



JAEA-Technology
2007-033



JP0750196

中性子核変換ドーピング Si 半導体(NTD-Si)製造用 JRR-3 高性能シリコン照射装置の概念設計

Conceptual Design of JRR-3 Automated Silicon Irradiation Device
for Neutron-Transmutation-Doped Silicon Semiconductor (NTD-Si) Production

廣瀬 彰 和田 茂 楠 剛

Akira HIROSE, Shigeru WADA and Tsuyoshi KUSUNOKI

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

中性子核変換ドーピング Si 半導体 (NTD-Si) 製造用 JRR-3 高性能シリコン照射装置の概念設計

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所
研究炉加速器管理部
広瀬 彰、和田 茂、楠 剛

(2007年2月13日受理)

中性子核変換ドーピング Si 半導体 (NTD-Si) は高性能の電力制御用半導体素子としての高品位特性を有している。NTD-Si の需要は、最近のハイブリッド車の増産に伴い増大している。このような需要増大に対応するため、中性子照射に適した日本原子力研究開発機構の研究炉 (JRR-3, JRR-4, JMTR) を用いた NTD-Si 増産の技術的課題に対する対策を進めている。その有効な対策の一つとして JRR-3 均一照射設備を利用した高性能シリコン照射装置の概念設計を行った。

JRR-3 の均一照射設備は、長尺な Si インゴット全体に対し均一に中性子照射を行うため Si インゴットを軸方向に上下反転して 2 度照射する方式が採用されており、反転作業を手作業で行っている。このため、シリコン照射装置内で許容線量率を下回るまで待つ必要があり、48 時間以上の待機後に反転作業を行っている。

照射設備の運転稼働率を高め NTD-Si 生産量の增量を図るために、待機時間を少なくすること及び手作業による操作工程を少なくする全自動化装置の製作を行うことが有効である。このため、本概念設計では、照射済 Si の自動反転機構の開発及びターンテーブル機構、移送装置機構の自動化を導入した。安全上要求される構造設計、遮へい設計及び耐震設計の基準を満足した結果を得た。

本報告書は、JRR-3 均一照射設備として使用する高性能シリコン照射装置の概念設計に関するものである。

Conceptual Design of JRR-3 Automated Silicon Irradiation Device for Neutron - Transmutation - Doped Silicon Semiconductor (NTD-Si) Production

Akira HIROSE, Shigeru WADA and Tsuyoshi KUSUNOKI

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 13, 2007)

Neutron-Transmutation-Doped Silicon Semiconductor (hereinafter referred as 'NTD-Si') has good properties for the power device. In recent years the demand of NTD-Si has increased significantly due to mass production of hybrid-cars. We have been investigated the expansion technology of the NTD-Si productivity using the research reactors JRR-3, JRR-4 and JMTR of JAEA in order to meet the demand. The conceptual design of the automated silicon irradiation device using the JRR-3 Uniformity Irradiation System was carried out as one of the effective measures.

After a Si ingot is irradiated once, it is turned over manually and irradiated again in order to irradiate the ingot uniformly. With the conventional equipment, it is necessary to wait radioactivity of the ingot decrease less than the permissible level with holding the ingot in the irradiation equipment. The waiting procedure takes 48 hours or more.

Because the automated NTD-Si irradiation device reduces the manual operation process and the waiting time, it is effective to shorten the waiting period. Therefore, the automation of the turntable and the transportation device mechanism, the development of the automatic turnaround of the irradiated ingot was introduced in this conceptual design. The result of meeting the standard of a structural design, the shield design, and the seismic design demanded on safety was obtained.

This report is concerning the conceptual design of the automated silicon irradiation device for the JRR-3 Uniformity Irradiation System.

Keywords: Neutron-Transmutation-Doped Silicon Semiconductor, NTD-Si, JRR-3, Research Reactors, Production Increases, Automated Silicon Irradiation Device, Conceptual Design

目 次

1	はじめに	1
2	設計仕様	4
2.1	目的	4
2.2	設計方針	4
2.3	設計条件	4
3	設計	8
3.1	概要	8
3.2	構造設計	12
3.3	遮へい設計	18
3.4	耐震設計	23
4	結言	27
	謝辞	27
	参考文献	28

Contents

1	Introduction	1
2	Design Specification	4
2.1	Purpose	4
2.2	Design policy	4
2.3	Design Condition	4
3	Design Results	8
3.1	Outline	8
3.2	Structure design	12
3.3	Shielding design	18
3.4	A seismic design	23
4	Conclusion	27
	Acknowledgments	27
	References	28

図表リスト(1/2)

表 1.1-1	均一照射設備の比較構成表	29
表 2.1-1	シリコン照射装置と高性能シリコン照射装置の機能比較表	30
表 2.3-1	構造設計条件	31
表 2.3-2	遮へい設計条件	32
表 3.1-1	高性能シリコン照射装置の設計仕様	33
表 3.2-1	許容応力値算出方法一覧表	34
表 3.2-2	主要材料の機械的性質一覧表	35
表 3.2-3	主要材料の許容応力一覧表	36
表 3.2-4	構造設計結果一覧表	37
表 3.3-1	ホルダー毎の照射時間及び冷却時間	39
表 3.3-2	純アルミニウム (A1050) 組成表	39
表 3.3-3	ホルダー線源強度 (純アルミニウム 1g;A1050)	40
表 3.3-4	ORIGEN79 のエネルギー群構造	41
表 3.3-5	熱中性子束の相対値から絶対値への換算結果	41
表 3.3-6	アルミニウム合金 (A5052) 組成表	42
表 3.3-7	アルミリンクチェーン線源強度 (アルミニウム合金 1g ;A5052)	43
表 3.3-8	接続アダプター線源強度 (純アルミニウム 1g;A1050)	44
表 3.3-9	接続アダプター線源強度 (アルミニウム合金 1g ;A5052)	44
表 3.3-10	ホルダー線源強度 (A1050)	45
表 3.3-11	アルミリンクチェーン線源強度 (A5052)	45
表 3.3-12	接続アダプター線源強度 (A1050 及び A5052)	46
表 3.3-13	装荷用キャスク本体部計算結果	47
表 3.3-14	装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算結果	48
表 3.4-1	耐震設計結果一覧表	50

図表リスト(2/2)

図 1.1・1	半導体生産方法と不純物濃度	51
図 1.1・2	Si 単結晶製造から NTD-Si 製造までの流れ	52
図 1.1・3	JRR-3 原子炉鳥瞰図	53
図 1.1・4	既設均一照射設備(シリコン照射装置)概略図	54
図 1.1・5	新設均一照射設備(高性能シリコン照射装置) 概略図	55
図 1.1・6	待機時間比較(既設:新設)イメージ図	56
図 2.1・1	シリコン照射装置シリコン照射流れ図	57
図 2.1・2	高性能シリコン照射装置照射工程流れ図	58
図 2.3・1	Si 照射工程モデル	59
図 3.1・1	高性能シリコン照射装置の配置図	60
図 3.1・2	高性能シリコン照射装置の構造概念図	61
図 3.1・3	高性能シリコン照射装置全体構造図	62
図 3.1・4	吊具構造図	63
図 3.1・5	高性能シリコン照射装置ホルダー構造図	64
図 3.1・6	高性能シリコン照射装置基本照射フロー	65
図 3.2・1	装荷用キャスク及び吊具構造設計対象図	66
図 3.2・2	装荷用キャスク本体吊金具部詳細図	67
図 3.2・3	クレーンフック取付部詳細図	68
図 3.2・4	ピン取付プレート詳細図	69
図 3.2・5	アーム詳細図	70
図 3.2・6	アーム先端ボス部詳細図	71
図 3.2・7	長さ調整用アイボルト詳細図	72
図 3.2・8	他の吊り機構部品詳細図	73
図 3.2・9	キャスク台座詳細図	74
図 3.2・10	ホルダー(昇降時及び回転時)詳細図	75
図 3.2・11	ホルダー(反転時)詳細図	76
図 3.3・1	炉心内照射モデル	77
図 3.3・2	ホルダーの冷却時間	78
図 3.3・3	アルミリンクチェーン各位置の計算に用いる熱及び高速中性子束	79
図 3.3・4	装荷用キャスク本体部計算モデル	80
図 3.3・5	装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算モデル	81
図 3.3・6	装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部線源モデル	82
図 3.3・7	装荷用キャスク本体部計算点の位置図	83
図 3.3・8	装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算点の位置図	84
図 3.4・1	固有振動数計算モデル	85
図 3.4・2	高性能シリコン照射装置転倒計算モデル	86
図 3.4・3	位置決めリング計算モデル	87

This is a blank page.

1 はじめに

半導体は、我々の身の回りにある家電製品をはじめ、機械設備、通信機器、車両等あらゆる分野で使用されている。この半導体の材料は、Si(珪素)、Ge(ゲルマニウム)、Se(セレン)等多種多様であるが、Siは半導体材料としての特性が優れている上、地球上の岩石成分の中で酸素に次いで27%と多いことから半導体材料の大部分はSiが使用されている。Siは高純度の単結晶に微量の不純物(B(ボロン)、P(リン)等)を混入させることにより、半導体として使用されている。不純物を添加することをドーピングといい、ドーピングされたSi半導体は、パワー・トランジスタ、サイリスタ、LSI(CPU、メモリ等)等に使用されている。

これらのSi単結晶は、極めて純粋な状態では電気的に不導体であり、適切な抵抗値まで引き下げなければ、電気材料として使用出来ない。また、半導体物質として最も重要な性質である導電型(正の導電型をP型、負の導電型をN型という。)を付与する必要があり、この導電型を決定し、かつ抵抗値を制御する物質として極微量の不純物を、主として単結晶化の工程で添加する。これをドープ剤といい、一般的にP型のドープ剤としてB、N型のドープ剤としてP、As(砒素)、Sb(アンチモン)などが使用されている。¹⁾

単結晶Siは、CZ(Czochralski)法と呼ばれる製造過程でP型又はN型のドープ材を拡散法で添加する。CZ法で製造される単結晶は、高純度の多結晶Siを石英ルツボで溶解し、種結晶に接触させて引き上げて製造する方法で、「CZ結晶」と言われている。この方法では、結晶の成長速度によって不純物の混入割合が変化し、抵抗率を一様にすることが困難である。これが半導体素子の耐圧性や電気特性の低下、あるいは素子破壊といった不具合をもたらす要因となる。CZ単結晶の用途としては、抵抗率の不均一性が問題とならないLSI(CPU、メモリ等)等に使用される。

一方、抵抗率が不均一となる問題を解決したのが、MCZ(Magnetic-Field-Applied Czochralski Method)法及びFZ(Floating Zone)法と呼ばれる製造過程である。まず、MCZ法は、CZ法の一種で磁場をかけながら結晶を引き上げる方法で、磁場の作用で融体の対流が抑制され、石英ルツボの不純物の結晶への混入が著しく少なくなる結果、CZ法より高純度の単結晶が得られる。FZ法は、円筒棒状の多結晶Siを直立に保持し、その一部をアルゴン雰囲気で高周波コイルにより加熱溶融し、種結晶に接触させて棒状のまま引き下げて製造する方法であって「FZ結晶」と言われている。FZ結晶は、CZ結晶に比べて石英ルツボなどを使用しないので周囲の汚染が少なく、高純度の結晶を作ることが出来る。この特徴を利用してNTD法によってドーピングする結晶の対象としてFZ結晶が多く使用されている。¹⁾ MCZ単結晶の用途は、抵抗の小さいところに大電流が集中するパワートランジスタ、CCD(Charge Coupled Device)や高度な集積素子に使用される。FZ単結晶の用途としては、パワートランジスタ、サイリスタ等の電力用個別デバイスに使用される。NTD-Siは、FZ法及びMCZ法により製造された単結晶が対象となる。

1961年にベルテレフォン研究所のTanenbaumらによって提案された、中性子による核変換 $^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P}$ を利用する中性子核変換ドーピング(Neutron Transmutation Doping: NTD)法は、ドーピングを行わずにFZ法で作られたSi単結晶に中性子を照射し、核変換により結晶中にドナーとなるPを生成するものである。この方法は、従来の方法では得られなかつた均一性の良いSiインゴットが得られるため、1974年にデンマークのトップシル社がDR-3炉を用い

て NTD 法による Si を売り出し、規格の厳しい製品に使用されるようになった。その後、半導体の進歩と共に 1975 年頃より NTD 技術の必要性が生じて実用化されるに至った。NTD 法によってドーピングされた P の分布は、従来の不純物を添加する方法では得られない均一性を示すため、Si 半導体製造の一分野をなしている。

近年、資源の有効利用化に向けた電気エネルギーへの関心の高まりを背景に、電力変換損失の低減化や高速動作化に対応した電力制御用半導体素子の需要が急速な伸びを示している。その代表的用途が、高速車両やハイブリッドカーなどの車載用である。原油価格の高騰と環境対応を受けハイブリッドカー等の需要はますます高まるものと予想される。自動車メーカーが発表するハイブリッドカーの製造計画と NTD-Si の需要動向が符号するところである。²⁾ NTD 法とガスドープ法による半導体生産方法と不純物濃度を図 1.1-1 に示す。

日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)の研究用原子炉 JRR-3 (Japan Research Reactor - 3) では、重水タンク内の SI-1 孔とよばれる垂直照射孔で NTD 法により生産する Si (以下「NTD-Si」という。) の照射を行っている。Si 単結晶製造から NTD-Si 製造までの流れを図 1.1-2 に、JRR-3 原子炉鳥瞰図を図 1.1-3 に示す。

JRR-3 は、軽水冷却で重水反射体を有するプールタイプの研究用原子炉で、熱出力は 20MW である。JRR-3 には、各種の照射設備が装備されており、そのひとつに垂直照射孔 (SI-1 孔) に設置された均一照射設備がある。均一照射設備は、最大直径 6 インチ (約 152.4 mm)、長さ 600 mm の Si に熱中性子を照射し P を Si 中に均一にドープできる設備である。既設の均一照射設備 (シリコン照射装置) 概略図を図 1.1-4 に示す。本報告書の設備名称として、既設をシリコン照射装置、新設を高性能シリコン照射装置として名称区分する。均一照射設備の比較構成を表 1.1-1 に示す。

シリコン照射装置は、長尺な Si インゴット全体に対し均一に中性子照射を行うため Si インゴットを軸方向に上下反転して 2 度照射する方式が採用されており、反転作業を手動で行っている。このためシリコン照射装置内で許容線量率を下回るまで、待つ必要がある。この待機時間は、Si インゴット及び Si 収納ホルダー (以下「ホルダー」という。) の放射能を減衰させている時間である。待機時間に大きく影響する直接の原因是、アルミニウム製のホルダーの放射化と減衰時間であり、シリコン照射装置内で 48 時間以上の待機時間を必要とする。この待機時間を減らす対策を講じる事により、生産量を向上する事が可能となるため、高性能シリコン照射装置を設計する。

今回概念設計を行った高性能シリコン照射装置は、既設シリコン照射装置の照射工程である「照射」・「冷却」・「反転」・「照射」・「冷却」を「照射」・「反転」・「照射」・「冷却」の流れに簡略化し、かつ自動化とするものである。新設の高性能シリコン照射装置概略図を図 1.1-5 に示す。シリコン照射装置の冷却時間で設定している 48 時間以上に対し、高性能シリコン照射装置で設定している冷却時間無しとした時の待機時間比較イメージを図 1.1-6 に示す。

概念設計の結果、高性能シリコン照射装置設置後の照射利用率 (照射時間／原子炉運転時間) は、約 66% であり、既設シリコン照射装置の約 33% に対して約 2 倍となり、NTD-Si 生産能力の向上が見込める。また、原子炉プール内に設置されている案内管及び垂直照射孔 (SI-1 孔) は既設備再利用となるため、コストパフォーマンスも良く、高性能シリコン照射装置の製作は NTD-Si 増産計画に有効である。

本書では、第 1 章に NTD-Si 照射及びシリコン照射装置の概要、第 2 章に設計仕様、第 3 章に

概念設計の結果、第4章にまとめについて述べる。

2 設計仕様

2.1 目的

シリコン照射装置は、炉頂の上部遮へい体上に設置する装荷用キャスク、キャスク台座、吊具及び制御盤並びに原子炉プール内に設置されている案内管及び垂直照射孔（SI-1 孔）から構成される。装荷用キャスクは、装荷用キャスク本体と駆動機構で構成され一体物であり天井クレーンにより移動可能な設備である。また、キャスク台座も天井クレーンにより移動可能な設備である。案内管及び垂直照射孔（SI-1 孔）は、原子炉プール内に固定されている。シリコン照射装置は、図 2.1-1 に示すとおり手動操作工程が多く、外部被ばく抑制のための待機時間が増え照射設備の照射利用率が低いのが現状である。

近年、NTD-Si 照射の需要は、最近のハイブリッド車の増産に伴い増大している。このような需要増大に対応するため、NTD-Si 照射の手作業による操作機會を極力減らした自動化を目的とした高性能シリコン照射装置の開発が有効であると考えた。

概念設計の基本は、既設シリコン照射流れ図の図 2.1-1 で示した手動操作工程を、照射用 Si の装荷及び照射済み Si の取り出し以外は全て自動化する機構の開発を目的とした。また、自動化機構の開発に伴い NTD-Si 増産のため、装荷用キャスク本体に装荷するホルダーの数量は 9 本に増量した。この 9 本の根拠は、ホルダー 1 本あたりの照射時間を 5 時間とした場合、反転前照射、反転後照射及び一次冷却を含めて 11 時間となる。月曜日から金曜日までを照射時間に割り当て、土曜日及び日曜日はホルダーの冷却を兼ねた停止期間と設定すると 1 週間あたり 9 本となる。これは、シリコン照射装置で勤務時間内操作による Si 生産量の 2 倍となる。

シリコン照射装置と高性能シリコン照射装置の機能的比較を表 2.1-1 に示す。この表からは、シリコン照射装置の手動操作工程に対し、高性能シリコン照射装置の自動化を達成させる各機構を記載した。高性能シリコン照射装置の照射工程毎の流れ図を図 2.1-2 に示す。

2.2 設計方針

設計方針は、JRR-3 原子炉設置許可申請書の条件等を満足した設計を行うものとし、NTD-Si 照射が安全かつ効率的に行えるものとする。特に、NTD-Si 生産量の増産を図るための重要な機構である駆動機構部については、ホルダーの反転前照射、反転後照射が自動運転でき、待機時間である冷却時間を大幅に短縮できる設計とする。ホルダーの反転前照射、反転後照射の自動化は、既設の手作業を自動化できる機構であり、高性能シリコン照射装置の中核になるものである。

概念設計は、構造設計、遮へい設計及び耐震設計を行い、NTD-Si 照射の増産及び安定供給が出来る装置設計の安全性及び耐久性を確認するものである。

2.3 設計条件

本高性能シリコン照射装置概念設計の各要求事項を以下に示す。

- (1) 構造設計
 - : ① 待機時間削減に伴う自動化機構の開発
 - : ② Si インゴットの押さえ込み機構の開発
 - : ③ 装荷用キャスクの重量制限に対する構造の開発 (装荷用キャスク総重量は、天井クレーンの吊上荷重 (30ton) 以下とする。)
 - : ④ 上部遮へい体(1枚あたり)の耐荷重(13ton 以下)の構造の開発
 - : ⑤ 手動バックアップ機構の開発
- (2) 遮へい設計 : 装荷用キャスク表面線量当量率が $60 \mu \text{Sv}/\text{h}$ 以下の遮へい性能
- (3) 耐震設計 : B クラス

2.3.1 構造設計

高性能シリコン照射装置は、基本方針である駆動部のホルダー反転照射の自動化、Si の自動による連続照射機構、Si の損傷防止機構等の機能的要件を満足する設計及び構造上の制約設計条件を満足する設計を行う。設計条件を表2.3-1に示す。また、機能的要件、構造上の制約設計条件及び照射設定を以下に示す。

- (1) 機能的要件
 - 1) ホルダーを 9 本、装荷用キャスク本体に内蔵し、連続自動照射ができること。
 - 2) ホルダーを駆動機構と自動で接続、切り離しができること。
 - 3) ホルダーを自動操作で設定した照射位置に下降セットできること。
 - 4) ホルダーを下降と同時に回転させることにより Si に対し設定された照射量について均一な照射ができること。
 - 5) 照射は、1 本の Si 照射に対し、反転前照射、反転後照射を各 1 回自動で行い、Si の安全性が確保でき、その後冷却ができること。
 - 6) 照射終了したホルダーは、次のホルダーと自動で交換できること。なお、9 本照射終了後、新しい Si との交換は手動で行うこと。
 - 7) 照射中故障が生じ、自動停止した場合は、手動による回避処置により安全に Si の回収できること。
- (2) 構造上の制約設計条件

- 1) 設置位置
装荷用キャスクの設置位置は、上部遮へい体上にあるため、燃料交換取扱装置レール、ストッパー等の障害物を考慮して構造を設計すること。
- 2) 原子炉プール内落下対策
原子炉プール内に落下する可能性のある機器、部品類は多重の落下対策を施すこと。
ネジ類はツイストワイヤ等により落下防止を施すこと。
- 3) 放射化防止対策
原子炉内照射場に挿入されるものについては、熱中性子による放射化を最小限にとどめるため、純度の高いアルミニウムを用いた設計とすること。
- 4) 汚染対策
照射されたホルダーは汚染するので、装荷用キャスク本体内の被ホルダーを取り扱う機器類には汚染飛散防止の設計を行うものとすること。

5) 電気機器類の使用電源

供給電源は動力用として AC200V、50Hz 及び制御用として AC100V、50Hz とする。

電気機器類は、接地を確実に取るものとし、漏電ブレーカやノンフューズブレーカ（NFB）を用いることにより、感電や過電流に対し防護措置を施すこと。

6) 保守性

高性能シリコン照射装置を設計するにあたり、保守性に考慮し、通常点検や故障時の対処の際、容易に点検修理が可能なものとすること。

(3) 照射設定

照射のための設定として以下のものができること。この設定に基づき照射を行うものとする。

1) 照射時間設定

設定された時間照射を行うこと。照射が可能な設定時間は、ホルダー1本あたり 15 分～1 サイクルであるが、評価は、月曜日から金曜日までの照射時間内で 9 本の照射が最大となる 1 本あたり 600 分とし、15 分～600 分とすること。

2) 照射量設定

既設の中性子検出器（SPND）の信号を取り込み積算し、設定された照射量の照射を行うこと。

3) 位置設定

設定された照射位置で照射を行うこと。

4) 冷却時間の設定

設定された冷却時間、照射物を冷却位置に保持し、冷却すること。

5) 自動操作

ホルダーに挿入され、駆動機構に取り付けられた照射物に対し一連の照射工程（「照射」・「反転」・「照射」・「冷却」）を自動操作できること。

① 照射物昇降機構

ホルダー昇降の際に異常により停止する可能性の極めて少ない材質、構造、機能を選択し採用すること。

② 軸方向回転機構

片面 15 分程度の短時間照射物の均一性を重視し、昇降時及び照射時に軸回転機構を有すること。

③ ホルダー

ホルダーは、自動反転に対応した構造とし、内蔵する Si の損傷防止及び落下防止を考慮した緩衝材、チャック機構を有すること。

④ インターロック

冷却時間の設定機能、時間照射機能、照射中の誤った操作などにより、不安全となるよう必要なインターロックを設けること。

⑤ 手動操作

電動機器類は、停電等の非常時に備え手動でも操作できる機構を有すること。

⑥ 装荷用キャスクからの Si の取り出し。

十分冷却した Si 取り出しあは、打痕等による損傷がないような機構とし、手動または自動のいずれかの工法を設計すること。

6) 制御装置が持つ機能

① 装荷用キャスク制御機能

以下の制御機能を有すること。

- イ 照射時間制御
 - ロ 照射量制御
 - ハ 位置制御
 - ニ 冷却時間の制御
 - ホ 自動運転
 - ヘ インターロック
- ② 電源供給機能

装荷用キャスクに電源を供給すること。

2.3.2 遮へい設計

JRR-3 原子炉運転は、5週間を1サイクルとする運転パターンを標準とし、4週間の連続運転の後、原子炉を1週間停止させ、この間に燃料要素及び照射キャプセルの交換を行っている。遮へい設計におけるホルダーの蓄積最大放射能量は、1年間あたり7サイクルの運転期間を基本としているため、7サイクル目が最大となる。この時の照射物を含む装荷用キャスク及び駆動機構外表面における基準線量当量率を $60 \mu\text{Sv/h}$ 以下（遮へい区分III）となるよう遮へい設計を行う。高性能シリコン照射装置の遮へい設計における設計条件を表2.3-2に、ホルダーの蓄積照射時間を示した照射工程モデルを図2.3-1に示す。

2.3.3 耐震設計

高性能シリコン照射装置の耐震設計における耐震設計は、以下に示す条件に耐える設計を行うものとする。

- (1) 地震力は水平方向から作用するものとし、鉛直方向の地震力は考慮しないものとする。
- (2) 耐震設計条件

高性能シリコン照射装置	: Bクラス
(3) 上部遮へい体の許容荷重	
1) 上部遮へい体（摺動遮へい体（東））	: 13ton
2) 上部遮へい体（摺動遮へい体（西））	: 13ton
3) 固定遮へい体の許容荷重	: 13ton

3. 設 計

3.1. 概要

3.1.1. 高性能シリコン照射装置の構成

本概念設計の対象とする高性能シリコン照射装置は、炉頂の上部遮へい体上に設置する装荷用キャスク及びキャスク台座、制御盤並びに吊具が設計対象構成物となる。原子炉プール内に設置されている案内管及び垂直照射孔(SI-1孔)の既存設備はそのまま利用する。以下に主な構成機器を示す。

(1) 装荷用キャスク	: 1式
1) 装荷用キャスク本体	: 1基
① 装荷用キャスク本体	: 1基
② ホルダー	: 9本
2) 駆動機構	: 1式
① 移送装置	: 1基
② 昇降装置	: 1基
③ 回転装置	: 1基
④ ターンテーブル	: 1基
⑤ 反転装置	: 1基
(2) キャスク台座	: 1基
(3) 吊具	: 1基
(4) 制御盤	: 1式
(5) 案内管(既設使用)	: 1式
(6) 垂直照射孔(SI-1孔)(既設使用)	: 1式

高性能シリコン照射装置の配置及び構造概念図を図3.1-1及び図3.1-2に、高性能シリコン照射装置の全体構造図を図3.1-3に示す。また、高性能シリコン照射装置の吊具構造図を図3.1-4に示す。

3.1.2. 設計仕様

高性能シリコン照射装置の設計に必要な主な設計仕様を表3.1-1に示す。

3.1.3. 主な機器仕様

高性能シリコン照射装置の主な機器仕様を以下に示す。なお、案内管及び垂直照射孔(SI-1孔)は既存設備のため省略する。

(1) 名 称	: 高性能シリコン照射装置		
(2) 総重量			
1) 装荷用キャスク	: 約 28.75ton		
2) キャスク台座	: 約 1.1ton	1)+2)=29.85ton	
3) 吊具	: 約 0.8ton	1)+3)=29.55ton	
(3) 装荷用キャスク外形寸法			

1) 外径	: 約 1,600 mm × 1,755 mm
2) 高さ	: 約 2700 mm
(4) 主要材質	
1) 装荷用キャスク本体	
① 装荷用キャスク本体	: SUS304、Pb
② ホルダー	: Al1050
2) 駆動機構	: SUS304、A5052、他
3) キャスク台座	: SUS304
4) 吊具	: SUS304、SS400、S45C
5) 制御盤	: SS400、プラスチック等
6) 収納物	: 高純度単結晶 Si (99.99999999%)

3.1.4. 各機器の概念構造

(1) 装荷用キャスク

1) 装荷用キャスク本体

① 装荷用キャスク本体

装荷用キャスク本体は、鉛遮へいを有する照射物収納容器であり、ホルダー9本をセットするターンテーブル、ホルダーを1本ずつ所定の工程を実行させる昇降、回転、反転装置を組み込む筐体となるものである。遮へい厚さは、遮へい設計により200 mmに決定した。

