



JAEA-Technology

2008-038

## JMTR を用いたシリコン半導体製造装置の 概念検討

Conceptual Study of Silicon Semiconductor Production Facility in JMTR

細川 甚作 菅野 勝 坂本 太一

Jinsaku HOSOKAWA, Masaru KANNO and Taichi SAKAMOTO

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

## J M T R を用いたシリコン半導体製造装置の概念検討

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

細川 甚作、菅野 勝、坂本 太一※1

(2008年3月28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(以下、JMTRと  
いう。)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  
の一環としてシリコン半導体の製造を検討している。

シリコン半導体は今や世界各国、様々な産業分野で使用されており、最近は、大口径シリコ  
ン半導体(シリコンウェーハ)の需要が高まってきている。シリコン半導体を製作するには、  
さまざまな方法があるが、ここでは、大洗研究開発センターのJMTRにおいてNTD法(Neutron  
Transmutation Doping)を用いたシリコン半導体の製造について検討を行った。

本報告では、JMTRへ設置予定のシリコン半導体製造装置の概念検討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

※1：出向職員（カワサキプラントシステムズ(株)）

## Conceptual Study of Silicon Semiconductor Production Facility in JMTR

Jinsaku HOSOKAWA, Masaru KANNO and Taichi SAKAMOTO<sup>※1</sup>

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 28, 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.

Silicon Semiconductor is used in every Country and every industrial field. Nowadays, the demand of large diameter Silicon Semiconductors are increasing. At JMTR in JAEA Oarai, the production of Silicon Semiconductors utilizing NTD (Neutron Transmutation Doping) Method is investigated. Particularly, this report describes the installation of Silicon Semiconductors producing facility on JMTR.

This Report described the Conceptual Study for Silicon Semiconductor Irradiation Facility in JMTR.

Keywords : Silicon Semiconductor,NTD,Doping, JMTR

---

※1 : Kawasaki plant systems Co. Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 国内需要と現状 .....	1
3. シリコン半導体製造装置の概要 .....	2
3. 1 JMTR の概要 .....	2
3. 2 シリコン半導体製造装置の系統構成 .....	2
3. 3 シリコン半導体製造装置の各系統の機能 .....	2
3. 3. 1 新試料搬入装置 .....	2
3. 3. 2 試料着脱装置 .....	2
3. 3. 3 試料照射装置 .....	3
3. 3. 4 炉内管 .....	3
3. 3. 5 供給水装置 .....	3
3. 3. 6 搬送装置 .....	3
3. 3. 7 吊下げ装置 .....	3
3. 3. 8 貯蔵装置 .....	3
3. 3. 9 取出装置 .....	4
4. 炉内管概略構造 .....	4
4. 1 構造 .....	4
4. 1. 1 炉内管の構造 .....	4
4. 1. 2 連絡管の構造 .....	4
4. 1. 3 小判蓋の構造 .....	4
4. 1. 4 試料の構造 .....	5
5. 試料交換装置 .....	5
5. 1 構造概念 .....	5
5. 2 課題 .....	5
6. 炉内管周辺要素 .....	6
6. 1 検討条件 .....	6
6. 2 グリッドの穴面積と流量配分 .....	7
7. シリコン試料輸送要領 .....	7
7. 1 検討条件 .....	7
7. 2 試料交換・輸送要領 .....	7
8. シリコン半導体製造装置の配置検討 .....	8
8. 1 配置 .....	8
8. 2 配置上の課題 .....	8
9. 安全方針 .....	8
9. 1 検討条件 .....	8
9. 2 安全設計方針 .....	8

10.まとめ .....	9
謝辞 .....	10
参考資料 .....	10

## Contents

1 . Introduction .....	1
2 . Domestic Demand and Current State .....	1
3 . Outline of Silicon Semiconductor Irradiation facility .....	2
3.1 Outline of JMTR .....	2
3.2 System Composition of Silicon Semiconductor Irradiation Facility .....	2
3.3 Function in each System of Silicon Semiconductor Irradiation Facility .....	2
3.3.1 New Sample Carrying Device .....	2
3.3.2 Sample Detaching Device .....	2
3.3.3 Irradiation Equipment .....	3
3.3.4 The in-reactor Tube .....	3
3.3.5 Water Supply Device .....	3
3.3.6 Transportation Device .....	3
3.3.7 Hanging Device .....	3
3.3.8 Storing Device .....	3
3.3.9 Taking out Device .....	4
4 . Structure of in-reactor Tube .....	4
4.1 Structure .....	4
4.1.1 Structure of in-reactor Tube .....	4
4.1.2 Structure of Joint Tube .....	4
4.1.3 Structure of Small lid .....	4
4.1.4 Structure of Silicon Sample .....	5
5 . Sample Exchanging Machine .....	5
5.1 Structural Concept .....	5
5.2 Some Problems .....	5
6 . Element around the in-reactor Tube .....	6
6.1 Study Condition .....	6
6.2 Hole Area and Flow Distribution in grid .....	7
7 . Procedure of Silicon Sample Transportation .....	7
7.1 Study Condition .....	7
7.2 Sample Exchange • Transportation Procedure .....	7
8 . Arrangement Study of Silicon Semiconductor Irradiation Facility .....	8
8.1 Arrangement .....	8
8.2 Problems of Device in Arrangement .....	8
9 . Safety Policy .....	8
9.1 Condition Study .....	8
9.2 Safety Design Policy .....	8
10 . Summary .....	9

Acknowledgements .....	10
References .....	10

## 1. はじめに

シリコン半導体は今や世界各国で使用されており、最近は、大口径シリコン半導体（シリコンウェーハ）の需要が高まっている。シリコン半導体は、ハイブリッド車、制御用インバータデバイスを搭載した燃料電池自動車、インバータ制御への転換が進んでいる高速車両などに利用されるなどパワーエレクトロニクスの大幅な発展に寄与しており、産業界からは、需要が大きい大口径（6 インチから 8 インチ）の単結晶から製造されるシリコン半導体の要求が強くなっている。

一般的に NTD 法<sup>\*1</sup> (Neutron Transmutation Doping) により製造したシリコン半導体は、抵抗分布の高均一性を有するが、製品にするには、照射欠陥の回復のための熱処理を行わなければならない。また、良質な製品を製造するためには、炉内照射場の高速中性子の割合などが影響を及ぼすとされている。この NTD 法は、シリコン単結晶に高速中性子を照射し生成した安定同位元素 P-31 をドナーとする n 型半導体を製作する方式で、製品の抵抗値分布の均一性に優れており、日本原子力研究開発機構の原研にある試験研究炉 JRR-4 や JRR-3 でも製造されている。

JMTR (Japan Materials Testing Reactor 50MW) は、平成 18 年 8 月 1 日をもって、一旦原子炉を停止し、原子炉施設の改修を経て平成 23 年度から再稼働させる予定である。この間、新たな照射ニーズに応えた照射設備の設計、製作、設置に係る検討を平成 18 年度から実施しており、燃材料の照射試験設備の検討の他にも産業界からの要求に応えるべくシリコン半導体の製造についての検討を行った。

本報告では、大洗研究開発センターの JMTR において NTD 法を用いたシリコン半導体の製造について、主に JMTR にシリコン半導体製造装置を設置する場合のハード的な概念設計について述べる。

<sup>\*1</sup>：高速中性子照射によりシリコン単結晶中のケイ素 (<sup>30</sup>Si；天然存在比：約 3%) がリン (<sup>31</sup>P) に変換する反応を利用して、シリコン中にリンを均一に添加（ドーピング）する方法。

## 2. 国内需要と現状

シリコン半導体の国内需要は、推定年間約 90 トン<sup>①</sup>である。このうち、JRR-3、JRR-4 で実施している中性子核変換ドーピングシリコン半導体 (NTD-Si) の製造はそれぞれ、年間約 5 トン程度である。これは、国内需要の 5%程度である。また、JRR-3 では最大 6 インチ、JRR-4 では 5 インチのシリコンインゴットを照射している。今

