



JP0150894

JAERI-Tech

2001-073



JT-60U用負イオンNBI装置の建設

2001年11月

河合 視己人・秋野 昇・海老沢 昇・本田 敦・伊藤 孝雄
梶澤 稔・栗山 正明・藻垣 和彦・大賀 徳道・大原 比呂志
奥村 義和・佐藤 藤男・薄井 勝富・山本 正弘・渡邊 和弘

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

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

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60U用負イオンNBI装置の建設

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

河合 視己人・秋野 昇・海老沢 昇・本田 敏・伊藤 孝雄⁺¹

桃澤 稔・栗山 正明・藻垣 和彦・大賀 徳道・大原 比呂志

奥村 義和⁺²・佐藤 藤男・薄井 勝富・山本 正弘・渡邊 和弘⁺³

(2001年10月1日受理)

JT-60U用負イオンNBI装置(N-NBI)は、世界初の負イオン源を用いた高エネルギー中性粒子入射加熱装置で、JT-60Uにおけるプラズマ中心部の高密度領域でのビーム電流駆動と加熱の実験を行うことを目的に、1996年3月に完成した。N-NBIは、イオン源2台、ビームライン1基、イオン源用電源、その他の設備から構成され、装置の建設終了後、イオン源や電源の調整試験や改良を行いながら初期プラズマ加熱実験を行った。1997年9月より本格的加熱実験を開始し、ビーム性能向上のための試験を行ないながら、現在までに最大400keV、5.8MWの重水素ビームのプラズマへの入射を達成した。現在もビームエネルギー、及び入射パワーの増大のために各種改良を加えながら入射実験を行っている。

Construction of Negative-ion Based NBI for JT-60U

Mikito KAWAI, Noboru AKINO, Noboru EBISAWA, Atsushi HONDA,
Takao ITO⁺¹, Minoru KAZAWA, Masaaki KURIYAMA, Kazuhiko MOGAKI,
Tokumichi OHGA, Hiroshi OOHARA, Yoshikazu OKUMURA⁺², Fujio SATO,
Katsutomi USUI, Masahiro YAMAMOTO and Kazuhiro WATANABE⁺³

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

(Received October 1, 2001)

The world's first negative-ion based neutral beam injector(N-NBI) system has been developed for studies of non-inductive current drive and plasma core heating with high energy neutral beam injection in higher density plasma. Construction of the N-NBI system for JT-60U was completed in March 1996. The system is composed of a beamline with two ion sources, a set of ion source power supplies, control system and auxiliary sub-system such as cooling water, refrigeration and vacuum system. In July 2001, deuterium neutral beam injection of 400keV and 5.8MW into JT-60U plasma was achieved. In order to increase both beam power and energy we have to go on more improvement of the N-NBI.

Keywords: Negative-ion Based NBI, JT-60U, Neutral Beam Injection, Ion Source, Beam-line

+1 Department of Administrative Services +2 Office of ITER Project Promotion

+3 Department of Fusion Engineering Research

目 次

1.はじめに	1
2.N-NBI 装置の概要	1
2.1 基本性能及び構成	1
2.2 パワーフロー	5
2.3 建設工程	5
3.各部構成の詳細	17
3.1 イオン源	17
3.1.1 全体仕様	17
3.1.2 負イオン生成部	18
3.1.3 引出部	18
3.1.4 加速部及び絶縁カラム	19
3.1.5 セシウム導入装置	20
3.2 ビームライン	26
3.2.1 共通仕様	26
3.2.2 イオン源タンク部	26
3.2.3 中性化セル部	28
3.2.4 イオンダンプタンク部	30
3.2.5 NBI ポート部	33
3.2.6 計測設備	34
3.3.電源	63
3.3.1 負イオン生成部電源	63
3.3.2 引出電源	65
3.3.3 加速電源	66
3.3.4 SF ₆ ガスダクト、高電位テーブル	67
3.3.5 サージ抑制機能	67
3.3.6 偏向コイル電源	68
3.3.7 受配電設備	69
3.4.補機設備	74
3.4.1 1次冷却系	74
3.4.2. 補助真空排気系	75
3.4.3 冷媒循環系	76
3.5 制御系	82
4.調整試験運転	93
4.1 初期試験運転結果	93
4.2 主なトラブルと対策	94
5.おわりに	98
参考文献	98

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of N-NBI System	1
2.1 Specification and Composition	1
2.2 Power Flow	5
2.3 Construction Schedule	5
3. Details of Composition	17
3.1 Ion Source	17
3.1.1 Common Specification	17
3.1.2 Plasma Generator	18
3.1.3 Extractor	18
3.1.4 Accelerator and Insulator	19
3.1.5 Cs-oven Controller	20
3.2 Beam-line Components	26
3.2.1 Common Specification	26
3.2.2 Vacuum Vessel for Source	26
3.2.3 Neutralizer	28
3.2.4 Vacuum Vessel for Ion-dump	30
3.2.5 Drift Tube	33
3.2.6 Diagnostics	34
3.3. Power Supply	63
3.3.1 Plasma Generation Power Supply	63
3.3.2 Extraction Power Supply	65
3.3.3 Acceleration Power Supply	66
3.3.4 SF₆ Gas-duct and High-voltage table	67
3.3.5 Countermeasures for Surge Voltage	67
3.3.6 Bending Coil Power Supply	68
3.3.7 Power Distribution System	69
3.4. Auxiliary Sub-system	74
3.4.1 Cooling Water System	74
3.4.2 Vacuum System	75
3.4.3 Refrigeration System	76
3.5 Control System	82
4. Initial Results of N-NBI Operation	93
4.1 Initial Results	93
4.2 Troubles and Countermeasures	94
5. Conclusion	98
References	98

1. はじめに

JT-60U 用負イオン NBI 装置（以下、N-NBI 装置という）は、JT-60U における高密度領域でのプラズマ中心部のビーム電流駆動と加熱の実験を行うことを目的としている¹⁾。この N-NBI は、イオン源 2 台を持つビームライン 1 基とイオン源用電源などから構成され、1996(平成 8)年 3 月に初めて JT-60U へ中性粒子ビームの入射に成功した後、イオン源や電源の特性試験や改良、調整を行いながら初期プラズマ加熱実験を実施した。1997(平成 9)年 9 月よりビーム出力向上のための改良試験を行いながら、本格的加熱実験を開始し、現在までに最大 400keV、5.8MW の重水素(D⁰)のビーム入射を達成したところである。また、入射パルス幅については、イオン源 1 台の運転ながら、最長 5.3 秒の入射を達成している。

N-NBI 装置の建設においては、その工程を 2 期に分けて、早期立ち上げの実現と信頼性の向上を図った。すなわち、先ず第 1 期分の建設により、イオン源及びイオン源用電源の調整試験を実施し、その結果を可能な限り第 2 期製作分のもう 1 台のイオン源及びイオン源用電源に反映させつつ、残りのビームライン等構成機器をすべて製作し、JT-60U へのビーム入射試験を実施した。

この N-NBI 装置について、1995(平成 7)年度から実施された、装置の建設及び初期調整試験結果を中心に報告する。

2. N-NBI 装置の概要

2. 1 基本性能及び構成

2. 1. 1 N-NBI 装置の基本性能

N-NBI 装置の最終目標とする基本性能は次のとおりである。

- ・ビームエネルギー : 最大 500keV
- ・入射パワー : 最大 10MW
- ・パルス幅 : 最大 10 秒
- ・繰返し率 : 1/60 以下
- ・ビーム種 : 重水素又は水素
- ・トーラスへのガス流入量 : 0.1Pa·m³/s 以下

N-NBI 装置のビームラインの座標軸及び名称の定義、JT-60U トーラス中心との関係を第 2. 1. 1-1 図に示す。

2. 1. 2 N-NBI 装置の基本構成

N-NBI 装置の基本構成は次のとおりである。これらの全体構成ブロック図を第 2. 1. 2-1 図に、また、実験棟本体室／組立室内の機器配置図を第 2. 1. 2-2 図に示す。

- ・イオン源 : 2台／ビームライン
- ・ビームライン : 1基 (JT-60U に対して、正方向接線入射)
- ・電源系 : 1式 (イオン源用電源(負イオン生成部、引出電源2式、加速電源1式)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、これらは既設の正イオン NBI と共に使用)
- ・制御系 : 1式

(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引出してビームとして加速するもので、セシウム添加型体積生成方式を採用した負イオン生成部、電子を分離して、負イオンのみを引出す引出部、引出部からの負イオンを最終エネルギーの 500keV まで加速する加速部、及びそれらを電気的に絶縁・支持する絶縁カラム等から成る。1 ビームラインに上下 2 台のイオン源（上側をイオン源 U、下側をイオン源 L と呼ぶ）が設置されている。

イオン源の目標とする性能は次のとおりである。

- ・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 : D⁻/H⁻
- ・ビームエネルギー : 500keV
- ・ビーム電流 : 重水素 22A
: 水素 22A
- ・パルス幅 : 10 秒
- ・ビーム発散角 : 5mrad 以下
- ・ビーム焦点距離 : 23.66m

負イオン生成部には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アークチャンバ壁との間でアーク放電が行なわれる。ソースプラズマ中では、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、引出される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クチャンバ間にバイアス電圧が印加される。

引出部はプラズマ電極、引出電極、それに電子抑制電極の 3 種の多孔型電極から成り、ソースプラズマ中に生成された負イオンを引出す。負イオンと同時に引出される電子は引出電極に埋込まれた永久磁石による横磁場を用いて偏向させ、引出電極に衝突させて熱的に処理する。負イオンは、この横磁場による影響を受けることなく 最大 10keV まで加速され加速部に入射される。

加速部では、引出部からの負イオンビームを 3 段加速により最大 500keV まで加速する。各段には最大 180kV の電圧が印加できる。各段の電界強度を制御することによって生ずるレンズ作用を最適化することによりビームは集束され、発散角 (1/e の半値幅) が 5mrad の集束性の良いビームを得ることを目標としている。

引出部と加速部が収納される絶縁カラムは、繊維強化プラスチック材料 (FRP) で製作されており、3 段で構成され、各段間の耐電圧は 200kVDC である。この各段間にはイオン源内部での

放電破壊発生時に、過渡的に耐電圧性能以上の電圧が印加されるおそれがある。この際、絶縁物表面で沿面放電を生じて表面が炭化し、その絶縁性能を著しく損なう可能性が高い。この沿面放電を防止するために、各段間には各イオン源毎に、約 180kV で放電する球ギャップを設置している。また、絶縁カラムは、負イオン生成部、引出部、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よう製作した。

イオン源各部は、高い熱負荷を受けるため、水冷構造となっている。イオン源電極の冷却水は、冷却水ヘッダから分岐され、電気絶縁配管によって各部へ供給される。負イオン生成部と引出部の各電源ケーブルは、イオン源近傍に設置されたイオン源保守ステージの端子台から、負イオン生成部と引出部のプラズマ電極と引出/電子抑制電極に接続される。加速部の各電源ケーブルはイオン源タンク上方の SF₆ ガスダクトの各段出力端子を起点とし、加速電源出力ケーブルは高電位ケーブル及びイオン源保守ステージを通って引出/電子抑制電極に接続され、第 1 加速、第 2 加速の各段出力ケーブルは限流抵抗を通ってイオン源各段に直接接続される。また、JT-60U からの漏洩磁場を遮蔽するために、負イオン生成部、引出部、加速部は単層の磁気シールドが設置されていた（しかし、内部の放電破壊を抑制する目的で、加速部、引出部の磁気シールドは 1999 年に撤去した）。

(2) ビームライン

ビームラインは、イオン源で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、中性化されなかつた残留イオンビームを熱化・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 ポート部から構成される。

イオン源タンクには、イオン源及び角度調整機構が取付けられ、タンク内部には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に大容量クライオポンプが設置される。また JT-60U からの漏洩磁場による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している。

中性化セルは長さ約 10m で、イオン源 U/L に対応して 2 系統設置され、その中間部には必要なガス線密度を得るためのガス導入孔が設置されている。セル内壁はビーム周辺部の一部発散成分による熱負荷を受けるため水冷されている。中性化セル全体は、イオン源タンクと同様に、二重磁気シールド構造である。

中性化セル出口では、中性ビームとその出力の約 20% に相当する残留負イオン(D⁻)ビーム、及び正イオン(D⁺)ビームがそれぞれ存在する。残留イオンビームは、JT-60U からの漏洩磁場によって、負イオンと正イオンはそれぞれ左右逆方向に曲げられ、左右両側に設置されたイオンダンプに衝突して熱化する。漏洩磁場は時間的に変化するため、これを補正する偏向コイルが設けられている。イオンダンプタンク内部には偏向コイル、イオンダンプの他、イオン源調整運転時の中性粒子ビームのターゲットであるカロリメータ、大容量クライオポンプ、仕切板、光プロファイ尔モニタ等が設置されている。

NBI ポート部は、JT-60U と NBI を真空的に切離すための圧空式ゲート弁(GV1)及び真空容器内の大気開放作業時の安全確保用の手動式ゲート弁(GV2)、電気絶縁のための絶縁リング、接続ベローズ、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内壁への直撃を防止するための保護板やビームリミタが設置される。

ビームライン全体構造を第2.1.2-3図に、ビームリミタ設置図を第2.1.2-4図に、それぞれ示す。ビームライン各部のビームパワー密度分布の計算予測図を第2.1.2-5図に示す。

(3) 電源系

電源系はイオン源用電源及び受配電設備から構成される。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、負イオンをソースプラズマから引出すと同時に電子を分離処理するための引出電源、負イオンを最大500keVまで加速するための加速電源、SF₆ガス絶縁のケーブルダクト、サージブロッカ、イオン源ガス導入系、それに偏向コイル電源等から構成される。

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る。フィラメント電源は合計48本のタンゲステンフィラメントを加熱し熱陰極とするためのものである。アーク電源は、フィラメントとアークチャンバとの間にアーク放電させるための電源である。バイアス電源は、プラズマ電極をアークチャンバに対して正の電位にバイアスし、負イオンと一緒に引出される電子の量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通電してフィルタ磁場を作るためのものである。

引出電源は、最大10keVまで負イオンを加速し、負イオンを引出す(同時に電子も引出す)ための電源である。適切な引出電圧を印加すること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できる。

高電位テーブルは、最高490kVまでの高電位に浮いた状態で使用する、負イオン生成部電源及び引出電源の各電源機器を収納するためのものである。

加速電源は、10keVで加速部へ入射された負イオンビームを最終的に500keV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、それぞれ最大で、-490kV、-360kV、-180kVの電位を供給するものである。加速電源はインバータによる交流側スイッチング方式を採用し、イオン源加速部での放電破壊時の遮断時間は200μs以下である。

イオン源の引出部及び加速部電極間においては、高い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、引出電源、負イオン生成部電源を収納している高電位テーブルからイオン源への給電ケーブル送出し部にサージブロッカが設けられている。

(4) 補機設備

a) 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、冷却水は既設の正イオンNBI装置の1次冷却系より供給される。

b) 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N-NBIの両タンク内の真空引き、クライオポンプ再生時の再生ガスの排気、及びイオン源短パルス運転時の作動ガス排気の、3種の役割を担う設備であり、イオン源タンク、イオンダンプタンクを真空排気する。粗引ポンプ系は正イオンNBI装置の補助真空排気系設備を共用する。

c) 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り、正イオン NBI 装置の冷媒循環系閉ループの中に組み込まれて、冷媒を供給する。

(5) 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。N-NBI 装置は超高電圧発生装置であると同時に放射線発生装置であるために、その制御は安全を第一とする一方で、実験装置するために、細かな運転制御ロジックや収集データ処理内容の改良等の改造が容易なように配慮されたハードウェア、ソフトウェアで構成されている。

2. 2 パワーフロー

N-NBI 装置の設計段階のパワーフロー図を第 2. 2 - 1 図に示す。負イオンビーム出力 500keV、44A、22MW に対し、加速電源出力は、490kV、47A、23MW、引出電源出力は 10kV、44.5A × 2 台、0.45MW × 2 が必要である。引出電流のイオン源 1 台あたりの内訳は負イオン電流が 29.5A、電子電流が 15A とした。負イオンのストリッピング損失を、引出部と加速部の合計で 25% と仮定すると、イオン源出力で 22A × 2、負イオンビームパワーで 22MW となる。中性化セル内で ~1.2MW (~5%) が失われ、中性化効率は 60% なので、中性化セル出口部での中性ビームパワーは ~12.4MW、残留する正負イオンビームパワーはそれぞれ 4.2MW の計 8.4MW である。NBI ポート内では、再電離損失の 3% と幾何学的損失 3.5% を合わせて 0.8MW の損失として、正味の入射パワーは 11.6MW であり、加速電源出力から見た入射効率は ~50% となる。*

2. 3 建設工程

N-NBI 装置建設の全体工程を第 2. 3 - 1 図に示す。図のように、N-NBI 装置の建設は、2 期に分けて実施した。第 1 期分で製作・据付を完了した設備／機器を使用してイオン源、電源単体及びイオン源と電源の組合せの各試験を実施した。引き続き、第 2 期分の機器の製作・据付及び試験を順次実施し、N-NBI 装置全体の試験、更に JT-60U へのビーム入射を実施した。第 1 期、第 2 期の内訳を第 2. 3 - 1 表に示す。

(1) 第 1 期分

負イオン源については、1993(平成 7)年 10 月から、イオン源テストスタンド (ITS-2M) で負イオン生成部の単体試験を行ない、次いで、1994(平成 6)年 10 月から、MeV 級試験装置で加速部も含めた負イオン源の高電圧試験を行った。第 1 期分の機器据付け完了後、イオン源用電源の単体試験を実施し、1995(平成 7)年 6 月から、両者の組合せ試験を開始した。この組合せ試験は、イオン源タンク内の短パルスビームターゲットを使用した 0.2 秒パルスのビームを加速しながらのイオン源と電源の調整試験を同年 10 月まで実施した。これらのイオン源と電源の単体試

* ただし、最近の試験において、イオン源加速部での損失が ~4.5% の設計に対し、~19% 程度、NBI ポート入口部の第 3 ビームリミタでの損失は無視可能と見積もっていたものが、6~7% 程度と設計値より大きなことがわかつてきたため、さらに改良を継続中である。

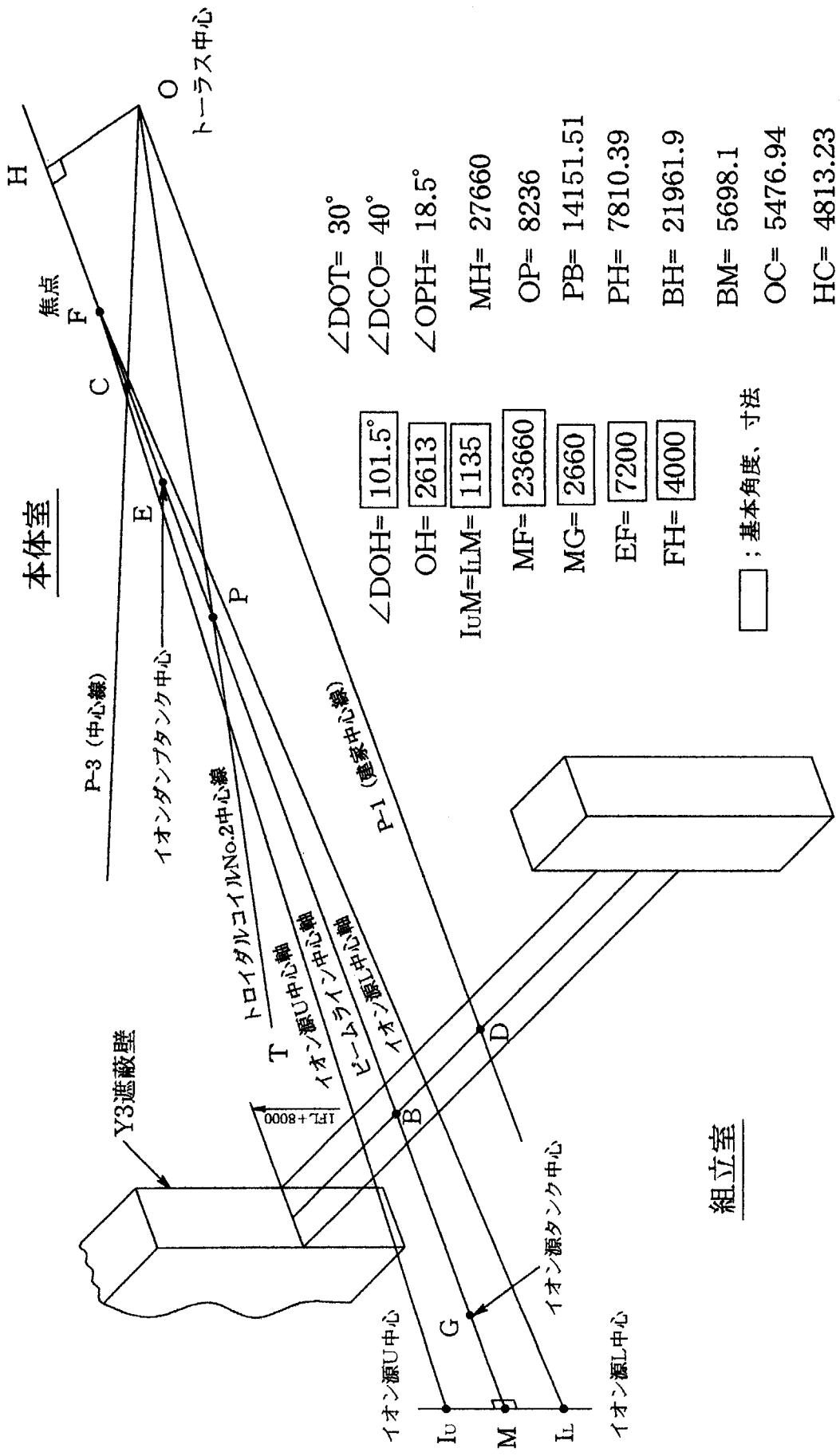
験及び組合せ試験の結果は、第 2 期で製作する分の電源及びイオン源に可能な限り反映させた。なお、短パルスビームターゲットは、第 1 期分調整試験の完了後に取外した。

(2) 第 2 期分

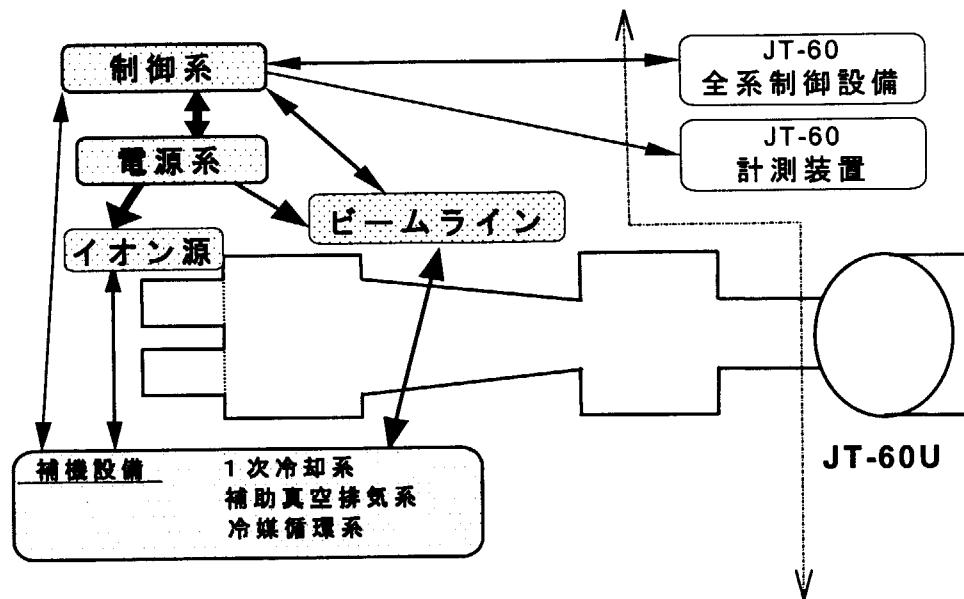
第 2 期で建設する設備、機器の据付は一部を 1994(平成 6)年 10 月から 12 月に実施し、残りを 1995(平成 7)年 11 月から開始して、1996(平成 8)年 2 月までに完了した。その後、直ちに、第 2 期分の単体試験、イオン源 2 台の組合せ試験、磁場試験、短パルスビーム入射を含めた JT-60U との組合せ試験を開始し、予定どおり同年 3 月に 180keV で 0.2MW 程度の中性ビームを JT-60U に入射することに成功した。同年 4 月から、イオン源のエージングやイオン源及び電源の改良を行って、同年 9 月にはエネルギー、350keV、パワー 2.5MW、の JT-60U への入射を達成した。

第2, 3, 1表 第1期、第2期建設項目内訳

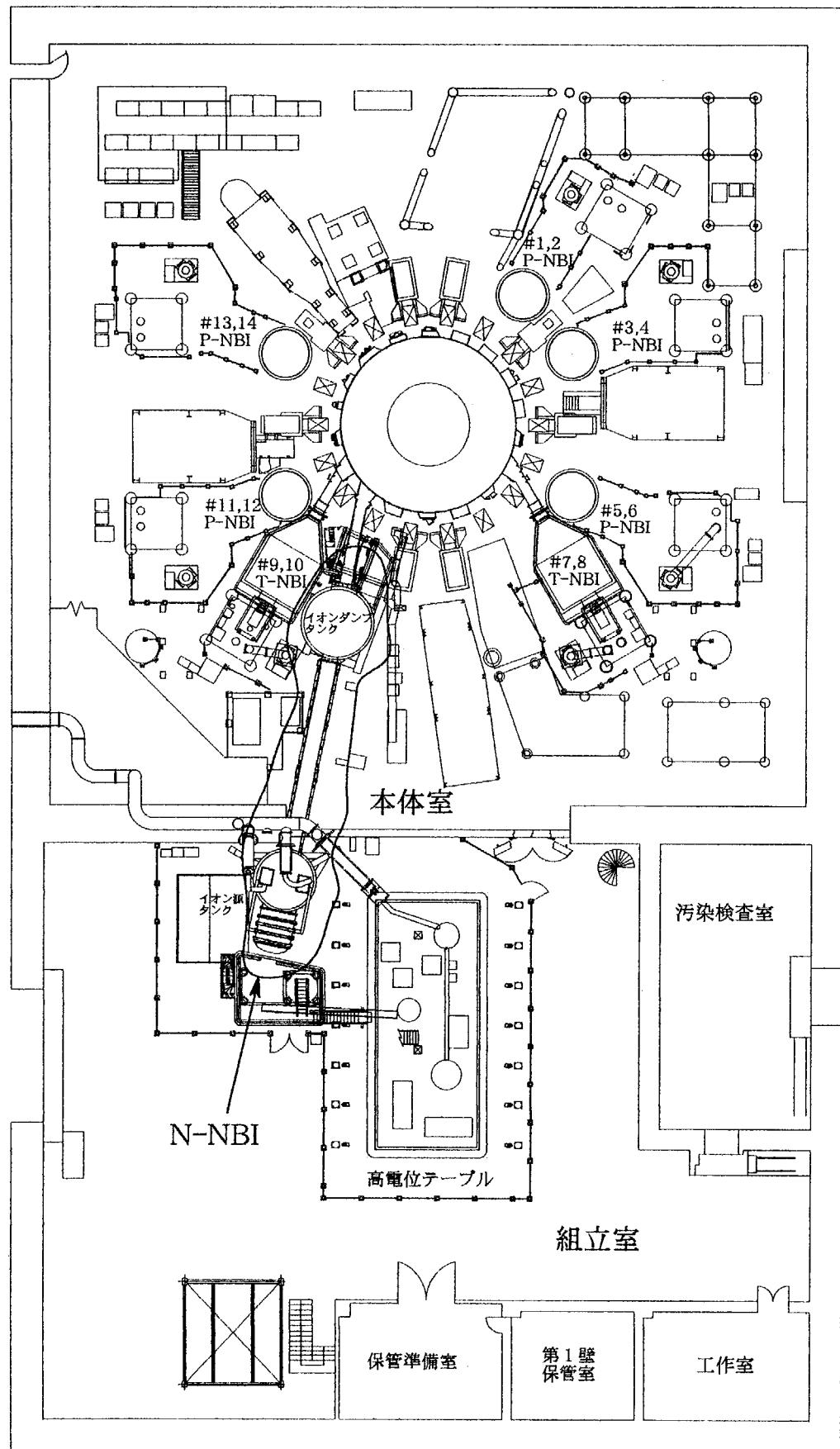
	第1期(～1995/3)建設分	第2期(～1996/3)建設分
イオン源	・イオン源1(L用)	・イオン源2(U用)
ビームライ ン	・イオン源タンク ・短パルスビームターゲット ・イオン源角度調整機構一式 ・計測設備のイオン源及びイオン源タ ンクに係わる部分	・ビームスクレイパ ・イオン源タンククライオポンプ ・中性化セル部一式 ・ビームラインガス導入系一式 ・イオンダンプタンク部一式 ・NBIポート部一式 ・計測設備の中性化セル及びイオンダ ンプタンクに係わる部分
電源	・負イオン生成部電源(イオン源L用) ・引出電源(イオン源L用) ・加速電源 ・SF ₆ ガスダクト ・高電位テーブル ・電源現場制御盤 ・イオン源ガス導入系一式 ・受配電設備	・負イオン生成部電源(イオン源U用) ・引出電源(イオン源U用) ・偏向コイル電源
1次冷却系	・イオン源L、イオン源タンク、加速 電源に係わる部分	・イオン源U、中性化セル部、イオン ダンプタンク部に係わる部分
補助真空 排気系	・イオン源タンクに係わる部分	・イオンダンプタンク部に係わる部分
冷媒循環系	—	・イオン源タンク、イオンダンプタン ククライオポンプに係わる一式
制御系	・イオン源Lの運転制御に係わる部分	・イオン源Lの運転制御に係わる部分 以外の全ての部分