② ホルダー

ホルダーは、6インチSiを収納して照射するための円筒型容器である。高純度アルミニウム製とし、不純物の放射化を極力避けるものとする。Si及び自重に対して十分な強度を有すると共に、接続アダプターに取り付けられる構造を有し、接続アダプターを経由してアルミリンクチェーンで吊り下げる方式で照射する。これは、自動球心構造となり、さらにパイプ状であるため、完全対象形であり、Siの均一度向上に有効である実績を持つ。内蔵するSiの固定は、上下にある高純度アルミニウム製のインナーリングにより固定する。5インチ(約127 mm)Siは、ホルダー内にパイプスペーサを挿入することで、5インチSiを固定でき、2種類の照射が可能となる。水中から引き上げた際、内部のプール水は、速やかに抜ける構造とした。高性能シリコン照射装置ホルダー構造図を図3.1-5に示す。

接続アダプターは、ホルダーとアルミリンクチェーンとを接続する部品である。接続アダプターとホルダーは、容易に脱着できる構造を有し、昇降中及び回転照射中は外れることのない構造を有している。この接続アダプターには、セラミックボール製のボールベアリングが装備されており、照射物冷却のための流水により接続アダプターが垂直照射孔(SI-1孔)に接触しても安定した回転が得られている実績を持つ。また、駆動装置の回転力をホルダーに伝える機能も有する。強度はSiを入れたホルダーを昇降、回転させるのに十分な強度を有すると同時に、照射位置に降ろされる部分のため、極力少ない材料で、低放射化材を用いている。

2) 駆動機構

駆動機構は、9本連続で所定の照射ができる様に各駆動装置を作動させるもので、ホルダーを案内管まで移動セットさせる移送装置、照射位置まで昇降、回転させる昇降

装置、回転装置及び 9 本のホルダーを順番にターンさせるターンテーブル、反転させるための反転装置で構成される。

昇降ストロークは最大 8m である。昇降スピードは最低 2 段階に分けて決定できるものとし、低速、高速の可変機能を有する機構とした。昇降直後と停止する直前は低速動作とし、その他は高速とする。昇降はオーバーロード及びオフロード検出の時、自動停止する。照射の均一化を行うため、昇降中及び照射中はホルダーを回転させ、回転速度は 2 回転／分とした。

昇降機構に用いる部材はアルミリンクチェーンを使用する。アルミニウム合金は、原子炉内にて照射され放射化する。従って駆動機構は、巻き上げられた部材からの放射線を遮へいするため、必要な遮へいを有する。アルミリンクチェーンは、軽量のためアルミリンクチェーン塊が出来やすいため、山崩し機構等による塊防止対策を講じる。遮へい体内部の点検、調整が容易にできるよう、遮へい体には点検ドアを設けた。

ターンテーブルは、円盤の周辺に 9 本のホルダーをセットし、中心に往復移動が出来る構造である。

反転装置は、照射済 Si を反転する装置であり、ホルダーに内蔵の Si を損傷させないように上下から緩衝材の耐放射線用ゴムによりホルダー内の Si を押さえ込み、ホルダー毎上下反転するためのものである。従来、反転作業は、手動によって実施していた。被ばく低減化及び待機時間を減らすため、自動で反転を行う機構とした。

3) キャスク台座

キャスク台座は、上部遮へい体上に装荷用キャスク本体及び駆動機構を設置するための台座である。ステンレス鋼製とし、装荷用キャスク本体及び駆動機構自重に対して十分な強度を有すると共に、容易に位置合わせが可能な構造とした。

4) 吊具

吊具は、装荷用キャスク及び駆動機構を天井クレーンにて吊上げ移動する吊具である。ステンレス鋼製とし、装荷用キャスク自重に対して十分な吊上げ荷重強度を有する構造とした。

3.1.5. Si 照射の流れ

Si 照射の流れは、ホルダー 9 本に Si を装荷し、連続自動照射を行う。照射の流れは以下に示す通りとする。高性能シリコン照射装置基本照射フローを図 3.1-6 に示す。

- (1) ホルダー 9 本に Si を手動装荷。
- (2) 1 本目 Si 反転前照射開始。
- (3) 1 本目 Si 反転前照射終了。
- (4) 1 本目 Si 冷却。(原子炉プール内：約 20 分)
- (5) 1 本目 Si 装荷用キャスク内戻し。
- (6) 1 本目 Si の自動反転
- (7) 1 本目 Si 反転後照射開始。
- (8) 1 本目 Si 反転後照射終了。
- (9) 1 本目 Si 冷却。(原子炉プール内：約 20 分)
- (10) 1 本目 Si 装荷用キャスク内戻し。
- (11) 2 本目 Si とホルダーカタリ替え
- (12) (2)～(11) 工程を 9 本目まで繰り返し

- (13) 9本目 Si 照射後 48 時間冷却
- (14) 照射済 Si(9本)を手動搬出
- (15) 第2週：(1)～(14)繰り返し
- (16) 第3週：(1)～(14)繰り返し
- (17) 第4週：(1)～(13)繰り返し
- (18) 第5週：照射済 Si(9本)を手動搬出
- (19) 終了

3.2. 構造設計

高性能シリコン照射装置の構造設計は、装荷用キャスク本体の胴部に取り付けられた4カ所の本体吊上用アイプレート及び装荷用キャスク専用の吊具、キャスク台座の吊金具部及びホルダーの強度について、使用材料の機械的性質における評価を行った。以下に評価対象部位を示す。

- (1) 装荷用キャスク本体の吊金具部の強度評価。
- (2) 装荷用キャスクの吊具の強度評価。
- (3) キャスク台座の吊金具部の強度評価
- (4) ホルダーの強度評価。

装荷用キャスク及び吊具構造設計対象図を図3.2-1に示す。

3.2.1. 計算条件

構造設計に使用する主要材料の機械的性質は表3.2-1に示す算出式に表3.2-2に示す降伏点の値を代入して求める。求めた主要材料の許容応力を表3.2-3に示す。

3.2.2. 構造設計結果

構造設計は、上記3.2項(1)～(4)について実施し、いずれも設計基準値を下まわり、十分な強度を有している。計算結果を表3.2-4に示す。また、詳細計算結果を次項に示す。

3.2.2.1. 装荷用キャスク本体の吊金具部の強度評価結果

装荷用キャスク本体の吊金具部に対する強度評価は、外胴の吊金具を介して生ずる引張応力、吊金具部のせん断応力、吊金具溶接部に生ずる曲げ力とせん断力の組合せ応力、吊金具孔部の支圧応力を求め、設計基準値と比較した。各部の応力は、いずれも設計基準値を下まわり、十分な強度を有している。強度評価の詳細モデル図を図3.2-2に示す。

(1) 胴部（図3.2-1のA部及び図3.2-2参照）

外胴については、吊金具を介して生ずる引張応力 σ_t ^⑥を求める。

$$\sigma_t = \frac{W}{A}$$

ここで W：設計重量 2.94×10^5 (N)^{*1}

A：外胴断面積 4.01×10^4 (mm²)

$$\sigma_t = 7.34 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \sigma_{ta} = 68.3 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{SUS304})$$

*1：装荷用キャスク及びキャスク台座の設計重量は、 2.82×10^5 (N) (28.75 ton)であるが、安全側に 2.94×10^5 (N) (30ton)として計算する。

(2) 吊金具（図3.2-1のA部及び図3.2-2参照）

1) a部

a部について、吊具のシャックルを介し生ずるせん断応力 τ ^⑥を求める。

$$\tau = \frac{W'}{2A}$$

ここで W' : 吊金具 1 枚に作用する重量 7.35×10^4 (N)

$$A = L \times t \quad 2,160 (\text{mm}^2)$$

$$\tau = 34.1 (\text{N/mm}^2) < \tau_a = 39.4 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{SUS304})$$

2) b 部 (図 3.2-1 の A 部及び図 3.2-2 参照)

溶接部に生ずる曲げ力とせん断力による組み合せ応力 σ ^⑥を求める。

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_b^2 + \tau_a^2}$$

ここで σ_b : 曲げ応力 $0.35 (\text{N/mm}^2)$

τ_a : せん断応力 $14.0 (\text{N/mm}^2)$

$$\sigma = 14.2 (\text{N/mm}^2) < 0.8 \sigma_{ta} = 0.8 \times 68.3 (\text{N/mm}^2) = 54.6 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{SUS304})$$

3) c 部 (図 3.2-1 の A 部及び図 3.2-2 参照)

溶接部に生ずる曲げ力とせん断力による組み合せ応力 σ を求める。

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_b^2 + \tau_a^2}$$

ここで σ_b : 曲げ応力 $38.4 (\text{N/mm}^2)$

τ_a : せん断応力 $15.4 (\text{N/mm}^2)$

$$\sigma = 43.9 (\text{N/mm}^2) < 0.8 \sigma_{ta} = 0.8 \times 68.3 (\text{N/mm}^2) = 54.6 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{SUS304})$$

4) 吊金具孔部の支圧応力 (d 部) (図 3.2-1 の A 部及び図 3.2-2 参照)

吊金具孔には吊具シャックルピンによるピンの接触部に生ずる支圧応力 σ_p を求め る。

$$\sigma_p = \frac{P}{A_p}$$

ここで P : 圧縮力 $W = 7.35 \times 10^4$ (N)

A_p : 接触部の断面積 $2,760 (\text{mm}^2)$

$$\sigma_p = 26.7 (\text{N/mm}^2) < \sigma_{da} = 95.6 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{SUS304})$$

3.2.2.2. 装荷用キャスクの吊具の強度評価結果

装荷用キャスクの吊具の強度評価は、クレーンフック取付用ピンに生ずる曲げ力とせん断力の組合せ応力、ピン取付プレートのせん断応力、ピン取付プレート取付溶接部に生ずる引張応力を求める。さらに、吊具のアームについて、曲げ力とせん断力の組合せ応力、アーム先端部のせん断応力、アーム孔部の支圧応力、アーム先端ボス部の曲げ力とせん断力の組合せ応力、吊り機構については、長さ調整用アイボルトねじ部の引張応力、その他

の吊具のシャックル及びチェーンスリングの保証荷重を求め設計基準値と比較した。各部の応力は、いずれも設計基準値を下まわり、十分な強度を有している。強度評価の各部詳細モデル図を図 3.2・3～図 3.2・8 に示す。

(1) クレーンフック取付用ピン (図 3.2・1 の B 部及び図 3.2・3 参照)

装荷用キャスクの吊上時に、ピンに、曲げ力とせん断力により生じる組合せ応力 σ を求める。

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_b^2 + \tau_a^2}$$

ここで σ_b : 曲げ応力 99.0 (N/mm²)

τ_a : せん断応力 25.9 (N/mm²)

$$\sigma = 106 (\text{N/mm}^2) < \sigma_{ta} = 115 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{S45C})$$

(2) ピン取付プレート

1) プレートの孔部 (図 3.2・1 の B 部及び図 3.2・4 参照)

ピンを介して生ずるプレートのせん断応力 τ を求める。

$$\tau = \frac{W''}{A}$$

ここで W'' : プレート 1 枚に働くせん断力 7.35×10^4 (N)

A : プレートのせん断面積 1,809 (mm)

$$\tau = 40.7 (\text{N/mm}^2) < \tau_a = 45.2 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{SS400})$$

2) ピン取付プレート取付溶接部 (図 3.2・1 の B 部及び図 3.2・4 参照)

ピン取付プレートと台盤の取付溶接部に生ずる引張応力 σ_t ^⑦を求める。

$$\sigma_t = \frac{0.707W}{2h\ell} + \frac{W}{2 \times 2h_1\ell}$$

ここで W : 装荷用キャスクの重量 2.94×10^5 (N)

h : すみ肉溶接のサイズ 10 (mm)

h_1 : 開先の深さ 12 (mm)

ℓ : 溶接有効の長さ 480 (mm)

$$\sigma_t = 34.5 (\text{N/mm}^2) < 0.8 \tau_a = 0.8 \times 45.2 = 36.1 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{SS400})$$

3) アーム

アームは、ピン取付プレート、台盤及び主軸を含む、中央部の剛性の高い構造物に取付けられていることから、ここではアーム単独の強度評価を行う。

①アーム (図 3.2・1 の C 部及び図 3.2・4 参照)

アームに働く負荷により生ずる曲げ及びせん断応力の組合せ応力 σ を求める。

$$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$$

ここで σ_b : 曲げ応力 68.6 (N/mm²)

τ_a : せん断応力 4.23 (N/mm²)

$$\sigma = 68.9 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \sigma_{ta} = 71.6 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{SS400})$$

② アーム (図 3.2-1 の C 部及び図 3.2-4 参照)

アームに働く負荷により生ずる曲げ及びせん断応力の組合せ応力 σ を求める。

$$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$$

ここで σ_b : 曲げ応力 18.4 (N/mm²)

τ_a : せん断応力 6.13 (N/mm²)

$$\sigma = 20.3 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \sigma_{ta} = 71.6 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{SS400})$$

③ アーム先端部 (孔部) (図 3.2-1 の C 部及び図 3.2-4 参照)

装荷用キャスクを吊り上げることでシャックルを介して、アーム先端部の孔部に生ずるせん断応力 τ を求める。

$$\tau = \frac{W'}{2A}$$

ここで W' : アーム 1 本当たりの荷重 7.35 × 10⁴ (N)

A : せん断面積 1,560 (mm²)

$$\tau = 23.6 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \tau_a = 41.3 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{SS400})$$

④ アーム孔部の支圧応力 (図 3.2-1 の C 部及び図 3.2-5 参照)

アーム孔には吊具アーム部のシャックルピンによるピンの接触部に生じる支圧応力 σ_p を求める。

$$\sigma_p = \frac{P}{A_p}$$

ここで P : 圧縮力 $W' = 7.35 \times 10^4$ (N)

A_p : 接触部の断面積 2,760 (mm²)

$$\sigma_p = 27.6 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \sigma_{da} = 100 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{SS400})$$

⑤ アーム先端ボス部 (図 3.2-1 の D 部及び図 3.2-6 参照)

4 本のアームの内、2 本のアームの先端には、吊り機構用の接続用の為のボスが取り付けられている。このボス取付部に吊り負荷により生ずる曲げとせん断の組合せ応力 σ を求める。

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_b^2 + \tau_a^2}$$

ここで σ_b : 曲げ応力 ⁶⁾

$$\sigma_b = \frac{4.24M}{h\ell^2} + \frac{3M}{h_1\ell^2} = 68.3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

M : 曲げモーメント $4.60 \times 10^6 \text{ (N}\cdot\text{mm)}$

h : すみ肉溶接サイズ 15 (mm)

h_1 : 開先深さ 18 (mm)

ℓ : 溶接長さ 180 (mm)

τ_a : せん断応力 30.6 (N/mm²)

$$\sigma = 76.1 \text{ (N/mm}^2\text{)} < 0.8 \tau_a = 0.8 \times 100 = 80.0 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (SS400)}$$

4) 吊り機構

① 長さ調整用アイボルト (図 3.2-1 の E 部及び図 3.2-7 参照)

ねじ部には、吊り時の負荷による、引張応力 σ_t を求める。

$$\sigma_t = \frac{W}{A}$$

ここで W : 吊金具 1 枚に作用する重量 $7.35 \times 10^4 \text{ (N)}$

A : ねじ部の最小断面積 (M64) $2,596 \text{ (mm}^2\text{)}$

$$\sigma_t = 28.4 \text{ (N/mm}^2\text{)} < \sigma_{ta} = 115 \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{ (S45C)}$$

② その他の吊り機構品 (図 3.2-1 の E 部及び図 3.2-8 参照)

その他の機構品には、市販品のシャックル(ピン付)及びチェーンスリングを使用する。シャックル及びチェーンスリングの保証荷重は 118 (kN) 及び 122.5 (kN) であり、使用荷重の 73.5 (kN) を上回るため健全である。

3.2.2.3. キャスク台座の吊金具部の強度評価結果 (図 3.2-1 の F 部及び図 3.2-9 参照)

キャスク台座の吊り上げは、吊り上げ時にキャスク台座に取り付ける 4 本のアイボルト (M24) により行う。JIS B1168において、M24 のアイボルト使用荷重は 9.32kN であり、吊り上げ角度 (θ) が 45° の場合の使用荷重は 2 本のアイボルトにつき 9.32kN である。キャスク台座の吊り上げは、4 本のアイボルトにより $\theta = 45^\circ$ 以上で行うが、保守側に $\theta = 45^\circ$ の場合の使用荷重を設計基準値とする。強度評価の各部詳細モデル図を図 3.2-9 に示す。

強度評価の結果、キャスク台座の設計負荷荷重は 10.6 kN であり、アイボルト 2 本あたり 5.3 kN である。従って、設計基準値 9.32 (kN) > 設計負荷荷重 5.3 (kN) となり、キャスク台座吊金具部は健全である。

3.2.2.4. ホルダーの強度評価結果

ホルダーの強度評価は、ホルダーの昇降及び回転並びに反転時にかかる負荷に対する

る強度評価を行った。ホルダーの昇降及び軸方向回転は、ピンで接続アダプターと接続している。そのピンに対するせん断応力を求め、設計基準値と比較した。ピンのせん断応力は、設計基準値を下まわり、十分な強度を有している。強度評価のモデル図を図 3.2-10 に示す。

ホルダーの反転時においては、図 3.2-11 に示すとおり Si を軸方向に直接押さえ込む構造となっている。また、押さえ込み先端部には耐放射線用ゴム材を設けることにより、荷重を吸収する構造となっており、ホルダーに負荷がかかることはなく、Si についても著しい負荷がかかることはない。そのため、ホルダー及び Si は反転時においても健全である。

(1) 昇降時及び回転時 (図 3.2-10 参照)

ホルダーの昇降及び軸方向回転は、ホルダーと接続アダプターをピンで接続して行う。ピンを介し生ずるせん断応力 (τ) を求める。

$$\tau = \frac{W'}{2A}$$

ここで W' : ピン取付部 1箇所に作用する重量 $9.00 \times 10^1 (\text{N})$

$$A = 42 (\text{mm}^2)$$

$$\tau = 2.15 (\text{N/mm}^2) < \tau_a = 3.84 (\text{N/mm}^2) \quad (\text{A1050})$$

(2) 反転時 (図 3.2-11 参照)

ホルダーの反転時における Si の固定は、ホルダーの上下から Si を耐放射線用ゴム材を緩衝材として直接押さえ込む構造となっている。反転時は、ホルダーに負荷がかかることはなく、Si についても著しい負荷がかかることはない。そのため、ホルダー及び Si は回転・反転時においても健全である。

3.3. 遮へい設計

高性能シリコン照射装置の遮へい設計は、装荷用キャスクにホルダー、アルミリンクチェーン等放射化物を内蔵したときの装荷用キャスク外表面での線量当量率の計算を行う。また、上部遮へい体に対する遮へい線源は炉心部の線源であり、シリコン照射装置の製作時に解析済である。従って、上部遮へい体透過後の線量当量率を加算する事により装荷用キャスク外表面への評価を行う。評価に用いた線源強度は、燃焼計算コード ORIGEN79⁸⁾で計算した。線量当量率計算は、3次元点減衰核積分法に基づく QAD-CGGP2⁹⁾コードを用いて行った。

炉心からの線源は、炉心上部に原子炉プール水及び上部遮へい体を配置した2次元円柱状の体型でDOT3.5¹⁰⁾で計算した既存設備改造時の評価結果を用いているため、ここでは省略する。

3.3.1. 線源計算

装荷用キャスクに収納される線源（原子炉内の照射により放射化するもの。）は、以下の4種類がある。

- (1) ホルダー [材質：純アルミニウム (A1050)]
- (2) アルミリンクチェーン [材質：アルミニウム合金 (A5052)]
- (3) 接続アダプター [材質：純アルミニウム (A1050) 及びアルミニウム合金(A5052)]
- (4) Si 単結晶 [Si 純度 : 99.99999999%]

これらのうち、Si 単結晶の線源強度は、同一条件で照射されるホルダーによる線源強度と比較して無視できるため省略する。これらの炉心内照射時のモデルを図 3.3-1 に示す。以下に、ホルダー、アルミリンクチェーン及び接続アダプターの線源計算について示す。評価は、燃焼計算コード ORIGEN79 を用いて行う。

(1) ホルダー

ホルダーは全部で9本あり、ホルダー1本あたりの照射条件は、2.3.2 遮へい設計に記述した設計条件に示す条件とした。ホルダーは1年間(7サイクル)継続使用するため、過去の照射履歴による線源強度への影響を考慮する設計とした。

遮へい計算は、最も厳しい条件として装荷用キャスク内に原子炉で照射されたホルダーが9本収納された状態について行う。

ホルダーは、装荷用キャスクから1本ずつ原子炉内に取り出して照射を行う。このため、各ホルダーが照射されてから9本目のホルダーが原子炉から取り出され装荷用キャスク内に収納されるまでの時間（冷却時間）は各々異なる。

9本のホルダーの照射が完了するまでの各々のホルダーの実質的な冷却時間は図 3.3-2 に示す。

1) 照射場

- | | |
|----------|---|
| 最大熱中性子束 | : $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ |
| 最大高速中性子束 | : $1.3 \times 10^{15} \text{ m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ |

2) 照射時間

1 照射あたり 10 時間 (600 分) : 5 時間 × 2 (反転前照射・反転後照射)

3) 冷却時間

反転前及び反転後照射終了後、そのつど原子炉プール内で 20 分の冷却を行う。

評価は、反転前、反転後の照射を連続して行い、その後 40 分間の冷却を行うものとする（原子炉で照射後、装荷用キャスクに収納するまでの冷却時間）。

遮へい計算は、最も厳しい条件として装荷用キャスク内に原子炉で照射されたホルダーが 9 本収納された状態について行う。

ホルダーは、装荷用キャスクから 1 本ずつ原子炉内に装荷して照射を行う。このため、各ホルダーが照射されてから 9 本目のホルダーが原子炉から取り出されキャスク内に収納されるまでの時間（冷却時間）は各々異なる。

9 本のホルダーの照射が完了するまでの各々のホルダーの実質的な冷却時間を図 3.3-2 に示す。

4) 計算条件

各ホルダーの照射時間は、1 サイクルあたり最大 10 時間を 4 週間分とし、40 時間照射を 7 サイクル連続（280 時間連続照射）に行うものとし、ホルダーの冷却時間は図 3.3-2 に示す値を用いるものとする。ホルダーの蓄積照射は、図 2.3-1 に示す照射パターンによる照射を年間 7 サイクル連続で行うものとする。

評価は、1 年間において、ホルダー 1 本あたりの照射は、連続して 10 時間 × 4 週間分 × 7 サイクル = 280 時間（16,800 分）行うものとして評価する。

また、ホルダー毎の冷却時間は図 3.3-2 に、9 本のホルダー（No.1～No.9）毎の照射時間及び冷却時間は表 3.3-1 に示す。

5) 組成

組成は、純アルミニウム（A1050）のミルシートを参考に、Fe 及び Ti については JIS 規格値とし、その他の元素については保守的計算のため、JIS 規格値の 1/2 とする。また、Co については、既設の場合と同様の値を用いる。純アルミニウム（A1050）組成表を表 3.3-2 に示す。

6) 結果

線源強度は、以上の条件を用いて燃焼計算コード「ORIGEN79」により求めた。純アルミニウム（A1050）1g の場合について計算を行った結果を表 3.3-3 に示す。また、ORIGEN79 のエネルギー群構造を表 3.3-4 に示す。

(2) アルミリンクチェーン

アルミリンクチェーンの照射条件を、以下に示す。

1) 照射場

炉心各位置（炉心中心から上方 50cm 以下）の位置における熱及び高速中性子束は、シリコン照射装置遮へい設計書から読み取ったものである。熱中性子束の相対値から絶対値への換算結果は表 3.3-5 に示す。

アルミリンクチェーンの炉内での各位置における計算に用いる熱及び高速中性子束を図 3.3-3 に示す。

2) 照射時間

1 サイクル 10 時間×36 週間分照射を 7 サイクル連続に行うものとする。
(2,520 時間連続照射)。

3) 冷却時間

2,520 時間連続照射後、40 分の冷却時間を考慮する。

4) 組成

組成は、アルミニウム合金 (A5052) のミルシートを参考に、Fe 及び Mg については JIS 規格値とし、Mn についてはミルシート記載値に対する余裕を考慮し 0.02%とする。その他の元素については保守的計算のため、JIS 規格値の 1/2 とする。また、Co については、既設の場合と同様の値を用いる。アルミニウム合金 (A5052) 組成表を表 3.3-6 に示す。

5) 結果

線源強度は、以上の条件を用いて燃焼計算コード「ORIGEN79」により求めた。アルミニウム合金 (A5052) 1g の場合について計算を行った結果を表 3.3-7 に示す。

(3) 接続アダプター

接続アダプターは、ホルダーとアルミリンクチェーンとを接続するためのものでありアルミリンクチェーンと常時一体物として扱われる。接続アダプターの照射条件を、以下に示す。

1) 照射場

接続アダプターの炉内での位置はアルミリンクチェーンの下端位置と同等であるため、アルミリンクチェーンの下端位置で用いた熱及び高速中性子束を計算に用いる。

炉心中心位置から上方 0.5m の位置

熱中性子束 : $9 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$

高速中性子束 : $1.4 \times 10^{14} \text{ m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$

2) 照射時間

1 サイクル 10 時間×36 週間分照射を 7 サイクル連続に行うものとする。
(2,520 時間連続照射)。

3) 冷却時間

2,520 時間連続照射後、40 分の冷却時間を考慮する。

4) 組成

接続アダプターの材質は、ホルダー (A1050) 及びアルミリンクチェーン (A5052) と同じであるため組成も同等とする。純アルミニウム (A1050) 組成表を表 3.3-2 に、アルミニウム合金 (A5052) 組成表を表 3.3-6 示す。

5) 結果

線源強度は、以上の条件を用いて燃焼計算コード「ORIGEN79」により求めた。アルミニウム (A1050 及び A5052) 1g の場合について計算を行った結果を、表 3.3-8 及び表 3.3-9 に示す。

3.3.2. 線源仕様及び計算モデル

3.3.2.1. 線源仕様

3.3.1 線源計算で求めた線源強度を用いて、遮へい計算を行う。遮へい計算に使用する線源仕様を以下に示す。

1) ホルダー

ホルダーは装荷用キャスク内に9本収納され、各々の照射終了後の線源強度は、表3.3-3に示すとおり、冷却時間の異なる9種類である。

本計算では、安全側の評価としてホルダー1本に9本分の線源強度を有するものとして評価を行う。線源強度を表3.3-10に示す。

2) アルミリンクチェーン

アルミリンクチェーンの各位置における線源強度は表3.3-5に示すとおりである。本計算では、アルミリンクチェーンを以下の3つの領域に分割して計算に用いる。各々の線源強度を表3.3-11に示す。

- ・アルミリンクチェーン下端から50cmの領域
- ・アルミリンクチェーン下端50cmから100cmの領域
- ・アルミリンクチェーン下端100cmから550cmの領域

3) 接続アダプター

接続アダプターの線源強度は、表3.3-8及び表3.3-9に示すとおりである。本計算で用いる線源強度を表3.3-12に示す。

3.3.2.2. 計算モデル

本計算は、装荷用キャスク本体部とアルミリンクチェーン収納部との2ケースの計算モデルを用いて行う。

1) 装荷用キャスク本体部

装荷用キャスク本体部は、接続アダプターを外した状態のホルダーを装荷用キャスク内に収納した状態をモデル化したものである。計算モデルを図3.3-4に示す。

2) アルミリンクチェーン収納部

アルミリンクチェーン収納部は、アルミリンクチェーンを昇降装置で巻き上げた状態をモデル化したものであり、ホルダーからの線量当量率の寄与も考慮に入れる。本計算で用いた計算モデルを図3.3-5に示す。

線源のモデル化を図3.3-6に示す。線源は、S1～S5までの5つにモデル化を行う。各々のモデル化の対象を以下に示す。

- S1：アルミリンクチェーン下端50cmの領域
- S2：アルミリンクチェーン下端50cmから100cmの領域
- S3：アルミリンクチェーン下端100cmから550cmの領域
- S4：接続アダプター部
- S5：ホルダー部

3.3.2.3. 計算モデル各領域の密度

計算モデルの各領域の密度を以下に示す。なお、アルミニウムの密度は、裕度を考慮し $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の値を用いる。