後産業界は、シリコンの生産量を約 50%まで拡大し、急速に高まりつつある需要に対応することを望んでいる。

### 3. シリコン半導体製造装置の概要

#### 3.1 JMTR の概要<sup>2)</sup>

JMTR は、軽水炉燃料・材料の研究、核融合炉開発、大学による基礎基盤研究のための中性子照射試験、RI 生産等に幅広く利用されてきた。JMTR の炉心は、直径 1,560mm、実効高さ 750mm の円筒状で燃料要素、制御棒、反射体、H 型のベリリウム枠から構成される。それぞれ 77.2mm 角の燃料要素及び反射体要素が 5×7 格子配列に並べられた燃料領域とその周辺のベリリウム及びアルミニウム反射体が配列された反射体領域からなる。炉心に装荷されるキャップセルは照射条件に合わせて、任意の炉心照射孔を選択でき、また照射ループ専用に設けた炉心孔を有する。シリコン半導体製造装置は、他の照射設備との関係を考慮して検討した結果、炉心孔 J, K, L, M-1, 2, 3, 4 を使用して設置することで検討を行った。JMTR 炉心の概略図を Fig. 1 に示す。

#### 3.2 シリコン半導体製造装置の系統構成

シリコンのインゴットを照射して半導体を製造する装置の概念系統図を Fig. 2 に示す。本装置は、新試料搬入装置、試料着脱装置、試料照射装置、炉内管、供給水装置、搬送装置、吊下げ装置、貯蔵装置、取出装置からなる。構成機器リストを Table. 1 に示す。

#### 3.3 シリコン半導体製造装置の各系統の機能

##### 3.3.1 新試料搬入装置

シリコン収納容器に収納した照射試料を貯留するスタック及び試料を試料交換室へ押込む装置からなる。貯留スタックは 2 系列設け、一方が運転中に、他方の貯留スタックに貯留する。人が搬入した試料をスタッカークレーンで積み上げる。スタッカーカークレーンで試料を取り出し、台車に載せて試料交換室へ自動で搬入する。

##### 3.3.2 試料着脱装置

試料交換室に押込まれた試料を吊り位置へ移動し、シリコン収納容器のピン穴と試料照射装置の吊具を合わせ、ピンを差しこみ、試料照射装置で試料の吊込み、照射し、吊り位置へ戻す。シリコン収納容器からピンを抜き取り、シリコン収納容器を遮へい容器に収納し、遮へい容器の蓋をする。搬送後は、空の遮へい容器の蓋を

外して、待機する。

### 3.3.3 試料照射装置

試料の上げ下ろしはチェーンブロックで行い、試料の回転はチェーンブロック自体の正逆回転により行う。これらの装置を載せたデッキを炉内管の上部と試料交換室の間に自走させて、試料の取込、照射、照射後試料の受け渡しを行う。各駆動装置の遮へいのためにデッキの下部には遮へい板を設置する。駆動装置事故時の安全対策として、強制的に引上げができるようにワイヤでウインチにつなぐ方式とする。

### 3.3.4 炉内管

試料を JMTR 内へ挿入照射するための 2 重管からなる。内部に仕切管を設け、試料の冷却及び、放射化物を排出させる流路を構成する。

### 3.3.5 供給水装置

循環ポンプ、イオン交換塔などからなる。炉心部の発熱（約 36kw）を循環水で除熱し、炉プール水中の配管から放熱させる。給水タンクにより系内の水張りを行う。又、サージタンクにより設定流量と吸込み側の圧損アンバランス（試料の出し入れ）時の循環ポンプの安定な運転を図る。イオン交換塔では放射化物を除去する。

### 3.3.6 搬送装置

試料を収納した遮へい容器を搬送装置に吊り下げ、ダクト内を貯蔵プールまで搬送する。貯蔵プール側で、遮へい容器を置き、蓋を外す。遮へい容器から試料を取り出し、吊り位置に置く。ダクトには換気配管を設け、JMTR 排気系へ接続する。

### 3.3.7 吊下げ装置

シリコン収納容器上部のつかみ部を吊下げ装置のつかみ機構でつかんで、ホイスト機構を作動させ、貯蔵プール内の貯蔵位置へ吊下す。荷重がコンベアにかかっていることを確認し、つかみ機構を開放し、つかみ部を引き上げる。

### 3.3.8 貯蔵装置

傾斜ローラコンベア上に貯蔵する。試料毎の貯蔵プール内における冷却時間を管理し、取出し側から取出装置で試料を取出すと、傾斜ローラコンベア上の試料は重力で、順次、取出し側へ流れる。

### 3. 3. 9 取出装置

貯蔵装置上の試料を取り出し装置で吊り、除染室内へ吊上げる。モニター、除染作業後、シリコン収納容器から試料を取出す。シリコン収納容器は再使用する。シリコンインゴットを収めてから新試料搬入装置の貯留スタックへ貯留する。

## 4. 炉内管概略構造

炉内管構造の概略、炉内管と試料交換室の位置関係、両者をつなぐ連絡管、試料照射装置の自走デッキの概略構造図を Fig. 3 に示す。

### 4. 1 構造

#### 4. 1. 1 炉内管の構造

炉内管は外筒管、内筒管、仕切管からなり、炉外部には炉内管と試料交換室を接続する連絡管がある。

内筒管は、シリコン半導体製造装置の循環水と原子炉一次冷却水との境界であり、外筒管は安全上のバックアップである。炉外部の連絡管は、シリコン半導体製造装置の循環水と炉プール水の境界になる。仕切管は試料挿入のガイドになり、又、試料の冷却、照射による不純物除去のための循環水の流路を構成する。

炉内管の耐圧条件は、原子炉一次冷却水との境界となるため、外圧 1.76 MPa、100°C とし、照射孔の寸法を考慮すると炉内管のサイズは以下のとおりになる。

外筒管  $\phi 290\text{mm} \times t8\text{mm}$

内筒管  $\phi 269\text{mm} \times t8\text{mm}$

仕切管  $\phi 241\text{mm} \times t3\text{mm}$

#### 4. 1. 2 連絡管の構造

連絡管は、炉内管の内筒管と試料交換室を結ぶ角型の管で、試料と試料照射装置を炉内管の上部まで移動するガイドになる。炉プール水との境界になるので、耐圧条件を 0.05MPa、50°C とし、試料照射装置を通すためにサイズは 600mm × 800mm (四角) 程度になる。

#### 4. 1. 3 小判蓋の構造

炉頂部にある小判蓋を貫通して炉内管を炉心部に挿入する。既設の小判蓋に変えて炉内管を挿入するノズルを設け、グランドパッキンでシールする。小判蓋の残りの部分には開口を設け、点検時に覗き窓として使用できるようにする。炉内管自体は十分な強度を有するが、地震時の反射体への反力の分散や、クランプサポート方式により確実に固定できることを考慮して、圧力容器内中段付近に段差を設ける構

造とする。小判蓋概略構造図を Fig. 4 に示す。

#### 4.1.4 試料の構造

シリコンインゴットはアルミ製のシリコン収納容器に収納する。このアルミ容器を含めて試料と呼ぶ。収納容器は容器本体、底板、回り止めねじからなり、底板にシリコンインゴットを乗せ、容器本体をかぶせてねじ込み、回り止めする。

容器本体には上部に、試料照射装置にピン連結するためのプラケット穴を設ける。収納容器は再使用する。シリコン収納容器構造図を Fig. 5 に示す。

## 5. 試料交換装置

シリコン試料交換装置は試料着脱装置と試料照射装置からなる。試料着脱装置は試料交換室内へ押し込まれた試料を受け取り、試料照射装置に取付け、又、照射後の試料を試料照射装置からはずし、搬送用の遮蔽容器へ収納、遮蔽容器の蓋を乗せる範囲までを行う装置である。試料交換装置概略構造図を Fig. 6 に示す。

#### 5.1 構造概念

試料を取り込んだ試料照射装置を炉内管上部まで自走させ、試料を吊り下げ、照射し、再び試料を試料照射装置に取り込んで試料交換室へ戻る方式を検討した。炉内管は炉内部で曲がっているため、試料が仕切管内壁に接触するが、炉内管の曲率を大きくすることにより、比較的垂直に吊ることが出来ることから、チェーンを用いた試料の昇降、回転動作機構を適用することも可能である。なおレールをクランプして昇降する方式は、故障時に強制的に引上げることを念頭においたものである。(レールをクランプして昇降する方式は昇降動作においては一般的ではないが、クランプの力を大きくすることにより成立性があると考えられる。) シリコン試料の概略照射手順を Table. 2 に示す。

