での焼結及び酸化処理前後において結晶構造の変化、粒子径の成長及び不純物含有量は始発粉末と同程度であり変化は見られないこと。
- (3) 焼結密度、熱拡散率及び比熱との関係により、高密度 MoO<sub>3</sub> ペレットの熱伝導率を評価し、 これまで報告されている熱伝導率よりも高いこと。
- (4) 6M-NaOH に対する溶解特性は、溶解液が無色透明であり 100 分以内に溶解可能であること。本成果により、JMTR で照射試験をするための高密度  $MoO_3$ ペレットの製作を行い、放電プラズマ焼結法を用いて、焼結温度 525  $\mathbb C$ 、焼結圧力 66.8 MPa、大気中にて成型焼結することにより目標焼結密度を達成できた。また、オゾンガスを用いた酸化処理(80  $\mathbb C$   $\times$  2h) を行うことにより、残渣のない Mo 溶液が得られることを明らかにした。これにより、JMTR 再稼働後、高密度  $MoO_3$ ペレットの照射試験を行い、その照射後特性を調べるとともに、 $MoO_9$   $MoO_9$  Mo

#### 謝辞

本研究開発は、国家課題対応型研究開発事業「原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ」の「JMTRを用いた放射化法による 99Mo/99mTc の国産化技術開発」の一環として実施した成果である。

本研究開発の実施にあたり、当該事業の研究代表者である福島研究開発部門福島廃炉技術安全研究所 河村 弘 所長、大洗研究開発センター 荒木 政則 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。また、本報告書をまとめるにあたり、原子力水素・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、照射試験炉センター及び技術工作課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) C. Craig, "Radioisotopes: The medical lifesavers that congress is suppressing", 21th Century Science & Technology, Winter 2009/2010, pp. 30-45.

- 2) "The Supply of Medical Radioisotopes -An Economic Study of the Molybdenum-99 Supply Chain-", OECD/ NEA No. 6967, 2010.
- 3) 「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, 2011 年 7 月 7 日.
- 4) International Atomic Energy Agency (IAEA), "Research Reactor Section: CRP on Production of Mo-99 from LEU or Neutron Activation", http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical-Areas/RRS/mo99.html, (accessed 2014年4月7日).
- 5) "Status Update on Conversion to LEU Based <sup>99</sup>Mo Production in South Africa", RERTR 2011, October 23-27, 2011.
- 6) G. Vandegrift, Private Communication.
- 7) 南 博志「レアメタルシリーズ 2009 コバルト及びモリブデンの需要・供給・価格動向 等」, JOGMEC 金属資源レポート 2010 年 1 月 号, pp. 129-142.
- 8) 濱井 昴弥「レアメタルシリーズ 2011 モリブデンの需要・供給及び価格の動向」, JOGMEC 金属資源レポート 2011 年 11 月号, pp. 75-80.
- 9) L. Brewer and R. H. Lamoreaux, Bull. Alloy Phase Diagrams, 1(2)Dec. 1980
- 10) 山林 尚道、「三酸化モリブデンペレットを使用したモリブデン-99 の製造法」、特公 昭 60-57040 号公報.
- 11) 守吉佑介, 笹本 忠, 植松敬三, 伊熊泰郎, 門間英毅, 池上隆康, 丸山俊夫, 「セラミックスの焼結」, 内田老鶴圃, 1995, 280p.
- 12) 田中紘一,石崎幸三,「新素材焼結 HIP 焼結の基礎と応用」,内田老鶴圃.
- 河村 弘,飯村光一,堀直彦,出雲寛互,加藤剣一,名取ゆり,蓼沼克嘉,「高密度,高純度 $(n,\gamma)$ 99Mo の製造方法、この方法により製造した高密度、高純度」,特開 2010-175409, 2010年8月12日公開.
- A. Kimura, Y. Sato, M. Tanase, K. Tsuchiya, "Development of High Density MoO<sub>3</sub> Pellets for Production of <sup>99</sup>Mo Medical Isotope", 2011 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 18 042001, 2011.
- 技術紹介「第1回 レーザーフラッシュ法による熱拡散率・熱伝導率の測定」, http://homepage3.nifty.com/agnesokutei/pag82002.htm, (accessed 2014年4月25日).
- 16) Y.S. Touloukian and Buyco, "Thermophysical Properties of Matter Volume 5 Specific Heat, Nonmetallic Solid -", IFI/PLENUM, New Yourk-Washington (1970), pp. 163-166.