- ・アルミニウム : $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- ・鉄 : $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- ・鉛 : $11.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- ・Si : $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

3.3.2.4. 計算に用いるビルドアップ係数

本計算には、鉛のビルドアップ係数を用いる。

3.3.3. 遮へい設計計算結果

遮へい計算は、線源となるホルダー（9本）、接続アダプター及びアルミリンクチェーンを装荷用キャスク内に収納した場合に、装荷用キャスク表面において線量当量率が $60 \mu \text{Sv/h}$ 以下となることを示す。

線量当量率の計算は、点減衰核積分法に基づく QAD-CGGP2 コードを用いて 3.3.2.2 項に記載した計算モデルを用いて線量当量率を求めた。

計算結果は、装荷用キャスク本体部の計算結果を図 3.3-7 及び表-3.3-13 に示す。また、装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算結果を図 3.3-8 及び表-3.3-14 に示す。

これらの結果から、装荷用キャスク表面での線量当量率は、装荷用キャスク本体部の最大値で Da3 位置において $34.9 \mu \text{Sv/h}$ 、装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部の最大値で Db12 位置において $54.4 \mu \text{Sv/h}$ であり、いずれも基準値 ($60 \mu \text{Sv/h}$ 以下) を満足している。

3.4. 耐震設計

高性能シリコン照射装置の耐震設計は、(1)装荷用キャスクの固有周期及び(2)装荷用キャスクの転倒並びに(3)キャスク台座の位置決めリングのせん断応力について評価を行う。なお、装荷用キャスクを仮置き場に移動して設置する場合、キャスク台座を使用するものとする。

3.4.1. 計算条件

- (1) 耐震設計上の重要度分類はクラス B とする。
- (2) 装荷用キャスクの重量は、重心位置に集中したものとする。
- (3) 装荷用キャスクは、キャスク台座によって上部遮へい体上に設置する。装荷用キャスク、キャスク台座及び上部遮へい体は、それぞれ位置決めリング(1)、(2)によって連結する。位置決めリング(1)、(2)は同一形状であるため応力計算は位置決めリング(1)により行う。
- (4) 地震力は水平方向から作用するものとし、鉛直方向の地震力は考慮しないものとする。
- (5) 本計算に使用する位置決めリング (SUS304) の室温における設計降伏点 : F は 205(N/mm²)¹¹⁾である。

3.4.2. 耐震設計計算結果

耐震設計は、上記 3.4 項(1)～(3)について実施し、いずれも設計基準値を下まわり、十分な強度を有している。計算結果を表 3.4-1 に示す。また、詳細計算結果を次項に示す。

3.4.2.1. 装荷用キャスクの固有周期の評価結果

装荷用キャスクは、構造的に 1 個の大きなブロック状をしており、重心位置がブロックのほぼ中心にあり全体的に 1 つの剛体である。従って、固有周期は十分に小さく計算は省略する。

装荷用キャスクを両端自由支持のはりとして考え固有振動数を計算し、剛体であることを示す。固有周期計算モデルを図 3.4-1 に示す。装荷用キャスクを円筒形状に近似し単純両端支持はりとして考えると、固有振動数(f_n)は、次式¹²⁾で表される。

$$f_n = Cn \sqrt{\frac{E \cdot I}{\gamma \cdot A \cdot l^4}} \quad (\text{Hz})$$

ここで、

Cn : n 次モードによる係数

$$Cn = n^2 \times \frac{\pi}{2}$$

E : 外胴 (SUS304) の縦弾性係数 1.95×10^5 (N/mm²)
I : 円筒部の断面二次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{\pi}{64} (d_0^4 - d_1^4) \quad (\text{mm})$$

d_0 : 外胴の外径 1,430 (mm)

d_1 : 外胴の内径 1,412 (mm)

$$I = \frac{\pi}{64} (1,430^4 - 1,412^4) \\ = 1.01 \times 10^{10} \quad (\text{mm}^4)$$

A : 断面積

$$A = \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_1^2) \\ = \frac{\pi}{4} (1,430^2 - 1,412^2) \\ = 4.02 \times 10^4 \quad (\text{mm}^2)$$

γ : 質量密度 (N/mm⁴·sec²)

$$\gamma = \frac{W}{A \cdot \ell} \cdot \frac{1}{g}$$

W : 装荷用キャスクの重量 2.94 × 10⁵ (N)

ℓ : 装荷用キャスクの全長 1,590 (mm)

g : 重力加速度 9.807 × 10³ (mm⁴/sec²)

$$\gamma = \frac{2.94 \times 10^5}{4.02 \times 10^4 \times 1,590} \times \frac{1}{9.807 \times 10^3} \\ = 4.69 \times 10^{-7} \quad (\text{N/mm}^4 \cdot \text{sec}^2)$$

である。これらの数値を代入すると、

$$f_n = Cn \sqrt{\frac{1.95 \times 10^5 \times 1.01 \times 10^{10}}{4.69 \times 10^{-7} \times 4.02 \times 10^4 \times 1,590^4}}$$

$$= 128Cn \text{ (Hz)}$$

となる。

従って、1次モードの場合、上記式に $C_1 = \pi/2$ を代入すると、固有振動数 f_1 は約 201 (Hz) であり、基準値である 20 (Hz)¹³⁾以上であり、高性能シリコン照射装置は剛構造である。

3.4.2.2. 装荷用キャスクの転倒評価結果

装荷用キャスクを床面に設置した状態の評価を行うものとする。転倒評価モデルを図 3.4-2 に示す。

1) 装荷用キャスクの安定度

① 装荷用キャスクの転倒モーメント

装荷用キャスクに作用する転倒モーメントは、次式^⑥で表される。

$$M_1 = C_H \cdot W_1 \cdot L \quad (\text{N} \cdot \text{mm})$$

ここで、

$$C_H : \text{水平方向震度} \quad 0.41$$

$$W_1 : \text{装荷用キャスクの重量} \quad 2.94 \times 10^5 \text{ (N)}$$

$$L : \text{装荷用キャスクの重心距離} \quad 1,321 \quad (\text{mm})$$

$$M_1 = 0.41 \times 2.94 \times 10^5 \times 1,321$$

$$= 1.60 \times 10^8 \quad (\text{N} \cdot \text{mm})$$

② 装荷用キャスクの安定モーメント

装荷用キャスクに作用する安定モーメントは、次式で表される。

$$M_S = W_1 \cdot \frac{d}{2}$$

ここで、

$$d : \text{装荷用キャスク本体の底面の直径} \quad 1,520 \quad (\text{mm})$$

$$M_S = 2.94 \times 10^5 \times \frac{1,520}{2}$$

$$= 2.23 \times 10^8 \quad (\text{N} \cdot \text{mm})$$

転倒モーメントと安定モーメントにより、安定度(S)は次式で表される。

$$S = \frac{M_S}{M_1}$$

$$= \frac{2.23 \times 10^8}{1.60 \times 10^8}$$

$$= 1.39$$

この結果、安定度は 1 以上となり、装荷用キャスクは転倒することはない。

2) キャスク台座の位置決めリングのせん断応力評価

位置決めリング計算モデルを図 3.4-3 に示す。

位置決めリングに生じるせん断応力 τ は次式^⑥で求められる。

$$\tau = \frac{G \cdot W_1}{A}$$

ここで、

$$G : \text{水平方向震度} \quad 0.41$$

$$W_1 : \text{装荷用キャスクの重量} \quad 2.94 \times 10^5 \text{ (N)}$$

$$A : \text{位置決めリングのせん断部の断面積}$$

$$A = \frac{\pi \times (289^2 - 190^2)}{4}$$

$$= 3.72 \times 10^4 \quad (\text{mm}^2)$$

$$\tau = \frac{0.41 \times 2.94 \times 10^5}{3.72 \times 10^4}$$

$$= 3.24 \quad (\text{N/mm}^2)$$

位置決めリングの許容せん断応力は、次式¹¹⁾で求められる。

$$1.5 \left(\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \right) \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$= 118 \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここで、

F : SUS304 の降伏応力 : 205(N/mm²)

$$\tau = 3.24 \quad (\text{N/mm}^2) < \text{許容せん断応力 } 118 \quad (\text{N/mm}^2)$$

この結果、位置決めリングのせん断応力は許容せん断応力に比べ十分に小さい値である。

4 結 言

概念設計は、JRR-3 を用いた NTD-Si 照射の増産に向けた技術的開発の一環として進めている高性能シリコン照射装置の製作に対して実施したものである。

概念設計は、構造設計、遮へい設計及び耐震設計を行い、NTD-Si 照射の増産及び安定供給が出来る装置設計の安全性並びに耐久性を確認するものである。設計方針を満足するホルダーの反転前照射、反転後照射の自動化、待機時間を大幅に短縮できる高性能シリコン照射装置を設計した。ホルダーの反転前照射、反転後照射の自動化は、既設の手作業を自動化する機構であり、これを改善することにより、現場での作業労力を減らすことができ、大幅な外部被ばくの低減が図れる。

構造設計では、NTD-Si 照射増産の重要なポイントとなる、ホルダー反転機構、連続照射機構、Si の損傷防止機構等の自動化装置の設計を行った。特に、ホルダー反転機構及び Si の損傷防止機構の設計では、ホルダーの上下にインナーリングをセットすることにより内蔵 Si を固定する構造とし、更にホルダー反転機構では、インナーリングの内側から耐放射線用ゴムの緩衝材により内蔵 Si を上下から押さえ込む構造とした。この構造設計により、待機時間を大幅に短縮でき、Si の連続照射が可能となった。構造設計に伴う装荷用キャスク吊金具、吊具及びホルダーの強度評価を行った結果、各部の応力は、いずれも設計基準値を下まわり、十分な強度を有していることを確認した。

遮へい設計では、装荷用キャスク及びキャスク台座の遮へい性能が要求される箇所について、遮へい計算を実施し、実効線量率が所定の基準を満足するような遮へい能力を有する構造とした設計を行った。計算の結果、装荷用キャスクのいずれの面においても $60 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下であることを確認した。

耐震設計では、装荷用キャスク及びキャスク台座の転倒及びキャスク台座リングの応力を評価した。いずれも所定の基準を満足していることを確認した。

概念設計の結果、シリコン照射装置の操作機能を全自動化した装置の概念設計を行い機能及び構造の安全性並びに耐久性を確認した。概念設計では、1週間あたり 9 本の照射を設計し、土曜日及び日曜日は冷却に充てた。実用機製作時の詳細設計では、土曜日及び日曜日も照射する 4 週間連続照射の設計により、約 2.7 倍の NTD-Si 照射量の増産が可能となることが証明できた。

謝 辞

本高性能シリコン照射装置の概念設計にあたって、データの取得等にご協力くださった木村化工機株式会社の嶽徳夫氏、今井英之氏に感謝いたします。また、本報告書をまとまるにあたり、貴重なご助言を頂きました NSRR 管理課の吉永真希夫氏、総合的にご協力いただいた研究炉利用課 JRR-3 利用係の皆様、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堀口洋二、梅井弘：JAERI-M86-002「中性子照射によるシリコンドーピング」
- 2) NTD 技術検討会：JAEA-Review 2005-006「研究炉等（JRR-3, JRR-4andJMTR）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」
- 3) 伊藤辰夫、戸田真人：シリコンの中性子照射ドーピング、放射線と産業No.64 1994年
- 4) 日本原子力研究所 東海研究所 研究炉部：「研究炉利用ハンドブック（改訂第2版）」
1999年3月
- 5) 溝口勲夫：核燃料輸送工学、日刊工業新聞社
- 6) 大西清：JISにもとづく機械設計製図便覧、理工学社
- 7) 渡辺正紀：溶接設計と管理、オーム社
- 8) ORNL：“ORIGEN-79 - Isotope Generation and Depletion Code- Matrix Exponential Method”，
- 9) 日本原子力研究所：JAERI-M 90-110 QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSIONS OF QAD-CGGP AND G33-GP, July 1990
- 10) Rhoades,W.A., "Mynatt,F.R.,” The DOT-III Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code, "ORNL-TM-4280(1973) ; RSIC Computer Code Collection CCC-276/DOT-3.5 等
- 11) 通商産業省資源エネルギー庁：解説 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準、(株)
電力新報社、(1994)
- 12) 津村利光：強度設計データブック、裳華房(1973年)
- 13) 社団法人 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987

表 1.1-1 均一照射設備の比較構成表

設備名	均一照射設備		
名称 構成物	既設	新設	
	シリコン照射装置	高性能シリコン照射装置	
(1)	装荷用キャスク本体 1) 装荷用キャスク本体 2) ホルダー	装荷用キャスク 駆動機構 1) 昇降装置 2) 回転装置	装荷用キャスク本体 1) 装荷用キャスク本体 2) ホルダー
(2)			駆動機構 1) 移送装置 2) 昇降装置 3) 回転装置 4) ターンテーブル 5) 反転装置
(3)	キャスク台座	キャスク台座	
(4)	吊 具	吊 具	
(5)	制御盤	制御盤	
(6)	案内管	案内管 (既設)	
(7)	垂直照射孔 (SI-1 孔)	垂直照射孔 (SI-1 孔) (既設)	

表 2.1-1 シリコン照射装置と高性能シリコン照射装置の機能比較表

機能	設備名	シリコン 照射装置	参考図 図 2.1-1	高性能シリコン 照射装置	機構	参考図 図 2.1-2
1.連続照射可能本数	1/2 本*	—	—	9 本	—	—
2.Si の装荷	手動	図内番号 1	—	手動	—	図内番号 1
3. 反 転 前 照 射	照射位置セット	手動	図内番号 2	自動	移送装置 ターンテ ーブル	図内番号 2
	接続アダプター セット	手動		自動	移送装置 昇降・回転 装置	図内番号 3
	下降	自動	図内番号 3	自動	昇降・回転 装置	
	照射開始、回転、 照射終了	自動		自動	昇降・回転 装置	
	一次冷却 (20 分)	自動		自動	昇降・回転 装置	
	上昇	自動	図内番号 4	自動	昇降・回転 装置	
	Si 及びホルダーの放 射能減衰待機時間	約 48 時間		なし	—	
	反転	手動	—	自動	移送装置 反転装置	図内番号 4
4.反転後照射	上記 3.の 繰り返し	図内番号 5～7	—	上記 3.の 繰り返し	—	図内番号 5, 6
5.照射済 Si の取り出し	手動	図内番号 8	—	手動	—	図内番号 7

* : 1 本の定義は、反転前照射、反転後照射各 1 回の照射本数とする。

表 2.3-1 構造設計条件

名称	項目	設計条件
高 性 能 シ リ コ ン 照 射 装 置	使用温度	常温(40°C以下)
	最高圧力	0.1MPa (水深約 6.5m)
	γ線量率	4.4×10^5 (Sv/h)
	最大高さ	FL+約 2,800 mm
	最大外径	φ 1,600 mm
	最大照射物寸法	直径：157.5 mm、長さ：700 mm
	照射物	高純度単結晶 Si
吊具	吊上荷重	2.94×10^5 (N)

表 2.3-2 遮へい設計条件

名称	項目	設計条件	
高性能シリコン照射装置 装荷用キャスク	線源	最大熱中性子束	3×10^{17} ($\text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)
		最大高速中性子束	1.3×10^{15} ($\text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)
		γ 線量率	4.4×10^5 (Sv/h)
		ホルダー材質①	A1050 (99.50%Al、不純物の Ga 含有量 : 100~200ppm)
		ホルダー材質②	高純度 Al (99.99%Al、不純物の Ga 含有量 : 20~50ppm)
		アルミリンクチェーン材質	Al 合金 A5052
		接続アダプター材質	Al 合金 A5052
		高純度単結晶シリコン純度	99.99999999 (%)
	線源形状	ホルダー	$\phi 161$ (外径) $\times 4.25$ (板厚) \times 約 840(長さ) (mm)
		高純度単結晶シリコ	直径 : 157.5 mm、長さ : 700 mm
	最大照射物寸法		直径 : 157.5 mm、長さ : 700 mm
	照射物		高純度単結晶 Si
	最小照射時間 (反転前、反転後)	1 照射あたり 30 分	
	標準照射時間 (反転前、反転後)	1 照射あたり 270 分	
	最大照射時間 (反転前、反転後)	1 照射あたり 600 分	
冷却時間	反転前、反転後照射直後	20 分(案内管内)	
	20 分冷却終了後	48 時間/本(装荷用キャスク内)	
	基準線量当量率 (照射物を含むキャスク外表面)	$60 \mu \text{Sv}/\text{h}$ 以下	

表 3.1-1 高性能シリコン照射装置の設計仕様

名称		主要寸法(mm)	重量	主要材料	基数
高性能シリコン照射装置	装荷用キャスク	装荷用キャスク本体	幅：約 1,480 長さ：約 1,755 高さ：約 1,681	SUS304 遮へい材：Pb	1 基
		ホルダー	外径：約 160 長さ：約 840	A1050	9 本
		駆動機構	幅：約 1,000 長さ：約 1,050 高さ：約 975	SUS304、A5052 他	1 基
	キャスク台座	幅：約 1,610 長さ：約 1,885 高さ：約 50	約 1.1 ton	SUS304	1 基
	吊具	外径：約 1,930 高さ：約 2,845	約 0.8ton	SUS304、 SS400、S45C	1 基
収納物	高純度単結晶シリコン	6 インチ 1 本あたり： 約 ϕ 153 mm × 約 700 mm	約 30 kg	Si： 99.99999999 (%)	9 本

表 3.2-1 許容応力値算出方法一覧表

応力の種類	応力記号	算出方法
鋼材の降伏点(N/mm ²)	σ_s	—
許容引張応力(N/mm ²)	σ_{ta}	$\frac{\sigma_s}{1.5} \times \alpha$
許容圧縮応力(N/mm ²)	σ_{ca}	$\frac{\sigma_s}{1.5} \times \alpha$
許容せん断応力(N/mm ²)	τ_a	$\frac{\sigma_{ta}}{\sqrt{3}}$
許容支圧応力(N/mm ²)	σ_{da}	$1.4 \sigma_{ta}$
追加する安全係数*1	α	1/2
溶接部に係る許容応力	突き合わせ溶接	0.8
	すみ肉溶接	0.8

使用材料の許容応力：「クレーン構造規格」（厚生労働省告示）を準拠

*1： 許容引張応力 σ_{ta} 及び許容圧縮応力 σ_{ca} は、安全係数を追加することにより、降伏点の 1/3 となり、「吊上荷重の 3 倍に耐えること」の設計条件に合致する。⁵⁾

表 3.2-2 主要材料の機械的性質一覧表

構成要素	材質	形状	厚さ等 (mm)	温度条件 (°C)	σ_s : 降伏点 (N/mm ²)	備考
吊具 ピン取付プレート アーム	SS400	板、棒	16 以下 16 を超え 40 以下 40 を超えるもの	16 以下	245	JIS G3101
					235 215	
吊具 吊具ピン 吊り機構	S45C	N H	棒	— —	345	JIS G4051
					490	
装備用キヤスク 胴部 吊金具	SUS304	板、棒	— —	—	205	JIS G4303 JIS G4304
					205	
ホルダー 昇降用ピン部	A1050	棒	—	10~35	20 *1	JIS H4040

*1: 耐力

表 3.2-3 主要材料の許容応力一覧表

構成要素	材質	形状	厚さ等 (mm)	σ_{ta} 許容引張応力 (許容圧縮応力) (N/mm ²)	τ_a 許容せん断応力 (N/mm ²)	σ_{da} 許容支圧応力 (N/mm ²)
吊 具	ピン取付プレート アーム	SS400	板、棒	16 以下 16 を超え 40 以下 40 を超えるもの	81.6 78.3 71.6	47.1 45.2 41.3
	吊具ピン 吊り機構	S45C H	N 棒	—	115 163	114 109 100
荷重用キヤスク 脛部 吊金具	SUS304	板、棒	—	—	66.3 94.1	161 228
	A1050	棒	—	68.3	39.4	95.6
ホルダー 昇降用ピン部				6.66	3.84	9.32

表 3.2-4 構造設計結果一覧表 (1/2)

No.	評価位置	材料	計算式	計算結果 発生応力 (N/mm ²)			許容応力 設計 基準値 (N/mm ²)	評価
				応力 の種類	σ _t	引張応力 σ _t		
1	外胴部	SUS304	$\sigma_t = \frac{W}{A}$			7.34	σ_{ta}	$\sigma_t < \sigma_{ta}$
2	吊具 a 部	SUS304	$\tau = \frac{W'}{2A}$	せん断応力	τ	34.1	τ_a	$\tau < \tau_a$
3	吊具溶接部 b 部	SUS304	$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$	曲げ応力 せん断応力 組合せ応力	σ_b τ_a σ	0.35 14.0 14.2	$0.8\sigma_{ta}$	$\sigma < 0.8\sigma_{ta}$
4	吊具溶接部 C 部	SUS304	$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$	曲げ応力 せん断応力 組合せ応力	σ_b τ_a σ	38.4 15.4 43.9	$0.8\sigma_{ta}$	$\sigma < 0.8\sigma_{ta}$
5	吊具 穴部	SUS304	$\sigma_p = \frac{P}{A_p}$	支圧応力	σ_p	26.7	σ_{da}	$\sigma_p < \sigma_{da}$
6	クレーン 取付用ビン	S45C	$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$	曲げ応力 せん断応力 組合せ応力	σ_b τ_a σ	99.0 25.9 106	σ_{ta}	$\sigma < \sigma_{ta}$
7	ピン取付 プレート の孔部	SS400	$\tau = \frac{W''}{A}$	せん断応力	τ	40.7	τ_a	$\tau < \tau_a$
8	吊具 ピン取付 プレート の取付溶接部	SS400	$\sigma_t = \frac{0.707W}{2h\ell} + \frac{W}{2 \times 2h_1\ell}$	引張応力	σ_t	34.5	$0.8\tau_{ta}$	$\sigma_t < 0.8\tau_a$

表 3.2-4 構造設計結果一覧表 (2/2)

No.	評価位置	材料	計算式	計算結果 発生応力 (N/mm ²)			許容応力	評価
				応力の種類	設計基準値 (N/mm ²)			
9	アーム①	SS400	$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$	曲げ応力 せん断応力 組合せ応力	σ_b τ_a σ	68.6 4.23 68.9	71.6	$\sigma < \sigma_{ta}$
10	アーム②	SS400	$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$	曲げ応力 せん断応力 組合せ応力	σ_b τ_a σ	18.4 6.13 20.3	71.6	$\sigma < \sigma_{ta}$
11	アーム先端部孔③	SS400	$\tau = \frac{W'}{2A}$	せん断応力	τ	23.6	τ_a	$\tau < \tau_a$
12	アーム孔部④	SS400	$\sigma_p = \frac{P}{A_p}$	支圧応力	σ_p	27.6	σ_{da}	100
13	アーム先端部ス部⑤	SS400	$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_b + \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_b^2 + \tau_a^2}$	曲げ応力 せん断応力 組合せ応力	σ_b τ_a σ	68.3 30.6 76.1	80.0	$\sigma < 0.8\tau_a$
14	①吊り機構	S45C	$\sigma_t = \frac{W}{A}$	引張応力	σ_t	28.4	σ_{ta}	115
15	②その他 の吊り機 構品	シャックル チーンスリング (12.5ton用)	JIS B2801、BB-44	使用荷重(W)	73.5 (kN)	評価 <	保証荷重 118 (kN) 122.5 (kN)	
16	キャスク台座	アイボルト	JIS B1168、M24	負荷荷重	5.3 (kN)	評価 <	設計基準値 9.32 (kN)	
17	ホルダー昇降 及び回転用ビ ン部	A1050	$\tau = \frac{W'}{2A}$	せん断応力	τ	2.15	τ_a	$\tau < \tau_a$

表 3.3-1 ホルダー毎の照射時間及び冷却時間

No.	照射時間	冷却時間
No.1	16,800 分連続照射	5,160 分
No.2	16,800 分連続照射	4,520 分
No.3	16,800 分連続照射	3,880 分
No.4	16,800 分連続照射	3,240 分
No.5	16,800 分連続照射	2,600 分
No.6	16,800 分連続照射	1,960 分
No.7	16,800 分連続照射	1,320 分
No.8	16,800 分連続照射	680 分
No.9	16,800 分連続照射	40 分

表 3.3-2 純アルミニウム(A1050)組成表

材 質		純アルミニウム : (A1050)	
密 度		2.71×10 ³ kg/m ³	
組 成 (%)			
核種	JIS 規格値	ミルシート記載値*1	計算に用いる値
Si	0.25 以下	0.06, 0.07, 0.06	0.125
Fe	0.40 以下	0.35, 0.33, 0.35	0.40
Cu	0.05 以下	0.02, 0.02, 0.00	0.025
Mn	0.05 以下	0.00, 0.00, 0.00	0.025
Mg	0.05 以下	0.00, 0.00, 0.00	0.025
Cr	—	—	—
Zn	0.05 以下	0.00, 0.00, 0.00	0.025
Ti	0.03 以下	0.03, 0.03, 0.03	0.03
Al	99.50 以上	99.53, 99.55, 99.53	100
Co	—	—	0.0002
Ga	—	—	200ppm

*1：既設ホルダーの素材メーカーから提出されたミルシート 3 枚から求めた値。

表 3.3-3 ホルダ一線源強度(純アルミニウム 1g; A1050)

(単位 : photons/sec)

エネルギー (Mev)	冷 却 時 間 (分)						
	直後	40	680	1320	1960	2600	3240
0.3	1.01×10^6	1.80×10^5	1.22×10^5	1.08×10^5	1.00×10^5	9.33×10^4	8.71×10^4
0.63	1.60×10^9	1.34×10^8	1.16×10^8	2.88×10^7	1.43×10^7	8.07×10^6	4.67×10^6
1.1	1.09×10^7	3.15×10^6	2.20×10^6	1.84×10^6	1.64×10^6	1.52×10^6	1.45×10^6
1.55	5.05×10^8	1.90×10^6	1.16×10^6	7.06×10^5	4.31×10^5	2.64×10^5	1.61×10^5
1.99	4.82×10^8	4.03×10^8	2.30×10^7	1.31×10^6	7.44×10^4	4.24×10^3	2.41×10^2
2.38	1.32×10^7	1.10×10^7	6.29×10^5	3.58×10^4	2.04×10^3	1.16×10^2	6.61×10^0
2.75	1.44×10^7	1.23×10^7	1.89×10^6	8.34×10^5	4.91×10^5	2.99×10^5	1.83×10^5
3.25	2.39×10^6	2.00×10^6	1.14×10^5	6.48×10^3	3.69×10^2	2.10×10^1	1.20×10^0
3.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3.3-4 ORIGEN79 のエネルギー群構造

(MeV)

エネルギー範囲			平均エネルギー
0.2	—	0.4	0.3
0.4	—	0.9	0.63
0.9	—	1.35	1.10
1.35	—	1.8	1.55
1.8	—	2.2	1.99
2.2	—	2.6	2.38
2.6	—	3.0	2.75
3.0	—	3.5	3.25
3.5	—	4.0	3.70
4.0	—	4.5	4.22
4.5	—	5.0	4.70
5.0	—		5.25

表 3.3-5 熱中性子束の相対値から絶対値への換算結果(単位 : $\text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)

チェーン位置 (cm) (チェーン下端からの距離)	相 対 値	絶 対 値 (換算値)
0	9×10^{17}	9×10^{16}
50	1×10^{16}	1×10^{15}
100	1×10^{12}	1×10^{11}
150	1×10^{10}	1×10^9
200	1×10^8	1×10^7
250	1×10^6	1×10^5

表 3.3-6 アルミニウム合金(A5052)組成表

材質	アルミニウム合金：(A5052)		
密度	$2.71 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$		
組成			
核種	JIS 規格値	ミルシート記載値 *2	計算に用いる値
Si	0.25 以下	0.07, 0.07, 0.08, 0.08	0.125
Fe	0.40 以下	0.28, 0.26, 0.28, 0.27	0.40
Cu	0.10 以下	0.01, 0.00, 0.02, 0.01	0.05
Mn	0.10 以下	0.01, 0.00, 0.00, 0.01	0.02
Mg	2.2~2.8	2.56, 2.64, 2.65, 2.58	2.8
Cr	0.15~0.35	0.17, 0.17, 0.17, 0.17	0.25
Zn	0.10 以下	0.01, 0.00, 0.00, 0.00	0.05
その他	0.15 以下	0.01, 0.02, 0.02, 0.03	0
Al	残	残, 残, 残, 残	100
Co	—	—	0.0002
Ga	—	—	200ppm

