



JAEA-Technology

2006-059



JP0750052

中性子核変換ドーピング Si 半導体(NTD-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)

Development of the External Cooling Device to Increase the Productivity of
Neutron-Transmutation-Doped Silicon Semiconductor(NTD-Si)
(Joint Research)

広瀬 彰 和田 茂 笹島 文雄 楠 剛
亀山 巍* 会澤 良二* 菊池 直之*

Akira HIROSE, Shigeru WADA, Fumio SASAJIMA, Tsuyoshi KUSUNOKI
Iwao KAMEYAMA*, Ryouji AIZAWA* and Naoyuki KIKUCHI*

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

January 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology
K3010052

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っておりま

〒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

**中性子核変換ドーピング Si 半導体 (NTD-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)**

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、笹島 文雄、楠 剛

亀山 巍*、会澤 良二*、菊池 直之*

(2006年12月4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大衆化に比例して増大している。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研究用原子炉である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の開発を進めている。

その有効な対策の 1 つとして、既存の JRR-3 均一照射設備に Si インゴットの装荷から照射済み Si インゴットの搬出までに、照射済み Si インゴットの放射能を減衰するための新たな設備 (外部冷却法対応設備) を外付けすることによって増産できる方法を開発した。

JRR-3 の均一照射設備では、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、反転作業を人為的に行っている。このため許容線量率を下回るまでの間、Si 照射設備内で放射能が減衰するのを待つ必要から長い待機が余儀なくされていた。照射設備の運転稼働率を高め Si 生産量の增量を図るために、人的関与の作業行程を見直し待機時間を短縮することが有効と考えた。外部冷却法はこの待機時間を改善する優れた方法として考案され、今回その製作と実用試験を実施した。この外部冷却法対応設備を有効に活用することにより、増産を見込んでいる。

本書は、外部冷却法対応設備の設計、製作及び性能に関するものをまとめたものである。

本報告書は日本原子力研究開発機構と、(財)放射線利用振興協会との共同研究に基づく成果によるものである。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
*(財)放射線利用振興協会

**Development of the External Cooling Device to Increase the Productivity of
Neutron – Transmutation – Doped Silicon Semiconductor (NTD-Si)
(Joint Research)**

Akira HIROSE, Shigeru WADA, Fumio SASAJIMA, Tsuyoshi KUSUNOKI
Iwao KAMEYAMA*, Ryouji AIZAWA* and Naoyuki KIKUCHI*

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 December 4, 2006)

Neutron-Transmutation-Doped Silicon Semiconductor (hereinafter referred as 'NTD-Si') is the best semiconductor for the power device. The needs of NTD-Si increase recently in proportion to the popularization of hybrid-cars. A fission research reactor, which is a steady state neutron source, is being expected as the best device to meet the needs. So far, we have reconsidered the existing approach which is employed for NTD-Si production works at the research reactors JRR3, JRR-4 and JMTR of JAEA so as to meet the needs. As one of the effective measures, we found out that the productivity can be increased by incorporating a new device to cool down radioactivity of irradiated silicon ingots at the place outside the main stream from the loading of silicon ingots to the withdrawal of irradiated ingots to the existing JRR-3 Uniformity Irradiation System. Consequently, we developed and installed the device (hereinafter referred as 'external cooling device').

After an ingot was irradiated once, it is turned over manually and irradiated again in order to irradiate the ingot uniformly. With the conventional system, it was necessary to wait the radioactivity of ingot decrease less than the permissible level with holding the ingot in the irradiation equipment. It was effective to shorten the waiting period by using an external cooling device for production increase of NTD-Si.

It is expected that the productivity of NTD-Si will be increased by using the external cooling device.

This report mentions the design of the external cooling device and verification between its design specifications and the performance of the device completed.

Keywords: Neutron-Transmutation-Doped Silicon Semiconductor, NTD-Si, JRR-3,
Research Reactors, External for Cooling Device, Production Increases

This work was performed by JAEA as a joint research with RADA.

* Radiation Application Development Association

目 次

1	はじめに	1
2	NTD-Si の概要	
2.1	製造原理と開発経緯	5
2.2	JRR-3 均一照射の方法	9
2.3	NTD-Si 増産計画	9
2.4	外部冷却法対応設備の概要	11
3	外部冷却法対応設備の開発	
3.1	外部冷却法対応設備の設計	15
3.2	設備の技術開発	37
3.3	Si 照射の流れ	46
4	製作及び受入検査	
4.1	外部冷却法対応設備製作の概要	50
4.2	製作仕様	52
4.3	受入検査要領	62
4.4	受入検査結果	63
5	性能確認試験	
5.1	計画工程及び作業手順	64
5.2	コールドランで得た知見	67
5.3	ホットランによる線量測定結果	70
5.4	ホットランで得た知見	80
5.5	計画被ばく	82
6	おわりに	83
	謝辞	84
	参考文献	84
付録 A	均一照射設備 Si 装荷孔上部の γ 線スペクトル測定	85
付録 B	Si 装荷孔線量測定記録(遮へい効果調査)	92
付録 C	シリコン照射パターン (48 時間冷却及び 20 時間冷却)	93
付録 D	保管容器耐震強度計算書	117

Contents

1	Introduction	1
2	Outline of NTD-Si	
2.1	Principle of Si doping and details of development	5
2.2	Method of JRR-3 uniformity irradiation equipment	9
2.3	NTD-Si production increase plan	9
2.4	Outline of equipment for external cooling device	11
3	Development of equipment for external cooling device	
3.1	Design of equipment for external cooling device	15
3.2	Technological of equipment development	37
3.3	Flow of Si doping	46
4	Manufacture and acceptance check	
4.1	Outline of equipment for external cooling device	50
4.2	Specification of manufacture	52
4.3	Acceptance check points	62
4.4	Results	63
5	Performance confirmation examination	
5.1	plan process and work procedure	64
5.2	Finding obtained by cold run	67
5.3	Radiation dosimetry result by hot run	70
5.4	Finding obtained by hot run	80
5.5	Plan of individual doses	82
6	Conclusions	83
	Acknowledgments	84
	Reference	84
	Appendix A γ spectrum measurement in the upper part of Si loadings hole	85
	Appendix B Dosimetry record of Si loadings hole (Investigation of effect of shield) ..	92
	Appendix C Pattern of silicon irradiation (Cooling time of 48 hours and 20 hours) ..	93
	Appendix D Earthquake resistant construction statement of container	117

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。今日、半導体を用いた電子機器の発達はめざましいものがあり、技術革新の中核をなしている。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⁾

半導体素子の基板となるn型のSi基板は、CZ(Czochralski)法と呼ばれる製造過程でP、Ge、Asなどを拡散法で添加する。CZ法は、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単結晶Siを製造する方法で、「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、FZ(Floating Zone)法と呼ばれる製造過程であり、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⁾

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、中性子照射によって抵抗率を径方向及び軸方向に一様にすることができる。FZ単結晶の用途としては、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、サイリスタ等の電力用個別デバイスに使用される。

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 No.3)では、重水タンク内のSI-1孔とよばれる照射孔でNTD法を用いたSi照射(以下「NTD-Si」という。)を行っている。JRR-3原子炉鳥瞰図を図1.1-1に示す。

Si照射を行うJRR-3均一照射設備は、重水タンク内の照射筒内でSiインゴットを回転させることで半径方向の中性子照射量を均一にすることができる、上下反転することにより垂直方

向の均一度も向上できる設備である。均一照射設備は、原子炉頂部に設置した Si 照射装置、原子炉プール内の案内管及び重水タンク内の照射筒により構成される。均一照射設備概略図を図 1.1-2 に示す。

Si インゴットは、Si 照射装置から照射筒に Si インゴットを吊り下げ、重水反射体領域の原子炉燃料領域近傍で照射を行う。その後、Si 照射装置内で一定時間以上の放射能の減衰を待ち、中性子照射による軸方向分布を均一化するための再照射を行う。

直径 152.4 mm(6 インチ)、長さ 600 mm の Si インゴットの均一度は、径方向 3 %以内、垂直方向 5 %以内を達成しており²⁾、使用開始以来現在に至るまで年間約 3ton が照射され、ユーザーの仕様を満足する均一度で照射できる設備として提供している。

現在 Si 照射装置で一定時間以上、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が、NTD-Si 増産のためには、放射能を減衰させている待機時間を短縮する必要があり、その方法の一つとして外部冷却法が考案された。外部冷却法では、これまでの待機時間（冷却時間）を約 1/2 以下に短縮することを設計目標とした。しかし、冷却時間の短縮は作業者が受ける放射線被ばく量の増加に直接つながることになる。そこで、照射物から遠隔遮へいすることで作業位置での空間線量を低減する構造を取り入れた。具体的には、照射済 Si インゴット及びホルダーを移送用遮へい体内に収納し、外付けの保管容器に移動して放射能を減衰させる方法である。

本書では、外部冷却法対応設備の概念設計、詳細設計、製作、性能確認試験について述べる。第 2 章では NTD-Si の概要、第 3 章では外部冷却法対応設備の開発、第 4 章では製作及び受入検査、第 5 章では性能確認試験について述べる。

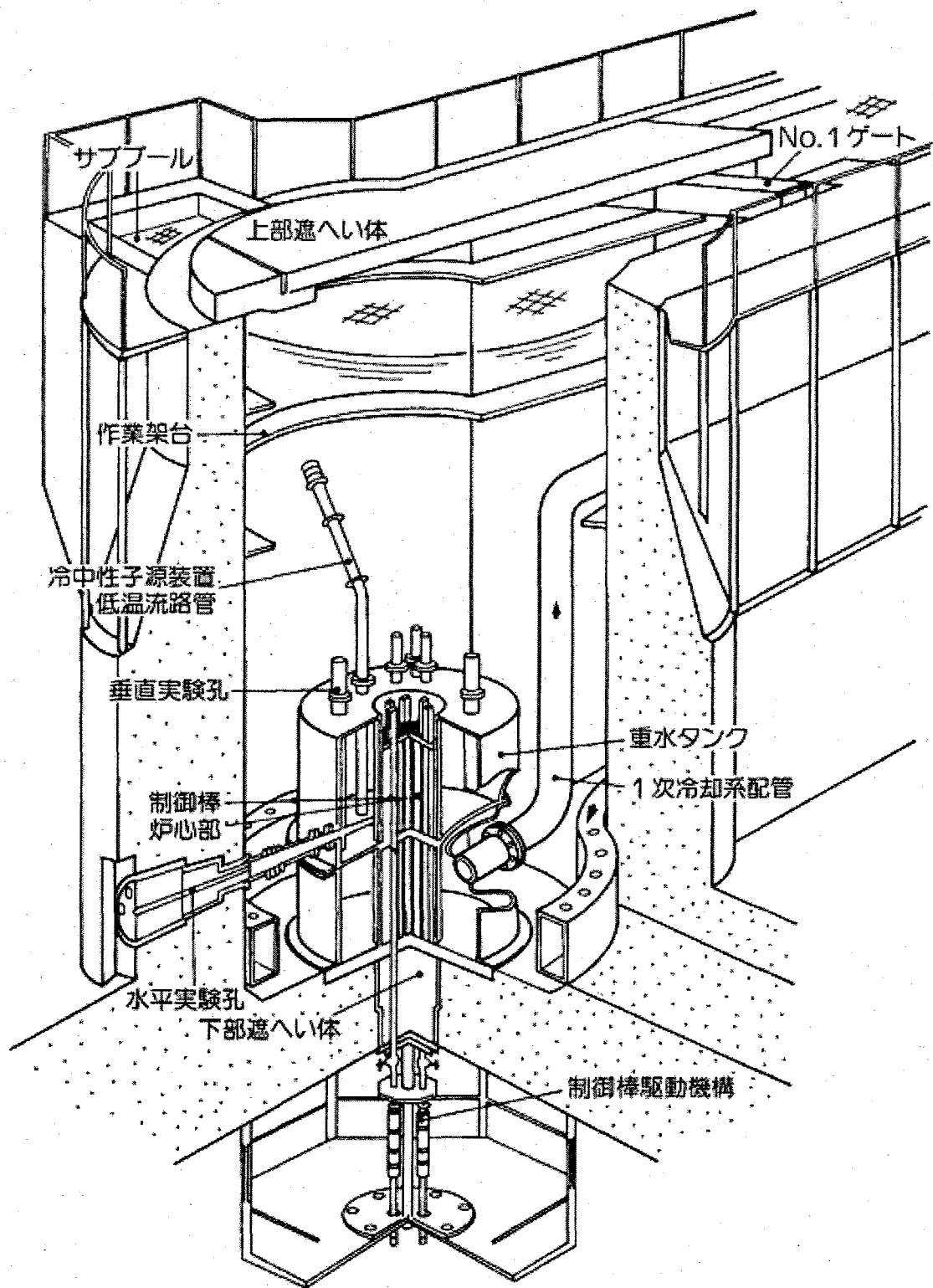


図 1.1-1 JRR-3 原子炉鳥瞰図

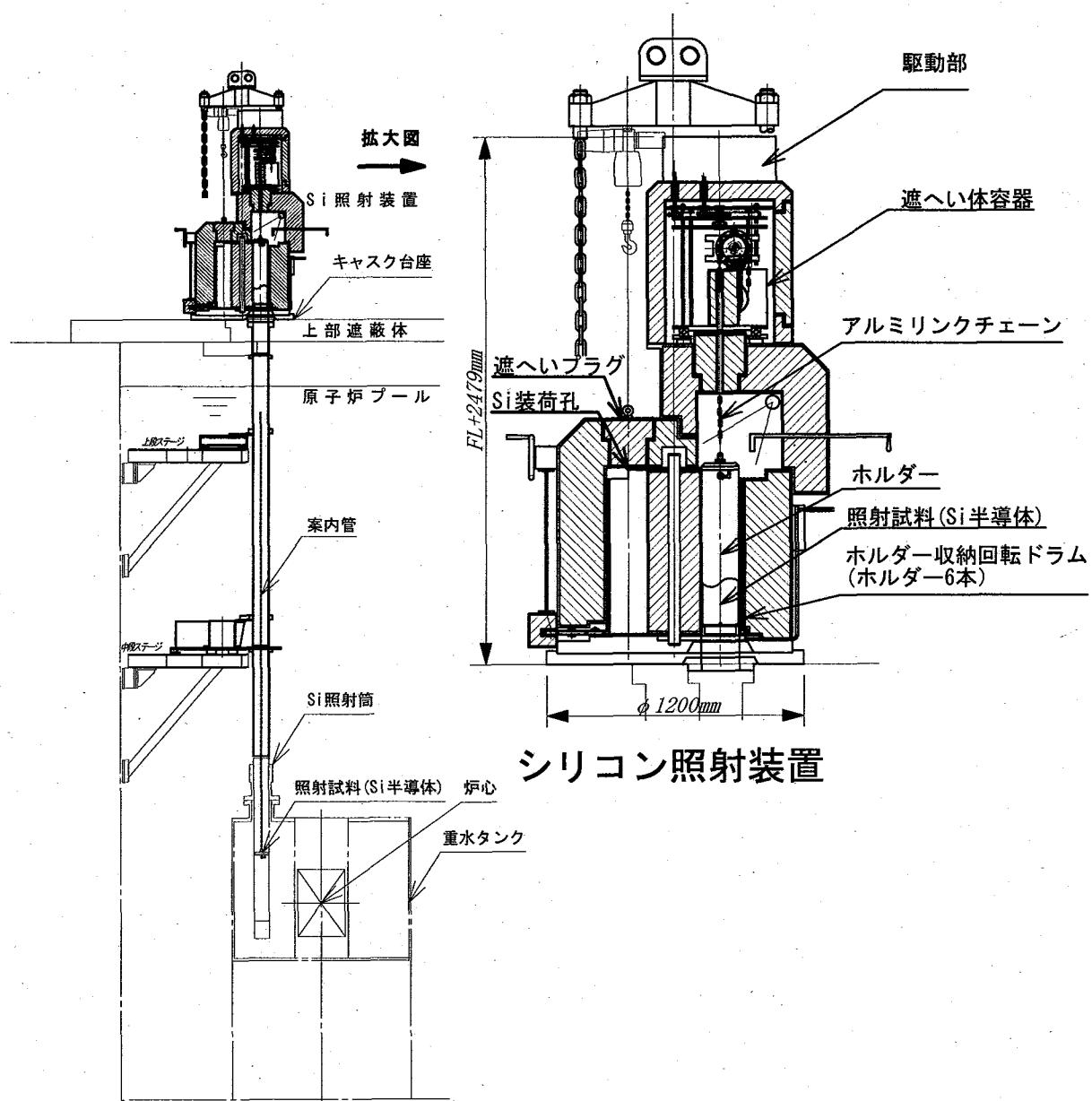


図 1.1-2 均一照射設備概略図

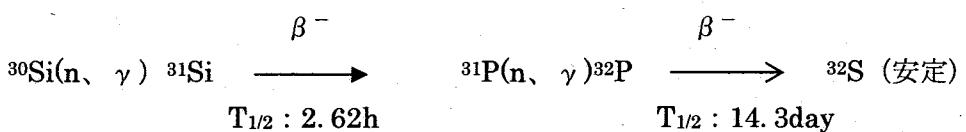
2 NTD-Si の概要

2.1 製造原理と開発経緯

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 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つた。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。図 2.1-1 に半導体生産方法と不純物濃度を示す。

我が国では、原子力機構の前身である日本原子力研究所が 1975 年に Si 材料メーカーからの依頼により、¹⁾ 研究炉における NTD-Si の製造に関する照射実験を開始し、1977 年からは(財)放射線照射振興協会(現(財)放射線利用振興協会)によって Si 単結晶の実用照射を開始した。

Si 単結晶は、Si-28(存在比:92.18%)とその同位体である Si-29(存在比:4.71%)と Si-30(存在比:3.12%)で構成されている。また照射用 Si の純度(高純度単結晶 Si インゴット)はイレブンナインクラス(99.99999999%)の高純度である。Si 単結晶を原子炉内で照射すると同位体である Si-30 が次の式で示されるように熱中性子を吸収し核変換により P-31 となる。NTD 法はこの反応を利用して単結晶内にドナー(半導体の電子供与体)である P をドーピングするものである。中性子照射前の Si は絶縁物に近いほど導電性が低いが、中性子照射によってごく少量の P が生成すると、その量に応じて導電性が上がり n 型の Si 半導体となる。

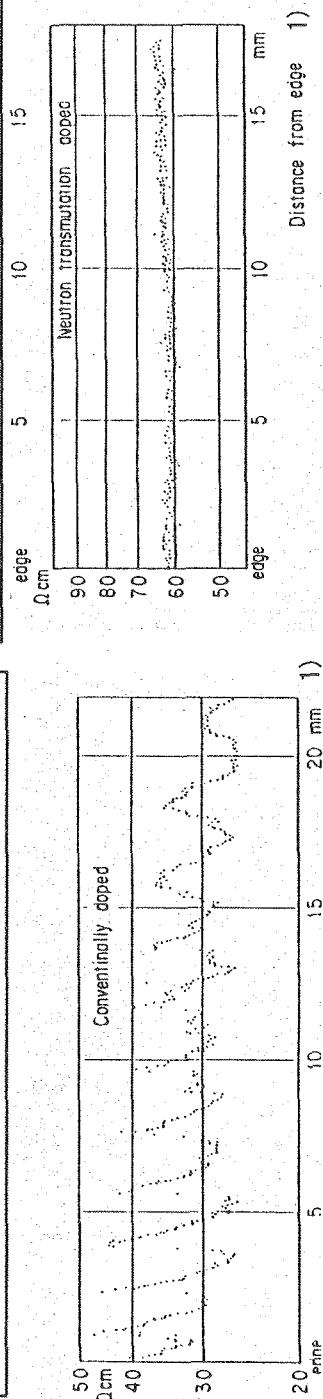
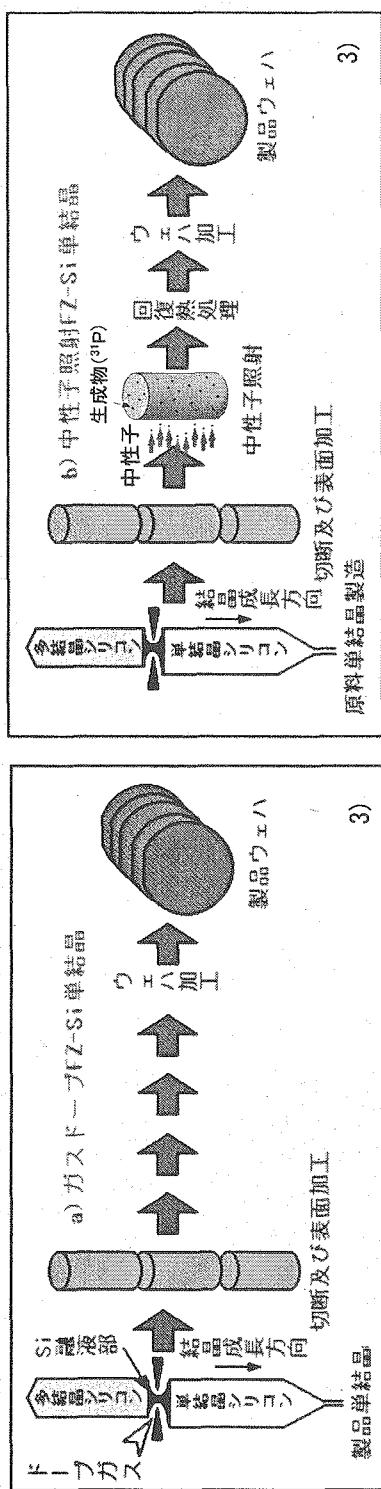


照射後には、照射によって生成される Si の単結晶内に生ずる様々な格子欠陥を除去するため、熱処理(回復処理)が行われる。熱処理は、照射する原子炉によって格子欠陥の状態が変わるので、それぞれ異なる条件となる。一般的には、軽水炉と重水炉とでは、重水炉の方が格子欠陥が少なく、良い特性が得られる。

照射は単結晶を研究炉の照射場に装荷することによって行われる。照射による P の生成量は照射量(時間)に依存する。従って照射量を制御することにより希望の抵抗率にすることができる。

このように、NTD-Si は抵抗率の均一性に優れていることから、電力用サイリスタ(Si 制御整流器)として使用されるようになり、半導体パワーデバイスとして一般産業分野から家電分野まで広く利用されている。また、中性子照射量と抵抗率の変化が明確であるため、希望する抵抗率の単結晶を作り易く、精度の高い半導体素材を得ることができる。更に、大電力素子

では、大口径に加えて、高比抵抗領域での均一性が要求されるため、NTD-Si の必要性が大きくなっている。半導体直径も増大の一歩をたどっており、現在は 127 mm(5 インチ)、152.4 mm(6 インチ)が主流となっているが、今後さらなる大口径化が予想される。図 2.1-2 に Si 単結晶製造から NTD-Si 製造までの流れを示す。

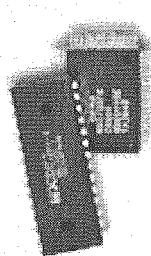


■ 不純物の濃度分布が不均一で抵抗値がバラツクためIC、LSI等の小さい集積素子に使用される。

■ リンの高い均一性及び高精度の濃度



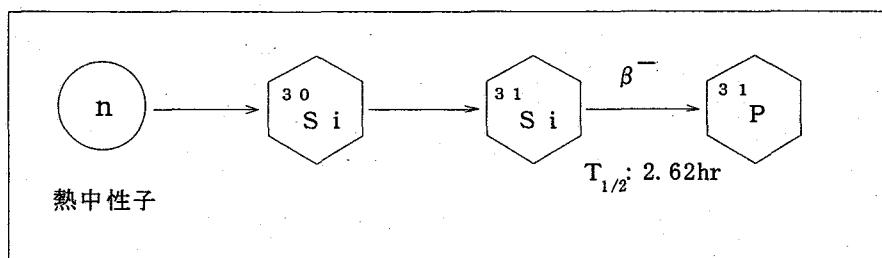
■ 希望抵抗値に調整可



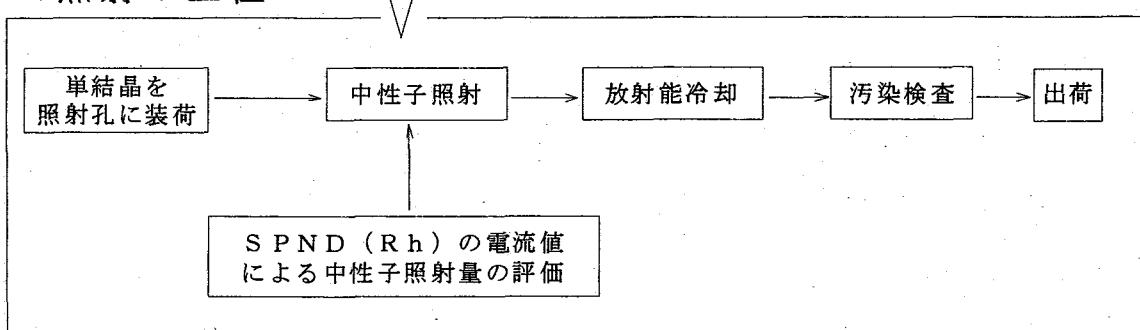
■ 大電流素子及び高品質素子への活用

図 2.1-1 半導体生産方法と不純物濃度

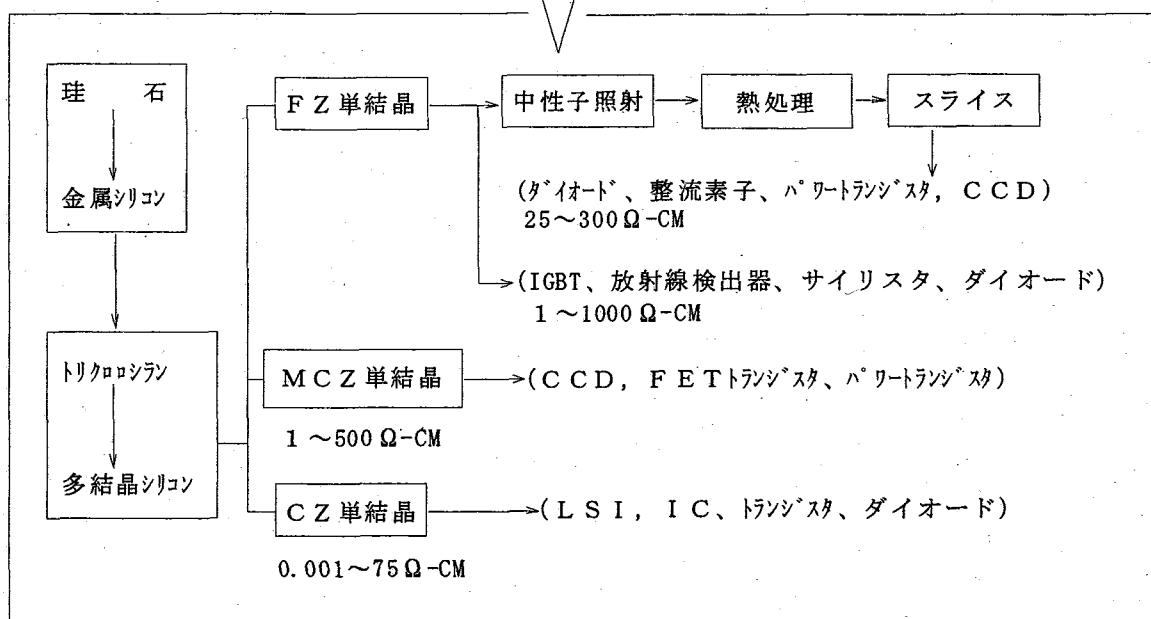
< N T D の原理 >



< 照射の工程 >



< 単結晶の製造 >

図 2.1-2 Si 単結晶製造から NTD-Si 製造までの流れ ⁴⁾

2.2 JRR-3 均一照射の方法

JRR-3 の炉心の大きさは、直径：600 mm、高さ：750 mmである。これに対し、Si インゴットの大きさは、直径：152.4 mm、長さ：600 mmと大きいため、単純に炉内に装荷した状態の照射では中性子束分布は均一にならない。このため、均一に照射するため、径方向は偏心の無いよう回転させながら照射する方法としている。垂直方向の照射では、Si インゴットの上下を反転させて 2 度に分けて照射する方法で利用している。⁵⁾

2.3 NTD-Si 増産計画

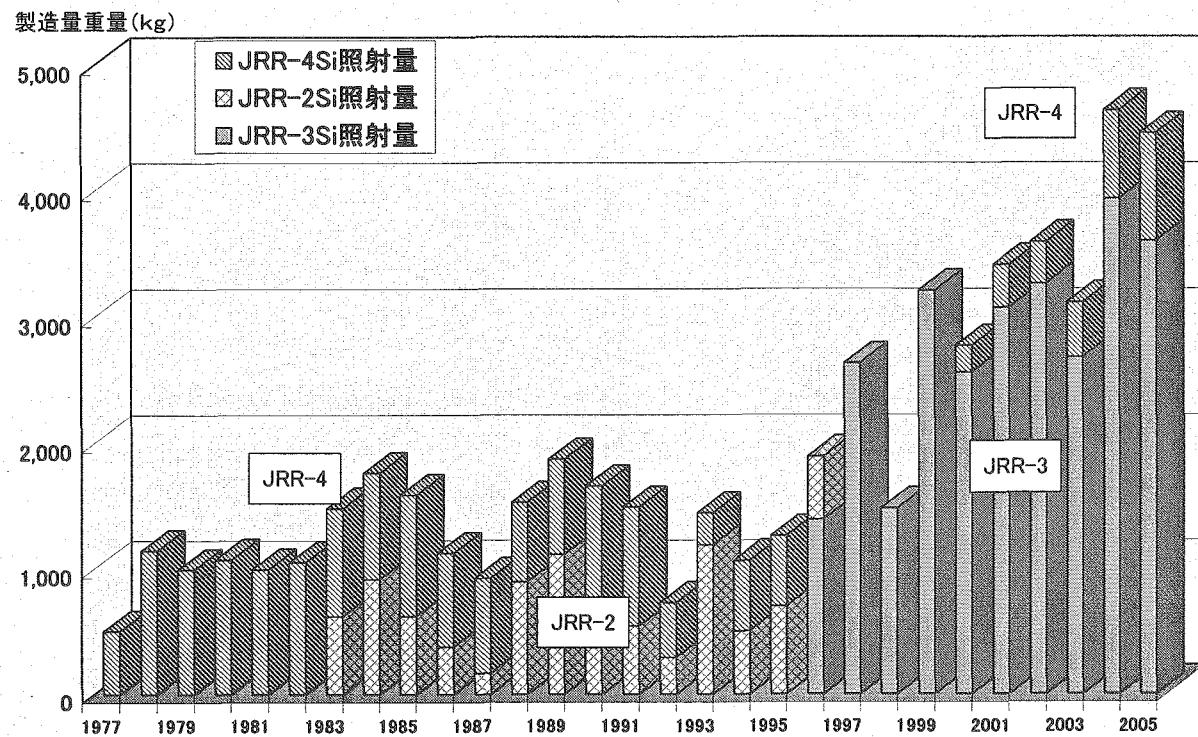
現在、原子力機構の研究炉(JRR-3 及び JRR-4)において NTD-Si の製造を実施しているが、国内の需要(推定、90ton)と比べると極めて能力が乏しい状況にあり、NTD 機能を拡充してもらいたいとの産業界からの要望がある。特に、ハイブリッド車、燃料電気自動車の制御用インバータデバイス、電気鉄道車両のインバータ制御車両への転換等、パワーエレクトロニクスの大幅な発展が期待されており、Si 半導体に対する需要が急速に伸びると予測されている。⁶⁾

ある自動車メーカーでは今後「ハイブリッド車を年間 100 万台のペースで生産する予定」としており、同社が、年間に 152.4 mm(6 インチ)ウエハ換算で 100 万枚の Si ウエハを消費することになる。

現在、JRR-3 及び JRR-4 で照射している Si インゴットはそれぞれ年間約 3.9ton 及び約 0.7ton 程度で、合わせても国内需要の 5%程度に過ぎない。加えて、JRR-3 で照射できるのは最大直径 152.4 mm(6 インチ)の Si インゴットであるが、現実には 203.2 mm(8 インチ)直径のものが主流になりつつあり、国内半導体メーカーは韓国やオーストラリアに NTD-Si の製造を依頼しているという実態がある。⁶⁾

年間照射量は、JRR-3 での照射が開始された 1996 年から年々増加し、2004 年度は JRR-3、JRR-4 合わせて 4.6ton に達した。図 2.3-1 に 1977 年度から 2005 年度までの研究炉 Si 照射実績(重量)の推移を示す。

日本原子力研究所は、核燃料サイクル開発機構と統合し 2005 年 10 月 1 日にから独立行政法人日本原子力研究開発機構(原子力機構)となり、独自の事業収入を増やすことが強く求められている。以上のことから、原子力機構での JRR-3 を活用した NTD-Si 増産計画の一環として外部冷却法対応設備を製作し、1.5 倍の増産計画を具体化した。⁶⁾

図 2.3-1 研究炉 Si 照射実績(重量)の推移⁶⁾

2.4 外部冷却法対応設備の概要

JRR-3 均一照射設備は、原子炉頂部に設置した Si 照射装置から重水タンクに据え付けた照射筒に Si インゴットを降下し、原子炉燃料領域近傍で Si インゴットを回転させながら照射する構造である。Si インゴットは、Si 照射装置内のアルミニウム合金製のホルダーに収納された状態で照射されている。

Si 照射装置からの取り出しにあたっては、Si 照射装置内で放射能を減衰させる必要があり、48 時間程度の減衰時間を要している。現状における最も取り組み易い NTD-Si 増産の方法として、待機時間の短縮を図ることが提起され、その具体方策として外部冷却法が考案された。外部冷却法では、約 20 時間冷却後に照射した Si インゴット及びホルダーを Si 照射装置から取り出し、移送用遮へい体（以下「遮へい体」という。）内に収納し、外付けの遮へい付き保管容器（以下「保管容器」という。）までポータブル門型クレーン（以下「門型クレーン」という。）で移送し、放射能を減衰させる。保管容器で約 20 時間冷却した Si インゴットについては、上下反転し再度 Si 照射装置に戻し、反転照射が行われる。外部冷却法の概念を図 2.4-1 外部冷却法対応設備概念図に、原子炉頂部に外部冷却法対応設備を設置したときの平面図を図 2.4-2 外部冷却法対応設備配置図に示す。また、冷却時間を 48 時間以上に対し 20 時間以上としたときの待機時間比較イメージ図を図 2.4-3 待機時間比較（通常照射：外部冷却法）イメージ図に示す。

本外部冷却法対応設備の設計、製作は、放振協と原子力機構の共同研究により実施したもので、製作は 2005 年 11 月から 2006 年 5 月に実施し、7 月にホットランを実施した。炉頂上部遮へい体上に Si 照射装置をセットした状態を写真 2.4-1 に、外部冷却法対応設備を設置した状態を写真 2.4-2 に示す。

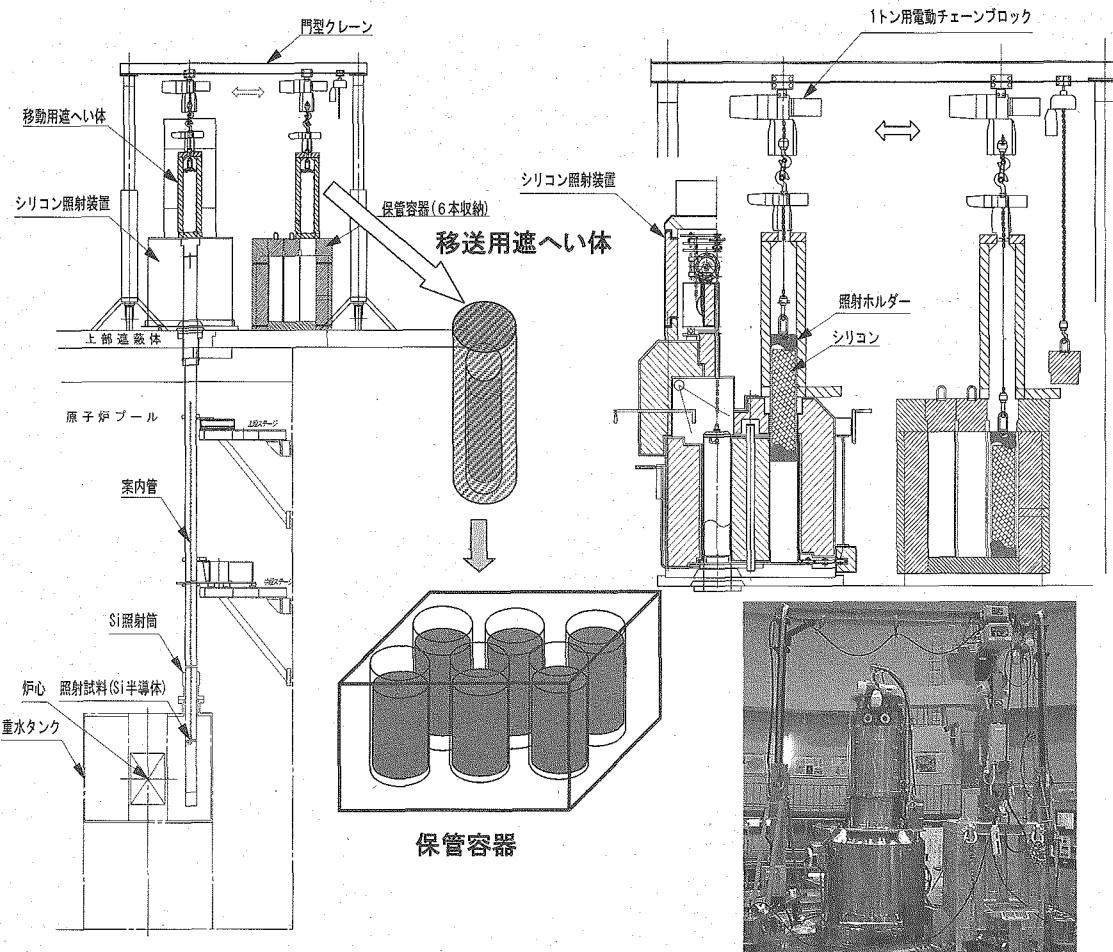


図 2.4-1 外部冷却法対応設備概念図

準備週の保管場所

詰替セル室の上部
に保管。

1. 遮へい体
2. 保管容器
3. 門型クレーン

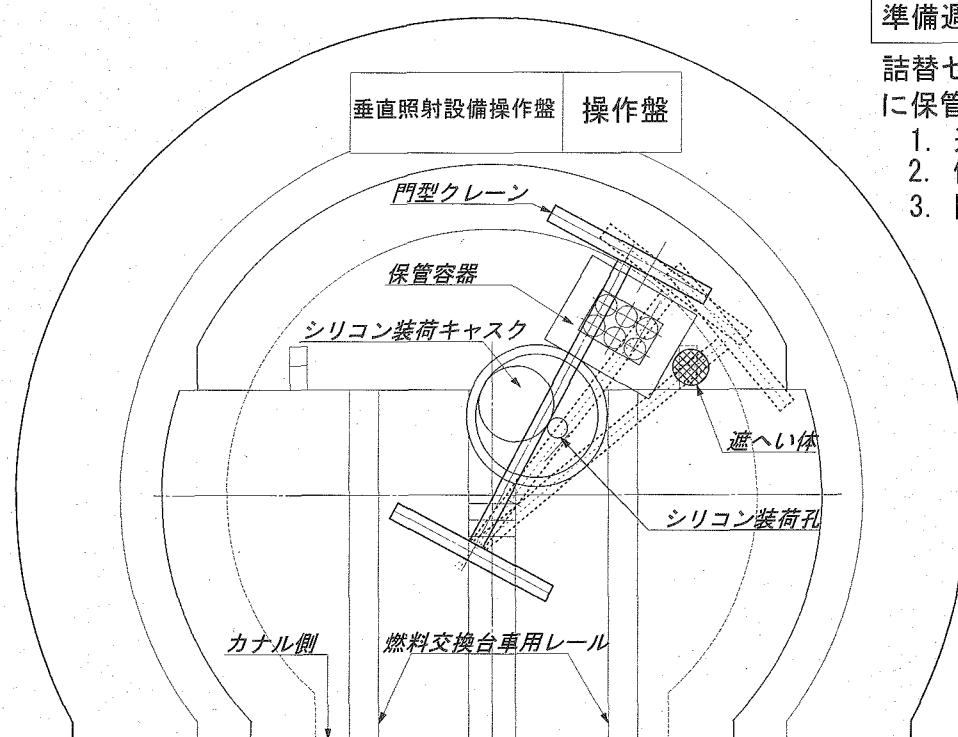


図 2.4-2 外部冷却法対応設備配置図

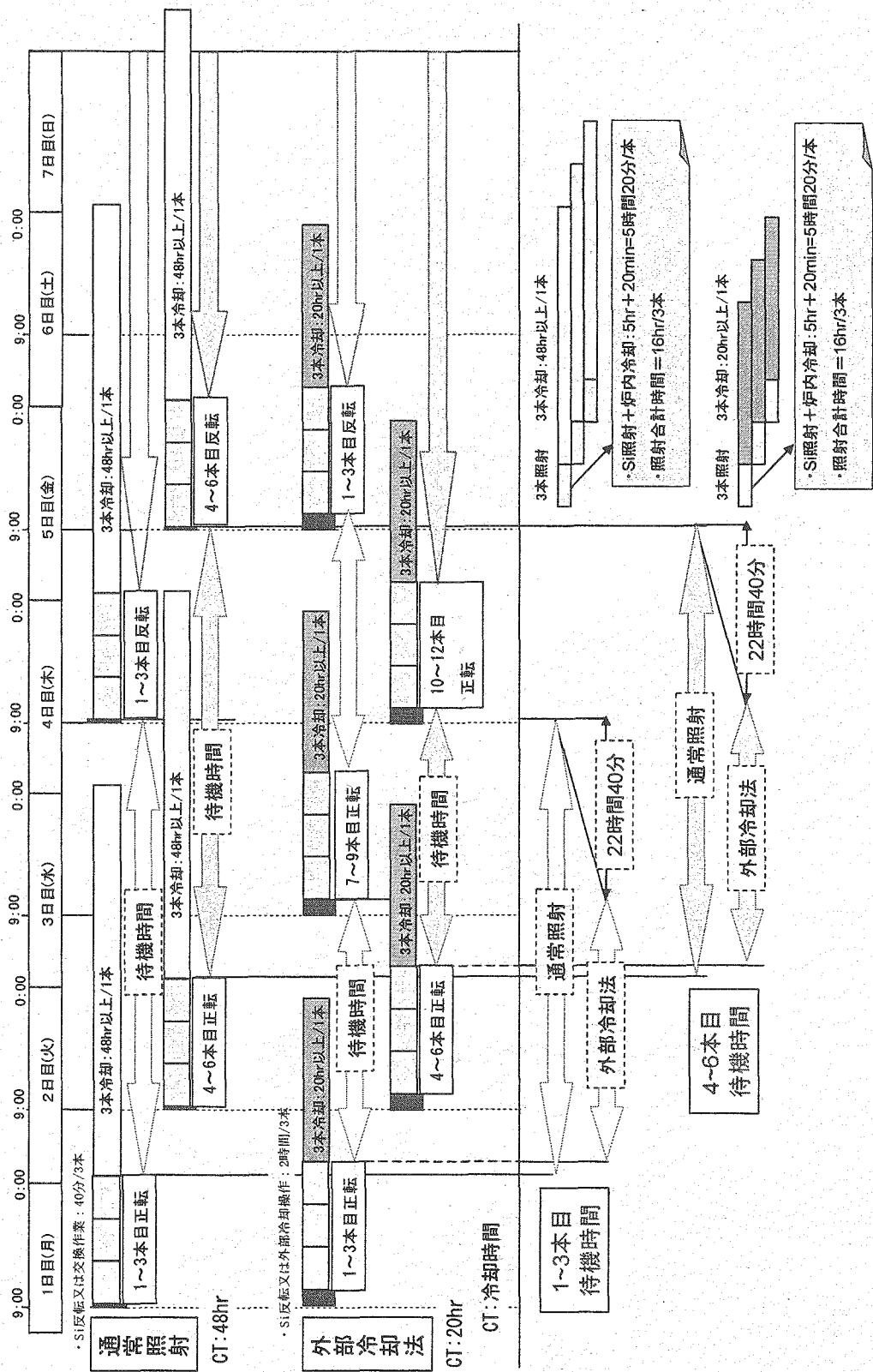


図 2.4-3 待機時間比較（通常照射：外部冷却法）イメージ

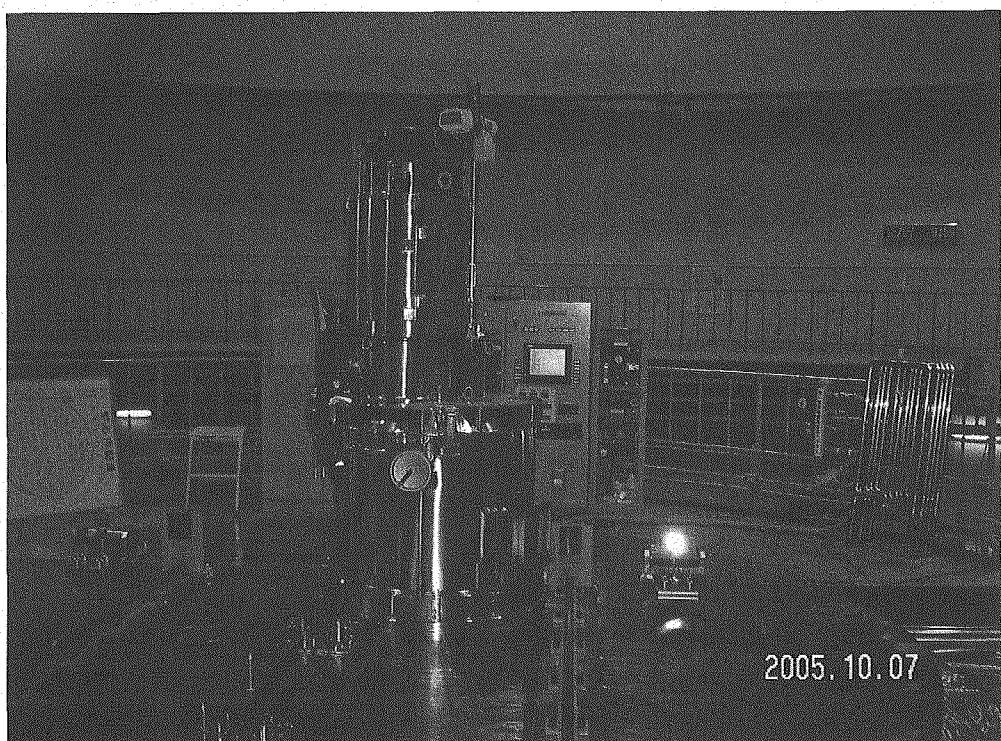


写真 2.4-1 炉頂状態

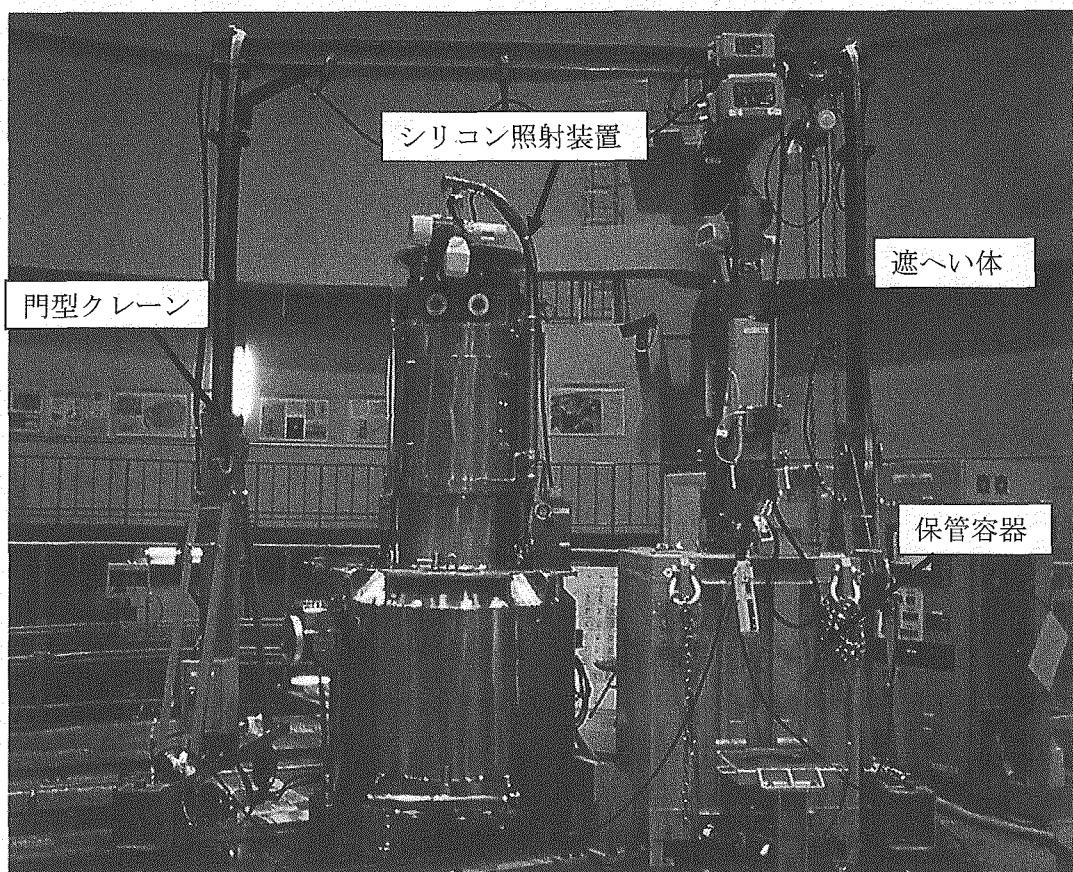


写真 2.4-2 外部冷却法対応設備設置状態

3 外部冷却法対応設備の開発

3.1 外部冷却法対応設備の設計

現 NTD-Si 生産量の約 1.5 倍の生産を目指し、既存均一照射設備に付加する外部冷却法対応設備を据え付けることにした。外部冷却法対応設備の設計にあたり、既存設備の Si 照射装置に外部冷却法対応設備を附加するためには、様々な物理的及び取扱上の制約がある。そのため、まず、これらを整理し対応策を講じた。対応策を検討したフローを図 3.1-1 NTD-Si 増産外部冷却法対応設備検討フローに示す。

3.1.1 原子炉上部遮へい体の耐荷重及び占有面積の制約

原子炉上部遮へい体は、炉心からの放射線を遮へいするため原子炉プール上部に設置され、2分割の構造である。その上部遮へい体の設計耐荷重は 1 枚当たり約 13ton である。片側の上部遮へい体に据え付けられている既存均一照射設備が約 12.5ton であり、既に設計耐荷重制限値であるため、他方の上部遮へい体及び上部遮へい体以外の床面を利用し、かつ、作業エリアを考慮し、外部冷却法対応の設備を分散して設置する設計とした。

