JAEA-Review
2011-012

低濃縮ウラン照射による ^{99m}Tc 抽出に関する調査

Survey of LEU Based ^{99m}Tc Generators Loading Process

谷本 政隆　Daniel AMAYA　青山 征司　木村 明博
出雲 寛互　土谷 邦彦

Masataka TANIMOTO, Daniel AMAYA, Masashi AOYAMA, Akihiro KIMURA
Hironobu IZUMO and Kunihiko TSUCHIYA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

June 2011

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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, 2011

JAEA-Review 2011-012

低濃縮ウラン照射による^{99m}Tc抽出に関する調査

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

谷本　政隆、Daniel AMAYA*、青山　征司+、木村　明博、出雲　寛互、土谷　邦彦

（2011年2月2日　受理）

テクネチウム-99m（^{99m}Tc）は放射性医薬品として核医学の分野で最も多く用いられており、核医学診断の80%以上を占めるに至っている。^{99m}Tcはウラン-235（^{235}U）からの核分裂及びモリブデン-98（^{98}Mo）をターゲットにした中性子照射によって生成されるモリブデン-99（^{99}Mo）から得られる。

しかしながら、その唯一の親核種であるモリブデン-99（^{99}Mo）は諸外国からの輸入に頼っていることから、材料試験炉（JMTR）では産業界と協力し、^{99}Moの一部国産化を目指して^{99}Moの（n, γ）法による製造を計画している。一方、INVAP社は低濃縮ウラン（LEU）を原子炉で照射し核分裂（n, f）法による^{99}Moを製造する施設の供給に携わってきている。

本報告書は、INVAP社が設計・製作した^{99m}Tcジェネレータ製造施設に関して調査したものであり、ここで紹介する技術的な課題は今後の^{99}Mo製造後における^{99m}Tcジェネレータ製造過程の検討において有用になるものと考える。

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
* INVAP S.E.（インバップ社）

JAEA-Review 2011-012

Survey of LEU Based ^{99m}Tc Generators Loading Process

Masataka TANIMOTO, Daniel AMAYA*, Masashi AOYAMA+, Akihiro KIMURA,
Hironobu IZUMO and Kunihiko TSUCHIYA

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

(Received February 2, 2011)

^{99m}Tc is most commonly used as a radiopharmaceutical in the field of nuclear medicine, accounting for more than 80% of all diagnostic nuclear medicine procedure. The ^{99m}Tc is obtained from ^{99}Mo, which is produced by fission of ^{235}U ((n, f) method) and the neutron capture (n, γ) method using the ^{98}Mo target.

However, a supplying of ^{99}Mo is only depends on imports from any other countries, so JAEA find a way out at domestic production of a part of ^{99}Mo that (n, γ) method in cooperation with the industrial circles.

On the other hand, INVAP has been working in the supply of ^{99}Mo production facilities using LEU. This report provides descriptions the detail technical aspects related to the facility and operations for loading ^{99m}Tc generator. These key issues and technical provided in this report is believed to be useful for developing and updating them.

Keywords: ^{99}Mo, ^{99m}Tc, Milking, (n,f) Method, Radiopharmaceutical, Nuclear Medicine

+ Department of JMTR Operation
* INVAP S.E.

目　次

１．はじめに…………………………………………………………………… 1
２．^{99m}Tcジェネレータの製造方法……………………………………………… 1
　２．１　GENTECの概要…………………………………………………………… 2
　２．２　^{99m}Tcの溶出 ……………………………………………………………… 2
３．^{99m}Tcジェネレータの製造………………………………………………… 2
　３．１　製造プロセス……………………………………………………………… 2
　３．２　製造装置…………………………………………………………………… 3
４．^{99m}Tcジェネレータ製造施設……………………………………………… 4
　４．１　ホットセル………………………………………………………………… 4
　４．２　放射線防護………………………………………………………………… 5
５．GENTEC製造管理………………………………………………………… 6
　５．１　^{99m}Tc製造管理 ………………………………………………………… 6
　５．２　施設に対する安全確保と審査…………………………………………… 6
　５．３　製品の組立………………………………………………………………… 6
　５．４　試運転……………………………………………………………………… 6
　５．５　訓練………………………………………………………………………… 7
　５．６　製品の認定………………………………………………………………… 8
６．結言………………………………………………………………………… 8
謝　辞…………………………………………………………………………… 9
参考文献………………………………………………………………………… 9

