



高精度照射時間制御型汎用照射設備の 設計検討及び整備の状況

Fabrication Study of New Irradiation Facility for ^{99}Mo Production in JMTR

滝田 謙二 飯村 光一 富田 健司 遠藤 泰一
菅野 勝

Kenji TAKITA, Koichi IIMURA, Kenji TOMITA, Yasuichi ENDO
and Masaru KANNO

大洗研究開発センター
照射試験炉センター
材料試験炉部

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

March 2012

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, 2012

高精度照射時間制御型汎用照射設備の設計検討及び整備の状況

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 材料試験炉部

滝田 謙二、飯村 光一、富田 健司、遠藤 泰一、菅野 勝

(2012年 2月 3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、2012年度に材料試験炉を再稼働させる予定で改造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 (^{99}Mo) の製造が計画されている。 ^{99}Mo は、その供給のすべてを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。

本報告書では、 ^{99}Mo の製造に必要な照射装置である水カラビット照射装置の選定、装置の構成検討について述べる。

Fabrication Study of New Irradiation Facility for ^{99}Mo Production in JMTR

Kenji TAKITA, Koichi IIMURA, Kenji TOMITA, Yasuichi ENDO and Masaru KANNO

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

(Received February 3,2012)

At JAEA Oarai Research and Development Center (JAEA Oarai), JAEA Oarai was proceeding a plan to repair JMTR, which is to re-operate in fiscal 2012.

Additionally, as an effective utilization of JMTR, JAEA Oarai is planning to manufacture ^{99}Mo , which is a parent nuclide of Tc-99. Tc-99 is most commonly used as a radiopharmaceutical in the field of nuclear medicine.

Currently ^{99}Mo supply is dependent only on foreign imports, so JAEA is aiming for working on partially manufacturing ^{99}Mo domestically with industrial circles in Japan.

In this article, this report described the choice and fabric of irradiation facility named Hydraulic Rabbit Facility for manufacturing ^{99}Mo , the technical study of fabrication technique.

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

目 次

1. はじめに	1
2. HR-2 の改造に係る整備	1
2-1 概要	1
2-2 試験及び検査	1
3. ラビット試料の設計及び検討	2
3-1 概要	2
3-2 照射領域の拡張	2
3-3 ラビットの構造の検討	2
3-4 ⁹⁹ Mo 製造量に関する検討	2
3-5 検討結果	2
4. 既設機器の利用と撤去	3
4-1 平成 22 年度の撤去範囲	3
4-2 平成 23 年度の撤去範囲	3
4-3 平成 24 年度の撤去範囲	3
5. 再利用機器の非破壊検査	3
5-1 目的	3
5-2 実施範囲	3
5-3 再利用機器の検査方法	4
5-4 検査結果	5
6. 機器の製作及び設置	5
6-1 詳細設計	5
6-2 機器の製作及び整備	6
7. まとめ	7
謝 辞	7
参考文献	7
付 録 HR-2 改造に係る放射線しゃへい計算書	23

Contents

1. Introduction	1
2. Maintenance concerning reconstruction of HR-2	1
2-1 Outline	1
2-2 Inspection of irradiation equipment	1
3. A design and examination of a rabbit's sample	2
3-1 Outline	2
3-2 Study of neutron irradiation region	2
3-3 Study of rabbit's structure	2
3-4 ⁹⁹ Mo Study of production	2
3-5 Study result	2
4. Reuse and dismantlement of irradiation equipment	3
4-1 Dismantlement equipment of 2010 F.Y.	3
4-2 Dismantlement equipment of 2011 F.Y.	3
4-3 Dismantlement equipment of 2012 F.Y.	3
5. The non-destructive check of reuse irradiation equipment	3
5-1 Purpose	3
5-2 Enforcement range	3
5-3 The inspection method of reuse equipment	4
5-4 Test results	5
6. Manufacture and installation of equipment	5
6-1 Detail design	5
6-2 Fabrication and installation of equipment	6
7. Conclusions	7
Acknowledgements	7
References	7
Translation Statement of radiation shielding	23

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では、放射性医薬品のテクネチウム-99mの製造を検討している。現在本薬品は、すべて輸入に依存していることから、テクネチウム-99mの親核種であるモリブデン-99(以下「⁹⁹Mo」という。)の国産化を計画している。

⁹⁹Moは、半減期が約66.7時間と短いため、製造においては、照射時間の制御が必要となることから、原子炉運転中において任意時間で試料の照射及び取出しができる「水カラビット照射装置」を用いてn, γ 法による製造を行う予定である。

水カラビット照射装置は、JMTRに3基まで据付けることが可能で、これまでJMTRにおいては、水カラビット1号照射装置(以下「HR-1」という。)及び水カラビット2号照射装置(以下「HR-2」という。)の2基を据付けた実績がある。現在は、HR-1が供用中であり、HR-2は、今後の照射需要による炉心構成のため、平成13年度に炉内管を撤去した。

今回整備を計画している高精度照射時間制御型汎用照射設備は、文部科学省予算による最先端研究基盤事業の一環としてHR-2を使用し、⁹⁹Moの製造やラジオアイソトープの製造を効率的に行うためのものである。HR-2の整備は炉内管へのラビット試料の挿入個数を従来の最大3本から最大5本に構造変更をするとともに、炉外循環系についても、照射個数変更に伴う改造を行う予定である。

本報告書は高精度照射時間制御型汎用照射設備の設計検討及び整備状況についてまとめたものである。

2. HR-2の改造に係る整備

2-1 概要

高精度照射時間制御型汎用照射設備の整備では、平成22年度に設備設置のための環境整備、非破壊検査による再利用機器の健全性確認を行った。また平成22年度に詳細設計を行い設工認及び使用施設の許可変更の申請を行い、平成23年度に機器の製作、平成24年度に製作、据付、総合的な試験・検査を行い、平成25年度に共用開始する計画である。

HR-2の改造に係る整備内容は、駆動冷却系の配管及び塔槽類について必要な点検を行った後、駆動冷却ポンプ等の主要機器類を撤去し、新たな設計仕様で主要機器の製作を行い、現地へ据付ける。なお、運転上必要な補助機器等については、全て分解点検を行うものとした。

HR-2の改造に係る手続き等スケジュール(案)をTable.1に、整備内容をTable.2に、HR-2のフローシートをFig.1に、HR-2炉内管の構造をFig.2示す。

2-2 試験及び検査

検査は、単体及び完成品の使用前検査を工場にて受検する。また、溶接品に関しては、別途溶接検査申請を行い、必要な検査を受検する。

製作品の据付け及び駆動冷却系の整備完了後、HR-2の性能を確認するために、作動検査及び漏えい検査等の使用前検査並びに施設検査を現地にて受検する予定である。

3. ラビット試料の設計及び検討

3-1 概要

HR-2の改造後におけるラビット試料は、最先端研究基盤事業において5本照射を行うことから、既設装置及び照射領域との適合性を考慮し、形状を直径32mm、長さ120mmで設計等を進めている。

また、改造後において、標準ラビット(直径32mm、長さ150mm)による照射も行うことから、改造による炉内管内の照射領域の拡張に併せ、ラビット試料の照射個数を長さ120mmのものを5本、150mmで4本とするための検討を実施した。ラビット試料の個数変更に伴う炉内管の変更の概略をFig. 3 炉心照射位置及び炉内管の構造に示す。

3-2 照射領域の拡張

HR-2 炉内管の照射領域は、これまでの水カラビット照射装置における照射実績から、試料の中性子照射領域を拡張し、既設450mmから600mm(ピークの上下限側におけるラビット配置が均等となる。)に拡張する計画であり、標準ラビットの装荷数は4本となる。

照射領域の概略をFig. 4に、挿入装置-取出装置の概略をFig. 5に示す。

3-3 ラビットの構造の検討

⁹⁹Mo製造に用いるラビットは、製造量を増やす観点から、内径を大きくとる必要があるが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。水カ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に封入するものである。ラビットの構造の検討の結果、肉厚を2mmまで薄くし内径を大きくとることが出来ることが判ったため、標準ラビットの寸法でも内容積の拡張が可能となった。

Fig. 6に5本照射用及び肉厚変更後の標準ラビットの形状を示す。

3-4 ⁹⁹Mo製造量に関する検討

国内での⁹⁹Mo需要量である1,110TBq/年(22.2TBq/週)から推定される供給メーカーの購入量は、推定で4,440TBq/年(88.8TBq/週)であり、全量が海外のメーカー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内生産を計画している。

JMTEを用いた⁹⁹Mo製造設備の概念検討⁽¹⁾によると、供給メーカーの推定購入量である89TBq/週に対し原子炉の年間運転日数に係るリスクを考慮して20%程度を担うことを想定し、製品の出荷を隔週とし放射エネルギーを18.5TBq/週とした。各照射孔における⁹⁹Mo生産量は、1バッチ(照射期間:6日)の標準ラビット3個の場合HR-1照射設備の照射孔D-5で7.3TBq、HR-2の照射孔M-9で36.6TBq、M-9においてラビット5個の場合61.0TBqであり、目標値を満足する結果が得られている。

3-5 検討結果

HR-2改造後におけるラビット照射本数は、新規形状による5本照射に加え、標準ラビットによる4本照射を可能とすることで、照射目的による選択肢が増える等利点が大きいことから、2種類のラビット形状による照射が可能となるよう22原機(大施)066により設工認申請を行った。

なお、形状の違いによる照射試験時の混在防止については、今後、規定等により防止策等を含めて検討する予定である。

4. 既設機器の利用と撤去

4-1 平成 22 年度の撤去範囲

水カラビット照射装置には駆動冷却系及び移送系があり、移送系については供用中であるため撤去範囲は駆動冷却系の主配管・ポンプ・塔槽類とそれらに付随する計装類とし、埋設配管との取り付け部については第一フランジ部とした。制御盤・電源盤については移送系が供用中であるため、必要機能のみを制御盤に移設しそれ以外を撤去した。HR-2 の制御盤・電源盤の撤去前後の写真を Photo. 1 及び Photo. 2 に、配管類の撤去前後を Photo. 3 及び Photo. 4 に、装置全体の撤去前後の写真を Photo. 5 及び Photo. 6 に示す。

4-2 平成 23 年度の撤去範囲

平成 24 年度に実施する水中機器等の分解点検に先立ち、カナル内水中機器であるボール弁及び流路切換弁の取外しを行うほか、カナル内の温度計及び通過検出器等の残存計装を撤去した。

取外した水中機器の一部であるボール弁の写真を Photo. 7 に示す。

4-3 平成 24 年度の撤去範囲

平成 24 年度は供用中であつた移送系配管、配管架台、制御盤等をすべて撤去し、更新機器の設置工事に備える。

5. 再利用機器の非破壊検査

5-1 目的

HR-2 の整備において、装置を構成する機器のうち、炉室 1 階フロアのコンクリート床内面に敷設され、No. 1 カナル水中機器と地上機器を連結するための埋設配管、炉プール内において、炉内管を接続するための貫通配管、照射済ラビットをホットラボに移送するための移送系配管及び圧空供給系等のユーティリティについては、再利用する予定である。

これらの機器は、昭和 47 年の HR-2 設置時から供用しており、機器の耐圧部材等は、全て溶接により組み立てられていることから、埋設配管等の内面観察及び、溶接部の非破壊検査を実施し健全性を確認するものである。

5-2 実施範囲

水カラビット照射装置の炉室内配置を Fig. 7 に、検査範囲のうち 1) 移送系配管を Fig. 8 HR-2 炉室 1 階配管配置図に、2) 埋設配管及び 3) 圧空供給系を Fig. 9 HR-2 埋設配管配置図に、4) 炉プール内貫通配管及びライニングプレートを Fig. 10 炉プール内配管配置図に示す。

1) 移送系配管

設置位置：炉室 1 階東側フロア

配管材質：SUS304

配管仕様：φ 76.3mm × 3.5^t

実施範囲：移送ポンプ出口部から埋設配管との連結部までの全ての溶接部

2) 埋設配管

設置位置：炉室 1 階東側フロア及びNo. 1 カナル内

配管材質：SUS304

配管仕様：80A-10 S、50 A-10 S、25A-10 S

実施範囲：ア) 駆動冷却系主配管(80A-10 S)

