

JAERI-Tech
99-030



JP9950392



中性子科学研究計画における研究施設
(第1次案)

1999年3月

中性子科学研究計画施設検討グループ

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。
入手の間合わせは、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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

中性子科学研究計画における研究施設（第1次案）

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
中性子科学研究計画施設検討グループ*

（1999年2月17日受理）

原研では、大強度陽子加速器による核破砕中性子源を新たに開発し広範な基礎科学と高レベル放射性廃棄物消滅処理技術開発に利用する中性子科学研究計画を進めている。

計画を推進するために、組織的には平成8年4月に中性子科学推進特別チームが東海研に設置され、平成9年4月には中性子科学研究センターが新たに発足した。

この間、所内の利用研究グループを中心として種々の中性子利用研究課題の提案があり、そのための施設検討が行われてきた。本報告は、これまで検討を進めてきた中性子利用研究計画及びそのための研究施設構想について提案書としてまとめたものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

※ 池添 博・池田裕二郎・大山 幸夫・佐々 敏信・鈴木 邦彦・関根 俊明・滝塚 貴和
辻本 和文・日野竜太郎・松岡 弘充（アイソトープ開発室）・安田 秀志
渡辺 昇（特別研究員）

Proposal of the Research Complex for the Neutron Science (The First Plan)

Design Group of Research Complex for Neutron Science *

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

(Received February 17, 1999)

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) is developing the world's strongest spallation neutron source using high power proton accelerator and promoting a neutron science project for comprehensive studies on basic science and nuclear transmutation of high-level radioactive nuclide from nuclear power stations. For this purpose, JAERI organized the Special Taskforce for Neutron Science and OMEGA Project in April 1996 and reorganized it to Center for Neutron Science in April 1997.

During this period, various research plans using the spallation neutron source are proposed and facilities necessary for research are studied by mainly research groups of JAERI.

This report describes research plans and results of the preliminary conceptual design study on proposed facilities plan.

Keywords : Neutron Science Project, Spallation Neutron Source, Proton Accelerator,
Neutron Scattering Facility, Nuclear Transmutation, Material Irradiation,
Nuclear Physics, Element Synthesis, Radioisotopes, Conceptual Design

※ Hiroshi Ikezoe, Yujiro Ikeda, Yukio Oyama, Toshinobu Sasa, Kunihiko Suzuki,
Toshiaki Sekine, Takakazu Takizuka, Kazufumi Tsujimoto, Ryutaro Hino,
Hiromitsu Matsuoka (Department of Radioisotopes), Hideshi Yasuda,
Noboru Watanabe (Scientific Consultant)

目 次

1. はじめに	1
2. 中性子科学研究計画	1
2.1 中性子科学研究計画の概要	1
2.2 研究施設の概要	2
3. 研究施設計画	7
3.1 中性子散乱施設 [執筆者：日野]	7
3.2 消滅処理実験炉 [執筆者：辻本]	47
3.3 消滅処理ターゲット熱流動実験施設 [執筆者：佐々]	66
3.4 消滅処理炉物理実験施設 [執筆者：安田]	96
3.5 材料照射試験施設 [執筆者：大山]	119
3.6 中性子核物理実験施設 [執筆者：池田]	135
3.7 核破砕生成片加速実験施設 [執筆者：池添]	174
3.8 R I 利用研究施設 [執筆者：松岡]	192
4. おわりに	202
謝辞	202
参考文献	203

Contents

1. Introduction.....		1
2. Neutron Science Project.....		1
2.1 Outline of Neutron Science Project.....		1
2.2 Outline of the Research Complex.....		2
3. Plan of Research Facilities	[Author].....	7
3.1 Neutron Scattering Facility	[R. Hino].....	7
3.2 Experimental Nuclear Transmutation Reactor	[K. Tsujimoto].....	47
3.3 Target Thermo-hydraulics Test Facility for Nuclear Transmutation		
	[T. Sasa].....	66
3.4 Reactor Physics Experiment Facility for Nuclear Transmutation	[H. Yasuda].....	96
3.5 Material Irradiation Test Facility	[Y. Oyama].....	119
3.6 Neutron Nuclear Physics Experiment Facility	[Y. Ikeda].....	135
3.7 Spallation Fragment Acceleration Experiment Facility	[H. Ikezoe].....	174
3.8 Radio Isotope Production and Research Facility	[H. Matsuoka].....	192
4. Concluding Remarks		202
Acknowledgement.....		202
References		203

1. はじめに

日本原子力研究所（原研）では、中性子科学研究計画として世界最大強度の高エネルギー陽子加速器を用いた核破砕中性子源を中心とした、基礎科学と原子力研究の両分野にまたがる研究を行う施設建設計画を検討している。この計画は、1996年にそれまで「陽子工学センター」構想と呼んでいたものを、中性子利用を中心に構想を見直し「中性子科学研究計画」として、本格的に検討を始めたものである。

本計画の技術検討の中心は、大強度の陽子加速器と核破砕中性子源であり、それらについては技術開発も進展している。これらについては別途報告書がまとめられている。しかし、これら加速器施設の検討及び技術開発とは別に、計画をより具体的にしていくためには、研究計画に上げられている研究内容を実施するための具体的な施設概念を基に、その実現性及び妥当性を見ることも重要な課題である。

本報告書は、中性子科学研究センターの中性子科学研究計画施設検討グループで、平成9年から10年に行った検討結果をまとめたものである。施設検討グループの構成をTable 1.1に示す。この施設検討に関する報告は、本計画では初めてのものであり、あくまでも1次案としてこれからの詳細な検討のたたき台となるものである。従って、今後、更に検討を進め、より現実的な案とすべきものである。

2. 中性子科学研究計画

2. 1 中性子科学研究計画の概要

中性子科学研究計画は、世界最大強度の核破砕中性子源からの中性子ビームを、構造生物学、物質科学等の基礎科学や消滅処理技術開発に利用するプロジェクトであり、基礎科学と原子力研究の両分野にまたがる研究を推進することを目指している。

中性子は20世紀後半からの原子力利用や、物質の構造探求などの基礎科学においても大きな役割を果たしてきた。これまでより一桁以上強力な中性子源が得られれば、物質の構造及び機能の探索子としての優れた性質を有する中性子は生命の探求や物質・材料研究に一大飛躍をもたらすことを可能とする。さらに、中性子を用いる核変換により、これからの原子力利用にとって欠かすことの出来ない高レベル放射性廃棄物処理の高度化を図ることも可能となる。

日本原子力研究所では大強度陽子加速器を建設し、それを用いて生成する核破砕中性子により、基礎科学の飛躍的な発展や消滅処理技術開発等の先進原子力技術開発を進める中性子科学研究計画を推進している。

2. 2 研究施設の概要

中性子科学研究計画の構想図を Fig. 2.1 に示す。計画では、陽子エネルギー1.5GeV、電流5.3mAの大強度陽子加速器とこれを利用する研究施設群を建設することを目指す。これら施設は国内利用者にかかれたもの、また国外の研究者にも利用出来るものとし、中性子散乱等の基礎科学においては米国、ヨーロッパに対抗できるアジア、オセアニアの中核的研究センターとなることを、さらに、消滅処理研究に関しては世界の研究開発拠点となることを目指している。

(1) 加速器の基本構想

核破碎反応による中性子発生効率及び中性子散乱用ビーム蓄積リングへの入射効率を考慮して、陽子加速エネルギーは1.5GeVとする。大電流を加速することから加速器本体及び周辺の放射化につながるビームロスが極力小さくしなければならない。この観点から線形加速器とし、高エネルギー加速にはビームダクト径を大きくすることができる超伝導加速空洞を用いる。超伝導加速の採用はビームロスが小さいことや加速距離が短いことの外に、超伝導技術の将来性に着目したことにもよる。また、中性子散乱などの基礎研究のためにはパルス運転をする。一方、消滅処理実験や材料照射実験には連続ビームが必要となる。そこで、パルス運転と連続ビーム(CW)運転の2つの運転モードに対応できる加速器とする。

幾つかの異なる分野の実験が並行して行えることが望まれるので、パルス運転時には正負水素イオンを交互に加速する。このとき、負イオンはビーム蓄積リングに導き高輝度短パルスとして中性子散乱に用いる。正イオンはミリ秒単位の長パルスとして消滅処理用ターゲット基礎実験等に用いる。ビーム出力はパルス運転時には、中性子散乱用に5MW、その他に3MW、合計8MWとする。CW運転時には消滅処理実験、RI製造や材料照射等のために各々占有マシンタイムを割り当てる。消滅処理システム実験には2~5MW必要であり、消滅処理ターゲット工学実験には7MW程度が必要となる。

ヨーロッパのESS及び米国のSNSは物質科学研究が目的であるためパルス運転のみであり、ビーム出力は最大5MWを目標にしている。これに対して、原研の計画では、基礎科学と消滅処理実験の両方が主目的であるため、パルスとCW運転の両方が可能であり、さらに、ビーム出力は8MWで世界最大である。

(2) 研究施設

研究施設群はビーム利用の形態によって大きく3種類に分ける。高輝度短パルスを利用する中性子散乱施設、ナノ秒の極短パルスを用いる中性子核物理や炉物理基礎実験の施設、そしてミリ秒パルスまたはCWビームを用いる消滅処理関連施設(ターゲット研究施設、実験炉)や材料照射施設である。

本報告では、これらの研究施設として以下の施設の概念を検討した結果をまとめた。

- 中性子散乱施設
- 消滅処理実験炉
- 消滅処理熱流動施設
- 消滅処理炉物理実験施設
- 照射実験施設
- 中性子核物理実験施設
- RI ビーム（核破碎生成片）加速実験施設
- RI 製造・研究施設

これらの内、消滅処理関連の技術開発施設として Fig.2.2 に示す消滅処理開発シナリオに従った。即ち、消滅処理熱流動施設と消滅処理炉物理実験施設による技術実証を経て実験炉による工学実証を行うための実験施設構想である。

Table 1.1 中性子科学研究計画施設検討グループの構成

タスク全体			
リーダー	大山 幸夫	中性子科学研究センター	中性子科学計画室
	鈴木 邦彦	中性子科学研究センター	中性子科学計画室
	中島 宏	中性子科学研究センター	中性子科学計画室
	成瀬 日出夫	建設部	設備課
中性子散乱施設サブグループ			
	渡辺 昇	中性子科学研究センター	
	日野 竜太郎	中性子科学研究センター	ターゲット開発室
	相澤 一也	先端基礎研究センター	超低温中性子散乱研究グループ
消滅処理ターゲット熱流動/照射施設サブグループ			
	滝塚 貴和	中性子科学研究センター	
	大山 幸夫	中性子科学研究センター	中性子科学計画室
	佐々 敏信	中性子科学研究センター	消滅処理システム工学研究室
	辻本 和文	中性子科学研究センター	消滅処理システム工学研究室
ミュオン施設サブグループ			
	棚瀬 正和	先端基礎研究センター	
	中島 宏	中性子科学研究センター	中性子科学計画室
中性子核物理炉物理基礎施設サブグループ			
	安田 秀志	中性子科学研究センター	粒子線工学研究室
	滝塚 貴和	中性子科学研究センター	
	池田裕二郎	中性子科学研究センター	核破碎中性子工学研究室
スポレーションR Iサブグループ			
	池添 博	先端基礎研究センター	重イオン未知重核サブグループ
	石井 哲郎	先端基礎研究センター	重イオン未知重核サブグループ
R I製造サブグループ			
	関根 俊明	物質科学研究部	核化学研究室
	松岡 弘充	アイソトープ開発室	研究開発課
加速器サブグループ			
	草野 譲一	中性子科学研究センター	陽子加速器研究室

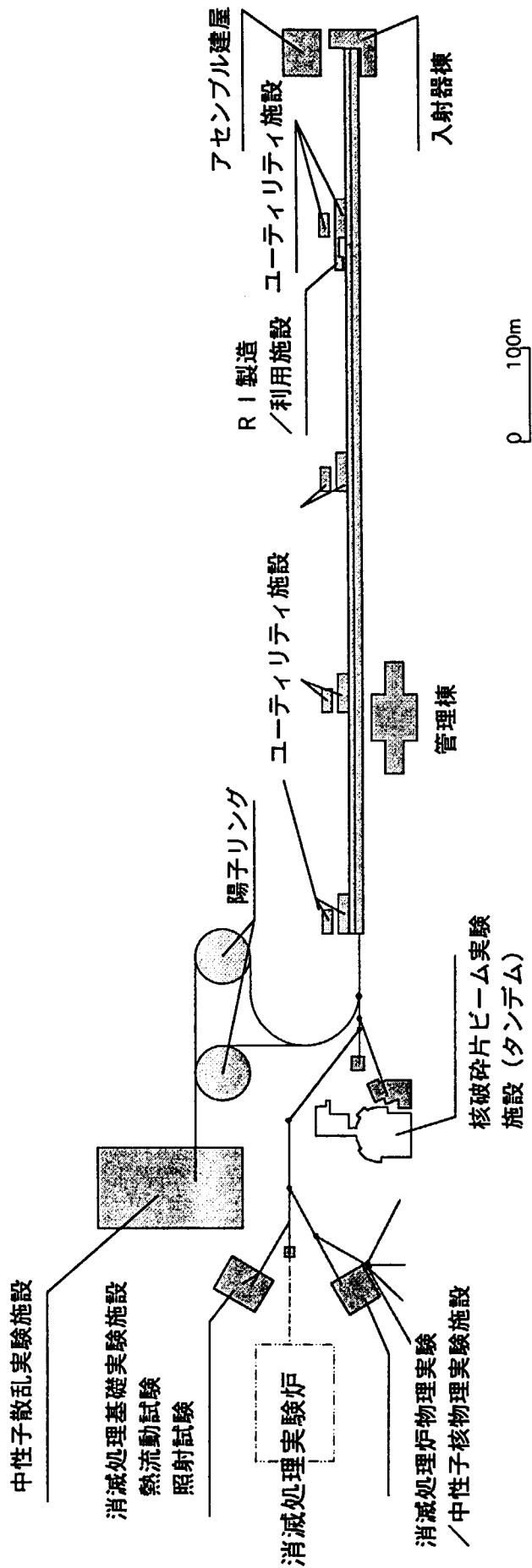


Fig. 2.1 加速器 / 利用施設配置 (案)

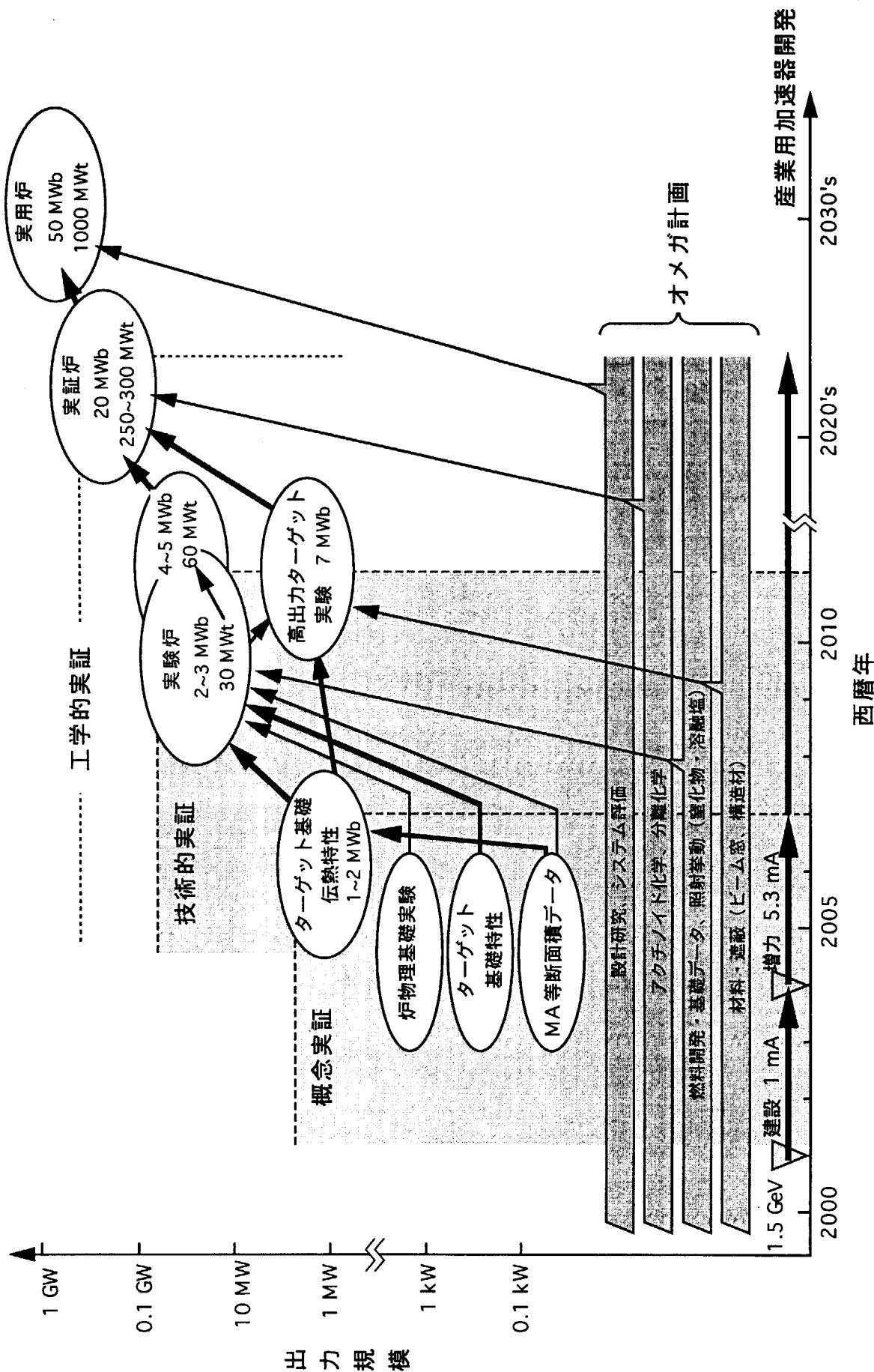


Fig. 2.2 消滅処理技術の開発シナリオ

3. 研究施設計画

3.1 中性子散乱施設

中性子散乱施設は、陽子加速器からの陽子ビームを重金属製のターゲットに入射して核破砕反応を起こし、発生する大強度中性子ビームを用いて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。本節では、中性子散乱施設の要求仕様、提案する施設の概要及び今後必要な検討等について述べる。

3.1.1 中性子及びターゲットステーションの条件

中性子散乱施設は、核破砕反応によって大強度の中性子ビームを発生させるターゲットステーションと、ターゲットステーションからの中性子ビームを用いて各種試験を行う中性子ステーションに大別される。以下に、中性子及びターゲットステーションの主要条件について記す。

(1) 中性子ステーション

(a) 中性子ステーションでの実験に必要な建屋条件は、

床面積 : 160m×90m以上

高さ : ~15m (クレーン揚程10m以上)

天井クレーン : 30ton 2基以上 (全エリアをカバーできること)

建屋構造 : 鉄骨構造。換気空調要。建屋自身の遮蔽能力不要。

床耐荷重 : 2t/m²以上

である。中性子ステーションは測定機器の搬入・据付等の便を考慮して地上1階に配置し、中性子ビームラインは床より1m~1.5mの高さに設置する。また、中性子利用の需要が極めて高いことから、中性子ビームライン数は従来施設よりも約2倍多い32本を目標とする。

(b) 各中性子ビームラインには第2種管理区域基準を満たす十分な遮蔽を施すこととし、各ビームラインには必要に応じて最適なコリメータを備えるものとする。中性子ビームラインに接続する測定器と中性子ビーム領域をTable 3.1.1 に示す。表中の中性子ビーム領域でL又はRは、後述する配置計画においてターゲットステーションを境に二分した中性子ステーションの左及び右側を表す。

(c) 各測定器のために電源及び冷却水の供給設備、さらに、各分光器共通に液体窒素供給設備を設ける。電源については、各測定器の配電盤に低ノイズ電力10kW (単相100V)、通常電力20kW (単相100V、三相200V/400V) の計30kWが供給できるようにする。

(d) 中性子ステーション内に、試料調整、クライオスタット、電気炉等の準備等を行な

う実験準備室と資材置場を設ける。また、データ処理等のための部屋を設置する。

(2) ターゲットステーション

ターゲットステーションは核破砕中性子源を構成するターゲット、減速材、反射体、生体遮蔽体などの機器と、それらを保守点検・交換するための遠隔操作設備、冷却設備、電源設備、使用済ターゲット保管設備等から構成される。Fig.3.1.1にターゲットシステムの主要機器構成を示す。ターゲットの上部に冷中性子減速材を2個、下部に熱及び熱外中性子減速材をそれぞれ1個ずつ配置し、全体を反射体で取り囲み、さらにその外側を生体遮蔽体で覆う構成である。以下に、ターゲットステーションの条件を記す。

- (a) ターゲットの中心位置は、中性子ステーションに合わせて地上一階とし、陽子ビームは地上1.2mの水平方向からターゲットに入射させる。
- (b) ターゲットについては、陽子ビームラインの調整等を行う陽子ビーム出力1.5MW (1.5GeV, 1mA) 運転時(第I期)には固体及び水銀ターゲットを設置し、フルパワーの5MW運転(1.5GeV, 3.3mA, 第II期)のための高度化及び運転制御データを取得する。第II期においては水銀ターゲットをメインターゲットとして使用し、固体ターゲットはバックアップとして準備する。設計検討中の固体及び水銀ターゲットの構造概要をFig.3.1.2及びFig.3.1.3に示す。
- (c) ターゲット及び反射体を除き、減速材、生体遮蔽体、中性子シャッター(中性子ビームライン遮断用)、冷却設備等の主要な機器・設備は、第I期及び第II期ともに共通とし、5MWベースで設計する。このとき、中性子シャッターは中性子ビームラインの要求数に合わせて設置する。
- (d) ターゲット本体は水平方向に移動可能なターゲット台車に搭載し、陽子ビーム窓、減速材、反射体、中性子シャッターは上方向に引き出す方式とする。これらの点検保守・交換はマニピュレータ、クレーン等による遠隔操作で行う。Fig.3.1.4に設計検討中の水銀ターゲットを組込んだターゲット台車の構造概要を示す。
- (e) 建屋内に長期保管を前提とした使用済ターゲット等の保管エリアを設ける。
- (f) ターゲットについては、ISIS等の経験からターゲット寿命の長期化を目指して設計上限温度を200℃とし、これに見合う冷却設備を設けるものとする。
- (g) システム各機器の冷却設備は3重の系統構成とし、放射性物質の環境への放散を防止するために、1次及び2次冷却系は閉ループ構成とする。3次系はクーリングタワー方式とし、大気に放熱する。2次及び3次冷却水には軽水を用い、中性子収率等に影響する固体ターゲット冷却系、ターゲットケーシング冷却系、反射体冷却系、冷中性子減速材のプリモデレータ部、陽子ビーム窓冷却系等には重水を使用する。
- (h) 電源は一般用に加えて非常用電源を備える。非常用電源母線からの電力を供給する系統は以下の通りとする。
 - ・水銀循環系
 - ・固体ターゲット冷却系
 - ・ターゲットケーシング冷却系
 - ・陽子ビーム窓冷却系

- ・減速材系
- ・反射体、生体遮蔽、ヘリウムベッセル冷却系他

(i) 安全保護

- ・系統の異常を検出した場合には、加速器本体及びリング側に「陽子ビームトリップ」信号を発信し、ターゲットへの陽子ビーム入射を停止させる。
- ・重水のリーク時に、トリチウムがターゲット等の点検保守・交換を行うホットセル換気系統に流入した場合、流入したトリチウムは大気中に希釈排気する。このとき、トリチウム濃度が排出許容濃度以上になった場合には冷却凝縮法によりトリチウム水として補集し、1次冷却水系のドレンタンクに回収する。
- ・水銀リーク時は、漏えい水銀をダンプタンクに回収するとともに、ホットセル換気系統に流入した水銀蒸気は水銀用キレート材フィルタ又は活性炭で吸着補集する。
- ・1次冷却水系統を収納する部屋はSUSライナ張りの気密セルとし、負圧制御を行う。
- ・ターゲット台車の周囲には気密カバーを設けて水銀の漏えい飛散を防止するとともに、台車上にはループからのリーク水銀を回収する亜鉛コーティングした鋼鉄製トレイを設置する。(水銀のアマルガム化)
- ・冷中性子減速材など水素を用いる機器及び配管の最外壁はヘリウムガスを充填した多重構造とし、配管敷設経路の部屋は空気の滞留がないように換気空調を行い、水素リーク時の燃焼及び爆燃を防止する。

3.1.2 提案する施設の概要

(1) 建屋構成

3.1.1で述べた条件に従って検討した施設の鳥瞰図をFig.3.1.5に、中性子ステーションの拡大鳥瞰図をFig.3.1.6に、ターゲットステーションの鳥瞰図をFig.3.1.7にそれぞれ示す。施設建屋の構成に当たっては、陽子ビーム入射位置を基準にして、陽子ビームライン、生体遮蔽体及びターゲット台車取扱室を直列に配置し、生体遮蔽体廻りに中性子ステーションエリアを設け、ターゲット台車後方に各種冷却水供給等を行うための補機関連設備を集約配置した。この配置構成を基にして、作業性、管理区域区分などを考慮して機器、設備の効率的な配置検討を行い、建屋構成を地下1階、地上4階の5階層とした。施設全体の規模、特殊設備等の概要をまとめたものをTable 3.1.2に、平面配置図をFig.3.1.8～3.1.12に、立面配置図をFig.3.1.13に、各階の部屋リストをTable 3.1.3にそれぞれ示す。以下に各階層の構成概要を平面配置図で示しながら記す。

(a) 地上1階エリア構成

地上1階の平面配置図をFig.3.1.8に示す。地上1階は、施設のメインとなる設備を

設置するエリアである。ターゲットステーション周りの機器配置はFig.3.1.14に示すように、陽子ビームライン、生体遮蔽体及びターゲット台車取扱室は直列に配置し、ターゲット台車取扱室後方には、ターゲット台車メンテナンス室及び反射体メンテナンス室を設けてある。その後方には、機器の搬出入性を考慮して機器搬出入室を設けた。また、ターゲット及びターゲット台車のメンテナンスのために、ターゲット台車取扱室の両側にマニピュレータ操作室を設けた。なお、陽子ビームラインエリア内には、中性子ステーション(2)側にマグネットの搬出入及び通路スペース、中性子ステーション(1)側にケーブル等の敷設スペースを確保した。

生体遮蔽体廻りには計32本の中性子ビームラインを配置し、Table 3.1.1に示した測定機器を設置できるようにし、測定器廻りへの近接性及びそのメンテナンス性を考慮して、中性子ステーション(1)～(4)のエリアを設定した。各中性子ステーション近傍には測定用試料の調整作業（加工等）を行う実験準備室を設置し、さらに、測定器等の搬出入を容易にするために各中性子ステーション毎に機器搬出入室を設けた。

減速材及び反射体のメンテナンス作業性を考慮して、反射体メンテナンス室廻りに反射体取扱操作室を設け、それに隣接して1次冷却水循環系機械室を設けてターゲット台車への冷却水配管ルートを確認した。また、使用済みのターゲット、減速材、反射体等の移送作業性を考慮して、ターゲット移送室、ターゲット取扱スペース及び操作室を1次冷却水循環系機械室の反対側に設けた。

ターゲット取扱スペースの隣にはターゲット搬出入室を設けて、使用済みターゲット等を試験検査のために別建屋のホットセル室へ移送できるようにした。ターゲット搬出入室の隣には高汚染区域用の出入管理設備(3)を設け、非常時（遠隔操作機器の故障を想定）等におけるターゲット・反射体保管エリア及びターゲット移送室等への作業員の接近性の便を図った。

中性子ステーション(2)及び1次冷却水循環系機械室近傍に研究員、作業員（補機メンテナンス員）の出入管理室をそれぞれ設け、さらに、屋外からのアクセス性を考慮して、ロビー室(1)及び一般員の展示、休憩室を設けた。また、中性子ステーション(1)の側部エリアにロビー室(2)及び出入管理設備室を設けて、研究員がアクセスする便を図った。ロビー室(1)近傍には非常用発電機（D/G）を設置するとともに、非管理区域設備（中央制御室及び電気設備）へのアクセス性の便を図るために非管理区域用エレベータを設置した。

(b) 地上2階エリア構成

地上2階の平面配置図をFig.3.1.9に示す。重水取扱い機器のメンテナンス時及びトリチウムが漏えいした場合のトリチウム処理を行う機械室である重水関連設備室は、重水風導配管のルート性とトリチウム漏えい及び被ばく低減の観点から、重水取扱設備である1次冷却水循環系機械室（地上1階）の上部に設置した。機器メンテナンス作業員の線源区域へのアクセス性を考慮して、入・退城の監視室である出入管理関係設備を地上1階設置の出入管理設備室の上部である重水関連設備室の隣室に設置した。

また、重水関連設備、出入管理関係設備室の仕切壁の外側は非管理区域設備エリアとし、電源設備室、運転員等の居室及びターゲットシステム全体の実験測定、監視を行うデータ処理室を設置した。

中性子ステーション(1)の側部エリアは、ステーションへのアクセス性を考慮して、研究員の居室及びデータ処理室等の非管理区域設備を集約配置した。なお、本エリアから非管理区域全体に通じることが可能なように非管理通路を設け、また、中性子ステーション(1)の側部、中性子ステーション(2)及び(3)(4)間に中性子ステーション全体が見学可能な通路を設けた。

天井クレーンは、後述するターゲット台車取扱室及びターゲット移送室用に5tonクレーンを各1基、中性子ステーション(1)及び(2)用に30tonクレーンを各1基、中性子ステーション(3)及び(4)に共通に30tonクレーンを1基設置した。

(c) 地上3階エリア構成

地上3階の平面配置図をFig.3.1.10に示す。生体遮蔽体、ターゲット台車取扱設備エリア(地上2階)の上部に減速材交換用の反射体交換プラグの吊上げスペース(約15m)を有する反射体取扱室を設置した。反射体取扱室の隣室には、減速材への冷却配管ルート及び建屋耐震性を考慮して、陽子ビームラインエリア上部に減速材冷却設備室を設置し、減速材冷却設備室の一部スペースに中性子ステーション(1)及び(2)間のアクセス性を向上するために連絡階段及び通路スペースを設けた。また、反射体取扱室の右側部には、非管理区域設備を集約配置することとし、アクセス性及びケーブルルートを考慮して、ターゲットシステムの運転・制御のための制御室、制御中継盤、無停電電源装置等を設置する電源盤・バッテリー室を配置した。反射体取扱室の左側部には、ターゲット台車及びターゲット関連設備機器の保守点検作業性を考慮して、機器メンテナンス室及びターゲット関連の部品を保管する機器置場(倉庫)を設けた。

(d) 地上4階エリア構成

地上4階の平面配置図をFig.3.1.11に示す。反射体取扱室の右側部には、外気取入れ及びダクトルートを考慮して管理・非管理区域を共用とした給気系の換気空調機械室を設置し、その隣には、排気性を考慮して放射線源を持たない非管理区域用排気系の換気空調機械室を設置した。反射体取扱室の左側部は、その下の階層が管理区域設備エリアであることから、排気性及びダクトルートを考慮して管理区域用排気系の換気空調機械室を設置した。反射体取扱室には、中性子シャッター、反射体交換プラグ(減速材/反射体を一括交換用)などの点検保守・交換用に100ton天井クレーンを1基設置した。

(e) 地下1階エリア構成

地下1階の平面配置図をFig.3.1.12に示す。地下1階は、建屋掘削量低減の観点から必要最小限の設備を設けることとした。ターゲット・反射体保管エリア(使用済みの

ターゲット、減速材、反射体、陽子ビーム窓などの放射化した機器とそれらの保守点検・交換時に発生した各種放射化廃棄物を保管するエリア) は水プール方式(暫定)とし、使用済みのターゲット、減速材などを移送する作業性を考慮して、ターゲット台車取扱室、ターゲット移送エリアの下部に設置した。本エリアには、移送のために5 ton天井クレーンを1基設置した。

排水設備は、ドレン配管ルート及び排水性を考慮すると最下階に設置する必要があるため、機器・床ドレン等の一般用の排水設備(1)は、一般ドレン配管のルート及び排水性を考慮してターゲット・反射体保管エリアを挟んで反対側に設置した。排水設備室(2)は、トリチウム漏えい低減の観点から重水ドレン配管のルート性を考慮し、重水取扱設備である1次冷却水循環系の真下に重水取扱設備の排水設備用として設置した。また、2次冷却循環系機械室は、1次冷却水循環系機器の連絡冷水配管ルートを考慮して排水設備(2)に隣接して設置した。

(2) 放射線管理区分

建屋管理区域区分及び放射線区分は下記のように設定した。ただし、ここで示した基準は暫定的なものであり、さらに検討していく予定である。

(a) 管理区域区分

- 第1種管理区域：放射性物質による汚染の可能性のある管理区域
- 第2種管理区域：放射性物質による汚染の可能性のない管理区域
- 非管理区域：放射性物質がなく汚染のおそれのない区域

(b) 管理区域の線量率区分

管理区域内の管理は年間50mSv、人の被曝管理は5年間平均で年間20mSv以下とする条件で、管理区域の線量区分を以下のように定めた。

1) 線量率区分Ⅰ (放射線レベル：5 μ Sv/h以下)

実験者が常時居ることを想定した区分とし、年間労働時間を2000時間とすると、5 μ Sv/h以下であるので、年間10mSv以下となる。

2) 線量率区分Ⅱ (放射線レベル：25 μ Sv/h以下/週40時間までの立入り)

通路や現場の操作盤等のあるところを主に想定した区分とし、通常実験者は立寄らないこととする。今後、週1mSv以下の制限となるため、週40時間のマニピュレータ操作等の立ち入りを考え、25 μ Sv/h以下と設定した。

3) 線量率区分Ⅲ (放射線レベル：100 μ Sv/h以下/週4時間までの立入り)

現場パトロールや目視点検を主に想定した区分とし、週4時間の点検パトロールの立ち入りを考え、100 μ Sv/h以下と設定した。

- 4) 線量率区分 IV $100 \mu\text{Sv/h}$ 以上 (通常立入り不要)
セル室等通常立入りが不要な区域を想定した区分とする。

上記の基準に従って、各階に設けられた設備室の建屋管理区域区分と管理区域における線量率区分をTable 3.1.3に示した。

3.1.3 主用設備

(1) 使用済みターゲット等の保管設備

本設備では、使用済みの固体ターゲット及び水銀ターゲット容器を中心にして、減速材容器、陽子ビーム窓、反射体など放射化された機器の保管を行う。上記主要機器の交換頻度(目標)は以下の通りとし、約10年分保管する。なお、保管設備の主要部分である水循環プールは、幅が約8m、全長が約30m、深さが約4mであるが、水の管理作業、コスト低減等の観点から保管をより容易にするために大気中での保管を検討中である。

固体ターゲット :	0.5年/基	計 5基	(2.5年分)
水銀ターゲット容器 :	0.4年/基	計19基	(7.6年分)
水素減速材容器 :	1.5年/基	計7x3基	(10.5年分)
水減速材容器 :	2.5年/基	計 4基	(10年分)
陽子ビーム窓 :	1年/基	計10基	(10年分)
反射体 :	10年/式	計 1式	(10年分)

本設備には、ターゲット等の保守点検・交換時に発生した廃棄物(水銀循環系の配管、機器等)を併せて保管するものとする。

(2) 冷却設備

大強度陽子加速器からの陽子ビームが重金属製のターゲットに入射する時、ターゲットでの核破砕反応とそれに伴い発生する中性子等の周辺機器への照射により、ターゲット、減速材、反射体、生体遮蔽体等で多量の熱を発生する。Fig.3.1.15に各コンポーネントで発生する熱量の概略を示す。本冷却設備は、これらの熱を適切に除去して機器の健全性を維持するためのものである。Table 3.1.4に冷却水系の容量等に加えて、ターゲットシステムを構成する各主要機器の仕様概要を示す。

固体ターゲットを組み込んだときの冷却系の全体系統をFig.3.1.16に、水銀ターゲットを組み込んだときの冷却系の全体系統をFig.3.1.17に示す。固体ターゲットの冷却系であるターゲット1次冷却系(冷却材:重水)は、核破砕反応によりターゲットで発生した熱を熱交換器で除去してターゲットの温度を 200°C 以下に保つことを目的とし、また、Fig.3.19に示す水銀冷却系は水銀ターゲット材の供給系として、核破砕反応により発生した熱を熱交換器で除去して、ターゲット入口水銀温度を 50°C 程度に保つことを目的としている。いずれも放射性物質の拡散を防止するために閉ループ構成とし、熱交換器は2次冷

却系Ⅰに接続している。

ターゲット1次冷却系及び水銀冷却系に設置したサージタンクのカバーガスにはヘリウムガスを用い、ヘリウムパージ装置によって圧力を制御しながら重水又は水銀を循環させる。ターゲット部で発生した水素ガスはサージタンクで濃度を監視し、必要に応じてヘリウムガスと共に大気に放出する。また、上記の冷却系には循環ポンプを2台設置し、運転中に1台のポンプが停止した場合には、陽子ビームトリップ信号を発信した後、健全なポンプ及びターゲットケーシング冷却系（冷却材：重水）で崩壊熱を除去する。なお、以下に記す冷却系に設置しているサージタンクのカバーガスはすべてヘリウムガスであり、ヘリウムパージ装置によって循環再使用する。

ターゲットケーシング冷却系は、中性子の照射によりターゲットケーシング、反射体で発生した熱を除去するとともに、ターゲット1次冷却系及び水銀冷却系での異常発生時に、陽子ビーム停止後の崩壊熱を除去することを目的としている。冷却材は核破砕反応によって発生した中性子の吸収をできるだけ少なくするために重水を使用する。放射性物質の拡散を防止するために閉ループ構成とし、また、ターゲット1次冷却系との独立性が保てるように、熱交換器を介して熱を2次冷却系Ⅱに伝える。

減速材系は、核破砕反応によって発生した高速中性子を減速して、使用目的に合わせた中性子に減速するもので、（超臨界）液体水素減速材系（冷中性子用）、液体水素—固体メタン減速材系（熱中性子用）及び水減速材系（熱外中性子用）から構成される。液体水素の供給は冷却ボックスで行い、減速材で発生した熱は熱交換器を介してヘリウム冷凍機で除去する。また、水減速材系は軽水を用いた閉ループ構成で、上記のターゲット1次冷却系と同じ構成である。なお、液体水素—固体メタン減速材系については開発に長期間を要するため、毒物を組み込んだ液体水素減速材を使用する予定である。

線源台車冷却系（冷却材：重水）は、ターゲット台車、生体遮蔽体及び陽子ビーム窓で発生した熱を除去することを目的としている。この設備も放射性物質の拡散を防止するために閉ループ構成とし、熱交換器を介して熱を2次冷却系Ⅱに伝える。

ターゲット、反射体、減速材を収納するヘリウムベッセルには、ヘリウムガスを閉ループ構成で循環させ、ヘリウムベッセルで発生する熱はループの熱交換器を介して2次冷却系Ⅰに伝える。

ヘリウムベッセル外側の生体遮蔽体については厚さ約6mの鋼製で大型設備であるため、線源台車冷却系による水冷に加えて、空気を強制的に生体遮蔽体内を循環させて冷却する方式の生体遮蔽体冷却系を設置する。ただし、空気の強制循環については空気の放射化等の問題もあり、今後の検討課題である。

上述したように、水銀冷却系、（固体）ターゲット1次冷却系、ヘリウムベッセル冷却系等は2次冷却系Ⅰに、ターゲットケーシング冷却系（反射体冷却系含む）、線源台車冷却系等は2次冷却系Ⅱに接続し、2次冷却系Ⅰ及びⅡはクーリングタワーを有する3次冷却系に熱交換器を介して接続する。2次冷却系Ⅰ及びⅡの系統構成をFig.3.1.18及び3.1.19に示す。これらの系統の設計条件は以下の通りである。

(a) 2次冷却系 I

運転圧力	大気圧 (サージタンク気相部にて)
運転温度	35°C (負荷機器入口部にて)
除熱量	3300kW (通常運転時)
循環流量	170m ³ /h

(b) 2次冷却系 II

運転圧力	大気圧 (サージタンク気相部にて)
運転温度	35°C (負荷機器入口部にて)
除熱量	8650kW (暫定)
循環流量	1300m ³ /h (暫定)

(3) 電気設備

電気設備は、変電所より3相6.6kV (50Hz) を高圧受電設備 (容量11000kVA) に受電し、

- ・ 3相400V (50Hz) 6000kVA
- ・ 3相200V (50Hz) 4000kVA
- ・ 単相200V/100V 890kVA

に変圧して、動力、計装制御、照明、コンセント、直流/交流無停電電源等に使用する。また、瞬時の電源喪失も許されない負荷で交流負荷は交流無停電電源装置から、直流負荷は直流 (無停電) 電源装置から給電する。主要系統としては、

- ・ 水銀冷却系
- ・ ターゲット1次冷却系
- ・ 減速材系
- ・ ターゲットケーシング冷却系
- ・ ヘリウムベッセル冷却系
- ・ 生体遮蔽体冷却系
- ・ 線源台車冷却系
- ・ 使用済みターゲット冷却系
- ・ ヘリウムパージ装置
- ・ 2次冷却系 I 及び II
- ・ 3次冷却系
- ・ 運転制御用機器

がある。無停電電源装置の連続通電は定格で10分間とし、その間に非常用発電機 (水冷4サイクル無気噴射式ディーゼル機関、3500kVA、2基) を立ち上げて、常用電源復旧まで、非常用発電機から給電を行う。管理/非管理区域換気空調系等については、商用電源喪失時には非常用発電機から給電を受ける。

電気設備の概略単結線図を Fig.3.1.20 に示す。本設備では、電源供給の信頼性を高めるために各母線に接続する負荷が同一のものが複数台ある場合は異なる母線に振り分けて接続し、また、各母線の負荷電流がほぼ同等になるように負荷を振り分けるために独立した2系統の設備を設けている。なお、1系統が商用電源を喪失した場合には、他の1系統からバックアップ給電が可能なよう母線連絡を設けてある。系統内の母線構成は次の通りである。

- ①高圧配電盤（一般負荷電源系と重要負荷電源系をき電する）
- ②一般負荷電源系（N系）低圧配電盤
- ③重要負荷電源系（E系）低圧配電盤
- ④一般負荷電源系（N系）モータコントロールセンタ
- ⑤重要負荷電源系（E系）モータコントロールセンタ
- ⑥一般負荷電源系（N系）照明配電盤
- ⑦重要負荷電源系（E系）照明配電盤
- ⑧直流電源装置
- ⑨交流無停電電源装置
- ⑩計測制御電源装置

動力については、電動機容量と給電母線区分は以下の通りである。

420V、90kW 以下	モータコントロールセンタ
420V、90kW 超過	低圧配電盤

また、火災により施設の安全性が損なわれることを防止するため、電気設備は不燃性、難燃性材料で構成し、また、地絡・短絡等の過電流による過熱防止のため、保護継電器と遮断器の組合せ等により故障系統の早期遮断を行い、過熱、焼損の防止を図る。液体水素減速材設備及びその配管敷設区域などに設置する電気機器・設備については防爆構造とする。

(4) 換気空調系

本系統は、中性子散乱施設内の室内を換気することにより所定の室温及び室圧（大気に対して負圧）に維持するためのもので、施設外へ放射化された空気が流出するのを防ぐための管理区域換気空調系と、中性子散乱施設内の非管理区域の機械室等室内を換気することにより所定の室温に維持することを目的とした非管理区域換気空調系に大別される。これらの設計条件は次の通りである。

室温度条件	通常時	10～40℃（全室）（暫定）
	非常時	10～40℃（全室）（暫定）
室圧力条件	-8～-20mmAq（大気に対して）	
処理対象室	(a) 管理区域換気空調系	
	管理区域換気空調機械室	
	減速材設備室	

	反射体取扱関連室
	機器置場及びメンテナンス室
	出入管理関連室
	重水関連設備室
	1次冷却水循環系及び2次冷却水循環系機械室
	機器搬出入室
	ターゲット取扱関連室
	マニピレータ操作室
	排水設備室
	ターゲット等の保管設備関連室
	(b) 非管理区域換気空調系
	非管理区域換気空調機械室
	電源盤室
	バッテリー室
	電源設備室
	D/G室
換気風量	(a) 管理区域換気空調系 : 150,000m ³ /h (暫定)
	(b) 非管理区域換気空調系 : 43,000m ³ /h (暫定)
外気条件	夏期最高温度 35℃
	冬期最低温度 -10℃

Table 3.1.5と3.1.6に処理対象室の換気風量等を示す。なお、運転員、研究員、作業員用の居室、データ処理室、制御室等は個別に空調を行うこととし、中性子ステーションについては防塵対策等を施して換気扇による換気を行うものとする。

3.1.4 今後必要な検討及びR&D

本節で提案した5MW規模の中性子散乱施設については、利用者に対して実用性能に優れた中性子ビームを安定して供給することが第一の条件である。中性子ビームの実用性能は、ターゲット及び減速材、反射体等の配置、形状、寸法に大きく依存し、中性子ビームの安定供給はこれらの機器の長寿命化と点検保守・交換に要する時間に影響される。ターゲット及び減速材、反射体の配置、形状、寸法に関しては、核計算グループの努力により、5MW施設にふさわしい条件が明らかになってきた。今後は、この条件に適う構造を長寿命を目標にして工学的に実現し、かつ、機器の点検保守・交換に要する時間をできるだけ短縮するための検討評価とR&Dを実施していく必要がある。以下に、必要と考えられる主要な検討及びR&D項目を記す。

(1) ターゲット構造

固体ターゲットについては、ターゲット板に発生する高密度の熱に起因する熱応力に対

する構造強度確保、ターゲット板の高効率な熱除去と狭隘冷却流路群における流量配分の均一化が重要である。一方、水銀ターゲットについては、陽子ビーム入射時に発生する圧力波と熱衝撃に対する構造強度確保、水銀流中でのホットスポットの発生抑制などの熱流動特性を改善していくことが重要である。また、定格運転時及び異常時におけるビーム窓部及び胴部での重水による効果的な除熱及び流量配分等の熱流動評価を行う必要がある。これらについては、構造強度／熱流動解析及び基礎的な熱流動及び熱衝撃実験を実施しているが、構造の詳細化のためには、CADを組み込んだ解析コードシステムの一層の整備と実物大の模型を用いた熱流動、熱衝撃等の実験設備の整備が必要である。

さらに、ターゲット容器材料などの陽子及び中性子照射、水銀腐食による劣化挙動等を明らかにして構造設計基準を作成し、また、ターゲット本体構造の支持部構造強度評価、ケーシングとターゲット容器間で生じる熱応力評価などを行い、これらを基にして最適化したターゲット構造の製作性を確認する必要がある。

(2) 水銀循環機器

水銀循環機器については、設置スペースの制約から小型化と高効率化が可能で耐久性のあるキャンドモータポンプ、ギャポンプなどの循環ポンプ及びプレートフィン型、スパイラル型等の熱交換器の開発、精度と応答性の高い水銀流量計（電磁流量計、超音波流量計）の開発、水銀配管の熱応力と振動伝播の緩和をはかる水銀用ベローズ及び遠隔操作の容易性を確保するための水銀用配管コネクタの開発が必要である。また、水銀ターゲットでは、水銀を長期間（約10年間）使用できるように水銀の純化を定期的実施する水銀純化装置の開発も必要である。

(3) 液体水素減速材系統・機器

容器内圧が1.5MPaの水素圧力に耐え、かつ、高い中性子収率を確保するために水素温度分布を3K以内に抑制するAl合金製の容器構造を構造強度／熱流動的に解析評価し、減速材容器を試作して製作性の確認と、その破壊条件、熱流動特性を実験的に検証する必要がある。また、液体窒素などを作動流体とする極低温ループを低温流体冷却のためのヘリウムガス冷凍機と合わせて製作し、極低温流体の取扱いとループ運転技術の蓄積、循環ポンプ、流量計、バルブなどの機器特性の評価を行い、起動・停止の効率化と安全保護技術の確立をはかる必要がある。

(4) 中性子シャッター

32本の中性子ビームラインを実現するための鍵となる中性子シャッターについては、省スペースで、気密性、冷却性を確保しつつ駆動信頼性に問題がなく、保守・点検性に優れた構造の設計検討を行い、モックアップモデルを試作して機能と保守性を確認する実証試験を行う必要がある。

(5) 遠隔保守技術

マニピュレータ及びクレーンによる遠隔操作で作業し易いようにループ機器等の配置を最適化するとともに、脱着の容易なコネクタ・フレキシブル配管、作業に必要な治具・工具等を開発する必要がある。マニピュレータについては、駆動可能な重量、操作範囲、必要基数などを明確にし、クレーンについては、吊り重量の検討とガータにセンサとサーボ機構を付加し回転機構を設けるなどの位置制御機構の開発が必要となる。これらの機器開発と並行して、ターゲット、減速材等の点検保守・交換手順と手法を明確化し、取扱い室におけるループ及び遠隔操作機器の配置、構成、規模を詳細化していく必要がある。

(6) ターゲット台車

重量が約250tonの台車を位置決め精度±1mm程度を目標にして、ラックオピニオンとACサーボを採用した速度可変の駆動機構等を検討し、また、ヘリウムベッセル等とのシール部分には、 10^{-4} atm/ccオーダー（ヘリウムガス）の気密性と台車とヘリウムベッセルとの緩衝機能を有する大型シール構造を開発する必要がある。

上述したターゲット、減速材等の開発は安全性の向上にも大きく関係しており、これに加えて、高温の水銀が容器亀裂部から重水中に漏えいするターゲット容器破損事故や、固体ターゲット1次冷却系や水銀循環系におけるポンプ停止事故に起因する流量過渡事象などの異常時における機器及びループの熱流動及び構造強度の解析評価とその実験的検証を行い、構成機器に加わる熱過渡条件を明確にして熱構造強度を確保する必要がある。さらに、異常発生後に陽子ビームのターゲットへの入射を極短時間内（数秒以内）に停止するために、異常検出方法と警報発信システムを組み合わせたインターロックの設計を行う必要がある。

また、利用者に対しては、できるだけ実験及びデータ解析環境を整備することが重要である。このためには、中性子ステーション内の電源、冷却水などの実験用設備の配置、実験準備室の整備とステーション内でのアクセス経路の容易性を向上させるなどの工夫を図っていく必要がある。

今後、上記の必要検討項目を中心にして施設の検討を進め、施設構成等をより詳細化していく予定である。

Table 3.1.1 Neutron scattering instruments planned to be connected to neutron beam-lines

NO.	測定器名称	分解能等	略称	中性子ビーム領域				備考
				inthermal region(L)	inthermal region(R)	Cold region(L)	Cold region(R)	
1	小角散乱装置	生物用、低分解能	Biology SANS			○		
2	小角散乱装置	生物用、高分解能	Biology SANS				○	
3	小角散乱装置	物質科学用、低分解能	SANS			○		
4	小角散乱装置	物質科学用、低分解能	SANS			○		
5	極小角散乱用2結晶回折計		DCD	○				
6	反射率計		Reflectometer			○		No.6のビームライン付
7	反射率計		Reflectometer			○		No.6のビームライン付
8	反射率計		Reflectometer			○		
9	液体・フェリタス用回折装置		SANDLAS type			○		
10	液体・フェリタス用回折装置		Glass & Liquid					
11	液体・フェリタス用回折装置		Glass & Liquid					
12	単結晶回折計	生命科学用	Biology SXD	○				No.16のビームライン付
13	単結晶回折計	物質科学用	SXD	○				
14	散乱散乱用回折計		D7 type			○		
15	粉末回折装置	高分解能	HRPD			○		
16	粉末回折装置	高分解能	HRPD			○		
17	粉末回折装置	中分解能高強度	HRPD			○		
18	粉末回折装置	特殊環境用	SEPD			○		
19	残留応力測定用回折装置		Residual stress			○		
20	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	MAPS type			○		
21	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	MARI type			○		
22	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	Epithermal chopper				○	
23	高分解能非弾性散乱装置	direct giometry型	IN5 type			○		
24	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	LAM-D type			○		
25	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	IRIS type			○		
26	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	IN10 type			○		
27	高分解能非弾性散乱装置	inverted giometry型	TFXA			○		No.35のビームライン付
28	高分解能非弾性散乱装置	eV分光器	eVS			○		
29	熱中性子三軸型分光器		TAS			○		No.16のビームライン付
30	冷中性子三軸型分光器		Cold TAS			○		No.35のビームライン付
31	スピネコー装置		Spin Echo			○		
32	スピネコー装置		Spin Echo			○		
33	材料用分光器		Hot Sample			○		
34	干渉計		Interferometer			○		No.25のビームライン付
35	超冷中性子発生装置		UCN			○		
36	素粒子・核物理用装置		PEN type			○		
37	素粒子・核物理用装置		Nucl.phys.			○		
38	未定1		A			○		
39	未定2		B			○		No.16のビームライン付
40	未定3		C			○		No.25のビームライン付
41	未定4		D			○		No.25のビームライン付

Table 3.1.2 Specification of neutron scattering facility

項目		内容
主体構造		鉄筋コンクリート造り
階数		地下1階 地上4階
建家寸法	高さ	地上 約30m 地下 約15m
	幅	約156m
	奥行き	約115m
床面積	コールド	実験室等 4,376m ² 電気室 554m ² 機械室 1,788m ²
	ホット	実験室等 16,725m ² 機械室 3,805m ²
	合計	27,248m ²
特殊設備	クレーン	ターゲットステーション用： 100ト 1基 5ト 3基 中性子ステーション用： 30ト 3基
	エレベータ	人荷用 (700kg) 1基
	機器搬入	シャッター (幅7m、高さ5m) 4
電気設備		三相 200V 4MW 三相 400V 6MW 単相 200V/100V 約1MW 非常用電源 7MW
空調設備		夏 25℃ 冬 22℃ 湿度 60%
給排水設備		上水 10m ³ /h 濾過水 5m ³ /h 排水 低レベル 5m ³ /h 一般 5m ³ /h

Table 3.1.3.1 Room list of neutron scattering facility (2nd-4th floor)

フロア	室名称	床面積 (m ²)	階高 (m)	室容積 (m ³)	管理区分	備考	
屋上	エレベータ機械室	53		158	II		
	通路(管理)	22	3.0	65	II		
地上4階	非管理区域換気空調機械室(給気)	389	7.0	2,720	非管理		
	非管理区域換気空調機械室(排気)	315	7.0	2,205	非管理		
	管理区域換気空調機械室(排気)	560	6.5	3,640	III		
	通路(管理)	351		2,282	II		
	階段室(管理)	40		257	II		
	機器搬出入口(管理)	13	6.5	81	II		
	通路(非管理)	92		645	非管理		
	階段室(非管理)	15	7.0	103	非管理		
	機器搬出入口(非管理)	22	7.0	152	非管理		
	エレベータ室	8	7.0	54	非管理		
	地上3階	制御室	389	7.0	2,720	非管理	
		減速材冷却設備室	350	6.5	2,275	IV	
反射体取扱室(機器搬出入室(1))		1,325	7.0	21,840	III		
電源盤室(A)		158	段有り	1,001	非管理		
バッテリー室(A)		28	2.5	70	非管理		
電源盤室(B)		152	段有り	965	非管理		
バッテリー室(B)		28	2.5	70	非管理		
反射体取扱操作室(1)		28	8.5	235	II		
機器置場(1)		331	6.5	2,150	III		
機器置場(2)		144	6.5	936	III		
機器メンテナンス室		144	10.2	1,469	III		
燃料ディタンク室(A)		19	6.0	113	非管理		
排気管室(A)		7	6.0	42	非管理		
給気フィルタ室(A)		9	6.0	53	非管理		
燃料ディタンク室(B)		19	6.0	113	非管理		
排気管室(B)		7	6.0	42	非管理		
給気フィルタ室(B)		9	6.0	53	非管理		
通路(管理)		357		2,319	II		
階段室(管理)		86		557	II		
機器搬出入口(管理)		25		163	II		
通路(非管理)		126		883	非管理		
階段室(非管理)		15	7.0	103	非管理		
エレベータ室		8	7.0	54	非管理		
地上2階		データ処理室(1)	105	段有り	735	非管理	
		居室(1)	156	7.0	1,092	非管理	
		D/G制御盤室(B)	30	7.0	210	非管理	
		出入管理関係設備室	283		1,979	I	
		電源設備室	252	7.0	1,764	非管理	
		重水関連設備室	369	6.5	2,399	IV	
		休憩室(2)	143		645	非管理	
		休憩室(3)	71		319	非管理	
		データ処理室(2)	198	4.5	891	非管理	
	データ処理室(3)	180	4.5	810	非管理		
	居室(2)	162	4.5	729	非管理		
	居室(3)	192	4.5	864	非管理		
	居室(4)	197		886	非管理		
	通路(管理)	30	6.5	195	II		
	階段室(管理)	75		488	II		
	機器搬出入口(管理)	25		163	II		
	通路(非管理: キャンパス用通路(1)含)	665		3,818	非管理		
	ギャラリー用通路(2)	278		829	非管理		
	階段室(非管理)	73		461	非管理		
	機器搬出入口(非管理)	18	7.0	123	非管理		
	エレベータ室	8	7.0	54	非管理		

Table 3.1.3.2 Room list of neutron scattering facility (1st floor and basement)

フロア	室名称	床面積 (m ²)	階高 (m)	室容積 (m ³)	管理区分	備考
地上1階	中性子ステーション(1)	1.687	段有り	27.734	I	
	中性子ステーション(2)	2.645	段有り	45.687	I	
	中性子ステーション(3)	2.840	段有り	60.323	I	
	中性子ステーション(4)	636	14.5	9.215	I	
	資材置場(1)	473	4.0	1.892	I	
	換気空調機械室(中性子ステーション用)	441	4.0	1.763	I	
	資材置場(2)	270	4.0	1.080	I	
	実験準備室(1)	248	4.0	990	I	
	実験準備室(2)	682	4.0	2.728	I	
	実験準備室(3)	420	4.0	1.681	I	
	展示室(1)	84	7.0	588	非管理	
	展示室(2)	172		772	非管理	
	ロビー(1)	195	7.0	1.365	非管理	
	ロビー(2)	203	4.5	911	非管理	
	従業員出入口	78		546	非管理	
	出入管理設備室(1)	113	7.0	788	I	
	出入管理設備室(2)	120	7.0	840	非管理	
	出入管理設備室(3)(階段室含)	157		1.102	II	
	出入管理設備室(4)	233	7.0	1.628	I	
	休憩室(1)	47	7.0	331	非管理	
	D/G室(A)	109	14.5	1.577	非管理	
	D/G室(B)	109	14.5	1.577	非管理	
	D/G制御盤室(A)	30	7.0	210	非管理	
	1次冷却水循環系機械室(1)	306	6.5	1.989	IV	
	1次冷却水循環系機械室(2)	236	6.5	1.532	IV	
	機器搬出入室(1)	111	10.3	1.055	II	
	機器搬出入室(2)	328	4.5	1.476	I	
	機器搬出入室(3)	293	段有り	1.316	I	
	機器搬出入室(4)	228	4.5	1.024	I	
	機器搬出入室(5)	56	14.0	441	II	
	反射体メンテナンス室	58	10.3	597	IV	
	反射体取扱操作室(2)	101	段有り	1.035	IV	
	ターゲット台車取扱室	89	11.0	974	IV	
	ターゲット台車メンテナンス室	102	11.0	1.119	IV	
	ターゲット移送室	110	段有り	1.213	IV	
	マニピレータ操作室(1)	18	11.0	197	II	
	マニピレータ操作室(2)	30	11.0	333	II	
	ターゲット取扱操作室	152	14.0	2.132	II	
	ターゲット取扱スペース	182	14.0	2.548	IV	
	ターゲット搬出入室	97	14.0	1.075	II	
	マニピレータメンテナンス室	278	4.5	1.249	II	
	通路(管理)	172		1.117	II	
	階段室(管理)	75		488	II	
	機器搬出入口(管理)	25		163	II	
	通路(非管理)	363		2.540	非管理	
	階段室(非管理)	73		508	非管理	
	機器搬出入口(非管理)	18	7.0	123	非管理	
エレベータ室	8	7.0	54	非管理		
地下1階	2次冷却水循環系機械室	236	5.8	1.367	II	
	排水設備室(1)	517	5.8	2.997	II	
	排水設備室(2)	369	5.8	2.140	II	
	ターゲット・反射体保管エリア	697	5.8	4.042	III	
	保管設備操作室(通路含)	1.916	段有り	1.374	II	
	通路(管理)	237		1.095	II	
	階段室(管理)	189		268	II	
	機器搬出入口(管理)	46		145	II	
	合計	27.248				

Table 3.1.4 Specifications of main components and auxiliary installations
in target system (1/3)

設備名	項目	仕様	
ターゲット本体	型式 設計温度 設計圧力 冷却材入口／出口温度 冷却材流量 ビーム入力 ビーム寸法	二重容器型 200°C 1.0 MPa 50/56.5°C 120 m ³ /h 1.5MW 80 ^W ×55 ^H (mm)	二重容器型 200°C 0.5 MPa 50°C/151°C 50 m ³ /h 5.0 MW 100 ^W ×68.8 ^H (mm)
ターゲット1次冷却系	冷却材 除熱量 冷却材入口／出口温度 冷却材流量	重水 0.9 MW 50°C/56.5°C 120 m ³ /h	水銀 2.6 MW 50°C/151°C 50 m ³ /h
液体水素減速材系	冷却材 運転温度 運転圧力 熱負荷 冷却材流量	液体水素 18 K(-255°C) 減速材容器入口 1.5 MPa 6.0 kW 15 m ³ /h	
液体水素－固体メタン 減速材系	冷却材 運転温度 運転圧力 熱負荷 冷却材流量	液体水素 18 K(-255°C) 減速材容器入口 1.5 MPa 7.0 kW 15 m ³ /h	
水減速材系	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	軽水 20°C 0.7 MPa 9.0 kW 4.0 m ³ /h	
生体遮へい体冷却系	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	空気 20°C -8~-20 mmAq 220 kW(発熱量 600 kW、380 kW について は線源台車冷却系により除熱) 16,800 m ³ /h	
ビームライン冷却系	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	ヘリウムガス 40°C 0.2 MPa 16 kW 1,100 m ³ /h at 60°C, 0.2 MPa (1,950 N m ³ /h)	
線源台車冷却系 (陽子ビーム窓冷却系、 生体遮蔽体冷却系を含む)	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	重水 50°C 0.5 MPa 900 kW 50 m ³ /h	
ターゲットケーシング冷 却系 (反射体冷却系含む)	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	重水 50°C 0.5 MPa 670 kW 65 m ³ /h	

Table 3.1.4 Specifications of main components and auxiliary installations
in target system (2/3)

設備名	項目	仕様
ヘリウムベッセル冷却系	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	ヘリウムガス 40°C 0.2 MPa 150 kW 6,600 m ³ /h at 60°C, 0.2 MPa (17,600 N m ³ /h)
ヘリウムパージ装置	冷却材 運転温度 運転圧力 流量	ヘリウムガス 50°C 1 MPa 4 N m ³ /h
使用済ターゲット冷却系	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	軽水 40°C 0.5 MPa (ポンプ出口) 1,500 kW 200 m ³ /h
2次冷却系Ⅰ 水銀冷却系(1次冷却系) ビームライン冷却系 ヘリウムベッセル 冷却系 ヘリウムパージ装置	冷却材 冷却材温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	軽水 35°C 大気圧 3,300 kW 170 m ³ /h
2次冷却系Ⅱ ターゲットケーシング 冷却系 線源台車冷却系 使用済ターゲット 冷却系 冷水系	冷却材 冷却材温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	軽水 35°C 大気圧 8,650 kW 1,300 m ³ /h
冷水系 水減速材系 生体遮へい体冷却系 建家換気空調系	冷却材 運転温度 運転圧力 除熱量 冷却材流量	軽水 12°C 大気圧 4,000 kW 670 m ³ /h
3次冷却水系Ⅰ	冷却材 冷却材温度	軽水 30°C
3次冷却水系Ⅱ	冷却材 冷却材温度	軽水 30°C
反射体	材質 寸法	ベリリウム 1200 ^L ×800 ^W ×1600 ^H (ターゲットを含む全体の高さ)
生体遮へい体	鉄 厚さ 総重量 コンクリート 厚さ 総重量	前:5500mm (陽子ビーム入射側)、 後:6500mm、横:5000mm、上:6000mm、 下:3000mm 6000ton 周辺:1000mm、上:1000mm、下:2000mm 1200ton

Table 3.1.4 Specifications of main components and auxiliary installations
in target system (3/3)

設備名	項目	仕様
ターゲット台車	構造 寸法 鉄遮へい体 冷却系機器 総重量 駆動源	前方に鉄遮蔽体、 後方にターゲット1次冷却系を設置 1400~1900 ^W × 1500~4000 ^H × 6600 ^L (mm) 3500 ^W × 4000 ^H × 7000 ^L (mm) 250ton 電動
中性子ビームポート	本数	32本
中性子ビームシャッタ	方式 材質 寸法 駆動方式 配置 保守	パイプ上下型 炭素鋼+コンクリート 300 ^W × 3200 ^H × 1500 ^L +400 ^W × 2200 ^H × 1000 ^L (mm) 油圧シリンダによる上下駆動 ヘリウムベッセル付近に設置 ユニット毎上方に引き抜く
ターゲット台車取扱室 遠隔操作機器	(MS マニピュレータ) 本数 揚重荷重	10本 (2本/鉛ガラス窓) 約 20kg
	(パワーマニピュレータ) 本数 揚重荷重	2本 約 90kg
	(クレーン) 形式 揚重荷重 台数	XY型天井クレーン 5 ton 1台
使用済ターゲット保管 設備	場所 保管個数	使用済ターゲット保管エリア ターゲット及び減速材 約 50個
電気設備	高圧受電設備 3相 200V 3相 400V 単相 200V/100V	11,000 kVA 4,000 kVA 6,000 kVA 890 kVA

Table 3.1.5 Ventilation of controlled area

フロア	室名称	床面積 (m ²)	階高 (m)	室容積 (m ³)	換気回数 (回/h)	必要風量 (m ³ /h)		換気風量 (m ³ /h)
						CO ₂ 濃度	汚染防止	
地上4F	管理区域換気空調機械室(排気)	393	6.5	2,553	2	—	5,106	5,106
地上3F	減速材設備室	350	6.5	2,275	2	—	4,550	4,550
	反射体取扱室	975	17.7	17,258	2	—	34,515	34,515
	反射体取扱操作室(1)	291	10.2	2,963	0.3	210	889	889
	機器置場(1)	270	6.5	1,755	2	—	3,510	3,510
	機器置場(2)	144	6.5	936	2	—	1,872	1,872
	機器メンテナンス室	144	17.7	2,549	2	—	5,098	5,098
地上2F	出入管理関係設備室(5)	297	7.0	2,079	2	—	4,158	4,158
	重水関連設備室	369	6.5	2,399	2	—	4,797	4,797
地上1F	出入管理設備室(1)	113	7.0	788	0.3	210	236	236
	出入管理設備室(2)	120	7.0	840	0.3	210	252	252
	出入管理設備室(3)	113	7.0	789	5	—	3,945	3,945
	1次冷却水循環系機械室(1)	306	6.5	1,989	2	—	3,978	3,978
	1次冷却水循環系機械室(2)	236	6.5	1,532	2	—	3,065	3,065
	機器搬出入室(1)	139	10.3	1,429	2	—	2,858	2,858
	機器搬出入室(5)	105	4.5	473	2	—	945	945
	反射体メンテナンス室	58	10.3	597	5	—	2,987	2,987
	反射体取扱操作室(2)	101	10.3	1,035	0.3	210	311	311
	ターゲット台車取扱室	89	11.0	974	5	—	4,868	4,868
	ターゲット台車メンテナンス室	102	11.0	1,119	5	—	5,596	5,596
	ターゲット移送室	110	11.0	1,213	5	—	6,067	6,067
	マニピレータ操作室(1)	18	11.0	197	0.3	210	59	210
	マニピレータ操作室(2)	30	11.0	333	0.3	210	100	210
	ターゲット取扱操作室	151	14.0	2,107	0.3	210	632	632
	ターゲット取扱スペース	182	14.0	2,548	5	—	12,740	12,740
	ターゲット搬出入室	138	14.0	1,932	5	—	9,660	9,660
マニピレータメンテナンス室	278	4.5	1,249	0.3	210	375	375	
地下1F	2次冷却水循環系機械室	236	5.8	1,367	2	—	2,735	2,735
	排水設備室(1)	517	5.8	2,997	2	—	5,994	5,994
	排水設備室(2)	369	5.8	2,140	2	—	4,280	4,280
	ターゲット・反射体保管エリア	697	5.8	4,042	5	—	20,209	20,209
	保管設備操作室	291	5.8	1,690	0.3	210	507	507
合計		—	—	73,589	—	—	—	157,154

Table 3.1.6 Ventilation of non-controlled area

フロア	室名称	床面積 (m ²)	階高 (m)	室容積 (m ³)	換気回数 (回/h)	換気風量 (m ³ /h)
地上4F	非管理区域換気空調機械室(排気)	315	7.0	2,205	2	4,410
地上3F	電源盤室(A)	145	7.0 (一部4.0)	923	5	4,616
	バッテリー室(A)	28	3.0	84	10	840
	電源盤室(B)	145	7.0 (一部4.0)	923	5	4,616
	バッテリー室(B)	28	3.0	84	10	840
	非管理区域換気空調機械室(給気)	315	7.0	2,205	2	4,410
地上2F	電源設備室	360	7.0	2,520	5	12,600
地上1F	D/G室(A)	109	14.5	1,577	2	3,154
	D/G室(B)	109	14.5	1,577	2	3,154
合計		—	—	12,098	—	38,640

