

OPAL 炉における照射技術の調査

Overview of Irradiation Technology in OPAL Reactor

細川 基作 出雲 寛互 石塚 悅男

Jinsaku HOSOKAWA, Hironobu IZUMO and Etsuo ISHITSUKA

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

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

OPAL 炉における照射技術の調査

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 原子炉施設管理部

細川 甚作、出雲 寛互⁺、石塚 悅男⁺

(2008 年 3 月 31 日 受理)

JMTR に設置する新しい照射設備の技術開発に資するため、オーストラリア OPAL 炉の医療用 RI 製造用 ⁹⁹Mo 製造設備、シリコン半導体製造設備、気送管照射設備、RI 取扱設備について調査した。本報告書は、これら照射設備について、設備の構造や安全設計の考え方等の調査結果をまとめたものである。

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

⁺照射試験炉センター

Overview of Irradiation Technology in OPAL Reactor

Jinsaku HOSOKAWA, Hironobu IZUMO⁺ and Etsuo ISHITSUKA⁺

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

(Received March 31, 2008)

For the purpose of advanced technology developments on new irradiation facilities installed in the JMTR, the ⁹⁹Mo production facility for medical RI, silicon semiconductor production facility, pneumatic irradiation facilities, RI handling facilities in the OPAL were investigated. In this paper, basic structure and the safety design concepts for these irradiation facilities are reported.

Keywords: OPAL, RI Production, Si Semiconductor Production, Pneumatic Irradiation Facility, Irradiation Technology

⁺ Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

目 次

1.はじめに	1
2. ⁹⁹ Mo 製造設備	1
3. シリコン半導体製造設備	3
4. 気送管照射設備	6
4.1 長時間照射設備.....	7
4.2 短時間照射設備.....	11
5. 放射性同位元素取扱設備（ホットセル）	12
6. まとめ	15
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. Irradiation facility for ⁹⁹ Mo production	1
3. Irradiation facility for silicon semiconductor production	3
4. Pneumatic irradiation facility	6
4.1 Long residence time irradiation facility	7
4.2 Short residence time irradiation facility	11
5. Radiation isotope handling facility (Hot cell)	12
6. Concluding Remarks	15
References	16

This is a blank page.

1. はじめに

JMTR は、平成 23 年度からの再稼動を目指し、平成 19 年度から 4 年間で原子炉施設の改修を進めている。原子炉施設の改修では、原子炉機器の一部更新と新しい照射設備の整備を検討している。

OPAL 炉は、INVAP 社(アルゼンチン共和国の政府系資本の株式会社)が設計及び建設を行い、ANSTO(Australian Nuclear Science and Technology Organization)が所有している。主な炉のスペックを以下に示す¹⁾⁻³⁾。また、OPAL 炉の外観及び炉プールの写真を Fig.1-1 及び Fig.1-2 に示す。

- ・炉のタイプ : プール型
- ・熱出力 : 20MW
- ・冷却材 : 軽水
- ・反射材 : 重水
- ・最高熱中性子束 : $3 \times 10^{18} (\text{n}/\text{m}^2)$
- ・最高高速中性子束 : $2 \times 10^{18} (\text{n}/\text{m}^2)$
- ・主な照射設備 : シリコン半導体製造設備、気送管照射設備、ビーム設備

本報告書は、JMTR に設置する新しい照射設備として、特にシリコン半導体の製造設備や放射性同位体の製造設備等の新たな照射設備技術開発に資するため、オーストラリアの OPAL 炉(Open Pool Australian Light-water reactor)の照射施設について調査とその結果をまとめたものである。調査では、医療用 RI に利用される⁹⁹Mo 製造設備、シリコン半導体製造設備、気送管照射設備、放射性同位元素取扱設備(ホットセル)の構造や安全設計の考え方等を調べた。

2. ⁹⁹Mo 製造設備

⁹⁹Mo(半減期:約 66 時間)は、がんの診断、脳や内臓の機能検査などに使用する放射性医薬品として使われている^{99m}Tc(半減期:約 6 時間)の親核種である⁴⁾。オーストラリアでは、⁹⁹Mo を²³⁵U の核分裂法で製造しており、ほぼ自国で自給している。

(1) 設備の概要

OPAL 炉では、17 基の RI 製造設備のうち、12 基が⁹⁹Mo 製造の専用設備となっている。⁹⁹Mo 製造設備の照射位置を Fig.2-1 および Fig.2-2 に示す。

キャップセルは、炉プールおよびサービスプールの上を移動するオペレーションブリッジで装荷・取出しを行うため、容易にかつ安全な取扱いが出来るように設計されている。特に、誤装荷されないように異なる径を有するキャップセルが使用されている。また、原料となる²³⁵U ターゲットを安全に収納できるようカバー機構があり、キャップセルには飛び出しを防ぐためのロック機構が設けられている。キャップセルは、長さが 1.15m、外径が 50mm、空状態での重量が 1.5kg である。⁹⁹Mo 製造に使用するキャップセルの反応度には以下の制限値が設けられている。

- ・⁹⁹Mo 製造用の最大反応度は 200pcm 以下。
- ・固定および固定されていないキャップセルの合計反応度は 3000 pcm 以下。

- ・移動する場合の反応度添加率は 10 pcm/s 以下。
- また、熱水力設計として設計上、下記が考慮されている。
 - ・核沸騰開始(ONB)熱流束と照射中の最大熱流束の割合が 1.3 以上。
 - ・キャップセルの最大壁温度はチャンネル出口で飽和温度以下。
 - ・通常運転中に炉心から取り出されたキャップセルは、自然対流で冷却できること。

(2) 設備の構造

キャップセルの材料は、機械的特性や低中性子吸収を考慮して、ジルカロイを採用している。 ^{99}Mo 製造用キャップセルの概要及び写真を Fig.2-3 及び Fig.2-4 に示す。これらのキャップセルは、 ^{99}Mo の他に、 ^{131}I および ^{192}Ir を生産するために利用されており、そのため原料として二酸化テルルおよびイリジウム金属を照射できる構造としている。キャップセルで発生した熱は、キャップセルと照射孔の間を下方向に流れる冷却水で冷却する構造となっている。キャップセル底部には、冷却水の流用を調整するための交換可能なノズルが設置されている。ターゲット(原料)は、長さ 150mm で、キャップセルに取り付けられ、一つの照射孔に最大 5 個まで装荷できる。 ^{99}Mo 製造用ターゲットは、 ^{235}U 濃縮度が 19.7 %、板の寸法が 130mm × 35mm × 1.4mm のアルミ被覆ウランアルミナイトである。通常、これらのターゲットは、キャップセルに 4 枚程度配置し、3つのキャップセルを一つの照射孔で照射している。

12 本の ^{99}Mo 製造用キャップセルを照射した場合の最大発熱量は 1500kW であり、安全解析により必要な冷却水速を確保できるような設計としている。Fig.2-5 に示す各照射孔での平均熱中性子束は、 $8 \times 10^{17}(\text{n}/\text{m}^2/\text{s})$ 以上となっている。なお、どの照射孔においても $5.6 \times 10^{17}(\text{n}/\text{m}^2/\text{s})$ 以上、かつ $1.5 \times 10^{18}(\text{n}/\text{m}^2/\text{s})$ 以下である。 ^{99}Mo の生産能力は、4 から 6 個のターゲットを 2 箇所で照射した場合、37TBq/週である。

^{99}Mo の製造工程を Fig.2-6 に示す。ターゲットの準備およびキャップセルへの装荷作業は、原子炉施設外の施設で行われる。また、 ^{99}Mo の製造工程に必要となるオペレータの作業は、ソフトウェアスケジューリングシステムによって支援されている。

炉内装荷から搬出までの流れを Fig.2-7 から Fig.2-9 に示す。新しいターゲットは、炉プール上の移送ホットセルでキャップセルに組み込まれる。ターゲットを装荷したキャップセルは、サービスプールエレベーターを使用して移送ホットセルからサービスプールへ移動させ、オペレータがオペレーションブリッジを利用して照射孔に装荷する。照射後は、オペレータがオペレーションブリッジから手動で取出し、減衰期間中は炉プール中のラックの中に置かれる。次に、照射したキャップセルは、サービスプールへ移動させ、目視等による確認を行った後、移送ホットセルに戻して解体される。サービスプールの貯蔵施設は、50 本のキャップセルを収容できる。

解体したキャップセルは、ホットセル内エレベータを介して装荷ホットセルに移動させ、ボトムローディングキャスクで RI 生産施設へ送られる。

(3) 設備の安全設計

本設備の安全設計においては、以下の項目について考慮している。

1) キャップセルの冷却

キャップセル表面の熱流束は、核沸騰開始(ONB)熱流束より低く抑えられている。ONB は、危険な

事象には該当しないが、定常状態における制限値として取扱われているため、本設備でも保守的な評価を行うために利用されている。

2) キャップセルの移動

キャップセル冷却システムにより、原子炉定格出力運転中においてキャップセルの装荷および取出しが可能である。設計では、最大 2 本の ^{99}Mo 製造キャップセルと ^{99}Mo 製造キャップセル以外の 1 本のキャップセルの取出が可能となるように設計されており、装荷・取出しの際には、わずかな水力学挙動の変動が生じる程度で、冷却能力にほとんど影響を与えない。

3) 照射キャップセルのキャップ

落下物に対する防護のために、以下の考慮がなされている。

- (i) リフレクターべッセル上部面がキャップセル照射用の開口部を有している。
- (ii) 上部板へのキャップセルの固定はキャップ式となっており、異物の侵入を防止する。キャップセルの取出しには、キャップを外さなければならない。
- (iii) 照射孔側壁は細かいメッシュで作られており、キャップセルを冷却し異物の混入を防止している。

キャップセルの装荷・取出しに特殊ツールが必要である。装荷・取出し作業は、ソフトウェアスケジューリングシステムで管理されており、不注意な取出し等が生じないようになっている。

4) 冷却水流量の喪失

照射キャップセル冷却システムのポンプが故障した場合は、「流量低下」信号により原子炉が停止する。原子炉停止後、キャップセルは上方向の自然循環によって冷却される。

5) 冷却水喪失(LOCA)

炉心冷却システムおよびキャップセル冷却システムでは、冷却水喪失事故時の冷却能力及び冠水を持続するため、炉心上部にサイフォンブレーカーが設置されている。配管破断事故の場合には、炉心および照射キャップセルが自然循環によって冷却される設計となっている。

6) キャップセルの誤装荷防止

キャップセルの誤装荷を防止するため、照射孔の形状が異なっている。また、手順書や管理によっても誤装荷を防止している。

7) ターゲット被覆の損傷／漏洩

キャップセル冷却システムには、核分裂生成物検出器および放射線液体モニターが装備されており、照射ターゲットの破損や漏洩を検出している。

8) 材料の共存性(キャップセル／ターゲット)

照射設備では、照射キャップセルにアルミおよびチタン、インナーキャップセルにアルミ、照射管にジルコニウム合金が使用されている。これらの材料は多くの研究炉での利用実績があり、共存性の観点から問題になることはない。

3. シリコン半導体製造設備

オーストラリアでは、研究炉を利用した中性子核変換ドーピング(Neutron Transmutation Doping : NTD)法によるシリコン半導体の製造を実施しており、NTD シリコン半導体の製造量としては世界の約

10%を生産している⁵⁾。NTDシリコン半導体の需要は、ハイブリッド電気自動車等の需要が大きく、より大口径のシリコン半導体の生産が求められている。このため、OPAL炉においても、大口径のシリコン半導体を照射するための施設が設置されている。

(1) 設備の概要

シリコン半導体の製造設備としては 6 基の大型照射施設がある。炉心の照射位置を Fig.3-1 及び Fig.3-2 に示す。また、大型照射施設を含む炉プールの写真を Fig.3-3 に示す。シリコン単結晶は、リフレクターベッセルの 6 本の照射孔に設置された専用キャップセルに装荷される。

シリコン半導体製造用キャップセルの概念図を Fig.3-4 に示す。キャップセルには、内側エレメントガイドの上部に 3 個のベアリングが取付けられており、内部エレメントが回転できる構造となっている。また、底部にはクイックリースペアリングアセンブリー設置されており、アセンブリー荷重を支えている。内部エレメントは、内側回転エレメントの上部に取り付けられているタービンによって回転する構造となっている。6 個の照射孔に設置されたタービンは、2 台のポンプによって炉プール水を再循環させることによって 150rpm 以下で回転する。これに加えて 1 台のポンプがバックアップとして待機状態となっている。シリコン半導体の品質は回転速度にほとんど影響しないことから、比較的低速の回転速度で照射が行われる。回転速度を制御する流量制御バルブは、シリコン半導体の装荷・取出し、あるいは保守作業のために取り外せる構造となっている。また、キャップセルが故障した場合に備えて、キャップセルごとリフレクターベッセルから取外せる構造になっている。

(2) 設備の構造

シリコン半導体の製造設備 6 基のうち、大型が 2 基、中型が 1 基、大中型が 3 基であり、これらのキャップセルはリフレクターベッセルを貫通しているチューブの中に設置されている。シリコン半導体製造設備の仕様を Table.3-1 に示す。これらのキャップセルは、原子炉の運転中に移動できないように固定されている。キャップセルの核的制限値は以下のように設計されている。

- ・ シリコン半導体製造設備の最大反応度は 200pcm 以下。
- ・ 固定および固定されていないリグの合計反応度は 3000 pcm 以下。

また、熱水力学的観点からは、ONB の発生を避けるように設計されている。キャップセルの総発熱量は、22.5kW で、キャップセル冷却システムによって下方向の強制流により冷却される。なお、シリコンのインゴットで発生する 1 体当たりの熱量は、0.42kW 程度である。

シリコン半導体製造用キャップセルには、装置ごとに取外し可能なフラックス平坦化装置が設置されており、リフレクターベッセルとの間には 50mm の反射材が設置されている。各キャップセルの熱中性子束はバナジウム SPND で監視するシステムとなっている。シリコンの収納容器は、冷却水が下方向に流れているために抑え枠等は必要なく、原子炉運転中に取り出せるような構造になっている。また、黒鉛スペーサを利用してシリコンの高さ位置を調整している。冷却は、シリコンと装置間の 2mm のギャップで行っている。

シリコン半導体製造設備では、長さ 600mm のシリコンの中心位置が熱中性子束のピークとなるが、運転サイクルを通じて熱中性子束は軸方向で平均 5%以下の誤差となっている。また、目標の熱中性子束分布を得るために、ダミーシリコンおよび黒鉛を上下に配置している。また、径方向の均一性を得る

ために、前述と同様に回転構造となっている。本設備の熱中性子束及び照射位置を Table.3-1 及び Fig.3-5 に示す。

炉プール内でのシリコンの移送は、専用のクレーンおよびオペレーションブリッジを使用する。照射後、シリコンは一時貯蔵のために炉プールおよびサービスプール内の専用貯蔵ラックに仮置きされる。短半減期核種が減衰した後、照射済シリコンはサービスプール内にある装荷・取出しステーションへと移送され、収納容器から取出される。収納容器は、未照射の新しいシリコンを再び装荷し、炉心に装荷される。照射済シリコンは、洗浄・乾燥した後、梱包等を行い、専用車両で輸送される。また、これらの作業は、ソフトウェアスケジューリングシステムによって管理されている。

未照射および照射済シリコンの受入れおよび発送は、トラックアクセス区域で実施される。 トラックアクセス区域は他の RI 施設コンテナーの積込・荷卸しのために使用される。ここでは、重量物およびパレットの移動を可能にするために 10 トンのクレーンが設置されている。 トラックアクセスには隣接して RI 貯蔵用の部屋があり、必要に応じて一時貯蔵が可能となっている。また、 トラックアクセスの隣にはサービスリフトがあり、未照射のシリコン等はこのリフトで NTD シリコン室へ運ばれる。

NTD シリコン室は、試験区域、梱包区域、貯蔵区域、オフィス区域に分かれている。未照射シリコンは、この区域で開梱され、専用ツールでサービスプール壁に位置する装荷・取出しステーションから照射施設に装荷される。シリコンは、専用モノレールおよび原子炉ホールクレーンを利用して、サービスプールから炉プールへと移送される。照射孔への装荷は、オペレーションブリッジから特殊ツールを使用して実施される。洗浄ステーションから炉心装荷の経路を Fig.3-6 に示す。

照射済シリコンは、オペレーションブリッジおよび専用ツールを用いて、回転しているキャップセルから取出され、原子炉容器の側壁上に取り付けられている作業台の上に置かれる。この後、専用モノレールおよび原子炉ホールクレーンを用いてサービスプールの貯蔵施設に移送される。サービスプールの貯蔵施設の面積は約 6m² である。貯蔵施設には、大量の照射キャップセルおよびコンポーネント、シリコン収納容器およびその他のサンプルターゲットを一時貯蔵できる。サービスプールで貯蔵した後、照射済シリコンを入れた収納容器は、サービスプール壁上の装荷/取出し移送ステーションへと移送される。ここで照射済シリコンはシリコン収納容器から取出され、原子炉ホールクレーンモノレールを使用してステーションに隣接する洗浄ステーションへと移送して洗浄され、トロリーでシリコン室へと移送される。プール上部にはサービスプール貯蔵区域と隣接してシリコンの装荷および取出しのための 2m² の処理区域がある。シリコンはこの位置から、サービスプール脇に取り付けられた作業台を経由してシリコン室へと移送される。キャップセル取出しから洗浄ステーションへのルートを Fig.3-7 に示す。

照射済シリコンは、サービスプールの側壁に隣接するプール上で純水を使用して洗浄され、圧縮空気によって乾燥して汚染チェックされる。サービスプールで適切に洗浄できなかったシリコンは、密閉容器に収納し、さらに洗浄するためにシリコン室に移送する。再洗浄は、純水、窒素ガス、圧縮空気、電気ブラシ等で行い、必要に応じて酸等も使用できるように小さな薬品タンクも設置している。

