

J A E R I - M
87-145

核融合次期装置設計(昭和61年度設計報告書)
－中性粒子入射適用の概念検討－

1987年9月

中島 国彦・山本 新・上出 泰生*・岡野 邦彦**
小原 祥裕・渡辺 和弘・水野 誠・荒木 政則

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

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申しこしください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 H 青工業株式会社

核融合次期装置設計
(昭和61年度設計報告書)
— 中性粒子入射適用の概念検討 —

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部
中島 国彦・山本 新・上出 泰生*・岡野 邦彦**
小原 祥裕⁺・渡辺 和弘⁺・水野 誠⁺・荒木 政則⁺

(1987年8月21日受理)

負イオンビームを用いた中性粒子入射装置を核融合次期装置(FER)の加熱・電流駆動・電流分布制御に適用する際のFER炉本体との適合性を検討したものである。

FER設計では、加熱・電流駆動・電流分布制御の機能を中性粒子入射に委ねる運転シナリオが一つの候補として設定されている。その基本条件とされる接線入射に起因する炉本体及び炉周辺設備と中性粒子入射装置ビームラインとの空間取合についての整合が本検討で得られた。これにもとづき、ビームライン主要機器の構造の具体化と組立・分解手順の検討が進められた。これに並行して中性子のビームライン構成機器へ及ぼす影響の粗い定量評価が行われ、構造材の選択と保守への課題が摘出された。

さらにイオン加速用500 kV直流電源について、それに必要とされる速断性と制御性の観点から高周波化した回路構成が検討され、イオン源電源の全体構成が提案された。

本検討によって負イオンビームを用いた中性粒子入射装置の全体概念が明らかにされFERへの適用に際しての炉本体に対する幾何学的制約は解決される見通しが得られた。

那珂研究所：〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ 核融合研究部

* 株日立製作所

** 株東芝

Conceptual Design Study of Fusion
Experimental Reactor (FY86FER)

- NBI Heating and Current Drive System Design -

Kunihiro NAKASHIMA, Shin YAMAMOTO
Taisei UEDE**, Kunihiro OKANO***
Yoshihiro OHARA+*, Kazuhiro WATANABE+*
Makoto MIZUNO+* and Masanori ARAKI+*

Department of Large Tokamak Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 21, 1987)

This report describes the results of applicability studies for the negative ion-based neutral beam injector to the Fusion Experimental Reactor (FER). The operation scenario of FER has been proposed to adopt the neutral injection method as one of candidates, which has three functions of heating, current drive and profile control. One of the fundamental requirements is the tangential injection of the neutral beam. For neutral beam injectors, three port sections are available. Supposing to adopt the beam line with the straight long neutralizer which has been designed in JAERI, the geometrical arrangement was determined so as to avoid any trouble to the reactor structure.

The conceptual study for major components which compose the beam line system was carried out including the estimation of the neutron streaming.

The power supply system was studied also and the work was concentrated on the acceleration power supply which requires the output voltage of 500kV and fast cut-off time. A basic concept, in which a inverter with a AC

+ Department of Thermonuclear Fusion Research

* Hitachi, Ltd.

** Toshiba Corporation

switch is used and the frequency of the supplied AC line is increased was proposed.

In these works, the configuration of the neutral beam injection system was detailed and it was shown that the beam line seems to be well implemented with the geometrical constraints related to the reactor configuration.

Keywords: FER, NBI, Plasma Heating, Plasma Current Drive, Negative Ion

目 次

1. はじめに	1
2. 負イオン源中性粒子入射装置の F E R への適用	3
2.1 F E R からの要求条件	3
2.1.1 物理的条件	3
2.1.2 炉心条件	4
2.2 中性粒子入射装置	10
2.2.1 検討経緯	10
2.2.2 負イオン源中性粒子入射システム全体構成	11
2.2.3 本年度検討結果まとめ	12
3. 主要機器の検討	21
3.1 検討課題	21
3.2 ビームライン	23
3.2.1 クライオポンプ	23
3.2.2 ビームダンプ	25
3.2.3 中性子シャッタ	26
3.3 ニュートロニクスの検討	38
3.3.1 検討項目	38
3.3.2 計算モデル	38
3.3.3 計算条件	39
3.3.4 入射中性子束	40
3.3.5 計算結果	41
3.3.6 D-D反応による中性子束の評価	43
3.3.7 まとめ	43
3.4 中性粒子入射装置用電源	67
3.4.1 システム設計条件	67
3.4.2 イオン源用電源	67
3.4.3 電力供給設備	69
3.4.4 定常系電源	69
3.4.5 まとめ	69
3.5 組立・分解保守	78
3.5.1 初期組立	78
3.5.2 分解保守	78
4. まとめ	85
謝辞	85
参考文献	86

Contents

1. Introduction	1
2. Requirements and applied NBI configuration	3
2.1 Requirements from reactor	3
2.1.1 Physical requirements	3
2.1.2 Engineering requirements	4
2.2 Configuration of NBI-beam line	10
2.2.1 Overview of NBI study for FER	10
2.2.2 Application of negative-ion based NBI system for '86 FER	11
2.2.3 Design considerations	12
3. Study on issues of concern	21
3.1 Key issues	21
3.2 Beam line components	23
3.2.1 Cryopump	23
3.2.2 Ion beam dump	25
3.2.3 Neutron shutter	26
3.3 Neutronics analysis	38
3.3.1 Outline	38
3.3.2 Calculation model	38
3.3.3 Assumptions	39
3.3.4 Estimation for neutron flux	40
3.3.5 Calculated results	41
3.3.6 Estimation of beam reaction	43
3.3.7 Discussion	43
3.4 Power supply	67
3.4.1 Design condition	67
3.4.2 Power supply system for ion-source	67
3.4.3 Motor generator	69
3.4.4 Stationary power distribution	69
3.4.5 Discussion	69

3.5 Maintenance considerations	78
3.5.1 Assemble	78
3.5.2 Maintenance	78
4. Conclusion	85
Acknowledgements	85
References	86

1. はじめに

FER建設計画は、目的とするところとそれに必要とされる性能の設定が幾度か見直しされながら、ここ数年にわたって検討が続けられている。¹⁾²⁾ 昭和61年度には国としてのFERの位置付けが明らかにされ、装置の持つべき物理・工学ミッションと建設に許容される費用の大枠が示唆されるに至った。

このような背景のもとで、これに見合う対応が急がれる状況となり、装置炉型の選択に新たな方向付けが必要となった。FER設計チームでは、炉体規模と建設費との相関を明らかにする過程で、プラズマ設計と炉構造およびプラント全体にわたる工学設計との調和を図かり今後検討の対象として採りあげるべき炉型の検討が進められている。

この結果、第1段階の選択としてTable 1.1に示す6種の炉型が採りあげられた。その選択理由も表中に併記している。加熱・電流駆動の手段については高周波または中性粒子入射、もしくはこれらの組み合わせから選択されるものとされており、第6ケースが中性粒子入射を適用した炉型として選択されている。これら炉型は次の段階でさらに詳細な工学設計を踏えて絞り込まれ、今後の計画対象としての炉型が選択される。

加熱については高周波法も中性粒子入射法も、物理・工学上は、相対的には致命的な問題は見出されてはいない。一方電流駆動においては中性粒子入射法では比較的高密度のプラズマ領域まで観測され始めている。このような状況を踏まえて、中性粒子入射法を適用する際の炉概念を構築するものとしてここでは第6ケースが選択されている。中性粒子入射法による電流駆動には、接線入射が基本的条件とされるので適用の対象とする炉体寸法や構成によっては、炉体構造との整合がむずかしい場合もある。炉体が小型化するにつれ、これが顕著になることを勘案して、ここでの対象炉体は第1ケースと同じものが選択されている。

これに供する中性粒子入射装置は、基本的には原研から提案されているシステム³⁾⁴⁾を適用するものとする。適用に際しての炉本体及び周辺設備との空間取合、その検討の基となる全体配置とビームライン遮蔽構造の整合化、および保守・分解、組立の観点からビームライン構造のFERへの適合性の検討を進め、併せて電源を含めたシステム全体の概念を形作ることを、今年の作業とした。

本報告書はこの作業結果をまとめたものである。次章で検討の前提と検討結果の全体を述べ、次々章で重要機器の現実性を検討する。

中性粒子入射装置の基本的事項を主として加熱工学第1研究室員が、これをFERへ適用する際の問題と機器の構造化具現化を主として炉設計研究室FER設計チーム員が分担して両者で検討を進めたものである。

Table 1.1 FER Comparative Design study (FY1986)

Case	型式 (通称)	特徴	基本諸元				備考
			R (m)	a (m)	ϵ	ϕ_{OH} (V.S.)	
1	規準炉 (Option C)	'86年度設定炉型式中次期大型装置検討分科会で示唆されたもの。	4.9	1.2	1.7	SND	50 '86年度FER Reference 設計
2	高性能炉(S) (ACS)	規準炉の機能を保持した合理化設計。	4.4	1.2	1.7	SND	50 合理化の取込み
3	高性能炉(D) (ACD)	Case 2と同主旨で高非円形度プラスマとダブルスルターダイヤル方式の採用。	4.0	0.9	2.0	DND	50 同上 高x, DND方式の検討
4	小型炉 (MINI)	'86年度設定オプションDグループから先進的選択	3.7	1.0	2.0	SND	15 パラメータスタディー範用でのコストミニマム炉
5	INTER LINK炉 (ILINK)	常電導OHコイルを採用し, TFコイルと鎖交させた方式。	4.7	1.7	1.7	SND	50 鎖交型の検討
6	NBI炉 (NBIR)	電流駆動, 追加加熱としてNBI採用を指向した方式	4.9	1.3	1.7	SND	50 規準炉の Alternative

2. 負イオン源中性粒子入射装置の F E R への適用

F E R の加熱・電流駆動、分布制御手段として、負イオン源を備えた中性粒子入射装置（N B I）を適用するに際して、工学設計を進めるに当っては次の条件を明らかにしてゆく必要がある。

- ① 中性粒子ビームの備えるべき条件
- ② 入射に際しての炉本体の構造的条件
- ③ 中性粒子入射装置の運転条件

すなわち①は中性粒子入射装置のシステム性能に関する事項で①イオン種、②加速エネルギー、③出力パワー、④ビーム分布等を定めるための物理的要求で、②は炉本体構造に関する事項で①入射位置と方向、②入射用ポート寸法、③本体周辺条件等を決めるための炉体構造固有のもの、③は中性粒子入射装置及び付帯設備容量を評価する際の条件でシナリオや運転計画等である。

本章では次節で中性粒子入射を適用する際に前提とされる基本的事項をまとめる。次にこれに供する中性粒子入射装置のシステム概要を述べ、F E R への適用のシステム面での問題を明らかにする。

2.1 F E R からの要求条件

2.1.1 物理的条件

F E R で検討の対象とする炉心プラズマでは、電流駆動に要求される中性粒子の入射エネルギーは少くとも数百キロ電子ボルト (eV) である。中性粒子入射装置のイオン種は、システム効率の観点から、負イオンを用いるシステムが選択される。中性化の方式と非中性化ビームの処理によってそのビームライン構成は大きく変わるものになる。

原研では直線状の長い軸長の中性化セルを用いたガス中性化方式と、炉心本体からの漏洩磁界によって、非中性化イオンを偏向し、熱化するビームライン構成を提案して来た³⁾。F E R へ適用するビームラインは、これを準用することを前提として物理条件を設定する。この中性粒子入射装置のビーム性能の主要目は次節 Table 2.2-3 に示す。

(1) 運転シナリオ

F E R のプラズマ電流立上げは高周波もしくは中性粒子入射による非誘導とされている。前者では低減混成波 (LHRF) による電流駆動と加熱を基本とし、不足する加熱電力はイオンサイクロトロン波 (ICRF) で供給するシナリオが提案されている。これを Fig. 2.1-1 に示す。

後者では電流立上げから加熱、燃焼時の分布制御まで中性粒子入射のみで対応できる可能性があることから、Fig. 2.1-2 に示す。シナリオが提案されている。

以下各フェーズにおける物理的条件をまとめておく。

(2) 電流立上げ

中性粒子入射による電流立上げには、ターゲットとなるプラズマ電流が必要である。この電流までは誘導立上げ等の手段を用いて電流を生成しておく必要がある。

ここではこのターゲット電流を 2 MA と設定し、この電流は誘導立上げで得るものとする。従ってこの時消費する磁束を補償し、燃焼時間 800 秒を確保するためにリチャージフェーズが置かれている。

1) 入射電力

電流駆動効率はプラズマ密度に反比例するので、低密度領域で電流立上げを行うことが望ましい。しかしビーム透過による対向面の熱設計やダイバータ部での低温高密度ダイバータプラズマの成立性とを考慮せねばならない。ここで入射パワーは、プラズマ密度を 10^{-19} m^{-3} として評価する。一方適用の前提となるビームラインの出力は約 20MW であることを勘案してビームライン 3 本分出力 (60MW) とする。

2) 入射位置

中性粒子入射による電流駆動にはプラズマ電流方向の速度成分が必要とされるため、接線入射が要求される。電流駆動効率の観点からは入射ビーム軸の接点位置 R_t はプラズマ主半径 R_p より幾分内径側にあることが望まれる ($R_t \sim R_p - a/4, a$; プラズマ副半径)。しかしトロイダルコイル間隔の大きさや対向面の構造、寸法、位置等の条件を勘案して次の範囲を許容するものとして入射位置を定める。

$$R_p - 3a/4 \leq R_t \leq R_p - a/4$$

(3) 燃焼立上げ

プラズマ設計では、エネルギー閉込め側は、Mirnov 則を採用している。この場合に燃焼立上げ時に必要な入射電力は約 45MW と算定されている。

(4) 電流分布制御

プラズマの高ベータ値化、鋸歯状波振動の抑制およびディスラプション制御には電流分布制御が考えられている。その手法として入射ビームの入射方向（垂直面内位置）を可変として入射ビームの空間的強度分布を制御することを前提とする。

Fig. 2.1-3 に示すような 3 例の典型的な強度分布に対して、ターゲットプラズマに流し得るビーム駆動電流分布 $j(r)$ を図中に示す⁵⁾。巨視的電流駆動効率とビーム透過率も図中に示す。

制御領域は、電流分布の自由度の観点からは、プラズマ全領域に渡ることが望ましいが少くともプラズマ領域の 3/4 程度の領域に渡る入射可変幅を有しておれば高ベータ値化のための電流分布が得られることから、ビーム可変域はプラズマ中央面からその存在域の 3/4 程度の領域とする。

2.1.2 炉心条件

電流駆動には接線入射が基本条件となる。一方通過ビームに対する対向位置での受熱構造 (数 MW/m²) を設置する必要がある。この受熱構造はその健全性を維持するために容易な可換構造 (1 方向移動) であることが望ましい。その設置空間は基本的にはトロイダルコイルの間となる。その際ポート利用条件から入射位置と対向面設置位置が、同一のポートセクションにあることが望まれる。

(1) 入射配位

上記条件で、対向面と入射開口空間を割り振り、他方トロイダルコイル用遮蔽厚の確保と炉内

遮蔽（可動遮蔽、三角ポスト）の切り欠き等が総合的に検討された⁶⁾。この結果前項入射軸接点位置（ R_t, θ ）は次のように決められた。

$$R_t = R_p - 3a/4$$

$$\theta = 2^\circ \text{ (トロイダルコイル間中心軸からの偏向)}$$

この平面状態を Fig. 2.1-4 に示す。

(2) ポート寸法（ドリフトダクト開口）

ドリフトダクト開口寸法は分布制御のために必要なビーム入射可変域と、ビーム発散条件および、遮蔽厚さの確保から設定する。

分布制御に必要なビーム偏向領域をプラズマ存在域の $\frac{3}{4}$ 領域とし、ビーム発散角 0.30° を前提にした時、偏向時のビームの幾何学的効率 0.8 を確保するものとして、次の開口寸法を設定した。

プラズマ側 $2.8 \text{ m}^H \times 0.5 \text{ m}^W$

入射口側 $2.0 \text{ m}^H \times 0.44 \text{ m}^W$

(3) ダイバータ保守空間

炉本体の保守時に必要な空間を確保しておく必要があり、ここではダイバータ保守のための空間を考慮した。

ダイバータ交換キャスクの寸法からトロイダルコイル内は幅 4.5 m、プラズマ中心面下方 1.8 m 以下はその為の空間とすることにし、ビームライン配置時の許容空間から外すものとする。

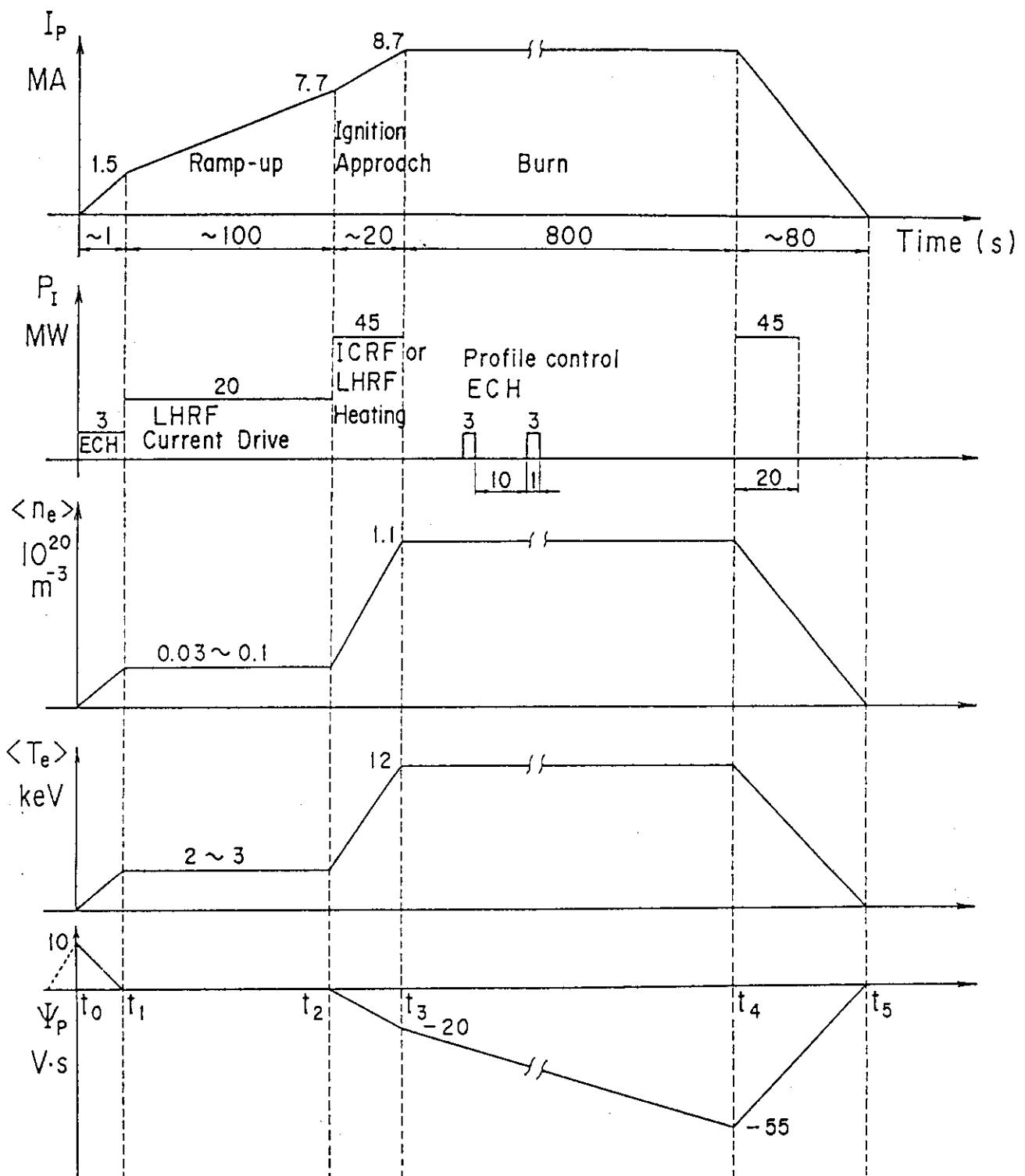


Fig. 2.1-1 Operation Scenario with RF

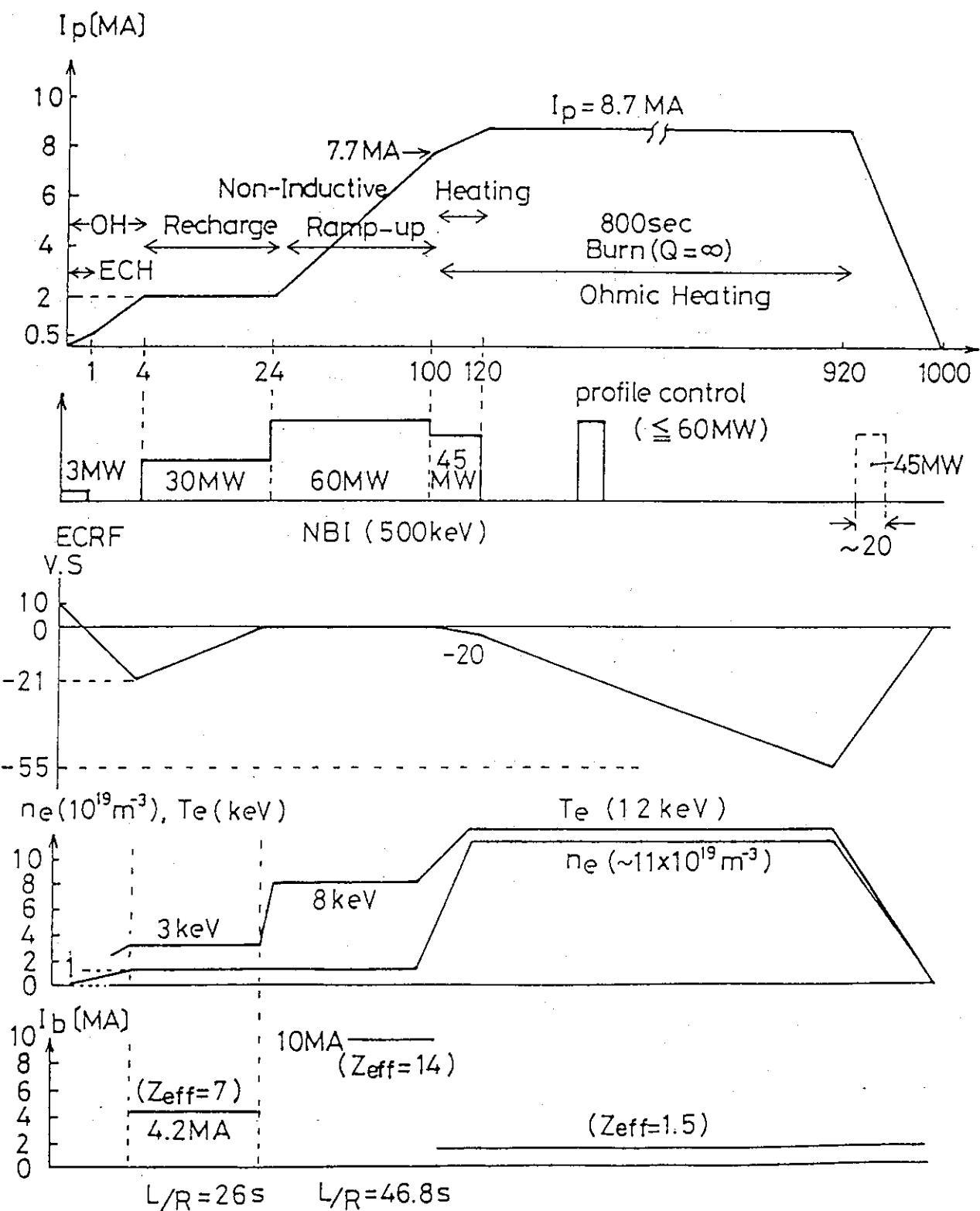


Fig. 2.1-2 Operation Scenario with NB

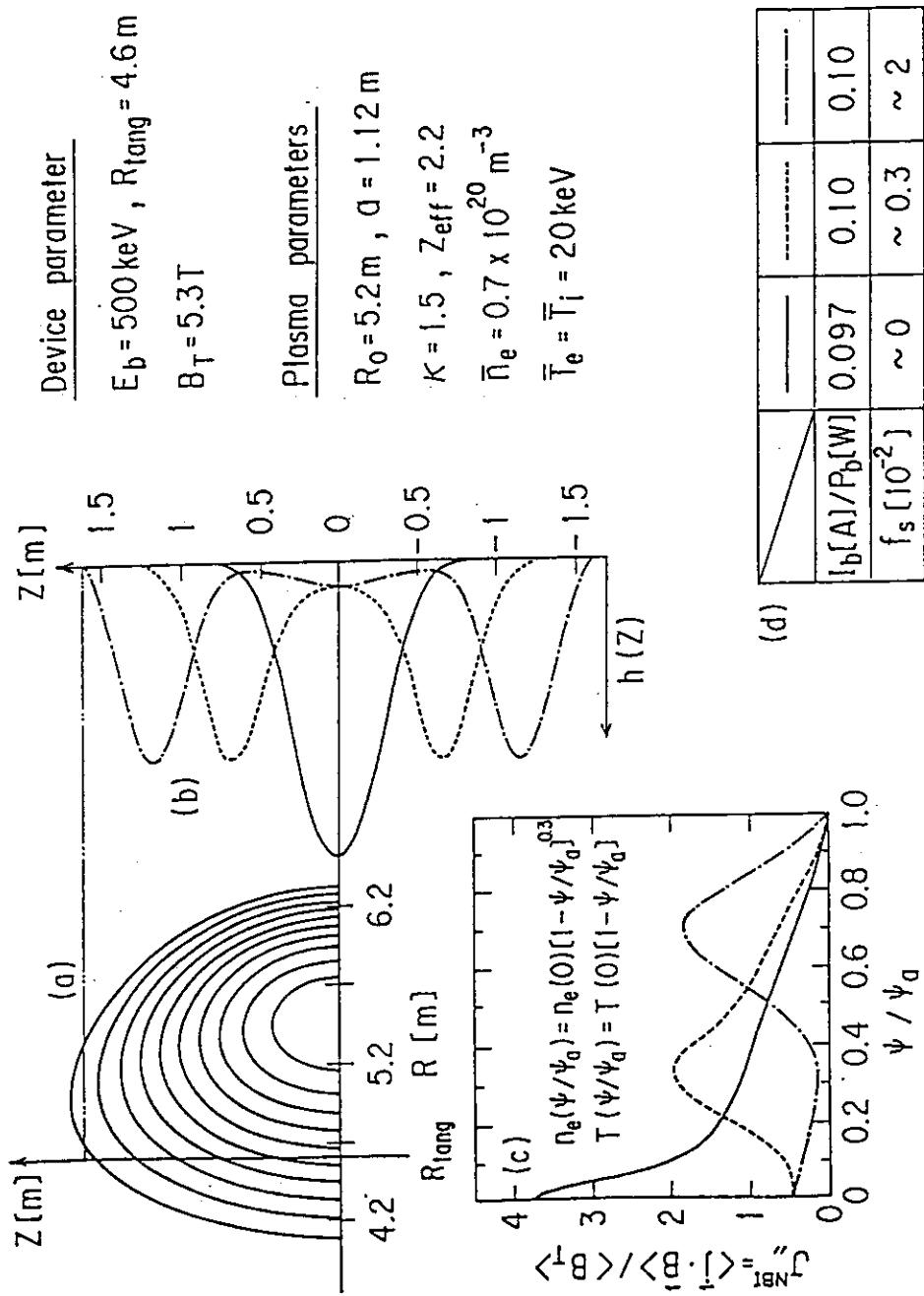


Fig. 2.1-3 Current Profile Control

- (a) magnetic surface
- (b) beam power profile $h(z)$
- (c) beam-driven current profile J_n^{NBI} and poloidal flux function ψ
- (d) beam shine through fractions f_s and global beam-driven current efficiency $I_b(A)/P_b(W)$

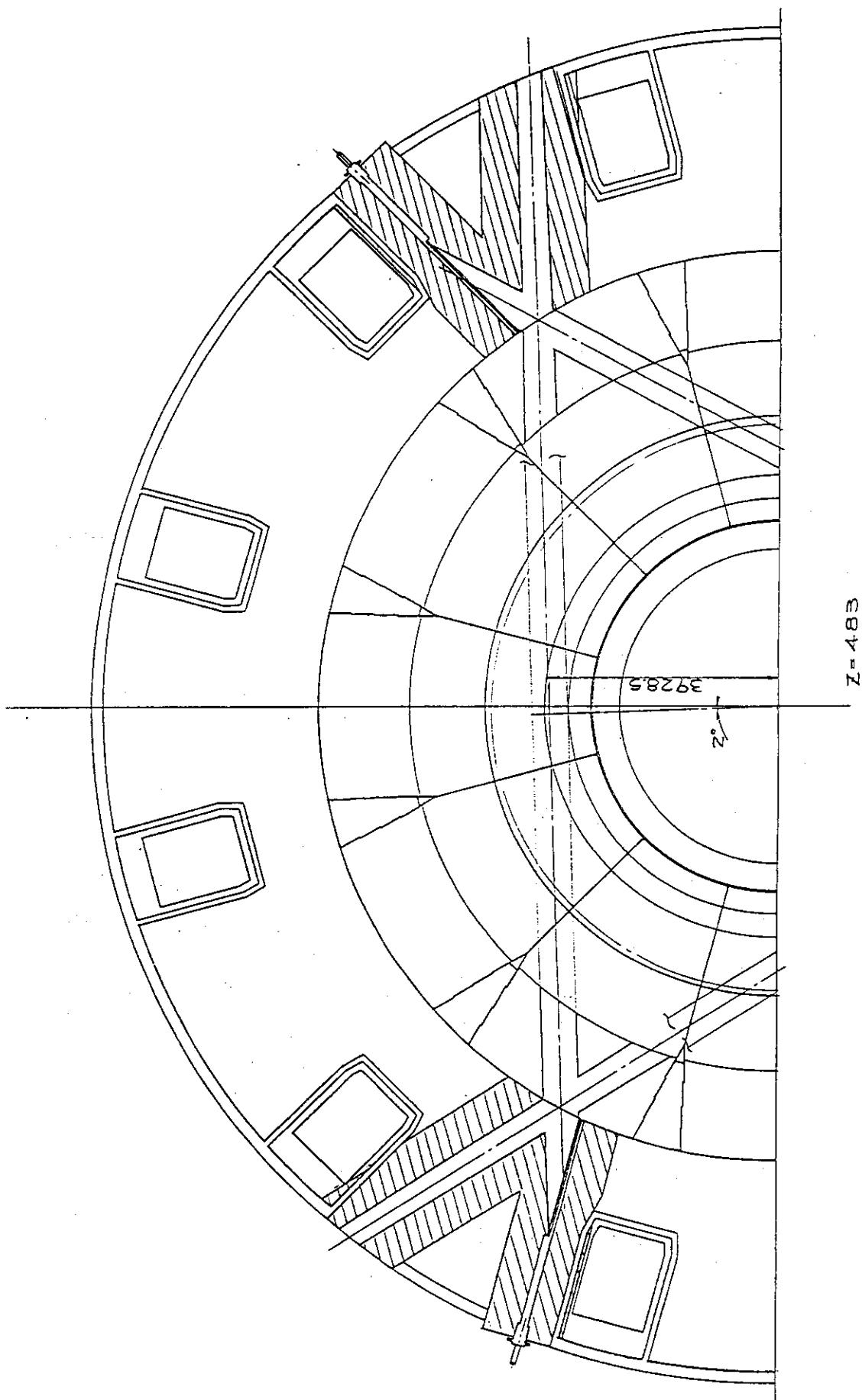


Fig. 2.1-4 Geometrical Requirement

2.2 中性粒子入射装置

2.2.1 検討経緯

昭和59年度F E R設計において、200 kV, 60MW, 20~50 s, 4ビームラインの正イオン源中性粒子入射装置(NBI)システムの検討を行なった。その設計条件と仕様をTable 2.2.1-1に示す。本設計の主な検討項目は、次のようなものである。

- ① バケット型正イオン源
- ② ガス中性化方式
- ③ 総合効率向上のためのエネルギー回収装置
- ④ 複数ユニットを設けた連続再生方式のクライオポンプ
- ⑤ 全半導体化イオン源電源
- ⑥ 放射線損傷の寿命評価
- ⑦ 分解修理法

本装置はプラズマの主加熱用として考えられ、現状技術レベルの延長上で高い確度で実現可能なシステムとなっている。

また、負イオン源N B Iシステムについても、昭和59年度F E R設計において、効率、スペースの面から検討すべきことが指摘された。

60年度F E R設計においては、負イオン源N B Iシステムについての検討の進展により、装置としての利点が明らかにされ²⁾、主加熱、電流駆動、電流分布制御に用いることが検討された⁵⁾。さらに負イオン源N B Iシステムについても概念設計³⁾が行なわれ、次のような特徴を持ったシステムが提案された。

