



JAEA-Technology

2008-035

JMTR を用いた ^{99}Mo 製造設備の概念検討

Conceptual Study of ^{99}Mo Production Facility in JMTR

飯村 光一 細川 甚作 菅野 勝 北島 敏雄
中川 哲也 坂本 太一 堀 直彦 河村 弘

Koichi IIMURA, Jinsaku HOSOKAWA, Masaru KANNO, Toshio KITAJIMA
Tetuya NAKAGAWA, Taichi SAKAMOTO, Naohiko HORI and Hiroshi KAWAMURA

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

June 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

JMTRを用いた⁹⁹Mo製造設備の概念検討

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 原子炉施設管理部

飯村 光一、細川 甚作、菅野 勝、北島 敏雄
中川 哲也、坂本 太一※、堀 直彦、河村 弘⁺

(2008年3月24日受理)

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターでは、2011年度に材料試験炉(JMTR)を再稼働させる予定で改修計画が進められている。

再稼働後におけるJMTRの有効利用の一環として、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いるテクネチウム-99m (^{99m}Tc) の親核種であるモリブデン-99 (⁹⁹Mo) の製造が計画されている。

⁹⁹Moは、その供給をすべて輸入に依存している状況にあることから、産業界と共同で⁹⁹Moの一部国産化を目指すものである。

本報告書では、⁹⁹Moの製造に必要な照射装置の選定、構成及び照射後工程において製品化のために必要な装置等の技術的な検討並びに製造に係るコスト面の検討結果について述べる。

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

※：出向職員(カワサキプラントシステムズ(株))

+：照射試験炉センター

Conceptual Study of ^{99}Mo Production Facility in JMTR

Koichi IIMURA, Jinsaku HOSOKAWA, Masaru KANNO, Toshio KITAJIMA
Tetuya NAKAGAWA, Taichi SAKAMOTO*, Naohiko HORI and Hiroshi KAWAMURA⁺

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

(Received March 24, 2008)

At Oarai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) advances the plan of refurbishing Japan Materials Testing Reactor (JMTR) to start the operation in fiscal 2011.

As part of effective use for JMTR, JAEA is planning to product ^{99}Mo , which is a parent nuclide of $^{99\text{m}}\text{Tc}$. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is most commonly used as a radiopharmaceutical in the field of nuclear medicine.

Currently the supplying of ^{99}Mo is only depend on imports from foreign countries, so JAEA is aiming at domestic production of a part of ^{99}Mo in cooperation with the industrial circles.

In this article, JAEA described the process, the choice and fabric of the irradiation facilities for ^{99}Mo production, the technical study of commercializing equipment after irradiation, and the cost study for ^{99}Mo production.

Keywords : Mo-99、Tc-99m, JMTR, Nuclear Medicine , Radiopharmaceutical

* : Research Staff on Loan (Kawasaki Plant Systems, Ltd.)

+ : Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

目 次

1. まえがき	1
2. ^{99}Mo 利用の現状	1
3. 製造プロセスの検討	2
3. 1 照射前工程	2
3. 2 照射中工程	4
3. 3 照射後工程	4
4. 水カラビット照射装置の整備及び増設等に関する検討	4
4. 1 製造量に関する検討	4
4. 2 照射装置の整備及び新設	5
4. 3 年間製造量	8
5. ホットラボ施設内への機器設置に関する検討	8
5. 1 ^{99}Mo 製造用作業セルの検討	8
5. 2 ^{99}Mo 製造フロー	9
5. 3 P Z C の概要	9
5. 4 ^{99}Mo 製造設備のセル内配置	9
5. 5 ホットラボ施設内移送に関する検討	10
5. 6 輸送容器の検討	10
6. 考 察	10
6. 1 設備設置コストの検討	10
6. 2 運転コストの検討	11
7. まとめ	11
謝 辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Current State of utilization of ^{99}Mo	1
3. Study of ^{99}Mo Producing Process	2
3.1 Pre- Irradiation Process	2
3.2 Irradiation Process	4
3.3 Post Irradiation Process	4
4. Maintenance of Hydraulic Rabbit №1 Facility, and Study of Increasing Next Facilities	4
4.1 Evaluation of ^{99}Mo Production	4
4.2 Study of Maintenance No.1 Facilities and Increasing Next Facilities	5
4.3 Amount of ^{99}Mo Production during year	8
5. Study of Installation ^{99}Mo Producing Device in Hot Lab Area	8
5.1 Study of ^{99}Mo Producing in Hot Lab Cell	8
5.2 Producing Process of ^{99}Mo in Hot Lab Cell	9
5.3 Outline of "PZC"	9
5.4 Arrangement of ^{99}Mo Producing Devices in Hot Lab Cell	9
5.5 Study of ^{99}Mo Capsule Transportation between Hot Lab Cells	10
5.6 Research of Outer Transportation Container	10
6. Considerations	10
6.1 Cost Research of Facilities Installation	10
6.2 Operation Cost for ^{99}Mo Producing	11
7. Conclusions	11
Acknowledgements	12
References	12

1. まえがき

独立行政法人日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターでは、平成23年度に材料試験炉(以下「JMTR」という。)を再稼働する予定で改修計画が進められている。

また、再稼働後におけるJMTRの有効利用の一環として、放射性医薬品として核医学の分野で最も多く用いられるテクネチウム- 99m Tc(以下「 99m Tc」という。)の親核種であるモリブデン-99(以下「 99 Mo」という。)の製造が計画されている。 99 Moはその供給をすべて輸入に依存している状況にあることから、産業界と共同で 99 Moの一部国産化を目指すものである。

99 Moの製造は、三酸化モリブデン(以下「 MoO_3 」といふ。)のペレットを一定時間原子炉で照射を行い、取出後、ホットラボ施設のセル内において主に 99 Mo吸着体として製品化する。

従って、原子炉運転時は、頻繁に MoO_3 の照射・取出しが行われることから、JMTRに設置されている照射装置のうち、任意時間での照射及び取出しができる「水力ラビット照射装置」を製造のための設備に選定すると共に、製品化に必要な設備をホットラボ施設に設置する予定である。

本書は、 99 Moの製造に必要な水力ラビット照射装置、ホットラボ施設において製品化のために必要な装置等の技術的な検討及び製造に係るコスト面について検討したものである。

2. 99 Mo利用の現状 [1], [2]

現在、医療の分野で放射線やラジオアイソトープ(以下「RI」といふ。)は、病気の診断、治療に欠かすことができないものとなっている。RIから放出される放射線は、物質自体はごく微量であっても確実に検出・定量することができ、この性質を利用してシンチグラフィによる検査、診断が行われている。これに用いる医薬品はいわゆる“放射性医薬品”と呼ばれる。放射線医薬品に用いられるRIには半減期が短く、放射線の透過力の大きいガンマ線を出すものが適しており、このうち 99m Tcは代表的なRIであり、臓器の形を画像として捉えることのできるガンマカメラまたはシンチレーションカメラの普及により、 99m Tc製剤の使用量は急増している。

この放射性医薬品に用いられる 99m Tcの従来からの利用としては、医療機関が親核種である 99 Mo(半減期66.7時間)を原料とした 99m Tc発生器(以下「ジェネレータ」といふ。)を各々に保有して、使用的都度、放射平衡にある 99m Tc(半減期6時間)を採取しているが、 99m Tcの利用の増加に従い大規模ジェネレータを備えた業者による 99m Tcの直接供給も増加してきている。供給量の推移をFig.1に示す。

99 Moは 99m Tcの唯一の原料であるが、現在国内生産は全く行われておらず、その供給をすべて輸入に依存している。日本の年間需要量は1,110TBq(世界需要の1/10)で需要量として毎週22.2TBqを輸入している。

今後の 99m Tcについての需要予測をFig.2に示す。この図において放射性診断薬の80%が 99m Tcであり、この図によると需要は今後20年程度、約16%の伸びを示すと考えられている。

3. 製造プロセスの検討

材料試験炉の設備を用いて^{99m}Tc の親核種である⁹⁹Mo を製造する基本プロセスを検討した。全体製造プロセスを Fig. 3 に、製造フローの概念を Fig. 4 に示す。

本検討は、原料を MoO₃ の粉末体として購入し、⁹⁹Mo を吸着剤に吸着させる、もしくは精製した水溶液の形態で容器詰めした製品を需要先へ出荷するまでを、製造プロセスの範囲とした。

⁹⁹Mo を得る方法として、「核分裂法」及び「中性子捕獲法」がある。核分裂法は天然ウランまたは、濃縮ウランをターゲットとして、²³⁵U の核分裂生成物として⁹⁹Mo を得るものであり、製造量において現在世界の主流となっている。しかし、この核分裂法では、原料となる高濃縮ウラン (HEU; 濃縮約 95% ²³⁵U) は IAEA の査察対象であること、⁹⁹Mo の製造に伴い処理できないプルトニウム (²³⁹Pu) 廃棄物などが生成し、長年の製造によって大量の放射性廃棄物の貯留が必要となり問題が多い。また、作業時間が長いことや化学処理の複雑さがあり、製造量も限られる。

中性子捕獲法は、⁹⁸Mo (n, γ)⁹⁹Mo 反応を利用し⁹⁹Mo を得るものであり、核分裂法に対して得られる⁹⁹Mo の比放射能は低いが、放射性廃棄物の発生量等が少ない利点を持つことから、本検討では、「中性子捕獲法」を製造方法として選定した。

主な工程は、水力ラビット照射装置での照射を念頭に、照射後の試料を JMTR ホットラボ施設で製品に処理することを前提とし、以下に示す工程毎に検討を行った。

(1) 照射前工程

原料の調達から試料の封入

(2) 照射中工程

照射装置での試料の照射

(3) 照射後工程

試料からの Mo の抽出、製品検査、梱包・出荷

3.1 照射前工程

(1) ターゲットの選定

原子炉を利用して⁹⁹Mo を製造する場合のターゲットの選定条件として、照射中の熱および放射線に対する化学的な安定性や、中性子自己遮へいの影響、照射後の化学処理の難易などが挙げられる。この条件を満たすものとして MoO₃ を選定した。

一般に原料として購入する MoO₃ は粉末であるが、試料の取扱い時に飛散することや充填密度が不均一になることを考慮し、ペレット化して取り扱う。また金属モリブデンと同じ体積、条件で照射した場合、MoO₃ペレットを採用する方が高い比放射能を得られることや照射中の中性子自己遮蔽の影響が少ないことが、実験例からも分かっている。また、金属モリブデンは強酸を用いて加熱しながら溶解しなければならないが、MoO₃ はアルカリ溶液で簡単に溶けることが分かっており、MoO₃ をペレット化してターゲットとして使用するものとした。

(2) 三酸化モリブデンペレットの製法

文献での試作例に基づき、高純度の MoO₃ の粉末を原料として調達し、これに樟腦と 2 w/o エタノールのバインダーを加えて焼結して、ペレット状に成型する。この焼結体は型崩れが無く、

またカドミウムや鉛より堅く、スズ、銅、アルミニウムより柔らかくペレットとなる。

ペレットは成型面圧 $1\sim 8 \text{ton}/\text{cm}^2$ の範囲で密度が $3\sim 3.5 \text{g}/\text{cm}^3$ となるが、この成型面圧の値は硬度にはそれほど影響が無いことが分かっており、成型機器の負担を減らすため成型面圧を $1 \text{ton}/\text{cm}^2$ とする。

焼結温度と硬度の関係については文献によると、 500°C 以上で急激に硬くなつて $600\sim 750^\circ\text{C}$ ではほぼ一定となること及び昇華性を有することから、これらを考慮して焼結条件を 720°C 、2 時間とする。ペレットの検査として、寸法検査、重量測定、外観検査、不純物分析を行い照射試料にする。

ペレットの製造工程を Fig. 5 ^{99}Mo 製品製造 照射前工程に、 MoO_3 ペレットの物性値を Table 1 示す。

(3) ラビットの構造及び封入方法の検討

1) ラビットの構造

水力ラビット照射装置で照射する試料は、アルミニウム合金あるいはステンレス製の容器（この容器が水流によってあたかも鬼が飛び跳ねるように移動することからラビットと称している。以下「ラビット」という）に封入するものであり、 ^{99}Mo 製造用には、アルミニウム合金製のラビットを採用し、試料である MoO_3 ペレットは、内筒に入れて取扱うものとする。また、ラビット内部の雰囲気は、既設と同様に、照射による放射化ガスの生成を抑えるため、ヘリウム等の不活性ガスを封入する。

構造例を Fig. 6 に示す。

2) 封入方法の検討

^{99}Mo 製造に用いるラビットは、製造量を増やす観点から、内筒挿入部の寸法（以下「内径」という。）を大きく取る必要がある。また、既設ラビットの最大長及び最大直径は、設工認において制限されていることから、 ^{99}Mo 製造に適した既設ラビットの選定を行った。

既設ラビットの端栓と外筒の接合方法は、封入する試料に応じて、圧接型あるいは溶接型がある。圧接型は、接合部断面積を大きくとる必要があることから、必要外筒厚さを 6mm 程度としているため、ラビットの内径は約 16mm 程度となる。

一方、溶接型は、必要外筒厚さを 3mm 程度としているため、ラビットの内径は約 20mm 程度となることから、 ^{99}Mo 製造に用いるラビットの封入方法は、「溶接型」を採用する。

これまでラビットの封入時における溶接方法としては TIG 溶接及び電子ビーム溶接（EBW）の適用例がある。TIG 溶接は、装置及び施工が簡便であるが、溶接施工時の溶接熱がラビット全体の温度を上げ、内部の試料の変質、劣化などの影響が懸念されるため、適用においては試作による確認が必要である。一方、電子ビーム溶接（EBW）は、不活性ガス容器内で溶接を行う溶接装置が必要であるが、溶接部の熱影響部が小さく、ラビットの温度上昇を TIG 溶接に比べて抑えることが出来る。従つて、試料への熱影響等を考慮し、電子ビーム溶接による溶接型ラビットを適用する予定である。

なお、今後の課題として、製造効率を上げるために溶接型ラビットと同等の内部空間を確保でき、かつ加工が簡便で、低温での封入加工方法について検討が必要である。

3.2 照射中工程

MoO_3 の照射は、原子炉運転の運転中に照射試料を任意の時間で挿入、取出しが行える「水力ラビット照射装置」を用いるものとする。Fig. 7 に照射装置の概要を示す。

水力ラビット照射装置における一連の作業工程は、 MoO_3 を内封したラビットを挿入装置から水力を利用して原子炉内に設置されている炉内管内に挿入し照射を行う。

照射終了後、冷却水の水流方向を切り替え、炉内管から取出装置へラビットを輸送する。輸送終了後、取出装置からラビットをハンドリングにより専用のバスケットに移し替え、カナルを通じて JMTR ホットラボ施設に水中で移送し引渡すものである。

3.3 照射後工程

ホットラボ施設に搬入したラビットは、セル内で外筒及び内筒を解体し、内封されている MoO_3 ペレットの取出を行う。

取出した MoO_3 ペレットは、溶解工程において ^{99}Mo を抽出し、吸着工程(一部はモリブデン溶液 ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) の形態)で ^{99}Mo 吸着体として製品化する。

製品化された ^{99}Mo は、pH 測定、 γ 線測定、容積・容量測定、重量測定等の製品検査及び不純物分析を行った後、放射能量に合わせて容器に配分・密栓し、輸送容器にローディングして、所定の汚染検査等を行いホットラボから出荷し、需要先において ^{99m}Tc (半減期 6 時間) を分離して放射性医薬品とする。Fig. 8 に照射後工程のプロセスを示す。

今後の検討課題は、 ^{99}Mo の半減期が 66.7 時間程度であることから、放射能量の減衰を考慮すると照射直後から出荷までの ^{99}Mo を扱う作業時間は短いほうが好ましく、各工程の短縮化を図るよう計画する。

また、外筒及び内筒の解体は、セル内の遠隔作業において実績のある、刃を押付けて切断する装置等、試料に熱や傷などの影響を与えない方法を考慮するものとする。

4. 水力ラビット照射装置の整備及び増設等に関する検討

^{99}Mo の製造量を決める主な因子は、大別すると「炉内管を設置する照射孔の熱中性子束」及び「炉内管に挿入できるラビットの個数」であることから、水力ラビット照射装置の整備及び新設に関して、以下の項目について検討を行った。

4.1 製造量に関する検討

国内での ^{99}Mo 需要量である 1,110 TBq/年 (22.2 TBq/週) から推定される ^{99m}Tc 供給メーカーの ^{99}Mo 購入量(推定)は、4,440 TBq/年 (88.8 TBq/週) であり、全量が海外の単一社からの輸入品であることから、輸入が途切れた場合のリスクを分散することを目的として、予備量に相当する量の国産化を図ることを目的とし、JMTR の稼働後における ^{99}Mo の製造量の目標値を以下に示す 3 ケース設定するとともに、水力ラビット照射装置で製造できる ^{99}Mo の生成量の試算を行い、目標値の成立性について検討を行った。

各ケースにおける「 ^{99}Mo 製品供給量の設定」を Table2 に示す。

(1) 製造量の目標値

1) 供給ケース 1

出荷製品の放射能量を 3.7 TBq/隔週に設定する。

2) 供給ケース 2

供給メーカの推定購入量 89 TBq/週に対して原子炉の年間運転日数に係るリスクを考慮し、20%程度までを担うことを想定して、出荷製品の放射能量を 18.5 TBq/隔週に設定する。

3) 供給ケース 3

参考として今後の炉心計画および設備の設置許可の範囲内で考えられる材料試験炉での最大生産量を検討する。

(2) 水力ラビット照射装置における⁹⁹Mo の生成量の試算

1) 照射孔の選定

照射孔の選定は、既設水力ラビット照射装置の炉内管(以下「既設炉内管」という。)が設置されている照射孔「D-5」の他に、炉心構成の計画により、炉内管の設置が可能な位置として照射孔「M-9」並びに照射孔「M-11」を候補とする。

また、各炉内管に挿入できるラビットの個数は、既設炉内管に合わせ 3 個とするが、照射孔 M-9 は、炉心格子板の形状の違いにより、他の照射孔に比べ、炉内管の炉心部分の寸法を長くすることができることから、最大 5 個の挿入も可能である。