#### 5.2 課題

試料交換装置を成立させるための課題を以下に挙げる。

##### (1) 電動機類の水中使用の条件と対応策、耐放射線性の検討

炉内管にチェーンが接触しない状態で試料を吊下げ、昇降、回転させるために、試料照射装置を炉内管の上部まで移動させる必要がある。このとき、照射装置は連絡管内を移動するが、水の遮へいを使用するために、連絡管内に水を満たして使用する。すなわち、試料照射装置は、水中での使用状態になる。

試料の昇降、回転、試料照射装置の移動は小型減速機付モータを使用するが、絶

縁対策、潤滑油漏えい防止が必要なため、標準品使用は改造が必要である。又、絶縁材などは、耐放射線性のものを使用する必要がある。電動機類を放射線から保護するため、試料照射装置の下に、遮へい体を設ける設計が、これ以外にも、試料交換室内での試料の搬送に合わせた遮へいの合理的な設計が必要である。

#### (2) 作業ロボットの適用条件

試料交換装置は次に示すような手順を検討した。

試料 10 体を各スタックに貯蔵し（最大 20 体）、順次、試料交換室へ搬入する。搬入した試料を、ロボットを使用し、試料照射装置の吊具にピンで連結する。又、ロボットで、照射後の試料のピンを外し、試料を遮へい容器内へ収納する。別のロボットで、遮へい容器の蓋を開閉する。という手順である。遮へい体におおわれた室内に多関節ロボットを設置する設備になり、ロボットのメンテナンスの観点からは、できるだけ単純な機能のロボットを検討する必要がある。そこで、試料の搬入位置の検討、試料の吊具構造の検討、照射後試料の収納方法、遮へい体の配置など、ロボットに行わせる作業を整理、検討する必要がある。

#### (3) 試料交換室内でのロボットへの遮へい対策

本検討では、コストの点から、汎用の多関節ロボットを使用することを想定する。すなわち、耐放射線性を考慮した製品ではないため、遮へい対策を検討する必要がある。

#### (4) 試料照射装置の具体的な設計条件の設定及び試作による確証

試料照射装置のより詳細な設計条件として、設備の運用条件から要求される試料の照射時間、単位時間当たりの照射試料数量、試料引き上げ前の減衰時間、照射後試料の線量、保管試料の保管時間等を設定するとともに、設備・装置のサイズ、遮へい体のサイズなどをより具体的に検討する必要がある。また、可能な限り市販品を利用する方針とすることから、多岐にわたる装置・部品の適用性の確認が必要となるため、装置の試作により成立性を実証する必要がある。

## 6. 炉内管周辺要素

シリコン半導体製造装置炉内管用周辺要素は、照射孔 16 孔分を占めることから、原子炉一次冷却水の炉心を通過する流量の配分に与える影響が大きいと考えられる。このことから既設の周辺要素の領域に比べて流量の配分が等価となるような構造を検討した。周辺要素概略構造図を Fig. 7 に示す。

### 6.1 検討条件

炉心部を均等に除熱するためにはグリッド全体に均等な隙間を開けて一次冷却水

を均等に流す必要がある。又、一次冷却水の圧損特性を変えないようにするには、グリッド全体の隙間の面積を変えないようにする必要がある。(隙間全体の面積が変わらなければ、偏流したとしても、一次冷却水の流量は変わらない。)

均等に流すことが原則であるが、実際は、周辺要素の形状や大きさが異なり、同じ形状にそろえるという方法が採用できない。又、グリッド厚さ 220mm の嵌めあい部の摩擦抵抗損失を合わせるのは、据付上の課題もあり難しい。従って、圧損の主要な部分はグリッド部の流路の拡縮によるものになり、角溝で隙間の面積を調整する方法が現実的な方法になる。

グリッドの流量配分の考え方として、周辺要素の面積に比例して流量配分するのが望ましいが、除熱も必要である。一方現状のものが実績として問題なく機能しており、バランスが成立しているので、現状のものの穴寸法に合わせて反射体を製作することが適切であると考えられる。

## 6.2 グリッドの穴面積と流量配分

シリコン半導体製造装置炉内管用の周辺要素は、既設 E タイプ（1 孔用）の穴 12 箇所、A タイプ（4 孔用）の穴 1 箇所の 16 孔分を使用するので、既設の穴の面積に準じるものとする。なお、シリコン半導体製造装置炉内管用の周辺要素は 4 隅に脚を設け、グリッドに固定する方式とする。

シリコン半導体製造装置炉内管用の反射体の方が既設の流量バランス状態に比べて約  $89\text{m}^3/\text{h}$  少なくなるが、一次冷却水量  $6000\text{m}^3/\text{h}$  の 1.4% であり、影響は小さいと考えられる。Table. 3 に JMTR 既設周辺要素の面積と流量配分、Table. 4 シリコン半導体製造装置炉内管用の周辺要素の面積と流量配分を示す。

# 7. シリコン試料輸送要領

## 7.1 検討条件

スタックに貯留した試料を、順次、試料照射装置に取り込み、照射する。照射後、試料を遮へい容器に収納して貯蔵プールへ搬送、貯蔵することを想定した試料の交換・輸送要領を検討した。

## 7.2 試料交換・輸送要領

照射設備における主な試料の流れは、試料搬入装置、試料交換機室、照射装置、炉内管、炉心部、試料搬送装置、吊下げ装置、貯蔵装置、取出装置、除染室の順となる。Table. 5 にシリコン試料の交換・輸送の手順を示す。

## 8. シリコン半導体製造装置の配置検討

### 8.1 配置

照射孔から立ち上がり圧力容器蓋を貫通した炉内管は、JMTR の東側に設けた試料交換室の下部から室内へ引き込む配置とした。

No. 1 カナルに沿って照射済み試料を搬送する試料搬送装置を設置する。貯蔵プール上に試料の吊下げ装置を配置し、貯蔵プール内に貯蔵装置を設ける。機器配置検討図を Fig. 8 に示す。

### 8.2 配置上の課題

- (1) 連絡管が炉プール上のキャスク台車レール用梁に接近しているので、キャスク台車側との干渉回避の調整が必要になる。
- (2) 試料交換室が大型の構造物になるので、既設の更衣室から炉周り架台への通路が使用できなくなる。更衣室を JMTR の西側へ移すなどの検討が必要になる。
- (3) 試料搬送装置は Tc-99m 製造装置の埋設配管の床上立ち上がりと干渉しないような高さに配置する必要がある。

## 9. 安全方針

### 9.1 検討条件

シリコン半導体用製造装置は、Fig. 2 概念系統図に示す各設備からなる。これらの設備を前提に安全設計方針を検討した。

### 9.2 安全設計方針

以下に想定される事象とその防止対策を示す。

- (1) 試料交換装置内で照射試料を取扱時の被曝  
内部装置に対する被曝低減を図りながら取扱いができる。交換装置外への遮へい機能を満足すること
- (2) 試料搬入時の障害  
人が介在する作業になるので、重量物を安全に扱うことができる設備にする。
- (3) 照射試料が取出し不可  
炉内管の中へ挿入後、装置に異常が起こっても、引上げられる構造であること。
- (4) 試料移送時の遮へい容器の落下防止  
重量物操作が確実にできる遮へい容器の構造であること。

### (5) 貯蔵プール内への安全な保管

重量物操作が確実にできる吊り下ろし装置、先入れ先出し（保管した順に、取出すこと）ができる構造であること。

## 10.まとめ

本検討において、JMTRにおけるシリコン半導体製造装置の系統構成、各装置の構成、炉内管の構造、周辺要素の形状、安全方針についての検討を行って装置の基本構成を構築した。

大口径のシリコン単結晶を炉内管でかつ水霧囲気中で試料照射をするためには、炉心北側の4×4孔（J, K, L, M-1, 2, 3, 4）の領域においてのみ成立し、この4×4孔に照射領域として確保できる穴径は約300mmが最大であることから、ここへ炉内管の設置を検討した結果、外側配管（ $\phi 290 \times \phi 270\text{mm}$ ）、内側配管（ $\phi 265 \times \phi 245\text{mm}$ ）、仕切管（ $\phi 240 \times \phi 235\text{mm}$ ）、アルミ容器（ $\phi 230 \times \phi 210\text{mm}$ ）となり、直径 $\phi 203.2\text{mm}$ のシリコン半導体の照射が可能であるとの検討結果を得た。