- ① トカマク炉本体近傍に大きな機器がない。
- ② 入射ポートの幅が狭いため中性子等の放射線シールドが容易にできる。
- ③ 入射ポートの幅が狭いため接線入射が可能となり、プラズマ加熱だけでなくトカマクの電流駆動、電流分布制御にも使用できる。
- ④ イオン源等の複雑な機器は炉本体から遠く離れた別室に設置できるので保守が容易である。
- ⑤ 中性化セルが長いため、クライオポンプの容量は合計で 950 m³/s ユニットと非常に小さくできる。
- ⑥ 装置が小型でかつ効率が良い。
- ⑦ 本体磁場により残留イオンの偏向を行なう。

一方工学的な面でも、主に全体構造、配置取合、放射化の検討が行なわれ、適合性の見通しを得た。

本年度は、新規対象炉型への適用とシステムの構築を課題として、次項に重点を置いて検討した。

- ① 全体構造、配置取合
- ② 放射化検討(ビームダンプ室、イオン源)
- ③ 組立分解保守

- ④ ビームライン構造（ビームダンプ，クライオポンプ，中性子シャッタ）
- ⑤ イオン源電源

2.2.2 負イオン源中性粒子入射システム全体構成

次期大型炉では、NBIは大容量化と高加速電圧化が必要でこれに伴ない正イオン源NBIシステムでは、効率向上のためエネルギー回収装置を設けること、また、中性化のためのガス負荷が大きく排気装置が大型化することで、炉近傍に設置するビームラインが大型化する。これに対して、負イオン源NBIシステムでは、中性化効率が良く、また、ビーム発散角が小さいことにより、イオン源を遠方に設置し炉近傍のビームラインを小型化することができる。これは同時にビームライン機器の放射化を軽減させる効果を生む。この外、正と負イオン源NBIシステムを次期大型炉に適用する観点から比較を行うとTable 2.2-2に示すようになる。

今年度の検討対象炉型へ、前項のシステム概念を有するNBIを適用した結果をFig.2.2-1に主要部をTable 2.2-3に示す。

NBIシステムは大きくわけて、イオン源部、中性化セル、ビームダンプ室、ドリフト部及びイオン源電源、冷却系、冷媒系、排気系、これらの制御系により構成される。Fig.2.2-2に全体構成ブロック図を示す。

イオン源は、体積生成型負イオン源を採用し、巾20cm、長さ240cmのシート状100Aビームを発散角0.3°で引き出すことを考える。イオン源は500kVの絶縁が必要となるためと、また電極部の排気コンダクタンスを大きくとり、加速過程での負イオンの中性化損失を低減するため大型のFRP絶縁カラムを考える。また、プラズマ電流分布制御のため、入射ビーム分布を制御する必要があり、水冷型のコイルをイオン源と中性化セルの間の空間に設ける。イオン源室のガス排気のためクライオポンプを設ける。

中性化セルは、内層より受熱部、真空容器、磁気シールド、遮蔽体の多層構造となる。イオン源より、イオン源保守用のゲート弁を設ける。中性化セルを長くし、中性化に必要な線密度を得るために真空度を低くし、ビームダンプ室に流入するガス量を低く抑える。

ビームダンプは、残留イオンビームが本体磁場により偏向されたものを熱化処理する。ビームダンプは、正負両イオンを処理するためビームラインの両サイド及び上下に設け、また、本体磁場の運転による変化にも対応できる寸法とする。冷却管として高熱流束に耐えるため、外部フィン付スウォールチューブの採用が考えられている。さらに、再電離損失を小さくするため、ビームダンプ室にクライオポンプを設ける。クライオポンプは、Heの流入も考慮して複合クライオポンプとする。本体との気密を保つため、ドリフト部との間にゲート弁を設け、また、NBI非ショット時に閉とし、ビームラインの放射化を低減するための中性子シャッタが設けられる。

ドリフト部は、内層より受熱部、真空容器、遮蔽体で構成される。

イオン源に、プラズマ生成用電源、加速電源等を供給するためのイオン源用電源がある。また、冷媒循環系はクライオポンプに液体ヘリウム、液体窒素を供給し、冷却系はビームダンプ等の受熱機器に、冷却水を供給する装置である。

2.2.3 本年度検討結果まとめ

(1) ビームライン配置

中性ビームの本体への平面入射配位は、Fig.2.1-4に従うものとしNBIビームライン配置を定めた。垂直面でのビームの本体への入射配位の基本寸法をFig.2.2-3に示す。また、ビームダンプ室の位置は、ダイバータ引抜き空間との干渉をさけるよう位置決めした。ここでは中性化セルは、全長24mとした。ドリフト部遮蔽体厚さがトロイダルコイル部で充分確保できない所が生じるので、これはタングステン等を補充して遮蔽体の実効厚をかせぐこととし、本入射配位案で進めることとした。

(2) 放射化計算

イオン源室、ビームダンプ室の放射化の計算を、本年度のビームライン配置、材料、構造で行なった。2年間で約1.3万回の燃焼を行ったとした時イオン源の炉停止後の γ 線の空間線量率は1 rem/h程度が算出されている。炉停止後2週間でイオン源単体としてはmrem/hオーダに入ると考えられる。今後、イオン源部真空容器材質をAl等にすることで、周辺構造物を含めた低放射化と保守方案（寿命、交換頻度）との整合化が重要となる。

ビームダンプ室遮蔽は現状ポート開口程度ならば、遮蔽構造上の問題は少いがイオン源室同様ビームダンプ等の保守の観点からの検討が必要であり次の課題である。

(3) 組立分解保守

組立分解保守についての基本手順を確立した。ただし、今後さらに、分解保守時放射化されたビームライン内部の露出を極力少なくすることや仮置き時の占有域等を考慮してゆくことが必要であり炉室全体との調和を図ることが課題となる。

(4) ビームライン

ビームダンプ、クライオポンプ、中性子シャッタについて要求される仕様検討結果に基づき構造概念を具体化した。クライオポンプについては、ガスロード上の連続運転時間が5時間あるため、バッチ再生方式とし、またHe排気可能な複合クライオポンプとした。ビームダンプは、高熱流束に対処するためフィン付スウォールチューブの採用を選択した。また、中性子シャッタは、ビームラインの放射化を低減するためには、開閉時間の短縮が効果的であり構造化にはプラズマ電流分布制御時のパルス運転との協調を図る必要がある。

(5) イオン源電源

加速電源は、500 kV, 100Aの高電圧大容量で定電圧制御とともに、イオン源電極ブレーキダウン時の流入サージを少なくし、イオン源の損傷を微少にするため高速の遮断機能が必要である。このような高電圧においては、従来のNBIに使用されていたような直流高速スイッチの使用は、素子数の増大と制御の複雑化により現実的でない。このため、交流側を高周波化して低電圧側で高速スイッチングとレギュレーションを行なう回路方式を選択した。主加速電源の外のイオン源電源はフローティング単位で作動させるため絶縁方式と制御方式とを評価し、イオン源電源システムの基本概念を構築した。

Table 2.2-1 Design parameters of a positive-ion-based NBI

Injection Energy (keV)	100 ~ 200 (Variable)
Ion Beam	D ⁺
Injection Power (MW)	60
Beam Duration (s)	20 ~ 50
Injection Angle to Plasma	Perpendicular
Number of Injection Ports	4
Number of Ion Sources per Port	6 (including one spare)
Length of Beam Line (from exit of ion source to exit to drift tube)	16 (m)
Length of Neutralizer	3.5 (m)
Dimensions of Injection Port	1.2 m (height) x 1.1 m (width)
(a) Neutralizer	
Pressure (Torr) Entrance	2.7×10^{-3}
Exit	9×10^{-5}
Neutralization Efficiency (%)	18
Beam Divergence Loss (%)	5
Cross Sectional Area (mm ²)	125 (height) x 1320 (width)
(b) Direct Energy Converter	
Collector Voltage (kV)	195
Suppressor Voltage (kV)	-30
Efficiency (%)	69
Pressure (Torr)	less than 9×10^{-5}
(c) Cryopump	
Total Gas Load to Cryopump per One Shot of 50 s	6.75×10^3 (Torr.l)
Maximum Number of Beam Shots without Regeneration	42 shots (12h)
Schedule of Cryopump Operation	continuous

Table 2.2-2 Comparison of NBI system for ion polarity

No.	項目	正イオンビーム	負イオンビーム
1	中性化効率	1) 高電圧化に伴ない効率が低下する。 2) エネルギ回収装置で高効率化 3) ガスロードが大きいので排気装置が大 4) 2)3)により炉近傍の機器が大型	1) 高電圧化しても中性化効率が良い 2) ガスロードが小さいので排気装置が小型 3) 2)より炉近傍機器が小型 4) NBI単機容量大によるユニット数の低減
2	ビーム発散角	1) 1° と比較的大きいのでイオン源を炉近傍に設置 2) イオン源が放射化損傷受けやすい	1) 0.3° と小さいのでイオン源を炉より離せる 2) イオン源を別室におけるためメンテナンス容易
3	ビームライン	1) エネルギ回収装置設置 2) 複数ユニットのクライオポンプを設け連続再生とする	1) 中性化セルが長い 2) 本体磁場による残留イオンビーム偏向 3) 接線入射可能 4) クライオポンプの再生はバッチ処理で可 5) ビーム分布制御可能
4	イオン原	1) 複数台 / ユニット (中性化セルが短いのでガスロード低減のため) (ドリフトダクト径小さくし、) (放射化損傷低減のため)	1) 大容量化により1台 / ユニット
5	イオン源電源	1) 全半導体化電源	1) 電流駆動も考えるため高電圧化される、サージ対応のため高周波化する
6	技術的難易度	すでに確立された技術 設計上のリスク小	イオン源のR&D必要

Table 2.2-3 NBI system parameters

1) Overall performance

Neutral beam power	22.5 MW
Beam energy	500 keV
Pulse length	quasi-continuous
Ion species	D

2) Ion source

Number	1
Type	volume production
Grid size	20x240 cm ²
Extracted current	120 A
Accelerated current	100 A
Current density	50 mA/cm ²
Beam divergence (1/e)	0.3°

3) Cryopump

Type	Complex cryopump
Re-generation	Intermittent
Operation time	5h (Gas load)
Pumping speed	750 m ³ /s Ion source chamber 200 m ³ /s Beam dump chamber

4) Beam dump

Inner size	0.8mW x 1.4mH x 3ℓ
Input power	16.7 MW
Heat flux	4 kW/cm ²
Element	Externally finned swirl tube
Coolant	1000 m ³ /h
Residual ion deflection	External poloided field

5) Neutralizer

Inner size	0.26mW x 2.4mH Ion source chamber side 0.4mW x 1.4mH Ion dump chamber side
Length	24m
Liner	20mm OFCu
Magnetic shield	20mm Permalley 200mm Iron

6) Drift duct

Inner size	0.44mW x 1.8mH	Ion dump chamber
	0.5mW x 2.8mH	1st wall
Liner	20mm	OFCu
Pressure	4×10^{-3}	Pa
Gas inlet	0.03	Pa m ³ /s

7) Neutron shutter

Duct size	0.5mW x 2.0mH	0.5mW
Thickness	1 m	
Shutter speed	20s	

8) Radiation shield

Drift duct	SUS 620mm
Ion Dump chamber	SUS 500mm + H ₂ O 400mm
Neutralizer	SUS 200mm + Iron 200mm (magnetic shield)
Ion source chamber	SUS 300 ~ 500mm

JAERI-M 87-145

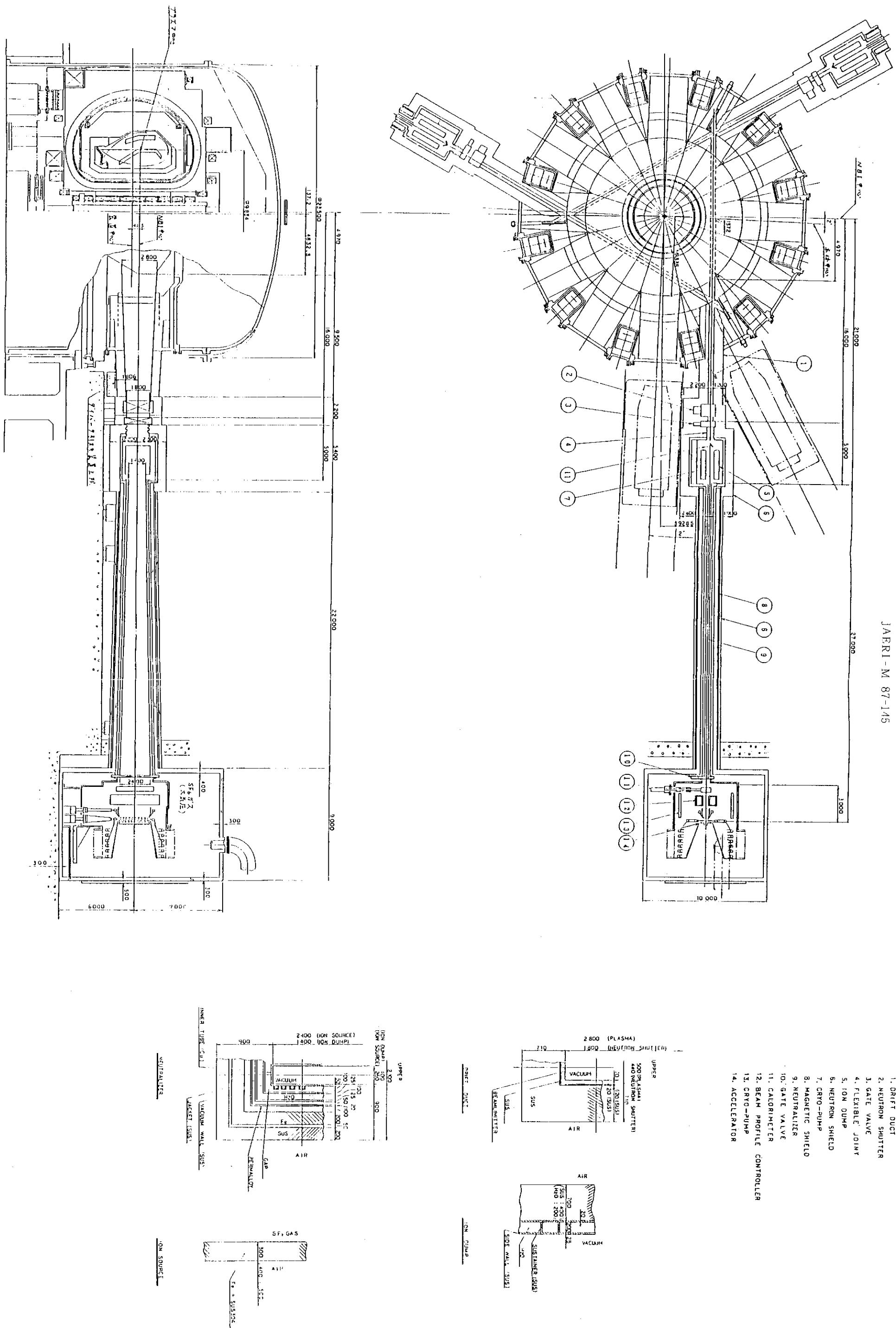


Fig. 2.2-1 Configuration of NBI Beam Line

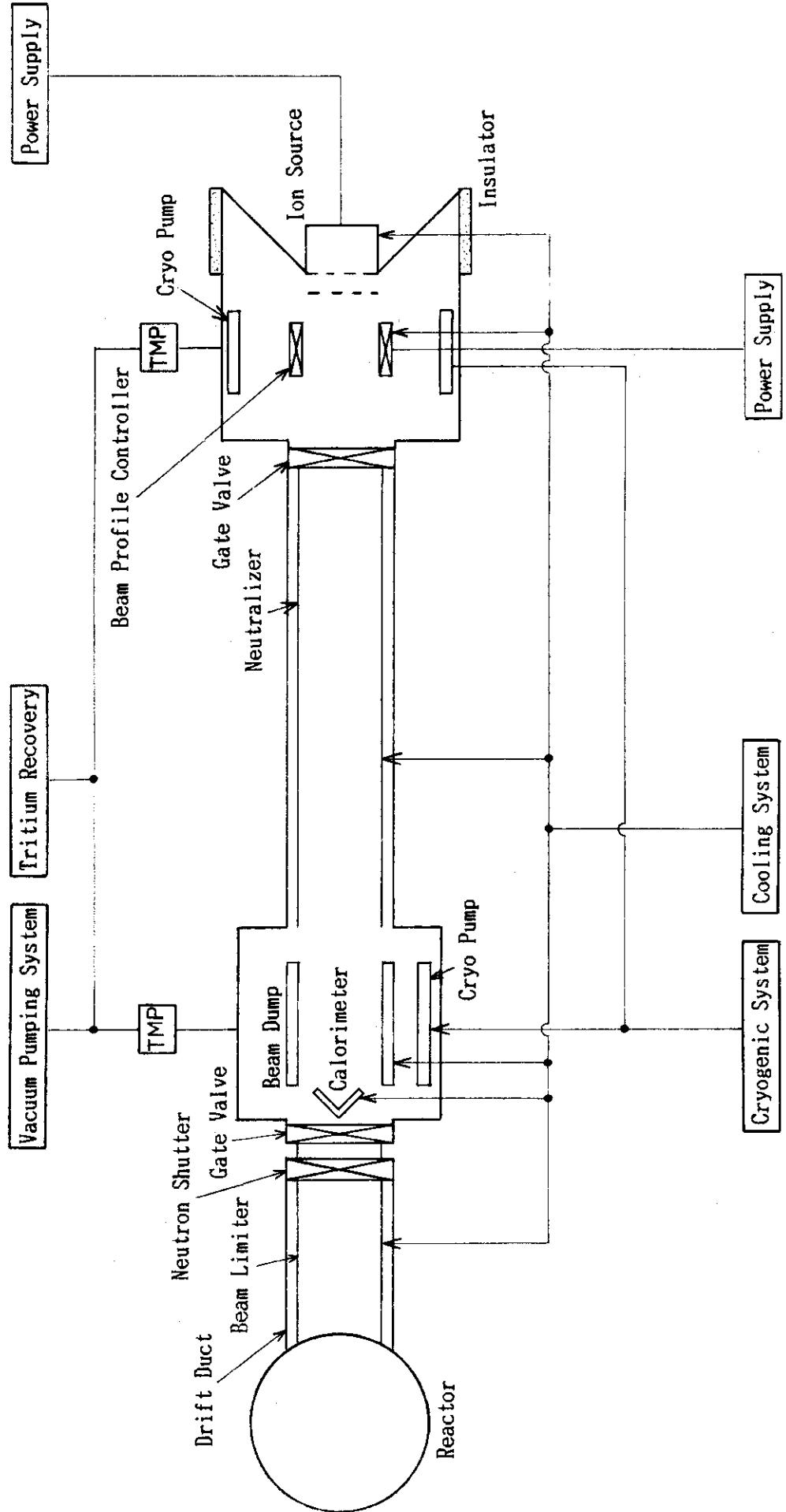


Fig. 2.2-2 Block Diagram of NBI System

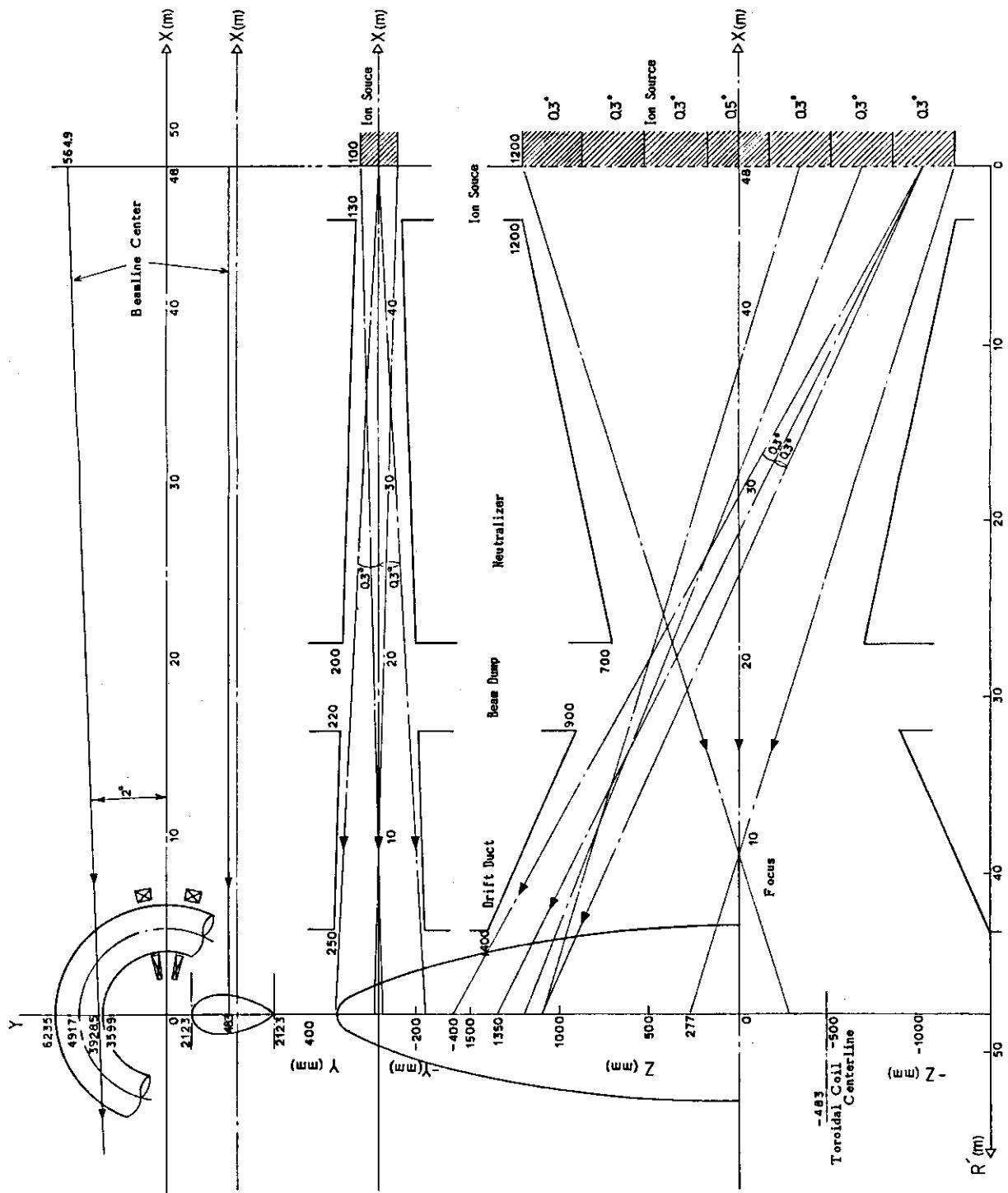


Fig. 2.2-3 Dimension of Beam Line

3. 主要機器の検討

前章で述べた構成の中性粒子入射装置ビームラインをF E Rへ適用する際の主要機器の概念検討を行い実現性を評価する。

3.1 検討課題

負イオン源N B Iシステムの工学的主要検討項目をTable 3.1-1に示す。イオン源、中性化方法、ガス、パワーフロー、効率、ビーム偏向等の性能検討も行なわれた³⁾。

全体構成としては、入射配置上の重大な問題は見出されていないので、今後は、トロイダルコイルとの取合、本体との真空シール、支持構造、分解組立時のNBI以外の設備との空間的、時間的取合を考慮して適合性を検討する必要がある。

放射化遮蔽体は、各部の放射化量の明確化とともに、今後は運転シナリオと生体許容値との関連の検討により、重量低減の検討が重要となる。核発熱、崩壊熱は微少と考えられるが、イオン源の照射損傷による寿命は確認しておく必要がある。ビームライン内のD D反応による中性子束は、概算推定によると、本体からの流入中性子束に匹敵するのでデータベースの調査確認が必要である。

負イオン源は、最も重要な開発項目である。負イオンの発生加速とともに、イオン源電源、加速電源の絶縁及び給電方式も具体化する必要がある。

ビームダンプは、高熱流束受熱可能な構造のR & Dが必要である。また、クライオポンプは、設計条件の構造に与える影響が大きいので、設計条件の明確化が重要である。

イオン源用電源には、イオン源へのサージ流入を低減するため、直流スイッチに代わる交流側高速スイッチング機能が必要であり、それに伴ってシステム・機器の高周波化を検討する必要がある。

Table 3.1-1 Engineering issues of concern

No	系 統	主要検討項目	主要設計条件
1	全 体 構 成	1) 本体との配置取合 2) 組立, 分解保守 3) 配管, 配線, 機器配置	1) 入射基本寸法 2) ビームライン基本寸法 3) 他設備との取合 4) システム諸元
2	ニュートロニクス	1) 遮 蔽 体 2) 放射損傷 3) 核 発 熱 4) D D 反応	1) プラズマ出力, 運転シナリオ 2) 生体許容値 3) システム諸元
3	イ オ ン 源	1) 絶縁, 給電, 構造 2) 電極位置制御	1) イオン源仕様 2) ビーム仕様 3) システム諸元
4	ビーム ライン	1) ビームダンプ構造 2) 中性化セル構造 3) ドリフト管 4) カロリメータ構造 5) 中性子シャッタ構造 6) ビーム分布制御装置	1) ビーム, ガスフロー 2) 運転シナリオ 3) 本体磁場
5	電 源	1) 電源システム 2) 絶縁, 給電構造	1) イオン源仕様
6	排 気 系	1) クライオポンプ構造 2) He 排気 3) トリチウム処理	1) トリチウム, He 流入量 2) 本体磁場 3) ガスフロー 4) 運転シナリオ
7	冷 却 系	1) 放射化処理	

3.2 ビームライン

3.2.1 クライオポンプ

本検討で適用する負イオン源NB Iシステムでは、クライオポンプは、正イオン源NB Iシステムに比べ大巾な容量低減が可能であるが、その構造は、設計条件により大きく影響される。運転シナリオにより再生方式が、また、He 排気の要否によりコンデンセーションポンプか、ソーポンプが決定される。He 分離排気するためには、両者をそなえた複合クライオポンプとする必要がある。本報告では、Table 3.2-1にまとめられる検討結果より、Fig.3.3-1のA1フィン型自然循環方式複合クライオポンプを採用することとした。He 二相流による自然循環方式は、JT-60 NB Iのクライオポンプでも採用され実績のある方法である。

(1) 再生周期

一日の運転回数を18として再生周期を定める。

a) ビームライン体積

ビームライン構成にもとづいて概算する。

- ビームダンプ室； $2.5\text{ m} \times 3\text{ m} \times 5\text{ m} = 37.5\text{ m}^3$
- 中性化セル； $(0.52\text{ m} \times 2.66\text{ m} + 0.64\text{ m} \times 1.66\text{ m}) \times \frac{1}{2} \times 26\text{ m} = 32\text{ m}^3$
- イオン源室； $\frac{\pi}{4} \times 5^2\text{ m} \times 3\text{ m} = 59\text{ m}^3$

以上、計 130 m^3 と算定する。

b) 1サイクル中のガスロード時間

運転シナリオより算定して定める。

- 電流立上、加熱時間； 120 s
- プラズマ電流分布制御； $(10\text{ s} + 30\text{ s}) \times 8\text{ 回} = 320\text{ s}$
- 電流立下げ； 20 s

以上、計 460 s / サイクルとする。ただし、上記の30 sは、ビームラインの真空時定数の2倍である。

c) 運転サイクル数

安全サイドの爆発限界よりの許容ビームラインホールドガス量は、次のように算定される。

$$130\text{ m}^3 \times 1700\text{ Pa} = 2.21 \times 10^5 \text{ Pa m}^3$$

前項より 1 サイクルのビームラインへのガス流入量は、

$$12.4 \text{ Pa m}^3/\text{s} \times 460\text{ s} / \text{サイクル} = 5.7 \times 10^3 \text{ Pa m}^3 / \text{サイクル}$$

となるので、再生までの運転サイクル数は、

$$\frac{2.21 \times 10^5 \text{ Pa m}^3}{5.7 \times 10^3 \text{ Pa m}^3 / \text{サイクル}} \approx 38 \text{ サイクル (4.9 h)}$$

となる。以上より、1ビームラインに単一ユニットのクライオポンプを設け、2日に1回(18サイクル×2日=36サイクル)再生を行なうこととする。また、再生時間を数時間程度とすることは可能と考えられるので、実験停止時の夜間に再生を行なうことでも対応可能と考えられる。

長期間連続運転する場合は、クライオポンプユニットを複数設け交互に再生する必要がある。この場合は、ビームダンプ室の拡張が必要となる。

(2) He 排気

本体からの流入量を、トリチウム流入量 1.37×10^{18} 個/s の 5 % とすると、 $0.005 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ となる。また、運転状態、真空度によるビームライン内の He のビルトアップとそれによるビームの再電離損の詳細は今後の検討によるが、スペース、冷媒系統上許容されると考えられるので、He 分離排気を考え活性炭ソープションクライオポンプを設けた複合クライオポンプとすることを考える。今後の詳細検討により、He 排気が不要になれば、冷媒系統、スペース上の大巾な変更なく、ソープションポンプの削除が可能である。

(3) トリチウム流入量

本体のトリチウム密度を、 4.42×10^{16} 個/ m^3 としビームダンプ室への流入量、イオン源室への流入量を算定する。

a) ビームダンプ室への流入量

ドリフト管のコンダクタンス C_D は次式で算出する。

$$C_D = \frac{166.7}{\sqrt{M}} \times \alpha \times \frac{a^2 b^2}{(a+b)l} = \frac{166.7}{\sqrt{6}} \times 1.3 \times \frac{47^2 \times 230^2}{(47+230) \times 1200} = 31 \text{ m}^3/\text{s}$$

ここで、

a, b : 縦、横寸法, α : 形状係数, M : 分子量, l : 長さ

単位時間当りの流入量 q_D は、

$$q_D = 4.42 \times 10^{16} \text{ 個}/\text{m}^3 \times 31 \text{ m}^3/\text{s} = 1.37 \times 10^{18} \text{ 個}/\text{s}$$

となり、1日当りの3ユニットでの全流入量は

$$\begin{aligned} Q_D &= 1.37 \times 10^{18} \text{ 個}/\text{s} \times 1000 \text{ s}/\text{サイクル} \times 18 \text{ サイクル}/\text{日} \times 3 \text{ ユニット} \\ &= 7.4 \times 10^{22} \text{ 個}/\text{日} \\ &= 0.74 \text{ g}/\text{日} \end{aligned}$$

となる。一方ビームダンプ室の密度は、クライオポンプの排気速度を $160 \text{ m}^3/\text{s}$ とすると

$$1.37 \times 10^{18} \text{ 個}/\text{s} \times \frac{1}{160 \text{ m}^3/\text{s}} = 8.56 \times 10^{15} \text{ 個}/\text{m}^3$$

となる。

b) イオン源室への流入量

中性化セルのコンダクタンス C_N は、前項と同様次のように算出される。

$$C_N = \frac{166.7}{\sqrt{6}} \times 1.35 \times \frac{33^2 \times 190^2}{(33 + 190) \times 2600} = 6.2 \text{ m}^3 / \text{s}$$

イオン源室への流入量 q_N は、ビームダンプ室のトリチウム密度と中性化セルのコンダクタンスの積で表わされ、

$$q_N = 8.56 \times 10^{15} \text{ 個} / \text{m}^3 \times 6.2 \text{ m}^3 / \text{s} = 5.3 \times 10^{16} \text{ 個} / \text{s}$$

となり、1日当りの全流入量 Q_N は、

$$\begin{aligned} Q_N &= 5.3 \times 10^4 \text{ 個} / \text{s} \times 1000 \text{ s} \times 18 \text{ サイクル} \times 3 \text{ ユニット} = 2.87 \times 10^{21} \text{ 個} / \text{日} \\ &= 0.028 \text{ g} / \text{日} \end{aligned}$$

となる。

以上より、ビームダンプ室、イオン源室とも再生排気ガスをそのまま大気放出することは許容されない。ビームダンプ室の再生排気ガスは、本体のトリチウム処理系に入れて本体排気ガスと同一に処理する²⁾一方イオン源室の再生排気ガスは、トリチウムは低濃度であるため（ただし再生時は、ゲート弁を閉じビームダンプ室とイオン源室を分離する必要がある）、純化精製して、所定濃度に達するまで再使用することで考える。純化精製循環システムとこの系からのトリチウム処理については、今後検討課題とする。

c) 湧電流損失

ビームダンプ室近傍の本体磁場を 1 k Gauss、立上り時間を 100 s とすると、磁場に垂直におかれた平板の湧電流損失 P は下式⁷⁾ で表わされる。

$$P = \frac{1}{12} \frac{1}{\rho} d W^3 \left(\frac{dB}{dt} \right)^2$$

l ：平板長 d ：厚み W ：巾 ρ ：抵抗率 B ：磁界

寸法 $0.3^W m \times 2^l m \times 3^d mm$ の Al フィン型クライオポンプに適用すると

$$P = \frac{1}{12} \frac{2m \times 3 \times 10^{-3} m}{9 \times 10^{-10} \Omega \cdot m} \times (0.3 m)^3 \times \left(\frac{0.1 W_b / m^2}{100 s} \right)^2 = 0.015 \text{ W}$$