*2 : 既設アルミリンクチェーンの素材メーカーから提出されたミルシート 4 枚
から求めた値。

表 3.3-7 アルミニウム合金線源強度(アルミニウム合金 1g,A5052)

(単位 : photons/sec)

冷却 エネルギー (Mev)	チエーン下端からの距離(cm)					250
	0	50	100	150	200	
照 射 直 後	0.3	1.43×10^7	1.59×10^5	1.59×10^1	1.59×10^{-1}	1.59×10^{-3}
	0.63	4.15×10^8	4.62×10^6	4.62×10^2	4.62×10^0	4.62×10^{-2}
	1.1	8.01×10^6	8.90×10^4	8.90×10^0	8.90×10^{-4}	8.90×10^{-6}
	1.55	1.52×10^8	1.69×10^6	1.69×10^2	1.69×10^0	1.69×10^{-4}
	1.99	1.16×10^8	1.29×10^6	1.29×10^2	1.29×10^0	1.29×10^{-4}
	2.38	3.17×10^6	3.53×10^4	3.53×10^0	3.53×10^{-2}	3.53×10^{-6}
	2.75	3.86×10^6	4.29×10^4	4.29×10^0	4.29×10^{-2}	4.29×10^{-6}
	3.25	5.73×10^5	6.38×10^3	6.38×10^{-1}	6.38×10^{-3}	6.38×10^{-7}
	3.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
照 射 後 40 分	4.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.3	1.42×10^7	1.58×10^5	1.58×10^1	1.58×10^{-1}	1.58×10^{-3}
	0.63	3.51×10^8	3.90×10^6	3.90×10^2	3.90×10^0	3.90×10^{-2}
	1.1	4.19×10^6	4.65×10^4	4.65×10^0	4.65×10^{-4}	4.65×10^{-6}
	1.55	8.04×10^5	8.92×10^3	8.92×10^{-1}	8.92×10^{-3}	8.92×10^{-7}
照 射 後 40 分	1.99	9.67×10^7	1.08×10^6	1.08×10^2	1.08×10^0	1.08×10^{-2}
	2.38	2.65×10^6	2.94×10^4	2.94×10^0	2.94×10^{-2}	2.94×10^{-6}
	2.75	3.35×10^6	3.72×10^4	3.72×10^0	3.72×10^{-2}	3.72×10^{-6}
	3.25	4.79×10^5	5.33×10^3	5.33×10^{-1}	5.33×10^{-3}	5.33×10^{-7}
	3.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
照 射 後 40 分	4.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3.3-8 接続アダプター線源強度(純アルミニウム 1g; A1050)

(炉心上方 50cm の位置)

(単位 : photons/sec)

エネルギー (MeV)	冷却時間 (分)	
	直後	40
0.3	3.35×10^5	8.64×10^4
0.63	4.81×10^8	4.03×10^8
1.1	5.48×10^6	3.15×10^6
1.55	1.52×10^8	5.71×10^5
1.99	1.44×10^8	1.21×10^8
2.38	3.96×10^6	3.31×10^6
2.75	4.31×10^6	3.70×10^6
3.25	7.16×10^5	5.99×10^5
3.70	0.00	0.00
4.22	0.00	0.00
4.70	0.00	0.00
5.25	0.00	0.00

表 3.3-9 接続アダプター線源強度(アルミニウム合金 1g; A5052)

(炉心上方 50cm の位置)

(単位 : photons/sec)

エネルギー (MeV)	冷却時間 (分)	
	直後	40
0.3	1.43×10^7	1.42×10^7
0.63	4.15×10^8	3.51×10^8
1.1	8.01×10^6	4.19×10^6
1.55	1.52×10^8	8.04×10^5
1.99	1.16×10^8	9.67×10^7
2.38	3.17×10^6	2.65×10^6
2.75	3.86×10^6	3.35×10^6
3.25	5.73×10^5	4.79×10^5
3.70	0.00	0.00
4.22	0.00	0.00
4.70	0.00	0.00
5.25	0.00	0.00

表 3.3-10 ホルダー線源強度(A1050)

遮へい計算に用いる線源強度として、ホルダー重量(4600g)を考慮した値を示す。

エネルギー (MeV)	線源強度 (photons/sec)
0.3	4.23×10^9
0.63	6.98×10^{12}
1.1	7.33×10^{10}
1.55	2.22×10^{10}
1.99	1.97×10^{12}
2.38	5.37×10^{10}
2.75	7.46×10^{10}
3.25	9.76×10^9
3.70	0.00
4.22	0.00
4.70	0.00
5.25	0.00

表 3.3-11 アルミリンクチェーン線源強度(A5052)

遮へい計算に用いる線源強度として、各部のチェーン重量(表中の値)を考慮した値を示す。

(単位: photons/sec)

エネルギー (MeV)	チェーンの領域 (cm)		
	0~50	50~100	100~550
0.3	1.56×10^9	1.74×10^7	1.76×10^3
0.63	3.86×10^{10}	4.29×10^8	4.33×10^4
1.1	4.61×10^8	5.12×10^6	5.17×10^2
1.55	8.84×10^7	9.81×10^5	9.91×10^1
1.99	1.06×10^{10}	1.19×10^8	1.20×10^4
2.38	2.92×10^8	3.23×10^6	3.27×10^2
2.75	3.69×10^8	4.09×10^6	4.13×10^2
3.25	5.27×10^7	5.86×10^5	5.92×10^1
3.70	0.00	0.00	0.00
4.22	0.00	0.00	0.00
4.70	0.00	0.00	0.00
5.25	0.00	0.00	0.00
重量	110g	110g	990g

表 3.3-12 接続アダプター線源強度(A1050 及び A5052)

遮へい計算に用いる線源強度として、以下の重量を考慮した値を示す。

- ① 純アルミニウム (A1050) : 2700g
- ② アルミニウム合金 (A5052) : 750g

エネルギー (MeV)	線源強度 (photons/sec)
0.3	1.09×10^{10}
0.63	1.35×10^{12}
1.1	1.16×10^{10}
1.55	2.14×10^9
1.99	3.99×10^{11}
2.38	1.09×10^{10}
2.75	1.25×10^{10}
3.25	1.98×10^9
3.70	0.00
4.22	0.00
4.70	0.00
5.25	0.00

表 3.3-13 装荷用キャスク本体部計算結果

計算点	表面線量当量率 (μ Sv/h)
Da1	0.03
Da2	0.26
Da3	34.9
Da4	0.39
Da5	34.3

表 3.3-14 装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算結果(1/2)

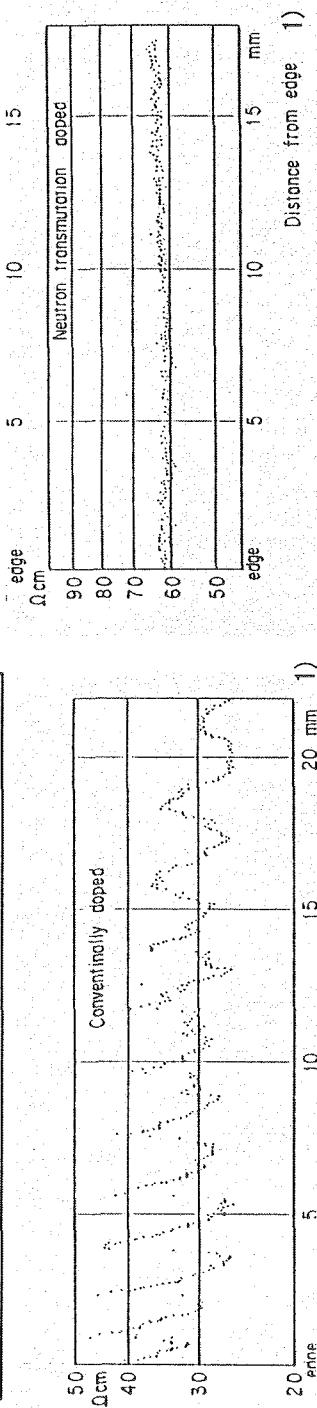
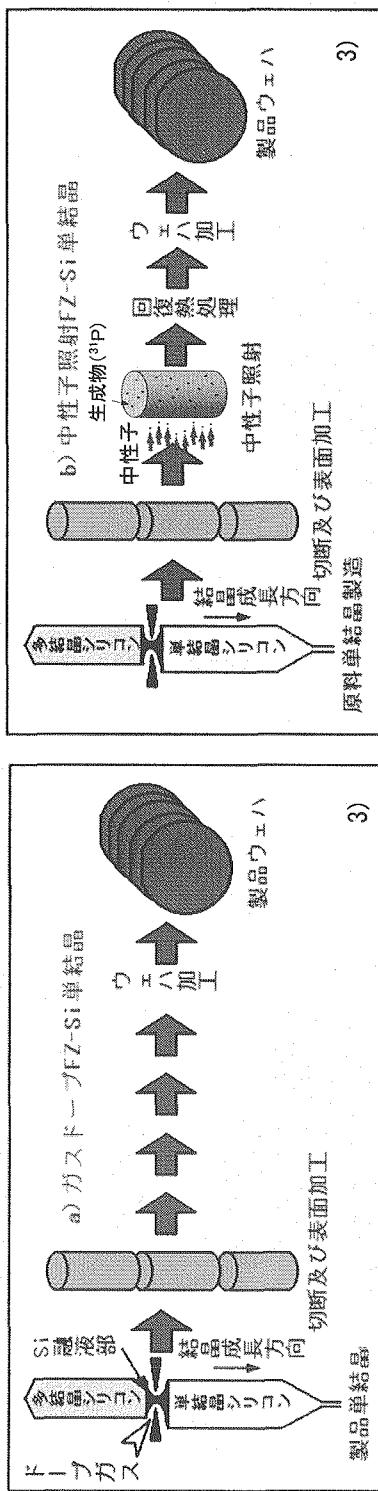
計算点	表面線量当量率(μ Sv/h)		
	線源位置	計算結果	合計値
Db1	S1	1.820E-09	1.463E+01
	S2	7.483E-12	
	S3	3.923E-19	
	S4	6.093E+00	
	S5	8.533E+00	
Db2	S1	2.364E+01	3.254E+01
	S2	6.338E-02	
	S3	7.391E-06	
	S4	2.797E-02	
	S5	8.804E+00	
Db3	S1	1.067E+01	1.630E+01
	S2	2.920E-03	
	S3	1.465E-07	
	S4	5.607E+00	
	S5	2.151E-02	
Db4	S1	5.430E+00	4.931E+01
	S2	2.356E-02	
	S3	4.883E-07	
	S4	4.298E+01	
	S5	8.761E-01	
Db5	S1	2.812E+00	1.814E+01
	S2	2.380E-02	
	S3	5.188E-07	
	S4	1.383E+01	
	S5	1.476E+00	
Db6	S1	8.921E-01	1.077E+00
	S2	1.147E-02	
	S3	9.717E-07	
	S4	4.003E-04	
	S5	1.726E-01	
Db7	S1	1.914E+01	4.601E+01
	S2	2.509E-02	
	S3	1.691E-07	
	S4	2.562E+01	
	S5	1.220E+00	

表 3.3-14 装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算結果(2/2)

計算点	表面線量当量率($\mu\text{Sv}/\text{h}$)		
	線源位置	計算結果	合計値
Db8	S1	2.549E-01	2.624E-01
	S2	7.359E-03	
	S3	9.064E-07	
	S4	1.957E-05	
	S5	9.141E-05	
Db9	S1	7.986E-01	8.863E-01
	S2	7.868E-02	
	S3	1.587E-05	
	S4	3.404E-03	
	S5	5.568E-03	
Db10	S1	7.535E+00	8.531E+00
	S2	8.892E-01	
	S3	1.919E-04	
	S4	8.392E-02	
	S5	2.248E-02	
Db11	S1	3.376E+01	4.389E+01
	S2	8.756E-01	
	S3	1.919E-04	
	S4	4.143E-02	
	S5	9.211E+00	
Db12	S1	3.951E+01	5.437E+01
	S2	2.203E+00	
	S3	6.509E-04	
	S4	6.697E-03	
	S5	1.265E+01	
Db13	S1	5.504E-06	1.970E+01
	S2	3.668E-07	
	S3	8.186E-11	
	S4	1.292E+01	
	S5	6.783E+00	

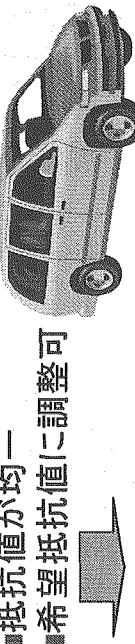
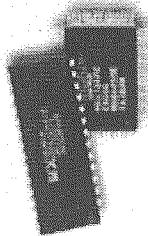
表 3.4-1 耐震設計結果一覧表

No.	評価位置		設計項目	設計結果		判定基準
1	装荷用キャスク	固有周期	固有振動数	f1	201(Hz)	20(Hz)以上
2		転倒	安定度	S	1.39	1 以上
3	キャスク台座	位置決めリング	せん断応力	τ	3.24	$\tau < S_y$ $S_y = 118 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



■ 不純物の濃度分布が不均一で抵抗値がバラツクためIC、LSI等の小さい集積素子に使用される。

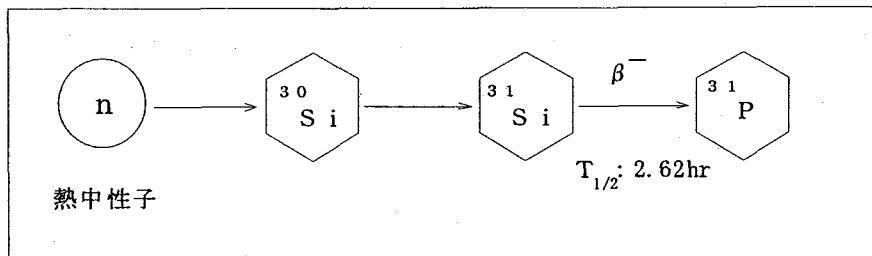
■ リンの高い均一性及び高精度の濃度
■ 抵抗値が均一
■ 希望抵抗値に調整可



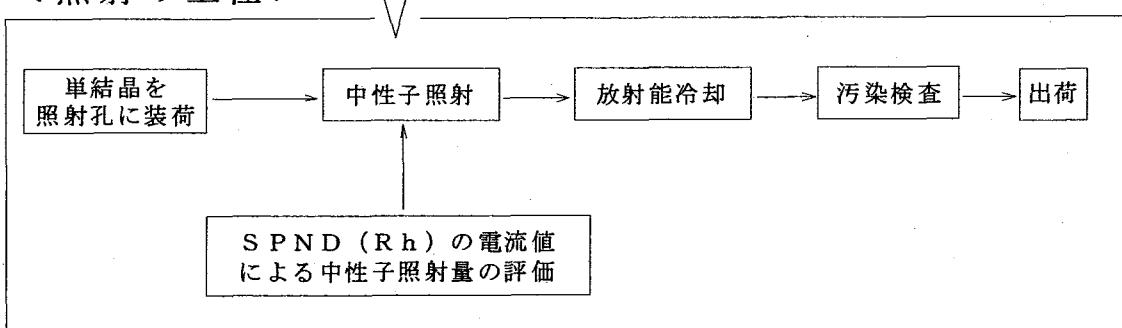
大電流素子及び高品質素子への活用

図 1.1-1 半導体生産方法と不純物濃度

< N T D の原理 >



< 照射の工程 >



< 单結晶の製造 >

() は用途

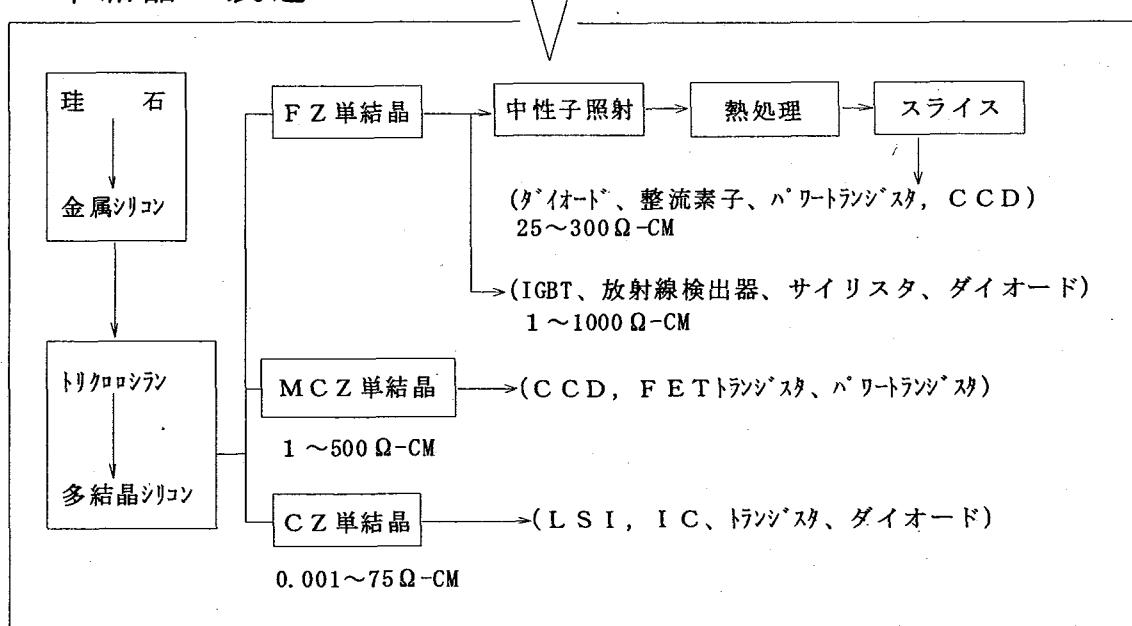


図 1.1-2 Si 单結晶製造から NTD-Si 製造までの流れ 4)