炉心照射位置を Fig. 9 に示す。

2) ⁹⁹Mo の生成量の試算

各照射孔における⁹⁹Mo の生成量の試算条件は、照射孔 M-11 における試験照射例の結果を基に、「M-11」と「D-5」及び「M-9」の熱中性子束を比較し、比例法により比放射能、MoO₃ 密度等を試算した。また試料寸法は、溶接式ラビットの内径とした。なお、照射時間については隔週の出荷を考慮し試験照射例と同じ 6 日間 (144 時間) とした。

試算の結果、各照射孔における⁹⁹Mo 生成量は、1 バッチ(照射期間 : 6 日)のラビット数 3 個の場合、6 日間 (144 時間) の照射直後において、照射孔 D-5 では 7.3 TBq、照射孔 M-9 では 36.6 TBq、照射孔 M-11 では 13.6 TBq また、M-9 においてラビット 5 個の照射を行った場合 61.0 TBq であり、製造量の目標値を満足する結果が得られた。

試算結果を Table3 に示す。

3) 各照射孔における炉内管の使用限界

既設水力ラビット照射装置の炉内管 (主要材質 : ステンレス鋼) 及び照射孔 M-9、M-11 にステンレス鋼製炉内管を設置した場合の使用限界(累積照射量: $1 \times 10^{22} n/cm^2$)を評価した。その結果、照射孔 D-5 では、約 232 サイクル (30 年以上)、照射孔 M-9 では約 36 サイクル (約 6 年間)、照射孔 M-11 では約 108 サイクル (約 18 年間) となる。

4.2 照射装置の整備及び新設

照射装置の整備は、各供給ケースに対して有効な整備内容を選定することとし、以下の 3 ケースについて検討した。

(1) 照射装置設置ケース 1

1) 装置の概要

本ケースは、照射孔 D-5 に設置されている既設の水力ラビット照射装置を整備し、⁹⁹Mo を製造するケースである。

水力ラビット照射装置は、大別すると、原子炉内に挿入されている炉内管及びカナル水中、床上に設置されている炉外装置部に分けられる。

炉内管は、2重管構造となっており、最大3個のラビットを挿入する事が可能である。炉内管の構造を Fig. 10 に示す

ラビットの挿入は、カナル水中に設置されている挿入装置により行われる。また、取出しは水流の向きを三方弁により逆転させ、ラビットを取出装置に送り、手動により取出しを行い、専用ラックを使用してホットラボ施設まで水中移送し、引き渡す。

この照射装置では照射孔 D-5 を使用することから、⁹⁹Mo 製造量は1バッチの照射直後において 7.3 TBq となり供給ケース 1 に対応するケースとなる。

装置全体の配置図を Fig. 11 に、仕様を Table4 に示す。

2) 整備項目

水力ラビット照射装置は、現在も施設定期自主検査の対象設備として、主要機器等の維持管理を行っているが、供用開始から約40年経過していること、また、今後数十年にわたる本格的な供用を行うことから、主要機器の更新、機器の分解点検、消耗部品等の交換及びその他これまでの運転経験に基づく一部改良が必要である。

また、ホットラボ施設へのラビット移送については、新たなラビット移送系の設置は行わず、従来の設備と新たに製作する試料移送用治具等を用いて人力により行うこととする。

Table5 に主な整備項目案を、Fig. 12 に整備範囲を示す。

3) 設工認申請

更新機器のうち、駆動冷却系ポンプ及び現場制御盤は、設計及び工事の方法の認可（以下「設工認」という。）を受けたものであり、これらの更新については設工認を行う予定である。

(2) 照射装置設置ケース 2

1) 装置の概要

本ケースは、⁹⁹Mo の増産対応として既設水力ラビット照射装置の他に、照射孔 M-9 に新炉内管とその炉外装置を設置し、2基の水力ラビット照射装置を用いて⁹⁹Mo を製造するケースである。

本ケースにおいて追加新設する炉外装置部の系統構成は、平成13年度に撤去・廃止した旧水力ラビット2号照射設備（以下「旧 HR-2」という。）と同等とするが、取出し及び移送に伴うラビット排出時に、系内の水を極力排出しないよう、別途ポンプを用いた移送系を設けるものとし、ホットラボ施設直近の No. 3 カナル内までラビットを移送できる構成とする。

なお、運転中の系内温度変化に伴う圧力を吸収するために膨張タンクを設けるものとする。この照射装置による⁹⁹Mo 製造量は、照射孔 D-5、照射孔 M-9 を使用し各3個のラビット照射を行うことにより1バッチの照射直後において合わせて 43.9 TBq となり、供給ケース 2 に対応す

るケースとなる。

照射装置の仕様を Table6 に、系統図を Fig. 13 に、炉内管配置図を Fig. 14 に配置図を Fig. 15 にそれぞれ示す。

2) 整備項目

① 旧 HR-2 炉外機器の撤去

旧 HR-2 は、平成 13 年度に炉内機器を撤去し、炉外機器については漏水防止等の保全処置を施し保管状態となっている。

新たに装置を設置するには、旧 HR-2 の炉外機器の撤去が必要となる。撤去にあたっては、No.1 カナル内に主要機器等が設置されているため、No.1 カナルの水位を低下させて実施する必要があるが、同カナル底部には、使用済炉内管等の高放射化物があるため、過去に行った No.1 カナル内機器の更新時の実績から、水位低下は、通常水位から -3,700mm までに制限する必要がある。

従って、照射装置の設置に際しては、水位 -3,700mm で撤去可能な機器を処分し、同水位で新設機器を設置できるよう機器の設計、配置等を行なうものとする。また、-3,700mm 以下に設置されている崩壊タンク等の旧 HR-2 設工認時に据付けた機器については、健全性を確認した上で再使用を予定しているが、監督官庁の認可が取れない場合は、カナル内保管とし、新たに設計製作する予定である。

② 埋設配管

旧 HR-2 のカナル水中機器と地上 1 階に設置されている炉外装置との接続は、埋設配管を利用して接続されている。

この埋設配管は、水力ラビット照射装置の専用配管として、昭和 41 年に設工認を経て敷設されたものである。

従って、増設に際しては、埋設配管のうち、未使用管あるいは旧 HR-2 で使用していた管を再使用する予定であるが、埋設配管は、設工認取得後、約 40 年経過していることから、使用にあたっては、健全性の確認及び品質管理上の問題等について検討する必要がある。

以上の懸案事項を含め、水力ラビット照射装置の増設に係る検討事項を Table7 に示す。

3) 設工認申請

新設の「水力ラビット照射装置」として設工認申請を行う予定である。

(3) 照射装置設置ケース 3

1) 装置の概要

水力ラビット照射装置の設置基数は、現行の設置変更許可申請書において 3 基まで設置が許可されていることから、⁹⁹Mo の増産対応として上記 2 ケースの他に、照射孔 M-11 に新炉内管を設置し、3 基の水力ラビット照射装置を用いて最大限 ⁹⁹Mo を製造するケースである。

本ケースで増設する水力ラビット照射装置の炉外装置の構造は、前項の炉外装置と同じとする。また、照射孔 M-9 に設置する炉内管の装荷個数を最大 5 個まで拡張する設計を行うものとする。

従って、本ケースは供給ケース 3 に対応するケースとなり、⁹⁹Mo 製造量は、照射装置 3 基を使用して照射孔 D-5、M-9 および M-11 でラビット各 3 個を照射すると 1 バッチの照射直後において

て 57.5 TBq、M-9 でラビット 5 個の照射を想定すると、合計で 1 バッチ最大の 81.9 TBq が生成される。

2) 整備項目

本ケースは、3 基の水力ラビット照射装置を設置することから、炉内管の炉心配置及び No.1 カナル内の炉外装置の配置について問題点を整理した。

炉内管については、照射孔 M-9 および M-11 が近接していること、またラビット通過を確保するため炉内管の曲率が大きくなることから、炉内管の取付工事の際に干渉する可能性が高く、炉内管形状および工事方法についてより詳細な検討により成立性を確認する必要がある。

No.1 カナル内の炉外装置の配置については、旧 HR-2 のカナル内機器撤去範囲に 2 基分の炉外装置を設置することになるため、撤去、再使用範囲を含め詳細な配置検討により成立性を確認する必要がある。

3) 設工認申請

成立性が確認された場合、新設の「水力ラビット照射装置」として設工認申請を行う予定である。

4.3 年間製造量

年間の製造量は、原子炉の運転状況、稼働率により影響を受ける。材料試験炉における平成 15 年度から平成 17 年度の運転実績では、目標として来た 180 日/年運転が達成されており、この運転サイクルパターンを基に材料試験炉における年間運転スケジュールを想定し、⁹⁹Mo 製造スケジュールを計画した。製造スケジュールの例を Fig. 16 に示す。

製品出荷の頻度は、原子炉運転の 1 サイクルを標準 31 日、この間に隔週の ⁹⁹Mo 製造、照射時間の 6 日間(1 バッチ)を考慮すると、1 サイクル中に 2 回の出荷となる。一方各運転サイクル間には、標準的に 9 日間のインターバルがあり、これにより出荷の間隔が隔週以上空く場合があり、また施設定期検査(約 3 か月)など長期にわたる運転停止期間中は、製品を出荷することができない期間が存在する。

以上により 180 日/年運転の場合、年間の照射合計日数は 72 日(12 バッチ)となり、各照射孔で照射ラビット数 36 個、照射直後の放射能量は照射孔 D-5 で 87.6 TBq/年、照射孔 M-9 で 439TBq/年、照射孔 M-11 で 163TBq/年の ⁹⁹Mo の生成量が見込まれる。また M-9 において 1 バッチ当たり 5 個の照射を想定すると 732TBq/年となる。

5. ホットラボ施設内への機器設置に関する検討

5.1 ⁹⁹Mo 製造用作業セルの検討

本項は、ホットラボ施設の遮へいセルのうち、取扱う放射能量及び ⁹⁹Mo 製造のための作業性並びに製品の品質管理を行う上で、⁹⁹Mo 製造に使用する作業セルの選定を行った。

検討において取扱う放射能量は、ラビット 3 個分の ⁹⁹Mo 生成量 7.4TBq(200Ci)/バッチ及び、ラビットの外筒等の構成材をアルミニウム材とした場合の生成放射能量とした。この結果、ラビット外筒開封作業はコンクリート C-2 セル、MoO₃ペレット溶解等及び搬出作業は、RI 使用施設の鉛セ

ルラインのL-2セル及びL-1セルを作業用セルの候補とした。

5.2 ^{99}Mo 製造フロー

ホットラボ施設における ^{99}Mo 製造は、 ^{99}Mo 溶液又は ^{99}Mo をPZCに吸着して出荷する場合の2ケースを想定し検討する。

^{99}Mo 製造フローの概略は、原子炉で照射されたラビットはカナルを経由してコンクリートC-1セルに受入れた後、コンクリートC-2セルでラビットの外筒を開封して内筒を取出す。

取出された内筒は施設内移送用の遮へい容器に収納し、材料試験用鉛セルラインのL-2セルに搬入し内筒を切断・開封し Mo O_3 ペレットを取出す。

Mo O_3 ペレットは、水酸化ナトリウム(NaOH)溶液で溶解し、一部溶液を分取した後、セル外のグローブボックスに持込み出荷に必要な製品検査を行う。製品検査において品質上確認された ^{99}Mo 溶液又は ^{99}Mo 吸着PZCは、隣接のL-1セルの背面壁ガンマゲートを介して輸送容器へ収納し出荷することを現在計画している。また、照射後のラビットの受入れから、一連の ^{99}Mo 製造作業及び製品出荷までの実作業時間の合計は、概略的な検討の結果、約11時間必要となる。

Fig. 17.1 から Fig. 17.2 にホットラボ施設での ^{99}Mo 製造フローシート図、Fig. 18 にホットラボの各セル間における製造の流れ及びFig. 19 に作業時間の計画をそれぞれ示す。

5.3 PZC の概要

PZC (Poly Zirconium Compound) は、日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)と株化研で共同開発した高性能Mo吸着材であり、従来、核分裂法等で使用されてきたアルミナより、100倍以上のMoを吸着することができる無機イオン吸着材である(約250mg-Mo/g-PZC)。PZCは、四塩化ジルコニウム(ZrCl_4)とイソプロピルアルコール($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$)の加熱縮合反応によって合成される。PZCに化学吸着された ^{99}Mo から、 β^- 崩壊して娘核種の ^{99m}Tc が生成される際、MoとTcの価数が異なるため、Tcだけが容易にPZCから溶離する。これを生理食塩水等で洗い流すことによって、

^{99m}Tc を利用できる。この様なしくみを利用したのがジェネレータであり、PZCは $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ジェネレータ、 $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$ ジェネレータを利用されている。なお、 $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$ ジェネレータは、診断とともに治療ができる放射性医薬品への応用が期待されている。

5.4 ^{99}Mo 製造設備のセル内配置

^{99}Mo 製造設備のセル内配置の概要是、天井ガンマゲート設備が備わっている鉛L-2セル内に内筒解体装置、 Mo O_3 ペレット溶解装置及びPZC-Mo吸着分離装置等を設置する。また、製品の搬出口は、L-2セルに隣接するL-1セルの貫通孔(200mm ϕ)を利用するものとし、外運搬輸送容器(トップオープン型)に収納する計画である。

なお、外運搬輸送容器の性能、仕様については、搬出先の製薬メーカ側での製品の受け入れ設備との整合及び取扱いの制約について十分な調査・検討が必要である。

ホットラボに整備する設備機器及びその概略仕様をTable8に、L-2セル及びグローブボックス内に設置する設備機器の状況をFig. 20に、 ^{99}Mo 製造設備のセル内配置をFig. 21にそれぞれ示す。

5.5 ホットラボ施設内移送に関する検討

コンクリート C-2 セルにおいて取出した内筒は、セル天井ガンマゲートから施設内移送用の遮へい容器に移し替えて、L-2 セル天井ガンマゲートへ移送する。

L-2 セル内への移送にあたっては、不要な放射性汚染物の混在を防止するため、専用の遮へい容器を使用する。この遮へい容器の概略仕様は、ボトムオープン型シャッター付き容器で、鉛遮へい材の厚さが 150mm、総重量は約 1.3ton である。Fig. 22 に移送用の遮へい容器の概要を示す。遮へい性能は、⁹⁹Mo 製造 1 バッチ（ラビット 3 個）の⁹⁹Mo 生成放射能量 7.4TBq(200Ci) 及びラビット内筒のアルミニウム合金材 A1050 (90g を想定) の放射化量を運ぶものとして計算した結果、遮へい容器表面で 30 μ Sv/h となる。

5.6 輸送容器の検討

⁹⁹Mo 製造品の出荷に適用可能な外運搬輸送容器は、JMTR に存在しないことから、製薬メーカ所有の輸送容器に収納し出荷することとする。

なお、当該輸送容器の詳細な技術仕様が明確でないため、得られている情報をもとに輸送容器の取扱いについて検討した。

ホットラボ施設での反復的な出荷作業を行う場合、当該輸送容器はトップオープン型の容器であることから、製品の収納作業について作業場所及び作業時間の制限がある。この理由から、前項 5.4 に記載のとおり、輸送容器への製品の収納作業は、L-1 セル背面貫通孔に設置する取出設備を介して製品をセル外へ搬出し、ホットラボ施設サービスエリアにおいて輸送容器に収納することを検討した。

6. 考 察

6.1 設備設置コストの検討

設備設置コストの検討は、平成 23 年度から⁹⁹Mo の製造を開始することを前提に「4. 水力ラビット照射装置の整備及び増設」と「5. ホットラボ施設内への機器設置」に係る費用についてケースを整理し概算を行った。なお、Mo O₃ペレット製造、ラビット製作（含む封入）に係る設備については、照射試料がラビットに封入された状態で利用者から受取ること及び輸送容器は薬剤販売・頒布メーカの所有容器を適用するため、本検討には含んでいない。

ケースの設定は、ホットラボ施設内の機器設置については、供給ケースに係らず、同一の装置仕様、容量にて対応できるものとし、1 ケースとした。また、照射装置については照射装置設置ケースと同様に 3 つのケースを設定した。概算結果を Table 9 に示す。

照射装置設置ケース 1 で製造する場合は、製造量において供給ケース 1 (3.7 TBq/隔週) を満たすことができ、また隔週（年間 12 バッチ）で製品を提供できれば良いことから⁹⁹Mo 製造のためラビット 3 個を約一週間照射した後、他の週には別の照射試験に設備を利用することができる。また、コストについては、既設水力ラビット照射装置を整備して使用することから、費用を低く抑えることができる。

照射装置設置ケース2の場合は、供給ケース2（18.5TBq/隔週）に対応することになり、水力ラビット照射装置を1基新設(照射孔「M-9」)する必要があり、かなりの費用を要するが2基の照射装置を用いて製造することから、1基が故障等により使用できない場合でも、供給ケース1の出荷量を確保することができる。

照射装置設置ケース3の場合は、照射装置を2基新設(照射孔「M-9」及び「M-11」)し既設と合わせて3基で製造を行うものであるが、製造量は、中性子束が最も高い「照射孔M-9」に配置する照射装置での製造が支配的であり、照射孔M-11に配置する装置では、全体の製造量に寄与する割合は低い。また、3基での製造となることから、製造量的には最大ケースとなるが、出荷のタイミングが原子炉の運転スケジュールにより制限されるため、出荷当該週間に對して過剰供給となることが予想される。従って、製品放射能の減衰により需要先で使用できる量が少なくなること、設備設置費用に比べ、設備の利用効率が低くなることから、現実的な選択ではないと考える。

各ケースによる平成23年度の材料試験炉の運転開始までの概略工程をFig.23.1からFig.23.2に示す。ここで、照射装置設置ケース2及び照射装置設置ケース3においては、新設に係る設計、製作及び現地据付等を考慮すると、供用開始は、材料試験炉の運転開始後となる。

6.2 運転コストの検討

照射装置設置ケース2及び照射装置設置ケース3は、原子炉内に炉内管を新設するが、中性子束が高い照射孔M-9に配置する炉内管の照射寿命は約6年（約36サイクル）であり、7年目以降⁹⁹Moの製造を継続するためには炉内管の更新費用が別途発生する。

⁹⁹Mo 製造のための年間運転費用等の概算結果をTable10に示す。

7. まとめ

⁹⁹Mo の製造及び製造設備の構成について検討・評価を実施し、次の結果を得た。

⁹⁹Mo 製造プロセスとして、原料に三酸化モリブデン (MoO_3) を選定し、焼結したペレットを照射ターゲットして、これを中性子の照射下における ^{98}Mo (n, γ) ^{99}Mo 反応を利用して ^{99}Mo を生成する方法を選定した。照射後工程では、 MoO_3 ペレットから ^{99}Mo を比較的簡単な化学処理によって溶解し、吸着剤もしくはモリブデンの溶液のままの形態で頒布可能な手法を構築した。

^{99}Mo の製造量については、想定される供給ケースの考え方をまとめ、製造目標量を3.7TBq/隔週と18.5 TBq/隔週以上のケースに分け、それに適合する炉内の照射孔と ^{99}Mo 生成量を試算した結果、全ての目標値を満足する結果が得られたことから、原子炉の運転計画を基にした年間の製造スケジュールを立案した。

^{99}Mo の製造に用いる照射装置は、原子炉運転中においても照射時間を任意に設定できる水力ラビット照射装置を適用する。また、照射後工程においては、ホットラボ・セル内に新たに導入すべき機器等の概念設計と配置検討を行い、照射直後から速やかに製品化、出荷するためのフローを構築した結果、JMTRを利用した ^{99}Mo の一部国産化に最適な製造設備の提供が可能であることが解った。

謝　　辞

本報告書をまとめるにあたり、ご指導を頂きました新見素二・原子炉施設管理部長、内容について貴重なご意見を頂きました齋藤順市・原子炉管理部技術主幹に深く感謝致します。

【参考文献】

- [1] 日本アイソトープ協会 「放射線利用統計 2005」
- [2] 米国, DOE, "Forecast future demand for medical Isotopes", 1999.