となる。この程度の値は、侵入熱全体からみれば問題とならないと考えられる。

d) 冷媒循環系

JT-60 NBI と同様な二相流圧送方式を考える。冷凍能力は、トランスマーチの長さ及び再生時間によるが、おおよそ 500 W 程度と考えられる。冷媒循環系々統図を Fig.3.2-2 に示す。

3.2.2 ビームダンプ

ビームダンプは、中性化セルより出た残留イオンビームが、本体磁場により偏向されたものを受け除熱するもので、JT-60 NBI のビームダンプの最高熱流束 $0.5 \text{ kW} / \text{cm}^2$ に比べ 8 倍の $4 \text{ kW} / \text{cm}^2$ のビームを受ける。また、イオンパワーは JT-60 より大であり 16.7 MW となり、さらに、本体

磁場により集束されることもある。このため、除熱能力を向上させる必要があり、実績のある外部フィン付チューブに、熱伝達を上げるためスウォールテープを挿入したもの及び、内部フィンを有したチューブ等を考える。外部フィン付スウォールチューブを採用したビームダンプの構造図をFig.3.2-3に、また、外部フィン付スウォールチューブをFig. 3.2-4 に示す。ビームダンプ室の全体構造をFig. 3.2-5 に示す。

NBI等に使用されたビームダンプの使用実績をTable 3.2-2 に示す。この中で最も熱流束の大きい、スウォールチューブ及び内部フィン付チューブの採用を考える。

冷却系の概略フローをFig.3.2-6 に示す。冷却系は、ビームライン、イオン源、電源の3系統にわけることで考える。

3.2.3 中性子シャッタ

プラズマ運転中で、NBI非入射時は、中性子シャッタを閉とすることにより、線量率はNBI入射時間にほぼ比例し低減できる。このため、遮蔽厚1mの中性子シャッタをドリフト部のビームダンプ室よりに設けることを考える。概略構造図をFig.3.2-7 に示す。

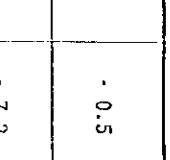
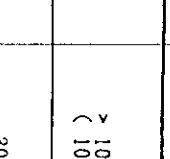
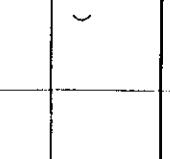
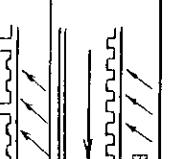
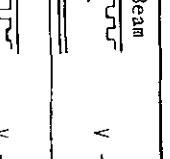
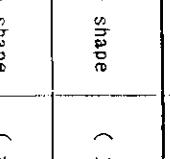
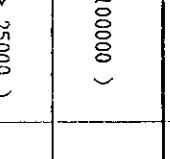
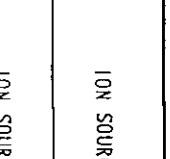
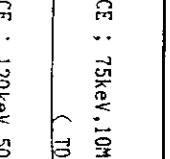
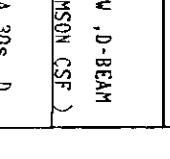
所で、シャッタなしの場合、正味プラズマ運転時間を同一とし、パルス運転、準定常運転、定常運転によるビームダンプ室線量率を比較すると、全運転期間にほぼ逆比例するものと考えられる。これは、短半減期核種は生成量が多いわりに消失が速いため、また長半減期核種は生成量が少ないために、ともに中間領域の半減期核種の影響に比べて無視できるためと考えられるためである。Fig.2.1-2 の運転シナリオで、焼燃時、プラズマ電流分布制御を、NBIの入射(10 s, duty 1/10)で行なう際のみに、シャッタを開くよう開閉速度が充分小さくできれば線量率は、 $\frac{1}{3}$ 程度にまで低減されると考えられる。

中性子シャッタは、イオン源保守時本体からの γ 線遮蔽の役割に主機能をおくか非入射時の放射化軽減をも含めるかの選択があり、保守方案と協調をとって構造と開閉速さを検討してゆく必要がある。

Table 3.2-1 Trade-off Study for CryoPump

No	項目	構成・構造を決定した内容
1	運転時間、デューティー	<p>1) Fig.2.1-2 運転シナリオの場合、38サイクル(5 h 連続)で再生となる。</p> <p>2) 上記以上の連続運転が必要な場合は、複数ユニットを設け交互に再生する必要がある。</p> <p>3) 再生時間短縮により夜間再生とすれば、実効的には連続運転可能</p>
2	He 排気	<p>1) トリチウム排気は、クライオコンデンセーションポンプと活性炭クライオソープションポンプの複合クライオポンプによる。</p> <p>2) 本体からの流入、ビルドアップがビームの再電離損に与える影響を考慮要する。</p>
3	トリチウム処理	<p>1) クライオポンプに吸着されたトリチウムを重水素といっしょに処理する必要がある。トリチウム処理装置は本体系と共にとする。</p> <p>2) クライオポンプそのものの構造には影響を与えない。</p>
4	放射損傷と核発熱	<p>1) 核発熱は小さいので構造上特に考慮する必要はない。</p> <p>2) 保冷材、熱絶縁材等の有機物の放射損傷を考慮する必要ある。</p>
5	渦電流損輻射熱	<p>1) ビームダンプ室近傍の本体磁場変化(10Gauss/s)は小さいため渦電流損は微少故、Al フィン型クライオポンプの採用は可能である。</p> <p>2) 本体からの電磁波、熱輻射による入熱は詳細に評価する必要がある。大きい場合は、Al フィンチューブ型クライオポンプは入熱が大きくなる。</p>

Table 3.2-2 Investigation on Beam Stops the Steady State Heat Removal in High Heat-Flux

	Max. heat flux (kw/cm ²)	Material	Size height width length	Requirement for the cooling water		Pulse length (sec)	Structure of the surface	Life time (cycle)	Remarks
				Press. inlet outlet (1/mm/tube)	Flow rate (l/min/tube)				
HYPER-VAPOTRON (JET)	1) 1.2 - 1.6 (1.0 - 2.0)	18Cr + Cu	112 940(540)	- 7.0	166 - 0.5	> 10 (10)			ION SOURCE ; 75keV, 10MW , D-BEAM (TOSHIBA CSF)
Beam dump for NBETF-NBI (LBL)	2) 1.6 (1.0)	0.2%Zr + Cu	215 200	8.5 -	220 - 7.2	(30)			ION SOURCE ; 120keV, 0-BEAM (TOSHIBA CSF)
DESIGN 3) Steady-State beam dump for TFR-NBI (PPU)	3) 1.0 - 2.0	Zr + OFHC or INCONEL	00 ; 19.1 1.6 Int. finned tubes	22.0 -	29 (average) (max 60)	- > 30			ION SOURCE ; 120keV, 0-BEAM (TOSHIBA CSF)
Beam target for MFTF-NBI (LLNL)	4) - 5.4 (3MW, 30s)	OFHC (tape; INCONEL)	00 ; 9.5 1.6 Swirl-tubes	4.0 -	16.0 20 - 11.0	(30)			ION SOURCE ; 75keV, 40A, 30s (UNITED TECH.)
Beam dump for MFSTF-NBI (LLNL)	5) 1.33 (8.0)	Mo	00 ; 5.0 0.25 Int. finned tubes	54.0	(total; 2700)	- (30)			ION SOURCE ; 75keV, 40A, 30s (UNITED TECH.)
JT-60 NBI (JAERI)	6) 0.5 (0.5)	0.2%Ag + OFHC	00 ; 14.0 Ext. finned tubes	9.0 11.5	22.6 (max 27) (total; 2400)	0.5 - 1.0 (10)			ION SOURCE ; 100keV, 70A, 10s H-BEAM
Water jacket	0.4 - 0.5 (0.45)	0.2%Ag + OFHC	16 X 16	5.0	16.1 (average) (total; 1000)	0.5 - 1.0 (10)			Flat
Calorimeter	7) 1.0 (1.0)	0.2%Ag + OFHC	30 36 30	9.0 5.0	9.3 (average) (total; 250)	0.5 - 2.0 (0.5)			LIMIT OF BELOW LIFE
Active diagnostics for for JT-60 (JAERI)	7)								ION SOURCE ; 200keV, 3.5A, 0.1s He-BEAM
Beam dump	- 7.5 (9.0)	W / OFHC	49 50 49	8.0 -	4.5 - 11.0 (series)	- (0.1)			Flat
Calorimeter	8) 3.7 (4.0)	0.2%Ag + OFHC	140 260 20	8.0 -	1.6 - 2.0 (series)	- (0.1)			V - shape
Rotating target	(20.0)								
Beam dump for FER NBI (JAERI)	8) 0.2%Ag + OFHC (tape; INCONEL) (5.0)	00 ; 10.0 1.5 Ext. finned swirl-tubes	(20.0)	(20.0 - 30.0)	(10.0 - 15.0)	(200.0)			ION SOURCE ; 500keV, 100A, 200.0s D - beam

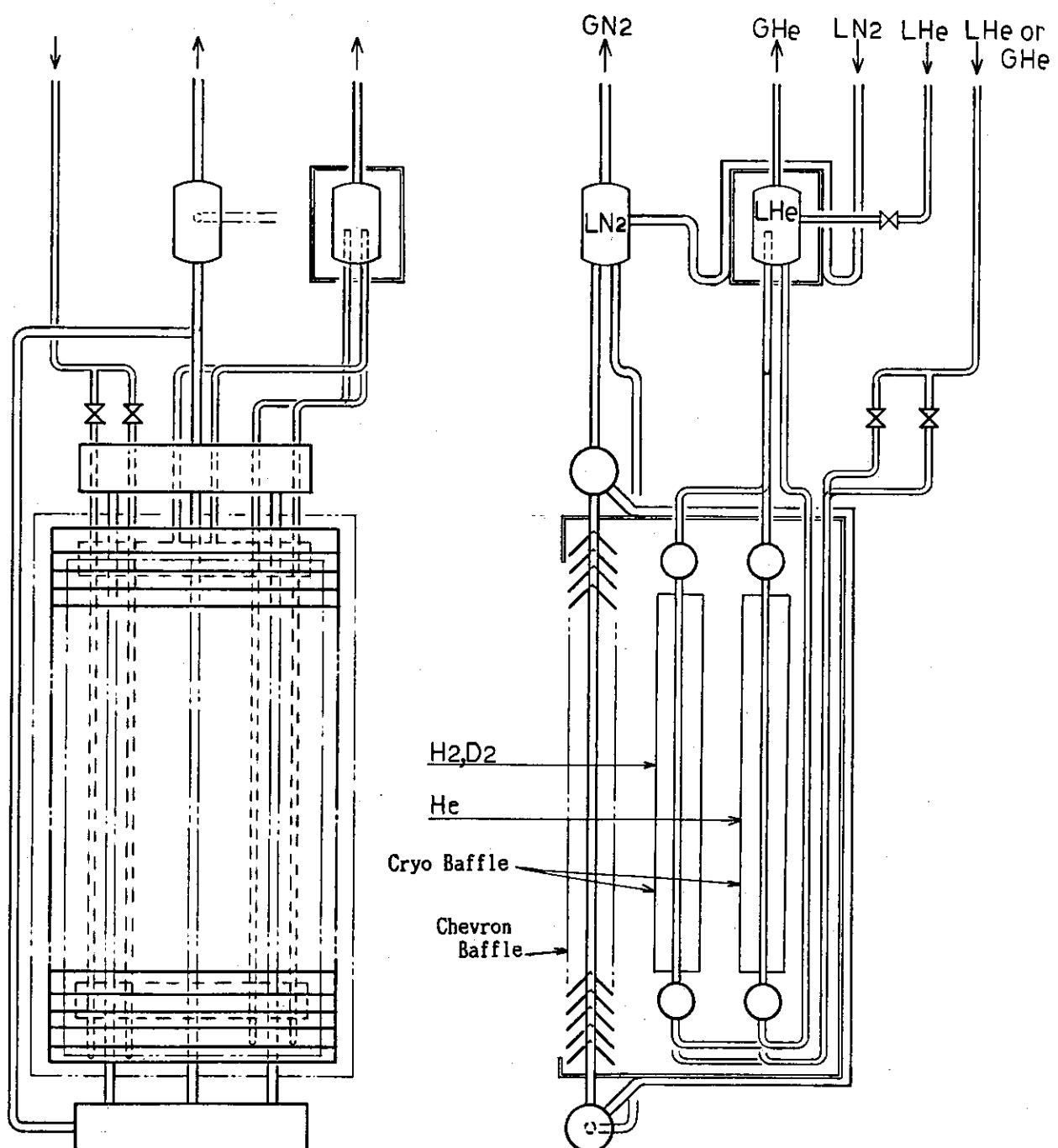


Fig. 3.2-1 Compound Cryopump

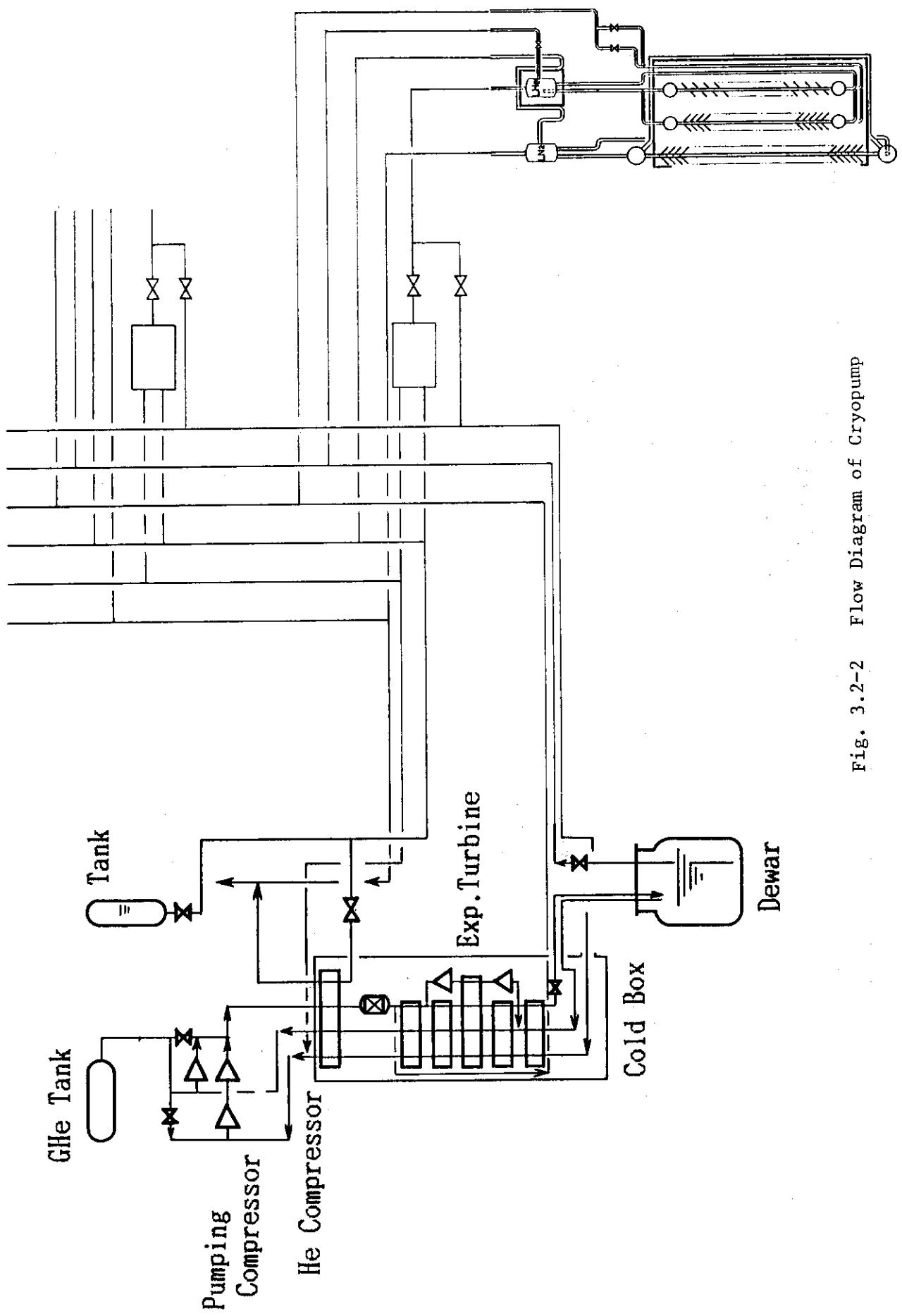


Fig. 3.2-2 Flow Diagram of Cryopump

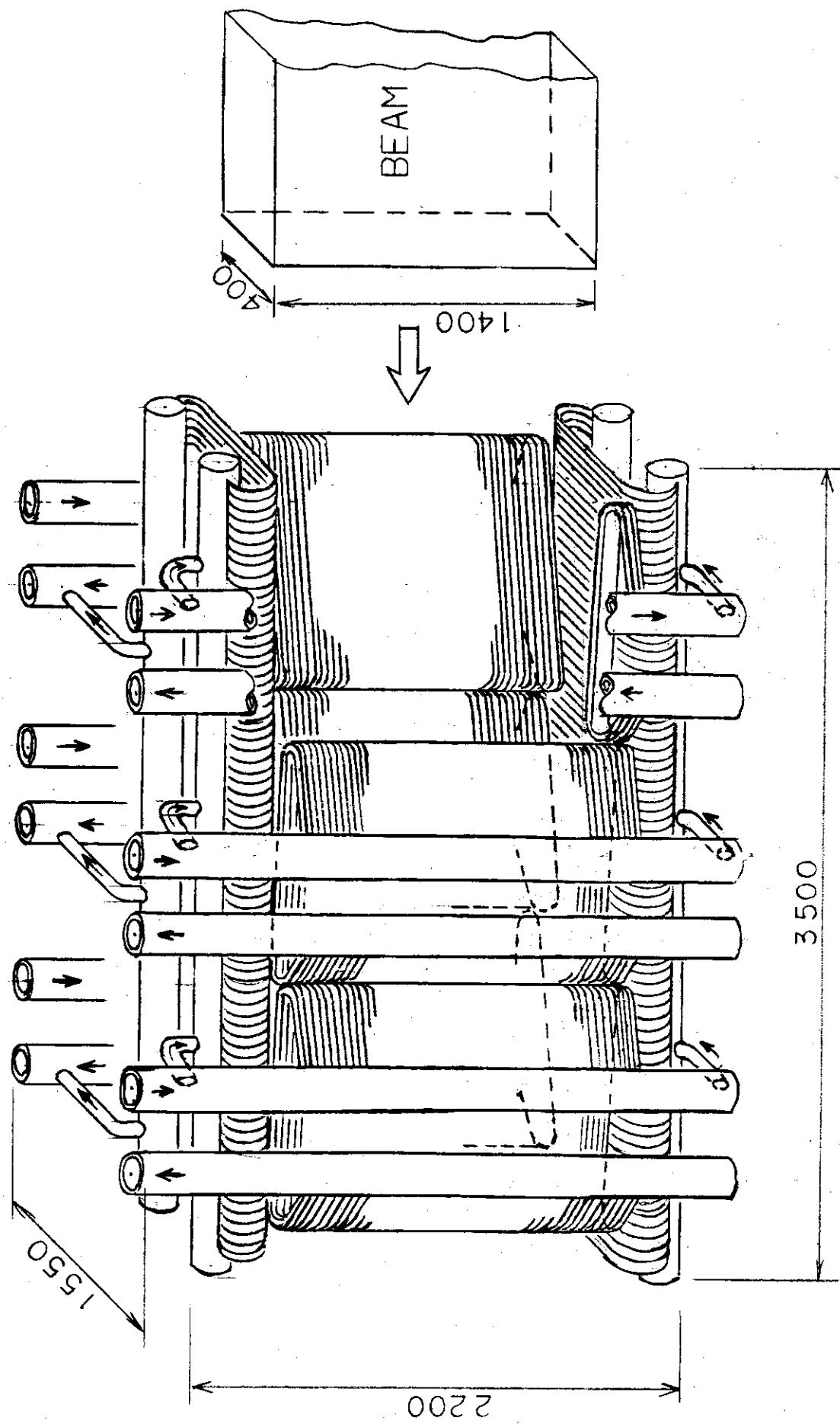


Fig. 3.2-3 Beam Dump

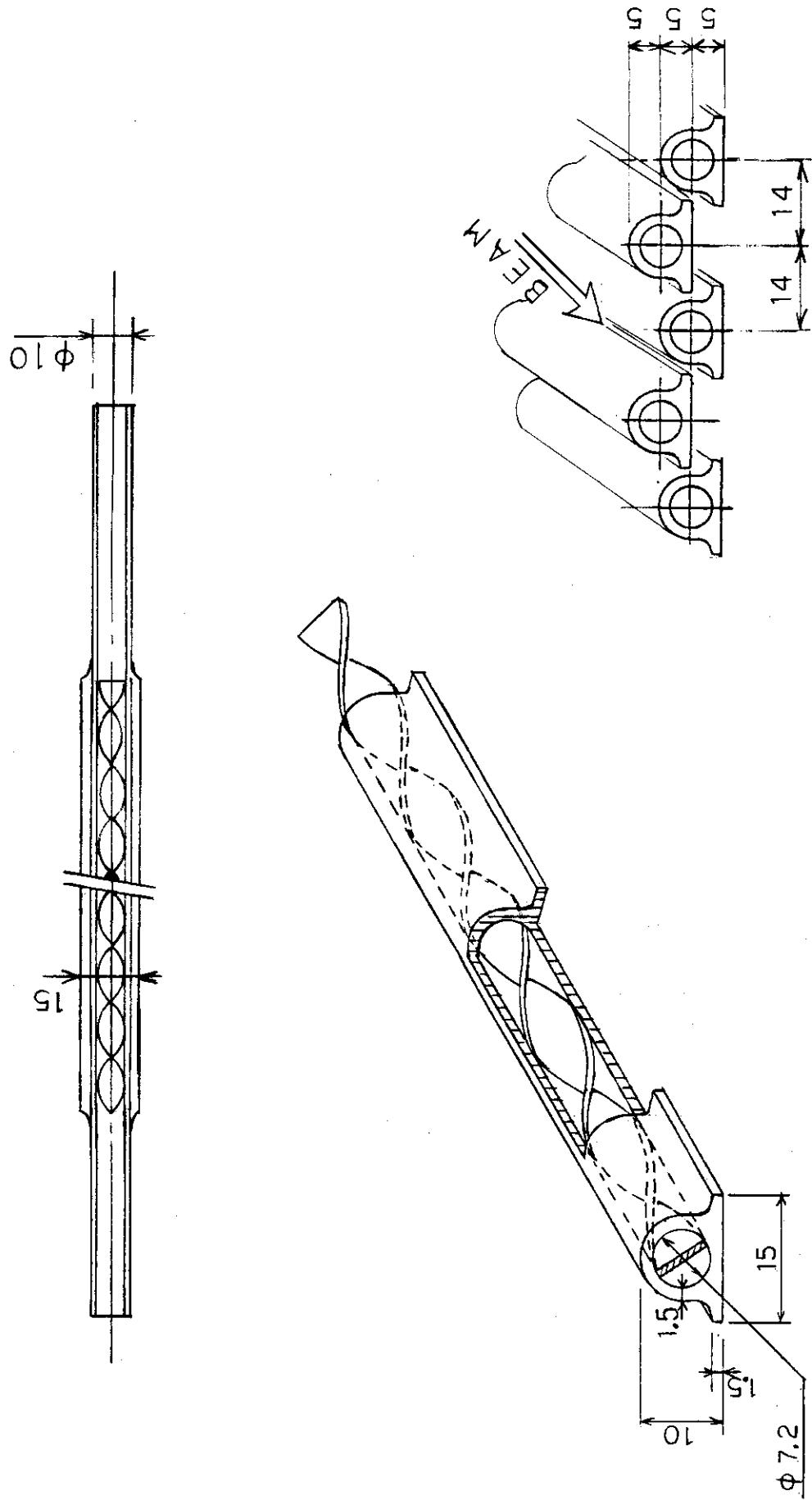


Fig. 3.2-4 Swivl Tube

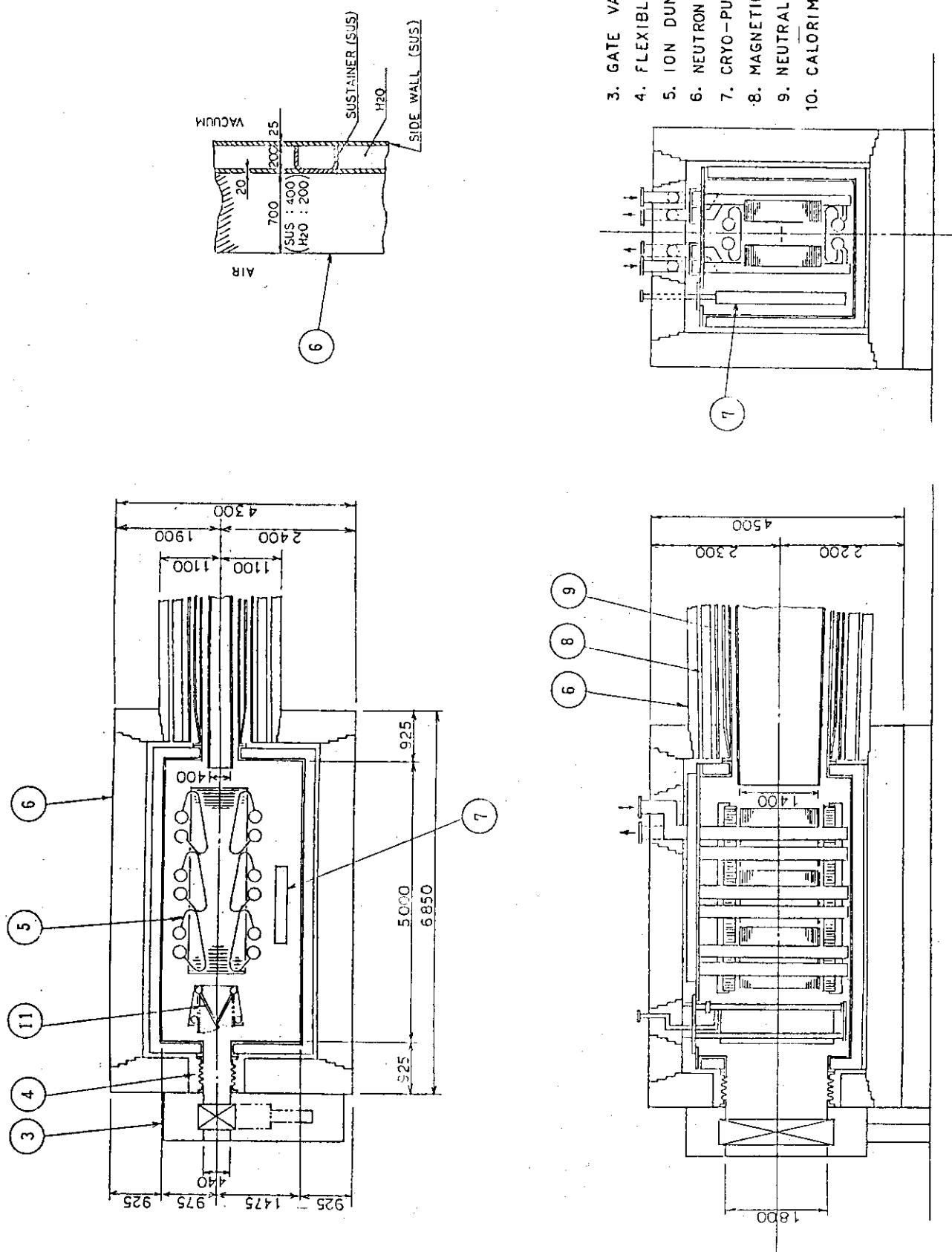


Fig. 3.2-5 Beam Dump Chamber

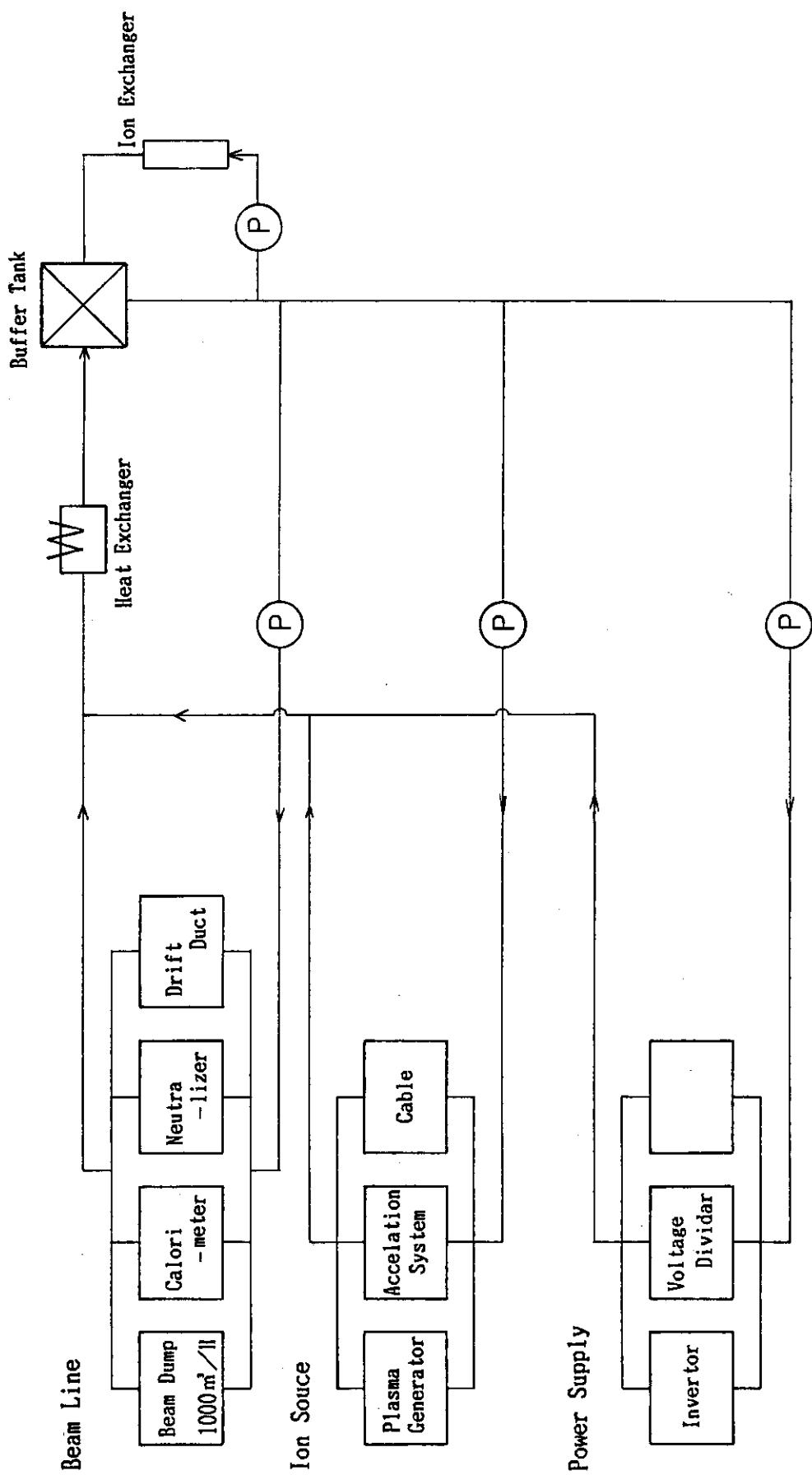


Fig. 3.2-6 Flow Diagram of Cooling System

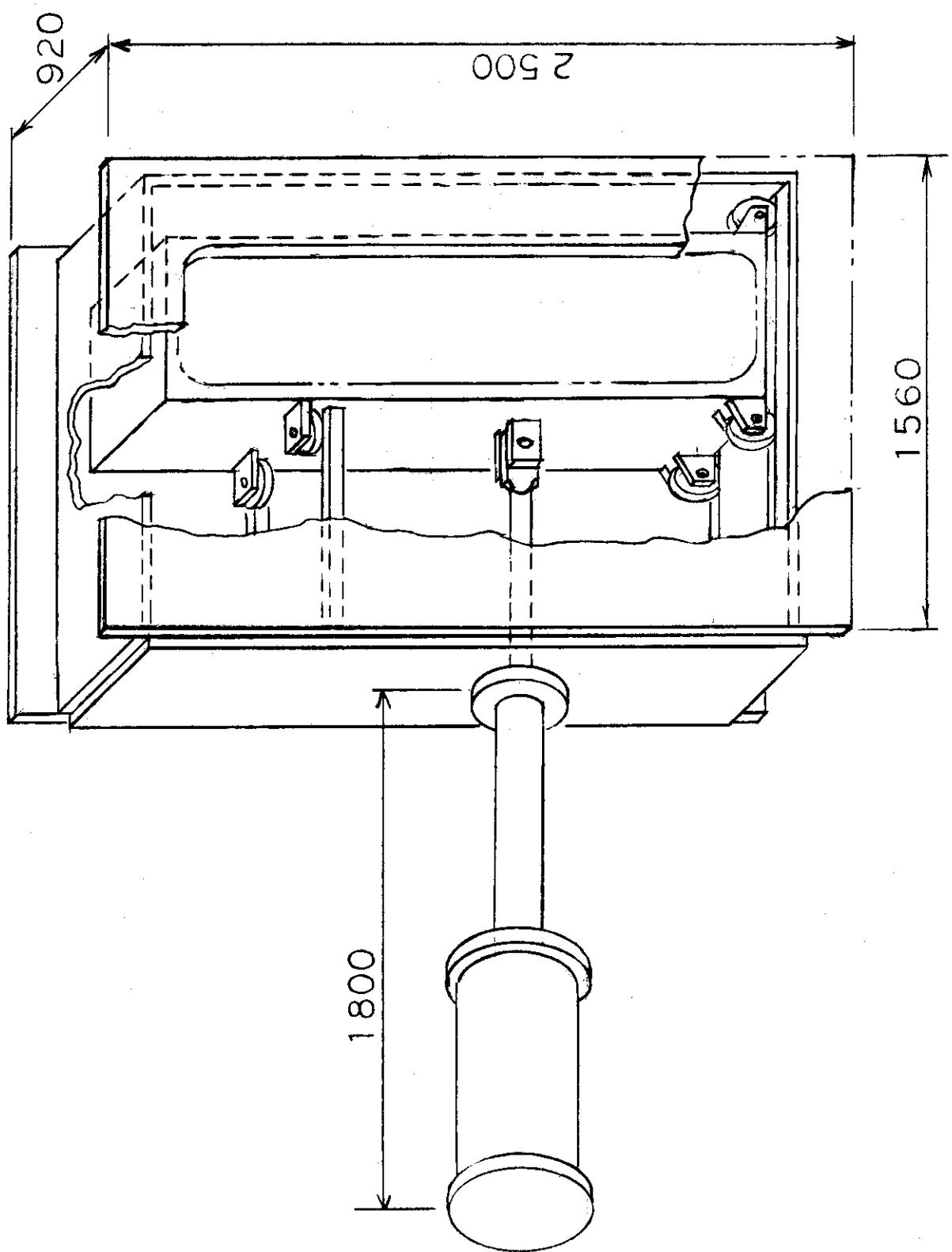


Fig. 3.2-7 Neutron Shutter

3.3 ニュートロニクスの検討

3.3.1 検討項目

F E R に N B I を適用する場合、従来の N B I での検討項目に加え、D-T 反応を行なうことによる起因する放射線対応やトリチウム処理に関する検討が必要となる。この D-T 核融合反応からは、核分裂中性子のエネルギー（約 2 MeV）に比べてはるかに高い 14 MeV のエネルギーを持った中性子が発生する。このため核融合炉では、核分裂炉では起らなかった ($n, 2n$), (n, p), (n, α) 等の放射化反応が発生し、炉の構成機器が高レベルに放射化される。また炉の運転中に生じた誘導放射能は、炉停止後も高レベル線量率雰囲気の原因となり、保守点検の遠隔操作化等、作業員の被曝低減対策が必要となる。そのためには核融合炉の誘導放射能を事前に評価しておくことが重要である。更に N B I に関するニュートロニクス上の問題点としては、① クライオパネルにおける核発熱量の評価とその低減、② イオン源部やビームダンプの放射線損傷による部品寿命の評価と長寿命化対策等がある。