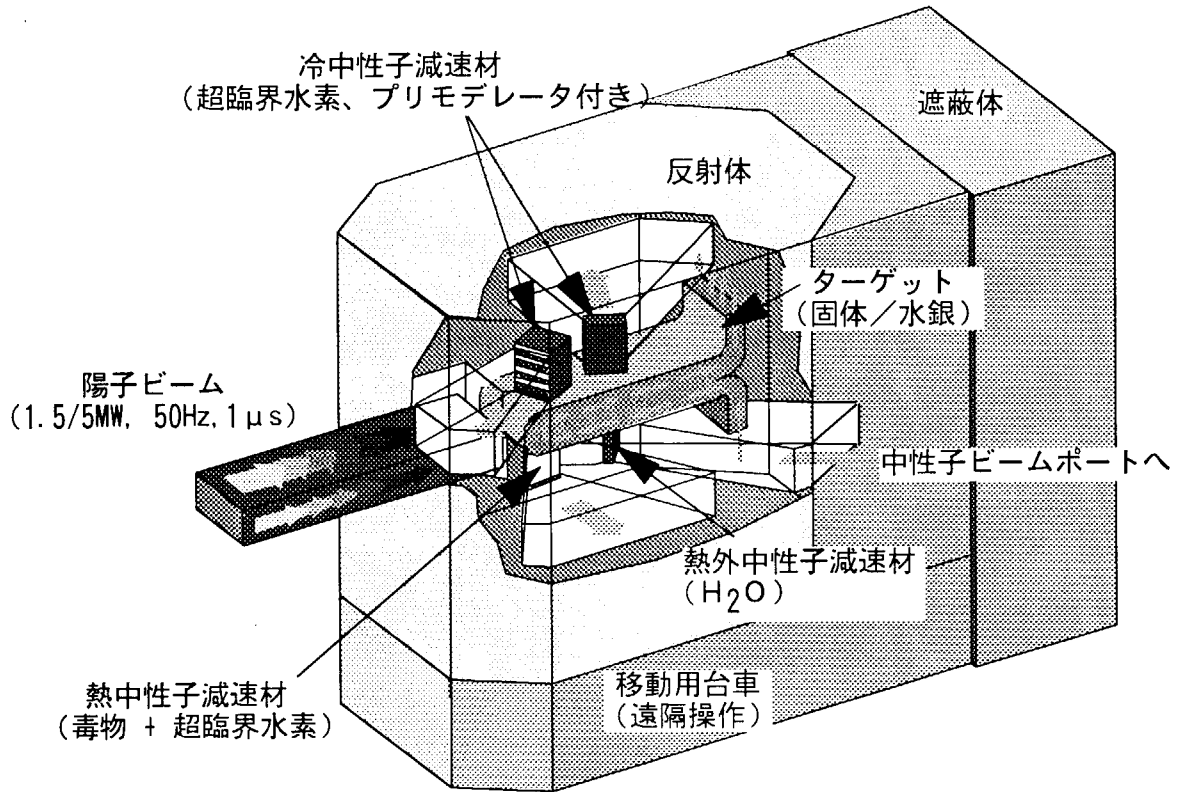


Fig. 3.1.1 Concept of target system

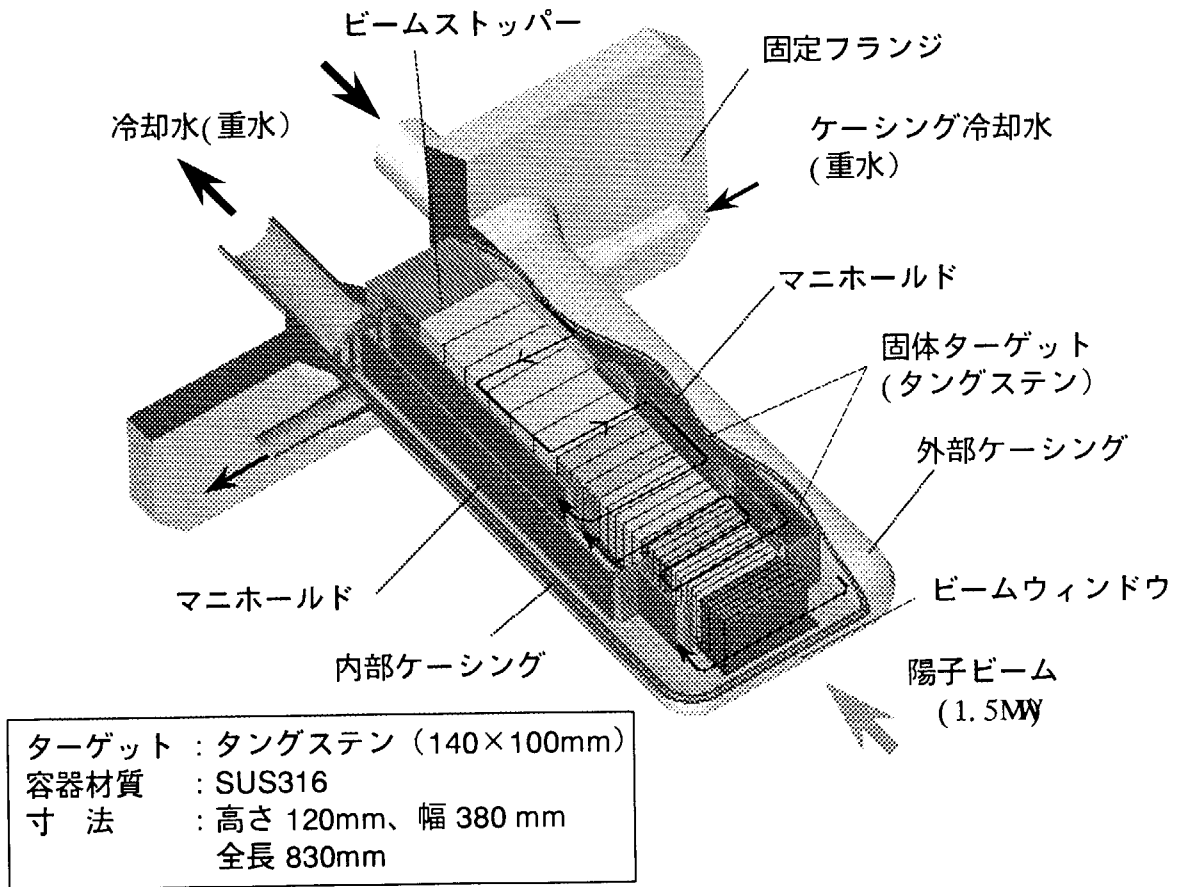


Fig. 3.1.2 Concept of solid target

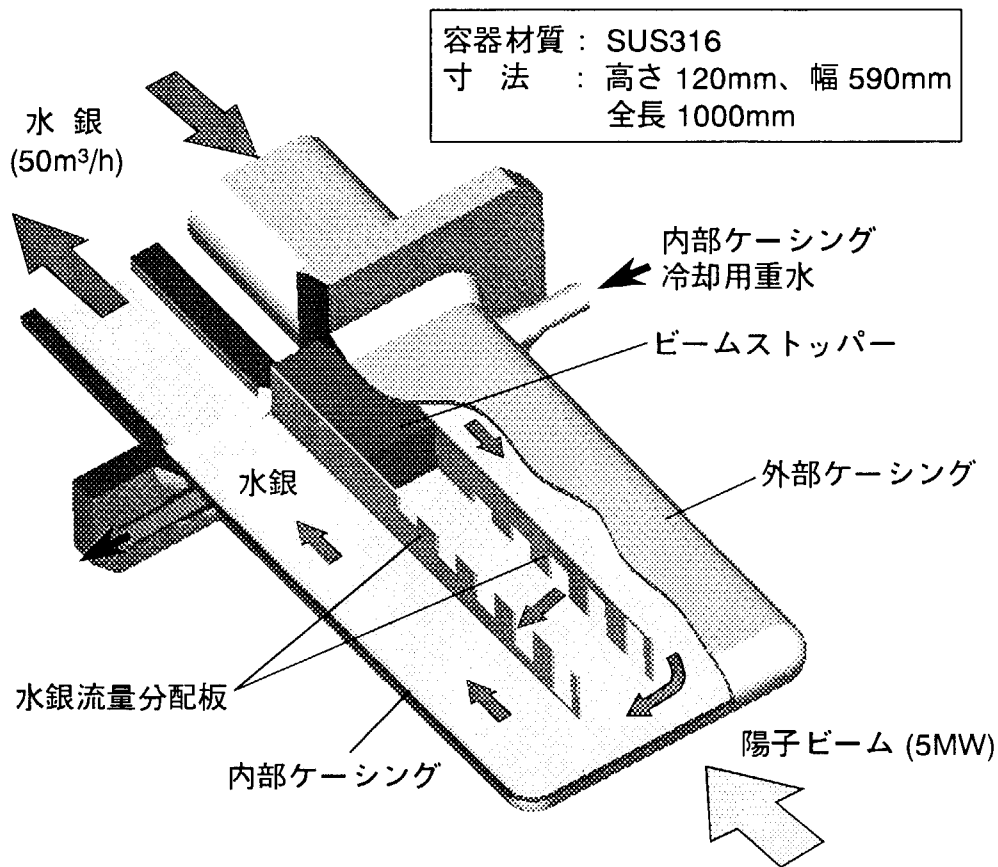


Fig. 3.1.3 Concept of mercury target

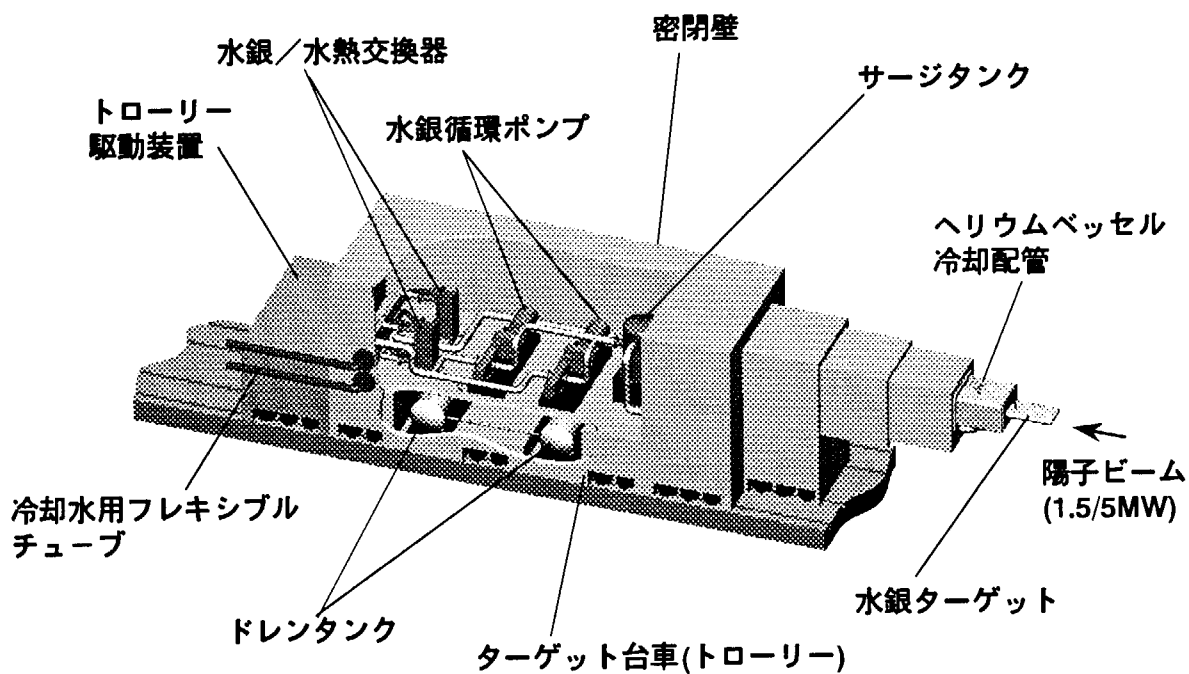


Fig. 3.1.4 Concept of target trolley

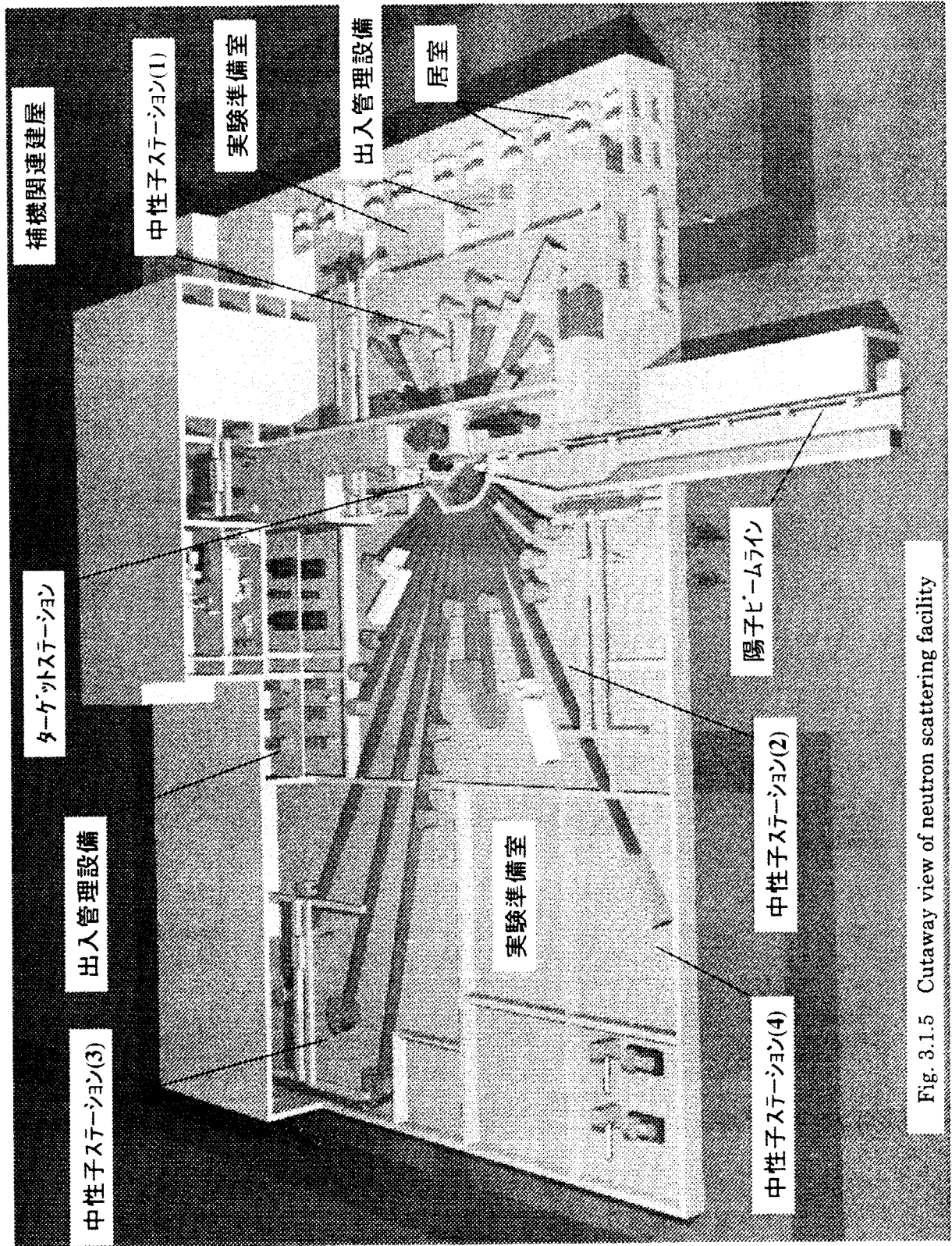


Fig. 3.1.5 Cutaway view of neutron scattering facility

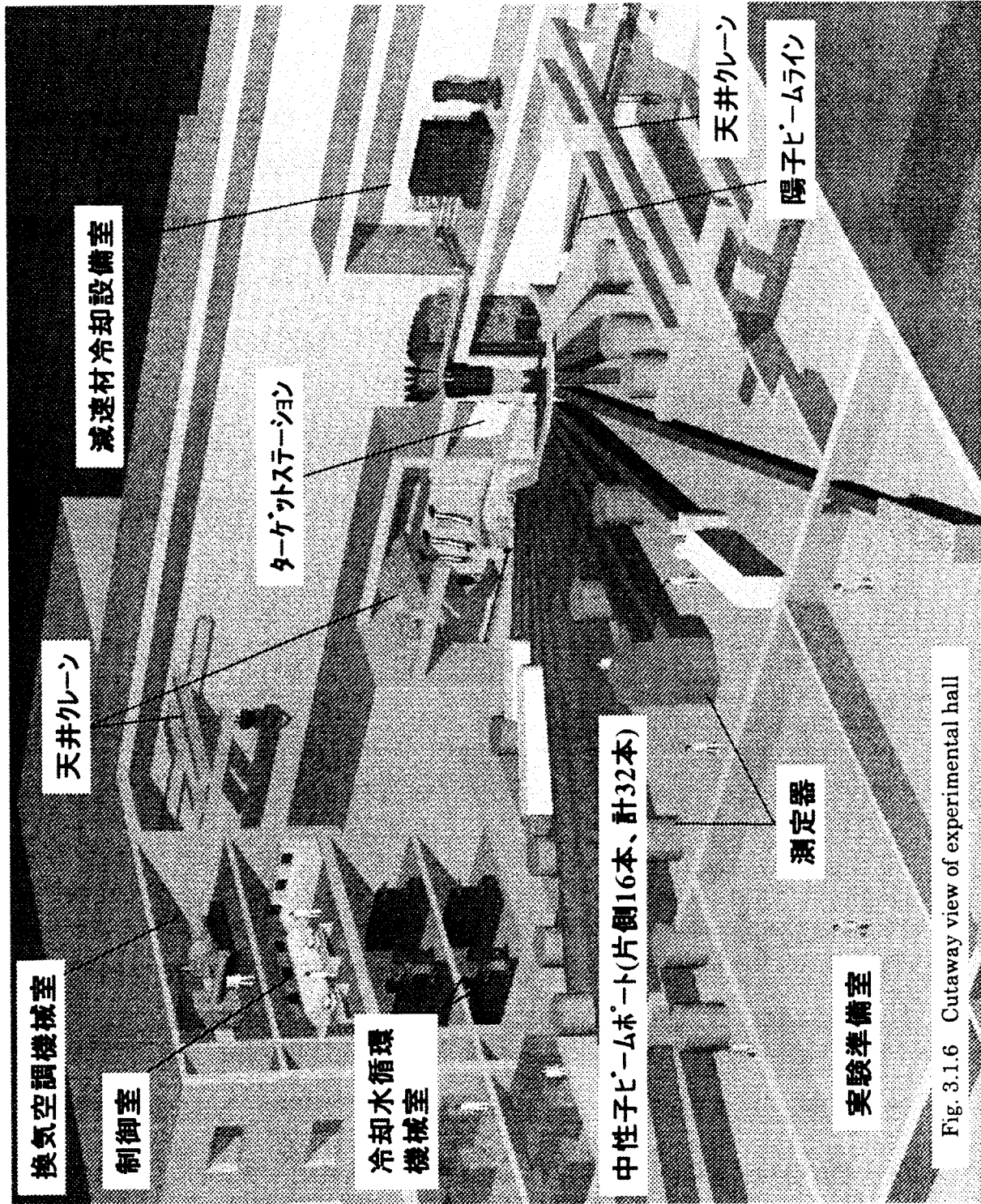


Fig. 3.1.6 Cutaway view of experimental hall

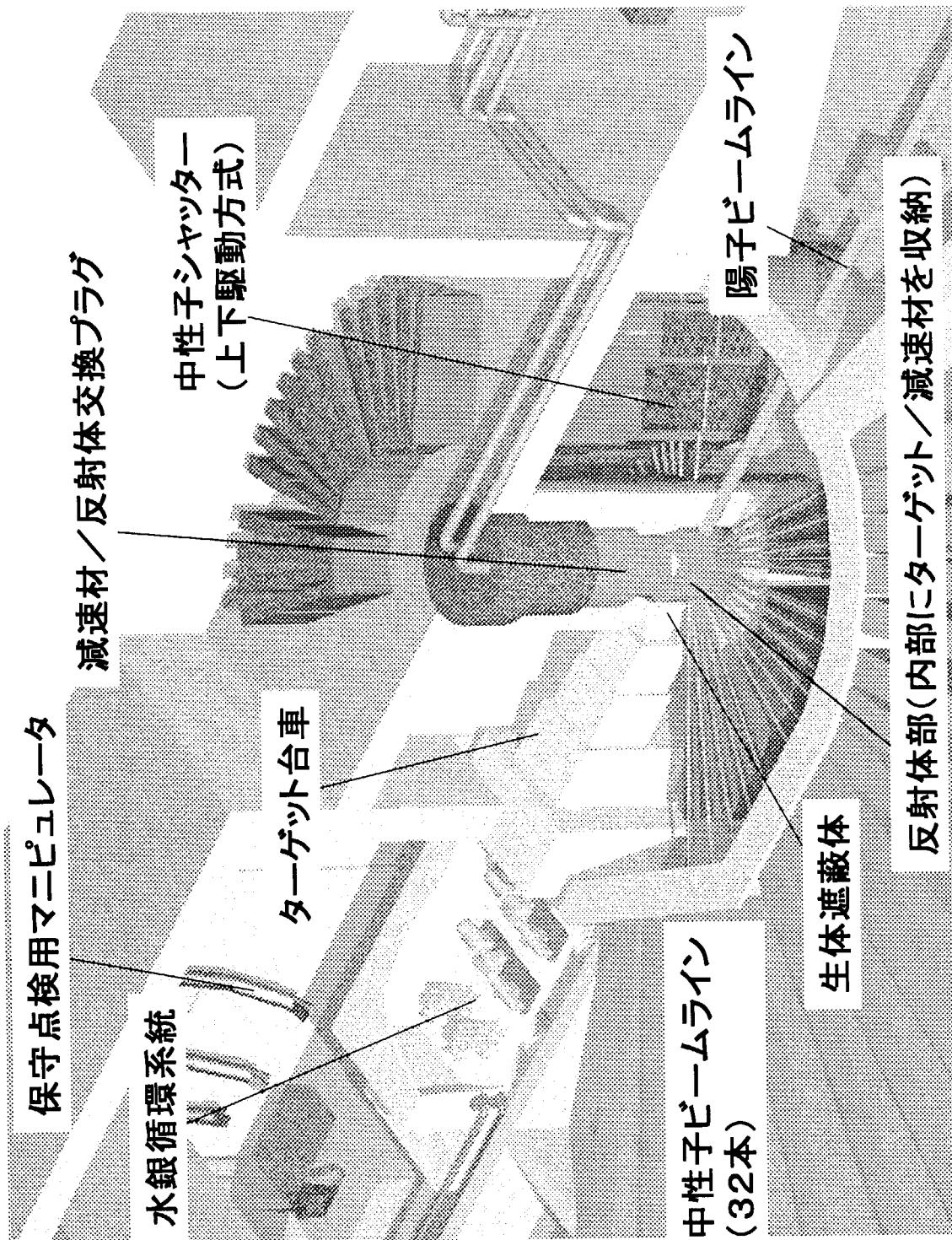


Fig. 3.1.7 Cutaway view of target station

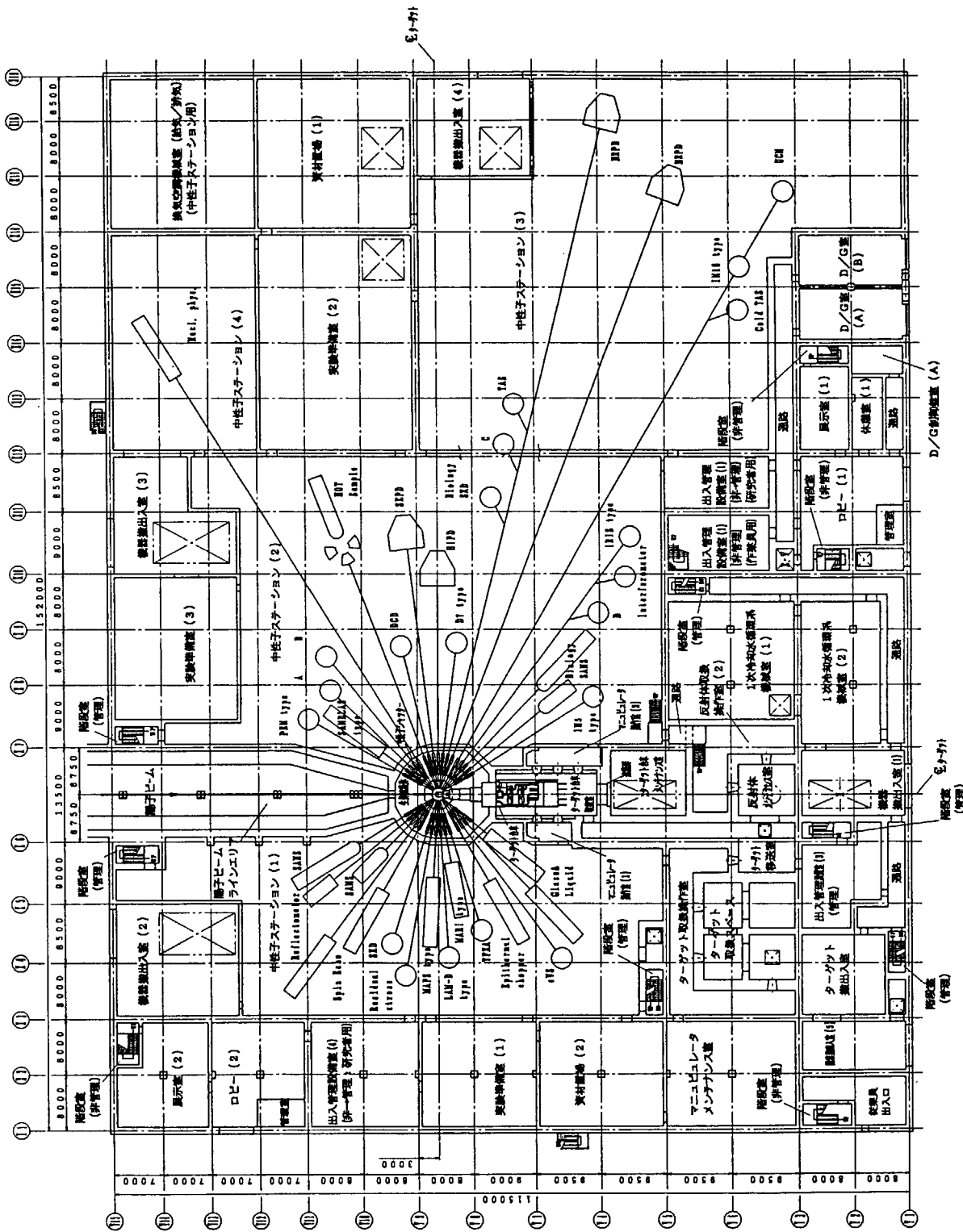


Fig. 3.1.8 Layout of 1st floor

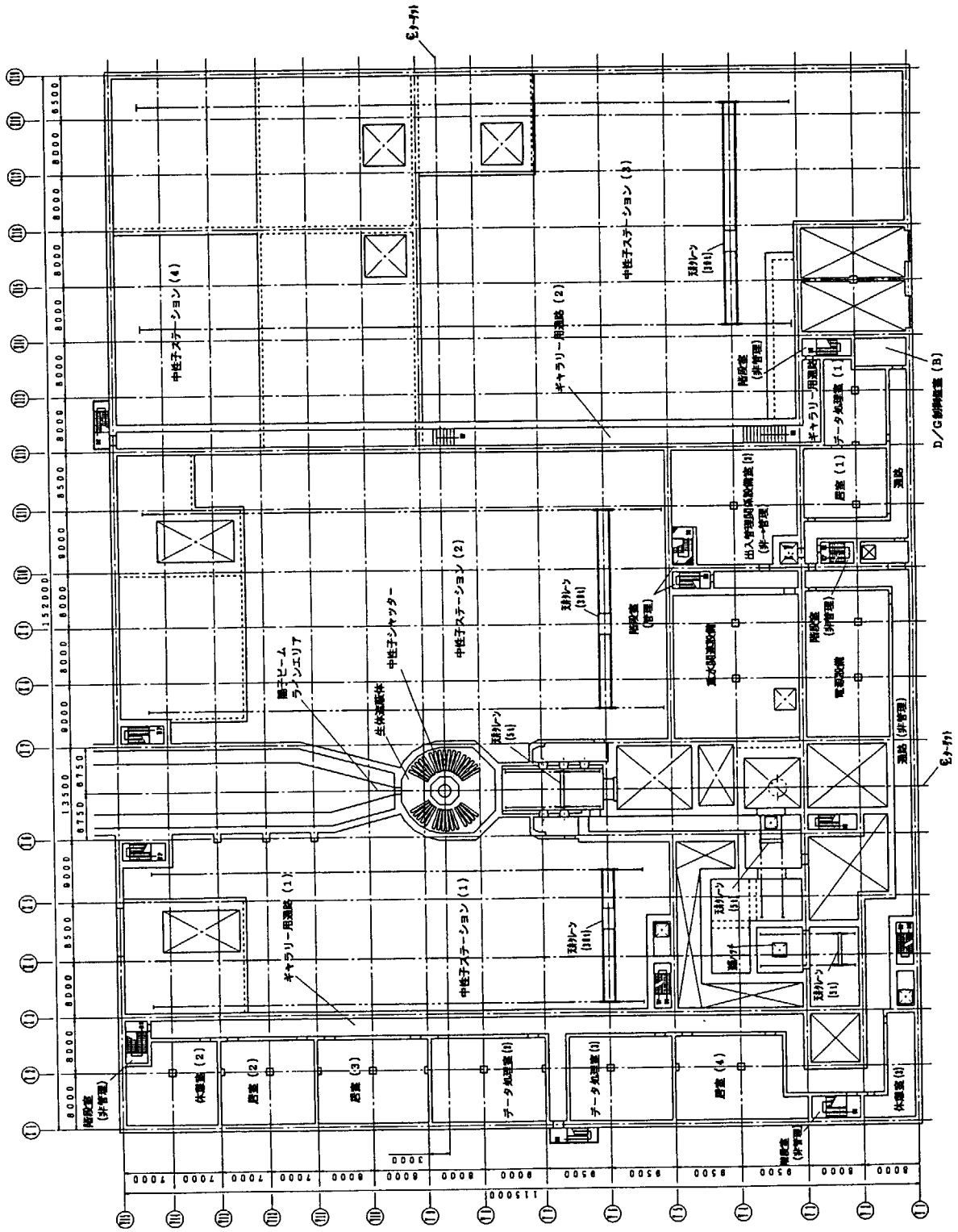


Fig. 3.1.9 Layout of 2nd floor

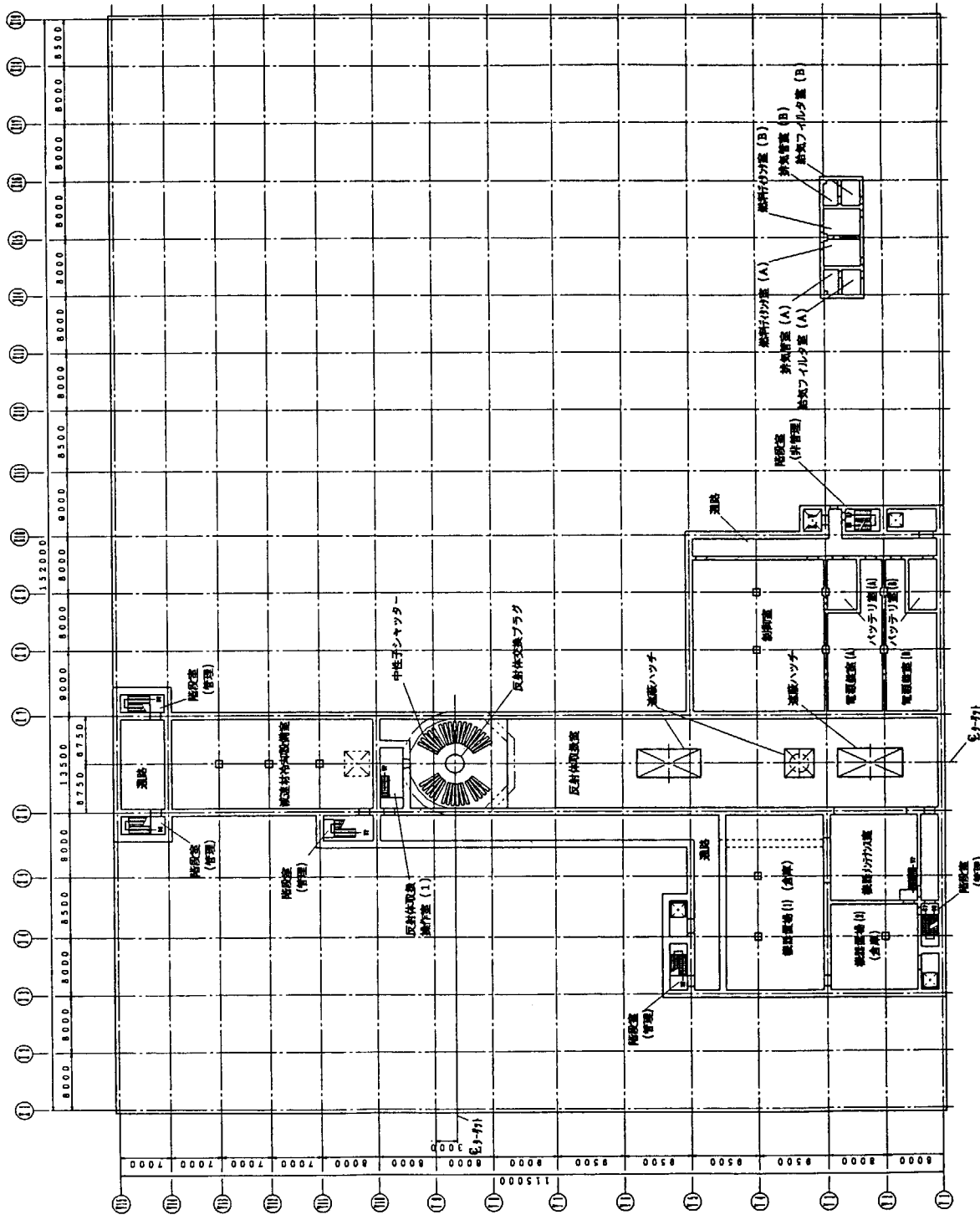


Fig. 3.1.10 Layout of 3rd floor

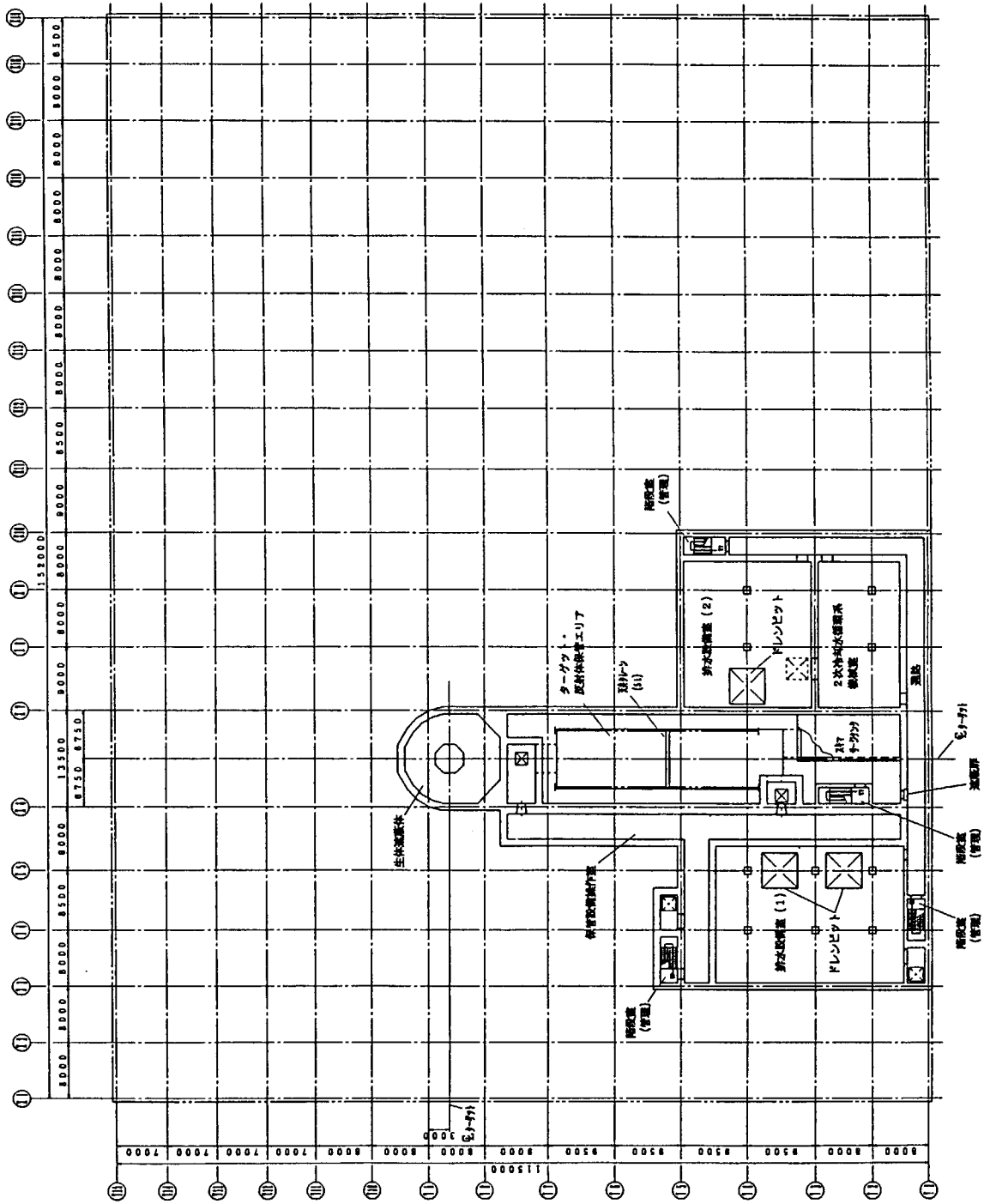


Fig. 3.1.12 Layout of basement

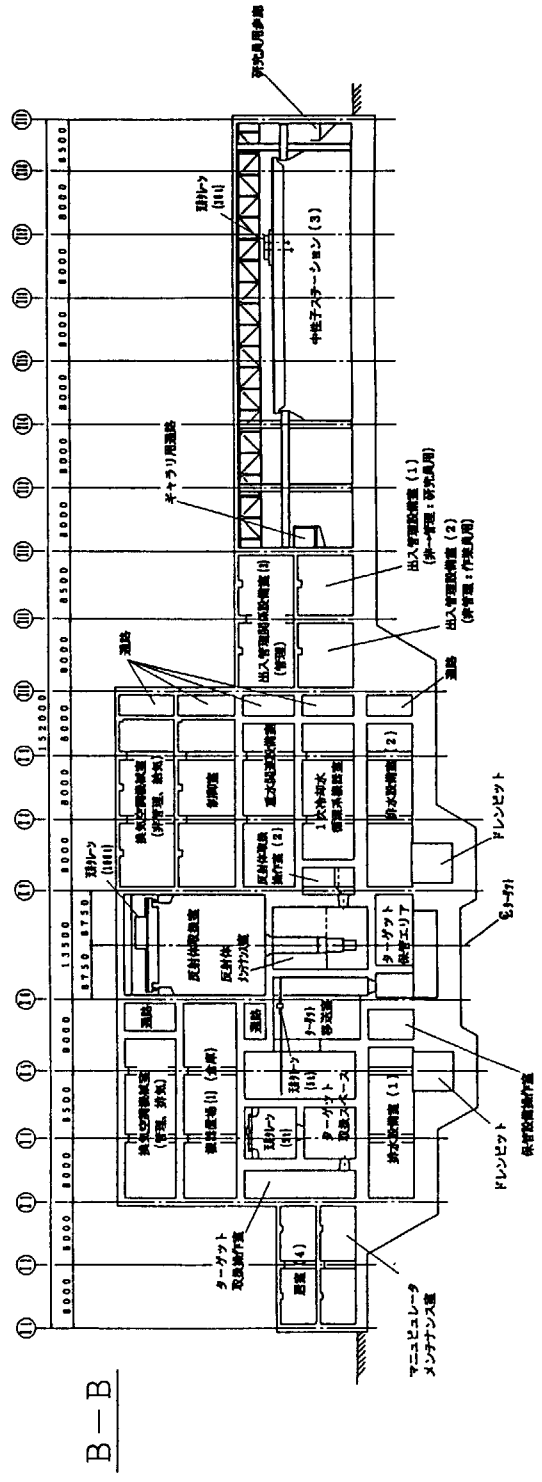
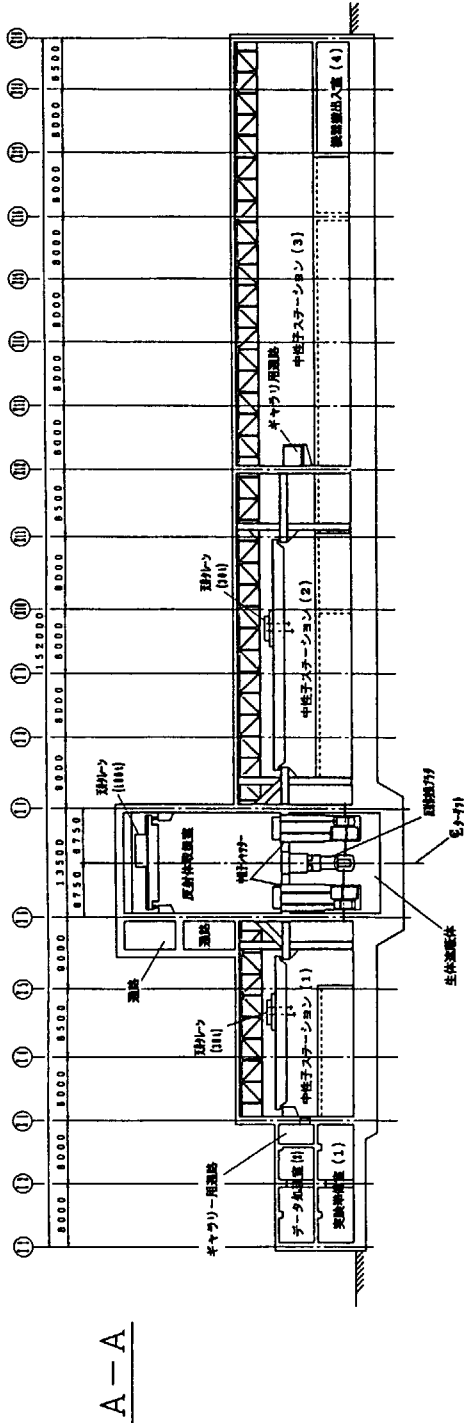
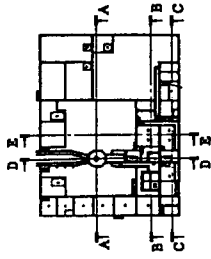


Fig. 3.1.13.1 Cross section of facility

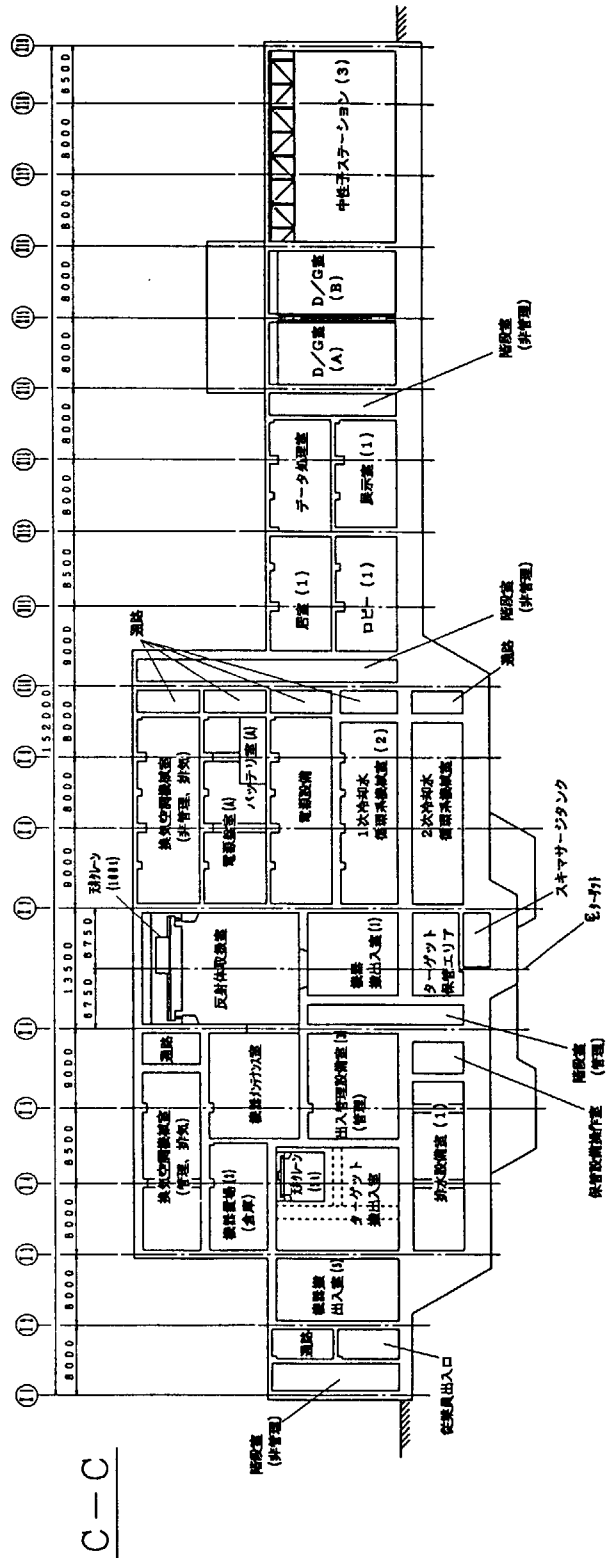
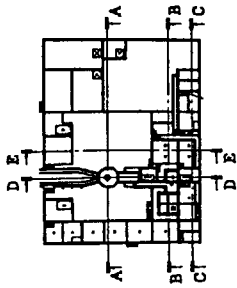


Fig. 3.1.1.3.2 Cross section of facility

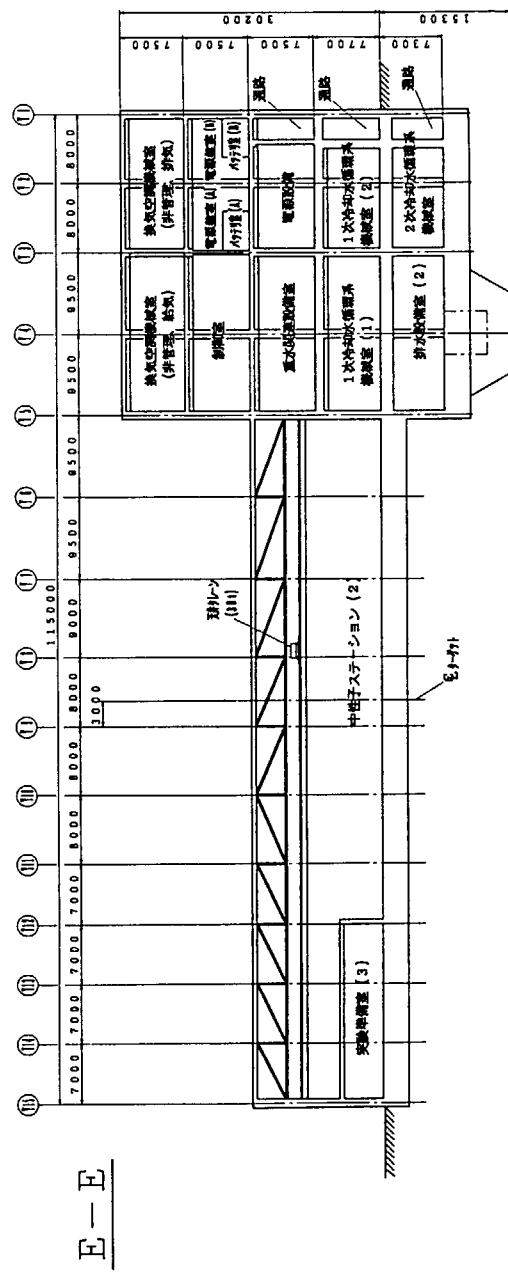
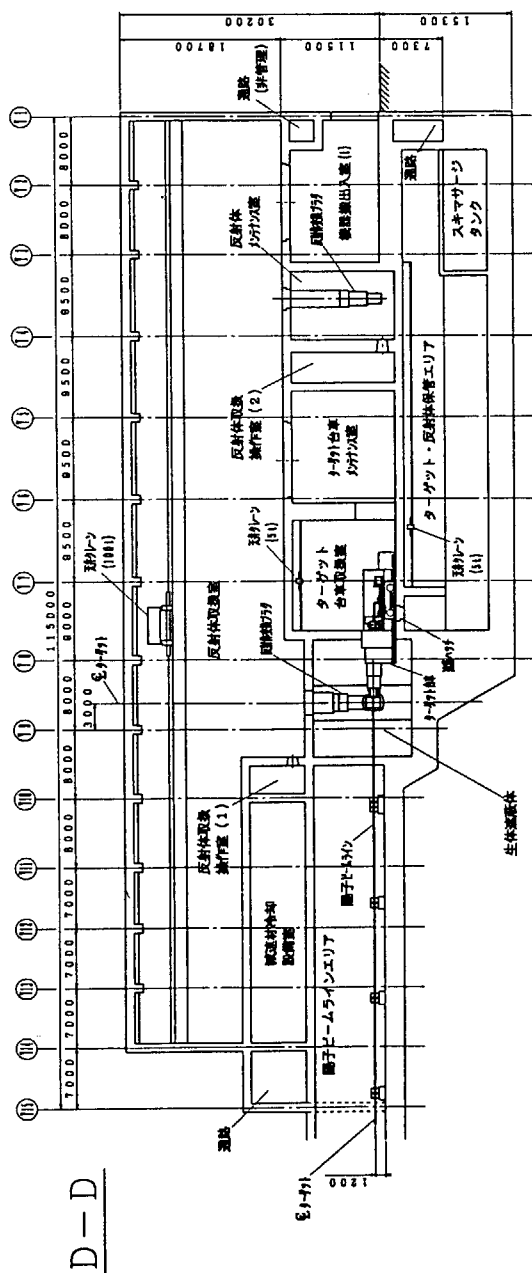
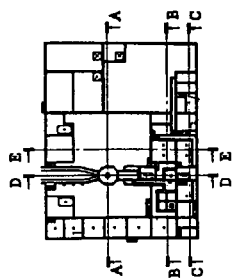


Fig. 3.1.13.3 Cross section of facility

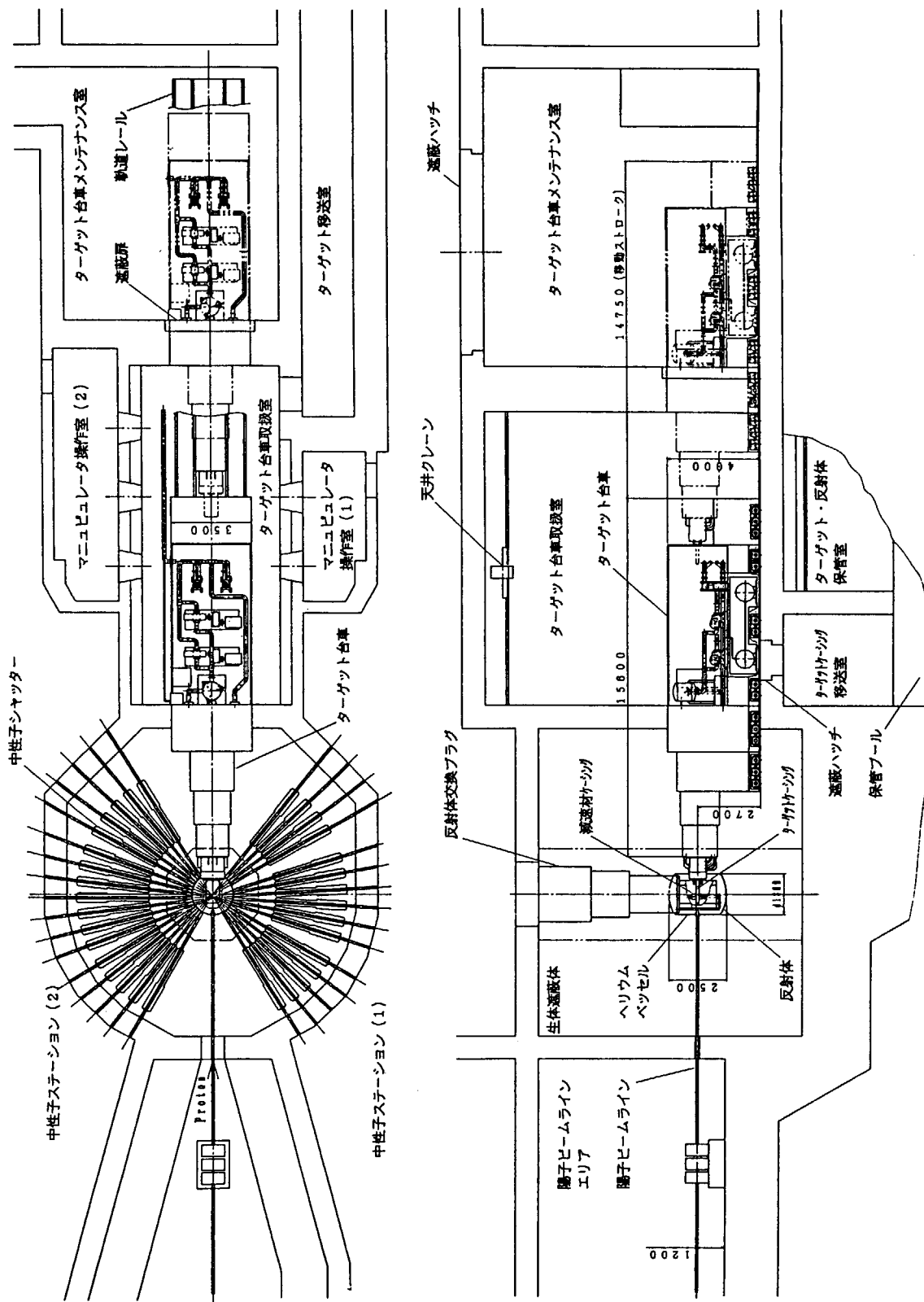
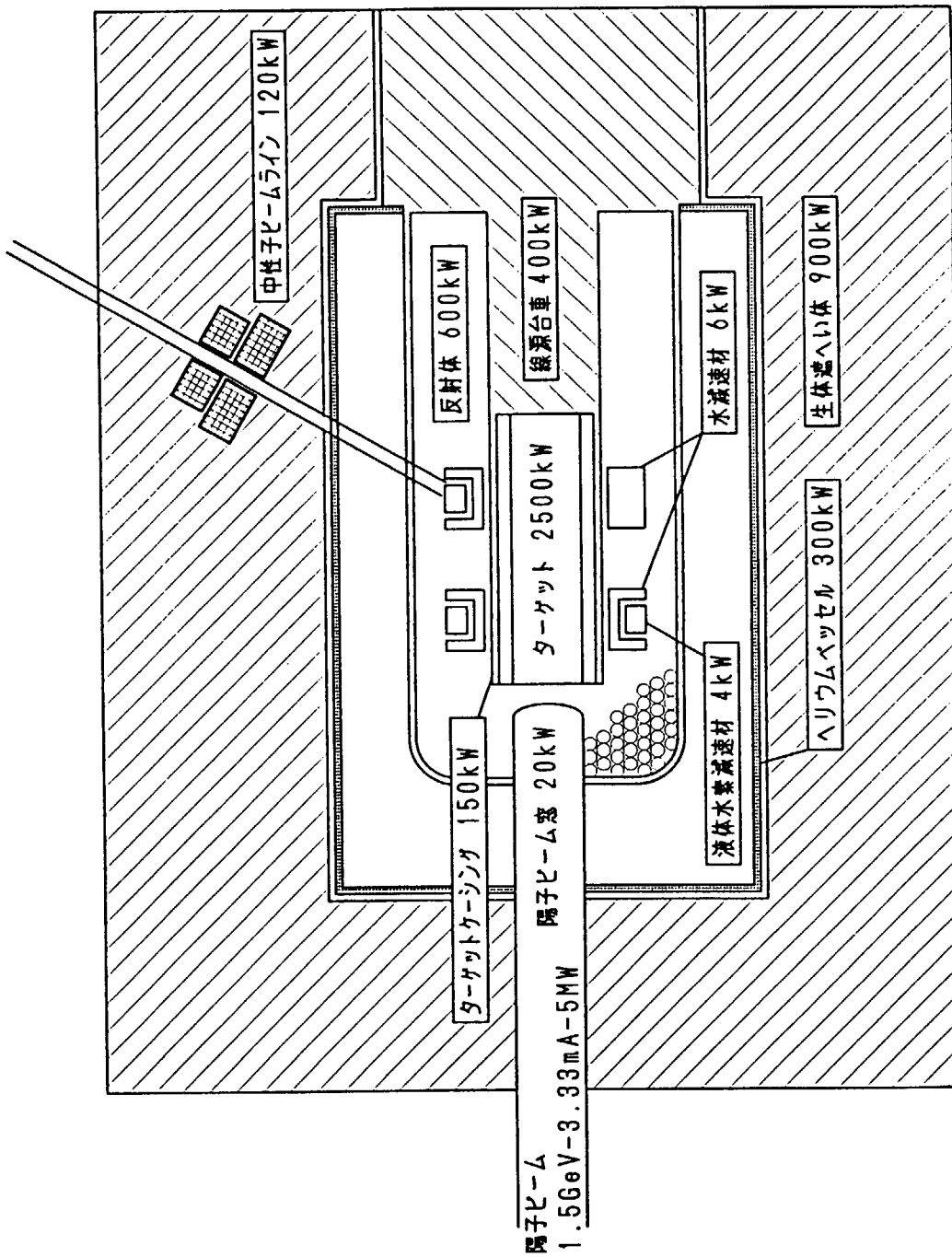
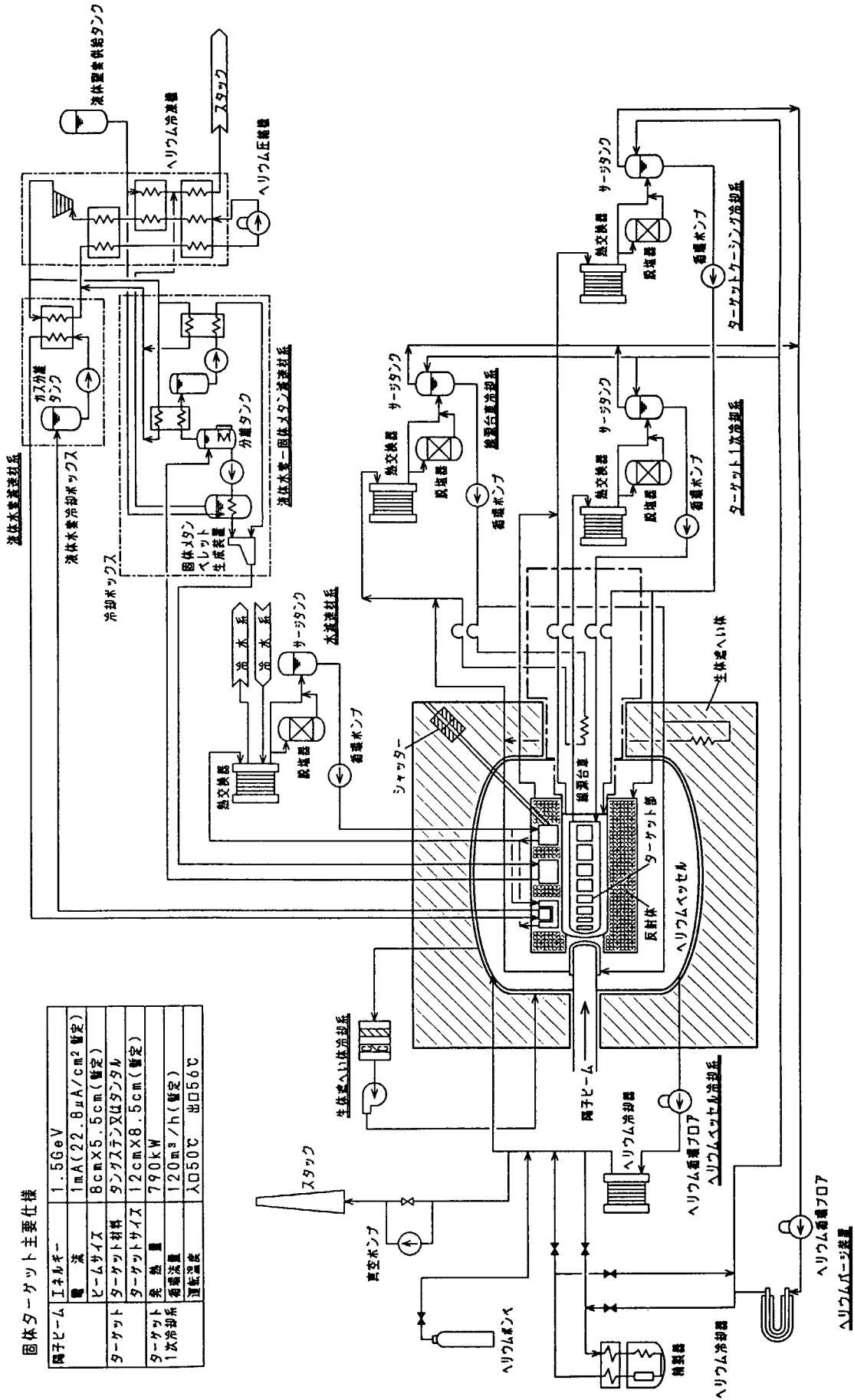


Fig. 3.1.14 Layout of target station



発熱部位	発熱量 (kW)
ターゲット	2500
ターゲットケーシング	150
陽子ビーム窓	20
水減速材	6
液体水素減速材	4
反射体	600
生体遮へい体	900
線源台車	400
中性子ビームライン	120
ヘリウムベツセル	300
合計	5000

Fig. 3.1.15 Heat deposition in target system



固体ターゲット主要仕様

陽子ビーム	エネルギー	1.5 GeV
	電流	1 mA (2.8 μA/cm ² 暫定)
	ビームサイズ	8 cm X 5.5 cm (暫定)
ターゲット	ターゲット材料	タングステン又はタンタル
	ターゲットサイズ	12 cm X 8.5 cm (暫定)
ターゲット	発熱量	790 kW
1次冷却系	循環流量	120 m ³ /h (暫定)
	運転温度	入口50℃ 出口56℃

Fig. 3.1.16 Cooling circuits for solid target system

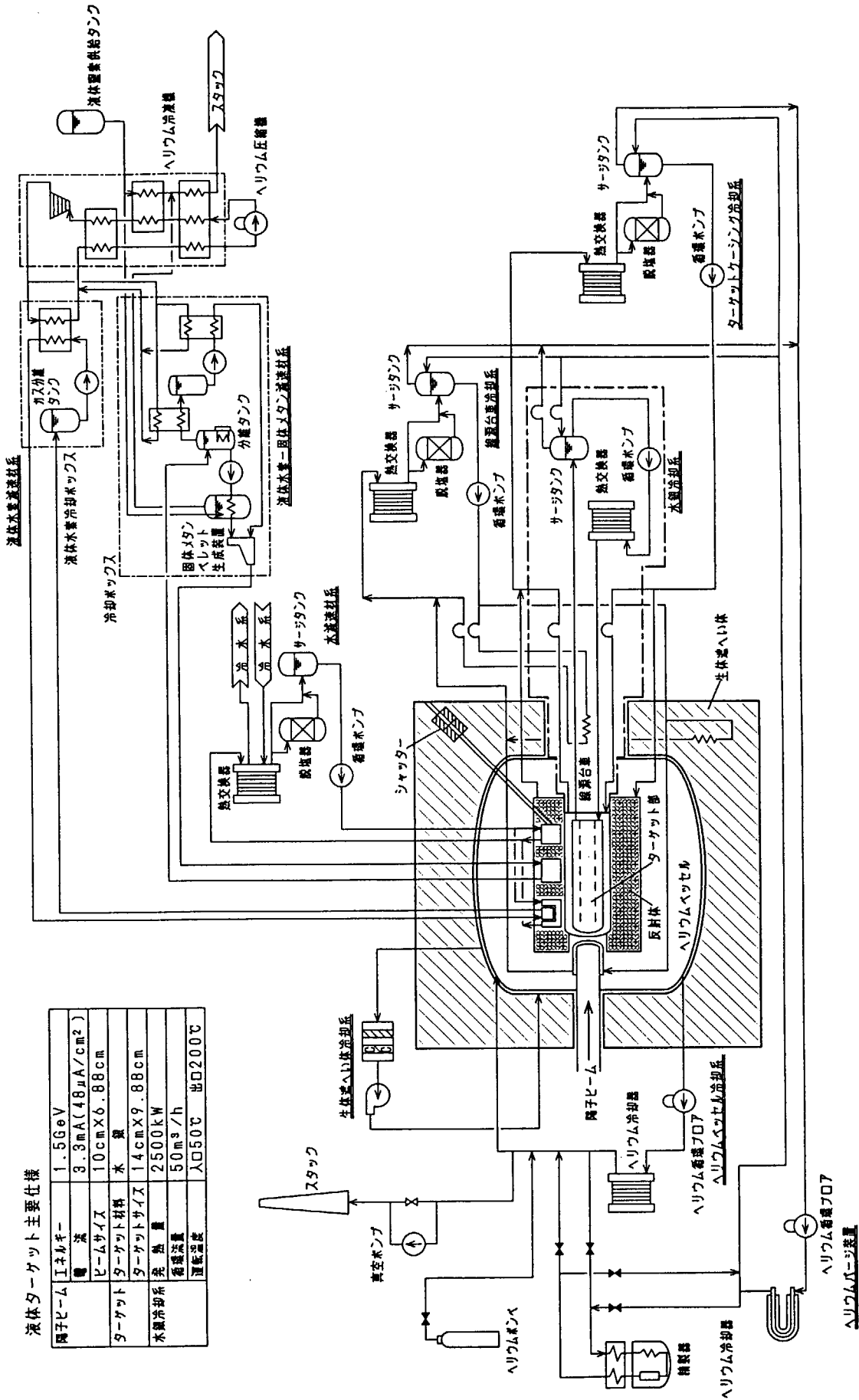


Fig. 3.1.17 Cooling circuits for mercury target system

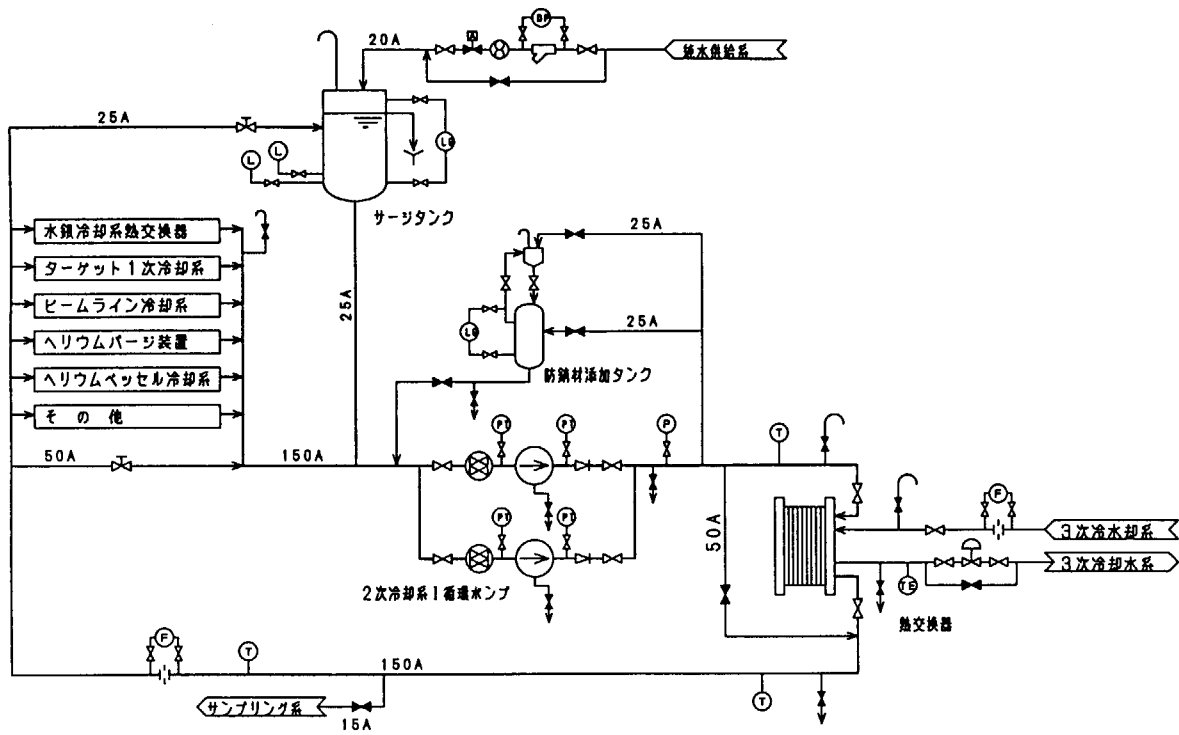


Fig. 3.1.18 Flow diagram of secondary cooling circuit I

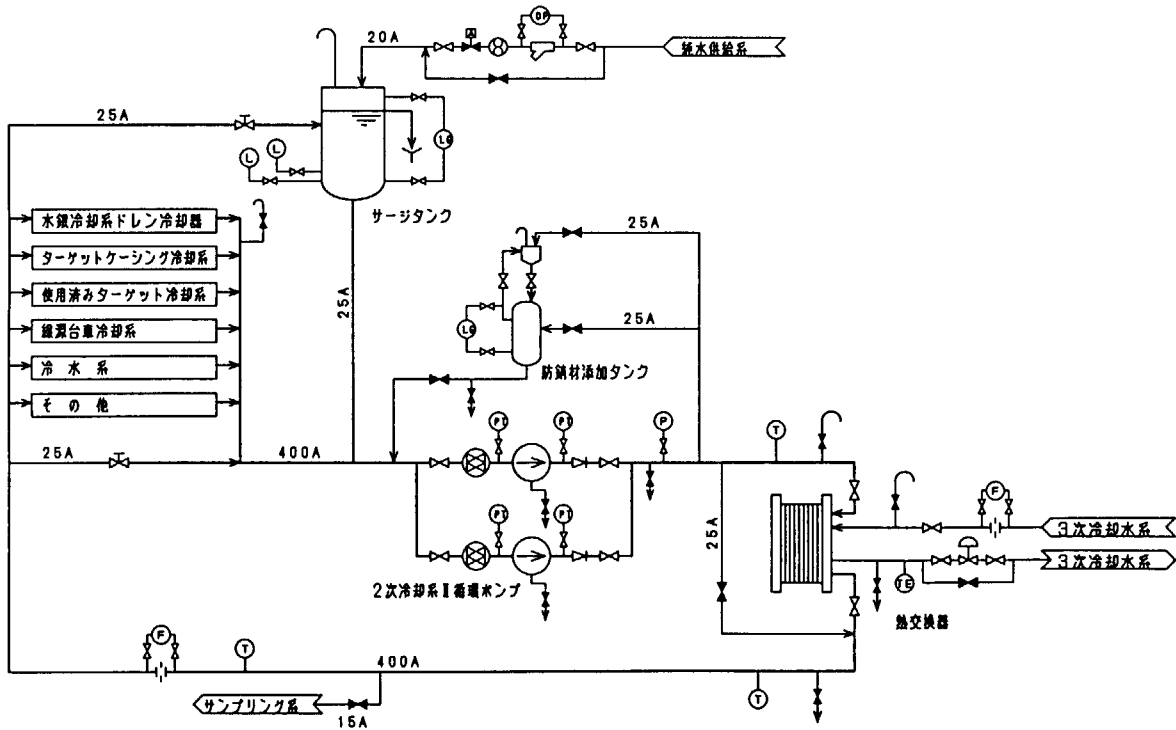


Fig. 3.1.19 Flow diagram of secondary cooling circuit II

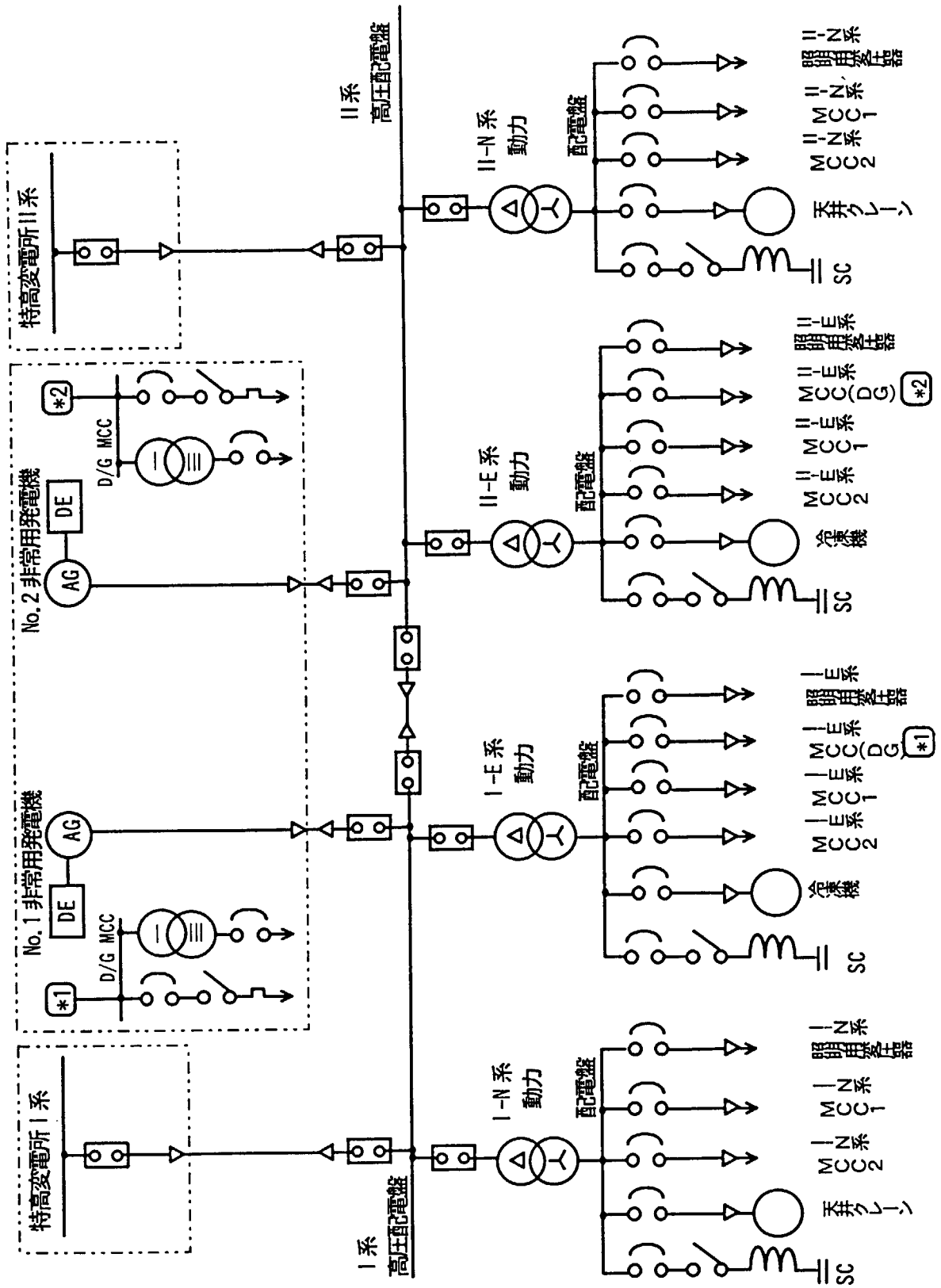


Fig. 3.1.20 Connection diagram for electric equipment

3.2 消滅処理実験炉

原研でこれまで検討を行ってきた加速器駆動消滅処理システムは、現行のナトリウム冷却高速炉技術に基づいた固体燃料システム概念と将来オプションとして熔融塩システム概念である。消滅処理実験炉では、技術的基盤のある固体燃料システム概念を主要研究開発対象とする。消滅処理実験炉の全体概念図を Fig. 3.2.1 に示す。以下では、消滅処理実験炉の施設仕様と概要について述べる。

3.2.1 消滅処理実験炉の施設概要

(1) 炉心

消滅処理実験炉では、小規模・小出力のターゲット/未臨界炉心システムを用いて、システムレベルでの核的特性、MA 燃料照射、計測・制御等に関する技術的成立性及び MA 燃料消滅性能を実証する実験を行う。炉物理及び燃料照射の観点から、中性子スペクトル条件を模擬する必要がある。実用消滅処理システムでは、MA 燃焼率は年間約 10% である。これを合理的な期間内で実証するためには実験炉において年間数%程度の MA 燃焼率を達成する必要がある。このため、炉心の中性子束を実用システムの 1/10 程度より高くする必要がある。ここで、システムのスケールは炉心の構成、燃料組成と中性子増倍係数で決まるので、実験炉に必要な熱出力が導かれる。燃料を 20%濃縮ウラン、中性子増倍係数を ~ 0.93 、MA 燃焼率を年間 1% (140 日照射) とすると、少なくとも 30MW の炉心の熱出力が必要となり、ビーム出力は約 2.3MW になる。従って、消滅処理実験炉の基本的な仕様は、実用消滅処理システムに近い中性子増倍率 ~ 0.93 と 30MW 程度の熱出力のウラン酸化物燃料 (20%濃縮) 燃料未臨界炉心に MA 窒化物燃料ペレットあるいは燃料ピンを装荷し、出力約 2.3MW の CW ビームを用いる。また実用消滅処理システムでは窒化物燃料を用いるので、実験炉は将来的に燃料をウラン窒化物 (20%濃縮) とし、炉心熱出力を 60MW 程度、ビーム出力を 4.5MW 程度に増強する。

以上の観点から検討した、ウラン酸化物燃料を用いた炉心の構成図を Fig. 3.2.2 に示す。燃料は、これまで十分な使用実績のあるウラン酸化物ペレットを用いることとし、濃縮度は 20%のものを用いる。炉心の実効増倍率は ~ 0.93 で、炉心高さ 100 cm、炉心半径は約 50 cm である。また核破碎ターゲットは、実用消滅処理システムと同じ固体タングステンを用い、炉心中央に半径約 10 cm のターゲット領域を設ける。また炉心外周部には、ステンレス鋼からなる径方向反射体領域を設ける。消滅処理実験炉 (熱出力 30 MW) の中性子束は、ピーク位置及び炉心平均でそれぞれ 7.8×10^{14} 、 4.0×10^{14} であり、実用消滅処理システム (熱出力 800 MW) のそれぞれの値 8.0×10^{15} 、 4.4×10^{15} と比較すると、目標とした実用消滅処理システムの約 1/10 程度のレベルを満足していることが分かる。

炉心を構成する燃料集合体及びターゲット集合体を Fig. 3.2.3、4 に示す。高速炉の燃料集合体は通常ラップ管に納められた構造をしているが、消滅処理実験炉では Fig. 3.2.3 に示すようにダクトレス集合体を用いる。燃料集合体は、85 本燃料ピンと 6 本のタイロッド

を正三角状に配列し、グリッドスペーサーによってピッチを保ちつつ束ねられる。実用消滅処理システムで用いる燃料要素の主成分はMAであり、これらの核種の α 崩壊による発熱を効果的に除熱する必要がありこのためにラップ管のないダクトレス集合体を用いることとしている。消滅処理実験炉の燃料はウラン酸化物であり除熱の問題はないが、要素技術の開発という観点から実用消滅処理システムと同じダクトレス集合体を用いることとした。消滅処理実験炉の燃料及び炉心の主要な仕様を Table 3.2.1 に示す。

ターゲット集合体の構造も実用消滅処理システムでもちいるものとほぼ同じ構造のものを用いる。ターゲット集合体は、Fig. 3.2.4 に示したように3種の厚さの異なる(1.5 cm、7.0 cm、12.0 cm) タングステン板で構成され、実質的な長さは燃料と同じ100 cmである。このようにビーム入射方向から徐々に厚さを厚くする構造は、ターゲット集合体内での発熱をできるだけ平坦化する目的で採用した。また、各タングステン板には冷却用のナトリウムが流入するための流入孔があいているが、高エネルギー粒子のストリーミングを抑えるため、隣接するタングステン板で流入孔が互い違いになるように配される。

(2) 炉内構造及び炉心廻りの構造

炉心部の概念をもとに、冷却性、ナトリウムバウンダリ等の観点から炉心支持構造及び原子炉容器構造を検討し、Fig. 3.2.5 に示すよう構造とした。1次冷却材、入口配管から炉内に流入した1次系ナトリウムは、炉内壁に沿って下降し、炉心支持構造内の高圧プレナム部に流入する。炉心及びターゲットへの冷却材の流れは、高圧プレナムから連結管のスリットを経て各集合体のエントランスノズルに導かれる。反射体への流れは、高圧プレナムから一部の流れを低圧プレナムに導き、ここで連結管を介して反射体エントランスノズルに導かれる。炉心部へ導かれた流れは、上方へ向かい、炉心、ターゲットを冷却したあと、ビーム窓を冷却して上部プレナムに至り、出口ノズルを経て出口配管に導かれる。

原子炉容器はオーステナイト系ステンレス鋼の直径2.6 m、高さ約8 mの下部半球殻付き堅型円筒容器であり、ルーフスラブからの直吊りしている。また、第4紀層立地を想定し、地震条件は緩いものとして原子炉容器には下部振止めは設けないこととした。冷却剤の流出入方式は、PWRと同様のサイドエントリ方式とし、出入口ノズルを原子炉容器の上方に設けている。これは、入口ノズルを下部に設置するとガードベッセルが複雑な形状になること、また上部流出入方式としてルーフスラブから出入口配管を差し込むと原子炉容器の径が増大することを避けるためである。従って、原子炉容器の中に内筒を設け、この内筒により入口側と出口側領域を仕切ることとしている。また原子炉容器外側には冷却材ナトリウム漏洩防止のためにガードベッセルを設ける。また実験炉支持構造は生体遮蔽コンクリートを兼用した形となる。消滅処理実験炉では、炉容器構造は従来の高速炉に比べ、格段に簡素化、軽量化しており耐震上は十分な強度で支持できるものと考えられる。また、炉容器は上部蓋(プラグ)部で支持し、ガードベッセルとは支持部を分けることができる。

消滅処理実験炉の炉容器構造廻りは、加速器系との取合構造、補助設備、各種取扱設備等が複雑に施設される。Fig. 3.2.6 に原子炉の支持構造(構築物)、陽子ビーム入射系、ビームダンプ、ビーム遮断系等の原子炉構造廻りの構造を示す。消滅処理実験炉は、加速

器によって未臨界炉を制御・運転するため、従来の高速炉のように制御棒による運転制御は行わない。従って、炉心上部機構、制御棒及び制御棒駆動機構が不要なため消滅処理実験炉の炉心上部構造も従来の高速炉に比べて簡略化されたものとなっているが、加速器からの陽子ビームラインが炉心上部中心軸から炉心部内に食い込んだ形で挿入される。

陽子ビーム入射系は炉容器に近い側から見て、ビーム入射窓、ビームパス、ビームエキスパンダ、4極マグネット、偏向マグネット、4極マグネットから成る。ビーム窓は高エネルギー陽子・中性子による高照射を受けるので定期的な交換が必要なため、この部分の長さをできるだけ短くするため、炉上部プレナムはFig. 3.2.6に示されるように浅くしている。このため、燃料・ターゲット交換時には、炉上部蓋部は対象集合体の全域をアクセス出来る概念としている。しかし、炉上部が浅いプレナムとなっているため、この空間で燃料を水平方向に移動させることはできない。従って、燃料・ターゲット交換は炉上部から直動型で行うことになる。このような概念とするためには、炉上部プラグにキャスク付交換装置を設置し、この装置が位置決めできるようにしておく必要がある。

ビーム窓が破損したとすると、ビームライン側は真空なので冷却材ナトリウムがビームラインに侵入する。この場合、冷却材バウンダリの破損は言うに及ばず財産保護的観点からも加速器側の損失は膨大で、その影響をできるだけ小さくする必要がある。このためビームライン途中にビームライン遮断弁を設けている。しかしながら、ビームストップあるいはビームライン遮断には、ビーム窓破損の迅速な検出が不可欠であるがこれは容易ではない。この他、ビーム窓を2重化する方法、ビームライン途中で仕切り弁を設ける方法等が考えられるが、十分な安全性・信頼性を確保するためのビーム窓構造等の詳細設計が必要である。

ビーム窓の定期交換のためビームラインは分割し、移動できる構造としている。ビームラインの分割は、ビーム窓、ターゲット、燃料等の交換時に炉上部に必要空間が得られるように行う。そのために陽子ビーム入射系は、ビーム窓部、緊急遮断弁敷設ビームパス、ビームエキスパンダ/4極マグネット部、偏向マグネットの各部に分けている。各部は真空フランジ等で接続されており、燃料等の交換時にフランジ部で切り離し、偏向マグネット等の水平移動装置を常設しておく。移動は炉から遠い部位から順に行う。当該部の遮蔽コンクリート等も必要により分割しておく。これらの移動のための、クレーン、自走モータ等も敷設しておく必要がある。

消滅処理実験炉の原子炉廻り構造を決定する上で重要となるのが原子炉遮蔽構造である。本施設では、一般的な高速炉の遮蔽に加えて高エネルギー陽子・中性子の遮蔽も考慮する必要がある。遮蔽設計の目標値を満足するためには遮蔽体を追加することであるが、遮蔽体を大きくすることは直接プラントの建設費の上昇につながるため、経済的に合理的なプラントを実現するには、きめ細かな評価が必要となる。予備的な遮蔽解析の結果、消滅処理実験炉の遮蔽では、20 MeV 以上の中性子及びその2次 γ 線の線量当量の評価が重要となることが分かった。従来の原子炉プラントにおける中性子源は実質的に核分裂のみであることを考えると、加速器駆動炉の遮蔽構造は従来の原子炉プラントとは大きく異なることになる。遮蔽体としてコンクリートを考えた場合、遮蔽体外側での線量当量が $6 \mu\text{Sv/hr}$

以下となる最小の遮蔽体厚さの概略値は炉心径方向で約 10 m、炉心底部で約 15 m となることが分かった。炉心上部遮蔽については、消滅処理実験炉では炉心中央に炉心上部より加速器ビームラインが挿入されており、炉心上部遮蔽を評価するにはこのストリーミング効果を考慮する必要がある、原子炉上部構造の詳細化とともに今後詳細な評価が必要となる。なお、ビームの曲げ半径は約 5 m であるが、炉廻りの遮蔽コンクリート厚さが膨大であるため、ビーム曲げにより施設を膨大化することにはなっていない。

(3) 冷却系及び補助系設備

消滅処理実験炉の除熱系統は主冷却系、補助冷却系（崩壊熱除去系）から成り、Fig. 3. 2. 7 に示す概念構成となっている。消滅処理実験炉の冷却系の施設概念を検討する上での前提条件は下記の通りとした。

熱出力（設備容量／定格出力）	60 MWt / 30 MWt
出入口温度（定格）	430 / 330 °C
1 次系流量（定格）	1.63×10^6 kg/h (60 MWt)
冷却系統	1 ループ

消滅処理実験炉の熱出力は 30 MW であるが、既にのべたように将来的に 60 MW に拡充することを考慮して、冷却系の設備容量は熱出力 60 MW で検討した。また前節で述べた予備的な遮蔽解析の結果から、原子炉廻り及び加速廻りのコンクリート遮蔽体の必要厚さは 10 m として検討した。

主冷却系は 1 ループによる系統構成であり、冷却材にナトリウムを使用することから中間冷却系（2 次系）を設ける。原子炉容器出口側のホットレグ配管中の高温ナトリウムは中間熱交換器に流入し、2 次側ナトリウムと伝熱管を介して熱交換する。ここで除熱された低温ナトリウムは、ミドルレグ配管を通過して 1 次主循環電磁ポンプで加圧され、コールドレグ配管を通過して再び原子炉容器内に入る。中間熱交換器で 1 次系ナトリウムと熱交換した 2 次系ナトリウムは 2 次主冷却系配管に流入するが、熱交換器を出た 2 次主冷却系配管は、格納容器を貫通して原子炉建屋内の空気冷却器に入り、フィン付きチューブの伝熱管を介して外気にて冷却された後、2 次主循環電磁ポンプで加圧されて再び中間熱交換器に戻る。

主冷却系に関わる補助系統としては、ナトリウム液面上を不活性化するための 1 次及び 2 次アルゴンガス系、系統中のナトリウム純度を許容値内に維持するための 1 次及び 2 次純化系、系統内のナトリウムをドレン及び充填するための 1 次及び 2 次充填ドレン系並びにナトリウムの凍結を防止するための各系統予熱保温設備等がある。