炉内管は、炉頂部北側の作業用蓋（小判蓋）を貫通して炉心の所定の位置に設置する必要があり、2次元曲げ（3次元曲げ）の二重配管となる。このことから製作にかかるコストが増え、製品との費用対効果の観点から設備コストに関する検討を進める必要がある。

今後JMTRにおいてシリコン半導体をNTD法によって製造するに当たり、今後の課題として材料試験炉であるJMTRの中性子スペクトルの特性による製品品質への影響を把握することが極めて重要である。目下、デバイスマーケタ及びエンドユーザーにおいては照射欠陥が電気特性に及ぼすミクロ的な影響に注目しているところであり、照射によるシリコン単結晶の様々な形態の格子欠陥のメカニズムをよく把握しておくことが要求される。

また現在のシリコン半導体の国内需要の伸び（または状況）を考慮した場合、単にJMTRだけの製造にとどまるのではなく、現在も原子力機構内で製造を行っているJRR-3、JRR-4等とも連携して、需要の一旦を担えるような安定供給体制の確立、及び特に需要が増えている大口径の照射が可能になれば、産業界への大きな貢献になると期待される。

## 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) 中性子核変換ドーピング Si 半導体 (NDT-Si) 製造機能拡充のための外部冷却法  
対応設備の製作 (共同研究) JAEA-Tech 2006-059
- 2) 「JMTR 照射ハンドブック」 JAERI-M 94-023

Table 1 シリコン半導体製造装置の構成機器リスト

(1/2)

品番	機器名称	構造/仕様	概略寸法/主要材質
1	新試料搬入装置	スタック貯蔵方式(約 10 試料/スタック × 2 系列)	
	1.1 搬入装置 1.2 試料押込み装置	台車、電動シリンダー	
2	試料着脱装置		
	2.1 着脱装置 2.2 遮へい容器蓋開閉装置	ロボットアーム 遮へい容器蓋開閉口ボット	
3	試料照射装置		
	3.1 移動装置	レールクランプ式	概略 600mm × 800mm × 1800mm
	3.2 試料吊上げ下げ装置 3.3 試料回転装置	チェーンブロック式 ギア回転式	
4	炉内管、連絡管		
	4.1 炉内管		
	外筒管	円筒形	φ 290mm × t 8mm SUS316
	内筒管	円筒形	φ 269mm × t 8mm SUS316
4.2 連絡管	仕切管	円筒形	φ 241mm × t 3mm SUS316
	角形		SUS316、SUS304、Pb
	小判形、ノズル付		SUS316
4.3 小判蓋	4.4 サポート		SUS304
	供給水装置		
5	5.1 ポンプ	6t/h 0.085MPa 0.75kW 2 台	SCS14
	5.2 イオン交換塔	20L 1 台	φ 216.3mm × t 6.5mm × 約 1.5m SUS316
	5.3 給水タンク	円筒錐型	φ 267.4mm × t 6.5mm × 約 1.5m SUS316
	5.4 配管、弁		SUS316

(2/2)

品番	機器名称	構造/仕様	概略寸法/主要材質
6	試料搬送装置	モノレール搬送方式	
6.1	搬送装置		
6.2	遮へい容器		
7	吊り下げ装置	ホイスト方式	
8	CFプール貯蔵装置	水中ローラコンベア	
9	CFプール取出装置	ホイスト方式	
10	ケーシング(遮へい)	試料交換室及び搬送装置用	鉛 20cm
11	排気配管		φ 60.5 mm SUS316
12	計装		

Table.2 シリコン試料の概略照射手順

No	装置	機能	構造概念
1	試料着脱装置	試料交換室内で試料を試料照射装置の吊り位置へ移動	ロボットアームで試料をつかみ移動する ピン穴向きを合わせる
2	試料照射装置	試料照射装置の吊具を吊り位置まで下げる	チェーンブロック方式
3	試料着脱装置	シリコン収納容器と試料照射装置の吊具をピンで連結	ロボットアームでピンをつかみ差し込む
4	試料照射装置	試料を試料照射装置内へ吊り上げ	チェーンブロック方式
5		炉内管上部まで試料照射装置の移動	レールクランプ方式 (安全対策として、ワイヤ牽引)
6		試料を炉心部まで吊り下ろし	チェーンブロック方式
7		試料照射、径方向均一照射のため試料回転	チェーンブロック自体を電動機で正逆反復回転させる
8		軸方向均一照射のため試料位置を約220mm 吊り上げ	チェーンブロック方式
9		試料照射、試料回転	チェーンブロック全体を電動機で正逆反復回転させる
10		試料を照射装置内へ吊り上げ	チェーンブロック方式
11		試料交換室内まで試料照射装置の移動	レールクランプ方式 (安全対策として、ワイヤ牽引)
12		試料を試料照射装置の吊り位置まで下ろす	チェーンブロック方式
13	試料着脱装置	シリコン収納容器と試料照射装置の吊具のピンを外す	ロボットアームでピンをつかみ、外す
14		遮へい容器内へ試料を収納	ロボットアームで試料をつかみ、収納する
15		遮へい容器の蓋をする	遮へい容器蓋を開閉する別のロボットで蓋をする
16		試料搬送後 空遮へい容器の蓋を外す	空遮へい容器の蓋を外す 遮へい容器蓋を開閉する別のロボットで蓋を開け、次の収納を待機する。

Table. 3 JMTR 既設周辺要素の面積と流量配分

穴タイプ (既設設備 の例)	グリッド 下端の絞り部 の穴面積	寸法など	推定流量
A (4孔用) (OGL-1)	2027mm <sup>2</sup>	グリッド寸法 □148 R30 面取り 周辺要素 (円筒 φ172×φ148 の中心に□147 を重ね、□147 の外側の部分を切取った、 4分割された状態の円筒) 炉内管 φ146	177m <sup>3</sup> /h
E (1孔用) (HR-2)	280mm <sup>2</sup>	グリッド穴寸法 φ62.7 周辺要素 φ62.4×φ42 4—溝巾 20×3.2 炉内管 φ42×φ30	22m <sup>3</sup> /h × 12箇所 =264m <sup>3</sup> /h
合計	441m <sup>3</sup> /h		

Table. 4 シリコン半導体製造装置炉内管用の周辺要素の面積と流量配分

穴タイプ	グリッド下端 の絞り部の穴 面積	寸法など	推定流量
A (4孔用)	1000mm <sup>2</sup>	グリッド穴寸法 □148 R30 面取り 周辺要素 □147.5 8—溝巾 27×4 プラグ用 (特に冷却する炉内管がないので、周囲の E タイプに合わせて 22m <sup>3</sup> /h の 4 倍に設定した 均等な流量バランスを図れる。)	88m <sup>3</sup> /h
E (1孔用)	280mm <sup>2</sup>	グリッド穴寸法 φ62.7 周辺要素 φ62.4×φ42 4—溝巾 20×3.2 脚用及びプラグ用	22m <sup>3</sup> /h × 12箇所 =264m <sup>3</sup> /h
合計	352m <sup>3</sup> /h		

Table.5 シリコン試料の交換・輸送の手順

(1/2)

