

JAERI-Research  
97-005



定常炉心試験装置の設計研究(第6編)  
— NBI装置 —

1997年2月

栗山正明・牛草健吉・伊藤孝雄・山本正弘・山崎 武  
佐藤藤雄・北井達也・森 活春・菊池 満・永見正幸

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 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 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 株原子力資料サービス

定常炉心試験装置の設計研究（第6編）

－ NBI 装置 －

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

栗山 正明<sup>+</sup>・牛草 健吉・伊藤 孝雄<sup>+</sup>・山本 正弘<sup>+</sup>

山崎 武<sup>+</sup>・佐藤 藤雄<sup>+</sup>・北井 達也・森 活春

菊池 満・永見 正幸

(1997年1月16日受理)

定常炉心試験装置で計画されている NBI 装置についての設計検討を実施した。ここで計画されている NBI 装置には、現 JT-60 で使用されている 100 keV 正イオン NBI 装置の一部及び 500 keV 負イオン NBI 装置を改造して、それぞれ計測用ビーム及び初期プラズマ加熱用として再使用するもの、さらに新たに製作して主加熱用として使用する 750 keV 負イオン NBI 装置がある。これらの 3 つのタイプの NBI 装置について、定常炉心試験装置での技術的適用及び改造あるいは製作における問題点の抽出に力点をおいて検討した。その結果、これらの NBI 装置はいずれも技術的に成立することが可能であることが明らかとなった。

本報告書では、これらの概念検討結果を示すものである。

The Design Study of the JT-60SU Device (No. 6)  
— The Neutral Beam Injection System of JT-60SU —

Masaaki KURIYAMA<sup>+</sup>, Kenkichi USHIGUSA, Takao ITOU<sup>+</sup>  
Masahiro YAMAMOTO<sup>+</sup>, Takeshi YAMAZAKI<sup>+</sup>, Fujio SATO<sup>+</sup>  
Tatsuya KITAI, Katsuhiro MORI, Mitsuru KIKUCHI  
and Masayuki NAGAMI

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

(Received January 16, 1997)

The design study of the neutral beam injection system for JT-60SU device has been progressed. The JT-60SU has planned to use three kind of neutral beam systems: 100 keV positive-ion based NBI for plasma diagnostics, 500 keV negative-ion based NBI for initial plasma heating phase, and 750 keV negative-ion based NBI for main plasma heating device. The first two NBIs are modified from present JT-60U NBI systems, and the third one is newly designed and fabricated. The design studies of these NBIs are concentrated the effort to a technical adaptability to the JT-60SU and an exposure of the technical issues in a modification or a NBI have been determined to the JT-60SU without any serious problems. This report describes the conceptual design results of the neutral beam injection system.

Keywords: 500 keV Negative-ion Based NBI System, 750 keV Negative-ion Based NBI System

---

<sup>+</sup> Department of Fusion Facility

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.NBI装置の概要 .....	1
3.設計条件 .....	1
3.1 受電条件 .....	1
3.2 建家条件 .....	2
4.NBI加熱装置の詳細仕様 .....	6
4.1 正イオンNBI装置 .....	6
4.1.1 構成 .....	6
4.1.2 イオン源 .....	6
4.1.3 配置 .....	6
4.1.4 イオン源用電源 .....	6
4.1.5 正イオンNBI装置の改造項目 .....	7
4.2 500 keV負イオンNBI装置仕様 .....	7
4.2.1 構成 .....	7
4.2.2 イオン源 .....	7
4.2.3 ビームライン .....	8
4.2.4 電源系 .....	12
4.2.5 配置 .....	16
4.2.6 500 keV負イオンNBI装置改造項目 .....	16
4.3 750 keV負イオンNBI装置 .....	16
4.3.1 基本構成 .....	17
4.3.2 750 keV負イオンNBI装置の一般仕様 .....	19
4.3.3 ビームライン詳細仕様 .....	29
5.まとめ .....	133
5.1 既設の100 keV正イオン・接線NBI装置を計測用NBI装置として計画 .....	133
5.2 既設の500 keV負イオンNBI装置をJT-60SU初期実験時に使用する計画 .....	133
5.3 750 keV負イオンNBI装置 .....	133
5.4 NBI電源受電容量 .....	133
謝辞 .....	134
参考文献 .....	134

## Contents

1. Introduction .....	1
2. NBI System .....	1
3. Design Condition .....	1
3.1 Acceptance Condition of Power Supply .....	1
3.2 Condition of Building .....	2
4. Detailed Specification of NBI Heating System .....	6
4.1 Positive-ion Based NBI System .....	6
4.1.1 Composition .....	6
4.1.2 Ion Source .....	6
4.1.3 Arrangement .....	6
4.1.4 Power Supply for Ion Source .....	6
4.1.5 Alteration Issues of Positive-ion Based NBI System .....	7
4.2 500 keV Negative-ion Based NBI System .....	7
4.2.1 Composition .....	7
4.2.2 Ion Source .....	7
4.2.3 Beamline .....	8
4.2.4 Power Supply System .....	12
4.2.5 Arrangement .....	16
4.2.6 Alteration Issues of 500 keV Negative-ion Based NBI System .....	16
4.3 750 keV Negative-ion Based NBI System .....	16
4.3.1 Basic Composition .....	17
4.3.2 General Specification of 750 keV Negative-ion Based NBI System .....	19
4.3.3 Detailed Specification .....	29
5. Summary .....	133
5.1 Plan of Diagnostic NBI System Using Existing 100 keV Positive-ion Based Tangential NBI System .....	133
5.2 Plan of Used of Existing 500 keV Negative-ion Based NBI System in First Stage Experiments of JT-60SU .....	133
5.3 750 keV Negative-ion Based NBI System .....	133
5.4 Electrical Acceptance Capacity of NBI Power Supply .....	133
Acknowledgement .....	134
References .....	134

## 1. はじめに

定常炉心試験装置（JT-60SU）用NBIシステムは、正イオンを使った既設の100keV NBIシステム（4ビームライン）、負イオンを使用した既設500keVNBIシステム及び新規に製作する750keVNBIシステムの計3種類のNBIシステムから構成する。

正イオンNBIシステムは、既設NBIのうちの接線入射ユニットとして使っている4ビームライン／2ビームラインタンクをそのまま再配置してプラズマ加熱及びプラズマ計測用ビームとして使用するものである。

500keV負イオンNBIシステムは、既設の負イオンNBIシステムを一部改造して再配置し、JT-60SUの初期プラズマ加熱実験に使用するものである。本NBIは後述の750keVNBIシステム導入時には撤去する。

750keV負イオンNBIシステムは、新規に製作して据付けるものである。本NBIシステムは、これまでのJT-60用N-NBIの性能を大きくはるかに凌ぐものが要求され、かつ装置サイズは大幅にコンパクトすることになるために、現在開発されているあるいは開発中の最先端の技術を駆使して設計・製作する必要がある。同時にJT-60SUでは、DT実験も視野に入れていることから装置の信頼性を上げてメンテナンスフリーに近い状態でNBI装置を運転することが要求される。

この他にNBIシステム共通の設備として、上記の各NBIシステムに冷却水を供給する一次冷却系、液体ヘリウム、液体窒素を供給する冷媒循環系、ビームラインタンク内をクライオポンプの動作領域まで真空引きするための補助真空排気系、NBIシステム全体を統括制御するための制御系などから構成されている。

## 2. NBI装置の概要

JT-60SU用NBI装置のうち、正イオンNBIシステムは、JT-60Uでの設置位置（P-4及びP-16）で接線NBIとして使用していたものをビームパルス幅を200秒にしてJT-60SUでのP-6及びP-16位置に移動して使用するものである。（図2.1.1参照）

500keV負イオンNBIシステムは、ビームパルス幅を現在の10秒から200秒に伸ばすことにより、JT-60SUでの初期実験に対応するもので、設置場所はJT-60SUでのP-3ポートとなるためにビームラインの移動を行う必要がある。（図2.1.2参照）

750keV負イオンNBIシステムは、JT-60SUの加熱・電流駆動装置である。本装置の全体配置について図2.1.3に示す。

## 3. 設計条件

### 3.1 受電条件

#### 1) 正イオンNBI装置

T-MGまたは、トロイダル系統電力系から受電するものとする。

#### 2) 500keV負イオンNBI装置及び750keV負イオンNBI装置

トロイダル系統電力系から直接受電するものとする。18.0kV、50Hzとする。ただし、ビーム立上げ時、あるいは加速部でのブレークダウン時の急激な負荷変動時にトロイダル系統電力系に影響を及ぼさないようにT-MGをバッファとして使用する。

## 1. はじめに

定常炉心試験装置（JT-60SU）用NBIシステムは、正イオンを使った既設の100keV NBIシステム（4ビームライン）、負イオンを使用した既設500keV NBIシステム及び新規に製作する750keV NBIシステムの計3種類のNBIシステムから構成する。

正イオンNBIシステムは、既設NBIのうちの接線入射ユニットとして使っている4ビームライン／2ビームラインタンクをそのまま再配置してプラズマ加熱及びプラズマ計測用ビームとして使用するものである。

500keV負イオンNBIシステムは、既設の負イオンNBIシステムを一部改造して再配置し、JT-60SUの初期プラズマ加熱実験に使用するものである。本NBIは後述の750keV NBIシステム導入時には撤去する。

750keV負イオンNBIシステムは、新規に製作して据付けるものである。本NBIシステムは、これまでのJT-60用N-NBIの性能を大きくはるかに凌ぐものが要求され、かつ装置サイズは大幅にコンパクトすることになるために、現在開発されているあるいは開発中の最先端の技術を駆使して設計・製作する必要がある。同時にJT-60SUでは、DT実験も視野に入れていることから装置の信頼性を上げてメンテナンスフリーに近い状態でNBI装置を運転することが要求される。

この他にNBIシステム共通の設備として、上記の各NBIシステムに冷却水を供給する一次冷却系、液体ヘリウム、液体窒素を供給する冷媒循環系、ビームラインタンク内をクライオポンプの動作領域まで真空引きするための補助真空排気系、NBIシステム全体を統括制御するための制御系などから構成されている。

## 2. NBI装置の概要

JT-60SU用NBI装置のうち、正イオンNBIシステムは、JT-60Uでの設置位置（P-4及びP-16）で接線NBIとして使用していたものをビームパルス幅を200秒にしてJT-60SUでのP-6及びP-16位置に移動して使用するものである。（図2.1.1参照）

500keV負イオンNBIシステムは、ビームパルス幅を現在の10秒から200秒に伸ばすことにより、JT-60SUでの初期実験に対応するもので、設置場所はJT-60SUでのP-3ポートとなるためにビームラインの移動を行う必要がある。（図2.1.2参照）

750keV負イオンNBIシステムは、JT-60SUの加熱・電流駆動装置である。本装置の全体配置について図2.1.3に示す。

## 3. 設計条件

### 3.1 受電条件

#### 1) 正イオンNBI装置

T-MGまたは、トロイダル系統電力系から受電するものとする。

#### 2) 500keV負イオンNBI装置及び750keV負イオンNBI装置

トロイダル系統電力系から直接受電するものとする。18.0kV、50Hzとする。ただし、ビーム立上げ時、あるいは加速部でのブレークダウン時の急激な負荷変動時にトロイダル系統電力系に影響を及ぼさないようにT-MGをバッファとして使用する。

## 1. はじめに

定常炉心試験装置（JT-60SU）用NBIシステムは、正イオンを使った既設の100keV NBIシステム（4ビームライン）、負イオンを使用した既設500keV NBIシステム及び新規に製作する750keV NBIシステムの計3種類のNBIシステムから構成する。

正イオンNBIシステムは、既設NBIのうちの接線入射ユニットとして使っている4ビームライン／2ビームラインタンクをそのまま再配置してプラズマ加熱及びプラズマ計測用ビームとして使用するものである。

500keV負イオンNBIシステムは、既設の負イオンNBIシステムを一部改造して再配置し、JT-60SUの初期プラズマ加熱実験に使用するものである。本NBIは後述の750keV NBIシステム導入時には撤去する。

750keV負イオンNBIシステムは、新規に製作して据付けるものである。本NBIシステムは、これまでのJT-60用N-NBIの性能を大きくはるかに凌ぐものが要求され、かつ装置サイズは大幅にコンパクトすることになるために、現在開発されているあるいは開発中の最先端の技術を駆使して設計・製作する必要がある。同時にJT-60SUでは、DT実験も視野に入れていることから装置の信頼性を上げてメンテナンスフリーに近い状態でNBI装置を運転することが要求される。

この他にNBIシステム共通の設備として、上記の各NBIシステムに冷却水を供給する一次冷却系、液体ヘリウム、液体窒素を供給する冷媒循環系、ビームラインタンク内をクライオポンプの動作領域まで真空引きするための補助真空排気系、NBIシステム全体を統括制御するための制御系などから構成されている。

## 2. NBI装置の概要

JT-60SU用NBI装置のうち、正イオンNBIシステムは、JT-60Uでの設置位置（P-4及びP-16）で接線NBIとして使用していたものをビームパルス幅を200秒にしてJT-60SUでのP-6及びP-16位置に移動して使用するものである。（図2.1.1参照）

500keV負イオンNBIシステムは、ビームパルス幅を現在の10秒から200秒に伸ばすことにより、JT-60SUでの初期実験に対応するもので、設置場所はJT-60SUでのP-3ポートとなるためにビームラインの移動を行う必要がある。（図2.1.2参照）

750keV負イオンNBIシステムは、JT-60SUの加熱・電流駆動装置である。本装置の全体配置について図2.1.3に示す。

## 3. 設計条件

### 3.1 受電条件

#### 1) 正イオンNBI装置

T-MGまたは、トロイダル系統電力系から受電するものとする。

#### 2) 500keV負イオンNBI装置及び750keV負イオンNBI装置

トロイダル系統電力系から直接受電するものとする。18.0kV、50Hzとする。ただし、ビーム立上げ時、あるいは加速部でのブレークダウン時の急激な負荷変動時にトロイダル系統電力系に影響を及ぼさないようにT-MGをバッファとして使用する。

### 3.2 建家条件

#### 1) 正イオンNBI装置

プラズマ生成電源は、現状のPIG室からRV(II)室に移設して使用する。

加速電源はRV(II)室に設置してあるものの中から使用する。

#### 2) 500keV負イオンNBI装置

基本的には現状のJT-60Uで使用している配置と同じとする。

#### 3) 750keV負イオンNBI装置

JT-60実験棟増築建家及びその西側にNBI電源棟を新設して設置する。

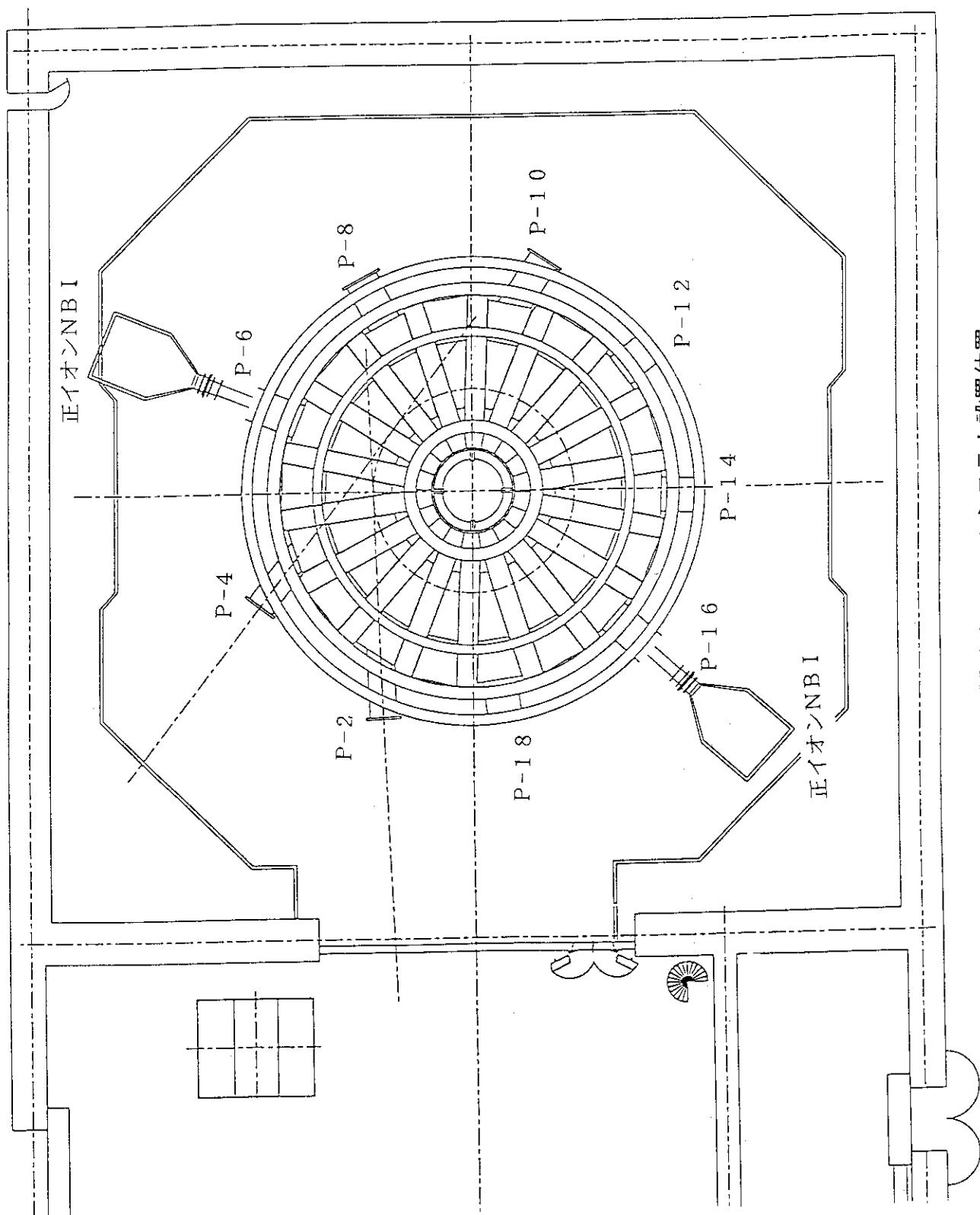


図 2.1.1 正イオンNB1 システム設置位置

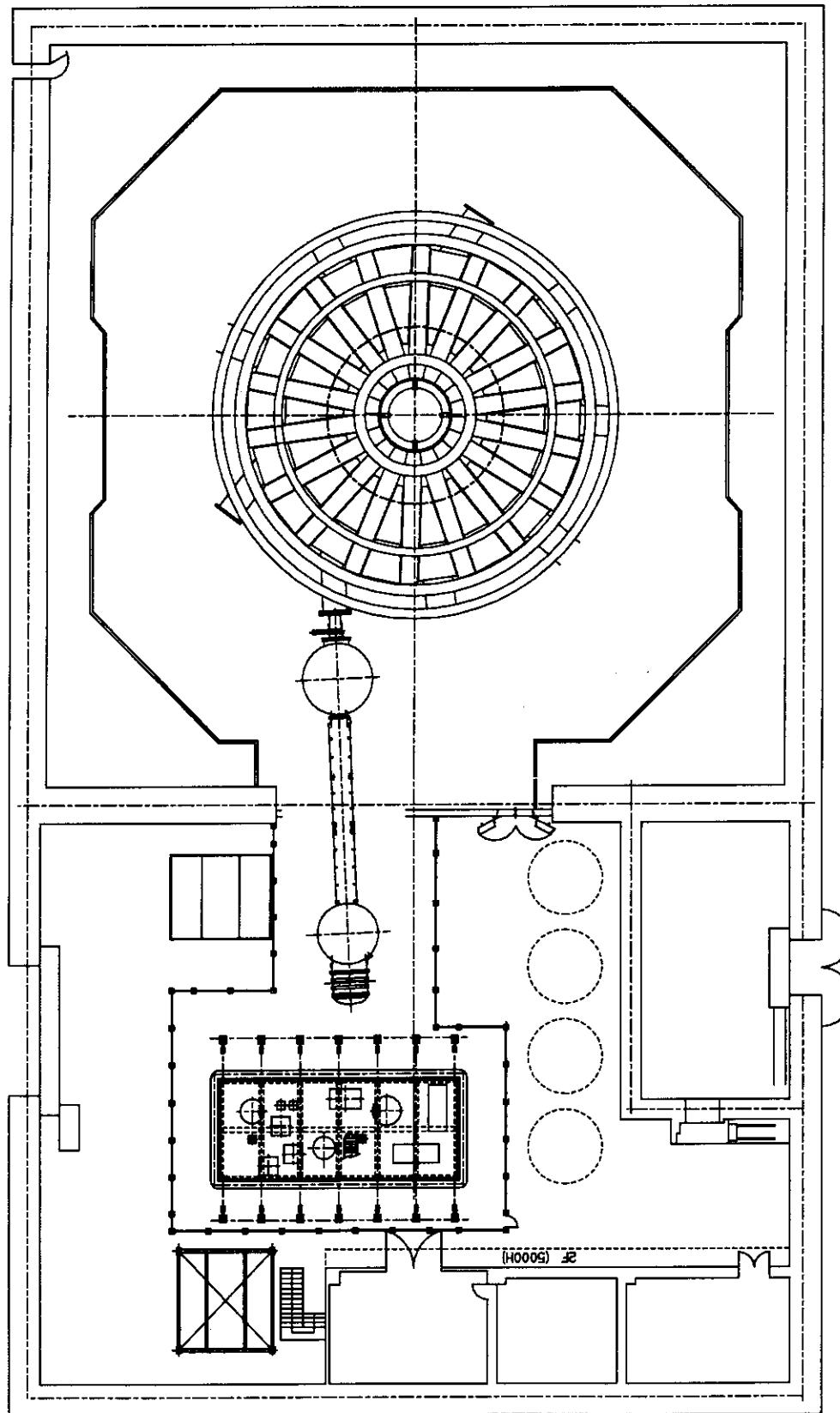


図2.1.2 500 keV負イオンNB1システム設置位置

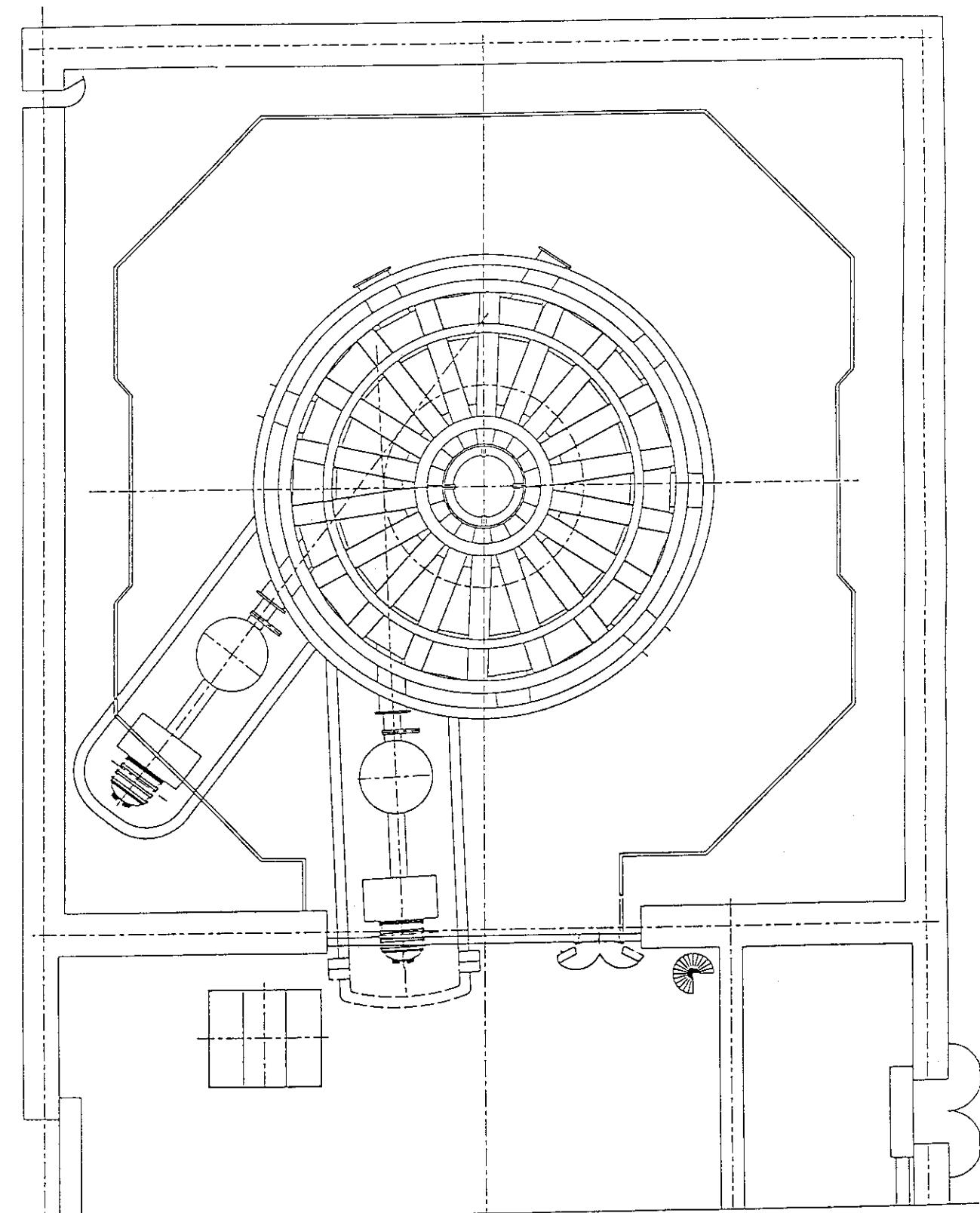


図2.1.3 750 keV負イオンNBS全体配置

## 4. NBI 加熱装置の詳細仕様

### 4.1 正イオンNBI装置

#### 4.1.1 構成

正イオンNBI装置は、JT-60Uでの14基の正イオンNBIのうちの接線入射用として使用していた4ユニットを再配置して使用するものである。

2ユニットを1つのビームラインタンクに収納してあり、2カ所から入射する。

#### 4.1.2 イオン源

イオン源は、最大120keV、35A/Dビーム、200秒の性能を持つもので、イオン生成部、加速部から構成される。イオン源性能は、以下のとおりである。

加速電圧	: 120 kV 最大
加速電流	: 35 A
ビームパルス時間	: 200秒
ビーム発散	: 1度
ビーム成分比	: 90 : 7 : 3 ( $D^+$ : $D_2^+$ : $D_3^+$ )
加速方式	: 静電2段加速方式

イオン源は、角度調整機構によりビーム軸を+0.2度の範囲で調整できる。

#### 4.1.3 配置

正イオンNBI装置のビームライン構造は2台のイオン源が装着されたビームラインは、各イオン源に対応する中性化セル、残留イオンビームを偏向するための偏向磁石、偏向された残留イオンを処理するためのビームダンプ、JT-60SUからの漏洩磁場を打消すための打消しコイル、中性ビームのパワー測定あるいはイオン源調整時のターゲットとして使用するカロリメータ、イオン源、中性化セル及びビームダンプから出るガスを排気するためのクライオポンプ、ビームリミタ、大口径ゲート弁等から構成されている。

1台のビームラインタンクに2基のビームラインが収納されている。

従来の正イオンNBI装置は、JT-60UのP-4及びP-16に接線方向入射として設置されているが、JT-60SUではP-6及びP-16に垂直方向入射として設置する。このビームラインの設置位置変更に伴い、配管用ヤグラ及び各種配管/配線の移設が必要となる。

#### 4.1.4 イオン源用電源

イオン源用電源は、フィラメント電源、アーク電源のプラズマ生成電源、及びビーム加速のための加速電源から構成されている。各電源の容量は以下のとおりである。

	電圧	電流	パルス幅	デューティサイクル
1) 加速電源 :	120 kV	94 A	10秒	1/30
2) 減速電源 :	-2 kV	+2 A	0秒	1/30
3) アーク電源 :	120 V	1200 A × 2	11秒	
4) フィラメント電源 :	15 V	2400 A × 2	16秒	
5) 偏向磁石電源 :	90 V	2300 A	13秒	
6) 打消コイル電源:	160 V	1200 A	13秒	

この電源を200秒ビームパルスに対応するように下記の容量に改造する。

	電圧	電流	パルス幅	デューティサイクル
1) 加速電源 :	120 kV	94 A	200秒	1/18
2) 減速電源 :	-2 kV	+2 A	200秒	1/18
3) アーク電源 :	120 V	1200 A × 2	201秒	
4) フィラメント電源 :	15 V	2400 A × 2	206秒	
5) 偏向磁石電源 :	90 V	2300 A	203秒	

## 6) 打消コイル電源: 160V 1200A 203秒

加速電源及びプラズマ生成用電源からなる14ユニットのイオン源用電源は、従来、NBIトランセラード、加熱電源棟、RV(Ⅰ)、RV(Ⅱ)、PIG室に設置されているが、このうちRV(Ⅰ)室、及びPIG室はJT-60SUでは使用できなくなるために、4ユニット分の加速電源及びプラズマ生成電源はRV(Ⅱ)室に収納することになる。このために高電圧ケーブルの移設及びSF<sub>6</sub>ガス絶縁ダクトのRV(Ⅱ)室～本体室への移設が必要となる。また、NBIトランセラード、加熱電源棟内の機器で不要となる機器(10ユニット分)を廃棄して残り4ユニット分の電源を再配列するものである。

## 4.1.5 正イオンNBI装置の改造項目

正イオンNBI装置電源系の主な改造項目を以下に示す。

## 加速電源

GTOスイッチのフィンを変更する。

ACサイリスタスイッチのフィンを風冷に変更する。スタック周辺の構造を変更する。

直流リアクトル(DCL-A)を新製する。

ダミー抵抗(R-A5)を新製する。

水冷抵抗(WR-A)を新製する。

変圧整流器を自冷からファン4個の風冷にする。

降圧変圧器を自冷からファン2個の風冷にすると共にレジエータを新製する。

## 減速電源

リアクトル(DCL-D)の周囲温度が30度以下になるように温度管理する。

ダミー抵抗(R-D4)の直並列数を増やす。

変圧器(IT-D)を新製する。

## 低圧閉鎖配電盤

周囲温度が30度以下になるように温度管理する。

## 第二高電位テーブル

フィラメント電源用絶縁変圧器を新製する。

フィラメント電源用直流リアクトルを新製する。

アーク電源直流リアクトルを新製する。

アーク電源GTO回路のフィンを交換する。

## サージ抑制リアクトル(DCL-A2)

リアクトルを新製する。

## サージ抑制抵抗(R-A6)

直並列数を増やす。

## 偏向磁石電源

ダイオード、サイリスタスタックを工場に引き取り、冷却フィンを追加する。

導体、サポートを新製する。

## 打消コイル電源

ダイオード、サイリスタスタックを工場に引き取り、冷却フィンを追加する。

相関リアクトル、入力端子を新製する。

## 4.2 500keV負イオンNBI装置仕様

## 4.2.1 構成

500keV負イオンNBI装置は、ビーム出力は現在のままで10MWとし、パルス幅を現状の10秒から200秒に変更して再取付けするものである。

## 4.2.2 イオン源

イオン源は重水素または水素プラズマから負イオンのみを加速してビームとして引き出すもので、

セシウム添加型体積生成方式の負イオン生成部、電子を分離し負イオンのみを引き出す引出し部からの負イオンを最終エネルギーの 500 keVまで加速する加速部からなる。1ビームラインに2基のイオン源が装着される。

イオン源性能は以下のとおりである。

負イオン生成方式 : セシウム添加型体積生成方式

ビーム種 : 重水素及び水素の負イオン

ビームエネルギー : 500 keV

ビーム電流 : 重水素 2.2 A

: 水素 2.2 A

パルス幅 : 200 秒

ビーム発散角 : 5 mrad 以下

ビーム焦点距離 : 23.66 m

図4.2.1にイオン源の鳥瞰図を示す。

#### 4.2.3 ビームライン

ビームラインは、加速されたイオンビームを中性ビームに変換してトーラスに入射するとともに、中性化されなかった残留イオンビームを処理するためのものでイオン源タンク部、中性化セル部、イオンダンプタンク部、及びNB1ポート部からなる。

イオン源タンク部には、イオン源及び角度調整装置が取付けられるとともに、イオン源電極部の真空度を良くしてストリッピング損失を小さくするため大容量クライオポンプが設置される。

また、JT-60からの漏洩磁場を遮蔽してイオンビームの偏向を防止するためにイオン源タンク部は2重の磁気シールド構造となっている。

中性化セル部は長さ約10mの角筒形構造物で、各イオン源に対応して設けられている。中性化セル部の中間部には必要なガス線密度を得るためにガス導入孔が設置されている。セル内壁はビーム衝突等による熱負荷に晒されるため水冷される。中性化セル全体は、イオン源タンク同様2重磁気シールドで漏洩磁場から遮蔽されている。

中性化セル出口からは負イオンビーム出力の約20%に相当する残留負イオンビームD<sup>-</sup>/H<sup>-</sup>及び同じく負イオンビーム出力の約20%に相当する正イオンビームD<sup>+</sup>/H<sup>+</sup>が出てくる。これらの残留イオンビームは、JT-60からの漏洩磁場及びこれを補正するためにイオンダンプタンクに設けられた偏向コイルによる磁場によって、負イオンビーム及び正イオンビームは各々左右逆方向に曲げられ、左右両側に設置されるイオンダンプに衝突して熱化する。イオンダンプタンクには上記の偏向コイル、負イオン/正イオン用のイオンダンプの他、中性ビームのパワー測定/イオン源調整運転時のターゲットとして使用するカロリメータ、光プロファイルモニタ、大容量クライオポンプ、仕切板等が設けられる。

NB1ポート部は、JT-60とNB1を真空的に切り離すためのゲート弁、電気的・熱的に切り離すための絶縁リング付きの接続ベローズ、NB1ポート等から構成される。また、NB1ポート内壁には中性粒子ビーム及び再電離イオンビームの直撃を防止するための保護板が設置される。本ポートは150°Cまでベーキング可能な構造である。

図4.2.2及び図4.2.3にビームライン全体構造を示す。

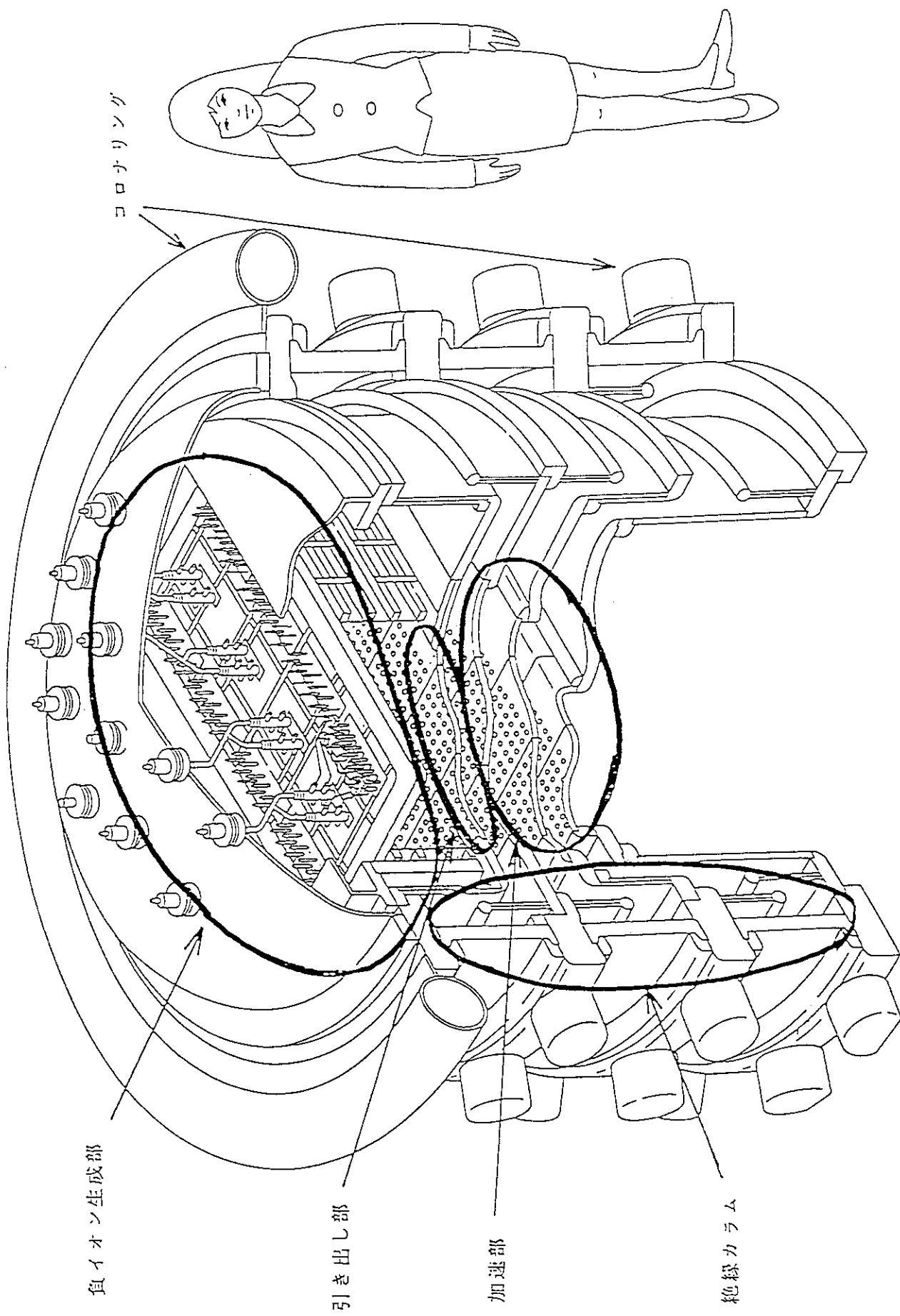


図4.2.1 500 keV負イオン源鳥瞰図

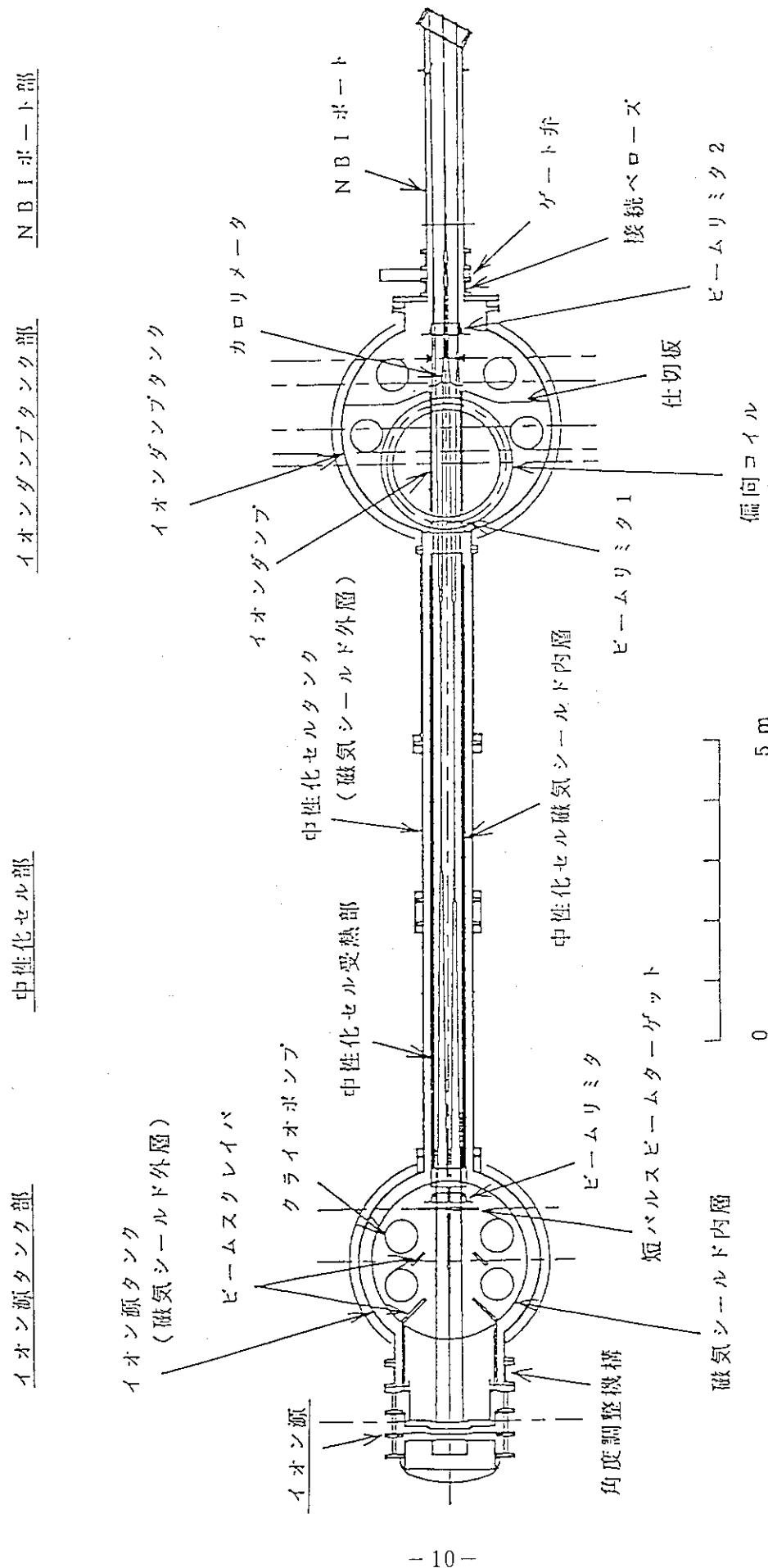


図4.2.2 500 keV負イオンNB1装置ビームライン平面図

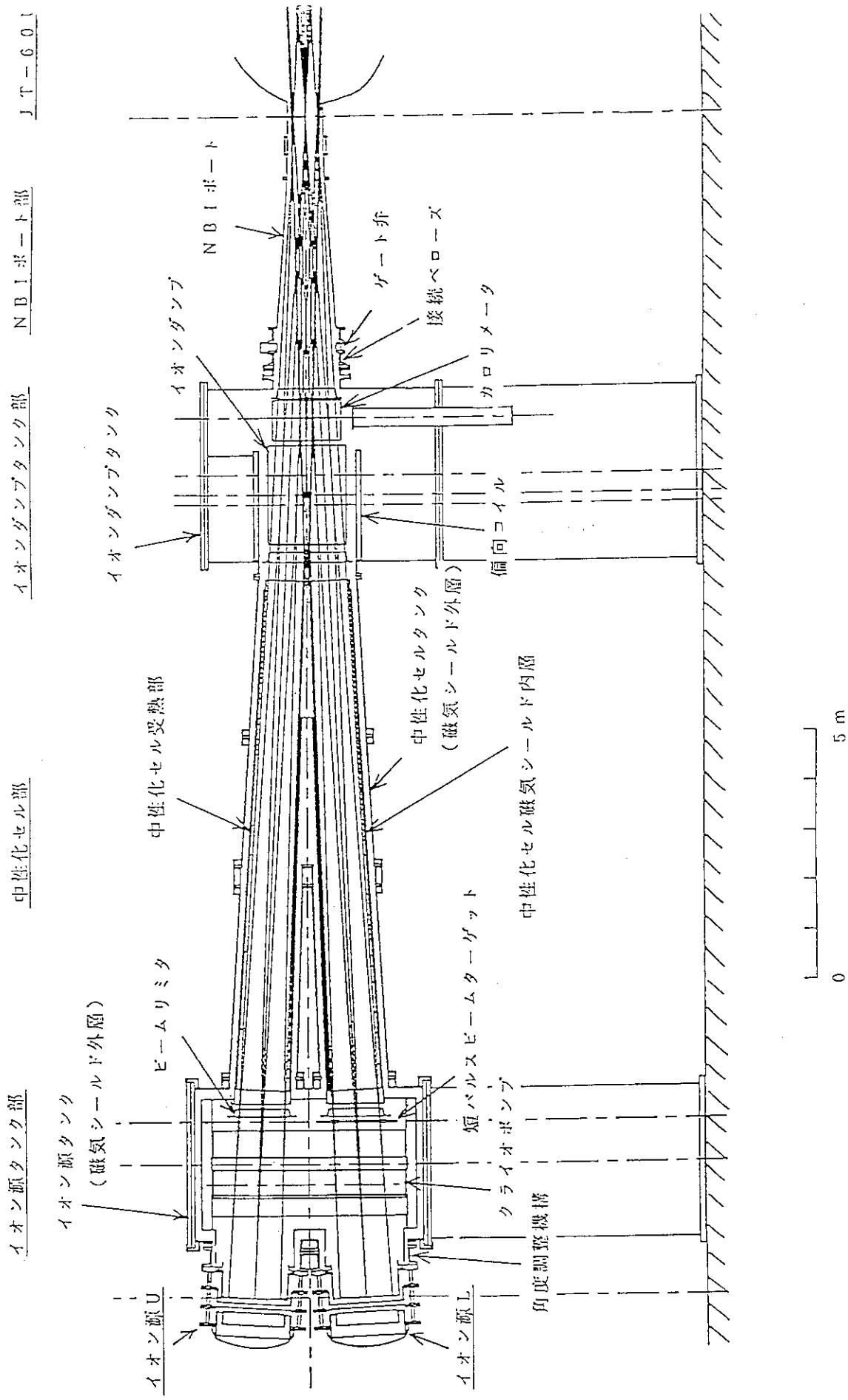


図 4.2.3 500 keV 負イオン NBI 装置ビームライン正面図

#### 4.2.4 電源系

電源系はイオン源用電源（偏向コイル電源及びガス導入系電源含む）及び受配電設備から構成されている。イオン源用電源は負イオンを生成するための負イオン生成部電源、負イオンをプラズマから引き出すと同時に電子を分離処理するための引出し部電源、負イオンを500 keVまで加速するための加速電源、SF<sub>6</sub>ガス絶縁のケーブルダクト、サージブロッカ等から構成されている。

(図4.2.4)

負イオン生成部電源は、フィラメント電源、アーク電源、バイアス電源、PGフィルタ電源から構成されている。アーク電源は、アーキングに対して高速遮断できる機能を持っている。バイアス電源は、プラズマ電極をアノードに対して正の電位にバイアスし、負イオンと一緒に引き出される電子を抑制するためのものである。PGフィルタ電源はプラズマ電極自身に電流を流してフィルタ磁場を作るとともに電子偏向用磁場をつくるためのものである。

引出し部電源は、引出し電源より構成され、最大10 keVまで負イオンを加速するためのものである。引出し電源は負イオンを引き出すと共に電子を処理するための電源である。本電源により加速部のビーム光学に最適なエミッタスを持つ負イオンビームを発生する。

加速電源は、10 keVで加速部へ入射された負イオンビームを最終的に500 keVまで加速するための電源である。加速電源は3つの直流電源を3段に積み重ねたもので、各々-492 kV、-360 kV、-180 kVの電位を供給するものである。加速電源も引出し電源と同様にインバータによる交流側スイッチング方式を採用しており、ブレーカダウン時の遮断時間は200 μs以下である。

イオン源の引出し部及び加速部電極間においてはかなりの頻度で放電破壊が発生し、これが原因となってイオン源用電源に向かってサージが伝播する。このサージによって電源が破損するのを防止するために本電源の適切な箇所にサージブロッカが設けられている。これらのイオン源用電源はビーム加速をパルス的に行うためにパルス運転される。このため定電圧制御、定電流制御のための特別の配慮が施されている。また本電源には各構成機器に付属する安全設備等も含まれている。

偏向コイル電源はビームラインの残留イオン偏向部に設けた1対の空心コイルに給電し、漏洩磁場を補正して残留イオンの軌道を制御するためのものである。

受配電設備及び加速電源を収納するため、負イオンNB1電源棟がJT-60実験棟に併設されている。JT-60実験棟内のイオン源への給電はSF<sub>6</sub>ガスダクトをとおして行う。

現在のイオン源用電源は、10秒/デューティサイクル1/30のビームパルスに対応するように以下に示す電源容量をもっている。

##### 1) 負イオン生成電源

フィラメント電源	:	15V / 9.6 kA / 16 sec × 2台
アーク電源	:	150V / 5 kA / 11 sec × 2台
バイアス電源	:	10V / 1.6 kA / 11 sec × 2台
PGフィルター電源	:	10V / 10 kA / 11 sec × 2台
2) 引出し電源	:	-10 kV / 80 A / 10 sec × 2台
3) 加速電源	:	-490 kV / 64 A / 10 sec × 1台

この電源を200秒ビームパルスに対応するように下記の容量に改造すること。

##### 1) 負イオン生成電源

フィラメント電源	:	15V / 9.6 kA / 206 sec × 2台
アーク電源	:	150V / 5 kA / 201 sec × 2台
バイアス電源	:	10V / 1.6 kA / 201 sec × 2台
PGフィルター電源	:	10V / 10 kA / 201 sec × 2台
2) 引出し電源	:	-10 kV / 80 A / 200 sec × 2台
3) 加速電源	:	-490 kV / 64 A / 200 sec × 1台

これらのイオン源用電源を駆動するための電力は、275 kV系統系から受電する。加速電源の立ち上がり時間は0.1秒以下、また加速部ブレークダウンでの加速電流遮断時間は200マイクロ秒以下である。ビーム立上げ及びブレークダウン時の電力系統への影響は1%以下とし、このためには既設のトロイダルMG又は超伝導ストレージリングを使用する。

電源配置図を図4.2.5に示す。

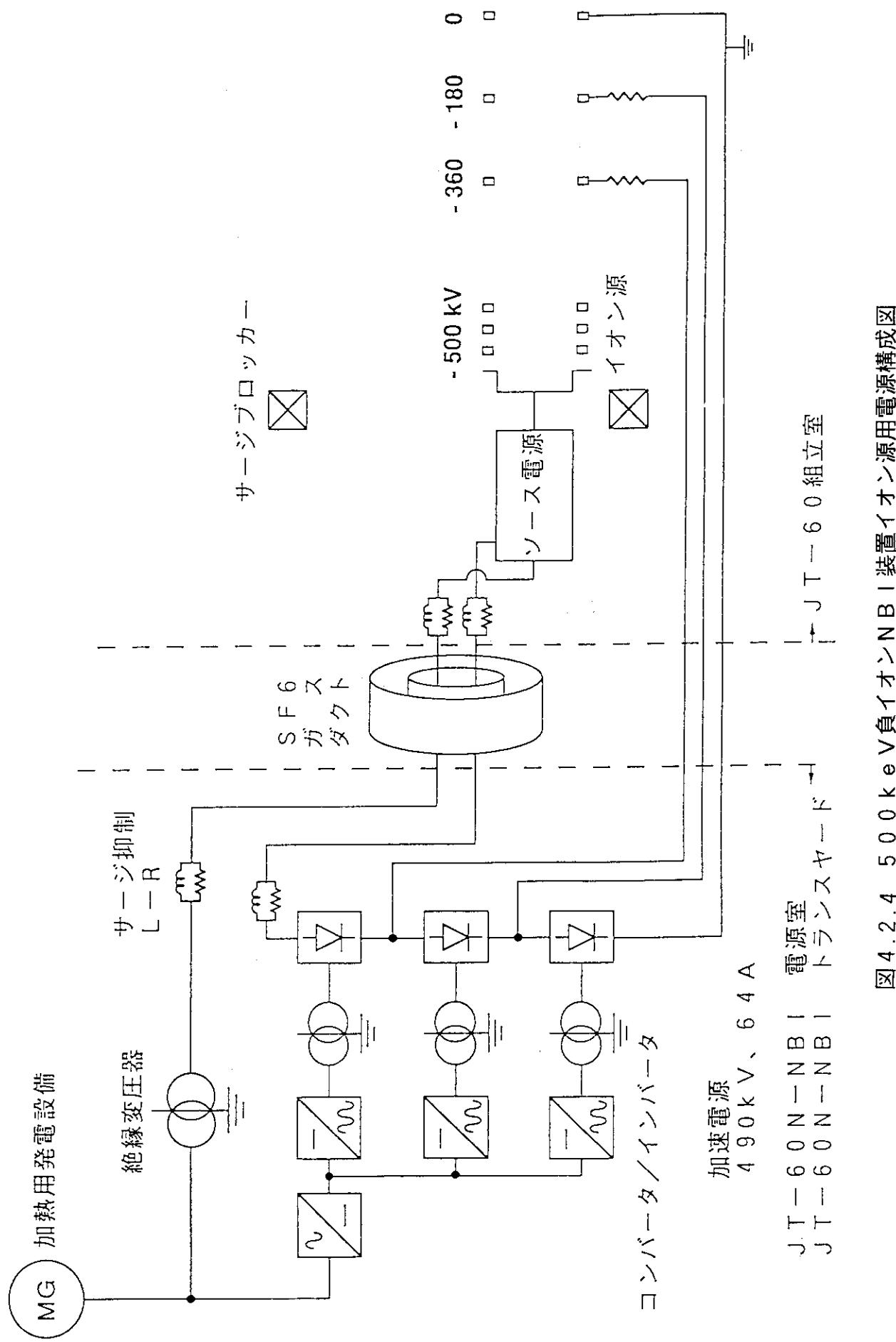


図4.2.4 500 keV負イオンNB1装置イオン源用電源構成図

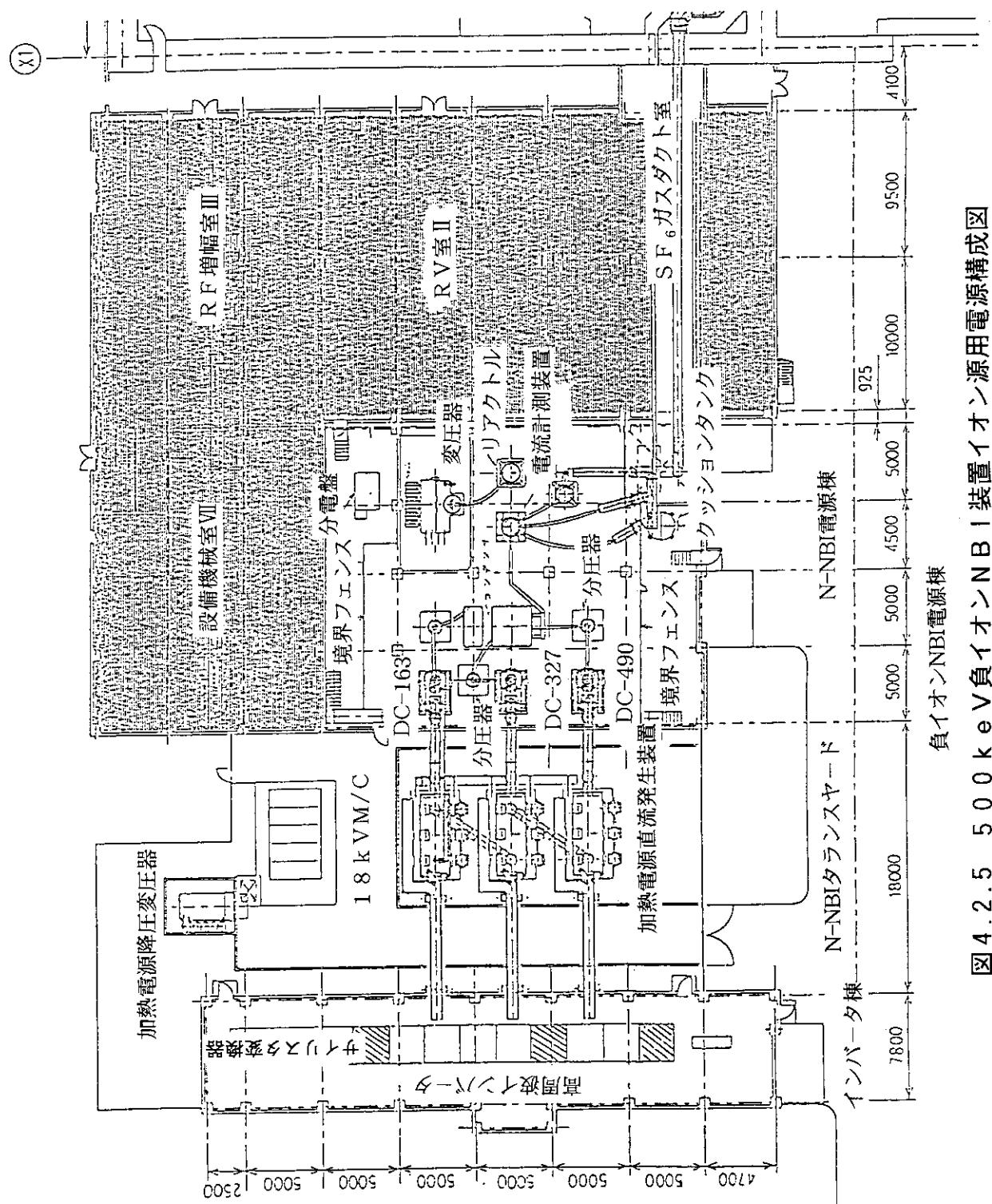


図 4.2.5 500 keV 負イオン NBI 装置イオン源用電源構成図  
(N-NBI 電源室、トランシスヤード、インバータ棟)

#### 4.2.5 配置

##### 1) ビームライン配置

J T - 6 0 S Uでの負イオンN B I装置は、P - 3セクションに接線方向に入射する配位で据付けられている。(図2.1.2参照のこと。)