本施設では、原子炉容器及び加速器系に対する遮蔽厚が膨大となるため、格納容器内の主冷却系設備はコンクリートの中に埋め込んだ構造とし、極力格納容器の寸法を縮小するものとした。このため、炉容器、中間熱交換器、1 次系主循環電磁ポンプ及び配管類はコンクリート内に埋め込まれた構造となる。機器・配管の廻りには、コンクリートを冷却す

るため窒素ガスの冷却パスを確保するものとした。主配管等は熱膨張による変位量を考慮して、配管とトンネル間の隙間寸法を計画する必要がある。主冷却系をコンクリートに埋め込んだ形とした場合に、各機器のメンテナンス性能は極端に悪くなるため今後この点を考慮した詳細検討が必要となる。また、主配管のサポート及び地震スナバ等の据え付け用のスペース及び供用中検査用のマンホール等を考慮した配管トンネル構造とする必要がある。

補助冷却系は、崩壊熱除去系として炉容器内に浸漬型熱交換器を直接挿入し、炉内で 2 次側ナトリウムと熱交換を行う。空気冷却器、2 次系配管を有し、伝熱中心差を高く取ることで自然循環による冷却を行う。また本系統にも予熱保温設備が必要である。

(4) 全体設備概要

これまでに述べた各機器の概略仕様を基に、消滅処理実験炉の全体プラント設備を検討した。Table 3.2.2 に消滅処理実験炉のプラント主要仕様を示す。原子炉建屋は、地下 5 階、地上 3 階建ての鉄筋コンクリート造りとし、建屋寸法は 45.6m×43.8m×H41.9m（基礎盤厚除く）である。原子炉建屋内配置を Fig. 3.2.8-10 に示す。格納容器はコンクリートに埋め込まれた矩形鉄筋コンクリート製であり耐圧性はライナ裏側の鉄筋コンクリートを受け持つ構造である。格納容器内は、遮蔽及び機器・配管類の支持を兼ねたコンクリートで充填した構造である。極力格納容器の寸法を縮小するため、主冷却系設備（中間熱交換器、1 次系主循環電磁ポンプ及び配管類）はコンクリートの中に埋め込んだ構造とし。機器配管類の廻りには、コンクリートを冷却するための窒素ガスの冷却経路を確保した。配置図面上の上方には陽子加速器系のビーム入射系を配置した。格納容器床面上には、原子炉上部遮蔽のためのコンクリートブロックを設置する。燃料交換やメンテナンスの際の炉心上面へのアクセスを考慮し、この上部遮蔽は分割し移動可能なものとする。

格納容器の右方向には、非放射性機器・設備を配置するものとして 2 次主冷却系の空気冷却器及びそれらの補助系と電気設備関係並びに非放射性的補機類を配置するものとした。格納容器の左側方向には、燃料取扱設備、廃棄物処理系設備等の放射性機器設備類を配置するものとして、管理区域区分を明確に分割配置するものとした。放射線管理区域区分の概念を Fig. 3.2.11 に示す。

3.2.2 研究・開発課題

消滅処理実験炉の建設に向けて、各部概念の詳細化を図る必要があるが、今後特に以下の事項に留意した検討を行う必要がある。

(1) 原子炉構造各部仕様の詳細化

原子炉構造各部概念について、構造評価・熱流動評価を踏まえて仕様を明確化する。特に基本概念に影響する構造設計として、下記の検討を行う必要がある。

① システム過渡応答の検討

加速器によって運転される消滅処理実験炉は、従来の高速炉プラントとは異なったシステム過渡応答になると考えられる。特に起動・停止、緊急停止時のシステム応答について検討を行っていく必要がある。

② ビーム入射窓構造の具体化

加速器駆動炉が従来の原子炉プラントと最も異なる点は、加速器ビーム入射系の存在である。中でも炉心上面蓋を貫通し、炉心内部に挿入されるビーム入射窓は高エネルギー陽子・中性子の高照射場にさらされるため、この構造・熱流動特性を把握し構造の具体化を図ることが重要となる。また、ビーム入射窓破損時の対策として、ビームライン仕切構造等を具体化していく。

③ 炉心伝熱流動特性の把握

消滅処理実験炉では、実用消滅処理システムの要素技術開発の観点からダクトレス集合体を使用する。ダクトレス集合体は、集合体の移送、解体及び製造にさいしての α 崩壊熱の冷却除熱の点では有利であるが、炉心における流量配分が困難になること、集合体としての剛性がラップ管型集合体に比べて劣ることなどが短所となる。また、ある割合の冷却材が集合体周囲に流れてしまつて、有効流量が相対的に小さくなる。従つて、炉心内での伝熱流動特性を詳細に評価しておく必要がある。また、ダクトレス集合体では、ラップ管がないため炉心支持板上面が高圧となり、従来の高速炉のようなハイドロリックホールドダウン力を確保することは難しい。フリースタンディングの炉心構成要素が浮き上がらないようにするためには、ハイドロリックホールドダウン力に代わる炉心構成要素の下向き力を炉内構造として検討する必要がある。

④ 液面近傍の構造検討

消滅処理実験炉の原子炉構造は、出入口ノズル共に原子炉容器上方に取り付けて原子炉容器の径を増大させない構造として、PWRのような内筒と原子炉容器を繋ぐ出口ノズルを設定している。この熱変位を緩和するため内筒上部に大口径ベローズを採用し、冷却材入口側の低温高圧部と炉心出口側の高温低圧部を仕切っている。このため、本ベローズには熱膨張変位差、圧力差の厳しい荷重条件が課せられることになる。従つて、その構造成立性を見通しをつけるとともに、供用中検査方法についても予め検討しておく必要がある。

(2) 消滅処理実験炉の詳細遮蔽解析

予備的な遮蔽解析の結果、消滅処理実験炉の遮蔽には従来の原子炉プラントと比べて大規模な遮蔽が必要であることが分かった。原子炉廻り構造の具体化には、消滅処理実験炉の詳細な原子炉廻りの遮蔽構造、特に炉上部に陽子ビームラインが存在するため、上方へのストリーミング効果を考慮したより詳細な遮蔽構造を検討する必要がある。さらに実験炉原子炉構造各部、冷却系をより具体化する上で、原子炉廻りの遮蔽構造を視野に入れたシステム概念を構築する。

(3) 炉上部概念の詳細化

消滅処理実験炉概念をより具体化する上で、炉上部の各設備機器について仕様を明らかにし、定期的に交換が必要となるビーム窓・燃料集合体交換手順等を具体化していく。

(4) 計測系・安全系概念の確立

実験炉の安全シナリオに基づき、計測系・安全系についても具体化を図る。特に炉心未臨界度モニター、ビーム入射窓破損検出系等は加速器駆動炉における安全性を確保するために重要となる。

3.2.3 まとめ

高レベル放射性廃棄物を安全に処理処分する技術を確立することは、今後原子力の開発・利用を進めていくうえできわめて重要な課題である。大強度加速器を用いた加速器駆動消滅処理技術の開発は、放射性廃棄物の処理処分法に新たに有望で有力なオプションを与えるものである。しかしながら、加速器消滅処理の実現には多くの技術的課題の解決が必要である。このため、原研の中性子科学研究計画において、加速器駆動消滅処理システムの様々な工学的実験を行うことにより加速器駆動消滅処理システムの実現に向けた研究開発を行っていく。本稿では、中性子科学研究計画のもとで建設が予定されている消滅処理実験施設のうち消滅処理実験炉の概略仕様について述べた。

Table 3.2.1 消滅処理実験炉の主要炉心パラメータ

炉心熱出力	30 MW (第1期) / 60 MW (第2期)
炉心実効増倍率	0.93
炉心高さ	1000 mm
直径	960 mm
燃料ピン直径	5.4 mm
燃料ピンピッチ	7.14 mm
燃料	ウラン酸化物 (第1期) ウラン窒化物 (第2期)
濃縮度	20 %
被覆材厚さ	0.3 mm (SUS316 製)
集合体形状	ピンバンドル型
集合体対面距離	68.0 mm
集合体当たり燃料ピン	85 本
初装荷ウラン重量	約 3200 kg

Table 3.2.2 消滅処理実験炉のプラント主要仕様

炉出力 (設備容量)	60 MWt	
炉型式	陽子入射高速炉型	
陽子ビーム入射法	上部入射-真空ビーム窓炉内挿入	
入射ビーム	1.5 GeV -1.5 mA (-2.3 MWb)	
プラント型式	ループ型炉	
主冷却系	ループ数	1 ループ
	構成	1 次系、2 次系、空気冷却系
	冷却材	ナトリウム
運転サイクル	1 年	
冷却材流出入方式	サイドエントリ方式	
漏洩時冷却材保持	ガードベッセル方式	
崩壊熱除去方式	熱交換器炉内浸漬型直接炉心冷却系	
燃料交換方式	直動式	
燃料出入方式	移送キャスク	

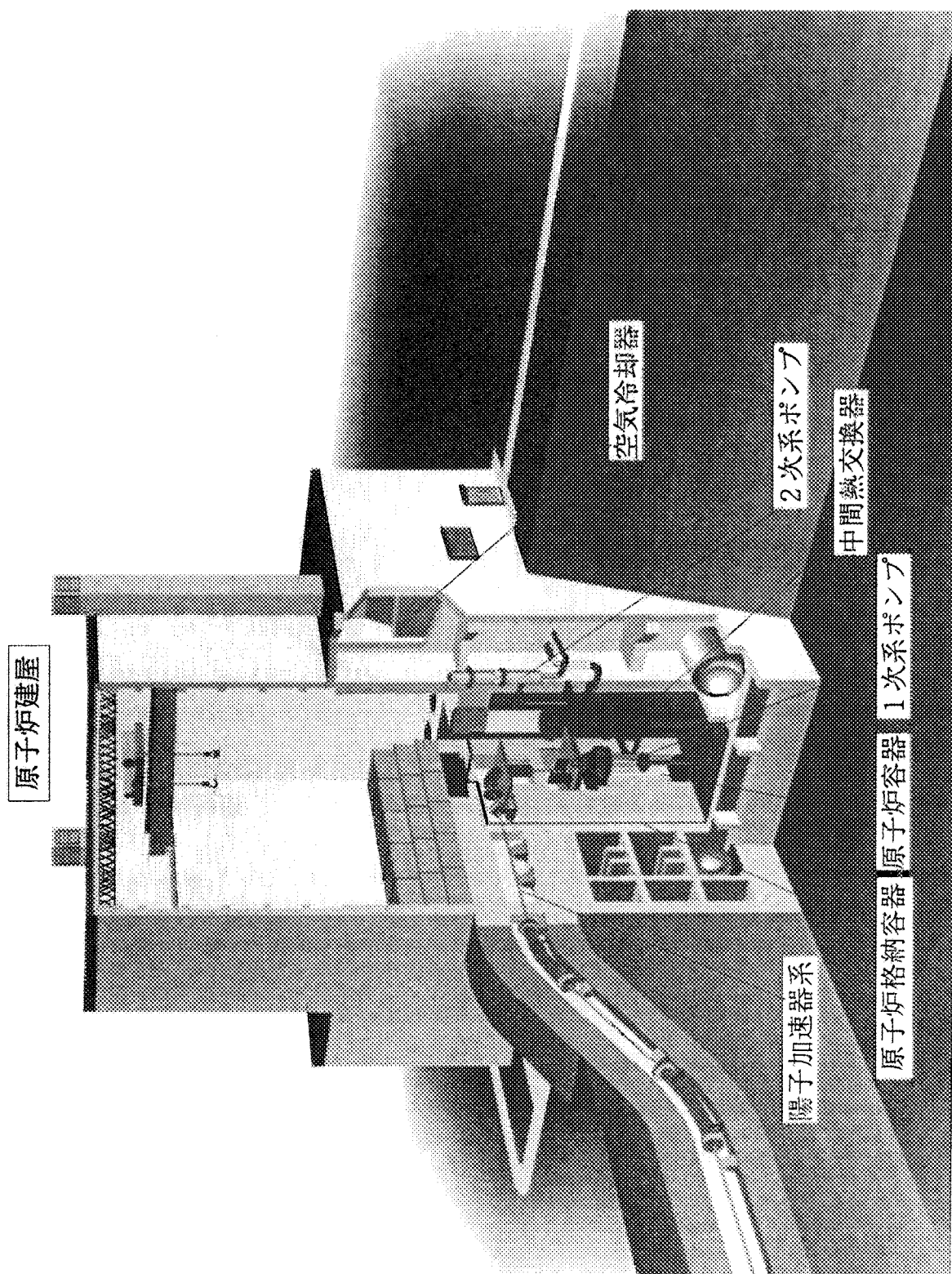
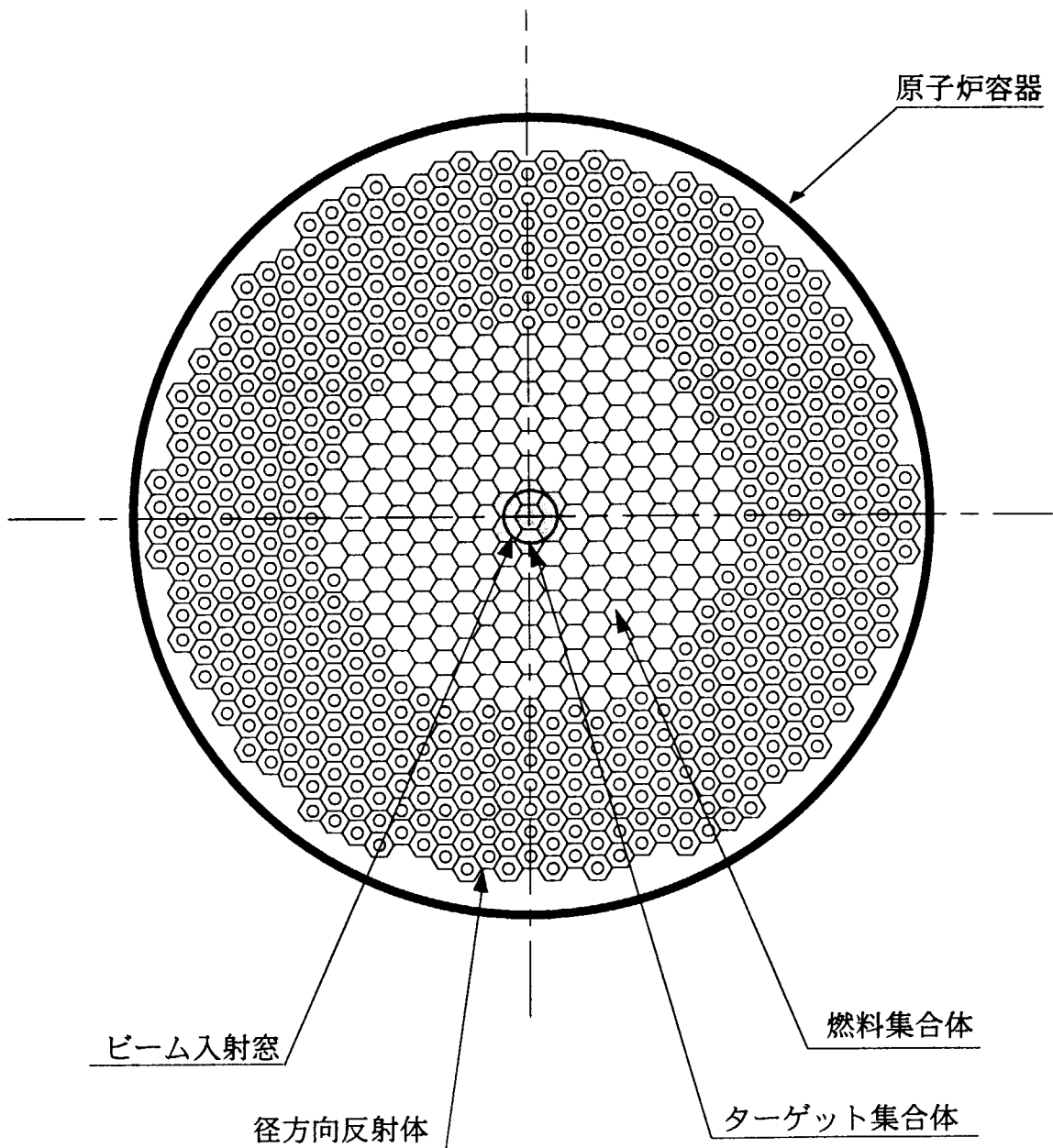


Fig. 3.2.1 加速器騒動消滅処理実験炉概念図






- 
 タングステン集合体 7体
- 
 燃料集合体 228体
- 
 反射体 570体

Fig. 3.2.2 消滅処理実験炉の炉心配置

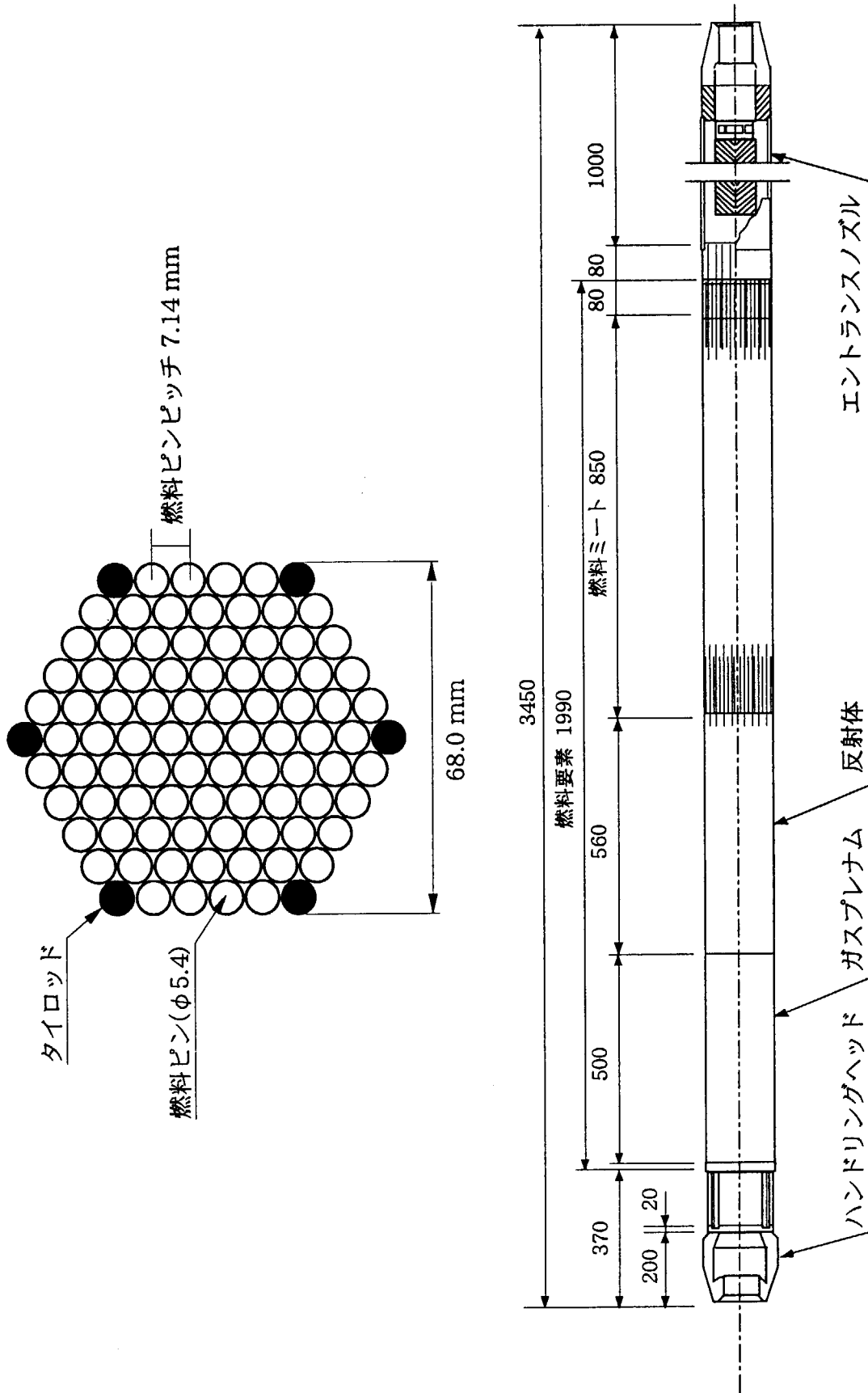
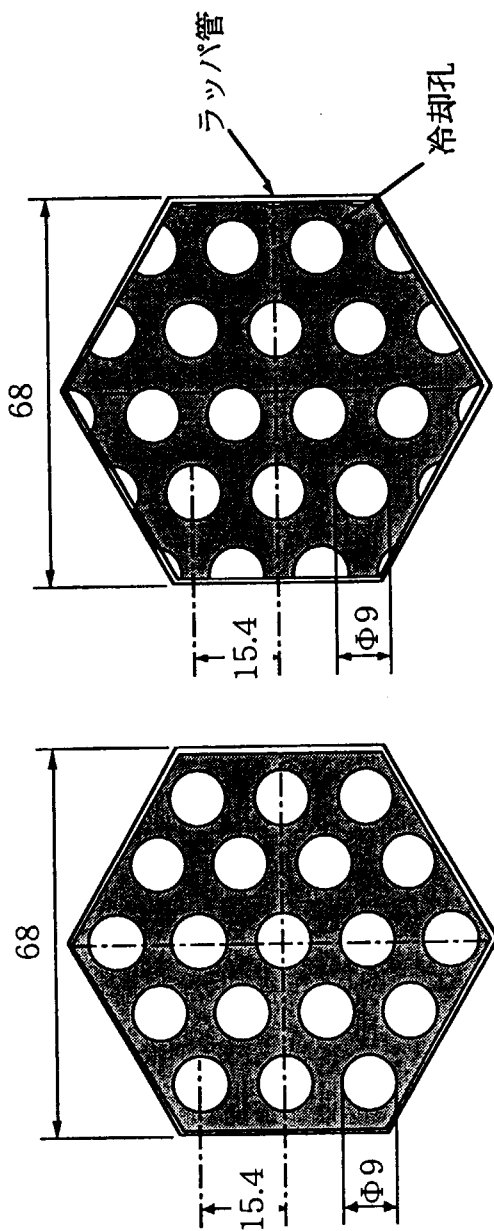


Fig. 3.2.3 燃料集合体構造図



タンガスステンディスク

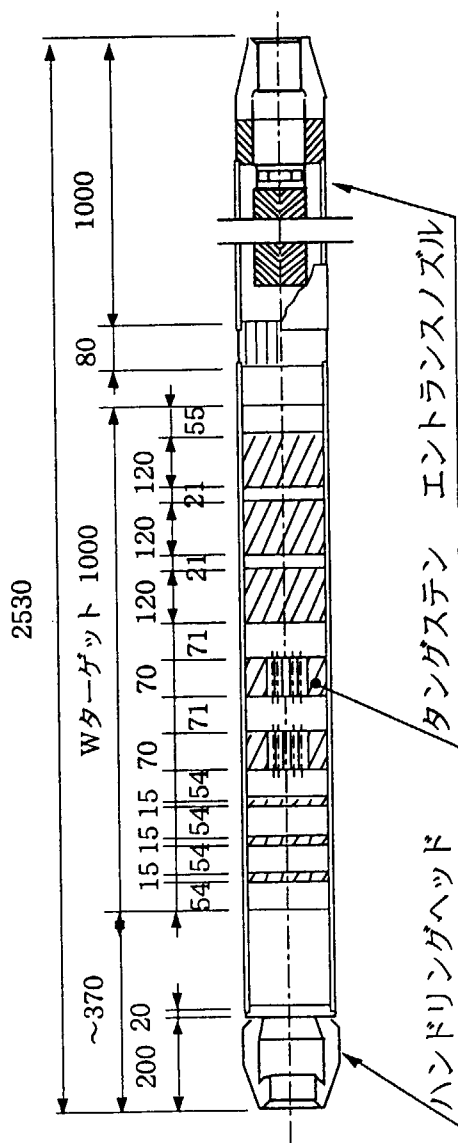


Fig. 3.2.4 ターゲット集集体構造図

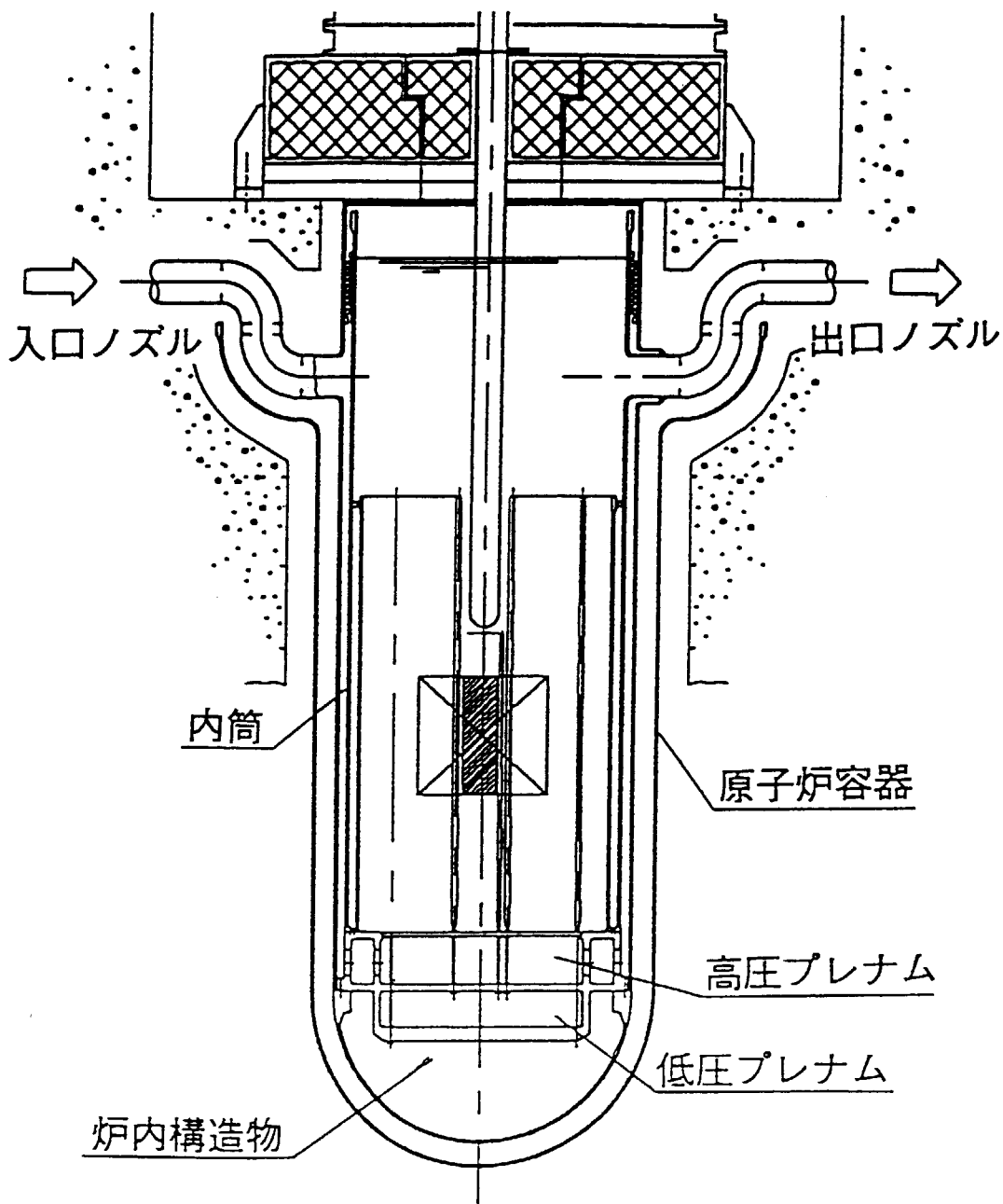


Fig. 3.2.5 消滅処理実験炉の原子炉支持構造及び原子炉構造概略図

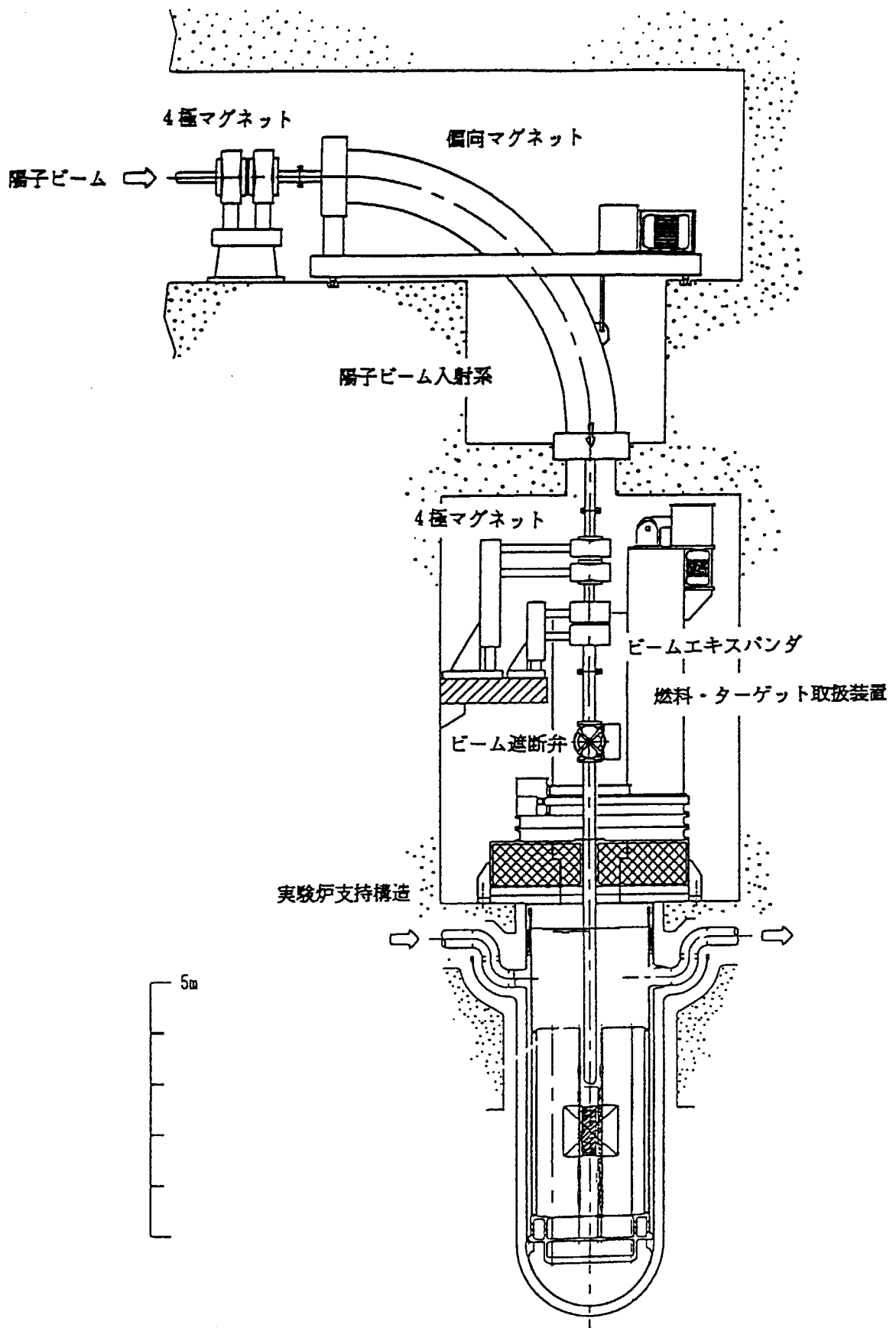


Fig. 3.2.6 消滅処理実験炉の炉心廻り構造概略図

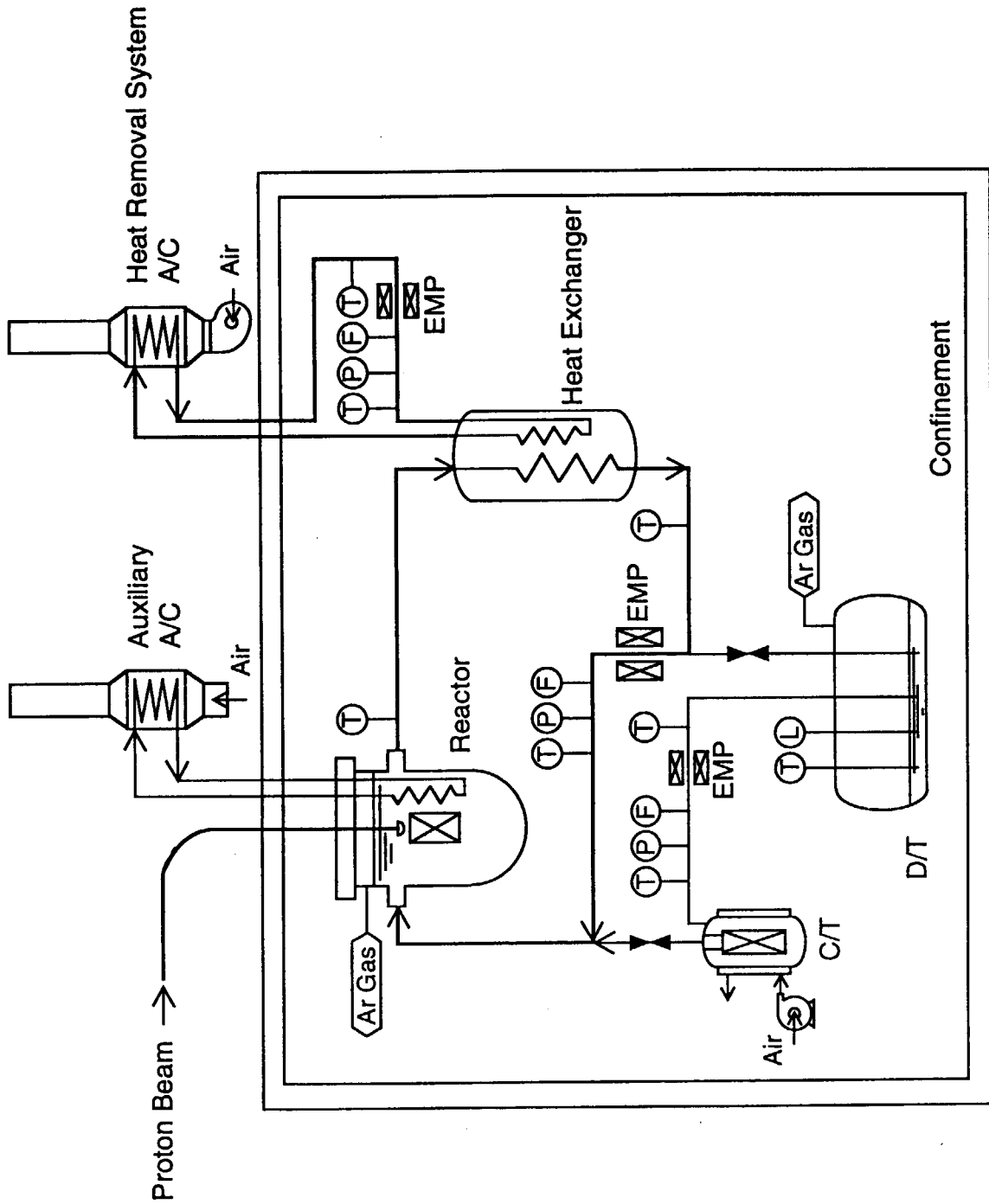


Fig. 3.2.7 消滅処理実験炉の冷却系統図

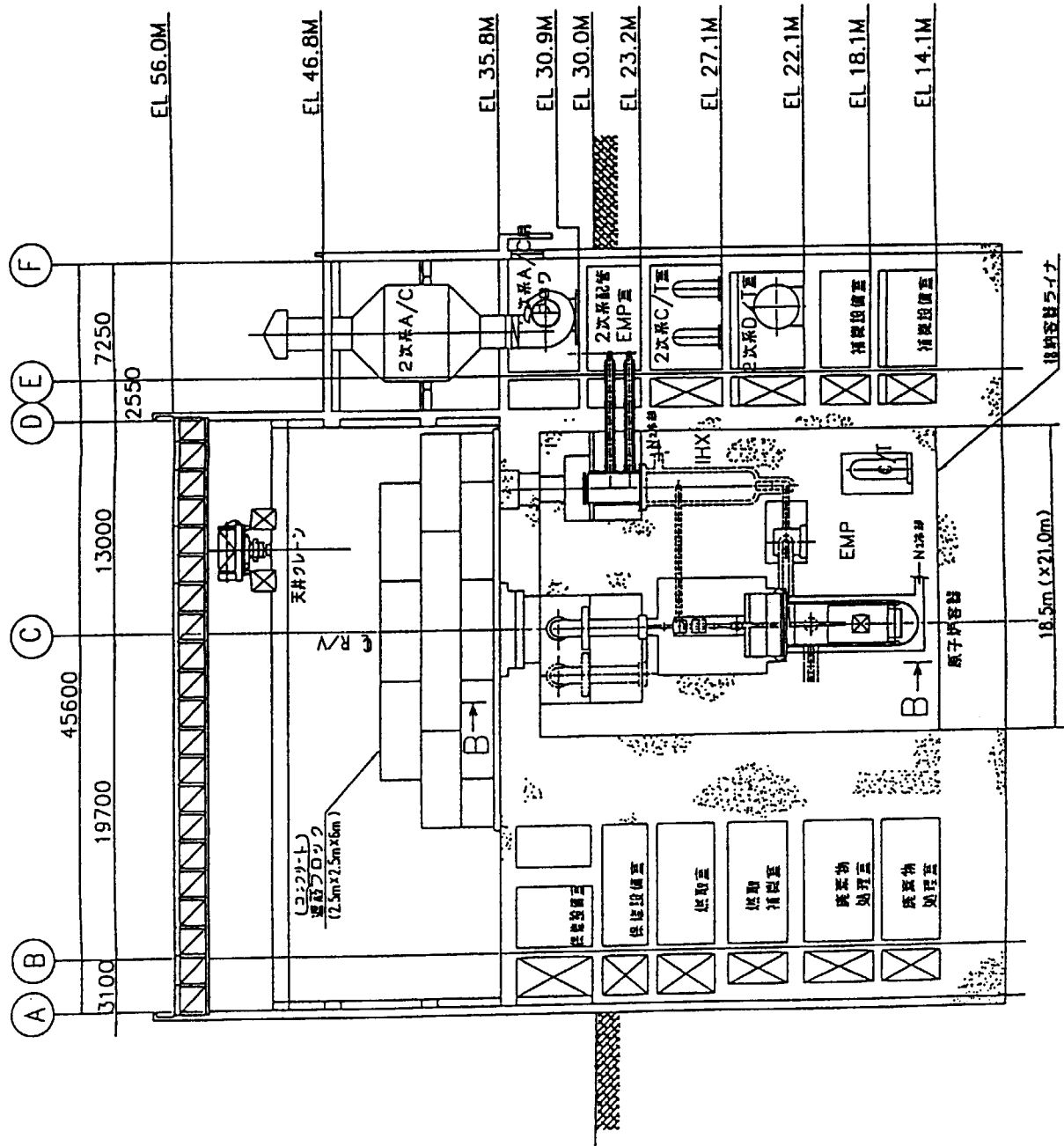


Fig. 3.2.8 消滅処理実験炉原子炉建屋全体配置概念図 (断面 A-A)

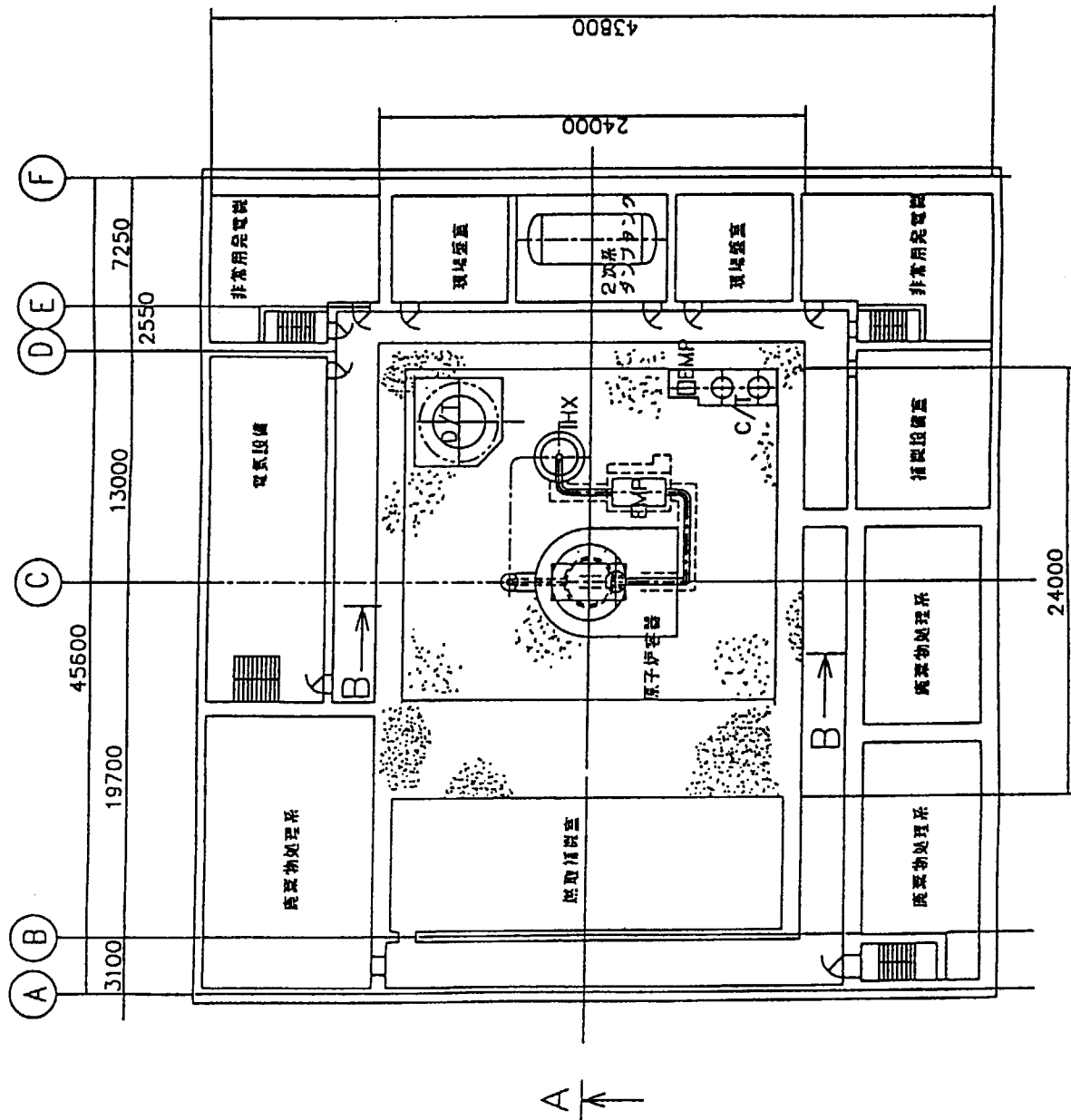


Fig. 3.2.9 消滅処理実験炉原子炉建屋全体配置概念図 (EL22.1M)

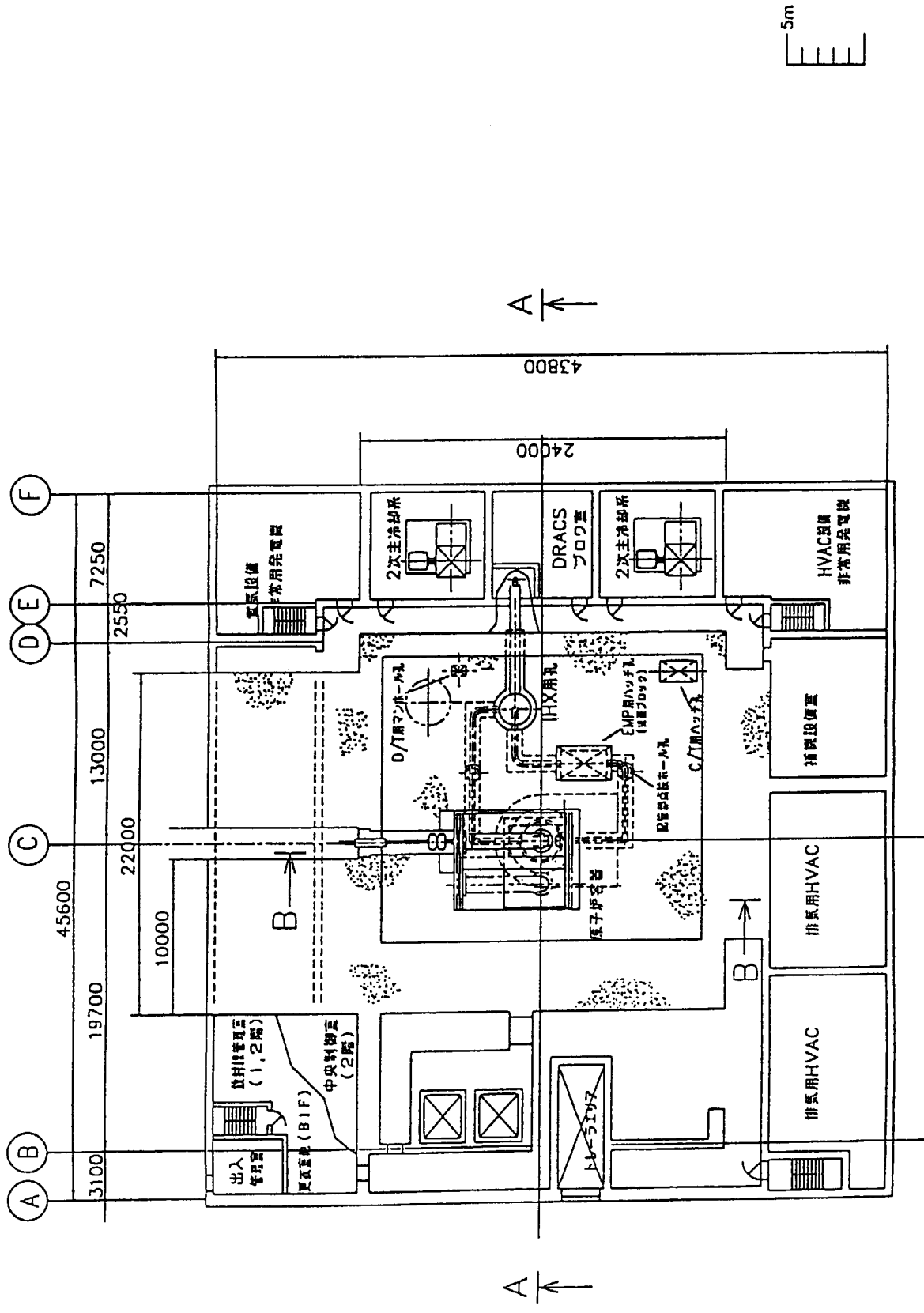


Fig. 3.2.10 消滅処理実験炉建屋全体配置概念図 (EL30.9M)

3. 3 消滅処理ターゲット熱流動実験施設

加速器駆動システムでは、加速器と未臨界炉心のインターフェイスとなるターゲットや原子炉バウンダリとなる陽子ビーム窓に代表される、全く新しいコンポーネントが炉内に組み込まれる。本実験施設では、消滅処理ターゲット熱流動実験装置を用いて、上述の新規コンポーネントのモックアップ試験を行い、加速器駆動システムの設置許可に係わる基礎データ、運転データの取得、陽子ビーム窓、構造材、冷却材の照射挙動試験及び材料開発等を行う。そのため、実験装置では、現在提案しているナトリウム冷却の加速器駆動消滅処理プラントのターゲット及びビーム窓部を模擬し、ナトリウムを用いて冷却を行う。本節では、実験装置及び実験施設の概念検討及び施設の仕様をまとめた。Table 3.3.1 に本施設の主要緒元を示す。

3.3.1 消滅処理ターゲット熱流動実験装置

(1) 装置の構成

消滅処理ターゲット熱流動実験装置は、装置の運転及び維持管理のための設備、陽子ビームライン、陽子ビームダンプと共に消滅処理ターゲット熱流動実験施設内に配置される。

消滅処理ターゲット熱流動実験装置の主要機器全体構成を Fig.3.3.1 に示す。実験装置はターゲットを収容するターゲット容器、ターゲットから発生する放射線及び熱の遮蔽及びターゲット交換機能を有する遮蔽プラグ、ターゲット交換及び移送機能を有するターゲット移送装置、メンテナンス時にターゲット容器内にアクセスを可能にするための陽子ビームマグネット回転台車、ターゲット容器内から取り出したターゲットアセンブリ等に付着したナトリウムを洗浄するためのターゲット洗浄装置等で構成される。

(2) ターゲット容器

ターゲット容器は、ターゲット及び遮蔽アセンブリを支持し、ターゲットを冷却するためのナトリウムを誘導する機能を有するものである。以下に主なターゲット容器の設計方針を示す。

- ・ ターゲット容器内のカバーガス（アルゴンガス）等のバウンダリを構成可能なシール構造とする。
- ・ ターゲット及び遮蔽アセンブリを支持し、位置決めを可能とする。
- ・ 1次冷却材であるナトリウムがターゲット内部を通過するように誘導する機能を有する。
- ・ 機器、配管等から冷却材が漏洩した場合に空気と接触しない構造とする。

ターゲット容器概念図を Fig.3.3.2 に示す。

1) 全体構成

ターゲット容器は、ターゲット・遮蔽アセンブリの支持及び1次冷却材をターゲット内

部に誘導するための構造を有するターゲットケーシング、ターゲットを内包・支持するターゲットアセンブリ、ターゲットから放出される高エネルギー粒子を遮蔽する遮蔽アセンブリ、機器、配管等から漏洩した冷却材を保護するガードベッセルから構成される。

2) ターゲットケーシング

ターゲットケーシングは、ターゲットアセンブリ及び遮蔽アセンブリの支持・位置決めを可能とし、かつ1次冷却材をターゲット内部へ誘導するための構造を有する。

ターゲットケーシングは、1次冷却材をターゲットケーシング下部から流入させ、ターゲット及び遮蔽アセンブリ内部を通過した後、上部から流出可能な構造としている。ここで容器上部はカバーガスとしてアルゴンガス雰囲気とし、ナトリウムの酸化防止及び冷却材の温度変化に伴う圧力の調整を行う。

3) ターゲットアセンブリ

ターゲットアセンブリは1次冷却材を案内するエントランスノズル、ターゲットを支持する六角形ラップ管、ターゲット交換時に使用するハンドリングヘッドから構成する。六角形ラップ管に収容するターゲットディスクには、冷却を効率的に行うための冷却孔を設けており、冷却孔からの粒子のストリーミングを抑制するため、奇数段のディスクと偶数段のディスクでは、冷却孔の位置をずらして配置してある。ターゲットアセンブリ及び後述の遮蔽アセンブリの概念図を Fig.3.3.3 に示す。

4) 遮蔽アセンブリ

遮蔽アセンブリは、ターゲットアセンブリの周囲に配置し、通常は遮蔽体の役割を果たす。また、実験目的により、漏洩粒子分布、温度分布等の各種調査のために、計測器を内蔵した計測用アセンブリや各種模擬アセンブリと交換して使用できる構造とした。

5) ターゲット容器

ターゲット容器は、Fig.3.3.4 に示すように、ターゲットケーシングを支持するための構造を有している。ターゲット容器は、ターゲットケーシングを含め耐震構造とした。

6) ガードベッセル

ガードベッセルは、機器、配管等から冷却材が漏洩した場合に、それを閉じこめる機能を有する。内部の機器、配管との間隙を極力制限することで、冷却材漏洩事故時に冷却材液面から陽子ビーム窓、ターゲットアセンブリ、遮蔽アセンブリが露出しないように考慮した。ガードベッセル上部には、1次主冷却系の熱交換機、電磁ポンプを配置し、漏洩した1次冷却材内に含まれる放射性物質を生体遮蔽体内に保持できる構造とした。

(3) 遮蔽プラグ

遮蔽プラグは、実験時にターゲットから発生する放射線と熱を遮蔽し、ターゲット容器

内のカバーガス等のバウンダリを形成するとともに、ターゲットを支持するために搭載している回転プラグ等の機器を所定の位置に位置決め・支持するものである。以下に遮蔽プラグの主な設計方針を示す。

- ・ ターゲット容器内カバーガス等のバウンダリを構成可能なシール構造とする
- ・ 実験中に発生する放射線を遮蔽する機能を有する。
- ・ 実験中にターゲットから発生する輻射・対流・伝導等を遮断可能とする。
- ・ ターゲットの交換が可能な構造を有する。
- ・ 1次冷却系の熱交換機、電磁ポンプ等を支持可能な構造を有する。
- ・ ターゲット熱流動実験中に陽子ビームをターゲットに照射可能にするため、陽子ビームラインをターゲットアセンブリ中央部に支持可能な構造とする。

上記設計方針により概念設計を行った遮蔽プラグ構造を Fig.3.3.5 に示す。

1) 遮蔽プラグのターゲット位置決め方法

遮蔽プラグのターゲット位置決め方法は、2軸回転プラグ方式を採用した。この方式により、全てのアセンブリ上部にターゲット取出口を誘導することが可能である。

2) 遮蔽プラグ構成

遮蔽プラグは2軸回転プラグ方式で、固定プラグ、回転プラグ1及び2、回転プラグ回転機構、遮蔽部等で構成され、ターゲット容器上部に配置する。

3) 固定プラグ構造

固定プラグは回転プラグ1/2、回転プラグ回転機構の回転部の支持・案内及び1次主冷却系の熱交換機、電磁ポンプを支持し、ターゲット容器の上部蓋の役目を果たす。また、回転プラグ回転時でも支持が可能なように考慮した。

4) 回転プラグ1構造

回転プラグ1は回転プラグ2、回転プラグ2回転機構部の回転部の支持・案内及び陽子ビームラインを支持するものとした。ここで、回転プラグ1は、回転プラグ2を全てのターゲット上部に案内が可能なように固定プラグ中心に対し、中心軸を400 mm ずらして配置している。

5) 回転プラグ2構造

回転プラグ2は、交換するターゲットアセンブリを取り出すためのターゲット取出口を支持している。ここで、回転プラグ2は、ターゲット取出口を全てのアセンブリ上部に案内できるように、回転プラグ1の中心軸に対して、400 mm ずらして配置している。

6) ターゲット取出口構造

ターゲット取出口は、ターゲットの取り出しに用いるためのターゲット案内管とドアバ

ルブで構成される。ターゲット取出口は、回転プラグ2に連動して回転し、全てのアセンブリ上部に移動することが可能である。ターゲット取出口には、ターゲット容器内のカバーガス雰囲気のパウダリを構成するためのドアバルブを設け、ターゲット取出時にのみ、ターゲット移送装置とのドアバルブ間で開閉する。

(4) ターゲット移送装置

ターゲット移送装置は、交換するアセンブリのターゲット容器外への取り出し、ターゲット洗浄装置への取り付け、取り出したアセンブリの移送時の冷却及び各部屋・設備間の移送機能を有するものである。以下に主なターゲット移送装置の設計方針を示す。

- ・ ターゲット容器内のアセンブリの取り出しが可能な駆動機構部を有する。
- ・ 取り出したアセンブリの移送中にカバーガス等のパウダリを構成可能なシール構造を有する。
- ・ 取り出したアセンブリの移送中にアセンブリから発生する放射線を遮蔽可能とし、また輻射、対流、伝導等を遮断可能とする。

上記設計方針により概念設計を行ったターゲット移送装置構造図を Fig.3.3.6 に示す。

1) ターゲット移送装置構成

ターゲット移送装置は、ターゲット交換機A及びB、ターゲット冷却設備（アルゴンガスブローア、アルゴンガス加熱器、空気ブローア、空気冷却器）及び移送台車等で構成しており、ターゲット容器上部に配置する。

2) ターゲット交換機A構造

ターゲット交換機Aは、取扱対象をナトリウム蒸気雰囲気を取り扱う設備であり、アセンブリを取り出すためのグリッパ、グリッパ駆動機構部、ナトリウム蒸気雰囲気のパウダリを構成するためのドアバルブ及び遮蔽体から構成される。交換機Aは、内部がナトリウム蒸気雰囲気であること及びナトリウムが固着しない温度に予熱する必要があるため、アルゴンガスブローア及びアルゴンガス加熱器で温度制御を行う。

3) ターゲット交換機B構造

ターゲット交換機Bは、取扱対象物を非ナトリウム蒸気雰囲気を取り扱う以外は、交換機Aと同等の機能を有する。交換機B内部は非ナトリウム蒸気雰囲気であり、空気ブローア及び空気冷却器でアセンブリを強制的に冷却する。

4) 移送台車構造

移送台車は、ターゲット交換機A・B及びターゲット冷却設備を支持し、所定の機器や部屋に移送または位置決めをするものである。ターゲット移送装置の走行は、照射材料取扱室-ターゲット移送室間に設けた駆動レールにより行う。また、移送台車は、遠隔自動で交換ターゲット上部に位置決め可能な機能を有する。

(5) 陽子ビームマグネット回転台車

陽子ビームマグネット回転台車は、マグネット下部に配置されるターゲット容器内のアセンブリ交換作業を可能とするために、ビーム偏向及び集束マグネットを回転移動させるためのものである。以下に主な陽子ビームマグネット回転台車の設計方針を示す。

- ・ 陽子ビームをターゲット容器内のターゲットに誘導するための偏向マグネット及び集束マグネットを支持するものとする。
- ・ ターゲット容器内のアセンブリ交換作業を可能とするためにマグネットを回転させる機能を有するものとする。
- ・ 陽子ビームマグネットを回転移動中に真空状態である加速器側陽子ビームラインに支障を来さない構造を有するものとする。
- ・ 陽子ビームマグネット回転台車- 遮蔽ハッチ間の陽子ビームの接続及び真空雰囲気化は、陽子ビームラインを自動的に接続可能な構造とすることにより行うものとする。

上記設計方針により概念設計を行った陽子ビームマグネット回転台車構造図を Fig.3.3.7 に示す。

1) 陽子ビームマグネット回転台車構成

陽子ビームマグネット回転台車は、回転台車本体、回転軸、駆動レール及びビームマグネット支持構造部等から構成し、陽子ビームをターゲットに誘導させる機能上、ターゲット容器上部に配置している。

2) 陽子ビームマグネット回転台車

陽子ビームマグネット回転台車は、陽子ビームマグネットを支持し、機器類を所定の位置に位置決めをするものである。陽子ビームマグネット回転台車の走行は、回転台車下部に設けた駆動レールにより行うものとした。また、回転台車は、遠隔自動でターゲットアセンブリ中心部にある陽子ビームラインに位置決め可能な機能を有するものとする。

(6) ターゲット洗浄装置

ターゲット洗浄装置は、ターゲット容器より取り出した交換アセンブリに付着したナトリウムを洗浄するための機能を有するものである。以下に主なターゲット洗浄装置の設計方針を示す。

- ・ ターゲット交換機内のカバーガス（アルゴンガス）等のバウンダリを構成可能なシール構造を有する。
- ・ 交換ターゲットの取り外しを可能とする構造を有する。

上記設計方針により概念設計を行ったターゲット洗浄装置について Fig.3.3.8 に示す。

1) ターゲット洗浄装置構成

ターゲット洗浄装置は、交換アセンブリを収納するためのターゲット洗浄槽、アセンブリの受け渡しを行うための床ドアバルブ、洗浄に必要な流体を洗浄槽内へ循環させるアルゴンガス循環設備及び脱塩水循環設備等により構成する。

3.3.2 消滅処理ターゲット熱流動実験施設内設備仕様

消滅処理ターゲット熱流動実験装置では、陽子ビームがターゲットに照射されることによる核破碎反応等によって、ターゲットが発熱する。そのため、ターゲットより発生する熱をナトリウムを用いて冷却するための設備が必要となる。今回検討を行った主要な冷却系の全体系統を Fig.3.3.9 に示す。また、以下に各系統の仕様について概説する。

(1) 1次ナトリウム冷却系

本系統は、消滅処理ターゲット熱流動実験施設のタングステンターゲットへの陽子ビーム照射によって発生する熱を除去するために、ナトリウムをターゲット部に循環、供給することを目的とする。本系統は2系統構成とし、通常時は2系統並列に運転する。また、1系統で崩壊熱を除去できるようにする。ナトリウムを純化するコールドトラップは2基設置し、内1基を予備とすることで、運転中の不純物除去によるコールドトラップの目づまりに対処する。

本系統の基本構成図を Fig.3.3.10 に示す。本系統は、ターゲット部にナトリウムを循環、供給する1次ナトリウム系電磁ポンプ、ターゲット部で発生した熱を除去する1次ナトリウム系冷却器、ナトリウム中の不純物を除去するコールドトラップ、コールドトラップに冷却したナトリウムを供給するコールドトラップ電磁ポンプ及びエコノマイザ、ナトリウムのドレン先として使用する1次ナトリウムダンプタンク等から構成する。

通常運転モードでは、1次ナトリウム系電磁ポンプで昇圧されたナトリウムは、ターゲット容器の底部に送られ、ターゲットを下方から上方の順に冷却する。ターゲットを冷却したナトリウムは、1次ナトリウム系冷却器に流入し、2次ナトリウム冷却系で冷却された後、再び1次ナトリウム系電磁ポンプに戻る。ターゲット容器内のナトリウムの一部はオーバフロー管を介して1次ナトリウムダンプタンクに流入する。ダンプタンク内のナトリウムは、コールドトラップ電磁ポンプで昇圧され、エコノマイザで冷却された後、コールドトラップにて不純物が除去され、ターゲット容器に戻る。

本系統は、外部電源喪失時には非常用電源母線負荷とし、陽子ビームを停止した後の崩壊熱を除去できるようにする。

本系統の主要材料は、ステンレス鋼とする。また、耐震クラスはBクラス、機器種別は第4種機器とした。

(2) 2次ナトリウム冷却系

本系統は、1次ナトリウムの冷却を行うために、1次ナトリウム系冷却器に冷却用のナトリウムを循環、供給することを目的とする。本系統は2系統構成とし、通常時は2系統

並列に運転する。ナトリウムを純化するコールドトラップは2基設置して、1基を予備とし、運転中の不純物除去によるコールドトラップの目づまりに対応する。

本系統の基本構成図を Fig.3.3.11 に示す。本系統は、1次ナトリウム系冷却器にナトリウムを循環、供給する2次ナトリウム系電磁ポンプ、伝えられた熱を大気に放出して2次ナトリウムを冷却する空気冷却器、2次ナトリウム系の圧力変動を抑制する2次ナトリウム系サージタンク、ナトリウム中の不純物を除去するコールドトラップ、コールドトラップに冷却したナトリウムを供給するコールドトラップ電磁ポンプ及びエコノマイザ、ナトリウムのドレン先として使用する2次ナトリウムダンプタンク等から構成する。

通常運転モードでは、2次ナトリウム系電磁ポンプで昇圧されたナトリウムは、1次ナトリウム系冷却器に送られ、伝熱管を介して1次ナトリウムを冷却する。1次ナトリウム冷却後のナトリウムは、2次ナトリウム系サージタンクを經由して空気冷却器に流入し、2次ナトリウム系送風器によって送られた空気により冷却された後、再び2次ナトリウム系電磁ポンプに戻る。2次ナトリウム系サージタンク内のナトリウムの一部はオーバフロー管を介して2次ナトリウム系ダンプタンクに流入する。ダンプタンク内のナトリウムは、コールドトラップ電磁ポンプで昇圧され、エコノマイザで冷却された後、コールドトラップにて不純物が除去され、循環配管に戻る。本系統は非常用電源母線負荷とし、外部電源喪失時には陽子ビームを停止した後の崩壊熱を除去できるようにする。

本系統の主要材料は、ステンレス鋼とする。また、耐震クラスはBクラス、機器種別は第4種機器とした。

(3) アルゴンガス系

本系統は、1次ナトリウム系及び2次ナトリウム系機器のナトリウム自由液面に、カバーガスであるアルゴンガスを供給し、起動、停止等に伴うナトリウムの温度変化による圧力変動の抑制、ナトリウムの酸化防止を行うことを目的とする。

本系統の基本構成図を Fig.3.3.12 に示す。本系統は、1次ナトリウム冷却系機器のカバーガス系としての1次アルゴンガス系、2次ナトリウム冷却系機器のカバーガス系としての2次アルゴンガス系から構成し、それぞれ1系統構成とする。1次アルゴンガス系は、ガス中のナトリウムミスト及びベーパーを捕獲するベーパートラップ等から構成する。2次アルゴンガス系は、2次ナトリウム冷却系を真空にする真空ポンプ、ガス中のナトリウムミスト及びベーパーを捕獲するベーパートラップ等から構成する。但し、運転中のナトリウムミスト及びベーパーによる目づまりを考慮して、1次アルゴンガス系のベーパートラップは2基設置し、内1基を予備とする。本系統は常用電源母線負荷とし、外部電源喪失時にはアルゴンガスを封じ込めるようにする。

通常運転モードでは、1次アルゴンガス系は、1次ナトリウムの温度低下によりガス圧力が低下した場合、アルゴンガス雰囲気調節系からアルゴンガスを供給し、圧力の回復を図る。1次ナトリウムの温度上昇に伴いガス圧力が上昇した場合、1次ナトリウム系ダンプタンク出口に設置された排出弁を開とし、ベーパートラップにてナトリウムミスト及びベーパーを除去した後、気体廃棄物処理系を介して大気に放出する。なお、ターゲット容器、

1次ナトリウム系冷却器内のアルゴンガスは、1次ナトリウム系ダンプタンクに送り、減衰時間を保つことによって、 ^{41}Ar の減衰を図る。2次アルゴンガス系は、2次ナトリウムの温度低下によりガス圧力が低下した場合、アルゴンガス雰囲気調節系からアルゴンガスを供給し、圧力の回復を図る。2次ナトリウムの温度上昇に伴いガス圧力が上昇した場合、2次ナトリウム系ダンプタンク出口に設置された排出弁を開とし、ベーパートラップにてナトリウムミスト及びベーパーが除去した後、建屋換気系を介して大気に放出する。なお、2次ナトリウム系サージタンク内のアルゴンガスは、2次ナトリウム系ダンプタンクに送り、減衰時間を保つことによって、 ^{41}Ar の減衰を図る。

本システムの主要材料は、ステンレス鋼とする。また、耐震クラスは1次アルゴンガス系はBクラス、2次アルゴンガス系はCクラス、機器種別は第4種機器とする。

なお、本システムに使用するアルゴンガスは、アルゴンガス雰囲気調節系から供給される。

(4) アルゴンガス雰囲気調節系

本システムは、1次ナトリウム冷却系設備が設置されているエリアの雰囲気気を低酸素濃度のアルゴンガス雰囲気気に維持すると共に、エリア内の温度を所定の温度範囲内に保つことを目的とする。

本システムの基本構成図を Fig.3.3.13 に示す。本システムは、エリア内のアルゴンガスを循環するアルゴンガス雰囲気循環ファン、アルゴンガス中の除塵及び冷却をする調温ユニット、液体アルゴン貯槽する液体アルゴン貯槽タンク、液体アルゴン貯槽をガス化するアルゴン蒸発器、アルゴンガスを貯槽、供給するアルゴンガス供給タンク等から構成される。本システムは1系統構成とするが、動的機器である循環ファン及び調温ユニットは2系列として、1系列を予備とする。

通常運転モードでは、対象エリアから送られたアルゴンガスは、調温ユニットにて除塵及び冷却された後、アルゴンガス雰囲気循環ファンによって再び対象エリアに戻される。対象エリアは、微正圧に保たれ、対象エリアへの空気の漏入を防ぐことによって、雰囲気内の酸素濃度を低濃度に保つ。対象エリアからの漏洩により圧力が低下した場合、アルゴンガス供給タンクからアルゴンガスが補給され、圧力の回復を図る。対象エリア内の圧力が上昇した場合、建屋換気系へアルゴンガスを排気して圧力を低下させる。

定期検査後等は、アルゴンガス置換運転モードとし、対象エリアを空気雰囲気からアルゴンガス雰囲気に置換する。その場合には、建屋換気系へ空気を排気した後、アルゴンガス供給タンクからアルゴンガスを供給して、エリア内を加圧し、酸素濃度を低下させる。酸素濃度が所定の濃度以下になるまでこの操作をくり返す。また、空気置換運転モードとして、定期検査等を行う場合に対象エリアに入域するのに先立って、対象エリアをアルゴンガス雰囲気から空気雰囲気に置換する。その場合は、建屋換気系の連絡弁を開として、アルゴンガスを排気すると共に空気を取り入れる。

本システムは非常用電源母線負荷とし、外部電源喪失時にも運転が可能とする。

本システムの主要材料は、炭素鋼とし、耐震クラスはBクラス、機器種別は第4種機器とした。

(5) 冷水系

本系統は、アルゴンガス雰囲気調節系、建屋換気系等で必要とする冷水（ブライン）を循環、供給することを目的とする。本系統は1系統構成とする。但し、動的機器である循環ポンプ及び冷凍機は2台として、1台を予備とする。

本系統の基本構成図を Fig.3.3.14 に示す。本系統は、負荷機器に冷水を循環、供給する循環ポンプ、負荷機器から与えられた熱を除去する冷凍機、冷水の温度変化による圧力変動を抑制するサージタンク、冷水中に防錆剤を注入する防錆剤添加タンク等から構成される。

通常運転モードでは、負荷機器を冷却後に機器から出た冷水は、循環ポンプにて昇圧された後、冷凍機にて3次冷却系で除熱され、所定の温度（ -2°C ）に冷却されて、再び負荷機器に戻る。冷凍機は安定した運転を維持するため、冷凍機の入口温度が一定になる負荷バイパス流量を制御する。更に3次冷却系の冷却水温度変化に応じて、冷凍機への通水流量制御する。防錆剤（亜硝酸イオン）濃度が低下した場合には、防錆剤添加タンク内に防錆剤を入れ、ポンプ吐出圧を用いて、冷水の一部を防錆剤添加タンクからポンプ吸込側に循環させ、系統内に防錆剤を注入する。

本系統は非常用電源母線負荷とし、外部電源喪失時にも運転が可能とする。

本系統の主要材料は、炭素鋼とする。また、耐震クラスはBクラス、機器種別は第4種機器とした。

(6) 使用済みターゲット冷却系

本系統は、消滅処理ターゲット熱流動実験装置での使用済みターゲットの崩壊熱を除去するために、使用済みターゲット保管庫内を空気冷却することを目的とする。

本系統の基本構成図を Fig.3.3.15 に示す。本系統は、外気を除塵する外気処理装置、外気を使用済みターゲット保管庫に送風する送風機、排気を除塵する排気フィルタ装置、排気をスタックより排気する排風機及びこれらを結ぶダクト系から構成される。本系統は1系統構成とし、動的機器である送風機、排風機は2台設置し、1台を予備とする。

通常運転モードでは、外気を外気処理装置にて除塵した後、送風機にて使用済みターゲット保管庫に送風し、使用済みターゲットからの崩壊熱を除去する。その後、排風機にて排気フィルタ装置に導き、本装置にて除塵した後、スタックより大気へ放出する。

本系統は非常用電源母線負荷とし、外部電源喪失時にも運転が可能とする。

本系統の主要材料は、炭素鋼とする。ダクトは炭素鋼又は亜鉛鉄板とする。また、耐震クラスはBクラス、機器種別は、排気ダクトは第5種管、その他は適用外とした。

(7) 建屋換気系

本系統は、消滅処理ターゲット熱流動実験施設内の室内を換気することにより、所定の室温及び室圧(大気に対して負圧)に維持し、施設外へ直接放射化された空気が流出することを極力防止することを目的とする。

本系統の基本構成図を Fig.3.3.16 に示す。本系統は、外気を除塵、冷却（又は加熱）する外気処理装置、外気を室内に送風する送風機、排気を除塵する常用排気フィルタ装置、非常時の排気を除塵する非常用排気フィルタ装置、排気をスタックより排気する排風機及びこれらを結ぶダクト系から構成される。本系統は1系統構成とするが、動的機器である送風機、排風機及び電気ヒータは2台として、1台を予備とする。

通常運転モードでは、外気を外気処理装置にて除塵、冷却（又は加熱）した後、送風機にて放射能濃度の低い室に送風する。その室の空気は室間のダクトを介して放射能濃度の高い室へ流し、排風機にて常用排気フィルタ装置に導き、本装置にて除塵した後、スタックより大気へ放出する。また、非常時運転モードで放射性物質等が漏洩した際には、排気フィルタ装置切り替え弁にて非常用排気フィルタ装置へ排気を導き、チャコールフィルタにて放射性物質を捕獲する。

定期検査後等には、アルゴンガス置換運転モードとし、アルゴンガス雰囲気対象エリアを空気雰囲気からアルゴンガス素雰囲気に置換する。その場合には、本系統との排気側連絡弁を開としてアルゴンガス雰囲気対象エリア内の空気を排気した後、アルゴンガス雰囲気調節系のアルゴンガス供給タンクからアルゴンガスを供給して、エリア内を加圧し、酸素濃度を低下させる。酸素濃度が所定の濃度以下になるまでこの操作をくり返し行う。また、定期検査等を行う場合には、空気置換運転モードとして、アルゴンガス雰囲気対象エリアに入域するのに先立って、対象エリアをアルゴンガス雰囲気から空気雰囲気に置換する。その場合は、本系統との排気側連絡弁を開として、本系統にアルゴンガスを排気すると共に、流入側連絡弁を開として、本系統から空気を取り入れる。

本系統は非常用電源母線負荷とし、外部電源喪失時にも運転が可能とする。

本系統の主要材料は、炭素鋼とする。ダクトは亜鉛鉄板とする。耐震クラスは、常用系はCクラス、非常用系はBクラスとし、機器種別は、主排気ダクト及び非常用排気フィルタ装置を第5種管、その他は適用外とした。

3.3.3 施設配置の検討

(1) 配置検討条件

消滅処理ターゲット熱流動実験施設建屋の概念配置検討を実施するに際して、以下に示す条件を考慮し概念配置検討を行った。

- ・ 出入管理室等の出入管理関係設備は地下1階に配置する。
- ・ 陽子ビームライン高さは、地表面より地下6.5mの位置とする。
- ・ 故障・誤操作等により陽子ビームを遮断不可能となった場合、振分け電磁石を用いて陽子ビームを捨てるため、ビームダンプを設置する。

その他に必要な廃棄物処理関係設備、気体供給設備、電気設備、放射線モニタリング設備、ビームダンプ本体等については、今回の検討からは除外した。

(2) 施設配置

施設の建屋全体構成図を Fig.3.3.17 に、Fig.3.3.18-1～4 に施設の概念配置図を示す。また、建屋内に設置する部屋は、ターゲットの取扱性及び冷却・換気設備等の配置を考慮して配置した。建屋の構成は4階層とし、地下に2階、地上に2階（一部3階）の構成とした。

1) 地下2階

地下2階は、使用済みターゲット及び照射材料の移送、保管を考慮して、設備エリアの配置検討を実施した。概念配置図（平面図）を Fig.3.3.18-1 に、概念配置図（断面図）を Fig.3.3.18-3 に示す。

- ・ 使用済みターゲット及び照射材料の移送性を考慮し、ターゲット保管エリアを設けた。ターゲット保管エリアにターゲットを保管するための作業は、マニピュレータ等を用いた作業となるため、ターゲット保管エリアに隣接して保管設備操作室を設けた。
- ・ 排水設備室は、2次・3次主冷却系室及び冷却設備機械室とのドレン配管ルートを考慮して設定した。
- ・ 2次主冷却系室は、ターゲット容器内の各機器へ冷却材を供給するための設備であり、配管ルートを考慮し、生体遮蔽体に隣接して設置した。また、2次主冷却系の各機器は3次主冷却系の冷却空気により冷却されるため、配管ルートを考慮し、2次主冷却系室に隣接して、3次主冷却系室を設けた。

2) 地下1階

陽子ビームライン及びターゲット取扱設備等の設置エリアである本階は、冷却配管ルート及びターゲットの取扱性を考慮し、設備エリアの配置検討を実施した。概念配置図（平面図）を Fig.3.3.18-1 に、概念配置図（断面図）を Fig.3.3.18-3 に示す。

- ・ 陽子ビーム偏向室は、陽子ビーム振分け室で振り分けられた陽子ビームをターゲット容器に導くため、陽子ビームマグネットを設置し、ターゲット容器上部に配置した。
- ・ ターゲット熱流動実験施設のターゲット取扱室は、ターゲットの移送性を考慮し、ターゲット保管エリア上部に配置した。
- ・ 2次主冷却系メンテナンス室及び3次主冷却系メンテナンス室は、機器の搬出入性、配管ルート等を考慮し、機器設置位置の上部に配置した。

3) 地上1階

地上階は、各部屋へのアクセス性、非管理設備の集約配置、換気設備の外気取り入れ等を考慮し、設備エリアの配置検討を実施した。概念配置図（平面図）を Fig.3.3.18-2 に、概念配置図（断面図）を Fig.3.3.18-4 に示す。

- ・ 陽子ビームライン側にロビーを設置し、運転員控室とデータ処理室の非管理設備を配置した。また、換気空調機械室は、外気取り入れ及び換気ダクトの短縮化の観点

から建屋の隅部に集約配置した。

- ・ 照射材料取扱室は、ターゲット熱流動実験施設のターゲット移送を考慮し、建屋中央に配置した。高さ方向のスペースは、地上2階層までの吹き抜け構造とした。
- ・ ターゲット移送室は、ターゲット熱流動実験施設で使用済みのターゲットをターゲット保管エリアに移送するため、ターゲット移送装置の操作性及びターゲットの取扱性を考慮し、ターゲット取扱室の上部に配置した。

4) 地上2階

非管理区域設備の集約配置及び換気ダクトのルート性を考慮して、設備エリアの配置検討を実施した。概念配置図(平面図)をFig.3.3.18-2に、概念配置図(断面図)をFig.3.3.18-4に示す。

- ・ 換気空調機械室(排気)は、排気用スタックへのダクトルート性を考慮し、最上階である地上2階に配置した。
- ・ 制御室は、非管理区域設備の集約配置を考慮し、ロビー上部に配置した。また、実験者の居室を通路に隣接して配置した。

(3) 放射線管理区分

ターゲット熱流動実験施設の概念配置検討を踏まえ実施した放射線管理区分をFig.3.3.19-1及びFig.3.3.19-2に示す。

1) 線量区分

線量区分は、非管理区域と管理区域に大別し、管理区域はさらにA管理(低線量域区分)、B管理(中線量域区分)、C管理(高線量域区分)に区分した。

2) 部屋区分

- ・ 制御室、データ処理室及び居室は非管理区域とした。
- ・ 管理区域ではあるが、作業員の出入りが頻繁であるマニピュレータ操作室、保管設備操作室及び出入管理室は、A管理(低線量域区分)とした。
- ・ 管理区域内に設備機器を配置している部屋及びその機器類のメンテナンスを行う部屋は、作業員の出入りが頻繁ではないため、B管理(中線量域区分)とした。
- ・ 管理区域で通常では作業員の出入りが無いホットセル室、ターゲット取扱室、ターゲット保管エリア等は、C管理(高線量域区分)とした。
- ・ 高・低線量区域の入退アクセスが交差しないよう配慮した。
- ・ 放射化された機器を屋外へ搬出する際、放射線モニタ及び除染設備設置スペースの確保から設備の共用化を考慮し、機器搬出入口は極力集約した配置とした。