No	手順	主な内容
1	試料準備	人力によりシリコン収納容器にシリコンを収める
2	試料搬入装置に貯留	スタッカーカークレーンを使い、シリコン収納容器を待機中の貯留スタックに積み上げる。(約 10 体/系列)
3	試料を試料交換室内へ押込み	試料をスタックから試料交換室へ台車を使い自動で押込む
4	試料交換室内で試料を試料照射装置の吊り位置へ移動	試料着脱装置（ロボットアーム）で、試料を照射装置の吊り位置へ移動する。ピン穴向きを合わせる
5	試料照射装置の吊具を吊り位置まで下げる	照射装置のチェーンブロックにより吊下ろす
6	試料と試料照射装置の吊具をピンで連結	ロボットアームでピンをつかみ差し込む
7	試料を試料照射装置内へ吊り上げ	照射装置のチェーンブロックにより吊り上げる
8	炉内管上部まで試料照射装置を移動	試料を吊り込んだまま移動する
9	試料を炉心部まで吊り下ろし	照射装置のチェーンブロックにより試料を吊り下ろす
10	試料照射、試料回転	チェーンブロック自体を電動機で正逆反復回転させる
11	試料位置を約 220mm 吊り上げ	照射装置のチェーンブロックにより吊り上げる（中性子分布の対称な上側に吊り上げる）
12	試料照射、試料回転	チェーンブロック自体を電動機で正逆反復回転させる
13	試料を試料照射装置内へ吊り上げ	必要な量を照射したら、照射装置のチェーンブロックにより吊り上げる
14	試料交換室内まで試料照射装置を移動	試料を照射装置内へ吊り上げたら、照射装置を移動させる
15	試料交換室内で試料を下ろす	照射装置のチェーンブロックにより吊下ろす
16	試料と試料照射装置の吊具のピンを外す	ロボットアームでピンを外す
17	遮へい容器内へ試料を収納	ロボットアームで試料をつかみ、収納する
18	遮へい容器の蓋をする	遮へい容器蓋を開閉する別のロボットで蓋をする
19	試料の移送	試料搬送装置で遮へい容器を CF プールまで移送する
20	遮へい容器の蓋外し	ロボットで蓋を外す
21	試料を遮へい容器から取出す	ロボットで、試料を遮へい容器から取り出し、試料吊り下げる
22	空遮へい容器に蓋を乗せる	ロボットで蓋を乗せる
23	空遮へい容器を試料交換室へ戻し、蓋を外し、待機する	ロボットで蓋を外す
24	試料を CF プール内へ保管	試料吊り下ろし装置（チェーンブロック）で CF プール内へ下ろす。傾斜ローラ上にのせ、自然移動させる

(2/2)