(3) 設備の安全設計

本設備の安全設計においては、以下の項目について考慮している。

1) シリコンの冷却

照射中の発熱は、ONB を避けるための冷却条件を満足するよう、キャップセル冷却システムで冷却さ

れる。

2) シリコン収納容器の移動

キャプセル冷却システムは、原子炉定格出力運転時にシリコン収納容器の装荷および取出しができるように設計されている。このため、シリコン収納容器 1 個を取り出しても、残りのキャプセルの冷却能力に影響を及ぼさない設計としている。

3) キャプセル流量の喪失

キャプセル冷却システムポンプに故障が発生した場合には、原子炉安全保護系の「低流量」信号で原子炉が停止する設計となっている。この際、プールシステムフラップバルブが開き、キャプセルは上方向の自然循環によって冷却される。

4) プール LOCA

一次冷却系およびキャプセル冷却システムにはサイフォンブレーカー弁が設置されており、配管破断事故時の炉心およびキャプセルを自然循環によって冷却できる構造になっている。

5) 放射線被ばく

作業職員の偶発的な放射線被ばくを防止するため、全ての手動作業は水中で実施し、装荷および取り出しづるは、安全水位より上で作業できないよう設計されている。

6) 材料の共存性

シリコン、黒鉛、アルミおよびステンレス鋼を使用しており、運転条件下での共存性の観点での問題はない。

7) 反応度への影響

核計算による解析によって、反応度への影響がほとんどないことを確認している。

8) 核計装への影響

リフレクターベッセルの外側および照射位置でのキャプセル移動の影響を評価し、原子炉出力自動制御システムおよび原子炉安全保護系の核計装に対する変化を最小限にできる位置に検出器を配置している。

4. 気送管照射設備

気送照射設備は、簡易に照射できる装置で、気送移送システムを使用することによって数秒から数時間までの照射が可能であるとともに照射試料を放射化学実験室に直接移送することも可能である。照射試料は、照射に適した専用のキャプセルを利用して照射される。

OPAL では 2 種類の気送管照射設備がある。

- a) 長時間照射設備; 17 台のリグの中に配分されている 55 本の気送管から成る。
- b) 短時間照射設備; 中性子放射化分析および遅発中性子放射化分析用として 2 本の気送管から成る。

4.1 長時間照射設備

(1) 設備の概要

長時間照射設備により、サンプルを気送コンベヤーシステムを用いてリフレクターべッセルのそれぞれの照射位置へ移送できる。17台のリグの中に55箇所の照射位置が確保されている。具体的には、2台のリグが各々5本の気送チューブを収納し、15台のリグが各々3本のチューブを収納している。長時間照射設備の照射位置をFig.4-1およびFig.4-2に示す。

気送システムは、排気システムに接続されており、キャップセルの冷却も兼ねている。また、窒素ガスの消費量を最少限にするために閉回路のシステムになっており、 ^{41}Ar の放出量も最少限にしている。

これらの設備は、RI生産および研究目的の照射利用等の多種多様な材料を照射するために使用されている。初めて照射する照射試料の場合は、照射前の分析が実施され、照射およびキャップセルの出入りについての制限値が定められ、公式の審査および承認が必要となる。全ての照射済試料は、適切な品質保証システムの下で準備され、照射試料およびキャップセルは、承認された仕様に基づいて準備される。

(2) 設備の構造

照射チューブは、各ラックレベルについてリフレクターべッセルに対して対称に配列されている。これは、2つある気送管用ホットセルのどちらかが使用できない場合でも、他の一方の気送管用ホットセルと気送システムで照射試験を行える様に配慮したためである。

気送システムは、キャップセル移送時の衝撃による損傷を防止するために、ソフトな装荷および移送を可能にしている。ガラスアンプルやその他の非常に脆いターゲットの場合には、損傷防止のためにアルミ箔で包まれる。また本システムは、複数のキャップセルの同時取出しを防止するためのハードとインターロックを装備している。このインターロックはキャップセル取出しが要求された場合、30秒間他のキャップセルが取出せない機構としている。万一、一つのシステムが故障した場合や保守が必要な場合でも、他の気送システムは通常通りの運転を行うことができる。

移送チューブは、気送管セルのフロアを通して南側に26本、北側に29本を設置しており、取外し可能な重コンクリートブロックで遮へいされている。接続ラックから原子炉プールへの移送チューブは、生体遮へい体を通る空洞に設置している。また、気送システム計装の一部として、キャップセルに隣接して温度センサーやバナジウムSPNDを設置している。温度およびSPNDの信号は、気送管制御装置モジュールに表示され、各照射キャップセルの情報をモニタ監視している。

キャップセルの気送輸送に適した窒素を供給するためのトリガリング系は、一連のバルブ操作によって気送作業を制御している。気送管システムの冷却及びトリガリング系のブロック図及び立体図をFig.4-3及びFig.4-4に示す。また、気送管照射施設の写真をFig.4-5に示す。短時間照射設備では、短時間での取り出しが要求されるため、ガス圧力が高く設定されているが、長時間照射設備では中程度の圧力のガスが供給されている。気送管システムでは、コンプレッサーで低圧バッファータンクに窒素を取り入れて高圧バッファータンクに送り、その際の圧縮熱はコンプレッサー空気冷却器によって除熱している。高圧バッファータンク中の窒素の最大圧力は、低圧バッファータンクへと放出する圧力制御バルブによって制御されている。

コンプレッサーは2台あり、1台が運転している場合、他の1台は待機状態となり、故障や保守時に

運転できるシステムになっている。中間圧力バッファータンクは、自動制御バルブによって高圧バッファータンクからガスが供給され、長時間照射設備の気送輸送のために利用され、キャプセル移送時の圧力低下を防止している。なお、双方のタンクはステンレス製である。

窒素ガスは、ステンレスのパイプラインを通じて、高・中圧力バッファータンクから装荷・取出しそうに供給される。両方のコンプレッサーが故障した場合、窒素ガスがバイパスを通してタンクに供給され、キャプセルを安全に取り出せるように設計されている。この他、自動制御圧力バルブによる高圧バッファータンクの圧力維持、異常な高圧によるコンプレッサーの停止、コンプレッサー停止時の逆流防止等が考慮されている。

ターゲット冷却系は、照射中に発生した熱を窒素ガスの循環によって冷却する。冷却系のブロック図を Fig.4-3 に示す。アルミキャップセル及びポリエチレンキャップセル、ターゲットで発生した熱は、すべてターゲット冷却系で冷却し、各キャップセルの最大許容温度を超えないよう設計されている。ターゲットを冷却した窒素ガスは、高効率フィルターを通してこのシステムに戻る。各センブリーから戻った窒素ガスは 2 台のヘッダーに集まり、再度、低圧バッファータンクへ送られる。また、ターゲットが損傷し、放射性微粒子が漏洩した場合に備えて、リターンヘッダーにフィルターが設置されている。ターゲット冷却系では、熱交換器での窒素および水の温度、冷却水流量、窒素ガス流量、窒素ガス中の湿度を監視しており、温度が異常に高い場合は、自動的に取り出すシステムとなっている。また、このシステムは、2 個あるいはそれ以上のキャップセルの同時取出しが出来ないようにコンピュータで監視されている。ターゲット冷却およびトリガリング系の機器は、管理区域である照射施設サービス区域に設置されている。

前述の通り、OPAL は 17 台のリグの中に配分された 55 箇所の気送照射位置を有している。49 箇所が熱中性子照射用として 7 種類のブラックスレベルに配置されている。残りの 6 箇所は高速中性子照射用として炉心近くに配置されている。3 孔及び 5 孔の熱中性子照射用リグの概略図を Fig.4-6 及び Fig.4-7 に示す。また、高速中性子照射用 3 孔照射リグの概略図を Fig.4-8 に示す。本設備では、カドミウムを内張りしたカドミウムライナーキャップセルも使用することが可能である。カドミウムライナーキャップセルの出し入れによる中性子変動レベルは 5% 以下で、最大反応度値（高速中性子照射用リグ用のカドミウムライナーキャップセルを含む）は、制限値を満足することが検証されている。照射試料は、密閉されたキャップセル（外径 25mm、長さ 70mm）に封入されるが、試料が粉末や液体等の場合は、インナーキャップセル等に封入される。キャップセルは、原子炉運転中に装荷および取出しが可能であり、1 分から 1 運転サイクルまでの照射が可能である。長時間照射設備の仕様及び気送管照射位置を Table. 4-1 及び Fig.4-9 に示す。

55 箇所の長時間照射設備の総発熱量は約 8 kW で、主としてチューブ壁を通じて炉プール水で冷却される。プロワー等からの圧縮熱は、シェルおよびチューブ熱交換器の中で熱交換され、二次冷却システムで冷却される。窒素ガスの温度は、各位置での熱電対によって監視される。冷却フローは、キャップセルの有無に関係なく全ての照射位置を流れるため、キャップセルの有無によって不均衡を生ずるが、キャップセルの冷却能力には影響を及ぼさない。窒素ガスは 2 台のプロワーで循環し、3 台目は 2 台のうちの何れかが故障あるいは保守作業時に運転できるように待機状態となっている。各プロワーは定格流量の 60% の流量を確保できる能力がある。

照射済キャップセルは、気送管用ホットセルと遮へいコンテナーを使用して輸送される。気送管用ホットセルには、自重移送パイプを通じて照射済キャップセルの移送を行うためのマスタースレイブマニピュレ

ーターが設置されている。また、気送管用ホットセルには、気送輸送システムターミナルがあり、原子炉建屋と RI 生産および処理施設との間のキャップセルの移送を可能にしている。キャップセルの封入・開封作業は、原子炉建屋内の施設では行わず、RI 生産施設および処理施設で行っている。

2 台の気送管用ホットセルにあるターミナルステーションでは、55 箇所の照射位置への装荷および照射位置からの取り出し作業を実施する。

- 気送管用ホットセル A

26 箇所の照射位置を管理するターミナルステーションが設置されており、23 箇所が熱中性子照射用で 3 箇所が高速中性子照射用である。

- 気送管用ホットセル B

29 箇所の照射位置を管理するターミナルステーションが設置されており、26 箇所が熱中性子照射用で 3 箇所が高速中性子照射用である。

ターミナルステーションには、以下の機構がある。

- 各気送管用ホットセル外から、新規キャップセル装荷装置を使用し、二重隔離弁を有する。
- 各気送管用ホットセル内へ装荷するためのマガジン。
- キャップセルを照射位置に出し入れするために移動させる装荷／取り出しステーション。
- 照射済キャップセル用冷却ステーション。
- RI 生産工場からのキャップセルの受取機構

このシステムの運転は以下の流れとなる。(Fig.4-10)。

- 1) システムプログラムが、必要な照射量から、照射位置および時間を決定する。
- 2) 事前に指定されたシーケンスに従って、キャップセルを移送マガジンへ装荷する。
- 3) マガジンから照射位置へ移送する。
- 4) キャップセルを照射する。
- 5) 装荷／取り出し移送ステーションでのターゲットを受け取る。
- 6) 冷却ステーションへのキャップセルを移送する。
- 7) 冷却後の放射能レベルを測定する。

移送可能な放射線レベルを確認後、遮へいコンテナーに自重移送パイプで移送し、トラックで RI 生産工場へと搬送する。

長時間照射設備へのキャップセルの装荷・取り出しの流れを Fig.4-11 から Fig.4-14 に示す。

(3) 設備の安全設計

気送管照射設備の安全設計上の概念は、いかのとおりである。

- 全てのシステムコンポーネントは、運転中の線量を減少させるために管理区域内に設置する。
- 換気システムによって低い放射能および湿度レベルを維持する。
- 被ばく線量を合理的かつ可能な限り低く保つための生体遮へいを設置する。
- 放射線線量を最少限にするためのシステムレイアウトを最適化する。
- 放射性核種(例えば、 ^{41}Ar)の放出を最小限にするために換気システムを設計する。特に、ターミナルステーションへのキャップセル装荷およびターゲット処理施設へのキャップセル移送時の窒素放出量を低減化する。

- ・ RI 生産工場へのキャップセル移送中の空気混入を防止する。ターミナルステーションモジュールへのキャップセル装荷時の空気混入を防止する。
- ・ 圧力容器には安全弁を使用する。
- ・ 全ての安全弁は、動作時に弁出口管を通じて換気システムの中へと放出され、室内への直接放出がないように設計する。
- ・ 気送管システムの水分含有量は露点センサーでモニターし、水の漏洩がある場合には原子炉制御システムに対してアラームを送る。
- ・ 窒素流量率の増加によるキャップセルの移動を防止するため、3台のプロワーは3台同時に運転できないようにする。最大2台のプロワーのみ起動できるようにシステムを設計する。

また、事故防止のために、以下の制限等が設けられている。

1) キャップセルの熱的制限値

照射試料を含む各キャップセルについての合計熱出力は、145W に制限されている。この熱出力を超えると冷却ガス温度が上昇し、気送システム運転員に対してアラームを出す。

2) キャップセル温度が設定された制限値に達した場合、キャップセルを照射孔から取り出す。

3) キャップセルの放射能

各ターゲットについての放射能は、²⁴Na の 100GBq 相当に制限されている。ホットセルは、短寿命核種を減衰させるための遮へいコンテナー(崩壊ステーション中の遮へいされたモジュール)を有している。

4) キャップセルの開封

キャップセルは原子炉建屋内で開封しない。また、粉末状あるいは危険物質を含むキャップセルの健全性を維持するために、照射試料は二重管のキャップセルに収納する。

5) キャップセルの詰まり

キャップセルは、気送管システムでの詰まりを防止するため、装荷ステーションの中に入れる前に物理的な検査を実施する。また、詰まった場合に備えて、ターゲットの位置を検出するための 2 台の位置センサーを設置する。回収作業は手動で行うが。なお、作業員に対する被ばくを最小限にするため、気送管チューブは遮へいされている。

6) キャップセルのミスハンドリング

誤った照射位置への移送、既にキャップセルが占有している照射位置への移送等のミスハンドリングを防止するため、ソフトウェアに基づいた気送管コントロールシステムとともにインターロック機構が設けられている。

7) 冷却機能の喪失

プロワーシステムの故障あるいは電気系統の故障等によって冷却能力が低下した場合には、キャップセルの損傷を防止するために、原子炉出力を低下させる。

8) キャップセル圧力の増加

キャップセルは、照射中の温度上昇による内部の空気膨張によって生じる最大圧力に耐えるように設計されている。また、照射を認可する前に、照射試料からのガス発生の可能性についても評価される。

9) 材料の両立性

構造材料およびキャップセル材料とも問題を生じないアルミ合金を使用している。

10) キャプセルからの漏洩

照射中あるいは照射後のキャプセルの損傷の場合には、運転員の被ばく防止のために、窒素循環系あるいはホットセルシステムがバリヤーとなる。この場合、汚染したキャプセルは交換できるような設計になっている。

11) 炉プールの気送管からの放射線ビーム

気送管は、運転員の放射化学的危険性/放射線被ばくを防止するために、二重の S 形状および遮へいが炉プール上部に設置されている。

4.2 短時間照射設備

(1) 設備の概要

短時間照射設備は、中性子放射化分析および遅発中性子放射化分析を実施するために設計されており、短時間照射が可能である。本システムは、一度に 1 個のキャプセルの照射が可能であり、3 秒から数分まで照射時間が選択できる。短時間照射設備の照射孔位置及び移送・冷却システムを Fig.4-15 および Fig.4-16 に示す。各施設は 1 台のリグおよび 1 セットの移送チューブから構成されている。

中性子放射化分析および遅発中性子放射化分析用の照射ターミナルステーションは、専用実験室に設置されている。照射孔とターミナルステーションとの間の移送は、 ^{41}Ar の生成を最少限にするために窒素気送システムが使用されている。リグの中の照射孔からターミナルステーションまでの通過時間は約 3 秒である。

(2) 設備の構造

短時間照射設備の気送移送システムと冷却システムは、長時間照射設備の中に統合されている。移送システムは、最大 50gまでの照射試料を移送できる。キャプセル装荷および取出しステーションは、中性子放射化分析実験室にある。炉プールから中性子放射化分析実験室までのパイプは、厚さ 25mm の鉛相当の遮へいを有しており、装荷および取出しステーションは厚さ 50mm の鉛相当の遮へいを有している。このシステムは閉回路型窒素冷却およびトリガリングシステムを有している。

キャプセルは、高密度ポリエチレン製であり、外径が 35mm、長さが 90mm であり、内部容積を出来るだけ大きくとれるように設計されている。キャプセルは、スナップ密封方式を採用しており、迅速な開閉を可能にしている。中性子放射化分析ターミナルステーションは厚さ 50mm の鉛相当、キャプセル移送チューブは厚さ 25mm の鉛相当のステンレス鋼の遮へいを有している。遅発中性子放射化分析取出しステーションは、厚さ 250mm の鉛相当の遮へいがあり、ガンマ線および中性子を遮へいできる構造となっている。

冷却能力としては、キャプセルあたり 10W までの熱発生に対応でき、キャプセル冷却システムは最大 50W で設計されている。中性子放射化分析の熱中性子束は、 $2\sim5\times10^{17} \text{ n/m}^2/\text{s}$ の範囲内で、遅発中性子放射化分析では $2\sim5\times10^{16} \text{ n/m}^2/\text{s}$ の範囲内である。この施設は一日に 40 個までのキャプセルを取扱うことができる。

中性子放射化分析ターミナルステーションは、2 つシステムから構成されている。一つは装荷作業用で、冷却システムを閉鎖したままにして移送パイプとリグを隔離するシステムがある。もう一つは移送位

置にあるキャプセルの移送および取出しを行うシステムである。熱中性子束は、バナジウム SPND で計測されており、プログラムによってキャプセルが自動的に照射できる設計となっている。その他、ガンマ線スペクトロメトリーによっても中性子束がモニターされている。また、遅発中性子放射化分析には、中性子計数計が設置されている。