3.3.4 具体化への課題

(1) 消滅処理ターゲット熱流動実験装置

消滅処理ターゲット熱流動実験装置に関する技術的課題を Fig.3.3.20 に示す。これらの課題について、各設備の取り合いを含めた総合的な検討が必要である。

1) ターゲット容器

ターゲットアセンブリ構造の具体化、ナトリウムの流動評価（流動試験）を踏まえた合理的なターゲット容器の構造検討が必要である。このターゲット容器の構造検討に関しては、耐震性、ナトリウム取扱方法、ドレン方法、メンテナンス方法を含めた上で総合的に検討する必要がある。また、ターゲットアセンブリの遠隔操作方法の具体化が必要である。

2) 遮蔽プラグ

ターゲットアセンブリ構造、陽子ビームライン、ターゲット容器構造等の詳細検討を踏まえ、遮蔽プラグの構造検討が必要である。

3) ターゲット移送装置

ターゲット取出方法、ナトリウム取扱方法、ドアバルブ構造等を踏まえ、ターゲット移送装置の構造検討が必要である。

4) 陽子ビームマグネット回転台車

陽子ビーム偏向マグネット構造、陽子ビーム拡張マグネット構造、陽子ビームライン接続方法等を踏まえ、陽子ビームマグネット回転台車の構造検討が必要である。

5) ターゲット洗浄装置

ターゲットの取扱方法、ターゲットアセンブリ構造を踏まえ、ターゲット洗浄装置の構造検討が必要である。

6) その他

- ・ ナトリウムの取扱方法、防護手段等の具体化
- ・ 陽子ビームラインの接続方法及び真空雰囲気化方法の具体化
- ・ 各種機器のメンテナンス方法の具体化
- ・ 陽子ビーム窓の構造、材質、耐久性、メンテナンス方法等を踏まえた陽子ビーム窓の構造検討
- ・ 各機器の耐震強度設計、高温強度設計の設計基準の整備及び各種構造応力解析

(2) 施設配置検討課題

以下の項目について、今後検討が必要である。

1) 各設備仕様の具体化

- 2) 冷却設備及び換気空調設備等の機器構造設計の具体化
- 3) 遮蔽必要壁・スラブ厚の詳細遮蔽設計
- 4) 機器荷重条件に基づく建屋強度及び躯体構造の具体化
- 5) 建物設計・各設備設計の具体的な検討結果による詳細配置
- 6) ターゲット検査のためのホットセル室の検査内容に基づく具体化
- 7) 総合的な消滅処理ターゲット熱流動実験施設建屋の詳細機器配置

消滅処理ターゲット熱流動実験施設内の機器に関する技術的課題を Fig.3.3.21 に示す。

Table 3.3.1 消滅処理ターゲット熱流動実験施設の主要諸元

陽子ビーム	
エネルギー	1.5 GeV
電流	1.0 mA
出力	1.5 MW
運転モード	パルスモード
周波数	50 Hz
ターゲット	
材質	タングステン
構造	有孔多層ディスク構造
最大中性子束	4.5×10^{14} n/cm ² /s
最大発熱密度	126 W/cc
ターゲット部全発熱量	1.13 MW
1次冷却系	
冷却材	ナトリウム
流量	57 t/h
熱負荷	1050 kW
冷却材入口温度	340 °C
冷却材出口温度	440 °C
2次冷却系	
冷却材	ナトリウム
流量	45 t/h
熱負荷	- 1100 kW
運転温度	300 °C
使用済みターゲット冷却系	
冷却材	空気
流量	5400 m ³ /h
熱負荷	— 50 kW

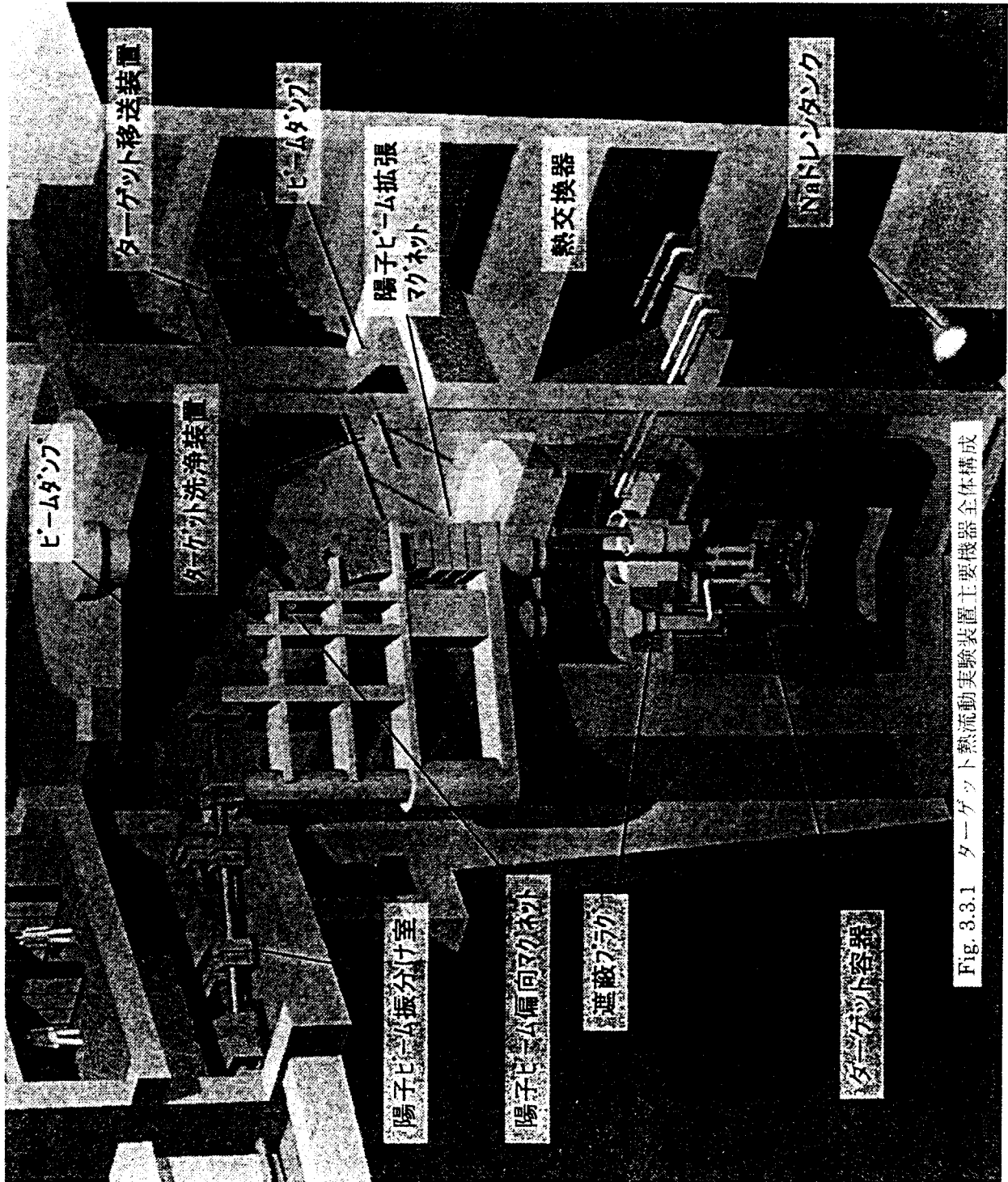


Fig. 3.3.1 ターゲット熱流動実験装置主要機器全体構成

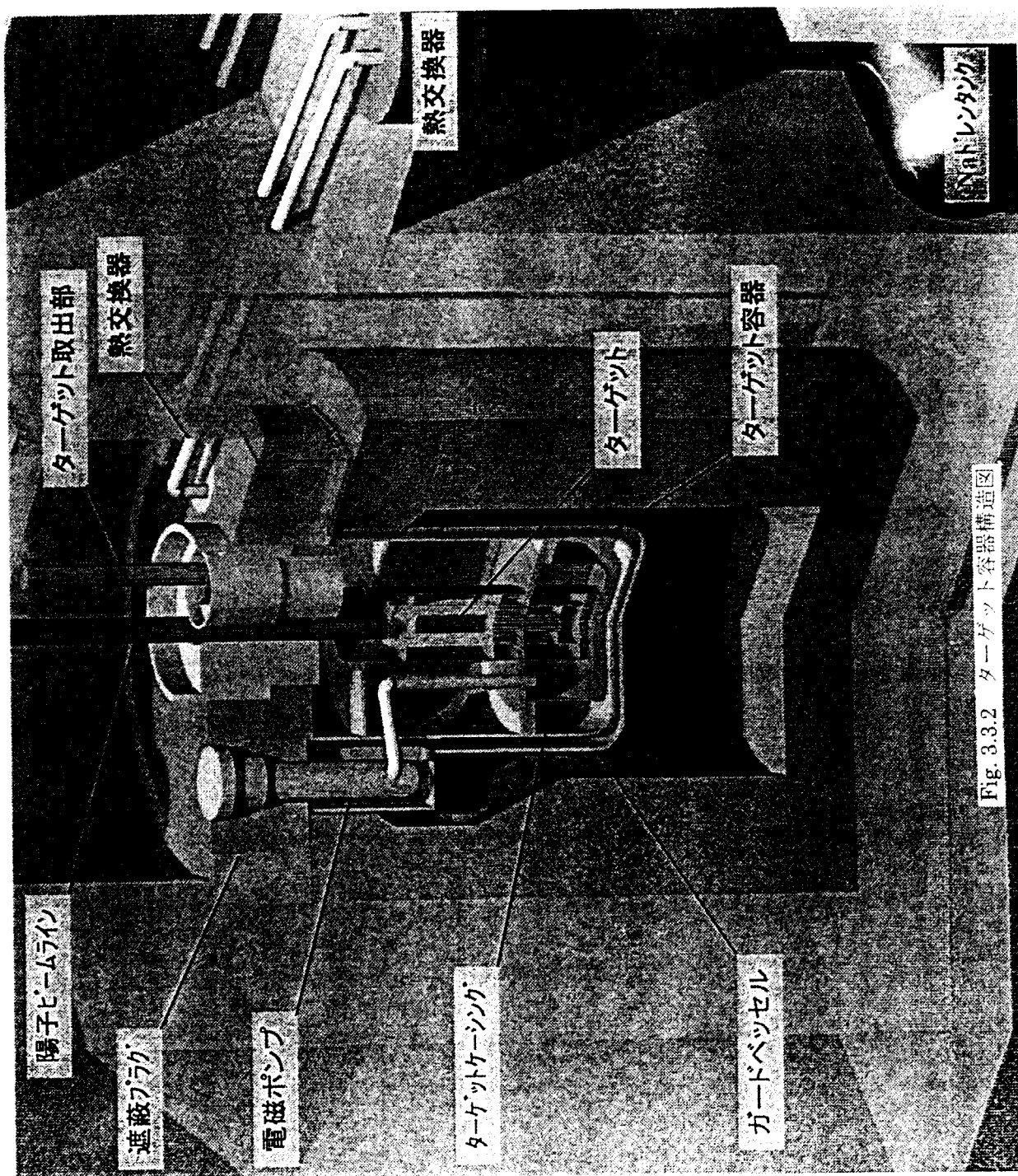


Fig. 3.3.2 ターゲット容器構造図

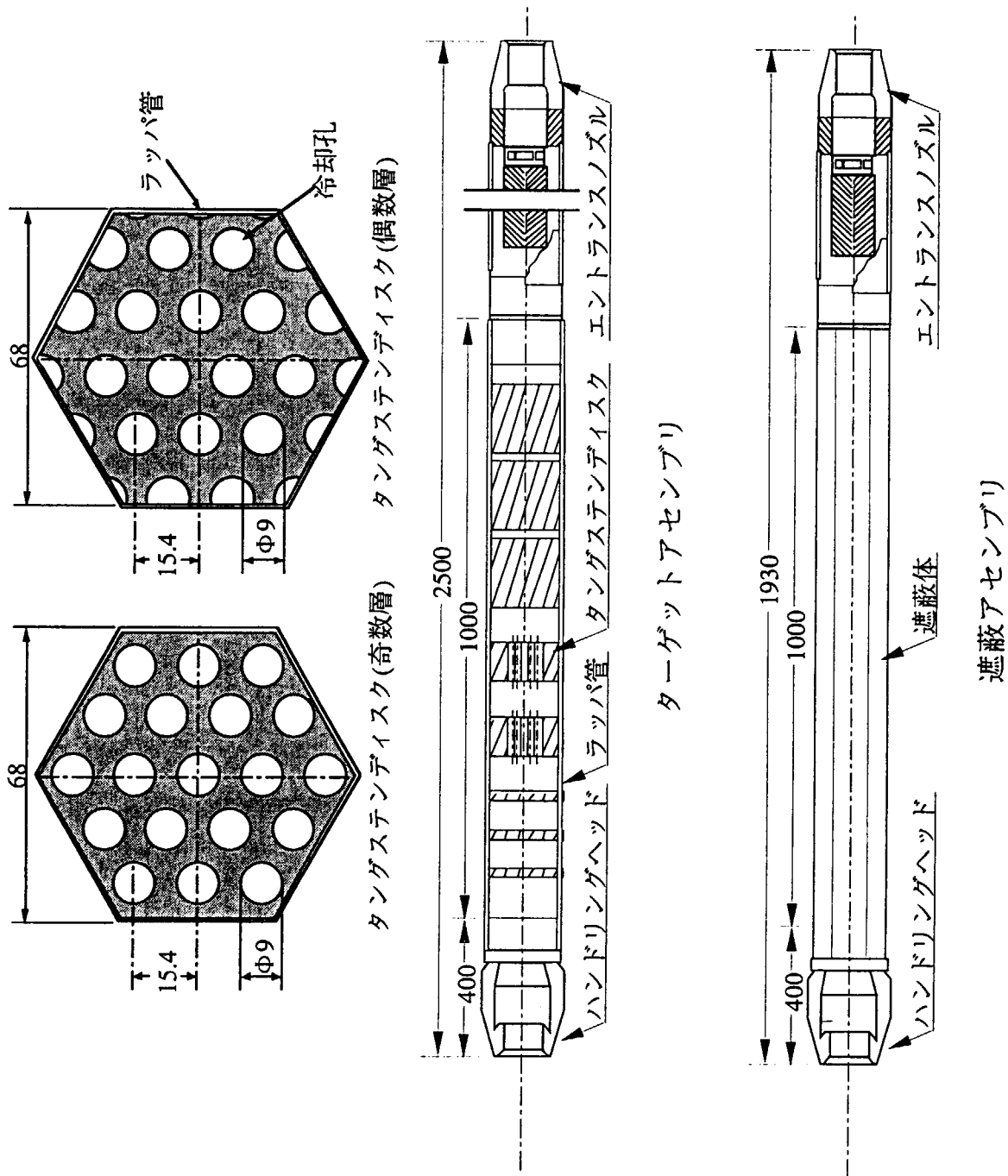


Fig. 3.3.3 ターゲット及び遮蔽アセンブリ概念図

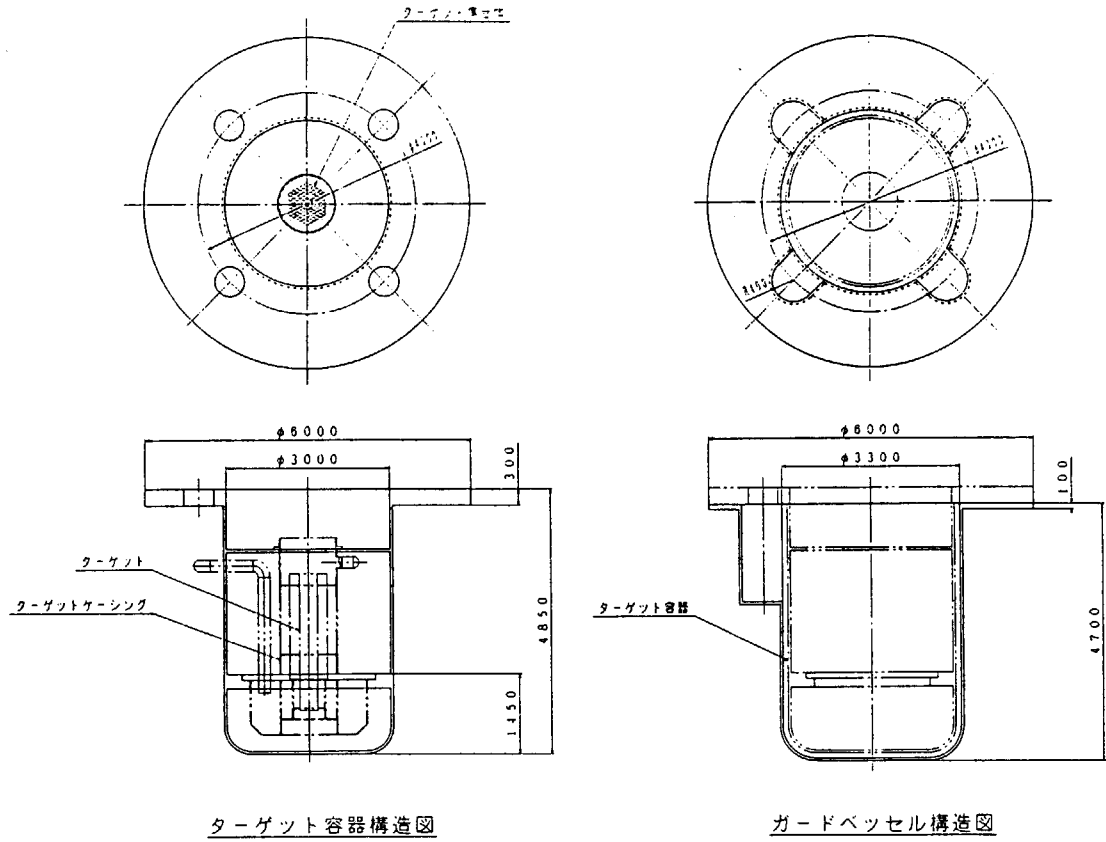


Fig. 3.3.4 ターゲット容器概念図

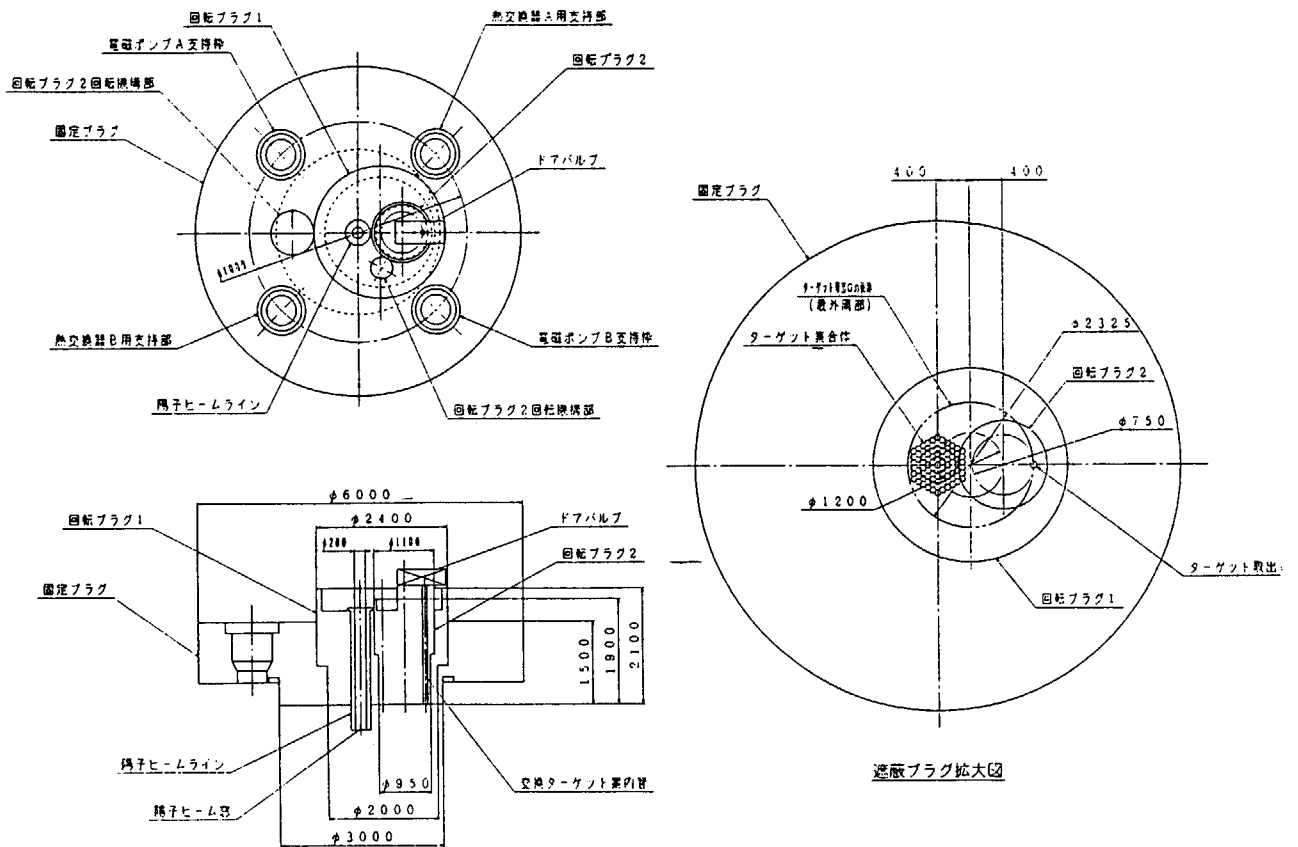


Fig. 3.3.5 遮蔽プラグ構造図

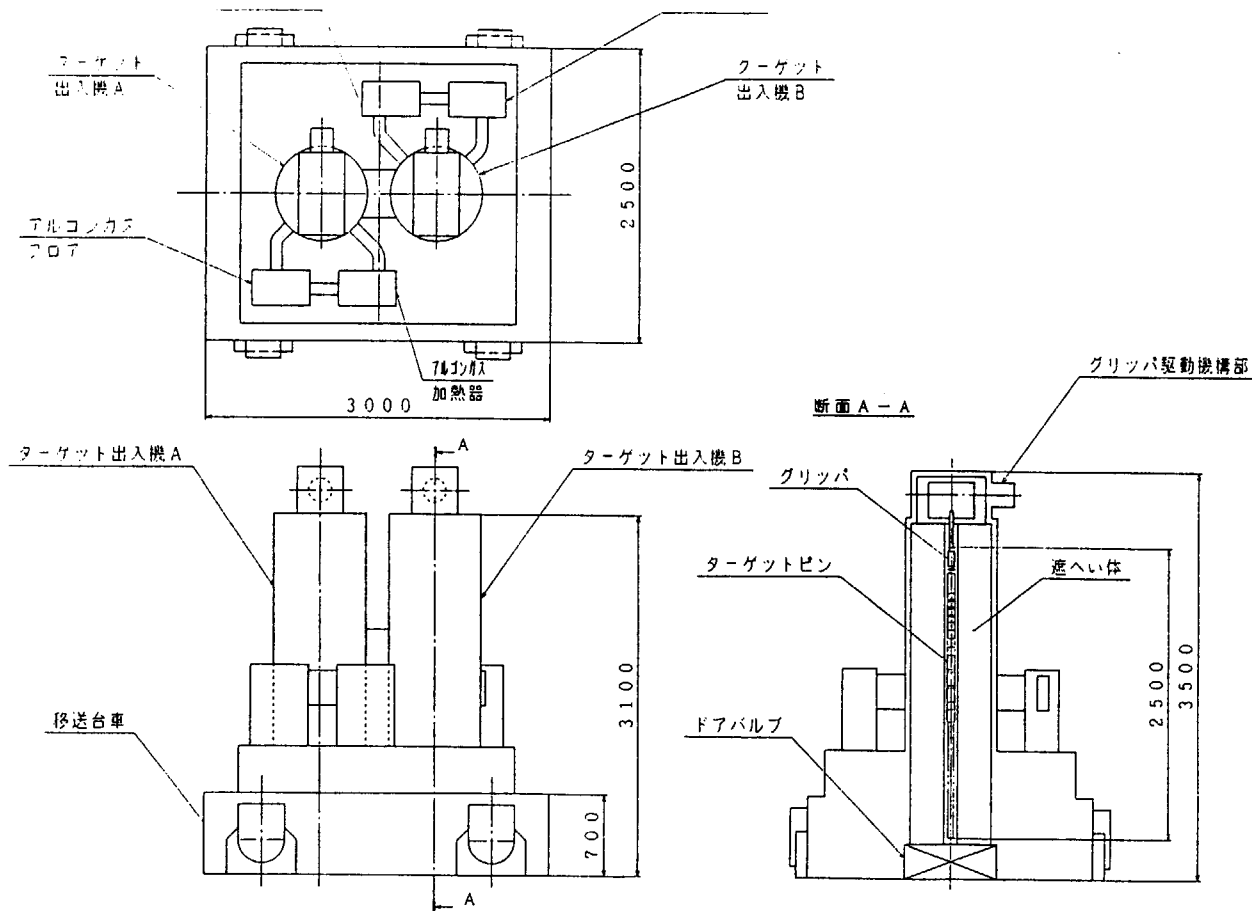


Fig. 3.3.6 ターゲット移送装置構造図

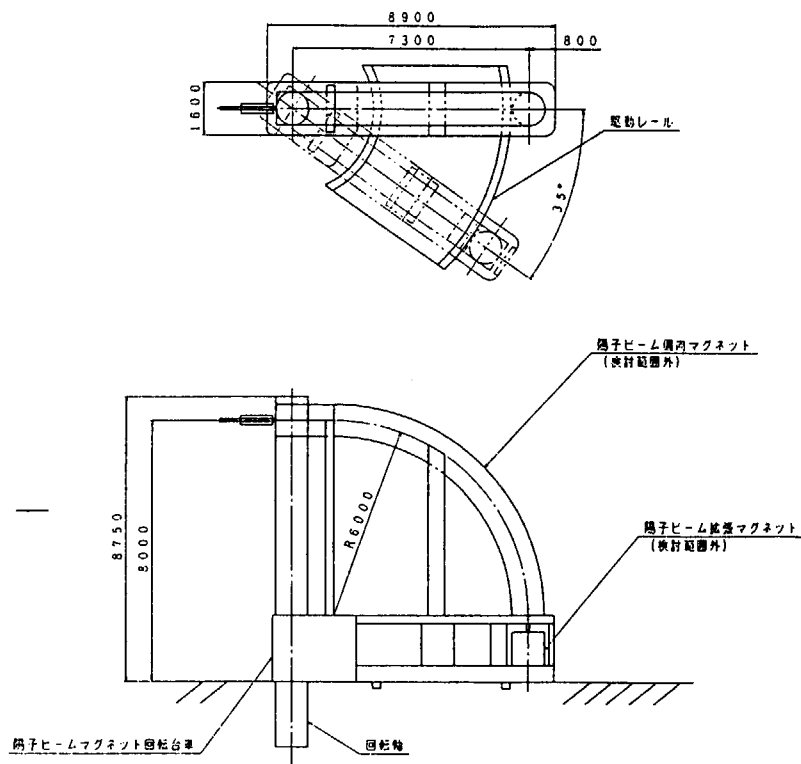


Fig. 3.3.7 陽子ビームマグネット回転台車構造図

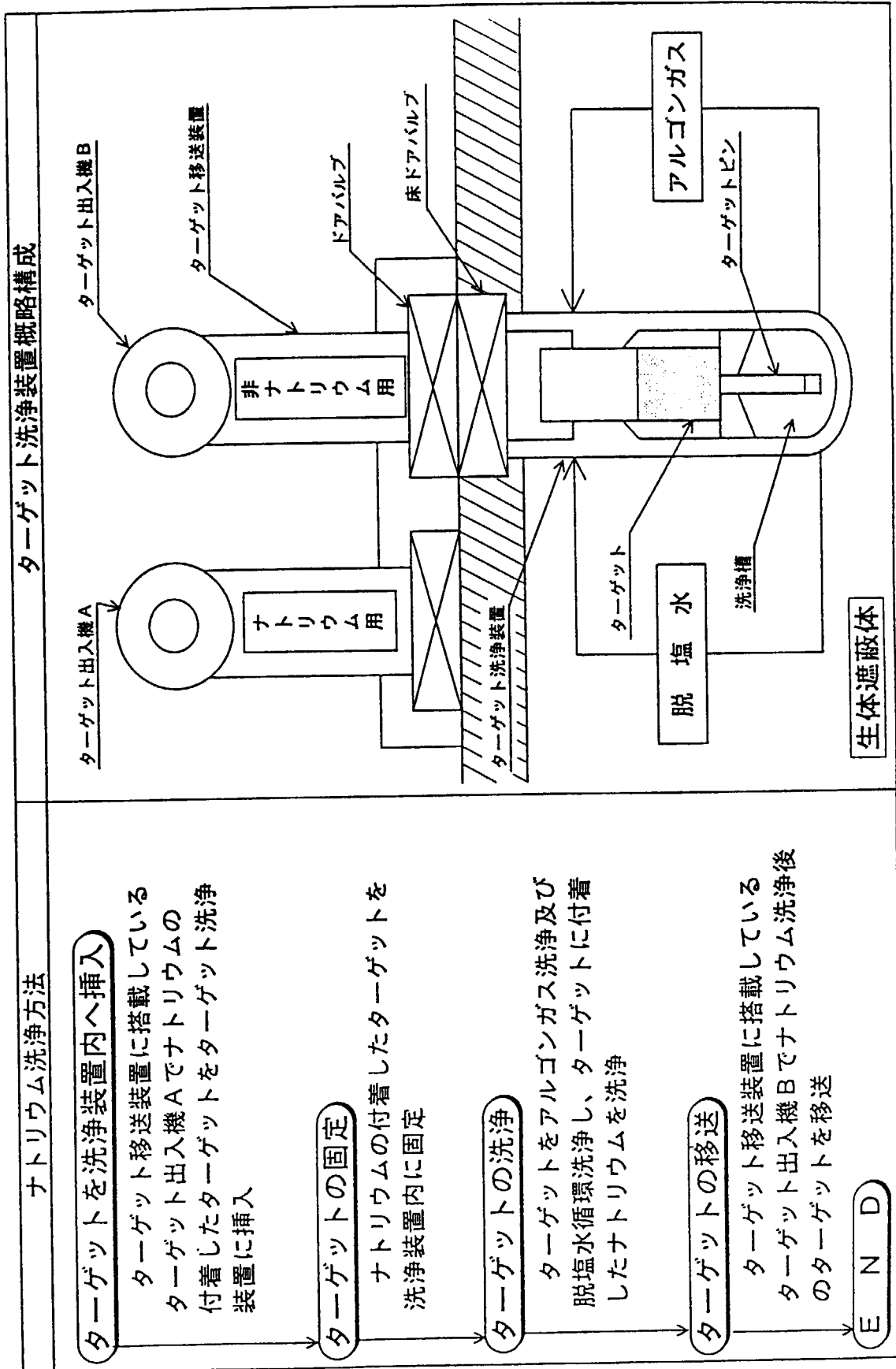


Fig. 3.3.8 ターゲット洗浄装置概念図

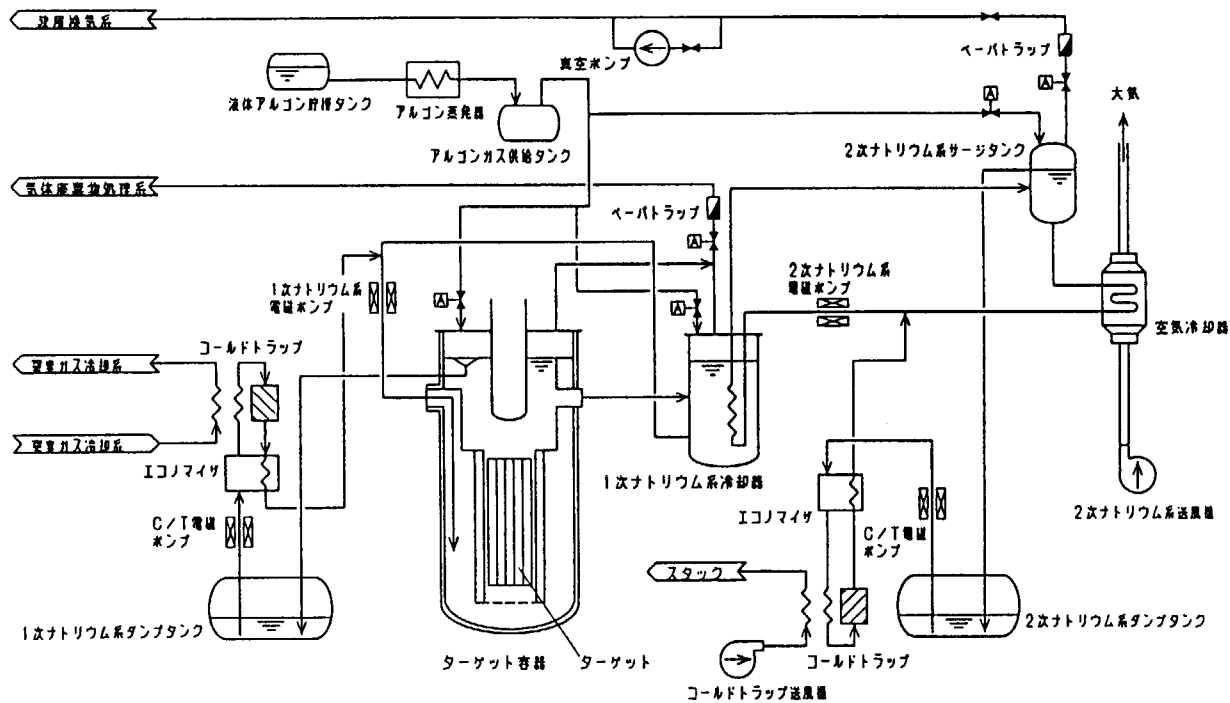


Fig. 3.3.9 主要冷却系全体系統図

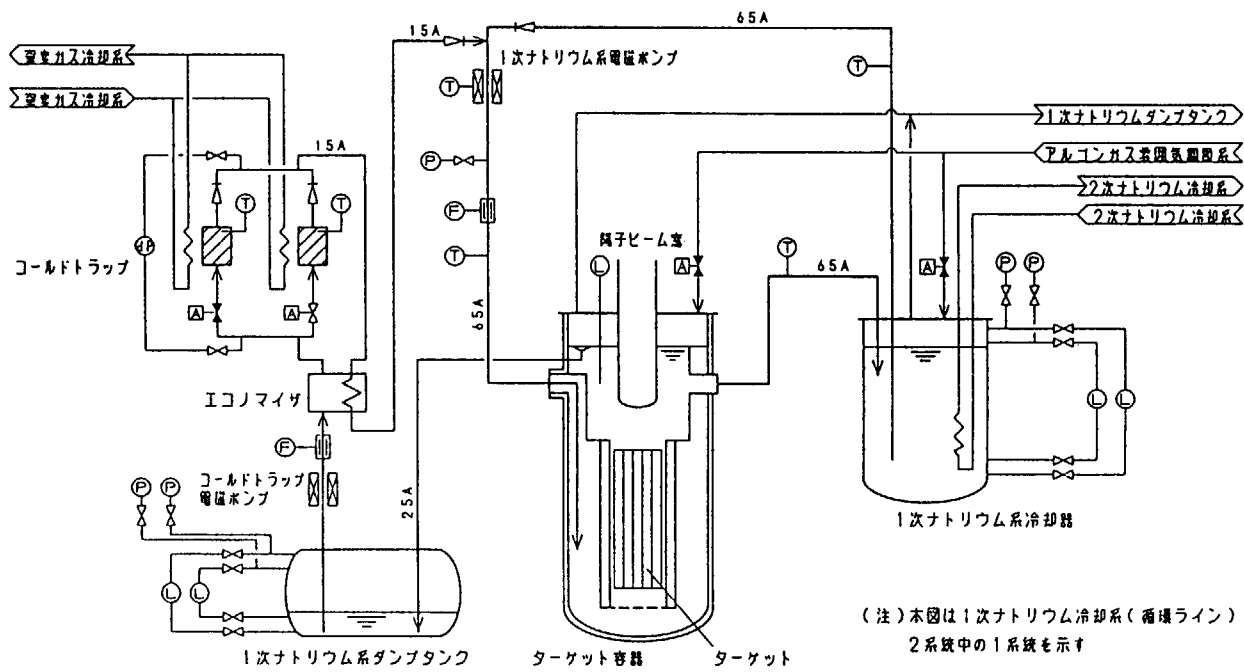


Fig. 3.3.10 1次ナトリウム冷却系基本構成図

(注)本図は2次ナトリウム冷却系(循環ライン)
2系統中の1系統を示す。

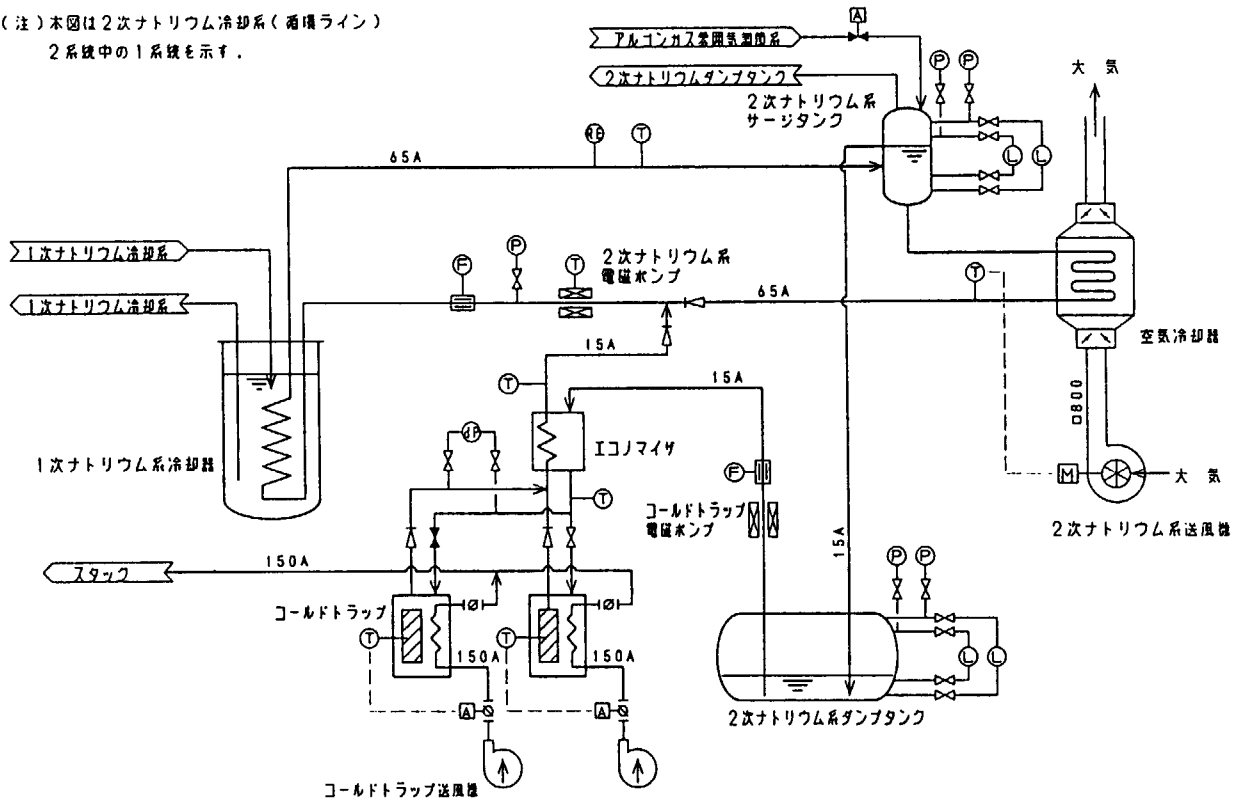


Fig. 3.3.11 2次ナトリウム冷却系基本構成図

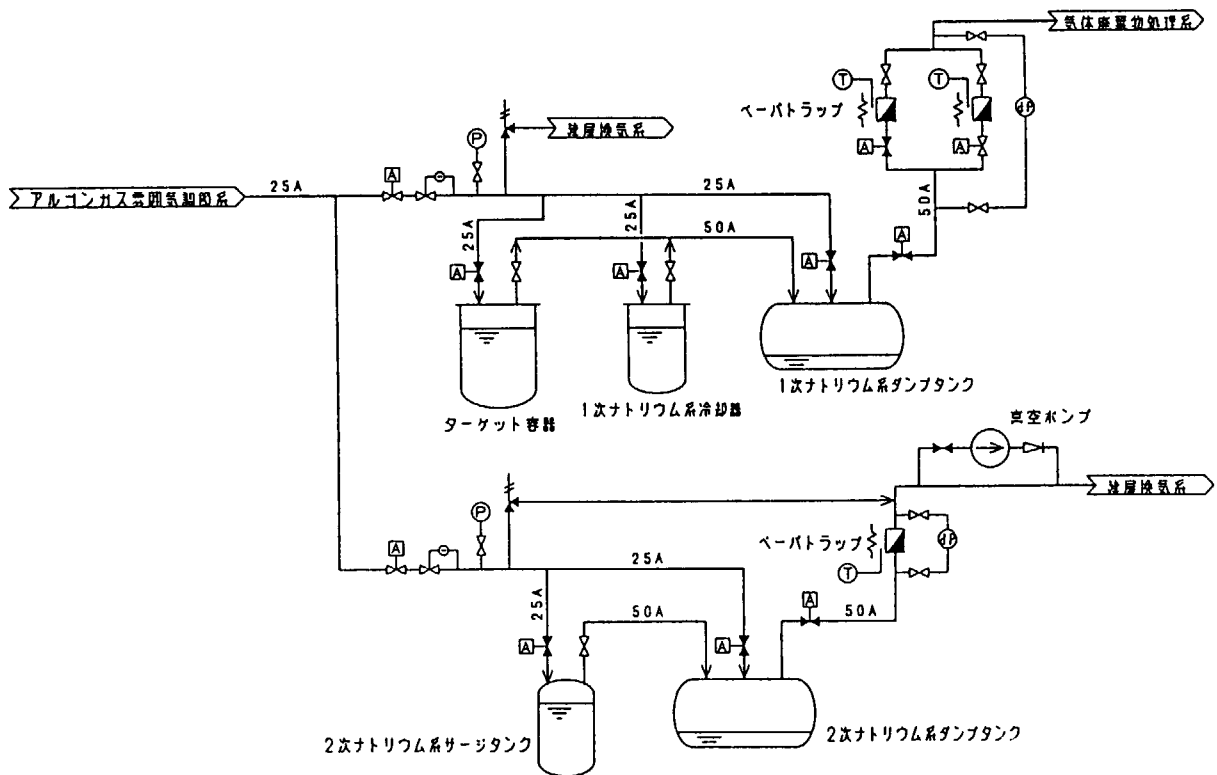


Fig. 3.3.12 アルゴンガス系基本構成図

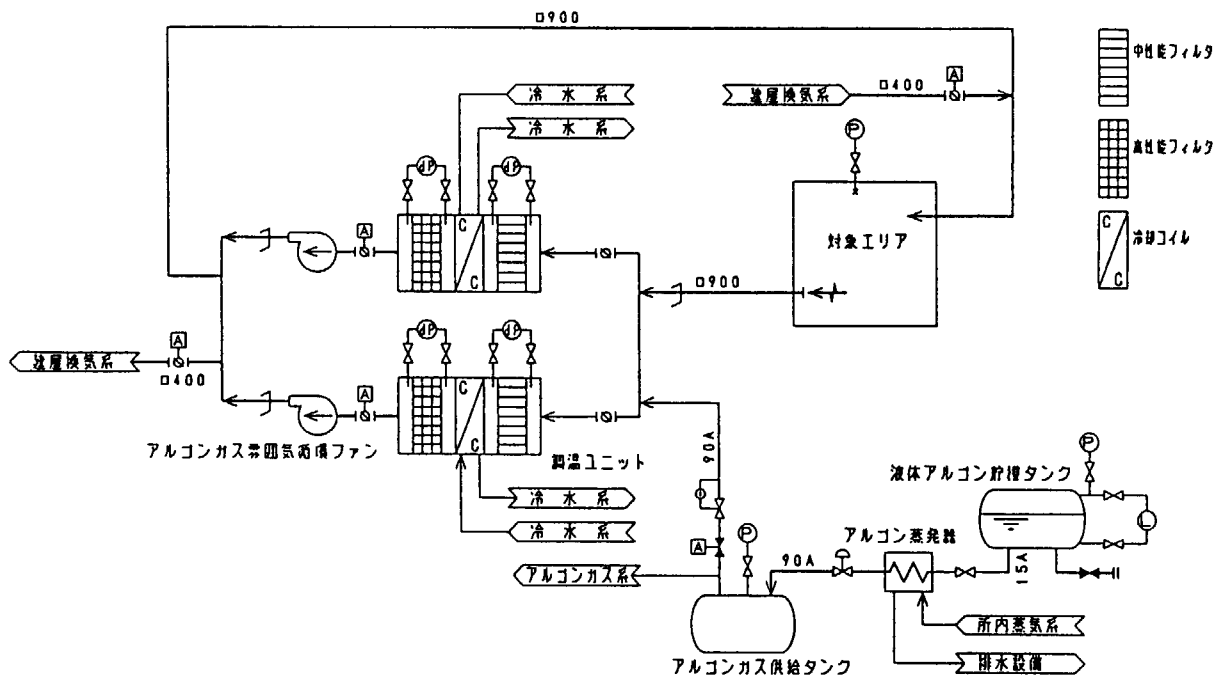


Fig. 3.3.13 アルゴンガス雰囲気調節系基本構成図

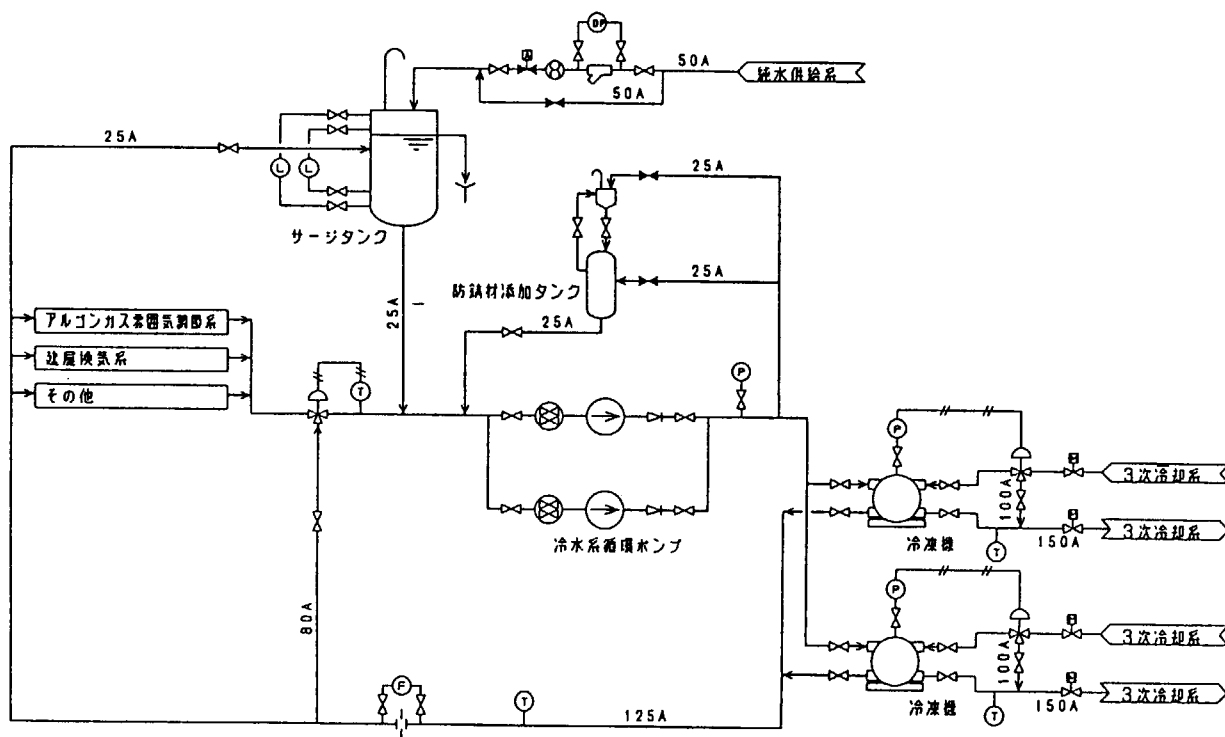


Fig. 3.3.14 冷水系基本構成図

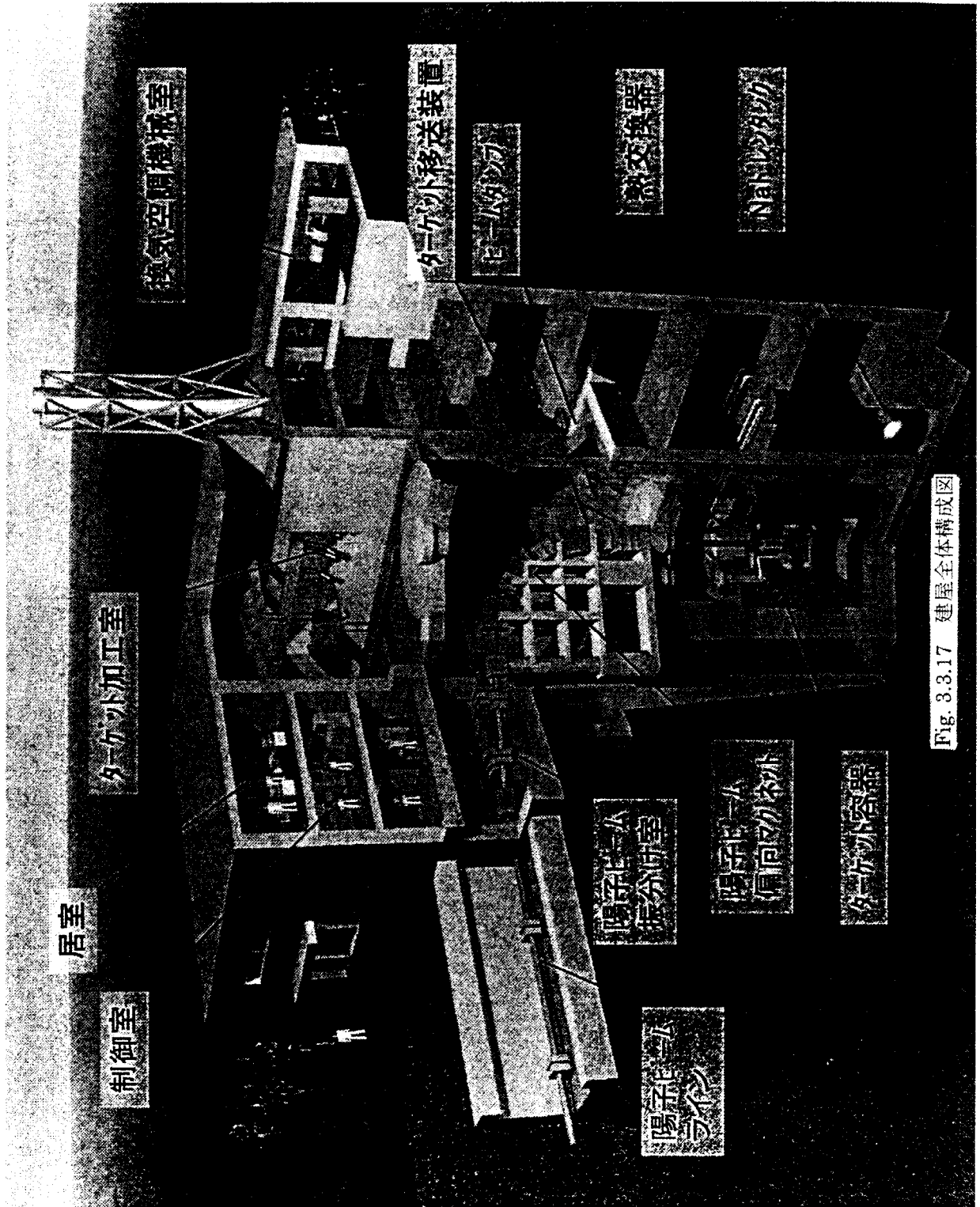


Fig. 3.3.17 建屋全体構成図

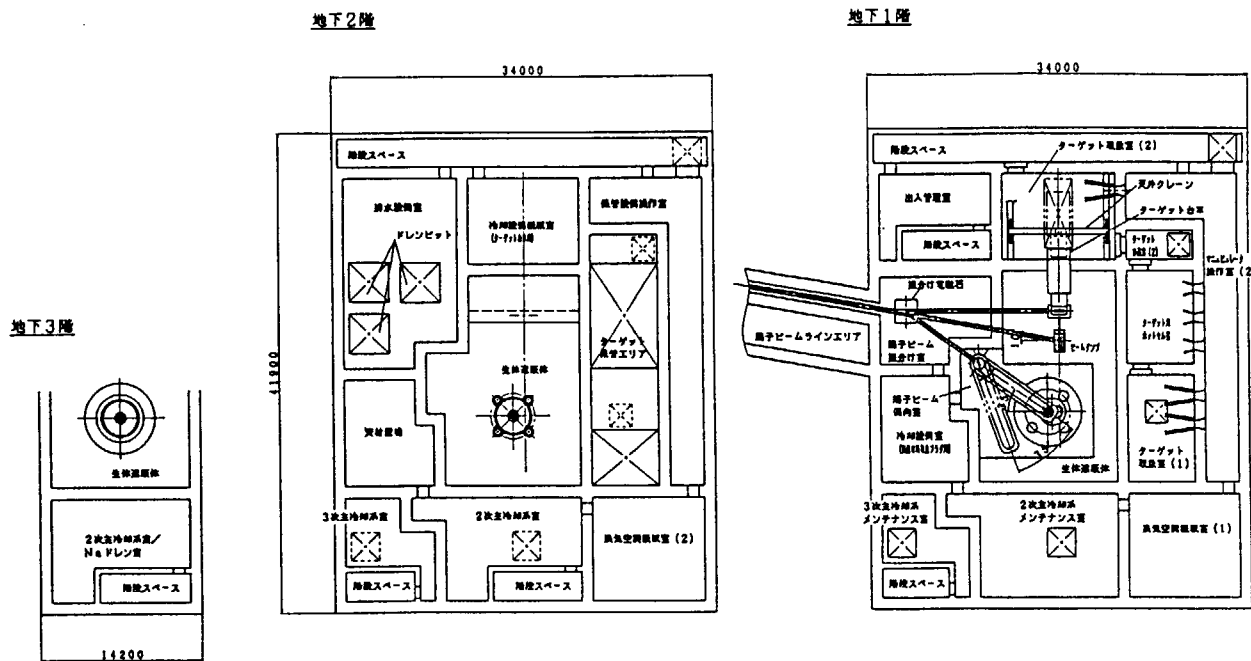


Fig. 3.3.18.1 施設概念配置図 (1)

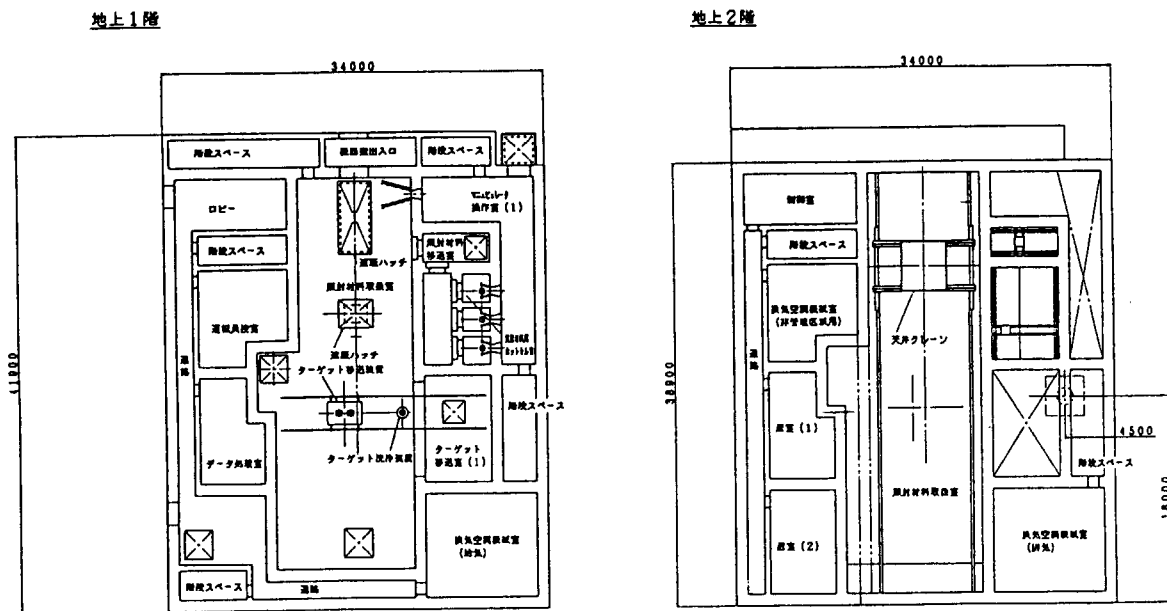


Fig. 3.3.18.2 施設概念配置図 (2)

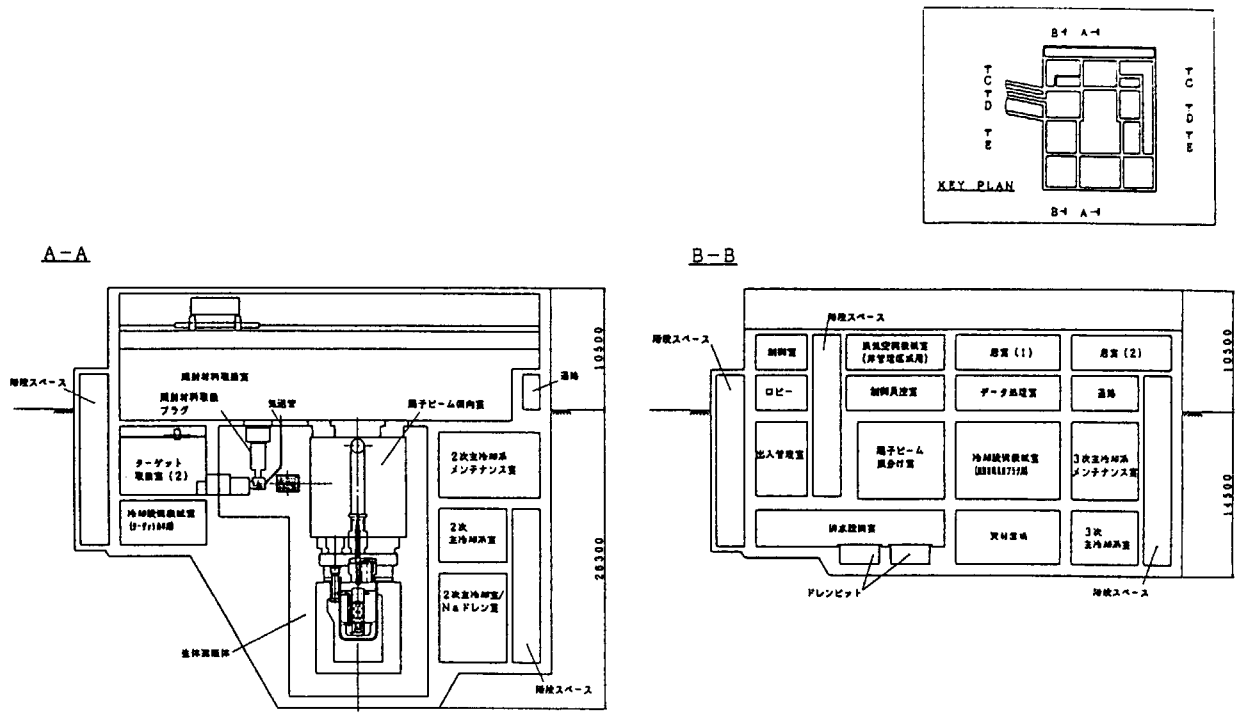


Fig. 3.3.18.3 施設概念配置図 (3)

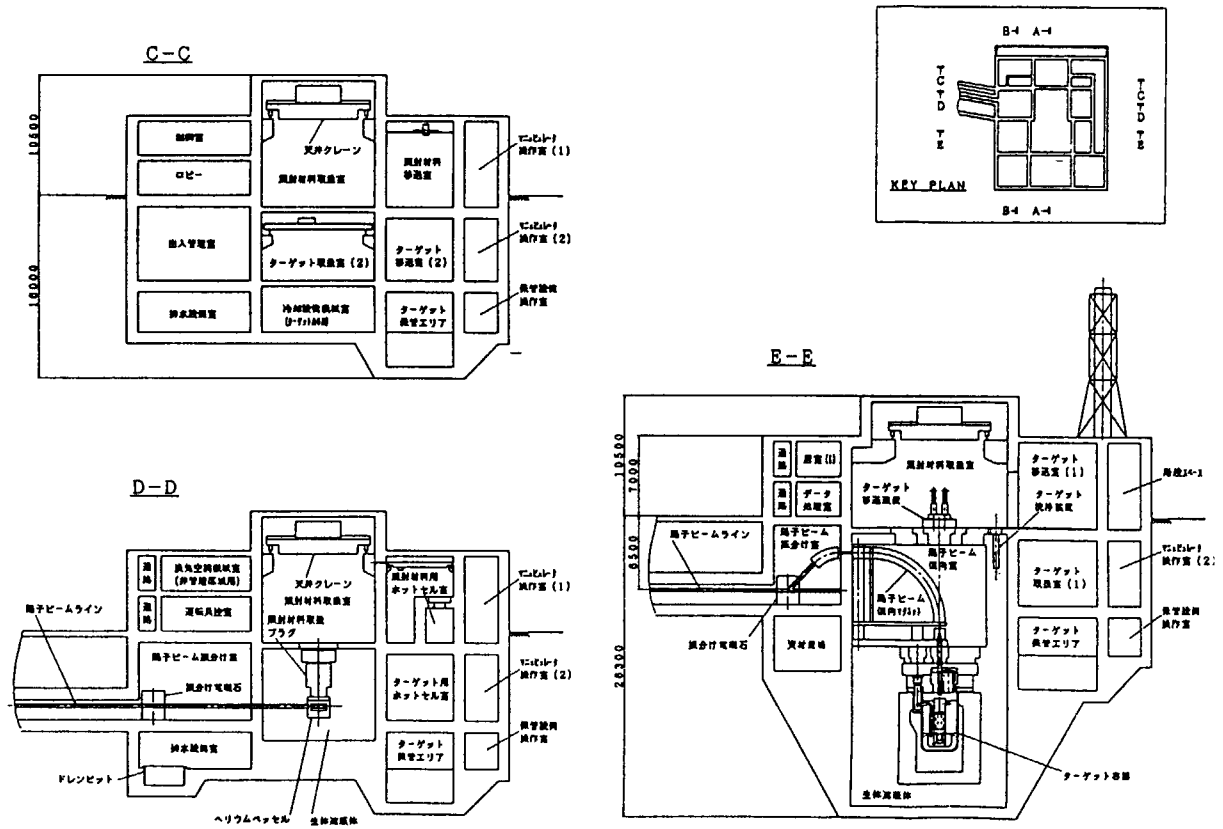


Fig. 3.3.18.4 施設概念配置図 (4)

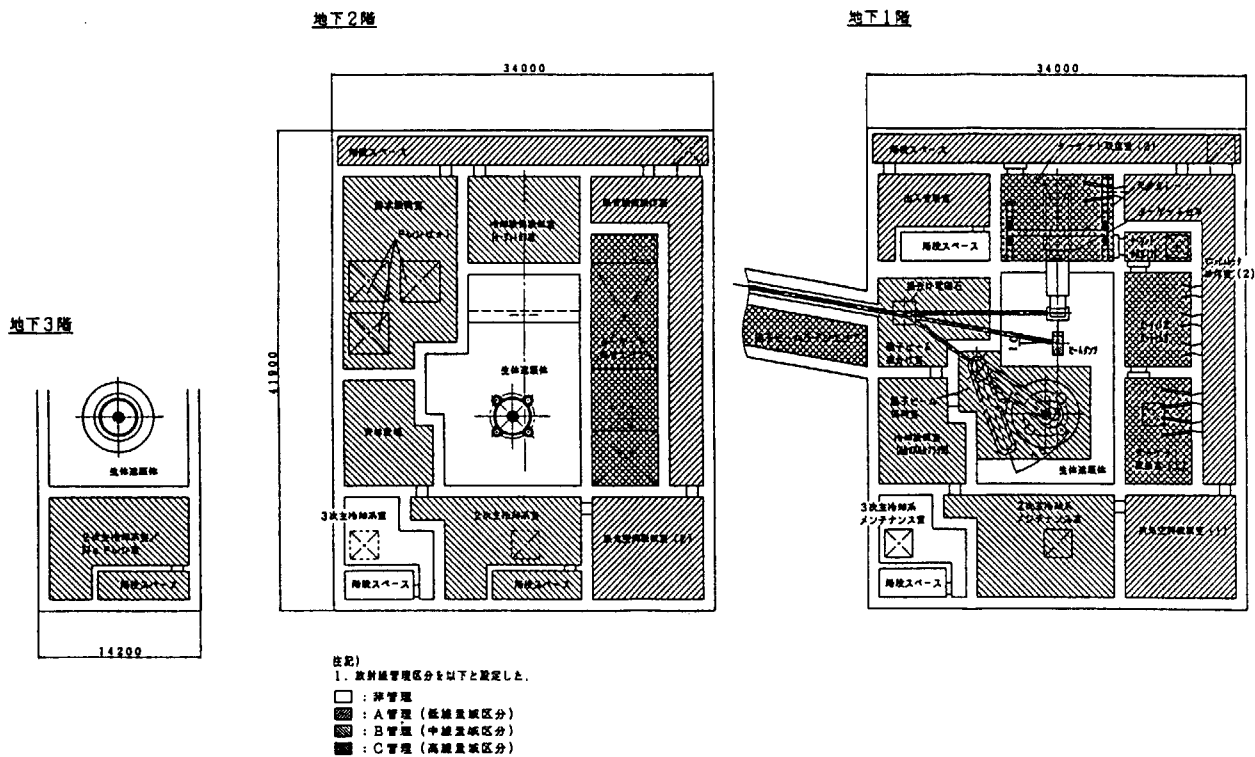


Fig. 3.3.19.1 放射線管理区分図 (1)

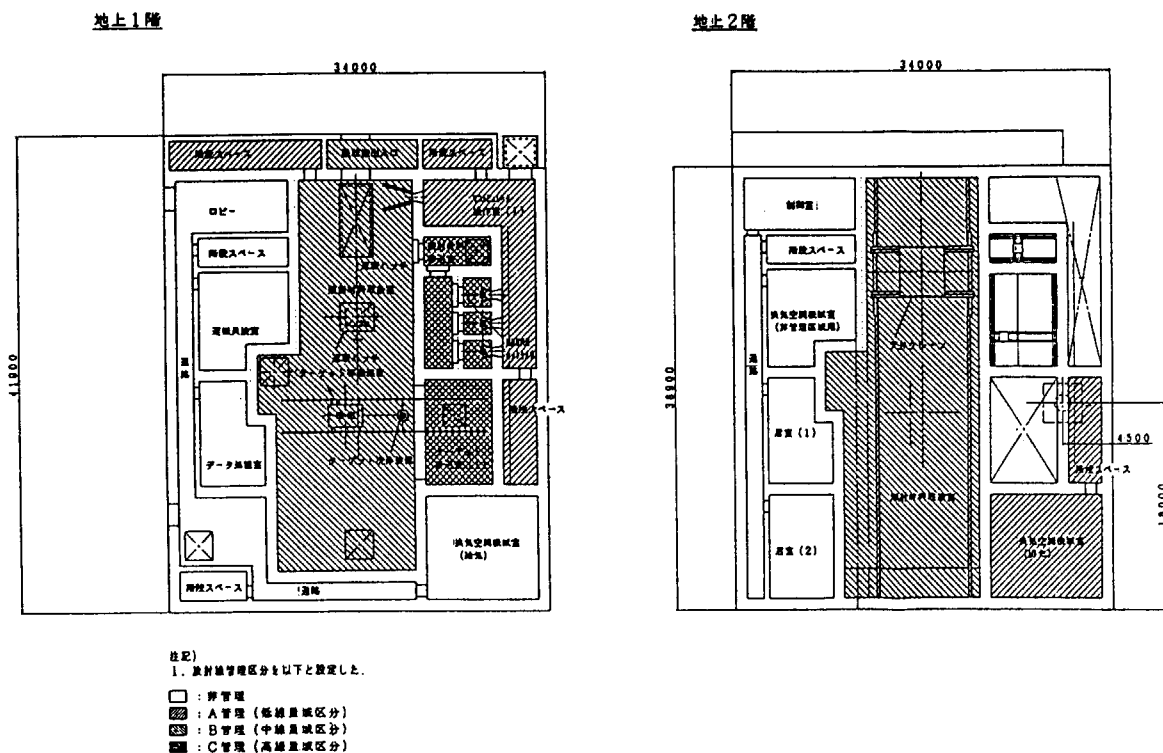


Fig. 3.3.19.2 放射線管理区分図 (2)

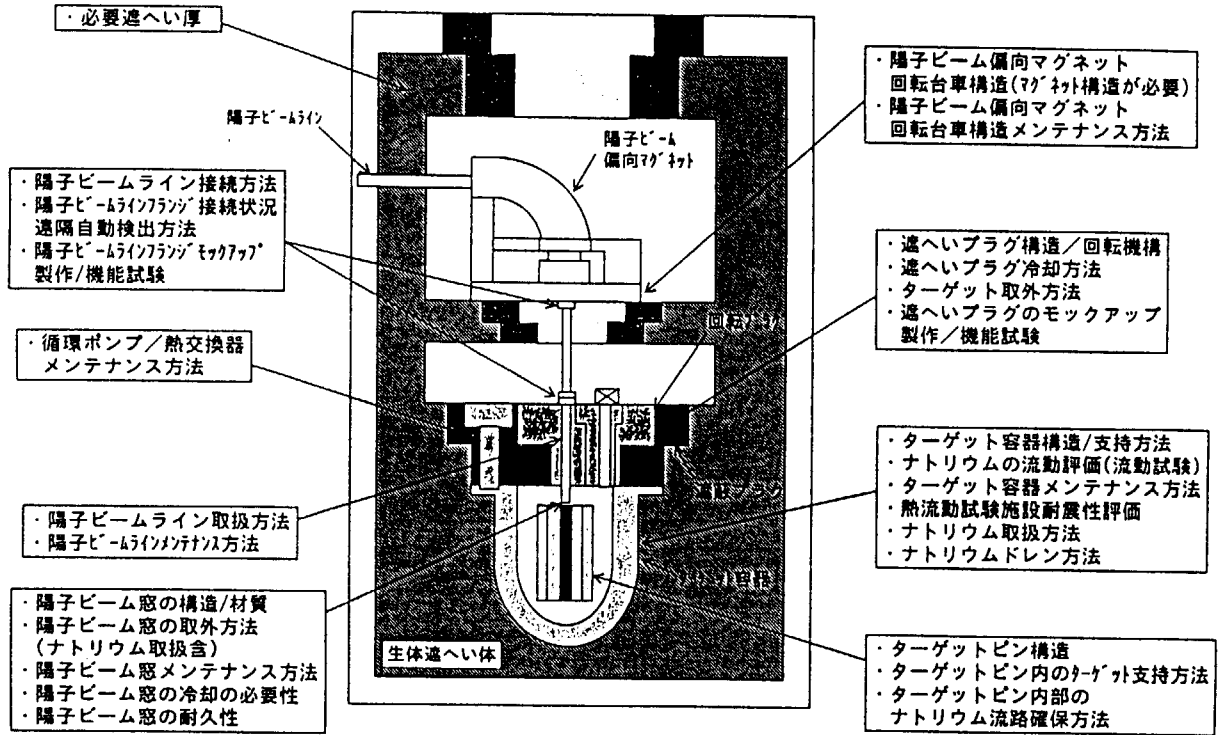


Fig. 3.3.20 ターゲット熱流動実験装置に関する技術的課題

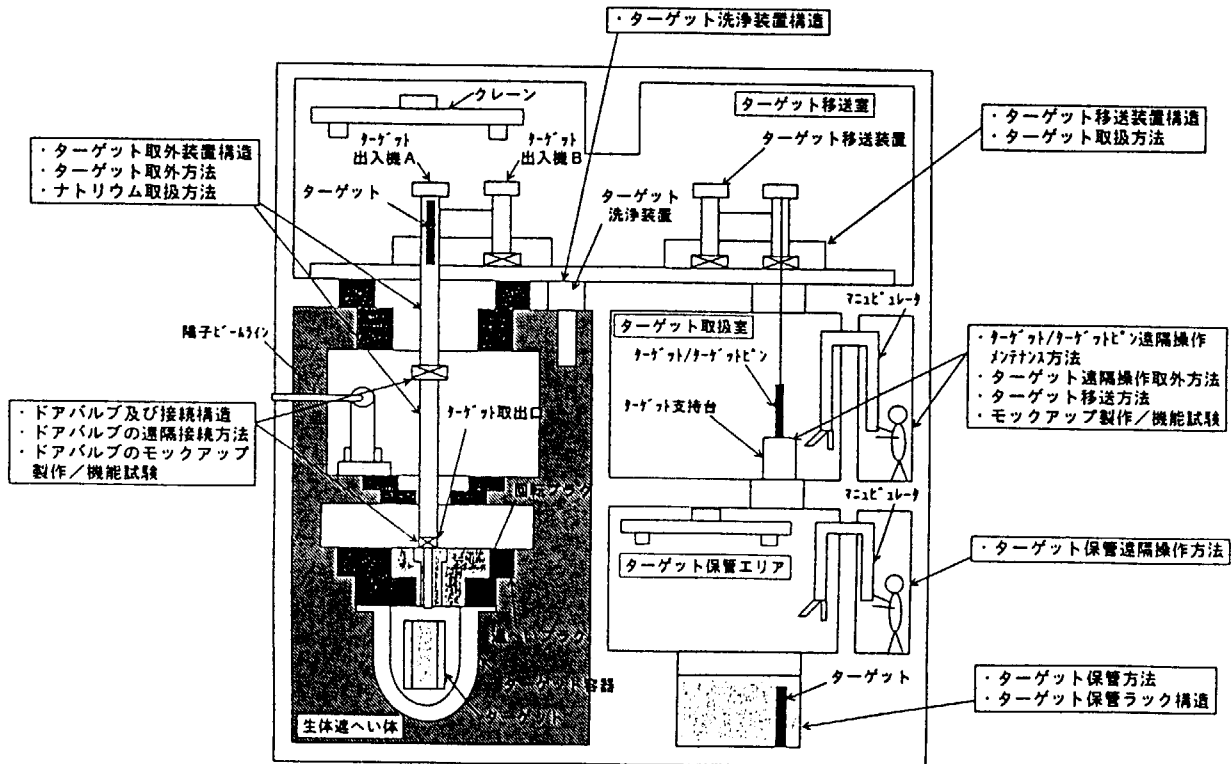


Fig. 3.3.21 施設内の機器に関する技術的課題

3. 4 消滅処理炉物理実験施設

3. 4. 1 炉物理実験の必要性

消滅処理実験炉及び消滅処理プラントの核的特性の予測技術を確立し、その精度を検証するため、未臨界体系と適当な外部中性子源を用いて以下のような内容について炉物理実験を実施する必要がある。中性子源としては、カリフォルニウム中性子源、14MeV D-T 中性子源でもかなりの範囲の実験が可能である。しかしながら、エネルギーの高い中性子を含む核破砕中性子源によって励起される深い未臨界体系の応答特性に関してはこれまでの原子炉開発研究の過程でも殆ど研究されていないので、最終的には実験炉で使用するのと同等のエネルギー (1.5GeV) の陽子投入を受けるターゲット核破砕中性子源によって十分に精度の高いモックアップ実験を実施することが実験炉に期待される性能を保証し、その安全性を検証する上で必要である。

なお、現在原研で検討している実験炉では濃縮ウランが主たる燃料であるが、もっと後のフェーズでは世界中でこれまでに全く未経験なマイナアクチニド燃料に変えて運転することが要求されるであろうから、そのための何らかのモックアップ実験も炉物理実験装置で実施することが必要となろう。

3. 4. 2 実験内容

1) 反応度予測精度の検証

消滅処理実験炉では大きなビーム導入管ボイドや大きくて複雑な構造のターゲットが存在すること、材料に関してもこれまでの原子炉では経験の乏しいものがあること、また、かなり大きな臨界未満度で運転される。このため、反応度予測精度が十分に高いとはいえないので計画した強度の陽子ビームでは不足であったり、強すぎて入射できなくなる恐れがある。また、ターゲットや冷却材の反応度効果も正確に評価しないとターゲット交換時の安全性が確保できない。したがって、消滅処理実験炉の設計で採り入れられている材料、構造をモックアップした体系を構成して反応度予測精度を検証することが必要である。反応度は中性子源の有無に依存しない物理量であるからこの項目に関しては FCA を用いて実験することができる。

2) 出力及び出力分布の予測精度の検証

消滅処理炉心の熱出力は臨界未満度または実効増倍係数(k_{eff})と陽子入射率と中性子源スペクトル $S(E, \theta, r)$ によって決まる。後者は陽子 1 個あたりに生まれる中性子のエネルギー、角度、位置をパラメータとする複雑な分布関数であり、陽子エネルギーとターゲット材料・構造によって決まる。また、陽子ビームは数十センチ直径の広がりをもって入射されるから、入射ポイントにも依存する。 $S(E, \theta, r)$ を精度良く求めることはモンテカルロ計算によっても容易ではない。陽子ビームを十分な厚さのターゲットに入射する核破砕実験によってこれを詳しく測定することは原理的には可能であるが、ターゲットで生まれた中性子は数百 MeV にも及ぶ高いエネルギー成分が含まれているし、非等方性をも含めて精度の高いデータを得ることは容易ではない。したが

って、実際的にはターゲット表面に放射化試料を置いて中性子の反応率を調べたり、単純構成の炉心(積分)の中に対象とするターゲットを置き、陽子を入射して体系中での中性子束分布を測定することによって $S(\mathbf{E}, \theta, \mathbf{r})$ を積分的に評価することが最も信頼性が高い。

消滅処理実験炉は高い未臨界状態で運転され、大型ボイド、局在ソース、局在中性子吸収をもつので、出力分布を正確に予測できることを検証することが必要である。このためには、詳細モックアップ炉心と核破砕中性子源を用いた実験が最も信頼性が高い。D-T反応による14 MeV中性子源やCf中性子源を用いた実験では十分ではない。

3) 漏洩中性子数の予測精度の検証

消滅処理実験炉の遮蔽設計のためには炉外に漏洩する放射線、特に高速中性子成分の評価が重要である。ターゲット中性子のうち高エネルギー部分の漏洩は遠地点での線量当量に寄与するので少量といえども確認が必要なのである。陽子ビーム入射部の大きなボイドからのストリーミングも正確に評価できなくてはならない。炉物理実験装置を使って遮蔽設計に使う線源項の評価精度を確認することができる。