##### 2) イオン源用電源配置

負イオンN B I用電源は、負イオン生成電源については組立室に、加速電源については負イオンN B I電源棟、トランスマニホールド、インバータ棟に設置されている。

#### 4.2.6 5 0 0 k e V負イオンN B I装置改造項目

5 0 0 k e V負イオンN B I装置電源系の主な改造項目を以下に示す。

##### 加速電源コンバータ

コンバータ盤の冷却ファン台数を増やし、冷却能力を増強する。又、制御回路もこれに合わせて改造する。主回路P Nブスサイズを大きくする。リアクトル盤は、相間リアクトルを含め盤を新製する。外形寸法は既設より大きくなる。改造は、盤を工場に引き取って実施する。

##### 加速電源インバータ

A Cリアクトルを新製する。

##### フィラメント電源

新規製作する。

##### アーク電源

主M C C B、A Cサイリスタ、主変圧器、整流器、G T O回路を交換する。

##### バイアス電源

主M C C B、サイリスタ用ヒューズ、整流器を交換する。

##### P G フィルタ電源

主M C C B、A Cサイリスタ、整流器を交換する。

##### 引出電源

主M C C B、A Cサイリスタ、主変圧器、整流器を交換する。ダミー抵抗の直並列数を変更する。

##### 加速電源降圧変圧器

試験データより、既設の4倍の能力を持つ放熱器が必要であるが、既設品はこの様な放熱器を取り付けることは外形寸法からいって不可能であるため、新規製作する。新規変圧器の概略寸法は、  
5 3 0 0 W × 4 5 0 0 D × 4 8 0 0 Hとなる。

#### 4.3 7 5 0 k e V負イオンN B I装置

本N B I装置は、プラズマセルを使用したときに6 0 M W / 2ビームラインの中性ビームパワーを入射できるように設計するもので、当初のガスセル使用時は、4 4 M W / 2ビームラインの入射パワーとする。ガスセルでの中性化効率は6 0 %、プラズマセルで8 5 %とする。また、設計は重水素で最大6 0 M W入射できる様に最適化するものとし、水素の場合はこのため多少運転上の制約を受けてもやむを得ないものとする。

7 5 0 k e V - N B I開発の最も主要な課題は2 0 ~ 3 0 Aにのぼるビームの高エネルギー加速であるが、大電流加速の問題は別の機会に扱うこととし、この報告では主としてビームラインの基本構成に主眼をおいて議論する。ビームラインのコンパクト化に検討の力点をおいた。

以下の各節ではビームラインの規模とパワー効率等を試算し、システムの現実的な規模を探るとともに、プラズマセル採用によるパワー効率の改善にも注目した。

本概念設計は実現の可能性があるN B Iシステムに対し、プラズマセルを組み込んだ最初の設計例になる。

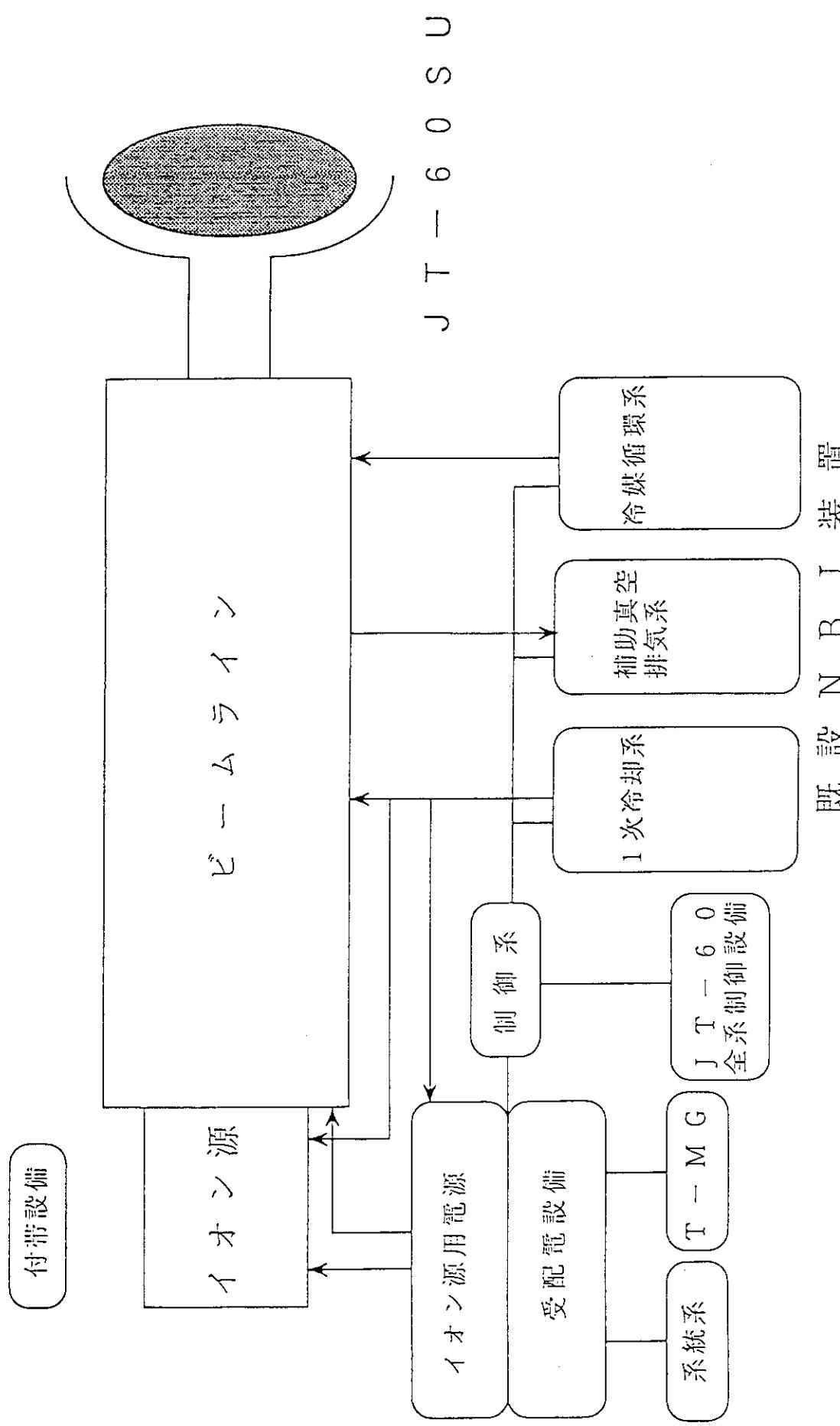
#### 4.3.1 基本構成

本装置は大きく分けて以下のブロックより構成される。

##### [装置基本構成]

イオン源	: 2台/ビームライン
ビームライン	: 2基 (正方向接線入射)
電源系	: 2式 (イオン源用電源及び受配電設備)
補機設備	: 1式 (1次冷却系、補助真空排気系及び冷媒循環系)
制御系	: 1式
付帯設備	: 1式

本装置の基本構成を分類ブロック図として図4.3.1に示す。イオン源とイオン源用電源は負イオンビームを発生するためのものである。ビームラインや補器設備は、負イオンビームを中性粒子ビームに変換してプラズマに入射するとともに、残留イオン処理やガス排気を行うためのものである。



#### 4.3.2 750 keV 負イオンNB1装置の一般仕様

##### 4.3.2.1 イオン源

イオン源は重水素又は水素プラズマから負イオンのみを加速してビームとして引き出すもので、セシウム添加型体積生成方式の負イオン生成部、電子を分離し負イオンのみを引き出す引出し部、引出し部からの負イオンを最終エネルギーの750 keVまで加速する加速部、それらを電気的に絶縁し支持する750 kVの絶縁カラムからなる。1ビームラインに2基のイオン源が装着される。イオン源各電極への冷却水の供給、プラズマ生成のための作動ガス導入の後、各電極に電圧を印加し負イオンビームを発生する。

イオン源は現在も改良研究を進めているが、その目標とする性能は以下のとおりである。

負イオン生成方式	: セシウム添加型体積生成方式
ビーム種	: 重水素及び水素の負イオン
ビームエネルギー	: 750 keV
ビーム電流	: 重水素 34 A : 水素 34 A
パルス幅	: 200 秒 (1時間)
デューティサイクル	: 1/18
ビーム発散角	: 5 mrad 以下
ビーム焦点距離	: 12 m
入射パワー	: 44 MW (ガスセル使用時) / (60 MW) (プラズマセル使用時)
ビームライン	: 2基
イオン源数	: 2台/ビームライン
トータスへのガス流入量	: 0.1 Pa · m <sup>3</sup> /s

各負イオン生成部には最大10 Pa · m<sup>3</sup>/sの重水素又は水素ガスが導入され、タンクステンフィラメントと陽極電位のアーキチャンバ壁との間でアーキ放電が行なわれる。発生したプラズマ中では、セシウムとフィルタ磁場の効果により負イオンが生成される。また、負イオン電流密度と電子電流密度を最適化する目的で、プラズマ電極とアーキチャンバ間にバイアス電圧が印加される。

引出し部は3枚の多孔型電極からなり、プラズマ中で生成された負イオンが引き出される。負イオンと同時に引き出される電子は横磁場によって曲げ、電極に衝突させて処理し、加速部には入らないように工夫されている。負イオンは、この横磁場によってその軌道が乱されることなく最大10 keVまで加速され加速部に入射される。電子が衝突・処理される電極は、熱負荷条件が局所的に0.4 kW/cm<sup>2</sup>以上になる可能性があり、その除熱構造には十分考慮が払われる。

加速部では、引出し部からのビームを4段加速により750 keVまで加速する。各段には最大200 kVの電圧が印加される。それぞれの段の電界の強さを制御することによって発生したレンズ作用によりビームは収束され、発散角(1/eの半値幅)が5 mradという非常に収束性の良いビームが得られる。

引出し部と加速部が収納される絶縁カラムは、セラミック材料(高耐電圧アルミナ)で製作されており、-750 kV、DCの絶縁耐圧があるとともに、負イオン生成部、引出し部、加速部、及びそれらへの配線、配管の重量に耐える十分な機械的強度を有する。

イオン源各部は、高い熱負荷に晒されるため、水冷構造となっている。イオン源電極を冷却するための冷却水は、イオン源タンクの近傍に設けられた冷却水ヘッダから分岐され、電気絶縁パイプによって各部へ給水される。また、負イオン生成部と引出し部の電源ケーブルはイオン源近傍に設けられた高電位テーブル上の電流導入部から、加速部の電源ケーブルは直列3段構成よりなる加速電源の各段出力端子から直接各電極に接続される。また、JT-60SUからの漏洩磁場を遮蔽するために、負イオン生成部、引出し部、加速部は、イオン源タンク磁気シールド(超伝導体によるマイスター効果により遮蔽)で覆われる。イオン源部は、周囲との絶縁を確保するためにSF<sub>6</sub>ガスタンク内に収納される。

#### 4.3.2.2 ビームライン

ビームラインは、加速されたイオンビームを中性ビームに変換してトーラスに入射するとともに、中性化されなかった残留イオンビームを処理するためのものでイオン源タンク部、中性化セル部、イオンダンプタンク部、及びNBIポート部からなる。

イオン源タンクには、イオン源及び角度調整装置が取付けられるとともに、イオン源電極部の真空度を良くしてストリッピング損失を小さくするため大容量クライオポンプが設置される。またJT-60SUからの漏洩磁場を遮蔽してイオンビームの偏向を防止するためにイオン源タンク部はマイスター効果を利用した磁気シールドが施される。イオン源タンクでは、クライオポンプと磁気シールドの両方の役割を超伝導パネルが果たすものとする。

中性化セルは長さ約3mの角筒形構造物で、各イオン源セグメントに対応して設けられている。中性化セルは、当初ガスセルを使用することとし、プラズマセルの開発後はプラズマセルに改造するものとする。このため、設計では両中性化セルに対応できるものとした。ガスセル使用時は、中性化セルの中間部には必要なガス線密度を得るためにガス導入孔が設置される。セル内壁はコンダクタンスを小さくするために液体窒素冷却された高温超伝導材で覆われており、この超伝導体はマイスター効果による中性化セル部磁気シールドも兼ねている。セル内壁はビーム衝突等による熱負荷に晒されないようにするため、ビームリミターを設けて超伝導体に、直接、ビームが入射しないようにする。またこのビームリミターは水冷される。

中性化セル出口からは、負イオンビーム出力の約20%（ガスセル使用時）／7%（プラズマセル使用時）に相当する残留負イオンビームD<sup>-</sup>／H<sup>-</sup>、及び同じく負イオンビーム出力の約20%（ガスセル使用時）／7%（プラズマセル使用時）に相当する正イオンビームD<sup>+</sup>／H<sup>+</sup>が出てくる。これらの残留イオンビームは、JT-60SUからの漏洩磁場及びこれを補正するためにイオンダンプタンクに設けられた偏向コイルによる磁場によって、負イオンビーム及び正イオンビームは各々左右逆方向に曲げられ、左右両側に設置されるイオンダンプに衝突して熱化する。イオンダンプタンクには上記の偏向コイル、負イオン／正イオン用のイオンダンプの他、中性ビームのパワー測定／イオン源調整運転時のターゲットとして使用するカロリメータ、光プロファイルモニタ、大容量クライオポンプ、仕切板等が設けられる。

NBIポート部は、JT-60とNBIを真空的に切り離すためのゲート弁、電気的・熱的に切り離すための絶縁リング付きの接続ペローズ、NBIポート等から構成される。また、NBIポート内壁には中性粒子ビーム及び再電離イオンビームの直撃を防止するための保護板が設置される。また、ベーキング150度まで可能な構造とする。

図4.3.2にビームライン全体構造を示す。

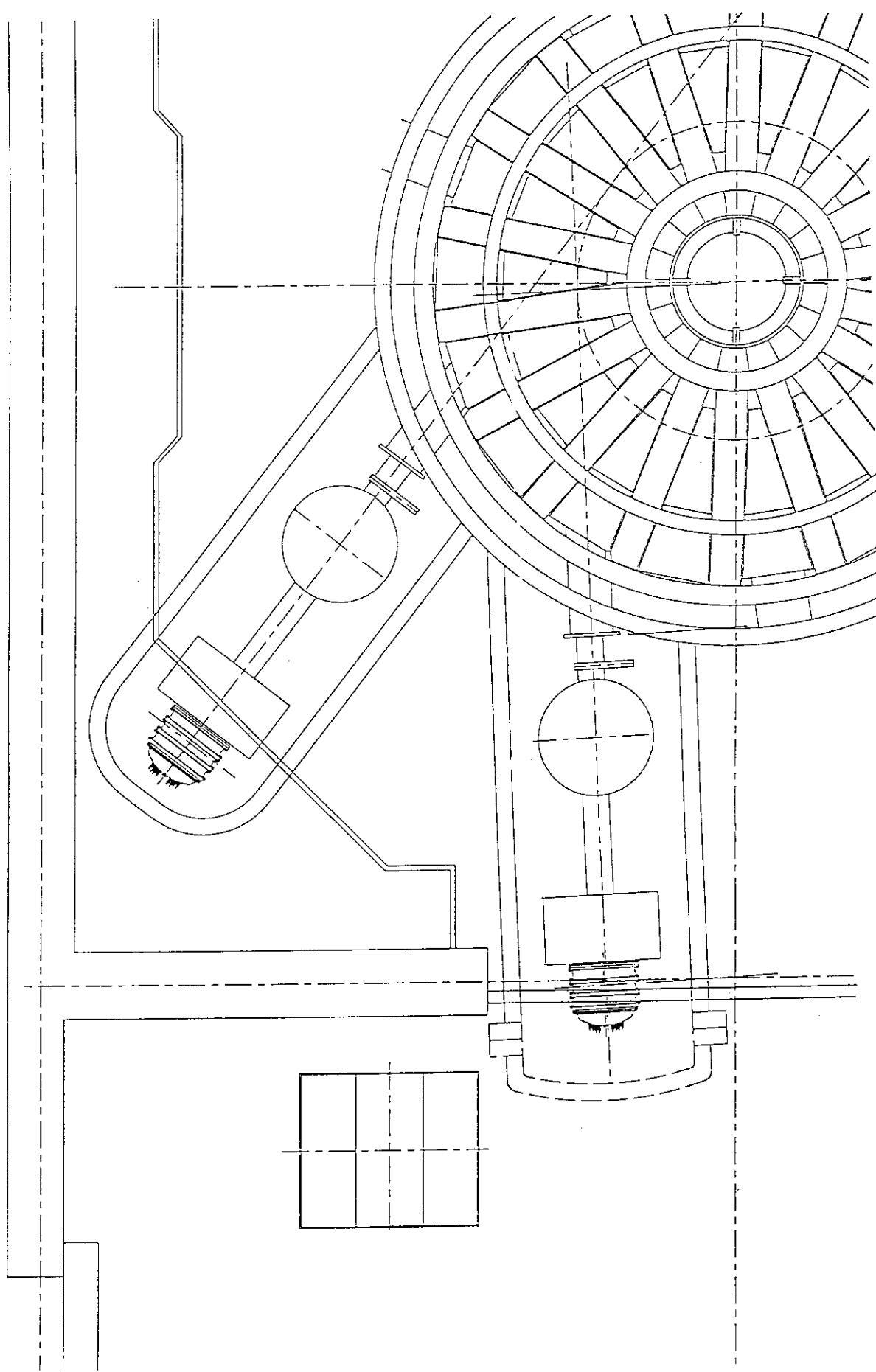


図4.3.2 750 keV負イオンNB I 装置ビームライン平面図

#### 4.3.2.3 電源系

電源系はイオン源用電源（偏向コイル電源及びガス導入系含む）及び受配電設備から構成されている。イオン源用電源は負イオンを生成するための負イオン生成部電源、負イオンをプラズマから引き出すと同時に電子を分離処理するための引出し部電源、負イオンを750 keVまで加速するための加速電源、SF<sub>6</sub>ガス絶縁のケーブルダクト、サージプロッカ等から構成される。

（図4.3.3及び図4.3.4）

負イオン生成部電源は、フィラメント電源、アーク電源、バイアス電源、PGフィルタ電源から構成され、一式SF<sub>6</sub>ガス絶縁タンク内に収納される。アーク電源は、アーキングに対して高速遮断できる機能を持っている。バイアス電源は、プラズマ電極をアノードに対して正の電位にバイアスし、負イオンと一緒に引き出される電子を抑制するためのものである。PGフィルタ電源はプラズマ電極自身に電流を流してフィルタ磁場を作るとともに電子偏向用磁場をつくるためのものである。

引出し部電源は、引出し電源より構成され、最大10 keVまで負イオンを加速するためのものである。引出し電源は負イオンを引き出すと共に電子を処理するための電源である。本電源により加速部のビーム光学に最適なエミッタスを持つ負イオンビームを発生する。引き出し電源も負イオン生成電源同様にガス絶縁タンク内に収納される。

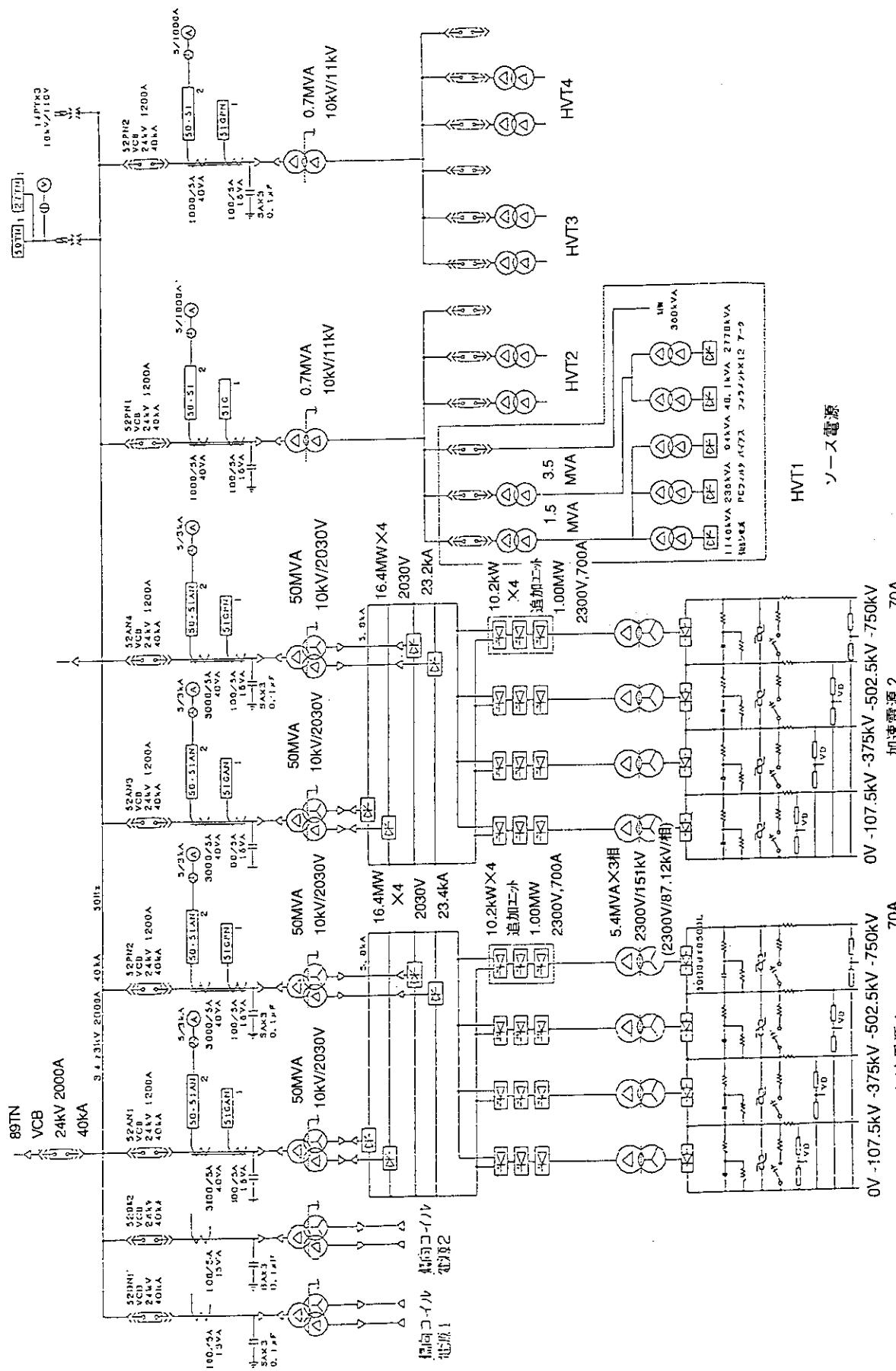
加速電源は、10 keVで加速部へ入射された負イオンビームを最終的に750 keVまで加速するための電源である。加速電源は4つの直流電源を4段に積み重ねたもので、各々-750 kV、-560 kV、-370 kV、-190 kVの電位を供給するものである。加速電源のOFF時の電力変動により、系統側に擾乱を与えないような受電変動補償回路を検討した。補償回路図を図4.3.5に示す。加速BDが2台以上同時に発生した場合はインバータOFF、GTOスイッチONとする。このことにより、抵抗で電力を消費させる。再立ち上げ時には、インバータをONすると共にGTOスイッチをOFFする。

バイパス回路のGTOスイッチ及び抵抗器の定格は、系統の有効電力ステップ変化許容値に応じて決定する必要がある。定格が非現実的に大きくなる場合には、加速BD発生後一定期間は運転を休止する等のインターロックを設けることで対処することが考えられる。加速電源も引出し電源と同様にインバータによる交流側スイッチング方式を採用しており、ブレーカダウン時の遮断時間は200 μs以下とする。

イオン源の引出し部及び加速部電極間においてはかなりの頻度で放電破壊が発生し、これが原因となってイオン源用電源に向かってサージが伝播する。このサージによって電源が破損するのを防止するために本電源の適切な箇所にサージプロッカが設けられている。ここにサージ解析等価回路案を示す。今後、イオン源への最大サージ電流許容値、許容エネルギー流入量によりフィルターCR定数を最適化する必要がある。又、ガスダクトのルートを決定し、回路定数を確定した後、解析を実施してサージ抑制機器の定格を決定する必要がある。現在判明している加速電源絶縁変圧器、ソース電源絶縁変圧器の浮遊静電容量は、図4.3.6、図4.3.7に示すように評価した。これらのイオン源用電源はビーム加速をパルス的に行うためにパルス運転される。このため定電圧制御、定電流制御のための特別の配慮が施されている。また本電源には各構成機器に付属する安全設備等も含まれている。

偏向コイル電源はビームラインの残留イオン偏向部に設けた1対の空心コイルに給電し、漏洩磁場を補正して残留イオンの軌道を制御するためのものである。

受配電設備及び加速電源を収納するため、既設の負イオンNB1電源棟を撤去して新たにJT-60実験棟に併設する。JT-60実験棟内のイオン源への給電はSF<sub>6</sub>ガスダクトを通して行う。



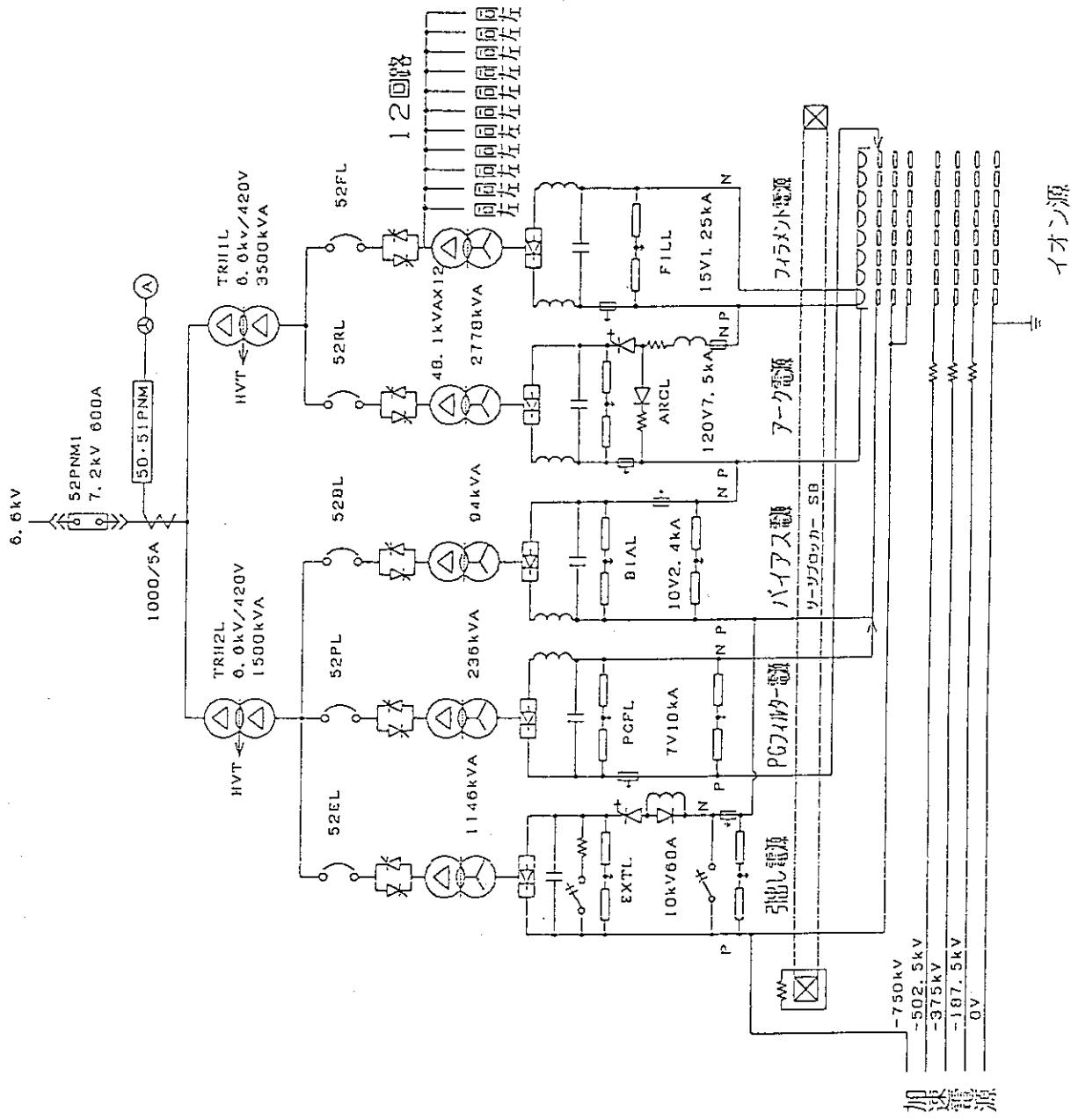


図4.3.4 750 kV 負イオンNB1装置イオン源用電源構成図

イオノ源

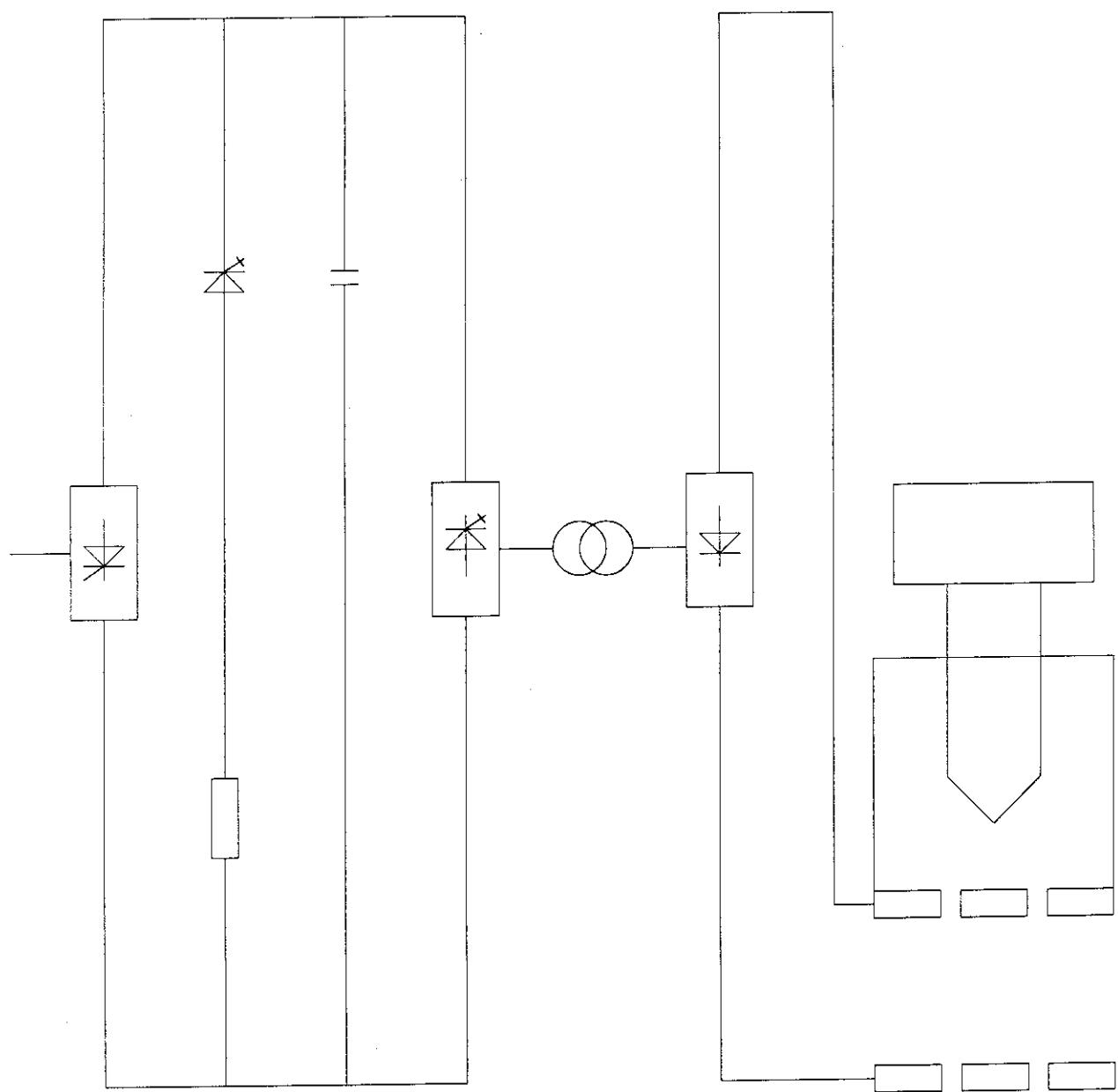
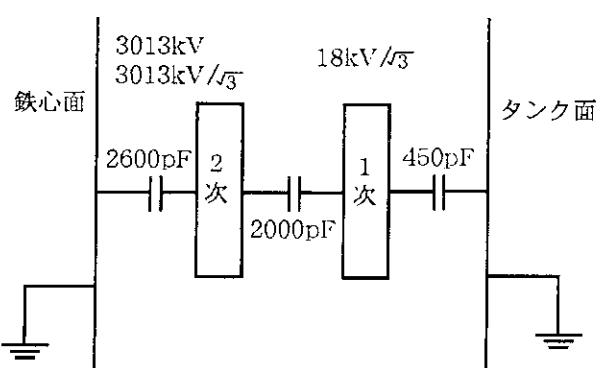
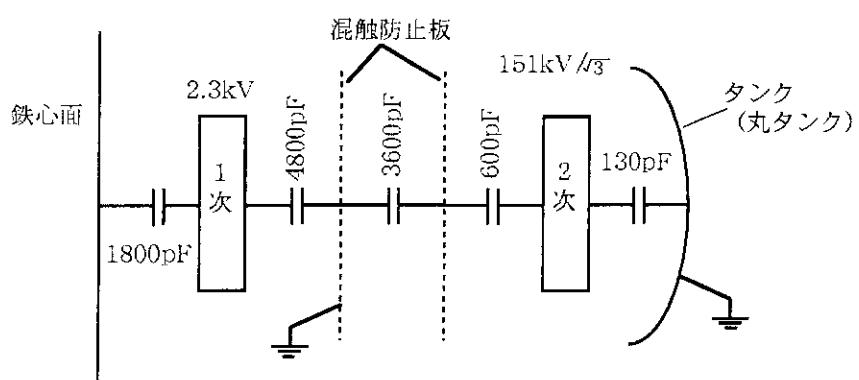


図 4.3.5 受電変動補償回路



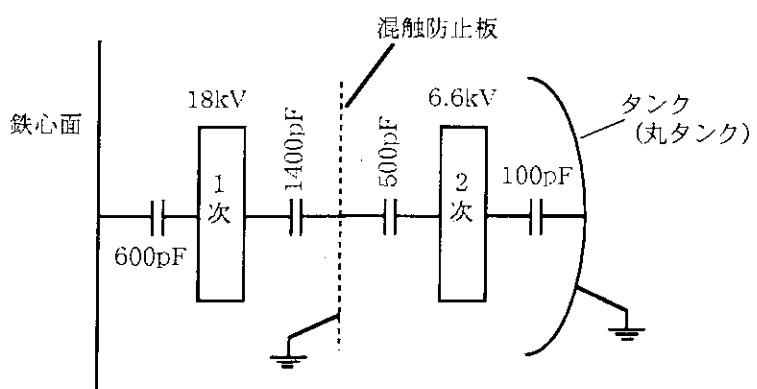
加速電源降圧用



\* : 対鉄心、巻線間については3相分を考慮

加速電源昇圧用

図 4.3.6 変圧器静電容量 (9.9 MVA, 16.2 MVA)



ソース電源用

図 4.3.7 変圧器静電容量 (5.5 MVA)

#### 4.3.2.4 1次冷却系

冷却対象機器は、イオン源、中性化セル、イオンダンプ、カロリメータ、ビームリミタ及び電源設備の一部等であり、冷却水は既設NBI装置の1次冷却系より供給する系統と放射化物含有となる本体室冷却系に分離する。冷却水ヘッダーは冷却対象機器の近傍に設置され、水温計測、流量計測、圧力計測等がこのヘッダー内に取付けられている。

冷却系の故障は機器の重大損傷につながる恐れが大きいので冷却系統のインターロックには十分な注意が払われる。

#### 4.3.2.5 補助真空排気系

補助真空排気系は、クライオポンプの作動領域までNBIのタンク内を真空引きすること、クライオポンプ再生時の再生したガスを真空排気すること、及び短パルス運転時のイオン源導入ガスを排気することの3つの役割を担っており、ターボ分子ポンプ(TMP)、メカニカルブースタポンプ(MBP)、ロータリポンプ(RP)、トラップ等により構成されている。この中でTMP下流側のMBP、RP等の背圧系統及び粗引系統は、NBI装置共通の補助真空排気系の設備を利用するものである。

#### 4.3.2.6 冷媒循環系

冷媒循環系は、イオン源タンク、イオンダンプタンクに取付けられているクライオポンプに液体ヘリウム、液体窒素を供給するための設備である。NBI装置共通のNBI装置の冷媒循環系閉ループの中に組み込まれて上記冷媒の供給を受けるとともに、負イオンNBI装置のクライオポンプに冷媒を供給する。このためNBI装置全体のクライオポンプとの整合性をとって設計を進める必要がある。

#### 4.3.2.7 制御系

制御系は、電源系、ビームライン等の制御、データ収集・処理を行うものである。本NBI装置は超高電圧装置であると同時に放射線を発生するためにその制御は安全を第一義としている。また一方では本システムは実験設備であるために運転・制御ロジック等の改良、改造が容易なフレキシビリティーのある制御系でなければならない。本制御系は計算機を介した運転が可能なものである。

#### 4.3.2.8 付帯設備

##### ①安全確保のための設備

750 keV負イオンNBI装置を安全に運転かつ点検保守できるように、安全確保のための設備には十分な配慮が必要である。安全確保のための設備には、水素ガス検知器、高所作業のための安全設備、水分検知器、安全標識、点検通路、安全柵、接地装置、非常停止ボタン、X線モニタが含まれる。

##### ②放射線対策設備

ビームラインから放出される放射線としては、イオンダンプ、カロリメータからのD-D反応による中性子、加速された電子と銅板との衝突によるX線、D-D反応により生成されるトリチウム、中性子照射されたビームライン機器、液体窒素、空気等からの誘導放射能等がある。またJT-60SUからは中性子、ガンマ線等の放射線が発生する。

これらの放射線は、JT-60SUの真空容器またはNBIビームラインタンク、クライオスタット及び本体室・組立室のコンクリート壁によって遮蔽され、建家外には漏れ出ない対策が施される。NBIビームライン周囲にはクライオスタットが設けられており、イオン源部のSF<sub>6</sub>ガス絶縁タンクは、このNBI用クライオスタット構造の一部を利用するものである。

電子回路、有機材料等で放射線により性能、品質が劣化する恐れのある機器の保護対策も施される。

#### 4.3.2.9 750 keV負イオンNBI装置の全体配置

750 keV負イオンNBI装置を設置する那珂研究所の建家配置及び概略レイアウトをそれぞれ図4.3.8に示す。負イオンNBI装置のうち、イオン源及びビームラインはJT-60実験棟本体室に、イオン源用電源はNBI電源増設エリアに新設される750 keV負イオンNBI電源棟に、また制御設備はJT-60中央制御室及び計算機室に設置される。

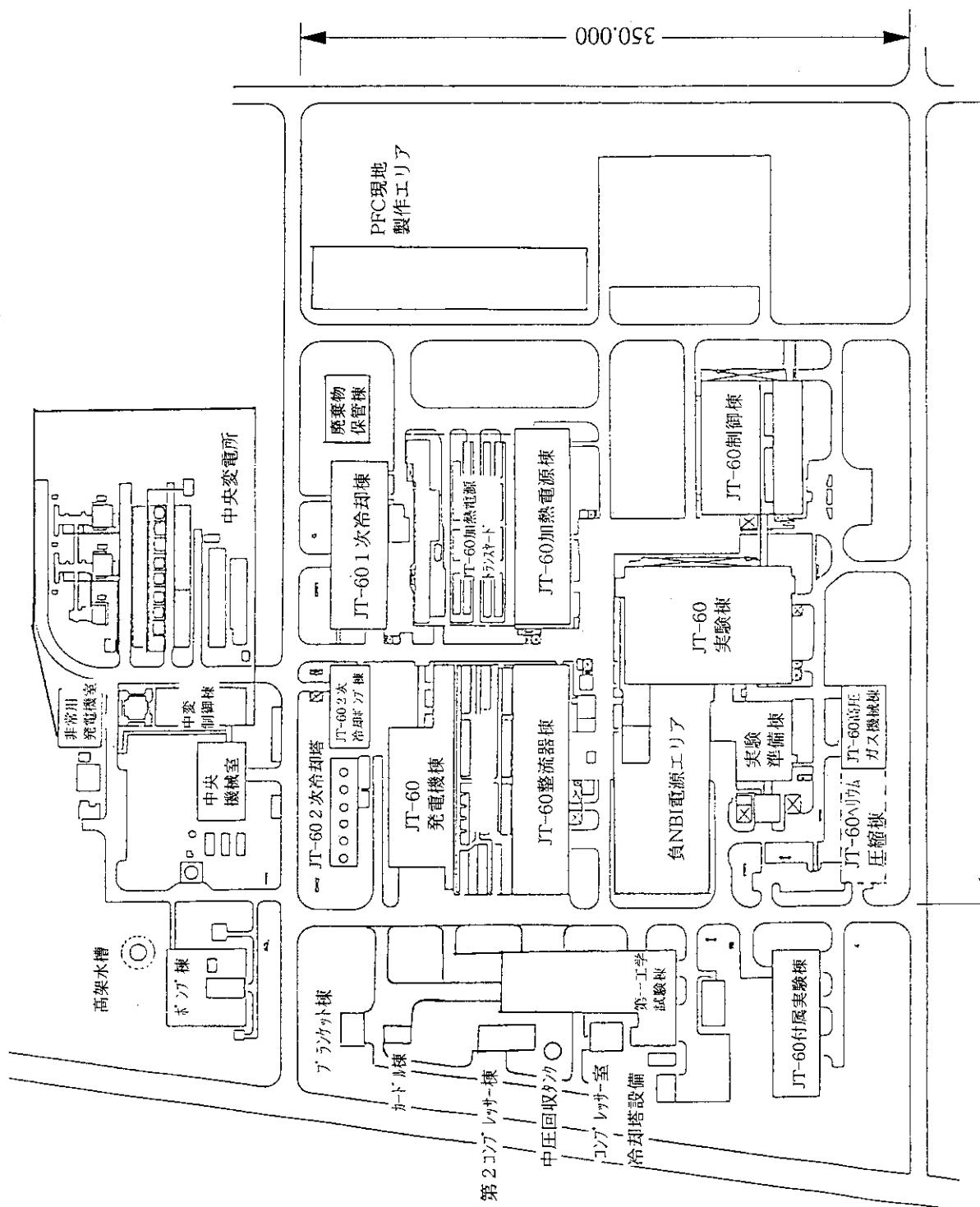


図 4.3.8 那珂研究所の建家配置および概略レイアウト

#### 4.3.3 ビームライン詳細仕様

##### 4.3.3.1 ビームラインシステム全体設計

###### 4.3.3.1.1 イオン源角度調整装置

###### 4.3.3.1.1-1 検討条件

角度調整量	: ± 10 mrad
雰囲気	: イオン源角度調整機構外部は SF <sub>6</sub> ガス (圧力 5 kgf/cm <sup>2</sup> G)
支持荷重	: 8.5 ton
(JT-60U用 500 keV イオン源 6.5 ton を参考に 加速段1段増加分を加算して算出)	
支持モーメント	: 13 ton f·m (8.5 ton f × 1.5 m)
フランジ面間距離	: 400 mm

###### 4.3.3.1.1-2 駆動方法と構造

###### a) 駆動方式

図4.3.9に示す通りイオン源の角度調整はX軸回り、Y軸回りに回転させて行う。回転駆動力の最終段階の伝達方法としては、下記の2通りが考えられる。

ア) X軸、Y軸回りの回転運動

イ) Z軸方向の直線運動

この場合、直線運動を伝達する継ぎ手部にリンク機構が必要である。フランジ面間距離400mm内に、駆動源とリンク機構をコンパクトに設置する事は困難である。

ここでは、ア) 方式のX軸、Y軸回りの回転運動方式を採用する。

###### b) 支持、駆動構造

イオン源角度調整装置周り取合いを図4.3.10に示す。イオン源の中心軸間隔は、接地電極位置で2.6 m (ビーム焦点を通る水平面から上下に±1.3 m) としている。イオン源、駆動装置は接地側に設けており、図4.3.10にコイルバネ及び水平・垂直軸周り駆動装置を示す。

イオン源自重による支持モーメントに対抗してそのまま駆動する方式とすれば、強力な回転駆動機構が必要になる。出力トルクの大きいモータや、減速比の大きい減速機の組み合わせが必要であるが、スペース的な問題から大きさに制限がある。駆動トルクを減少させるため、複数個のコイルバネをイオン源の下部に取付け、イオン源自重による支持モーメントをバネの圧縮力で相殺する方式とする。コイルバネとしては圧縮バネと引張バネが考えられるが、バネ支持部の長さの短い圧縮バネを採用した。コイルバネは各イオン源で6個設置し、その平均設置位置はイオン源の水平軸から下方に約1.0 mとした。

イオン源角度調整装置の構造図を図4.3.11に示す。イオン源は連結環を介してイオン源タンクと連結されており、連結環にはイオン源を支持・回転する為のピンジョイント機構が設けてある。図4.3.11に示すように、イオン源は連結環に垂直軸のピンで支持され、連結環はイオン源タンクと水平軸のピンで支持される。

イオン源自重による支持モーメントを相殺するための圧縮コイルバネの仕様を表4.3.1に示す。駆動機構の負荷トルクは、 $176 \text{ kgf} \times 6 \times 1.02 \text{ m} = 1.08 \text{ ton f} \cdot \text{m}$  となり、自重によるモーメントを駆動機構が支持する場合の1/10以下になる。

イオン源の回転駆動には、半径1320 mmのウォーム車を負荷側に取付て、ウォームを介してサーボモータで制御する。駆動機構の主要諸元を表4.3.2に示す。

###### 4.3.3.1.1-3 フランジ面間距離、溶接ベローズ長

図4.3.12に示すイオン源の角度変位部には、真空境界を保持するために溶接ベローズを用いる。角度調整装置のフランジ面間距離400 mmの間に、必要な溶接ベローズ長が収まるかどうか検討する。

## a) ベローズ諸元

ベローズ内径D <sub>i</sub>	1600 mm
ベローズ外径D <sub>o</sub>	1700 mm
ベローズ山高さh	50 mm
ベローズピッチp	8 mm
ベローズ板厚t	1 mm
ベローズ軸方向変位s	±9 mm
ベローズ材質	SUS316

## b) ベローズ寿命とベローズ長の関係

ベローズ寿命評価式として一般的なケロッグの式を用いる。

$$S_p = P (\beta \cdot h)^2 / (2 t^2)$$

$$S_d = 3 E \cdot t \cdot \delta / (\beta \cdot h)^2$$

$$N_f = (1125 / (S_p + S_d))^{3.5}$$

ここで、S<sub>p</sub> : 壓力による応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

S<sub>d</sub> : 変位による応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

N<sub>f</sub> : 変位繰り返し寿命

E : ヤング率 (1.9 × 10<sup>4</sup> kg/mm<sup>2</sup>)

p : 壓力 (0.06 kg/mm<sup>2</sup>)

β : ネスティング係数 1

δ : ベローズ1枚当たりの変位量 (4.5/n mm)

n : ベローズ山数

ベローズ山数を任意に与えて計算した結果を図4.3.1.3に示す。図の横軸のベローズ自由長は、山数n×ピッチ8 mmで求めた値である。

繰り返し寿命を1×104回とすれば、ベローズ自由長L<sub>f</sub>は130 mm以上必要である。このベローズ長にベローズフランジ厚、角度調整装置フランジを加えて、フランジ面間距離は約330 mm以上必要になる。ベローズの角度変位の軸方向変位換算値±9 mmに余裕を見る必要があるが、フランジ面間距離400 mmと設定すれば十分である。

4.3.3.1.1-4 SF<sub>6</sub>ガスダクト

幾何学的な干渉を避けて設定したSF<sub>6</sub>ガスタンクの寸法は、縦4 m×横4.2 m×高さ6.6 mとした。

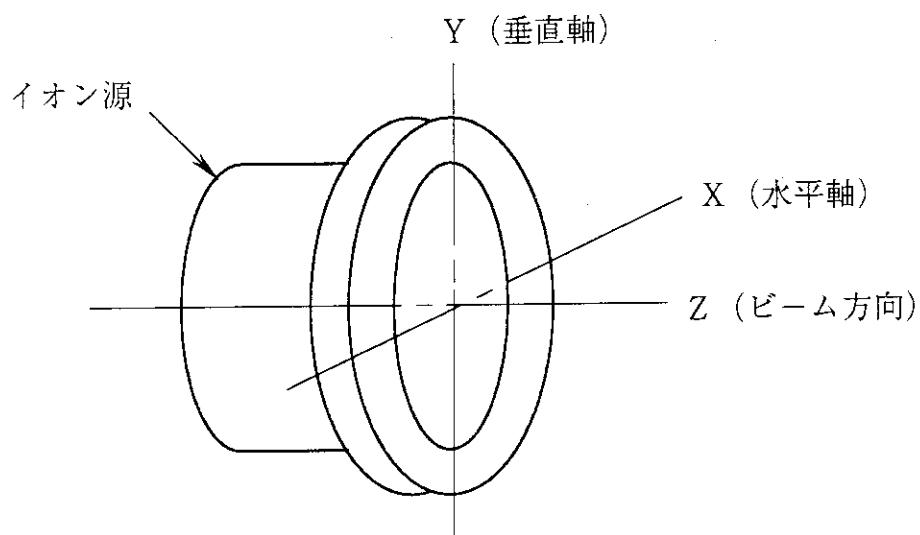


図 4.3.9 イオン源角度調整装置 駆動方式

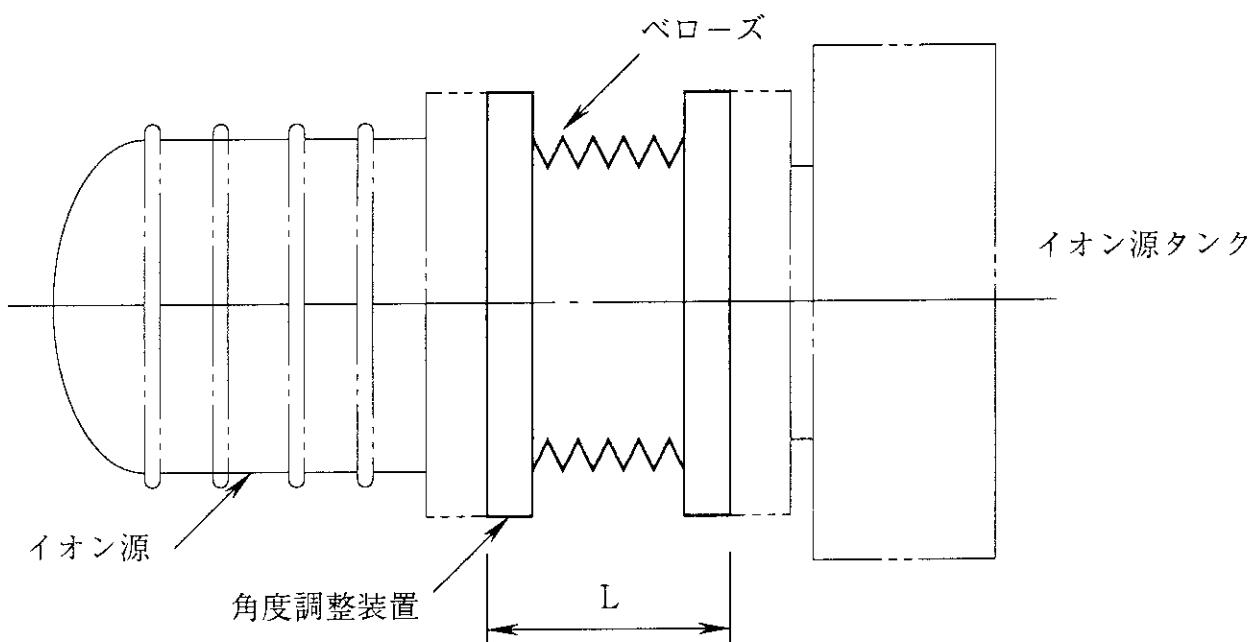
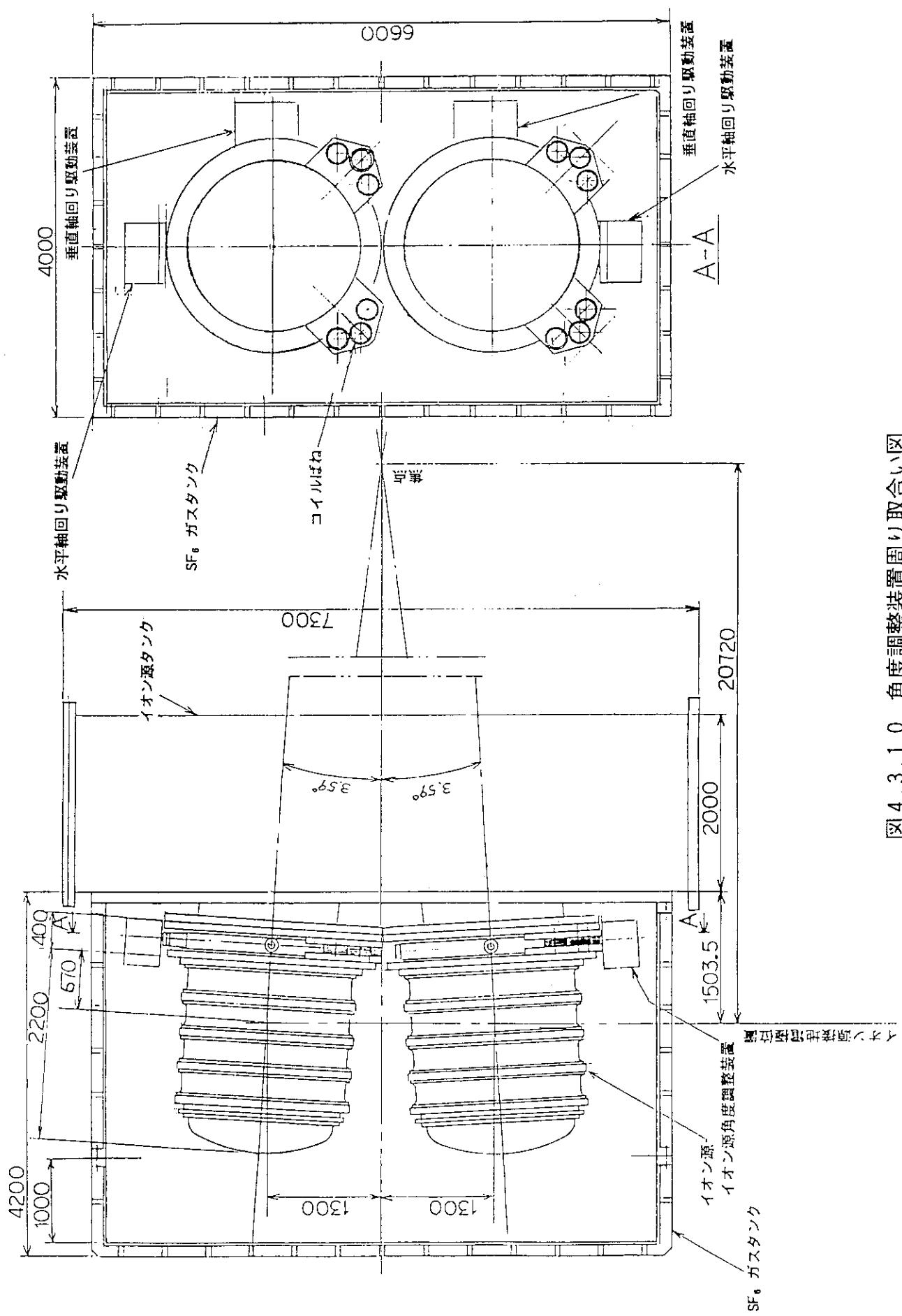