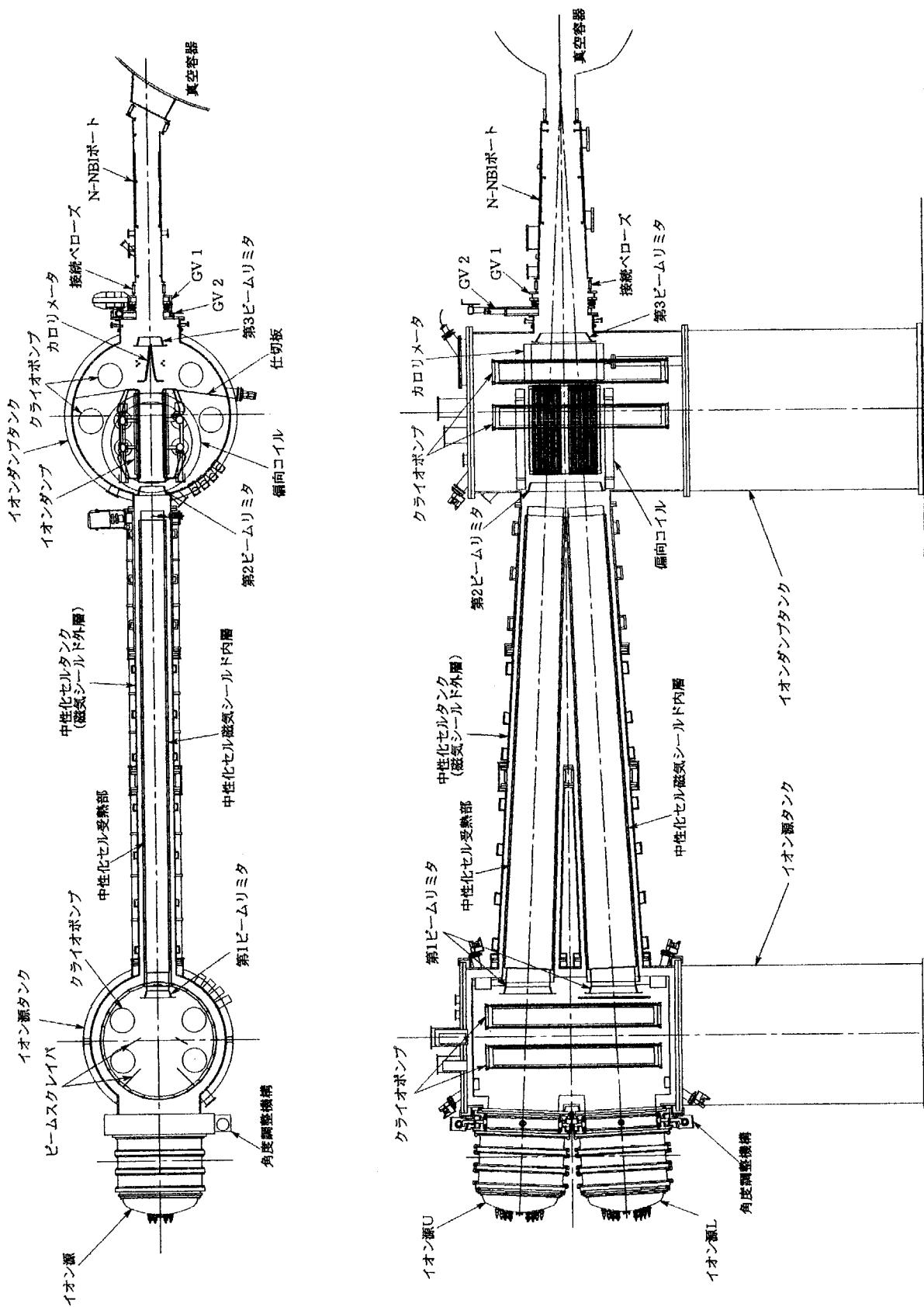
第2. 1-1 図 ビームラインの座標軸及び名称の定義



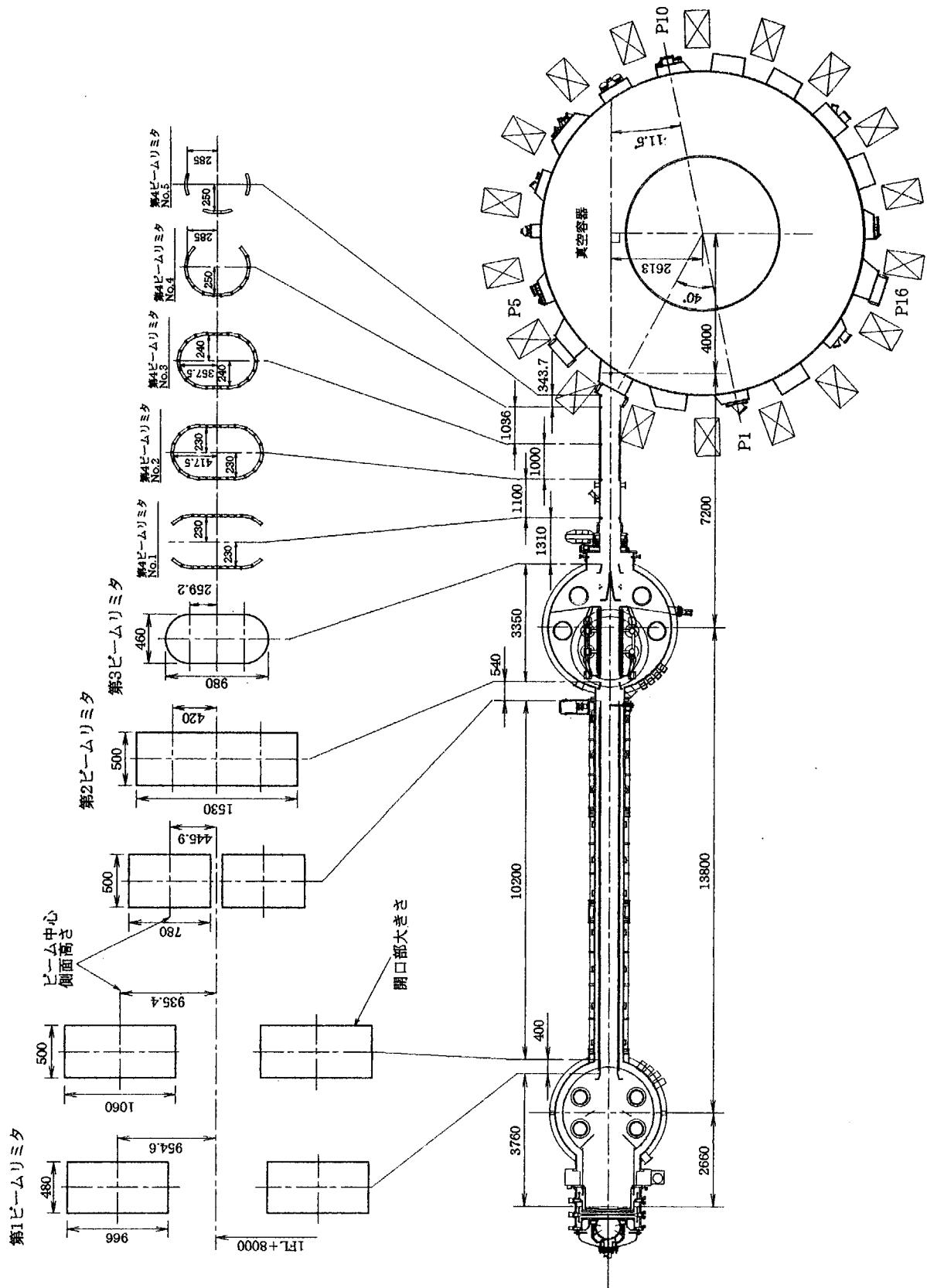
第 2. 1. 2-1 図 N-NBI 装置ブロック構成図

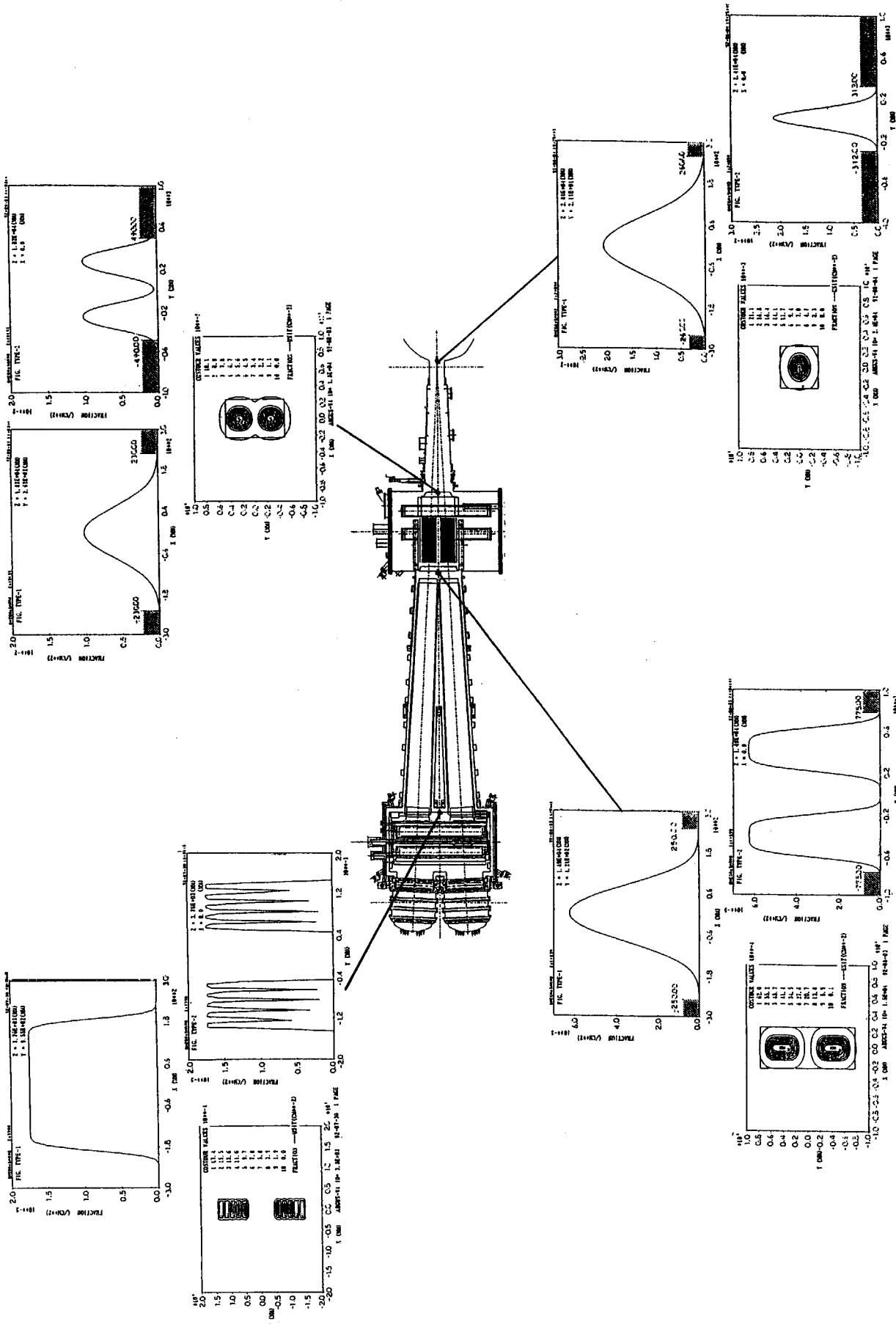


第2. 1. 2-2 図 本体室、組立室内配置図

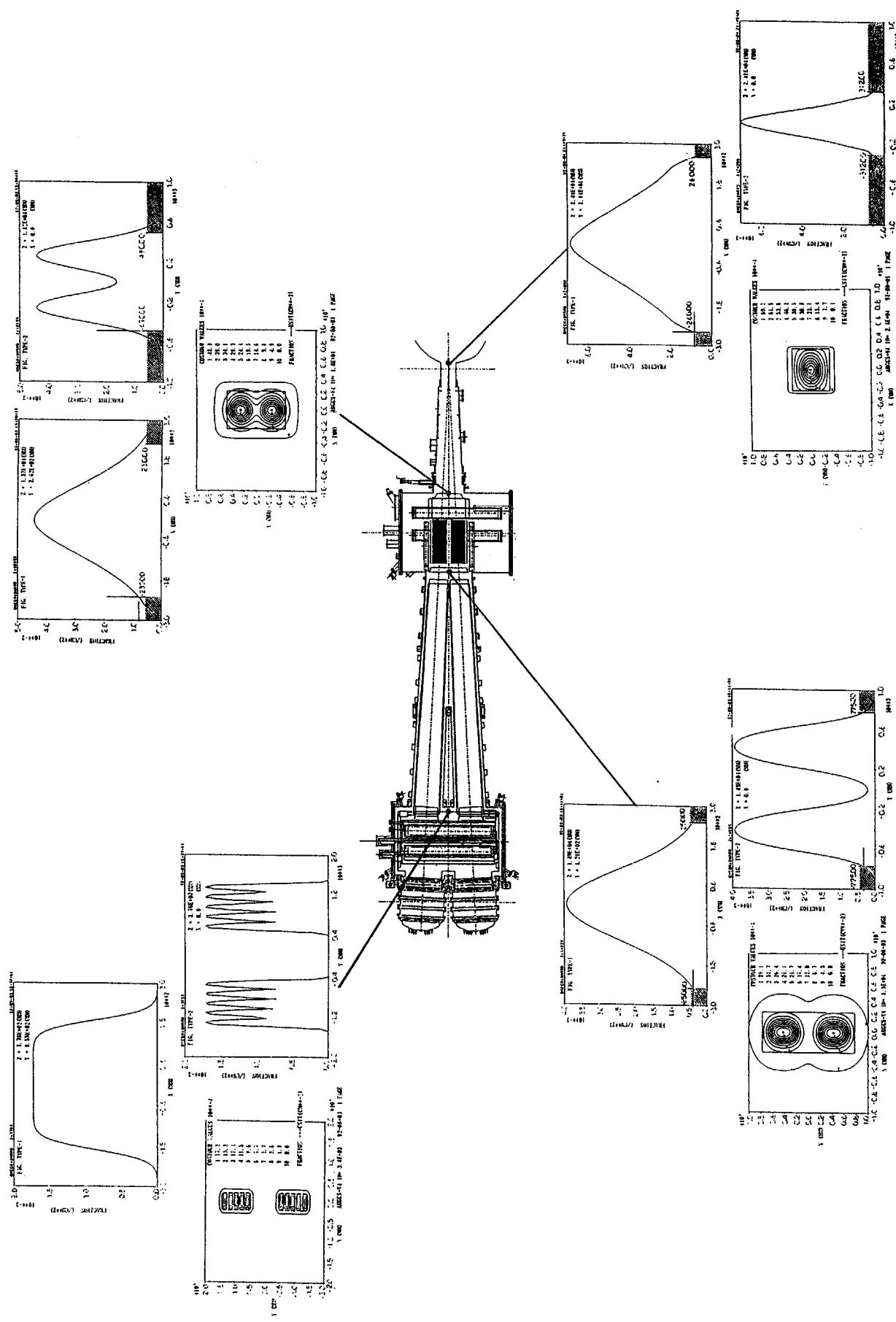


第2. 1. 2-3 図 ビームライン全体図

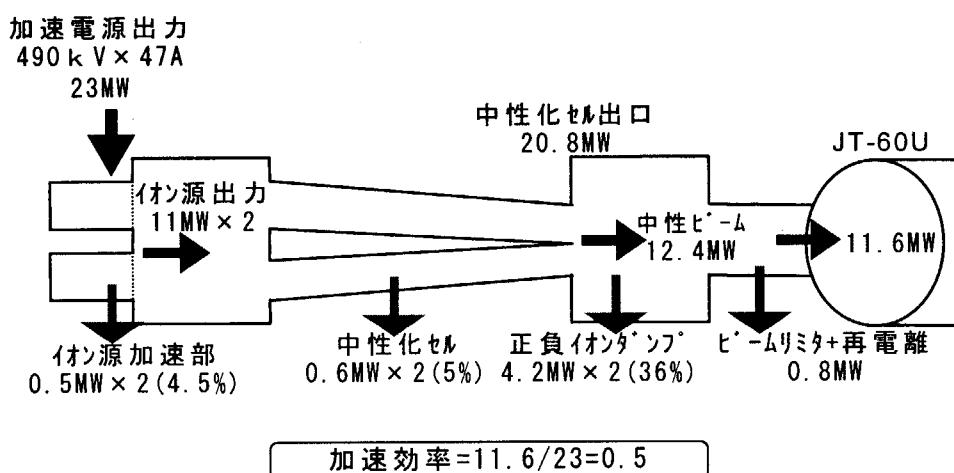




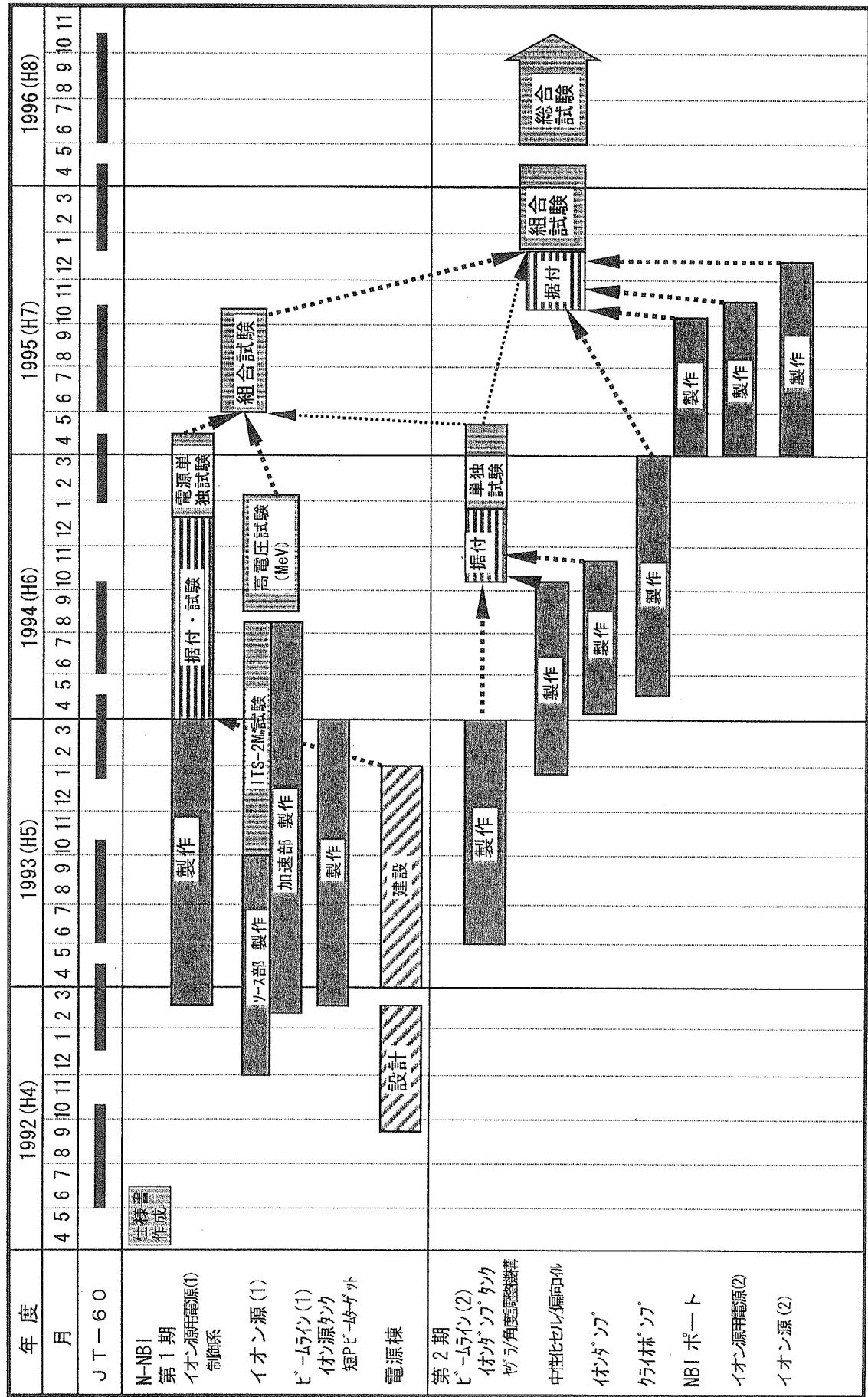
第2. 1. 2-5a 図 ビームライン上でビームパワーダensityその1 (5 mradの場合)



第2. 1. 2-5b 図 ビームライン上でビームパワー密度その2 (8 mradの場合)



第2. 2-1図 N-NBI パワーフロー図 (設計値)



第2. 3-1 図

3. 各部構成の詳細

3. 1 イオン源

イオン源は、イオン源1とイオン源2と呼ばれる、同一の構造を有する下側(L)用と上側(U)用の2台の負イオン源から構成される。各イオン源は、負イオンを生成する負イオン生成部、生成された負イオンを引出す引出部、最終エネルギーまで加速する加速部、それらを電気的に絶縁し、支持する絶縁カラムから構成される。イオン源の断面図を第3. 1-1、2図に示す。

3. 1. 1 全体仕様

(1) 真空

イオン源を組立てた後の、全体の許容真空リーク量は $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下とした。このために、負イオン生成部、引出部、それに加速部で使用する真空シールの必要な各部品について、一カ所あたりの許容真空リーク量は $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下とした。

(2) 製作精度

イオン源はビームラインに装着された状態において、各電極の引出孔の相対位置精度は 50 ミクロン以下となるように製作した。電極平面度は1セグメントあたり、0.2mm以下を目標とした。電極平行度は 1mrad 以下とした。

(3) 永久磁石

永久磁石は、すべてサマリウムコバルト(Sm-Co)で、寸法は、幅 9.4mm、厚み 22.4mm、長さ 25~50mm、エネルギー積 24MG エルステッド以上のものを使用した^{*1)}。

(4) 引出部及び加速部電極共通仕様

引出部及び加速部電極の主要パラメータを第3. 1. 1-1 表に示すとおりである。引出部及び加速部の計6種の各電極は、それぞれ5枚のセグメントにわけ、各セグメントを幾何学的に 26.3 mm 先の焦点に向け、傾けて設置している。

各電極間の標準的な間隔と調整可能幅は、電極多孔部において以下のとおりである。なお、括弧内の数値は、定格運転時における標準的な印加電圧の一例である。

・プラズマ電極－引出電極	6 mm	$\pm 100 \mu\text{m}$	(8 kV)
・引出電極－電子抑制電極	3 mm	$\pm 100 \mu\text{m}$	(同電位)
・電子抑制電極－第1 加速電極	75 mm	$\pm 2\text{mm}$	(163kV)
・第1 加速電極－第2 加速電極	65 mm	$\pm 2\text{mm}$	(163kV)
・第2 加速電極－接地電極	55 mm	$\pm 2\text{mm}$	(163kV)

*1) 後に、より磁力の強い Nd 磁石を使用したが、水素吸収による脆化で水素雰囲気中では使用できないことが判明した。

3. 1. 2 負イオン生成部

負イオン生成部の主要パラメータは第3. 1. 2-1表に示すとおりである。

(1) 機能

導入された重水素又は水素ガスにより、0.3Pa程度の圧力に維持されたアークチャンバ内で、陰極であるタンゲステンフィラメントと陽極であるチャンバ壁との間でアーク放電を行なうことにより、重水素又は水素のプラズマを生成する。生成されたプラズマはチャンバ壁に取付けられた永久磁石の作るラインカスプ磁場によって効果的に閉じ込められる。更に、プラズマ電極に電流を流して発生する横磁場(磁気フィルタ)によるタンデム方式によって、負イオンを生成する。また、プラズマ電極表面の仕事関数を低くして負イオンの表面生成過程を利用することによって、負イオン生成効率を高めるために、セシウム導入装置よりアークチャンバ内にセシウム蒸気が導入される。

(2) 構造

a) アークチャンバ

内径680mm ϕ 、内側の長さ1,220mmの半円筒型で、「カマボコ型」と呼ばれる。ラインカスプ磁場形成のために、幅14mm、厚さ30mmの永久磁石を多数用いている。この永久磁石の配置を第3. 1. 2-1図に示す。ラインカスプの1列毎に冷却チャンネルを設け水冷する。ラインカスプの間には96本の電流導入端子を設け、最大48本のタンゲステンフィラメントを装着する。アークチャンバの材質は無酸素銅で、磁石押えや支持柱、フランジなどはステンレス又はアルミニウム合金を使用している。

b) ガスの供給

ガス供給配管と18 ϕ ゲージポートの一方所で取合い、アークチャンバの長手方向5カ所に設けられたガス導入口に分岐している。

c) セシウムの供給

セシウム蒸気導入のために、セシウム導入装置の導入口を熱絶縁ポートの一方所で取合い、この導入口先端をアークチャンバの中央部に露出させている。セシウム導入装置は全体を300°Cまで加熱でき、オープン温度を遠隔制御することにより、セシウム蒸気の導入量を調整する。

3. 1. 3 引出部

(1) 機能

生成された負イオンを負イオン生成部から引出し、最大10keVまで加速して加速部へ入射するとともに、負イオンと同時に引出される電子を回収・処理する。

(2) 構造

円形の孔を有する3種の多孔型電極から構成され、負イオン生成部側からプラズマ電極(PLG)、引出電極(EXG)、電子抑制電極(ESG)と呼び、それぞれ5枚のセグメントから成る。プラズマ電極と引出電極の間に最大10kVの引出電圧を印加するとともに、引出電極と電子抑制電極の

間に電子抑制電圧（最大 8kV）が印加可能であるが、1996(平成 8)年 5 月より、永久磁石による電子抑制効果が十分なため同電位で使用している。プラズマ電極には、最大 10kA の電流を長軸方向に流し、アークチャンバ内に負イオン生成に必要な横磁場（フィルタ磁場）を発生する構造である。この磁場を PG フィルタ磁場と呼ぶ。

プラズマ電極の電極多孔部は、セシウム導入による負イオンの表面生成効率を高めるため、表面温度を 200°C 以上に加熱する。加熱は、フィラメント及びアーク放電からの輻射熱により行われる。プラズマ電極には表面の温度測定用として、5 枚の各セグメント端部に熱電対が取付けられている。

引出電極には、孔 1 列ごとに永久磁石が埋め込まれており、この磁場により負イオンと同時に引出される電子を偏向して加速部へ入射しないようにしている。また、この磁場による負イオンビームの偏向を補正するために、電子抑制電極の電極孔を他の電極の中心軸に対して、0.5mm ずつ変位させている。セグメントの長手方向の各列毎に永久磁石の極性を交互に入れ替えているため、この変位方向もセグメントの長手方向の各列毎に交互に逆にしている。

3. 1. 4 加速部及び絶縁カラム

3. 1. 4. 1 加速部

(1) 機能

引出部から入射された負イオンビームを加速して、最大エネルギー 500keV の集束性の良い負イオンビームを発生する。

(2) 構造

円形の孔を持つ 3 段の多孔型電極から構成される。負イオン生成部側から第 1 加速電極(A1G)、第 2 加速電極 (A2G)、接地電極 (GRG) と呼び、引出部から入射された負イオンビームを、3 段加速により最大 500keV まで加速する。各段には、最大 180kV の電圧が印加可能である。

3 段の電極の、それぞれ 5 枚のセグメントは、第 2. 1. 1-1 図の焦点 F に向けて 0.5 度刻みに傾けて設置して上下(チャンバ長手)方向のビーム集束を行っている。さらに、接地電極の電極孔を他の電極の中心軸に対し、上下左右両方向の合成で最大 4 mm までの範囲で変位させることにより、上下左右両方向のビームレットの集束を図っている*)。

3. 1. 4. 2 絶縁カラム

(1) 機能

負イオン生成部、引出部、加速部を支持するとともに、それらを最大 500kV の印加電圧に対して絶縁する。

(2) 構造

*) 現状の最大合成変位量は、イオン源 1 で 3.53mm、イオン源 2 はその半分の 1.76mm としている。なお、文献 1)では、チャンバ長手方向の 0.5 度刻みのセグメント傾き量に応じてこの変位量は異なる設計をしていたが、現状は 5 枚のセグメントとも同一の変位量である。

絶縁管と接続フランジ、電極支持枠から構成される。イオン源全体およびケーブル類の全荷重に耐える強度を持ち、かつ内部の真空圧に対しても十分な強度を持つ。電界の緩和のために、各段間にコロナシールドを設け、真空中側のコロナシールドに関しては、負イオンビームから絶縁管内壁が直視できない構造になっている(当初、各段のコロナシールドには 1cm 厚の μ メタルを張付け、JT-60U からの漏洩磁場に対して磁気シールドしていたが、イオン源内部の放電破壊抑制目的で 1999(平成 11)年に撤去した)。

- a) 絶縁管内径寸法 : 直径・ 1.8m
- b) 材質 : 絶縁管は FRP
- c) 絶縁耐圧 : 絶縁カラム全体の耐電圧は DC550kV、10 分間 (外側は大気で湿度 60%以下、内側は 1×10^{-2} Pa の真空を想定)
- 耐電圧試験は各段ごとに行い、外側は大気で湿度 60%以下、内側は SF₆ガス封入の状態で各段ごとの耐電圧は 200kV、10 分間で実施した。
- d) 真空リーク量 : 1×10^{-6} Pa・m³/s 以下
- e) 脱ガス量 : 真空引き 10 時間後の全脱ガス量は 1×10^{-3} Pa・m³/s 以下

3. 1. 5 セシウム導入装置

負イオンの生成効率を高めるためにアーキチャンバ内にセシウム蒸気を導入するためのもので、セシウムオーブン、手動弁、導入管により構成される。またこれら全体を最高 300°C にまで加熱するためのヒータ、保温材、熱電対などから構成される。なお、セシウムオーブンコントローラ現場盤は高電位テーブル内に設置されている。当初は、電磁弁や圧空弁などを使用していたが、温度の一様性に問題があったため、現在は、手動弁のみの構造とし、また、ヒータも当初シーズヒータであったが現在はマントルヒータを使用している。

セシウム導入装置の外形図を第 3. 1. 5-1 図に示す。

第3. 1. 1-1表 引出部及び加速部電極パラメータ

項目	設計時データ(JAERI-M94-072)	現状データ
電極の種類 引出部	プラズマ電極(PLG) 引出電極(EXG) 電子抑制電極(ESG) 第1 加速電極(A1G) 第2 加速電極(A2G)、 接地電極(GRG)	同左
加速部		
セグメント数	各 5	同左
電極孔総面積	1662cm ² (PLG)	1366cm ² ^{注1)}
電極透過度	41% (PLG)	— ^{注1)}
多孔部寸法	45cm × 110cm (45cm × 18cm / セグメント)	同左
電極孔の数	1080 個 (216 個 = 9 列 24 行 / セグメント)	888 個 ^{注1)}
電極孔の直径	PLG EXG ESG A1G A2G GRG	14mm ϕ 14mm ϕ 14mm ϕ 16mm ϕ 16mm ϕ 16mm ϕ
電極厚み	PLG EXG ESG A1G A2G GRG	6mm 11mm 3mm 20mm 20mm 20mm
電極間の距離	PLG-EXG EXG-ESG ESG-A1G A1G-A2G A2G-GRG	6mm 3mm 75mm 65mm 55mm
電極材質	プラズマ電極 : モリブデン その他 5 枚の各電極 : 無酸素銅	同左

注 1) アークチャンバ長手方向の上下両端にあたる、PLG 引出領域の一部をマスキングして

いるため、上 3 列、下 5 列の場合を示す。

2) 引出部電極は、上表に示す寸法の変更の他、ESG を EXG と一体化する改造を、1998 年 1 月に実施した。

3) 引出部では、EXG の永久磁石の磁場による負イオンビームの偏向の補正のために、ESG の電極孔を他の電極の中心軸に対して、0.5mm ずつ変位させている。

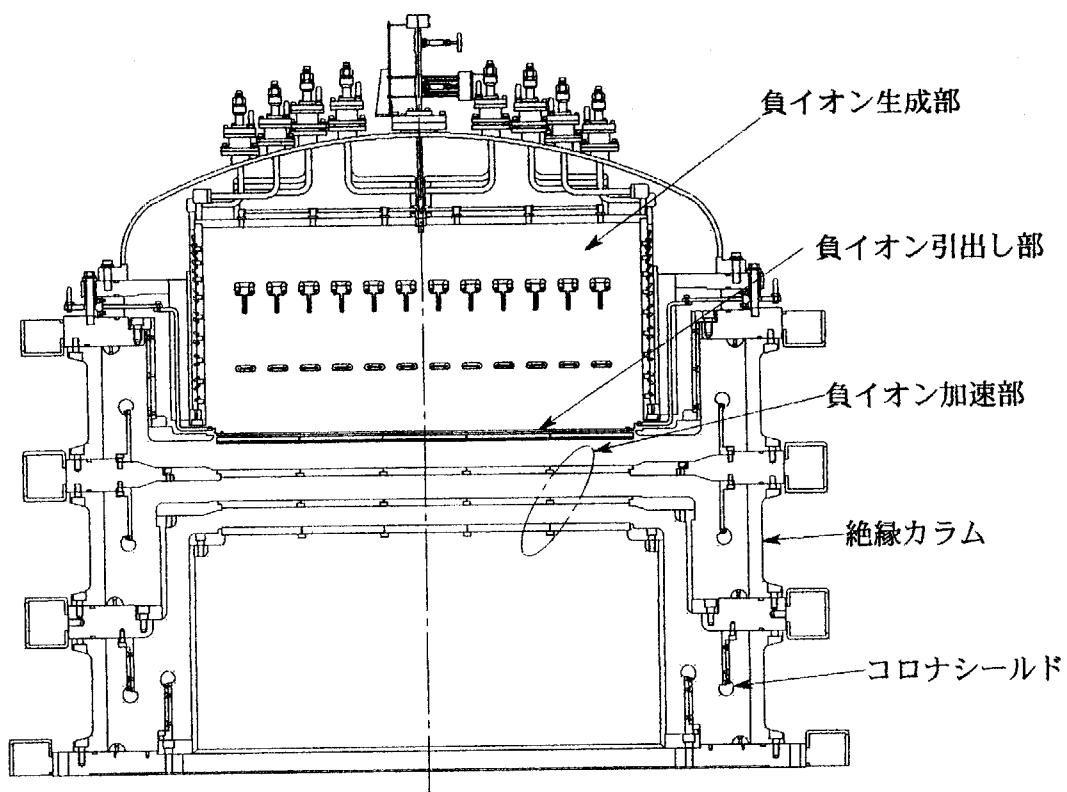
4) 加速部では、ビームレットの集束を図るために、GRG の電極孔を他の電極の中心軸に対し、両方向の最大合成量で、イオン源 1 は 3.53mm、イオン源 2 は 1.76mm、それぞれ変位させている。

第3. 1. 2-1表 負イオン生成部パラメータ

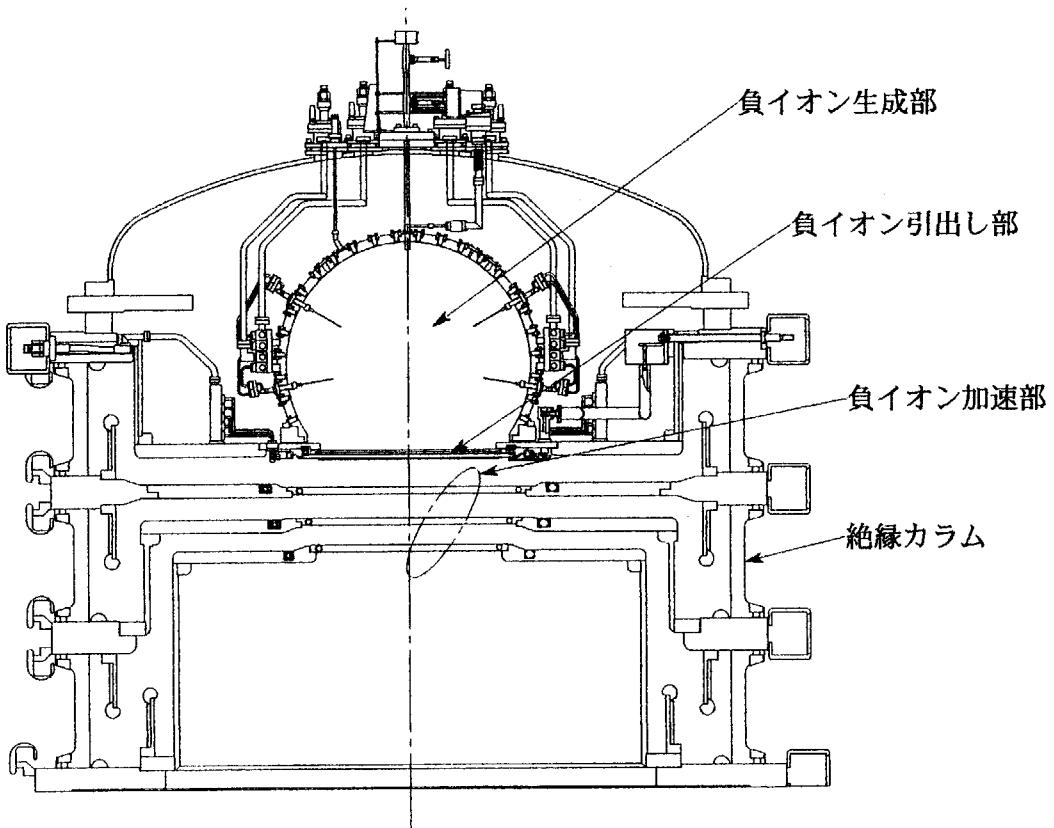
項目	設計時データ (JAERI-M94-072)	現状データ
アークチャンバ		
形状	半円筒形	同左
長さ	122cm	同左
直径	φ 64cm	φ 68cm ^{注1)}
奥行	深さ 44cm	深さ 55cm
体積	$287 \times 10^3 \text{ cm}^3$	$384 \times 10^3 \text{ cm}^3$
表面積	$20(22.5) \times 10^3 \text{ cm}^2$	$24 \times 10^3 \text{ cm}^2$
体積/表面積	14.4(12.7)	16.0
カスプ磁場	2.2kG	
磁石	14mm×33mm、18等配、7列	9.4mm×22.4mm、26等配、10列
カスプ長	2,952(2,824)cm	4,274cm
フィラメント	φ 1.5mm×24本	φ 1.5mm×48本
磁気フィルタ	PG フィルタ、1,000G·cm	同左
アークパワー	~70V、<5kA、<350kW	同左
電流密度	13mA/cm ²	同左、又はこれ以上 ^{注2)}
運転ガス圧	0.3Pa	同左

注 1) アークチャンバの大型化の改造は、1995年の第1期試験開始前に行つた。

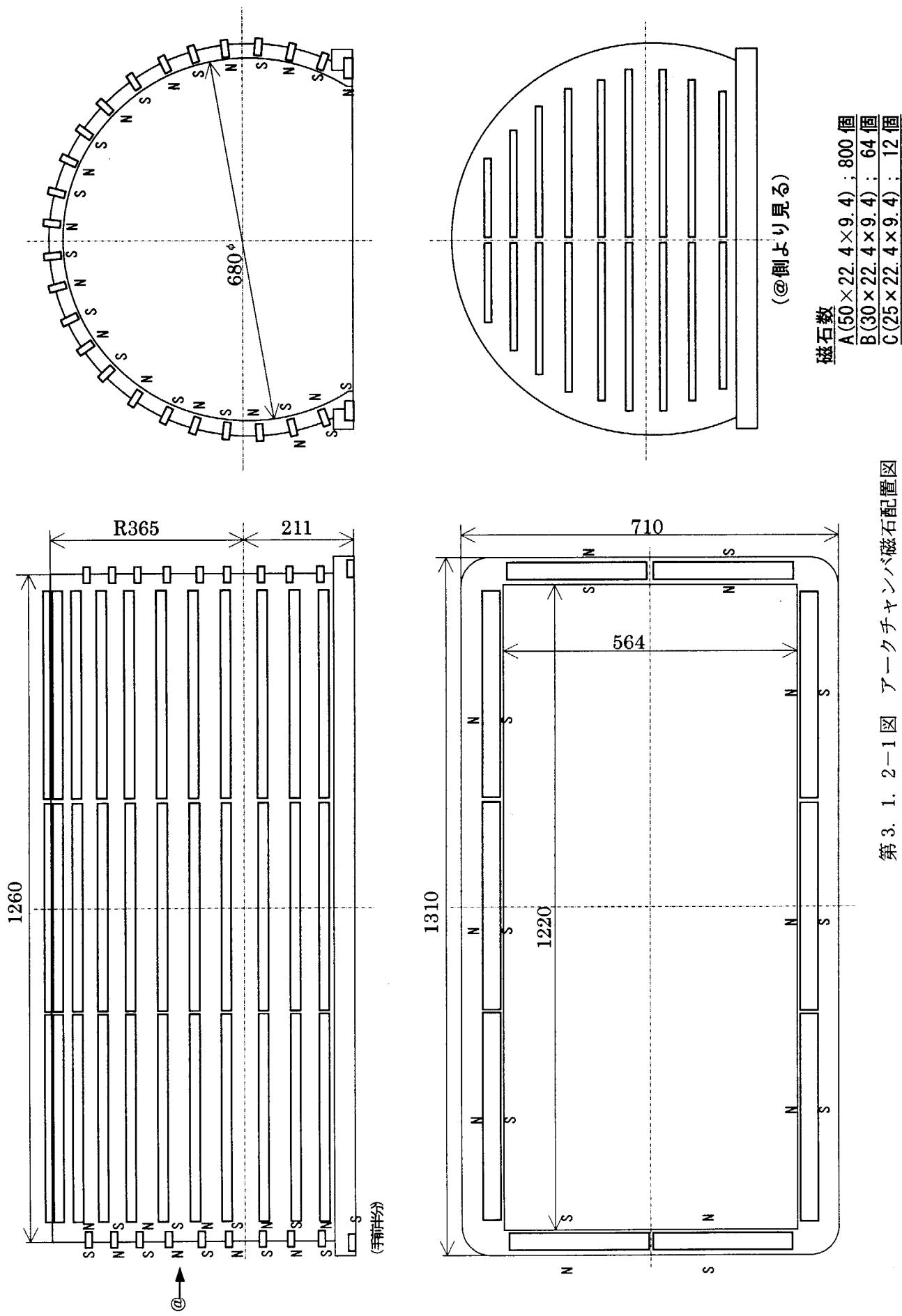
2) アークチャンバ長手方向の上下両端にあたる、PLG引出領域の一部をマスキングしているため。



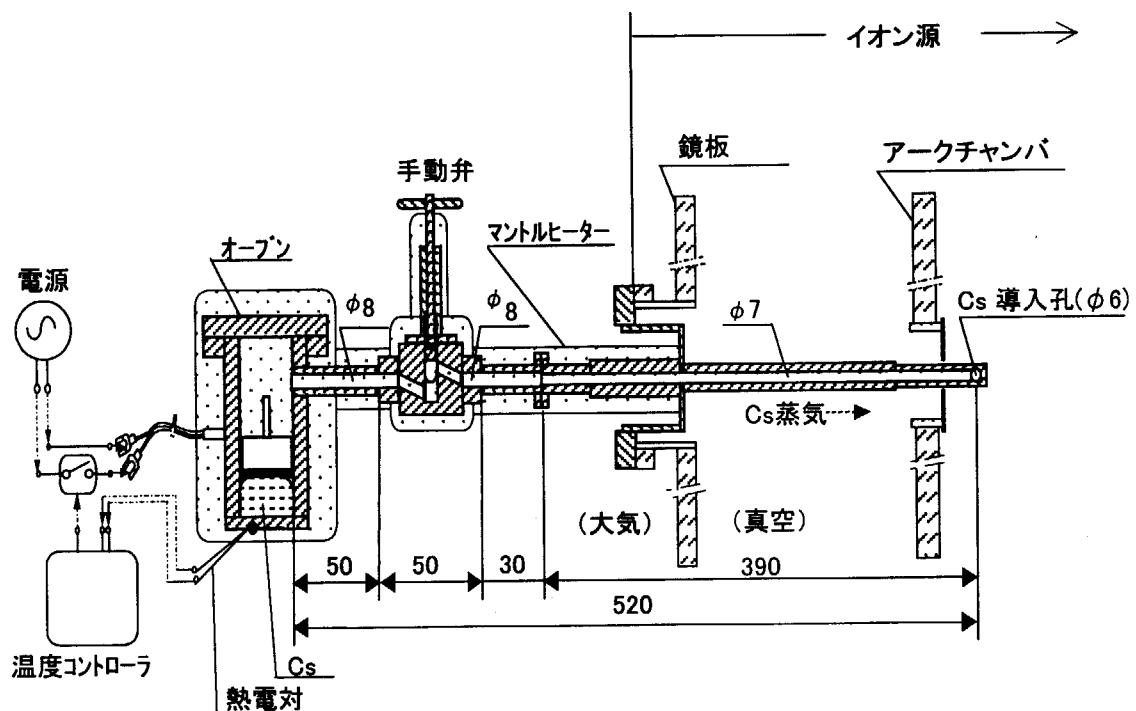
第3. 1-1図 JT-60U用負イオン源（横断面図）



第3. 1-2図 JT-60U用負イオン源（縦断面図）



第3. 1. 2-1図 アークチャンバ磁石配置図



第3. 1. 5-1 図 セシウム導入装置

3. 2 ビームライン

ビームラインは、イオン源からの負イオンビームを中性粒子ビームに変換して JT-60U に入射し、中性化されなかった残留イオンビームを処理するもので、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 ポート部から構成される。

3. 2. 1 共通仕様

(1) 真空部材質

イオン源タンク、中性化セルタンクの材質として、磁気シールドと真空境界壁の両方の機能を持たせるため、ステンレスクラッド鋼 1 種 (JIS G 3601) を使用した。母材は SS400 で、必要な磁気シールドファクターを確保できる厚みとし、真空側の合わせ材は SUS304 厚み 2 mm を使用した。イオンダンプタンクの材質は SUS304 である。

(2) 許容ヘリウムリーク量

真空部の許容ヘリウムリーク量は $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ とした。

(3) ビームラインガス導入系

ビームラインガス導入系は中性化セルガス導入系と光プロファイルモニタガス導入系から構成される。流量調整機構は第 3. 3. 1. 5 項のイオン源ガス導入系と同様である。最大流量はニードル弁の開度調整により、容易に変更可能である。イオン源ガス導入系も含めたガス導入系の系統図は第 3. 2. 6. 1 - 1 図のとおりである。中性化セルガス導入系は中性化セル U、L の各中央部に設置された導入孔から、光プロファイルモニタガス導入系は第 3. 2. 6. 4 項の光プロファイルモニタが設置されるイオンダンプタンクの NBI ポートフランジ部の導入孔から導入する。