4) パルスビーム、ランプビームに対する応答性の予測精度の検証

原研が開発する陽子加速器による消滅処理実験炉の駆動は、少なくとも当初はパルスビーム入射によることが避けられない条件であり、高エネルギー成分を含む中性子のパルス照射を受けるシステムの安全性確保のため、早い過渡変化と空間高調波を伴う分布についての知見に基づいて実験炉構造の健全性を評価することが必要であり、この項目は実験炉詳細設計までに実施したい。FCAで短パルスの14 MeV中性子を投入する実験を行えば概念設計段階で役立つデータが得られるだろう。しかし、詳細設計検証用としてはやはり核破砕中性子源による実験データが要求される。このほか、は測定できない。比較的強いパルスビームを炉物理実験施設に投入すればNUCEFのTRACY並みに特別の冷却材ループを備えなくても燃料体固有の安全性まで試験することができる。

5) 消滅処理特性の研究

この項目は実験炉の安全性には必ずしも直接に関係しないが、本来の研究開発目的である。中性子スペクトルと核分裂断面積が正確に分かっていない場合、消滅処理特性は着目する各種試料の反応率測定等によって検証することができる。核破砕中性子源を用いた炉物理実験施設での実験データが消滅処理特性の評価精度を担保する。実験項目としては、スペクトルインデックス、構造物の反応度価値、ウラン、プルトニウムサンプルのドプラー効果、マイナアクチナイド試料等の反応率、実効増倍係数、実効遅発中性子分率、冷却材ボイド係数、燃料熔融時の反応度変化、熔融塩燃料炉の燃料流動効果を含めた動特性等が挙げられる。

6) ハイブリッドシステムとしての運転の信頼性検証

消滅処理プラントの実用化に期待される加速器の信頼性は他の中性子科学研究目的の場合に比べて格段に高い。これはハイブリッドシステムとして大きな熱出力、大きな放射能インベントリ、高温等の厳しい条件で運転されるとともにコストパーフォ

ーマンスの高さが要求されるからである。このような工学技術実証は本来、実験炉の目的である。炉物理実験装置と加速器を組み合わせたハイブリッドでも運転経験は有用である。将来は、実験炉を運転する前に加速器と原子炉プラントシミュレータとのハイブリッドでの運転経験も価値があろう。

以上の項目には属さないが、十分な炉物理実験の経験を通じて、炉心に与えるべき実効増倍係数が何処まで高くできるかをステップバイステップで追求して行くことができるので、この成果は、将来の消滅処理プラントにおける加速器の仕様に対する要求を下げ、経済性を向上することに資することができる。

3. 4. 3 炉物理実験装置の概念

(1) 集合体本体 (Fig. 3.4.1)

集合体は正方マトリクス管を積層して鋼製の固定枠で支持した構造とする。マトリクス管の中には燃料板、構造材模擬板、冷却材模擬板、反射体板等を装填したドロワが挿入される。集合体外形は正方断面直方体である。原則的には中央の4本または9本のマトリクス管は陽子ビーム入射ターゲットに用いられ、その外側は燃料体ドロワを装荷して炉心に、炉心の外側は反射体に使われる。燃料体領域の一部は安全棒挿入に用いられる。

集合体寸法	高さ	1.8 m
	巾	1.8 m
	長さ	1.8 m

1) 炉心

① 構造 (Fig.3.4.2)

燃料板、冷却材模擬板及び構造材模擬板等を装填したドロワをマトリクス管の中に装荷して炉心を構成する。装荷配置は実験計画によって変更できる。

② 燃料体の最大挿入量 3,500kg UO₂ 620 kg ²³⁵U

③ 主要な核的制限値

最大実効増倍係数	0.98
安全棒による停止時の実効増倍係数	0.95 以下

④ 主要な熱的制限値

最高熱出力	200 W (200J/s)
-------	----------------

2) 燃料体 (Fig.3.4.3)

燃料材の種類	UO ₂
形状	板状(燃料板)
	一辺 50 mm 正方形、厚さ 5 mm
ウラン濃縮度	20 wt%
被覆材の種類	SiC または、 Al (過度な汚染を防止する構造)

3) 反射体

ステンレス鋼

固定式反射体とドロワを利用した移動式反射体からなる。

4) 放射線遮蔽体

普通コンクリート 厚さ 2 m

建屋の壁を兼ねる

5) 陽子ビーム(Fig. 3.4.4)

陽子ビームは集合体前面からビーム入射管等を用いてターゲットに入射される。

陽子エネルギー 1.5 GeV(加速器の設計に合わせる)

ビーム強度 平均 5 nA

ビーム入射方向 水平

陽子ビーム入射管 加速器の末端部、ステンレス鋼製

陽子ビーム入射補助管 アルミニウム製封じ切り真空管

陽子ビーム調整装置 (加速器施設側に設置)

ビームダンプ、ビーム切替え回路は別途検討する。

6) ターゲット(Fig. 3.4.3)

ターゲットはターゲット板、冷却材模擬板、構造材模擬板を装填したドロワをマトリクス管に装荷して構成する。

材料 W、Pb-Bi、PbCl₂-UCl₃、NaCl-UCl₃、その他
(ターゲット板)

形状 板状

被覆材の種類 W 板以外はステンレス鋼被覆

(2) 核燃料物質の取扱い施設及び貯蔵施設(Figs. 3.4.5、6、7)

燃料ドロワ移動、交換装置 1 式

燃料ドロワ保管棚 1 式

燃料板保管容器 1 式

貯蔵能力 620 kg ²³⁵U

(3) 計測制御系統施設

1) 核計装 中性子電離箱系 3 系統

2) ビーム計装 2 系統

3) 温度計装 5 系統

4) 安全保護回路 1 式

① 緊急停止

次の条件のいずれかが起こった時、ビーム停止、安全棒引抜き及び警報吹鳴を行う。

ビーム高

中性子高

炉室扉開放

遮蔽扉開放

② 警報装置

次の条件のいずれかが起こった時、ランプ表示及び警報吹鳴を行う。

- ビーム高
- 中性子高
- 温度高
- 計装異常

③ 連動装置

● ビーム入射インターロック

次のすべての条件を満たさないと陽子ビームを集合体に入射できない。

- 炉室扉及び遮蔽扉が閉鎖されていること
- 圧縮空気圧が正常であること (バイパスあり)
- 安全棒が4本とも挿入されていること (バイパスあり)
- ターゲットの固定状態が良好であること
- 核計装の動作が良好であること (バイパスあり)
- 中性子計数率が基準値以上であること (バイパスあり)
- 放射線管理モニター動作が正常であること
- 安全棒の制御電源が正常であること

(バイパスあり) : 集合体を使わず、ターゲット単体で実験する場合この条件をバイパスすることができる。

● 炉室入室インターロック

次のすべての条件を満たさないと炉室に入室できない。

- 陽子ビーム入射停止状態がロックされていること
- 放射線管理モニターの動作が正常であること

● 安全棒挿入インターロック

次のすべての条件を満たさないと安全棒を集合体に挿入できない。

- 陽子ビームの入射が停止されていること
- 圧縮空気圧が正常であること (バイパスあり)
- 核計装の動作が良好であること (バイパスあり)
- 中性子計数率が基準値以上であること (バイパスあり)
- 放射線管理モニター動作が正常であること

5) 制御設備(Fig. 3.4.8)

安全棒装置	4式
方式	吸収体/燃料ドロウ置換式
挿入時間	200秒/1本
引抜き時間	0.5秒以上

反応度制御能力 4本当たり 3% $\Delta k/k$ 以上
 集合体前面には安全棒装置取付け架構が設けられる。(Fig. 3.4.9)

(4) 放射性廃棄物の廃棄施設

1) 気体廃棄設備

排風機、エアフィルタ、排気口

2) 液体廃棄設備

手洗い、配管、サンプルピット、廃液貯槽(3 m³ x 2 基)

(5) 放射線管理施設

屋内管理設備

エリアモニタ、ダストモニタ、ハンドフットモニタ、サーベイメータ

屋外管理設備

スタックダストモニタ、周辺監視設備

(6) 格納施設

鉄筋コンクリート耐火構造

寸法 東西 40 m、南北 40 m、地下1階、地上1階

設計圧力 大気圧

漏洩率 特に気密構造にはしない

遮蔽構造 常時人の立ち入る区域との境界は壁厚 2 m

地下構造部の外壁は壁厚約 50 cm

建て屋内の室・設備配置を Fig. 3.4.10 から Fig. 3.4.15 に示す。

(7) その他の附属施設

定常中性子源装置

Am-Be 3 Ci 1 式

パルス中性子発生装置

パルス巾 1 μ s、繰返し周波数 1 kHz、中性子発生数 10⁶ n/パルス、中性子エネルギー 14 MeV

検出器

検出器駆動装置

実験用集合体装荷物

冷却材模擬板 (Na、Pb - Bi)

構造材模擬板 (鉄合金)

MA、FP 模擬板、熔融塩模擬体

実験用試料 (Pu、Th、U 等)

3. 4. 4 添付図面の説明

Fig. 3.4.1 炉物理実験装置概念図

装置本体である集合体はマトリクス管水平積層構造であり鋼鉄製固定枠によって支持される。マトリクス管には、燃料体ドロワ、ターゲットドロワ、反射体、その他実験用装荷物を装荷できる。各ドロワは地震等によって位置がずれないように簡便な方法によって固定できる。集合体前面には安全棒装置及び陽子ビーム入射管、陽子ビーム入射補助管を設ける。安全棒は圧縮空気力及びモーター駆動によって水平方向に挿入・引抜きを行う。集合体は床、壁、天井からの中性子反射の影響を受け難いようにこれらから必要な距離を保って設置する。燃料体ドロワ、実験用挿入物の出入れ作業等は原則として集合体背面で行う。

Fig. 3.4.2 集合体断面図

集合体は 33 行、33 列のマトリクス構造を持ち、燃料板、ナトリウム板、等を装填した燃料体ドロワ、ターゲットドロワ及び反射体ドロワを水平方向に挿入できる。炉心領域は燃料ドロワの数量/配置によって調節できる。安全棒の挿入位置は集合体の最大実効増倍係数が 0.95 以下に抑制できる場所とする。各ドロワは地震等によって位置がずれないように簡便な方法によって固定する。本図の炉心構成では実効増倍係数は 0.98 である。

Fig. 3.4.3 燃料体及びターゲットドロワ概念図

燃料体は燃料板とナトリウム板、構造材模擬板をドロワに装填して構成する。板の種類、枚数比率は実験目的によって変更する。燃料板は 20%濃縮ウラン酸化物及び窒化物の焼結体である。表面は放射能汚染、酸化を抑制するための被膜を施す。ターゲットも燃料体と同様にドロワを利用して組み立てる。ターゲット物質候補材であるタングステンは単体で板状に仕上げる。Pb-Bi 及び Pb はステンレス被覆管等に収納する。温度センサー付きの板もある。

Fig. 3.4.4 陽子ビーム入射方法概念図

直径 52 mm のステンレス鋼製ビーム入射管はビーム入射補助管を介して集合体前面から炉心内部にあるターゲット表面まで届く。ビーム入射管は加速器の真空構造と 1 体となっている。ビーム入射補助管を外して集合体外部にターゲットを置けばターゲット単独での特性実験を行える。ビーム入射管及びビーム入射補助管の端部は陽子ビームが透過しやすいように薄板とする。

Fig. 3.4.5 燃料体交換装置

燃料ドロワやターゲットドロワはかなり重いので集合体への装荷・取出しには交換装置を利用する。交換装置は集合体背面にあって、自動制御により上下左右にドロワを移動させて所定のマトリクス位置に一致させる。ドロワは燃料貯蔵室、ターゲット

保管室で調整、組み立て、移送台車を使って交換装置まで運ばれる。

Fig. 3.4.6 燃料体移送装置

本交換装置は燃料ドロワ、ターゲットドロワをそれぞれの貯蔵室から取り出し、炉室の集合体背面まで移送するのに用いる。レール上または直床上電動自走式である。電動油圧昇降動作が可能である。

Fig. 3.4.7 燃料体交換装置及び燃料体移送装置の配置図

移送ルートについては Fig.3.4.10 と整合性があるように定める。

Fig. 3.4.8 安全棒装置概念図

安全棒は可動式の燃料ドロワであり、実験中は炉心に挿入する。引き抜くことによって集合体の実効増倍係数を **0.95** 以下に抑制できる。設置の主目的はターゲット交換時の安全性を確保するための反応度抑制である。なお、安全棒は炉心領域から急速に引抜ける構造とすることにより、燃料体装荷時の万一の臨界接近を防止するのにも役立つ。ワンロードスタックマージンの考え方は採用しない。安全棒は4体あり、それぞれが独立の駆動装置によって駆動される。駆動源は圧縮空気及び電動機である。

Fig. 3.4.9 安全棒装置取付け概念図

集合体のビーム入射側には安全棒装置の取付け架構を設ける。集合体との相対位置が狂わないことが必要であるので、ベース構造、架構とも、十分な剛構造とする。

Fig. 3.4.10 建屋配置図 地下1階平面図 (Fig. 3.4.15 の後で一括説明)

Fig. 3.4.11 建屋配置図 地上1階平面図 (Fig. 3.4.15 の後で一括説明)

Fig. 3.4.12 建屋配置図 南北立面図 (Fig. 3.4.15 の後で一括説明)

Fig. 3.4.13 建屋配置図 東西立面図 (Fig. 3.4.15 の後で一括説明)

Fig. 3.4.14 建屋配置図 地下1階管理区域設定図 (Fig. 3.4.15 の後で一括説明)

Fig. 3.4.15 建屋配置図 地上1階管理区域設定図

陽子ビームは地下約 **3 m** の深さで水平に建屋に導かれる。建屋は地上1階地下1階の鉄筋コンクリート造りであり、中性子核物理実験施設と建屋を共有している。地階には炉室、作業室、制御室、核燃料貯蔵室、ターゲット、模擬物質保管室、非管理区域用換気空調機室等がある。炉室天井は高く、一階との間で吹き抜けとなっている。一階には測定室、出入り管理室、管理区域換気空調機室、電気室、事務室、玄関等がある。放射線管理区域に指定されるのは、非管理区域用換気空調機室を除く地階の全エリア及び一階の管理区域換気空調機室である。管理区域の空気はフィルターを通過し、モニターしつつ管理区域換気空調機室の排風機を使って屋上の排気口から建屋外に放出する。

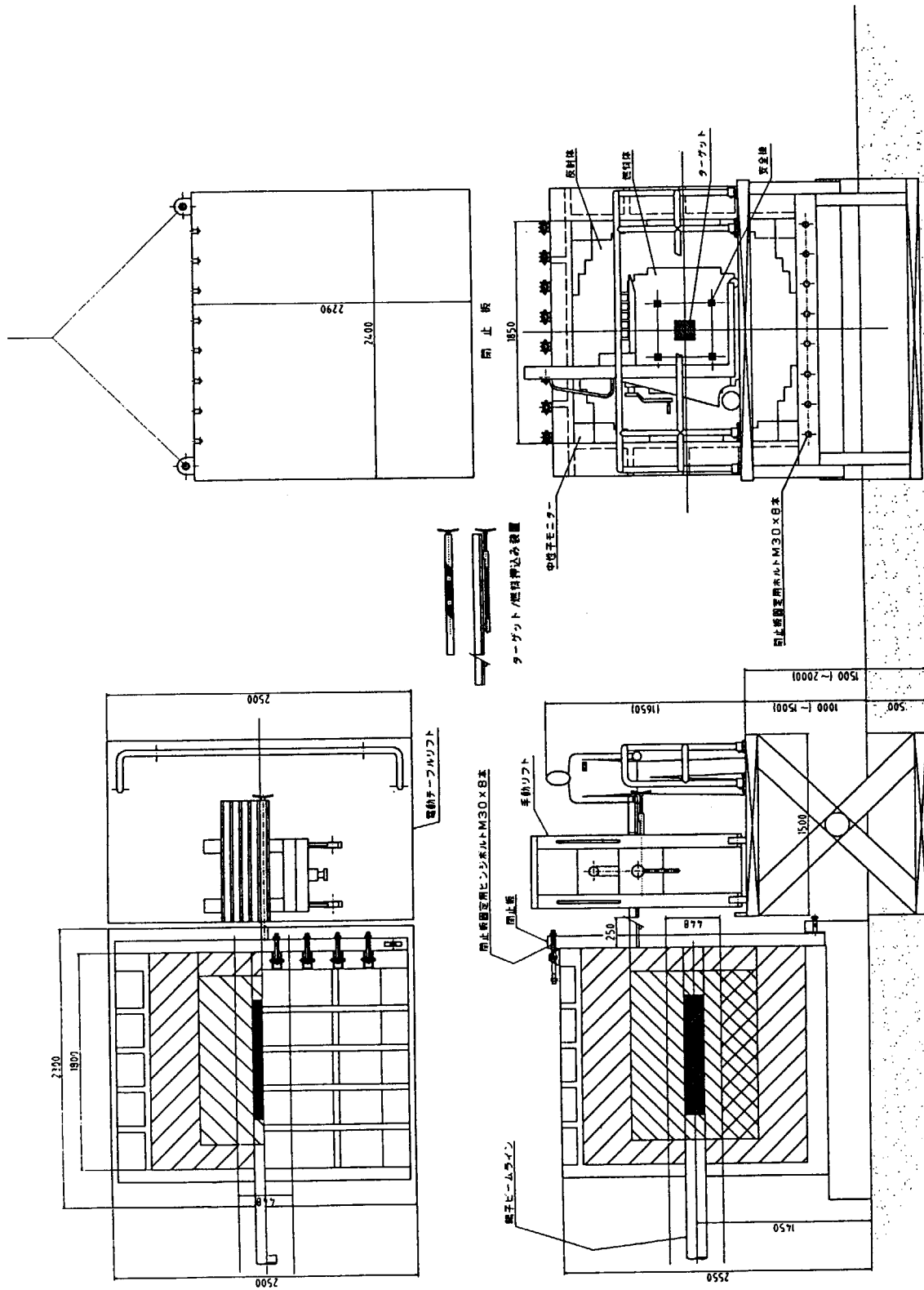
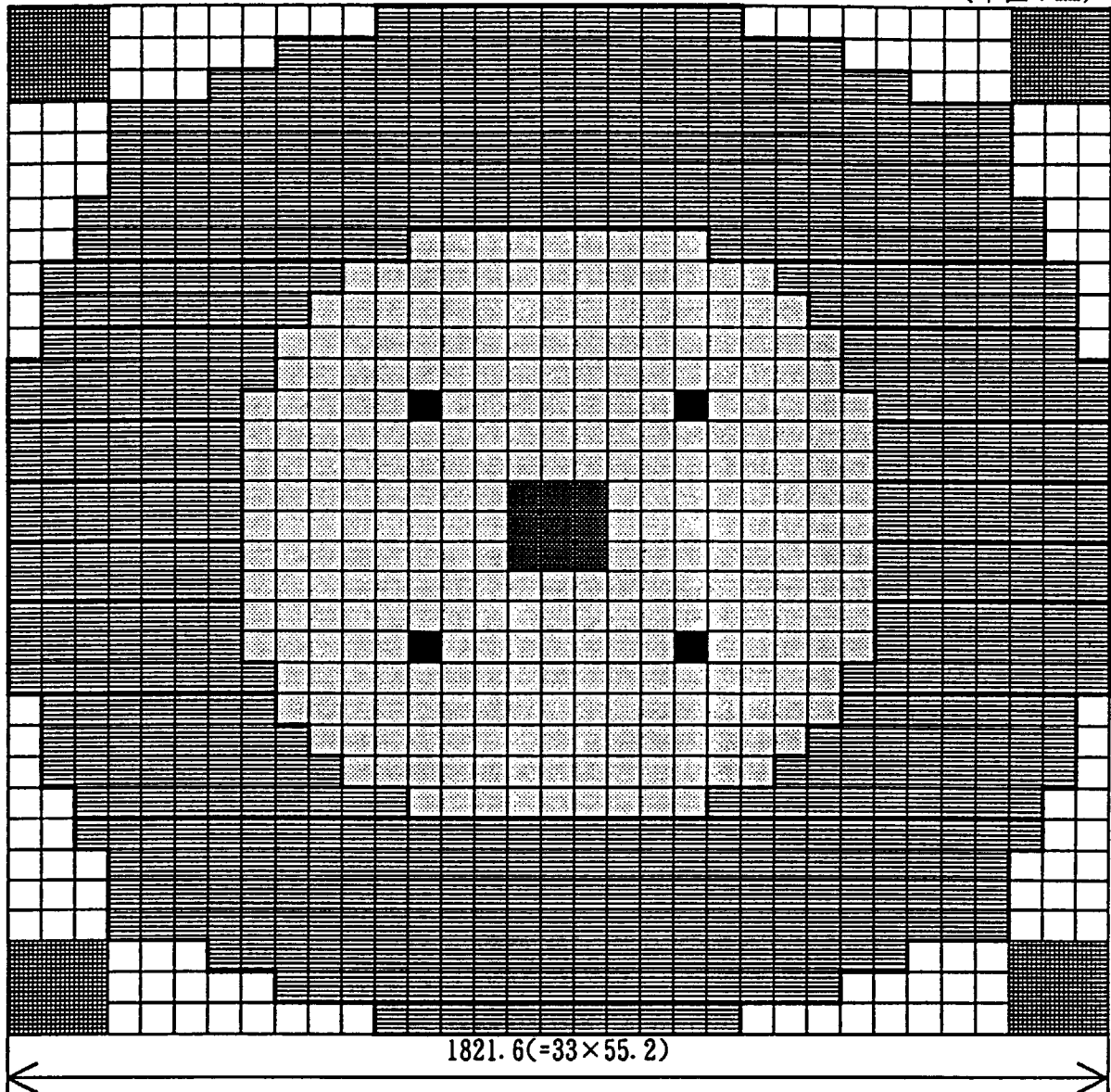


Fig. 3.4.1 炉物理実験装置概念図

(単位: mm)



- | | | | |
|---|-------------|---|---------------|
|  | 燃料(U濃縮度20%) |  | ターゲット(タングステン) |
|  | 反射体(SUS) |  | 安全棒 |
|  | 中性子モニター | | |

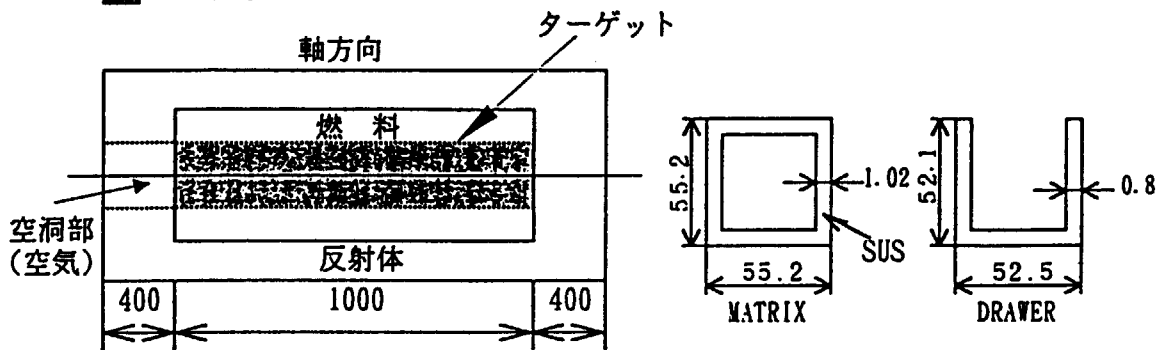
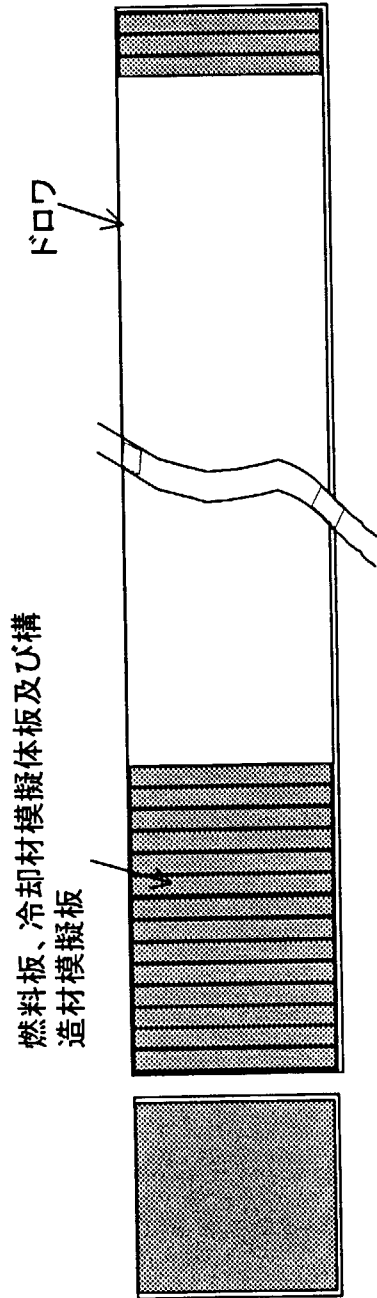
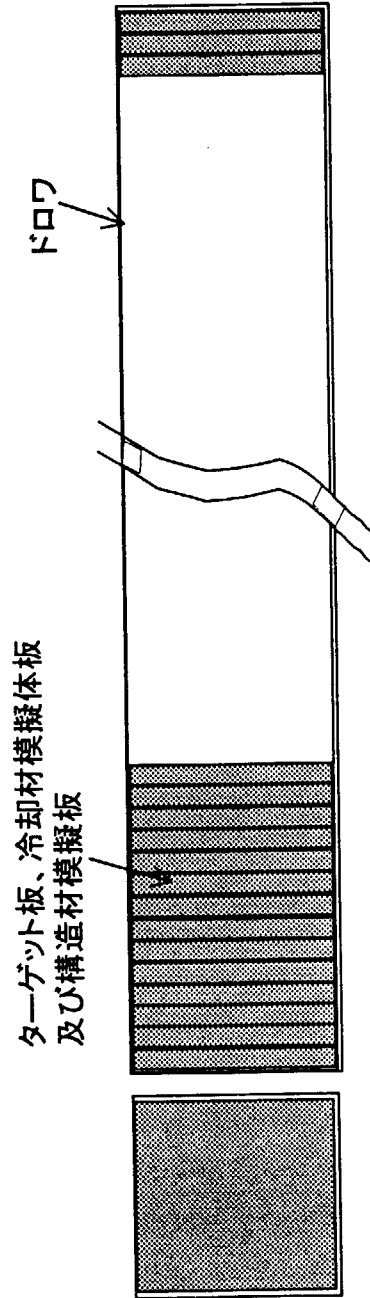


Fig. 3.4.2 集合体断面図



燃料体ドロワ概念図



ターゲットドロワ概念図

Fig. 3.4.3 燃料体及びターゲットドロワ概念図

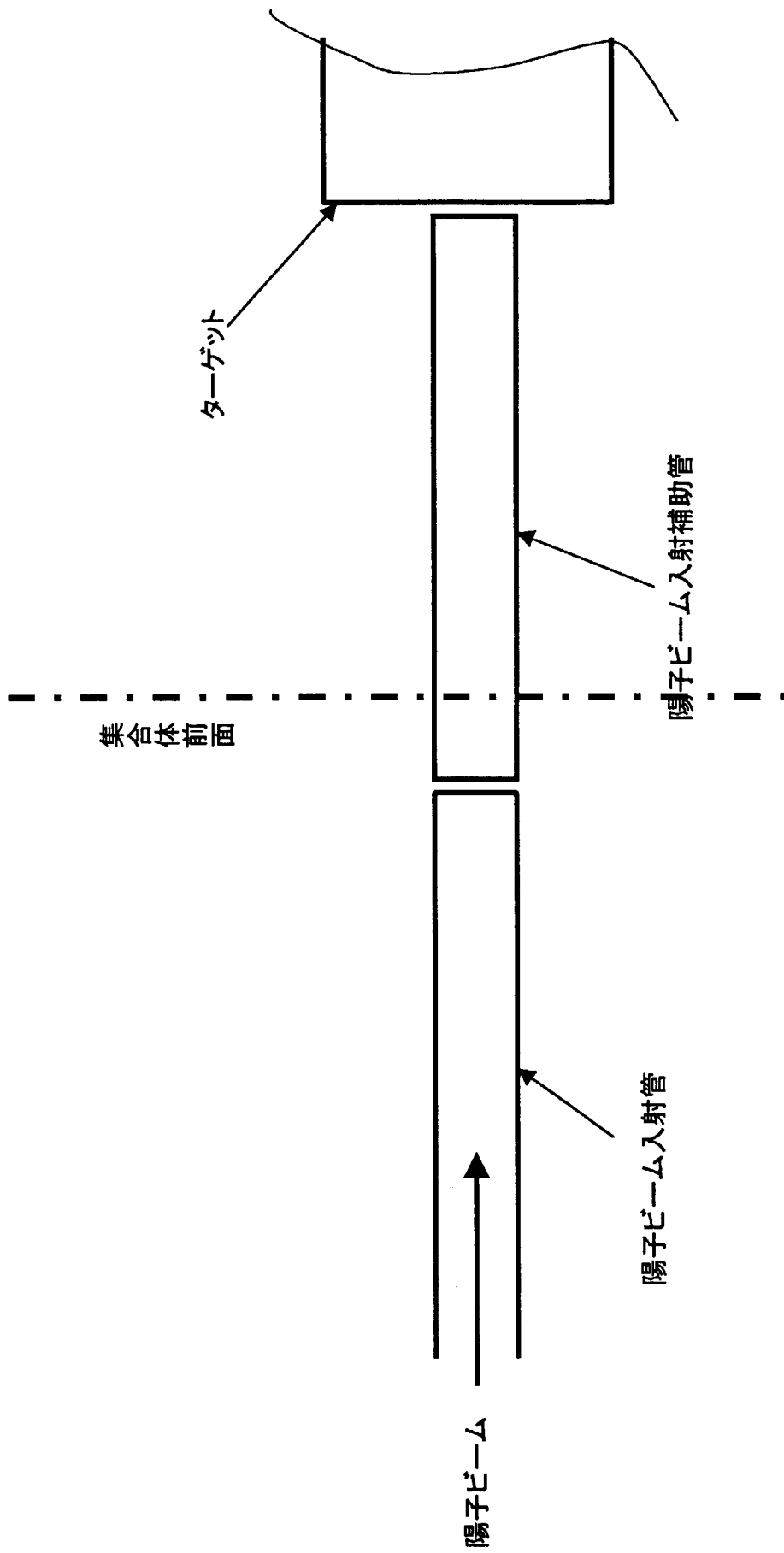


Fig. 3.4.4 陽子ビーム入射方法概念図

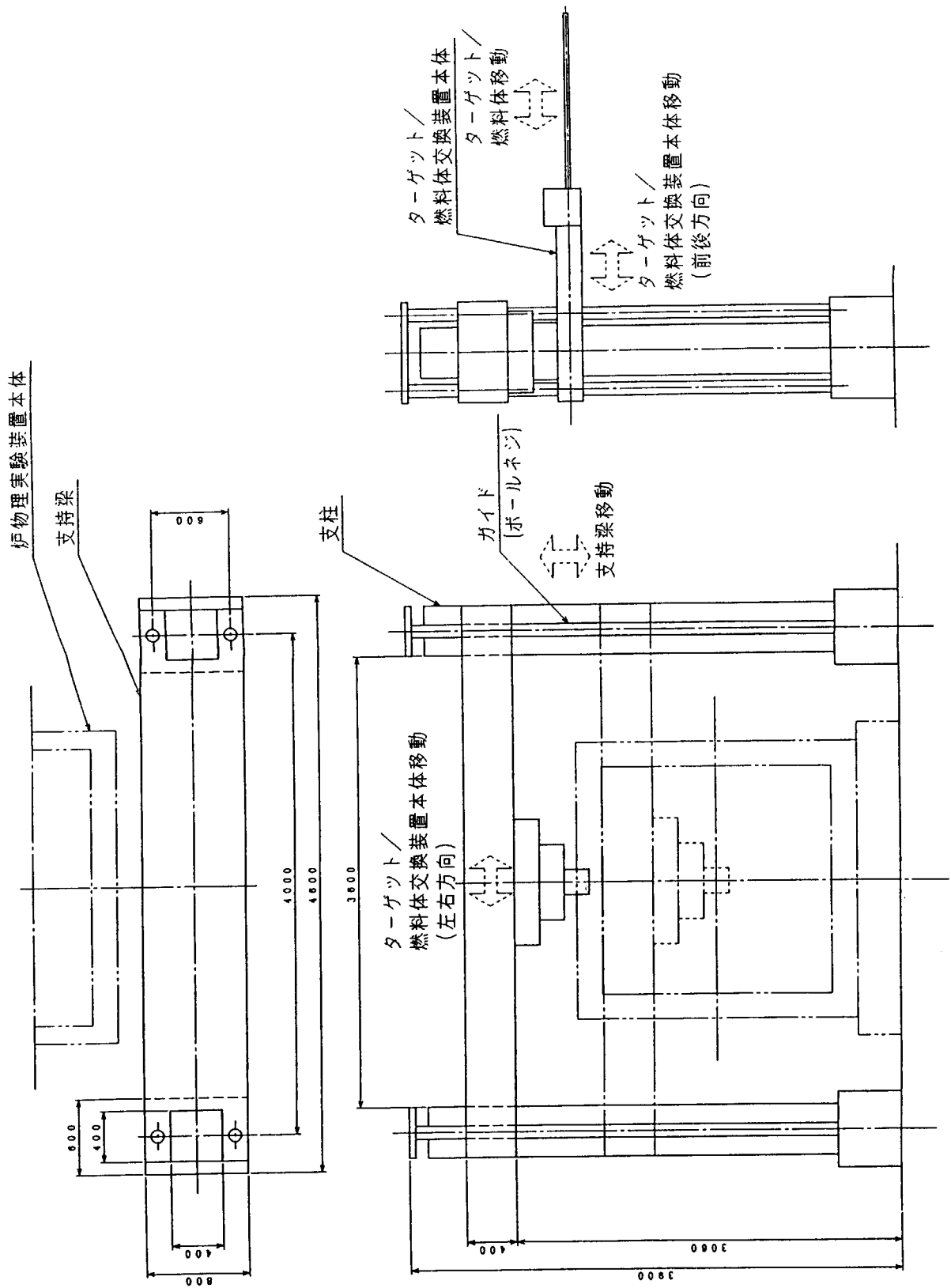


Fig. 3.4.5 燃料体交換装置

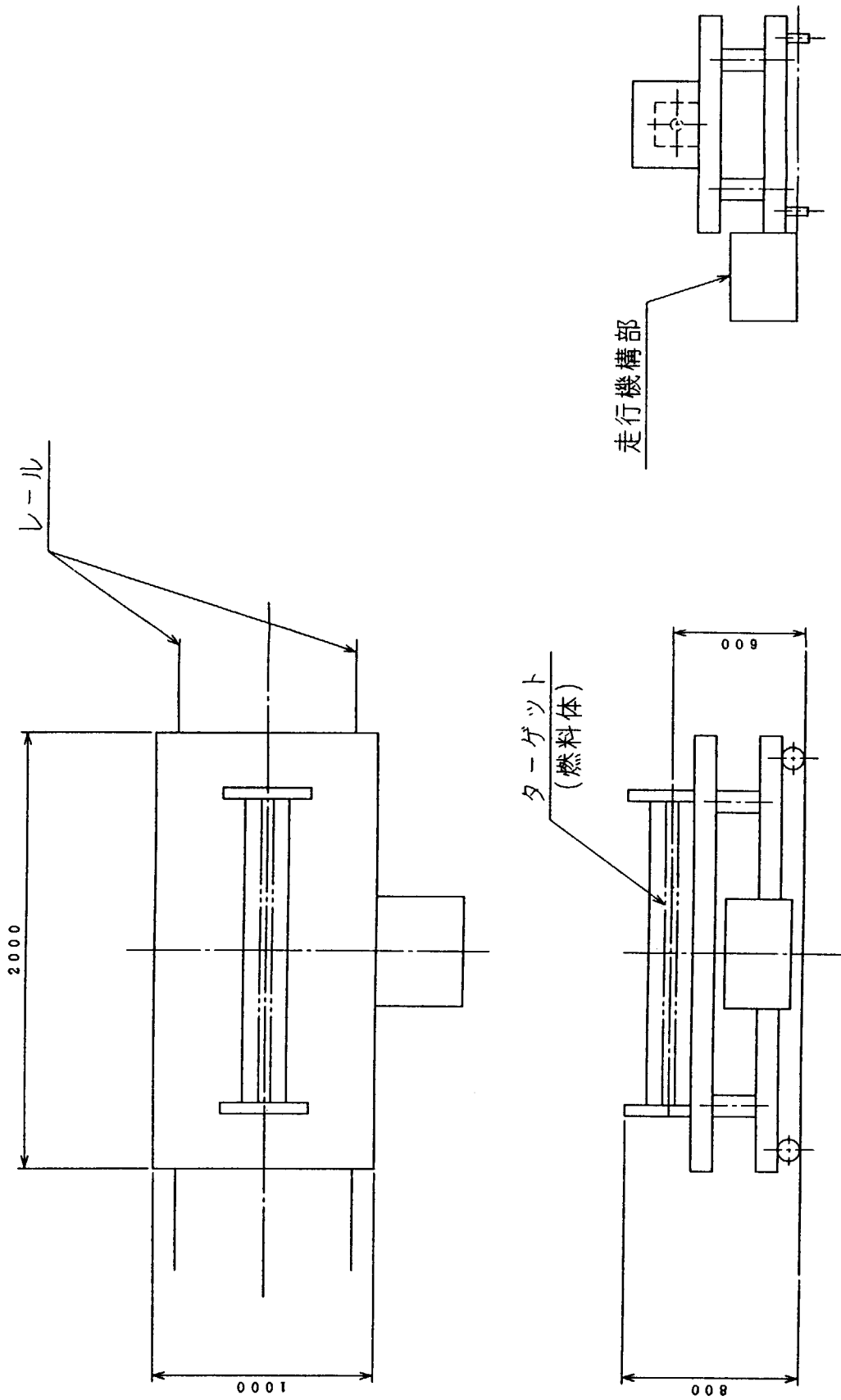


Fig. 3.4.6 燃料体移送装置

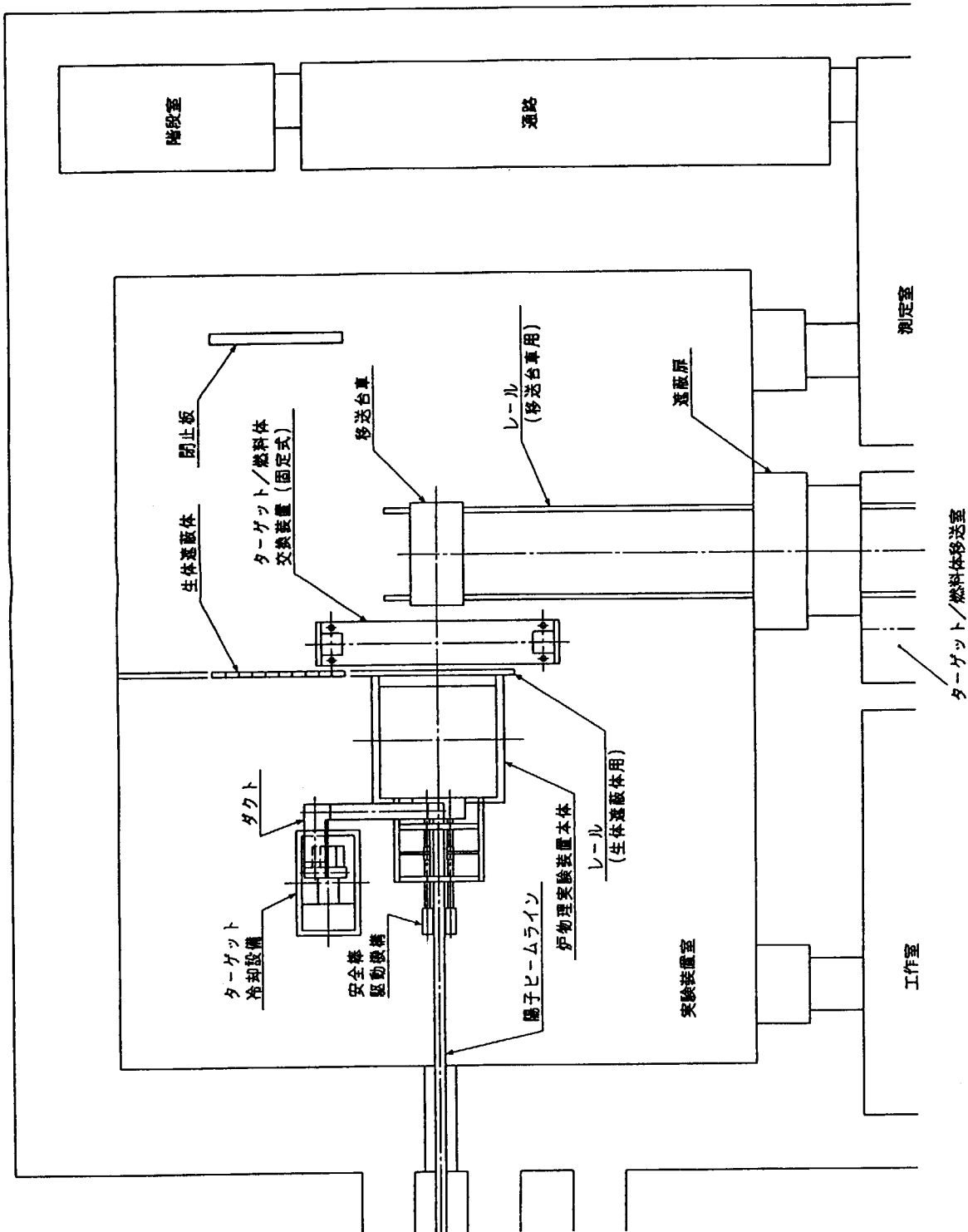


Fig. 3.4.7 燃料体交換装置及び燃料体移送装置の配置図

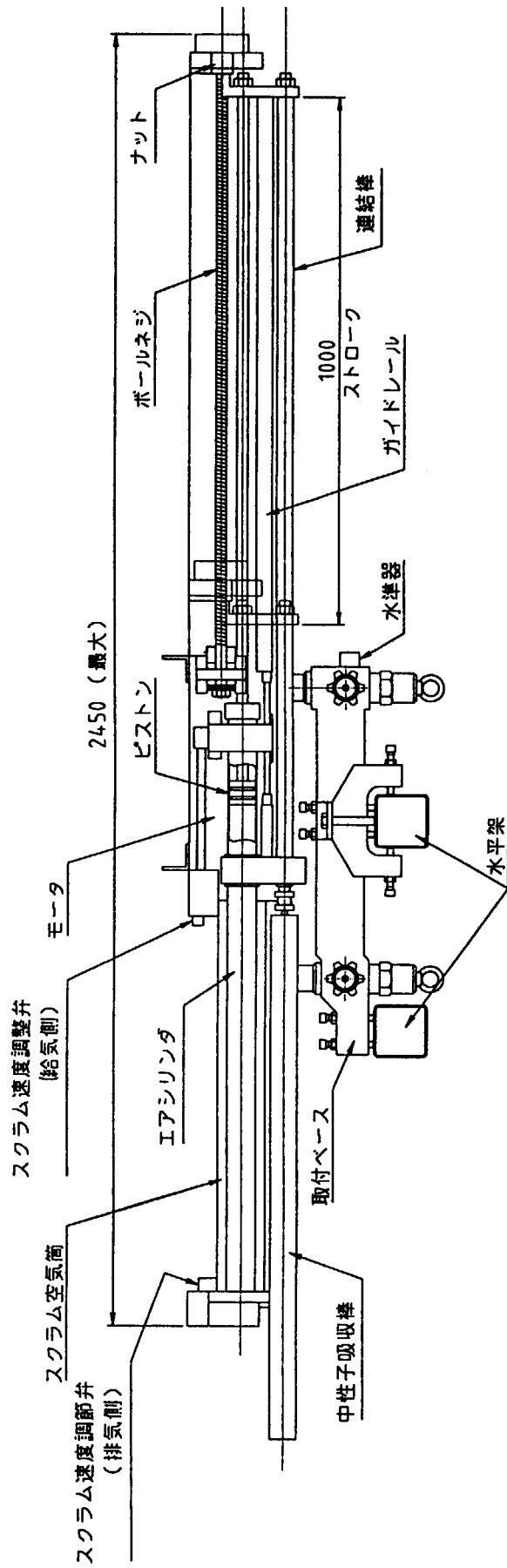


Fig. 3.4.8 安全棒装置概念図

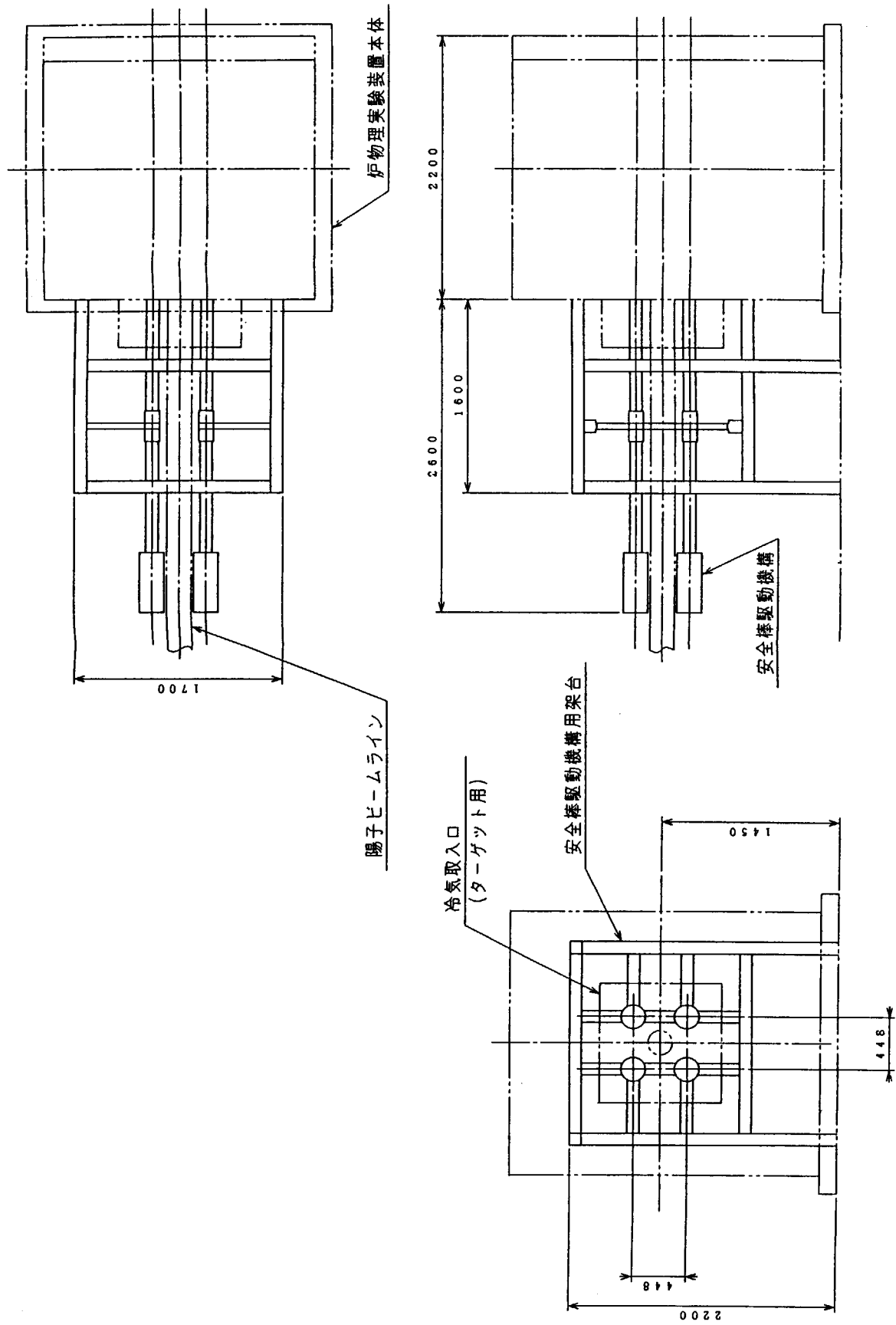


Fig. 3.4.9 安全棒装置取付け概念図

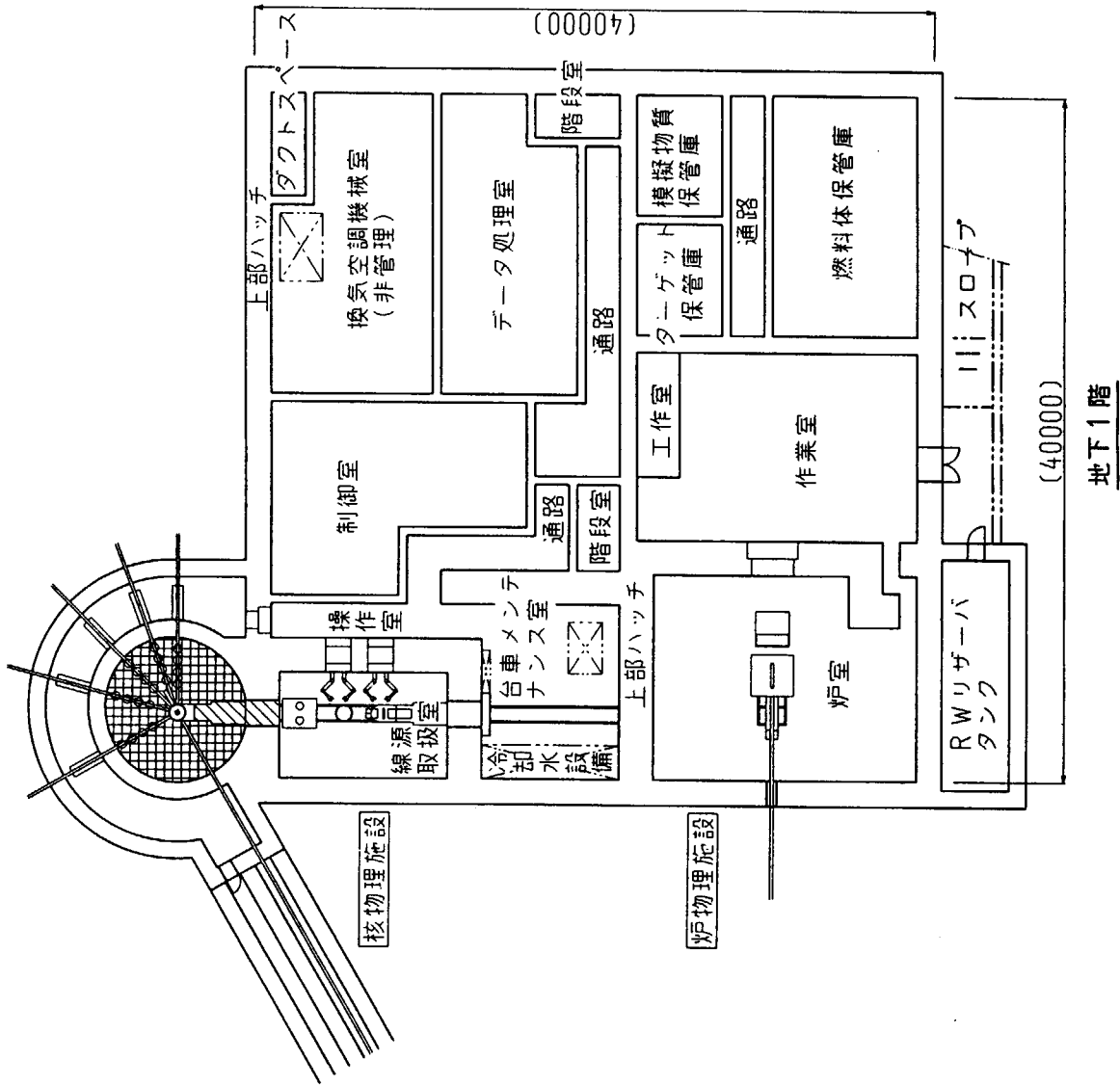


Fig. 3.4.10 建屋配置図 地下1階平面図

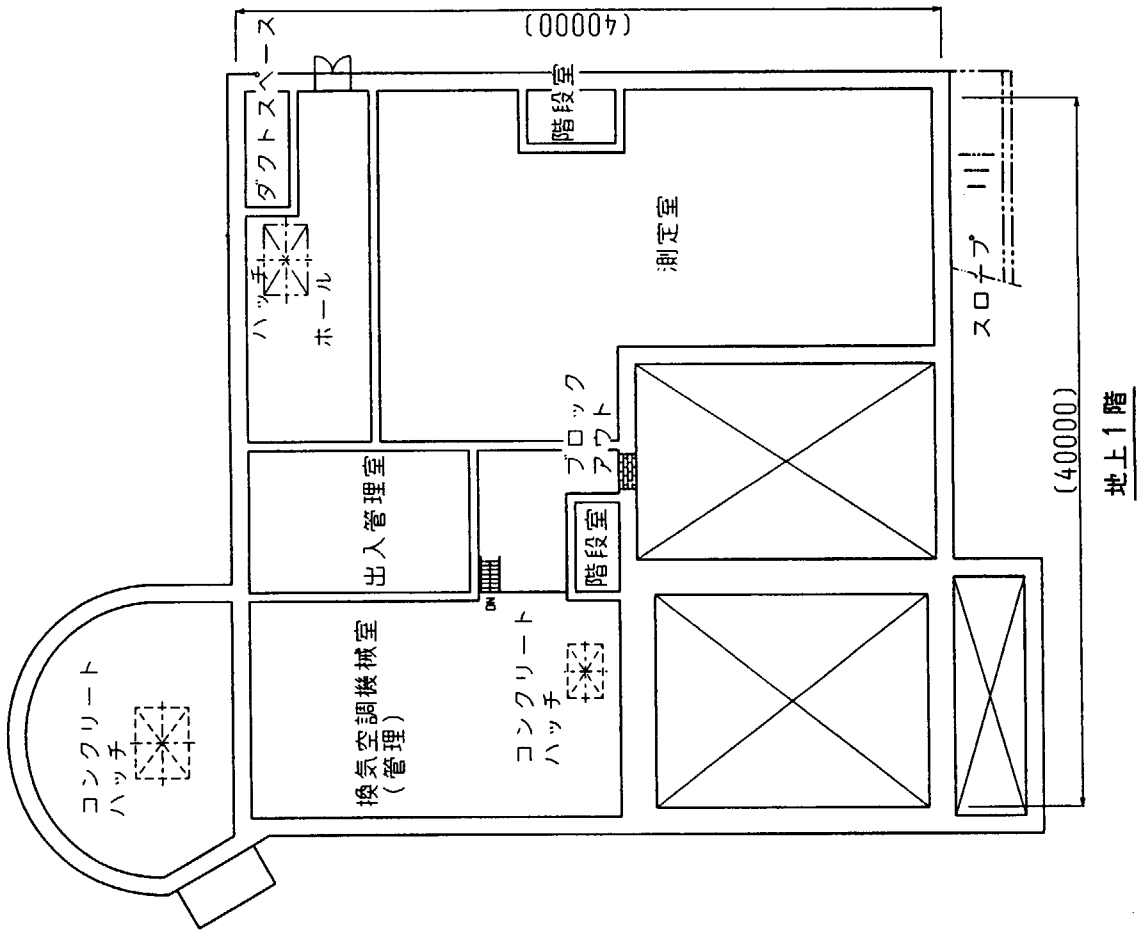
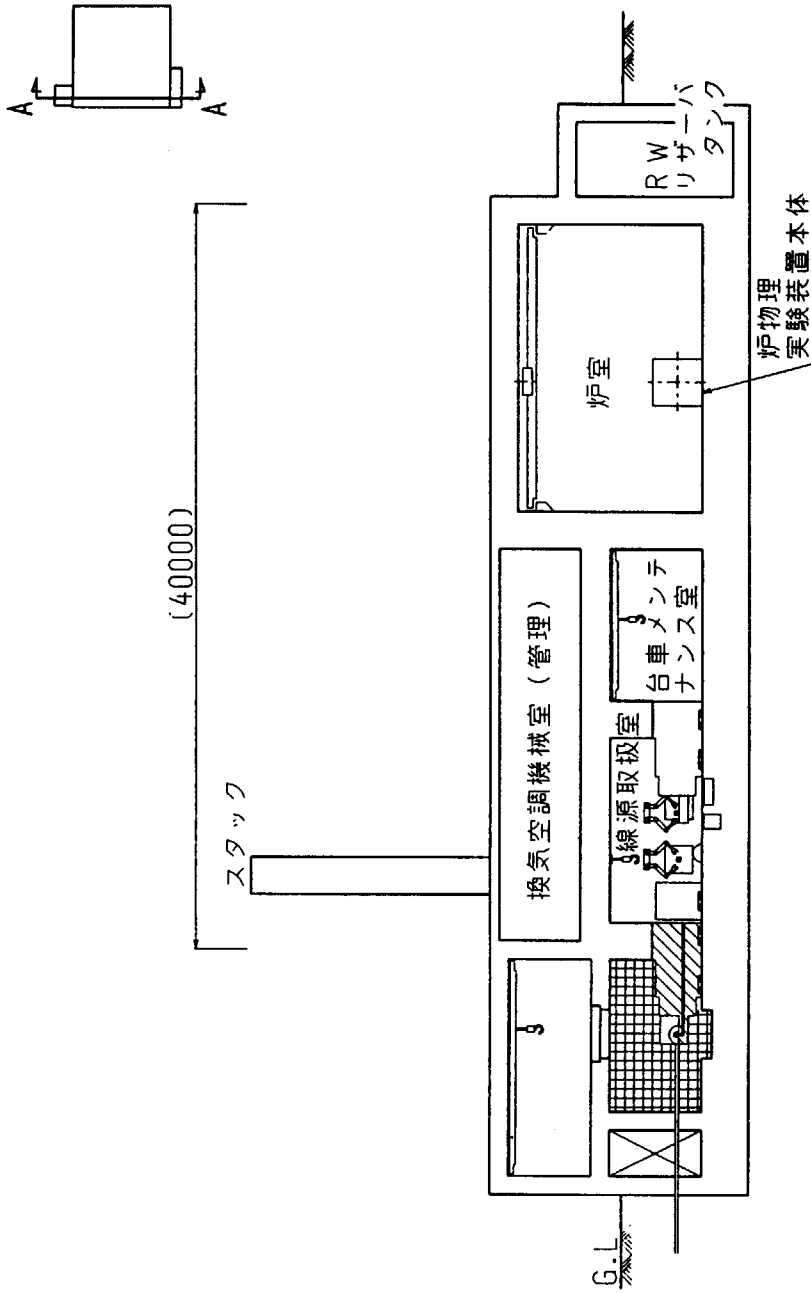


Fig. 3.4.11 建屋配置図 地上1階平面図



A-A断面

Fig. 3.4.12 建屋配置図 南北立面図

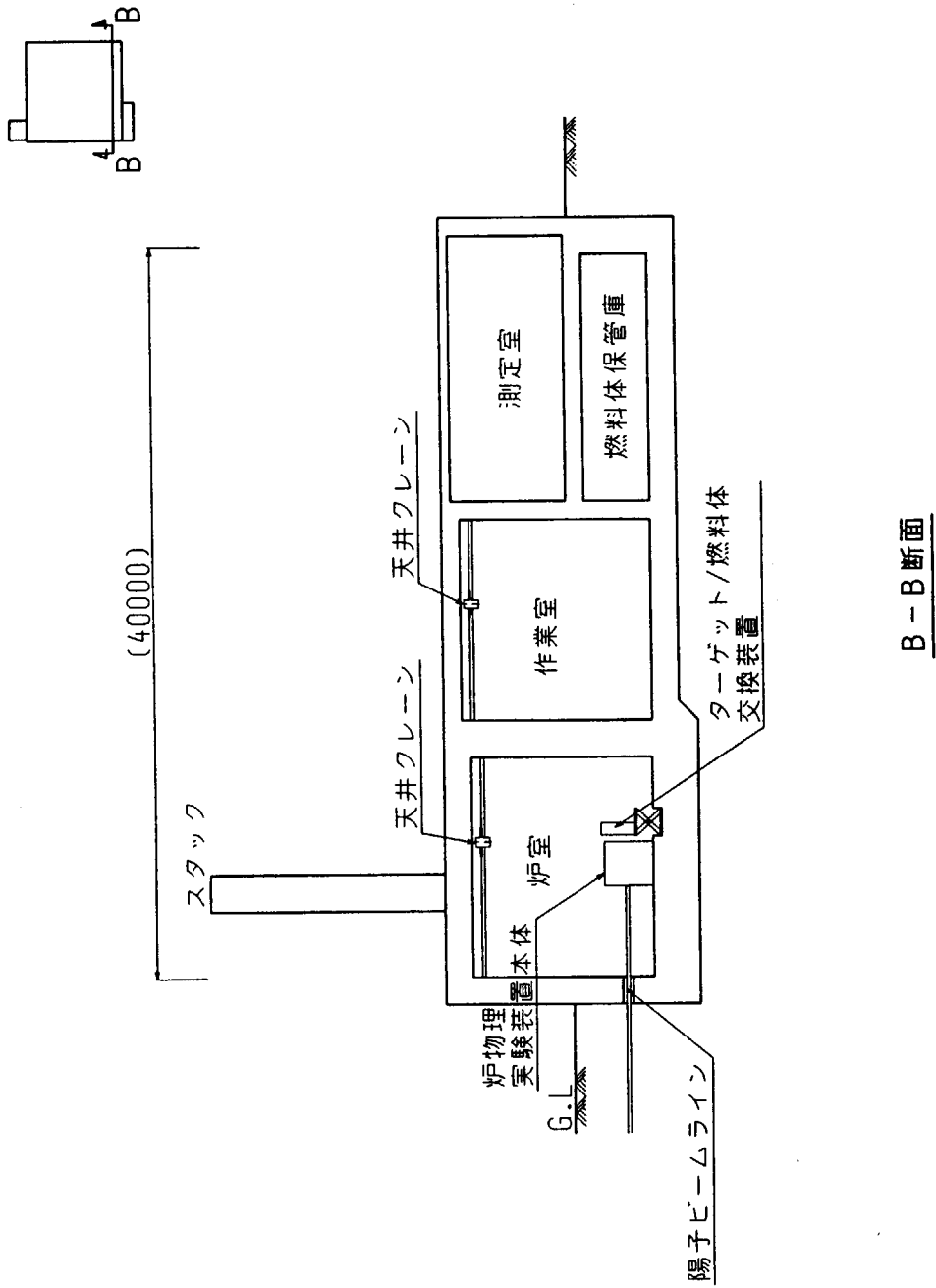


Fig. 3.4.13 建屋配置図 東西立面図

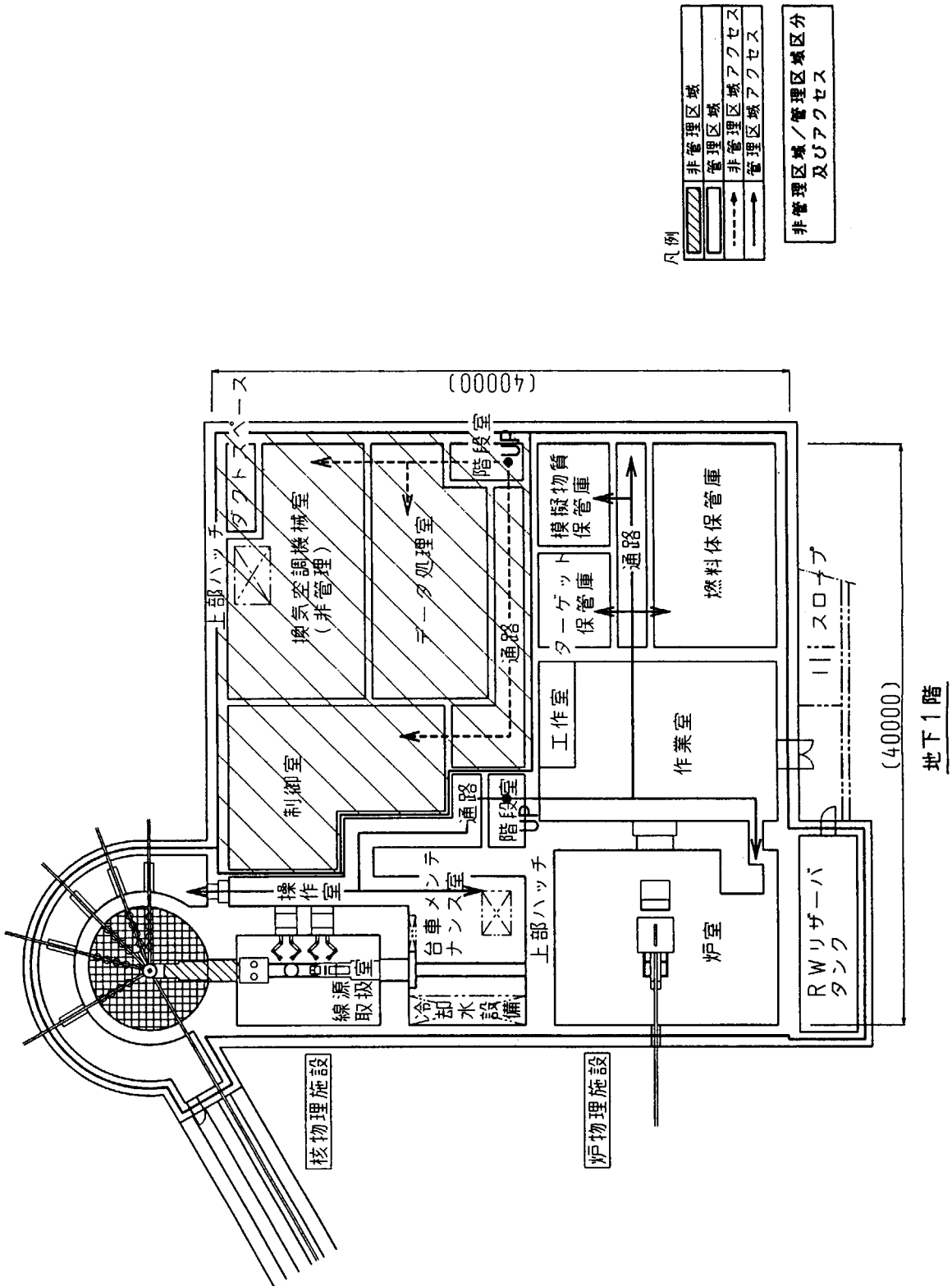


Fig. 3.4.14 建屋配置図 地下1階管理区域設定図

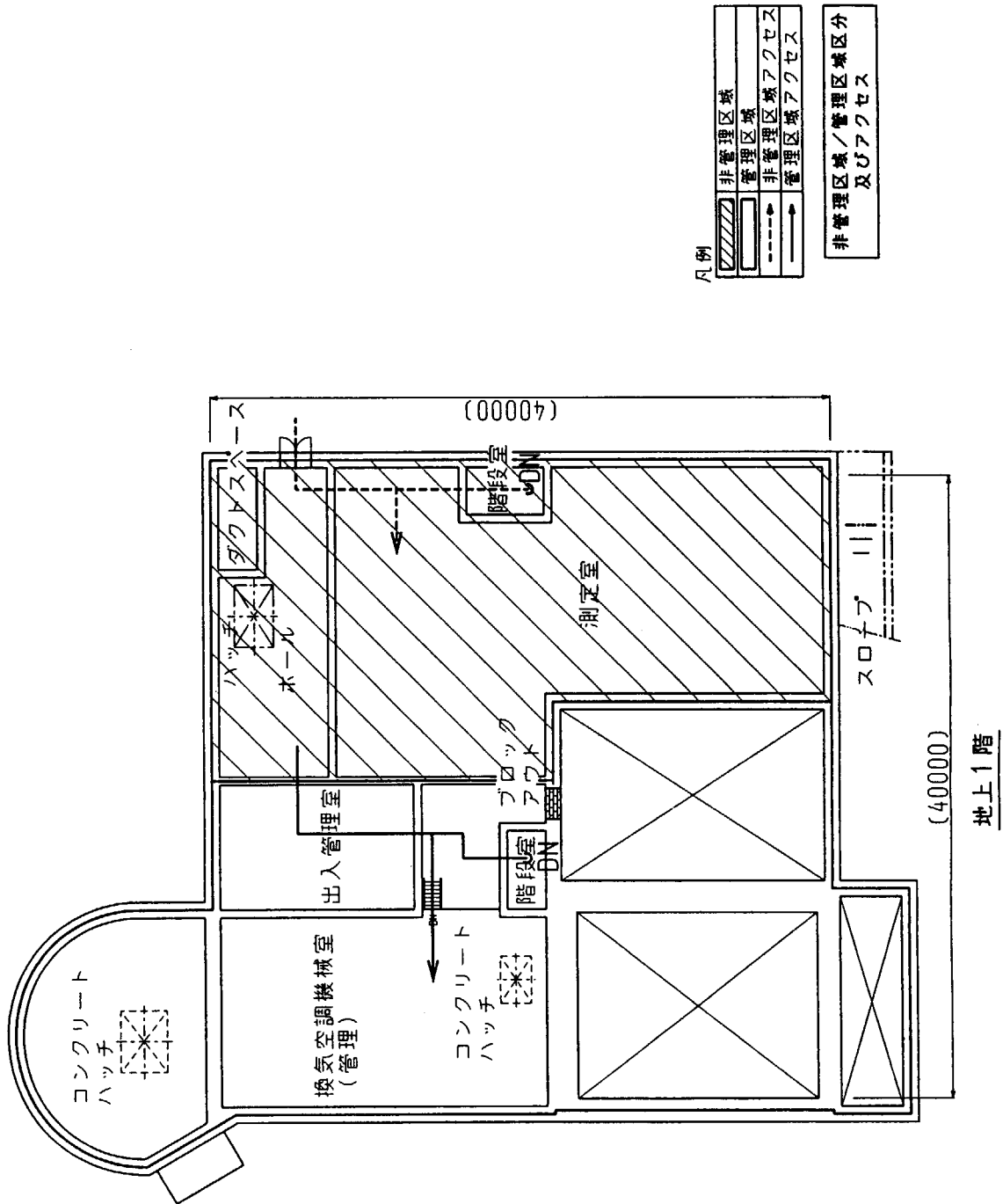


Fig. 3.4.15 建屋配置図 地上1階管理区域設定図

3.5 材料照射試験施設

3.5.1 核破碎中性子照射場

核破碎中性子は、数百 MeV の高エネルギーまでに及び極めて幅広い中性子スペクトルと大電流化により極めて高い中性子束を発生できる特徴を備えている。さらに、照射場への接近性が良いこと、中性子発生条件の制御性が良いこと等から材料照射損傷の基礎研究等の材料科学から原子力システム用材料の研究開発等までの幅広い材料照射研究での利用が期待される。

核破碎中性子による照射場の特性はターゲット形状及びその周囲の配置等により異なる。水冷却のターゲットを考えた場合、材料としては重金属の固体材料としてタングステンやタンタル等が考えられる。以下に、中性子照射場としての特徴を述べる。

(1) 中性子エネルギースペクトル

高エネルギー陽子による核破碎によって生成する中性子のエネルギースペクトルはターゲットの種類により多少異なるが、 $d-T$ 反応や重陽子-リチウム ($d-Li$) ストリッピング反応を利用する中性子源の中性子スペクトルに比べ、そのエネルギー幅が広く、高エネルギー部は数百 MeV にまで及ぶが、平均エネルギーは比較的 low、数 MeV 程度以下である。Fig. 3.5.1 に鉛ターゲットに 1.5 GeV の陽子ビームを入射した場合の中性子スペクトルと他の照射用中性子源で得られる中性子スペクトルの比較を示す。核破碎中性子スペクトルのエネルギー幅は極めて広いが、そのピークエネルギーは 1 MeV 程度であり、材料照射試験に必要な中性子束という観点では、高速炉の中性子スペクトルを少し硬くしたスペクトルである。

核破碎中性子源では、発生する中性子以外に高エネルギー中性子との反応で生成する陽子、ミューオン等の 2 次粒子、 γ 線が発生する。また、高中性子束領域では減速した 1 次陽子が混入してくる。従って、その影響について考慮をする必要があるが、これらの陽子や γ 線の線束は中性子に比べ桁違いに低い。

(2) 中性子束分布

核破碎中性子源の特徴は他の加速器型中性子源に比べ、中性子発生効率が高いことである。Fig. 3.5.2 に直径が 5 cm と 10 cm の円柱形状の長さ 80 cm のタングステンターゲットに 1 mA の陽子ビーム (ビームスポット直径: 2 cm) を入射させた場合について、ターゲット周囲での中性子束強度を図示した結果を示す。但し、ターゲット注の冷却水の体積割合を 40% としており、実際より少し多いため中性子の生成密度が低めに出ることに注意する必要がある。中性子束の高い領域はターゲットの軸方向 (ビーム方向) に沿ってビーム入射面に近い領域であり、中性子束が $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 以上の試験体積は各々約 2 リットル及び約 0.7 リットルである。また、 $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 以上の領域はどちらも約 10 リットル以上になる。一方、弾き出し損傷量については、各々の中性子束に対しておおよそ 5 dpa/y 及び 2 dpa/y が

対応する。

このように細いターゲットでは高い中性子束領域が得られるが、全中性子生成量は太いターゲットの方が多い。材料照射には高い中性子束が要求されるので、細いペンシル型と呼ばれるターゲットが用いられる。ターゲット径を細くすれば利用可能な最大中性子束・最大損傷率を上げることは可能であるが、ターゲットの前面入射面の材料損傷とともに1次陽子の照射場への混入が増える。

(3) 材料損傷パラメータ

材料照射効果という観点では、中性子束、中性子照射量、スペクトル等ばかりでなく、これらが材料に直接(1次的に)及ぼす効果である材料損傷パラメータ(すなわち、弾き出し損傷率、ガス状核変換生成物生成率等)が重要である。

核破砕中性子のスペクトルは核分裂型のスペクトルに加えて、その強度はMeV領域に比べ2桁程低い数百MeVまでの高エネルギー成分をもっている。このため、中性子の弾き出し効率は核分裂炉のそれに比べ大きい。また、核分裂で得られる中性子のエネルギーを越える領域では、He等のガス状核変換生成物生成の反応断面積が大きくなっていくので、生成He量が増え、He/dpaが高速炉照射に比べ大きくなる。(但、HFIRでは、ステンレス鋼中のNiの熱中性子吸収反応、He生成反応の2段反応により多量のHeが生成する。) Fig. 3.5.3に核分裂炉、d-T型中性子源(FNS、RTNS)、d-Li型中性子照射施設(IFMIF)、核融合炉及び本材料照射施設におけるFe中のHe生成率と弾き出し損傷率との関係と比較して示す。この図より、核破砕中性子照射施設である本施設は核融合炉と核分裂炉との中間的特性を持つことがわかる。

(4) 発生中性子の時間構造

「中性子科学研究計画」における大強度加速器の陽子ビーム加速モードは第1期ではパルス運転(1.5GeV、1mA)が、第2期では連続ビーム運転が検討されている。

第1期のパルスビーム加速モードでは、マクロ構造として50Hz、2msの幅のビームが取り出され、更にその各々のパルスはナノ秒程度のパルス幅と間隔のマイクロ構造(ビーム休止時間は8msとなる。)が想定される。一方、連続ビーム運転では、ナノ秒程度のマイクロ構造を有するパルスビームがマクロ構造を持たず連続的に加速される。

パルス加速モードで材料照射を行う場合、発達する照射損傷組織や照射効果にはパルス照射効果を考慮する必要がある。すなわち、生成する点欠陥の寿命(温度により異なるが、400°C付近のステンレス鋼中の格子間原子の寿命は 10^{-6} s程度、空格子の寿命は 10^{-1} s程度である。)を考慮すると 10^{-6} s程度よりも長いビーム休止期間があると点欠陥の濃度が連続ビーム照射の場合とは異なり、その結果、連続照射により形成される損傷組織とは異なった損傷組織の発達や照射効果が生ずると言われている。一方、連続ビーム運転では、マイクロ構造によるビーム休止時間が点欠陥の寿命より十分に短いので、連続ビーム照射の場合と同様の損傷組織となると考えられる。原子力システムではその使用条件が一般的に連続ビーム照射であり、従って、損傷効果を実証するには、その材料の照射は連続ビー

ム運転（ビームの休止期間が μ 秒以下）で行う必要がある。

一方、照射によって生成する点欠陥や励起についての過渡的挙動等の照射損傷基礎過程に関しては、高い強度のパルス照射により、これらの挙動が容易に測定可能となり、照射損傷基礎研究の発展につながると予想される。（この場合、研究対象に依存するがナノ秒レベルのパルス幅が望まれる。）

(5) 照射場への接近性等

本施設のような加速器型中性子源を用いる材料照射施設では、原子炉のように炉心照射場に持ち込む際の安全規制を受けない上、照射場への接近性も高く、装置の耐照射性及び生体遮蔽等が確保されれば、種々の照射実験を行うことが可能である。このため、原子炉では実施できなかった繊細な照射実験（極低温照射等を含む）や高度なその場実験が実施できる。（高速炉では周囲のNaの温度が400°C程度なので、低温での照射は特別な低温照射設備が必要となり大きな照射体積等を確保するのは困難。）

3.5.2 中性子照射施設の検討

(1) 施設概念

中性子照射施設の検討を行うために、以上の中性子場特性を基に施設概念の構築を行った。材料照射施設は、大強度陽子加速器により加速した陽子ビームを核破砕用の金属ターゲット（W、Pb等）に導き、核破砕中性子を多量に発生させ、種々の材料照射研究を行う。このため、材料照射施設は中性子発生用の金属ターゲット及び照射試験のための照射セル等を配置する照射ターゲット室が施設の中心である。これに、ターゲットアSEMBリー保守、試料照射装置と照射キャプセルの解体・組立て等を行うホットセル、使用済みターゲット貯蔵室、試料照射装置及び照射済キャプセル等貯蔵室、計測・実験制御室、実験準備室等から構成される。但し、照射後の試料の測定試験は、照射後試験施設へ移送して行うものと考えこの施設の中には含まない。

照射ターゲット室は高エネルギー陽子と中性子を遮蔽するためターゲット・照射セルを鉄遮蔽体で取り囲んだものを想定する。照射セルは必要最小限の大きさにし、遮蔽体の大きさ及びその放射性物質の生成量等を極力抑える。また、試料照射装置（遮蔽プラグの先端に照射キャプセルが取り付けられる）の交換が容易で、計装照射及びその場実験のための各種計装・制御装置へのアクセスが良い必要がある。試料照射装置は遠隔操作で照射ターゲット室から上部へ引き上げ、試料照射装置及び照射キャプセル解体・組立て用ホットセルで遠隔操作で解体を行う。照射キャプセルの装荷については、キャプセルの試料照射装置への組込みをホットセルで行い、遠隔操作でテストセルへ装荷する。また、計装照射及びその場実験のための各種計装・制御は計測・実験制御室及びホット計測室で行う。

以上の施設概念を基に施設の検討を進めた。Fig. 3.5.4にその施設概念を示す。

(2) ターゲット及び照射ターゲット室の検討

1) ターゲット

重照射施設用ターゲットでは以下の特性を持つターゲットが必要である。

(1) 硬いスペクトルを持った最大中性子束を発生する

目的によってスペクトルを調整する必要がある。例えば、加速器駆動炉や消滅処理システムと核融合炉材料では、照射に適切なスペクトルは異なるであろう。

(2) 高中性子束領域の有効利用体積が大きいこと

(3) 稼働率 50%以上を確保できる寿命と保守性の確保

これらの条件と、先に述べた中性子照射場特性とから、ターゲット構造を検討した。

ターゲットは、構造を簡単にするため固体ターゲットで水冷却を考えると、ISIS 型の固体ターゲットの径を細くした、Fig. 3.5.5 に示すような冷却面を交互に持つプレート積層型の構造について冷却性能の検討を行った。この概念について必要な流路構造と流速を評価した。ステンレス鋼における照射損傷条件からの類推として 400°C以下を運転温度ととし、Fig. 3.5.6 に示すようにターゲット前面で 5mm 厚さのタングステンプレートに対し流路 2.5mm に流速 5m/s で、温度を 400°C以下にできることを確認した。