図 4.3.12 イオン源角度調整装置 フランジ面間距離と溶接ペローズ長



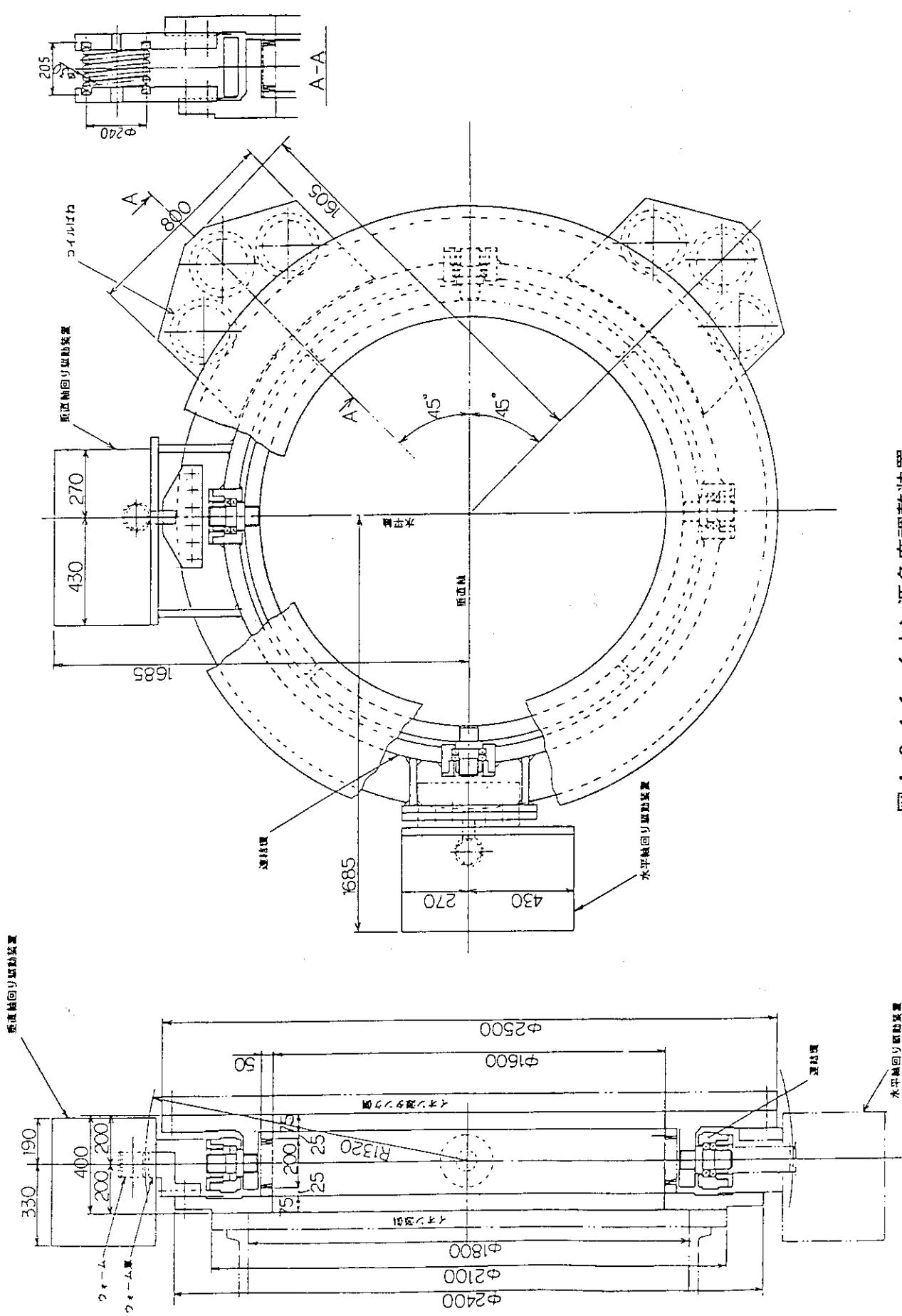


図 4.3.1-1 イオン源角度調整装置

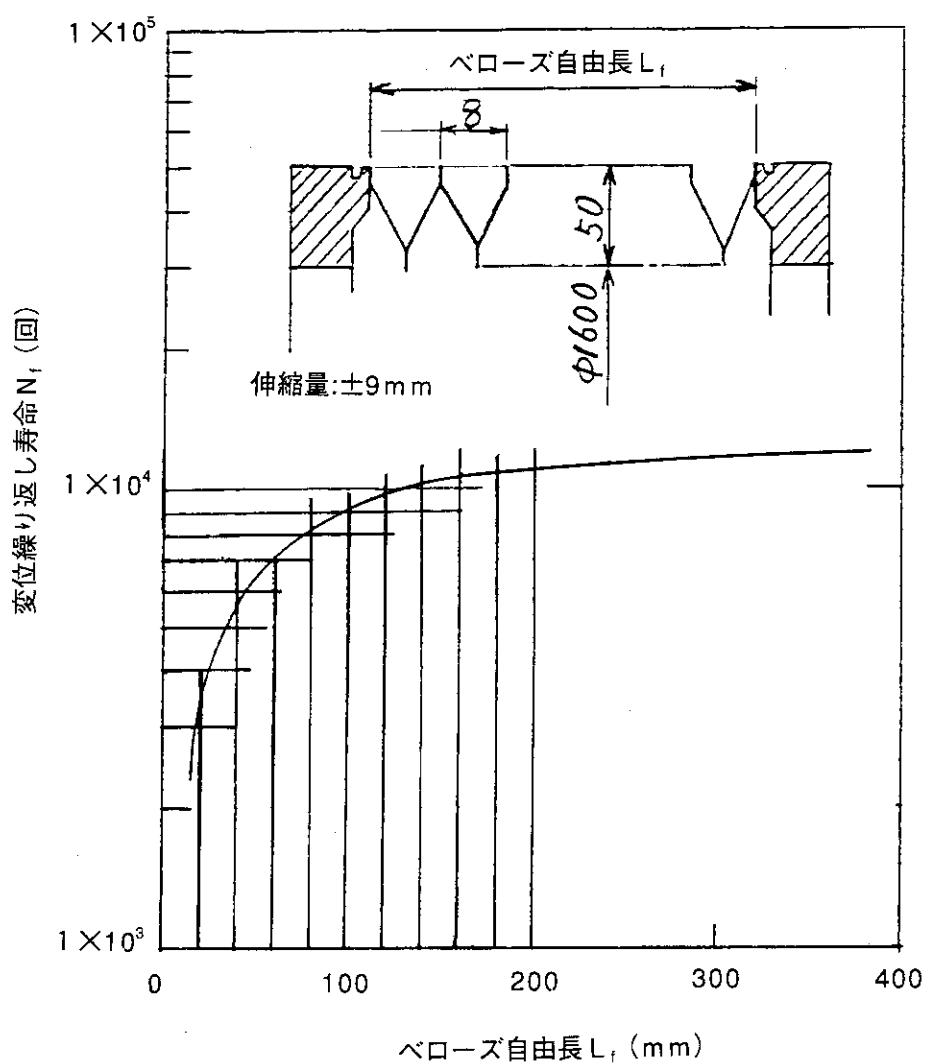


図 4.3.1.3 ベローズ長と繰り返し寿命

表 4.3.1 圧縮コイルバネ仕様

バネ個数	6 個
コイル平均径D	240 mm
コイル線径d	30 mm
有効巻き数N A	4
自由高さH f	351 mm
バネ定数K	14.65 kgf/mm
バネ密着高さH s	183 mm
バネ設置高さH o	205 mm
駆動時バネ変位δ	±12 mm
駆動荷重	176 kgf/コイル

表 4.3.2 駆動機構主要諸元

減速比	1 / 110
駆動速度	0.4 rad/min
最大フランジ径	2400 mm
最大突起寸法	中心から 1685 mm

#### 4.3.3.1.2 ビームラインの概念設計

750 keV負イオンNB Iシステムのビームライン概要図を図4.3.1.4に示す。ビームラインは主にイオン源タンク部、中性化セル部、イオンダンプタンク部の3要素からなり、イオン源タンク部はイオン源2基、角度調整機構、イオン源タンク（クライオポンプ）で、イオンダンプタンク部は偏向コイル2基、イオンダンプ、カロリーメータ、クライオポンプで構成される。またイオン源タンク部、中性化セル部には外部磁場の影響を小さくするための磁気シールドが施されている。

J T - 6 0 S Uでは現有の設備を最大限に有効利用することを前提に検討を進めた。以下の概念設計では、「ビームエネルギー」と「入射パワー」及び「ビームライン長」を固定した条件下で、システム設計を行った。

750 keVのNBIシステム開発で最も困難な部分は20~30Aにのぼる大電流イオンビームの加速である。J T - 6 0 Uの500 keV NBIシステムで22Aの静電加速の試験中であり、750 keVシステムにその成果を反映する計画である。

概念設計では主として、システムのパワーフローとガスフローの試算を行いビームラインの規模を見積もることにする。以下の設計計算において、500 keV-NBIの設計例（JAERI-M94-072）をベースにした[1]。

##### 4.3.3.1.2-1 ガスセルを用いたNBIシステム

###### A) パワーフロー

イオン源の放電室から引き出されたD-ビームは、ビームの発散や加速途中の電子剥離などで減衰する。ビームラインに沿ったビーム減衰を求める。

###### a) 引き出し／加速電極でのパワー損失

D-の電子剥離断面積は図4.3.1.5に示すように、20 keV以下では $10^{-19} \text{ m}^2$ を上回り[2]、加速の初期段階でのビーム損失が大きい。引き出し・加速電極部での、ガスと負イオンの衝突による中性化損失を求める。

###### b) ビームの減衰

負イオンビーム I が距離  $d_x$  すすむ間に、ガスと衝突して電子をはぎ取られ、減衰する割合  $dI$  は、電子剥離断面積を  $\sigma_{-0}$ 、ガス密度を  $n$  として次式で表される。

$$dI = -In\sigma_{-0}dx$$

上式から、

$$I = I_0 \exp \left( - \int n \sigma_{-0} dx \right)$$

ここで  $I_0$  は放電室から引き出されたビーム強度である。ビームの減衰は上式をプラズマグリッド下流面から接地グリッド下流面まで積分して求める。ただし、断面積  $\sigma_{-0}$  はエネルギーの関数であり、ビームエネルギーもガス密度  $n$  もともに場所の関数である。ビーム減衰を厳密に求めるためには、上式を数値計算しなければならないが、ここでは次のように近似して減衰を概算する。

積分領域を適宜分割し、各領域内でガス密度は一定とするとともに断面積  $\sigma_{-0}$  を、

$$\sigma_{-0}(E) = \sigma_0 \left( \frac{E}{E_0} \right)^\beta$$

で近似する。Eはエネルギーで、 $\sigma_0$ 、 $E_0$ 、 $\beta$ は断面積のデータをフィッティングして求める定数である。

さらにビームのエネルギーは放電室との電位差  $V$  で決まることを利用して、

$$\frac{dE}{dx} \rightarrow \frac{dV}{dx} = \epsilon$$

で積分変数を入れ替える。 $\epsilon$ は電場の強度である。 $\epsilon$ も各加速段では一定であるとした。

断面積のエネルギー  $E$  は  $V$  で読みかえる。

以上の近似を用い上式の積分を以下のように求めた。

$$\int_{x_1}^{x_2} n \sigma_{\perp 0} dx = \int_{V_1}^{V_2} \sigma_0 n \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\beta} \frac{dV}{\epsilon}$$

$$= \frac{q}{\epsilon} \sigma_0 \left( \frac{1}{V_0} \right)^{\beta} \frac{1}{\beta+1} [ V_2^{\beta+1} - V_1^{\beta+1} ]$$

またグリッドの孔内や電位の変化しない領域では、

$$\int_{x_1}^{x_2} n \sigma_{\perp 0} dx = n \sigma_{\perp 0} (x_2 - x_1)$$

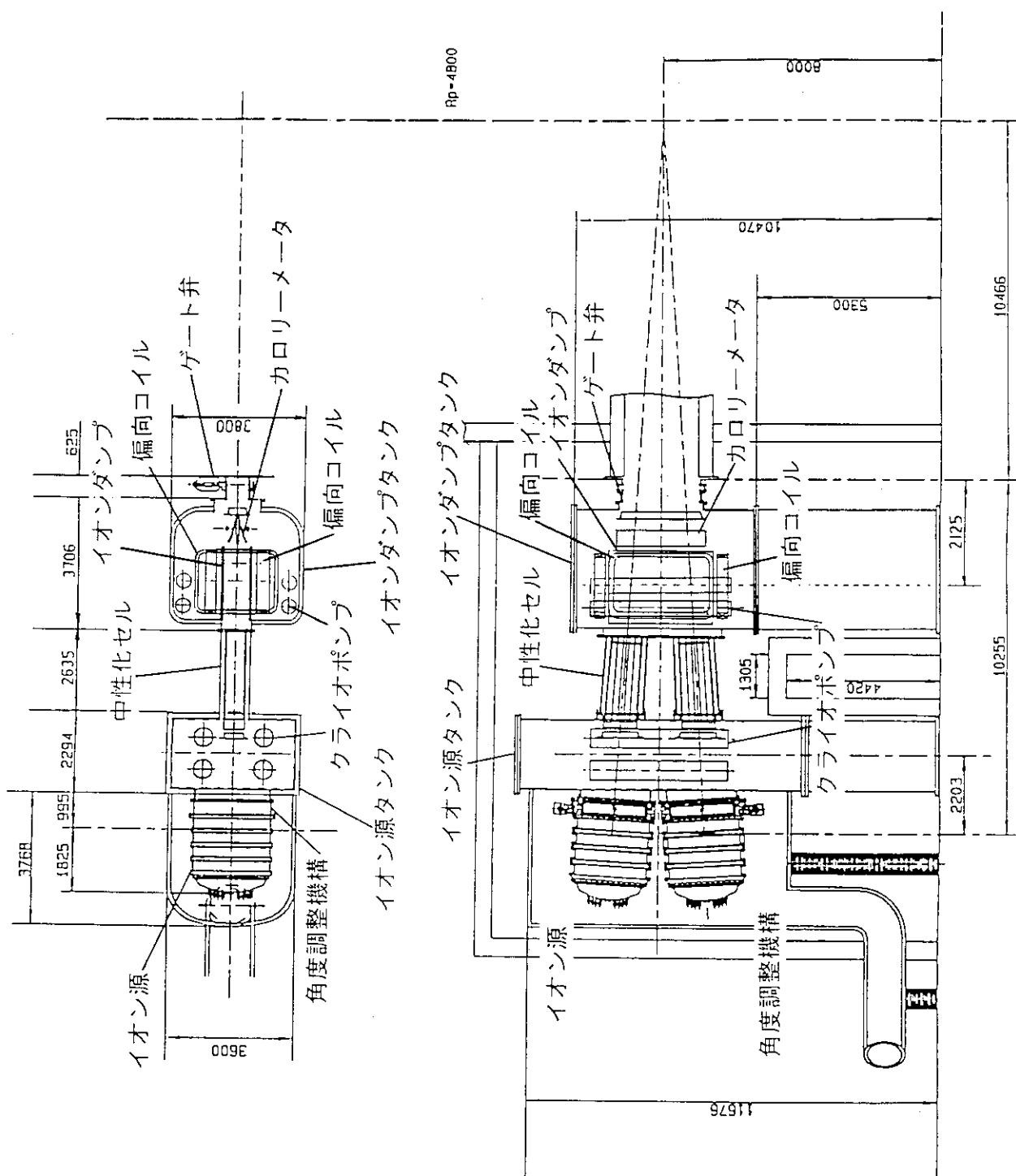
計算に用いた断面積の定数等を表4.3.3に示す。フィッティングに用いたデータはORNEL-5206を参照した[2]。図4.3.15に原データとともに近似式で求めた値を示す。

上式の計算のモデルに用いた電極は、図4.3.16に示すようにJAERI-M94-072に記す500 keV-NBIに加速段数を一段増した構成とした。

ガス密度の分布もJAERI-M94-072[1]をベースに、プラズマ電極付近で $4.1 \times 10^{19} \text{ molecules/m}^3$ (0.3 Pa - 1000 K)、接地電極付近で $0.66 \times 10^{19} \text{ molecules/m}^3$ (0.02 Pa - 400 K)とした。圧力分布を図4.3.17(a)に示す。圧力は電極間では一定で、各グリッドで圧力差が生じるとした。ただし上式の積分では簡単のため孔内の計算には平均値を用いた。

またビームのエネルギーは図4.3.17(b)のように、各加速段では直線的に変化するとして、グリッド孔内は一定エネルギーと考えた。

計算した電子剥離損失を図4.3.17(c)に示す。電子剥離反応は、ガス密度が高く、ビームエネルギーが低い引き出し部や第1段加速部で多く発生する。引き出し部で8.87%、第1加速電極出口までに21.6%が中性化し、加速管出口までの中性化損失量は28.9%である。



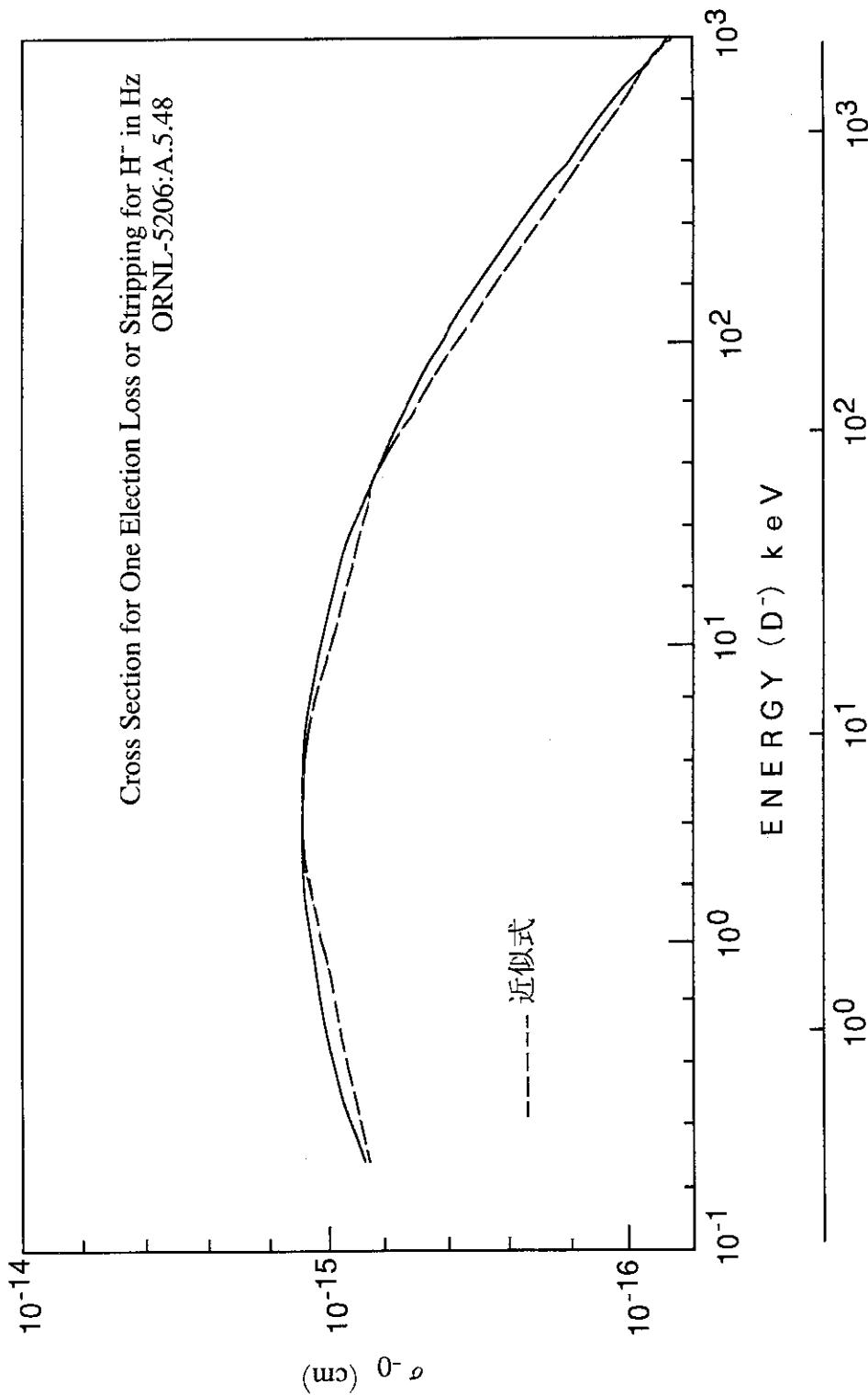


図 4.2.1.5 電子剥離断面積

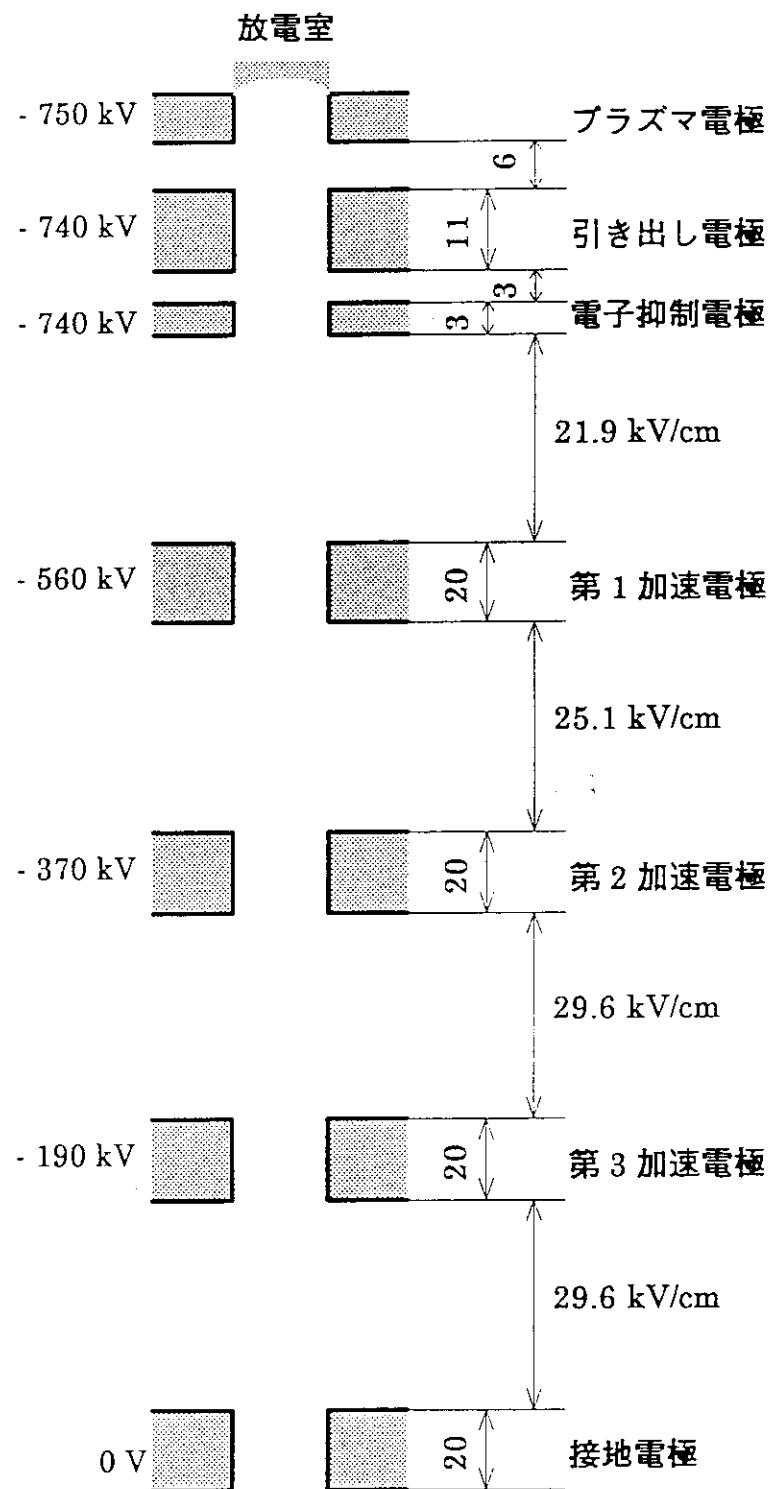


図4.3.1.6 引き出し／加速電極の構成

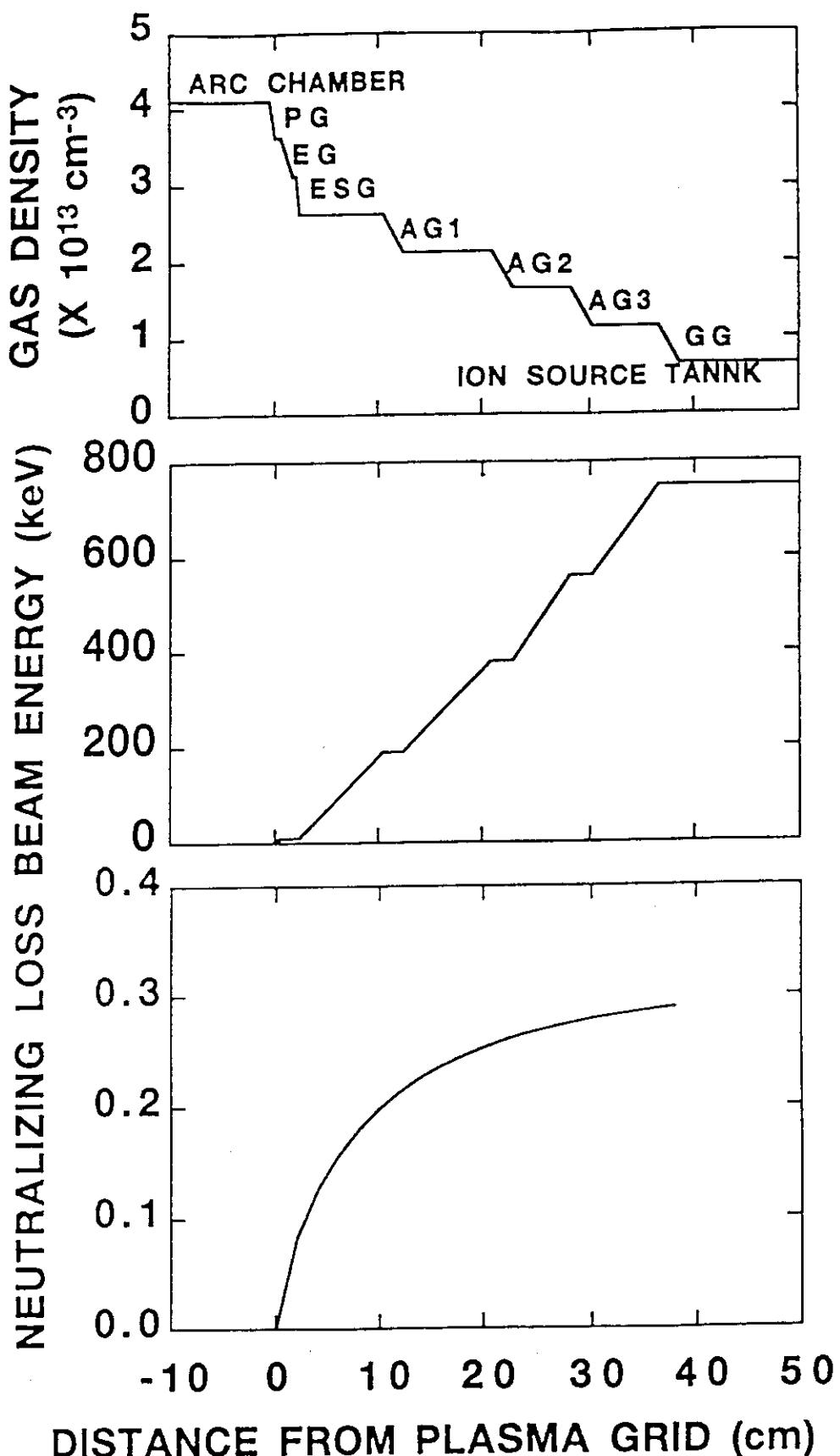


図 4.3.1.7 引き出し／加速電極での電子剥離損失  
 (a) 圧力分布 (b) ビームエネルギーの分布 (c) 電子剥離損失

表4.3.3 断面積を近似した定数

<i>Energy</i> (keV)	$\sigma_o$ (cm <sup>2</sup> )	<i>E<sub>o</sub></i> (keV) ( <i>V<sub>o</sub></i> (kV))	$\beta$
~ 4	$1.2 \times 10^{-15}$	4.	0.204
4 ~ 10	$1.2 \times 10^{-15}$	dummy	0.
10 ~ 100	$0.6 \times 10^{-15}$	100.	-0.301
100 ~	$0.072 \times 10^{-15}$	1000.	-0.7078

表4.3.4 ガスセルを用いたNB-Iシステム

ビームエネルギー	750keV
入射パワー	22MW
ビーム種	D
イオン源	
・ビーム種	D <sup>-</sup>
・イオン源の数	2台／ビームライン
・電極のセグメント数	5/source
・電極寸法	41cm × 18cm (セグメント当たり)
・電極開孔率	40%
・引出	電極数3引出電圧 10kV
・加速	4段加速 (-740/-560/-370/-190kV)
・放電室圧力	0.3Pa
・引出電流	37.6A
・電流密度	25.3mA/cm <sup>2</sup> (プラズマグリッド出口) 18mA/cm <sup>2</sup> (接地グリッド出口)
・ビーム焦点	20.7m
イオン源タンク	
・圧力	0.02Pa
中性化セル(ガスセル)	
・中性化セル長	3m
・中性化効率	60%
・セグメントの数	5×2／ビームライン
・セグメントの断面寸法	0.37m × 0.18m (入口) 0.33m × 0.17m (出口)
・ガス導入位置	1.48m (上流から)
・ガス導入圧力	0.2Pa
ビームダンプタンク	
・第1室の圧力	0.015Pa
・第2室の圧力	0.0022Pa
排気ポンプ	
・イオン源タンク	排気速度 632m <sup>3</sup> /s ガス流量 12.7Pa·m <sup>3</sup> /s
・ビームダンプタンク(第1室)	排気速度 462m <sup>3</sup> /s ガス流量 6.92Pa·m <sup>3</sup> /s
(第2室)	排気速度 558m <sup>3</sup> /s

## c) 電子を剥ぎとられた粒子のパワー

引き出し電極・加速電極の間で電子を剥ぎとられたD<sup>-</sup>イオンは所定エネルギーまで加速されない。750 keV以下のエネルギーの粒子はすべて損失パワーとして算定した。

$d_x$ の領域で中性化する負イオン電流  $dI_n$  は前項で示したように、

$$dI_n = In \sigma_{-0} dx$$

で与えられる。 $I$  はビーム電流である。中性化したときの粒子は放電室との電位差  $V$  に相当するエネルギーをもつ。領域  $x_1 \sim x_2$  で中性化した粒子は、

$$P_n = \int_{x_1}^{x_2} In \sigma_{-0} V dx$$

のパワーをもつ。前節と同様の近似を用いると上式は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_n &= I \int_{x_1}^{x_2} n \sigma_{-0} V \frac{dx}{\epsilon} \\ &= I \frac{n}{\epsilon} \sigma_{-0} \left( \frac{1}{V_0} \right)^{\beta} \left[ V_2^{\beta+2} - V_1^{\beta+2} \right] \end{aligned}$$

積分領域では  $I$  と  $n$  は一定とした。

図4.3.18に計算の結果を示す。同図(a)は電子が剥離された粒子の割合で図4.3.17(c)の微分値である。同図(b)は電子を剥がされたときの粒子エネルギーである。同図(c)に中性化した粒子のパワーをビーム軸に沿って表した。上式の積分ではビームの減衰の影響を考慮して、 $x$ を多数の領域に区切って計算した。中性化した粒子のパワーは、放電室から引き出した電流1A当たり42 kWである。内訳は、引き出し部で0.76 kW、第1段加速部で12.5 kW、第2段目以降で29 kWである。

ところで、電極間で中性化した粒子のパワーがすべて電極への熱負荷となるとは限らない。一部は電極へ衝突し、残りの部分はビームライン機器への熱負荷となると考えられる。詳細な熱負荷分布を評価するには粒子の軌道解析が必要であるが、ここでは検討の対象とはしなかった。この報告では、発生場所が電極部であることから、中性化した粒子のパワーを電極部の損失として見積もった。

## d) 剥離反応で発生した電子のパワー

負イオンとガスとの衝突で発生した電子数は図4.3.18(a)で表される。剥離電子はJAERI-M94-072 [1] の評価と同じように、各電極間の電位差の半分の電圧に相当するエネルギーに加速されるとして損失パワーを見積もる。計算の結果を図4.3.19に示す。同図で、グリッド孔内など電位勾配のない領域で発生した電子は、加速されないとして算定には加えていない。剥離反応で発生した電子のパワーは、放電室から引き出した電流1A当たり16 kWである。

## e) 中性化効率と中性化セルでの発散損失

中性化に必要なガス線密度と中性化効率は次の反応式から求める。 $\Gamma_+$  と  $\Gamma_-$ 、 $\Gamma_0$  を正と負のイオンおよび中性粒子のビーム強度とすると、

$$\begin{aligned} d\Gamma_+/dx &= -(\sigma_{10} + \sigma_{-1}) \Gamma_+ + \sigma_{01} \Gamma_0 + \sigma_{-1} \Gamma_- \\ d\Gamma_0/dx &= \sigma_{10} \Gamma_+ - (\sigma_{01} + \sigma_{0-}) \Gamma_0 + \sigma_{-0} \Gamma_- \\ d\Gamma_-/dx &= \sigma_{-1} \Gamma_+ + \sigma_{0-} \Gamma_0 (\sigma_{-1} + \sigma_{-0}) \Gamma_- \end{aligned}$$

ここで、 $\sigma_{1-}$ 、 $\sigma_{-1}$ 、 $\sigma_{0-}$  および  $\sigma_{-0}$  はそれぞれ、{正イオンD<sup>+</sup>→負イオンD<sup>-</sup>}、{負イオンD<sup>-</sup>→正イオンD<sup>+</sup>}、{中性子D<sup>0</sup>→負イオンD<sup>-</sup>}、{負イオンD<sup>-</sup>→中性子D<sup>0</sup>} の断面積である [2]。

上式を  $x=0$  で、 $\Gamma_+=1$ 、 $\Gamma_0=\Gamma_-=0$  の境界条件下で解いた結果を図4.3.20に示す。縦軸はD<sup>0</sup>、D<sup>-</sup>、D<sup>+</sup>の成分比である。横軸は標的ガスであるD<sub>2</sub>の線密度を圧力と距離の積で示した。ガス線密度が0.451 Pa·mのときに中性化効率が最大値で60.5%となる。正負のイオンの比率は24.3%と15.1%である。ガス線密度を0.388 Pa

$a \cdot m$ に選ぶと中性化効率はわずかに下がって60%となるが、正負イオンの比率が各々20%と等しくなる。この場合には各イオンに対し、同じ設計のビームダンプを使用することが可能になるほか、排気ポンプの負担もかるくなる。以下の設計では中性化のためのガス線密度を0.388 Pa・mと選ぶことにする。

また中性化セルでは5%がビーム発散で失われるとする。

#### f) 中性化セル下流の再電離損失

中性化セルを出た中性粒子ビームの一部は、プラズマへ入射するまでにガスと衝突して電離される。電離した粒子はすべて損失として扱う。 $n l$ をビームの進行方向に沿ったガス線密度とし、 $D^0$ の電子剥離断面積を $\sigma_{01}$  [2] とすると、再電離損失は、

$$1 - \exp(-n \sigma_{01} l)$$

であらわされる。後に示すようにビームダンプタンク内は差動排気のために仕切板で区分けする。上流側（第1室）と下流側（第2室）の圧力とビーム走行距離が次の値であるとする（圧力分布は後ほど示す）。

	圧力	ビーム走行長
第1室	0.015 Pa	1.75 m
第2室	0.0022 Pa	1.75 m

また、ビームダンプタンクにつづくドリフト管の長さは5.8 mで、圧力は0.002 Paで一定とした [1]。

上の数値を用いて再電離損失を計算すると4%と求まる。

ドリフト管でのビーム発散損は考慮しなかった。

#### g) 放電室からの引き出し電流密度

以上の計算から求めたパワーフローを図4.3.2.1に示す。イオン源当たりのビーム電流は、750 keV 加速後の接地電極出口で26.6 Aである。加速後の電流密度を18 mA/cm<sup>2</sup>とすると、ビーム透過孔の開孔率を40%としてグリッドの面積は3696 cm<sup>2</sup>である。グリッドを短辺寸法が18 cmの5ヶのセグメントで構成すると、グリッドの寸法は41 cm × 18 cmとなる。

引き出し・加速電極間でのD<sup>-</sup>のガスとの衝突による中性化損失を考慮すると、プラズマグリッドでの引き出し電流は37.5 A、電流密度は25.3 mA/cm<sup>2</sup>である。放電室から引き出される電子電流はD<sup>-</sup>電流の半分とした。

ソース電源パワーは引き出し電流に比例するとして、JAERI-M94-072をベースに見積もった [1]。引き出し電源と加速電源の損失もJAERI-M94-072と同じく10%、15%とした。

イオンの生成・加速に要するパワーに対する入射パワーの効率は40.6%である。

#### B) ビーム強度分布

中性化セル等のビームラインの構成機器の寸法を見積るためにビームの強度分布{beam envelope} を求める。

ビームレットは、イオン源の電極から一様に引き出されるとしてビームの強度分布を計算する。各ビームレットは同じ発散角  $|\omega_1/e| = 5 \text{ mrad}$  をもち、イオン源の接地電極から~11 mの位置を焦点として集束する。

2台のイオン源は水平面に対し上下対象に配置し、各イオン源のグリッドは5ヶのセグメントで構成する。セグメント間の上下方向の間隔は5 cmで、イオン源の中心は水平面から上下それぞれ113.5 cmである。

図4.3.2.2に計算に用いた機器の配置をビーム軸に沿って示した。接地電極出口から加速管出口までの距離を67 cmとし、加速管とイオン源タンクの間には軸方向長さが40 cmのイオン源角度調整装置があるとした [1]。

図4.3.2.3はひとつのセグメントから引き出されたビームの分布で、中性化セル入口、出口での強度分布である。この計算結果から中性化セルの寸法を決定した。中性化セルの寸法は、各セグメント当たり、入口が縦16cm、横33cmで、出口が縦13cm、縦25cmのテーパ状とした。中性化セルでのビームの透過率は95%で、5%のビームがセル壁面で遮られる。

図4.3.2.4は中性化セル以降の強度分布である。中性化セル出口(620cm)、ビームダンプタンク中心(782cm)、ビームダンプタンク出口(957cm)と焦点位置について強度分布を示す。上下のイオン源のそれぞれ5ヶのセグメントから引き出されたビームは、セル出口ではセグメントに対応したピークがみられるが、距離とともにになだらかになる。ビームダンプタンク中央に設ける差動排気のための仕切板は、同図から横19cm、縦85cmの孔を上下2カ所に設けた。

以上でビームラインの構成に大きく影響する機器の主要寸法が決定された。これらの寸法をもとに、次項でシステムのガスフローをみつめる。

### C) ガスフロー

排気システムはNBⅠのシステムサイズに大きな影響をあたえる。

ガス源のひとつはイオン源からの流出ガスである。いまひとつはD<sup>-</sup>の中性化のために中性化セルへ供給するガスである。排気ポンプはイオン源タンクとビームダンプタンクの2箇所に配置する。ビームダンプタンクではトーラスへの流入ガスを減らすため差動排気のための仕切板を設け、上流側から第1室と第2室に区分する。イオン源タンクとビームダンプタンク第1室、第2室の各排気ポンプの容量を $s_i$ 、 $s_{b1}$ 、 $s_{b2}$ と表わす。また、イオン源放電室、イオン源タンク、ビームダンプタンク第1室、第2室の圧力をそれぞれ、 $p_s$ 、 $p_i$ 、 $p_{b1}$ 、 $p_{b2}$ とする。中性化セルへはセル上流から距離 $x$ の位置で圧力 $p_c$ で $D_2$ ガスを供給する。ガスフローは次式で表される。

$$s_i p_i = C_s (p_s - p_i) \times 2 \text{ sources} + C_{cu}(x)(p_c - p_i) \times 5 \text{ セグメント} \times 2 \text{ sources}$$

$$s_{b1} p_{b1} = C_{cl}(x)(p_c - p_{b1}) \times 5 \text{ セグメント} \times 2 \text{ sources} + C_{bd}(p_{b1} - p_{b2})$$

ただし $C_s$ 、 $C_{bd}$ はイオン源の引き出し・加速電極、ビームダンプタンクの仕切板のガスコンダクタンスである。電極や仕切板の開孔面積をA cmとして[3]、

$$C = \frac{62.5}{M} A (l/sec)$$

$C_{cu}(x)$ 、 $C_{cl}(x)$ はガスの供給箇所からそれぞれイオン源側、ビームダンプ側へのガスコンダクタンスで、 $x$ の関数である。例えば $C_{cu}(x)$ は中性化セルの分割された矩形管の断面寸歩をa cm、b cmとして[3]、

$$C_{cu}(x) = \frac{166.7}{M} \alpha \frac{a^2 b^2}{(a+b)x} (l/sec)$$

$\alpha$ は形状係数である。計算の条件として、

$$p_s = 0.3 \text{ Pa}$$

$$p_i = 0.015 \text{ Pa}$$

$$p_{b2} = 0.0022 \text{ Pa}$$

とした。これらはいずれもJAERI-M94-072[1]の設計で採用されている値である。 $p_s$ は引き出し／加速途中でのD<sup>-</sup>の損失を抑えるためであり、 $p_i$ の値はイオンの空間電荷を中和するために必要なガス圧力である。また $p_{b2}$ はトーラスへ流入するガス量を500 keV-NBⅠの場合と同等程度に抑えるために設定した圧力である。

さらに計算の条件として、各部の圧力はD<sup>-</sup>の中性化のためのガス線密度を満たす必要がある。中性化に有効な領域は、イオン源の加速電極出口から中性化セル出口までである。ガス線密度は前節で見積もった。その値を $(pl)_o$ とあらわす。

$$(pl)_o = p_i l_i + \frac{p_s + p_i}{2} x + \frac{p_c + p_{b1}}{2} (l_n + x)$$

$l_n$  はセル長さである。  $l_i$  はイオン源の加速電極出口から中性化セル入口までの距離である。 $l_i$  には、加速電極の出口から加速管端面までの距離（0.67 m : JAERI-M94-072を参考に算定）と、イオン源とイオン源タンクの間におく角度調整装置の寸法（0.4 m）を算入した。

ガスフローの計算結果を図4.3.2.5に示す。図は  $x$  と  $p_{b1}$  を変化させ、全排気容量  $(S_i + S_{b1} + S_{b2})$  が最小となる場合を求めた。

イオン源タンクの排気圧力は 0.02 Pa で、ポンプ容量は  $632 \text{ m}^3/\text{s}$  である。ビームダンプタンク上流側の圧力は 0.015 Pa、下流側は 0.0022 Pa で、排気容量はそれぞれ  $462 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $558 \text{ m}^3/\text{s}$  と見積もった。全排気容量は  $1651 \text{ m}^3/\text{s}$  である。

ガスセルを用いたシステムの概念設計の結果を表4.3.4にまとめて示した。

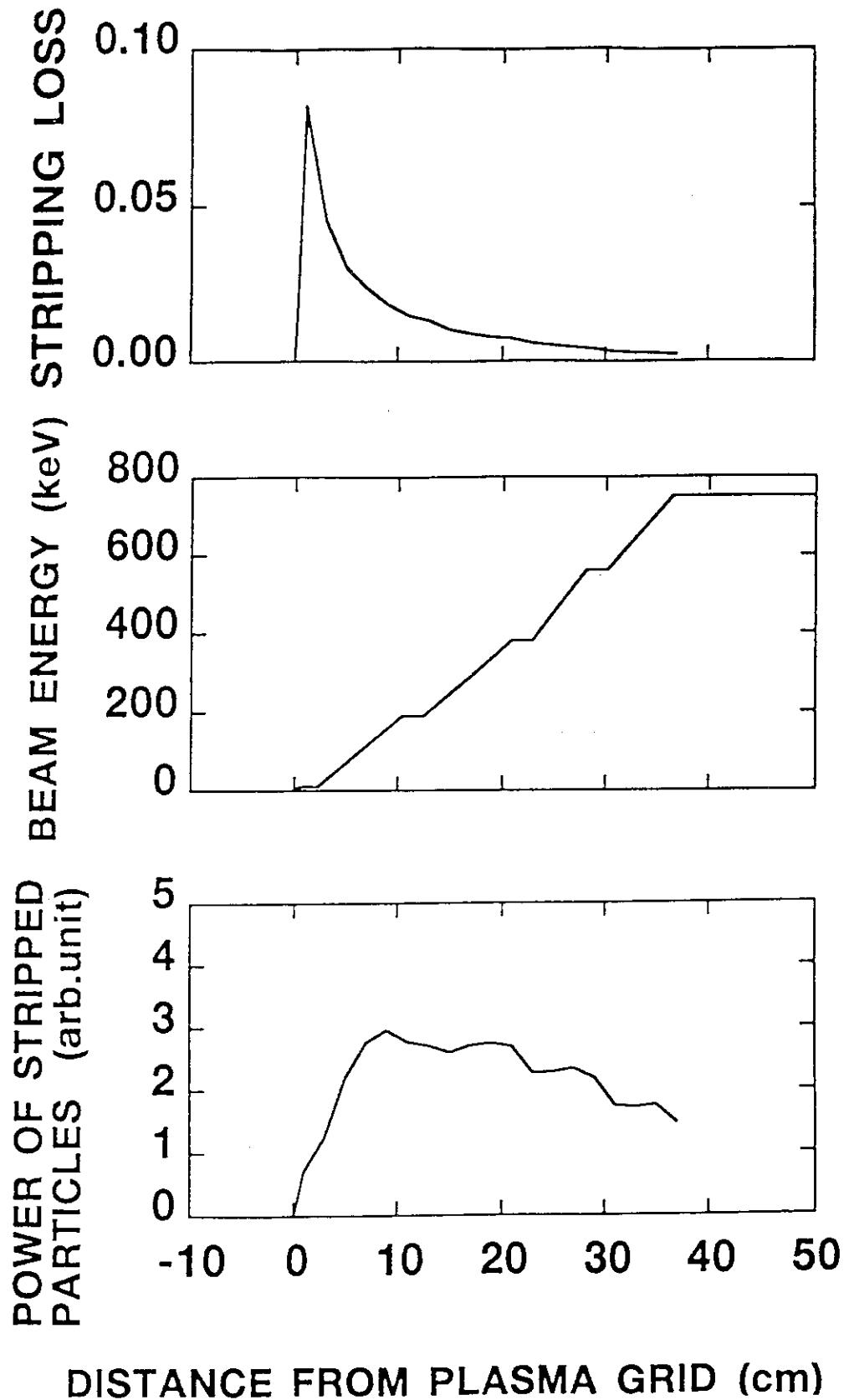


図4.3.18 電子を剥ぎとられた粒子のパワー

- (a) 中性化した粒子の発生割合 (b) ビームエネルギーの分布
- (c) 電子を剥ぎとられた粒子のパワー

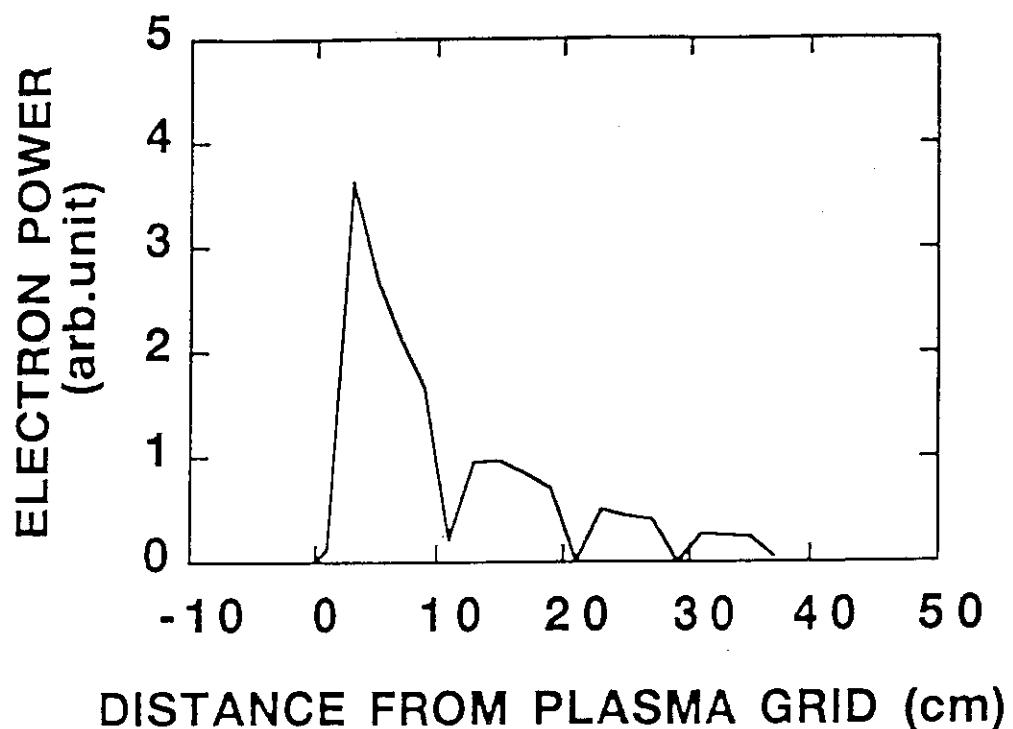
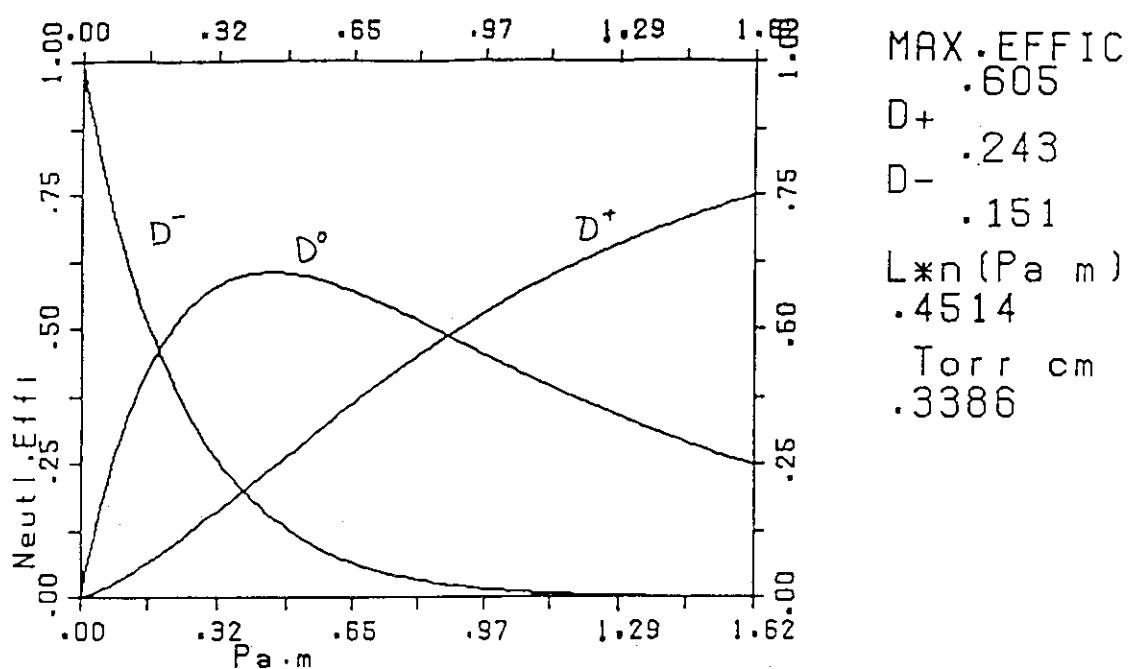