炉室 1 階床面立ち上がり部から第 1 フランジ部間の全ての溶接部及びNo. 1 カナル水中出口部と機器との連結部

イ) 計装配管(50 A-10 S、25A-10 S)

No. 1 カナル水中出口部と機器との連結部

3) 圧空供給系

設置位置：炉室 1 階東側フロア

配管材質：SUS304

実施範囲：圧空供給系の主要機器である空気貯槽タンク及び排気タンク等を構成する全ての溶接部

4) 炉プール内貫通配管及びライニングプレート

設置位置：炉プール内

配管材質：SUS304

配管仕様： $\phi 76.3\text{mm} \times 3.5^t$ 、 $\phi 40.7 \times 2^t$

ライニングプレート：400mm \times 600mm \times 10mm(概略)

実施範囲：HR-2 炉内管と取り合う炉プール内貫通配管及びライニングプレートの全ての溶接線

5-3 再利用機器の検査方法

再利用する埋設配管について、以下の検査を実施した。

1) 溶接部の非破壊検査(約 200 か所)

浸透探傷検査^{*1}を実施するとともに、主要な埋設配管及び塔槽類等については、X線または γ 線等の線源を用いた放射線透過試験^{*2}または超音波探傷試験^{*3}等を合わせて実施した。

なお、放射線透過試験を実施する場合は、可能なかぎり被検査箇所³の 360 度周方向について、3 分割にて撮影した。

2) 溶接部の金相試験^{*4}(約 50 個)

HR-2 を構成する配管等の溶接部からサンプルを取出し、金相試験を実施した。

3) 駆動冷却系主配管の内面観察

駆動冷却系主配管の埋設部について、内面の状態を内視鏡等により観察を行った。

*1 : PT(Penetrant Testing)

材料表面に発生した表面開口傷に浸透液を浸透させ、浸透液を毛細管現象により表面に吸い出し、拡大されて現れた指示模様を観察して表面傷を調べる方法。

*2 : RT(Radiographic Testing)

判定結果が放射線透過写真(フィルム)として残り、溶け込み不足やブローホールの様な体積を持つ内部傷の検出を目的とした信頼性が高く一般的な検査方法。

*3 : UT(Ultrasonic Testing)

パルス発信器から発生した超音波パルスを探触子から発信しその一部が内部の欠陥に反射され、その反射波が探触子に受信され高周波電圧に変換され受信器を經由してブラウン管で表示することにより、欠陥の存在位置及び大きさの程度を知る検査。

*4 : 機械や構造物などに用いられる材料の性質を調べるための試験の一つであり、金属および合金の内部組織を調べて、構造・組成や性質を検査する方法。

5-4 検査結果

再利用する埋設配管等について各種の検査により健全性の確認を行った結果、放射線透過検査において数カ所に傷が確認されたが、傷の形状等から施工時に発生した傷と推測され、進行した形跡は見られなかった。供用開始から 40 年弱が経過しているが、これまでの運転時の使用圧力、振動等により傷の進行、配管の減肉等が認められないことから今後の使用にも耐えられると判断した。また、この検査結果を設工認申請に係るヒアリングにおいて文科省に報告した。

6. 機器の製作及び設置

6-1 詳細設計

機器の製作にあたり、まず ^{99}Mo の製造を効率的に行うために、従来、試料の最大照射個数が 3 個であったものを、5 個照射することが可能な構造に改造を行うため、平成 22 年度に詳細設計にて以下に示す計算書等を作成し、HR-2 の改造に係る設計の妥当性及び試験研究の用に供する原子炉等の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則（総理府令 11 号）等から要求される安全性を確認した。以下に各計算、検討結果の概要を示す。

1) 炉内管耐圧強度計算

炉内管の耐圧強度の評価を行うものであり、炉内管の構成部材である管、管の平板、フランジの実際厚さは、いずれも計算上必要な厚さより大きく、耐圧強度上十分であった。

2) 熱流力計算

HR-2 の各想定事象における炉内 2 重管の各温度分布および冷却水温度（炉外循環系を含む）を計算し、①「構造材の温度が最高使用温度を超えない」②「炉心部の HR-2 冷却水に沸騰が生じない」③「炉心部の原子炉一次冷却水に沸騰が生じない」ことを確認した。

3) 炉内管耐震応力計算

炉内管の耐震応力解析及び評価を実施し、許容値を満足している事を確認した。

4) 支持金具強度計算

支持金具の強度計算書であり、主金具の圧縮・引張応力およびピンのせん断応力について評価し構造が健全であることを確認した。

5) 周辺要素強度計算

周辺要素の応力評価を実施した結果全て許容値を下回っており、構造が健全であることを確認した。

6) ラビット試料着座時の応力計算

ラビット試料着座時の衝撃荷重による炉内管及びラビット試料受の応力及び評価を実施し、構造が健全であることを確認した。

7) 放射線しゃへい計算

HR-2 のラビット 5 個照射が可能な構造への改造に伴い、カナル水中に設置されている水中機器及び地上部配管機器からの放射線線量当量率が、作業者の近接する場所において設置変更許可申請書で定める設計目標値以下であることを確認した。水中機器については設計目標値である $50 \mu\text{Sv/h}$ に対してラビット取出時のカナル水面評価点における線量当量率は $48 \mu\text{Sv/h}$ であった。また地上部配管については、設計目標値である $10 \mu\text{Sv/h}$ に対して運転操作及び点検等で立入る制御盤前の推定線量率は $2.6 \mu\text{Sv/h}$ であり、いずれも設計目標値を下回っていることを確認した。

8) 炉内管曲率検討

現設計の炉内管の曲げ部分をラビットが妨げられることなく通過できることを確認した。

9) 安全動作検討

ラビット表面及び炉内構造物の表面において冷却水及び原子炉冷却水に沸騰を生じさせないための最低流量を求めた。諸条件を基に計算した結果 HR-2 の沸騰限界流量は $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。一方、HR-1 照射施設では原子炉セットバックの作動条件は冷却水流量が $3.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下になったときと定めている。水カラビット施設としては共通の条件を指定しておくことが望ましいので HR-2 のセットバック作動条件も $3.8 \text{ m}^3/\text{h}$ とする。沸騰限界流量までは十分な余裕を有することを確認した。

これ以外にも、傾斜フランジ等炉内部機器及び配管、配管架台、制御盤、駆動冷却ポンプ等地上部機器について耐圧、耐震に係る計算・検討を実施した。

6-2 機器の製作及び整備

上記の計算・検討結果及び設工認申請書をもとに以下に示す機器の製作及び整備を行っている。

1) 炉内部機器

- ① 炉内管の製作
- ② 炉内管取付アダプタの製作
- ③ 炉内管支持金具の製作
- ④ 周辺要素の製作

2) 炉外部機器

- ① 駆動冷却系制御盤、移送系制御盤、電源盤及び中継盤の製作
- ② 地上部配管架台の製作
- ③ 駆動冷却系配管の製作
- ④ 基礎ボルトの製作
- ⑤ 模擬流動試験装置の製作
- ⑥ 駆動冷却ポンプ・移送ポンプの製作
- ⑦ 流路切換弁用三方弁・空気作動式三方弁の整備

7. まとめ

JMTRでは⁹⁹Moの製造等に資するために照射装置である高精度照射時間制御型汎用照射設備(HR-2)の設計から現地据付けまでを平成22年度から平成24年度までの3年計画で進めている。この間、装置の設計、既設機器の有効利用、炉心構成や炉内管の評価、ラビット試料の数の検討、ラビット試料の内容積検討による⁹⁹Mo生産量の評価等を行った。その結果、今後行われる機器の製作・組立、現地据付に問題ないことを確認し、平成24年度の現地据付工事を経て、平成25年度から⁹⁹Moの照射や汎用照射のための運転が可能である見通しを得た。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、ご指導を頂きました小森芳廣・材料試験炉部長、内容について貴重なご意見を頂きました近江正男照射課長に深く感謝致します。

【参考文献】

- (1) JAEA-Technology 2008-035 「JMTRを用いた⁹⁹Mo製造設備の概念検討」

Table 1 HR-2 の改造に係る手続き等スケジュール (案)

項目 \ 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度
工場製作及び 現地工事 所内審査				
【原子炉施設】 設工認手続き 使用前検査手続き		◎ 設工認申請	◇*1 ▽ 認可予定 ◇*2 ⊕ 使用前検査申請予定	◇*4 ◇*3
【核燃料使用施設】 許可変更手続き 施設検査手続き		◎ 許可変更申請	◇*1 ◇*2 ⊕ 施設検査申請予定	◇*4 ◇*3

*1：使用前検査・施設検査予定（炉内部機器部品）

*2：使用前検査・施設検査予定（炉外部主要機器の一部）

*3：使用前検査・施設検査予定（炉内部機器完成）

*4：使用前検査・施設検査予定（現地）

※ 炉内部機器とは、炉内管、炉内管取付アダプタ、周辺要素、支持金具をいう。

炉外部機器とは、駆動冷却系主配管、駆動冷却系制御盤、移送系制御盤、駆動冷却ポンプ、移送ポンプをいう。

現地工事とは、上記機器の据付け、空気作動式三方弁、流路切替用三方弁、挿入・取出装置、移送装置の分解点検等をいう。

Table 2 HR-2 の改造に係る整備内容

機器名称		数量	据付位置	項目
主要機器	炉内管	1 基	原子炉容器内	新規製作
	周辺要素	1 台	原子炉容器内	新規製作
	支持金具	1 台	原子炉容器内	新規製作
	傾斜フランジ	1 台	原子炉容器上蓋	新規製作
	地上部主配管の一部	一式	炉室 1F フロア	更新
	駆動冷却ポンプ	2 台	炉室 1F フロア	更新
	流路切換用 3 方向弁	2 台	カナルNo. 1 水中	更新
	空気作動式 3 方向弁	3 台	炉室 1F フロア	更新
	安全弁	1 台	炉室 1F フロア	更新
	給水タンク	1 台	炉室 1F フロア	更新
	計測・制御機器	1 式	炉室 1F フロア	更新
	挿入装置	1 台	カナルNo. 1 水中	分解点検
	取出装置	1 台	カナルNo. 1 水中	分解点検