3. 2. 2 イオン源タンク部

イオン源タンク部はイオン源タンク、ビーム軸合わせのためのイオン源角度調整機構、イオン源と中性化セルからのガスを排気するためのクライオポンプ、水平方向の発散の大きいビーム成分をカットするとともにクライオポンプへのビームの直撃を防ぐためのビームスクレイパ及び中性化セル入口部を発散性ビーム成分から保護するためのビームリミタなどから構成される。

3. 2. 2. 1 イオン源タンク

イオン源タンクは、真空部を形成する上板、胴部、下板及びそれを支持する下スカートから構成される。真空部にはイオン源及び角度調整機構が取り付けられ、ビームスクレイパ、ビームリミタ、及び大容量クライオポンプ等が設置される。また、JT-60U 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真空部は 2 重の磁気シールドで覆われている。

タンクの形状、寸法は内径 3,000mm ϕ × 内面高さ 4,800mm の円筒形で、第 3. 2. 2. 1 - 1 図のとおりである。真空部の材質はクラッド鋼、サポート部は SS400 である。

3. 2. 2. 2 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 JT-60U からの漏洩磁場をシールドしてイオン源タンク内への漏れ磁場を 0.05G 程度以下に抑えることにより、イオンビームが偏向されるのを防ぐためのものである。その構造を第 3. 2. 2. 2-1、2 図に示す。

- ・磁気シールド方式：二重
- ・外層 : SS400、厚さ 30mm (イオン源タンク壁材を兼ねた構造)
- ・内層 : μ メタル、厚さ 10mm

3. 2. 2. 3 イオン源角度調整機構

イオン源角度調整機構は、イオン源 U、L とイオン源タンクの間に各 1 台設置され、第 2. 1. 1-1 図のイオン源 U、L 各中心軸とビームラインの幾何学的中心を一致させるようにイオン源の角度を調整するものである。調整精度は $\pm 0.05\text{mrad}$ 以下、モーメントは $1,100\text{mm} \times 6.5$ トンである。構造、寸法を第 3. 2. 2. 3-1 図に示す。なお、自重は 1 台あたり 7.8ton である。

イオン源の角度調整は、ビームライン軸と直交する第 3. 2. 2. 3-1 図の X 方向、Y 方向について行う。調整幅は両方向ともビーム中心軸に対して $\pm 10\text{mrad}$ である。角度調整操作は中央制御室のパソコンより遠隔制御される。

3. 2. 2. 4 ビームスクレイパ

ビームスクレイパは、水平方向の発散性ビームからクライオポンプ、クライオポンプ配管及びイオン源タンク内スーパーインシュレーションの一部を保護するためのもので、水冷された二対の銅板スクレイパの他、冷却なしの SUS 製クライオ保護板、スーパーインシュレーション保護板より構成される。2 対のスクレイパの寸法は以下のとおりである。

- ・スクレイパー1 : 480mm 幅 \times 4,000mm 長 \times 2 枚
- ・スクレイパー2 : 270mm 幅 \times 4,000mm 長 \times 2 枚

ビームスクレイパの設置位置は第 3. 2. 2. 2-1 図中に示すとおりである。

3. 2. 2. 5 第1ビームリミタ (イオン源タンクビームリミタ)

第1ビームリミタは、イオン源タンク内の中性化セル入口直前部分において、イオンビーム周辺部の発散成分をカットし、この周辺の中性化セル入口構造物やイオン源タンク内壁を保護するためのものである。

本ビームリミタは、ビーム外周部をカットする受熱部とイオン源タンク内壁をビームから保護する SUS304 製の保護板より構成され、イオン源タンク内の中性化セル直前部の、ビームライン中心軸上の Z=3,760mm (後縁) 、ビームライン中心軸より上下に 954.6mm (中央) の位置に、イオン源 U、L に対応して合計 2 台が設置されている。

本ビームリミタの構造は第 3. 2. 2. 5-1 図のとおりであり、ビームライン軸を含む平面上の上下左右各 1 本ずつ、計 4 本の熱電対 ($\phi 1$ 非接地型 K) が銀ロード付けされている。

3. 2. 2. 6 イオン源タンククライオポンプ

本クライオポンプは加速途中の負イオンのストリッピング損失を抑制するためにイオン源タンクに設置され、イオン源及び中性化セルからイオン源タンクに流入する大量の重水素又は水素ガスを排気する、液体ヘリウム冷却によるクライオ凝縮型ポンプである。円筒形クライオポンプモジュール4本、ヘリウム及び窒素の気液分離器、ヘリウム及び窒素用配管によって構成され、排気速度は、モジュール1本あたり $300\text{m}^3/\text{s}$ (重水素値) であり、設置位置は第2. 1. 2-3図中に示すとおりである。

(1) クライオポンプモジュール

クライオポンプモジュールはガス粒子を吸着するために液体ヘリウム温度まで冷却されたクライオパネルと液体窒素温度まで冷却されたシェブロンバッフルから成る。本クライオポンプの外形を第3. 2. 2. 6-1図に示す。

a) クライオパネル*

SUS316L 製の二重管構造である。

- ・外管寸法 : $3,600\text{mm} \times 372\text{mm } \phi$ (外径)
- ・内管寸法 : $3,600\text{mm} \times 362\text{mm } \phi$ (外径)

b) シェブロンバッフル

垂直方向に対して 100 度傾いたアルミ製の円筒形のバッフル板を液体窒素で冷却されたパイプに 25mm 間隔で取付けた構造である。

- ・フィンの寸法 : $3,900\text{mm} \times 540\text{mm } \phi$ (外径)
412mm ϕ (内径)
- ・材質 : A 1100 (アルミ)

(2) 気液分離器

- a) ヘリウム気液分離器は、 $216\text{mm } \phi \times 600\text{mm}$ 、窒素気液分離器は $216\text{mm } \phi \times 530\text{mm}$ で、材質は SUS316L である。

(3) 内部配管

a) 液体ヘリウム配管

第3. 2. 2. 6-2図にヘリウムのフローシートを示す。予冷用及び定常用の 2 系統で構成される。配管材質は SUS316L とし、配管の全長にスーパインシュレーション(SI)を巻く。

b) 液体窒素配管

第3. 2. 2. 6-3図に窒素のフローシートを示す。

3. 2. 3 中性化セル部

中性化セル部はイオンビームを中性化するためのもので、中性化セルタンク、中性化セル、中性化セル受熱部、中性化セル磁気シールドから構成される。中性化セルの中央部には中性化セル

* 本クライオパネルは、薄板 2 重管構造のため、保守時等、タンク側が大気の状態でクライオポンプ内を真空引きすると座屈を起こす可能性があるため注意が必要である。

内のガス線密度を保つための中性化セルガス導入系のガス導入孔及び真空計測用ポートを設けている。中性化セル内壁の受熱部は発散性ビーム成分の照射に対して問題ないように水冷している。中性化セル部全体もイオン源タンクと同様、外層を真空容器壁と兼ねた二重磁気シールド構造としている。中性化セル部の構造を第3.2.3-1図に示す。材質は第3.2.1項のとおりである。

3.2.3.1 中性化セルタンク

中性化セルタンクは、イオン源タンクとイオンダンプタンクをつなぐ矩形断面形状のものである。中性化セル全体は、2重の磁気シールド構造とし、中性化セルタンク壁をステンレスクラッド鋼製として磁気シールドの外層部の役割を兼ねている。内壁には受熱板が取付けられ、水冷される。

- ・ 内面寸法、形状

イオン源側 : 1,260mm×800mm

イオンダンプ側 : 1,650mm×840mm

・全長 : 10m

3.2.3.2 中性化セル受熱部

中性化セル受熱部は、第3.2.3-1図のとおり、イオン源中心軸に沿って磁気シールド内外層と共にI、II、IIIの3区分から成る矩形状のダクトである。中性化セル受熱部の水平方向の総延長は10,200mmであり、その始点はイオン源タンク中心から水平に1,500mm離れた位置である。

・長さ : 10.2m

・入口口径 : 縦1,060mm×横500mm

・出口口径 : 縦780mm×横500mm

中性化セル受熱部の出口部には上下左右の4点に熱電対を設置している。設置位置は上下左右の面の各中央部で冷却チャンネル間の中央、中性化セル受熱部出口終端より1cm手前の位置である。

3.2.3.3 中性化セル磁気シールド

中性化セル磁気シールドはJT-60Uからの漏洩磁場をシールドして中性化セル内への漏れ磁場を0.05G程度以下に抑え、イオンビームが偏向されるのを防ぐためのものである。

・シールド方式 : 二重

・外層 : SS400、厚さ40mm/20mm（中性化セルタンク壁を兼ねる）

・内層 : μ メタル、厚さ10mm

内外層間隔は100mmとし、外層の厚みはイオンダンプタンク側3.2mが40mm、他は20mm厚である。

3. 2. 4 イオンダンプタンク部

イオンダンプタンク部は、第3. 2. 4-1図のとおりで、イオンダンプタンク、偏向コイル、イオンダンプ、カロリメータ、クライオポンプ、仕切り板及び2台のビームリミタから構成される。

偏向コイルは、JT-60Uからの漏洩磁場を補正してビームエネルギーに対応した一定の磁場を生成して、中性化されなかった残留イオンビームを偏向し、イオンダンプに導くものである。JT-60Uからの漏洩磁場がない場合には、単独の偏向磁場を生成する。イオンダンプは残留イオンビームを受け止め熱化させるもので、強制冷却を利用した水冷のパネルである。カロリメータは、イオン源のコンディショニング運転時等に中性粒子ビームのターゲットとして用いるもので、ビームパワー及び強度分布の測定も可能である。受熱部は慣性冷却により除熱している。クライオポンプは中性化セルから流れ込むガスや、イオンダンプ表面で発生するガス、及びJT-60U本体から流れ込むガスを排気するものである。仕切り板は、NBIポート部内の真空中度を良くし中性ビームの再電離を低減するために、イオンダンプタンクを2室に分け、差動排気するためのものである。

3. 2. 4. 1 イオンダンプタンク

イオンダンプタンクには、大容量クライオポンプと仕切り板、偏向コイル、イオンダンプ、カロリメータ、ビームリミタ等が設置されている。

タンクの形状、寸法は内径 $\phi 3,500\text{mm}$ × 内面高さ $4,800\text{mm}$ の円筒形である。真空中部の材質はSUS304である。

3. 2. 4. 2 偏向コイル

偏向コイルは、中性化セル通過後に残存する正負の高速イオンを磁気的に偏向してイオンダンプに導くために使用するもので、上下一対の空心コイルから成る。イオンダンプ表面の時間平均の最大熱流束を低減するために、偏向コイル電流は2Hz程度で振動可能である。

(1) 取付け位置

偏向コイルと偏向磁場測定用のホール素子の取付け位置を第3. 2. 4. 2-1図に示す。偏向コイルの中心はイオンダンプタンク中心より中性化セル側に 600mm 寄った位置である。2個のコイルの中心高さは、 $FL+8,000\text{mm} \pm 600\text{mm}$ の位置である。個々のコイルは半径 $1,000\text{mm}$ の円形コイルで、上下方向の磁場を発生する。

ホール素子の取付け位置は、 $FL+8,000\text{mm}$ において、偏向コイルの中心からイオン源から見て右側に 350mm ずらした位置で、極性は下向きの磁場を正としている。

(2) コイル

コイルは水冷するためにホロー導体とし、ターン数は各50である。

コイルの定格電流は $1,200 \pm 300\text{A}$ 、最長通電時間 13秒、デューティはビームパルス基準で $1/60$ とする。つまり、最短周期では 30秒毎に 3.5秒間通電する。 $\pm 300\text{A}$ は最大 $1,200\text{A}$ を中心として最大 $\pm 300\text{A}$ の範囲で電流を 2Hzで振動させることを意味する。一対のコイルは電気的に

直列に接続し、コイル極性は、上方より見て時計回りに電流が流れる方向を正と定義する。

3. 2. 4. 3 イオンダンプ

イオンダンプは、中性化セル内で中性化されなかった負イオンと中性粒子を経て生成された正イオンを偏向磁場により中性粒子ビームから分離して受け止め、熱化処理するものである。受熱面の受熱パワーは負イオン、正イオンそれぞれ $2.1\text{MW} \times 10\text{sec}$ 、最大熱流束は最高 1.5kW/cm^2 である。除熱はスワール管を用いた強制冷却方式により行っている。

イオンダンプの設置位置及び構造は第 3. 2. 4. 3-1 図のとおりである。

(1) 構造、寸法

イオンダンプは、支持架台、マニホールド、受熱面を構成する外部フィン付管の配列、背面に無酸素銅製水冷パイプを銀ロー付した銅板、温度監視用熱電対、及びスパッタシールドから成る。

a) 受熱面

イオンダンプの受熱面は縦 $1,600\text{mm}$ 、横 $1,980\text{mm}$ である。正／負残留イオン用受熱面各 1 枚がそれぞれビーム軸を含む鉛直面に対して対称に 500mm の間隔で設置されている。

受熱面は 0.2% 銀入り無酸素銅製のフィン付冷却管を並べて構成する。この熱負荷はイオンダンプ受熱面中での位置に依存するため、第 3. 2. 4. 3-2 図のように中央部にはフィン付管、周辺部は低熱部受熱板と呼ぶ銅板を設置している。フィン付冷却管の詳細は第 3. 2. 4. 3-3 図に示すとおりで、フィン幅 25mm と 26mm のものを交互に並べた計 28 本が 1 式で、計 4 式から成る。フィン付冷却管には、熱伝達促進を図るためにインコネル製のスワールテープがツイスト比 : 3 で挿入されている。冷却水は、全体流量で 4000l/min 、最大流速で 10m/s である。

b) 热電対

受熱面には、第 3. 2. 4. 3-2 図に示される計 22箇所に、熱電対を第 3. 2. 4. 3-3 図に示されるように埋込んで銀ロー付けしている。

c) スパッタシールド

イオンダンプの上下開口部には、銅製ブラインド構造のスパッタシールドを設置し、イオンダンプからのスパッタ粒子がクライオポンプへ到達しないようにしている。スパッタシールドは水冷構造である。

3. 2. 4. 4 カロリメータ

イオン源のコンディショニング運転時には差込位置に移動し、中性粒子ビームのビームターゲットとして使用するもので、ビームパワーの測定にも使用される。JT-60U へのビーム入射時には引抜位置へ移動し、ビームの軌道を開ける。カロリメータは、受熱部、駆動部等から構成され、イオンダンプの下流側に設置される。

最大熱流束は 2kW/cm^2 、受熱パワーは、 $10\text{MW} \times 0.5\text{sec}$ である。

(1) 受熱部構造、寸法

受熱部の構造、寸法は第 3. 2. 4. 4-1 図のとおりである。高パワーの中性粒子ビームを熱化処理するため、受熱部断面形状は第 3. 2. 4. 4-2 図に示すようなビーム軸に対し三段

階の角度をもったV字型形状である。受熱面は65本の水冷パイプを並べ、1本の水冷パイプに23個の受熱セグメント（モリブデンと0.2%銀入り無酸素銅母材の接合体）を串ざし状に銀ロー付けしたもので構成される。セグメントの形状、寸法は第3. 2. 4. 4-2図のとおりである。

受熱セグメントには、熱電対計21本を第3. 2. 4. 4-1図に示される位置に埋込み、銀ロー付けして、上下それぞれのイオン源中心軸に合わせて十文字状の位置の温度分布計測が可能である。

3. 2. 4. 5 イオンダンプタンククライオポンプ

本クライオポンプは、中性ビームの再電離による損失を抑制することを目的として、イオンダンプタンク内部に設置されている。差動排気により排気効率を上げるために、2本ずつのクライオポンプモジュールを仕切板により分けている。本クライオポンプの設置位置は第2. 1. 2-3図中に示すとおりである。

本クライオポンプの各機器仕様は、第3. 2. 2. 6項「イオン源タンククライオポンプ」と同一である。

3. 2. 4. 6 イオンダンプタンク仕切板

イオンダンプタンククライオポンプの排気効率を上げるため、タンク内の二室の間に仕切板を設置する。仕切板の設置位置は第3. 2. 4-1図中に示すとおりである。

3. 2. 4. 7 第2、第3ビームリミタ（イオンダンプタンクビームリミタ1、2）

イオンダンプタンク内の中性化セル側及びNBIポート側には、ビームの発散成分や不正に偏向されたビームをカットし、ビームライン・ポート部を保護するための2台の水冷式のビームリミタが設置されている。

(1) 設置位置

設置位置は第3. 2. 4-1図中に示すとおりである。

- ・第2ビームリミタ：ビームライン中心軸上Z=14.9mの位置
- ・第3ビームリミタ：ビームライン中心軸上Z=18.2mの位置

(2) 構造

各ビームリミタの詳細構造は、第2ビームリミタが第3. 2. 4. 7-1図に、第3ビームリミタが第3. 2. 4. 7-2a、b図^{*}にそれぞれ示されるとおりである。第3ビームリミタは、無酸素銅製の受熱部と、ビームリミタ周辺のイオンダンプタンク内壁をビームから保護するためのSUS304製の保護板より構成される。

各ビームリミタの受熱部は、厚さ10mmの銅板に外径10mm、肉厚1.5mm相当の銅製冷却管を銀ロー付けしている。また、第3ビームリミタについては、第3. 2. 4. 7-2図中に示すとおり、各イオン源中心軸上の左右二箇所及び上下一個所ずつ計6本の熱電対を銀ロー付けして

^{*} 第3ビームリミタの熱負荷が設計時よりも大のため、2001年3月より、改良型のものと交換を実施した。改良前が第3. 2. 4. 7-2a図、改良後が同b図である。

いる。

3. 2. 5 NBI ポート部

NBI ポート部は、N-NBI 装置と JT-60U とを電気的に絶縁するための絶縁リングを含む NBI 側接続ベローズ、真空的に切り離すためのゲート弁、N-NBI と JT-60U とをつなぐ NBI ポートから構成される。NBI ポートには各所にビームの発散成分から NBI ポート内壁やベローズ等を保護するためのビームリミタや保護板を設けている。NBI ポートは JT-60U に合わせてベーキングができるように外周にヒータと保温層を取付けている。

3. 2. 5. 1 NBI 側接続ベローズ

本接続ベローズは、後述の手動ゲート弁 GV2 と圧空ゲート弁 GV1 との間に設置され、GV1 及び JT-60U 本体真空容器の水平ポートボックスとの設置誤差、変位及び振動等を吸収するためのものである。イオンダンプタンクポートに GV2 を設け本接続ベローズを設置する。GV1 との間には絶縁リングによる電気的絶縁部及びスペーサを設ける。ベローズは溶接ベローズとし、概略寸法は、内径=1,100×600mm、フランジ面間距離 43.5mm である。

3. 2. 5. 2 ゲート弁

ゲート弁は GV1、GV2 の 2 台があり、これらの設置位置は第 2. 1. 2-3 図中に示すとおりである。GV1 は圧空式、バイトンシールで、N-NBI と JT-60U の真空絶縁のためのものである。当初、GV1だけが設置されていたが、1997(平成 9)年 2 月に手動式ゲート弁 GV2 の追加を行った。GV2 は、真空仕切弁を二重化することにより JT-60U 真空容器内と N-NBI タンク内のいずれか一方が大気、もう一方が真空の状態で大気側の真空容器内で作業を行う際の安全性を確保するためのものである。

3. 2. 5. 3 NBI ポート

NBI ポートは、中性粒子ビームを JT-60U プラズマへ入射するための接続管で、第 4 ビームリミタと台座保護板、再電離保護板、ポートボックス壁保護板、接続ベローズから構成される。NBI ポートはベーキングが行えるように、外側に電気ヒータ及び温度測定用熱電対が取付けられている。NBI ポートの寸法、形状、構造を第 3. 2. 5. 3-1 図に示す。NBI ポートの材質は SUS304 である。

(1) 第 4 ビームリミタと台座保護板

第 4 ビームリミタは NBI ポート内壁への熱負荷を軽減するために、ポートの入口部、中間部及び出口部に設置されるモリブデン製のもので計 5 箇所に設置されている。その取付位置及び形状は第 3. 2. 5. 3-1 図に示すとおりである。

(2) 再電離保護板

再電離保護板は、再電離したイオンビームが磁場によりトロイダルコイル外側近傍のポート内

壁に、直撃するのを防止するための純モリブデン製の保護板である^{a)}。取付け位置は第 3. 2. 5. 3-1 図の F 点より 3,000mm の位置から約 1,650mm 長さの全周である。

(3) ポートボックス保護板

ポートボックス保護板は、高熱負荷を受ける JT-60U 真空容器のポートボックス内面に設置される、等方性黒鉛製の保護板である。

(4) 熱電対

ビームリミタ、再電離保護板、ポートボックス保護板及び保温層に熱電対が以下のとおり、取り付けられている。

- ・ビームリミタ：計 19 点、第 3. 2. 5. 3-2 図。
- ・再電離保護板：計 4 点、第 3. 2. 5. 3-2 図。
- ・ポートボックス保護板：3 点、第 3. 2. 5. 3-3 図。
- ・保温層：計 3 点。ポート軸方向の両端近傍、中央。ポートベーキング用。

(5) 接続ベローズ

中間接続ベローズは、ゲート弁 GV1 と NBI ポート接続時の変位吸収及び、NBI ポートベーキングによる GV1 への熱伝導を防ぐために、GV1 と NBI ポートの間に設置されている。

本体側接続ベローズは、NBI ポートと JT-60U 真空容器水平ポートボックスとの接続部に用いられ、ポートの設置誤差吸収及び真空容器のベーキング（～300°C 最大）時^{b)}の変位とプラズマ放電時の電磁力による変位を吸収する。ベローズ内面にはベローズをビームから保護するための保護板を設けている。

3. 2. 6 計測設備

3. 2. 6. 1 真空計測設備

イオン源、イオン源タンク、中性化セル、イオンダンプタンク内の圧力を測定するため、第 3. 2. 6. 1-1 表に示す電離真空計、ペニング真空計、ピラニ真空計、圧力伝送器、バラトロン圧力測定器などの各種真空計が設置されている。これら真空計と残留ガス分析計の取付位置は第 3. 2. 6. 1-1 図に示すとおりである。電離真空計はフィラメントが 2 本付いた磁気シールド付きのヌードゲージを使用している。

3. 2. 6. 2 受熱部温度監視

ビームライン各機器の受熱部には温度監視用の熱電対が設置されている。温度監視項目一覧を第 3. 2. 6. 2-1 表に示す。熱電対全体配置及び熱電対番号を第 3. 2. 6. 2. -1 図に示す。

^{a)} 本保護板は JT-60 真空容器内に設置されていた Mo 板の再利用品である。

^{b)} 本体側接続ベローズの許容応力から NBI ポートをベーキングする場合の JT-60 真空容器のベーキング温度は最高 150°C に制限している。

3. 2. 6. 3 分光モニタ

分光モニタはドップラーシフトしたビーム光 (D_a) を分光することによって、負イオンビームのエネルギー成分や不純物量を測定するもので、ビーム光を集光するレンズ系、集光した光を伝送するための大口径光ファイバなどから構成される。集光のための覗き窓とレンズ系をイオン源タンク部、イオンダンプタンク部に設置している。集光した光は光ファイバにて一つの分光器に集め、光ファイバを切り替えて測定する。イオン源出口部用に1式、中性化セル出口部用に1式の、計2式である。設置位置は第3. 2. 6. 3-1図に示すとおりである。

3. 2. 6. 4 光プロファイルモニタ

光プロファイルモニタは、光学的に水平、垂直の二方向から見たビームの中心軸と発散角を測定する装置で、イオンダンプタンク出口部に設置される。ビーム観測窓付きフランジ、固体素子センサーカメラ、ビーム中心軸を与えるための軸中心光源（マーカーライト）から構成されている。

プロファイルモニタの取付け位置は第3. 2. 6. 3-1図中に、カメラ及びマーカーライトの取付けポートを第3. 2. 6. 4-1図に示す。CCDカメラ及びレンズは垂直用、水平用に各一式である。水平視野角58.7度、焦点距離4.5mm程度のレンズを使用している。

3. 2. 6. 5 赤外モニタ

赤外モニタは正負イオンダンプ、カロリメータ、対向面の温度分布を赤外線熱画像により計測、監視するシステムで、赤外線カメラ本体を含む制御部は正負イオンダンプ、カロリメータ用と対向面用の二式で構成する。設置位置は第3. 2. 6. 3-1図中のとおりである。

(1) 窓材は、直径100mm、厚さ10mmのサファイヤ单結晶を使用している。透過率は、1~4nmの赤外線に対して85%以上、5nmの赤外線に対して40%を有し、透過部分はφ65以上である。

(2) 赤外線レンズ系

a) イオンダンプ、カロリメータ用は視野中に正負イオンダンプとカロリメータの両方が入る設計であった。

b) 対向面用は測定位置より約20m離れたJT-60U真空容器内第1壁のN-NBI対向面の1m×1mの領域を観察できる。

c) 赤外モニタ制御部

視野中にある設定温度以上の部分が検出された場合にはアラーム信号を出力することが可能である。

3. 2. 6. 6 内部監視カメラ

本監視カメラはイオン源の接地電極監視用に一式、中性化セル入口監視用に一式及びイオンダンプタンク内カロリメータ部監視用に二式の計4式で構成され、カメラ、支持架台、ゲートバルブ、真空中照明器等から成る。

第3.2.6.1-1表 真空計測器一覧

番号	種類	測定範囲 (Pa)	取付け位置	計器No.
1	電離真空計	$1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0$	イオン源接続フランジU	IG1
2	"	"	" L	IG2
3	"	"	イオン源タング(中性化セル入口部)	IG3
4	"	"	中性化セルU	IG4
5	"	"	中性化セルL	IG5
6	"	$1.0 \times 10^{-6} \sim 3.1 \times 10^{-1}$	中性化セル出口	IG6
7	"	"	イオンダンプタンク P ₁ 室	IG7
8	"	"	イオンダンプタンク P ₂ 室	IG8
9	"	"	ドリフト部	IG9
10	"	"	N B I ポート	IG10
11	ペニング真空計	$1.3 \times 10^{-3} \sim 1.3$	イオン源タンク上部	Peg1
12	"	"	中性化セルU	Peg2
13	"	"	イオンダンプタンク P ₂ 室	Peg3
14	ピラニ真空計	$4 \times 10^{-1} \sim 2.7 \times 10^3$	イオン源タンク上部	Pig1
15	"	"	中性化セルU	Pig2
16	"	"	ドリフト部	Pig3
17	圧力伝送器	0 ~ 100kPa	イオン源タンク上部	CCMT
18	ピラニ真空計	$4 \times 10^{-1} \sim 3.0 \times 10^3$	イオン源 U アークチャンバ	PAU
19	"	"	イオン源 L "	PAL
20				

注)各取り付け位置は第3.2.6.1-1図のとおり。

第3.2.6.2-1表 受熱部温度監視項目一覧

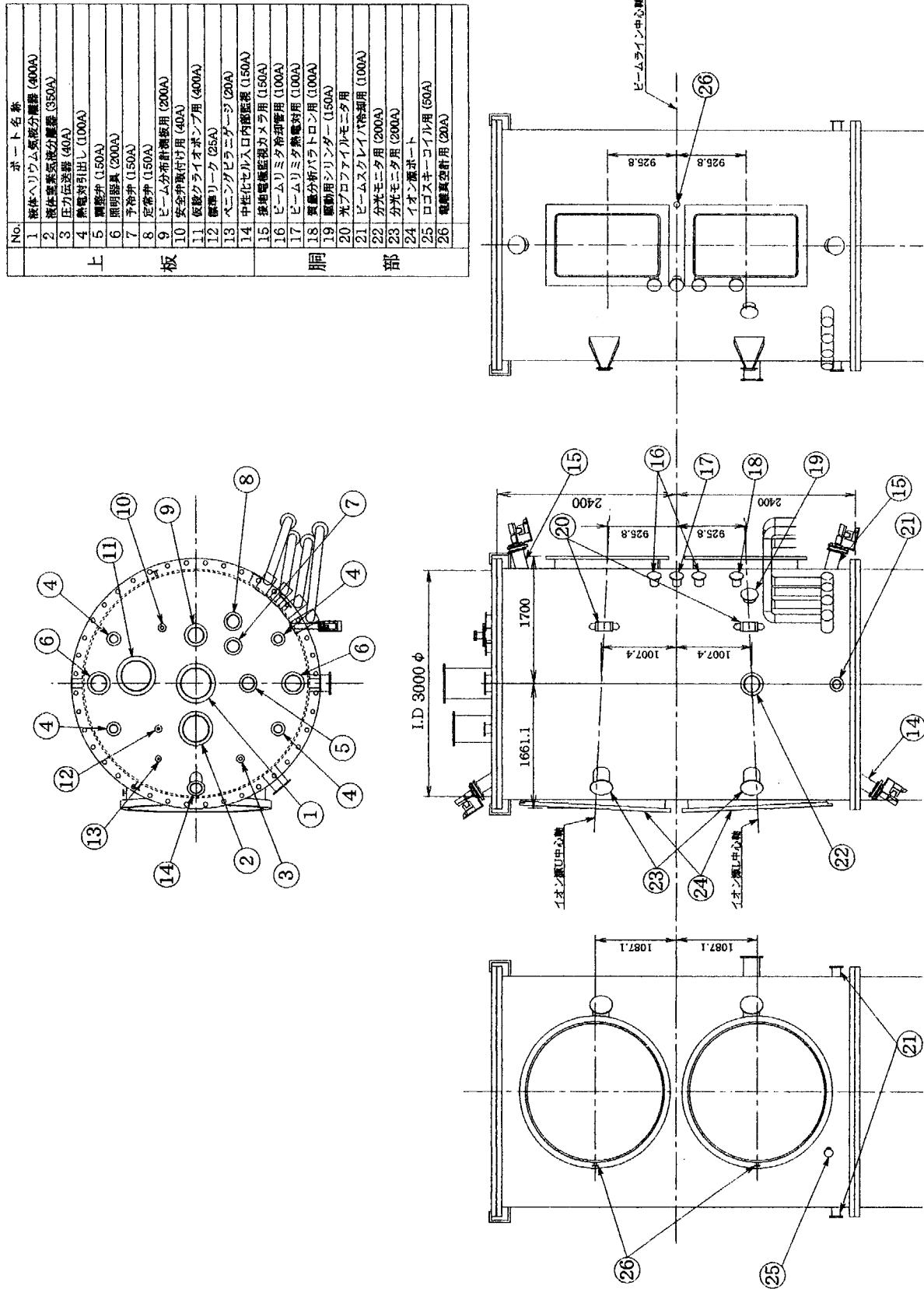
番号	名 称 (略称)	点数	測定範囲 (°C)	警報器／設定温度	予想値
1	第1ビームリミタU、L (1BL)	4+4	0~500	U-0/100°C	150°C
2	中性化セルU、L (NC)	4+4	"	U-1/150°C	150°C
3	イオンダンプ右 (IDR ₁)	4	"	U-2/100°C	100°C
4	" (IDR ₂)	8	"	U-3/150°C	150°C
5	" (IDR ₃)	10	"	U-4/170°C	170°C
6	イオンダンプ左 (IDL ₁)	4	"	U-5/100°C	100°C
7	" (IDL ₂)	8	"	U-6/150°C	150°C
8	" (IDL ₃)	10	"	U-7/170°C	170°C
9	カロリメータ (CM ₁)	6	0~1000	U-8/250°C	250°C
10	" (CM ₂)	4	"	U-9/250°C	250°C
11	" (CM ₃)	11	"	U-A/250°C	250°C
12	第3ビームリミタ (3BL)	6	0~500	U-B/250°C	150°C
13	第4ビームリミタ (4BL)	19	0~1000	U-C/550°C	550°C
14	再電離保護板 (RP)	4	"	U-D/400°C	550°C
15	ポートボックス保護板 (PP)	3	"	U-E/400°C	550°C
16	突抜モニタ (SM)	4	"	U-F/550°C	790°C
17	ビーム分布計測板	1	"	L-0/350°C	350°C

注)1.本表の内容は H13.7.6 現在の最新情報を示す。

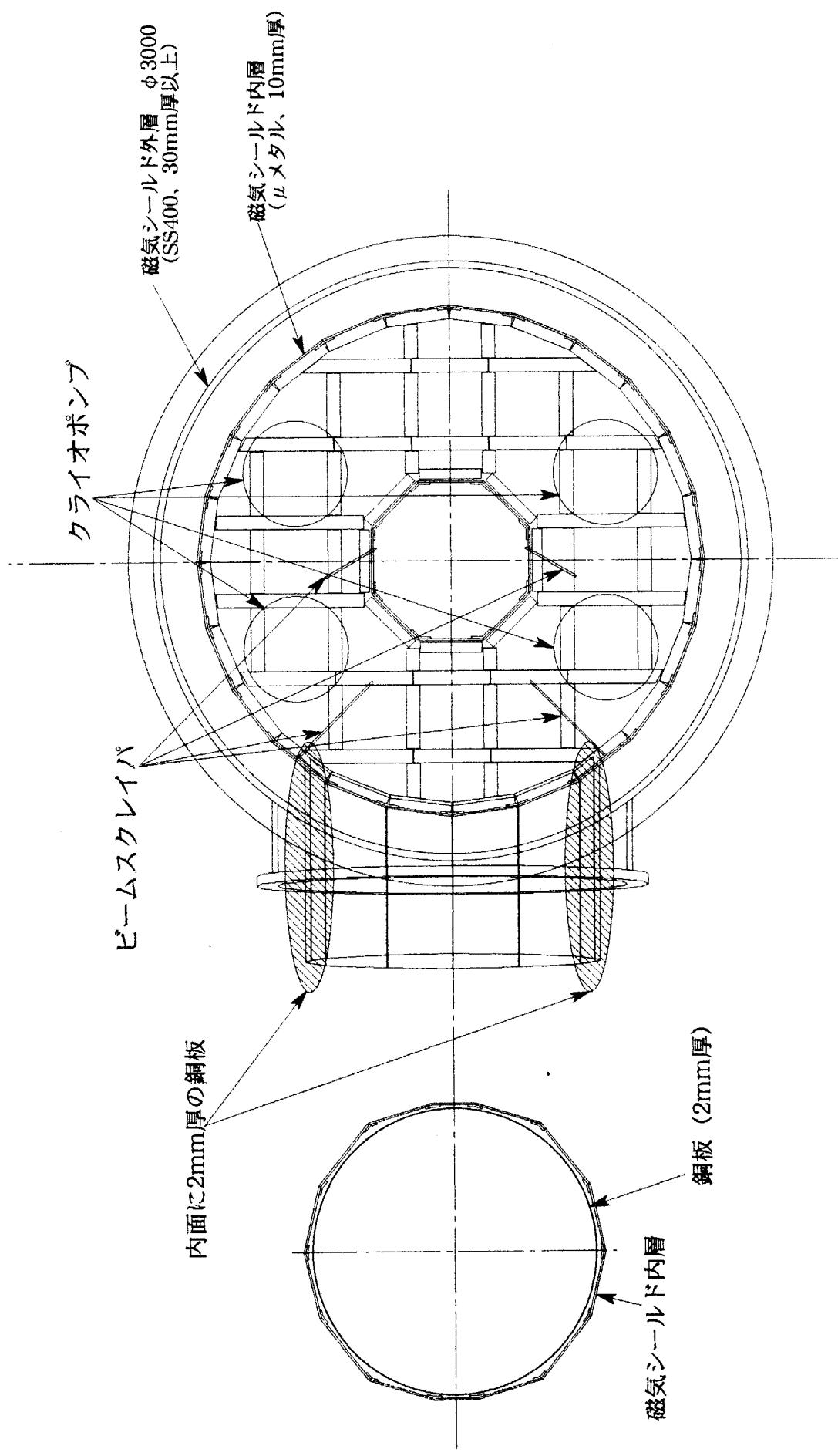
2.イオンダンプ、カロリメータの警報設定グループと各熱電対番号との関係は次のとおり。

- IDR₁/IDL₁ ; No.1,2,7,20
- IDR₂/IDL₂ ; No.3,4,8,9,18,19
- IDR₃/IDL₃ ; No.5,6,10~17
- CM₁ ; No.1,2,7,15,20,21
- CM₂ ; No.3,4,18,19
- CM₃ ; No.5,6,8~14,16,17