図 4.3.19 剥離電子のパワー

図 4.3.20 ガスセルによる  $D^-$  の中性化

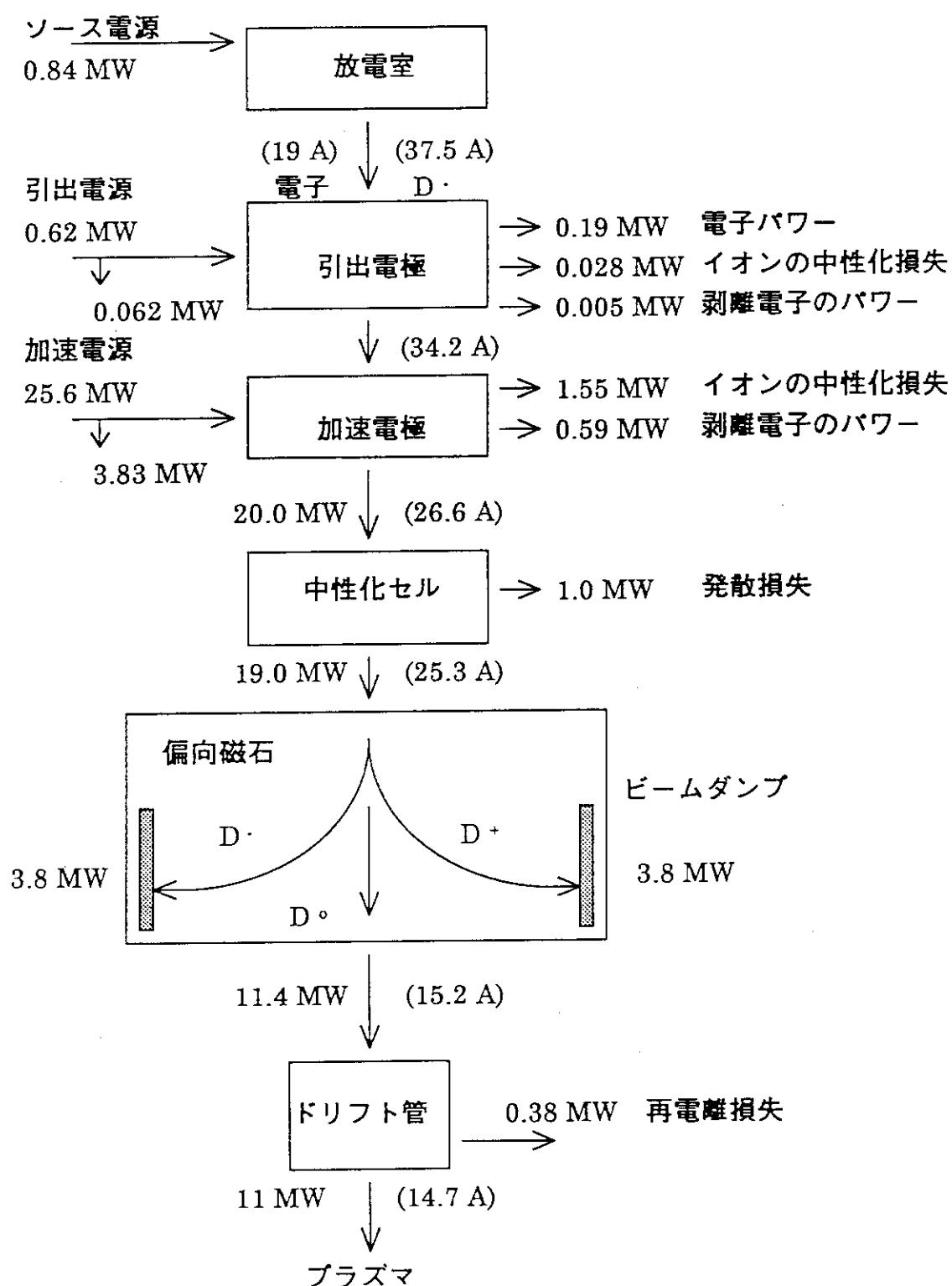


図 4.3.2.1 イオン源当たりのパワーフロー（ガスセル方式）

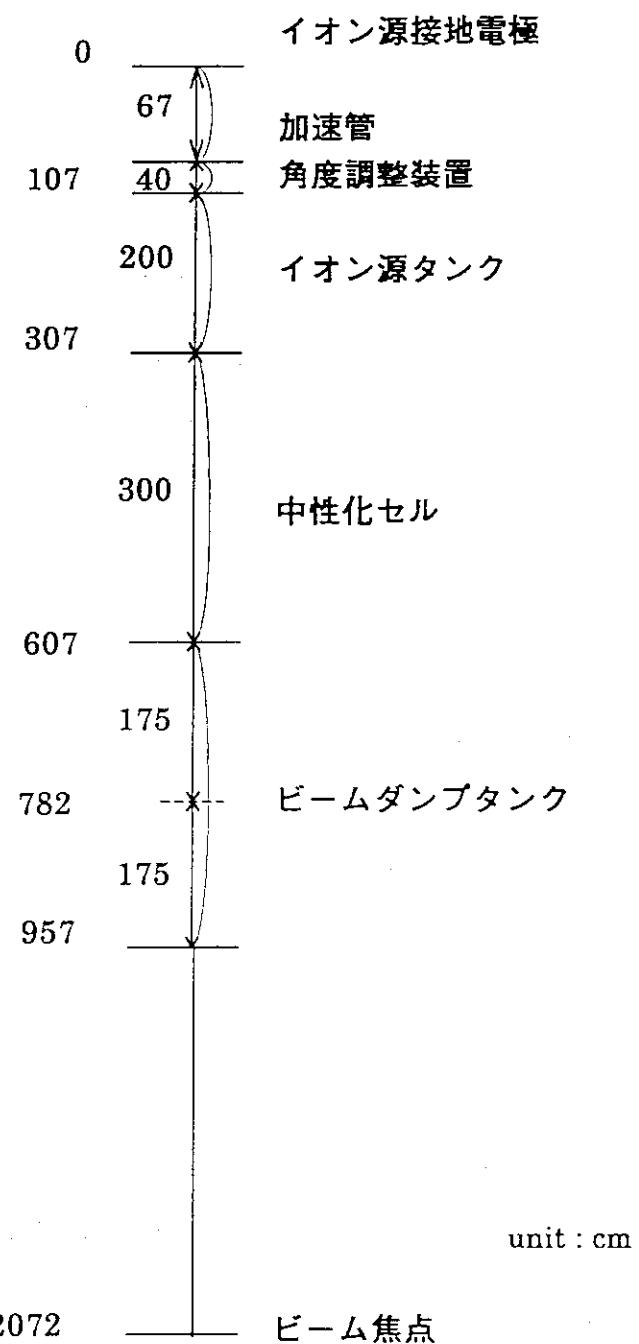


図 4.3.2.2 計算に用いたビームラインの構成

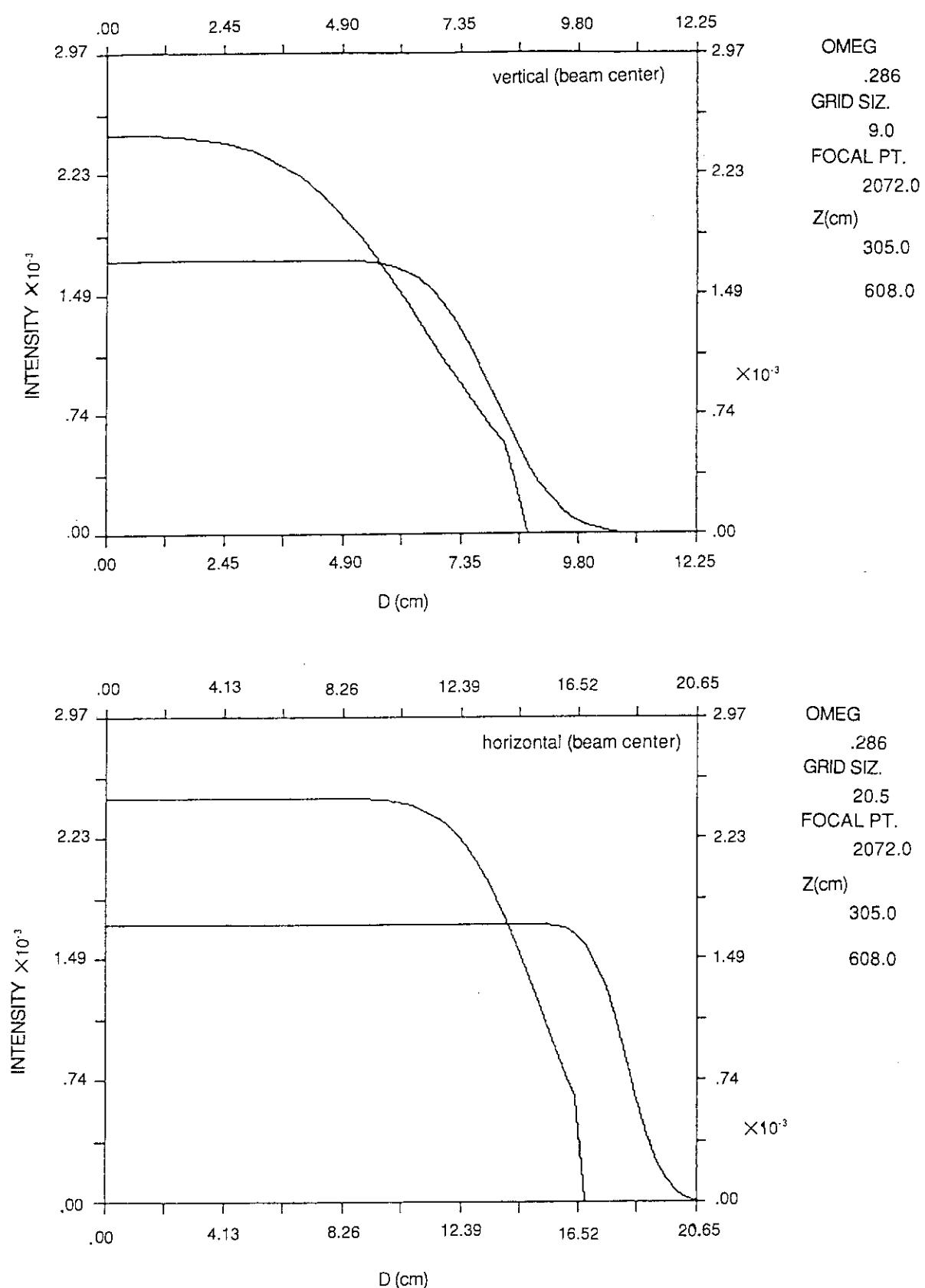


図 4.3.2.3 ビームライン強度分布（ガスセル方式）  
中性化セル前後の強度分布

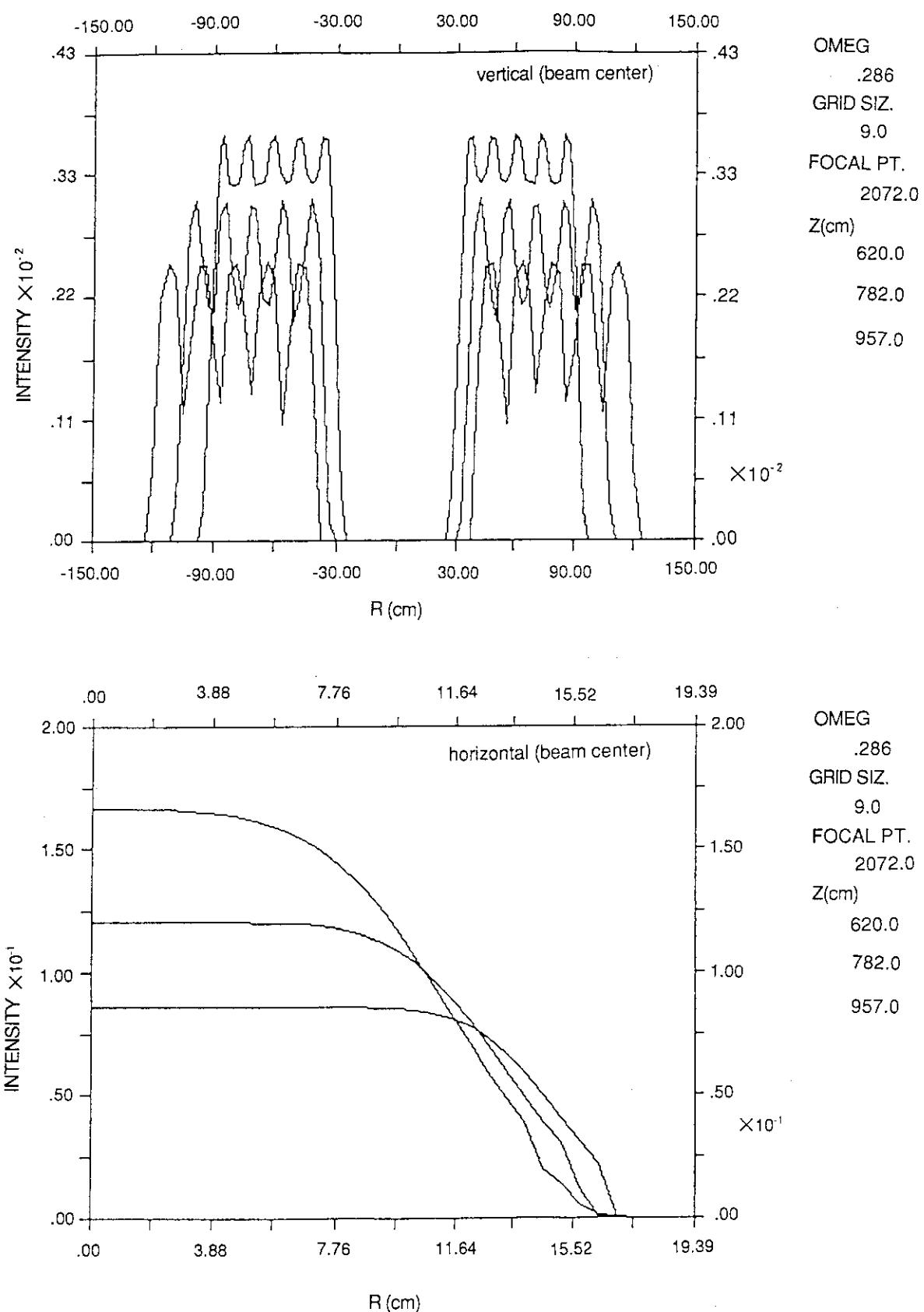


図 4.3.2.4 ビームライン強度分布（ガスセル方式）  
2台のイオン源からのビームを合成した強度分布

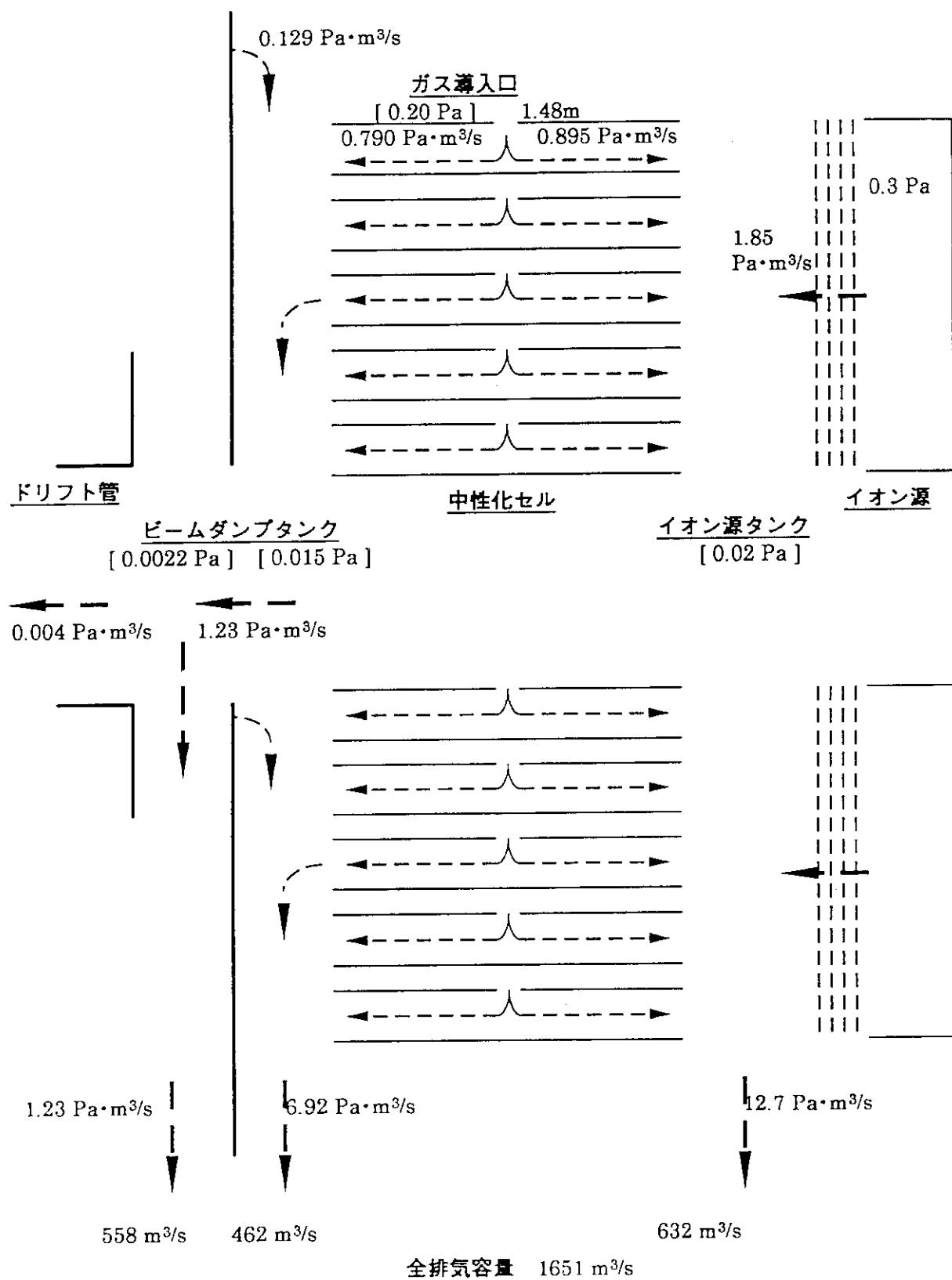


図 4.3.2.5 ビームライン当たりのガスフロー（ガスセル方式）

#### 4.3.3.1.2-2 プラズマセルを用いた負イオンNBIシステム

NBIを実用炉の加熱や電流駆動の方法として用いるためには、システム効率が極力高いことが望まれる。NBIの高効率化の方法として、中性化のための標的にプラズマを用いようとする考え方がある（プラズマセル）。ガスセルを用いた場合の中性化効率は60%程度（数百keV～）であるが、Berknerはプラズマセルによる中性化効率を80～90%と試算した[4]。また、IvanovとPoslyakovは500keVのH<sup>-</sup>と水素のプラズマを用いた実験で、84%の中性化効率が得られることを示した[5]。プラズマセルの利用によって負イオンNBIのシステム効率が改善できる期待がある。

しかし、プラズマセルの有効性の指摘はあっても、中性化セルへの応用を念頭に置いた実験はなく、セルプラズマの解析も充分に行われているわけではない。この報告でもいくつかの仮定のもとに、プラズマセルを採用した場合のNBIのシステム効率の改善度合いを試算する。

##### A) プラズマセル

###### a) プラズマによるD<sup>-</sup>の中性化

プラズマセル中のD<sup>-</sup>の反応はガスセルの場合に比べより複雑である。主な反応を揚げる。

###### プラズマイオン (D<sup>+</sup>) との反応



###### プラズマ電子との反応



###### ガス分子との反応



しかし上記の反応について、必要なエネルギー領域にわたってすべての断面積の測定値があるわけではない。とくに、120keV程度までしか測定値がない[6]。ここではIto.Rの実験式[7]を参照することにする。現状ではNBIで必要とする数百keV以上での中性化効率の算定に曖昧さが生ずることは避けられない。

表4.3.5に反応断面積を示す。表からわかるようにD<sup>+</sup>や電子とD<sup>-</sup>との反応断面積はガス分子との反応に比べて一桁大きい。ガスセルよりもプラズマセルを用いた方が中性化効率が高くなる理由がここにある。

プラズマセル中の反応は、中性粒子ビーム、正イオンビーム、負イオンビームの各強度をI<sub>0</sub>、I<sub>+</sub>、I<sub>-</sub>ビームの進行方向をXとして以下の方程式で表わせる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_{tot}} \frac{dI_0}{dx} &= <\sigma_+> I_+ + <\sigma_o> I_- - [ <\sigma_+> + <\sigma_o> ] I_0 \\ \frac{1}{n_{tot}} \frac{dI_+}{dx} &= - [ <\sigma_{+o}> + <\sigma_{+-}> ] I_+ + <\sigma_{-+}> I_- + <\sigma_{oo}> I_0 \\ \frac{1}{n_{tot}} \frac{dI_-}{dx} &= <\sigma_{+-}> I_+ - [ <\sigma_{-o}> + <\sigma_{oo}> ] I_- + <\sigma_{o-}> I_0 \end{aligned}$$

ただし<σ<sub>ij</sub>>はBerknerの表し方にしたがって、

$$<\sigma_{ij}> = \frac{\sum_s \sigma_{ij}^s n_s}{n_{tot}}$$

である[4]。sは+ (D<sup>+</sup>)、(電子)、G (ガス)を、i、jは- (負イオン (D<sup>-</sup>))、+ (正イオン (D<sup>+</sup>))、o (中性粒子 (D<sup>0</sup>))を表す添字である。また、

$$n_{tot} = \sum_s n_s$$

とし、電離度n<sub>i</sub>を、

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_o} = \frac{n_i}{n}$$

と定義する。ただし、 $n = n_i + n_g$  で、 $n_i$ 、 $n_g$  はプラズマのイオン密度とガス密度である。また  $n_e = n_i$  とすると ( $n_e$  は電子密度) 、

$$n_i = n_e = \alpha n$$

$$n_g = (1 - \alpha) n$$

$$n_{tot} = (1 + \alpha) n$$

$\langle \sigma_{ij} \rangle$  は、

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{\sigma_{ij}^i \alpha + \sigma_{ij}^e \alpha + \sigma_{ij}^G (1 - \alpha)}{1 + \alpha}$$

と表わせる。

前記の反応方程式をプラズマセル入り口での境界条件

$$I_o = I_{o0}$$

$$I_+ = I_{+0}$$

$$I_- = I_{-0}$$

を用いて解くことによって中性化効率がえられる。ただし、 $I_{o0}$ 、 $I_{+0}$ 、 $I_{-0}$  はプラズマセル入口でのビーム成分である。上式の解は解析的にもとまる。

図 4.3.2.6 に、上式から求めたターゲット線密度と  $I_o$ 、 $I_+$ 、 $I_-$  との関係を示す。電離度  $\alpha$  は 20 % とし、入射ビームは  $I_-$  だけの場合である。 $I_-$  はターゲット線密度とともに急激に減少し、対応して  $I_o$  は大きく増大する。 $I_o$  は最大値に達した後、緩やかに減少する。 $I_o$  の減少は  $I_o$  からの電子剥離により  $I_+$  が生成されるためである。プラズマセルの  $I_o$ 、 $I_-$  の変化はガスセルの場合に比べてより急峻である。図 4.3.2.6 の中性化効率の最大値は 76 % に達する。

また、中性化効率は電離度  $\alpha$  の関数である。図 4.3.2.7 に電離度を変化させたときの、中性化効率の最大値と、最大値を与えるターゲット線密度の関係を示す。電離度が零のときはガスセルの場合に当たり、中性化効率は 60 % である。中性化効率は電離度  $I_o$  とともに上昇し、30 ~ 40 % 付近から飽和傾向を示し出す。電離度が 100 % のときの中性化効率は 84 % に達する。

また、ターゲット線密度は図 4.3.2.7 に示すように、電離度  $I_o$  増大とともに急激に減少する。電離度が 20 % のときには、ガスセル（電離度：零）に比べターゲット線密度は約半分に減少する。ターゲット線密度の低下は排気ポンプの負担を軽減できる可能性を与える。

ところで、 $\langle \sigma_{-o} \rangle$ 、 $\langle \sigma_{o+} \rangle$ 、 $\langle \sigma_{-+} \rangle$  に比べて  $\langle \sigma_{+o} \rangle$ 、 $\langle \sigma_{o-} \rangle$ 、 $\langle \sigma_{+-} \rangle$  の値は小さい。Berkner 等によって与えられている解 [4] は上式反応方程式において、

$$\langle \sigma_{+o} \rangle = \langle \sigma_{o-} \rangle = \langle \sigma_{+-} \rangle = 0$$

とおいた近似解である。

### B) プラズマセル上流のドリフト領域の影響

前項ではプラズマセルへ  $I_-$  が入射した場合の中性化について議論した。システムの中へプラズマセルを組み込んだ場合は前項と様相が異なる。

ガスセルを用いた場合のビームライン構成は図 4.3.2.2 に示した。同図で中性化セルを、ガスセルからプラズマセルへ置き換えた場合を考える。ガスセルの場合は、イオン源の接地電極から中性化セルの間にあるガス分子も、中性化のための標的粒子の一部であった。中性化セルをプラズマセルに置き換えた場合も、この領域でビームとガスとの間の荷電交換反応がおこる。プラズマセルの入り口でのビーム組成は、 $I_-$  だけでなく  $I_o$  や  $I_+$  との混合ビームとなる。混合ビームの場合は、単一組成の場合にくらべて得られる中性化効率は低くなる。

イオン源接地電極からセル入り口までの距離を 307 cm とし、圧力をガスセルの場合と同じく 0.02 Pa とすると、セル入り口でのビーム組成は、

$$I_o = 0.208$$

$$I_+ = 0.019$$

$$I_- = 0.773$$

である。プラズマセルの電離度を20%としたときの最高効率は75%で、若干ではあるが $I_{\perp}$ だけの単一ビームの場合に比べて低くなる。中性化効率は、セル上流のガス線密度が上昇するに従いより低下する。図4.3.28に、セル上流のガス線密度と中性化効率の関係を示す。ガス線密度が $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のときには、中性化効率は66%に低下する。セル上流の圧力が図4.3.17に示すように、0.02 Pa程度であれば影響は軽微であるが、システムの効率を重視する場合にはセル上流の圧力条件の設定に注意が必要である。

図4.3.29はセル上流のガス条件を(307 cm × 0.02 Pa)として、プラズマセルの電離度と中性化効率の関係を示す図である。同図はガスセルの設計で示したように、中性化セル通過後の正負のイオン電流値が等しくなるように線密度を選んだ。以下では図4.3.29を基準に検討をすすめる。

### C) プラズマセルの電離度

図4.3.29にみられるように、電離度を上昇させるに従い中性化効率は増大する。図4.3.30に放電室から引き出すD-電流と電離度の関係を示した。同図もガスセルの場合と同様に正負イオンの比率が同じになるようなターゲット線密度を選んだ。ガスセルの場合にはイオン源当たりの引き出し電流は37.4 Aであるが、電離度が20%では30.5 A(中性化効率73.3 A)に減少する。さらに50%の電離度では引き出し電流は28.5 Aになる。またプラズマセル内の標的粒子の線密度も、ガスセルの場合に比較して電離度が20%で49%に、50%では34%に減少する。

プラズマセルの電離度は40~50%程度得られれば充分であるが、20%程度でもプラズマセル採用の効果は大きい。

プラズマセルの電離度は放電方法やプラズマの閉じこめ方法に依存する。さらに中性化セル内は圧力勾配があり、ガスの流れもある。このような状況でセル内のプラズマの様子を見積もることはたやすくはなく、セルの電離度の定義自体も簡単ではない。セル内のプラズマの解析は今後の検討項目として残し、ここでは電離度が決まることによって、図4.3.18で示した標的粒子の線密度がセル内に与えられるとする。

プラズマセルの電離度を見積もることができる適当な実験が見あたらぬため、NB Iイオン源の例を参考にする。NB Iイオン源のソースプラズマの典型的な電離度は数%から10%内外である。しかし放電室を大型化し、プラズマの閉じこめに配慮したイオン源では、0.5 Paで350 mA/cm<sup>2</sup>のイオン飽和電流密度を得ている[8]。電離度に換算すると19%程度である。このデータを参考に電離度を20%程度としてみる。

さらに仮定としてセル内の標的粒子はそれぞれ平均密度で代表できるとし、ガス密度、プラズマ密度を $n_g$ 、 $n_e$ とする。中性化セルの長さを3 mとすると、図4.3.29から各標的粒子の平均密度は、

$$n_g = 8.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

$$n_e = 2.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

となる。

上記のガス密度はNB Iイオン源の場合より一桁程度低い。このような圧力条件で $10^{18} \text{ m}^{-3}$ 台のプラズマを中性化セル内に生成することは容易ではない。放電圧力を高く設定する考え方もあるが、排気ポンプの負担が大きくなる。プラズマセルを用いたシステムの検討として、以下では電離度を20%、標的粒子密度を $n_g = 8.6 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 、 $n_e = 2.2 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ として試算をすすめる。

### 4.3.3.1.2-3 プラズマセルを用いたNB Iシステム(1)

#### A) ビームライン構成

イオン源の放電室から引き出したH-電流の減衰は前述したように、

引き出し・加速部での電子剥離損失 0.29

中性化セルでの発散損失	0.05
中性化セル下流での再電離損失	0.03

とする。

プラズマセルの電離度が20%のときは中性化効率は73.3%で、放電室からの引き出し電流は図4.3.1.9で示したように、30.2Aである。加速後の電流密度を18mA/cm<sup>2</sup>に選ぶと、イオン源のセグメントグリッドの大きさは、0.18m×0.33mである。ただしセグメントはイオン源当たり5ヶで、開孔率は40%とした。

ビームレットの発散角( $\omega_{1/e}$ )を仕様書に基づき5mradとしてビームの強度分布を求めた結果を図4.3.3.1に示す。同図(a)はひとつのセグメントから引き出したビームの中性化セル前後の分布である。セルで5%のパワーが削られるとしてセル寸法を決めた。

(b)は上下の各イオン源の5つのセグメントを合成した強度分布で、20.7mの焦点位置でガウス分布となる。

#### B) ガスフロー

前項で求めた中性化セル等の寸法から計算したガスフローを図4.3.3.2に示す。イオン源のグリッドは7枚構成で各グリッドの開孔率は40%である。同図の計算ではセル内のガス分子は、セル等のガスコンダクタンスに従う圧力分布を形成するとした。中性化セルへのガスの補給位置は上流から1.14mで、合計した排気ポンプの容量が最も少なくなるように選んだ。ガス源はイオン源からの流出ガスと中性化セルへ補給したガス、およびビームダンプでガス化した非中性化イオンを加えたガスである。排気するガスは全体で6.8Pa·m<sup>3</sup>/secで、トカマクへ0.004Pa·m<sup>3</sup>/sec流入するとした。

排気ポンプはイオン源タンクとビームダンプタンクにおき、ビームダンプタンクではふたつのポンプで差動排気する。イオン源タンクの排気容量は25.7m<sup>3</sup>/sec、ビームダンプタンクはそれぞれ17.6m<sup>3</sup>/secと29.2m<sup>3</sup>/secで、全体で72.5m<sup>3</sup>/secである。ガスセルの場合と比べて大きく減少する。プラズマセルの採用は、中性化効率の増大とともに、排気ポンプの容量低減に効果がありシステム全体の規模を小さくできる。

#### C) プラズマセルに要する放電パワー

ビームの強度分布から求めた寸法を基に、セル内にプラズマを発生するために必要な放電パワーを見積もる。プラズマはフィラメントを用いた直流放電で発生させるとし、荒川等の手法で計算する[9]。詳細は参考文献に依ることにし必要な数式を転記する。

放電パワーの見積もりにおいても、セル内の粒子はそれぞれ平均密度で代表できると仮定する。放電で発生する単位時間当たりのイオンの生成率は、

$$I^+ = e n_p n_g \langle \sigma v \rangle_1 V + n_e n_g \langle \sigma v \rangle_2 V$$

である。ただし、 $I^+$ はイオン生成率で、 $n_e$ 、 $n_p$ は熱電子密度とフィラメントから放出された一次電子密度 $n_g$ 、 $V$ はガス分子密度、プラズマ体積である。また、 $\langle \sigma v \rangle_1$ と $\langle \sigma v \rangle_2$ は一次電子によるイオン化の反応係数と熱電子によるイオン化の反応係数である。

イオンは無衝突(自由落下モデル)でカソードやプラズマセルの壁へ衝突し失われるとする。イオンの損失は、

$$I^+ = 0.4875 e C_s S_L$$

ただし、0.4875はSelf,S.A.の無衝突プラズマモデルから導かれる係数[10]、 $C_s$ はイオンの音速、 $S_L$ はイオンの損失面積である。プラズマセルの壁面はプラズマ閉じ込め用の永久磁石によってカスプ磁場が形成されているものとし、磁場によって覆われていない壁の面積をA1、覆われている面積をA2とし、カソード面積を $S_L$ とすると、損失面積はプラズマセル壁のうち、

$$S_L = A_1 + A_2 f_c + S_f$$

はカスプ磁場によって覆われている面積の比率である。

また、フィラメントから放出された一次電子  $I_e$  は、ガス分子やイオンとの衝突で減速されるとともに、プラズマセルの壁に衝突して失われる。

$$I_e = \frac{e n_p}{\tau_e} V + e n_p n_g \langle \sigma v \rangle_3 V$$

ただし、 $\langle \sigma v \rangle_3$  は一次電子が減速される割合  $\tau_e$  は一次電子の保持時間で  $v_e$  を一次電子の速度として、

$$\tau_e = \frac{4V}{v_e (A_1 + f_c A_2)}$$

である。

上式からイオンの生成率  $I^+$  は、

$$I^+ = f \cdot I_e \frac{n_g \langle \sigma v \rangle_1}{\left( \frac{1}{\tau_e} + n_g \langle \sigma v \rangle_3 \right)}$$

$$f = \frac{1}{1 - \frac{V n_g \langle \sigma v \rangle_2}{0.4872 C_s S_L}}$$

ここで、放電パワーの計算に必要な数値を、上述の見積もりと JT-60U の NB I の設計例を参考に、各セグメント当たり次のように与える [1]。

- ・電子温度  $T_e = 5 \text{ eV}$
- ・電子密度  $n_e = 2.17 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
- ・D<sub>2</sub>密度  $n_g = 8.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
- ・プラズマセルのセグメントの形状断面  $0.18 \text{ m} \times 0.32 \text{ m} \times \text{長さ } 3 \text{ m}$  (両端面は損失領域と考える)
- ・一次電子のエネルギー  $60 \text{ eV}$
- ・カスプの幅は壁表面でのイオンのラーマー半径の2倍で、磁石間隔は  $7 \text{ cm}$  とする。
- ・ $\langle \sigma v \rangle_1 = 3 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{s}$  [9]
- ・ $\langle \sigma v \rangle_2 = 3 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$  [9]
- ・ $\langle \sigma v \rangle_3 = 3 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{s}$  [9]

以上の値を代入して電子電流  $I_e$  を求めると、

$$I_e = 5233 \text{ A}$$

放電電流は参考文献から [9]、

$$I_{arc} = I_e + I_i = I_e + 2.9 \frac{m_e}{M_i} I_e$$

$$= 5372 \text{ A}$$

ここで  $I_i$  はイオン電流、 $m_e$ 、 $M_i$  は電子とイオンの質量である。

放電電圧を  $70 \text{ V}$  程度とするとセグメント当たりの放電パワー  $P_{arc}$  は、

$$P_{arc} \sim 0.38 \text{ MW}$$

と見積もられる。

また電子源であるフィラメントはタンクステンを用い、直径と長さを  $0.0015 \text{ m}$ 、 $0.2 \text{ m}$  とする。フィラメントからの電子放出は Richardson-Dashmann の式に従うとし、動作温度を  $3000 \text{ K}$  に選ぶと、フィラメント端での電流、電圧は、

$$\text{フィラメント電流} \quad 4688 \text{ A}$$

$$\text{フィラメント電圧} \quad 13 \text{ V}$$

である。ただし計算は、フィラメントへの投入パワーと放射熱が等しいとしてもとめた。

用いた定数は [11] [12]、

仕事関数	$4.5 \text{ eV}$
熱電子放出係数	$70 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{T}^{-2}$
比抵抗 ( $3000 \text{ K}$ )	$9.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
放射熱 ( $3000 \text{ K}$ )	$1.60 \times 10^4 \text{ W/m}^2$

セグメント当たりのフィラメントのパワーは 0.059 MW と見積もられる。

#### D) パワーフロー

プラズマセルに要する放電パワーを含めたパワーフローを図 4.3.3.3 に示す。損失パワーの算定は前報と同じである。インバータ／コンバータ、変圧器、ケーブル等を含めた引き出し電源、加速電源の損失は、それぞれ 10%、15%とした [1]。イオン源の放電電源、引き出し電源、加速電源およびセルの放電電源の各投入パワーと、プラズマへの入射パワーとの比は 45.3% となり、プラズマセルのために新たな放電パワーを要しても効率は改善できる。

#### 4.3.3.1.2-4 プラズマセルを用いた NBI システム (2)

プラズマセルを用いたシステムの別の例として、プラズマセルをセグメントに分けず一体型とした場合を考える。セルをセグメントに分割した場合には、隔壁がプラズマの大きな損失領域となる。セルを図 4.3.3.4 のように一体型にすると、排気ポンプの負担は増大するが、セルの放電パワーは低減できる。

前節と同様の試算を行ったパワーフローの計算結果を図 4.3.3.5 に示す。一体型にするとフィラメント電源も含めたセルの放電電源容量は、セグメント方式に比べて約半分の 1.1 mW となる。引き出し電源と加速電源の各電源への投入パワーとプラズマへの入射パワーとの比は 47.4% に上昇する。

一方排気ポンプの容量は全体で 2 割程度増大する。ただしセルのコンダクタンスは、角管と薄い孔のコンダクタンスの合成で与えられた。

排気ポンプの設置領域が確保できる場合には、セルを一体化することによってシステムのパワー効率を向上させられる。

表 4.3.6 と表 4.3.7 に設計値の一覧を示す。

#### 4.3.3.1.2-5 負イオン中性化方式のまとめ

J T - 60 S U の 750 keV - NBI システムについて、負イオンの中性化にガスセルとプラズマセルを用いるふたつの方式の概念設計を行った。750 keV システムは中性粒子ビームによる電流駆動も計画に含み、核融合炉の中核装置としての NBI 開発を目指している。システムの設計検討においては、コンパクト化等の装置の適正規模を探るとともに、システムのパワー効率の向上なども検討対象になる。

ガスセルを用いたシステムは、J T - 60 S U の 500 keV - NBI システムのクライオポンプ排気速度  $2400 \text{ m}^3/\text{s}$  に比べて  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  と約 1.4 倍の排気速度が必要となった。原因是ビームライン長を短くした影響で排気ポンプの負担が大きくなつたためである。しかし、セルを複数個のセグメントに分割するとともに、差動排気を効果的に用いることにより、現実的な構成が可能であるとの見通しをえた。ガスセル方式をさらにシステム全体として整合のとれた構成とするためには、概念設計の結果をビームラインの各構成機器の設計に反映させることが必要で、今後の課題である。

負イオンの中性化にプラズマセルを用いると中性化効率を改善できる期待がある。しかしプラズマセルに関する実験あるいは解析は皆無にちかい。本報告では粗い近似ではあるが、プラズマセルを用いた場合のシステム効率への影響を議論し、新たな放電パワーを追加したとしてもプラズマセルの採用によってシステム効率の改善が出来ることを示した。セルの電離度は中性化効率に大きく影響し、電離度は高い方が望ましいが 20% 程度でもプラズマセル採用の効果は大きい。

またプラズマセルを採用した場合は中性化のためのターゲット粒子の線密度が少なく、排気ポンプの容量を低減できる可能性もある。この特性を利用するには、低圧力で高い電離度のプラズマの発生が必要で、本概念設計では電離度 20%、電子密度  $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  のプラズマを例として示した。プラズマセルを利用するための課題は、閉じ込め性能が良く低圧力で効率の良い放電方法の開発である。

表4.3.5 プラズマセルの計算に用いた断面積 (750 keV-D<sup>-</sup>)

断面積	$\times 10^{-17} \text{cm}^2$	出典
$\sigma_{-0}^i$	95	[8]
$\sigma_{-0}^e$	100	[12]
$\sigma_{-0}^G$	16	[15]
$\sigma_{-+}^i$	-	-
$\sigma_{-+}^e$	3	[16]
$\sigma_{-+}^G$	0.9	[17]
$\sigma_{0+}^i$	6	[18]
$\sigma_{0+}^e$	4	[19]
$\sigma_{0+}^G$	4	[20]
$\sigma_{+0}^i$	-	-
$\sigma_{+0}^e$	-	-
$\sigma_{+0}^G$	0.009	[21]
$\sigma_{0-}^i$	-	-
$\sigma_{0-}^e$	-	-
$\sigma_{0-}^G$	0.0009	[21]
$\sigma_{+-}^i$	-	-
$\sigma_{+-}^e$	-	-
$\sigma_{+-}^G$	$2 \times 10^{-7}$	[21]

