

JAERI-Tech
95-044



接線入射NB I 装置の建設

1995年9月

大賀徳道・秋野 昇・海老澤昇・蛭田和治^{*1}・伊藤孝雄・檍村隆則^{*2}
河合視己人・小泉純一・小又将夫・国技俊介・栗山正明・松岡 守^{*3}
水野 誠^{*4}・藻垣和彦・大原比呂志・大内 豊・佐藤藤雄・清水和彦
菅原忠義^{*5}・宇佐美広次・薄井勝富・山崎 武

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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 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 Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株高野高速印刷

接線入射 N B I 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

大賀 徳道・秋野 昇・海老澤 昇・蛭田 和治^{*1}
伊藤 孝雄・樋村 隆則^{*2}・河合視己人・小泉 純一
小又 将夫・国枝 俊介⁺・栗山 正明・松岡 守^{*3}
水野 誠^{*4}・藻垣 和彦・大原比呂志・大内 豊
佐藤 藤雄・清水 和彦・菅原 忠義^{*5}・宇佐美広次
薄井 勝富・山崎 武

(1995年8月14日受理)

J T - 60高性能化にて真空容器の口径を大きくしたことからトロイダルコイルとプラズマが接近することになりプラズマ表面でのトロイダルコイル磁場リップルが大きくなつた。既設の垂直入射N B Iではこのリップル磁場による損失が30~40%と評価された。リップル損失を減少させる有効な方法は接線方向のビーム入射である。一方、J T - 60高性能化にてダイバータコイルを除去したことにより接線入射用水平ポートの確保が可能となつた。接線入射への改造は14基のうちの4基について実施した。4基のビームラインは新作した2基のビームラインタンクに収納しそれぞれ正および逆方向入射とした。打ち消しコイル以外の大部分のビームライン機器は再使用した。接線入射への改造は1993年に完成しその後順調にビーム入射を行つてゐる。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

+ 管理部

*¹ 開発電気株式会社

*² 原子力エンジニアリング株式会社

*³ 三重大学

*⁴ エス・ティ・エス株式会社

*⁵ 株式会社日立製作所

Construction of Tangential Injection NBI System

Tokumichi OHGA, Noboru AKINO, Noboru EBISAWA, Kazuharu HIRUTA *¹
Takao ITOH, Takanori KASHIMURA *², Mikito KAWAI, Junichi KOIZUMI
Masao KOMATA, Shunsuke KUNIEDA +, Masaaki KURIYAMA, Mamoru MATSUOKA *³
Makoto MIZUNO *⁴, Kazuhiko MOGAKI, Hiroshi OHHARA, Yutaka OHUCHI
Fujio SATOH, Kazuhiko SHIMIZU, Tadayoshi SUGAWARA *⁵, Hiroji USAMI
Katsutomi USUI and Takeshi YAMAZAKI

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

(Received August 14, 1995)

In the Upgrading of the JT-60, the vacuum vessel has been modified to a larger bore. This larger bore vacuum vessel yields a larger toroidal field ripple in the vicinity of a plasma surface because of closing the toroidal field coils and plasmas. A ripple loss of injected neutral beams, then, estimated to be 30~40% through ripple field in the beam injection with the present NBI system that injects the beam perpendicularly to the plasma. An effective way to decrease the ripple loss in the plasma is to inject the beam tangentially. Meanwhile, it has been determined possible with the JT-60 upgrading to use a horizontal port as a tangential beam injection, because of eliminating a group of outer horizontal poloidal coils which are used as a diverter coil in the former JT-60. The modification from perpendicular beamline to tangential one has been executed in four beamlines out of 14 units. Four tangential beamlines are installed in two

+ Department of Administrative Services

*¹ Kaihatsu Denki Co.,Ltd.

*² Nuclear Engineering Co.,Ltd.

*³ Mie University

*⁴ S.T.S Co.,Ltd.

*⁵ Hitachi Co.,Ltd.

beamline tanks which are newly fabricated and positioned co-and counter-injection, respectively. Most of the beamline components are reused except a couple of cancellation coils.

The modification to the tangential beamline completed in 1993, and the beam injection experiments with the tangential have been conducted successfully since 1993.

Keywords : Beam Injection, NBI, Tangential Injection, Beamline, JT-60

目 次

1. はじめに	1
2. 接線入射NBI建設までの経緯	3
2.1 NBI接線入射化改造の必要性	3
2.2 接線入射化改造の方針	5
3. 接線入射化改造に必要としたR&D	11
3.1 クライオポンプ内配管方式のガラスモデル流動実験	11
3.2 漏洩磁場対策	14
4. ビームライン全体構成	27
4.1 ビームライン全体構成およびビーム軸基本寸法	27
4.2 イオン源	37
4.3 ビームライン	39
4.4 イオン源用電源	96
4.5 冷媒循環系	104
4.6 1次冷却系設備	109
4.7 補助真空排気系	122
4.8 配管用ヤグラ	126
5. 接線入射NBI装置でのポートエージング	143
6. おわりに	146
参考文献	147

Contents

1. Introduction	1
2. Circumstance for Tangential NBI System	3
2.1 Necessity of Tangential NBI System	3
2.2 Concept of Tangential NBI System	5
3. R&D for Tangential NBI System	11
3.1 Experiment of Cryopump Piping system with a Scale Model Made by Glass	11
3.2 Experiment of Magnetic Shielding with a Scale Magnetic Model for Countermeasure Against the Stray Field	14
4. Beamlne Composition	27
4.1 Composition of Beamlne and Definition of Beamlne Axis	27
4.2 Ion Source	37
4.3 Beamlne	39
4.4 Power Supply for Ion Source	96
4.5 Refrigeration System	104
4.6 Cooling Water System	109
4.7 Auxiliary Pumping System	122
4.8 Piping Tower	126
5. Port Aging in Tangential Infection NBI System	143
6. Concluding Remarks	146
References	147

1. はじめに

J T - 6 0 用粒子入射加熱装置は、合計 1 4 ユニットから成り、J T - 6 0 の周囲 7 カ所に、2 ユニットづつ上下 2 段に重ねられて配置されている。上下 2 段のビームラインは、プラズマ水平面を対称にそれぞれ 3 5. 5° およびプラズマ中心軸に対しプラズマ水平面投影角にて 7 5° の入射角をもっている（以下、既設の粒子入射加熱装置を準垂直入射 N B I 装置または単に N B I という）。

準垂直入射 N B I 装置の入射角は、主に J T - 6 0 のトロイダルコイルの間隙寸法および J T - 6 0 トーラス真空容器の外周部に当初設置されていた磁気リミタコイルによる幾何学的制限により決められた。

J T - 6 0 は、昭和 6 3 年度から平成 2 年度にかけて、“プラズマ電流を増大しプラズマの閉じ込め性能の向上と重水素による運転を可能にすること”を目的として高性能化改造（以下、J T - 6 0 U と言う）を実施した。J T - 6 0 U での主な改造点は、ダイバータコイルの位置変更を含むポロイダルコイルの高性能化およびトーラス真空容器の大口径化である。なお、トロイダルコイルは特に変更せずそのまま再使用した。

トーラス真空容器の大口径化に伴い、J T - 6 0 U のプラズマ境界は、J T - 6 0 に比べ相対的にトロイダルコイル内側に近づくことになり、トロイダル磁場のリップルが最大 2 % 程度まで大きくなった。このため準垂直入射では、プラズマ周辺での高速イオンのリップル損失が大幅に増大し、加熱効率の低下が予測された。

一方、大電流化改造によりダイバータコイルの配置が、真空容器外周部プラズマ水平面から真空容器下側に変更になったことから従来の J T - 6 0 では不可能であった水平方向入射ポートの確保が可能となった。これらのことから、リップル損失が極めて少なく、高効率のプラズマ加熱が期待される N B I ビームの接線入射化（以下、接線入射 N B I 装置と言う）を行うこととした。

接線入射 N B I 装置は、準垂直入射 N B I 装置の # 7、8 および # 9、1 0 の 4 ユニットビームラインを改造してビームを接線方向に入射できるようにしたものである。具体的には、# 7、8 の 2 ユニットを 1 つのビームラインタンクに収納してプラズマ電流の向きに対して逆方向入射とし、# 9、1 0 についても同様に 2 ユニットを 1 つのビームラインタンクに収納するがビーム入射方向を正方向入射としたものである。

これらのビームライン改造に伴ってイオン源用電源および制御系の一部、1 次冷却系、冷媒循環系および補助真空排気系の配管配線等の変更を行った。また、配管用ヤグラについては、ビームラインの高さが準垂直入射 N B I 装置のそれに比べて低くなったこと、および配管配線や現場盤の配置が大きく変更になったこと等のため新たに製作することにした。

接線入射 N B I 装置の全体性能は以下のとおりである。

ビームライン : 4 ユニット / 2 ビームライン (2 ポート)

正方向入射 ; 2 ユニット

逆方向入射 ; 2 ユニット

ビームエネルギー : 3 0 ~ 1 2 0 k e V

イオン源 : 2 台 / ビームライン

ビーム種 : 水素／重水素
最大入射パワー : 約 6 MW／ポート (重水素ビーム)
約 3 MW／ポート (水素ビーム)
入射パルス幅 : 10 秒
デューティサイクル : 1 / 30

本設備の改造は、平成4年5月から平成6年3月にかけて実施され、JT-60の実験運転の合間を縫って実施された。主に5月および11月～12月のJT-60停止期間中に実施したものである。

2. 接線入射NBI建設までの経緯

2.1 NBI接線入射化改造の必要性

2.1.1 リップル損失

接線入射NBIへの改造の発端はJT-60の高性能化計画に伴うトロイダル磁場のリップルによる高速イオンの損失（リップル損失）の低減にある。JT-60の高性能化（JT-60U）計画は、大電流化、重水素の導入により、従来のJT-60と次期核融合装置との間の物理的、工学的ギャップを低減すると共に、次期装置のためのデータベース確保に努めることを目的として推進されたものである¹⁾。第2.1.1-1図(a)、(b)はそれぞれJT-60とJT-60Uの断面図である。JT-60ではダイバータ配位における最大のプラズマ体積、プラズマ電流がそれぞれ約60m³、2.7MAであったのに対し、真空容器とポロイダルコイルを置き換えたJT-60Uでは100m³となり、6MAまで運転可能となった。

特に、JT-60では主半径外側のダイバータ配位であったのに対しJT-60Uでは下側ダイバータ配位とすることにより大断面積の、したがって大電流のダイバータ配位が可能となっている。

一方、トロイダルコイルは変更していないので、大体積のプラズマを生成した場合、プラズマ周辺はトロイダル磁場のリップル率の大きいトロイダルコイルの内周付近により接近することになる。この結果、JT-60ではプラズマ中のトロイダル磁場のリップル率が0.3%以下であったのに対し、第2.1.1-2図に示すようにJT-60Uでは最大3%にも達する。ここでトロイダル磁場のリップル率 δ は、磁力線に沿って見た磁場強度の最大を B_{\max} 、最小を B_{\min} とすると次式で定義される量である。

$$\delta = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}$$

リップル損失には本来のリップル捕捉損失に加えてバナナドリフト損失がある。このうちリップル捕捉損失は、捕捉粒子がピッチ角散乱によって捕捉解除されるまでの時間を τ_{eff} 、トロイダルドリフト速度を v_d 、磁場に垂直な速度成分を持つ高速イオンの発生位置からプラズマ境界までのドリフト距離を L_d とすると、次式の条件を満たす場合、高速イオンはリップル捕捉損失によって失われてしまう。

$$\tau_{\text{eff}} v_d > L_d$$

これよりリップル損失をする高速イオンのエネルギーの範囲が次のように求められる。

$$E_b[\text{eV}] > \left[\frac{1}{4\sqrt{2}\pi\varepsilon_0^2} \frac{n_i L_d e^{3/2} z_b^2 z_i^2 m_b^{1/2} R_d \omega_{cb} \ln \lambda}{\delta} \right]^{2/3}$$

ここで ε_0 は真空の誘電率、 n_i はプラズマイオンの密度、 e は電子の電荷、 z_b, z_i はそれぞれ高速イオンとプラズマイオンの価数、 m_b は高速イオンの質量数、 R_d は高速イオンの位置の主半径、 ω_{cb} は高速イオンのサイクロトロン角周波数、 $\ln \lambda$ はクーロン対数である。この式はトロイダル磁場のリップル率が大きく、プラズマイオンの密度が低ければより低いエネルギーのイオンもリップル損失で失われてしまうことを示している。

しかしながら、NBIにより入射した中性ビームが電離することにより生ずる高速イオンは、高速イオンの生成される位置がビームエネルギーに依存するため、単純に上式だけでは評価

できない。そこで一般的には、バナナドリフト損失を含めたリップル損失の評価には軌道追跡モンテカルロコードOFMCが用いられる²⁾。

JT-60Uにおいても接線入射NBIの設計検討時にOFMCコード³⁾を用いてリップル損失の評価が行われた⁴⁾。第2.1.1-3図はその結果をまとめ直したものである。計算条件は、重水素運転、中心密度： $5 \sim 9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、ビームエネルギー： $100 \times 120 \text{ keV}$ で、上下ユニットのうち上ユニットだけを用いた場合である。図中、Quasi-Perp. はこれまでの準垂直NBI、Tangentialは接線入射NBIである。standardはJT-60Uの真空容器をほぼ満たすような標準配位、elongatedは垂直磁場コイルの結線を変更することにより得られる高非円形配位のプラズマに対応する結果である。準垂直入射の場合リップル率とリップル損失とには明確な正の相関関係があり、リップル率3%のとき、リップル損失は40%にも達することがわかる。ただし高非円形配位の場合はリップル率が2%以下と小さくなることから、リップル損失も20%程度以下となる。

一方、接線入射NBIの場合はリップル率が2%以上あってもリップル損失は10%未満と準垂直NBIの場合の1/2～1/3となり、リップル損失の低減のためにはNBIの接線入射化が非常に有効であることがわかる。

2.1.2 NBI加熱実験領域拡大

NBIの接線化後は、2.1.1項に述べたリップル損失の定量的検証の他にプラズマ閉じ込め特性への影響の実験的解明など以下に示すNBI加熱実験の領域拡大が期待できる。

(1)ビーム電流駆動の予備的実験

JT-60高性能化実験(Ⅲ)の高密度電流駆動装置として500keVの負イオンN-NBI装置が採用される。駆動電流のビームエネルギーへの依存性は、第2.1.2-1図に示すとおりであり、120keVの接線入射NBI装置を用いても1MW入力当たり100kA程度の電流を駆動できる。

正イオン接線入射NBI装置を用いる電流駆動のメリットは、電流駆動ビームによって生じるプラズマ回転を制御し閉じ込め特性との関連を研究できる点にある。これらのデータは、高性能化実験(Ⅲ)における負イオンビーム電流駆動実験のための予備データベースとして重要な知見となる。

(2)ビームによる核反応の促進

比較的低密度($n_{e0} \leq 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)のプラズマ中に、互いに逆の接線方向にビーム入射した時、第2.1.2-2図に示すようにビーム相互の強い核反応が発生しうる。この現象は特に高電子温度のプラズマ中で著しくなる。このような核反応の向上の程度を定量的に知り得ることができ、これは自己点火の物理を解明する上で重要である。

(3)閉じ込め特性の改善

①高イオン温度モード

プラズマ中に接線方向に強力なNBI加熱を行うことによって、中心イオン温度が25～30keVに及ぶHモードや高いイオン温度のプラズマ限られたプラズマパラメータ範囲で生成されうることがTFTRやJETで示されている⁵⁾。このような高イオン温度モードを得るためにプラズマパラメータ範囲の拡大を行うことができる。これはトカマク研究を進める上で重要である。

②プラズマ回転の制御

相対向する接線NBIによって、プラズマ回転を制御したトカマクプラズマの閉じ込めがLモードの3倍以上に達しうることがTFTRで示された(スーパーショット)⁶⁾がそれを実現する

密度・プラズマ電流の範囲はまだ狭い。また、プラズマ電流方向と逆方向にのみ接線NBIを行うことによって閉じ込めを改善する方法もASDEXで実験的に示されるようになってきた。これらは、プラズマの回転に関連する電界の発生やプラズマ中心部へのパワー・粒子注入と閉じ込め特性の間に重要な関係があることを示している。JT-60Uにおいてもプラズマ回転の制御のために接線入射は有力な手段となる。

なお、第2段加熱したトカマク閉じ込めには、LモードとHモードが知られているが、最近諸種の装置で改良型Lモード（JFT-2M、ASDEX、JT-60）、高イオン温度モード（TFTR、JE T）、スーパーショット（TFTR）、逆入射NBIモード（ASDEX）、ペレット入射（JT-60、TFTR、JET等）が見いだされるようになってきた。Hモードは、平坦な密度分布、Lモードは中心に比較的ピークした密度分布であるのに対して、その他の改良モードのほとんどは、著しく強くピークした密度分布をもつことが特徴的である。

(4) モーションナル・ショタルク法用いた電流分布計測

NBI入射粒子が出す $H\alpha$ 光は速度 \vec{v} と磁場 \vec{B} に垂直方向の電場 \vec{E} を持つことを利用した電流分布計測（Motional Stark法）が極く最近実証され大きな注目を集めている⁷⁾。この方法を採用するためには、NBI粒子を接線入射することによって、1個の粒子が経験するトロイダル磁場の変化を小さくし $H\alpha$ 光の電場 \vec{E} の偏向角を大きくすることができる。

2.2 接線入射化改造の方針

既設の準垂直NBIから接線NBIに変更するにあたっては変更の方法、変更するユニット数の決定に関して多くの議論がされた⁴⁾。

その結論として次の方針に則って改造を行うこととした。

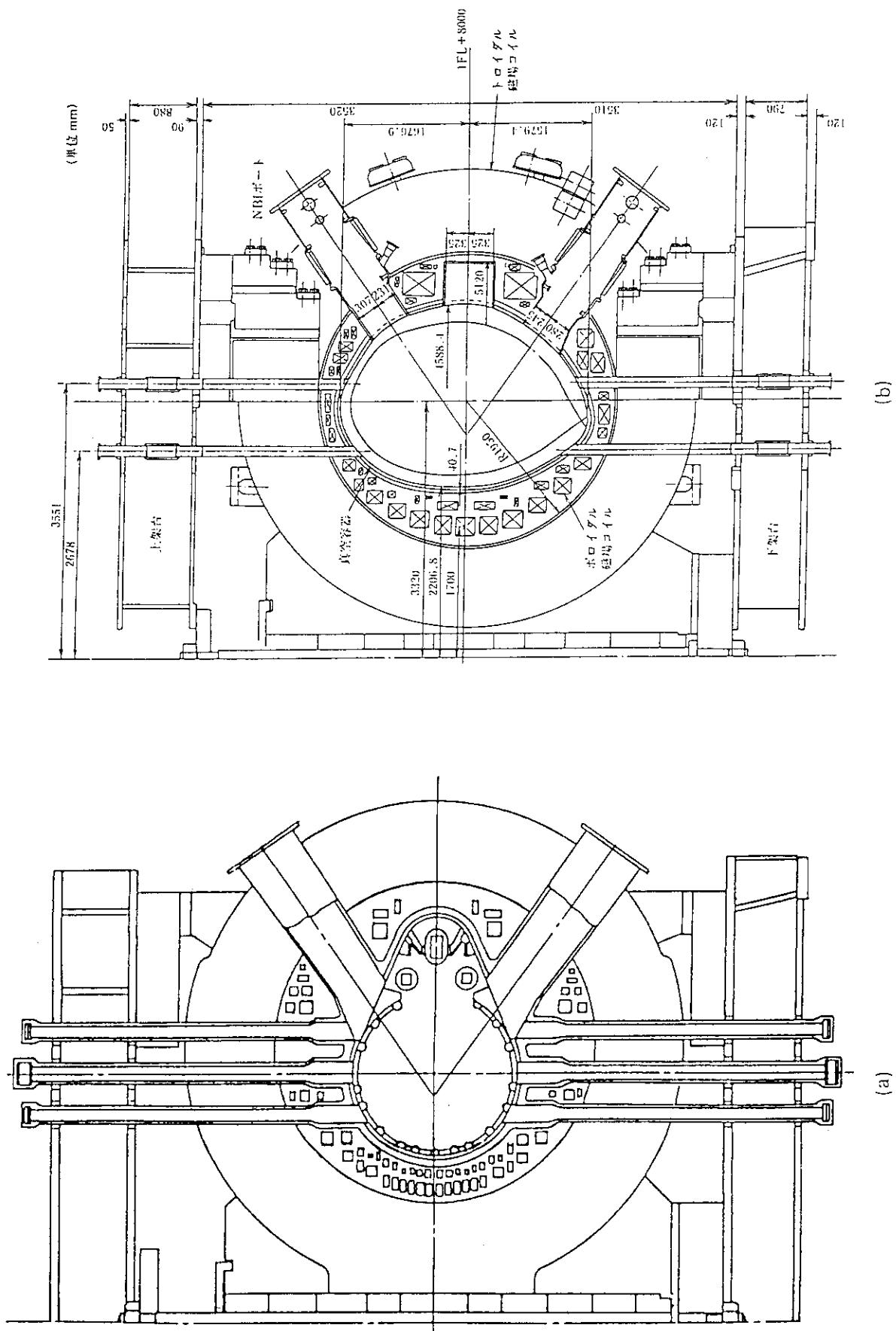
(1)接線入射化は既設準垂直NBI装置14ユニットのうち4ユニットとする。内訳はプラズマ電流の向きに対し正／逆方向それぞれ2ユニットとする。

入射パワーは重水素ビーム時最大11MWでバランス入射となる。

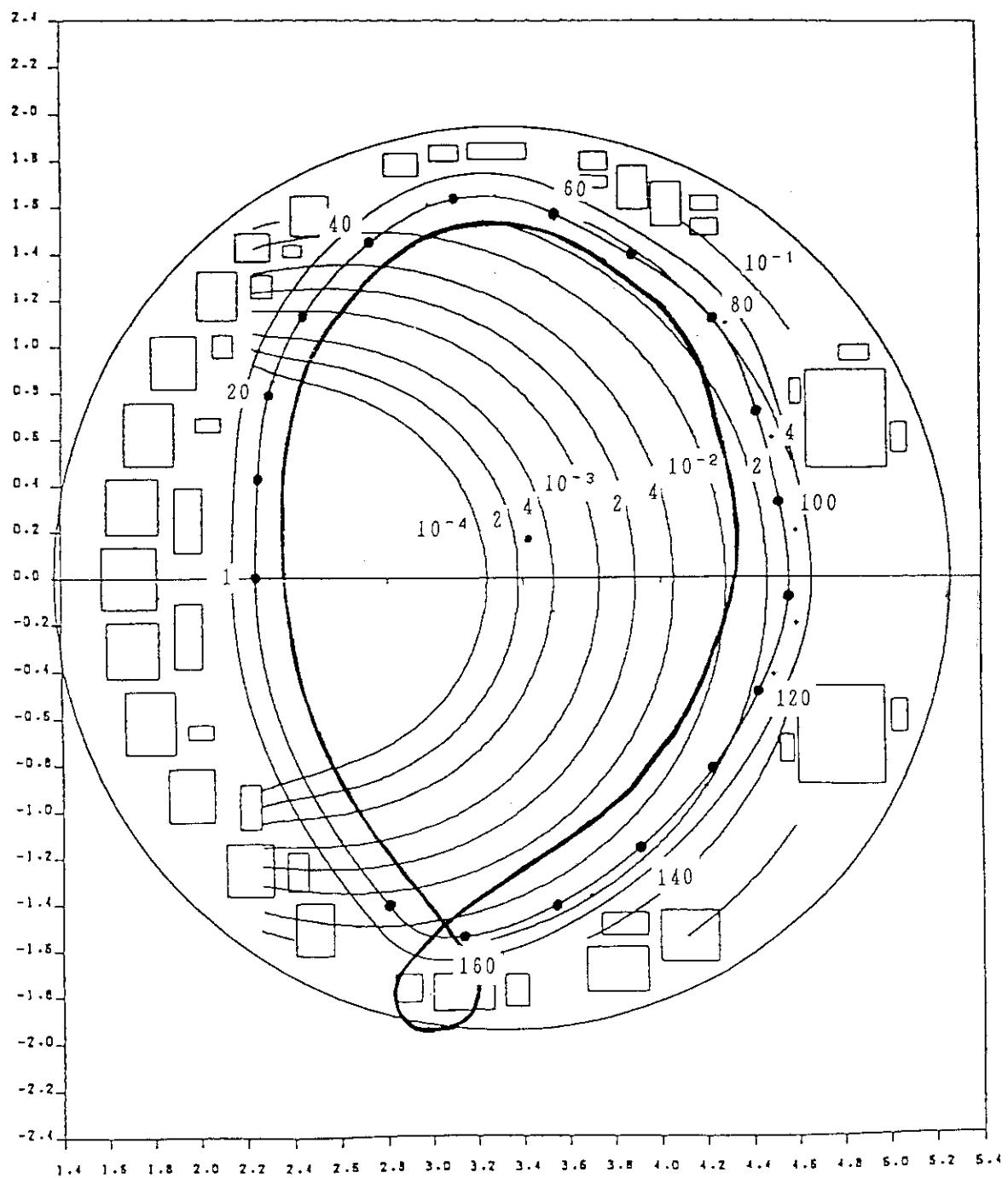
(2)正／逆方向それぞれ2ユニットは、同一のトロイダルセクションの上下ユニットとし、新規に製作した一つの真空容器内に設け、一つの水平ポートから上下ユニットまとめて入射するようとする。したがって対となる上下ユニットのビームライン機器は、これまで個別の真空容器に収められていたのに対し、常に同一の真空雰囲気下に置かれることとなる。

(3)イオン源、及びビームライン機器は最大限従来の機器を使用する。新規に製作して使用する主なものは、真空容器、打消しコイル、ビームライン機器サポート構造、及び入射ポートである。

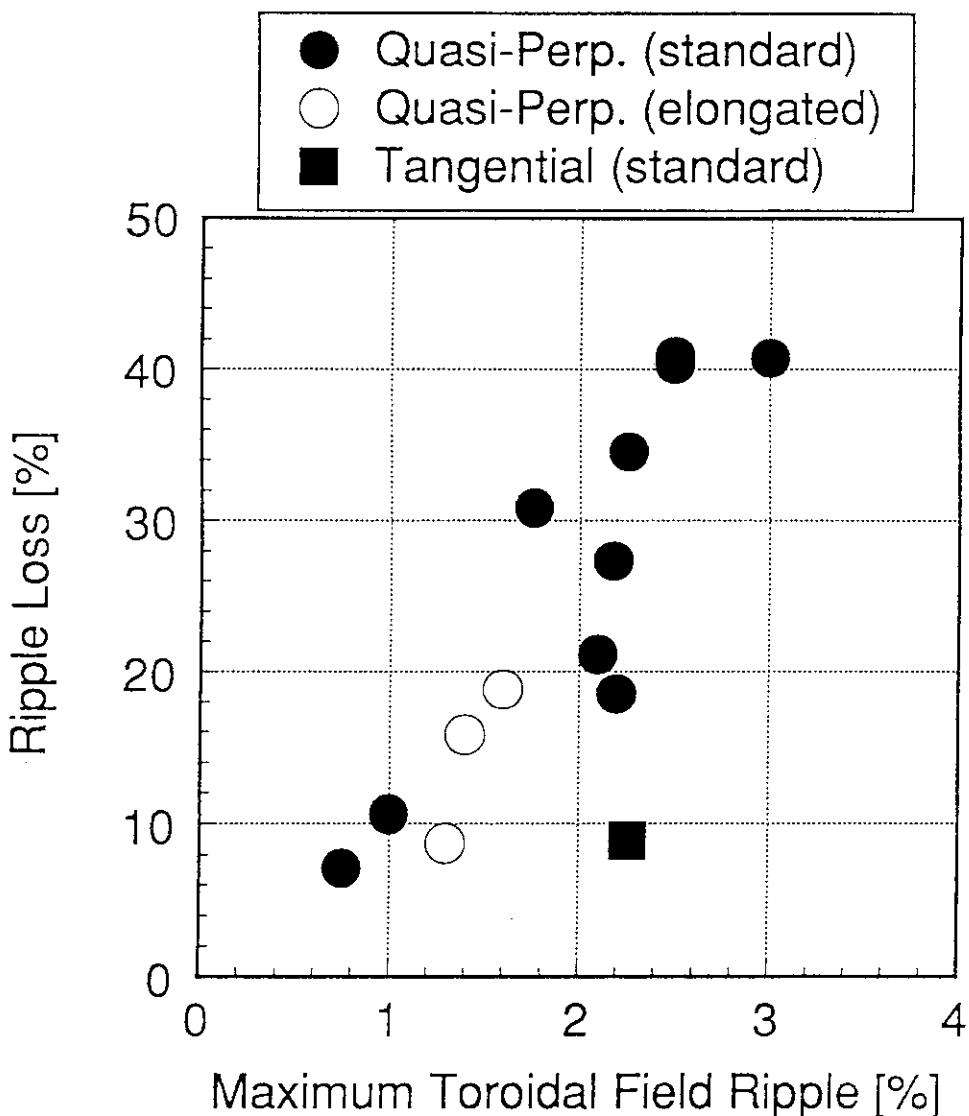
以上の方針に基づいてビーム軸、ビームライン配置を定めた。第4章にこれらの基本配置と共に各部の詳細を示す。



第2.1.1-1図 JT-60改造前後の断面形状。
(a) 改造前 (JT-60), (b) 改造後 (JT-60U)。



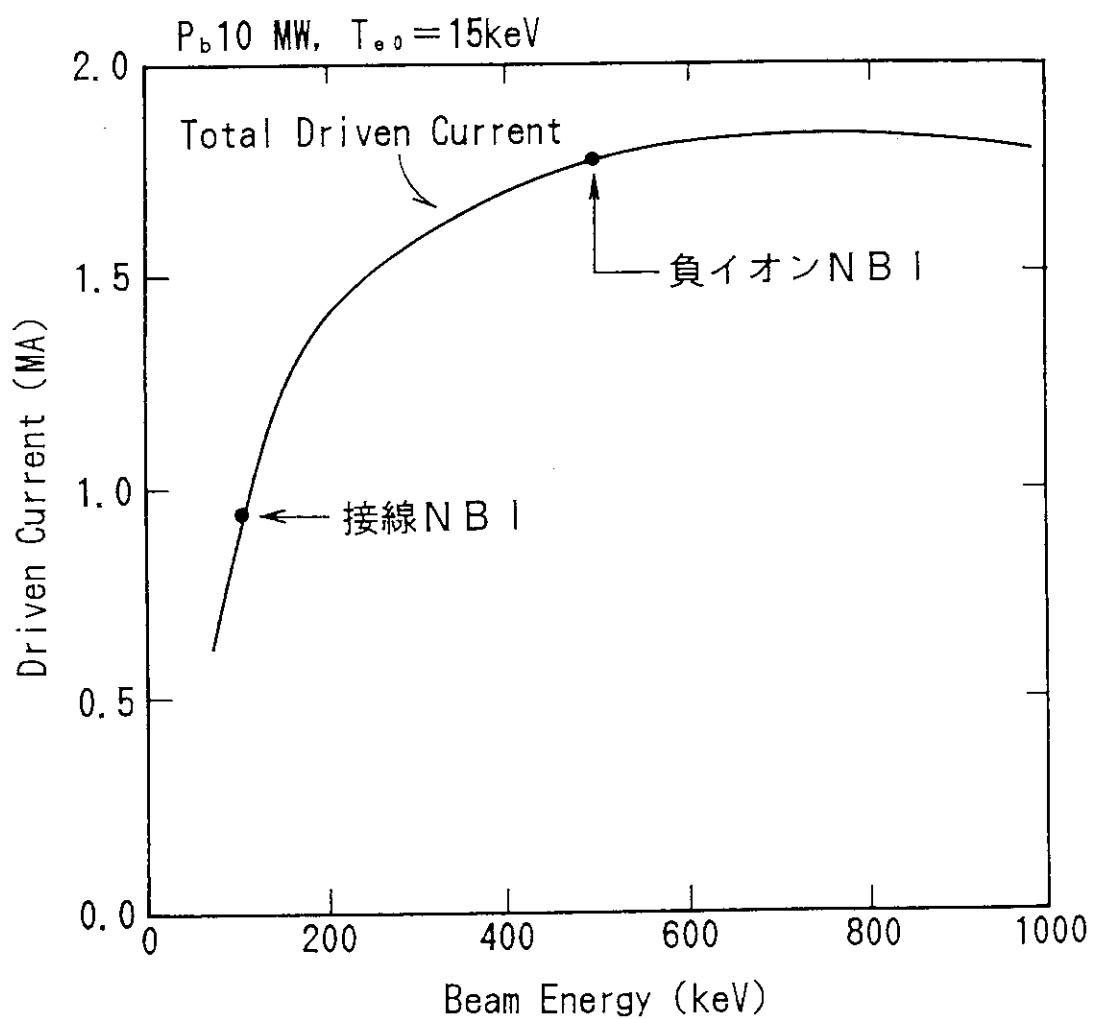
第2.1.1-2図 JT-60Uのトロイダル磁場のリップルの空間分布。



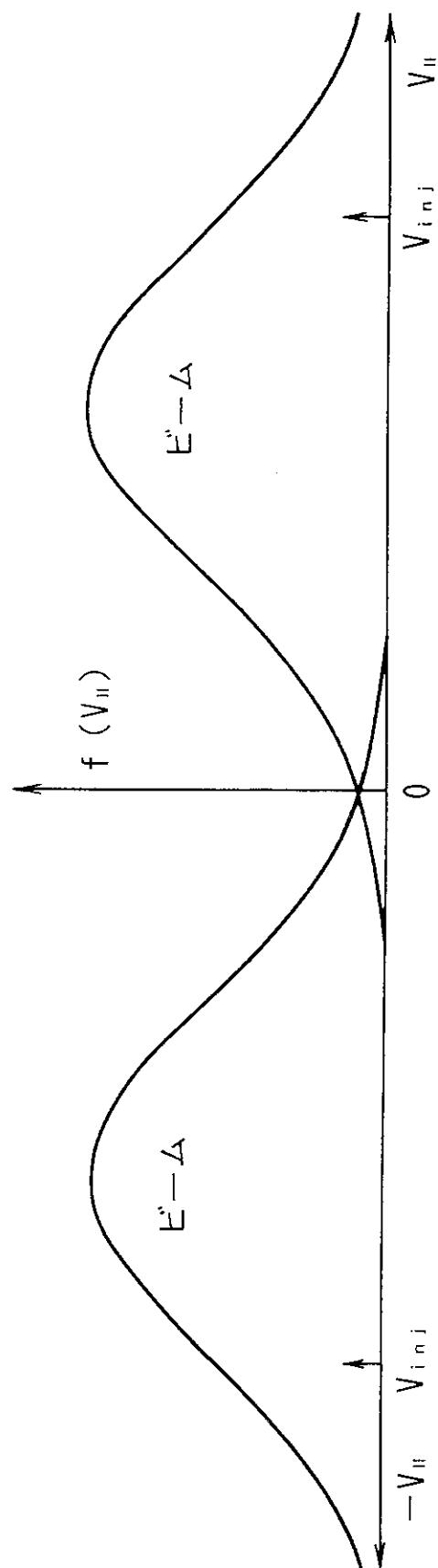
第2.1.1-3図 OFMCコードにより求めたプラズマ中の最大リップル率とリップル損失との関係。

Quasi-Perp. :これまでの準垂直NBI, Tangential :接線入射NBI,
standard :標準配位, elongated :高非円形配位。

いずれも上ユニットだけを用いた場合の計算結果である。



第2.1.2-1図 NBI電流駆動のビームエネルギー依存性



第2.1.2-2図 対抗 $\beta - \mu$ 核反応

3. 接線入射化改造に必要としたR & D

3.1 クライオポンプ内配管方式のガラスモデル流動実験

3.1.1 概要

接線入射NBI装置（T-NBI）のクライオポンプは、1ユニットあたり大型のクライオパネル6枚と小型のクライオパネル4枚の計10枚から構成され、これらは1基の気液分離器を中心に並列に接続されて使用される。クライオパネルを冷却する液体ヘリウムは、まずパネルを充分に冷却した後気液分離器に溜められ、気液分離器からの並列配管によって各パネルに供給される。その後液体ヘリウムはクライオパネルにより熱負荷を受け自然に循環する。いわゆる自然循環形供給方式である。

自然循環形供給方式のうち、大型パネル4枚と小型パネル2枚を並列に接続した方式については、準垂直NBI装置（P-NBI）にて実績があるため特に問題はないが、今回のように大型パネルを6枚、小型パネルを4枚とした計10枚ものパネルの並列接続は始めてであり、1基の気液分離器（既設の気液分離器を流用せざるを得ないため1基となる）からの並列配管で各パネルを均一にかつ十分に冷却することができるかどうかが問題となった。10枚ものパネル枚数は、ほぼP-NBIの2ユニット分相当である。

そこで、気液分離器は1基とし各クライオパネルの接続方式は並列接続を原則とすることとして、T-NBIにおける予冷および定常冷却運転に最も適した配管方式を検討することとした。検討は、ガラスモデルを用いて実際に液体ヘリウムを流した流動実験を実施しながら進めることにした。

3.1.2 液体ヘリウム流動実験

試験装置の概略系統図を第3.1.2-1図に示す。

試験装置は、クライオパネルを模擬したガラス容器（以下、クライオパネル模擬容器と言う）を4箇並列に接続し、配管径を実機相当の14mm ϕ としたものである。クライオパネル模擬容器は実機クライオパネルの容積の1/10となるように設定し（内容積1.9リットル）、気液分離器は、実機の約1/2の容積をもつ容器（6リットル）を1基とした。また、各クライオパネル模擬容器内にはクライオパネル部での熱負荷を模擬するために、最大50W出力の電気ヒータを設置した。実機における熱負荷は約40Wである。

試験装置全体は、その周囲の雰囲気を真空とする必要があるために大型の真空容器内に設置した。真空容器には覗き窓が設置されており液体ヘリウムの挙動が分かるようになっている。試験装置への液体ヘリウムは外部から供給し、装置内でガス化したヘリウムガスは、気液分離器出口配管に接続した油回転ポンプ（RP）にて大気へ放出することとした。

試験は、次の3ケースにて実施した。

(1)ケース 1

第3.1.2-1図に示す①～③の閉止板付フランジのうち、②③を開としたもの。

(2)ケース 2

第3.1.2-1図に示す①～③の閉止板付フランジのうち、②を開としたもの。

(1)ケース 3

第3.1.2-1図に示す①～③の閉止板付フランジのうち、①③を開としたもの。

上記のうちケース1は、予冷ラインおよび定常運転ラインを一本化でき、配管の簡素化および熱負荷低減化を期待したものであり、ケース2は、予冷のみ2系統とし短時間にかつ均一化された予冷を期待したものである。ケース3は、第3.1.2-1図の気液分離器を中心に右側と左側とにクライオパネル群を2分割しそれぞれに予冷、定常運転を行うもので、P-NBIにて実施している方式と同様なものである。

3.1.3 試験結果

まず予冷運転についてはケース1～3のいずれにおいても、供給開始後2.5時間～3時間で気液分離器に液体ヘリウムが溜まりはじめた。最も短かったのは、ケース2の場合で約2.5時間であった。液体ヘリウムデュワーの送り出し圧力は、0.3kg/cm²一定とした。

予冷運転時におけるクライオパネル模擬容器内への液体ヘリウムの溜まりかたは、ケース1とケース2についてはクライオパネル模擬容器間の圧力差による液面の上下動が結構あるものの4箇のクライオパネル模擬容器がほぼ同時に液溜めを開始できた。しかし、ケース3の場合は、液体ヘリウムの流れ易いクライオパネル模擬容器とそうでない容器に分かれ液溜め開始の時刻に差が生じた。時間差は、およそ10分から15分位であった。

定常運転については、気液分離器内に液体ヘリウムが充分満たされた後に、液体ヘリウムの供給を停止して液体ヘリウムの挙動を観察することにした。その結果、ケース1～3のいずれにおいても液体ヘリウムの流れはおむね円滑に循環していたが、ケース1とケース3についてはバイパスライン（予冷ライン）側に向かって液体ヘリウムの液柱が立ち上がる現象（以下、液柱現象と言う）が見られた。これは、封じきりになっているバイパスラインに液体ヘリウムが流れ込もうとして起きる現象である。この場合、封じきりライン内のヘリウムガスが周囲からの熱負荷を受けて液体ヘリウム供給圧よりも大きくなると、そのガスが一時的にクライオパネル側に流れ込む恐れがあり気液分離器での液面制御に外乱を呈することになる。今回の試験では、その外乱は見られなかったが運転制御上はあまり良いことではない。なお、液柱の高さはおむね5mm程度であった。

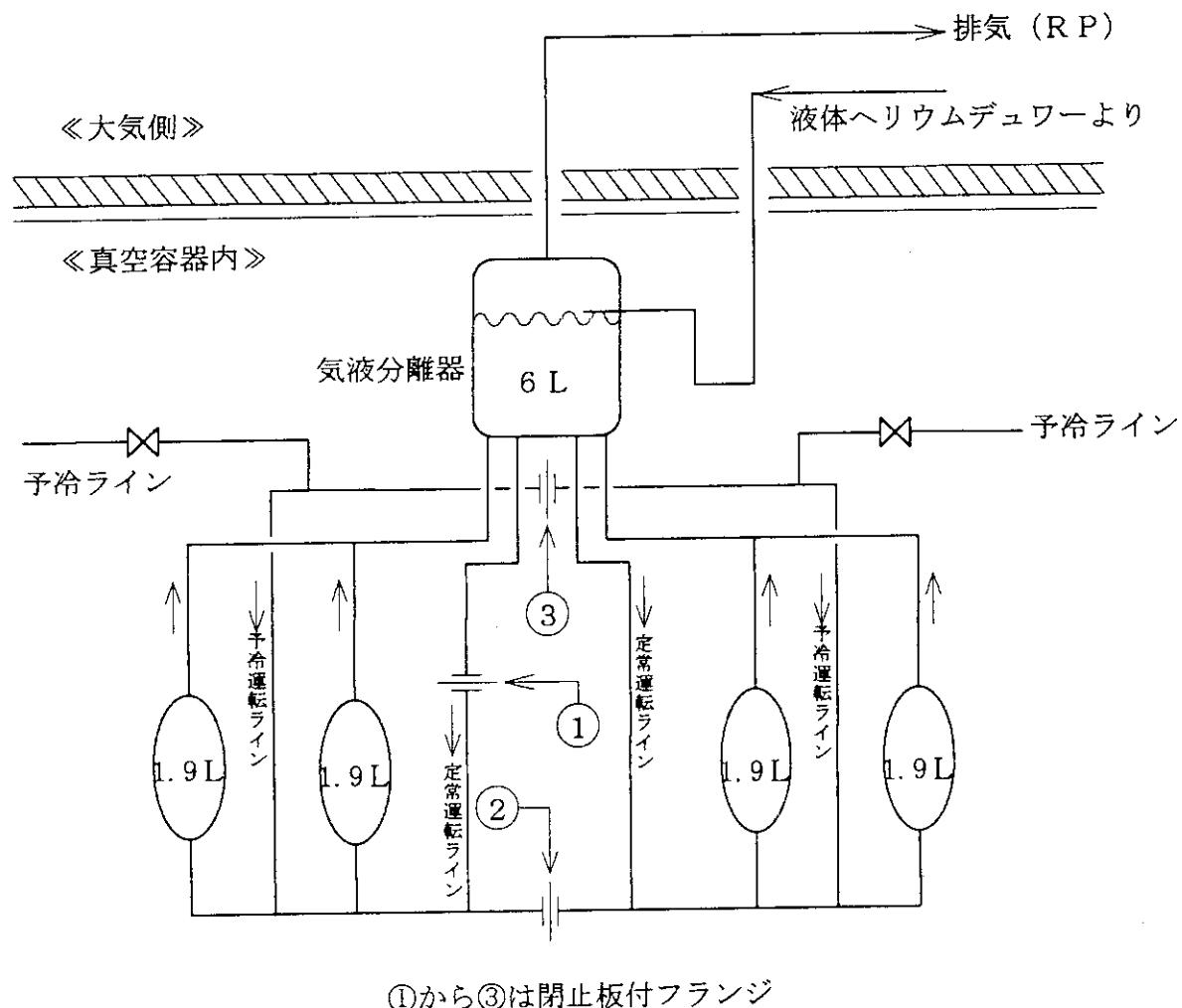
ケース2についてはクライオパネル内の圧力バランスが比較的良好く、バイパスラインへの液柱現象は起こらなかった。

ガラスモデルの定常熱負荷は、オリフィス流量計にて測定した結果、全ケースとも19.7Wであった。

3.1.4 配管方式

3ケースでの流動試験を実施したが、その結果いずれの方式でも大きな問題はなく自然に循環している様子であった。しかし、ケース1とケース3についてはバイパスラインへの液柱現象が起こっておりクライオパネル模擬容器間の圧力バランスもあまり良くなかった。よってT-NBIのクライオ配管はケース2を採用することとした。

すなわち、第3.1.2-1図に示すように予冷弁を2ヶ設置することとし、定常運転時の液体ヘリウム供給は1本のライン（第3.1.2-1図にて①のラインを削除したるものに相当する）で行う配管方式としたものである。



ガラスモデル流動実験

	①	②	③
ケース1	閉	開	開
ケース2	閉	開	閉
ケース3	開	閉	開

第3.1.2-1図 T-NBI冷媒循環系ガラスモデル流動実験

3. 2 漏洩磁場対策

3.2.1 概要

NBI装置では、ビーム引出し中のビームラインに対しトカマクからの漏洩磁場が存在するとその磁場によりイオンビーム曲げられ、ビームライン機器に多大な熱負荷を与え、あるいはビーム自体が発散性になって必要な集束性のよいビームを得ることができないなどの弊害が発生する。そのため、たとえばイオン源や中性化セルではその周囲を電磁軟鉄と μ メタルから成る2層構造の磁気シールドで囲み、あるいは磁気シールドが困難な空間については漏洩磁場を能動的に打ち消すための打消コイルなどを設置して漏洩磁場遮蔽としている。ここでは、接線入射NBI装置で採用した打消コイルによる漏洩磁場対策について述べる。

3.2.2 計算機シミュレーションおよび1/10モデル実験

NBI装置への漏洩磁場は、JT-60U本体からの磁場でありその最大値は、プラズマ電流 $I_p=6M$ A、ダイバータ放電、ベータ値 $\beta p=0.6$ 、Vコイル高非円形モードの場合である。その時の接線入射NBI装置および既設NBI装置ビームライン付近の漏洩磁場分布を第3.2.2-1図に示す。

既設NBI装置の打消コイルは中性化セル先端に設置され、中化セル出口からビームダンプに至る空間における漏洩磁場を打ち消している。一方、接線入射NBI装置への改造では、極力既設のものを流用しようとしたが、既設における磁場のベクトルとビーム軸との相関関係が接線入射NBI装置の場合と大幅に異なるため、既設のコイルは流用できないことが分かった。このため、接線入射NBI装置用打消コイルは新たに設計製作する必要が生じ、設計のデータベースを得るために以下に述べるような計算機シミュレーションおよび1/10モデル実験を行うこととなった⁸⁾。

まず、計算機にて、接線入射NBI装置の中性化セル出口付近におけるJT-60Uからの最大漏洩磁場分布を、磁気シールドおよび偏向磁石などの磁性材を実体に近い配置として計算した。その結果を第3.2.2-2図(a)(b)に示す。計算は、3次元の磁場計算コード (ELF/MAGIC) を用いた。第3.2.2-2図からも分かるようにその最大値は10mT前後である。漏洩磁場対策ではこれを1mT以下とすることにした。

次に上記の漏洩磁場を打ち消すべく打消コイルの配置を検討した。その代表例を第3.2.2-3図に示す。これらの配置を基に前述の計算コードにて検討した結果、⑥の配置が最適であることが分かった。これは、大型コイル (Mコイル) と小型コイル (Sコイル) の2つのコイルを組み合わせたもので、JT-60Uからの最大漏洩磁場相当のときに、必要な領域の磁場を打ち消して目標値以下にでき同時に不整磁場の値を目標値をわずかに超える程度に抑えることができるものである。

採用することとした打消コイルの基本的構成を以下に示す。

- (1)打消コイルは、タンク外のMコイルとタンク内のSコイルを1組とし、これをJT-60U赤道面に対し上下対称に配置して接線入射NBI装置2ユニット用とする。
- (2)Mコイルは、タンク外周を囲むように設置し、漏洩磁場を効果的に打ち消す向きの磁場を発生させ、かつ周辺機器との干渉のない形状とする。
- (3)Sコイルは、Mコイルのみでは部分的に打ち消し性能が不足するのでその領域を補足する

コイルとし、タンク内に設置する。

(4) MコイルとSコイルは、直列接続とする。

以上は計算コードを用いた結果による結論である。そこで計算結果の健全性、信頼性の確認を行うべく1/10縮小モデルを製作し計算値と実測値との比較検討を行った。

1/10モデルの構成を第3.2.2-4図に示す。1/10モデルは、磁場計算モデルに合わせるため磁気シールド部を実際の2層構造を外層のみとし、本モデルによる実測値と同一条件・同一測定点の計算値との比較を行った。その結果、全般的には良い一致を示したが、磁性体に近い部分を中心に両者の間に若干の相違点がみられた。そのため計算手法の再チェックを行い磁性材の要素指定や形状およびメッシュの切り方、B-Hカーブの入力値などの一部訂正をして再計算した。また、実測値については、発生磁場が小さいことから、1/10モデルの磁性体のわずかな残留磁気の影響が無視できない量となっていることが分かり、この分を補正して比較した。その結果、相違の程度はかなり小さくなかった。