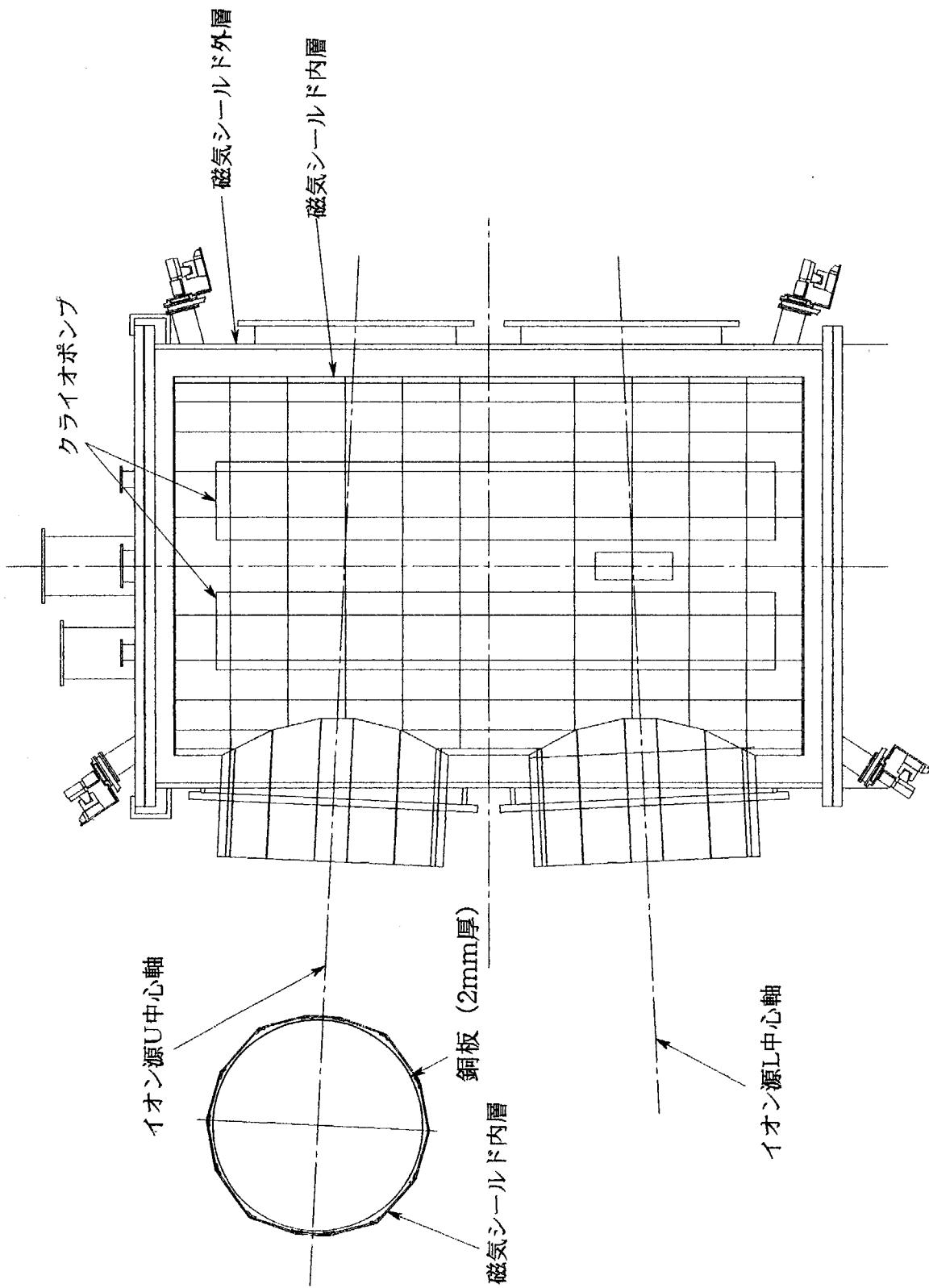
3.3 BL の 250°C は H12 年 9 月より



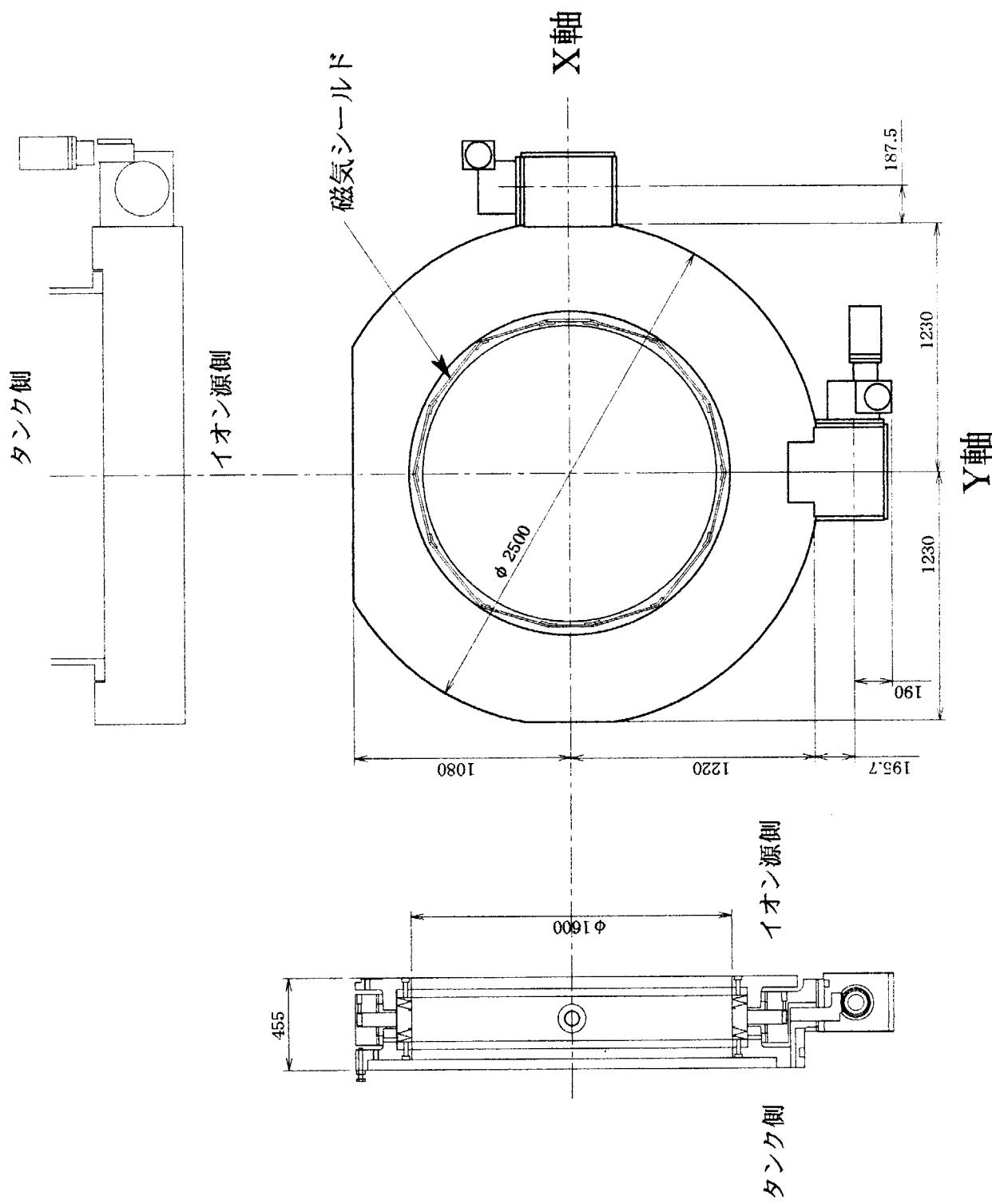
第3.2.2.1-1 イオン源タンク



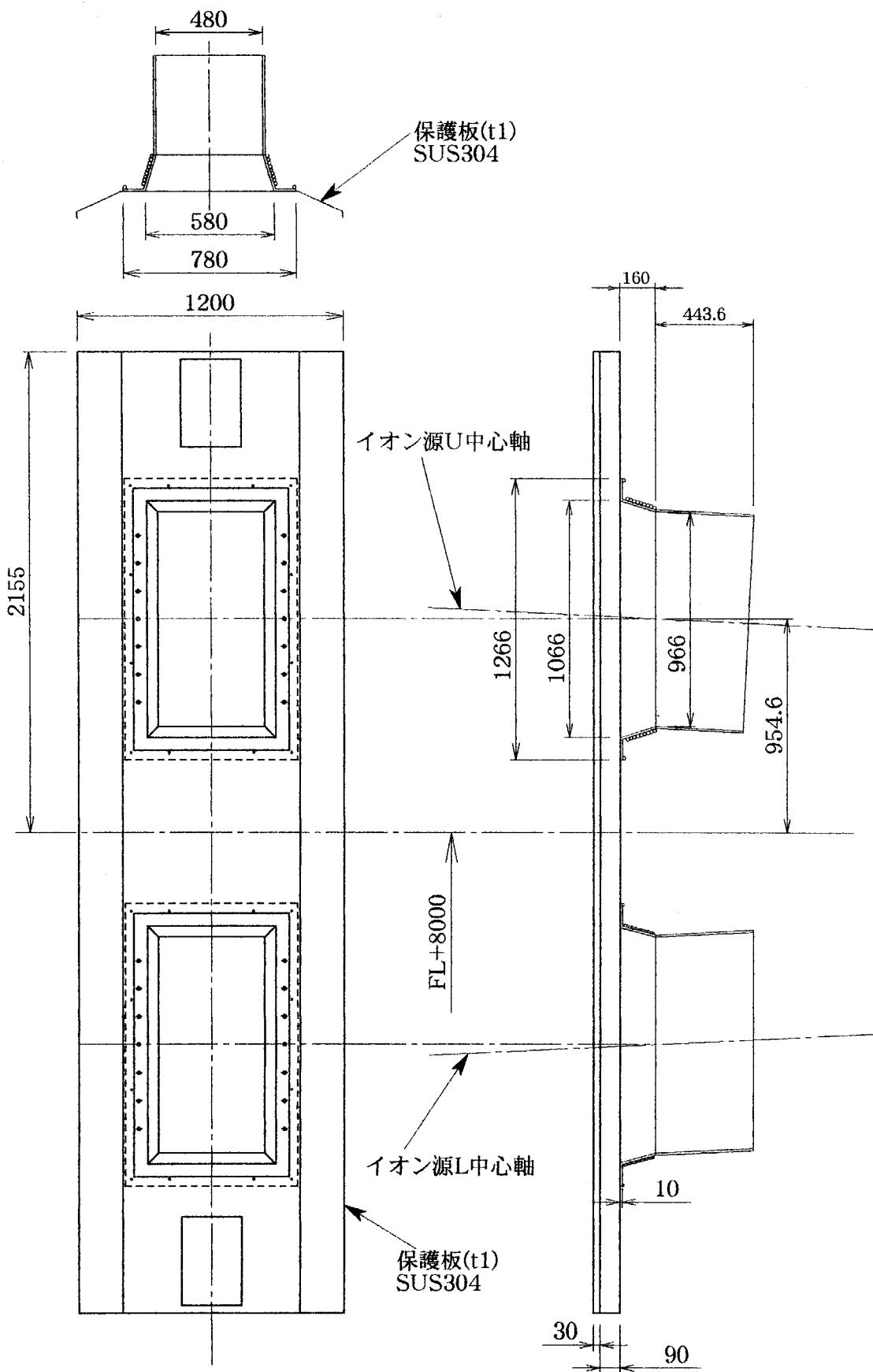
第3.2.2.2-1 図 イオン源タンク磁気シールド（平面図）



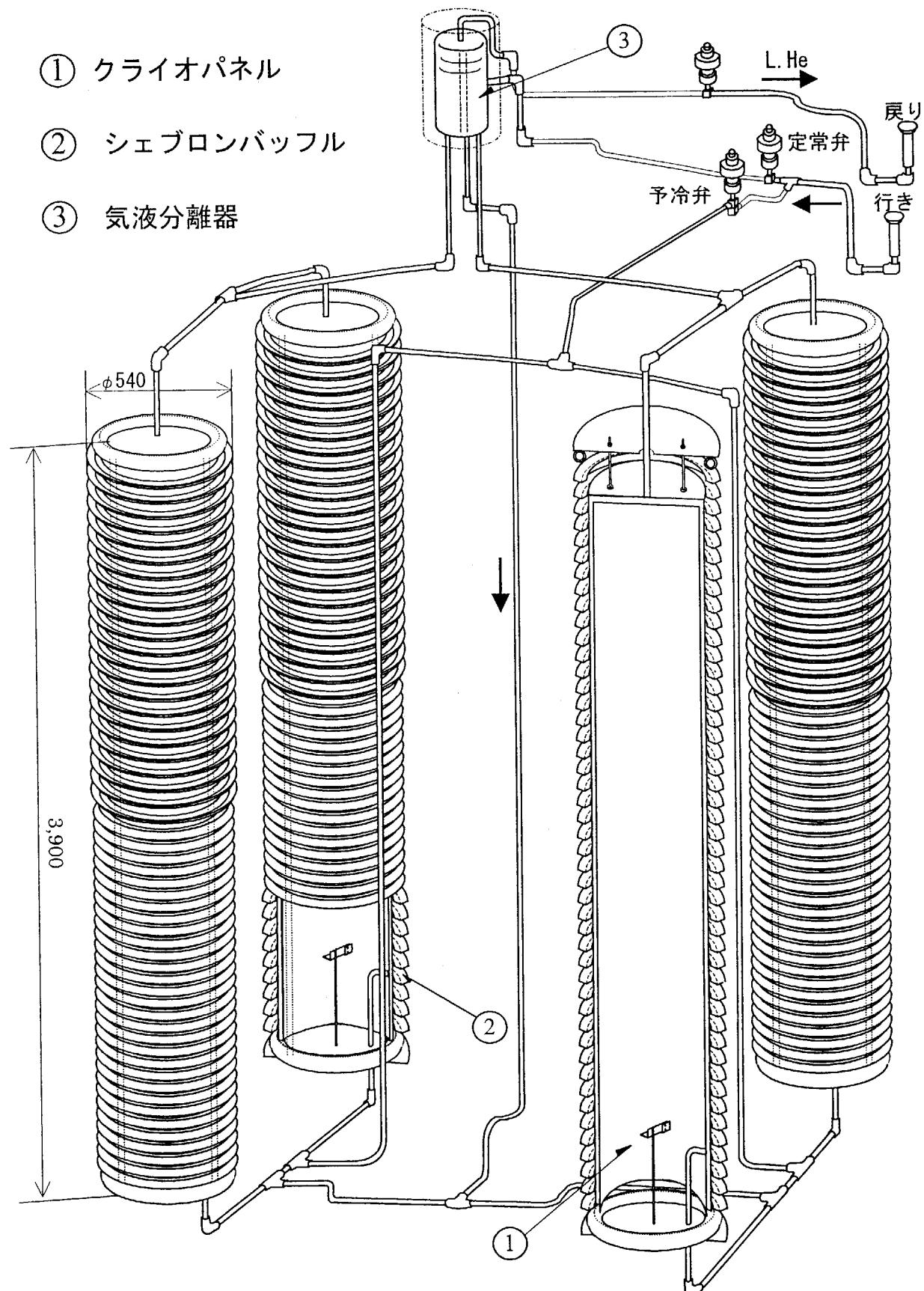
第3.2.2-2 図 イオン源タンク磁気シールド（側面図）



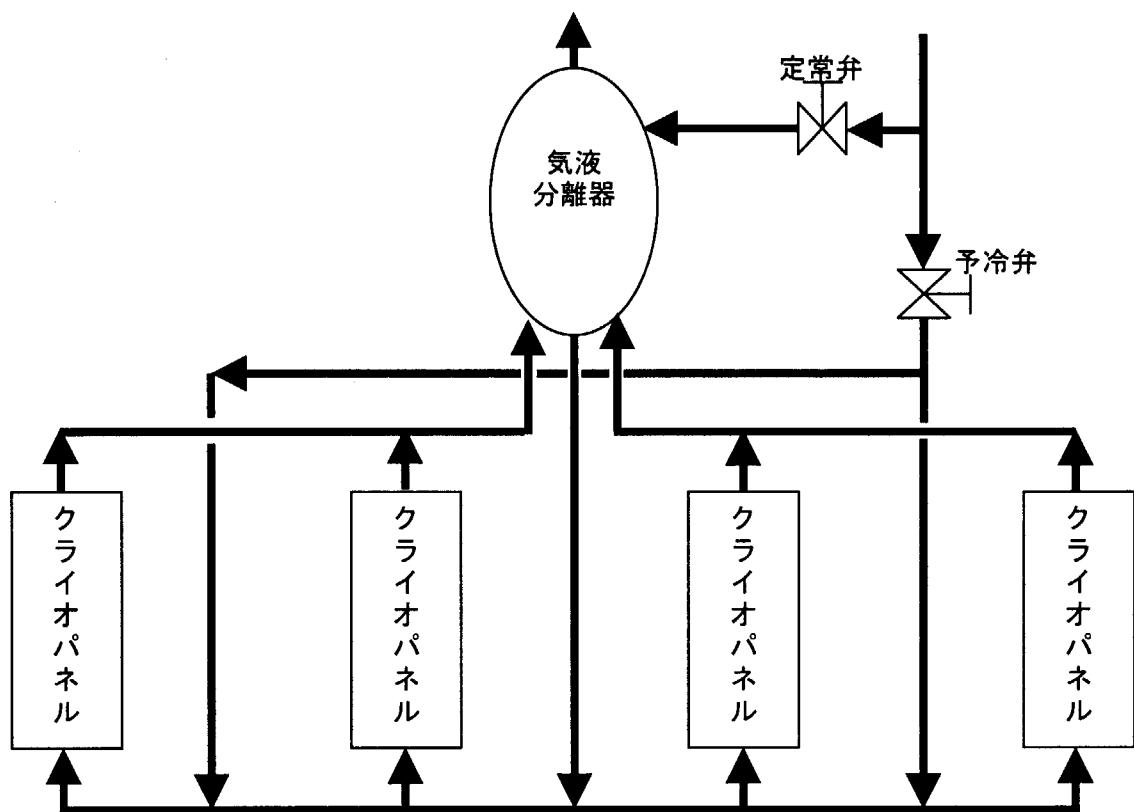
第3.2.2.3-1図 イオン源角度調整機構



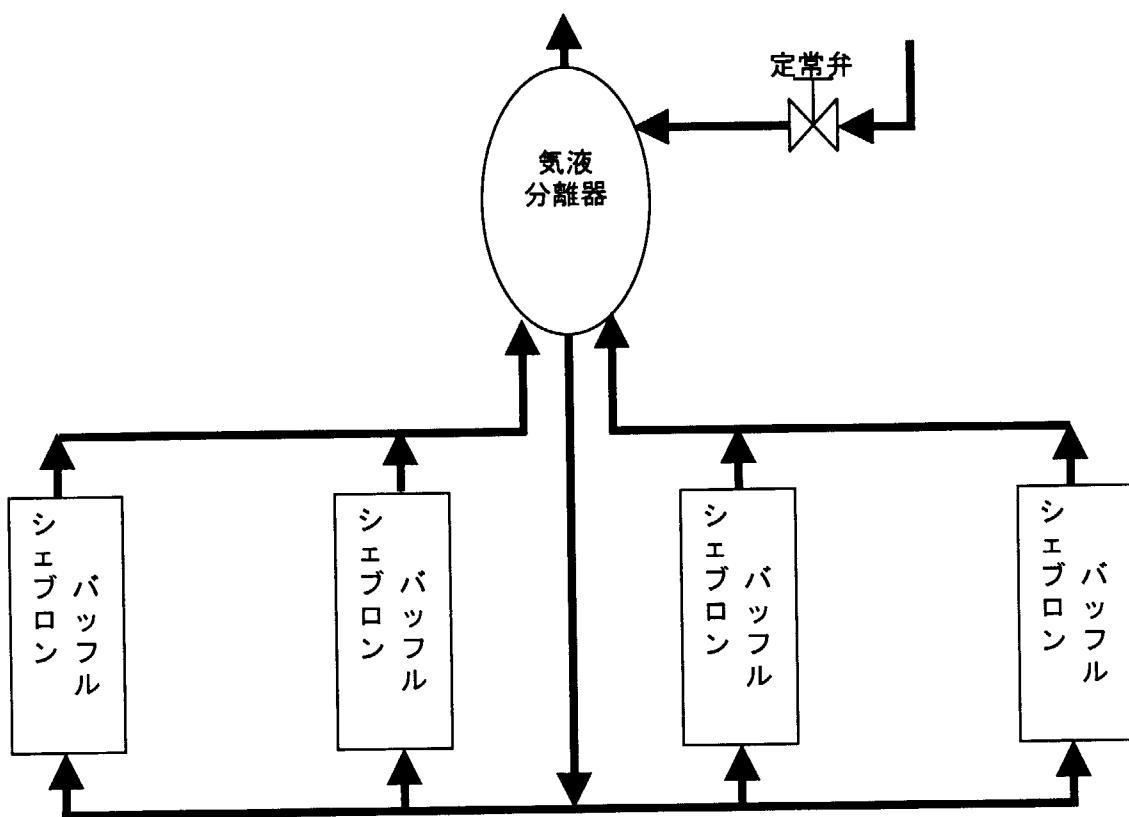
第3.2.2.5-1図 第1ビームリミタ



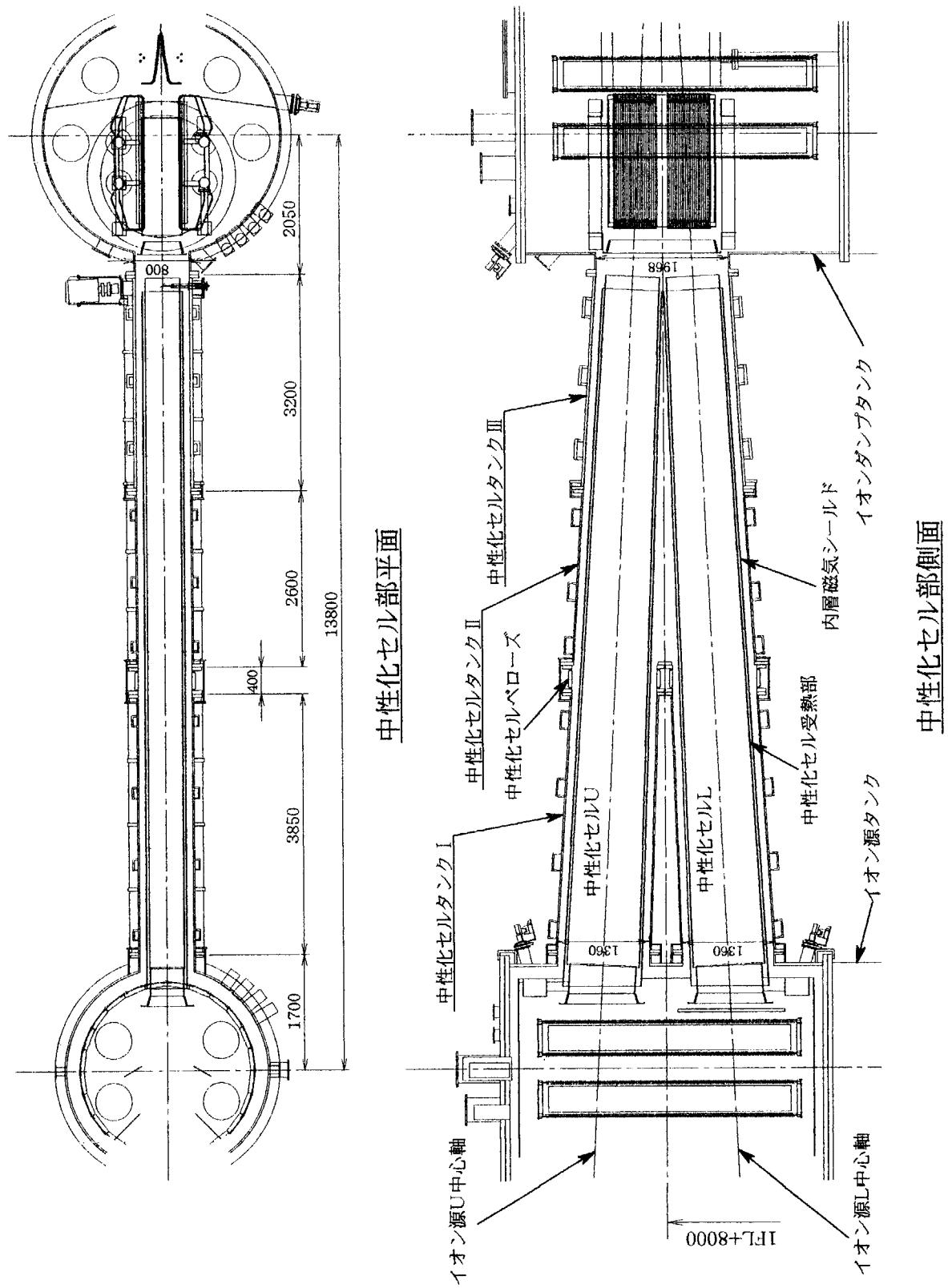
第3. 2. 2. 6-1図 クライオポンプ鳥瞰図



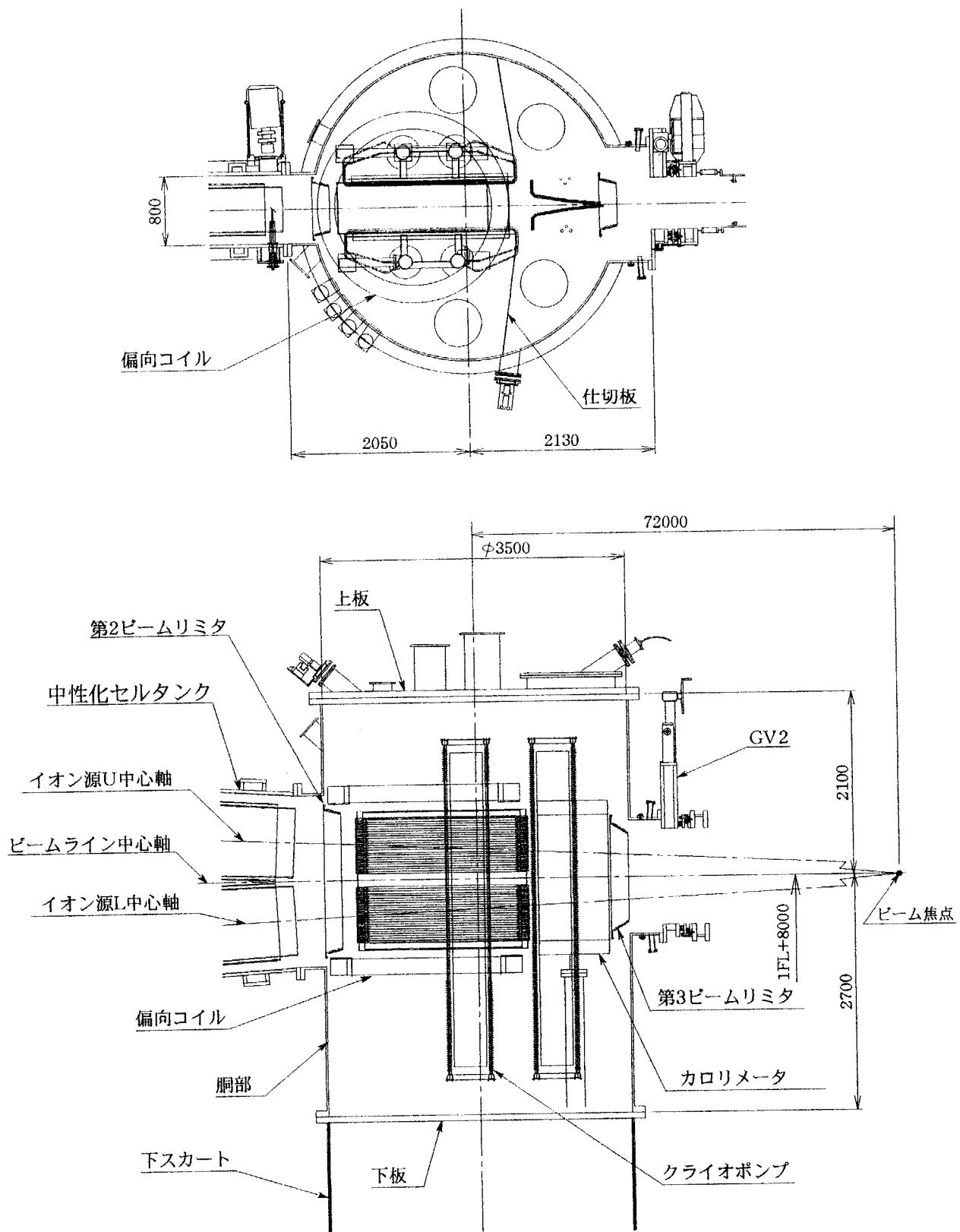
第3.2.2.6-2図 液体ヘリウムの供給フロー



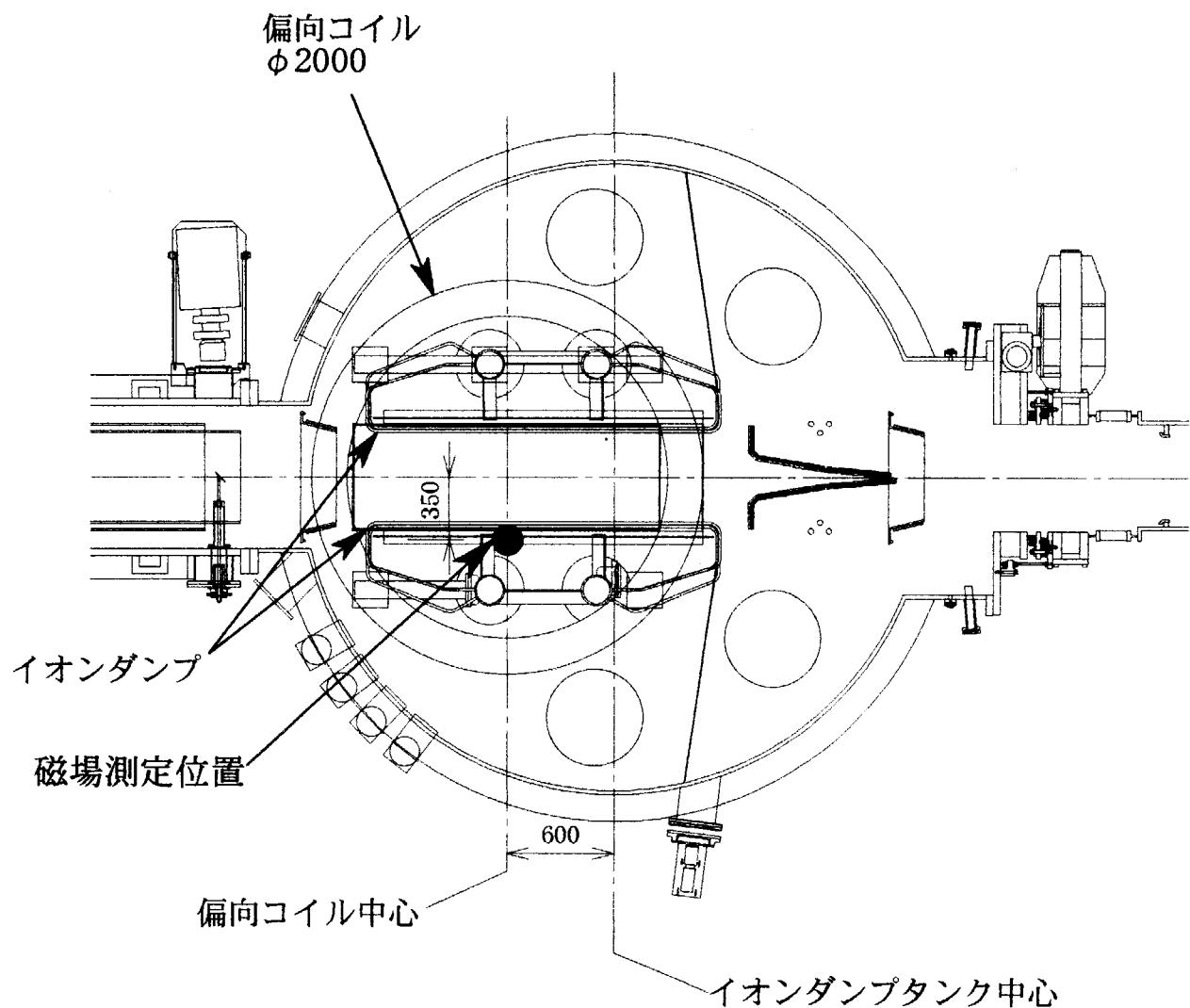
第3. 2. 2. 6-3図 液体窒素の供給フロー



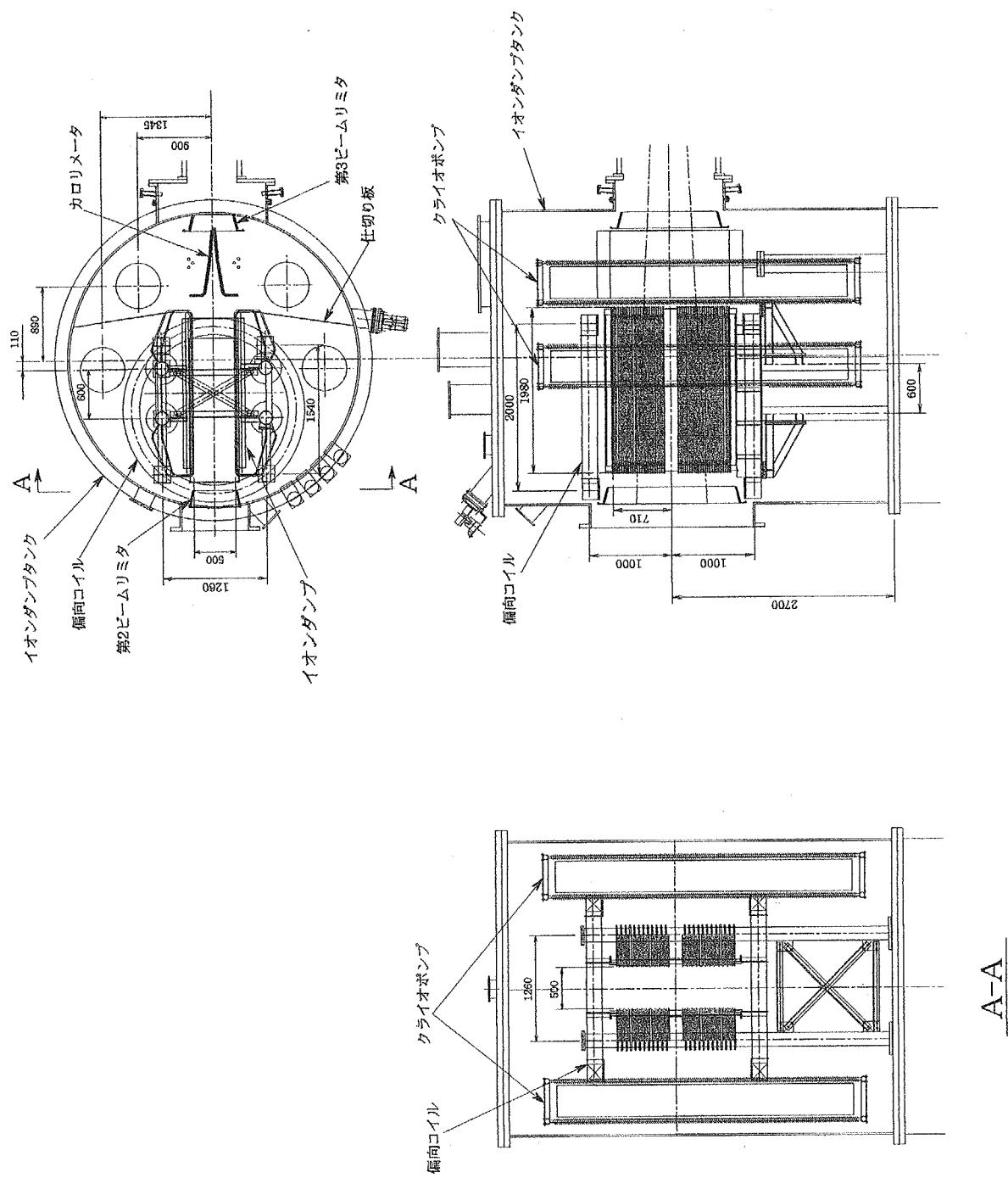
第3. 2. 3-1 図 中性化セル部



第3. 2. 4-1図 イオンダンプタンク部