炉頂上部遮へい体に本外部冷却法対応設備の遮へい体が落下した事を想定した上部遮へい体の強度評価は、衝撃応力及びせん断応力を計算し、上部遮へい体の主な材料である SM400B の許容応力値以下であり、強度は十分であることを確認した。

3.1.2 冷却時間を 20 時間とした場合の Si インゴット及びホルダーの線量評価に基づく遮へい厚の検討

外部冷却法で採用する Si 照射装置内での冷却時間は、就業時間内作業において、現在の冷却時間 48 時間程度の約 1/2 である 20 時間と仮定した。

冷却時間を 20 時間とした場合、遮へい体及び保管容器の表面目標線量当量率がそれぞれ、2mSv/h 以下、 $25 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下となるよう設計することとした。設計値の 2 mSv/h 及び $25 \mu\text{Sv}/\text{h}$ の根拠は、各々、原子力機構原子力科学研究所核燃料物質等周辺監視区域内運搬規則における運搬容器技術基準の設計基準である、“容器表面の線量当量率が 2mSv/h を超えないこと。” 及び立入制限区域設定基準の目安値である。この冷却時間において、外部被ばくに大きく寄与する線源は、照射済の Si インゴット及びアルミニウム合金製のホルダーである。ホルダーからの γ 線放出核種を同定するため Si 照射装置の Si 装荷孔における γ 線スペクトル測定、鉛の遮へい能力確認のため Si 装荷孔位置での線量測定、冷却時間に対する Si インゴット及びホルダーの表面線量測定を行うこととした。図 3.1-2 にこれらの γ 線スペクトロメトリ及び線量測定手法の概念図を示す。

まず、Si 装荷孔位置において可搬型高純度 Ge 検出器による γ 線スペクトル測定を 2005 年 8 月 26 日に実施した。 γ 線スペクトルを図 3.1-3 Si 照射装置の Si 装荷孔 γ 線スペクトルに示す。 γ 線スペクトルから、Si インゴット以外の高線量の原因は、ホルダーの材料であるアルミニウム合金中の不純物である Ga-71 の $[^{71}\text{Ga}(\text{n}, \gamma)^{72}\text{Ga}]$ により生成された Ga-72(半減期:14hr) が主要核種であることが判った。また、Ge 検出器のバックグラウンド測定により、Ge 検出器の放射化による $[^{72}\text{Ge}(\text{n}, \text{p})^{72}\text{Ga}]$ の生成ではないことも確認した。

均一照射設備 Si 装荷孔上部の γ 線スペクトル測定記録を付録 A に示す。

ホルダーの材料である A1050 の不純物として含まれる Ga-72 を主要核種として線量当量率を計算した。また、Si の半導体化に伴う Si-31 も同様に評価を行った。

線量当量率の評価結果から Ga+Si の線量減衰カーブを求めた。図 3.1-4 Si 照射装置の Si 装荷孔線量評価グラフに求めた Ga+Si 減衰カーブとともに Si 装荷孔での実測値をプロットした。図に示すように、計算値は実測値と概ね一致している。この結果から、冷却時間を 20 時間とした場合の Si 装荷孔での線量当量率は、約 3.2mSv/h と推定した。

次に Si インゴット表面の線量評価を行った。Si の半減期から各冷却時間における 10 cm 線量当量率を計算により求める一方、32 時間及び 40 時間の冷却時の Si 表面線量を実測して冷却時間 20 時間の推定線量当量率を算出した。更に、ホルダーの支配的核種を Ga-72 とした場合の各冷却時間における 10 cm 線量当量率を計算した。Si 表面線量及びホルダー線量評価グラフを図 3.1-5 に示す。グラフから冷却時間が 20 時間の Si 表面線量当量率は、約 11mSv/h であり、実測値から推定した Si 表面線量当量率は約 400 μ Sv/h と低いため、Si 表面線量当量率は、最大で 10mSv/h とした。ただし、この表面線量当量率は、このグラフの 32 時間及び 40 時間の Si インゴット実測値との比較から判るように、安全側評価となっている。ホルダーの計算による線量評価は、20 時間冷却時で約 17mSv/h とした。

ホルダーの実測線量から冷却時間 20 時間のホルダー表面線量当量率を推測した。ホルダーは、表面線量当量率が高いため、67~95 時間冷却したホルダーの表面線量当量率を測定した。この実測値からの近似線により冷却時間 20 時間の値を推定した。この推測したグラフを図 3.1-6 ホルダーの実測線量値から推測した 20 時間冷却時のホルダー線量グラフに示す。このグラフにより求めた冷却時間を 20 時間とした場合の線量当量率は、約 22mSv/h である。

遮へい体及び保管容器の遮へい厚さを決定するため、鉛ブロックによる遮へい効果を評価した。遮へい効果は、Si 装荷孔上部を鉛ブロックで遮へいしたときの、線量の変化からその減衰率として表した。その結果、遮へい無しの時の線量当量率は 1,450 μ Sv/h、鉛ブロック 5 cm 厚の時の線量当量率は 100 μ Sv/h、鉛 10 cm 厚の時の線量当量率は 10 μ Sv/h であった。ここで、Si 装荷孔外からのビルドアップは、Si 装荷孔の直接線と比べその寄与が小さいと考え無視した。これらから、鉛 5 cm の減衰率は、1/14.5 となった。この減衰率線から求めたエネルギー毎の減衰率を図 3.1-7 鉛の γ 線エネルギー別減衰率グラフに示す。このグラフにより実測値と等価な γ 線エネルギーは 2.0MeV であった。この値は、Ga-72 の γ 線エネルギーとほぼ一致する。

鉛及び鉄の γ 線エネルギー 2.0MeV に対する質量減衰係数から、それぞれの材質の減衰率を計算した。この減衰率を図 3.1-8 材質別減衰率グラフに示す。遮へい体厚を鉛 5 cm とした場合、ホルダー表面線量当量率 22mSv/h が 1/12.8 に減衰し 1.7mSv/h となり、設計値を満足することが確認できた。また、保管容器は、鉛厚 13.3 cm とすることで 1/880 に減衰し、25 μ Sv/h 以下となり、設計値を満足することが確認できた。エネルギー 2.0MeV 每の遮へい厚さの計算式及び結果を表 3.1-1 に、2.0MeV の減衰率から計算した遮へい厚計算結果を表 3.1-2 に示す。また、鉛ブロックによる遮へい効果を測定した記録を付録 B Si 装荷孔線量測定記録（遮へい効果調査）に示す。

3.1.3 照射ホルダーの交換頻度の検討

2年間繰り返し照射したホルダーは、廃棄処分まで一次保管容器内で保管している。平成17年11月28日で3年の冷却期間となる使用済ホルダーの線量測定を行ったところ、まだ、約1.4mSv/hもあることが判った。本外部冷却法においては、ホルダーの使用本数が増えることから、使用済ホルダーを2年から3年冷却して再度使用することを検討したが、線量が減衰しない結果から、これまで通り、使用期間2年を目安として新品に交換することとした。図3.1-9にホルダーの冷却期間3年及び3年7ヶ月後との比較グラフを示す。

3.1.4 照射タイムスケジュールの検討

(1) 基本照射タイムスケジュール

Si照射は、目標の抵抗率により照射時間が異なる。抵抗率と中性子照射量の関係は、抵抗率とPドーパント濃度の関係から算出される。照射時間は、Si材料メーカからの要求抵抗率により決定する。この外部冷却法採用にあたり、Si増産量を検討するため、予め既存設備での照射時間を変化させたSi照射パターンを作成した。Si照射は、原子炉起動日の月曜日17:00から4週間後の金曜日16:30までとする。照射パターンとしては、その期間内に照射と冷却を繰り返すこととし、照射に伴う現場操作は、就業時間とする。

検討したSi照射パターンは、近年照射量の増えている低抵抗率の $60\Omega\cdot\text{cm}$ 、平均時間の $172\Omega\cdot\text{cm}$ 及び最小時間の高抵抗率の $777\Omega\cdot\text{cm}$ である。これらの平均時間は、 $172\Omega\cdot\text{cm}$ の片側2時間15分で、最大時間は、 $60\Omega\cdot\text{cm}$ の片側5時間、最小時間は、 $777\Omega\cdot\text{cm}$ の片側35分である。

Si照射パターンは、6本のSiインゴットを3本ずつ2組に分け次の工程を繰り返す。
Si装荷→Si①照射(原子炉プール内冷却含む)→48時間以上冷却→Si①冷却中にSi②照射(原子炉プール内冷却含む)→48時間以上冷却→Si①及び②冷却中にSi③照射(原子炉プール内冷却含む)→48時間以上冷却の順で3本の照射が終了する。その後、照射済Siインゴットの反転操作を行った後、正転照射工程を繰り返す。反転操作に伴う作業時間は3本当たり40分として加算した。

(2) 外部冷却法照射タイムスケジュール

外部冷却法は、冷却時間を1/2以下に短縮し待機時間を有効に活用する方法である。冷却時間を20時間とした場合の $60\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $172\Omega\cdot\text{cm}$ 及び $777\Omega\cdot\text{cm}$ の照射パターンを検討した。Si照射パターンは、基本照射に外部冷却操作として照射済SiインゴットをSi照射装置と外付け保管容器を往復移動する作業が加算される。6本のSiインゴットを3本ずつ2組に分け次の工程を繰り返す。Si装荷→Si①照射(原子炉プール内冷却含む)→20時間以上冷却→Si①冷却中にSi②照射(原子炉プール内冷却含む)→20時間以上冷却→Si①及び②冷却中にSi③照射(原子炉プール内冷却含む)→20時間以上冷却の順で3本の照射が終了する。その後、照射済Siインゴットを保管容器に移送する。反転操作は、保管容器上で行い、手動反転後、正転照射工程を繰り返す。本タイムスケジュールではこの時間を3本当たり2時間の作業時間を加算した。

60Ω・cm、172Ω・cm及び777Ω・cmの基本照射パターン及び外部冷却法照射パターンを付録Cシリコン照射パターン(48時間冷却及び20時間冷却)に示す。

3.1.5 Si生産量の試算

Si照射本数は、就業時間内照射を基本とした場合、1サイクルあたり24本が標準的な照射本数となる。前項の照射タイムスケジュール毎に算出した照射量は、基本照射パターンと外部冷却法照射パターンとの比較で、基本照射パターンに対し、外部冷却法照射パターンでは、約1.3倍から1.5倍の増量が見込める試算ができた。試算量は、あくまで、ひとつの抵抗率を1サイクル連続で照射した場合を想定した照射量であり、実際の複数の抵抗率の照射パターンではないため、試算量は目安である。また、年間利用サイクルが減少したような時の対応で1サイクルあたり増量する手段としては非常に有効である。

過去の実績に基づく照射量は、最小照射時間、片側15分～最大照射時間、片側345分まで様々な照射時間による照射を実施している。参考に平成18年度の第1サイクル(2006年4月4日～4月28日)～第5サイクル(2006年8月21日～9月15日)におけるSi照射は、127mm(5インチ)Siインゴット及び152.4mm(6インチ)Siインゴットの合計本数が132本で、Siインゴット重量は約2.5tonである。平成18年度実績から求めた照射時間の割合をみると、最小照射時間片側15分から最高照射時間片側371分で、平均照射時間片側183分である。これらを照射時間1時間未満の高抵抗率、照射時間4時間以上の低抵抗率及び照射時間1時間以上4時間未満の平均抵抗率の3パターンに分け、全体に占める割合を算出した。高抵抗率は25.0%、低抵抗率は47.0%、平均抵抗率は28.0%を占める。図3.1-10に平成18年度01サイクルから05サイクルにおける照射実績グラフを示す。

3.1.6 Siインゴットの反転方式の検討

照射済Siインゴットの冷却時間を1/2に短縮したSiインゴットの反転方式の検討は、外部冷却法の重要な部分である。以下に検討した方法について述べる。

反転方式を検討するにあたり、主な着眼点を次の2点とした。まず1点目は、作業中の外部被ばくの低減化であり、2点目は、Siインゴットの衝撃による損傷等に対して、健全性を確保することである。

検討した反転方式は、大きく分類して、次の2通りの方法である。まず第1の方法は、照射済Siインゴットを反転装置で反転する方法。第2の方法は、保管容器で冷却後に手動で反転する方法である。この、2通りの反転方式内には、Siインゴットのみを反転する方式とホルダー毎反転する方式の2種類が考えられる。検討した概略図を図3.1-11～図3.1-14に示す。今回は、ホルダー毎取り出して、保管容器で一次保管後にSiインゴットのみを手動で反転する方式(図3.1-14)を採用した。

図3.1-14 Siインゴット入りホルダー取り出し手動反転方式(外部冷却)に示すように、採用した反転方式は、Siインゴット入りのホルダーを1本ずつ取り出し、冷却保管後にSiインゴットを手動反転した後、Si照射装置に戻して再度反転照射する方法である。

Siインゴット入りホルダー取り出し手動反転方式(外部冷却)は、Siインゴットの健全性を確保することを優先条件とし、手動反転で行うこととした。外部被ばくの低減化対策は、片側照射終了後、照射済みSiインゴット入りホルダーを遮へい体内に取り込み、

保管容器に保管冷却する方式をとることにより十分に冷却した Si インゴットを手動反転することとした。ただし、ホルダーを遮へい体に吊り込む時に遮へい体の片面が解放状態になるため、作業時には外部被ばく及び汚染拡散の対策を講じて作業することが必要となる。

3.1.7 Si 照射装置 Si 装荷孔セットの遮へい体構造の検討

Si 照射装置の Si 装荷孔は、図 1.1-2 に示すように 6 本のホルダーを 1 カ所の孔から出し入れを行う構造で、遮へいプラグを有している。

外部冷却法を取り入れるためには、Si 装荷孔から移送用遮へい体内に Si インゴットを収納する必要がある。Si 装荷孔の外周の片側 120 度側には、駆動部があり、円筒形状の遮へい体とした場合 Si 装荷孔に遮へい体がセットできないため、遮へい体側面に扉部を設けセット出来る構造とした。扉は 2 枚の観音扉方式とした。遮へい体の主要材質は、SUS304 と鉛である。図 3.1-15 に遮へい体側面扉と Si 照射装置関係図を示す。

写真 3.1-1 に Si 装荷孔遮へいプラグ吊り上げ作業を、写真 3.1-2 に吸着装置による照射用 Si インゴットの出し入れ作業写真を示す。また、写真 3.1-3 及び写真 3.1-4 に Si 装荷孔外観及び Si 装荷孔と駆動部の隙間の関係写真を示す。

3.1.8 照射済 Si を移動する遮へい体の吊り上げ方式の検討

照射済 Si インゴットを移動する遮へい体の重量は、設計の結果、約 630 kg となったため、Si 照射装置の隣に設置する保管容器まで移動する設備を検討した。吊り上げ対象設備として、天井クレーン（定格荷重 30/5ton）（既存）、ホイスト付き搬送台車（定格荷重 1ton）（新設）、ジブクレーン設置（定格荷重 1ton）（新設）及び門型クレーン設置（定格荷重 1ton）（新設）を検討した結果、門型クレーンが適していた。吊り上げ方式対象設備の概略図等を図 3.1-16 遮へい体吊り上げ方式対象設備に示す。

検討に際しては、安全性、操作性、設置に関する諸手続、運転者の資格等の観点から対象設備を検討した。

選択した門型クレーンは、1ton 用の市販品があり、電動ホイストを据え付けることにより横行操作が遠隔で可能となる。更に、片側の支柱にペアリングによる回転機構を据え付けることにより、旋回出来るように改造することで、操作性、安全性等の検討課題を満足するため、当該設備を選択した。

なお、遮へい体吊り上げ方式に門型クレーンを選択したが、天井クレーンは取扱者に有資格者が揃えばいつでも使用可能であり、必要に応じて門型クレーンと併用することができる。

表 3.1-1 エネルギー2.0MeVの遮へい厚さの計算式及び結果

エネルギー: 2.0MeV

$$I/I_0 = \exp(-\mu \chi)$$

$$\mu = \mu_m \times \rho$$

ここで

 I_0 : 遮へい体に入射前の一次γ線強度 I : 遮へい体に入射後の一次γ線強度 χ : 遮へい体の厚さ

[cm]

 μ : 線減衰係数[cm⁻¹] μ_m : 質量減衰係数 Fe=0.0425、Pb=0.0450 [cm²/g] 質量減衰係数⁷⁾ ρ : 吸収体の密度 Fe=7.87、Pb=11.35 [g/cm³]

遮へい体材質: Fe			
I/I_0	線減衰係数 [cm ⁻¹] $\mu = \mu_m \times \rho$	$\ln(I/I_0)$	吸収体の厚さ [cm] $\chi = -1/\mu \times \ln(I/I_0)$
1/10	0.0425 × 7.87 = 0.334475	$\ln(1/10) = -2.303$	6.88
1/100		$\ln(1/100) = -4.605$	13.77
1/150		$\ln(1/150) = -5.011$	14.98
1/300		$\ln(1/300) = -5.704$	17.05
1/888		$\ln(1/888) = -6.788$	20.29
1/1000		$\ln(1/1000) = -6.908$	20.65
1/10000		$\ln(1/10000) = -9.210$	27.54

Fe20 cmにおける減衰 = $\exp(-\mu \chi)$

$$I/I_0 = \exp(-\mu_m \times \rho \times \chi) = \exp(-0.0425 \times 7.87 \times 20) = 1/804$$

遮へい体材質: Pb			
I/I_0	線減衰係数 [cm ⁻¹] $\mu = \mu_m \times \rho$	$\ln(I/I_0)$	吸収体の厚さ [cm] $\chi = -1/\mu \times \ln(I/I_0)$
1/10	0.045 × 11.35 = 0.51075	$\ln(1/10) = -2.303$	4.51
1/12.8		$\ln(1/12.8) = -2.549$	4.99
1/100		$\ln(1/100) = -4.605$	9.02
1/150		$\ln(1/150) = -5.011$	9.81
1/300		$\ln(1/300) = -5.704$	11.17
1/880		$\ln(1/880) = -6.779$	13.27
1/1000		$\ln(1/1000) = -6.908$	13.53
1/10000		$\ln(1/10000) = -9.210$	18.03
1/100000		$\ln(1/100000) = -11.513$	22.54

Pb1 cmにおける減衰 = $\exp(-\mu \chi)$

$$I/I_0 = \exp(-\mu_m \times \rho \times \chi) = \exp(-0.045 \times 11.35 \times 1) = 1/1.67$$

表 3.1-2 エネルギー2.0MeV の減衰率から計算した遮へい厚計算結果

材質別減衰率

ホルダー線量 当量率	遮へい厚	表面線量当量率			使用設備
		減衰率	mSv/h	μ Sv/h	
22mSv/h	Pb5 cm	1/12.8	1.72	1718.8	遮へい体
20mSv/h		1/12.8	1.56	1562.5	
22mSv/h	Pb13.3 cm	1/880	—	25.0	保管容器
20mSv/h		1/880	—	22.7	
22mSv/h	Fe20.3 cm	1/888	—	24.8	
20mSv/h		1/888	—	22.5	

保管容器の表面線量当量率を立入制限区域目安値の 25μ Sv/h 未満とした場合の遮へい厚さを検討した。図 3.1-8 材質別減衰率グラフから、ホルダー線量当量率を 22mSv/h と設定した場合、Pb13.3 cm は減衰率 1/880 であり、22mSv/h の時に 25.0μ Sv/h となる。一方、減衰率 1/888 の時の Fe 遮へい厚さは、20.3 cm である。20.3 cm で 24.8μ Sv/h となることから、Fe 材の遮へい厚さは 20.3 cm とした。

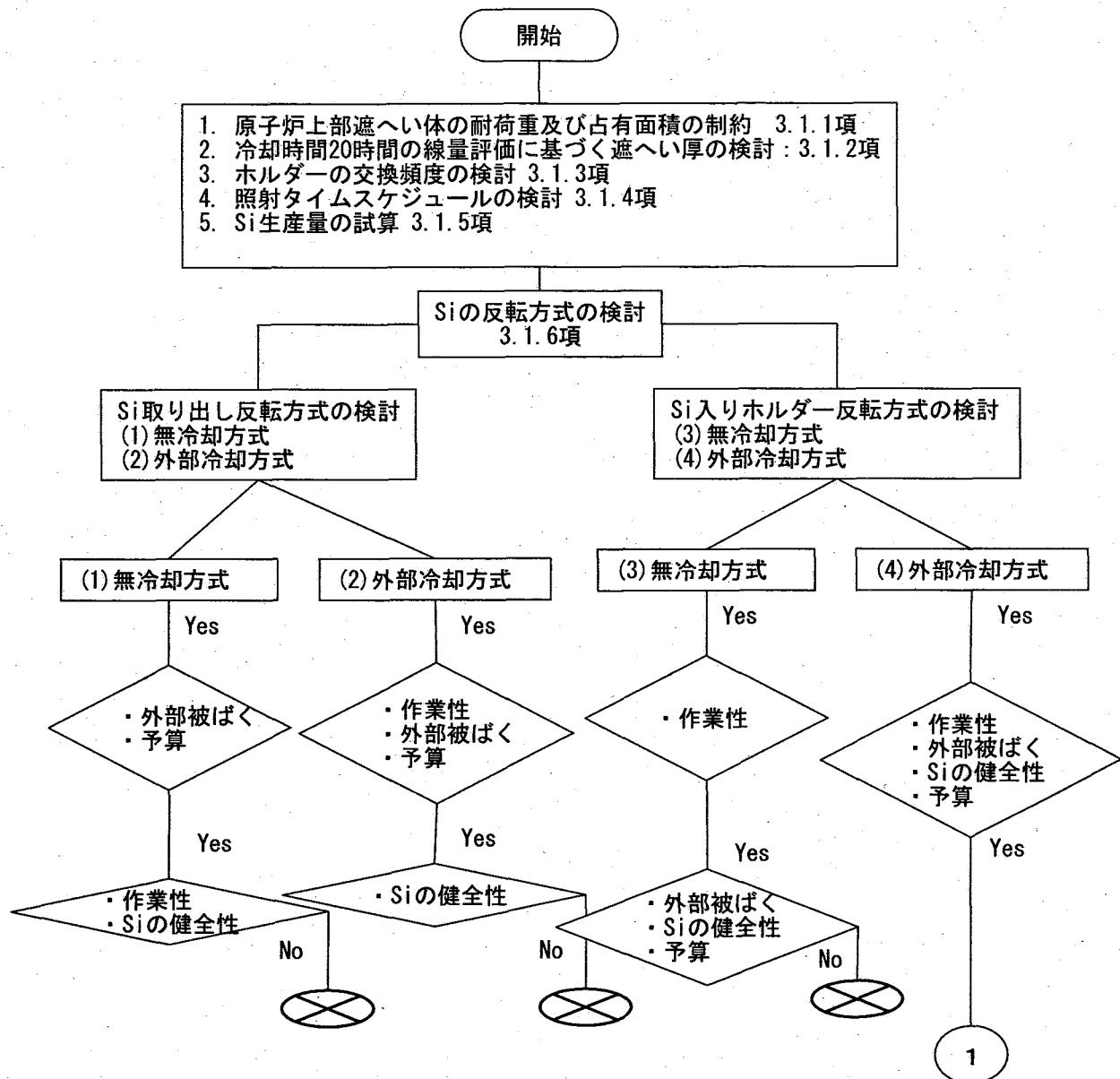


図 3.1-1 NTD-Si 増産外部冷却法検討フロー(1/2)

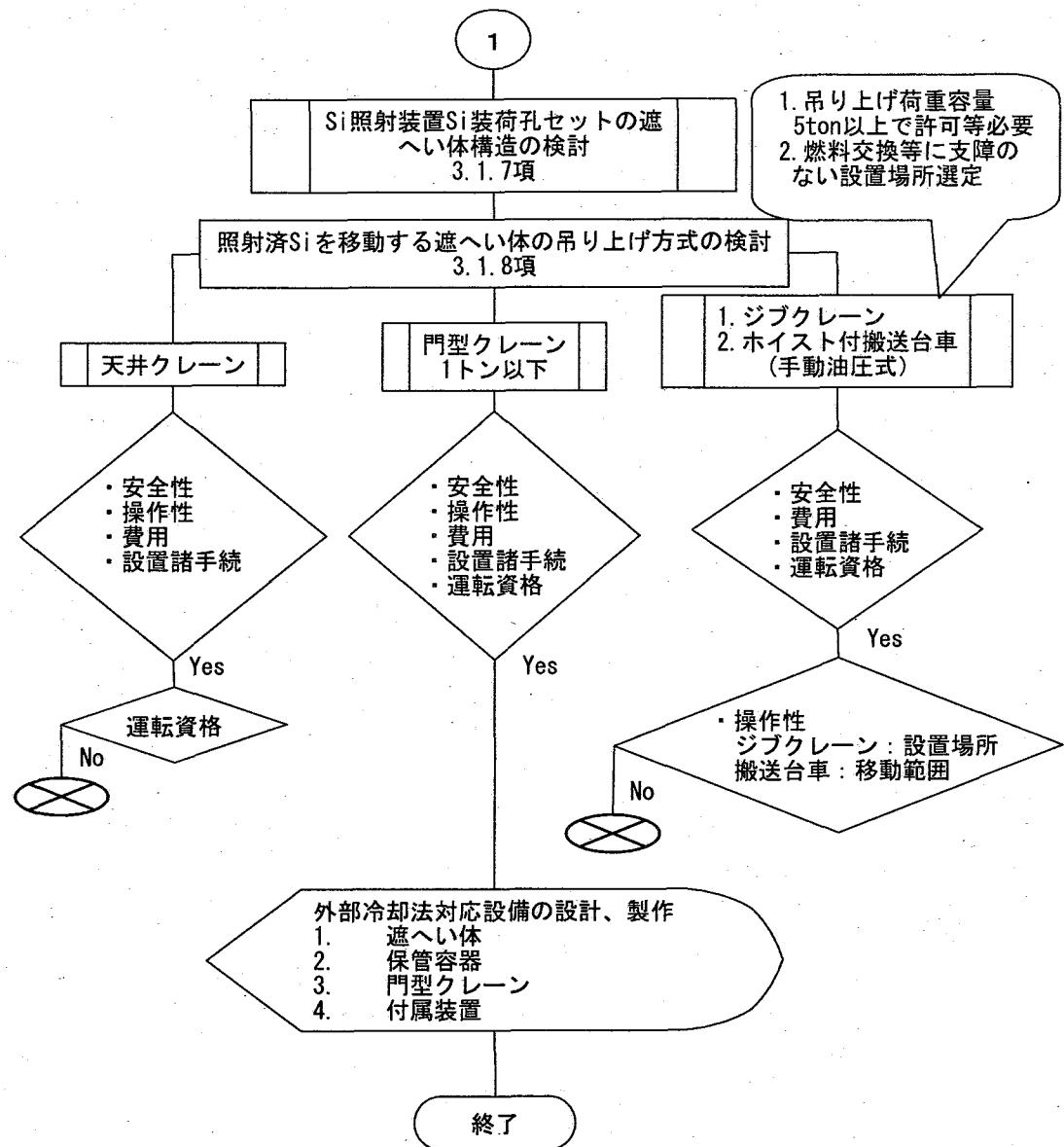


図 3.1-1 NTD-Si 増産外部冷却法検討フロー(2/2)

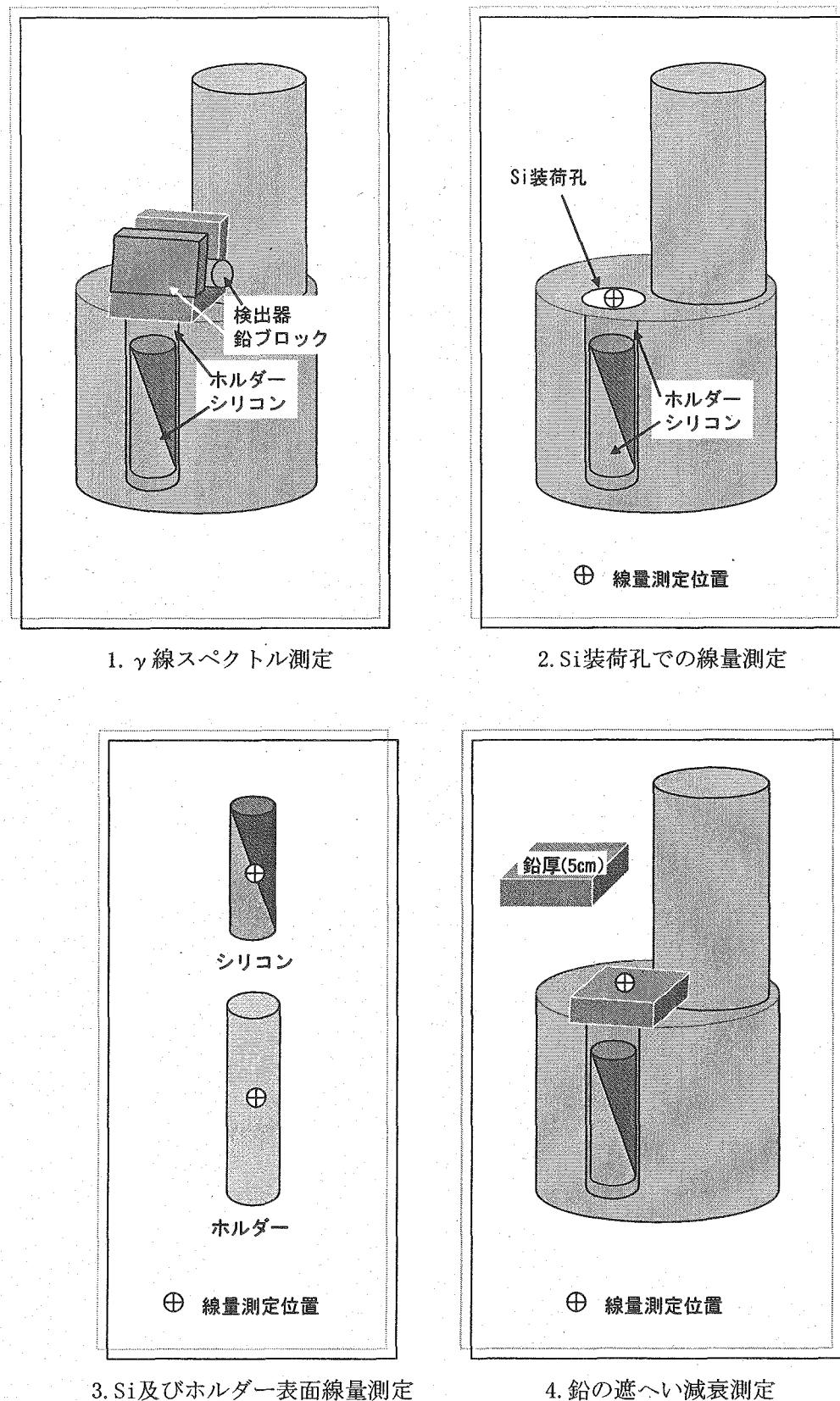


図 3.1-2 γ 線スペクトロメトリ及び線量測定手法の概念図

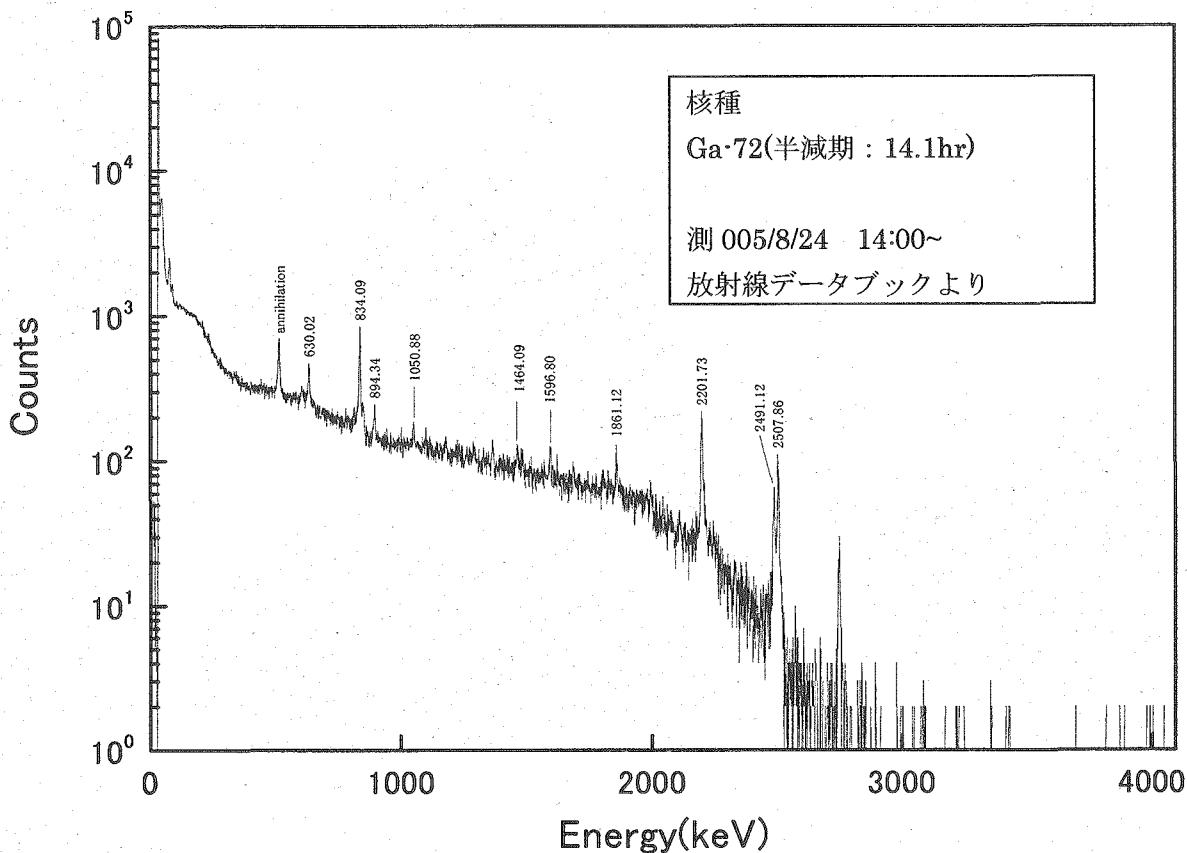
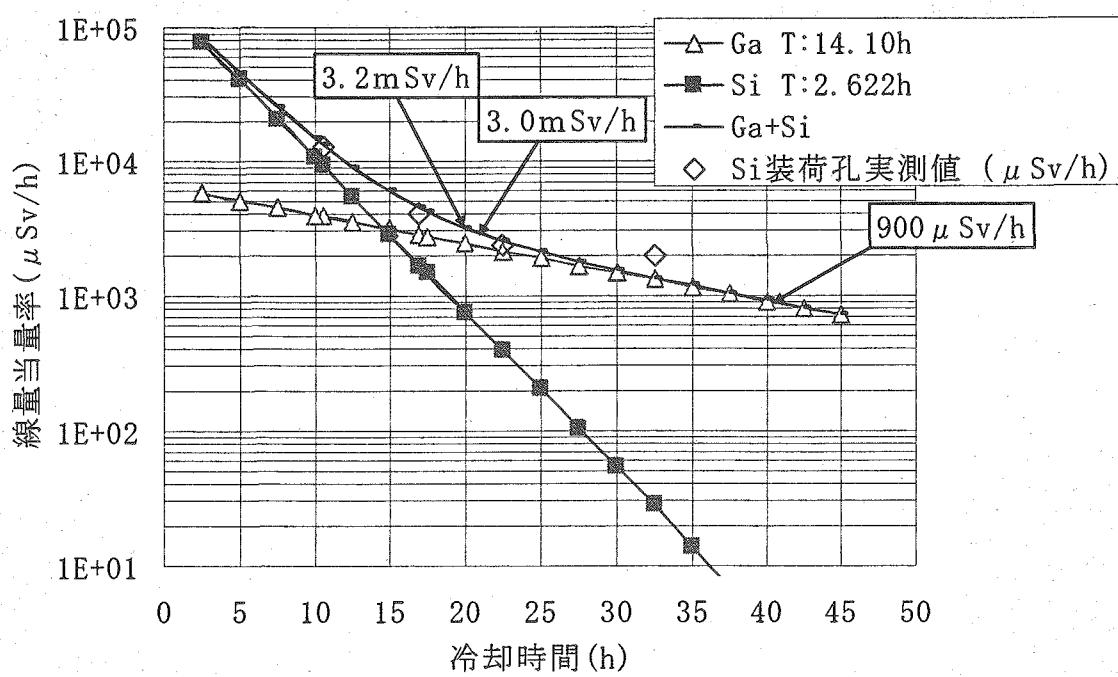
図 3.1-3 Si 照射装置の Si 装荷孔 γ 線スペクトル

図 3.1-4 Si 照射装置の Si 装荷孔線量評価グラフ

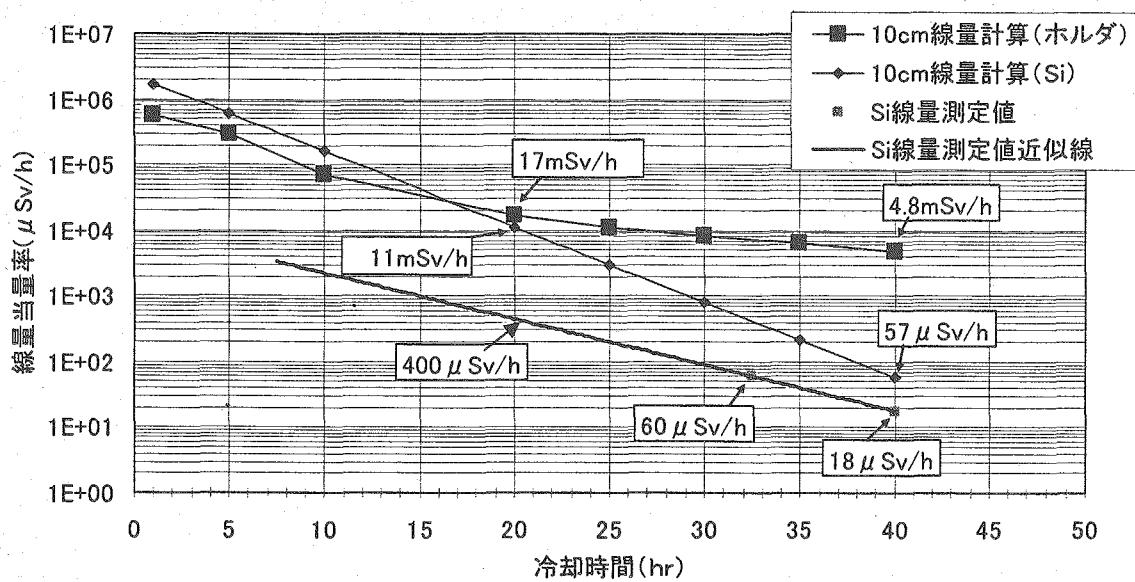


図 3.1-5 Si 表面線量及びホルダー線量評価グラフ

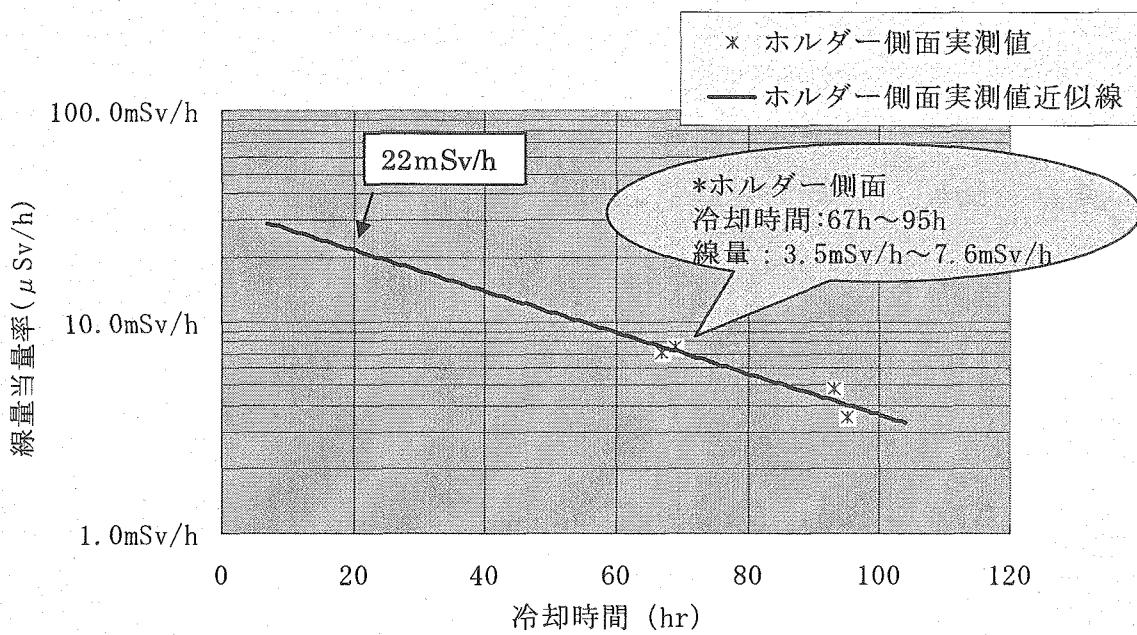


図 3.1-6 ホルダーの実測線量値から推測した 20 時間冷却時のホルダー線量グラフ

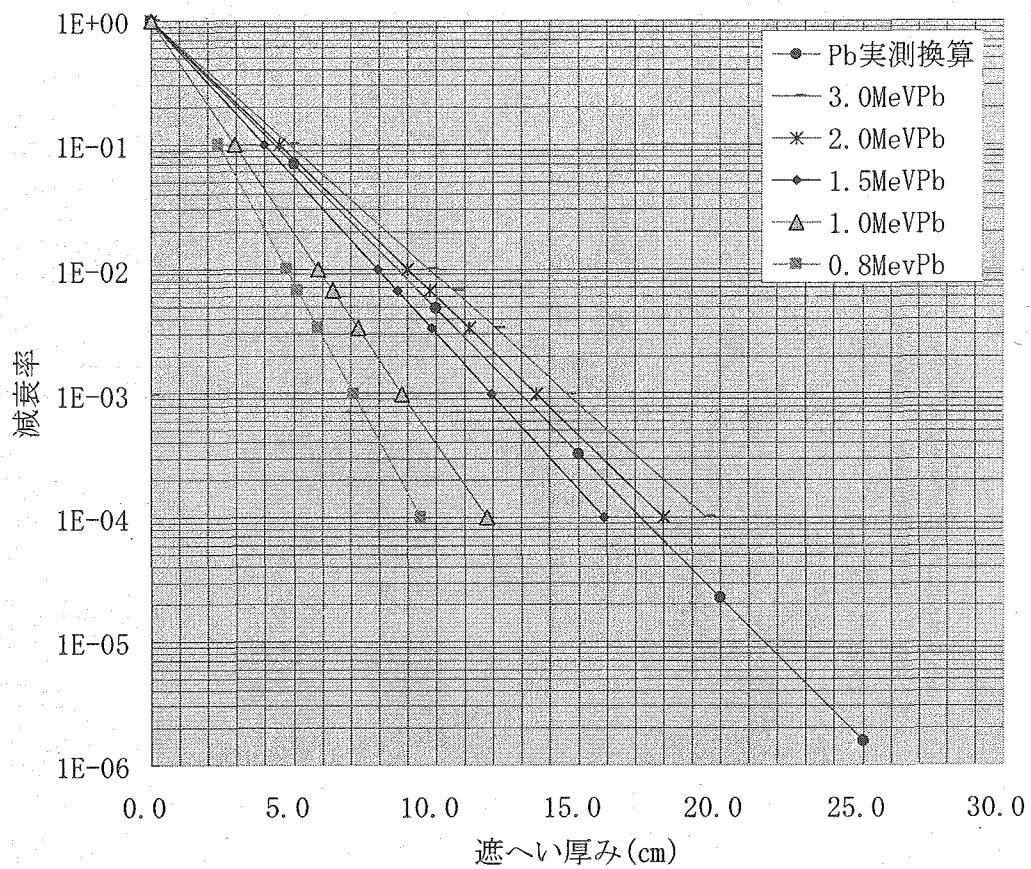
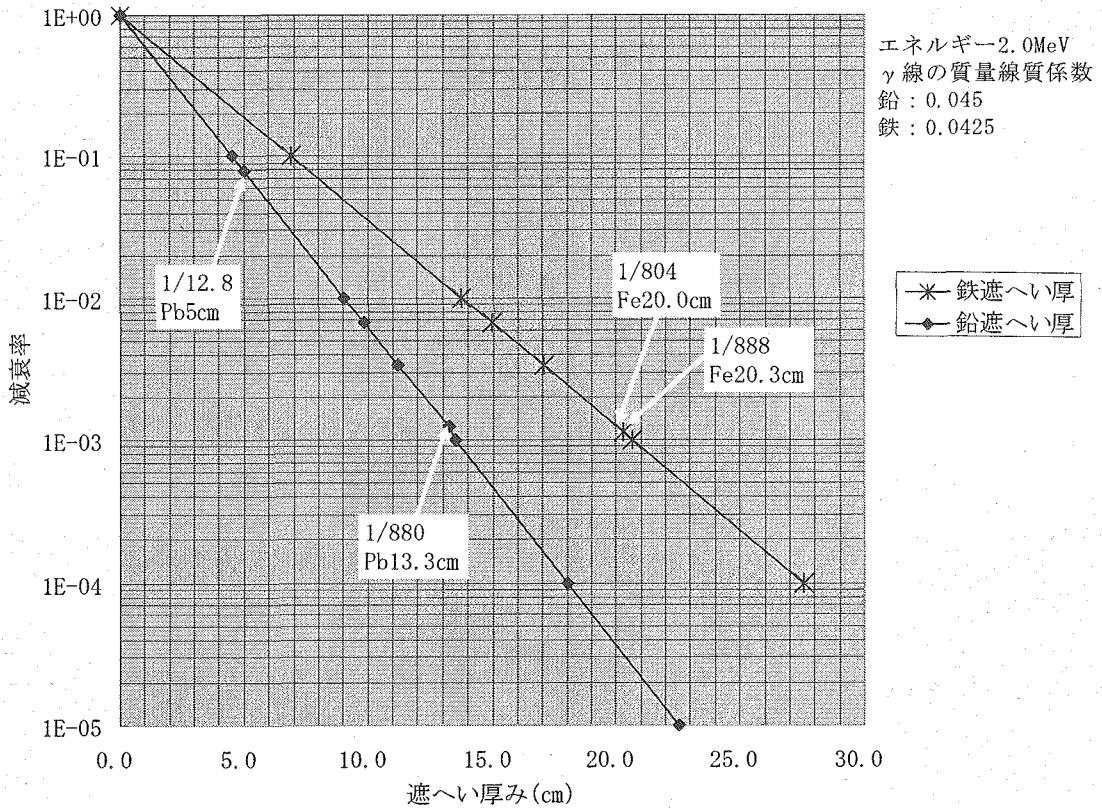
図 3.1-7 鉛の γ 線エネルギー別減衰率グラフ

