

JAERI-Tech  
2000-068



JP0150005



中性子散乱施設使用済ターゲット取扱・  
保管設備の概念検討

2000年11月

安達 潤一\*・神永 雅紀・佐々木 忍・日野 竜太郎

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

中性子散乱施設使用済ターゲット取扱・保管設備の概念検討

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター

安達 潤一\*・神永 雅紀・佐々木 忍・日野 竜太郎

(2000年9月13日受理)

日本原子力研究所は、高エネルギー加速器研究機構と共同で大強度陽子加速器計画を進めており、同計画の中核施設である MW 規模の中性子散乱施設の設計を実施している。中性子散乱施設の使用済のターゲット容器（使用済ターゲット）は、加速器からの陽子ビーム照射による水銀ターゲットの核破碎反応によって高レベルに放射化するため、被曝防止の観点から遠隔操作機器により交換する必要がある。また、使用済ターゲットの保管等に際しては、使用済ターゲットは崩壊熱を有するとともに内部に蒸発による外部汚染の可能性を有する水銀が残留していることを配慮する必要がある。

本報告書は、このような使用済ターゲット等の取扱・保管設備について、その設計方針・基準の策定を行うとともに設備の概念設計の結果をまとめたものである。放射線被曝防止、水銀汚染拡大防止、崩壊熱除去を配慮して設備の基本配置計画を立案するとともに取扱・保管フローダイヤグラムを作成した。また、主要機器である使用済ターゲットキャスク、ターゲット交換台車の基本構造についての概念設計を行い、取扱いが容易で信頼性等の高いキャスク等を提案した。さらに、設備の安全性確保の観点から放射線監視設備の基本仕様を定めた。

Conceptual Design of the Handling and Storage System of the Spent Target Vessel  
for a MW-Class Neutron Scattering Facility

Junichi ADACHI\*, Masanori KAMINAGA, Shinobu SASAKI and Ryutaro HINO

Center for Neutron Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 13, 2000)

The Japan Atomic Energy Research Institute is promoting the High-Intensity Proton Accelerator Project in cooperation with the High Energy Accelerator Research Organization, and is designing a MW-class neutron scattering facility, which is the main facility in the project. In designing of the neutron scattering facility, a spent mercury target vessel should be replaced with remote handling devices in order to protect radioactive exposure, since it would be highly activated through the spallation reaction between mercury of the target material and the proton beam induced from the accelerator. In the storage of the spent target, it is necessary to consider decay heat of the target vessel and mercury contamination caused by vaporization of the residual mercury in the vessel.

This report presents the results of conceptual design study on the handling and storage system of the spent target vessel, which includes a proposed design bases and criteria. A plot plan of the system as well as a block flow diagram of handling and storage procedures are drawn up, which are aimed to protect radioactive exposure, to decrease mercury contamination and to remove the decay heat effectively. Conceptual structures of main components such as a spent target cask and a target exchange trolley are designed from viewpoints of assuring of high reliability and high operability. The conceptual design of a radiation monitoring system has been also carried out to clarify its specification with a view to maintaining the system safety.

**Keywords:** Neutron Scattering Facility, Spent Mercury Target, Conceptual Design, Handling and Storage System, Plot Plan, Block Flow Diagram, Spent Target Cask, Target Exchange Trolley, Radiation Monitoring System, System Safety

---

\* On leave from Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.基本計画 .....	2
2.1 中性子散乱施設ターゲットステーションの概要 .....	2
2.2 取扱対象主要機器 .....	3
2.3 取扱の頻度および量 .....	4
2.4 設計基本方針 .....	4
2.5 使用済ターゲット等の保管方法および保管容量 .....	5
2.6 使用済ターゲット等の取扱・移送経路および手順 .....	6
2.7 使用済ターゲット等の取扱・保管に関する機器・設備内配置計画 .....	6
3.使用済ターゲットの取扱手順 .....	8
3.1 使用済ターゲットの取扱・保管フローダイヤグラム .....	8
3.2 ターゲットの取外・移送概念 .....	8
4.使用済ターゲットキャスクの概念設計 .....	10
4.1 概要 .....	10
4.2 使用済ターゲットキャスクの構造 .....	10
4.3 崩壊熱の除去 .....	11
4.4 キャスク支持脚開閉リンク機構 .....	13
5.ターゲット交換台車の概念設計 .....	17
5.1 概要 .....	17
5.2 ターゲット収納機構 .....	17
5.3 他設備との取合い .....	18
6.放射線モニタリング .....	20
6.1 放射線モニタリングの要求条件 .....	20
6.2 モニタリング機器の主要仕様の検討 .....	20
7.安全対策検討 .....	22
7.1 安全設計方針の検討 .....	22
7.2 安全対策の検討 .....	23
8.おわりに .....	24
謝辞 .....	24
参考文献 .....	24
付録1 キャスク表面での室内空気による自然対流熱伝達率 .....	83
付録2 研究成果（特許出願） .....	85

## Contents

1 . Introduction .....	1
2 . Basic Concepts .....	2
2.1 Outline of Target Station in Neutron Scattering Facility .....	2
2.2 Main Spent Components .....	3
2.3 Frequency and Amounts of Spent Components .....	4
2.4 Design Bases .....	4
2.5 Storage Process and Capacity of Spent Components .....	5
2.6 Handling and Transfer Root of Spent Components .....	6
2.7 System Arrangement .....	6
3 . Handling Procedures of Spent Components .....	8
3.1 Block Flow Diagram of Handling and Storage Procedures .....	8
3.2 Concept of Removal Procedure of Spent Target .....	8
4 . Conceptual Design of Spent Target Cask .....	10
4.1 Outline .....	10
4.2 Structure of Spent Target Cask .....	10
4.3 Decay Heat Removal of Spent Target .....	11
4.4 Support Leg for Cask .....	13
5 . Conceptual Design of Target Exchange Trolley .....	17
5.1 Outline .....	17
5.2 Target Insertion Mechanism .....	17
5.3 Consistency with other Equipments .....	18
6 . Radiation Monitoring .....	20
6.1 Requirements for Radiation Monitoring .....	20
6.2 Specifications of Monitoring Equipments .....	20
7 . Safety .....	22
7.1 Requirements for Safety .....	22
7.2 Design Conditions .....	23
8 . Concluding Remarks .....	24
Acknowledgement .....	24
References .....	24
Appendix 1 Natural Convection Heat Transfer Coefficients on Cask Surface .....	83
Appendix 2 Study Results (Patents) .....	85

## 1. はじめに

日本原子力研究所（原研）は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同で大強度陽子加速器計画を進めている。同計画の中核施設である中性子散乱施設は、陽子加速器からの陽子ビーム（MW 規模）を重金属（水銀）製のターゲットに入射して核破碎反応により大強度中性子を発生させ、生命科学等の先端科学分野における各種試験を行うことを目的とした放射線取扱施設である<sup>(1)</sup>。本施設においては、ターゲット材である水銀を格納しているターゲット容器、減速材容器および陽子ビーム窓は、陽子ビームのみならず大強度中性子の照射を受け、同時に、それらの核反応等に伴い大量の熱が発生する。このため、上記のターゲット容器等は過酷な核・熱負荷による材料の劣化等により数ヶ月間の運転後に交換が必要となる。このとき、交換対象となる使用済のターゲット容器、減速材容器や陽子ビーム窓は高レベルに放射化されているため、その取扱いはマニピュレータ等を用いて遠隔で行う必要があり、またマニピュレータ等の遠隔操作機器は耐放射線性と高信頼性が要求される。特に、使用済ターゲットは残留放射能による崩壊熱が高く、その取扱・保管時には冷却を考慮する必要があるとともに、内部に飛散し易い水銀が一部付着・残留しているため、飛散防止等の対策が必要である。

米国およびヨーロッパにおいても MW 規模の陽子ビームを用いた中性子散乱施設の設計等が進められている<sup>(2) (3)</sup>。これらの設計では、使用済ターゲット等の取扱いの重要性は指摘されているものの、取扱いシナリオ、必要機器等については明確ではない。原研では、中性子散乱施設の設計検討を開始した当初より、使用済ターゲット等の取扱・保管方法が中性子散乱施設の配置計画および運転管理に大きな影響を与えるものとして、設計条件、交換等のシナリオを含む基本計画を検討し、それを基に、主要機器である使用済ターゲットキャスク、ターゲット交換台車等について高放射線場において信頼性が高く、かつ遠隔操作による取扱いが容易なように構造設計を含む概念設計を進めてきた。本報は、基本設計を含む概念設計検討結果のこれまでの成果をまとめたもので、併せて、作業員の被曝低減等の観点から取扱・保管設備に関する放射線監視計画と安全対策について検討した結果を報告する。

## 2. 基本計画

### 2.1 中性子散乱施設ターゲットステーションの概要

#### (1) 中性子散乱施設ターゲットステーション

中性子散乱施設は、陽子加速器からの陽子ビーム（MW 規模）を水銀ターゲットに入射して核破碎反応により大強度中性子を発生させ、生命科学等の先端科学分野における各種試験を行うことを目的とした放射線取扱施設である。中性子散乱施設は、Fig.2.1 に示すように、建家寸法が幅 70m、全長 120m、最大高さ 28m であり、一部をミュオン実験施設と共にしている。中性子散乱施設の中核部であるターゲットステーションを Fig.2.2 に示す。生体遮蔽体に囲まれたターゲットは本施設の中核となる機器であり、ターゲットトローリーの先端に設置され、ターゲット材である水銀がターゲット容器内を循環する。ターゲットに水平方向から入射した陽子ビームは水銀との間で核破碎反応を起こし大強度の中性子が発生する。ターゲットで発生した大強度中性子は、そのエネルギーレベルをターゲット上下に配置した減速材により熱外中性子、熱中性子、冷中性子の各エネルギーレベルに分けられ、中性子ビームシャッターを介してターゲットの周囲に放射状に設置した中性子ビームラインを通して 30 台以上の中性子スペクトロメータに導かれる<sup>(1)</sup>。ターゲット前方には、超高真空の陽子ビームラインと微圧のヘリウム雰囲気であるターゲットシステムの境界壁となる陽子ビーム窓を設けている。

交換対象となる使用済のターゲット容器（以後、使用済ターゲットと呼ぶ。）、減速材容器や陽子ビーム窓は高レベルに放射化されているため、マニピュレータ等を用いて遠隔で交換する。また、減速材容器については、反射体と一緒に取扱えるように、生体遮蔽を組み込んだ交換プラグを用いる。これらの交換された使用済ターゲット、減速材容器等は、ターゲットステーション地下に設けられた使用済ターゲット等保管室で長期保管する。

#### (2) 準拠すべき法令等

中性子散乱施設ではターゲットでの核破碎反応により種々の核種が発生するが、核暴走につながる連鎖反応は起こらず、また、発生する核種はターゲット材料である水銀（原子量 196～204）よりも原子量が小さい核種のみであり、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉等の規制に関する法律」（炉規法）の対象となるウラン（U-235,238）、トリウム（Th-232）、プルトニウム（Pu-236～244）等の核燃料物質及び核原料物質は発生しない。このため、中性子散乱施設には炉規法は適用されないが、発生した核種は放射性同位元素を多数含んでいることから、本施設の設計では「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」（障防法）が適用される。障防法は放射化したターゲット容器のみならず、放射化した減速材容器、陽子ビーム窓等にも適用される。

また、ターゲットである水銀は「毒物及び劇物取締法」において規制対象となっており、「労働安全衛生法」で取扱いが、「公害対策基本法」「水質汚濁防止法」で環境への放出が制限されている。したがって、水銀が一部付着した状態の使用済ターゲットについては密封条件で取扱い、万が一漏えいした時にも回収できるとともに、漏えいした水銀の閉じこめ対策が必要である。さら

に、「公害対策基本法」「水質汚濁防止法」で環境への放出が制限されているため、水銀蒸気が室内に放出された場合には換気空調系から直接外気に放出されないような対策が必要となる。

## 2.2 取扱対象主要機器

使用済ターゲット等保管室に移送して長期保管する主要機器は以下の通りである。

### (1) ターゲット容器 (Fig.2.3 参照)

ターゲット容器は、内部に直接循環させたターゲット材である重金属の水銀に陽子ビームを照射して核破碎反応によって大強度中性子を発生させるものである。使用済ターゲットの交換、移送等の取扱・保管は、ターゲット材である水銀をターゲット容器内からドレンした後に行うものとする。ただし、水銀を完全にドレンするのは困難なため、ターゲット容器内には水銀が一部付着残留する。このため、ターゲット容器は、容器自身が高レベルに放射化しているほか、容器内に付着残留した水銀と水銀中に含まれる各種の核破碎生成物によりさらに高レベルに放射化されている。ターゲット容器は、配管のコネクタ部で分離し接続配管と一緒に取扱い、保管を行うものとし、その取扱対象の概略の寸法・重量は以下の通りである。

寸法： 約 1,600mm(W) x 2,900mm(L) x 740mm(H) (接続配管を含む。)

重量： 約 1200kg (水銀ドレン後)

### (2) 減速材容器 (プリモデレータ付き) (Fig.2.4 参照)

減速材容器は、内部を極低温の超臨界水素または常温の軽水を循環させてターゲットで発生した中性子を冷中性子、熱中性子または熱外中性子に減速するものである。減速材容器は反射体から分離できる構造となっており、水素および軽水をドレンした後、使用済減速材容器は上部に長く伸びた配管が付いたまま反射体から取り外して保管するものとする。使用済減速材容器は高レベルに放射化しているほか、軽水の核分裂生成物（トリチウム等）が容器内に付着・残存している可能性がある。保管対象の概略の寸法・重量は以下の通りである。

寸法： 約 300mm(W) x 400mm(L) x 6,000mm(H) (配管付)

重量： 約 51kg

### (3) 陽子ビーム窓 (Fig.2.5 参照)

陽子ビーム窓はターゲット前方に配置され、超高真空の陽子ビームラインと微圧のヘリウム雰囲気であるターゲットシステムの境界壁を形成するものであり、陽子ビーム照射による発熱を重水を流動させて冷却する。陽子ビーム窓は、冷却材である重水をドレンした後、上部に長く伸びた冷却配管と一緒に取り外して移送、保管するものとする。陽子ビーム窓は高レベルに放射化しているほか、重水の核分裂生成物（トリチウム等）が容器内に付着・残存している可能性がある。保管対象の概略の寸法・重量は以下の通りである。

寸法： 約 320mm(W) x 50mm(L) x 6,000mm(H) (配管付)

重量： 約 100kg

#### (4) 反射体 (Fig2.4 参照)

反射体は、ターゲット容器、減速材容器を取り囲むように配置し、発生した中性子を反射させるものであり、中性子照射による発熱を重水で冷却する。減速材容器は反射体交換プラグと分離できる構造となっており、その保管は重水をドレンした後に上部に長く伸びた配管を付けた状態で反射体交換プラグから取外して行うものとする。保管対象の概略の寸法・重量は以下の通りである。

寸法 : 1,200mm(W) x 800mm(L) x 6,000mm(H) (配管付)  
 重量 : 約 1,200kg

### 2.3 取扱の頻度および量

上述した取扱対象主要機器である使用済ターゲット等の取扱の頻度および交換量は、材料の照射損傷（特にはじき出し損傷）等から以下の通りとした。ただし、取扱頻度と量は現時点では暫定値であり、今後の機器設計の詳細化に伴い、変更していく予定である。

	取扱頻度、	取扱量
①ターゲット容器 :	3 回/年、	1 基/回
②減速材容器 :	1 回/年、	3 基/回 (超臨界水素減速材 2 基、軽水 1 基)
③陽子ビーム窓 :	1 基/年、	1 基/回
④反射体 :	1 回/10 年、	~3 体/回

### 2.4 設計基本方針

上記機器の取扱・保管に関する設計上の基本方針は以下の通りとした。

- (1) 使用済ターゲットは、ターゲット材である水銀をドレンした状態で取扱い、保管する。その際、ターゲット容器の崩壊熱が小さいため、特に強制冷却を行わなくても気中において自然対流冷却により低温に維持可能である。しかし、蒸発・飛散し易い水銀が内部に残留付着しているため、交換後の移送・保管に際しては密封容器（キャスク）に収納して取り扱うものとする。同様に、減速材容器、陽子ビーム窓および反射体についてもトリチウム等の放射性物質が残存している可能性があるため、それらで使用する水素、軽水および重水をドレンした後、密封容器（キャスク）に収納して取り扱うものとする。
- (2) 上記のキャスクは取扱重量を低減するため、遮蔽機能を有しない構造とする。また、移送等の取扱作業は、被曝を防止するためにパワーマニピュレータ等を使用した遠隔操作により行うものとする。
- (3) 通常の保管状態においては保管室内への作業員の立ち入りを可能とし、遠隔操作機器等の保守は作業員による直接作業により行うものとする。したがって、保管設備（保管ラック）上に

は必要な遮蔽を設けるものとする。

- (4) 移送途中等において、使用済ターゲット等が保管設備に収納されていない状態下で保管室内の設備故障等が発生した場合は必要な対応が取れることとする。

## 2.5 使用済ターゲット等の保管方法および保管容量

### 2.5.1 保管方法

使用済ターゲット等の機器の保管方法は、保管容量の関係から、中性子散乱施設内で崩壊熱が1桁以上低下して取扱・処理等が容易となるまで所定の期間保管する減衰待ち保管と使用済ターゲット等保管施設で長期保管を目的とした減衰後保管とに分けて行う。

#### (1) 減衰待ち保管

##### ① 使用済ターゲット

使用済ターゲットは、有毒かつ各種の核破碎による放射性物質を含有するため、専用のキャスクに密封収納して保管する。このとき、設備の簡素化等の観点から気中保管（大気中で保管）とし、空気による自然対流冷却を行う。

##### ② 減速材容器、陽子ビーム窓

減速材容器は、反射体メンテナンス室で反射体プラグから配管と一緒に取り外し（モジュール交換）、配管と一緒に保管する。このとき、減速材容器は、崩壊熱がターゲットよりもさらに小さいため、保管設備の簡素化等の観点から気中保管する。保管に当たっては、保管ラックに設けた専用の管状キャスク内に収納・保管し、管外面を空気の自然対流冷却により間接的に冷却する。本方法と同様な方式の保管設備としては、HTTR 使用済燃料貯蔵建家内貯蔵設備がある。

陽子ビーム窓についても減速材容器と同様に、配管と一緒に専用の管状キャスクに収納して気中保管する。

##### ③ 反射体

反射体については、減速材容器と同様、反射体メンテナンス室で反射体プラグから配管と一緒に取り外し（モジュール交換）、配管と一緒に専用の管状キャスクに収納して保管することとする。

##### ④ 雜固体放射化物等

使用済ターゲット等の交換等に伴い発生する雑固体放射化物等については、容器またはドラム缶等に収納して気中保管するものとする。

対象としては、ターゲット等の取付けボルトおよびシール材、冷却設備の水処理フィルタ等がある。また、使用済ターゲットを照射後試験するために試験片を切り出すことも計画しており、残材は所定の容器に収納して放射化物として保管する。

なお、中性子散乱施設では固体放射化物処理施設を持たないので、これらの放射化物の保管は

一時保管であり、搬出基準等を考慮して適当な時期に後述する放射化物保管施設や原研内の関連処理施設（例えば、高減容処理施設）に移送して長期保管または処理を行う。

## (2) 減衰後保管

所定の期間、減衰待ち保管した後の使用済ターゲット、減速材容器等は、建設を計画している放射化物保管施設内に移送して気中保管する。なお、放射化物保管施設については、陽子ビームラインの使用済電磁石などの保管を含めて検討に着手する予定である。

また、雑固体放射化物等については高減容処理施設に移送して減容処理する。このとき、一部返還されたものについては同様に放射化物保管施設内で気中保管する。

### 2.5.2 保管容量

上記の減衰待ち保管の対象となる使用済ターゲット等については、減衰等を考慮して暫定的に8年相当分の保管容量を有するものとした。保管容量は以下の通りである。

- ①使用済水銀ターゲット : 24 基 (3 基/年 × 8 年)
- ②使用済減速材容器 : 24 基 (3 基/年 × 8 年)
- ③使用済陽子ビーム窓 : 8 基 (1 基/年 × 8 年)
- ④使用済反射体 : ~ 3 体

## 2.6 使用済ターゲット等の取扱・移送経路および手順

使用済ターゲット、減速材容器等の保管室への移送経路を Fig.2.6 に示す。これらの機器は、交換後、中性子散乱施設の地下に設けたターゲット等設備保管室に移送して保管する。使用済ターゲット、減速材容器については、照射後試験を行うため、所定の期間保管した後、所内の照射後試験施設へ搬出する。また、ターゲットの交換等に伴い発生するシール等の比較的放射化レベルの高い雑固体放射化物も所定の容器に収納して同一の保管室に移送して一定期間保管する。

ターゲットおよび減速材容器を取り外し、保管室に移送するまでの取扱い手順を Fig.2.7 および 2.8 に示す。使用済ターゲットは、ターゲット台車に搭載された状態でヘリウムベッセル内からターゲット台車取扱室に引き出し、ターゲット台車取扱室においてターゲット台車先端から取り外して使用済ターゲットキャスクに収納する。この後、床ハッチを経由して地下の保管室に移送し、キャスクに収納した状態で保管ラック内に収納・保管する。

反射体交換プラグに反射体と一体に固定された使用済の減速材容器は、交換プラグごと反射体取扱室の天井クレーンでヘリウムベッセルから上方に引き上げ、反射体メンテナンス室に移送する。減速材容器は、反射体メンテナンス室において配管と一体で反射体交換プラグから取り外し、地下の減速材容器保管ラック内へ吊り下ろして仮置きした後、所定の保管用キャスクに収納・保管する。

## 2.7 使用済ターゲット等の取扱・保管に関する機器・設備配置計画

使用済ターゲット等の取扱・保管に関する機器・設備の配置計画を Fig.2.9 および 2.10 に示す。1 階にターゲット台車取扱室、ターゲット台車メンテナンス室、反射体メンテナンス室を配置し、使用済ターゲット保管設備、減速材容器保管設備等は地下の保管室内に配置する。使用済ターゲットの取外し等の遠隔ハンドリング作業は、ターゲット台車取扱室等に設けたマスタースレーブマニピュレータおよびパワーマニピュレータ等を使用して行う。

### 3. 使用済ターゲットの取扱手順

本章では、取扱いが特に難しい使用済ターゲットについてその取扱・保管方法を述べる。

#### 3.1 使用済ターゲットの取扱・保管フローダイヤグラム

使用済ターゲットの取外しから保管、新ターゲットの取付・再設置までの取扱・保管フローダイヤグラムを Fig.3.1 に示す。

本フローの設定に当たっての基本的考えは以下の通りである。

- ① 他の部屋との雰囲気の境界を構成するハッチや遮蔽扉は、不測の事態における放射性物質の拡散防止のため、取扱対象物の通過時以外は原則として閉鎖しておくものとした。このため、作業の効率化の観点から、ハッチ等の開閉の回数を極力少なくするような取扱手順とした。
- ② ターゲットはそれ自体で床置き時等の自立が困難であることを考慮し、また、取扱いの容易化、全体設備の合理化等を図るために、新ターゲットも使用済ターゲットキャスクに収納して取り扱うものとした。このため、新ターゲットを取り付け後、空となったキャスクは、①とも関連して、上流側への汚染拡大防止や使用後の汚染検査、保管等の観点から地下の保管室へ移送して保管するものとした。そして、次回の使用済ターゲットの交換時には、前回の新ターゲット取り付け時に使用して保管しているキャスクを地下から吊り上げ、使用済ターゲットの収納に使用することとした。

#### 3.2 ターゲットの取外・移送概念

使用済ターゲットをターゲット台車から取外し、使用済ターゲット等保管室への移送および保管設備への収納・保管するまでの手順（概念）を Fig.3.2 に示す。使用済ターゲットの取外しからキャスクへの収納を効率的かつ短時間で行うため、交換台車上に水平に搭載したキャスクをターゲット台車前方から進行させることにより使用済ターゲットをキャスク内にそのまま収納することとした。これにより、使用済ターゲットを遠隔操作で吊り上げ、キャスク内に収納する作業が不要となり、作業の効率化に加えて設備の簡略化も達成できる。

作業は、先ずターゲットをキャスク内に収納し、ケーシング内の水銀、冷却水をドレンした後、配管コネクタを解除しジャンパー管を撤去する (Fig.3.2(1)～(3))。次に、ターゲット台車から支持しているボルトを解除し、使用済ターゲットをターゲット台車から引き離し、キャスクの蓋を閉める (Fig.3.2(4))。なお、キャスクの蓋は、蓋の遠隔による取扱いの容易さ等を考慮してキャスク本体と一体の水平開閉のヒンジ構造とした。キャスク構造の詳細については後述する。

仮置きスペースの極小化、床ポート開口部面積の低減化、保管設備エリアの低減化等による設備の合理化、安全性等の観点から、キャスクは縦に起こした状態で取扱い、保管するものとする。このため、使用済ターゲットを収納した後、キャスクを引き起こし、床ポートを経由して使用済ターゲット等保管室へ移送し、保管室内床に仮置きする (Fig.3.2(5)～(7))。その後、キャスクを

吊り上げ、保管設備（ピット）内に収納し、保管する（Fig.3.2(8)）。

## 4. 使用済ターゲットキャスクの概念設計

### 4.1 概要

中性子散乱施設では、水銀をターゲット材として使用し、供用後は、ターゲット材である水銀を容器内からドレンしてターゲット容器を取り扱い、保管する。このとき、ターゲット容器の崩壊熱は小さく、空気による自然対流冷却により崩壊熱の冷却が可能である。一方、水銀ターゲットの場合、容器内には蒸発・飛散し易い有毒な水銀が内部に付着しているほか、核破碎により発生した放射性物質（核破碎生成物）が残留付着していると考えられる。このため、2章および3章で述べたように放射能等の拡散防止の観点からターゲットはキャスクに気密収納して取扱・保管を行うこととした。この措置により、取扱・保管時にターゲット容器は直接外気に接触しなくなるため、冷却性能が低下する可能性がある。そこで、冷却性能を確保しつつ、遠隔操作による取扱・保管が容易でかつ設備の簡素化を目的とした使用済ターゲットキャスクの設計検討を行った。

なお、本検討結果に基づき、使用済ターゲットキャスクに関する特許出願を行い、その一部については既に特許（登録）されている（出願した発明の名称等については付録2に示す）。

### 4.2 使用済ターゲットキャスクの構造

使用済ターゲットキャスクの構造をFig.4.1（保管状態）およびFig.4.2（床仮置き状態）に示す。キャスクは、ターゲットの冷却性能を確保するため、特に崩壊熱の大きいターゲット容器先端部を収納する部分（以後、ターゲット収納部と呼ぶ。Fig.4.3中のA部）についてはその内面とターゲット容器外面のギャップが極小となるようにし、また、内部の伝熱性能向上のため、キャスク付属の蓋（キャスク蓋）を閉めた後に熱伝導率の高いヘリウムガスをキャスク内部に密封充填する。このとき、キャスクは自立できないので、キャスクの周囲に支持架台を設け、自立できるようにして取扱いの容易化を図った。

ただし、ターゲットは細長く、ターゲット台車側が重いので、Fig.4.2に示すようにキャスクを縦置にすると上部に重心が位置して安定が悪い。そこで、床置き時に支持架台の支持脚が広がる構造として安定化を図ることとした。支持脚の開閉機構の構造をFig.4.4に、支持脚の開脚メカニズムをFig.4.5に示す。支持脚はキャスク両側にそれぞれ1組設け、キャスクを床に下ろしていくと先ず各支持脚開閉リンク機構の中央の開閉用ロッドが床に接触する。さらにキャスクを下げていくと、ロッドが上に押し上げられるに従い両側の支持脚が開いていく、所定の角度まで開くとロッド先端と両支持脚の3点が接触するようになる。開脚の角度を制限するためのストッパの位置をこの位置に設定することも可能であるが、床の平面度や脚の製作精度等を考慮すると、3点接触の場合（両側では6点接触）には浮く点が生じる場合があり、その場合はがたを生じる可能性がある。がたつきを極力なくして安定化を図るために、中央の開閉用ロッドが床から浮くまで両支持脚がさらに広がる位置にストッパを設けることとした。また、支持脚には閉じる方向に作用するバネを設けておき、吊り上げた状態では自動的に脚が閉じられるようにした。なお、

キャスクを立てた状態では、バネがなくても脚の自重によって閉脚することも可能である。しかし、このバネにより、キャスクをターゲット交換台車に搭載する場合のように横置きする状態でも脚が開くことがない。このバネの発生力は支持脚の自重を吊り上げる程度の小さなもので十分である。このように、メンテナンスフリーでかつ信頼性を向上させる観点から、本機構ではモーター等の能動的なアクチュエータを使用しないため、キャスクは高レベルに放射化したターゲットを長期間収納・保管することが可能である。

一方、保管ピット内で長期間安定に保管するため、支持脚による床置きとはせず、Fig.4.1に示すように、保管ピット側壁から張り出した支持台に支持架台を搭載支持することとしている。