こうして得られた打消コイル単独通電時のビーム軸上における磁場値の比較を第3.2.2-5図に示す。本図によると、偏向磁石近傍の空間では計算値と実測値とのベクトルの向きの差は約10度以下であり大きさもほぼ一致しているが、中性化セル磁気シールドに近づくにつれ向きも大きさもその差が大きくなり、中性化セル先端部では両者の差は約25度となっている。この原因は、縮小モデルが1/10スケールであることによる実測値の精度と、磁性材形状としての中性化セル磁気シールド形状が複雑であることによる計算値の精度とにそれぞれ限界があるためである。また、第3.2.2-5図は打消コイル単独通電時でのデータであるが、漏洩磁場模擬コイルの単独通電時にはベクトルの向きがほぼ逆となる。このことは両コイルに同時通電した場合は、計算に若干の誤差があったとしても互いに相殺することを意味し、結果的には有利な方向に作用することとなる。

このように中性化セル磁気シールド先端付近では計算値と実測値に若干の差が出たが、全体としては良い一致を示したことから計算値は信頼できるものと判断した。

3.2.3 打ち消しコイルの詳細

計算によりMコイルとSコイルのアンペアターンの比の最適条件をサーベイした。

まず、MコイルとSコイルにそれぞれ単独通電した時その合成ベクトルが各点毎に漏洩磁場のそれと180度の角度に近くなるのはどのような条件かを検討した。対象の計算点は、漏洩磁場の影響の一番大きい中性化セル先端と偏向磁石前面の中間点とした。その結果、アンペアターン数は、Mコイルを74kAT、Sコイルを3kATとした時に各点のベクトルの向きが平均として最適であることが分かった。最終的なMコイルとSコイルの形状を第3.2.3-1図に示し、漏洩磁場を打ち消したときの磁場分布を第3.2.3-2図に示す。

次に、この打ち消し後の磁場データを用いてイオンビームの軌道・熱負荷計算を行い、ビーム軌道に悪影響のないことと熱負荷に極端なアンバランスがないことを確認した。

以上の結果よりコイル仕様を決定した。決定に際しては、コイル導体の断面積や並列数は既設の打消コイル電源がそのまま使用できるように選定した。

コイルの仕様は以下のとおりである。

(1) Mコイル

アンペアターン；74ターン×1000A

使用導体；2重ガラス巻き平角線（4.5×15mm）3並列

電気抵抗；～135mΩ

重量；～2.3Ton

冷却方式；自然空冷

(2) Sコイル

アンペアターン；3ターン×1000A

使用導体；中空導体（12.5×10／9.5×7mm）

冷却方式；水冷

両コイルを直列接続したときの抵抗は、約140mΩ、自己インダクタンスは約60mHである。一方既設の打消コイル電源の定格は、160V、1200Aであり最大漏洩磁場を打ち消す場合の打消コイル電流1000Aを通電したとしても電圧余裕は約20Vとなる。この値は、1000Aを10秒間で立ち上げるとして最小の余裕電圧が6V ($0.06H \times 1000A / 10s = 6V$) と見積られることからゆっくりとした漏洩磁場の変化には充分余裕のある値である。

3.2.4 接線入射NBI装置における打ち消しコイルの電流制御

接線入射NBI装置の打消コイルは、既設NBI装置で使用していた2台の独立した電源を再利用することにしており、上下ユニットの打消コイルは、同時通電を原則としている。そのため、上下ユニットの磁場が互いに干渉しないか、制御上への影響はないか等について調査検討を行った。

まず制御用の漏洩磁場と残留磁場の各信号を検出する磁気プローブ1と磁気プローブ2の配置および検出方向について既設NBI装置に準じた方法でよいかどうかを計算により調べた。両プローブを既設NBI装置に準じた方法で設置した場合の#7、8ユニットでの配置を第3.2.4-1図に示す。図中の①；プローブ1、②；プローブ2がそれである。具体的には、プローブ1は既設NBI装置主排気タンクの側面に設置したもので、JT-60U本体中心軸からの水平距離R=8.5m、JT-60U本体水平面からの上下方向距離Z=±4mの位置である。プローブ2は、中性化セル先端に配置したものでR=11.2m、Z=±1mの位置となる。

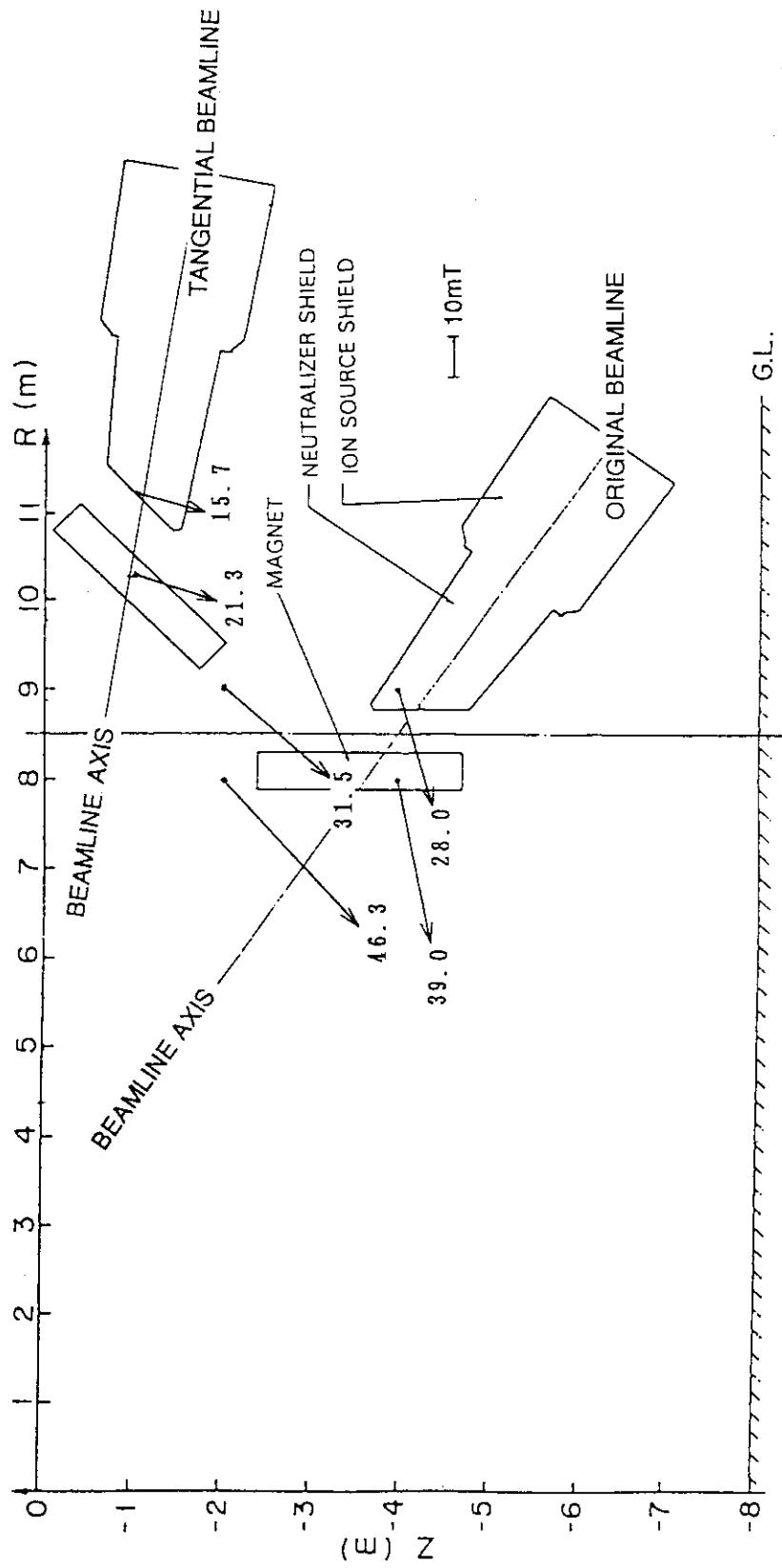
この配置における計算結果より、プローブ1は打消コイルによる磁場の影響をほとんど受けずに、プローブ2は漏洩磁場および打消コイルによる磁場を打消コイルに比例した値で検出できることが分かった。

次に磁場の相互干渉について検討した。接線入射NBI装置の打消コイルは先にも述べたように上下ユニット用の一対のコイルを2台の電源で同時通電するため、上下ユニットのコイル電流のバランスが取れず双方の制御が正常に行われない等の影響が懸念された。その対策として、上下のコイルを直列通電すれば一応の解決にはなるが、そのためには既設の電源の改造が必要となりさらには上下ユニットの打消強度の個別微調整ができなくなるなどから直列通電は不採用とした。

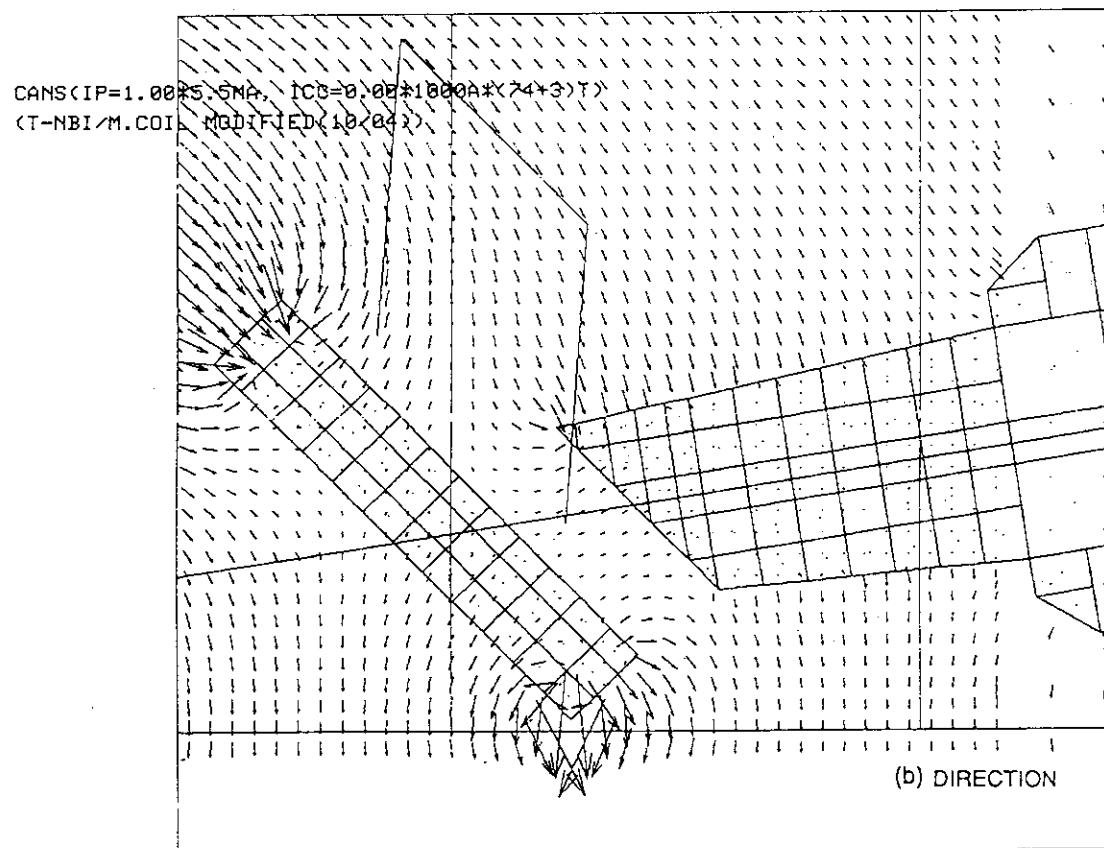
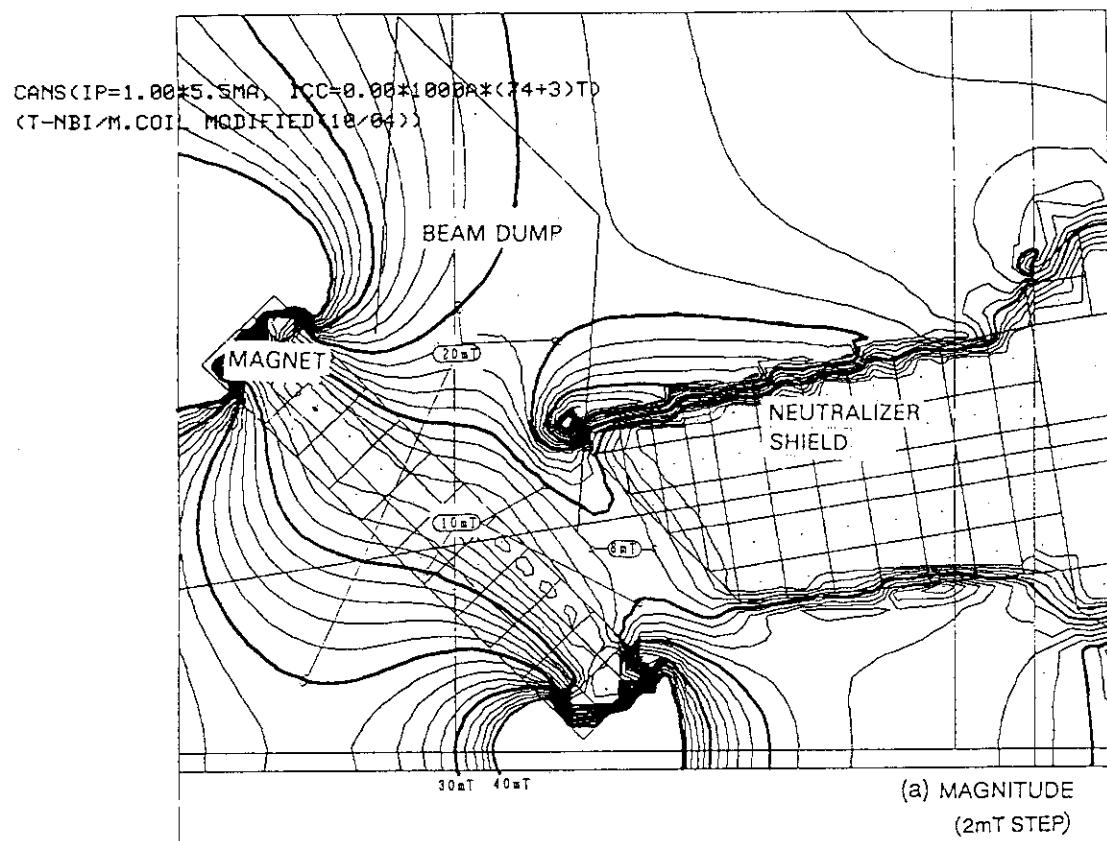
本件に関しては、プローブ2の位置での漏洩磁場や打消コイルを単独通電したときの各磁場のベクトルがどのようになるかを計算した結果、第3.2.4-2図に示すように、プローブ2は漏洩磁場と上下の打消コイル同時通電の差となる向きの磁場を検知できることが分かり、また上ユニットから見た場合上下一対のうちの相手側に当たる下ユニットのコイルのみ通電した場合のベクトルは漏洩磁場のそれに近いことが分かった。これは、なんらかの原因で上下

ユニットの電流バランスが崩れて相手側ユニットの電流が過大なった場合でも自ユニットの電流は増大側に作用してバランスを取ろうとすることであり、制御系にとっては大変好都合な作用である。したがって、上下ユニットの打消コイルは当初の方針通り2台の独立電源で同時通電とすることにした。

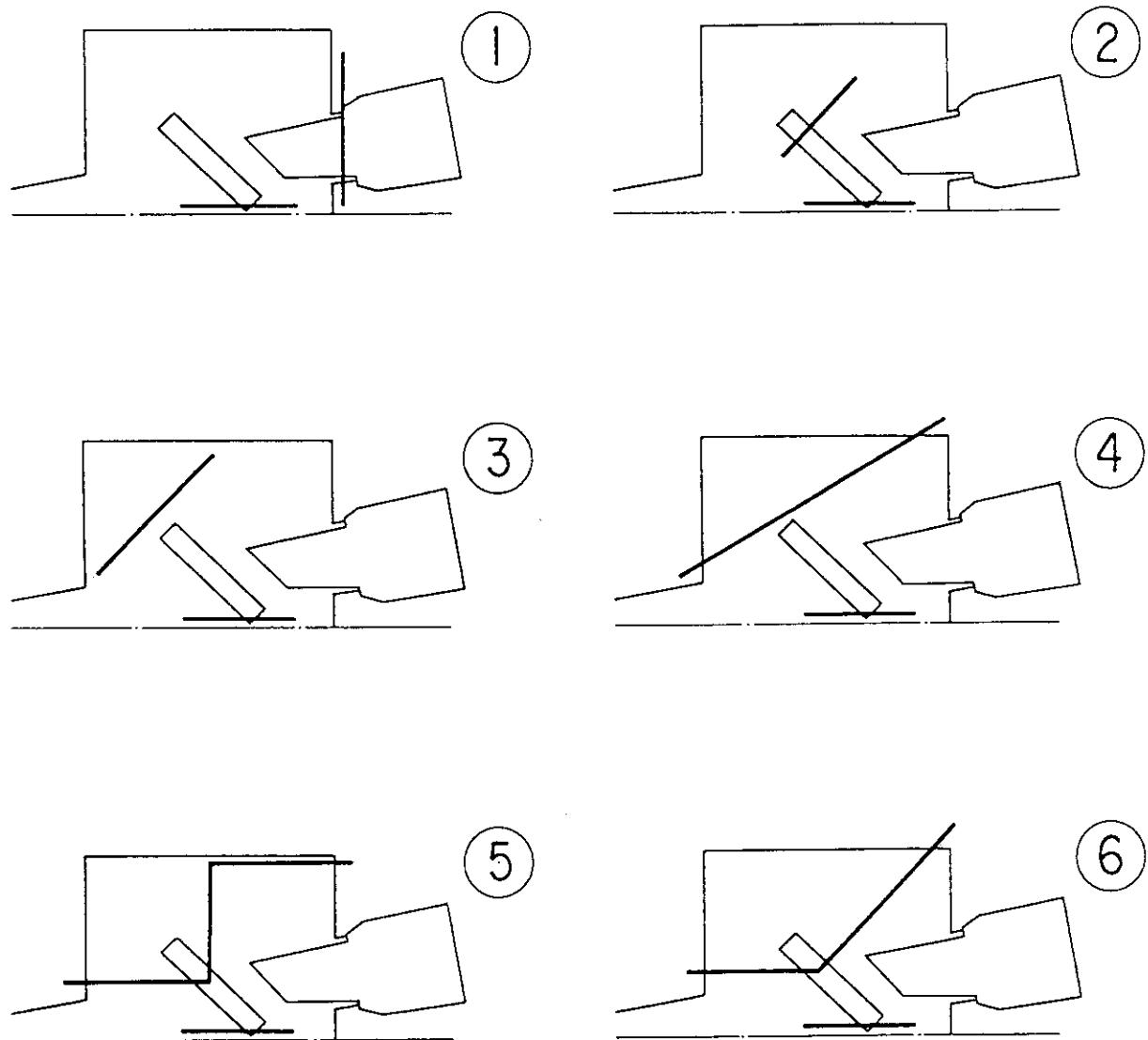
その他、制御上の問題として既設NBI装置にくらべMコイルが大きいためコイル全体の自己インダクタンスが約60mHと既設の約6倍になることや、プローブ1、2の配置の相互関係も既設とは異なるなどがあったが、これらはいずれも制御系の定数の再調整をして解決した。



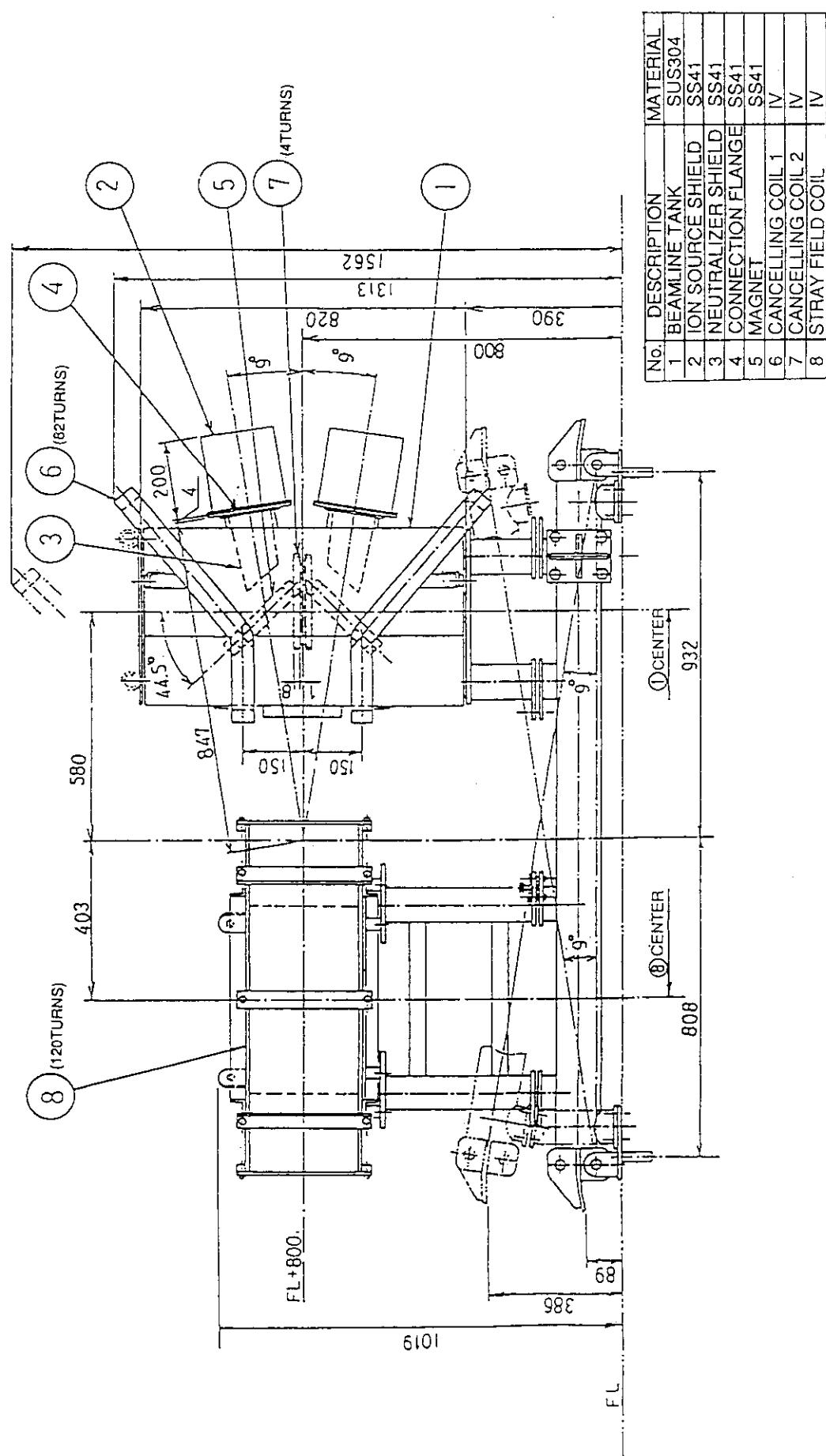
第3.2.2-1図 JT-60Uからの漏洩磁場分布（磁気シールドなし）



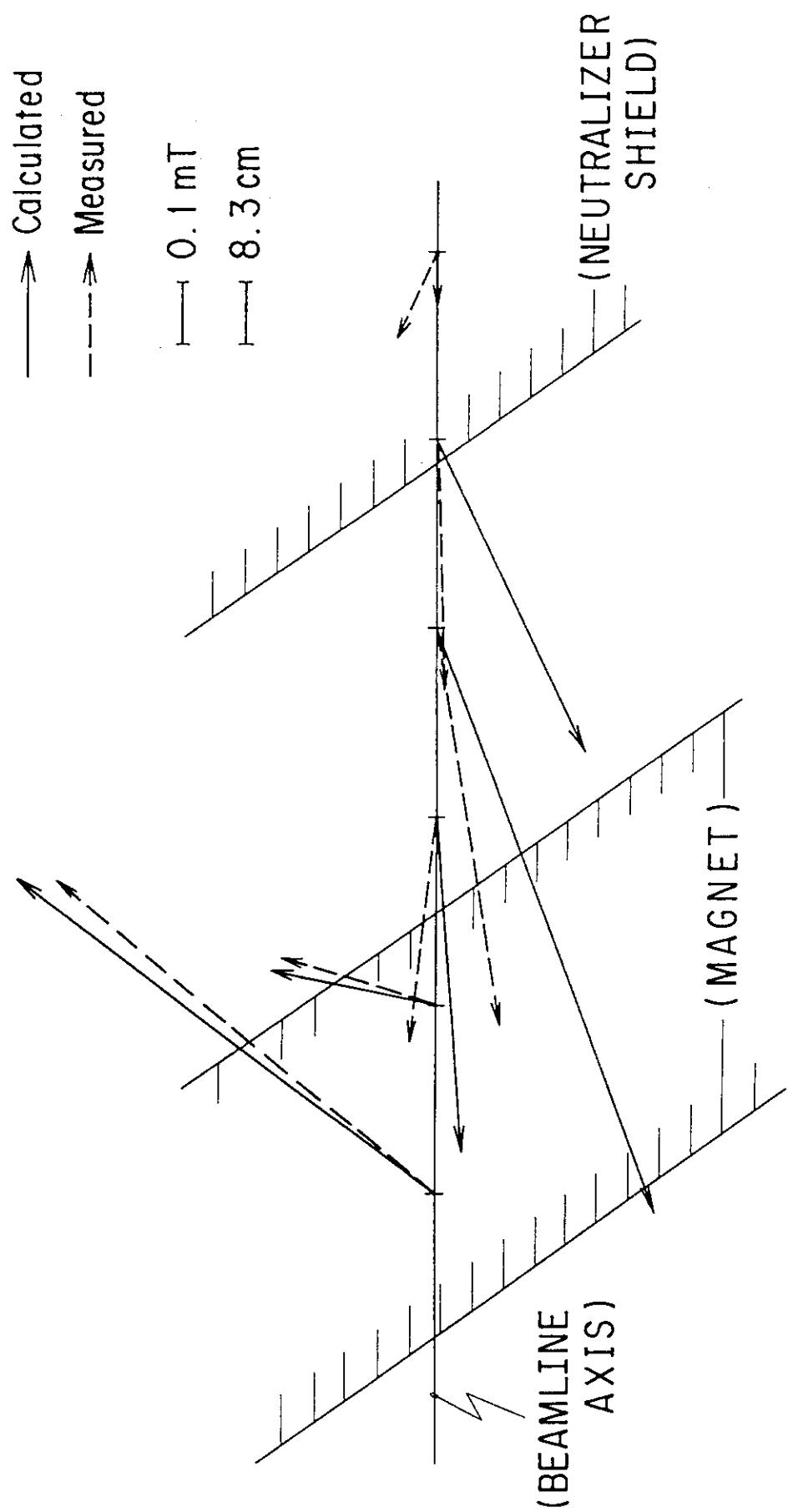
第3.2.2-2図 中性化セル出口付近の最大漏洩磁場の大きさ (a) と向き (b)



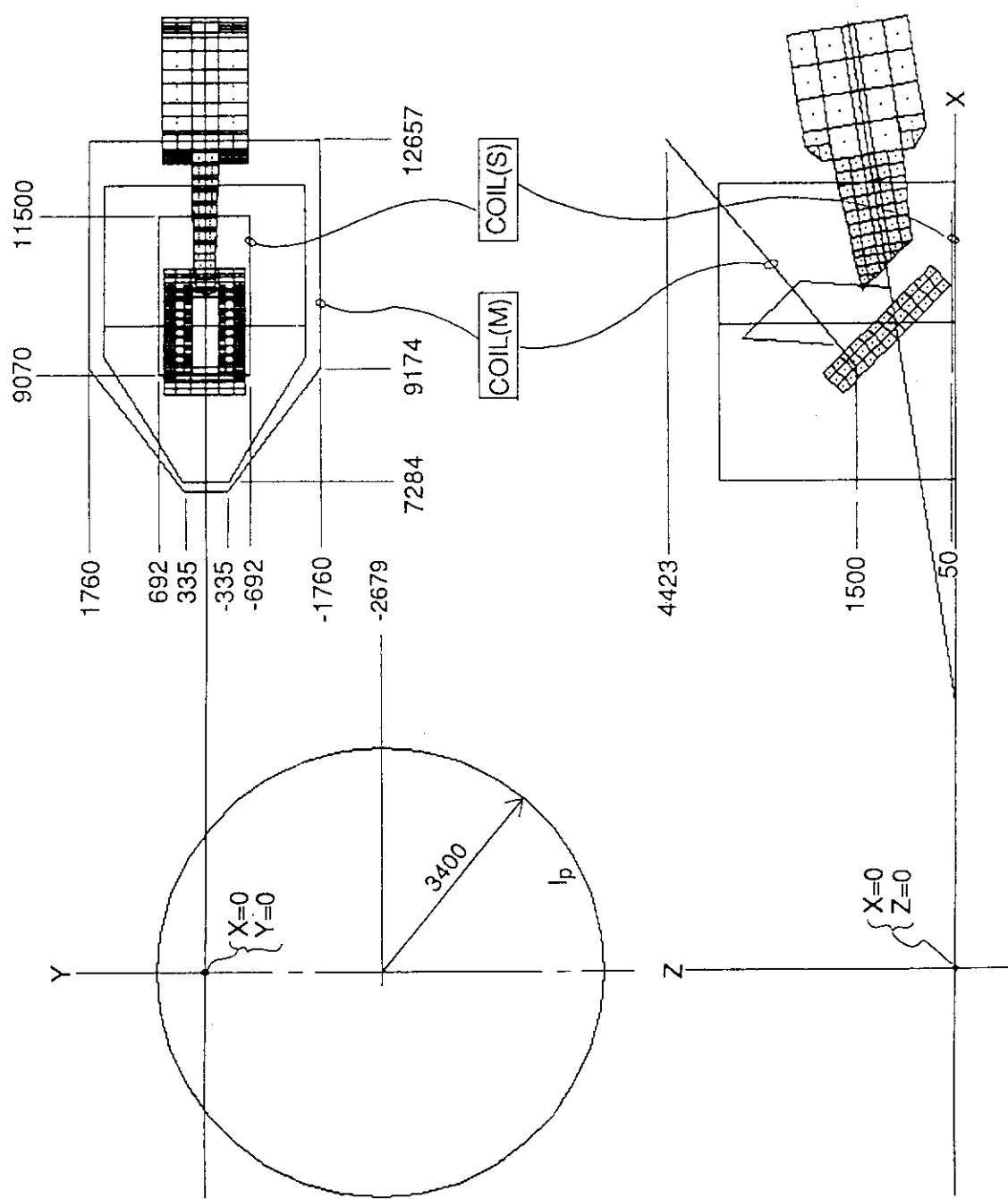
第3.2.2-3図 接線入射NBI装置の打ち消しコイル形状と配置例



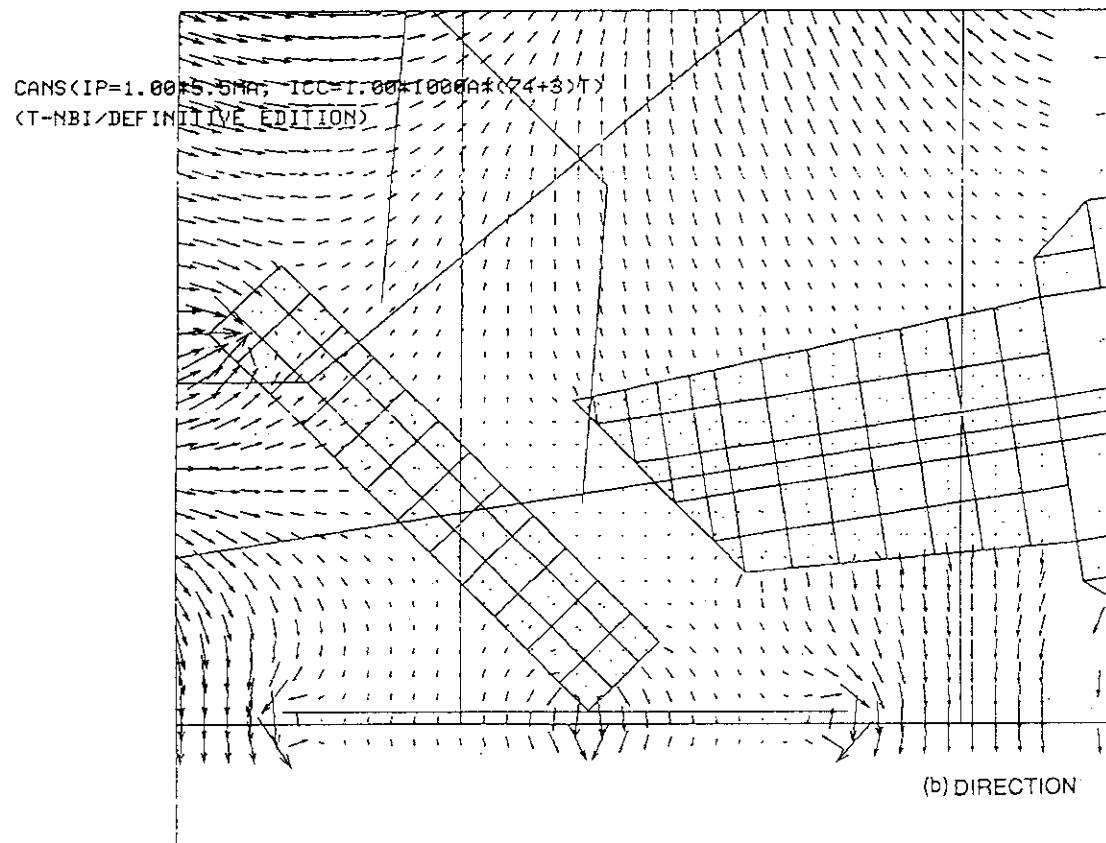
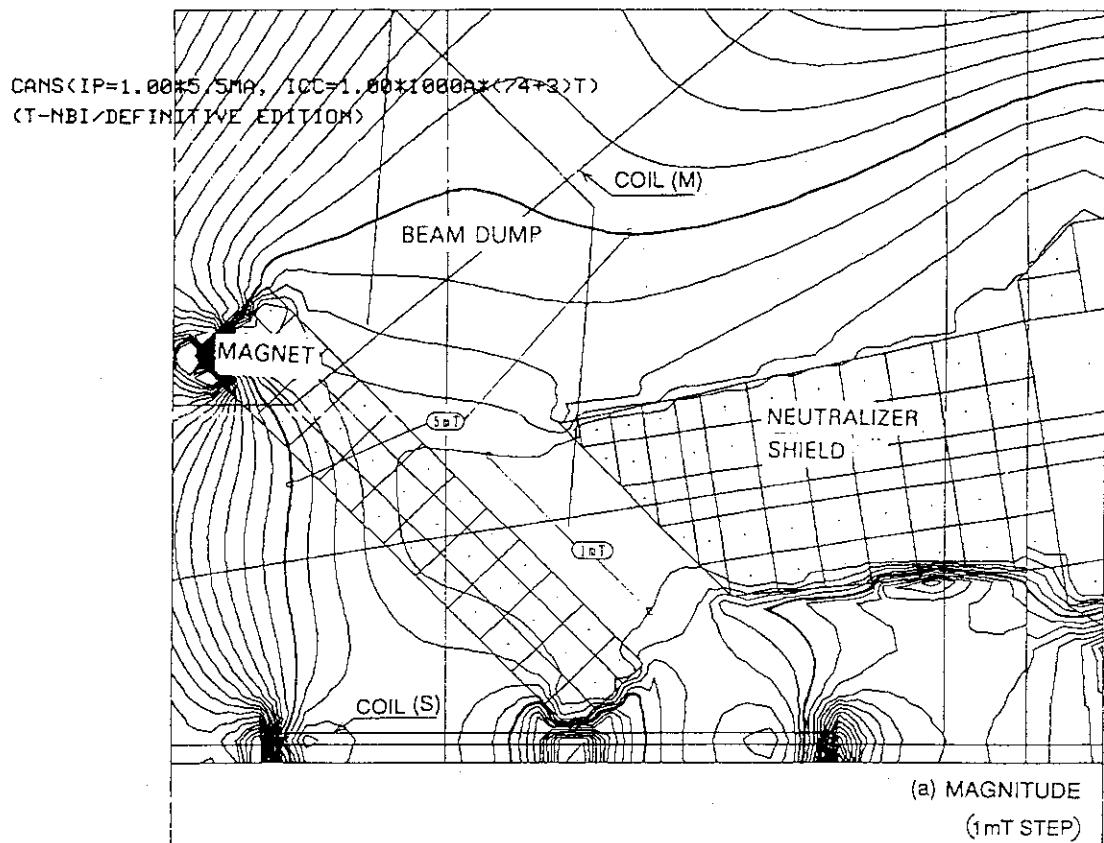
第3.2.2-4 図 打ち消しコイル1/10モデル構成図



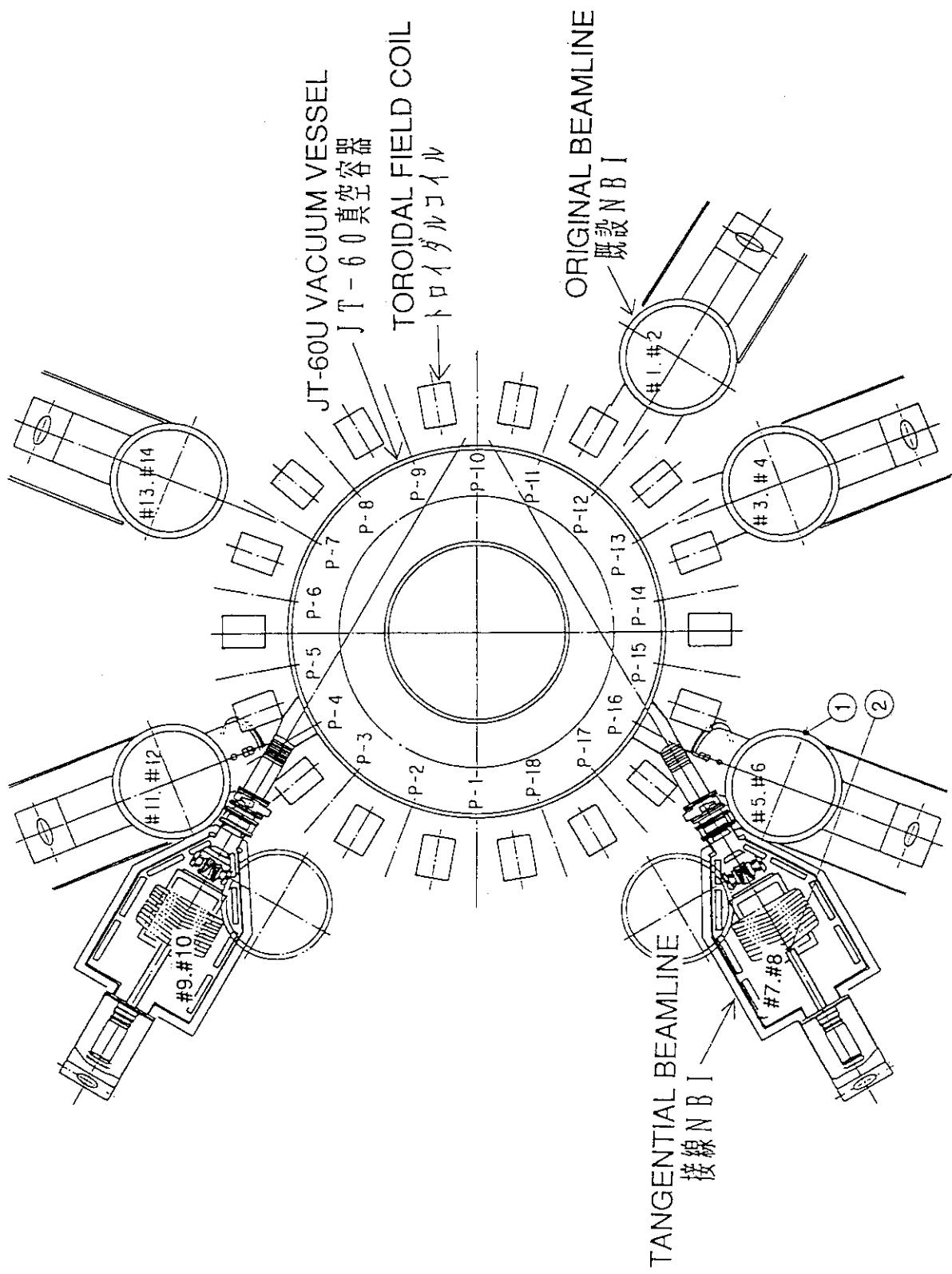
第3.2.2-5図 ピーム軸における磁場の計算値と測定値の比較
(打ち消しコイル単独通電)



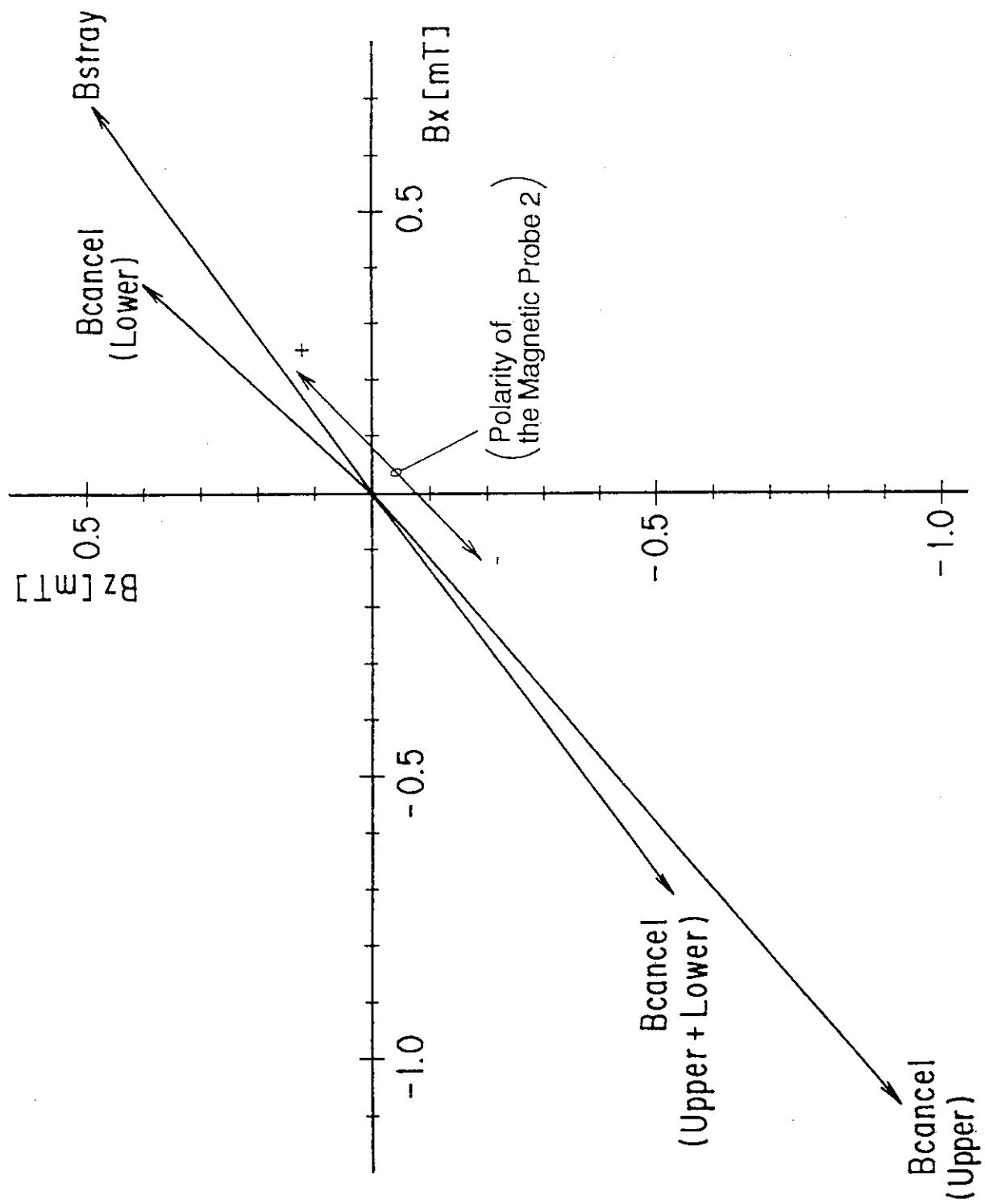
第3.2.3-1図 接線入射NBI装置上ユニットの打ち消しコイル形状と配置



第3.2.3-2図 漏洩磁場打ち消し後の磁場分布（計算値）



第3.2.4-1図 磁気プローブの配置（#7, 8ユニットの場合）



第3.2.4-2 図 プローブ2における漏洩磁場と打ち消し磁場との比較（計算値）

4. ビームライン全体構成

4.1 ビームライン全体構成およびビーム軸基本寸法

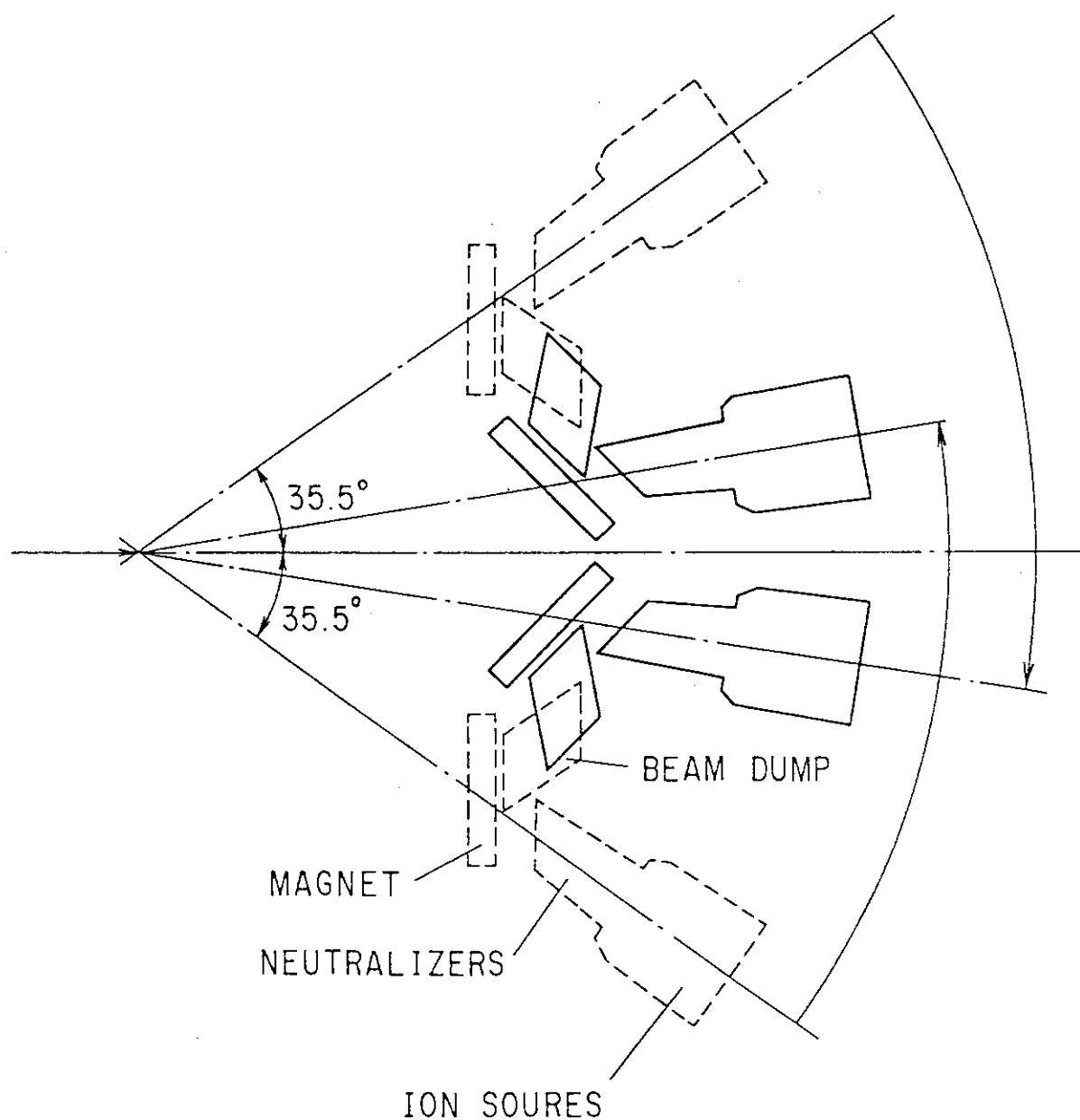
接線入射NBI装置は、そのビーム軸の仰角をなるべく小さくし、ビームをできるだけトカマクプラズマの赤道面に沿って入射させることが望ましい。準垂直NBI装置の場合は当初JT-60に取付けられていた外側ダイバータコイルを避けてビームラインを設定したことから上下の斜めポートより $\pm 35.5^\circ$ の角度で入射している(第2.1.1-1図(a))。一方、接線入射NBI装置では、既設NBI装置のイオン源(2台)、中性化セル(2本)、偏向磁石およびビームダンプ等ビームライン機器をそのまま再利用することとした。したがって、これらビームライン機器の相互位置は固定したまま入射角度を極力小さくする必要が生じた。また、ポートからイオン源までの距離は、ビーム発散による幾何学的損失の観点からあまり長くできない。そこでこれらの条件の下で最も仰角を小さくできる方法として、第4.1-1図に示すように既設NBI装置における上下ユニットのビームライン機器を上下位置交換することとした。すなわち上ユニットビームライン機器を下側に、下ユニットビームライン機器を上側に配置することとし、その結果、仰角は上下の偏向磁石の空間的干渉が避けられる最小の角度 $\pm 9^\circ$ まで小さくすることができた。