図 3.1-8 材質別減衰率グラフ

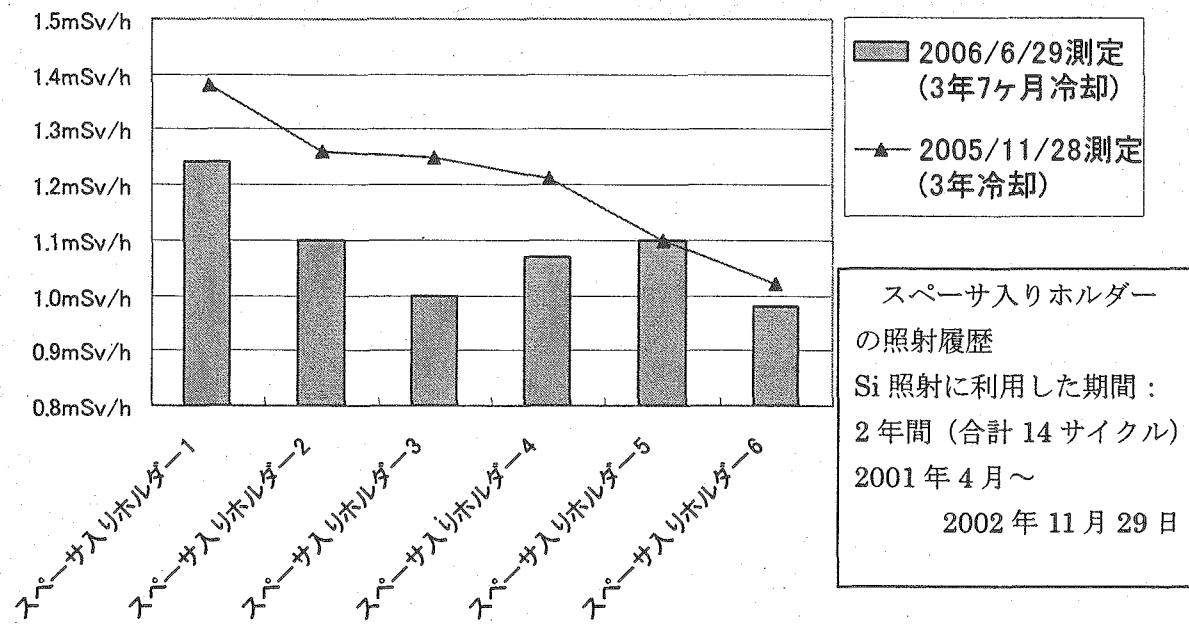


図 3.1-9 ホルダーの冷却期間 3 年及び 3 年 7 ヶ月後との比較グラフ

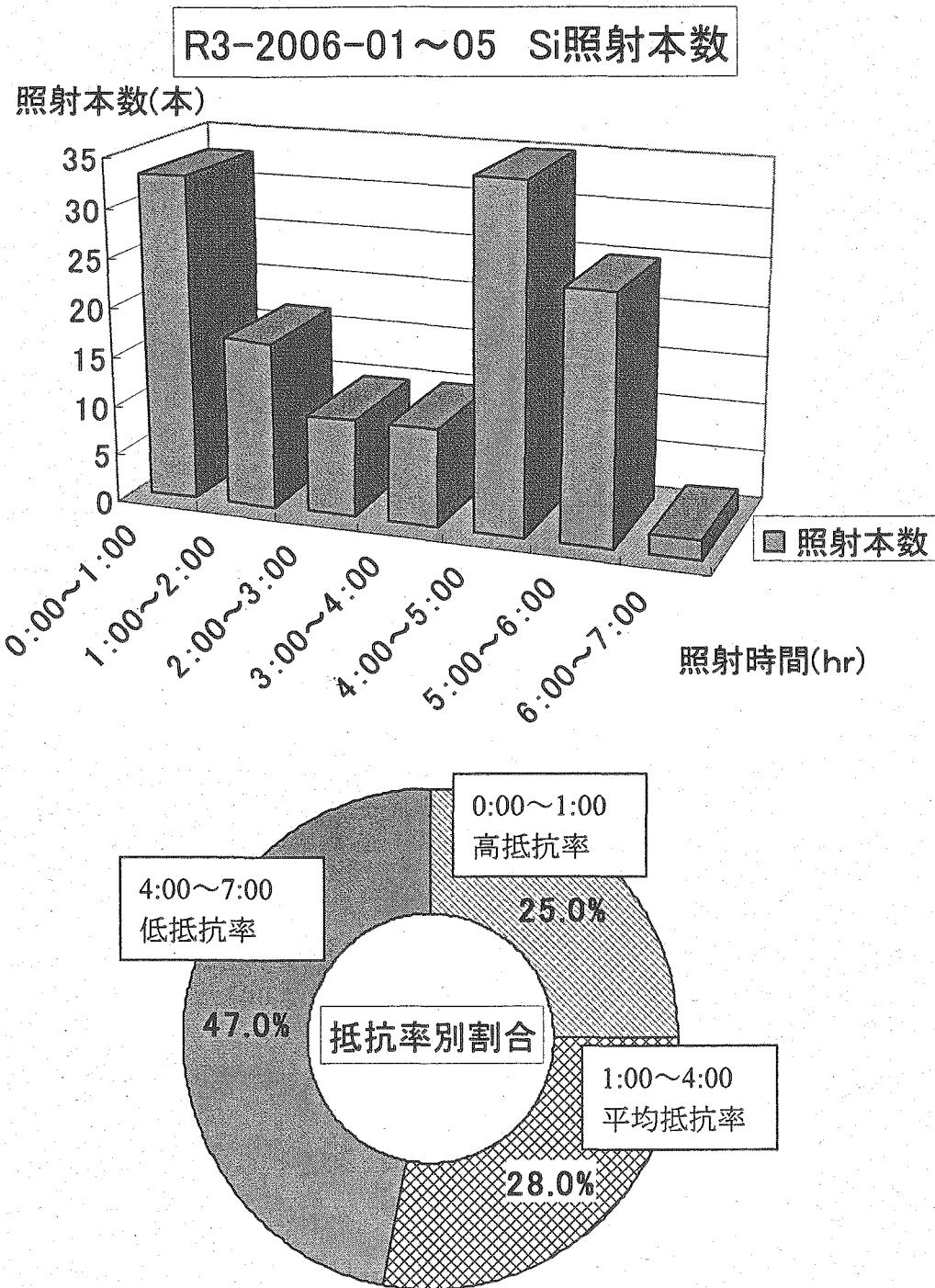
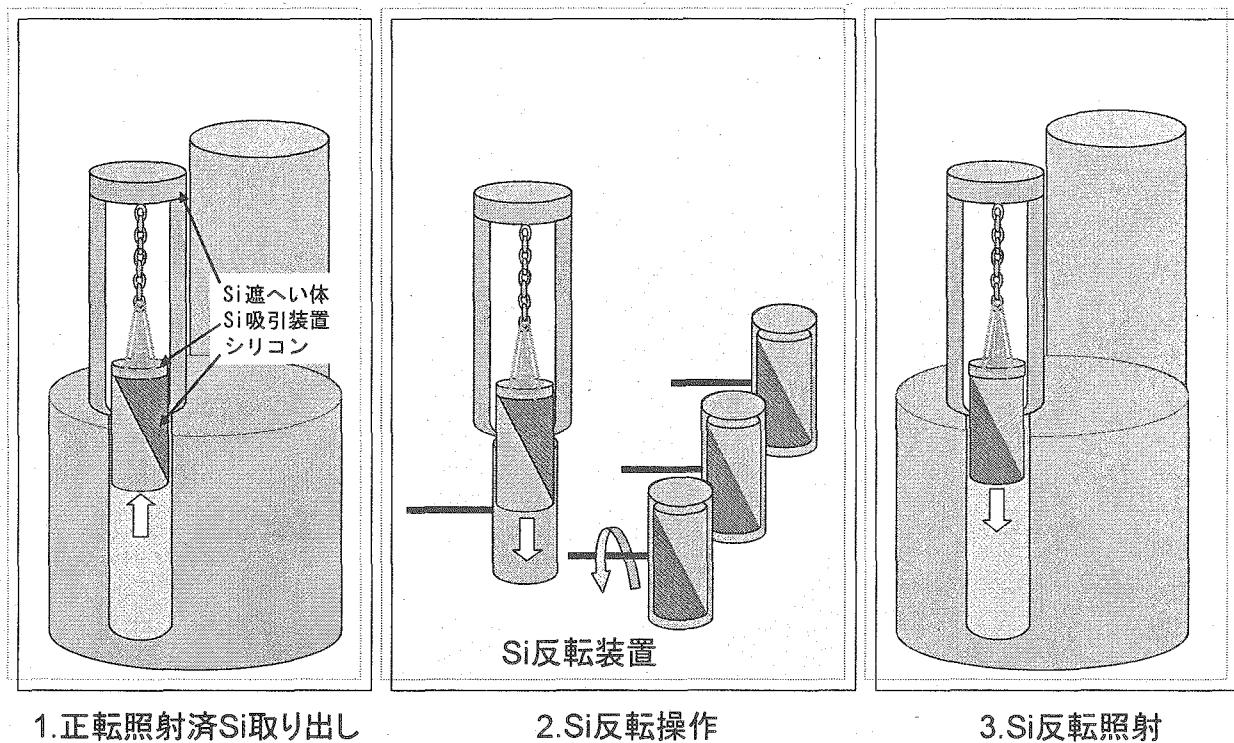


図 3.1-10 2006 年度 01 サイクルから 05 サイクルにおける照射実績



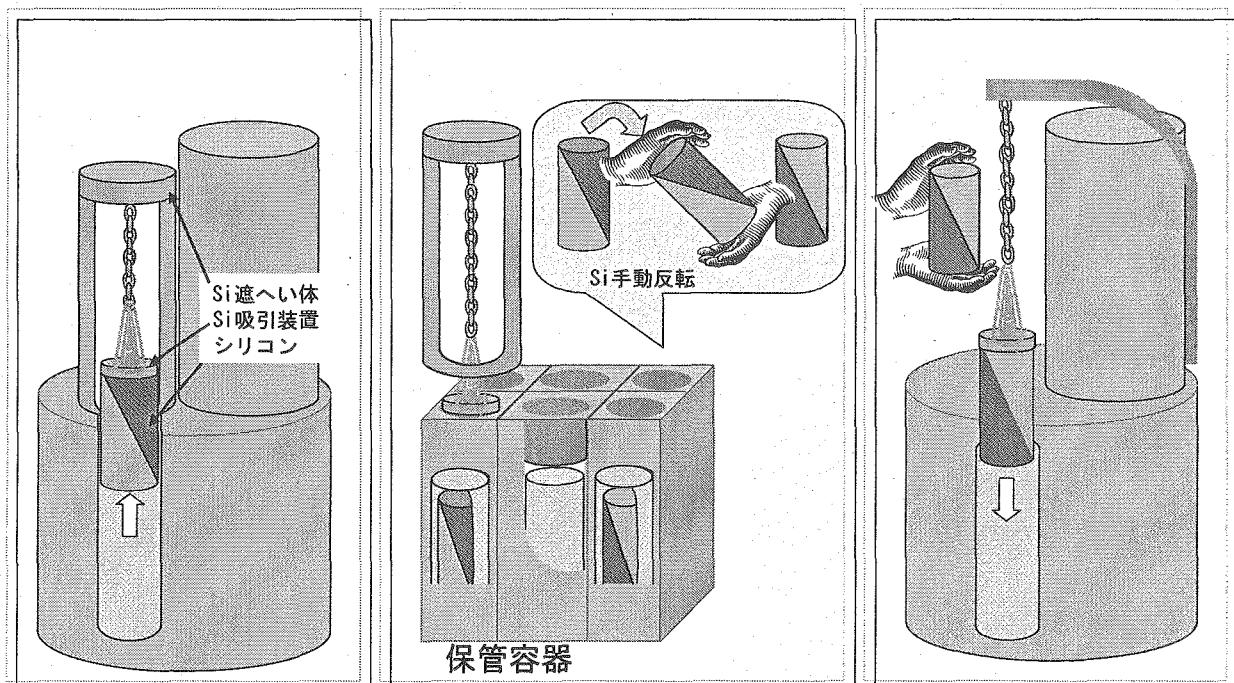
1. 正転照射済Si取り出し

2. Si反転操作

3. Si反転照射

片側照射終了後、Si インゴットのみを遮へい体に取り込み、Si 反転装置に移動する。上下反転後すぐに、Si 照射装置内に戻し、残りの片側照射を実施する方法。

図 3.1-11 Si 取り出し反転方式(無冷却法)概要



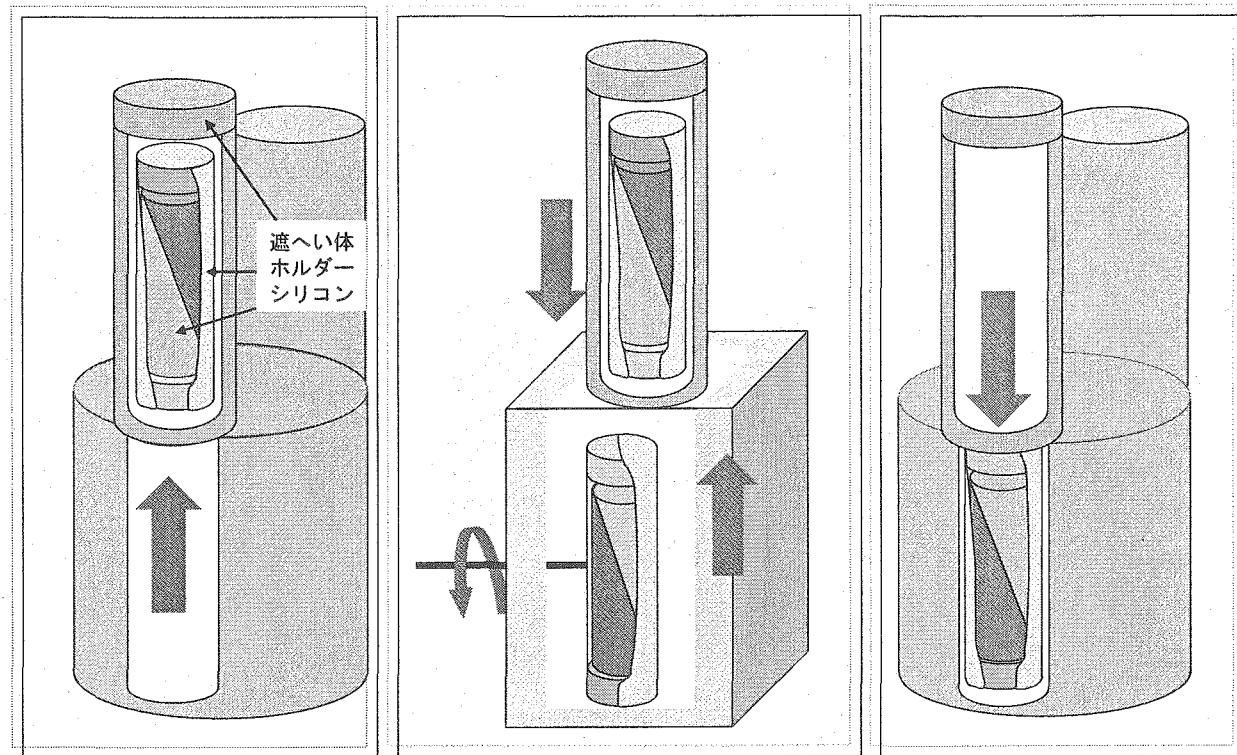
1. 正転照射済Si取り出し

2. Si反転操作

3. Si反転照射

片側照射終了後、Si インゴットのみを保管容器に移動後、一定時間保管冷却後、Si インゴットを手動反転する。その後、Si 照射装置に戻す方法。

図 3.1-12 Si 取り出し反転方式(外部冷却法)概要



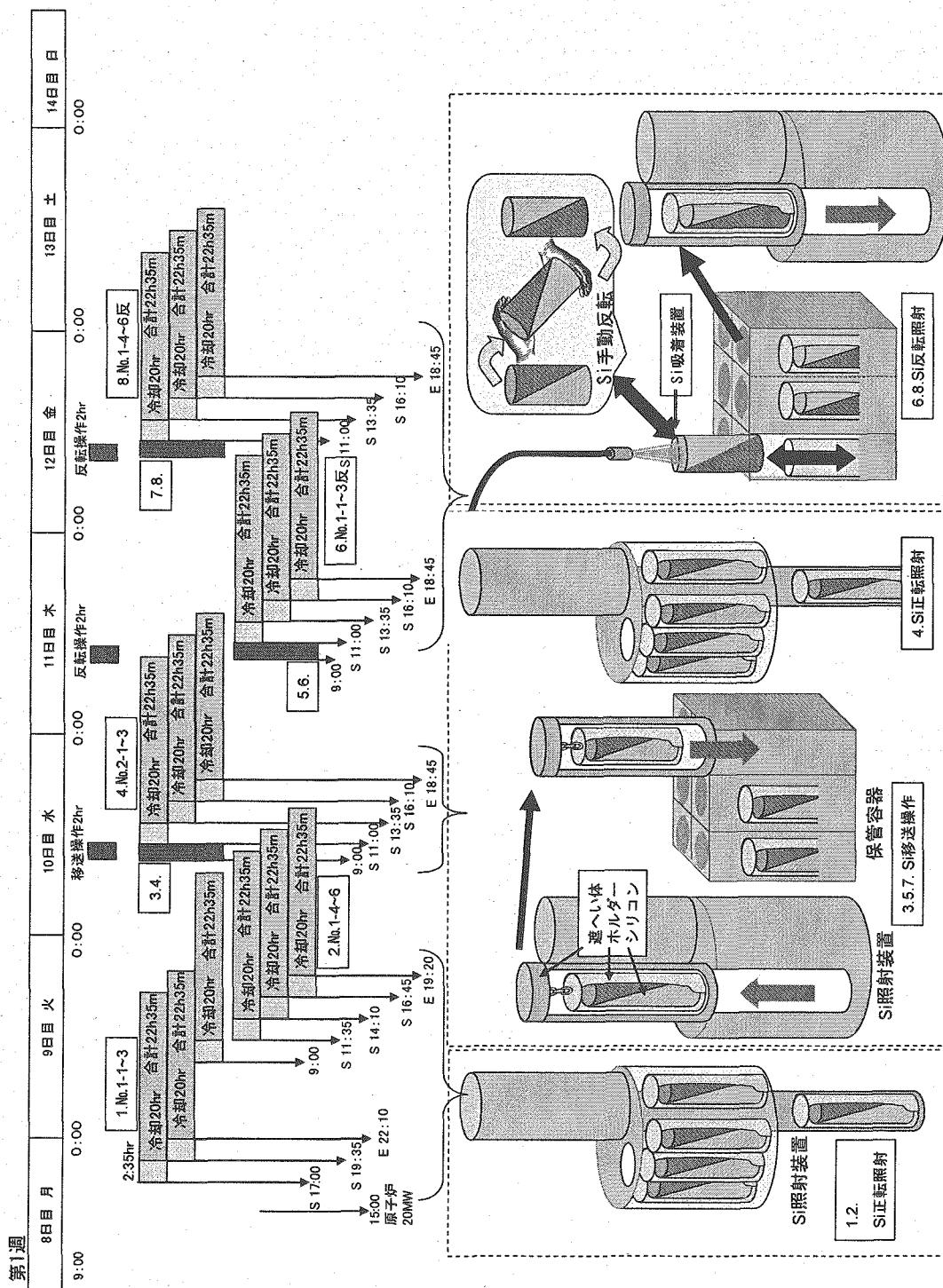
1.正転照射済Si取り出し

2.ホルダー反転操作

3.Si反転照射

片側照射終了後、Si インゴット入りのホルダーを遮へい体内に取り込み、反転装置でホルダー毎反転した後、Si 照射装置に戻す方法。

図 3.1-13 Si 入りホルダー反転方式(無冷却)概要



片側照射終了後、照射済 Si インゴット入りのホルダーを遮へい体内に取り込み、保管容器に保管冷却する。一定時間保管冷却後、Si 吸着装置を取り出し、手動で Si インゴットを上下反転した後、Si 照射装置に戻し反転照射する方法。

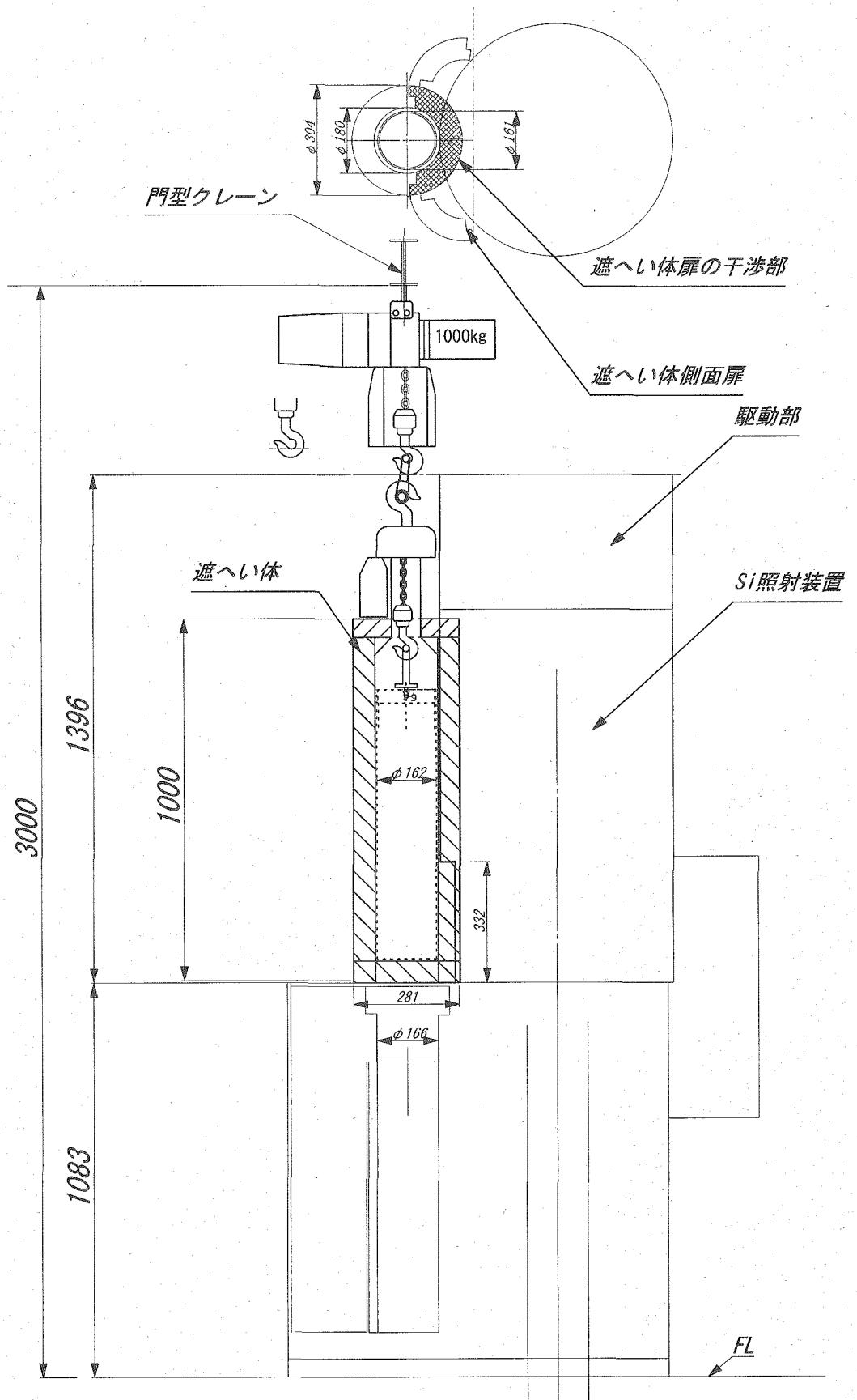


図 3.1-15 遮へい体側面扉と Si 照射装置関係図

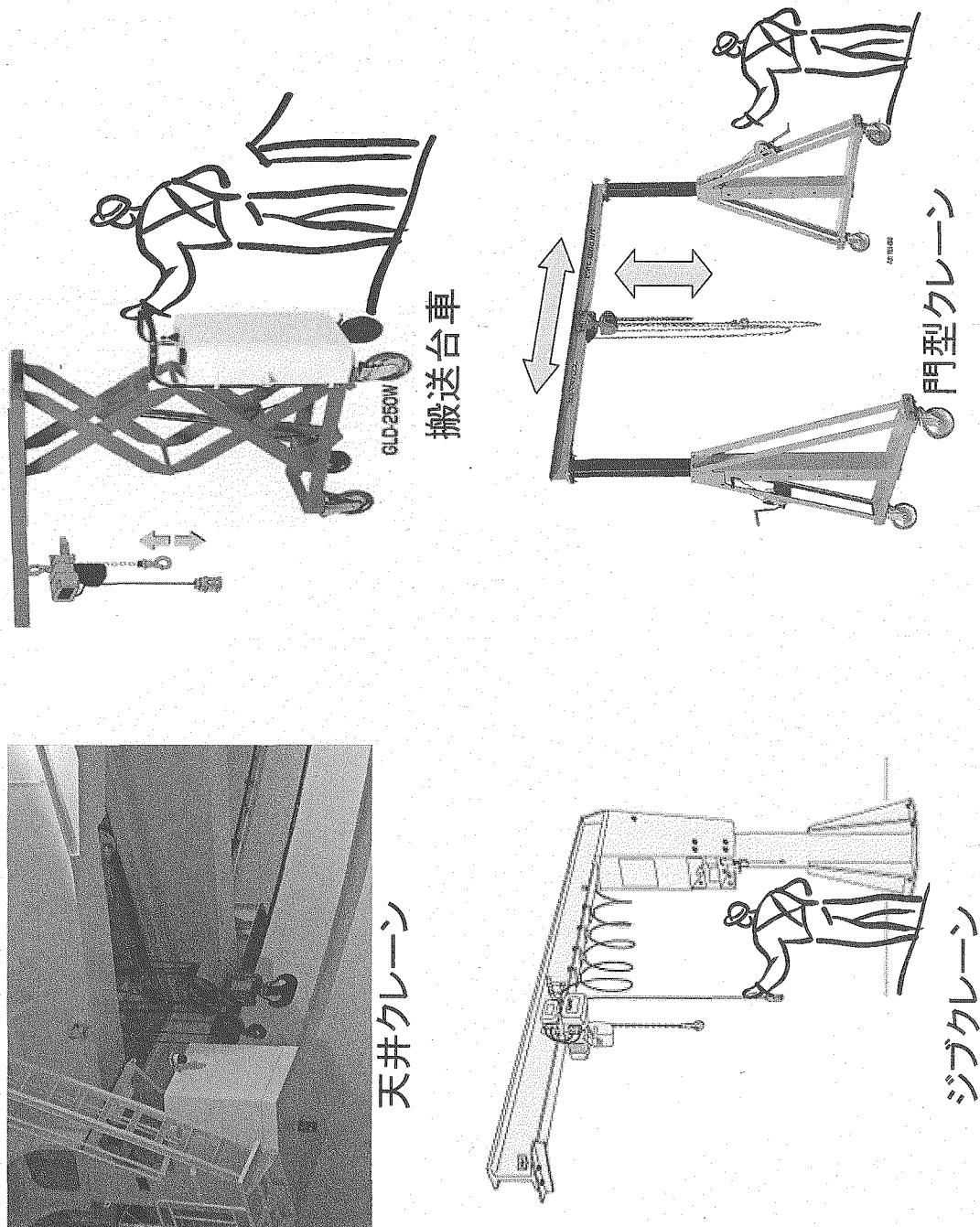


図 3.1-16 憲へい体吊り上げ方式対象設備

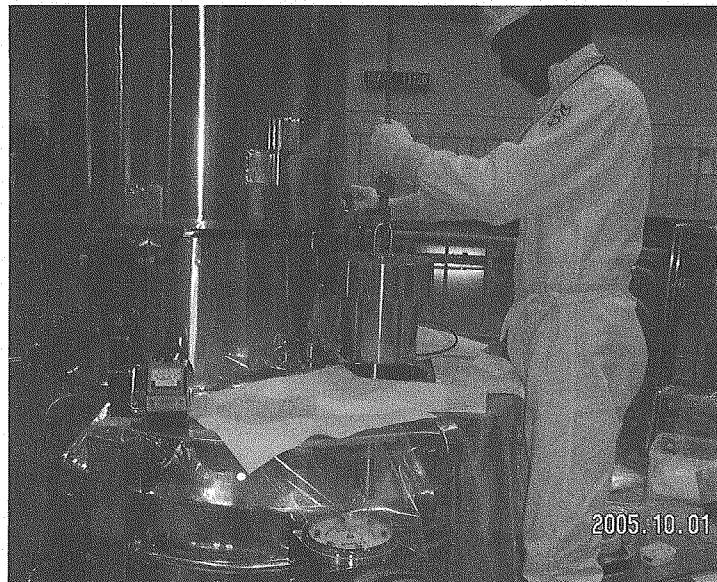


写真 3.1-1 Si 装荷孔遮へいプラグ吊り上げ作業



写真 3.1-2 吸着装置による照射用 Si の出し入れ作業



写真 3.1-3 Si 照射装置 Si 装荷孔



写真 3.1-4 Si 装荷孔と駆動部の隙間の関係

3.2 設備の技術開発

3.2.1 遮へい体扉部の歪み防止技術開発

遮へい体は、外径 304 mm、高さ 1152 mm の円筒型であり、ライニングに板厚 3 mm のステンレス鋼板を用い、内面に 50 mm の遮へい用鉛を鋳込むものである。遮へい体断面図を図 3.2-1 から図 3.2-3 に示す。

遮へい体の製作における技術的開発としては、観音式側面扉と本体接触面及び左右の観音式扉相互接触面の歪み防止が大切である。設計は、遮へい体の構造上歪みの生じやすいステンレス鋼の薄板部分に対し、対策を講じた。

一つ目は、SUS304 のライニングの鉛鋳込み作業時の温度差による影響を考慮し、鉛が缶体に冷やされてしまう現象及び鉛内のエア溜まり等を防止するために缶体を熱しながら作業を行うこととした。鉛充填時の缶体温度は約 400°Cまで熱し、液状になった鉛を鋳込む。この時の缶体鋳込み口温度は、約 70°Cである。この温度差が原因として歪むことが考えられるため、強固な枠組みを施して鉛を充填した。図 3.2-4 に遮へい体補強図を、写真 3.2-1 に歪み防止対策を施した枠組み付き遮へい体を示す。

二つ目は、缶体の薄板部分には溶接時の熱応力が発生する。薄板の曲げ加工による熱応力対策で強度は増すと考えられるが、左右扉の接触面は、当初設計のステンレス鋼板厚 3 mm を 16 mm に厚くし、隙間調整には、16 mm 板を削り加工により調整しながら仕上げた。写真 3.2-2～写真 3.2-8 に製作後の遮へい体を示す。

3.2.2 門型クレーンの旋回

遮へい体移送用に選択した門型クレーンは、片側の支柱にボールベアリングを使用して対角柱が旋回できる構造に改造した。この結果、手動操作により旋回可能となった。写真 3.2-9 に門型クレーンの旋回中の写真を示す。

3.2.3 外部冷却法対応設備の設置位置マーキング

外部冷却法対応設備は、原子炉運転期間以外は原則炉頂から移動する。移動には、天井クレーンを使用する。各対象設備を毎回同じ位置にセットすることにより、正確な位置取りによる作業が可能となる。各対象設備の設置位置合わせには、炉頂部にマーキングを施した。写真 3.2-10 に炉頂部のマーキング写真を示す。

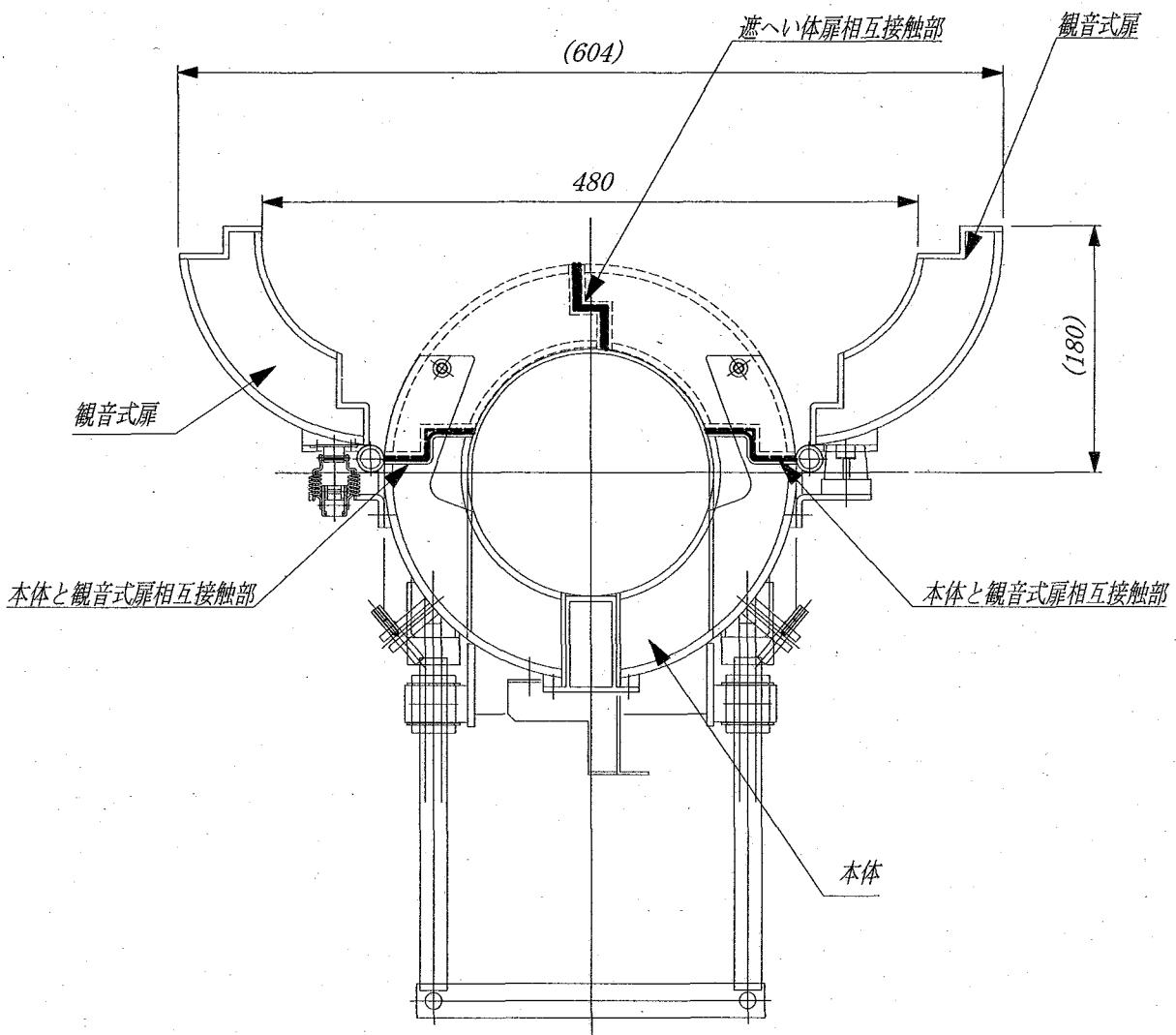


図 3.2-1 遮へい体断面図

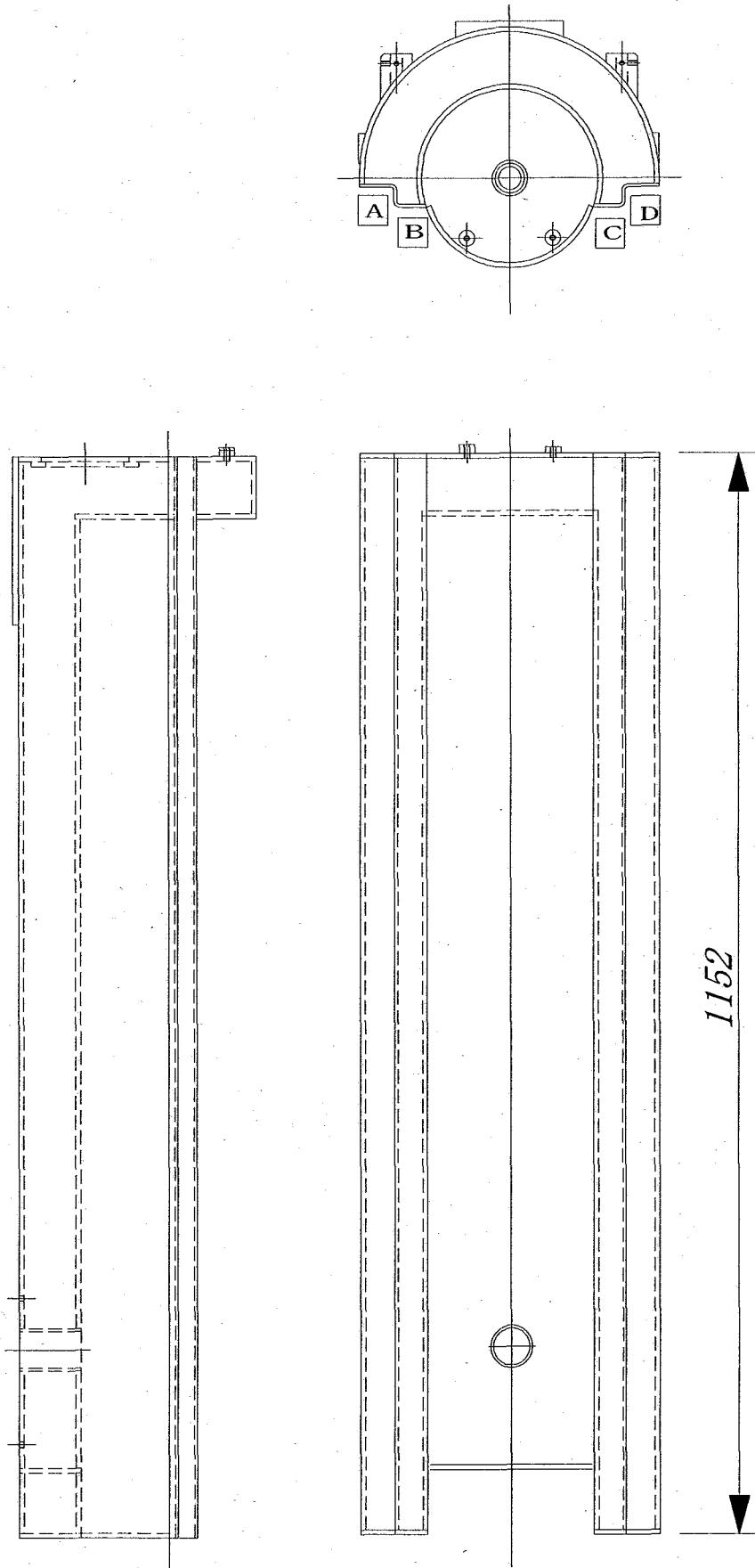
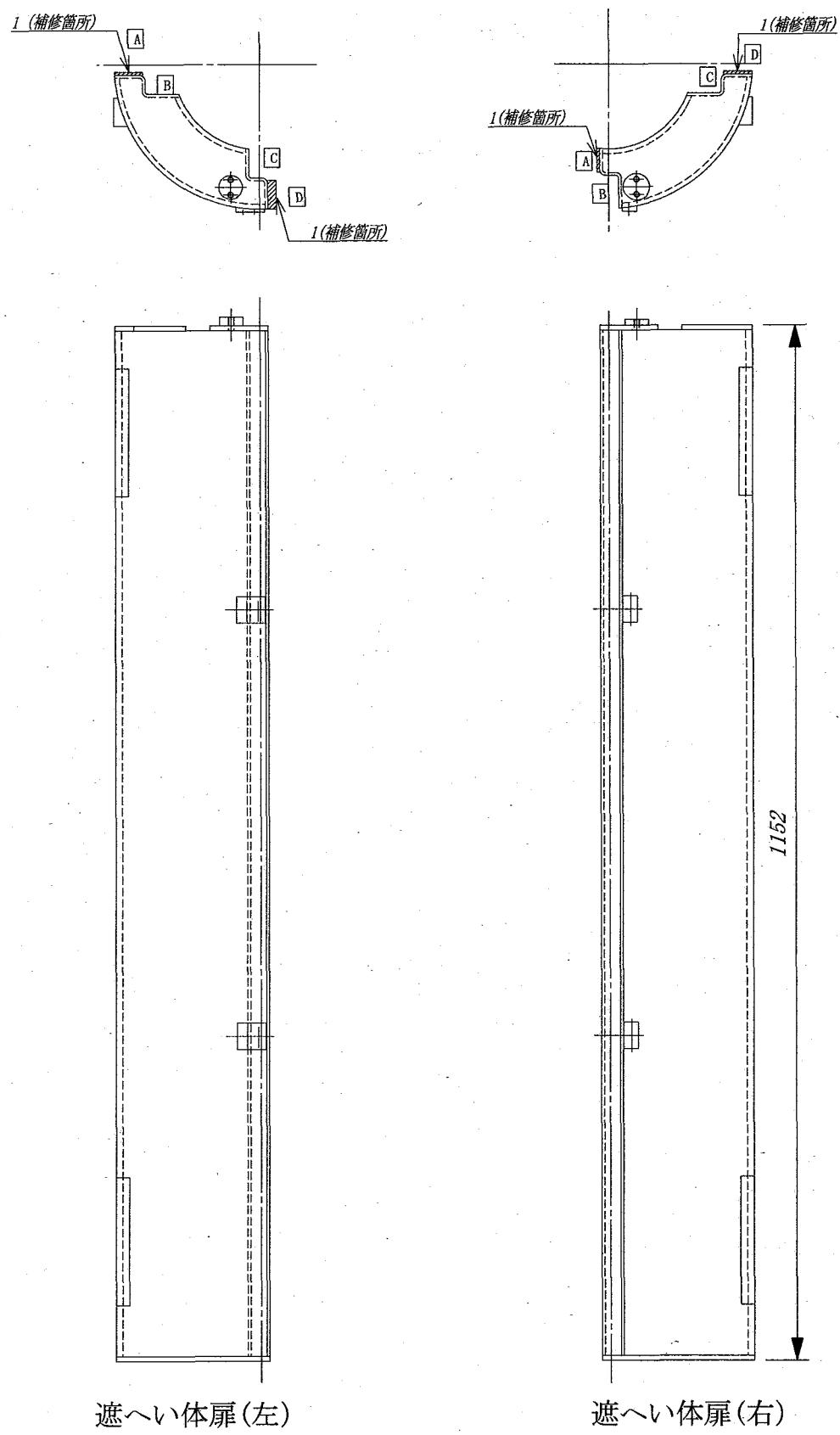


図 3.2-2 遮へい体本体縦断面図



遮へい体扉(左)

遮へい体扉(右)

図 3.2-3 遮へい体左右扉縦断面図

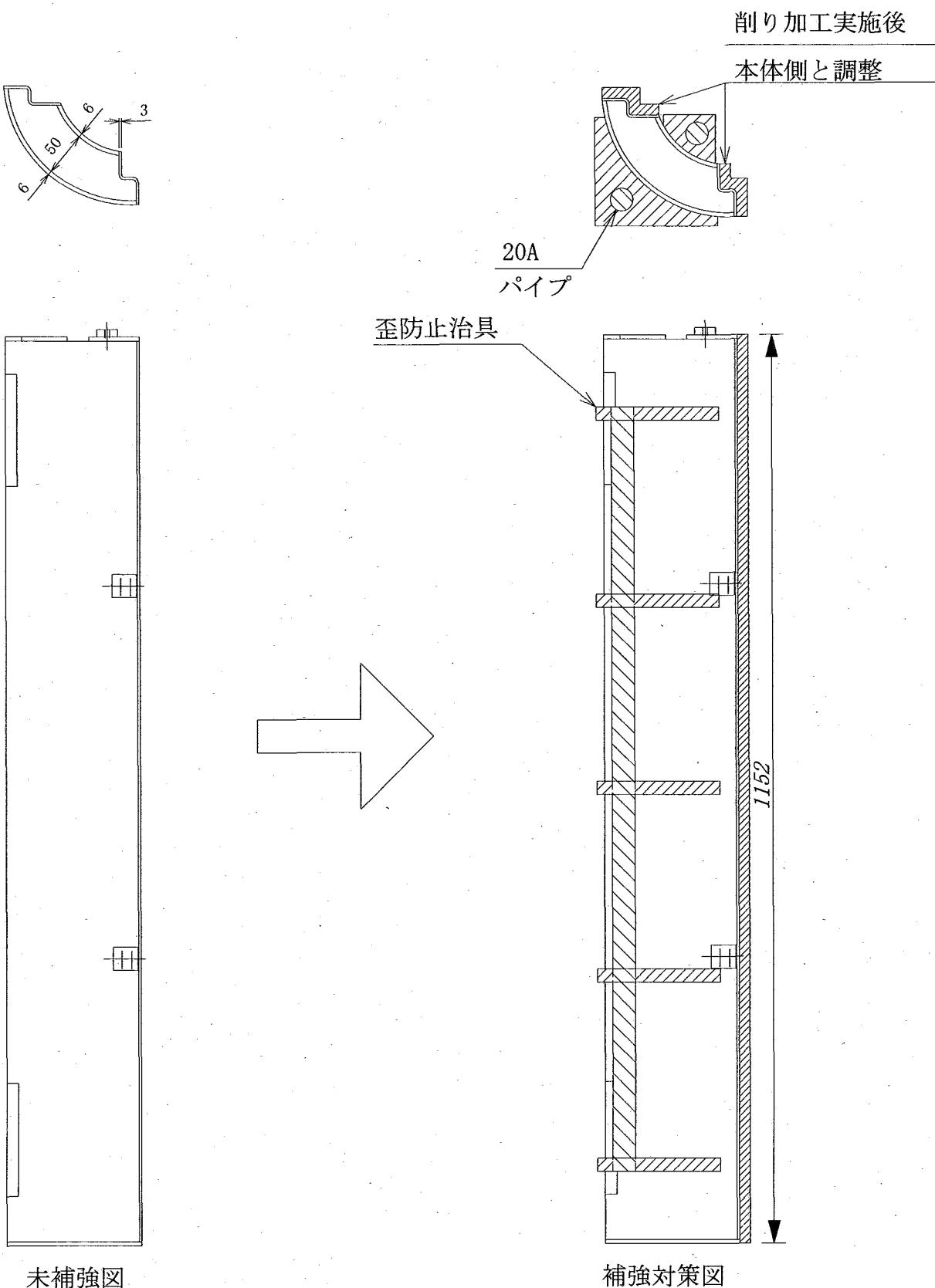


図 3.2-4 遮へい体補強図

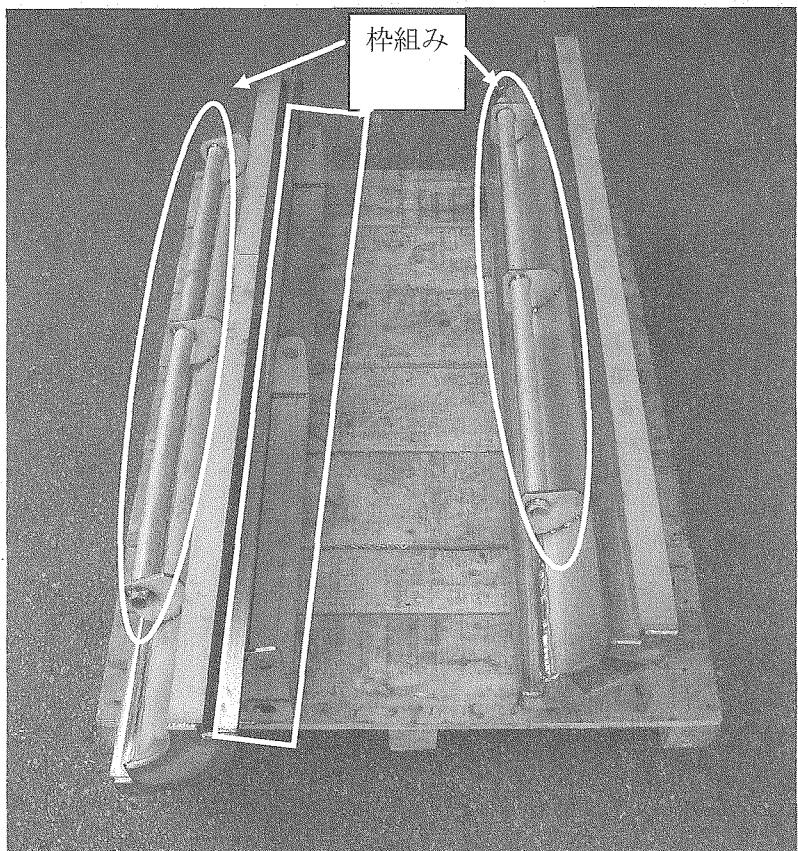


写真 3.2-1 歪み防止対策を施した枠組み付き遮へい体

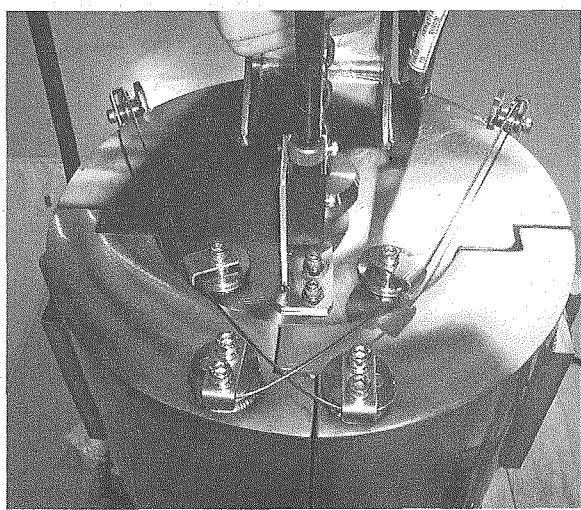


写真 3.2-2 製作後の側面扉(上面)

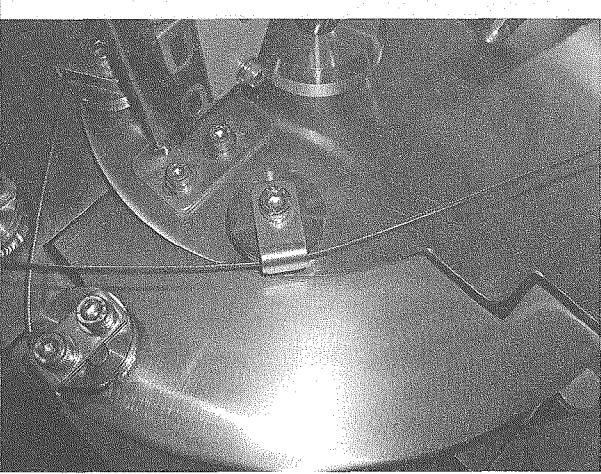


写真 3.2-3 製作後の側面扉右(上面)