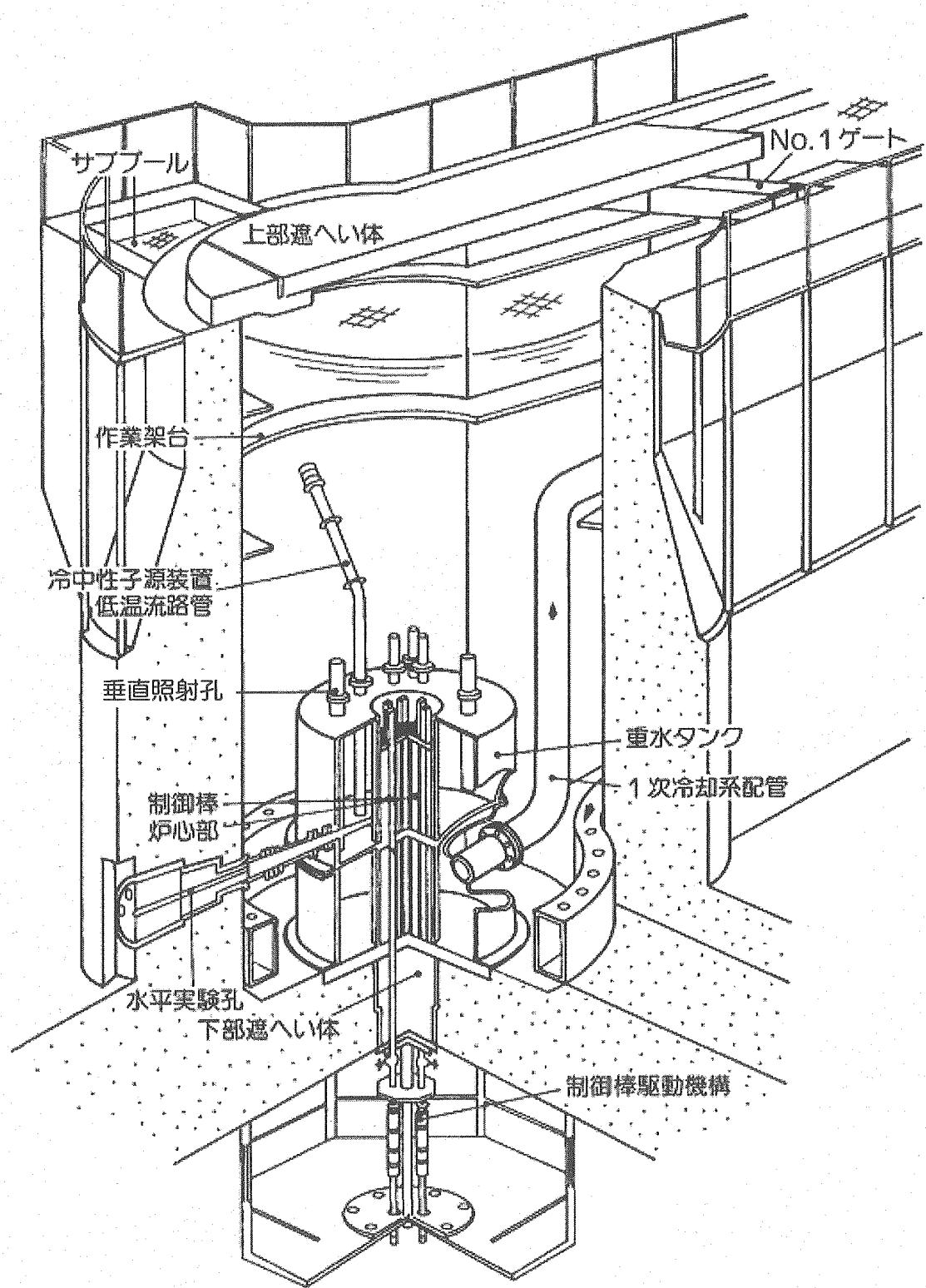


図 1.1-3 JRR-3 原子炉鳥瞰図

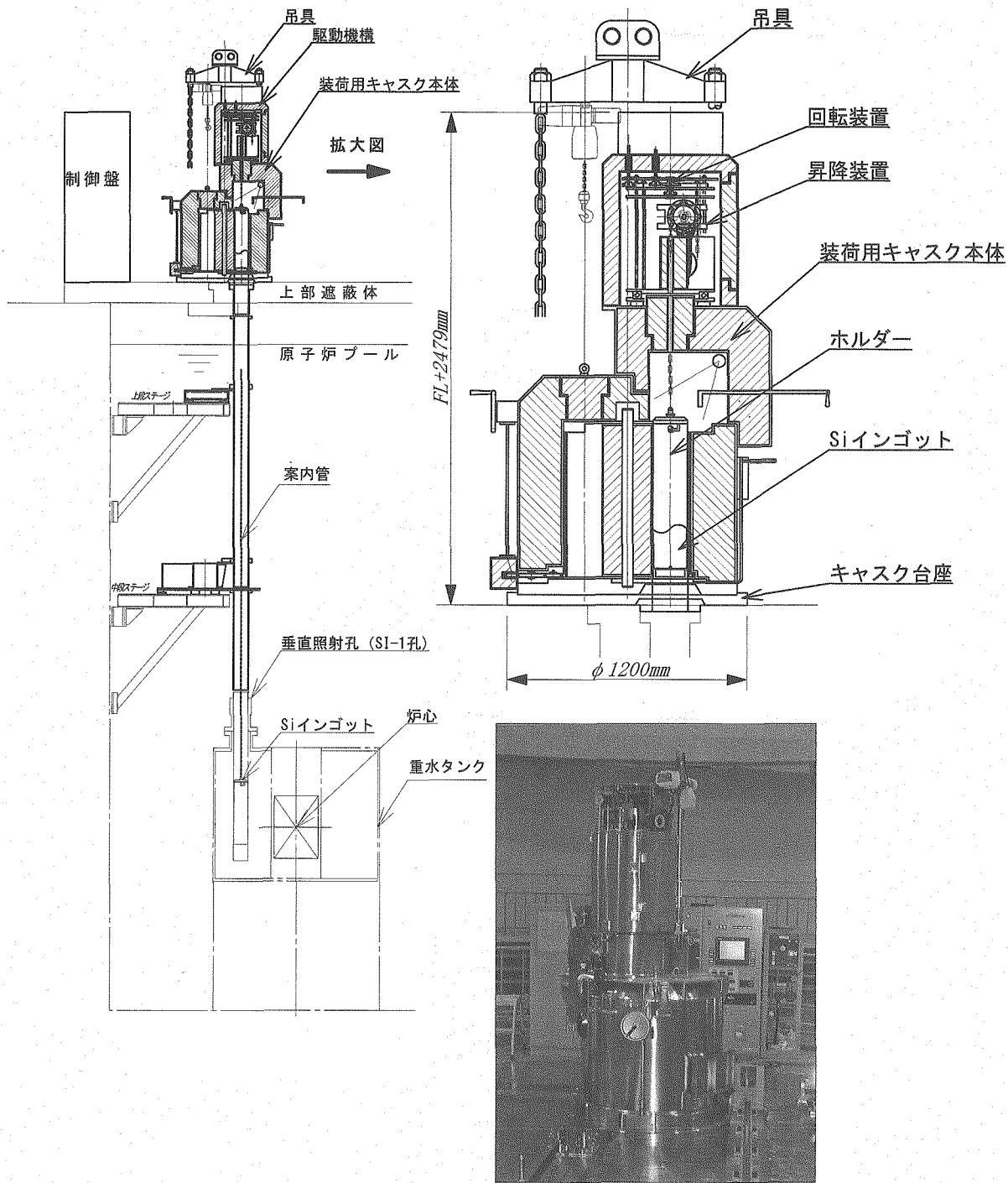


図 1.1-4 既設均一照射設備(シリコン照射装置)概略図

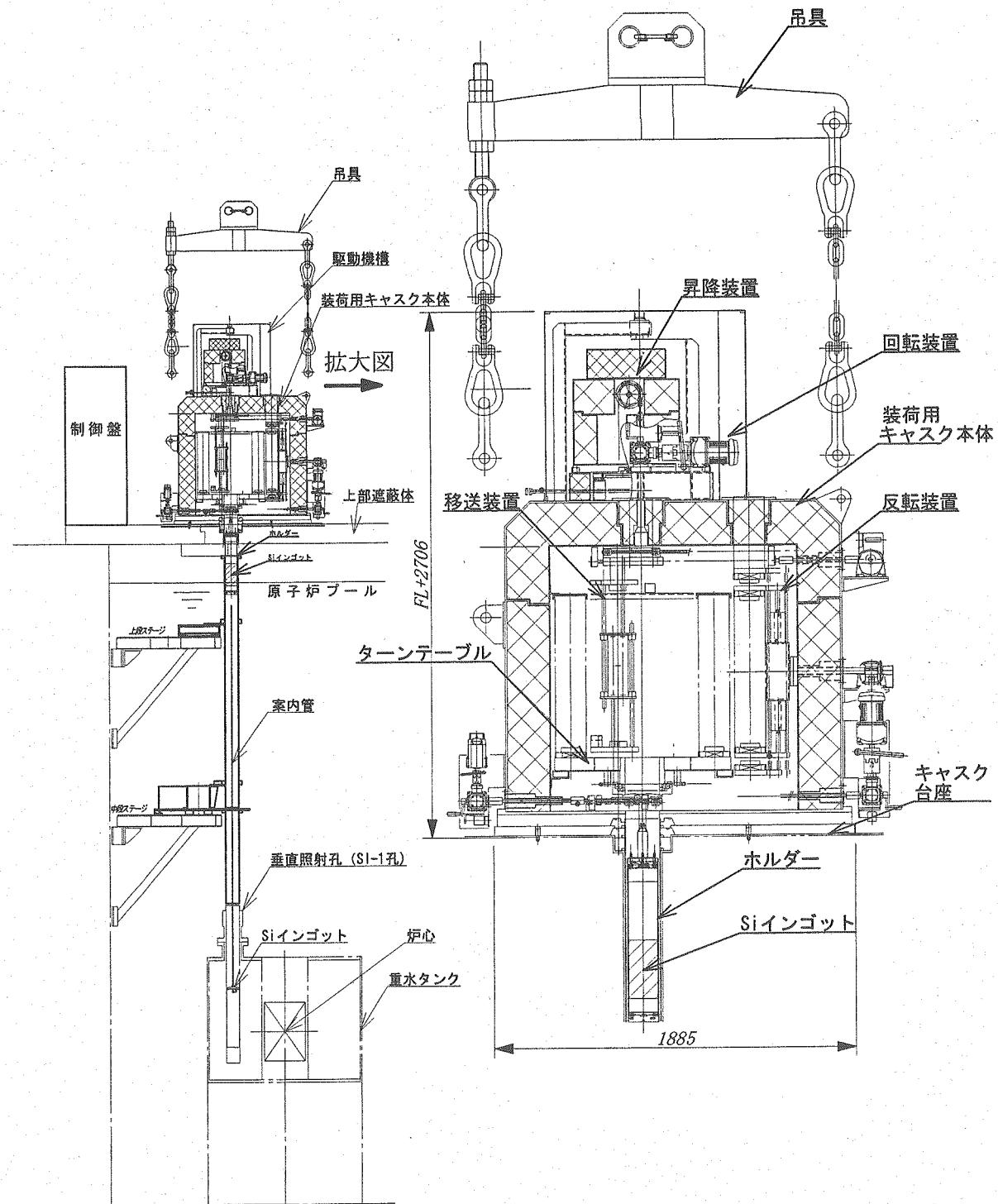


図 1.1-5 新設均一照射設備(高性能シリコン照射装置)概略図

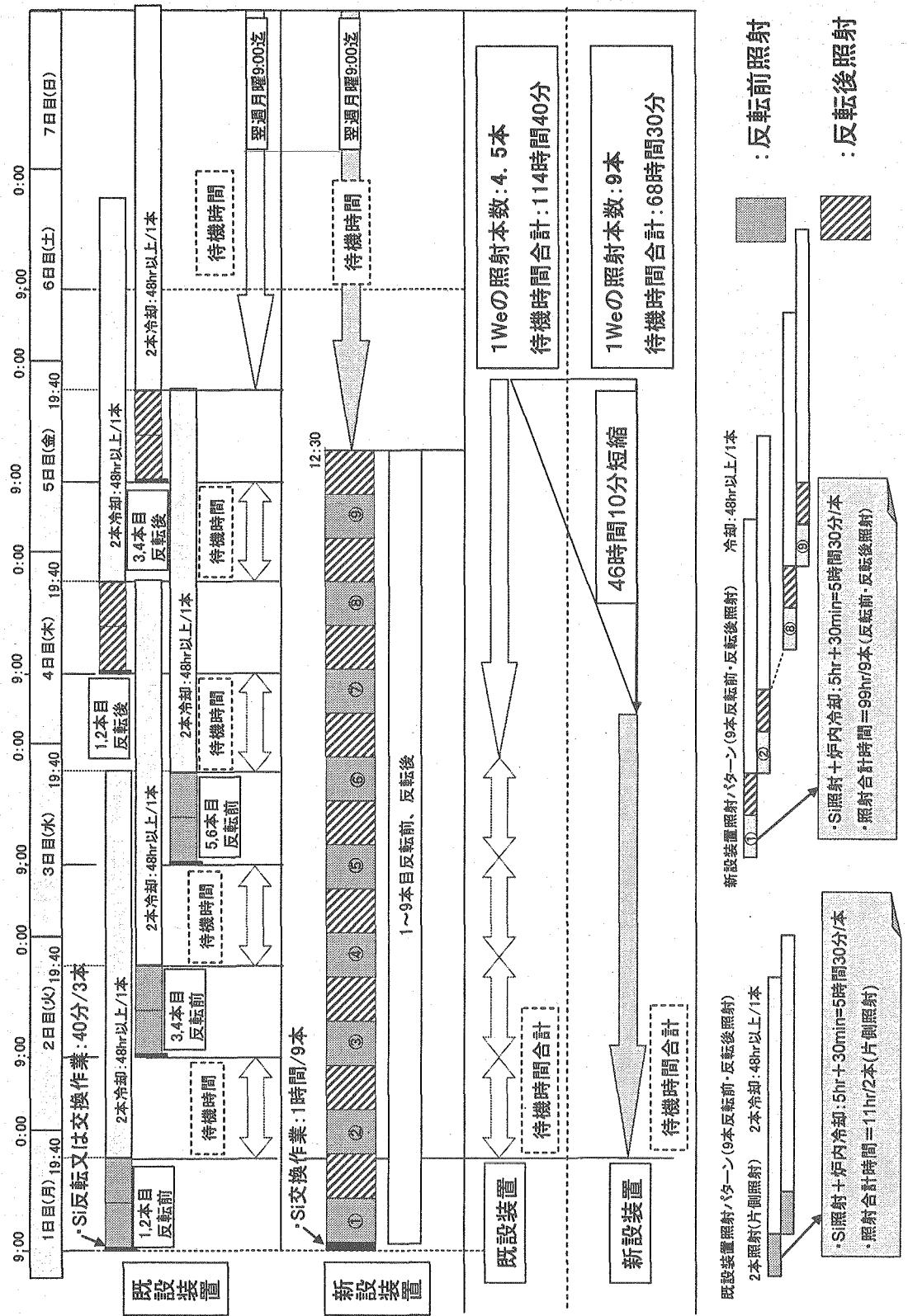


図 1.1-6 待機時間比較 (既設・新設) イメージ

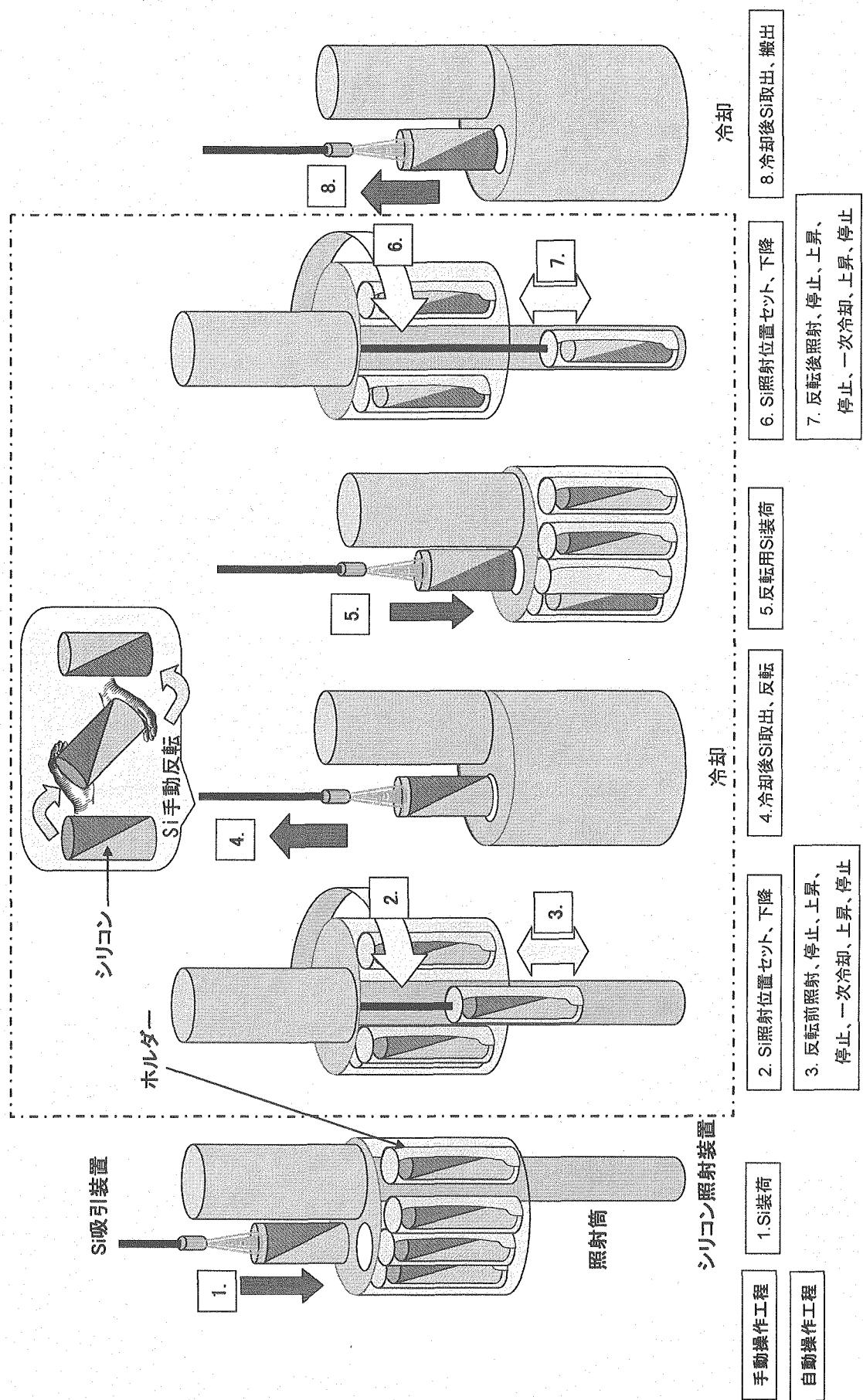


図 2.1-1 シリコン照射装置シリコン照射流れ図

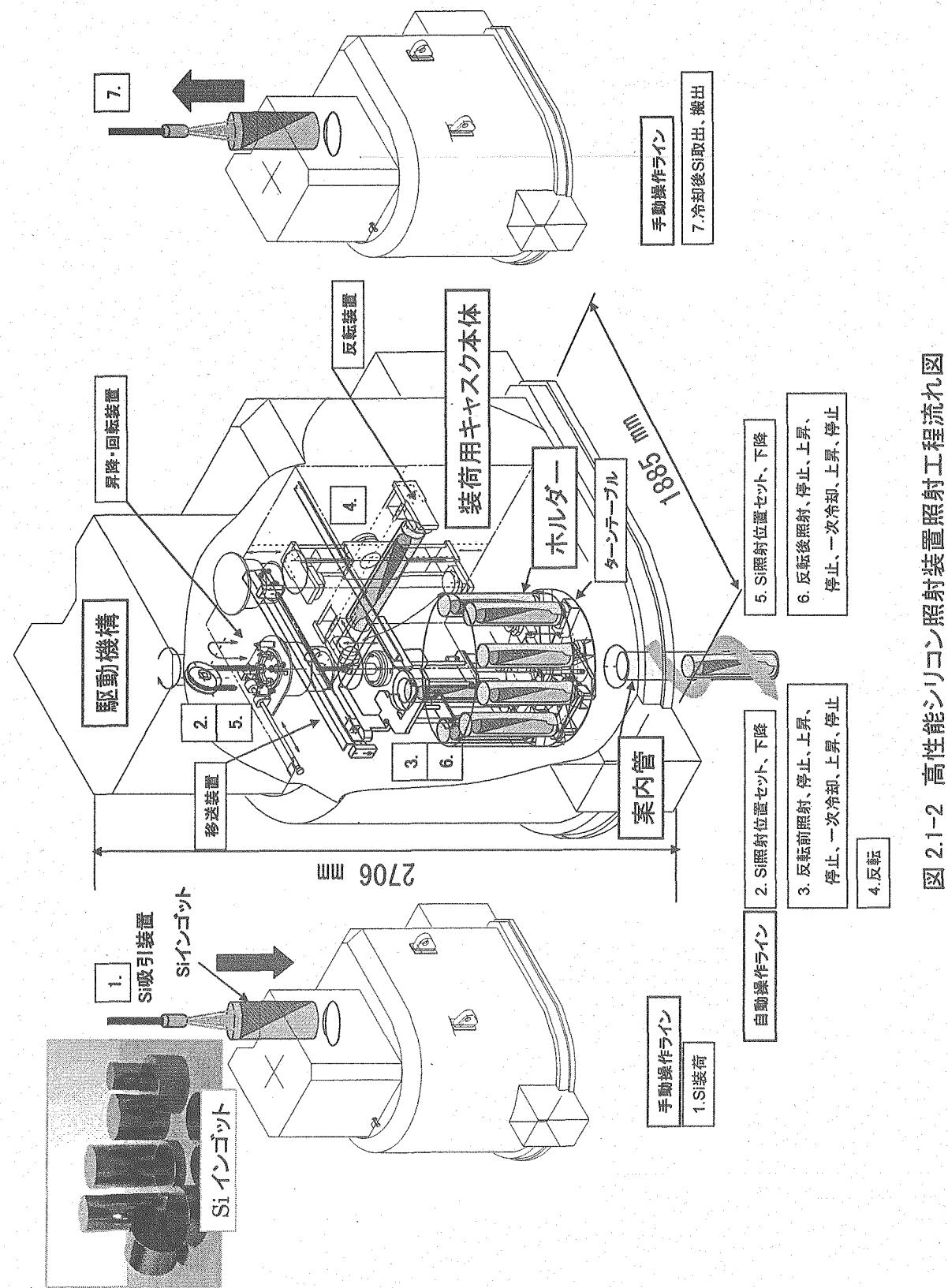
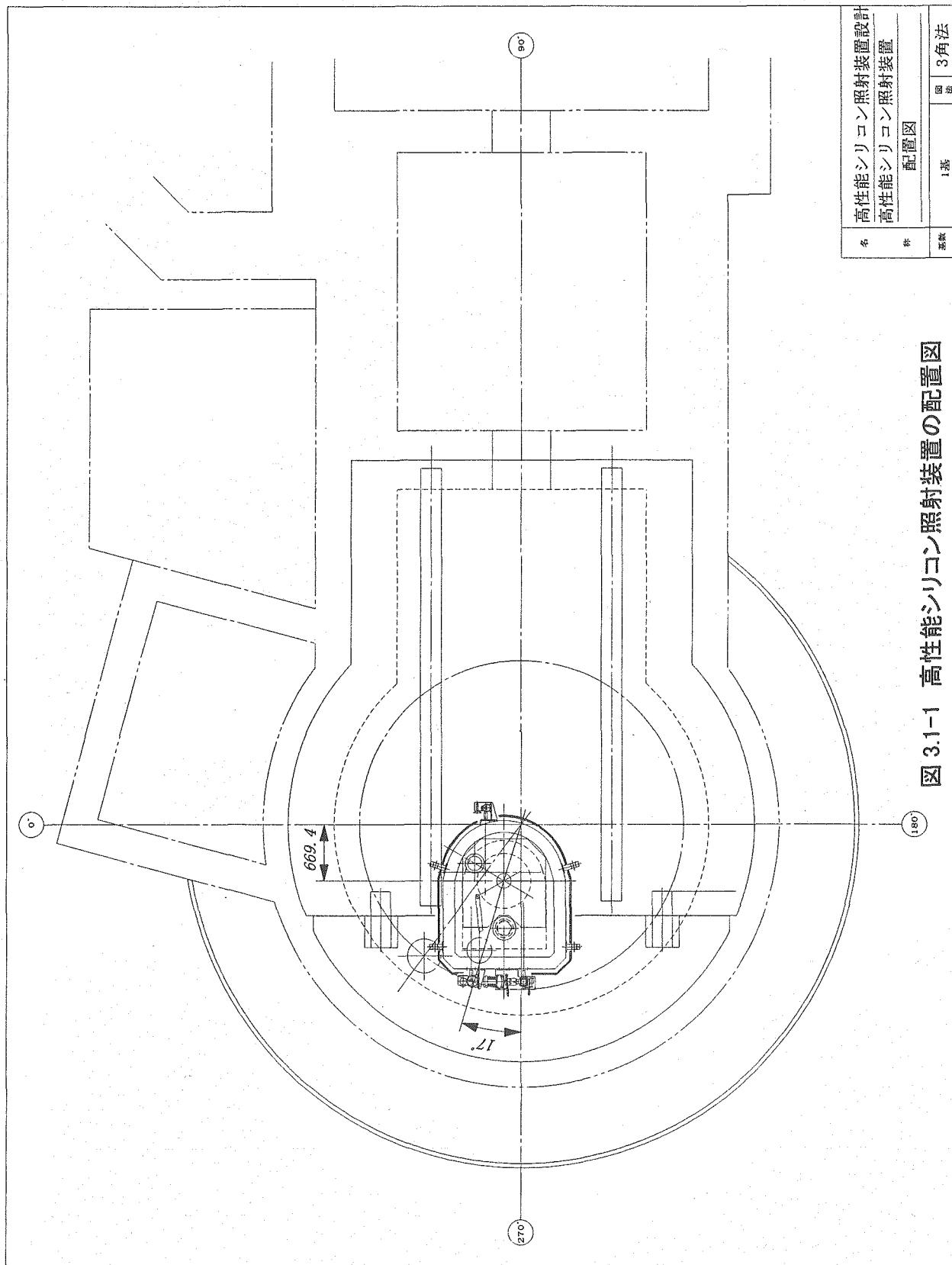


図 2.3-1 Si 蒸射工程モード



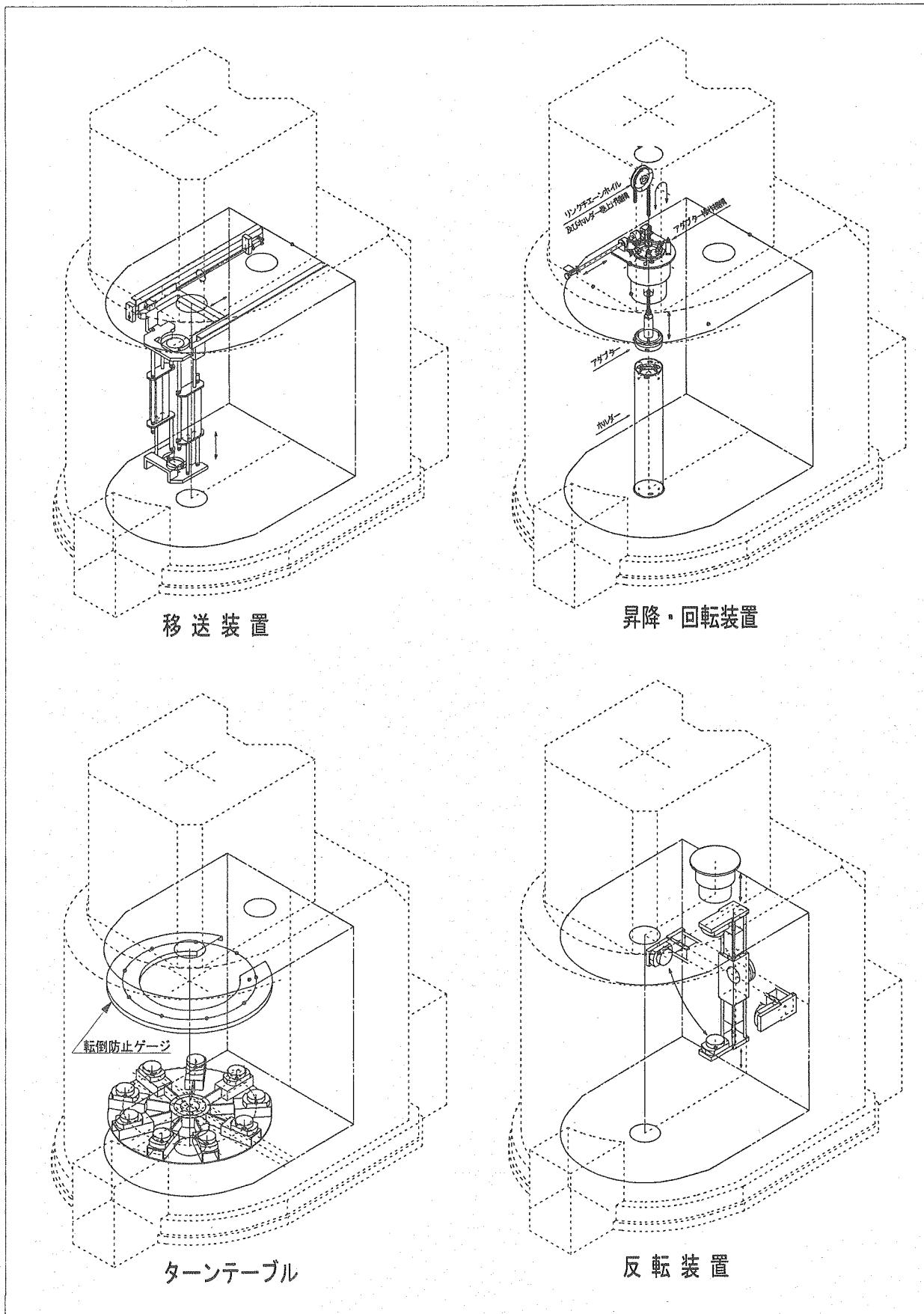


図 3.1-2 高性能シリコン照射装置の構造概念図

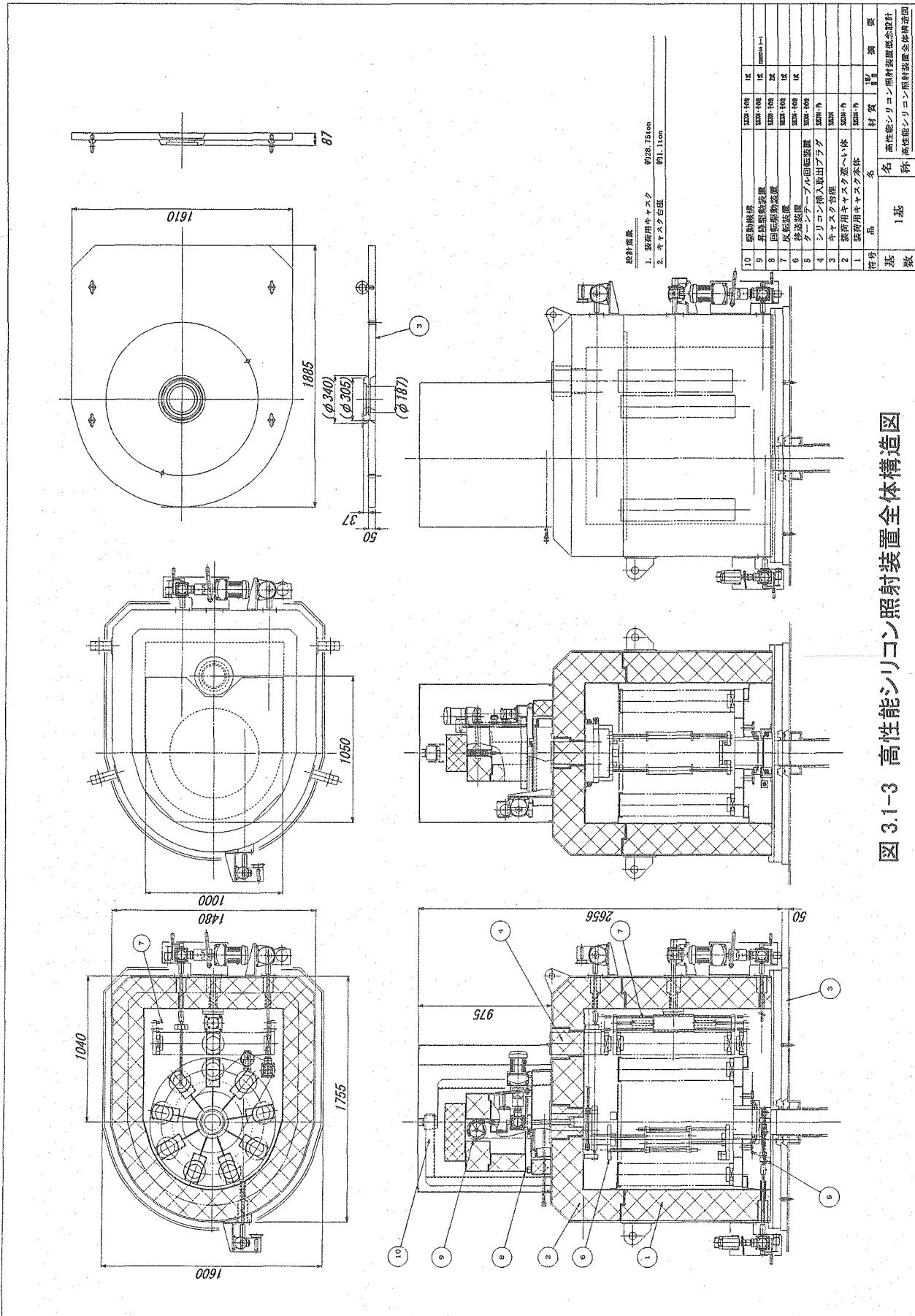
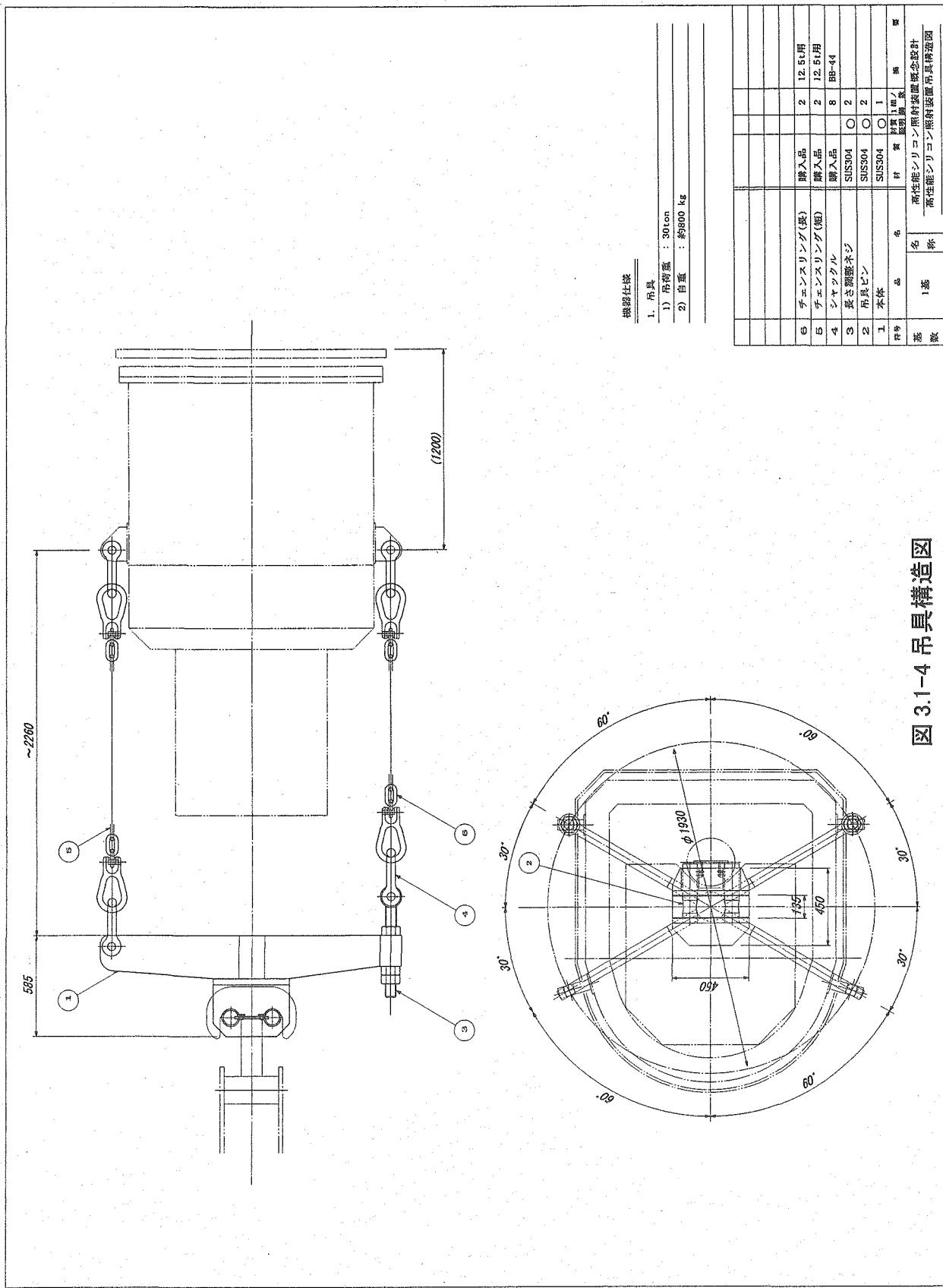
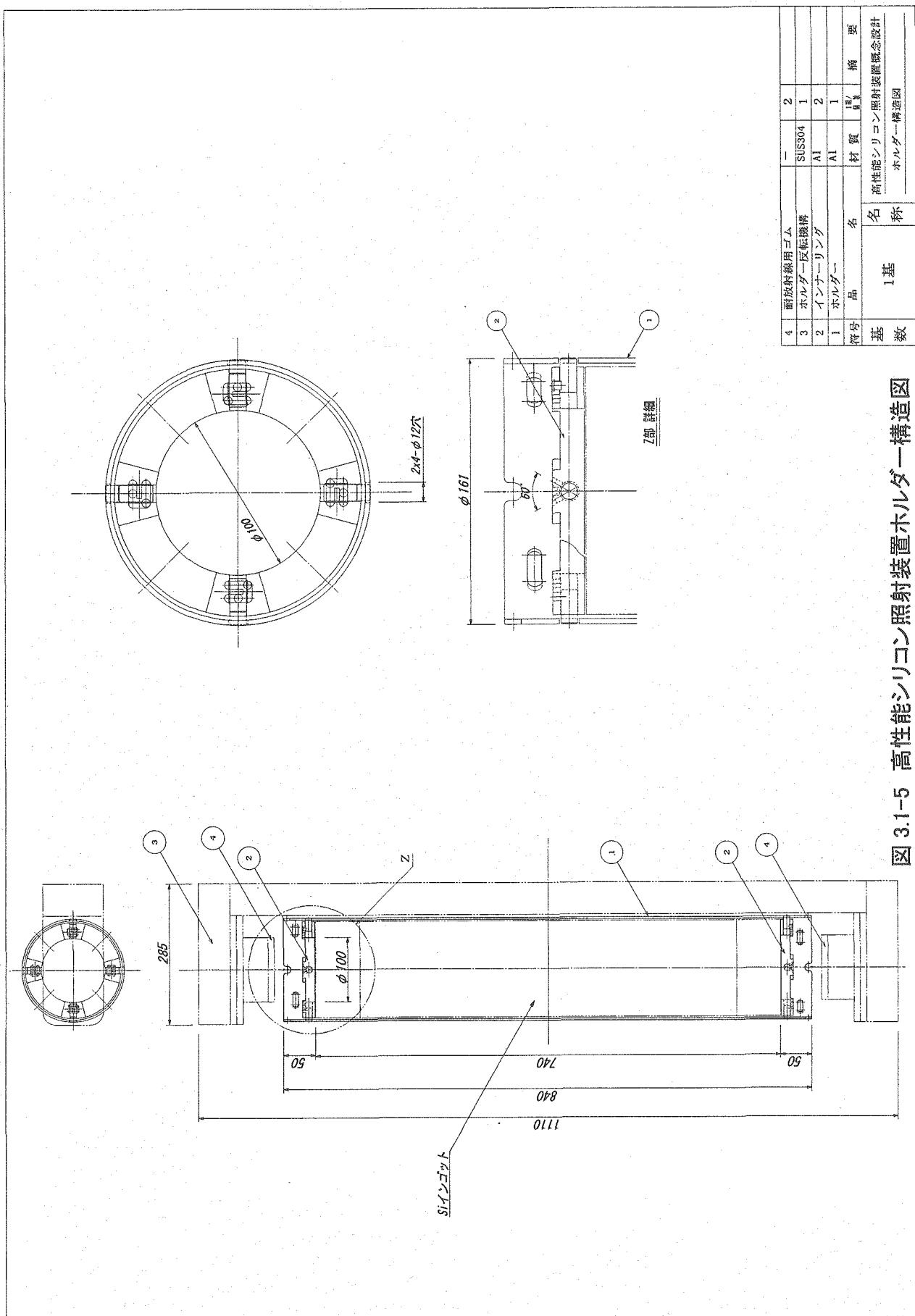