(3) 設備の安全設計

短時間照射設備の安全設計は、基本的に長時間照射設備の安全設計と同様である。

1) キャプセルの開封および健全性

キャプセルは、高密度ポリエチレンで設計されており迅速な開閉装置を有している。これらのキャプセルは換気装置と高性能フィルタを装備した装置内で開封される。

2) キャプセルの詰まり

移送工程は、長時間照射設備と同様に専用のコントロールソフトウェアに基づくシステムによって制御されている。さらに、ポリエチレンキャプセル移送用の気送チューブおよび装荷および取り出しステーションは適切に遮へいされている。

5. 放射性同位元素取扱設備(ホットセル)

(1) 設備の概要

RI 取扱施設は、サービスプールと 4 基のホットセル(サービスプール上側に位置する移送ホットセル(THC)1 基、気送管用ホットセル(PHC)2 基及び下側に位置する装荷ホットセル(LHC)1 基)及び照射済試料を移動するための遮へい貫通孔から成る。移送ホットセルと気送管用ホットセルが、サービスプール上にホットセルコンプレックス(APHCC)として一箇所に集中して設置されている。装荷ホットセルはホットセルコンプレックスの下部に位置し、天井面は照射済み試料を遮へい容器に装荷するために トラック入口と同じ高さに設計されている。RI 取扱施設の設置位置及び概略を Fig.5-1 と Fig.5-2 に示す。

(2) 設備の構造

1) 移送ホットセル (THC)

移送ホットセルでは、未照射試料をリグに装荷し、キャプセルはサービスプールエレベータ経由でサービスプールへ移送される。照射後に、キャプセルから試料を取り出し、再度未照射試料を装荷する。照射済試料はホットセル間エレベータ(ICE)経由で装荷ホットセルへ移送される。また、気送管用ホットセル A,B からの照射済キャプセルの受け取り、または移送が ICE 経由で可能である。Fig.5-3 に移送ホットセルの断面図を示す。

移送ホットセルの遮へい壁厚さは約 1300mm で、寸法は ^w1600mm×^l1720mm×^h2700mm である。ホットセルの側壁は気送管用ホットセル A, B の側壁と共有である。また、壁、床及び天井にはエポキシ樹脂塗装が施されている。移送ホットセルは、7 日間照射で最高 125kW の熱を発する ⁹⁹Mo 製造用キャプセルを取扱うことが可能である。なお、照射済試料が移送ホットセルへ移送される前に、数時間の冷却期間が必要である。移送ホットセルの外側には、遠隔操作用のマスタースレイブマニピュレーター、キャプセルとターゲットを操作する付属操作装置及び約 ^h406mm×約 ^w640mm の遮へい窓 1 箇所が設

置されている。セル内側には放射線モニターがあり、インターロック機能の付いた原子炉プール側にアクセスドアが 1 箇所設置されている。また、試料の一時保管のために遮へい付きのステーションが設置されている。

セルの操作は原子炉プール上側の APHCC オペレーションエリアから行われる。照射用試料は APHCC オペレーションエリアから自重装荷パイプを経て装荷される。このパイプには 2 つの遮断弁があるために外部への汚染の可能性はない。運転員は制御卓の情報から試料を搬送するエレベータやアクセスドア等の操作およびセル内部での保守作業を安全に行うための必要な情報を得ることができる。

2) 装荷ホットセル (LHC)

装荷ホットセル(Fig.5-4, Fig.5-5 および Fig.5-6 を参照)は、プール上 APHCC エリア、移送ホットセル、または気送管用ホットセルから照射済試料を受入れる。その後、照射済試料を輸送容器等へ封入し、サイト内へ輸送する。なお、このセルでは照射済試料が入ったキャップセルの開封は実施しない。

セルの内寸法は、^w1500mm × ^l1700mm × ^h2700mm で、遮へい壁の厚さは 1300mm である。壁、床および屋根はエポキシ樹脂塗装が施されている。このセルも ⁹⁹Mo を取扱える遮へい壁を有している。遮へい壁の外側には、2 基の遠隔操作用のマニピュレーター、キャップセルとターゲットを操作する付属操作装置があり、約 ^h406mm × 約 ^w610mm の遮へい窓 1 箇所が設置されている。移送ホットセルと同様に放射線モニターによるインターロック付きアクセスドアが 1 箇所設置され、ドアには操作中の漏風を防ぐ膨張ゴムシールが付いている。このセルには、操作中に試料を仮置きする試料一時貯蔵ステーションが設置されている。装荷ホットセルは、照射済試料を移送するために 1 基のホットセル間エレベータにより移送ホットセルとつながっている。また、気送管用ホットセル(PHC)A,B とは、長時間照射施設で照射したキャップセルの移送に用いられる 4 本の自重移送パイプで繋がっている。気送管用ホットセル内の各自重移送パイプの上端には隔壁弁がついている。また、装荷ホットセル内側の下端には隔壁弁付きの密封ボックスが設置されている。このため、セル間がそれぞれ分離した構造となっている。装荷ホットセル天井の上には、照射済試料を輸送容器に封入するためのポートランクシステムが設置されている。輸送を容易にするようトラック入域レベルに設置されており、10トンの輸送容器を積載可能な構造となっている。

3) 気送管用ホットセル (PHC)

APHCC エリアに気送管用ホットセル A,B が設置されており、A,B ともに同じ仕様となっている。このセルは、APHCC または RI 製造施設から長時間照射施設で照射するための試料を受入れ、4 本の自重移送パイプで装荷ホットセルへの試料キャップセル移送、建室内気送システム(IPTS)を経由して RI 製造処理施設へのキャップセル移送及びホットセル間気送システム(IHTS)による移送ホットセルへのキャップセル移送などが可能である。また、照射位置と装荷ホットセル間のキャップセル移動は、気送試料冷却システム(PTCS)を用いて行われる。全てのパイプはインターロック付きの隔壁弁によってセル間を分離している。なお、このセルはキャップセルの封入・開封は目的としていない。Fig.5-7 に気送管用ホットセルの断面図を示す。このセルの寸法は約 ^w3250mm × ^l2550mm × ^h2700mm で、遮へい壁の厚さは約 900mm である。遮へい窓の寸法は、約 ^h400mm × ^w600mm である。壁、床及び屋根はすべてエポキシ樹脂塗装を施してある。各気送管用ホットセルは、キャップセル受入・送出しを遠隔操作するための 2 基の制御装

置が設置されている。取扱量については、1 キャプセルあたり ^{24}Na 等価放射能量で 100GBq まで取扱いが許可されており、10 キャプセルまで取扱い可能である。なお、30 分を超えて試料を一時貯蔵することはできない。放射線モニターによるインターロックがついたアクセスドアが 1 箇所設置され、ドアには操作中の気密を守るための膨張ゴムシールが付いている。

4) 輸送容器等

輸送容器には、建家内で使用される小型容器(SIC)と大型のボトムローディングキャスク(BLF)の 2 種類のタイプがある。SIC は、小試料を RI 製造処理施設へ移送するために用いられる。SIC は劣化ウランの 85mm 厚の遮へいを備え、セルからハッチ又はサービスリフトを通り、フォークリフトを用いてトラックアクセスエリアに移動される。BLF はトラックにより外へ搬送されるためのもので、6 トン又は 10 トンのものがあり、内部に試料を固定するための容器が付属している。この容器は、装荷ホットセルの試料の取出し、装荷に使用される。BLF は鉄、鉛から構成されている。他に照射済試料を炉室内の他の場所に搬送する試料搬送装置がある。

5) サービスプールエレベータ

サービスプールと移送ホットセル間のキャプセルの移動は、サービスプールエレベータで行われる。エレベータは、垂直度 35 度のダクト(□500mm、重コンクリート遮へい壁 1300mm 一部鉄、鉛板遮へい)内のレールガイド上をワゴンが上昇・下降する。ダクトは、炉プールのサイフォンブレーカーレベルまで貫通している。エレベータ速度は電動モータ使用で 10m/min で、1 回の輸送で重量 5kg、 ϕ 65mm、長さ 1150mm のキャプセル等を運搬可能である。移送ホットセルでキャプセルを安全に取扱うため、エレベータは自動で引き上げられ、特定の場所で線量を測定することになっている。

6) ホットセル内エレベータ (ICE)

ホットセル内エレベータは原子炉建家内に組み込まれており、約 150mm × 200mm、長さ 13.5m の貫通孔にガイドレールにより、移送ホットセルから装荷ホットセルへの照射済試料(長さ 300mm まで)の移動を可能にしている。貫通孔の両端部には装荷または取出しステーションを備え、それらは移送ホットセルと装荷ホットセルのバウンダリを形成している。万一のケーブル故障時には、制動システムが装荷ホットセルの取出しステーションで作動し、キャプセルへの負荷を軽減する。さらに、上下限、ケーブル故障、ステーションドア開、気送管用ホットセルへ接続する自重移送パイプ開、ICE ドア開等のインターロックがある。

7) 自重移送パイプ

気送管用ホットセル A, B と装荷ホットセルを結ぶ 4 本のステンレスパイプ(50mm、最小遮へい厚さ 700mm 重コンクリート)。

8)ホットセル間気送搬送システム (IHTS)

気送管用ホットセル A,B と移送ホットセルを結ぶ 2 本の気送管。

(3) 設備の安全設計

本設備の安全設計においては、以下の項目について考慮している。

1) 換気系

汚染をセル内に留めるため、ホットセル内の負圧は(-250Pa)に維持されている。セル換気系入口側には吸着フィルター、出口側にはチャコールフィルターが取付けられている。換気回数は、1時間に7回から30回行われ、外気に対し原子炉建家レベルの負圧を維持している。また、セル内の通常時及び非常時の汚染レベルを管理、監視するために、エアサンプラーが設置されている。

2) 放射線防護

セルは高密度コンクリート、マスタースレイブマニピュレーター、遮へい窓、セル一時滞在の核種用遮へい、エリアモニター等の放射線防護対策を施してある。

3) 除染

万一、キャップセル開封でセル内が汚染したとしても、セルはエポキシ樹脂塗装により除染し易い構造となっている。保守時には、アクセスドア付近に設置してある呼吸気用バルブへエアホースを接続することにより、作業員がセル内に立ち入ることができる。

4) 電源喪失

電源喪失時には、換気系、非常灯が非常用電源からの電力供給により自動的に作動する。

5) 接近

ホットセル内部には保守時には入域可能であるが、汚染物質の吸引防止のため保守時にはドアが閉となるようインターロックが設けてある。

6) 火災検知

電気火災への対応も可能な消化設備が設置されており、セル外の防火システム盤から操作することが可能である。

7) 試料搬送装置故障

万一、試料が電源喪失、運搬装置異常などで目的のセルに到着しない場合、手動運転に切替えて対応する。そのため、ダクトはスムーズな曲線とし、試料のひつかりがないように設計されている。

8) 廃棄物処理

サンプルまたは試料を取り扱った器具の洗浄から生じる廃液を一時的貯蔵する容量約35リットルの廃液タンクが各セルの作業台の下に設置されている。

6. まとめ

JMTRに設置する新しい照射設備の技術開発に資するため、OPAL炉の⁹⁹Mo製造設備、シリコン半導体製造設備、気送管照射設備、ホットセル設備について、設備の構造や安全設計の考え方等を調査した。特に、今後、JMTRへの設置を検討している⁹⁹Mo製造設備(ラビット照射設備)やシリコン半導体製造設備の調査で得た安全設計の考え方等は、参考になる有用な情報である。

参考文献

- 1) Sungjoong (Shane) KIM, “The OPAL (Open Pool Australian Light-water) reactor in Australia”, Proceedings of the International Symposium on Research Reactor and Neutron Science, – In Commemoration of the 10th Anniversary of HANARO – , Daejeon, Korea, April 2005.
- 2) <http://www.iaea.or.at/worldatom/rrdb/>.
- 3) <http://www.ansto.gov.au/opal.html>.
- 4) 豊沼克嘉,町 末男,”(n, γ)⁹⁹Mo–^{99m}Tc ジエネレータの実用化開発 –新技術によるアジアでの製造を目指して–”, Isotope News 2001 年3月号,pp2-8 (2001).
- 5) NTD 技術検討会, ”研究炉等(JRR-3, JRR-4 and JMTR)を用いた中性子核変換ドーピング Si 半導体(NTD-Si)製造機能拡充の検討”, JAEA-Review 2005-006 (2006).

Table. 3-1 シリコン半導体製造設備の仕様

Irradiation tube size	Approx. Rig OD (mm)	Qty.	Approximate Thermal neutron Flux (n.cm-2s-1)	Maximum Silicon dimensions		
				Approx. OD (mm)	Length (mm)	Mass (kg)
Medium	130	1	3.5×10^{12}	120	600	17.96
Medium Large	160	3	1×10^{13}	150	600	26.0
			1.1×10^{13}			
Large	210	2	1.9×10^{13}	200	600	46.1
			3.2×10^{12}			
			1×10^{13}			73.3

Table. 4-1 長時間照射設備の仕様

Irradiation Tube No.	Neutrons		Average Neutron Flux		Stores rig of:	
	Thermal	Fast	Value (n/cm ² .sec.)	Level	3 cans	5 cans
1	X		$\sim 2.97 \times 10^{12}$	1	X	
2	X		$\sim 8.35 \times 10^{12}$	2	X	
3	X		$\sim 8.35 \times 10^{12}$	2	X	
4	X		$\sim 1.43 \times 10^{13}$	3	X	
5	X		$\sim 1.43 \times 10^{13}$	3	X	
6	X		$\sim 1.43 \times 10^{13}$	3	X	
7	X		$\sim 1.43 \times 10^{13}$	3	X	
8	X		$\sim 2.84 \times 10^{13}$	4	X	
9	X		$\sim 2.84 \times 10^{13}$	4	X	
10	X		$\sim 5.04 \times 10^{13}$	5	X	
11	X		$\sim 5.04 \times 10^{13}$	5	X	
12	X		$\sim 6.80 \times 10^{13}$	6	X	
13	X		$\sim 6.80 \times 10^{13}$	6	X	
14	X		$\sim 1.22 \times 10^{14}$	7		X
15	X		$\sim 1.08 \times 10^{14}$	7		X
16		X	$\sim 8.96 \times 10^{12}$	1	X	
17		X	$\sim 8.96 \times 10^{12}$	1	X	