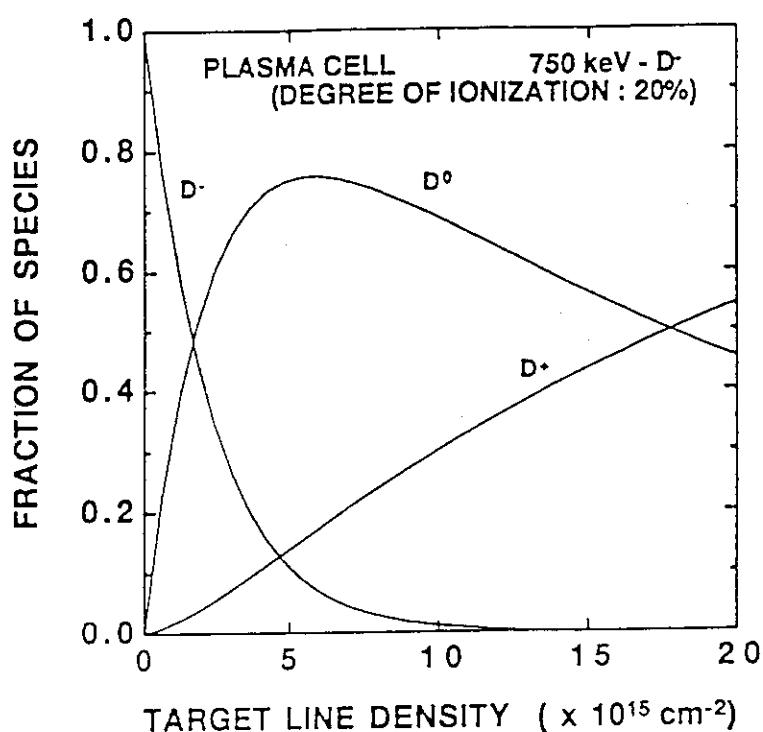


図 4.3.2.6 プラズマによる  $D^-$  の中性化

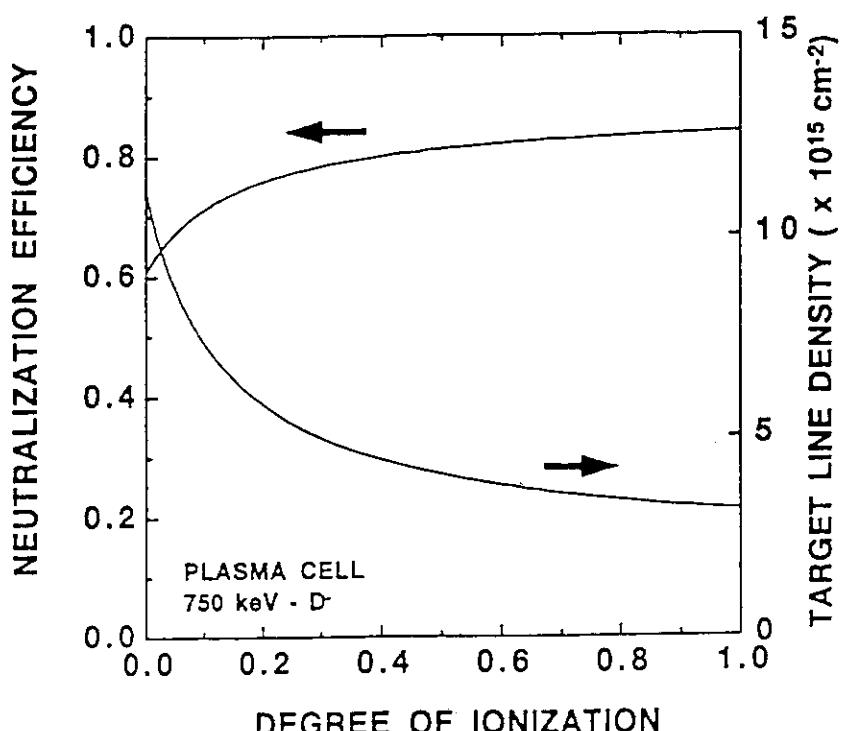


図 4.3.2.7 プラズマセルの電離度と中性化効率

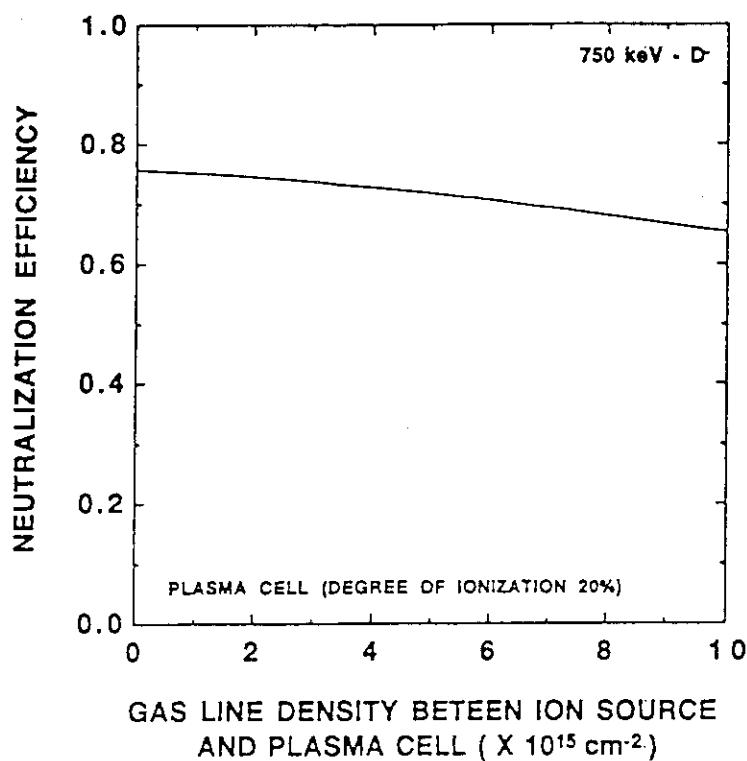


図 4.3.2.8 プラズマセルの上流でのビーム・ガス衝突を考慮したときの中性化効率

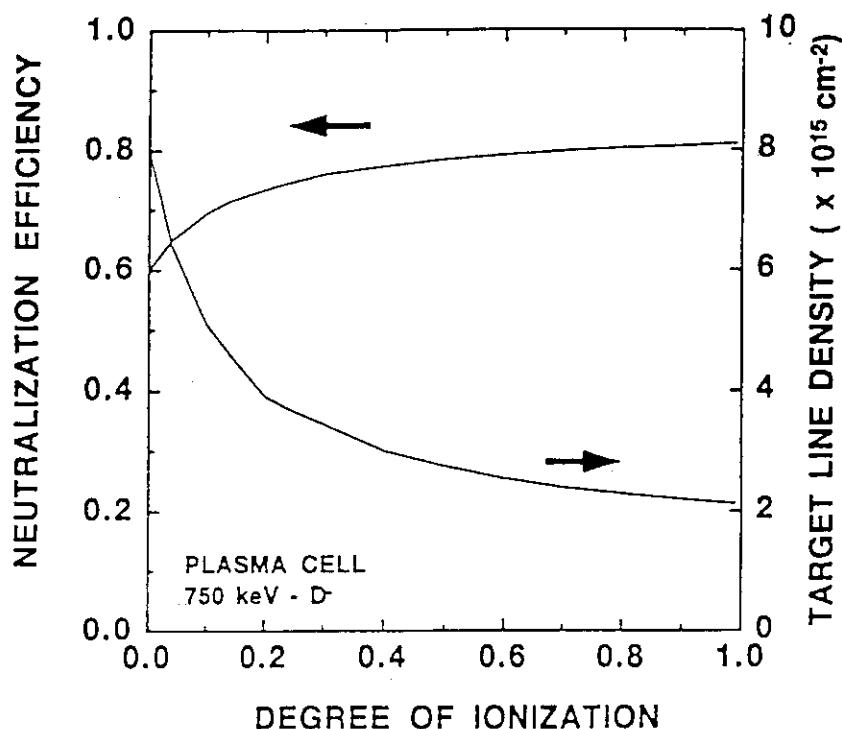


図 4.3.2.9 プラズマセルの上流でのビーム・ガス衝突を考慮したときの電離度と引き出し電流

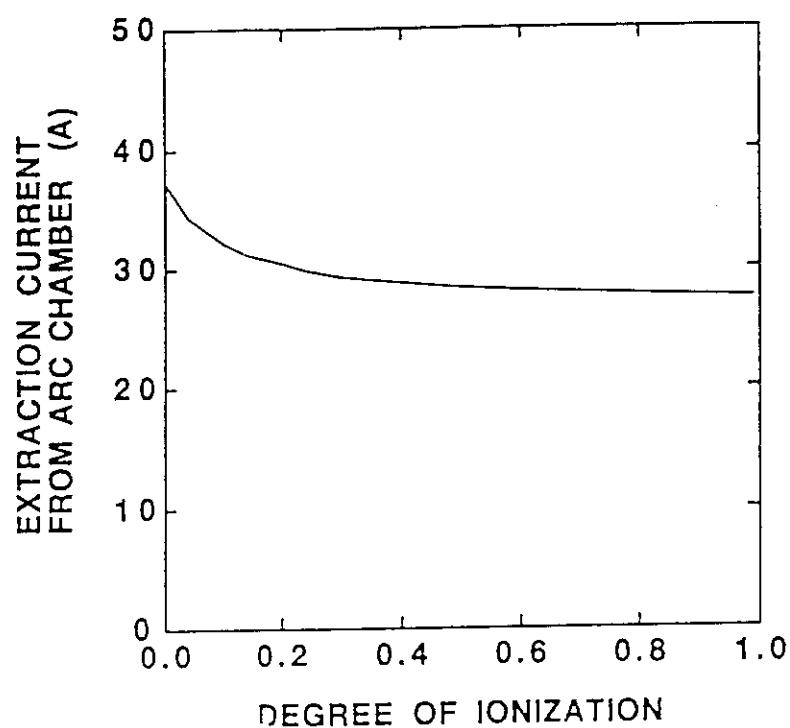


図4.3.3.0 プラズマセルの電離度と引き出し電流

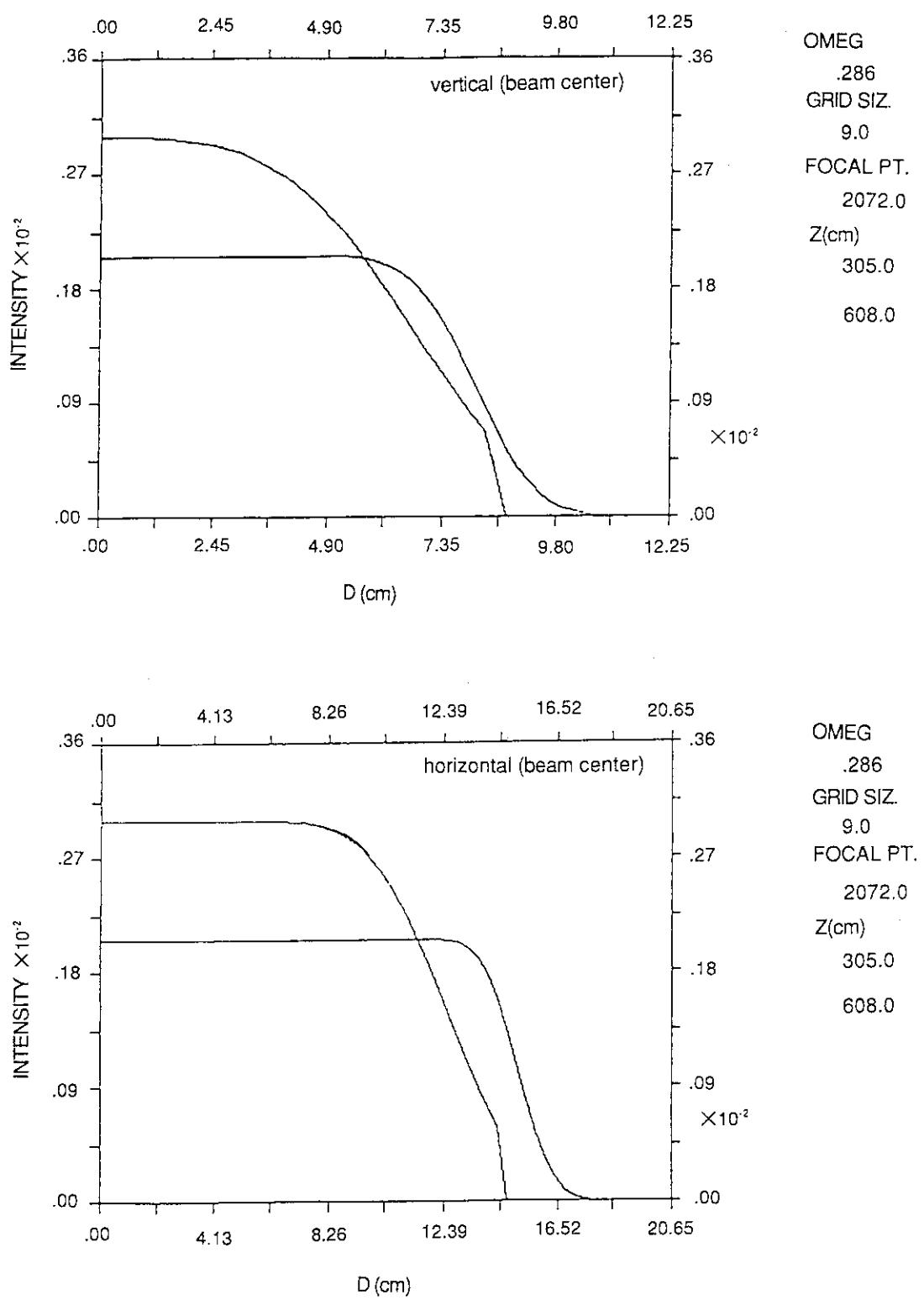


図 4.3.3.1 (a) ビームライン強度分布（プラズマセル方式）の強度  
中性化セル前後の強度分布

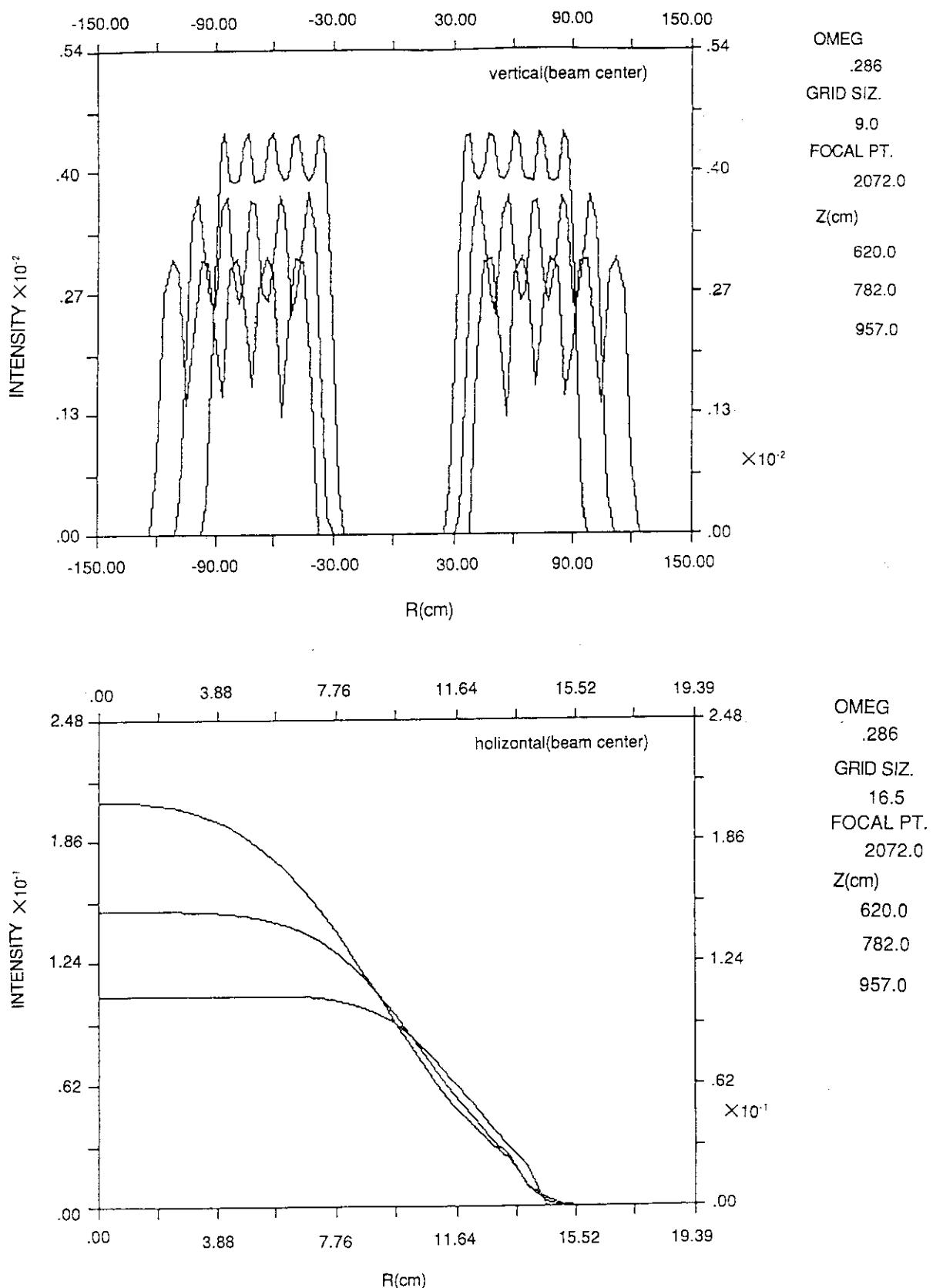


図 4.3.3.1 (b) ビームライン強度分布（プラズマセル方式）の強度  
2台のイオン源からのビームを合成した強度分布

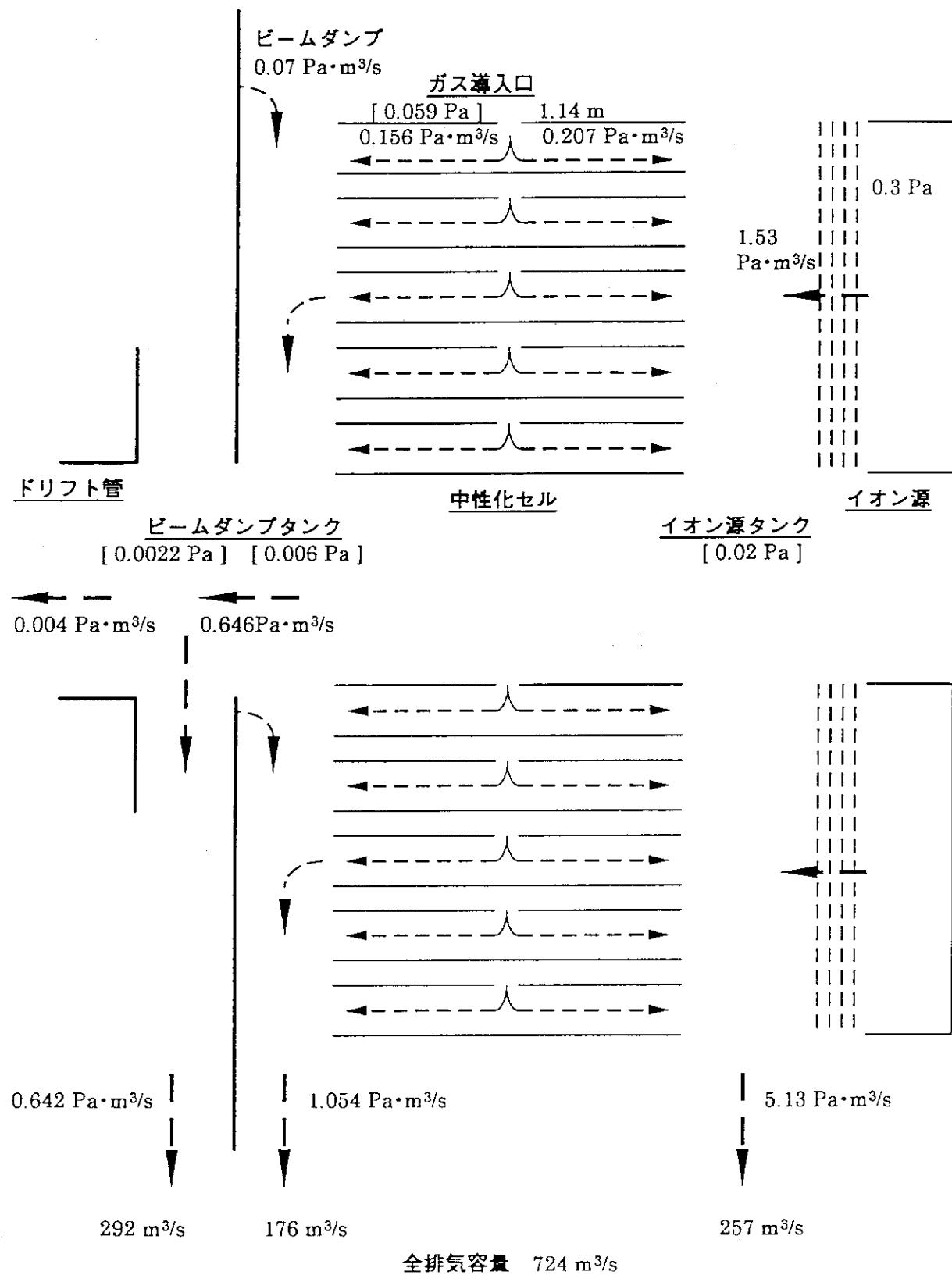


図4.3.3.2 プラズマセル方式のときのガスフロー（例1）

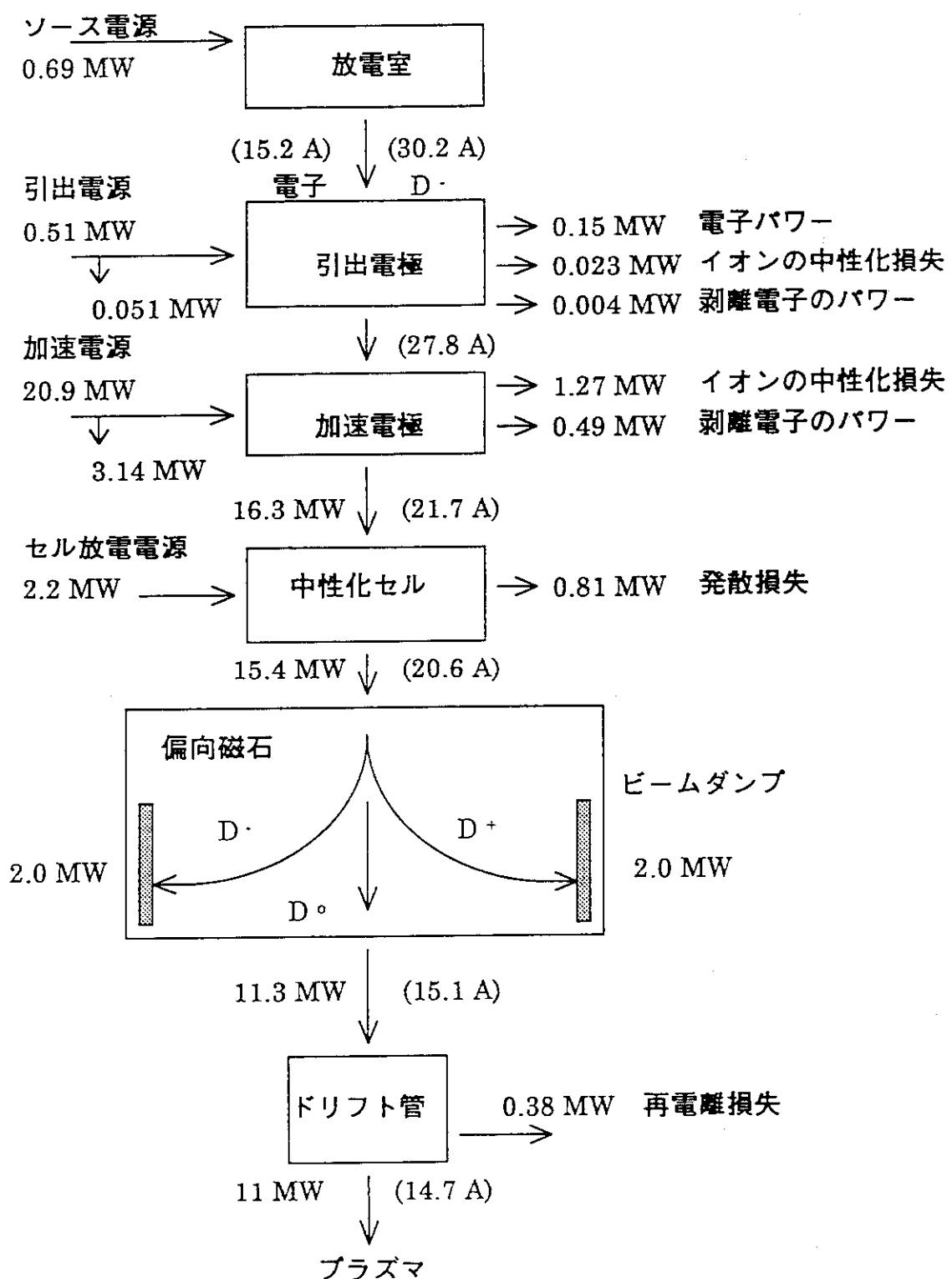


図4.3.3.3 プラズマセル方式のときのパワーフロー（例1）

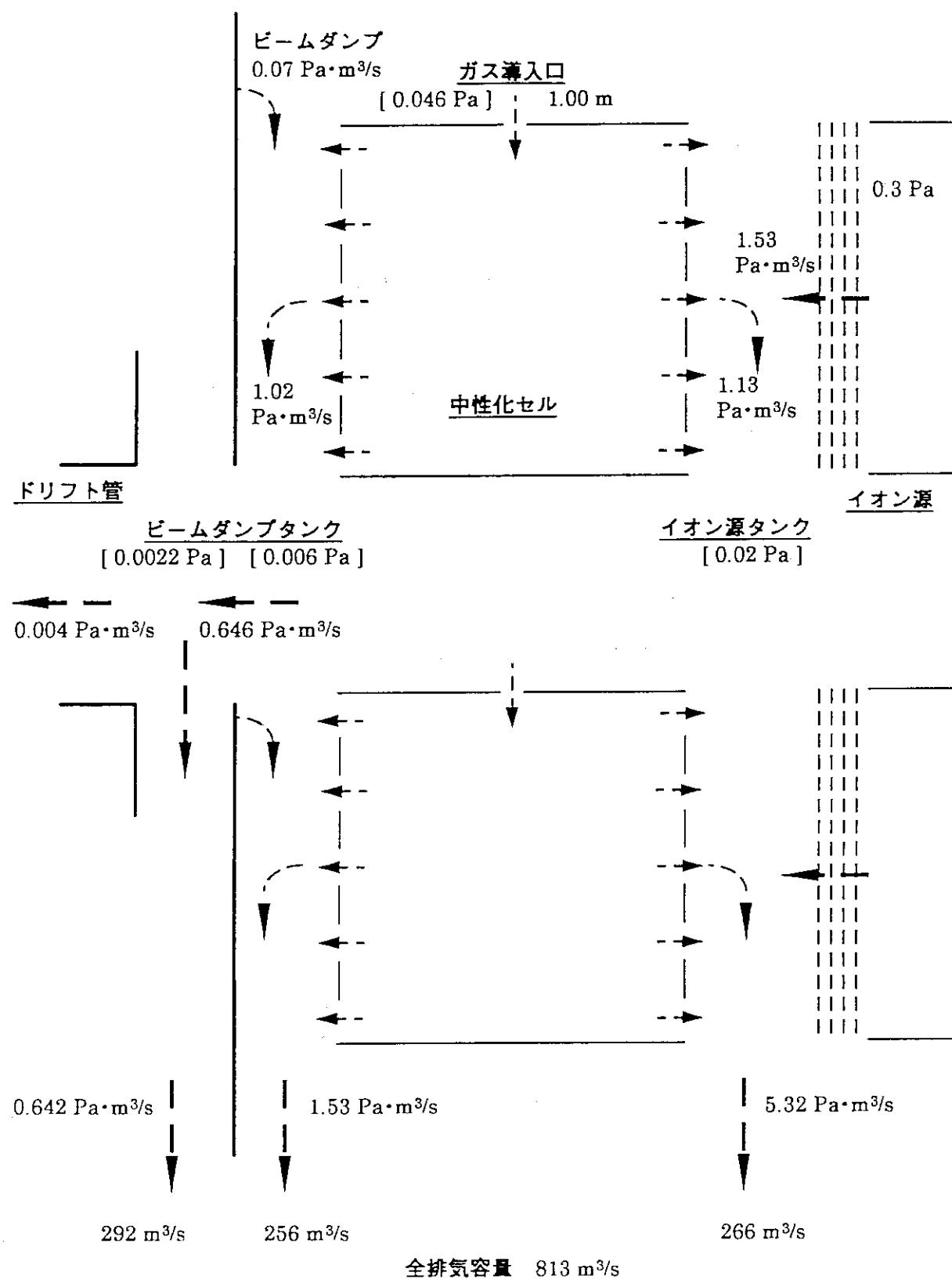


図4.3.3.4 プラズマセル方式のときのガスフロー（例2）

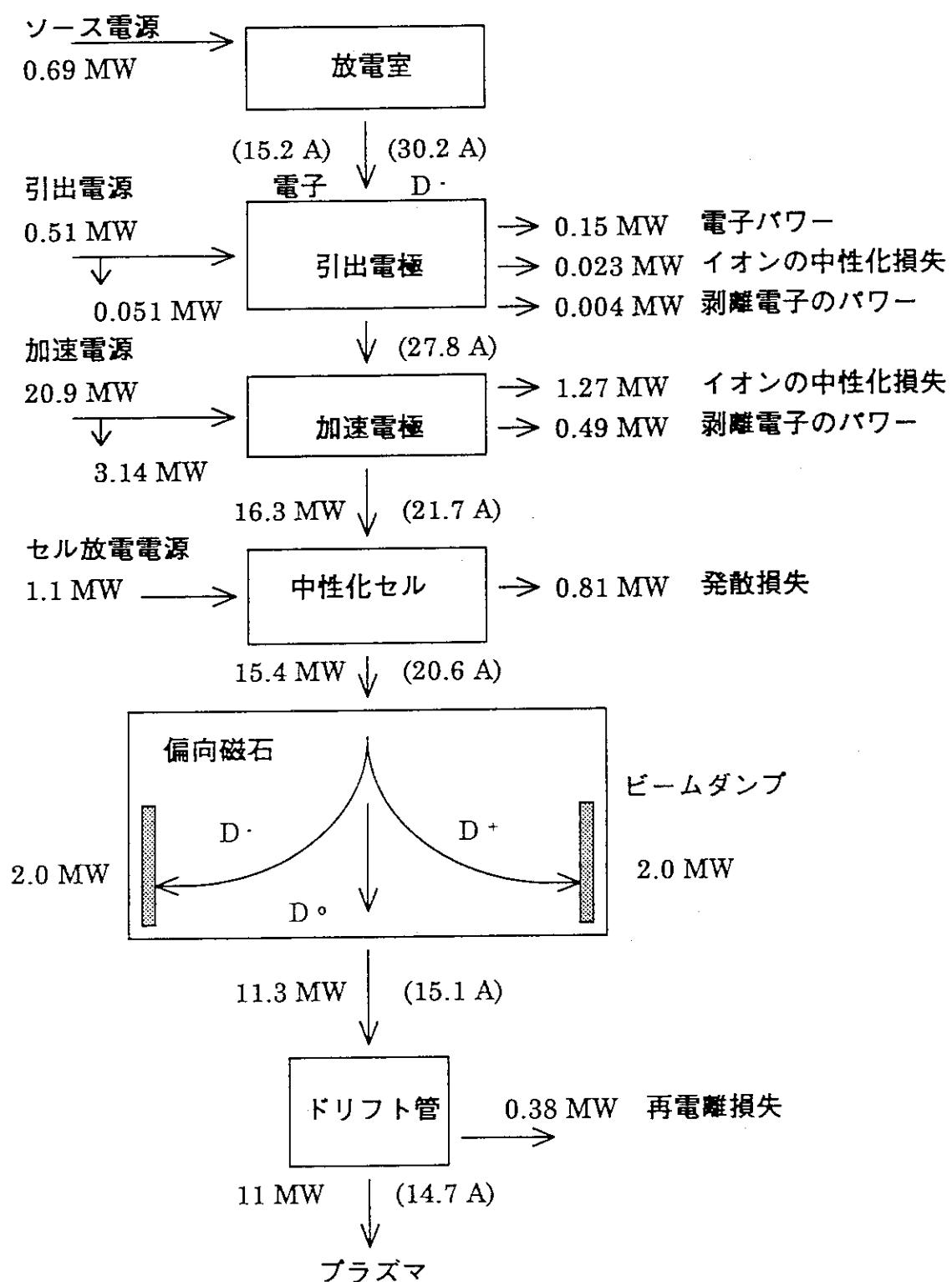


図 4.3.3.5 プラズマセル方式のときのパワーフロー（例2）

表4.3.6 プラズマセルを用いたNB-Iシステム—電離度20%（例1）

[セグメント方式]	
ビームエネルギー	750keV
入射パワー	22MW
ビーム種	D
イオン源	
・イオン源の数	2台／ビームライン
・電極のセグメント数	5／source
・電極寸法	33cm × 18cm (セグメント当たり)
・電極開孔率	40%
・引出	電極数3引出電圧 10kV
・加速	4段加速 (-740/-560/-370/-190kV)
・放電室圧力	0.3Pa
・引出電流	30.2A
・電流密度	25.7mA/cm <sup>2</sup> (プラズマグリッド出口) 18mA/cm <sup>2</sup> (接地グリッド出口)
・ビームレット発散角	5mrad.
・ビーム焦点	20.7m
イオン源タンク	
・圧力	0.02Pa
中性化セル	
・中性化セル長	3m
・中性化効率	73%
・セグメントの数	5×2／ビームライン
・セグメントの断面寸法	0.32m × 0.18m (入口) 0.29m × 0.17m (出口)
・ガス導入位置	1.14m (上流から)
・ガス導入圧力	0.059Pa
ビームダンプタンク	
・第1室の圧力	0.006Pa
・第2室の圧力	0.0022Pa
排気ポンプ	
・イオン源タンク	排気速度 257m <sup>3</sup> /s ガス流量 5.13Pa·m <sup>3</sup> /s
・ビームダンプタンク (第1室)	排気速度 176m <sup>3</sup> /s ガス流量 1.054Pa·m <sup>3</sup> /s
(第2室)	排気速度 292m <sup>3</sup> /s ガス流量 0.64Pa·m <sup>3</sup> /s

表4.3.7 プラズマセルを用いたNB-Iシステム—電離度20%（例2）

[一体型セル方式]	
ビームエネルギー	750keV
入射パワー	22MW
ビーム種	D
イオン源	
・イオン源の数	2台／ビームライン
・電極のセグメント数	5／source
・電極寸法	33cm × 18cm (セグメント当たり)
・電極開孔率	40%
・引出	電極数3引出電圧 10kV
・加速	4段加速 (-740/-560/-370/-190kV)
・放電室圧力	0.3Pa
・引出電流	30.2A
・電流密度	25.7mA/cm <sup>2</sup> (プラズマグリッド出口) 18mA/cm <sup>2</sup> (接地グリッド出口)
・ビームレット発散角	5mrad.
・ビーム焦点	20.7m
イオン源タンク	
・圧力	0.02Pa
中性化セル	
・中性化セル長	3m
・中性化効率	73%
・ビーム入口寸法	0.32m × 0.18m × 5ヶ
出口寸法	0.29m × 0.17m × 5ヶ
・ガス導入位置	1.00m (上流から)
・ガス導入圧力	0.046Pa
ビームダンプタンク	
・第1室の圧力	0.006Pa
・第2室の圧力	0.0022Pa
排気ポンプ	
・イオン源タンク	排気速度 266m <sup>3</sup> /s ガス流量 6.32Pa · m <sup>3</sup> /s
・ビームダンプタンク (第1室)	排気速度 256m <sup>3</sup> /s ガス流量 1.53Pa · m <sup>3</sup> /s
(第2室)	排気速度 292m <sup>3</sup> /s ガス流量 0.64Pa · m <sup>3</sup> /s

#### 4.3.3.1.3 イオン源タンク

イオン源タンクは、設置される2台のイオン源から流入する過大なガスを処理し、イオン源の安定な運転を行うためにある。この概略寸法は、図4.3.3.6に示すように縦2m、横1.5m、高さ7mである。

##### ①基本仕様

- A) イオン源タンクの領域における漏洩磁場は、平均が約1000Gと予想されている。よって、このイオン源タンクは、極低温超伝導におけるマイスナー効果を用いて磁気シールドされる。
- B) イオン源タンクはイオン源からの過大なガスを排気するためのものであるので、大容量の排気系が必要である。よって、上記の磁気シールドはクライオパネルを兼ねるものとする。ここで使用する極低温超伝導材はニオブチタン（新日鉄）等を検討評価すること。なお、磁性体による磁気シールドを行った場合についても検討評価する。
- C) 真空容器の上下フランジは取外し可能とする。
- D) フランジ面の真空シールはバイトンOリングを使用する。
- E) 本真空容器のうち真空となる部分は、下スカート部の上に固定され、下スカート部には、電源ケーブル及び冷却水導入部などが収容れる。
- F) 真空容器内からの放出ガス量は、真空引き開始24時間後で、 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下とする。
- G) 真空容器は、ステレンスクラッド鋼で検討する。
- H) ビーム監視用に可視光をカメラでモニターできるようにタンクの側面に2箇所、上部に2箇所のポートを取付けること。ただし、上部に取付けられたポートは、中性化セル入口（イオン源タンク側）が直視できる位置に取付ける。
- I) ビームの分光測定が行えるようにタンク側面に4箇所ポートを設ける。
- J) イオン源タンクには数多くのポートが存在するので、その事を考慮したタンク構造とする。
- K) 中性化セル入口（イオン源タンク側）に図4.3.3.7に示すような熱電対の付いたビームリミタを取付ける。
- L) 以下に本タンクに必要とされるポートを挙げる。
  - a) イオン源設置角度調整装置用 2個
  - b) クライオポンプ設置用 8個
  - c) ターボ分子ポンプ用 1個
  - d) 冷却水導入用 2個
  - e) 電力導入用 1個
  - f) 計測用 10個
    - ア) ガス圧測定 (2個)
    - イ) 可視光測定 (2個)
    - ウ) 分光測定用 (2個)
    - エ) その他 (4個)
  - g) マンホール 500mmφ 1個
  - h) その他必要と思われるポート
- M) 以下このタンクに設置されるものについて挙げる。
  - a) 磁気シールド兼クライオポンプ
  - b) ターボ分子ポンプ
  - c) イオン源角度調整装置
  - d) ビームリミタ
  - e) 水抜き用ドレン
  - f) マンホール
  - g) その他必要な機器

ステンレスクラッド鋼

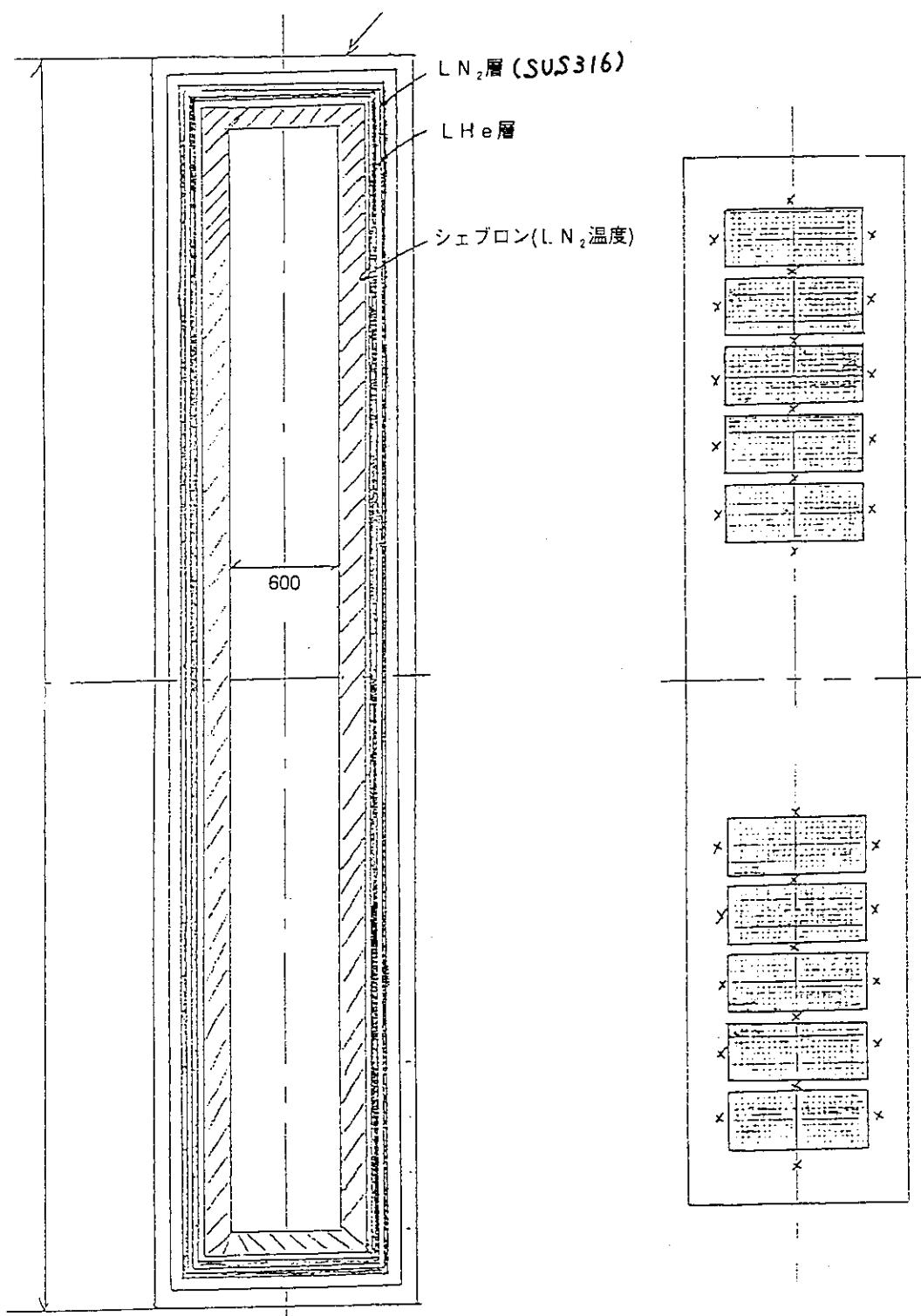


図4.3.3.6 イオン源タンク(750keV) 図4.3.3.7 中性化セル入口ビームリミタ  
(X印は熱電対取付位置を示す)

#### 4.3.3.1.4 中性化セル

中性化セルは、2台のイオン源に対応して、上下2本からなる。この1本の概略内面寸法は、図4.3.3.8及び図4.3.3.9に示すような断面が $800\text{ mm} \times 1400\text{ mm}$ であり、長さ3mの矩形管である。この矩形管は断面が $500\text{ mm} \times 210\text{ mm}$ の5本の矩形管に分割される。この5本の矩形管にはそれぞれ中央部にガス導入穴が開けられている。

##### ①仕様

- A) この中性化セルの領域における漏洩磁場は、平均が約 $1000\text{ G}$ と予想されている。よって、中性化セルは高温超伝導におけるマイスター効果を用いた方法により磁気シールドされる。また、極低温超伝導におけるマイスター効果を用いた磁気シールド及び磁性体による磁気シールドを行った場合についても検討評価する。
- B) ガス導入用ポートを中性化セルの5つの矩形管の中央部にそれぞれ取付ける。ここから導入するガスは液体窒素温度にし、中性化セルにおけるコンダクタンスを小さくする。
- C) 中性化セル側面の上下にビームの分光用ポートを取付ける。
- D) 中性化セルの受ける熱量をモニターするために、ビーム軸に沿って3箇所熱電対を受熱板に取付ける。
- E) 中性化セル内の真空度をモニターするために、ビーム軸に沿って5箇所の真空度計測用ポートを取付けることとする。
- F) 中性化セルの受熱板は、イオン、電子、中性ビームに直接面し、最大 $1.4\text{ MW}$ の熱量を受けるため、水冷構造とする。この場合、導入するガスの温度をできるだけ液体窒素温度に押さえる構造とする。
- G) 中性化セルとイオン源タンク及びイオンダンプタンクとの接続部にはペローズを設け、熱変形などの変位を吸収できる構造をする。

#### 4.3.3.1.5 イオンダンプタンク

概略寸法は、直径 $3.5\text{ m}$ 、高さ $8\text{ m}$ の円筒である。

##### ①基本仕様

- A) 真空容器の上下フランジは取外し可能とする。
- B) フランジ面の真空シールは、バイトンOリングを使用する。
- C) 本真空容器のうち、真空となる部分は、下スカート部の上に固定され下スカート部には、電源ケーブル及び冷却水導入部などが収容される。
- D) 真空容器内からの放出ガス量は、真空引き開始24時間後で、 $1 \times 10^{-3}\text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下とする。
- E) 可視光測定用のポートを5箇所取付ける。
- F) 赤外光測定用のポートを4箇所取付ける。
- G) 分光測定用のポートを側面に8箇所取付ける。
- H) イオン源タンクには数多くのポートが存在することを考慮したタンク構造とする。
- I) 以下に必要とされるポートを挙げる。
  - a) 中性化セル接続用 1個
  - b) 高速シャッター管接続用 1個
  - c) ターボ分子ポンプ用 1個
  - d) クライオポンプ設置用 10個
  - e) ビーム可視光モニター用 5個
  - f) カロリーメータ冷却水用 1個
  - g) プロファイルコントローラ冷却水用 1個
  - h) 真空ゲージ用 3個
  - i) 赤外カメラ用 4個

- j) 分光測定用 8 個
- k) マンホール 500 mm  $\phi$  1 個
- l) イオンダンプ冷却水用 4 個
- m) 偏向コイル冷却水用 2 個
- n) その他必要なポート
- J) 以下このタンクに設置されるものについて挙げる。
  - a) クライオポンプ
  - b) ターボ分子ポンプ
  - c) カロリーメータ
  - d) イオンダンプ
  - e) プロファイルモニター
  - f) 偏向コイル

## ②イオンダンプタンク機器検討

ビームダンプタンク内には、偏向コイル2組、ビームダンプ、カロリーメータ、クライオポンプ4個が設置される。これら機器を配置する空間を十分に確保するために、図4.3.4.0に示すように炉本体側が円形、イオン源側が角形となる構造に設定する。タンク内に設置される偏向磁場コイルとビーム偏向後のビームダンプ上の熱負荷についての検討結果を次項4)の①{偏向磁場コイル・磁場分布解析検討}及び5)①{偏向された残留イオンのビームダンプ上の熱負荷分布検討}に示す。

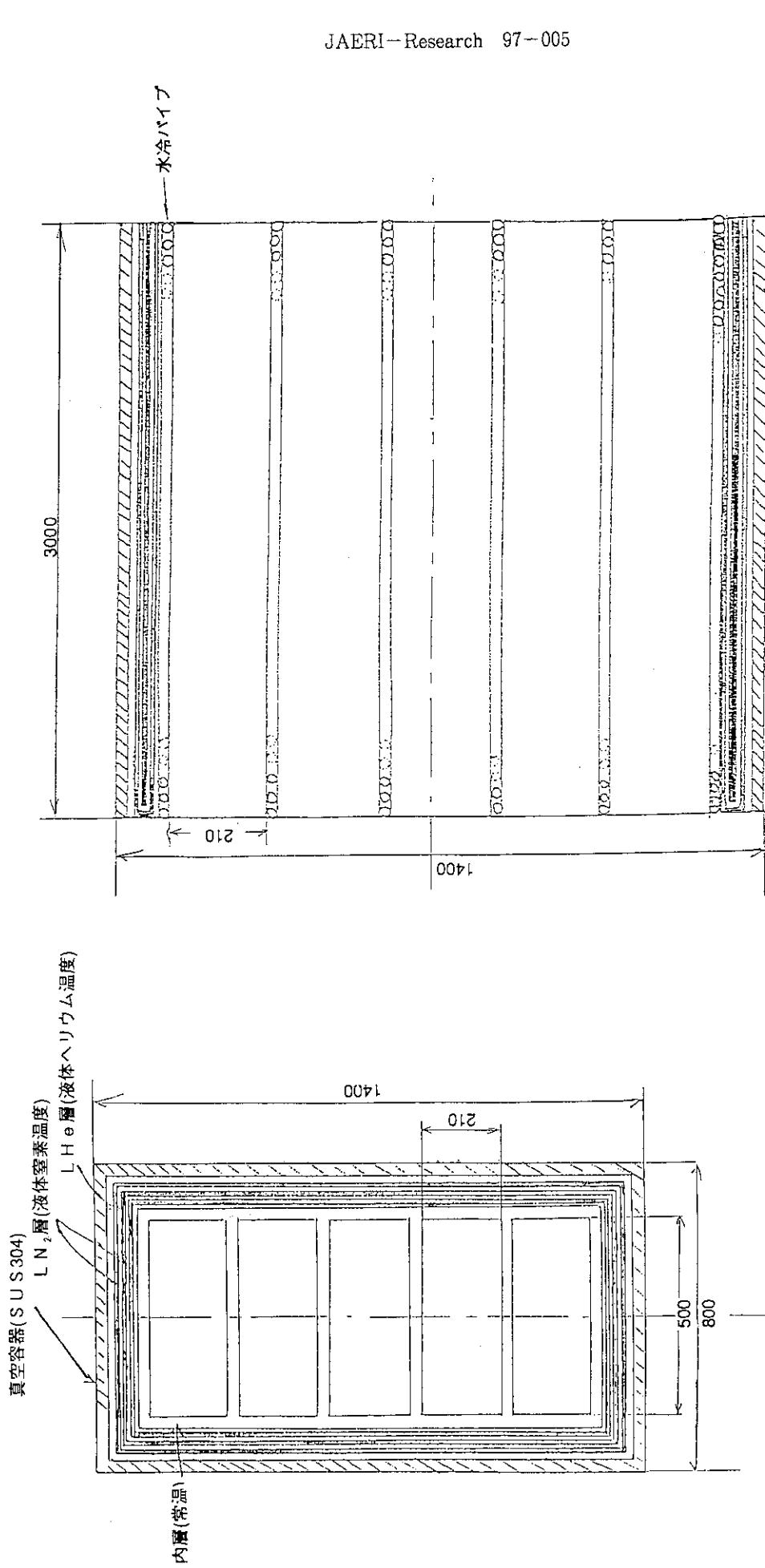


図4.3.3.9 中性化セル(750keV)イオン源側断面

図4.3.3.8 イオン源タンクビームリミタ

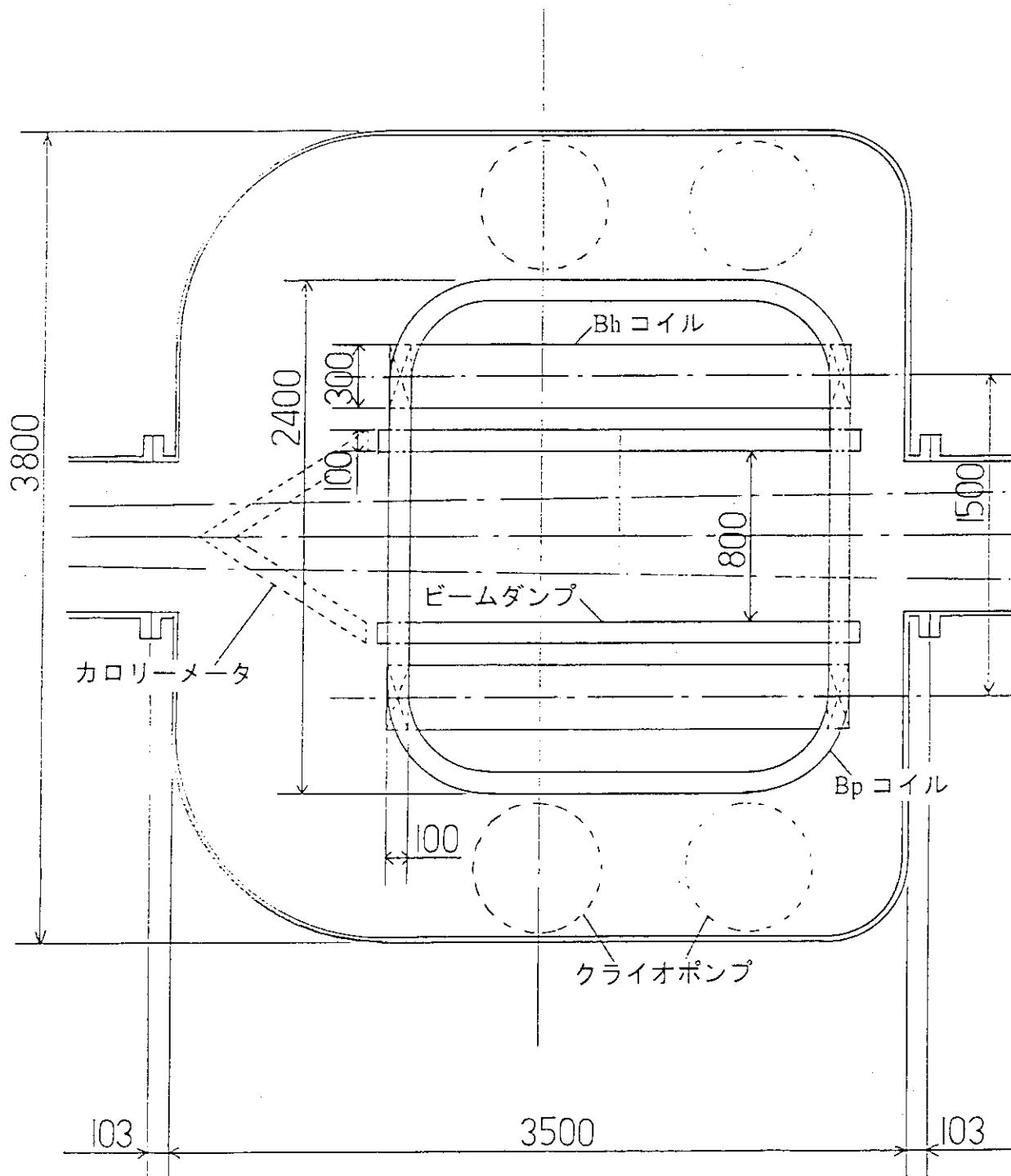


図 4.3.4.0 イオンダンプタンク内機器配置上面図

#### 4.3.3.1.6 偏向コイル系

偏向コイル系は、正負イオンビームを水平方向に偏向し左右のイオンダンプに導くための鉛直方向の偏向磁場発生コイルとイオンダンプ上ビームの当たる面を上下に振り分ける水平方向の偏向磁場発生コイルからなる。必要な磁場値は、750 keV重水素ビーム運転時、鉛直方向 ( $B_p$ ) が約200Gで、水平方向 ( $B_h$ ) は800Gである。

ビームエネルギーやビーム種を変えたときもイオンビームが同一の軌道を描くように発生磁場も連動して変える。偏向コイルの位置ではトカマクからの時間変化する漏洩磁場が上下方向に発生する。このような外乱に対しても両偏向コイルの中央付近の磁場が所定の値になるように、磁気プローブを設けその信号を基に偏向コイル電源は磁場一定となるような制御がなされる。

鉛直方向の偏向磁場発生コイル（以後  $B_p$  偏向コイルと記す）の発生する磁場の向きはトカマク放電の後半における漏洩磁場の向きと同方向に発生させることとし、 $B_p$  偏向コイルの必要なアンペアターン数の低減をはかる。プラズマ電流の向きが正極性（上方より見て時間周り）の場合、後半における漏洩磁場は反時計方向の電流の発生する向き、すなわち  $B_p$  偏向コイル近傍では下向きの磁場となる。 $B_p$  偏向コイルもこの方向に励磁することからこの場合、イオン源から見て左側のイオンダンプに正イオンが導かれ、右側に負イオンが導かれる。プラズマ電流の向きが逆極性の場合は逆となる。 $B_p$  偏向コイルの励磁電流はトカマク放電の初期で漏洩磁場が0の場合単独で必要磁場（750 keV重水素時約200G）を発生し、放電後半で漏洩磁場が過大な場合は逆向きに磁場を発生させて磁場を一定に保つ。

$B_p$  偏向コイルの可能な発生磁場値は両コイルの中央付近で±250Gとする。アンペアターン数は各150 kATとし、両コイルは電気的に直列に接続される。

磁気プローブは一軸のホール素子とし、左右のイオンダンプの背後に近接して上下及び左右方向の磁場を測定するように設ける。冗長性を持たせたもので、2個の測定値を比較しながら偏向コイル電源が制御される。

水平方向の偏向磁場発生コイル（以後  $B_h$  偏向コイルと記す）はビーム軸に直角で且つ  $B_p$  偏向コイルの磁場と直角な磁場を発生させる。この磁場によりイオンビームを鉛直（上下）方向に曲げる。これによりイオンダンプ面でイオンの当たる面積を等価的に増し、イオンダンプでの、極所的な熱負荷量を減少させる。

##### ①偏向磁場コイル・磁場分布解析検討

750 keV負イオンNB1システムでは焦点距離が20721mmと長く、ダンプタンク内を通過するビーム位置が上下に高くなるため、広範囲に渡ってビーム偏向磁場領域をつくらなければならない。またビームダンプ寸法が高さ3000mm×長さ2300mmと大きいため、偏向コイル間距離が長くなり、ダンプ中心と端部での磁場勾配を出来るだけ小さくする必要がある。そこで図4.3.4.0、図4.3.4.1に示すように偏向コイルを厚さが太く、幅が小さい構造にする。

偏向磁場コイル形状および電流値を表4.3.8に示す。

図4.3.4.2 イオン源からビーム焦点までの機器配置略図を示す。ダンプタンク内の偏向磁場中心を基準に図のように座標系をとる。図4.3.4.3 (a) に  $B_p$  コイルによる中心磁場分布変化 ( $B_y$ ) を、図4.3.4.3 (b) に  $B_h$  コイルによる中心磁場分布変化 ( $B_z$ ) を示す。ここではビーム単独運転時を想定しているため、プラズマ電流やポロイダル磁場コイルによる漏洩磁場は考慮していない。 $B_h$  コイルによる中心磁場は、中心と端部の傾きが小さいが、 $B_p$  コイルによる中心磁場変化では磁場勾配が大きい。

次にビーム通過領域内での磁場について見てみる。図4.3.4.4に示す(1)～(8)の位置での磁場変化について調べる。(1)～(2)及び(5)～(6)については  $B_p$  コイルによるY方向磁場変化を、それぞれY方向、Z方向をパラメータに、(3)～(8)については  $B_h$  コイルによるZ方向磁場変化をZ方向をパラメータに計算すると図4.3.4.5の様になる。図中の

黒で囲んだ領域がビーム通過領域である。B<sub>p</sub>コイル磁場はX方向位置変化について見ると0.01 T程度で大きな変化はないが、Z方向位置変化で見るとビーム上端(5)では通過領域内で大きく変化し、下端(6)では大きく変化していない。したがってビーム上端に近くなるほどB<sub>p</sub>コイル磁場が大きくなりビームの偏向軌道に影響することになる。またB<sub>h</sub>コイル磁場はビーム通過上端((3)、(5)、(7))と下端((4)、(6)、(8))とで約0.02～0.025 Tの違いがあり、下端側のビーム軌道半径がビームの軌道に大きく寄与するのが分かる。

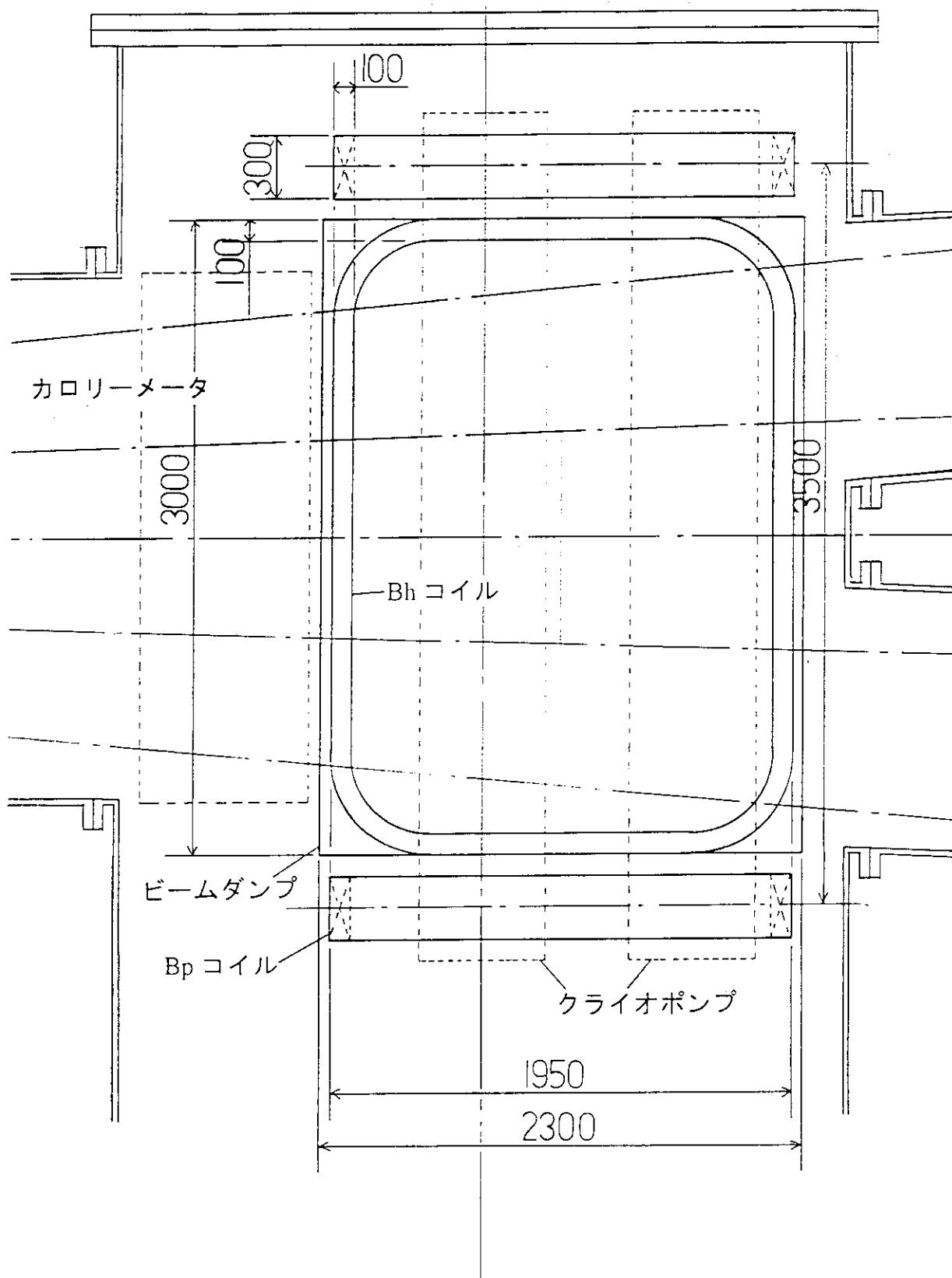


図4.3.4.1 イオンダンプタンク内機器配置側面図

表 4.3.8 偏向コイル基本条件

(1) B h コイル

コイル形状	3 0 0 0 mm × 1 9 5 0 mm
コイル高さ	3 0 0 mm
コイル幅	1 0 0 mm
左右コイル間幅	1 5 0 0 mm
コイル電流	1 5 0 kA

(2) B p コイル

コイル形状	2 4 0 0 mm × 1 9 5 0 mm
コイル高さ	3 0 0 mm
コイル幅	1 0 0 mm
左右コイル間幅	3 5 0 0 mm
コイル電流	2 2 0 kA

表 4.3.9 ビーム軌道解析条件（イオン源 1 個につき）

電極寸法	1 0 0 0 mm × 5 0 mm
エネルギー	7 5 0 keV
引出電流	3 4. 2 A
質量 ( $D^+$ , $D^-$ )	$3.32 \times 10^{-17} kg$
発散角	5 mrad
焦点距離	2 0 7 2 1 mm
中性化効率	6 0 %
ビームダンプへのパワー	7.6 mW ( $D^+ + D^-$ )
B h コイル電流	1 5 0 kA
B p コイル電流	2 2 0 kA

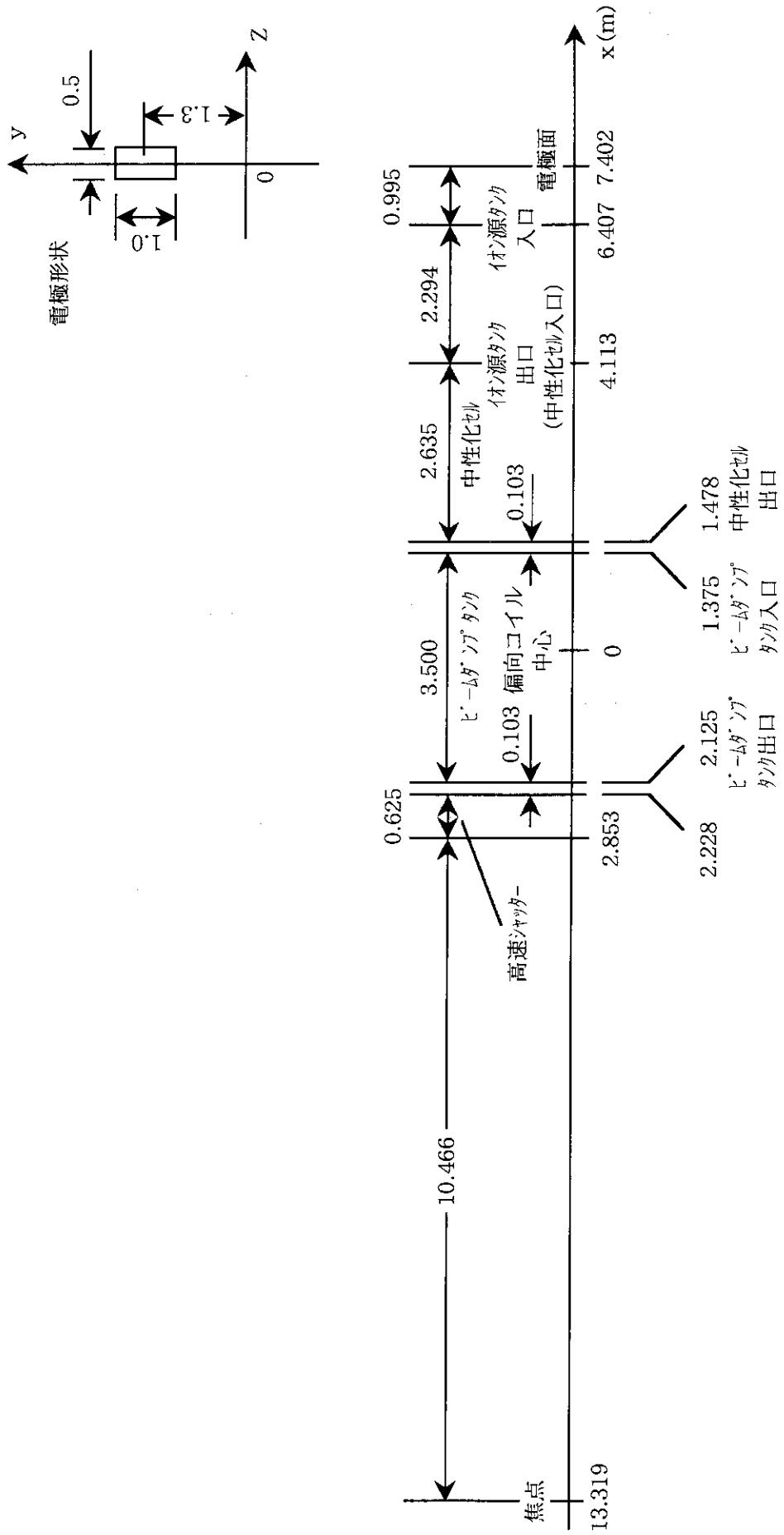
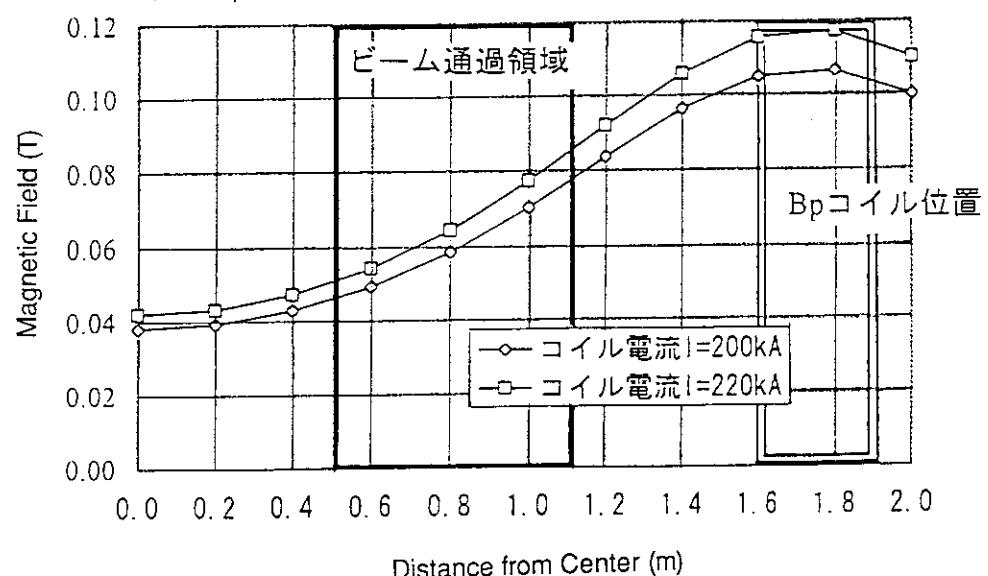


図 4.3.4.2 NB1 機器配置寸法概略・座標系図

(a) Bpコイルによる中心磁場変化



(b) Bhコイルによる中心磁場変化

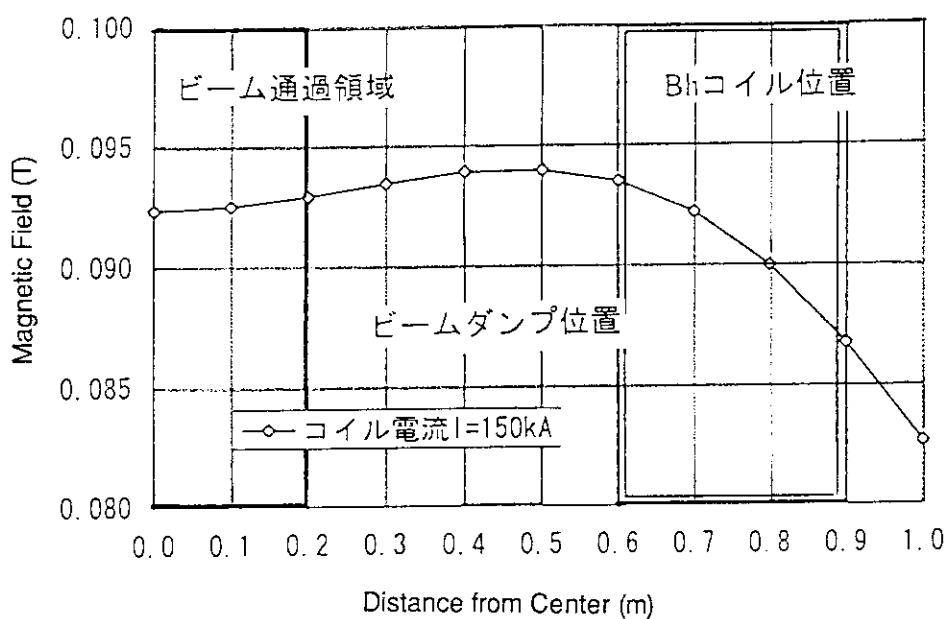


図 4.3.4.3 偏向磁場コイルによる中性化磁場変化

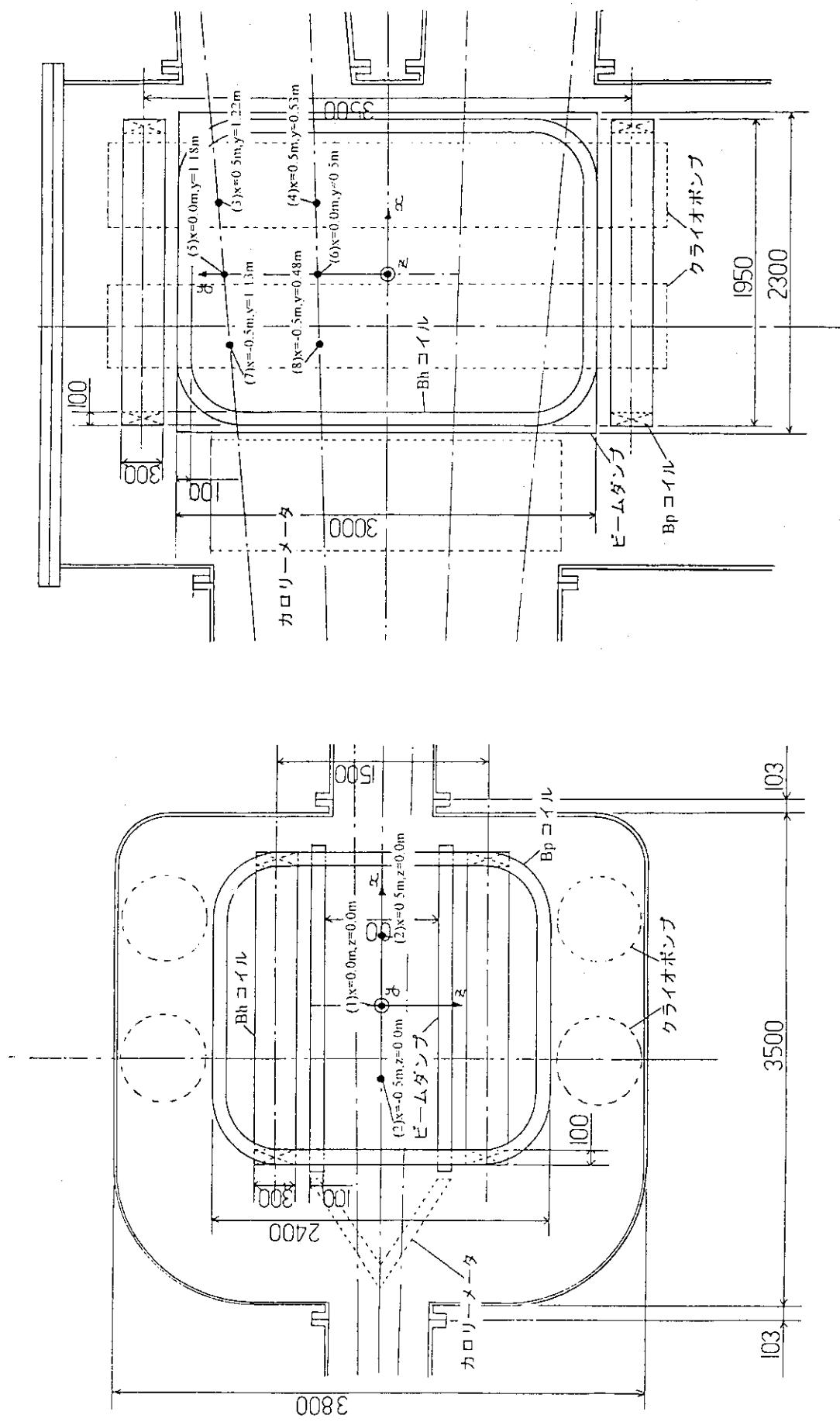
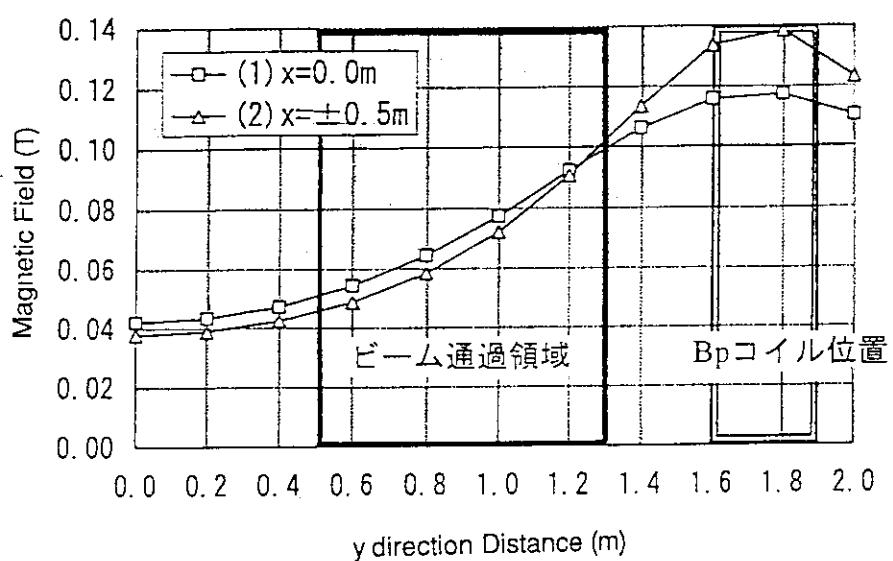


図 4.3.4.4 ダンプタンク内偏向磁場着目位置

(a) Bpコイルによる磁場変化



(b) Bpコイルによる磁場変化

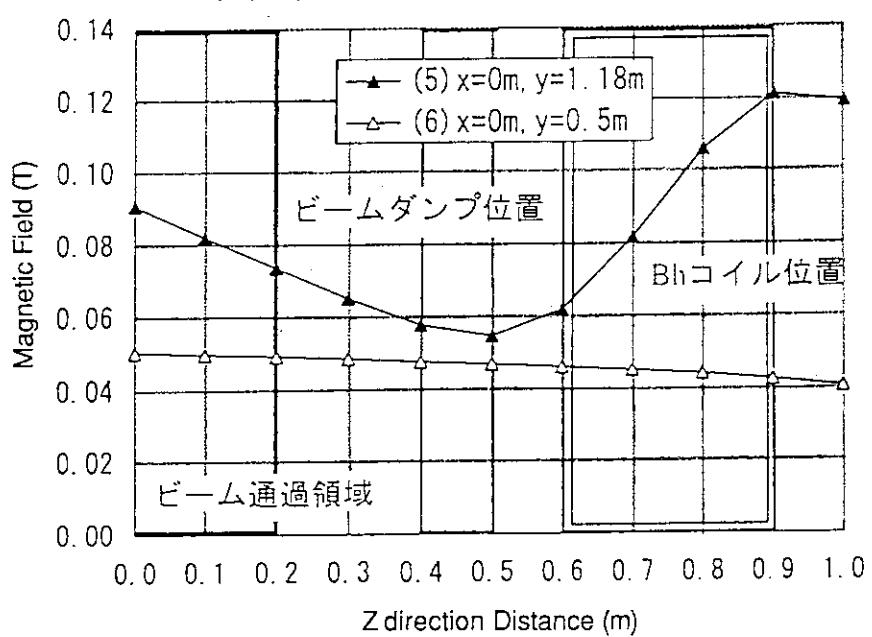


図4.3.4.5 (1) 偏向磁場コイルによる着目位置の磁場変化 (1)