Contents

1. Introduction ····· 1
2. Outline of ^{99m}Tc production method ····· 1
   2.1 GENTEC ····· 2
   2.2 ^{99m}Tc production ····· 2
3. Description of the GENTEC production process ····· 2
   3.1 GENTEC production process system ····· 2
   3.2 In-Cell equipment ····· 3
4. GENTEC loading facility description ····· 4
   4.1 Hot cells ····· 4
   4.2 Radiation protection system ····· 5
5. GENTEC production project management ····· 6
   5.1 ^{99m}Tc production management ····· 6
   5.2 Safety review for plant facilities ····· 6
   5.3 Installation of equipment and trial run ····· 6
   5.4 Trial run ····· 6
   5.5 Training ····· 7
   5.6 Product certification ····· 8
6. Conclusion ····· 8
Acknowledgements ····· 9
References ····· 9

1. はじめに

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 材料試験炉（JMTR）は、原子炉の運転を平成18年8月の第165サイクルで一旦停止し、平成23年度からの再稼働に向けて原子炉機器の一部更新及び照射設備の整備を進めている[1,2]。照射設備の整備については新たな照射ニーズに応えるべく、がんの診断等に用いる医療用ラジオアイソトープの国産化についても検討している。

がんの診断には、^{99}Moの娘核種である^{99m}Tcが主に用いられている。^{99m}Tcが医療用検査薬として広く普及[3]している理由は幾つか挙げられるが、その一つに、半減期が約6時間であることが挙げられる。放射線の身体への影響を少なくするためには、これに比して更に半減期の短いラジオアイソトープを利用することが有効である。しかしながら、がんや臓器などを検査するため、人体の静脈に注射してから、薬が検査対象の臓器に集まるまでにある程度の時間が必要である。したがって、半減期が極端に短いと、薬が集まる前に検査ができなくなる可能性があることから、^{99m}Tcの6時間という半減期は非常に好都合であると言える。

さらに、^{99m}Tcはその親核種である半減期約66時間の ^{99}Moから取り出して製剤化することから、この程度であれば輸送に十分に耐えうると言うことも利点として挙げられる。

テクネチウム製剤の流通ルートは大きくは2つに分かれており[4]、放射性医薬品メーカーで^{99}Mo原料から^{99m}Tcを取り出して製剤化して病院に供給する方法と、^{99}Moを充てんした^{99m}Tcジェネレータと呼ばれる特殊な装置から^{99m}Tcを取り出して、別に供給される標識キットを用いて^{99m}Tc製剤を作る方法がある。何れにしても両者の方法とも、^{99m}Tcジェネレータより^{99m}Tc溶出液を得ている。

この^{99m}Tcジェネレータの中心部はアルミナカラムとなっており、^{99}Moをモリブデン酸二ナトリウム（MoO_4^{2-}）（以下「モリブデン酸溶液」という。）の形でアルミナカラムに吸着させて、ほぼ1日放置することで^{99m}Tcと過渡平衡状態となることから、これを生理食塩水で溶出すると$^{99m}TcO_4^-$が得られる。最終製品は人体への直接投与となるため、pHの調整、濃度、放射性核種の純度等が要求され、それらを満足するための製造施設に対する管理基準は厳しい。本報告書はこうした管理基準を含め、^{99m}Tcジェネレータ製造施設及び施設の運転、管理に関する技術について紹介するものである。

2. ^{99m}Tcジェネレータの製造方法

INVAP社 ^{99m}Tcジェネレータ（以下商品名より「GENTEC」という。）の製造は、製品1つを製作するのに小規模なバッチ処理技術から自動生産ラインにまでわたっている。製造と品質管理は、米国食品医薬品局が規制している医薬品適正製造基準（GMP: Good Manufacturing Practice）の要件が適用され、これらは無菌の状態下で行われる。

2.1 GENTECの概要

GENTECにはアルミナカラムが使用される。このアルミナカラムに^{99}Moを吸着させ、生理食塩水（移動相）がアルミナカラムを通過する際に^{99}Moから生成した^{99m}Tcを溶出させる。GENTECの設計にあたっては以下の特性を満足した溶液について高効率で安全性の高いものが求められる。