赤道面に投影した図において、トカマク中心からビーム軸に下ろした足の長さ(接線半径)をプラズマの主半径程度とするとビーム吸収分布がプラズマ中心で良くピーキングし、電流駆動効率も最大となる⁴⁾。したがって接線半径についてはトカマクの主半径程度にするのが望ましいが、ビームはトロイダルコイル間に設けられたポートから入射するものであるので、ビーム軸を垂直から接線にするにつれてビーム軸方向に見たポートの幅が狭くなる。そこで必要なポートの幅の確保できる最大の接線半径としてR=2679mm、約2.7mとした。これはプラズマ形状にもよるが概略(主半径)-(2/3)(小半径)である。

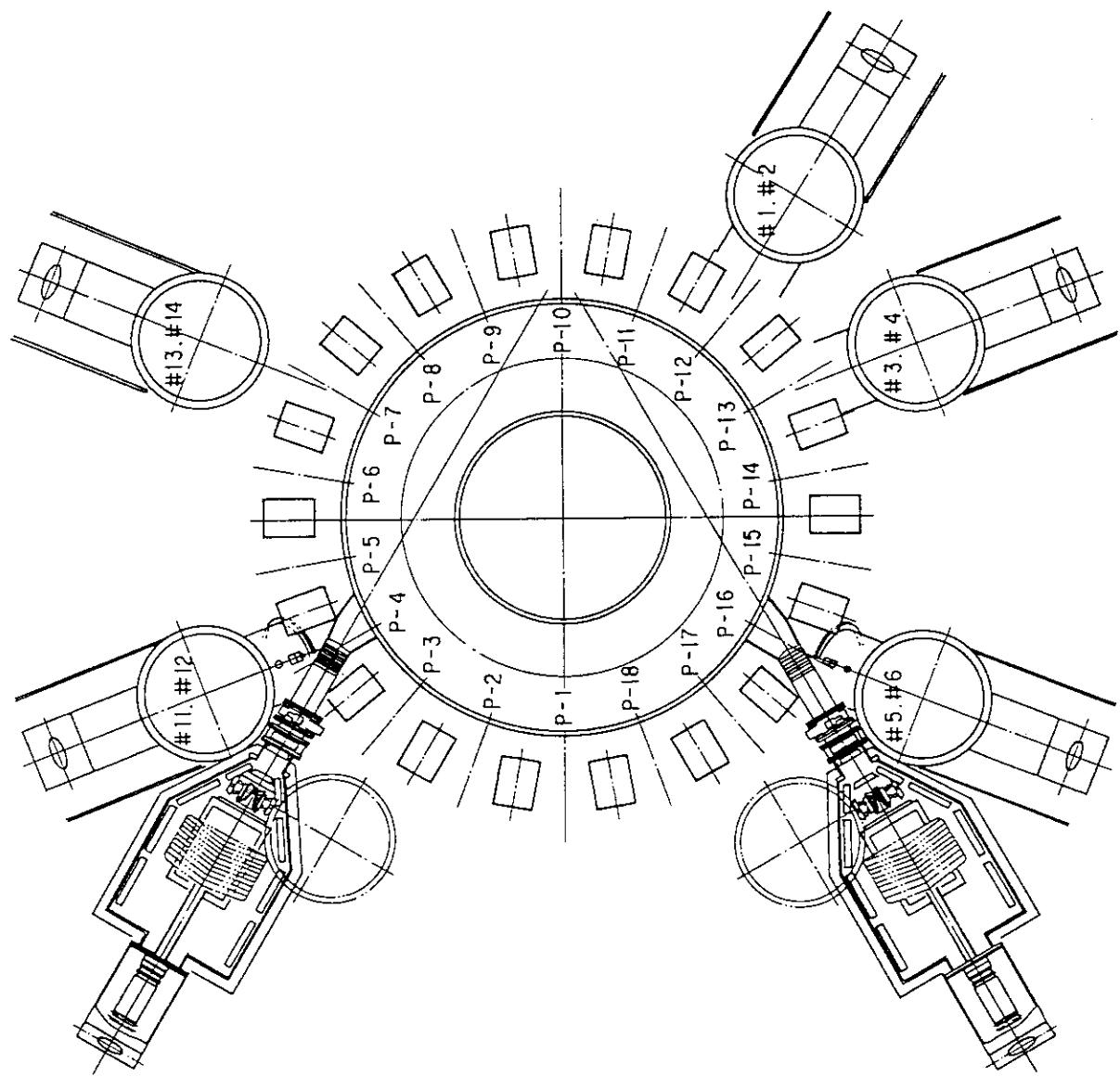
第4.1-2図に接線入射NBIの全体配置平面図を、-3図に同拡大図、-4図に断面図、-5図にビームライン内部の鳥瞰図を示す。第4.1-2図中、#1~6、#11~14ユニットは既設NBI装置、#7、10ユニットが接線入射化されたNBIである。正/逆方向入射毎に上下ユニットは共通の真空雰囲気下に置かれ、かつビームラインは上述のように上下入れ替えられているが、既設準垂直NBIと同様に下ユニットを奇数番(#7、9)、上ユニットを偶数番(#8、10)と呼称することとした。

ビーム軸基本寸法図を第4.1-6図に示す。上および下ビームライン中心軸はイオン源の接地電極を起点(M、M')としJT-60U真空容器との接続点であるNBIポート出口部の点Eで交叉する。また、2台のイオン源は、M点を中心にして上下対称に取付けられ、それぞれのイオン源の中心座標はI1、I2となる。イオン源から入射ポートまでの概略の距離はME=9035mmであり、これは準垂直NBI装置の同距離8300mmより少し長くなっている。

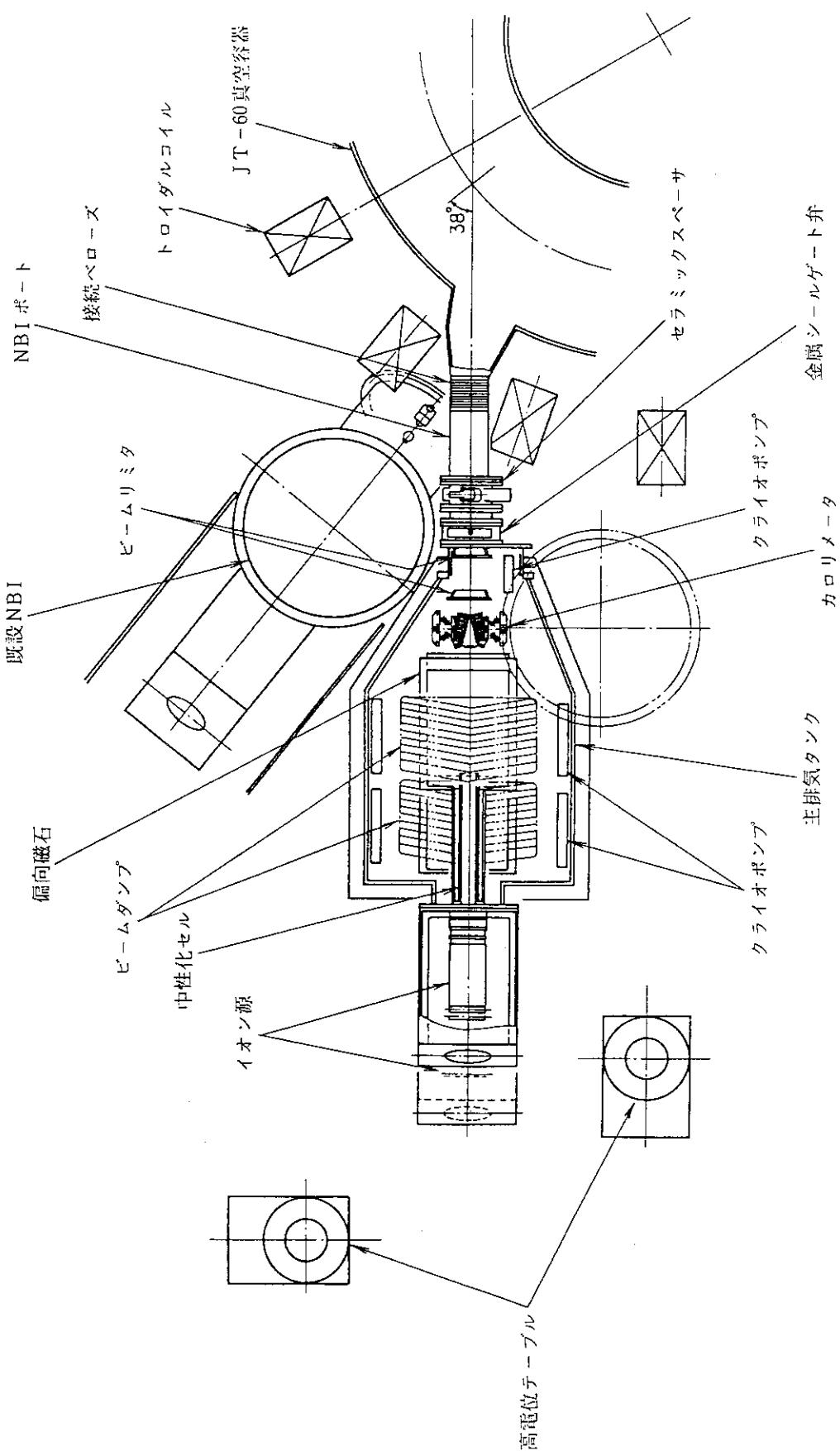
第4.1-7図にJT-60Uを含めた全体配置鳥瞰図を示す。



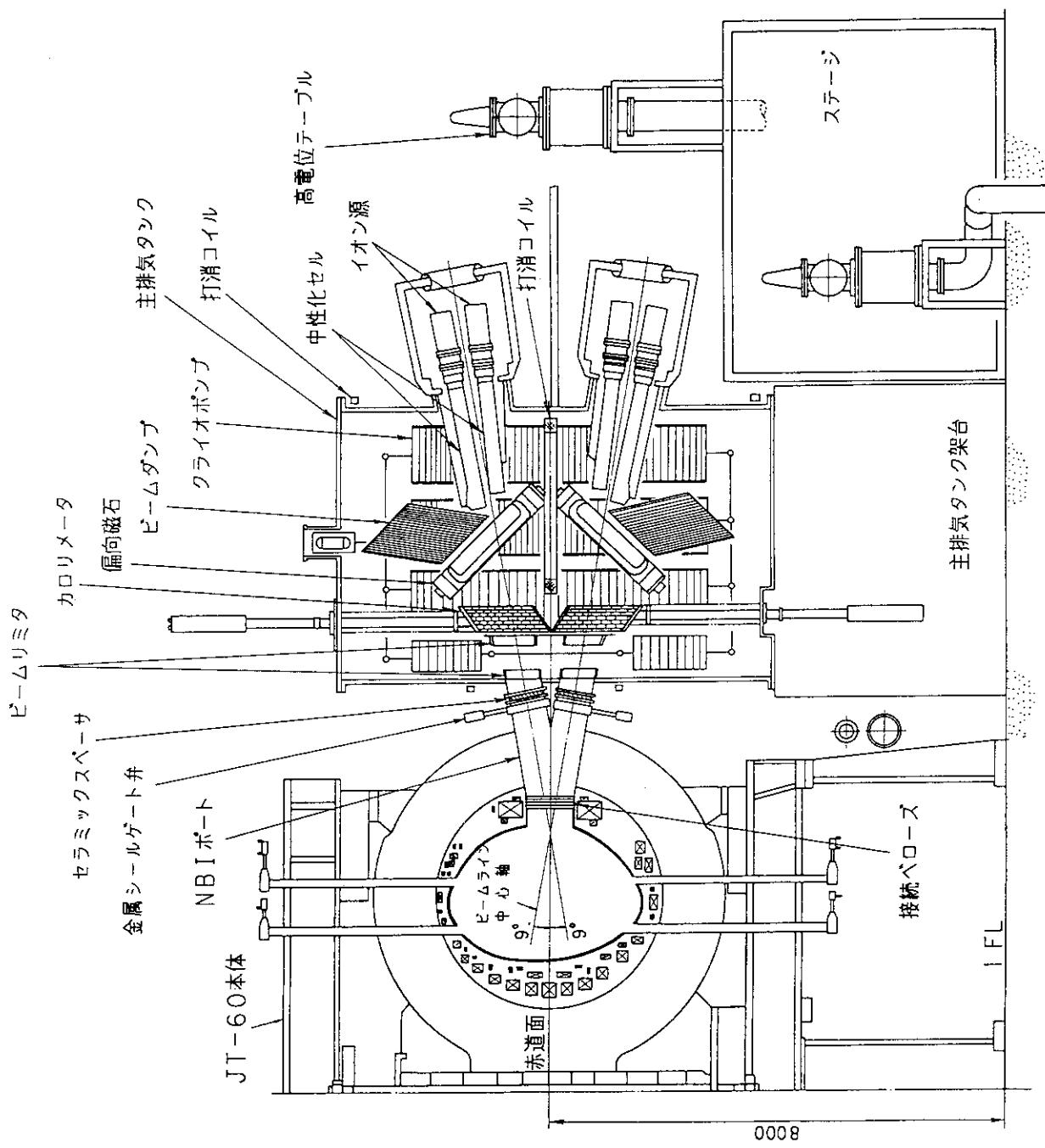
第4.1.1-1図 イオン源、中性化セル、偏向磁石、及びビームダンプの位置の変更方法。



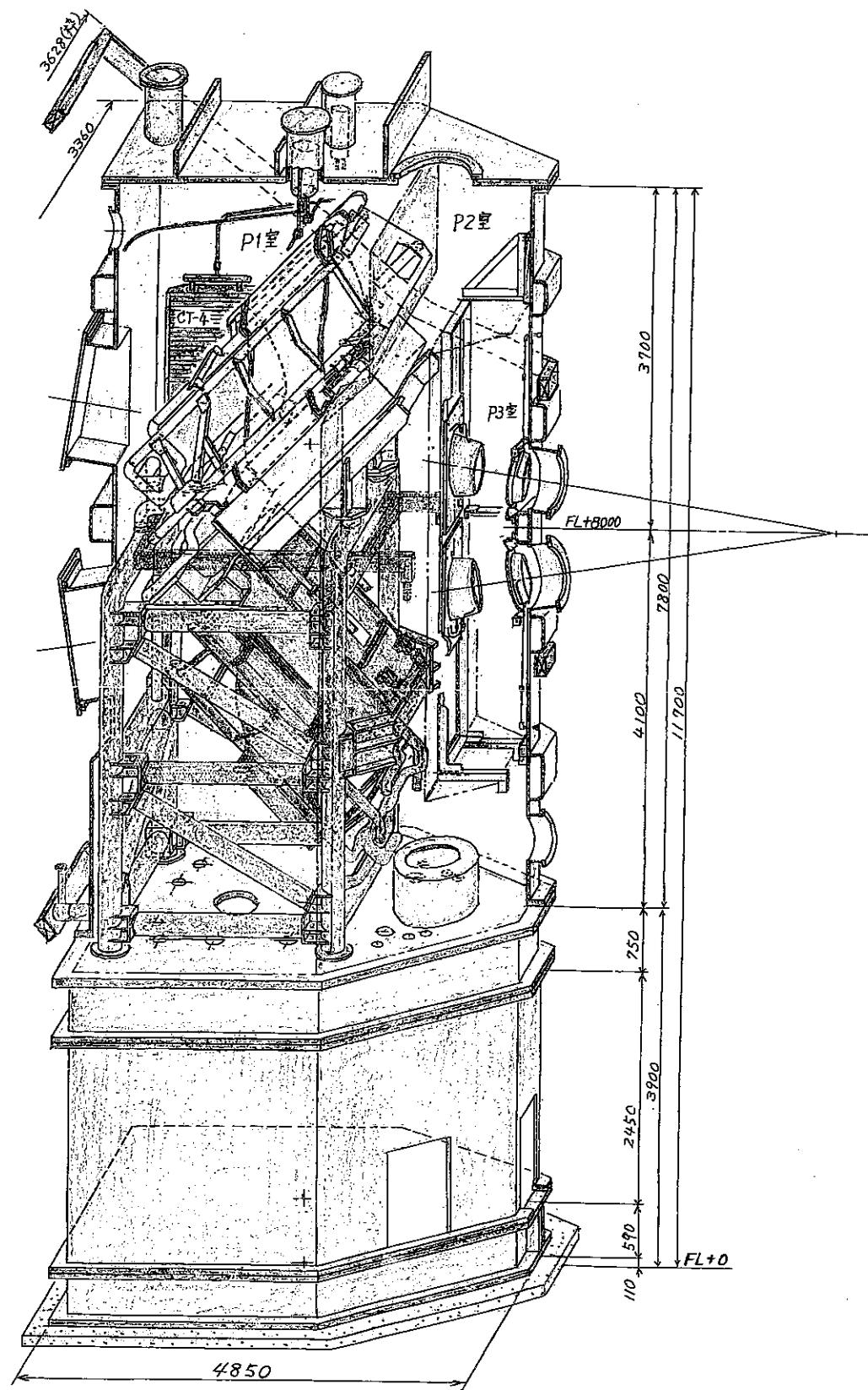
第4.1.1-2図 極線入射NBIの全体配置平面図。



第4.1.1-3図 接線入射NBIの平面拡大図。



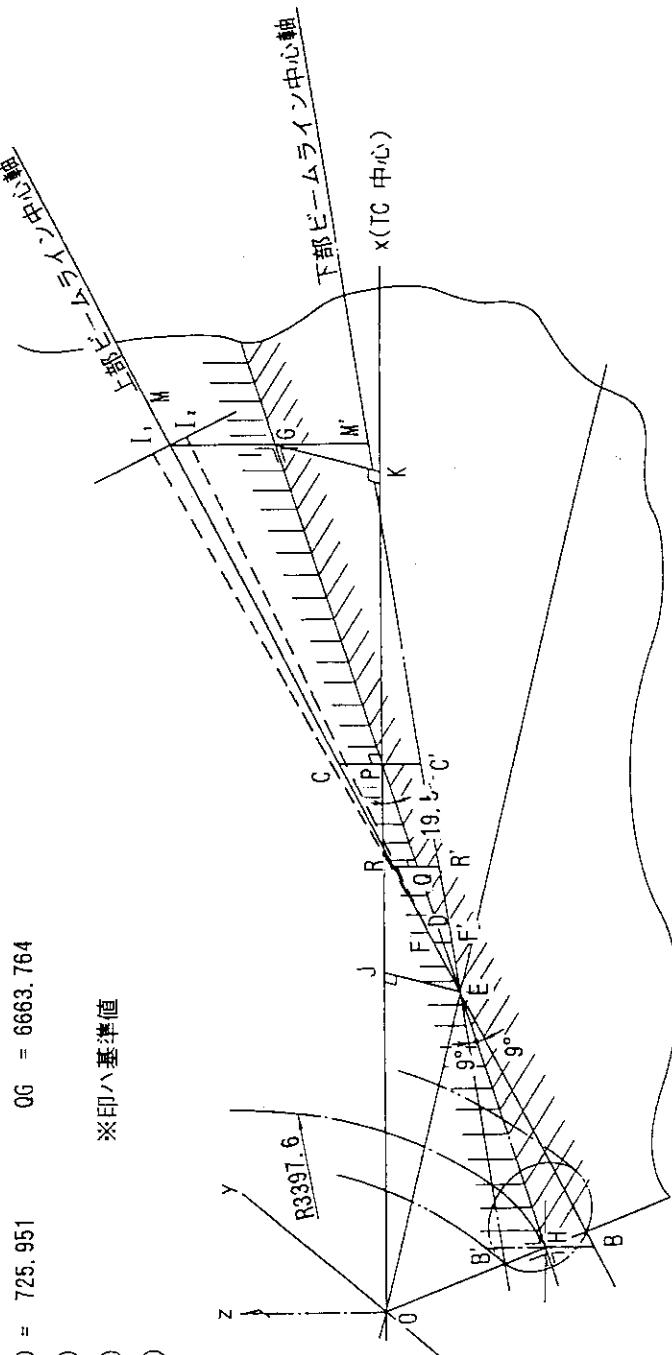
第4.1.1-4図 接線入射NBIの断面図。



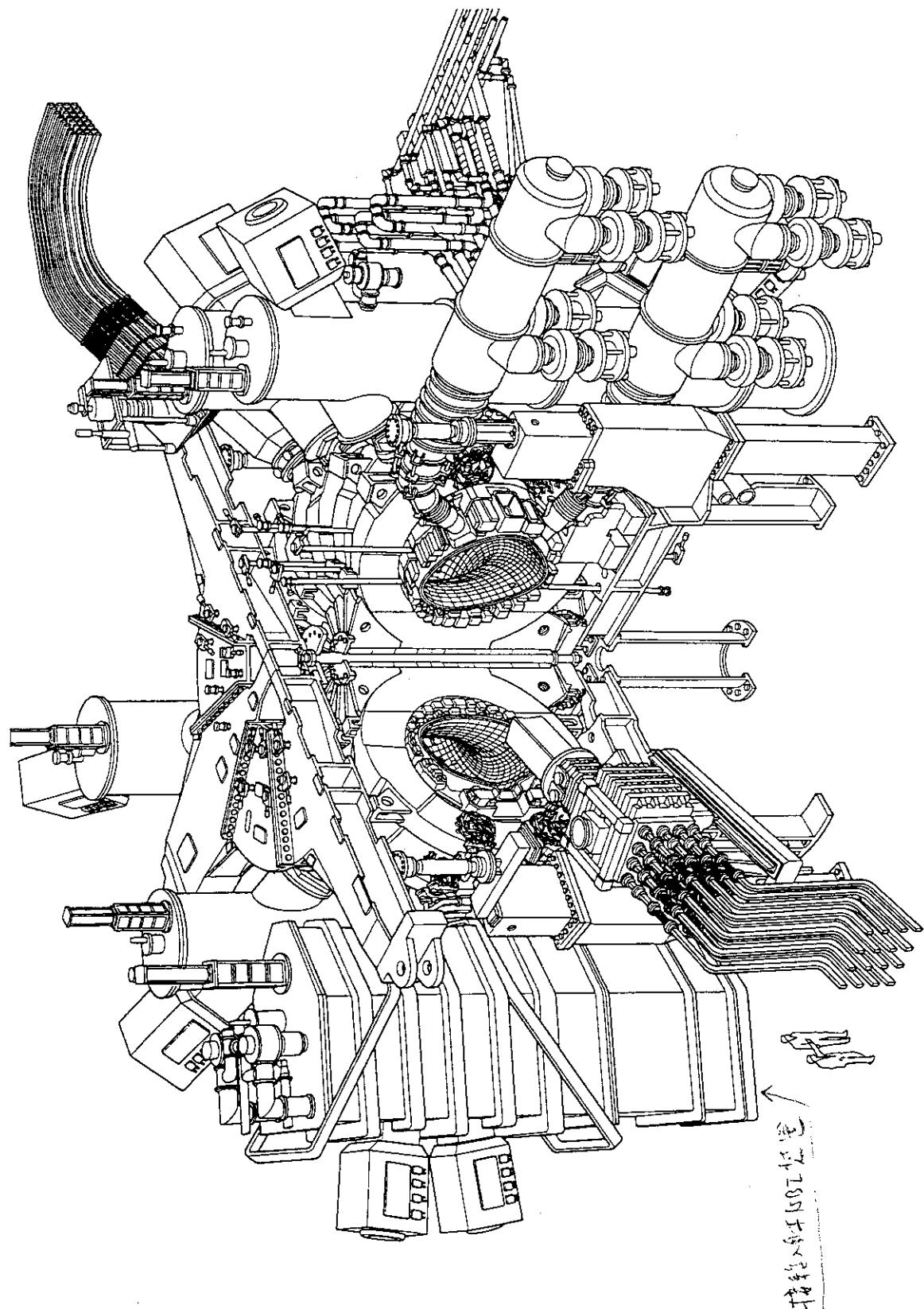
第4.1.1-5図 接線入射NBIビームライン内部の鳥瞰図。

※ OP = 8025.	PC, PC' = 559.334	EF, EF' = 735.0	QR, QR' = 357.749
※ EP = 3531.5	PG = 5392.264	ER, ER' = 2288.171	GM, GM' = 1413.385
※ EM, EM' = 9035.	PH = 7564.698	EC, EC' = 3537.521	RM, R'M' = 6746.829
※ EO = 2260.	PO = 2805.549	EG = 8923.764	CM, C'M' = 5459.479
※ FM, F'M' = 8300.	PK = 5082.772	FC, F'C' = 2840.521	M1, M1' = 275.0
※ $\angle OPE = 19.5^\circ$	E0 = 4841.761	HB, HB' = 638.796	OJ = 4696.06
※ $\angle MEG = 9.0^\circ$	EJ = 1178.84	HG = 12956.962	OK = 13107.972
$\angle EOP = 56.408$	EH = 4033.198	DG = 8197.813	JP = 3328.94
$\angle POH = 70.5^\circ$	EB, EB' = 4083.472	DF, DF' = 114.979	KG = 799.975
※ $\angle OHE = 90^\circ$	ED = 725.951	QG = 6663.764	
E. (-4696.1, 1178.8 P. (-8025.0, 0.0 M. (13108.0, 1800.0, 1413.4)	0.)	0.)	

※印ハ基準値



第4.1.1-6図 ビーム軸基本寸法図。#9, #10の場合。#7, #8は勝手違いたる。



第4.1.1-7図 全体配置・鳥瞰図。

4. 2 イオン源

イオン源は、既設の準垂直NBI装置のものをそのまま再使用したので、ビーム性能、運転方式は、準垂直NBI装置と全く同一である。イオン源構造図を第4.2-1図に示す。

本イオン源は、バケット型イオン源と呼ばれ、イオン生成部と加速部とから構成されている。全体寸法は、約600mmW×500mmD×1000mmHであり、重量は約450kgである。

イオン生成部は、アーク放電室（アークチャンバー）、8本のフィラメント、カスプ磁場用永久磁石およびガス導入系等から成り、アークチャンバー下面開口部には第1正電極が配置される。

アーク放電により生成されたプラズマは、アークチャンバー内に一様に広がり、アークチャンバー外側に配置された永久磁石の作るラインカスプ磁場により安定に閉じ込められる。

加速部は、第1正電極、第2正電極、負電極および接地電極の4枚の多孔型電極から構成される。第1正電極、第2正電極に正の電位を与えることにより、イオン生成部にて生成されたソースプラズマからイオンを引出し、加速する。第1正電極電位によりビームのエネルギーが決まる。

イオン源の性能は以下のとおりである。

ビームエネルギー	： 最大 120 keV
イオンビーム電流	： 35 A (重水素ビーム)
	40 A (水素ビーム)
ビーム発散角	： 1度
ビームパルス幅	： 最大 10 秒
ビーム種	： 重水素／水素
ビーム成分比	： (H+ : H2+ : H3+) = 92 : 5 : 3

準垂直入射NBI装置では、イオン源からポート出口までの距離が8.3mであるのに対し、接線入射NBI装置では約9.1mと0.8mも長くなっている。そのため、幾何学的入射効率（ビーム発散：1度の場合）は、0.88から0.86と約2%減少する。

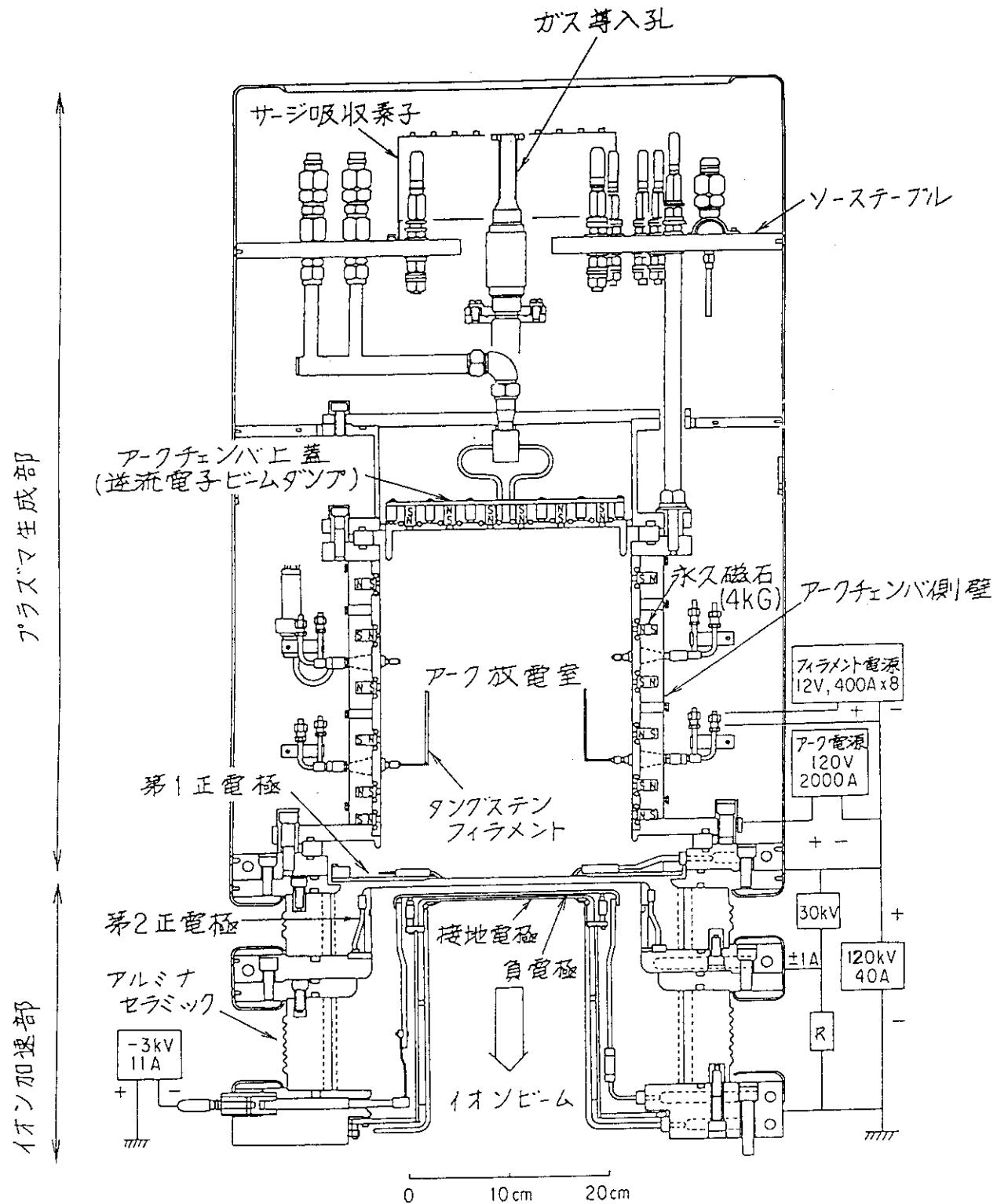


図4.2.1 イオン源構造図

4. 3 ビームライン

4.3.1 ビームライン改造項目

NBI接線入射化改造に際しては以下の課題について解決する必要があった。

①ビームライン軸の角度が変わるためにJT-60Uからの漏洩磁場遮蔽を新たに設計し直す必要が生じた。遮蔽方式として磁気シールドかまたは打消コイルによる能動的遮蔽を考えた。結果的には、打消コイルによる方式とした。

②ビームライン角度が変更になったため、ビームライン機器のサポート構造を再設計する必要が生じた。

③ビームラインの空間的な制約が厳しく、これを配慮しつつ真空容器を新たに設計製作しなければならなかった。

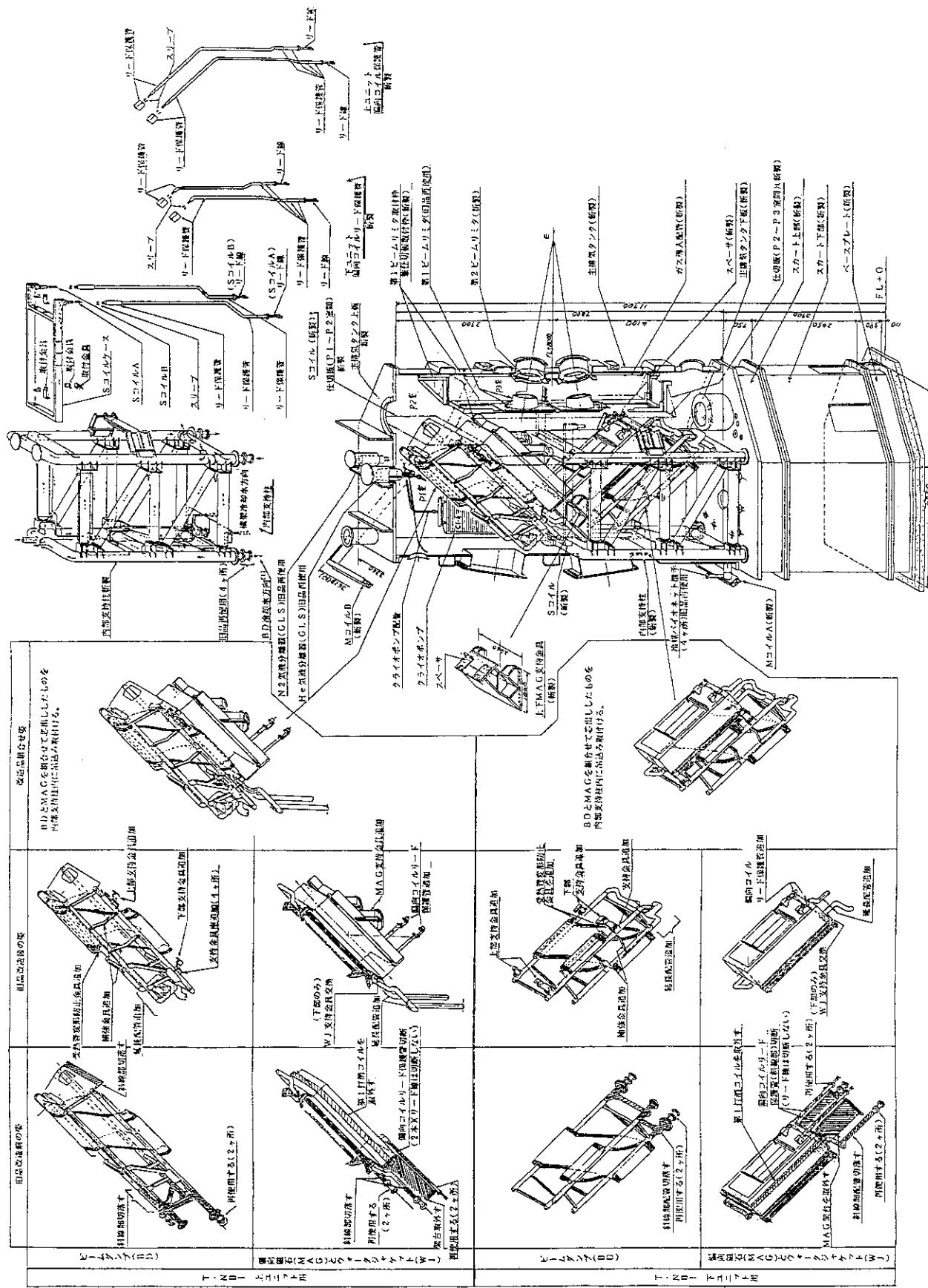
④真空容器の形状寸法やイオン源などビームライン機器の配置が変更になったためこれらの後方に控える配管配線用ヤグラも新たに設計製作しなければならなかった。

ビームラインの改造項目は以下のとおりである。

- (1) 真空容器（主排気タンク）（新規製作、架台となるスカート、基礎を含む）
- (2) 打消しコイル（新規製作）
- (3) ドリフト管（新規製作）
- (4) 偏向磁石、ビームダンプのサポート構造（新規製作）
- (5) クライオパネルの枚数変更
- (6) ビームライン仕切り板（新規製作）
- (7) ビームダンプ補強金具追加
- (8) カロリメータ上下位置にビーム漏れ止め板追加
- (9) 第二ビームリミタ（新規製作）
- (10) 高速シャッタの不使用
- (11) 金属シールゲート弁のアンシール閉機能追加
- (12) ドリフト管内グロー放電電極追加

この他各機器への配管、配線の変更がある。以上の改造の概略の要領を第4.3.1-1図に示す。なお、イオン源磁気シールド、角度調整機構、イオン源ゲート弁、イオン源接続フランジ、中性化セル、中性化セル磁気シールド、第2打消コイルおよびホール素子2は、取付角度以外の変更はしなかった。また、中性化セル先端に設けてある第2打消コイルは接線入射NBI装置では使用しないこととしたため電気的な結線および冷却水配管の接続はしなかった。ホール素子2は4.3.14項に示すように打消コイルと共に新しく取り付けたものを使用することとした。

以下に各機器別の改造の詳細を示す。



第4.3.1-1図 接線入射NBIへの改修の概略要領。

4.3.2 主排気タンクとその基礎

第4.3.2-1図に主排気タンクの構造図、-2図に内部機器配置を示す。主排気タンクの基本寸法は、長さ4.55m、幅3.06m、高さ7.8mでありJT-60U近傍の他機器との空間的干渉を避けるためにJT-60U側先端を先細りの形とした。材料は非磁性のSUS304である。胴部側壁の厚みは3cmとし、胴部大気側には、タンク内を真空にした場合の大気圧による変形を小さくするためにU字状のリブを取り付けた。特にイオン源ポート（1030mm×1410mmの矩形ポート2個）部の変形はそのままビーム軸のずれにつながることから、リブの高さを高くして強度を確保した。

第4.3.2-3図は主排気タンクの上板、-4図(a)は下板を含むスカート上部、-4図(b)はスカート下部(下スカートとも言う)である。材質は、不整磁場の発生を防ぐため、いずれも非磁性のSUS304製とした。下板とスカート上部は溶接により一体構造とした。下板は偏向磁石やビームダンプ等のビームライン機器のサポート構造の基礎となるので変形を微小に抑える必要がある。そこで厚みを上板8cmに対し、下板は10cmと厚くした。さらに、上板、下板とともに大気圧による変形を最小にするために、上板にあっては50mm厚×3300mm長×300mm高×2枚、50mm厚×3120mm長×600mm高×1枚、下板にあっては50mm厚×3010mm長×600mm高×2枚の補強リブを設けた。

主排気タンクは、本体室の既設床貫通孔を塞ぐように配置した。このことから、主排気タンクの基礎と床貫通孔に既に設置されているJT-60U本体真空容器ガス冷却配管およびトロイダルコイルフィーダー線(#9、10のみ)とが干渉することになり、そのために、下スカートに配管配線用開口部を設けた。#9,10ユニットの下スカート開口部配置を第4.3.2-4図(b)に示す。このうち、スカート先端部の552mmW×100mmHの開口はトロイダルコイルフィーダー線用であり、右前方550mmW×1050mmHの開口は真空容器ガス冷却配管用である。なお、これらの開口は#7,8ユニットにおいてはビームライン中心軸を中心に左右勝手違いとなる。

第4.3.2-5図に主排気タンクの基礎(ベースプレート)を示す。主排気タンクの基礎となるチャンネルベースは、撤去したNBI装置のソールプレート、隣接する準垂直NBI装置のソールプレートを利用して固定し、さらに床貫通孔を利用した本体室床挟み込み補強材で補強した。この結果、新たにアンカーボルトを設置しなくても耐震上問題のないことを確認した。なお、本チャンネルベースの重量は1基当たり約15tonにもなるが、トカマクプラズマからの距離が約11mとなりチャンネルベースの磁化によるプラズマ位置での誤差磁場が0.1G以下と見積もられることから、チャンネルベースの材質は安価なSS-41とした。

第4.3.2-6図(a)、(b)にSAP-Vコード^⑨を用いた大気圧による主排気タンクの変形量の計算結果を示す。(a)図が計算モデル、(b)図が変形量の計算結果である。リブはこれと等価な強度を有する平板で近似した。(b)図のとおり、最も広い面積を有する平面1で変形量が最大となり、中央付近で約1cmへこむ。しかしこれはリブなしとして計算したときの変形量5.4cmと比較すればかなり低減されており、リブの効果が大変大きいことが分かる。

接線入射NBI装置のビームラインにて必要とされる設置精度を内蔵機器のものを含めて以下に示す。また第4.3.2-1表に主排気タンクに取り付けたポートの一覧を示す。

(1)ビームライン中心軸；水平面に対して±9±0.05度

(2)主排気タンク

(イ)イオン源部ポートの精度；ビームライン中心軸に交わる面に対して±0.05度

ドリフト管取付ポートの精度；鉛直面に対して±0.05度

(d)胴部の精度；±12mm

(e)下板の精度

ベースプレートとの接続面に対する平行度；0.007度

平面度；±0.2mm

ベースプレートとの接続面に対する上下方向相対性度；±1mm

(f)ビームラインを組み立てた状態で各ビームライン機器が所定の精度で設置可能となること。

(g)中性化セル；先端部で±2mm

(h)偏向磁石（座標系は、第4.3.2-7図参照、y'が偏向磁石の面に平行）

磁極中心 x' 方向；-3~0mm

y' 方向；±3mm

z' 方向；±1mm

許容回転角 x' 軸周り；±0.1度

y' 軸周り；±0.1度

z' 軸周り；0~+3度

(i)ウォータージャケット

受熱面の角度；±0.5度

角形冷却管の凹凸；1mm

(j)ホール素子

ホール素子1 並進；±5mm
回転；±2度

ホール素子2 並進；±2mm
回転；±1度

(k)カロリーメータ

ビームライン中心軸に対する受熱面のずれ；上下左右共に±4mm

(l)ビームダンプ

下板よりの高さ；±5mm

受熱部対称軸のビームライン中心軸との偏差角度；±1度

フィン付冷却管の角度ずれ；±1度

(m)ビームリミタ

ビームライン中心軸に対するずれ；±2mm

(n)角度調整機構

中心のずれ；±0.5mm

(o)ベースプレートの精度

水平度；0.007度（主排気タンク用）

±0.5mm以下（管配線用ヤグラ）

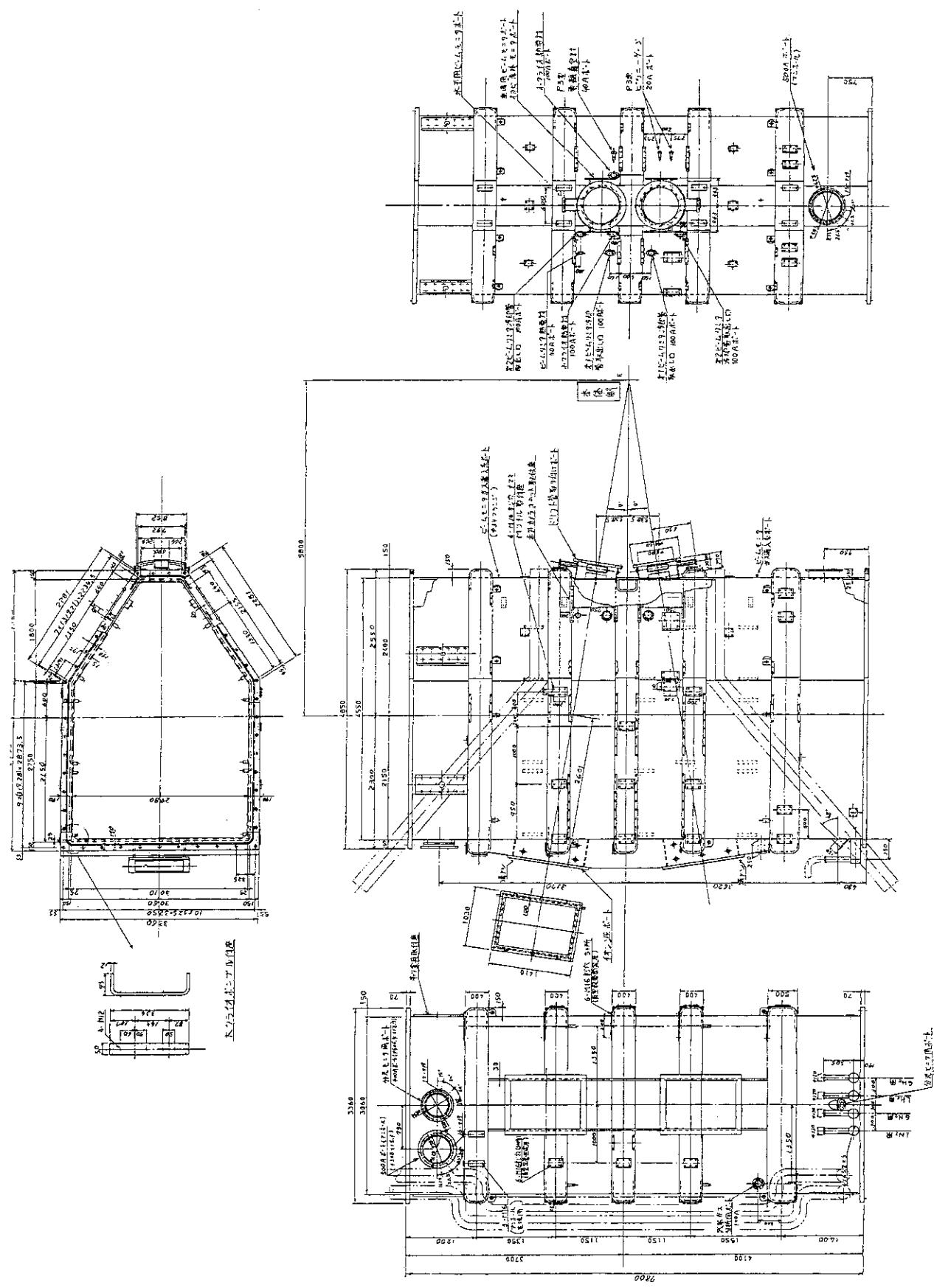
中心位置ずれ；基準点に対して東西南北±1mm

床面に対するずれ；±1mm

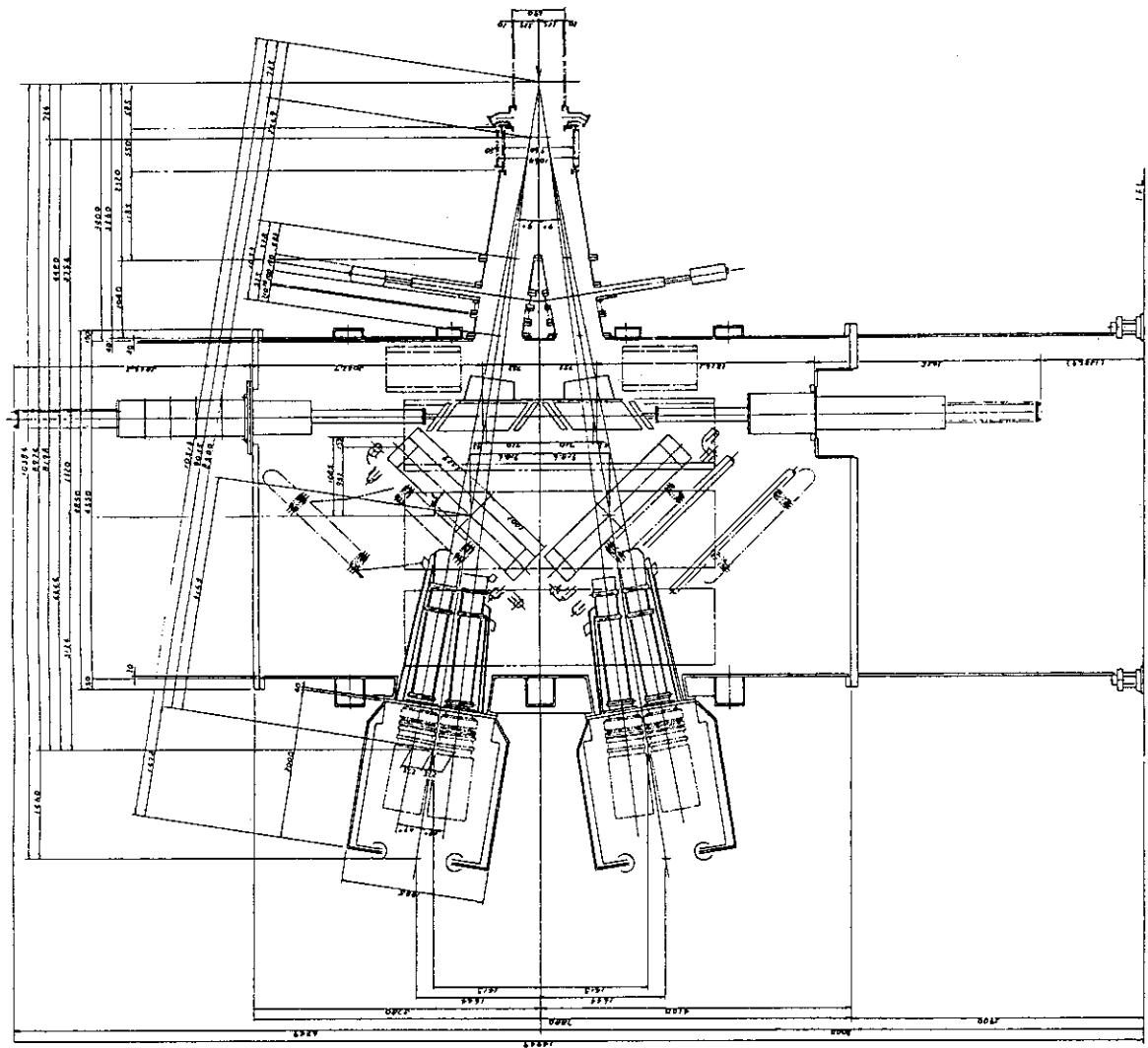
本体室床面貫通部の施工精度；±13mm以下

第4.2.2-1表 主排気タンクポート一覧

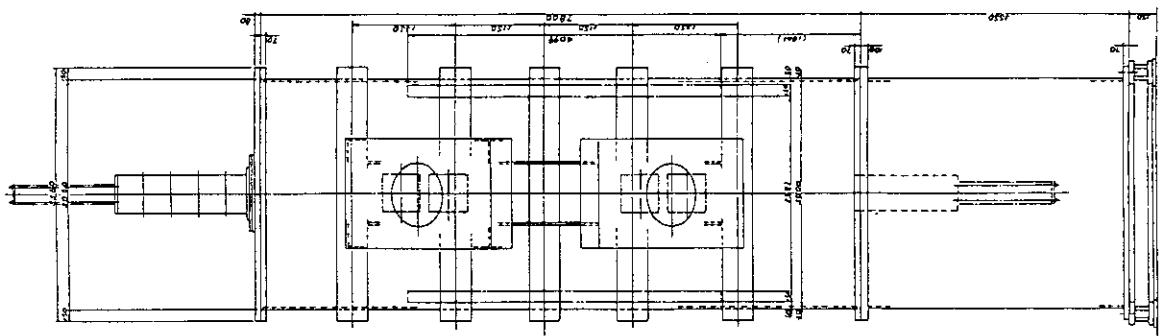
No.	名 称	寸 法	数量	設置場所	備考
1	イオン源部ポート	内径1210×830	2	胴部	
2	補助排気用ポート	400A	2	上板	
3	マンホール	500A	1	"	
4	He気液分離器ポート	-	1	"	
5	N2 "	-	1	"	
6	G. N2出口用ポート	-	1	胴部	
7	L. He入口用ポート	-	1	"	
8	G. N2出口用ポート	-	1	"	
9	L. He入口用ポート	-	1	"	
10	He定常弁	-	1	上板	
11	He安全弁	-	1	"	
12	He予冷弁	-	2	"	
13	N2調整弁	-	1	"	
14	ビームダシフ冷却管入口	(250φ)	2	下板	
15	ビームダシフ冷却管出口	"	2	"	
16	マンホール	500A	1	"	
17	熱電対取り出しポート	-	2	"	ビームダシフ, WJ, ホール素子用
18	WJ冷却管入口	180φ	2	"	
19	WJ冷却管出口	"	2	"	
20	打ち消しSコイル用	140φ	2	"	
21	偏向磁石コイル用	160φ	4	"	
22	カリーメータ取付ポート	-	2	上下板	
25	熱電対取り出しポート	-	2	胴部	クライオポンプ用
26	第1 BL冷却管取り出し	100A	2	"	
27	第2 BL冷却管取り出し	"	2	"	
28	ビームモニターガス導入系	50A	2	"	
29	残留ガス分析用ポート	"	1	"	
30	ドリフト管取り付けポート	-	2	"	
31	ゲージポート	40A	2	上板	
32	ゲージポート	"	3	胴部	
33	ゲージポート	20A	2	"	ピラニ用
34	覗き窓	200A	2	上下板	
35	分光用窓	"	2	胴部	
36	予備ポート	100A	1	上板	
37	標準リーク用ポート	-	1	下板	
38	ドレン用ポート	25A	1	"	