ターゲットの周りには照射に必要なスペースを確保し、全面を鉄の遮蔽体で取り囲む構造とした。ターゲットは側面の遮蔽体を台車構造にし、それにターゲットを固定して、冷却配管類は遮蔽体のなかを通す構造とした。この遮蔽体台車を引き抜いた状態で、ターゲット先端部がホットセル構造の場所に位置するようにし、そこでターゲットの解体保守を行えるようにした。このような構造は ISIS のターゲット保守方式と類似のものを想定した。

。

2) 実験配置

円柱型ターゲットにまたがるように、近接して照射キャプセルを設置し、その中に照射試料、環境制御のための He ガスによる冷却・雰囲気ガス制御用配管、また、パルスではその場測定のための信号線を引く。これらは遮蔽体プラグを通して挿入される。

これらに必要な実験装置として以下のものが考えられる。

(1) 温度雰囲気制御装置

(2) ガス雰囲気制御装置

(3) 極低温冷却器

(4) 各種計測機器

電気計測、光計測、音響計測等

3) ターゲット室の構造

構造はターゲットを鉄遮蔽体で取り囲み、ターゲット台車を水平に引き抜くとともに、照射装置を付けた遮蔽プラグが上から挿入される。また、照射用気送管や陽子ビーム導管と真空窓が遮蔽体内に設置される。この時、遮蔽体重量とその放射化を極力抑えるため照射ターゲット室を必要最低限の大きさにする。

遮蔽体構造では、NMTC/JAERI と MCNP-4A による計算では、約 4 m の鉄遮蔽で 1 Sv/h ま

で線量を落とすことができることが分かった。しかし、放射線従事者レベルまで落とすには更に5桁遮蔽する必要がある。このためには、鉄を追加するよりはコンクリートで遮蔽するのが効率的であり、鉄遮蔽の外側で1/Eスペクトルを仮定すると1/10減弱距離を20cmとして、1mのコンクリートで外周を囲むことになる。更に40cmのコンクリートを追加すれば、一般公衆に対する許容レベルまで線量を下げることができる。

以上の条件を総合した概念をFig. 3.5.7に示す。ターゲット台車の引き抜き方向については、この横方向以外にビーム方向に抜くことも考えられる。試料照射装置がターゲットに馬乗りになる配置では、ビーム方向に引き抜く方が照射試料挿入と独立して操作ができるので、今後その配置も検討する。

(3) 冷却設備

ターゲット、照射装置、遮蔽体、閉じこめベッセル等では中性子による核発熱の発生が予想される。従って、これらには冷却が必要であり、照射試料がヘリウムガス冷却・加熱を行うほかは、水冷却を行う。Fig. 3.5.8に全体冷却系統図を示す。図のターゲット冷却系では放射線分解した水を再結合させるため再結合器を入れるとともに、全冷却系はカバーガスとしてヘリウムを用いる。

(4) 保守方式

施設の保守で重要なのは、ターゲット周りの保守である。これには、ターゲットアセンブリーと照射装置の遠隔保守である。Fig. 3.5.9に保守スキームの概念を示す。

ターゲットは台車ごと取扱室に引き抜かれ、マニピレータでターゲットアセンブリーと冷却配管をはずし、使用済みターゲットアセンブリーを保管キャプセルに収納して、保管設備に送る。保管設備は、Fig. 3.5.10に示すように空冷の保管庫であり、使用済みターゲットを入れたキャプセルは保管庫内のキャプセルに収納保管する。

試料照射装置はクレーンで上に引き抜き、照射試料取扱室で横転させマニピレータで照射キャプセルを取り外す。照射キャプセルは、ホットセルに移して分解、加工して試験試料として、施設外のホット実験室へ搬出する。

(5) その他の付帯設備

以上の施設のほか、材料照射施設では以下の設備及び実験室等が必要である。

1) 管理区域内設備

(1) ホットセル

照射材料取り扱い用セル

照射材料加工用セル

運搬容器への移送用セル

ターゲットアッセンブリー加工用セル

(2) 照射材料取り扱い室

(3) ホット機械室

- (4) ターゲット貯蔵室
- (5) 照射治具等貯蔵室
- 2) 非管理区域内設備
 - (1) 計測・実験制御室
 - (2) 実験準備室
 - (3) 照射プラグ運転・遠隔操作制御室

(6) 施設配置図

以上を総合して、建屋配置の概念検討を行った。Fig. 3.5.11 に示す立面断面図は、施設合理化のために消滅処理ターゲット熱流動試験施設と建屋を共有した場合を想定した概念図である。主クレーンは扱える限度として50トンを想定した。揚程は消滅施設との共有のために、照射プラグを引き抜くのに必要である以上に高くなっている。その他、特徴としてはホットセルを縦に3層に設置し、上下に放射化物の移送ラインを取っている。

3.5.3 まとめ

材料照射施設の概念検討を行った。検討の結果、遮蔽施設規模、冷却設備規模の概要を把握することができた。この施設概念を基に、今後検討すべき作業項目を整理したのが Table 3.5.1 のWBS (Work Breakdown Structure) である。これだけの項目について詳細仕様とともにそのコストを評価し、全体としてコストパフォーマンスの最適化を図らねばならない。

ここで得られた概念では、遮蔽体及びターゲットシステムは ISIS の 160kW 中性子散乱施設の 10 倍の 1.5MW 規模のものとなるが、減速材システムが無い分シンプルなターゲットである。しかし、照射プラグは巨大な遮蔽体を伴う重量構造であり、これを避けるため、ターゲット台車を共有する考えもあるかもしれない。この場合ホットセルもターゲット保守用と共有できる可能性があるが、ターゲット本体と照射サンプルの放射化量は相当異なると思われるので、放射能レベルを区別したセルを 2 段階に別途用意することが必要であろう。

いずれにしろ遠隔保守については、ターゲット保守、サンプルの装荷、治具への脱着、照射プラグの構造等を含んで今後更に検討していくことが必要である。

Table 3.5.1 材料照射試験施設の WBS 一覧 (1/2)

1.設計管理				
2.中性子照射施設	2.1 ターゲットセル	2.1.0 中性子物理設計	2.1.0.1 ターゲット発熱	
			2.1.0.2 ターゲット形状最適化	
		2.1.1 ターゲット構造	2.1.1.1 ターゲットアセンブリ	2.1.1.1.1 熱流動設計
				2.1.1.1.2 構造強度設計
			2.1.1.2 1次冷却系	
		2.1.2 ベッセル	2.1.2.1 ヘリウムベッセル (シール構造)	
				2.1.2.2 陽子ビーム窓アセンブリ
		2.1.3 遮蔽体	2.1.3.1 バルク遮蔽構造体	
				2.1.3.2 プラグ構造体
				2.1.3.3 ヘリウム循環系
				2.1.3.4 一次冷却系 (軽水)
		2.2 ビーム輸送系	2.2.1 ビーム成形磁石系	
	2.2.2 ビーム輸送系			
	2.2.3 ビームライン遮蔽			
	2.3 照射試料取扱設備	2.3.1 試料照射シナリオ		
		2.3.2 試料挿入プラグ		
		2.3.3 試料温度制御系		
		2.3.4 試料遠隔取出システム		
		2.3.5 試料取扱ホットセル		
	2.4 保守設備	2.4.1 保守シナリオ		
		2.4.2 ターゲット保守遠隔操作セル		
		2.4.3 廃棄物取扱設備		
2.4.4 マニピレータ				
2.5 ユーティリティ	2.5.1 二次冷却系			
	2.5.2 ヘリウム供給系			
	2.5.3 ドレイン			

Table 3.5.1 材料照射試験施設の WBS 一覧 (2/2)

	2.6 安全管理システム	2.6.1 放射線管理モニター	
		2.6.2 インターロック	
		2.6.3 冷凍機／高圧ガス	
		2.6.4 排気設備	
		2.6.5 廃棄物保管設備	
	2.7 制御システム	2.7.1 ターゲット	
		2.7.2 トロリー	
		2.7.3 照射条件制御	
	2.8 計測装置	2.8.1 基本計測系	
		2.8.2 レイアウト	
		2.8.3 サンプル交換技術	
	2.9 建屋設備	2.9.1 建屋レイアウト	
		2.9.2 特殊設備	
		2.9.3 電気設備	
		2.9.4 空調排気／排水設備	
2.9.5 非常用設備			
2.10 ビームダンプ			

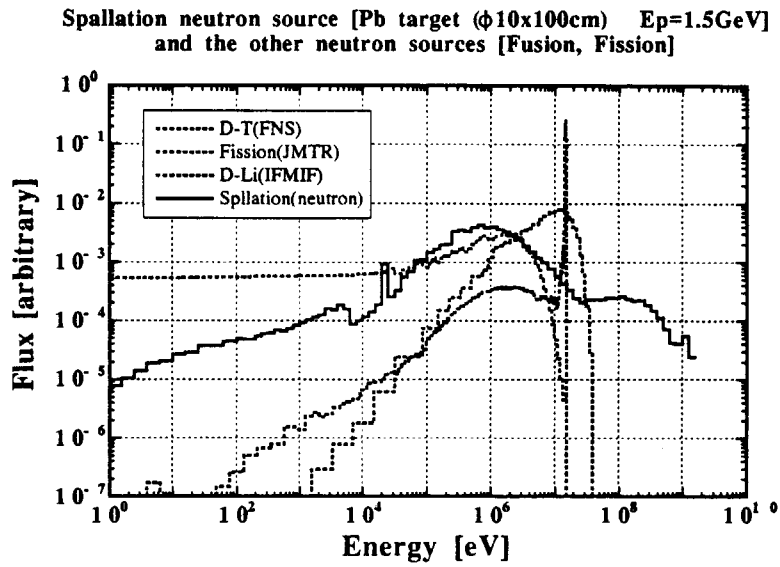


Fig. 3.5.1 Comparison of Neutron spectra obtained from various neutron sources

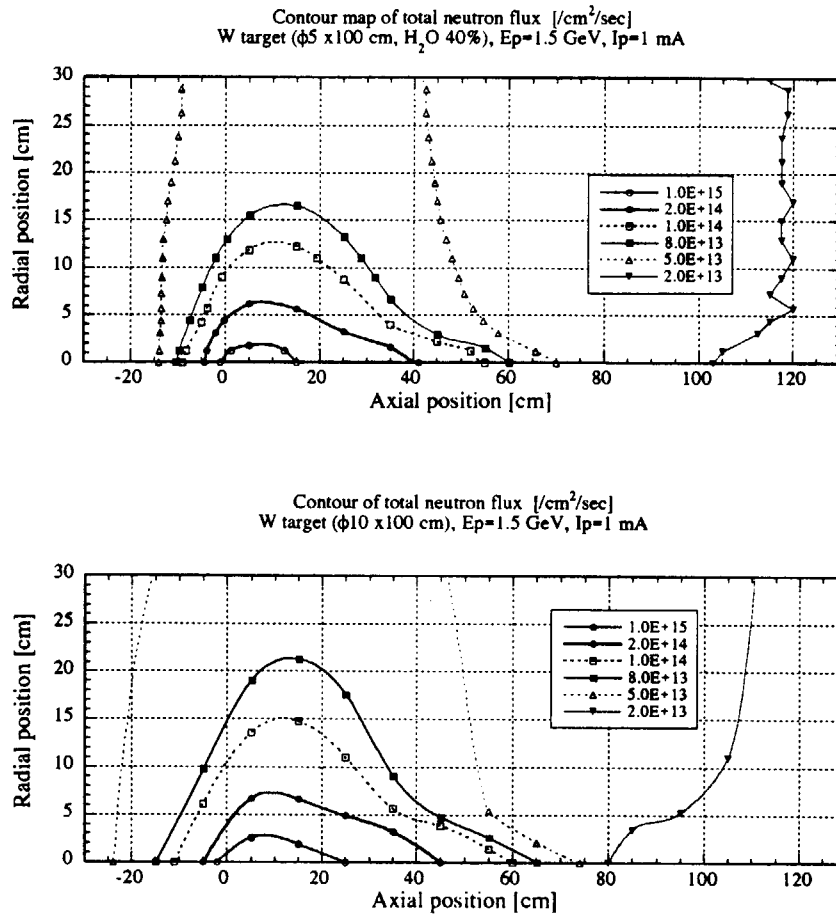


Fig. 3.5.2 Neutron flux distribution around the cylinder target with a diameter of 5cm

Neutron Irradiation Facility

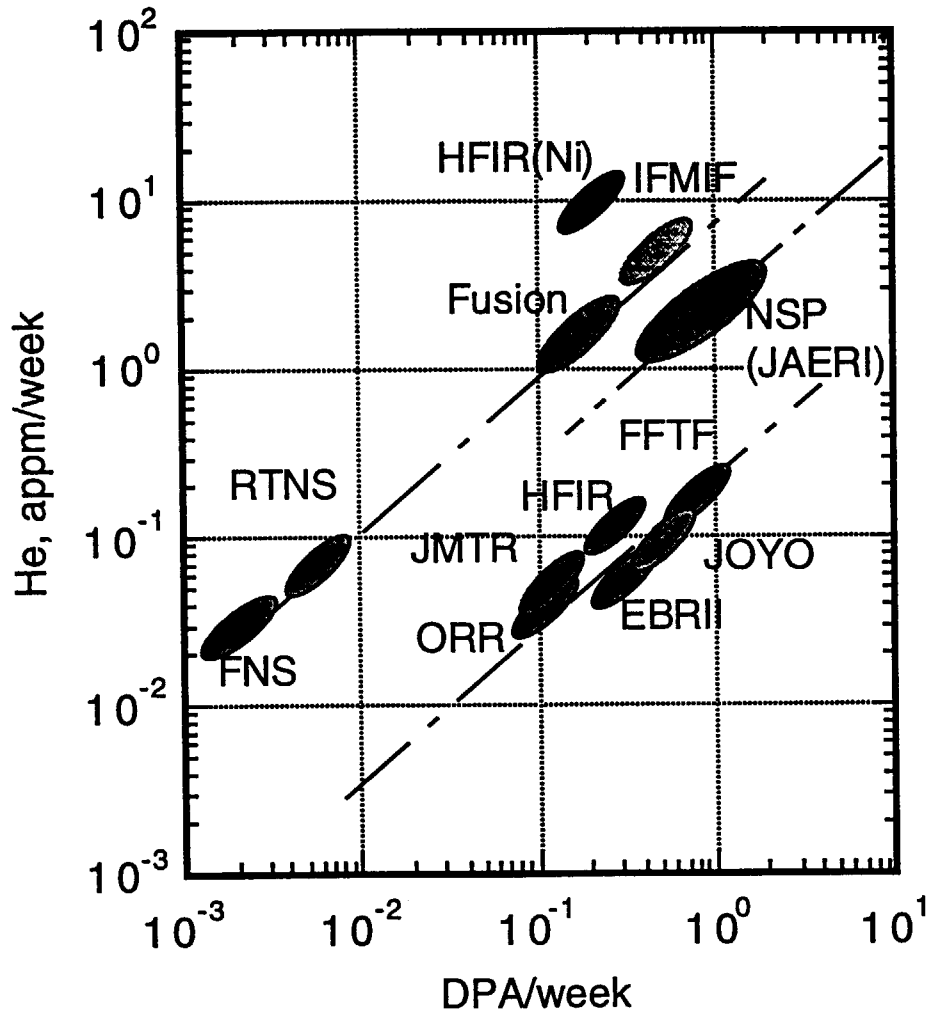


Fig. 3.5.3 Neutron flux distribution around the cylinder target with a diameter of 10cm

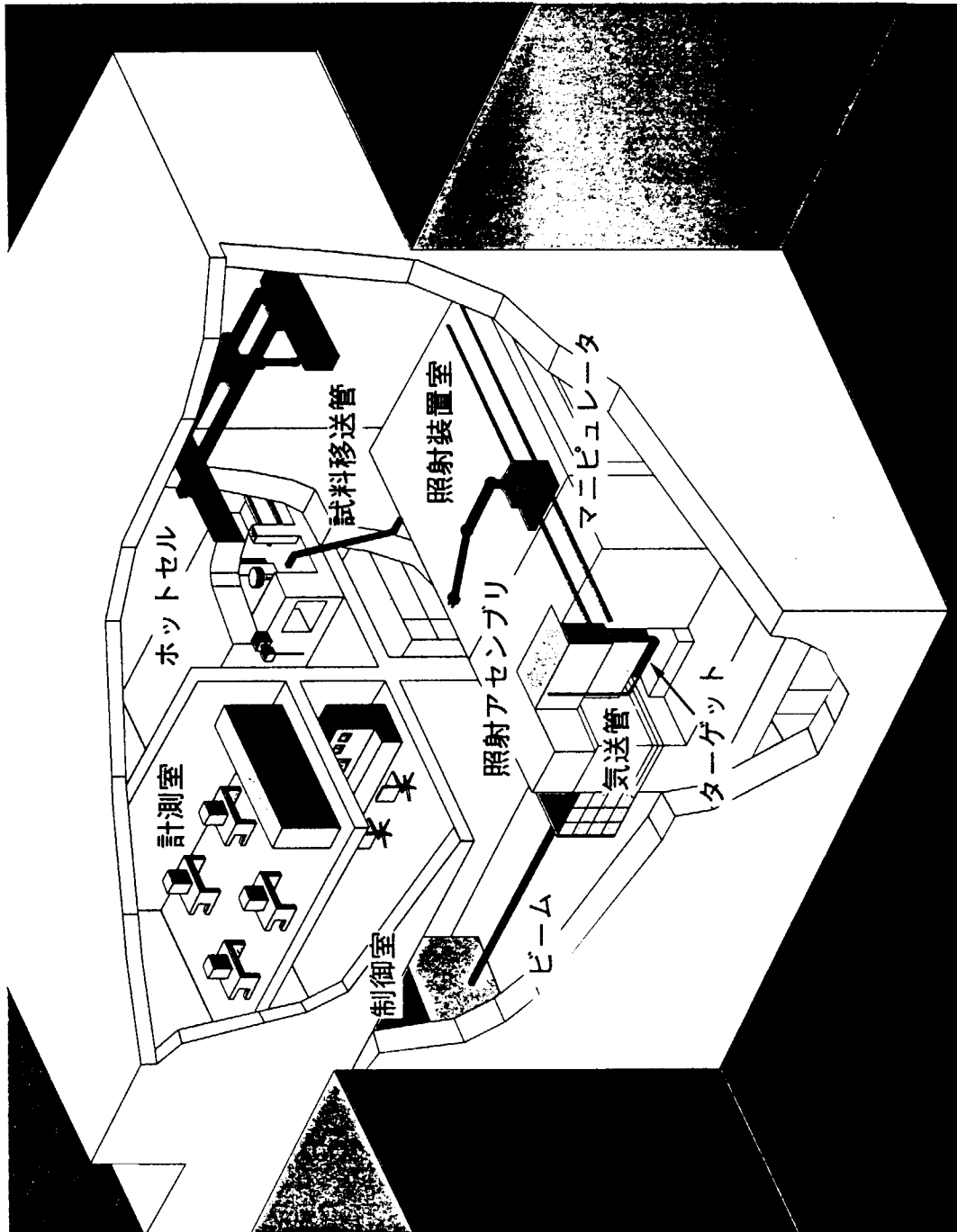


Fig. 3.5.4 材料照射試験施設概念図

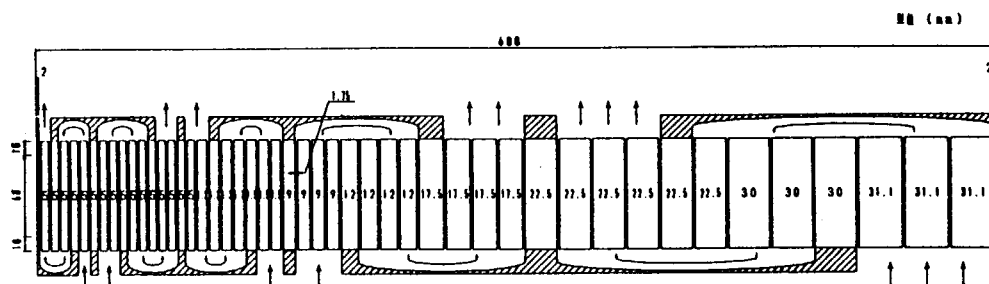


Fig. 3.5.5 Concept of target assembly

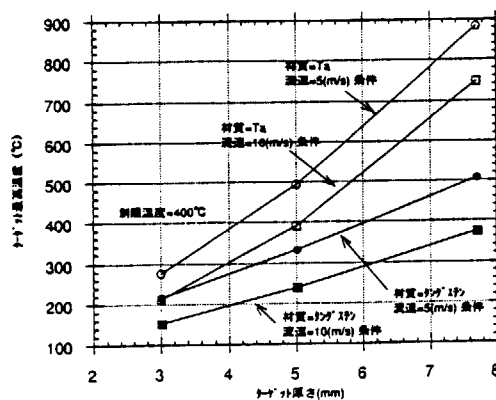


Fig. 3.5.6 ターゲットプレート内のピーク温度の材料、冷却水流速及びプレート厚さの依存性

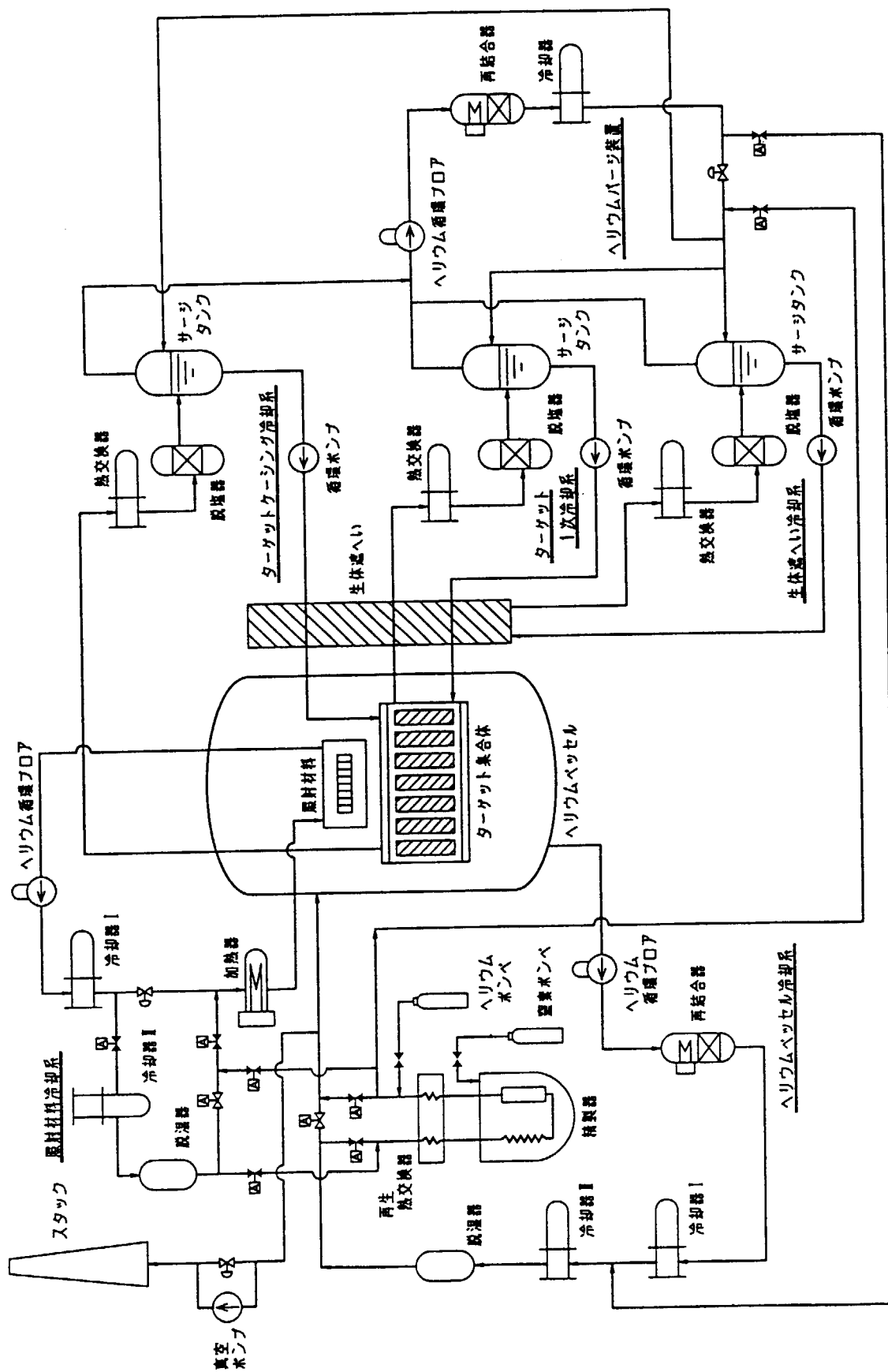


Fig. 3.5.8 ターゲット及び周辺機器冷却系統図

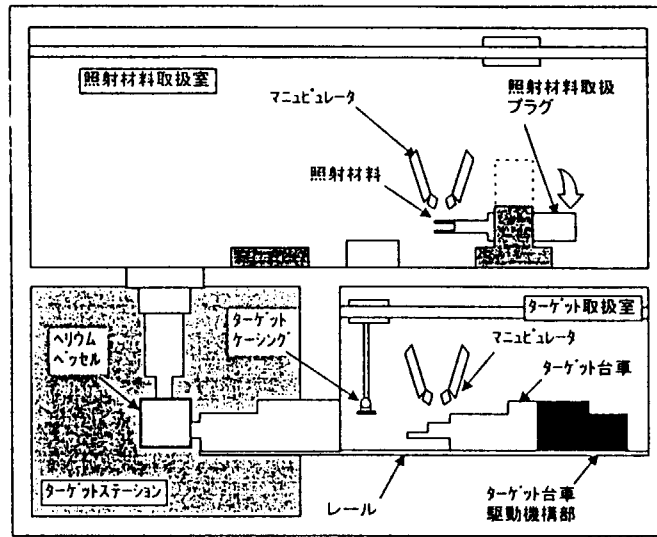


Fig. 3.5.9 ターゲット及び照射装置保守概念

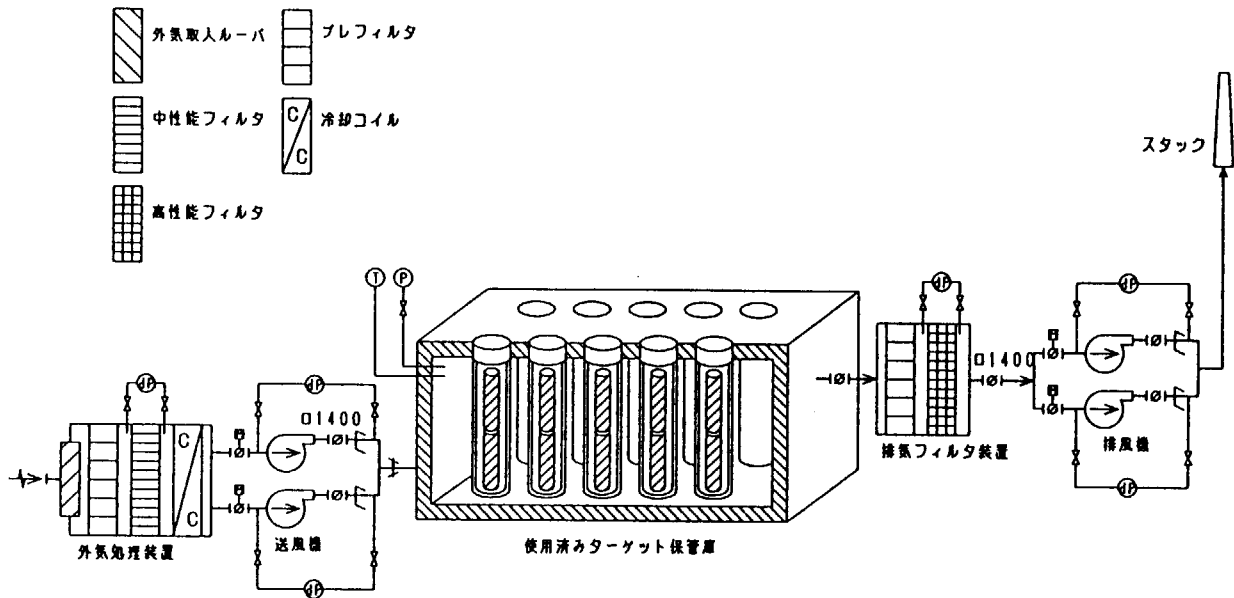


Fig. 3.5.10 使用済みターゲット保管庫冷却概念

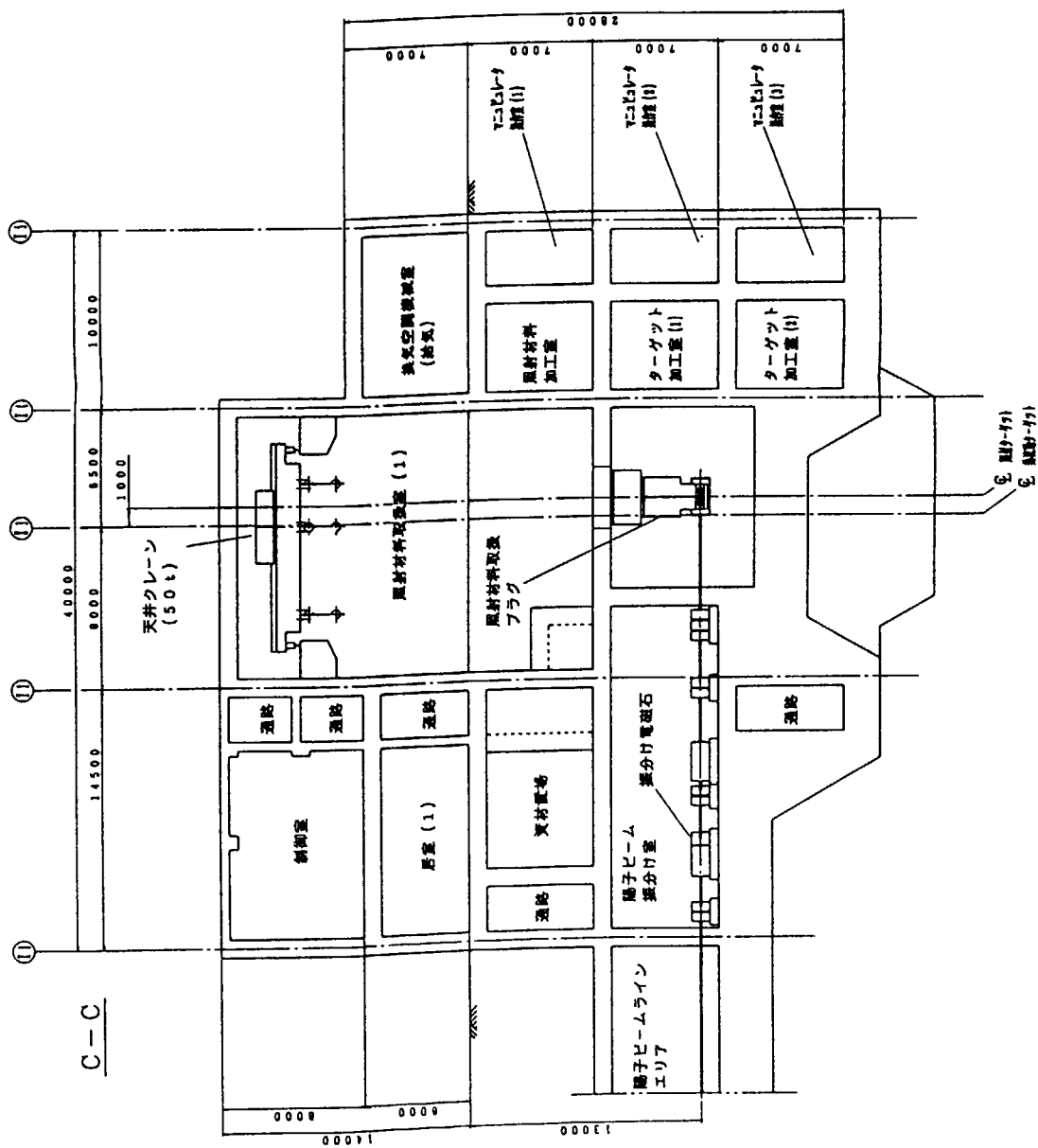


Fig. 3.5.11 材料照射試験施設概念断面図

3. 6 中性子核物理実験施設

3. 6. 1 研究目的

中性子核物理研究施設では、大強度で且つ GeV エネルギーに至る高エネルギー中性子ビームを用いて、電荷を持たない中性子の特性を生かした多角的な実験研究を推進する。これにより、物質を構成する有限多体系である原子核現象をより定量的な理解を深化させ物質の基本的な構造や動的様相の解明、核変換や元素合成機構等の統一的な解明を目的とした研究を実現する。同時に、加速器駆動型消滅処理システムに係わる核データの開発・整備を目的とした実験的研究を行う。

3. 6. 2 核破碎中性子核物理研究施設の現状

これまでに行われている数百 MeV から GeV 領域の中性子核物理に係わる研究として、米国ロスアラモス研究所の WNR 施設におけるエネルギー 800 MeV までの陽子入射核破碎中性子実験がある。その他、電子加速器中性子源である Geel の JERINA を用いた核データ実験がある。しかしながら、エネルギーは 100 MeV 以下に限定される。日本では、陽子サイクロトロンビームを用いた研究施設が幾つか存在し、主に p-Li 反応を用いた疑似単色中性子核データ実験が行われている。エネルギーの上限が 150 MeV 程度で、それ以上のエネルギー領域での研究は殆ど存在しない。このように数百 MeV から GeV 領域での中性子核物理を目的とした中性子源は、決定的に不足している。従って、原研提案の中性子核物理研究施設の実現により、今後、系統的な研究の進展への期待は大きい。

3. 6. 3 中性子核物理研究施設の特長

Fig. 3. 6. 1 に原研が提案する施設で得られる核破碎中性子源スペクトルを示す。中性子核物理研究施設としてはこれまでにデータの不足している GeV 領域まで高強度の中性子束が実現でき系統的な中性子核反応実験が効率的に実施できる。他の実験施設と比較して、極短パルス (180 ps) による超高分解能測定、高中性子束による極微量試料を用いた実験、及び 1.5 GeV までの広範なエネルギー領域での統一的な測定が可能となることが特筆される。

3. 6. 4 研究テーマ

(1) 基礎科学研究

(i) 超高分解能中性子スペクトロスコープにより、sub-threshold 核分裂断面積における中間構造の研究で新たな局面が開かれ、超重元素の安定性とも密接に関係する vibrational resonance や spin isomer、更に、非常に変形した原子核の存在様式を解明する。

- (ii) MeV 領域で見られる全断面積の揺らぎの精密な測定が実現し、高励起エネルギー準位における原子核の準位密度に関する系統的な情報を基に原子核存在様式を解明する。
- (iii) 原子核共鳴の研究を進め、クリスタルボールを用いたスピン依存の捕獲ガンマ線スペクトルの測定等により、原子核構造に対する詳細な研究が可能となる。Fig. 3.6.2 に LANSCE/WNR に設置されているガンマ線測定用クリスタルボールのセットアップを示す。
- (iv) 大強度陽子ビームで実現できる高強度核破碎中性子源により、ナノグラム程度の試料で、不安定核やデータの極めて乏しいマイナーアクチノイド捕獲断面積や核分裂断面積の測定を可能とし、元素合成・変換プロセスの理解を決定的に高める。
- (v) 中性子過剰核（中性子スキン又はハロー）/欠損核領域や超重元素領域、超変形核領域等のこれまで未知とされてきた原子核物理の飛躍的な発展が期待できる。
- (vi) 0 から 1.5GeV までの広エネルギー範囲の中性子により、多重モード核分裂機構のエネルギー 変遷、核分裂障壁の核温度・角運動量依存性、前平衡過程との競合等、核分裂機構の理解が進む。さらに、核分裂片の質量数、電荷、エネルギー、角度分布を詳細な観測により、核分裂障壁上での遷移状態についての新たな情報が得られる。
- (vii) 中間エネルギー核分裂を詳細に研究することで核子多体系における viscosity、すなわち 2 体衝突によるエネルギー散逸機構について新しい知見が得られる。

(2) 高度な中性子核反応データを必要とする新たな原子力応用技術

- (i) 加速器駆動消滅処理研究に必要な中間エネルギー領域における核データを系統的に測定し、現在の核反応計算コードの不確定性を減少させシステム設計の高度化が期待できる。
- (ii) 医学利用として治療・診断用 RI 製造に必要な核反応断面積、放射能生成率を精密に測定する。
- (iii) 高エネルギー粒子線のドシメトリー手法の高度化を図る。
- (iv) 高中性子束ビームを利用して中性子励起 γ 線レーザーのポンピング（例えば、 ^{57}Co の中性子捕獲に続く陽子放出生成する ^{57}Fe の離散レベルから γ 線を放出させる。）を用いた中性子核励起レーザーの概念を実証する。
- (v) 高エネルギー密度のアップコンバージョン型 γ 線レーザー用準安定核生成率を調べる。

以上の研究を有機的に進め、今後の新たな原子力の展開が期待できる分野での技術基盤を開拓する。

3. 6. 4 施設概念検討

1) 始めに

中性子科学研究計画に含まれる研究施設の中で、中性子核物理研究施設では、高エネルギー中性子の飛行時間法による実験を基本とする。極短パルス、低電流、高繰り返し周波数という特色のあるパルスを使用する。本施設ではさらに発生する陽子、パイ中間子を用いる実験も予定されている。これまでに、「中性子核物理研究施設」における核破碎ター

ゲットシステムについての概念検討を行った。Fig. 3. 6. 3に核物理研究施設の概念を示す。図に示した1次陽子ビーム及び2次中性子利用の2つの施設群として構成されている理想的レイアウトである。本検討では核破碎中性子ターゲットを中心とする2次中性子利用施設を対象とする。

2) 検討内容

中性子核物理研究施設では、陽子加速ライナックよりのマイクロパルス構造をそのまま使用し、かつ、繰り返し0.1~1MHz、電流値は最大100 μ A程度のパルスモード運転を行うことを想定した。このようなパルスから高エネルギー中性子を効率よく、確実にかつ安全に発生するために、

- ・核破碎ターゲットの構造、発熱量および冷却システム、
- ・得られる中性子、陽子、 π 中間子のエネルギースペクトル、強度、時間構造、
- ・遮蔽体の基本構成、
- ・コリメータの基本構成、
- ・ビームシャッターの基本構成、
- ・ビームダンプの基本構成、
- ・減速材付きターゲットシステムの可能性、

についての検討を行ったものである。この検討のために、下記の作業項目を実施した。

(1) 高エネルギー発生ターゲットの基本検討

ロスアラモスのWNRにおける核破碎ターゲット（タングステン、直径3 cm、長さ7.5 cm）を参照ケースとして、数種類の形状のターゲットを想定し、NMTC/JAERI相当のカスケード・蒸発・低エネルギー中性子輸送コードを用いて得られる中性子、陽子、 π 中間子のエネルギースペクトル、強度、時間構造を数角度について計算した。さらに発熱量を計算し、可能な冷却システムについての検討を行った。ターゲット材質についても、ニュートロニクス、除熱、材料学的強度、冷却材との共存性等の観点から検討を行った。また、残留放射能の計算も行った。なお、ビーム強度は最大100 μ Aとした。

(2) 遮蔽基本検討

(1)で検討した中性子発生ターゲットを含むバルク遮蔽体の基本構造（材質、厚さ等）を検討した。本遮蔽体には、ビームダンプ用及び実験用貫帳孔が数本程度あけられるので、これに伴うコリメータ、ビームシャッター、荷電粒子をクリアリングマグネットの概念検討を行った。

(3) ビームダンプの基本検討

中性子核物理研究施設に導入される陽子ビームは中性子発生ターゲットを通過した後最終的にはビームダンプで全てのエネルギーを消費する。ビームダンプは実験装置

にバックグラウンドとならないよう中性子、ガンマ線等の粒子を極力漏洩しない構造で、かつ陽子ビームによる熱を効率よく除去する必要がある。このようなビームダンプの基本構造についての概念検討を行った。

(4) ターゲット交換用マニピュレータシステムの概念検討

ターゲットステーションは放射化するため使用後の機器交換には遠隔操作が必要となる。このためのターゲット等交換用マニピュレータシステムについての概念検討も行った。

(5) 施設全体の概念検討

上記の検討をふまえて、ターゲット、遮蔽体内構造、遮蔽体、中性子飛行管、コリメータ、ビームダンプ、遠隔操作機器を含む概念図を作成した。Fig. 3. 6. 4に示すように、ターゲットステーション、ビームダンプ、遮蔽体中性子飛行管、測定ステーション、中性子ダンプ等が配置される。

概念検討に基づく中性子核物理研究施設の鳥瞰図をFig. 3. 6. 5に示す。中性子ビームライン端は十分な環境に対する遮蔽のための土盛りによるダンプが設置される。

Fig. 3. 6. 6にNMTC/JAERIで計算された、タンタルターゲットで発生する中性子の内、角度10度、45度、90度方向に放出される中性子スペクトル束を示す。角度10度の前方方向のスペクトルは入射陽子エネルギー1.5GeVに近い高エネルギー成分が多い。角度が高くなるに従って高エネルギー成分の割合が減少する。異なる角度のスペクトルの特長を生かした実験が期待できる。

3. 6. 5 高エネルギー中性子発生ターゲットの基本検討

1) 発生粒子のエネルギースペクトル等の評価

中性子核物理研究施設では飛行時間測定法を基本とした様々な実験が計画されている。そこで、核破砕ターゲットシステムにおいて、発生する荷電粒子のエネルギースペクトル及び中性子エネルギースペクトルと TOF スペクトルを評価した。

(1) 計算条件

陽子ビームエネルギー	: 1.5 GeV
陽子ビーム形状	: ペンシル型
陽子ビーム強度	: 100 μ A
ターゲット	: タンタル(^{181}Ta)
ターゲット密度	: 16.4 g/cm ³
寸法	: タンタルのみの場合(3 cm \times 7.5 cm) 除熱用冷却水付きの場合 (3 cm Ta = 2 mm \times 36 + 3 mm \times 1, Water = 1mm \times 36)

発生粒子の放出角度	: 入射ビームラインより $10^\circ \pm 5^\circ$, $45^\circ \pm 5^\circ$, $90^\circ \pm 5^\circ$
ヒストリー数	: 30万
その他	: ターゲット以外の領域は全て真空とした。

Fig. 3. 6. 7に除熱用冷却水付きのターゲット断面を示す。 _

(2) 計算項目

- (a)陽子、中性子、 π^\pm 中間子のエネルギースペクトル
 (b)ターゲット中心より 10 m, 50 m, 100 m離れた地点における中性子の TOF スペクトル

(3) 計算コード

LAHET 及び MCNP を用いた。20 MeV 以下の中性子断面積に JENDL3.2 を用いた。

LAHET ; 陽子、 π^\pm 中間子、及び 20 MeV

以上の中性子

MNNP : 20 MeV 以下の中性子

(4) 計算結果

(a) エネルギースペクトル

測定唾置が 10 m の中性子のエネルギースペクトルは既に Fig. 3. 6. 3 に示した。その他の位置及び角度のスペクトルも同様な形状を示した。

(b) 中性子の TOF スペクトル

チャンネル幅が 10 n sec、電流が 100 μ A の場合の測定位置 (10 m) での角度 10, 45, 90 における中性子の TOF スペクトルを Fig. 3. 6. 8 に示す。

(c) 1チャンネル当たりの中性子束とエネルギーの関係

1チャンネルを 10 n sec とした場合の、1チャンネル当たりの中性子束とエネルギーの関係は以下の様に与えられる。

ここで、中性子のエネルギー E が飛行時間 T により、
 $E=f(T)$ ----- (1)

の関数で表せるため、解像度 R は、以下により算出した。

$R = dE/E = (f(t+dT)-f(T))/f(T)$ ----- (2)

上式において、 dT がチャンネル幅を示す。

(2) 式は、相対論的なエネルギー領域 E_r と非相対論的なエネルギー領域 E_{nr} において、それぞれ以下のように表すことが出来る。

$E_r = mc^2(1/((1-d^2)/c^2T^2)-1/2)$

$E_{nr} = 1/2 \times m \ c^2 \ (d^2/c^2T^2)$

上式に於いて、 m は中性子の静止質量、 c は光速、 d は飛行距離を示す。

Fig. 3. 6. 9 に中性子飛行距離とエネルギー分解能の関係を図示する。このように、飛行距離は測定のエネルギー分解能に影響を与えるため、実験によって最適な飛行時間を得

るように様々なレイアウトをもつ施設設計が重要となる。

(d) 除熱用冷却水付きターゲットからの発生中性子のエネルギースペクトルを Fig. 3. 6. 10に示す。測定位置は100 mとした。比較のために、冷却水が無い場合のスペクトルを点線で、冷却水がある場合を実線で示した。冷却水による減速の効果により、全ての角度について、中性子フラックスがやや軟らかくなることが明らかになった。

Fig. 3. 6. 10 除熱用冷却水付きターゲットからの発生中性子のエネルギースペクトル

以上発生中性子に関して得られた知見をまとめると、

(i) 20 MeV 以上

冷却水がある場合と無い場合で、中性子のフラックスはほとんど変わらない。

(ii) $10 \sim 20$ MeV

10° 方向の中性子に関しては、冷却水がある方がそうでない場合に比べて、フラックスが減少し始める。これは、 10° 方向の方がターゲット内 (の水) の透過距離が長いからである。

(iii) $100 \text{ keV} \sim 10 \text{ MeV}$

全ての方向について、冷却水のない場合に比べて中性子フラックスが減少する。

(iv) 100 keV 以下

すべての方向について、冷却水のない場合に比べて中性子フラックスが増加する。

3. 6. 6 残留放射能の評価

1) 全ビーム損失に対する飽和放射能の評価

Barbier の評価式によれば、1 GeV 以上の陽子ビームに対するビームダンプ等での放射化量 A_{sat} は次式で評価できる。

$$A_{\text{sat}} = 6.3 \times 10^{12} \text{ Bq/kW}$$

本ターゲットシステムの最大電圧は 1.5 GeV、最大電流は 100 μA であるから、その出力は 150kW となる。したがって、飽和放射能は、

$$A_{\text{sat}} = 6.3 \times 10^{12} \times 150 = 9.5 \times 10^{14} \text{ Bq} = 2.6 \times 10^5 \text{ Ci} \quad \text{となる。}$$

2) ターゲットメンテナンスルームの遮蔽壁厚

放出される γ 線エネルギーを Ta の 1.25 MeV と仮定すると、その Sv 係数は、

$$\text{Sv/Bq} = 0.347 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / \text{MBq/hr}$$

である。1.25 MeV の γ 線に対する普通コンクリートの線量当量減衰係数は 5.19×10^{-2} (cm^2/g)、コンクリートの密度を 2.35g/cc とすれば、線減衰係数は、

$$0.1219 / \text{cm}$$

となる。ターゲットを点線源とみなすと、コンクリート遮蔽厚さを 1.3 m とすれば、遮蔽の背面での線量当量率は 2.04 $\mu\text{Sv/hr}$ となり、管理区域境界の線量当量率の制限値である

6 $\mu\text{Sv/hr}$ 以下となる。

3. 6. 7 発熱率の評価

HETC-KFA2 コードを用いてターゲットの発熱量を評価した。

1) 計算条件

陽子ビーム： エネルギー： 1.5 GeV

ビーム電流： 100 μA

ビーム形状： ・ペンシルビーム

・一様円柱ビーム (ビーム半径：0.5 cm, 1.0 cm, 1.5 cm)

ビーム入射方向： ターゲット軸に水平に入射

ターゲット 材質： タングステン

形状： 円柱 ($\phi 3 \times 7.5$ cm)

2) 計算コード

計算コード： HETC-KFA2 (50 万イベント)

計算で考慮した発熱過程

- ・陽子、 π 中間子、B粒子による電離エネルギー損失
- ・蒸発粒子(d, t, He-3, α)によるエネルギー付与 (全運動エネルギーを生成位置で付与させた。)
- ・反跳核の運動エネルギー (全運動エネルギーを生成位置で付与させた。)
- 20 MeV 以下の π^0 中間子、中性子および γ 線による発熱は無視した (20 %程度)。

3) 計算結果

計算結果の内、円板の温度上昇の時間変化を Fig. 3. 6. 11 に示す。また、発熱密度分布の最大値をビーム形状別に以下にまとめる。

発熱分布最大値

ビーム形状

ペンシルビーム 5,495 [$\text{W} / \text{cm}^3 / 100_{\text{A}}$] ($r= 0-0.5$ cm, $z= 0.5-1.0$ cm)

円柱ビーム

半径 0.5cm 5,266 [$\text{W} / \text{cm}^3 / 100_{\text{A}}$] ($r= 0-0.5$ cm, $z= 0.5-1.0$ cm)

半径 1.0cm 1,422 [$\text{W} / \text{cm}^3 / 100_{\text{A}}$] ($r= 0-0.5$ cm, $z= 0.5-1.0$ cm)

半径 1.5cm 667 [$\text{W} / \text{cm}^3 / 100_{\text{A}}$] ($r= 0-0.5$ cm, $z= 0.5-1.0$ cm)

4) 安全率

発熱密度の計算では 20 MeV 以下の中性子と π^0 中間子および γ 線による発熱 (約 20 %

程度)が無視されている。これらのエネルギーが全てターゲットに付与されることはないが、適当な安全率を設定する必要がある。

3. 6. 8 バルク遮蔽体の概念検討

ここでは、ターゲットステーション建屋の遮蔽構造を前節までの解析結果から決定する。前章で検討した中性子線源強度および遮蔽厚さはビームが全てターゲットおよびビームダンプ中で止められた状態(フルストップ)に対応する。この場合でもターゲットステーション建屋表面で先に示した線量基準を満たす遮蔽厚さを評価する。

なお、ここで評価するのは遮蔽が十分に施された場所の線量であり(バルク遮蔽)、遮蔽欠損部等の詳細な評価(ストリーミング評価)は詳細設計の後に別途行わなければならない。

鉄とコンクリートの価格差、重量差から可能な限り鉄よりもコンクリートを使用するのが望ましい。一般に、高エネルギー中性子による線量は主に鉄で減衰し、コンクリート中では厚さ1 m以降の減衰は緩やかになる。したがって、まず十分な厚さの鉄で高エネルギー中性子を減衰させた上でコンクリートにより低エネルギー成分を減衰させる。このために、鉄を内側に、コンクリートを外側にした遮蔽構造とする。

コンクリートの厚さは、検討の範囲の最大値である2 mと固定し、以下の鉄遮蔽体の厚さを設定した。

(鉄遮蔽体厚さ)

陽子ビーム前方方向	4.0 m
側方	3.6 m

ターゲットやビームダンプから漏れ出る中性子束は、その自己遮蔽効旺のためにビーム方向に対して15°~25°の方向で最も高い。この方向の中性子の遮蔽には鉄4.2 m+コンクリート2 mが必要である。前方に4 mの鉄遮蔽を設ければ、この方向の透過距離は4.0 (m) / cos (25°)=4.4 (m)と、上記の必要厚さを満たす

ターゲット下部に遮蔽プラグを設け、遮蔽プラグ毎、地下のターゲットメンテナンスルームに引き込んで、遠隔操作にてターゲット交換等のメンテナンスを行う。放射化したターゲットを取り扱うターゲットメンテナンスルームとマニピュレータ操作室との間の隔壁はコンクリート1.3 mで十分である。上記の検討から設定したターゲットステーションの遮蔽構造を Fig. 3. 6. 12に示す。

3. 6. 9 中性子ビームダンプの遮蔽検討

3. 6. 5で求めた、測定建屋位置での中性子スペクトルから線量当量を求めると下記の帳りとなる。

位置	線量当量率 (Sv/hr)
距離 100 m、10° 方向	3.5
距離 50 m、45° 方向	14.1
距離 10 m、90° 方向	204.5

距離 10 m での中性子線量を管理区域境界の基準値(6 $\mu\text{Sv/hr}$)まで下げるには、約 8 桁の減衰が必要である。土盛により中性子ビームダンプを作るとした場合に必要な厚さは、土中での中性子の減弱距離を 117 (g/cm^2)として、約 2.2 kg/cm^2 に相当する厚さが必要である。土の密度を 2 g/cc と仮定すると、これは約 11 m の厚さに相当する。仮に乾燥した砂であるとすると、その密度は 1.13 g/cc 程度であるから、この場合は約 20 m の厚さが必要である。

また、距離 100 m の位置は敷地境界に近接すると考えられる。したがって、この点では敷地境界の線量限度として、目標値である 50 $\mu\text{Sv/yr}$ を考える。週 50 時間運転を仮定すると年間運転時間は 2555 時間であり、線量基準は 0.02 $\mu\text{Sv/hr}$ となる。上記の 3.5 Sv/hr の線量当量率をこの基準まで減衰するには、やはり約 8 桁の減衰が必要である。したがって、距離 100 m の位置でも 20 m 程度の厚さの土盛が必要となる。

3. 6. 10 ビームシャッターの遮蔽性能評価と概念検討

1) 概念検討

加速器運転中に全ての中性子ビームラインからの中性子を常に実験に使用しているわけではない。従って使用していない中性子ビームラインからの中性子は、中性子ビームライン内に設置されるビームシャッターによって、遮蔽される。ここではビームシャッターの方式について概観しその中で最も適当であると考えられる円盤回転型の構造概念について検討を行う。

押しつぶし型 (KENS タイプ)

本方式は「高エネルギー研究所中性子散乱施設 (KENS)」において用いられている方式であり、シャッターを中性子ビームライン内に単に降ろすことによって遮蔽を行う。本方式の概念図を Fig. 3. 6. 13. 1 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

「閉」の位置の時に中性子ビームライン周辺にボイド空間が出来ない。

単純な上下機構を考えればよいので、作成・調整等は容易である。

シャッター「閉」時に生じる上方のボイド空間はかなり上方に出来るため実質的な遮蔽欠損にならない。

インナーコリメータやガイドをシャッター部分に入れることは不可能である。

パイプ上下型 (IPNS Upgrade タイプ)

本方式は米国 Argonne National Laboratory (ANL) にある「upgrading ANL's Intense Pulsed Neutron Source (IPNS Upgrade)」で検討されている方式である。シャッターの胴体内にパイプを設置し、「開」の位置では中性子ビームがパイプ内を通過するようにシャッターを上下させる。本方式の概念図を Fig. 3. 6. 1 3. 2 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

- インナコリメータやガイドをシャッター部分に挿入することが可能である。
- 単純な上下機構を考えればいいので、作成・調整は容易である。
- 内部にコリメータ等を入れた場合その位置の微調整を行う必要がある。
- 「閉」の位置でビームライン下にボイド空間が生じる。

円盤回転型 (SNQ タイプ)

本方式はスイス Paul Scherrer Institute (PSI) にある「The spallation neutron source SINQ」で用いられている方式であり、円盤型のシャッターの胴体内にパイプを設置し、「開」の位置では中性子ビームがパイプ内を通過するようにシャッターを回転させる方式である。本方式には1個の円盤ではなく複数個の小型の円盤を連動させて回転させる方式（小型円盤連動回転型）がある。それぞれの概念図を Fig. 3. 6. 1 3. 3 及び Fig. 3. 6. 1 3. 4 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

- シャッターが閉じた位置でほとんどボイド空間が生じない。
- インナコリメータやガイドをシャッター部分に挿入することが可能である。
- 回転機構であるから重力に逆らわず開閉できる。
- 駆動機構が故障したときに開いたままになる恐れがある。（上下機構では重力でシャッターを閉めることができる。）
- 機構が複雑になる恐れがある。

水銀注入型

本方式は中性子ビームラインに水銀を流し込む方式である。概念図を Fig. 3. 6. 1 3. 5 に示す。この方式のシャッターには以下の特徴がある。

- 機械的な駆動機構を必要としない。
- 水銀の中性子遮蔽能力は良くない。
- 毒性の高い液体を取り扱う必要がある。
- 密度が高いため中性子ビームラインの支持が困難である。
- 大量の水銀が必要となる。

機械的なシャッターの場合、材料としては「炭素鋼または重コンクリート：ANL IPNS Upgrade」や「炭素鋼+コンクリート：「ISIS」等が使われている。そのため必然的に相当な重量となる。また、遮蔽の観点からは周辺の遮蔽体や中性子ビームライン内にボイド空

間が発生しない方が望ましい。従って、重力に逆らわず開閉できボイド空間が発生しない「円盤回転型」が最も適切であると考えられる。

構造概念

方式として「円盤回転型」の内、1個のシャッターの重量が軽くて済む「小型円盤連動回転型」を採用する。構造を決める上で、前提条件にもとづいて検討した構造概念図をそれぞれFig. 3. 6. 13. 1～5に示す。

2) 遮蔽性能評価

ビームシャッター部の遮蔽性能評価を、前節でコリメータの遮蔽評価を行ったのと同様に、2次元Sn計算を用いて行った。ビームシャッターはバルク遮蔽体の鉄遮蔽体部分のみを閉じるものである。したがって、鉄の部分の穴が塞がれた場合の線量当量を計算し、バルク遮蔽による線量当量減衰と比較した。

コリメータ(長さ5m)後端での、計算された遮蔽体内側からの線量当量減衰は約12桁であり、コンクリート厚にして約1m程度の追加射影をビームシャッターが閉じた時にコリメータ(長さ5mとする)の後ろに施せば、バルク遮蔽部の線量と同程度になる。

3. 6. 11 高エネルギー核破碎中性子ビームのコリメータ特性の検討

1) 目的

中性子核物理実験施設では、飛行時間法を基本技術として多様な高エネルギー中性子核反応に関する実験を行う。実験施設の設計では、核破碎ターゲット系と共に中性子コリメータの特性評価が重要である。飛行時間法では時間原点となるターゲットでの発生源中性子のスペクトルが測定場所まで保存されることが極めて重要である。しかしながら、ターゲット遮蔽体に組み込まれる1次コリメータ、飛行中の2次コリメータ、測定場所に入射する唾置での3次コリメータなどとの散乱・吸収などの中性子相互作用により入射スペクトルと飛行時間との相関が失われることがある。従って、極力源中性子スペクトルが保存され、中間コリメータ物質・材料による擾乱を押さえて、かつ、バックグラウンドの低いよく制限された入射中性子ビームを実現するために、想定される条件での中性子コリメータ特性を詳細に検討し、設計に反映させることが必要である。

本検討では、これまでの中性子核物理実験施設検討で得られた核破碎源中性子特性とターゲットステーション構造を踏まえて、中性子コリメータの構造の最適化、飛行中性子ビーム特性、測定位置での入射中性子特性等について詳細な検討を行うことを目的とする。

2) 検討内容

これまで検討した中性子核物理実験の核破碎中性子ターゲットステーションの概念をもとに、ここで検討する中性子飛行管及び測定室の概念配置を Fig. 3. 6. 14にコリー

タの構成とともに示す。本検討では、ターゲットステーションで発生した高エネルギー核破砕中性子が測定室に至るまでに飛行間中に設けられた各コリメータを通過して行く過程における中性子スペクトルの変化、散乱線の影響を定量的に計算し、実設計における最適化のためのベースを系統的に評価する。

2-1) 検討対象

中性子核物理研究施設 (NPF) では、最大 1.5 GeV, 100 μ A の陽子ビームをタンタル等のターゲットに入射させて生じる核破砕中性子を利用して、GeV 領域から MeV 領域までの中性子核反応断面積を測定する施設である。ターゲットを中心とした 10 m²~100 m² の長さの中性子飛行管を複数有し、コリメートされた中性子ビームを用いて飛行時間法 (TOF) により対象とするエネルギーを取り出し、標的核との反応により発生する粒子、放射線を測定し断面積を求める。従って、NPF における中性子コリメータの性能評価は極めて重要である。また、この施設では最大出力 150 kW の大出力ターゲット核破砕中性子源でもあり、中性子飛行管はその遮蔽欠損ともなる。従って、コリメータを含む中性子ビーム飛行管の設計は遮蔽及び周辺環境放射線安全性の観点から高い評価精度が要求される。

コリメータには、ターゲット及びその遮蔽体からなるターゲットステーションコリメータ、中性子飛行管、中間コリメータ、及び、標的物質及び測定機器が設置される測定ステーションでの最終コリメータがある。(Fig. 3. 6. 14 参照)

2-2) ターゲットステーションコリメータ

ターゲットステーションのコリメータは、中性子飛行管による遮蔽体の欠損を補うことが主な役割である。コリメータのターゲットからの距離は、ターゲットステーションの外径程度 (10 m) である。

3-3) 中性子ビームライン中間のコリメータ

長い飛行管には、中性子ビームライン中間にコリメータが設置され、最終コリメータに入射する中性子ビームプロファイルを整える。

3) 計算条件

3-1) 計算コード

入射中性子ビームエネルギー範囲により、以下の2種類の方法を用いて中性子輸送計算を行った。

入射中性子エネルギー	計算方法	計算コード、中性子断面積
~400 MeV	2次元 Sn 法	DORT, HIRO-86R
20~1500 MeV	モンテカルロ法	HERMES

HERMES コードシステムでは、20 MeV 以上の中性子輸送計算に核内カスケードコード HETC-KFA2 を、減速の結果生ずる 20 MeV 以下の中性子及び 2 次ガンマ線の計算に MORSE-CG コードを用いた。なお、MORSE-CG の計算では多群断面積ライブラリーとして、HIRO-86R を用いた。

いずれの計算でも、20 MeV 以下の中性子の非弾性散乱や捕獲反応で生じる 2 次 γ 線についても、中性子- γ 線結合計算により評価した。

3-2) 計算モデル

コリメーターを 2 次元 RZ 形状モデルで表して一般化し、下記の量をパラメーターとした計算を行うことにより、ターゲットステーション、中性子ビームライン、測定ステーションに設置されるコリメーターのコリメーション性能及び遮蔽性能を同時に評価する。

- ・口径 (ID) : 50 mm, 100 mm, 200 mm
- ・外径 (OD) : 600 mm
- ・長さ (L) : 500 mm, 1000 mm, 1500 mm

HERMES コードを用いたモンテカルロ計算では、計算時間の制約により、長さについては、1500 mm の場合についての計算を行い、入り口から 500 mm, 1000 mm のコリメーター出口の線束を近似した。

Sn 計算では、各長さのコリメーターをそれぞれモデル化し、コリメーター外側の 1 cm 厚も空気中での中性子束・ガンマ線束を用いて線量等量率を評価した。

3-3) 材質

コリメーターの材質は、鉄またはポリエチレンの単一層とした。コリメーション性能（反射成分）に関しては単一層でも十分に評価可能である。コリメーション性能と遮蔽性能を両立させるための多重層コリメーターに関しては、単一層の遮蔽計算結果を重ね合わせて評価する。

3-4) 線源

コリメーターの外径 600 mm に対して、ターゲットからのコリメーター開口部までの距離は最短（ターゲットステーションコリメーター）で約 10 m、最長でも 100 m である。従って、ビームとコリメーター中心軸とのなす角度は最大でも $\tan^{-1}(0.6 \text{ m}/10 \text{ m})=3.4^\circ$ にしかない。この線源ビーム広がりをも Sn 法で表すには、S30 分点相当の非常に詳細な角度分点が必要である。また、HETC では散乱角 5° 以内程度の前方散乱は、Pauli-blocking により精度良く取り扱うことは難しい。これらの使用する計算コードの精度を考慮すると、線源モデルでビームの広がりを考えても、コリメーター出口の線束分布に有意な影響は与えないと考えられる。すなわち、現実的に、コリメーター入射底面には一様・平行なビームが入射していると考えられる。このため、線源条件はコリメーター底面に一様・平行なビームが入射しているとして取り扱った。線源中性子エネルギーは、1, 10, 20,

100, 400, 1500 MeV の5点とした。

3-5) 計算のケース

(1) 2次元 Sn 法(DORT+HIRO-86R)

パラメーター	量	ケース数
中性子エネルギー	1, 10, 20, 100, 400 MeV	5
材質	鉄、ポリエチレン	2
コリメーター内径	50, 100, 200 mm	3
コリメーター長さ	500, 100, 1500 mm	3

(2) モンテカルロ法(HERMES)

パラメーター	量	ケース数
中性子エネルギー	100, 400, 1500 MeV	3
材質	鉄、ポリエチレン	2
コリメーター内径	50, 100, 200 mm	3
コリメーター長さ	1500 mm	1

3-6) 計算詳細条件

3-6-1) 2次元 Sn 法

(1) 角度分点と散乱角展開次数

長さ 1500 mm、開口部半径 50 mm のコリメーターの場合 m コリメーター入り口から出口を見込む角度は、わずかに 1.9° ($\cos\theta = 0.99945$) である。従って、コリメーター入り口の中心から見て、コリメーター内に少なくとも 1 本以上の角度分点が入ることを条件として、上方にバイアスした S315 分点 (上方 280 分点=S56、下方 35 分点=S10) を用いた。散乱角展開次数は HIRO-86R に含まれる散乱マトリックスの最大(P5)とした。

(2) 収束精度

各メッシュ点のスカラー束で 1%以内とした。

3-6-2) モンテカルロ法

(1) 入射中性子数 (ヒストリー)

HERMES を用いたモンテカルロ計算では、入射中性子数（ヒストリー数）を以下の帳りとした。

エネルギー領域	ヒストリー数
20 MeV 以上	1 0 0 万
20 MeV 以下	1 0 万

（ただし、ポリエチレンでは20万）

20 MeV 以下の計算 (MORSE) で HETC のヒストリーが少ないのは、MORSE の線源となる中性子が、核反応により入射中性子当たり 10 個程度生成されるため、1/10 のヒストリー数でも 20 MeV 以上と同等の統計が得られるためである。

なお、ポリエチレンからの核破碎中性子発生はコンクリート及び鉄に比べて少ない。このため、MORSE の計算での統計精度を上げるように、入射中性子数（ヒストリー）が倍になるようにした。このとき、1500 mm 長さのコリメーター出口の中性子束に対する統計誤差 (FSD) は、概ね以下の程度であった。

入射中性子エネルギー	エネルギー領域	FSD
1500 MeV	100 MeV < E < 1.5 GeV	1~7 %
	20 MeV < E < 100 MeV	7~10%
	E < 20 MeV	数十%
400 MeV	100 MeV < E < 400 MeV	1~10 %
	20 MeV < E < 100 MeV	7~20 %
	E < 20 MeV	>50 %
100 MeV	100 MeV	2~3 %
	20 MeV < E < 100 MeV	10~20%
	E < 20 MeV	>50 %

コリメーター出口では直視成分がほとんどを占めるため、MORSE で計算する範囲まで減速される中性子の数は少なく、統計誤差が大きくなっている。コリメーター側面では数 10 keV のエネルギーまで、中性子束の統計誤差は 10 %以内である。

(2) 中性子カットオフエネルギー

HETC で核内カスケードモデルで計算する中性子エネルギーの下限は 20 MeV とした。MORSE で計算する中性子エネルギーの下限 (カットオフ) は特に設けず、熱群 (10⁻⁵ eV ~ 0.414 eV) まで減速された中性子を計算しているが、計算時間の制約から、10 keV 以下に減速された

中性子はほとんど計数されていない。

4) 計算結果及び検討

4-1) 遮蔽性能の評価

コリメーター入り口と外面での中性子及び2次 γ 線による線量等量率の比を計算し、コリメーターの遮蔽性能を評価した。

4-1-1) 線量等量率換算係数

DORT あるいは HERMES により計算されたコリメーター出口の線束分布に以下の線量等量率変換係数を乗じて、線量等量率分布を求めた。

(1) 中性子

中性子エネルギー20 MeV までは ICRP51 に掲載されている 1 cm 深部線量等量を用いた。20 MeV 以上については半無限平板ファントムでの最大線量等量を、エネルギー群の上限エネルギーについて内外挿して用いた。

(2) 光子

HIRO-86R では2次ガンマ線のエネルギーは、最大 20 MeV である。10 MeV 以下のエネルギー範囲の光子については、ICRP51 に掲載されている 1cm 深部線量等量を、エネルギー群の上限エネルギーについて内外挿して用いた。また、10~20 MeV のエネルギー範囲については、半無限平板ファントムでの最大線量等量を用いた。

4-2) コリメーション性能の評価

4-2-1) エネルギースペクトル

コリメーター開口部での中性子スペクトルを、コリメーター材質、開口部の径及びコリメーター長さ毎に、入射中性子エネルギーをパラメーターとして求めた。

4-2-2) コリメーション性能

入射中性子エネルギー毎の、コリメーター開口部と周辺部での中性子束の比の分布をた中性子束は、コリメーター出口蔓での入射中性子エネルギーと同じ群の中性子の入射中性子束に対する比として検討した。なお、モンテカルロ法計算では、透過成分の計算に十分な統計精度が得られなかったため、ここではSn法による計算結果(入射エネルギー400 MeV 以下)のみを評価した。

20 MeV 以上の中性子に対しては、鉄のコリメーター性能が最も優れている。10 MeV では鉄とコンクリートはほぼ同等であり、1 MeV ではポリエチレンが最も有効である。10 MeV の鉄及びコンクリート、1 MeV のポリエチレンでは、コリメーターの長さが 100 cm から 150 cm に伸びても、ほとんど周辺部の中性子束は変わらなくなることが明らかとなった。

3. 6. 1 2 施設統合概念検討

これまでの施設検討結果に基づいて、ターゲットステーションのレイアウトをさらに現実的な付属設備も含めて検討した。以下に、主要な仕様項目を示す。

- 1) ターゲット仕様 (形状、大きさ、電流強度、冷却等)
 - 材料：タンタル (タングステン)
 - 形状：円柱 (ペンシル型：30 mm 直径、120 mm 長さ)
 - 電流：最大 100 μ A
 - 冷却：水令
- 2) ターゲット室仕様 (床面積、高さ、遮蔽扉、迷路、クレーン等)
 - 地上 1 階 (ターゲット部、遮蔽体、ビームダンプ、最終偏向磁石
クリアリング磁石、コリメータ、ビームシャッター)
 - 建て屋床面積：50 m^2 (外壁での投影で 100 m^2)
 - ターゲット部：3 x 3 x 4 m^3
 - ターゲットアクセスホール 1.5 m 直径
 - 地下 1 階 (ターゲット操作、メンテナンス、保管)
 - 床面積：操作ホール：200 m^2
：保管庫：20 m^2
- 3) 実験項目：中性子飛行時間法による各種中性子核断面積測定
(前方に関しては Li ターゲットによる準単色中性子源も考慮)
- 4) 実験のためのスペース、設備仕様
 - TOF 測定ステーション (10、45、90 度) (20 m、50 m、100 m)
 - クレーン (2.9 トン)
 - 広さ (各 50 m^2)
 - 信号ケーブルラック、信号・通信ケーブル
 - TOF 飛行管、中性子束モニター
- 5) 保守のための設備 (保守の方法、実験のアクセス)
 - ターゲット遠隔操作、保管庫
- 6) 廃棄物の種類
 - 中性子発生核破碎ターゲット、陽子入射窓材料 (定期的交換)
- 7) 保管設備 (使用済みターゲット、燃料等)
 - 使用済み個体ターゲット保管庫
 - 標準線源保管庫 (測定ステーション)
 - 核分裂物質検出器保管庫
- 8) ユーティリティ (電源容量、冷却水等)
 - ・ビームシャッター駆動
 - ・クリアリングマグネット (各中性子飛行管について)
 - ・最終偏極マグネット

- ・可動遮蔽体（必要であれば設置）
- ・ターゲット架台自動遠隔装置
- ・使用済みターゲット格納遠隔装置
- ・水冷用ポンプ駆動
- ・吸排気設備
- ・クレーン駆動
- ・天井隔壁自動開閉装置駆動
- ・陽子ビームモニター
- ・中性子発生モニター
- ・TV監視カメラ
- ・一箱照明、電話
- ・ビームダンプ（水冷却）

9) その他

中性子飛行管真空排気系

中性子測定ステーションの実験機器基本設備（電源、ラック）

信号ケーブル付設

モニター系整備

上記の仕様のもとに、中性子核物理実験施設の構造・配置に関する案として現在検討されている2例をそれぞれ Fig. 3. 6. 15. 1～Fig. 3. 6. 15. 3及び Fig. 3. 6. 15. 4～Fig. 3. 6. 15. 6に示す。

これ等の案は平行して検討を進めている消滅処理研究用炉物理実験施設との統合を基調として検討されたものである。従って、両施設で共通なユーティリティー等が最適になるような配置として構成されている。今後は、中性子科学研究計画の中で主要施設と整合性を取りつつ、更に詳細を検討し、施設の実現に向けて努力が必要である。