キャスクの蓋にはグリッパ挿入孔を設け、クレーン先端に設けた開閉可能なグリッパを内側より挿入把持することにより、遠隔により容易にキャスク（蓋）の把持、引き起こし、吊り上げを可能としている。また、移送ポートの開口面積、保管面積を極小化するためキャスクを極力スリム化すべく、キャスク蓋固定アームを設け、蓋の固定は蓋上部で行うこととしている。この場合、キャスク蓋のシールの信頼性を確保しつつ蓋構造を簡素化するため、キャスク吊り上げ時の荷重がシール部に作用しないように支持フレームを蓋本体と構造機能的に分離して吊り上げ荷重に対して支持フレームが蓋と独立に自由に変形できるようにしている。

#### 4.3 崩壊熱の除去

キャスク構造の簡素化を図るため、キャスクには特別な強制冷却装置を設けず、キャスク表面からの空気による自然対流冷却によりターゲット容器の崩壊熱の除去を図るものとする。そのため、前述したように、ターゲット容器をキャスク内に収納して蓋で密封した後、キャスク内にはヘリウムガスを充填するとともに、特に崩壊熱の大きいターゲット容器先端部を収納するターゲット収納部についてはキャスクとのギャップを極小化してキャスクへの伝熱性能の低下を防ぐ。また、保管ピットでは、上下部に保管室との間に空気の流路を形成して円滑な自然対流の実現を図る。このため、キャスク表面からの自然対流による冷却性能は、キャスク表面の形状に依存することになる。特に高い冷却性能が必要なターゲット収納部については、平滑な外表面構造は加工を施さない分簡素で安価になるが、キャスク表面からの熱伝達率の向上は望めない。一方、キャスク外表面に伝熱促進用のフィンを設けると、構造は複雑化するが、キャスク表面からの熱伝達が向上して冷却性能が高くなる。

このようなターゲット収納部の表面構造の相違（平滑またはフィン付き）による冷却性能について評価した。

##### (1) ターゲット収納部表面が平滑の場合

先ず、ターゲット収納部表面が平滑な場合のキャスク温度を評価した。評価に当たっては、キャスク温度を保守的に評価するため、ターゲット収納部の幅の広い両面のみからの定常一次元熱伝達計算（Fig.4.2 紙面の水平方向）によりキャスク表面温度を推定することとした。崩壊熱については、現在、詳細な評価を行っており、高くても数百Wと考えられるため、ここでは従来の評価結果を基に広範囲な熱量（200W、400W、600W、800W）についてケーススタディーをした。

ターゲット収納部の表面積 S は、保守的にターゲット前面部に相当する範囲として

$$\begin{aligned} S &= 2 \times 0.6\text{m} \times 1.0\text{m} \\ &= 1.2\text{m}^2 \end{aligned}$$

を使用すると、キャスク表面温度 T [°C] は以下の式で求まる。

$$T = T_{\text{air}} + Q / (h \cdot S) \quad (4.1)$$

ここで、 $T_{\text{air}}$ ：周囲空気温度 [°C]

Q：崩壊熱 [W]

h：表面熱伝達率 [W/m²K]

キャスク表面の空気の自然対流による表面熱伝達率 h を  $4\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ （付録 1 参照）とすると、キャスク温度は (4.1) 式より以下の通りとなる。

崩壊熱 [W]	キャスク表面温度* [°C]
200	72
400	113
600	155
800	197

\* 周囲空気温度  $T_{\text{air}}$  :  $30^\circ\text{C}$

以上より、キャスク表面温度は崩壊熱が  $400\text{W}$  以上では  $100^\circ\text{C}$  を超え、取扱いに支障が出る可能性がある。また、このような温度上昇により長期保管時にターゲットに付着残留した水銀の蒸発が促進されることにより水銀蒸気による容器壁の腐蝕に対してキャスクの健全性を維持するためにキャスク肉厚を厚くする措置が必要となり、容器温度はここで示した温度よりもさらに上昇することになる。

## (2) キャスク表面にフィンを設けた場合

上述した結果から、崩壊熱が数百Wと大きな場合には表面が平滑な状態では熱伝達率が低いため、十分な冷却は難しい。そこで、キャスク表面にフィンを設けた場合の冷却性能の向上について検討した。

フィンの形状については、プレート型や突起型など種々のものがある。Fig.4.6 に代表的なフィンの形状を示す。各タイプの特徴は次の通りである<sup>(4)</sup>。タイプ1はプレート型とも呼ばれ、図に示す3タイプ中最も低コストである。風向はフィンプレートに平行な1方向のみであるのに対し、タイプ2では風向がフィン取付面に対して全方向と上方であり、タイプ3では風向はフィン取付面に対して全方向である。また、タイプ3では、フィンを高さ方向に伸ばしても放熱効率の低下が少ない。各タイプの放熱特性を Fig.4.7 に示す<sup>(4)</sup>。これより、低風速域ではタイプ2が最も熱抵抗が低くなるため、自然対流による冷却には最も適していると考えられる。

しかしながら、使用済ターゲットキャスクへのフィンの加工性はタイプ1が最も優れており、また、キャスクの取扱の形態は主として縦置きであるため風向は1方向のみを考えればよいことから、低コストで冷却性能の確保が見込めるタイプ1を採用することとした。フィンの配置は、

縦置き時にフィンプレートが鉛直方向 (Fig.4.2 紙面上下方向) になるように配置する。

フィンの熱抵抗はフィンの包絡体積でほぼ決まり、プレート型の場合の熱抵抗は Fig.4.8 のようになる<sup>(4)</sup>。ターゲット収納部の幅の広い両面に高さ 50mm のフィンを設けた場合、片面での包絡体積 V は、

$$\begin{aligned} V &= 600\text{mm} \times 1,000\text{mm} \times 50\text{mm} \\ &= 3.0 \times 10^7 \text{mm}^3 \end{aligned}$$

となる。このとき、ヒートシンクの熱抵抗 R は、Fig.4.8 より外挿して

$$R = 0.095^\circ\text{C}/\text{W}$$

となる。

したがって、崩壊熱 Q が、200W、400W、600W、800W の場合のキャスク温度 T は、

$$T = T_{\text{air}} + R \cdot Q / 2$$

より、以下のようになる。

崩壊熱 [W]	キャスク表面温度* [°C]
200	40
400	49
600	58
800	68

\* 周囲空気温度  $T_{\text{air}}$  : 30°C

上記の結果から、プレート型フィンをキャスク表面に設けることにより、崩壊熱が 800W と大きな場合でもキャスク表面温度を約 70°C と十分低い温度に維持可能である。また、キャスク内部を熱伝導の良いヘリウムガスを密封充填しておくことでターゲット容器自体の温度も比較的低い温度に維持可能と考えられる。

キャスクの蓋は二重または三重のガスケットでシールすることによりヘリウムガスの長期間安定密封を計画しているが、今後実験による検証等を行い、必要があれば溶接シールの採用も考慮する。

今後、崩壊熱が決定された段階でより詳細な解析を行い、必要があれば実験による検証を行つてフィンプレートの配置等の決定、冷却特性の確認等を行う予定である。

#### 4.4 キャスク支持脚開閉リンク機構

使用済ターゲットキャスク支持脚の開閉リンク機構について、リンク機構の動作の妥当性等について検討した。以下に検討結果について述べる。

##### 4.4.1 リンク機構の動作の検討

###### (1) リンク機構モデル

Fig.4.9 に示す支持脚のリンク機構図より、開閉用ロッドの押し込み量（変位）x とロッド/支

持脚先端間高低差  $y$  との関係は以下のように与えられる。

$$x = (a \cdot \cos \alpha_0 + b \cdot \cos \beta_0) - (a \cdot \cos \alpha + b \cdot \cos \beta) \quad (4.2)$$

$$y = y_0 - x + (b + c)(\cos \beta_0 - \cos \beta) \quad (4.3)$$

$$a \cdot \sin \alpha - b \cdot \sin \beta = d \quad (4.4)$$

ここで、添字 0 は、ロッド、各リンクの初期位置または初期角度を表す。

(4.4)式より、

$$\alpha = \sin^{-1}\{(d + b \cdot \sin \beta)/a\} \quad (4.4)'$$

と与えられ、(4.2)、(4.3)、(4.4)'式より、支持脚の開度  $\beta$  をパラメータとして、 $x$  と  $y$  の関係を求めることができる。なお、ロッド/支持脚先端間高低差は支持脚先端がロッド先端より高い位置にあるとき正の値となり、逆に支持脚先端の方が低い場合に負の値となる。

## (2)支持脚の開度について

キャスクを床に置くときの支持脚の開度 ( $\beta$ ) が大きいほどキャスクの安定度が増すが、床の設置面積が大きくなり、ターゲット台車取扱室内での仮置き配置が制約される。そこで、キャスクを床に置くときの支持脚の開度を重心位置、床の設置面積を考慮して 24 度と設定した。このとき、支持脚の開閉用ストッパーの位置は、前述したようにロッド先端と支持脚ストッパー先端が一直線となる場合の角度より大きな角度になるように設定しておき、キャスクを床に置いた状態では開閉用ロッドは床に接触しないようにしておくこととする。

## (3)開閉用ロッドと支持脚の相対高さの変化

支持脚の最大開度 24 度までの範囲で、開閉用ロッドを押し込む量  $x$  に対する開閉用ロッドと支持脚の相対高さの変化を調べ、リンク機構の動作について検討した。検討では、ロッドの押し込みに対してロッド/支持脚先端間高低差が単調に減少し、最大開度になる前の所定の角度に支持脚が開いたときにロッド先端と脚の先端の位置が一致すること、およびそれ以上の角度において（最大開度までの範囲で）ロッド/支持脚先端間高低差が負となっていること（ロッドの方が支持脚より高くなっていること）を確認することを目的とした。

### (a)ケース 1

各リンク長等を  $a = 900\text{mm}$ 、 $b = 550\text{mm}$ 、 $c = 1200\text{mm}$ 、 $d = 425\text{mm}$ 、 $y_0 = 39\text{mm}$ 、 $\beta_0 = 0^\circ$  と設定し、ロッド押し込み量とロッド/支持脚先端間高低差の関係について評価した結果を Fig.4.10 に示す。図中の  $\Delta y$  は支持脚先端の移動量を表す。図より、支持脚先端の移動量はロッドの押し込みに対して単調に増加するが、その増加量はロッドの押し込み量  $x$  より小さく、その結果、ロッド/支持脚先端間高低差は単調に減少して、ロッドを約 71mm 押し込んだとき、ロッド先端と支持脚先端の高さがほぼ一致する。

ロッド/支持脚先端間高低差と支持脚開度 ( $\beta$ ) との関係を Fig.4.11 に示す。この図より、ロッド先端と支持脚先端の高さがほぼ一致するときの支持脚の開度 ( $\beta$ ) は約  $11^\circ$  である。支持脚がこれ以上の開度になると、ロッド/支持脚先端間高低差は負となり、ロッドは床から離れ、支持脚のみが床と接触するようになる。ロッド/支持脚間高低差はこの最大開度において約 13mm とな

る。なお、最大開度となるまでのキャスク下端位置の差は約 190mm である。

### (b)ケース 2

支持脚開度が最大開度に近い角度（約 20 度）で開閉用ロッド/支持脚先端間高低差が一致するケースについて調べるために、各リンク長等を  $a=900\text{mm}$ 、 $b=600\text{mm}$ 、 $c=1150\text{mm}$ 、 $d=425\text{mm}$ 、 $y_0=80\text{mm}$ 、 $\beta_0=0^\circ$  と設定し、ロッド押し込み量とロッド/支持脚先端間高低差の関係について評価した結果を Fig.4.12 に示す。ロッドの押し込みに対してロッド/支持脚先端間高低差は単調に減少し、ロッドを約 180mm 押し込んだとき、ロッド先端と支持脚先端の高さがほぼ一致する。また、支持脚開度は、Fig.4.13 に示すように、ロッド先端と支持脚先端の高さが一致したとき約 19° であり、それ以上の開度ではロッド/支持脚先端間高低差は負となり単調に減少していることがわかる。なお、最大開度となるまでのキャスク下端位置の差は、約 231mm である。

以上の結果より、最大開度となるまでのキャスク下端位置の差（ストローク）が少なくてすむケース 1 を主案とすることとした。

#### 4.4.2 支持脚開閉機構の検討

本支持脚開脚機構では、Fig.4.5 に示すように、開閉用ロッドが床に接触するとロッドが押し上げられ、それによって両方の支持脚が開いていき、支持脚が所定の角度開くとロッドと支持脚の 3 点が床に接触する。支持脚が床に接触すると、支持脚の回転中心に対して支持脚が開く方向にモーメントが働くため、ピンが床から離れても支持脚の開閉が可能となる。したがって、開閉用ロッドで支持脚を若干開いた後は、床に接触した方の支持脚には開くような回転モーメントが作用するので、キャスクが多少傾いた状態であっても支持脚の開閉が可能である。ただし、支持脚が床に接触してからさらに支持脚が開くためには、支持脚の接觸点が床に対して滑ることが必要である。

そこで、支持脚と床との滑りについて検討した。Fig.4.14 に片側の支持脚に作用する力の釣り合いを示す。支持脚が床に対して滑るためには、支持脚の自重による水平方向作用力  $F$  が、支持脚と床との摩擦力  $R$  より大きいことが必要である。すなわち、

$$F > R$$

ここで、

$$F = (W/2)\tan \beta$$

$$R = \mu N$$

$$N = W/2$$

$W$ ：キャスクの自重（片側の 2 本の脚に作用する力）

$\mu$ ：支持脚と床との摩擦係数

$\beta$ ：支持脚の開度

であるから、

$$(W/2)\tan \beta > \mu N = \mu (W/2)$$

より、

$$\beta > \tan^{-1} \mu$$

すなわち、支持脚の開度が摩擦係数に相当する角度以上になることが必要である。摩擦係数と  $\beta$  との関係を以下に示す。

摩擦係数 $\mu$	支持脚の開度 $\beta$ [度]
0.05	2.9
0.1	5.7
0.2	11.3
0.3	16.7
0.4	21.8
0.5	26.6
0.6	31.0
0.7	35.0

金属同士の摩擦係数は 0.3~0.4 であるので<sup>(5)</sup>、この表より、支持脚の開度  $\beta$  が 10~20° 程度の場合には滑らない可能性がある。したがって、支持脚を確実に最大角度まで開かせるにはすべりを向上させることが必要となる。

そこで、支持脚が最大角度まで確実にすべるようにしたローラ方式の支持脚開閉機構の概要を Fig.4.15 に示す。本機構では、支持脚にローラとその内側に平坦部の底を有する支持部を設けてある。支持部底面は、支持脚が閉じた状態では最低部がローラより若干上の位置にあり、支持脚が最大開度となった状態でローラの最下部と同じ高さとなるように設定してある。この機構の動作を Fig.4.16 に示す。ロッドと両支持脚の 3 点が床に接触した状態では、支持脚はローラを介して床に接触しており、その後はロッドが床から離れ、支持脚はローラが回転することにより円滑に開くことができる。支持脚が最大開度となるとローラ横の支持部が床に接触し、摩擦により支持脚のすべりが抑制され、支持脚の開脚が停止する。

この場合、ある程度の摩擦力が期待できればストップを削除することも考えられるが、最大開度付近では滑りを防止することが不可欠なので、安全のためにストップを設けておくことが望ましい。

## 5. ターゲット交換台車の概念設計

### 5.1 概要

前述した使用済ターゲットをキャスクに収め、また、新ターゲットを取り付けるためのターゲット交換台車について設計検討を行った。ターゲット交換台車は、Fig.5.1 および Fig.5.2 に示すように、ターゲット交換台車本体、ターゲットを昇降する昇降装置、使用済ターゲットをキャスクに収める際にキャスクへの挿入位置決めを行うためのターゲット収納機構、および交換台車をターゲット交換台車メンテナンス室からの出し入れに使用する台車搬送ポータから構成される。以下にこれら装置の検討結果について記す。

なお、本検討結果に基づき、ターゲット収納機構に関する特許出願を行い、既に特許（登録）が完了している（付録2の1(2)に示す）。

### 5.2 ターゲット収納機構

前述したように取扱時に使用済ターゲットの温度を低く維持するために、使用済ターゲットとキャスク内壁間ギャップは極力小さくして、ギャップの熱抵抗を低減することが不可欠である。このためには、キャスク内に狭いギャップを通して使用済ターゲットを挿入する必要があり、高い位置決め精度が要求される。

このような高精度な制御を距離センサ等とアクチュエータと組み合わせたフィードバック制御により行う場合は、通常、多数の高機能なセンサとアクチュエータが必要となる。しかし、使用済ターゲットは高レベルに放射化しているため、使用部品の放射線による劣化と信頼性の低下等を考慮すると、高度なセンサや電子部品、複雑なアクチュエータ等を使用することは望ましくない。

そこで、耐放射線性の比較的低いセンサや電子部品、さらに複雑なアクチュエータ等を必要とせず、劣化しにくい簡素な機構により高い信頼性で使用済ターゲットをキャスク内に収納できる機構として、Fig.5.1 に示すようなバネと液圧シリンダを組み合わせた機構を選定した。キャスクは、Fig.5.2 に示すように、ターゲット交換台車上にそれぞれ左右1対からなる上端支持部、下端支持部上に搭載されており、各支持部の下部には、Fig.5.2 の A 部詳細に示すばねとシリンダを組み合わせたターゲット収納機構を設けてある。ターゲット収納機構のシリンダは、Fig.5.3 に示すようにピストン両側の液室間を途中に弁を設けた管で接続している。また、キャスクのターゲット本体収納部入口部は傾斜面を設けてある。

本装置を使用して使用済ターゲットを収納する場合は、先ずシリンダのピストンに接続する管に設けた弁を開封した状態で、キャスクを前進させてターゲット容器先端部をキャスク内に収納する。このとき、キャスクとターゲットの上下（鉛直）方向の中心軸、位置等が多少合っていないても、ターゲット先端がキャスク内面に接触し、その力でばねが変位してキャスクがターゲッ

トに倣って上下し挿入することができる。ただし、この状態で、ターゲットの固定支持を解除すると、ターゲットの重量がばねに直接作用してターゲットが下がる。そのため、ターゲットの固定支持を解除する前にシリンダ接続管の弁を閉じ、高さ方向のロックを行う。なお、左右（水平）方向の位置のずれに対しては、キャスクを交換台車上でスライドできるようにしておくことにより、特別な機構を設けずにターゲット容器をキャスク内に押し込むことに倣ってキャスクが水平方向に動いて挿入することができる。

また、本機構の場合、キャスクへのターゲットの挿入を滑らかにするため、必要があればキャスク内表面に固体潤滑材をコーティングしておくことも考えられる。このとき、水銀ターゲットの場合は、固体ターゲットより重量が小さいことおよびキャスク内へ漏洩した水銀のアマルガム化を考慮して、コーティング材として亜鉛等を使用することも考えられる。

### 5.3 他設備との取合い

ターゲットは、交換作業の効率化、高い位置決め精度の確保等の観点から、新旧ターゲットの交換作業にはターゲット交換台車を用いる。ただし、ターゲット交換台車は床面のレール上を走行するため、ターゲット台車、壁貫通型マスタースレーブ（M/S）マニピュレータ等により移動空間の制約を受ける。

そこで、台車の機械的制約、他の設備機器との取合い等を考慮に入れ、ターゲット交換台車とその設備側との取合い等の検討を行った。

#### (1)ターゲット台車との取り合い検討

ターゲット台車とターゲット台車取扱室壁の間の空間には十分な余裕が取れないため、ターゲット交換台車がその空間を通過するのは困難である（Fig.2.7 参照）。したがって、ターゲット交換台車はターゲット台車先端の遮蔽体の下を通過してターゲットの前方へ回り込む必要がある。

また、Fig.5.4 に示すようにターゲット交換台車の昇降装置を最下端にまで下降した状態にも、キャスクを搭載した状態で遮蔽体の下を通過するのは困難である。一方、キャスクを搭載しない場合は、Fig.5.5 に示すように遮蔽体と干渉せず、通過することができる。

そこで、ターゲット交換台車は、使用済ターゲットを搭載しない状態でターゲット前方まで走行し、予めターゲット移送台車でターゲット台車取扱室内に搬入し仮置きしてあるキャスクをインセルクレーンによりターゲット交換台車上へ移送するものとする。

#### (2)ターゲット交換台車の保管、搬入方法

現状の建家設計はコスト低減と散乱実験スペース確保を前提にしている。このため、Fig.2.7 に示すようにターゲット移送室は狭く、またターゲット台車取扱室に移送室からターゲット台車を搬入する経路はクランク状に曲げざるをえない。このような条件下では、交換台車が旋回等してターゲット前方まで走行するのは困難である。そこで、Fig.2.7 に示すようにターゲット台車取扱室内にターゲット交換台車の保守を兼ねた保管エリア（ターゲット交換台車メンテナンス室）を設け、使用時はそのエリアからターゲット前方までターゲット交換台車を走行させることとし

た。ただし、この場合でもターゲット交換台車メンテナンス室からターゲット前方まで交換台車を走行させるためには、途中のターゲット台車前部の遮蔽体下部でターゲット交換台車の方向を変える必要がある。

この方向転換の方法として、床に回転テーブル（ターンテーブル）を設ける方法、ターゲット交換台車に方向変換機能を設ける方法が考えられる。床に回転テーブルを設ける方法については、通常立入り不可能なので高い放射線照射環境においては故障の発生の確率が高く、また保守が困難である。このため、信頼性等の観点からはターゲット交換台車自身に方向転換機能を設ける方が好ましい。そこで、狭いエリア内で方向転換が可能であり、また、ターゲット交換台車の機能を複雑化して保守性が損なわれないように、方向転換機能を分離することとした。すなわち、ターゲット交換台車は直進機能のみ持たせ、ターゲット交換台車メンテナンス室とターゲット台車前部の遮蔽体下部との間は、Fig.5.5 に示すようにターゲット交換台車の下に潜り込ませた台車搬送ポータによりターゲット交換台車を走行させることとする。この間の走行は、ターゲット交換台車には使用済ターゲット等は搭載されていない状態であり、台車搬送ポータの搭載重量はターゲット交換台車の重量のみであるので、台車搬送ポータの構造は比較的簡素なもので達成可能と考えられる。現在、台車搬送ポータの設計を進めている。

### (3) ターゲット台車取扱室内の設備等との取り合い

ターゲット台車取扱室内のインセルクレーン等の他設備との取り合いを Fig.5.6 に示す。キャスクに収納された新ターゲットはターゲット移送台車によりターゲット台車取扱室に搬入され床に仮置きしてインセルクレーンによりターゲット交換台車上へ移送される。図に示すように、インセルクレーンのアクセス性は確保できている。

また、ターゲット交換台車上のキャスクに M/S マニピュレータがアクセスできるため、M/S マニピュレータでキャスク蓋のボルト締め等のハンドリング作業も可能である。

## 6. 放射線モニタリング

### 6.1 放射線モニタリングの要求条件

一般に放射性物質取扱施設では、施設周辺の一般公衆の放射線被曝が十分低く保たれていることを確認するとともに、作業従業者を施設に起因する放射線被曝から防護するために、放射線モニタリングを設置する。使用済ターゲット取扱・保管設備においても、以下の設計方針にて、放射線モニタリング設備を設けるものとする。

- ① 施設従業者及び管理区域内に立ちに入る者及び物品の搬入に対して、出入り管理、汚染管理及び各個人の被曝管理が可能なようとする。
- ② 施設からの異常な放射性物質の放出、施設内外の空間線量、放射性物質濃度を測定及び監視できる設計とする。
- ③ 制御室または適当な管理場所に必要な情報の通報ができるようにする。
- ④ 通常運転時及び万が一の事故に備えて必要な放射線計測器及び防護作業機材を備える。

このうち使用済ターゲット取扱・保管設備においては、①、②に対応してプロセスモニタを設置する。プロセスモニタは施設内の液体、気体の放射能を連続測定し、制御室で記録、指示を行って放射線レベルが設定値を越えた場合に警報を発するとともに、放射能汚染防止対策あるいは施設外への放出を制限する対策を取るための情報を提供する設備である。このようなプロセスモニタとしてガスマニタとエリアモニタがある。ガスマニタは、プロセス取扱・保管設備エリアの換気空調系に排気中の放射能の放出を監視するものとする。なお、ガスマニタにはダスト状の放射性物質濃度を測定するとともに、本中性子散乱施設のターゲット取扱い設備特有の要求条件として、ガス中の水銀濃度のモニタが必要となる。

一方、エリアモニタは施設の室内の空間線量率を監視し、制御室で記録、指示を行い必要に応じて人の立入制限を行うための設備である。エリアモニタを設置する場所は、従事者が滞在する場所（制御室、操作室等）及び直接に放射性物質を取り扱う場所とする。

取扱・保管設備で必要なモニタリング項目を整理して Table 6.1 に示す。また、Fig.6.1 にはターゲット移送経路等におけるエリアモニタの設置位置を、Fig.6.2 には保管設備におけるエリアモニタの配置をそれぞれ示す。

### 6.2 モニタリング機器の主要仕様の検討

前項のモニタリング項目及び要求条件に基づき、既存プラントの放射線モニタリングシステム構成、エリアモニタ、プロセスモニタ（ガスマニタ）の仕様を参考にして、放射線モニタリングシステム構成及び主要仕様を設定した。

Fig.6.3に放射線モニタ構成図を、Table 6.2に放射線モニタ基本仕様表を、Table 6.3に放射線情

報監視システム基本仕様表を示す。

### (1) プロセスモニタ

プロセスモニタであるガスモニタの検出対象は排気中のダスト( $\beta$ )とガス(Hg-203)とし、排気ダストモニタと排気ガスモニタを設けることとした。排気ダストモニタの検出器は一般的にはPLシンチレータ、半導体が候補として上げられるが、今回はバイアス高圧が不要な半導体を選定した。測定方式はダストフィルタへのダスト集塵、同時計測方式とした。

排気ガスモニタの検出器は一般的にはPLシンチレータ、通気型電離箱が候補として上げられ、Hg-203の放出濃度限度を測定できる事を目標として、高感度の通気型電離箱を選定し、 $\gamma$ 補償型とした。検出器信号は耐ノイズ性を考慮し、監視盤へは光ファイバで伝送する。

なお、この排気ガスモニタについては今後、感度の校正等についての検証が必要と考えられる。

### (2) エリアモニタ

エリアモニタの検出対象は $\gamma$ 線が主体となると考えられるので、 $\gamma$ 線エリアモニタを選定した。 $\gamma$ 線エリアモニタの検出器は一般的には半導体、電離箱が候補として上げられる。パルス状の放射線を測定する場合電離箱を選定する必要があるが、本施設ではその必要はないため小型軽量で安価な半導体を採用することとした。測定範囲は通常BGレベルから遮蔽設計線量率区分の上限値を充分カバーできるものとし、検出器信号は耐ノイズ性を考慮し、監視盤へは光ファイバで伝送することとした。

### (3) 放射線モニタリングシステム

放射線情報監視システムは連続監視を目的とし、無停電電源系統から給電する放射線監視盤と情報処理を行うNTサーバとPC端末の組み合わせで構成し、データ収集、データ保存、集中監視システムへのデータ転送等の機能を持たせるものとした。なお、集中監視システムは設置されることを想定したものである。

## 7. 安全対策検討

### 7.1 安全設計方針の検討

中性子散乱施設の使用済のターゲット容器は高レベルに放射化され崩壊熱を有し、かつ、内部に核破碎により生成した放射性物質が付着・残留している。この使用済ターゲットの取扱・保管設備の安全設計を検討するために、既存の中性子ターゲット照射施設の例についての安全設計方針とともに原子力発電所の使用済燃料取扱設備の安全設計方針について調査し、これらと2章で整理した基本計画を合わせて、安全設計方針（案）を検討した。

既存の中性子ターゲット照射施設としては米国 ANL<sup>(6)</sup>及び BNL<sup>(7)</sup>の概念設計検討を調査したが、例えば BNL の例ではターゲット取扱設備の基本的な安全要求および設備対応は次の通りである。

#### ① 放射線防護

作業従事者の被曝を最小限にするため、使用済ターゲットは遮蔽されたキャスク内に収納して移送する。

#### ② 崩壊熱除去

使用済ターゲットは、崩壊熱除去のための冷却を行う（移送中もターゲット冷却系に接続して強制冷却）。

これらは、原子力発電所の使用済燃料取扱設備の安全設計方針に包絡される。

原子力発電所の使用済燃料取扱設備安全設計方針の整理対象としたプラントは以下の通りである。

- ・軽水炉（軽水炉安全設計審査指針）<sup>(8)</sup>
- ・高温工学試験研究炉 HTTR（安全設計方針）<sup>(9)</sup>
- ・FBR 原型炉もんじゅ（安全設計方針）<sup>(10)</sup>

なお、ターゲット台車取扱室、使用済ターゲット等保管室等で放射化されたターゲット容器を取扱う上では再処理施設等向けの「核燃料施設安全審査基本指針」も参考になるが、取扱・貯蔵（保管）についての安全設計要求については原子炉の安全設計審査指針及び安全設計方針がより詳細で具体的である。

上記の使用済燃料取扱設備における安全要求を基に使用済ターゲット取扱・保管設備の安全設計方針案を設定した。Table 7.1 に設定した安全指針案を、上記の各使用済燃料取扱設備の安全設計指針と合わせて示す。放射性防護及び除熱の観点からは基本的に原子炉の燃料取扱設備と類似の安全設計方針が必要となる。このとき、核燃料物質は含まれていないことから臨界についての考慮は不要である。また、本施設に特有なものとしては水銀に対する配慮があるが、安全上の要求としては水銀中には核破碎で生じたトリチウム等の放射性物質が含まれていることから、燃料取扱設備と同様な考え方で対応するものとした。

## 7.2 安全対策の検討

Table 7.2 に、安全設計方針を満足するための設計方針の整理とそれを参考にした現状概念についての設計方針の整理結果を示す。本施設では核燃料と異なり臨界が発生することができないので、臨界防止の項目は省略してある。表にみられるように、基本的には原子炉の燃料取扱設備の設計方針（対策）に準じた対応を取ることとした。

本施設の安全上の設計方針、設計対応で特徴的なものとしては下記の点が挙げられる。

- ① ターゲットは格納性を確保するために、ターゲット台車取扱室内以外ではキャスク内に密封して取り扱う設計とする。
- ② 高放射性ターゲットを取扱う部屋には遮へい壁で十分な遮へい効果を確保するとともに、取扱う室内での移送機故障時には室外から遮へい付きキャスク等で取り出して対応できるようとする。
- ③ 高放射性ターゲットの取扱い室外への移送時には遮へい付き容器等に入れるなどにより移送機故障時の対応においても運転員の被曝を最小限とする設計とする。
- ④ 水銀ターゲットを開放状態で取り扱う室内はライナ張りとして水銀の拡散を抑制し、室外ではキャスク内密封で取り扱い、水銀蒸気の拡散を抑制する。

## 8. おわりに

中性子散乱施設の使用済ターゲット等取扱・保管設備について概念設計検討を行い、設備の基本計画を策定して設計条件を明確化・整理し、併せて取扱経路等、設備配置計画について取りまとめた。また、使用済ターゲット取扱設備の主要機器である使用済ターゲットキャスクとターゲット交換装置の設計検討を行い、崩壊熱の除去と遠隔操作で取扱の容易な使用済ターゲットキャスクを設計するとともに、複雑な制御を必要とせず簡易で信頼性等の高いターゲット交換台車を提案した。さらに、作業員の被曝防止を図るべく放射線監視計画を明確にするとともに、在来の原子炉等を参考に安全対策を立案した。

今後、ターゲットシステムの設計の進捗に応じて使用済ターゲット取扱・保管設備の仕様を見直しつつ、今回実施した設計検討結果に基いて、使用済ターゲット取扱・保管設備の設計の詳細化を図っていく予定である。

## 謝 辞

本検討を進めるに当たり、富士電機（株）、川崎重工業（株）の関係者に御協力いただいた。また、本報告をまとめるに当たり、核熱利用研究部研究主幹宮本喜晟氏には懇切丁寧な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム：JAERI-Tech 2000-003、“大強度陽子加速器計画”（2000）。
- (2) Bill R. Appleton：“A Progress Report on the Spallation Neutron Source”，Proc. of 14th Mtg. of Int. Collabo. on Advanced Neutron Source, 32 (1998).
- (3) Harald Conrad：“The European Spallation Source(ESS) Technology Study”，Proc. of 2nd Int. Mtg. on Nuclear Application of Accelerator Technology, 13 (1998).
- (4) “事例 LSI パッケージ用ヒートシンクの最適化”，沖電気工業株式会社，  
<http://www.oki.co.jp/OKI/Cng/Softnew/JIS/hs.htm> (1999).