・無菌
・pH 5～7（溶出後のテクネチウム溶液）
・テクネチウム溶液に含まれる^{99}Mo濃度は 0.1%未満
・薬事法に従った放射性核種純度

Fig.2-1にGENTECの断面図、Fig.2-2にGENTECの外観写真を示す。
モリブデン溶液はアルミナ粉末と共にガラスのカラムに固定されることで、生理食塩水（移動相）とアルミナ粉末（固定相）との間での溶質の分離装置としてのクロマトグラフとして機能する。生理食塩水や抽出後のテクネチウムはステンレス鋼製のニードルを通して移動する。Fig.2-2の溶液バイアルは真空のバイアルとなっており、生理食塩液は真空に引かれてニードルのラインからアルミナカラムを通って溶液バイアルに流れ込む過程において^{99m}Tc溶液が溶出される。カラムは鉛でできた生体遮へい内に設置され、それを覆うGENTEC容器全体としては放射性物質安全輸送規則（TS-R-1）のカテゴリー3容器を取得するように設計されている。また、生体遮へいはプラスチック容器に入れられて組立てられた状態だけのものではなく、衛生状態を保てるよう分解しメンテナンスできるようになっている。なお、GENTECの外側は梱包材（発泡スチロール＋プラスチック容器）で覆い製品を保護している。

2.2 ^{99m}Tcの溶出

GENTEC が病院に到着すると、患者に投与する医者により操作が行われる。ここでの操作では真空のバイアルと、生理食塩水溶液のバイアルを接続するだけである。なお、テクネチウムの溶出は3分で完了する。

3. ^{99m}Tcジェネレータの製造

GENTECの製造プロセスは、輸送されてくる放射性モリブデン酸溶液（^{99}Mo）を受け取ることから始まる。その次に、GENTECの組立とこのモリブデン酸溶液の調整を行う。GENTEC製造プロセスのフロー図をFig.3-1に示す。

3.1 製造プロセス

製造プロセスは病院から回収する使用済GENTECの再利用から製品の品質管理及び出荷に至る迄であり、これら一連の工程を以下に示す。

①**GENTECの解体**：病院から回収したGENTEC構成部品を使い捨て部品と再利用可能部品に分

別する。

②**洗浄と除染**：再利用可能な部品を除染・洗浄し、滅菌するものと消毒のみのものに分別する。

③**消毒**：GENTEC組立前に外蓋と遮へい構成部品を消毒する。

④**内部部品の準備**：カラムや内部構成部品（ホース、フィルター）をすべて専用の場所において準備する。

⑤**殺菌**：組立前に全ての内部構成部品とバイアルを蒸気滅菌器で殺菌する。

⑥**組立**：GENTECを非放射性条件下で組立てるが、先ず、外部部品をすべて消毒した後、次に内部部品をすべて殺菌する。その後、組上がったGENTECを層流式フードに移し全体を殺菌する。

⑦**モリブデン酸溶液の調整**：モリブデン酸溶液の入ったバイアルをモリブデン酸溶液調整用のホットセル内の装置に移動させる（Fig.3-2を参照）。ここでモリブデン酸溶液を調整し、放射能濃度とpHを調節する。

⑧**モリブデン酸溶液の注入**：非放射性条件下で組立てられたGENTECは、モリブデン酸溶液の入ったバイアルと共に、モリブデン酸溶液注入用ホットセルに運ばれる（Fig.3-3、3-4参照）。GENTECはセル内に設置され、ここで保護バイアルが取り外されて注入装置が接続される。この注入装置を介してモリブデン酸溶液をGENTEC内のアルミナカラムに投入する。

⑨**製品取り出し**：モリブデン酸溶液の注入が終了したGENTECを、モリブデン酸溶液注入用ホットセルから層流式フードへ取り出す（Fig.3-4）。

⑩**品質管理**：品質管理のためのテクネチウム溶出試験とサンプリングは、層流式フードで実施される。実施項目は以下のとおりである。

- 溶出物の放射能濃度の測定
- 放射化学品質管理
- 測光法による品質管理
- 放射分析による品質管理
- 無菌試験

⑪**製品の梱包**：GENTECに保護用のバイアルと外部カップを取付けて、出荷の準備を終える。

3.2 製造装置

セル内に設置される装置の設計については、セル内での作業性だけでなく、廃棄物をできる限り低減できるように工夫しており、その保守性や部品交換のための脱着能力についても特に注意を払って設計している。さらに、最も重要な構成部品については、容易に保守・交換できるように工夫するとともに、設計と操作手順によって放射能汚染の拡大を最小限に抑えられるようになっている。