Table1 三酸化モリブデンペレットの物性値

MoO_3 ペレット の特性	ペレット密度	3.25~3.4 g/cm ³
	昇華開始温度	~750°C
	線膨張係数	$1.75 \times 10^{-5} /^\circ\text{C}$ (軸方向, 平均値)
		$4.4 \times 10^{-5} /^\circ\text{C}$ (径方向, 平均値)
MoO_3 物性値 (粉末)	熱伝導率 *	$K = 2.07 - 2.05 \times 10^{-3} T$ $- 4.64 \times 10^{-6} T^2 + 1.38 \times 10^{-8} T^3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	分子量	143.95 (Mo 66.6%, O 33.3%)
	⁹⁸ Mo 存在比	23.75 %
	α 相結晶	斜方晶系
	密度	4.692 g/cm ³
	融点	780°C 融解
	溶解度	1~2 g/l H ₂ O (pH 4.0~4.5)
電気伝導度	誘電性	
	生成熱	-745.7 kJ/mol

* 60°C~300°C, T [°C], $\rho = 3.28 \text{ g/cm}^3$ のもの

Table2 ^{99}Mo 製品供給量の設定

ケース	供給ケース1	供給ケース2	供給ケース3
^{99}Mo 供給量 *1	3.7 TBq (100 Ci)/隔週*2	18.5 TBq (500 Ci)/隔週*2	(JMTR最大生産量)/隔週*2
設定の考え方	輸入が100%の現状に対し、国産化を目指し、輸入が途切れた場合の予備量を想定した。	国内需要を分担するが、原子炉の稼働状況によるリスクを考慮し、需要の約20*%を想定した。	JMTRでの最大可能生産量(ラビット照射孔3ヶ所)を想定した。

*1 出荷時の製品放射能量（照射直後から出荷までの減衰率を0.55と想定）

*2 運転サイクル期間中において隔週とすると、年間12/バッチの出荷回数となる。

Table3 照射位置による照射後 ^{99}Mo 生成放射能量の推定

照射位置	試算条件 *1			試算結果	
	M-11	D-5 *2	M-9	M-11	M-9 (参考)
熱中性子束	[n/cm ² /s]	1.0 × 10 ¹⁴	7.0 × 10 ¹³	3.5 × 10 ¹⁴	1.3 × 10 ¹⁴
試料寸法		φ20 × L100mm	φ20 × L100mm		3.5 × 10 ¹⁴
MoO ₃ 密度	[g/cm ³]	—	3.25		
MoO ₃ ペレット質量	[g/ラビット]	80.28	102		
Mo 質量	[g/ラビット]	53.51	68.0		
照射時間	[h]	144 ([日])	144 (6)	144 (6)	
比放射能	[TBq/g Mo]	0.0666	0.0466	0.233	0.233
^{99}Mo 生成量 (1ラビット当たり)	[TBq/ラビット]	3.56	2.44	12.2	12.2
同時照射ラビット個数 [国/ハッシュ]	—	3	3	3	5
^{99}Mo 生成量 (1ハッシュ当たり)	[TBq/ハッシュ] ([Ci/ハッシュ])	—	7.3 (197)	36.6 (989)	13.6 (368)
	合計		43.9 (1186)	57.5 (1554)	61.0 (1649)
参考					81.9 (2214)
炉内管寿命 (50MW換算)				自己遮へい率 0.77を想定 Mo(95.94g/mol) O(16g/mol)にて計算	約36サイクル 使用可能
				約232サイクル 使用可能	約108サイクル 使用可能

*1 JMTR 水力ラビット2号機 (HR-2(照射位置M-11))での試験照射例 .[3]

*2 水力ラビット照射設備1号機 照射孔位置

Table4 照射装置設置ケース1の仕様
(既設水力ラビット照射設備)

炉心位置	D-5	
熱中性子束	最大	$1.1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
	平均	$8.1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
高速中性子束	最大	$8.8 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
	平均	$6.7 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
γ加熱率	1.1 W/g	
核的制限値	$+0.1\% \Delta k/k$ 以下 (ラビット挿入/取出による反応度変化)	
冷却材	種類	軽水
	流量	11 m ³ /h
	温度	約 40 °C
	圧力	1.96 MPa (最大)
ラビット	外形寸法	$\phi 32 \times \ell 150 \text{ mm}$
	材質	アルミニウム合金 または ステンレス鋼
	重量	600 g/個 (最大)
	試料寸法	$\phi 26 \times \ell 120 \text{ mm}$ (最大)
	発熱量	20kW (最大)
	挿入個数	3 (最大)
	照射時間	1分以上

カナル、 プール水	水質	pH 5.5~7, $5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$
	温度	35 °C以下
	圧力	静水頭 (炉室内解放)

Table5 既設水力ラビット照射設備の主な整備項目案

分類	項目	整備内容	作業期間 (月)
機器等の更新	駆動冷却ポンプの更新*	ポンプ 2 台を新たに製作し、交換する。	6 ~ 10 (製作期間込)
	制御盤等の更新*	経年劣化対策（供用開始後約 40 年経過）として、制御盤、電源盤及び計装機器等を全数更新する。	
	通過検出器の更新	通過検出器 2 台を新たに製作（購入）し、交換する。	
	安全弁の更新*	安全弁 2 台を新たに製作し、交換する。	
	差圧伝送器の更新	循環水流量、取出水流量及び炉内管出入口差圧用の伝送器を更新する。	
分解点検 消耗品交換	挿入装置、取出装置、仕切弁の分解点検	点検台数 3 台について、機能部品、消耗部品を交換する。	0.5 ~ 1
	空気作動弁の分解点検	点検台数 4 台について、機能部品、消耗部品を交換する。	
	パッキン類交換	地上配置機器で使用しているネオプレーンパッキンを全数交換する。	
改良	試料移送治具等の製作	⁹⁹ Mo 製造に対応するため、移送用水中ラック及び水中ハンドリング治具等を新たに製作する。	3 (製作期間)
	カナル給水時圧力降下対策	圧力降下対策として、給水ラインを新たに敷設する。	1

* 設計及び工事の方法の認可対象

Table6 照射装置設置ケース2及び3の仕様
(水力ラビット照射装置 増設機の仕様)

炉心位置	M-9
熱中性子束	最大 $3.5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
	平均 $2.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
高速中性子束	最大 $9.3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
	平均 $7.0 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
γ加熱率	6 W/g
核的制限値	+0.1%Δk/k 以下 (ラビット挿入/取出による反応度変化)
冷却材	種類 軽水
	流量 $8.4 \text{ m}^3/\text{h}$
	温度 約 40 °C
	圧力 1.96 MPa (最大)
ラビット	外形寸法 $\phi 32 \times \ell 150 \text{ mm}$
	材質 アルミニウム合金 または ステンレス鋼
	重量 700 g/個 (最大)
	試料寸法 $\phi 26 \times \ell 120 \text{ mm}$ (最大)
	発熱量 26kW (最大)
	挿入個数 5 (最大)
	照射時間 1分以上

移送設備	水質	pH 5.5~7, $5 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ (プール、カナル水)
	温度	35 °C以下
	流量	6 m³/h

Table7 照射装置設置ケース2及び3における既設機器撤去及び装置設置に関する検討

装置設置及び既設機器撤去ケースの検討			
水カラビット照射設備の機器構成 (1971年 設工認申請書抜粋)	設置場所	機器の据付及び既設機器の撤去に係るカナル内作業については、No.1 カナル水位を-3,700mm (約 200m ³) 低下させて作業を行う。(その際No.1 カナル作業水位部の放射線線量を実測、マップ化した上の作業が必要。更にカナル水位の低下が必要な場合は、No.2 カナル等への高放射化物の移動を考慮するための問題点の抽出を行う。)	
炉内管	炉内管	撤去 (2002年) 済み 炉外部とは炉ブル 内 閉止フランジで隔離	新規製作しラビット5個を挿入可能なように設計する (M-9 照射孔の場合) 新耐震計算、流力計算、耐圧強度、試料受け強度計算、核的・熱的評価、遮へい計算、ラビットの構造検討などをを行い炉外装置とともに水力ラビットとして設工認申請を行う。 照射孔をM-9とすると、ラビット5個挿入可能であるが、炉内管の寿命は約7年となる。
駆動冷却系	駆動冷却ポンプ ラビット挿入装置 ラビット取出装置 ラビット輸送管 崩壊タンク	地上 1 階 No.1 カナル水中 " " "	駆動冷却系の新規製作を行う。 なお、崩壊タンクについては、カナル底部にボルトにより固定されていることから、遠隔による撤去方法等を検討する。
移送系	移送用ポンプ ラビット移送用挿入装置 ラビット移送管	地上 1 階 No.1, 2 カナル水中 " "	移送系を新規に製作、設置してラビットをNo.3 カナルまで自動移送する (No.2, 3 カナルの水位低下の必要あり) か、もしくは既設HR-2移送系を用いてNo.1 カナルで取出したラビットを乗せ換えNo.3 カナルに移送する。(No.3 カナル中にラビットを取出せる改良工事 (No.3 カナルの水位低下) が必要。)
キャスク設備	キャスク設備	No.3 カナル (ホットラボ) 北側 サービスエリア	キャスク設備は、上記の新設、改良することによって不要となるが、今後の大学等の利用を勘案して廃止、存続の検討が必要。
その他	空気貯槽 配管 計装機器	地上 1 階 " "	空気貯槽、配管及び計装機器の新規製作を行う。
設工認申請書記載以外の機器			
電源盤、 カナル内 機器等	電源盤等 カナル内機器(架台など)	地上 1 階 No.1 カナル水中	電源盤等計装品の入替を行う。 なお、カナル内の架台については、健全性を確認した上で再利用する。
埋設管	1966 年水力ラビット照 射設備用として 63 本の 埋設管について設工認申 請 ((原子炉本体 (4) の 設計及び工事の方法))	カナル内と炉外機器と の接続 最長配管 : 7, 000mm, 80A	水力ラビット照射設備用埋設管は原子炉本体(4)で認可を受けたものであり、未使用管を使用するための考え方を構築する必要がある。(認可を取得以降、未整備であり使用においては現規制上の考え方及び配管の健全性を確認する方法を確立する必要がある。)

Table8 ホットラボ施設工程 必要設備機器の概略仕様

No.	作業工程	必要設備機器	概略仕様
①	ラビット試料搬入	キャップセル搬入装置	既存設備 (C-1 セル/カナル設置)
②	ラビット外筒開封	ラビット解体装置	試料回転ダイヤモンドフォイル切断
③	内筒移送	移送用遮へい容器	ボトムオープン型 鉛厚さ 15cm 重量 約 1 ton
④	内筒開封・ MoO_3 レット取出	内筒解体装置	シースカッター (パイプカッター)
⑤	MoO_3 レット溶解	溶解装置	構成：溶解槽、攪拌機、循環チラー、 局所ドラフトチャンバー
⑤'	PZC-Mo 吸着	PZC-Mo 吸着装置	構成：反応槽、循環型加熱器
⑥	製品検査	グローブボックス PH メーター 電子天秤 等	* グローブボックスは既存設備の流用 を検討中 (寸法 : 1.2 × 1.0 × 1.0m)
⑦	輸送容器収納	搬出設備 外運搬輸送容器	セル背面壁ガンマゲート (L-1 セル既 設の壁貫通孔部に出荷製品移替え設備 として一部改造を要す。) 外運搬B型輸送容器 ($^{99}\text{Mo A}_2$ 値: 0.6TBq)
⑧	出 荷	クレーン	既存設備 (30ton クレーン)

Table9 ^{99}Mo 製造設備の整備・設置概算コスト検討

(単位 千円)

内 容	ケース 1			ケース 2			ケース 3											
	• 既設の水力ラビット照射設備の整備、一部機器の更新 ^{99}Mo 製造の専用照射装置を 1 基新設 * ₃			• 既設の水力ラビット照射設備の整備、一部機器の更新 ^{99}Mo 製造の専用照射装置を 1 基新設			• 既設の水力ラビット照射設備の整備、一部機器の更新 ^{99}Mo 製造の専用照射装置を 2 基新設											
照射後装置の設置																		
• ホットラボへの新規装置の導入、セルの整備																		
	<u>供給量</u> * ¹		<u>供給量</u> * ¹		<u>供給量</u> * ¹		<u>供給量</u> * ⁴		<u>供給量</u> * ²									
	100Ci (3.7TBq) /隔週 * ²		500Ci (18.5TBq) /隔週 * ²		500Ci (18.5TBq) /隔週 * ²		(最大生産量 * ⁴)		/隔週 * ²									
(1)	照射装置の設置・整備		100,000		100,000		1,100,000		2,100,000									
(2)	照射後装置の設置 (ホットラボ、施設整備)					100,000												
	合計		200,000		200,000		1,200,000		2,200,000									

* 1 照射直後から出荷までの減衰率を約 0.55 と想定した出荷時点の量

* 2 隔週とは材料試験炉 (JMTR) の運転を行っている週にに対してであり、年間 12 バッチの出荷を予定している。

* 3 炉外装置及び炉内管ともカナル及び原子炉へ 2 基新設する場合の配置の成立性については、今後検討を要する。

* 4 表一 3 による。

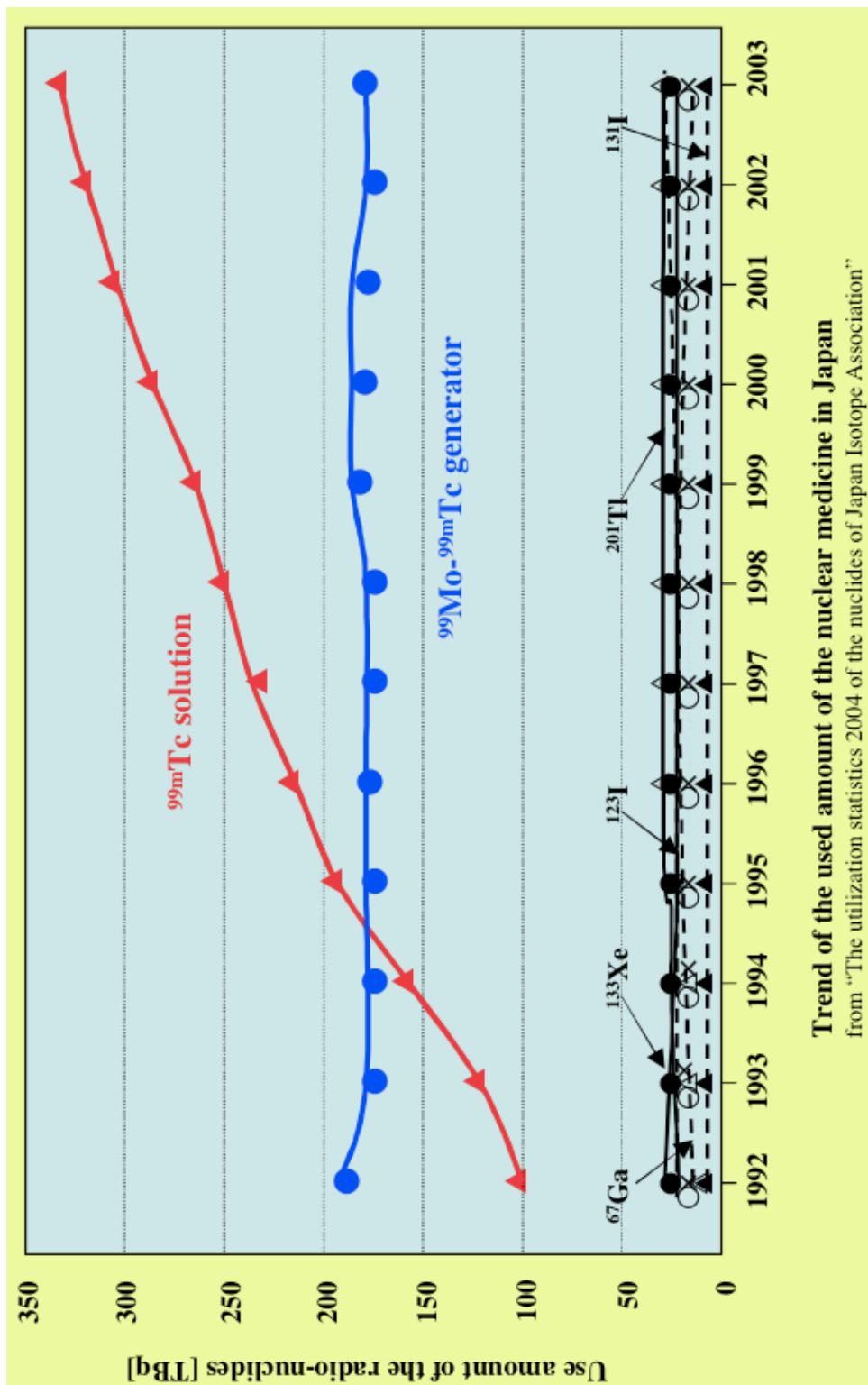
○ 事業所外用輸送容器、ペレット製造機、ラビット製作・封入に係る設備については含まない。

Table10 ^{99}Mo 製造運転 概算コスト（年間）

ケース		ケース1		ケース2		ケース3	
	照射孔 1バッチの本数	D-5 3	M-9 3	D-5 3	M-9 3	D-5 3	M-11 3
年間バッチ数	12	12	12	12	12	12	12
年間本数	36	36	36	36	36	36	36

項目		単位：千円			
年間の照射費等 〔1本あたりの照射費（中性子料金）等〕		15,000 [400]	21,000 [560]	15,000 [400]	21,000 [560]
利用料金	照射後試験費	112,000	112,000	112,000	112,000
	廃棄物処理処分費	2,000	2,000	2,000	3,000
	利用料金合計	129,000	150,000	150,000	168,000
人件費	照射関連	9,000	9,000	9,000	9,000
	ホットラボ関連	30,000	30,000	30,000	30,000
人件費合計		39,000	39,000	39,000	39,000
合計（年間）		168,000	189,000	189,000	207,000

- ※ 利用料金については、JAEAの施設共用制度の単価をもとに算出した値であり、今後の見直しにより変更になる可能性がある。
- ※ 人件費は ^{99}Mo 製造のために新たに業務協力員又は業務委託するためである。(照射作業1名、ホットラボ作業3名の合計4名を想定)
- ※ 高純度 MoO_3 原料調達及びペレット製造費は含まれない。
- ※ ラビットの製作（ラビット外筒、インナーシースの製作からラビット封入）に係る費用は含まれない。
- ※ 照射時間は、6日間（144時間）とする。
- ※ 需要先への事業所外輸送費用は含まれない。
- ※ M-9は、製造開始から7年間（炉内管寿命）までを対象とした。

Fig.1 ^{99m}Tc 供給量の推移

Estimated Isotope Production Revenues

(Adapted from Expert Panel: Forecast Future Demand for Medical Isotopes.
Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science, and Technology, 1999.)