- (5) 日本機械学会編：“機械工学便覧改訂第5版”，日本機械学会（1978）。
- (6) ANL-95/13、“IPNS Upgrade: A Feasibility Study”（1995）。
- (7) BNL60678 SNS-7、“5MW Pulse Spallation Neutron Source Preconceptual Design Study”（1994）。
- (8) “改訂9版 原子力安全委員会安全審査指針集”，大成出版社（1998）。
- (9) “日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置許可申請書 [HTTR(高温工学試験研究炉)原子炉施設の設置]”，日本原子力研究所（1989）。
- (10) “高速増殖炉もんじゅ発電所 原子炉設置許可申請書”，動力炉・核燃料開発事業団（1980）。

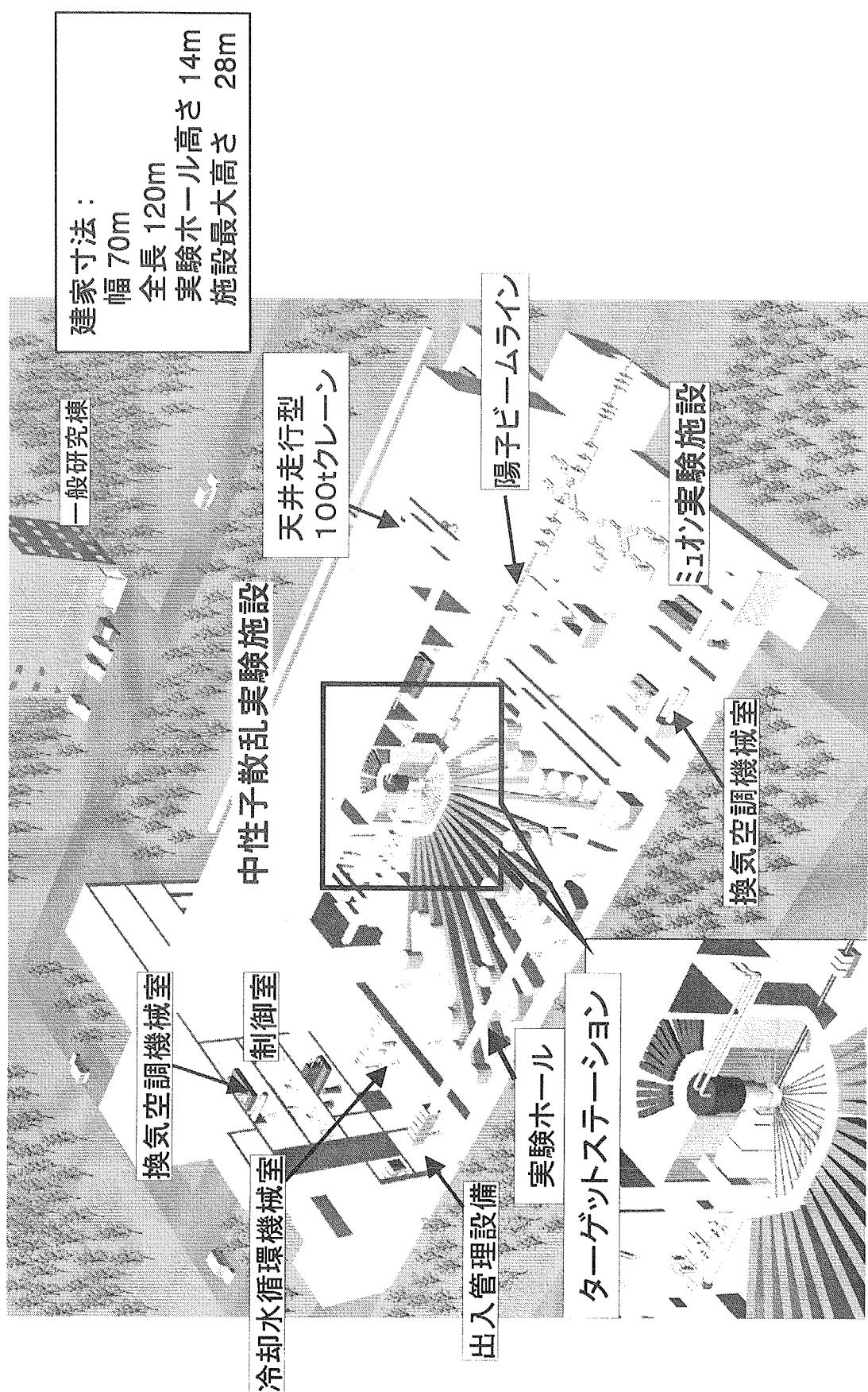


Fig.2.1 中性子散乱施設の概要

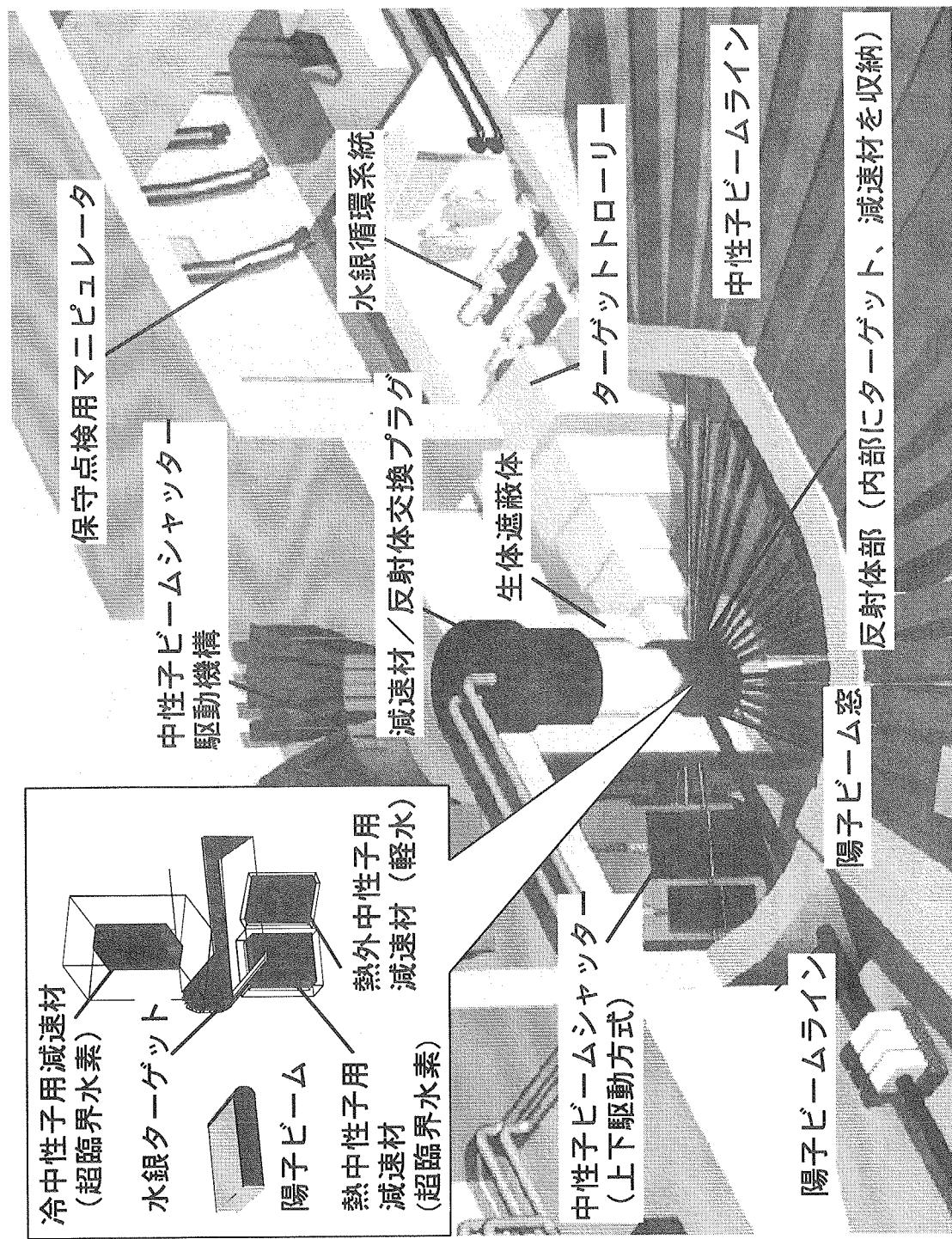


Fig. 2.2 中性子散乱施設ターゲットステーション

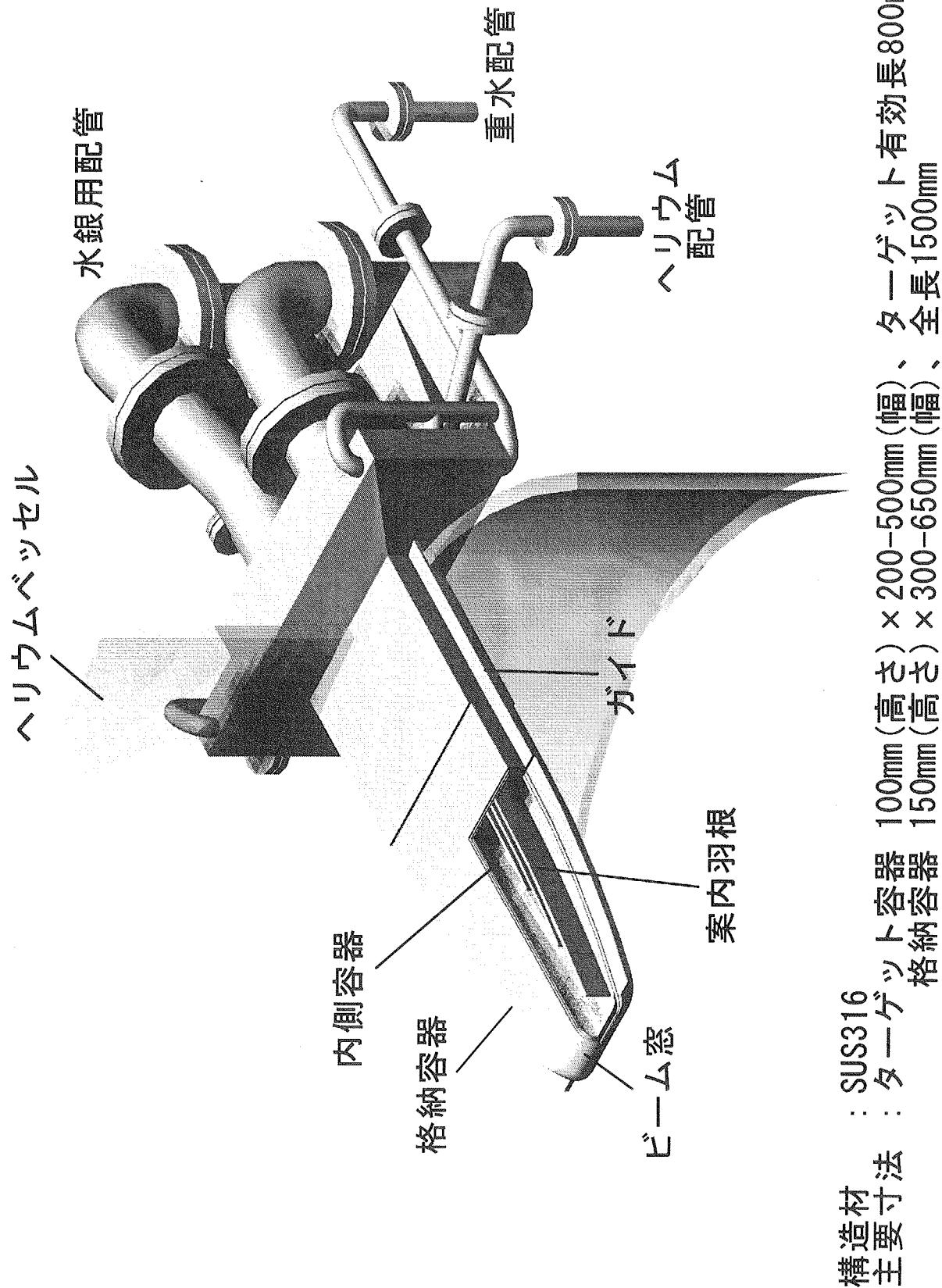


Fig. 2.3 水銀ターゲット容器の構造概念

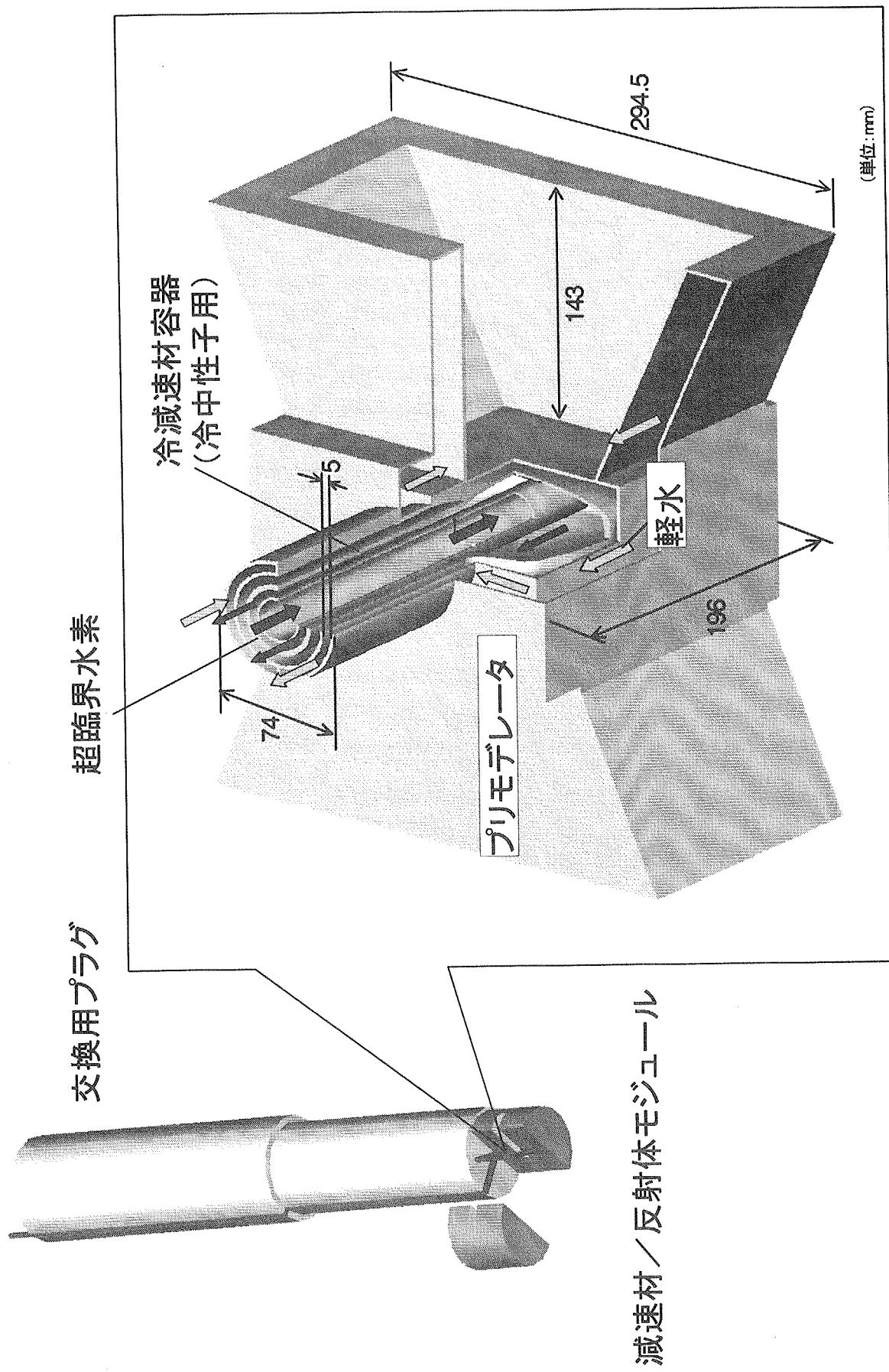


Fig. 2.4 プリモデレータ付き冷減速材容器の概念