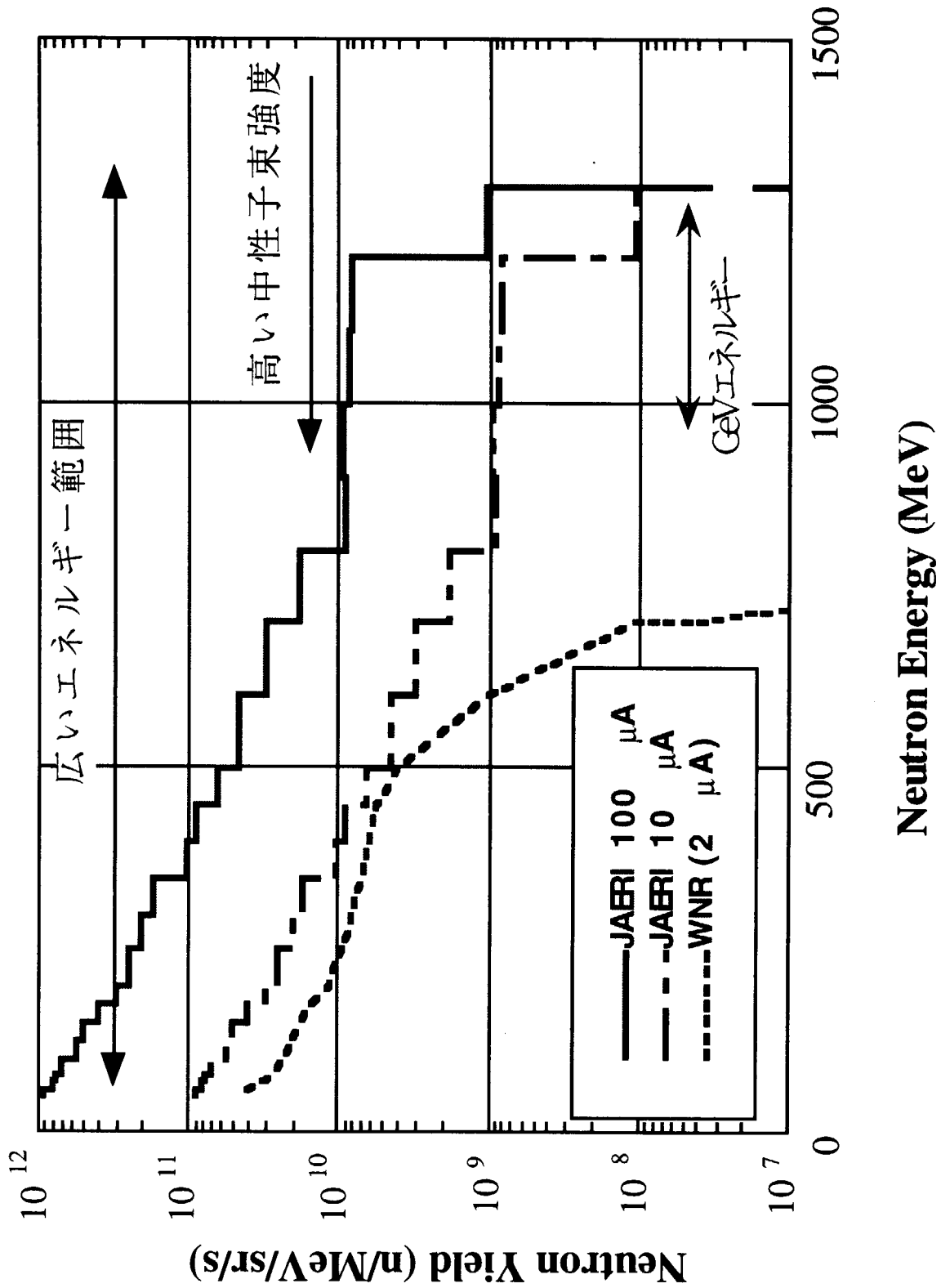


Fig. 3.6.1 大強度陽子加速器核破砕中性子源スペクトル

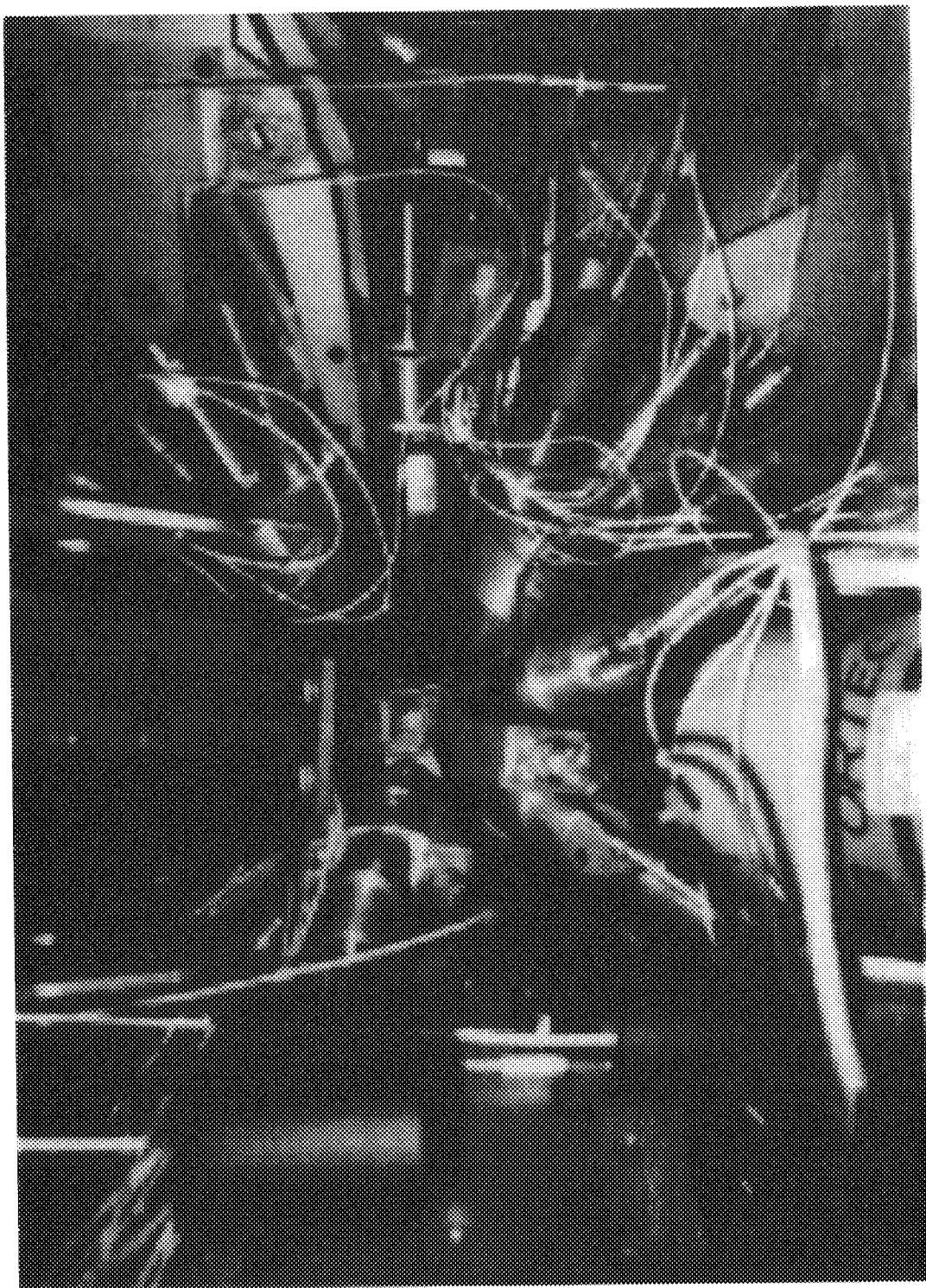


Fig. 3.6.2 LANSCE/WNR に設置されているガンマ線測定用クリスタルボールの
セットアップ

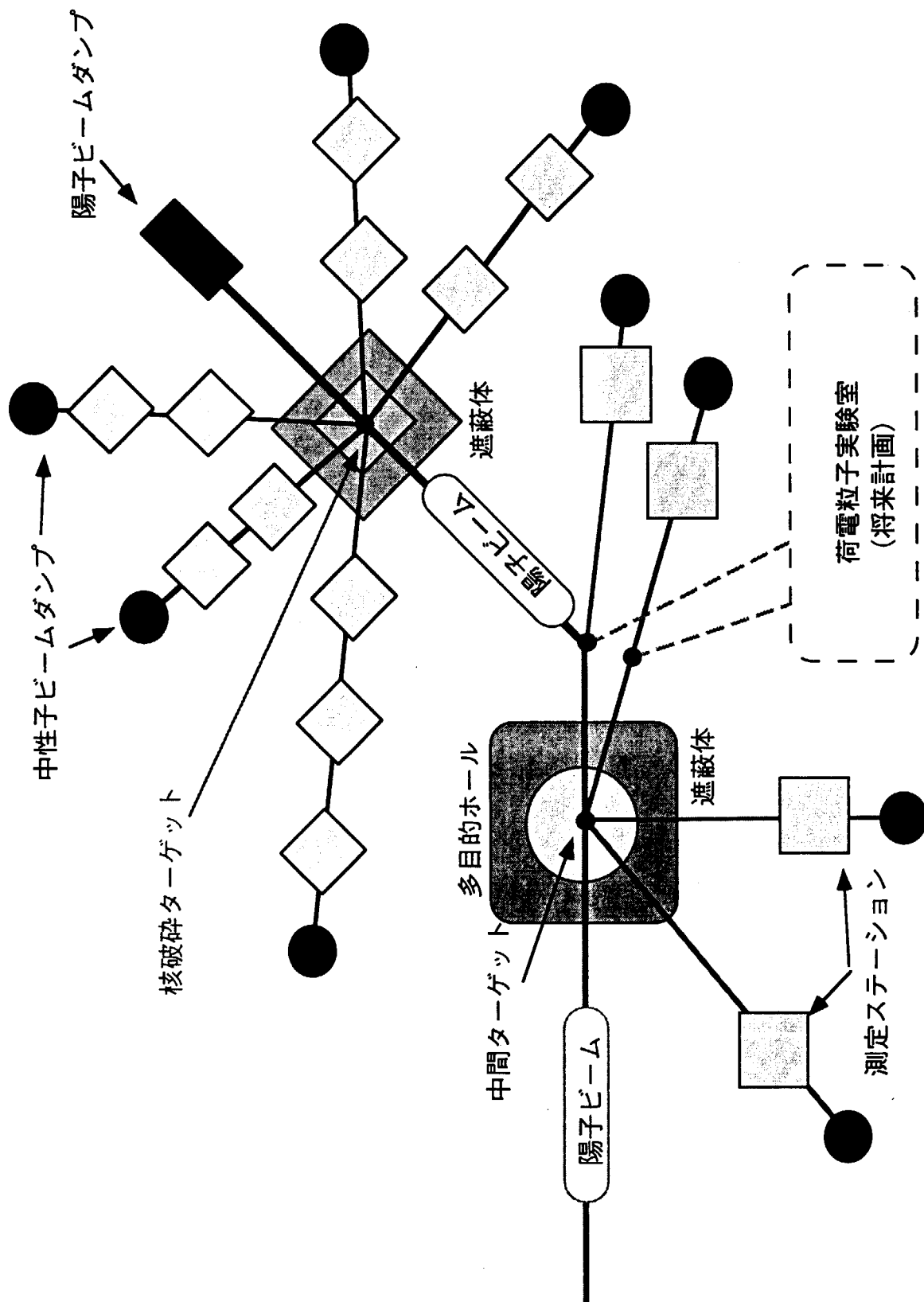


Fig. 3.6.3 核物理研究施設の概念図

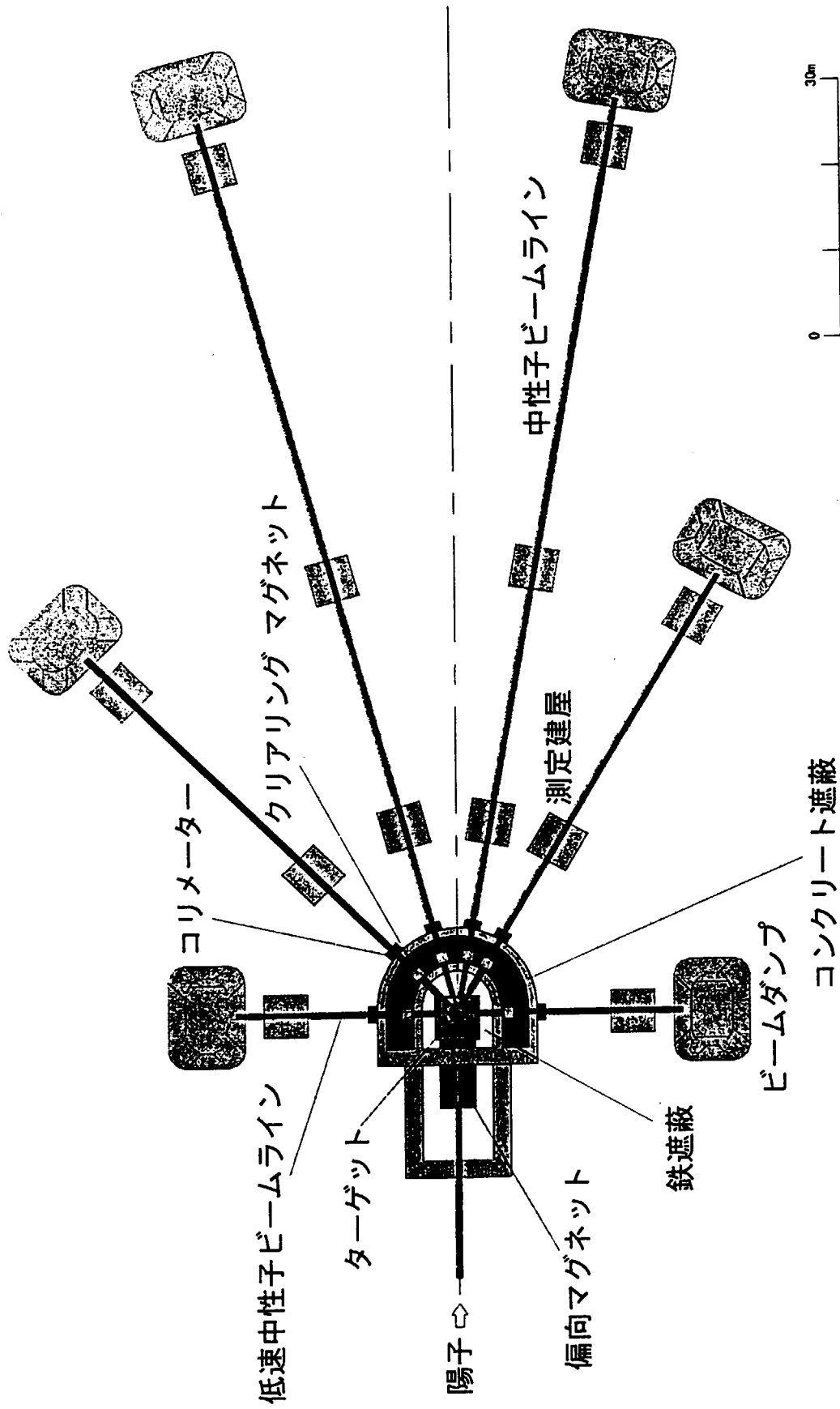


Fig. 3.6.4 中性子核物研究施設基本レイアウト

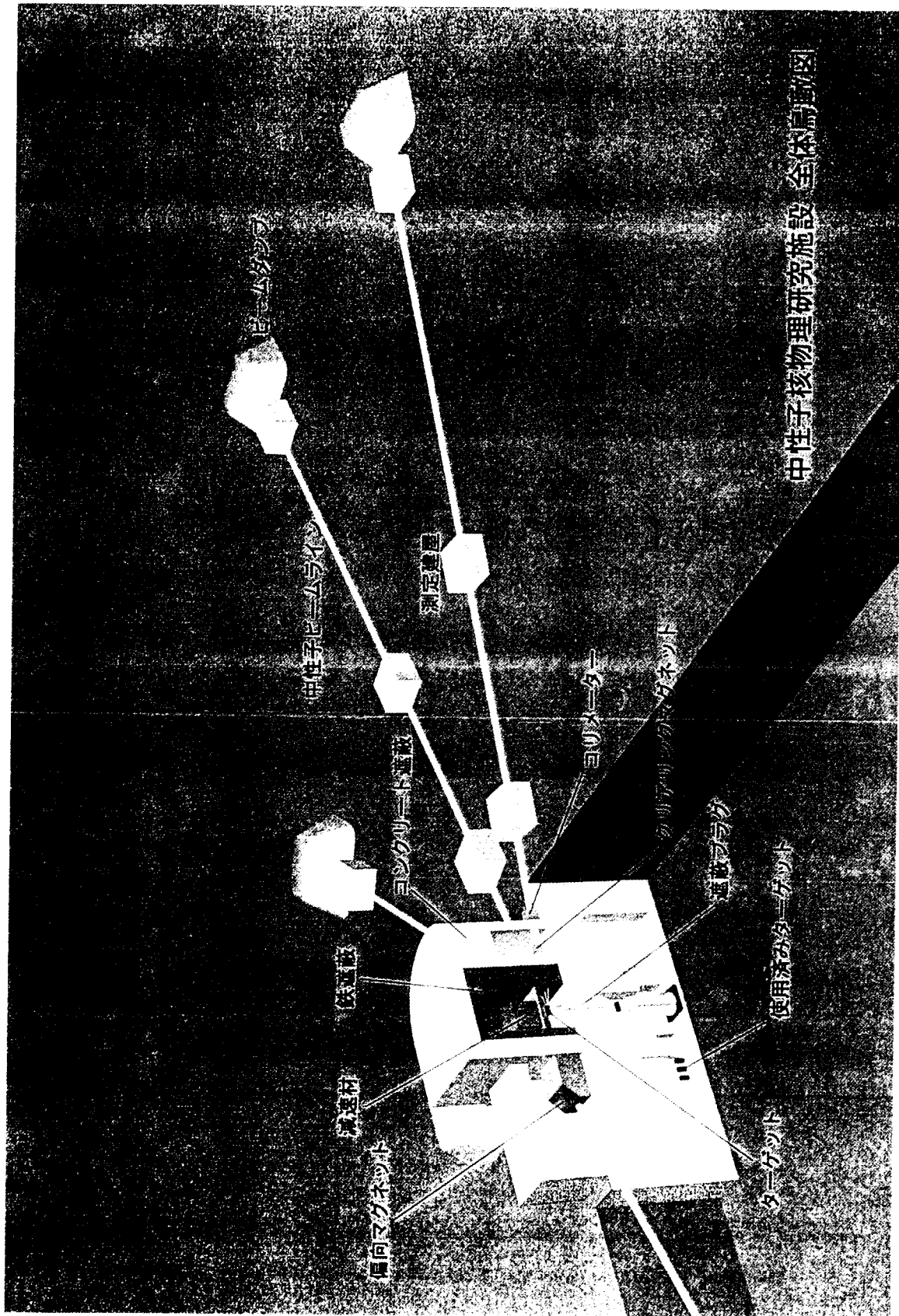


Fig. 3.6.5 概念検討に基づく中性子核物理研究施設の鳥瞰図

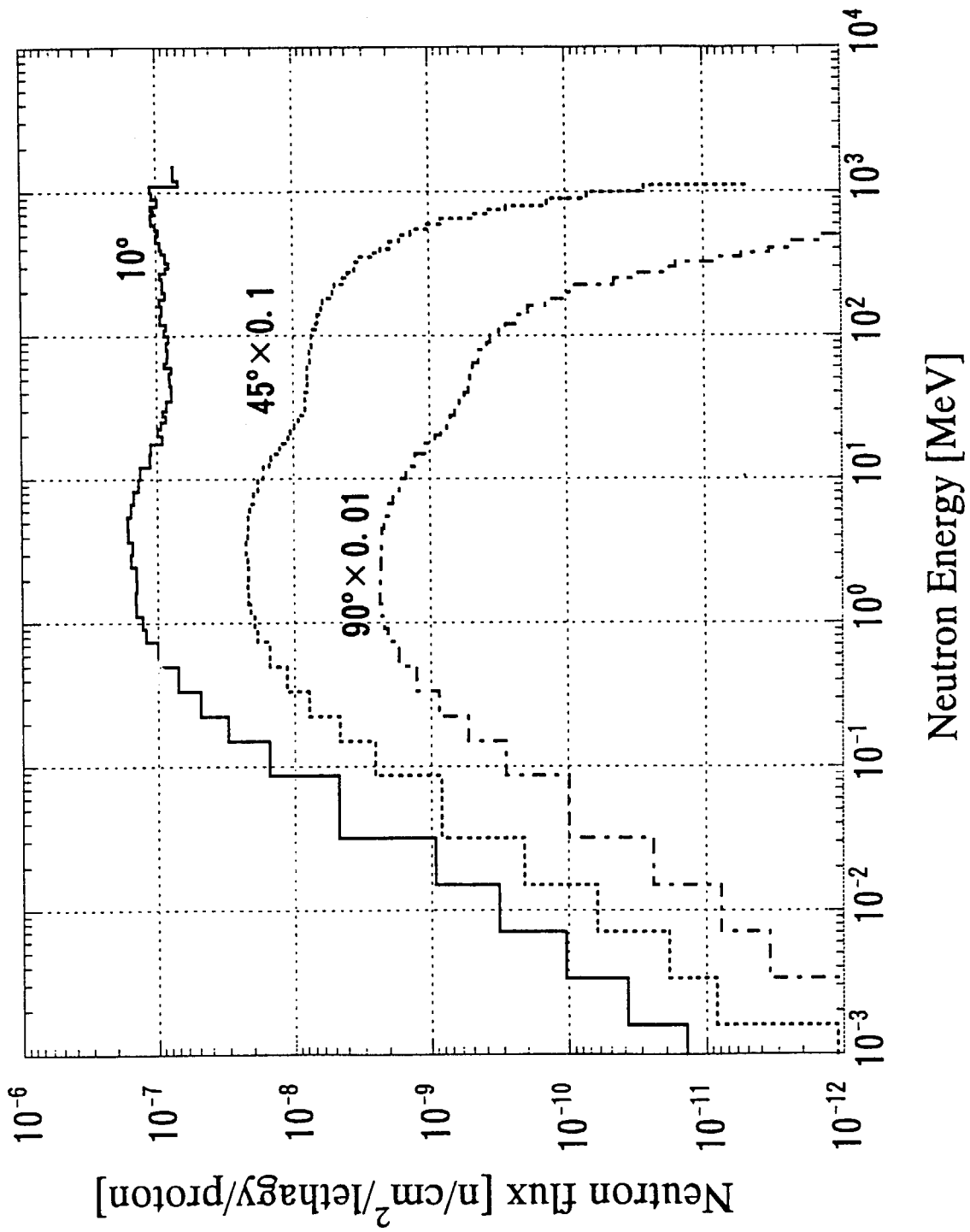


Fig.3.6.6 中性子のエネルギースペクトル (測定装置=10m)

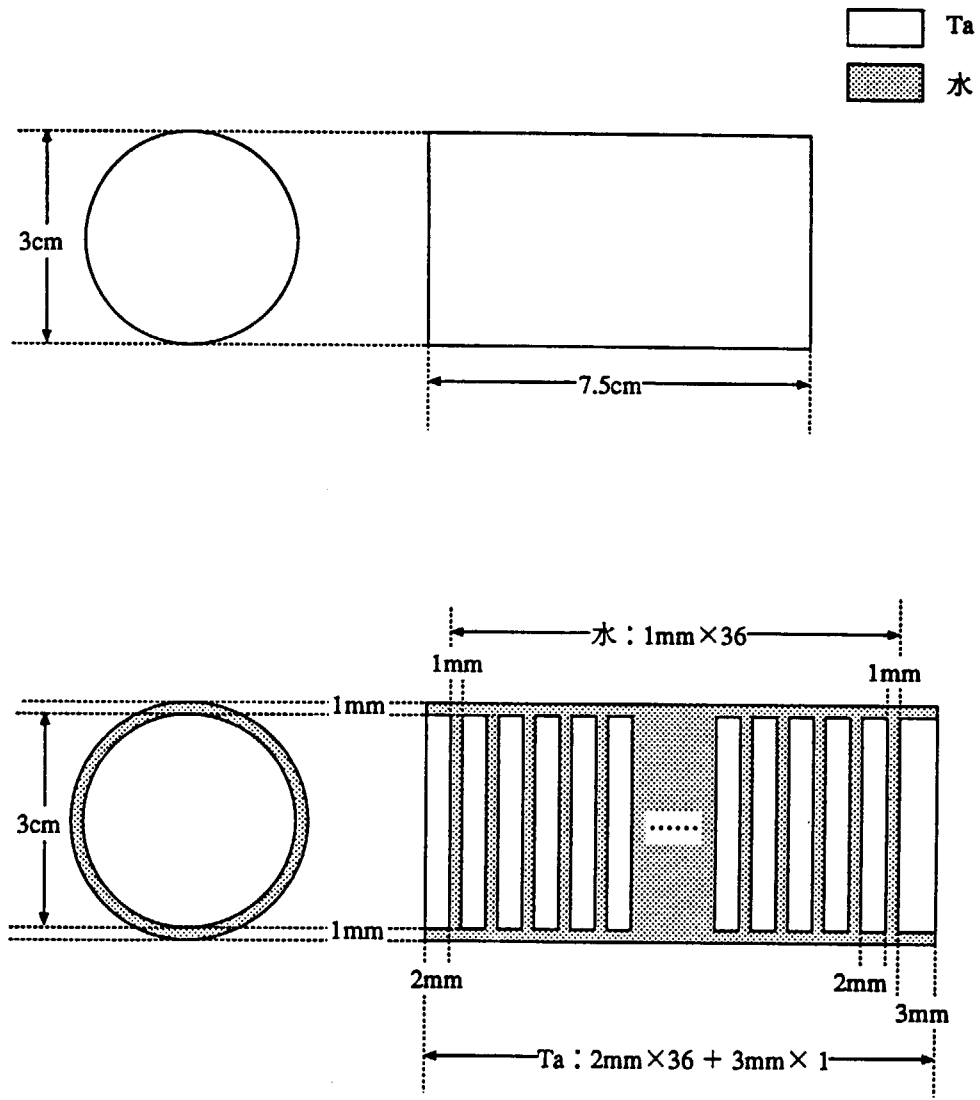


Fig. 3.6.7 除熱用冷却水付きターゲット断面

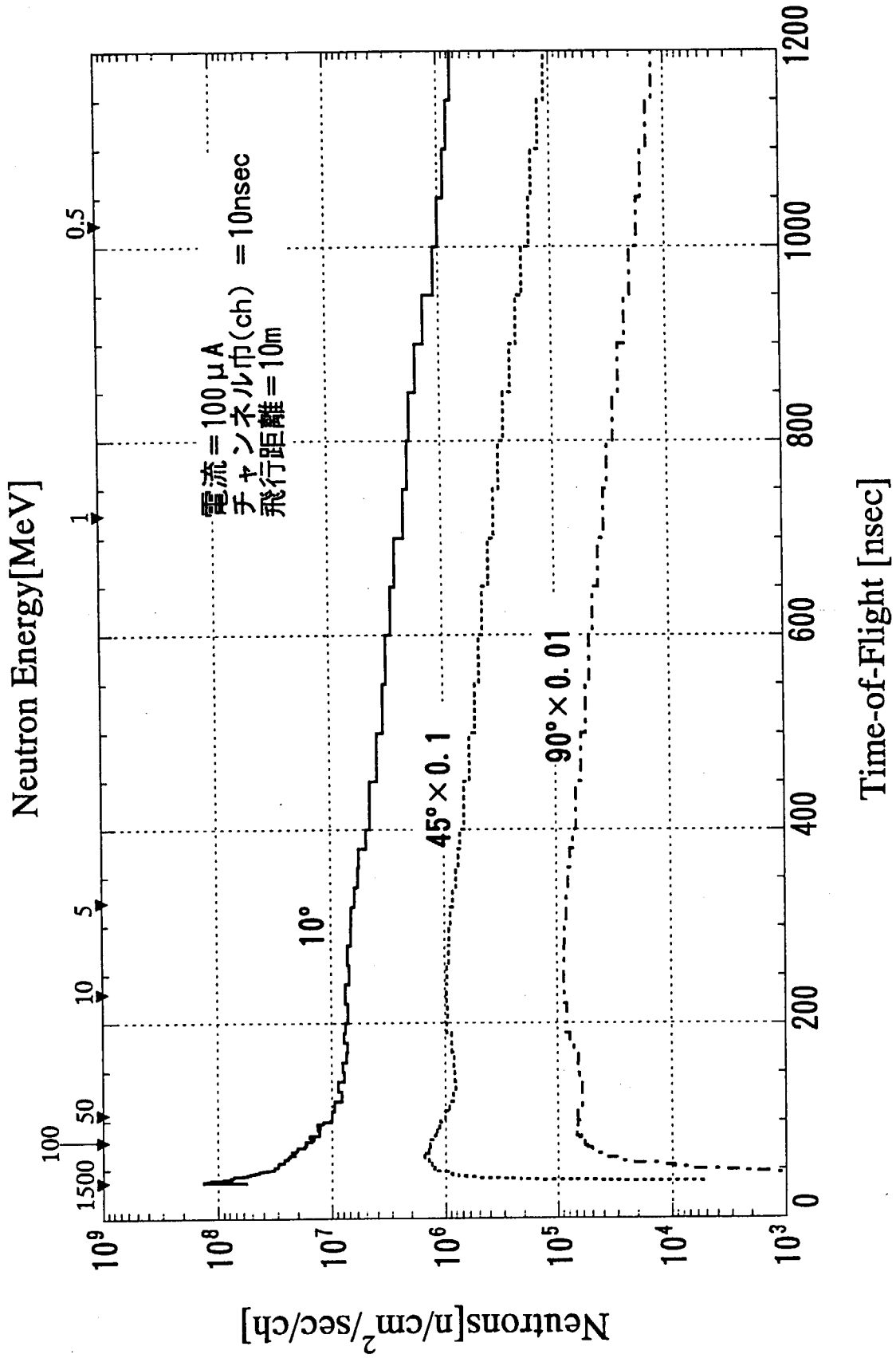


Fig. 3.6.8 位置 10m での中性子の TOF スペクトル

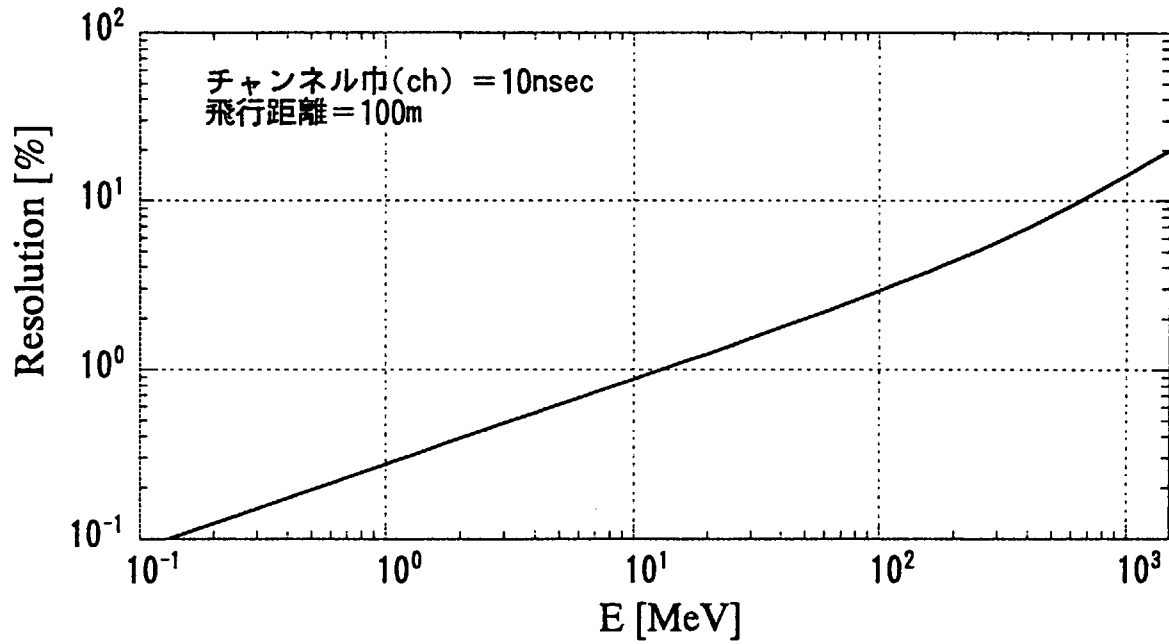
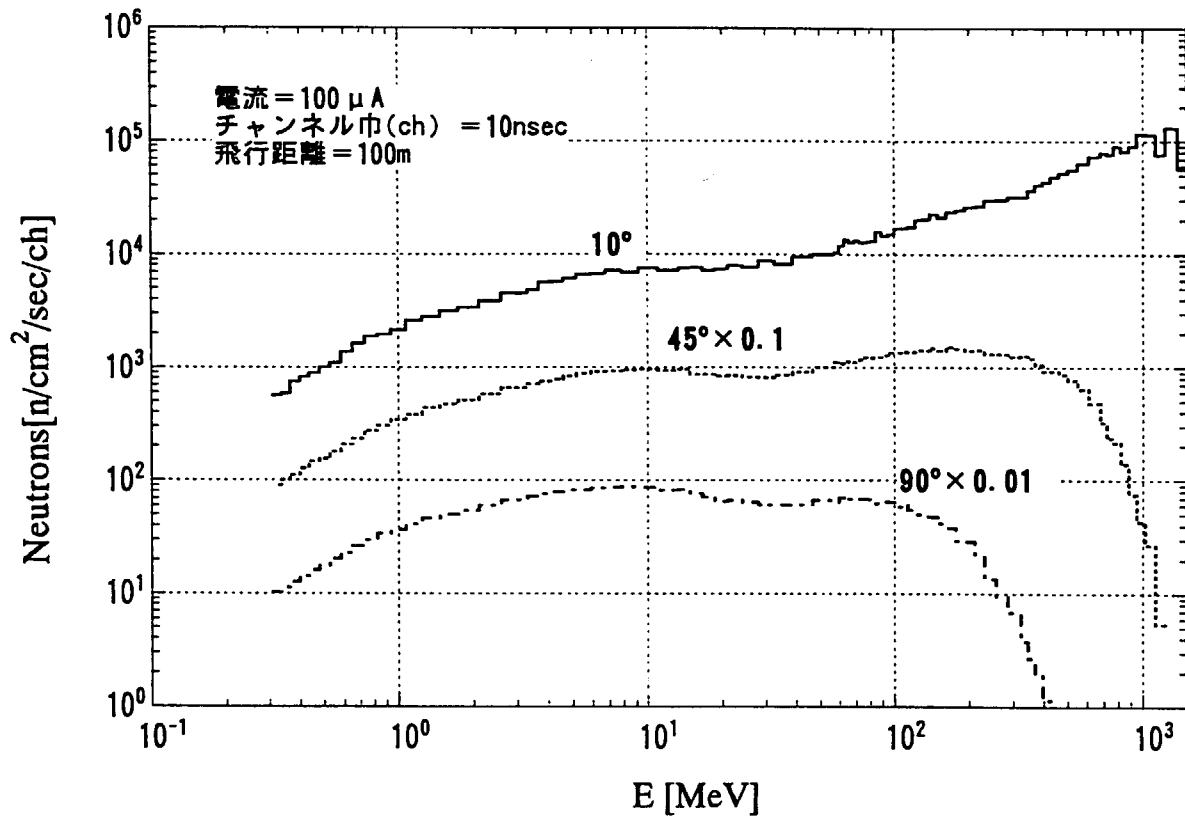


Fig. 3.6.9 中性子飛行距離とエネルギー分解能の関係

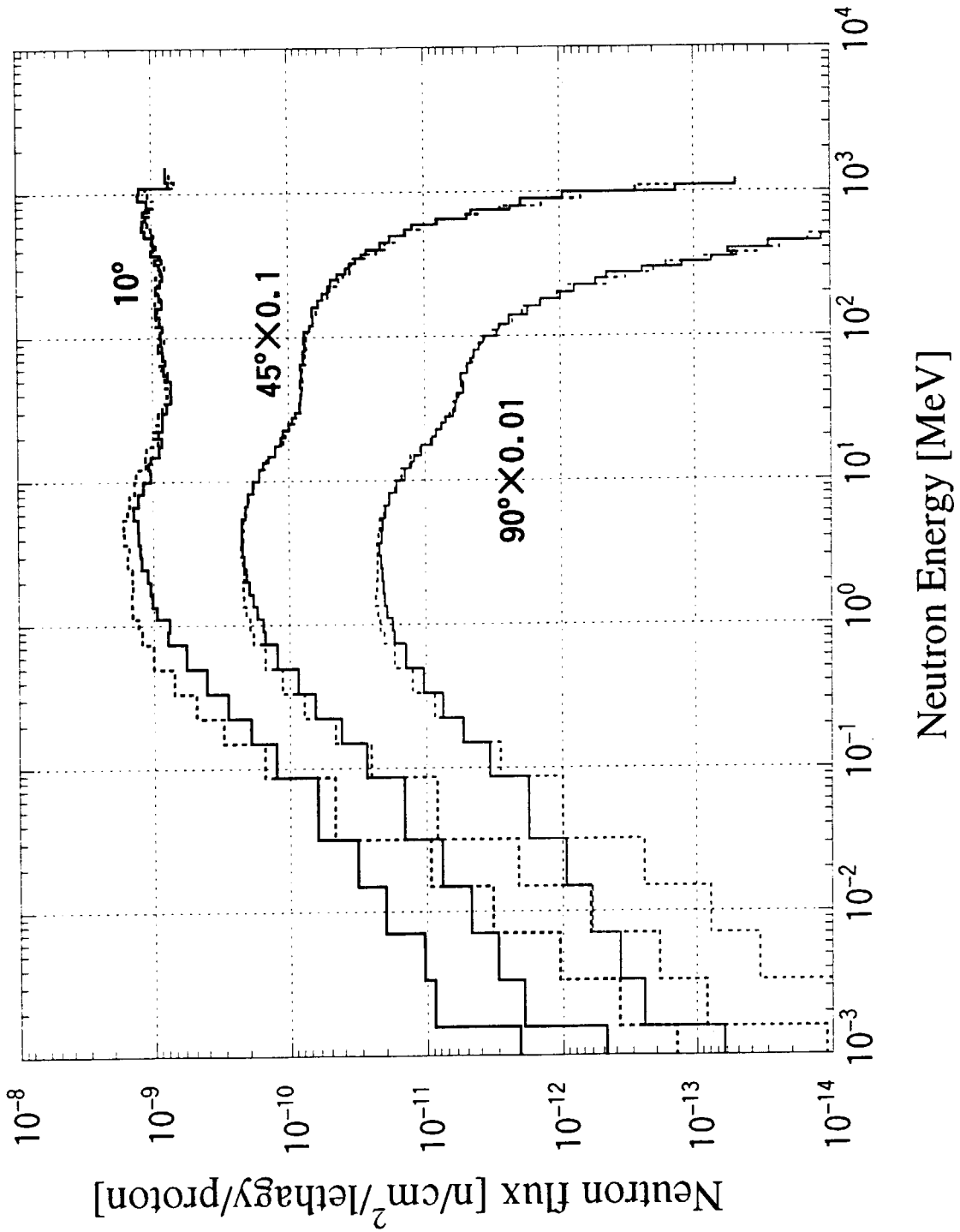


Fig. 3.6.10 除熱用冷却水付きターゲットからの発生中性子のエネルギースペクトル

Case3 円板の温度上昇時刻歴

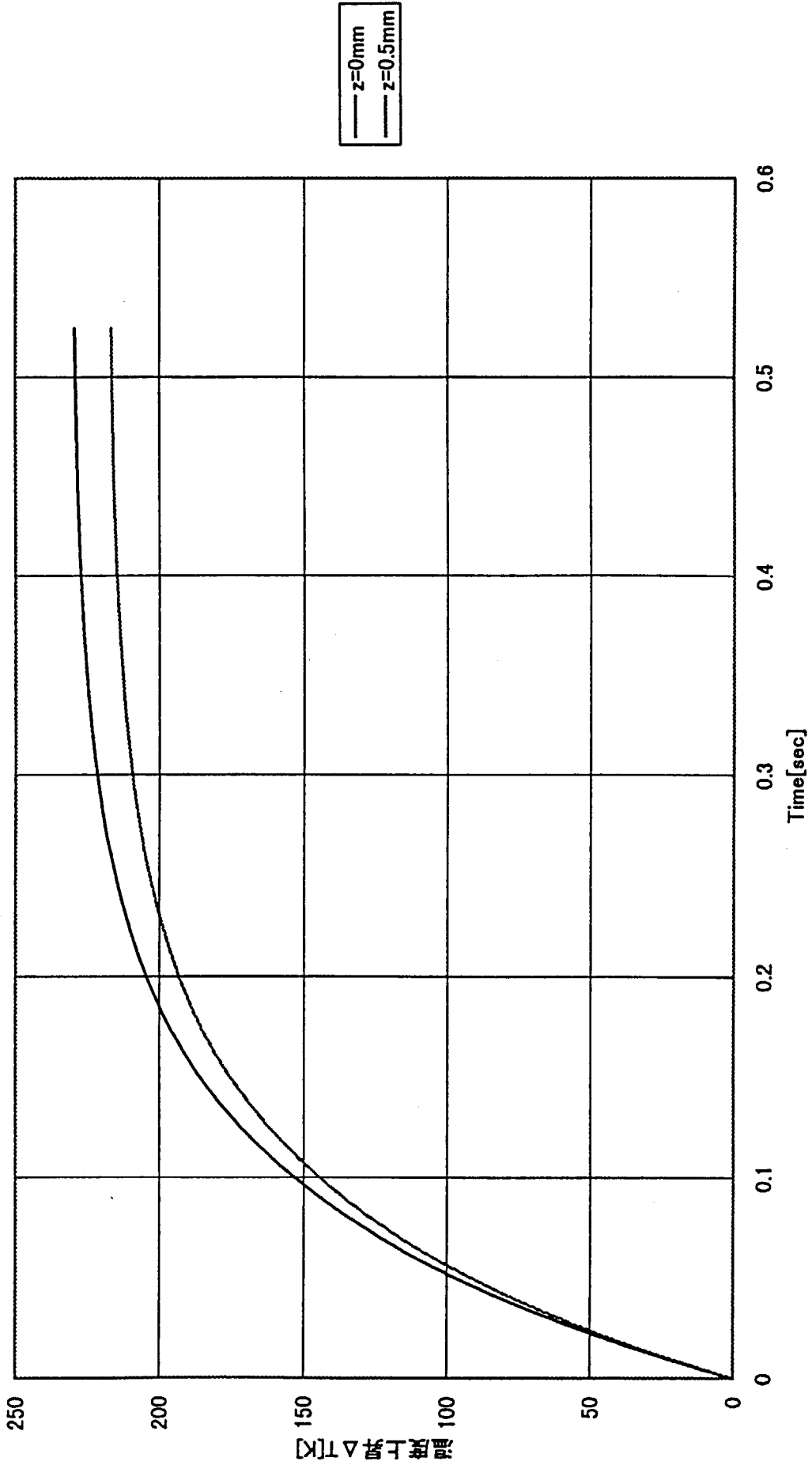


Fig. 3.6.11 円板の温度上昇の時間変化

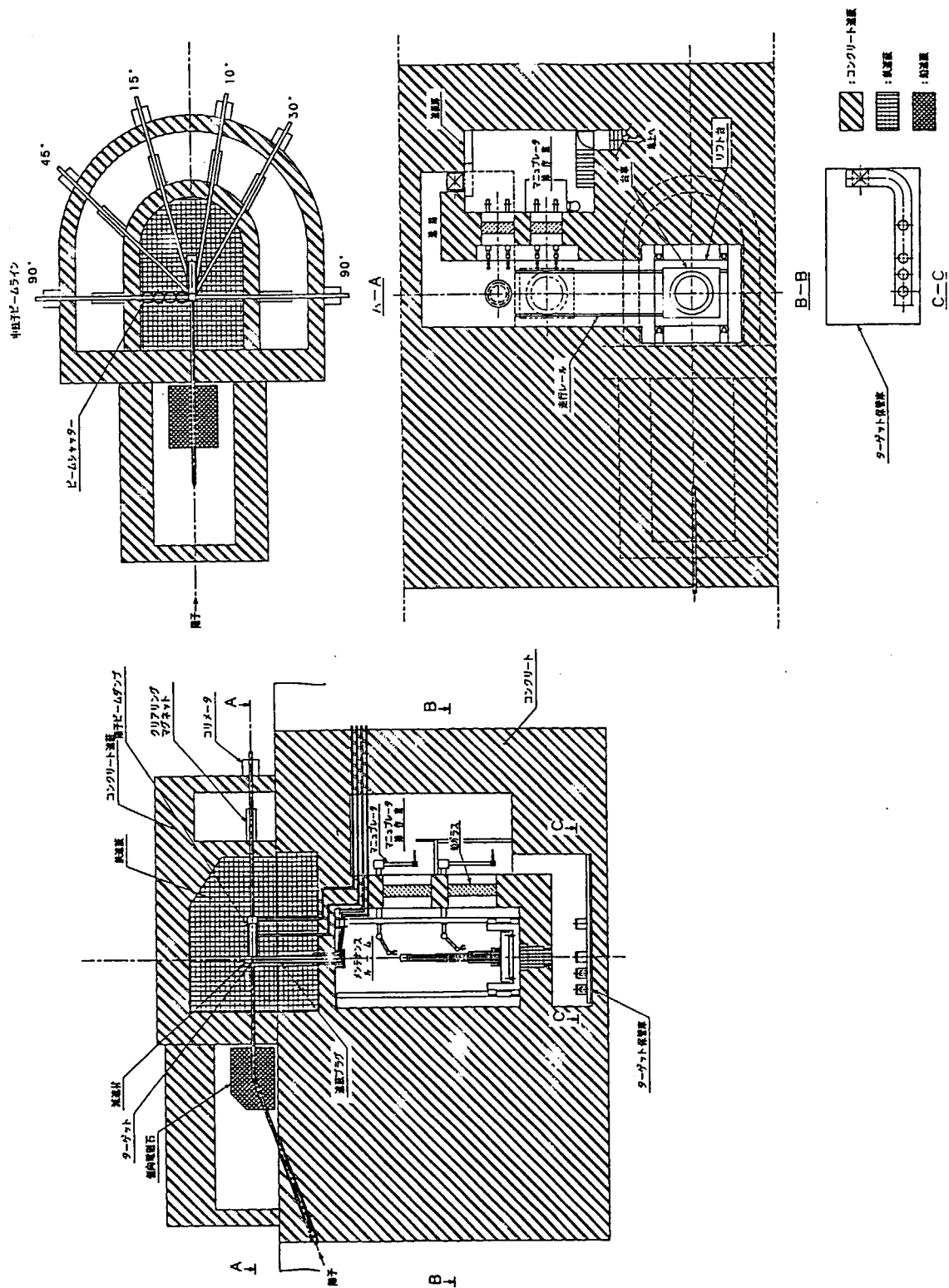


Fig. 3.6.12 ターゲットステーションの遮蔽構造

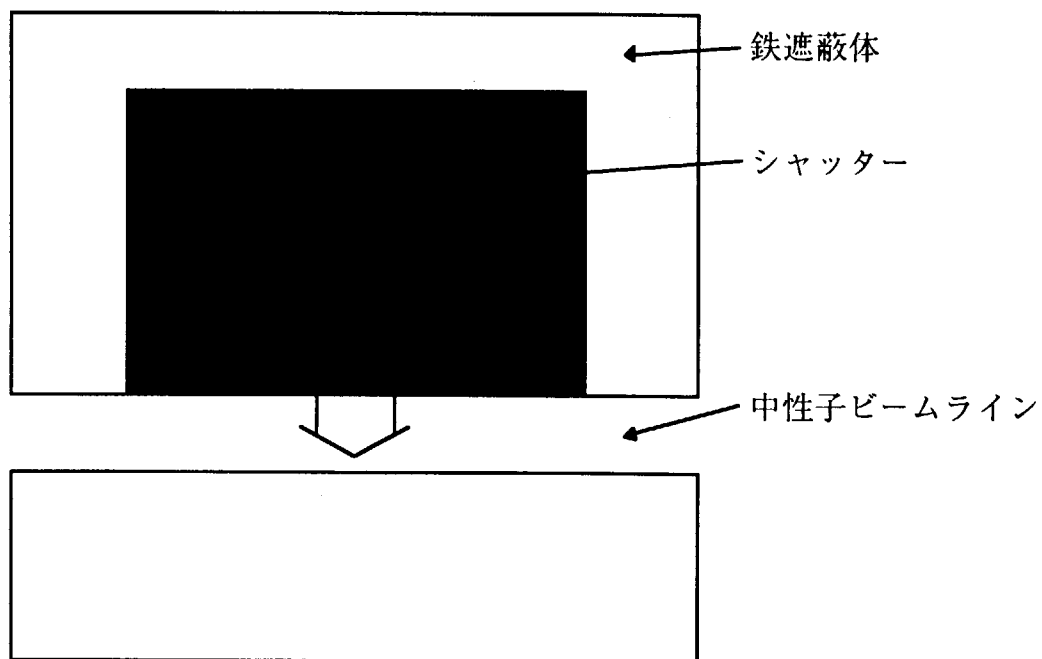


Fig. 3.6.13.1 ビームシャッター概念図 (押しつぶし型)

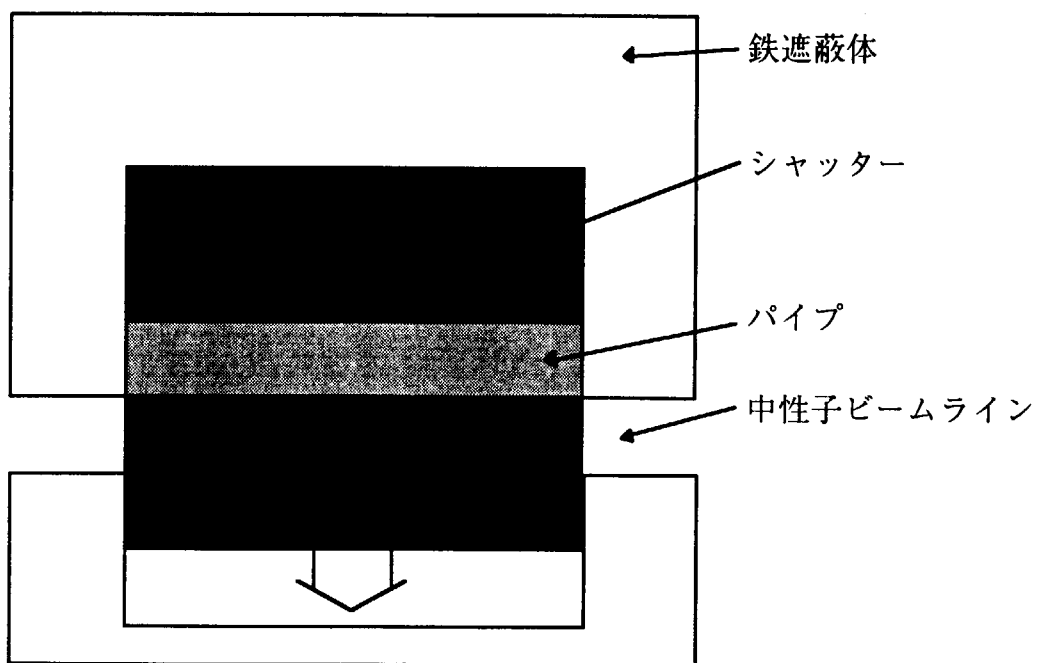


Fig. 3.6.13.2 ビームシャッター概念図 (パイプ上下型)

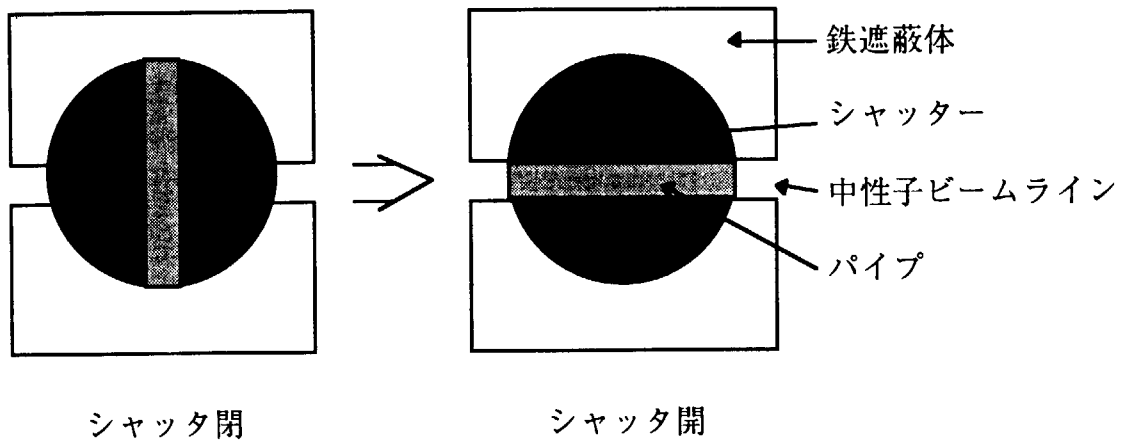


Fig. 3.6.13.3 ビームシャッター概念図 (円盤回転型)

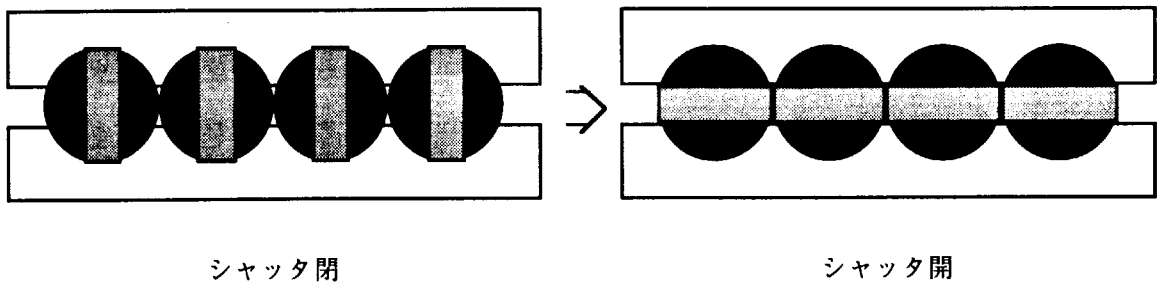


Fig. 3.6.13.4 ビームシャッター概念図 (小型円盤連動型)

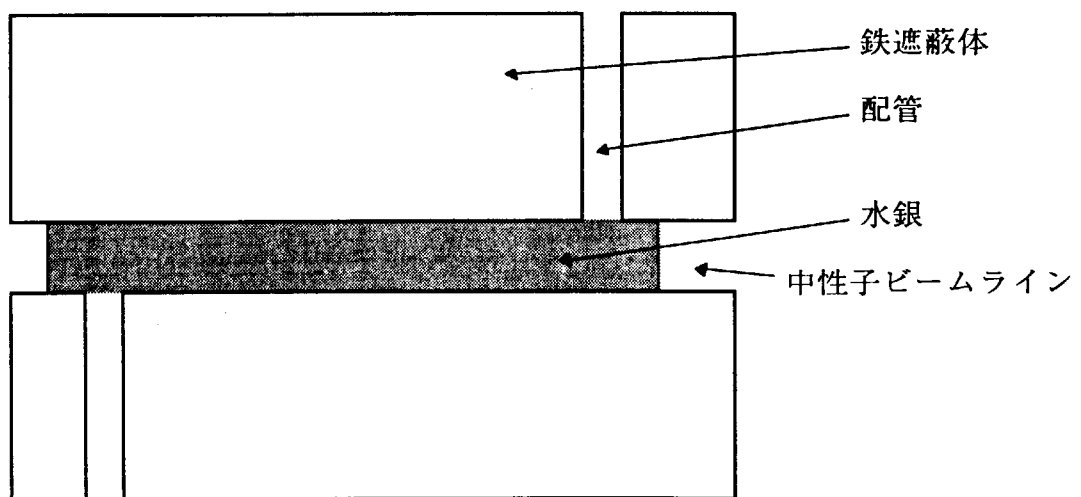


Fig. 3.6.13.5 ビームシャッター概念図 (水銀注入型)

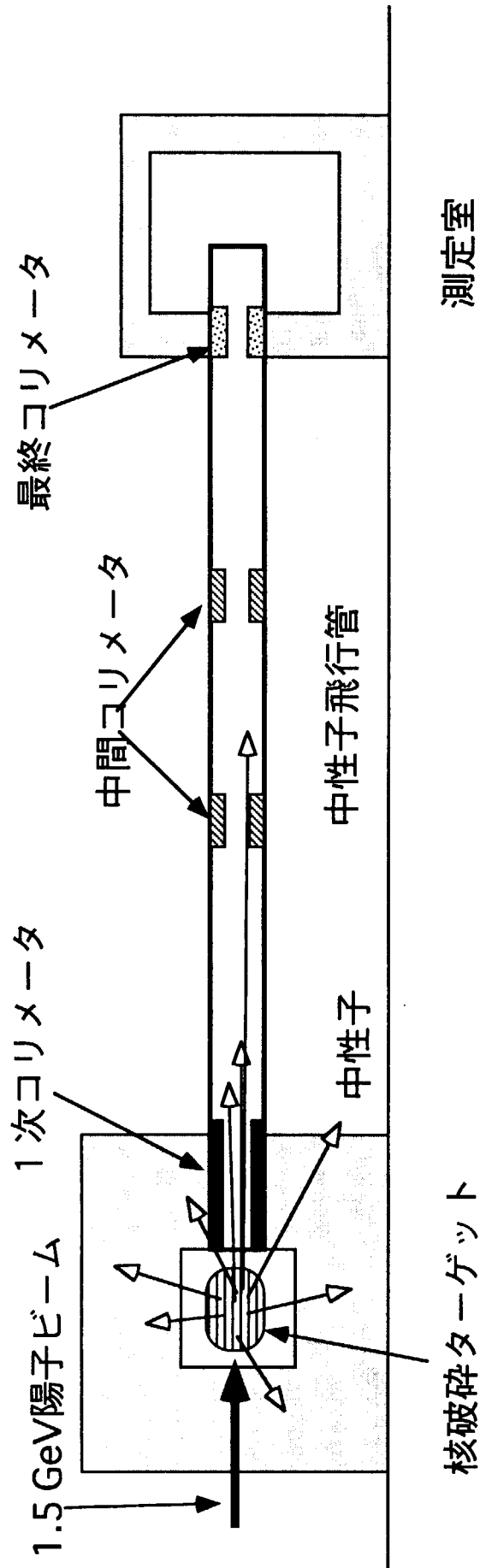


Fig. 3.6.14 中性子飛行管、コリメータの構成及び測定室の概念配置

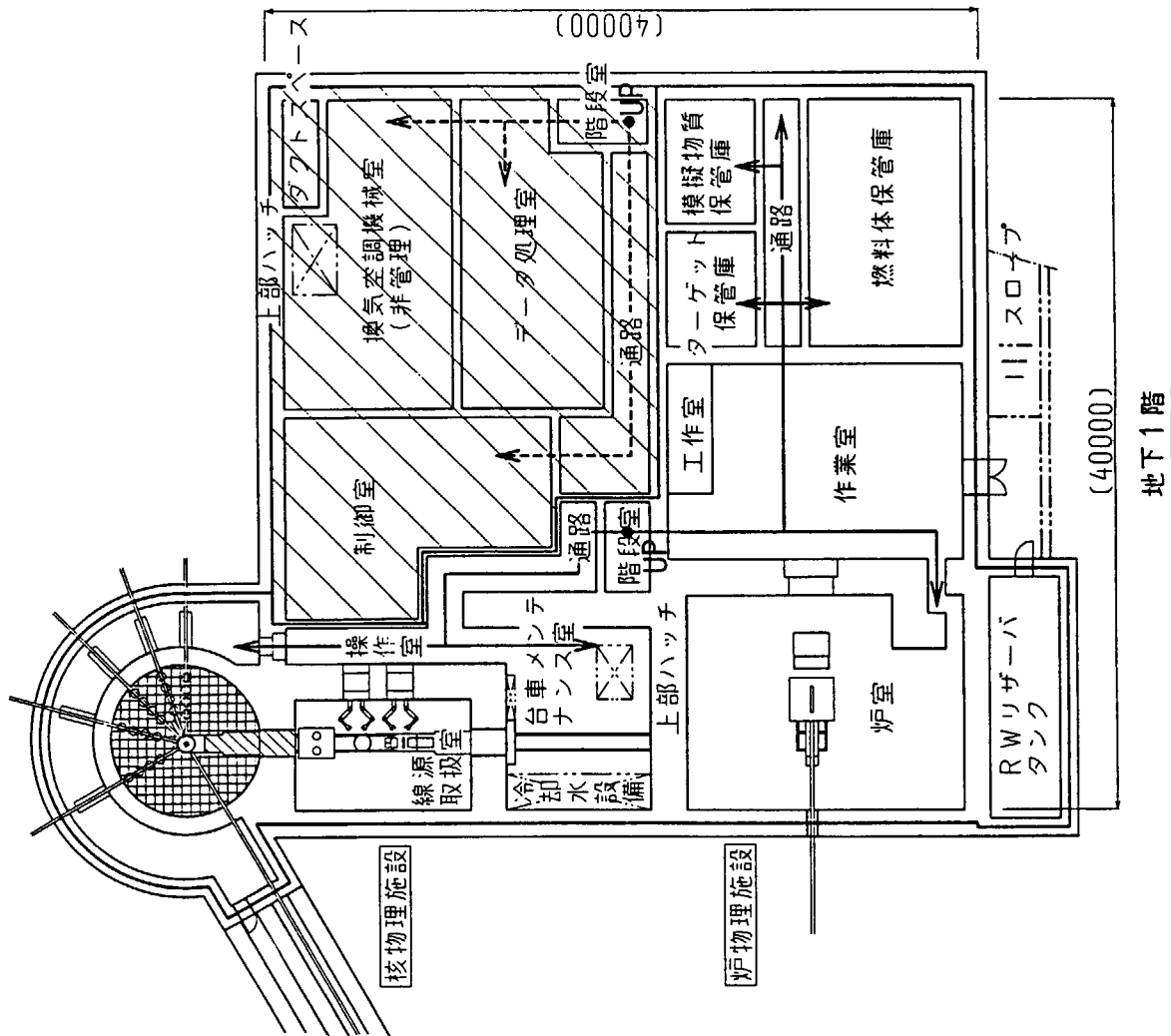


Fig. 3.6.15.1 検討例 1: (ターゲットステーション及び1階部の平面図)

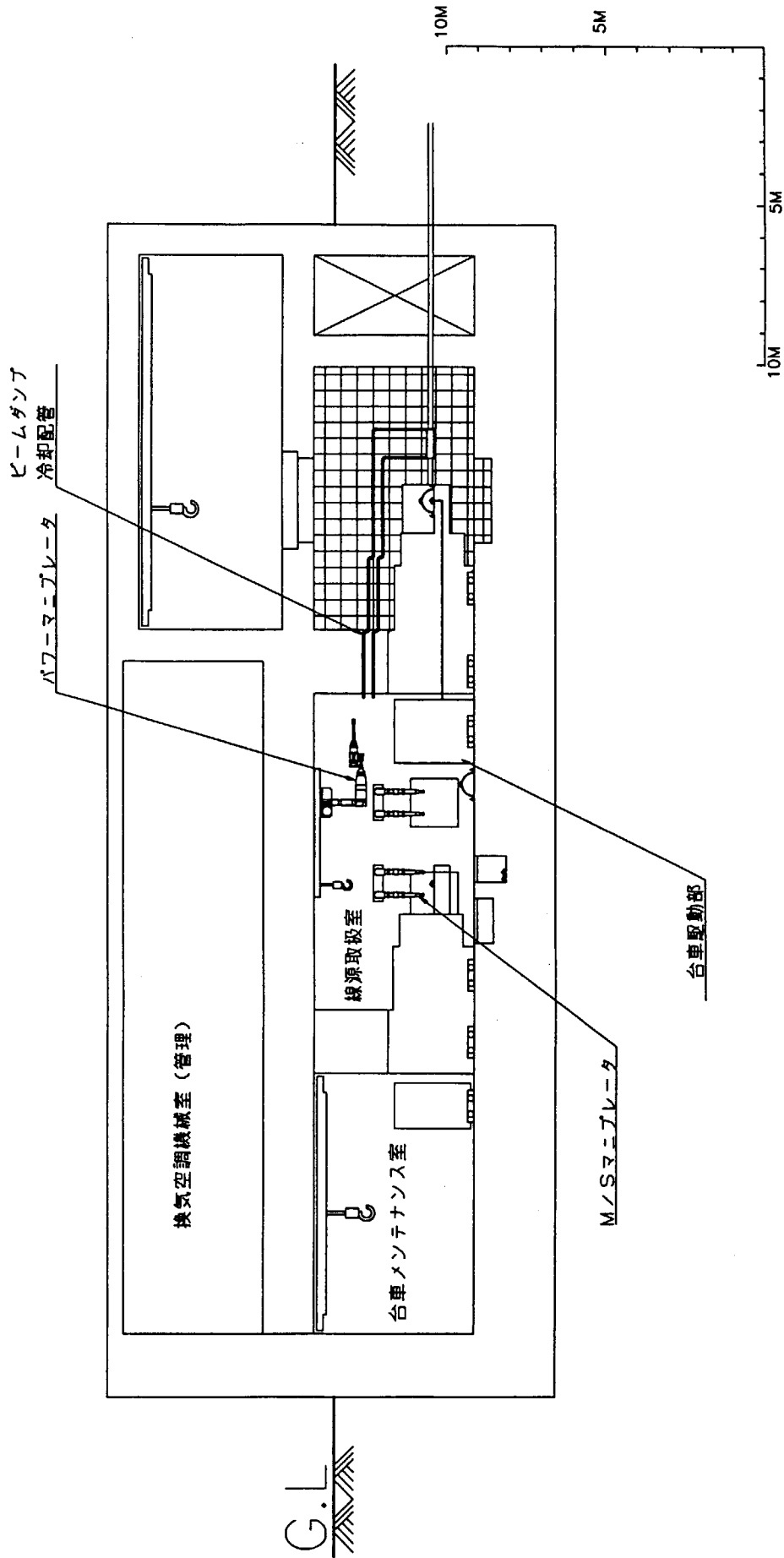


Fig. 3.6.15.2 検討例 1 : (ターゲットステーションを含む垂直断面図)

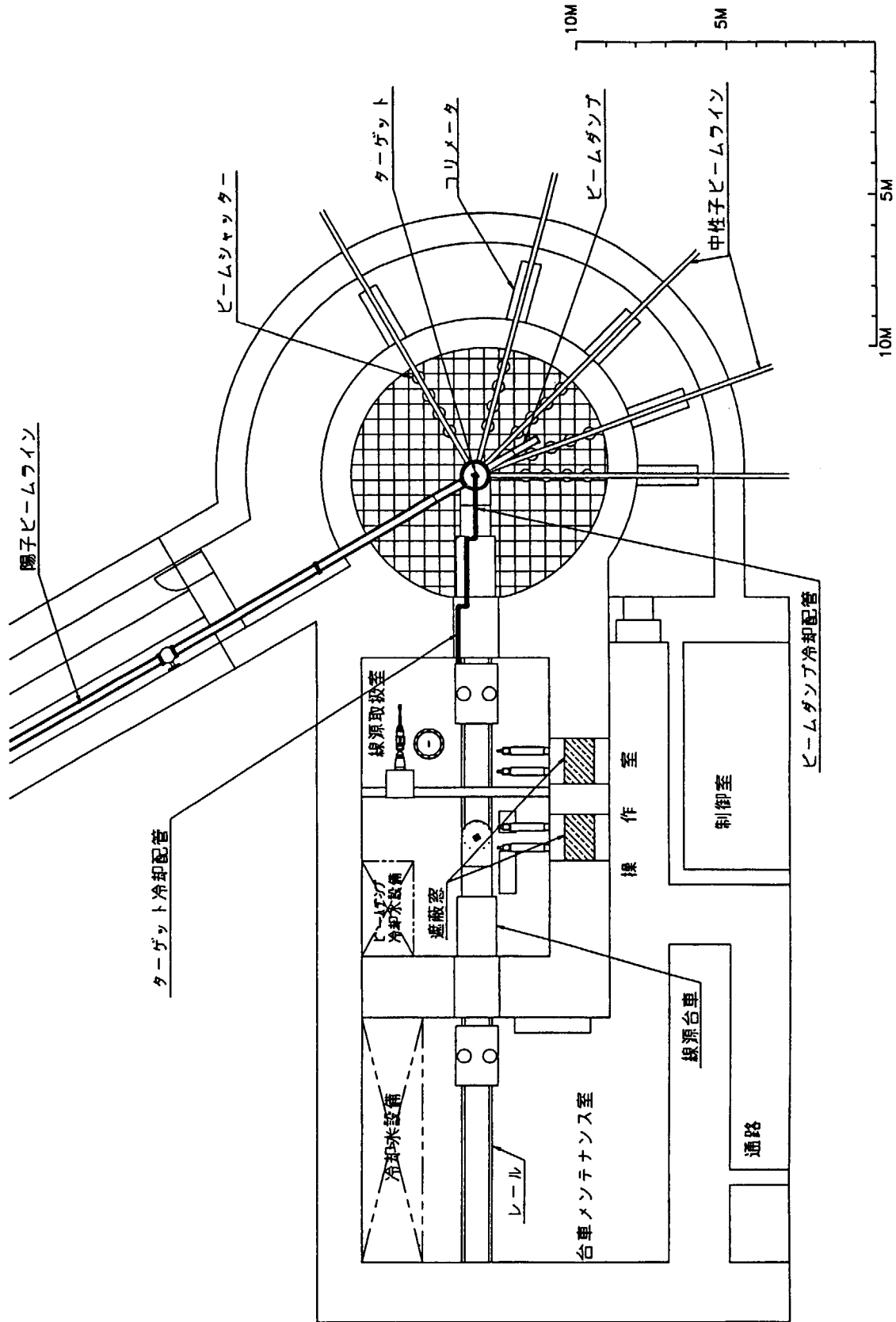


Fig. 3.6.15.3 検討例 1: (ターゲットステーションの拡大平面図、ターゲット、ターゲット冷却配管、ビームシャッター、コリメータ、ビームダンプ、中性子ビームライン)

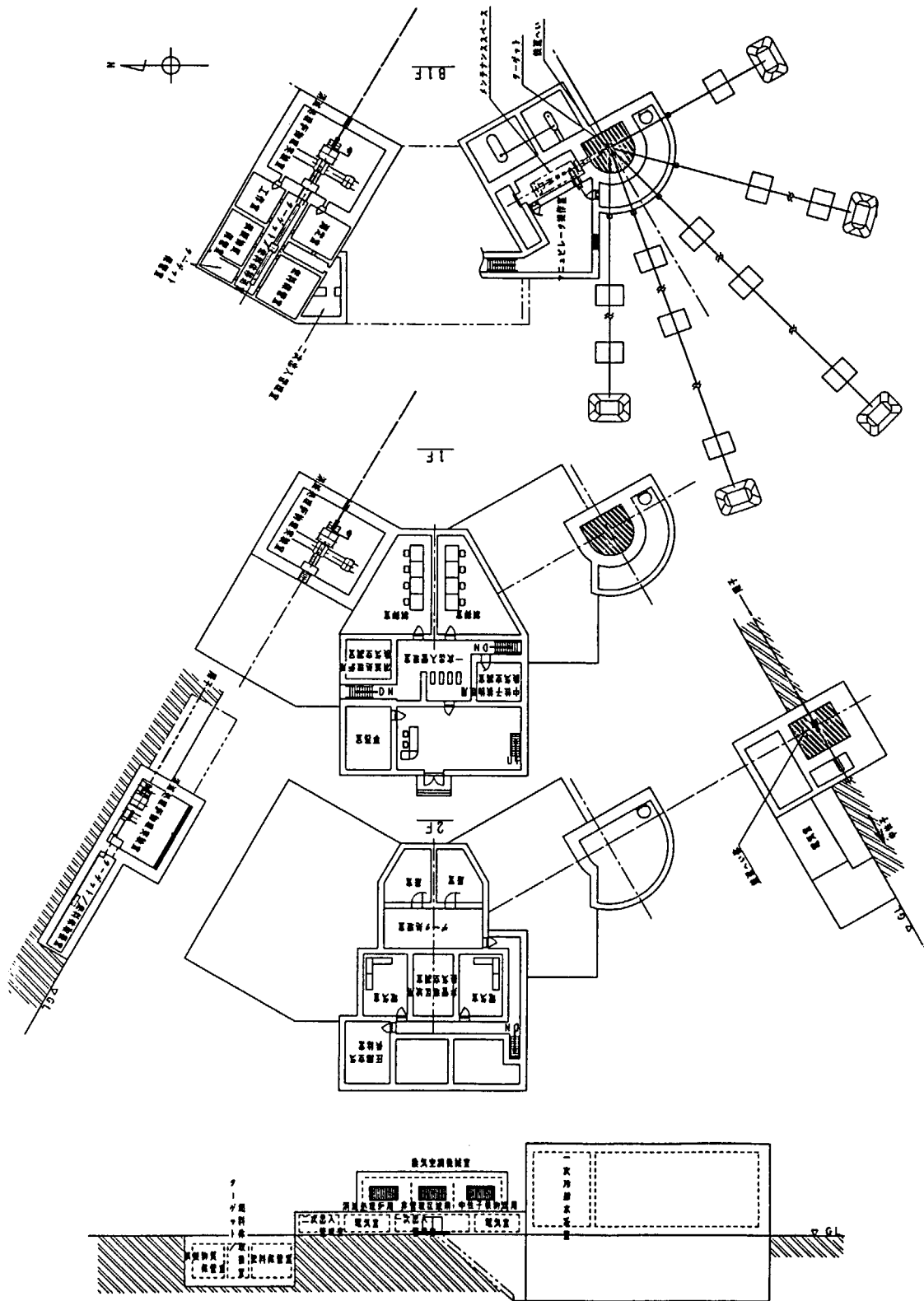


Fig. 3.6.15.4 検討例 2 : (全体配置構成図)

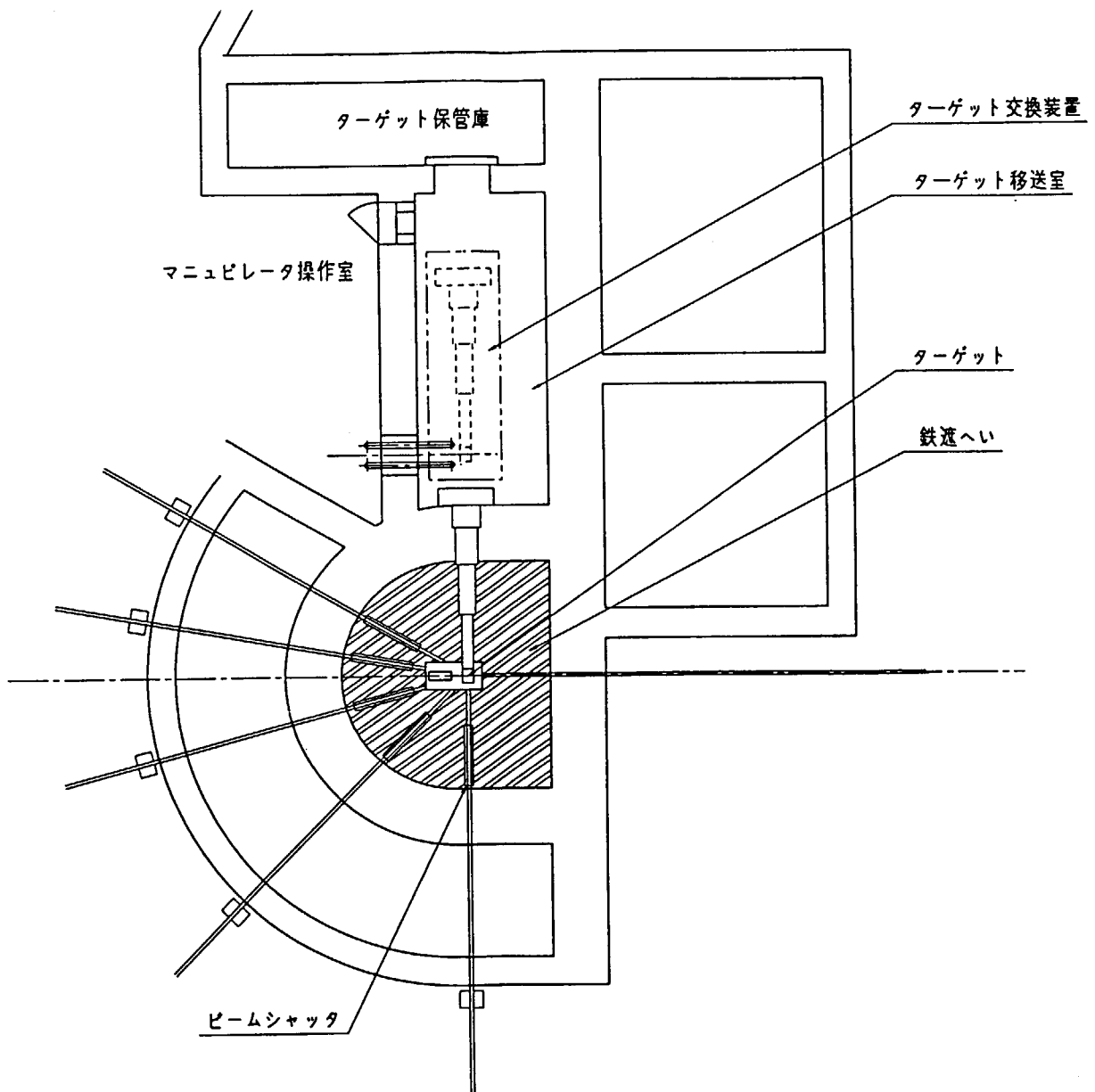


Fig. 3.6.15.5 検討例 2 : (ターゲットステーション拡大平面図)

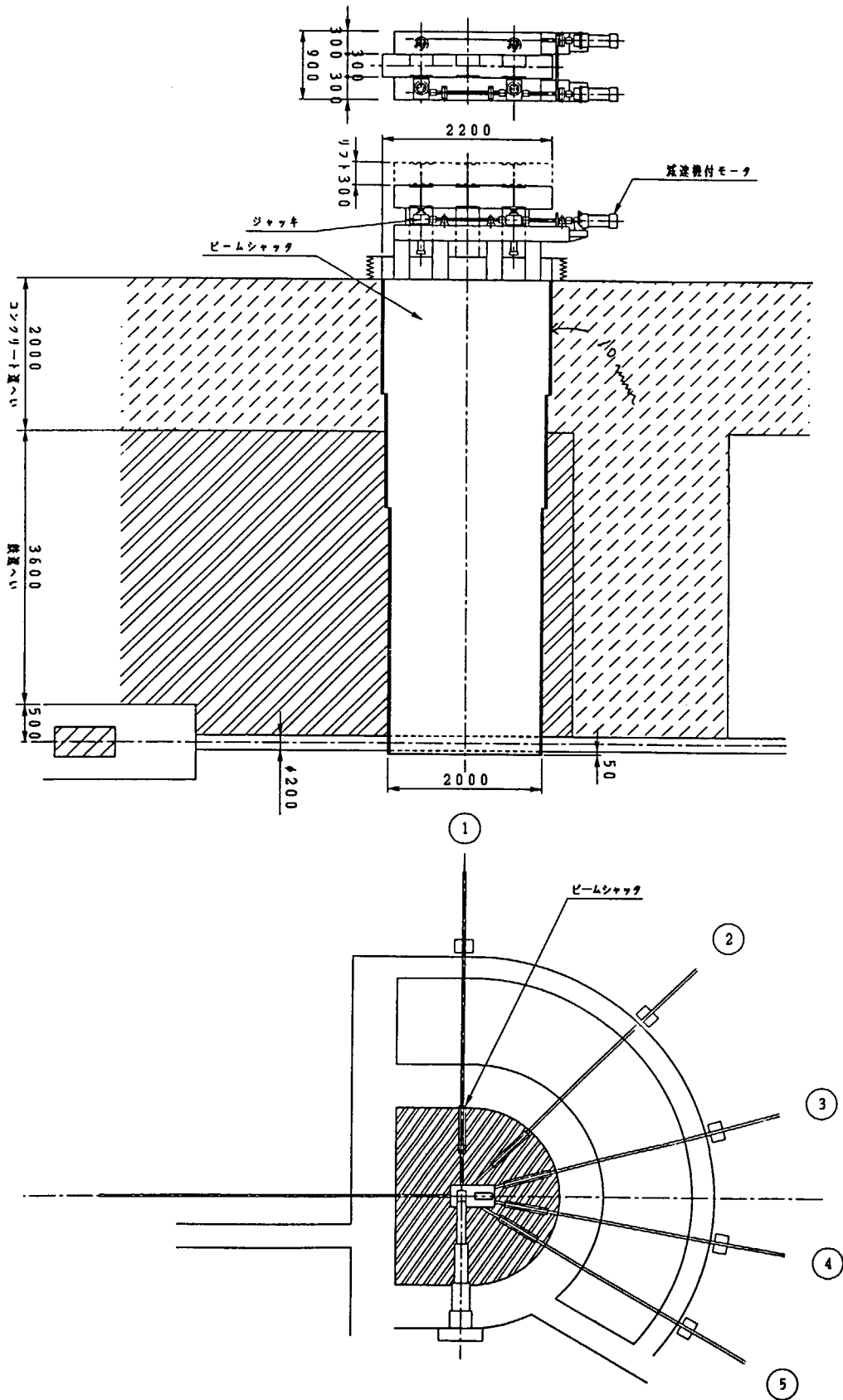


Fig. 3.6.15.6 検討例 2 : (ビームシャッターとステーション配置)

3. 7 核破碎生成片加速実験施設

3. 7. 1 研究の目的と概要

本実験施設では、大強度陽子加速器から供給される陽子ビーム (1.5 GeV、数 10 ～ 数 100 μ A) をウラン炭化物等の標的に照射し、核破碎反応で生成する多様な放射性同位元素 (以下 R I という) を核種毎に取り出して原子核の性質を研究したり、核子あたり 10 MeV 程度まで加速して、核物理、核化学、物性物理などの基礎研究に利用する。R I の加速には、ビームのエミッタンスやエネルギーの可変性とエネルギー分解能に優れ、重いイオンまで容易に加速できる既設のタンデム静電加速器と超電導ブースター加速器を利用する。

(1) 超アクチノイドの物理と化学

R I ビームを用いて超重元素領域の原子核を合成し、その核的化学的性質の研究を行う。Fig. 3. 7. 1 は重核の殻構造エネルギーの計算値を陽子数 Z 、中性子数 N の関数として示したものである。 $Z=114$, $N=178$ 近傍に殻構造エネルギーの大きな領域があり、球形な超重元素の存在が予測されている⁽¹⁾。図にはこれまでに確認された超アクチノイド核種を四画形で示した。これらの核種は既存の安定核ビームを用いて合成されたものであるが、安定核ビームと利用可能な標的核の組み合わせでは中性子数の少ない原子核しか合成できず、超重元素領域の原子核を合成することは困難である。中性子数の多い R I ビームを使う利点はここにある。さらに、中性子の多いビームによる核融合反応は、融合確率を大きくする可能性がある。また、中性子の結合エネルギーが小さいため、融合して励起した原子核が中性子を放出して生き残る確率も大きくなると予想される。

超アクチノイドを含む重元素の化学的研究では、R I ビームを使って中性子数の多い長寿命の超アクチノイド核種を合成し、その化学的性質が相対論的効果によってどのように変化するかを調べる。重原子の内殻電子の速度は大きな原子核電荷との相互作用により速くなり、相対論的効果が重要になる。このため、内殻電子の軌道が収縮し、原子核電荷を遮蔽する。この結果、外殻の電子軌道が膨張して非相対論的な場合と異なる電子配置をとることが予測されている。たとえば 105 番元素 Db では、非相対論の場合と比べて、7s と 6d 軌道電子のエネルギー準位が逆転することが予測される。この効果は、ハロゲン化物の揮発性の違いとして反映され、軽い同族の NbBr₅ や TaBr₅ に比べて DbBr₅ は大きな揮発性を示すことが予測される。

宇宙における元素合成 (r-過程) と密接に関連している中性子過剰なアクチノイド核種などの β 遅延核分裂を研究する。r-過程における元素合成では中性子捕獲と β 崩壊の繰り返して重い元素がつくられていくが、ある程度重い原子核にたどりつくと β 崩壊と核分裂過程が競争する。このため、 β 崩壊による重元素の生成は阻害され超重元素など重い核は自然界に存在できないと予想される。r-過程の終端を決める上で β 遅延核分裂に関するデータは必要不可欠である。

(2) エキゾチック原子核の構造

高エネルギー陽子ビームによるウランなどの核破砕反応では安定領域から離れた R I が多数生成される。これらの中性子過剰 R I の構造を研究することで、安定領域近辺で有効性が実証されている原子核の殻構造が安定領域から離れたところでどのように変化するかが調べられる。(d, p) 反応などの直接反応は、エネルギー準位やスピン、分光学因子を決定する上で、極めて有効な実験手段である。R I ビームを重陽子の標的にあてる逆反応を利用することで、安定核から離れた原子核の核構造の研究が飛躍的に発展する。特に、二重閉殻核 ^{132}Sn の原子核を直接反応で調べることも可能になる。

生成される R I の中には中性子過剰の未知核種が多く含まれる。中性子過剰核種の核データ（半減期、質量、中性子分離エネルギー）は r -過程を理解するための重要な情報である。本実験研究施設で設置を予定している、標的とイオン源システムならびに同位体分離器を使うことにより、多くの未知中性子過剰核を研究対象とすることが可能になる。