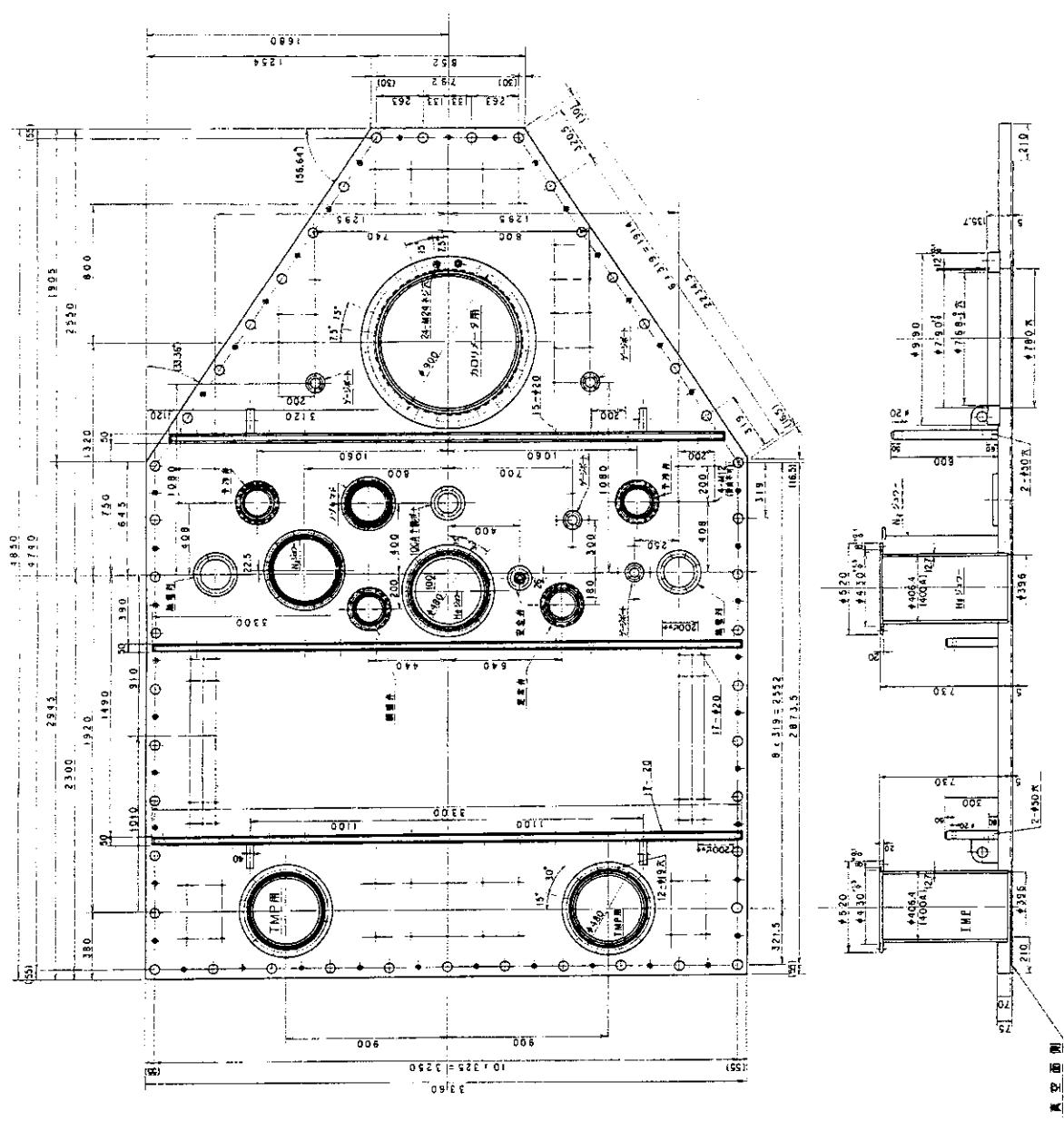


第4.3.2-1図 主排気タンクの構造図。

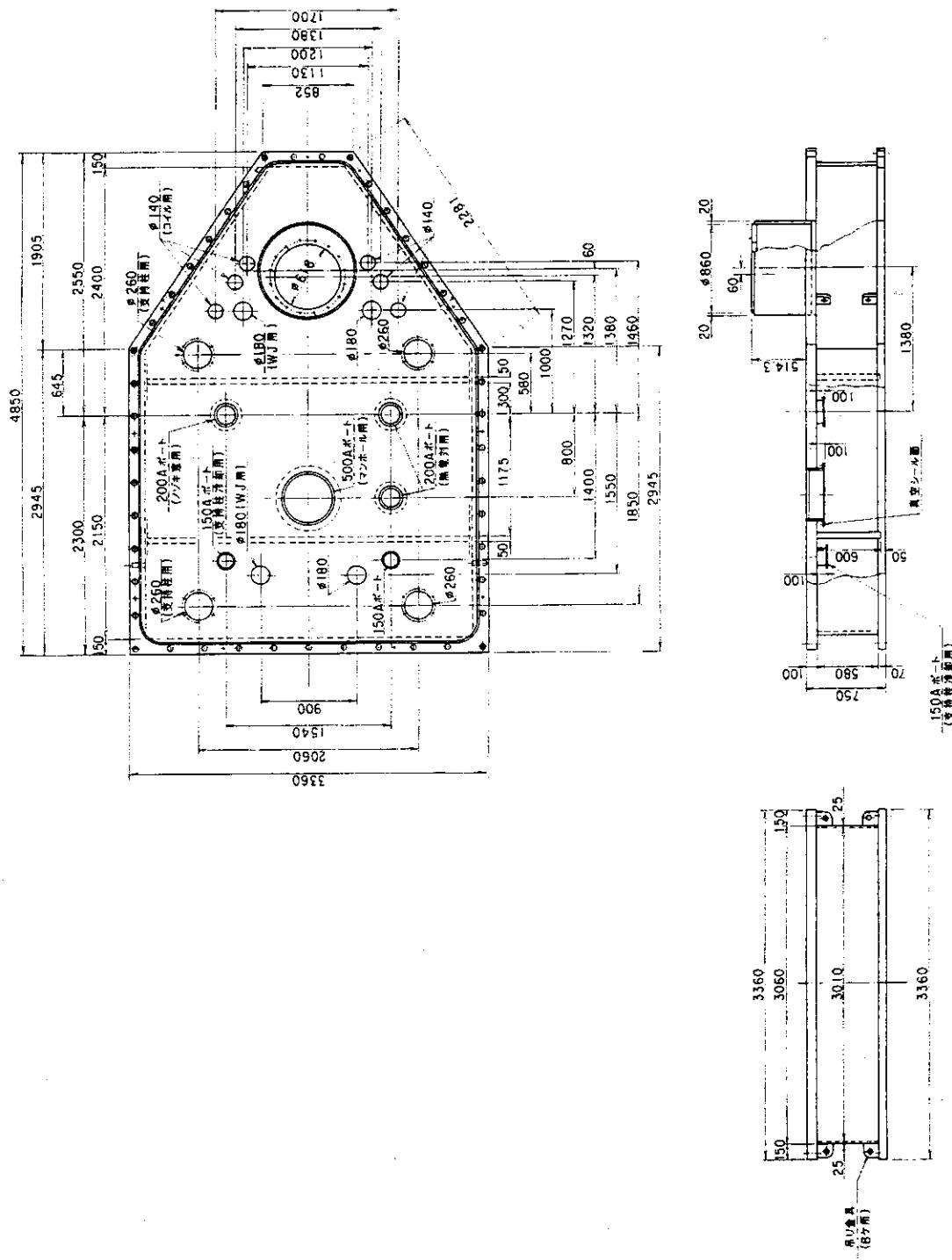


第4.3.2-2図 主排気タンクの内部機器配置図。

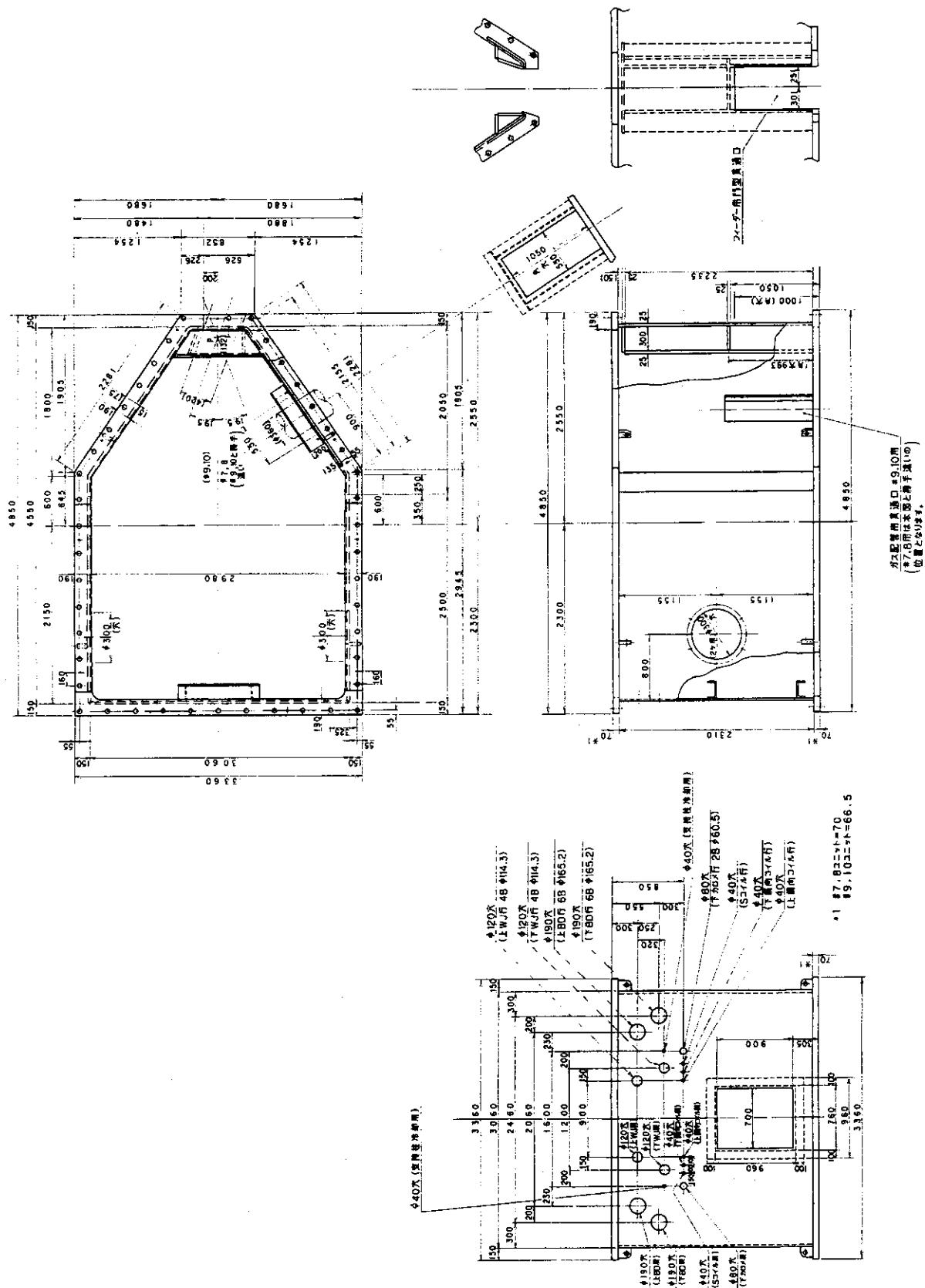




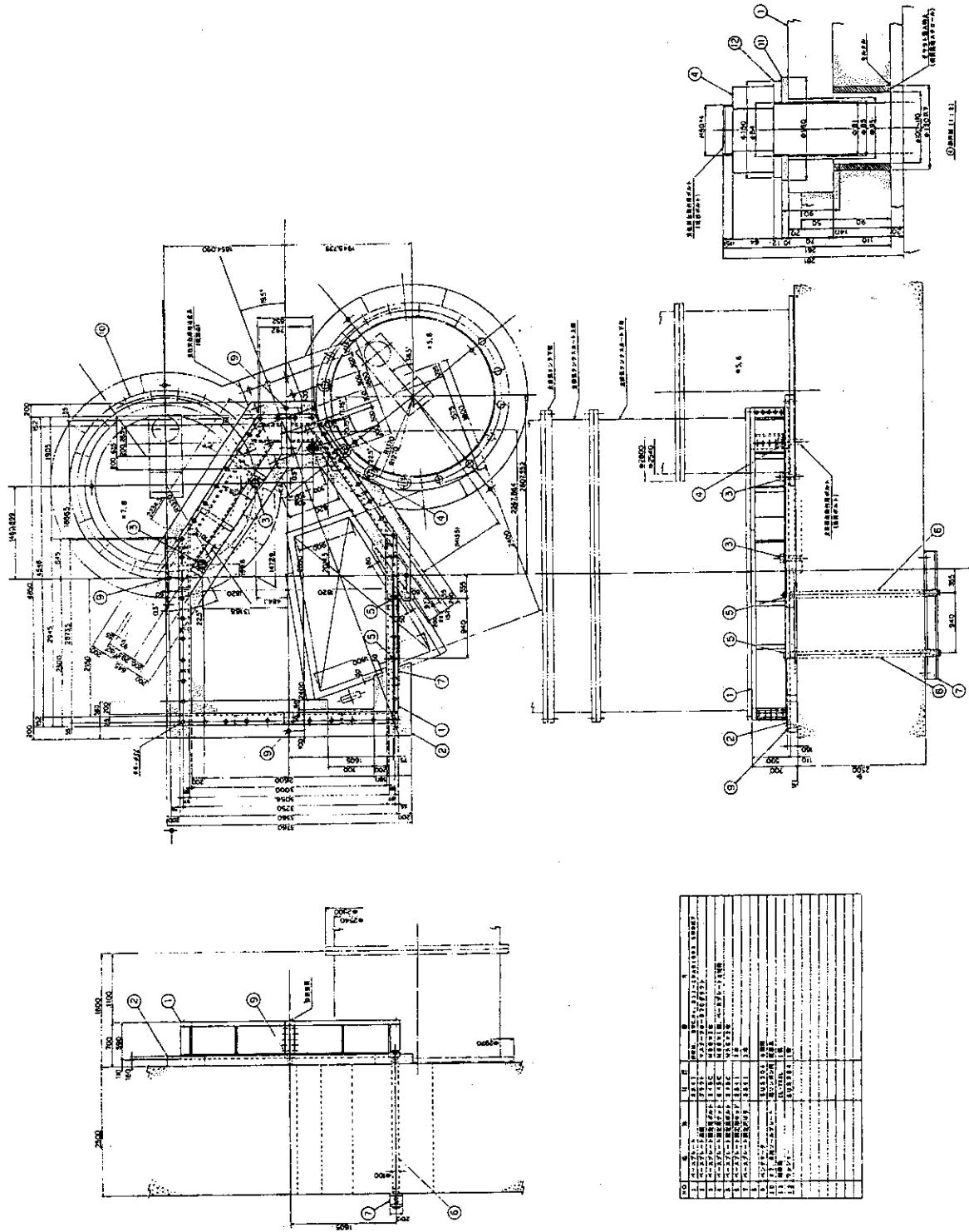
第4.3.2-3図 主排気タンク上板。



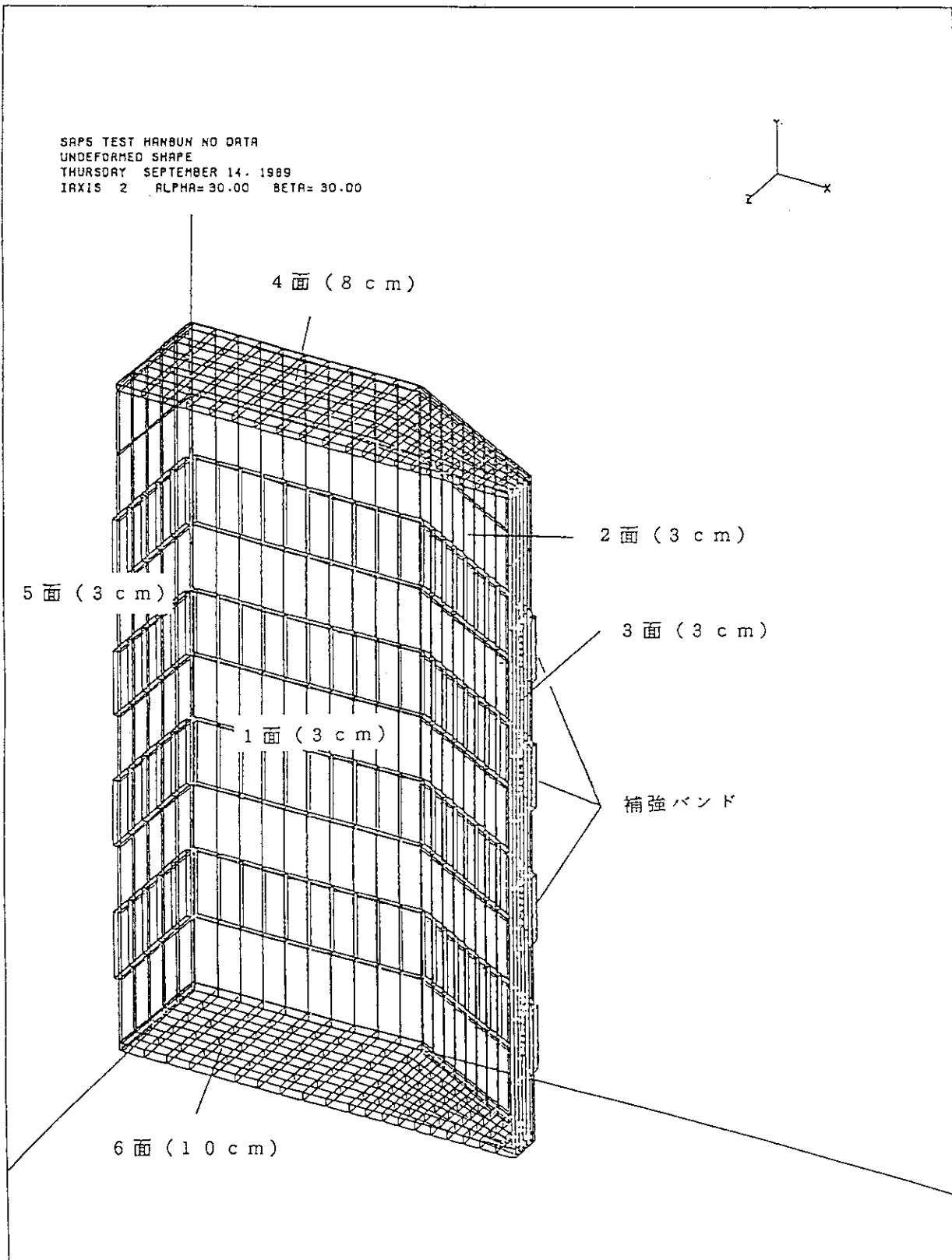
第4, 3, 2-4図 主排気タンク下板及びスカート。
a) 下板を含むスカート上部



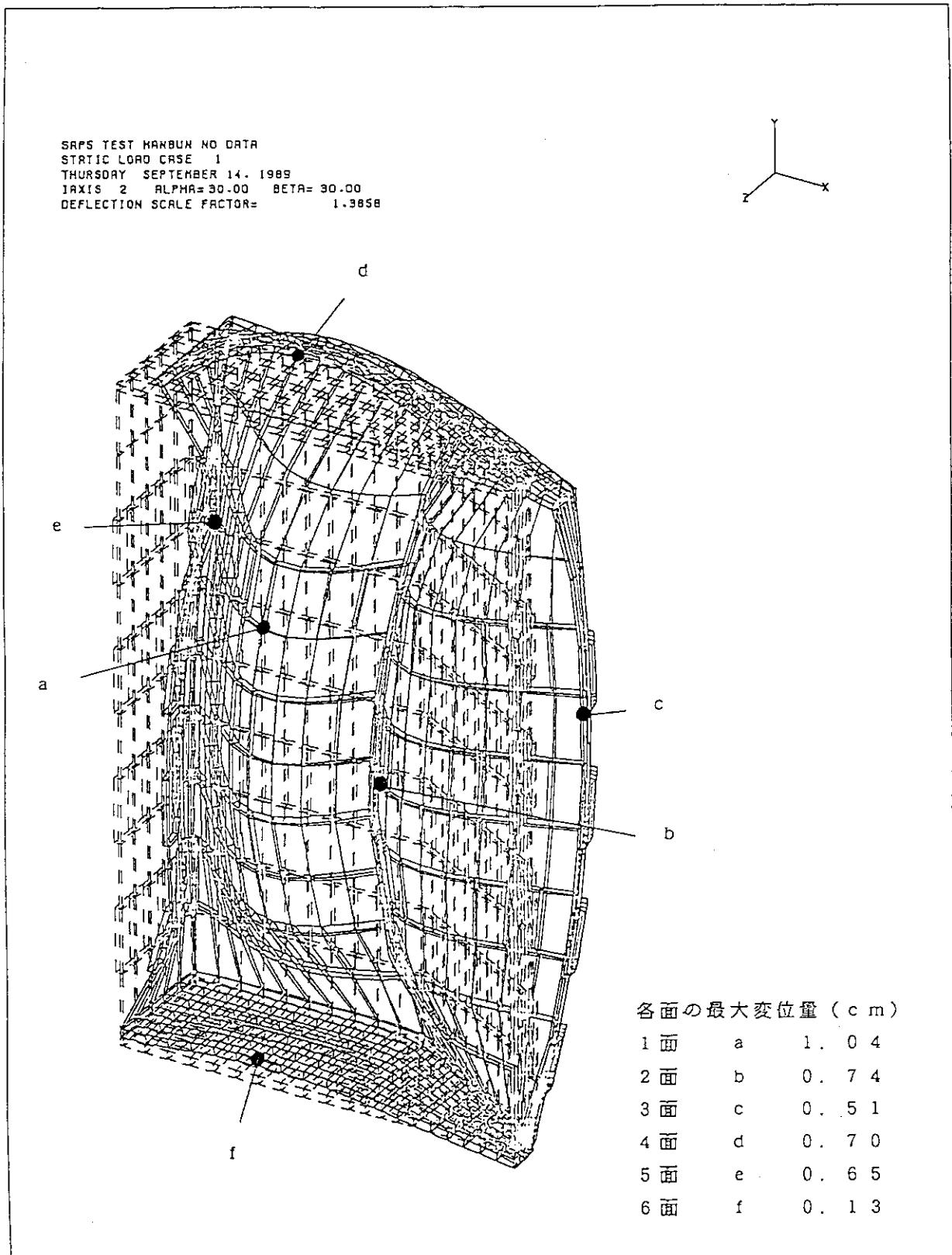
第4.3.2-4図 主排気タンク下板及びスカート。
b) スカート下部 (#9, 10の場合)



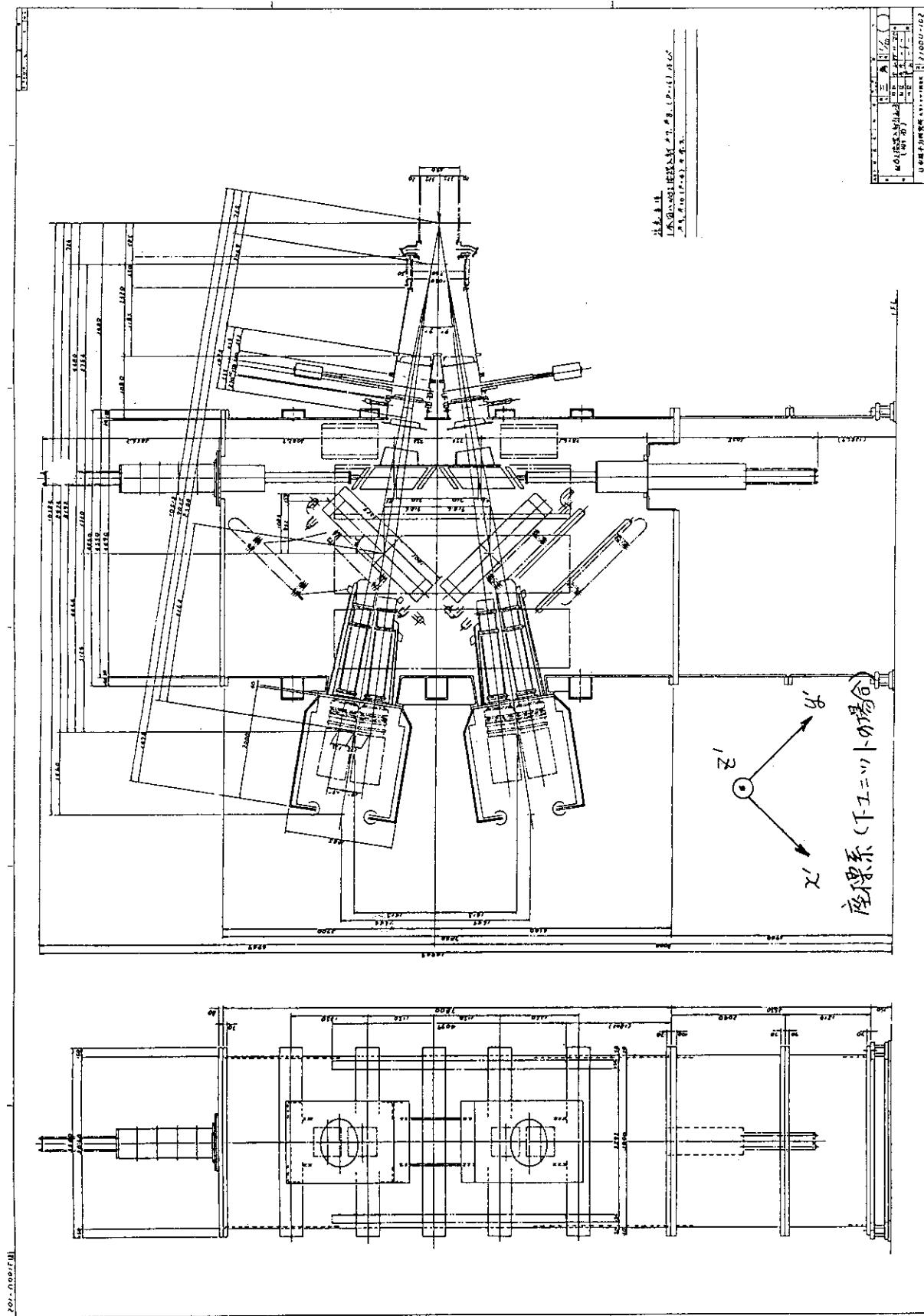
第4.3.2-5図 主排気タンク及びヤグラ用の基礎。



第4.3.2-6図 大気圧による主排気タンクの変形量の計算結果。
a) 計算モデル



第4.3.2-6図 大気圧による主排気タンクの変形量の計算結果。
 b) 変形量の計算結果



第4.3.2-7図 接線入射NBI装置偏向磁石座標系

4.3.3 ビームライン支持構造

第4.3.3-1図にビームライン機器を支持するために主排気タンク内部に設置する内部支持柱の構造を示す。第4.1-5図の鳥瞰図に示す黄土色の部分が内部支持柱である。

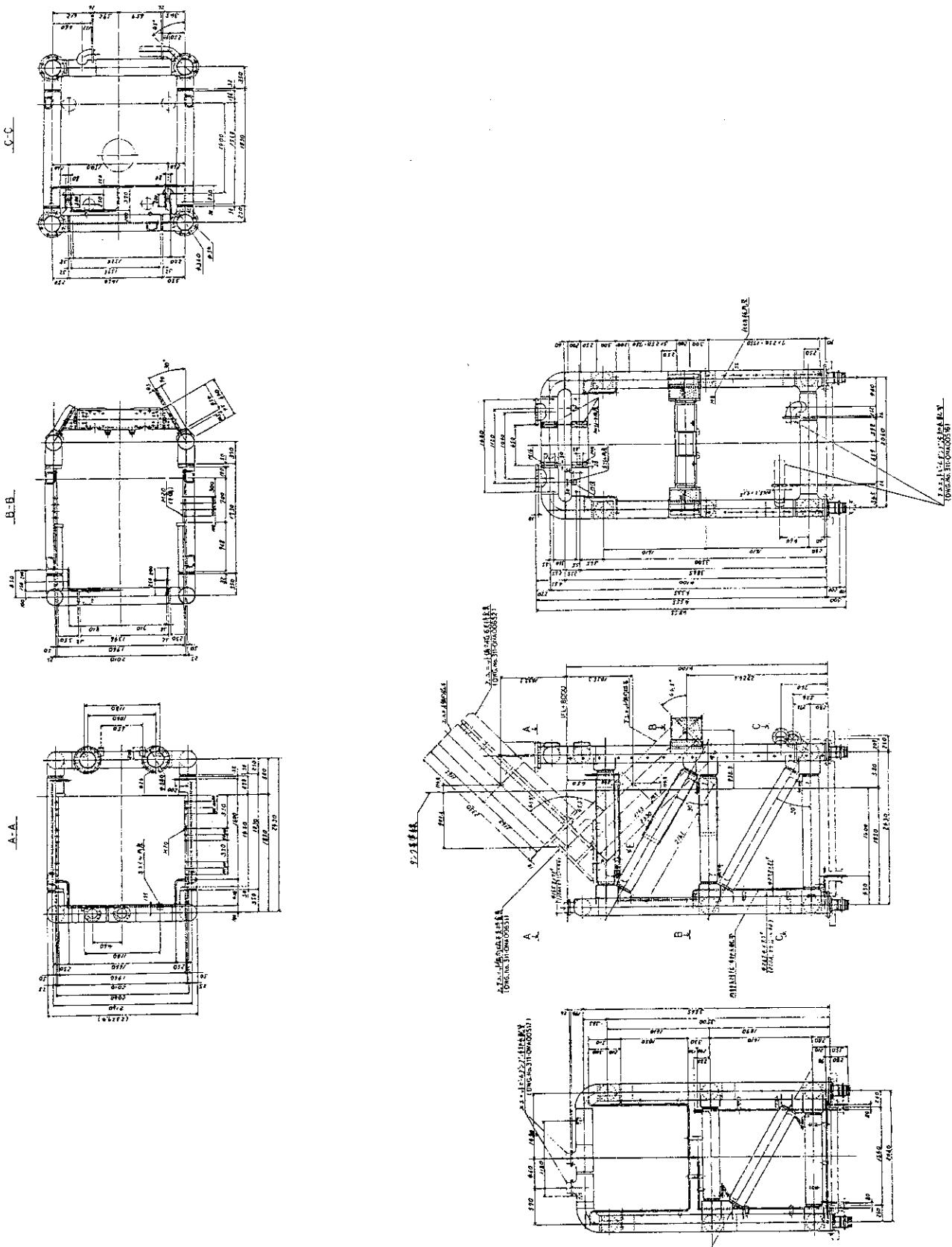
内部支持柱は、上下ビームライン2ユニットの偏向磁石とウォータージャケット、ビームダンプ（以上第4.1-5図中の水色と紫色の部分）および打消しコイルS（同赤色の部分）を支えるもので、主排気タンク下板に固定した自立型構造である。

内部支持柱を構成するパイプはビームダンプの冷却水配管を兼ねている。これは、配管合理化という意味の他に、内部支持柱が液体窒素温度のクライオパネルのシェブロンに囲まれていることから放射冷却による支持柱自体の熱変形を避け、内部支持柱に固定されているビームライン機器のアライメントのずれを防止するという重要な役割を持たせている。また支持柱構造体内に空気溜りや水溜りがあると局所的に冷えたりあるいは凍結したりする可能性があるので、こうした箇所のないよう流路の設定に配慮した。

4.3.4 変更磁石、ウォータージャケット、ガスリミタ

偏向磁石は、既設NBI装置では鉛直方向に設置するものとして設計製作されたものである。接線入射NBI装置の場合は、これを水平面に対し45.5度の角度を持って斜めに設置することになる。そのため偏向磁石の支持は、従来の下側支持に加えて偏向磁石の上側でも支持することとした。また既設NBI装置では、中性化セルと偏向磁石との間の空間に入り込む漏洩磁場を打ち消すための打消コイル（第1打消コイル）を偏向磁石の周りに設けていたが、接線入射NBI装置ではこれが不要となるため撤去した。これは上下ユニット間での空間的干渉を避け、少しでもビーム軸の仰角を小さくするのに寄与している。

ウォータージャケット（偏向磁石により偏向される残留イオンビームうちの一部が偏向磁石の鉄心に向かって衝突する。それを受けるために、偏向磁石鉄心のイオンビーム側に設けた水冷保護カバー）や、ガスリミタ（偏向磁石内の中性ビーム通過開口部を必要最小限にし、中性ガスの流れを制限している。）も既設NBI装置のものをそのまま流用した。ただし取付角度は接線入射NBI装置ビーム軸に合わせて設定した。



第4.3.3-1図 内部支持柱の構造。

4.3.5 ビームダンプ

ビームダンプは、外部フィン付冷却水配パイプ（通水部分は 10ϕ ）53本を並列に並べてビーム受熱面を形成し、偏向磁場により曲げられた残留イオンビームを受けてそのエネルギーを熱化除去するものである¹⁰⁾。受熱面はイオンビームの進行方向（水冷パイプの並列方向）に熱負荷を均等にするためにお椀状に曲面加工してある。材料は熱的機械的特性に優れた0.2%銀入り無酸素銅を使用し、さらに強度を増すために20%の低温加工硬化をさせている。ビームダンプを第4.3.5-1図に示す。

一方、水冷パイプの熱負荷は相互に異なるため、従って熱変形も異なることから相互拘束による応力増大を防ぐため個々の水冷パイプは両端のマニホールドだけの2点支持とし、相互の水冷パイプの変形は基本的には自由にさせている。

このようにビームダンプは非常に軟らかい構造体であることから、その取り付け角度を変更すると自重で冷却水パイプが変形してしまうおそれがある。そこで第4.3.1-1図に示したようにマニホールドの手前で水冷パイプを相互に固定し、ビームダンプ全体としての剛性を若干高めた構造とした。これは熱変形に関してはこれまでより多少厳しくなるが、既存の機器の再利用のためには止むを得ないものとした。

4.3.6 カロリーメータ

カロリーメータは、中性ビームのパワー測定あるいはイオン源のエージング時にビームターゲットとして使用するもので、通常は受熱面がビーム軸上に来るよう配置されがJT-60Uへのビーム入射時にはビーム通路の妨げにならない位置に移動できるものである。この動作は圧縮空気によって行われカロリーメータはガイドレールに沿って移動する。既設NBI装置の場合、ガイドレールは、鉛直に立てられ重みのかからないことを想定して設計製作されていた。そのため、接線入射NBI装置においてもその構造を変えることなく鉛直のままで取り付けすることとした。なお、既設NBI装置と同様にカロリーメータの受熱面の中心をビーム軸に合わせようすると、接線入射NBI装置の場合は上下のビーム軸仰角が既設NBI装置に比べて小さくなっていることからカロリーメータの先端が空間的に干渉してしまい結果的には上下のカロリーメータを引き離すように43mmずらすこととした。

カロリーメータは、ビーム軸調整やビームの発散特性を測定することができる。これはカロリーメータの受熱面中心にビーム軸（既設NBI装置の場合は、カロリーメータ中心水平面に対し35.5度傾いている。）に対し直交するように十字状に配置された17本の熱電対によるものである。したがって、接線入射NBI装置にてビーム軸調整やビームの発散特性を調べる場合、カロリーメータの位置が上下方向に43mmずれていること、ビームの仰角が35.5度から9度に変更になっていることに注意する必要がある。

また、これらのことからビームの一部がカロリーメータの受熱面から上下方向に若干ずれる恐れがあるため受熱面の前面の上下端部にビーム漏れ止め板を設けることにした。ビーム漏れ止め板は3.2mm厚の無酸素銅製である。

4.3.12項にて示すように接線入射NBI装置では高速シャッターを用いない構造とした。したがって、このままではビーム入射前に一連のシーケンスに従って実施するフラッシング運転時にJT-60U本体真空容器内に多量の中性ガスを流し込んでしまう可能性がある。そこでこの流量を低減するためにカロリーメータの後方にコンダクタンスを制限するコンダクタンス制

限板（1mm厚のステンレス製板）を取り付けた。中性ガスは、コンダクタンス制限板とこれに面する第一ビームリミタのコンダクタンスとで制限される。なお、カロリーメータとコンダクタンス制限板との間隙は、カロリーメータの差し込み／引き抜き動作に支障ないよう最小限の距離（10mm）とした。

4.3.7 仕切板

仕切板は、ビーム通路を除く主排気タンク内機器間の隙間を極力塞ぐようにして主排気タンク内空間を3つに区切り、タンク内の圧力分布に大きな差が生じないように、効率よく差動排気ができるようにしたものである。

仕切板は、偏向磁石近辺と第1ビームリミタ近辺の2カ所に設けた。上下ユニット間の仕切はない。仕切板によって仕切られた3つの部屋は、既設NBI装置と同様に中性化セル～偏向磁石間をP1室、偏向磁石～第1ビームリミタ間をP2室、第1ビームリミタ～第2ビームリミタ間をP3室とした。4.3.9項に示すように、P1室には大型クライオパネルを4枚、P2室には同2枚、P3室には小型クライオパネルを4枚設置した。

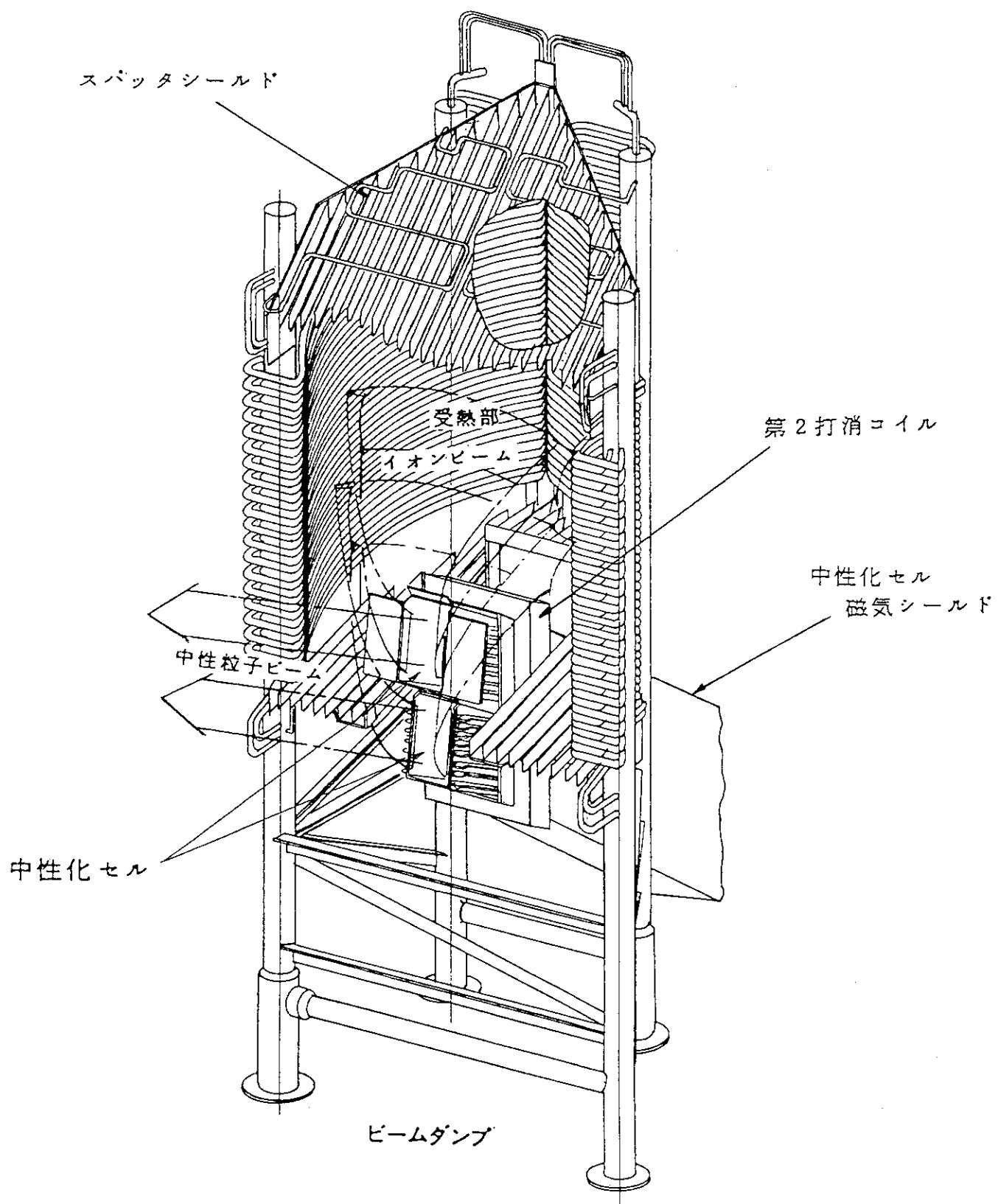
仕切板は、単にガスの流れを制限するだけのものであるので、板厚0.5mmの薄いSUS304製の板を用いた。

4.3.8 第1、第2ビームリミタ

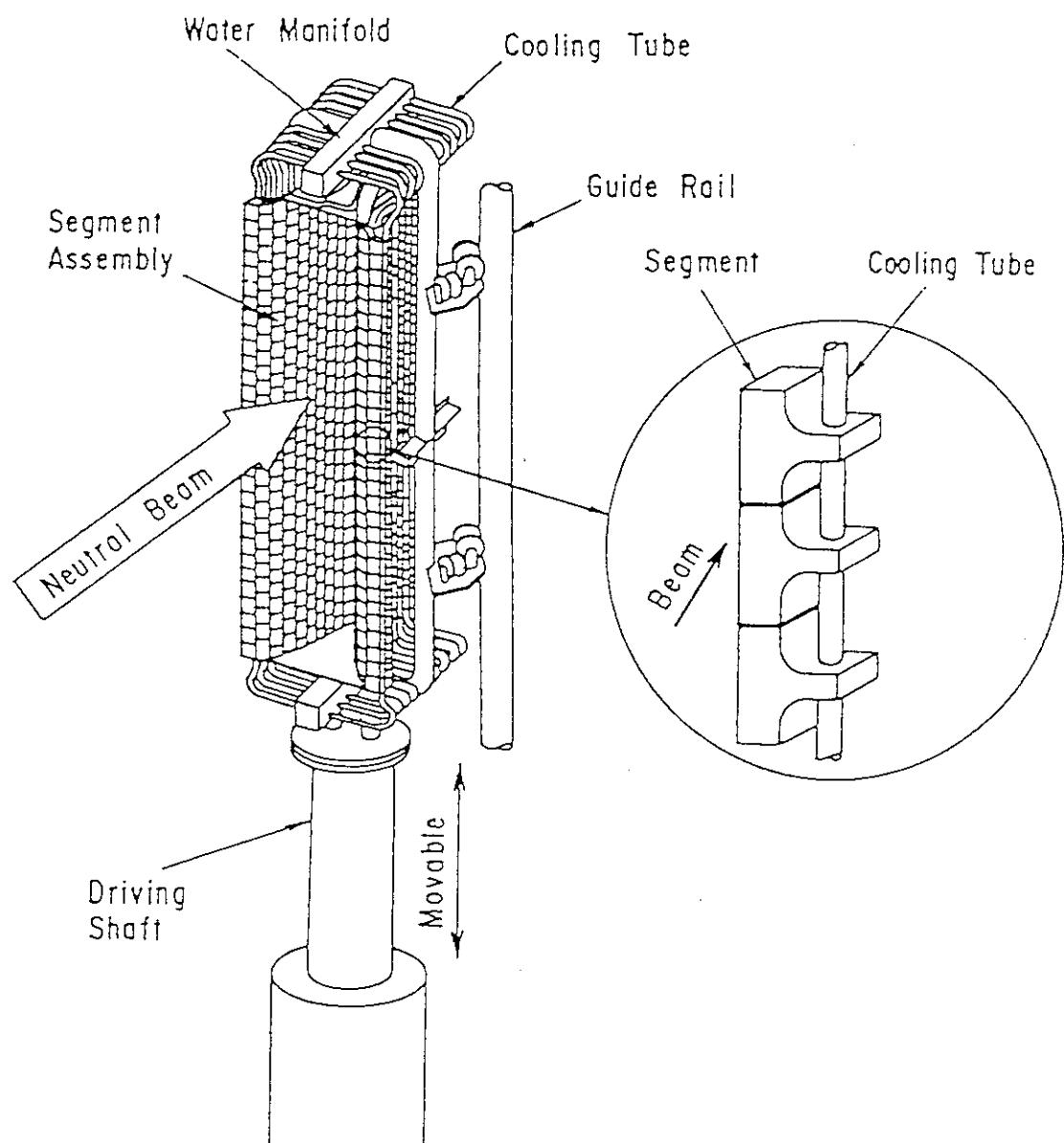
第1、第2ビームリミタは、それぞれP2室とP3室との境界およびP3室とドリフト部との境界に設たレーストラック型円筒形のリミタで、リミタ内を通過する中性ビームのテール部分をカットしドリフト部の内壁にビームが当たるのを防ぐためのものである。いずれのリミタもビームをカットする面の形状は、既設NBI装置のものと同一で構造もほぼ同等であるが取付角度が異なる。よって第1ビームリミタは新規に製作したものを取り付け、第2ビームリミタは既設のものを改造して取り付けた。