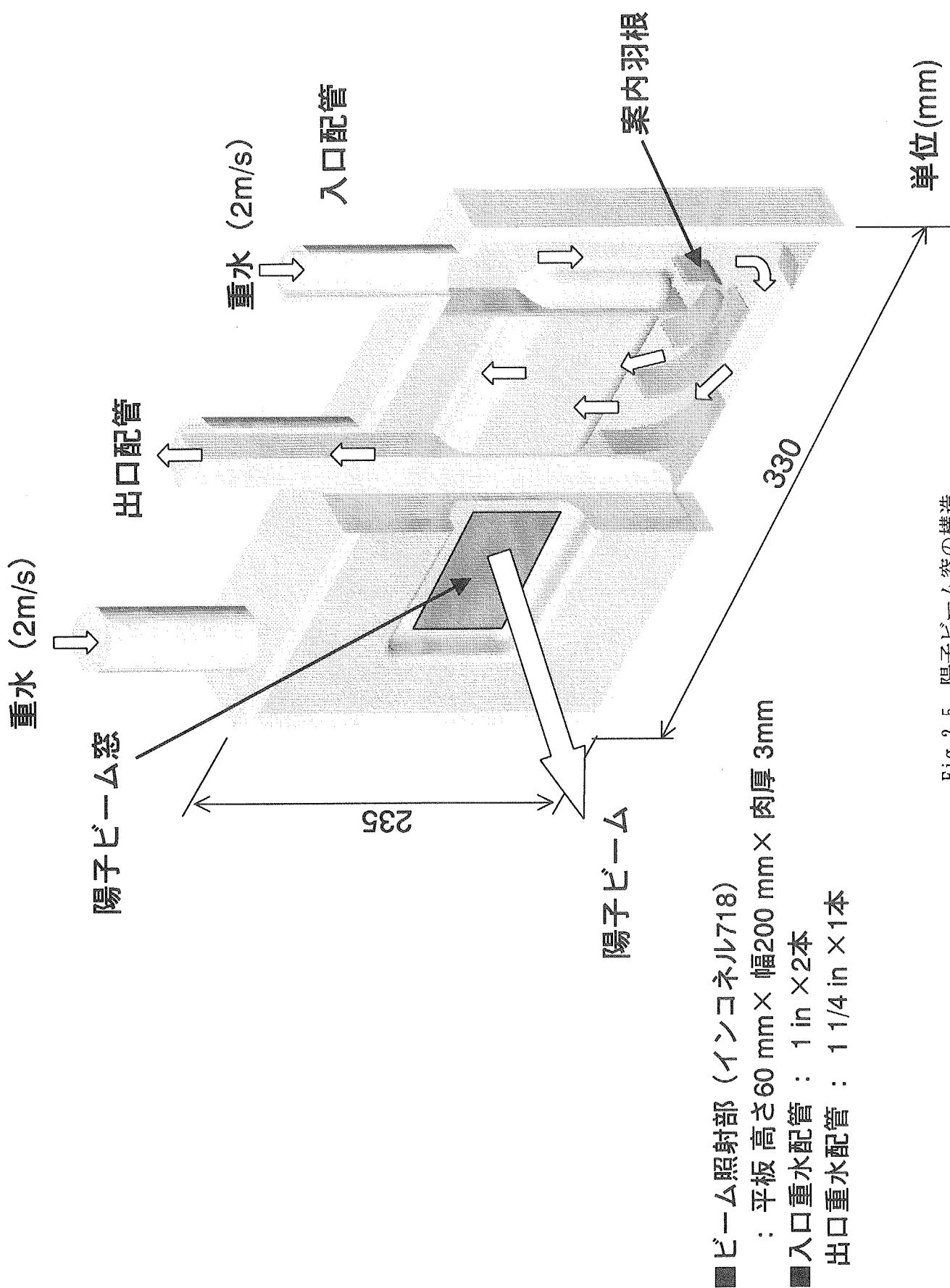


Fig. 2.5 陽子ビーム窓の構造

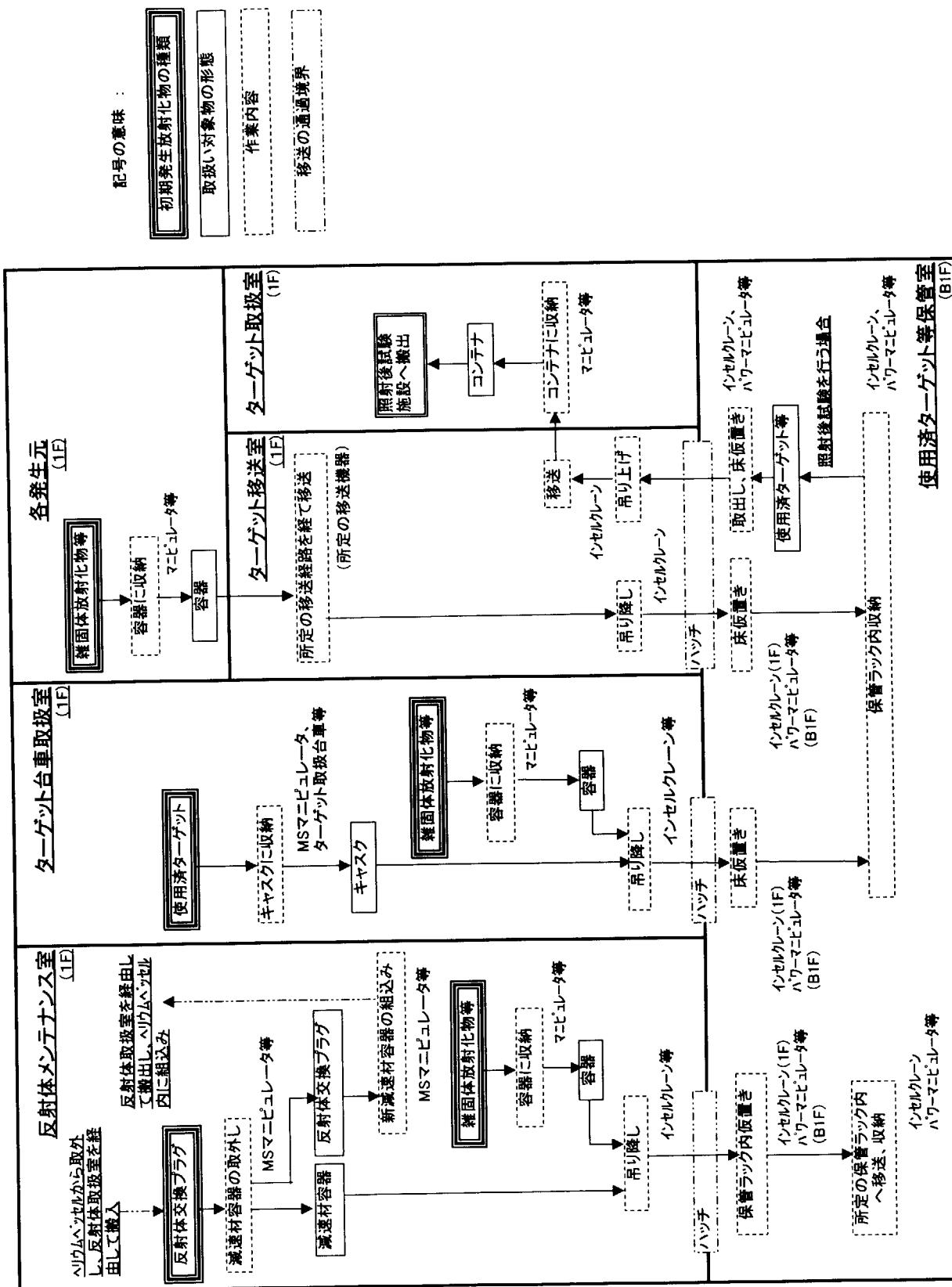


Fig.2.6 使用済ターゲット等の移送経路

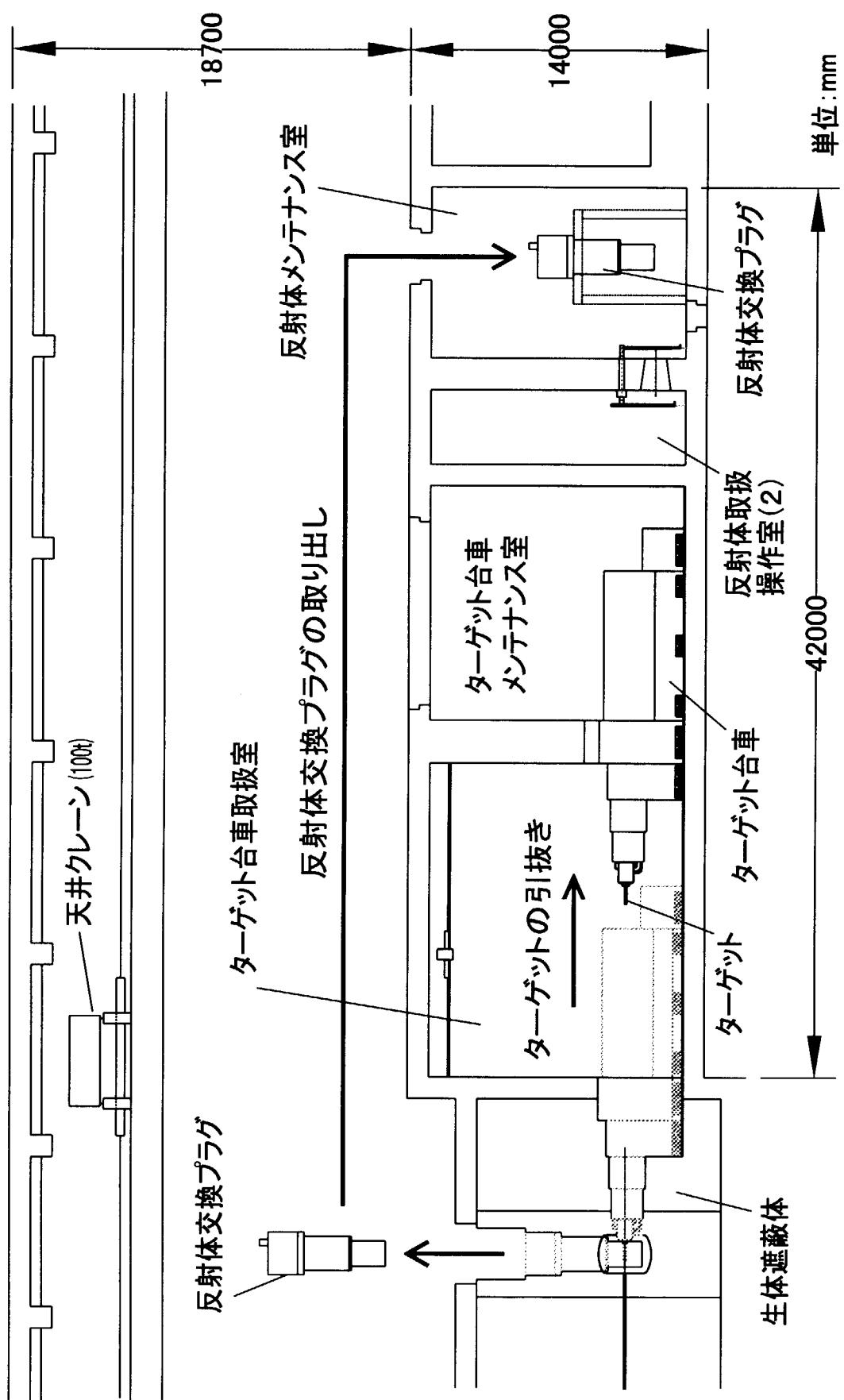


Fig.2.7 ターゲットの引き抜き、反射体交換プラグの取り出し

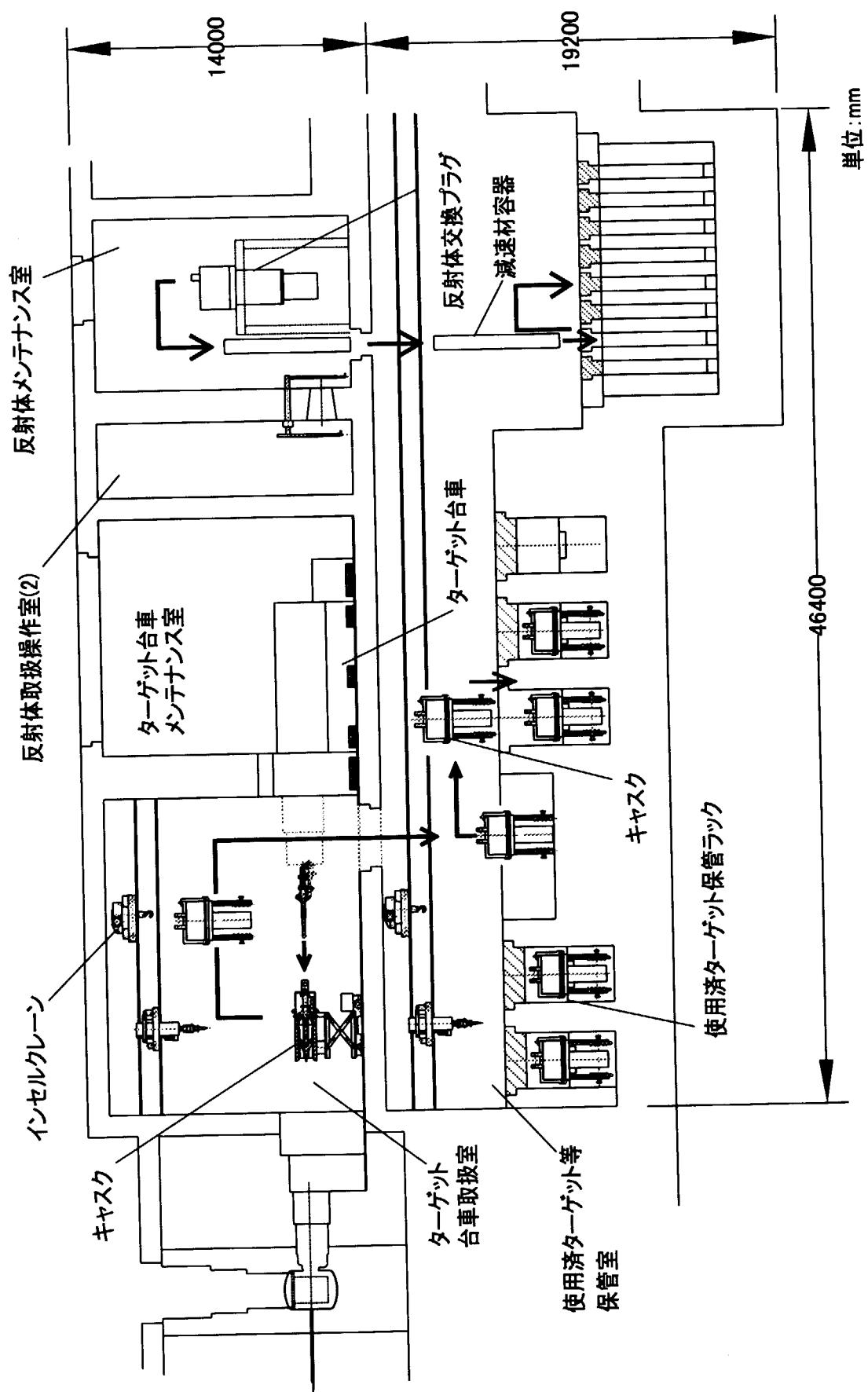


Fig.2.8 使用済ターゲット等の保管室への移送

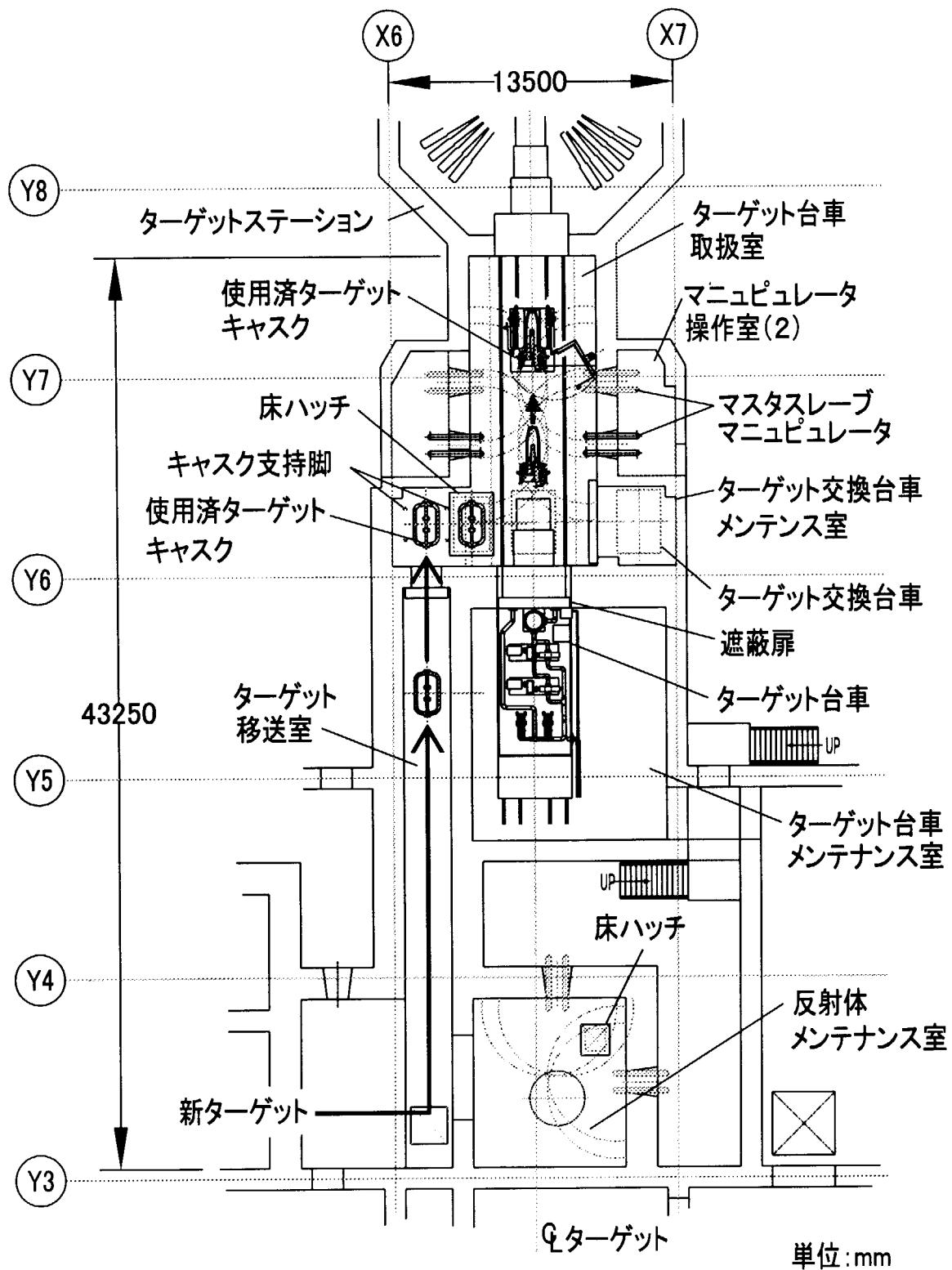


Fig.2.9 使用済ターゲット取扱機器・設備の配置（1階）

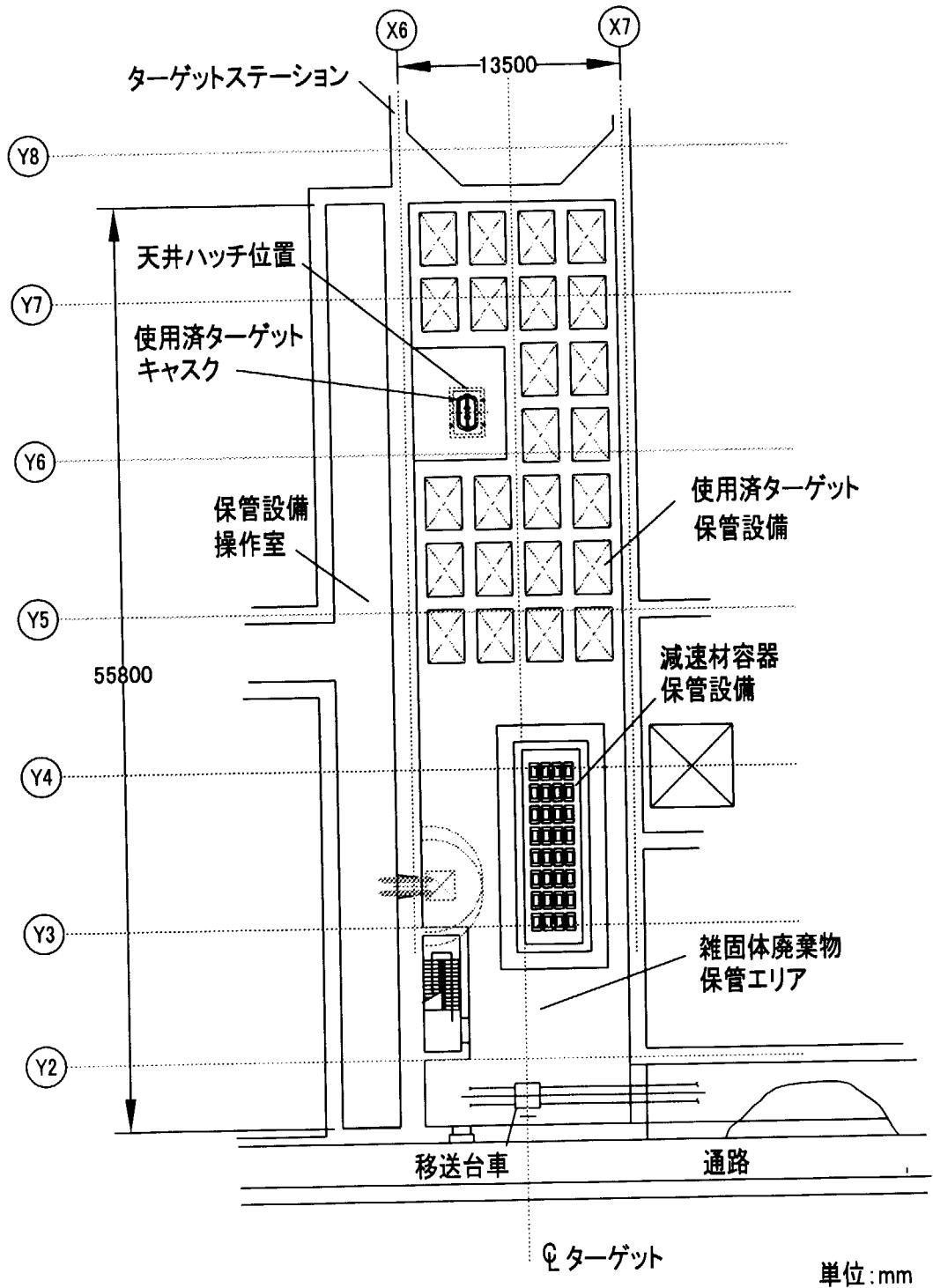


Fig.2.10 使用済ターゲット等の保管室内の機器・設備の配置（地下1階）

This is a blank page.

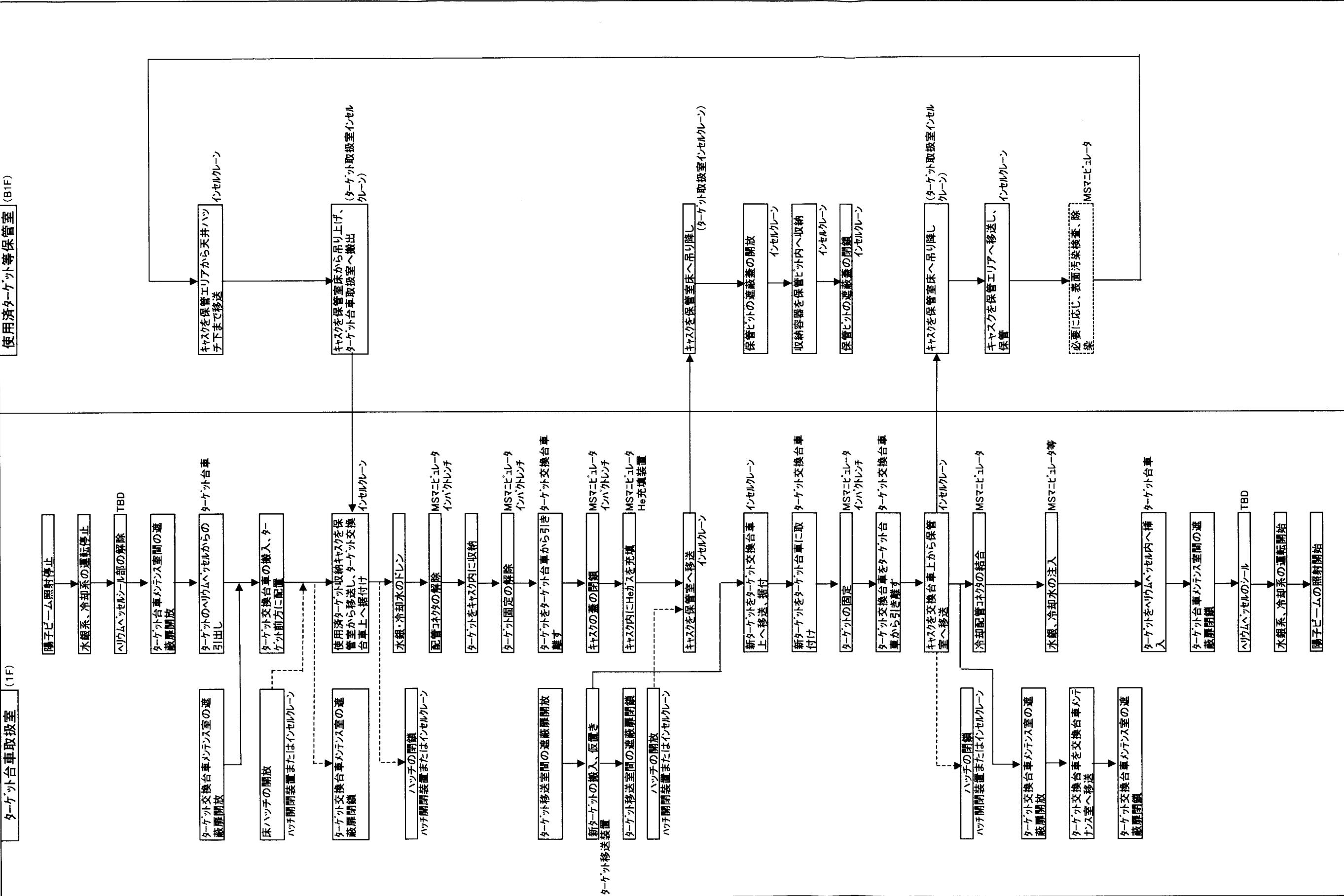


Fig. 3.1 使用済ターゲット取扱・保管フローダイアグラム

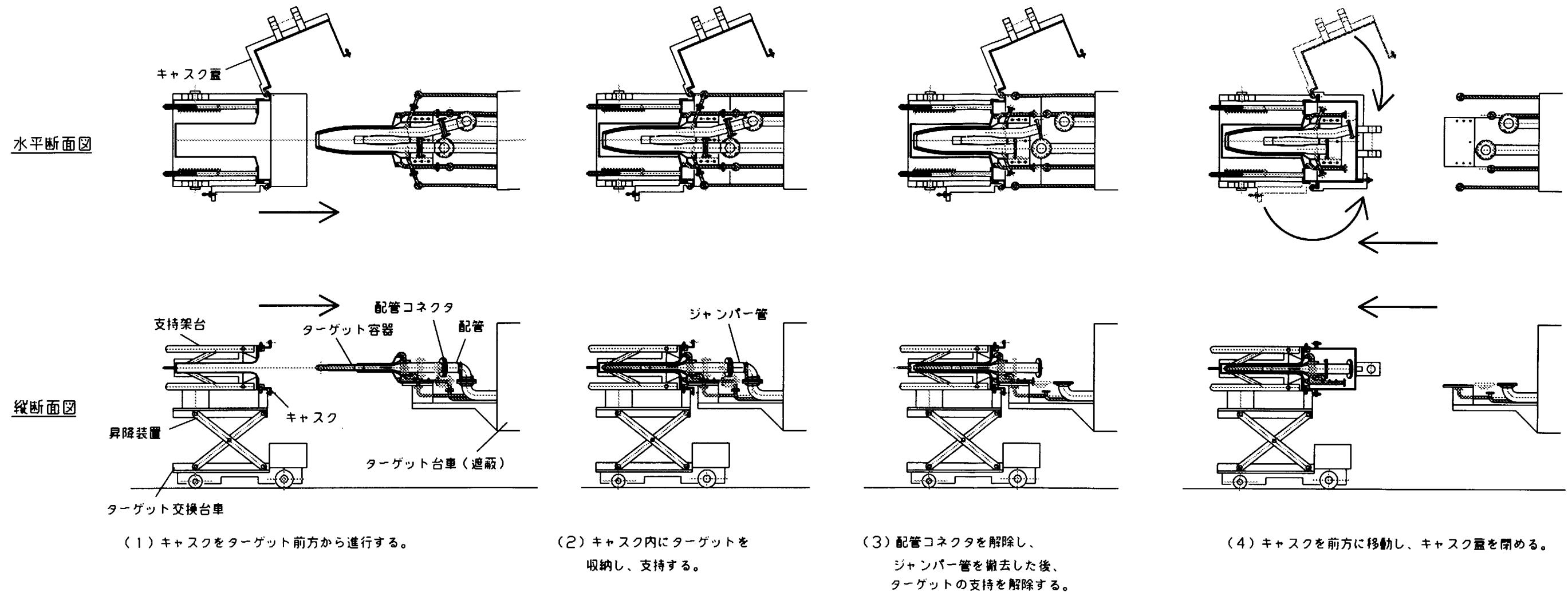


Fig.3.2 使用済ターゲットの取外・移送手順 (1/2)

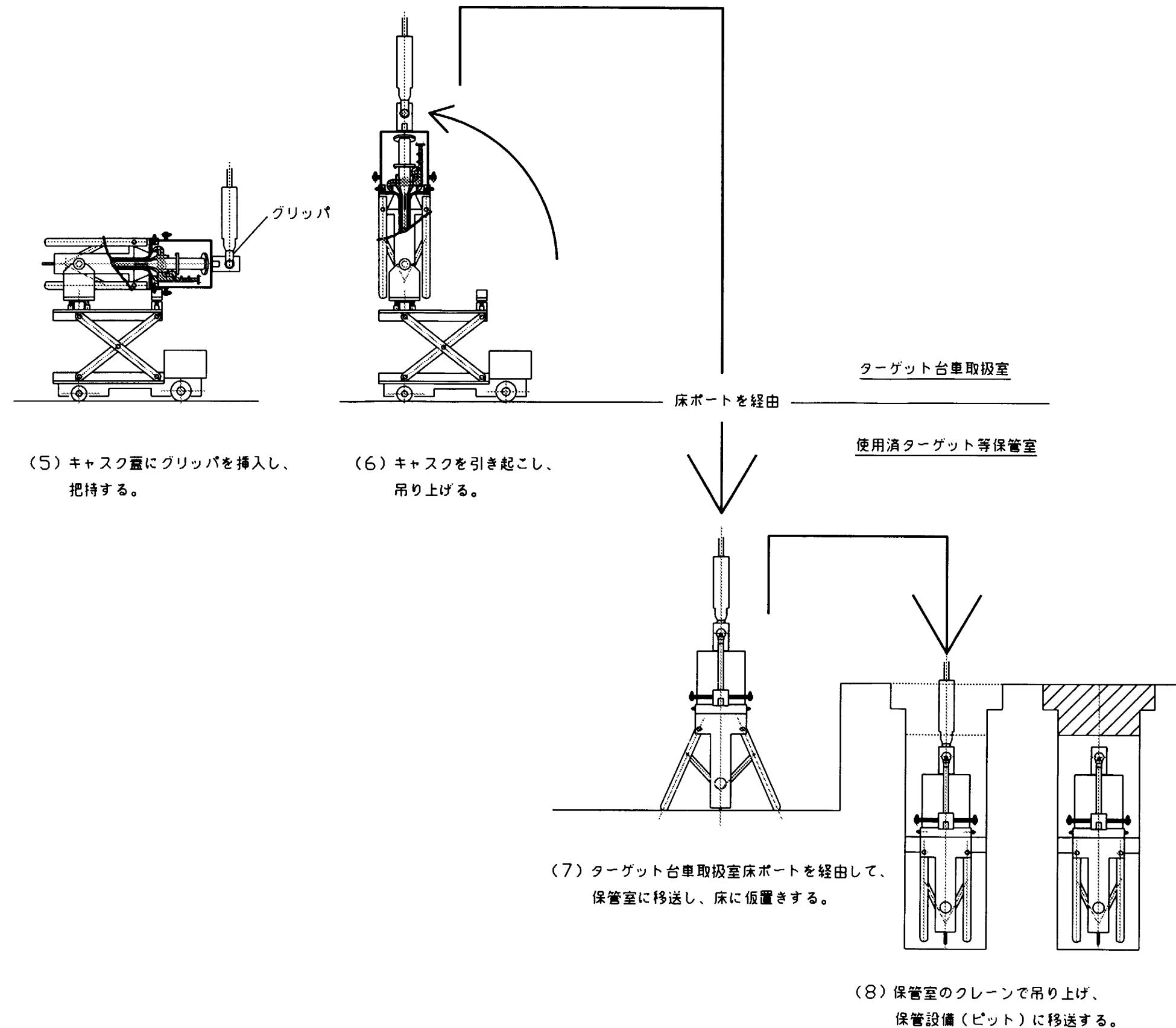


Fig.3.2 使用済ターゲットの取外・移送手順 (2/2)