一方、製造装置の材料は、耐放射性及び強度条件を考慮して選定されている。溶液と接触する部分については、ステンレス鋼、ポリエチレン、石英もしくはガラスが使用されている。特に、溶液の流れる配管については、ステンレス製配管もしくはPVC ホースが使われ、装置

の内部接続部については、ステンレス鋼製のクイックコネクタやホースコネクタが使用されている。なお、装置は手動操作により放射線被ばくのリスクが最小限になるように配置されている。

これらセル内の装置を操作するのは専用の制御システム（PLC）であり、各セルの正面に置かれた制御盤には、制御システムと状態表示器が搭載されている。

4. ^{99m}Tcジェネレータの製造施設

GENTECの製造施設は、以下の通りである。なお、GENTEC製造における主なホットセルについての説明と製造施設全般についての放射線防護の考え方について記述する。

①**使用済ジェネレータ室**：クリーン区域。GENTECの分解、除染のための専用室。

②**コールド準備室**：クリーン区域。GENTECの部品倉庫と化学薬品及びGENTEC組立準備作業室がある。

③**組立て室**：クリーン区域。ここでGENTECが組立てられる。作業員や運転員はエアロックから出入りする。GENTECの組立て部品については、層流式フードに通じる壁面の開口部からアクセスする。GENTECの組立てが終わると、移動コンベアで装填室に移動する。

④**装填室**：クリーン区域。ホットセル、層流式フード及び移動コンベアがある。

⑤**ホットラボ室**：クリーン区域。品質管理に必要な測定用の機器が設置されている。

⑥**放射線防護室**：運転員や環境の安全を確保するための測定機器や放射線管理担当者の席がある。

⑦**梱包・保管室**：輸送用梱包材、化学薬品及び発送用GENTECの保管専用室である。

4.1 ホットセル

モリブデン酸溶液の調整とGENTECへのモリブデン酸溶液の注入操作はホットセル内で実施される。Fig.4-1にモリブデン酸溶液注入用ホットセルの正面からの写真を示す。ホットセルの鉛遮へいはALARA（As low As Reasonably Achievable：「放射線防護の最適化」）の基準[5]に従って設計されており、運転員の年間線量は20mSv/年の上限を大幅に下回るようになっている。窓は鉛ガラスで、ホットセルの壁とともに十分な厚さを保って設置されている。ホットセルの構成は以下のとおりである。

a）構造体及び遮へい：

ホットセルの遮へいは、GENTECとその製造で発生した廃棄物の放射線を遮へいする。構成材は主に炭素鋼と鉛である。セル厚は15cmの鉛、あるいは同等の性能を持った遮へい材で遮へいされている。構造体は遮へい、気密性エンクロージャ、セル換気システムから構成されており、それらは金属枠で仕切られている。アクセス環境は固体移送システムとGENTEC移送システムがあり、このアクセス環境のための遮へいに必要なものは以下のものが挙げられる。

・層流式フードを通じてモリブデン酸溶液注入セルにあるGENTECにアクセスするための空気圧作動遮へいドア（Fig.3-4）。
・モリブデン酸溶液調整セル内の固体物の移送のための遮へいドア。
・両セル（モリブデン酸溶液調整セルとモリブデン酸溶液注入セル）の背後の壁にある保守作業用の遮へいドア。
・両セルの正面の壁にあるテレトン用遮へい導管（ヒンジジョイント）。
・両セル内の鉛ガラス覗き窓。
・照明およびサービスアクセスのための遮へい導管。

b）作業用気密ボックス：

作業用気密ボックスは、ステンレス鋼で溶接によって製作されている。この作業用気密ボックスは、ホットセルの換気システムと接続されており、外部環境に対して負圧環境下で操作される。気密ボックスには、照明、電源、水、圧縮空気用コンプレッサー、気密ボックス内覗き窓、機器の設置・保守のためのアクセス用接続部が装備されている。

c）固体移送システム：

本システムは、モリブデン酸溶液調整セル内部の標準輸送容器からモリブデン酸溶液バイアルを移送するのに使用される。また、システムには遮へい容器が1つ設置されており、セルから出た固体廃棄物を排出できるようになっている。これらシステムに固定されたアクセス用の扉と輸送に使用する専用容器には遮へいが施されている。

d）廃液移送システム：

本システムにより、モリブデン酸溶液調整セルかモリブデン酸溶液注入セルの一方のセルの下に設置されている廃液用遮へい容器に対し、双方のセルから廃液を収集できるようになっている。集められた廃液は遮へい容器と廃液移送のためのポンプの付いた車両によって外に搬出される。