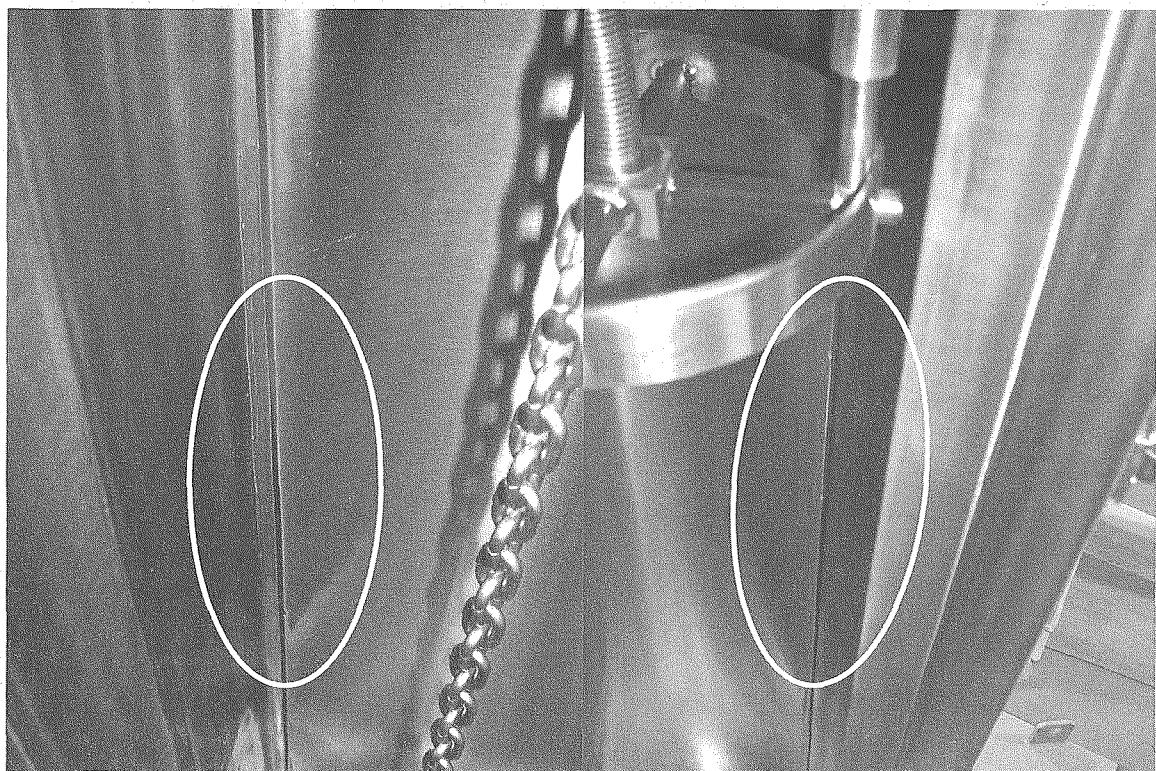


写真 3.2-4 製作後の側面扉内面

写真 3.2-5 製作後の側面扉内面

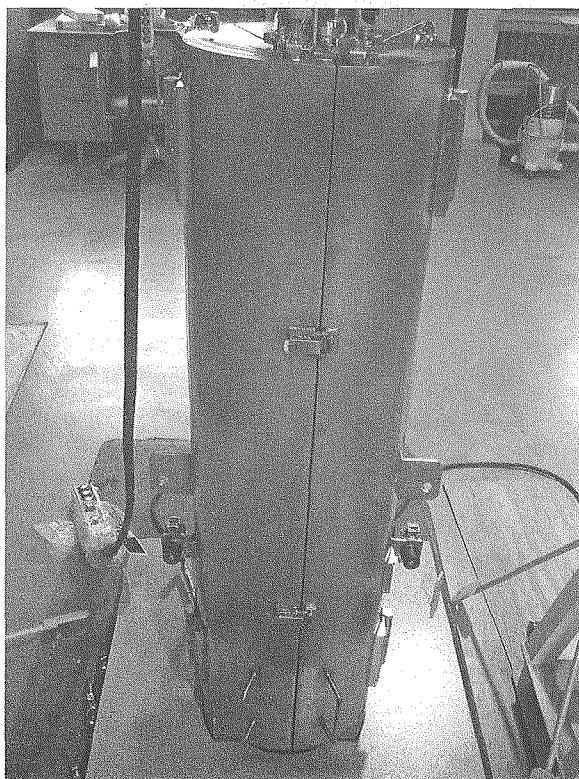


写真 3.2-6 再製作後の側面扉（左右側面扉合わせ部）

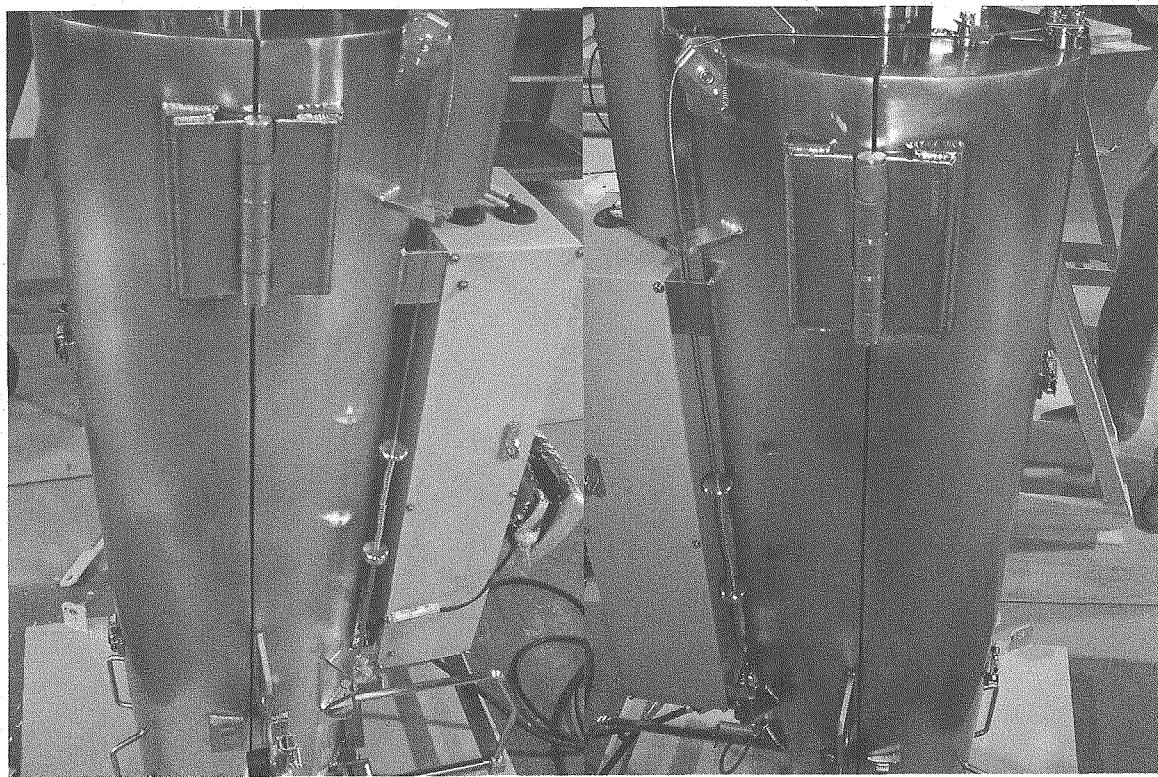


写真 3.2-7 製作後の側面扉(左ヒンジ部)

写真 3.2-8 製作後の側面扉(右ヒンジ部)

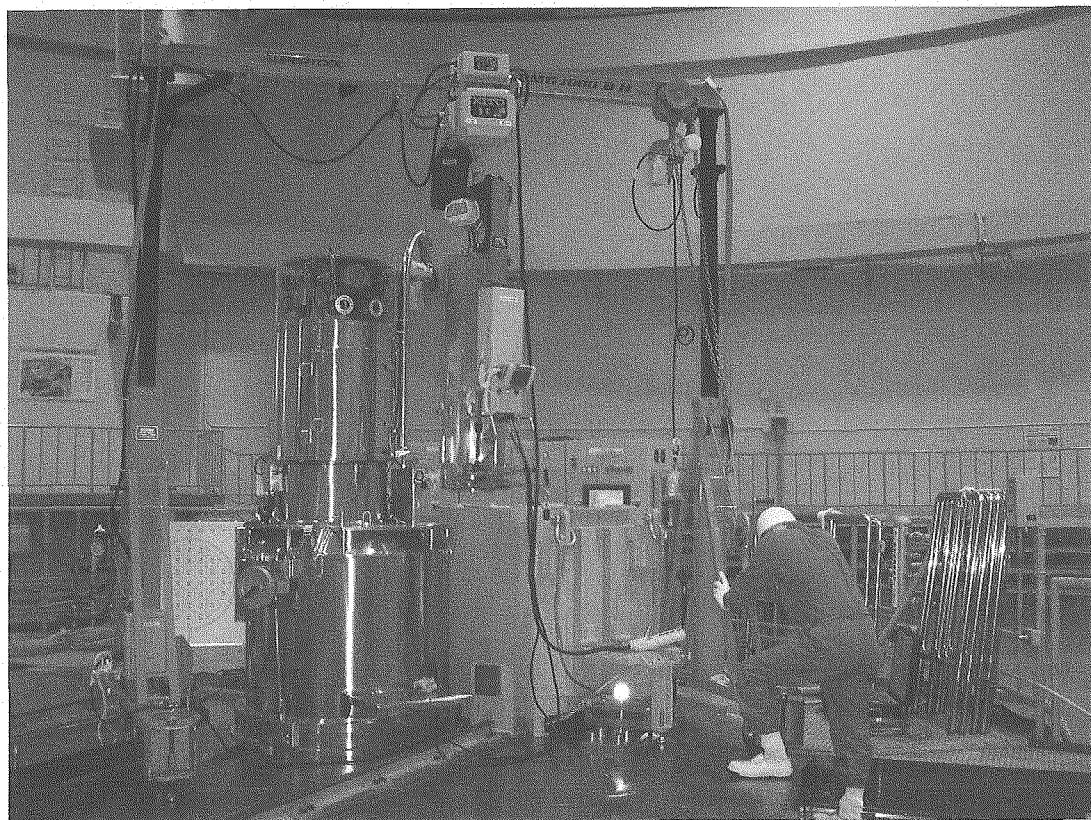


写真 3.2-9 門型クレーンの旋回

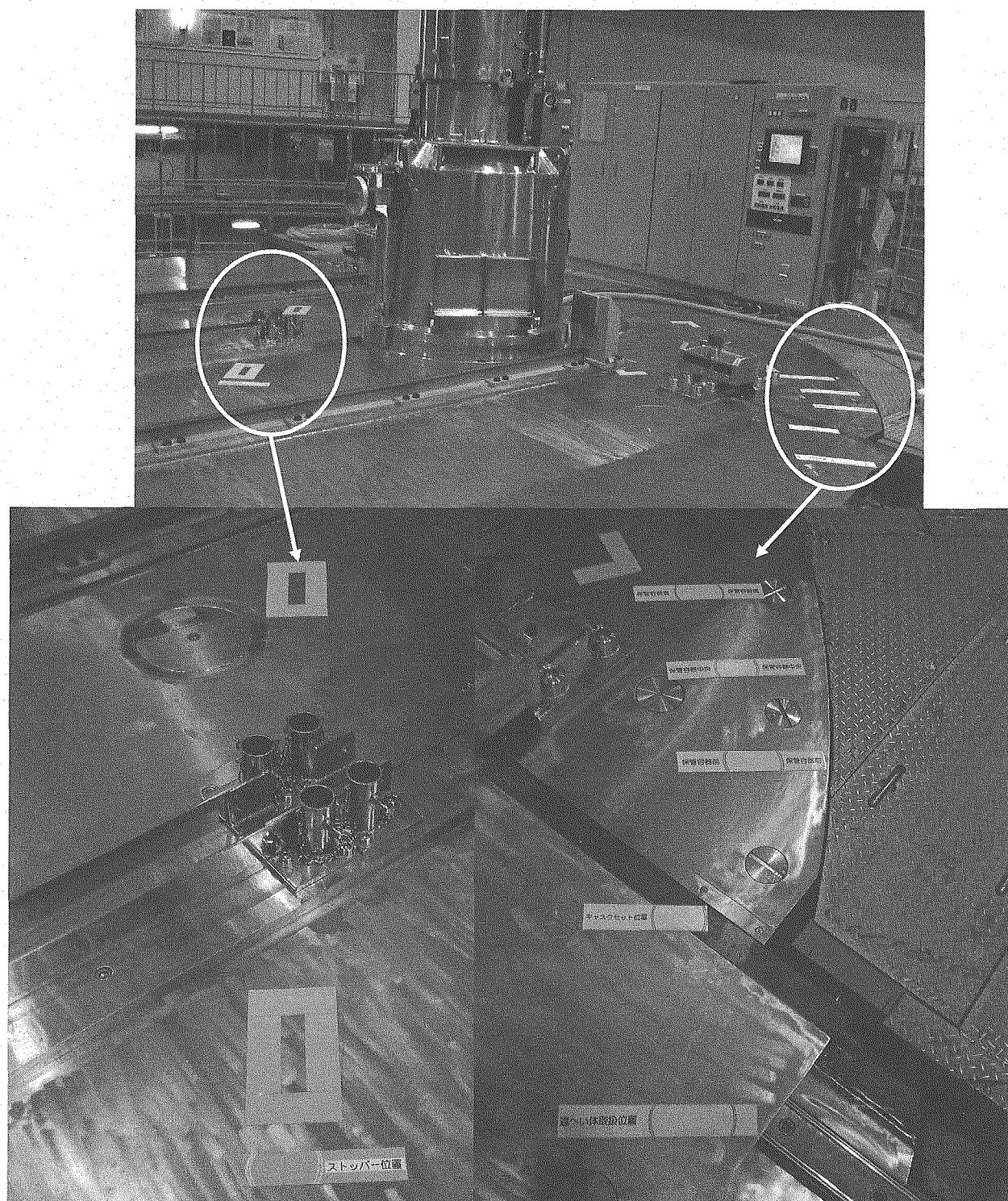


写真 3.2-10 炉頂部マーキング

3.3 Si 照射の流れ

外部冷却法の採用により今までの Si 照射の流れに外部冷却法対応設備への移送・保管冷却の工程が加わる。外部冷却法の時は、ホルダーを 6 本追加して使用することとなる。外部冷却法の作業の流れは、ホルダー 3 本を 1 工程として保管容器まで移送・保管を行う。基本的な Si 照射の流れを図 3.3-1 外部冷却法対応作業フロー及び図 3.3-2 Si 照射の流れ図に示す。この流れ図では、最初に 20 時間冷却が経過した①～③の Si インゴットを保管容器の空の孔 3 カ所に移送する。(流れ図 2、3) 次に、⑦～⑨の未照射 Si インゴットをホルダーに収納して Si 照射装置に移送、照射を行う。(流れ図 4) この繰り返し作業を定期的に実施する。

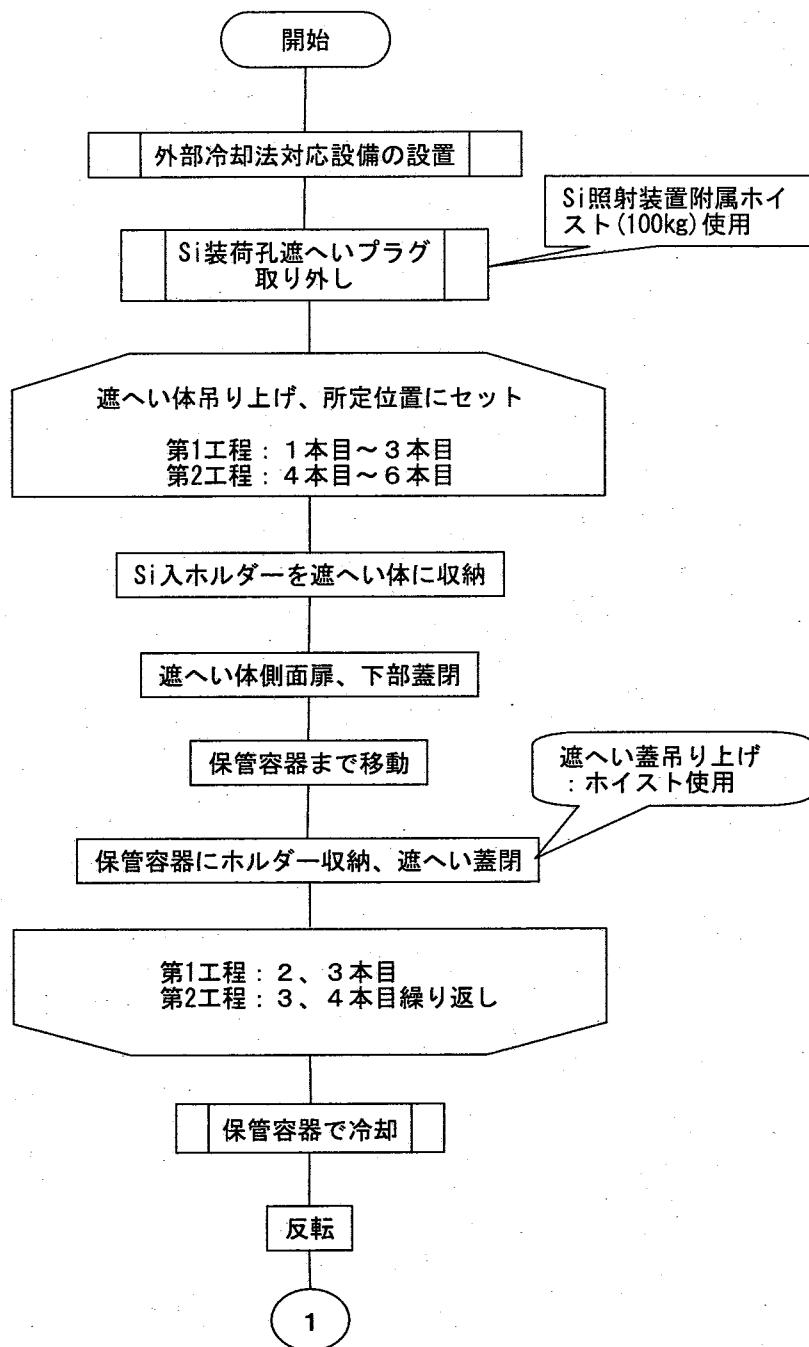


図 3.3-1 外部冷却法対応設備作業フロー（ホルダー取出法）(1/2)

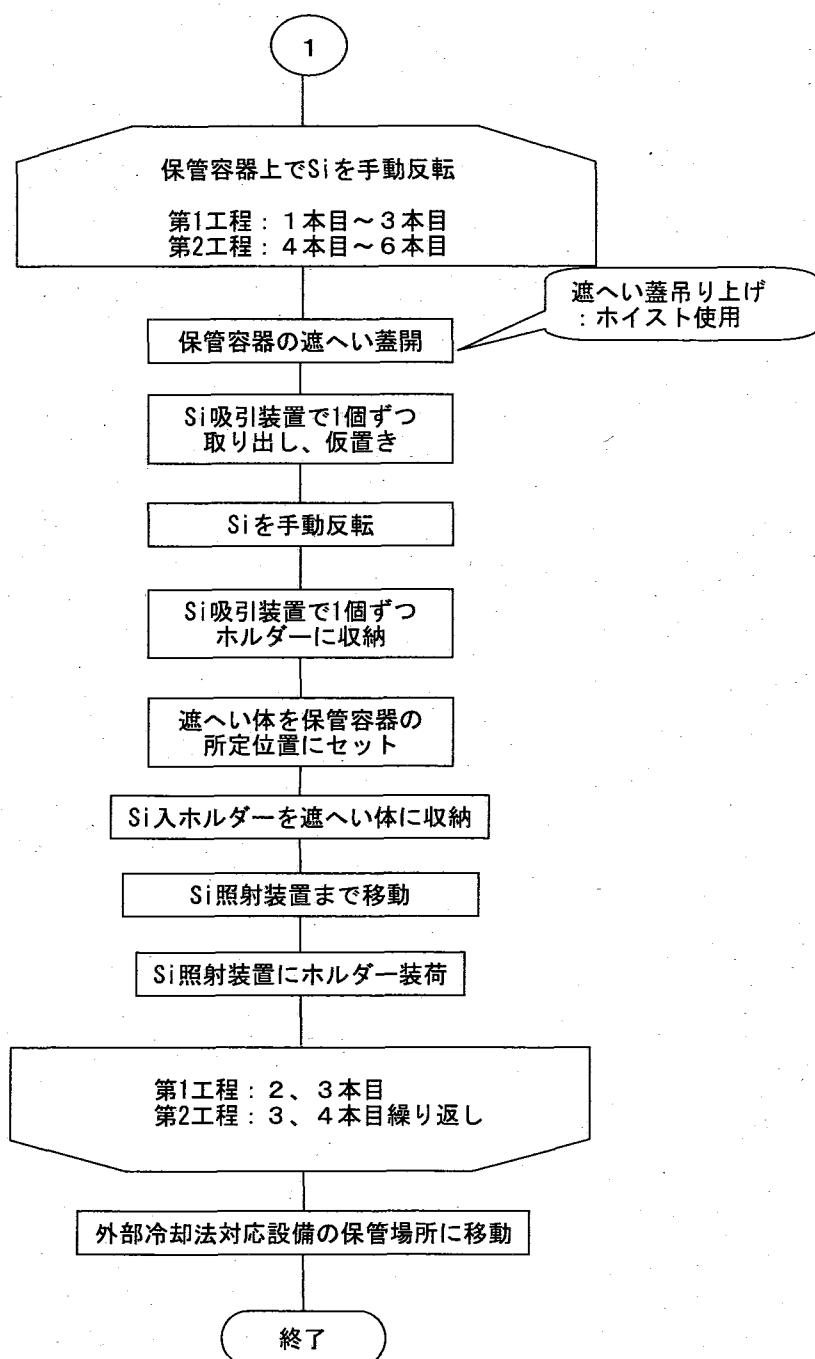


図 3.3-1 外部冷却法対応設備作業フロー（ホルダー取出法）(2/2)

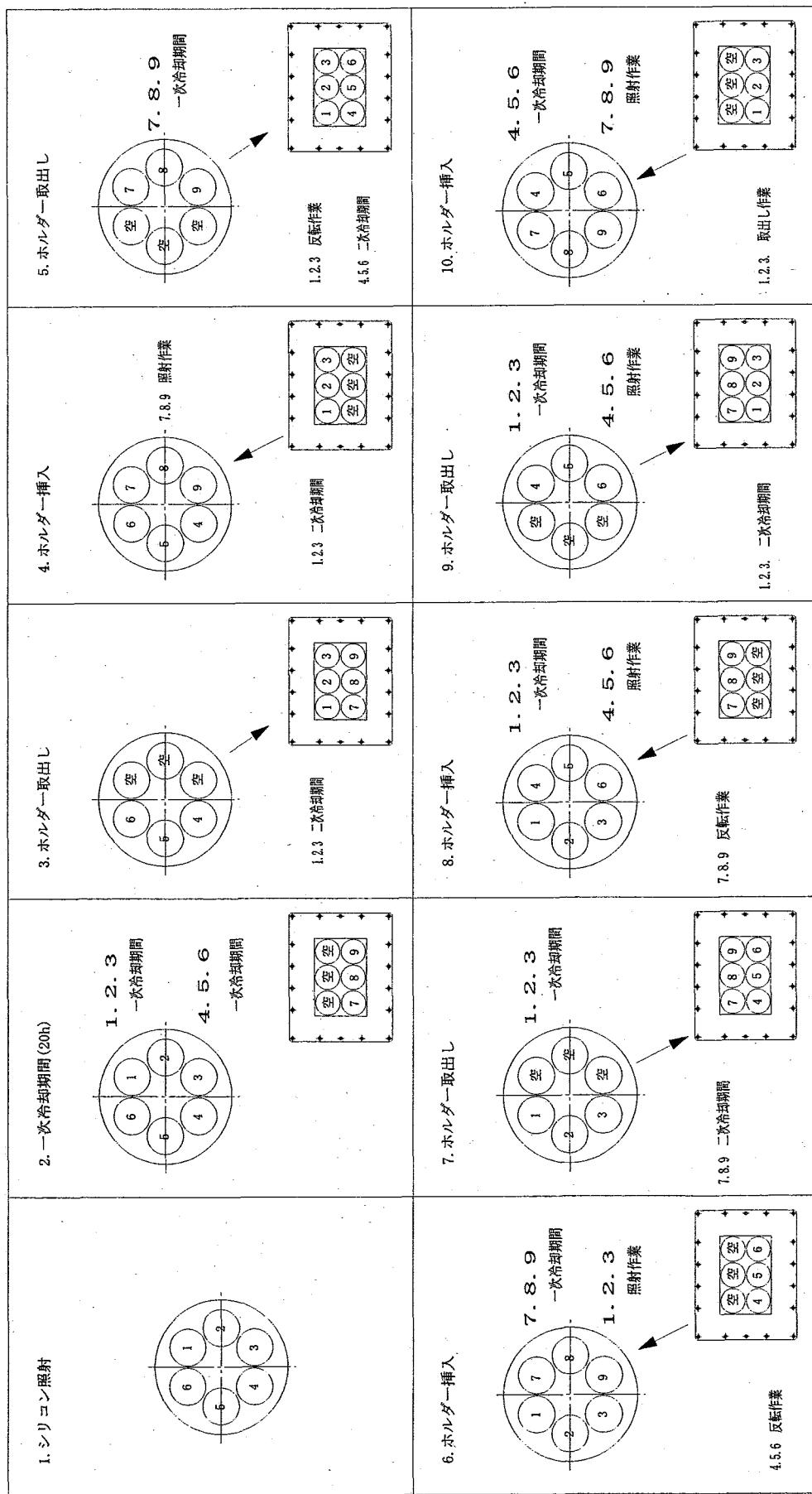


図 3.3-2 Si 照射の流れ図

4 製作及び受入検査

4.1 外部冷却法対応設備製作の概要

外部冷却法対応設備は、以下の設備で構成される。表 4.1-1 に外部冷却法対応設備主要仕様一覧を示す。

外部冷却法対応設備は、既存の Si 照射装置に遮へい体、保管容器及び門型クレーンを附加するものである。

遮へい体は、Si インゴット入りホルダーを Si 照射装置から懸吊機構を介して収納し、外部冷却用保管容器まで移送する時に使用する。形状は外径 304 mm、高さ約 1625 mm、遮へい厚は鉛 50 mm である。

保管容器は、縦置き型、縦 1020 mm × 横約 820 mm × 高さ約 1170 mm、遮へい厚 200 mm、6 本収納孔それぞれに遮へい蓋を有し、全て SS400 材である。

門型クレーンは、間口 3020 mm、高さ 2450～3450 mm、吊り上げ荷重 1ton 用門型クレーン、同荷重 1ton 用電動ホイスト及び同荷重 100 kg 用電動ホイストで構成する。

外部冷却法対応設備の設計、製作は、2005 年 11 月から 2006 年 5 月に実施し、順次、受入検査合格後に現場に納入据付を行った。

表 4.1-1 外部冷却法対応設備主要仕様一覧

設備名称	仕 様	外観写真
1.Si 照射装置 (既存設備)	① 型式：円筒型 ② 個数：1 ③ 主要寸法：外径 1044 mm 高さ 1380 mm ④ 遮へい厚：200 mm (鉛) ⑤ 重量：約 12.5ton ⑥ 材質：SUS304、鉛(遮へい材)	
2.遮へい体	① 型式：円筒型 ② 個数：1 ③ 主要寸法：外径 304 mm 高さ 1625 mm ④ 遮へい厚：50 mm (鉛) ⑤ 重量：約 630 kg ⑥ 材質：SUS304、鉛(遮へい材) ⑦ ホルダー収納数量：1本	
3.保管容器	① 型式：箱型 ② 個数：1 ③ 主要寸法：縦 1020 mm 横 820 mm 高さ 1170 mm ④ 遮へい厚：200 mm (SS400) ⑤ 重量：約 6250 kg ⑥ 材質：SS400 ⑦ ホルダー収納数量：6本	
4.門型 クレーン	① 型式：ポータブル型 ② 個数：1 ③ 主要寸法：間口 3020 mm 高さ 2450~3450 mm ④ 容量：1000 kg ⑤ 重量：約 415 kg ⑥ 材質：SUS304 ⑦ 電動ホイスト：1000 kg用 1基 100 kg用 1基	

4.2 製作仕様

4.2.1 遮へい体の製作

(1) 概要

遮へい体は、本体、左右側面扉及び底部スライド扉で構成する。付属設備は、100 kg ホイスト及び遮へい体架台である。

遮へい体は、Si 照射装置の Si 装荷孔上で高線量ホルダーを吊り込み、所定の場所に設置した保管容器上まで移送し、保管容器内に収納するまで移送時の線量を低減するために必要なものである。

構造は、円筒形で遮へい厚を鉛材で 50 mm 以上とし、Si 照射装置の構造上の理由から、側板及び底板をスライド開閉式とした特殊遮へい体である。遮へい体に吊り込むホルダーは、Si 照射装置の Si 装荷孔上で Si 照射後約 20 時間冷却の高線量ホルダーを吊り込み、所定の場所に設置した保管容器上まで門型クレーンを使用して移送し、保管容器にホルダーを収納するものである。ホルダーの表面線量当量率は、約 22mSv/h と推測する。

遮へい体断面図を図 4.2-1 に、遮へい体の概略構造図を図 4.2-2 に示す。

(2) 詳細設計

1) 遮へい体本体

① 設計条件

- (ア) 照射済 Si インゴット入りホルダーを遮へい体内に短時間で、安全かつ確実に取り込み、保管容器まで移送出来る構造設計とする。
- (イ) 照射済 Si インゴット入りのホルダー 1 本を収納した状態で移送できる十分な強度を有する設計とする。
- (ウ) 遮へい体スライド式側板は、手動開閉式とし、自然閉止状態となる設計とする。
- (エ) ホルダーに付着した炉プール水による汚染拡大防止対策を講じた設計とする。
- (オ) 照射済み Si インゴット入りのホルダー 1 本を収納した状態で、炉頂ガンマ線エリアモニタの線量当量率が基準線量を超えない設計とする。遮へい体から炉頂 γ 線エリアモニタまでの直線距離は約 6m で、警報設定値は $100 \mu \text{Sv}/\text{h}$ である。
- (カ) 移送中、又は取扱い中に、万一炉頂上部遮へい体上に落下した場合、上部遮へい体の構造に影響がない重量構造に設計する。
- (キ) 門型クレーンに設置した 1ton 用電動ホイストで吊れる構造とする。
- (ク) ホルダーを吊り込むホイストは、遮へい体本体と一体型とする。
- (ケ) ホルダーを吊り上げ、吊り下げる際に懸吊機構をガイドする操作ロッド(トング)を遮へい体附属設備として設計する。
- (コ) 遮へい体を使用しない時は、所定の遮へい体架台に保管出来る構造とする。
- (サ) 取扱い場所は、炉頂の均一照射設備設置付近とする。

② 設計仕様

(ア) 型式：縦置き式

(イ) 尺寸法：外径 ϕ 約 304 mm × 内径 ϕ 約 180 mm × 高さ 約 1625 mm

(ウ) 重量：約 630kg

(エ) 主要材質 : SUS304、Pb

(オ) 数量 : 1基

(カ) 開閉扉 : 左右開閉側板及び底板は、スライド式遮へい板とする。

2) 100 kg荷重ホイスト

100 kg荷重ホイストは、遮へい体本体と一体型とし、定格荷重 100 kgの巻上下電動ホイストを設置する。

① 型式 : キトー製 ED10ST相当品 (単相 100V)

② 定格荷重 : 100 kg

③ 制御方式 : 電動 2速選択型

④ 操作方式 : 床上押ボタン操作

⑤ 数量 : 1基

3) 遮へい体保管架台

遮へい体本体は、ホルダーを外部冷却のために取り扱う時以外は、保管架台で保管するものとする。保管架台は、門型クレーン移動範囲内に設置出来るよう設計し、可能な限りコンパクトな構造とする。

① 尺寸法 : 外径 φ約 350 mm × 内径 φ約 340 mm × 高さ 500 mm

② 主要材質 : SS400 (塗装仕上げ)

③ 数量 : 1基

④ その他 : 約 700 kgの遮へい体の転倒防止対策を施すこと。

4.2.2 保管容器の製作

(1) 概要

保管容器は、外部冷却法を行うため、高線量のホルダーを Si 照射装置から取り出し、保管容器で冷却するものである。従って、高線量のホルダーを遮へいし、周辺に人が立ち入る事ができるような構造とする。また、原子炉運転が終了すると所定の場所に移動する必要があるため、天井クレーンにより、吊り上げ移動可能な構造とする。

構造は、ホルダーを 6 本収納する本体、ホルダー収納毎の遮へい蓋、本体用 4 点吊手から構成する。保管容器には、Si 照射後最短 20 時間冷却のものを収納し冷却保管するものである。ホルダーの表面線量当量率は、約 22mSv/h と高線量となることから、遮へい厚は、保管容器側面外表面で $25 \mu\text{Sv}/\text{h}$ を目安値に設計し、製作手間及び材料費を低減することによる低価格化を図る方針とした。この目安値 $25 \mu\text{Sv}/\text{h}$ は、原子力機構の保安規定に定める管理区域内における人が常時立ち入る場所の線量当量率は $1\text{mSv}/\text{週}$ を超えないようにするとしており、その 1 時間あたりに換算した線量当量率である。保管容器の概略構造図を図 4.2-3 に示す。

(2) 詳細設計

1) 設計条件

① 水平方向震度 0.36 に対し、転倒モーメントを計算し、その計算結果が水平方向震度 0.36 で転倒しない設計構造とする。

② 吊手は、照射済 Si インゴット入りのホルダー 6 本を収納した状態で移送できる十分な強度を有する設計とする。

- ③ 照射済みSiインゴット入りのホルダー6本を収納した状態で、ホルダー表面線量当量率約22mSv/hとしたとき、保管容器表面で $25\mu\text{Sv}/\text{h}$ 未満となり、漏洩線量がない設計とする。
 - ④ 保管容器内筒は、除染性を考慮した設計とする。
 - ⑤ 保管容器の蓋は、門型クレーンに設置した100kg用電動ホイストで吊れる構造とする。
 - ⑥ 遮へい厚は、鉄鋼材(SS400)約200mmとし、追加遮へいが可能な構造を考慮した設計とする。
 - ⑦ ホルダー収納は、6箇所とする。
 - ⑧ 蓋は、ホルダー収納部毎に設置する。
 - ⑨ 本体上部側面に吊手を4個設ける。
 - ⑩ 蓋には吊手を1個設ける。
 - ⑪ ホルダー収納部にSUS304材等内筒を収納し、保管容器内部の汚染防止対策を講じる。内筒は、取り外し可能な構造とする。
- 2) 設計仕様
- ① 型式：上部開放、直方体蓋付型。
 - ② 尺法：縦1020mm×横約820mm×高さ約1170mm、遮へい厚200mm。
 - ③ 重量：約6250kg
 - ④ 主要材質：SS400、SUS304
 - ⑤ 表面仕上げ：塗装仕上げ
 - ⑥ 数量：1基
- 保管容器の耐震強度計算書を付録D保管容器の耐震強度計算書に示す。

4.2.3 門型クレーンの製作

(1) 概要

門型クレーンは、Si照射装置と保管容器を挟むように設置し、Si照射装置と保管容器間の約1.5mの距離を遮へい体を吊り上げて移送するものである。門型クレーンの概略構造図を図4.2-4に示す。

(2) 仕様

1) 門型クレーン

門型クレーンは、遮へい体を吊り上げたまま保管容器の位置まで移動するもので、保管容器にホルダーを保管する際に、片脚を固定し、保管容器側の脚を横行移動させるため、固定脚側にペアリング等により旋回可能な構造とする。

- ① 型式：ポータブル門型クレーン(伸縮式)㈱スーパーツール製 PMC1000BN
相当品
- ② 尺法：間口3020mm、高さ2450～3450mm、
- ③ 荷重容量：1000 kg
- ④ 重量：約415 kg
- ⑤ 揚程：約3450 mm(伸縮型)
- ⑥ キャスター：固定型4個

- ⑦ 改造 : 片脚を固定し、保管容器側の脚を横行移動させるため、固定脚側にベアリング等により旋回可能な構造とする。
- ⑧ 固定ブーム : 左右脚に各固定用ブームを設置し、転倒防止対策も講じる。
- ⑨ 吊り具 : 天井クレーンにより移動するための吊り手を2箇所設置する。
- ⑩ 数量 : 1基

2) 1ton 荷重ホイスト

1ton 荷重ホイストは、遮へい体本体を吊り上げ、移動するために定格荷重 1ton の巻上下・横行電動ホイストを設置する。

- ① 型式 : キトー製 ERM010IS-IS 相当品 (3相 200V)
- ② 定格荷重 : 1000 kg
- ③ 制御方式 : インバータ制御
- ④ 操作方式 : 床上押ボタン操作
- ⑤ 摆れ防止 : 約 630 kg の遮へい体を吊り走行移動する際の揆れ防止対策は、インバータ制御機能及び低速走行により揆れが軽減できる。
- ⑥ 数量 : 1基

3) 100 kg荷重ホイスト

100 kg荷重ホイストは、保管容器の蓋を吊り上げるために定格荷重 100 kg の巻上下電動ホイストを設置する。

- ① 型式 : キトー製 ED10ST 相当品 (単相 100V)
- ② 定格荷重 : 100 kg
- ③ 操作方式 : 床上押ボタン操作
- ④ 数量 : 1基

4.2.4 付属装置の製作

(1) 概要

付属装置は、ホルダー懸吊機構、CCD 小型カメラ及びディスプレイ、荷重計及び吊具で構成する。

(2) 仕様

1) ホルダー懸吊機構

遮へい体内にホルダーを吊る込むための懸吊機構を製作する。

遮へい体内に設置したホルダー懸吊機構により、ホルダーを吊り上げる構造は、ホルダー上部の接続部に懸吊機構を乗せ、回転ロックすることにより接続する。しかし、接続部は目視確認できないため、遮へい体側面から挿入する CCD カメラにより確認しながら操作トングにより接続操作を行う。ホルダーの上部側面には、カギ型の切り欠きが 90 度方向に 4 力所あり、そこに懸吊機構を接続する事により吊り上げる。また、荷重計による過荷重、無負荷検知により、安全装置が作動する機構とする。

- ① 寸法 : 外径約 $\phi 162$ mm × 高さ約 145 mm
- ② 主要材質 : SUS304
- ③ 数量 : 1基

④ その他 : 約 60 kg の重量物が吊れる構造とし、既設ホルダーの懸吊部構造に合わせた寸法とする。

⑤ ホルダー : ホルダー懸吊機構概略構造図を図 4.2-5 に示す。

2) CCD カメラ及びディスプレイ

ホルダー懸吊部と懸吊機構の吊り込み部が目視で確認出来る様、小型の CCD カメラを遮へい体側板に内蔵し、モニターで確認出来る構造とする。

① LED 照明付き CCD カラーカメラ及び TFT 液晶ディスプレイ

: Snake Eye クロダ・オプトロニクス(株)製

② 数量 : 1 式

3) 荷重計

ホルダーを吊り上げた時、確実に吊り上げた事を確認するため、ロードセル等による荷重計をホルダー懸吊機構に設置し、操作位置で荷重を確認する事が出来る構造とする。

① ホルダー懸吊機構等に設置し、ホルダーを吊り上げた重量を検知出来ること。

② 数量 : 1 基

4) 吊具

遮へい体、門型クレーン、保管容器及び保管容器蓋用吊具を用意する。

① 遮へい体 : ナイロンスリング 1 本

② 門型クレーン : ナイロンスリング 2 本

③ 保管容器 : ワイヤー及びシャックル各 4 本

④ 保管容器蓋 : アイボルト 4 個

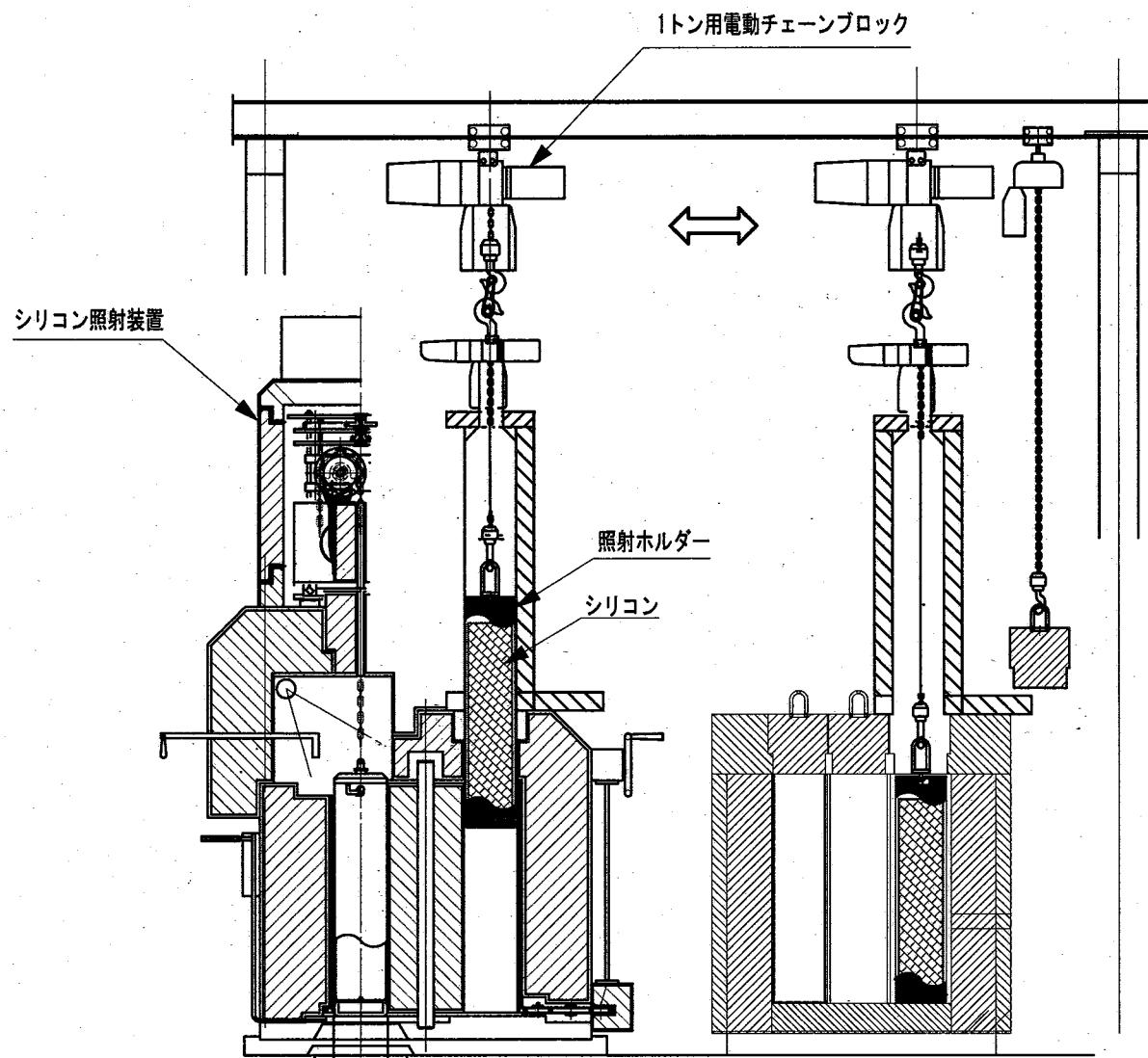


図 4.2-1 遮へい体断面図

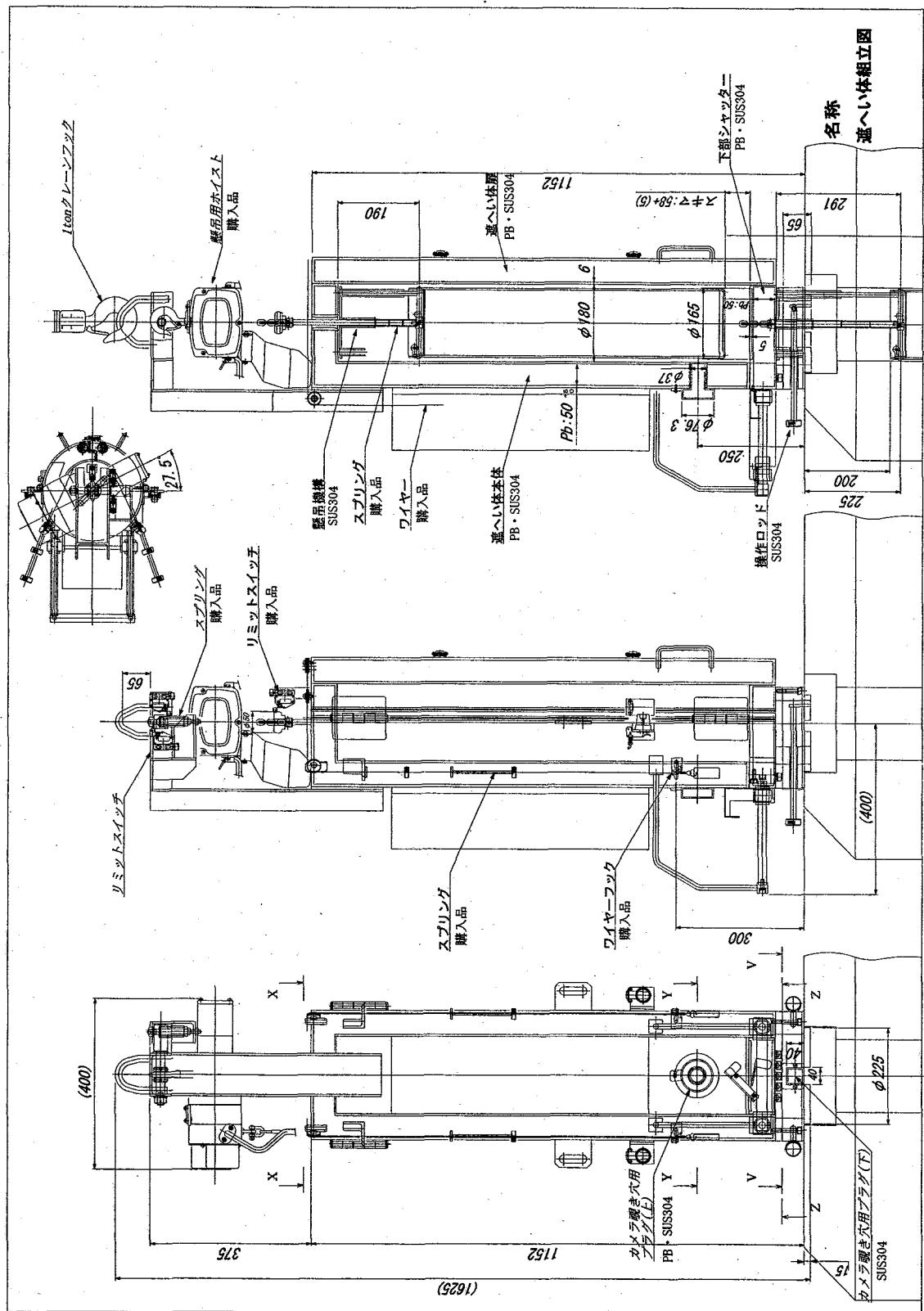
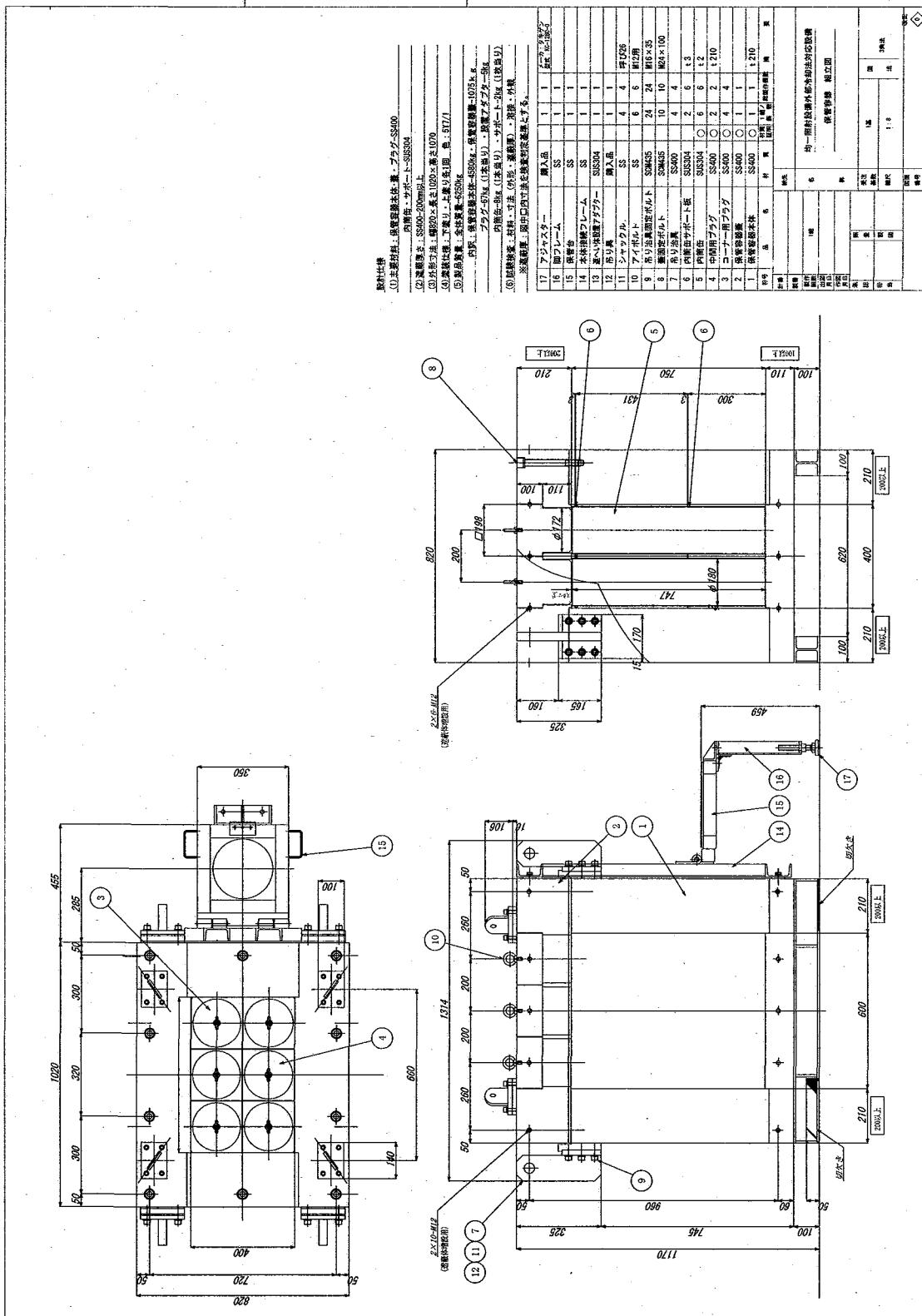