第4.3.8-1図に側面から見た第1、第2ビームリミタの取付位置をドリフト部と共に示す。第4.3.8-2図、-3図はそれぞれ第1、第2ビームリミタの構造を示す。

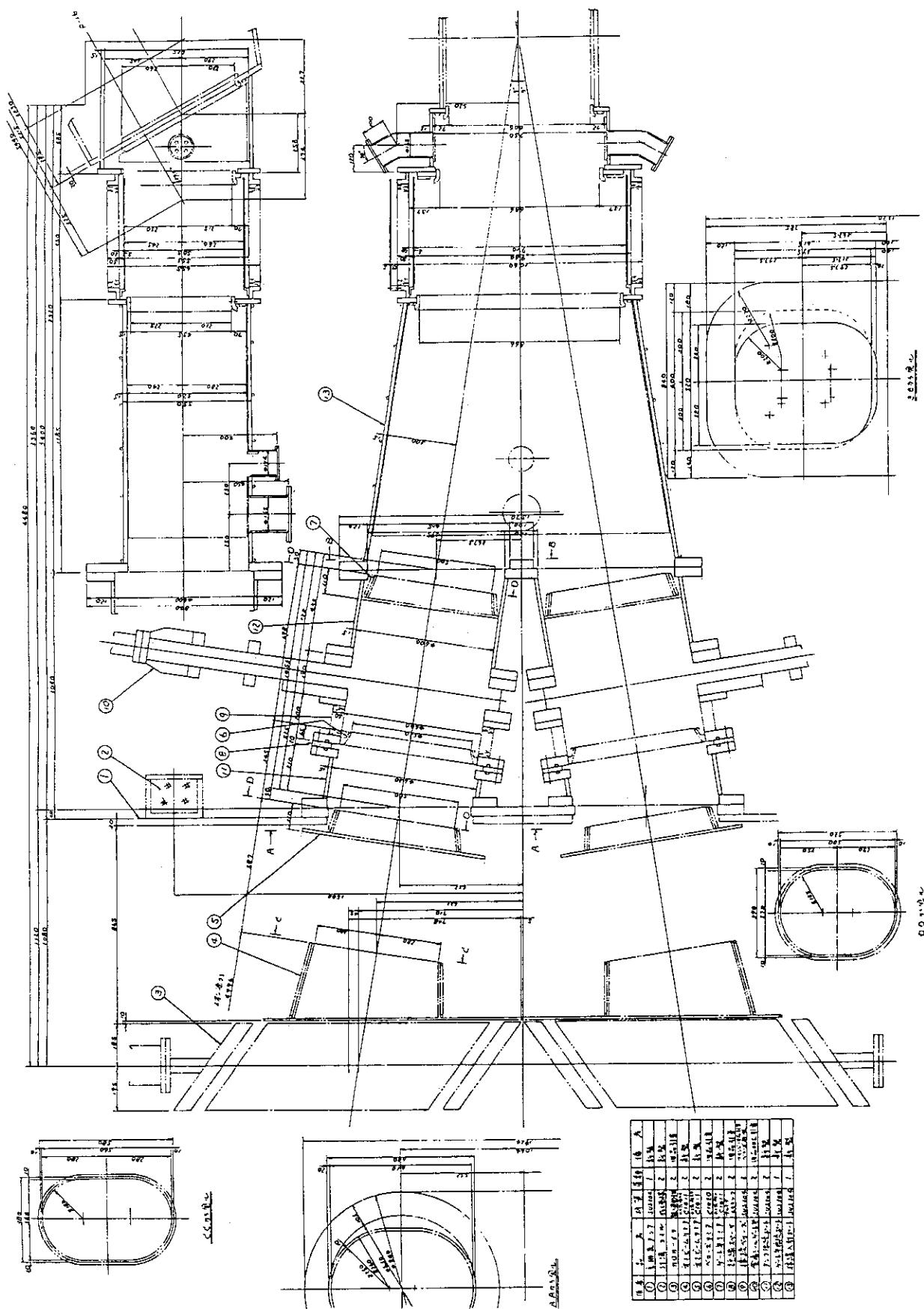
第4.3.8-4図(a)(b)に、計算コードを用いて求めた中性ビームによる各リミタの熱負荷を示す。(a)は上下方向、(b)は水平方向の熱負荷である。ビームは、重水素120keV、80A、ビーム発散1.2°の運転を想定した。熱負荷は、上下位置で厳しく、第1ビームリミタで486W/cm²、第2ビームリミタで861W/cm²という結果が得られている。このような高熱負荷に耐え得るよう新規に製作する第1ビームリミタも従来と同様に0.2%銀入り無酸素銅とし、リミタ外周部に外径13mm、厚み1.5mmの無酸素銅水冷パイプを銀ロー付けした。またそれぞれのビームリミタの上下位置に熱電対を取り付けた。



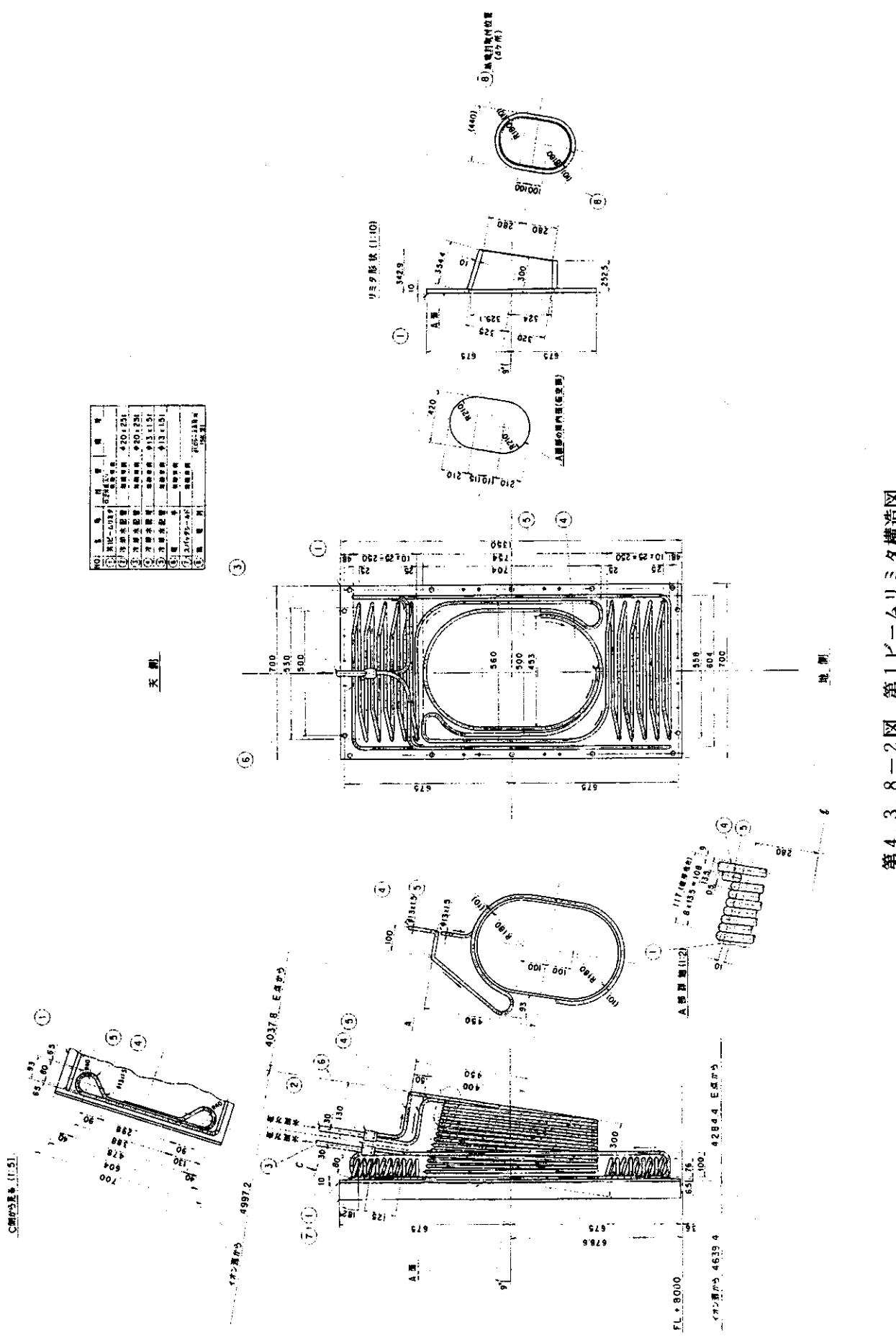
第4.3.5-1図 ビームダンプの形状（サポートは既設準垂直NBIの場合である）。



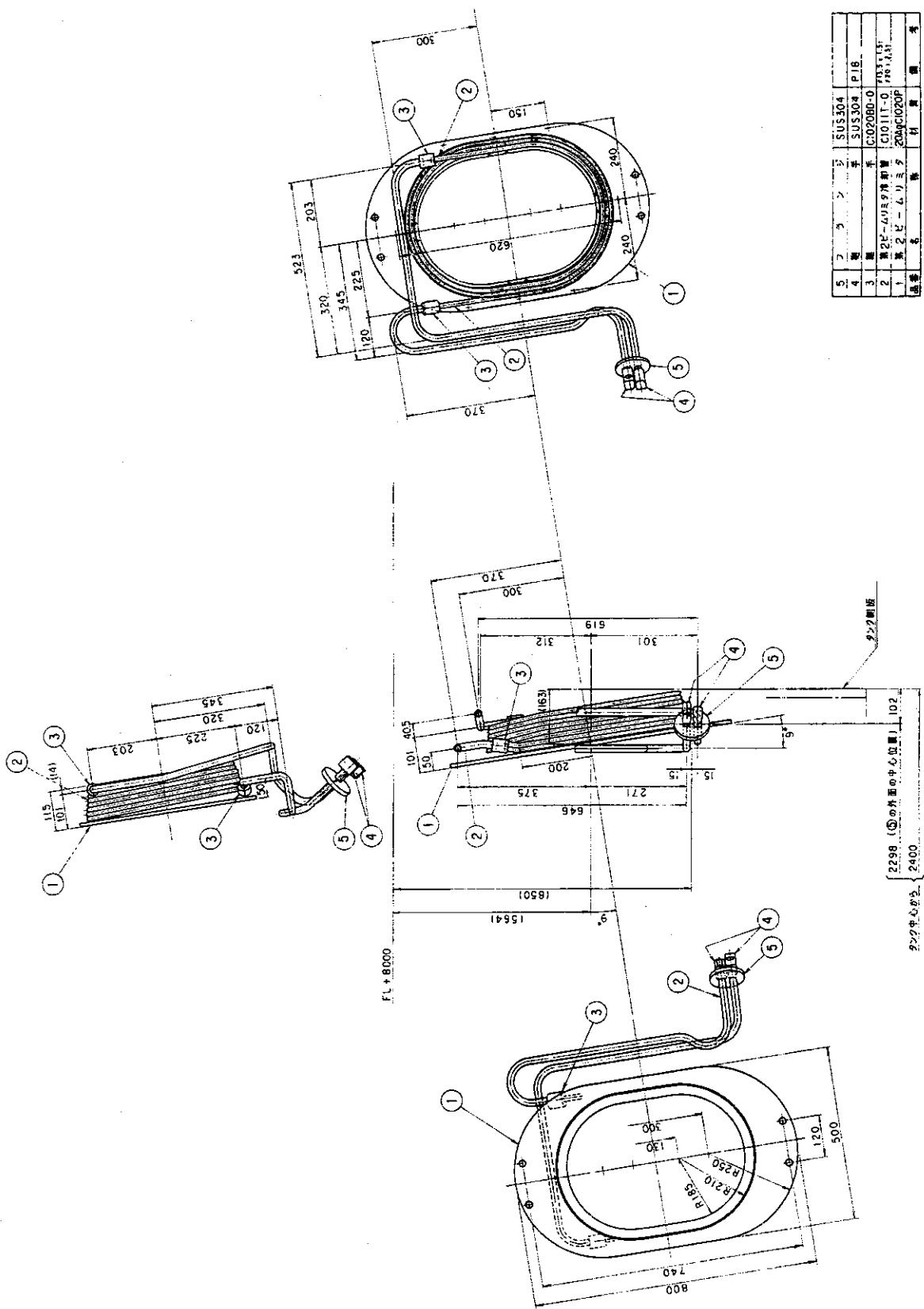
第4.3.6-1図 カロリーメータの構造



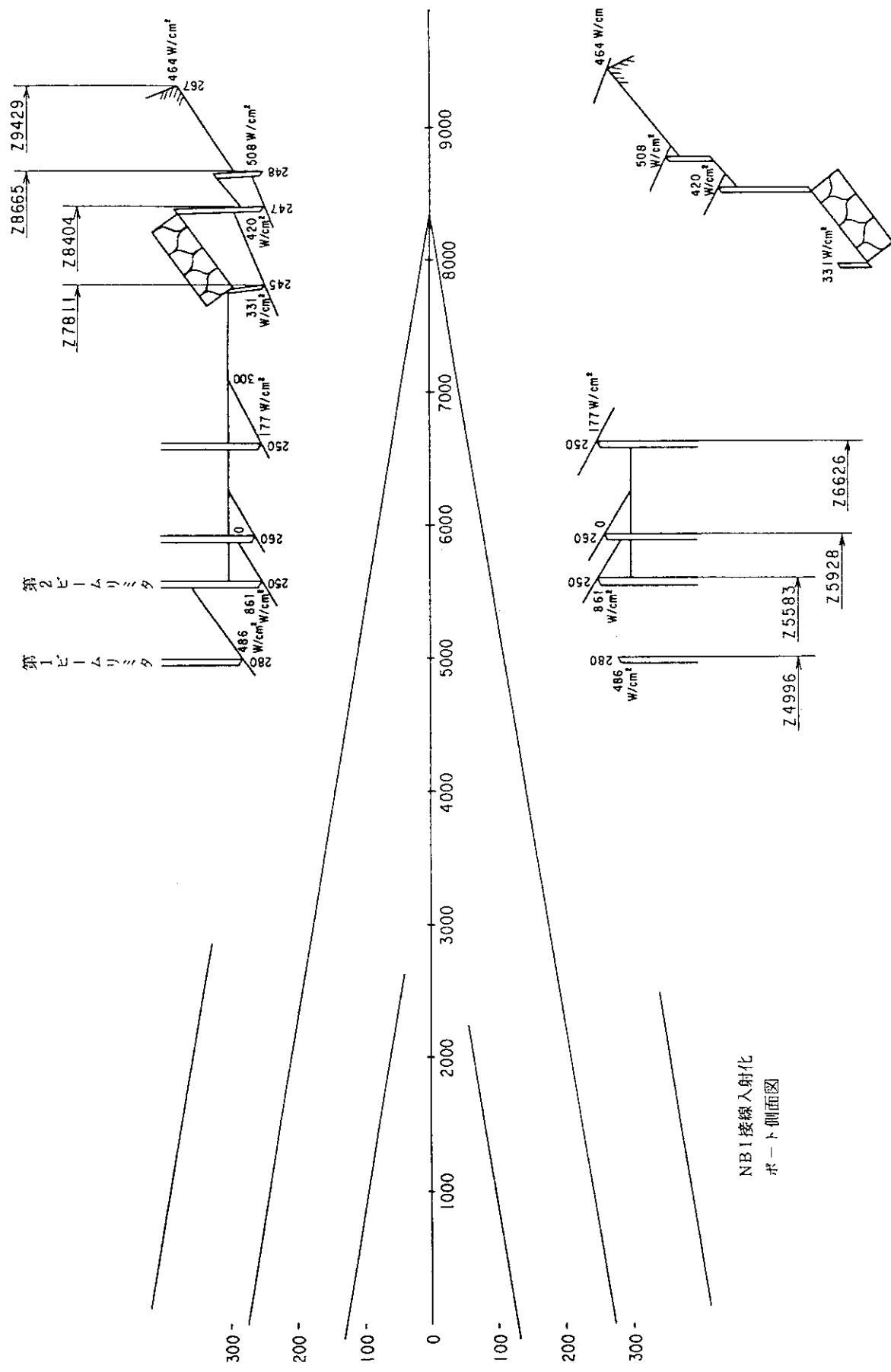
第4.3.8-1図 第1, 第2ビームリミタの取付図（側面図）



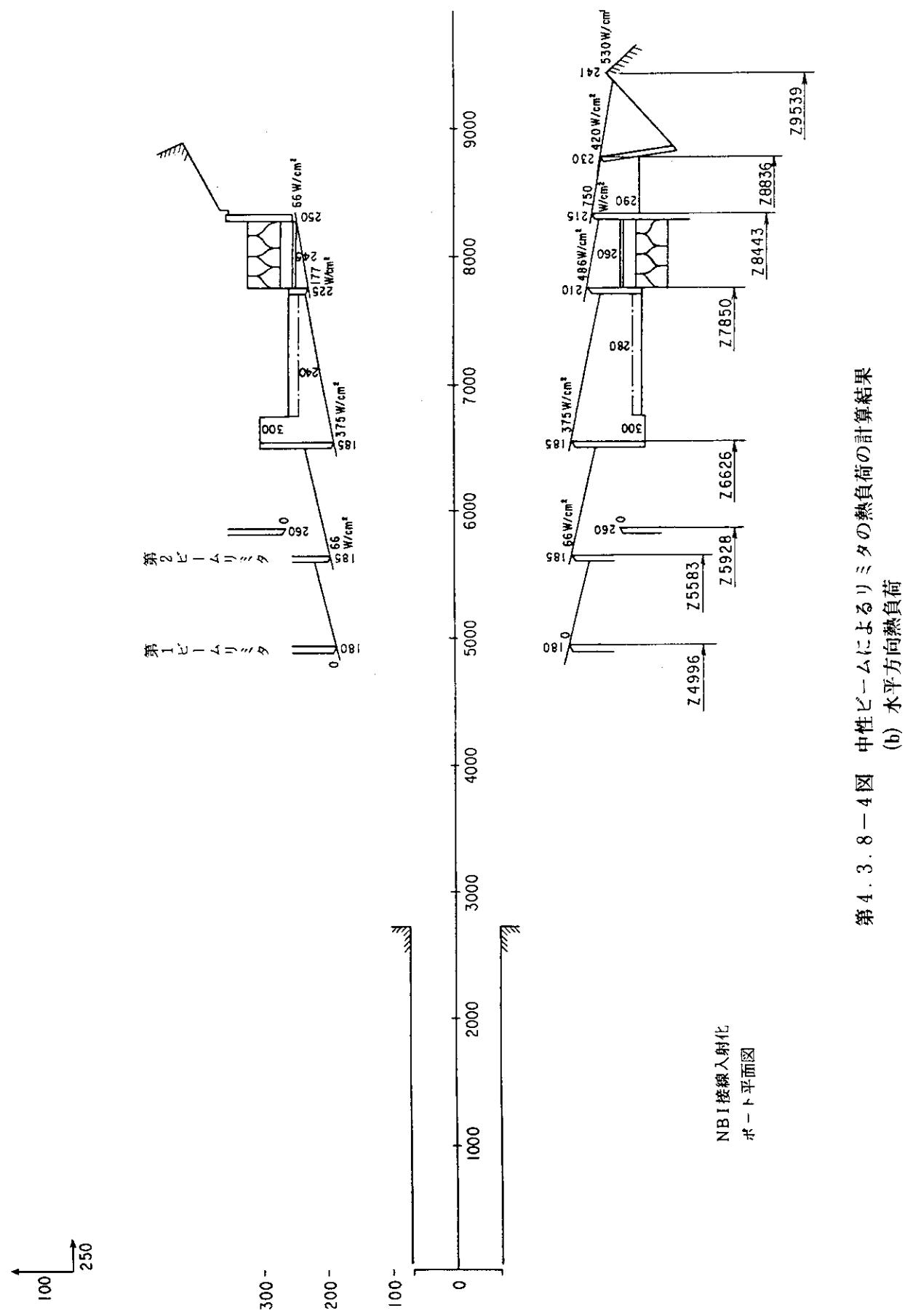
第4.3.8-2図 第1ビームリミタ構造図



第 4, 3, 8 - 3 図 第 2 ビームリミタ構造図



第4.3.8-4図 中性ビームによるリミタの熱負荷の計算結果
(a) 上下方向熱負荷



第4.3.8-4 図 中性ビームによるリミタの熱負荷の計算結果
(b) 水平方向熱負荷

4.3.9 クライオポンプ

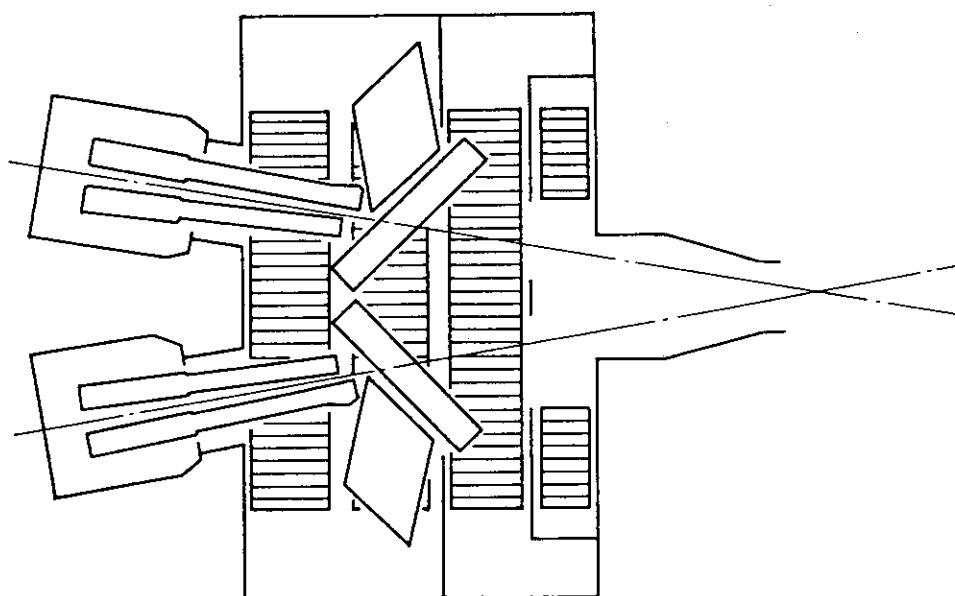
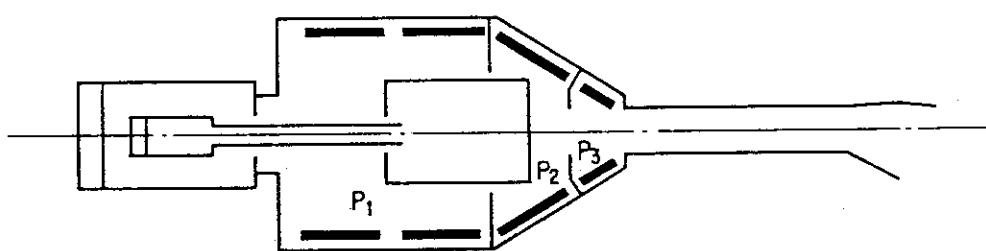
クライオポンプは、クライオパネルとそれを覆うように設置されるシェブロンバッフルおよびシールド板から構成されている。クライオパネルは液体ヘリウムにて冷却され、シェブロンは液体窒素にて冷却される。

既設準垂直NBI装置に取り付けられているクライオポンプは、複数のクライオパネルの上位に気液分離器を配し気液分離器とクライオパネルとは並列配管にて接続された自然循環方式のポンプである。また、クライオパネルはサポート構造からの熱侵入を防ぎ、温度変化による縮みが許されるように鉛直に吊り下げる構造となっている。準垂直NBI装置では1ユニット当たり大型クライオパネルがP1室内に2枚、P2室内に2枚の計4枚、小型クライオパネルがP3室内に2枚取り付けられている。

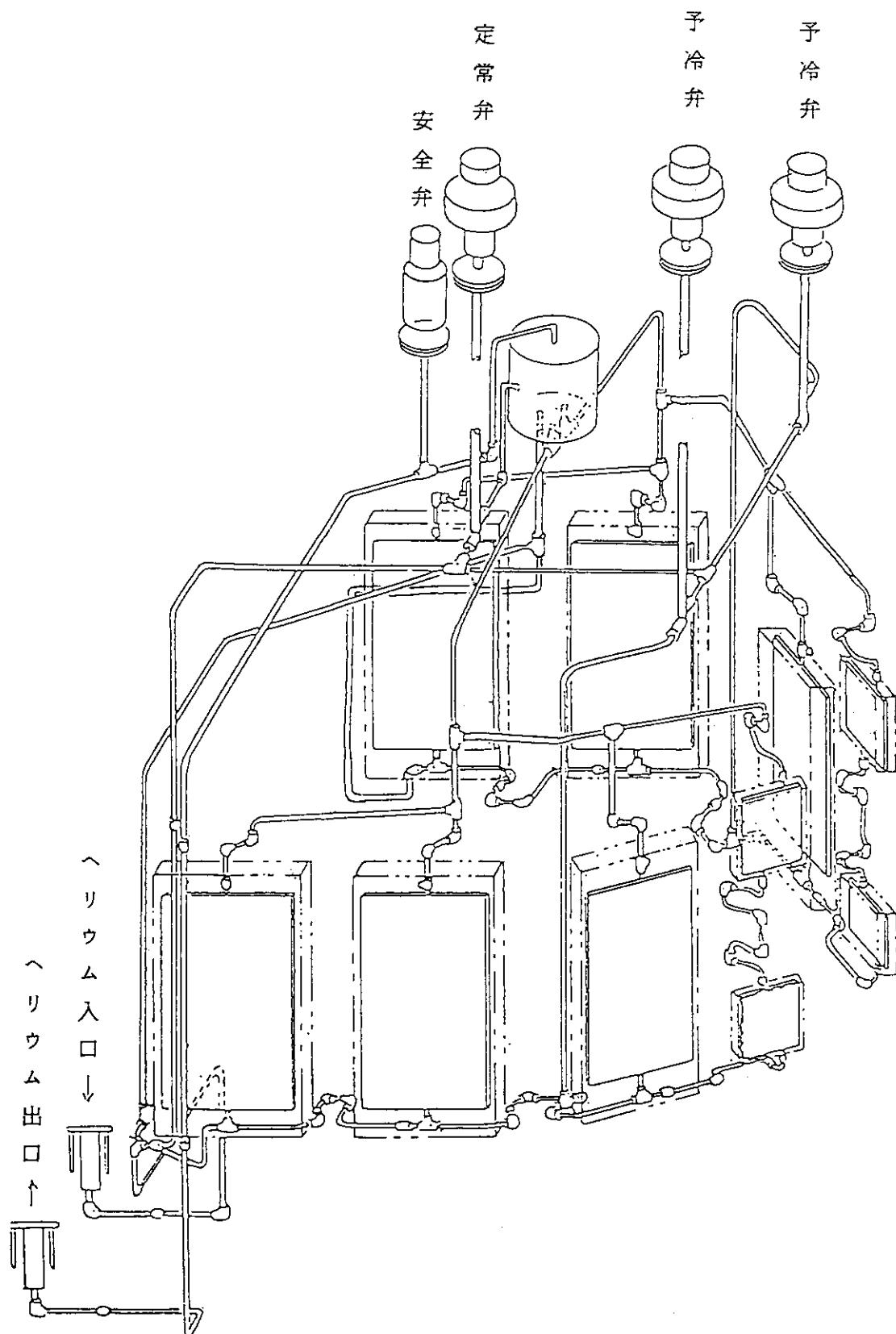
接線入射NBI装置においても本方式を踏襲することとしクライオパネルの取り付け角は変更しないこととした。接線入射NBI装置では上下ユニットが一つの真空容器に収められるので、既設のものをそのまま取り付けるとなると大小併せて12枚のクライオパネルを取り付けることになる。特に大型クライオパネル8枚の据え付け空間の確保が大きな問題となった。大型クライオパネルは1枚当たり高さ3900mm×幅90mm×厚み64mm（これにシェブロンバッフルおよびシールド板を考慮すると外形 4023mm×1030mm×72mmとなる。）である。これを主排気タンク内に同じ高さに横並びさせるとすると1周約8mとなり、このほかに小型クライオパネルおよびビームライン機器類の設置スペースも確保しなければならず限られた空間への接線入射NBI装置設置自体が難しくなる。また、クライオパネルを垂直方向に2段積みとすると真空容器の高さ寸法が少なくとも8m以上となってしまい現実的ではない。そこで大型クライオパネルを2枚減らした場合の排気速度、真空容器内の圧力等を検討した。その結果、真空容器内およびドリフト部内の再電離損失にほとんど変化がないことが分かった⁴⁾。

よってクライオパネルの配置は、第4.3.9-1図に示すとおり、上下ユニット分合わせて大型クライオパネルをP1室内に4枚、P2室内に2枚、小型クライオパネルをP3室内に4枚取り付けることとした。クライオパネル間およびパネルへの配管の立体図を第4.3.9-2図に示し、同系統図を第4.3.9-3図に示す。小型クライオパネルを2直列にする以外はすべて並列に接続することとした。ビームライン左右のクライオパネル（複数）に対する流れのバランスを確保するため、予冷弁は左右の系にそれぞれ独立に設けた。このクライオパネル配置および配管構成に対する液体ヘリウムの流れについては、ガラスモデルを用いて確認した（3.1項を参照のこと）。

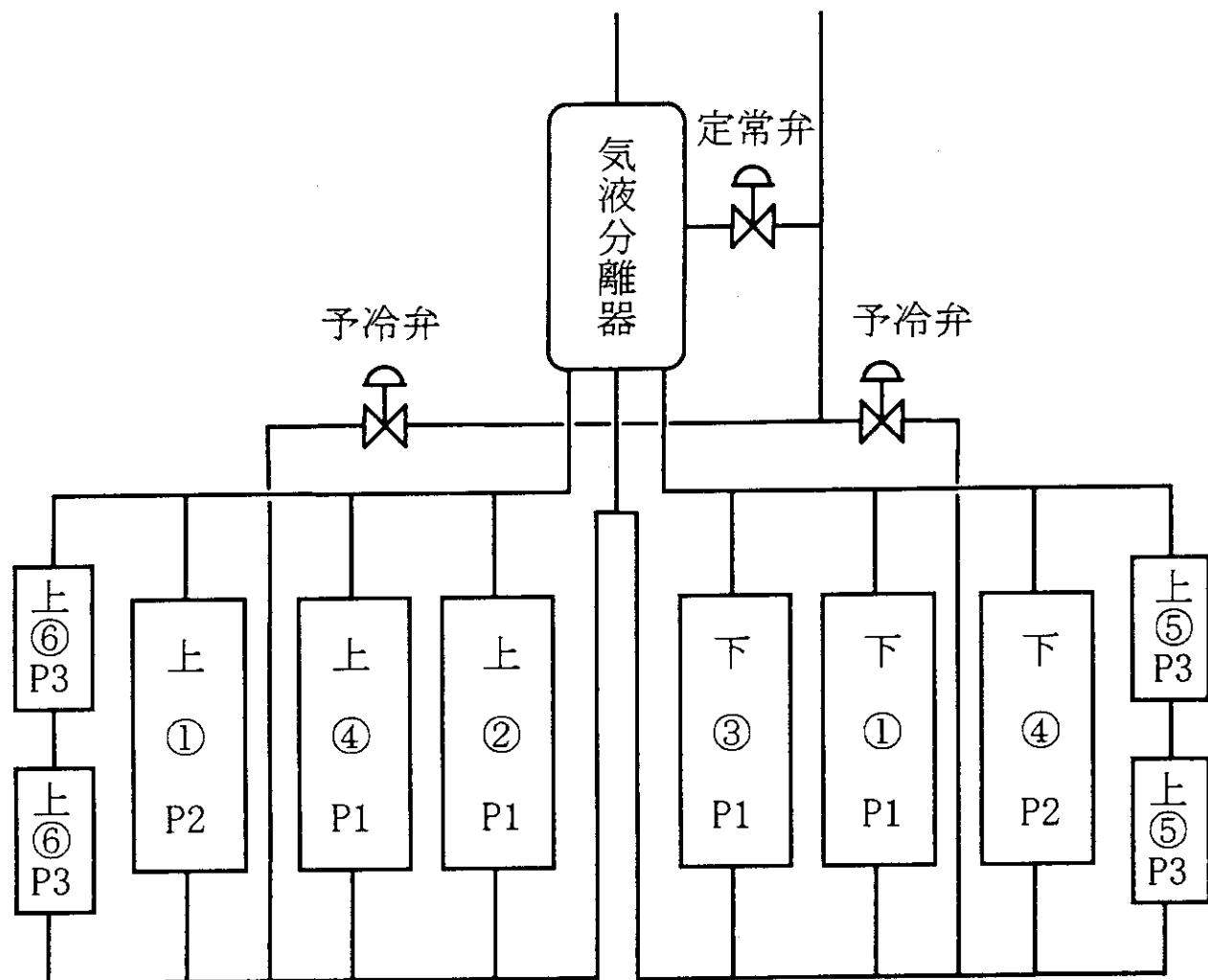
上記のクライオポンプ動作中における重水素の典型的なガスフローを第4.3.9-4図に示す。図中記号Cは各部のコンダクタンス（単位m³/s）、Sは排気速度（単位m³/s）、Pは各部の圧力（単位Pa）を表す。数値は形状から求められる計算値、軽水素に対する実測値を組み合わせて用いて得たものである。この結果においても、充分な排気が行われていることが分かる。



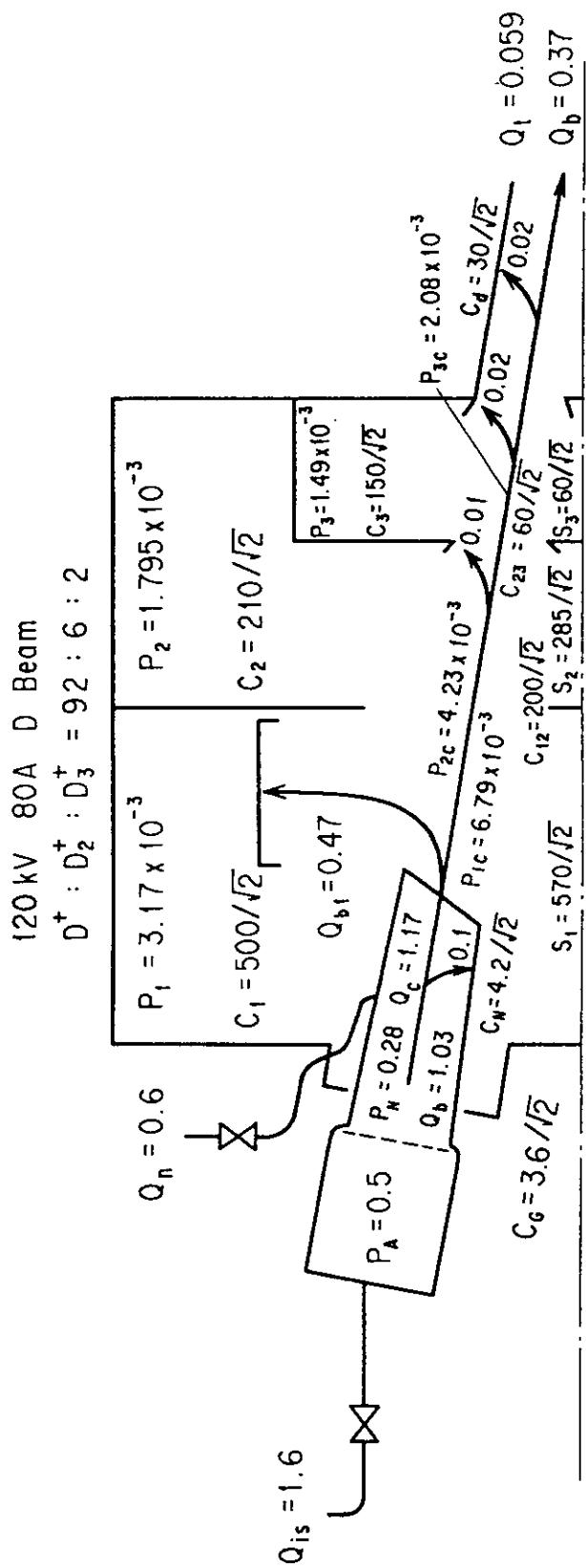
第4.3.9-1図 クライオパネルの配置。



第4.3.9-2図 液体ヘリウム配管接続立体図。



第4.3.9-3図 液体ヘリウム配管系統図。



第4.3.9-4 図 重水素運転時のガスフロー。

4.3.10 ドリフト部

ドリフト部は接線入射NBI装置主排気タンクとNBIポート間にあって、主排気タンクドリフトポート、絶縁セラミック、接続ベローズ、金属シールゲート弁、ゲート弁接続ポート等からなる。

第4.3.10-1図にドリフト部の全体図を示す。主排気タンクドリフトポートには、ビーム分布を測定する光ビームモニタと対向面の温度分布の計測・監視を行う赤外モニタを取り付けた。絶縁セラミックはJT-60U本体との電気的絶縁を行うものである。接続ベローズは主排気タンクとNBIポート間との機械的な接続をフレキシブルにするものであり、また金属シールゲート弁は主排気タンクとJT-60U本体真空容器との間の真空的な切り離しを行うためのものである。なお、既設NBI装置にはこの他に高速シャッタを設けていたが、接線入射NBI装置では設置スペース関係からこれを省略した。

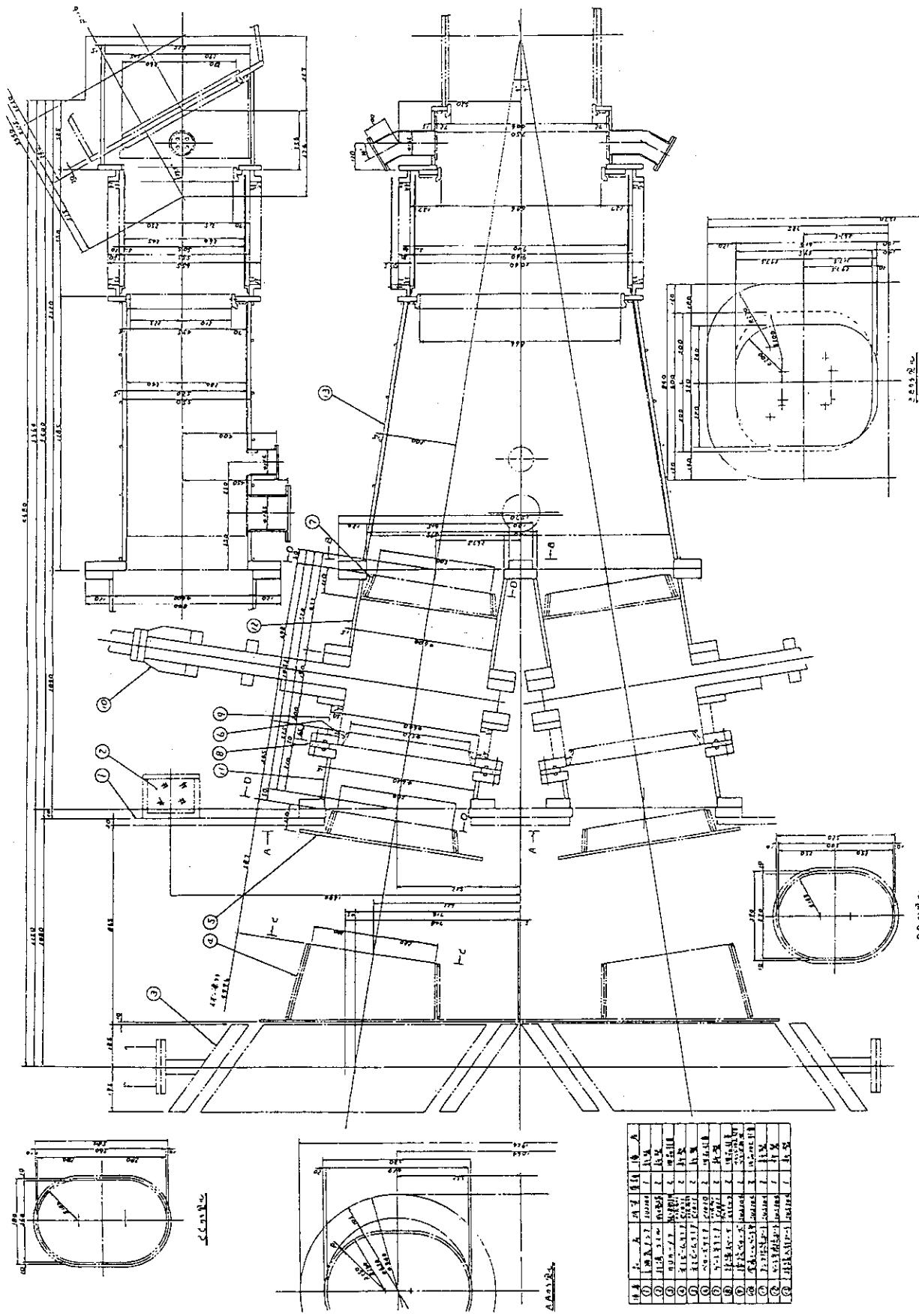
以下、個々の機器について示す。ただし、光ビームモニタと赤外モニタは4.3.15項に、金属シールゲート弁と高速シャッタについては4.3.12項に述べる。

主排気タンクドリフト部の詳細を第4.3.10-2図に示す。図は#7、8のもので、#9、10のものは左右勝手違いとなる。主排気タンクドリフト部は主排気タンクに直接溶接してある。この部分に光ビームモニタと赤外モニタが取り付けられる。

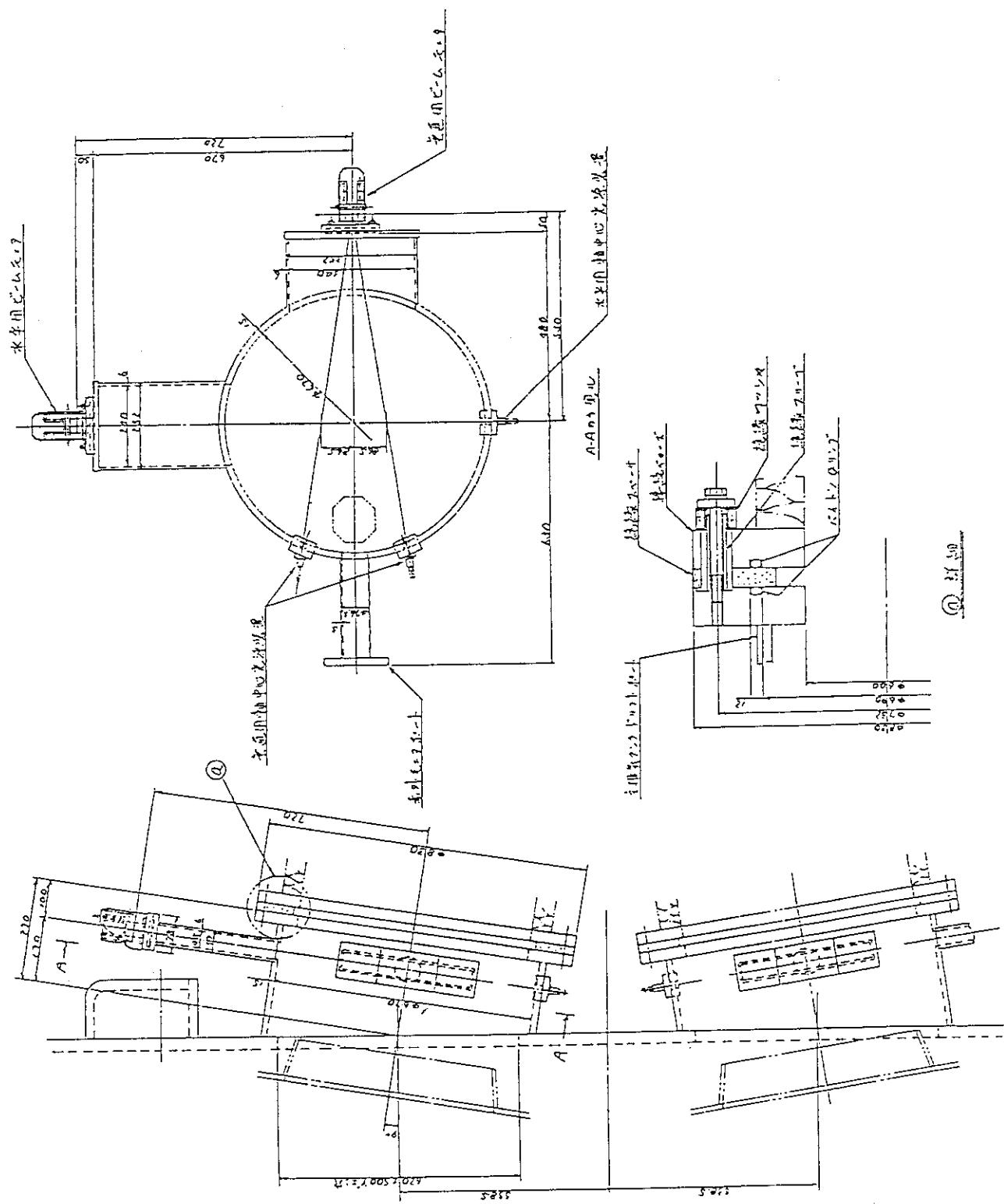
絶縁セラミックは既設NBI装置に用いていたものをそのまま再利用した。絶縁セラミックの形状と取り付け位置をそれぞれ第4.3.10-3、-4図に示す。

絶縁セラミックと金属シールゲート弁の間に設置する接続ベローズも既設NBI装置に用いていたものをそのまま再利用した。接続ベローズの形状を第4.3.10-5図に示す。材質はSUS304、変位と寿命は軸直角方向±6mm、 1×10^3 回、軸方向±4mm、 1×10^3 回である。

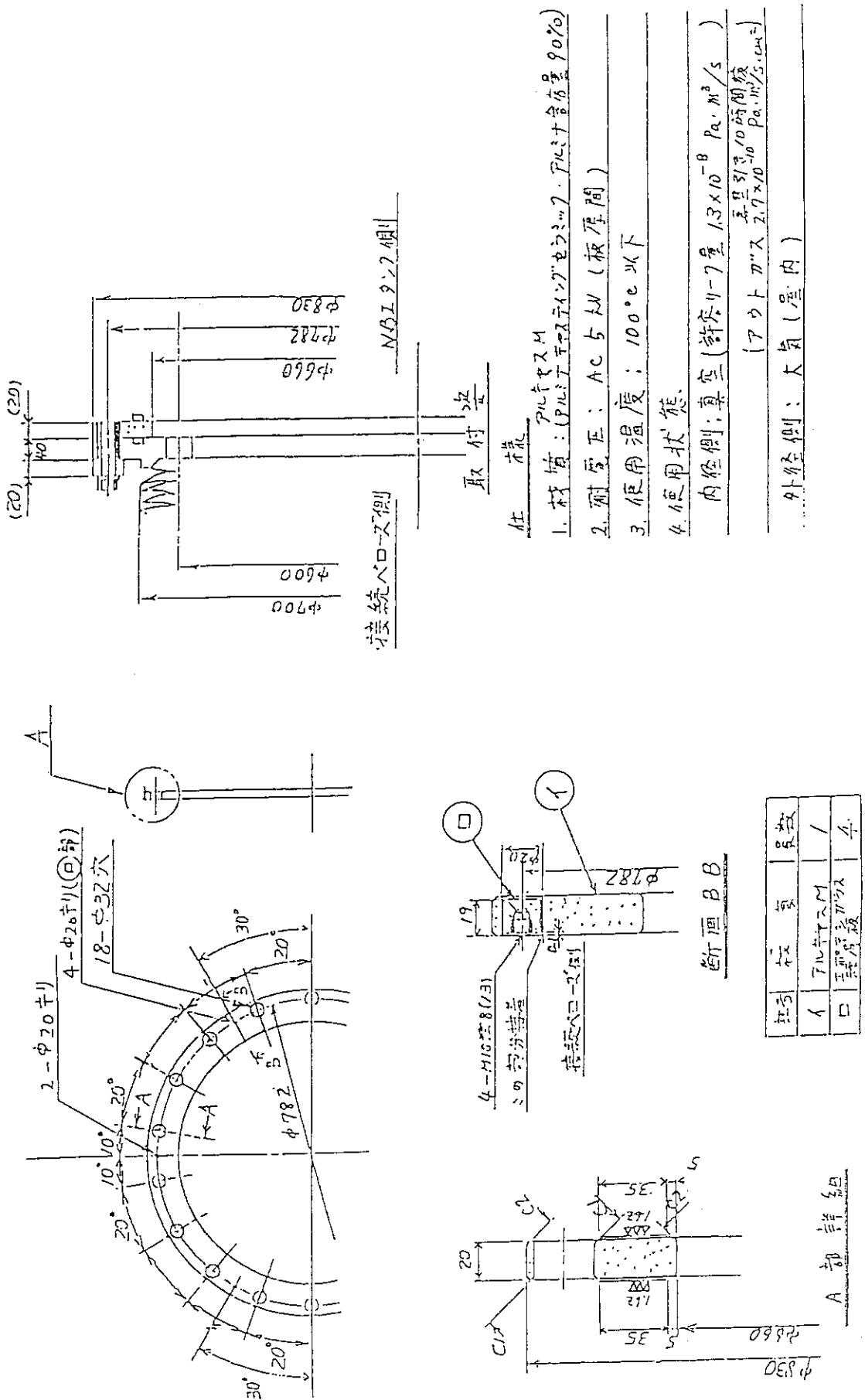
第4.3.10-6図にビームからベローズを保護するための接続ベローズリミタの構造図を示した。