## (c) Bhコイルによる磁場変化

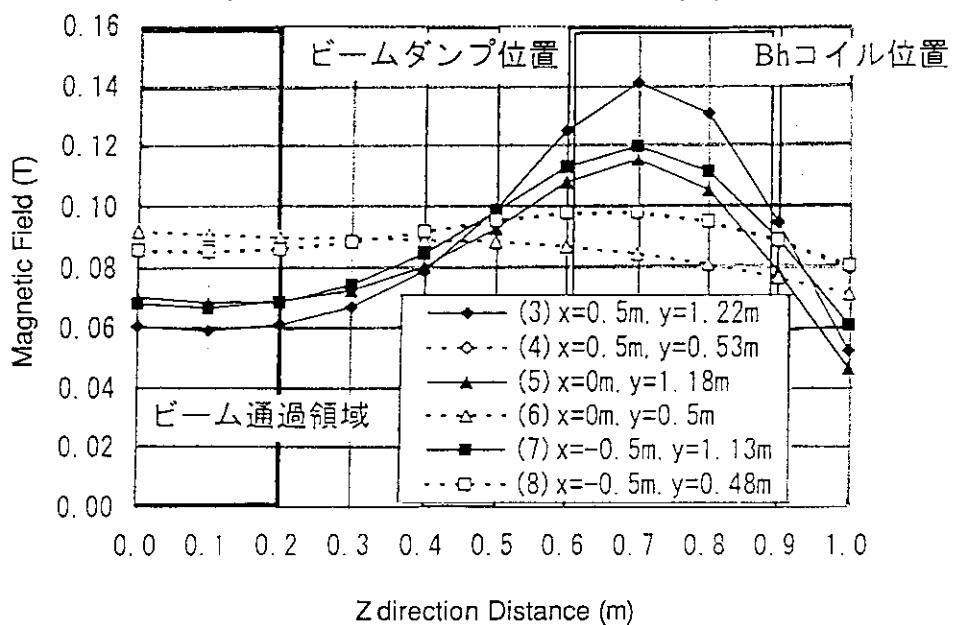


図 4.3.4.5 (2) 偏向磁場コイルによる着目位置の磁場変化 (2)

#### 4.3.3.1.7 イオンダンプ

偏向コイル磁場で偏向された正負イオンビームを受け止め、熱化処理するものある。イオンダンプは正イオンダンプと負イオンダンプからなり、ビーム軸を含む鉛直面について対称である。各イオンダンプは、2つのビームダンプから構成される。ビームダンプは原則的に図4.3.4.6に示す外部フィン付チューブを重なり合うように並べたものとする。概略寸法は、幅2m、高さ3mとするが、偏向コイルの設計により決定すること。ただし、受熱部表面負荷が $2.0 \text{ kW/cm}^2$ を越える場合は、外部フィン付スワールチューブを部分的に使用し、他のチューブとは独立して冷却水を供給する等の対策を講じること。イオンダンプ全体の冷却水流量は、 $3000 \text{ l/min}$ とする。ただし、外部フィン付スワールチューブ（図4.3.4.6参照）を使用する場合は、その系の冷却水流量は $30 \text{ l/min}$ として設計すること。以下に設計条件を示す。

概略寸法	: 幅1.0m、長さ2.3m、高さ3.0m
材質	: チューブ 銅又は0.2%銀入銅
その他	: SUS304等
冷却水総流量	: 最大 $3000 \text{ l/min}$
冷却水供給圧力	: $25 \text{ kg/cm}^2$
冷却水供給温度	: 最大 $42^\circ\text{C}$

イオンダンプの上下の部分には、ブラインド状の銅製スパッタシールドを取付けること。

##### ①偏向された残留イオンのビームダンプ上の熱負荷分布検討

偏向磁場解析結果を基に、残留イオンビームの軌道解析、ダンプ上の熱負荷分布解析を行う。表4.3.9にビーム軌道解析に用いた入射ビーム条件を示す。

偏向磁場の作用位置を中性化セル出口からとし、ビーム軌道解析、ビームダンプ上の熱負荷分布解析を行った。図4.3.4.7、図4.3.4.8にD<sup>+</sup>、D<sup>-</sup>ビーム軌道解析結果を示す。図中の座標系は図4.3.4.1と同じとする。このときD<sup>+</sup>は広がってビームダンプに衝突するが、D<sup>-</sup>は収束して衝突することが分かる。しかしひームライン2本同時に考えると、図4.3.4.9に示すような位置にイオンビームが衝突することになる。しかし、このとき上下のビームラインで偏向されたビーム同士は重ならない。図中のA領域、B領域の熱負荷分布を見ると図4.3.5.0になる。A領域では最大熱負荷は $1.9 \text{ kW/cm}^2$ であるのに対し、B領域では $2.5 \text{ kW/cm}^2$ となり、基準値( $2.0 \text{ kW/cm}^2$ )を超ってしまう。しかも偏向イオン種が2種、ビームラインが2本あるため、片方のビーム収束を緩和しようとしても、もう一方のビーム収束が逆に大きくなり熱負荷が大きくなる。したがって、偏向コイル電流を変化させ、ビームをダンプ上に走査させ熱負荷低減を計らなければならない。

そこで偏向コイル電流を変化させたときのビームダンプ上に衝突するイオンの分布変化について検討する。

まずB<sub>h</sub>コイル電流を可変(正～負)に、B<sub>p</sub>コイル電流を一定にした場合について見てみる。両コイル電流波形を図4.3.5.1(a)のように仮定し、B<sub>h</sub>コイル電流を $150 \sim -150 \text{ kA}$ 、B<sub>p</sub>コイル電流を $220 \text{ kA}$ とする。図中の(1)～(3)のコイル電流値での分布を計算する。計算に用いるイオン種はD<sup>+</sup>とする。図4.3.5.2(a)にこのときのダンプ上の分布を示す。B<sub>h</sub>コイル電流を正から負に変化させると図の(1)から(3)の順に分布が移動する。ビームの収束傾向によりY軸方向に分布が移動するが、ビーム走査時((1)→(2)→(3))に常に重なり合う部分が発生するのが分かる。また(3)の場合、下側のビームラインとは同時には重ならないが、Y軸負方向に分布がはみ出してしまうことになる。

次にB<sub>h</sub>コイル電流( $100 \sim -100 \text{ kA}$ )、B<sub>p</sub>コイル電流( $150 \sim 300 \text{ kA}$ )両方を走査させた場合の分布の移動について見てみる。このとき仮定した両コイル電流波形を図4.3.5.1(b)に示す。このときB<sub>h</sub>コイル電流を $100 \text{ kA}$ に下げたのは、上記と同様の電流値 $150 \text{ kA}$ とすると、B<sub>p</sub>コイル電流が低いとき、イオンがビームダンプ設置領域を越え、飛

び出してしまうためである。図中(1)～(3)の電流値での分布を計算すると、図4.3.5.2(b)に示すような分布になる。B<sub>p</sub>コイル電流値を変化させることにより、X軸方向に分布が拡大している。またイオン衝突面積も前者と比べ極端な変化はしていないが、(A)の分布と比較すると、Y軸負方向にはみ出さず、また常に重なり合う部分が減少していることが分かる。

そこで、図4.3.5.2(b)における各(1)～(3)領域での熱負荷分布について考えると、図4.3.5.3のようになる。図から分かるように、常に重なる部分の熱負荷は1.0 kW/cm<sup>2</sup>以下であり、また熱負荷が2.0 kW/cm<sup>2</sup>を超える部分も図4.3.5.0と比べてもほんの一部であり、磁場を変化させビームを走査することによりダンプ上の熱負荷は低減され、2.0 kW/cm<sup>2</sup>以下になると推定される。

以上から、2組の偏向コイル電流を同時に変化させることにより、ビームダンプ面を有効に利用でき、ビームダンプ上の熱負荷を2.0 kW/cm<sup>2</sup>以下にすることが可能になる。

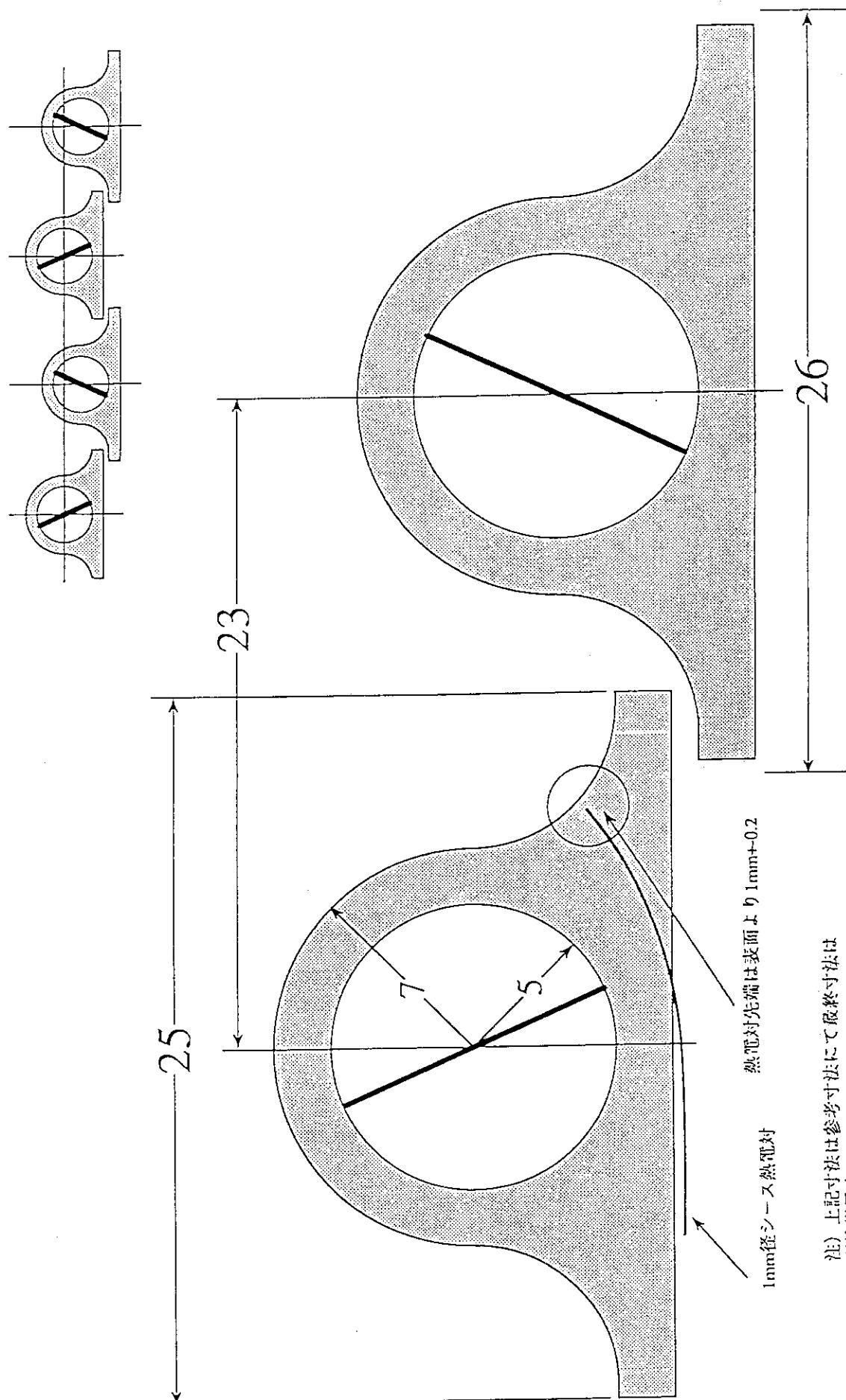


図 4.3.4.6 外部フィン付スワールチューブ詳細図

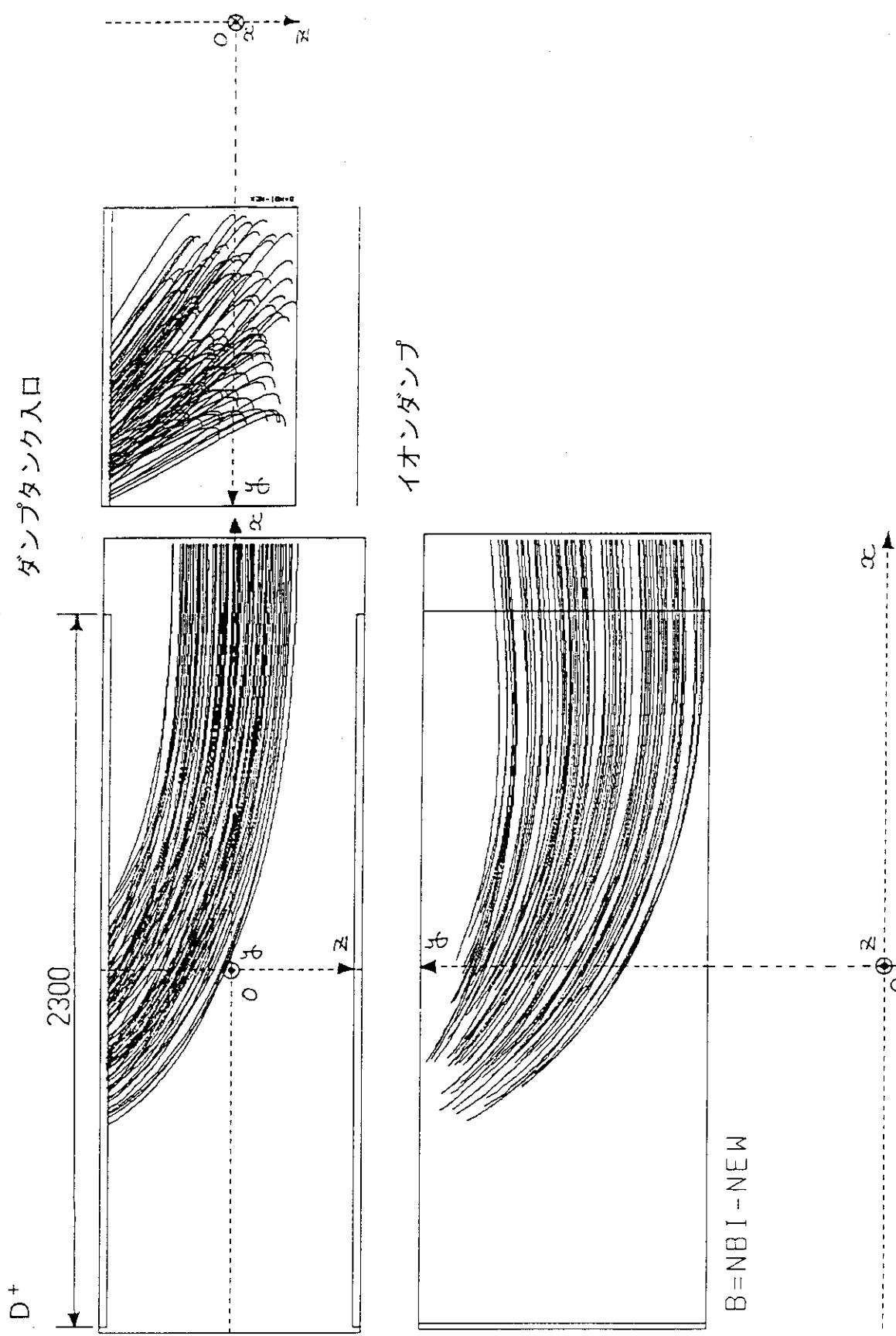


図 4.3.4.7 ダンプタンク内における  $D^+$  ビーム軌道例

D-  
イオンダンプ  
ダンプタンク入口

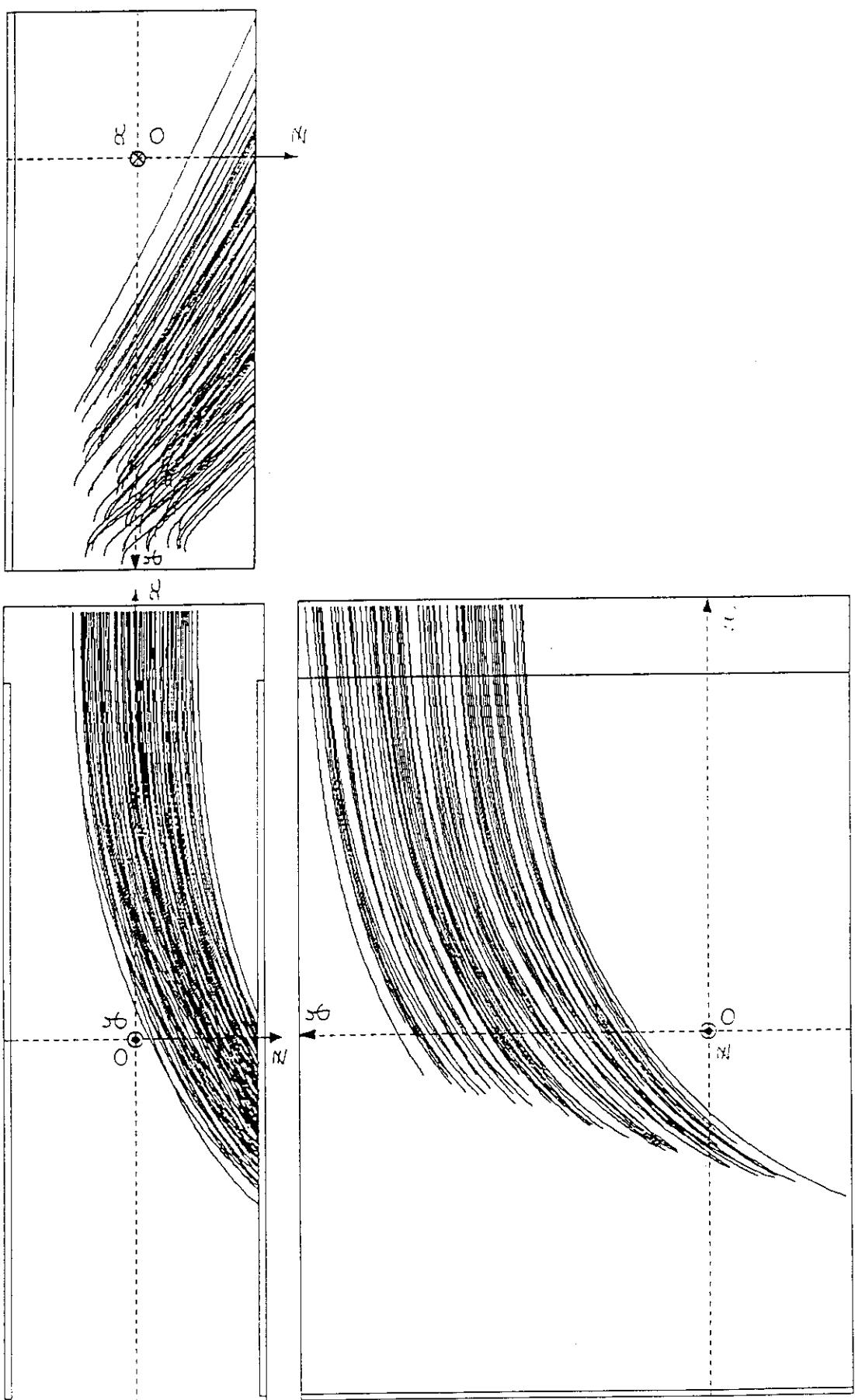


図 4.3.4.8 ダンプタンク内における D-ビーム軌道例

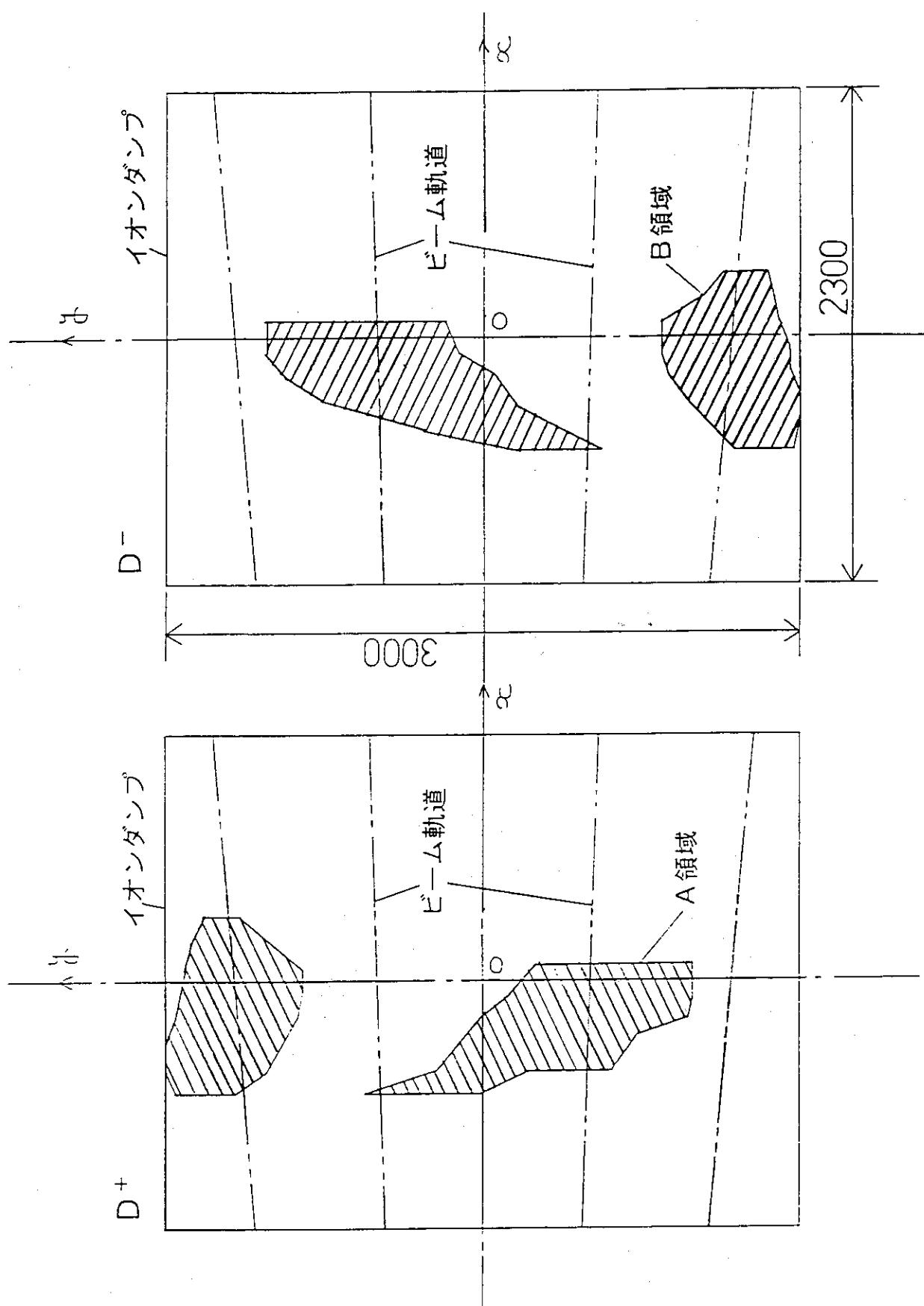


図 4.3.4.9 イオンダンプ上での偏向イオンビーム衝突位置

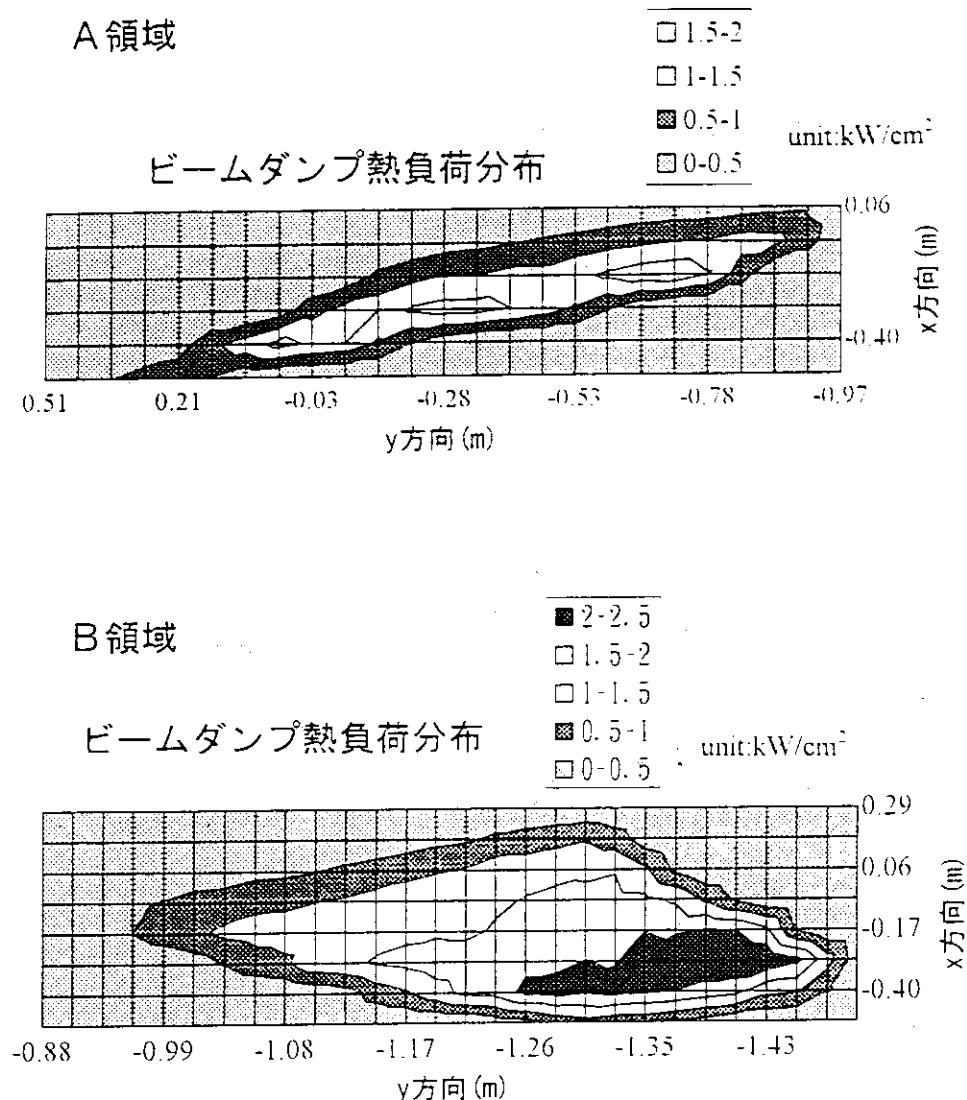


図4.3.5.0 イオンダンプ上の熱負荷分布

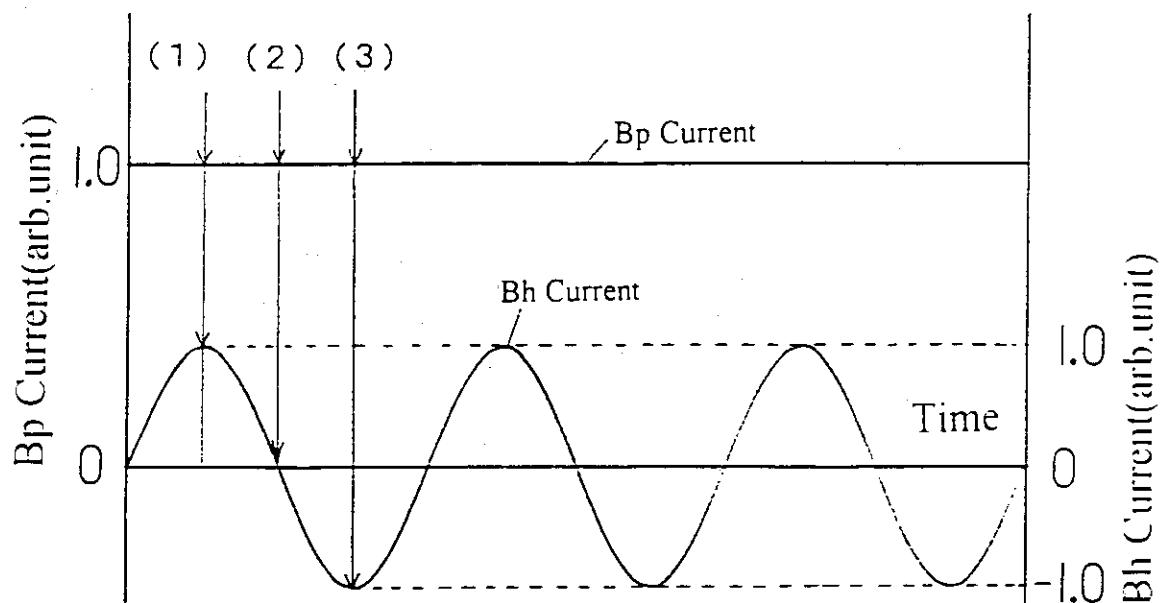
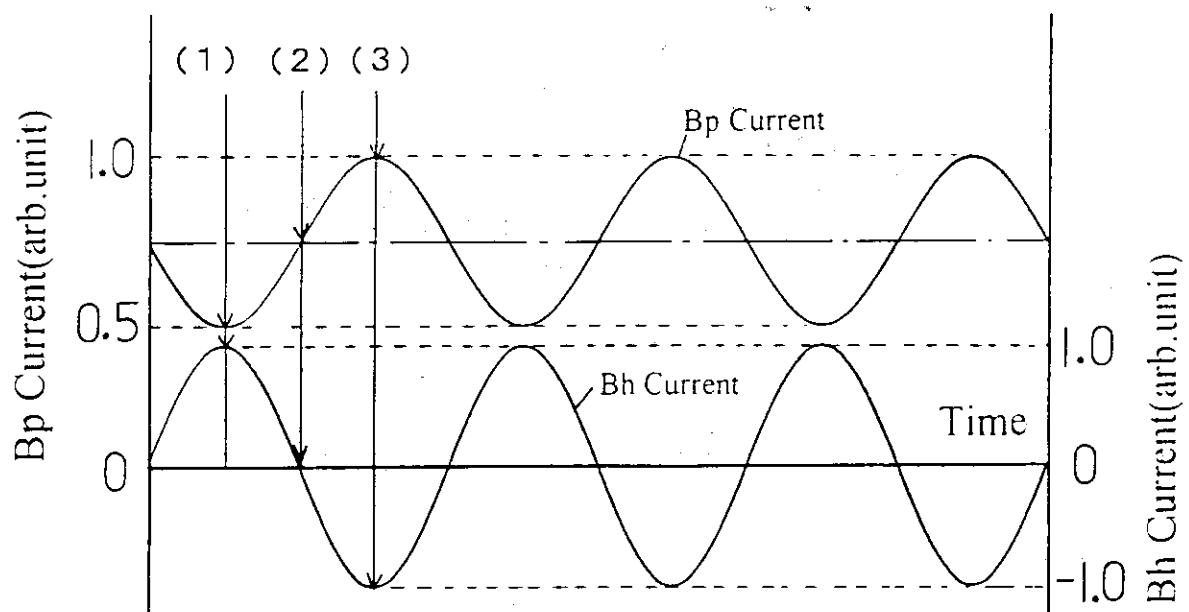
(a)  $B_h$ (可変)・ $B_p$ (一定)コイル電流変化(b)  $B_h$ (可変)・ $B_p$ (可変)コイル電流変化

図 4.3.5.1 偏向磁場コイル電流の電流変化

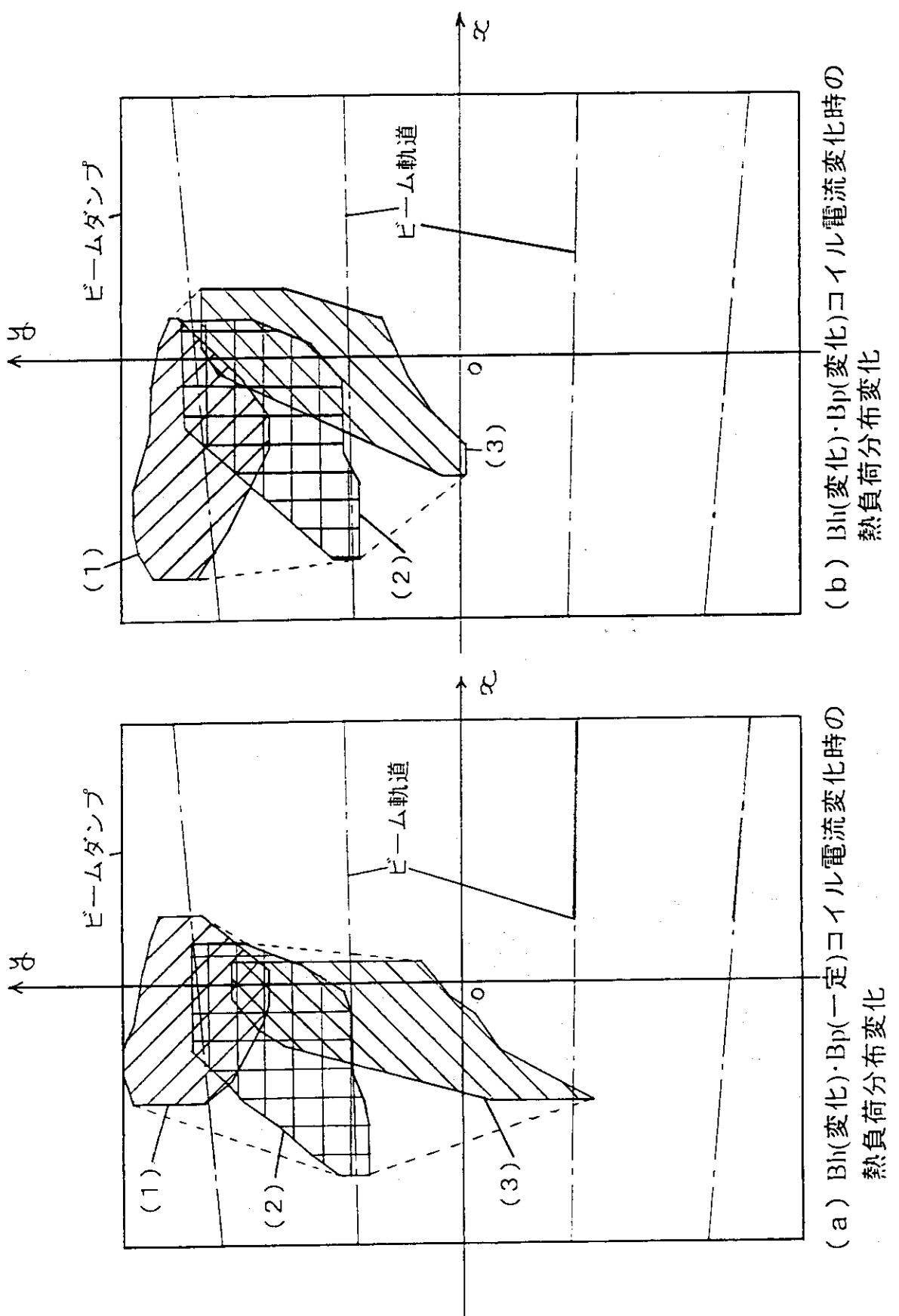


図 4.3.5.2 電流変化によるイオンダンプ上での偏向イオントリム衝突位置・変化  
熱負荷分布変化

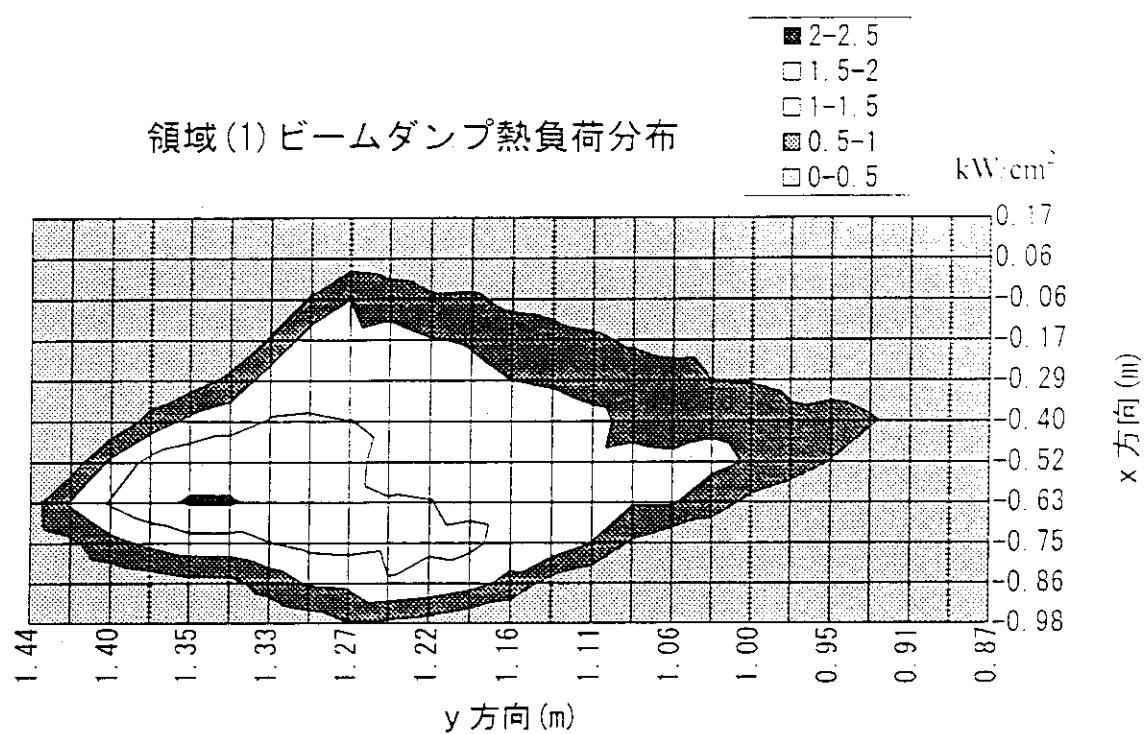


図4.3.5.3(1) 電流変化によるイオンダンプ上での熱負荷分布(1)

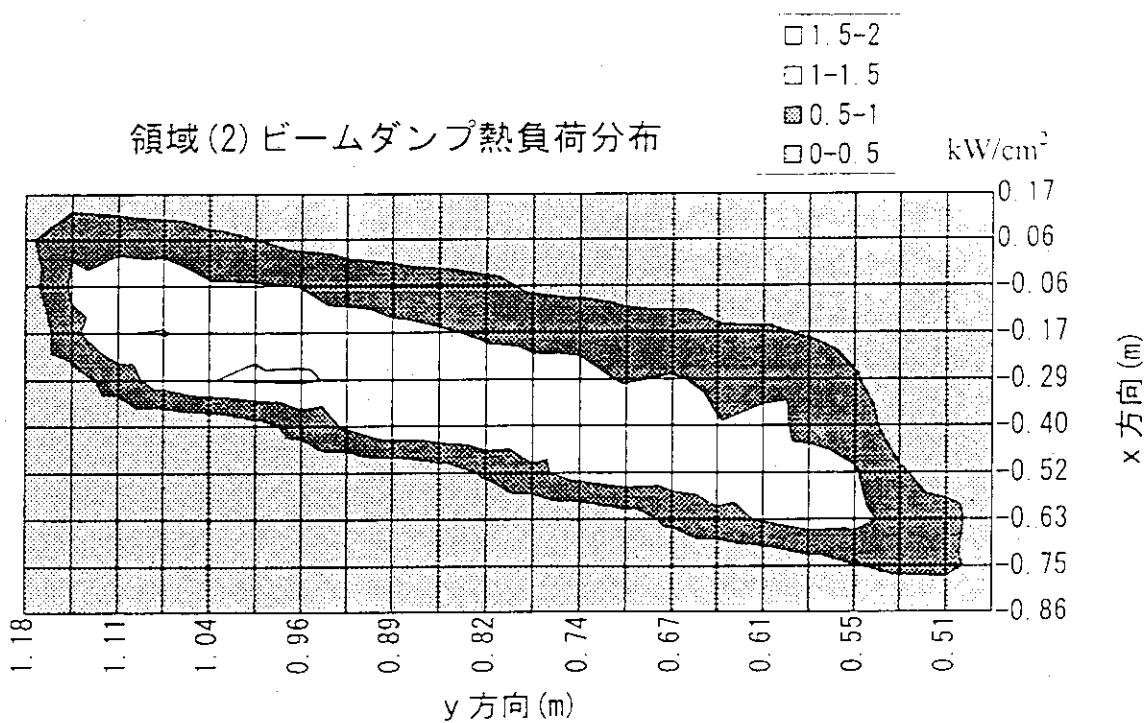


図4.3.5.3(2) 電流変化によるイオンダンプ上での熱負荷分布(2)

## 4.3.3.1.8 カロリーメータ

プラズマに入射しないときに中性ビームを受け止め、熱化するもので、ビームパルス最大（1秒）にも耐えるものとする。

不使用時はビームに曝されない位置まで移動できる、遠隔駆動機構を有している。

①受熱部の概略形状	: V字開口寸法 600 mm
	: ビーム軸方向 800 mm
	: 高さ 2000 mm

V字の受熱面は、各々独立した平板のパネルをV字に組み立てる構造とし、パネル毎に組立分解可能な構造とすること。

②受熱量	: 30 MW
③受熱面での最大熱流束	: 2 kW/cm <sup>2</sup>
④冷却	: 強制水冷
⑤駆動部仕様	: 駆動時間: 30秒
⑥駆動回数	: 1 × 10 <sup>4</sup>
⑦駆動方式	: 駆動源 圧空 (9.9 kg/cm <sup>2</sup> ) 利用

気密保持 ベローズを利用

⑧材質 : 受熱部表面候補材料

タンクステン、モリブデンを無酸素銅製強制冷却水配管にロー付けすること。

支持構造物: 非磁性鋼	
⑨冷却管	: スウォールチューブ
⑩ストローク	: 2000 mm
⑪設置精度	
上下方向	: ±5 mm
左右方向	: ±5 mm

## 4.3.3.1.9 高速シャッター

高速シャッターはNBIビームラインとJT-60真空容器の間のガスの移動を制限するためのもので、ビーム入射時のみ開にし、通常は閉の状態である。

## ①基本仕様

A) 口径	: 700 mm幅 × 1400 mm高
B) 開閉時間	: 1秒以下
C) ビーム軸方向のフランジ面間距離	: 300 mm以下
D) シャッター閉時のコンダクタンス	: 0.2 m <sup>3</sup> /sec以下
E) 材質	: SUS304
F) シャッター駆動源	: 圧縮空気 (7 kg/cm <sup>2</sup> 以下)

## 4.3.3.1.10 金属シールゲート弁

大口径ゲート弁は、NBIとJT-60SU真空容器を真空的に仕切るためである。

## ①基本仕様

A) 口径	: 700 mm幅 × 1400 mm高
B) シール方式	: メタル中空Oリング
C) 開閉時間	: 10秒以下
D) フランジ面間距離	: 500 mm以内
E) 許容リーク量	: 1 × 10 <sup>-6</sup> Pa · m <sup>3</sup> /sec以下
F) 材質	: SUS304
G) 駆動源	: 圧縮空気 (7 kg/cm <sup>2</sup> 以下)

弁板の駆動方向は、弁板短手方向としてゲート弁サイズを極力、小型化すること。

#### 4.3.3.1.1.1 入射ポート部

中性ビームをトカマクプラズマまで導く間の輸送管である。入射ポート外面には、銅製冷却管を銀ロード付けし、冷却する。また、同ポート内面の再電離ビームが当たる箇所にはMo製保護板をボルト止めする。保護板の概略寸法は $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ とする。また、入射ポート入口部、中間部及び出口部にはリミタを取り付け、ポート内面へのビーム衝突を防止するようとする。

#### 4.3.3.1.1.2 磁気シールド

トカマクからの漏洩磁場は図4.3.5.4に示すように平均約 $1000\text{ G}$ 程度と予想される。この漏洩磁場に対しイオン源タンク及び中性化セルに磁気シールドを施し、内部の磁場を $0.05\text{ G}$ 程度以下におさえることを目標とするものである。磁気シールドはイオン源タンク磁気シールド及び中性化セル磁気シールドに分けられるが、互いに磁気的につながっている。

イオン源タンクにおける磁気シールドの概略形状は図4.3.3.6のとおりであり、イオン源部の磁気遮蔽も兼ねるものとする。極低温におけるマイスナー効果を利用した構造である。また、この磁気シールドはクライオパネルとして真空ポンプの役割も担う。

中性化セル磁気シールドは高温超伝導におけるマイスナー効果を利用した構造である。

#### 4.3.3.1.1.2-1 発生磁場評価と仕様条件

図4.3.5.5にポロイダルコイルによる漏洩磁場の計算結果を示す。イオン源ビームライン各位置での漏洩磁場は以下の通りである。

イオン源領域 : 平均 $3.5\text{ mT}$  ( $2.5\text{ mT} \sim 4.5\text{ mT}$ )  $A_t t = 2.97\text{ s}$

イオン源タンク領域 : 平均 $6.0\text{ mT}$  ( $4.5\text{ mT} \sim 7.0\text{ mT}$ )  $A_t t = 2.97\text{ s}$

中性化セル領域 : 平均 $9.5\text{ mT}$  ( $7.0\text{ mT} \sim 12.0\text{ mT}$ )  $A_t t = 2.97\text{ s}$

仕様条件での最大許容磁場は $B \leq 5\text{ } \mu\text{ T}$  ( $0.05\text{ G}$ )

#### 4.3.3.1.1.2-2 超伝導シールドの現状

##### A) 極低温超電導

新日鉄(株)より、超電導磁気シールド用NbTi/Nb/Cu多層複合材が開発されている。板厚 $1\text{ mm}$ の超電導板の場合、 $10\text{ } \mu\text{ m}$ 厚NbTi $\times 30$ 層とほぼ同じ厚さのCu層 $31$ 層から構成される。この超電導板の特性を以下に示す。

##### 超電導特性と磁気シールド特性

図4.3.5.6から図4.3.5.8に臨界電流密度と磁気シールド特性を示す。

NbTi部分の臨界電流密度は磁場 $0.5\text{ T}$ で約 $2\text{ kA/mm}^2$ である。

超電導シールド特性は円筒寸法によるが、実験では $0.5 - 0.8\text{ T}$ のレベルまでは磁気シールドが可能となっている。円筒寸法が大きくなると、必要なシールド電流(電流密度)が大きくなるため、臨界電流密度の制限からシールドできる磁場の大きさが低下する。

##### 超電導板(NbTi)の製作可能寸法(現状)

圧延板 $1.0\text{ mm} \times 1.3\text{ mW} \times 7\text{ m}$

圧延板 $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mW} \times 1.0\text{ m}$

##### B) 高温超電導

##### Y系酸化物超電導材の超電導特性と磁気シールド特性

図4.3.5.9、図4.3.6.0に臨界電流密度と磁気シールド特性を示す。

Y系酸化物はB1系酸化物に比べて、臨界電流密度が高い。臨界電流密度は磁場 $0.5\text{ T}$ で約 $125\text{ A/mm}^2$ である。

超電導シールドには $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ のタイル状構成で現状は製作されており、磁気シールド特性は良くない。図4.3.6.0によれば、 $1.3\text{ mT}$ の磁場を $8\text{ mT}$ に低減するレベルである。現状のタイル構成とすれば、タイル寸法を多少大型にできたとしても磁気シールド特性の大幅な向上は困難と考えられる。大型の超電導厚膜容器の製造技術が必要であるが、Y

系酸化物は単結晶成長で製造するため、大型容器形状の厚膜製作は現状からは大きな飛躍が必要となる。

#### B i 系酸化物超電導材の超電導特性と磁気シールド特性

図4.3.6.1、図4.3.6.2に臨界電流密度と磁気シールド特性を示す。また、図4.3.6.3、図4.3.6.4に、電流リード用のB i 系酸化物超電導材の臨界電流密度を示す。

B i 系酸化物はY系酸化物に比べて、臨界電流密度が低い。臨界電流密度は温度77Kで約 $1.75\text{ A/mm}^2$ である。図4.3.6.3に示すBi系酸化物超電導材の臨界電流密度は、液体窒素中(77K, 0.1T)で約 $1 - 2.5\text{ A/mm}^2$ である。

円筒容器形状に製作されたBi系超電導材の磁気シールド特性は良く、図4.3.6.2に示すようにほぼ完全シールドできている。ただし、実験はシールド電流の小さい1Gの印加磁場に対する結果である。臨界電流密度が低いため、大型容器の高磁界シールドにはまだ不十分と予想される。

#### C) 超電導シールドにおける地磁気の問題

一般には地磁気 $50\mu\text{T}$ (0.5G)の条件下で極低温冷却し超電導化するため、超電導シールドでは地磁気成分はシールドできない。すなわち、ポロイダル磁場を完全シールドできたとしても $50\mu\text{T}$ の残留磁場となり、許容値の10倍となる。

これを解決するには、以下の方法がある。

- a) 地磁気を打ち消す補償コイルを超電導シールドの外部に設置
- b)  $\mu$ メタルを超電導シールドの内部、または外部に設置

広範囲の地磁気を打ち消す補償コイルの形状を決定するのは、かなり困難と考えられるため、今回は $\mu$ メタルを用いるものとする。

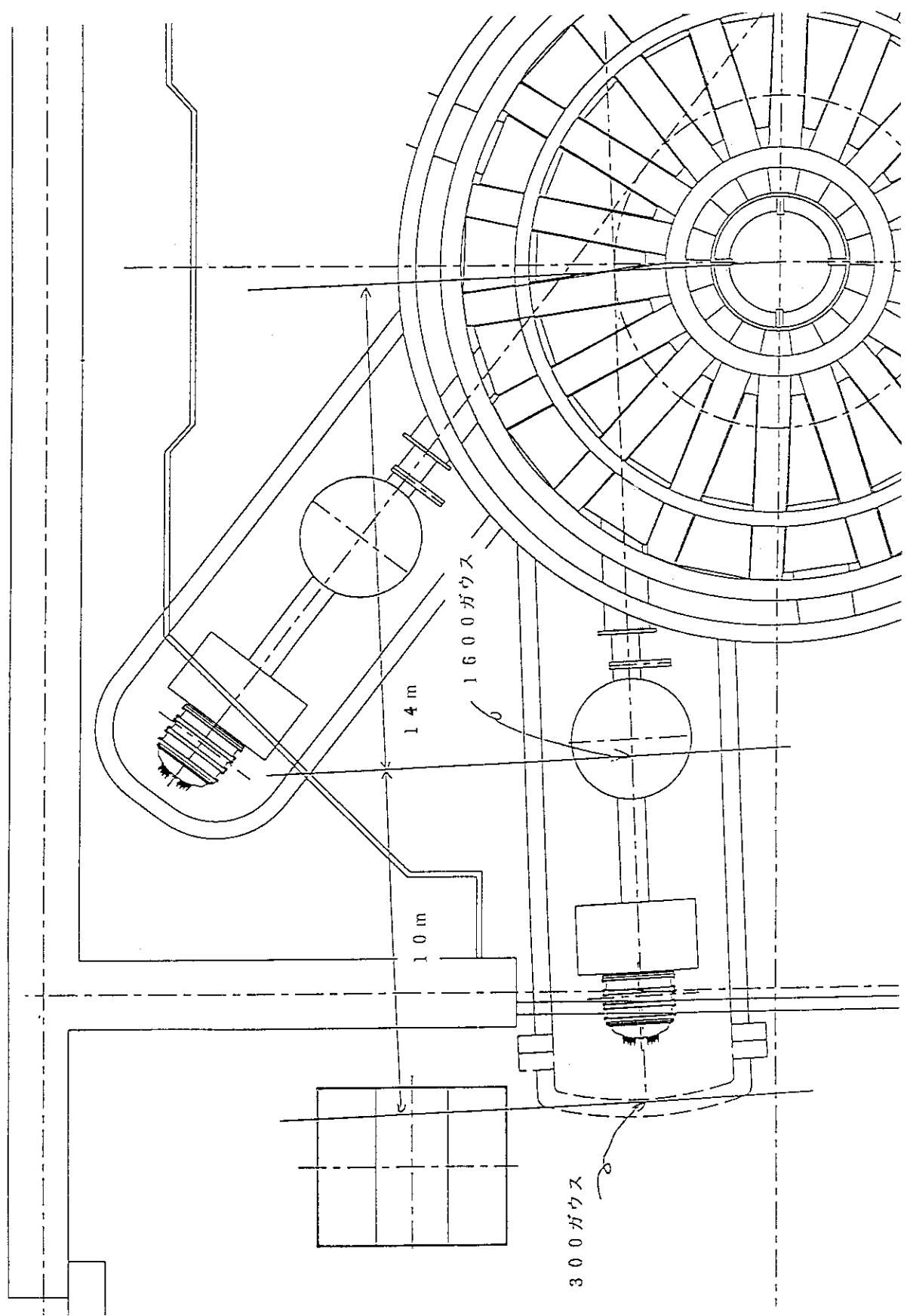


図 4.3.5.4 漏洩磁場

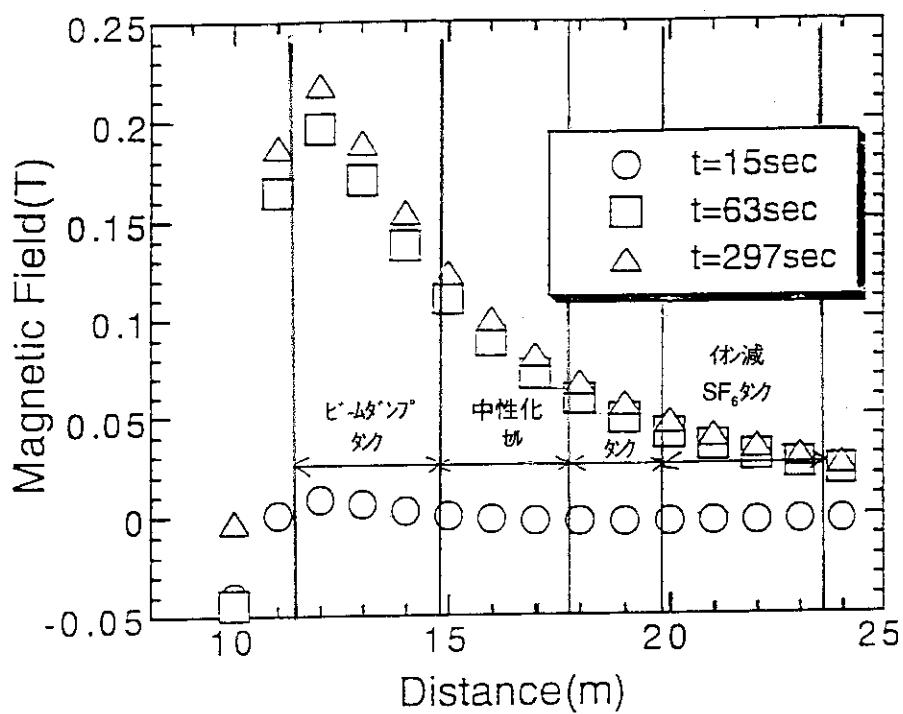
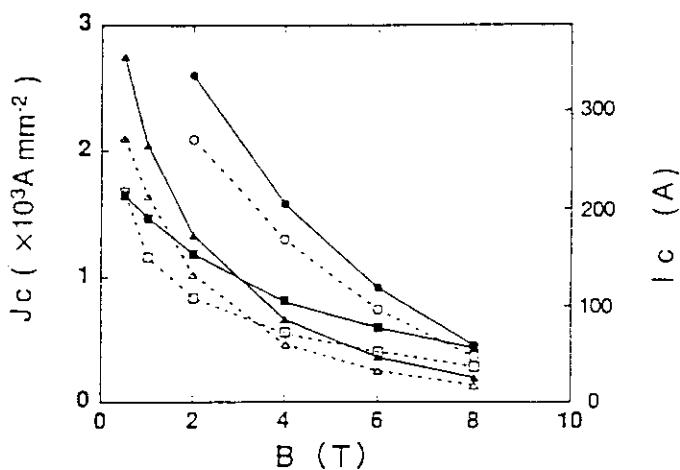
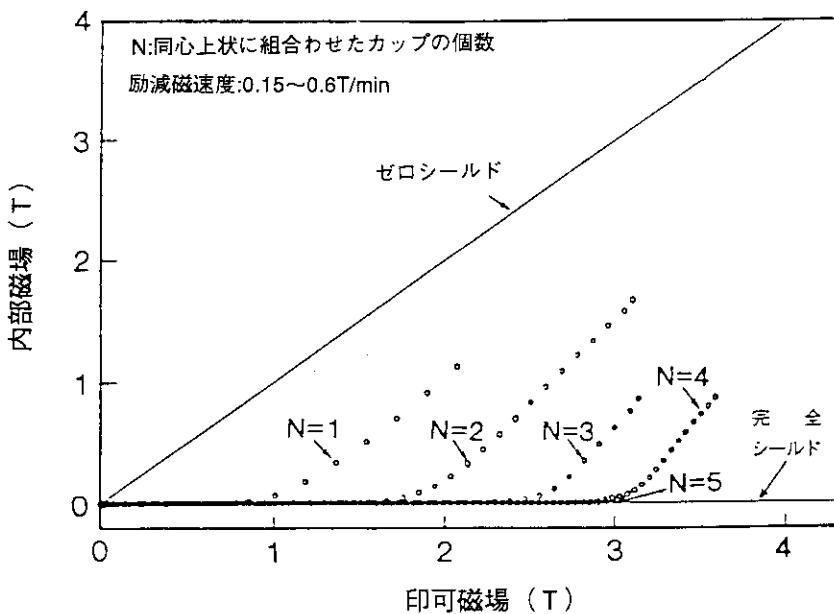


図 4.3.5.5 ポロイダル磁場コイルによる漏洩磁場  $B_z$   
(プラズマ電流考慮せず)

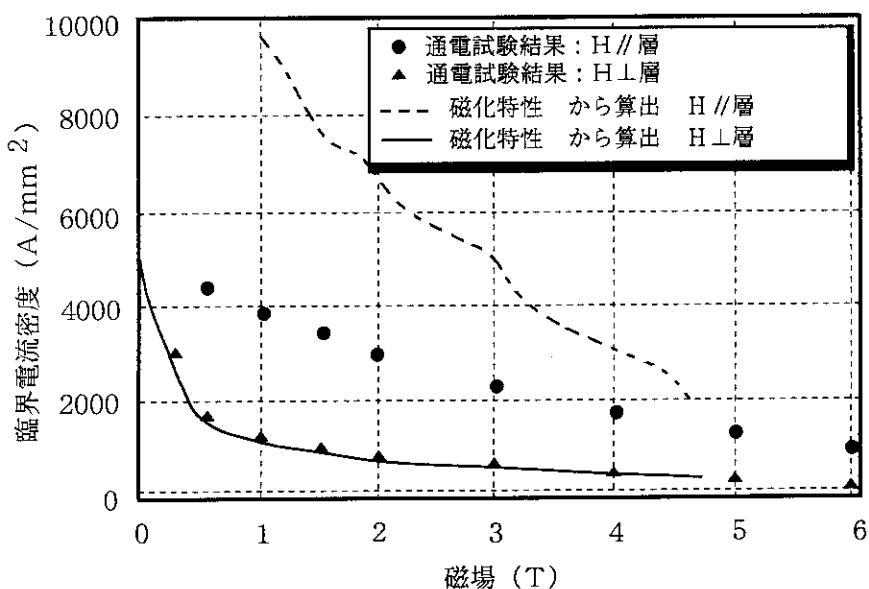


**Figure 2** Critical current and critical current density versus applied magnetic field. The field is applied parallel to the NbTi layers, and the transport current paths of the samples are normal (— and filled symbols) or parallel (---- and open symbols) to the rolling direction of the sheet. The conditions of the final heat treatment are as follows: (a) ■,□, without final heat treatment; (b) ▲,△, 400°C × 120 h; (c) ●,○, 350°C × 672 h

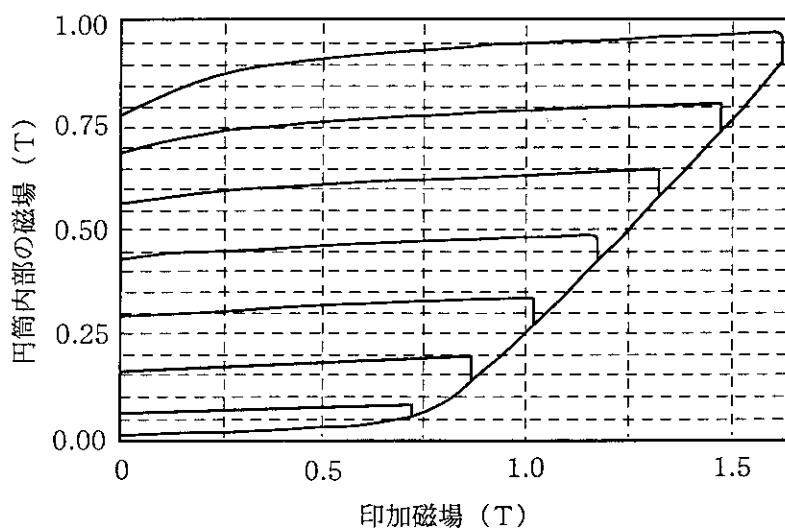
**図 4.3.5.6 NbTi 多層板の超電導部分の臨界電流密度  
(Cryogenics 35 (1995) p.403-404)**



**図 4.3.5.7 同心上に組合せたカップ状円筒の直流磁気シールド特性  
(1 mm、内径 20 ~ 40 mm、長さ 45 mm)  
(までりあ第 33 卷 第 5 号(1994)p.637-639)**



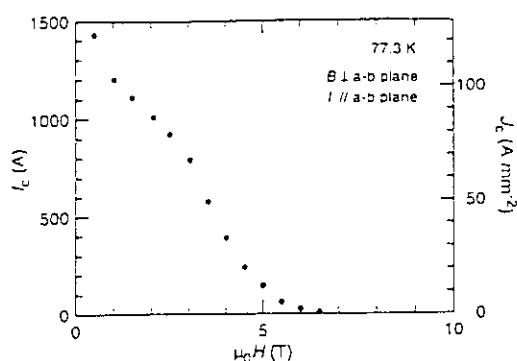
超電導多層板の超電導部分の臨界電流密度



超電導多層円筒体のシールド効果

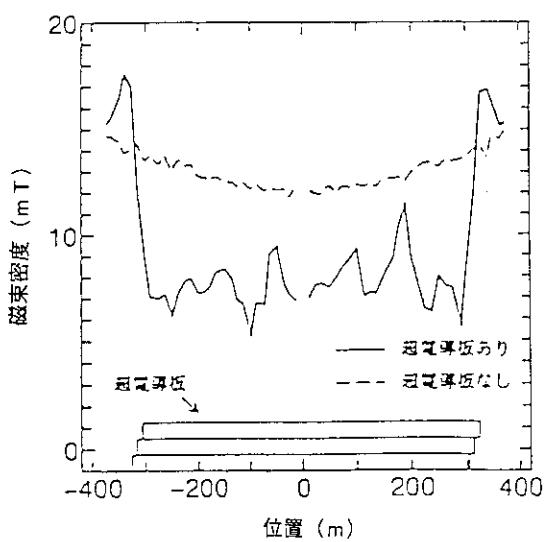
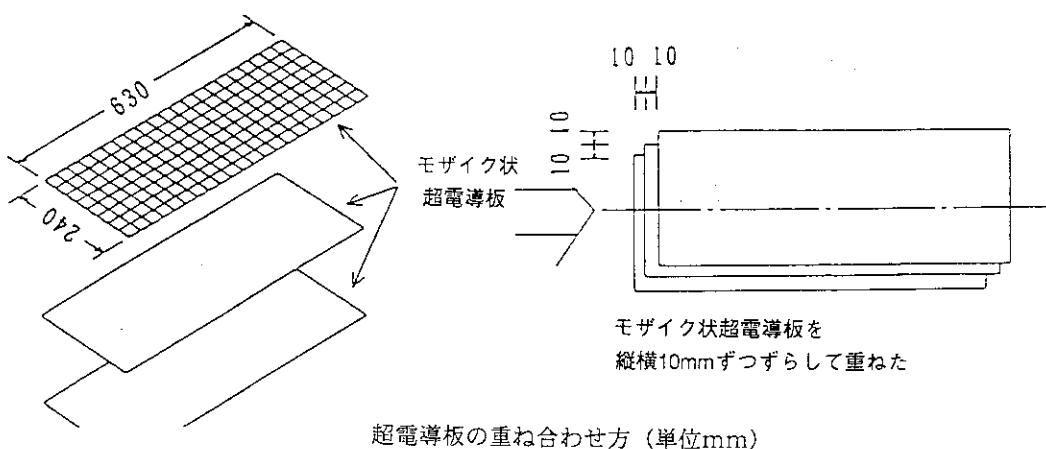
(円筒形状:  $\phi 100$ 、長さ100mm、厚さ1mm)  
 (印加磁場: 円筒の軸方向)

図4.3.5.8 NbTi多層板の臨界電流密度、シールド特性  
 (第54回 1995年秋季低温工学・超電導学会、P83)



The magnetic field dependence of the critical current and critical current density at 77 K for the  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  bulk superconductor.