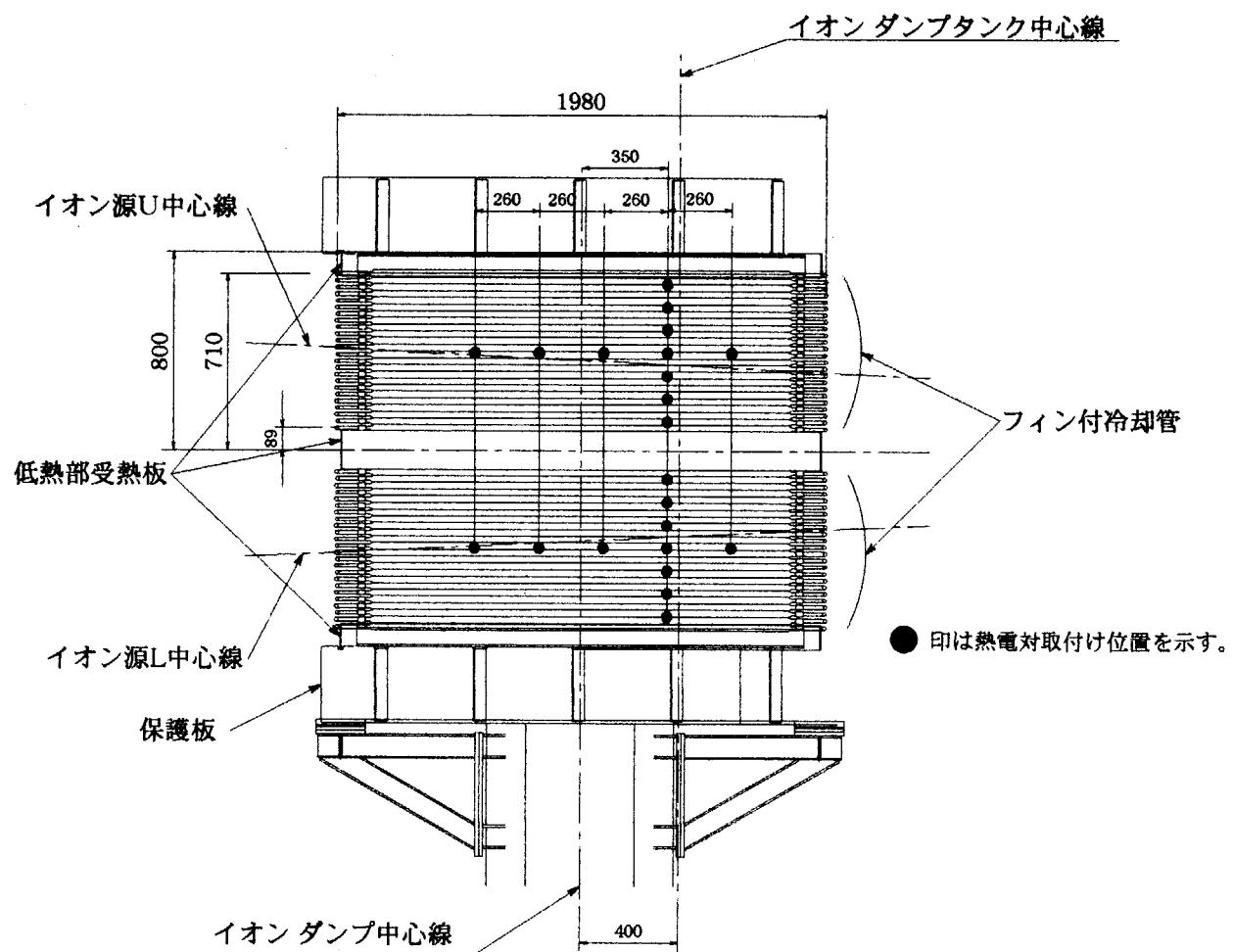


第3. 2. 4. 2-1 図 偏向コイルとホール素子の取付け位置図

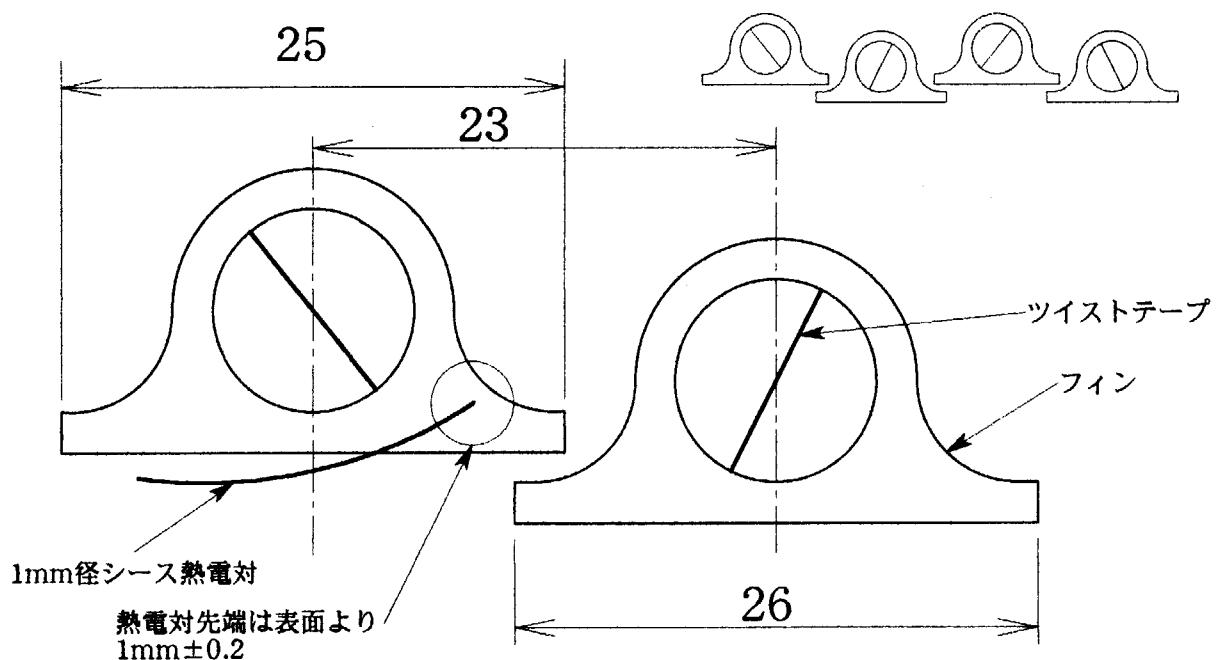


第3. 2. 4. 3-1図 イオンダンプ設置位置及び概略構造図

A-A

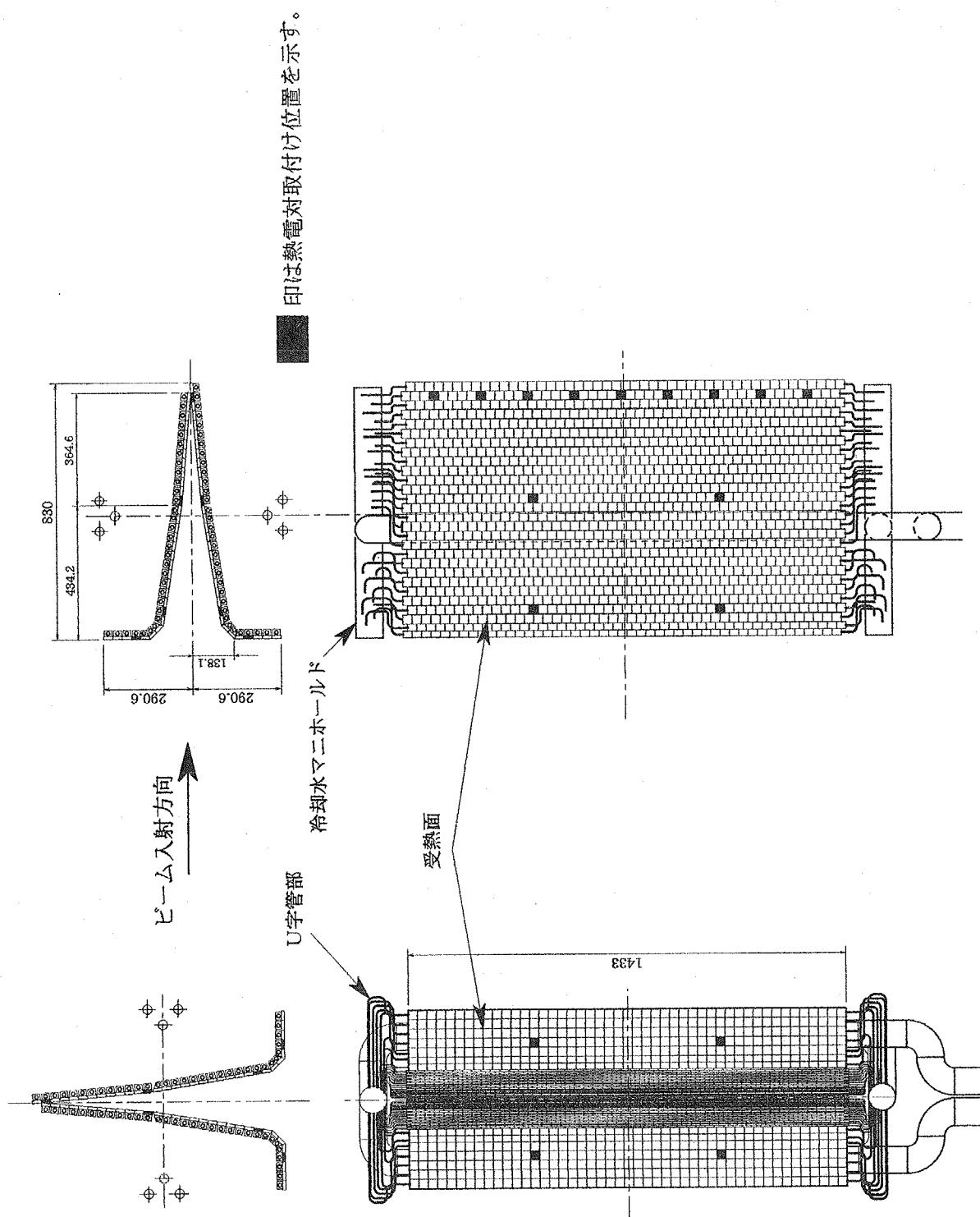


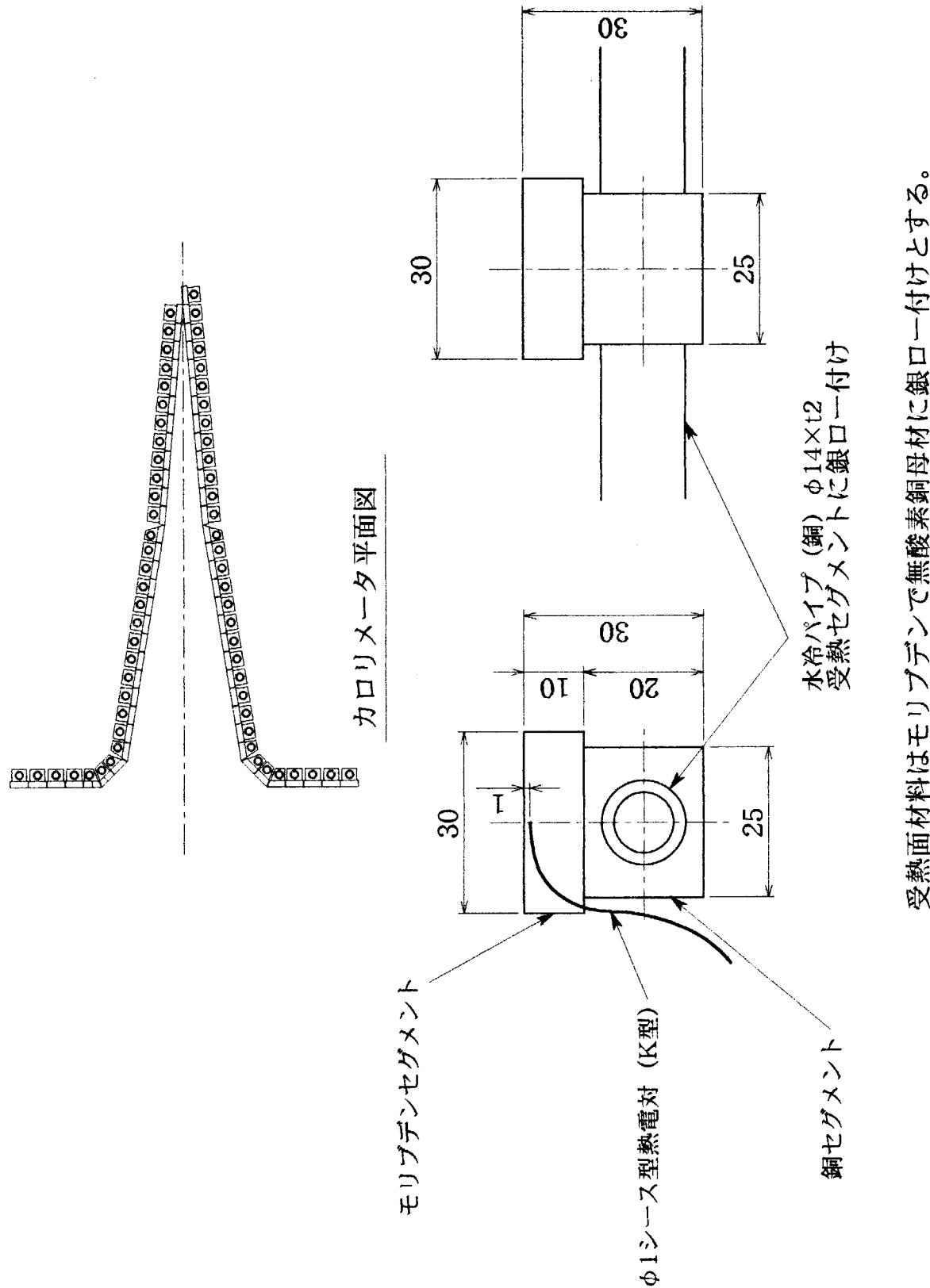
第3. 2. 4. 3-2図 イオンダップ受熱面の配置



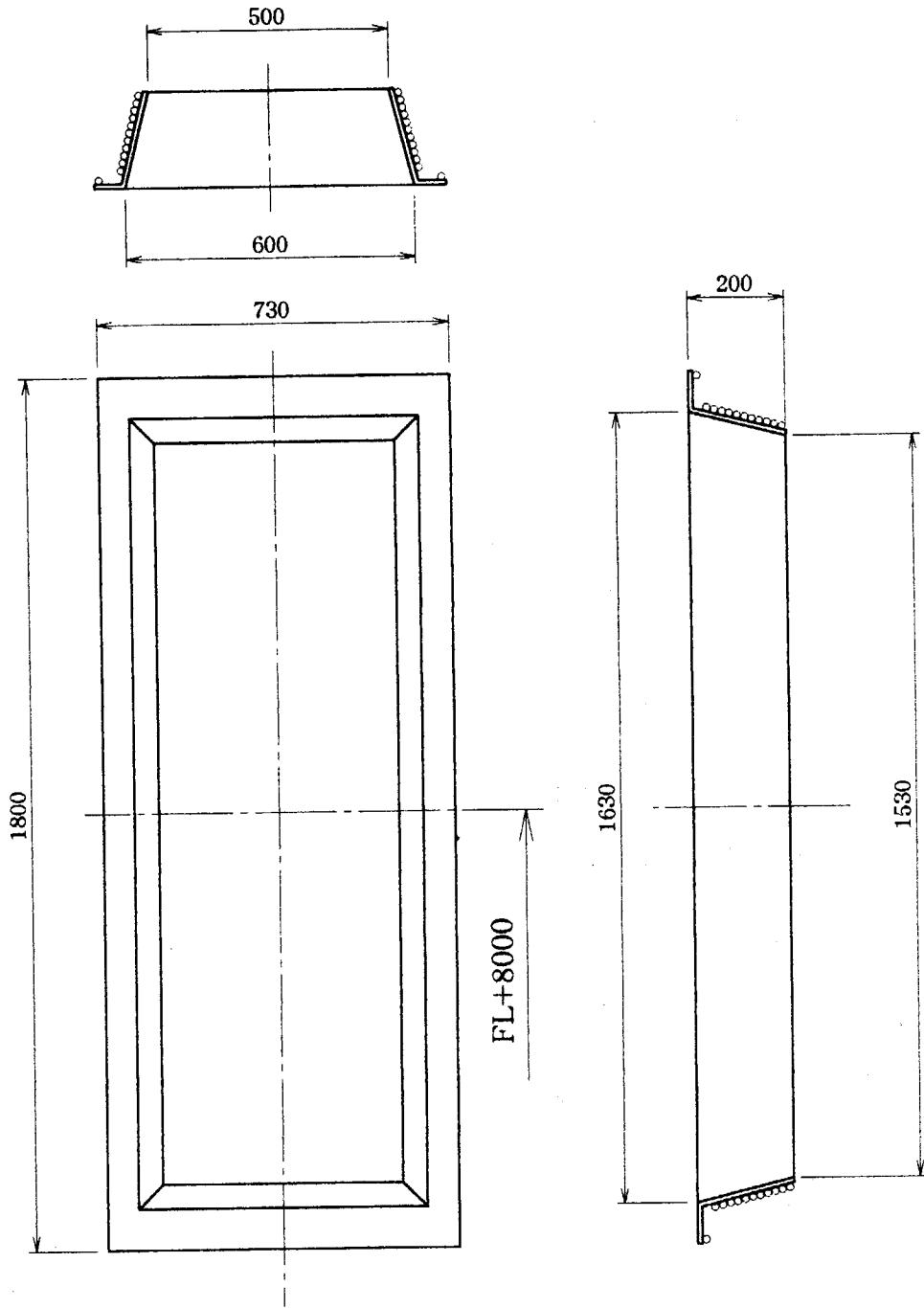
第3. 2. 4. 3-3図 外部フィン付スワール管詳細

第3.2.4.4-1図 カロリメータ受熱部構造

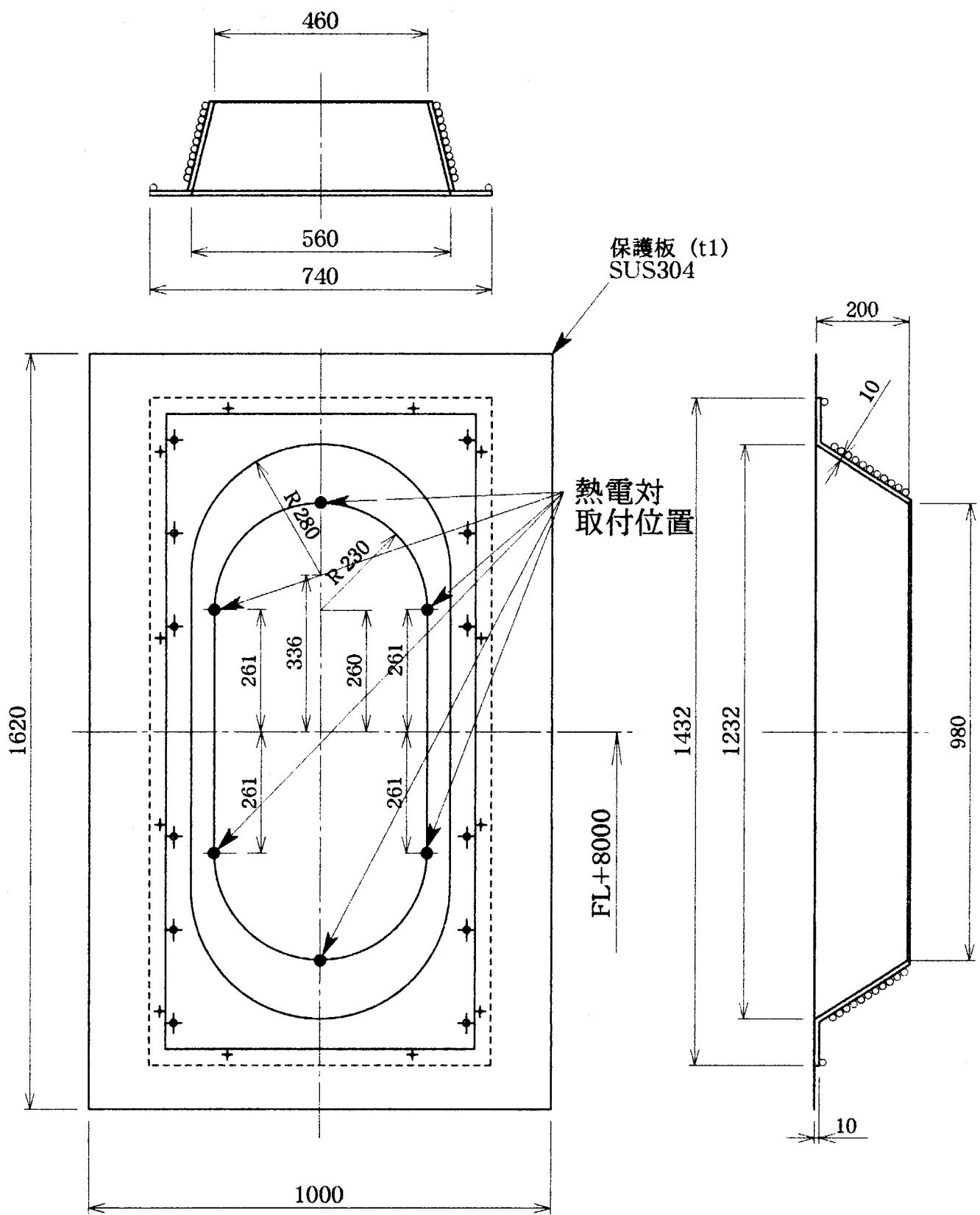




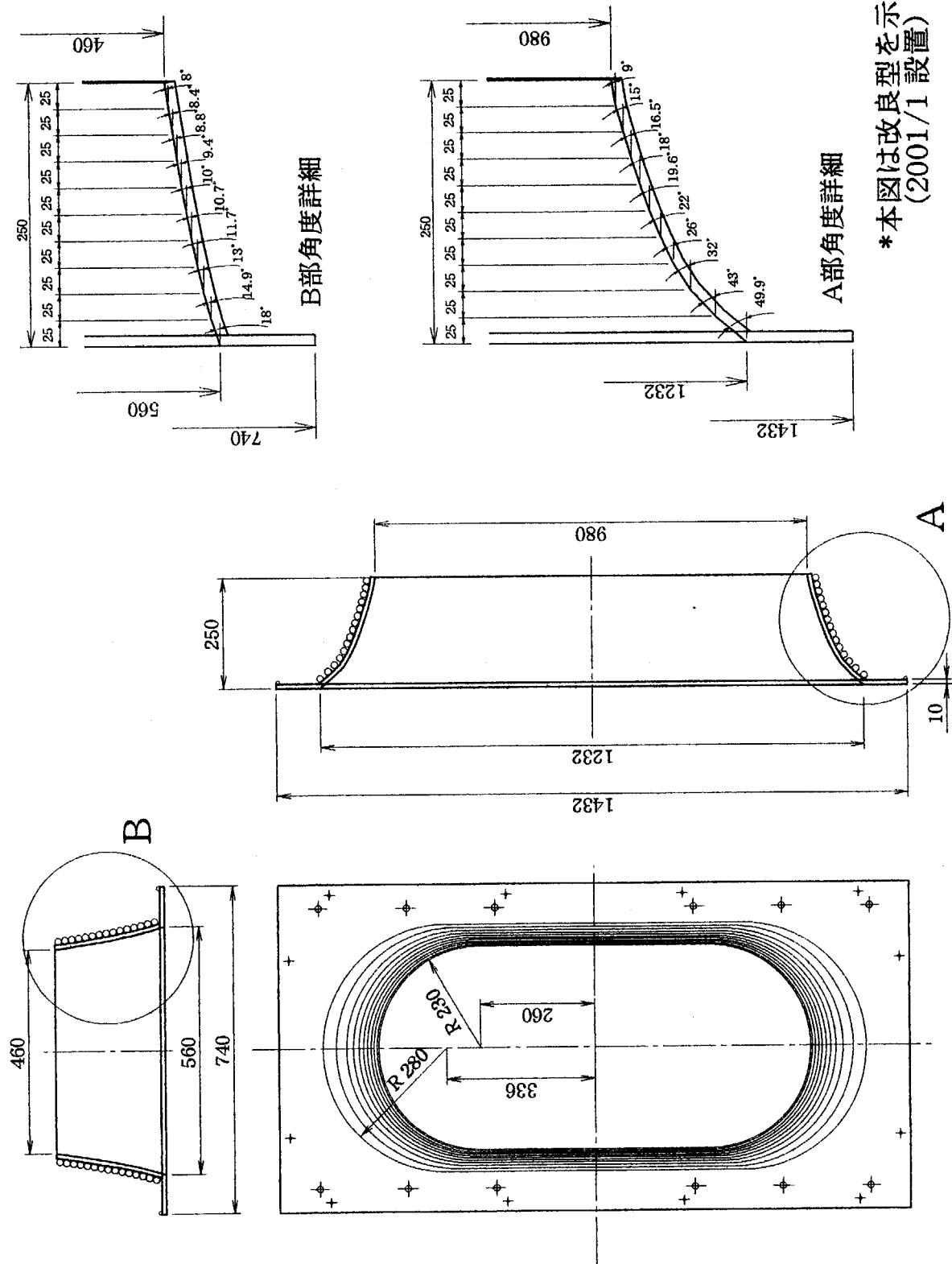
第3. 2. 4-2 図 カロリメータ受熱セグメント詳細



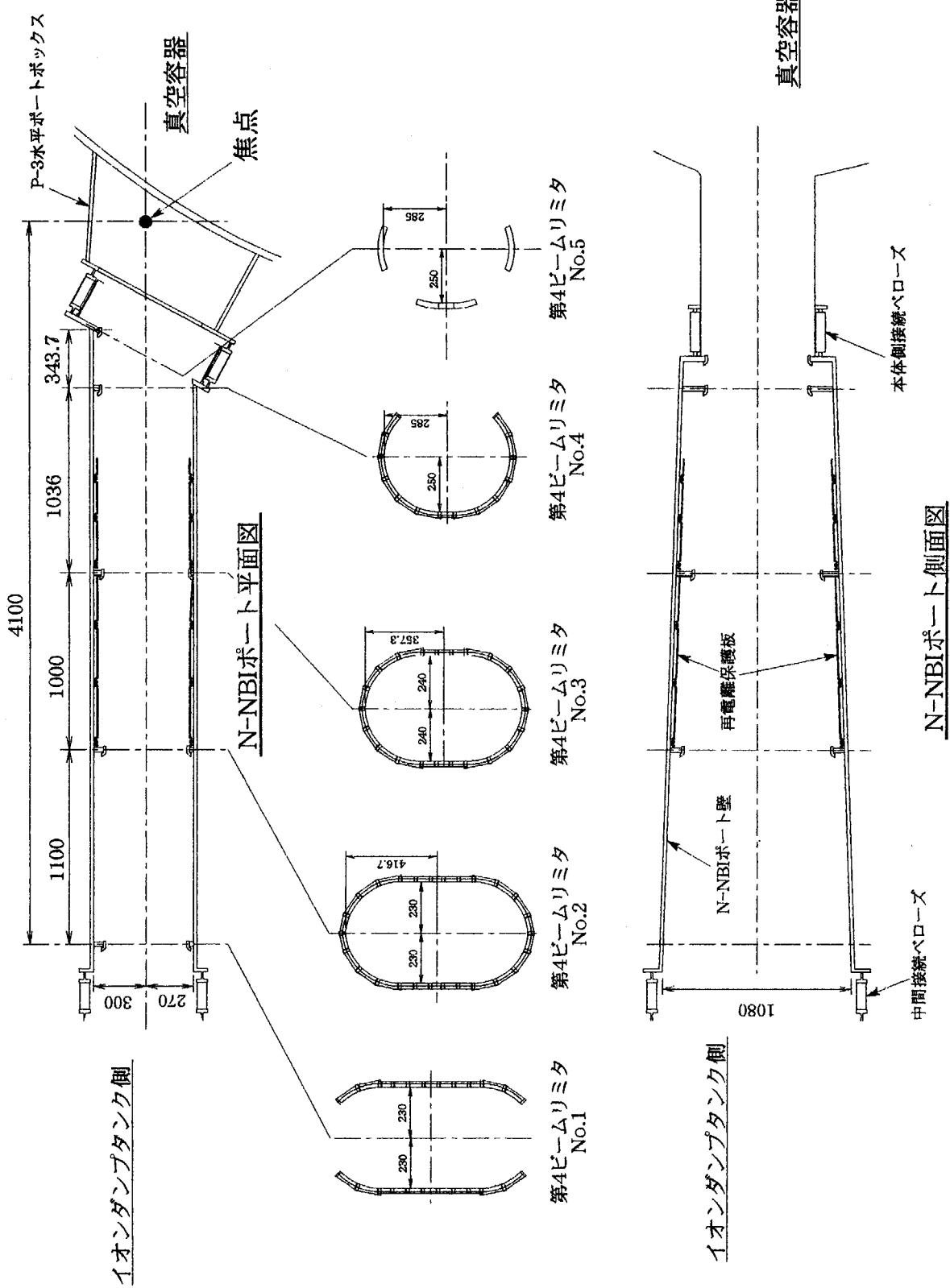
第3. 2. 4. 7-1図 第2ビームリミタ



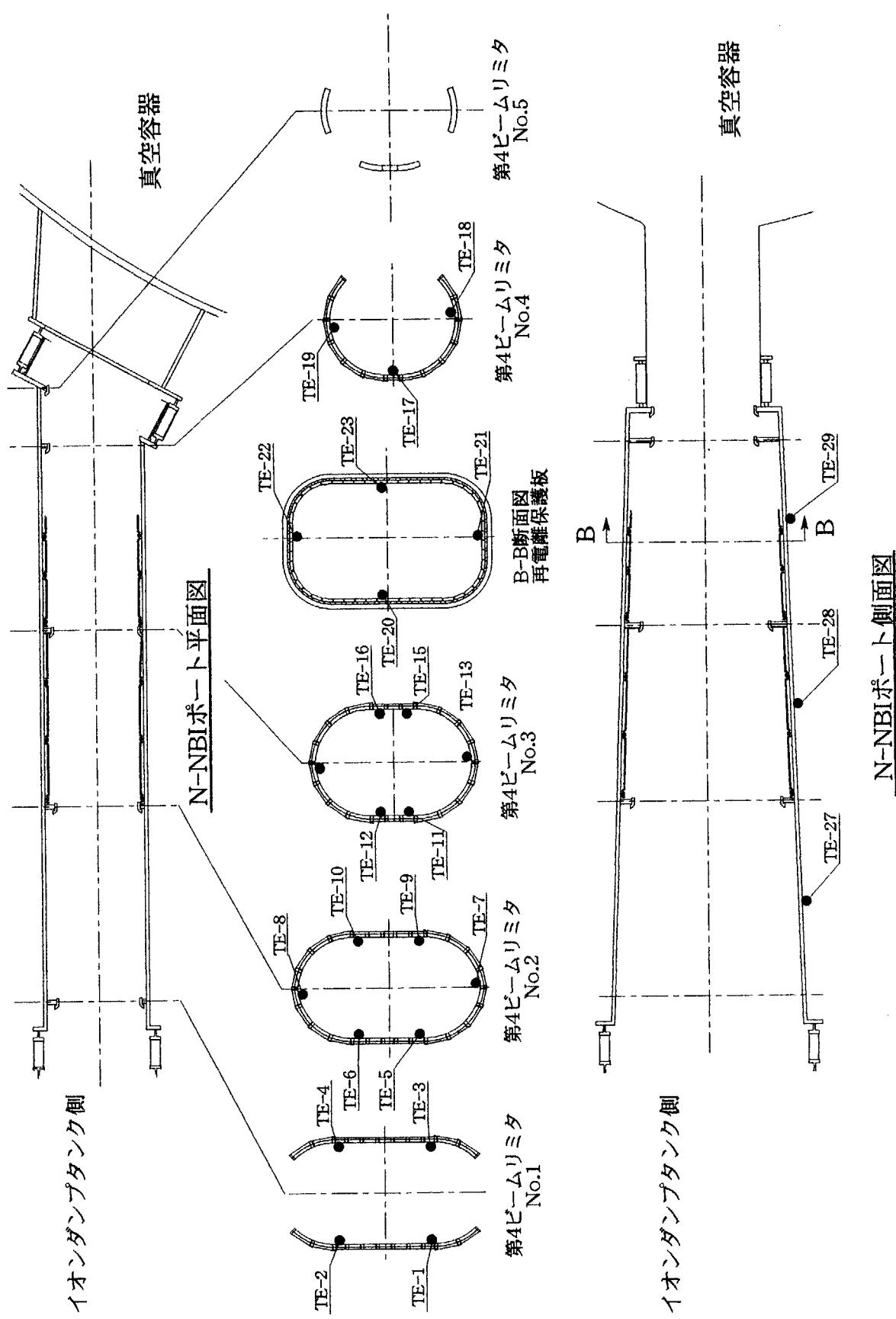
第3. 2. 4. 7-2a 図 第3ビームリミタ (改造前)



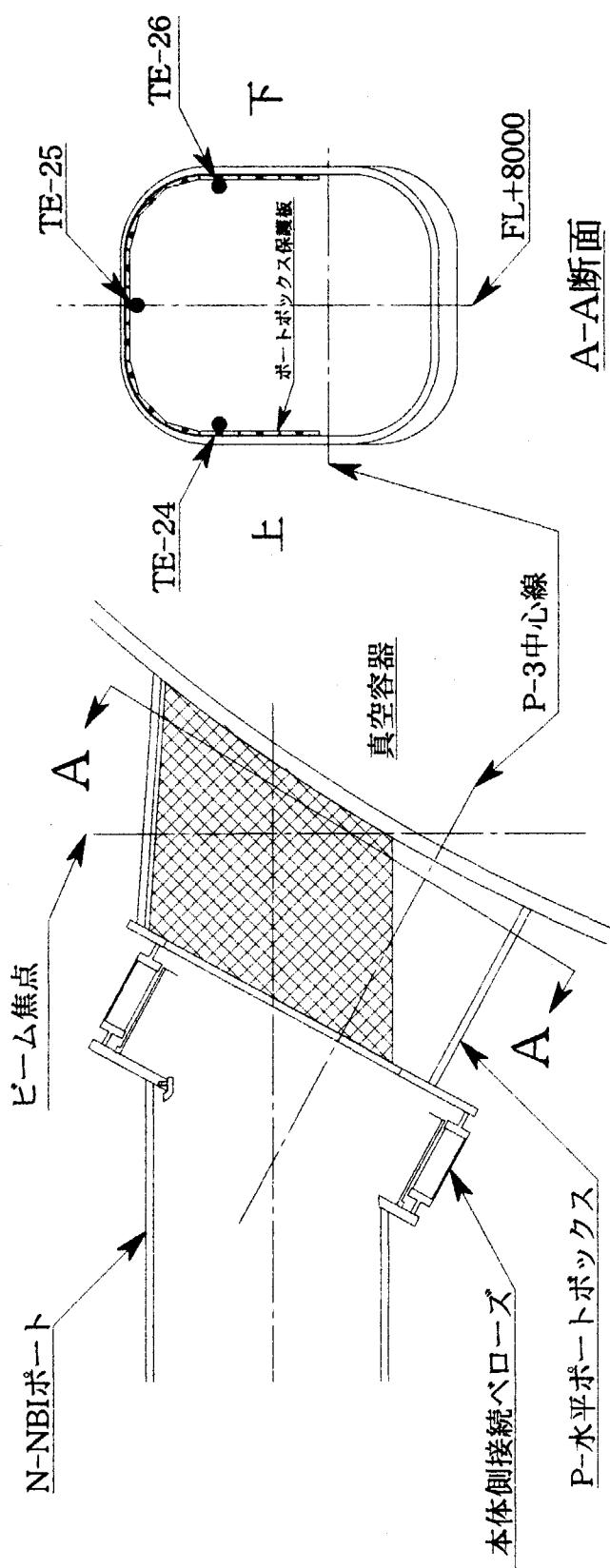
第3. 2. 4. 7-2b図 第3ビームリミタ (改修後)