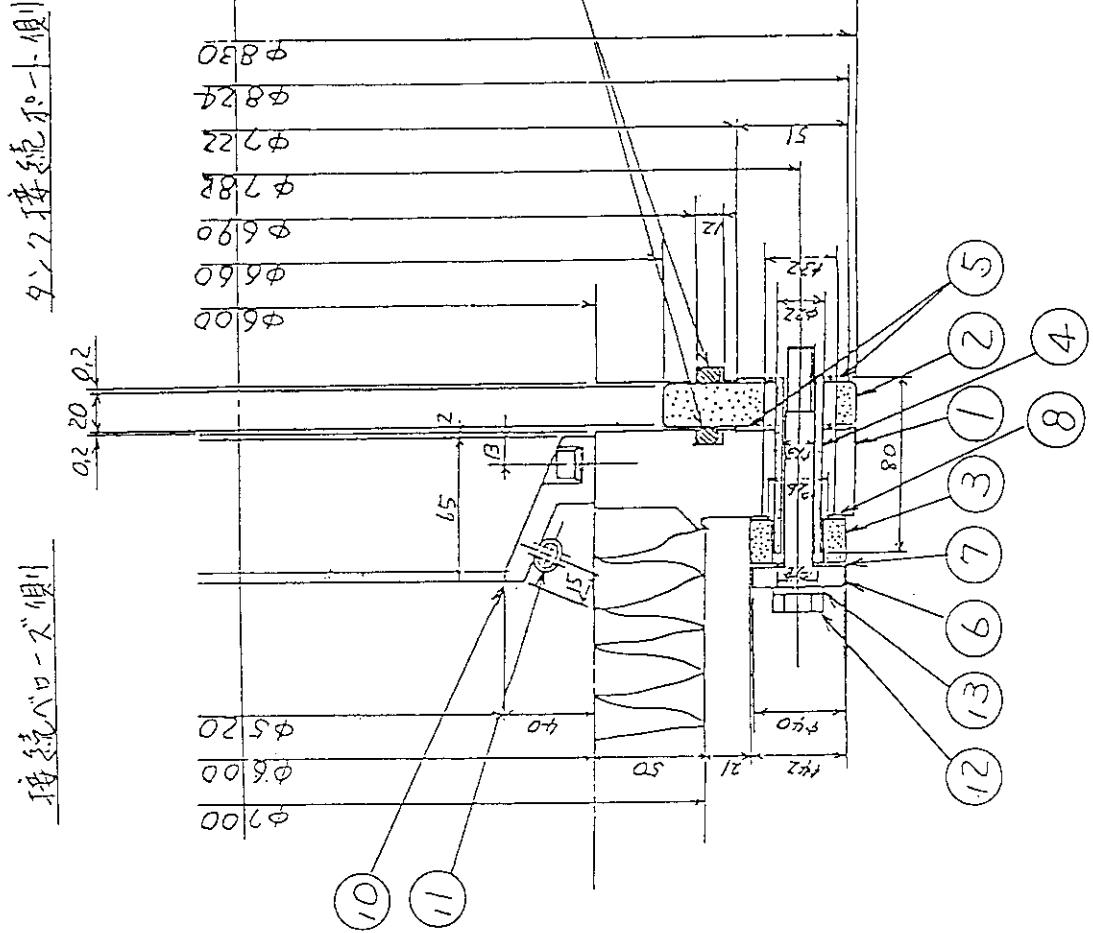
第4.3.10-1図 ドリフト部の全体図。



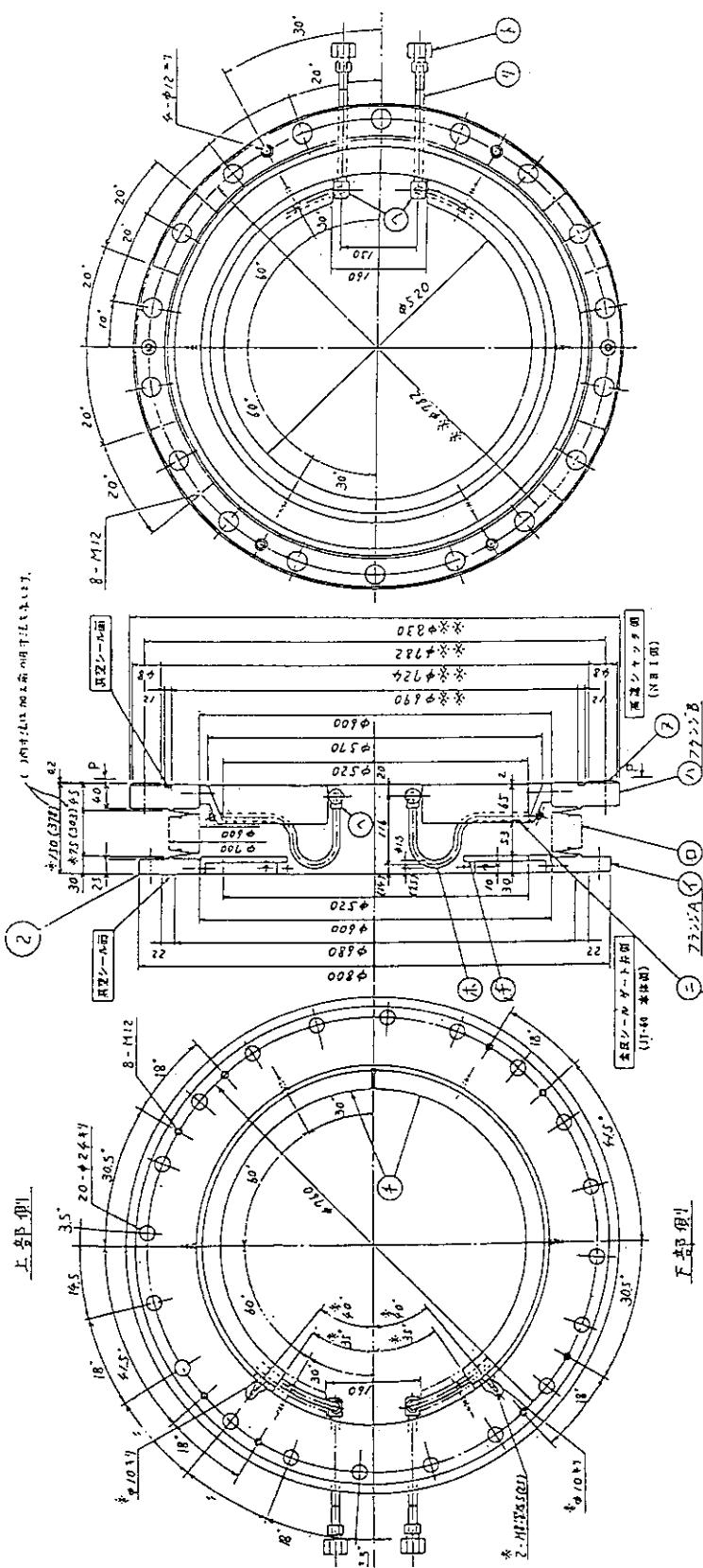
第4.3.10-2図 主槽ガスタンクドリフト部の詳細図。



第4.3.10-3 図 絶縁セラミック形状



第4.3.10-4図 絶縁セラミック取り付け位置。



部品名	材料	寸法	表面仕上		基面	表面仕上
			粗目	細目		
④ フランジ A	SS350#4	—	/	/	○	—
⑤ フランジ B	SS350#4	—	○	○	○	—
⑥ フランジ C	SS350#4	—	○	○	○	—
⑦ フランジ D	SS350#4	—	○	○	○	—
⑧ フランジ E	SS350#4	—	○	○	○	—
⑨ フランジ F	SS350#4	—	○	○	○	—
⑩ フランジ G	SS350#4	—	○	○	○	—
⑪ フランジ H	SS350#4	—	○	○	○	—
⑫ フランジ I	SS350#4	—	○	○	○	—
⑬ フランジ J	SS350#4	—	○	○	○	—
⑭ フランジ K	SS350#4	—	○	○	○	—
⑮ フランジ L	SS350#4	—	○	○	○	—
⑯ フランジ M	SS350#4	—	○	○	○	—
⑰ フランジ N	SS350#4	—	○	○	○	—
⑱ フランジ O	SS350#4	—	○	○	○	—
⑲ フランジ P	SS350#4	—	○	○	○	—
⑳ フランジ Q	SS350#4	—	○	○	○	—
㉑ フランジ R	SS350#4	—	○	○	○	—
㉒ フランジ S	SS350#4	—	○	○	○	—
㉓ フランジ T	SS350#4	—	○	○	○	—
㉔ フランジ U	SS350#4	—	○	○	○	—
㉕ フランジ V	SS350#4	—	○	○	○	—
㉖ フランジ W	SS350#4	—	○	○	○	—
㉗ フランジ X	SS350#4	—	○	○	○	—
㉘ フランジ Y	SS350#4	—	○	○	○	—
㉙ フランジ Z	SS350#4	—	○	○	○	—

用途：機器間接続用

接続器：JT-60-NBI高圧ソルターベンチ用

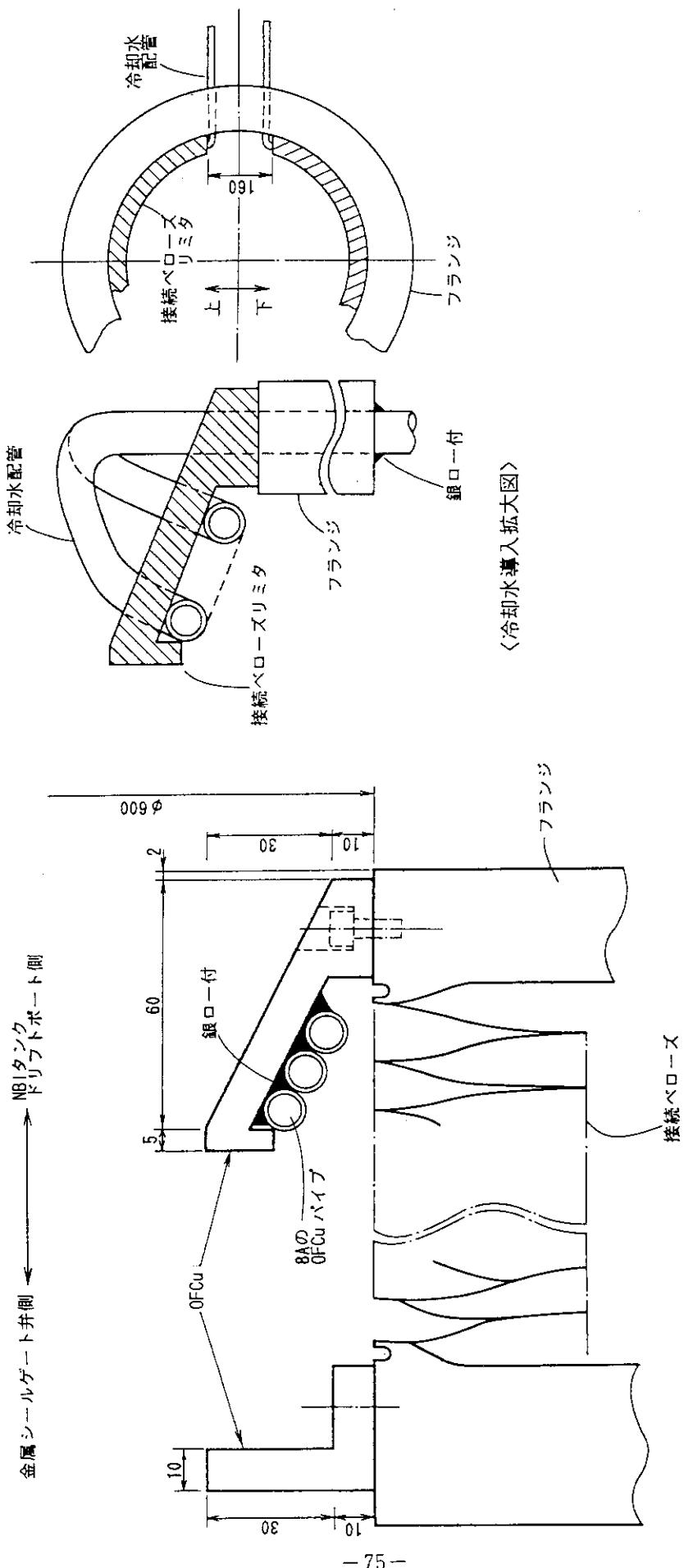
構成：(内)真空(外)大気

温度：-15～150°C

圧力：(内) 1.3×10^{-5} Pa変位許容：軸直角方向 $\pm 2 \text{ mm}$ (初期誤差 $\pm 1 \text{ mm}$) 200回軸方向 $\pm 2.5 \text{ mm}$ 1×10^3 回耐定数：約 1.0 MPa (絶対圧)耐重量： 160 kg
※参考値：本図中の各部に加工面がある場合、
※参考値：本図中の各部に加工面がない場合、

上記の値を2倍する。

第4.3.10-5 図 接続ペローズ形状。



第4.3.10-6図 接続ペローズリミタ構造図。

4.3.11 NBIポート

NBIポートはJT-60U本体真空容器と接線入射NBI装置主排気タンクとを連結して中性ビームを本体真空容器内に導くためのもので、ポート胴部、ポート胴部冷却、ポートベローズ、ベローズ内側保護カバー、ベローズ外側保護カバー、ビームリミター、ビーム受熱板、熱電対、ポートサポートから構成される。

NBIポートの構造を第4.3.11-1図に示す。NBIポートは、接線入射NBI装置側を内径707φの上下方向二股フランジ取り合いとしJT-60U側はビームライン中心軸より29.5度傾いたレーストラック型フランジ取り合いとなる。JT-60U側は溶接接続である。JT-60U側とNBIポートとの間にはベローズ（ポートベローズ）を挿入した。NBIポートの材質は非磁性のSUS-304であり、ポート胴部はサーモセメント及びクリートにより固定した直径12.7mmの冷却水パイプにより冷却できる。ポート胴部の冷却水配管を第4.3.11-2図に示す。

ポートベローズは第4.3.11-1図に示すとおりNBIポートとは水平方向に29.5度の傾きをもって設置した。この場合、ポートベーキングにおけるベローズの軸芯ずれ伸縮およびJT-60Uでのプラズマ消滅時における軸直角変位が問題となった。いずれもベローズの寿命に関係する。ポートベローズの仕様は以下のとおり。

材質：SUS304

内径：770×770 mm

外径：880×880 mm

板厚：0.8 mm

山数：15

自由長：180 mm

圧力：内部真空

本件に関し、ベーキング温度を200°Cとしベーキング時の軸芯ずれを±1mm、軸方向変位量を-20mm、またプラズマ消滅時の軸芯ずれを±1mm、軸直角方向変位量を±1.5mm（ただし軸方向変位量は-20mmのまま）として寿命計算をした。その結果、ベーキング時の寿命は46150回、疲労損傷率は0.0022となり、プラズマ消滅時は寿命11664回、疲労損傷率は0.008573となった。よって累計損傷率は、0.0879となり1以下であることから充分使用に耐え得ると判断した。

なお、ポートベローズの内側に保護カバーを設けた。これはポート部内で発生する再電離イオンビームからの熱負荷を避けるためのものである。再電離イオンビームは、NBIポート内で中性ビームが中性ガスと衝突電離することにより生ずる。発生した再電離イオンビームは、JT-60U本体の磁場により曲げられ、ビームリミタの影であって中性ビームは当たらないようなNBIポート内壁にまでも回り込む。またNBIポート近辺の磁場は一様ではないので、再電離イオンビームによる熱負荷は局所的に集中すると考えられている。すなわち、再電離イオンビームが発生するとJT-60Uへの入射パワーが減ずるのみならずポート部やベローズに多大な熱負荷（再電離損失）を与えることになる。再電離損失は、ポート内の圧力、ポート内壁からのアウトガスなどにもよるが、ポート内壁のエージングが充分進めば入射パワーの約5%位におさまる。⁽¹⁾

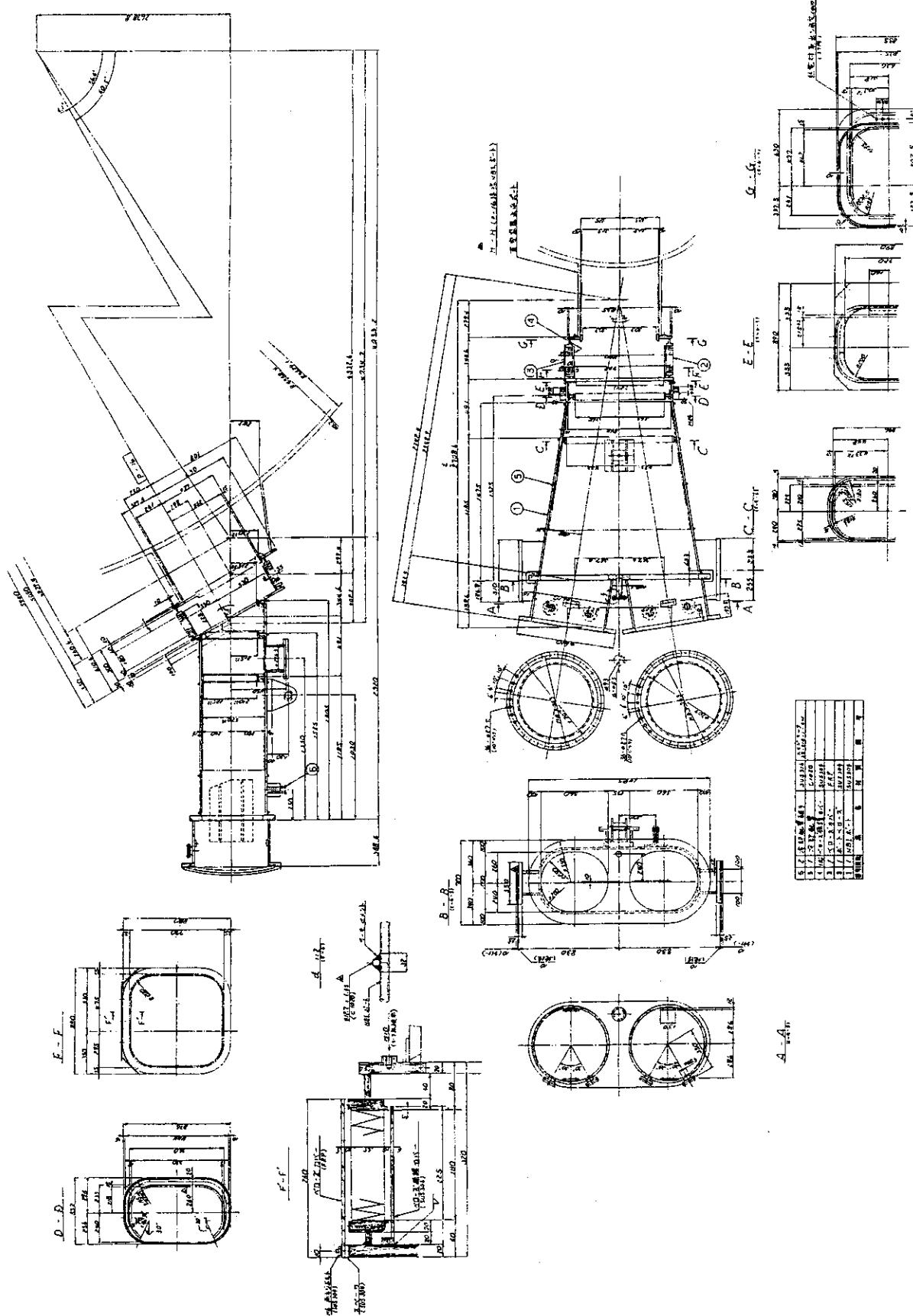
第4.3.11-3図にポートベローズおよび内側保護カバーの形状を示す。内側保護カバーは、その全体形状をベローズの形に合わせたレーストラック状筒型とし、保護カバーを形成している20枚の保護板は、トカマクプラズマのディスラプションに伴う渦電流による電磁力を低

減するために筒の軸方向に切り込みを入れて幅120mmおよび125mmの短冊状とした。材質はSUS 304である。またベローズの外側にはFRP製のベローズ外側保護カバーを設けた。外側保護カバーも第4.3.11-3図に示す。

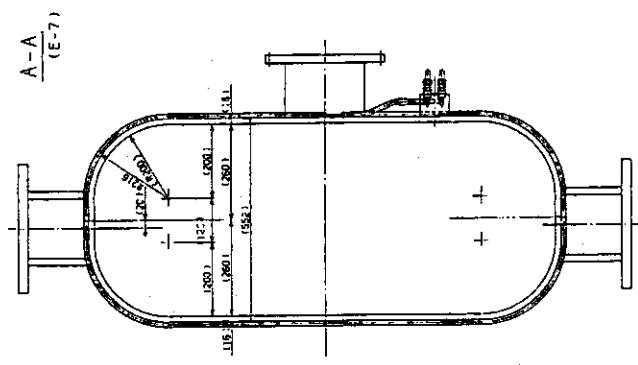
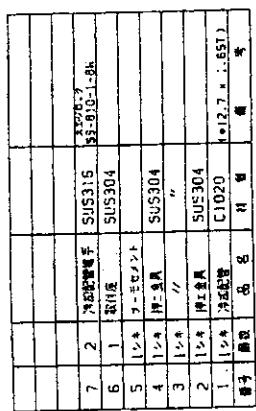
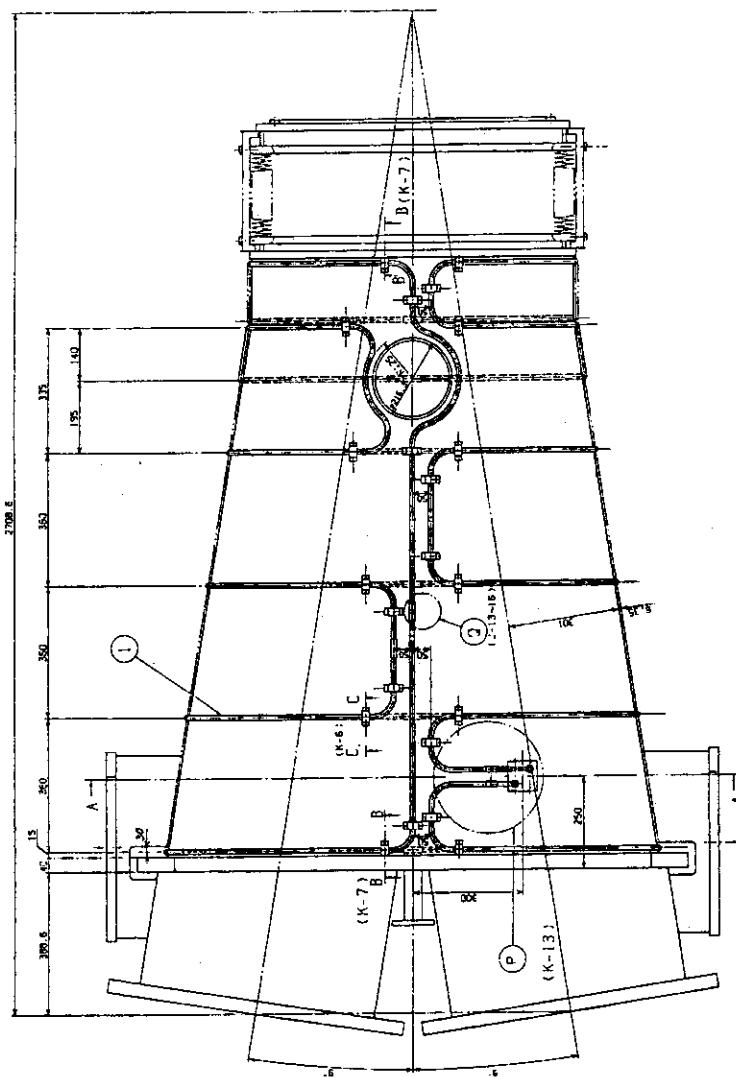
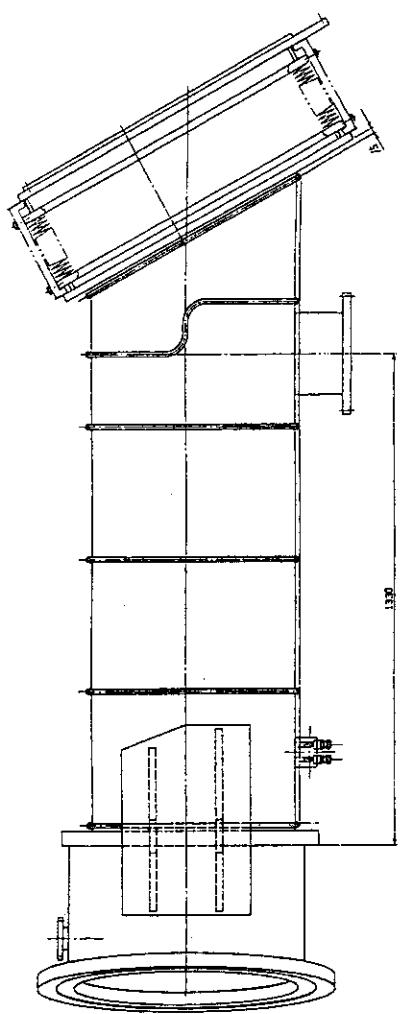
NBIポート内部のビームリミターを第4.3.11-4図に示す。ビームリミターは、ポートベローズの接線入射NBI装置側に2カ所（第4.3.11-4図の断面A-AおよびB-B）、JT-60U真空容器側に1箇所（第4.3.11-4図の断面D-D）の計3箇所取り付けた。材質はモリブデンである。

ビーム受熱板は、再電離イオンビーム（第4.3.11-5図に代表的な再電離イオンビーム軌道を示す。）からNBIポート内壁を保護するためのものである。第4.3.11-6図にビーム受熱板の取り付け展開図を示す。ビーム受熱板は100mm角程度のカーボングラファイトタイルを並べたものである。タイルはNBIポート内壁にSUSボルトにてタイル毎に各2箇所（図中の+記号の位置）で固定した。再電離イオンビームによる熱負荷モニタのため、ビーム受熱板の要所（ポート毎に20箇所）には熱電対を取り付けた。

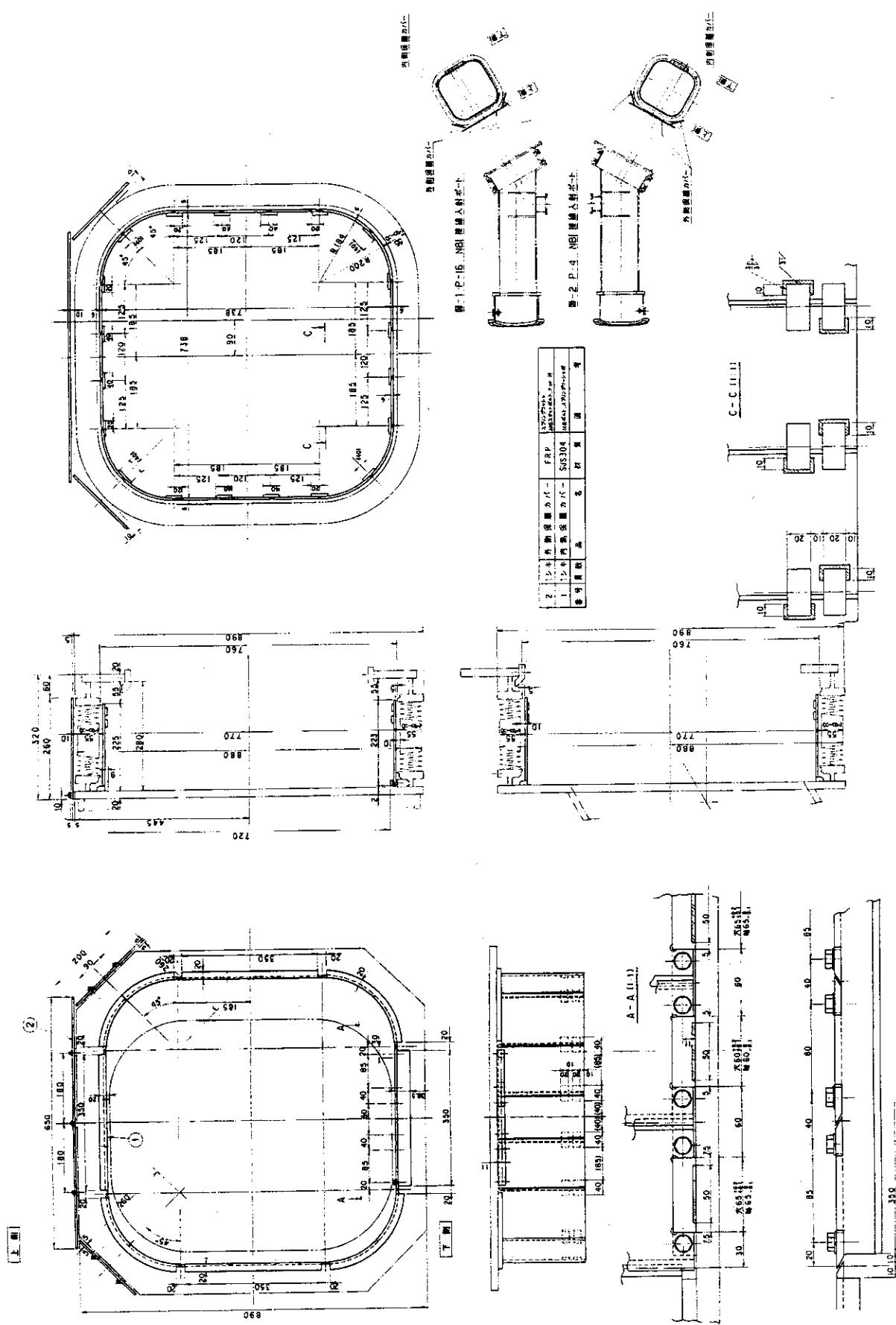
NBIポートは、より強固に固定するため、隣接する準垂直NBI装置の主排気タンクより支持することとした。すなわち#7、8用ポートは#5、6ユニットより、#9、10用ポートは#11、12ユニットより支持した。このポートサポートは4.3.12項の金属シールゲート弁のサポートを兼ねる。NBIポートと金属シールゲート弁はJT-60U本体真空容器電位、NBIタンクはユニット毎に個別のNBI接地電位であるので、この間は実効値AC1.1kVの絶縁を施した。



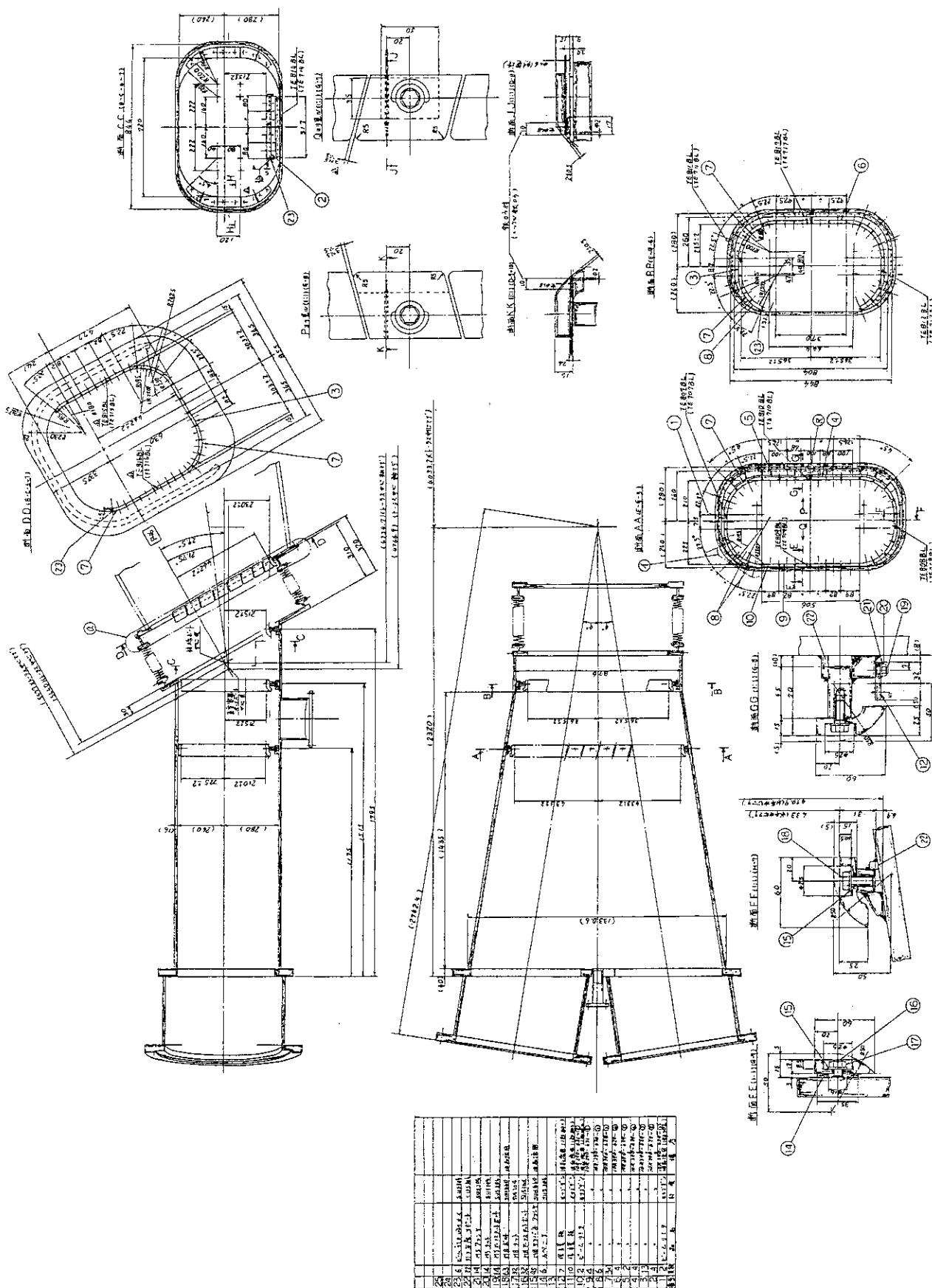
第4.3.11-1 図 NBI-1 構造図。



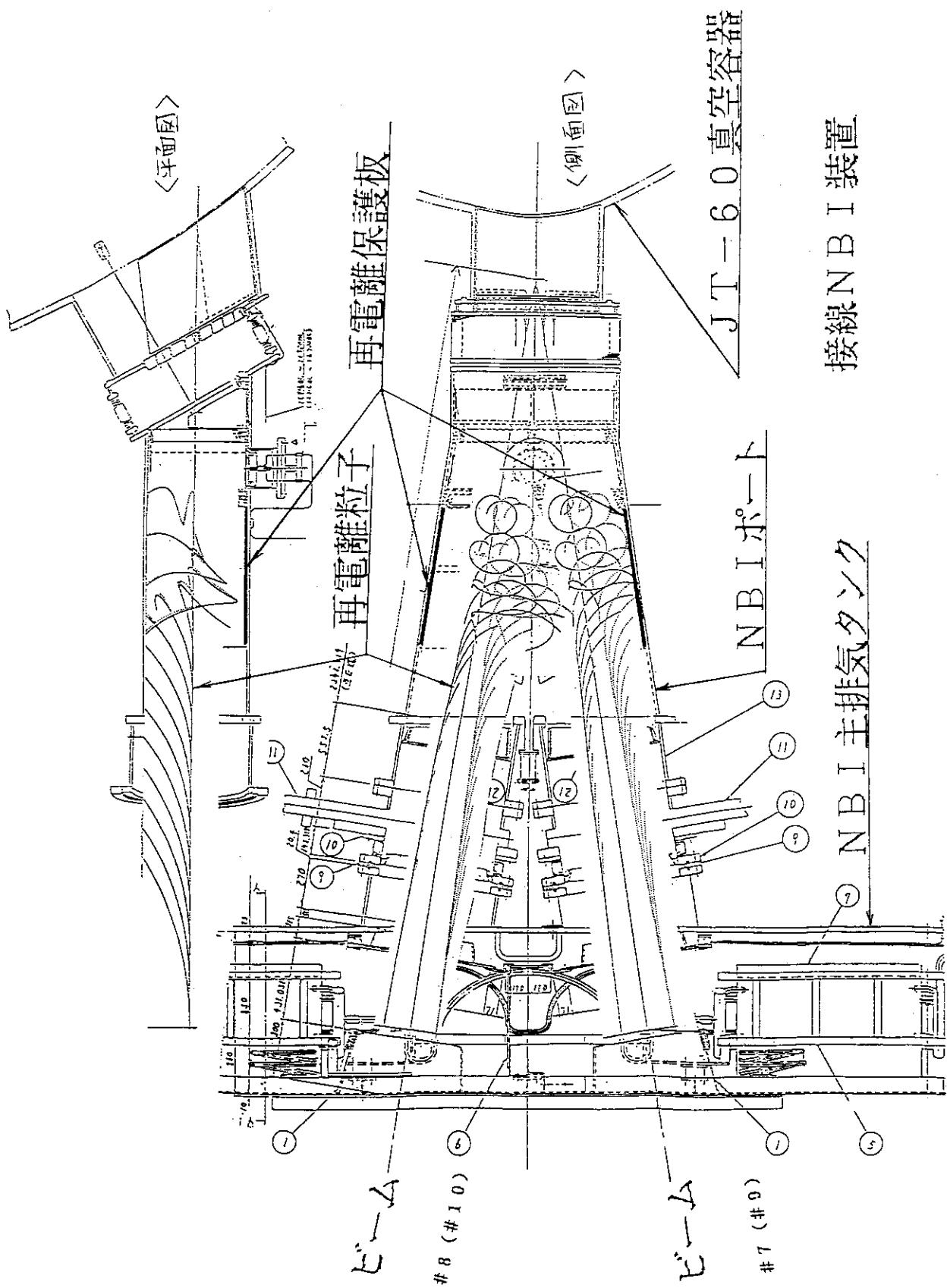
第4.3.11-2図 NBIポート冷却配管図。



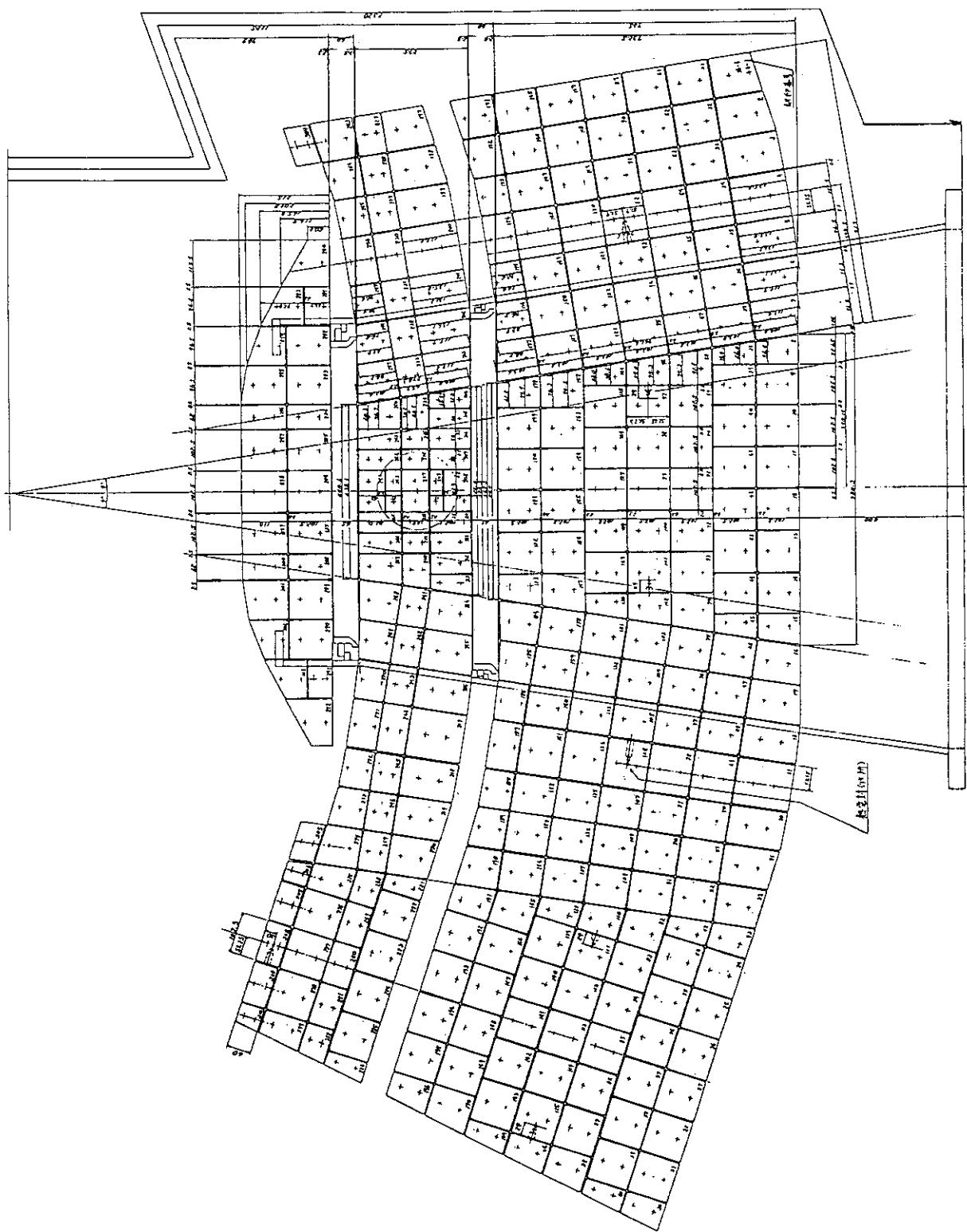
第4.3.11-3図 ポートベローズおよびベローズ保護カバー。



第4.3.11-4図 ビームミラミラー構造図



第4.3.11-5図 接線入射NBII装置における代表的な再電離イオンビーム軌道



第4.3.11—6図 ビーム受熱板取り付け展開図。

4.3.12 金属シールゲート弁、高速シャッタ

金属シールゲート弁は既設NBI装置に用いていたものを、上下ユニット用のものが相互に空間的に干渉しないようフランジ外径を小さくして再利用した。なお、このゲート弁は弁板自体はO-リングシールである。

4.3.9項で示したように、ビーム入射中に接線入射NBI装置からJT-60U本体真空容器へ流れ込む中性ガス流量は $0.059\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 程度と小さい。逆に、JT-60U本体プラズマ消滅後、NBI主排気タンク側に逆流する中性ガス流量は、JT-60U本体内に導入される動作ガスが全て接線入射NBI装置に逆流したとしても、その合計は約 $2\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s} \times 5\text{s} \times 40\text{shots} \times 5\text{days} = 2000\text{Pa}\cdot\text{m}^3$ と見積もられ、接線入射NBI装置#7, 8または#9, 10ユニットにおけるクライオポンプでの安定吸着量が約 $10000\text{Pa}\cdot\text{m}^3$ であることから、接線入射NBI装置では約10%の排気負荷増大となる。実際には、JT-60Uでのプラズマ放電1ショット当たりのガス導入量に若干の変動はあるものの、JT-60Uでの真空排気設備との差動排気となるため接線入射NBI装置への排気負荷増大はそれほど大きくならないと想定される。したがって、高速シャッタを設置するスペースの確保も困難であったこともあり接線入射NBI装置ではこれを省略することとした。

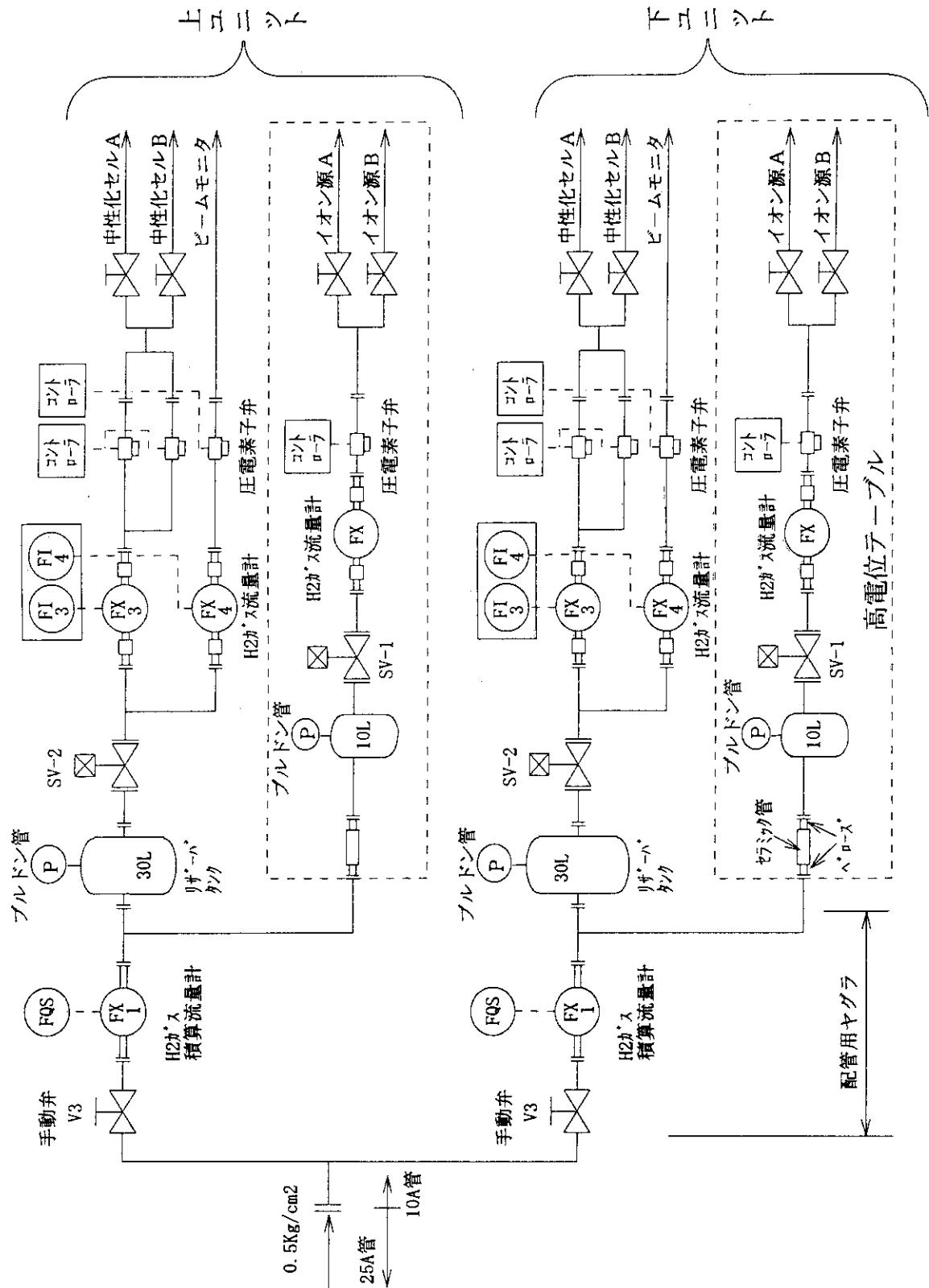
なお、高速シャッタがないと、JT-60Uでのヘリウム放電洗浄運転時にJT-60U真空容器内が約 0.2Pa 程度の圧力となることから、ヘリウムガスが接線入射NBI装置内に流入することになる。この場合、もともとクライオポンプにはヘリウムの排気能力がないために、接線入射NBI装置内の圧力が上昇し結果的にはクライオポンプへの熱負荷が増大することになりクライオポンプの運転上大きな問題となる。

そこでヘリウム放電洗浄を実施する際は、予め金属シールゲート弁をアンシール閉とすることで対処することとした。このために金属シールゲート弁はアンシール位置でも弁板を停止できるように改造した。アンシール閉状態におけるコンダクタンスは、約 $900\text{m}^3/\text{s}$ (#10ユニット)である。ちなみに高速シャッターの場合は、約 $300\text{m}^3/\text{s}$ である。

金属シールゲート弁は、JT-60Uへのビーム入射直後には閉操作はできない。これは、ビーム入射中に金属シールゲート弁が、その近傍にて発生する再電離イオンビームによる熱負荷のために加熱されシール面の温度が上昇していることによるもので、シール面の温度が高いときにゲート弁を全閉操作するとO-リングが高温シール面に溶着してしまった可能性があるからである。通常、金属シールゲート弁の全閉操作は、経験的に、ビーム入射後約15分経過してからとしている。したがって、ヘリウム放電洗浄運転時よりも高い圧力で運転されるヘリウムグロー放電洗浄時には、その直前に金属シールゲート弁を全閉とする必要があり、かつ充分な冷却時間を経過した後に操作する必要がある。

4.3.13 ガス導入系

ガス導入系は、ヘリウム液化機室(I)に設置されている集中ガス導入系、および各ユニット毎に設けられるイオン源ガス導入系、中性化セルガス導入系、ビームモニターガス導入系から構成され、H₂ガスまたはD₂ガスを供給するものである。接線入射NBI装置においてもこれまで使われていた各ガス導入系をそのまま再利用する。変更は配管のみである。上下ユニットを合わせたガス導入系の系統を第4.3.13-1図に示す。



第4.3.13-1図 上下ユニット分のガス導入系。

4.3.14 打消しコイル

接線入射NBI装置では既設NBI装置で用いていた第1、第2打消しコイルは使用できない。これは、接線入射NBI装置におけるビーム軸とJT-60Uからの漏洩磁場の向きとの相対角が既設NBI装置のそれとは全く異なり、従来の打消コイルシステムをそのまま流用できないためである。したがって、接線入射NBI装置では新たな打消コイルシステムを構築する必要が生じた。