図4.2-2 遮へい体概略構造図

図 4.2-3 保管容器概略構造図



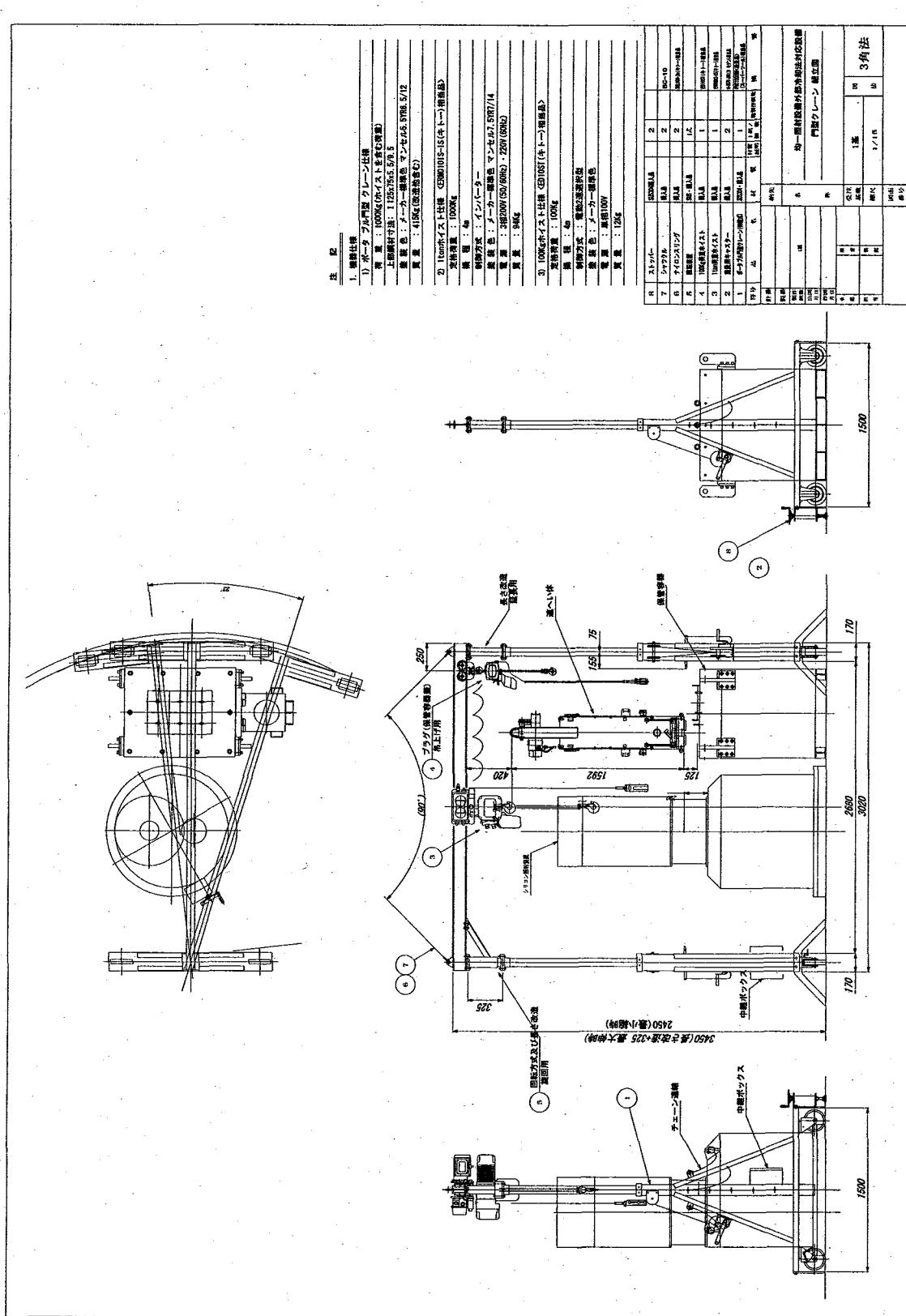


図 4.2-4 門型クレーン概略構造図

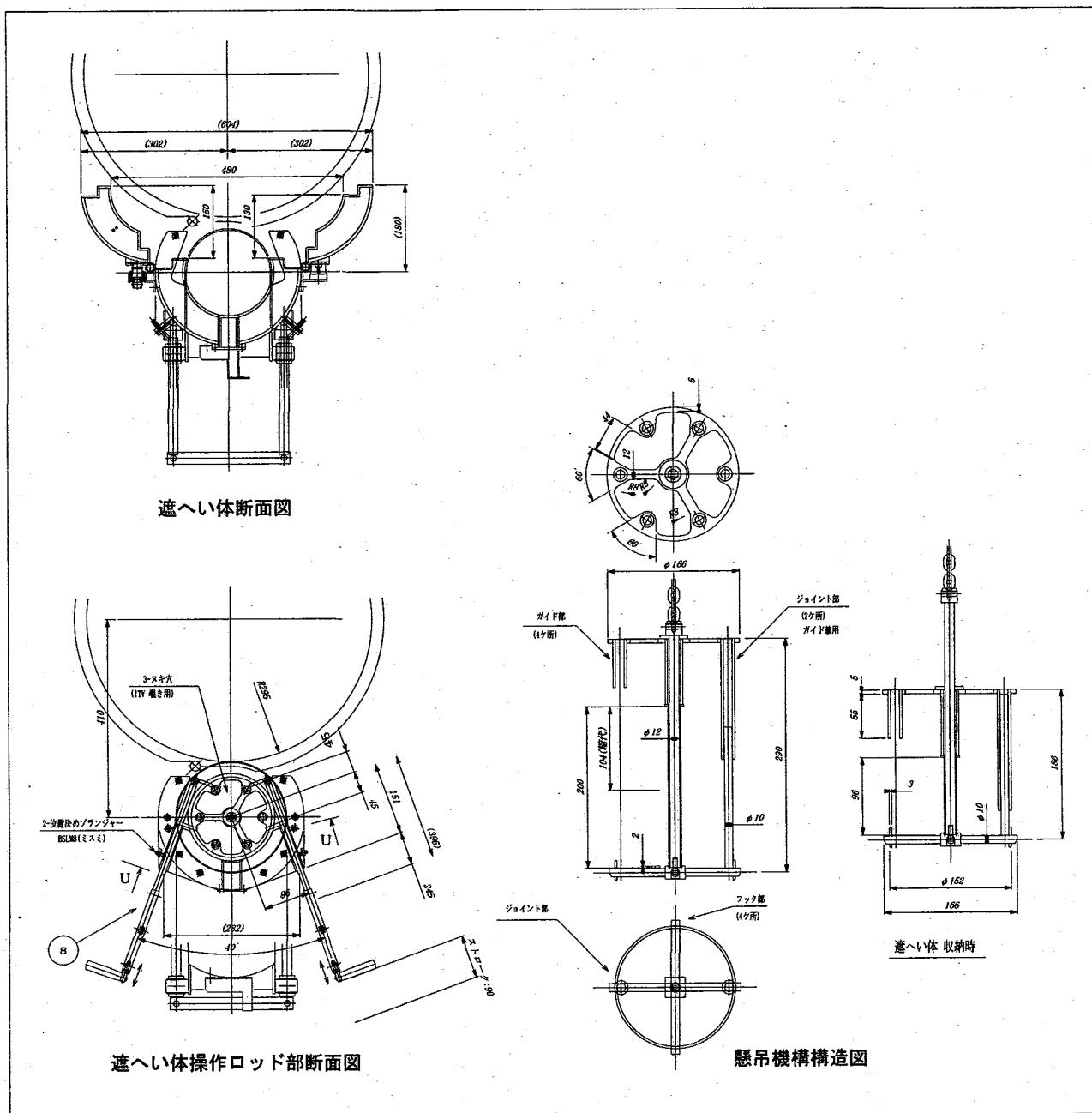


図 4.2-5 ホルダー懸吊機構概略構造図

4.3 受入検査要領

4.3.1 材料検査

材料検査は、遮へい体の鉛材、保管容器の鉄鋼材について、ミルシートに記載の材質が承認図どおりであること。素材メーカーから提出される日本工業規格（以下「J I S」という。）認定工場等が発行する材料検査成績証明書により行うものとし、方法、合格基準及び許容値は J I S によるものとする。また、J I S に規定されていないものについては、協議の上決定するものとする。

4.3.2 外観検査

遮へい体、保管容器、門型クレーン、付属装置について、目視により、有害な変形、仕上げ状況、傷、汚れ等の無いことを確認する。

4.3.3 寸法検査

遮へい体、保管容器、門型クレーン、付属装置について、巻尺、直尺、ノギス等により主要な寸法を測定し、承認図に示された寸法公差内であることを確認する。

4.3.4 鉛充填率検査

遮へい体について、鉛充填率が 97 %以上であることを確認する。

4.3.5 溶接検査

溶接検査は、遮へい体、保管容器、門型クレーンの溶接部外観検査及び浸透探傷検査を行うものとし、内容の詳細については試験・検査要領書で決定するものとする。

(1) 溶接部外観検査

遮へい体、保管容器、門型クレーンの溶接部について、割れ等有害な変形及び欠陥のないことを目視により確認する。

(2) 浸透探傷検査

遮へい体、保管容器、門型クレーンの溶接線主要部について、浸透探傷検査等を行い有害な発色がないことを確認する。

4.3.6 単体作動検査（工場及び据付時）

(1) 遮へい体

設計方針を満足する事が検査できる検査項目とし、側板、底板の開閉動作が良好であり、ホルダーの収納、取り出しがスムーズに作動することを確認する。

(2) 保管容器

設計方針を満足する事が検査できる検査項目とし、蓋の着脱、内筒の着脱操作がスムーズに作動することを確認する。

(3) 門型クレーン

設計方針を満足することが検査できる検査項目とし、定格荷重の 1ton ウエイトを吊り上げ、ホイスト走行が良好に作動し、旋回作動が一人の力でスムーズに作動することを確認する。

(4) 付属装置は、各々の設置目的を満足し、良好に作動することを確認する。

4.3.7 総合作動検査

遮へい体、保管容器、門型クレーン及び付属装置を現場に設置し、一連の作業を行い、良好に作動することを確認する。

4.4 受入検査結果

製作に伴う受入検査は全ての検査項目において合格であった。検査結果のまとめを表 4.4-1 に示す。

また、門型クレーンについては、使用開始前に労働安全衛生法施行令第 13 条第 3 項第 14 号及びクレーン等安全規則第 11 条の規定に基づき、水戸労働基準監督署宛てに、原子力機構から平成 18 年 6 月 9 日に設置の報告を行い、同日受理された。荷重試験は、原子力機構クレーン等の運転管理要領第 10 条に定めにより、平成 18 年 7 月 4 日、荷重試験を実施し、判定基準を満足していることを確認した。

表 4.4-1 検査結果のまとめ

検査項目	検査対象機器	検査部位	検査結果
材料検査	① 遮へい体	鉛材	合格
	② 保管容器	鉄鋼材	
外観検査	① 遮へい体	主要部	合格
寸法検査	② 保管容器 ③ 門型クレーン ④ 付属装置製作品	主要部	合格
鉛充填率検査	① 遮へい体	全体	合格
溶接検査 (1) 溶接部外観 (2) PT検査	① 遮へい体	主要溶接部	溶接検査 (1) 合格 (2) 合格
	② 保管容器	主要溶接部	
	③ 門型クレーン	吊手部	
	④ 付属装置製作品	主要溶接部	
単体検査	① 遮へい体		合格
総合作動検査	② 保管容器 ③ 門型クレーン ④ 付属装置		合格

5 性能確認試験

5.1 計画工程及び作業手順

外部冷却法対応設備の性能確認試験は、コールドラン及びホットランで行った。コールドランでは、主に現場据付の調整確認、作業手順の確認、作業者へのOJTを目的に行った。ホットランでは、一連作業の流れを把握することで問題点、作業に係る所要時間、作業エリア、遮へい体表面、保管容器表面等の線量当量率を測定することにより実作業に向けて課題を残さないために実施した。

コールドランは、2回に分けて行った。最初は、現場据付調整から作業手順書の内容を確認しながら実施した。2回目は、作業者へのOJTを主目的とし、作業手順書に沿った手順で、安全に問題なく作業が遂行できることを確認した。

ホットランは、平成18年7月7日、R3-18-03サイクルの最終日に実施した。使用したSiインゴット及びホルダーは、反転照射終了後の冷却時間、41時間1本、21時間1本の合計2本である。

ホットランの方法は、作業手順書及びチェックシートに従い、冷却時間が41時間のものから始めた。作業人数は、外部冷却法対応設備に関わる作業員が所定の3人で、他に放射線管理2人、チェックシートによる確認を含め記録3人で行った。

外部冷却対応設備を操作する作業員配置は、門型クレーンのホイストを操作する者1名、遮へい体セット時にガイドする者1名、門型クレーンの旋回を行う者1名の合計3名の配置で実施した。

ホットランにより、製作した各設備の一連操作による総合作動を確認し、作業人数、作業時間、作業の安全性及び各設備の安全性を確認することが出来た。外部冷却法対応設備操作手順を図5.1-1に示す。

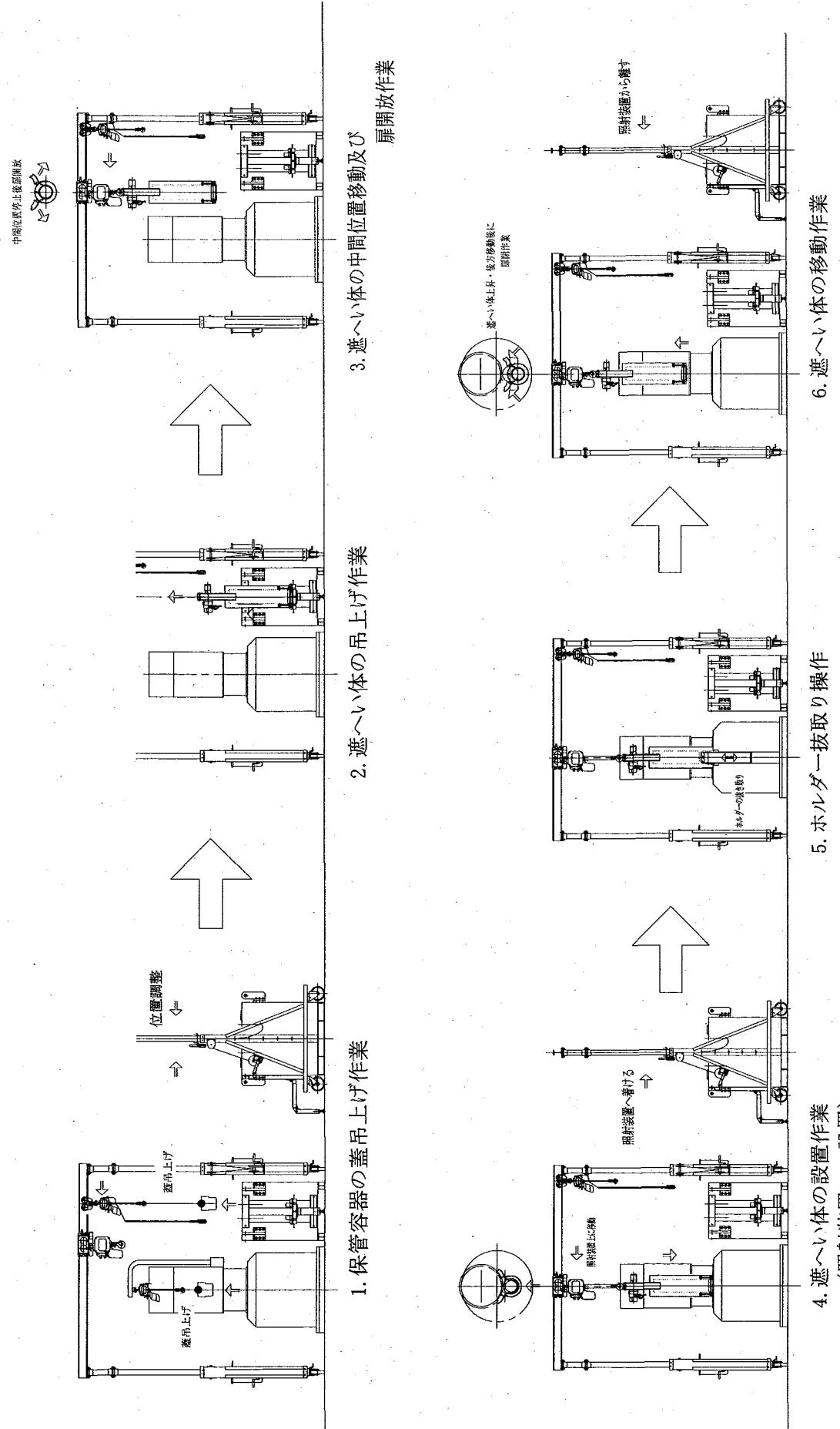


図 5.1-1 外部冷却法対応設備操作手順図 (1/2)

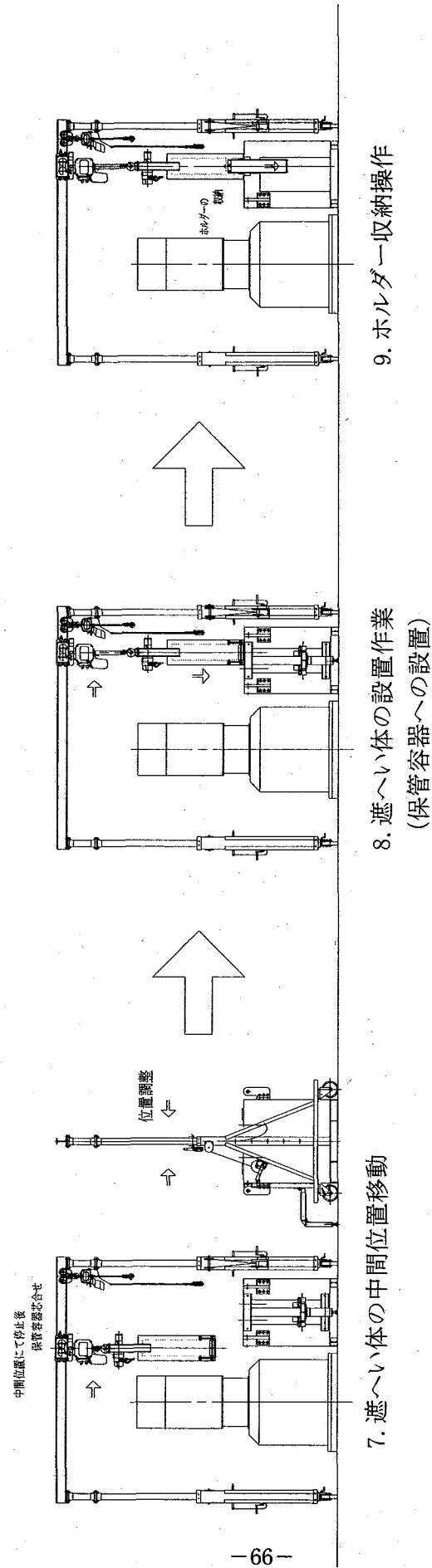


図 5.1-1 外部冷却法対応設備操作手順図(2/2)

5.2 コールドランで得た知見

コールドランは、ホットラン時には線量が高いために確認できない遮へい体側面扉を開放した状態でのホルダーと懸吊機構接続部の作動状態やモニターとの関係を確認した。

ホルダーと懸吊機構の接続は、懸吊機構の赤くペイントした十時バーがホルダー溝部と接続する所は、カメラで目視確認できるが、溝に入れてから回転させ、廻り止めのロック位置に合ったことが確認し難いことがわかった。原因は、ホルダー側の溝ロック部にマーキングがないためであり、新規ホルダーにはペイントマーキングを施すこととした。コールドラン作業中のホルダー接続状況等を写真 5.2-1～5.2-8 に示す。

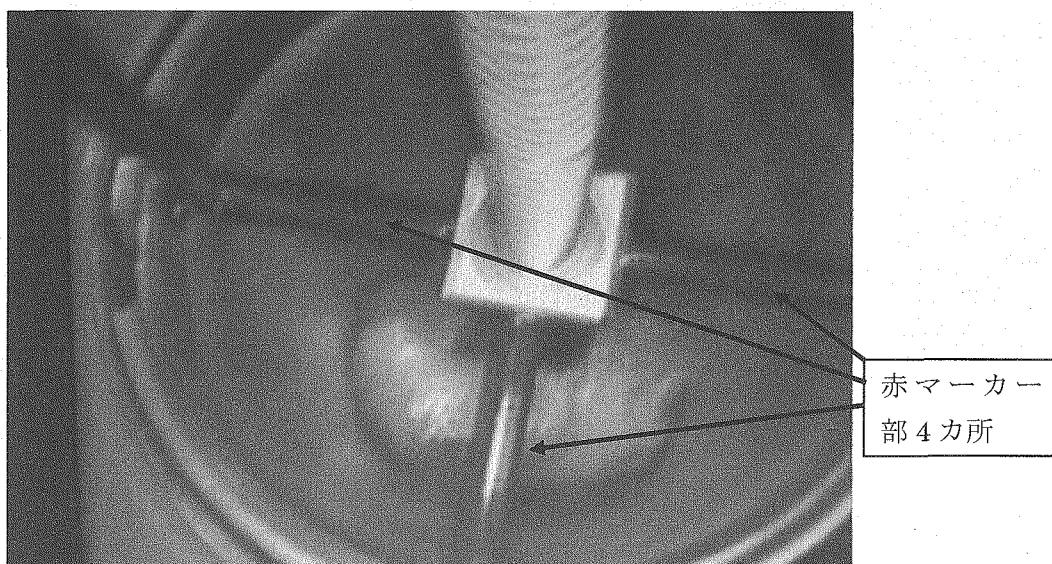


写真 5.2-1 懸吊機構接続部モニター画面



写真 5.2-2 懸吊機構とホルダー

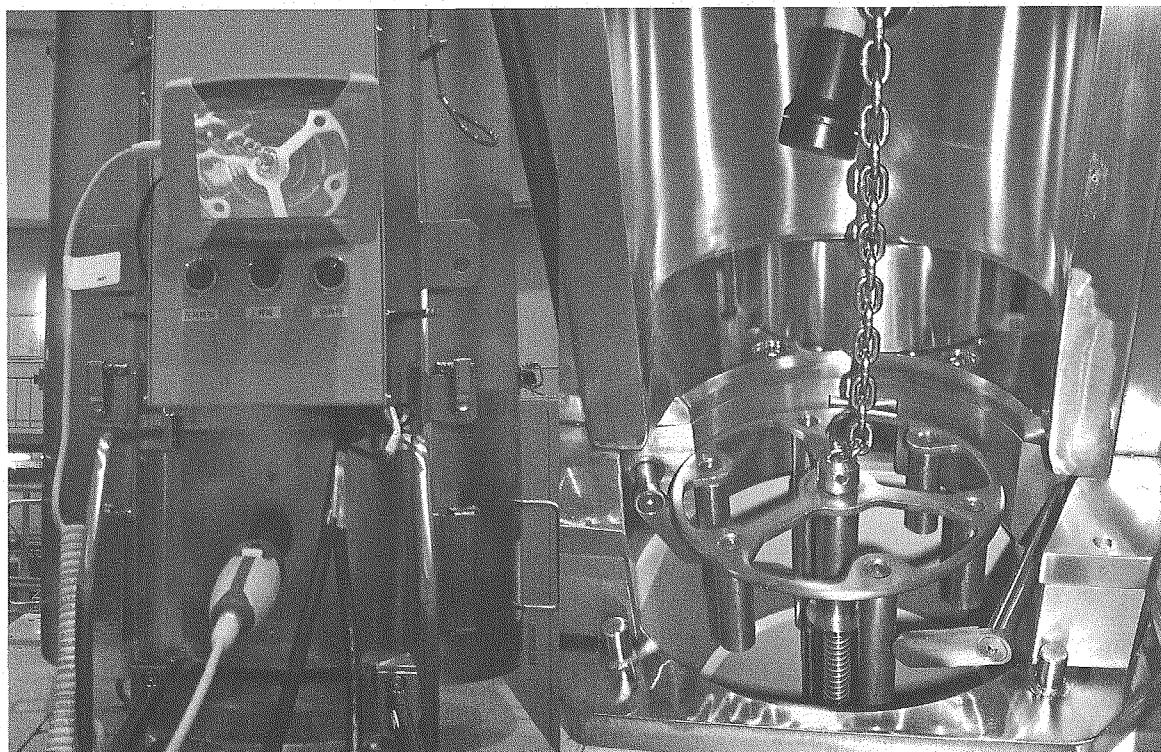


写真 5.2-3 懸吊機構接続部確認モニター

写真 5.2-4 懸吊機構とカメラ先端

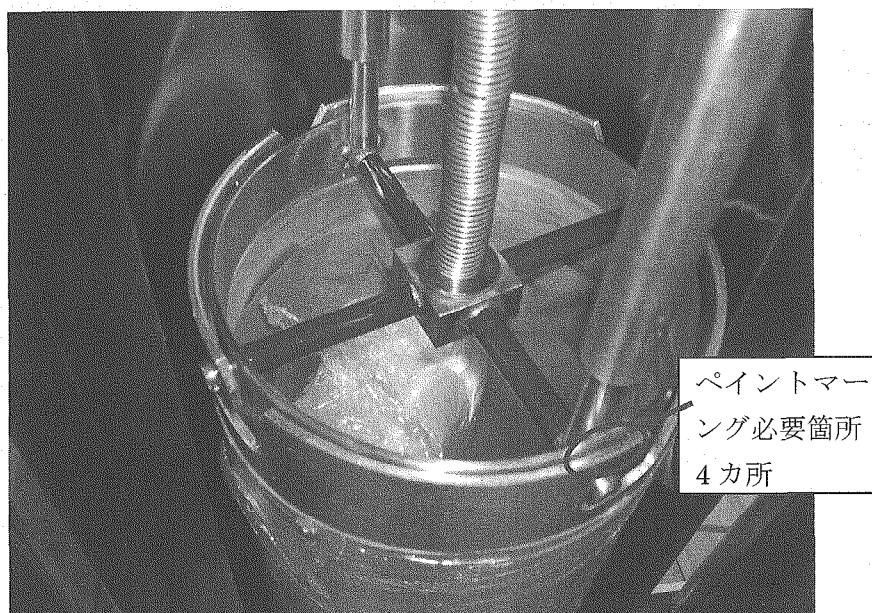


写真 5.2-5 懸吊機構とホルダー

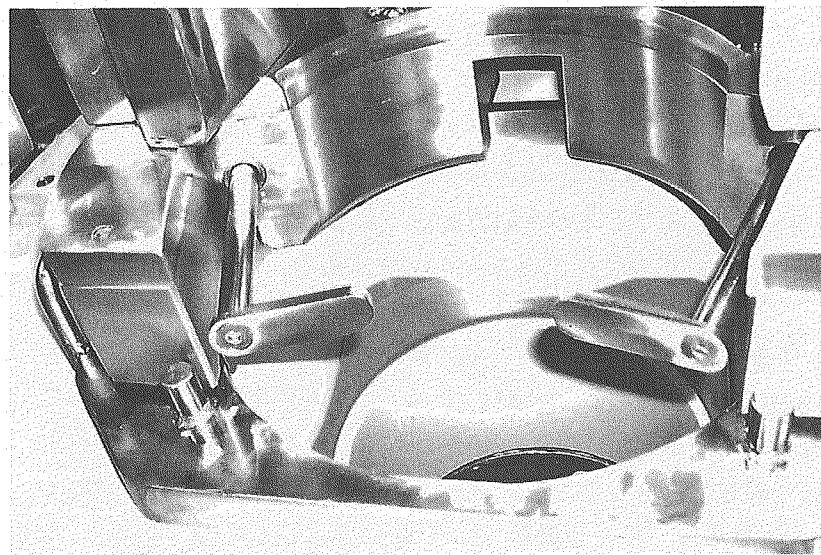


写真 5.2-6 操作ロッド先端爪部

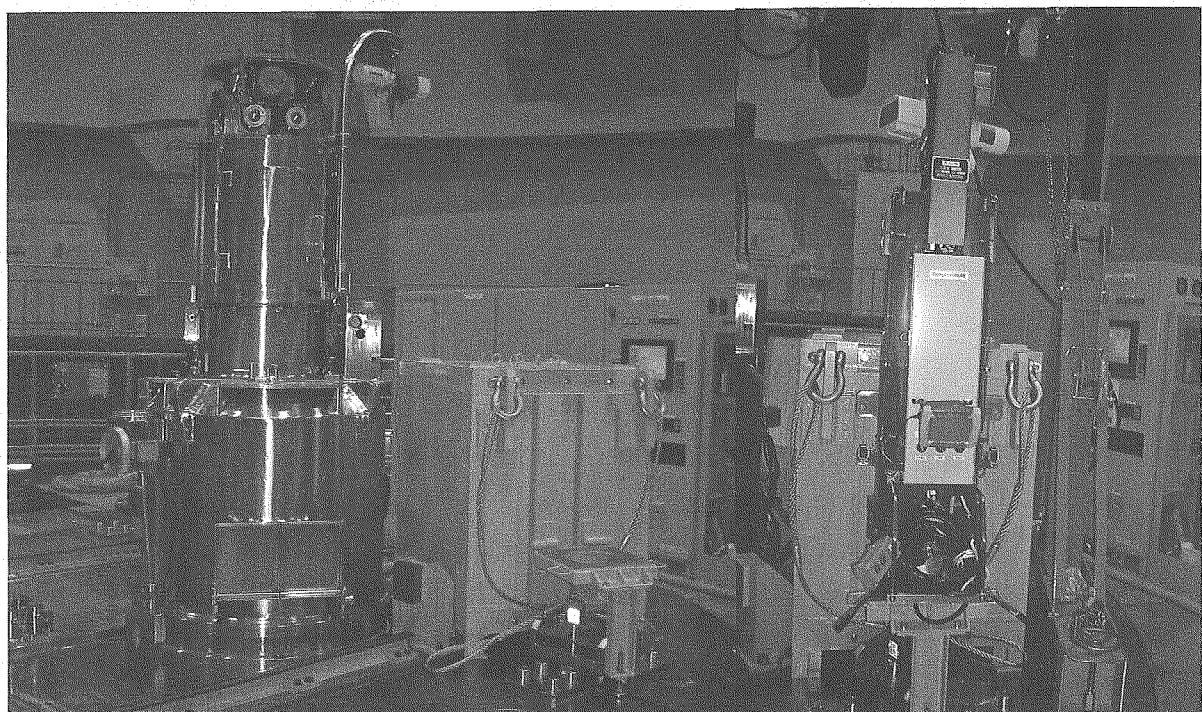


写真 5.2-7 保管容器設置状態

写真 5.2-8 遮へい体仮置き固縛状態

5.3 ホットランによる線量測定結果

作業は遮へい体を門型クレーンで吊り上げるところから開始した。作業中、重要ポイント毎に線量測定を行いながら進め、設計線量に対する実測値の確認を行った。ホットランにおける各設備に対する測定部位の設計線量と実測線量の比較を表 5.3-1 ホットラン線量測定による設計値との比較表に示す。

まず、Si 装荷孔の遮へいプラグを取り外した後の線量当量率は、冷却時間 41 時間で実測値 1.2mSv/h であった。3.1.2 項 冷却時間を 20 時間とした場合の Si インゴット及びホルダーの線量評価に基づく遮へい厚の検討で記述した図 3.1-4 Si 照射装置の Si 装荷孔線量評価グラフによる、 $\text{Ga}+\text{Si}$ カーブでは $900 \mu \text{Sv/h}$ である。21 時間では実測値 2.3mSv/h に対し、同グラフの設計値 3mSv/h であり、ほぼ、近い値を示している。

次に遮へい体を Si 照射装置にセット後、懸吊機構をホルダーに接続して、高線量のホルダーを遮へい体内に吊り上げた。この時、テレテクター線量計により、遮へい体の隙間からホルダー表面の線量当量率を測定した。冷却時間 21 時間で 16mSv/h で、図 3.1-5 Si 表面線量及びホルダー線量評価グラフでは、 17mSv/h の設計値であり設計値通りであった。冷却時間 41 時間の測定結果からは、設計線量より約 1mSv/h ほど高い 5.7mSv/h を測定した。

ホルダーを収納した遮へい体は、Si 照射装置から手前側に離し、側面扉の閉操作を実施した。この時、操作のため遮へい体に作業員が近付くため、外部被ばくが多くなる原因となるが、作業時間は約 20 秒で終了したため、1 人の作業員の PD 値は $1 \mu \text{Sv}$ の上昇であった。

遮へい体表面の線量測定は、高さ方向に 100 mm 間隔で測定した。この結果、底部から 300 mm から 400 mm 近辺が一番高く、冷却時間 41 時間で $400 \mu \text{Sv/h}$ 、冷却時間 21 時間で $800 \mu \text{Sv/h}$ の測定結果で、図 3.1-8 材質別減衰グラフから求めた設計線量当量率と比較して設計値に対し低い値を示した。

保管容器に遮へい体を移送し、ホルダーを保管容器に吊り下げる作業を実施した。この時も保管容器にセットする際にガイドのために近付くため、1 人が約 1 分間、遮へい体に近付いて作業を行った。その時の作業員の PD 値は $1 \mu \text{Sv}$ の上昇であった。

保管容器内にホルダーを降下し、ホルダーから懸吊機構を取り外す操作は、モニターを確認しながらの取り外し操作となり、カメラの向き調整、操作ロッドの扱いに時間を要し、操作の慣れが必要と感じた。

保管容器表面の線量測定は、側面遮へい能力確認のため、高さ方向の最大値を測定した。この結果、底部から 400 mm 近辺が一番高く、冷却時間 41 時間で $25 \mu \text{Sv/h}$ 、冷却時間 21 時間で $45 \mu \text{Sv/h}$ の測定結果で、図 3.1-8 材質別減衰グラフから求めた設計線量の冷却時間 41 時間で $7.1 \mu \text{Sv/h}$ 、冷却時間 21 時間で $19.9 \mu \text{Sv/h}$ より約 2~4 倍高い値を示す結果となった。

ホットラン作業中の外部被ばくは、ガラスバッチ及びアラーム付きポケットドジメータで管理した。作業は、冷却時間 21 時間及び 41 時間の Si インゴット入りホルダーを Si 照射装置から保管容器、保管容器から Si 照射装置までの 2 往復の作業を実施した。主な作業を実施した 3 名のうち最大 PD 値は $13 \mu \text{Sv}$ であり、主な作業は懸吊機構とホルダーの接続操作を実施した。

作業エリア、遮へい体表面、保管容器表面等の線量当量率を測定したデータは、表 5.3-2 外部冷却法対応ホットラン線量測定記録に示す。また、外部冷却法実施時と通常照射時の作

業エリア線量当量率の比較のため、図 5.3-1 に通常照射時の外部冷却対応設備配置前線量測定マップを示す。線量測定の様子を写真 5.3-1～写真 5.3-4 に、ホットラン作業中の様子を写真 5.3-5～写真 5.3-11 に示す。

表 5.3-1 ホットラン線量測定による設計値との比較表

測定対象	比較対象	設計線量	ホットラン 実測線量	備考
Si 装荷孔	CT:21 時間	3 m Sv/h	2.3 m Sv/h	図 3.1-4
	CT:41 時間	900 μ Sv/h	1.2 m Sv/h	
ホルダー表面	CT:21 時間	17 m Sv/h	16 m Sv/h	図 3.1-5
	CT:41 時間	4.8 m Sv/h	5.7 m Sv/h	
遮へい体表面	ホルダー表面が 16 m Sv/h (CT:21h)	1250 μ Sv/h	800 μ Sv/h	図 3.1-8 Pb50 mm
	減衰率	1/12.8	1/20	
	ホルダー表面が 5.7 m Sv/h (CT:41h)	446 μ Sv/h	400 μ Sv/h	
	減衰率	1/12.8	1/14.2	
保管容器表面	ホルダー表面が 16 m Sv/h (CT:21h)	19.9 μ Sv/h	45 μ Sv/h	図 3.1-8 Fe200 mm
	減衰率	1/804	1/355	
	ホルダー表面が 5.7 m Sv/h (CT:41h)	7.1 μ Sv/h	25 μ Sv/h	
	減衰率	1/804	1/228	

* CT (Cooling Time) : 冷却時間

表5.3-2 外部冷却法対応ホットラン 線量測定記録

線量測定日時：平成18年7月7日、14:00 ~15:14 (測定時間)

測定者：放射線管理第1課、作業者：放振協、研究炉利用課

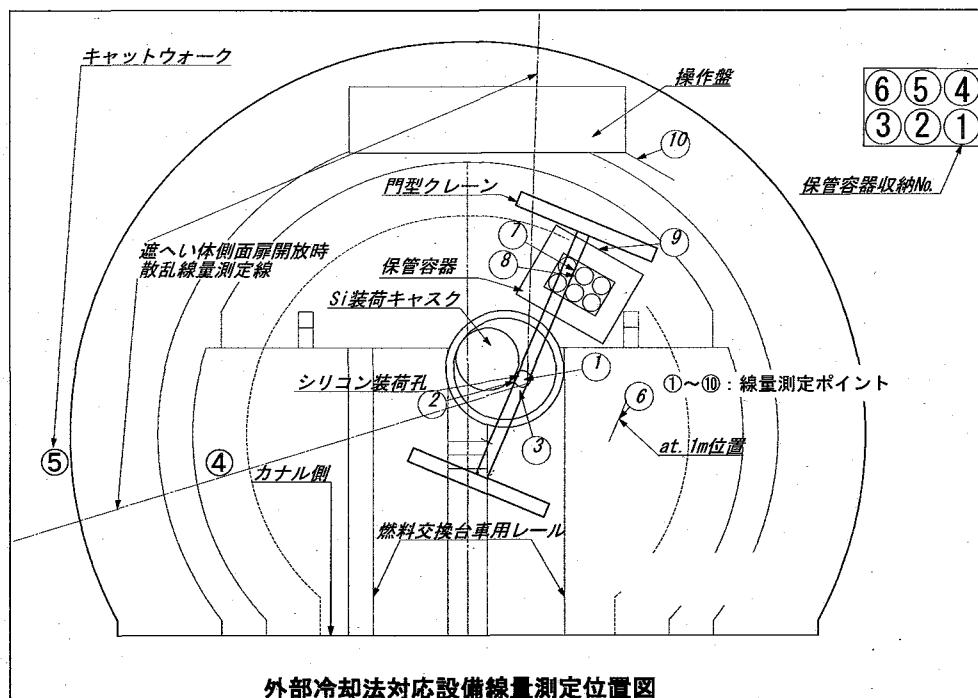
測定時の状況：第3サイクル、照射試料：5インチSi及び6インチSi16本冷却のうち、冷却時間41hr及び21hrを測定

作業者被ばく：最大13 μ Sv、集団線量当量73人・ μ Sv(10人) (PD値)

測定器：GM管式サーベイメータ、テレテクター、電離箱式サーベイメータ

冷却時間 (hr)	線源位置	測定位置	線量当量率 μ Sv/h												備考	測定器
			① Si装荷孔入口	1.2mSv/h												
41時間 14:00 現在	キャスク上	② 照射ホルダー表面	-													テレテクター
		③ 底部からの距離	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm	110cm			上昇時最大値 テレテクター
		④ 遮へい体側面表面	100	200	400	400	350	300	200	150	100	40	40			扉「閉」時 電離箱
		⑤ キャットウォーク	40													扉「開」時
		⑥ 遮へい体から0.5m	110													高さ：1m GM
収納No. 5	保管容器上	⑦ 底部からの距離	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm	110cm			
		⑧ 照射ホルダー表面	5.7mSv/h													下降時最大値 テレテクター
		⑨ 保管容器表面	最大値：側面；25、上面6													底面から40cm GM
		⑩ 保管容器から1m	最大値：側面；4													底面から40cm GM

冷却時間 (hr)	線源位置	測定位置	線量当量率 μ Sv/h												備考	測定器
			① Si装荷孔入口	2.3mSv/h												
21時間 15:00 現在	キャスク上	② 照射ホルダー表面	16mSv/h													上昇時最大値 テレテクター
		③ 底部からの距離	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm	110cm			扉「閉」時 電離箱
		④ 遮へい体側面表面	350	600	800	750	700	600	450	350	200	100	50			扉「開」時
		⑤ キャットウォーク	70													扉「開」時 GM
		⑥ 遮へい体から1m	60													高さ：1m GM
収納No. 5	保管容器上	⑦ 底部からの距離	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm	110cm			扉「閉」時 側面扉接合部 (遮へい厚が薄い部位) 電離箱
		⑧ 照射ホルダー表面	15mSv/h													下降時最大値 テレテクター
		⑨ 保管容器表面	最大値：側面；45、上面6													底面から40cm GM
		⑩ 保管容器から1m	最大値：側面；5													底面から40cm GM