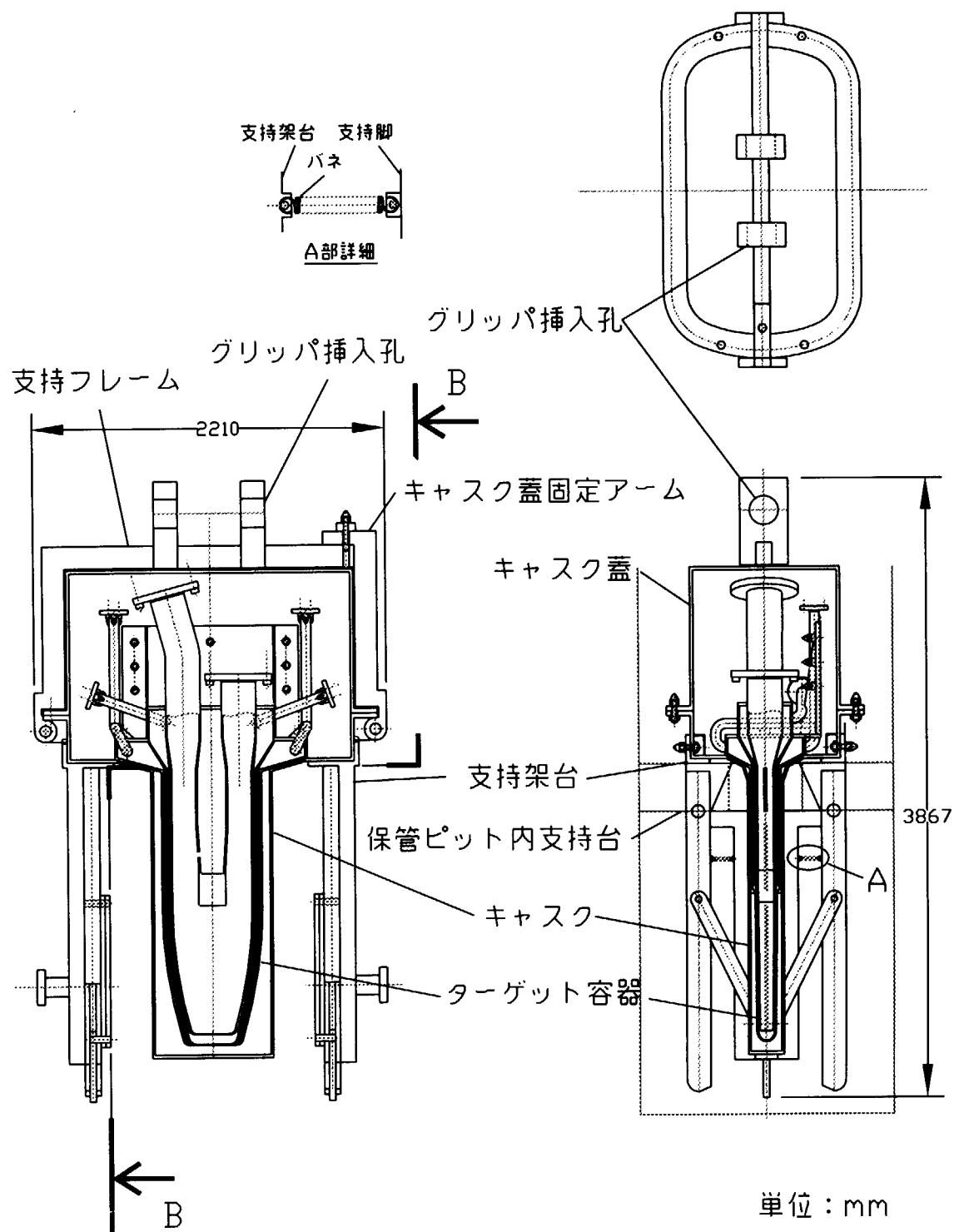


Fig.4.1 使用済ターゲットキャスク（保管状態）

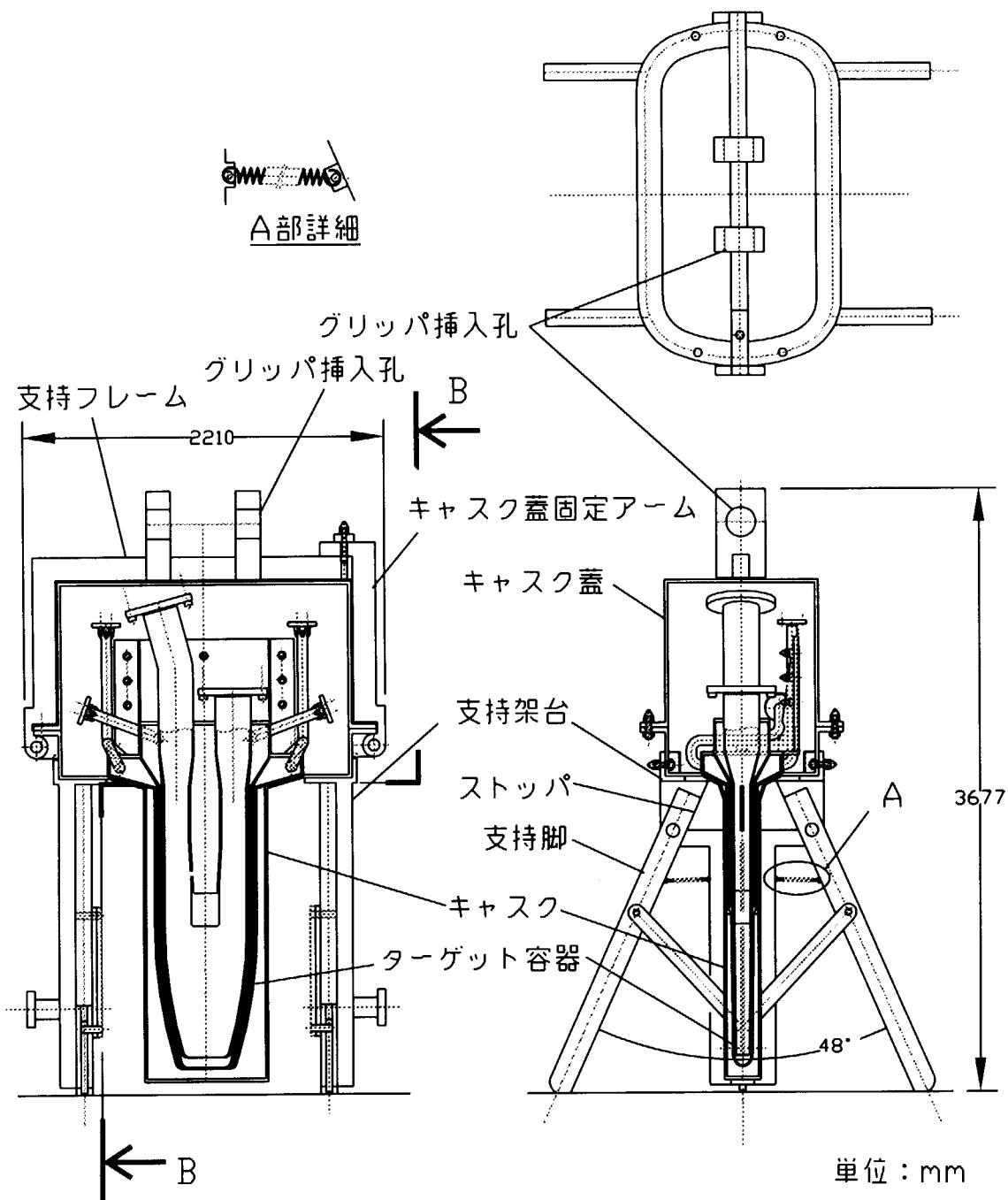


Fig.4.2 使用済ターゲットキャスク（床仮置き状態）

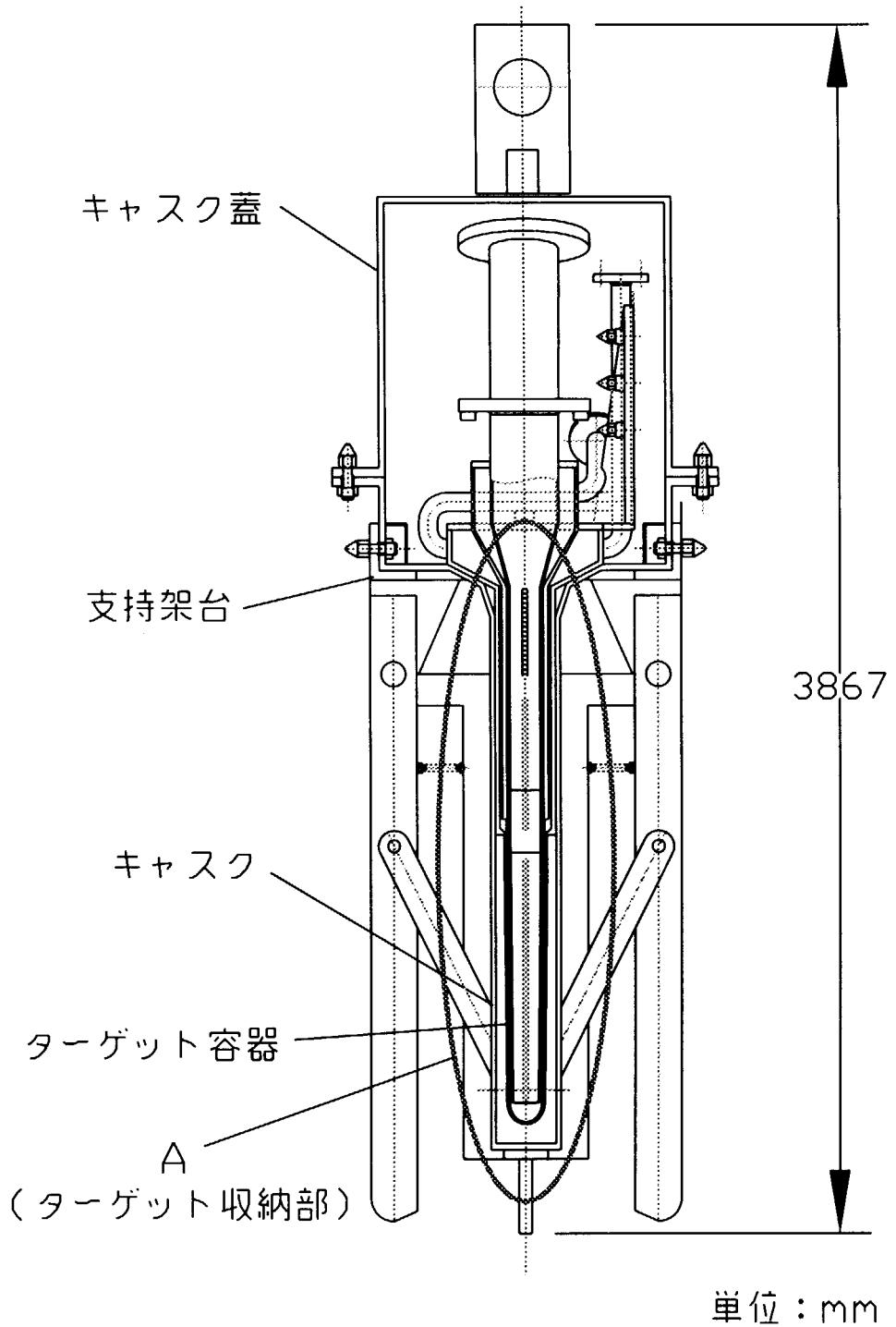


Fig.4.3 キャスクのターゲット収納部

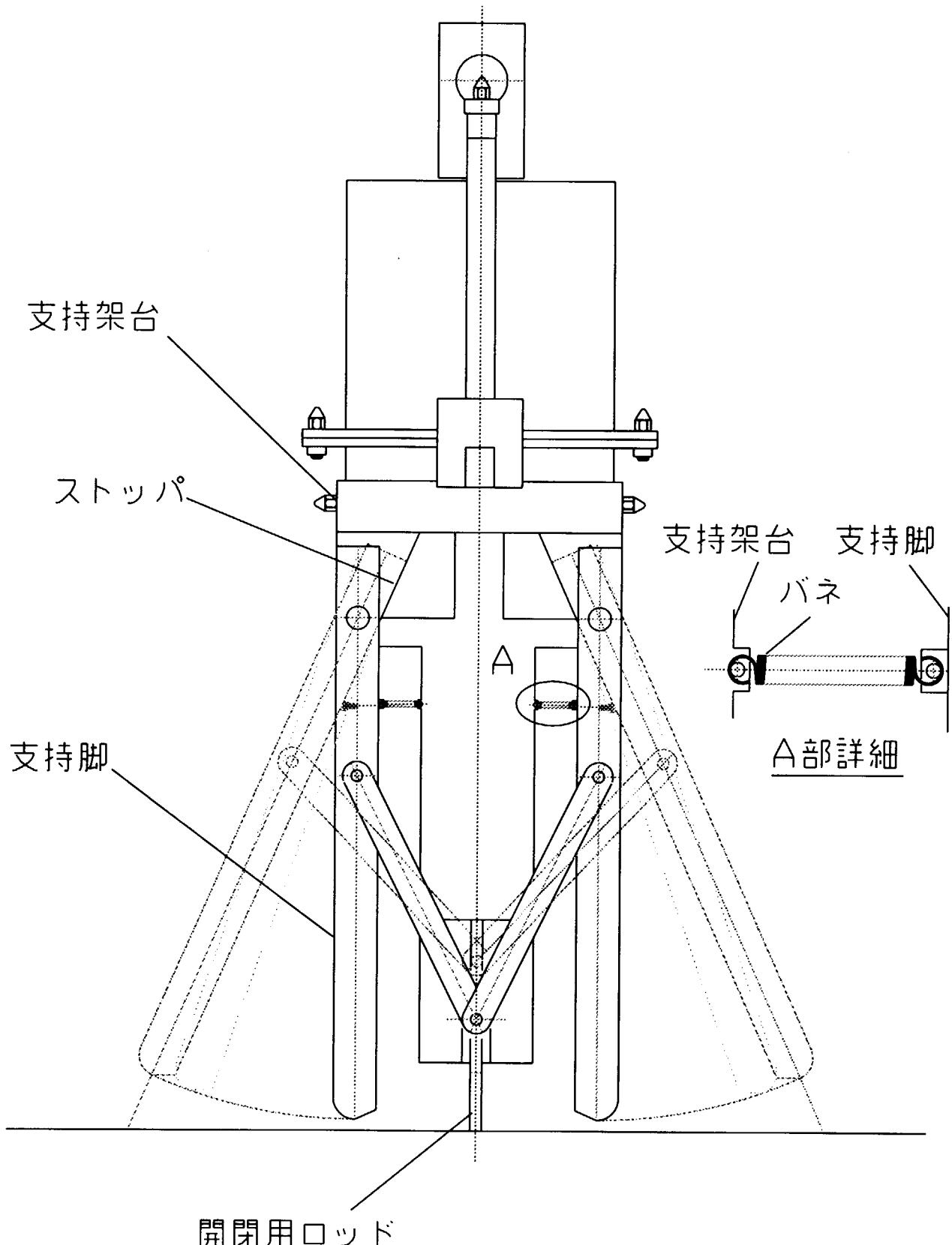


Fig.4.4 キャスク支持脚開閉機構 (Fig.4.1 の矢視 BB)

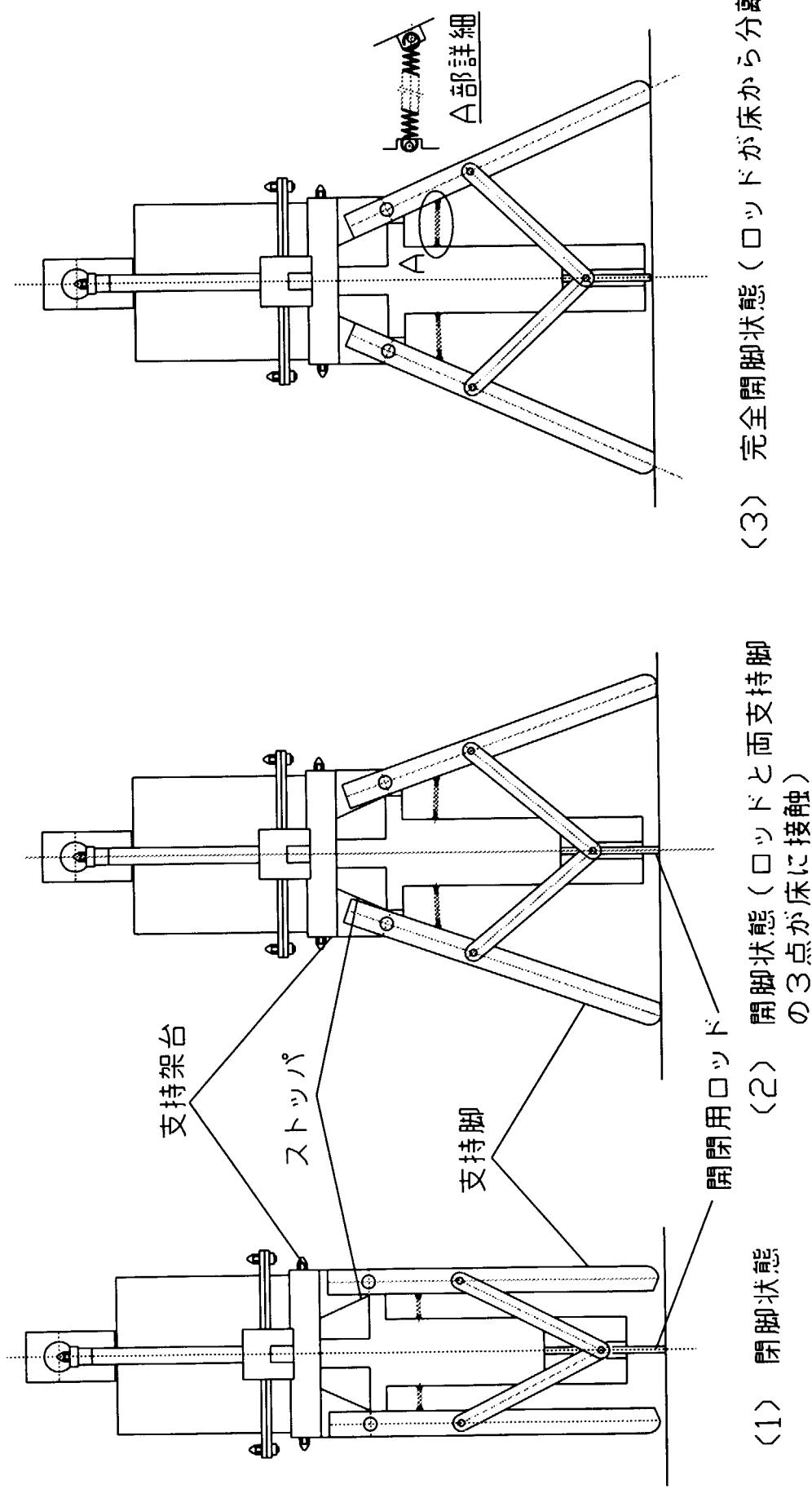


Fig.4.5 キャスク支持脚開閉機構の開閉動作 (Fig.4.1 および Fig.4.2 の矢視 BB)