接線入射NBI装置用打消コイルは、MコイルとSコイルから成る。

Mコイルは、75kAT/ユニット（ $1000\text{A} \times 75\text{T}$ ）であり、接線入射NBI装置主排気タンクの外側を取り囲むように大気中に設置した自然空冷のコイルである。

Sコイルは、接線入射NBI装置主排気タンク内に設置したもので、3kAT/ユニット（ $1000\text{A} \times 3\text{T}$ ）の容量をもち、設置雰囲気が真空のためSUS304製のケーシング内に収めたものである。ケーシング内は大気に通じているが、設置場所がタンク内にありケーシング内の経路が複雑なためコイルそのものの自然空冷は期待できないことから、Sコイルは水冷とした。そのため、Sコイルは外形 $10\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ 、厚さ 1.5mm の中空導体を使用した。中空部分に冷却水を流す。第4.3.14-1図にMコイルの形状を、第4.3.14-2図にM、S両コイルの配置を示す。

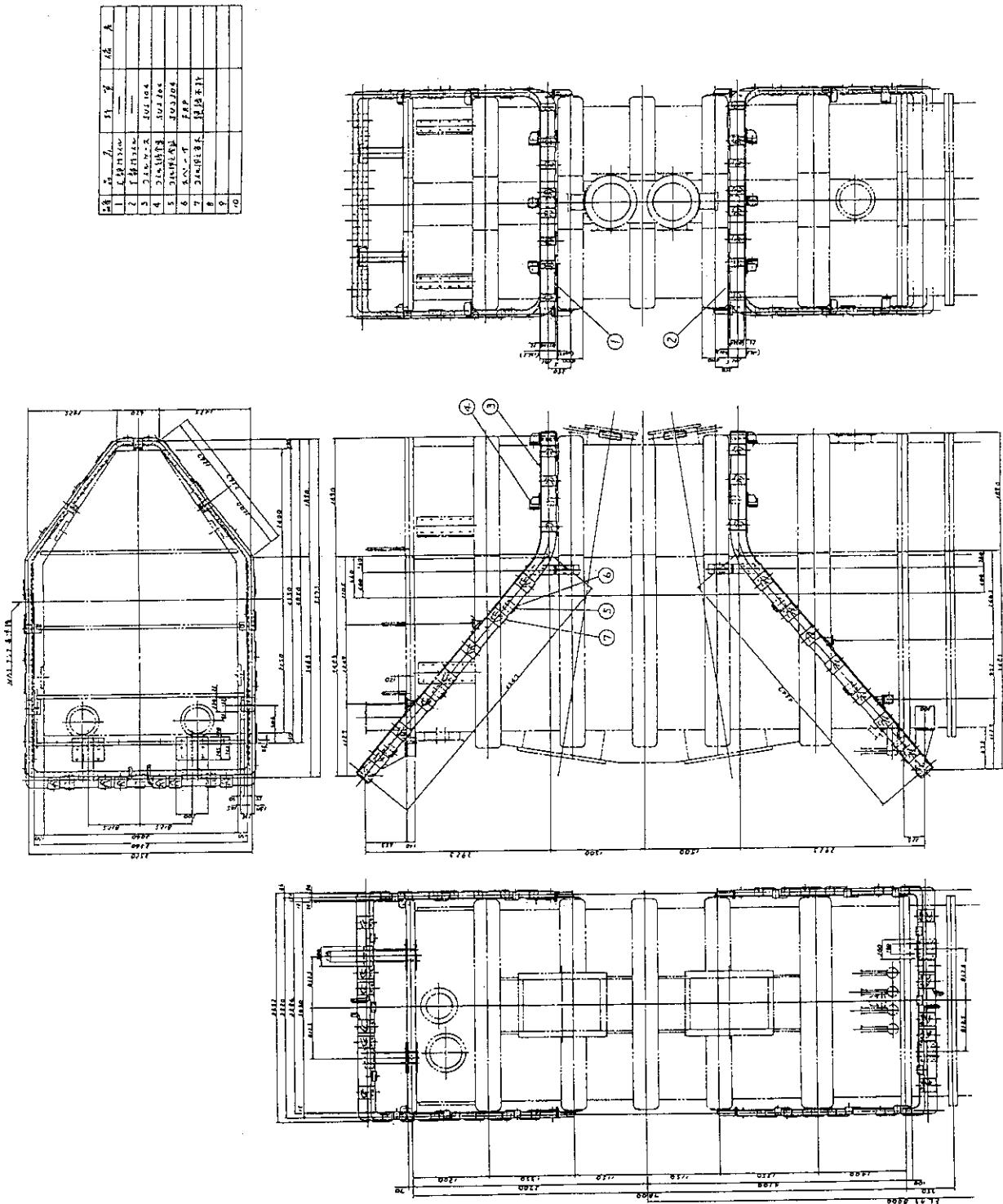
MコイルとSコイルは直列に接続して使用する。電源は既設の打消コイル電源をそのまま再利用した。また打消コイル電源を負帰還制御するためにホール素子を設置した。ホール素子は、ホール素子1と2の2式用意した。

ホール素子1は、JT-60U本体からの漏洩磁場を測定するためのもので、隣接する準垂直NBI装置の主排気タンク側壁に設置した。これは、ホール素子設置場所は本来ならば漏洩磁場を打ち消そうとする場所近辺が好ましいが、接線入射NBI装置ではMコイルを主排気タンク外側に設けたことによりその影響を受けてしまい漏洩磁場を正確に測定できないからである。

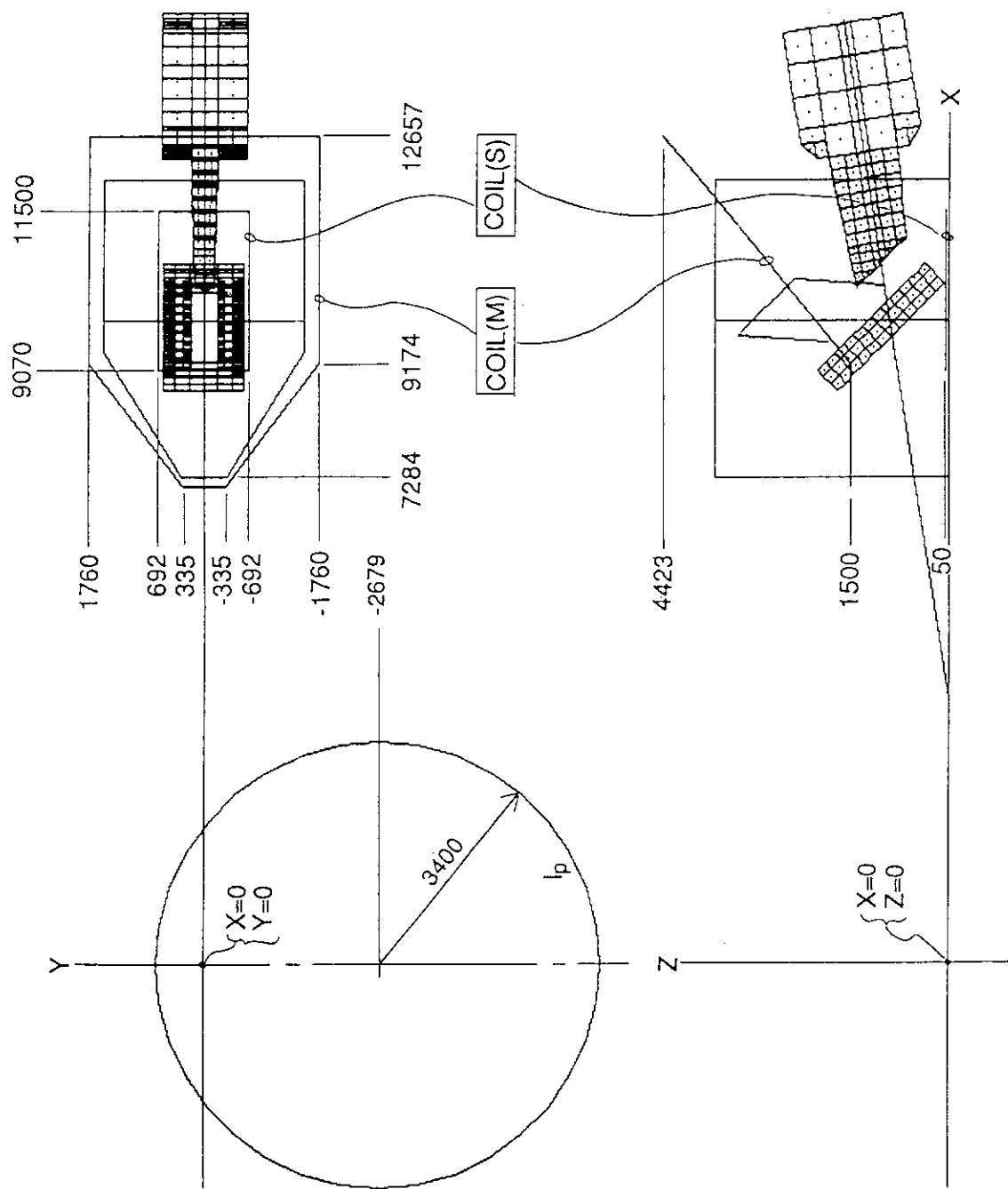
ホール素子2は、漏洩磁場と打消し磁場との差（残留磁場）を測定するためのもので、中性化セル磁気シールドの先端に取り付けられていたものをそのまま再利用した。

これらの取り付け箇所を第4.3.14-3、-4図に示す。

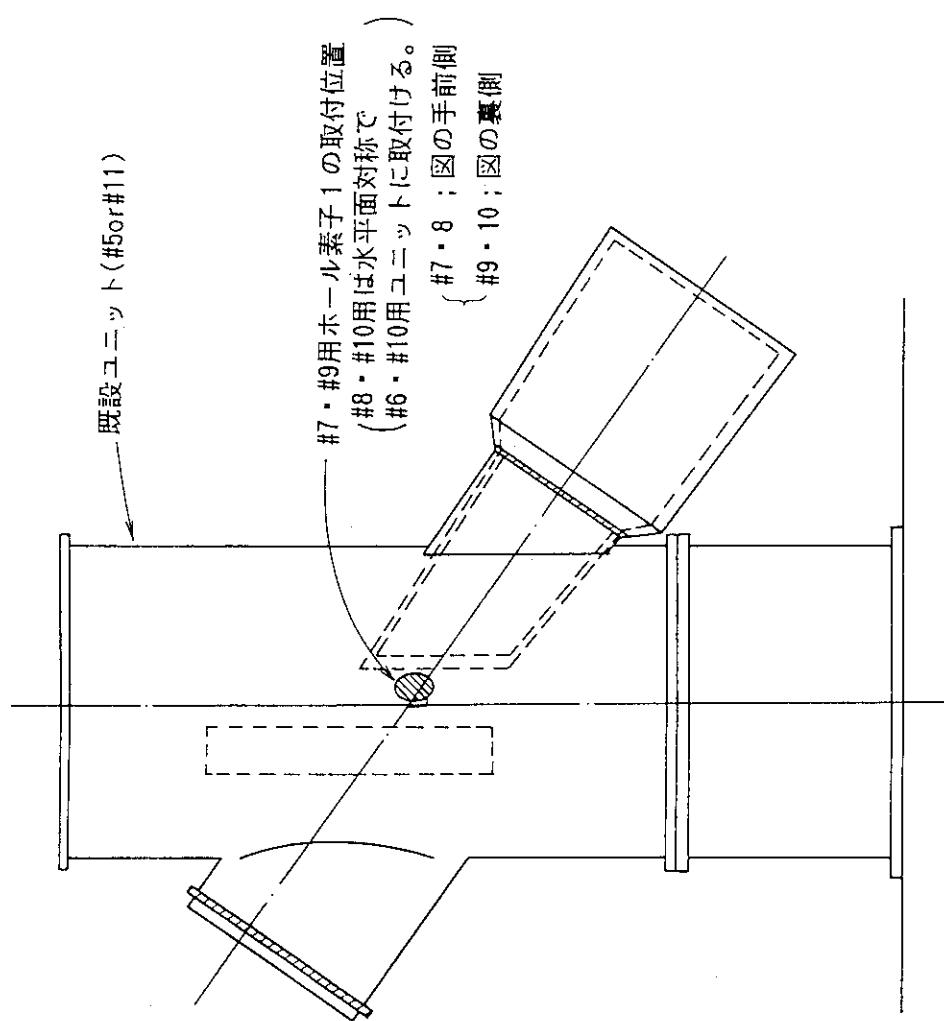
なお、コイル名称は主たるコイル（Main）、小さなコイル（Small）からとったものである。



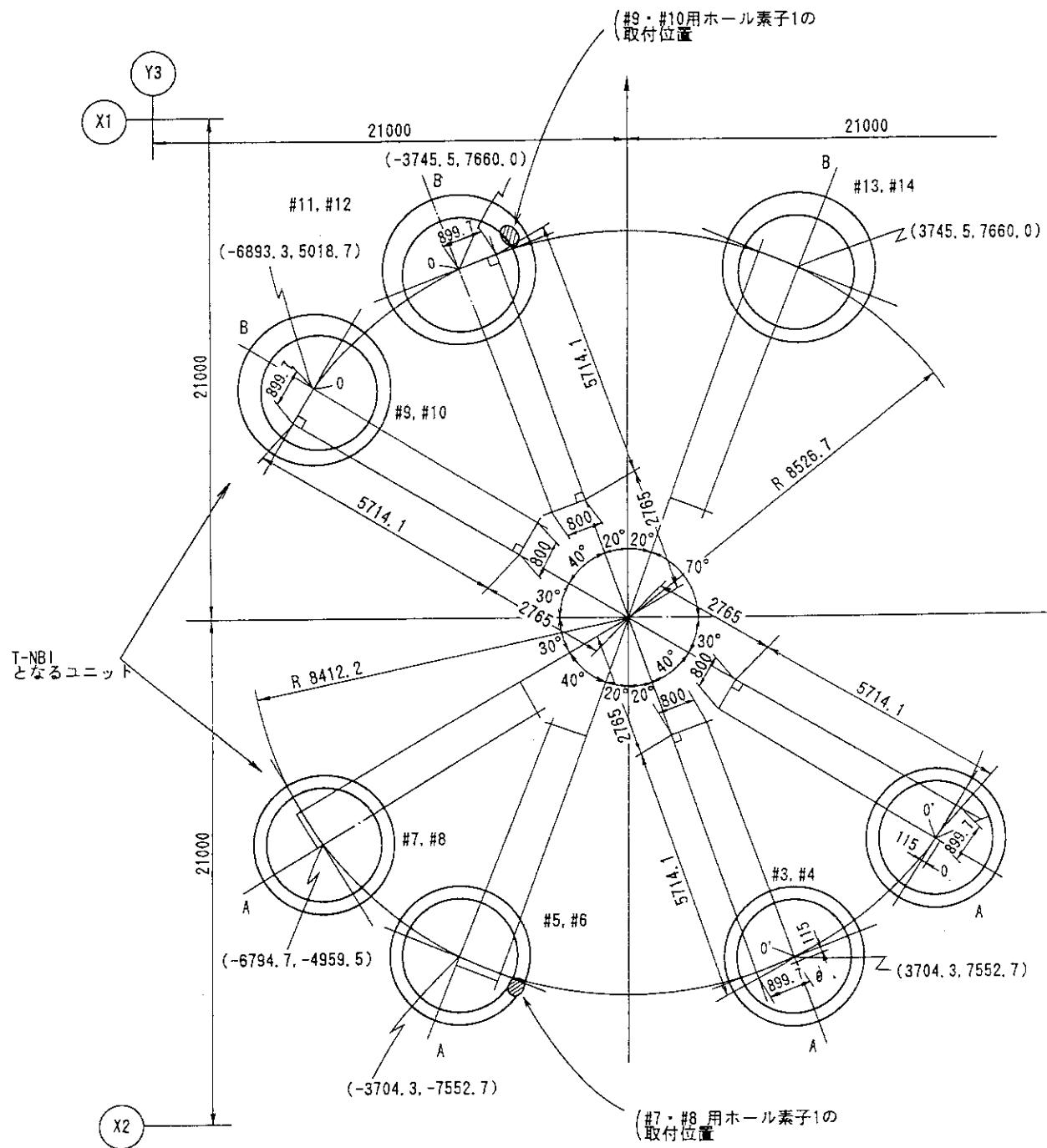
第4.3.14-1図 M哥イル形状。



第4.3.14-2図 M, Sコイル配置図 (#8ユニットの場合を示す。#7ユニットは
Z=0を境界に上下対称となる。)。



第4.3.14-3図 ホール素子1取り付け位置（立面図）。



第4.3.14-4図 ホール素子1取り付け位置(平面図)。

4.3.15 計測設備

接線入射NBI装置には、既設NBI装置と同様に運転状態のモニター、インターロックのために各種計測設備を設た。

接線入射NBI装置に取り付けた真空計測ゲージ一覧を第4.3.15-1表に示す。電離真空計は漏洩磁場のある雰囲気でも測定可能なように二重磁気シールド付きとした。この他、主排気タンク毎にバラトロンと残留ガス分析器を各1台取り付けた。

熱電対は、既設NBI装置と同様に受熱機器の主要部分に多数取り付けたが、接線入射化に際しては第4.3.15-2表に示す箇所について変更を行った。これらは既設NBI装置と形状ないしビームの当たる箇所が変更になったことによるものである。

分光モニターは、ビームが発するドップラーシフトしたバルマーアルファ光をスペクトル分析することにより、ビーム組成を測定するものである。ここで測定しようとしているビーム組成とは、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 、 H_2O^+ の形で加速されたイオンビームの相互の比率である。イオンビームの速度の比は1:1/2:1/3:1/18となるので分光した各スペクトルの光量はビーム組成に対応する。なお、分子状イオンビームは途中で中性ガスとの衝突により部分的に原子状イオンビームに変わる。

ビームからの光は分光モニター用窓に取り付けた望遠レンズにより集められ、集められた光は各信号毎に光ファイバーケーブルにて分光器まで伝送する。伝送された光信号は、分光器にて切り替えてモニターする。接線入射NBI装置における分光モニター用窓の取付位置を第4.3.15-1図に示す。

光ビームモニターは、主排気タンクから出てくる中性ビームの発する光の強度分布をモニターしてビーム軸調整を行うことを主目的とするものである。合わせてビーム発散の情報も得られる。分光はしない。第4.3.15-2図はビームモニター覗き窓と検出部である固体素子センサーモニターカメラ、ハニカム構造の反射防止板、ビーム中心軸を知るための中心軸光源装置の取り付け図を示す。得られる情報（ビデオ信号）は既設NBI装置で使用している光ビームモニター信号処理部（デジタルビデオメモリ、パソコン、モニター等）を共用し信号を切り替えて使用する。

赤外モニターはJT-60U本体真空容器内の対向面の温度をモニターするものである。接線入射NBI装置は、既設NBI装置に比べプラズマ内のビーム通過長さが格段に長いのでプラズマを突き抜けて対向面に当たる量（ビーム突き抜け量）は少ないと考えられる。そこで接線入射NBI装置のうち赤外モニターは当面#7ユニットだけに取り付けることとした。また、#7ユニットの対向面付近には高周波加熱装置のLHランチャーが設置されており、#7ユニットの赤外カメラはランチャーへの入熱モニターともなっている。

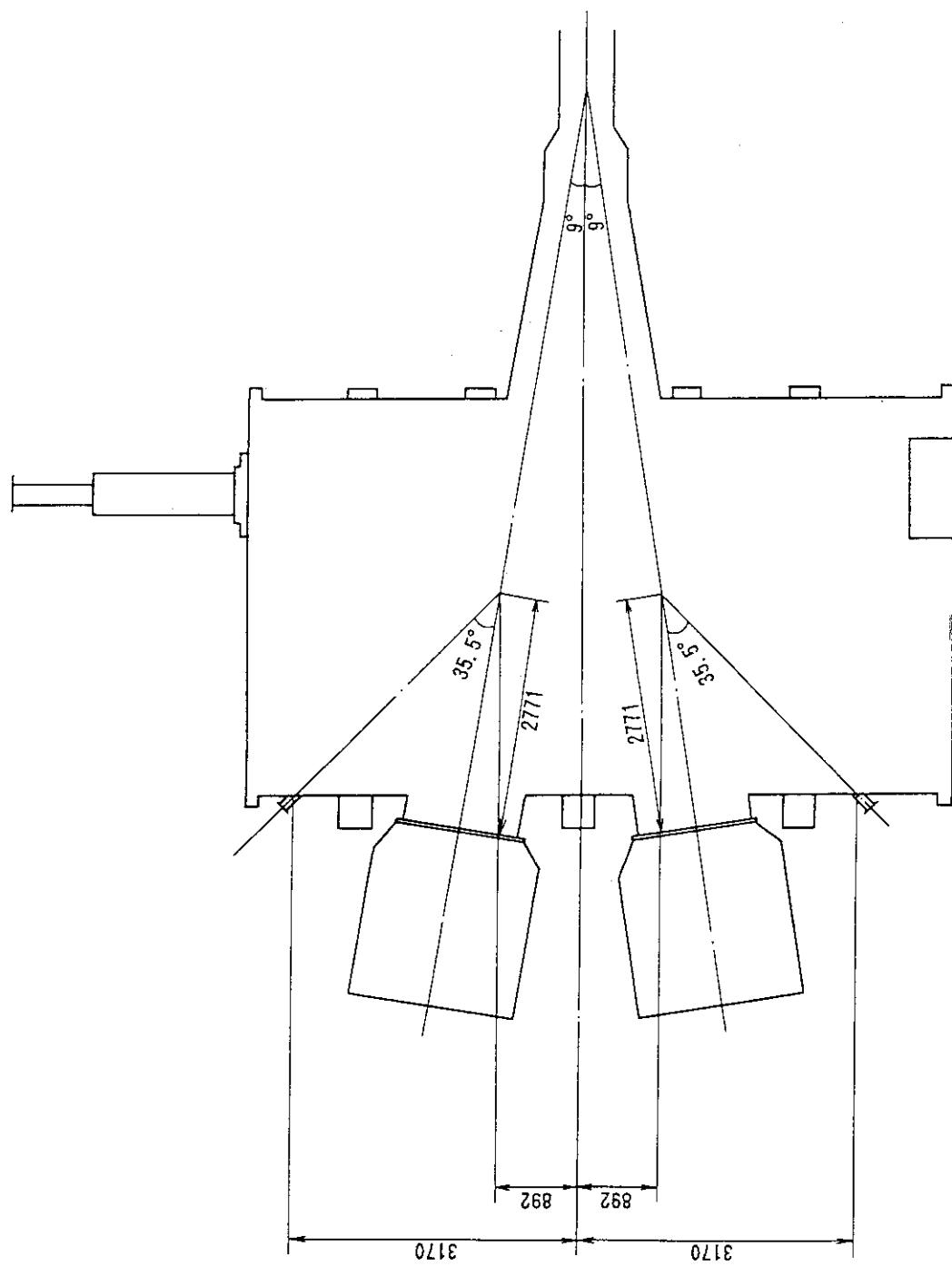
第4.3.15-3図に赤外モニターの取り付け位置を示す。赤外カメラは日本アビオニクス（株）製で温度測定範囲の上限は2000度、256階調で画像表示できるものである。また、対向面保護のため、ある設定温度以上になるとビーム入射を停止するようインターロックを組んである。

第4.3.15-1表 接線入射NBI装置の真空計測ゲージ

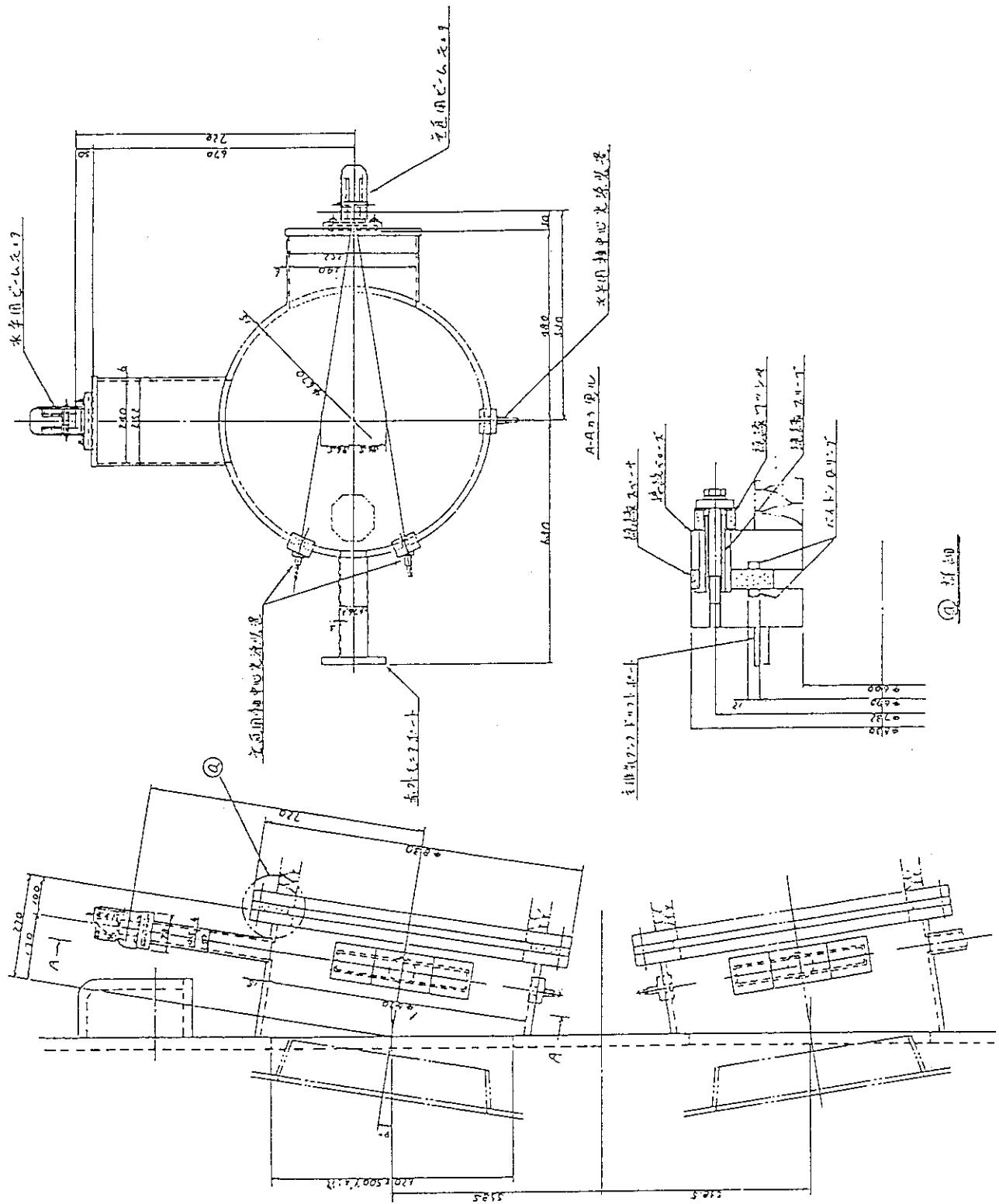
記号	ゲージの種類	取付位置	目的	個数/タク
1	電離真空計	P1室	真空度モニター	1
2	電離真空計	P2室	真空度モニター	1
3	電離真空計	P3室	真空度モニター	1
4	電離真空計	イオン源接続フランジ	中性化セル入口 真空度モニター	4
5	ピラニゲージ	P3室	ゲート弁差圧信号 クライドソフ再生時の補助排気開始指令	2
6	ペニンクゲージ	P1室	タク内真空度のインタ-ロック信号	1
7	ペニンクゲージ	イオン源接続フランジ	中性化セル圧力インタ-ロック信号	4
8	圧力伝送器	P2室	真空度モニター	1
9	電離真空計	NBIポート	真空度モニター	1

第4.3.15-2表 受熱部温度監視盤の入力項目（追加、改造分のみ）

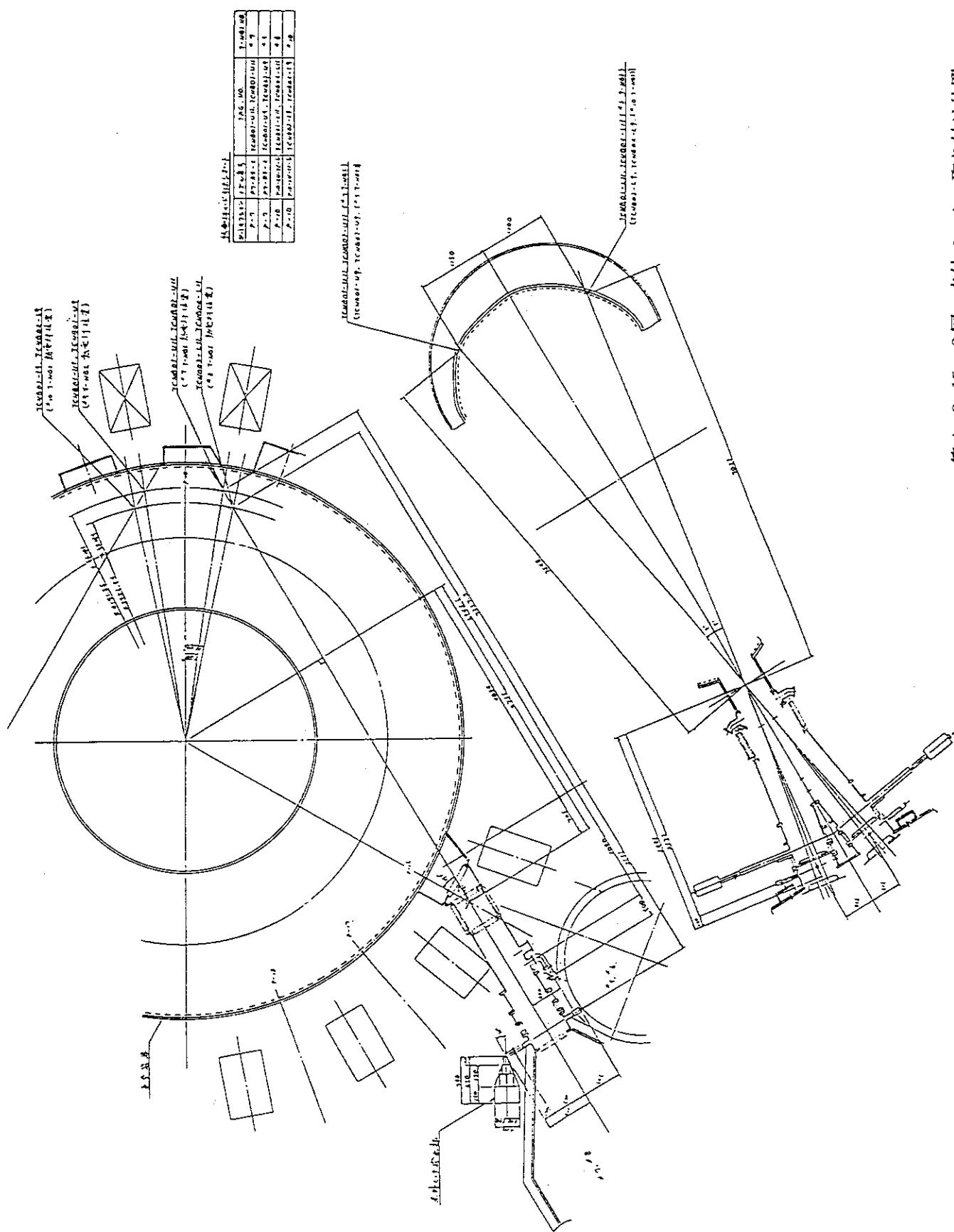
No	項目	点数 タク当たり	アナログ信号 データ収集盤入力	備考
1	第1ビームミク	4	有	新規追加
2	第2ビームミク	4	有	新規追加
3	第3ビームミク	2	有	新規追加
4	突抜モニタ	4	有	点数変更



第4.3.15-1図 分光モニター用窓の取り付け位置。



第4.3.15-2 図 光ビームモニターの取り付け図。



第4.3.15-3図 赤外モニター取り付け位置。

4. 4 イオン源用電源

イオン源用電源は、14ビームラインに対応して14ユニットから成り、電源1ユニットは、1ビームラインあたり2台のイオン源に対し、1式の加速電源および減速電源、各イオン源に対応した2式のアーク電源、フィラメント電源から構成されている。

加速電源は、イオン源のプラズマ生成部内に生成されたイオンにエネルギーを与える、イオン源からイオンビームとして引き出すための電源で、イオン源の第1正電極および第2正電極に正の電位を与える電源である。加速電源の性能は、第1正電極に最大120kV、94A、10sの電力を供給することができ、第2正電極には20~90kV、±2A、10sの電力を供給することができるものである。第2正電極へは第1正電極への出力を高出力真空管と水冷抵抗器により分圧しその中間電圧を供給する。

減速電源は、イオン源の下流側にできるビームプラズマ中の電子が加速電圧によりイオン源方向に加速されるの防ぐために設けられた減速電極への負電位供給電源である。最大 -2kVまで印加することができる。加速電源、減速電源は、2台のイオン源に共通の電源である。

アーク電源は、イオン源のアーク放電室にアーク放電を起こしソースプラズマを生成するための電源で、2台のイオン源に対し1式づつ設けられており各々個別に制御できる。1式当たりの性能は、電圧DC120V、電流120A、パルス幅11s、デューティ1/30である。

フィラメント電源は、アーク放電の陰極となるタンゲステンフィラメントを加熱し熱電子を放出させるための電源であり、アーク電源と同様に各イオン源毎に1式づつ設けられている。なお、フィラメント電源は、イオン源のフィラメントがイオン源1台あたり8本設けられていることから、その出力も8系統に分岐されている。1系統当たりの出力は、電圧AC5~15V、電流最大300A、パルス幅16s、デューティ1/30である。

アーク電源およびフィラメント電源は、加速電源の第1正電極電位に電気的に浮いた状態で使用される。

加速電源およびアーク、フィラメント電源の出力ケーブルは、SF6ガスにて絶縁された金属製の同軸状2重配管（以下、SF6ガスダクトと言う）の内管内に納められて敷設される。

このほかに、1ビームラインあたり一式の偏向磁石電源、打消コイル電源が設置されている。偏向磁石電源は、中性化セルにて中性化されなかったイオンビームを偏向してビームダンプに導くための磁場を発生させる偏向磁石を励磁するための電源である。偏向磁石電源の定格は、DC65V、1500Aである。

打消コイル電源は、中性化セルにて中性化されなかったイオンビームが中性化セルからビームダンプに至るまでの間にJT-60U本体からの漏洩磁場により偏向されないようにするために、この漏洩磁場を打ち消す磁場を発生する打消コイルを励磁するための電源である。打消コイル電源の定格は、DC165V、1200A、13sである。

イオン源用電源1ユニットあたりの定格を第4.4-1表に示し、第4.4-1図にイオン源用電源の単線結線図を示す。

NBI接線化に伴うイオン源用電源の主な改造点は、上記のうちの実験棟本体室内におけるSF6ガスダクトのルート変更と現場盤の配置変更および打消コイル電源制御系の改造である。

4.3.1 SF 6 ガスダクト

加速電源およびアーク、フィラメント電源の出力ケーブルなど高電位にある伝送系は以下の理由により SF 6 ガスダクトとした。

- (1)高電圧回路における対地浮遊容量を極力少なくし、イオン源電極間にて発生する放電破壊時に高電圧回路からの電極への流入サージ電流を極力少なくする。
- (2)SF 6 ガスダクトの外管を加速電源の戻りライン（加速電源の接地ラインでもある）とすることによって電路の低インダクタンス化を図り、イオン源での放電破壊時に生じる接地ラインの電位変動を抑制する。
- (3)負荷変動の大きい回路を同軸往復線路とすることによって他の機器への電磁的影響を軽減する。

SF 6 ガスダクトの外径は406.4mm（厚さ7.9mmのSS製配管）、内管外径は260mm（厚さ6.3mmのAl製配管）であり、ダクト内には約1.5kg/cm²のSF 6 ガスを封入している。内管と外管とは、数カ所で、絶縁スペーサによる内管の機械的保持を施し、外管は各ユニット毎の接地点（1点）にて電位固定している。

SF 6 ガスダクトは、既設NBI装置の場合は、JT-60実験棟地下に設置されている第2高電位テーブルと、同実験棟1階本体室に設置されている第1高電位テーブルとの間に敷設され、1ユニットあたりの全長は、ユニットによって若干異なるが約8.5mである。

NBI接線化に伴うSF 6 ガスダクトの変更は、上記のうちの本体室内部分についてであり、NBI接線化のための配管配線用ヤグラの新設に伴うルート変更である。変更部分は、本体室1階床上から第1高電位テーブルまでとし、既設ダクトを撤去した後に新たに設定したルートに従って新設のダクトを設置したものである。

接線入射NBI装置#8ユニット用SF 6 ガスダクト外形図を第4.4.1-1図に、SF 6 ガスダクトの内部構造図を第4.4.1-2図に示す。

SF 6 ガスダクトの外管は、配管配線用ヤグラに固定される。この場合、外管は、既に述べたように各ユニット毎に1点接地されること、イオン源用電源の負荷であるイオン源にて放電破壊が生じたとき外管に0.5~2.0kV程度のサージ電圧が加わることなどから、接地点以外は電気的絶縁が必要である。そのため、配管配線用ヤグラからは、3.3kV用屋内支持碍子にて支持し、他の構造物からは60mm以上の離隔距離を確保することにより絶縁することとした。

4.4.2 打消コイル電源制御系の改造

ビームラインの中性化セル出口からビームダンプまでの間の空間において、JT-60Uからの漏洩磁場によるイオンビーム軌道への影響を極力少なくするために、漏洩磁場打消コイルが必要となる。

打消コイルは、従来のNBI装置にも設置されているが、以下の理由から従来のコイルは再利用できず、新たに設計製作した。

- (1)接線入射NBI装置への改造によってビームライン入射角が変更になったこと。
- (2)ビームラインに沿って設置されている中性化セルや偏向磁石、ビームダンプの配置も変更になったこと。

接線入射NBI装置用打消コイルの設計は、3.2項に示すように3次元磁場計算コードにより

基本設計を行い、それに並行して1/10縮小モデルによる実測値と計算値との比較検討を行いながら進めた。

その結果、1ユニットあたり2つのコイルを組み合わせて漏洩磁場を打ち消す方式とした。本方式により打ち消しを必要とする領域の漏洩磁場は、1mT以下にすることができた。

接線入射NBI装置用打消コイルの仕様は、以下のとおりである。

①接線入射NBI装置1ユニットあたり2つのコイルから構成する。これらを、接線入射NBI装置上下ユニットにおいて、JT-60U赤道面に対して面對称となるように設置する。

②2つのコイルのうちの1つは、接線入射NBI装置真空容器の外側に真空容器を囲むように設置し、漏洩磁場に対し主たる打消磁場を発生させる（以下、Mコイルと言う）。他方は、Mコイルの補助的なコイルとして使用するもので、Mコイルのみでは満足できない領域を補足するものである（以下、Sコイルと言う）。Sコイルは、接線入射NBI装置真空容器内に設置した。

③MコイルとSコイルは、直列に接続する。なお、接線入射NBI装置上下ユニットの打消コイルは、それぞれの打消磁場による相互干渉があるために同時に同時通電とし、一方のみの通電は行わない。打消コイル用電源は、従来の電源を各ユニット毎に用いる。

④打消コイルの仕様は、以下のとおりである。

Mコイル	アンペアターン；74ターン×1000A 導体；2重ガラス巻平角線(4.5×15mm)3本並列 抵抗値；~135mΩ 冷却方式；自然空冷
Sコイル	アンペアターン；3ターン×1000A 導体；中空導体(12.5×10/9.5×7mm) 抵抗値；~5mΩ 冷却方式；水冷

第4.4.2-1図に打消コイルの配置を示す。両コイルを直列接続したときの抵抗は約140mΩ、自己インダクタンスは約60mHである。

なお、本打消コイルの発生磁場による不整磁場のJT-60Uプラズマ閉じ込めへの悪影響およびMコイル近傍に設置されるターボ分子ポンプ(TMP)への磁気的悪影響が懸念されたが、いずれも許容値以内であることを確認した。

接線入射NBI装置の打消コイルは前述したように、独立した2台の電源を流用し上下ユニットを同時に通電することが必要条件であることから、

- ①打消コイル電源の準備完了は、上下ユニットのANDで「完了」信号を発信する。
- ②打消コイル電源への外部からの通電開始信号は、上下ユニットについて1つの信号とし、それを受信後に上下ユニットに振り分ける。
- ④打消コイル電源から外部への故障警報信号は、上下ユニットからの発信信号のOR信号とし、本信号により上下ユニットを同時に保護する。

などの改造を施した。

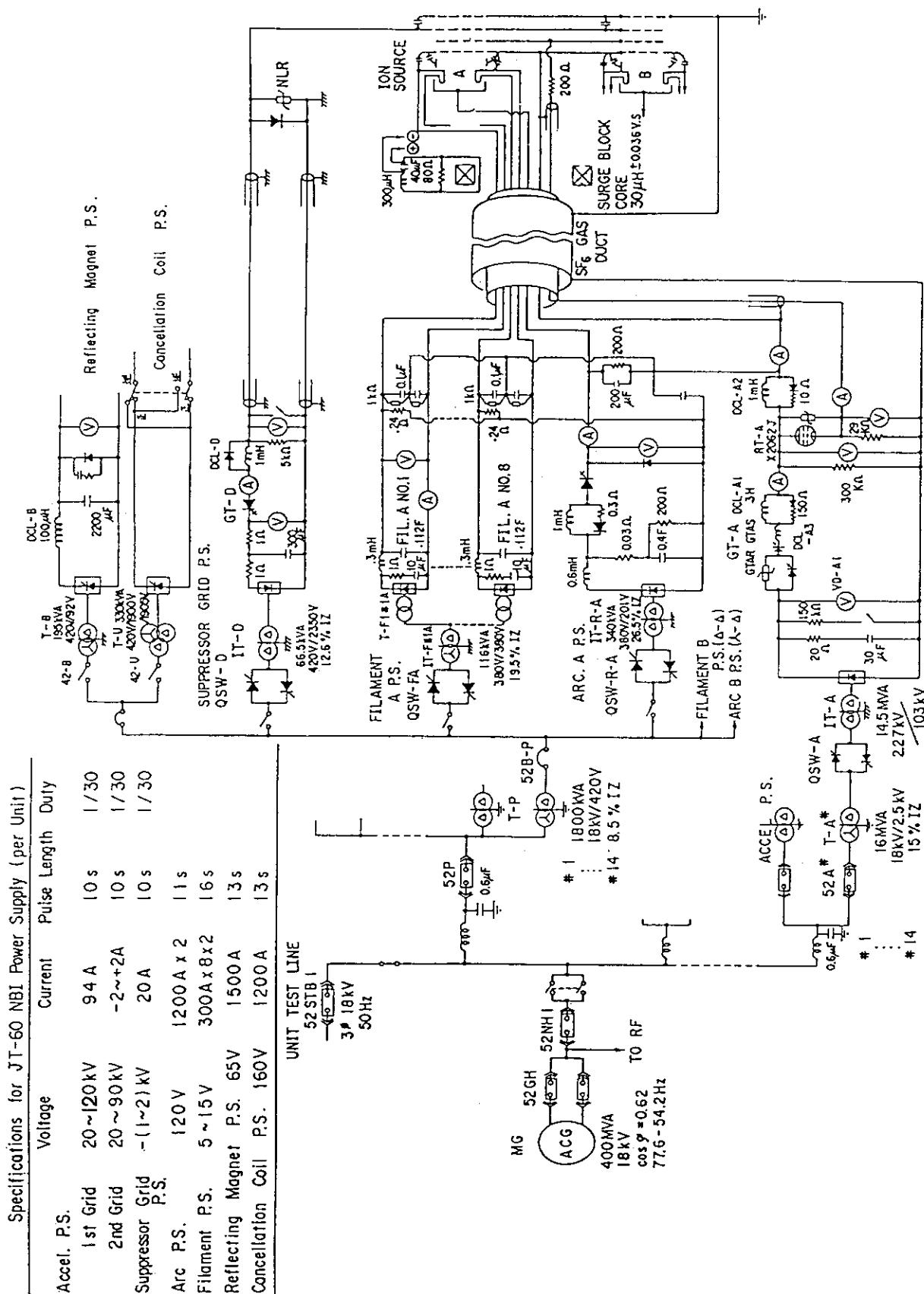
第4.4-1表 1ユニットあたりのイオン源用電源の定格

	電圧	電流	パルス幅	繰返し率 *	リップル
加速電源					
第1正電極	20~120 kV	94 A(80 A)	10 s	1/30	2 % p-p
第2正電極	20~ 90 kV **	-2~+2 A	10 s	1/30	2 % p-p
減速電源	-(1~2) kV	20 A	10 s	1/30	3 % p-p
アーク電源	120 V	1200 A ×2	11 s	—	3 % p-p
フィラメント電源	5~10 V	300 A(~200 A) ×8×2	16 s	1/30	5 % p-p
偏向磁石電源	65 V	1500 A	13 s	—	2 % p-p
打消コイル電源	160V	1200 A	13 s	—	2 % p-p