ここでは、Fig.2.2-1 で示されるビームライン配置においてビームダンプ室、イオン源室の遮蔽設計の為の検討を行う。

3.3.2 計算モデル⁸⁾

(1) N B I の 2 次元モデル

N B I ビームラインの形状を 1 次元モデルで取扱う事は困難で、2 次元又は 3 次元のモデルで取扱う必要がある。ところが 3 次元コードでは多大な計算時間がかかる。よって 2 次元コードを工夫して用いる事が望ましい。本検討では、2 次元輸送コード DOT 3.5⁹⁾ を工夫して用いる事とした。N B I ビームラインを 2 次元でモデル化するに際しては次の 3 点を重視した。

- ① 中性子は N B I ポートを通過してイオン源やクライオパネルに達するため、ポート孔及びその周囲を正しく記述できること。
- ② 放射線損傷による各機器の寿命を評価するため、プラズマから各機器に直接到達する中性子線を正しく記述できること。（放射線損傷に主要な寄与をもつものは中性子の直接線束及びその数回の散乱線束である。）
- ③ N B I ビームライン各部ごとの全核発熱量を求めるため、各部分の体積を正しく扱えること。

以上の観点から Fig.2.2-1 に示されているビームラインを次のような手順でモデル化した。

1) 座標系

条件①を満足させるため、R Z 円柱座標系を用いポート中心線上に Z 軸を取り、ポート中心線と直角方向に R 軸を探る。

2) 領域分割

Z 方向の領域寸法は、実寸を採用した。R 方向の領域寸法については等価半径を採用した。これは、実際と計算モデルで中性子の通過面積が異なると、ストリーミング効果により中性子束が異なるためである。構成機器については、条件③より各部の体積が実際と等しくなる様に、R 方

向の厚さを決定した。

3) 領域の組成

本2次元R-Zモデルでは、各領域の体積が等しくなる様に半径方向の寸法を決めている。よって各領域の組成や体積占有率は、実体系から求めたものをそのまま用いる事が可能である。

以上の方針に従って実体系をモデル化した。Fig.3.3-1にイオン源部、Fig.3.3-2にイオンダンプ室周辺部のモデルを示す。イオン源部の領域とその組成をTable 3.3-1に示す。同様にイオンダンプ室周辺部の領域とその組成をTable 3.3-2に示す。

(2) ニュートロニクス計算システム

本計算システムは、放射線輸送計算と誘導放射能計算により構成されている。放射線輸送計算により炉運転中の中性子束分布を求める。この中性子束分布を誘導放射能計算コードの入力データとして、一定期間運転・休止を繰返した後の誘導放射能、崩壊熱を求める。更にこれをガンマ線源に変換し、再度放射線輸送計算コードに入力して炉停止後のガンマ線束分布を計算し、最後にこのガンマ線束分布に照射線量の換算係数を掛けて、ガンマ線線量率を求めるものである。

(3) イオン源部モデル計算

イオン源部モデルに関し述べる。イオン源電極は厚さ3cm、ボイド率50%の銅、真空容器は厚さ3cmのSUS、絶縁用FRPは厚さ5cm、イオン源室壁は厚さ30cmのSUS、中性化セルは銅・SUS・パーマロイ・ボイドの混合体とし、Z方向は実寸・R方向は実体系と等断面積の円柱近似とした。空間分割は44×84メッシュとした。中性子束・ガンマ線束の計算に使用した計算コードは、DOT3.5である。中性子束分布計算には中性子18群、ガンマ線7群の群定数ファイルを、ガンマ線束分布計算には、ガンマ線のみ54群の群定数ファイルを使用した。Table 3.3-3に18群中性子エネルギー群構造を、Table 3.3-4に54群ガンマ線エネルギー群構造を示す。散乱角の離散化に必要な角度分点セットは、中性子の場合入射線束の一方向性が強いことから、前方散乱を強調した120分点セットを、ガンマ線の場合は粒子の発生を等方と考えてよいので、等方48分点セットを用いた。中性子束分布計算では、計算体系内に散乱体が少ないと想定される方向にのみ粒子輸送が強調されるRay effectの発生が十分予測されるが、平均的な振舞は把握可能と考えた。

3.3.3 計算条件

NBIの放射化計算を行なうに当り、基本的計算条件として下記を想定した。

- ① 計算対象領域は、イオン源及びその近傍とイオンダンプ室近傍とした。
- ② 中性子はドリフトダクト内にコリメートされて、イオンダンプ室以降のビームラインに入射する。線源条件は、プラズマからの直視線を解析計算により評価する。
- ③ 現時点では、設計の目安となる概略の数値を得る事が重要と考え、モデルは概略モデルとした。
- ④ 炉停止後の線量率評価は、本年度の構造設計に基づいた。
- ⑤ 炉停止後のガンマ線源としては、計算対象領域内構造物の放射化に基づくものとした。
- ⑥ 昨年度設計計算結果に基づき、中性子シャッタは設けるものとし、その開閉スピードは1ストローク20秒とした。

3.3.4 入射中性子束

体系への入射中性子条件を算定する。

(1) 中性子発生量

核融合出力 P_f 時の発生中性子 N は次式で算定する。

$$N = \frac{0.8 P_f (\text{MW}) \times 10^6}{14.1 \times 10^6 \text{eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{J/eV}} = 4.43 \times 10^{17} \times 0.8 \times P_f$$

ここで対象とする炉の核融合出力は $P_f = 459 \text{ MW}$ となっているので中性子発生は

$$N = 1.63 \times 10^{20} \quad (\text{n/s}) \quad \text{と算出される。}$$

(2) 中性子密度

プラズマ主半径 R , 小半径 a , 非円形度 κ のプラズマ体積は

$$\begin{aligned} V_p &= 2\pi R \pi a^2 \kappa = 2\pi \times 4.92 \times \pi \times 1.32^2 \times 1.7 \\ &= 287.4 \text{ (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

と算定され、プラズマが一様であると仮定すれば単位体積当たり平均中性子発生量は次のように算定される。

$$S = N / V_p = 5.67 \times 10^{11} \quad (\text{n/cm}^3 \cdot \text{s})$$

(3) 中性子直接線束

体系への入射位置に達するまでに充分コリメートされると仮定して 14 MeV 中性子束の直接線束を求める。

1) イオンダンプ室

Fig.3.3.-3 に示す P 点における中性子束を次のように算定する。 P から x 離れた位置から、 P を直接見込むプラズマ面積 A は次式で考える。

$$A = \frac{0.5 \times 2.8}{6.5^2} x^2$$

中性子は等方的に放射されるとし、 P 点開口を見込む立体角に散射されたものが到達しているとした時の中性子束 ϕ_p は次式で表わされる。

$$\phi_p = \int_{6.62}^{13.74} \frac{S}{4\pi x^2} A dx = 1.9 \times 10^{-2} S$$

よって

$$\phi_p = (1.9 \times 10^{-2}) \times (5.67 \times 10^{11}) = 1.1 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

発散角

$$\tan^{-1} (2.8 \times 0.5 / \pi)^{1/2} / 6.5 = 6^\circ$$

以上より、中性子束分布計算の線源として $1.1 \times 10^{10} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の 14MeV 中性子が最大 6° の発散角で放出されているものを扱う。

2) イオン源室

Fig.3.3-3 に示す空間条件より、前項と同様に中性子束 $\phi_{p'}$ を算出する。

$$\phi_{p'} = \int_{38.12}^{47.82} \frac{S}{4\pi x^2} A' dx = 7.48 \times 10^{-3} S$$

よって

$$\phi_{p'} = (7.48 \times 10^{-3}) \times (5.67 \times 10^{11}) = 4.28 \times 10^8 (\text{n/cm}^2 \cdot \text{s})$$

$$Q'_{\max} = \tan^{-1} (2.8 \times 0.5 / \pi)^{1/2} / 38 = 1^\circ$$

14MeV の中性子束 $4.28 \times 10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ が発散角 1° で放出されているものとする。

3.3.5 計 算 結 果

(1) イオン源部

Fig.3.3-4, 5 に炉運転中の 14MeV 中性子束分布の計算結果を、Fig.3.3-6, 7 に照射損傷に主として寄与する 1 MeV 以上の中性子束分布の計算結果を示す。Fig.3.3-4, 5 でビーム軸近傍とイオン源室壁面で正規と考えられる分布が見られるが、その他の空間では Ray effect が顕著にあらわれている。しかし、これらの図からわかる様に、Ray effect の影響を受けている領域はイオン源室内の空間に限られており、平均的な振舞い、ビーム軸上、イオン源室壁の分布は正しいと考えてよい。イオン源及び F R P 部における 14MeV 中性子束は、 $\sim 10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、 $\sim 10^5 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ である。またイオン源室前部壁、後部壁からの漏洩が大きいことがわかる。

Fig.3.3-8, 9 に 1 日 5 時間運転で 2 年間運転後 1 日経過時の空間線量率分布を示す。放射化を評価する為の運転パターン（中性子シャッタの開閉パターン）例を考える。Fig.3.3-10 に示す第 1 の運転パターンをモデル A と呼ぶとする。炉運転中であっても中性子シャッタが閉止可能な時の運転パターンを Fig.3.3-11 に示す。この運転パターンをモデル B と呼ぶ。モデル B での空間線量率分布を Fig.3.3-12, 13 に示す。この計算では炉心からのガンマ線は中性子シャッタの効果により無視できるものとし、イオン源室内機器の放射化により発生するガンマ線のみを示している。直接中性子線にさらされる電極及びプラズマ室の放射化が最も大きく 1 rem/h 程度である。又イオン源室後壁では中性子束同様の漏洩がみられ、設計基準の 2.5 mrem/h を守るために遮蔽体の追加が必要である。SUS の厚さを増す場合は 50~60cm 程度の厚さが必要である。イオン源室前壁部でも中性子線束の増大がみられるので 40cm 程度とするのが無難である。Fig.3.3-14~18 に各領域を構成する材料に含まれる放射性核種の炉停止後の減衰を示す。電極部では ^{65}Cu ($n, 2n$) ^{64}Cu の反応により生成される ^{64}Cu により減衰時間が決定されることが Fig.3.3-16 よりわかる。又この図より電極及びプラズマ室（Cuとした場合）単体ならば、炉停止後 2 週間

程度で、設計基準の線量率に達すると考えられる。イオン源真空容器及びイオン源室壁に用いているSUSは、⁵⁵Fe, ⁵⁷Co等減衰時間の長い放射性核種が多く含まれるため炉停止後短時間で保守作業にとりかかるには空間線量低減の為にアルミ等の材料変更の検討が必要と考えられる。

イオン源絶縁物領域の中性子束は $10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度が算出されている。主要材料をエポキシ樹脂とすると、 γ 線照射による機械的使用限界は1 MGy程度と予想され、0.1 MeV以上の中性子照射に換算すれば $5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 程度となる。電気的特性から見た使用限界は若干低いと云われこれら不確定さを2~3桁見込んで総合評価するなら 10^7 s 程度の寿命も期待できる。

FER全燃焼時間は約 10^7 秒(5~6年間)とされているので悲観的に評価しても、1年毎の交換程度に収まる可能性があり、イオン源保守の面でも実用の範囲にあると考えられる。

(2) イオンダンプ室

Fig.3.3-19,20に炉運転中の14 MeV中性子束分布の計算結果を、Fig.3.3-21,22に1 MeV以上の中性子束分布の計算結果を示す。この領域においてもビームダンプとビームダンプ室の間の空間で多少のRay effectが見られるがほぼ正常な分布と考えられる。Fig.3.3-23~26に前述の運転パターンのモデルAとBの空間線量率分布を示す。本年度設計では、放射線シールド外面では、中性子束、空間線量率共に十分遮蔽されている。但しビームライン内部では、イオンダンプ表面での中性子束が $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ に達するため、今後高熱流束下での寿命の検討が必要である。又空間線量率は数 rem/hとなるため解体時の遠隔操作又は作業時間の管理が必要である。Fig.3.3-27~34に各領域を構成する材料に含まれる放射性核種の炉停止後の減衰を示す。

3.3.6 D - D反応による中性子束の評価

ビームラインのパワーフローを Fig.3.3-35に示す。ビームライン中で発生する中性子は、D-D主反応による 2.45 MeVの中性子と、D-T副反応による 14.1 MeVの中性子からなる。副反応に関与するトリチウムは主反応の生成物である。

まず主反応による中性子の発生は、次の 2種類の過程に起因する。

- ① 金属表面に打ち込まれたD粒子とビーム中のD粒子の核反応
- ② D₂ガスとビーム中のD粒子の衝突による核反応

次に上記①②の過程で発生する中性子数を評価する。

(1) 過程①による中性子発生量

ターゲット面が銅の場合については、J.Kim等¹⁰⁾がビームエネルギー 300 keV以下の多成分ビームで評価している。その結果を Fig.3.3-36に引用して示す。Berkner 等¹¹⁾が120 keV以下のビームで検証している。この結果から 500 kV, D⁺100 %の場合を外挿すると、平衡中性子発生量は、 $1.0 \times 10^{12} \text{ n/s} \cdot \text{A}$ となる。

(2) 過程②による中性子発生量

この場合についても上記 J.Kim等によって評価されており、その結果を Fig.3.3-37に示す。この結果を用いて 500 kV, D⁺100 %の場合を外挿すると中性子発生量は、 $1 \times 10^{10} \text{ n/s/A}/10^{16} (\text{mol/cm}^2)$ となる。

上記値を用いて、ビームライン機器での中性子発生量と中性子束を見積る。その結果を Table 3.3.5 に示す。これら中性子束による誘導放射能の線量率については今後検討を行なう必要がある。しかしながら一般的には、放射化反応はしきい値反応であり、ビームラインで用いられている材料はD-D主反応による中性子のエネルギー 2.45 MeVで放射化されるものは少ないため、線量率は本体から飛来する 14.1 MeV中性子に起因するものに比べて十分小さいと考えられる。

次に副反応により発生する 14.1 MeV中性子束とこれに起因する線量率を考える。

J Kim等による金属ターゲット表面でのD-D反応によるトリチウムの発生量データから、本ビームラインでのトリチウム発生量を外挿すると $5 \mu\text{Ci/s}$ となり、極めて微量である。従って今回の検討ではこれについては除外した。

3.3.7 まとめ

- ① イオン源部では、遮蔽厚さをステンレス換算厚さとしてイオン源室後部壁で 50cm、前部壁で 40cm、側面壁で 30cm の厚さが必要である。又メンテナンス上真空容器と遮蔽壁の材質の検討が必要である。
- ② イオンダンプ室部の遮蔽はステンレス換算厚さ 40cm と水厚さ 40cm とで得ているが更に遮蔽構造の合理化検討が望まれる。
- ③ 放射化についてはギャップストリーミング等詳細部の検討が又構造物については核発熱の評価・放射線損傷についても検討を進める必要がある。

Table 3.3-1 Material Composition of Ion Source Room

Region	Region name	Composition (Volume fraction)
1	真 空 容 器	SUS(1.0)
2	硝 子	F R P(1.0)
3	電 極	Cu(0.50)+V(0.5)
4	中 性 化 セ ル	Cu(0.052)+H ₂ O(0.216) +SUS(0.109)+Pam(0.05)
5	イ オ ン 源 室 壁	SUS(1.0)
6	真 空	V(1.0)

Table 3.3-2 Material Composition of Ion Dump Room

Region	Region name	Composition (Volume fraction)
1	真 空	V(1.0)
2	ビームリミッタ	Cu(0.8)+H ₂ O(0.2)
3	放 射 シ ー ル ド	SUS(1.0)
4	放 射 シ ー ル ド	H ₂ O(1.0)
5	ビームダンプ室	H ₂ O(0.8)+SUS(0.2)
6	ビームダンプ	Cu(0.5)+H ₂ O(0.5)
7	中 性 化 セ ル	SUS(0.33)+H ₂ O(0.67)
8	磁 気 シ ー ル ド	Pam(1.0)
9	磁 気 シ ー ル ド	Fe(1.0)

Table 3.3-3 18-group Neutron Energy Set

Group	Energy Limits	Mid-Point Energy
1	15.0 - 13.7 MeV	14.35 MeV
2	13.7 - 11.5	12.6
3	11.5 - 9.31	10.405
4	9.31 - 7.33	8.32
5	7.33 - 5.76	6.545
6	5.76 - 4.52	5.14
7	4.52 - 3.16	3.84
8	3.16 - 1.87	2.515
9	1.87 - 1.06	1.465
10	1060 - 566 keV	813 keV
11	566 - 283	424.5
12	283 - 100	191.5
13	100 - 10	55
14	10 - 1	5.5
15	1000 - 100 eV	550 eV
16	100 - 10	55
17	10 - 1	5.5
18	1000 - 1 meV	500.5 meV

Table 3.3-4 54-group γ -ray Energy Set

	E(MeV)		E(MeV)		E(MeV)
1	3.0 ~ 2.7	19	0.73 ~ 0.66	37	0.16 ~ 0.15
2	2.7 ~ 2.5	20	0.66 ~ 0.6	38	0.15 ~ 0.14
3	2.5 ~ 2.3	21	0.6 ~ 0.55	39	0.14 ~ 0.13
4	2.3 ~ 2.1	22	0.55 ~ 0.5	40	0.13 ~ 0.12
5	2.1 ~ 2.0	23	0.5 ~ 0.45	41	0.12 ~ 0.11
6	2.0 ~ 1.9	24	0.45 ~ 0.4	42	0.11 ~ 0.10
7	1.9 ~ 1.8	25	0.4 ~ 0.36	43	0.10 ~ 0.09
8	1.8 ~ 1.7	26	0.36 ~ 0.33	44	0.09 ~ 0.081
9	1.7 ~ 1.6	27	0.33 ~ 0.3	45	0.081 ~ 0.073
10	1.6 ~ 1.5	28	0.3 ~ 0.27	46	0.073 ~ 0.066
11	1.5 ~ 1.4	29	0.27 ~ 0.25	47	0.066 ~ 0.06
12	1.4 ~ 1.3	30	0.25 ~ 0.23	48	0.06 ~ 0.055
13	1.3 ~ 1.2	31	0.23 ~ 0.21	49	0.055 ~ 0.05
14	1.2 ~ 1.1	32	0.21 ~ 0.20	50	0.05 ~ 0.045
15	1.1 ~ 1.0	33	0.20 ~ 0.19	51	0.045 ~ 0.04
16	1.0 ~ 0.9	34	0.19 ~ 0.18	52	0.04 ~ 0.036
17	0.9 ~ 0.81	35	0.18 ~ 0.17	53	0.036 ~ 0.033
18	0.81 ~ 0.73	36	0.17 ~ 0.16	54	0.033 ~ 0.03

Table 3.3-5 Neutron Yield by Beam Reaction

No.	区分	中性子発生量(n/s)	中性子束(n/cm ² ·s)
1	イオン源加速部	4×10^{12}	1.6×10^8
2	中性化セル部	1.1×10^{13}	8.7×10^6
3	ビームダンプ部	4×10^{13}	3.1×10^8
4	ドリフト部	5×10^{12}	6.3×10^6

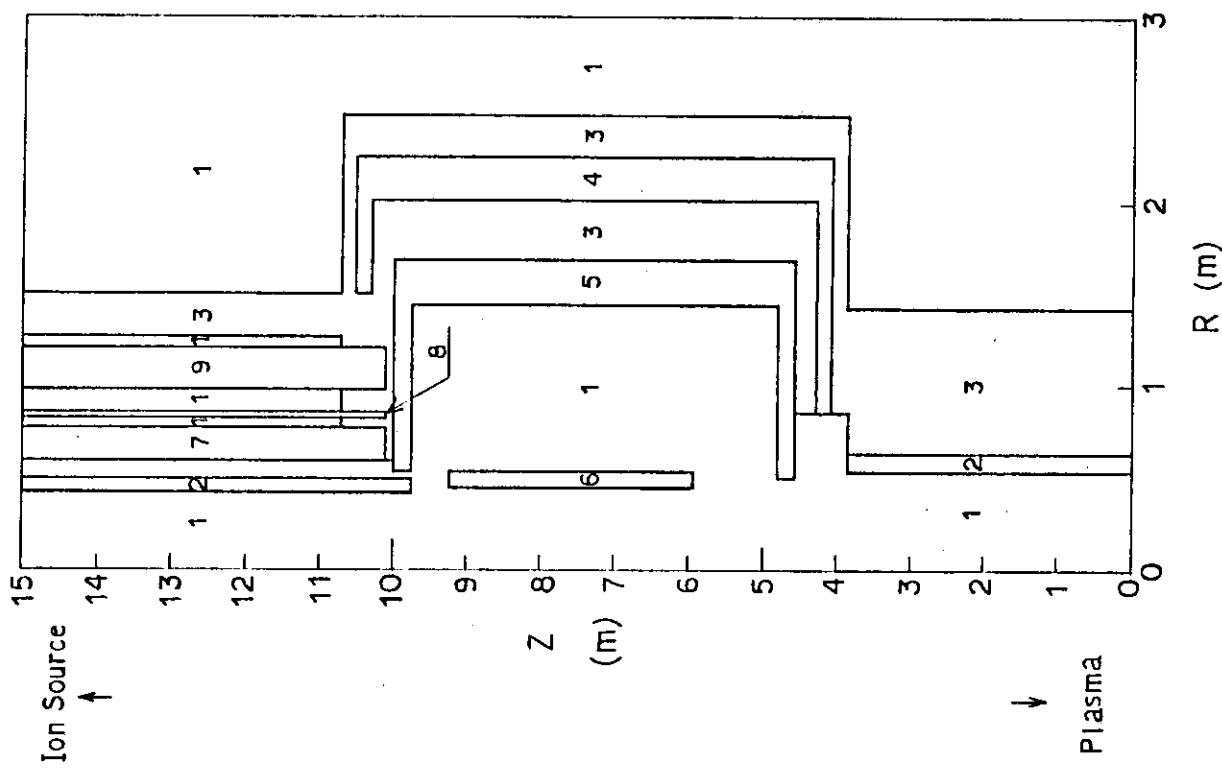


Fig. 3.3-1 Geometrical Model of DOT3.5 for Ion Source Room

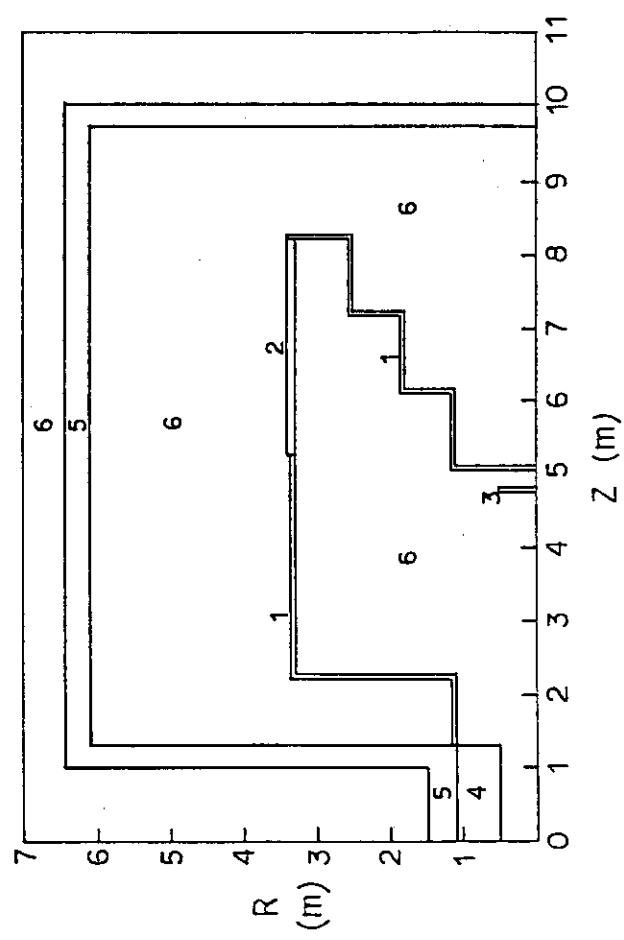


Fig. 3.3-2 Geometrical Model of DOT3.5 for Ion Dump Room

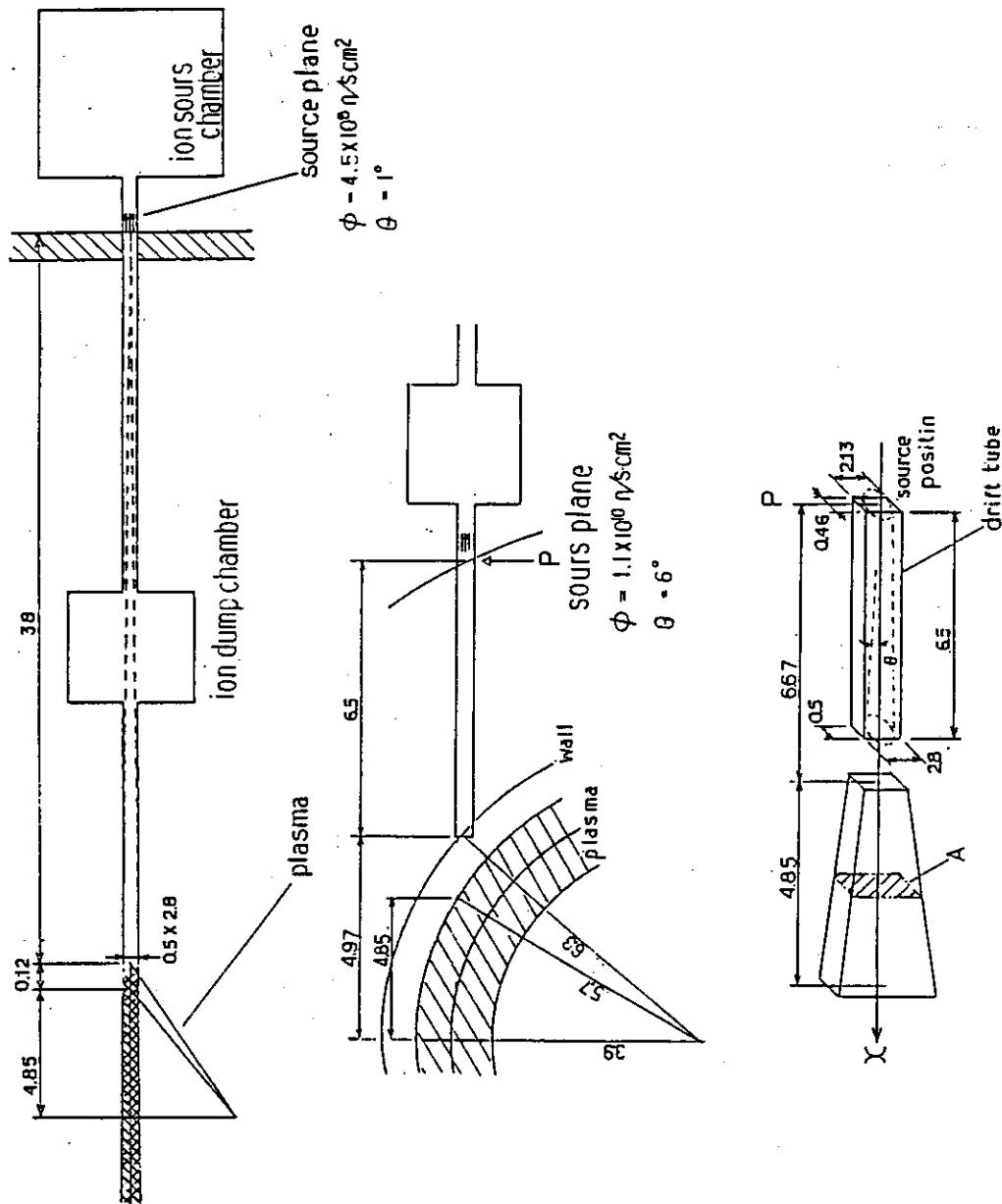


Fig. 3.3-3 Flux Estimation Model

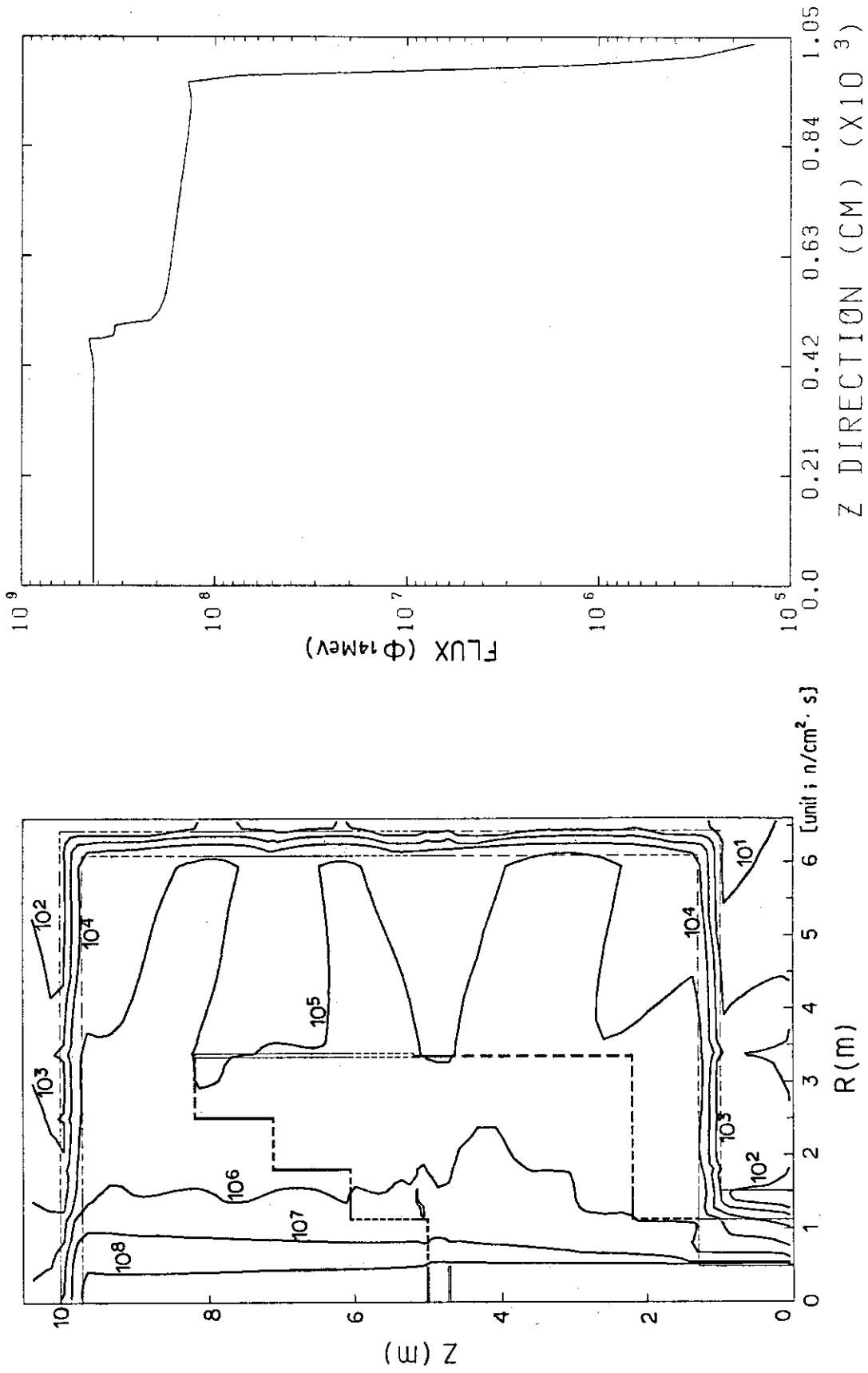


Fig. 3.3-4 14 Mev Neutron Flux Contour in Ion Source Room during Operation (Two Dimension)