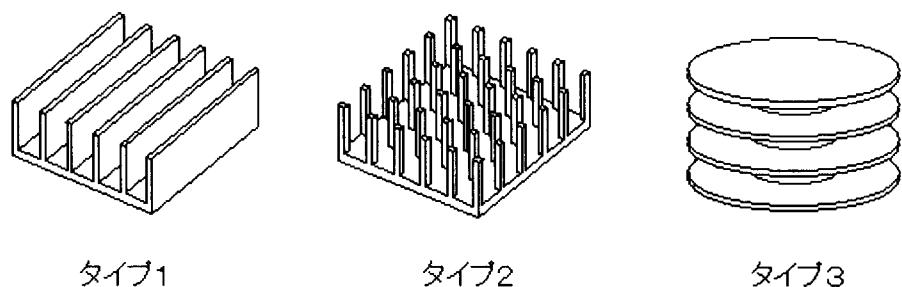


Fig. 4.6 各種のフィンの形状

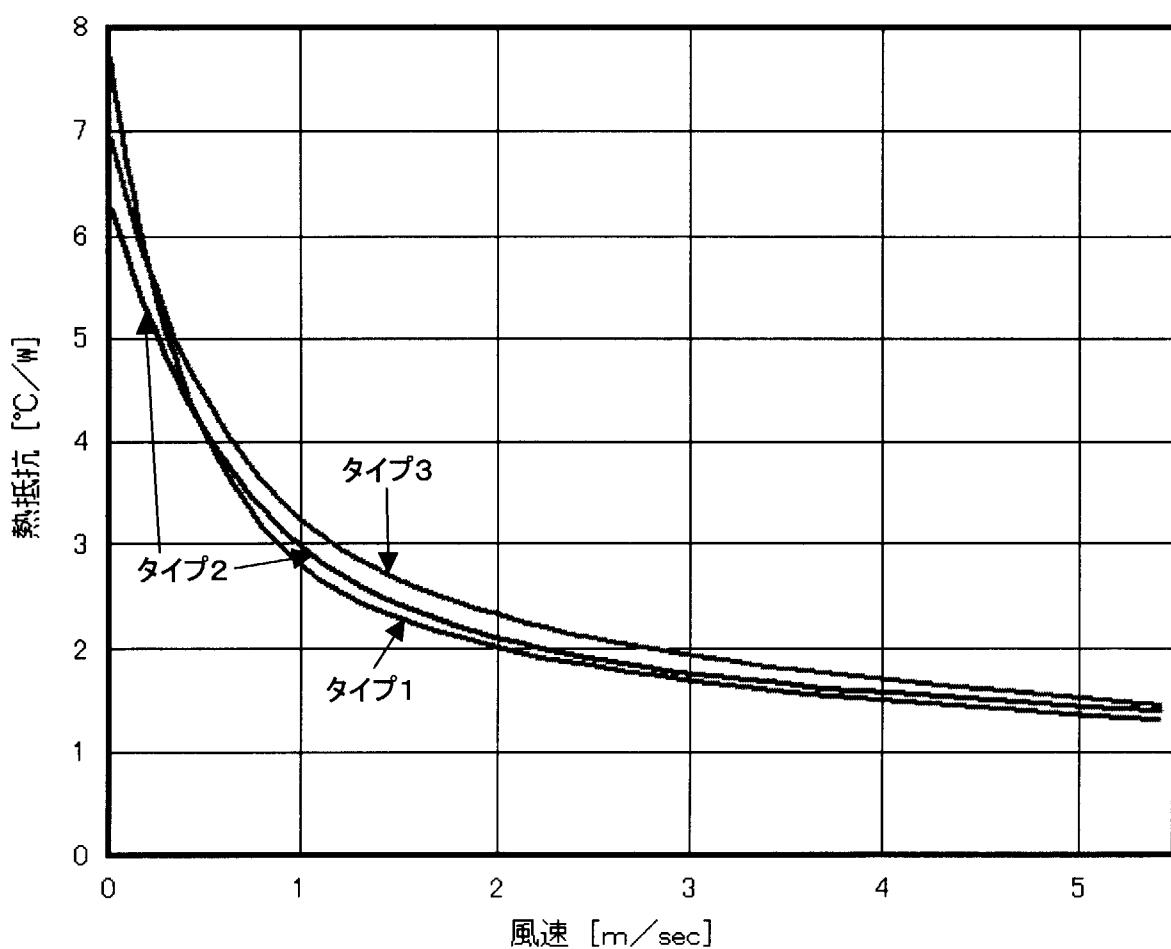


Fig. 4.7 各種のフィンの熱抵抗

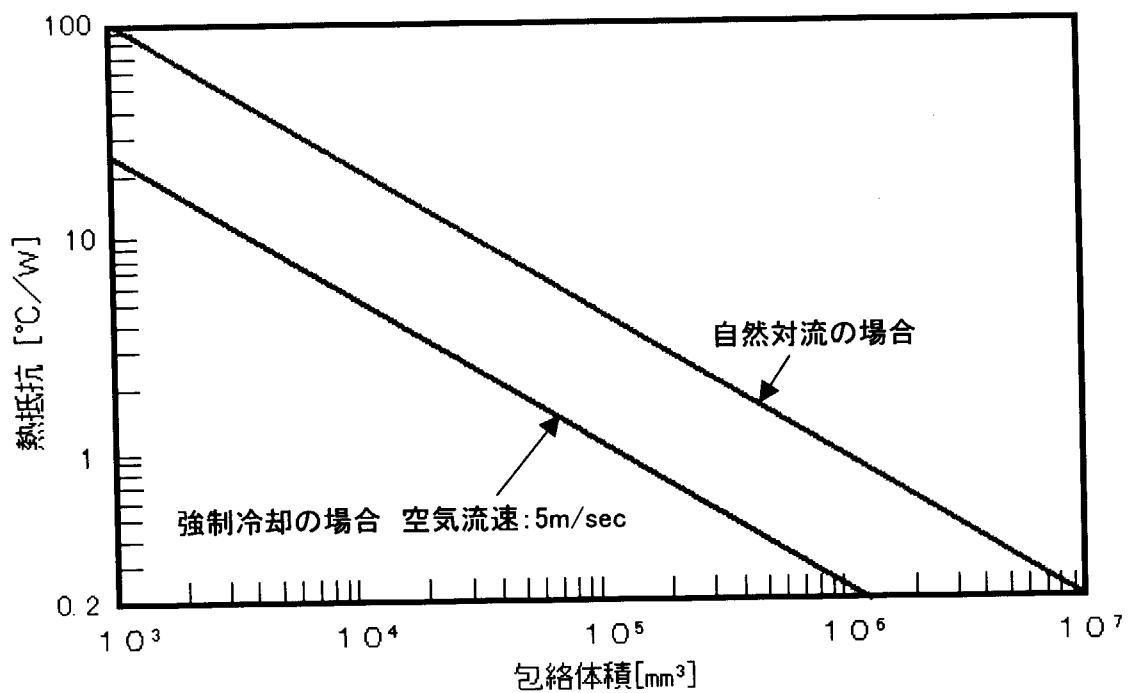


Fig. 4.8 フィンの包絡体積と熱抵抗

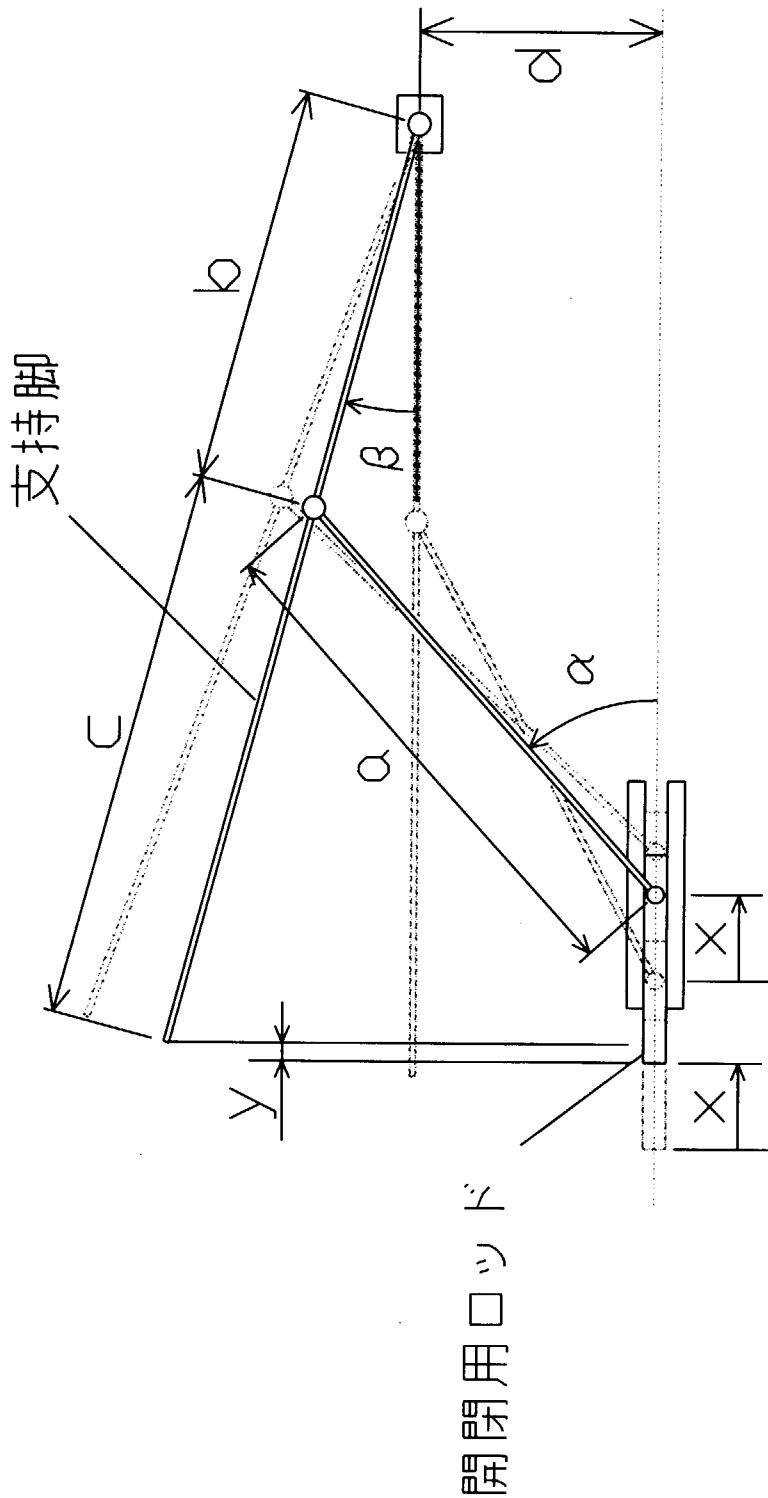


Fig.4.9 キャスク支持脚開閉リンク機構検討図

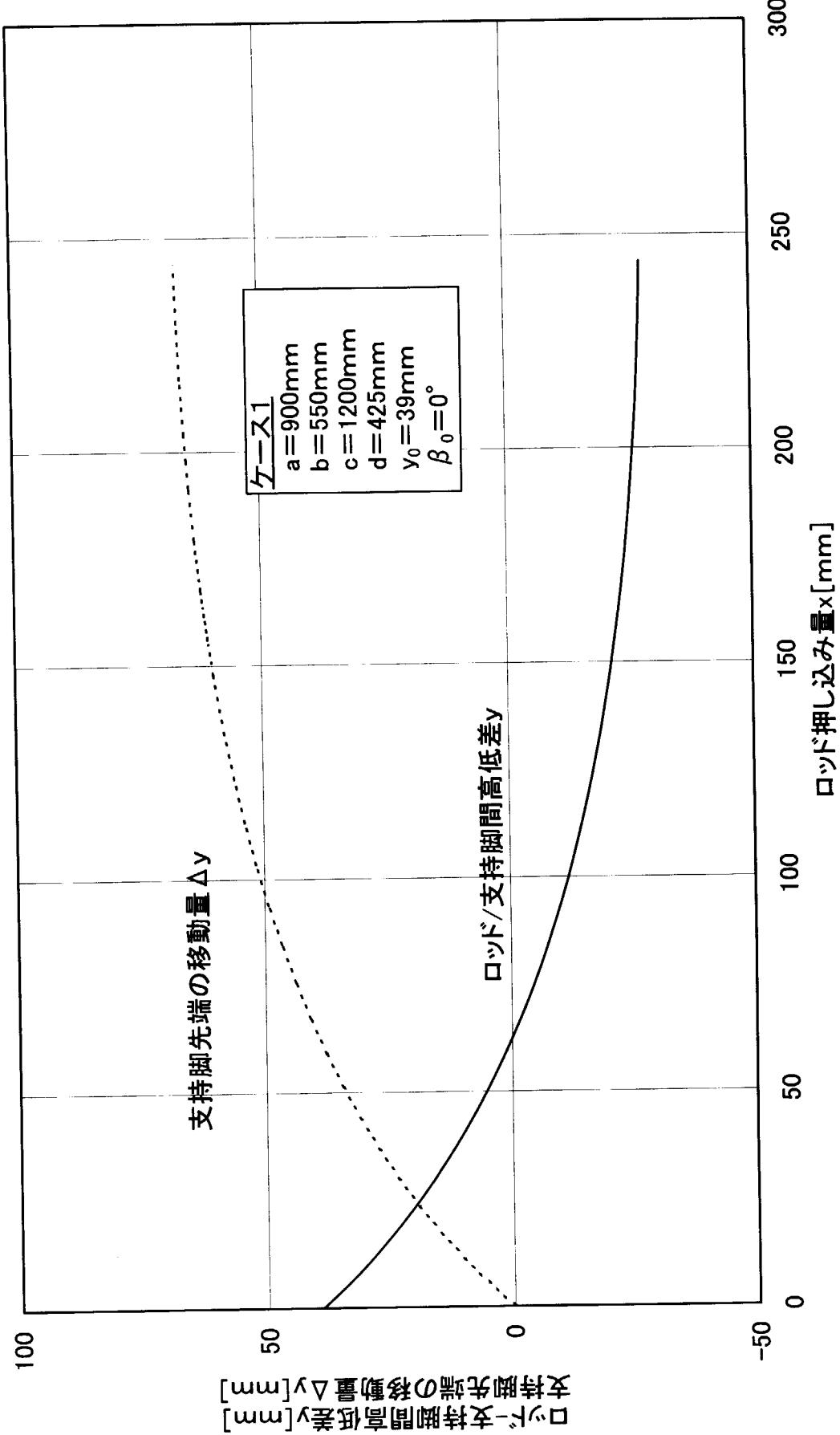


Fig.4.10 ロッド押し込み量とロッド/支持脚先端間高低差との関係（ケース1）

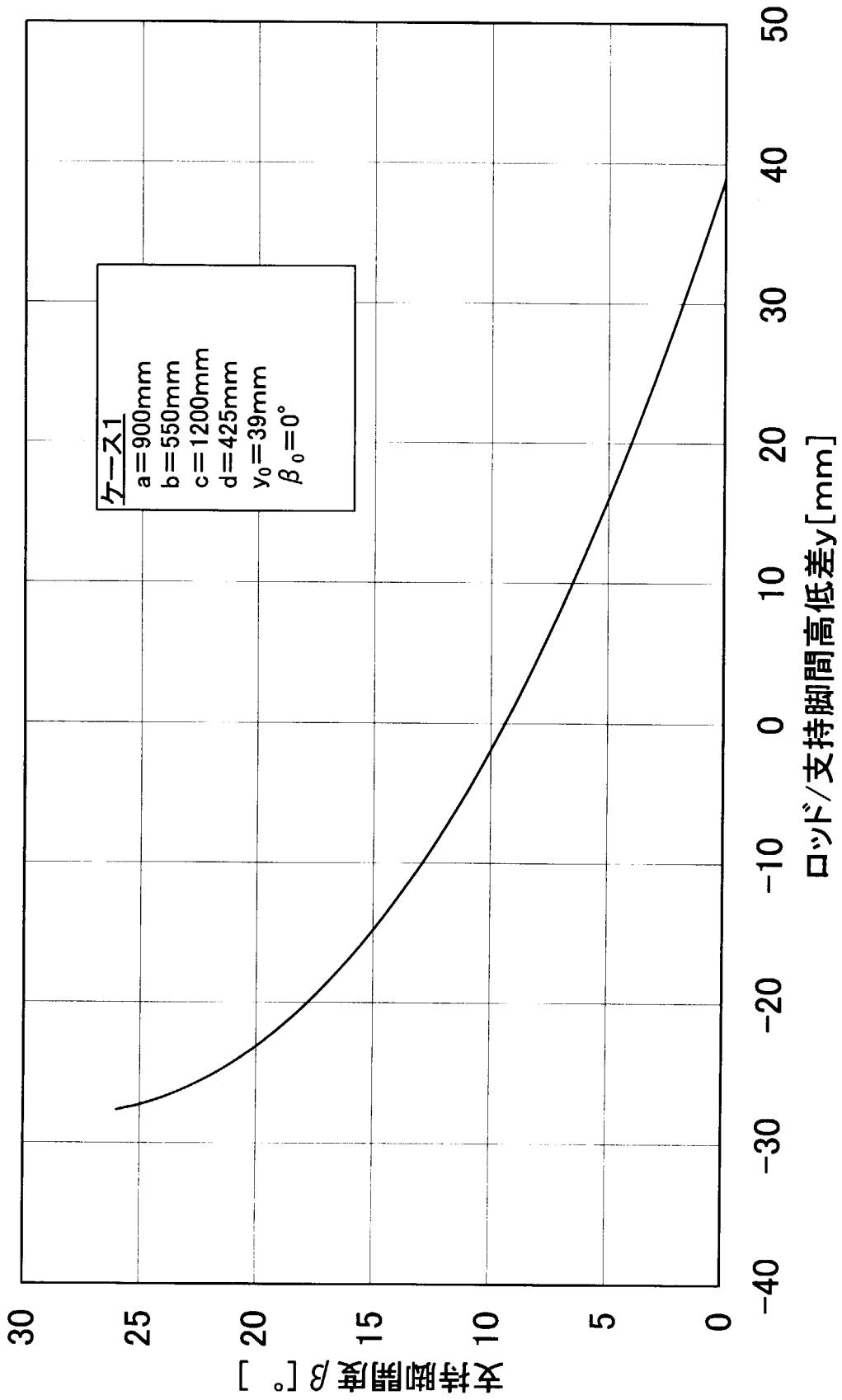


Fig.4.11 ロッド/支持脚先端間高低差と支持脚開度との関係（ケース1）

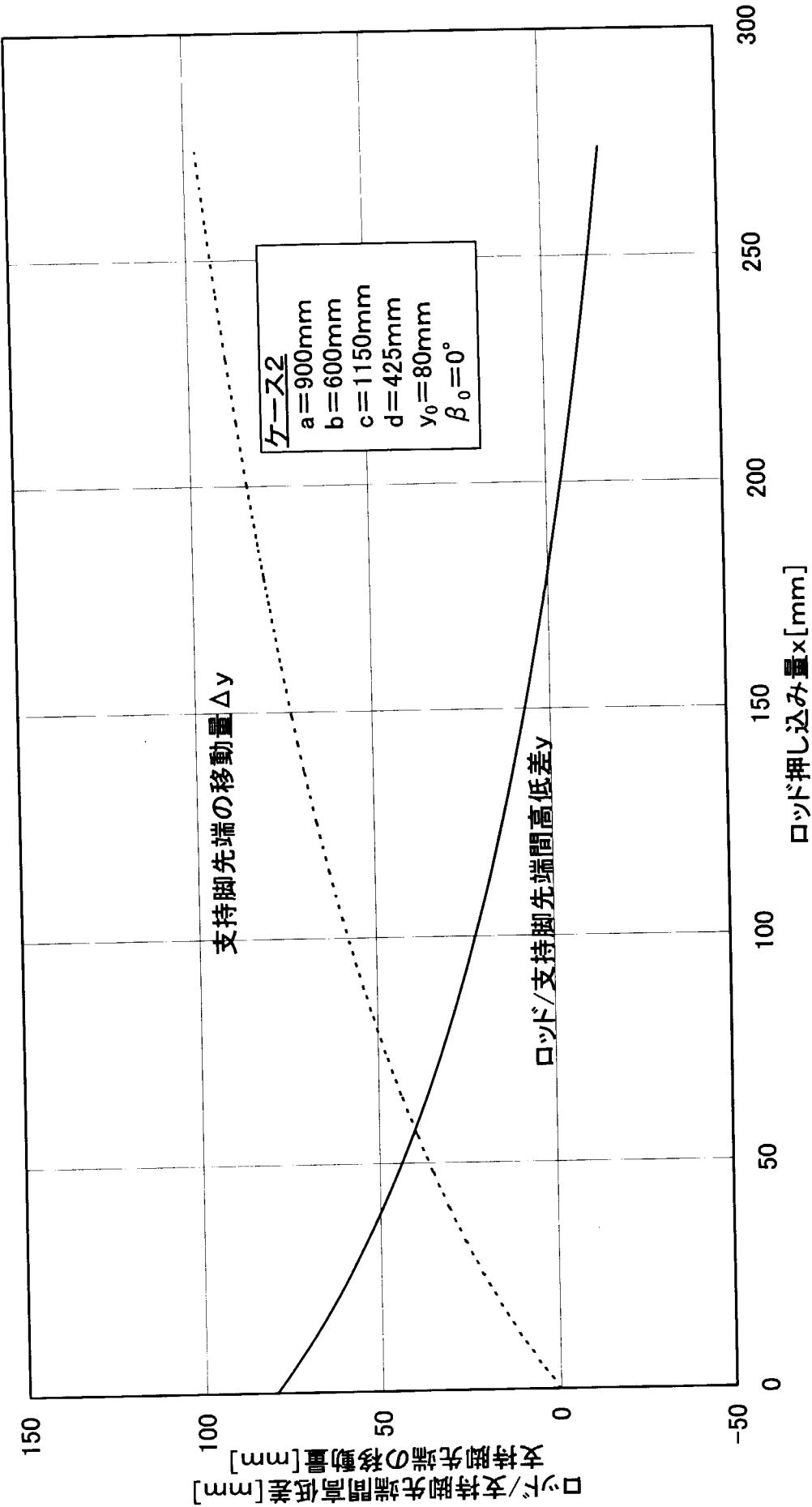


Fig.4.12 ロッド押しこみ量とロッド/支持脚先端間高低差との関係（ケース2）

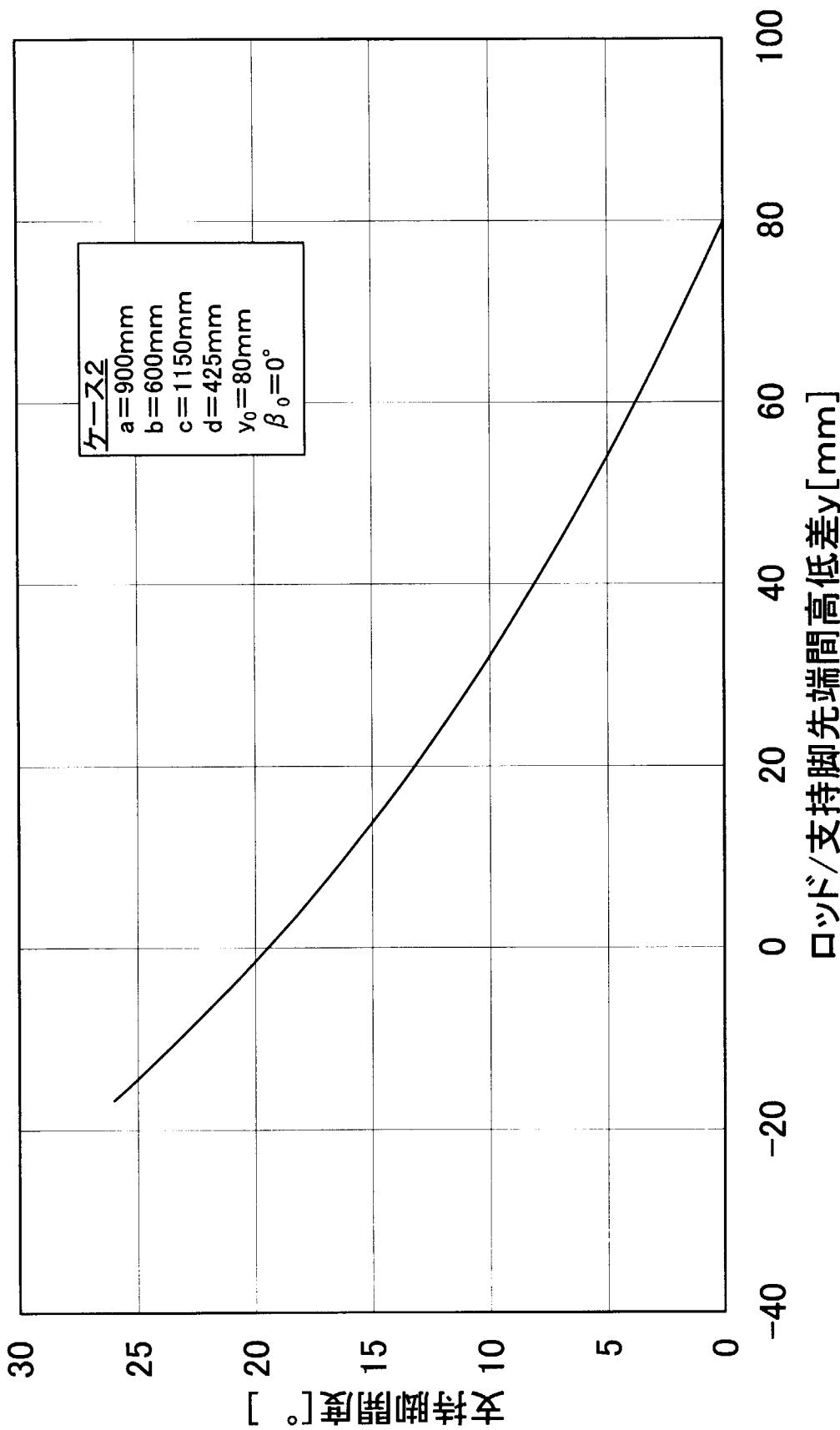


Fig.4.13 ロッド/支持脚先端間高低差と支持脚開度との関係（ケース2）

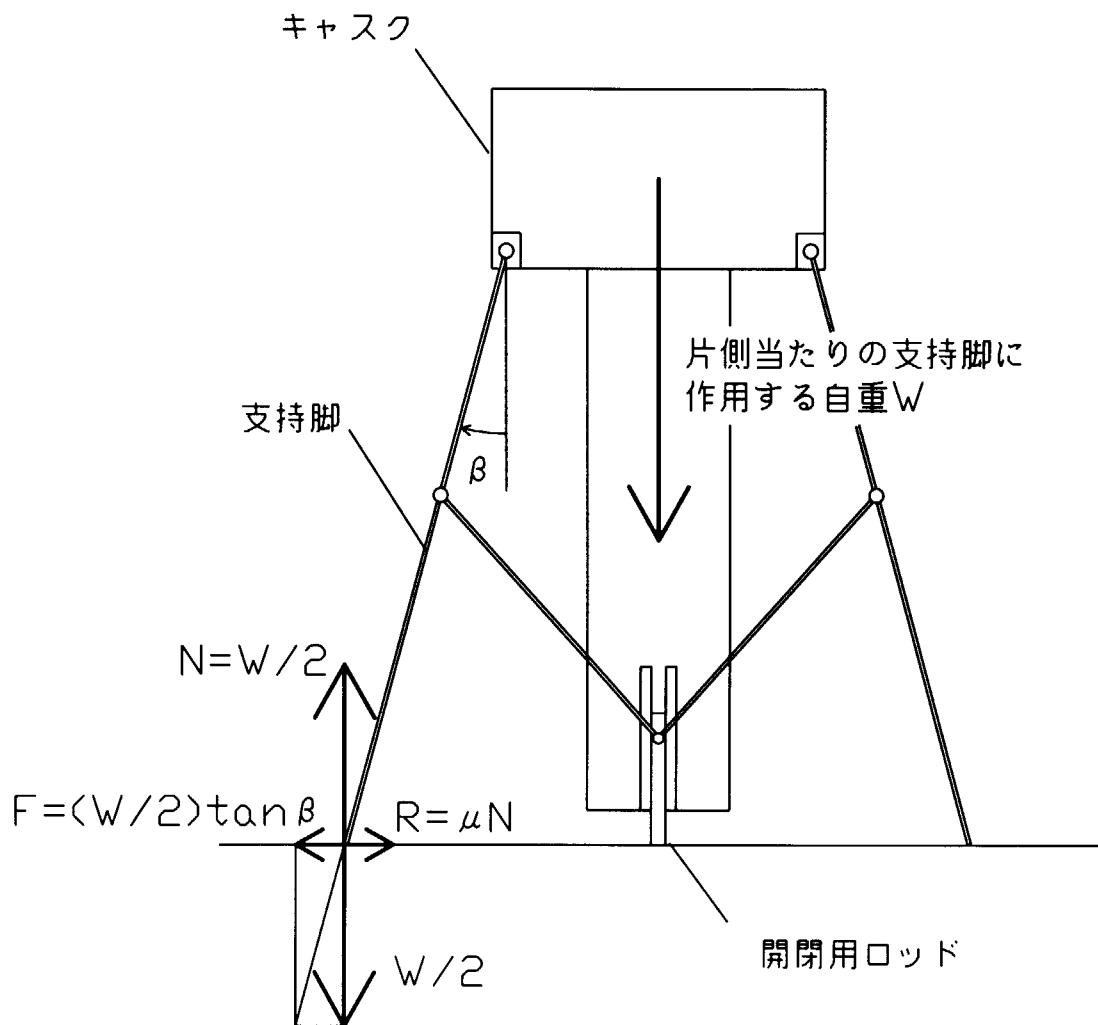


Fig.4.14 キャスク支持脚に作用する力

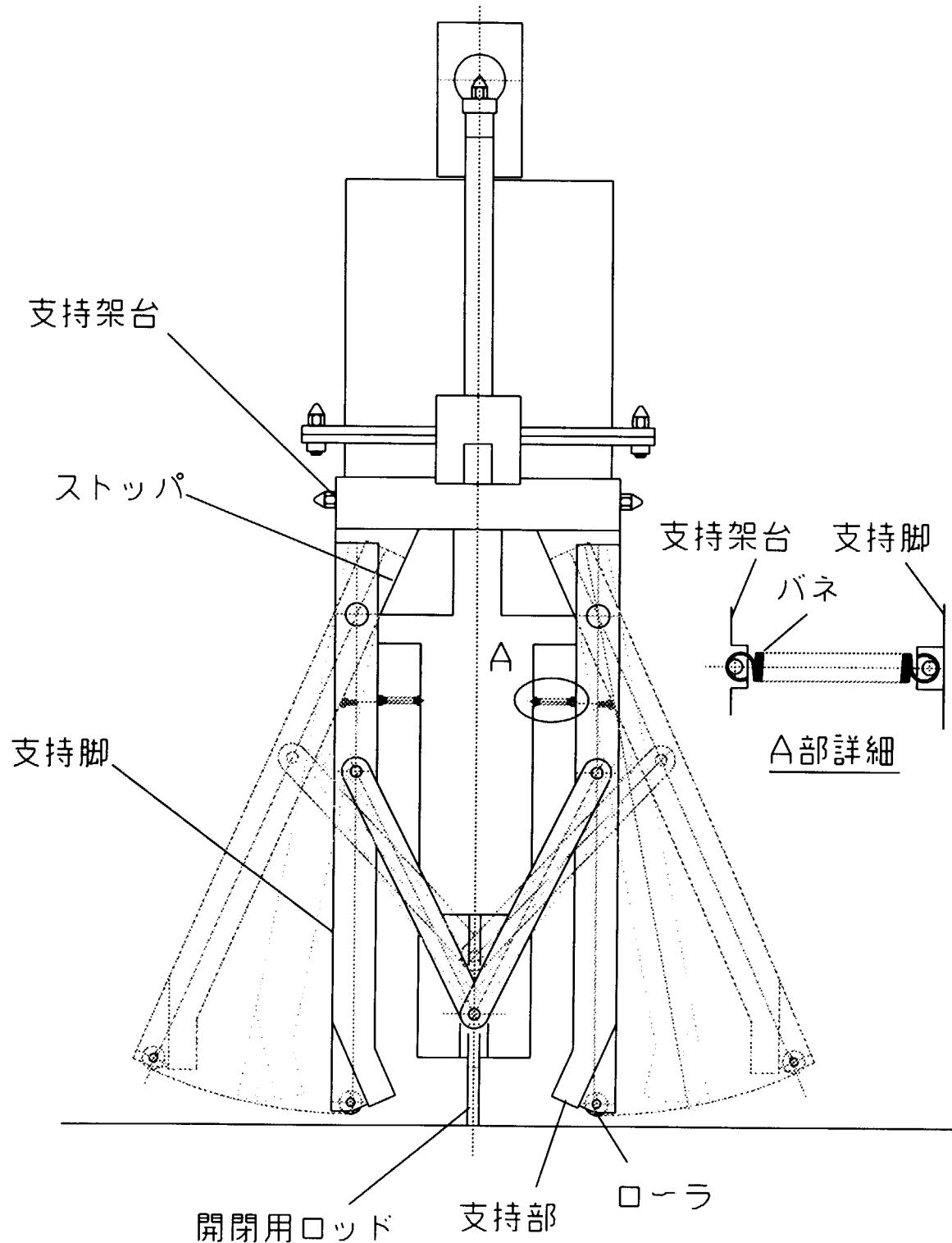
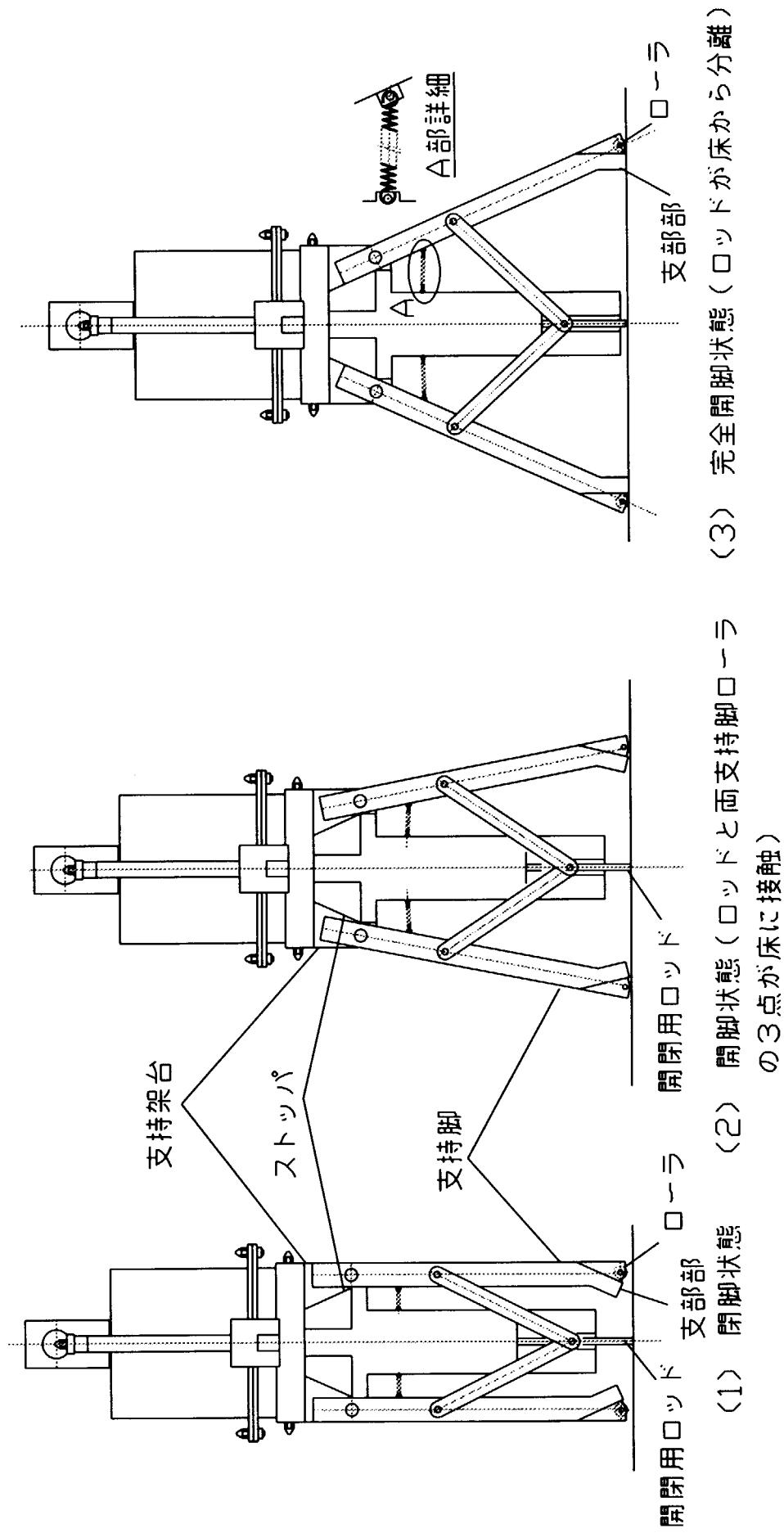


Fig.4.15 キャスク支持脚開閉機構（ローラ方式）(Fig.4.1 の矢視 BB)



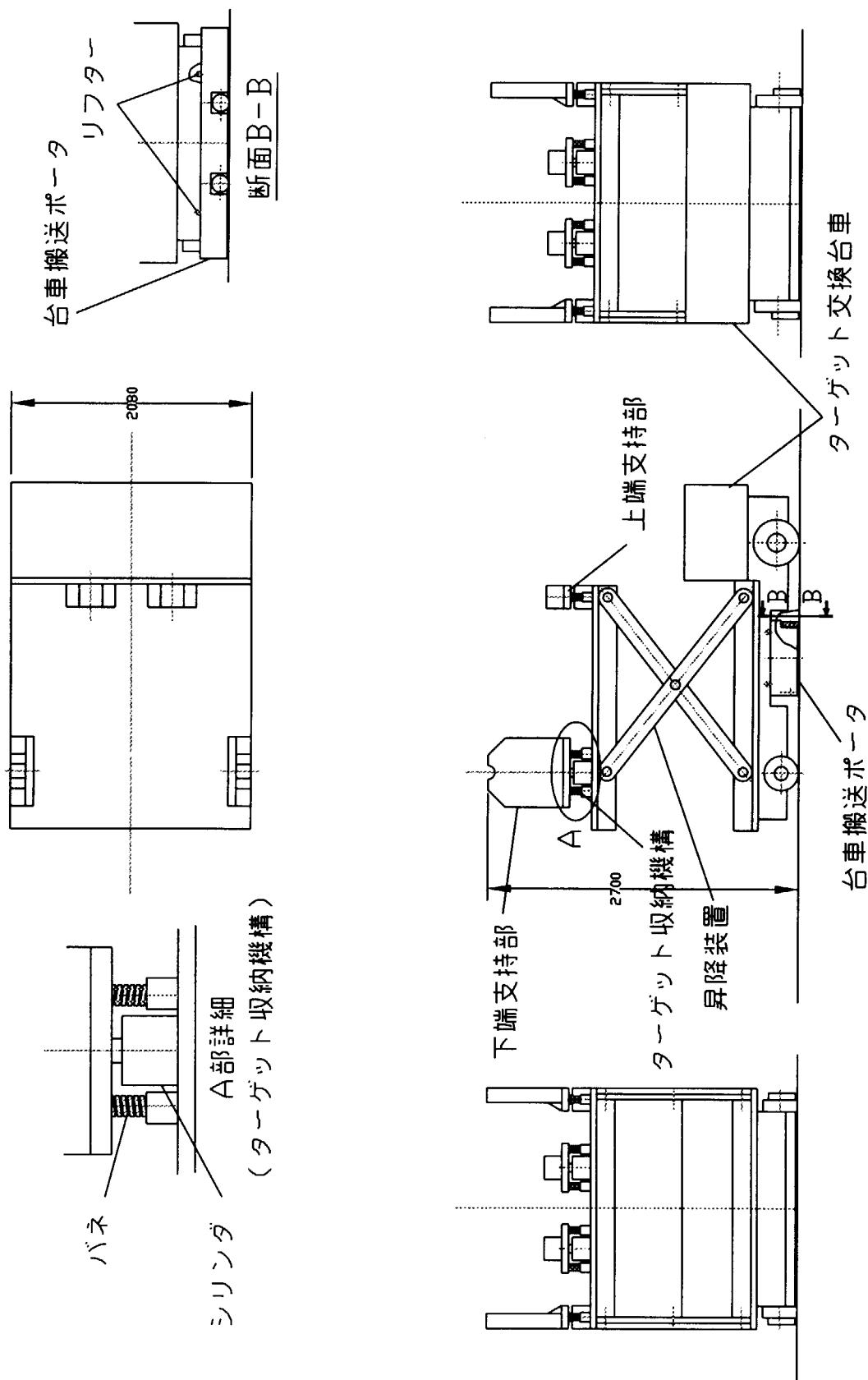


Fig.5.1 ターゲット交換台車

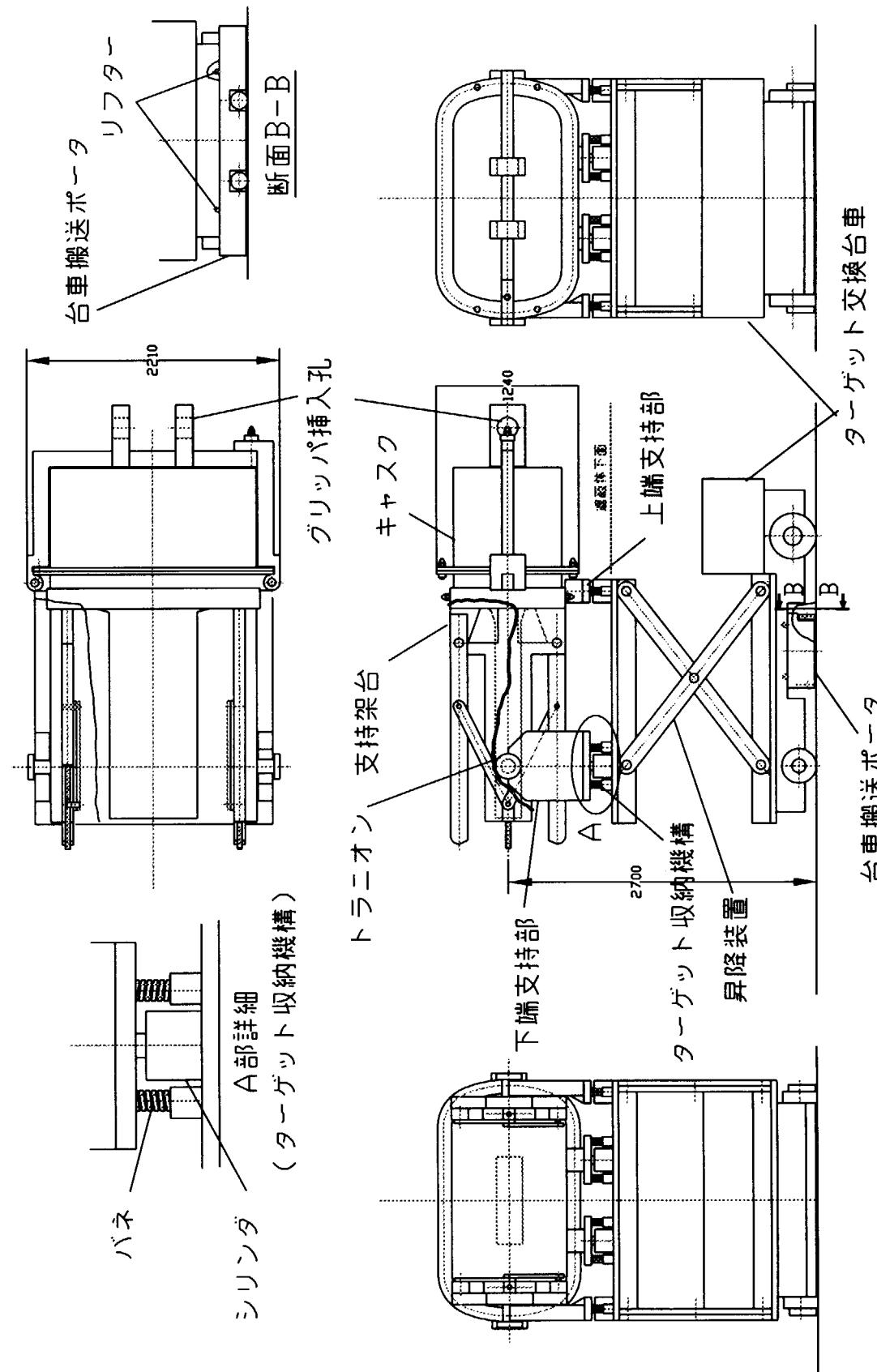


Fig.5.2 ターゲット交換台車(キャスク搭載)