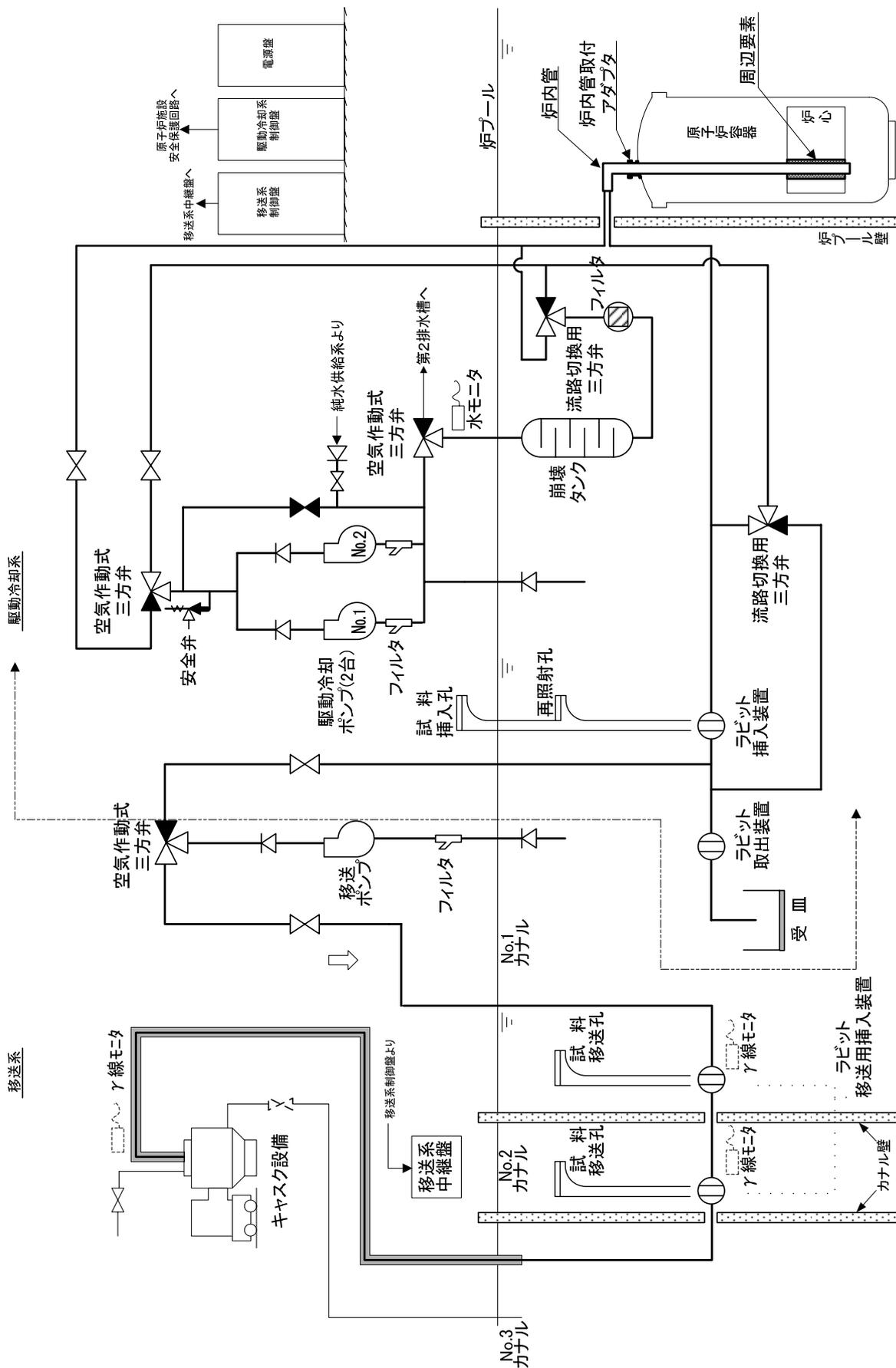
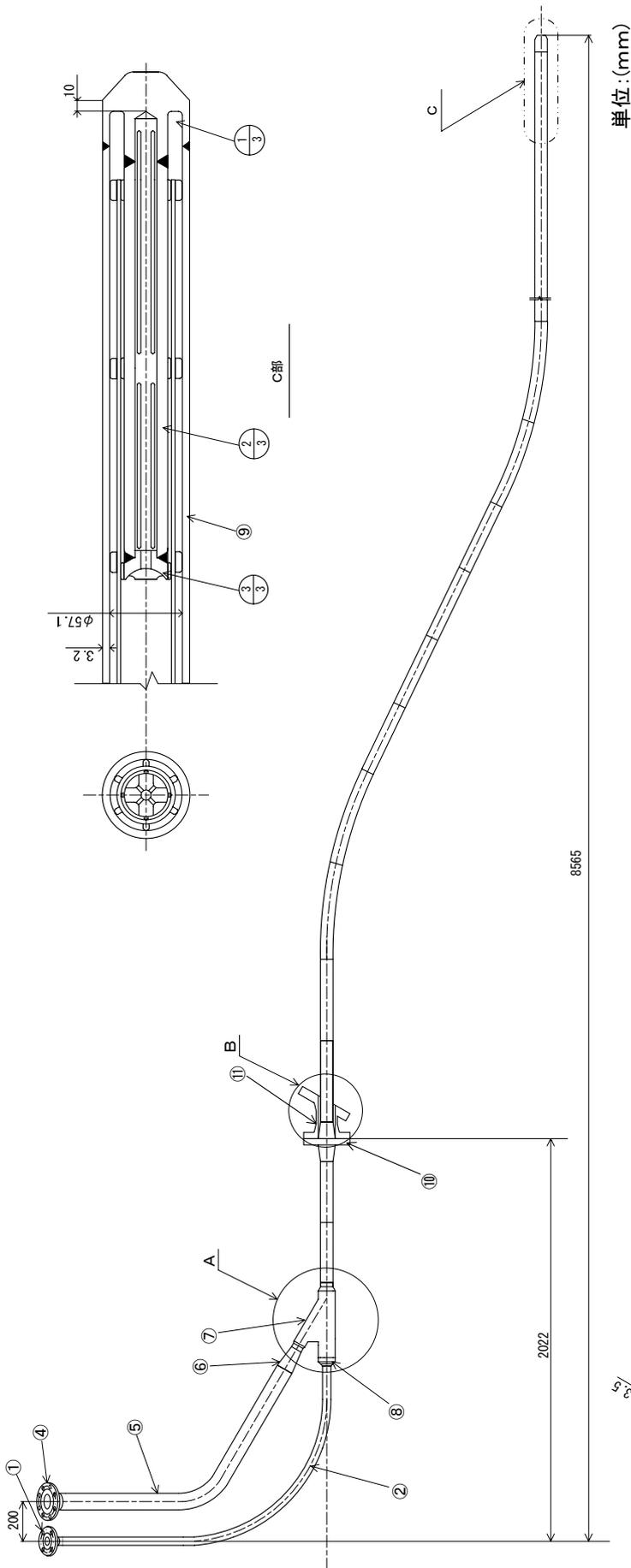


Fig.1 HR-20のフローシート



単位:(mm)

品番	品名	員数	材質	備考
11	炉内管取付アダプタ	1	SUS F 316	
10	支持フランジ	1	SUS F 316	
9	外管	1	SUS316 TB	13分割に切断後、機械加工を実施する。
8	エンドプレート	1	SUS F 316	
7	Y字管	1	SUS F 316	
6	レジューサ	1	SUS F 316	
5	接続管	1	SUS316 TP	
4	外管フランジ	1	SUS F 316	
3	ラビット受け(2)	1	SUS F 316	
3	ラビット受け(1)	1	SUS F 316	
1	先端金物	1	SUS F 316	
2	内管	1	SUS316 TP	
1	内管フランジ	1	SUS F 316	