Fig. 3.3-5 14 Mev Neutron Contour in Ion Source Room during Operation (on Center Line)

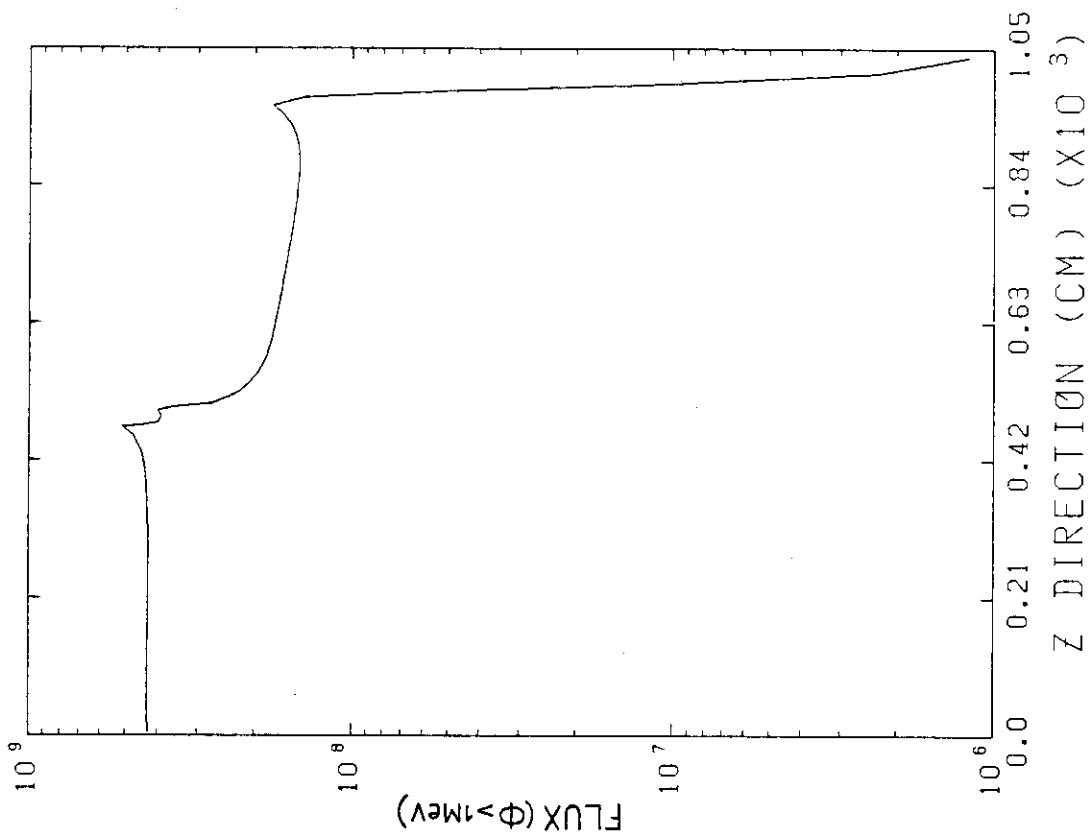


Fig. 3.3-7 Over 1 Mev Neutron Flux Contour in Ion
Source Room during Operation
(on Center Line)

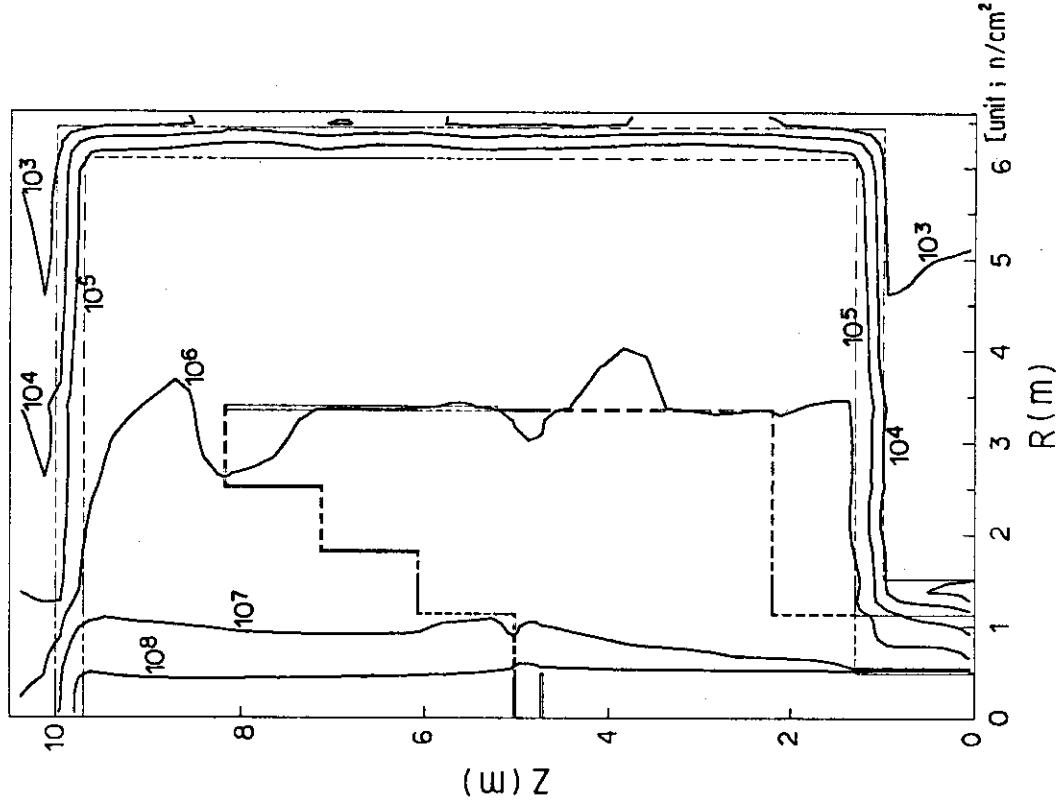


Fig. 3.3-6 Over 1 Mev Neutron Flux Contour in Ion
Source Room during Operation
(Two Dimensional)

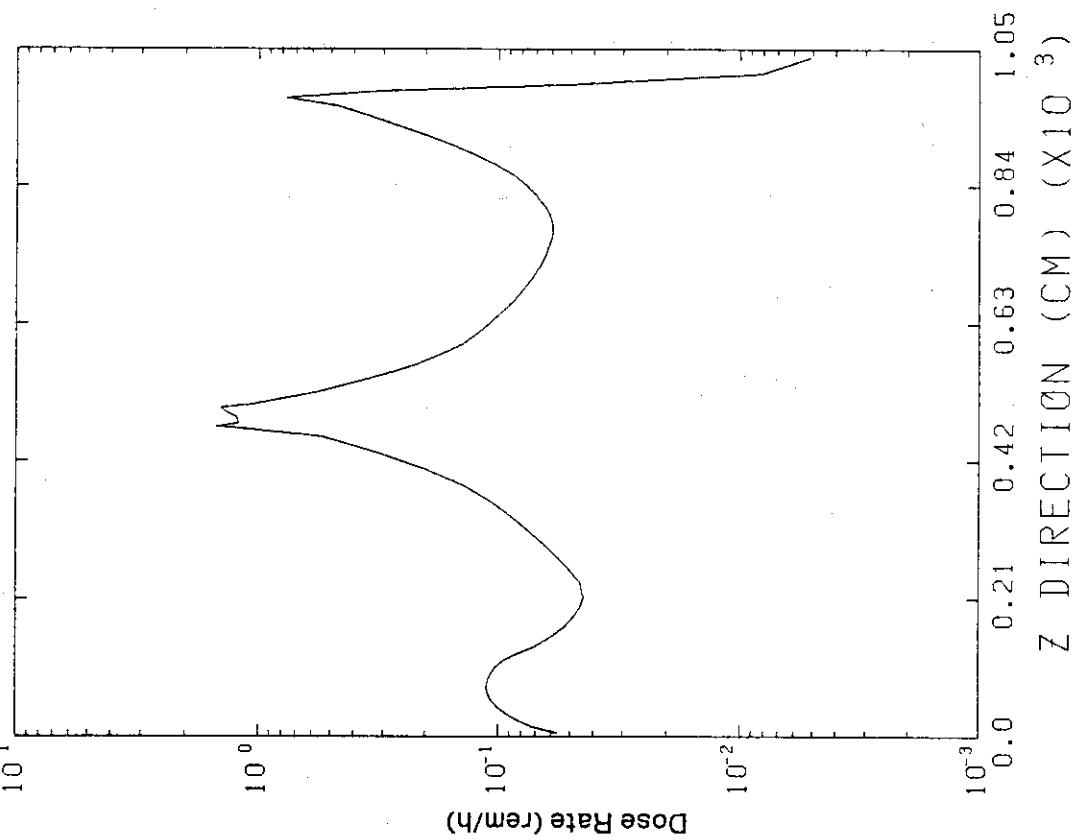


Fig. 3.3-9 Dose Distribution on Center Line Ion Source Room Model 1 Day after Shut-down Following 2-yr Full Power Operation (Neutron Shutter Operation Model A)

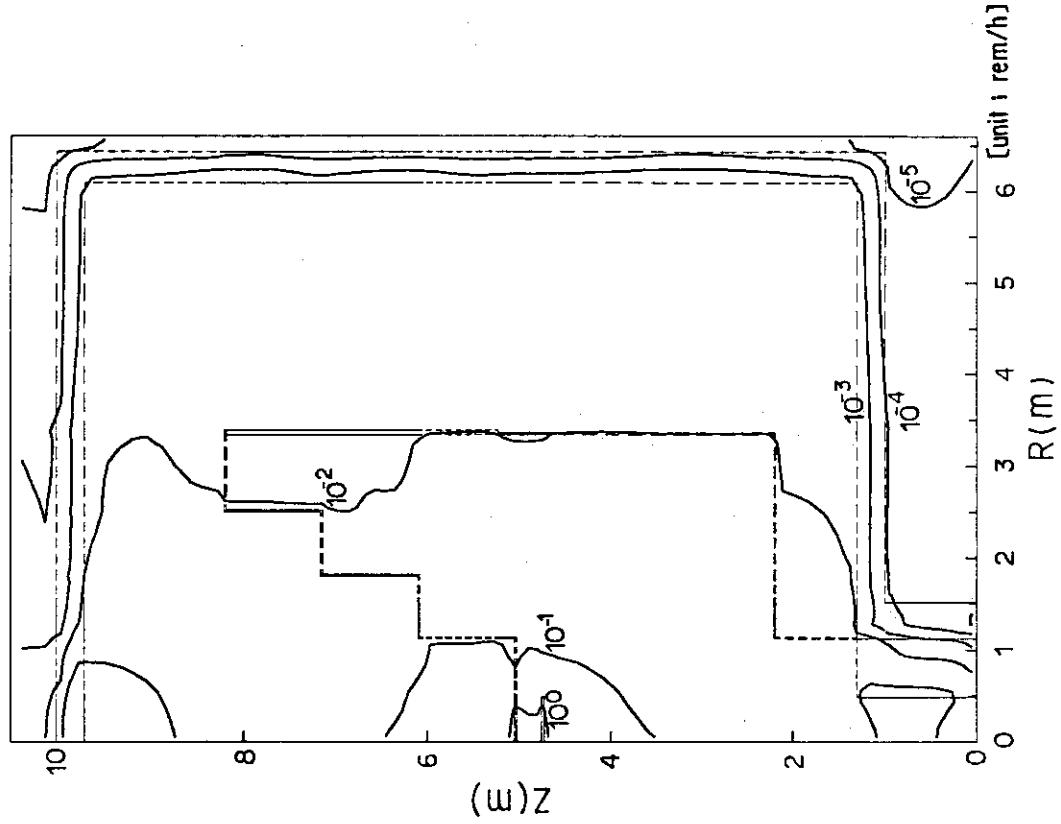


Fig. 3.3-8 Dose Distribution two-dimensional Ion Source Room Model 1 Day after Shut-down Following 2-yr Full Power Operation (Neutron Shutter Operation Model A)

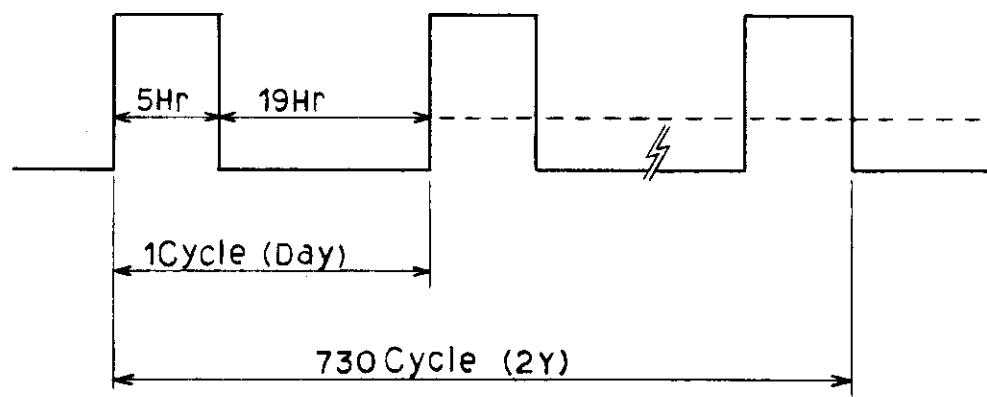


Fig. 3.3-10 Operation Model A

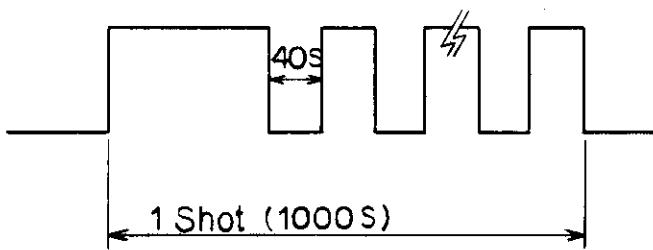
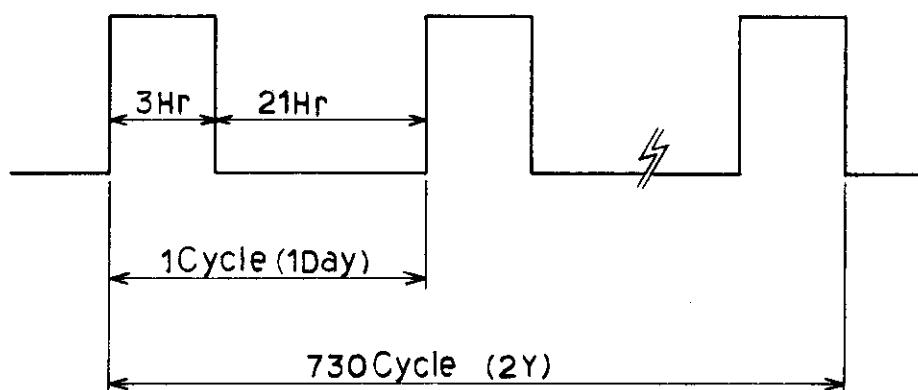


Fig. 3.3-11 Operation Model B

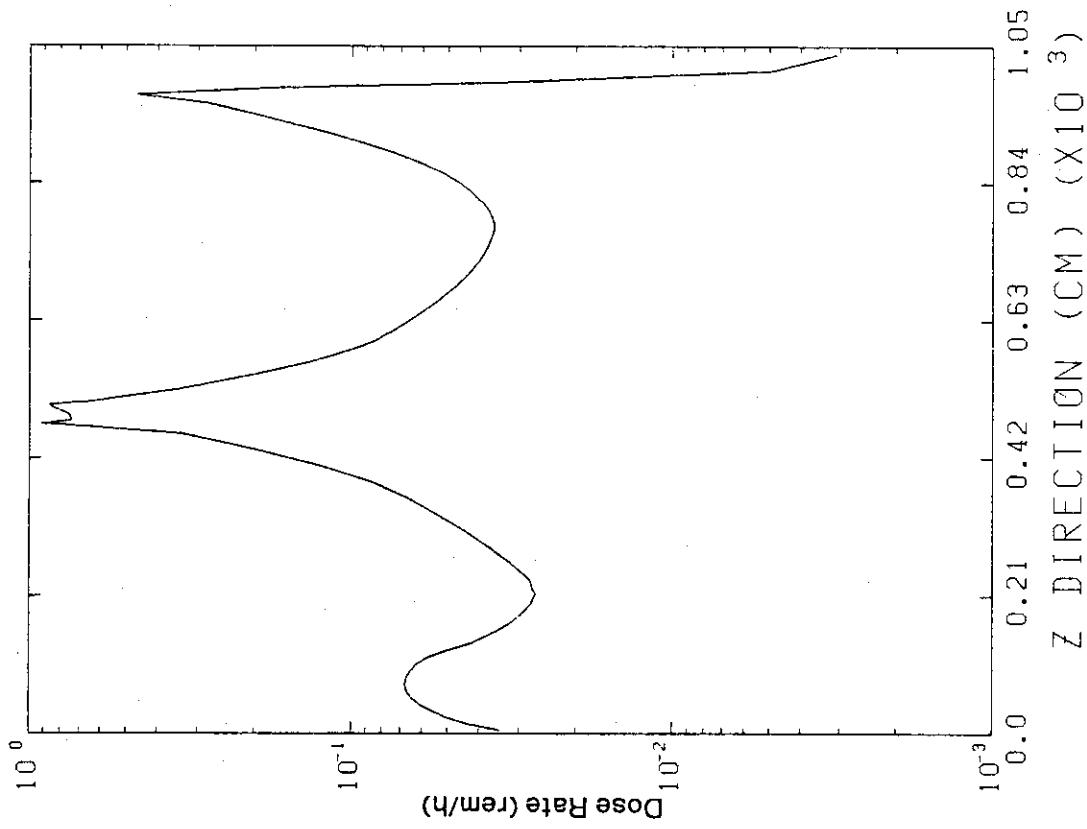


Fig. 3.3-13 Dose Distribution on Center Line Ion
Source Room Model 1 Day after Shut-down
Following 2-yr Full Power Operation
(Neutron Shutter Operation Model B)

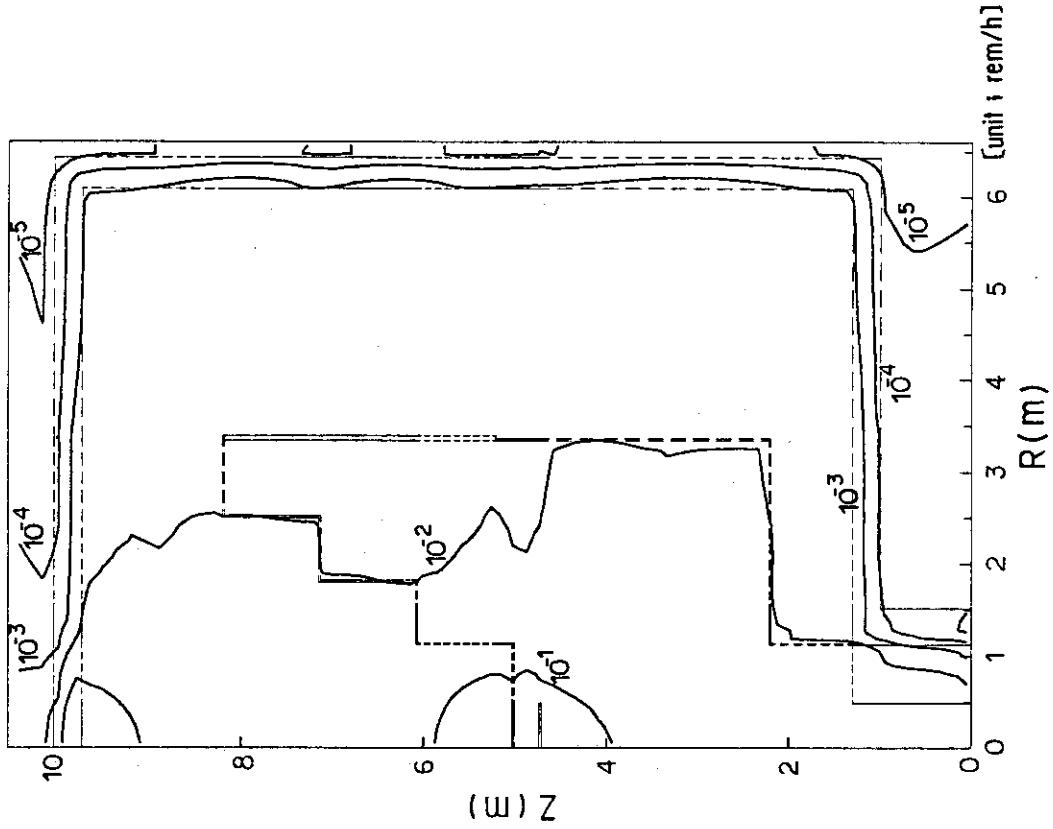


Fig. 3.3-12 Dose Distribution of Two-dimensional Ion
Source Room Model 1 Day after Shut-down
Following 2-yr Full Power Operation
(Neutron Shutter Operation Model B)

- TI 51 • NB198
- V 49 ● MO 1
- V 52 ▲ MO 91
- V 53 * MO 99
- V 54 * MO191
- ▲ CR 49 ♦ MO193
- CR 51 ■ TC 1
- ♦ CR 55 • TC199
- * MN 54 ○ TOTAL
- ♦ MN 56
- MN 57
- MN 58
- FE 53
- ▲ FE 55
- x FE 59
- ♦ FE153
- CO 57
- CO 58
- * CO 60
- ♦ CO 61
- CO 62
- CO158
- CO160
- ▲ CO162
- ▲ NI 57
- * NI 65
- ♦ Y 189
- ZR 89
- ♦ NB 97
- ♦ NB 98

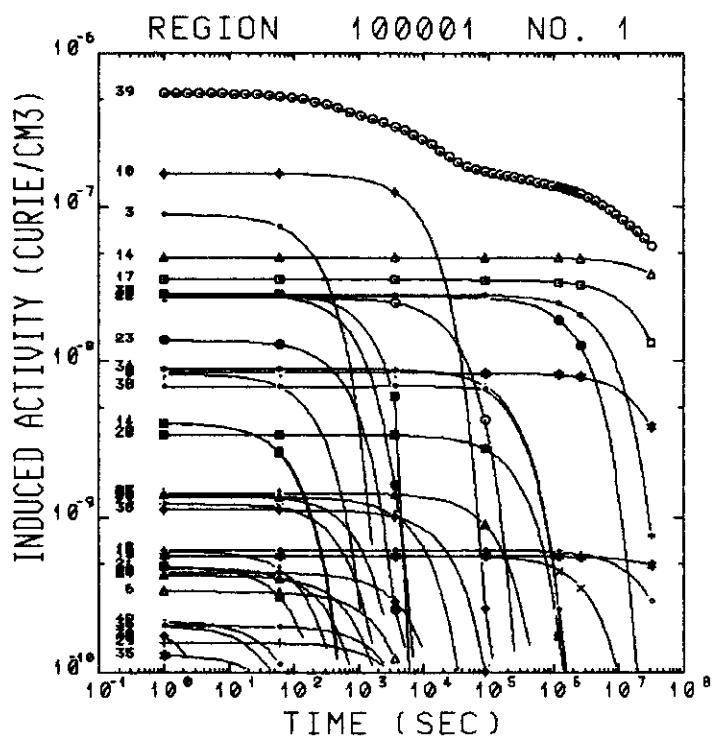


Fig. 3.3-14 Time Evolution of Radioactivity in Ion Source Room Region 1

- x LI 8
- + BE 8
- C 11
- N 16
- NA 24
- MG 27
- ♦ AL 28
- AL 29
- AL 30
- SI 31
- A 37
- A 41
- ▲ K 38
- K 42
- + K 44
- ♦ CA 39
- ▲ TOTAL

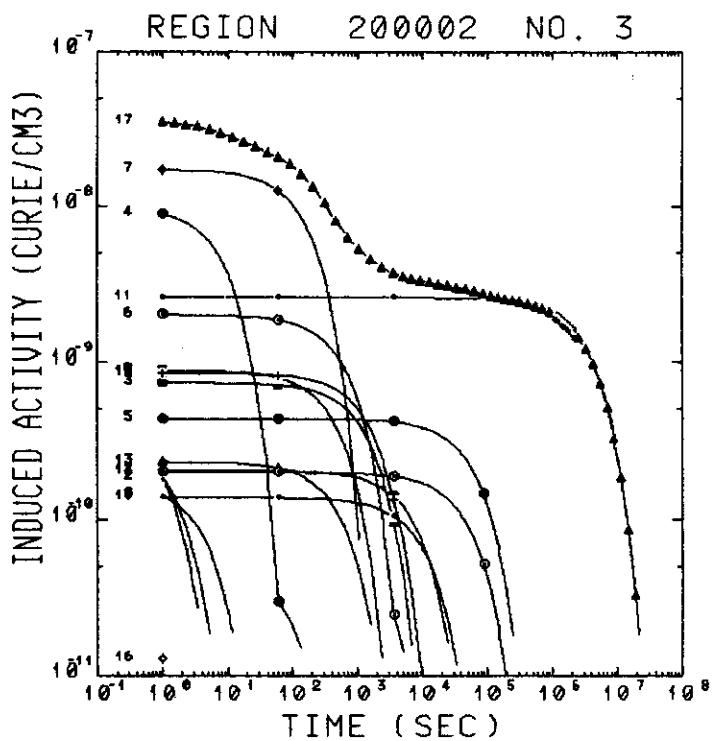


Fig. 3.3-15 Time Evolution of Radioactivity in Ion Source Room Region 2

x CO 60
 + CO 61
 ♦ CO 62
 □ CO160
 • CO162
 ♦ NI 65
 ■ CU 62
 • CU 64
 • CU 66
 ▲ TOTAL

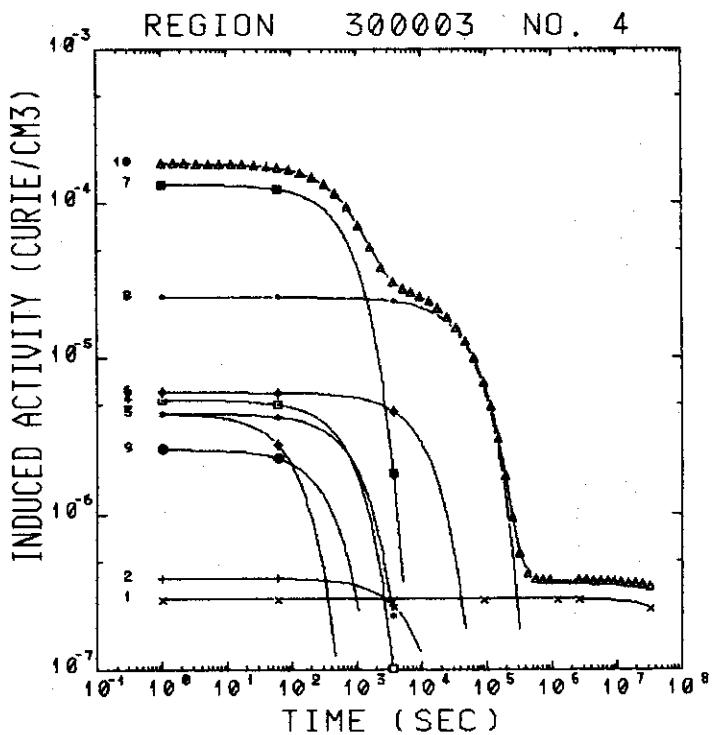


Fig. 3.3-16 Time Evolution of Radioactivity in Ion Source Room Region 3

■ N 16
 ▲ V 52
 ▲ V 53
 + CR 51
 * CR 55
 • MN 54
 • MN 56
 o MN 57
 o FE 55
 □ FE 59
 ♦ CO 57
 ■ CO 58
 • CO 60
 • CO 61
 o CO 62
 ▲ CO158
 • CO160
 • CO162
 x NI 57
 • NI 65
 • CU 62
 • CU 64
 ▲ CU 66
 • Y 189
 o ZR 89
 □ MO 1
 ▲ MO 99
 • TC 1
 + TC199
 ♦ TOTAL

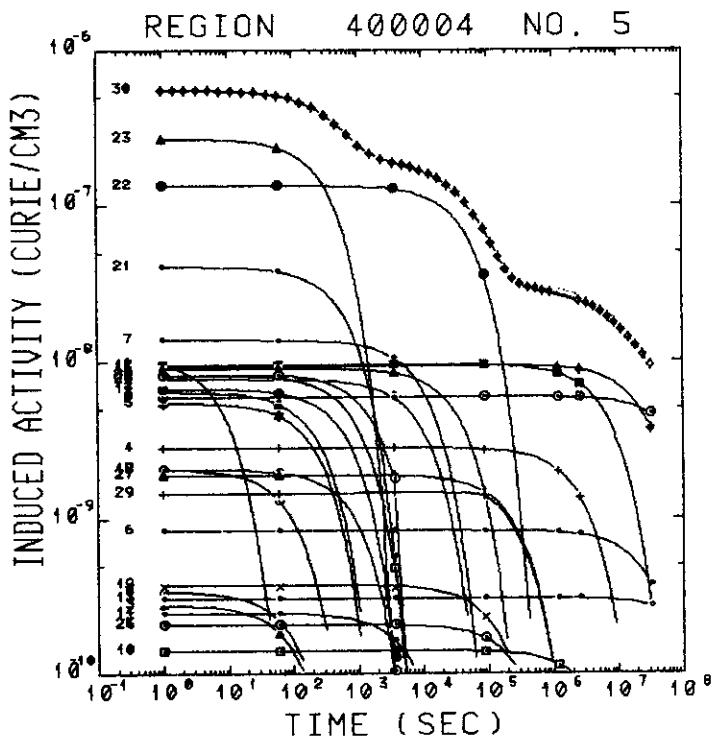


Fig. 3.3-17 Time Evolution of Radioactivity in Ion Source Room Region 4

- TI 51 ■ TC 1
- U 49 • TC199
- U 52 ○ TOTAL
- U 53
- △ CR 49
- CR 51
- ◆ CR 55
- * MN 54
- ♦ MN 56
- MN 57
- FE 53
- △ FE 55
- x FE 59
- ◊ FE153
- CO 57
- CO 58
- * CO 60
- ♦ CO 61
- CO 62
- CO158
- CO160
- △ CO162
- ▲ NI 57
- * NI 65
- ♦ Y 189
- ZR 89
- MO 1
- ▲ MO 91
- MO 99
- ♦ MO193