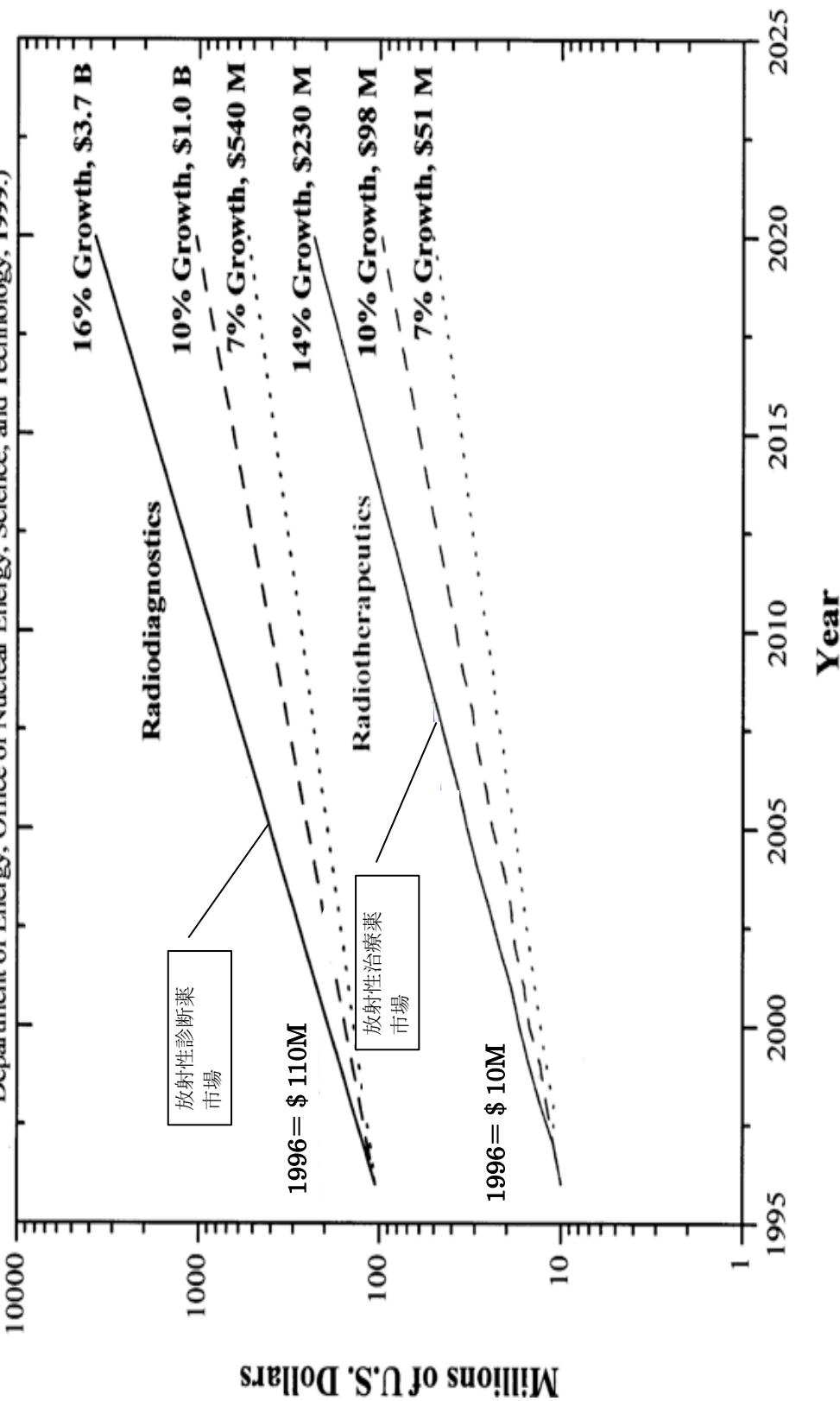
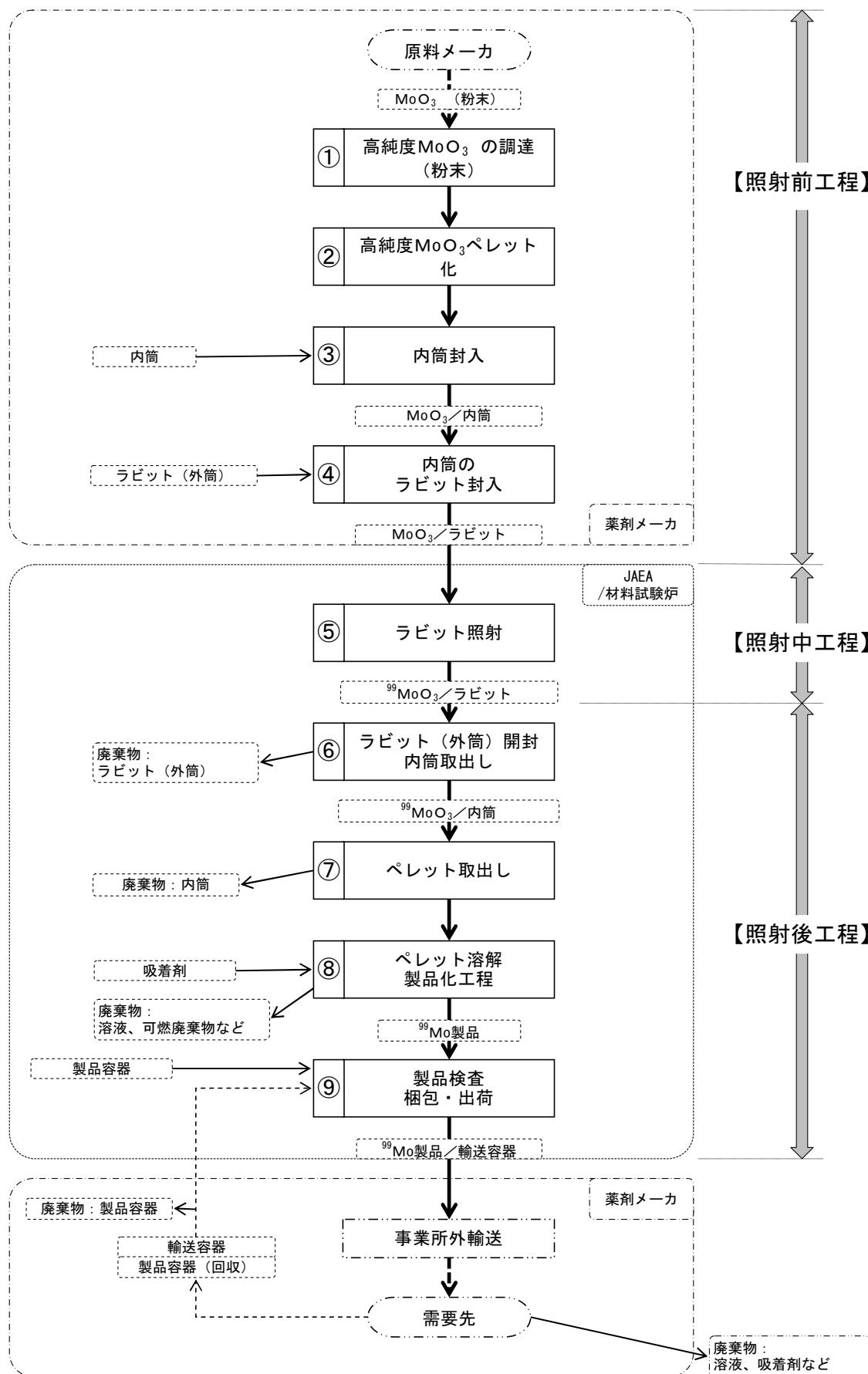
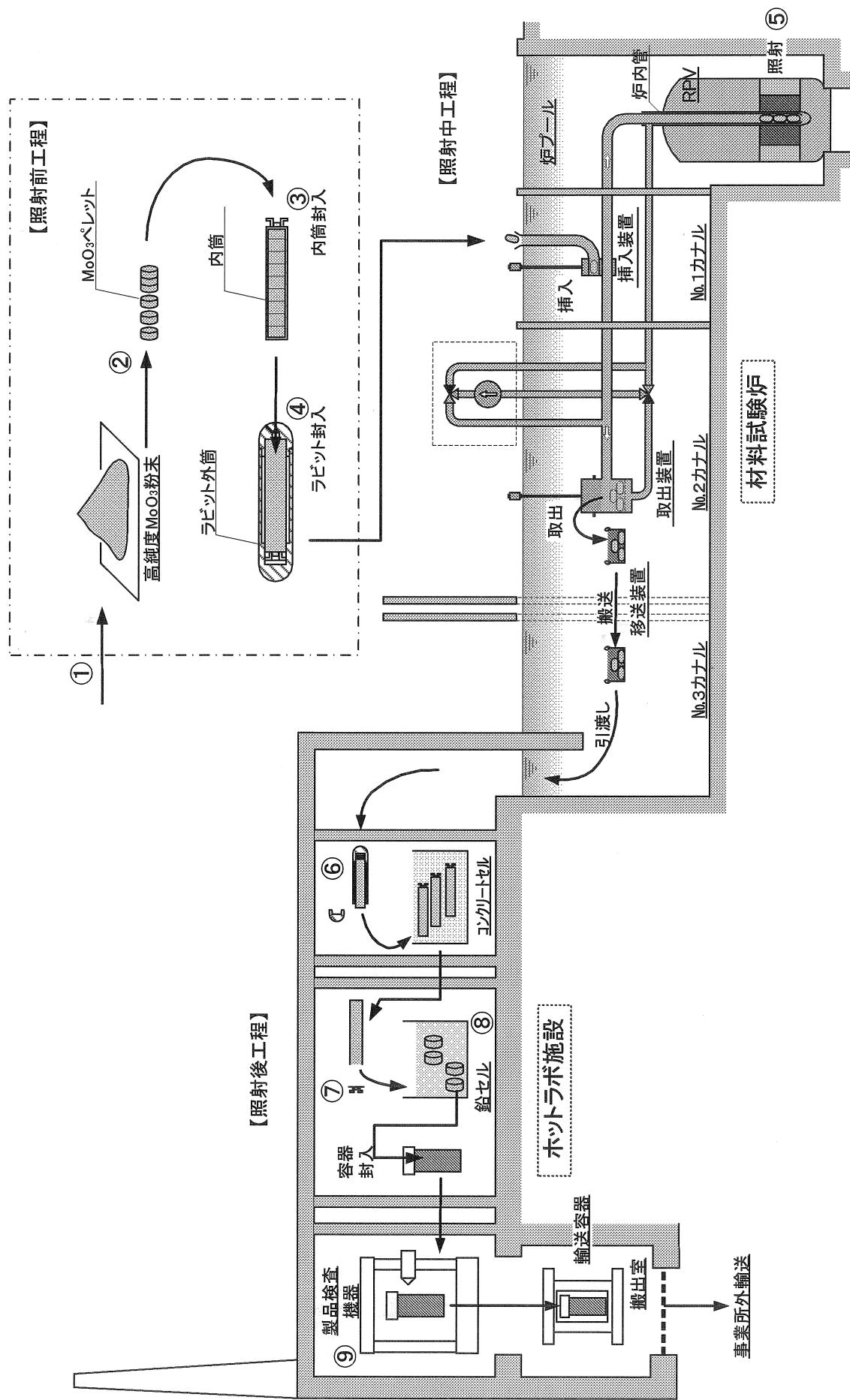
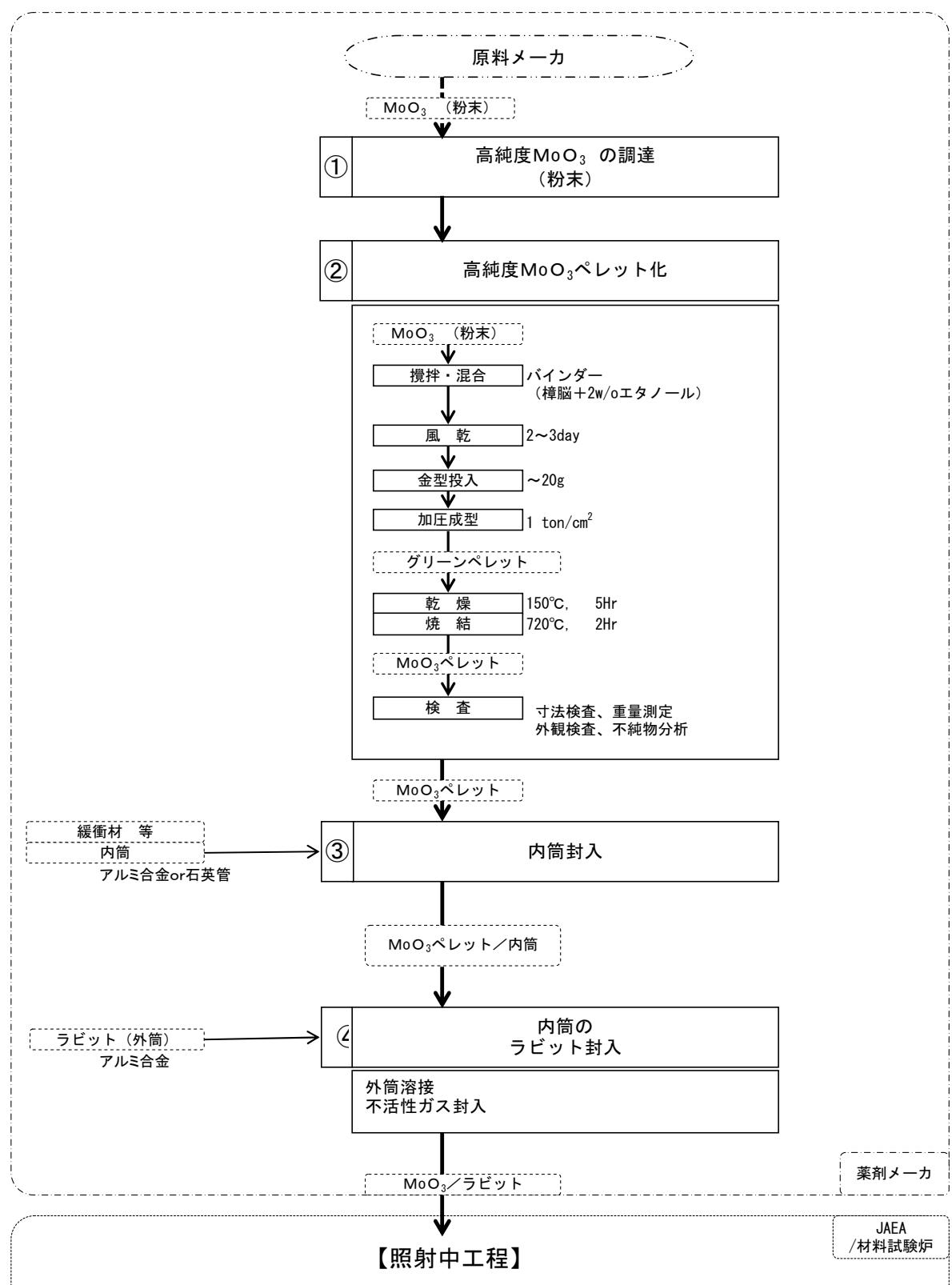


Fig.2 ^{99m}Tc 需要の予測

Fig.3 ^{99}Mo 製品全体製造プロセス

Fig.4 ^{99}Mo 製品製造フロー一概念図

・番号は、工程番号を示す。(Fig.3参照)