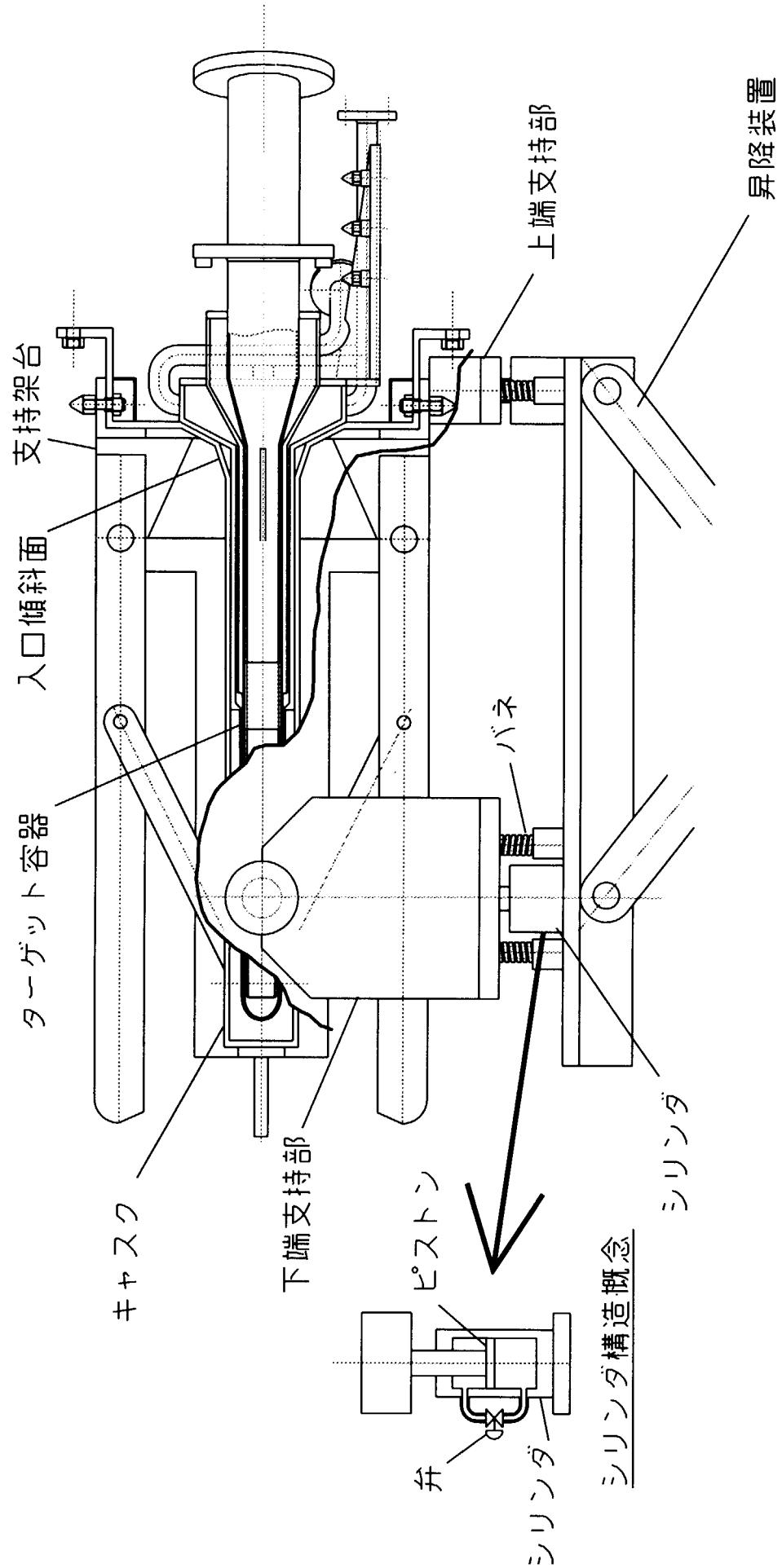


Fig.5.3 使用済ターゲット収納機構

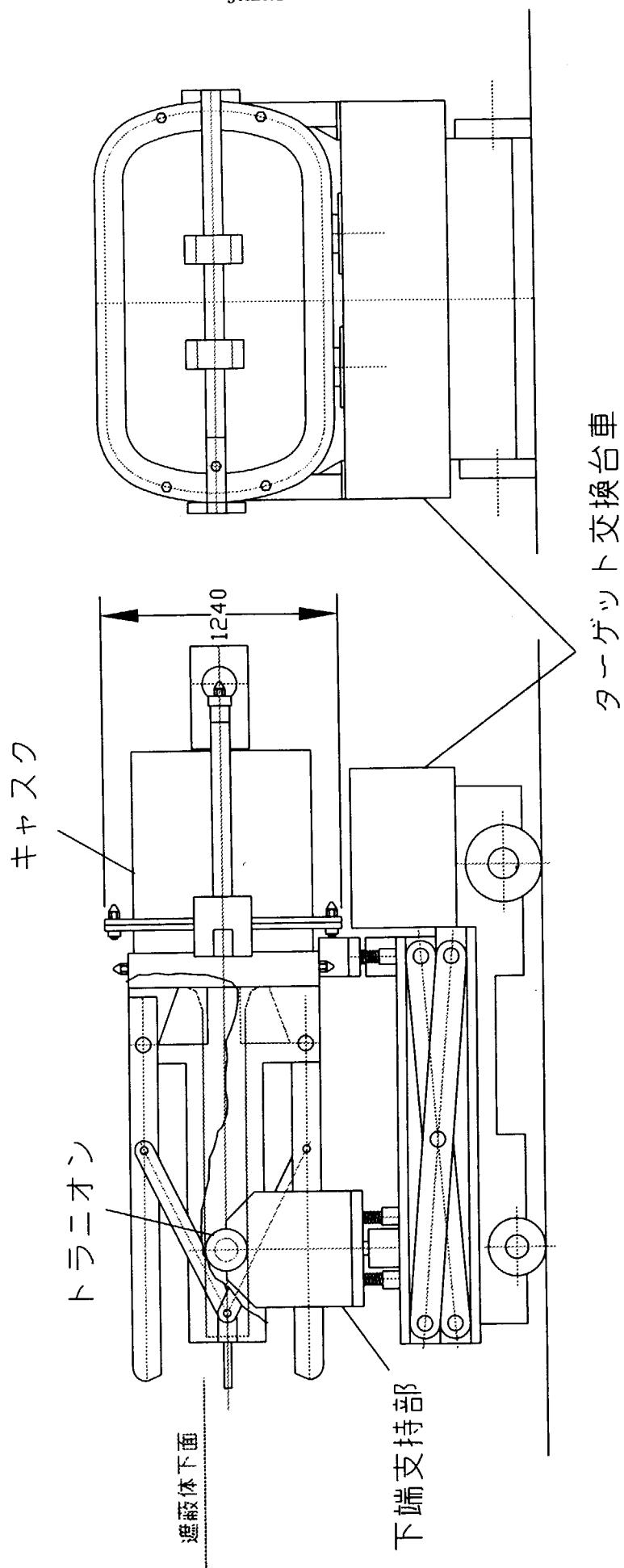


Fig.5.4 ターゲット交換台車(キャスクを下降)

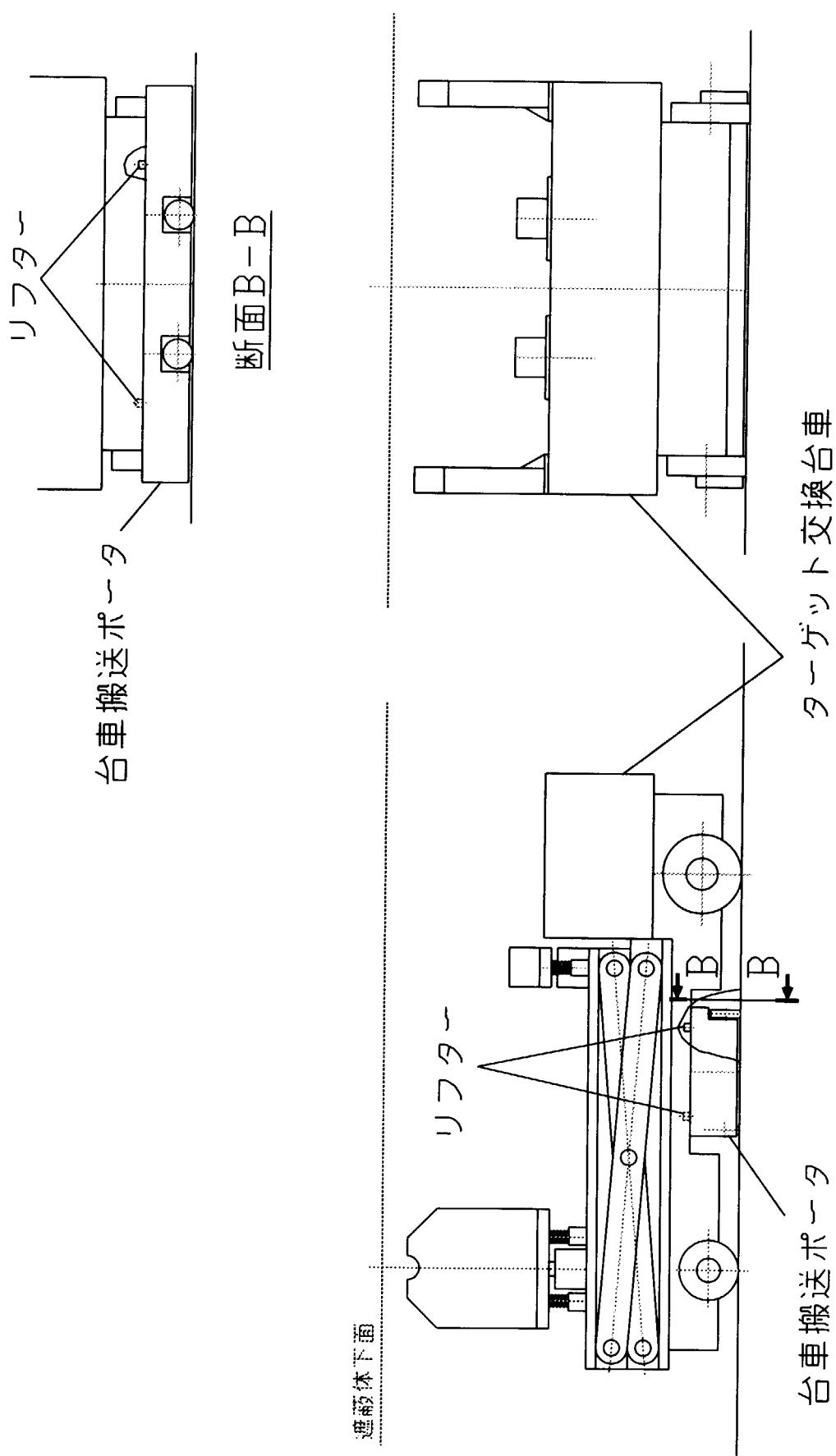


Fig.5.5 ターゲット交換台車（遮蔽体下空間の通過時）

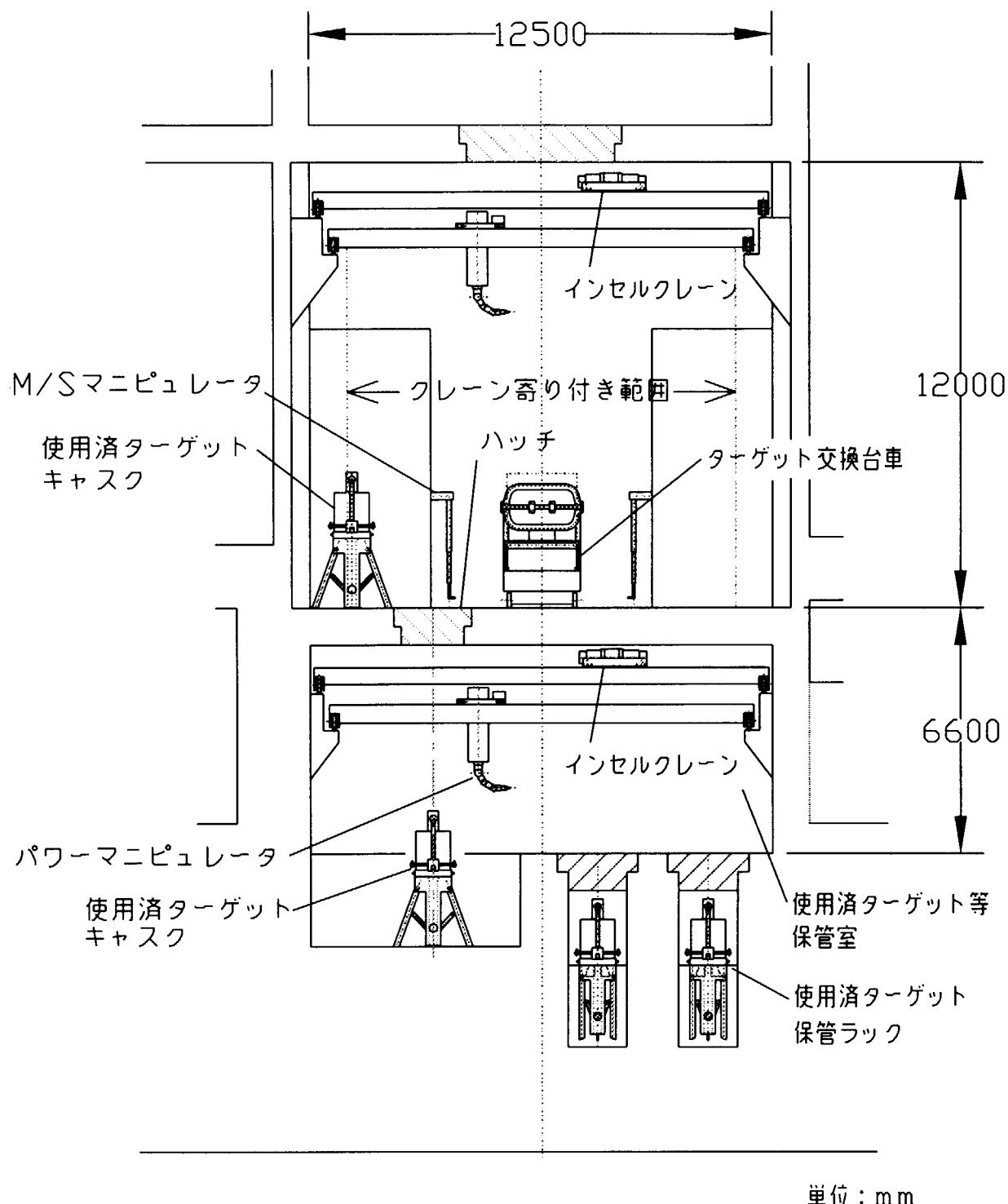


Fig.5.6 使用済ターゲット取扱・保管の設備配置（側面図）

Table 6.1 モニタリング項目

モニタリング設備	モニタリング場所	モニタリング対象	備考
ガスモニタ	・ターゲット取扱い・保管設備エリア排気系	ガス中放射性物質濃度 ガス中水銀蒸気濃度	
エリアモニタ	・マニピュレータ操作室1 ・マニピュレータ操作室2 ・反射体取扱い操作室 ・ターゲット取扱い操作室 ・保管設備操作室 ・出入管理室 ・ターゲット搬出入室	空間線量率	線量率区分Ⅱ* ( $\leq 25 \mu \text{Sv/h}$ )
	・ターゲット等保管室	空間線量率	線量率区分Ⅲ* ( $\leq 100 \mu \text{Sv/h}$ )
	・ターゲット台車取扱い室 ・反射体メンテナンス室 ・ターゲット移送室 ・ターゲット取扱いスペース	空間線量率	線量率区分Ⅳ* ( $> 100 \mu \text{Sv/h}$ )

\* JARI-Tech99-030 にて JRR-3M の線量区分を参考にして設定された線量率区分（暫定値）

Table 6.2 放射線モニタ基本仕様表

モニタ種別	検出器	基本仕様
γ線モニタ	Si半導体	<p>機器構成 検出器感度 工件半径範囲 指示範囲 指示誤差 指示方式 検出器寸法・質量</p> <p>:検出器(アリノ)°・光伝送器内蔵)、警報表示器、監視盤 :約0.5 μSv/h/s<sup>-1</sup> :約60keV～3MeV :±25% (80keV～1.3MeV, Cs-137基準) :1.00E-4～1.00E+1 mSv/h :±10% (線源照射試験による) :LEDデジタル表示 (9.99E±9 mSv/h) :約260W×85D×255H mm・約3kg</p>
排気ダクトモニタ	Si半導体	<p>機器構成 検出下限濃度 センサ流量 指示範囲 指示誤差 指示方式 センサ寸法・質量</p> <p>:検出器、ダクトソフテイ、光伝送器、監視盤 :捕集時間に応じて 3.7E-6/T Bq/cm<sup>3</sup> (U308 β) :約60 l/min :集塵径45mm φ以上 HE-40T :1.00E-1～1.00E+4 s<sup>-1</sup> :±1% (基準) W入力に対し :LEDデジタル表示 (9.99E±9 cps) :約600×440×1300mm・約200kg</p>
排気ガスマニタ	通気型電離箱 (γ補償型)	<p>機器構成 検出下限濃度 検出器容積 検出器遮蔽 指示範囲 指示誤差 指示方式 センサ寸法・質量</p> <p>:検出器*2、ガスセンサ、計測装置、光伝送器、監視盤 :Hg-203=7.0E-5 Bq/cm<sup>3</sup> (目標値) :約30l :約2cm厚 鉛遮蔽 :約2.0E-1～1.00E+4 s<sup>-1</sup> :直線目盛換算 ±4%FS :LEDデジタル表示 (9.99E±9 cps) :約920×800×1200mm・約750kg</p>

Table 6.3 放射線情報監視システム基本仕様表

種 别	構成機器	基 本 仕 様
施設監視システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NTサ-ハ</li> <li>・PC(端末)</li> <li>・コンソールCRT</li> <li>・光磁気ディスク</li> <li>・カラーリンク</li> </ul>	<p>ハ-ド-ウエア</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・NTサ-ハ</li> <li>・PC(端末)</li> <li>・富士通GRANPOWER5000/280相当</li> <li>・富士通FMV-6450DX2相当</li> <li>・放射線監視機能</li> </ul> <p>主要機能</p> <p>放射線監視機能</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・データ収集</li> <li>・データ保存</li> <li>・ディスプレイ出力</li> <li>・プリタ出力</li> <li>・モニタ制御</li> <li>・データ転送</li> <li>・ホ-ムページ</li> <li>・バ-ックアップ</li> </ul> <p>シケンから10秒周期でデータを収集し1分、10分、1時間値を演算 10秒値は1週間、1分、10分、1時間値は1年以上</p> <p>データ一覧、トリップレコード、マップ・系統図、警報履歴一覧等</p> <p>データ一覧、測定記録、警報履歴、画面ハ-ド-ヒ-等</p> <p>モニタ点検操作、警報設定値変更操作等</p> <p>集中監視システムへ1分毎にデータ転送</p> <p>集中監視システムで作成したホ-ムページを表示(データは自動更新)</p> <p>データ収集・保存(10秒値を3日間)</p>

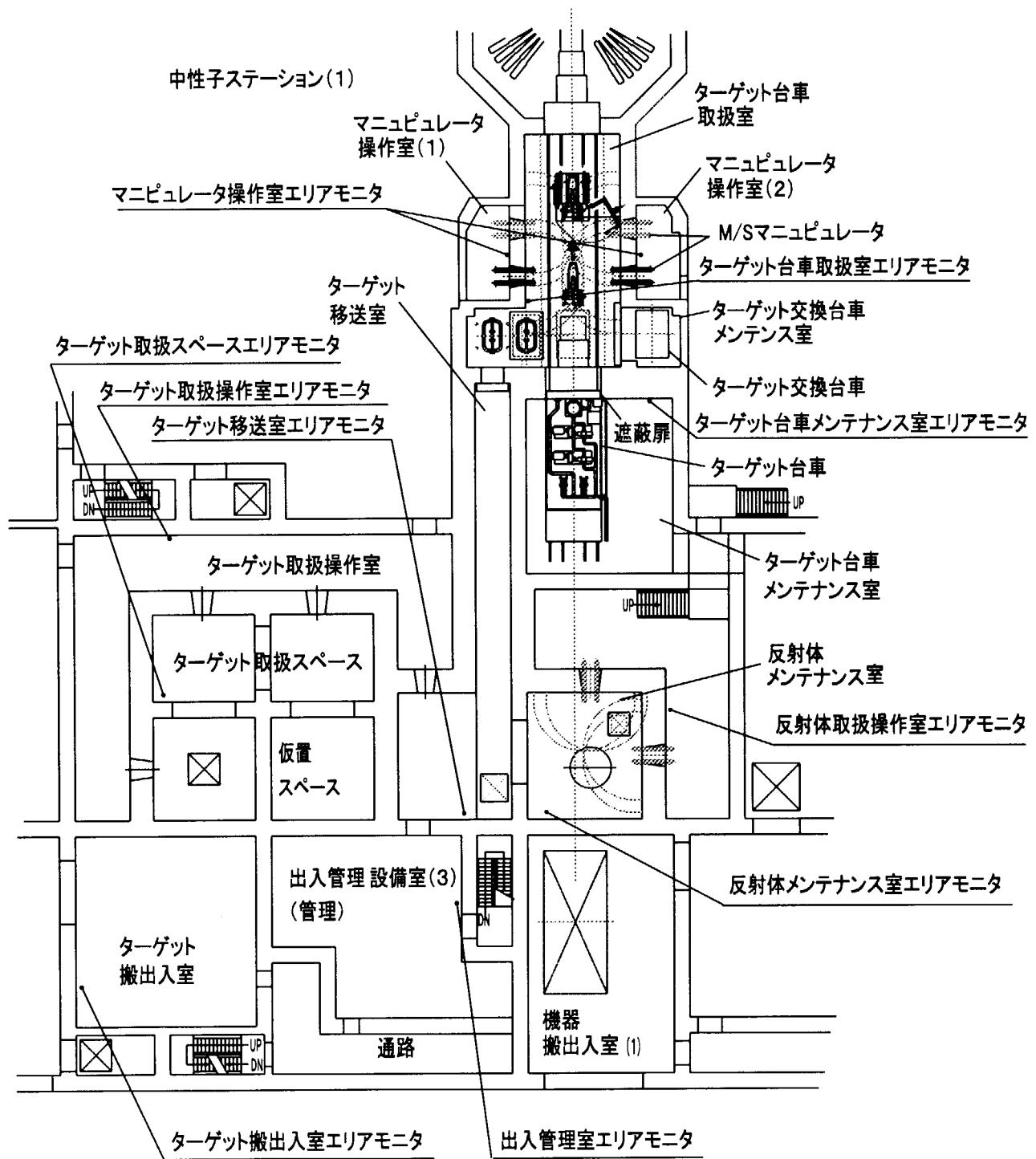


Fig.6.1 使用済ターゲット等移送経路におけるエリアモニタ配置

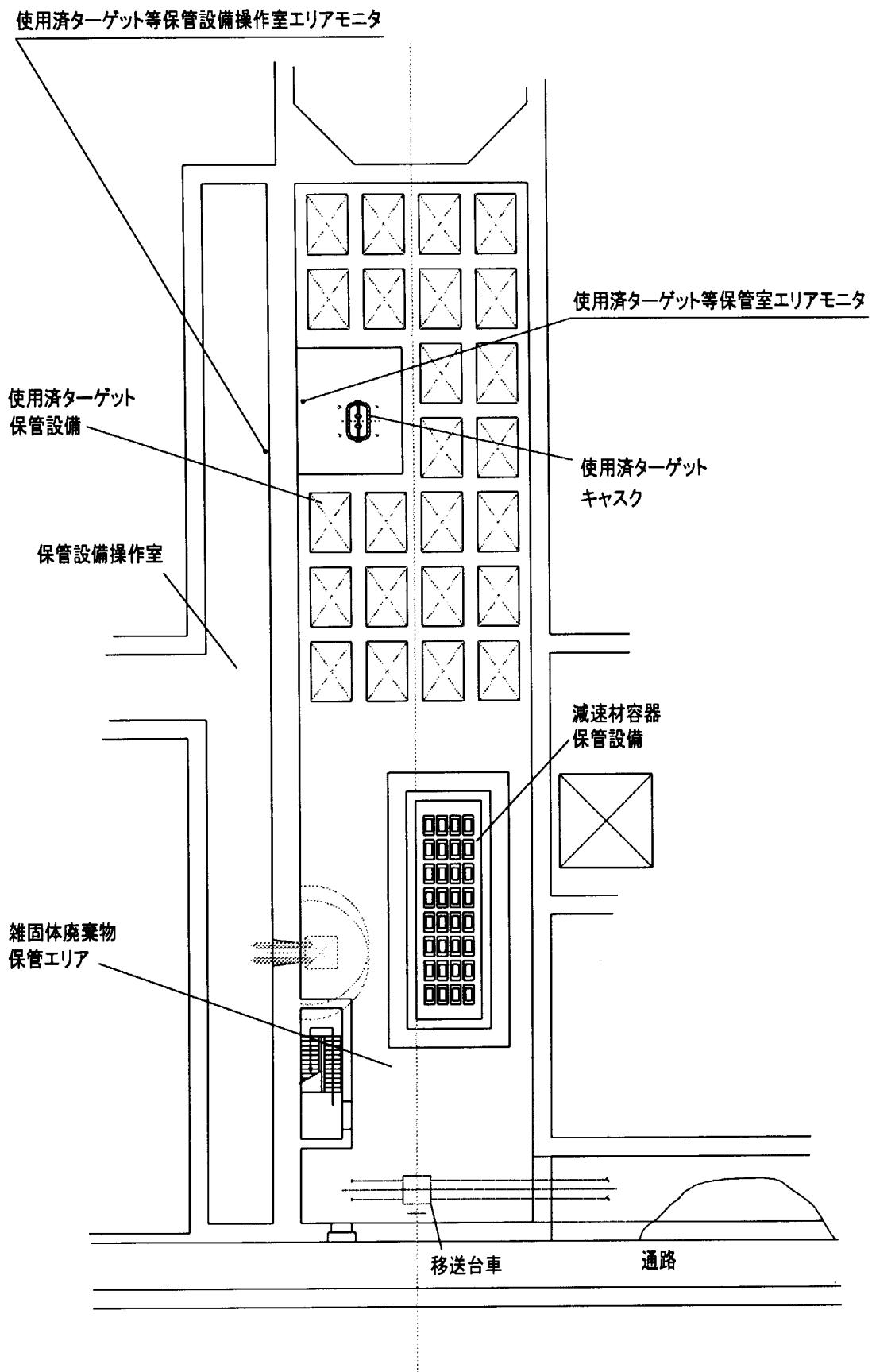


Fig.6.2 使用済ターゲット等保管室におけるエリアモニタ配置

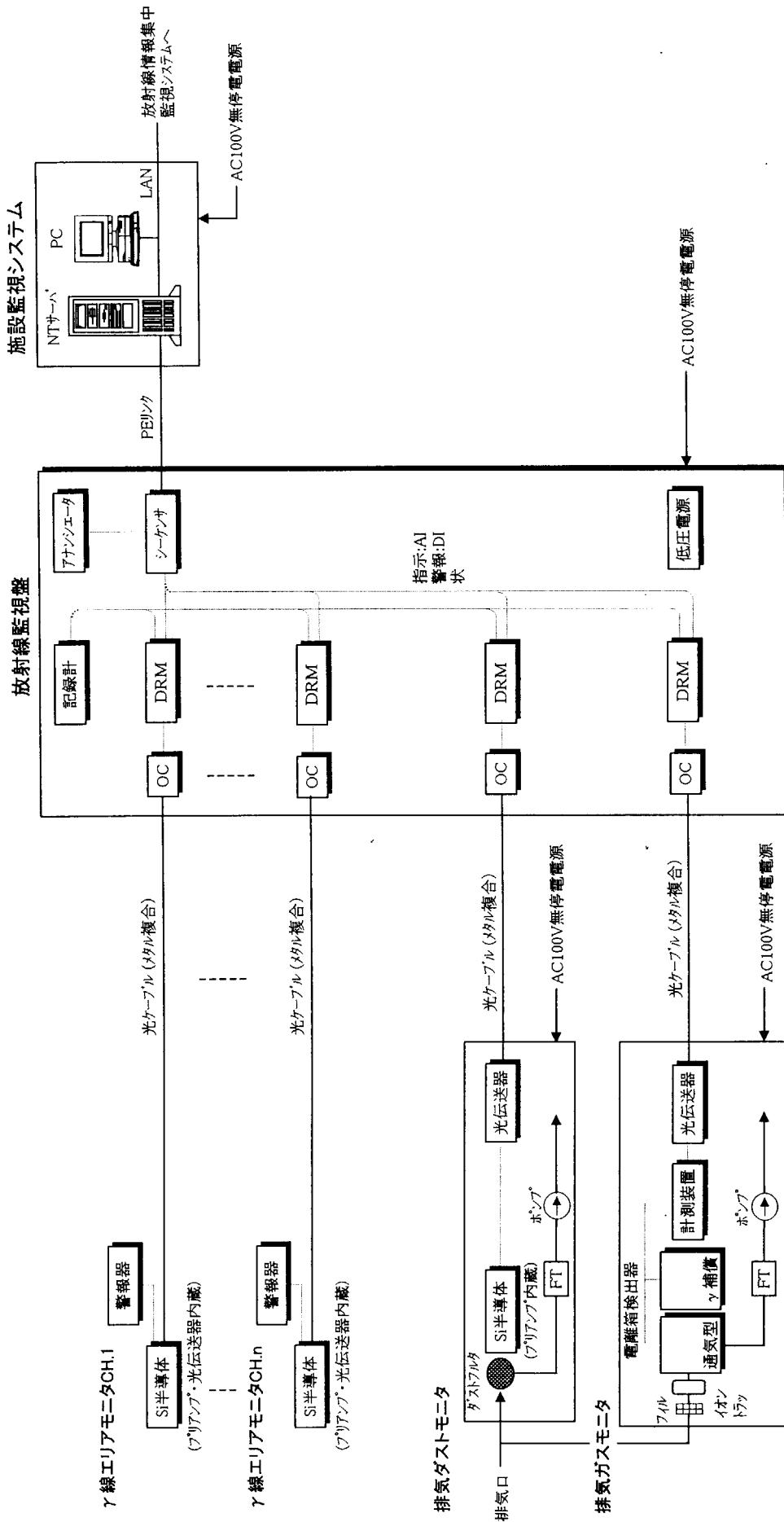


Fig. 6.3 使用済ターゲット取扱・保管設備放射線モニタ構成図

This is a blank page.