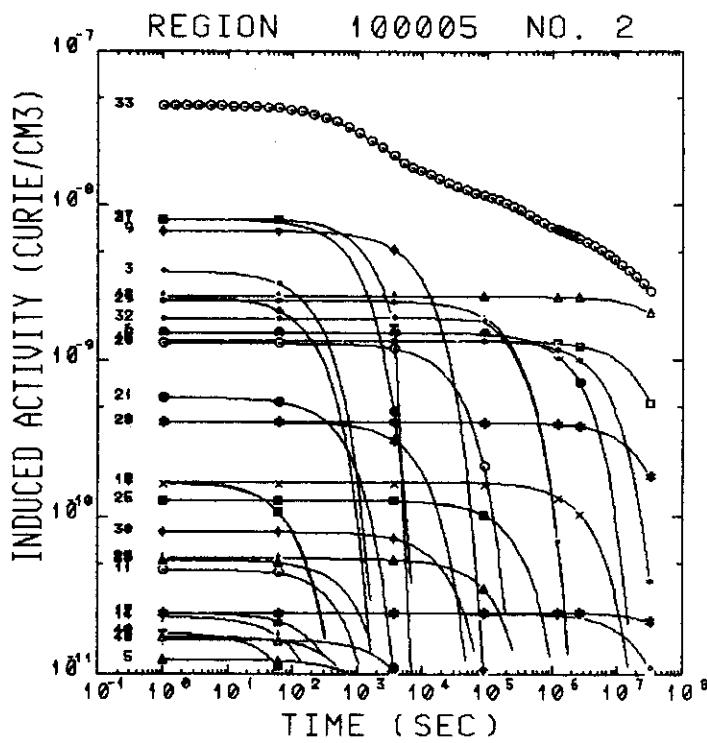


Fig. 3.3-18 Time Evolution of Radioactivity in Ion Source Room Region 5

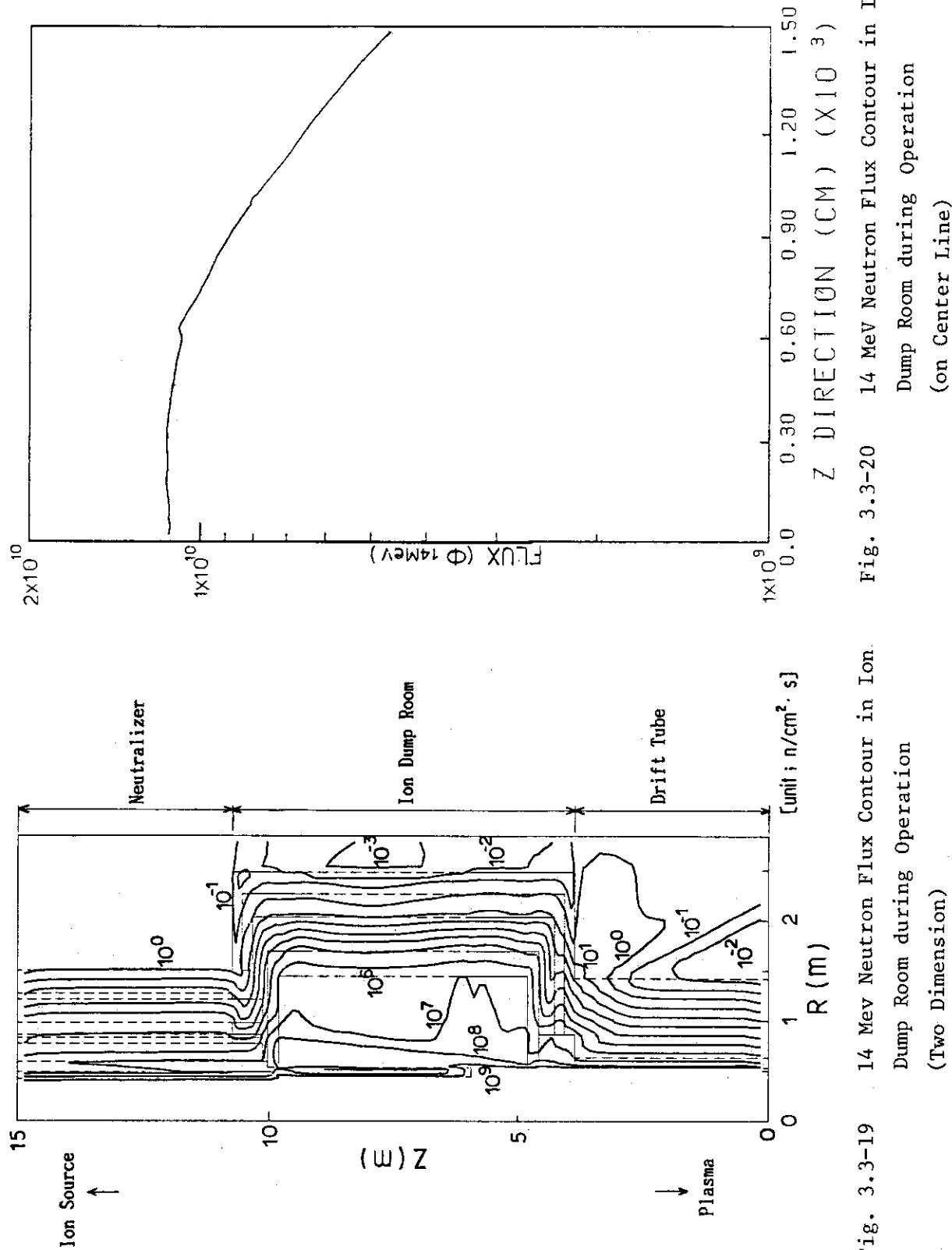


Fig. 3.3-19 14 Mev Neutron Flux Contour in Ion Dump Room during Operation (Two Dimension)

Fig. 3.3-20 14 Mev Neutron Flux Contour in Ion Dump Room during Operation (on Center Line)

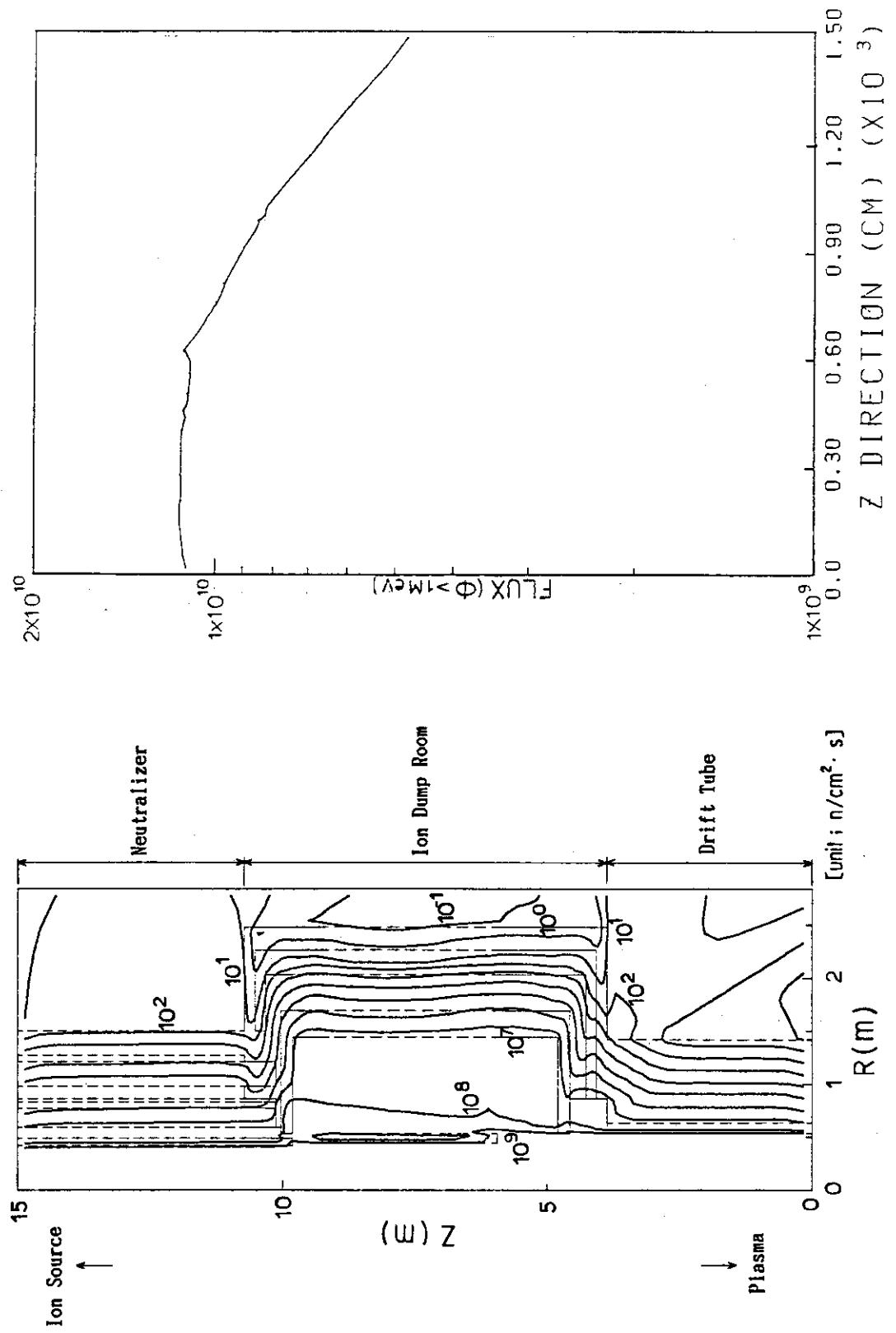


Fig. 3.3-21 Over 1 Mev Neutron Flux Contour in Ion Dump Room during Operation (Two Dimension)

Fig. 3.3-22 Over 1 Mev Neutron Flux Contour in Ion Dump Room during Operation (on Center Line)

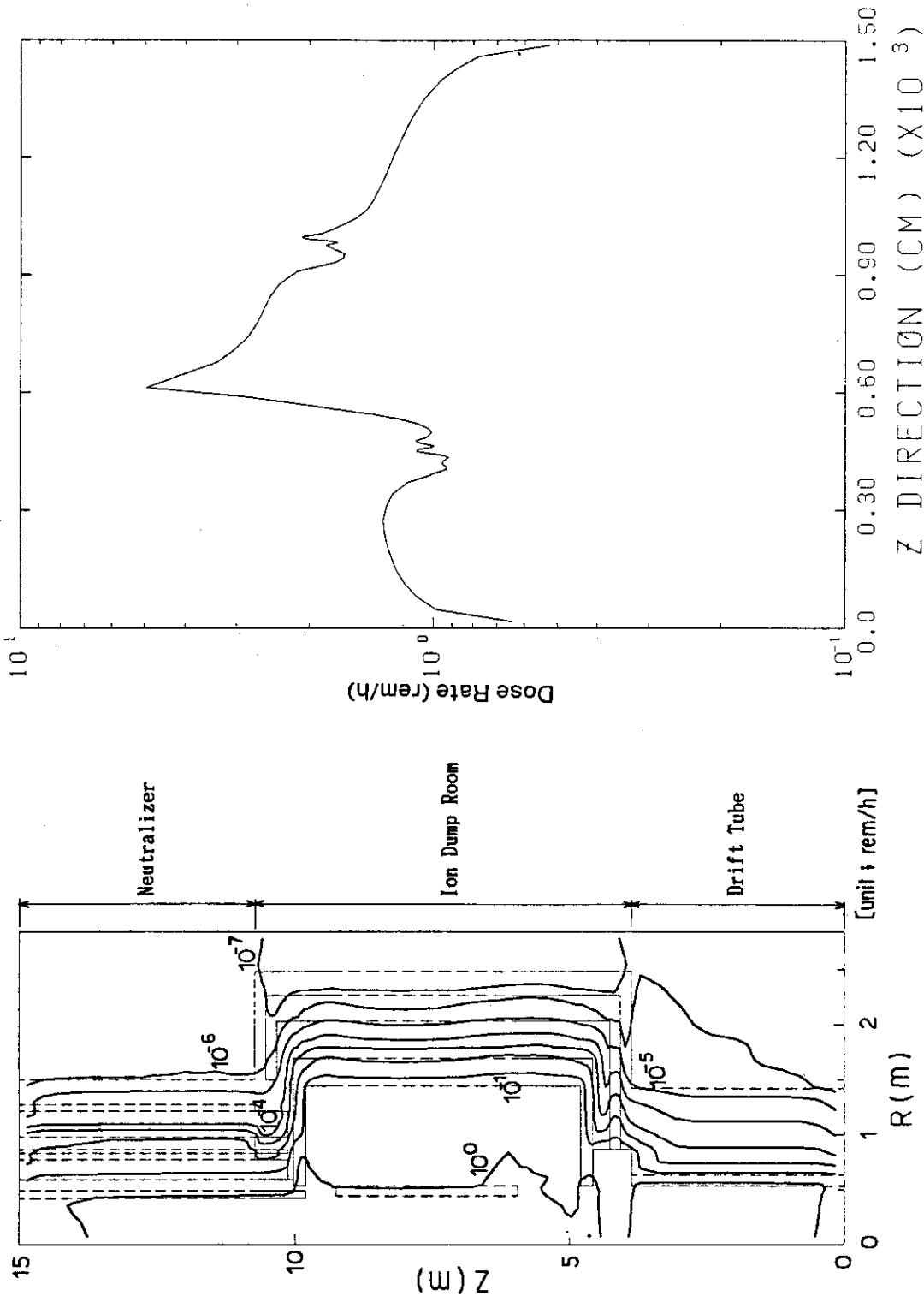


Fig. 3.3-23 Dose Distribution of Two-dimensional Ion Source Room Model 1 Day after Shut-down Following 2-yr Full Power Operation (Neutron Shutter Operation Model A)

Fig. 3.3-24 Dose Distribution on Center Line Ion Dump Room Model 1 Day after Shut-down Following 2-yr Full Power Operation (Neutron Shutter Operation Model A)

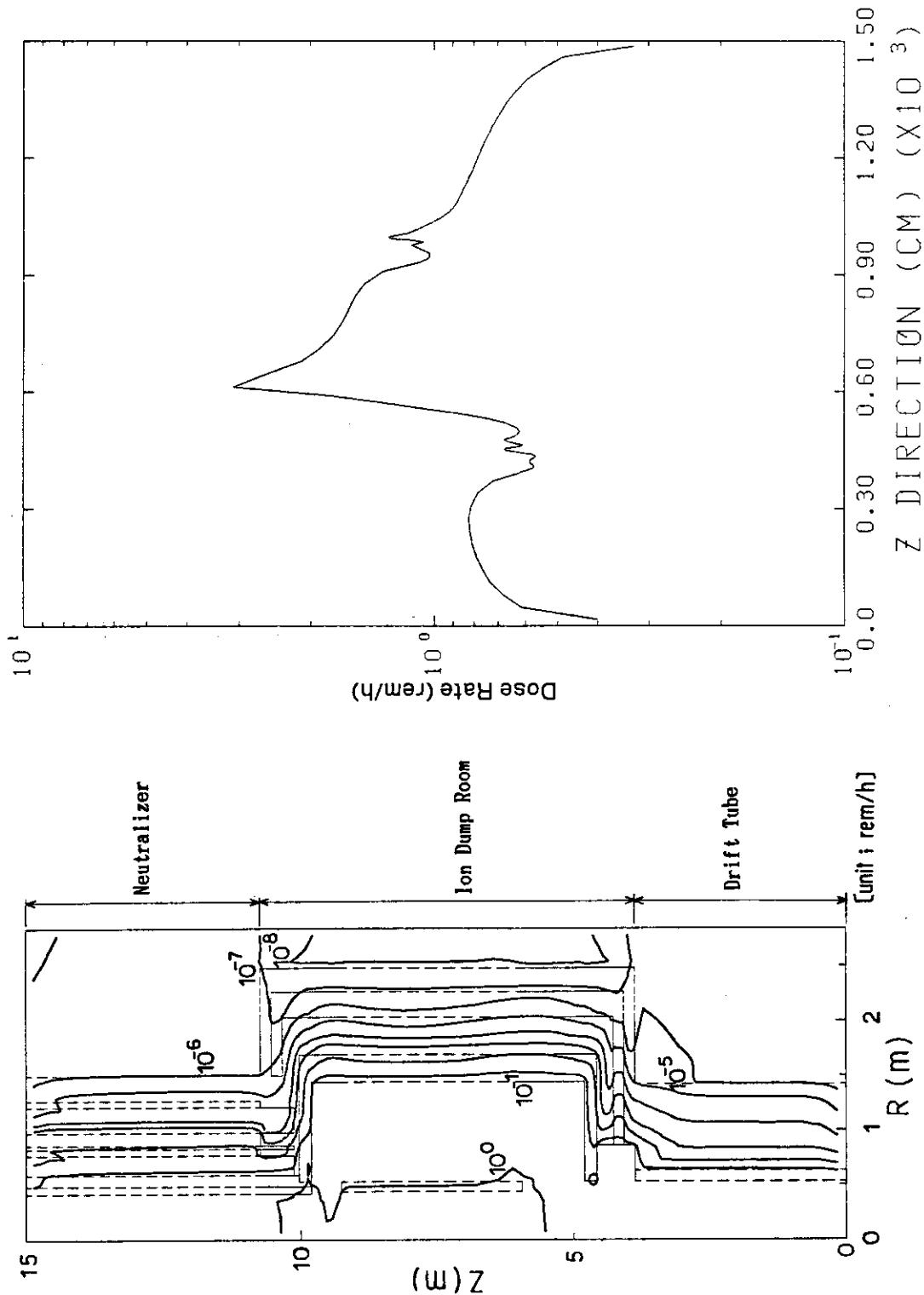


Fig. 3.3-25 Dose Distribution of Two-dimensional Ion Dump Room Model 1 Day after Shut-down Following 2-yr Full Power Operation (Neutron Shutter Operation Model B)

Fig. 3.3-26 Dose Distribution on Center Line Ion Dump Room Model 1 Day after Shut-down Following 2-yr Full Power Operation (Neutron Shutter Operation Model B)

+ N 16
 • CO 60
 * CO 61
 ♦ CO 62
 ■ CO160
 • CO162
 ○ NI 65
 ● CU 62
 ▲ CU 64
 ◉ CU 66
 × TOTAL

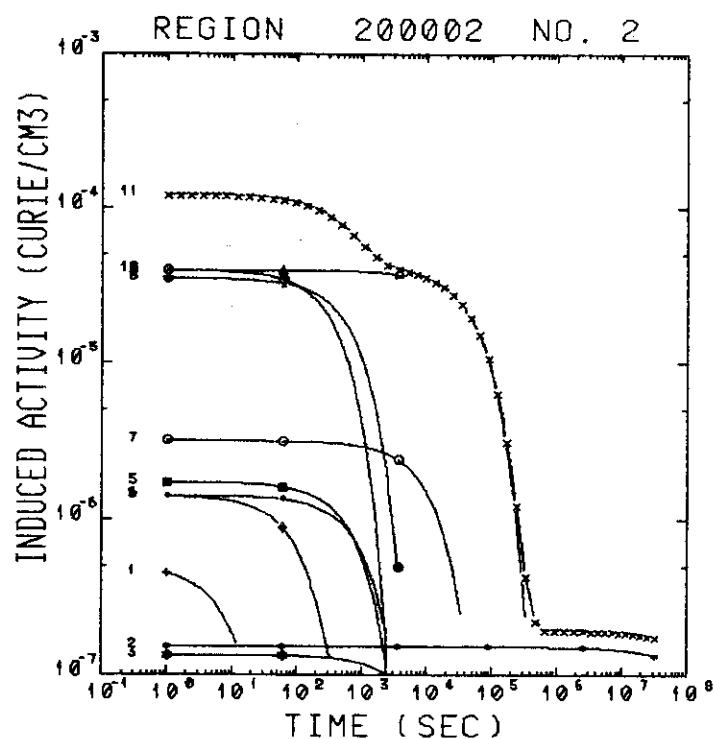


Fig. 3.3-27 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 2

■ TI 51 • MO 99
 • V 49 ♦ MO193
 • V 52 ■ TC 1
 ○ V 53 • TC199
 ▲ CR 49 ○ TOTAL
 ● CR 51
 ♦ CR 55
 * MN 54
 ♦ MN 56
 ■ MN 57
 • MN 58
 ○ FE 53
 ▲ FE 55
 × FE 59
 ♦ FE153
 □ CO 57
 • CO 58
 * CO 60
 ♦ CO 61
 ■ CO 62
 ○ CO158
 • CO160
 ▲ CO162
 ▲ NI 57
 □ NI 63
 * NI 65
 ♦ Y 189
 ■ ZR 89
 ● MO 1
 ▲ MO 91

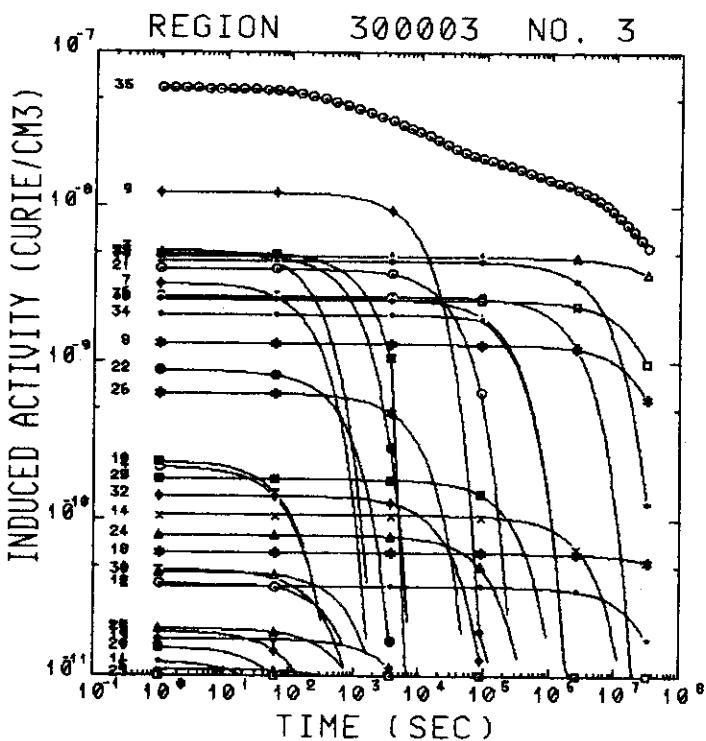


Fig. 3.3-28 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 3

+ N 16
• TOTAL

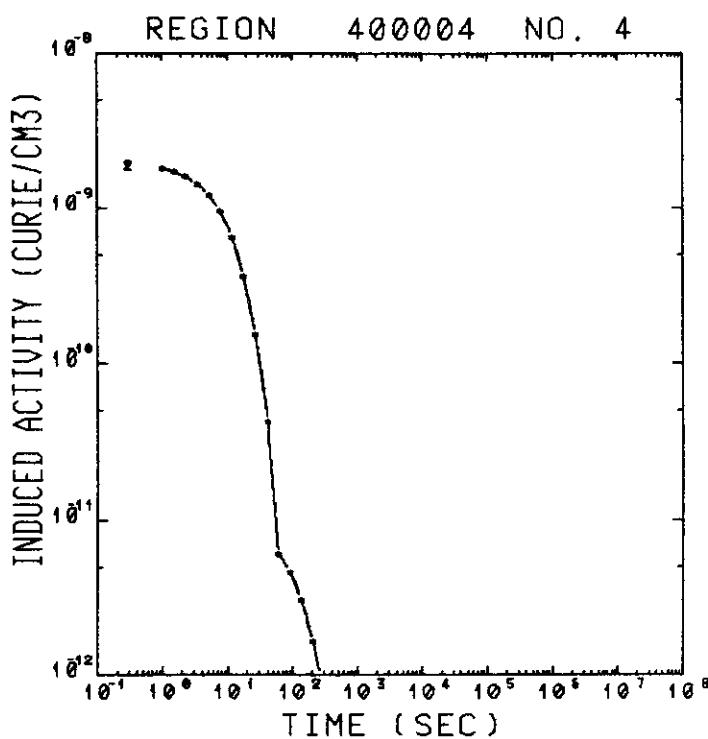


Fig. 3.3-29 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 4

■ N 16
△ V 52
▲ V 53
+ CR 51
* CR 55
• MN 54
• MN 56
○ MN 57
● FE 55
□ FE 59
◆ CO 57
■ CO 58
▲ CO158
● CO160
× NI 57
• NI 65
• Y 189
○ ZR 89
● MO 1
■ MO 99
• MO193
○ TC 1
△ TC199
▲ TOTAL

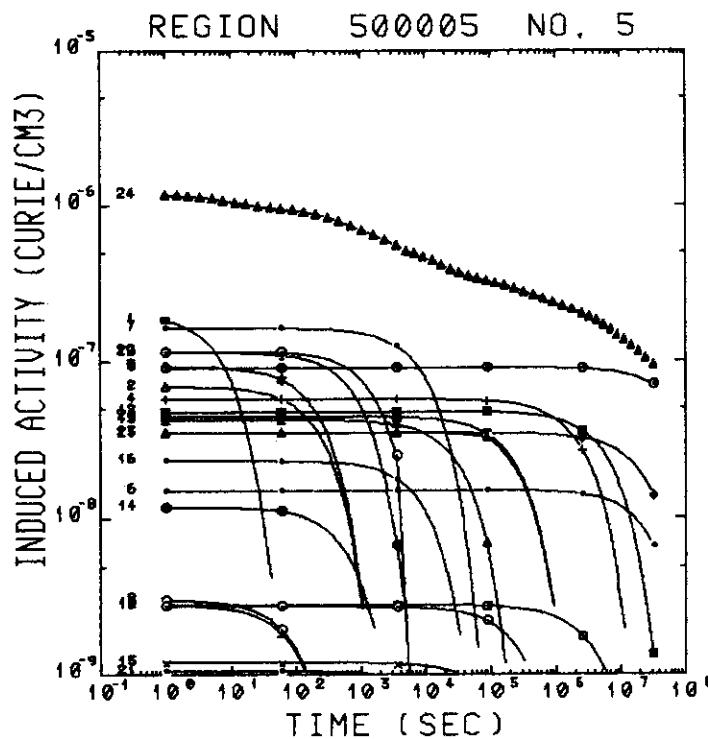


Fig. 3.3-30 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 5

+ N 16
 • CO 60
 • CO 61
 ♦ CO 62
 ■ CO160
 • CO162
 ○ NI 65
 ● CU 62
 ▲ CU 64
 ◎ CU 66
 × TOTAL

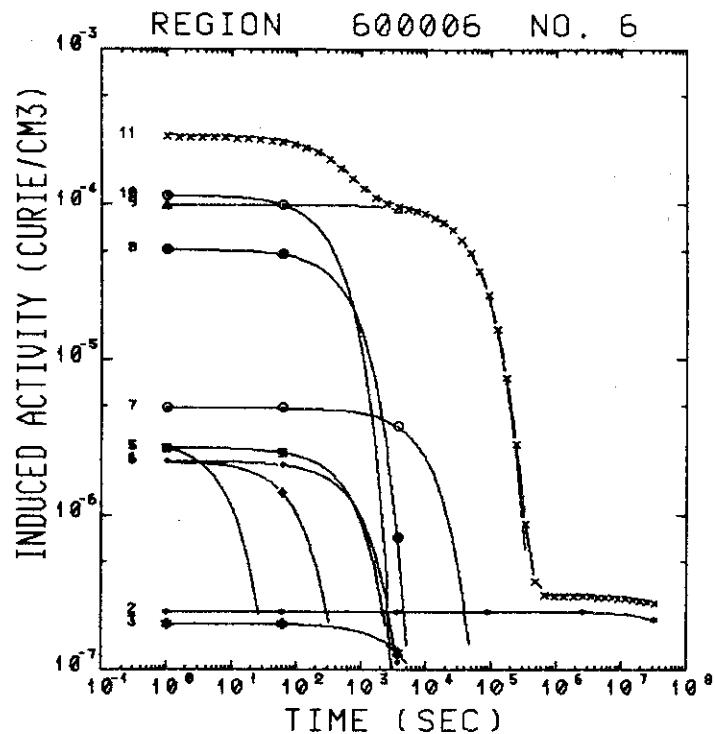


Fig. 3.3-31 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 6

■ N 16 + MO193
 ○ TI 51 ○ TC 1
 ● U 49 ▲ TC199
 ▲ U 52 ▲ TOTAL
 ▲ U 53
 + CR 51
 * CR 55
 • MN 54
 • MN 56
 ○ MN 57
 ▲ FE 53
 ● FE 55
 □ FE 59
 * FE153
 ♦ CO 57
 ■ CO 58
 • CO 60
 ○ CO 61
 ▲ CO 62
 ▲ CO158
 ● CO160
 • CO162
 × NI 57
 ♦ NI 63
 • NI 65
 • Y 189
 ○ ZR 89
 ● MO 1
 ● MO 91
 ■ MO 99

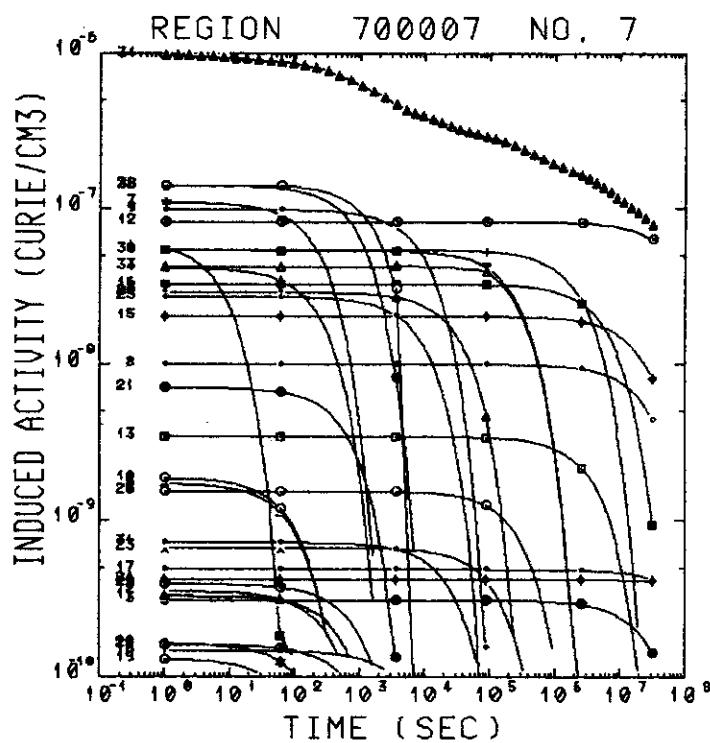


Fig. 3.3-32 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 7

× CR 51
 * MN 54
 * MN 56
 ♦ MN 57
 ● FE 55
 ♦ CO 57
 □ CO 58
 • CO 60
 * CO 61
 ♦ CO 62
 • CO158
 ○ CO160
 ● CO162
 ▲ NI 57
 • NI 65
 * TOTAL