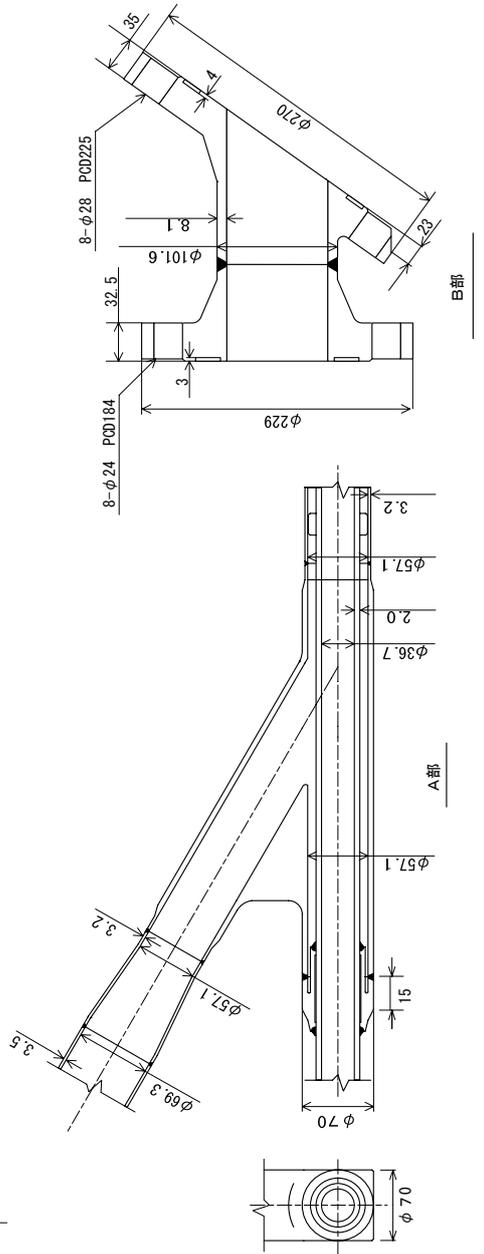


Fig.2 HR-2炉内管の構造

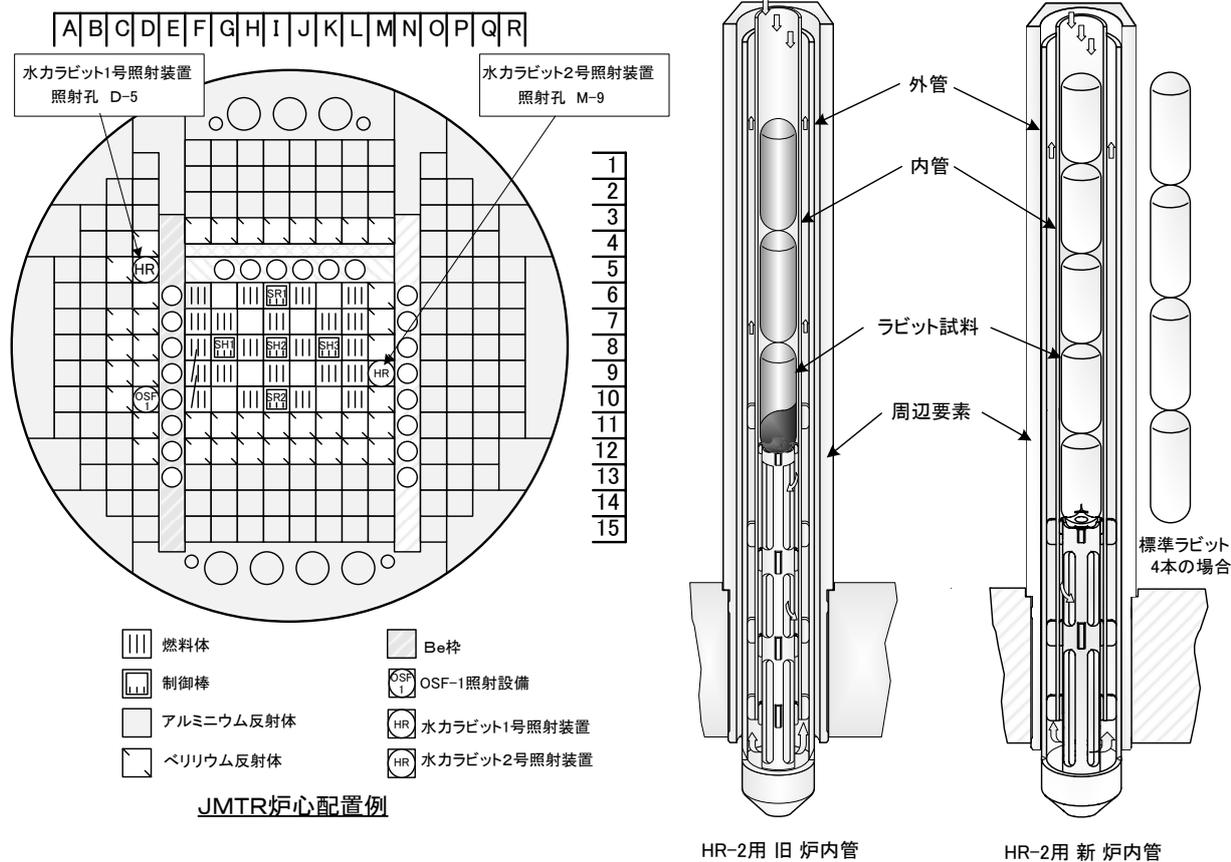


Fig.3 炉心照射位置及び炉内管の構造

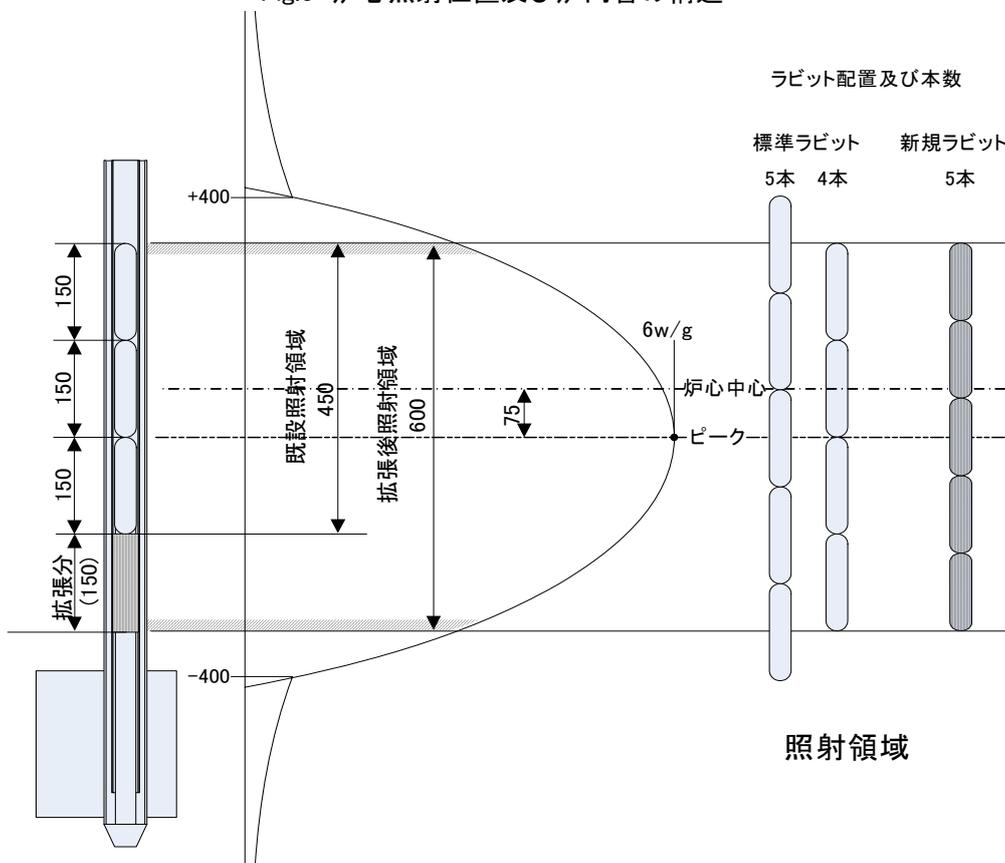


Fig.4 照射領域の概略

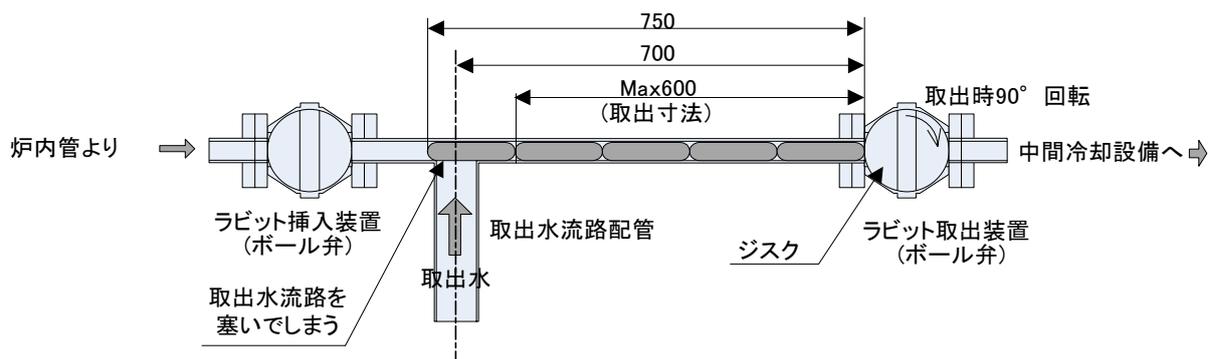


Fig.5 挿入装置—取出し装置の概略

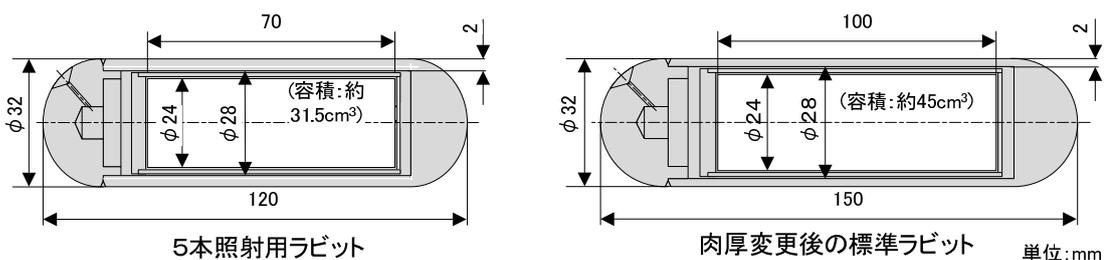


Fig.6 5本照射用及び肉厚変更後の標準ラビットの形状

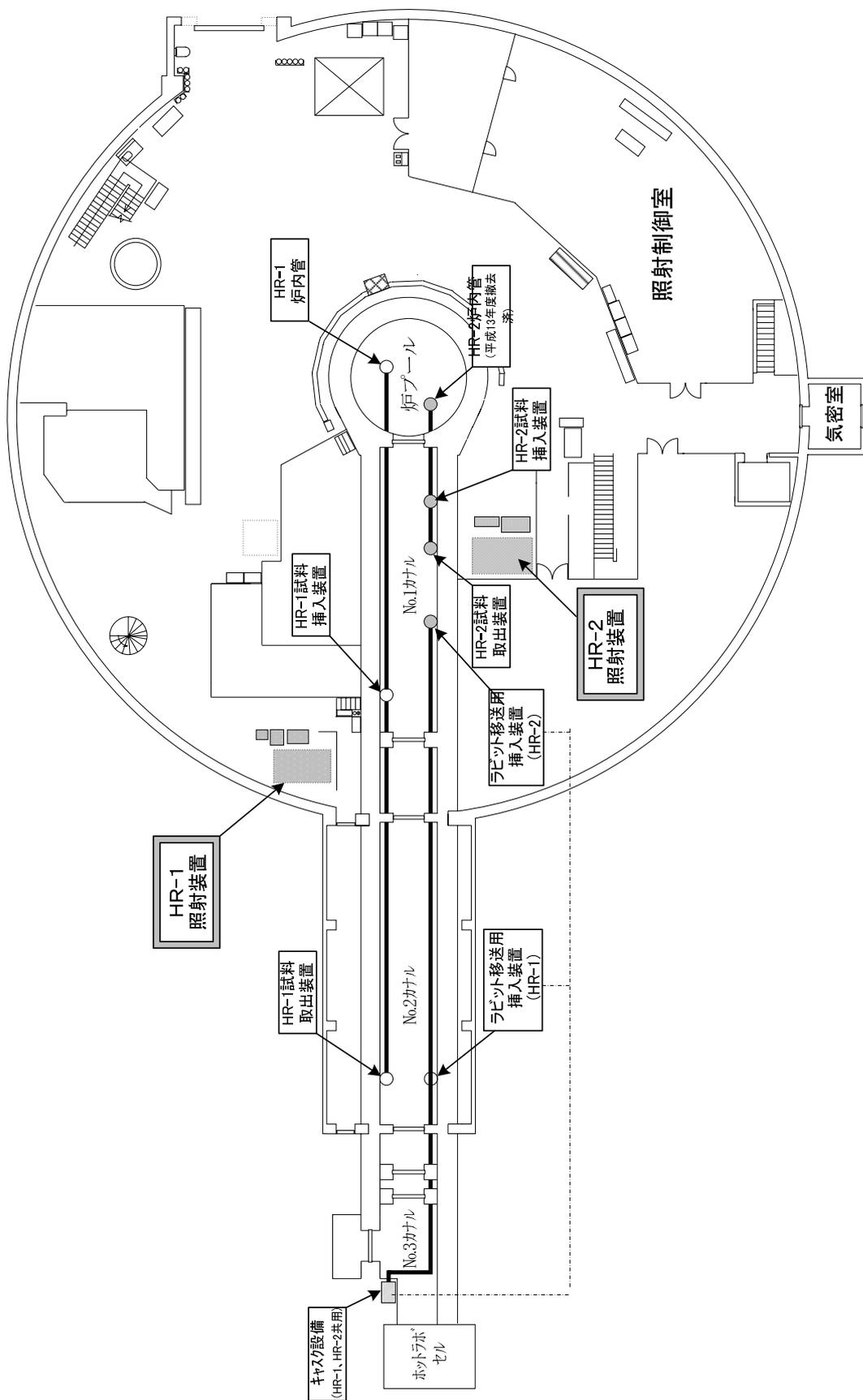


Fig.7 水カラボリット照射装置の炉室内配置図

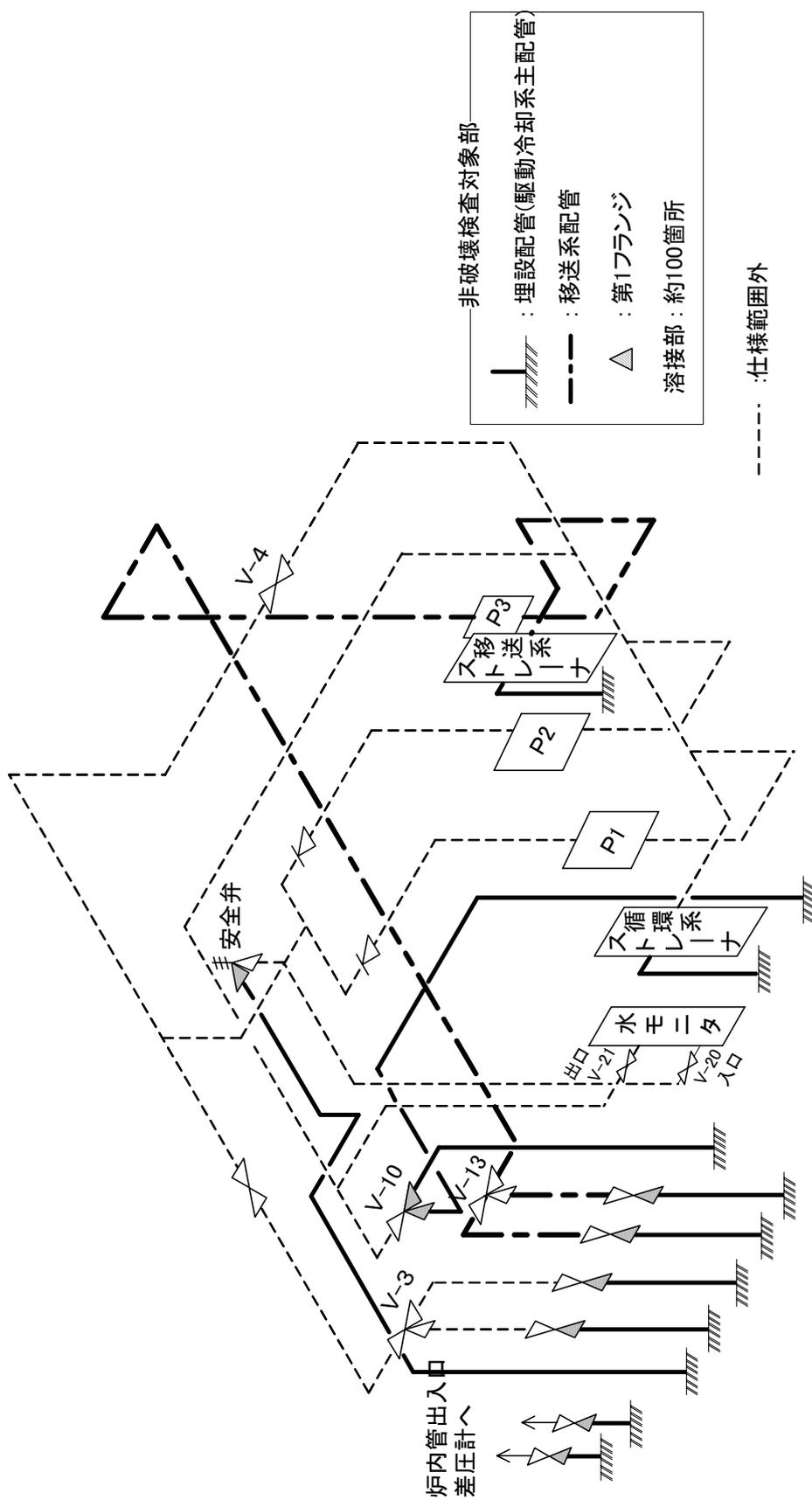


Fig.8 HR-2炉室1階配管配置図

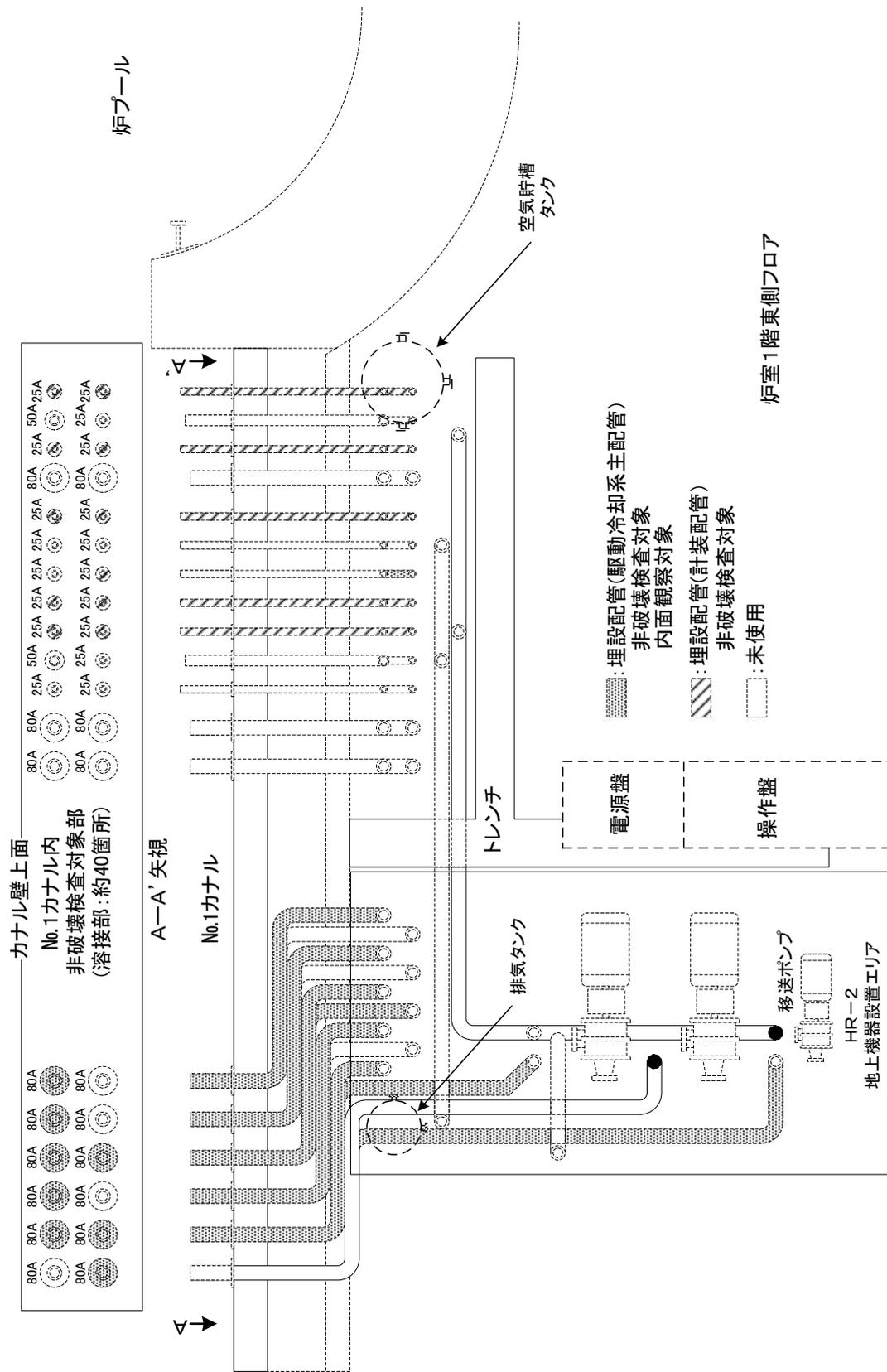


Fig.9 HR-2埋設配管配置図

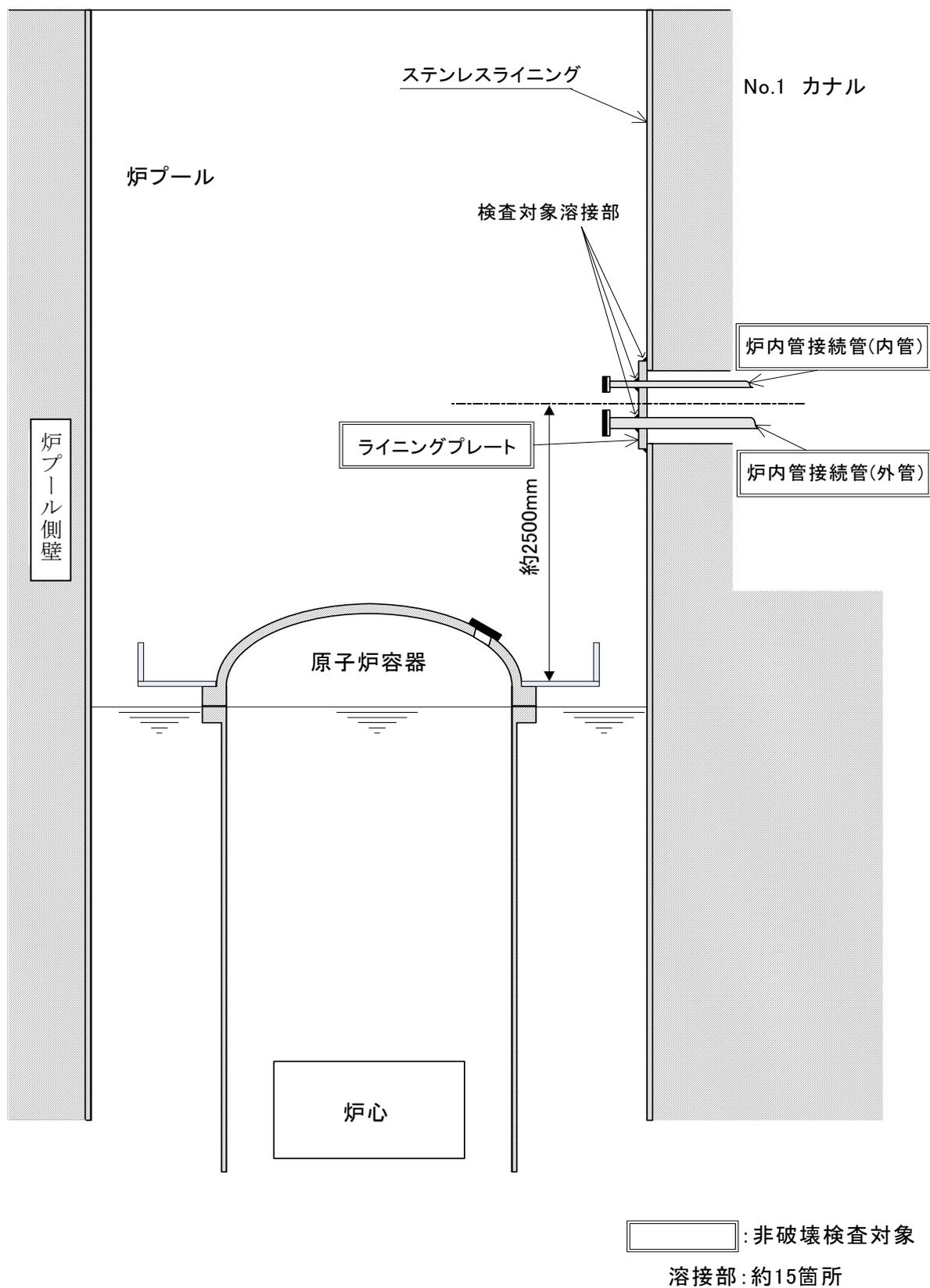


Fig.10 炉プール内配管配置図

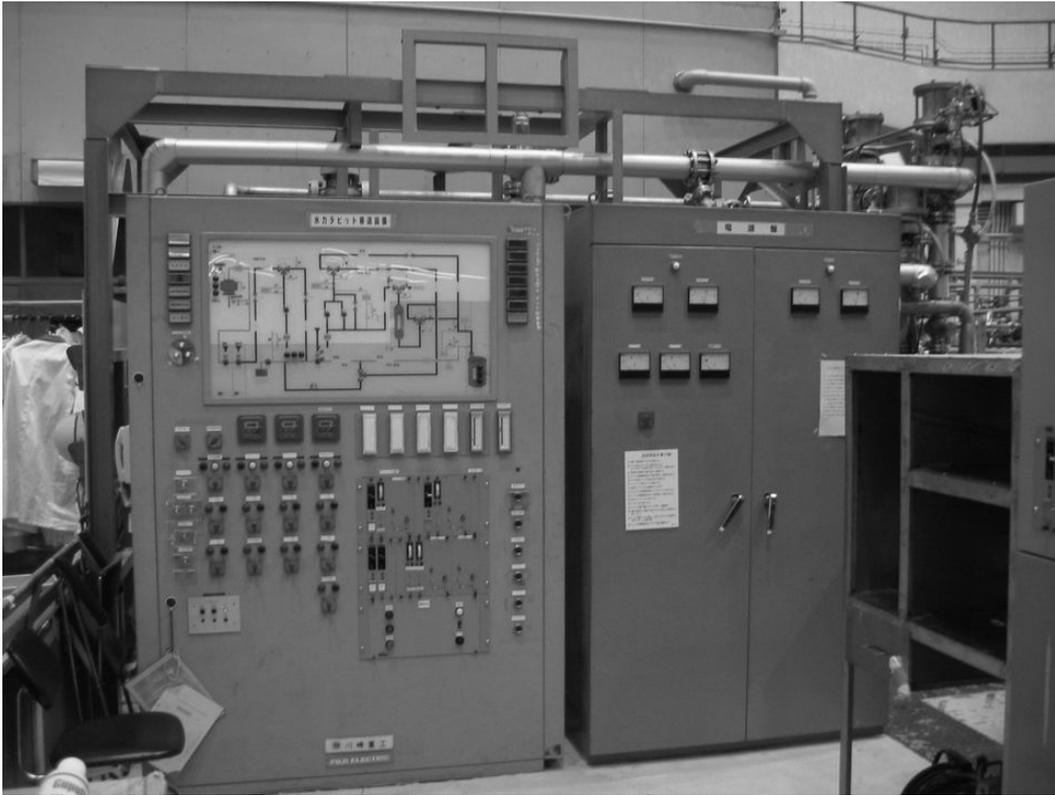


Photo.1 HR-2 制御盤・電源盤の撤去前写真

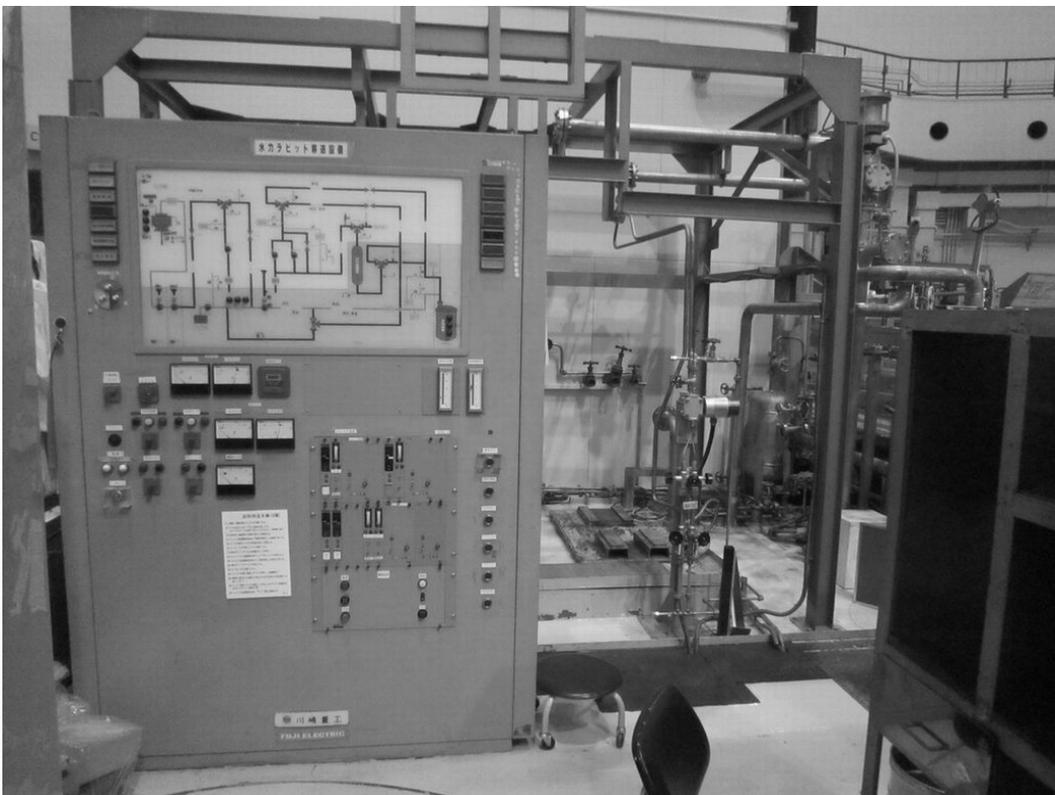


Photo.2 HR-2 制御盤・電源盤の撤去後写真

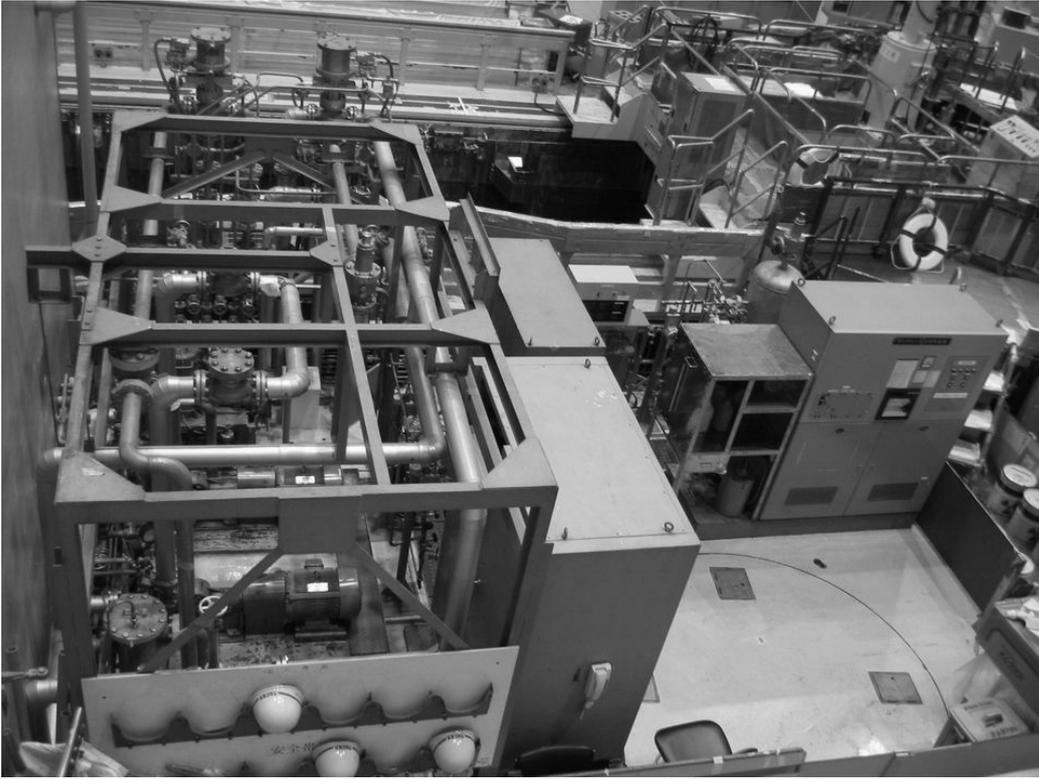


Photo. 3 HR-2 配管類の撤去前写真



Photo. 4 HR-2 配管類の撤去後写真



Photo. 5 HR-2 装置全体の撤去前写真

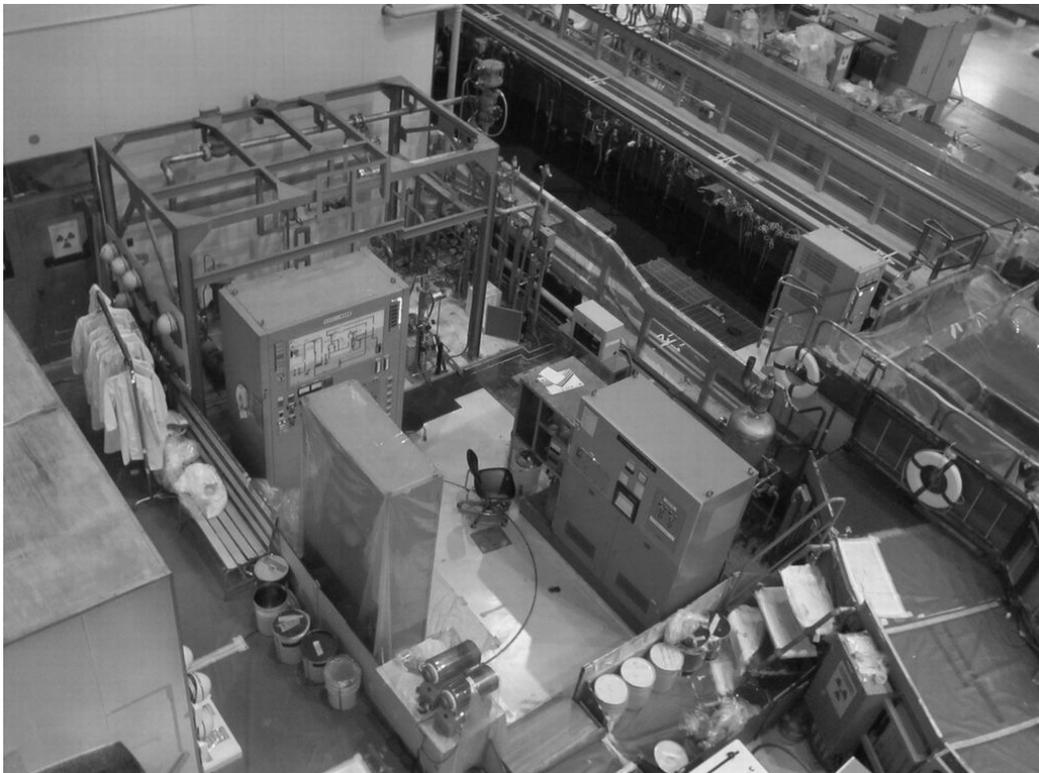


Photo. 6 HR-2 装置全体の撤去後写真



Photo.7 水中特殊弁取外し作業

This is a blank page.

付録

HR-2 改造に係る放射線しゃへい計算書

This is a blank page.

目 次

1. 概要	27
2. 水中機器によるチャンネル上部の線量率計算	27
2.1 概要	27
2.2 計算方法	27
2.3 計算条件	27