Australia's new reactor

Fig. 1-1 OPAL 炉の外観

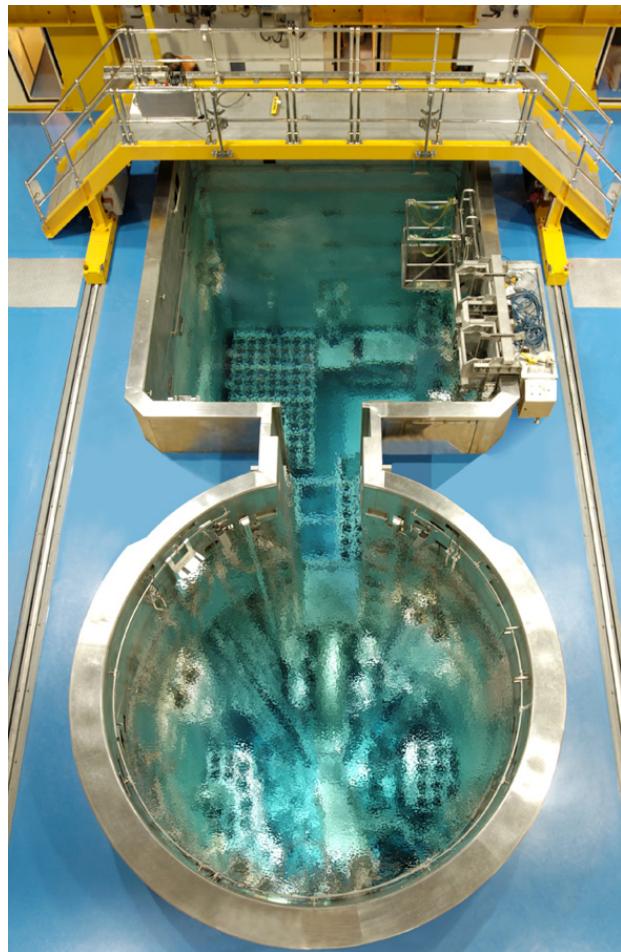


Fig. 1-2 OPAL 炉の炉プール

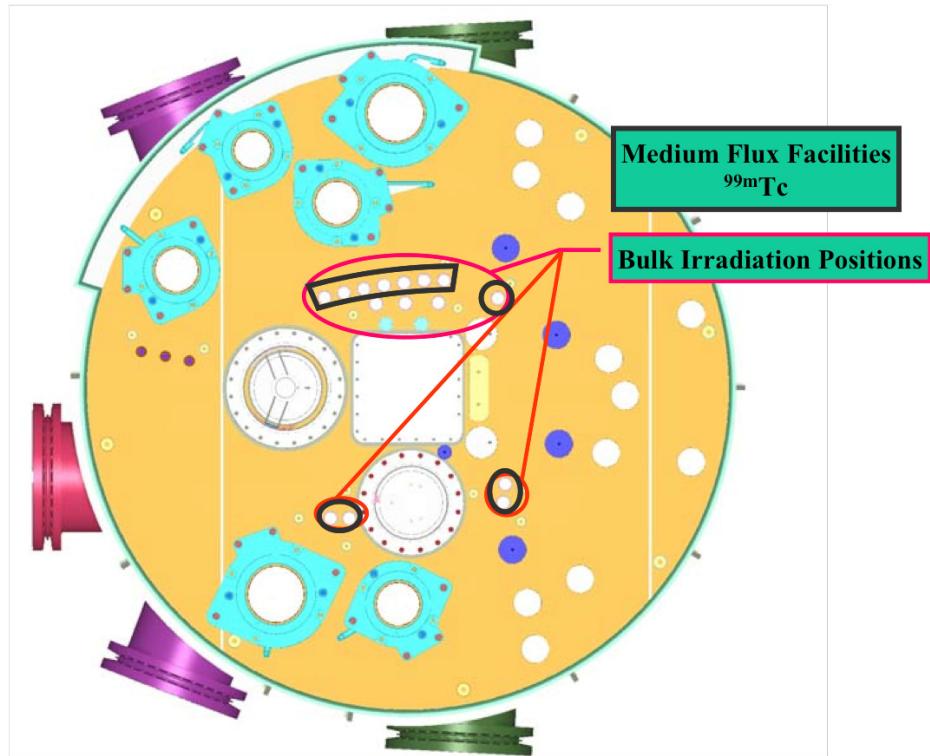


Fig. 2-1 ^{99}Mo を製造するためのキャプセル照射位置（炉心平面図）

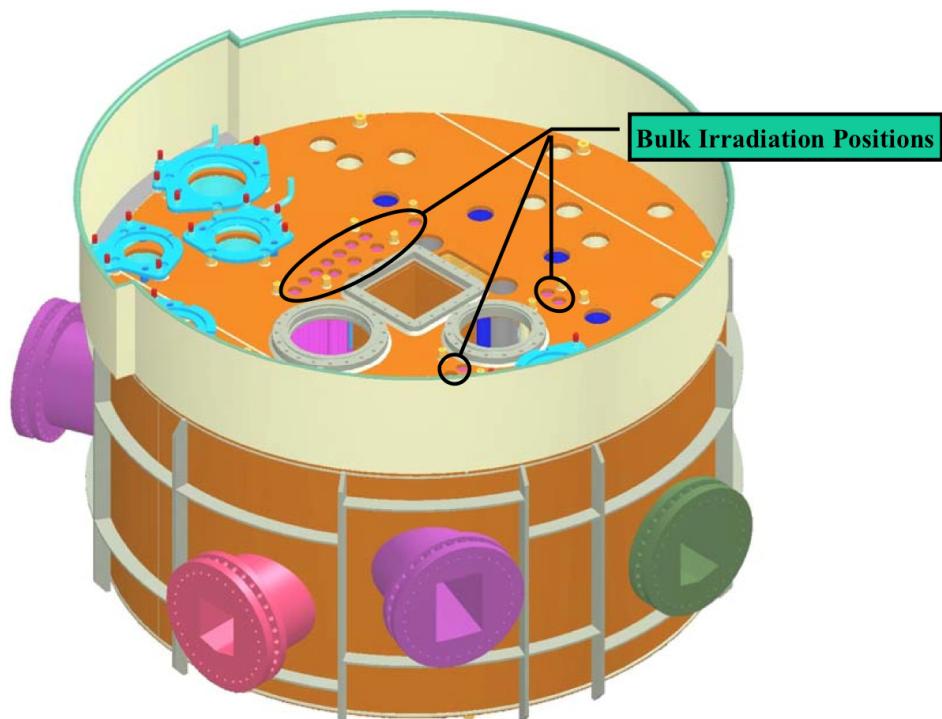


Fig. 2-2 ^{99}Mo を製造するためのキャプセル照射位置（炉心立体図）

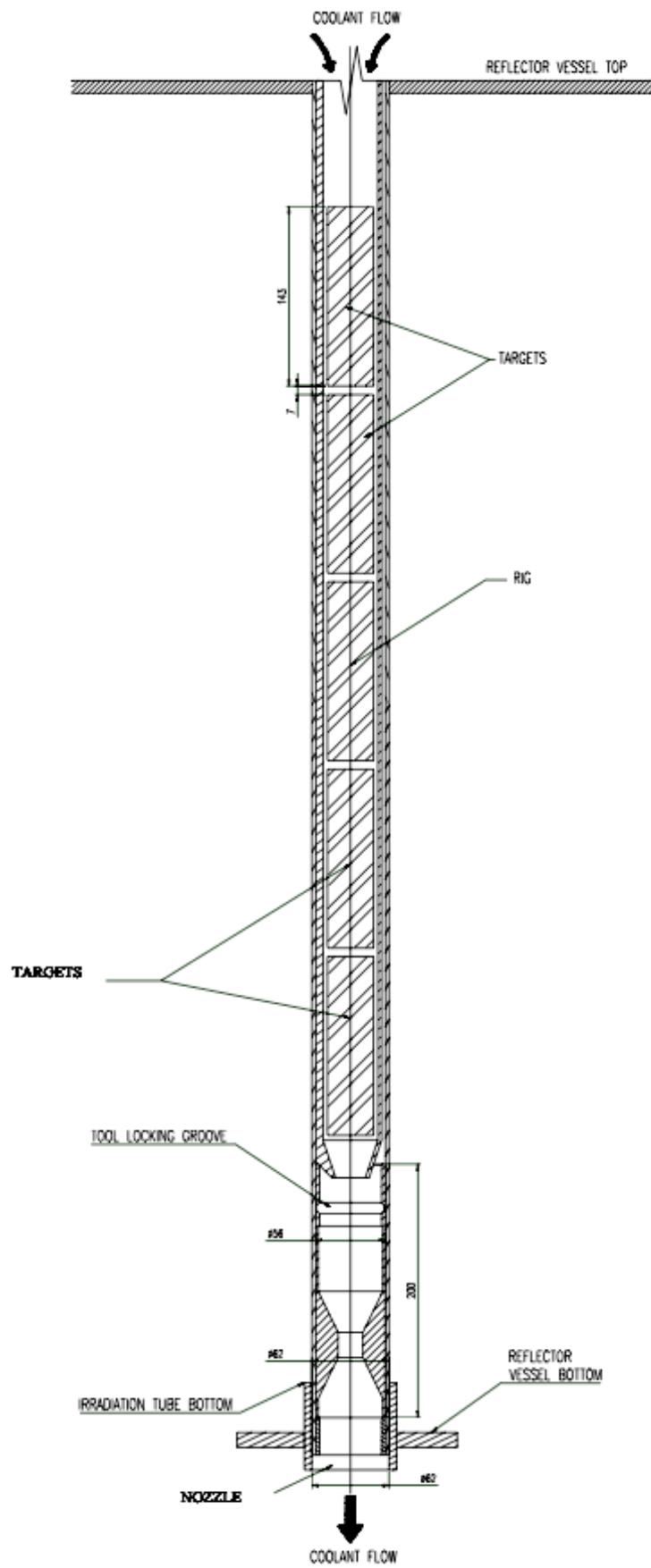


Fig. 2-3 ^{99}Mo 製造用キャップセル



Fig. 2-4 ^{99}Mo 製造用キャプセルの写真

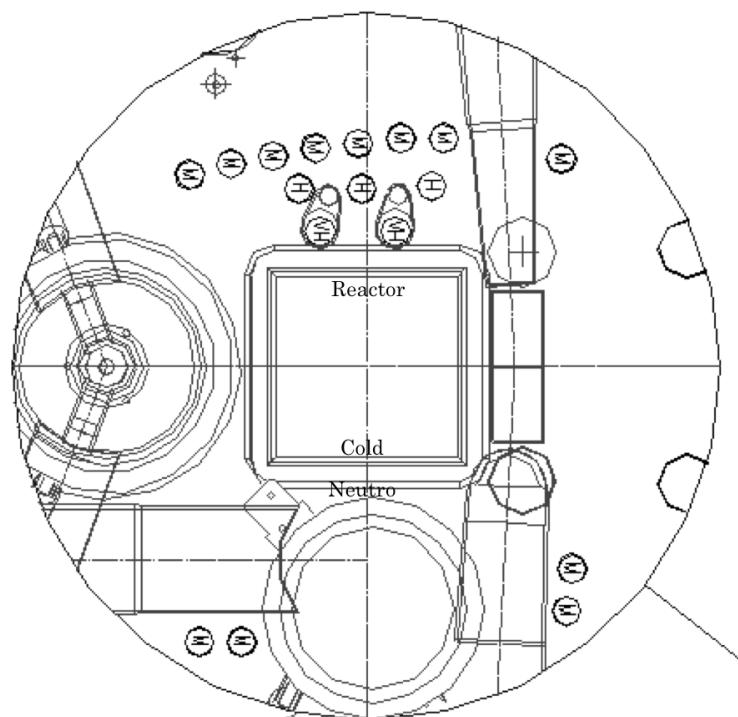
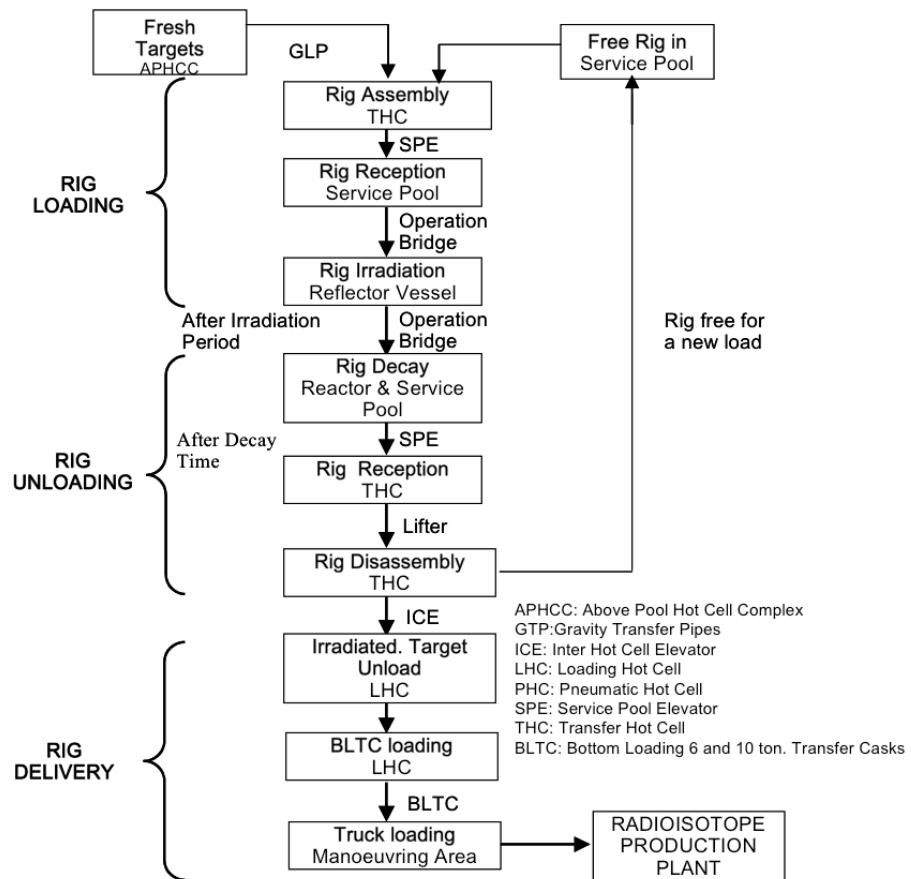
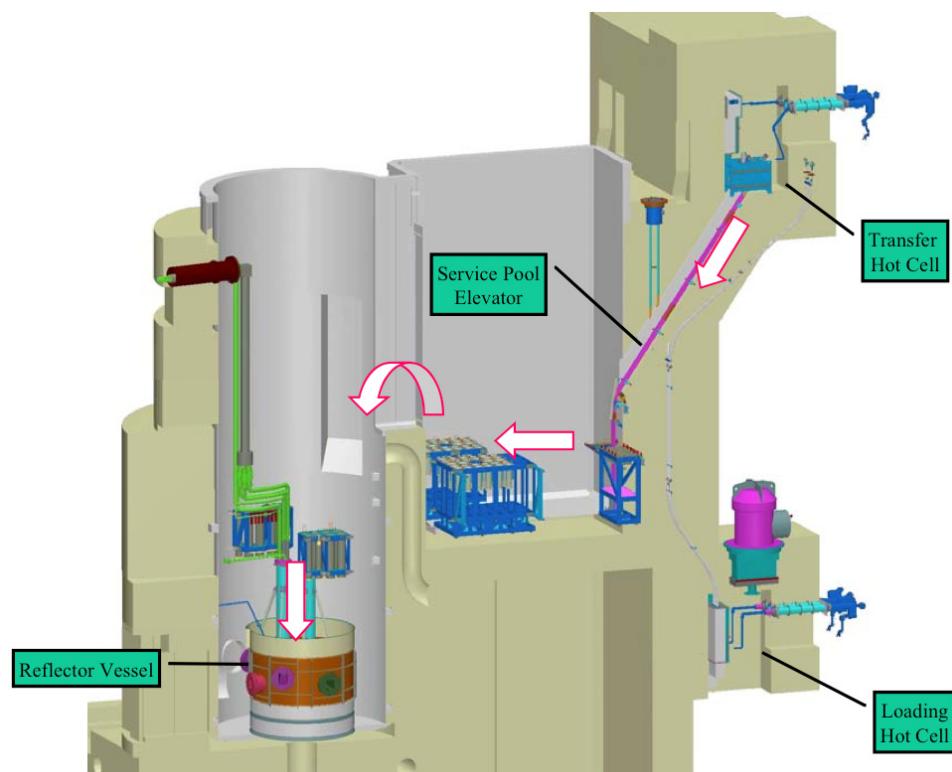


Fig. 2-5 ^{99}Mo 製造設備の炉心位置(図中 M で表記)