Fig.5 ^{99}Mo 製品製造 照射前工程

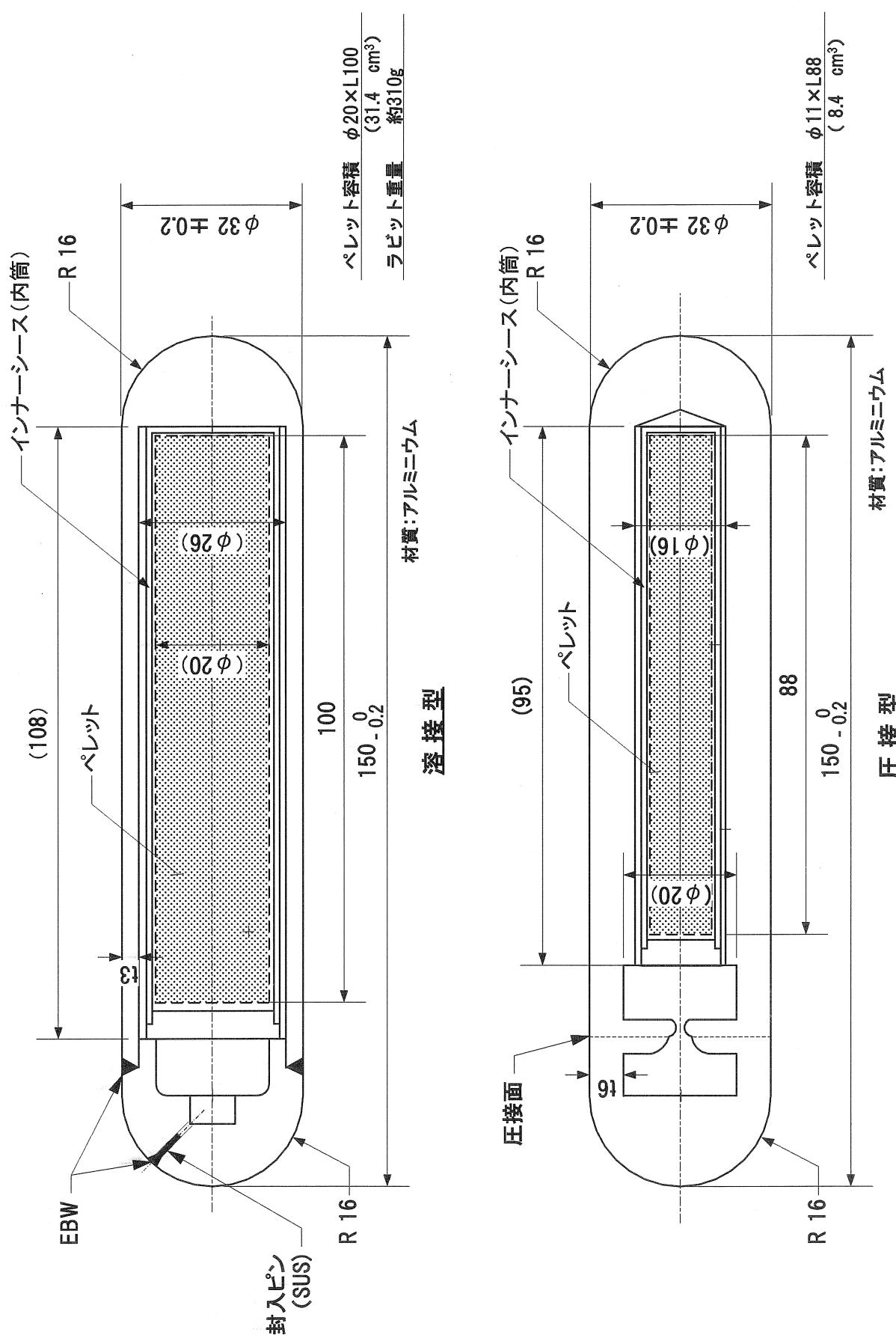


Fig.6 水力ラバット構造図

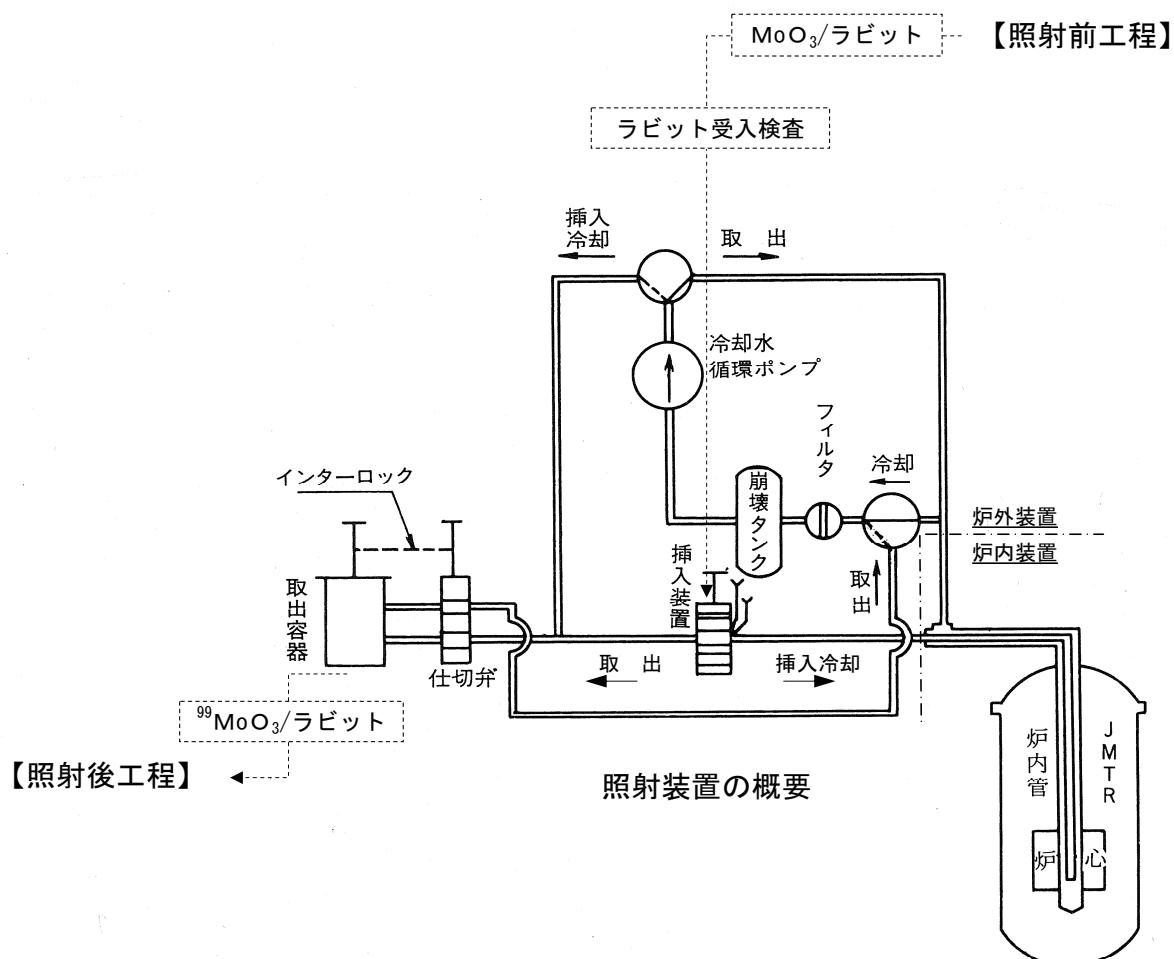


Fig.7 ⁹⁹Mo製品製造 照射中工程

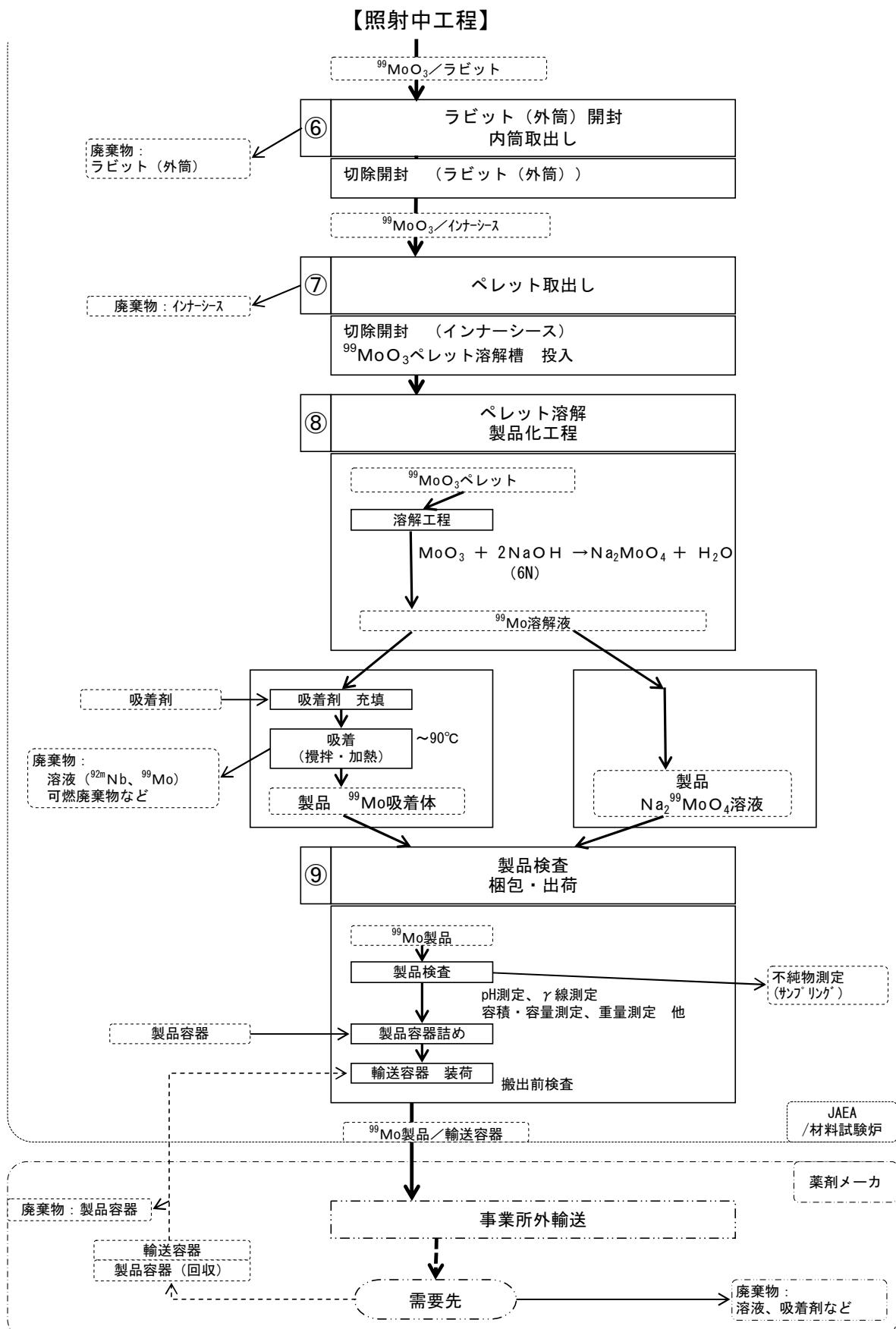


Fig.8 ^{99}Mo 製品製造 照射後工程

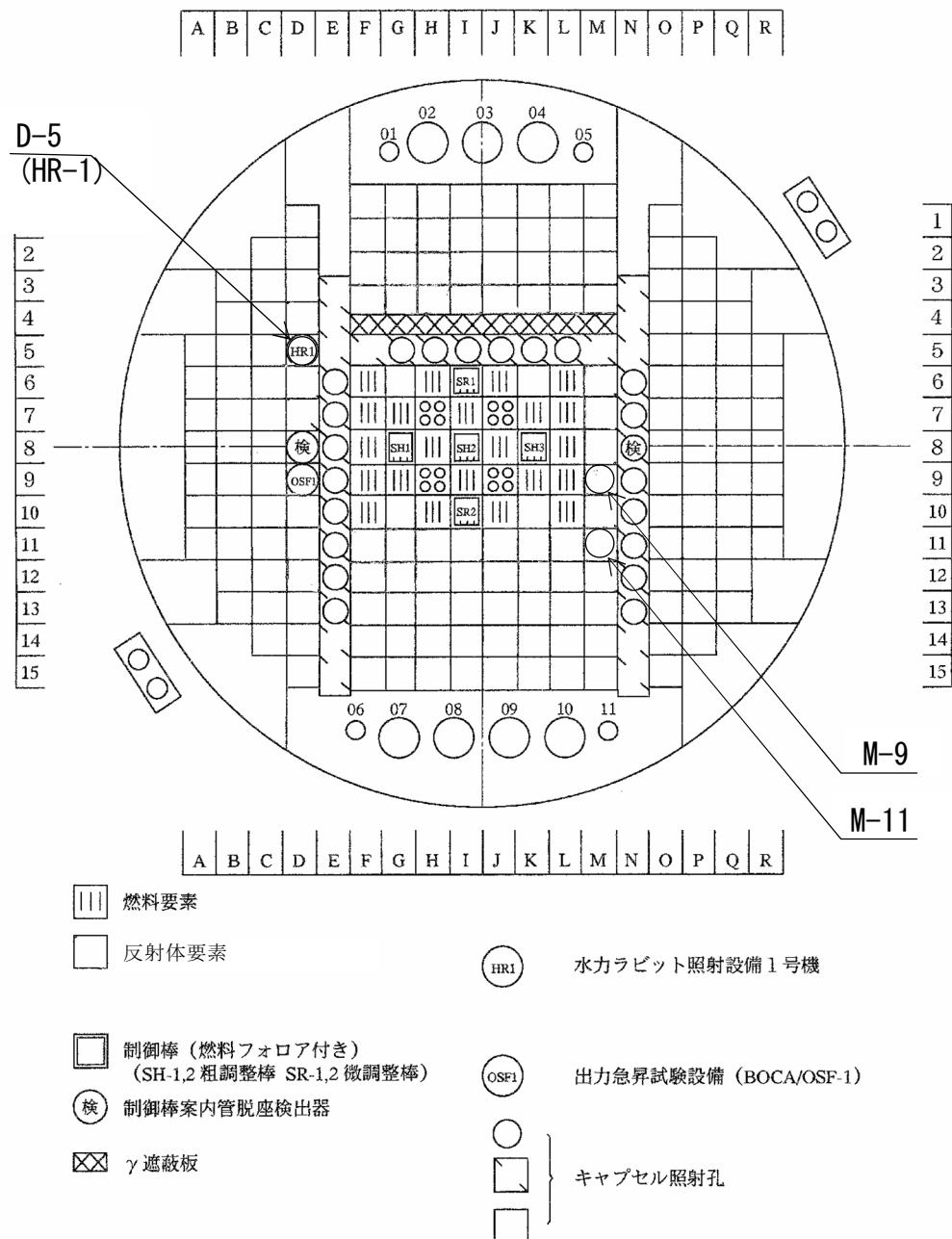


Fig.9 炉心照射位置 (JMTR)

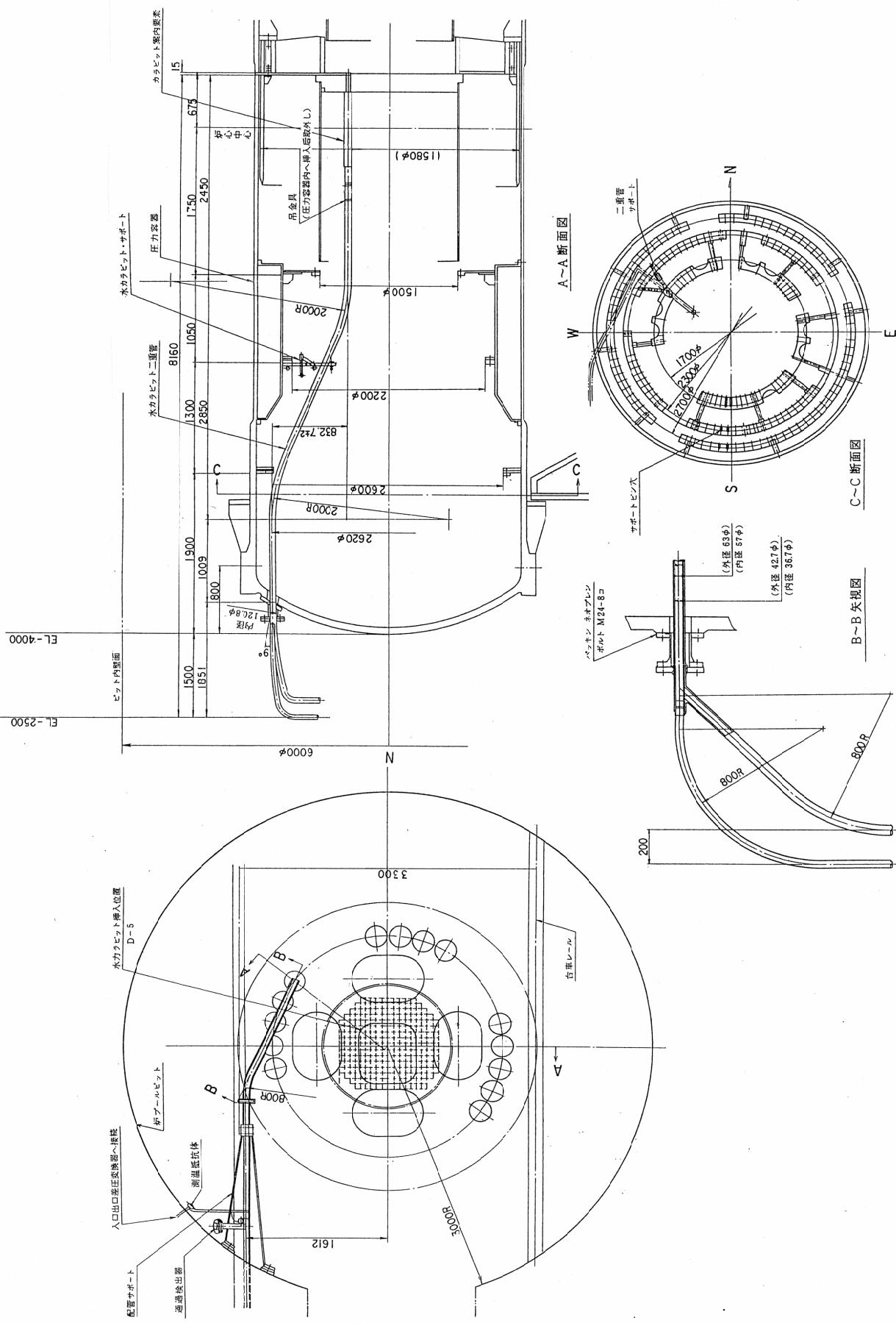


Fig.10 炉内管配置図(照射装置設置ケース1)