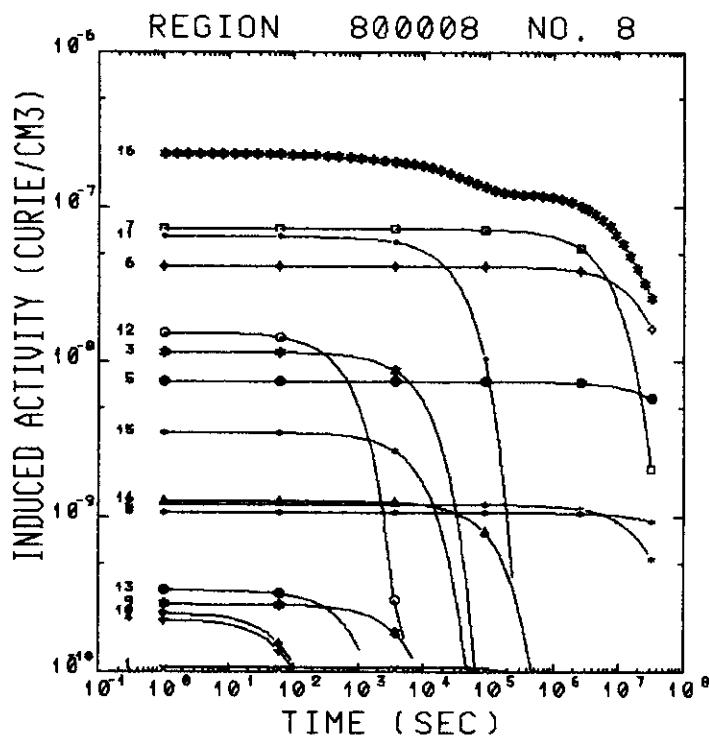


Fig. 3.3-33 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 8

× CR 51
 + CR 55
 * MN 54
 * MN 56
 ♦ MN 57
 ■ MN 58
 • FE 53
 ● FE 55
 ● FE 59
 × FE153
 + TOTAL

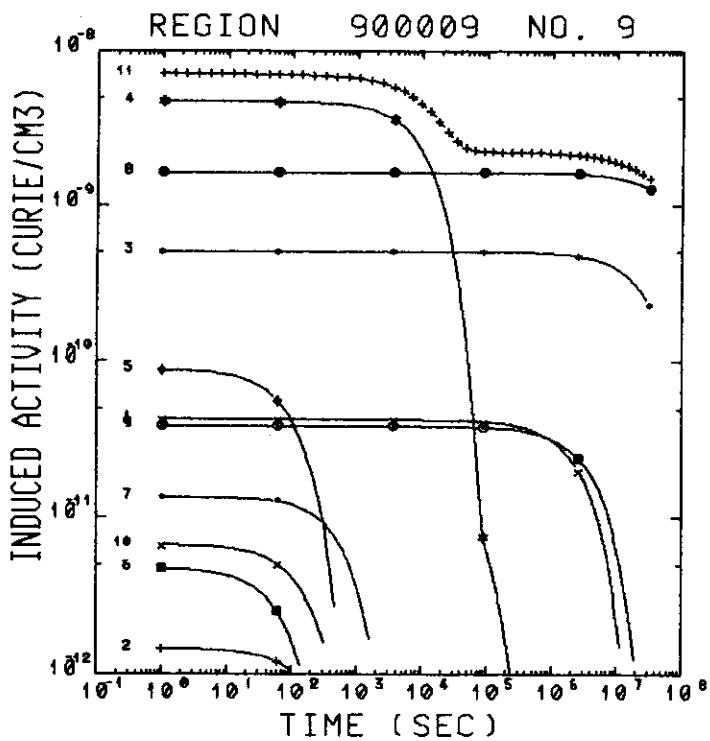


Fig. 3.3-34 Time Evolution of Radioactivity in Ion Dump Room Region 9

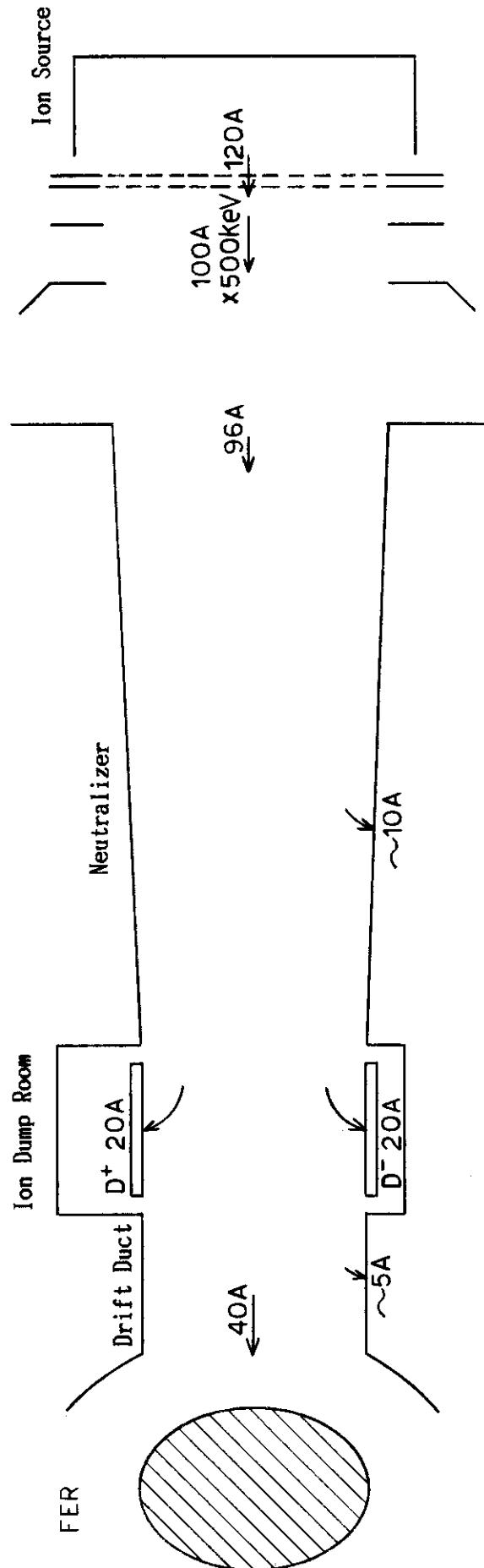


Fig. 3.3-35 Energy Flow

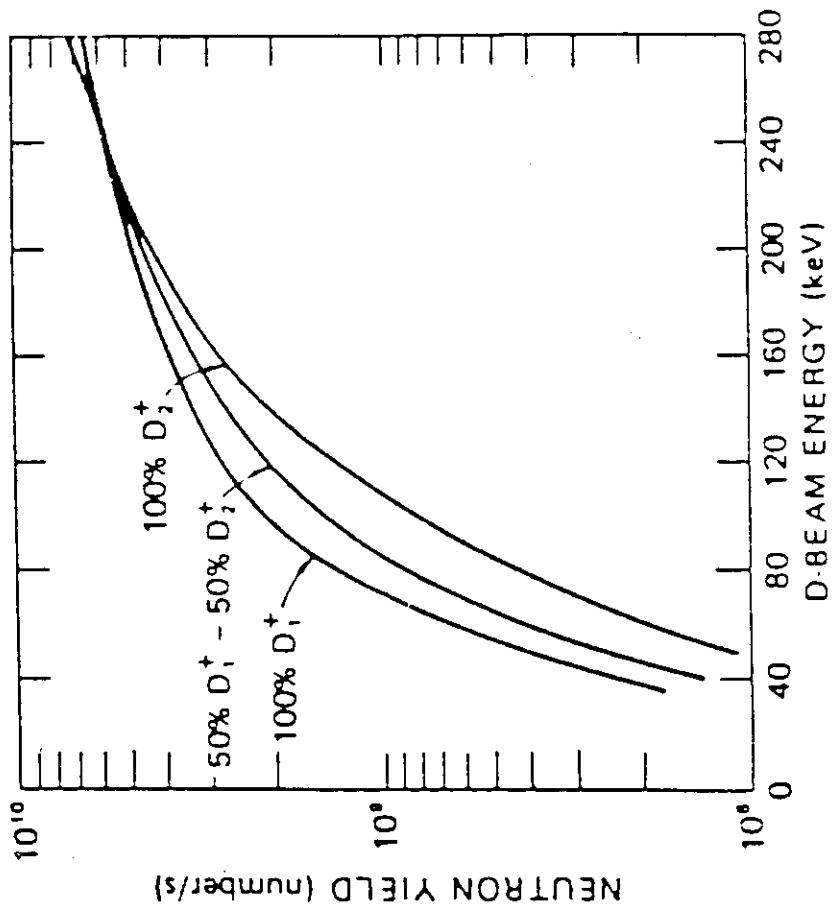


Fig. 3.3-36 D-D Neutron Yield per Ampere of Denterium Beam from Copper Target as a Function of Beam Energy ($C_D=1.7 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ assumed)
(Ref. ⑩)

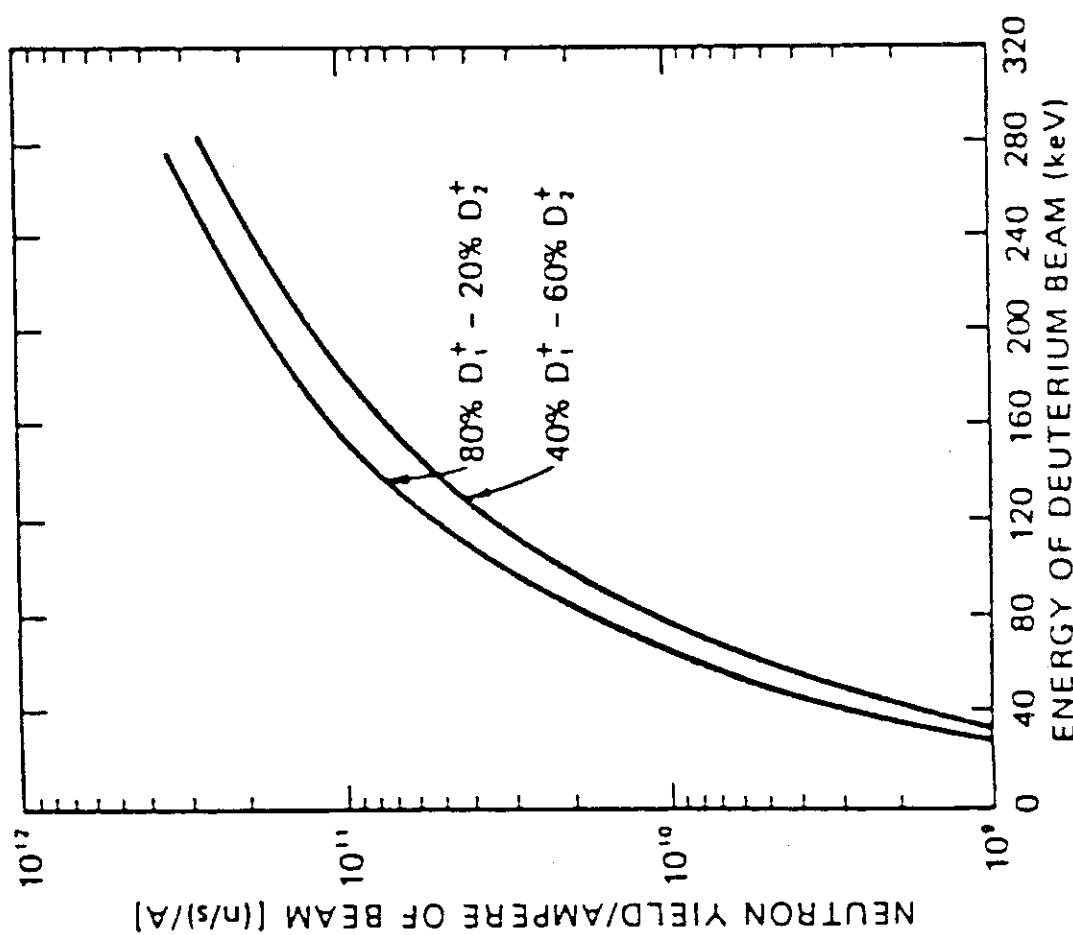


Fig. 3.3-37 Neutron Yield from Gas Cell per Ampere of Beam Current per Thickness of 10^{16} molecule/cm² as a Function of Beam Energy.
(Ref. ⑩)

3.4 中性粒子入射装置用電源

3.4.1 システム設計条件

NBI用電源は、イオン源に電力を供給するためのイオン源用電源系と主としてビームライン用の冷媒循環系や冷却水循環系に電力を供給するための定常系の2系統から構成される。定常系はほぼ一定負荷であるため、系統（商用電源）から受電するが、イオン源用電源は、

- ① 平均繰返し率約0.2の大容量パルス負荷であること
- ② 電力償御用サイリスタ装置や直流発生装置から生ずる高調波による系統電力の影響を防止すること

等のため、専用に設けられた発電設備から受電するものとする。

Table 3.4-1に示される負イオン源NBIシステムの設計条件³⁾とFig. 2.1-2に示されるNBIオペレーションシナリオの2つの条件に基づき電源システムの設計を行なう。

3.4.2 イオン源用電源

(1) 基本構成

イオン源用電源は、イオン源でイオンビームを生成するための電力を供給するものであり、大別するとイオン源のプラズマ生成室にプラズマを発生させるためのソースプラズマ生成用電源とプラズマ生成室からイオンビームを引き出すためのイオン引き出し電源で構成される。

イオン引き出し電源は、ビーム引き出し用の電極に電位を与えるためのもので、負イオン源用電源では従来の正イオン源用電源とは異なり、主加速電源、前段加速電源、電子抑制電源、バイアス電源、引き出し電源等の電源からなる。ソースプラズマ生成用電源は、アーク電源、フィラメント電源、バイアス電源の3電源で構成される。これらの電源は高電位にフロートした状態で使用される。Fig. 3.4-1にイオン源への電源接続方式を示す。

(2) 電源仕様及び検討課題

現在までに開発済の負イオン源から外挿される20MWイオン源に使用される各電源の仕様をTable 3.4-2に示す。又オペレーションシナリオから考えて、電源全体として

- ① ビームショット中にビームエネルギーを可変とする。
- ② ビームショット中にビームエネルギーは一定のまま入射パワー（ビーム電流）を可変とする。

事が必要である。

59年度設計では、電源系は従来と比べエネルギー回収用電源が追加された点を除いて、従来実績（JT-60用NBI電源及びJT-60用能動粒子線電源）と大差ないため、大きな問題点はなかった。しかし61年度設計では、負イオン源の特長を生すために加速電圧を500 kVと超高压化した。

イオン源電源の問題としてこの高圧化による問題を考えると次の3点に集約できる。

- ① イオン源のブレークダウン時に生ずるイオン源への流入エネルギーの増加とアース電位変動による制御系への影響
- ② 高電位化に起因するコロナノイズの制御系への影響

(3) 高電位化に伴う絶縁距離の増加

上記問題に対し主として次の 2 点について検討した。

- ① イオンビームの制御及びイオン源加速電極保護の観点から、高速スイッチング方式の検討
- ② 浮遊容量減少のための絶縁方式の検討

(3) 検 討 結 果

1) 主加速電源

Fig. 3.4-2 に従来方式の主加速電源¹²⁾ の接続図を示す。しかし、出力電圧が 450 kV にも達した場合、本図の構成では高電位にフロートした部分に設置される直流スイッチ部に十分な信頼性を得る事が難しいと予想される。このため仕様を満足出来かつ十分な信頼性を得る事が可能と考えられる回路方式を検討した。その結果、Fig. 3.4-3 及び Fig. 3.4-4 に示す回路を得た。これらは、交流電源を高周波化し¹³⁾¹⁴⁾ 低圧交流側でスイッチングする事により、高圧直流を高速でスイッチングしようとするものである。必要な周波数は、要求されるスイッチングスピードで決まる。例えば 25 μs のスイッチングスピードを得るためにインバータをサイリスタで構成した場合、25 kHz 程度となる。インバータを GTO で構成すれば更に高速スイッチングが可能である。

第 1 方式・第 2 方式の相異点は、定電圧制御機能及びスイッチング機能をどの機器に持たせるかである。前者におけるコンバータ、インバータは単なる周波数変換器であり、制御及びスイッチングは交流電力制御装置で行なうものである。後者は、粗い電圧設定をコンバータで行ない電圧の微調整及びスイッチングをインバータで行なうものである。

Table 3.4-3 に従来方式と高周波化方式の比較を示す。

2) フローティング電源

主加速電源以外の電源については、本項で一括して検討する。負イオン源用電源は、主加速電源を除けば全て高電位にフロートした状態で運転されるため、回路方式と並んでその絶縁方式も重要な検討課題である。

i) 回 路 方 式

ア) 直流高速スイッチングを必要とする電源

前段加速電源、引き出し電源、電子抑制電源、アーク電源の 4 電源は、高電位にフロートした状態で運転され、かつ高速スイッチングが必要である。これらの電源は、主加速電源と同様の考え方から高周波化方式を採用する。

イ) 直流高速スイッチングが不要な電源

フィラメント電源及びバイアス電源は、高速スイッチングもなくほぼ連続電源と考えて良いため、JT-60用 NBI のフィラメント電源と同様の回路方式とする。

以上をまとめてイオン源 1 台分の単線接続図を Fig. 3.4-5 に示す。

ii) 絶 縁 方 式

絶縁方式としては、Fig. 3.4-6 に示す個別絶縁方式と Fig. 3.4-7 に示す一括絶縁方式が考えられる。一括絶縁方式はソースプラズマ生成用電源の変圧器の浮遊容量を減らすためのものであり、サージ抑制用リアクトルの挿入が可能になるのでサージブロッカーの小型化の可能性がある。

上記 2 方案を Table 3.4-4 に示す。

3.4.3 電力供給設備

Fig. 2.1-1 に示す NBI のオペレーションシナリオから、発電設備に要求される放出エネルギーの最大値は約 12G J である。この値は現状のこの種の用途に使用されるフライホイール付発電機（以後 MG と略す）の能力を上まわっている。従って現状レベルでは、1 ビームラインに 1 台の MG を設けるのが制御上有利である。一部は既設の MG を改造流用する事や又本体コイル電源を含めて合理的な給電システム設計を行なう必要がある。

3.4.4 定常系電源

Fig. 3.4-8 に定常系電源の単線接続図を示す。定常系電源の容量は、59年度設計に比べ大幅に減少した。

3.4.5 まとめ

イオン源電源システムを検討する中で次のような課題が摘出された。

- ① 高周波化方式による加速電源については、大容量インバータの開発を進めると共にこの思想に基づいた新しい回路方式の検討が必要である。
- ② 絶縁方式については構造、配置を含めた総合的な視野に立っての検討が必要である。
- ③ ビーム制御に関しては、従来の様に電源個々の制御によるのではなく、発電機を含めたトータル制御について検討が必要である。

さらに次の段階では電源効率の点からビームエネルギー回収を前提としたシステム適用も考慮せねばならない。

Table 3.4-1 Performance of NBI for FER

No.	項 目	条 件
1	中性粒子ビームパワー	22.5MW×3ポート
2	ビームエネルギー	200～500 kV
3	ビーム電流	100 A
4	イオン種	D ⁻
5	総合効率	45%

Table 3.4-2 Electrical Requirements (Estimated)

No.	項 目	主加速電源	前段加速電源	引き出し電源	電子抑制電源	アーク電源	フィラメント電源	バイアス電源
1	出力電圧 ^{注1)}	-450kV	-50kV	-4 kV	+3 kV	150V	15 V	10 V
2	出力電流	100A	140A	600A	16 A	4000A	8000A	600A
3	リップル(%)	3 >	3 >	3 >	3 >	3 >	3 >	3 >
4	パルス幅 ^{注1)}	120	120	120	120	120	C.W	C.W
5	くり返し率	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	—	—
6	制御	AVR	AVR	AVR	AVR	AVR	AVR	AVR
7	負荷端容量	45MW	7MW	24MW	0.048MW	0.6MW	0.12MW	0.006MW

注1) 可変 表中の値は最大値を示す。

Table 3.4-3 Accel. p.s. Feature using High Frequency invertor

No	項目	従来方式	高周波化方式
1	長所	1. 開発要素が少なくスケールアップが容易 2. ブレークダウン時カットオフ時間短 3. 電源効率高(約80%)	1. 直流スイッチ不要 2. 直流フィルタ不要 3. システムの小型化が可能 4. 原理的には、高圧化が容易
2	短所	1. 直流スイッチ部が巨大 2. 浮遊容量によるサージノイズが大で、信頼性の確保が困難	1. 大容量高周波インバータ及び高周波トランスの開発が必要 2. 電源効率低下(約70%) 3. カットオフ時間が回路に依存する。

Table 3.4-4 Comparison in Insulation methods for Power supplies

No	項目	一括絶縁方式	個別絶縁方式	評価及び問題点
1	浮遊容量	• 変圧器部の浮遊容量減 • 変圧器以降の機器がフロートするため浮遊容量増	• 変圧器の浮遊容量増	構造・配置を含めてトータルの浮遊容量の評価が必要。一括絶縁方式はサージ抑制リクトルの採用が可能となり、サージブロックコアの小型化の可能性がある。
2	制御性	• 高電位にフロートした部分に制御機器が大量にある。	• 高電位部には制御用電子回路は無い。	個別絶縁が有利。
3	構造	• 大半の機器が高電位にフロートし対地絶縁の必要があり安全上も問題有。 • DCによる集じんを考えるとクリーンルームに収納要。	• 高電位にフロートする機器は、ほとんどなく安全。 • イオン源近辺以外は建屋に対する考慮は不要。	配置(建屋)・安全性共に個別方式が有利。

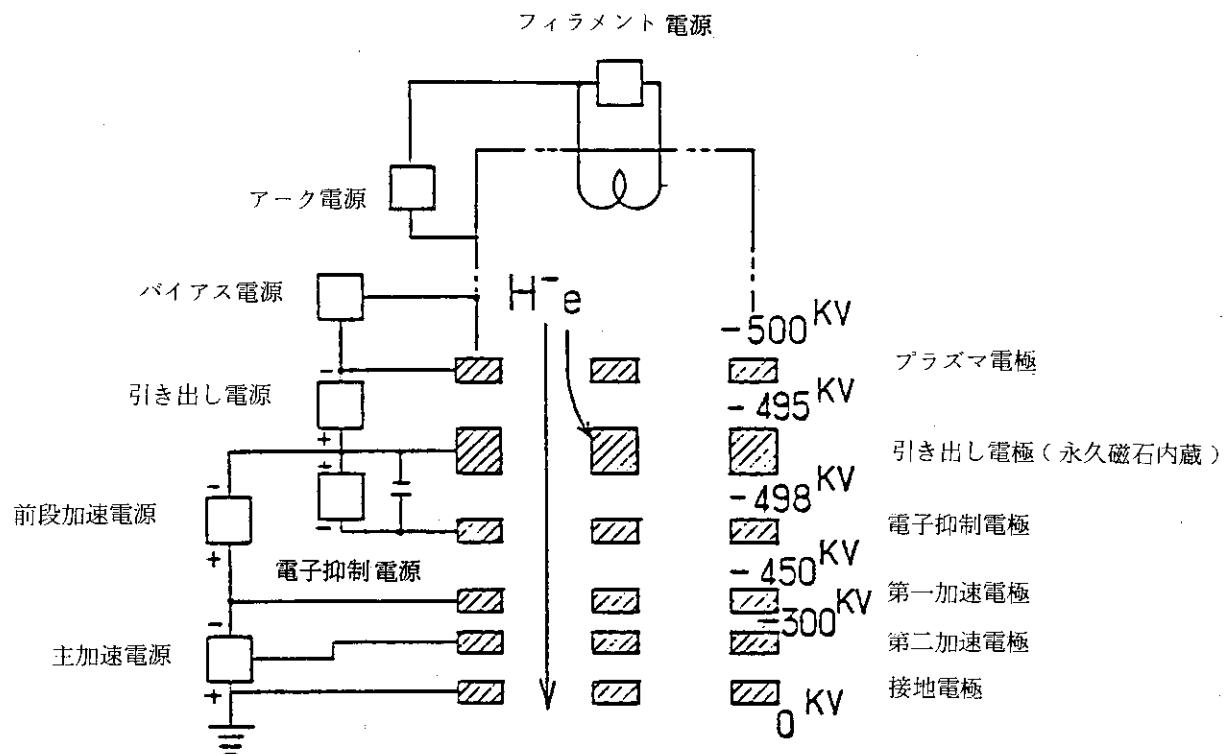
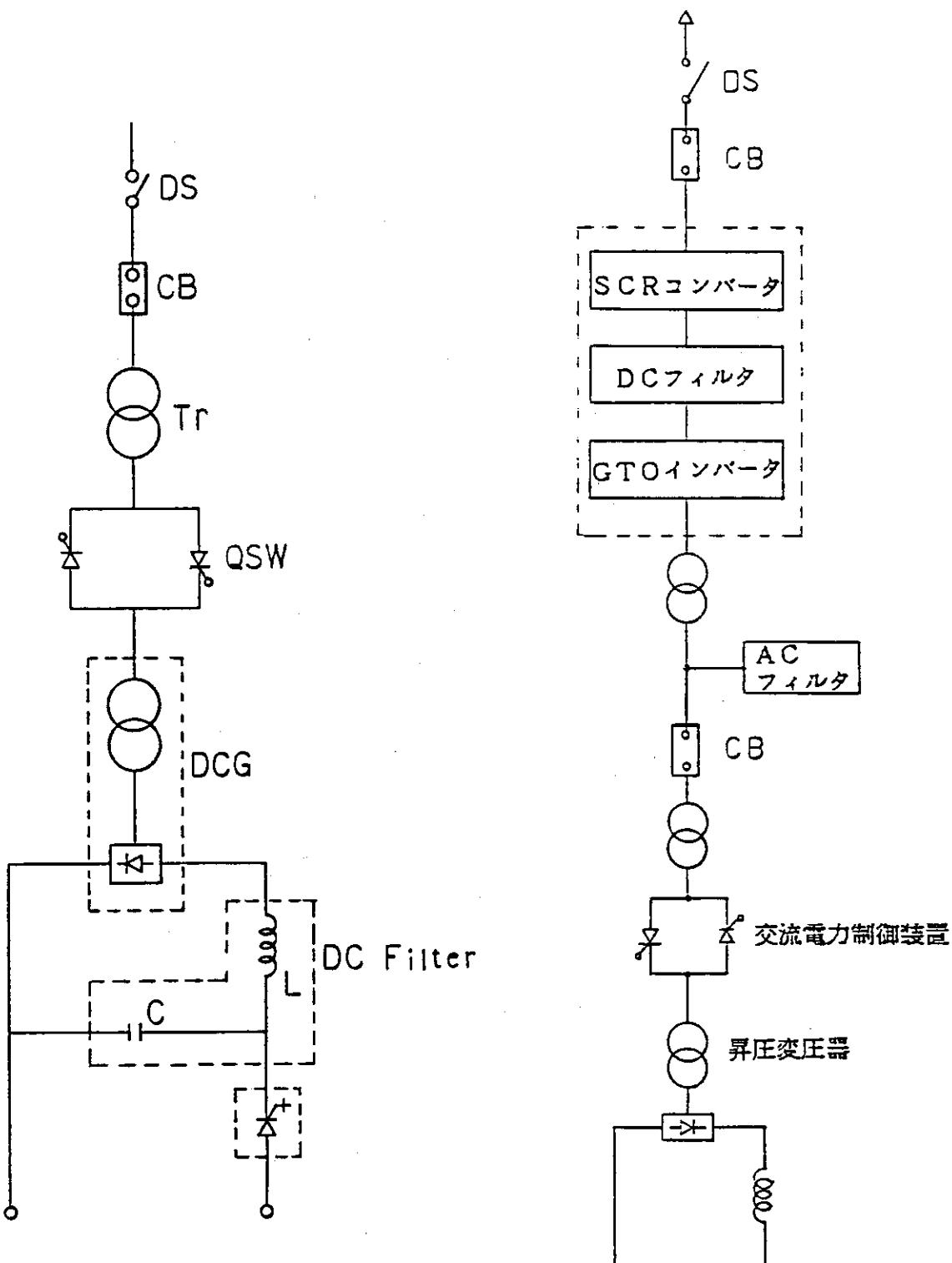


Fig. 3.4-1 Power Supply Scheme



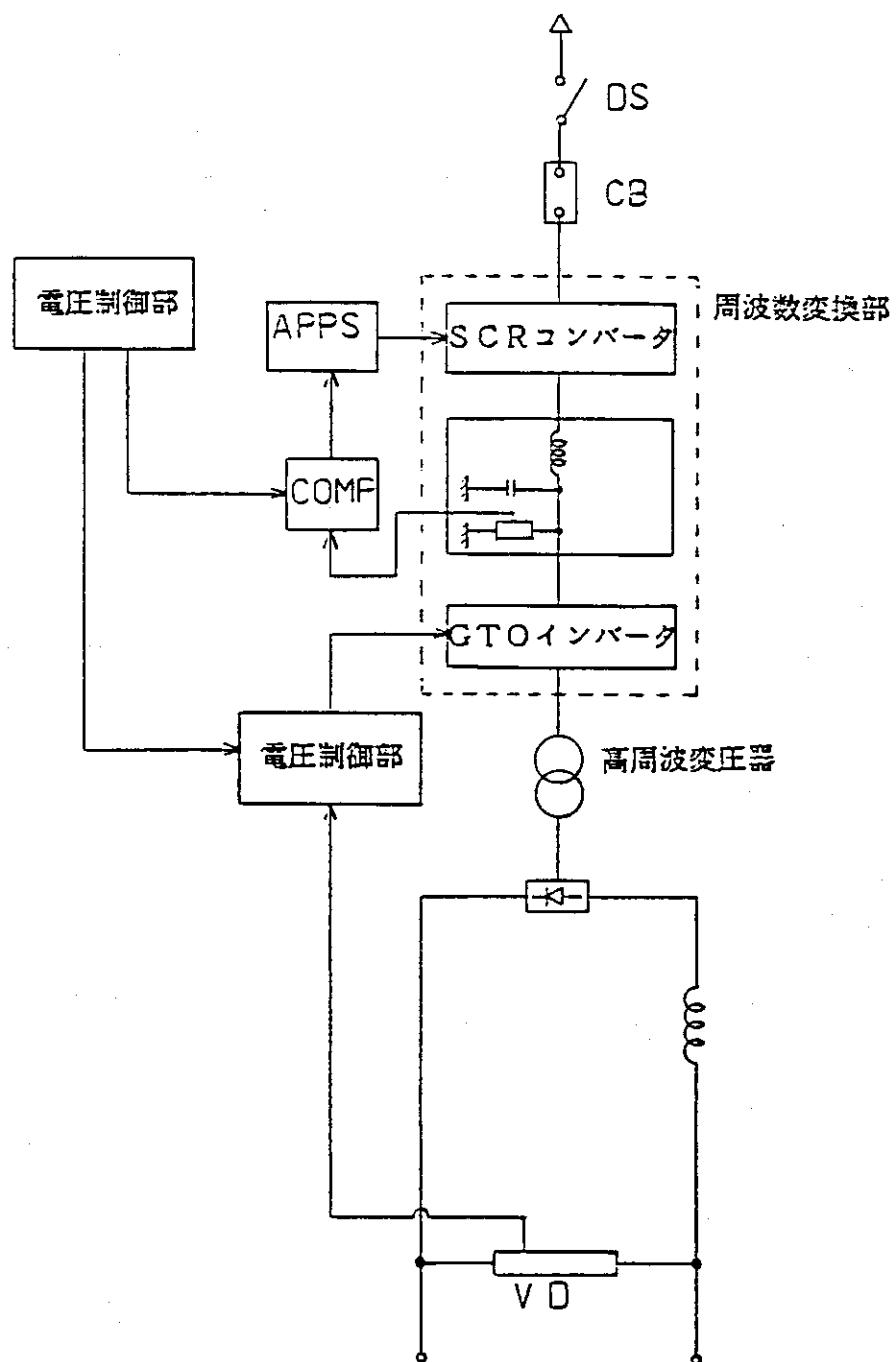
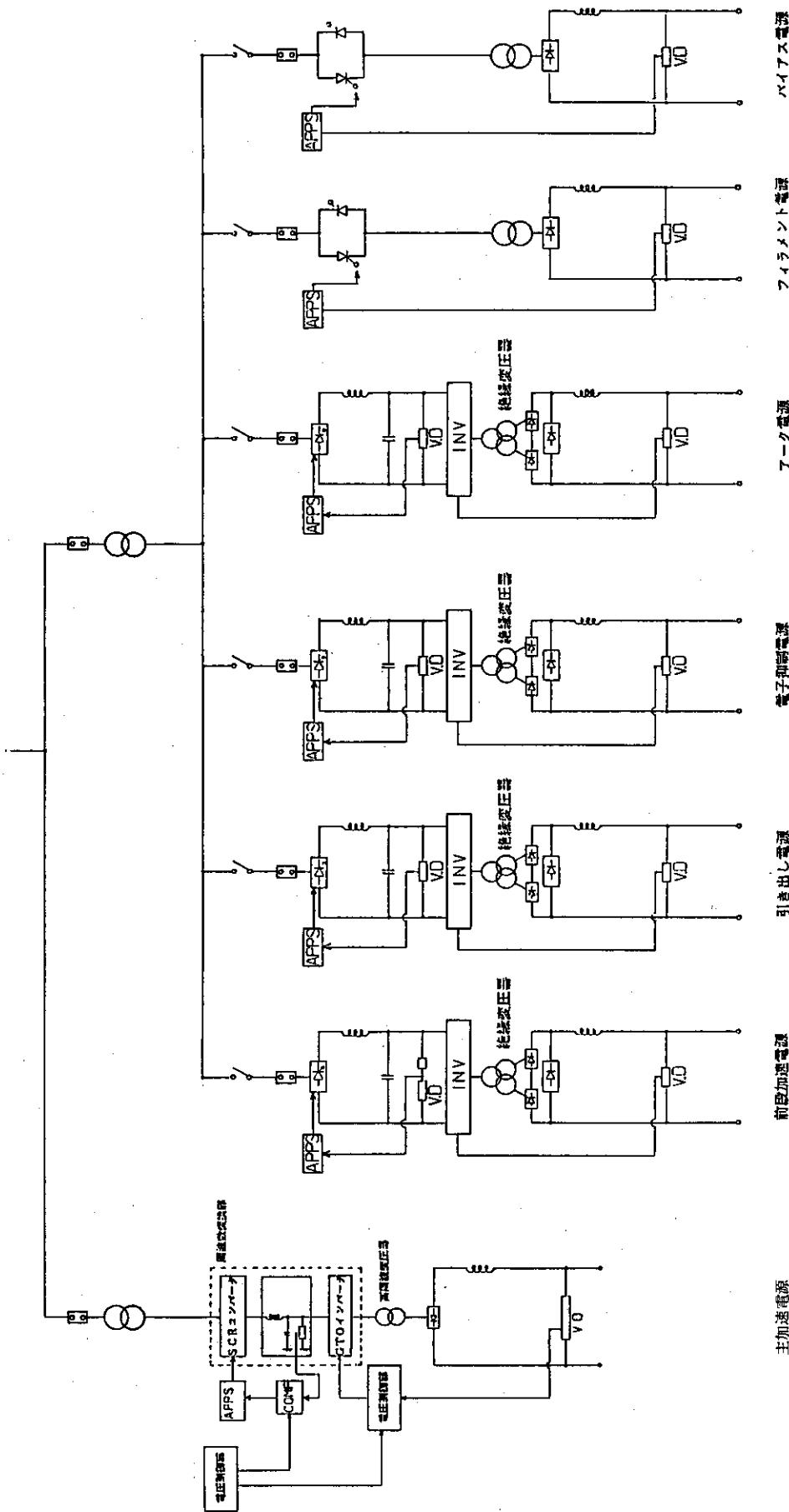