Fig. 2-6 ^{99}Mo の製造工程Fig. 2-7 ^{99}Mo 製造用キャプセルの装荷

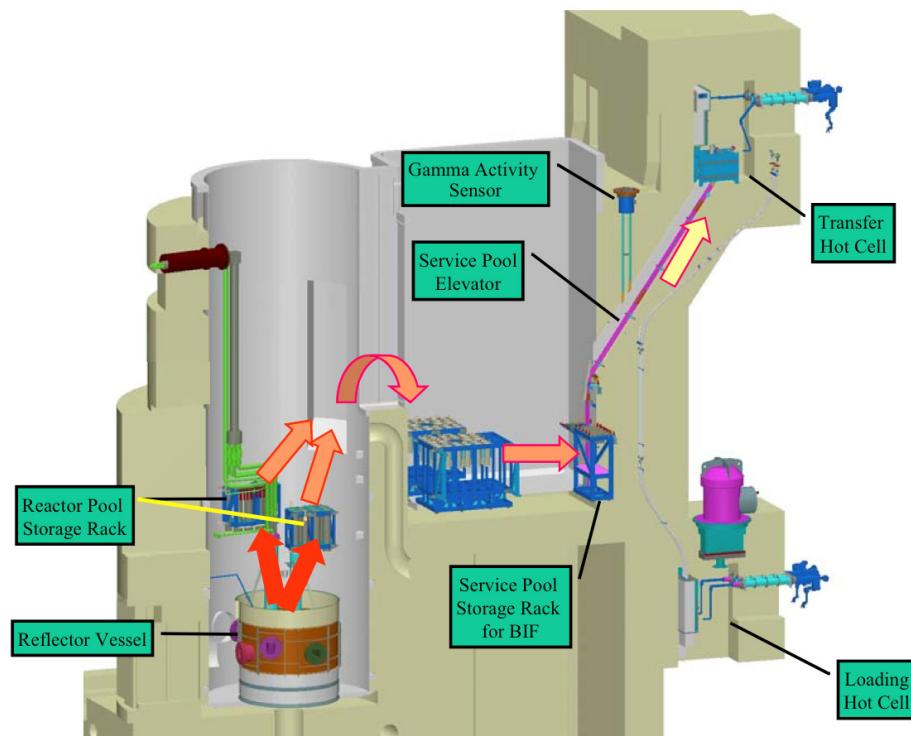


Fig. 2-8 ^{99}Mo 製造用キャプセルの取出し及びホットセルへの移送

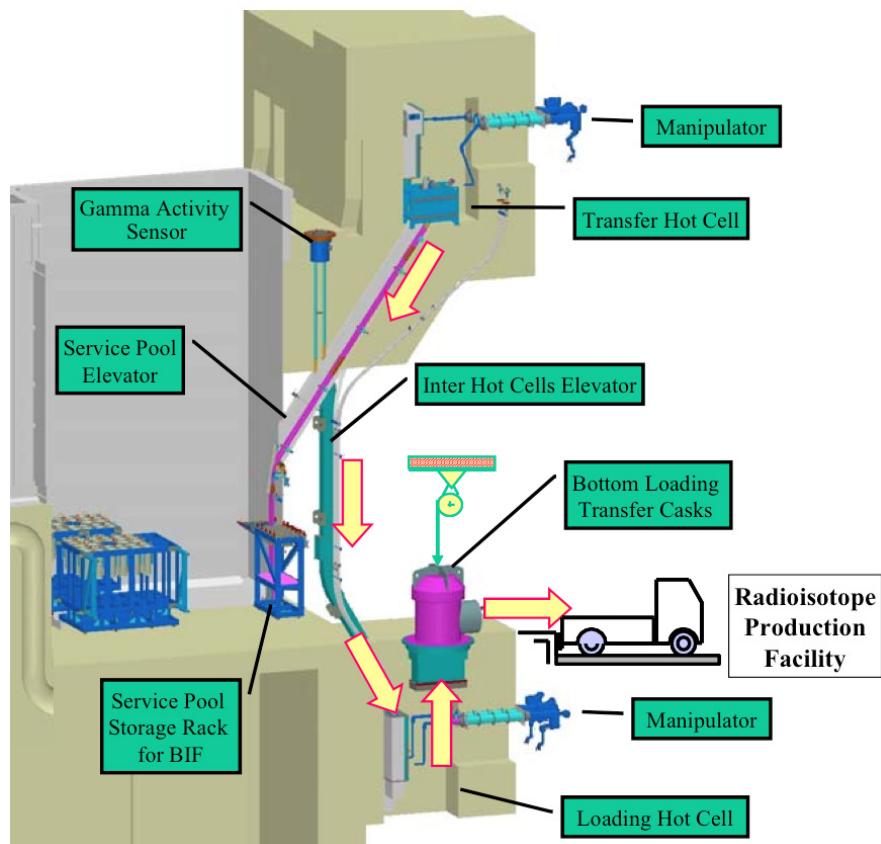


Fig. 2-9 ^{99}Mo ターゲットの移送

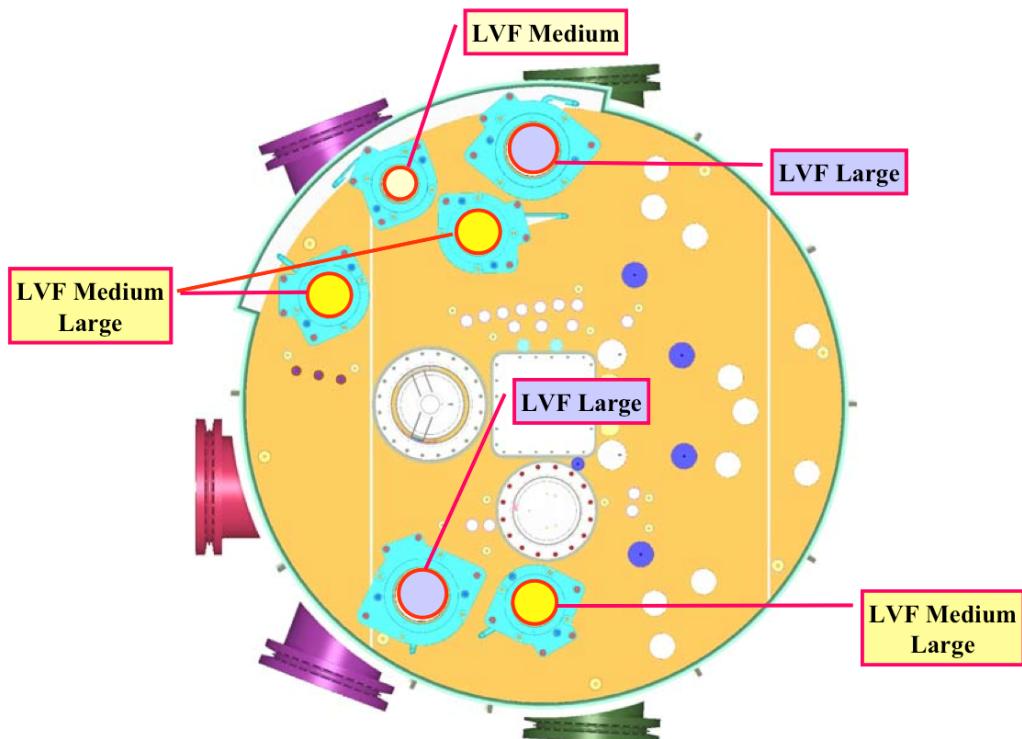


Fig. 3-1 シリコン半導体製造用照射孔位置(平面図)

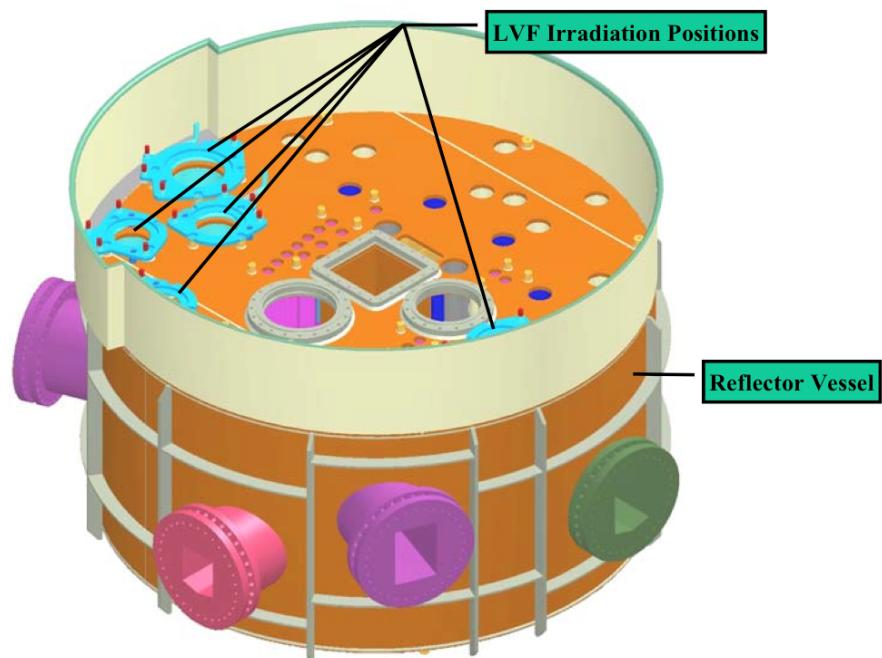


Fig. 3-2 シリコン半導体製造用照射孔位置(立体図)

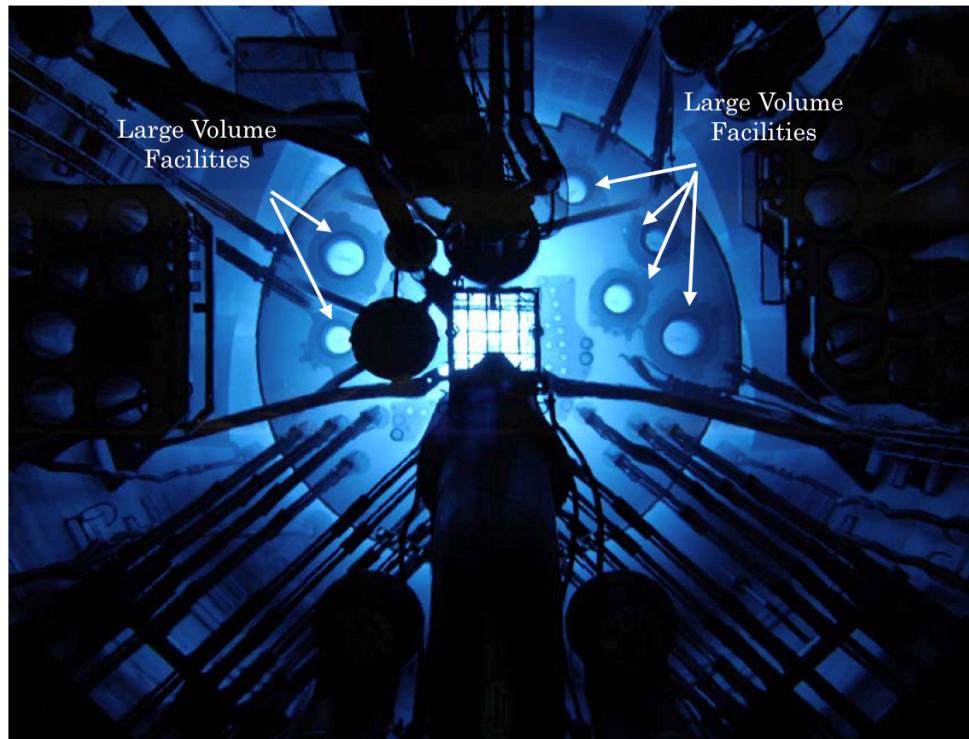
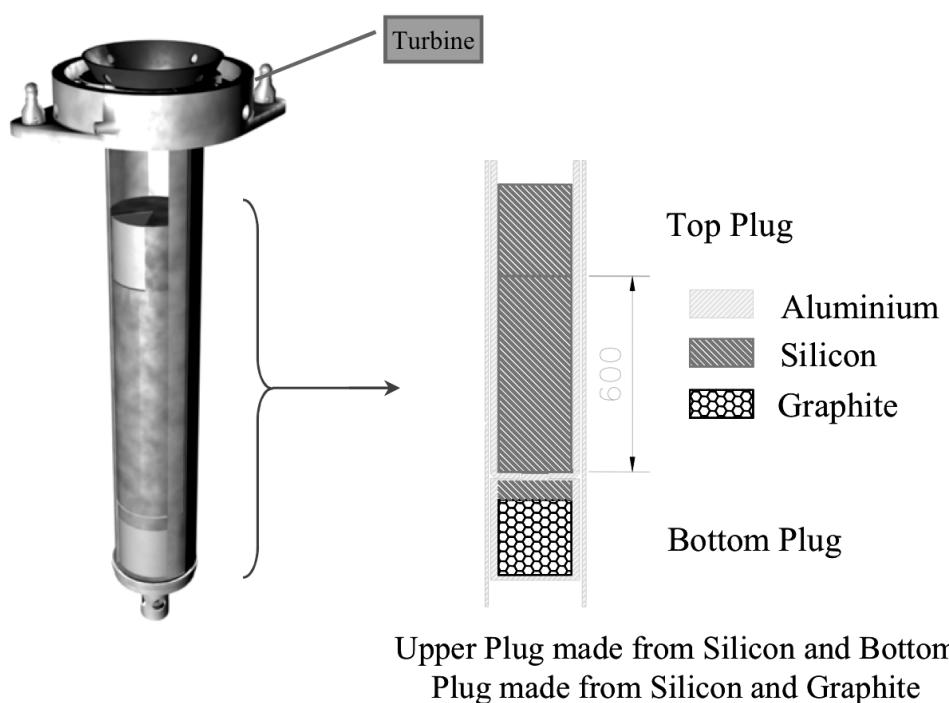


Fig. 3-3 大型照射施設を含む炉プールの写真



Upper Plug made from Silicon and Bottom
Plug made from Silicon and Graphite

Fig. 3-4 シリコン半導体製造用キャップセルの概念図

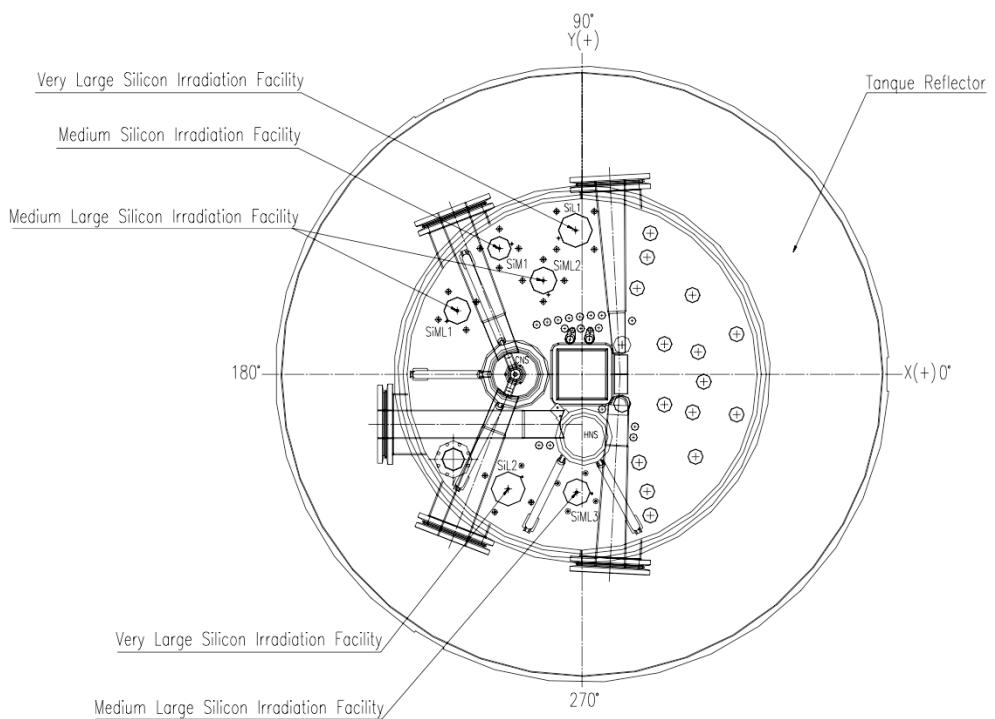


Fig. 3-5 シリコン半導体製造設備の位置

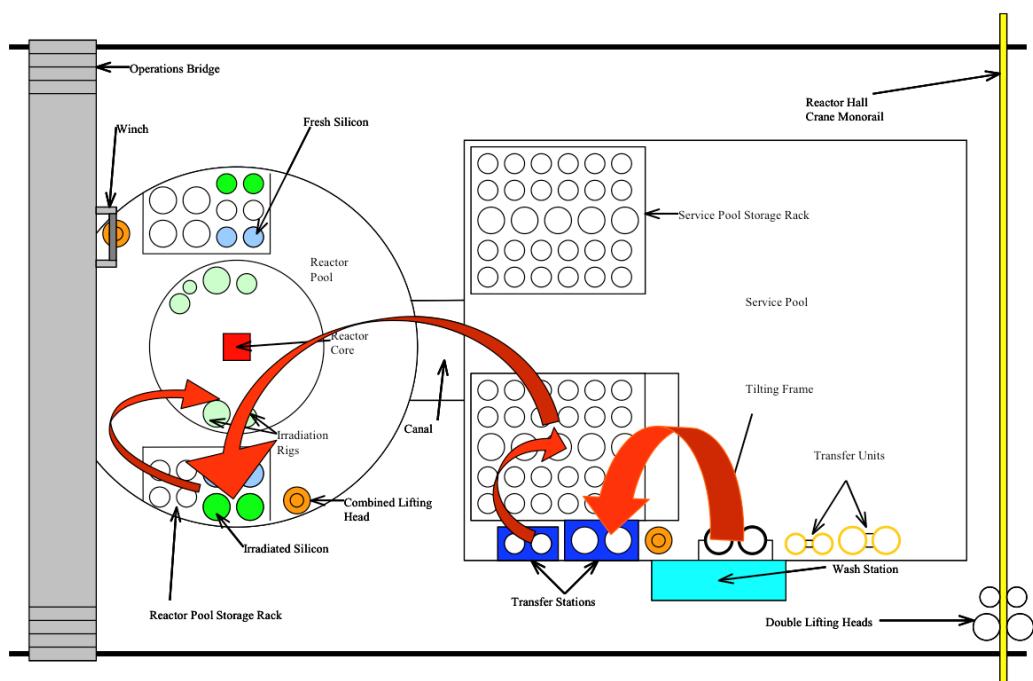


Fig. 3-6 洗浄ステーションから炉心装荷のルート

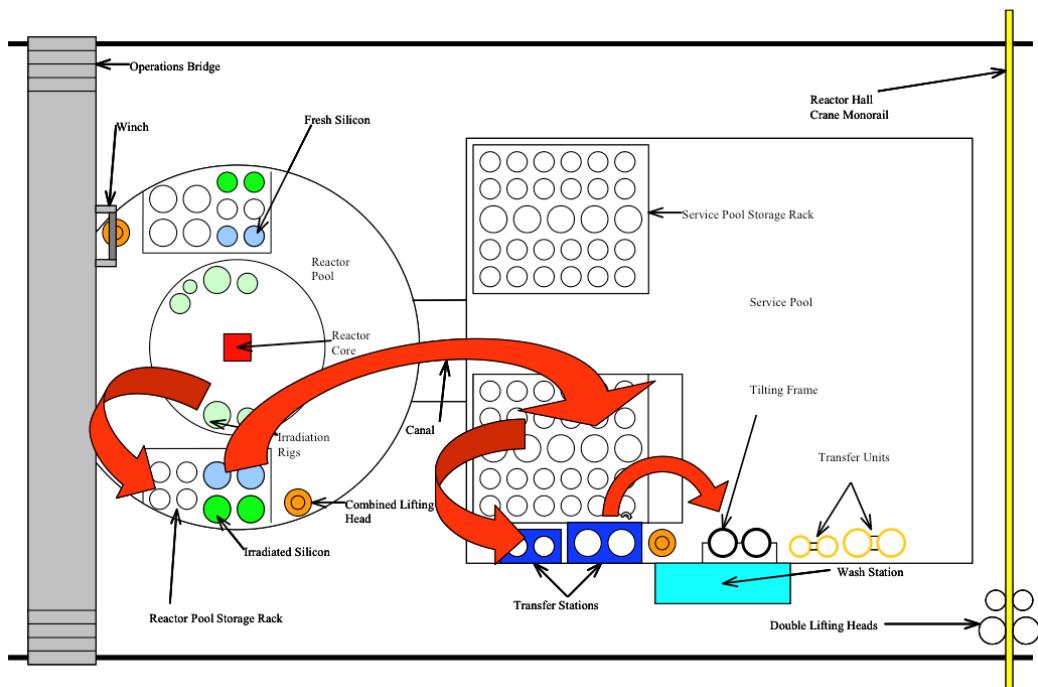


Fig. 3-7 キャプセル取出しから洗浄ステーションへのルート

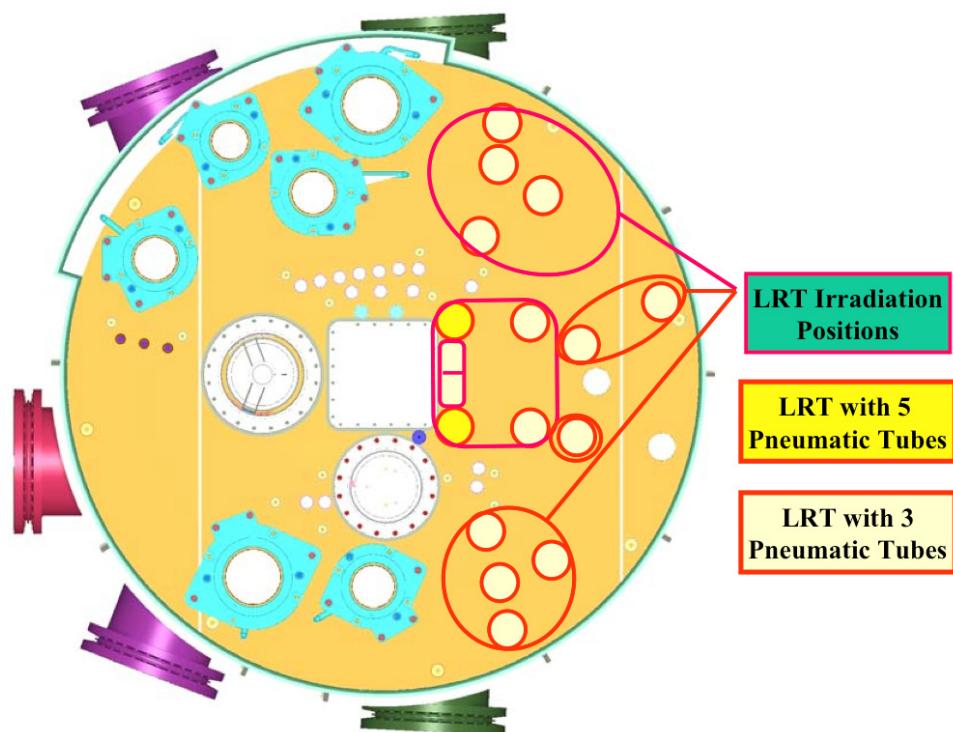


Fig. 4-1 長時間照射設備の照射位置(平面図)