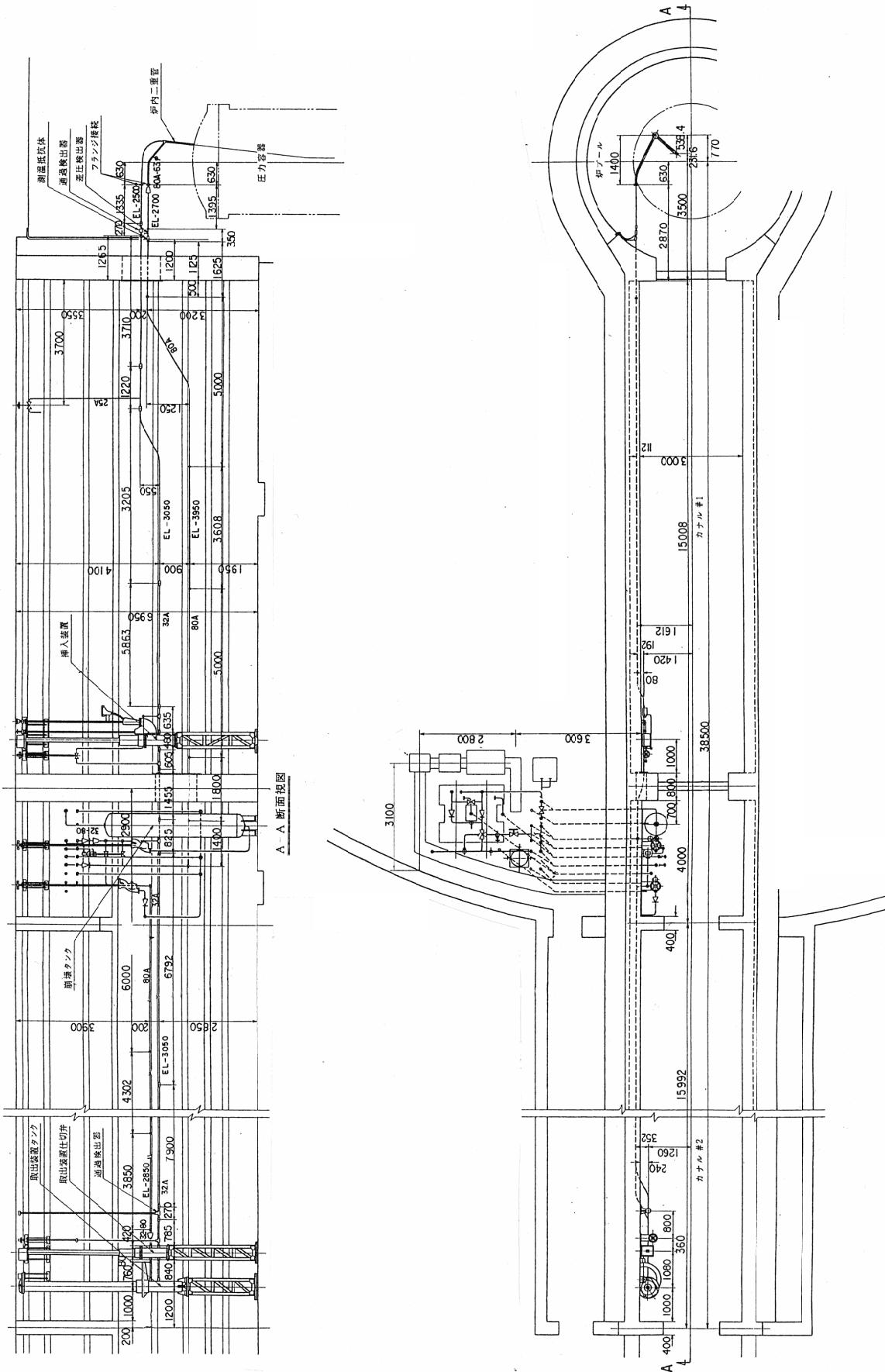


Fig.11 炉外装置配置図(照射装置設置ケース1)

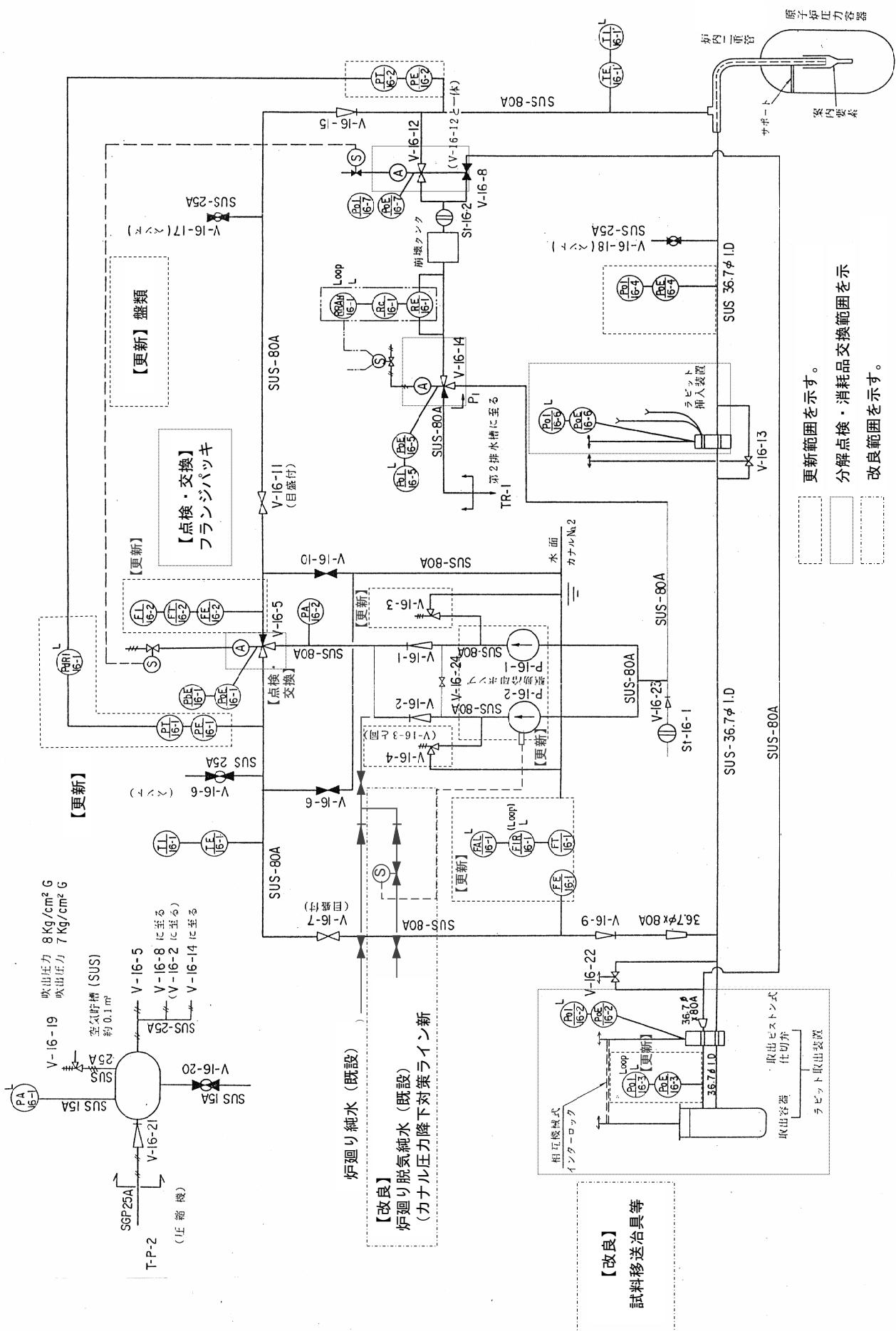


Fig.12 系統図(照射装置設置ケース1)

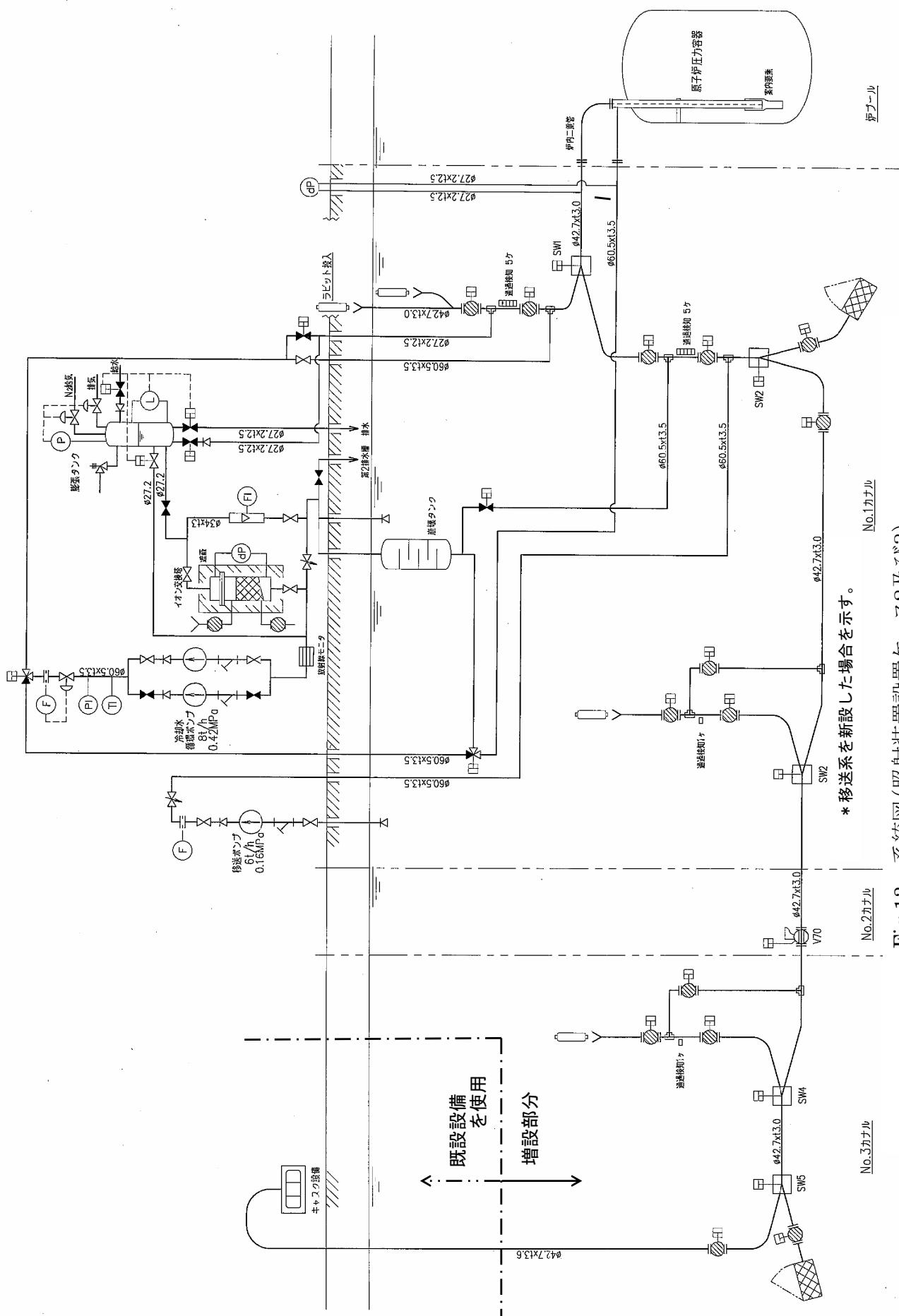


Fig.13 系統図(照射装置設置ケース2及び3)

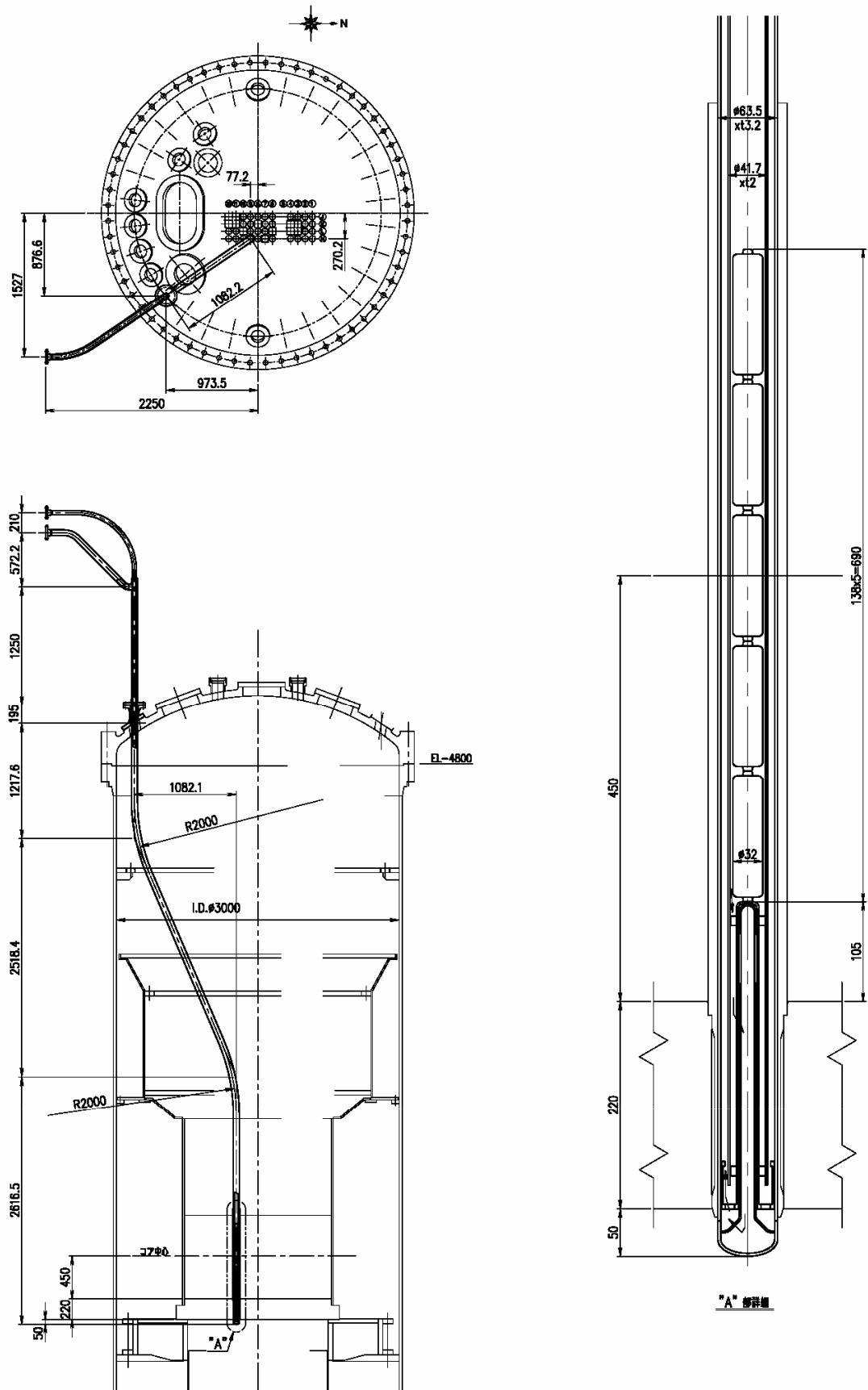


Fig.14 炉内管配置図(照射装置設置ケース2)

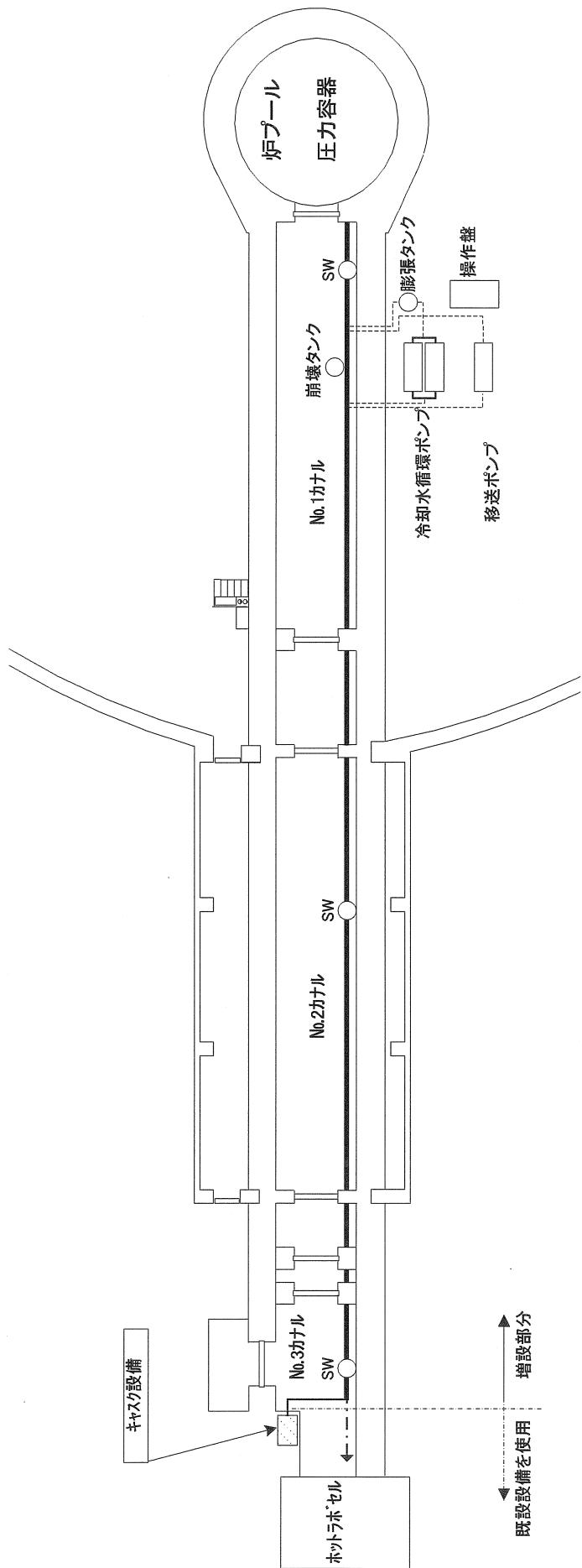


Fig.15 炉外装置配置図(照射装置設置ケース2)