No	手順	主な内容
25	取出し装置で資料を除染室へ吊上げ	取出し装置（チェーンブロック）で吊上げる
26	除染、搬出	除染し、モニター後、搬出する

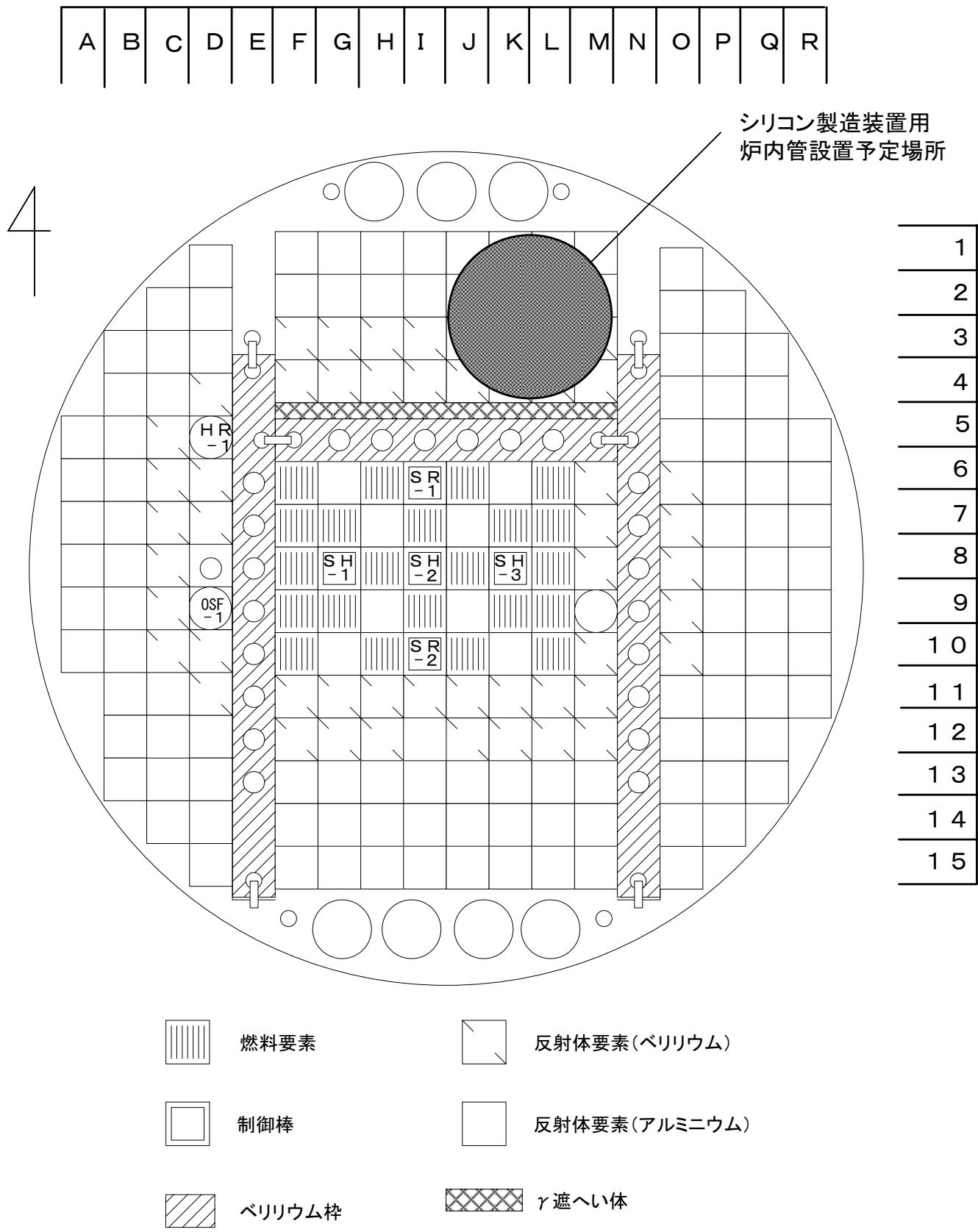


Fig.1 JMTR炉心の概略図

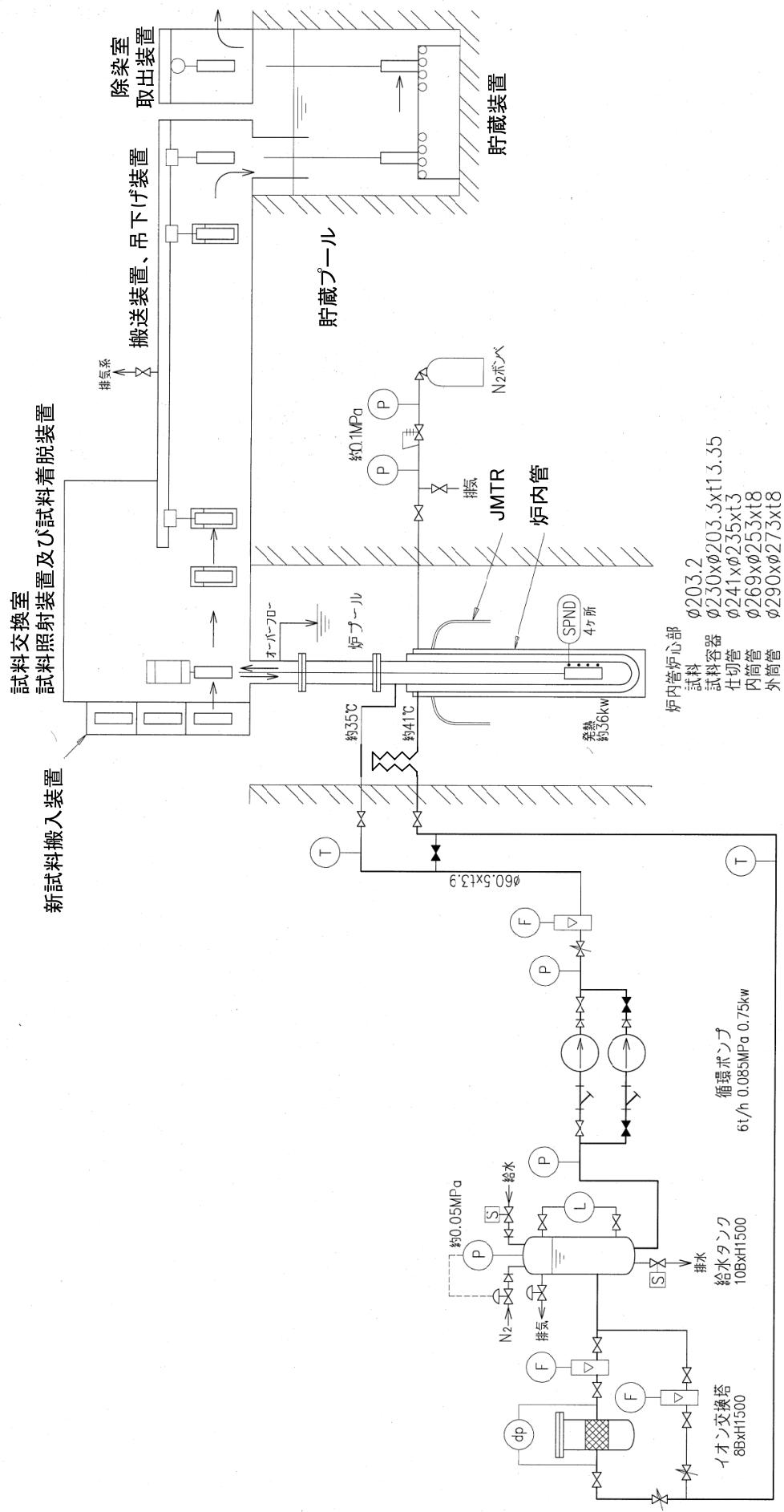


Fig.2 シリコン半導体製造概念系統図

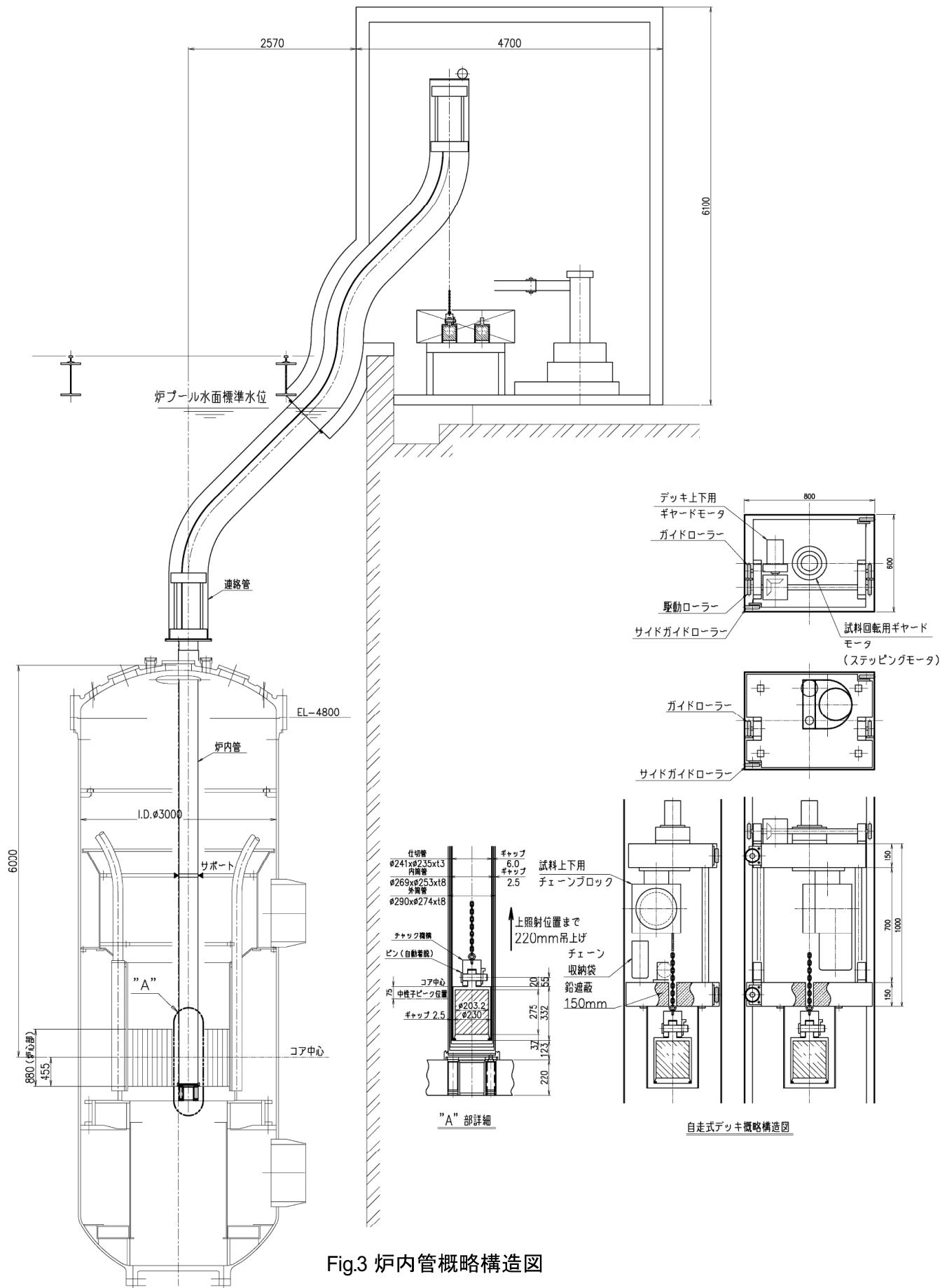


Fig.3 炉内管概略構造図

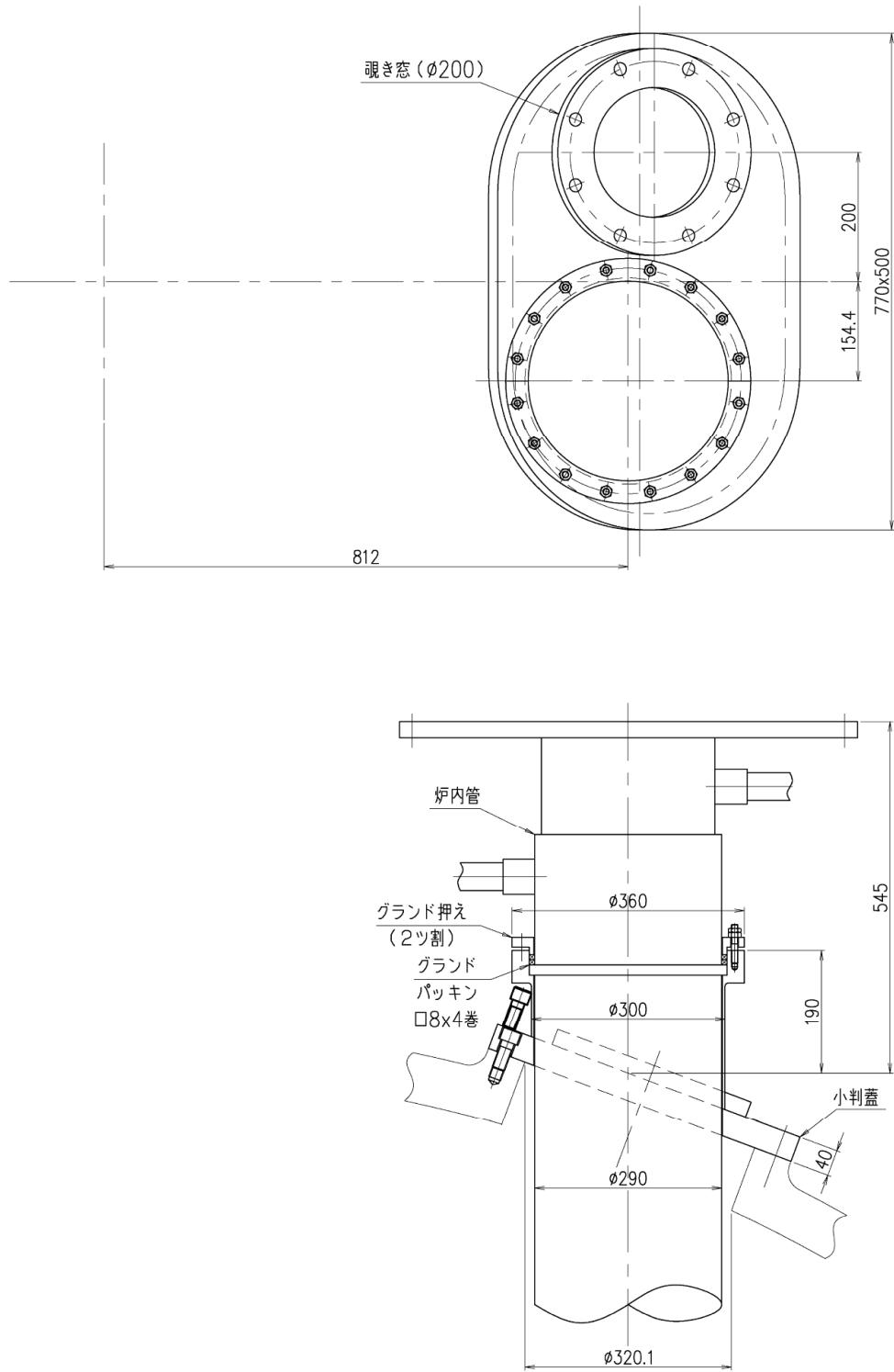


Fig.4 小判蓋概略構造図

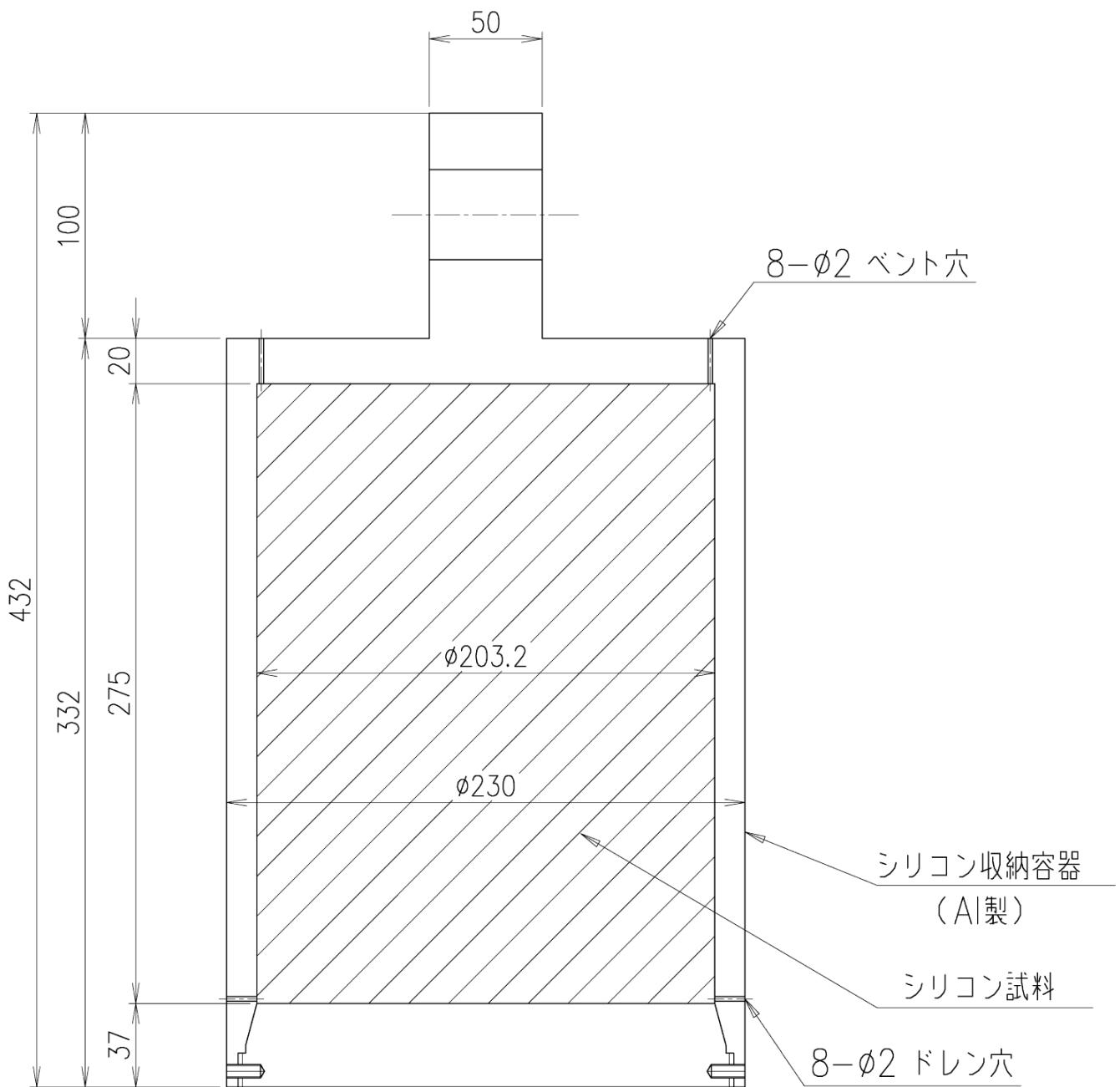


Fig.5 シリコン収納容器構造図

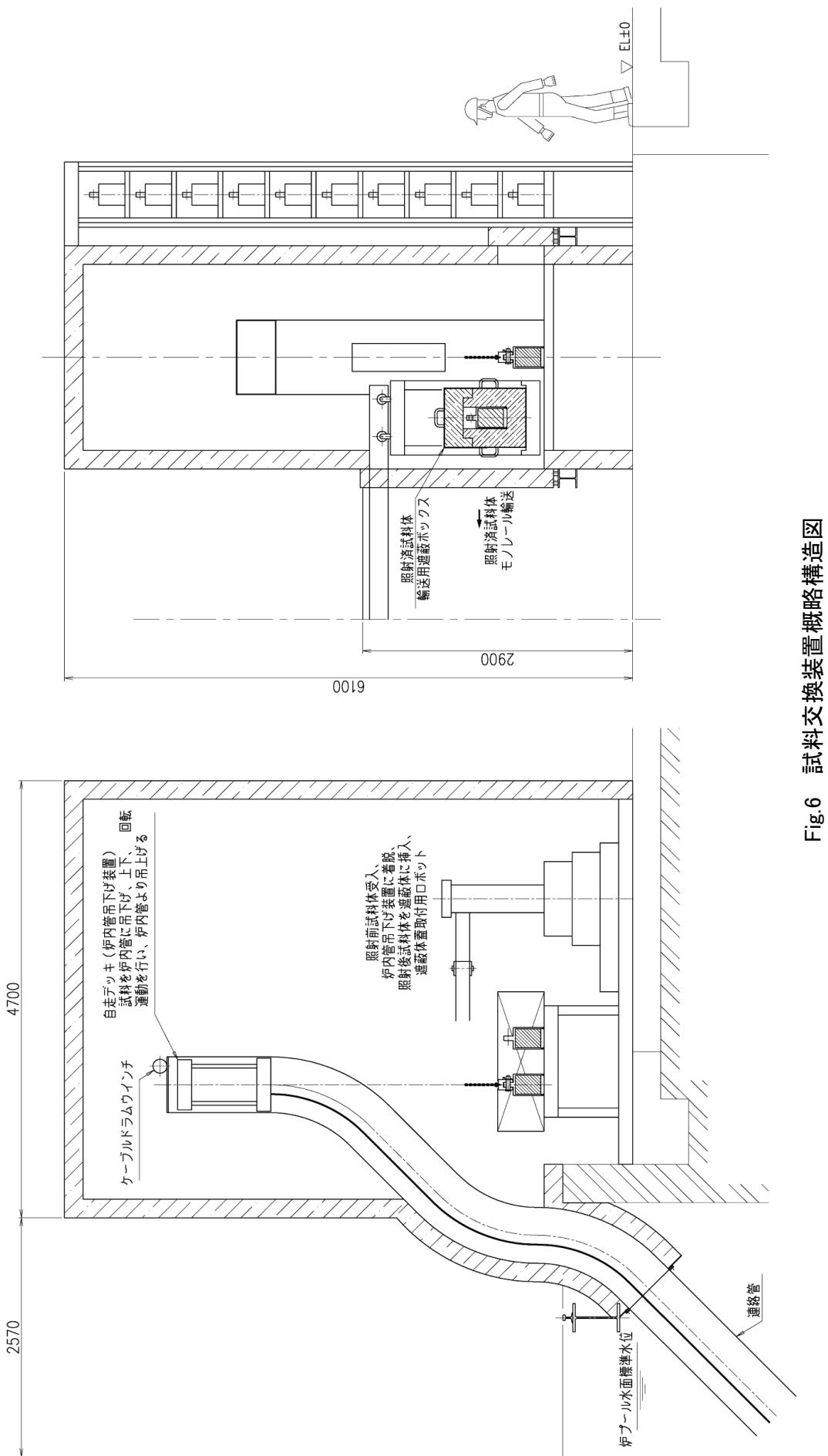


Fig.6 試料交換装置概略構造図

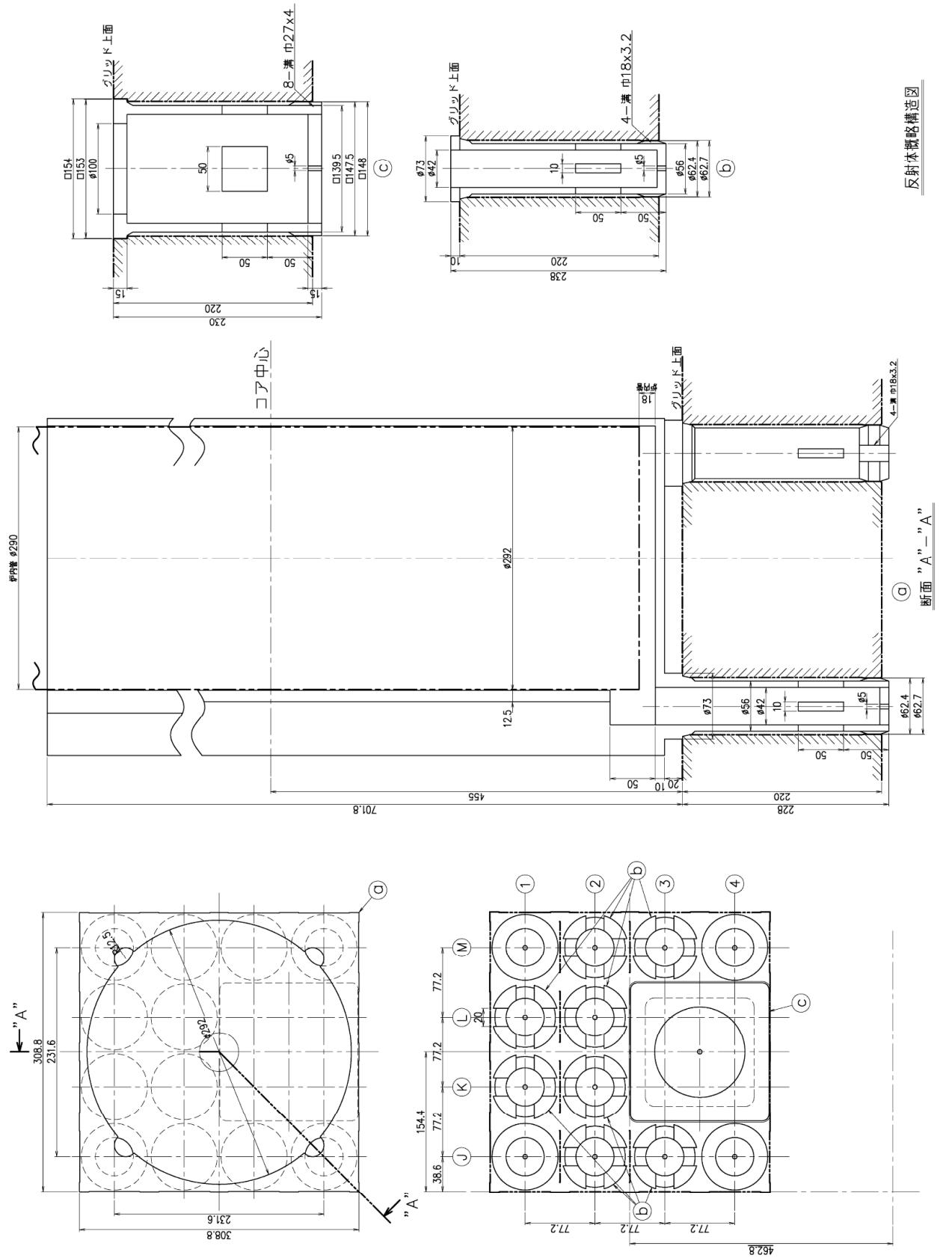


Fig. 7 周辺要素概略構造図

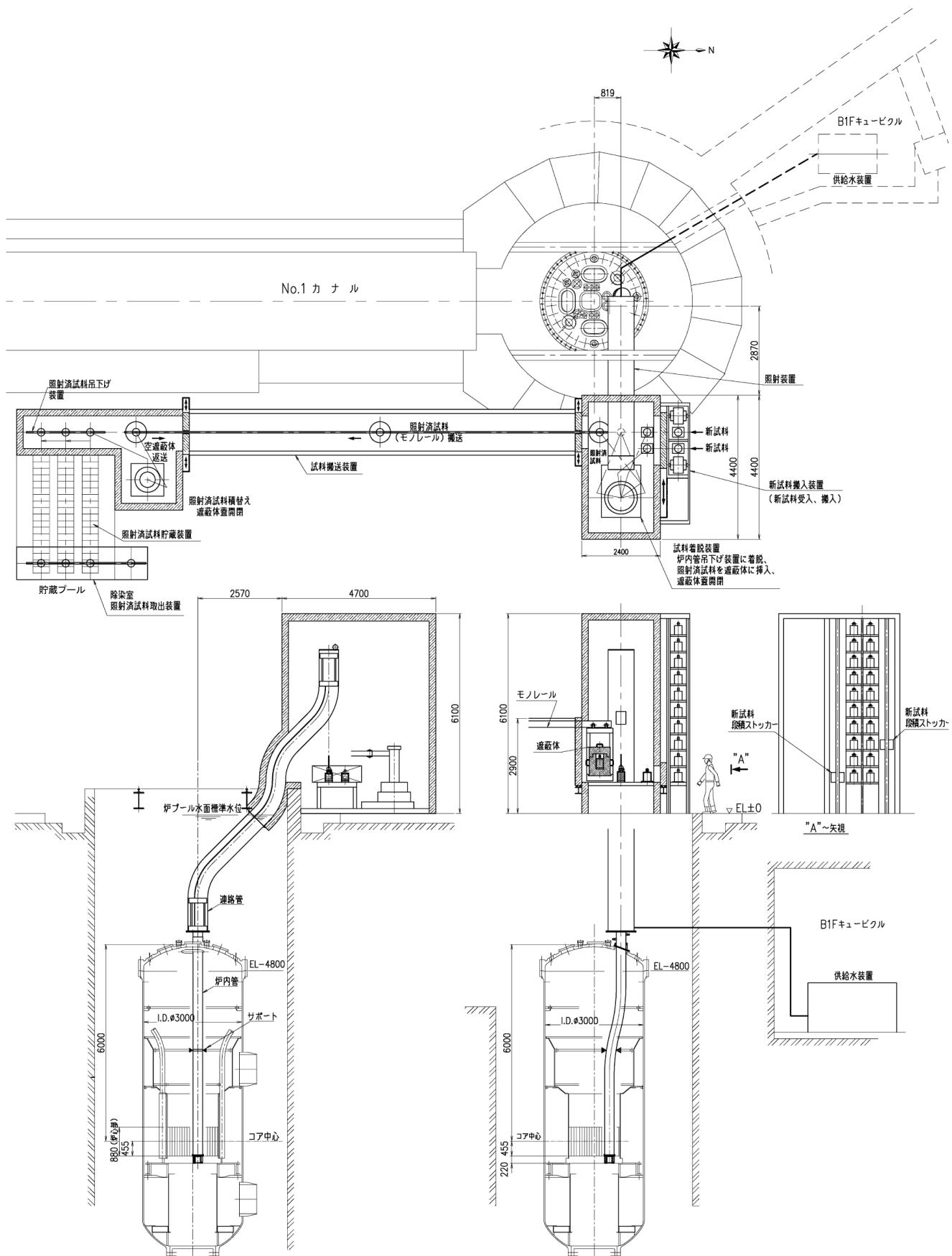


Fig.8 機器配置検討図

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル毎秒	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
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 <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
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 <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}$ <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}$ <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
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	$V/A$
電気抵抗	オーム	Ω	$V/A$
コンダクタンス	ジemens	S	$A/V$
磁束密度	テスラ	T	$V \cdot s$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$Wb/m^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/A$
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm/m^2$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	$J/kg$
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot s^{-2}$
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	$J/kg$

(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	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot s^{-2}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-3}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
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 <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
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 <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
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		$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
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 <sup>2</sup> · 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 <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	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	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	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	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチルブ	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	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジヤンスキ	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	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