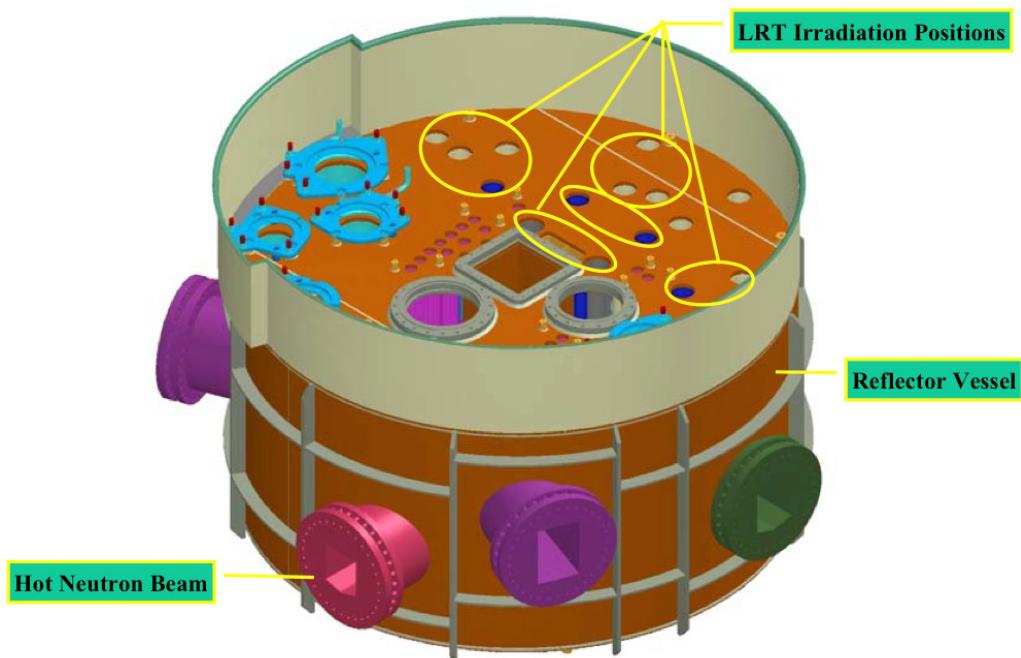


Fig. 4-2 長時間照射設備の照射位置(立体図)