## 国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本i	単位
左 半 里	名称	記号
長き	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	
加工車	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体程		m <sup>3</sup>
速 さ , 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	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比 体 積	立方メートル毎キログラム	m³/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質 量 濃 度	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度		cd/m <sup>2</sup>
屈折率 (b	(数丁=>>)	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
- (albatin Concentration) ない。 (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

大3. 固有の名称と記方で衣されるSI組立単位				
			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	10 M	記り	表し方	表し方
	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (p)	m/m
	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		$s^{-1}$
カ	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{-2} A^{-1}$
	ヘンリー	Н	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	$^{\circ}$ C		K
· ·	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 (f)	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		$s^{-1}$
吸収線量, 比エネルギー分与,	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
カーマ		ч	9/Kg	m s
線量当量, 周辺線量当量, 方向	S. S. J. (g)	Sv	I/lva	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
性線量当量,個人線量当量	シーベルト (g)	SV	J/kg	m s
酸 素 活 性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol
( . ) CT # 次元 (本 ) - (	= ~ 40 + H H 1, 40 7. A	1- 11-7 3 E	と田一本キッ 1 3、1 4次元章:	キャートリ もみんしょう はめ

- 酸素活性|カタール kat silmol
  (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。
  (e) 池外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) へルソは周朔現象についてのみ、ペクレルは放射性接種の統計的過程についてのみ使用される。
  (a) 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増別な名称で、セルシウス温度開展を表す表慮に使用される。セルシウス度とケルビンの地単位の大きなは同である。したがって、温度差や温度開展を表す表慮に使用られる。セルシウス度とケルビンの(b) 数料性核種の放射能(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

表 4. 単位 0	)中に固有の名称と記号を含	むSI組エ単位	<u>v.</u> 001911
	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒		m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量,エントロピー			$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム		$m^2 s^2$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
	クーロン毎立方メートル		m <sup>-3</sup> sA
	クーロン毎平方メートル		m <sup>-2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位			m <sup>-2</sup> sA
誘 電 率	ファラド毎メートル		$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		kg <sup>-1</sup> sA
吸 収 線 量 率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

乗数 接頭語 記号 乗数 接頭語 記号  $10^{24}$ 3 Y 10 d  $10^{21}$ ゼ 7. 10-2 c  $10^{18}$ サ Е  $10^{-3}$ m  $10^{15}$ Р 10<sup>-6</sup> μ  $10^{12}$ 5 Т 10<sup>-9</sup> n  $10^{-12}$  $10^{9}$ ギ ガ G p  $10^{\cdot 15}$  $10^6$ ガ Μ フェムト

k 口

h

 $10^3$ 丰

 $10^2$ 

 $10^1$ 

10<sup>-18</sup>

 $10^{\cdot 21}$ 

 $10^{-24}$ 

ゼプ

ク

а

 $\mathbf{z}$ 

表 5.SI 接頭語

表 6. SIに	属さない	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
目	d	1 d=24 h=86 400 s
度	۰	1°=(п/180) rad
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣され	の剱旭	か 美験的に 侍られるもの
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 <sup>-19</sup> J
ダ ル ト ン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> m

記号 SI 単位で表される数値 名称 1 bar=0.1MPa=100kPa=10<sup>5</sup>Pa bar 水銀柱ミリメートル nmHg 1mmHg=133.322Pa オングストローム 1 Å=0.1nm=100pm=10<sup>-10</sup>m 海 里 M 1 M=1852m 1 b=100fm<sup>2</sup>=(10<sup>-12</sup>cm)2=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup> b

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

ツ kn 1 kn=(1852/3600)m/s ネ Np SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。 11 В 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 <sup>-7</sup> J
ダ イ ン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$
ガ ウ ス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10³/4π)A m <sup>-1</sup>

(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	はさない	いその	他の	単位の	)例	
						-	=

名称				記号	SI 単位で表される数値		
+	ユ		リ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq	
$\nu$	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy	
$\nu$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv	
ガ		ン		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T	
フ	æ.		ル	3		1フェルミ=1 fm=10-15m	
メートル系カラット			ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg		
卜				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力	П		IJ	ĺ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	ク		口	ン	μ	1 μ =1μm=10 <sup>-6</sup> m	