Fig. 3.4-4 Accel. P.S. using invertor (2)



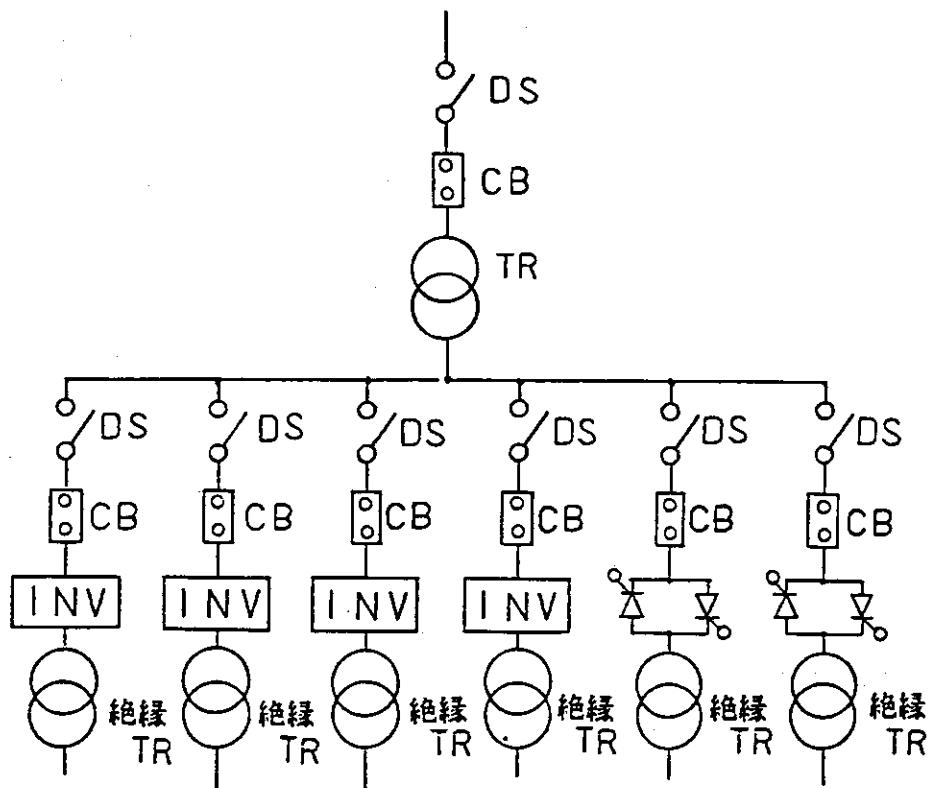


Fig. 3.4-6 Separated Type Insulation

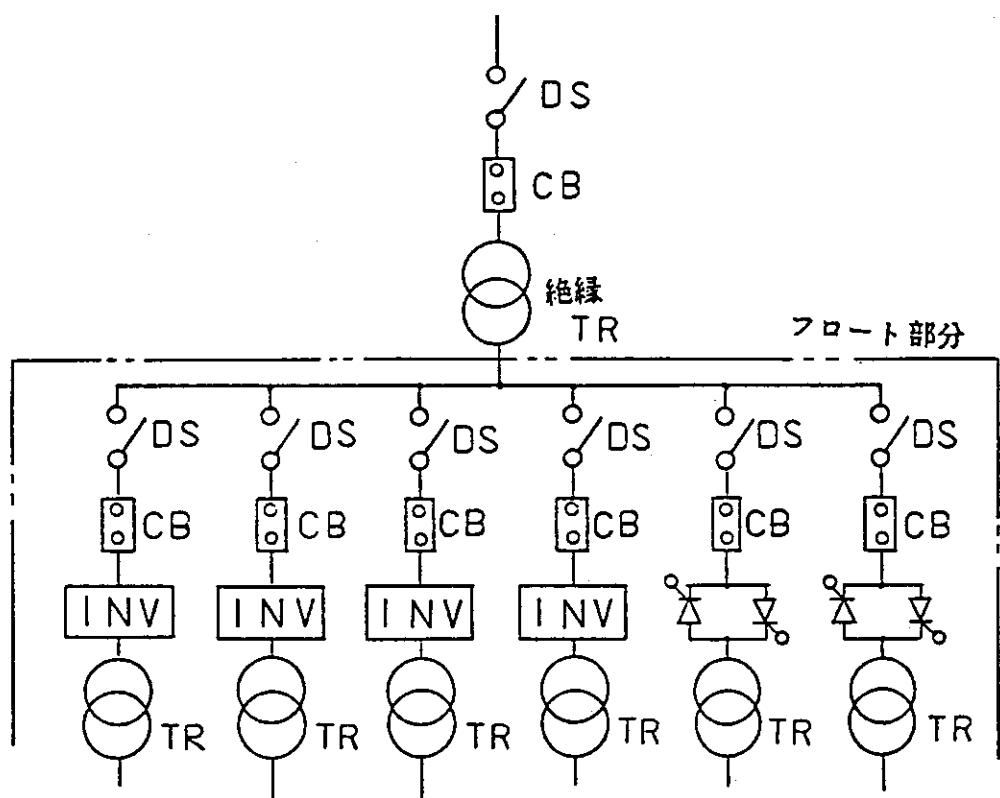


Fig. 3.4-7 Collected Type Insulation

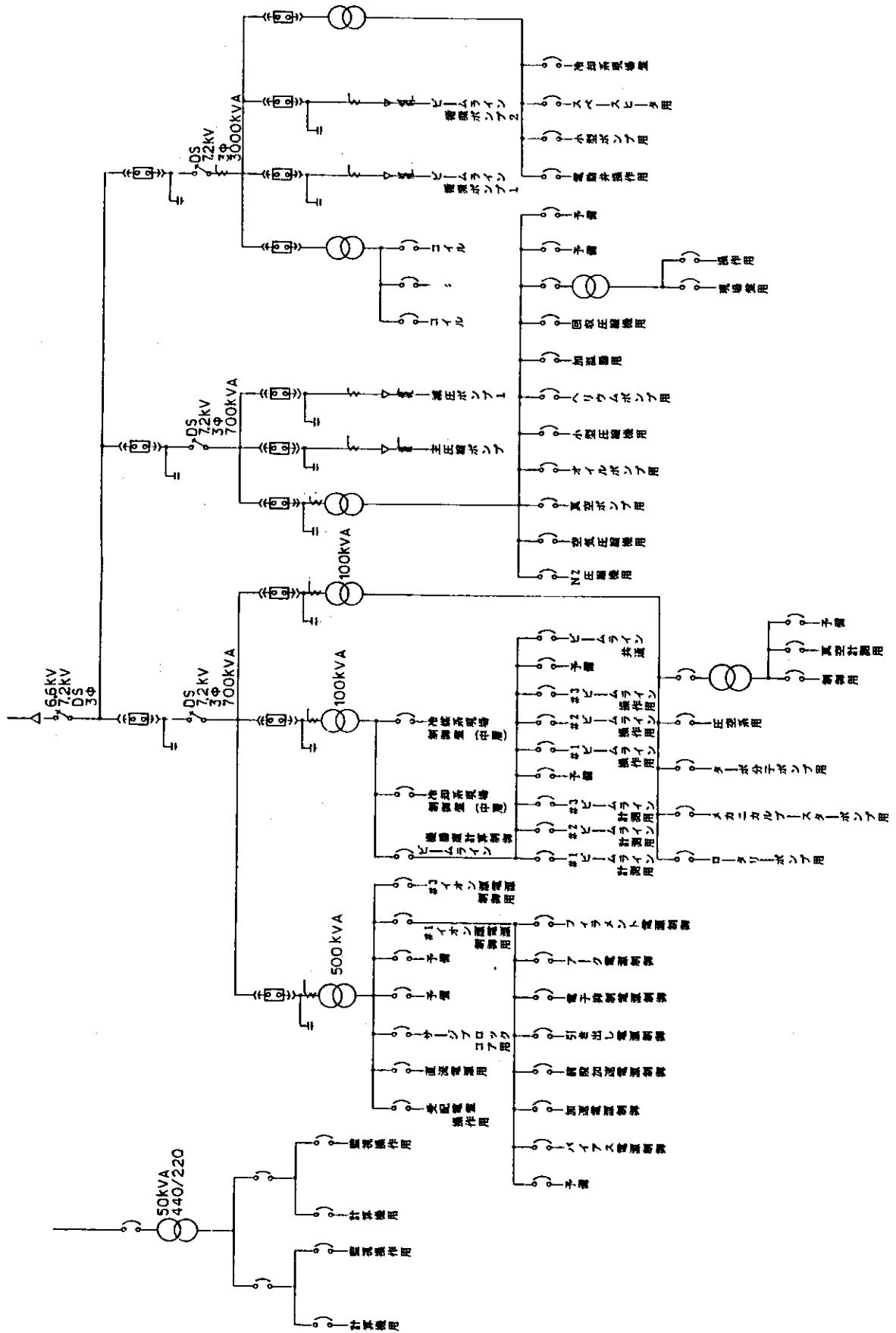


Fig. 3.4-8 One Line Diagram of Ordinary Power

3.5 組立・分解保守

3.5.1 初期組立

ビームラインは、工場で製造及び輸送限界を考慮した上、部分組立され建屋に搬入される。その後、さらに下記4つの構成部分ごとに組立据付される。手順はTable 3.5-1, Fig. 3.5-1に示す。

- ① ドリフト部 (700 ton)
- ② ビームダンプ室 (800 ton)
- ③ 中性化セル (1,000 ton)
- ④ イオン源 (2,000 ton)
- ⑤ 配管、配線

ドリフト部は、本体室で受熱部、真空容器、遮蔽体を組立後、バランスウェイト付台車に取付け本体に挿入する。ドリフト部は、本体の一部となりまた、本体との真空シール溶接があるため、組立工程は本体工程と合せて考える必要がある。また、NBIを据付完了するまでの放射線遮蔽、真空封じ切りのために、中性子シャッタとゲート弁の据付が必要である。

ビームダンプ部は、本体室内で真空容器にビームダンプ等の機器を組込後据付け、その後遮蔽体を取付ける。中性化セルは、長いためと分解保守のため、3分割し本体室内で組立据付する。イオン源部は、イオン源室内で組立据付される。

3.5.2 分解保守

分解保守対象機器とその作業頻度を

ドリフト部受熱板	1回/年
ビームダンプ	1回/年
イオン源	1回/年

とする。Table 3.5-2~4 と Fig. 3.5-2 に分解手順を示す。ビームライン内部の高放射化物を露出した状態での作業は、遠隔作業用マニピュレータ装置等を使う必要があるので極力さける方向で、また、分解移動する手数も極力少なくする方向で検討する必要がある。

分解の中で、最も手間を要するものはドリフト部である。これは、ドリフト部を本体から抜くためには、中性化セル分解とビームダンプ室の移動が必要となるためである。

Table 3.5-1 Assemble Procedure of Beam Line

順序	内 容	治工具等
1-1	ドリフトを本体へさし込み用台車を設置	バランスウェイト付台車
1-2	ドリフト部を台車に取付	
1-3	台車を移動しドリフト部を本体にさし込む 本体とドリフト部を真空シール接続する	
2-1	台車を撤去する	
2-2	ビームダンプ室下部遮蔽体設置	
2-3	中性子シャッタ, ゲート弁, 取合ベローをド リフト部に取付る	
2-4	ビームダンプ室移動用レール設置	レール
2-5	ビームダンプ室をレール上にのせる	
2-6	ビームダンプ室を移動する	
3-1	ビームダンプ室設置する	
3-2	レール撤去	
4-1	三分割した中性化セルの内ビームダンプ室よ りのものを設置する	
4-2	イオン源部及びイオン源よりの中性化セルの 設置	
5-1	ビームダンプ室遮蔽体設置する	
5-2	中性化セルを接続する	

Table 3.5-2 Drift Duct Disassembly

順序	内 容	治 工 具
1-1	ビームダンプ室遮蔽体取外し	
1-2	ビームダンプ室移動用ローラ取付	ローラ
1-3	中性子シャッタ, ゲート弁, ベローを取出す	
1-4	中性化セル三分割の内一部を取り外す	
2-1	ビームダンプ室移動用レール設置	レール
2-2	ビームダンプ室を後方に移動	
3-1	レール撤去	
3-2	ビームダンプ室底面しゃへい体撤去	
3-3	ドリフト部用台車を設置 本体とドリフト部真空シール部の接続を切断	台 車
3-4	ドリフト部と台車を後方に移動	
4-1	ドリフト部に台車撤去後の移動用ローラ取付	ローラ
4-2	移動スペースをあけるため台車を撤去する	
5-1	ドリフト部をさらに後方に移動	
5-2	ドリフト部内壁をひきぬく	

Table 3.5-3 Ion Source Disassemble

順序	内 容	治 工 具
1 - 1	絶縁用 SF ₆ ガスぬき行なう	
2 - 1	遮蔽体後部扉を開く	
2 - 2	イオン源プラズマ室移動用レール設置	レール
3 - 1	プラズマ室を後方に引出す	
4 - 1	プラズマ室を吊り上げ移動	
4 - 2	加速部引出し扉を挿入	引出扉
5 - 1	加速部引出し	
6 - 1	加速部吊上げ移動	

Table 3.5-4 Beam Pump Disassemble

順序	内 容
1 - 1	ビームダンプ部上部遮へい体取外
1 - 2	ビームダンプ吊り出し
1 - 3	カロリメータ吊り出し

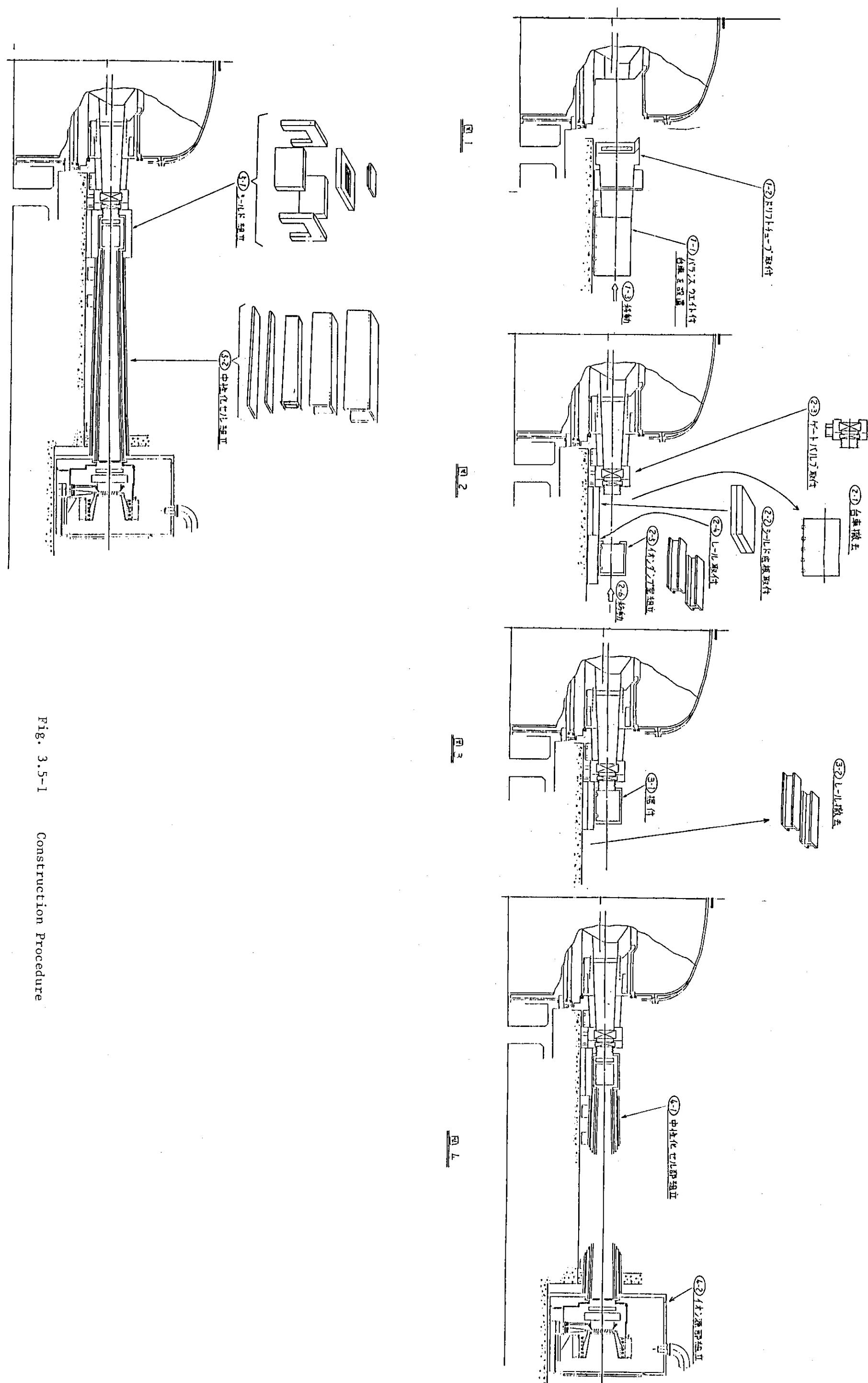
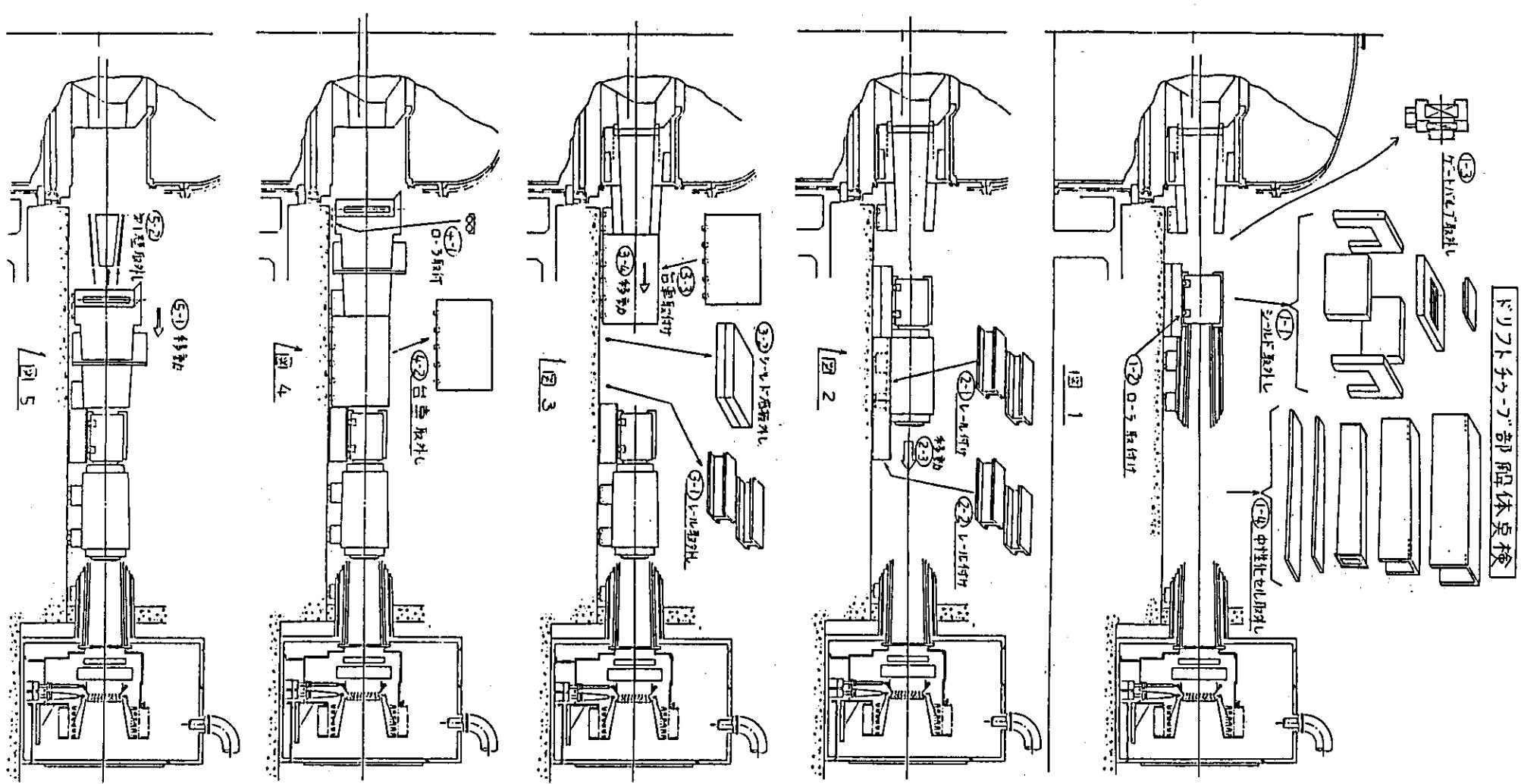
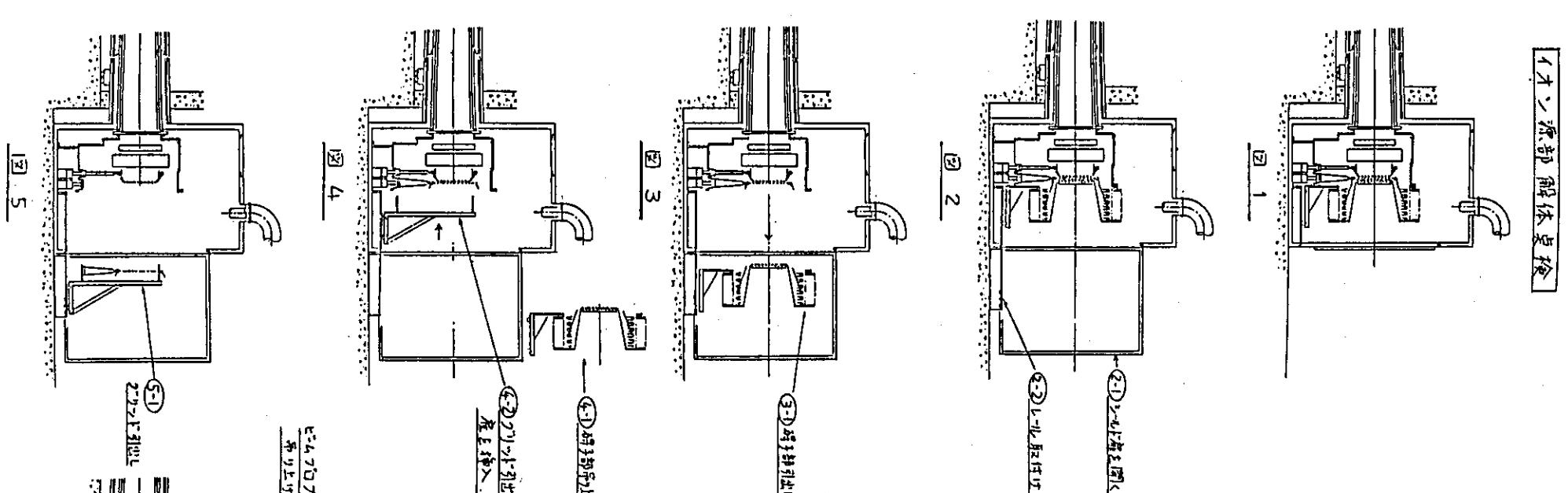


Fig. 3.5-1 Construction Procedure

ドリフトシャーフ部解体検査



才少源部解体要稿



イオーダンノ部解体要検

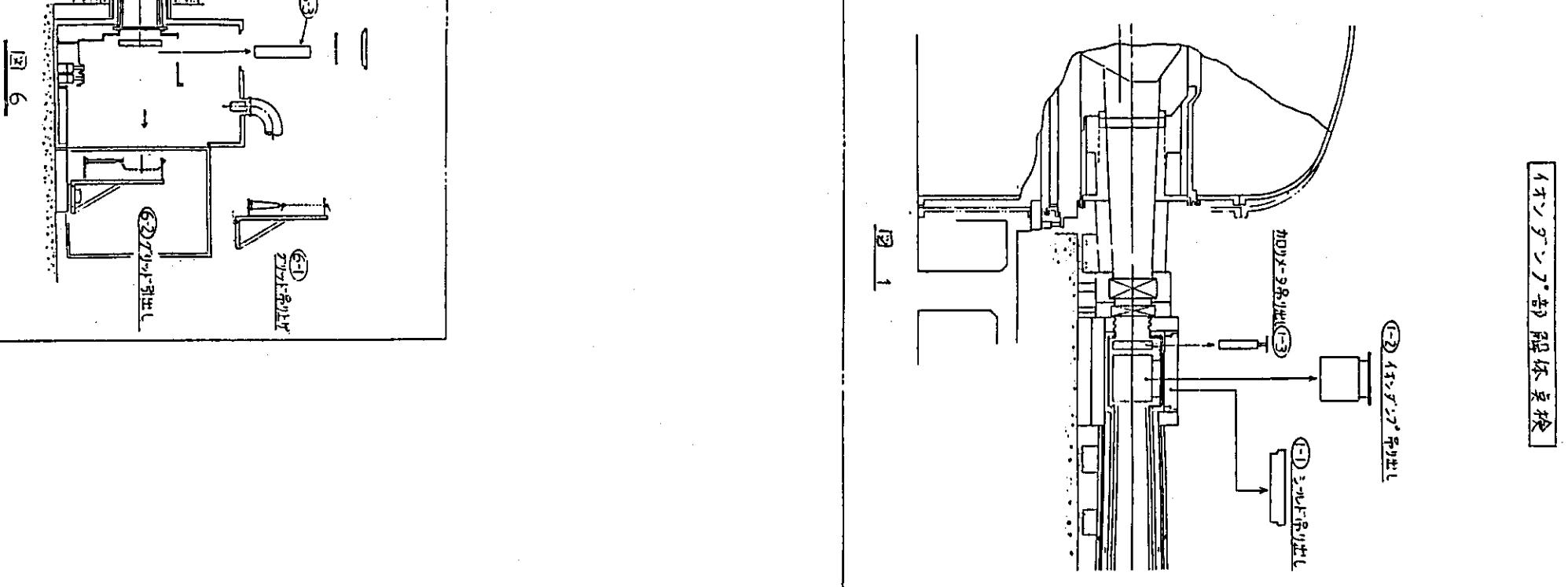


Fig. 3.5-2

Removal Procedure

4. ま　　と　　め

電流駆動・加熱・分布制御に機能させる中性粒子入射装置のビームラインのF E Rへの適合性検討とイオン源電源を含めたシステムの構築を進めた。

ここで対象とした炉体規模（主半径約5m）でのビームラインの幾何学的適合性はほぼ確保できた。これをもとに主要機器構造の具体化を進めビームライン構成機器の概念を明らかにした。ビームダンプ室とイオン源室の中性子束分布計算と運転停止後の τ 線量計算を行い遮蔽構造の評価を行った。さらに分解保守手順の基本案を作成しビームライン構成との整合を図った。

一方500kV 100A級直流電源の構成については、速断性と制御性の面から低圧側にインバータを置いた構成を選択し、他のイオン源電源を含めた構成案を設定した。

F E Rへの適用に当っての今後のシステム検討においてはF E R固有の運転条件を明らかにして機器設計条件を検討してゆく必要がある。保守の観点からは保守周期と構造材放射化（運転時間）、保守手順の整合を図ること、トリチウム処理の観点からは本体トリチウム処理系との整合化と再生周期（排気系容量）の協調を図ること、イオン源ガス循環系との整合等がある。

接線入射のためには適用する炉型とその規模とによって適合性の評価が異ってくる。炉体との取合寸法はイオンビーム性能と遮蔽構造に依存しておりここで前提としたビームライン取合部寸法は大きくは変わらない。この観点から中性粒子入射装置と適合する炉型・規模も見直すことも必要となろう。

謝　　辞

終りに臨み、本報告書関連の業務および報告書作成に当り、ご指導およびご協力を頂いた関係課室各位および協力企業の各位に対し厚くお礼申し上げます。

4. ま　　と　　め

電流駆動・加熱・分布制御に機能させる中性粒子入射装置のビームラインのF E Rへの適合性検討とイオン源電源を含めたシステムの構築を進めた。

ここで対象とした炉体規模（主半径約5m）でのビームラインの幾何学的適合性はほぼ確保できた。これをもとに主要機器構造の具体化を進めビームライン構成機器の概念を明らかにした。ビームダンプ室とイオン源室の中性子束分布計算と運転停止後の τ 線量計算を行い遮蔽構造の評価を行った。さらに分解保守手順の基本案を作成しビームライン構成との整合を図った。

一方500kV 100A級直流電源の構成については、速断性と制御性の面から低圧側にインバータを置いた構成を選択し、他のイオン源電源を含めた構成案を設定した。

F E Rへの適用に当っての今後のシステム検討においてはF E R固有の運転条件を明らかにして機器設計条件を検討してゆく必要がある。保守の観点からは保守周期と構造材放射化（運転時間）、保守手順の整合を図ること、トリチウム処理の観点からは本体トリチウム処理系との整合化と再生周期（排気系容量）の協調を図ること、イオン源ガス循環系との整合等がある。

接線入射のためには適用する炉型とその規模とによって適合性の評価が異ってくる。炉体との取合寸法はイオンビーム性能と遮蔽構造に依存しておりここで前提としたビームライン取合部寸法は大きくは変わらない。この観点から中性粒子入射装置と適合する炉型・規模も見直すことも必要となろう。

謝　　辞

終りに臨み、本報告書関連の業務および報告書作成に当り、ご指導およびご協力を頂いた関係課室各位および協力企業の各位に対し厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本原子力研究所・臨界プラズマ研究部, 準定常核融合実験炉(FER-Q)概念設計報告書
(その2) JAERI-M 85-178 1985年12月
- 2) 日本原子力研究所・臨界プラズマ研究部, 核融合実験炉(FER)概念設計(昭和59, 60年度),
JAERI-M 86-134 1986年11月
- 3) 掘池 寛他, 負イオンビームを用いた500 keV 20MW 中性粒子入射装置の概念設計, JAERI-M-86-064 1986年4月
- 4) 柴田猛順他, 負イオンビームを用いた500 keV, 20MW 実験炉用NBIの概念設計, 核融合研究 56 (1986)
- 5) S. Yamamoto, et al., 11 th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Kyoto, Japan, 13-20 Nov, 1986
- 6) 小林 武他, 核融合次期装置設計(昭和61年度設計報告書) -炉本体構造設計-
JAERI-M 投稿中
- 7) 日本原子力研究所加熱工学第1研究室, JAERI-M 7655 (1978)
- 8) H. Fukumoto, Journal of Nuclear Science and Technology 23 [2] 99~109 Feb. 1986
- 9) W. A. Rhoades, F.R. Mynatt : "The DOT III Two-Dimensional Discrete Ordinates Code", ORNL/TM-4280, Oak Ridge National Laboratory (1973)
- 10) J. Kim, et al., Nuclear Technology Vol. 44 Jul 1979
- 11) K. H. Berkner, et al., "Neutron Production by Neutral Beam Sources" Proc. of the 8 th Symp. on Engineering Problems of Fusion Vol.2 (1979) 857
- 12) M. Matsuoka, et al., JAERI-M 84-112 (1984)
- 13) Walter Praeg (ANL) Fusion Tech. 1984 p.859~864
- 14) J.M. Botterean (Fontenay) Soft 1986 p.383~386