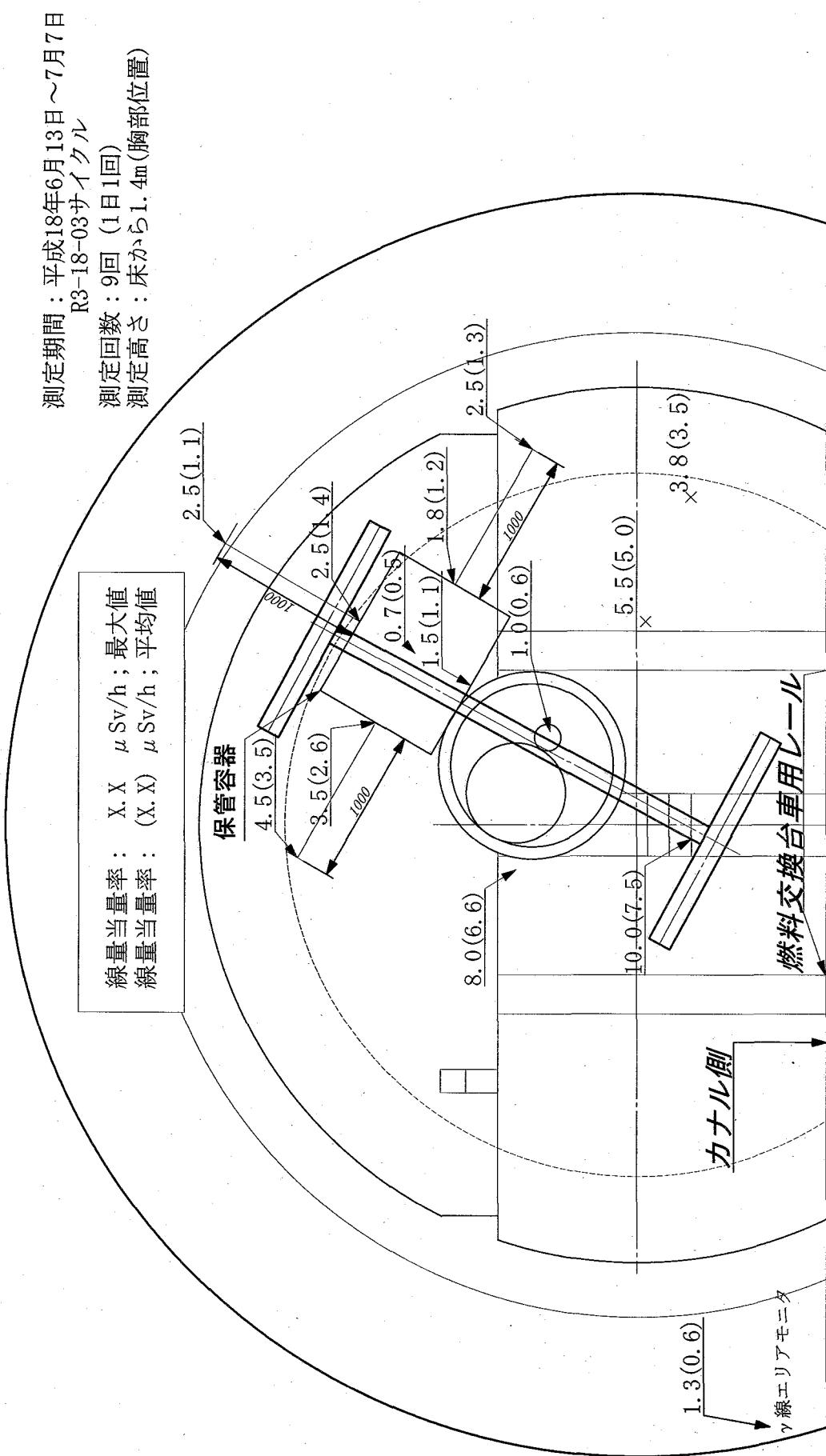


図 5.3-1 外部冷却対応設備配置前線量測定マップ

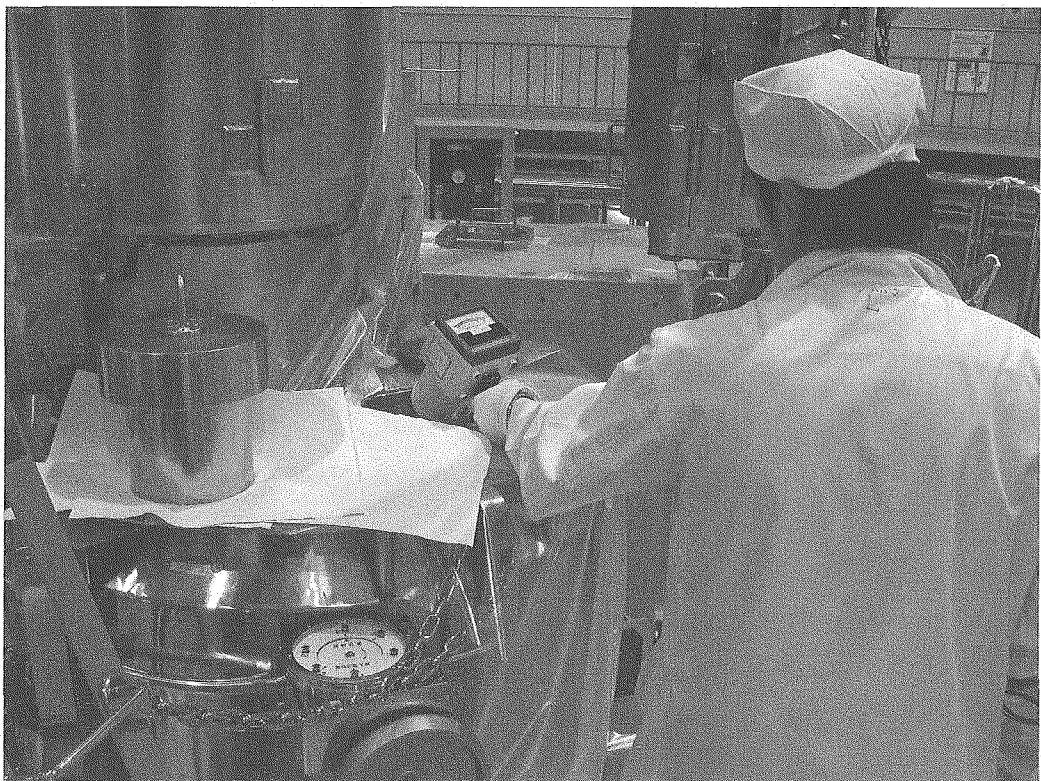


写真 5.3-1 Si 装荷孔線量測定

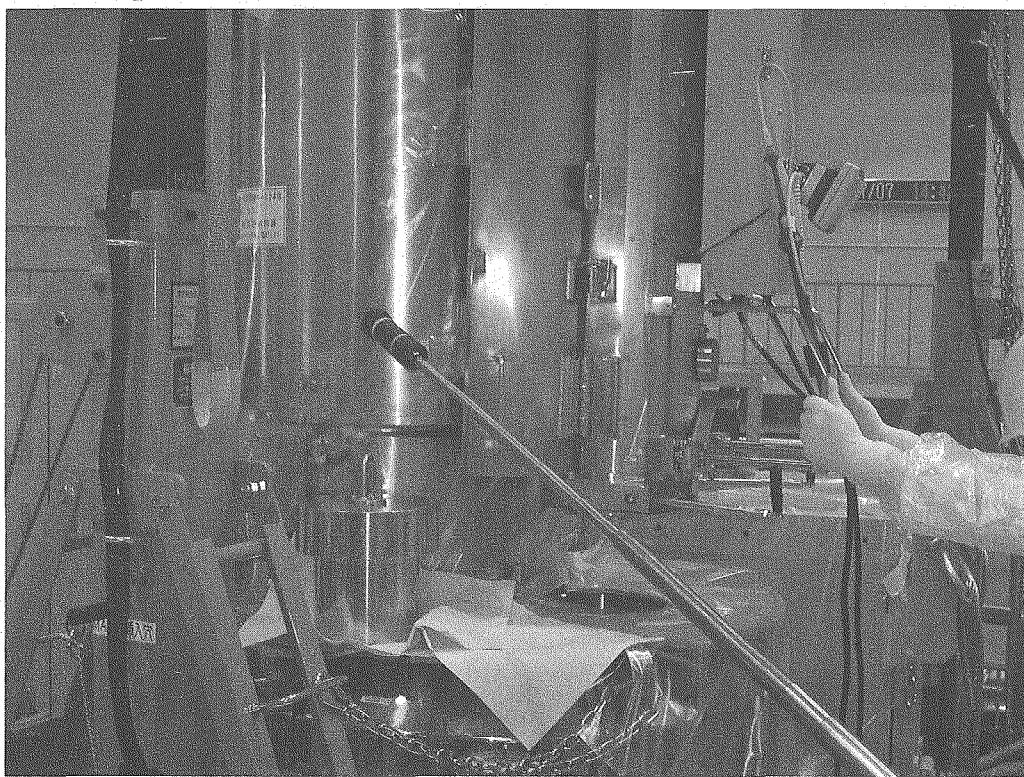


写真 5.3-2 遮へい体からの漏洩線量測定

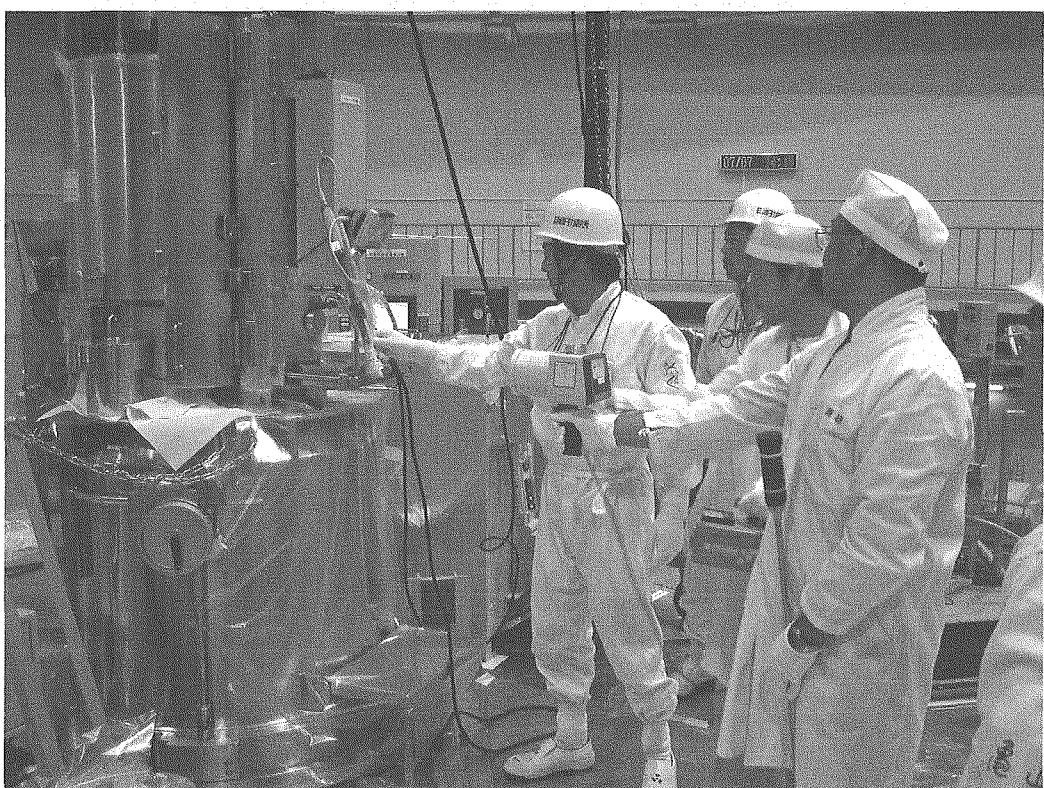


写真 5.3-3 作業位置の線量測定



写真 5.3-4 保管容器側面線量測定



写真 5.3-5 遮へい体を Si 照射装置にセット

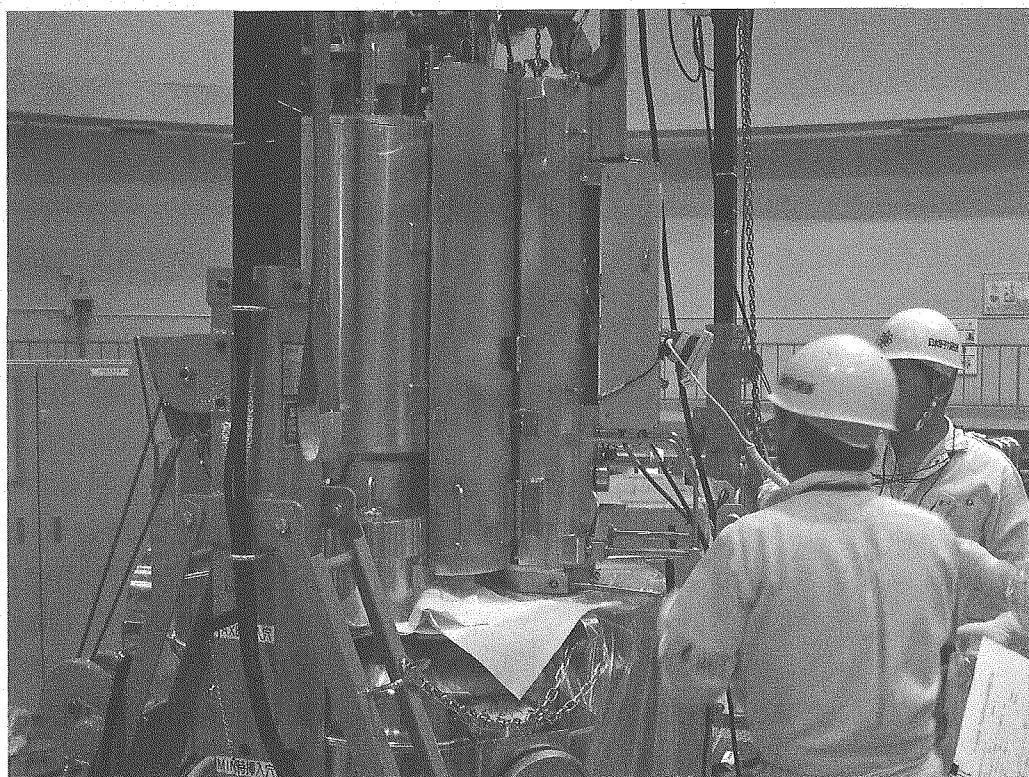


写真 5.3-6 遮へい体を Si 照射装置にセット終了

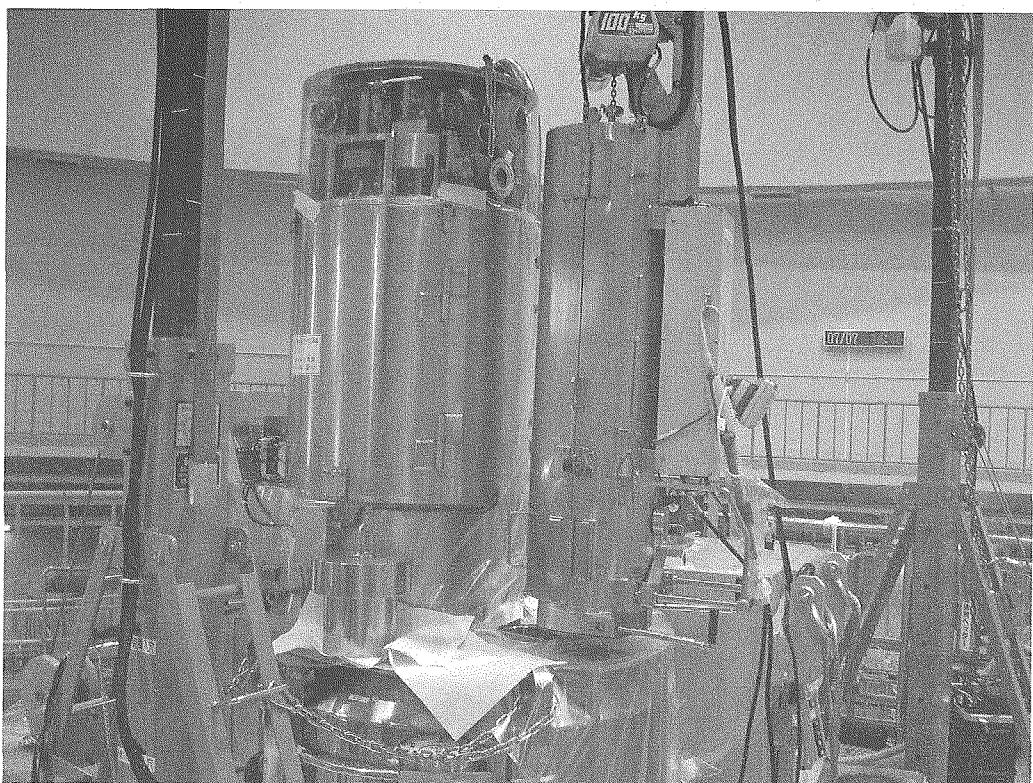


写真 5.3-7 遮へい体を Si 照射装置から移動

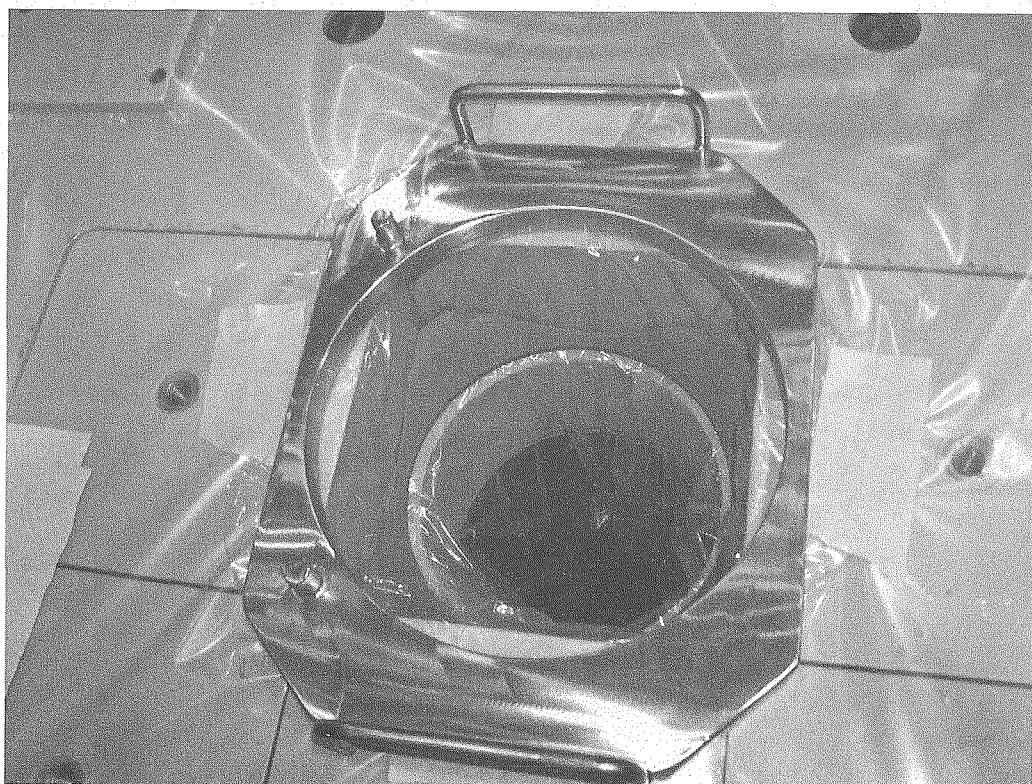


写真 5.3-8 保管容器の遮へい体セッティングガイドと養生

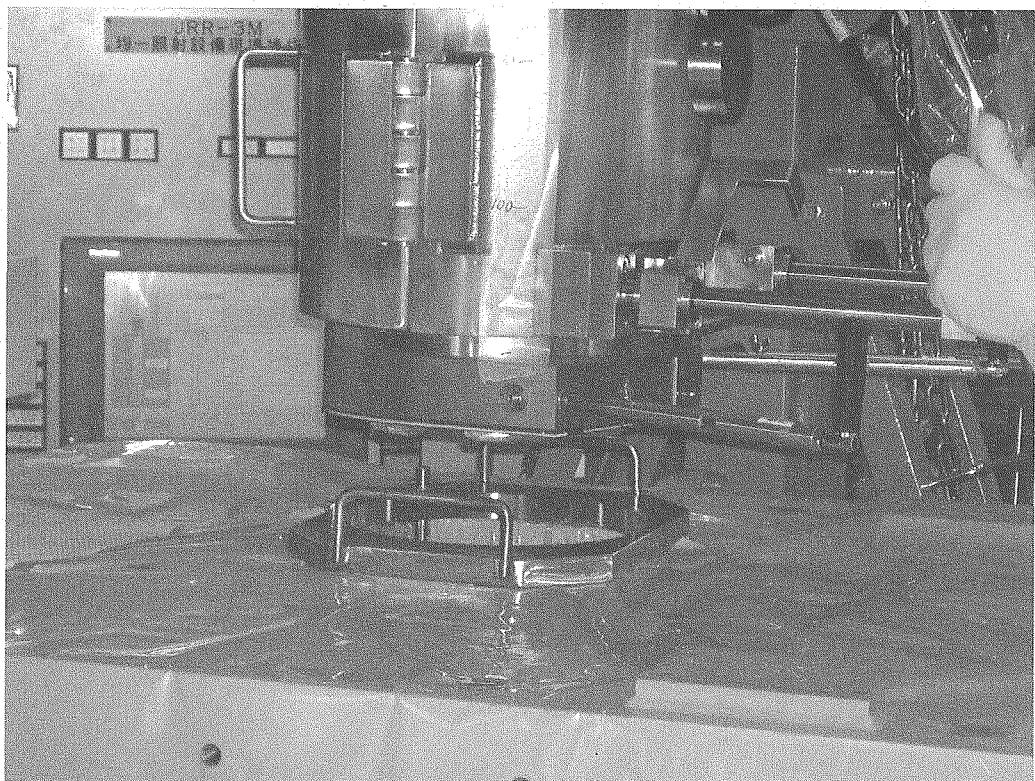


写真 5.3-9 遮へい体を保管容器にセット



写真 5.3-10 保管容器内にホルダーの降下準備

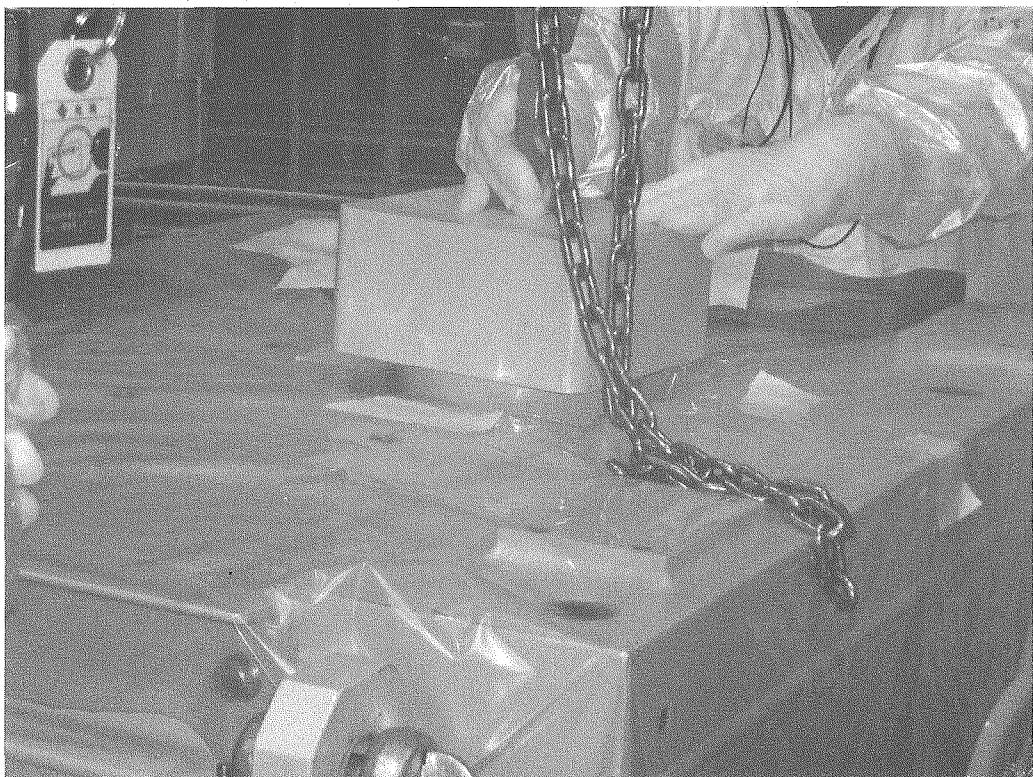


写真 5.3-11 保管容器蓋の閉作業

5.4 ホットランで得た知見

遮へい体及び保管容器の遮へい性能について、ホットラン線量測定の結果、遮へい体は設計値 $1/12.8$ の減衰率に対し、実測値から、21 時間冷却で $1/20$ に、41 時間冷却で $1/14.2$ の減衰率で設計値より低い実測線量であった。保管容器に関しては、設計値 $1/804$ に対し実測値から、21 時間冷却で $1/355$ 及び 41 時間冷却で $1/228$ の減衰率しかなく、設計値より高い実測線量であった。

遮へい体に使用した鉛は、実測に基づいて減衰率を求めていた。このため、設計と実測で概ね良い一致を示しており設計値内の遮へい能力を有していることが確認できた。

一方、保管容器に使用した鉄材の遮へい能力に関しては、実際の厚さは 20 cm であるにもかかわらず設計値減衰率から計算すると 16.2 cm 相当の遮へい能力しかなく、約 4 cm 相当の遮へいが不足する結果となった。これは、評価において、主要核種を 2 核種に限定したこと、 γ 線エネルギーを 2.0 MeV と仮定して減衰率を求めたこと等により誤差が大きくなつたものと考えられる。

保管容器の遮へい評価対策は、当面の対策として、追加遮へいの為に設計製作してあるボルト穴に約 1 cm の遮へい厚の鉛毛マットをボルトにより吊り下げ、表面線量を下げる事が可能である。又、ローピング及び標示によりみだりに人が近づかないようにして外部被ばくを抑制できる等の対策が可能である。写真 5.4-1 に保管容器の追加遮へい用鉛毛マットを吊り下げた写真を示す。

ホルダーには、原子炉内の照射筒内を昇降移動するため、原子炉プール水滴が付着している。冷却時間が短くなったことに伴い水滴付着が多くなると予測し遮へい体に吊り込んだ時に付着水がこぼれ落ちないように、遮へい体の下部シャッターには受け皿を設計した。今回、冷却時間の短い21時間のホルダーからの付着水は少なく、受け皿には殆ど溜まらなかったことから、遮へい体の移送によって、付着水がこぼれ落ちることは無いことが確認できた。

保管容器内は、付着水を除去出来るように着脱式内筒を収納している。付着水が少ない場合は、内筒、ホルダー等からの浮遊汚染物の飛散による汚染拡大の注意が必要であるため、保管容器内の汚染防止の観点と水滴除去の観点からビニール袋を収納し、その中にホルダーを収納した。

ホットラン後、遮へい体内部表面に $1.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ (スミヤ法 300cpm) の汚染が確認された。表面は SUS304 であるので、濡れウエスによる拭き取りで除染することが出来た。なお、原子炉施設保安規定に定める第1種管理区域での汚染除去に係る表面密度の基準値である $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以下である。その他の設備及び作業エリアへの汚染は確認されなかった。



写真 5.4-1 保管容器の追加遮へい用鉛毛マット

5.5 計画被ばく

ホットラン実施中、炉頂に設置してある γ 線エリアモニタの最大値は、 $70 \mu\text{Sv}/\text{h}$ で、遮へい体側面扉を開放した状態でホルダーを収納した作業時であった。この時の γ 線エリアモニタは遮へい体側面扉の開放面方向に位置していた。また、この時のキャットウォークの最短距離位置における最大値は、GM サーベイメータで $8 \mu\text{Sv}/\text{h}$ であった。従って、外部冷却法作業における立ち入り制限は、遮へい体側面扉を開放した時に最大線量となる炉頂の入り口から炉頂部までの一部とすることで安全に作業を進めることができることが判った。なお、炉頂の γ 線エリアモニタの原子炉運転中における警報設定値は、 $100 \mu\text{Sv}/\text{h}$ である。

遮へい体表面線量当量率の設計値は $2\text{mSv}/\text{h}$ である。作業時間は、照射済 Si インゴットを Si 照射装置から保管容器に移送する1本当たりの所要時間は、約15分である。反転照射用 Si インゴット入りホルダーの Si 照射装置に移送又は空ホルダーの Si 照射装置に移送する作業時間は約15分でこの往復作業で合計30分を要する。ホルダー3本分、3往復工程に係る作業時間は合計1時間30分で、1サイクル内で外部冷却法に伴う作業は15往復工程ある。

計画被ばくは、ホットランの実績から1人最大 $20 \mu\text{Sv}/1\text{往復工程}$ とする。合計すると $300 \mu\text{Sv}/1\text{サイクル}$ となる。このため、1年間、7サイクルにおける一人あたりの計画被ばくは、 $2.1\text{mSv}/\text{年}$ となる。作業に必要な人数は、最低3人である。放射線業務従事者に係る線量限度は、 $100\text{mSv}/5\text{年}$ 、 $50\text{mSv}/\text{年}$ であるため、計画被ばく線量は、充分に下回る値である。

なお、通常作業時における1サイクルあたりの外部被ばく量は、約 $60 \mu\text{Sv}$ である。1年間、7サイクルにおける一人あたりの計画被ばくは、 $420 \mu\text{Sv}/\text{年}$ となり、外部冷却法における計画被ばくは、通常作業時の約5倍の計画被ばくとなる。

6 おわりに

Si 単結晶に中性子を照射し、P をドーピングする NTD 法は、Si 半導体製造分野の一部として定着し、今日の世界ではヨーロッパ及びアジアを中心に多くの試験研究炉で実施してきている。

一方、原子力機構の研究炉においても 1975 年に開発を始め、1977 年に NTD 法による実用照射を開始して以来 JRR-4、JRR-2、JRR-3 の各研究炉で NTD 法の照射が行われてきた。

Si がトランジスタとして出現して以来、半導体電子部品の基盤材料として多く利用されているのは、NTD-Si の不純物拡散係数が他の材料に比べて非常に低く安定性に富んでいること、電気特性が変わりにくいくこと等々、優れた性質をもっているからである。更に、未だこれに対抗し得る材料が出現していないことである。

今後、益々、半導体需要の増加に伴い、コスト低減、Si インゴット直径の増大に伴う均一性向上を含めた技術改良、照射設備の充実、照射精度の向上、サービス向上等について、十分な検討、対応が求められることになる。

以下に各章の概要をまとめ、本書のまとめとする。

第 1 章はじめに及び第 2 章 NTD-Si の概要是、NTD-Si の製造原理と開発経緯、NTD-Si 増産計画等を記述し、原子力機構における Si 照射の過去の歴史から未来への展望を記述した。

第 3 章外部冷却法対応設備の開発は、外部冷却法対応設備の設計に際した検討を行った。ここでは、これまでの待機時間（冷却時間）を約 1/2 以下に短縮することを設計目標として、放射線評価、作業時間の検討、炉頂の重量制限評価、保管場所及び Si 増産量の試算等、様々な観点から検討した。

外部被ばくに大きく寄与する線源は、ホルダーの材料として使用している A 1050 材の不純物である Ga-71 の放射化により生成する Ga-72 が大きく寄与していることを明らかにした。このことは、待機時間の短縮及び作業時の外部被ばく量低減に役立てるものとして、今後、より一層の検討を進めることしたい。また、照射パターンのシミュレーションによる増産検討も行った。現均一照射設備では、Si 照射は 1 本毎に手動操作が必要であることから、就業時間外の照射には空白時間が出来るため、外部冷却設備によって就業時間内で対応しても、夜間の照射がストップしてしまい、増産に限界がある。今後、照射設備の運転稼働率の向上、外部被ばく低減化促進のためにも、上下反転から照射に至る均一照射設備の自動化を設計することとしたい。

第 4 章製作及び受け入れ検査では、各設備の概要、設計仕様、受入検査要領及び検査結果を記述した。受入検査は、受入検査要領に沿って行い、全ての検査項目で判定基準を満足し、据え付けを行った。

第 5 章性能確認試験は、コールドラン及びホットランで得た知見から、設計

に対する性能を検証した。遮へい体及び保管容器の遮へい能力を確認し、作業エリアの放射線環境を検証したことにより、作業における外部被ばく量を計画することが出来た。また、製作した各設備の一連操作による総合作動を確認し、作業人数、作業時間、作業の安全性及び各設備の安全性を確認した。

これらをまとめると、待機時間を短縮し Si 照射量を増産する方法の設計は、本外部冷却法対応設備を使用することにより、通常運転サイクル中の増産及び原子炉が計画外停止した時などの非常時の集中増産が可能であることが証明できた。しかし、Si 増産に伴い取扱い作業者の外部被ばくが増えることを考慮すると、大幅な增量のためには、将来的に Si 自動化装置の整備が必要となる。

謝 辞

共同研究計画の一環として実施した今回の外部冷却法対応設備の製作にあたっては、(財)放射線利用振興協会の一色正彦特別参与にご助言、ご協力を頂いた。また、桜井文雄研究炉加速器管理部長、山下清信研究炉加速器管理部次長、丸尾研究炉技術課長には大変貴重なご意見を頂いた。更に、上部遮へい体の強度評価を実施していただいた JRR-3 管理課の小林哲也氏、ホルダーの γ 線スペクトル測定、ホットラン時の線量測定にご協力いただいた放射線管理第 1 課研究炉管理係の皆様、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) 岸敏明、鳥居義也、横尾健司、熊田博明、堀口洋二、桜井文雄、佐藤久男：1998 年春の年会原子力学会予稿集「研究炉における大口径シリコン均一照射技術」
- 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) 研究炉部：JAERI-Tech 95-047 「平成 6 年度研究炉部年報」
- 6) NTD 技術検討会：JAEA-Review 2005-006 「研究炉等（JRR-3, JRR-4 and JMTR）を用いた中性子核変換ドーピング Si 半導体（NTD-Si）製造機能拡充の検討」
- 7) 兵藤知典：放射線遮蔽入門（第 2 版）産業図書

付録 A

均一照射設備Si装荷孔上部の γ 線スペクトル測定

1. 測定日：平成17年8月26日（金） 13:30から15:00

2. 測定者：施設放射線管理第1課；4人

研究炉利用課；3人

3. 立会者：放射線振興協会；3人

4. 測定器： ① 可搬型高純度Ge検出器

② 電離箱サーベイメータ (IC-507)

③ 中性子線レムカウンタ

④ GM管サーベイメータ

5. 6インチSi照射履歴

照射時間：正転；平成17年8月23日	7:59
～平成17年8月23日	9:31 (92分)
反転；平成17年8月25日	9:48
～平成17年8月25日	11:20 (92分)

γ 線スペクトル測定時の冷却時間：27時間00分 (8/26、14:20)

6. ホルダー照射履歴

照射時間：正転；平成17年8月23日	10:05
～平成17年8月23日	10:54 (49分)
反転；平成17年8月25日	13:35
～平成17年8月25日	14:24 (49分)

γ 線スペクトル測定時の冷却時間：24時間16分 (8/26、14:40)

7. 測定方法：測定位置概略図を図1に示す。

①測定対照のSiをSi装荷位置に合わせる。

②遮へい体を吊り上げ、電離箱サーベイメータでSi装荷入口表面の線量当量率を測定する。

③中性子線レムカウンタにより中性子線の線量当量率を測定し、必要に応じ中性子線遮蔽を施す。

④鉛ブロック等で γ 線遮蔽を施す。出来る限り表面線量当量率を下げてから、 γ 線スペクトルサーベイメータによりスペクトル測定を行う。

8. 測定結果： 中性子線レムカウンタによる測定値 : <0.15 μ Sv/h

電離箱サーベイメータによる測定値 : 400 μ Sv/h

鉛ブロックによる遮へい後の測定値 : 10 μ Sv/h

可搬型高純度Ge検出器による γ 線スペクトル測定：別紙-1参照

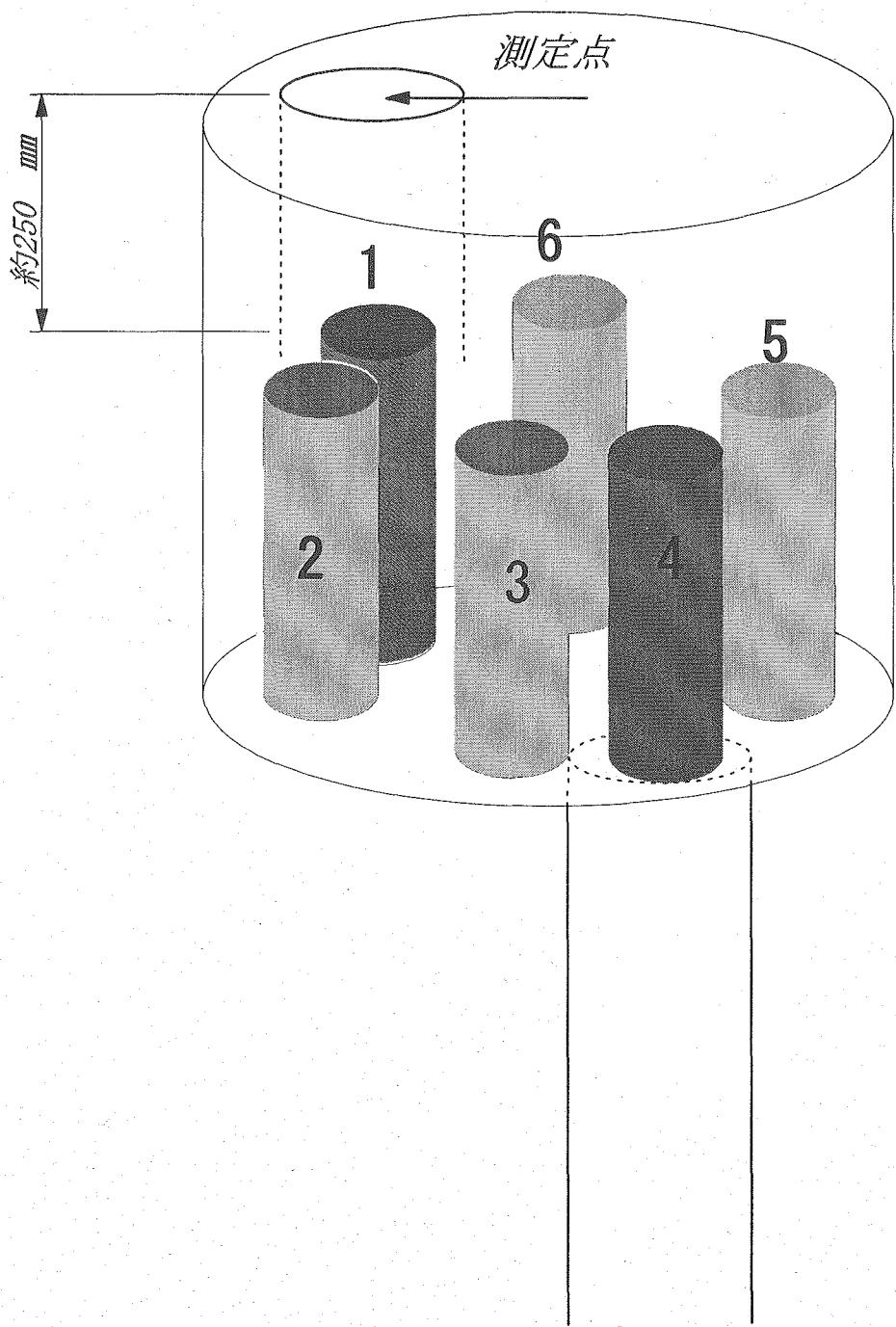


図1 照射済 Si 線量測定概略図

付録 A 別添-1

均一照射設備 Si 装荷孔上部の γ 線スペクトル測定

装置全体の概要

- ・可搬型高純度Ge検出器
デュワー容量: 1.2 l
Ge結晶: 52.8 mm φ × 56.6 mm
相対効率: 25 %
印加電圧: -3000 V
- ・プリアンプ(Ortec572)
- ・多重波高分析器(MCA7600)
- ・測定データ保存用ノート型PC

※ 1keV / チャンネル に信号増幅率を調整した。

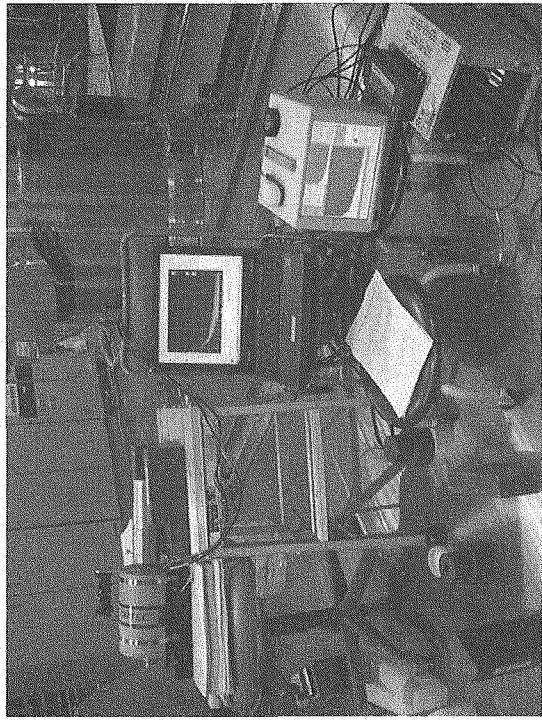


写真 Ge 検出器による測定前の状態

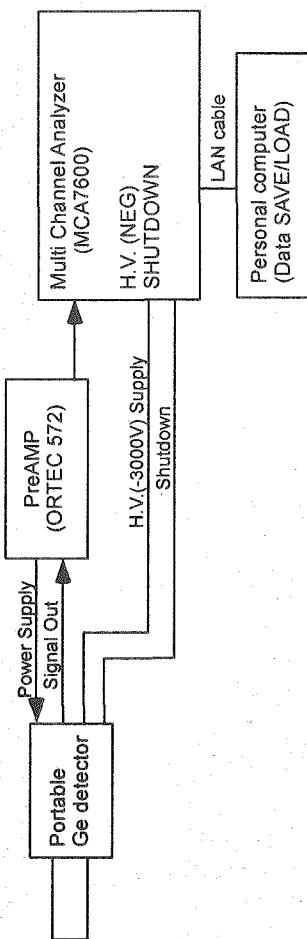


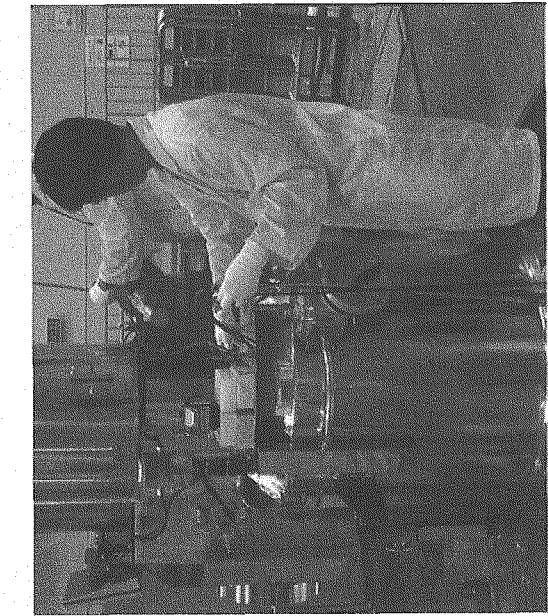
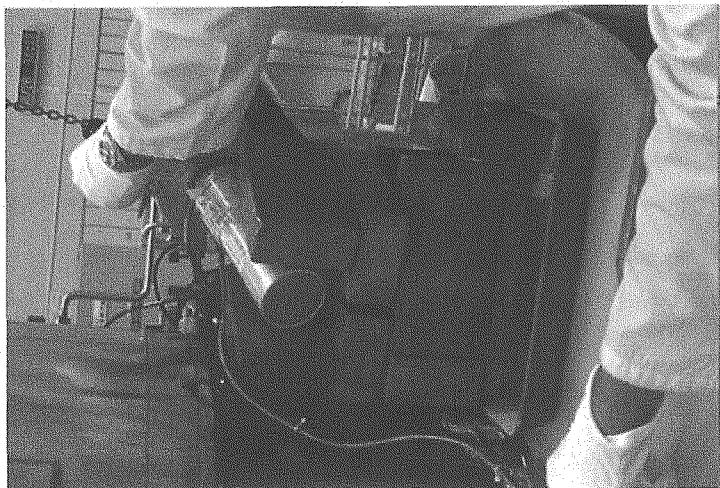
図 機器の接続図及びモジュール設定

1

サーべイ記録及び測定中の様子(写真)

作業時のサーべイ

試料挿入孔蓋開放時	挿入口上部	線量当量率	ガンマ線 1.0~2.0 mSv/h(I.C.)
作業場周辺	表面汚染	中性子線 < 0.15 μ Sv/h $\beta (\gamma) < 0.4 \text{Bq/cm}^2$	ガンマ線 10 μ Sv/h(I.C.)
作業前サーべイ	作業場周辺の線量当量率	ガンマ線 4.0 μ Sv/h(GMサーべイメータ) 中性子線 < 0.15 μ Sv/h(レムカウント)	中性子線 < 0.15 μ Sv/h(レムカウンタ)
試料挿入孔蓋開放時	挿入口上部	線量当量率	鉛遮へい体による遮へい時の試料挿入孔上部 ガンマ線 2.0~4.0 μ Sv/h(I.C.)

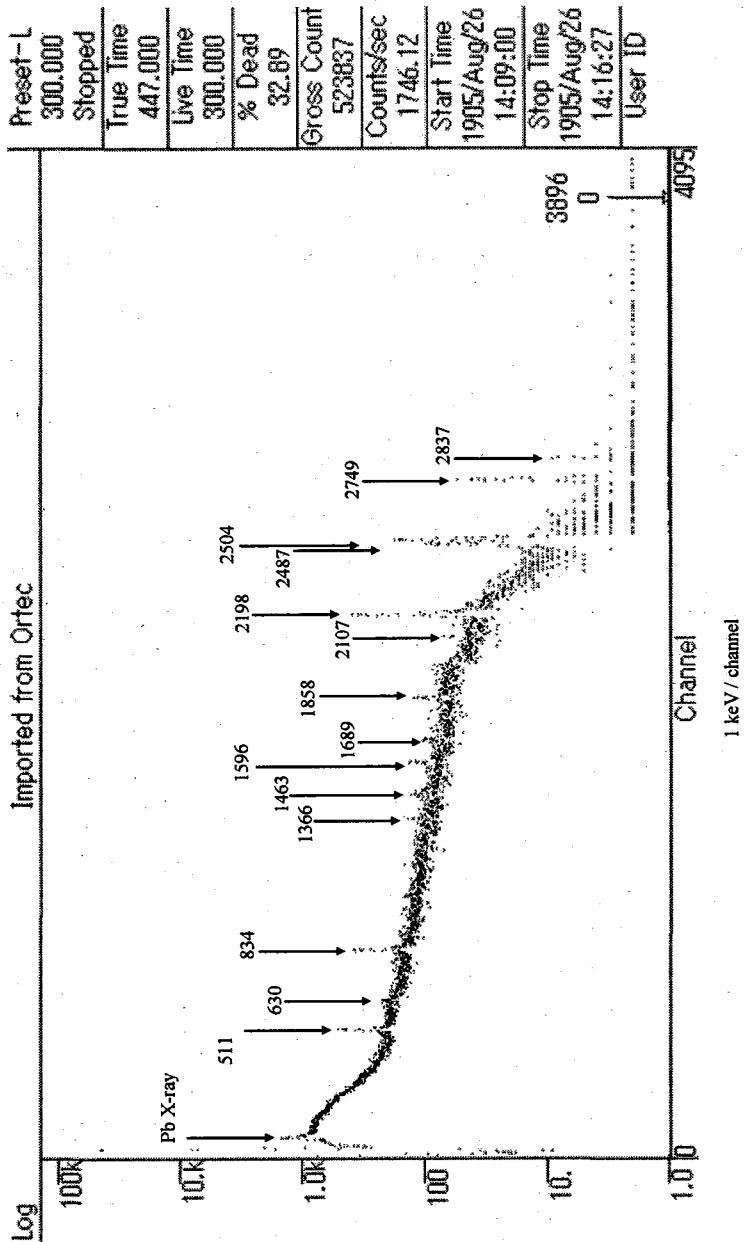


均一照射設備 Si 装荷孔上部(中央付近)の γ 線スペクトル測定結果

測定日時 2005/Aug/26 14:00-

- 検査分析の結果 Ge-72 (半減期: 14 hr) が主要核種であることが分った。
- (Ge)検出器の放射性ではないことは次々項目により証明している。)

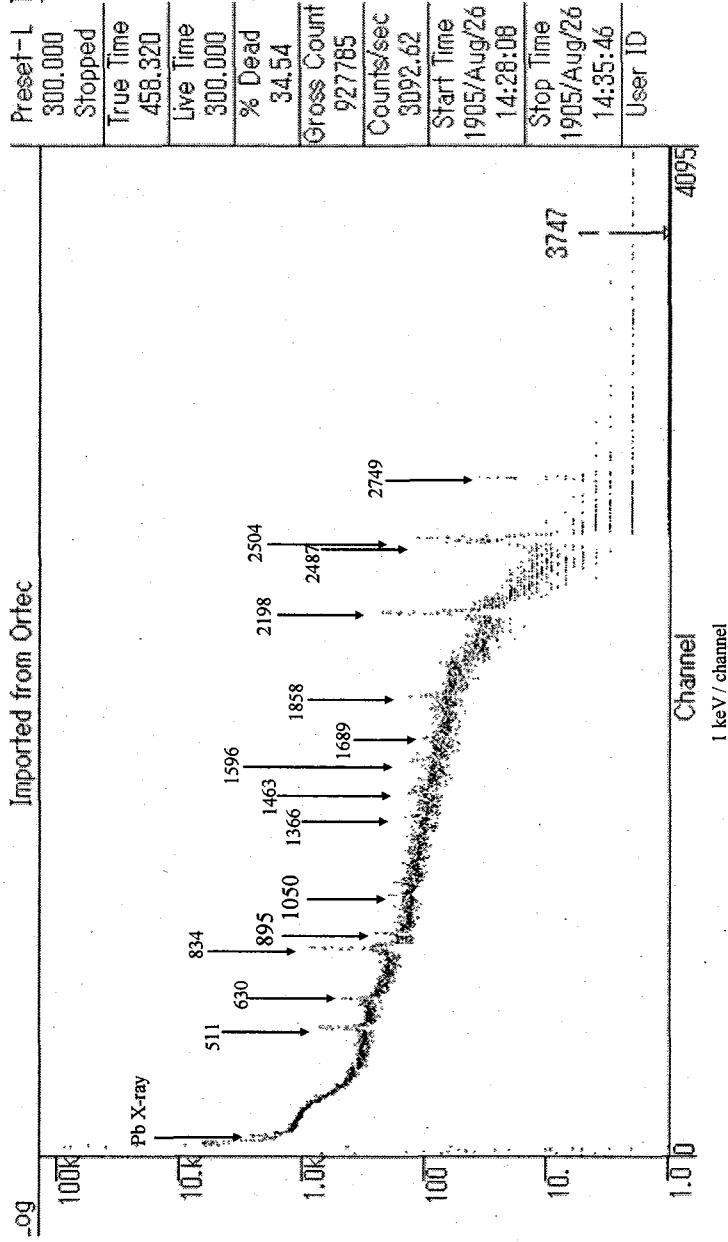
• 放射線データーベンチより
主な生成反応
Ge-71 (n, γ) 4.71(23)
Ge-72 (n, p) 0.031(3)
As-75 (n, α) 0.0135(15)
Zn-70 (α , p n) 0.085(20)
Zn-72→10頁を参照



均一照射設備 Si 装荷孔上部(側面付近)の γ 線スペクトル測定結果

測定日時 2005/Aug/26 14:00~

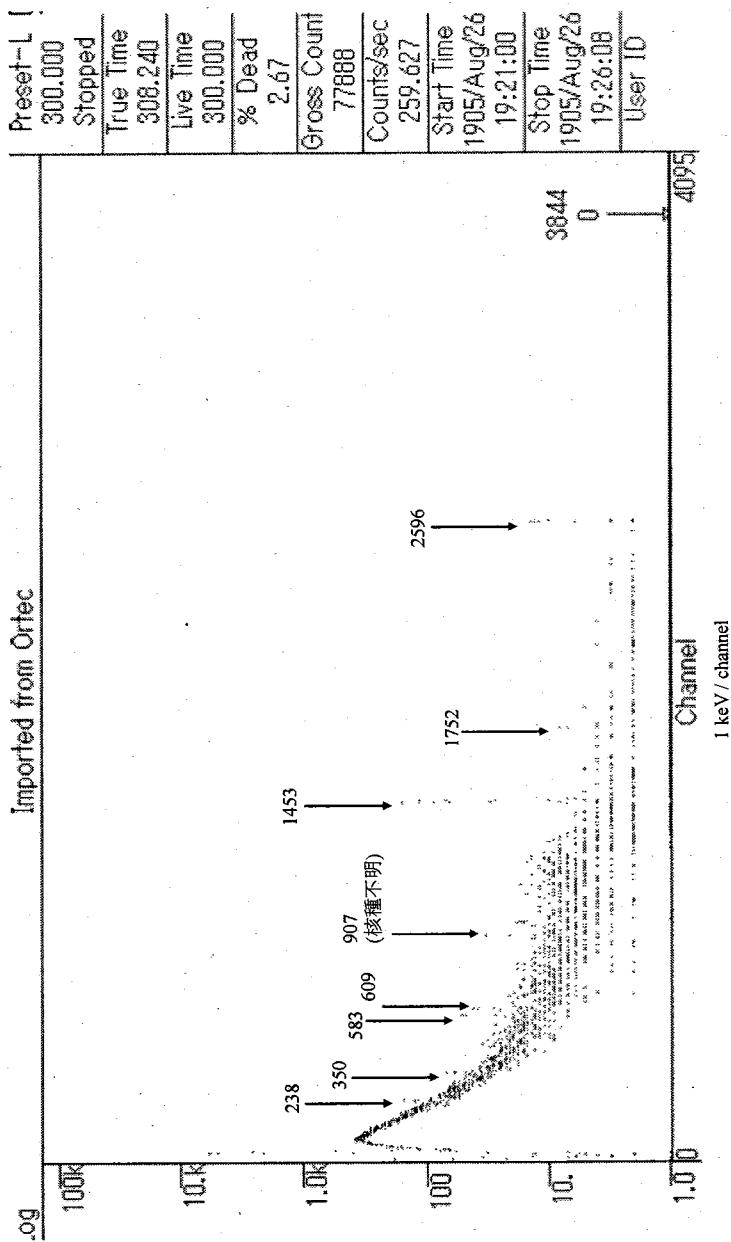
・核種分析の結果 Ga-72 (半減期: 14 hr) が主要核種であることが分った。
 (全ピーケでは見えなかつたピーケを確認 895,1050keV)
 (Ge検出器の放射化ではないことと次項により証明している。)



JRR—3放管測定室におけるGe検出器のBG測定結果

測定日時 2005/Aug/26 19:30~

- ・シリニン照射體備燃料挿入部において検出されたGa-72(半減期14hr)であるため、Ge検出器の放射化であれば、Ga-72のピークが強ると考えられる。
- ・BGの測定で、Ti-208, Bi-214, Pb-212などの自然放射性核種に起因するγ線ピークが検出された。
- ・Ge検出器の放射化ではないことが証明された。



付録 B

Si 装荷孔線量測定記録（遮へい効果調査）

線量測定日時：平成 17 年 11 月 16 日、9:30～9:45（測定時間）

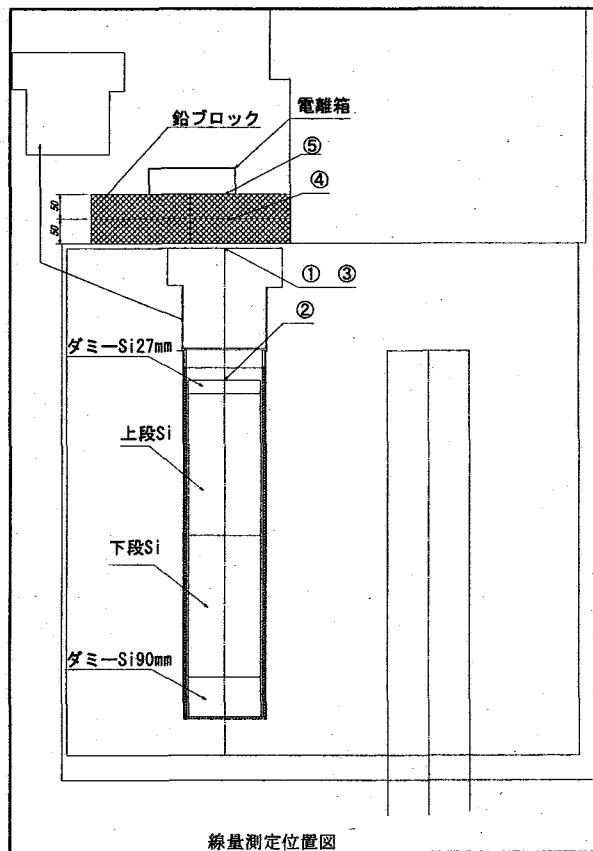
測定者：2 人 放振協；4 人

測定時の状況：第 7 サイクル、照射試料：6 インチ Si、約 5 時間照射後

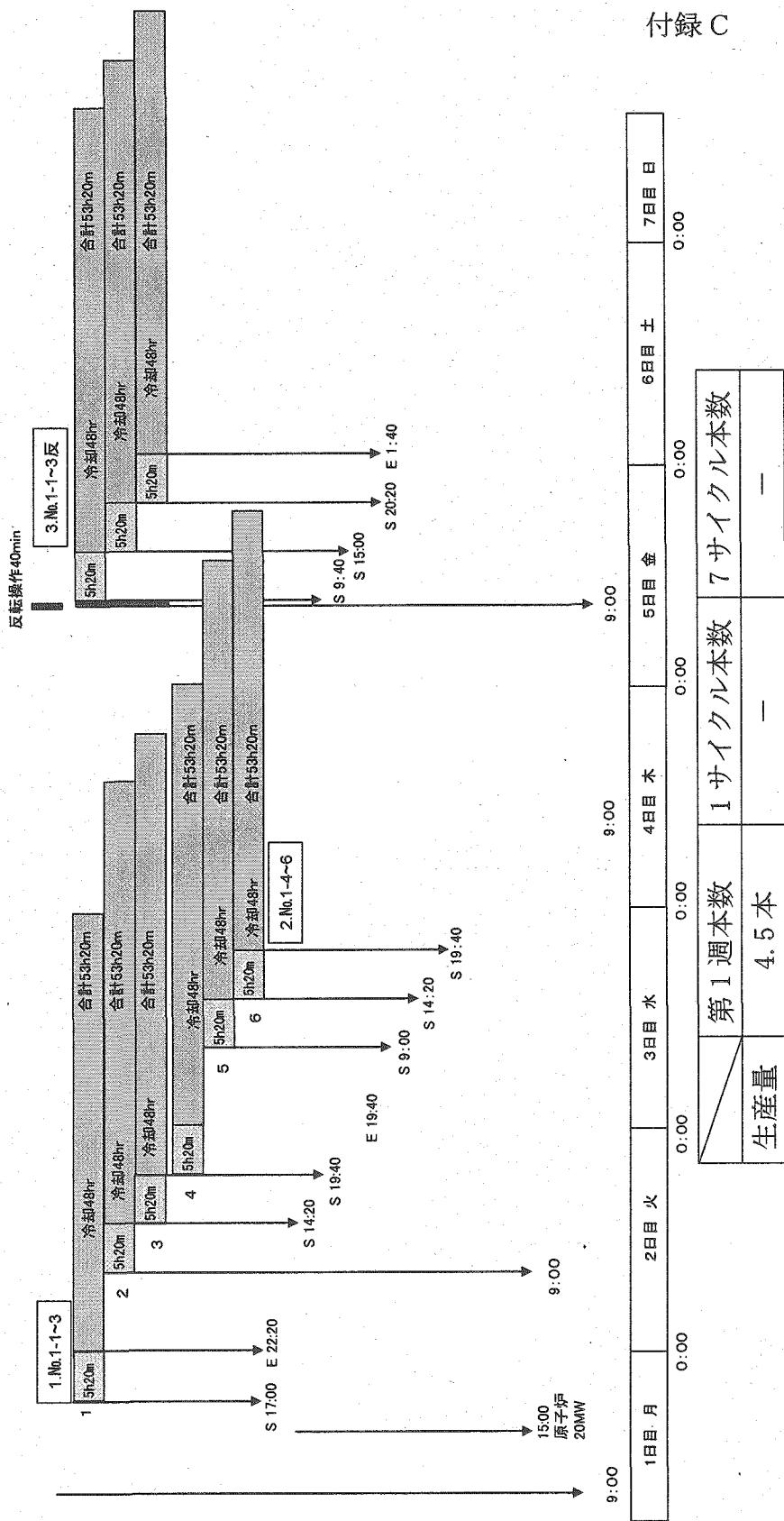
K5007、11/14 21:58～11/15 2:58 4:56 分正転照射

外部被ばく (PD 値) : A ; 1 (μ Sv)、B ; 0 (μ Sv)、C2 (μ Sv)、D ; 0 (μ Sv)、E ; 0 (μ Sv)

ホルダーNo.	冷却時間 (hr)	測定位置	線量当量率 (μ Sv/h)	
			電離箱	GM 管
6	30.5 時間 (9:30)	① 遮へい蓋開後入口	1,450	
		② 上部シリコン表面	15,000	
		③ 敷き板上	1,450	
		④ 鉛ブロック 50 mm 上	100	100
		⑤ 鉛ブロック 100 mm 上	10	10