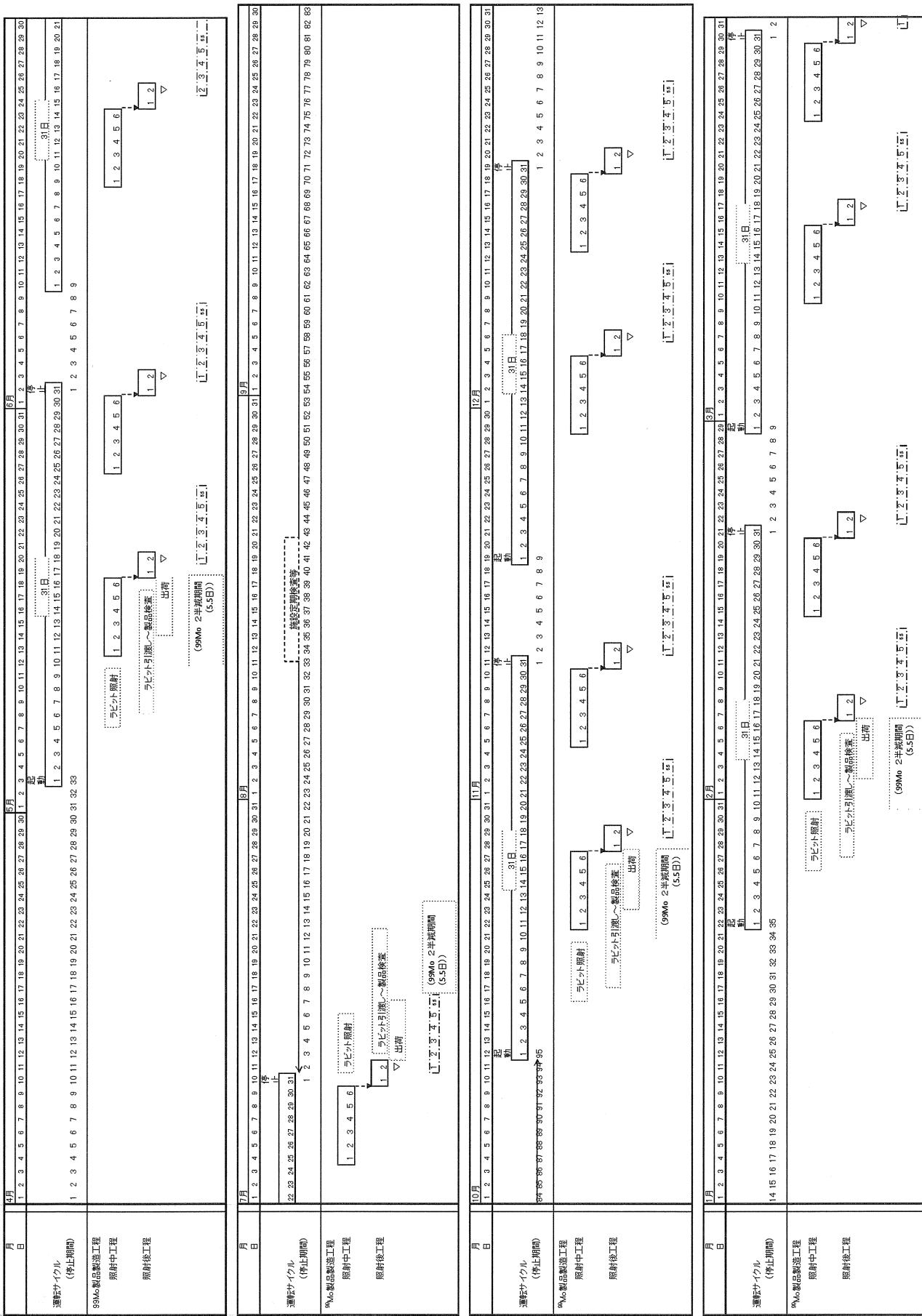
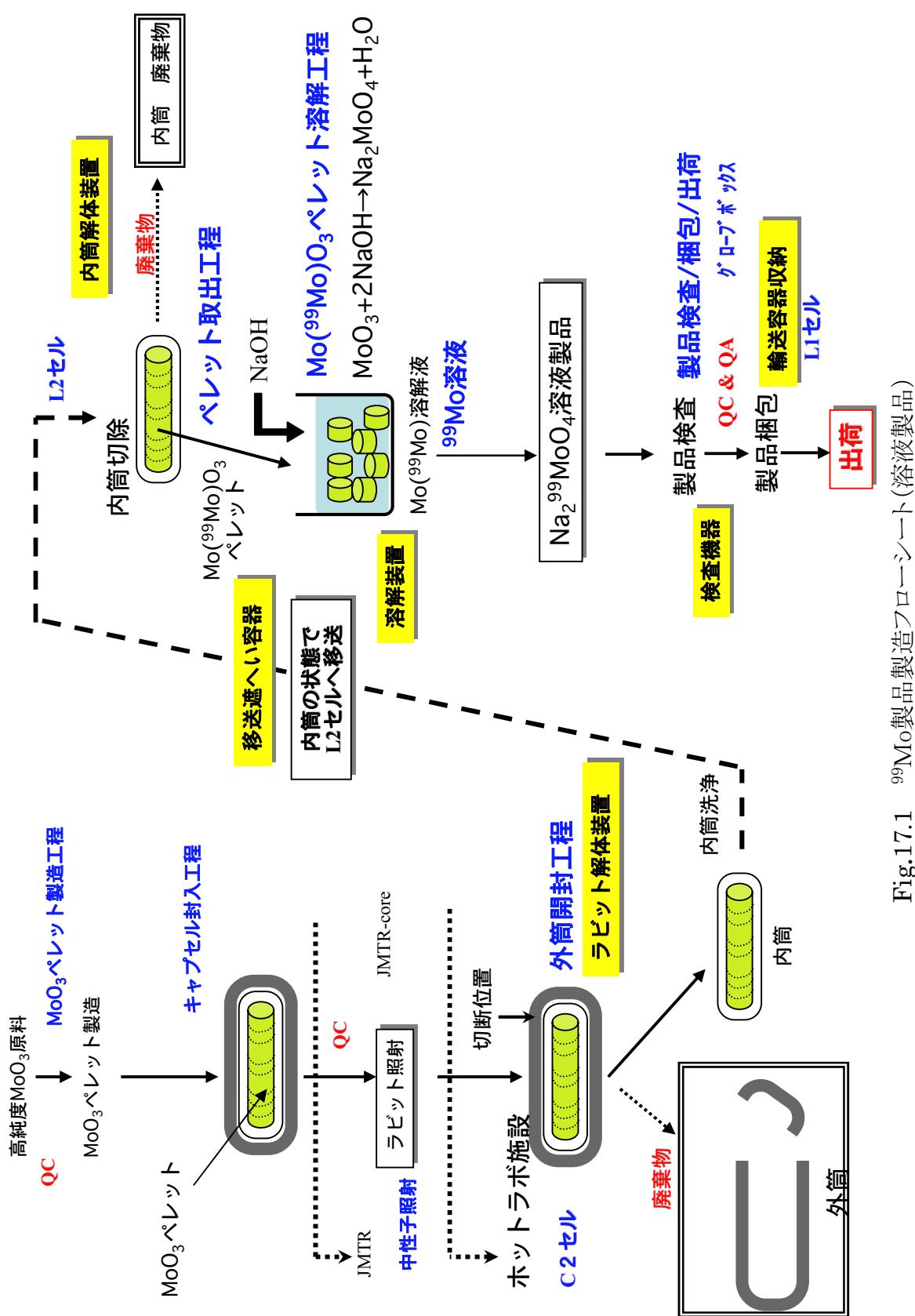
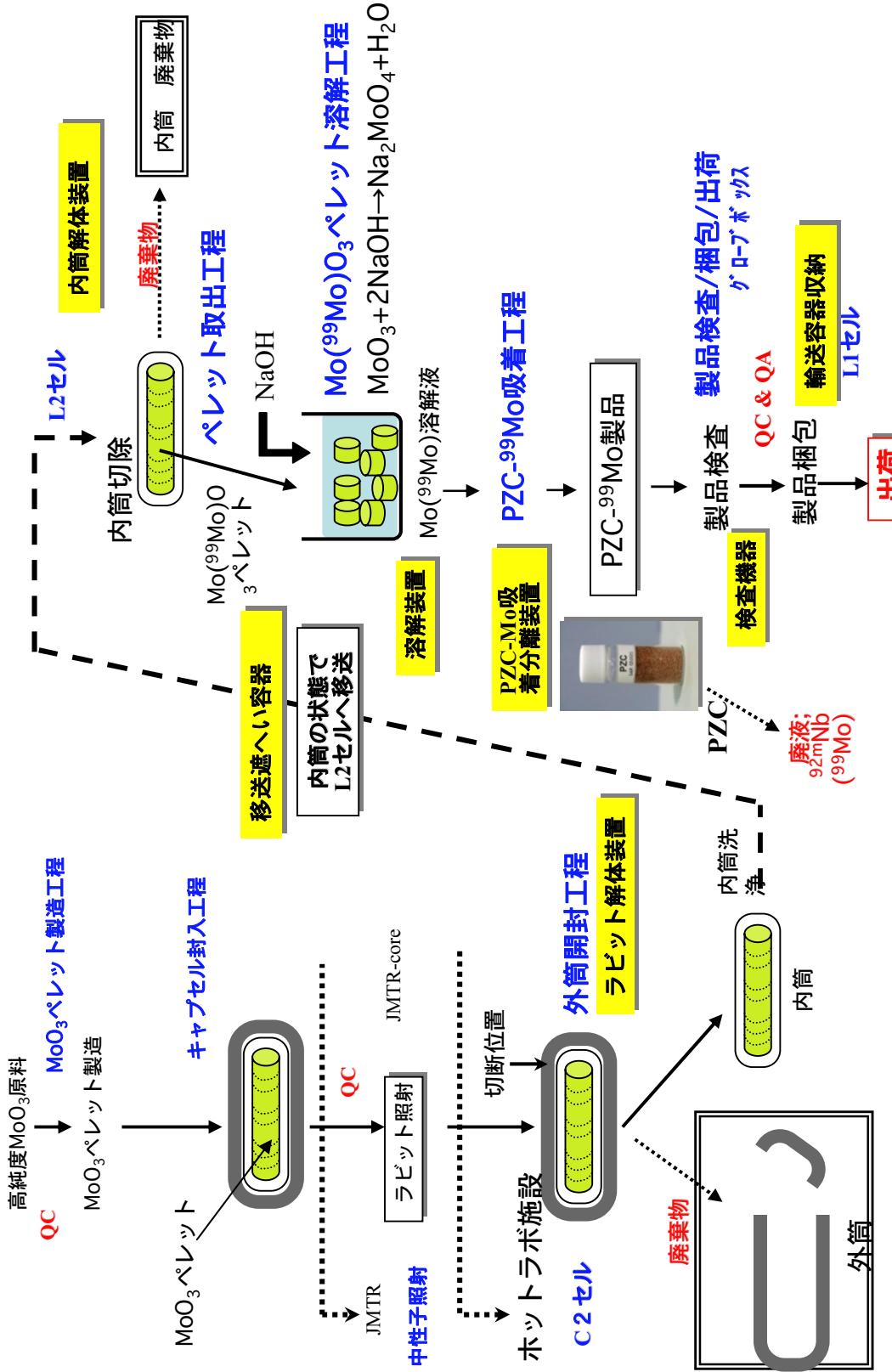


Fig.16 99Mo製品 年間製造スケジュール例(照射試験炉 年間180日運転例)

Fig.17.1 ^{99}Mo 製品製造フローシート(溶液製品)

Fig.17.2 ^{99}Mo 製品製造フローチート(PZC吸着製品)

Mo溶解操作／精製操作／品質管理／梱包／出荷
(PZC- ^{99}Mo 吸着操作)