図 4.3.5.9 Y径酸化物超電導材の臨界電流密度  
(低温工学 Vol.30 No.12 (1995) p.577-582)



上図の1点鎖線上の磁束密度分布図

図 4.3.6.0 タイル状Y系超電導板による磁気シールド特性  
(第52回 1994年秋季低温工学・超電導学会、p.96)

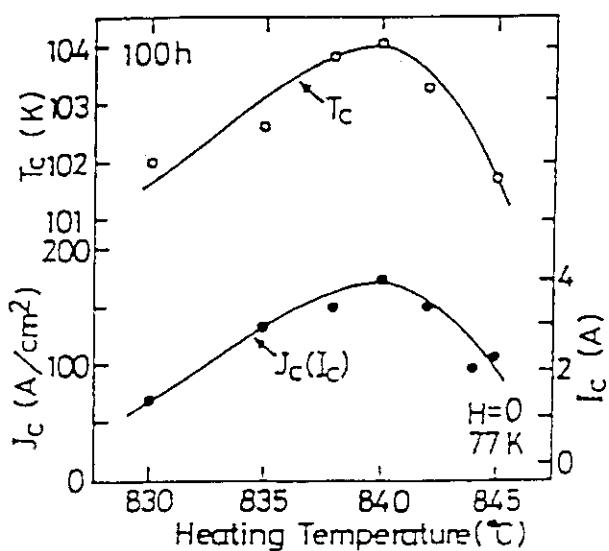
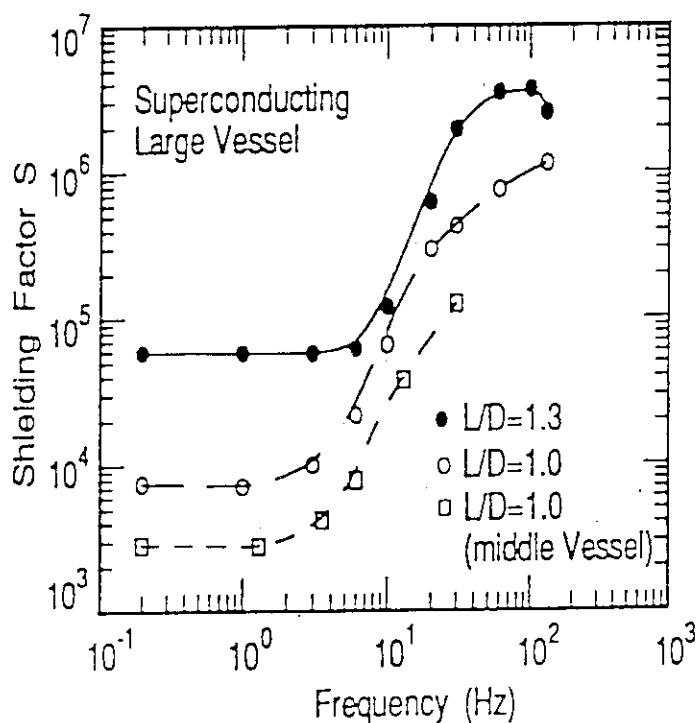
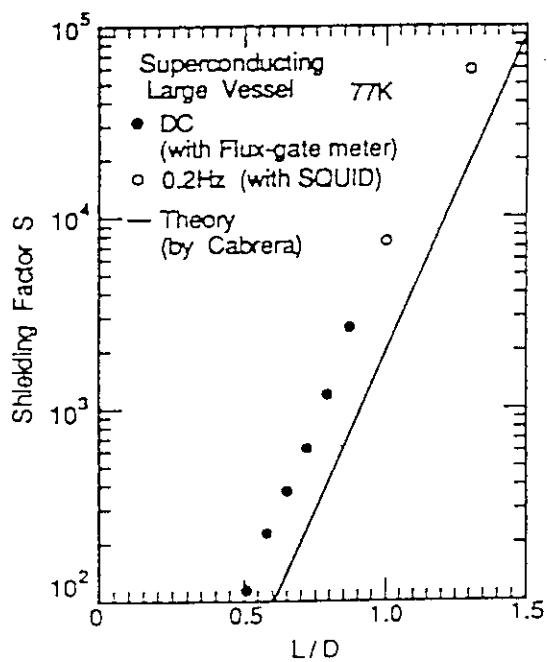
熱処理温度による  $T_c$ ,  $J_c$ および  $I_c$  の変化

図 4.3.6.1 プラズマ容射による Bi-2223 層膜の超伝導特性  
(第 49 回 1993 年春季低温工学・超電導学会、p.97)



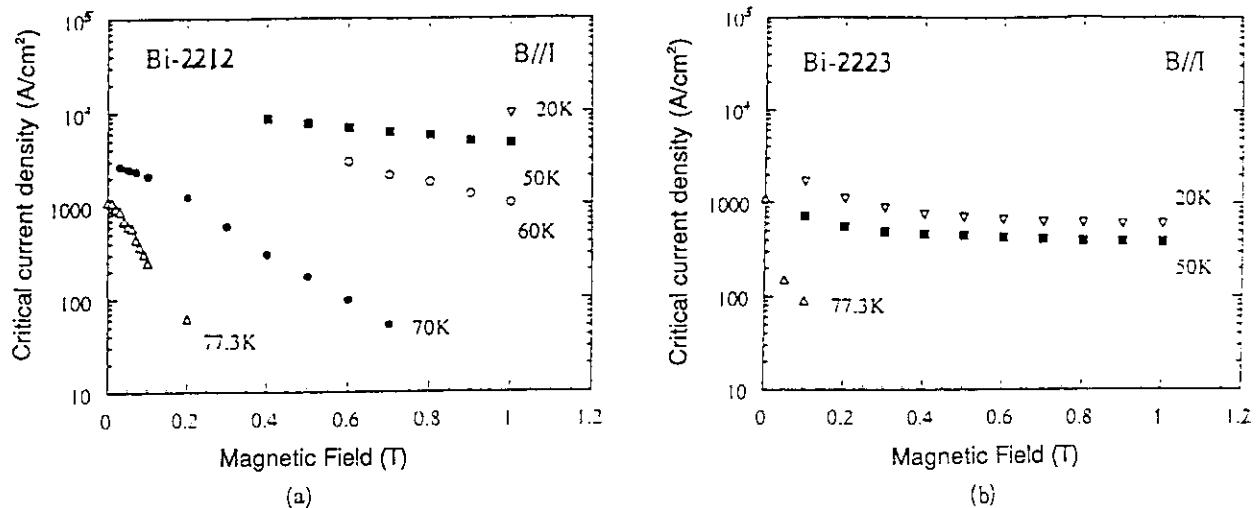
直径 32cm、深さ 64cm の

大型容器の磁気シールド効果

 $L/D$  と磁気シールド効果の関係

(印可磁場 0.1~1G、円筒軸と平行)

図 4.3.6.2 Bi 系超伝導磁気シールド容器の磁気シールド特性



Magnetic field dependence of  $J_c$ ; (a) for the Bi-2212 bulk, (b) for the Bi-2223.

図 4.3.6.3 Bi 系酸化物電流リード材の臨界電流密度  
(低温工学 Vol.30 No.12 (1995), p572-576)

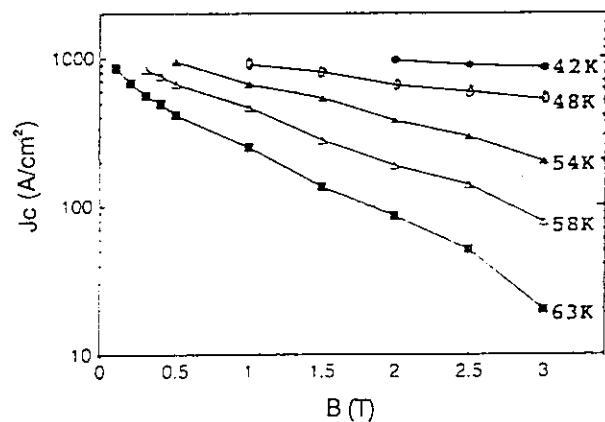


図 4.3.6.4 Bi (2223) バルク電流リードの臨界電流密度  
(低温工学 Vol.30 No.12 (1995), p582-589)

## 4.3.3.1.1 2-3 イオン源磁気シールドの設計検討

## A) 仕様条件

漏洩磁場 : イオン源領域の平均  $3.5 \text{ mT}$  ( $350 \text{ G}$ )

最大許容磁場 :  $B \leq 5 \mu\text{T}$  (ただし、 $1.2 \text{ m}$ 程度の短区間なら  $20 \mu\text{T}$ 許容)

注) JAERI-m94-072 JT-60U用負イオンNBI装置の設計検討より

最大許容磁場 : 負イオン生成部で  $B \leq 0.1 \text{ mT}$  ( $1.0 \text{ G}$ )

イオンビーム (長区間) に対し  $B \leq 5 \mu\text{T}$  ( $0.05 \text{ G}$ )

イオンビーム (短区間) に対し  $B \leq 20 \mu\text{T}$  ( $0.2 \text{ G}$ )

ここで、短区間とはイオン源電極からイオン源タンク入口まで  $1.16 \text{ m}$

必要磁気シールド係数 :  $7000$  (短区間の条件で  $1750$ )

## B) 磁性体による磁気シールド方式

## a) 構造

イオン源回りの  $\text{SF}_6$  ガス絶縁タンクに磁性材を用いて磁気シールドする事とする。 $\text{SF}_6$  ガス絶縁タンクは縦  $3.6 \text{ m}$ 、横  $3.8 \text{ m}$ 、高さ  $7.3 \text{ m}$  の箱形状である。イオン源短区間領域の許容磁場  $B \leq 20 \mu\text{T}$  を条件とし、必要磁気シールド係数は  $1750$  を目標とする。2重磁気シールド構造とする。外層の磁性材は  $\text{SS}400$  (板厚  $0.2 \text{ m}$ ) とし、内層の磁性材は  $\mu$  メタル (板厚  $30 \text{ mm}$ ) とする。

## b) 磁気シールド評価

箱形状のタンクを同じ容積の球殻で近似し、球殻に対する磁気シールドの解析式を用いて検討する。外層の近似半径は  $2.79 \text{ m}$ 、内層の近似半径は  $2.55 \text{ m}$  とした。

外層の磁性材  $\text{SS}400$  に対して、許容磁束密度と比透磁率は各々  $1 \text{ T}$ 、 $1000$  を用いた。外層の磁性材の内部の磁束密度が許容磁束密度  $1 \text{ T}$  となる外層厚さは  $0.2 \text{ m}$  である。この板厚における外層だけのシールド係数は  $49$  である。

内層の磁性材  $\mu$  メタルに対して、許容磁束密度と比透磁率は各々  $0.2 \text{ T}$ 、 $30000$  を用いた。内層の磁性材の内部の磁束密度が許容磁束密度  $0.2 \text{ T}$  となる厚さは  $5 \text{ mm}$  であるが、高い磁気シールド係数を得るために、設計板厚は  $30 \text{ mm}$  としてある。内層のみのシールド係数は  $235$  である。外層及び内層の2重磁気シールドでは、磁気シールド係数は  $2140$  となる。必要シールド係数  $1750$  を満足しており、漏洩内部磁場は  $16 \mu\text{T}$  である。

## 4.3.3.1.1 2-4 イオン源タンク磁気シールドの設計検討

## A) 仕様条件

漏洩磁場 : イオン源タンク領域の平均  $6.0 \text{ mT}$  ( $600 \text{ G}$ )

最大許容磁場 :  $B \leq 5 \mu\text{T}$

必要磁気シールド係数 :  $12000$

## B) 極低温超電導による磁気シールド方式

## a) 構造

イオン源タンク内に、中性化セル用超電導磁気シールド方式と同様の箱形状で設置する事とし、その寸法は縦  $1.4 \text{ m}$ 、横  $0.9 \text{ m}$ 、長さ  $2.2 \text{ m}$  とする。超電導材の厚さは  $1 \text{ mm}$  とする。中性化セル用磁気シールドとはビーム長さ方向に  $200 \text{ mm}$  重ね合わせ、端部での漏洩磁場の浸透を防ぐものとする。また、中性化セル用磁気シールドに対し、イオン源タンク用磁気シールド寸法は大きめに設定し、幅方向に  $0.1 \text{ m}$  の空間を設けてある。イオン源タンク用極低温超電導材はクライオポンプの機能も持っており、クライオポンプ再生時にはこのギャップを通じてガスを排気する。

超電導磁気シールド方式では  $50 \mu\text{T}$  ( $0.5 \text{ G}$ ) の地磁気シールドは困難であり、イオン源タンク内壁に  $2 \text{ mm}$  の  $\mu$  メタルを設置する。

## b) 超電導特性の評価

無限長の角筒 (縦  $1.4 \text{ m}$ 、横  $0.9 \text{ m}$ ) に垂直磁場  $6.0 \text{ mT}$  がかかる場合のシールド電

流を評価する。完全シールドに必要な電流は 125 KA であり、銅も含めた 1 mm 厚の超電導材の電流密度は  $6.8 \text{ A/mm}^2$  となる。銅と NbTi の断面積比を 1.6 とすると、NbTi 部分の電流密度は  $17.6 \text{ A/mm}^2$  となる。液体ヘリウム中 (4.2 K) での臨界電流密度 ( $J_c$ ) は 0.5 T の磁場下で約  $2 \text{ kA/mm}^2$  であり、必要電流密度を満足する。従つて、極低温超電導材をイオン源タンク磁気シールドに適用できる。

#### c) 磁気シールド評価

イオン源タンク磁気シールドは有限長で開放端があり、この端部でシールド電流が回り込み、端部効果による漏洩磁場が生じる可能性がある。これを避け十分なシールド係数を得るために、中性化セル側では同じ超電導シールドを重ね合わせ、開口幅 100 mm に対し、重ね合わせ領域を 200 mm とした。また、イオン源側では、イオン源用の磁性体磁気シールドと位置的に重なる配置とした。端部の定量的な磁気シールド効果の評価は今後の課題である。シールド電流密度は極低温超電導材の臨界電流密度よりも十分小さく、端部効果を除けば完全な磁気シールドができる。

### C) 磁性体による磁気シールド方式

#### a) 構造

イオン源タンクは縦 3.6 m、横 2.3 m、高さ 8.3 m の箱形状である。必要磁気シールド係数 12000 を満たすため、3 重磁気シールド構造とする。外層の磁性材は SS 400 とし、その板厚は 0.3 m である。中間層、及び内層の磁性材は  $\mu$  メタルとし、その板厚は各々 10 mm、5 mm とする。

#### b) 磁気シールド評価

箱形状のタンクを同じ容積の球殻で近似し、球殻に対する磁気シールドの解析式を用いて検討する。外層の近似半径は 2.32 m、中間層の近似半径は 1.97 m、内層の近似半径は 1.81 m とした。

外層の磁性材 SS 400 に対して、許容磁束密度と比透磁率は各々 1 T、1000 を用いた。外層の磁性材の内部の磁束密度が許容磁束密度 1 T となる外層厚さは 0.28 m であり、設計板厚は 0.3 m とした。外層だけのシールド係数は 87 である。

中間層、内層の磁性材  $\mu$  メタルに対して、許容磁束密度と比透磁率は各々 0.2 T、3000 を用いた。中間層の磁性材の内部の磁束密度が許容磁束密度 0.2 T となる厚さは 4 mm であり、設計板厚は 10 mm とした。中間層のみのシールド係数は 102 である。外層及び中間層の 2 重磁気シールドでは、磁気シールド係数は 2670 となる。必要シールド係数を満足していないため、 $\mu$  メタルの内層をさらに設置した。

内層のみのシールド係数は 55 である。外層、中間層及び内層の 3 重磁気シールドでの磁気シールド係数は 26900 となり、条件を満足する。

#### 4.3.3.1.1 2-5 中性化セル磁気シールドの設計検討

##### A) 仕様条件

漏洩磁場 : 中性化セル領域の平均 9.5 mT (950 G)

最大許容磁場 :  $B \leq 5 \mu\text{T}$

必要磁気シールド係数 : 19000

##### B) 高温超電導による磁気シールド方式

#### a) 構造

中性化セル容器は縦 1.7 m、横 1.0 m、長さ 2.3 m の箱形状とし、その中に高温超電導磁気シールド層を設置する。超電導磁気シールド方式では  $50 \mu\text{T}$  (0.5 G) の地磁気シールドは困難であり、容器内壁または中性化セル外壁に 2 mm の  $\mu$  メタルを設置する。高温超電導薄膜タイル構成では磁気シールド係数は小さいため、高温超電導材は箱形状の厚膜構造とする。Bi系あるいはY系酸化物が候補材となるが、大面積の厚膜生成の実績から、Bi系を対象とする。箱形状超電導材の寸法は縦 1.38 m、横 0.69 m、長さ 3.2 m とし、超電導膜の厚さは 1 mm として検討する。

## b) 超電導特性の評価

無限長の角筒（縦1.38m、横0.69m）に垂直磁場9.5mTがかかる場合のシールド電流を評価する。完全シールドに必要な電流は173kAであり、1mm厚の超電導材の電流密度は $101\text{ A/mm}^2$ となる。液体窒素中（77K、0.1T）での臨界電流密度（Jc）は約 $1 - 2.5\text{ A/mm}^2$ であり、必要電流密度よりもかなり小さい。冷却温度を20K程度に下げるとき臨界電流密度は1桁程度上昇するが、まだ不十分である。従って、現状の技術レベルでは高温超電導材を中性化セル磁気シールドに適用できない。将来の高臨界電流密度化を待つ必要がある。

## C) 極低温超電導による磁気シールド方式

## a) 構造

高温超電導による磁気シールド方式と同様、中性化セル容器は縦1.7m、横1.0m、長さ2.3mの箱形状とし、その中に極低温超電導磁気シールド層を設置する。超電導磁気シールド方式では $50\mu\text{T}$ （0.5G）の地磁気シールドは困難であり、容器内壁または中性化セル外壁に2mmのμメタルを設置する。極低温超電導材は箱形状とし、その寸法は縦1.38m、横0.69m、長さ3.2mとし、超電導材の厚さは1mmとする。

## b) 超電導特性の評価

無限長の角筒（縦1.38m、横0.69m）に垂直磁場9.5mTがかかる場合のシールド電流を評価する。完全シールドに必要な電流は173kAであり、銅も含めた1mm厚の超電導材の電流密度は $101\text{ A/mm}^2$ となる。銅とNbTiの断面積比を1.6とすると、NbTi部分の電流密度は電流密度は $263\text{ A/mm}^2$ となる。液体ヘリウム中（4.2K）での臨界電流密度（Jc）は0.5Tの磁場下で約 $2\text{ kA/mm}^2$ であり、必要電流密度を満足する。従って、極低温超電導材を中性化セル磁気シールドに適用できると判断する。

## c) 磁気シールド評価

中性化セル磁気シールドは有限長で開放端があり、この端部でシールド電流が回り込み、端部効果による漏洩磁場が生じる。この状況は磁性体磁気シールドの開放端と同じである。磁性体開放端の場合、開放端から1直徑距離進入する毎に磁気シールド係数は1000だけ増加（漏洩磁場が $10 - 3$ に減衰）する結果が得られている。超電導シールドの場合も開放端から約1mの位置でシールド係数1000程度になり、端部に向かってシールド係数は低下すると予想される。

中性化セル長が3mの条件では、上記のような端部効果の影響が大きい。これを避ける為には、必要な中性化セル長さよりも1m以上長く中性化セル磁気シールドを設置、またはイオンダンプタンクも磁気シールドする等の対策が必要と考えられる（磁性体による磁気シールド方式も同様）。

## D) 磁性体による磁気シールド方式

## a) 構造

中性化セル容器は縦1.74m、横1.05m、長さ2.3mの箱形状であり、2重磁気シールド構造とする。必要磁気シールド係数は19000である。外層の磁性材はSS400とし、その板厚は0.3mとする。内層の磁性材はμメタルとし、その板厚は20mmとする。

## b) 磁気シールド評価

今回の中性化セルはビーム軸方向にさほど長くないが、従来の評価と同様に無限長の円筒に横磁場がかかる場合の磁気シールドの解析式を用いて検討する。外層の近似半径は0.675m、内層の近似半径は0.44mとした。

外層の磁性材SS400に対して、許容磁束密度と比透磁率は各々1T、1000を用いた。外層の磁性材の内部の磁束密度が許容磁束密度1Tとなる外層厚さは0.13mであり、設計板厚は0.15mとした。この板厚における外層だけのシールド係数は5.6で

ある。

内層の磁性材 $\mu$ メタルに対して、許容磁束密度と比透磁率は各々 0.2 T、3 0 0 0 0 を用いた。内層の磁性材の内部の磁束密度が許容磁束密度 0.2 T となる厚さは 5.7 mm であるが、高い磁気シールド係数を得るために、設計板厚は 20 mm としてある。内層のみのシールド係数は 682 である。外層及び内層の 2 重磁気シールド効果では、磁気シールド係数は 22500 となり、必要シールド係数を満足している。内部の漏洩磁場は  $4 \mu$  T となる。

超電導シールドの項でも述べたが、中性化セル磁気シールドは有限長で開放端があり、端部効果による漏洩磁場が生じる。端部効果による漏洩磁場は

$$H_i (Z) = 0.33 \cdot H_e \times t \cdot e \times p (-7Z / 2R)$$

で表される。ここで、Z はシールドの軸方向の端部からの距離、R は半径である。

開放端から 1 直径距離進入する毎に磁気シールド係数は 1000 だけ増加（漏洩磁場が 10~3 に減衰）する。中性化セル長が 3 m の条件では、上記のような端部効果の影響が大きい。これを避ける為には、必要な中性化セル長さよりも 1 m 以上長く中性化セル磁気シールドを設置、またはイオンダンプタンクも磁気シールドする等の対策が必要と考えられる。

#### E) 磁気シールドのまとめ

##### a) イオン源磁気シールド

イオン源磁気シールドは磁性体方式で検討した。2 重磁気シールド構造とし、外層の磁性材は SS 400（板厚 0.2 mm）、内層の磁性材は $\mu$ メタル（板厚 30 mm）とすれば、漏洩内部磁場を  $16 \mu$  T に低減できる。

##### b) イオン源タンク磁気シールド

イオン源タンク磁気シールドは極低温超電導方式と磁性体方式の 2 方式で検討した。極低温超電導磁気シールド構造の可能性があり、今回検討のようにビームラインを取り囲む縦 1.4 m、横 0.9 m の箱形状とすればコンパクトな超電導磁気シールドとなる。

##### c) 中性化セル磁気シールド

中性化セル磁気シールドは高温超電導、極低温超電導、及び磁性体方式の 3 方式で検討した。現状の Bi 系高温超電導材では臨界電流密度が低く、磁気シールドできない。極低温超電導、及び磁性体方式はともに可能である。開口部の磁気シールド低下に対して、対策が必要である。

#### 4.3.3.1.1.3 クライオポンプ

イオン源及び中性化セルから導入される重水素ガスを排気するパネルである。イオン源タンク及びイオンダンプタンクとに設置する。イオン源タンクでは磁気シールドと本クライオパネルとを兼用する。概略の仕様は以下の通りとする。

	イオン源タンク	イオンダンプタンク
排気速度	2 0 0 0 m <sup>3</sup> /s	1 0 0 0 m <sup>3</sup> /s
パネルサイズ	-----	6 0 0 mm φ × 4 0 0 mm (円筒型)
パネル数		4
ガス流量	2 0 P a · m <sup>3</sup> /s	3 P a · m <sup>3</sup> /s

#### 4.3.3.2 電源

##### 4.3.3.2.1 負イオン生成部電源

負イオン生成部電源の構成を図 4.3.3 に示す。負イオン生成部電源はイオン源毎に設ける。各電源の定格を以下に示す。

a) フィラメント電源	定格電圧	15 V
	定格電流	15 kA (1.25 kA × 12 回路)
	運転時間／周期	210 秒／60 分
	台数	4 式

b) アーク電源	定格電圧	120 V
	定格電流	15 kA
	運転時間／周期	201秒／60分
	台数	4式
c) バイアス電源	定格電圧	±10 V
	定格電流	2.4 kA
	運転時間／周期	201秒／60分
	台数	4式
d) PGフィルター電源	定格電圧	7 V
	定格電流	10 kA
	運転時間／周期	201秒／60分
	台数	4式

#### 4.3.3.2.2 引出し電源

引出し電源の構成を図4.3.4に示す。引出し電源はイオン源毎に設ける。引出し電源の定格を以下に示す。

定格電圧	-10 kV
定格電流	60 A
運転時間／周期	200秒／60分
台数	4式

#### 4.3.3.2.3 加速電源

加速電源の構成を図4.2.5に示す。加速電源はイオン源2台に共通の電源1式で構成する。加速電源の1式の定格事項を以下に示す。

電源方式	4段加速方式
定格電圧	-750 kV
定格電流	76 A
運転時間／周期	200秒／60分
台数	4式
出力容量	5.7 MW
運転時間／周期	210秒／30分
台数	2式

加速電源の主要機器は高周波変圧器、高周波インバータ、コンバータ、コンバータ用変圧器及びダイオード整流器である。

高周波変圧器	定格1次電圧	2300 V
	定格2次電圧	87.12 kV (相電圧)
	定格容量	16.22 MVA (1段)
	結線方式	1次：オープンデルタ 2次：スター
	台数	4台
高周波インバータ	交流定格電圧	2286 V
	直流定格電圧	2800 V
	定格容量	5.406 MVA (3相1ユニットの容量)
	台数	12台
	コンバータ	交流定格電圧 3013 V
	直流定格電圧	2828 V
	定格容量	16.38 MVA
	台数	4台

コンバータ用変圧器	定格1次電圧	3相18kV
	定格2次電圧	3013V
	定格容量	49.37MVA
	結線方式	1次：デルタ 2次：デルタ／スター
	台数	2台
ダイオード整流器	入力定格電圧	150.9kV(線間)
	出力定格電圧	DC-187.5kV
	定格電流	76A

#### 4.3.3.2.4 SF<sub>6</sub>ガスダクト

SF<sub>6</sub>ガスダクトはソース電源用4式及び加速電源用2式からなる。

##### ①ソース電源用SF<sub>6</sub>ガスダクト

ソース電源用SF<sub>6</sub>ガスダクトは円筒状の内部導体内にフィラメント電源ケーブル、アーク電源ケーブル、PGフィルタ電源導体、バイアス電源導体、引出し電源ケーブル及びガス導入系配管・配線を収納する。

内部導体直径	700mm
ガスダクト外形	1000mm
SF <sub>6</sub> ガス圧力	0.35MPa

##### ②加速電源用SF<sub>6</sub>ガスダクト

加速電源用SF<sub>6</sub>ガスダクトは円筒状のガスダクト内に同軸状の4つの導体を配置し、各導体間の電位の傾き(2.5kV/mm)の最大が同じになるように寸法を決める。

第1加速導体半径	5mm
第2加速導体半径	203mm
第3加速導体半径	294mm
第4加速導体半径	379mm
SF <sub>6</sub> ガスダクト半径	462mm

#### 4.3.3.2.5 受電方式

負イオンNBⅠ装置の電源供給は旧トロイダル磁場コイル電源系統系の変圧器(275kV/18kV/198MVA/短時間定格)により供給する。受電点には力率補償コンデンサー及び高調波フィルターを設ける。

力率改善補償コンデンサー容量	89.3Mvar
高調波フィルター容量	7.5Mvar

#### 4.3.3.2.6 ユーティリティ要求事項

加速電源降圧変圧器、加速電源絶縁変圧器、ソース電源絶縁変圧器のガス圧、ガス量、冷却水量を以下に示す。

##### 加速電源降圧変圧器

SF <sub>6</sub> ガス圧	0.125MPa
SF <sub>6</sub> ガス量	300kg
冷却水量	660L/min

##### 加速電源絶縁変圧器

SF <sub>6</sub> ガス圧	0.4MPa
SF <sub>6</sub> ガス量	700kg
冷却水量	450L/min

##### ソース電源絶縁変圧器

SF <sub>6</sub> ガス圧	0.4MPa
SF <sub>6</sub> ガス量	500kg
冷却水量	450L/min

## 4.3.3.2.7 騒音評価

加速電源降圧変圧器、加速電源絶縁変圧器、ソース電源絶縁変圧器の騒音予想値を以下に示す。

加速電源降圧変圧器	約 71 dB
加速電源絶縁変圧器	約 75 dB
ソース電源絶縁変圧器	約 75 dB

## 4.3.3.2.8 ケーブルの設計

① 加速電源用 SF<sub>6</sub>高圧リード及びガスダクトの絶縁設計

## A) 検討前提条件

a) 加速電源用 SF<sub>6</sub>高圧リードの耐電圧仕様

定格電圧	- 750 kV
直流電圧	- 750 kV × 1.1 = - 825 kV (10分間)
サージ電圧	- 750 kV × 1.4 = - 1050 kV (インパルス耐電圧)

直流電圧とサージ電圧の重畠及び極性反転は考慮しない。

b) SF<sub>6</sub>ガスの使用ガス圧

SF<sub>6</sub>ガスのガス圧としては当社製G I S (ガス絶縁変電所)において標準的に使用している0.5 MPで設計した。

ガス圧	常用	0.5 MP
	最高*1	0.6 MP
	耐電圧保証圧力*2	0.45 MP

## 《注》

\*1: 温度上昇を考慮した圧力

\*2: ガス圧監視において警報を出し、耐電圧を保証する圧力

したがって、以後のSF<sub>6</sub>ガスの許容ストレスを検討する時は耐電圧保証圧力 p = 4.5 kg/cm<sup>2</sup> · abs (0.45 MP) を使用する。

B) SF<sub>6</sub>ガス中の許容ストレスa) インパルス電圧許容ストレス: E<sub>a-IMP</sub>

SF<sub>6</sub>ガス圧を p (abs: 絶対圧) とする時、インパルス電圧の50%絶縁破壊ストレス E<sub>50</sub>は負極性の場合、次式で表わせる。

$$E_{50-IMP} = 33.7 + 66.3 p - 1.85 p^2 \text{ (kV/cm)} \quad \dots [4.3.1]$$

p = 4.5 kg/cm<sup>2</sup> · abs を代入すると

$$E_{50-IMP} = 294.6 \text{ (kV/cm)}$$

許容ストレス E<sub>a</sub> としてはバラツキを考慮して 3σ をとると、次式で表わせる。

$$E_{a-IMP} = E_{50-IMP} (1 - 3\sigma) \quad \dots [4.3.2]$$

σ: 絶縁破壊バラツキ (標準偏差)

SF<sub>6</sub>ガス絶縁の場合は σ = 294.6 × (1 - 0.07) = 232.7 (kV/cm)

b) 直流電圧許容ストレス: E<sub>a-DC</sub>

直流電圧の50%絶縁破壊ストレス E<sub>50</sub>は負極性の場合、次式で表わせる。

$$E_{50-DC} = 26p + 58 \text{ (kV/cm)}$$

p = 4.5 kg/cm<sup>2</sup> · abs を代入すると

$$E_{50-DC} = 175 \text{ (kV/cm)}$$

許容ストレス E<sub>a</sub> としては [4.3.2] 式より

$$E_{a-DC} = 175 \times (1 - 3 \times 0.07) = 138.3 \text{ (kV/cm)}$$

以上より

インパルス電圧許容ストレス E<sub>a-IMP</sub> : 232.7 (kV/cm)

直流電圧許容ストレス E<sub>a-DC</sub> : 138.3 (kV/cm)

インパルス電圧許容ストレス E<sub>a-IMP</sub> と直流電圧許容ストレス E<sub>a-DC</sub> の比を求め

ると

$$E_a - IMP / E_a - DC = 232.7 / 138.3 = 1.27$$

すなわち許容ストレスの比の方が耐電圧の比よりも大きいので、SF<sub>6</sub>ガス中ではインパルス耐電圧の方が絶縁裕度は大きくなる。したがって絶縁設計では直流電圧許容ストレスをチェックすれば良い。

### C) SF<sub>6</sub>ガスダクトの構造検討

a) SF<sub>6</sub>ガスダクトの管路直径は建屋を貫通するために1000mm以下を推奨されている。高圧電極は途中での繋ぎ接続及び端末部の接続を考慮すると、パイプの方が工作しやすい。また第1電極:-750kVから第2電極:-560kV、第3電極:-370kV、第4電極:-190kVと順次電圧が下がっていくので、パイプ径は順次小さくなってしまってもよいが、接続部と部品の共通化を計るために全て同一径とした。(またこれは後で述べるガス区分用絶縁スペーサとの接続の容易化に有効である。)以上のこと考慮して、SF<sub>6</sub>ガスダクトの構造を検討した結果を図4.3.6.5に示す。管路内径は920mmとし、第1電極から第4電極まで導体径を180mmとして図のように左右対象に配置した。各電極は適宜配置した支持用スペーサによって固定されると共に絶縁されている。

### D) SF<sub>6</sub>ガスダクト一般部の電極に直流耐電圧を印加した時の電極ストレス

a) 簡略式による計算結果は以下の通りである。

各電極と対ダクト(大地)間のストレス(電極側ストレス)

$$\text{第1電極 (電圧 } 825 \text{ kV) : } E_{1E} = 70 \text{ (kV/cm)} < 138.3$$

$$\text{第2電極 (電圧 } 616 \text{ kV) : } E_{2E} = 65 \text{ (kV/cm)}$$

$$\text{第3電極 (電圧 } 407 \text{ kV) : } E_{3E} = 43 \text{ (kV/cm)}$$

$$\text{第4電極 (電圧 } 209 \text{ kV) : } E_{4E} = 39 \text{ (kV/cm)}$$

各電極間のストレス

$$\text{第1電極-第2電極 (電圧 } 209 \text{ kV) : } E_{12} = 21 \text{ (kV/cm)} < 138.3$$

$$\text{第1電極-第3電極 (電圧 } 418 \text{ kV) : } E_{13} = 41 \text{ (kV/cm)}$$

$$\text{第1電極-第4電極 (電圧 } 616 \text{ kV) : } E_{14} = 33 \text{ (kV/cm)}$$

$$\text{第2電極-第3電極 (電圧 } 209 \text{ kV) : } E_{23} = 13 \text{ (kV/cm)}$$

$$\text{第2電極-第4電極 (電圧 } 407 \text{ kV) : } E_{24} = 40 \text{ (kV/cm)}$$

$$\text{第3電極-第4電極 (電圧 } 198 \text{ kV) : } E_{34} = 20 \text{ (kV/cm)}$$

### E) 加速電源用SF<sub>6</sub>ガスダクトのガス区分用絶縁スペーサの検討

#### a) ガス区分用絶縁スペーサの構造検討

SF<sub>6</sub>ガスダクト単独ではガス区分が必要でないため、スペーサとしては支持用スペーサのみで事足りる。しかしSF<sub>6</sub>ガスダクトと負イオン源SF<sub>6</sub>ガスタンクとの接続部及びSF<sub>6</sub>ガスダクトと加速電源タンクとの接続部ではガス区分が必要となる。したがってこの接合部にはガス区分用絶縁スペーサが必要となる。

ガス区分用絶縁スペーサは大口径となり、製造の技術的な問題から対称形に設計する必要がある。図4.3.6.5のSF<sub>6</sub>ガスダクトの形状では非対称であるから、ガス区分用絶縁スペーサの形状には不適で、対称形とするためには管路径を大きくする必要がある。またガス区分用絶縁スペーサの開発・注形形の製作には多額の費用がかかるので、従来使用実績のあるガス区分用絶縁スペーサの流用を検討した結果、図4.3.6.6に示すようなGIS三相母線用絶縁スペーサの流用を図ることにした。

各電極導体にはSF<sub>6</sub>ガスダクトと同様に外径180mmのパイプを使用し、ダクト内径は約1250mmとしている。また加速電源用SF<sub>6</sub>ガスダクト部とガス区分用絶縁スペーサの接続構造を図4.3.6.7に示す。ガス絶縁ダクト部の各導体とガス区分用絶縁スペーサ部の各導体とは曲がり導体によって接続するようになっている。

#### b) ガス区分用絶縁スペーサ部に直流耐電圧を印加した時の電極ストレス

簡略式による計算結果は以下の通りである。

各電極と対ダクト(大地)間のストレス(電極側ストレス)

第1電極(電圧825kV):  $E_{1E} = 71 \text{ (kV/cm)} < 138.3$

第2電極(電圧616kV):  $E_{2E} = 53 \text{ (kV/cm)}$

第3電極(電圧407kV):  $E_{3E} = 35 \text{ (kV/cm)}$

第4電極(電圧209kV):  $E_{4E} = 17 \text{ (kV/cm)}$

各電極間のストレス

第1電極-第2電極(電圧209kV):  $E_{12} = 15 \text{ (kV/cm)} < 138.3$

第1電極-第3電極(電圧418kV):  $E_{13} = 30 \text{ (kV/cm)}$

第1電極-第4電極(電圧616kV):  $E_{14} = 21 \text{ (kV/cm)}$

第2電極-第3電極(電圧209kV):  $E_{23} = 7 \text{ (kV/cm)}$

第3電極-第4電極(電圧198kV):  $E_{34} = 14 \text{ (kV/cm)}$

#### F) 加速電源用SF<sub>6</sub>ガスダクトと負イオン源のSF<sub>6</sub>ガスタンクとの接続部検討

構造の検討結果を図4.3.6.8に示す。

加速電源用SF<sub>6</sub>ガスダクトと負イオン源SF<sub>6</sub>ガスタンクとの接合部には、E)節で検討したガス区分用絶縁スペーサが適用され、各電極導体はパイプで接続される。負イオン源は2基あり、ガス絶縁ダクトは1本であるから、負イオン源の各電極導体の外部シールド径が不明であるがガスダクトからくるパイプと異径でも接続は可能である。

#### 4.3.3.2.9 ソース電源リードのSF<sub>6</sub>ガスダクト内配置とリード温度上昇

##### ①イオン電源用リード導体の温度上昇の検討

###### A) 前提条件

雰囲気

リード導体はSF<sub>6</sub>ガスダクト内のシールドダクト内側に収納。

SF<sub>6</sub>ガス圧 0.5 MP

ガス温度 30°C以下

計算仮定

通電時(200秒)の熱は全てリード導体に蓄積される。

リード導体回りのSF<sub>6</sub>ガスは淀まないものとし、他のケーブルからの熱影響はない。

リード導体の熱は被覆絶縁物表面からSF<sub>6</sub>ガスに熱伝達で逃げる。

200秒通電-3400秒非通電の繰り返し運転12回/日。

###### B) 通電時間によるリード導体温度上昇: $\Delta\theta_c$

通電中のリード導体の熱は全て蓄積されると仮定すると、リード導体の温度上昇は次式で計算できる。

$$\Delta\theta_c = \frac{r \times L \times I^2 \times t}{U} \quad (\text{°C})$$

$$U = S \times C_p \times \gamma \times L \quad (\text{J/°C})$$

$U$  = リード導体熱容量 ( $\text{J/°C}$ )

$r$  = 1mあたりのリード導体の抵抗 ( $\Omega/m$ )

$I$  = リード通電電流 (A)

$t$  = 通電時間 (200秒)

$S$  = リード導体断面積 ( $\text{m}^2$ )

$C_p$  = リード導体比熱 (銅390J/(kg/m<sup>3</sup>))

$\gamma$  = リード導体比重 (銅8.9×10<sup>3</sup>/(kg/m<sup>3</sup>))

$L$  = リード導体長さ (m)

###### C) 非通電終了時の残留温度上昇(1サイクル): $\Delta\theta_t$

60分サイクル運転(200秒運転後3400秒非通電)における非通電時の放熱冷却によるリード導体の残留温度は次式で計算できる。

$$\Delta \theta_t = \theta_0 \times \exp(-\alpha \cdot t)$$

$\theta_0$ : 非通電終了時のリード初期導体温度上昇 (ガスに対する)

$\alpha$ : 放熱の時定数 (1/秒)

$t$ : 非通電時間 (秒 / 3 6 0 0 - 2 0 0)

$$\alpha = h \times A \times L \times / U$$

$h$ : 热伝達率 (J / (秒 · m<sup>2</sup> · °C))

$A$ : 冷却表面積 (m<sup>2</sup>)

導体被覆がある場合の熱伝達は次の式で計算できる。

熱伝達率 (平板で仮定) :  $h$

$$h = (d / k + 1 / h')^{-1}$$

$h$ : 热伝達率 (J / (秒 · m<sup>2</sup> · °C))

$d$ : 絶縁物厚さ (m)

$k$ : 热電導率 (W / (m · °C))、ポリエチレン → 0.3

$h'$ : 絶縁被覆がない場合の熱伝達率 (J / (秒 · m<sup>2</sup> · °C))

$$h' = 0.53 \times k' \times \left( \frac{g \times \beta \times P_r \times \Delta \theta_c}{v \times d} \right)^{1/4}$$

$g$  = 重力加速度 (m<sup>2</sup> / 秒)

$P_r$  = プラントル数 ( $\rightarrow 0.84$  at 0.5 MP SF<sub>6</sub>)

$v$  = SF<sub>6</sub> の動粘性係数 (m<sup>2</sup> / 秒 →  $6.3 \times 10^{-7}$  at 0.5 MP SF<sub>6</sub>)

$d$  = 導体直径 (m)

$\beta$  = 1 / 導体温度 (絶対温度)

$k'$  = 絶縁被覆がない場合の熱伝導率 (W / (m · °C) → 1.533 at 0.5 MP SF<sub>6</sub>)

D) 繰り返し運転時のリード導体の温度上昇 (n回運転)

運転パターンによるリード導体の温度上昇を図 4.3.6.9 に示す。

n回運転時の導体リードの温度:  $\theta$

$$\theta = \theta_{gas} + (n - 1) \cdot \Delta \theta_t + \Delta \theta_c$$

$\theta_{gas}$ : SF<sub>6</sub> ガス温度 (°C) 一定と仮定

E) リード導体の温度上昇

表 4.3.1.0 に示すリード導体の温度上昇の計算結果は以下の通りである。

いずれもリード導体の温度も 90 °C 未満である。

CVケーブル (架橋ポリエチレン被覆) の許容温度は 90 °C であり、表 4.3.1.0 に示すケーブルが適用可能である。

SF<sub>6</sub> ガスダクト内に収納するソース電現用リード導体はリード導体部での電圧降下、発熱量などを考慮して選定する。

少なくとも表 4.3.1.0 で示すケーブルサイズより安全側で構成する必要がある。

②ダクト内の SF<sub>6</sub> ガスの温度上昇:  $\theta_{SF6}$

リード導体の発熱量の全てがダクト内の SF<sub>6</sub> ガス及び SF<sub>6</sub> ガスダクトに吸収されたと仮定する。

$\theta_{SF6}$  = リード導体発熱量 / (SF<sub>6</sub> ガス + SF<sub>6</sub> ガスダクトの熱容量)

$$\text{ダクト内の SF}_6 \text{ ガス熱容量} = R^2 \times \pi \times 1.00 \text{ m} \times C_{PSF6} \times \gamma_{SF6} \\ \rightarrow 1.49 \times 10^6 \text{ J / } ^\circ\text{C}$$

$R$  : SF<sub>6</sub> ガスダクト半径 (0.5 m)

$C_{PSF6}$  :  $0.74 \times 10^3 \text{ J / (kg} \cdot {^\circ}\text{C)}$

$\gamma_{SF6}$  :  $25.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$\text{SF}_6 \text{ ガスダクト熱容量} = 2R \times \pi \times 1.00 \text{ m} \times C_{PSF6} \times \gamma_{SF6}$$

$$\rightarrow 3.48 \times 10^7 \text{ J}/\text{°C}$$

D : SF<sub>6</sub>ガスダクト厚さ (0.008 m)

C<sub>PSF6</sub> : 5.15 × 10<sup>3</sup> J/(kg · °C)

$\gamma_{SF6}$  : 2.69 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>

リード導体の総発熱量 ( $389 \times 200$ ) kJ (表 4.3.1.1) が全て SF<sub>6</sub>ガス及びダクトに均等に吸収されたと仮定すると、SF<sub>6</sub>ガスの温度は 1 回の運転当たり 2.4 °C 上昇する (他に熱が逃げない前提)。

SF<sub>6</sub>ガス・SF<sub>6</sub>ガスダクトへの熱伝達の時間遅れ、タンク表面からの放熱があることなどから詳細検討には計算機を用いた解析が必要となるが、今回は上記簡易検討に留めた。

前項までの検討はリード導体回りのガス温度が 30 °C 一定、他のリード線からの熱影響はないとしているが、実際のリード導体配置ではリード導体同志が比較的隣接しているので SF<sub>6</sub>ガスを強制的に流さない限りこの仮定が成り立たない。

以上総合すると、SF<sub>6</sub>ガスの冷却に関して次の対策が必要である。

SF<sub>6</sub>シールドダクト内の SF<sub>6</sub>ガスは送風ポンプなどで強制的に流す必要がある。

SF<sub>6</sub>ガス送風用モーターの容量は 200 kW (30 °C ベース) 程度である。

### ③ダクト内の SF<sub>6</sub>ガスの温度上昇: $\theta_{SF6}$

#### A) ソース電源用リード部の電圧降下

表 4.3.1.1 にソース導体部の電圧降下と発熱量を示す。

リード導体部での電圧降下は負イオン源の定格電圧に対して無視できない。

ソース電源用変圧器の 2 次巻線の定格電圧値 (無負荷電圧) は、変圧器の漏れインピーダンス及びリード胴体部分の電圧降下を見込んで設計する必要がある。

通電中はリード導体の温度上昇にともなって導体抵抗が変化する。抵抗変化は基準温度に対して  $(273 + \Delta \theta_w) / (273 + \Delta \theta_0)$  倍に変化する。 $(\Delta \theta_w:$  導体温度、 $\Delta \theta_0:$  導体基準温度)。導体基準温度 30 °C、導体温度 60 °C では通電前に対しリード抵抗値が 1.099 倍となり、運転を繰り返す事によりリード部での電圧降下が大きくなる。

### ④ソース電源リード導体の遣い回し検討

#### A) リード導体の電位 (図 4.3.7.0)

シールド部の電界として図 4.3.7.1 に示す。

リード導体の遣い回しの具体例を図 4.3.7.2 に示す。

シールドダクトは加速電源の -750 kV 電位に接続。

引出し電源 + 側のリードのみ 11 kV - CV ケーブル、他のリードは全て 600 V - CV ケーブル。

リード導体とシールドダクト間との 10 kV 電位のリード → 11 kV - CV ケーブル

200 V 電位以下のリード → 600 V - CV ケーブル

### ⑤ SF<sub>6</sub>ガスダクトの絶縁検討

図 4.3.7.2 に示すように、全てのソース電源用リード導体及び -750 kV 加速電源リードを -750 kV に電位固定されたシールドダクト内に配置する。

SF<sub>6</sub>ダクトの寸法を次のように仮定する。

SF<sub>6</sub>ガスダクト内径: 1000 mm

シールドダクト外径: 510 mm

同形状のダクトの電位頻度

同軸円筒一般部の最大電位頻度:  $E_1 = 4.8 \text{ kV/mm}$

(直流試験電圧 / -750 kV × 1.1)

許容値に対して 2 倍以上の裕度を有する。

### ⑥シールドダクトの支持構造

シールドダクトの支持は SF<sub>6</sub>ガスダクトに取り付けられた支持用スペーサにより固定される。

支持用スペーサは直流試験電圧DC-825kV、直流運転電圧DC-750kVの電圧に耐える必要があり、500kV電力用に適用している支持スペーサが、この仕様を満足する。取付け概念図を図4.3.73に示す。

#### ⑦ SF<sub>6</sub>ガスダクトのガス区分方法

ソース電源用SF<sub>6</sub>ガスダクトは、不具合時のガス抜き作業の低減、保守・組立作業性を考えてダクト内をガス区分する他、負イオン源・ソース電源用直流発生装置とのガス区分が必要である。

ガス区分用として、電力用に開発されたガス区分用絶縁スペーサを応用する。使用ガス圧、絶縁強度、信頼性の面から最適である。

しかし、今回のように40本近いリードを貫通させるガス区分用絶縁スペーサは存在せず、新たに開発する必要がある。

ガス区分用絶縁スペーサ部では、リードの接続・切り離し作業のための接続スペース及びマンホールが必要である。

ガス区分用絶縁スペーサ部のリード接続構造概念図を図4.3.74に示す。

#### ⑧ ソース電源リードのSF<sub>6</sub>ガスダクト内配置とリード温度上昇等のまとめと課題

A) 大電流リード（PGフィルタ、アーク、バイアス、フィラメント電源）に対してリード導体の電流密度をおおよそ4.2~6.3A/mm<sup>2</sup>程度に選定すれば作業性・保守等が比較的容易なCVケーブルの適用が可能である。

B) これら全てのリード導体をSF<sub>6</sub>ガスダクト内に設けた円筒型の-750kVシールドダクト内に設置する事により、リード導体は高々10kVの絶縁を考えればよい。