Table 7.1 安全設計要求条件の比較と中性子散乱施設のターゲット取扱・保管設備への要求条件の整理

	軽水炉 (軽水炉安全設計審査指針)	高温工学試験研究炉 HTTR (安全設計方針)	FBR 原型炉もんじゅ (安全設計方針)	中性子散乱施設安全設計方針案	備考
試験検査	安全機能を有する構築物、系統及び機器は、適切な定期的試験及び検査ができること。	同左。	安全上重要な機器の適切な定期的試験及び検査ができること。	安全機能を有する構築物、系統及び機器は、適切な定期的試験及び検査ができること。	
格納性と雰囲気浄化	貯蔵設備は、適切な格納系及び空気浄化系を有すること。	同左。	貯蔵設備及び取扱設備は、適切な格納系及び雰囲気浄化系を有すること。	使用済ターゲットの保管設備は、適切な格納系及び空気浄化系を有すること。	未使用ターゲットは放射性物質を含まないため、使用済ターゲットのみに適用する。
貯蔵能力	貯蔵設備は、適切な貯蔵能力を有すること。	同左。	貯蔵設備は、適切な貯蔵容量を有すること。	保管設備は、適切な保管容量を有すること。	
取扱い中の落下防止	取扱い設備は、移送操作中の燃料の落下を防止できること。	取扱い設備は、移送操作中の燃料体の落下を防止できること。	取扱い設備は、移送操作中の燃料の落下を防止できること。	取扱い設備は、移送操作中のターゲットの落下を防止できること。	
放射線防護	(使用済燃料からの) 放射線防護のための適切な遮へいを有すること。	同左。	放射線防護のための適切な遮へいを有すること。	使用済ターゲットからの放射線防護のための適切な遮へいを有すること。	中性子散乱施設では新ターゲットは放射性ではなく軽水炉や HTTR と同様、使用済のみに要求。
崩壊熱除去	(使用済燃料の) 貯蔵設備は、崩壊熱を十分に除去し、最終的な熱の逃がし場へ輸送できる系統及びその浄化系を有すること。	同左。	(使用済燃料の) 貯蔵設備は、残留熱を十分に除去できる冷却設備およびその浄化系を有すること。	使用済ターゲットの保管設備は、崩壊熱を十分に除去し、最終的な熱の逃がし場へ輸送できる系統及びその浄化系を有すること。	
冷却材の保持	(使用済燃料の) 貯蔵設備の冷却水保有量が著しく減少することを防止し、適切な漏えい検知を行うことができる。	同左。	(使用済燃料の) 貯蔵設備の冷却材保有量が著しく減少することを防止し、適切な漏えい検知を行うことができる。	使用済ターゲット保管設備内の自然対流が確保できるように流路閉塞を防止し、適切な温度上昇検知を行うことができる。	使用済ターゲットは、空気による自然対流冷却が可能なため気中保管する。
貯蔵時の落下への対応	(使用済燃料の) 貯蔵設備は、燃料集合体の取扱中に想定される落下時においても、その安全機能が損なわれる恐れがないこと。	(使用済燃料の) 貯蔵設備は、燃料体の取扱中に想定される落下時においても、安全機能が損なわれる恐れがないこと。	(使用済燃料の) 貯蔵設備は、燃料集合体の取扱中に想定される落下時にも、損傷するおそれがないこと。	使用済ターゲットの保管設備は、ターゲット等の取扱中に想定される落下時にも、安全機能が損なわることがないこと。	
取扱中の過熱防止	-	-	(使用済燃料の) 取扱い設備は取扱中の燃料の温度が著しく上昇することを防止できること。	使用済ターゲットの取扱設備は取扱中のターゲット等の温度が著しく上昇することを防止できること。	使用済ターゲットは、空気による自然対流冷却により温度上昇を防止可能である。
核燃料の臨界防止	核燃料の貯蔵設備及び取扱設備は、幾何的な安全配置又は他の適切な手段により、想定されるいかなる場合でも、臨界を防止できる設計であること。	同左。	核燃料の貯蔵設備および取扱い設備は、幾何的な安全配置、または他の適切な手段により、想定されるいかなる場合でも、臨界を防止する設計であること。	-	中性子散乱施設では核燃料がないため臨界防止規定は必要なし。
モニタリング	燃料取扱場所は、崩壊熱の除去能力の喪失に至る状態及び過度の放射線レベルを検出できるとともに、これを適切に従事者に伝えるか、又はこれに対して自動的に対処できる設計であること。	核燃料取扱い場所は、残留熱の除去能力の喪失に至る状態及び過度の放射線レベルを検出できるとともに、その事態を適切に放射線業務従事者に伝えるか、又は自動的に対処できる設計であること。	核燃料の取扱い場所は、残留熱の除去能力の喪失に至る状態及び過度の放射線レベルが検出できるとともに、その事態を適切に従事者に伝えるか、又は自動的に対処できる設計であること。	ターゲット等の取扱場所は、残留熱の除去能力の喪失に至る状態及び過度の放射線レベルが検出できるとともに、その事態を適切に従事者に伝えるか、又は自動的に対処できる設計であること。	

Table 7.2 安全設計要求への適合のための設計方針の比較とターゲット保管設備の設計方針の整理 (1/5)

	軽水炉（軽水炉安全設計方針への適合のための設計方針）	HTTR(安全設計方針への適合のための設計方針)	FBR 原型炉もんじゅ（安全設計方針への適合のための設計方針）	中性子散乱施設安全設計方針案への適合のための設計方針	備考
試験検査	燃料交換機は、その使用前に必ず機能試験検査を実施する。原子炉建屋クレーン、燃料プール冷却浄化系ポンプ等は定期的に検査する。	新燃料及び使用済燃料の貯蔵設備及び取扱設備のうち、安全機能を有する燃料取扱い設備等は、定期的な試験及び検査ができるようにする。	核燃料の貯蔵設備及び取扱設備のうち、安全機能を有する燃料取扱い設備等は、定期的な試験及び検査ができるようになる。	安全機能を有する構築物、系統及び機器は、適切な定期的試験及び検査がされること。	移送設備、保管設備の主要機器については定期的試験・検査が行えるようとする
格納性と雰囲気浄化	貯蔵設備は、原子炉建屋原子炉棟内に設置し、適切な雰囲気を換気空調系で維持する設計とする。また、燃料落下等により放射性物質が放出された場合は、その飛散を防ぎ、非常用ガス処理系で処理する設計とする。	貯蔵設備は、適切な格納性を有し、換気系を備えた設計とする。使用済燃料を収納する機器は、気密性を有する設備とし、燃料が取扱われる部屋の雰囲気の排気は、排気フィルタユニットを通した後、排気筒から排出するようにする。	貯蔵設備は、適切な格納系及び雰囲気浄化系を有する区画として設計する。使用済燃料を収納する機器は、気密性を有する設計とし、燃料が取扱われる部屋の雰囲気の排気は、排気フィルタユニット又は浄化フィルタユニットを通した後、排気筒から排出する設計とする。燃料出入設備内の気相部より建物への漏えい率は $0.1\% / d$ 以下となるような設計とする。	保管設備は適切な格納性を有し、換気系を備えた区画に配置する。使用済ターゲットを収納する容器は気密性を有する機器とし、使用済ターゲットが取り扱われる部屋の雰囲気の排気は排気フィルタユニット（水銀捕集機構を含む）を通した後、排気筒から排出するようとする。	貯蔵設備では放射性物質の閉じこめと雰囲気ガスのフィルタ後の排気筒からの管理放出を実施する。
貯蔵能力	新燃料貯蔵庫の貯蔵能力は、全炉心燃料の約 40%とする。使用済燃料プールの貯蔵能力は、全炉心燃料の約 500%とする。	新燃料の貯蔵容量は、1.5 炉心相当分とする。使用済燃料の貯蔵容量は、原子炉建屋内で約 2 炉心相当分、使用済燃料貯蔵建屋内で約 10 炉心相当分とする。	新燃料の貯蔵容量は、燃料交換時に必要とする燃料を考慮し、新燃料貯蔵ラック、炉外燃料貯蔵槽合わせて 1/5 炉心分以上の容量を有し、また、使用済燃料の貯蔵容量は、燃料交換時に取出されている燃料を考慮し、炉外燃料貯蔵槽、燃料池合わせて 21/5 炉心分以上の容量を有するように設計する。	新ターゲット保管設備は、計画外交換にも即応可能のように、ターゲット等の約 1 年分の保管容量を有する設計とする。中性子散乱施設内使用済ターゲット保管施設には、8 年相当分の保管容量を有するように設計する（暫定）	ターゲット交換は年間 3 体として保管容量を暫定的に選定した。 1 年分保管容量 ：ターゲット 3 基 8 年相当容量 ：水銀ターゲット 24 基
取扱い中の落下防止	燃料交換機の燃料つかみ具は二重のワイヤや種々のインターロックを設け、燃料移動中の燃料集合体の落下を防止できる設計とする。 また、原子炉建屋クレーンの主要要素は種々の二重化を施すとともに使用済燃料輸送容器を吊った場合は、使用済燃料プールの上を走行できない等のインターロックを設ける設計とする。	燃料取扱設備は、取扱中の燃料体の落下に、十分な配慮を払う。	燃料集合体を取扱う通路及び、吊上げ駆動系は、予想される変形状態でも取扱中の燃料を落下させることのないように十分配慮した設計とする。	ターゲット取扱設備は、クレーン等のワイヤの多重化、インターロック等により移送操作中のターゲットの落下を防止できること。	落下防止のための具体的な対応について軽水炉を参考にした。

Table 7.2 安全設計要求への適合のための設計方針の比較とターゲット保管設備の設計方針の整理（2/5）

	軽水炉（軽水炉安全設計方針への適合のための設計方針）	HTTR（安全設計方針への適合のための設計方針）	FBR 原型炉もんじゅ（安全設計方針への適合のための設計方針）	中性子散乱施設安全設計方針案への適合のための設計方針	備考
放射線防護	使用済プールの壁面及び底部はコンクリート壁による遮へいを施すとともに、使用済燃料の上部は十分な遮へい効果を有する水深を確保する設計とする。	使用済燃料を取扱う移送機器は、十分な厚さの鉄あるいは鉛等により遮へいする。使用済燃料貯蔵設備には、建家のコンクリートによる遮へいのほか、十分な厚さのコンクリートのプラグ等の遮へいを設ける。	新燃料及び使用済燃料の取扱及び貯蔵設備は、作業員の被曝を合理的に達成できる限り低くするように設計する。 使用済燃料を取扱う機器は、内部の汚染流体が運転員の立入領域に波及することを最小限に抑制するように設計する。	使用済ターゲット等の取扱い及び保管設備は、放射線作業従事者等の被曝を合理的に達成可能な限り低くするように設計する。 使用済ターゲット保管設備の壁面及び底部はコンクリート壁による遮へいを施すとともに、使用済ターゲットの上部は十分な厚さのコンクリートのプラグ等の遮へいを設ける。 使用済ターゲットのホットセル内の移送時にはホットセル遮へい壁で十分な遮へい効果を確保するとともに、ホットセル内での移送機故障時にはセル外から遮へい付きキャスク等で取り出して対応できるようする。ホットセル外移送時には遮へい付き容器等に入れるなどにより移送機故障時の対応においても運転員の被曝を最小限とする設計とする。	保管設備の遮蔽要求については HTTR を参考に設定した。 移送時の遮へいについては、具体的な対応策を含めて記載した。
崩壊熱除去	使用済燃料プールの崩壊熱は燃料プール冷却浄化系の熱交換器で使用済燃料プール水を冷却して除去するが、必要に応じて残留崩壊熱除去系の熱交換器を併用する。燃料プール冷却浄化系及び残留崩壊熱除去系の熱交換器で除去した熱は、原子炉補機冷却系を経て最終的な熱の逃がし場である海へ輸送できる設計とする。 燃料プール冷却浄化系は、ろ過脱塩装置を設置して使用済燃料プール水の浄化を行う設計とする。	原子炉建家内の使用済燃料貯蔵設備では、使用済燃料の崩壊熱の除去は、十分な熱除去能力を有し、使用済燃料から除去した熱を補機冷却水設備に輸送する。なお、補機冷却水設備は冷却塔を介して、最終的な熱の逃がし場である大気に熱を輸送する。 使用済燃料貯蔵建家内の使用済燃料の崩壊熱は、構造物及び雰囲気の空気に伝えられ、大気に放散する。	炉外燃料貯蔵槽冷却設備は、炉外燃料貯蔵槽内ナトリウムを冷却し、炉外燃料貯蔵槽に貯蔵した使用済燃料からの崩壊熱を十分除去できる能力を持つ設計とする。 炉外燃料貯蔵槽内ナトリウムに含まれる不純物を除去し浄化するために、純化系を設ける。 また、燃料池水冷却浄化装置は燃料池水を冷却し、燃料池に貯蔵した。使用済燃料からの崩壊熱を十分除去できる能力を持つ設計とする。 燃料池水冷却浄化装置は燃料池水を適切な水質に維持できる設計とする。	使用済ターゲットの保管設備は、崩壊熱を除去するのに十分な熱除去能力を有する設計とする。 動的機器を用いる場合には、予備を備えるものとする。 また、動的機器を採用する場合には、外部電源喪失時にも対応可能のように非常用電源に接続する設計とする。	参考文献 6 の記載を参考に動的機器の予備、外部電源喪失時の対応を追加した。

Table 7.2 安全設計要求への適合のための設計方針の比較とターゲット保管設備の設計方針の整理 (3/5)

	軽水炉（軽水炉安全設計方針への適合のための設計方針）	HTTR（安全設計方針への適合のための設計方針）	FBR 原型炉もんじゅ（安全設計方針への適合のための設計方針）	中性子散乱施設安全設計方針案への適合のための設計方針	備考
冷却材の保持	<p>使用済燃料プールの耐震設計は、As クラスで設計し、内面はステンレス鋼でライニングし漏えいを防止する。また使用済燃料プールには排水口を設けないとともに、使用済燃料プール水に入る配管には逆止弁を設けサイフォン効果により使用済燃料プール水が流出しない設計とする。</p> <p>また、万一の使用済燃料プールライニングの破損による漏えいを監視するため漏えい水検出器及び燃料プール水位検出器を設ける設計とする。</p>	<p>原子炉建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プールは、冷却水の保有量が著しく減少することを防止するため、十分な耐震性を有するようにするとともに、冷却水の減少を引起こす可能性のあるドレン配管は設けないようにし、貯蔵プールに接続する配管は、冷却水の著しい減少を引起すことのないようにする。</p> <p>使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プールは、冷却水漏えい監視のため、漏えい検知装置を備えるようとする。</p>	<p>使用済燃料を貯蔵する炉外燃料貯蔵槽及び燃料池は、冷却材の保有量が著しく減少することを防止するため、十分耐震性を有する設計とするとともに、ドレン配管等は冷却材の著しい減少を引起こすことのない設計とする。</p> <p>使用済燃料を貯蔵する炉外燃料貯蔵槽及び燃料池には冷却材の漏えい監視のため、漏えい検出器及び炉外燃料貯蔵槽、燃料池液位監視のための液位低警報を有する設計とする。</p> <p>炉外燃料貯蔵槽は、ナトリウムが漏えいした場合においても、外容器により必要最低液位が保持できる設計とする。</p>	<p>使用済ターゲットの保管設備は、空気による自然対流に必要な流路の確保ができるよう十分な耐震性を有する設計とする。</p> <p>使用済ターゲットキャスクには、内部の温度監視のため、温度検出器及び過熱警報を有する設計とする。</p>	軽水炉、HTTR の設計を参考に設定
貯蔵時の落下への対応	<p>燃料交換機の燃料つかみ具は、二重のワイヤや種々のインターロックを設け、かつ、ワイヤ、インターロック等は、その使用前に必ず機能試験、検査を実施するので燃料集合体取扱中に燃料集合体が落下することはないと考えるが、万一の落下時にも使用済燃料プールのライニングは、落下した燃料集合体によって使用済燃料プールの機能を失うような損傷は生じない設計とする。なお、使用済燃料輸送容器の落下については、キャスクピットは使用済燃料プールとは障壁で分離し、かつ、原子炉建屋クレーンは種々の二重化を施すとともに使用済燃料輸送容器を吊った場合は、使用済燃料プール上を走行できない等のインターロックを設ける設計とすることで、使用済燃料輸送容器が使用済燃料プールに落下することを想定する必要はない。</p>	<p>使用済燃料貯蔵設備は、燃料体の取扱の落下を想定しても、使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プール水の漏えい等を引き起こすような損傷を起こさないようにする。</p>	<p>炉外燃料貯蔵槽、燃料池は燃料集合体の取扱時に万一落下を想定しても著しい冷却材の減少を引起こすような損傷を避けるように設計する。</p>	<p>使用済ターゲット保管設備は、十分な構造強度・耐震性を有するようにし、万一ターゲット等の取扱中の落下を想定しても保管設備が自然対流等の機能障害を引き起こすような重大な構造上の損傷を生じない設計とする。</p>	

Table 7.2 安全設計要求への適合のための設計方針の比較とターゲット保管設備の設計方針の整理 (4/5)

	軽水炉（軽水炉安全設計方針への適合のための設計方針）	HTTR（安全設計方針への適合のための設計方針）	FBR 原型炉もんじゅ（安全設計方針への適合のための設計方針）	中性子散乱施設安全設計方針案への適合のための設計方針	備考
取扱中の過熱防止	-	-	取扱中の燃料の温度は、通常時 675°C 以上に上昇することの無いような設計とする。原子炉容器内では、燃料は常にナトリウム中で取扱われ、ナトリウムは冷却の役目を果たす。原子炉容器外で高崩壊熱状態で取扱う原子炉容器、炉外燃料貯蔵槽、及び燃料検査設備の検査槽間では燃料はナトリウム入り燃料移送ポットに入れて取扱う。冷却系は燃料移送ポットを冷却して、取扱中の燃料からの崩壊熱を十分除去できる能力を持つ設計とする。原子炉容器外で低崩壊熱状態で取扱われる炉外燃料貯蔵槽、燃料洗浄槽、及び燃料水中移送室では、燃料はガス中で取扱う。冷却系は取扱中の燃料からの崩壊熱を十分除去できる能力を持つ設計とする。取扱い設備での使用済燃料の雰囲気ガスは、冷却に必要な条件で保持できる設計とする。燃料移送ポットを取扱う設備のうち、冷却用プロワは多重性を考慮した設計とし、非常用所内電源系より給電できる設計とする。燃料移送用ポットを取り扱う設備は、地震時でも冷却の容量を喪失しない設計とする。	取扱中の使用済ターゲットの温度は、通常時 200°C 以上に上昇することの無いような設計とする。 取扱中の使用済ターゲットは空気による自然対流冷却を確保する設計とする。	制限温度は、ターゲットの腐食が著しくなる温度 250°C に余裕をみて 200°C とする（暫定）。
モニタリング	使用済燃料プールには、崩壊熱除去能力の喪失に至る状態を監視する目的で、燃料プール水位検出器及び燃料プール水温度検出器を設け、異常が検出された場合には中央制御室に警報を出し、適切な処置がなされるよう運転員に伝える設計とする。 また、燃料取替床放射線モニタにより、過度の放射線レベルを検出した場合は、非常用ガス処理系を自動的に起動させる設計とする。	原子炉建家内の使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プールは、冷却水の漏えいを監視できる設計とする。また、使用済燃料貯蔵設備の貯蔵プールの水位を監視するため「水位低」の警報を設け、中央制御室に警報を発する設計とする。 使用済燃料貯蔵設備のプール水冷却浄化設備の運転状況は、現場及び中央制御室で監視できるように設計する。使用済燃料貯蔵建家の使用済燃料貯蔵設備では、残留熱は、貯蔵セル内の空気に伝えられるので、雰囲気温度を現場で監視できるように設計する。 核燃料の取扱場所には、周辺の放射線監視のためのエリアモニタを設け、過度の放射線レベルに達したときは中央制御室に警報を発する設計とする。	使用済燃料を貯蔵する炉外燃料貯蔵槽及び燃料池には、冷却材の漏えい監視のため、漏えい検出器を設ける。 また、冷却材液位監視のため、液位低警報を設け、燃料取扱設備操作室に警報を発する設計とする。 使用済燃料を貯蔵する設備の冷却系及び純化系の運転状況は、燃料取扱設備操作室で監視できるようにする。 また、炉外燃料貯蔵槽冷却設備の安全上重要な監視項目、警報は中央制御室でも監視できるようにする。 核燃料の取扱場所には周辺の放射線監視のためのエリアモニタを設けてガンマ線、中性子線、アルファ線の監視を行い、過度の放射線レベルに達した時は中央制御室に警報を発する設計とする。	ターゲット等の取扱場所は、周辺の放射線監視を行い、過度の放射線レベルに達した場合には中央制御室に警報を発する設計とする。 施設内の使用済ターゲット保管設備に保管中の使用済ターゲットの過熱監視のため、キャスク内の温度監視ができるようにするとともに「温度高」警報を設け、中央制御室に警報を発するようにする。	放射線監視はエリアモニタを設置して行う。

Table 7.2 安全設計要求への適合のための設計方針の比較とターゲット保管設備の設計方針の整理（5/5）

	軽水炉（軽水炉安全設計方針への適合のための設計方針）	HTTR（安全設計方針への適合のための設計方針）	FBR 原型炉もんじゅ（安全設計方針への適合のための設計方針）	中性子散乱施設安全設計方針案への適合のための設計方針	備考
その他 （水銀に対する配慮）	-	-	-	<p>水銀を内包するターゲットを収納する移送容器等は、水銀蒸気の拡散を防止するために気密構造とし、ターゲット外へ漏えいした水銀回収の必要がある場合に回収が容易にできるように内面を亜鉛コーティングする。</p> <p>開放状態で取り扱うホットセル内はライナ張りとし水銀の拡散を抑制する。</p> <p>また、室内換気空調系へ流入した水銀蒸気は水銀用キレート材フィルタまたは活性炭で吸着捕集する。</p>	労働基準法及び公害対策基本法からの要求は、安全上放射性物質としての取扱に包絡される。

## 付録 1

### キャスク表面での室内空気による自然対流熱伝達率

空気温度  $T_{\infty} = 303\text{K}$  (30°C)、使用済ターゲットキャスク温度  $T_w = 373\text{K}$  (100°C) として、“伝熱工学設計資料改訂第4版”(日本機械学会、1986.10.20) I編2.3節(p.68~70)に基づき、キャスク表面の自然対流熱伝達率を以下のように評価した。

代表温度  $T_r$  は

$$\begin{aligned} T_r &= T_w - 0.38 (T_w - T_{\infty}) \\ &= 373 - 0.38 \times (373 - 303) \\ &= 346\text{ K} \end{aligned}$$

であるから、

熱伝導率 :  $\lambda = 0.0294\text{ W/m}\cdot\text{K}$

動粘性率 :  $\nu = 0.2051 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$

プラントル数 :  $\text{Pr} = 0.718$

となり、プラントル数の関数  $C_1$  は、

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{3}{4} \left( \frac{\text{Pr}}{2.4 + 4.9\sqrt{\text{Pr}} + 5\text{Pr}} \right)^{1/4} \\ &= \frac{3}{4} \left( \frac{0.718}{2.4 + 4.9\sqrt{0.718} + 5 \times 0.718} \right)^{1/4} \\ &= 0.387 \end{aligned}$$

となる。また、

体積膨張係数 :  $\beta = 1/T_{\infty}$

$$= 1/303$$

であるから、高さ  $x$  の局所グラスホフ数  $\text{Gr}_x$  は、

$$\begin{aligned} \text{Gr}_x &= g \beta (T_w - T_{\infty}) x^3 / \nu^2 \\ &= 9.8 \cdot (1/303) \cdot (373 - 303) \cdot x^3 / (0.2051 \times 10^{-4})^2 \\ &= 5.38 \times 10^9 x^3 \end{aligned}$$

となる。

高さ  $x$  を 0.5m とすると、その位置の局所グラスホフ数は

$$\text{Gr}_x = 6.73 \times 10^8$$

となるので、レーリー数  $\text{Ra}$  は

$$\begin{aligned} \text{Ra}_x &= \text{Gr} \cdot \text{Pr} \\ &= 6.73 \times 10^8 \times 0.718 \\ &= 4.83 \times 10^8 \end{aligned}$$

となり、層流となる。したがって、局所ヌセルト数  $Nu_x$  は

$$\begin{aligned} Nu_x &= C_1 Ra_x^{1/4} \\ &= 0.387 \times (4.83 \times 10^8)^{1/4} \\ &= 57.4 \end{aligned}$$

となるので、局所熱伝達率  $h_x$  は、

$$\begin{aligned} h_x &= \lambda Nu_x / x \\ &= 0.0294 \times 57.4 / 0.5 \\ &= 3.38 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

平均熱伝達率  $h$  は、

$$\begin{aligned} h &= 4/3 \cdot h_x \\ &= 4.51 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

となる。

なお、熱伝達率は、キャスク表面の温度が高くなり、空気温度との温度差が大きくなるほど大きくなる傾向にある。本報では、保守的な評価を行う見地から、キャスク表面の熱伝達率を 4 W/m<sup>2</sup>K とする。

## 付録2

### 研究成果（特許出願）

本設計検討の結果得られた成果について、権利取得のため特許出願を行い、一部については既に特許（登録）された。特許出願の一覧を以下に示す。

#### 1. 登録済み

- (1) 発明の名称： 使用済ターゲット収納キャスク  
出願番号： 特 11-313025  
出願日： 平成 11 年 11 月 2 日  
特許番号： 特 3071432 号  
登録日： 2000 年 5 月 26 日
- (2) 発明の名称： ターゲット交換装置  
出願番号： 特 11-374297  
出願日： 平成 11 年 12 月 28 日  
特許番号： 特 3071433 号  
登録日： 2000 年 5 月 26 日
- (3) 発明の名称： 放射性物質収納キャスク  
出願番号： 特 11-320120  
出願日： 平成 11 年 11 月 10 日  
特許番号： 特 3087896 号  
登録日： 2000 年 7 月 14 日
- (4) 発明の名称： 使用済ターゲット保管ラック  
出願番号： 特 11-374296  
出願日： 平成 11 年 12 月 28 日  
特許番号： 特 3087897 号  
登録日： 2000 年 7 月 14 日

#### 2. 出願中

- (1) 発明の名称： 使用済ターゲット収納容器  
出願番号： 特 11-313322  
出願日： 平成 11 年 11 月 4 日
- (2) 発明の名称： 使用済みターゲット収納容器

出願番号： 2000-085646  
出願日： 平成 12 年 3 月 27 日  
(3) 発明の名称： 使用済みターゲット収納キャスク  
出願番号： 2000-287211  
出願日： 平成 12 年 9 月 21 日

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、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	ジemens	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

単位	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>3</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>3</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

中性子散乱施設使用済ターゲット取扱・保管設備の概念検討