図 3.1-3 高性能シリコン照射装置全体構造図





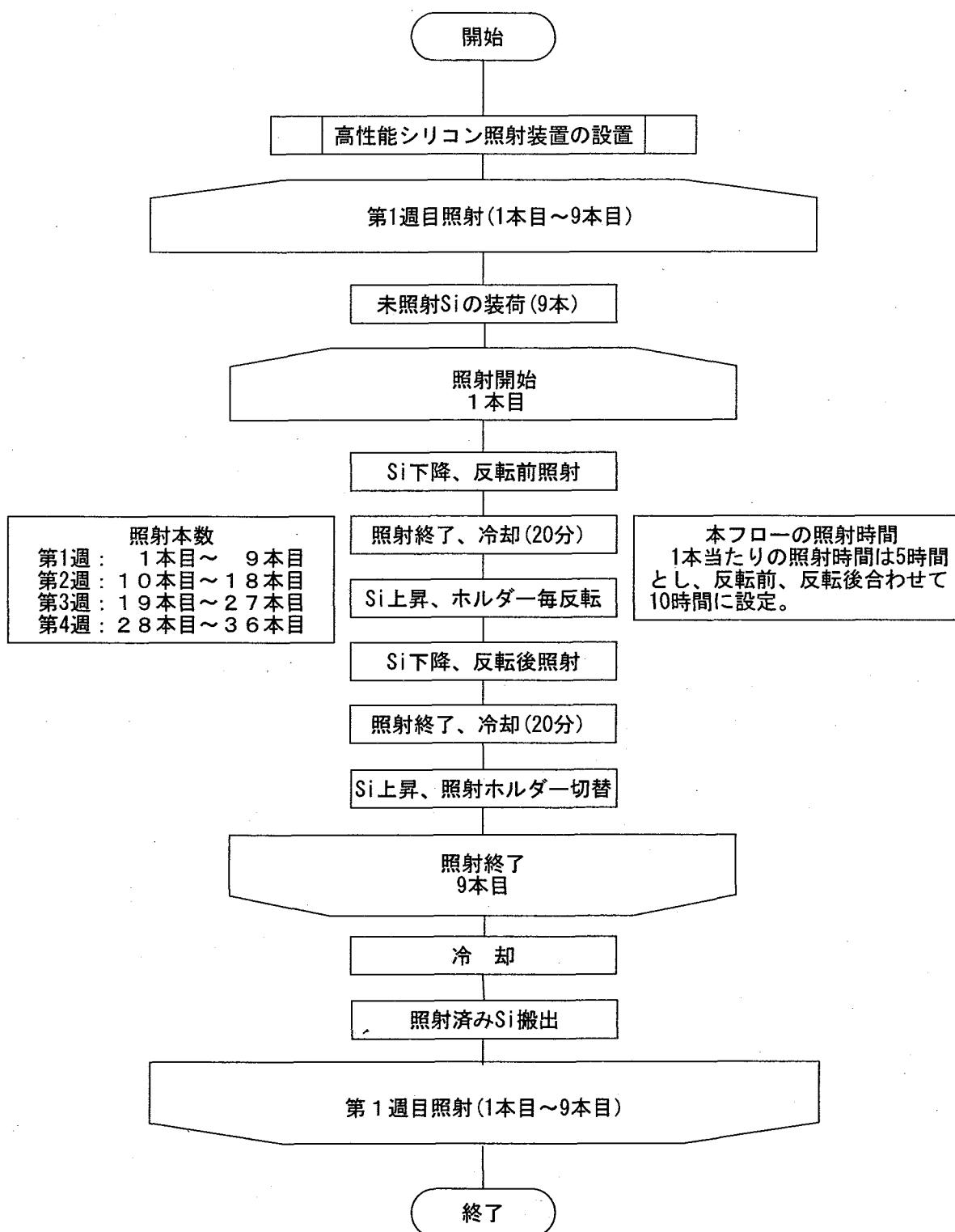


図 3.1-6 高性能シリコン照射装置基本照射フロー

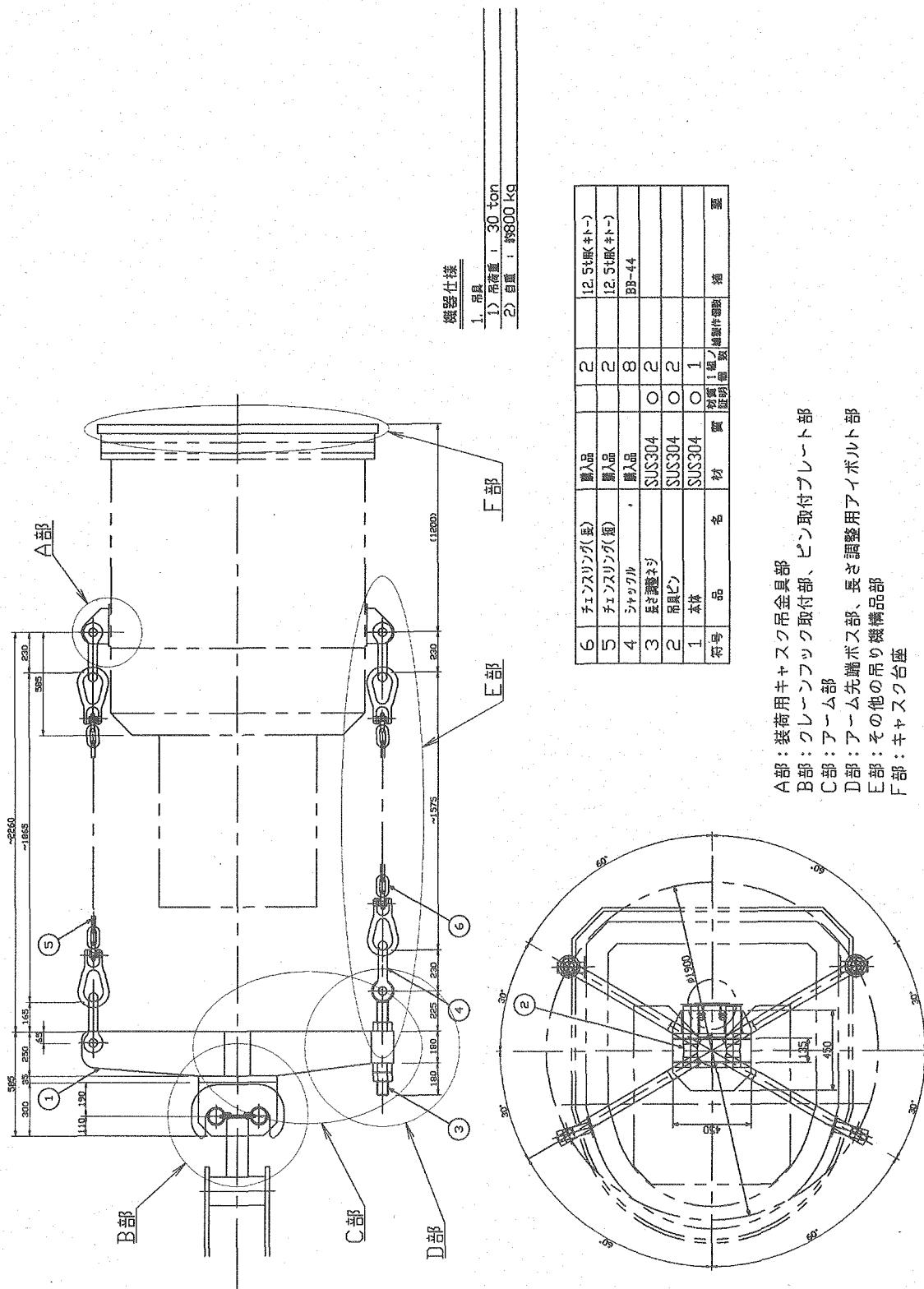
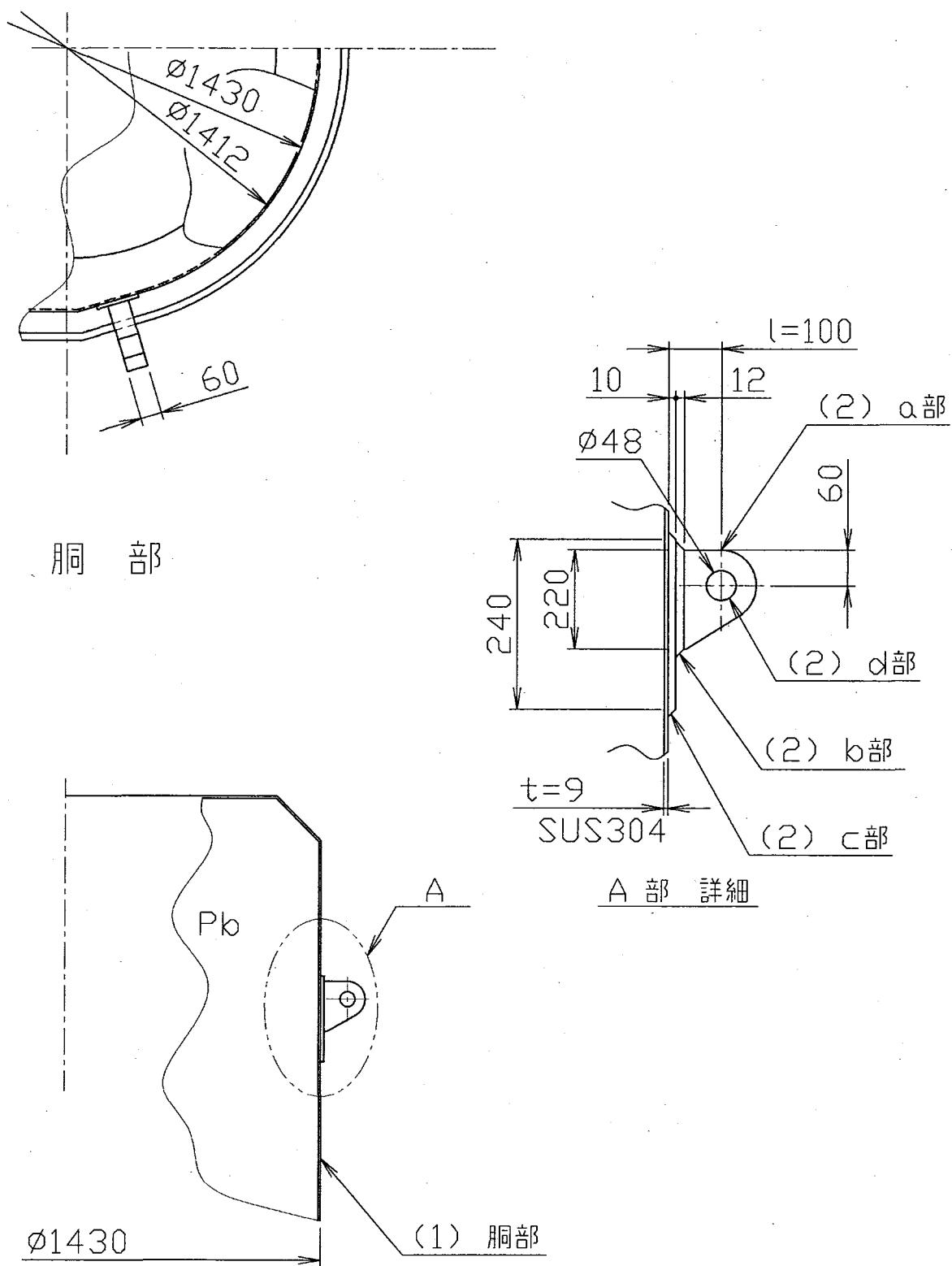
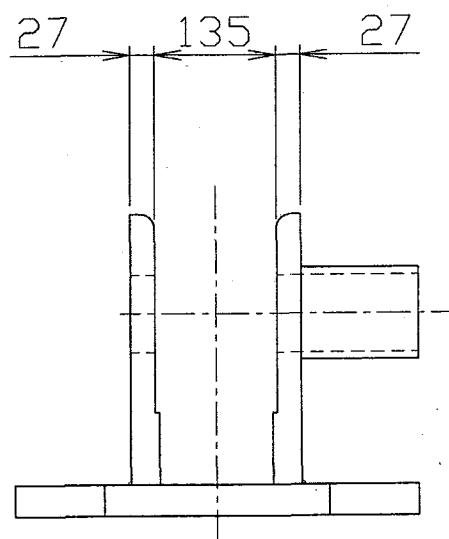
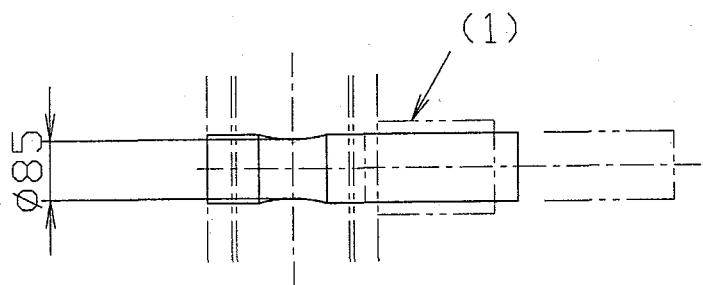


図 3.2-1 装荷用キャスク及び吊具構造設計対象図



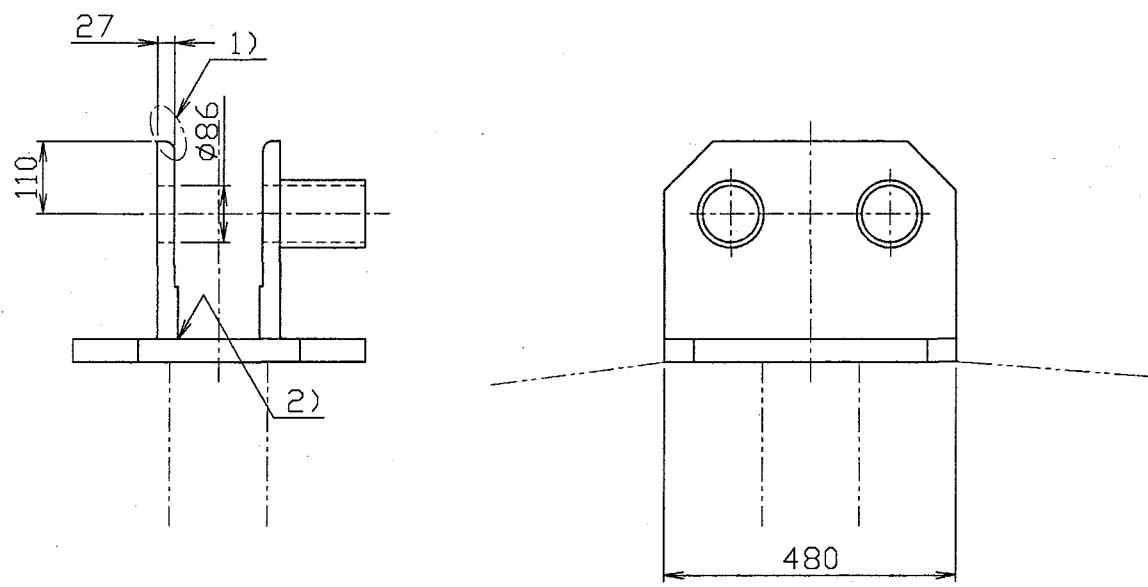
(単位 : mm)

図 3.2-2 装荷用キャスク本体吊金具部詳細図



(単位 : mm)

図 3.2-3 クレーンフック取付部詳細図



(単位 : mm)

図 3.2-4 ピン取付プレート詳細図

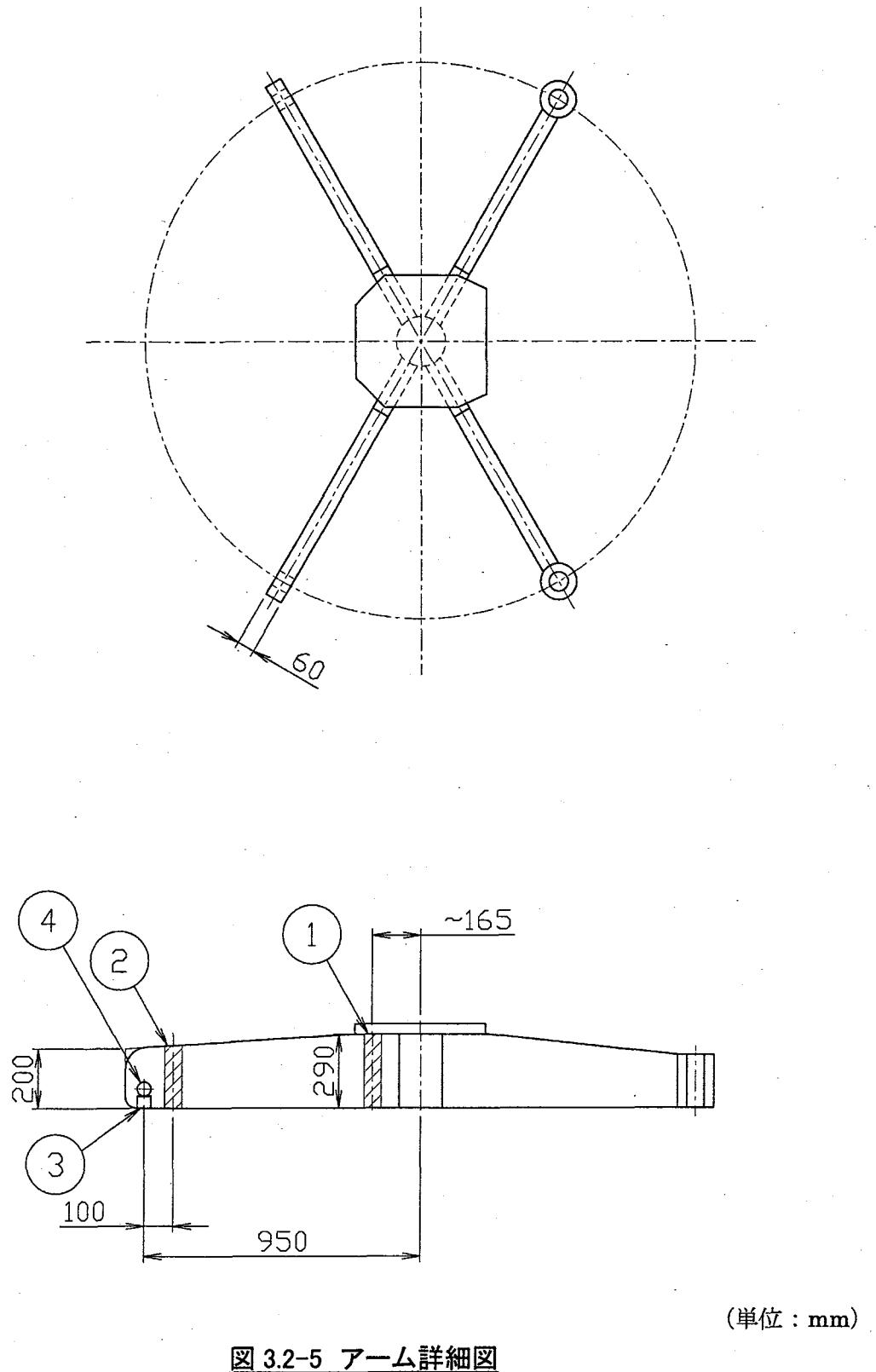
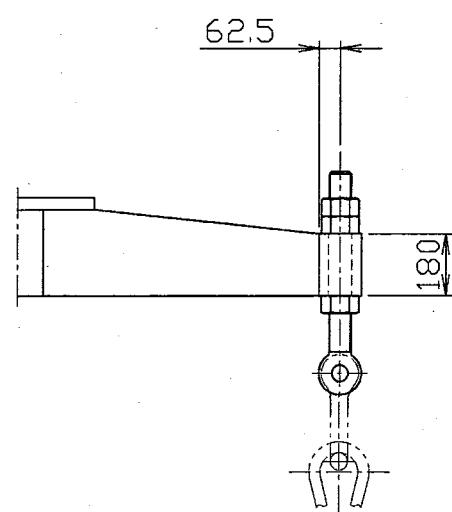
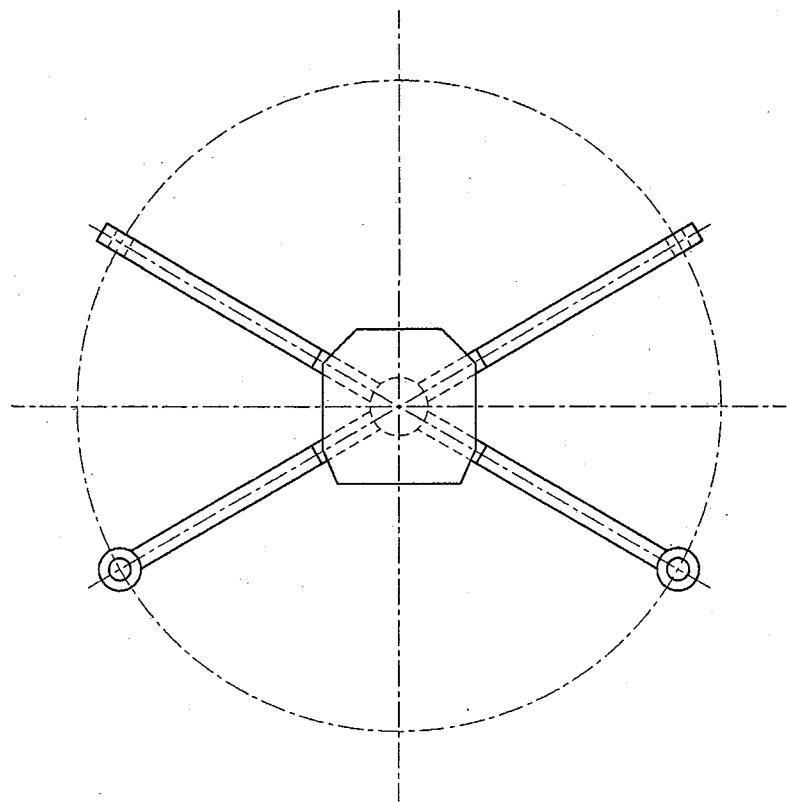


図 3.2-5 アーム詳細図

(単位 : mm)



(単位 : mm)