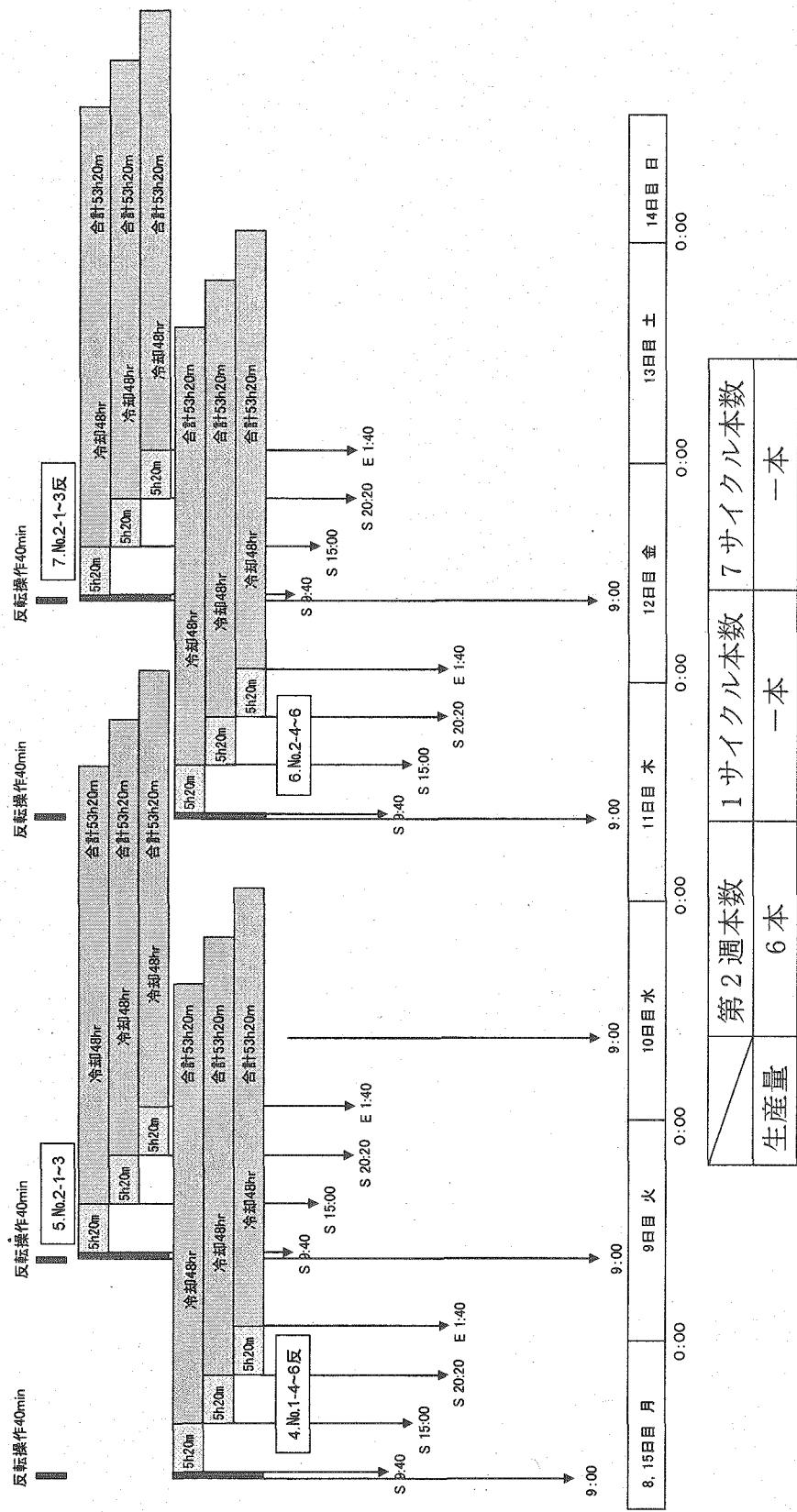
- シリコーン照射パターント (抵抗率: 60 Ω · cm) 【48h冷却】 第1週 I
- ① 照射+プール内冷却: 5時間+20分=5時間20分(片側)
 - ② キャスク内冷却時間(1本)= 48時間(片側)



付録 C

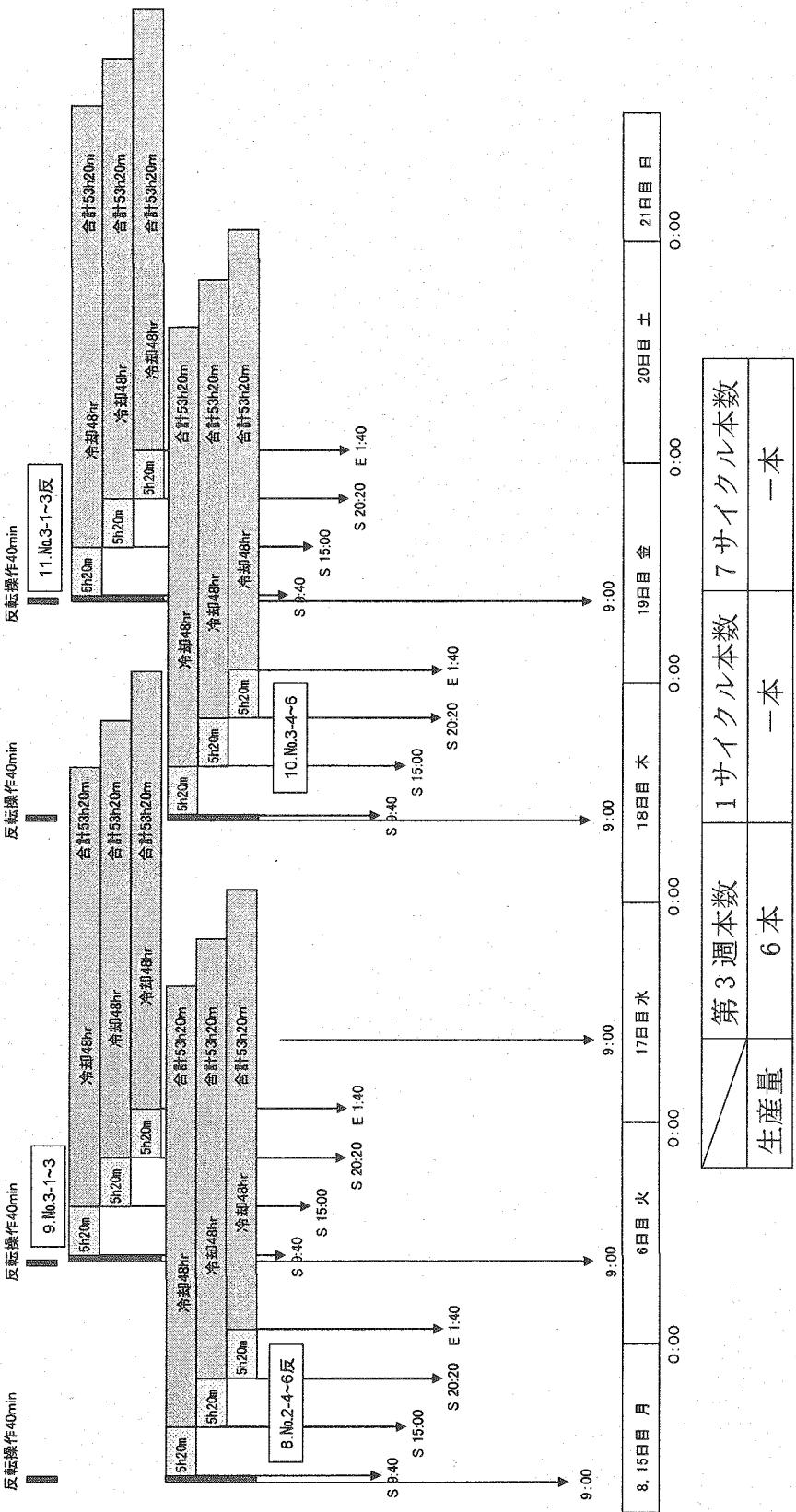
シリコン照射パターン (抵抗率: 60Ω·cm) 【48h冷却】 第2週 1

- ① 照射+プール内冷却: 5時間+20分=5時間20分(片側)
- ② キャスク内冷却時間(1本)= 48時間(片側)



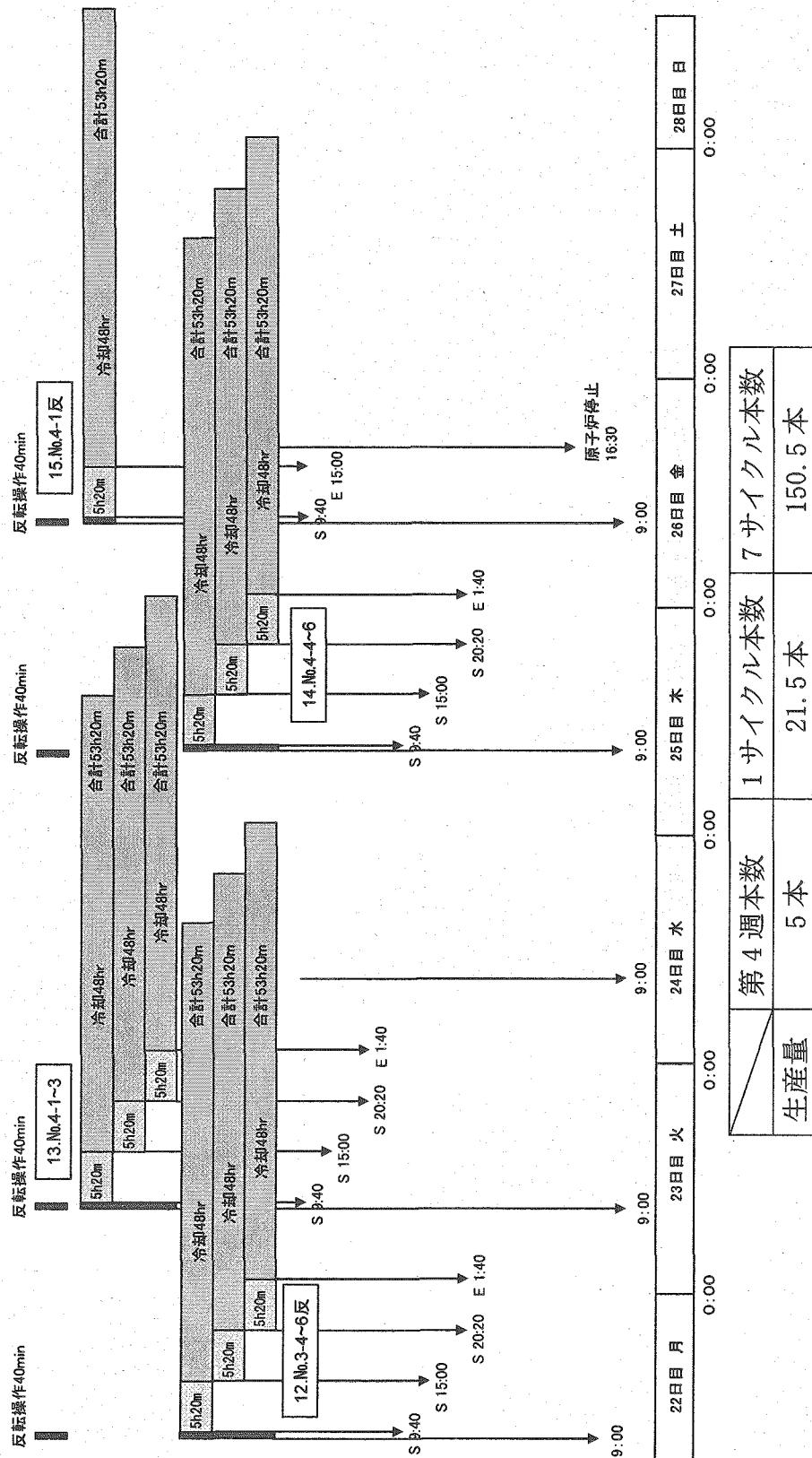
シリコン照射パターン（抵抗率： $60\Omega \cdot \text{cm}$ ）【48h冷却】第3週 1

- ① 照射+プール内冷却：5時間+20分=5時間20分（片側）
- ② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



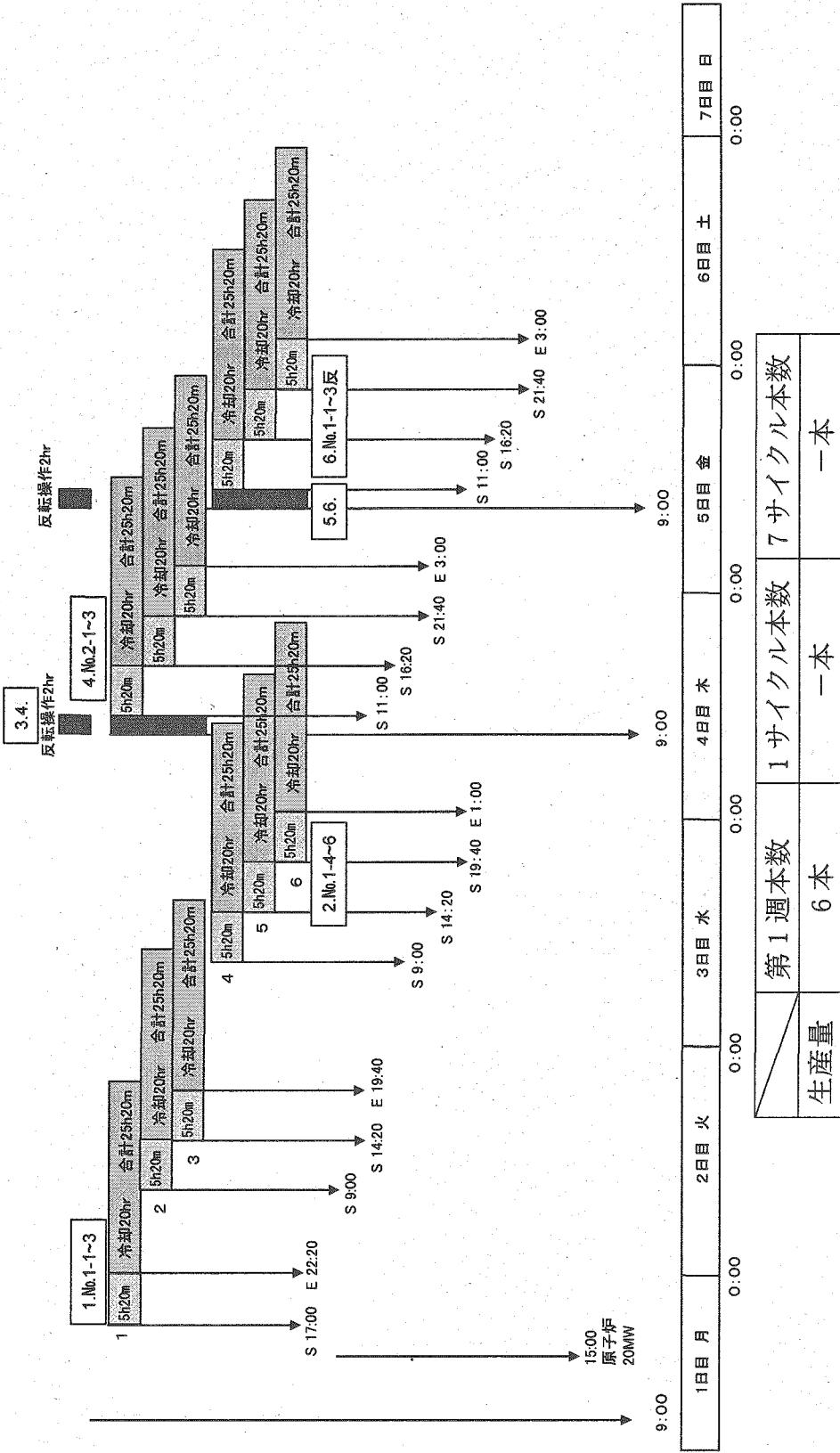
シリコン照射パトーン(抵抗率:60Ω·cm)【48h冷却】第4週 I

- ① 照射+プール内冷却:5時間+20分=5時間20分(片側)
 ② キャスク内冷却時間(1本):48時間(片側)



シリコン照射パターン (抵抗率: 60Ω・cm) 【20h冷却】 第1週 II

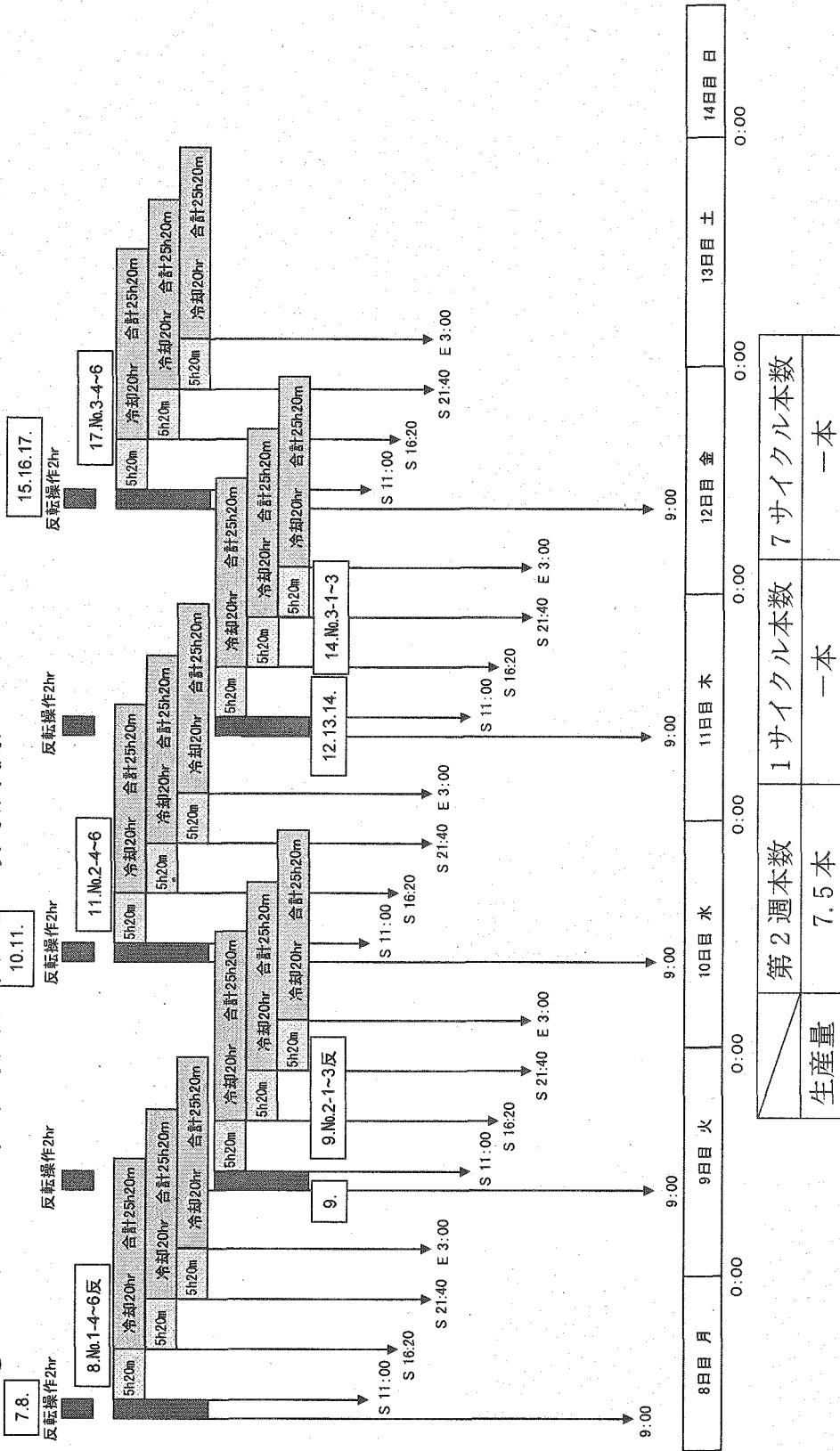
- ① 照射+プール内冷却: 5時間+20分=5時間20分(片側)
- ② キャスク内冷却時間(1本)= 20時間(片側)



シリコン照射パターン (抵抗率:60Ω·cm) 【20h冷却】 第2週 II

① 照射+プール内冷却:5時間+20分=5時間20分(片側)

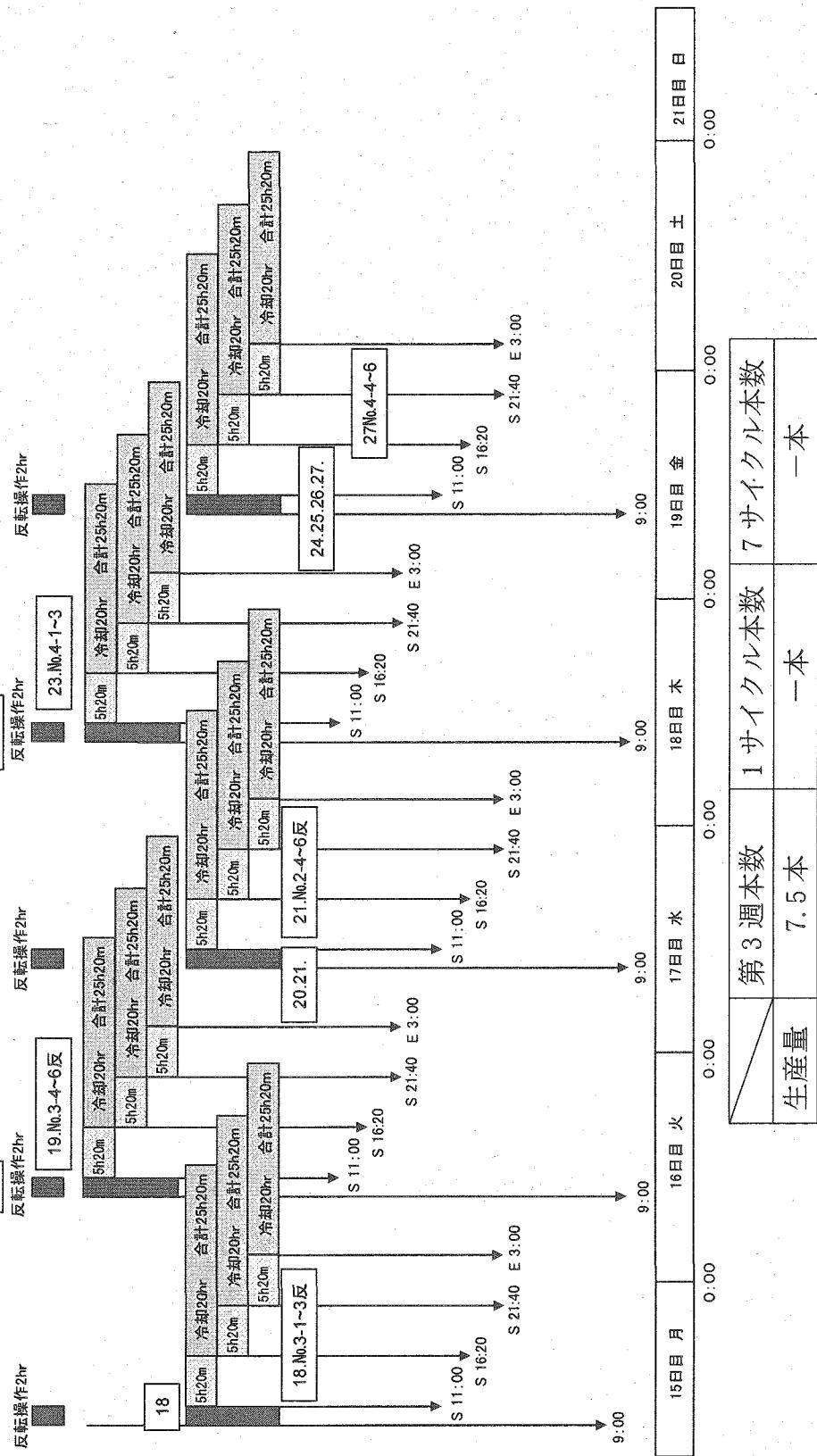
② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)



シリコン照射パターントラップ率：60Ω·cm) [20h冷却] 第3週 II

① 照射+ポール内冷却：5時間+20分=5時間20分（片面）

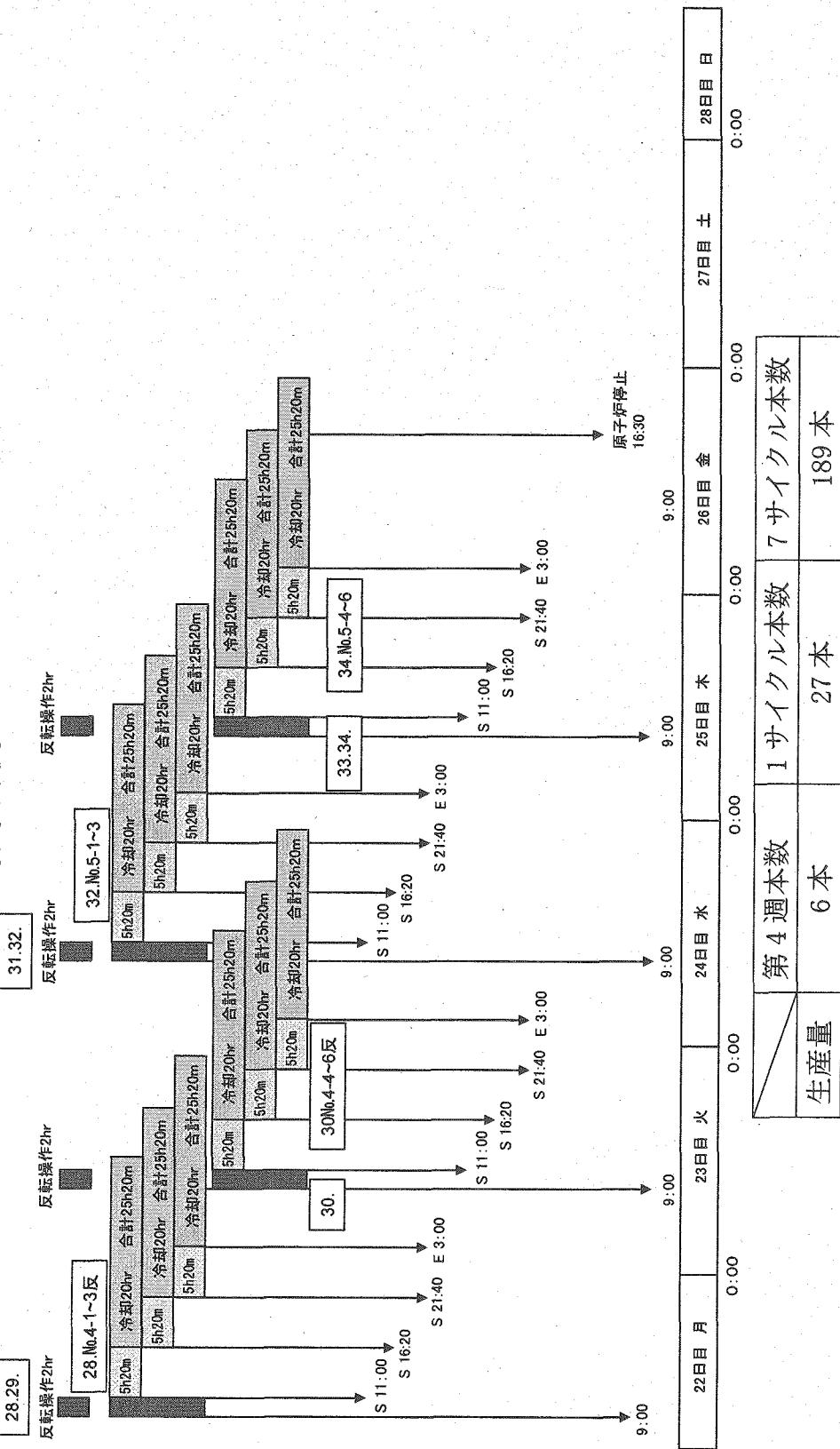
② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片面)



シリコン照射パターン (抵抗率: 60 Ω·cm) [20h冷却] 第4週 II

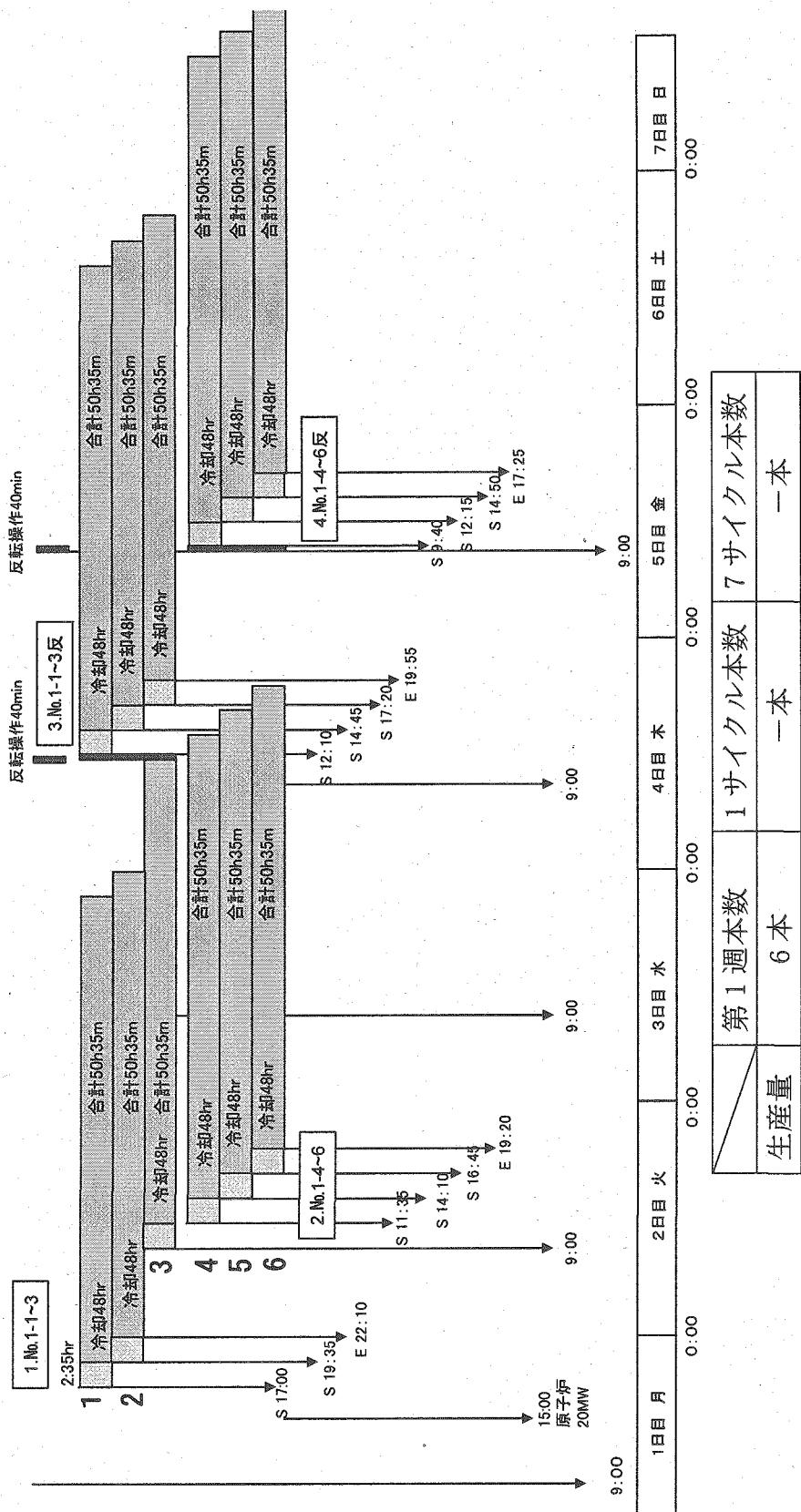
① 照射+プール内冷却: 5時間+20分=5時間20分(片側)

② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)



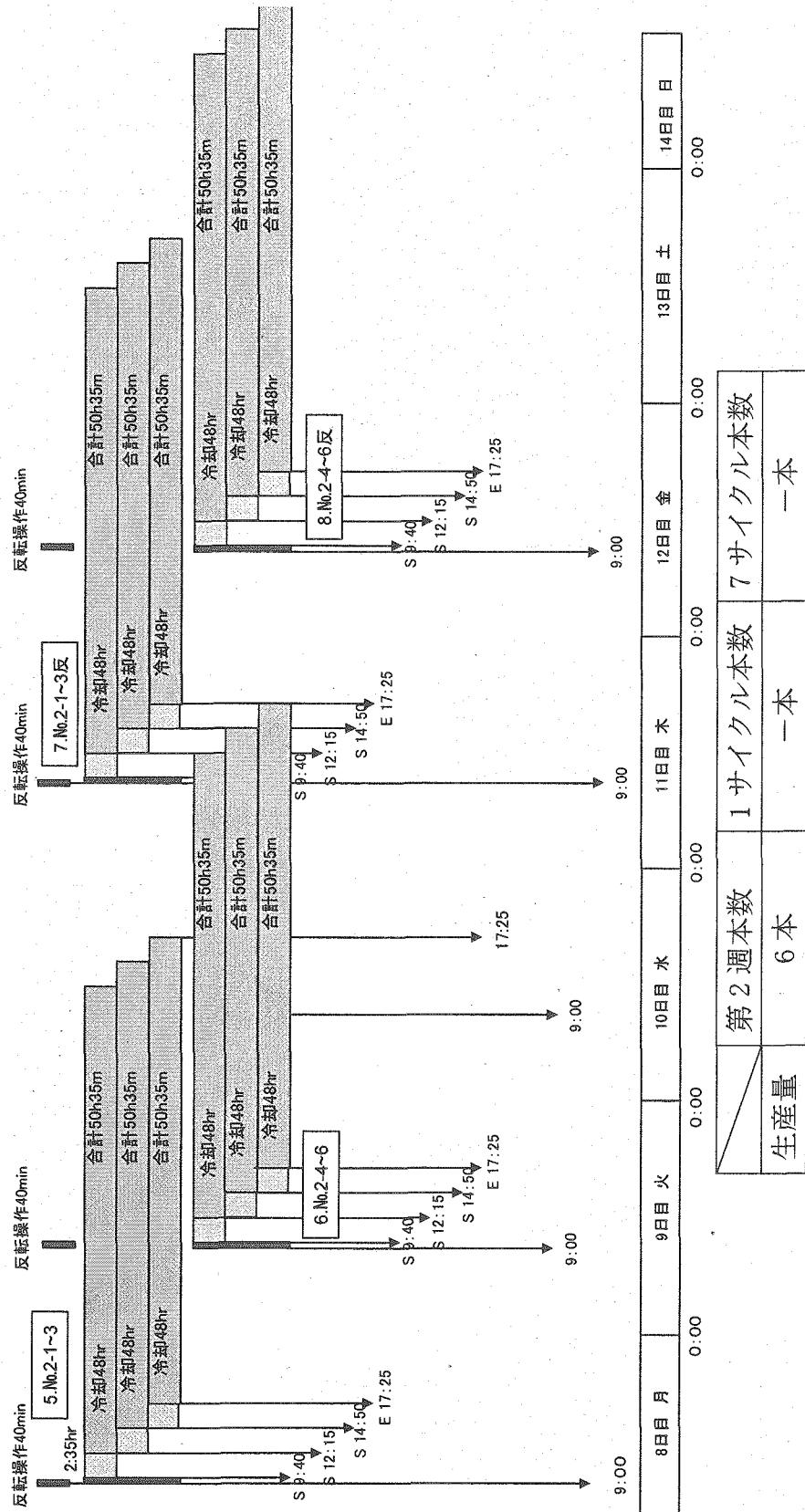
シリコン照射ノバーン (抵抗率:172Ω·cm) 【48h冷却】第1週 III

- ① 照射+プール内冷却:2時間15分照射+20分=2時間35分(片側)
 ② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



シリコン照射パターン（抵抗率：172Ω·cm）【48h冷却】第2週Ⅲ

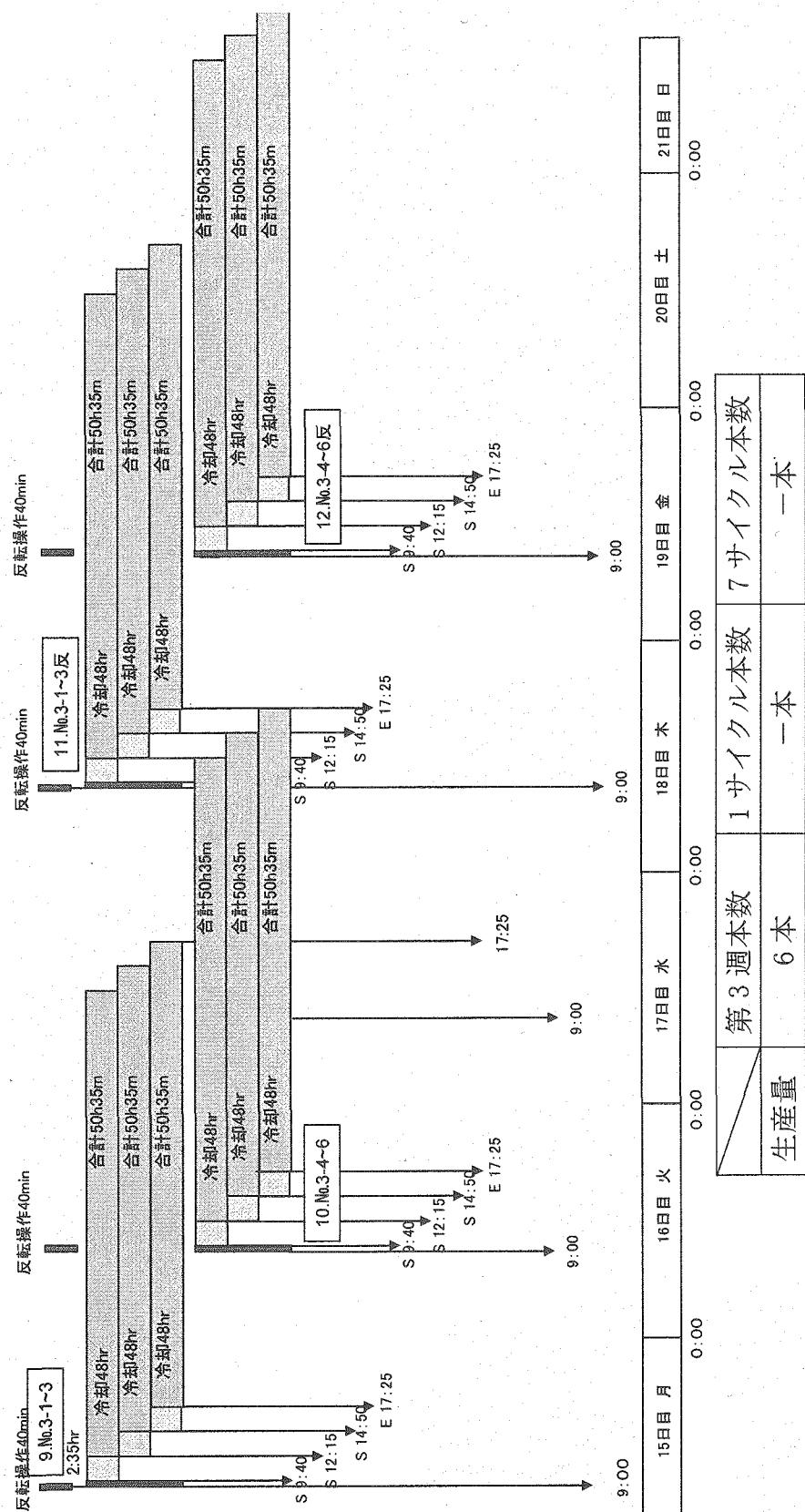
- ① 照射+プール内冷却：2時間15分照射+20分＝2時間35分(片側)
- ② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



シリコーン照射パターン (抵抗率: 172 $\Omega \cdot \text{cm}$) [48h冷却] 第3週 Ⅲ

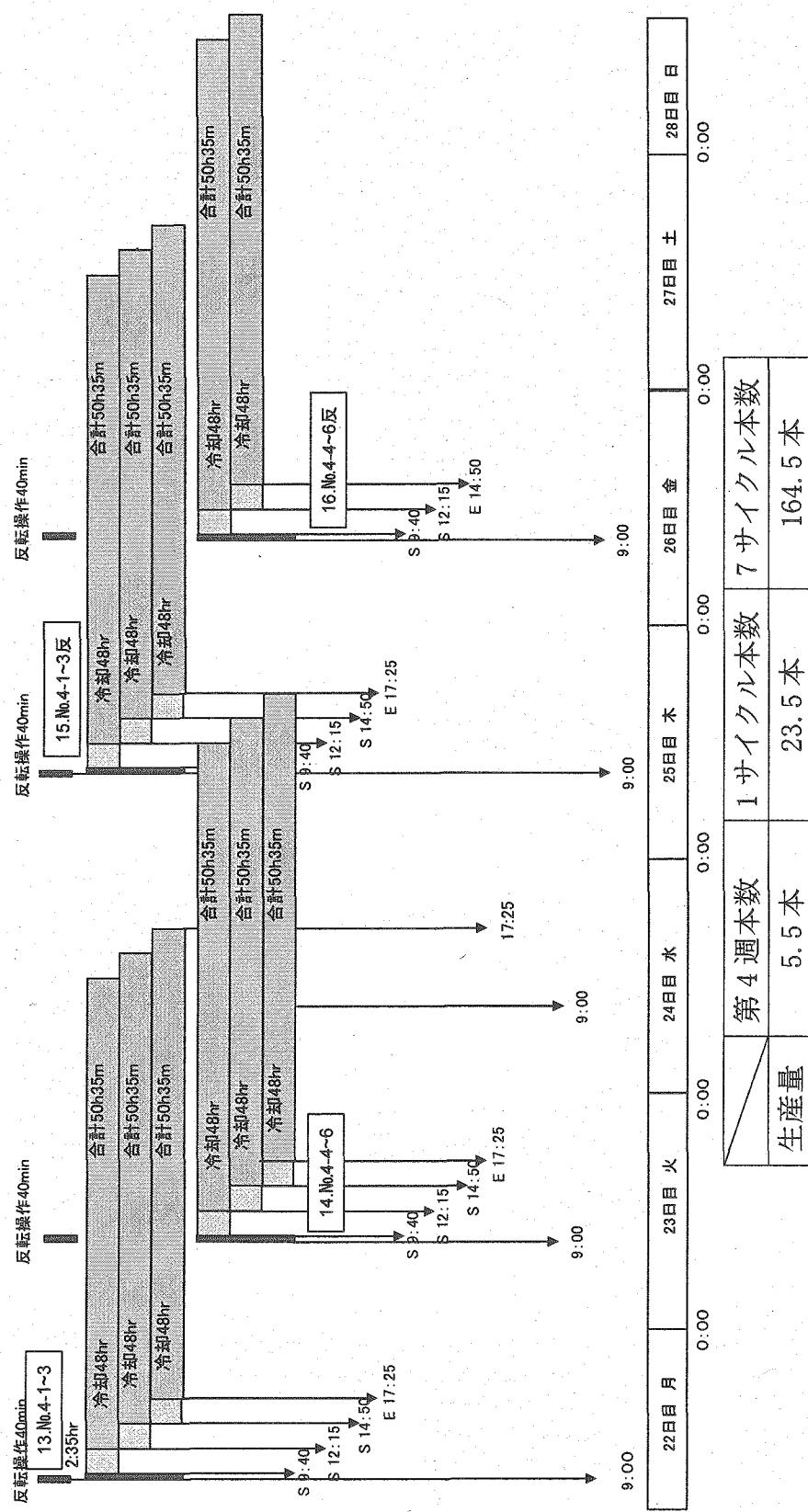
① 照射 + プール内冷却：2時間15分照射+20分=2時間35分(片側)

② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



シリコン照射ノバターン (抵抗率: 172 Ω · cm) 【48h冷却】第4週 III

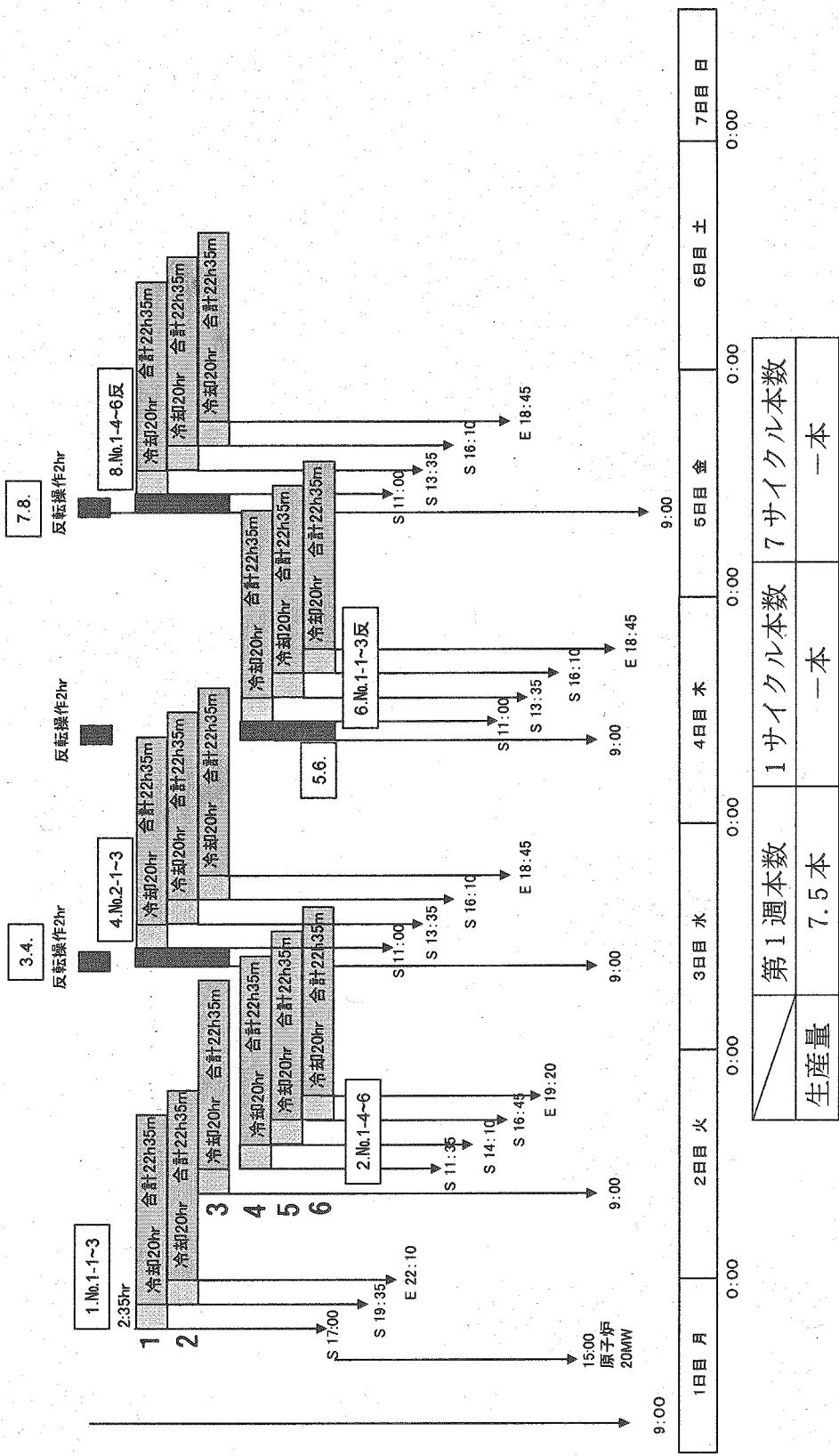
- ① 照射 + ブール内冷却: 2時間15分照射+20分 = 2時間35分(片側)
- ② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



シリコン照射パターン (抵抗率: 172 $\Omega \cdot \text{cm}$) [20h冷却] 第1週 IV

① 照射 + プール内冷却: 2時間15分照射+20分 = 2時間35分(片側)

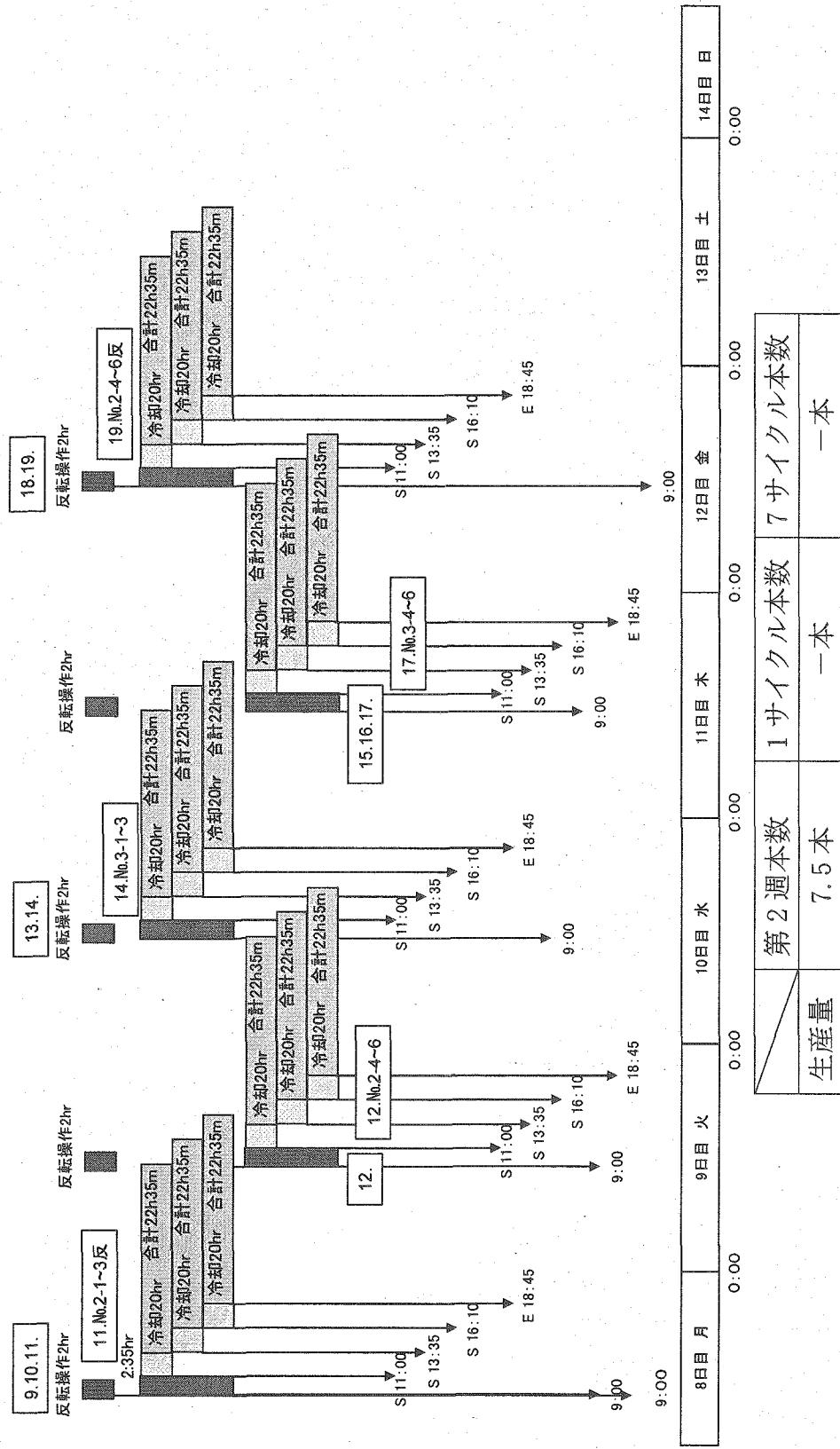
② キヤスケ内冷却時間(1本)=20時間(片側)



シリコン照射パターント (抵抗率: 172 Ω · cm) 【20h冷却】第2週 IV

① 照射 + ブール内冷却: 2時間15分照射+20分=2時間35分(片側)