3. 7. 2 R I ビーム加速の概要

R I ビーム加速の概要を Fig. 3.7.2 に示す。高エネルギー陽子ビームで炭化ウランなどを照射したときに核破砕反応で生成する多種類の R I を熱拡散などで標的から取り出し、イオン源へと導く。ここで、R I を正または負にイオン化し、同位体分離器（以下「ISOL」と呼ぶ）で質量と電荷の比 m/e で特定の質量の R I のみを選択する。この後、負イオンはタンデム静電加速器に入射され、目的のエネルギーまで加速される。正イオンの場合は、負イオンに荷電変換した後、タンデム加速器へと導かれる（タンデム加速器は負イオンのみを加速する）。

本施設で用いる ISOL は質量分解能 ($M/\Delta M$) 2000 と 20000（質量数 100）の二種類を予定している。ISOL は加速電圧 300 kV のプラットフォーム上に設置する。これにより、質量数 80 ~ 150 までの 1 価イオンは 2 ~ 3 keV/u で引き出され、つぎのタンデム静電加速器へと導かれる。

(1) R I の生成：標的物質の選択とイオン化過程への移送

R I の生成には陽子ビーム強度に応じて 2 種類の方法を使う。その 1 つは最大 10 μA の陽子ビームをウラン等の炭化物あるいは酸化物に照射し、R I を標的からの熱拡散を利用してイオン化過程へ移送する。もう 1 つは大強度（数 100 μA ）の陽子ビームとタングステン等（核破砕標的と中性子のコンバーターとして働く）との核破砕反応で多量に発生する中性子によるウランの核分裂反応を利用する。この場合、標的であるウラン等は効率良く中性子と反応するようコンバーター周辺に配置する。ここでは、R I のイオン化過程への移送は、ガスジェット搬送法（核反応生成物をエアロゾルを含むガス気流でイオン源まで搬送する方法）を使う。

Fig. 3.7.3 に、1.5 GeV 陽子をウラン炭化物に照射した場合の生成核種分布の計算結果を示す。これによると、陽子数 30 から 90 の広い範囲で、多くの中性子過剰核

の生成が期待される。後述するように、コンバーターから発生する中性子によるウランの核分裂では、入射陽子ビーム 100 μA に対して 7×10^{11} 個/秒の ^{132}Sn が期待できる。

(2) R I ビームの取り出し：イオン源の選択

R I ビームの取り出しに使うイオン源は、R I を生成しつつ迅速にイオン化し電場で引き出すものであり、短寿命 R I のオンライン同位体分離に使われているイオン源そのものである。

核反応で生成した R I のイオン源から引き出されるビーム強度 I (ions/s) は、陽子加速器から得られるビーム強度 ϕ 、標的物質の原子数 N 、着目した R I の生成断面積 σ 、イオン化効率 ε_1 、標的物質からイオン源への移行率 ε_2 およびイオンの引き出し効率 ε_3 の積であらわせる。また、R I が生成後イオンとして引き出されるまでに時間を要した場合、核種の半減期を $T_{1/2}$ 、引き出されるまで経過した時間を t_{del} とすると、核崩壊による強度の減衰は $I' = I \exp(-\ln 2(t_{del}/T_{1/2}))$ で近似できる。

R I がイオンとして引き出されるまでに経過する時間は、標的物質からの移送時間とイオン源内での滞留時間で表せる。ここで、イオン源内での滞留時間を短くするために、標的物質、R I をイオン源へ導く移送管およびイオン源を 2000 K 以上の高い温度に均一に加熱する。

現在まで、ISOL に使われているオンライン・イオン源には、正イオンを生成する電子衝撃型イオン源（または低電圧放電型とも呼ぶ）や ECR（電子サイクロトロン共鳴）イオン源並びに表面電離型イオン源がある。また、負イオンの生成には、 LaB_6 をイオン化面とした表面電離型負イオン源が使われている。

ウラン等の核破碎反応や核分裂反応で合成される R I の負イオン生成に着目すると、Br、I 等ハロゲン元素のイオン化には表面電離型負イオン源を使用し、その他の元素は FEBIAD イオン源（低圧アーク放電型イオン源）で正 1 価のイオンとして引き出した後、荷電変換により負イオンに変換する方法が最適と考えられる。すなわち、周期表で VIIA 族元素の Cl, Br, I は、電子親和力 E_A が 3 eV であることから、表面電離型負イオン源ではほぼ 100%、 E_A が 2 eV 程度の VIA 族元素の Se, Te では最大 16% の効率が期待される。他方 1 価正イオンを 1 価負イオンへ変換する荷電変換効率は E_A が 1 eV 程度の元素で 10 ~ 20% と見積もられる^[2,3]。IVA 族 (Ge, Sn, Pb), VA 族 (As, Sb, Bi), IB 族 (Cu, Ag, Au) 元素のイオン化効率は、FEBIAD イオン源で、約 20 ~ 50% と報告されている^[4]。したがって、荷電変換効率とイオン化効率を考慮すると、Sn, Sb, Ge 等は 2 ~ 4% の引き出し効率が期待される。以上の評価から、本施設では、Br, I, Se, Te のイオン化には表面電離型負イオン源を、Ge, As, Sn, Sb, Cu, Ag 等のイオン化には FEBIAD イオン源を選択した。

(a) FEBIAD イオン源

FEBIAD イオン源と標的の配置を模式的に Fig. 3.7.4 に示す。示した配置は、CERN の ISOLDE で使用されているものである^[5]。図示した標的とイオン源の構成では、

R I は標的から熱拡散で離散し、分子流として移送管中を移動しイオン源へと導かれる。ここでR I は、カソードから放出した電子が外部からの磁場によりトロコイド運動をしている放電領域へと入り、電子と相互作用することによりイオン化される。このイオン源の特徴は、放電領域に熱電子を放出するフィラメントが内蔵されていないことにある。これにより、フィラメントの破壊や過大な電子の放出を抑制することができ、安定した動作が確保される。核反応で生成したR I を用いたイオン化効率の測定では、Sn: 54%, Ag: 55%, Ge: 41% など比較的高い値が報告されている。また安定同位体をタンデム加速器からイオン源の標的（タンタルまたはグラファイト箔）に打ち込みつつ分離したときの効率測定では、Ga: 30%, Se: 2.4%, Br: 4% という値が得られている⁽⁶⁾。

(b) 表面電離型負イオン源

表面電離型負イオン源は、熱せられたイオン化表面（通常表面電離に関わる仕事関数の低い化合物である LaB_6 を使う）に電子親和力の高いハロゲン元素（Cl, Br, I）等が吸着されると、その一部は電離され負イオンとなって離散する。この原理を用いたイオン源と生成核の移送方法の一つであるガスジェット搬送法とを組み合わせた概念を Fig. 3.7.5 に示す。この場合、R I を得るのに陽子ビームあるいは、陽子ビームとコンバーターとの反応で発生する中性子を使う。この移送方法の特徴は、標的をイオン源と離れた地上電位に設置できることと、搬送時間が流すガス流量と標的槽の容量で決まることにある。また、標的とイオン源を 50 ~ 60 m 程度離すことができ、標的から発生する中性子やガンマ線のイオン源への影響をなくすることができる。これにより、標的がイオン源と一体となっている配置（Fig. 3.7.4）に比べ、強い陽子ビームを使うことが可能になる。

イオン化効率は、 $\alpha = n_i/n_0 = \sigma_i/\sigma_0 \exp((E_A - \phi)/kT)$ で記述される。ここで、 E_A は被イオン化元素の電子親和力、 ϕ はイオン化表面の仕事関数、 k はボルツマン定数、 T は温度、 σ_i 、 σ_0 はそれぞれイオンと原子の統計的重率を意味する。この式から、仕事関数の高い LaB_6 ($\phi = 2.3 \sim 2.7 \text{ eV}$) をイオン化表面とし 1800 K まで加熱したとき得られるイオン化効率は、イオンと原子の統計的重率の比を 1 とすると、Br ($E_A = 3.364 \text{ eV}$) ~ 100%, I ($E_A = 3.061 \text{ eV}$) ~ 100%, Se ($E_A = 2.0206 \text{ eV}$) ~ 16% と期待される。

表面電離型負イオン源の最大の欠点は、イオン化表面として使用する LaB_6 の反応性が高いことから、被イオン化元素の滞留時間が長いことにある。Rabbel⁽⁷⁾ らは、イオン化表面の温度 1600 ~ 1700 K、標的（酸化ウラン）の温度 ~ 2300 K で I と Br の滞留時間（付着時間）を測定し、I ~ 2 s, Br ~ 20 s と報告している。また、滞留時間を短くするにはより高い温度 ~ 1800 K まで昇温する必要があると述べている。

(c) 荷電変換とビーム強度の推定

様々の低エネルギーの 1 価正イオンを 1 価負イオンに変換する効率は、ナトリウム

蒸気やマグネシウム蒸気を使い、Heinermeier^{(2), (3)}らにより測定されている。それによれば、電子親和力 1 eV より高い元素に対しては、10 ないし 20% の効率が報告されている。さらに電子親和力 2.3 eV の金では、約 50% と高い効率が得られている。ここで、中性子過剰核で最も興味のある、二重閉殻核である ^{132}Sn のビーム強度を推定する。

大強度陽子ビーム 100 μA を 20 mm ϕ , 100 mmL のタングステン・コンバーターに入射した時発生する中性子数とその平均エネルギーは約 4×10^{16} neutrons/s、2.45 MeV である。これは、コンバーター表面で 5.8×10^{14} neutrons/cm² s の中性子束に相当し、そのエネルギースペクトルは原子炉中性子のスペクトルとほぼ同じである。計算には、標的に用いる ^{235}U の量を 63 g (1 g/cm² の厚さでコンバーター表面に設置する) とし、独立収率は原子炉中性子を使ったときに得られる値 7.4 mb を用い、 ^{235}U の中性子による全核分裂収率は 1000 mb とする。この条件で毎秒生成する ^{132}Sn ($T_{1/2}=40$ s) は約 7×10^{11} 個と見積もられる。陽子ビーム強度 10 μA を 110 g のウラン標的に直接入射した場合の生成量は、CERN-ISOLDE のデータを基に推定すると、 2×10^9 個と見積もられる。

つぎに、R I の移送とイオン化並びに荷電変換効率を考慮し、ISOL 出口でのビーム強度を見積もる。大強度の陽子ビームを使う場合、生成 R I の移送にガスジェット搬送法とイオン源を組み合わせたシステムを計画している。このようなシステムでの効率測定の見積りが無い場合、推定されている効率 0.36%^[8] を使う。一方陽子ビームを直接ターゲットに入射した場合の効率は 2.4% と報告されている。これらデータと荷電変換効率 20% を勘案すると、それぞれ、 5×10^8 、 1×10^7 個のビーム強度が期待される。

3. 7. 4 実験施設の概要

本施設は Fig. 3. 7. 6 に示すように、大きく 4 つのビームエリアに分かれる。このうち、エリア (C) は既存のタンデム・ブースター加速器施設で、地上 8 階・地下 2 階である。残りの 3 つのエリア (陽子ビームエリア、低エネルギー R I 実験エリア、高エネルギー実験エリア) は地上 1 階・地下 1 階の施設で、既存施設の北東側空地に新しく建設する。さらに、陽子ビーム本線のビームダンプの直前にガスジェット搬送用 R I 生成セクションを設ける。ここでは、陽子ビーム本線は地下 1 階のレベルで、本施設の東側を南から北方向に進むと仮定している。

(1) 各ビームエリアの概要

(a) 陽子ビームエリア

陽子ビーム本線から分岐された陽子ビーム (10 μA まで) は、ターゲット室内に置かれた R I 生成用の標的を照射した後、ビームダンプ (15 kW 級) に捨てられる。イオン源はターゲット内蔵型で、ターゲット室に設置する。ターゲットの交換およびイオン源の保守は、ホットエリアからロボットによる遠隔操作で行う。大強度陽子ビーム (数 100 μA まで) による R I 生成は、陽子ビーム本線のビームダンプ (8 MW

級)直前に設置した標的で行い、ガスジェット搬送装置によりR Iを陽子ビームエリアのイオン源まで搬送する。

(b) 低エネルギーR I 実験エリア

イオン源から引き出されたR I イオンは、分析室で大まかに質量分離された後、高分解能質量分析装置により目的の核種に分離される。生成されたR I の核的化学的性質を調べる場合にはR I ビームは低エネルギー実験室に輸送され、高エネルギーに加速して実験する場合はタンデムブースター加速器エリア (c) に輸送される。

(c) タンデムブースター加速器エリア

タンデム加速器により加速されたR I ビームは、照射室 (現在唯一の非密封R I 使用室) に輸送され実験に用いられる。他の4つの既存実験室にはR I ビームを輸送せず、現行通りの安定核種ビームによる実験を行う。ブースター加速器によりさらに高エネルギーに加速されたR I ビームは、既設のブースターターゲット室と新設する高エネルギーR I 実験エリア (d) に輸送される。

(d) 高エネルギーR I 実験エリア

現在のブースターターゲット室を拡張して、ホット化学実験等ができる実験エリアにする。ブースター加速器ビームラインの直線上には、エネルギー分析を必要としないR I ビームを照射できる照射室を設置する。90度分析電磁石後には、化学分離等を行うホットエリアに隣接したホット化学実験室を設置する。

(2) 建屋サイズと管理区域

各エリアの主要設備について、法令上の区分と原研内部で規定している管理区域の区分、床面積と壁厚を Table3.7.1 にまとめておく。陽子ビームエリア (a) は、大強度かつ高エネルギー陽子ビームによる放射化の影響が大いため、非密封R I 使用室 (第1種管理区域) とし、陽子加速器の運転中・停止中ともに常時立ち入り禁止とする。またこのエリアには専用の排気・排水設備、ホットエリアなどの安全設備を設置する。既存のタンデム・ブースター加速器エリア (c) は基本的に現行の密封R I 使用室 (第2種管理区域) とするが、R I ビームを利用するブースターターゲット室だけは非密封R I 使用室に改造する。高エネルギーR I 実験エリア (d) は非密封R I 使用室とし、ブースターターゲット室と併せて非密封R I の使用に必要な設備を設置する。SF₆ ガス操作設備は従来通り一般管理区域とする。

陽子ビームエリア (a) 及び高エネルギーR I 実験エリア (d) は、標的にウラン等の核燃料物質を使用する。とくに陽子ビームエリア (a) は、核燃料物質中に生成する放射性物質の総量が、100 Ci を超えるため、施設検査等を要する核燃料物質取り扱い施設の対象となる。

3. 7. 5 放射線防護の検討と安全対策

本実験施設のうち、新規に建設する陽子ビームラインと標的照射室ならびにビームダンプ室は、高エネルギーかつ大強度陽子ビームによる線量率が高く、人が短時間に立ち入った場合でも大きく線量限度を超える恐れがあるため、常時立ち入り禁止とすると共にインターロック設備を設置する。標的の交換や機器のメンテナンス等はロボットによる遠隔操作を基本とする。

一方、加速するR Iの強度は最大でも 10^{10} イオン/秒程度でありエネルギーも核子当たり 10 MeV と低エネルギーでしかも秒程度の半減期である。したがって、既存の加速器施設については現在の設備を大きく改造せずに使用することは十分可能である。ここで問題となるのは、たとえビーム自身が短半減期核種でも、崩壊してできた娘核が長半減期の場合、ビームライン内部にビームが当たると放射能が時間とともに蓄積してしまうことである。(ただし法律上は、通常の放射化物に該当すると考えられる。) もし真空ビームラインを開放して作業する際には、残留放射能が飛散し作業環境を汚染する恐れがあるため、こうした要素を十分考慮にいった放射線管理が必要となる。作業者が立ち入る場所では、残留放射能の影響によっては加速するR Iの核種や強度をある程度制限する必要がある。

(1) 既存の加速器施設

通常の加速器運転の場合、R Iの蓄積される恐れがあるのは密封された真空ビームライン内部に限定される。そこで、既存のタンデムブースター加速器とR Iビーム輸送用のビームラインは放射線発生装置かつ密封R I使用室とし、R Iビームを利用する実験室は非密封R I使用室とすることを基本とする。現在のタンデム加速器施設は、地上2階から8階にタンデム加速器タワー、1階にイオン源室、入射マグネット室、地下1階に分析用および分配マグネット室、ブースター加速器室、および6つの実験室がある。このうち、非密封R I使用室は照射室のみで、あとは密封R I使用室である。また、タンデム加速器の圧力タンク内に SF₆ ガスを供給する設備は一般管理区域である。これら密封R I使用室のなかで(実験室は除く)、通常の保守作業で真空ビームラインを開放して作業するのは、タンデム加速器の高電圧ターミナル内にあるフォイルストリッパーだけである。このフォイルストリッパーは加速された負イオンを多価の正イオンに変換するためのもので、ビームはすべてフォイルを通過してしまうために、この部分にR Iが蓄積されることはない。また、仮にR Iの残留があったとしても、保守時にフォイルを交換する場合は、前後の真空ビームラインとの間を真空バルブで遮断して作業するため、この作業領域に飛散を防ぐ措置をとることは可能である。

(2) R Iビームの核種と強度の制限

既存施設においてイオンビームは、ビームライン外部に設置された電磁石によって収束偏向されて実験室まで輸送される。途中のビームライン内部には、ビームプロファイルモニターやファラデーカップ(FC)を設置してイオンビームの形状や電流量

をモニターする。また必要に応じてスリットによりイオンビームを整形している。したがって、この FC やスリット、電磁石の真空容器内壁に多くのビームがロスすると考えられる。これまでの運転経験上、加速管やビームライン内部に設置されたスリット等の故障はないが、ごくまれに FC の電流読み取り部の修理を行っている。作業は FC の真空容器をビームラインから真空バルブにより遮断し、その容器のみを大気圧に開放して行う。

本施設で R I ビームを輸送する場合、この部分に R I が沈着していると、密閉容器を解放して作業するため、密封 R I 使用室とする根拠がなくなる。そこで、加速を予定している R I ビームの核種 (Table 3. 7. 2) について、ビームライン途中で最大限 100% ビームロスしたと仮定し、時間経過にともなう R I の娘核種への崩壊とその累積や減衰を考慮に入れて、作業環境における放射性物質の表面汚染密度や空气中濃度を評価した。

(a) R I ビームの強度

CERN-ISOLDE (1 GeV, 1 μ A 陽子ビームによる R I の生成分離) のデータにある核種についてはそのビーム強度の 10 倍、それ以外の核種については 10^{10} イオン/秒を仮定した。

(b) R I の累積と減衰

現在タンデム加速器では、3 ヶ月の運転と 1 ヶ月の定期点検のサイクルで運転が行われている。ここでは、1 ヶ月間にビームの全量がビームラインの一箇所に連続照射され、ビーム停止後の 1 ヶ月後にビームラインを解放すると仮定する。

(c) R I の飛散

ビームラインを解放したときの飛散率を 10^{-4} と仮定し、1 m^2 の範囲に均一に飛散したときの表面汚染密度と、1 m^3 に飛散したときの空气中濃度を計算する。

(d) 表面密度および空气中濃度の限度

表面密度限度については障害防止法告示別表 3 の値を、空气中濃度限度については同別表 1 の値を使用する。別表に記載されていない核種については、別表に記載された原子番号が同じ R I のなかで最も厳しい値を使用した。

加速を予定している R I ビームのうち、作業環境で予想される表面汚染密度と空气中濃度のいずれかが、濃度限度の 1/100 を超えるものを Table 3. 7. 3 に示す。この表から、利用する R I ビームが短半減期でも、生成する娘核種によっては長期間にわたって濃度限度より高くなる場合があることがわかる。その場合は、限界の 1/100 未満になるように、R I ビームの強度と運転時間を制限するか、もしくは冷却時間を確保することを検討する。現在のところ本施設で加速しない核種は限定しないが、限度を大きく超える恐れのある場合にはその核種の使用を禁止することも考えられる。

(3) 排気・排水施設

非密封R I 使用室における排気の方法は次の3つが考えられる。

- (a) 管理区域の空气中濃度を規定値以下に保つように常時連続排気する。
- (b) 換気した空気を一時的に貯留するリザーバタンク等を設置して、規定値以下の濃度に減衰するまで待ってから排気する。
- (c) 運転中および運転停止後一定時間の間は排気せず、規定値以下の濃度に減衰するきは直ちに強制排気する。

R I ビームを利用する実験室では (a) の方式を、陽子ビームを扱う施設では (b) または (c) の方式を採用する。いずれの場合も、排気設備からの空気の放出は、フィルタ等を通して行い、排気口にはダストモニタを設置して空气中濃度を常時監視する。非密封R I 使用室からの排水は、主に電磁石やターゲット、ビームダンプの冷却水である。陽子ビームラインの冷却水には、酸素の核破砕反応によりトリチウム等が生成され、さらに配管から溶出した放射性金属イオンが含まれる。金属イオンはイオン交換樹脂により浄化されるが、トリチウムは濃度が基準値以上になると冷却水ごと交換する必要がある。

3. 7. 6 今後のR & D

核破砕生成片加速では、ウラン標的とイオン源ならびに荷電変換方法の開発が最も重要な要素となる。そこで、ウランの炭化物標的を装着できる FEBIAD イオン源を製作し、ウランの陽子誘起核分裂で生成する、Ga, Ge, Sn 等の分離効率を測定する。引き続き、これら元素の正1価イオンから負1価イオンへの荷電変換効率の測定と最適化を計る。

イオンの引き出し効率の測定では、標的に用いるウラン炭化物の組成の違いによる、生成核種の標的からの放出率を明らかにする。標的とイオン源の開発に引き続き、荷電変換効率の測定を進める。この場合、イオンビームのエネルギー（同位体分離器の加速エネルギー）と荷電変換効率の関係を求め、同位体分離器と荷電変換装置の設計に反映させる。これらR & Dは、イオン源と荷電変換装置の設計・製作後、既存のオンライン同位体分離器を用いて行う。

実機に設置するイオン源と標的は、当初 CERN-ISOLDE 型[9]を予定している。このイオン源は、ウラン炭化物を 100 g 程度装着でき、抵抗加熱で全体を均一に 2000 °C 程度まで昇温させることができる。この場合、ウラン炭化物の基礎的研究と標的の開発並びにイオン源の設計を進める必要がある。

同位体分離器の設計では、粗分離ならびに同重体分離に必要なビームオプティクス、荷電変換により広がったビームの収束などを考慮して進める。

Table 3.7.1 主要設備の法令上の区分と原研の区分、床面積と壁厚

エリア	設備	法令上の区分	原研の区分	床面積 (m×m)	壁厚 (m)
A	ターゲット室	非密封R I 使用室	第1種管理区域*	10×10	3
	ビームダンプ	〃	〃	10×10	3
	ホットエリア	〃	〃	15×20	1
	汚染排気設備	非密封R I 使用室	第1種管理区域	15×10	1
	汚染排水設備	〃	〃	15×10	1
B	分析室	〃	〃	15×10	2
	高分解能分析室	〃	〃	15×25	2
	低エネルギー実験室	〃	〃	15×25	2
C	タンデム加速器	密封R I 使用室	第2種管理区域	15×15	2
	ブースター加速器	〃	〃	10×45	2
	SF ₆ 操作室	—	一般管理区域	30×15	2
	軽イオンターゲット室	非密封R I 使用室	第1種管理区域	20×15	2
	ブースターターゲット室	〃	〃	25×15	2
D	高エネルギー実験室	〃	〃	35×15	2
	ホット化学室	〃	〃	15×10	0.5
	汚染検査室	〃	〃	10×10	0.5
	汚染排気排水設備	〃	〃	15×25	0.5

*運転中および停止中ともに立ち入り禁止、その他については運転中における立ち入り制限

Table 3.7.2 加速を予定している核種とビーム強度

核種	半減期	ビーム強度	核種	半減期	ビーム強度
Cu-66	5.09 m	1.0E+10	Sb-115	32.1 m	1.0E+10
Cu-68	3.75 m	3.0E+10 *	Sb-116	60.3 m	1.0E+10
Cu-70	47 s	2.0E+08 *	Sb-118	5 h	1.0E+10
Cu-72	6.6 s	1.0E+10	Sb-120	5.76 d	1.2E+09 *
Ge-77	11.3 h	4.0E+08 *	Sb-122	2.7 d	9.1E+06 *
Ge-78	88 m	1.0E+10	Sb-131	23 m	1.0E+10
Ge-79	39 s	1.0E+09 *	Sb-132	4.1 m	1.0E+09 *
Ge-80	29.5 s	1.0E+10	Sb-133	2.5 m	1.0E+10
Ge-81	7.6 s	2.5E+07 *	Sb-134	10.4 s	1.0E+10
Ge-82	4.6 s	1.0E+10	Te-113	1.7 m	1.0E+10
As-78	90.7 m	1.0E+10	Te-114	15.2 m	1.0E+10
As-79	9 m	1.0E+10	Te-115	6.7 m	1.0E+10
As-80	15.2 s	1.0E+10	Te-116	2.49 h	1.0E+10
As-81	33.3 s	1.0E+10	Te-117	62 m	4.2E+08 *
As-82	19.1 s	3.0E+08 *	Te-119	4.7 d	3.9E+08 *
Ag-108	2.37 m	3.0E+08 *	Te-131	30 h	1.0E+09 *
Ag-109	39.6 s	1.0E+10	Te-132	3.2 d	1.0E+10
Ag-110	24.6 s	1.0E+09 *	Te-133	55.4 m	6.6E+09 *
Ag-111	7.45 d	3.0E+11 *	Te-134	41.8 m	1.0E+10
Ag-112	3.13 h	1.0E+10	Te-135	19 s	1.0E+10
Ag-113	5.37 h	2.8E+10 *	Te-136	17.5 s	1.0E+10
Ag-114	4.6 s	1.0E+10	Pb-187	18.3 s	1.3E+05 *
Ag-118	3.76 s	1.0E+09 *	Pb-188	24.2 s	2.7E+04 *
Sn-123	129 d	5.0E+09 *	Pb-189	51 s	1.0E+10
Sn-125	9.64 d	1.3E+09 *	Pb-190	1.2 m	6.6E+06 *
Sn-127	2.1 h	6.0E+08 *	Pb-191	2.18 m	4.9E+07 *
Sn-129	2.23 m	5.0E+08 *	Bi-189	680 ms	2.0E+02 *
Sn-131	58.4 s	1.5E+08 *	Bi-190	6.2 s	8.0E+03 *
Sn-132	39.7 s	1.0E+10	Bi-191	12 s	7.0E+04 *
Sb-110	23 s	1.0E+10	Bi-192	39.6 s	7.0E+05 *
Sb-111	75 s	1.0E+10	Bi-193	67 s	2.2E+06 *
Sb-112	51.4 s	1.0E+10	Bi-194	125 s	6.0E+06 *
Sb-113	6.67 m	1.0E+10	Bi-200	36.4 m	2.0E+07 *
Sb-114	3.49 m	1.0E+10			

注): * 印は、欧州原子核研究所の同位体分離器 (ISOLDE) で加速されたビーム強度の10倍を仮定した。

Table 3.7.3 30日冷却後の残留放射能の空气中濃度及び全表面密度の限度比が1/100を超える核種

ビーム		残留同位体元素			30日冷却後の残留放射能と限度比		
核種	強度 (ion/sec)	核種	半減期	濃度限度 (Bq/cm ³)	残留放射能 (Bq)	空气中濃度 濃度限度	全表面密度 密度限度
¹¹¹ Ag	3.0×10 ¹¹	¹¹¹ Ag	7.45 d	1×10 ⁻²	1.7×10 ¹⁰	4.1×10 ¹	4.3×10 ⁰
		¹¹¹ Cd	48.5 m	3×10 ⁻⁵	0	0	
¹²³ Sn	5.0×10 ⁹	¹²³ Sn	129.2 d	2×10 ⁻³	6.3×10 ⁸	7.5×10 ¹	1.6×10 ⁻¹
¹²⁵ Sn	1.3×10 ⁹	¹²⁵ Sn	9.64 d	4×10 ⁻³	1.3×10 ⁸	7.9×10 ⁻¹	3.7×10 ⁻²
		¹²⁵ Sb	2.76 y	7×10 ⁻³	1.5×10 ⁷	5.2×10 ⁻²	
¹³¹ Sn	1.5×10 ⁸	¹³¹ Sn	58.4 s	7×10 ⁻⁴	0	0	<10 ⁻²
		¹³¹ Sb	23.0 m	3×10 ⁻¹	0	0	
		¹³¹ Te	25.0 m	6×10 ⁻²	0	0	
		¹³¹ I	8.02 d	6×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁷	4.1×10 ⁻¹	
¹³² Sn	1.0×10 ¹⁰	¹³² Sn	39.7 s	7×10 ⁻⁴	0	0	<10 ⁻²
		¹³² Sb	4.10 m	3×10 ⁻¹	0	0	
		¹³² Te	3.20 d	3×10 ⁻³	1.5×10 ⁷	1.2×10 ⁻¹	
		¹³² I	2.30 h	1×10 ⁻¹	0	0	
¹¹³ Sb	1.0×10 ¹⁰	¹¹³ Sb	6.67 m	3×10 ⁻³	0	0	3.4×10 ⁻¹
		¹¹³ Sn	115.1 d	7×10 ⁻³	1.4×10 ⁹	4.7×10 ⁰	
¹²⁰ Sb	1.2×10 ⁹	¹²⁰ Sb	5.76 d	2×10 ⁻²	3.2×10 ⁷	3.8×10 ⁻²	<10 ⁻²
¹³¹ Sb	1.0×10 ¹⁰	¹³¹ Sb	23.0 m	3×10 ⁻¹	0	0	1.7×10 ⁻¹
		¹³¹ Te	25.0 m	6×10 ⁻²	0	0	
		¹³¹ I	8.02 d	6×10 ⁻⁴	6.9×10 ⁸	2.8×10 ¹	
¹³² Sb	1.0×10 ⁹	¹³² Sb	4.10 m	3×10 ⁻¹	0	0	<10 ⁻²
		¹³² Te	3.20 d	3×10 ⁻³	1.5×10 ⁶	1.2×10 ⁻²	
		¹³² I	2.30 h	1×10 ⁻¹	0	0	
¹¹³ Te	1.0×10 ¹⁰	¹¹³ Te	1.70 m	2×10 ⁻¹	0	0	3.4×10 ⁻¹
		¹¹³ Sb	6.67 m	3×10 ⁻³	0	0	
		¹¹³ Sn	115.1 d	7×10 ⁻³	1.4×10 ⁹	4.7×10 ⁰	
¹¹⁹ Te	3.9×10 ⁸	¹¹⁹ Te	4.70 d	2×10 ⁻¹	4.6×10 ⁶	5.5×10 ⁻²	<10 ⁻²
		¹¹⁹ Sb	1.59 d	3×10 ⁻¹	8.1×10 ²	<10 ⁻²	
¹³¹ Te	1.0×10 ⁹	¹³¹ Te	1.25 d	3×10 ⁻³	6.0×10 ¹	<10 ⁻²	1.7×10 ⁻²
		¹³¹ I	8.02 d	1×10 ⁻¹	6.8×10 ⁷	2.7×10 ⁰	
¹³² Te	1.0×10 ¹⁰	¹³² Te	3.20 d	3×10 ⁻³	1.5×10 ⁷	1.2×10 ⁻¹	<10 ⁻²
		¹³² I	2.30 h	1×10 ⁻¹	0	0	
¹³³ Te	6.6×10 ⁹	¹³³ Te	55.4 m	3×10 ⁻¹	0	0	3.1×10 ⁻²
		¹³³ I	20.8 h	3×10 ⁻³	2.5×10 ⁻¹	<10 ⁻²	
		¹³³ Xe	5.24 d	3×10 ⁰	1.2×10 ⁸	<10 ⁻²	
¹⁸⁹ Pb	1.0×10 ¹⁰	¹⁸⁹ Pb	51.0 s	3×10 ⁻⁶	0	0	4.1×10 ⁻¹
		¹⁸⁹ Tl	2.30 m	3×10 ⁻²	0	0	
		¹⁸⁹ Hg	8.60 m	3×10 ⁻⁴	0	0	
		¹⁸⁹ Au	28.7 m	5×10 ⁻³	0	0	
		¹⁸⁹ Pt	10.9 h	3×10 ⁻¹	0	0	
		¹⁸⁹ Ir	13.2 d	5×10 ⁻²	1.6×10 ⁹	7.8×10 ⁻¹	

表中の0は<10⁻¹⁰である。表面密度限度：はα崩壊核種：4Bq/cm²、β崩壊核種：40Bq/cm²とした。

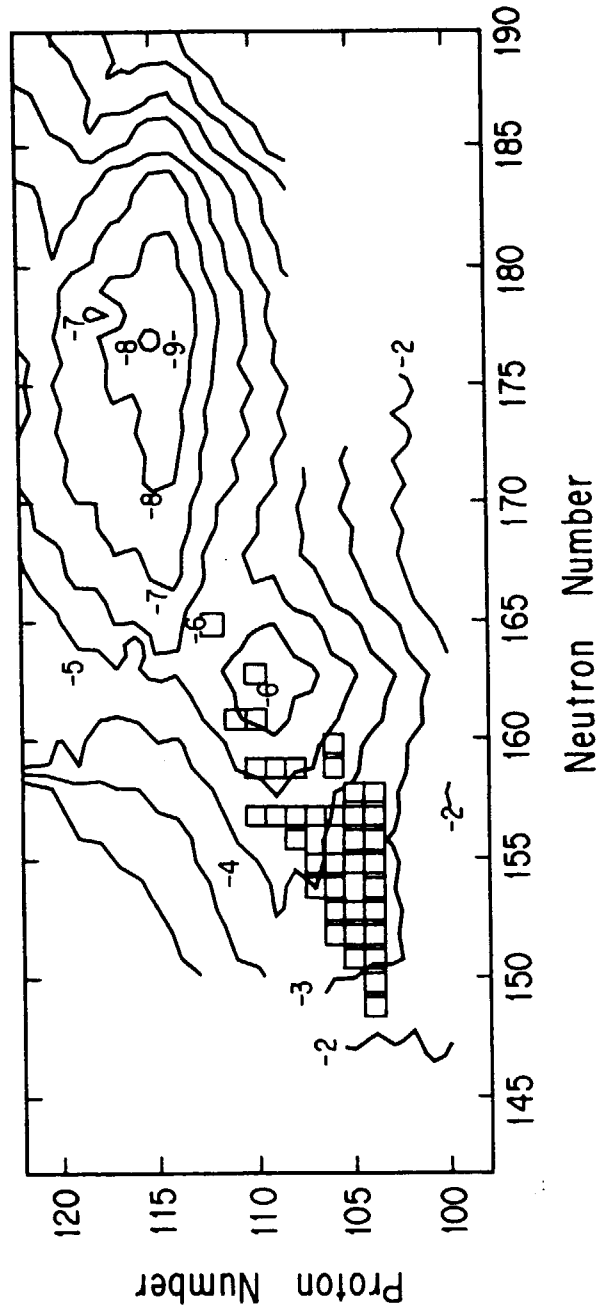


Fig. 3.7.1 重核の安定性に関するポテンシャルエネルギー一面。
 四角形はこれまで確認された核種を示す。

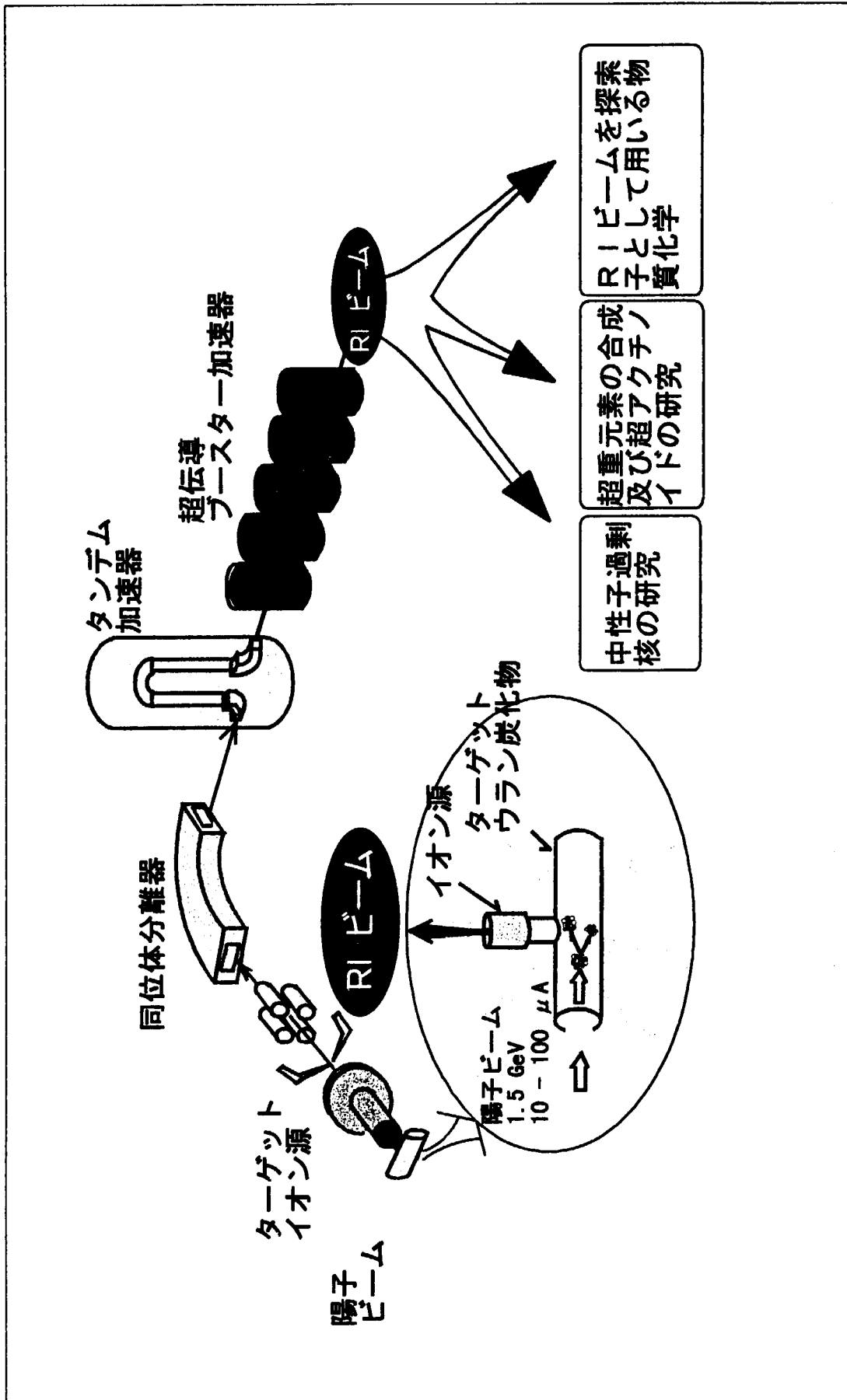


Fig. 3.7.2 RIビーム加速の概要

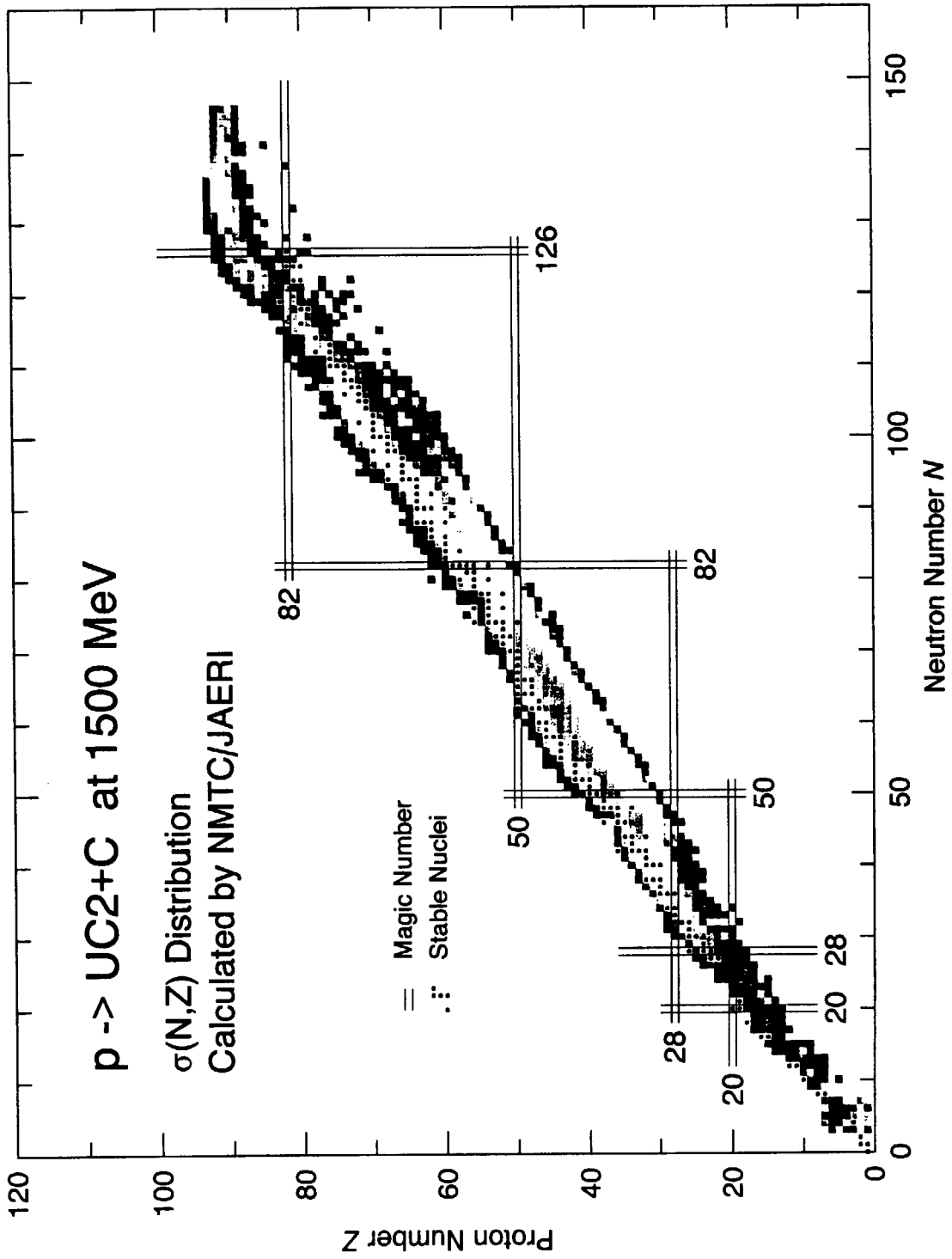


Fig. 3.7.3 1.5GeV 陽子ビームで炭化ウランを照射したときの生成核分布

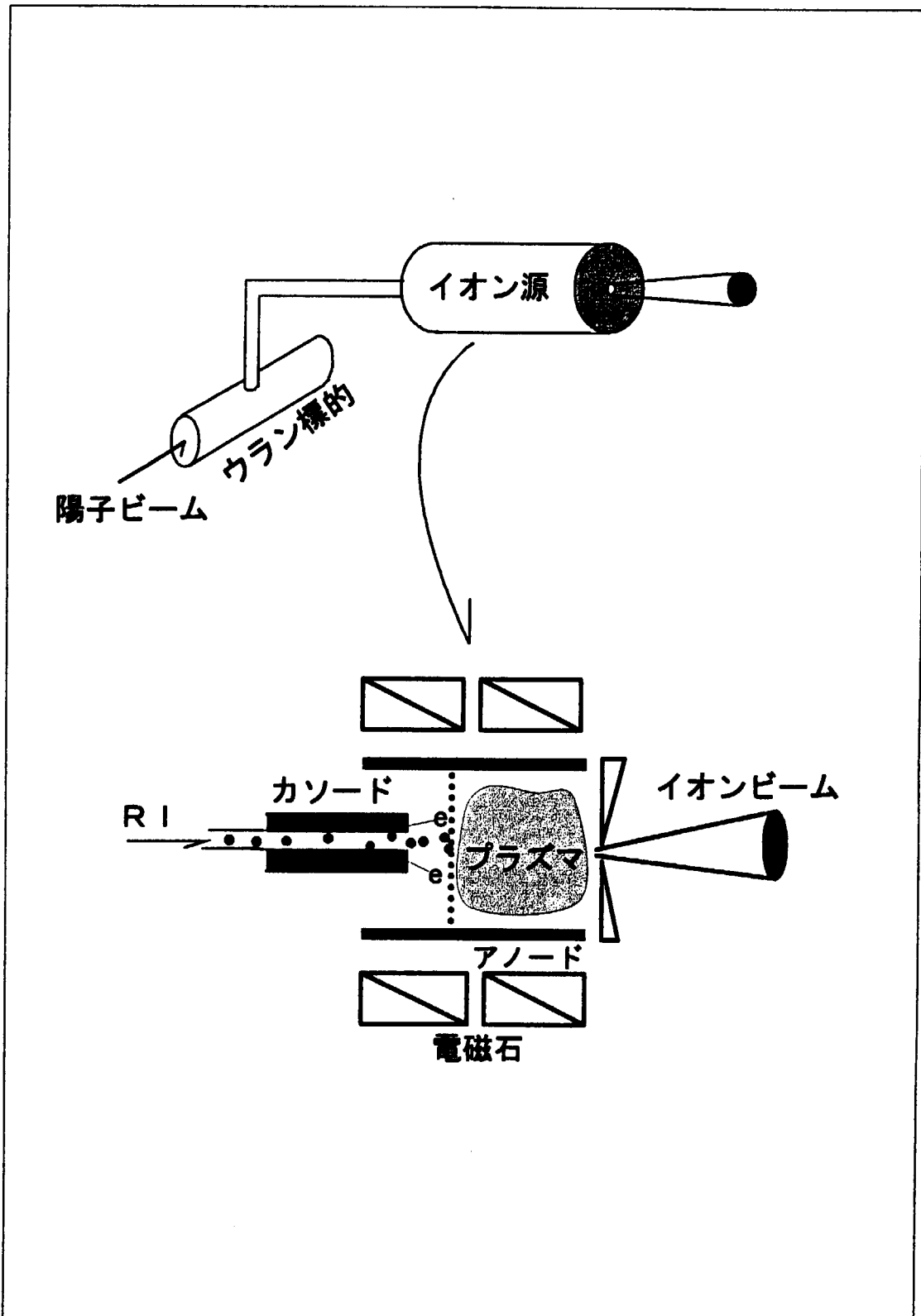


Fig. 3.7.4 FEBAID イオン源と標的の配置

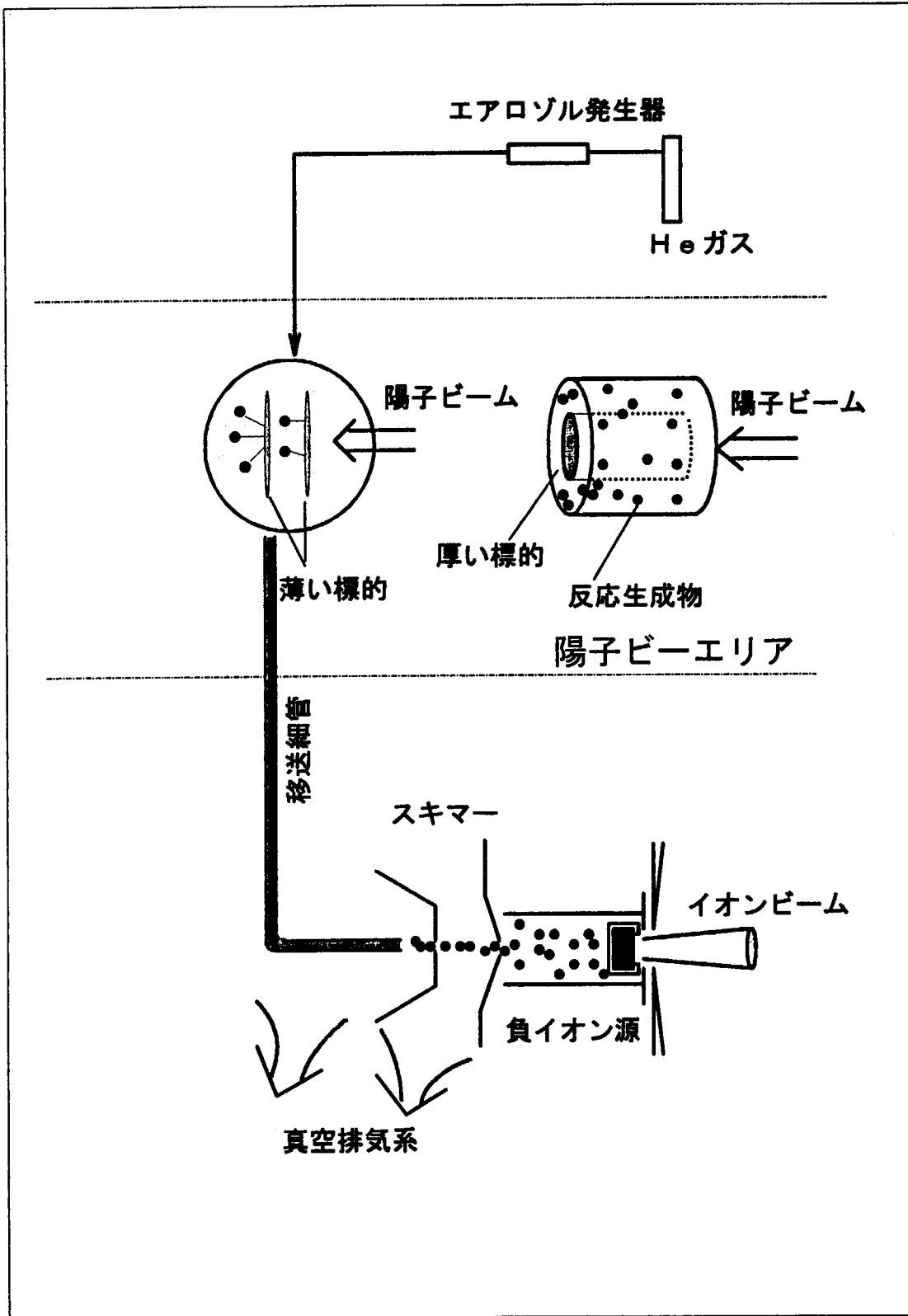


Fig. 3.7.5 ガスジェット搬送装置結合型イオン源

3. 8 R I 利用研究施設

3.8.1 本施設の利用目的

本施設は、ラジオアイソトープ (R I) の製造開発をし、かつそれを用いて実験する施設である。高エネルギー陽子加速器の特徴を生かして広範囲のR Iの製造開発をするとともに、大きな陽子ビーム強度により、研究用のみならず、いくつかのR Iは実用規模での製造開発をする。製造したR Iは施設内での実験や教育に用いると同時に、国内や近隣諸国の利用者に研究支援として送る。

本施設は、R Iの利用の中でも、特に医学・生命科学の分野に貢献するためのものである。R Iの利用において最も大きな部分を占める医学利用について、国内の状況を見てみよう。インビボ (人体に投与して) で利用されたR Iの量をTable3.8.1に示す⁽¹⁰⁾。最も多く使用されているのは⁹⁹Mo/^{99m}Tc、¹³³Xeなどの²³⁵Uの核分裂によって製造されたR Iで、いずれも海外からの輸入品である。これに続く⁶⁷Ga、²⁰¹Tl等の加速器R Iは、日本メジフィジックス社、第一ラジオアイソトープ研究所、ダイナボット社のサイクロトロン (陽子ビームでおよそ30—70 MeV) で製造・供給されている⁽¹¹⁾。これらの中で治療に用いられている核種は¹³¹Iで、甲状腺機能亢進症および甲状腺ガンの治療に用いられている。¹³¹I以外には、日本で体内投与される放射性医薬品として承認されているものはない。欧米では、リウマチ性関節炎などの関節炎が放射性医薬品により治療されている⁽¹²⁾。また、非常に大きな痛みを引き起こす骨転移ガンの疼痛軽減も放射性医薬品に期待されているが、日本国内ではそのための研究開発が始まったところである。治療の場合だけでなく、診断のためのR Iについても必要なR Iの供給は、ヨーロッパや米国に比して十分ではない。

日本では100 MeV以上のエネルギーの陽子ビームがR I製造に使われていない。低・中エネルギーのイオンビームでは、生成核種は数種類に限定されるが、100 MeV以上では、核破砕反応が起きて、広範囲 (数十核種) のR Iが同時に生成し、低・中エネルギーのイオンビームでは製造不可能なR Iを製造できる。生成核種の種類が多くなると個々の核種の生成断面積は小さくなるが、入射エネルギーが大きいためにターゲットの有効厚さが増大するので、ビーム強度が大きければ、十分な量を得ることができる。これによって医学の治療・診断や生命科学において有用なR Iが製造できる。

高エネルギー陽子加速器で製造できるR Iの例をTable3.8.2に示す⁽¹³⁾。この中で長半減期の核種は輸入されている。例えば、⁶⁸GeはPET装置の校正に必要で、定期的に補充されている。輸入が不可能な短寿命核種も多く、例えば、⁶⁷Cuである。⁶⁷Cu (半減期: 61.9 h) は低エネルギーのβ線と、低エネルギーのγ線を放出し、銅のR Iの中では最も半減期が長く、生体中の銅の挙動を長時間追跡する場合に必要である。その半減期は腫瘍の治療にも適当であって、放射免疫療法への利用が期待されている。特に、その放出するγ線によって同時に診断も可能であって、治療のための大量投与に先立ち、体内での集積度を調べることにより、適当な投与量を決定できる。なお、核破砕反応によってポジトロン放射体の⁶¹Cu (半減期: 3.4 h) と⁶⁴Cu (12.7 h) が副生するので、これらのある程度減衰さ

せて人体に投与する。

^{28}Mg も短寿命であるために高エネルギー陽子加速器で製造する必要がある核種であつて、マグネシウム代謝の研究に欠くことができない。 ^{28}Mg は、 $^{27}\text{Al}(\alpha, 3p)^{28}\text{Mg}$ 反応でも製造できるが、エネルギーを上げて厚いターゲット収率は0.7 MBq/ A・hを越えることはできないが、高エネルギー陽子加速器では塩素を含むターゲットを照射すると150MeVでこの十倍となる。

Table3.8.2にある $^{117\text{m}}\text{Sn}$ の原子核は安定な ^{117}Sn の異性体で、スピン・パリティ $11/2^-$ を持つ。 $11/2^-$ 状態から $3/2^+$ の励起状態にM4遷移する際に放出される内部転換電子及びオーージェ電子を骨転移ガンの疼痛軽減に利用することが米国において臨床的に検討されている⁽¹²⁾。同様な骨転移ガンの治療への利用が考えられる β^- 崩壊核種 ^{89}Sr , ^{153}Sm , ^{186}Re に比べて、骨髄への障害が小さいとみられる。 $^{117\text{m}}\text{Sn}$ は、高中性子束原子炉で(n, γ)反応または(n,n)反応で製造できるが、担体の少ない高比放射能製品の製造を含めて、高エネルギー・大強度陽子加速器による製造開発も検討に値しよう。

これまでは素粒子物理学のために建設された加速器がR I 製造にも使われてきた。この種の加速器でR I に使われているものには、世界に6台 (BLIP (米国)、 LAMPF (米国)、 TRIUMF (カナダ)、 PSI (スイス)、 NAC (南ア)、 JINR (ロシア)) 存在する。しかし、日本やアジア地域には存在しない。

日本におけるR I の医学的治療・診断や生命科学研究への利用・研究開発は、アジアの中では抜きん出ているが、欧米諸国に比して十分とは言えない。その大きな理由はR I 製造設備において劣っていると言わざるを得ない。高エネルギー陽子加速器の建設に伴ってR I 利用施設を設置することは、日本とアジアにおけるR I を用いた医療の進歩や研究の進展のために大きな意義がある。

製造したR I は、利用者の研究施設に送るが、寿命の短いものは本施設内で実験ができるようにする。このための設備を設ける必要がある。R I の利用を普及させるには、研究者・技術者の訓練が必要であり、本施設はこのような目的にも使う。

3.8.2 必要な陽子ビームの仕様

本施設で予定しているビーム仕様は次のとおりである。

- ビームエネルギー：200 MeV
- ビーム電流：最大500 μA
- ビーム直径：5 cm (ターゲット位置で)
- ビームライン数：5本

ビームエネルギーは次のような理由で選んだ。低エネルギーの陽子はターゲット核との融合の後、中性子・陽子・ α 粒子などの粒子が蒸発する複合核形成過程が主たる過程であるが、100 MeVを超えるとターゲット核破碎反応の寄与が顕著になる。複合核形成過程は

(p, xn)、($p, \alpha xn$)反応により主として中性子欠損核種を生成する。ターゲット核破碎反応では、入射陽子とターゲット核中の核子とが直接相互作用して核子が核外に弾き出される。これにより中性子欠損核種も生成するが、中性子過剰核種も生成する。一方、エネルギーの増加とともに、核分裂過程の寄与が大きくなる。核分裂が顕著でない範囲で十分高いエネルギーとして200 MeVを選んだ。また、このエネルギーには次のような利点がある。200 MeVの陽子は25 ~ 40 g/cm²のターゲットで止めることができる。この厚さのターゲットを用いれば、入射した全ての陽子を使うことができる。陽子エネルギーに依存して生成するR Iが異なるので、ターゲットを分割した積層ターゲットにすると、それぞれのターゲットから異なるR Iを得ることができる⁽⁴⁾。

ビーム電流はターゲットの発熱、放射線遮蔽を考慮して最終的に決定するが、現在は設計がまだ進んでいないので、大きくても500 μ Aを越えることはないとする。このビームは十分な量のR Iを製造できる。しかし、前述のようにターゲット中で全て止めた場合、200 MeV \times 500 μ A = 100 kWの発熱がある。単位体積当たりでは、ビーム直径5 cm、ターゲットの厚さを25 g/cm²、密度を5 g/cm³としたとき、平均 0.8 kW/cm³の発熱となり、かなり過酷な照射条件となる。

ビーム直径は前述の発熱のために、できる限り大きいことが望ましいが、化学処理などターゲットの取扱いにおいては小さい方がよい。両者の妥協点として5 cmとする。

各ビームラインにターゲットステーションを1個設けるとして、ビームライン数は5本とする。複数のビームラインが使えると、1本のビームラインで照射中に、次の照射準備、及び照射済みのターゲットの冷却が可能になり、効率的にビームが利用できる。

3.8.3 R I 製造とR I を用いた実験に必要な施設の仕様

(1) ビームライン

(a) 磁石の仕様

200 MeVの陽子ビームの磁気剛性は、 $B\rho = 2.15$ [T \cdot m]であるので、200 MeVリニアックからR I 製造用照射室（以下、照射室という）へビームを導くための偏向電磁石の磁場を $B=1.4$ Tと仮定すると、磁石の曲率半径は $\rho = 1.54$ mとなる。

ここではビームとしてH⁻ではなく、H⁺を考えている。H⁻の場合、ローレンツ・ストリッピングを考慮して磁場を下げる必要があり、そのため磁石が大きくなる。200 MeVのH⁻ビームでは磁場を0.55 T以下にしなくてはならないため、 $\rho = 3.19$ m以上になり、H⁺の場合の2倍以上必要である。そのため、ビームのパスレングスが2倍になる。同じことが、照射室内の電磁石にも言える。

リニアックでH⁺とH⁻が同時に加速されている時にH⁺ビームを取り出すため、偏向電磁石をパルス励磁できるようにする。但し、照射室内の電磁石はその必要がない。

照射室内でビーム収束のための四重極電磁石を必要とする。ビーム軌道計算には四重極電磁石を配置して計算した。なお、ビームをターゲットに正確に照射するために、ステアリング電磁石も必要と考えられる。更に詳細に検討する必要がある。

(b) ビームモニター

ビーム強度とビーム形状は連続的にモニターするのが望ましい。ビーム強度はビームラインの外側にトロイダル・カレント・トランスフォーマを各ビームラインの2箇所に設置する。ビーム形状はビームライン内にマルチワイヤー・セカンダリ・エミッション・モニターを設置する。

(2) 照射装置

(a) ターゲットの搬送と脱着

ビーム電流が比較的小さい場合には、気送管による搬送や自走式台車に載せて運ぶことが可能である。しかし、これらに使うエレクトロニクス機器が500 μ Aのビーム照射で発生する中性子の照射を受けることを考慮すると、ここでは原理的に単純な方式が望ましい。また、次項のターゲット冷却系との着脱も同時に行えるようにする必要がある。チェーンによる駆動機構、或いは台車によって搬送するのが、有効と考えられる。いずれにしても、このような高エネルギー・大電流によるR I製造はこれまでに例がなく、最終的な方式の決定に向けて技術開発を進める必要がある。

(b) 照射時のターゲット冷却

ターゲット中に発生する最大100 kWの発熱に対して、純水の流れによりターゲット表面を冷却する。水は陽子や中性子によって放射化されるので閉回路の循環システムとする。今、冷却水のターゲット通過後の温度上昇を40°Cまで許容すると、100 kWを冷却するに必要な流量 Q [L/min]は、 Q [L/min]=14.5 x 発熱量[kW]/温度上昇[°C]から計算して、少なくとも40 L/min必要である。

冷却水循環に必要な熱交換機、及び水の純度を保つためのイオン交換樹脂カラムは地上部に置く。

3.8.4 提案する施設の概要

本施設は、Fig.3.8.1及びFig.3.8.2に示すように地下部分と地上部分からなる。地下部分は地下18 mを約600 m²掘り、照射室、照射準備室、エレベータを建設する。地上部分はエレベータ、ホットラボ、ホット実験室1、ホット実験室2、R I貯蔵室、廃棄物一時保管室、機械室、管理区域出入室(汚染検査室)、放射線測定室、実験準備室、放射性廃液貯蔵施設、居室を含む約800 m²を建設する。各部屋の大凡のスペースはTable3.8.3のようであり、各部屋は主として次のような機能を持つ。

(1) 照射室

母管から分岐したビームラインが本室に導入され、さらに照射形態を考慮したターゲットステーションを備えたビームライン5本に分岐する。ステーションへのターゲットへの脱着は、遠隔操作による自動脱着装置により行い、当室と地上部ホットラボ間に設置したターゲット搬送装置により搬送される。室内に線量率モニターを設置する。

(2) 照射準備室

照射室のビームラインの保守、準備機器、放射化物の保管などの他、エレベーターによる大型機器類の搬入に用いる。室内に線量率モニターを設置する。

(3) エレベータ

照射室と照射準備室へのアクセスに使用する。機器類の搬入を考慮して最大積載量は約3トンと考えている。

(4) ホットラボ

照射済みターゲットからRIを分離するためにコンピューターを備えた鉛20cm相当の遮蔽体を有するセルを6基設置する。標識化合物製造用セル(鉛10cm遮蔽でスライド式扉により開閉)を4基設置する。なお、これだけでは十分ではないと考えられるので、既設のRI製造棟のセルも利用するものとする。

ターゲットステーション、ビームラインなどの制御卓を設置する。室内に線量率モニターを設置する。

(5) ホット実験室1

ホットラボで分離されたRIを使用して各種実験を行う。鉛5cm相当の遮蔽体を有するセルとヒュームフードを設置する。

(6) ホット実験室2

ホット実験室1と基本的に同じ仕様となる。

(7) RI貯蔵室

鉛5cm厚の貯蔵庫(10個程度)を設置する。

(8) 廃棄物一時保管室

当施設から搬出されるまでの間、可燃物、不燃物、金属、ガラスなどに分別した放射性廃棄物を保管する。耐火性の容器(キャビネット型)を設置する。

(9) 機械室

当施設全体の空調、給排気、電気、浄水、冷却水を供給する。管理区域の換気にはフィルターを設置すると共に排気スタックの放射能レベルモニターを設置する。

(10) 管理区域出入室

管理区域への出入口でありβ-γハンドフットクローズモニター、バリヤーを設置する。

(11) 放射線測定室

共用性のあるβ線およびγ線測定器、分析機器を設置する。

(12) 放射性廃液貯蔵施設

化学分離などで発生した廃液を一時的に貯蔵する。3m³タンクを2台設置する。

3. 8. 5 必要なR&D

(1) ターゲット照射技術

ターゲットの着脱、照射中の冷却、ターゲットの輸送、照射容器の構造、更にターゲット輸送に用いる搬送装置を設置するダクトの放射線遮蔽を含めて考慮する必要がある。加

えて、冷却に用いる水の漏洩時の対策、冷却水の放射化も検討する必要がある。地下部分にある装置の故障時の対策としてロボット技術の採用も必要であろう。

(2) ターゲットからのR I 化学分離技術

高エネルギー陽子で照射したターゲットには多くの核種が含まれてれている。この中から目的のR I を化学分離しなければならない。その放射能レベルが高いので、セル内で遠隔操作により半自動的に化学分離する技術を色々な核種について開発する必要がある。

Table 3.8.1 国内で放射性医薬品として供給されたラジオアイソトープ：
1997年の in vivo 利用⁽¹¹⁾

核種	半減期	製造核反応	放射能/GBq
^{99m} Mo/ ^{99m} Tc*	66 h/6.0 h	²³⁵ U(n,f)	179,476
^{99m} Tc	6.0 h	²³⁵ U(n,f)	227,380
¹³³ Xe	5.3 d	²³⁵ U(n,f)	16,640
¹³¹ I	8.0 d	²³⁵ U(n,f)	5,740
⁵¹ Cr	28 d	⁵⁰ Cr(n, γ)	11
⁵⁹ Fe	45 d	⁵⁸ Fe(n, γ)	1
²⁰¹ Tl	3.0 d	²⁰⁹ Tl(p,3n) ²⁰¹ Pb(β ⁺)	27,451
¹²³ I	13 h	¹²⁴ Xe(p,x) ¹²³ Xe(β ⁺)	22,496
⁶⁷ Ga	3.3 h	⁶⁸ Zn(p,2n)	17,991
⁸¹ Rb/ ^{81m} Kr*	4.6 h/13 s	⁸² Kr(p,2n)	936
¹¹¹ In	2.8 d	¹¹² Cd(p,2n)	241

*ジェネレータ

Table 3.8.2 高エネルギー陽子加速器 (BLIP の 200MeV 陽子) で製造された
ラジオアイソトープと利用目的⁽¹⁴⁾

核種	半減期	崩壊モード	利用目的
⁷ Be	53 d	EC	肺検査 (炭素トレーサ)
²⁸ Mg	21 h	β ⁻	トレーサ
⁴⁷ Sc	3.4 d	β ⁻	放射免疫療法
⁵² Fe	8.3 h	β ⁺	トレーサ
⁵⁵ Co	17.5 h	β ⁺ /EC	PET 用抗体標識
⁶⁵ Zn	244 d	EC	トレーサ
⁶⁸ Ge/ ⁶⁸ Ga	271 d/ 68 m	EC/ β ⁺	PET 装置校正線源
⁷² As	26 h	β ⁺	PET イメージング
⁸² Sr/ ⁸² Rb	25 d/ 75 s	EC/ β ⁺	PET による心機能研究
⁸⁸ Y	107 d	EC	トレーサ
^{95m} Tc	61 d	EC	トレーサ
⁹⁶ Tc	4.3 d	EC	トレーサ
⁹⁷ Ru	2.9 d	EC	抗体標識、及び各種化合物標識
^{117m} Sn	14 d	IT	がん骨転移疼痛軽減
¹²⁷ Xe	36 d	EC	肺検査
²⁰³ Pb	52 h	EC	放射免疫療法

Table 3.8.3 RI 製造施設の各部屋のスペース

	部屋名	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	面積 (m ²)	壁厚 (m)	クレーン		階
							容量 (t)	揚程 (m)	
1	照射室	20	20	5.5	400	2.0	2.8	4	B3
2	照射準備室	9	20	5.5	180	3.0	2.8	4	B3
3	エレベータ	3	5	18.0	15				
4	ホットラボ室	15	15	3.0	225	0.5			1
5	ホット実験室 1	15	10	3.0	150	0.3			1
6	ホット実験室 2	15	10	3.0	150	0.3			1
7	RI 貯蔵室	5	4	3.0	20	0.5			1
8	廃棄物一時保管室	5	2	3.0	10	0.5			1
9	機械室	12	10	3.0	120	0.2			1
10	管理区域出入室	3	8	3.0	24	0.3			1
11	放射線測定室	10	10	3.0	100	0.2			1

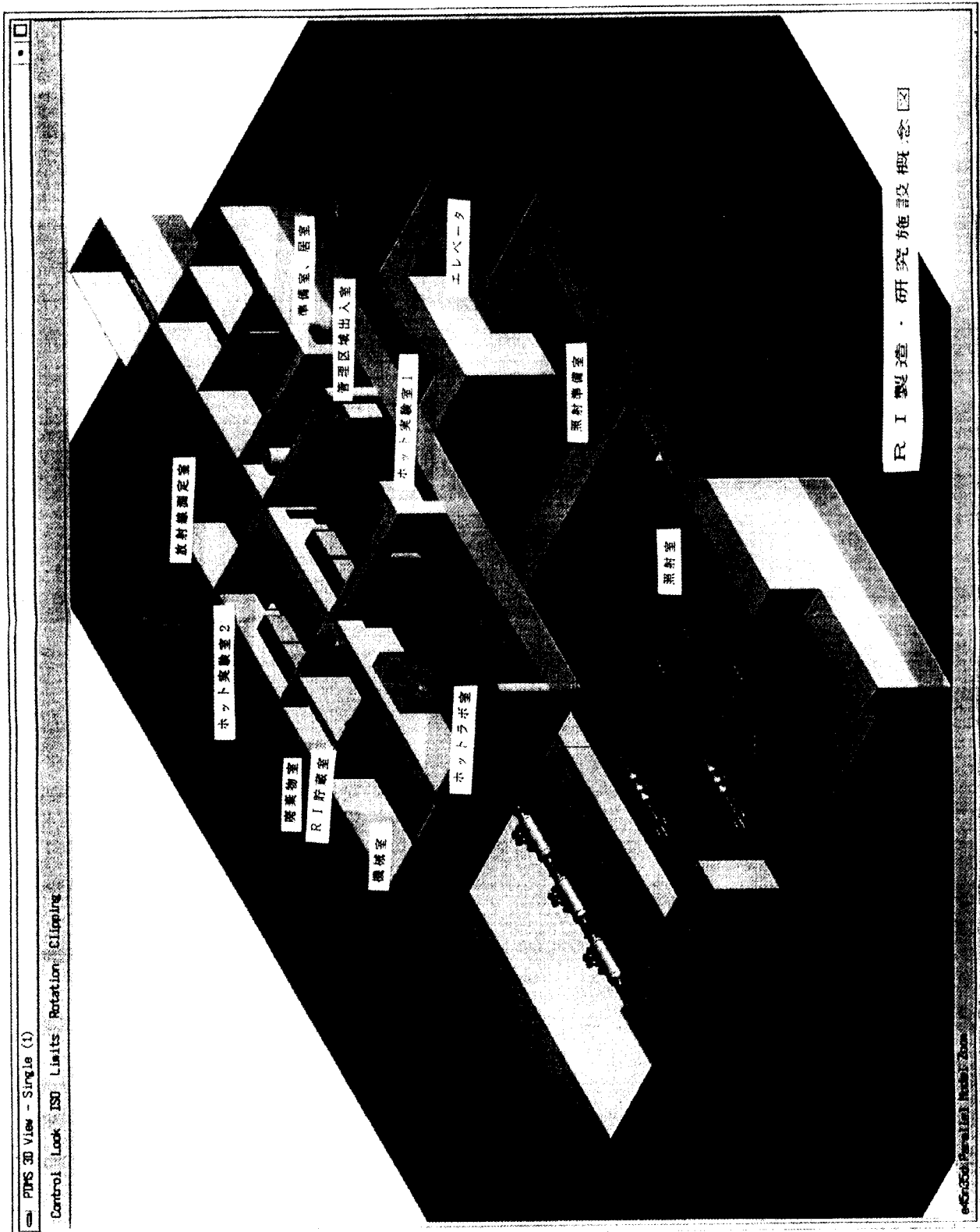


Fig. 3.8.1 RI製造・研究施設全体の概念図

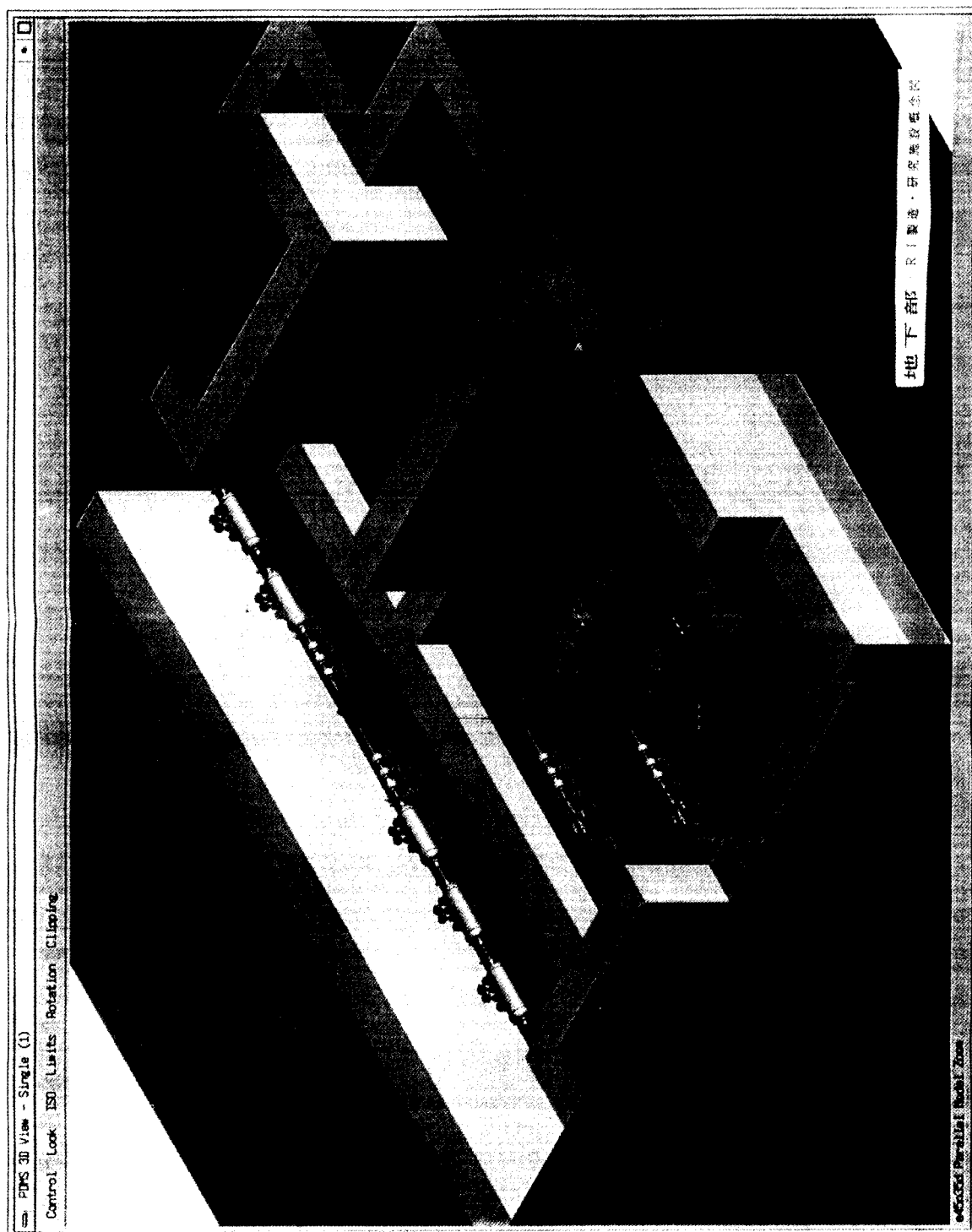


Fig. 3.8.2 リニアックから200MeV陽子を導入するRI製造・研究施設用ビームラインの概念図

4. おわりに

本報告書は、施設検討グループの各施設担当者が中心となってまとめたものである。巻頭にも述べたように、これは一次案であり、今後、コスト評価の結果を踏まえて、研究内容と施設規模のバランス等も考慮して合理化していく必要がある。さらには、施設によっては研究計画そのものを見直す必要のあるものが出てくると思われる。この意味で、本報告の内容はこれをすぐ具体化するというものでなく、それぞれの施設を作るとすればどういふ姿になるかを示したものであり、次のステップに進むためのものである。本検討を踏まえて、引き続き2次案の検討に進む予定である。

謝 辞

本検討を進めるにあたり、施設概念の検討にご協力をいただいた(株)日立製作所、三菱重工業(株)、(株)東芝、川崎重工業(株)、日立エンジニアリング(株)、住友重機械工業(株)、住友原子力工業(株)、(株)三菱総合研究所の各社の関係者の皆様に、また、本報告をまとめるにあたりご教示をいただいた向山武彦中性子科学研究センター長、貴重な助言をいただいた高野秀機中性子科学研究センター次長に謝意を表します。

参考文献

- (1) P. Moeller and J.R. Nix, *J. Phys. G.: Nucl. Phys.* 20, 1681 (1994)
- (2) J.Heinemeier and P.Hevlpund, *Nucl. Instr. Meth.* 148, 425 (1978).
- (3) J.Heinemeier and P.Hevlpund, *Nucl. Instr. Meth.* 148, 65 (1978).
- (4) R.Kirchner, *Nucl. Instr. Meth.* B70, 186 (1992).
- (5) S.Sundell, H.Ravn and the ISOLDE collaboration, *Nucl. Instr. Meth.* B70, 160 (1992).
- (6) H. K.Carter, J.Breitenbach, S.Ichikawa, J.Kormicki, private communication.
- (7) V.Rabbel, U.Stoehlker, J.Muenzel, H.Wollnik, F.Bloennigen, K.Kobras and W.Lippert, *Nucl. Instr. Meth.* B26, 246 (1987).
- (8) H.L.Ravn, P.Bricault, G.Ciavola, P.Drumm, B.Fogelberg, E.Hagebo, M.Huyse, R.Kirchner, W.Mittig, A.Mueller, H.Nifenecker and E.Roeckl, *Nucl. Instr. Meth.* B88, 441 (1994).
- (9) S.Sundell, H.Ravan and the ISOLDE collaboration, *Nucl. Instr. Meth.* B70, 160 (1992).
- (11) 日本アイソトープ協会、“アイソトープ流通統計 1997年度” ,
Isotope News, No.531, p.26 (1998).
- (12) 中本俊輔、“放射性医薬品の製造現場から”、*放射線科学*、32, 332-336 (1989).
- (13) 横山邦彦、絹谷清剛、利波紀久、久田欣一、“講座：ラジオアイソトープの
治療への応用Ⅶ. 新しいR I 内用療法—放射免疫療法、放射線滑膜切除術、
骨転移の除痛療法—”、*Radioisotopes*, 44, 123-134 (1995).
- (14) S.C. Srivastava, "Production and Supply of Radioisotopes with High-
Energy Particle Accelerators: Current Status and Future Directions",
Proc. of Japan Conference on Radiation and Radioisotopes, Tokyo, Feb.
2-4, 1994, B550.
- (15) L.F. Mausner, S. Mirzadeh, H. Schnakenberg and S.C. Srivastava, "The
Design and Operation of the Upgraded BLIP Facility for Radionuclide
Research and Production", *Appl Radiat. Isot.* 41, 367 (1990).

This is a blank page.

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 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	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

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	b
バ	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

- 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, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクターも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- 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。
- 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ない。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)

= 4.184 J (熱化学)

= 4.1855 J (15 °C)

= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS (仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

中性子科学研究計画における研究施設(第1次案)