e）GENTEC移送システム：

本システムにより、層流式フードの上に設置された準備台から作業用気密ボックス内にあるセルの内部注入ステーションまでGENTECを手動にて容易に移動することができる。ドアは空気作動式であるが、移動ガイドによって移動中のGENTECが保持されるようになっている。

f）ホットセル制御盤：

ホットセル正面に設置されており、マンマシンインターフェイスを基に設計されているため、快適に操作できる。セル内のプロセスを管理・監視し、プロセス機器のコマンド、インターロックの指示、警報及び換気システムの現場指示についても操作することができる。

4.2 放射線防護

放射線防護システムには、運転員と環境への放射線に対する安全を確保するために必要な計装や手順書が含まれる（放射線障害予防規程に該当）。放射線や放射性物質に不必要に被ばくしないよう立入が制限されている管理区域の出入口には、衣服、手足の汚染モニタが設

置される。また、放射線を放出する可能性がある全ての区域を監視・サーベイするエリア・モニタリングシステムには、視覚と音声による警報が設置されている。一方、個人線量計及び可搬型線量計によって個人の外部被ばくの監視や、工具、物品、エアサンプリング装置等の外部汚染を確認する。

5. GENTEC製造管理

GENTEC製造にあたっては、基本及び詳細設計の開発、調達と製造、現場の組立作業、起動と試運転、訓練及び製品の認定の各段階で行われる。

5.1 ^{99m}Tc製造管理

管理スタッフの業務は、製造プロジェクトに対して設定した目標を達成するべく、製造品質要件の適合性、予め設定した期限、予算を管理する。

5.2 施設に対する安全確保と審査

施設は、良好な製造品質と国際放射線防護基準を満たすように設計され、かつ、国際薬事法に沿った品質レベルで製品を製造するように設計されている。基本設計の段階で、予備的及び最終設計審査(PDR＆DFR)が行われ、詳細設計の段階でシステムの統合を含めた全体の調整と検証による詳細審査が行われる。

5.3 製品の組立

品質保証を受けた手順書に従って製品の組立てを実施する。なお、プロセス機器の設置においては、予めコールドランで試験を行ってから施設に設置する。

5.4 試運転

ホットセル内に装置及びシステムが設置された後に予備試験を実施する。予備試験では、個々の設備試験とシステムの動作確認試験を実施する。その後、試運転において全ての装置とシステム全体が統合された状態における動作確認を行う総合試験が行われる。予備試験では、以下のa)～c)の項目を確認する。

a) 装置とシステム（及び補助システム）が設計通りに運転されていることを確認し、かつ運転要件に関する性能基準を満たすこと。
b) プロジェクト設計図書はプラントの運転と保守に関して適切であること。
c) 予備試験の完了時に、プラントシステムが万全、かつ安全であり試運転の準備が整っていること。

予備試験が終了すると、続いて試運転に移る。試運転では製造プロセス、安全保護システム及び施設全体の確認試験が行われる。試運転によってシステムは運転条件に置かれる。すなわち、予備試験で確認を行った全ての機器が設計条件を満たした運転に入る。保守手順が

整うと運転員は完全な運転状態で施設を運転することができる。なお、試運転は以下のa)～g)の項目を確認するために実施される。

a) プラントシステムと補助システムは、設計目的に従って統合された方法で作動し、運転要件に関する性能基準を満たすこと。
b) 設計図書は運転が適切であること、また、プラントや手順を正確に説明していること。
c) 運転員は、労働衛生安全要件(OHS：Occupational Health and Safety)や規制要件に従って適切にプラントを運転できる技能を備えていること。
d) 施設が設計どおりに機能していること。
e) プラントは関連施設との適切なインターフェースがあること。
f) 安全機能を有する機器については測定結果が目標とする設計基準値以下であることを満足すること。
g) 機器は仕様に適合しており、良好な運転が行われていること。