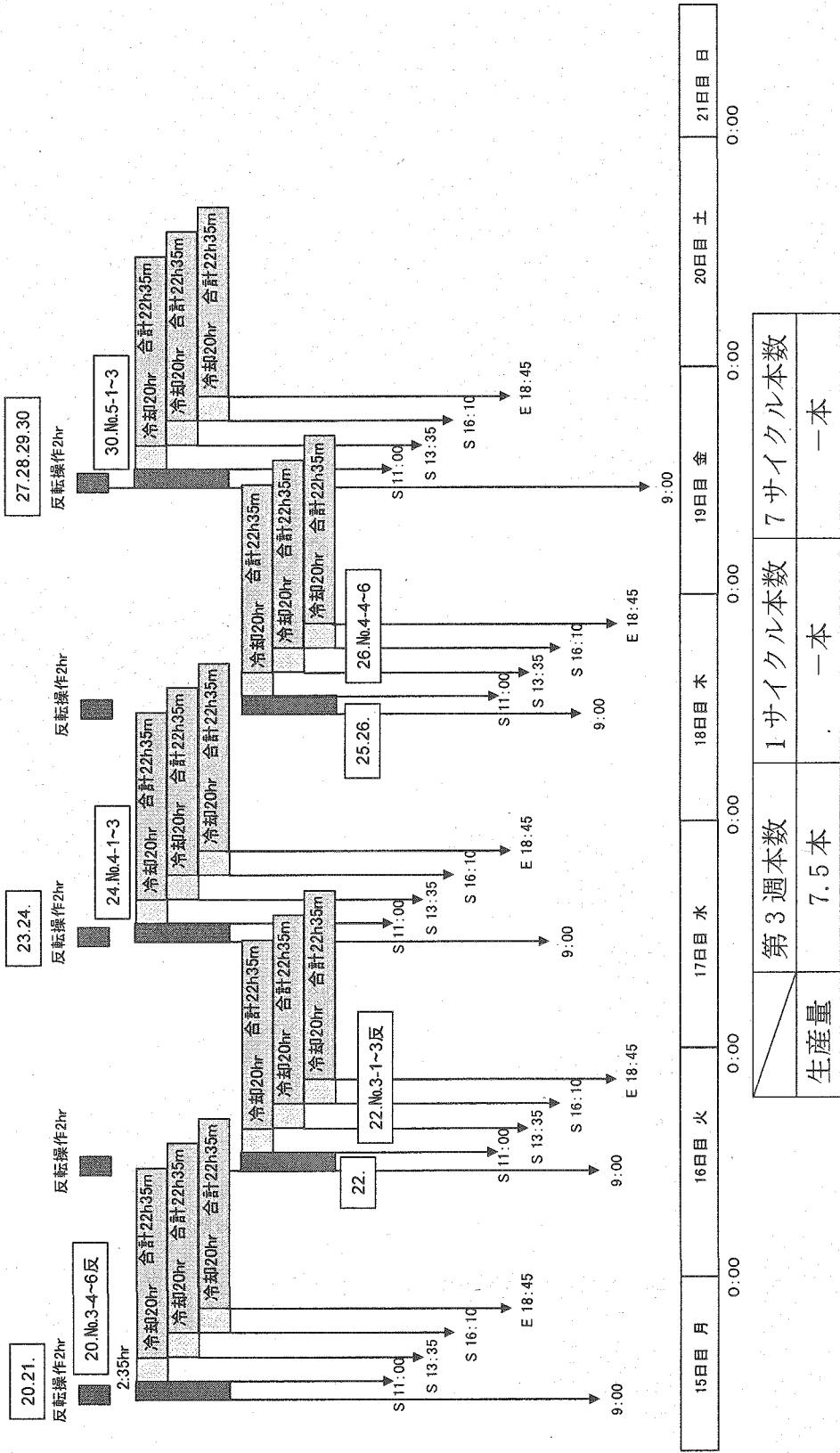
② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)



シリコン照射パトーン（抵抗率：172Ω・cm）【20h冷却】第3週 IV

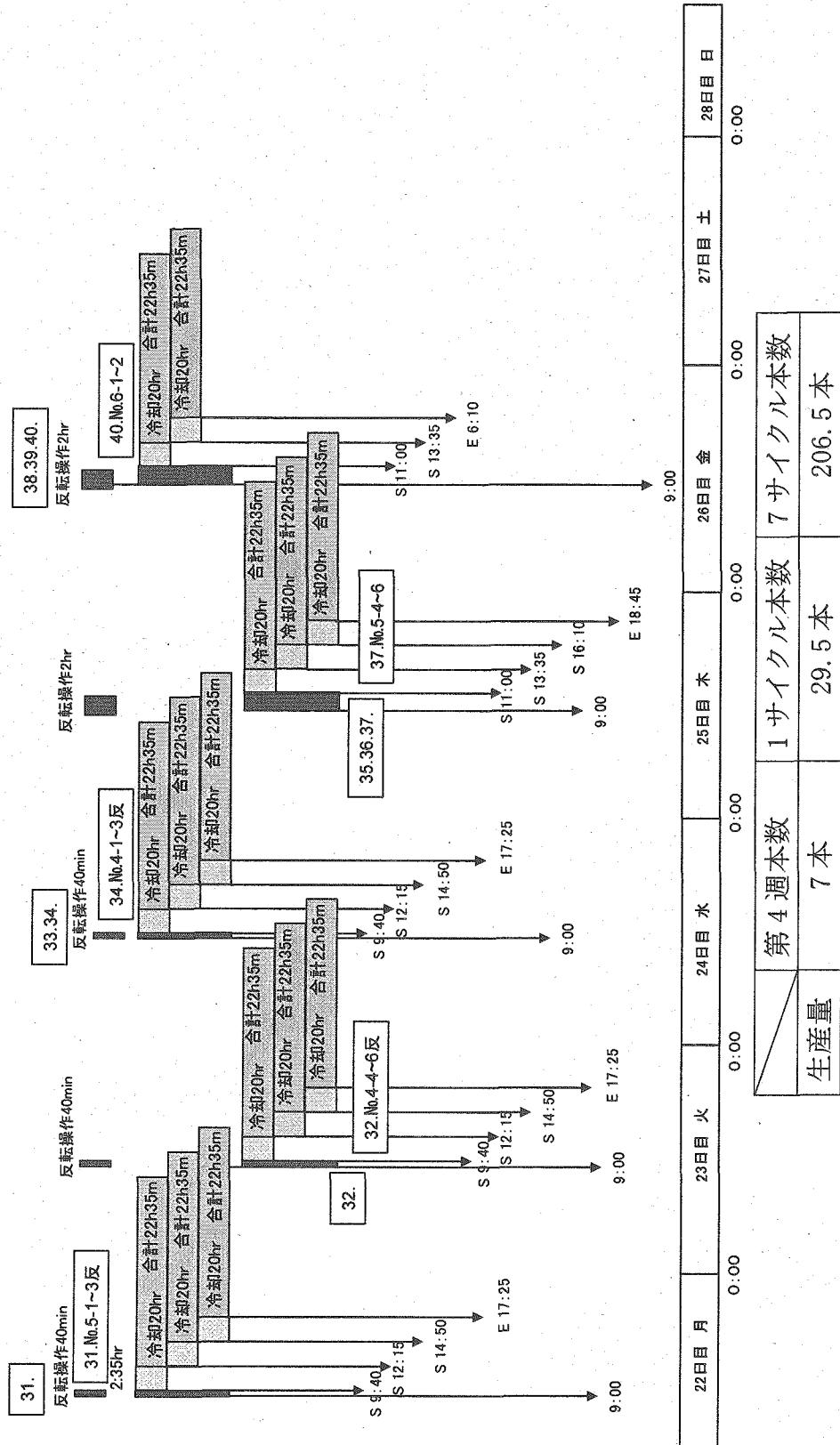
① 照射+プール内冷却：2時間15分照射+20分=2時間35分(片側)

② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)



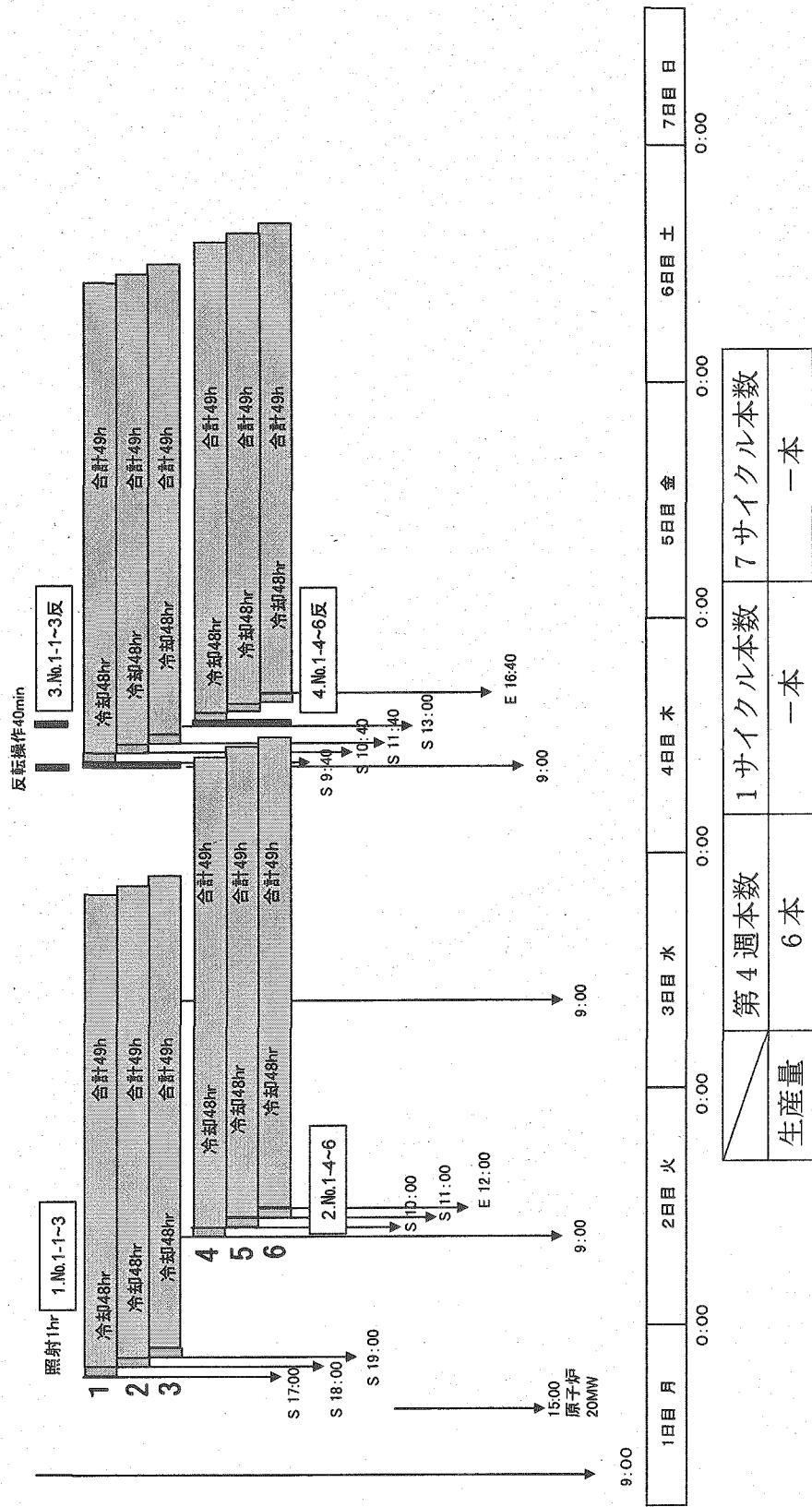
シリコン照射ナビゲーション (抵抗率: 172 Ω · cm) 【20h冷却】 第4週 IV

- ① 照射+プール内冷却: 2時間15分照射+20分 = 2時間35分(片側)
 ② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)



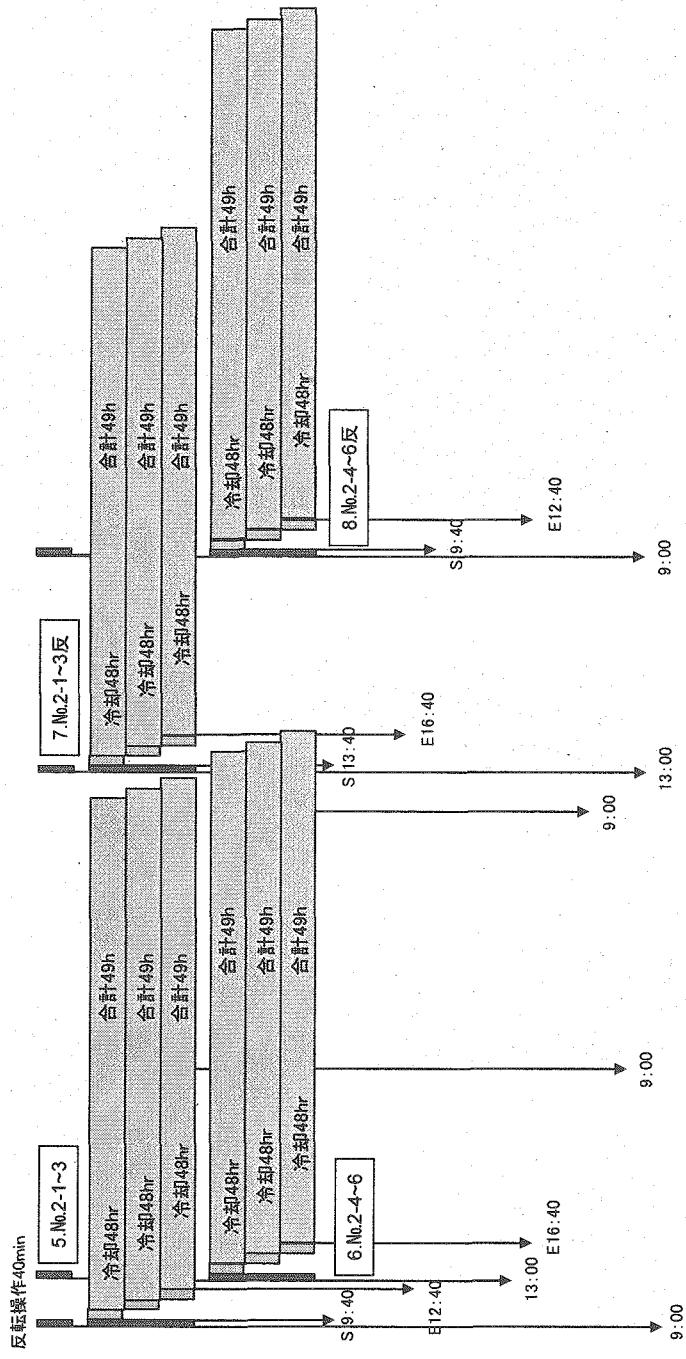
シリコン照射パターン (抵抗率: 777Ω·cm) 【48h冷却】第1週 V

- ① 照射+プール内冷却: 35分照射+20分=1時間(片側)
 ② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



シリコン照射パターン (抵抗率: 777 Ω · cm) 【48h冷却】第2週 V

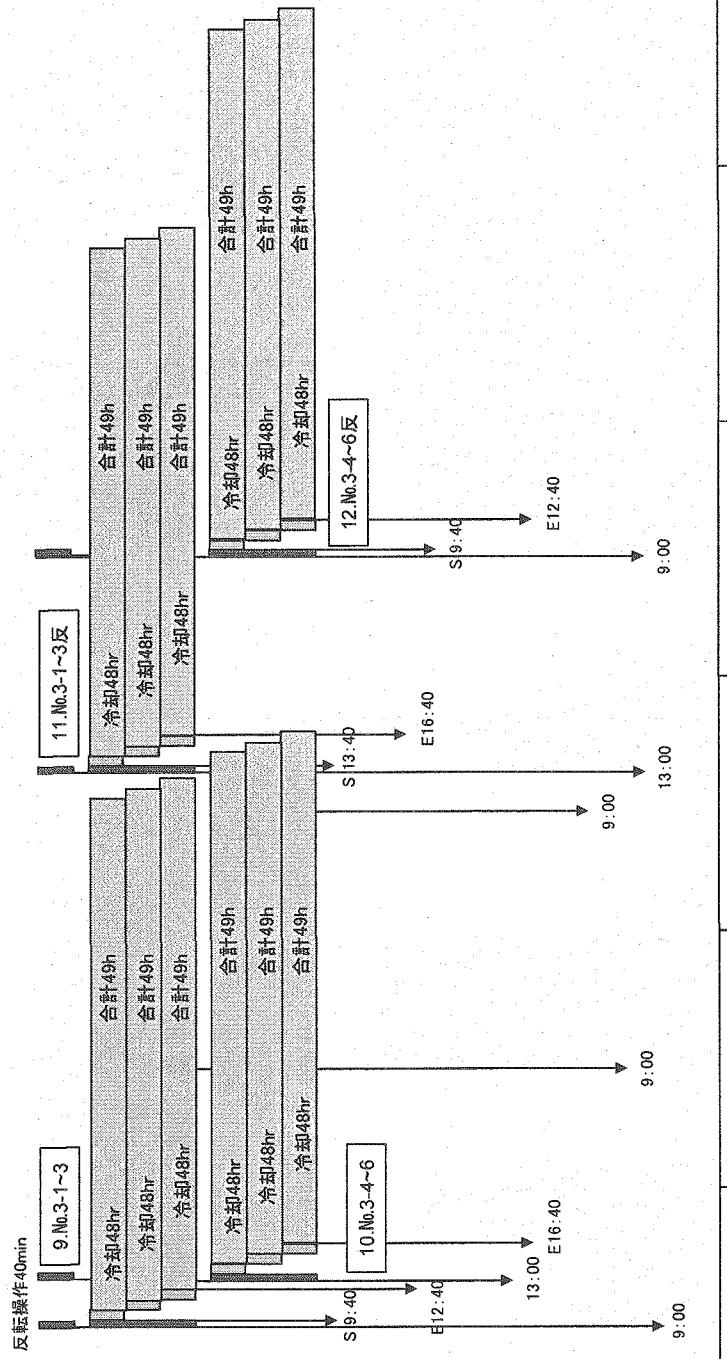
- ① 照射十プール内冷却: 35分照射+20分=1時間(片側)
- ② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



8日月	9日火	10日水	11日木	12日金	13日土	14日日
0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
生産量	第4週本数 6本	1サイクル本数 一本	7サイクル本数 一本			

シリコン照射パターン (抵抗率: 777 Ω · cm) 【48h冷却】第3週 V

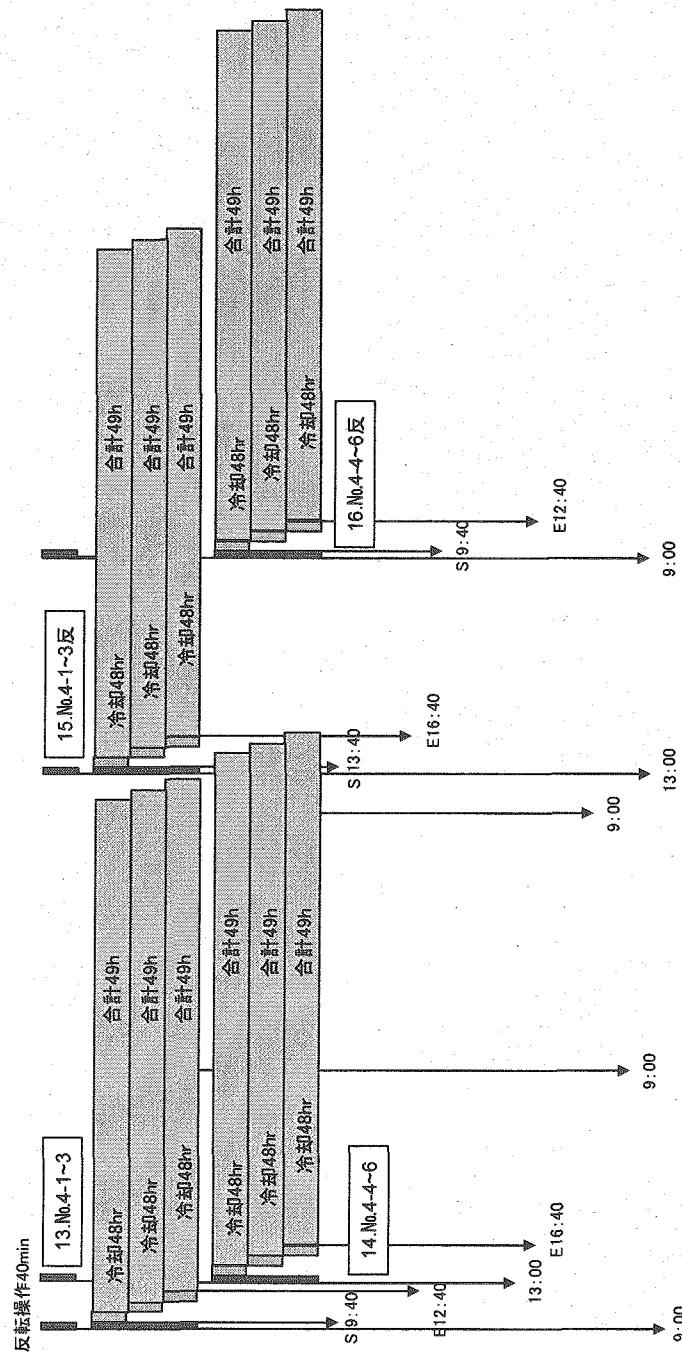
- ① 照射+プール内冷却: 35分照射+20分=1時間(片側)
 ② キャスク内冷却時間(1本)=48時間(片側)



15日 月	16日 火	17日 水	18日 木	19日 金	20日 土	21日 日
0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
生産量	第4週本数 6本	1サイクル本数 一本	7サイクル本数 一本			

シリコン照射パターン（抵抗率：777 $\Omega \cdot \text{cm}$ ）【48h冷却】第4週 V

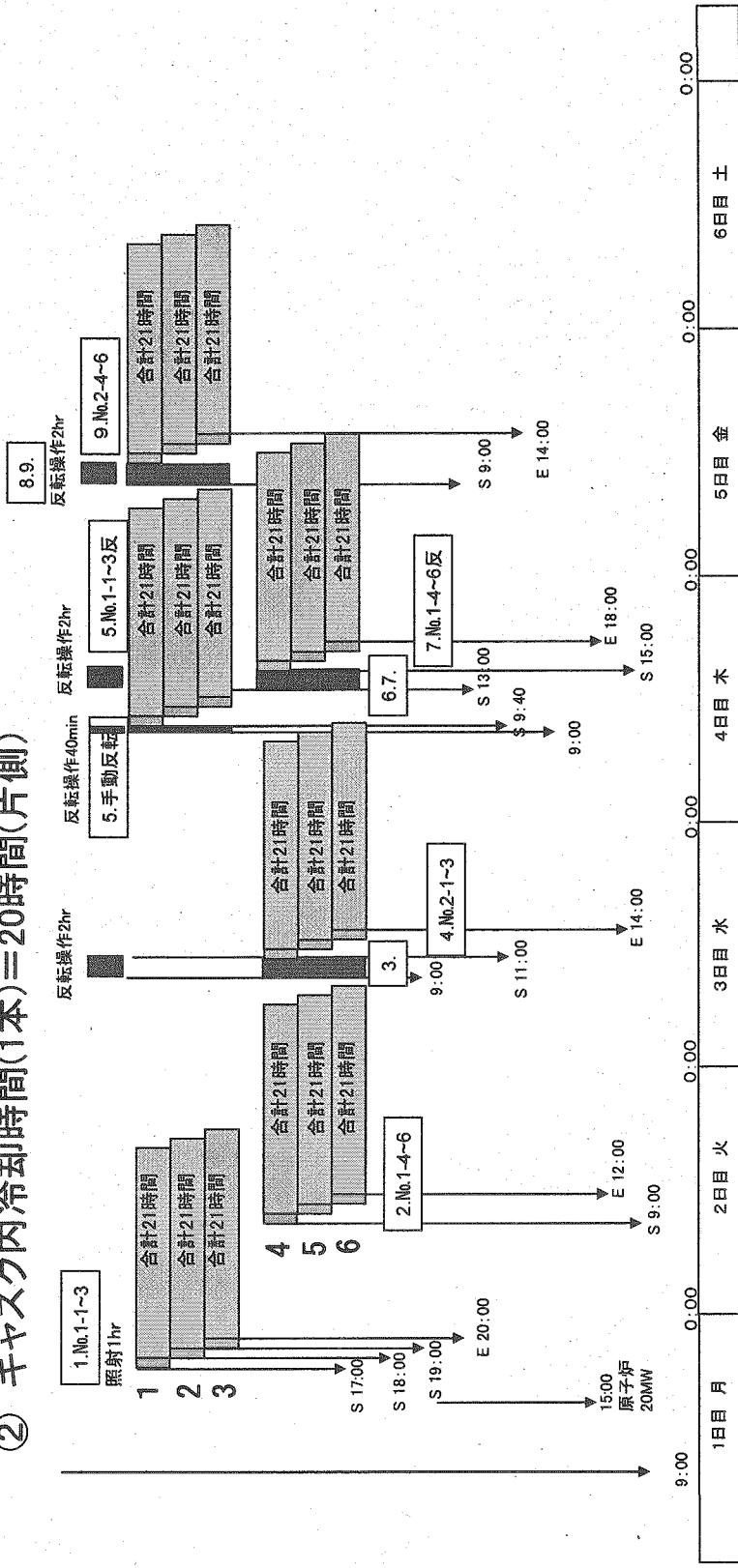
- ① 照射 + プール内冷却 : 35分照射+20分 = 1時間(片側)
 ② キャスク内冷却時間(1本) = 48時間(片側)



シリコン照射パターン (抵抗率: 777 Ω · cm) [20h冷却]第1週 VI

① 照射+プール内冷却: 35分照射+20分 = 1時間(片側)

② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)

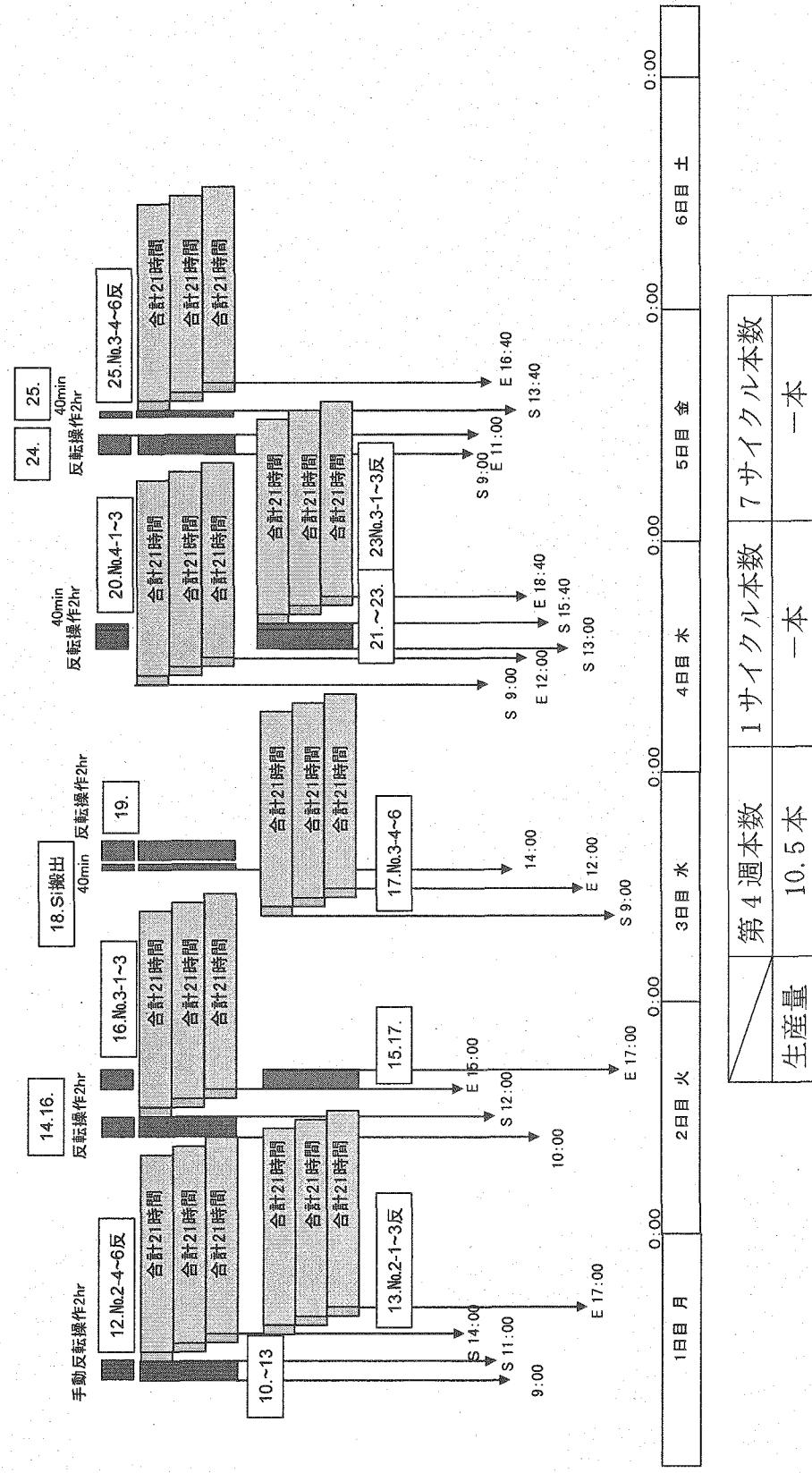


	第4週本数	1サイクル本数	7サイクル本数
生産量	9本	一本	一本

シリコン照射パターン (抵抗率: 777 Ω · cm) 【20h冷却】第2週 VI

① 照射+プール内冷却: 35分照射+20分=1時間(片側)

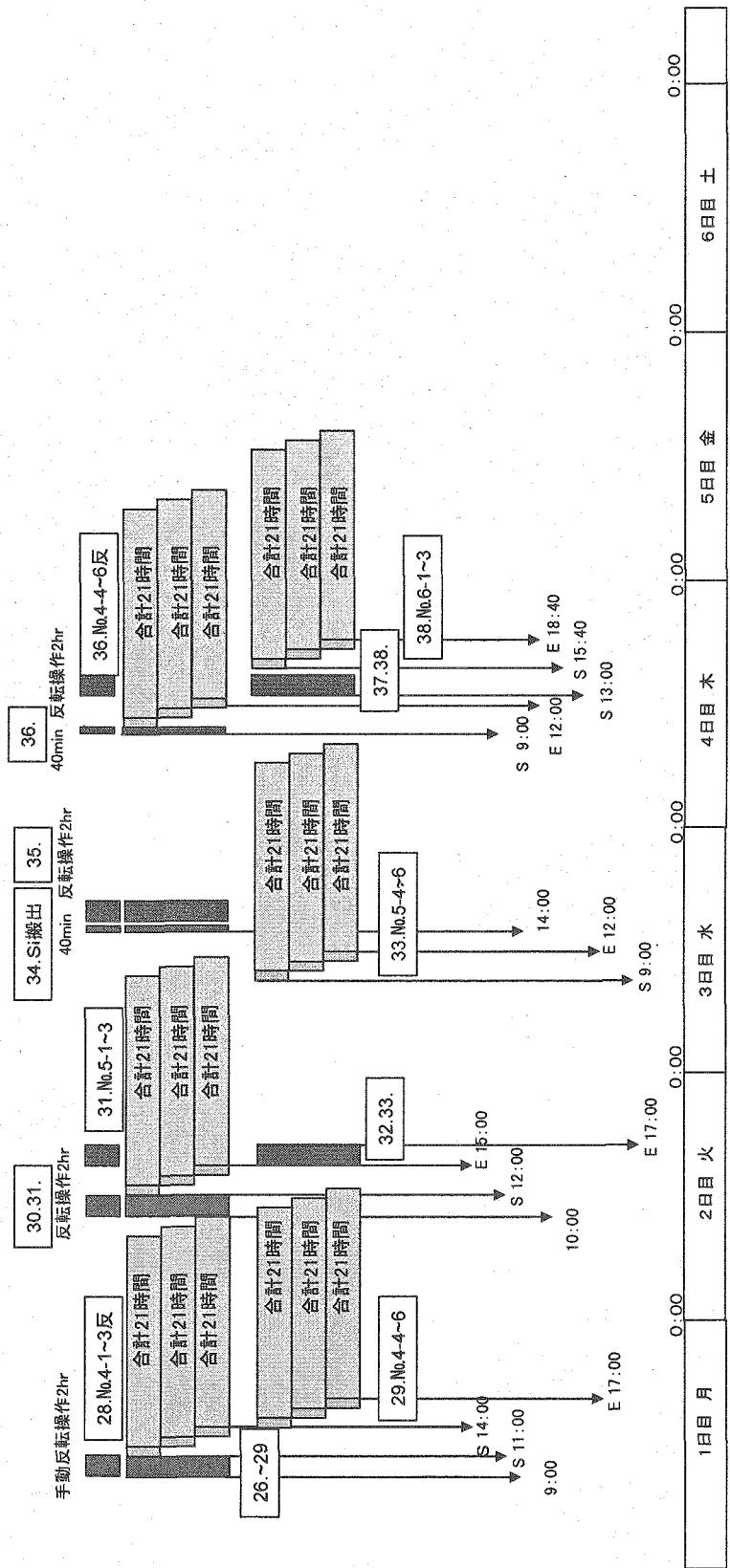
② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)



生産量	第4週本数	1サイクル本数	7サイクル本数
10.5本	一本	一本	一本

シリコン照射パターン（抵抗率：777Ω・cm）【20h冷却】第3週 VI

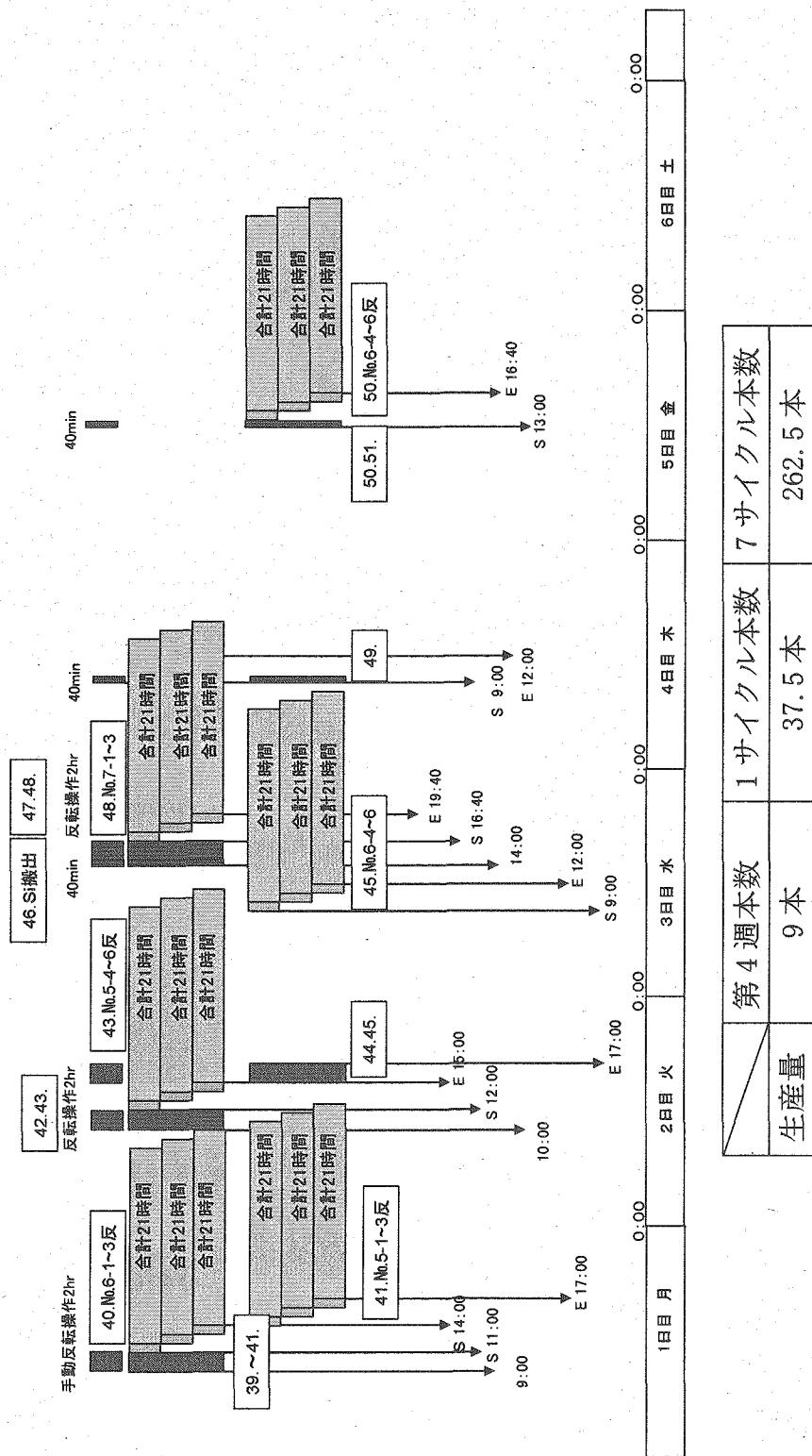
- ① 照射十プール内冷却：35分照射+20分＝1時間(片側)
- ② キャスク内冷却時間(1本)＝20時間(片側)



生産量	第4週本数	1サイクル本数	7サイクル本数
	9本	一本	一本

シリコン照射パターン（抵抗率：777 Ω・cm）【20h冷却】第4週 VI

- ① 照射+プール内冷却：35分照射+20分＝1時間(片側)
- ② キャスク内冷却時間(1本)=20時間(片側)



付録 D

保管容器耐震強度計算書

1. 適用

本計算書は、均一照射設備外部冷却法対応設備の設計における、「保管容器」についての耐震強度計算を記したものです。

2. 設計条件

2.1 耐震条件

- ・水平震度 : $K = 0.36$
- ・垂直震度 : 考慮しない

2.2 荷重条件

- ・静荷重 : 保管容器本体及び収納物($400N \times 6$ 本 = $2400N$)
- ・地震荷重 : 水平荷重のみを対象とする

2.3 材料の許容応力

鋼構造設計基準により算出するものとし、下表に示す。

単位 : N/mm^2

短期許容応力			
材質	耐力 : F	応力種類	許容応力値
SS400	205	曲げ応力	$f_M = 235 / 1.5 \times 1.5 = 235$
		せん断応力	$f_s = 235 \times 0.385 \times 1.5 = 135$
		引張応力	$f_t = 205 \times 1.5 \times 1.5 = 235$
		せん断応力	$f_a = 205 / 0.385 \times 0.45 \times 1.5 = 60$
SS400(溶接部)			

3. 耐震強度計算

計算は、保管容器は SS400 材厚板を組み上げ、溶接により一体構造となっている。そこで、本保管容器の耐震強度計算においては、地震時による転倒及び吊り具部においての強度計算を実施する。

図-1に保管容器の概略図を 表-1には部材重量を示します。

(1) 保管容器の転倒計算(地震時)

(2) 保管容器の吊り具溶接部の強度計算

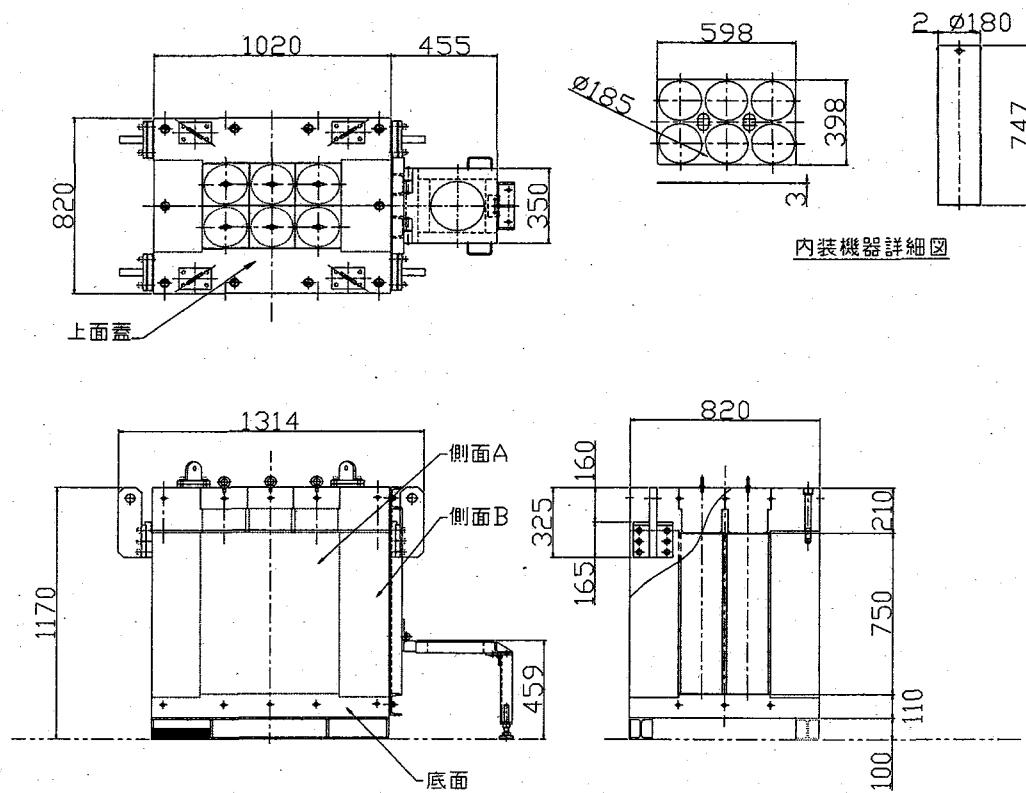


図-1 概略図

表-1 部材重量

部材名	員数	質量	重心高さ
上面蓋	1 枚	14700N	1170mm
側面板	1 式	35850N	585mm
底板(H鋼含む)	1 式	7800N	210mm
内装品 (収納品含む)	1 式	2900N	585mm
	合計	61250N	678mm

3.1 保管容器の転倒計算

地震時に図-2に示す方向に水平荷重がかかった際に 保管容器の転倒の有無を検討する。

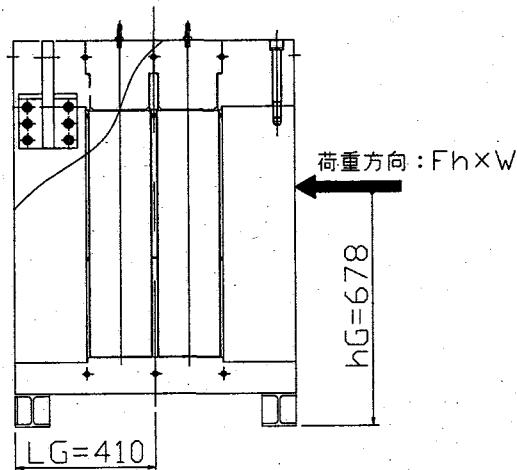


図-2 転倒計算モデル

① 水平地震力 : F

$$\begin{aligned} F &= K \cdot W_1 \\ &= 0.36 \times 61250 \\ &= 22050\text{N} \end{aligned}$$

K : 水平震度 = 0.36

W_1 : 総重量 = 61250N

② 転倒モーメント : M_e

$$\begin{aligned} M_e &= F \cdot h_G \\ &= 22050 \times 678 \\ &= 1.495 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

F : 水平地震力 = 22050N

h_G : 高さ方向重心位置 = 678mm

③ 復元モーメント : R_e

$$\begin{aligned} R_e &= W_1 \cdot L_G \\ &= 61250 \times 410 \\ &= 2.512 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

W_1 : 総重量 = 61250N

L_G : 重心から固定点までの距離 = 410mm

①②③より

$M_e < R_e$ なので保管容器は転倒しない。

3.2 保管容器吊り具の強度計算

図-3に示す溶接部及びフック部について強度計算を行うとする。

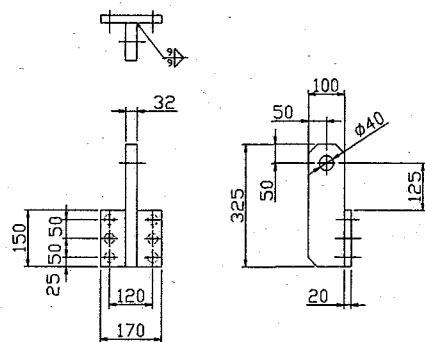


図-3 計算モデル

(1)1箇所当りに作用する荷重

①吊り具1箇所当りの垂直方向に作用するせん断荷重: W2

$$W2 = W1(\text{総質量}) \times 1.1(\text{安全係数}) // 4 \text{ (箇所)}$$

$$= 61250 \times 1.1 / 4 = 67375 / 4 = 16843.75N$$

$$= 16900N$$

②吊り具1箇所当りに作用する引張り荷重: F1

使用ワイヤーのつり角度(62°)より

$$F1 = W2 / \sin 62 = 19140.5N = 19150N$$

③吊り具1箇所当りに作用する水平方向に作用する曲げ荷重: F2

$$F2 = W2 / \tan 62 = 8985.9N = 8990N$$

(2)吊り具フック部の強度

①作用する最大荷重である引張り荷重: F1

$$F1 = 19150N$$

②フック部の断面積: A1

$$A1 = 2 \times H1 \times t(\text{板厚}) = 2 \times 50 \times 32 = 3200mm^2$$

③フック部に係るせん断応力: τa

$$19150 / 32 = 5.99N/mm^2$$

以上①②③より

$$\tau a = 5.99N/mm^2 < f_s (\text{短期許容せん断応力}) = 135N/mm^2$$

④結果

上記結果より発生せん断応力は、許容値以下なので安全である。

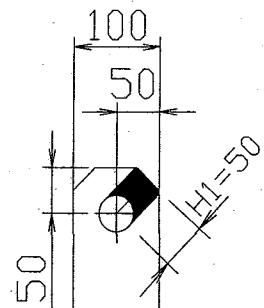


図-4 計算モデル

(3) 吊り具溶接部の強度

吊り具溶接部は、溶接脚長を 8mm 以上として計算を行う。

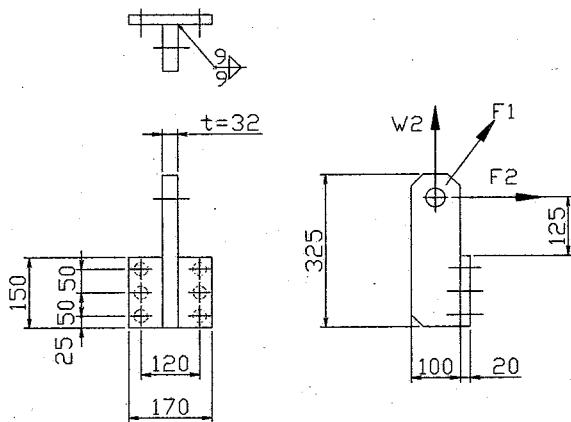


図-5 計算モデル

1) 引張り荷重 (F1) による発生応力 : σ_a

$$\sigma_a = \frac{0.707 \cdot F1}{\ell \cdot h} = \frac{0.707 \times 19150}{150 \times 8} = 11.29 N/mm^2$$

2) 水平方向による曲げ荷重 (F2) による発生応力 : σ_b

$$\sigma_b = \frac{4.24 \cdot F2 \cdot L1}{\ell^2 \cdot h} = \frac{4.24 \times 8990 \times 125}{120^2 \times 8} = 26.47 N/mm^2$$

3) 水平方向による曲げ荷重 (F2) による発生応力 : τ_b

$$\tau_b = \frac{0.707 \cdot W2}{\ell \cdot h} = \frac{0.707 \times 16900}{150 \times 8} = 9.96 N/mm^2$$

4) 合成応力 : σ_c

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + 3 \cdot \tau_b^2} = \sqrt{11.29^2 + 26.47^2 + 3 \times 9.96^2} \\ &= 33.56 N/mm^2 \end{aligned}$$

以上①②③より

$$\tau_b = 33.56 N/mm^2 < f_a (\text{短期許容溶接部せん断応力}) = 60 N/mm^2$$

④結果

上記結果より発生せん断応力は、許容値以下なので安全である。

(4) 固定ボルトの強度

①ボルトに係る最大引張り力 : F_a

ボルト 1 本当りに作用する力は以下の式にて求められる。

$$F_2 \cdot La = n(F_a \cdot \ell a + F_b \cdot \ell b + F_c \cdot \ell c)$$

$$\frac{F_c}{F_b} = \frac{\ell c}{\ell b} \quad , \quad \frac{F_c}{F_a} = \frac{\ell c}{\ell a}$$

各ボルトに係る引張り力は、原点よりの距離に比例することから最大値 F_c は

$$F_c = \frac{F_2 \cdot La}{n \left(\ell c + \frac{\ell b^2}{\ell c} + \frac{\ell a^2}{\ell c} \right)}$$

$$= \frac{8990 \cdot 125}{2 \left(125 + \frac{75^2}{125} + \frac{25^2}{125} \right)} = 3120 N$$

②ボルトに係る引張り応力 : σ_d

$$\sigma_d = \frac{F_c}{A_2} = \frac{3120}{148.6} = 20.86 N / mm^2$$

③1 本当りのボルトに係るせん断力

$$W2/6 本 = 16900 N / 6 本 = 2816.7 N$$

④ボルトに係るせん断応力 : τ_c

$$\tau_c = \frac{F_3}{A_2} = \frac{2816.7}{148.6} = 18.83 N / mm^2$$

⑤合成応力 : σ_e

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_d^2 + 3 \cdot \tau_c^2} = \sqrt{20.86^2 + 3 \times 18.83^2}$$

$$= 38.72 N / mm^2$$

以上①②③より

$$\sigma_s = 38.72 N / mm^2 < f_t \text{ (短期許容引張り応力)} = 235 N / mm^2$$

故に充分安全である。

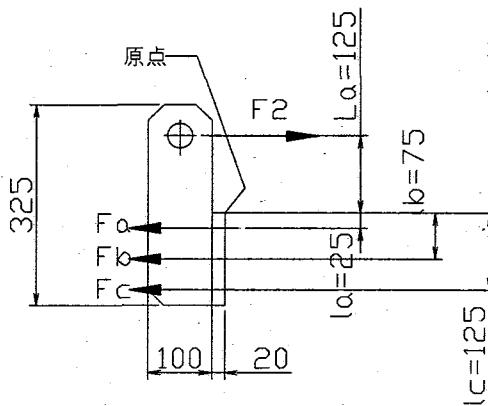


図-6 計算モデル

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
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表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	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シemens	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	$ed \cdot sr^{(c)}$
光度	ラメル	lm	$1m \cdot m^2$
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ	ベクレル	Bq	$1m \cdot m^4 \cdot cd = cd$
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	グレイ	Gy	J/kg
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			J/kg
			$m^2 \cdot s^{-2}$

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

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

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

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

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
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	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	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	ジュール毎モル毎ケルビン	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	Gy	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アトト	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	°	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. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	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
ヘルツ	Hz	1 Hz=1 s ⁻¹
バル	bar	1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オンスストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
パン	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
ダイナ	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
ホット	ph	1 ph=10 ¹ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントグ	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	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fermi	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 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
力	cal	1 cal = 1J = 10 ⁻³ kg · m ² = 10 ⁻⁶ m
ミクロ	μ	1 μ = 1pm = 10 ⁻⁶ m