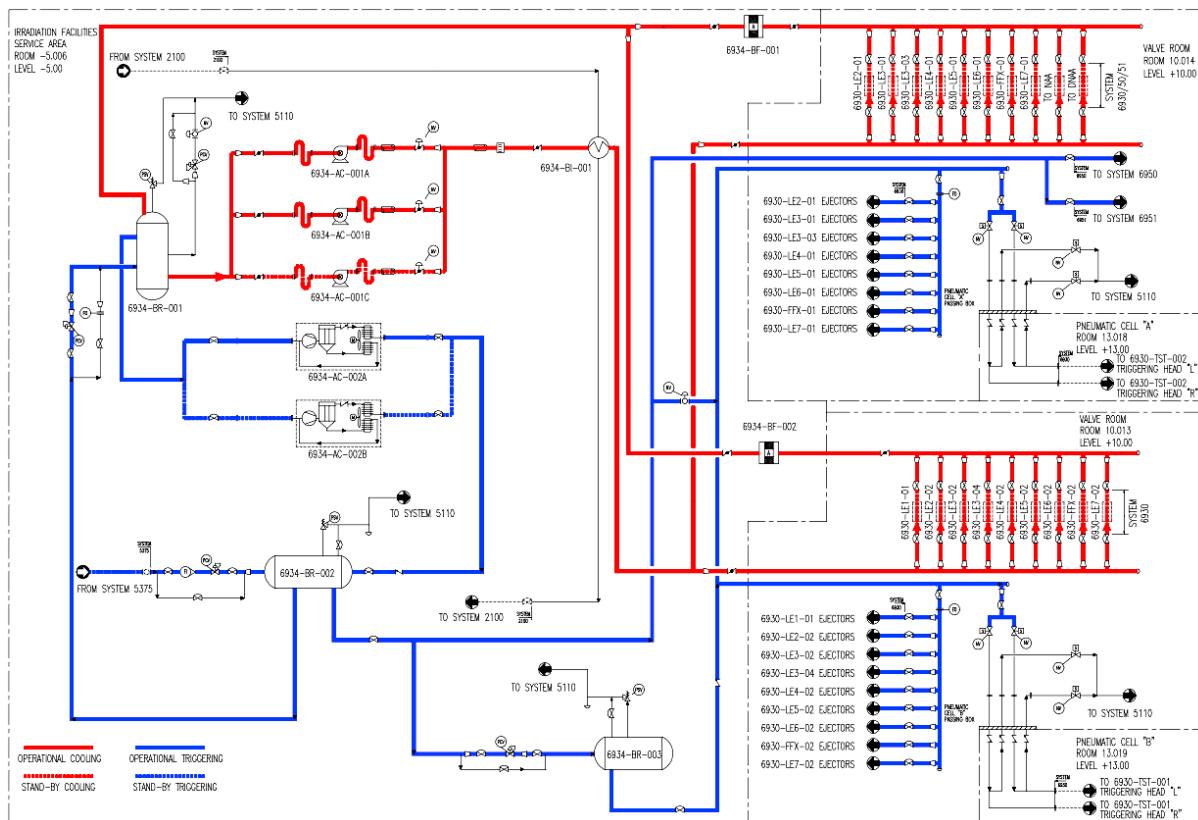


Fig. 4-3 気送管システムの冷却及びトリガリング系のブロック図

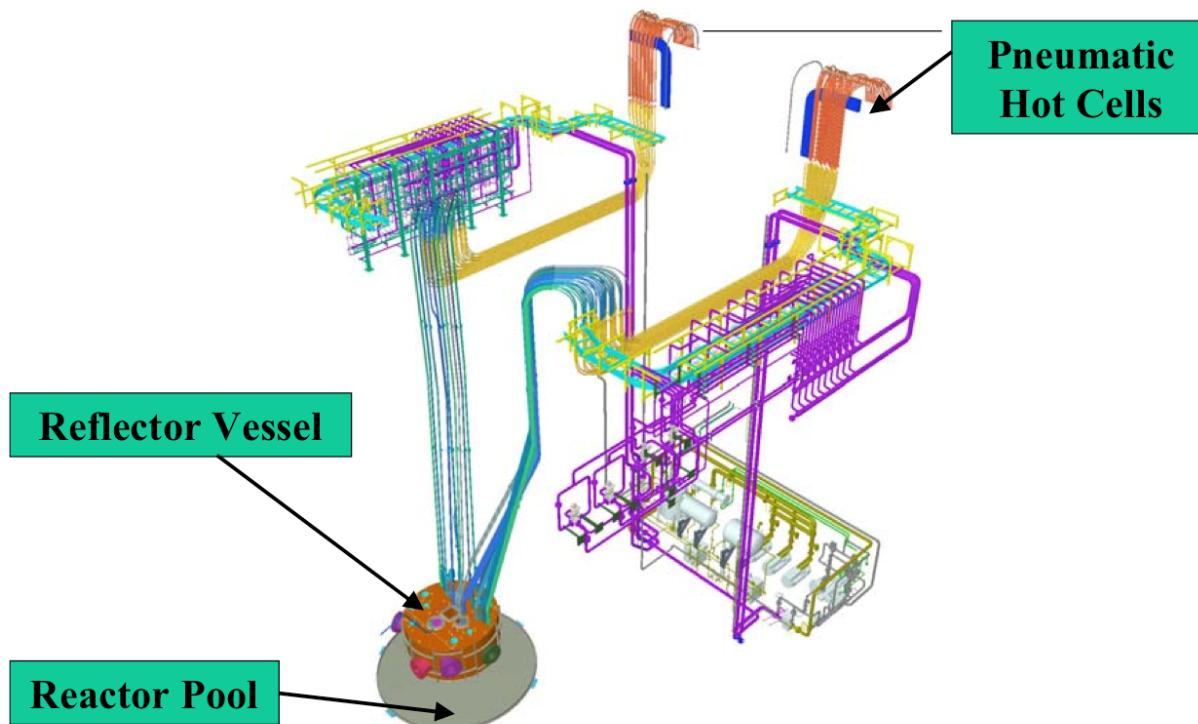


Fig. 4-4 気送管システムの立体図

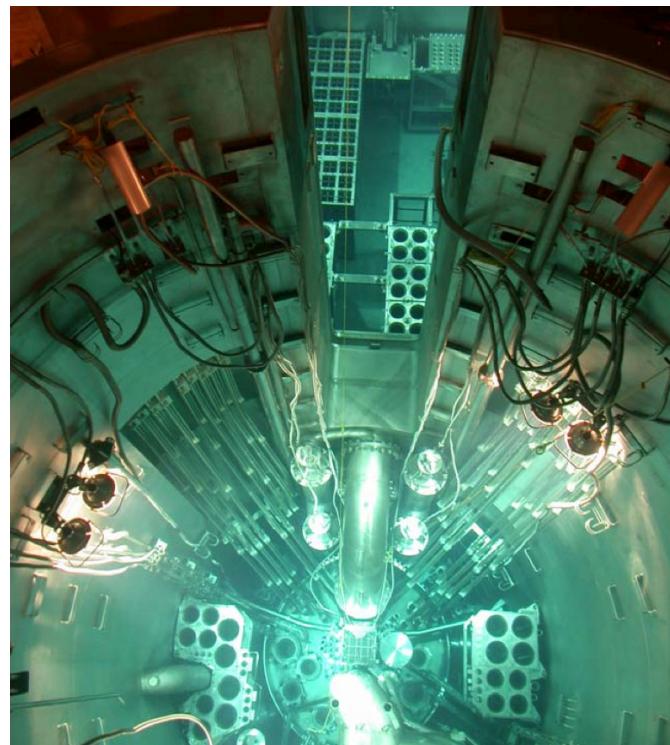


Fig. 4-5 気送管照射施設の写真

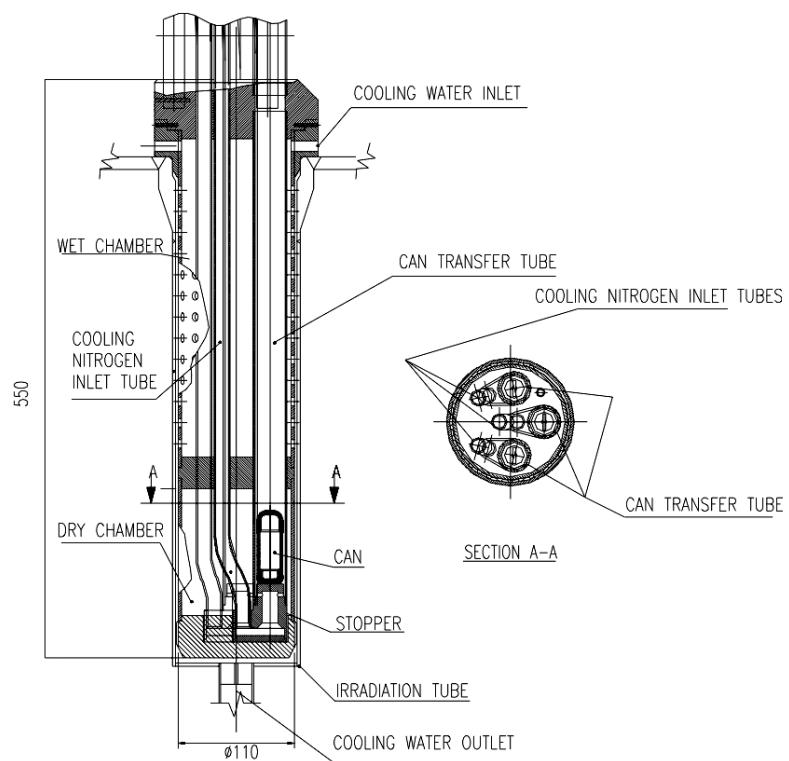


Fig. 4-6 热中性子照射用3孔照射リグ

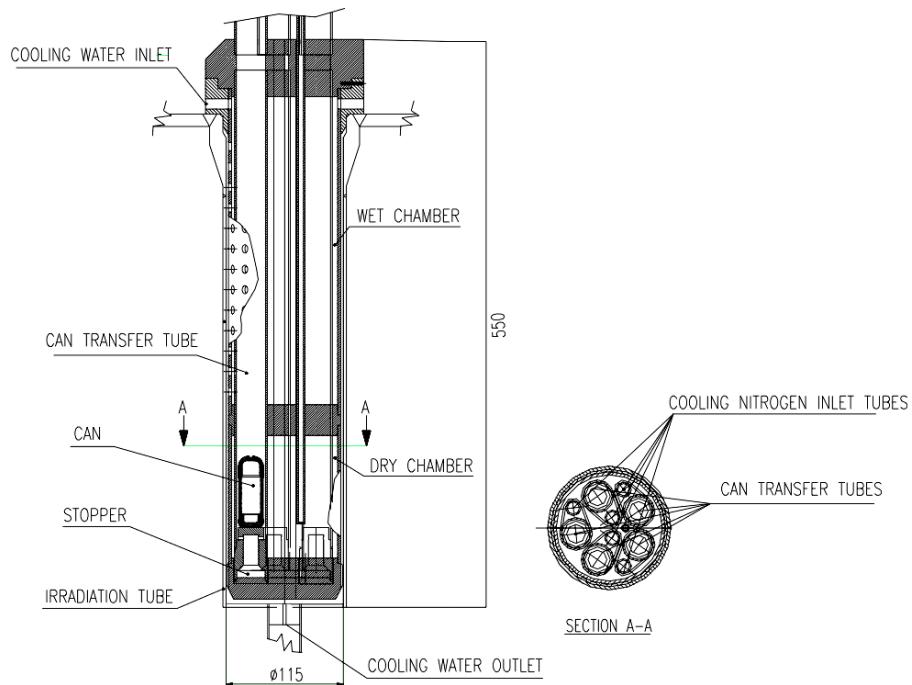


Fig. 4-7 热中性子照射用 5 孔照射リグ

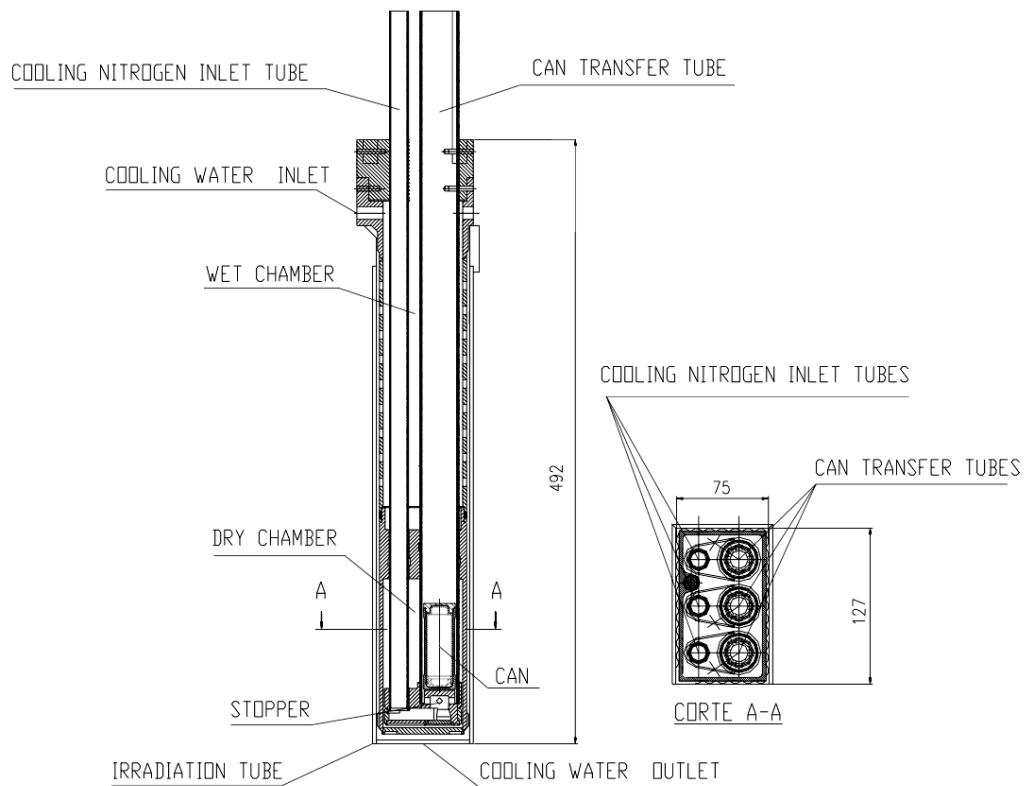


Fig. 4-8 高速中性子照射用 3 孔照射リグ

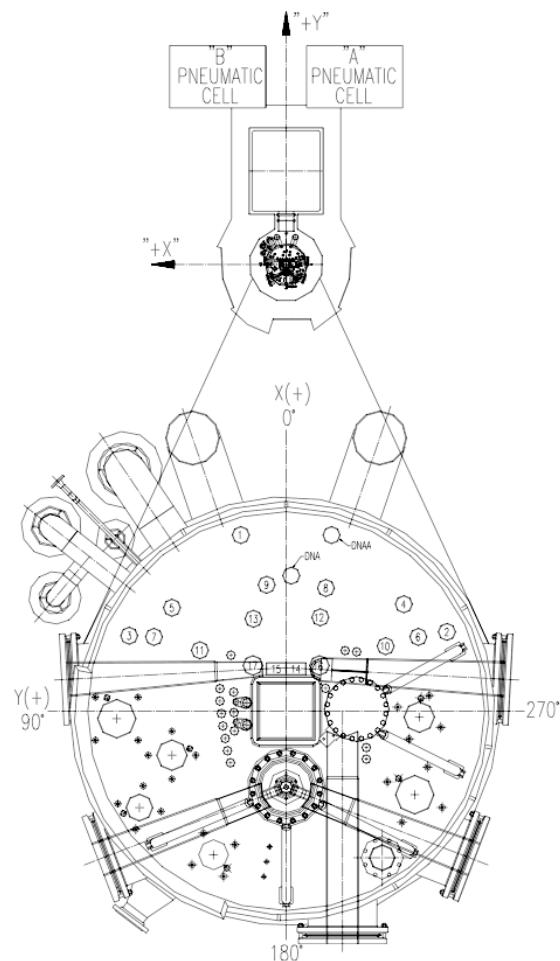


Fig. 4-9 気送管照射位置

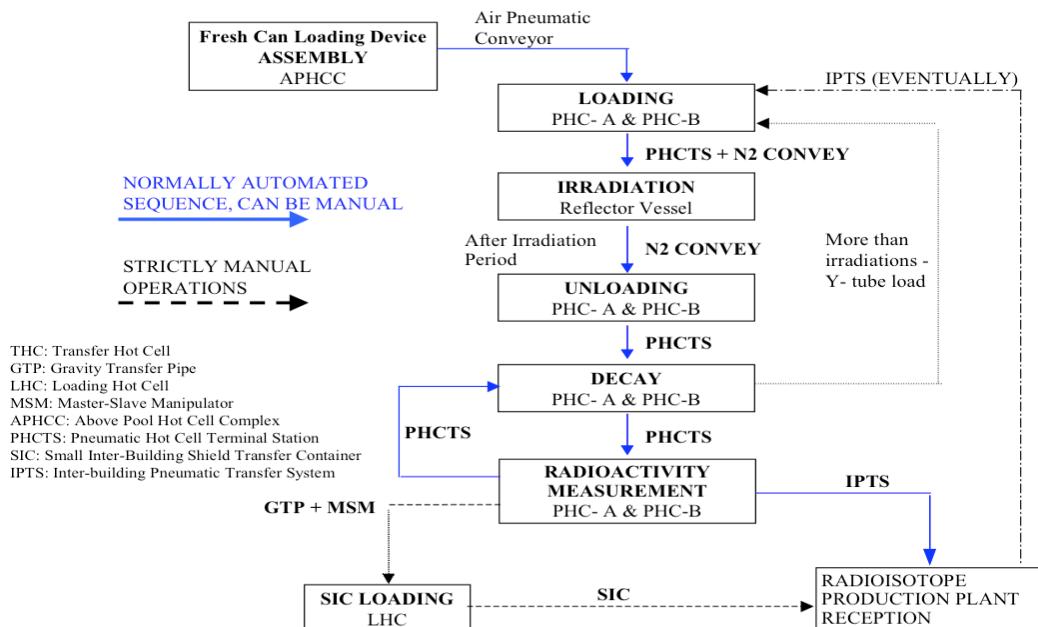


Fig. 4-10 各気送管用ホットセルの運転手順

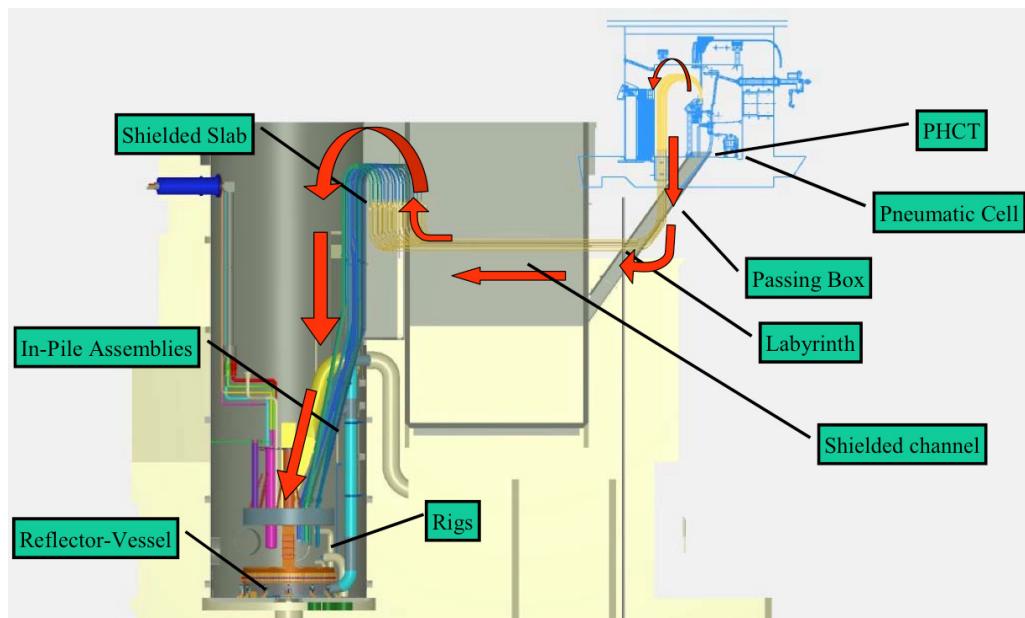


Fig. 4-11 長時間照射設備へのキャプセルの装荷(断面図)

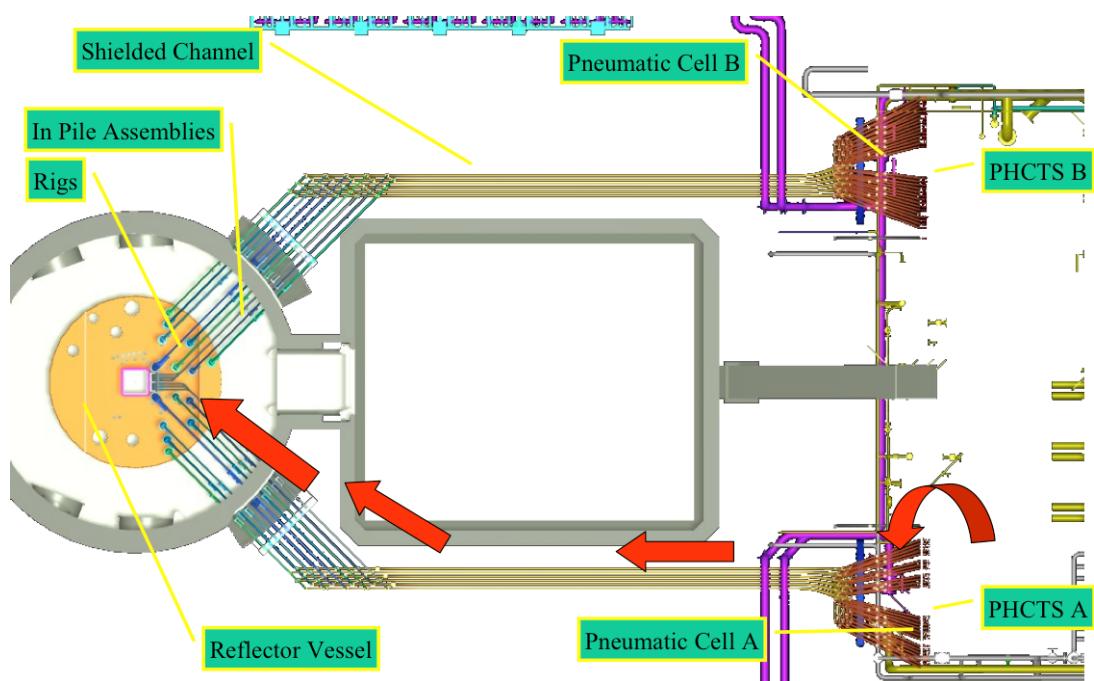


Fig. 4-12 長時間照射設備へのキャプセルの装荷(平面図)

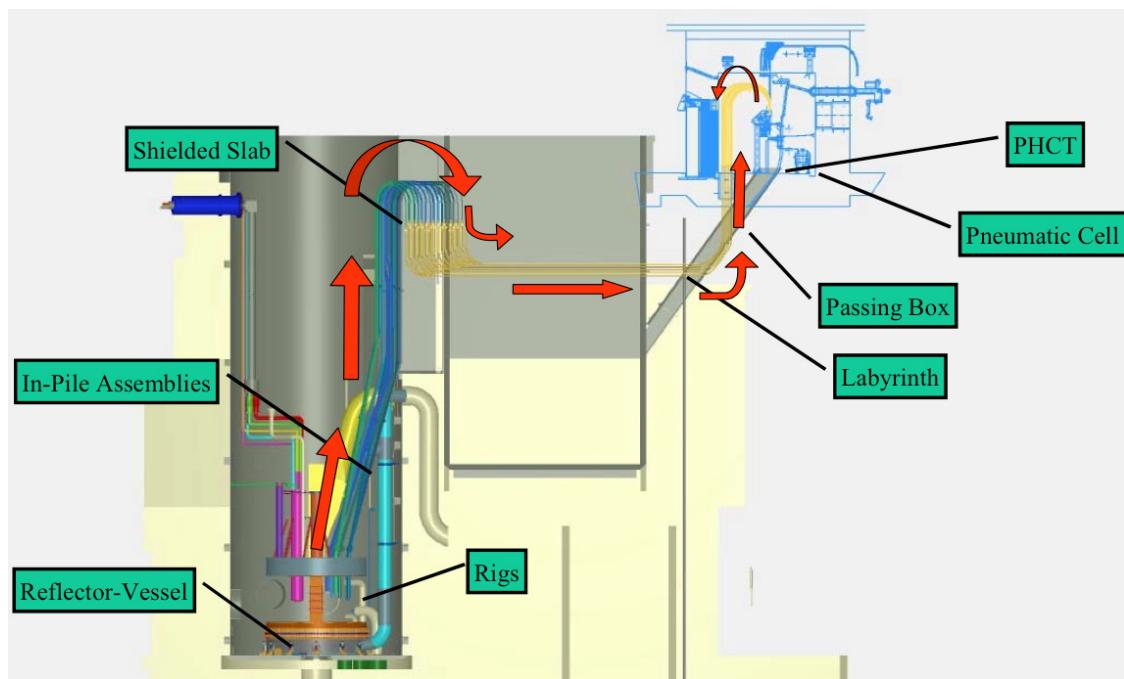


Fig. 4-13 長時間照射設備へのキャプセルの取出し(断面図)

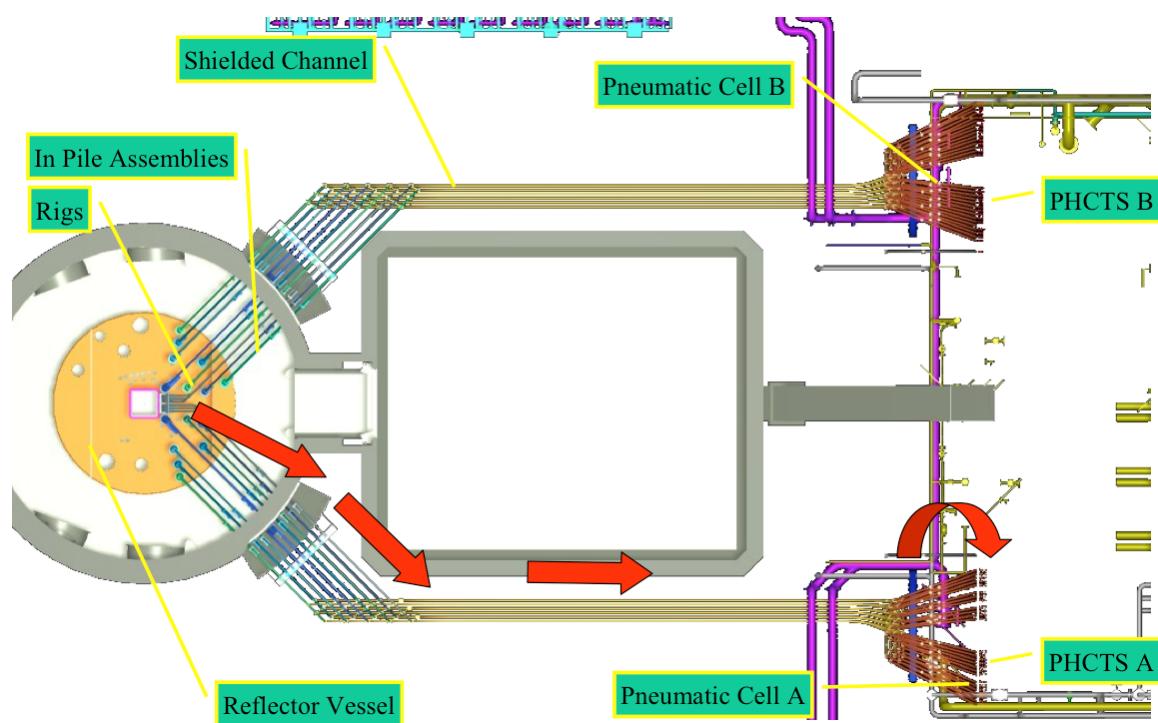


Fig. 4-14 長時間照射設備へのキャプセルの取出し(平面図).