第3.2.5.3-1 図 N-NBI 求一卜構造寸法図



第3. 2. 5. 3-2 図 第4ビームリミタ、再電離保護板の熱電対取付け位置

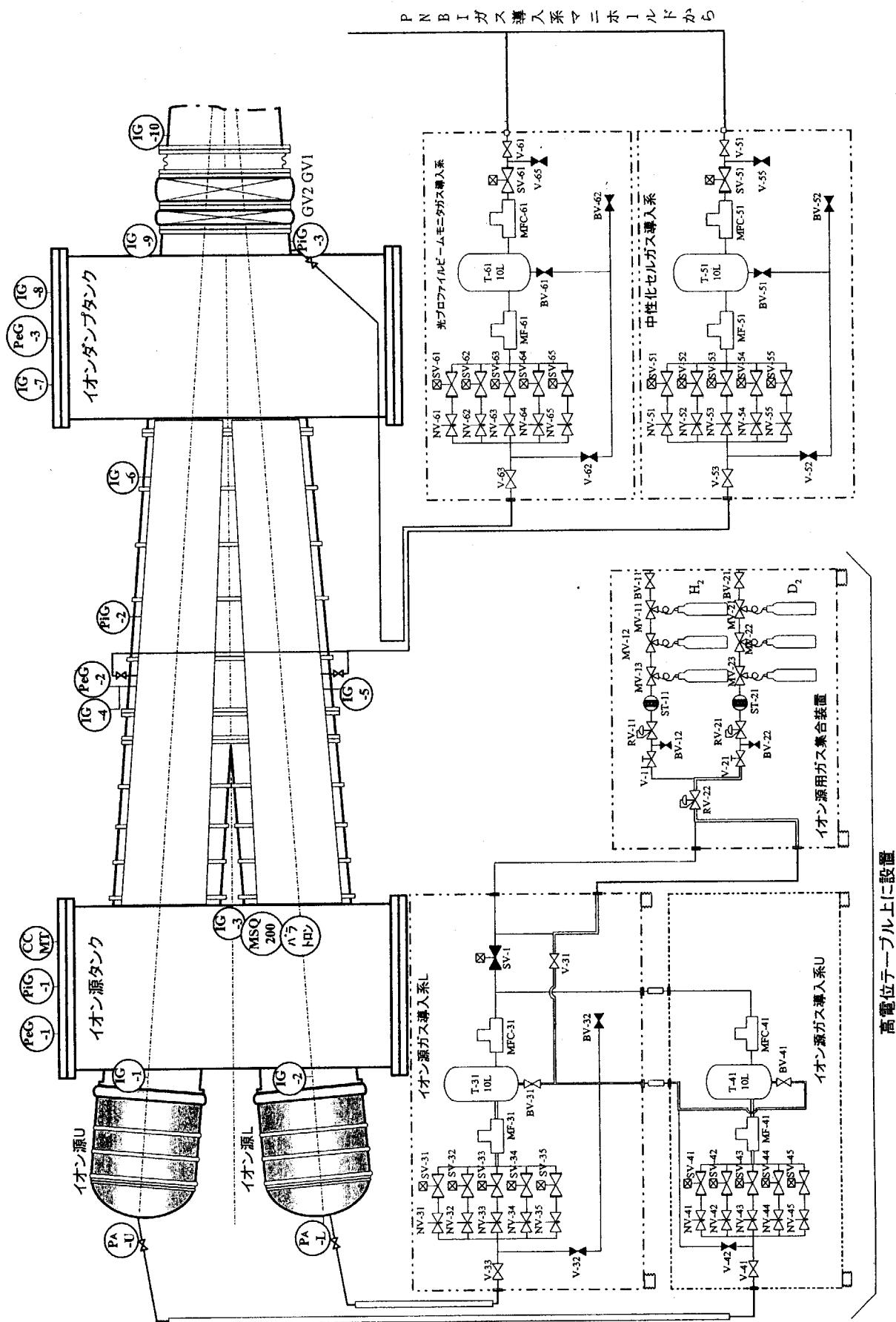


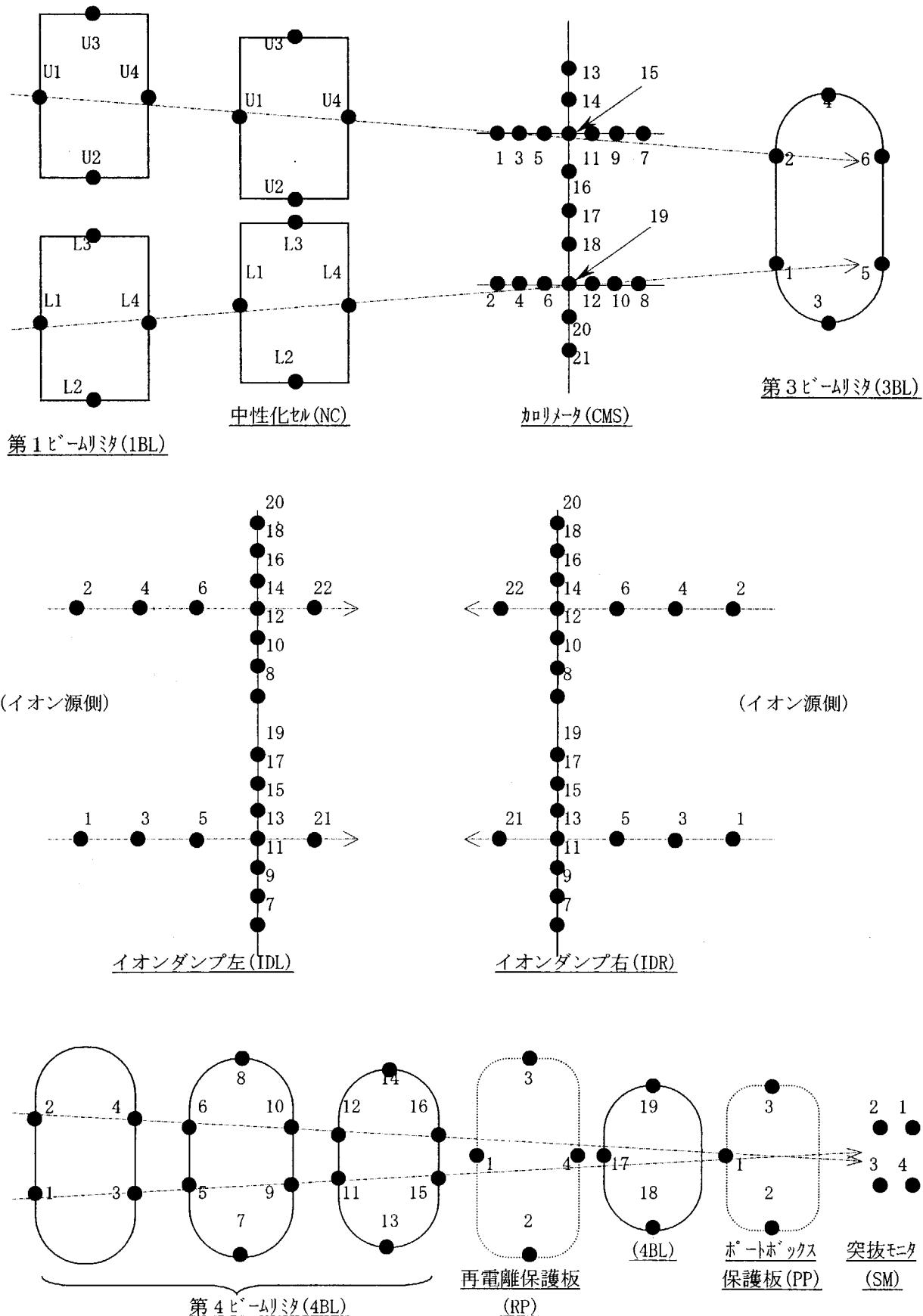
P-3ポートボックス平面図

部はポートボックス保護板取付け領域

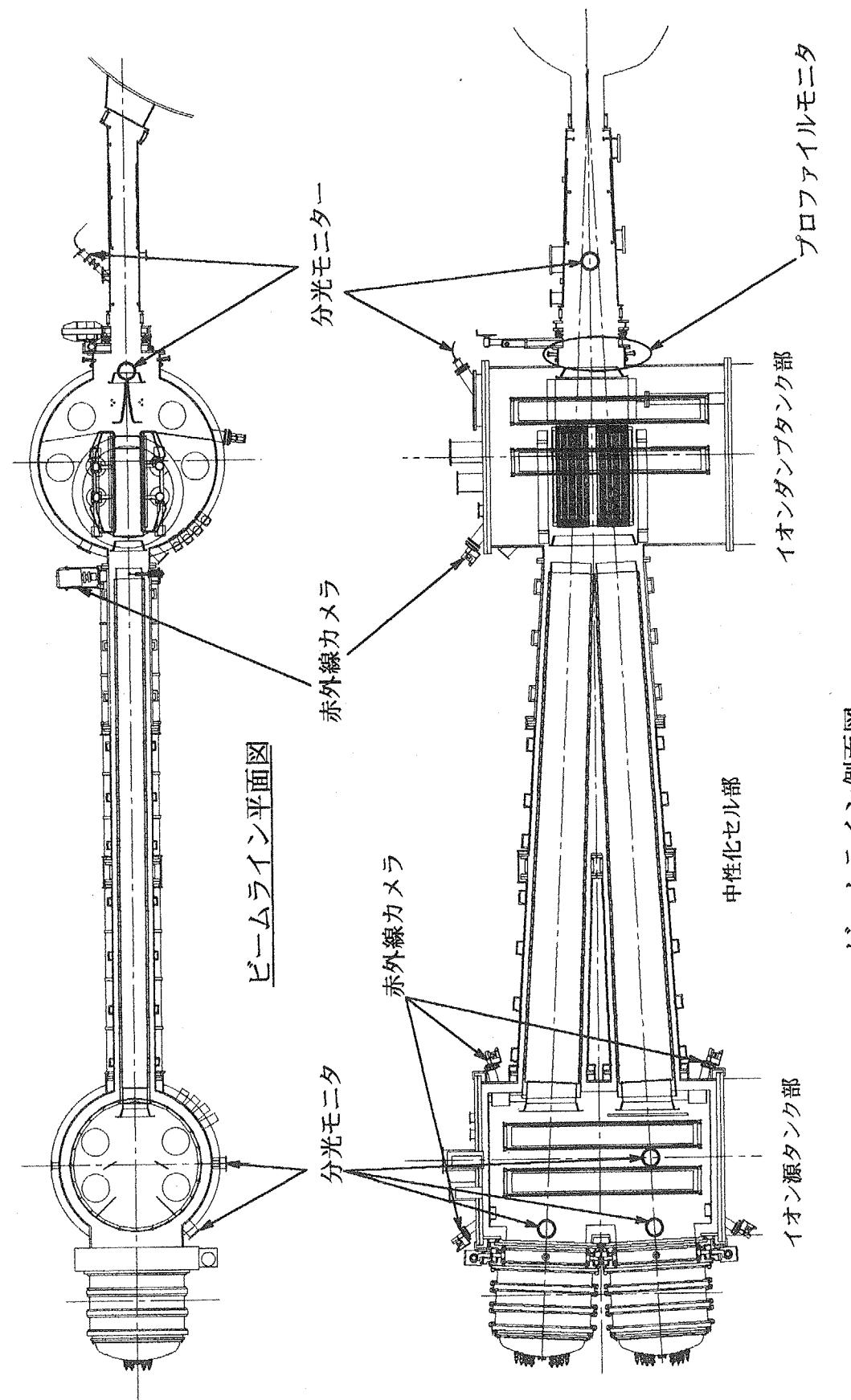
第3.2.5.3-3 図 ポートボックス保護板熱電対取付け位置

図 統系導入及びガス配置計画図

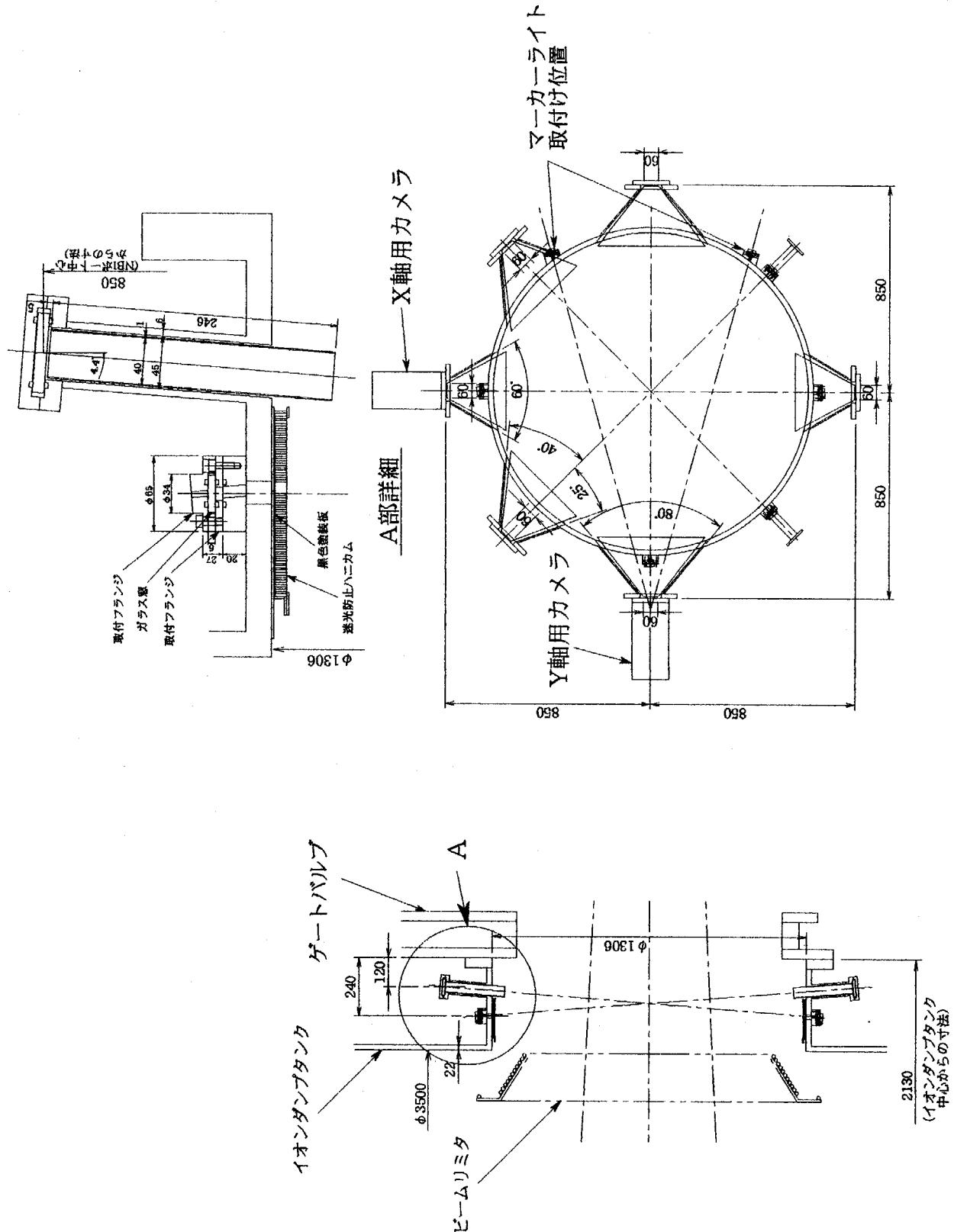




第3. 2. 6. 2-1図 ビームライン機器熱電対配置図



第3.2.6.3-1図 分光モニタ、赤外線カメラ、プロファイルモニタ設置位置



第3. 2. 6. 4-1 図 光プロファイルモニタ取付けポート

3. 3 電源

電源はイオン源用電源及び受配電設備から構成される。

イオン源用電源は、イオン源にソースプラズマを生成し、そこから負イオンビームを引出し、加速するために必要な各種電力を供給するための電源である。第3.3.1-1図に示すとおり、二式の負イオン生成部電源（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）及び引出電源、一式の加速電源及び偏向コイル電源より構成される。また、負イオン生成部で使用される二式のイオン源ガス導入系も、ここではイオン源用電源の一部として扱うものとする。各電源の定格は次のとおりである。

電源名称	出力電圧	電流	パルス幅	リップル	員数
負イオン 生成部電源	15V	1200A ×8系統	16秒	6%p·p	2式
	120V	5000A	11秒	3%p·p	2式
	10V	1600A	11秒	3%p·p	2式
	5V	10kA	11秒	3%p·p	2式
引出電源	-(2~10)kV	80A	10秒	2%p·p	2式
加速電源	-(150~490)kV	64A	10秒	10%p·p	1式
偏向コイル電源	1220V	1500A	13秒	-	1式
(イオン源ガス導入系)	(流量:最大 20Pa·m ³ /s)		-	-	2式

3. 3. 1 負イオン生成部電源

負イオン生成部電源はイオン源の負イオン生成部(アークチャンバ)でアーク放電を生じさせ、ソースプラズマを生成させるための電源で、フィラメント、アーク、バイアス電源及びPG フィルタ電源から構成され、イオン源 U、L に対応して計二式より成る。

3. 3. 1. 1 共通仕様

- (1) 各電源の繰返し率(デューティ)は、ビームパルス基準で 1/60 以下である。ビームパルス基準の繰返し率は、実際に引出されるビームの繰返し率であり、各電源に対する繰返し率は高くなる。例えば、45秒周期で 0.8 秒のビームを引出す場合、フィラメントは予熱時間が 6秒程度必要なのでフィラメント電源の通電時間は 6.8 秒となり、繰り返し率は 6.8/45 となる。
- (2) 最短繰り返し周期は、30秒である。
- (3) JT-60 加熱用発電設備は、電圧で +7.5% ~ -10.5%、周波数で 77.6 ~ 54.2Hz の範囲の出力変動があるが、これに対して各電源の出力変動を抑えるよう補償する機能を持つ。

3. 3. 1. 2 フィラメント電源

(1) 基本構成

フィラメント電源は絶縁変圧器、サイリスタスイッチ、8 系統の降圧変圧器、ダイオード整流

器、直流フィルタより構成される。

(2) 基本性能

a) 出力電圧は 0~15V 連続可変、最大電流は 1200A×8 系統である。ただし、この電流値は定常値とし、通電開始時に過渡的に 3 秒間、最大 130% の電流を流すことが可能である。

b) ソフトスタート

フィラメント通電開始時点の電流立上がりのピーキングを抑えるため、サイリスタ制御によりソフトスタートをかける。ソフトスタートの定常値の 90%までの立上がり時間は 0.2~3 秒の範囲で可変である。

c) フィラメント断線時の保護

イオン源 1 台あたりフィラメントは 6 本×8 系統装着されている。この 8 系統毎の電流が 200A 以下となった場合、フィラメント断線として、ビーム引出し禁止の保護動作を行う。

d) 結線方式

フィラメント電源とイオン源及びアーク電源との結線方式を第 3. 3. 1-2 図に示す。高電位テーブル内の 8 系統のフィラメント電源出力は、サージブロッカを貫通してイオン源保守ステージ内の端子台で中継した後、イオン源の 8 系統のフィラメント端子と接続される。フィラメントのマイナス端子とアーク電源マイナス端子とはアーク限流抵抗を通して接続され、アーク電流の帰路はフィラメント回路を分流する。限流抵抗を介したアーク電源のマイナス端子はフィラメント端子のプラス極と接続することも可能である。

アーク電源のプラス出力ケーブルはサージブロッカを通してイオン源のアークチャンバ端子に接続される。アーク電源マイナス出力は 8 系統に分岐され、それぞれ直流スイッチと限流抵抗を通った後、サージブロッカを通してイオン源保守ステージでさらに直列の限流抵抗を介した後、端子台においてフィラメント出力（8 系統）のマイナス極に接続される。

3. 3. 1. 3 アーク電源

アーク電源は陰極であるフィラメントと陽極であるアークチャンバ間に電圧を印加し、ソースプラズマを生成するための電源である。

(1) 基本構成

アーク電源は、絶縁変圧器、サイリタ変換器、直流フィルタ、それに 8 系統の直流スイッチ、限流抵抗などから構成されている。

(2) 基本性能

a) 出力遮断性能

アーキング発生時等の出力遮断時間は $100\mu s$ 以下である。ここで、遮断時間とはアーキング等発生から電流が定格の 5% 以下となるまでの時間である。

b) 受電電圧の変動に対し、出力電流が $\pm 100A$ 以上変化しないようにサイリスタ位相制御により補償している。

c) 限流抵抗

アーク電源マイナス出力側には、8 系統毎に限流抵抗を設け、定電流性を持たせるとともに、8 系統間に流れるアーク電流の分流を均等化することを行う。限流抵抗の値は当初 $100m\Omega$ で

あったが、イオン源保守ステージ側に直列に抵抗器追加し、現在は最大 $200\text{m}\Omega$ となっている。

(3) 高速保護

a) イオン源放電破壊時の保護

イオン源の加速部電極、又は引出部電極間で放電破壊が発生した場合、第3. 5. 2項に述べるように、アーク電源も連動して高速遮断し、保護動作を行う。

b) アーキング時の保護

通常、アーク放電はフィラメント表面全般にわたって一様な放電であるが、フィラメントの表面の一ヵ所に集中することがあり、これをアーキングと呼ぶ。アーキングはフィラメントの重大な損傷を伴うため、第3. 5. 2項に述べるように、これを高速に検出し、遮断させるようしている。

3. 3. 1. 4 バイアス電源、PG フィルタ電源

バイアス電源はアークチャンバに対して、プラズマ電極に電位を与え、負イオンと共に引出される電子量を抑制するための電源である。

PG フィルタ電源はプラズマ電極に直接電流を流し、フィルタ磁場を形成させ、負イオン生成効率を最適化するための電源である。

(1) 基本構成

両電源は、絶縁変圧器、サイリスタスイッチ、降圧変圧器、ダイオード整流器、直流フィルタより構成される。

3. 3. 1. 5 イオン源ガス導入系

イオン源ガス導入系の構成は第3. 2. 6. 1-1図中に示すとおり、配管を5系統に分岐し、それぞれが電磁弁及びニードル弁を通った後、再度一系統に合流している。各系統のニードル弁を調整して、系統毎の流量比が $1:2:4:8:16$ となるよう設定してあり、開とする電磁弁の組合せを変化させることにより流量を調整する方式である。最大流量は当初、 $20\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ であったが、現在は $4.65\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ に設定している。

供給ガスは重水素又は水素であり、高電位テーブル内に設置されているガス集合装置のガス種選択用電磁弁により選択される。

3. 3. 2 引出電源

引出電源はプラズマ電極と引出電極に負の電界を与え、ソースプラズマから負イオン（電子も含む）を引出すための電源である。

(1) 基本構成

引出電源は、絶縁変圧器、サイリスタスイッチ、直流発生装置、直流フィルタ、直流スイッチ、分圧器、接地装置、非線形抵抗より構成され、イオン源 U、L に対応して計2式より成る。

(2) 基本性能

a) 負荷パルス中の受電電力変動に対して、出力電圧変動率は $\pm 2.5\%$ 以下である。

b) 高速遮断機能

放電破壊発生時等の出力遮断時間は $100\mu\text{s}$ 以下である。ここで遮断時間とは放電破壊等の発生から電流が定格の 5%以下となるまでの時間で定義する。また、放電破壊発生時のイオン源へのエネルギー流入量は 1J 以下を目標としている。

c) 出力電圧設定分解能 50V

3. 3. 3 加速電源

加速電源は引出された低エネルギーの負イオンビームを最大 500keV まで加速するための電源である。

(1) 基本構成

加速電源は、降圧変圧器、コンバータ、インバータ、直流発生装置、過電圧抑制用コンデンサ、サーボ抑制用リアクトル、出力安定化用模擬負荷抵抗器、分圧器、接地装置、非線形抵抗より構成される。インバータ、直流発生装置は三組設けられ、直流発生装置は直列接続され、接続点より 2 個中間出力が可能である。コンバータは共通に 1 台設けられる。イオン源 U、L 共通に一式である。

(2) 基本性能

a) 出力電圧

加速電源出力 -490kV (単体最大出力 -500kV)

第 1 加速電極出力 最大 -360kV

第 2 加速電極出力 最大 -180kV

b) 出力電流

加速電源出力電流 64A

第 1 加速電極電流容量 20A

第 2 加速電極電流容量 10A

c) 電圧立上げ時間

出力電圧が定常値の 10%～90%に達するまでの立上げ時間 100ms 以下。

d) 電圧変動率

負荷パルス中の受電電力の変動 (電圧 $+7.5\%$ ～ -10.5% 、周波数 77.6Hz～54.2Hz) に対して、出力電圧変動率 $\pm 2.5\%$ 以下。

e) 高速遮断機能

放電破壊発生時等のインバータ出力遮断時間 $200\mu\text{s}$ 以下。

f) 出力電圧設定分解能 1 kV。

ドリフト 3% 以下 (1 時間繰返し運転中)

g) デューティ 1/60 以下

最短繰返し周期 30 秒

パルス幅 10ms～10sec

h) 出力電圧の調整はコンバータの位相角制御及びインバータのパルス幅制御により行う。各

段の電源は独立に半固定式で制御可能とし、一段あたり最大 180kV の出力が可能である。

i) 電流遮断時の過電圧抑制

引出部の放電破壊等により加速電源の出力電流が遮断された場合、直流発生装置変圧器巻線の漏れリアクタンスに蓄えられたエネルギーにより出力過電圧が発生する。この過電圧を抑制するため出力端に過電圧抑制用コンデンサ $0.36 \mu F$ を設ける。同コンデンサには放電破壊時のイオン源へのエネルギー流入を抑えるため抵抗 164Ω が直列に接続される。

j) 配線方式

加速電源出力は第 1 加速電極出力及び第 2 加速電極出力、それにソース電源用絶縁変圧器二次出力とともに SF_6 ガスダクトを通して実験棟組立室に入り、 SF_6 ガスダクトを出た後にサージ抑制用リアクトルを通して高電位テーブルに接続される。第 1 加速電極出力及び第 2 加速電極出力は SF_6 ガスダクトを出た後に保護抵抗を通した後、二分割してイオン源 U、L の各電極に接続される。保護抵抗は、組立室内と電源室内に設置され、放電破壊時の電流を $1kA$ 以下にするよう、第 1 加速電極用が 400Ω 、第 2 加速電極用が 300Ω の抵抗値である。

3. 3. 4 SF_6 ガスダクト、高電位テーブル

(1) SF_6 ガスダクト

SF_6 ガスダクトは 3 軸構造とし、3 本の内管はそれぞれ加速電源出力、第 1 加速電極出力、第 2 加速電極出力の導体を兼ね、外管より絶縁支持される。外管は加速電源の戻りラインを構成し、建家より絶縁支持される。ソース電源用絶縁変圧器の二次出力ケーブルは加速電源出力内管の内側を通して配線される。 SF_6 ガスダクトの断面図を第 3. 3. 4-1 図に示す。

実験棟本体室の壁貫通部は放射線遮蔽のため、迷路構造とし、中性子の減衰率は 7×10^{-6} 以上とした。

(2) 高電位テーブル

負イオン生成部電源及び引出電源は、加速電源の出力電位上に浮いた状態で使用されるため、 $500kV$ 以上の十分な対地絶縁能力を持つ高電位テーブル上に収納される。

高電位テーブル上の機器用電力はソース電源用絶縁変圧器により SF_6 ガスダクトを通して供給される。この電力は高電位テーブル上で降圧され、低压分電盤を介して各機器に供給される。

高電位テーブルにはイオン源 U、L の各プラズマ電極の電位となるプレートを設け、各電源は U、L 每に各プレートに電位固定される。高電位テーブルからイオン源へのすべての配線は、サージブロッカを貫通させる。イオン源と電源間の配線図を第 3. 3. 4-2 図に示す。

イオン源のセシウム導入装置の遠隔制御用現場盤も高電位テーブル上に設置されている。

3. 3. 5 サージ抑制機能

サージ抑制はイオン源での放電破壊時に流入するサージ電流を抑制することにより、イオン源及び電源の保護を行うものであり、サージブロッカ、及びサージ抑制用リアクトルより構成される。サージ電流抑制用リアクトルは、サージブロッカが大型化するのを防ぐために、加速電源及

びソース電源の各電源出力に挿入するものである。

(1) サージプロッカ

サージプロッカは、高電位テーブルの各電源からイオン源への給電用ケーブルを貫通させることにより、イオン源での高電圧放電破壊発生時のサージ電流を抑制するために設置される。磁性材として、新素材のファインメットコアを用い、2次回路に 600Ω の電流抑制用抵抗、 $1mH$ のバイアス回路用リアクトルを設置している。

a) 構成

ファインメットコア $\phi 900 - \phi 500 \times 25.4\text{mm}$ 30枚重ね

b) 性能

ピーク電流 1kA 以下、エネルギー 6J ($\text{Varc}=100\text{V}$ 一定と仮定) 以下を目標とした。

c) 磁気特性

最大動作磁束量 $8.93\sim9.83\text{mWb}$

リセット磁化力 23A/m

バイアス電流 114A

(2) サージ抑制リアクトル

加速電源出力、ソース電源用絶縁変圧器二次側の、電源室の送出し部と高電位テーブル上の受け部にそれぞれ2台ずつ、 $3mH$ のリアクトルを設置している。

3. 3. 6 偏向コイル電源

偏向コイル電源は、中性化セルを通過したビームについて、中性ビームから正及び負イオンビームを分離するために使用する偏向磁場コイル用の励磁電流を供給するものである。加速電圧に応じてコイル電流を変化させ、磁場強度を変化させて運転する。また、プラズマ放電中に変化する漏洩磁場に対して偏向コイルの発生磁場強度を制御し、偏向磁場一定制御を行う。さらにイオンダンプの熱負荷を低減するために、 2Hz の正弦波成分を重畠することも可能である。

(1) 基本構成

偏向コイル電源は、降圧変圧器、サイリタ変換器、直流フィルタ、限流抵抗などから構成されている。

(2) 基本性能

a) 負荷

負荷は空心の偏向コイルであり、抵抗値は $460\text{m}\Omega$ 、インダクタンス値は 80mH である。

b) 定常状態での電流リップルは $\pm 2\%$ 以下とした。また、設定値に対する差は $\pm 2\%$ 以下とした。

c) 立上がり、立下がり時間は1秒以下である。ただし、ここでの立上がり時間は通電開始から設定値の $\pm 2\%$ 以内の範囲に入るまでの時間である。

d) 制御方式は、第3. 5. 2項に示すとおりである。

3. 3. 7 受配電設備

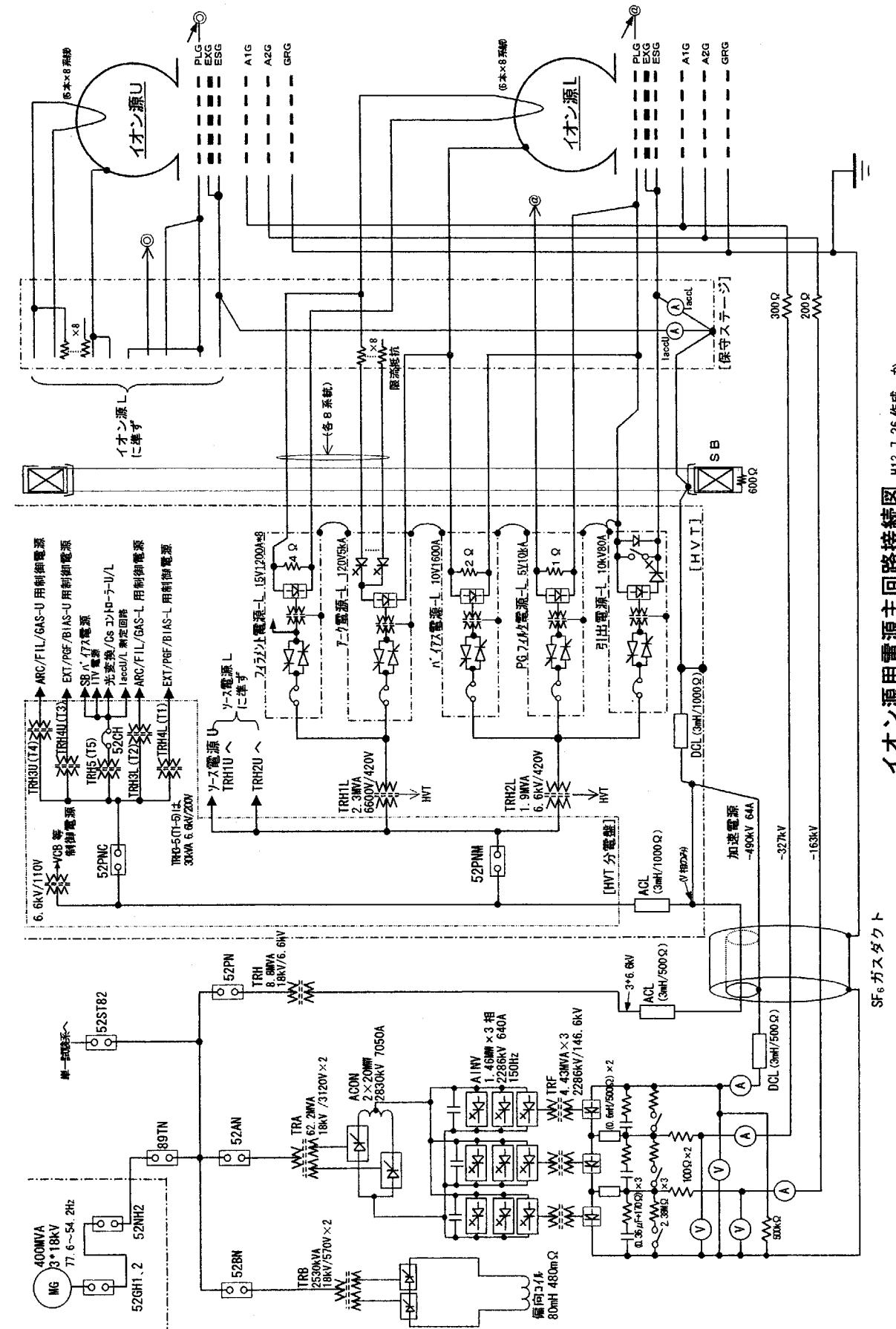
受配電設備は変動系受配電設備と常用系受配電設備から構成される。

(1) 変動系受配電設備

変動系受配電設備は JT-60 加熱用発電設備の N-NBI 用遮断器から、18kV の電力を受電し、特別高圧閉鎖配電盤により、加速電源、ソース電源(負イオン生成部、引出部電源)、偏向コイル電源に配電する。また、試験調整用運転などの際、加熱用発電設備を使用しないで運転できるように、単一試験系受配電設備と呼ぶ商用系からの受電も可能となっている。

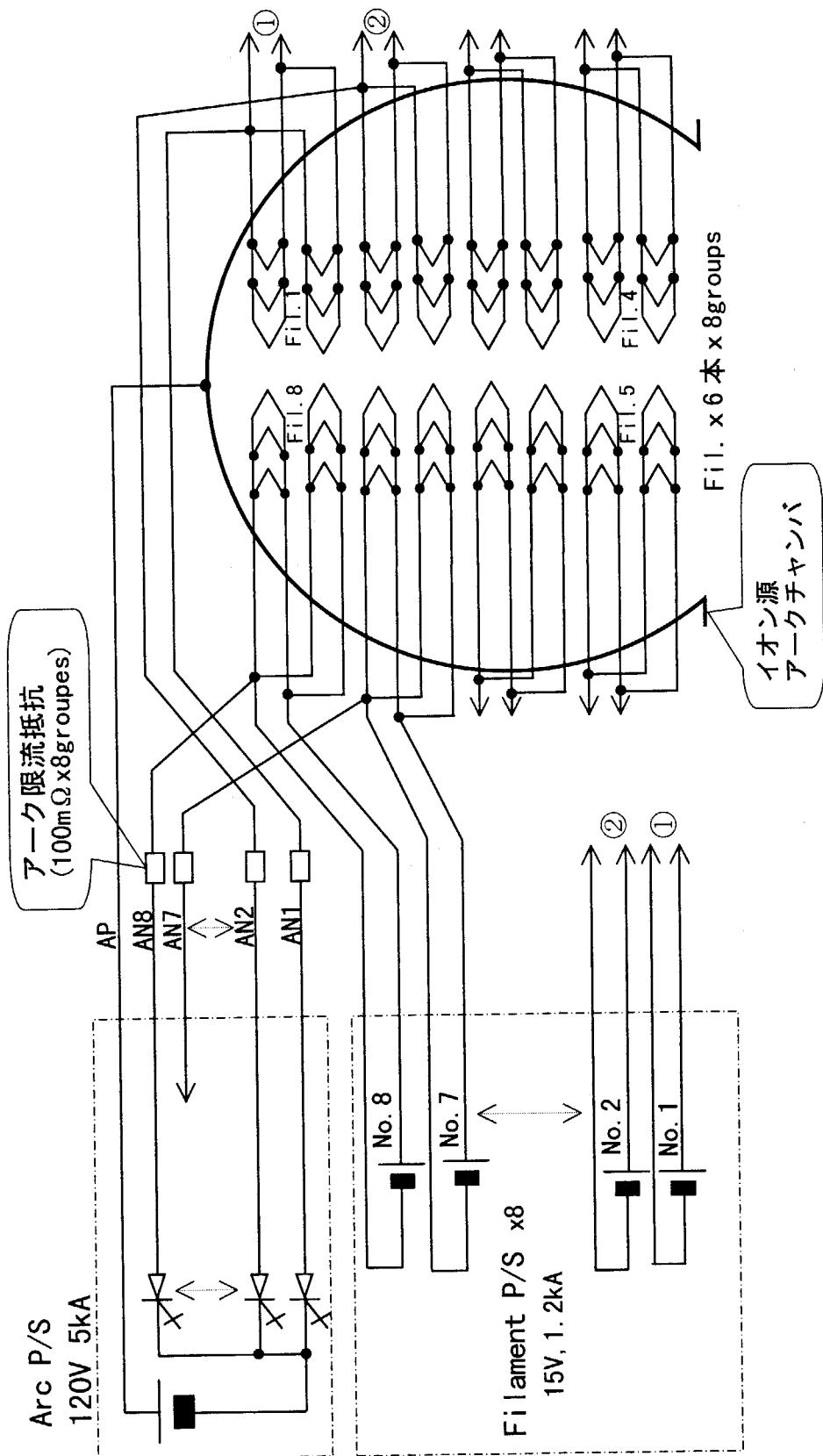
(2) 定常系受配電設備

定常系受配電設備は JT-60 操作用配電設備から低圧(420V)電力を受電し、N-NBI 装置構成設備の低圧動力用電力及び制御用電力を供給するものである。

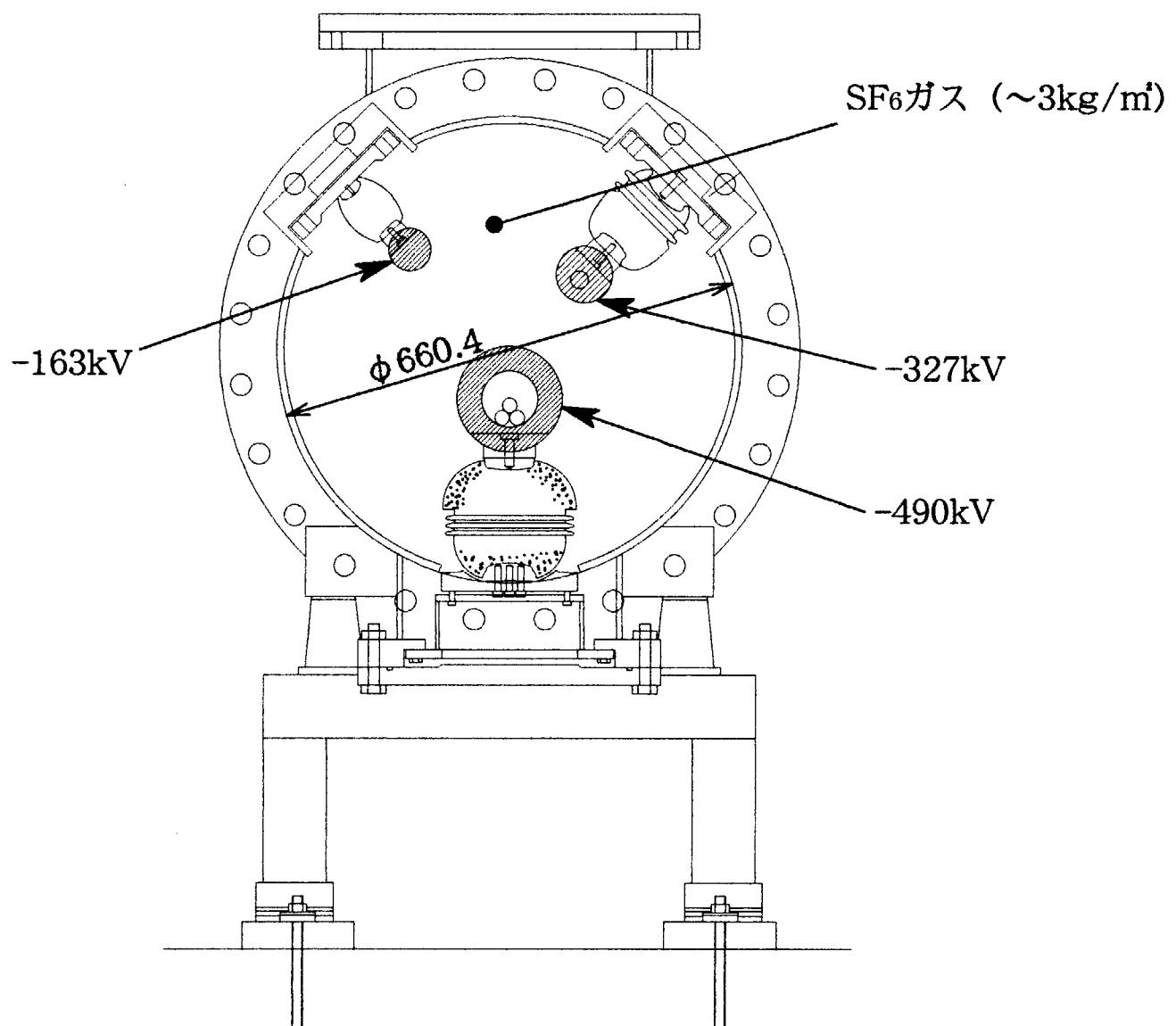


イオノン源用電源主回路接続図 1113.7.26 作成 か

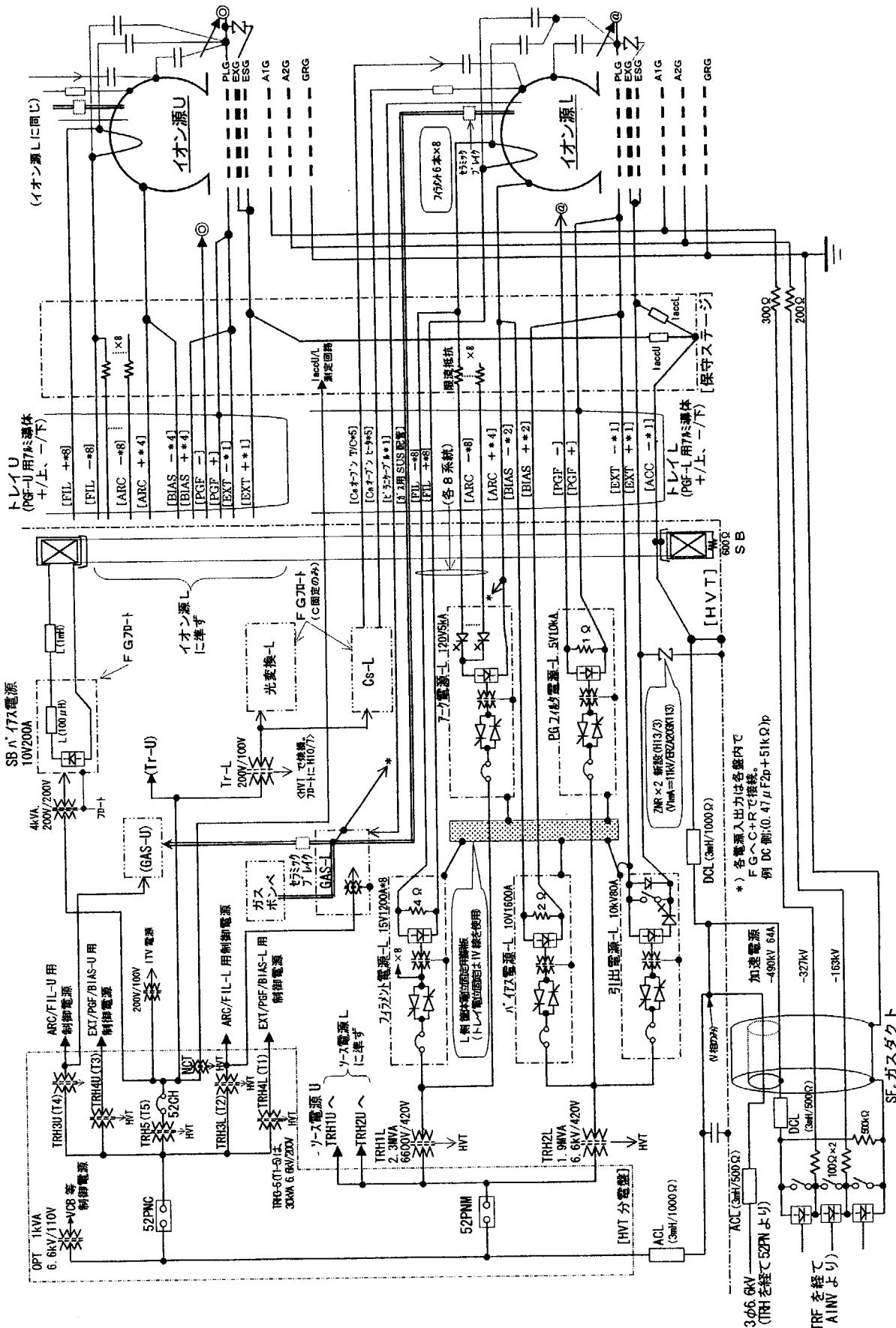
第3.3.1-1 図 イオシン源用電源主回路接続図



第3. 3. 1-2図 フィラメント電源とイオン源／アーキ電源との関係



第3.3.4-1図 SF₆ガスダクト断面図



第3.3.4-2図 イオン源-電源間配線図

3. 4 極機設備

3. 4. 1 1次冷却系

1次冷却系は、ビームラインやイオン源の各受熱機器を冷却するビームライン冷却系及び電源系設備の一部を冷却する電源冷却系で構成される。系統図を第3. 4. 1-1図に示す。