2.4 計算結果	28
2.5 まとめ	28
3. 地上部配管エリア廻りの空間線量当量率計算	29
3.1 概要	29
3.2 線源計算	29
3.3 HR-2炉外配管エリアまわりの線量当量率	29
3.4 計算結果	30
3.5 まとめ	30

This is a blank page.

1. 概要

水力ラビット2号照射装置(HR-2)のラビット5個照射が可能な構造への改造に伴い、カナル水中に設置されている水中機器及び地上部配管機器からの放射線線量当量率が、作業者の近接する場所において設置変更許可申請書で定める設計目標値以下であることを確認する。

2. 水中機器によるカナル上部の線量率計算

2.1 概要

ラビット試料として線源強度が最大となる核燃料試料を内包したラビット試料の取出し・挿入操作において、ラビット試料から発生するγ線によるカナル水面における線量当量率を算出し、しゃへい能力が適切であることを評価する。

(1) カナル水面での線量当量率

核燃料物質を含むラビット試料を照射したときの照射ラビットの線源強度を求め、照射済みラビットを No.1 カナルのラビット中間冷却棚に取出すときのラビット中間冷却棚位置直上部のカナル水面での空間線量率を評価する。

(2) しゃへい設計目標値

しゃへい設計目標値は、表1から、カナル水面において、乙区域の特別な場合における基準線量当量率(500 μ Sv/h 以下)の 1/10 の設計目標値 50 μ Sv/h とする。

2.2 計算方法

(1) 線源強度

核燃料物質を含む試料の照射による放射性核種を線源とする。線源強度は ORIGIN-2 コードを使用して求める。

(2) 線量当量率

線源強度の計算には点減衰核積分法によるガンマ線透過コード QAD-CGGP2R コードを用いる。線源を点状等方線源に近似し、No.1 カナルの水深相当の水をしゃへい体として、ラビット中間冷却棚位置直上部 No.1 カナル水面を評価点として線量当量率を算定する。

2.3 計算条件

(1) 線源強度

線源強度計算条件を表2に示す。照射試料として U-235 を 5g と Pu-239 を 5g それぞれ同時に装荷するものとし、照射期間は実績最大値の 14 日、冷却時間は保守側の設定として 0 分とする。

(2) 線量当量率

計算条件を図1に示すように、線源と評価点との距離は 3500mm、しゃへい体は水とする。

2.4 計算結果

(1) 線源強度

ラビット1個あたりの線源強度計算結果を表 3 に示す。