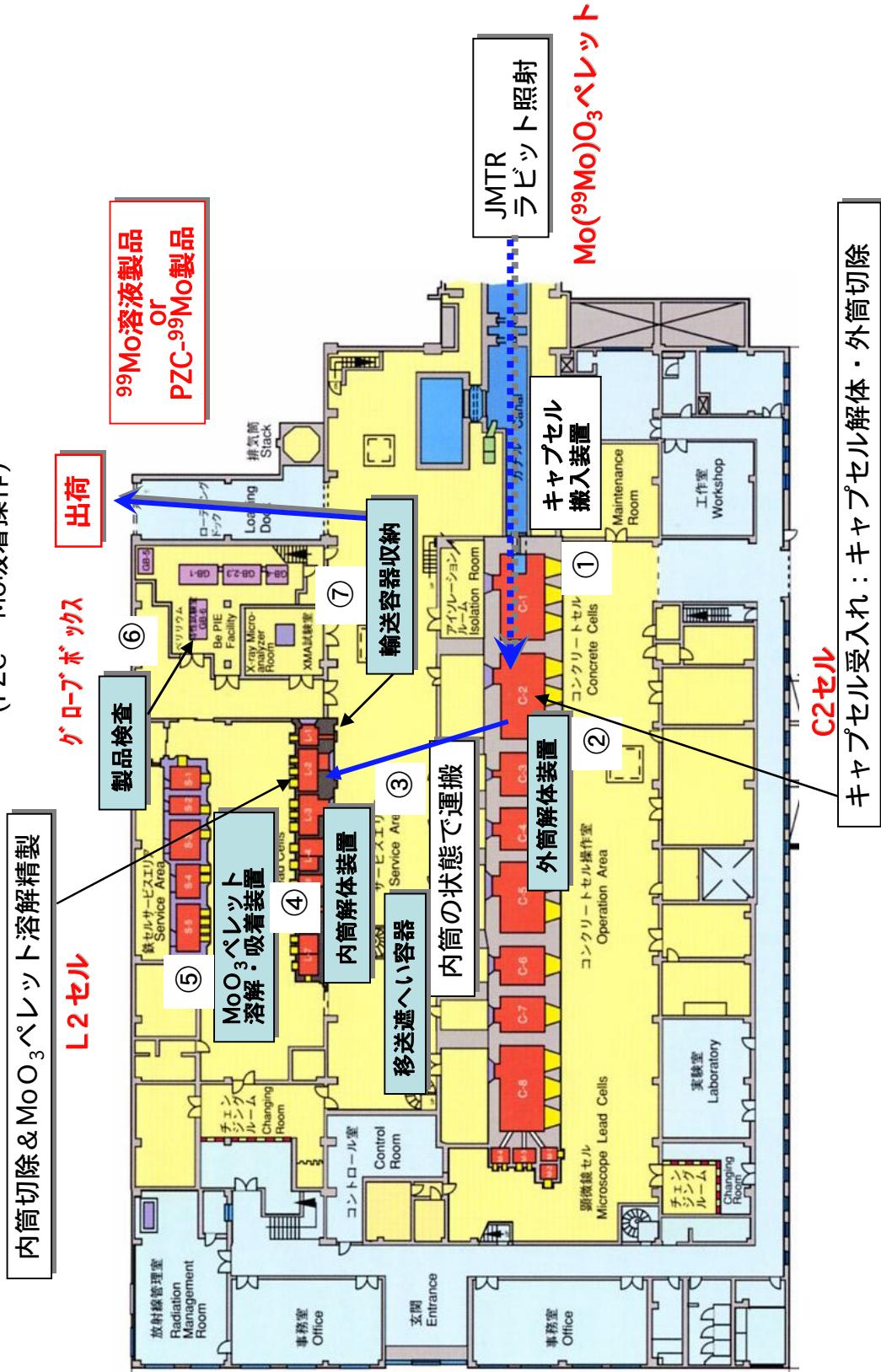


Fig.18 ホットラボ施設での ^{99}Mo 製造の流れ

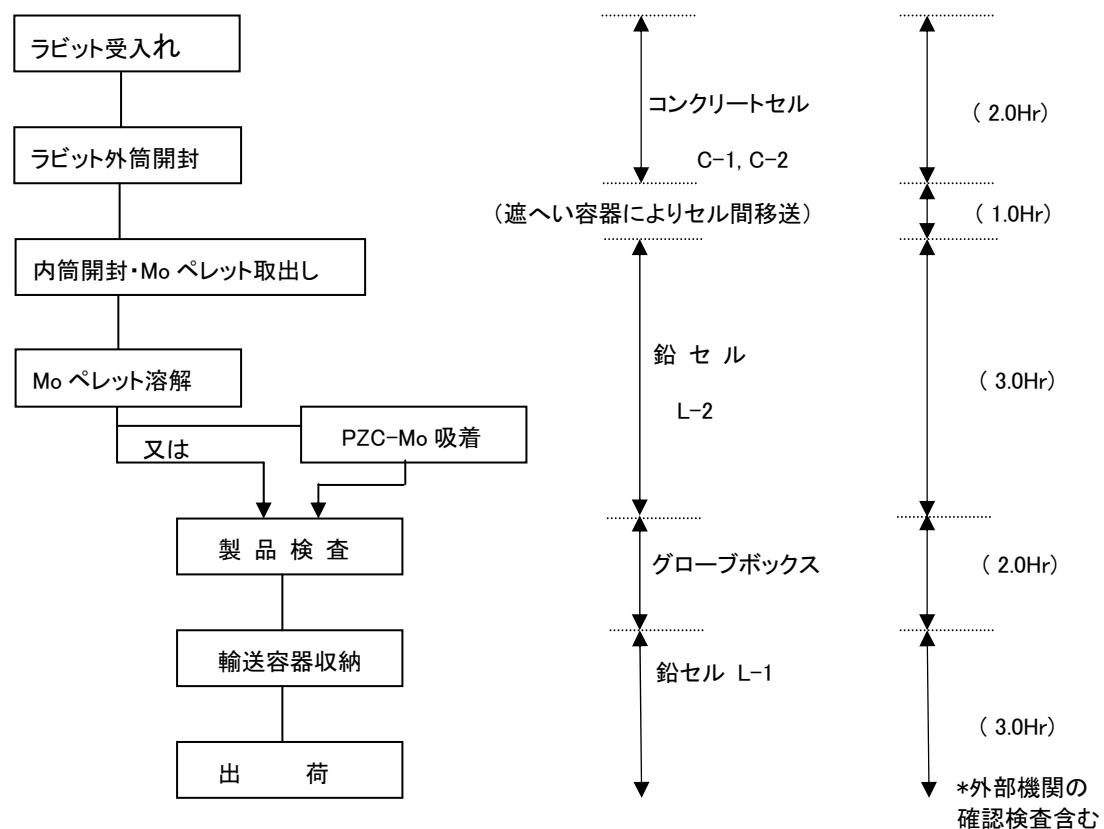
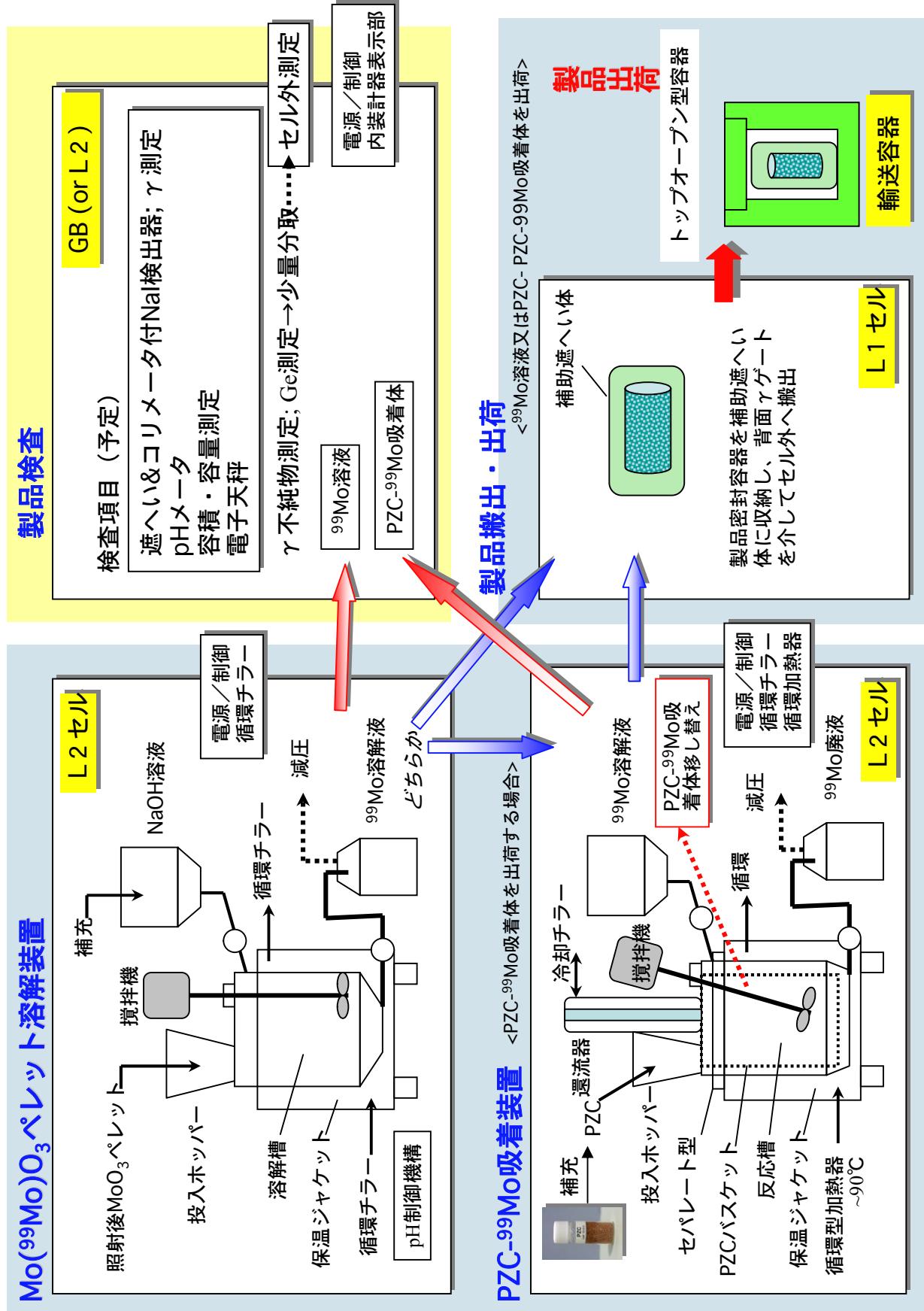
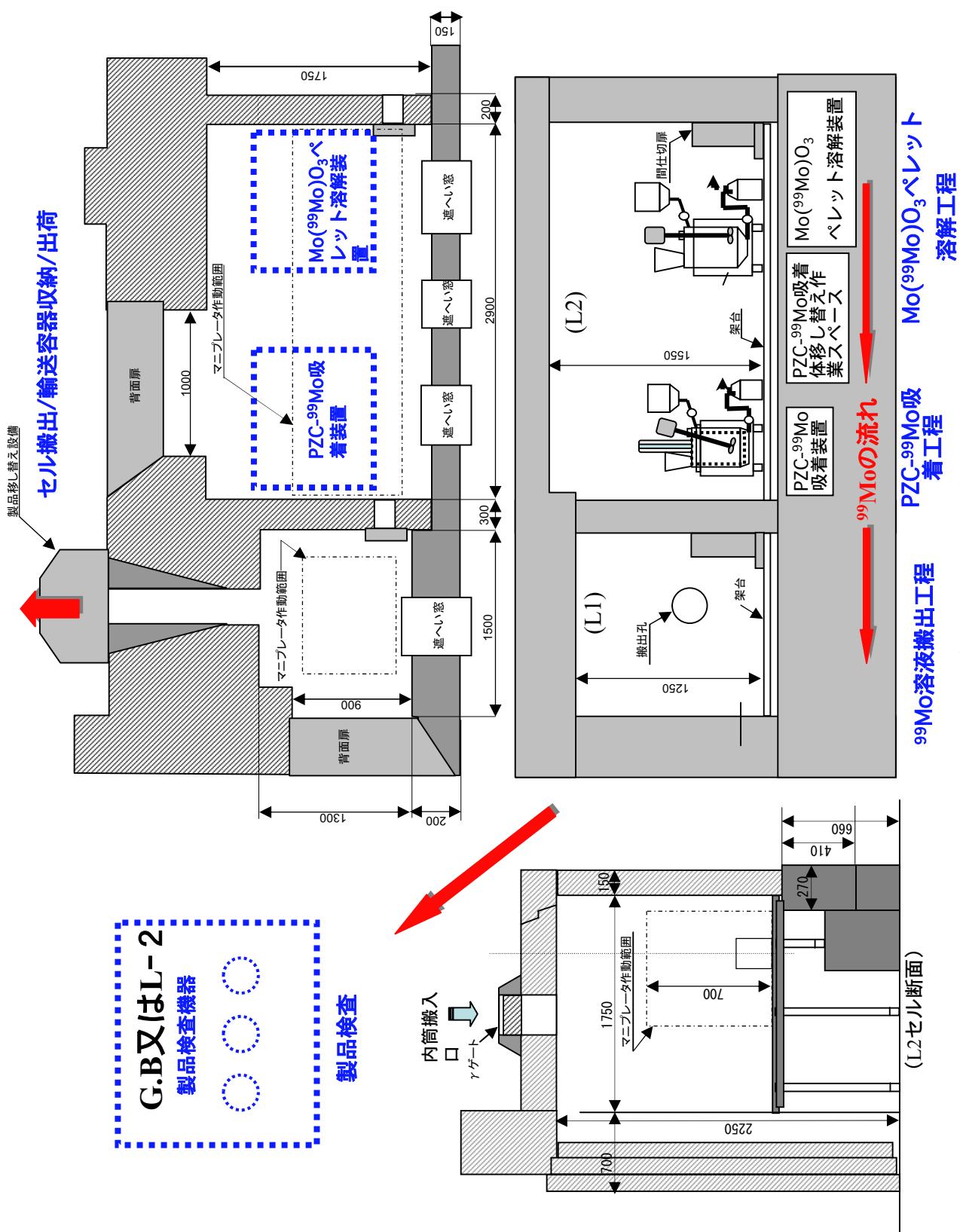


Fig.19 99Mo 製品製造に係るホットラボ作業時間

Fig.20 ⁹⁹Mo製造関連設備(L2セル内設置予定)

Fig.21 ^{99}Mo 製造設備のセル内配置

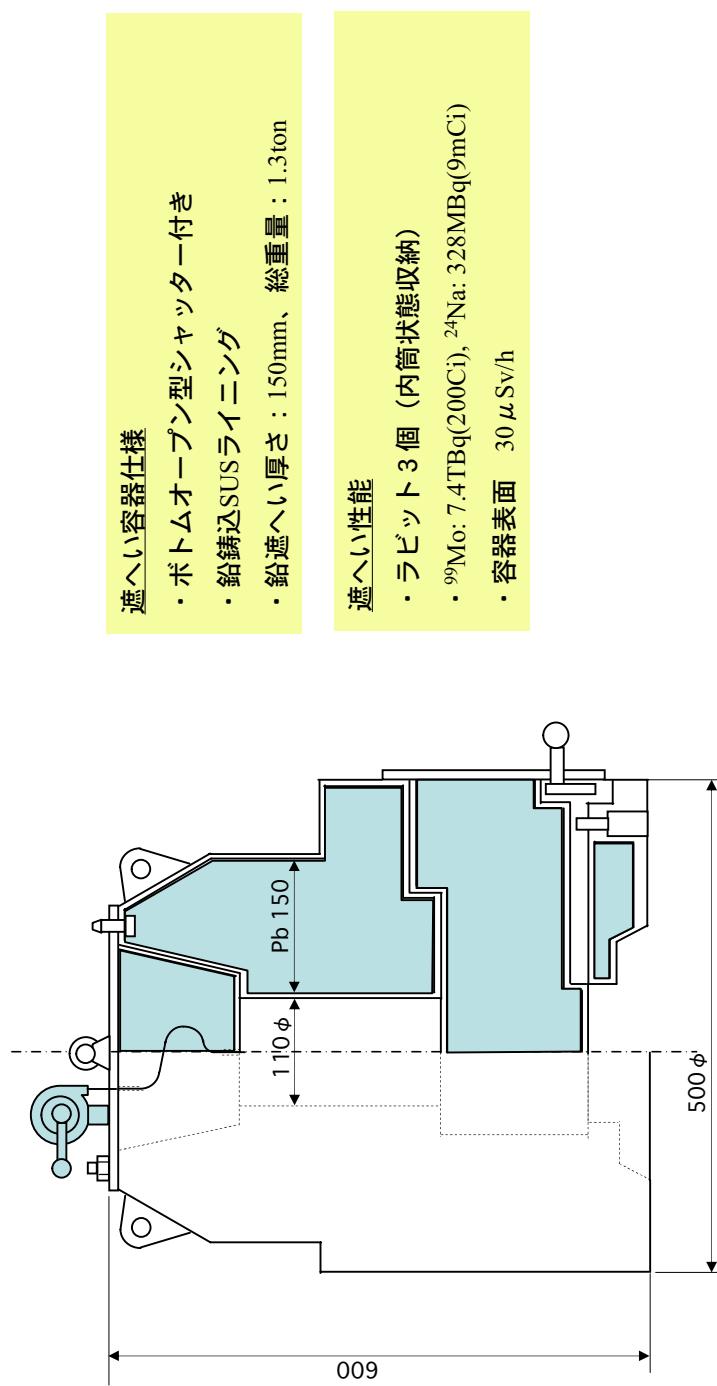
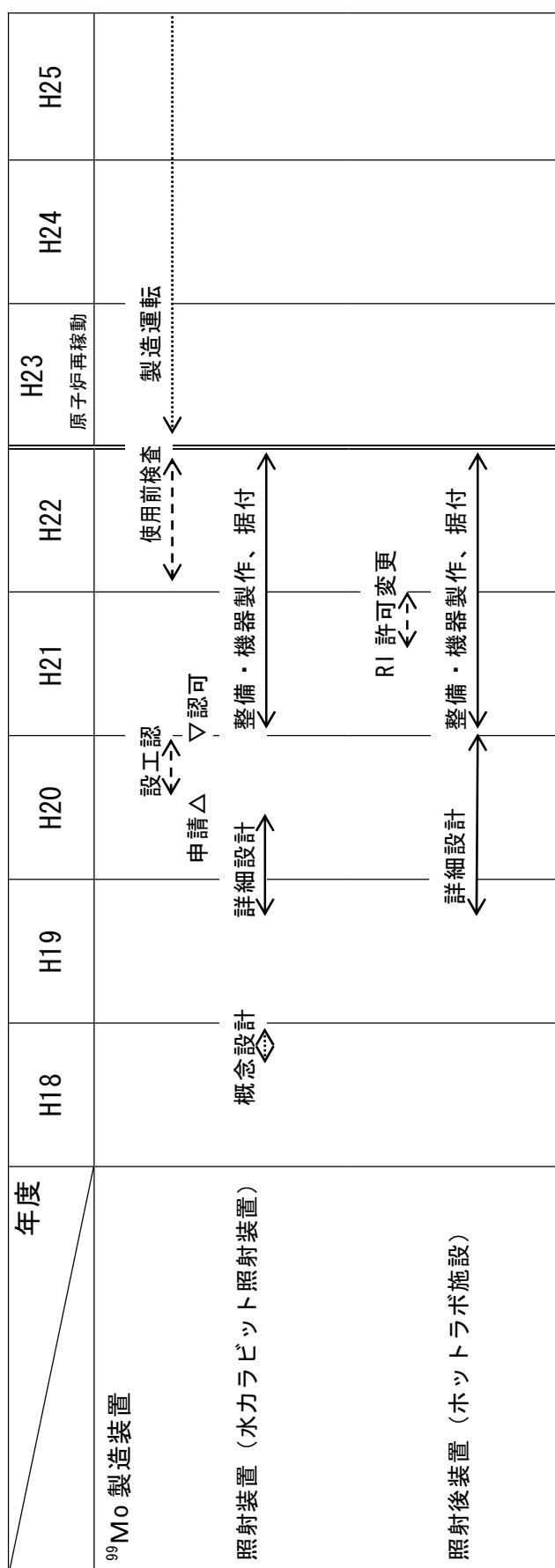
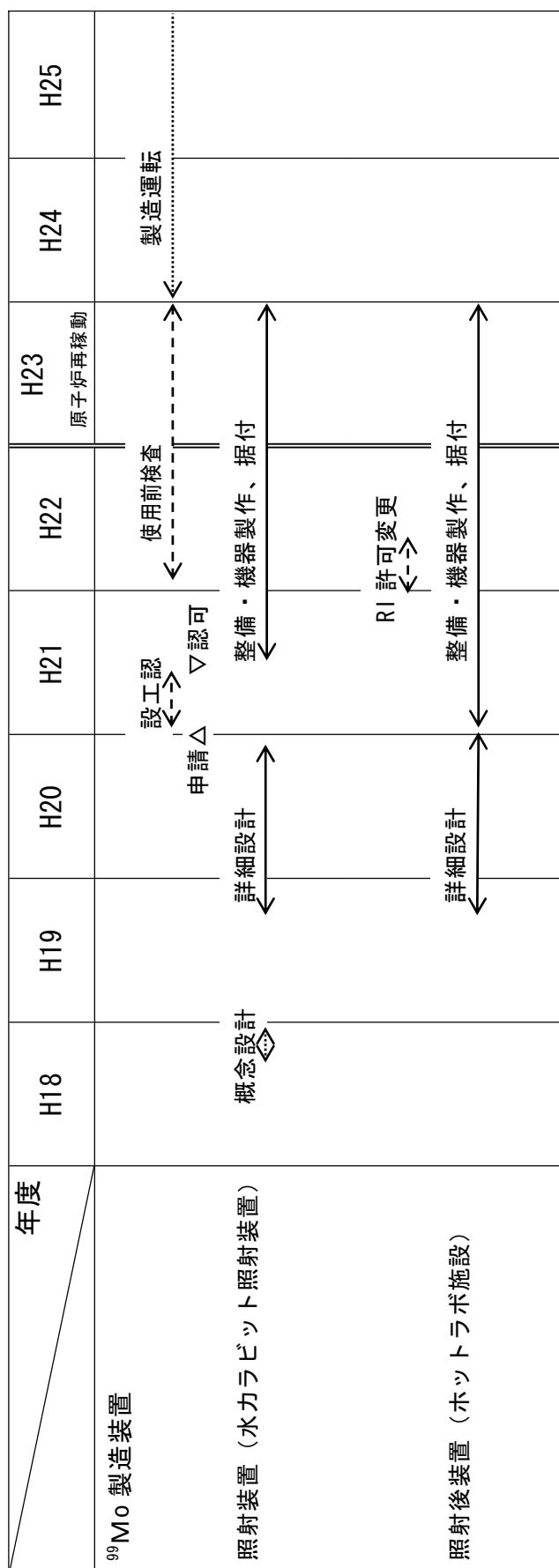


Fig.22 ホットラボ施設内移送用 遮へい容器の概要

Fig.23.1 ^{99}Mo 製造設備の整備・設置 概略工程(ケース1)

Fig.23.2 ⁹⁹Mo 製造設備の整備・設置 概略工程(ケース2、3)

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	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法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
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^{-2}$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	lm/m^2
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)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“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

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}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ポアソン	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m/s$
ガウス	G	$1 G \triangleq 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 γ=1 nT=10^{-9} T$
ジヤンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリヨン	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 μm = 10^{-6} m$