C) シールドダクト内のSF<sub>6</sub>ガスを強制的に流す。

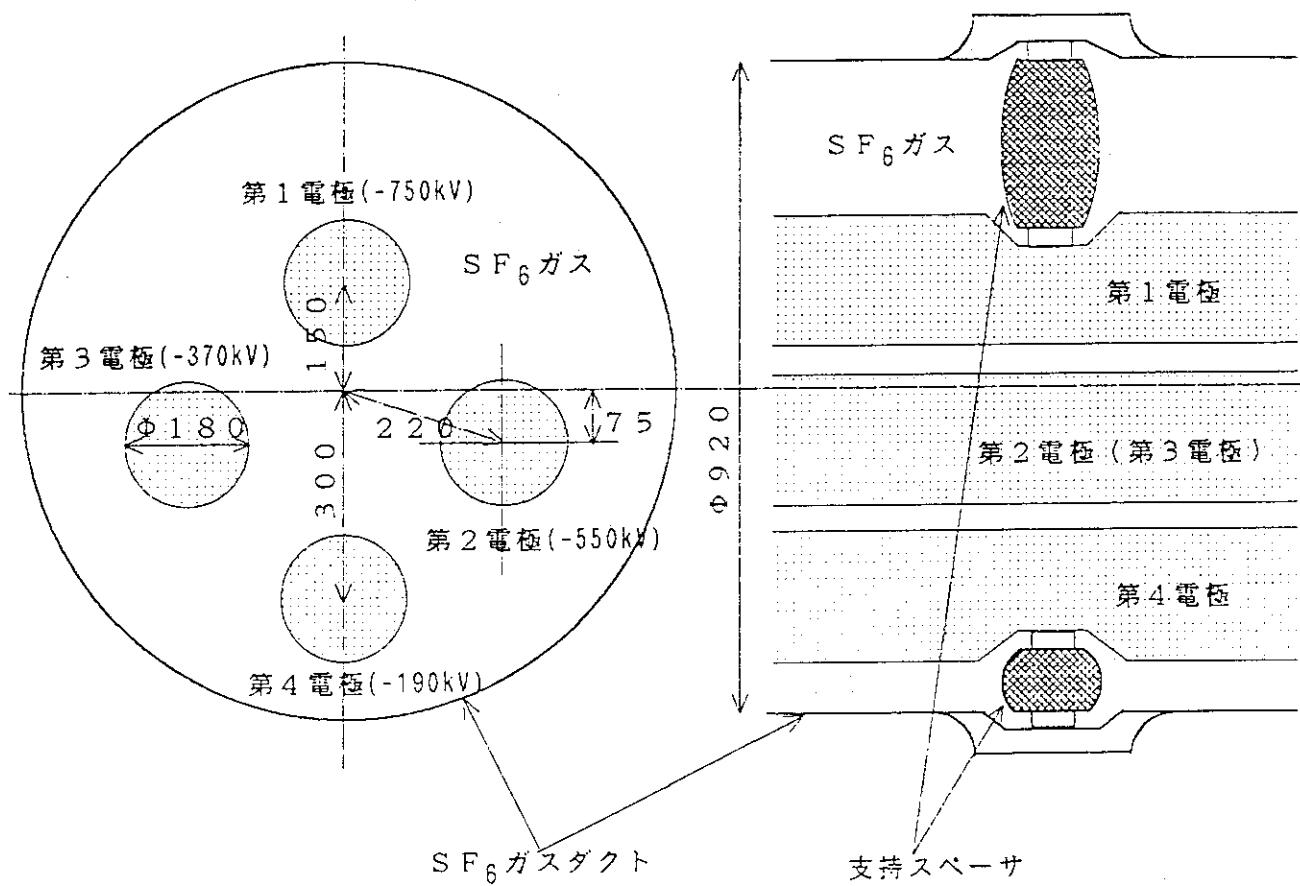
D) 保守・組立の容易性、不具合発生時の作業性を考えればSF<sub>6</sub>ガスダクト内をガス区分する他、負イオン源、ソース電源直流発生装置とのガス区分が必要。ガス区分は電力用に開発された大口径ガス区分用絶縁スペーサによるガス区分技術を応用できる。但し、多本数リードが貫通する絶縁スペーサを新たに開発する必要がある。

E) 60分連続運転については今後の検討課題として残っている。次のような検討が必要である。

a) リード導体温度にとって60分運転は連続運転と同じであり、ケーブルの許容温度90°Cに納めるために必要な熱検討。

b) リードに裸導体を使用すると許容温度はCVケーブルの場合より高くできるが、絶縁スペーサ部の導体温度は材料特性から110°C程度に抑えることが必要。また、導体が裸のためその支持構造の検討が必要となる。

c) リード導体断面積を倍増した場合のリード遣い回し作業性、ガス区分用絶縁スペーサ部での接続作業・貫通部構造との兼合いから、断面積増加には限界がある。（リード導体からSF<sub>6</sub>ガスへの熱伝達率は裸導体で20W/°C·m<sup>2</sup>オーダと推測されることから、現検討の2~3倍の導体断面積が必要となることが予想される。）



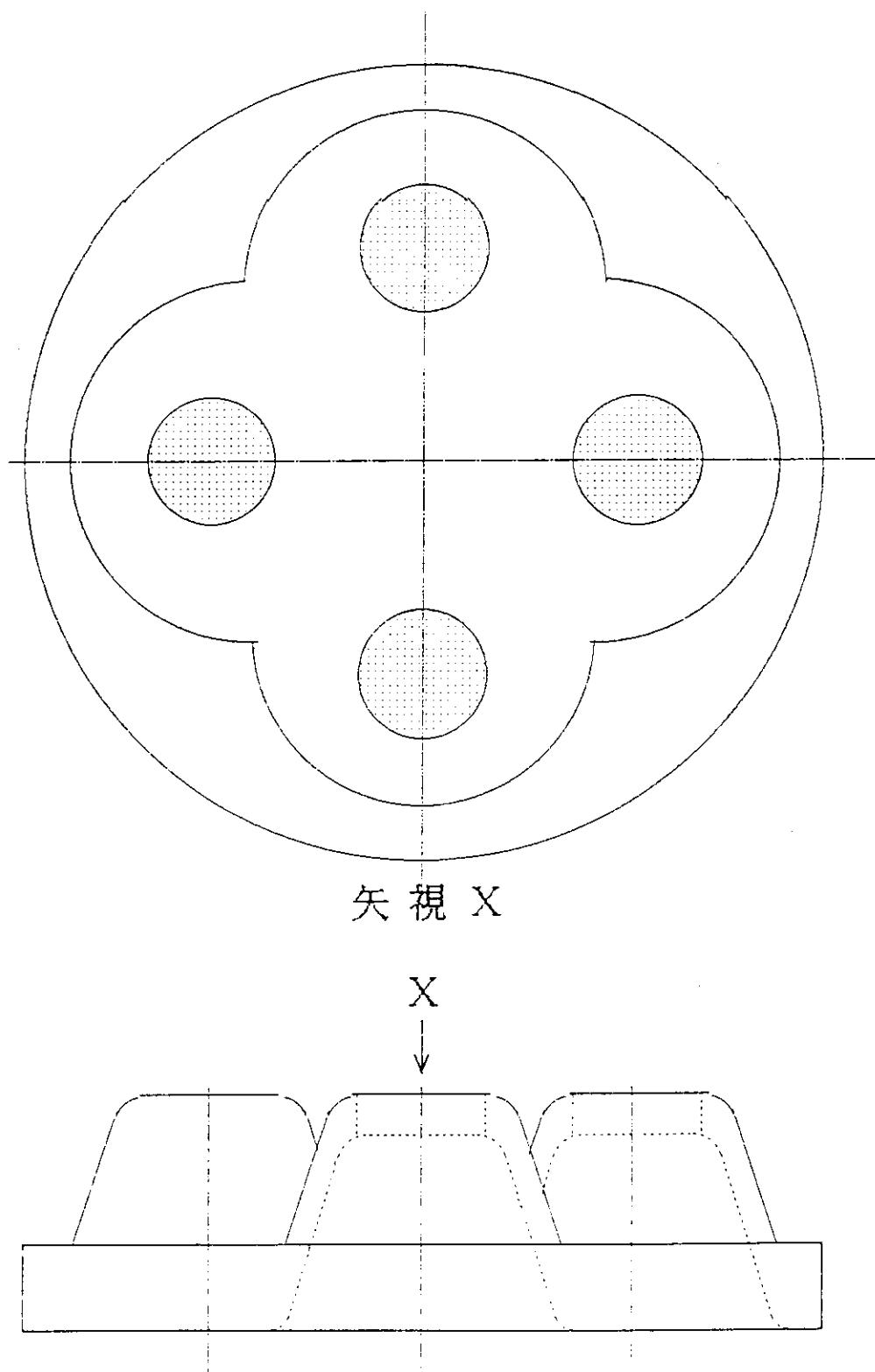


図4.3.6.6 加速電源用  $SF_6$  ガスダクトガス区分絶縁スペーサ

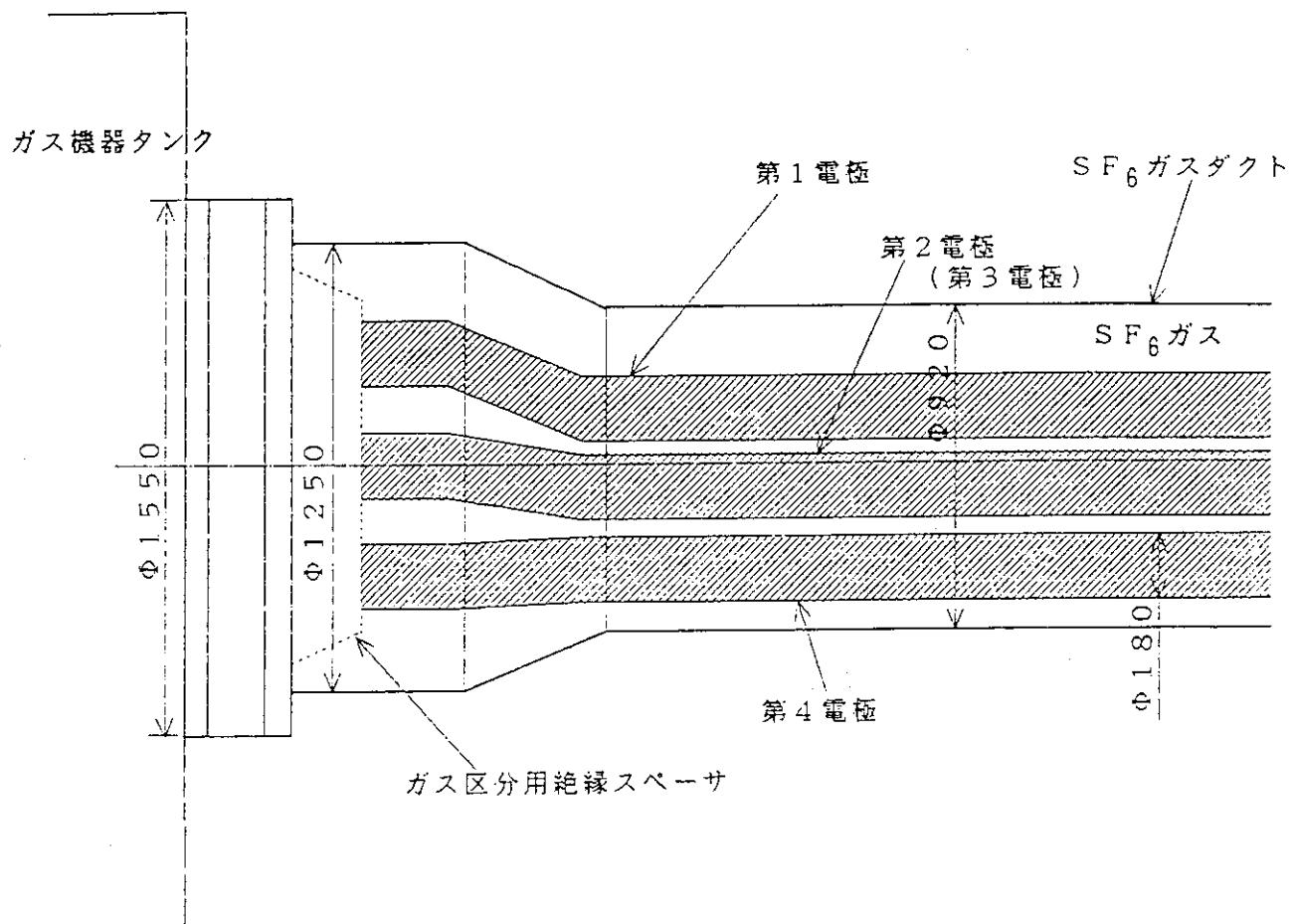


図4.3.6.7 加速電源用SF<sub>6</sub>ガスダクト構成図

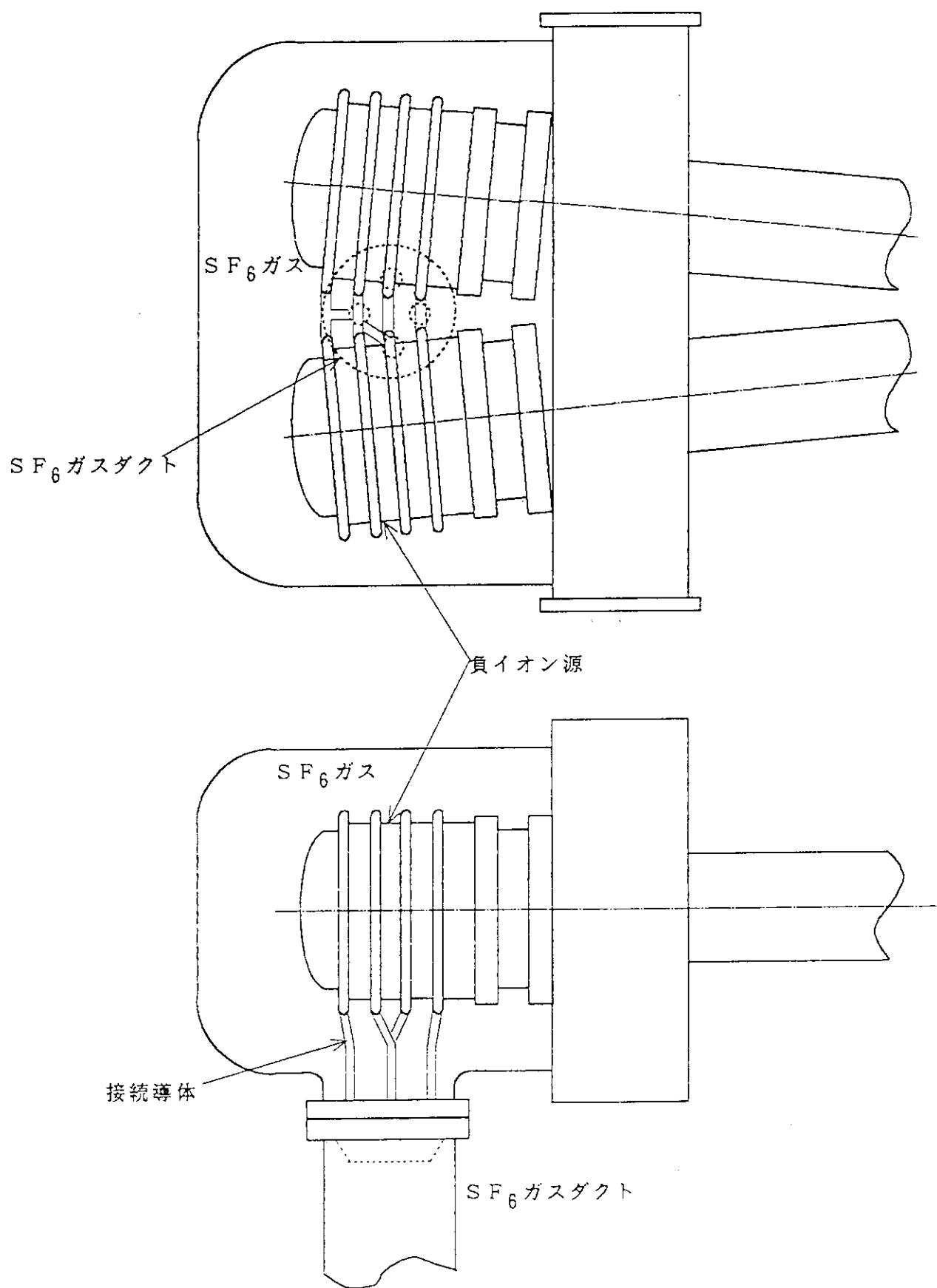


図4.3.6.8  $SF_6$  ガスダクトと負イオン源の接続部構造

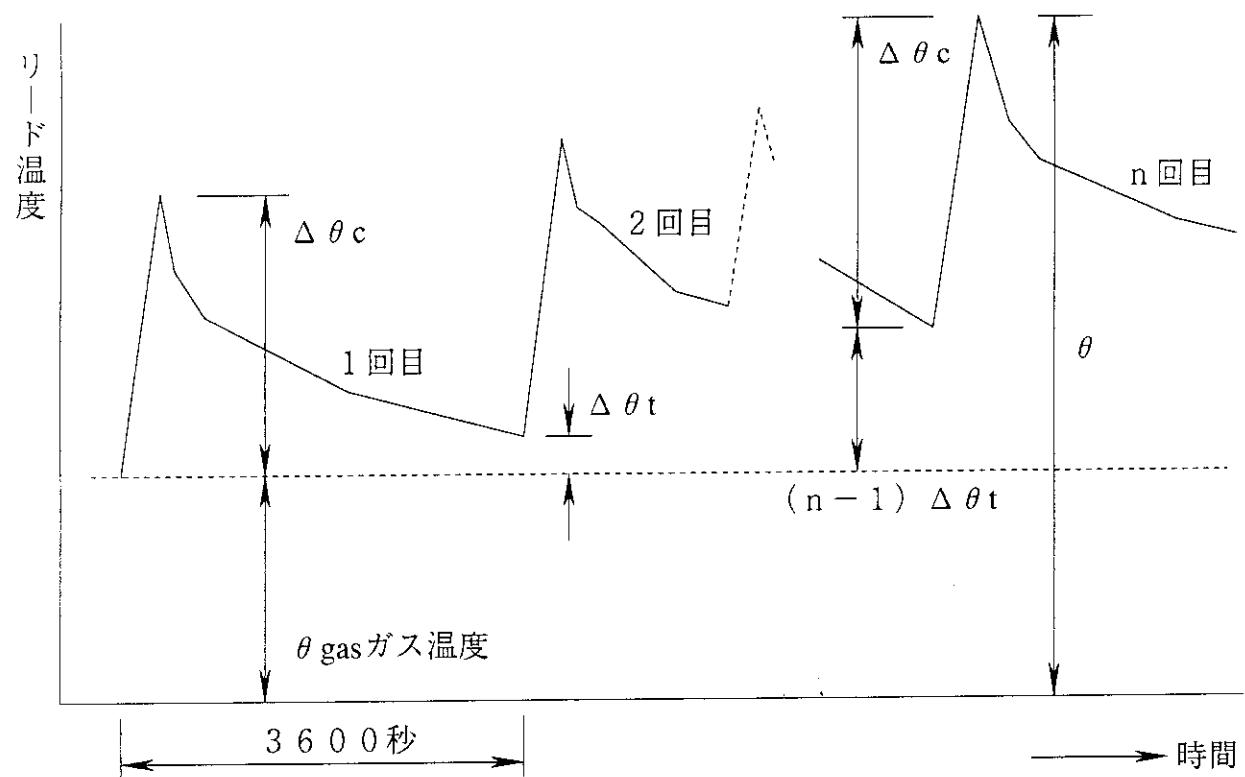


図4.3.6.9 運転パターンによるリード導体の温度上昇

表4.3.10 リード導体の温度上昇計算結果

ケーブル用途	ケーブル種類	リード導体温度上昇		12回運転時の リード温度: $\theta$ °C (SF6充満温度 30°C)
		蓄熱分: $\Delta\theta_c$ °C	1回毎の残留分: $\Delta\theta_t$ °C	
PGフィルター電源 10 kA	2×1200mm <sup>2</sup>	21	3.2	86.2
アーク電源 7.5 kA	2×800mm <sup>2</sup>	27	1.9	77.9
バイアス電源 2.4 kA	400mm <sup>2</sup>	44	0.4	78.4
フィラメント電源 1.25 kA	**200mm <sup>2</sup>	47	0.2	79.2
引き出し電源 60A	60mm <sup>2</sup> *60mm <sup>2</sup>	2	≈0	32
-750kV加速電源 76A	60mm <sup>2</sup>	2	≈0	32

注) \* : 11kV-CV 単心ケーブル、 \*\* : 600V-CV 2心ケーブル

\*、\*\*以外のケーブルは、600V-CV 単心ケーブル

表4.3.11 リード導体部の電圧低下と発熱量

	直流抵抗 Ω/100m (75°C)	電圧低下 V/100m	発熱量 kJ/100m
PG74M-電源 7V	8.75 × 10 <sup>-4</sup>	8.75 at 10kA	88 × 200
アーク電源 120V	1.313 × 10 <sup>-3</sup>	9.84 at 7.5kA	74 "
バイアス電源 10V	5.25 × 10 <sup>-3</sup>	12.6 at 2.4kA	30 "
フィラメント電源 15V	0.0105	13.1 at 1.25kA	197 "
引き出し電源 10kV	0.035	2.1 at 60A	0.2 "
全発熱量			389 × 200

表4.3.12 風冷による許容電流計算結果

	22kV CV 600mm <sup>2</sup>	22kV CV 150mm <sup>2</sup>	3300V CV 250mm <sup>2</sup>
風速 (m/s)	許容電流 (A)	許容電流 (A)	許容電流 (A)
0.12	936	394	558
1.0	1065	456	668
2.0	1114	476	711
3.0	1142	487	736
4.0	1162	494	754

ケーブル1本当りの許容電流値

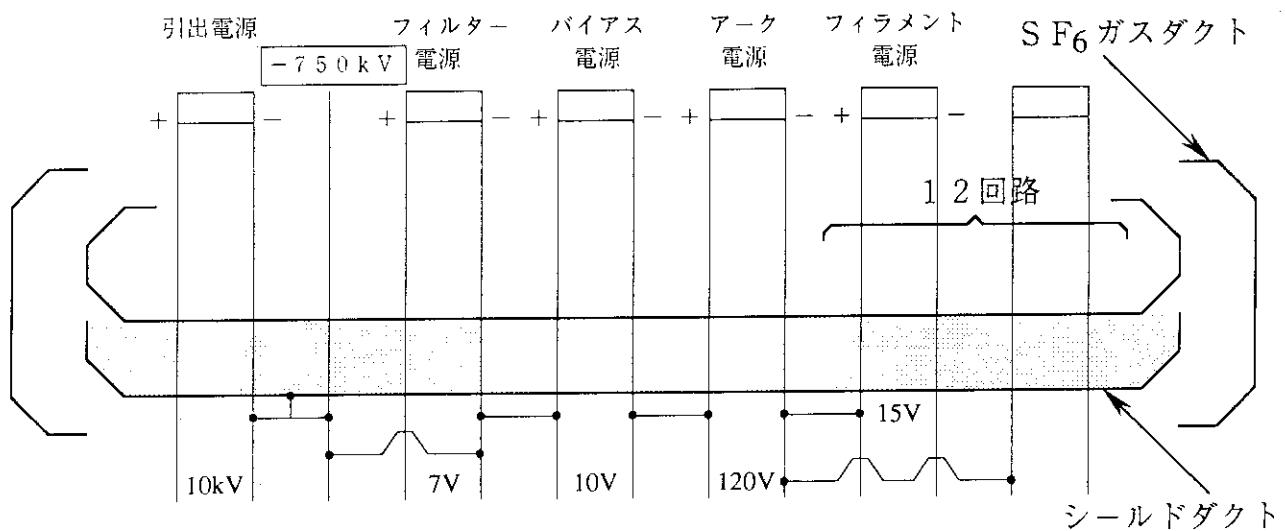


図 4.3.7 0 リード導体の電位

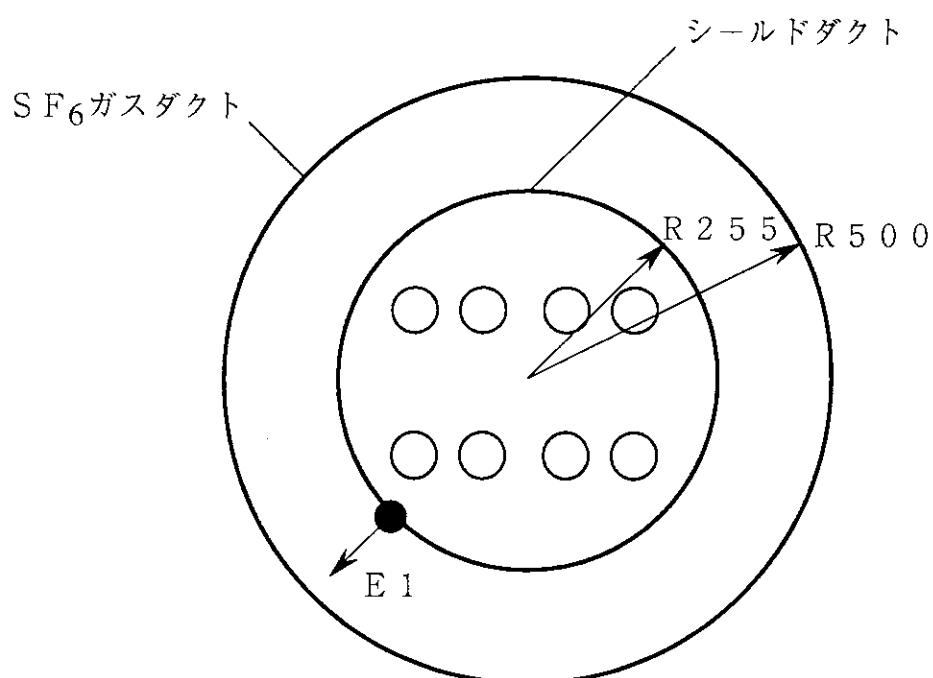
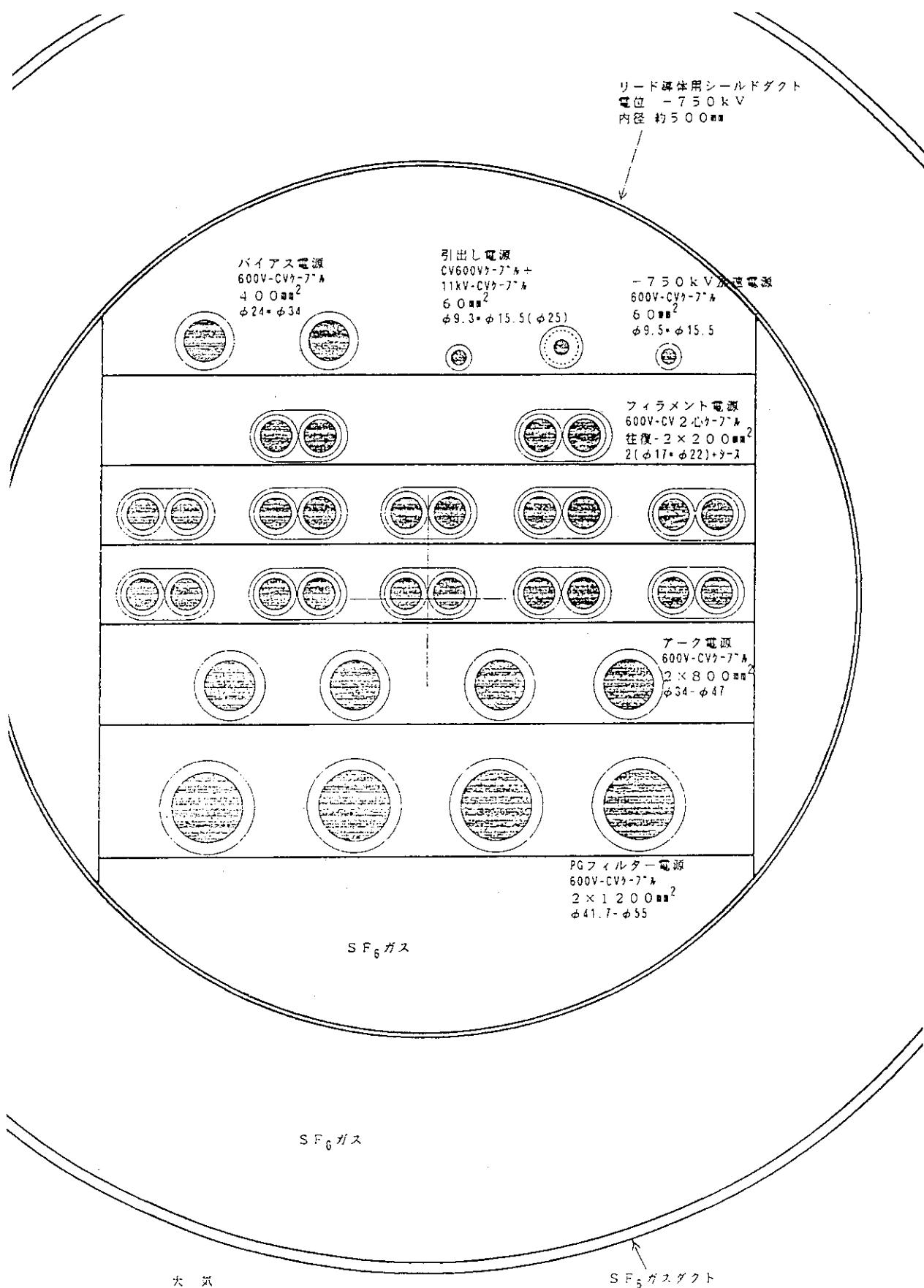


図 4.3.7 1 シールド部の電界

図 4.3.7.2 S F<sub>6</sub> ガスダクト内電源用リード導体の配置

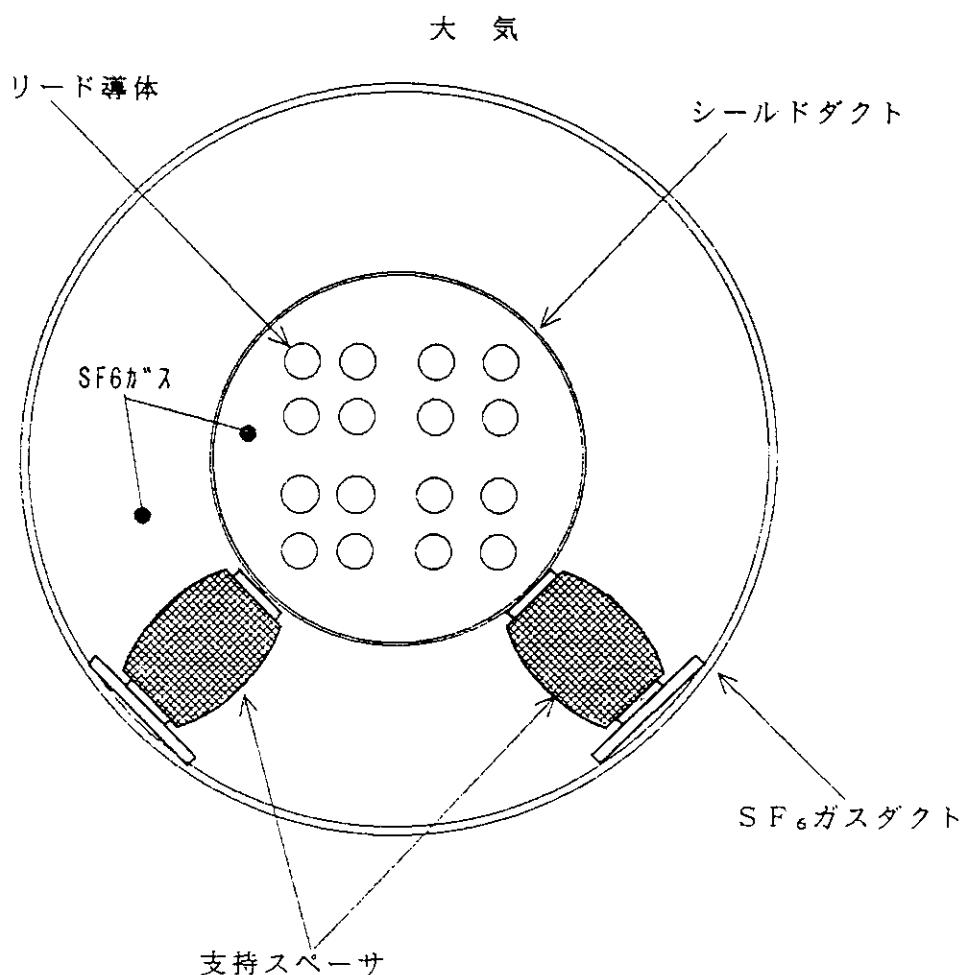


図4.3.7.3 シールドダクト取付概念図

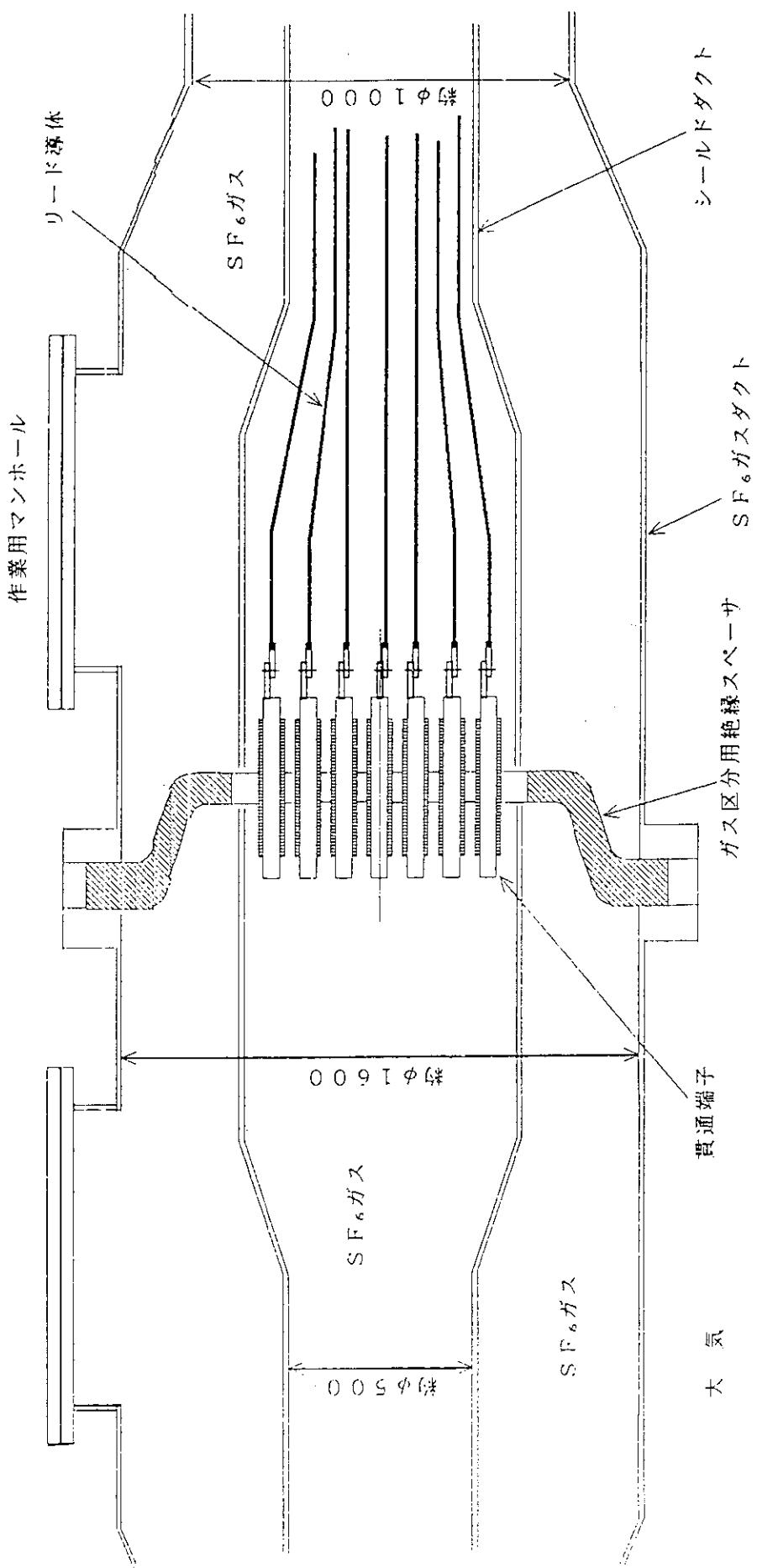


図4.3.7.4 ガス区分用絶縁スペーサーのリード導体接続構造概念図

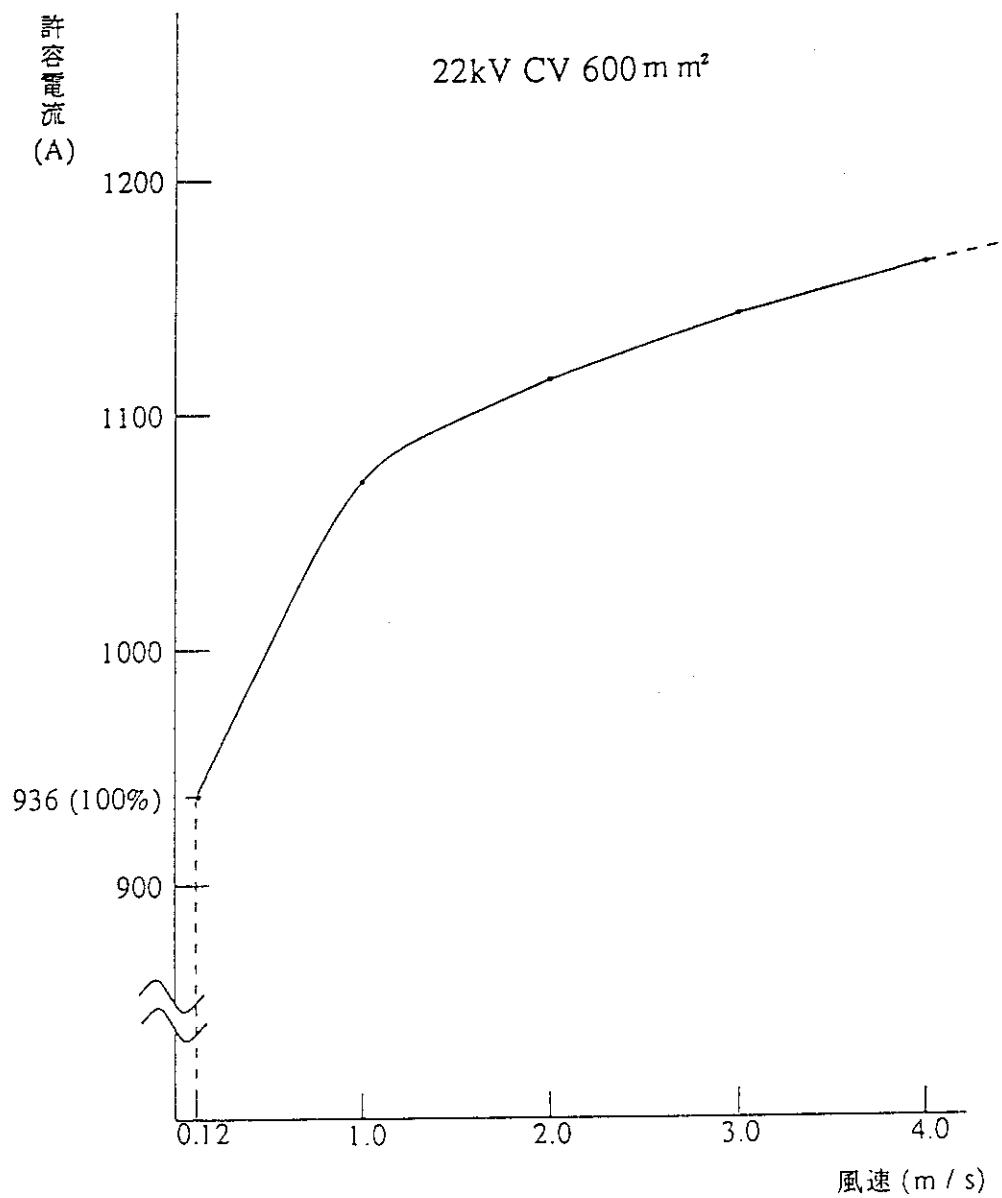


図 4.3.7.5 風冷による許容電流計算結果グラフ (22kV CV 600 mm<sup>2</sup>)

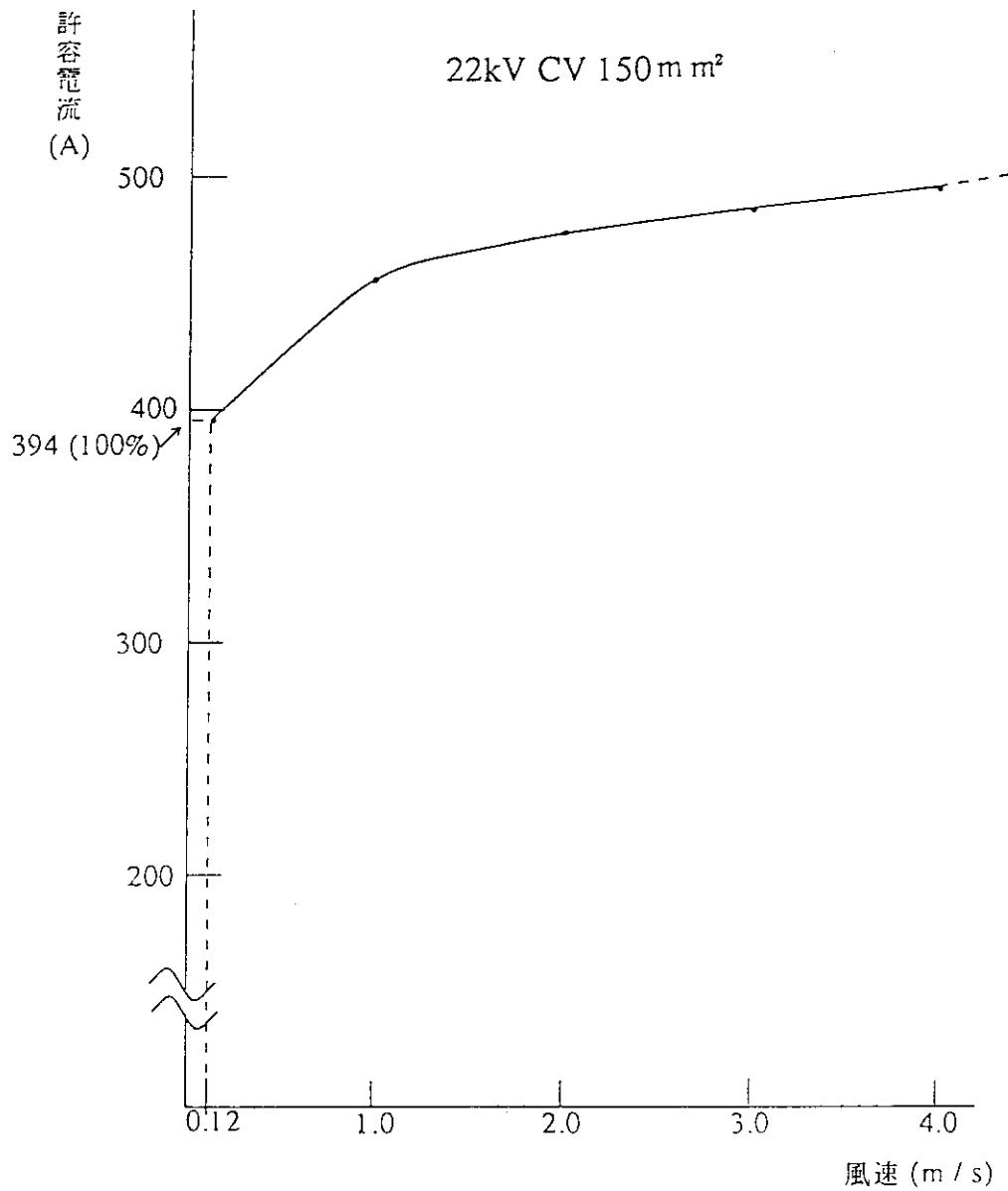


図 4.3.7.6 風冷による許容電流計算結果グラフ (22kV CV 150 mm<sup>2</sup>)

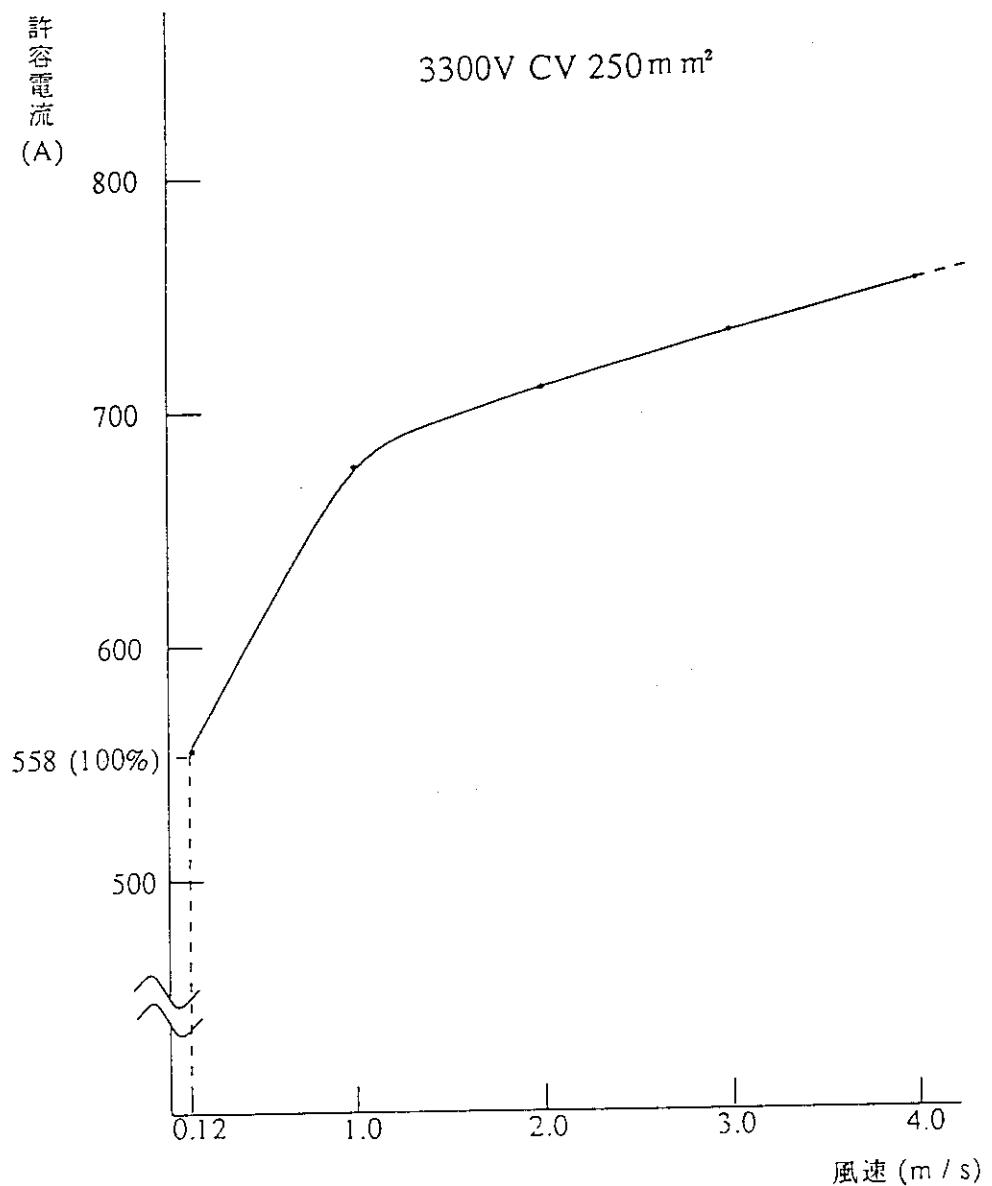


図4.3.7.7 風冷による許容電流計算結果グラフ (3300V CV 250 mm<sup>2</sup>)

#### 4.3.3.2.1.0 既設ケーブル風冷化の検討

既設ケーブルを風冷化することによって許容電流がどの程度向上するか検討を行った。

検討は、正イオンNBIの交流ケーブルを対象としたが、ケーブルの布設状態としては、風が直接ケーブルに当たるものとした。

検討条件を次頁以下に示す。検討結果を表4.3.1.2及び図4.3.7.5～図4.3.7.7に示す。結果から分かるように風冷による許容電流の増加は風速4.0 m/sにおいても高々20%程度であり、風冷設備増設に見合う効果は期待出来ないと考えられる。

#### 4.3.3.3 NBI共通設備

##### 4.3.3.3.1 1次冷却系

NBI一次冷却系は、ビームラインを冷却するためのビームライン循環系（イオン源、中性化セル、イオンダンプ（ビームダンプ）、カロリメータ、ビームリミタ等）と電源機器を冷却するためのRV循環系からなる。ビームライン循環系最大流量：3200 m<sup>3</sup>/h、RV循環系流量は900 m<sup>3</sup>/hである。

冷却系の故障は機器の重大損傷につながる恐れが大きいので冷却系統のインターロックには十分な注意が払われている。

##### 4.3.3.3.2 補助真空排気系

補助真空排気系は、クライオポンプの作動領域までNBIのタンク内を真空引きすること、クライオポンプ再生時の再生したガスを真空排気すること、及び短パルス運転時のイオン源導入ガスを排気することの3つの役割を担っており、ターボ分子ポンプ（TMP）、メカニカルブースタポンプ（MBP）により構成されている。この中でTMPは各ビームラインタンクに設置されており、TMP下流側のMBP及び粗引系統は、各NBI装置で共用するものである。

##### 4.3.3.3.3 冷媒循環系

冷媒循環系は、イオン源タンク、イオンダンプタンクに取付けられているクライオポンプに液体ヘリウム、液体窒素を供給するための設備である。液体ヘリウム及び液体窒素は、トランスマスファーラインを通して各NBIシステムのビームラインクライオポンプに供給される。本設備の液体ヘリウム冷凍能力は約3 kWである。

##### 4.3.3.3.4 制御系

制御系は、電源系、ビームライン等の制御、データ収集・処理を行うものである。NBI装置は超高電圧装置であると同時に放射線を発生するためにその制御は安全を第一義としている。

##### 4.3.3.3.5 安全確保のための設備

負イオンNBI装置を安全に運転かつ点検保守できるように、安全確保のための設備には十分な配慮が必要である。安全確保のための設備には、水素ガス検知器、高所作業のための安全設備、水分検知器、安全標識、点検通路、安全柵、接地装置、非常停止ボタン、X線モニタが含まれる。

## 5. ま　と　め

J T - 6 0 S Uでの使用が計画されているN B I 加熱設備についての設計検討を行い、以下のことを明確にした。

### 5.1 既設の100 k e V正イオン・接線N B I装置を計測用N B I装置として計画。

本N B I装置の設置空間について検討し、技術上の問題はないことが明らかになった。今後は、現在の10秒ビームパルスを200秒に伸ばす際の技術的な改造項目についての洗い出し及び改造内容の最適化、N B I以外の他設備機器との干渉問題、更に配管・配線ルート等についての検討を行う計画である。

### 5.2 既設の500 k e V負イオンN B I装置をJ T - 6 0 S U初期実験時に使用する計画。

本N B I装置について本体室内の配置等について検討し問題のないことを確認した。今後、200秒までのビームパルス幅拡大の技術的検討などについて検討を行う計画である。

### 5.3 750 k e V負イオンN B I装置

ビームライン2基で44MW（ガスセル使用時）、60MW（プラズマセル使用時）の入射パワーを持つN B Iシステムについて検討した。ビームラインでは、プラズマセル使用時の中性化効率の検討、マイスナー効果を利用した超伝導磁気シールドの検討、イオン源角度調整機構の構造検討などを実施し、技術的及び物理的问题点の摘出等を行った。750 k e V電源システムでは、高電圧伝送路、電源配置等について検討した。今後、これらの摘出した問題点についての解決策を明確にして本装置実現の基盤を確立する計画である。

### 5.4 N B I電源受電容量

N B I装置全体の必要受電容量についての評価を行い、約300MVAの受電容量が必要であることがわかった。本N B I装置の電源は、系統系電力から受電することが予定されているために受電容量をできるだけ小さくする必要があり、今後更に最適化して200MVA以下にする必要がある。また、イオン源ビーム加速立ち上げ時の負荷変動及びイオン源加速部での負荷短絡による負荷変動があつた時の系統系に及ぼす影響を少なくするためのエネルギーバッファ設備についても今後検討を行う計画である。

## 謝 辞

J T - 6 0 S U の設計研究を進めるに当たって、終始、有意義な議論、教示をいただきました炉心プラズマ研究部岸本部長、核融合装置試験部船橋部長始め、関連各室長、各室員に、また、核融合工学部N B I 加熱研究室室長始め、各室員に感謝致します。

また、以下の方々の設計協力のあったことを付記して、感謝の意を表します。

設計研究協力者：（株）東芝；三木信晴、川島秀一、石附勝基  
：（株）日立製作所；小野要一

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 日本原子力研究所核融合装置試験部N B I 装置試験室,核融合工学部N B I 加熱研究室 ; J T - 6 0 U 用負イオン N B I 装置の設計検討, JAERI-M94-072(1994)
- [ 2 ] Barnett,C.F., Ray,J.A., Ricci,E., Wilker,M.L., McDaniel,E.W., Thomas,E.W.: Atomic Data for Controlled Fusion Research,ORNL-5206(1977)
- [ 3 ] 熊谷寛夫, 富永五郎, 辻 泰, 堀越源一：“真空の物理と応用”, pp.378～379, (1970), 裳華房
- [ 4 ] Berkner,K.H., Phyle,R.V., Savas,S.E., Skalder,K.R.: Plasma neutralizers for H<sup>-</sup> or D<sup>-</sup>,Proceedings of the second International Symposium on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ion and Beams, BNL-51304, pp.291～297(1980)
- [ 5 ] Ivanov,A.A., Roslyakov,G.V.: Conversion of negative hydrogen ions into atoms in a hydrogen plasma target, Sov.Phys.Tech.Phys., 25(11), pp.1346～1347(1980)
- [ 6 ] Peart,B., Grey,R., Dolder,K.T.: Measurement of cross section for electron detachment from H<sup>-</sup>ions by proton impact,J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. Vol.9, ,No.17, 3047(1976)
- [ 7 ] Ito,R., Tabaka,T., Shirai,T., Panbuf,R.A.; Analytic Cross Section of H, H<sub>2</sub>, He and Li Atoms and Ions with Atoms and Molecules 3, JAERI-Data/Code,95-006(1995)
- [ 8 ] Okumura,Y., Horiike,H., Mizuhashi,K.: High magnetic field, large-volume magnetic multipole ion source producing hydrogen ion beams with high proton ratio, Rev. Sci. Instrum.,55(1), pp.1～7(1984)
- [ 9 ] 荒川義博,秋場真人,桜庭順二,松田慎三郎,田中茂: 中性粒子入射用イオン源のソースプラズマに関する理論的考察,JAERI-M8741, (1980)
- [ 1 0 ] Self,S.A.: Exact Solution of the Collisionless Plasma-Sheath Equation,Phys Fluids, 6(12), pp.1762～1768(1963)
- [ 1 1 ] 日本学術振興会第132委員会編：“電子イオンビームハンドブック(第2版)”, p.116, (1986), 日刊工業新聞社
- [ 1 2 ] 富永五郎他：“真空技術常用諸表”, p.255, (1965), 日刊工業新聞社

## 謝 辞

J T - 6 0 S U の設計研究を進めるに当たって、終始、有意義な議論、教示をいただきました炉心プラズマ研究部岸本部長、核融合装置試験部船橋部長始め、関連各室長、各室員に、また、核融合工学部 N B I 加熱研究室室長始め、各室員に感謝致します。

また、以下の方々の設計協力のあったことを付記して、感謝の意を表します。

設計研究協力者：（株）東芝；三木信晴、川島秀一、石附勝基  
：（株）日立製作所；小野要一

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 日本原子力研究所核融合装置試験部 N B I 装置試験室,核融合工学部 N B I 加熱研究室 ; J T - 6 0 U 用負イオン N B I 装置の設計検討, JAERI-M94-072(1994)
- [ 2 ] Barnett,C.F., Ray,J.A., Ricci,E., Wilker,M.L., McDaniel,E.W., Thomas,E.W.: Atomic Data for Controlled Fusion Research,ORNL-5206(1977)
- [ 3 ] 熊谷寛夫, 富永五郎, 辻 秦, 堀越源一："真空の物理と応用", pp.378~379, (1970), 裳華房
- [ 4 ] Berkner,K.H., Phyle,R.V., Savas,S.E., Skalder,K.R.: Plasma neutralizers for H<sup>-</sup> or D<sup>-</sup>,Proceedings of the second International Symposium on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ion and Beams, BNL-51304, pp.291~297(1980)
- [ 5 ] Ivanov,A.A., Roslyakov,G.V.: Conversion of negative hydrogen ions into atoms in a hydrogen plasma target, Sov.Phys.Tech.Phys., 25(11), pp.1346~1347(1980)
- [ 6 ] Peart,B., Grey,R., Dolder,K.T.: Measurement of cross section for electron detachment from H<sup>-</sup>ions by proton impact,J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. Vol.9, ,No.17, 3047(1976)
- [ 7 ] Ito,R., Tabaka,T., Shirai,T., Panbuf,R.A.; Analytic Cross Section of H, H<sub>2</sub>, He and Li Atoms and Ions with Atoms and Molecules 3, JAERI-Data/Code,95-006(1995)
- [ 8 ] Okumura,Y., Horiike,H., Mizuhashi,K.: High magnetic field, large-volume magnetic multipole ion source producing hydrogen ion beams with high proton ratio, Rev. Sci. Instrum.,55(1), pp.1~7(1984)
- [ 9 ] 荒川義博,秋場真人,桜庭順二,松田慎三郎,田中茂: 中性粒子入射用イオン源のソースプラズマに関する理論的考察,JAERI-M8741, (1980)
- [ 1 0 ] Self,S.A.: Exact Solution of the Collisionless Plasma-Sheath Equation,Phys Fluids, 6(12), pp.1762~1768(1963)
- [ 1 1 ] 日本学術振興会第132委員会編："電子イオンビームハンドブック(第2版)", p.116, (1986), 日刊工業新聞社
- [ 1 2 ] 富永五郎他："真空技術常用諸表", p.255, (1965), 日刊工業新聞社