(2) 線量当量率

ラビット5個を対象線源とし、カナル水面評価点における線量当量率は48 μ Sv/h となる。

2.5 まとめ

ラビット取出時のカナル水面評価点における線量当量率は 48 μ Sv/h となり、設計目標値である 50 μ Sv/h を下回ることを確認した。

3. 地上部配管エリア廻りの空間線量当量率計算

3.1 概要

水力ラビット2号照射装置(HR-2)について、運転時の水分析結果に基づいた線源条件を用いて、ポンプ更新に伴う配管配置変更による炉外配管エリア廻りの空間線量当量率を評価する。

循環水中の腐食生成物等の不純物が放射化して生じる誘導放射能を線源核種として、HR-2 炉外配管エリア廻りのポンプ更新に伴う駆動冷却系配管配置及び制御盤配置の変更を反映した配置において、運転操作・点検等で立入る位置での線量当量率を評価した。

線量当量率の管理目標値は、乙区域の基準線量当量率($100 \mu \text{ Sv/h}$ 以下)の $1/10$ の設計目標値($10 \mu \text{ Sv/h}$)以下とする。

3.2 線源計算

(1) 線源条件

1) 線源機器

HR-2 配管エリア内床上配管とする(図-2 参照)。

2) 線源核種

水分析記録に基づき表-4 に示す循環水中の腐食生成物等の不純物が放射化して生じる以下の誘導放射能を考慮する。

3.3 HR-2 炉外配管エリアまわりの線量当量率

(1) 計算条件

1) 線源強度

核種ごとの γ 線強度を表-5 に示す。

2) 線源強度

ガンマ線エネルギーごとに集計した線源強度を表-6 に示す。

3) 計算モデル

配管は全て SUS304(OD76.3×t3.5)とし、弁の部分は配管として考慮した。またポンプは配管に比べて肉厚が十分厚いことから無視した。線源は円柱系(円筒座標 r 、 ϕ 、 z 体系)とし、線源の分布は一樣であるとした(配管 2~18 についても同様)。各配管の分割数を表-7 に示す。

4) 計算コード

点減衰核積分法によるガンマ線透過計算コード「QAD-CGGP2」を使用した。

5) 評価点

空間線量当量率の評価点は図-3 に示す 4 点のうち、運転操作等で立入る制御盤前とした。

(2) 線量当量率の管理目標値

乙区域における基準線量当量率($100 \mu \text{ Sv/h}$ 以下)の1/10の設計目標値($10 \mu \text{ Sv/h}$)以下とする。