試運転を行うためには他のプロジェクトで行った組織とは異なる特別な組織が設立される。この組織は試運転作業を実施する責任を負ういくつかのグループやマネジャーで構成される。システムの運転はホット試運転の完了後、プロジェクトから徐々に運転員に引き継がれる。実施する作業の性質が異なるため、試運転は2つの段階に分かれる。なお、試運転は以下のa)～c)の段階から成る。

a) 放射能を伴わない試運転(コールド試運転)
b) 放射能を伴う試運転(ホット試運転)
c) GENTEC製造運転と製品の認証

試運転は、統合試験から始まり、非放射性ターゲットでのコールド試験の運転が続く。ホット試運転は溶液の放射能を徐々に増加させて、最後に設計で想定する最大の放射能量で試験を終了する。試運転試験の目的は、主な安全系のシステムが正しく作動することを実証し、異なるシステム間の統合を試験すること、さらにはプラントの性能と製品の品質を証明することである。最後に、プロセスと製品の認定及び検証を行い、GENTEC製造システム、製造手順及び補助施設を試験する。また、GENTECの製造にあたっては少なくとも3度実施し、製品の品質が仕様に適合することを示す。

5.5 訓練

運転員の訓練は、施設の運転員が各自の作業分野に要求される基本的技能を持っていることを保証しなければならない。個別の訓練を開始するためには、放射線防護、原子力安全、核物理、放射性物質の遮へい及び取扱いなどの項目に関して、運転員のこれまでの経験が基本になる。各訓練項目を組み合わせて訓練を行い、試運転後の施設内における現場での訓練が最終となる。訓練中に扱う項目の概念リストをa)、b)に示す。

a) 一般訓練
- 操作の紹介
- 操作
- 概要

・ 各運転員の役割

b) 現場訓練

・ プロセス動作
・ 機械的動作
・ 放射線防護
・ 廃棄物管理
・ 保守
・ 品質管理
・ 計装

各運転員は、「プラントマネジャー」、「製造」、「保守」、「品質管理」及び「放射線防護」の役割別に現場訓練が行われる。実地訓練には、施設で行う作業の習熟が含まれる。訓練の頻度と期間は、訓練時のプラントの作業を利用して予定が組まれる。

5.6 製品の認定

プラントの試運転と運転員の訓練の終了後、製品を販売する前に薬事関係組織の要件を満たさなければならない。なお、認定にあたっては設置認定、運転認定及び製品認定が必要とされる。

6. 結言

平成23年度のJMTRの再稼働に向け、「科学技術の向上」、「軽水炉の長寿命化」、「産業利用の拡大」をテーマに、利用性向上に努め利用者の大きな期待に応えることのできる世界の中核的照射施設を目指した取り組みを進めている。これらのテーマのうち「産業利用の拡大」の一つとして、RIの製造を通して、逼迫する医療用^{99m}Tcを国内生産することで、国民の医療福祉に貢献していくことは新JMTRに期待される役割の一つである。照射試験炉センターでは^{99m}Tcの原料である^{99}Moの（n, γ）法による製造技術開発について着手してきているところである。

本報告書は、オーストラリアのOPAL炉での（n, f）法による^{99}Moの製造に関する調査報告書に続き、^{99m}Tcの抽出ついての製造技術についてまとめたものであり、今後のJMTRにおけるMo製造に関する設計開発の際に大いに参考になるものである。

謝　辞

本報告書をまとめるにあたり、大洗研究開発センター　河村　弘副所長（照射試験炉センター長兼務）及び照射試験炉センター　石原正博副センター長及び原子炉施設管理部　技術管理課　堀　直彦課長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本調査にあたり、INVAP社のRuben MAZZI氏に有意義な情報提供及びご指導を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

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] 小林正明「わが国における放射性医薬品の供給とRI原料入手の現状」 核医学技術,21,357-362 (2001) .

[4] 中村吉秀「テクネチウム-99m放射性医薬品の安定供給の現状と課題」社団法人日本アイソトープ協会　がん医療の今 No.45 2010721 (2010) .

[5] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (adopted 1965) in :ICRP Publication 9, Pergamon press, (1966) .