図 3.2-6 アーム先端ボス部詳細図

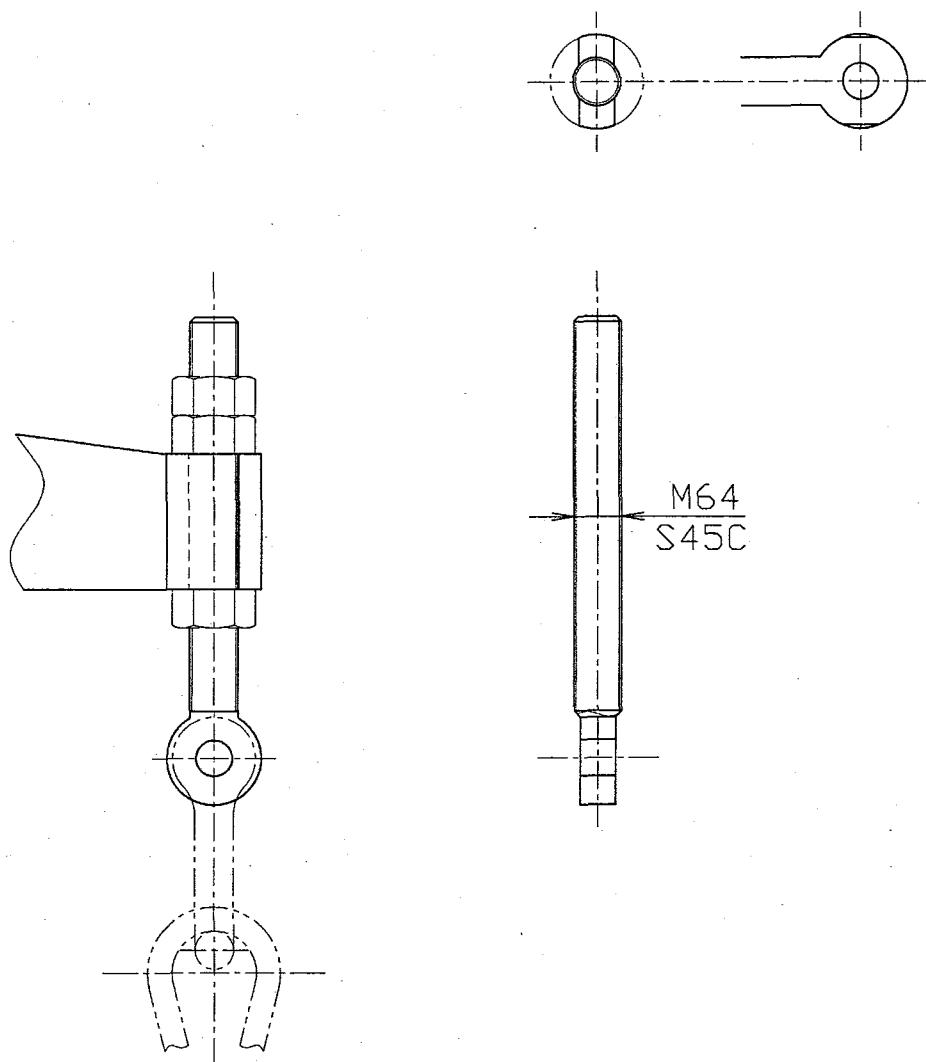
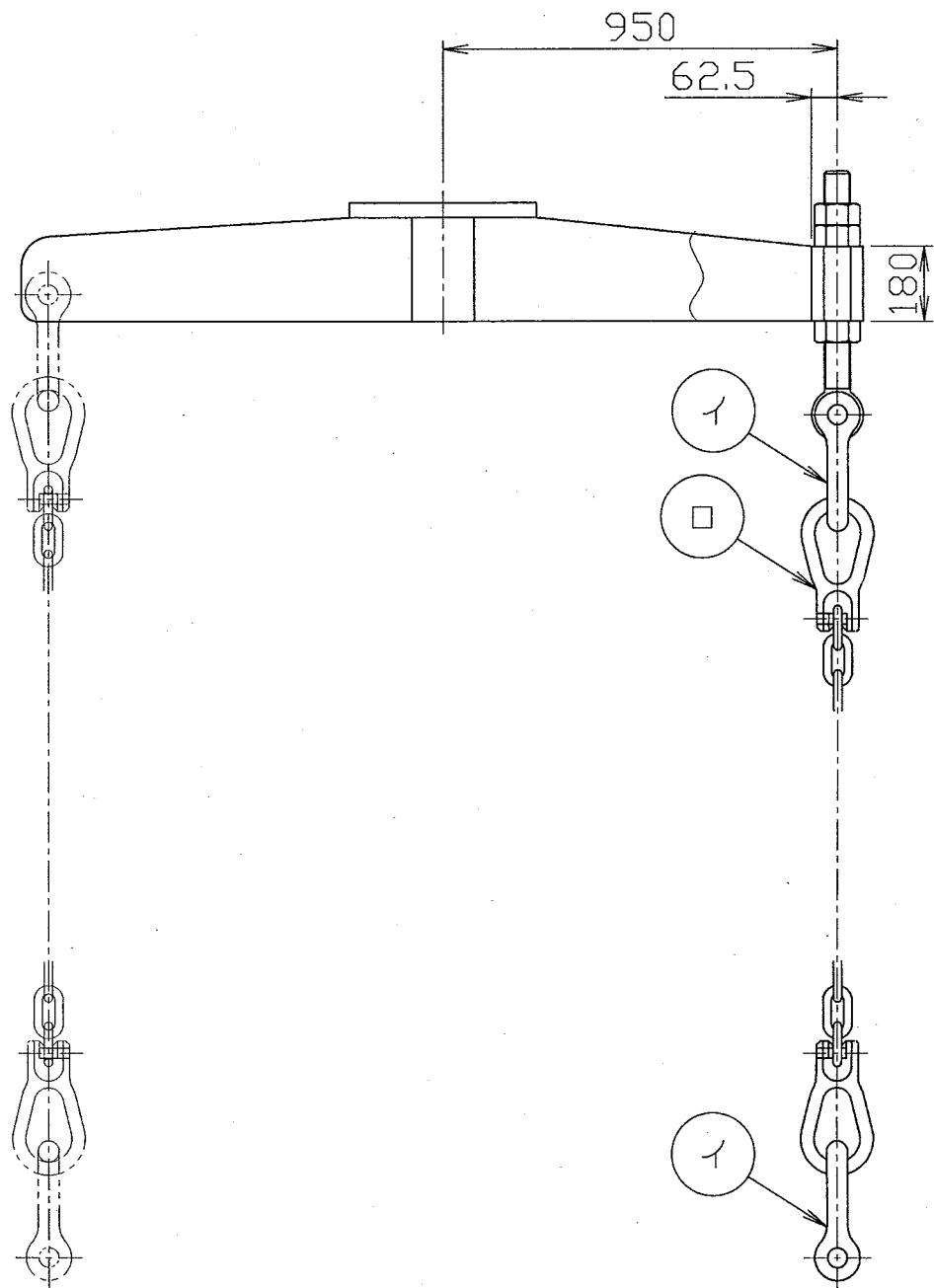
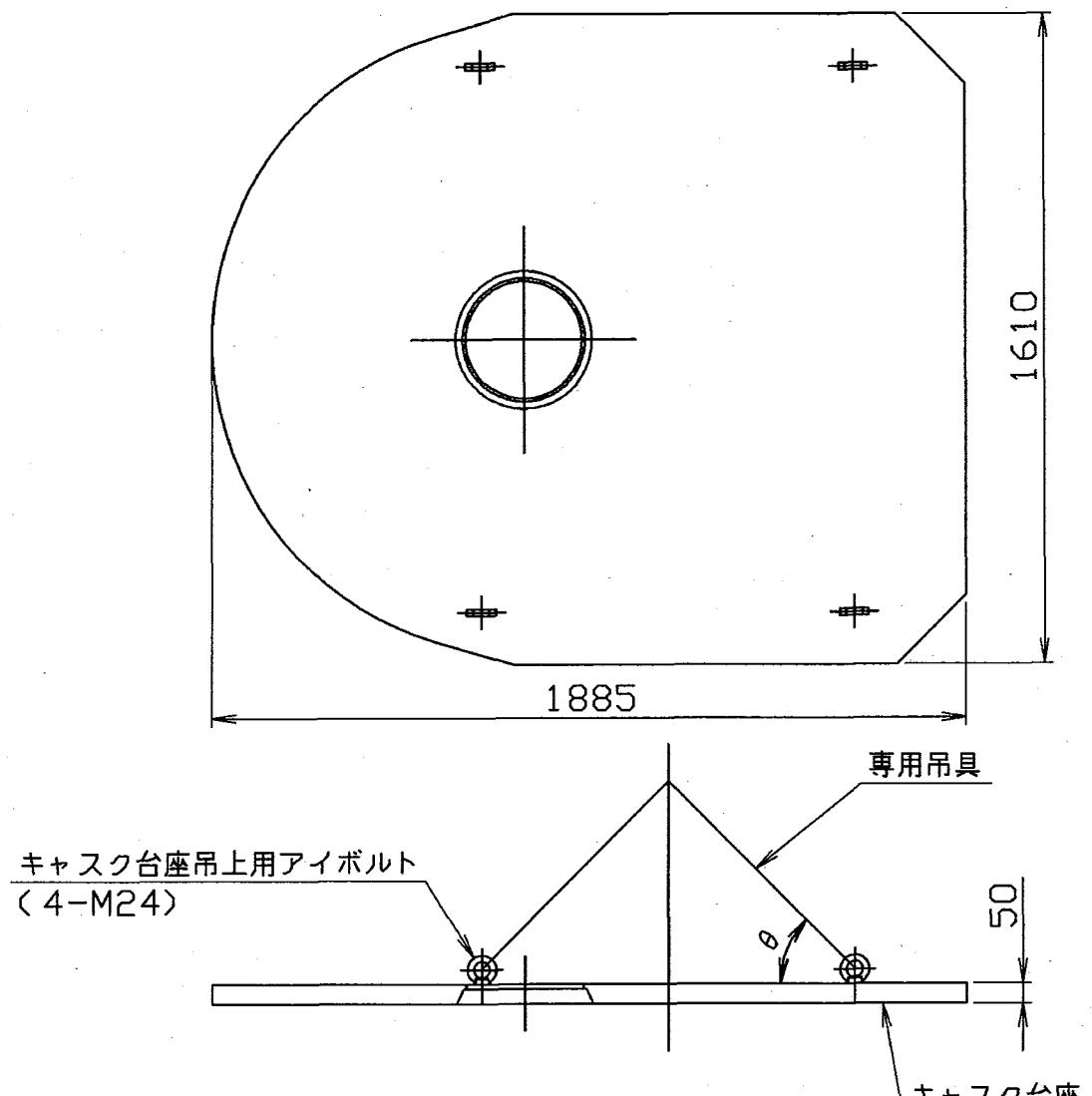


図 3.2-7 長さ調整用アイボルト詳細図



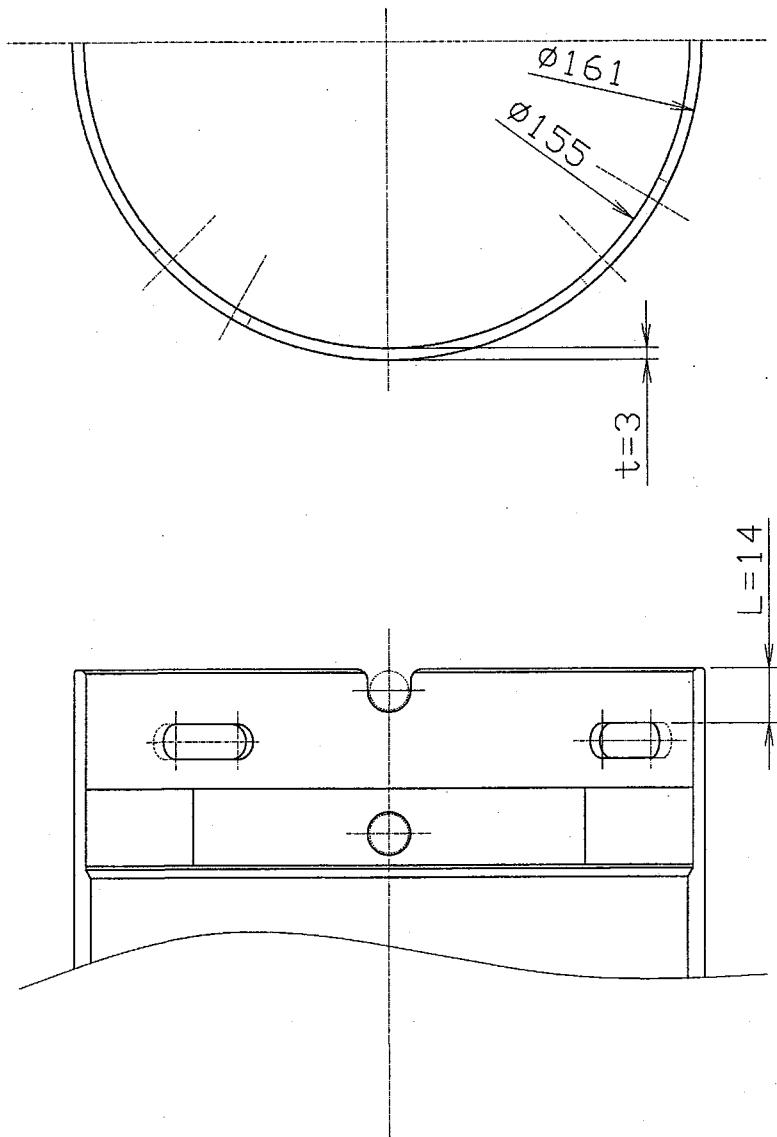
(単位 : mm)

図 3.2-8 その他の吊り機構部品詳細図



(単位 : mm)

図 3.2-9 キャスク台座詳細図



(単位 : mm)

図 3.2-10 ホルダー(昇降時及び回転時)詳細図

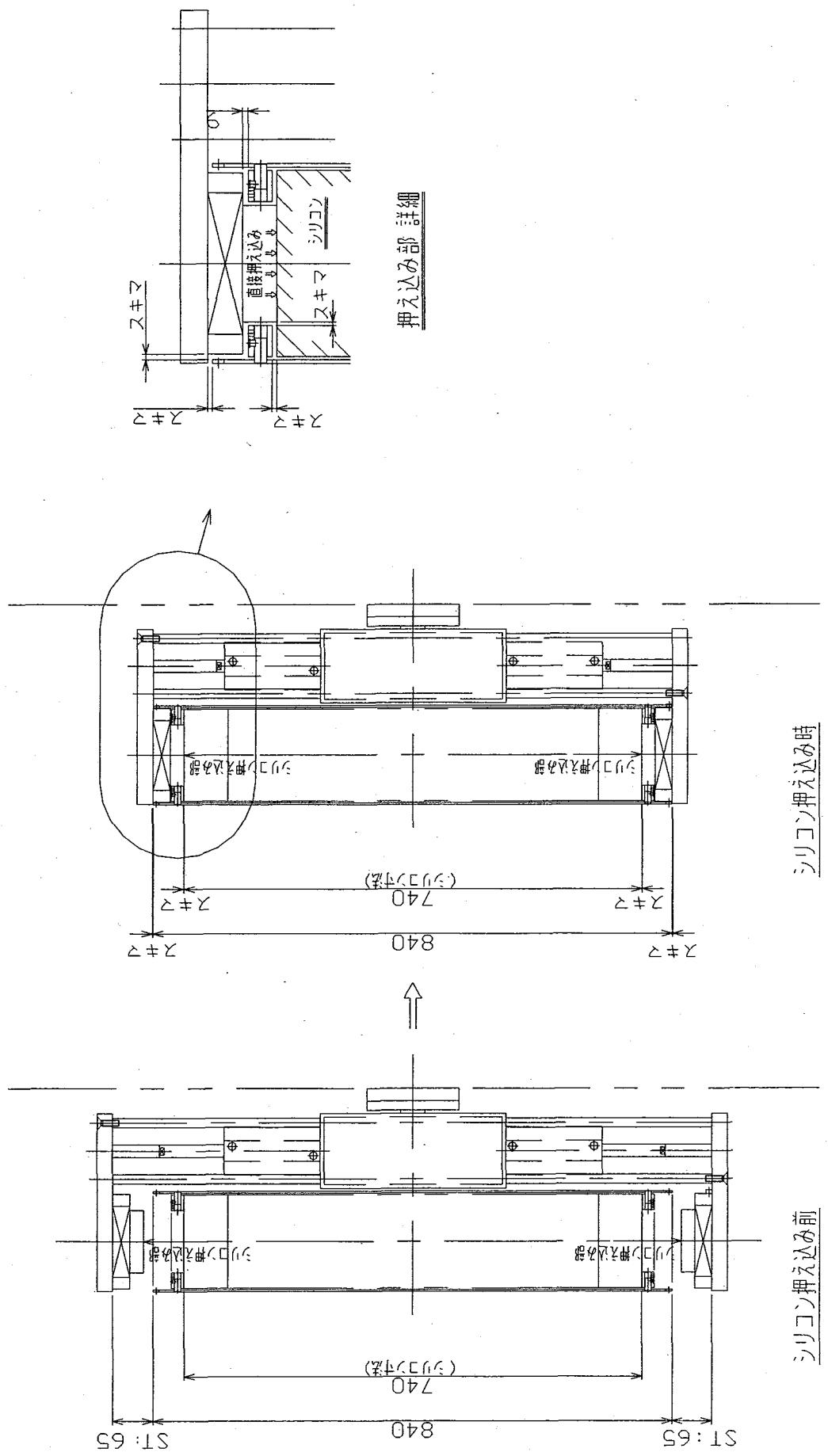
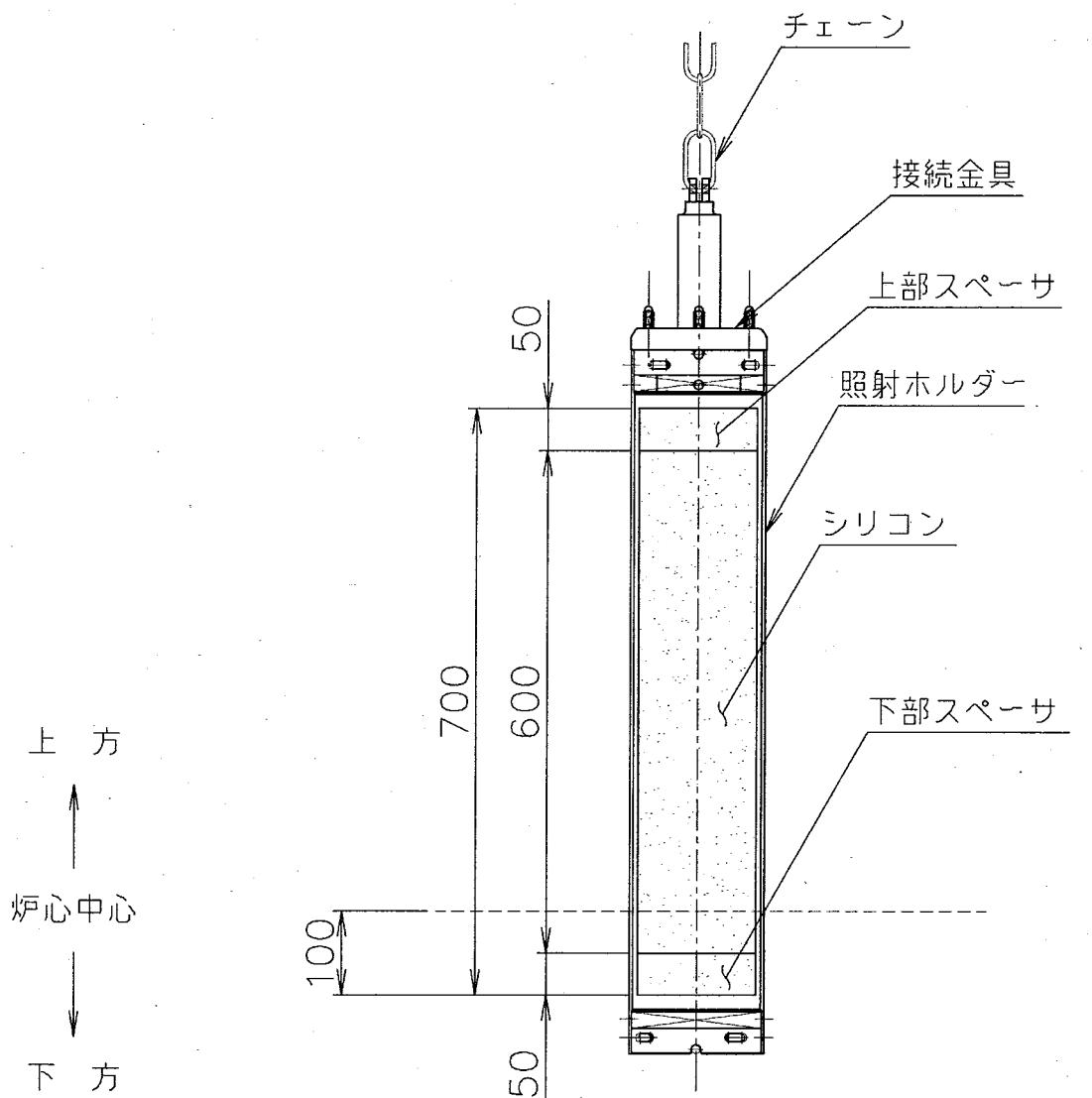


図 3.2-11 ホルダー(反転時)詳細図



(单位: mm)