3.4 計算結果

評価結果を表-8に示す。

いずれの評価点についても推定線量当量率は管理設計目標値の $10 \mu \text{ Sv/h}$ を下回っている。運転操作及び点検等で立入る制御盤前の推定線量率は $2.6 \mu \text{ Sv/h}$ であり、乙区域の線量当量率の設計目標値($10 \mu \text{ Sv/h}$)以下である。

3.5 まとめ

運転操作及び点検等で立入る制御盤前の推定線量率は $2.6 \mu \text{ Sv/h}$ であり、乙区域の線量当量率の設計目標値($10 \mu \text{ Sv/h}$)以下であることを確認した。

[参考文献]

1)Y.Sakamoto et al., "QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP", JAERI-M 90-110

表 1 材料試験炉しゃへい区分

表 8-1 遮へい区分

			立入又は作業の頻度	基準線量当量率	設計目標値
場所	甲区域	常時放射線業務従事者が作業する所で、自由に立入できる場所	48h/週	20 μ Sv/h 以下	2 μ Sv/h 以下
	乙区域	常時放射線業務従事者が作業する場所ではないが、随時あるいは定期的に立入ることがある場所で立入時間等について適当な管理をしなければならない場所	2~10 h/週	原則として 100 μ Sv/h 以下 特別の場合でも 500 μ Sv/h 以下	原則として 10 μ Sv/h 以下 特別の場合でも 50 μ Sv/h 以下
	丙区域	事故、故障、修理及びまれな作業以外には放射線業務従事者が立入らない場所で、立入時間を厳重に管理しなければならない場所	まれ	特に規定せず 立入時間で管理する	
作業	甲作業	常時行う日常の作業で過度の放射線を受けるおそれのない作業	48h/週	20 μ Sv/h 以下	原則として 2 μ Sv/h 以下
	乙作業	特に放射線に注意し、作業時間等を適当に管理して行わなければならない作業	1~4 回/月	原則として 1 mSv/回 以下 特別の場合でも 4 mSv/回 以下	原則として 100 μ Sv/回 以下 特別の場合でも 400 μ Sv/回 以下
	丙作業	事故、故障、修理等の場合にまれに行う作業で、線量当量率を測定し作業時間を厳重に管理して行う作業	まれ	特に規定せず 作業時間で管理する	

表 8-2 放射線の遮へい；場所の区分

場所	炉 運 転 時	炉 停 止 時
炉室地上階	甲	甲
炉室地上階一般	乙	甲
プール・チャンネル上面	(ただし、チャンネル上面は甲)	甲
炉下室	丙	丙 (ただし設計目標値6 時間後で 400 μ Sv/h 以下とする)
制御棒駆動装置室	丙 (ただし設計目標値天井面で 1 mSv/h 程度以下)	乙
ルーブキュービクル	乙 (ただしルーブ停止中)	乙
主循環系統機器室	丙	乙
精製系統機器室	乙 (ただし人の立入る部分)	甲
地下4階ポンプ室	原則として乙 (ただし第1排水系貯槽に汚 染水を入れた場合を除く)	同 左

表 8-3 放射線の遮へい；作業の区分

作 業	区 分
燃料交換	乙
ループ内試料交換	乙
ループ交換(上部)	乙
ループ交換(炉下室)	丙
チャンネル内運搬作業	原則として甲
ループ、冷却系保守	乙(炉停止後)
制御棒駆動装置保守	乙(炉停止後)

表 2 線源強度計算条件

条件		数値	備考	
照射条件	中性子束(n/cm ² /s)	3.5 × 10 ¹⁴ *1)	熱中性子	
	照射期間(日)	14 *2)		
	冷却期間(分)	0 *3)		
装荷条件	ラビット数量	5 *4)		
	ラビット1 個あたり	U-235 (g)	5*4)	
		Pu-239 (g)	5*4)	
		キャプセル構造材(g)	—	

- *1) 最大熱中性子束
- *2) 実績最大値
- *3) 暫定設定
- *4) U-235 と Pu-239 を同時に装荷するものとした

表 3 線源強度計算

エネルギー平均値 (MeV)	γ 線束(ラビット1個) (photon/sec)
0.01	4.601E+15
0.025	1.199E+15
0.0375	9.415E+14
0.0575	9.873E+14
0.085	7.154E+14
0.125	7.388E+14
0.225	1.765E+15
0.375	1.304E+15
0.575	2.032E+15
0.85	2.052E+15
1.25	1.279E+15
1.75	4.178E+14
2.25	2.409E+14
2.75	1.025E+14
3.5	5.228E+13
5	2.224E+13
7	1.952E+11
9.5	3.648E+07

表 4 線源核種及び放射能濃度

核種	濃度[Bq/cm ³]
¹³ N	6.36×10^1
²⁴ Na	2.16×10^2
²⁷ Mg	7.62×10^1
⁴¹ Ar	1.78×10^1
⁵¹ Cr	2.51×10^1
⁵⁶ Mn	1.21×10^2
⁶⁰ Co	3.18×10^1

(注)放射能濃度は、平成7年4月の「水カラビット照射装置の一部更新」
 設工認申請書に記載の運転時の水分析結果に基づく線源核種及び
 濃度に中性子束の増加を考慮して近似した値を使用した。

表 5 核種ごとの γ 線収率及び強度

γ 線エネルギー (MeV)	γ 線収率 (%)						
	^{13}N	^{24}Na	^{27}Mg	^{41}Ar	^{51}Cr	^{56}Mn	^{60}Co
0.171			0.8				
0.320					9.83		
0.511	199.62						
0.844			73.0				
0.847						98.9	
1.014			29.0				
1.173							99.9
1.294				99.2			
1.333							99.98
1.369		100					
1.677				0.05			
1.811						27.2	
2.113						14.3	
2.523						0.99	
2.754		99.92					
3.867		0.08					

表 6 γ 線エネルギー群ごとの線源強度

γ 線平均エネルギー (MeV)	光子発生数 (photons/sec)																		
	配管 1	配管 2	配管 3	配管 4	配管 5	配管 6	配管 7	配管 8	配管 9	配管 10	配管 11	配管 12	配管 13	配管 14	配管 15	配管 16	配管 17	配管 18	
0.010	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
0.025	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
0.038	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
0.058	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
0.085	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
0.125	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
0.225	4.60E+3	1.72E+3	6.60E+3	3.45E+3	3.39E+3	3.22E+3	5.70E+2	1.03E+3	2.41E+3	9.20E+2	6.90E+2	1.63E+3	1.15E+3	1.47E+3	1.03E+3	5.41E+3	1.38E+3	6.09E+3	6.09E+3
0.375	1.86E+4	6.98E+3	2.67E+4	1.40E+4	1.37E+4	1.30E+4	2.31E+3	4.19E+3	9.77E+3	3.72E+3	2.79E+3	6.61E+3	4.65E+3	5.96E+3	4.19E+3	2.19E+4	5.58E+3	2.47E+4	2.47E+4
0.575	9.58E+5	3.59E+5	1.38E+6	7.18E+5	7.05E+5	6.70E+5	1.19E+5	2.15E+5	5.03E+5	1.92E+5	1.44E+5	3.40E+5	2.39E+5	3.06E+5	2.15E+5	1.13E+6	2.87E+5	1.27E+6	1.27E+6
0.850	1.32E+6	4.96E+5	1.90E+6	9.92E+5	9.74E+5	9.26E+5	1.64E+5	2.98E+5	6.94E+5	2.64E+5	1.98E+5	4.69E+5	3.31E+5	4.23E+5	2.98E+5	1.56E+6	3.97E+5	1.75E+6	1.75E+6
1.25	2.41E+6	9.03E+5	3.46E+6	1.81E+6	1.77E+6	1.69E+6	2.99E+5	5.42E+5	1.26E+6	4.82E+5	3.61E+5	8.55E+5	6.02E+5	7.71E+5	5.42E+5	2.83E+6	7.23E+5	3.19E+6	3.19E+6
1.75	2.48E+5	9.31E+4	3.57E+5	1.86E+5	1.83E+5	1.74E+5	3.08E+4	5.59E+4	1.30E+5	4.97E+4	3.73E+4	8.82E+4	6.21E+4	7.95E+4	5.59E+4	2.92E+5	7.45E+4	3.29E+5	3.29E+5
2.25	1.31E+5	4.89E+4	1.87E+5	9.79E+4	9.61E+4	9.14E+4	1.62E+4	2.94E+4	6.85E+4	2.61E+4	1.96E+4	4.63E+4	3.26E+4	4.18E+4	2.94E+4	1.54E+5	3.92E+4	1.73E+5	1.73E+5
2.75	1.64E+6	6.14E+5	2.35E+6	1.23E+6	1.21E+6	1.15E+6	2.03E+5	3.68E+5	8.60E+5	3.27E+5	2.46E+5	5.81E+5	4.09E+5	5.24E+5	3.68E+5	1.93E+6	4.91E+5	2.17E+6	2.17E+6
3.50	1.30E+3	4.89E+2	1.87E+3	9.78E+2	9.60E+2	9.12E+2	1.62E+2	2.93E+2	6.84E+2	2.61E+2	1.96E+2	4.63E+2	3.26E+2	4.17E+2	2.93E+2	1.53E+3	3.91E+2	1.73E+3	1.73E+3
5.00	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0
7.00	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0

表 7 各配管要素の寸法と分割数

配管	長さ[cm]	r 方向	ϕ 方向	z 方向
1	200.0	4	24	40
2	75.0	4	24	15
3	287.2	4	24	57
4	150.0	4	24	30
5	147.3	4	24	30
6	140.0	4	24	28
7	24.8	4	24	5
8	45.0	4	24	9
9	105.0	4	24	21
10	40.0	4	24	8
11	30.0	4	24	6
12	71.0	4	24	14
13	50.0	4	24	10
14	64.0	4	24	13
15	45.0	4	24	9
16	235.3	4	24	47
17	60.0	4	24	12
18	265.0	4	24	53

表 8 各評価点における線量当量率

単位[μ Sv/h]

配管	評価点			
	1	2	3	4
1	2.5E-01	2.5E-01	1.3E-01	6.2E-02
2	9.9E-02	7.7E-02	3.7E-02	2.2E-02
3	6.6E-01	6.7E-01	1.8E-01	1.9E-01
4	1.2E-01	3.9E-01	1.7E-01	3.0E-01
5	9.1E-02	4.8E-01	4.5E-01	3.5E-01
6	1.1E-01	7.6E-01	5.3E-01	1.6E-01
7	2.3E-02	1.4E-01	8.0E-02	1.8E-02
8	3.5E-02	4.0E-01	1.0E-01	3.3E-02
9	1.6E-01	1.8E+00	1.9E-01	8.7E-02
10	3.8E-02	1.9E-01	6.6E-02	3.0E-02
11	2.6E-02	9.1E-02	5.5E-02	2.1E-02
12	7.0E-02	2.2E-01	8.7E-02	4.9E-02
13	6.5E-02	1.8E-01	5.2E-02	3.7E-02
14	9.2E-02	2.0E-01	4.8E-02	6.1E-02
15	6.3E-02	8.0E-02	2.8E-02	3.6E-02
16	3.2E-01	2.7E-01	1.1E-01	8.9E-02
17	5.1E-02	3.9E-02	2.3E-02	1.4E-02
18	2.9E-01	2.5E-01	1.4E-01	7.1E-02
合計	2.6E+00	6.5E+00	2.5E+00	1.6E+00