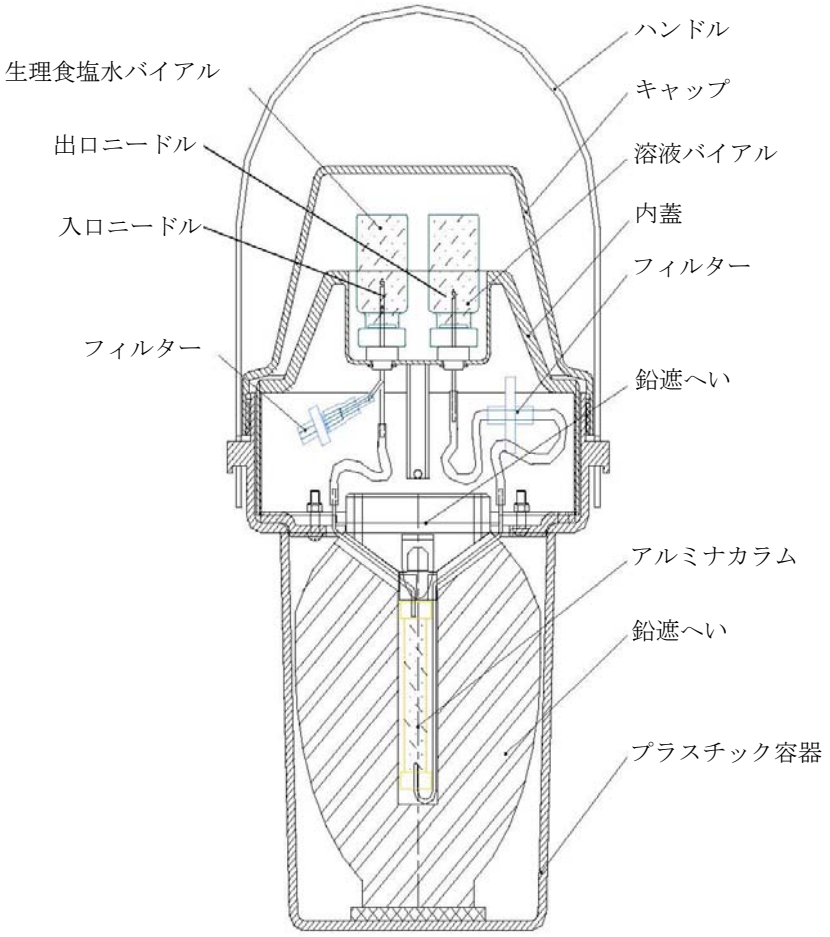

Fig. 2-1 GENTECの断面図

Fig. 2-2 GENTECの外観写真

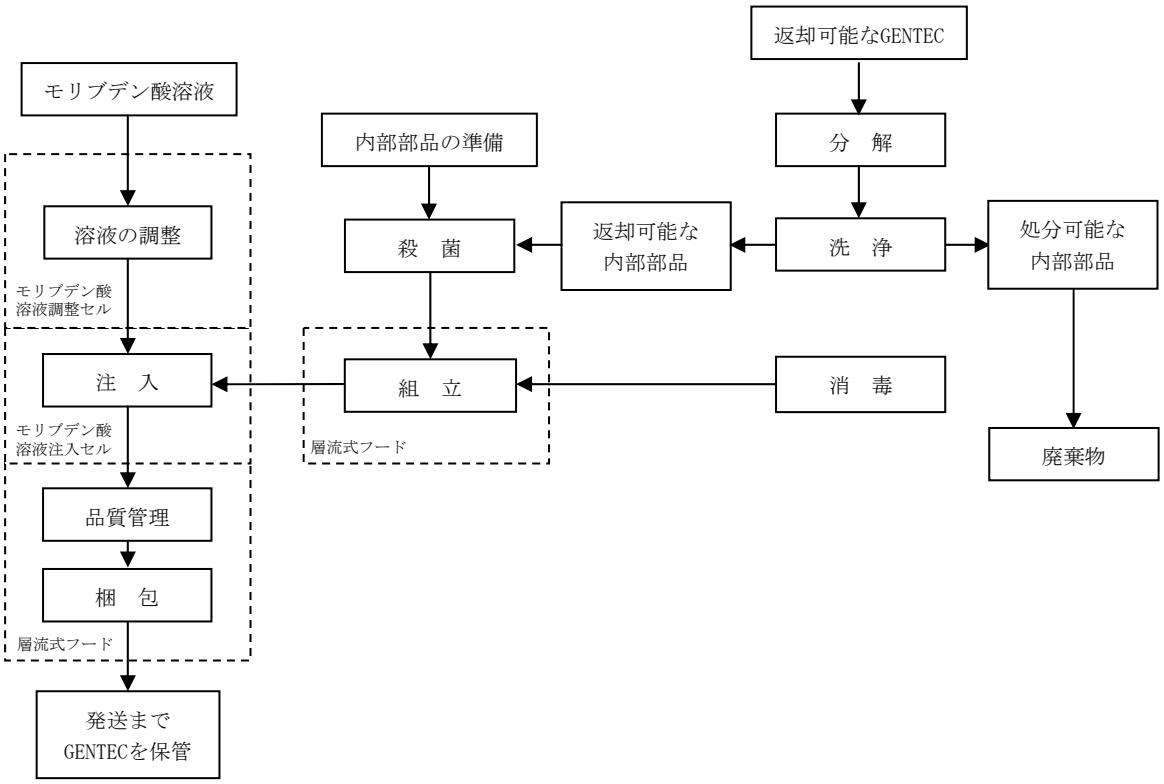

Fig.3-1 GENTEC製造プロセスのフロー

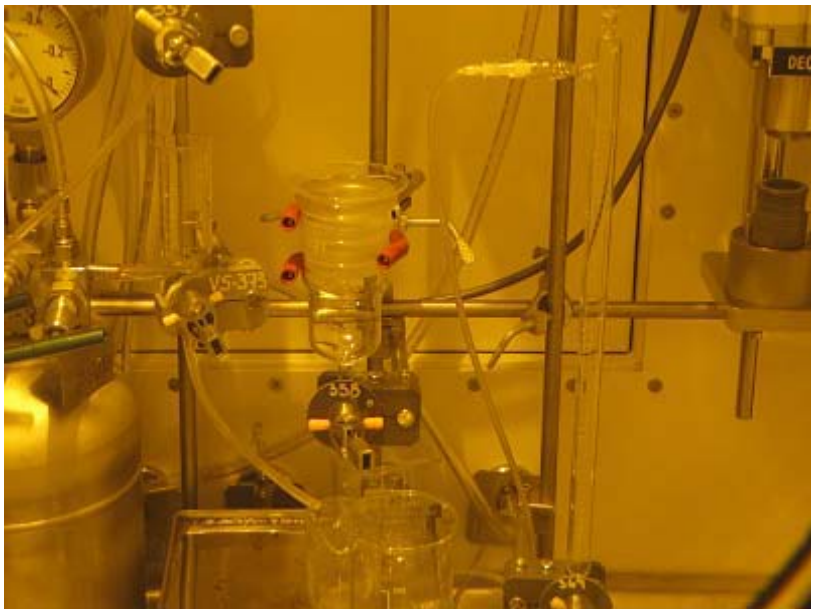

Fig. 3-2 モリブデン酸溶液調整用ホットセル

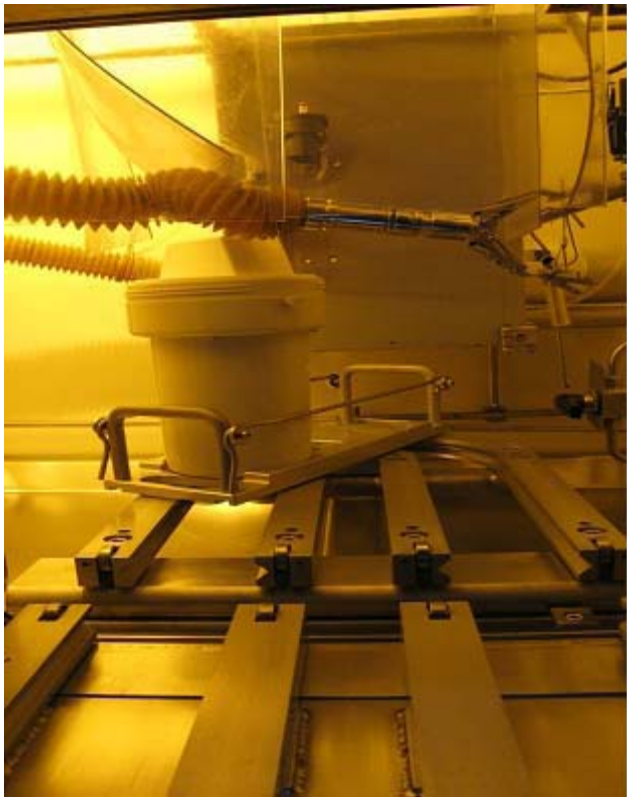

Fig. 3-3 モリブデン酸溶液注入用ホットセル

Fig.3-4 層流式フード内部（注入用セルとの連結部）

Fig.4-1 モリブデン酸溶液注入用ホットセル（正面）

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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

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

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	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]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	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
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，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	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
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)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
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	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

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

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	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	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(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	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
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=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	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）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています