

低濃縮ウラン (LEU) からの ^{99}Mo 製造プロセスに関する調査

Survey of LEU Based ^{99}Mo Production 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 Kunihiro TSUCHIYA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

March 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

低濃縮ウラン(LEU)からの ^{99}Mo 製造プロセスに関する調査

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1月7日 受理)

テクネチウム-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) 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。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 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。

世界的に ^{99}Mo の需要が高まる中、最近になって ^{99}Mo の供給不足が懸念されており、とりわけ ^{99}Mo を製造しているカナダ等における原子炉の停止による同位体製造に係わる運転条件の低下、高濃縮ウラン (HEU) ターゲットの入手困難が懸念事項となっている。

この課題解決の一助として、HEUを用いず低濃縮ウラン (LEU) を用いる ^{99}Mo 製造が行われている。INVAP社は、LEUを10年前から ^{99}Mo 製造施設へ供給している。LEUによる ^{99}Mo 製造プロセスであり、アルゼンチン原子力委員会 (CNEA) が開発したものである。

本報告書は、INVAP社と協力して、LEU を原子炉で照射し核分裂 (n, f) 法を用いた ^{99}Mo 製造方法について調査したものである。

Survey of LEU Based ^{99}Mo Production Process

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

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

(Received January 7, 2011)

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 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 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 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.

Recently, worldwide demand of ^{99}Mo became rises. However the availability and supply of ^{99}Mo for the manufacturing of generators has been a matter of concern. Concern arose from several factors including, amongst others, the shutdown of some nuclear reactors at Canada(NRU, etc.), uncertainty of reliable operating condition for radioisotope production and difficulties in the availability of highly enriched ^{235}U (HEU) target material used in the majority of the production facilities.

As countermeasure for this issue, the HEU is not used but ^{99}Mo production from Low enriched ^{235}U (LEU) is performed. This production process was developed in Argentina by the Argentine Atomic Energy Commission (CNEA). In the last ten years, INVAP has been working in the supply of ^{99}Mo production facilities using LEU.

This report provides descriptions for the detail technical aspects related to a ^{99}Mo production system using irradiated LEU targets.

Keywords: ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, Low Enriched ^{235}U (LEU), (n,f) Method, Radiopharmaceutical, Nuclear Medicine

* INVAP S.E.

目 次

1. はじめに	1
2. ^{99}Mo 製造工程	1
2.1 ターゲットの照射	2
2.2 照射済ターゲットの輸送	2
2.3 ^{99}Mo の製造	2
2.4 ^{99}Mo の品質管理	3
2.5 ^{99}Mo の出荷	3
3. ^{99}Mo 製造工程における留意点	4
3.1 照射済ターゲットの溶解	4
3.2 ガス処理	4
3.3 溶解液のろ過	4
3.4 強塩基性陰イオン交換樹脂を用いた精製	4
3.5 Moの錯イオン交換分離での精製	5
3.6 無機吸着剤を用いた精製	5
3.7 最終コンディショニング	5
4. ^{99}Mo 製造プロセスから発生する放射性廃棄物	5
4.1 液体廃棄物	5
4.2 気体廃棄物	6
4.3 固体廃棄物	6
5. プラント施設	6
5.1 建屋	7
5.2 ホットセル	8
5.3 放射性物質の移送装置	8
5.4 ^{99}Mo 製造プロセスシステム	8
5.5 換気システム	9
5.6 放射線防護システム	10
5.7 ウランターゲットの準備及び管理室	10
5.8 その他の補助システム	11
6. ^{99}Mo 製造の実施	11
6.1 ^{99}Mo 製造管理	11
6.2 施設に対する安全確保と審査	11
6.3 機器の設置及び試運転	11
6.4 訓練	13
6.5 製品の認定	13
7. 結言	14
謝 辞	14
参考文献	14
付録1 ^{131}I の製造	26

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of ⁹⁹ Mo production	1
2.1 Target irradiation	2
2.2 Target transportation	2
2.3 ⁹⁹ Mo production	2
2.4 ⁹⁹ Mo quality control	3
2.5 ⁹⁹ Mo shipment	3
3. Description of the ⁹⁹ Mo production process	4
3.1 Target dissolution	4
3.2 Gas treatment	4
3.3 Filtering	4
3.4 Purification with strong anionic exchange resin	4
3.5 Purification with Mo complex ion exchange separation	5
3.6 Purification with inorganic sorbent	5
3.7 Final conditioning	5
4. Radioactive waste from the ⁹⁹ Mo process	5
4.1 Liquid waste	5
4.2 Gaseous waste	6
4.3 Solid waste	6
5. Plant facilities	6
5.1 Building	7
5.2 Hot cells	8
5.3 Radioactive material transfer equipment	8
5.4 ⁹⁹ Mo production process system	8
5.5 Ventilation system	9
5.6 Radiation protection system	10
5.7 Target preparation and control laboratories	10
5.8 Auxiliary and other services	11
6. Project implementation	11
6.1 ⁹⁹ Mo production project management	11
6.2 Safety review for plant facilities	11
6.3 Installation of equipment and trial run	11
6.4 Training	13
6.5 Product certification	13
7. Conclusion	14
Acknowledgements	14
References	14
Appendix 1: ¹³¹ I Production	26

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。

放射性診断薬である^{99m}Tc「テクネチウム製剤」は前立腺ガンや骨ガンの転移、アルツハイマー病の検査などに使われる。注射で体内に入れた薬から出る微量の放射線を画像で写し出し、体内の様子を調べるものであるが、半減期が短く、放射エネルギーも低い^{99m}Tcは放射性物質を使う検査の医療診断薬として80%以上を占めている^[3]。^{99m}Tcはその親核種である⁹⁹Moが唯一の原料であり、⁹⁹Moはウランを核分裂させて得る核分裂法「以下（n, f）法という。」、天然に存在している⁹⁸Moを原子炉で中性子を照射して得る中性子放射化法「以下（n, γ）法という。」がある。また、原子炉を用いず加速器で製造する方法も検討されている^[4]。

現在、⁹⁹Moの生産は数ヶ国に限られている。特に世界のシェアの約40%^[3]を占めるカナダの原子炉が2007年や2009年にトラブルで停止した際は、世界的に不足問題が起きている^[5,6]。また、半減期が約66時間で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空輸が止まったことによる影響が出たことも記憶に新しい^[7]。

こうした⁹⁹Mo不足の懸念への対応として国内生産の要望^[8]もあり、再稼働後のJMTRを利用して⁹⁹Moの国産化の検討を進めている。JMTRで検討を進めている（n, γ）法での製造については、照射後の⁹⁹Moの抽出などの実験や検証が必要で、今後の更なる実践的な検討が必要不可欠となっている。

一方、世界的に見れば、現在の⁹⁹Mo製造は高濃縮ウラン（HEU）を使った（n, f）法で行われているが、HEUは核拡散防止条約によって国際的な輸出入が厳しく制限されており、国際原子力機関（IAEA）では、今後新たに稼働を予定する原子炉においては、低濃縮ウラン（LEU）を使用した製造しか認めないとしている。LEUでは、天然の²³⁸Uの存在比が多くなることからHEUに比べ²³⁸Puの生成が問題となり、放射性廃棄物の量を抑えて⁹⁹Moを効率良く取り出す製造技術の確立が必要である。さらに、これら廃棄物の問題について、制度や枠組みを整理・構築することが求められる。

本報告書は、LEU燃料からの⁹⁹Mo製造における課題の一つである製造技術についてまとめたものであり、（n, f）法によるLEUから、⁹⁹Moを製造する際のプロセス技術について紹介するものである。

2. ⁹⁹Mo製造工程

原子炉内に装荷したLEU のミニプレート照射することによって⁹⁹Moが製造される。その製造から出荷に至る主な製造プロセスは以下のとおりである。

- (1) LEUミニプレートの照射
- (2) 照射済LEUミニプレートの輸送
- (3) ^{99}Mo の製造
- (4) ^{99}Mo の品質管理
- (5) ^{99}Mo の出荷

^{99}Mo は使用される時期を考慮した放射能の単位に基づいて販売される。時間の調整は放射能の減衰があるためである。 ^{99}Mo の製造者は、 ^{99}Mo の精製施設を出た6日後の出荷物の ^{99}Mo 放射能(キュリー)に合わせて販売価格を調整する。この量は6デイズ・キュリーズと呼ばれる。Fig. 2-1に 6 デイズ・キュリーズの概念を示す。

2.1 ターゲットの照射

ターゲット (LEU ミニプレート：ウラン・アルミニウム) を原子炉で照射することでターゲットのウラン-235が熱中性子により核分裂を起こし、核分裂生成物の一つである ^{99}Mo が製造される。Fig. 2-2にターゲットになるLEU ミニプレートを示す。ターゲットは平らなミニプレートで、原子炉内でプレートホルダーに保持され、表面を冷却水が通過できるよう配置される。各プレートは心材にウランアルミナイド、それを設置するアルミニウム側板で構成される。ターゲットの設計は原子炉及び、その特性によって決定される。プレートの配列形状の違いは、中性子束密度に影響を与える。また、各施設で使用される中性子束密度は約 $8 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 、照射時間は100～170 時間、冷却は10～20 時間の幅がある。

2.2 照射済ターゲットの輸送

原子炉のプールでの冷却期間が終わると、ターゲットは輸送キャスク (鉛遮へい容器) に装填し、製造ホットセルに移送される。ターゲットの輸送キャスクへの装填は水中またはホットセル内で行われる。輸送キャスクの設計には、ターゲットのミニプレートの数と特性、放射エネルギー及びホットセルへの接続が考慮される。Fig. 2-3に原子炉と移送ホットセルを示す。

2.3 ^{99}Mo の製造

調査した ^{99}Mo 製造技術は、アルゼンチン原子力委員会 (CNEA) がアルゼンチンのLEU燃料から ^{99}Mo を製造するために開発され、INVAP 社がオーストラリア原子力科学技術機構 (ANSTO) に対して ^{99}Mo の製造を確立したものであり、オーストラリア治療製品局 (TGA) と米国食品医薬品局 (FDA) の承認を受けた製品である。本 ^{99}Mo の製造プロセスは、多様な作業に対応できる柔軟性のある製造を実現し、製造の保証に必要な機器を含んでいる。本施設は国際保障措置基準に適合し、国際仕様に適合するよう高品質の製品を製造するよう設計される。本製造プロセスは、Table. 2-1の仕様を満たす精製施設を出た6日後の放射能が600Ciの ^{99}Mo を含むモリブデン酸ナトリウム水溶液を毎週2バッチで製造することを目指している。また、製造プロセスは、最終製品の純度を満足する製品を得るまで、複数のモリブデン抽出及び精製作業で構成される。製造プロセスの時間は約24時間で、通常、化学的収率は60%である。Fig. 2-4に ^{99}Mo 製造

プロセスフローを示す。全製造段階、ターゲット溶解、モリブデン抽出及び精製作業は、ろ過の工程を除いて負圧保持させた施設内で行われる。製造プロセス装置は製造用ホットセル内に設置されている。多様な作業や要件を考慮して、精製作業は以下のa)～d)のとおり作業に合わせ異なるホットセルで行われる。

- a) Mo 溶解
 - ・照射済ターゲットの投入
 - ・ターゲットの溶解
 - ・ウランのろ過
 - ・強塩基性陰イオン交換樹脂での精製
 - ・中レベル放射性液体廃棄物の貯蔵
 - ・ウランケーキのろ過貯蔵
 - ・カラムでの貯蔵
- b) Mo精製及び最終処理
 - ・錯イオンのイオン交換分離での精製
 - ・無機吸着剤での精製
 - ・最終処理
 - ・低レベル放射性液体廃棄物の貯蔵
 - ・カラムでの貯蔵
- c) 最終コンディショニング
 - ・最終処理
 - ・低レベル放射性液体廃棄物の貯蔵
- d) ガスの処理
 - ・水素変換器及び、水凝縮
 - ・ガスの管理

2.4 ⁹⁹Moの品質管理

製造後、製品が品質保証上仕様を満たしているかどうかを確認するために、化学的及び放射化学的分析が行われる。以下のa)～e)の測定機器が使用される。

- a) ⁹⁹Moの放射能測定
- b) γ -スペクトロメトリ
- c) β -液体シンチレーション
- d) α -計測及び、/または α/β -液体シンチレーション
- e) ラジオクロマトグラフィー

2.5 ⁹⁹Moの出荷

⁹⁹Mo用コンテナは国際規定に従いBU型輸送容器を用いて行われる。BU型輸送容器をFig. 2-5に示す。

3. ^{99}Mo 製造工程における留意点

3.1 照射済ターゲットの溶解

照射済LEU ミニプレートの溶解は、ステンレス鋼製溶解槽の中にある水酸化ナトリウム溶液にLEU ミニプレートを入れて行う。その溶解工程として、まず、真空状態で水酸化ナトリウム溶液をバッファタンクから溶解槽に注入する。次に、照射済LEU ミニプレートは専用の入口から装荷する。溶解槽を閉止し空気を注入する。溶解槽に所定の流量で窒素を循環させ、専用システムで溶解槽を加熱することによって、ターゲットの溶解反応が始まる。溶解槽をFig. 3-1に示す。溶解時間は約2時間を必要とし、ウラン酸化物、二ウラン酸ナトリウム、アルミン酸塩等が発生する。溶解槽内にある照射済LEU ミニプレートは臨界の観点から安全管理するため、ウラン重量が管理されている。

3.2 ガス処理

溶解から発生するヨウ素や臭素(核分裂生成物)、希ガス、水素の一部は溶解槽から排出される。溶解槽はステンレス鋼製の冷却器に接続されている。酸化銅ワイヤを内蔵した水素変換器を通して400℃の水素ガスが水に変換される。一方、この酸化反応で水素変換器中の酸化銅は銅に還元されている。このため、溶解工程が終了した後、還元した銅は空気との加熱反応によって再び酸化し、酸化銅として再生され、水素変換器中に再装荷することにより、再利用される。

水素変換によって生成した気体廃棄物は適正に処分される。例えば、水は水冷式冷却器を通過する気体の流れによって凝縮され、容器に回収され、貯蔵タンクに送られる。一方、希ガスやヨウ素を排出する排気口の出口には核分裂生成ガス補助トラップ(AFGT)が使用されている。さらに、希ガス、ヨウ素等のガスは崩壊のために、通常6週間タンク内で貯蔵される。その後、タンク内を真空ポンプで排気し、換気システムのフィルタを通してセル内に排出される。

3.3 溶解液のろ過

照射済LEU ミニプレートの溶解工程で発生するウラン、ルテニウム、ジルコニウム、ニオブ、ランタニド等を含む沈殿物は、ろ過によって溶液から分離する。ろ過した溶液はフィルタを通過して溶解槽から専用ステンレス鋼製回収タンクに移送される。ろ過材を覆うろ過体の材料はステンレス鋼で、ろ過材は焼結ステンレス鋼である。核分裂生成物の全インベントリの約95%を含む酸化ウランと二ウラン酸ナトリウムはフィルタに吸着される。フィルタをFig. 3-2に示す。1バッチ毎に新規フィルタを使用し、その後保管と崩壊のための管理と識別を可能にする専用ラックに数ヶ月間保管する。なお、保管容量は1年分の製造量である。

3.4 強塩基性陰イオン交換樹脂を用いた精製

^{99}Mo 、可溶性アルミン酸塩及び塩基性の媒体中で可溶性の核分裂生成物を含むろ液は、陰イオン交換樹脂で精製される。モリブデンは樹脂に保持され、Cs、Zr、Nb、Ru、Rh、Ba、La

及びTe は分離される。この作業では何本かのカラムを使用する。ろ液は真空吸引にてイオン交換カラムを通過させる。カラムから発生する液体は中レベル放射性廃棄物で、このための専用ステンレス鋼製容器のある第1ホットセルに集められる。カラムに保持されるモリブデンは、一定の流量のアルカリ溶液により溶出させる。なお、溶出中にある⁹⁹Moを含む溶液はプラスチック製容器に回収される。各カラムは1度だけ使用され、使用済カラムは中レベル放射性固体廃棄物になる。

3.5 Moの錯イオン交換分離での精製

精製段階では、陰イオン交換樹脂の装荷と溶出によってモリブデンを精製する。モリブデンをカラムに吸着させるために、前段階からの溶液に錯化溶液を加え、モリブデン錯体を形成させる。錯化溶液は真空吸引によってオペレーションコリダーから容器に移される。このように調整した溶液は、あらかじめ空にした容器に接続し、真空吸引によりカラムに注入される。また、容器に回収されたカラムに吸着しない核種を含む溶液は低レベル放射性廃棄物になる。なお、錯体は一定の流量のアルカリ溶液で溶出する。各カラムは1度だけ使用され、使用済カラムは低レベル放射性廃棄物になる。

3.6 無機吸着剤を用いた精製

ここでの溶液は真空によりカラムを通過し、あらかじめ空にした容器に入る。容器に回収された液体は前段階(Moの錯イオン交換分離)の液体に混ざり、低レベル放射性液体廃棄物になる。カラムは水酸化アンモニウムで溶出し、セル内部に置かれた容器で回収する。Fig. 3-3にモリブデン精製セルを示す。使用済カラムは低レベル放射性廃棄物になる。

3.7 最終コンディショニング

ここでの作業工程は蒸発、希釈、ろ過及び放射能測定で構成され、テクネチウムジェネレータに適したモリブデン溶液が得られる。

4. ⁹⁹Mo製造プロセスから発生する放射性廃棄物

⁹⁹Mo製造では、液体、固体及び気体廃棄物が発生する。このため、製造プロセスにおいては、その貯蔵による放射能減衰のための機器が設置されている。各廃棄物別の装置について以下に説明する。なお、貯蔵による放射能減衰のための機器はセル内での崩壊期間を最短化するように設計されている。

4.1 液体廃棄物

⁹⁹Mo製造にあたっては、中低レベル放射性廃棄物が発生する。最初の精製段階でバッチ当たり約8ℓの中レベル放射性廃棄物が発生する。これは、Ba、Cd、Sr、Eu、Zr、Ru及びRhを含む可溶性アルミン酸塩のアルカリ溶液である。なお、強塩基性陰イオン交換樹脂カラムの装

填から発生する中レベル放射性廃棄物は、ホットセルの下にある貯蔵タンクに貯蔵される。この貯蔵タンクの廃棄物貯蔵能力は約1年である。貯蔵容量が満たされると、中レベル放射性廃棄物は廃棄物管理ホットセル内で移送容器に移し、廃棄物処理施設へ運搬される。最後の精製処理工程では、1バッチ当たり約100の低レベル放射性廃棄物が発生する。これは硫酸ナトリウム溶液であり、Nb、Rh、Ru、Te及びZrを含んでいる。また、低レベル放射性廃棄物はホットセルの下にある中レベル放射性廃棄物とは別の貯蔵タンクで貯蔵される。貯蔵容量が満たされる(約6ヶ月)と、低レベル放射性廃棄物は廃棄物管理ホットセル内で移送容器に移し、廃棄物処理施設へ運搬される。

4.2 気体廃棄物

^{99}Mo 製造で発生する主な放射性ガスは、希ガス(キセノン他)とヨウ素の2種類である。ターゲットの溶解中に発生した水素は、水素変換器で処理され水に変換されるため、セル内部での貯蔵のリスクが減る。溶解槽から排出される水素は、希ガスと少量のヨウ素を含んでいる。このガスを貯蔵タンクに貯蔵することで、希ガスとヨウ素の放射能を減衰させる。もう一つの放射性ガス源は精製プロセス中の機器からの放出と、セルに貯蔵された廃棄物からの崩壊を通じて発生するガスである。換気システムの専用フィルタは、施設設計に適合するように、ヨウ素の排出を減らし、希ガスを崩壊させる。放出される気体量はホットセルの換気システムの設計によって決定される。なお、溶解から発生する放射性ガスはホットセルの下に設置されている貯蔵タンクで貯蔵される。保管容量が満たされる(約6週)と、最長崩壊時間のタンクが専用真空ポンプで空にされ、内容物はホットセルの換気システムに送られる。

4.3 固体廃棄物

使用済精製カラムには放射性核種が含まれているため、カラムは放射性廃棄物になる。各強塩基性陰イオン交換樹脂の各カラムには Nb、Rh、Ru、Sb、Te及びZrが含まれる。各ホットセルには精製カラムの崩壊用貯蔵ラックが設置されている。崩壊後、精製段階で用いたカラムは低レベル固体廃棄物になる。発生するその他の固体廃棄物は、ホース、フィルタ、紙、プロセス機器、その他の補助的品目である。

5. プラント施設

プラント施設は、項目毎に主要設備を含めたものとなる。プラント施設は、以下a)～i)の設計基準を考慮に入れている。

- a) 想定する作業による区域の物理的分離
- b) 類似する機能を持つプロセス区域の集合
- c) 以下の放射線障害予防規程に従う区画の実施
 - ・ 同様の放射線リスクの区域を分ける。
 - ・ 放射線区域を通る循環を最小化する。

- ・ 汚染の拡大を防止するための管理地点を確立する。
- ・ 運転員の放射線被ばくを管理する。
- d) 当該区域の出入地点での気圧調整の実施
- e) 運転員と物質(試薬)の進入地点の区別
- f) 安全システムの物理的分離
- g) 異なる区域からの適切な避難経路の確保
- h) 施設の効率的運転のための広く快適な作業区域の提供
- i) 運転員と装置の移送が容易にできる動線の確保(廊下、通路、ロビーなど)

また、放射線防護の要件を満たすために、遮へい中に設置する必要がある構成機器は「遮へい体を最適化するための「分類基準」と「使用中の装置が放射線場で作業を継続する間に待機中の機器の介入を可能にするための機器の「分離基準」」の二つの基準を満足させる必要がある。主要設備について、以下に述べる。

5.1 建屋

Mo製造建屋全体の面積は約1400m²で、全ての設備が建屋内部に置かれ、運転及び安全目標の達成に必要な作業を実施するための十分な部屋がある。建屋は2階建てであり、1階が⁹⁹Mo製造区域、実験室、事業所、地下がセル換気システムと液体廃棄物管理システムのタンクに關係する活性炭ろ過装置などの放射性廃棄物管理区域である。

建屋は、類似する放射線防護レベルの部屋を含む区域に分け、同様の放射線リスクになるよう分類して施設を循環する運転員の放射線被ばくを最小化し、適切な管理を実現している。放射線防護の観点から区域レベルを以下のa) ～c)の3区分としている。

a) 監視区域：

この区域は放射性物質には関係ない。この区域としては施設の測定室及び、警備システム、倉庫、補助システム、配電、更衣室が当たる。

b) 管理区域 I：

この区域へのアクセスは、放射線や放射性物質の被ばくから発生する過度のリスクに対して個人を防護するために法律により制限されている。この区域には、特別な手順を必要としない場合でも放射線条件を監督下に置かなければならない作業場がある。この区域には、主にラボ、換気の取り外し、製品用コンテナの受け取り・発送室、放射線防護及び、工作室がある。ラボのグループには、放射能測定、製造プロセスで使用する溶液の準備、セルからのサンプルの受け取りと準備に使用する個々の部屋がある。梱包・配送室には、最終製品を受け取り、発送のためコンテナに移すための遮へいされた施設がある。

c) 管理区域 II：

この区域へのアクセスは、放射線や放射性物質の被ばくから発生する過度のリスクに対して個人を防護するために法律により制限されている。

この区域には、通常運転条件下で放射線被ばくを管理し、放射線汚染の拡大を防止するために作業員に規定の手順に従うことが要求される作業場がある。

この区域には、製造セル、廃棄物管理、換気装置及び工作室がある。さらに、セルの換気に関する活性炭ろ過装置や地下レベルに計画する液体廃棄物管理用貯蔵タンクがある。

5.2 ホットセル

製造プロセスは、放射性物質の生体遮へいと閉じ込めを行うコンクリート/鉛のホットセル内で行われる。遮へいの内部を覆うステンレス鋼ライニングは α 線、 β 線及び γ 線放射性物質を伴う作業に対して適切で安全な環境を提供する気密を形成し、外部環境への放出を防止する。各ホットセルでは10～30cm鉛の遮へいを使用している。Fig. 5-1にコンクリート/鉛のホットセルを示す。 ^{99}Mo の製造ラインではホットセル4室を使用し、 ^{131}I の製造にはホットセル1室を使用している。さらに、水管理にホットセル1室を使用している。

製造ラインでは良好な製造性を有すると共に、国際放射線防護基準に従っており、国際薬事法に従う高品質な製品を提供している。

ホットセルには、サンプルを操作し、プロセスを運転するためのマスター/スレーブユニットや、プロセス業務、計測・制御及び電力供給用の多数の入口を備える必要がある。ホットセルの内側は作業テーブルによって分かれている。上部は運転に使用するプロセス機器に使用される。下部は液体、気体及び固体廃棄物の一時貯蔵タンクが配置されている。ホットセルの主な構成機器は以下のa)～f)のとおりである。Fig. 5-2にホットセルの断面図を示す。

- a) 構造物及び、遮へい
- b) 気密ライニング
- c) 放射性物質のアクセス、通路、移送
- d) マスター/スレーブマニピュレータ
- e) 視認装置
- f) 電気照明システム

5.3 放射性物質の移送装置

放射性物質の移送作業は、ホットセルに連結したCTTA(放射性物質の移送・輸送コンテナ：Fig. 5-3)とSATE(固体放射性廃棄物移送要素：Fig. 5-4)と呼ばれるシステムによって行われる。これらシステムが気密状態での移送を実現し、遮へいの継続性を維持する。異なる2つのシステムを使用することで所要の運転条件を満たし、ホットセル内の液体廃棄物及び気体廃棄物に関する貯蔵容器の位置等の配置を適切に考慮することができる。

5.4 ^{99}Mo 製造プロセスシステム

^{99}Mo 製造プロセスに係る各構成機器の設計は、セル内で実施するすべての作業と廃棄物の低減を考慮するとともに、各構成機器（特に重要機器）の保守及び交換を簡素化にすることを重視している。これらの構成機器の設計及び製作は、当該国際標準(ASME等)に準拠してい

る。 ^{99}Mo 製造プロセスに係る機器の材料は、放射能特性、取り扱う放射エネルギー、製品を得るための条件を満足したものが選定される。

^{99}Mo 製造プロセスの設計及び手順は、汚染と放射能の拡大を最小化することを目指している。プロセス上、溶液に接する機器はステンレス鋼、ポリエチレン、石英もしくはガラス製である。溶液はステンレス鋼製配管やPVCホースを用いて移送し、機器の接続にはクイックコネクタやホースコネクタを使用している。セル内の機器は、空間を最大限に取り、手動操作のリスクを最小にするよう設置される。タンクは廃棄物の一時貯蔵に使用される。Fig. 5-5にタンクの収納風景を示す。

専用制御システム(PLC)は冷却加熱システム、ポンプ、弁、制御装置を管理し管理データを継続的に記録している。各セルの前面に配置される制御パネルには制御システムと状態表示装置がある。専用制御システム(PLC)画面例をFig. 5-6に示す。このシステムの管理データのパラメータは以下のa)～k)のとおりである。

- a) 溶解槽の温度管理
- b) 溶解槽の圧力測定
- c) 水素変換器の温度管理
- d) 窒素スワイプガスの流量管理
- e) 水素変換器の再生空気流量管理
- f) 真空ポンプの動作
- g) 空気ポンプの動作
- h) 攪拌器の動作
- i) 加熱器の動作
- j) タンクの圧力管理
- k) 温度管理

^{99}Mo 製造プロセスには以下のa)～e)の補助サービスが装備されている。

- a) 真空：このシステムには液体の輸送及びろ過を目的とする真空ポンプとバッファタンクが含まれる。
- b) 冷却水：冷却水は溶解槽の冷却、リフラックスカラム及び、水コンデンサに使用する。
- c) 圧縮空気：空気圧装置にはオイルフリーの圧縮空気を使用する。
- d) 窒素：スワイプとパージに使用する。窒素シリンダのバッテリーと弁が使用される。
- e) 電気：すべての電気部品は制御パネルの中にスイッチがある。

5.5 換気システム

換気システムは「監督区域の換気システム」、「管理区域の換気システム」及び「製造セルの換気システム」から構成される。監督区域の換気システムは、大気に対して区域を過圧状態に保ち、室内の空気を快適な状態に維持する。

管理区域の換気システムは、大気に対して区域を減圧状態に保ち、連結区域間の空気の流れを放射線汚染が潜在的に大きい区域の方向に保つ。運転中このシステムは室内の空気を快

適な状態に保つ。排出した空気は排気筒を経由して放出する前にろ過される。管理区域の排気フィルタをFig. 5-7に示す。

製造セルには、所要回数の空気の入れ替えと周辺の部屋に対して負圧を維持するための専用換気システムが備わっている。セルに流入する空気はHEPAと活性炭ろ過装置でろ過される。排出される空気は、排気筒に到着する前にろ過(HEPAフィルタと活性炭ろ過装置)され、監視される。

5.6 放射線防護システム

放射線防護システムには、運転員と環境の放射線安全を保証するために必要な計器や手順が含まれる。さらに、放射線監視方針は詳細な放射線障害予防規程に従っている。システムの構成は以下のa) ～f)のとおりである。

a) エリアモニタシステム：

放射線放出の潜在性がある全区域の監視と調査を行うために、視覚警報や音声警報を備えている。Fig. 5-8にエリアモニタ検出器を示す。

b) 大気放出物監視システム：

プラント運転中の気体排出物を確認する。Fig. 5-9に大気放出物監視システムを示す。

c) 液体放出物監視システム：

液体放出物を放出できるかどうか決定するためにサンプルのオンライン分析を行う。

d) ハンドフットクロスモニタ：

潜在的汚染リスクのある区域を離れた運転員(手、足、衣服)を測定するために使用する β/γ 線表面汚染検出器

e) 全身表面汚染モニタ

潜在的汚染リスクのある区域を離れた運転員の身体の最終的汚染を測定し、検出するための表面汚染モニタ

f) 放射線防護用携帯装置：

個人線量計、ツールや品目の外部汚染を確認するための携帯検出器、空気サンプリング装置

5.7 ウランターゲットの準備及び管理室

施設には、製造する品目の品質管理を行うために必要な機器や技術が備わっている。放射化学及び化学管理は、施設のラボ室で行われる。Fig. 5-10にラボ室の設備を示す。一般的な機能は以下のa) ～c)のとおりである。

a) 放射線ケミカルフードやグローブボックスを備えた、サンプルの準備と化学管理のためのラボ。

b) 製造プロセスやラボで使用する溶液を準備するためのラボ。当該基準を満たし、ケミカルフードや関連機器を設置。

c) 放射能測定のための測定室。

5.8 その他の補助システム

施設を運転するために必要な補助システム及びサービスは以下が挙げられる。

- ・電気システム
- ・水システム
- ・圧縮空気システム
- ・物理的安全システム
- ・火災検出及び、消火システム
- ・情報伝達
- ・材料取扱い(橋形クレーン、巻き上げ手段、カート)

6. ⁹⁹Mo製造の実施

⁹⁹Mo製造の実施には「管理」、「基本設計」、「建設」、「試運転」、「訓練」及び「製品の認定」が行われるが、項目毎にそれぞれ以下に述べる。

6.1 ⁹⁹Mo製造管理

管理運転員の責務は、契約した⁹⁹Mo製造に関して、合意された予算、納期内で、所定の方法及び品質要件に適合し、必要なすべての措置をまとめることである。Fig. 6-1に組織図を示す。すべての⁹⁹Mo製造管理手順は品質保証マニュアルに定められている。この⁹⁹Mo製造は、環境法及び政策を順守した手順が全段階で適用される。例えば、調達と製造作業は、仕様及び品質要件の適合を保証するために管理される。品質管理と品質保証は、サイト内の組立作業、起動及び試運転前試験、さらには試運転中の技術支援の計画立案、調整及び管理を審査及び監査により行われている。

6.2 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設計される。基本設計の開発中に、予備的及び、最終設計審査(PDR&DFR)や統合調整部門の確認によって全体審査と詳細な審査が行われる。

6.3 機器の設置及び試運転

プラント施設の設備や機器の調達と設置は、品質保証手順に従って実施される。各設備及び機器の要件に従って、個別購入リスト、建設仕様、設置及び試験方法が決定される。これらの設備及び機器は、工場での予備試験を行った後、施設に設置される。

設備や機器の設置終了後、予備試験として、個別機器に対する動作確認試験とシステム(プラントシステムと補助システム)の統合確認試験が行われる。予備試験は、以下のa)～c)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 (^{99}Mo 製造プロセスシステム、換気システム及び放射線防護システム) 及び補助システムまたはその部品が設計通りに動作することを確認すること。
- 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。

プラントシステムと補助システムは、予備試験完了後にお互いのシステムが独立して作動するシステムであることが確認でき次第、運転可能になる。このシステムは、通信、配電、照明、接地、圧縮空気、排水、換気、運搬・巻き上げ、装置などである。試運転前の手順を経た後にこれらのシステムは運転可能になり、試運転の支援システムに含められる。したがって、予備試験は試運転を行うための前提条件になる。

試運転が始まると、プロセス、システム、施設全体の試験が行われる。試運転後、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)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) Mo 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。ホット試運転は放射能を次第に高めたターゲットを使用し、設計で想定する最大の放射能量で試験を終了する。試運転の目的は、主な安全系のシステムに対して正確な性能を示すこと、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、 ^{99}Mo 製造プロセスシステム、製造手順及び、補助施設を試験する。また、 Mo の製造に当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。なお、試運転の計画については、機器の設置後から製造試験の完了と契約に従うプラント性能の証明までの試運転作業を行うために必要な全ての作業に対して行う。

6.4 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る訓練を行い、試運転後の施設内の現場での訓練が最終になる。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

- ・ 運転への導入
- ・ 運転
- ・ 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。

6.5 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。設置認定、運転認定及び製品認定が要請される。通常、製品認定には少なくとも3度の製造を経ることが必要とされる。

7. 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。他方、本報告書のように他の製造方法についても調査を行い、 ^{99}Mo の製造に関し体系的にまとめ、データベース化することは更なる技術開発の一助に繋がる。

謝 辞

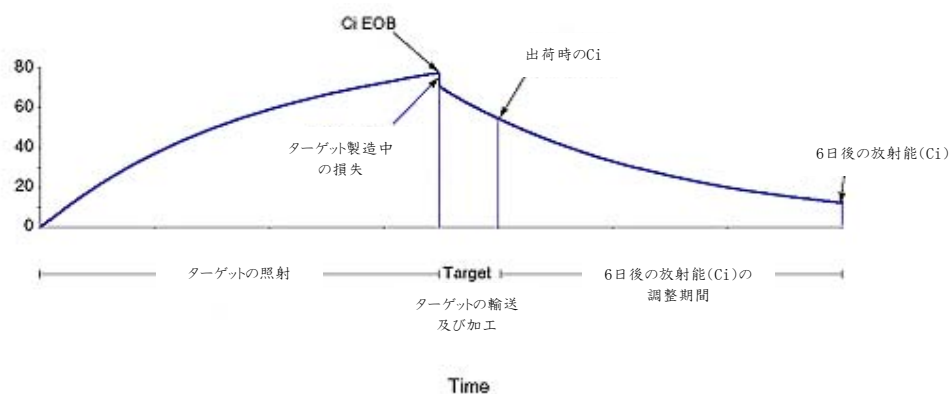
本報告書をまとめるにあたり、大洗研究開発センター 河村 弘副所長（照射試験炉センター長兼務）及び照射試験炉センター 石原正博副センター長及び原子炉施設管理部 技術管理課 堀 直彦課長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本調査にあたり、INVAP社のRuben MAZZI氏に有意義な情報提供及びご指導を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

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] Masahiro ISHIIHARA、Hiroshi KAWAMURA、Motoji NIIMI、"Refurbishment status and future program of Japan Materials Testing Reactor (JMTR) ", Proceedings of 12th International Group on Research Reactors (12th IGORR), 2009/10.
- [3] 源河次雄「世界のMo-99の供給現状と課題」第47回原子力委員会資料1-1号(2008. 11. 8).
- [4] プレス発表「我が国既存の施設の活用による核医学検査薬の安定的供給へ」独立行政法人 放射線医学総合研究所 (2010. 10. 29) .
- [5] 井戸達雄「第46回アイソトープ・放射線研究発表会」Isotope News 2009年11月号.
- [6] 「MAPLE炉の復活は困難とAECLが見解」日本原子力学会誌 Vol. 51, No11 (2009) .
- [7] 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) .
- [8] 提言「我が国における放射性同位元素の安定供給体制について」日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会 (2008) .

Table. 2-1 製造するモリブデンの仕様

	仕様
比放射能	$>10\text{Ci /mg Mo}$
放射性化学的純度	$^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ で $>95\%$
放射性核種純度	
^{131}I	$< 2 \times 10^{-4} \%$
^{103}Ru	$< 5 \times 10^{-3} \%$
$\text{Te}/^{132}\text{I}$	$< 2 \times 10^{-3} \%$
その他のガンマ線	$< 1 \times 10^{-2} \%$
$\Sigma \beta$	$< 6 \times 10^{-6} \%$
$\Sigma \alpha$	$< 5 \times 10^{-5} \%$



左から

- (1) 5日から7日のターゲット照射中の ^{99}Mo の蓄積と崩壊
- (2) 加工プラントへのターゲット出荷中の ^{99}Mo の崩壊
- (3) ターゲット加工中の ^{99}Mo の崩壊
- (4) 加工中に起こる ^{99}Mo の追加的損失(化学的損失)
- (5) 最後に、 ^{99}Mo の出荷後、処理センターに到着するまでの6日間における崩壊

Fig. 2-1 6 デイズ・キュリーズ概念

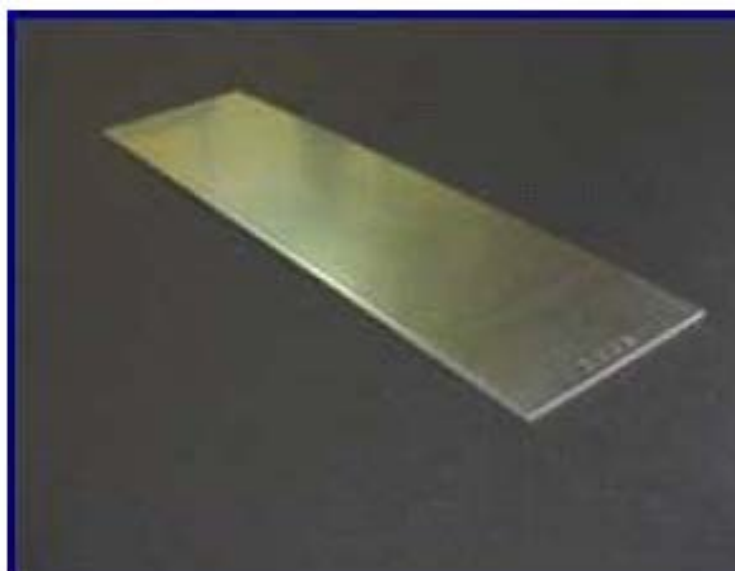


Fig. 2-2 LEUミニプレート

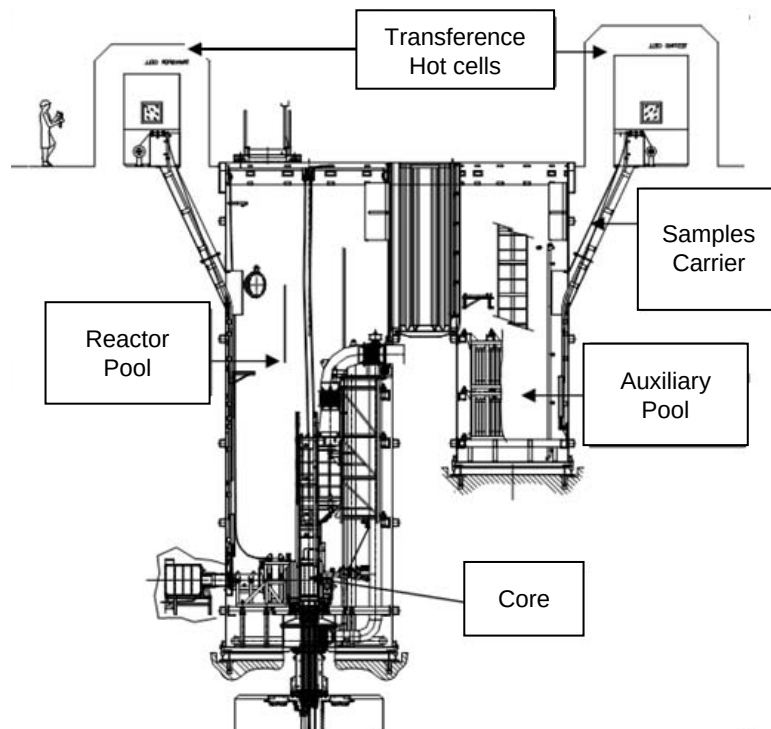


Fig. 2-3 原子炉と移送ホットセルの関係

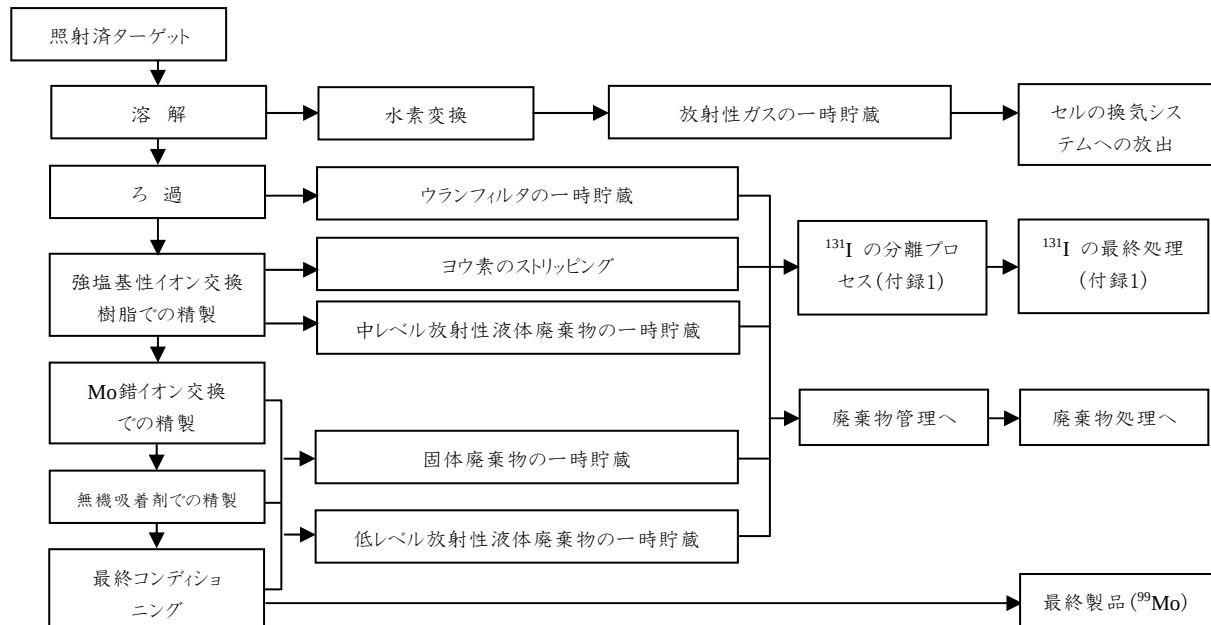
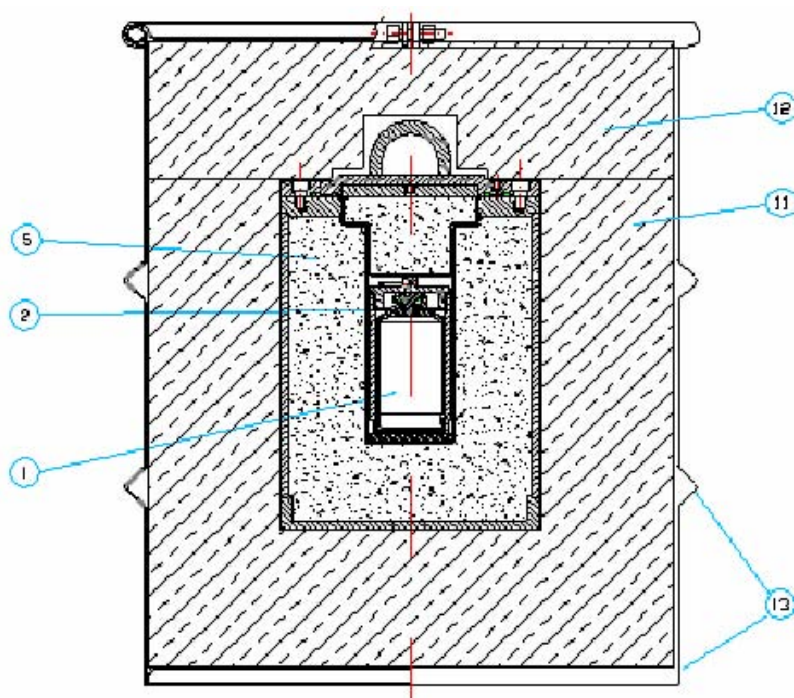


Fig. 2-4 ^{99}Mo の製造プロセス



- ①内部ステンレス鋼コンテナに装荷した⁹⁹Mo
- ②内部コンテナの二重コンテナ
- ⑤遮へい
- ⑪⑫支持コンテナ
- ⑬外部キャスク

Fig. 2-5 BU型輸送容器



Fig. 3-1 溶解槽



Fig. 3-2 フィルタ



Fig. 3-3 モリブデン精製セル



Fig. 5-1 コンクリート/鉛セル

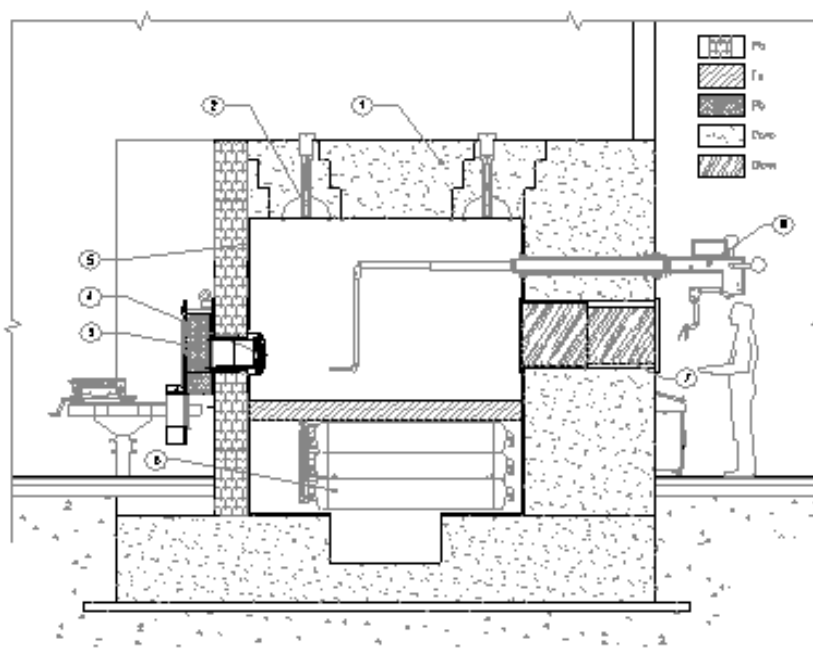


Fig. 5-2 ホットセルの断面図



Fig. 5-3 CTTA（放射性物質の移送・輸送コンテナ）



Fig. 5-4 SATE（固体放射性廃棄物移送要素）



Fig. 5-5 タンクを載荷したラック

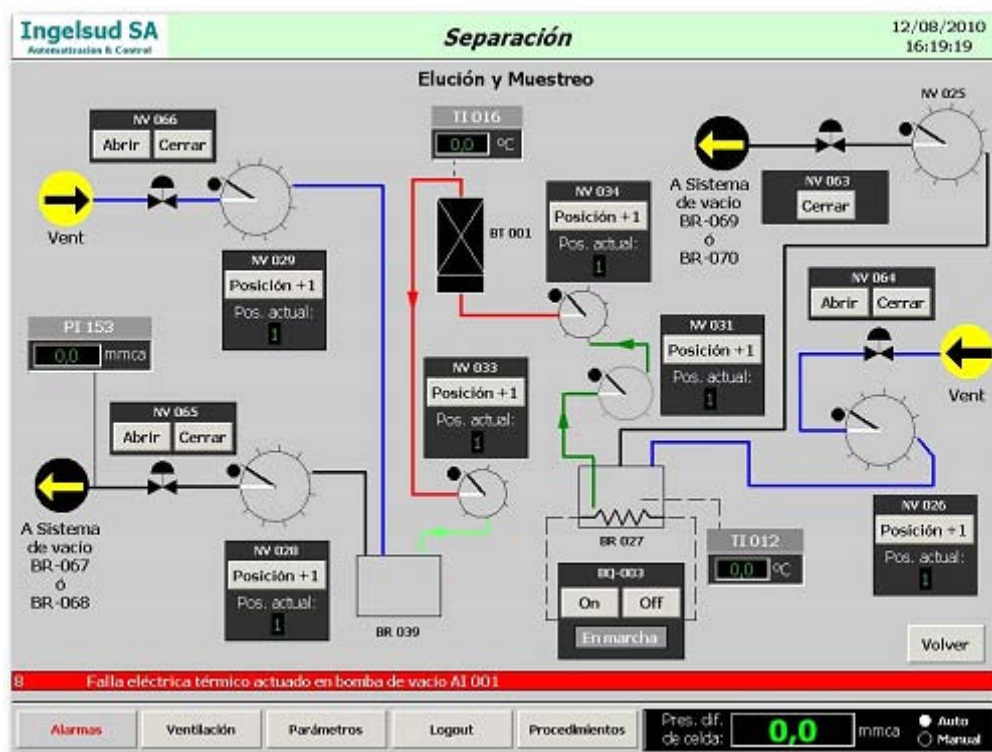


Fig. 5-6 専用制御システム (PLC) 画面例



Fig. 5-7 管理区域の排気フィルター



Fig. 5-8 エリアモニタ検出器



Fig. 5-9 大気放出監視システム



Fig. 5-10 管理ラボ室の設備

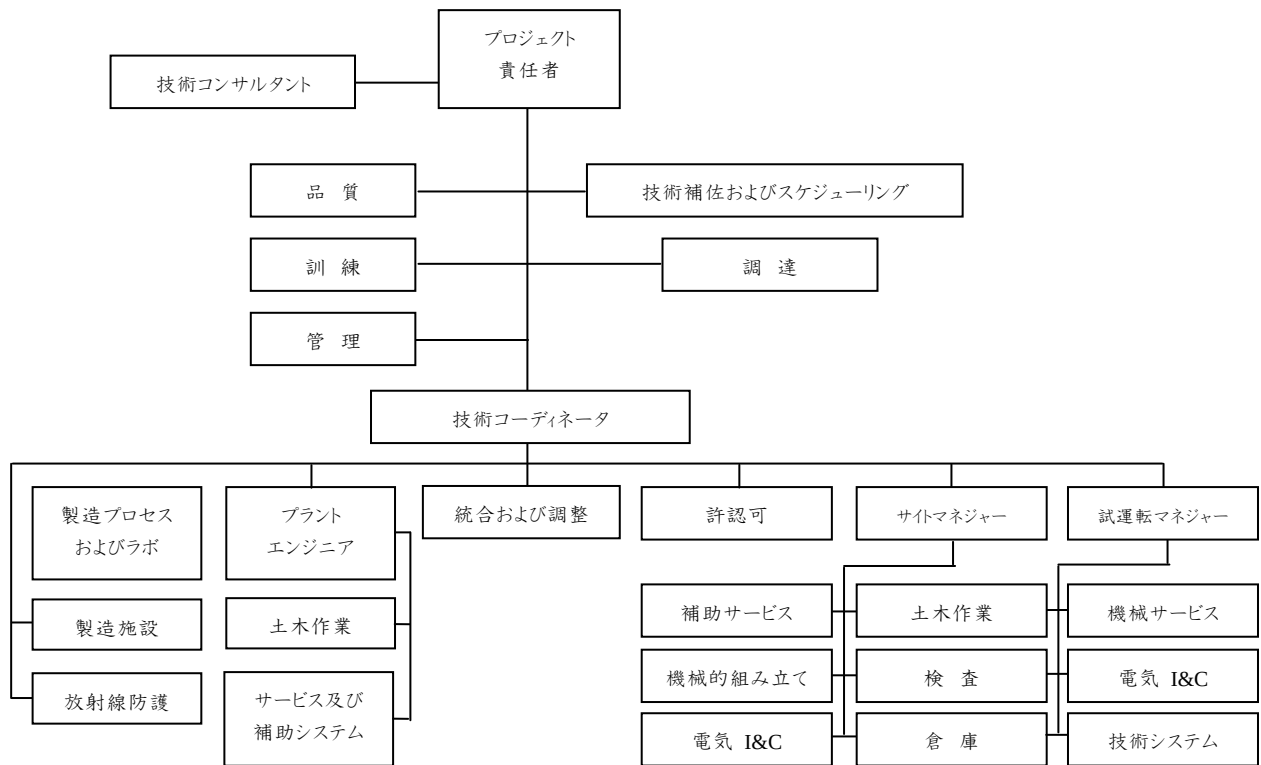
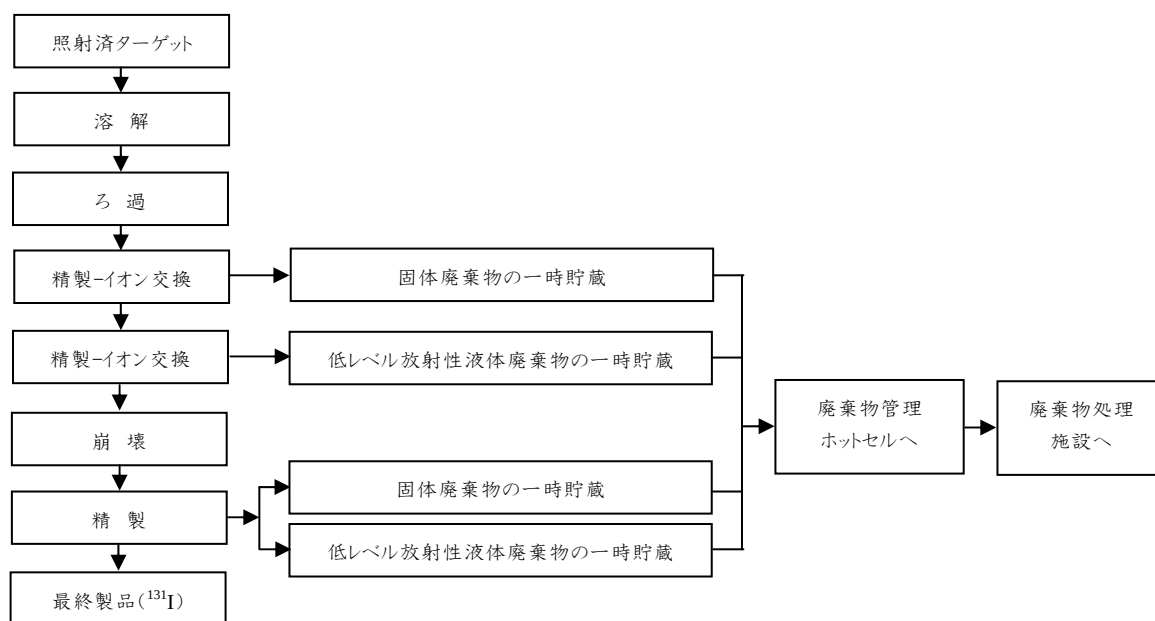


Fig. 6-1 プロジェクトの組織図

付録1 ^{131}I の製造

- (1) このプロセスは、 ^{131}I 水溶液の製造を目的とする。
- (2) プロセスは、最高純度の製品が得られるまでのヨウ素の精製と抽出に関するいくつかの段階で構成される。Fig. A-1に ^{131}I の製造フロー図を示す。
- (3) モリブデン製造プロセスでのイオン交換樹脂の最初の精製段階で、ヨウ素は他の放射性核種に対して濃縮される。その後分離と精製をさらにを行い、最終製品が得られる。
- (4) 第1精製カラムに保持され、モリブデンから分離された後に、以下の段階を含むヨウ素の精製プロセスが始まる。
 - a) 強塩基性陰イオン樹脂での精製
 - b) イオン交換樹脂での精製
 - c) 崩壊
 - d) イオン交換樹脂での精製
- (5) 二次的作業は以下のとおりである。
 - a) 廃棄物管理
- (6) (4)の a) 段階とb) 段階は ^{99}Mo 製造ホットセルで、同、c) 段階とd) 段階はヨウ素製造専用ホットセルで行われる。
- (7) 各セルには廃棄物の貯蔵を目的とする空間もある。

Fig. A-1 ^{131}I の製造フロー図

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
物質モル	mol	
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速さ, 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 ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	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付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 ³ 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=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

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

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

表 8. SI に属さないが、SI と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガール	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

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

表 10. SI に属さないその他の単位の例

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