ビームライン冷却系は、既設ビームライン循環系から分岐し被冷却機器へ冷却水を供給する。

電源冷却系は、正イオン NBI 用の RV 循環系(II)から分岐し被冷却機器へ冷却水を供給する。

3. 4. 1. 1 ビームライン冷却系

ビームライン冷却系は、正イオン NBI 装置 #9、10 用の冷却系配管の分岐部より、ビームライン及びイオン源に冷却水を供給する。イオン源ヘッダとイオン源間のシンフレックスチューブの長さは、水の電気伝導度より 7 m とした。

(1) 冷却対象機器

a) イオン源全体の最大設計熱負荷は $1\text{MW} \times 10\text{s}$ で、各部の冷却水流量は次のとおりである。

	項目	設計流量	実流量	計器 No.
負イオン 生成部	アークチャンバ (ARC)	200(l/min)	145	FIS-22U、L
	フィラメント電流導入端子 (FIL)	16	20	FIS-24U、L
引出部	プラズマ電極支持枠 (PGF)	40	不使用	FIS-26U、L
	引出電極 (EXG)	200	165	FIS-28U、L
加速部	電子抑制電極 (ESG)	30	EXG と一体化のため削除	
	第 1 加速電極 (A1G)	216	180	FIS-32U、L
	第 2 加速電極 (A2G)	216	180	FIS-34U、L
	接地電極 (GRG)	216	200	FIS-36U、L
	接地電極支持枠 (GGF)	20	同左	FIS-38U、L

注)1998(平成 10)年 1 月に、ESG はイオン源内で EXG と同一電位、一体構造に改造したため、冷却水ヘッダとの取合いは不要となった。

b) ビームライン各機器の冷却水流量、最大設計熱負荷は次のとおりである。

	項目	設計最大熱負荷	設計流量	実流量	計器 No.
イオン源 タンク部	ビームスクレイパ		30(l/min)	同左	FIS-52
	第 1 ビームリミタ		30	同左	FIS-56
中性化セル 部	中性化セル U	$0.6\text{MW} \times 10\text{s}$	150	160	FIS-62
	中性化セル L	$0.6\text{MW} \times 10\text{s}$	150	160	FIS-64
イオンダン プタンク部	第 2 ビームリミタ		30	40	FIS-74
	イオンダンプ右	$4.2\text{MW} \times 10\text{s}$	2000	同左	FIS-70
	イオンダンプ左	$4.2\text{MW} \times 10\text{s}$	2000	同左	FIS-68
	カロリメータ	$10\text{MW} \times 1\text{s}$	600	400	FIS-72
	第 3 ビームリミタ		30	80	FIS-76
	偏向コイル	$0.6\text{MW} \times 2 \times 13\text{s}$	90	同左	FIS-66
NBI ポート 部	ゲート弁絶縁リング部		30	同左	FIS-78
	ポート絶縁部		30	同左	FIS-80

注)2001(平成 13)年現在、第 2 ビームリミタは $40\text{l}/\text{min}$ に、第 3 ビームリミタは改造が
あつたため、 $80\text{l}/\text{min}$ に増量した。

2. 偏向コイルは上下一対のコイルで、ホロー導体通電時の発熱を想定したもの。

(2) 通水モード

a) 定常運転

被冷却機器に(1)項に示す定格流量を供給する運転であり、機器入口圧力は、 $10\text{kg/cm}^2\text{ G}$ である。

b) 凍結防止運転

クライオポンプからの放射冷却による被冷却機器の配管内凍結を防止するために、定格流量の数%の流量を供給する運転である。

(3) ヘッダ

ヘッダは、イオン源系ヘッダ U、同 L、イオン源タンク系ヘッダ及びイオンダンプタンク系ヘッダによって構成され、冷却水は各ヘッダから、イオン源 U 及び L、イオン源タンク内機器及びイオンダンプタンク内機器と一部 NBI ポートへ各々供給される。

イオン源系ヘッダの電極及びアークチャンバ系統については、各系統毎にマニホールドを介して、電極については 5 本 (5 セグメントに対応)、アークチャンバについては 4 本 (4 分割/イオン源) にそれぞれ分岐し、その他の系統は 1 本にて、シンフレックスチューブ ($\sim 7\text{m}$) を通してイオン源に接続する。

(4) 計測制御

1 次冷却系計装盤の水温差計測信号を第 3. 4. 1 - 1 表に示す。

(5) 正イオン NBI との同時運転

文献 1) の設計検討では、N-NBI ビームライン循環系を通水する場合、正イオン NBI の 14 ユニットのうち、2 ユニットを停止する必要がある、としていたが、N-NBI と正イオン NBI の 14 ユニット同時運転が可能であった。これは、N-NBI ビームライン冷却系の必要流量が $458\text{m}^3/\text{h}$ であり、正イオン NBI14 ユニットの必要流量が $3,080\text{m}^3/\text{h}$ で、合計 $3,540\text{m}^3/\text{h}$ と、ポンプ 3 台の供給可能流量以下で、バイパス流量が多量にあったのを振替して解決できたためである。

3. 4. 1. 2 電源冷却系

電源冷却系は、正イオン NBI 装置冷却系の RV 循環系 (II) の入口配管より分岐し、電源系設備の加速電源インバータに冷却水を供給する。最大設計熱負荷は $1.1\text{MW} \times 10\text{s}$ 、冷却水流量は $1,500\text{l/min}$ 、機器入口圧力： $5\text{kg/cm}^2\text{ G}$ である。

3. 4. 2 補助真空排気系

補助真空排気系（以下、補助排気系と言う。）は、イオン源タンク及びイオンダンプタンク内部を大気圧からクライオポンプの作動領域（約 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 以下）にまで排気すること、及び両タンク内のクライオポンプ再生時にクライオパネル面から放出される重水素又は水素ガスを安全かつ円滑に排気すること、さらにクライオポンプを使用しないで、補助排気系だけの排気のみで、短パルスのビーム加速運転もできることを目的としている。補助排気系系統図を第 3. 4. 2 - 1 図に示す。

(1) 被排気容器の種類、容積は、次のとおりである。

・イオン源	-----約 $3\text{m}^3 \times 2$
・イオンダンプタンク部	-----約 34m^3
・イオン源タンク部	-----約 46m^3
・中性化セル部	-----約 10m^3

これら容器は、それぞれの間に真空的仕切りがないため、四者を同時に排気する。

(2) 粗引系と TMP 排気系は既設の正イオン NBI 用の設備を配管追加により改造して使用し、TMP 排気系を新規製作した。TMP は、当初イオン源タンク部のみに 4 台が設置され、その後、イオンダンプタンクにも 2 台が追加設置され、合計 6 台である。

N-NBI 単独で大気から排気する場合の概略所要時間は次のとおりである。

- ①数 Pa に達し、TMP 排気開始可能となるまでの時間：1.5～2 時間
- ② 10^{-1}Pa 以下となるまでの時間：2～3 時間

3. 4. 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設置さ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、正イオン NBI 装置の冷媒循環系の中の一部として運転される。

(1) 配管系、トランスファーライン

液体ヘリウムトランスファーラインは、正イオン NBI 装置冷媒循環系閉ループより分岐し、イオン源タンク、イオンダンプタンク近辺の取合口までを接続する。

液体窒素トランスファーラインは、正イオン NBI 装置冷媒循環系開ループより分岐する。イオン源タンク、イオンダンプタンク近辺の取合口までの液体窒素ラインは、液体ヘリウムトランスファーラインのシールドの役割も兼ねる構造とする。

第 3. 4. 3-1 図に配管関係の系統図を示す。

(2) 正イオン NBI との同時運転

文献 1)の設計検討では、N-NBI の 2 基のクライオポンプを運転する場合、正イオン NBI の 14 ユニットのうち、2～4 ユニットを停止する必要がある、としていたが、N-NBI と正イオン NBI の 14 ユニット同時運転が可能であった。これは、従来の正イオン NBI 14 ユニットの運転に比べ、予冷運転に要する時間を長くした ($\sim 17\text{H} \rightarrow \sim 23$ 時間) こと、及びヘリウムを液化する工程の供給ガス量を増大した ($12\text{kg/cm}^2 \rightarrow 14\text{kg/cm}^2$) ことにより、解決できたためである。

(3) クライオ予冷運転処要時間

常温から予冷開始し、定常となるまでの所要時間は概略次のとおりである。

- ①クライオ予冷開始から、クライオ定常となるまでの時間： ~ 20 時間

第3.4.1-1表 1次冷却系計装盤水温差信号一覧

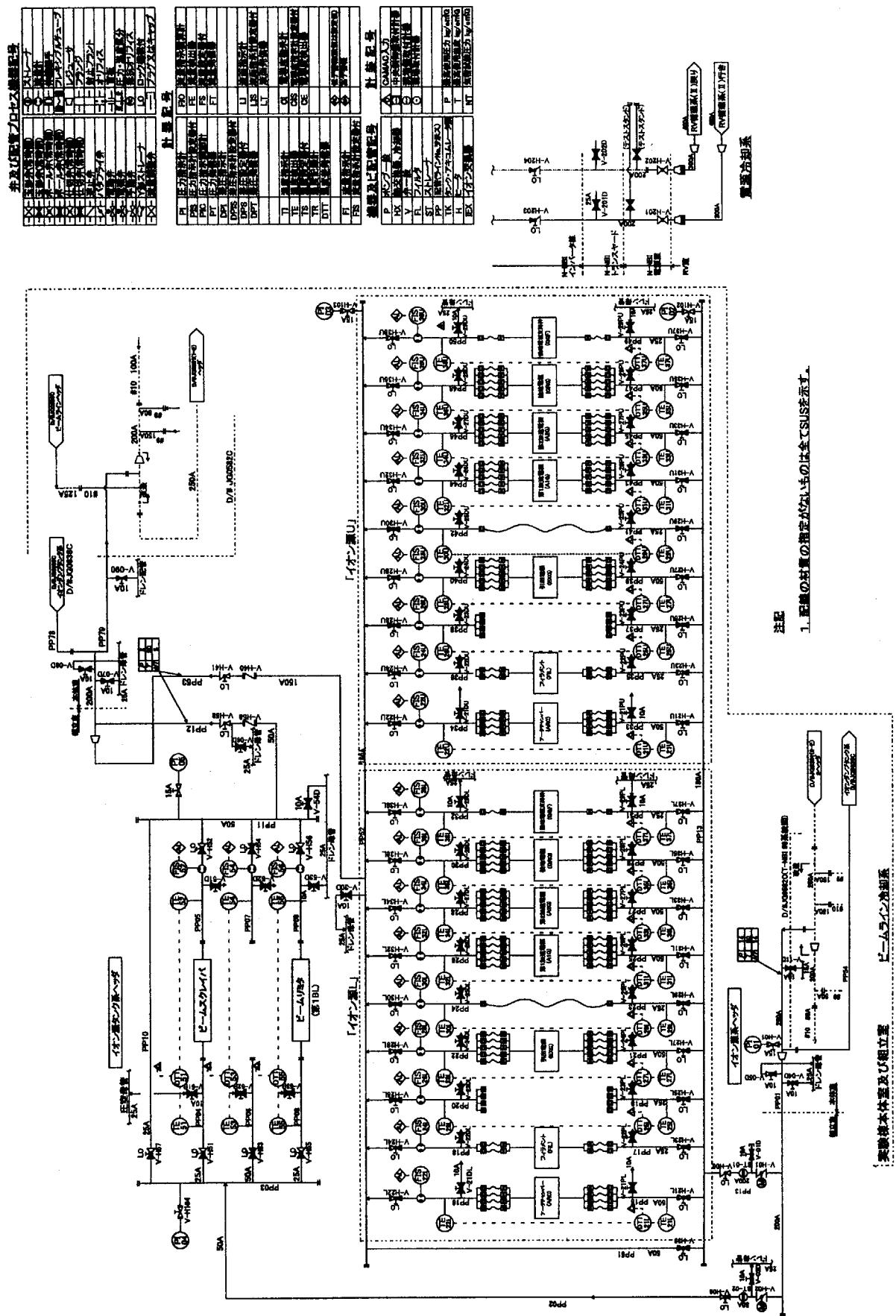
H13.7.06 現在

系 統	Tag. No.	計 装 盤	初期換算比	現状換算比	備 考
ARC U	DTT21U	組立室 LP-W2	±5°C/10V	同 左	
EXG U	DTT27U			同 左	注
ESG U	DTT29U			同 左	不使用
A1G U	DTT31U			同 左	
A2G U	DTT33U			±10°C/±10V	
GRG U	DTT35U			±10°C/±10V	
GGF U	DTT37U			同 左	
ARC L	DTT21L			同 左	
EXG L	DTT27L			同 左	注
ESG L	DTT29L			同 左	不使用
A1G L	DTT31L			同 左	
A2G L	DTT33L			±10°C/±10V	
GRG L	DTT35L			±10°C/±10V	
GGF L	DTT37L	▼		同 左	
ビームスクレイパ	DTT51			同 左	
第1ビームリミタ	DTT55	組立室 LP-W2		±10°C/±10V	
中性化セル U	DTT61	本体室 LP-W4		同 左	
中性化セル L	DTT63	▼		同 左	
イオンダンプ 右	DTT69			同 左	
イオンダンプ 左	DTT67			同 左	
カロリメータ	DTT71	▼	▼	同 左	
第2ビームリミタ	DTT73			±10°C/±10V	
第3ビームリミタ	DTT75	本体室 LP-W4	±5°C/10V	±20°C/±10V	

注)EXG はイオン源内で ESG と一体化しているので実際は EXG+ESG の水温差である。

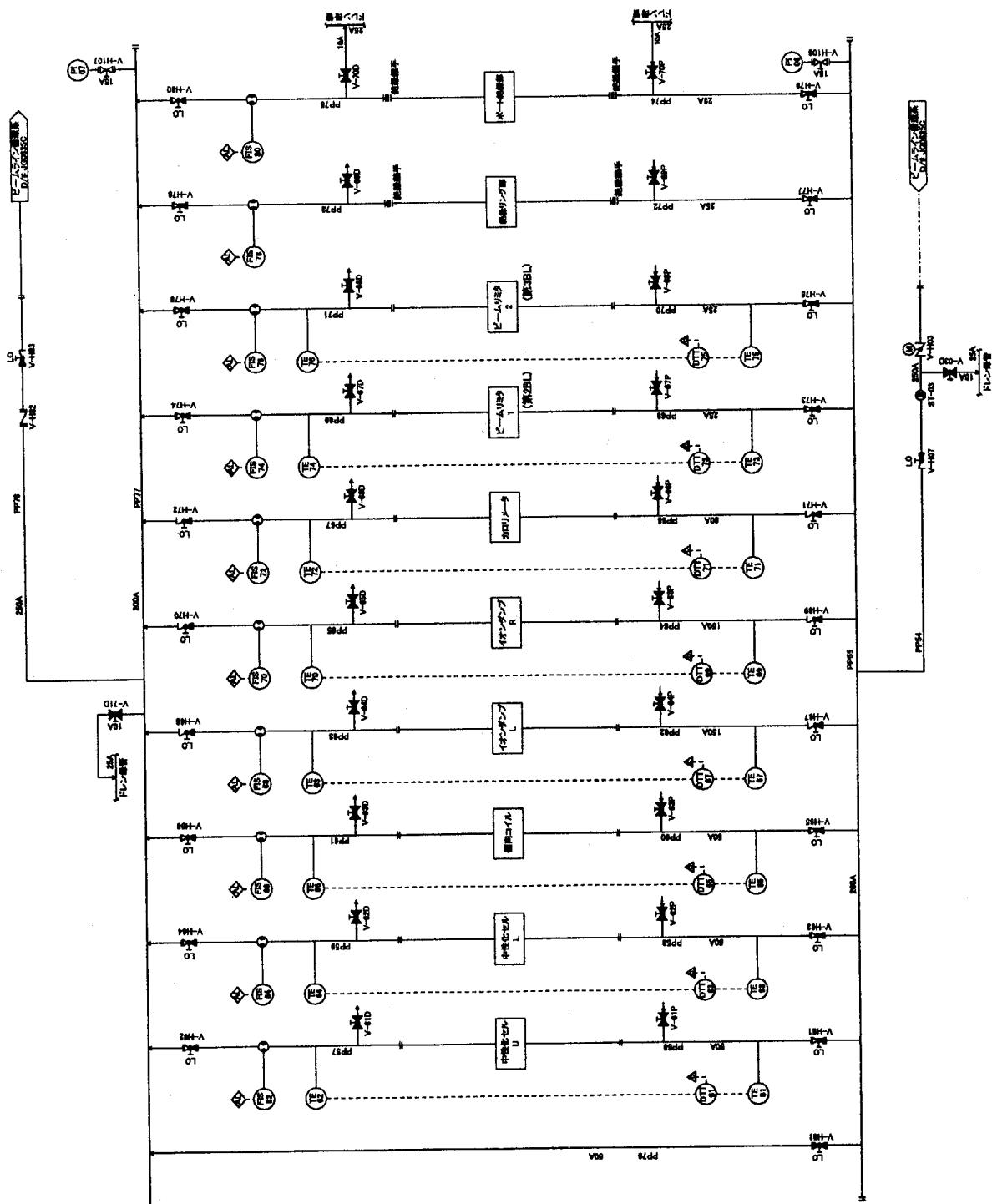
関連 H12.4.11 : 第2、第3ビームリミタの流量 30l/min から 40l/min に変更。

H13.2 : 第3ビームリミタの流量 40l/min から 80l/min に変更。

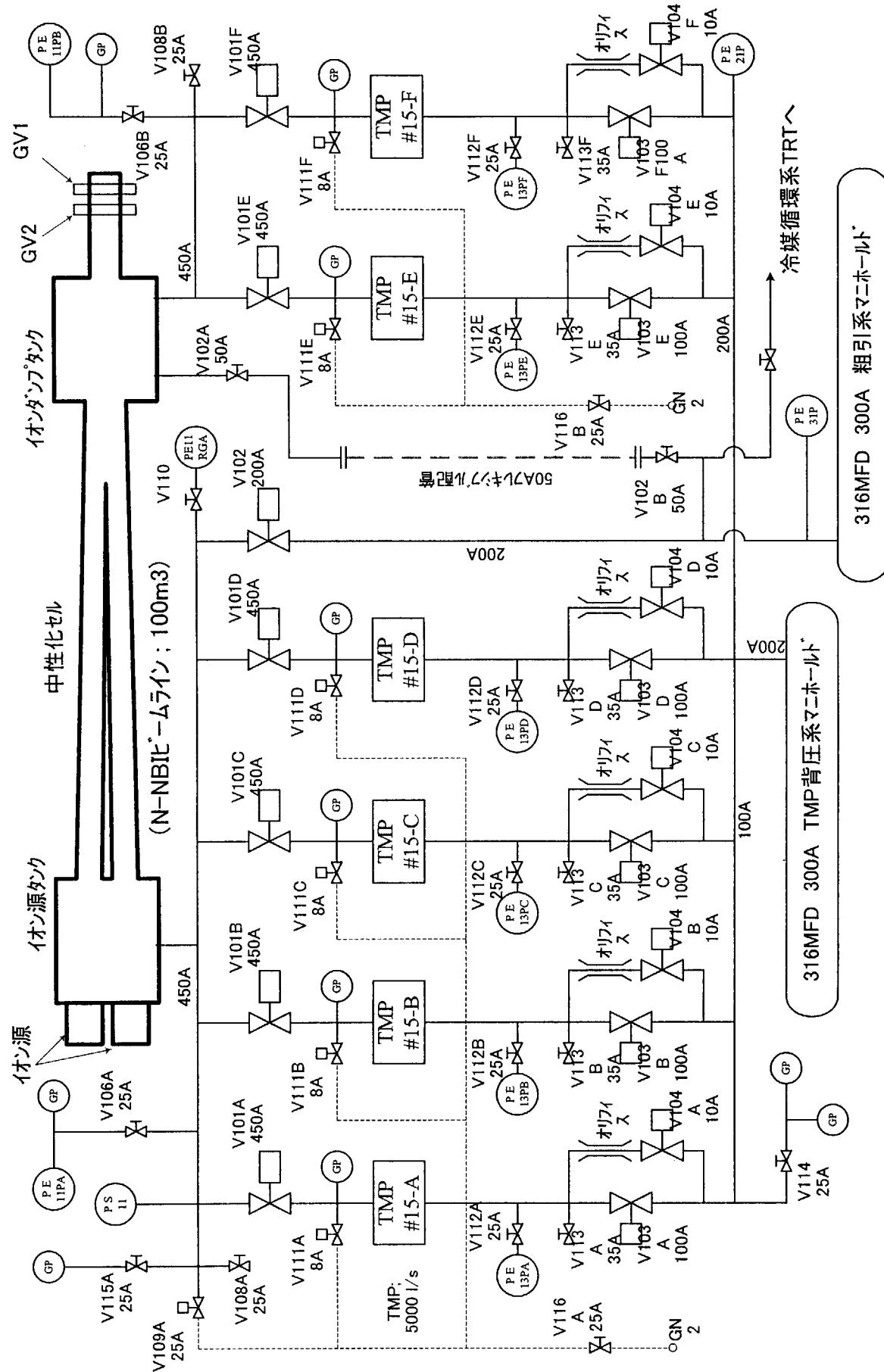


半及び記録プロセス登録記号		計器記号		計器記号		計器記号	
○	ストレーブ	PJ	ガバナ計	PQ	電流計	PI	CAN入力
○	リモコン	PIS	電圧表示計	PS	電圧出力	IV	CAN出力
○	リモコン	PIC	電圧表示計	PT	電流出力	V	変送器
○	リモコン	DPI	電流表示計	U	電圧表示計	F	フルダ
○	リモコン	DPS	電圧表示計	US	電流表示計	ST	スループー
○	リモコン	DET	電圧表示計	UT	電流表示計	PP	回路モニタ
○	リモコン	DIT	電圧表示計	CI	電流表示計	TR	トランジスター
○	リモコン	FI	電流表示計	GS	電圧表示計	FL	アクチュエータ
○	リモコン	TE	電流表示計	GT	電流表示計	EX	エクスパンション
○	リモコン	TS	電流表示計	GR	電流表示計	H	ヒューズ
○	リモコン	TR	電流表示計	GD	電流表示計	EX	エクスパンション
○	リモコン	DIT	電流表示計	GD	電流表示計	EX	エクスパンション
○	リモコン	FI	電流表示計	GD	電流表示計	EX	エクスパンション

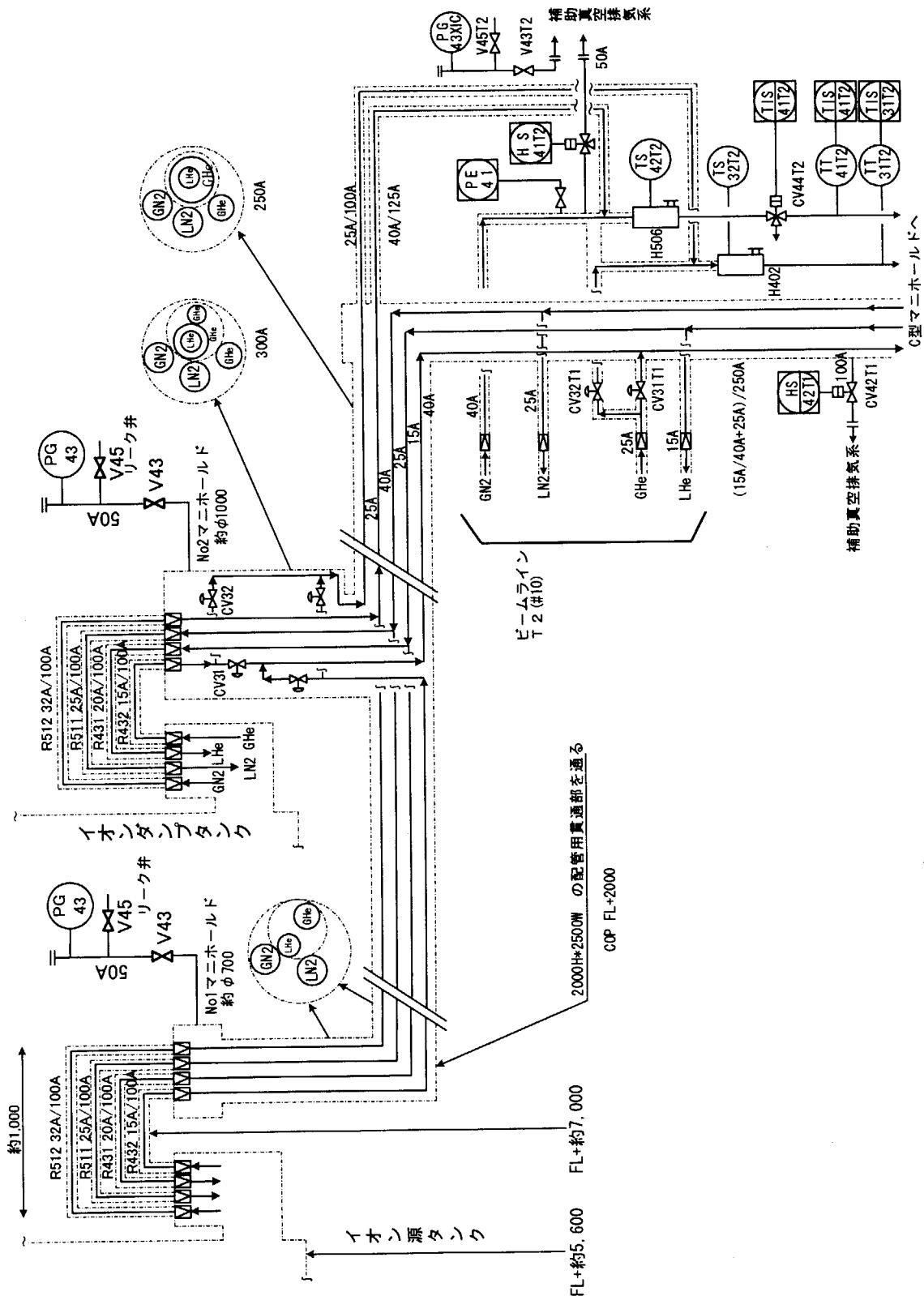
1. 正確の計算の結果が正しいものは全てSUSを示す。



第3.4.1-2 図



第3. 4. 2-1図 溶助真空排気系統図



第3. 4. 3-1 図 冷媒循環系系統図

3. 5 制御系

本制御系は、N-NBI 装置の電源系（受配電設備、イオン源用電源）及びビームライン系（ビームライン機器、1 次冷却系、補助真空排気系、冷媒循環系）の運転制御を統括管理するための設備である。

本制御系は、第 3. 5. 1-1 図に示すとおり、計算機システム 2)、電源系制御設備、ビームライン系制御設備により構成される。

3. 5. 1 制御系の構成、機能

(1) 計算機システム

本システムは、ワークステーション 2 台とその周辺機器（プリンタなど）、データ収集盤（制御室用、本体室用、液化機室用）により構成する。

a) ワークステーションのうち、1 台は主に、オフラインで過去のショットデータの保存、再表示などを行うデータ処理機能を受け持つ。残り 1 台は主に、イオン源運転時の設定変更操作や運転／計測データの表示、N-NBI 装置全体の運転監視や JT-60 全系制御設備（全系）計算機システムとのイーサネットを介した交信などの機能を受け持つ。各ワークステーションは、イーサネットにより、N-NBI 内のデータ収集盤、電源系制御盤内のプログラマブルコントローラ（PLC）、タイミング制御装置（TSC）との交信の他、全系制御設備との交信機能を持っている。

b) データ収集盤は、VME バスシステムにより構成される。このうち、制御室データ収集盤は、JT-60 制御棟中央制御室に設置され、主にイオン源用電源からの計測データの高速収集とビームライン系からの運転状態／警報データを収集する機能及び計算機システムや電源系制御盤との交信機能を持つ。本体室データ収集盤は、JT-60 実験棟 PIG 電源室に設置され、液化機室データ収集盤と光ファイバケーブルで接続され、主にビームライン受熱機器の温度や冷却水温差などの計測データの低速収集と温度高や冷却水流量低などの警報データを収集する機能を持つ。液化機室データ収集盤は、JT-60 実験棟 He 液化機室 II に設置され、真空度などの計測データの低速収集する機能を持つ。

(2) 電源系制御設備

本設備は、電源系制御盤、低圧制御ユニット盤、その他より構成される。電源系制御盤及び低圧制御ユニット盤は、中央制御室に設置され、受配電設備やイオン源用電源の遮断器の入／切等の操作を行う他、ビームライン系制御設備との信号授受、N-NBI 運転モードの管理、イオン源運転時の制御／保護のインターロック機能、タイミング制御の機能などを持つ。また、イオン源用のセシウム導入装置もこれら制御盤から制御される。

(3) ビームライン系制御設備

本設備は、ビームライン系制御盤、受熱部温度監視盤、その他により構成される。ビームライン系制御盤は、中央制御室に設置され、ビームライン系設備の遠隔制御／監視機能の他、必要な信号授受を電源系制御盤との間で行う機能を持つ。また、受熱部温度監視盤は、JT-60 実験棟本

体室に設置され、ビームライン受熱機器の温度を監視し、警報出力機能の他、1点毎の計測データを本体室データ収集盤に出力する機能を持つ。

(4) 正イオン NBI との同時運転

文献 1)の設計報告では、N-NBI と正イオン NBI を同時運転する場合、正イオン NBI の最大運転ユニット数は 12 に制限する、とした。この理由のひとつであった、1 次冷却系や冷媒循環系の能力不足は第 3. 4 節で述べたように解決し、これらの全ユニット同時運転は可能になった。しかし、もう一つの理由である実験棟本体室の放射線遮蔽能力の条件(中性粒子加熱パワー最大値: 44MW) は不变のため、同時運転時の正イオン NBI の最大ユニット数は 12 のままである。このために、正イオン NBI のイオン源運転ユニット数が 13 以上である場合、N-NBI のイオン源運転のタームシーケンスを停止とするインターロックを追加して対処した。

3. 5. 2 電源系制御設備

(1) 運転機能

a) 運転モードの管理

N-NBI 運転モードは、第 3. 5. 2-1 図に示すとおりで、各モード中の運転内容、モード間の移行ルートも図中に示すとおりである。

b) タイムシーケンス

各タイミング設定値の詳細を第 3. 5. 2-1 表に、各運転モードにおけるタイムチャートを第 3. 5. 2-2 ~ 3 図に示す。CND、BAA 各運転モードの場合は、N-NBI 単独に最短周期 30 秒、繰返し率 1/60 を超えない範囲で運転を行う。BAA モードの場合は、最大パルス幅を 0.2 秒とし、正イオン NBI と異なり、対向面で上下ビーム軌道が重なることがないため、イオン源 2 台同時の運転も可能とした。INJ モードの場合、全系からの指令に従って、フラッシング(最短周期 30 秒、繰返し率 1/60 など CND モード相当)と実験入射を実行する。

イオン源のビーム加速運転を行うタイムシーケンスとして、加速、引出の各出力をオンした後、アーク出力をオンするアーク立上げ方式と、加速、アークの各出力をオンした後、引出出力をオンする引出立上げ方式の二種がある。これらは、各タイミング設定値を変更することにより選択可能である。通常、アーク立上げ方式を使用している。

c) 電源系の運転

ア. 計算機システムと取合うイオン源用電源出力設定値は、次のとおりである。

加速電源	×1 0~10V/0~-500kV
引出電源	×2 0~10V/0~-10kV
PG フィルタ電源	×2 0~10V/0~10kA
バイアス電源	×2 0~10V/0~10V
アーク電源	×2 0~10V/0~120V
フィラメント電源	×2 0~10V/0~15V
ビームエネルギー	×1 0~10V/0~500keV*

イオン源ガス導入系 ×2 0~10V/0~4.65Pa·m³/sec

中性化セルガス導入系 ×1 0~10V/0~7.75Pa·m³/sec

なお、加速電源の各段電圧比、及び光プロファイルモニタガス導入系の流量は低圧制御ユニット盤からのみ設定可能である。

イ. 偏向コイル電源の運転制御は、次のとおりである。

①必要な偏向コイル電流 I_{dc} は次のとおりである。

$$I_{dc} = I_v - I_{BS} + I_s$$

ここで I_v はビームエネルギー依存成分、 I_{BS} は JT-60U からの漏洩磁場の補正成分、 I_s はビームをスイープするための正弦波電流成分である。

② I_v はビームエネルギー E_B により次式で与えられる。

$$I_v = K_A \times \sqrt{E_B}$$

ここで、定数 K_A は計算機システムの定数テーブルの値で設定し、 E_B は引出電圧設定値 U 、 L の平均値と加速出力電圧設定値の和を NBI 計算機が求め、出力する値である。

③ I_{BS} は JT-60U からの漏洩磁場 B_s により次式で与えられる。

$$I_{BS} = K_B \times B_s$$

ここで、定数 K_B は低圧制御ユニット盤で設定する値であり、漏洩磁場 B_s は正イオン NBI 装置 #13 ユニットの計測値を分岐して用いている。

④ I_s は周波数 2Hz の正弦波電流成分であり、振幅は低圧制御ユニット盤で設定可能であり、最大電流振幅は 300A である。

(2) 保護機能

a) 電極間放電破壊時

イオン源の電極間では放電破壊がしばしば発生する。この時、イオン源及び電源を保護するために引出電源、加速電源は以下の動作を行う。

ア. イオン源内放電破壊は、三種類に分類し、その内容は次のとおりである。

・ 加速電源ブレークダウン(BD)

BD項目	検出レベル
Iacc OC	120% 76.8A
Vacc OV	114% -570kV or 110% -550kV
Vacc UV	10% -50kV
Ialg OC	120% ±24A ← Iacc 立上げ時の過渡的超過に要調整
Valg OV	110% -396kV
Valg UV	10% -36kV
Ia2g OC	120% ±12A ← Iacc 立上げ時の過渡的超過に要調整
Va2g OV	110% -198kV
Va2g UV	10% -18kV
Vacc-Va1g UV	10% -16kV
Va1g-Va2g UV	10% -16kV
Vacc-Va2g UV	10% -32kV

・ 引出電源 U、L ブレークダウン(BD)

IextU or L OC	120% 96A
VextU or L UV	10% -1kV

- イ. 放電破壊検出後、加速電源、該当する側の引出電源及びアーク電源の出力を高速遮断し、各電源毎の設定時間（第3. 5. 3-1表の、 T_{4A} 、 T_{1B} 、 T_{2B} ）経過後にそれぞれ自動的に再起動する。
- ウ. 1パルスの間のいずれかのBD積算回数が、許容回数（1～9回可変）に達した場合をカウントアップと呼び、そのパルス中の再起動は行わない。ただし、INJモード中の実験入射時には、一定時間（0.5、1.0、1.5秒間の半固定値）内に許容回数に達したかどうかを監視するようになっている。

b) イオン源内アーキング時

イオン源のアークチャンバ内で、フィラメントのある一部にアーク放電が局所集中してしまう「アーキング」がしばしば発生する。この時、イオン源フィラメントを保護するために、低圧制御ユニット盤、電源系制御盤で次の保護インターロック動作を行う。

ア. アーキング検出

フィラメントの8グループ毎に流れるアーク電流の最大と最小の差を監視し、これが設定レベルを越えた場合をアーキングと判定する。電流差は50～500Aの範囲で設定可能である。

イ. 遮断

アーキング検出時、放電破壊時と同様に、該当するアーク及び引出電源と加速電源の出力を高速遮断する。当初、放電破壊時と同様に、1パルスの間に9回以内の遮断、再立上げが可能であったが、より確実な保護動作とするために1回だけで再立上げ動作を行わないよう改造した。

c) 運転時間超過検出

ア. 電源毎の運転超過時間検出は、各電源盤毎に自身の通電時間を監視する機能である。

イ. 引出電源モニタ値による超過時間検出

引出電源の出力電圧を監視し、定格の10%以上のレベルが運転モードにより異なる設定時間以降も継続した場合、モード毎運転時間超過として、タイムシーケンス停止とする。設定時間は、CND/FLA時には運転設定電圧に応じて、0.6～1.1秒、BAA時には0.26秒、EXINJ時に1.1～10.1秒の各半固定値である。CND/FLA時の設定電圧対運転可能パルス幅の関係を第3. 5. 2-4図に示す。

d) ビームライン機器等の保護

ア. タイムシーケンス停止

イオン源のビーム加速運転中に非標準事態が発生した場合には、これをただちに検出し、高速にビーム遮断させる機能を持つ。このために、非標準事態信号を直接タイミング制御装置へ入力し、タイムシーケンスに従った動作を強制的に停止させて各電源等への運転指令をオフとしてビーム遮断を行う、この動作をタイムシーケンス停止と呼ぶ。