図 3.3-1 炉心内照射モデル

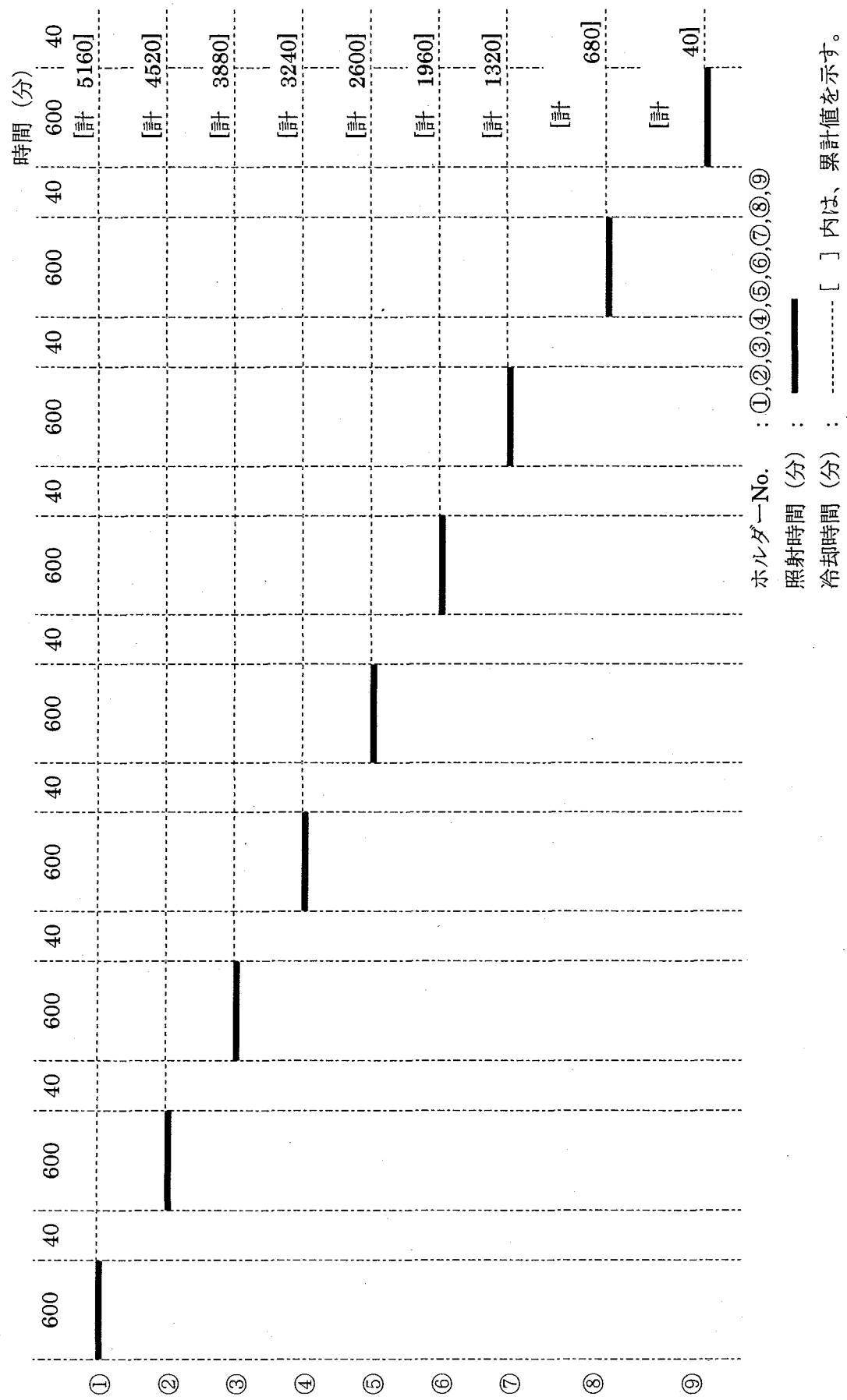


図 3.3-2 ホルダーの冷却時間

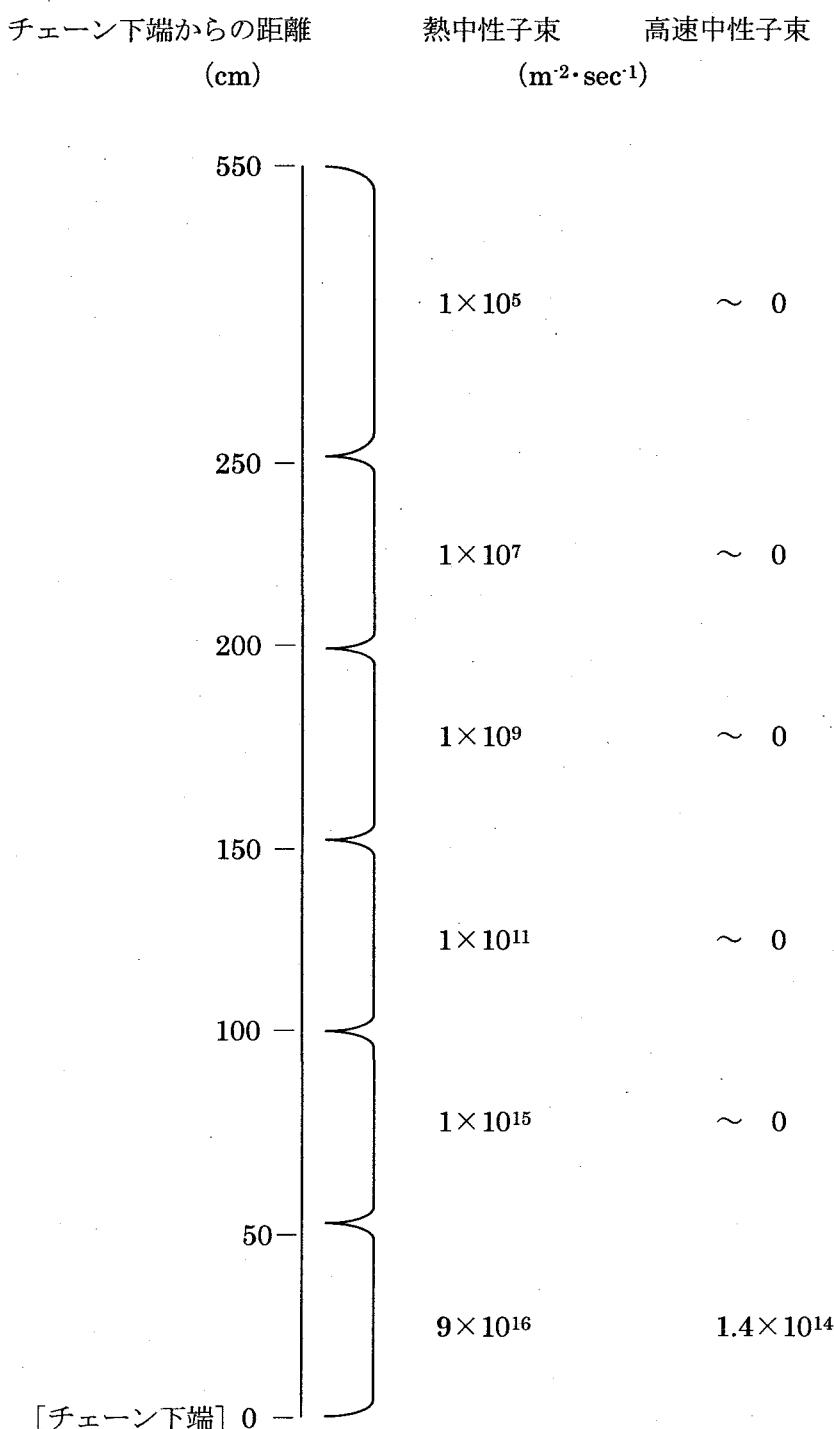
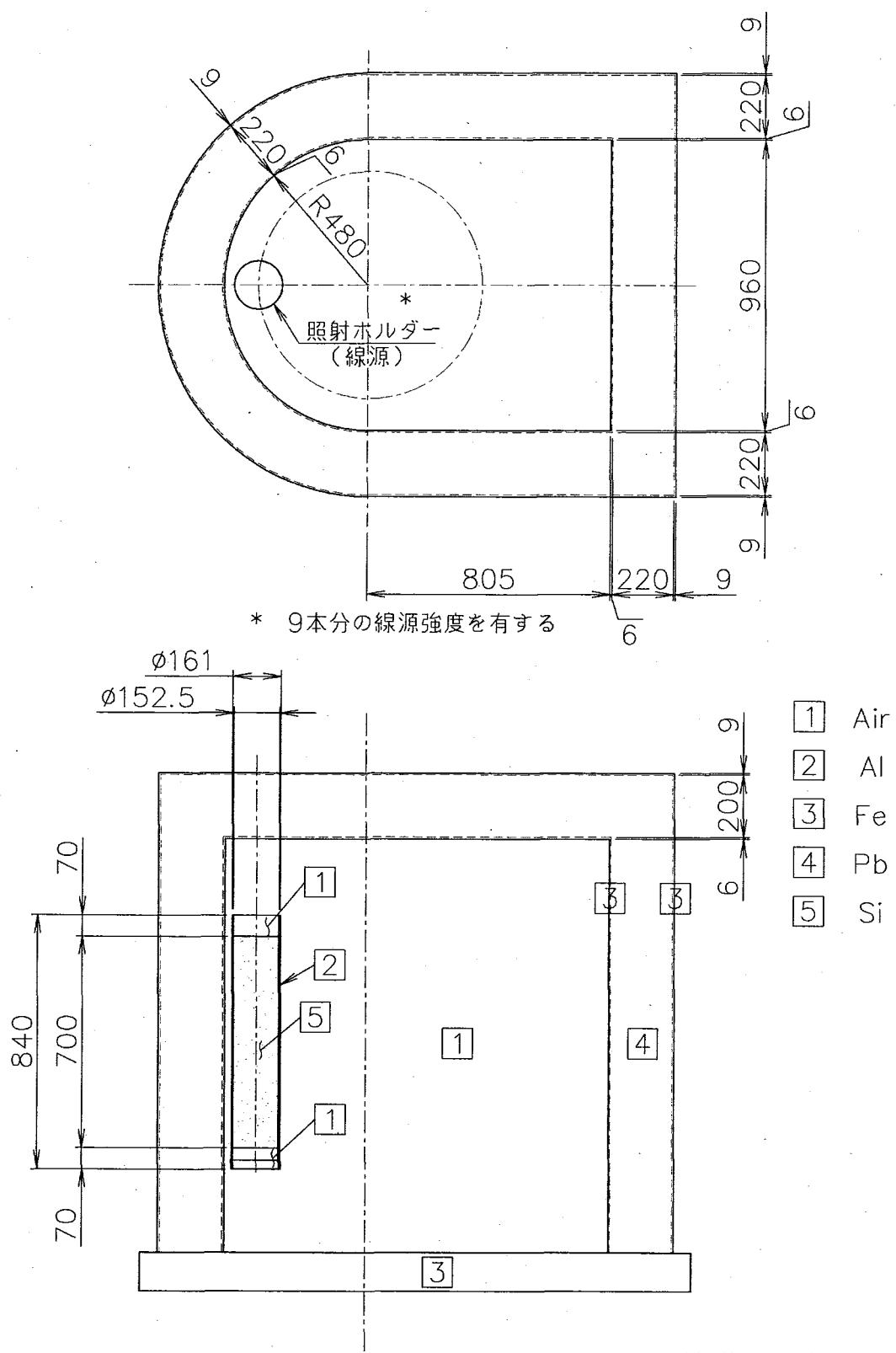
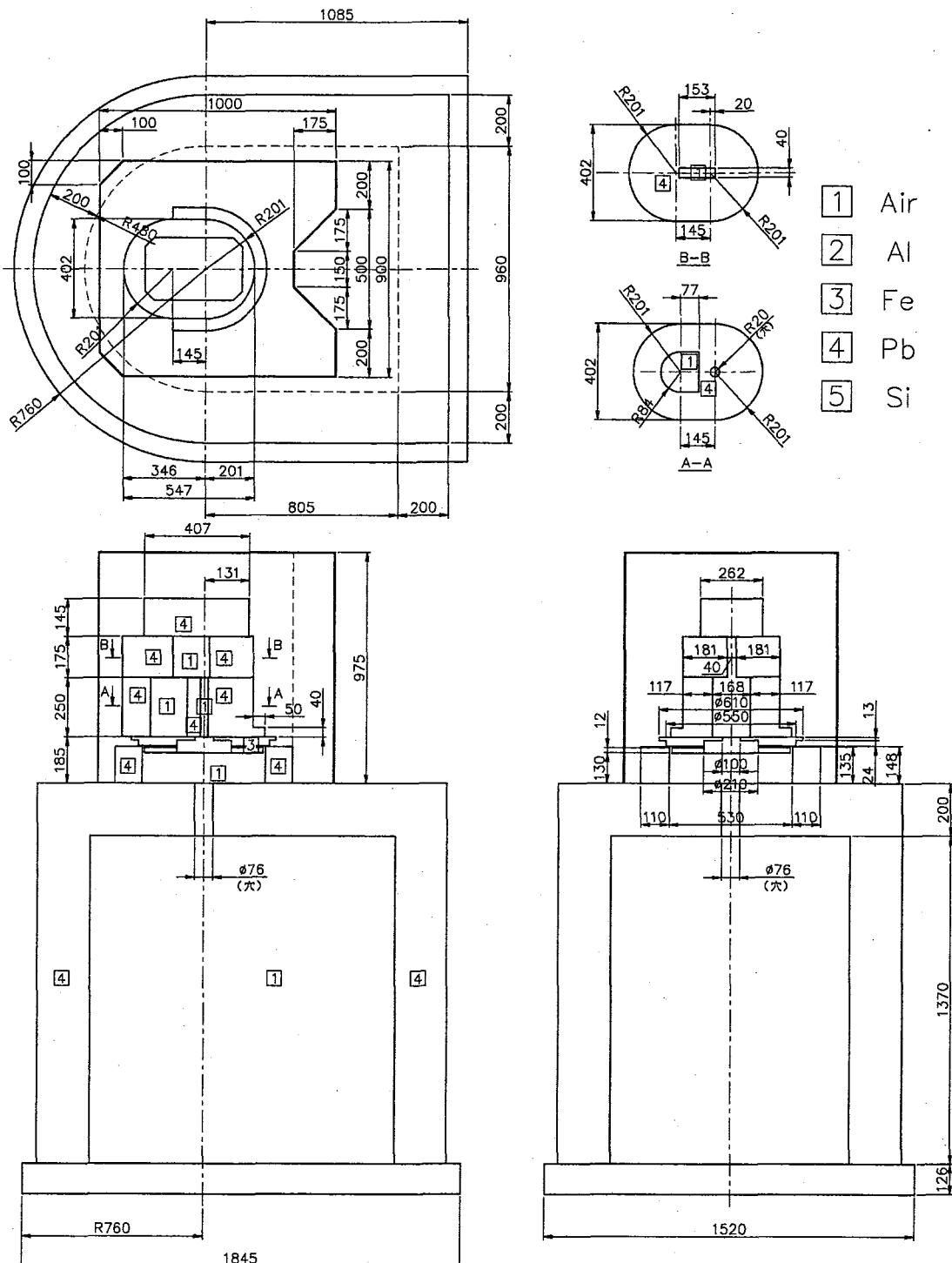


図 3.3-3 アルミリンクチェーン各位置の計算に用いる熱及び高速中性子束



(単位: mm)

図 3.3-4 装荷用キャスク本体部計算モデル



(単位: mm)

図 3.3-5 装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算モデル

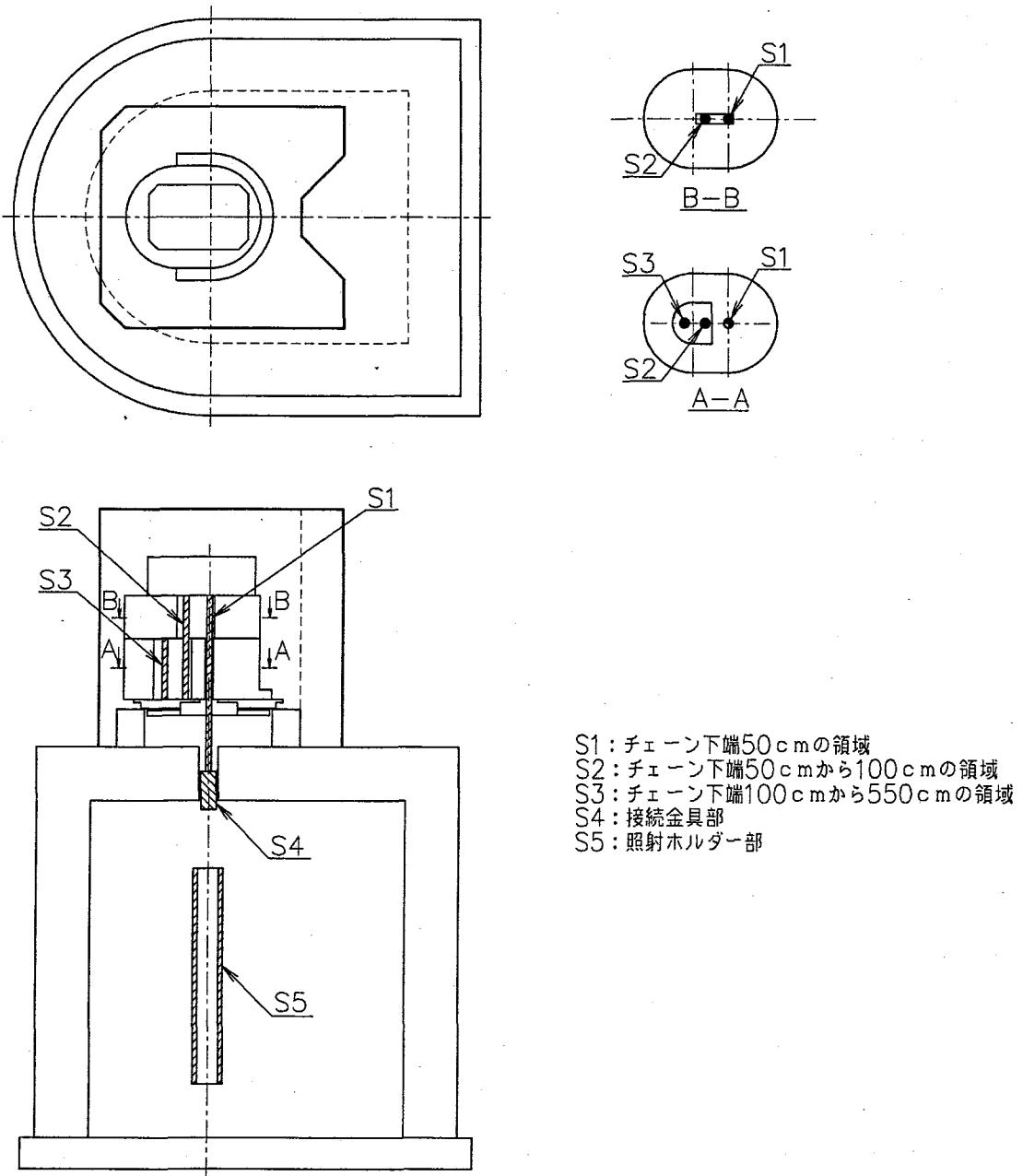
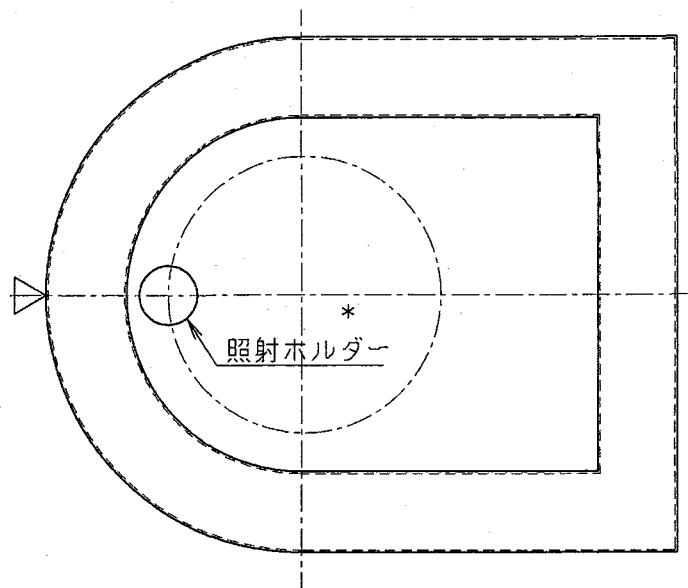


図 3.3-6 装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部線源モデル



* 9本分の線源強度を有する

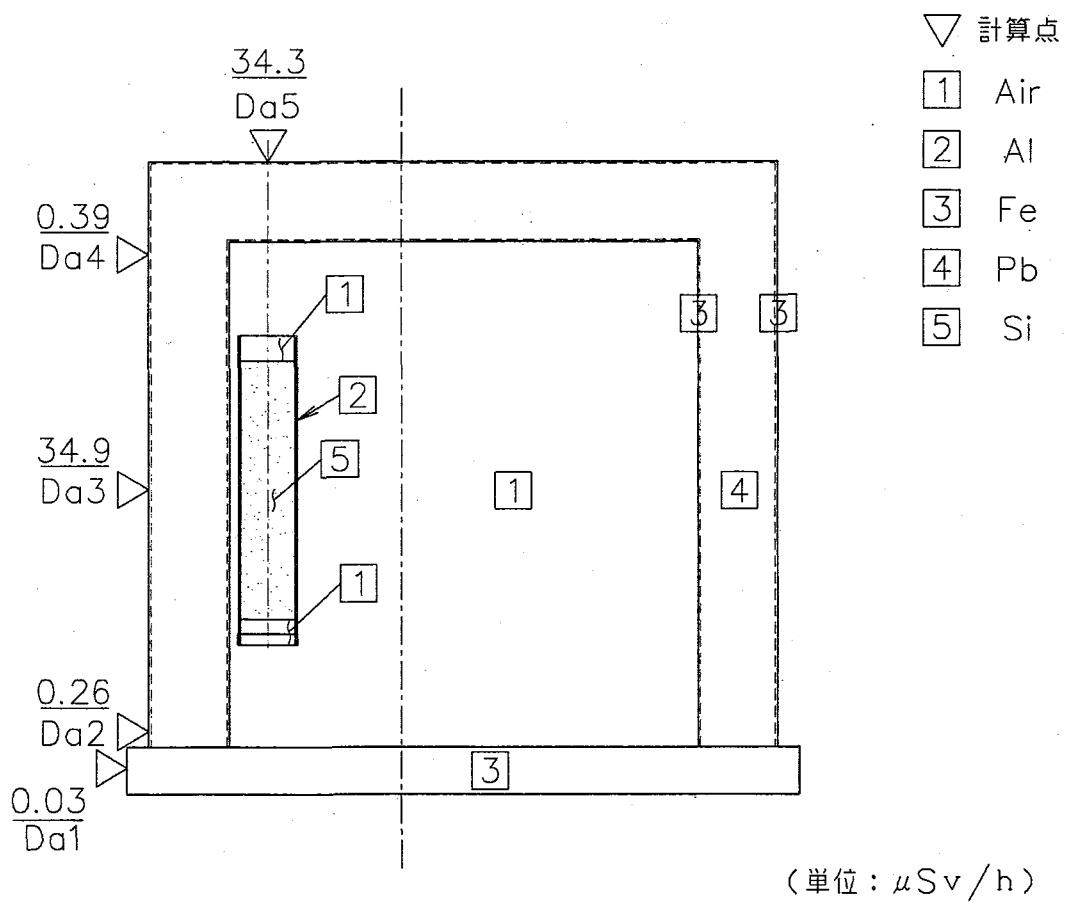


図 3.3-7 装荷用キャスク本体部計算点の位置図

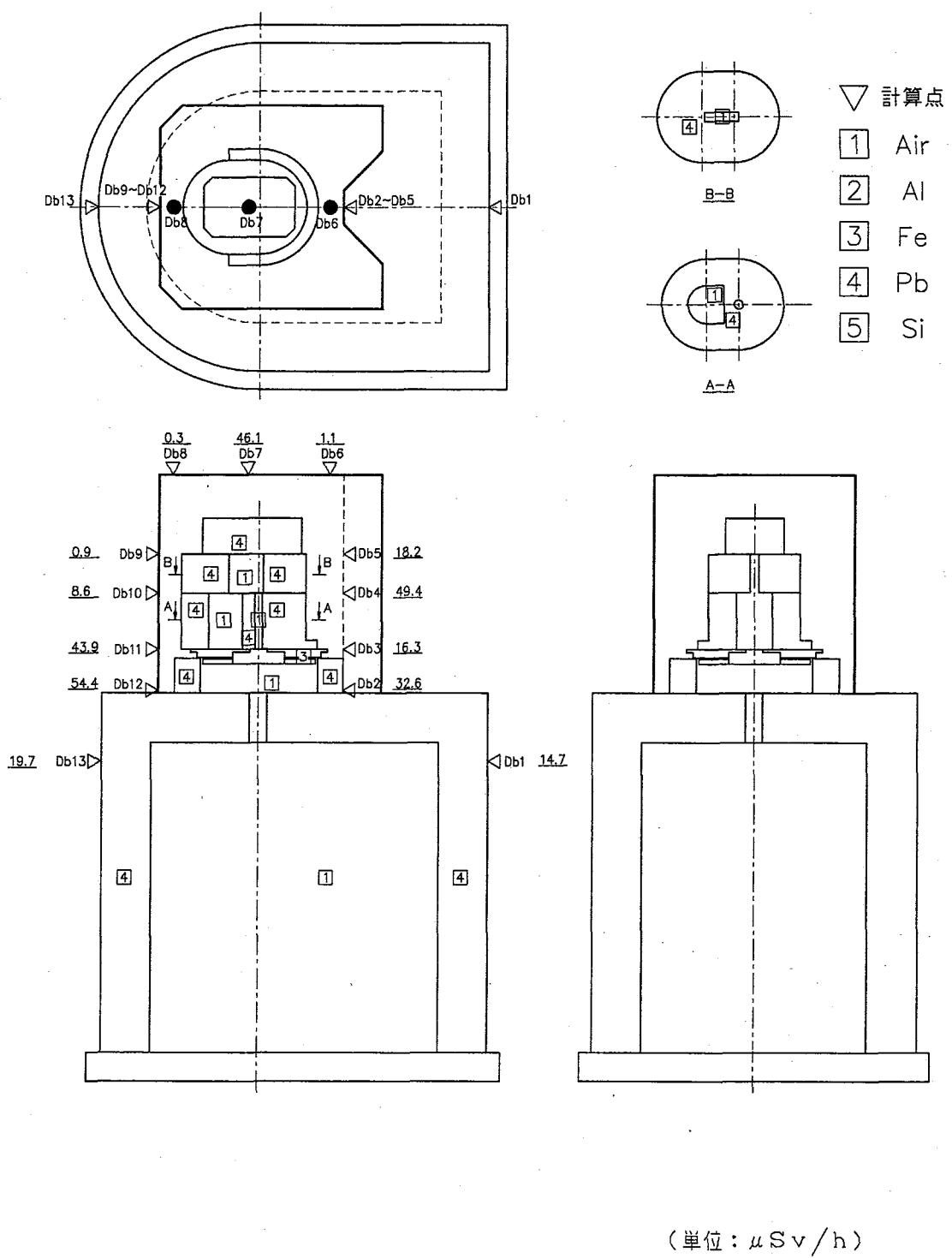


図 3.3-8 装荷用キャスクアルミリンクチェーン収納部計算点の位置図

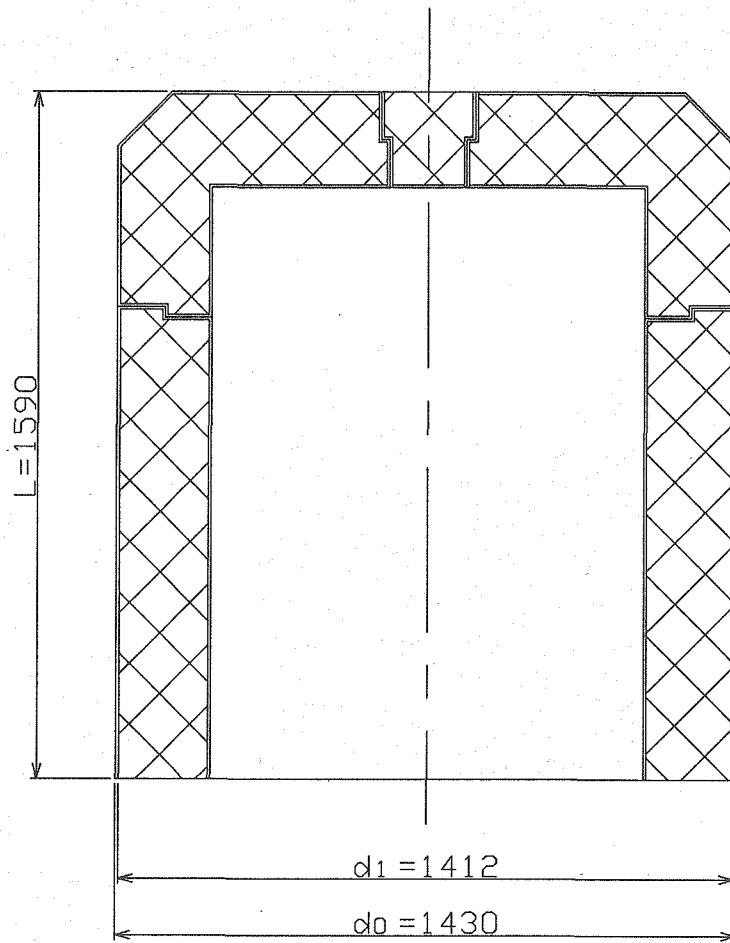
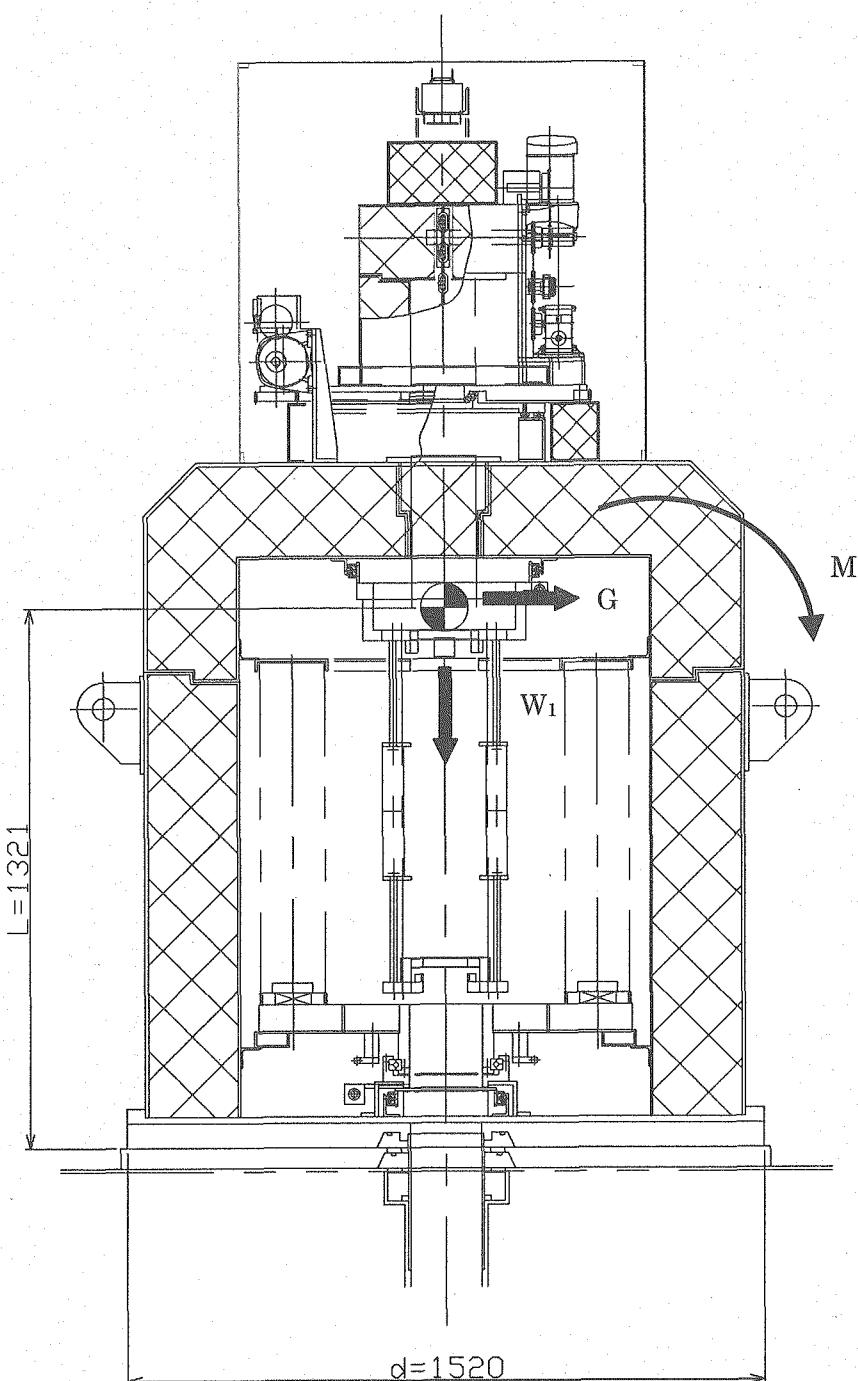
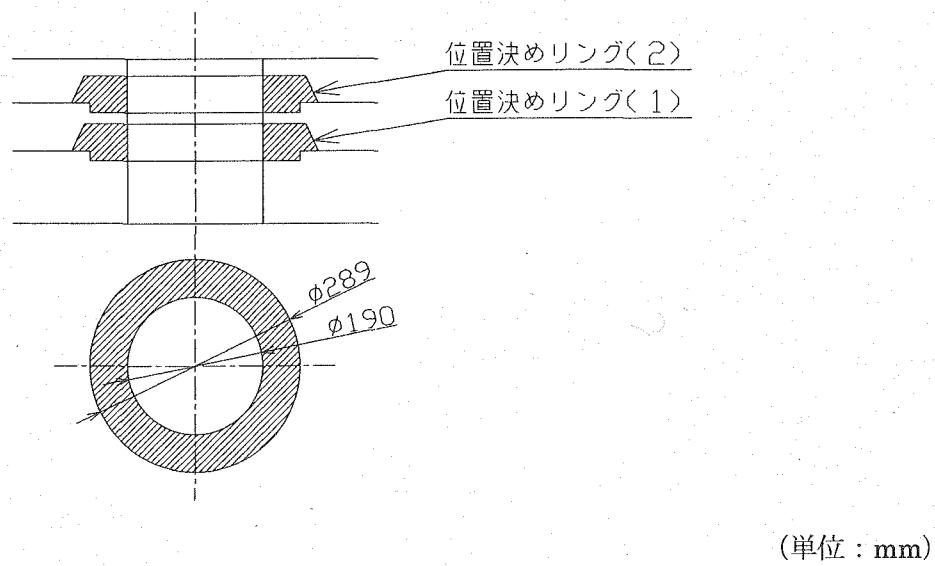


図 3.4-1 固有振動数計算モデル



(単位 : mm)

図 3.4-2 高性能シリコン照射装置転倒計算モデル



(単位: mm)

図 3.4-3 位置決めリング計算モデル

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
立体角	立体度	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
(物質量の)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 ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	m ² ·m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力	ニュートン	N	m ² ·kg·s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
工作效率、放射束	J	N·m	m ² ·kg·s ⁻²
電荷、電気量	C	J/s	m ² ·kg·s ⁻³
電位差(電圧)、起電力	V	W/A	m ² ·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹
静電容量	F	C/V	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ⁴ ·A ²
電気抵抗	Ω	V/A	m ² ·kg ⁻¹ ·s ⁻³ ·A ²
コンダクタンス	S	A/V	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ⁻³ ·A ²
磁束密度	Wb	V·s	m ² ·kg ⁻¹ ·s ⁻² ·A ⁻¹
インダクタンス	H	Wb/m ²	kg ⁻¹ ·s ⁻² ·A ⁻¹
セルシウス温度	℃	Wb/A	m ² ·kg ⁻¹ ·s ⁻² ·A ⁻²
光束度	lm	K	m ² ·s ⁻²
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、力マス線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	Gy	cd·sr ^(c)	m ² ·m ⁻² ·cd=cd
		lx	lm/m ²
		Bq	m ² ·m ⁻⁴ ·cd=m ⁻² ·cd
		J/kg	s ⁻¹
		Sv	J/kg
			m ² ·s ⁻²

表6. 國際単位系と併用されるが國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=60 s
時	h	1 h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(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. 國際単位系と併用されこれに属さない単位で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. 國際単位系に属さないが國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	mi	1 海里=1852m
ノット	kn	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ⁴ m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バルス	bar	1 bar=0.1MPa=100hPa=10 ⁵ Pa
オンストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バー	b	1 b=100fm 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
ダイーン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	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 ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(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
ホルト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 國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	IX unit	1 IX unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁰ 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
ト標準大気圧	atm	1 Torr=(101 325/760) Pa
力口リーン	cal	1 atm=101 325 Pa
ミクロ	μ	1 μ=1mm=10 ⁻⁶ m