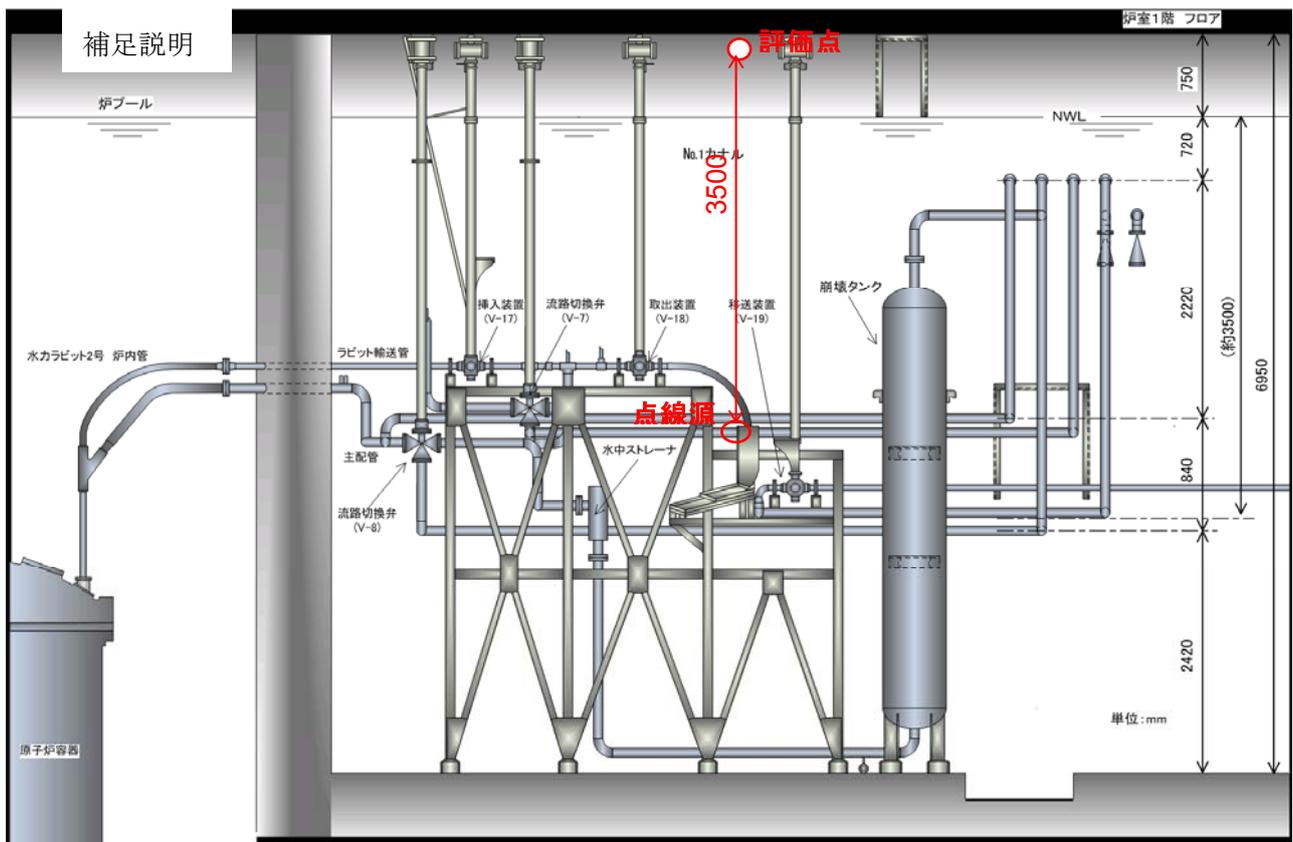
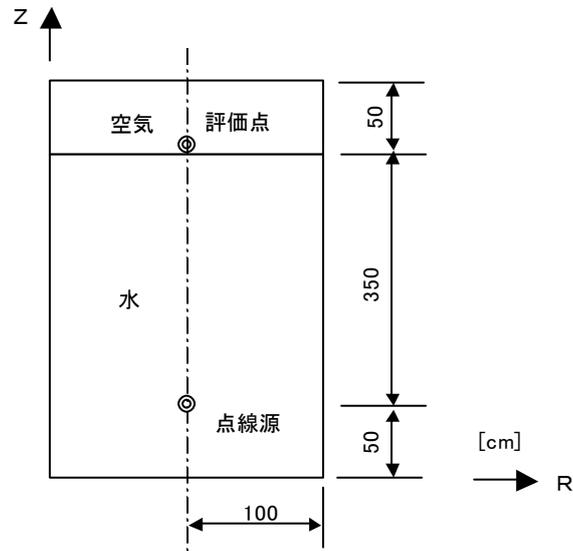


図 1 線量当量率計算モデル

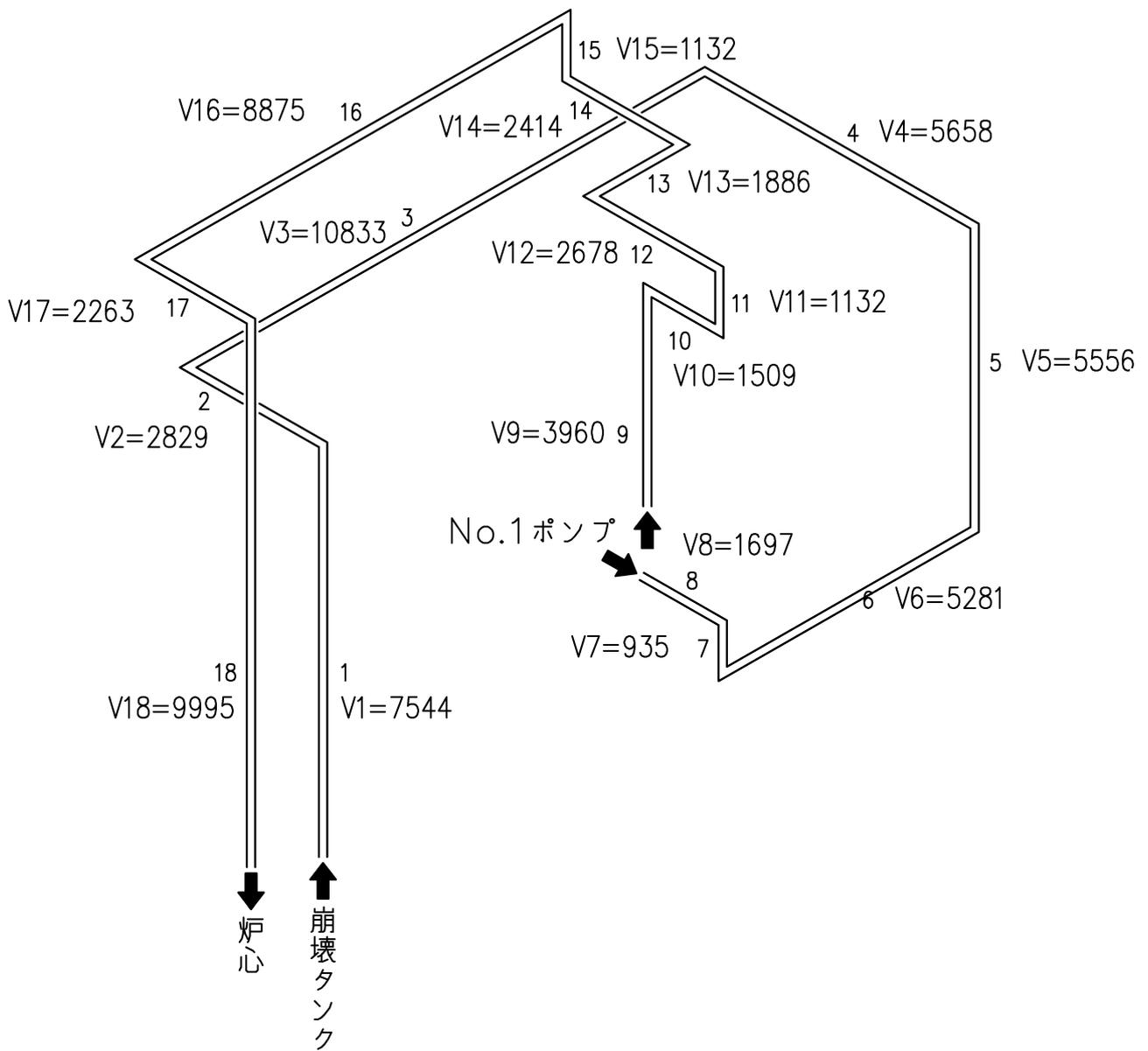


図 2 地上部配管機器配置

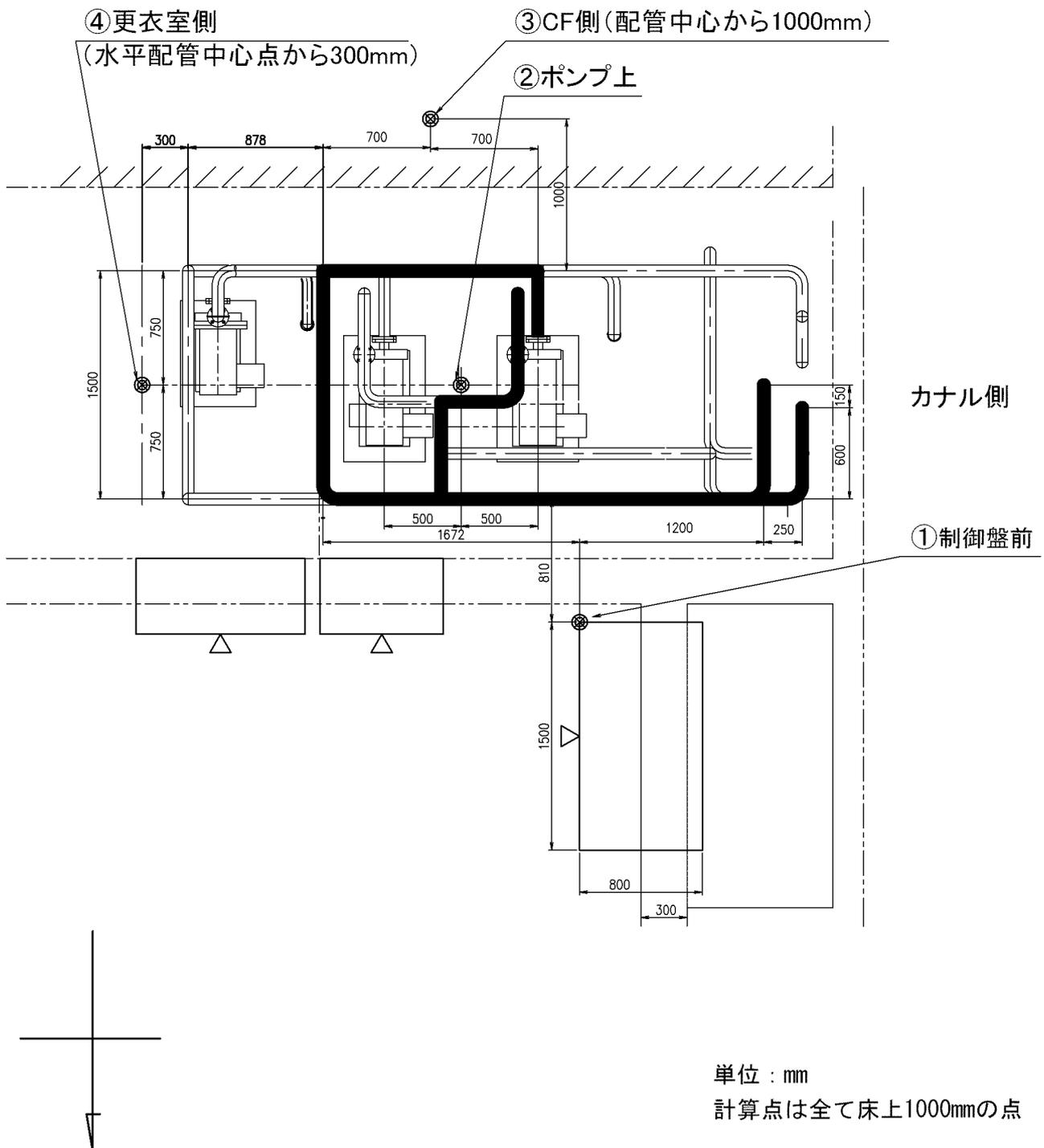


図 3 地上部配管機器の線源配置と評価位置

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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
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
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
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
酸素活性化	カタール	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電表面電荷	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m ³
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m ³
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m ³
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
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)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
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)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m 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	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	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 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単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 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
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	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 _e =(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
フェルミ	f	1 フェルミ=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), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