イ. ビーム引出禁止

タイムシーケンス停止の他、シーケンスそのものは停止させずに、加速電源等への運転指令のみをオフする、この動作をビーム引出し禁止と呼ぶ。

ウ. 中性化セルガス圧の監視

イオン源のビーム加速運転中において、加速電圧に応じた中性化セルガス流量が過不足し、

中性化セルガス圧正常がオフとなった場合は、ビーム引出禁止とし、タイムシーケンス停止動作は行わない。

e) 磁場系異常時の保護

磁場系異常信号は、偏向コイル電源異常、ホール素子不調があり、この場合にも高速にタイムシーケンス停止の動作に入る。また、偏向コイル電流値が目標値の±30%（可変）を超えた場合は、シーケンス停止はせずにビーム引出し禁止とする。なお、本異常検出は、当初、偏向磁場モニタ値を監視していたが電流値に変更したものである。

f) TSC の異常検出

ア. タイミング指令の監視

TSC の誤動作の場合にも機器保護できるよう、タイミング指令の出力継続時間を監視し、各運転モードにより異なる設定時間を超えた場合に時間超過として、タイムシーケンス停止させる機能を持つ。設定時間は、CND／FLA 時に 100ms、BAA 時に 50ms である。

g) 実験入射時の保護

全系からの入射開始／中断指令は、正常時には I_p 励起シーケンス開始信号受信後、NBI 停止指令受信までの間、どちらか一方が 10ms 周期で発信されている。これが両方受信できない場合、あるいは I_p 励起シーケンス開始信号受信後一定時間経過以前に入射開始指令が受信された場合には、それぞれ異常として、タイムシーケンス停止を行っている。

第3.5.2-1表 タイミング設定値一覧

No.	項目	名 称	設定範囲	ステップ	有効モード等
1	T_{cycle}	マスタパルス繰返し周期	30~990s	15s	C, B, F
2	T_{1F}	フィラメント遅延時間	100~5800ms	100ms	全
3	T_{1G}	イオン源ガス導入遅延時間	100~9700ms	100ms	全
4	T_{NG}	中性化セルガス導入遅延時間	100~9700ms	100ms	全
5	T_{PG}	PG フィルタ・バイアス遅延時間	100~9700ms	100ms	全
6	T_{1A}	引出・アーク等 SCR 遅延時間	3900~9900ms	100ms	全
7	T_{2A}	アーク GTO 遅延時間	10~990ms	10ms	全
8	T_{3A}	ビーム引出基準時間	500~9900ms	10ms	C, B, F, (E)
9	$T_{4A}U$	アーク休止時間 U	$T_{4A}L+8ms$		全
10	$T_{4A}L$	アーク休止時間 L	70~990ms	10ms	全
11	T_{5A}	ビームパルス幅	10~2000ms	10ms	C, F B; 10~200ms
12	$T_{6A}U$	アーク中断時間 U	10~990ms		E
13	$T_{6A}L$	アーク中断時間 L	10~990ms		E
14	$T_{1B}U$	引出 GTO 遅延時間 U	70.0~999.9ms		0.1ms
15	$T_{1B}L$	引出 GTO 遅延時間 L	70.0~999.9ms		0.1ms
16	T_{2B}	加速コンバータ遅延時間	50~99ms	1ms	全
17	$T_{3B}U$	OFF 時アーク遅延時間 U	1~99ms		1ms
18	$T_{3B}L$	OFF 時アーク遅延時間 L	1~99ms		1ms
19	$T_{4B}U$	OFF 時加速・引出遅延時間 U	1~99ms		1ms
20	$T_{4B}L$	OFF 時加速・引出遅延時間 L	1~99ms		1ms
21	T_{OFF}	フィラメント等停止遅延時間	100~9900ms	100ms	全
22	T_{DC}	偏向コイル遅延時間	100~9900ms	100ms	全
23	T_{1C}	カロリメータ引抜遅延時間	100~900ms	100ms	INJ
24	T_{2C}	カロリメータ差込遅延時間	1000~9000ms	1000ms	INJ
25	T_{1P}	光プロファイルモニタガス導入遅延時間	100~9900ms	100ms	B, E
26	T_{FD}	フランシング開始遅延時間	計算値(1~99s)	1s	INJ
27	T_{OV1}	TSC 運転時間超過検出	計算値	10ms	C, B, F
28	T_{5B}	加速インバータ遅延時間	20~99ms	1ms	全 No. 31~33
31	T_{TP1-3}	トリガパルス発信時間	0.01~99.99s	0.01s	全 No. 34~36
34	T_{TE1-3}	トリガパルス発信時間	0.01~99.99s	0.01s	E

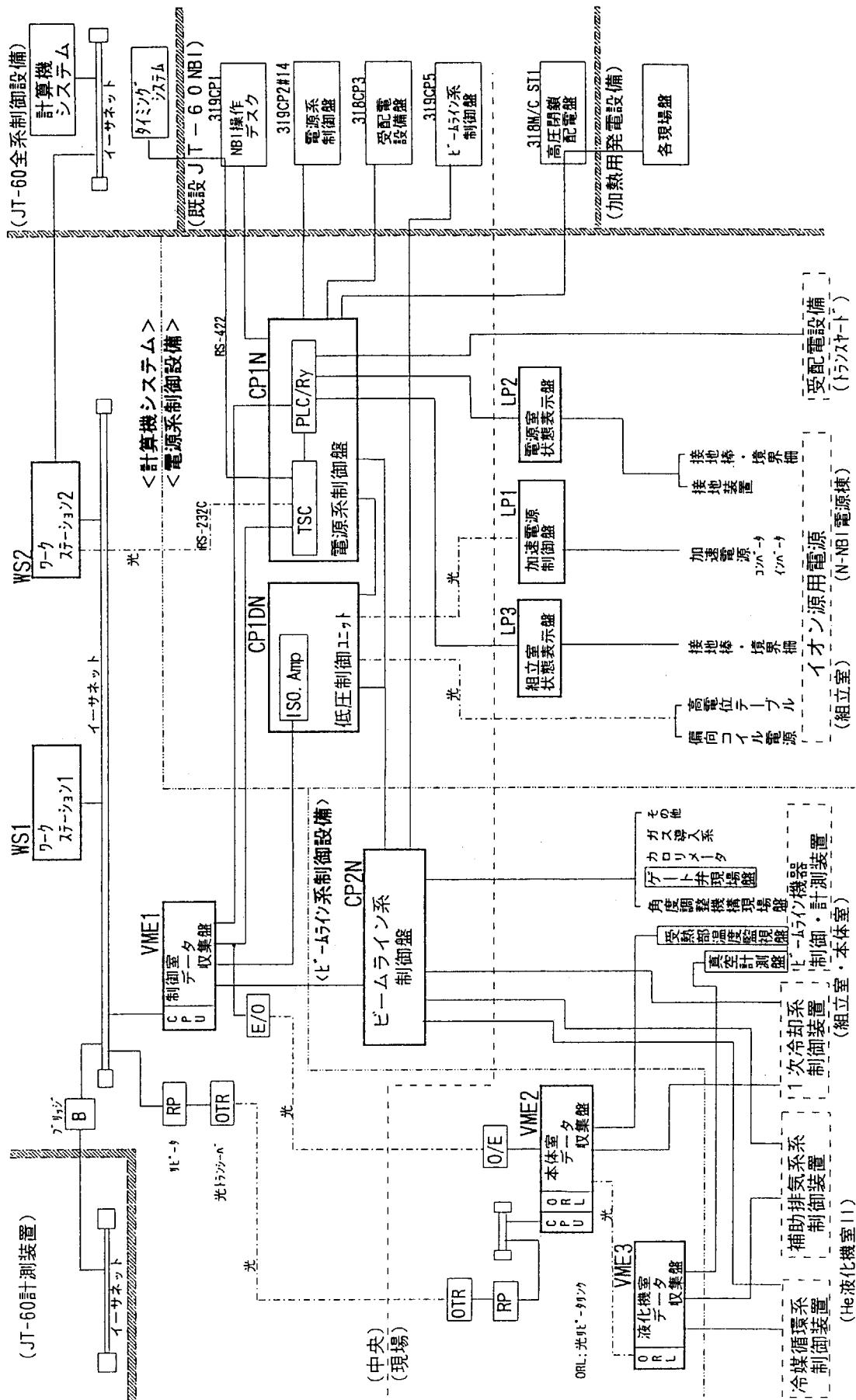
No. 29、30 は欠番

注 1) $T_{FD} = T_{cycle} + (T_{FL} - 11) \bmod T_{cycle}$ (T_{FL} : FLA 所要時間)

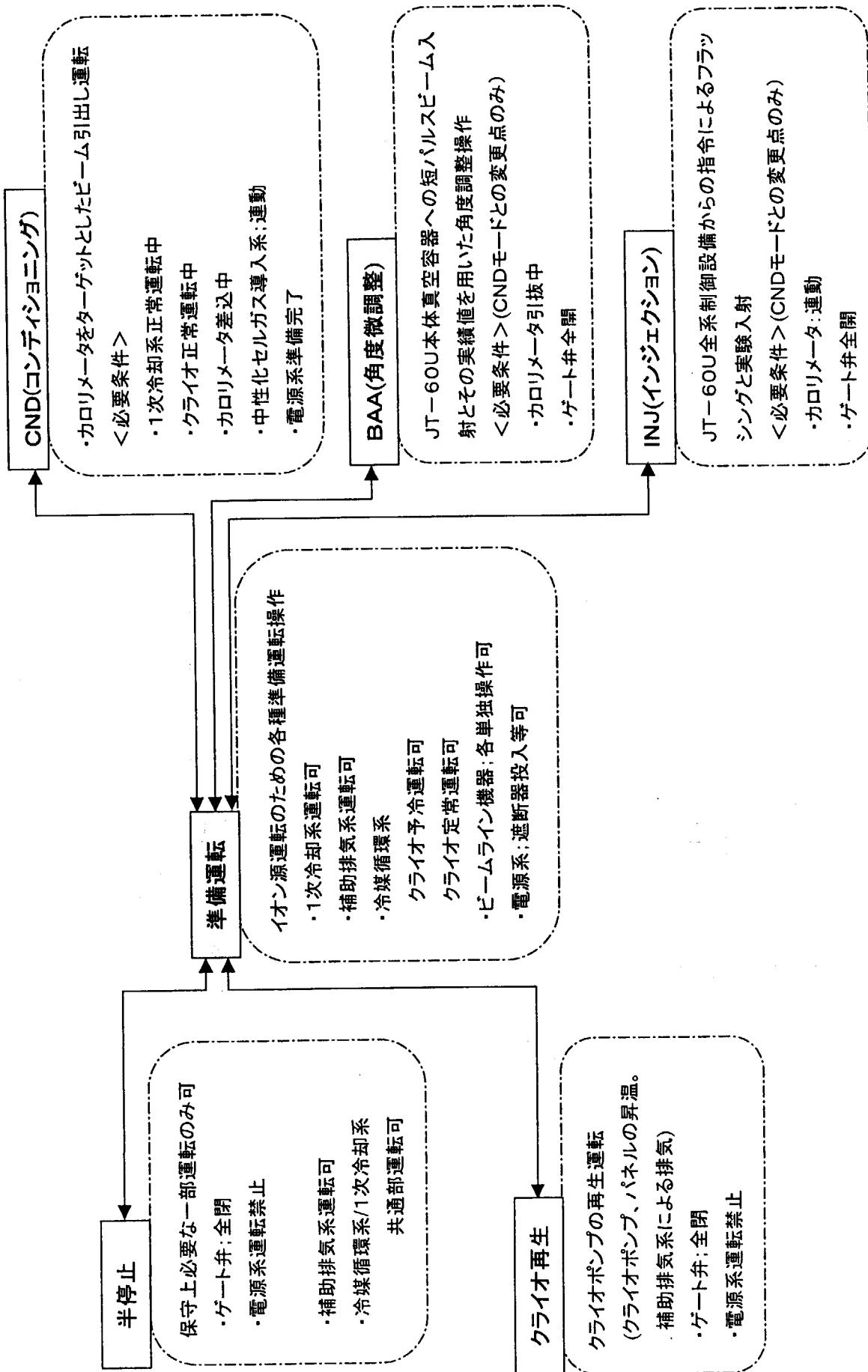
$T_{OV1} = (T_{5A} + T_{4B} + T_{3A} + \max(T_{1B}, T_{4A})) + \alpha$ ($\alpha = 50\text{ms}(\text{B}) \text{ or } 100\text{ms}(\text{C/F})$)

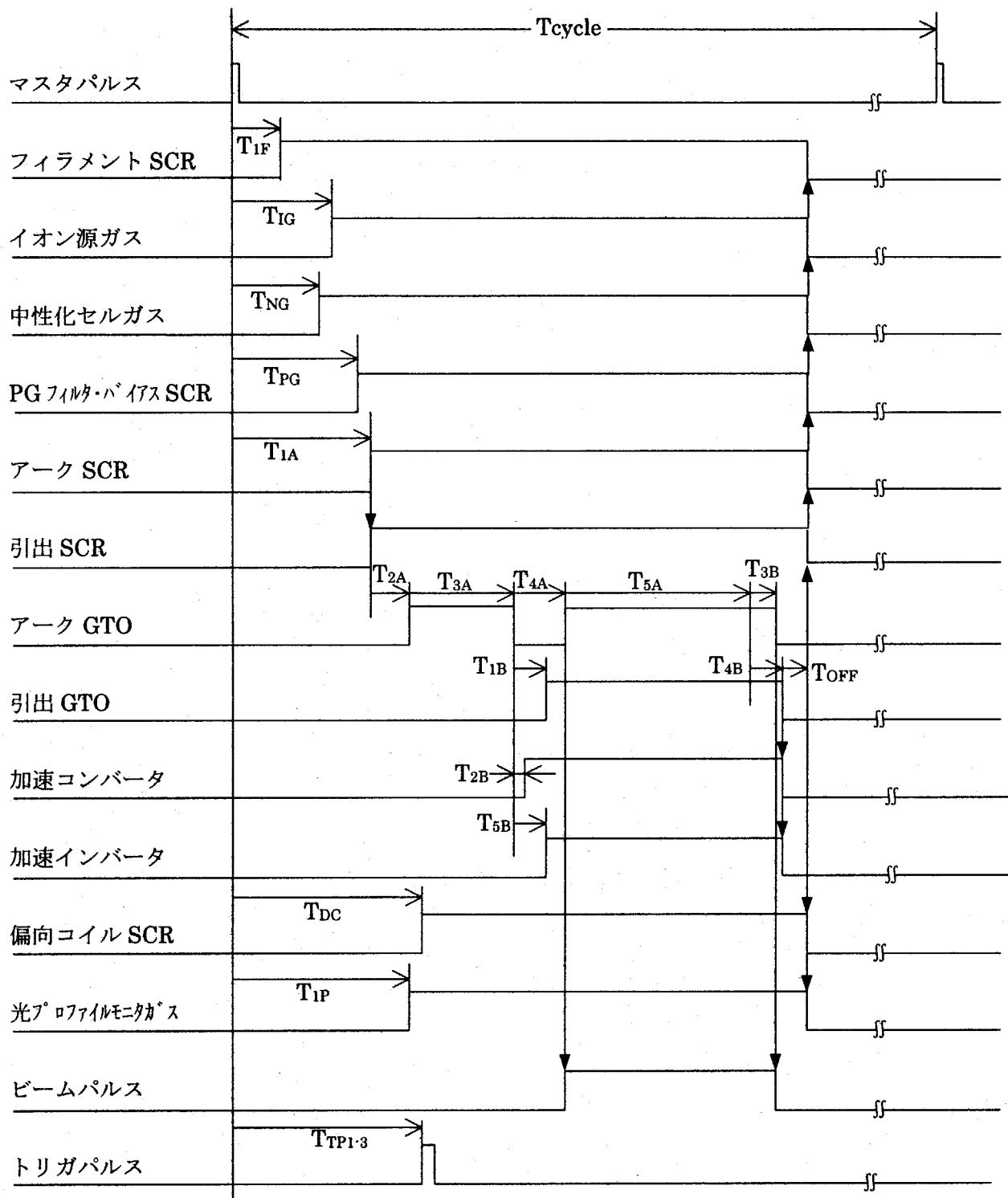
2) 有効モード欄の記号 ; C=CND モード、B=BAA モード、F=INJ モード中のフランシング

E=INJ モード中の実験入射

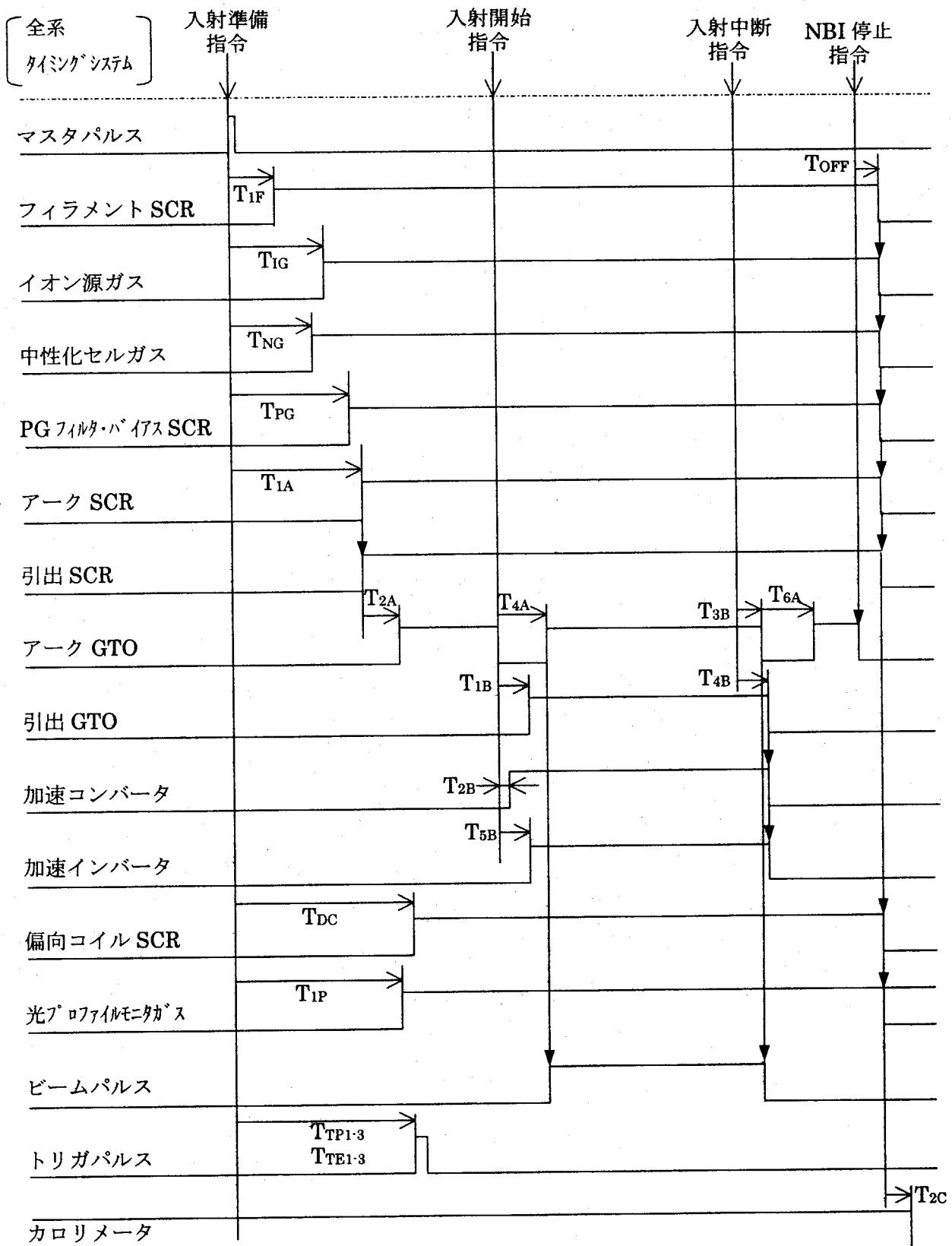


第3. 5. 1-1 図 制御系全体構成図

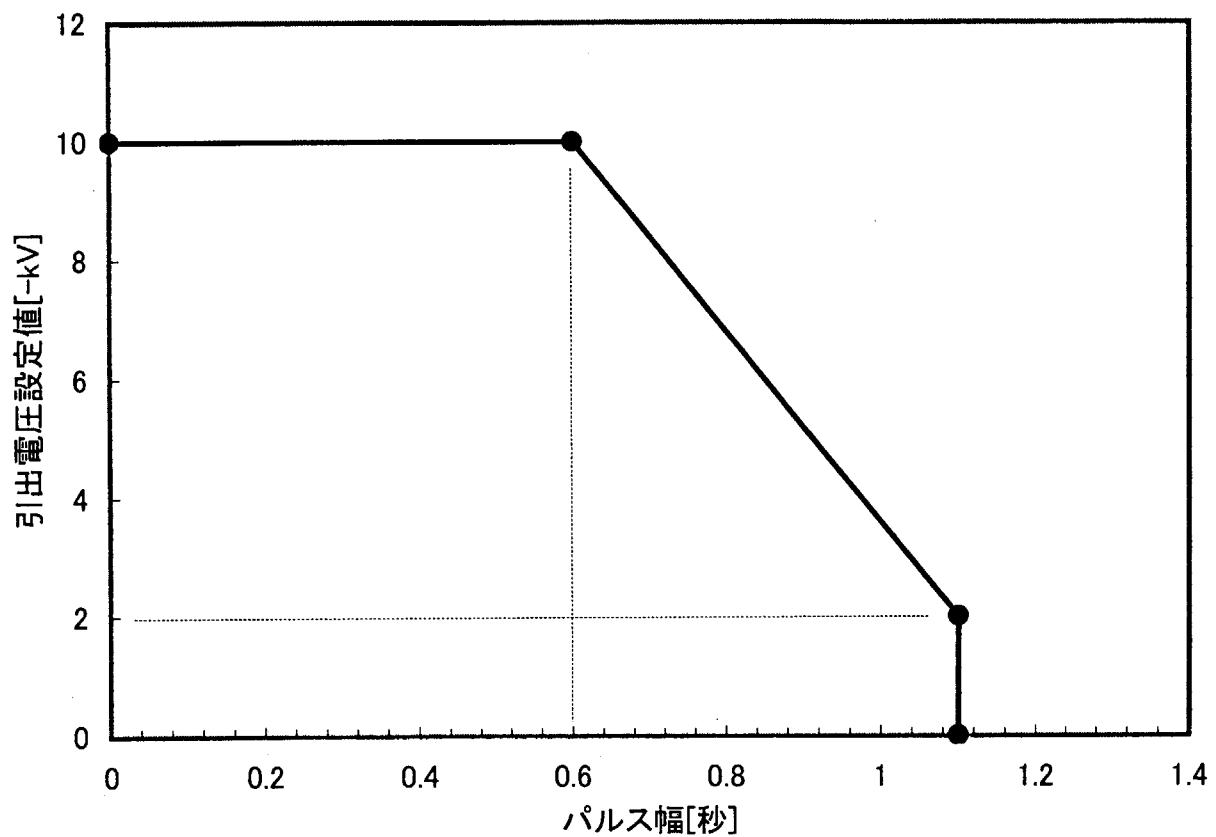




第3.5.2-2図 CND/BAA/FLA時のタイムチャート



第3.5.2-3図 EXINJ時のタイムチャート



第3.5.2-4図 引出設定電圧対運転可能パルス幅

4. 調整試験運転

N-NBI 装置の建設は第 2. 3 - 1 図の計画どおりにほぼ実施され、1995(平成 7)年 3 月に第 1 期分の建設を終了し、この後、イオン源及びイオン源用電源を組合せた調整試験を実施した。同時に第 2 期分のもう 1 台のイオン源及びイオン源用電源、残りのビームライン等構成機器の製作を進め、第 1 期試験終了後に、第 2 期分の据付けを実施した。その後、イオン源 2 台を使用した調整試験、及び JT-60U への初めての入射試験を実施して、1996(平成 8)年 3 月に、N-NBI 装置全体の建設を終了した。その後、本格的なイオン源のエージングや特性試験、改良試験を開始した。

4. 1 初期試験運転結果

第 1 期分及び第 2 期分の試験を実施した、1995、1996 年度の 2 年間の試験内容、トラブル、及び改良項目についての概略を第 4. 1 - 1 図に示す。

(1) 第 1 期分試験

第 1 期分の建設終了後、イオン源用電源の単体通電試験として、負イオン生成部電源 L、引出電源 L、加速電源について、それぞれ模擬負荷を用いた各電源毎の通電試験を行い、最後に加速電源の短絡試験を実施し、1995(平成 7)年 5 月初旬までにすべて終了した。

その後、5 月末より、イオン源 L を実装し、電源とイオン源とを組合せた実負荷通電試験及びビーム加速試験を開始した。この試験は、イオン源タンク内に設置した短パルスビームターゲットを使用した 0.2 秒までのビームを引出しながらの調整運転試験で、1995(平成 7)年 10 月まで実施した。

代表的な運転パラメータは次のとおりであった。

加速電圧	～-410kV (ビームなし)
引出電圧	～-4.2kV
アーク電圧	～66V
アーク電流	～1930A
フィラメント電圧	～12.0V (フィラメント 4 本×8 グループ)
PG フィルタ電流	～1.5kA
バイアス電圧	4.0～4.5V
イオン源ガス流量	4.75Pa・m ³ /sec (P _{AC} =0.17Pa TMP 排気)
最高データ	-400kV、10.8A(I _{D-} =5.85A)、0.13sec (1995.9.9 データ)

(2) 第 2 期分調整試験

第 2 期分の機器据付工事は、1995(平成 7)年 11 月から 1996(平成 8)年 2 月の期間に実施され、その後直ちに、第 2 期分の単体試験、イオン源 2 台の組合せ試験、磁場試験、短パルスビーム入

射を含めた JT-60U との組合せ試験を行ない、予定どおり 1996 年 3 月に、マイルストーンである JT-60U への最初のビーム入射を達成した。その時の電圧、電流波形を第 4. 1 - 2 図に示す。その後、同年 4 月から、イオン源 2 台のエージングやイオン源の特性改良試験を本格的に開始し、同年 9 月にはエネルギー 350keV、パワー 2.5MW の JT-60U への入射を達成した。

代表的な運転パラメータは次のとおりであった。

加速電圧、電流	～-375kV、41A
引出 U/L 電圧、電流	～-5.1/5.0kV、～31/25A
アーク U/L 電圧、電流	～65/～62V、～2500/～2300A
フィラメント U/L 電圧	12.5/12.7V (フィラメント 6 本×8 グループ)
PG フィルタ U/L 電流	～5.4/～2.8kA
バイアス U/L 電圧	～5.0/～4.7V
イオン源 U/L ガス流量	6.0/6.0Pa·m ³ /sec
中性化セルガス流量	3.0Pa·m ³ /sec (以上、1996.8.30 データ)

4. 2 主なトラブルと対策

運転中止を伴う修理、対策が必要だったトラブルは、イオン源の不具合が最も多い、次いで、イオン源用電源の不具合、それに真空リーク等が主なものであった。

(1) イオン源用電源

イオン源用電源では、運転初期を中心に、イオン源加速部電極間の放電破壊時のサージ電圧に起因する各電源の誤動作が頻発し、そのためのノイズ対策として、ソース電源を構成する各電源、引出電源、それにイオン源ガス導入系やサージプロッカバイアス電源について、電位固定の強化、制御回路へのサージ侵入阻止用のコンデンサや絶縁アンプ等の追加、その他の各種の処置を対症療法的に実施した。これら対策の実施により、誤動作の発生頻度を徐々に低下させることができた。

(2) イオン源

イオン源の大きなトラブルとして、第 1 期試験開始から、引出部の絶縁不良が計 7 回、負イオン生成部フィラメント導入端子からの水リークが 3 回発生し、その都度イオン源を分解修理して再度試験を実施した。引出部の絶縁不良は、1995(平成 7)年 7 月から 1997(平成 9)年 7 月の間に発生したもので、①L のみ、イオン源内部の電子抑制電極(ESG)の給電用同軸ケーブルの端末処理改良、②L のみ、内部の ESG 用電流導入端子の交換、③U/L とも、ESG と引出電極(EXG)の同電位化、内部の電流導入端子部改良、④L のみ、内部の EXG 用の同軸コネクタ改良、⑤U/L とも、引出部セラミック交換、⑥U/L とも、引出部同軸ケーブルを同軸管に交換、⑦U/L とも、同軸管テフロンスペーサをポスト碍子と交換、などの対策を重ねた結果、以後、引出部の絶縁不良は発生していない。なお、引出部は 1997(平成 10)年 1 月より、EXG と ESG を一体化し、EXG 引出孔の径の縮小や ESG の厚み変更などを行った改良型電極との交換を実施した。

フィラメント電流導入端子からの水リークは、1995(平成 7)年 8 月から 1998(平成 10)年 9 月の

間にすべてイオン源 L で発生し、導入端子がサージ電力により破損していた。電流導入端子の改良型との交換、イオン源外部端子にサージ吸収用コンデンサを追加設置した後は発生していない。

また、運転後の定期開放点検では、加速部の各所で数多くの放電痕や接地電極の端部の部分的溶痕が確認されたため、電極及び支持枠に各種の電界集中緩和対策や上下(チャンバ長手)方向両端部の一部ビーム引出孔のマスク処置等を実施し、これら放電痕や溶痕の低減に努めた。このマスクの設置は加速部電極の熱負荷低減に効果があった。

イオン源に直結して設置されているセシウムオーブンは、イオン源の電極間放電破壊時のサージ電圧に起因するヒータ断線や温度コントローラの破損などの不具合発生を繰返した。ヒータ通電中に放電破壊が発生すると高い確率で、断線が発生することがわかり、加速電圧印加中はオーブンのヒータへの通電をオフとする回路の追加や各部電位固定の修正、強化を実施したことにより、トラブル発生を抑制することができた。

(3) ビームライン

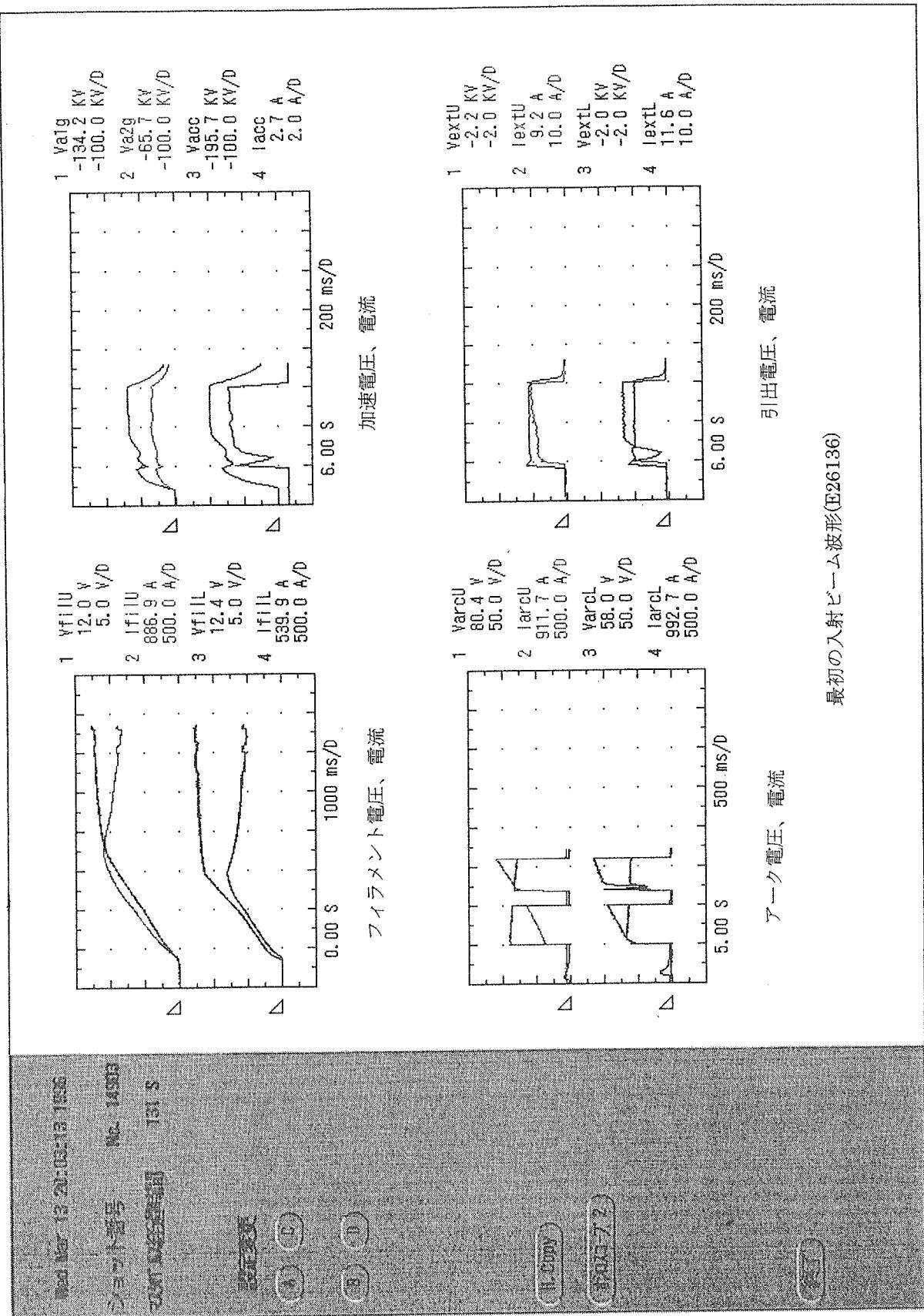
真空リークとして、イオン源フィラメントの冷却水リークの他、イオン源タンク内に設置のビーム強度分布測定用の可動プローブからリークが数回発生し、改良を加えたが、根本的対策とならず、1999(平成 11)年 8 月に撤去した。その代わりに、冷却水を使用せず、リーク発生の可能性が低い、赤外線カメラを使用する新規のビーム分布測定装置を設置した。

タンク内部監視用覗き窓のひび割れが、1997(平成 9)年 10 月と 1999(平成 11)年 8 月に 2 回発生した。この原因是、電子ビームが偏向されてガラス窓に照射されたためであり、ガラス窓交換と運転中のゲート弁全閉とする処置を実施した。

イオン源のビーム軸調整に使用する角度調整機構が一旦、軸調整実施後に設定した角度からずれてしまう不具合のあることがわかり、1997(平成 9)年 2 月にブレーキ付モータと交換する対策を実施した。

試験／運転概況

年 度	1995 (H7)												1996 (H8)												
	月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
JT-60 全体工程 試験/運転	電源試験 単体												定 檢												
TOPICS	第1期試験												第2期試験												
イオン源 点検結果 & 改良項目	PLG 変形→片端支持化 絶縁がム放電痕→Gap長65mm フィラメント4本→6本(計48本) AC内ヒメット冷却水漏れ→修理 引出導入端子割れ→修理	(7/10-15) (8/23-29) (9/14-22)	11-12月 引出絶縁不良→同軸端末改良 AC内ヒメット冷却水漏れ→修理 引出導入端子割れ→修理	PLG四隅電子漏れ止板追加 GRG交換(4→2mm) EXG磁極性反転 Csオーブン圧空バーブ化	イオン源U/L点検 11-12月 引出絶縁不良対策実施 PLG四隅電子漏れ止板追加 GRG交換(4→2mm) EXG磁極性反転 Csオーブン圧空バーブ化	イオン源U/L点検 5月 引出絶縁不良対策実施 PLG四隅電子漏れ止板追加 GRG交換(4→2mm) EXG磁極性反転 Csオーブン圧空バーブ化																			



第4. 1-2 図

5. おわりに

JT-60U 用負イオン NBI 装置は、世界初の負イオン源を用いた中性粒子入射加熱装置として 1996 年 3 月に完成以来、負イオン源の改良試験を進めながら、JT-60U のプラズマ高密度領域でのビーム電流駆動実験やプラズマ性能の向上に大きく貢献してきた。しかしながら、2001(平成 13)年現在、設計上の定格値である、500keV、10MW の目標に対して、400keV、5.8MW にとどまっている。これは負イオン生成部のソースプラズマの空間的な非一様性や加速部での放電破壊多発などいくつかの解決すべき課題が残っているためである。現在、これら課題の解決を目指してさらに試験を進めている。今後とも、さらに改良を加え、ビームエネルギー、入射パワーの増大を図る必要がある。

最後に、負イオン NBI 装置の建設にあたり、終始変わらぬご指導と励ましをいただきました清水正亜核融合装置試験部長をはじめとする JT-60U 関係者の皆様、NBI 装置試験室及び NBI 加熱研究室の皆様に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) JT-60U 負イオン NBI 装置設計グループ(秋野昇、海老沢昇、朴木敏郎、櫻村隆則、河合視己人、桃澤稔、国枝俊介、栗山正明、小泉淳一、松岡守、水野誠、藻垣和彦、大賀徳道、大原比呂志、佐藤藤雄、清水和彦、高橋春次、高安利男、宇佐美広次、薄井勝富、山本正弘、山崎武、荒木政則、花田磨砂也、井上多加志、前野修一、宮本賢治、小原祥裕、奥村義和、鈴木哲、渡邊和弘) : JAERI-M 94-072, “JT-60U 負イオン NBI 装置の設計検討” (1994)
- 2) 河合視己人、青柳哲雄、大原比呂志、本田敦、栗山正明 : JAERI-Tech 97-012, “JT-60U 負イオン NBI 計算機システムとそのソフト開発” (1997)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジューク	J	N·m
J率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

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

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

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

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

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

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

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

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

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

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

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

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

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

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{-8}	エクサ	E
10^{-15}	ペタ	P
10^{-12}	テラ	T
10^{-9}	ギガ	G
10^{-6}	メガ	M
10^{-3}	キロ	k
10^{-2}	ヘクト	h
10^{-1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

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

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

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

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}		
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}		
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}		
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}		$= 75 \text{ kgf}\cdot\text{m/s}$
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}		$= 735.499 \text{ W}$
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876		100	
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

トヨタ用負イオンZB-1装置の建設

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。