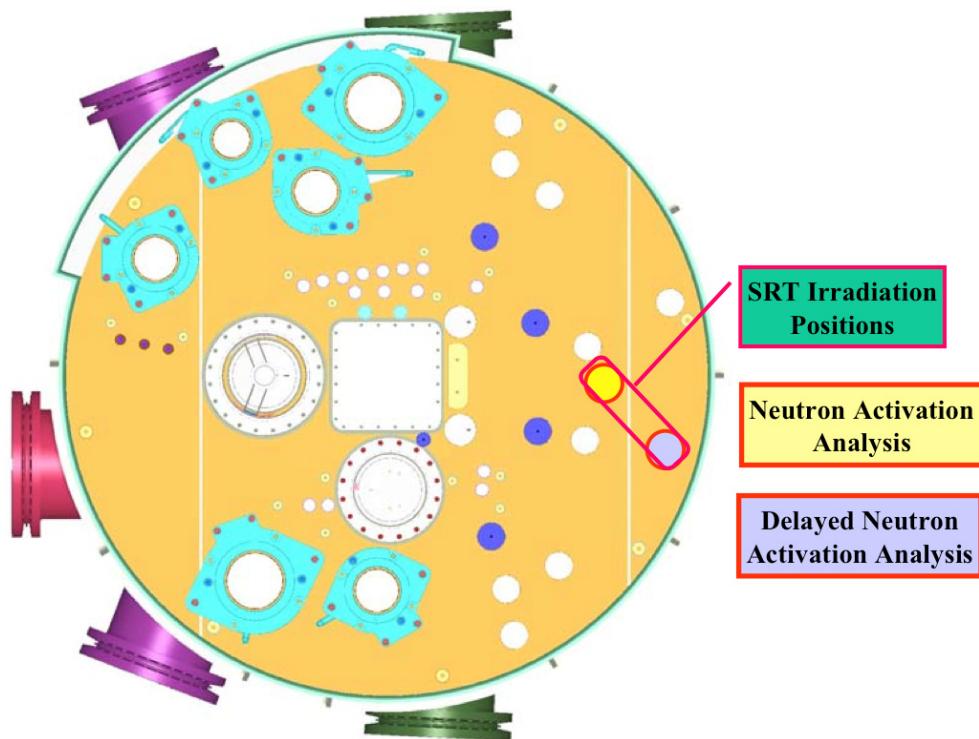


Fig. 4-15 短時間照射設備の照射孔位置

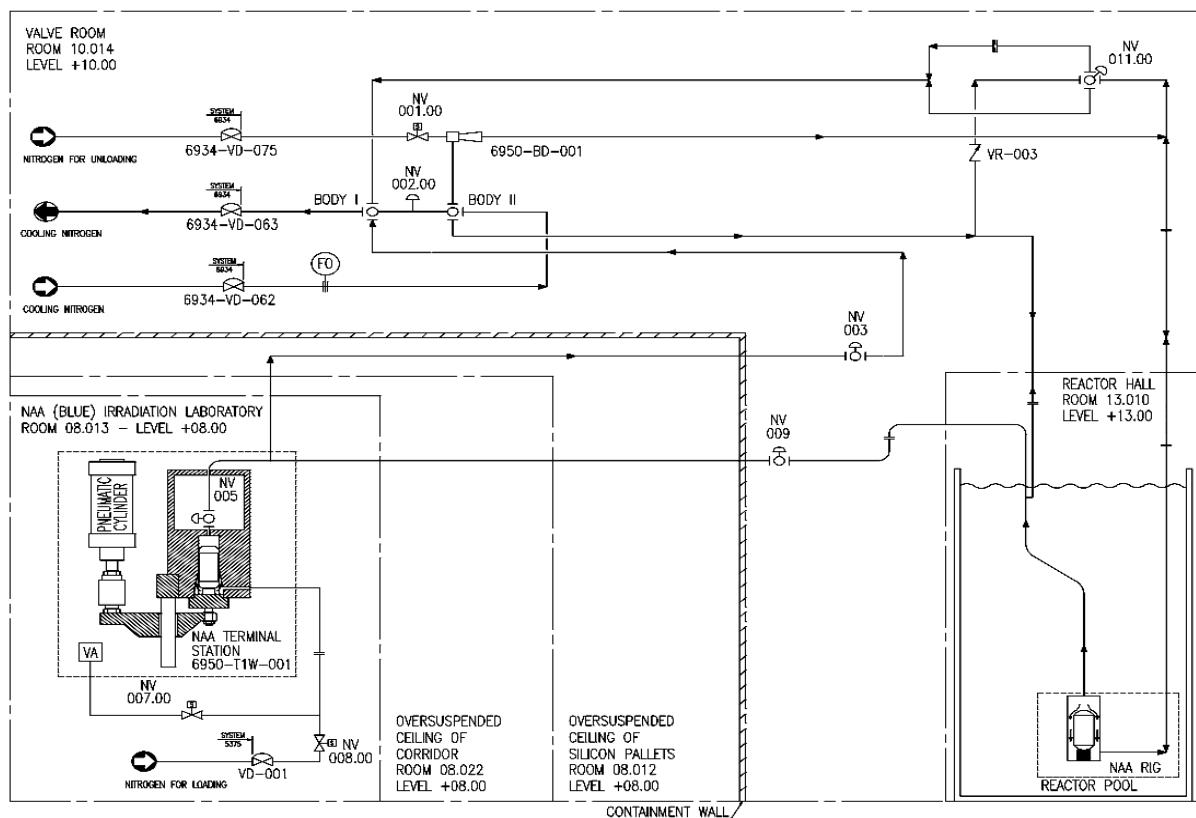


Fig. 4-16 短時間照射設備の移送・冷却システム

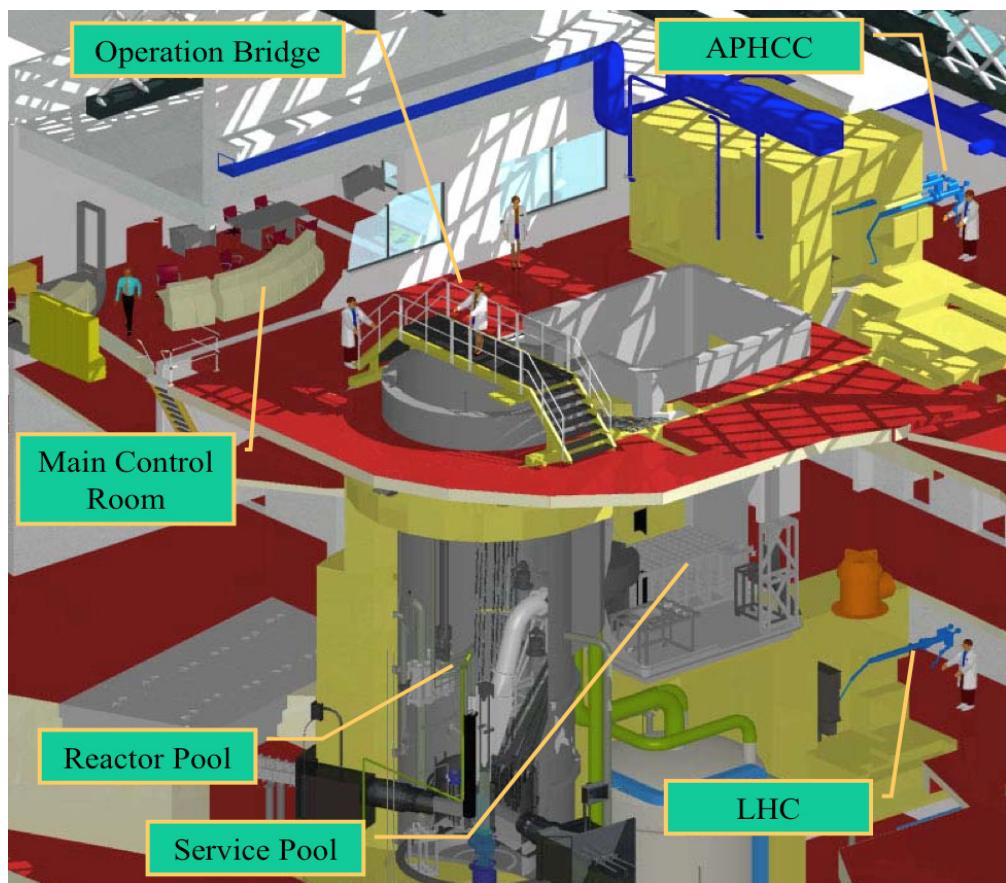


Fig. 5-1 RI 取扱施設の設置位置

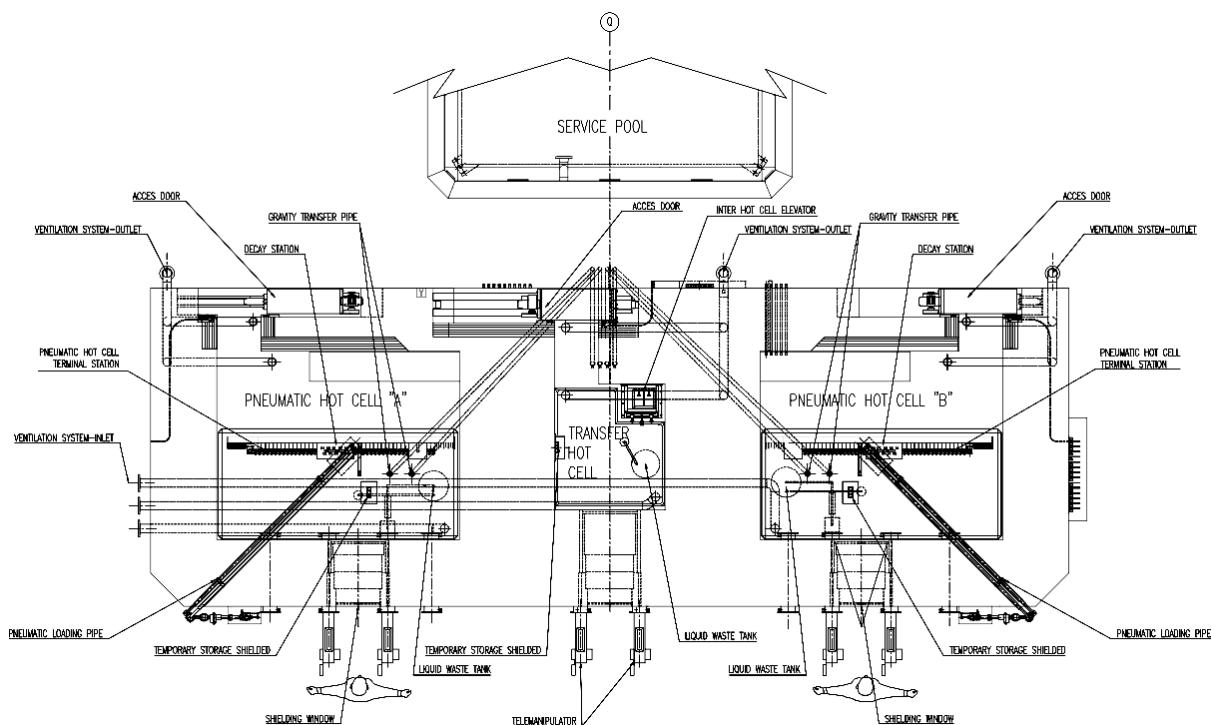


Fig. 5-2 RI 取扱施設の概略

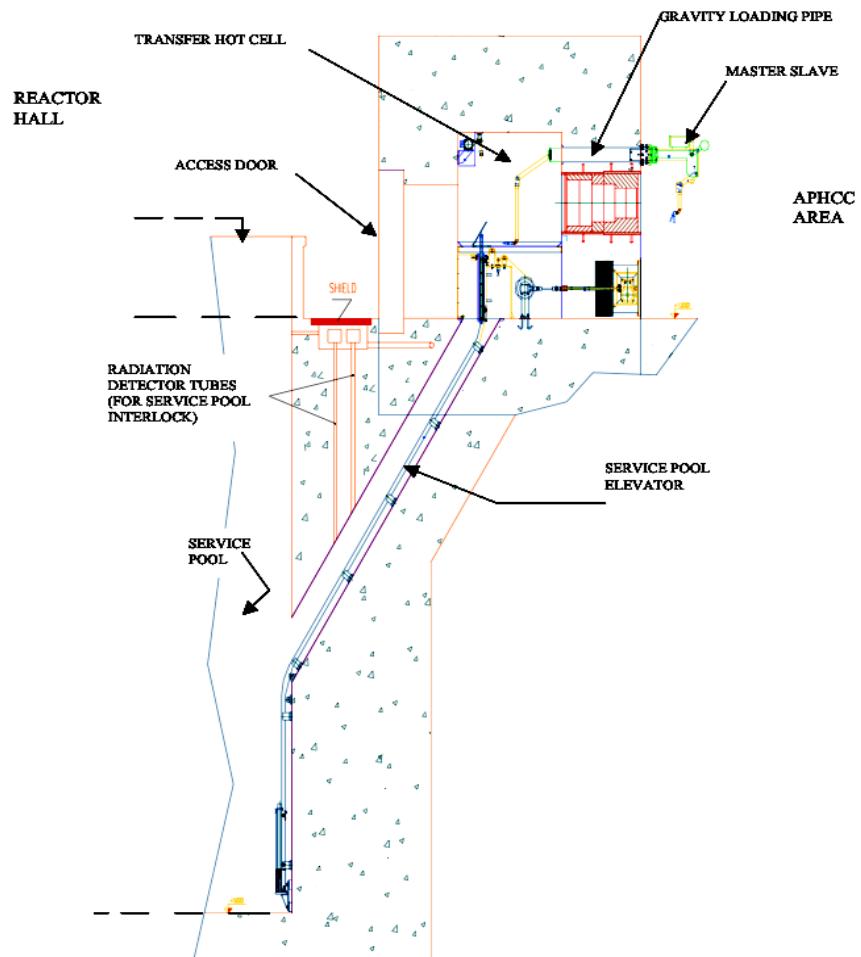


Fig. 5-3 移送ホットセルの断面図



Fig. 5-4 装荷ホットセルの写真

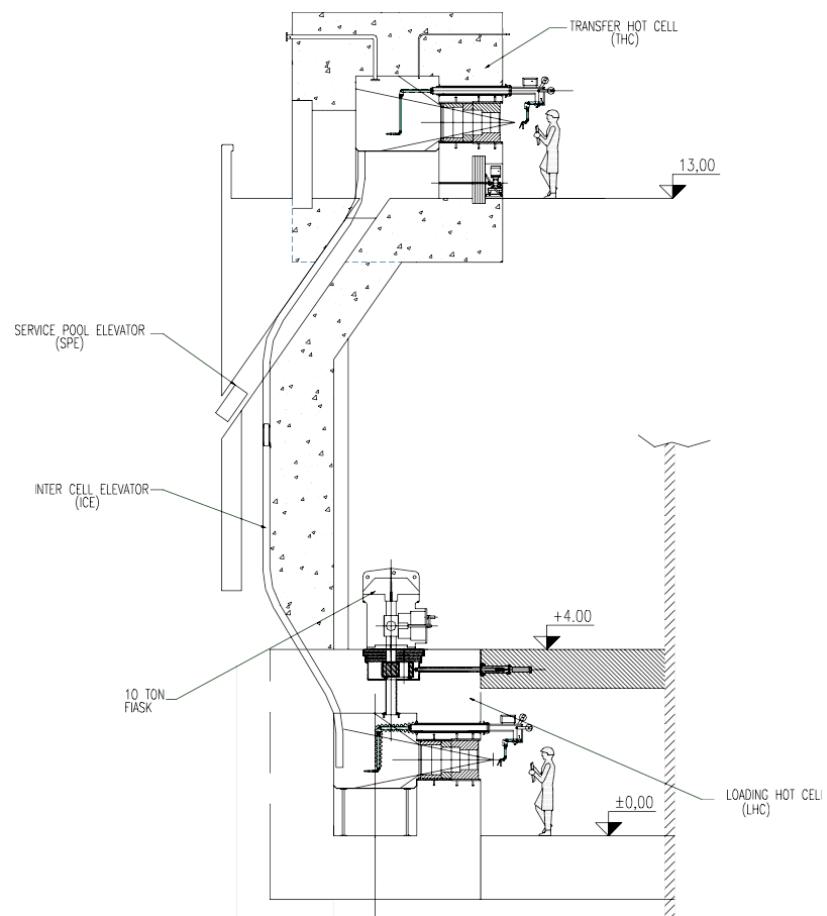


Fig. 5-5 移送セルと装荷セルの断面図

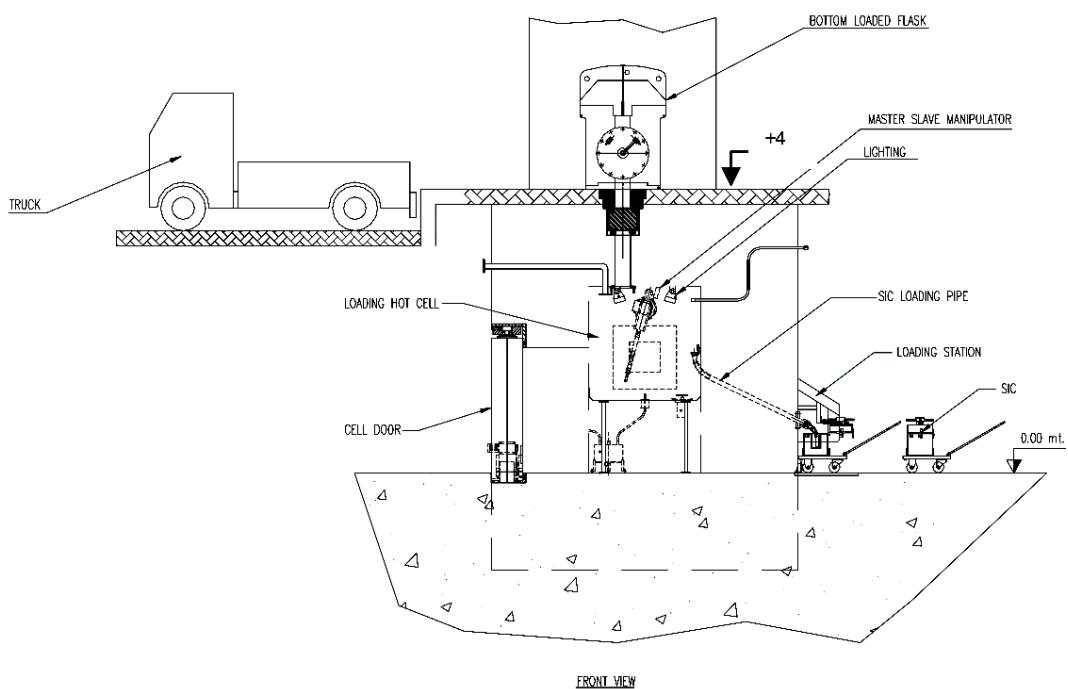


Fig. 5-6 装荷ホットセルの断面図

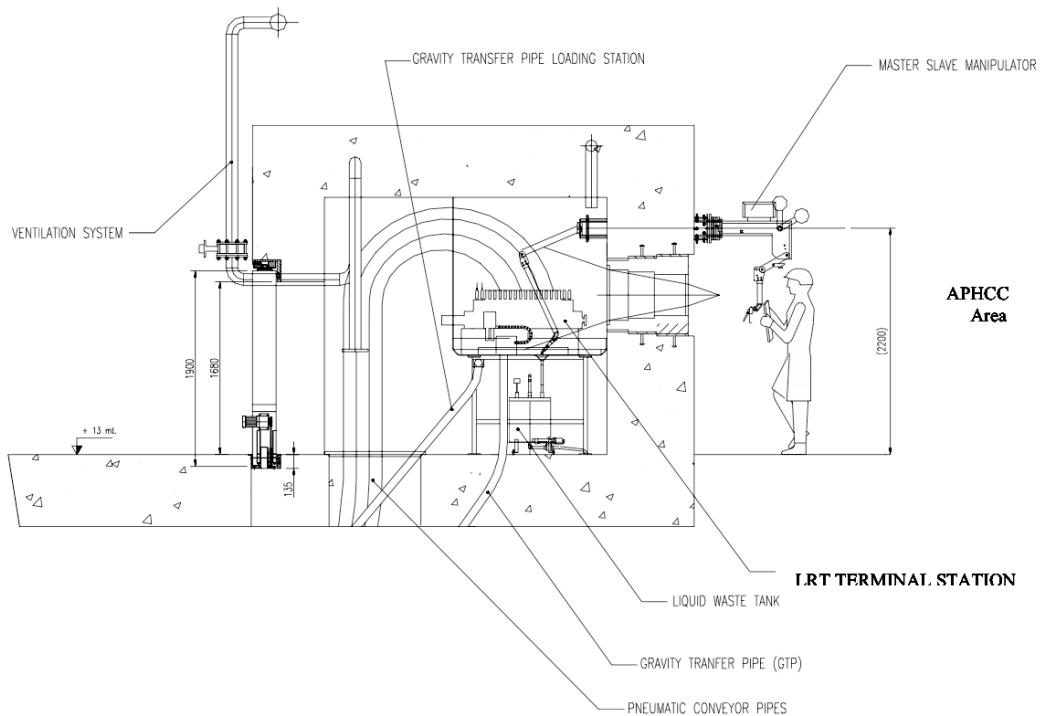


Fig. 5-7 気送管用ホットセルの断面図

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)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×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	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1b=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·s/cm ² =0.1Pa·s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m/s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≈ 1(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≈ 10 ⁻⁸ Wb
スチール	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/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=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャニスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W·m ⁻² ·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 = 2×10 ⁻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 = 1μm=10 ⁻⁶ m