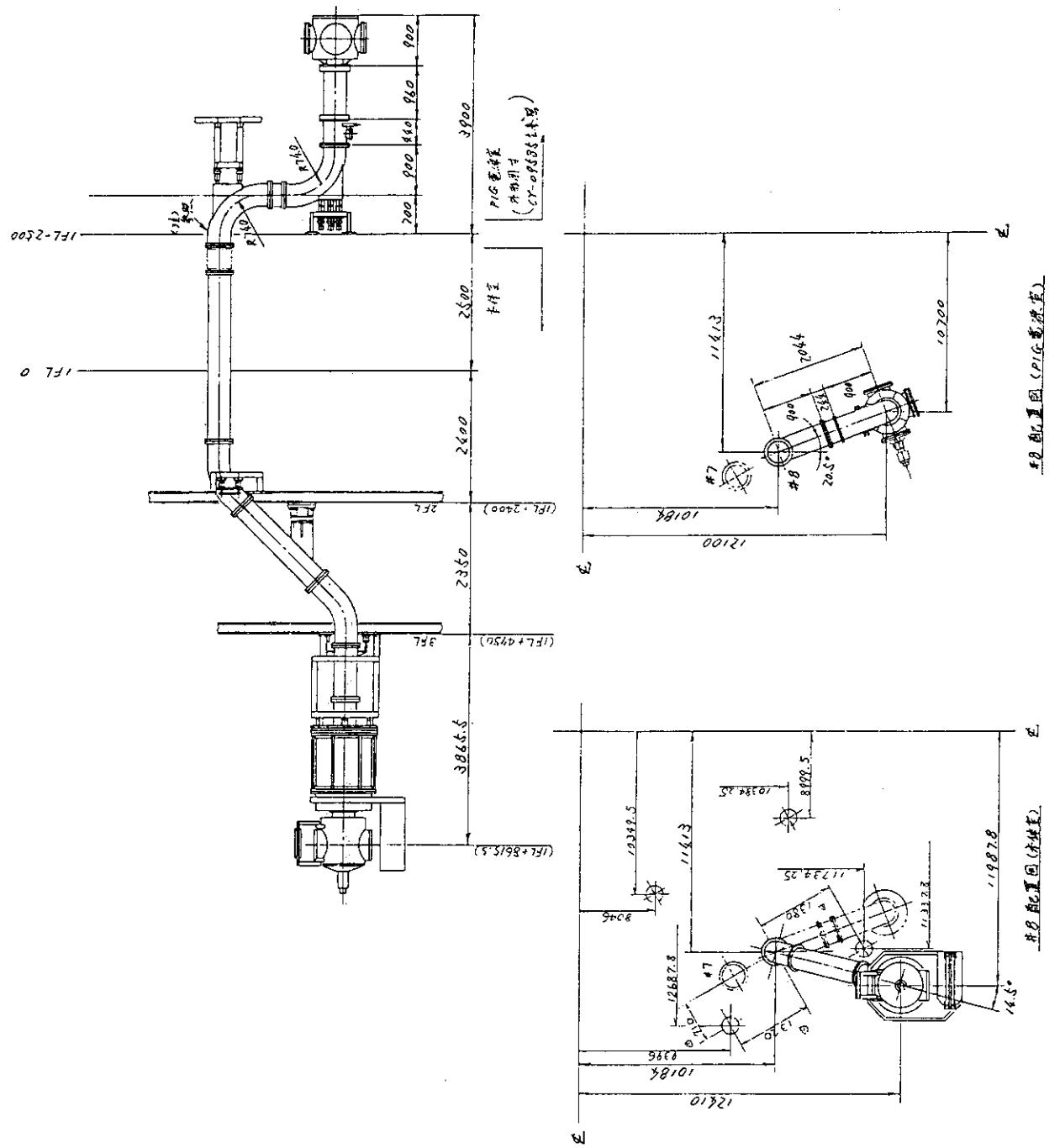
ただし、()内の数値は、負荷であるイオン源によって決まる上限値である。

* : 最短繰り返し周期は、30秒である。

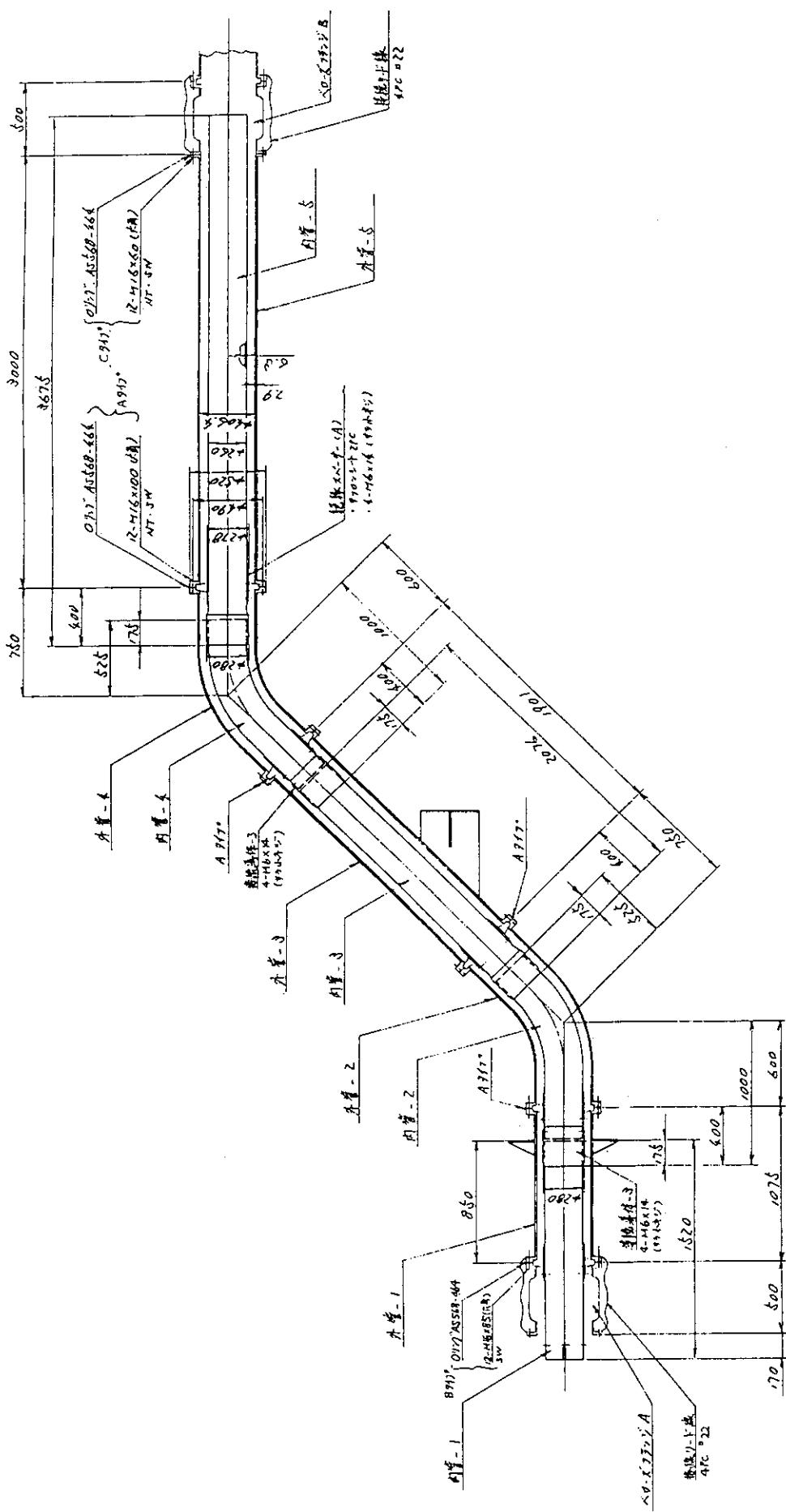
** : (第1正電極電圧) - (10~30kV) の範囲に限られる。

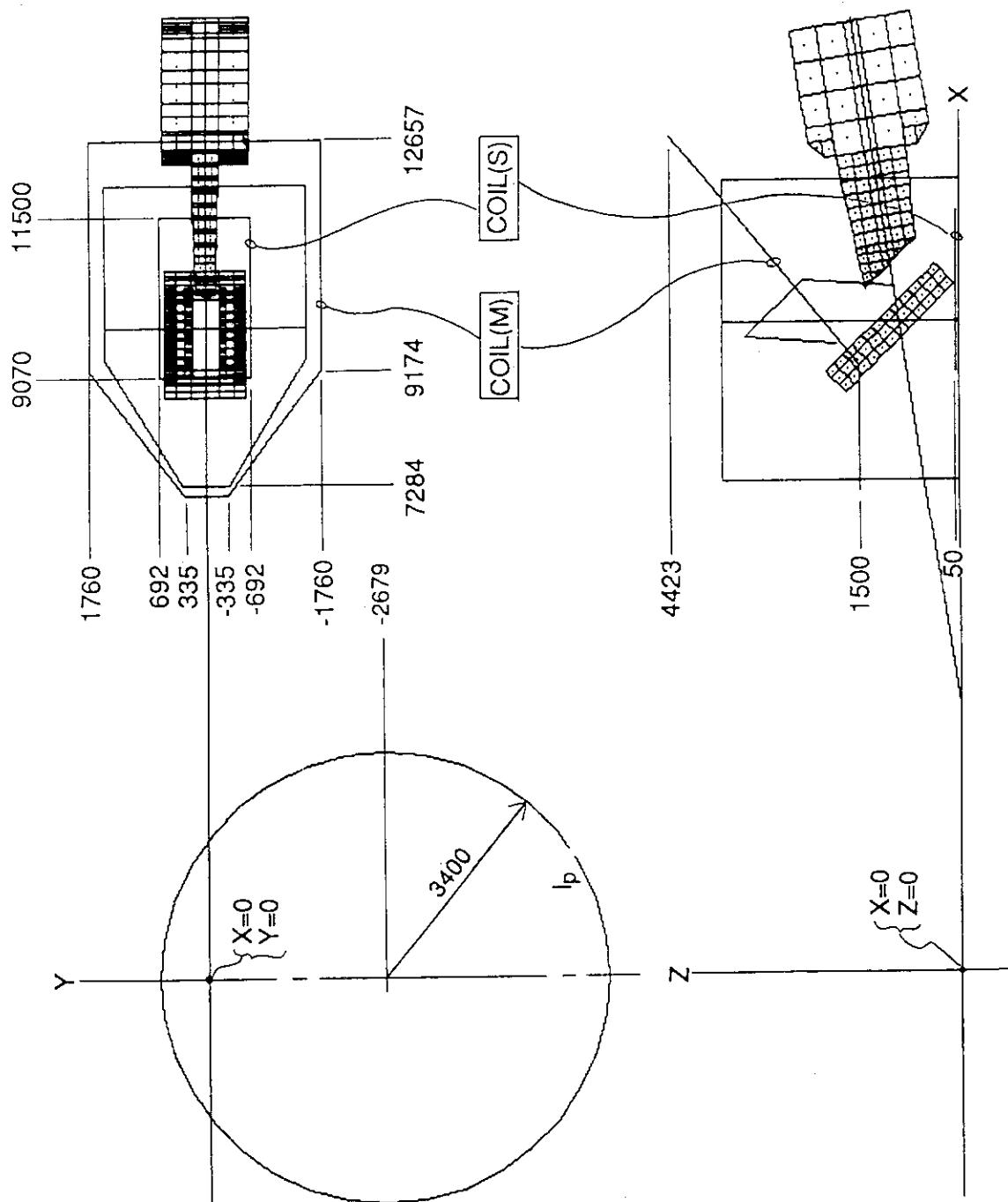


第4.4-1図 イオン用電源の単線結線図



第4.4.1-1図 #8ユニットのSF6ガスダクト外形図

第4.1-2図 SF₆ガスダクト構造図



第4.4.2-1図 #8ユニット打ち消しコイル配置図

4. 5 冷媒循環系

冷媒循環系は、主排気タンク内のクライオポンプに液体ヘリウムと液体窒素を供給するための設備であり、液体ヘリウムループと液体窒素ループとから構成されている。

液体ヘリウムループは、クライオポンプのうちのクライオパネルを液体ヘリウムにより3.7K以下に冷却するための設備で、ヘリウム圧縮機、ヘリウム液化機、液体ヘリウムデュワー、液体ヘリウムransファーライン、加温器およびヘリウム減圧ポンプ等から構成されており、閉ループを形成している。

液体窒素ループは、クライオポンプのシェブロンおよび熱シールド板の冷却のためおよびヘリウム液化機の熱交換器冷却のために液体窒素を供給するループであり、液体窒素貯槽からの圧送方式により液体窒素を各機器に供給する設備である。液体窒素は、各機器を冷却した後加温器により常温近くに暖められガス化し大気中に放出される。液体窒素ループは終端大気開放のオープンループである。冷媒循環系設備の全体鳥瞰図を第4.5-1図に示す。

これらのうち接線化改造での作業範囲は、#7、8および9、10ユニットの主排気タンクがそれぞれ一つのタンクに集約され、かつ、配管配線用ヤグラが大幅に改造されたことによる配管（液体ヘリウムransファーライン、液体窒素ransファーラインなど）の改造および制御系の変更などである。

4.5.1 配管

(1)ransファーライン

ransファーラインは、冷媒循環系構成設備のうち、ヘリウム液化機（コールドボックスとも言う）からクライオポンプまでの液体ヘリウム供給配管、液体窒素タンクからヘリウム液化機の熱交換器およびクライオポンプのシェブロンバッフルなどへの液体窒素供給配管から成り、前者を液体ヘリウムransファーライン、後者を液体窒素ransファーラインと区別している。ただし、ヘリウムデュワーからビームライン各ユニットへの入口分岐点までは、液体ヘリウムと液体窒素配管およびヘリウムガス戻り配管をひとまとめにした三重管構造（以下、TRTと言う）となっており、液体窒素配管は、ヘリウム配管の熱シールドをも兼ねた構造となっている。

冷媒循環系の概略フローシートを第4.5.1-1図に示し、液体ヘリウムransファーラインを第4.5.1-2図に示す。

接線化におけるransファーラインでの改造は、実験棟本体室床上付近からの立ち上がりransファーラインと#7、8ユニットおよび#9、10ユニットへの分岐配管部分である。

立ち上がりransファーラインは、既設配管を一旦、本体室床上付近で切断し、新たに設けられる配管配線用ヤグラおよび接線化ユニットとの配管取り合い点までの再立ち上げを行うものである。

分岐部分は、TRTから液体ヘリウム、液体窒素およびガスヘリウム配管をそれぞれ分岐する部分であり、TRTと主排気タンクとを接続する重要な部分である。分岐方法は、既設のものと同様である。分岐点は、主排気タンクとTRTとの接続管を既設のものを再利用すること

にしたことから、主排気タンクの配置によって決められ、配管用ヤグラの2階床上とした。接続管は、供給管と戻り管を個別なものとし、配管用ヤグラ側配管とビームライン各ユニットとをバイオネット継ぎ手でつなぎ、その部分を取り外し可能な構造としたものである。

再立ち上げTRTおよび接続管の仕様は、以下のとおりである。

(a)立ち上げTRT

外管	250A
内管	15A (LHe)
内管	40A (GHe)
内管	25A (LN2)
シールド管	125A

(b)ヤグラ内配管及びクライオ接続管

L He	15A/100A
G He	25A/100A
LN2	25A/100A
GN2	40A/125A

(2)常温配管および加温器

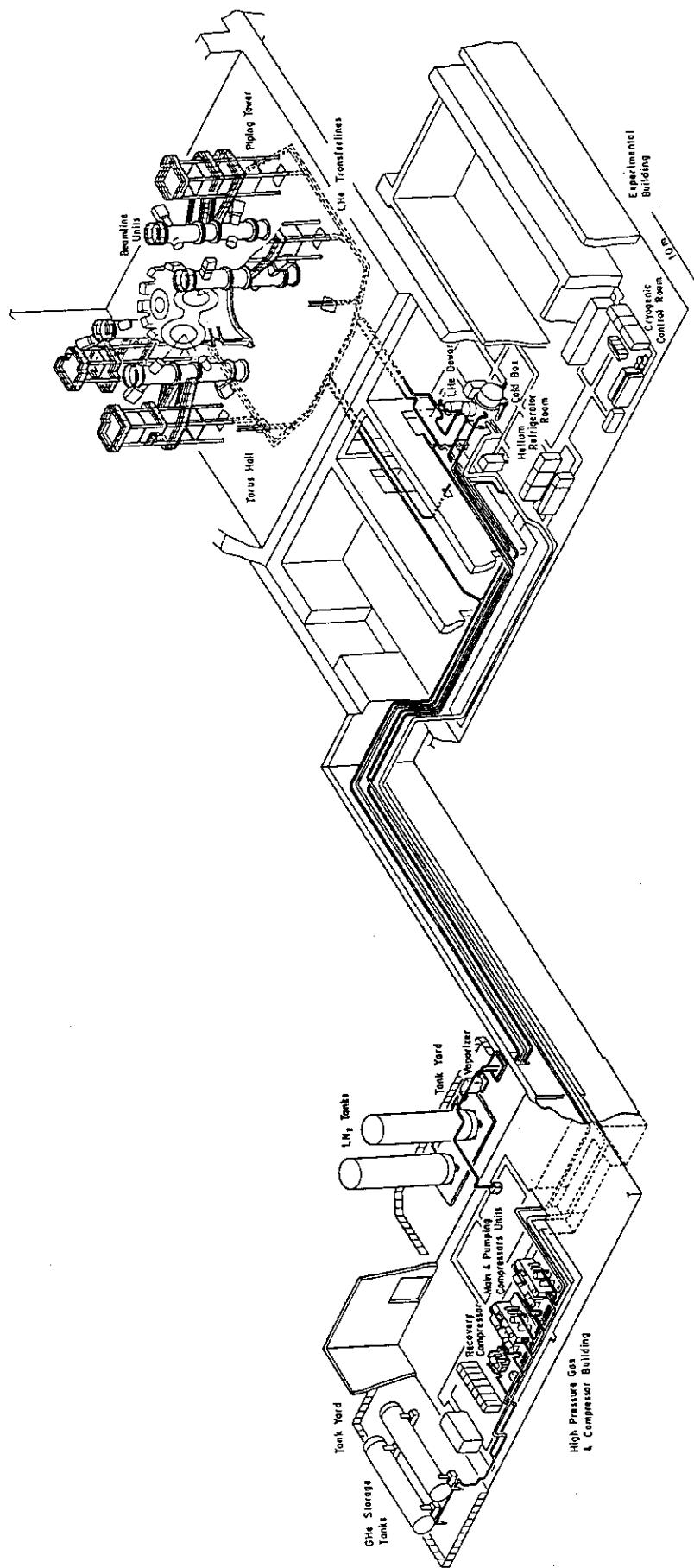
クライオパネルの予冷時における低温ヘリウムガスやシェブロンバッフルおよびシールド板を冷却した後の低温窒素ガスは、それぞれの系統内に設けられた加温器によりほぼ常温にまで加温され、ヘリウムガスの場合はヘリウム冷凍機に戻され、窒素ガスの場合は大気に放出される。

これらの常温配管のルート変更および加温器の取付位置変更も行った。このうち、ヘリウム加温器および窒素加温器は、#8/#10ユニットで使用していたものをそのまま再利用した。ヘリウム加温器出口配管は40A、窒素加温器出口配管は65Aである。

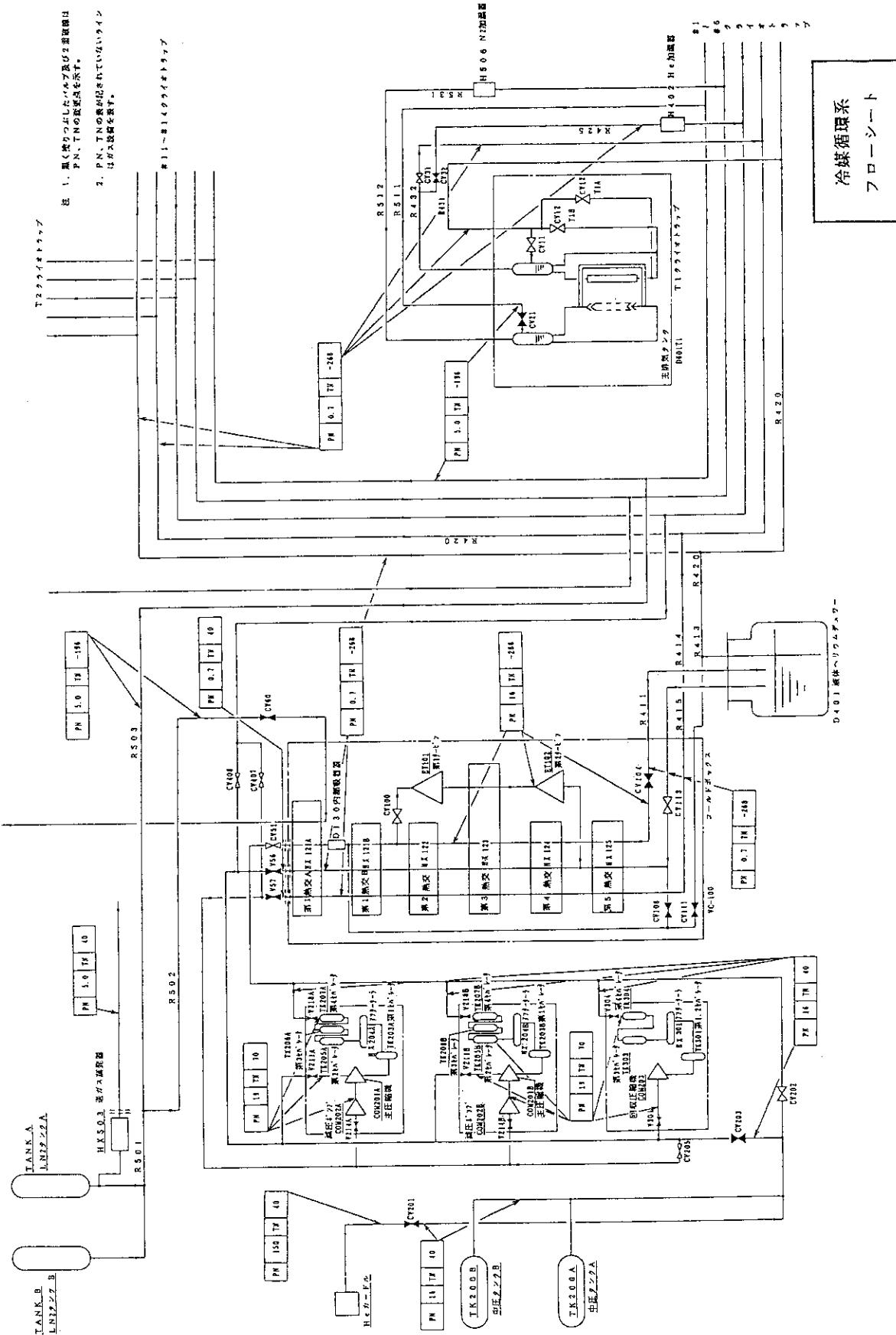
4.5.2 制御設備

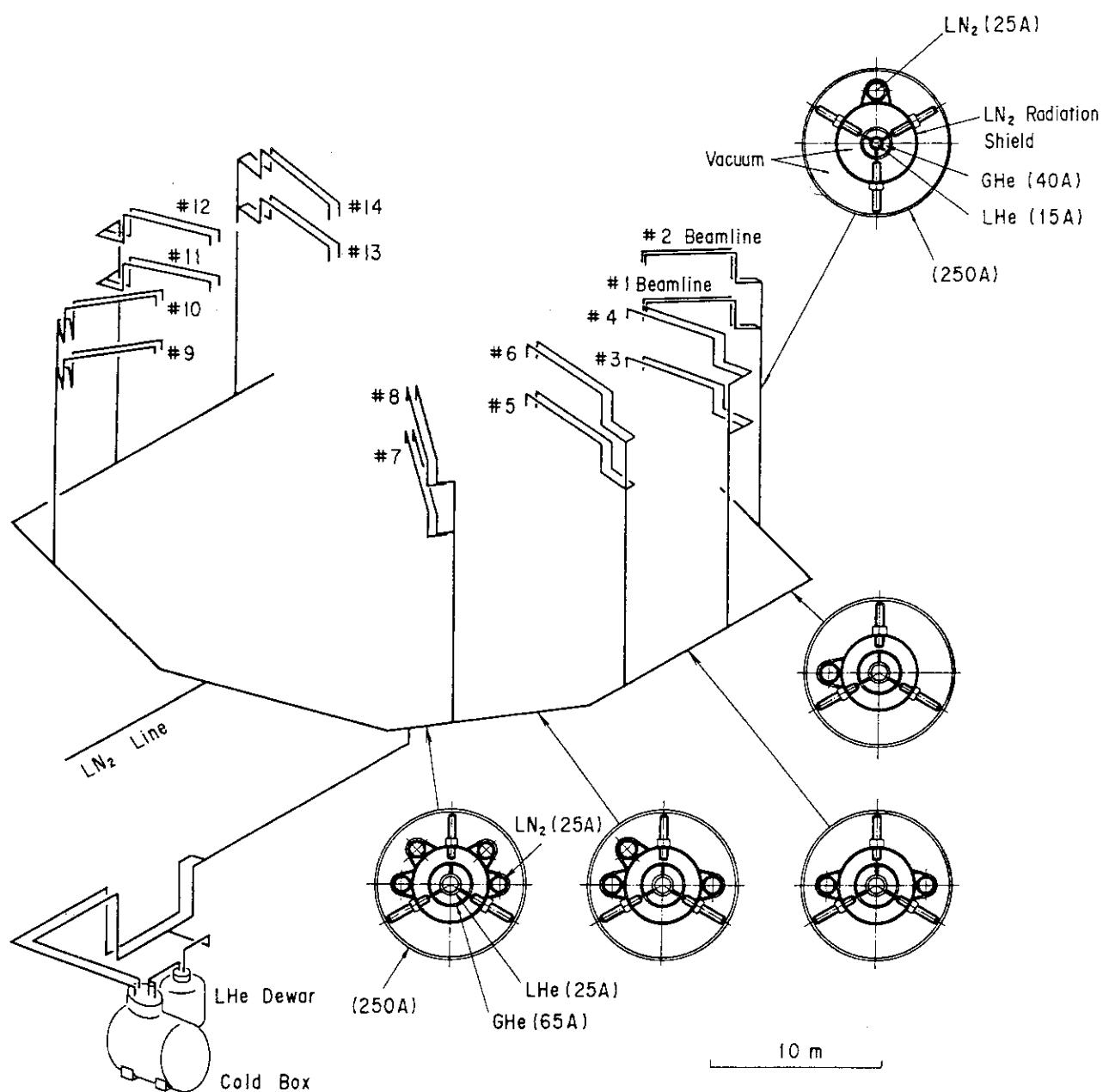
制御用計算機のソフトは、基本的には14ユニットのビームラインがそれぞれ任意の運転モードを選択することが出来ることを基本思想として構築されている。一方、接線化では、#7~10ユニットの4ユニットのうち#7と8、#9と10の2ユニットがそれぞれ一つのタンク内に収容され、クライオポンプは、タンク1基につき従来の1ユニット分相当のものが設置されている。そのため、制御系での基本構成は変更せず制御用計算機から見た制御対象は、従来のまま14基とし#7、#9の2ユニットは常時停止の扱いとした。

よって、接線入射化ビームラインについては、#8と#10に対応させることとし、それぞれの信号線を復旧接続することで、制御ソフトの改造も行なわなかった。



第4.5-1図 冷媒循環系設備全体鳥瞰図





第4.5.1-2図 液体ヘリウムransfer Line

4. 6 1次冷却系設備

1次冷却系設備は、NBI装置14ユニットに共通の設備である。本設備は、イオン源電極や中性化セル、ビームダンプ、カロリーメータ、偏向磁石ウォータジャケットおよびビームリミタなどビームライン機器類を冷却するためのビームライン循環系と、イオン源用電源のうちの高出力真空管（レギュレータチューブ、以下RVと略す）や水冷抵抗器を冷却するためのRV循環系から構成される。

1次冷却系設備のビームライン循環系系統図を第4.6-1図に、RV循環系系統図を第4.6-2図に示す。

1次冷却系設備における接線入射化に伴う改造は、上記のうちのビームライン循環系におけるポンプの増設と実験棟本体室内における冷却水ヘッダーの配置、配管配線変更および凍結防止運転時の熱交換器バイパス弁開度改造である。

4.6.1 ポンプの増設と系統変更

ビームライン循環系のポンプの増設は、NBI装置での重水素ビーム化並びに高エネルギー化による入射パワーの増大と、JT-60大電流化に伴う漏洩磁場の増大および重水素ビームでの偏向磁場増大に伴う磁場のゆがみによる熱負荷増大に対応するもので、従来は2台であったものに、同じ仕様のポンプを1台追加し合計3台としたものである。

上記の理由で増大する熱負荷は、受熱機器によっても若干異なるが、全般的には以下のとおりである。

- (1)重水素ビーム化並びに高エネルギー化による入射パワーの増大：約200%
- (2)JT-60大電流化に伴う漏洩磁場の増大および重水素ビームでの偏向磁場増大に伴う磁場のゆがみによる熱負荷増大：約20%

そのため、全体流量を約1.5倍にし、各受熱機器においては、系統構成を変更して1.5~2.0倍にしている。

変更箇所は、NBI装置全般については、第1、第2ビームリミタおよびベローズ系統の並列化、カロリーメータ系統とビームダンプ系統の並列化を行った。このうちカロリーメータ系統とビームダンプ系統の並列化は、カロリーメータでの熱負荷分布測定や中性ビームのパワー測定などにも有効で、今までの直列接続に比べより精度よく測定できるようになった。

接線入射NBI装置のうち、#7、9ユニットにては、第1打消コイル系統の削除と支持柱系統の追加、第2打消コイル系統の削除と打消Sコイル系統の追加および第2ビームリミタ系統へのGVリミタ系統追加、NBIポート系統の削除などを行った。

#8、10ユニットについては、第1、第2打消コイル系統の削除と第2ビームリミタ系統へのGVリミタ系統の追加を実施した。

ビームライン循環系に増設したポンプの仕様は、以下のとおりである。

型式：両吸込型渦巻ポンプ

揚程×流量：135mm×1225m³/h

基数：1基

材質：SCS13

電動機：620kW、4P、50Hz、6000V

これらの結果、ビームライン循環系の諸元は、以下のとおりとなった。

冷却水被冷却機器入口温度：42°C以下

冷却水全流量：51.24m³/min

熱交換器 2 次冷却水入口温度：31°C以下

電気伝導度：2MΩ・cm以上

フラッシング運転時の熱負荷：1.36MW×0.5sec×10shot/cycle・unit

事件入射運転時の熱負荷：8.36MW×10sec×1shot/cycle・unit

ポンプ台数：3台（3台とも同一仕様である）

ポンプ運転方式：ポンプはNBIの運転ユニット数によって異なる

11ユニット以上運転する場合は、ポンプ3台運転となり、10ユニット以下の場合は、2台（A号機とC号機）運転となる。

ビームライン循環系における負荷側ヘッダーの変更後の系統図を第4.6.1-1図～第4.6.1-3図に示す。第4.6.1-1図は#7ユニット、第4.6.1-2図は#8、10ユニット、第4.6.1-3図は#9ユニットのそれを示す。

4.6.2 凍結防止運転時の熱交換器バイパス弁開度改造

ビームライン循環系内には、ビームライン循環ポンプA～Cの他に凍結防止ポンプが設置されている。凍結防止ポンプは、冬期およびクライオポンプ運転中におけるクライオポンプからの輻射冷却による受熱機器の凍結を防止（クライオ凍結防止運転）するためのものである。

クライオポンプは、一旦起動すると通常1週間は昼夜連続運転となる。この間クライオポンプの受熱機器に対向するパネル表面の温度は液体窒素温度になっている。したがって、クライオポンプ運転中に受熱機器への冷却水を停止してしまうと、受熱機器および冷却水パイプなどが凍結してしまう恐れがあり、ビームラインタンク内への水漏れの原因となってしまう。クライオ凍結防止運転は、クライオポンプが定常運転にあってビームライン各ユニットがコンディショニングやビーム入射運転されていないとき、すなわち、受熱機器への入熱がなくビームライン循環系の定常運転を必要としないときに運転され、受熱機器の凍結を防止するための運転である。クライオ凍結防止運転時の流量は、定常流量の約1/5である。

冬期の場合は、外気温度が0°Cになった場合に自動的に運転される。

凍結防止ポンプ運転時の冷却水の流路は、定常運転時の流路と全く同じである。従来のNBI装置では、系統毎の配管長や被冷却機器の高低差などの違いで、若干の差異はあるものの、ほぼ平均的に各ユニット／各系統に流量を分配してきた。

一方、今回の接線入射化は、先にも述べたとおり、従来2ユニットが2段積みにて設置されていたものを、1つのタンク内に納め、かつ、JT-60Uの赤道面中心付近に配置することになったことから、既設準垂直NBI装置とのユニット間の高低差が大きくなり、凍結防止運転時の流量配分、特に、準垂直NBI装置の上ユニットへの配分が困難になってきた。（定常運転時には、十分な圧力、流量が確保できることから特に問題とはならない）

今回は、それに対応すべく改造を行った。改造は、バルブの新設や配管の変更は極力避け、既存のものを最大限に活用することとして進めた。具体的には、既設の手動や電動の流量調整弁の開度を何段階か設定し、その都度実際に流量を流して確認しながら最適値を求め

た。結果的には、凍結防止ポンプ吐出側の圧力調整弁V-F9と熱交換器バイパス弁V-C10および熱交換器入口弁V-C12の3台のバルブを適当に調整することにより、系内圧力を上昇させることができ、準垂直NBI装置の特に上ユニットへの流量確保が可能になった。

第4.6.2-1図に凍結防止ポンプ運転時の系統図を示し、□内に凍結防止運転時の諸量を示す。また第4.6.2-1表～第4.6.2-4表には、バルブ開度調整試験運転時の代表的な流量実測値を示す。最終的には、第4.6.2-1図のとおりとなり、V-C10の開度16%およびV-C12の全閉は凍結防止運転モードを選択すると自動的に設定されるようにした。

凍結防止ポンプの諸元は以下のとおり。

ポンプ台数：1台

流量：700m³/h

全揚程：50m

回転数：1470rpm

電動機：150kW

なお、クライオ凍結防止運転に、3台あるビームライン循環系ポンプのうちの1台を流用する考え方もある。しかし、この場合は、

(1)ポンプ3台運転時に比べ流量が大幅に減少することから、系統内の圧損も減少しポンプの吐出圧力も減少する。その結果、ポンプのモーターが過負荷となってしまう。

(2)圧損については、たとえば既存のモーターバルブに中間開度を設け、凍結防止運転時に自動的にその開度を選択できるようすれば(1)の問題は、解決できる。

(3)しかし、その開度もバルブでのキャビテーションと流量計の耐圧の問題から都合良く選定できない。すなわち、ポンプの定格圧力は、13.5kg/cm²Gであり、キャビテーションの影響をなくそうとするとバルブでの圧損は約5.0kg/cm²Gとなり、従って、14ユニットの各ヘッダーには約8.5kg/cm²Gの圧力がかかることになる。一方、各ヘッダーに設置されている流量計は、5.0kg/cm²Gの耐圧しかない。

などから、従来の凍結防止ポンプを使うこととした。

第4.6.2-1表 #7凍結防止ポンプ運転時の流量 (実測値)

運転モード (定常 クライオ)		#7 #9		弁開度より閉側から (単位%)		流量単位はt/min		測定値	
ヘッダ区分	負荷名称	計器No.	流量設定値	警報設定値	入口	定/ク	定/ク	定/ク	定/ク
イオン源ヘッダ	EBD (アーチチャンバー上蓋) PG (第一正電極)	FIS-16	95	75	100	2/24 15:00	2/24 18:00	2/27 16:00	/ /
	GG (第二正電極)	FIS-9	56	45	100				
	SG (負電極)	FIS-10	50	40	100				
	EG (接地電極)	FIS-11	50.5	40.5	100				
	AC導入端子 (アーチチャンバー側壁フライメント)	FIS-12	51	41	100				
ビームラインヘッダ	EG支持柱 (接地電極支持柱)	FIS-8	15.5	12.5	100	4.5	4.5	4.3	4.3
	支持柱	FIS-6	20	16	100	5.5	5.5	5.5	5.5
	偏向磁石コイル (偏向磁石コイルホロー導体)	FIS-7	26.5	21	100	7.2	7.2	7.2	7.2
	打消Sコイル	FIS-15	10.7	9	100	線上	線上	線上	線上
	ビームリミタ系 (第一、第二ビームリミタ、NB1ポート)	FIS-3	56	45	100	—	14	14	14
	カロリメータ	FIS-4	270	215	100	90	80	90	90
	W (偏向磁石ウォータージャケット)	FIS-2	1900	1500	100	650	650	650	650
	中性化セル	FIS-5	530	420	100	150	150	150	150
	ビームダンプ	FIS-1	2700	2200	100	800	750	750	750
(凍結防止運転時)	ビームラインヘッダ出口圧力	—	1.5	—	—	1.35			

第4.6.2-2表 #8凍結防止ポンプ運転時の流量(実測値)

運転モード ヘッダ N.O.	(定常 ヘッダ #8)	弁開度				羽側から 実測値		流量単位 は㎥/min
		負荷区分	計器N.O.	流量 設定値	警報 設定値	定/ク 定/タ 定/ク 定/タ 定/ク 定/タ 定/ク 定/タ		
イオン源ヘッダ	E B D (アークチャンバー上蓋)	F I S - 1 6	95	75	100	28	28	
	中性化セル	F I S - 5	530	420	100	160	160	
	カロリメータ	F I S - 4	270	215	100	80	80	
	E G 支持枠 (接地電極支持枠)	F I S - 8	15.5	12.5	100	4.5	4.5	
	A C 導入端子 (アークチャンバ側壁フライメント)	F I S - 1 3	46.5	37	100			
	E G (接地電極)	F I S - 1 2	51	41	100			
	S G (負電極)	F I S - 1 1	50.5	40.5	100			
	G G (第二正電極)	F I S - 1 0	50	40	100			
	P G (第一正電極)	F I S - 9	56	45	100			
ビームラインヘッダ	W J (偏向磁石ウォータージャケット)	F I S - 2	1900	1500	50	550	550	550
	ビームリミタ系 (第一、第二ビームリミタ、NB I ポート)	F I S - 3			—	15	15	15
	偏向磁石コイル (偏向磁石コイルホロー導体)	F I S - 7	26.5	21	100	7.5	7.5	7.5
	—	F I S - 1	2700	2200	100	* —	—	
(凍結防止運転時)	ビームラインヘッダ出口圧力	—	0.8	—	—	1.5	1.5	

* FIS-1 流量計 O 調不能のため
交換予定。

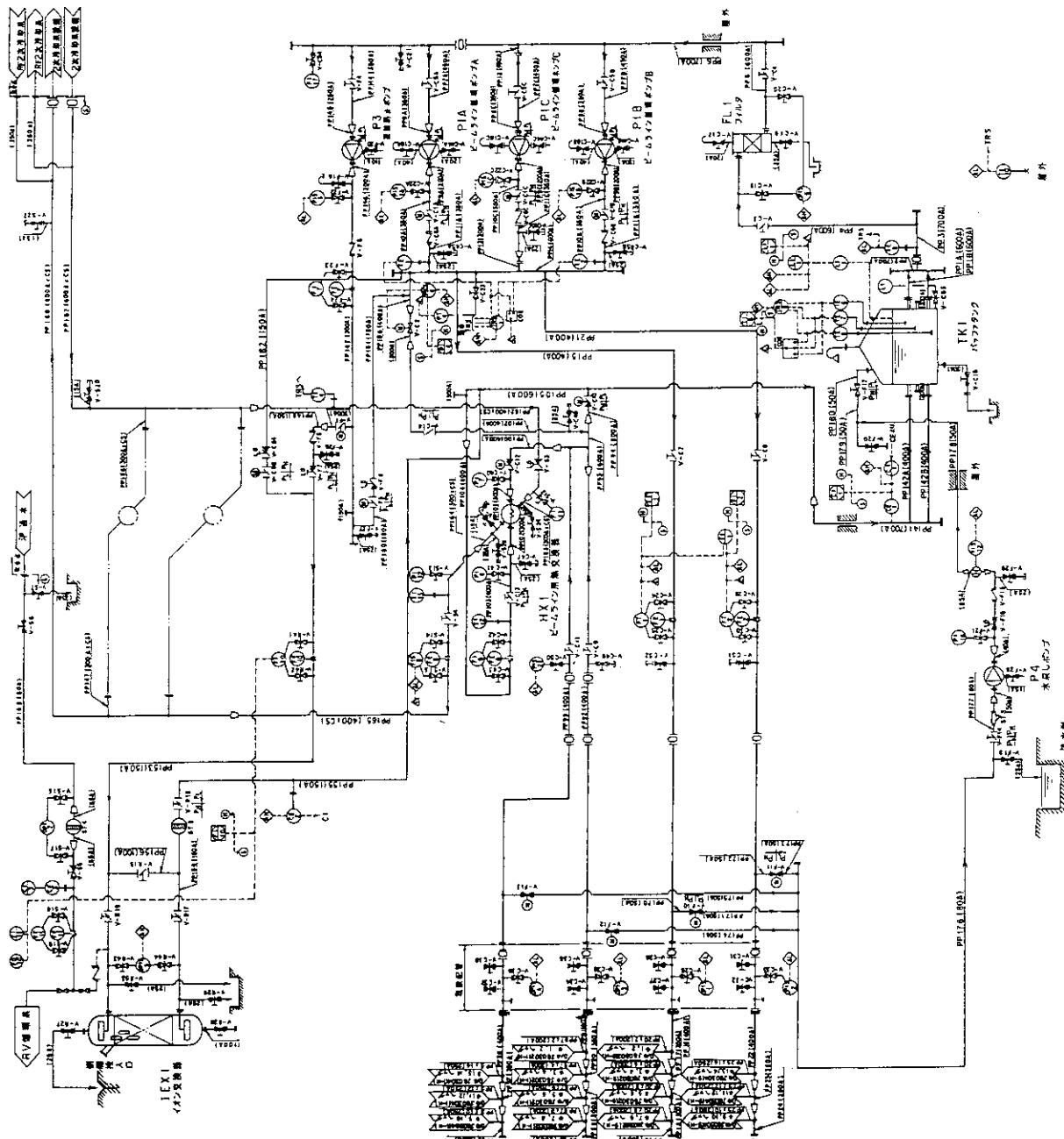
第4.6.2-3表 #9凍結防止ポンプ運転時の流量(実測値)

運転モード ヘッダ N 0.	運転モード (定常 #7、#9)	弁開度		閉側から (単位%)		流量単位は l/min	
		開度	度	定/ク	定/ク	定/ク	定/ク
ヘッダ区分	負荷名称	計器No.	流量設定値	警報	入口 15:00	2/24 16:00	/ /
イオン源ヘッダ	E B D (アーケンバー上蓋)	F I S - 1 6	95	75	100	32	/
	P G (第一正電極)	F I S - 9	56	45	100	33	/
	G G (第二正電極)	F I S - 1 0	50	40	100		
	S C (負電極)	F I S - 1 1	50.5	40.5	100		
	E G (接地電極)	F I S - 1 2	51	41	100		
ビームライシンヘッダ	A C導入端子 (アーケンバー側壁フライメント)	F I S - 1 3	46.5	37	100		
	E G支持棒 (接地電極支持棒)	F I S - 8	15.5	12.5	100	5	4.5
	支持柱	F I S - 6	20	16	100	5	5.5
	偏向磁石コイル (偏向磁石コイルホロー導体)	F I S - 7	26.5	21	100	8	7.5
	打消Sコイル	F I S - 1 5	10.7	9	100	線上	線上
	ビームリミタ系 (第一、第二ビームリミタ、NB1ボート)	F I S - 3	56	45	100	20	18
	カロリメータ	F I S - 4	270	215	100	90	90
	W J (偏向磁石ウォーター・ジャケット)	F I S - 2	1900	1500	50	700	650
	中性化セル	F I S - 5	530	420	30	150	140
	ビームダンプ	F I S - 1	2700	2200	100	800	900
(凍結防止運転時)	ビームラインヘッド出口圧力	-	1.5	-	-	1.5	

第4.6.2-4表 #10凍結防止ポンプ運転時の流量（実測値）

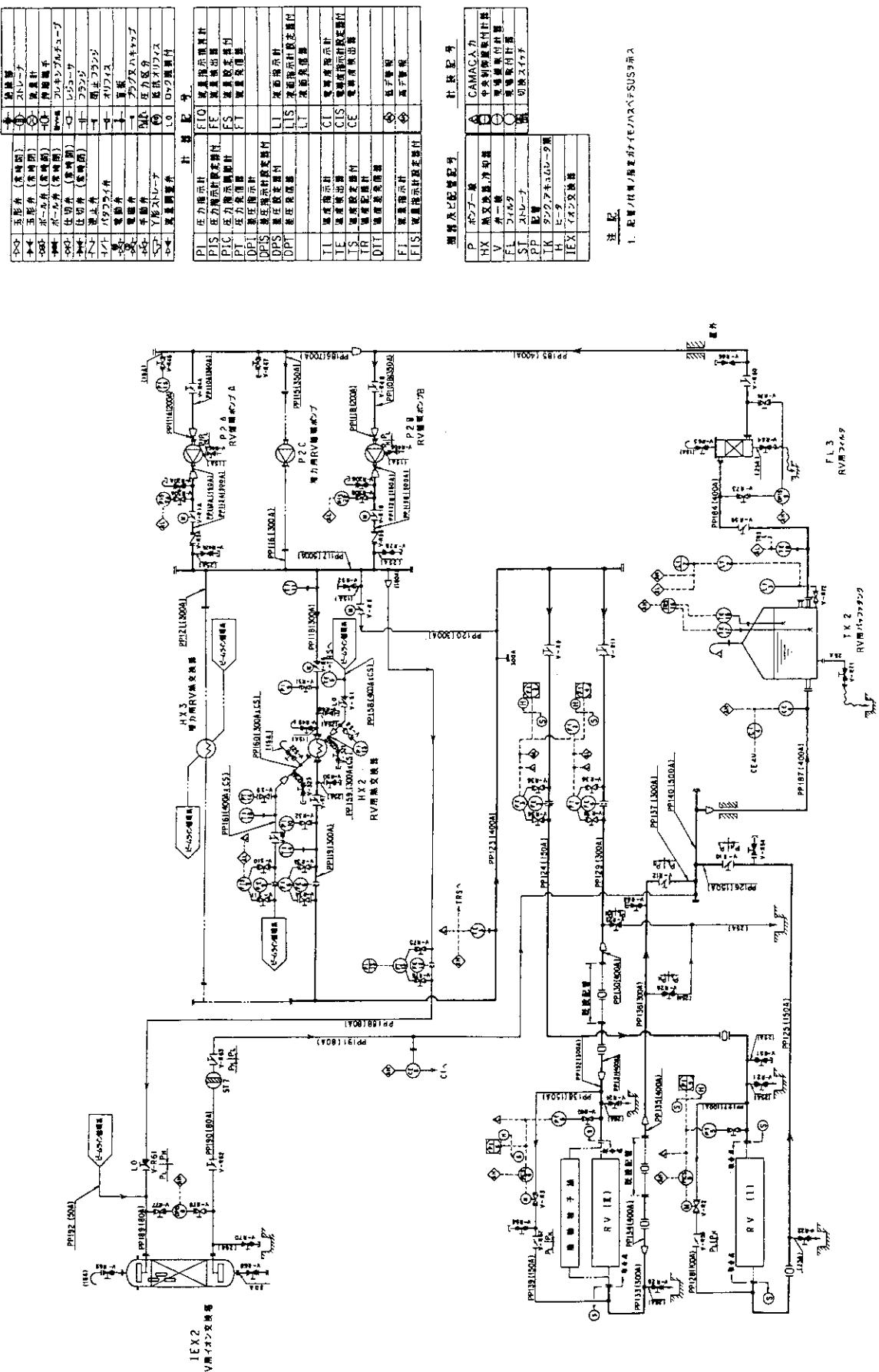
運転モード ヘッダ N o.	(定常(クライオ) #8、#10)	弁開度		刃側から (単位%)		流量単位は/ m^3/h
		開度	弁	定/ク	定/ク	
イオン源ヘッダ	負荷名称	計器 N o.	流量設定値	警報設定値	入口 15:00 出口 18:00 16:00	/ /
	EBD (アークチャンバー上蓋)	F1S-16	95	75	100 100	2/24 2/27
	中性化セル	F1S-5	530	420	100 40	/ /
	カロリメータ	F1S-4	270	215	100 20	31 31
	EG支持棒 (接地電極支持棒)	F1S-8	15.5	12.5	100 100	180 180
	AC導入端子 (アークチャンバ側壁フイラメント)	F1S-13	46.5	37	100 30	
	EG (接地電極)	F1S-12	51	41	100 100	
	SG (負電極)	F1S-11	50.5	40.5	100 100	
	GG (第二正電極)	F1S-10	50	40	100 100	
	PG (第一正電極)	F1S-9	56	45	100 100	
ビームラインヘッダ	WJ (偏向磁石ウォータージャケット)	F1S-2	1900	1500	50 60	640 640
	ピームリミタ系 (第一、第二ピームリミタ、NB1ポート)	F1S-3	22	18	— 100	線 上 線 上
	偏向磁石コイル (偏向磁石コイルホルダ基体)	F1S-7	26.5	21	100 100	6.5 6.5
	ピームダンプ	F1S-1	2700	2200	100 100	*350 320
	(凍結防止運転時)	ビームラインヘッダ出口圧力	—	0.8	— —	1.6 1.6

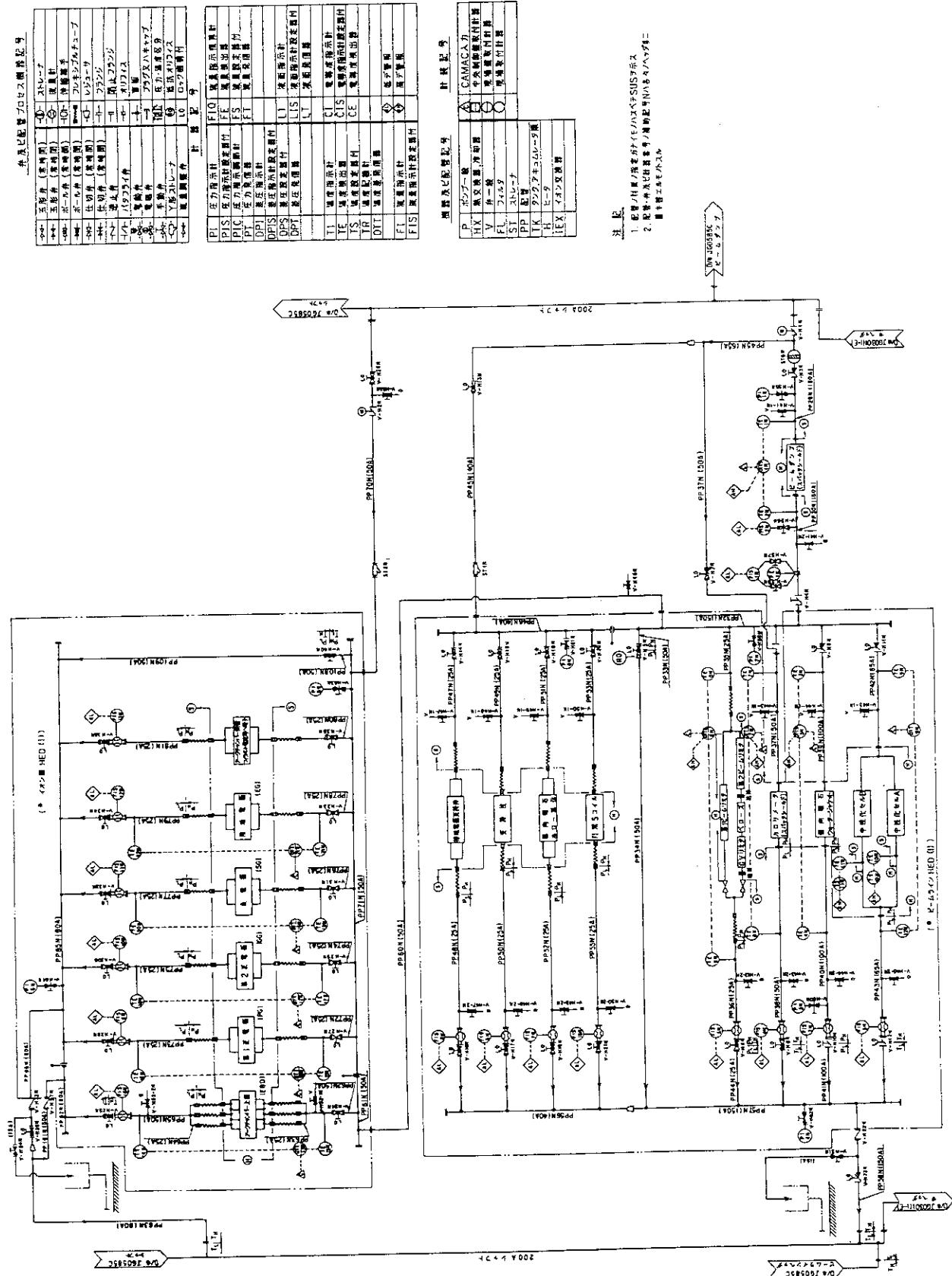
* F1S-1。仕様が違ったため低流量表示。



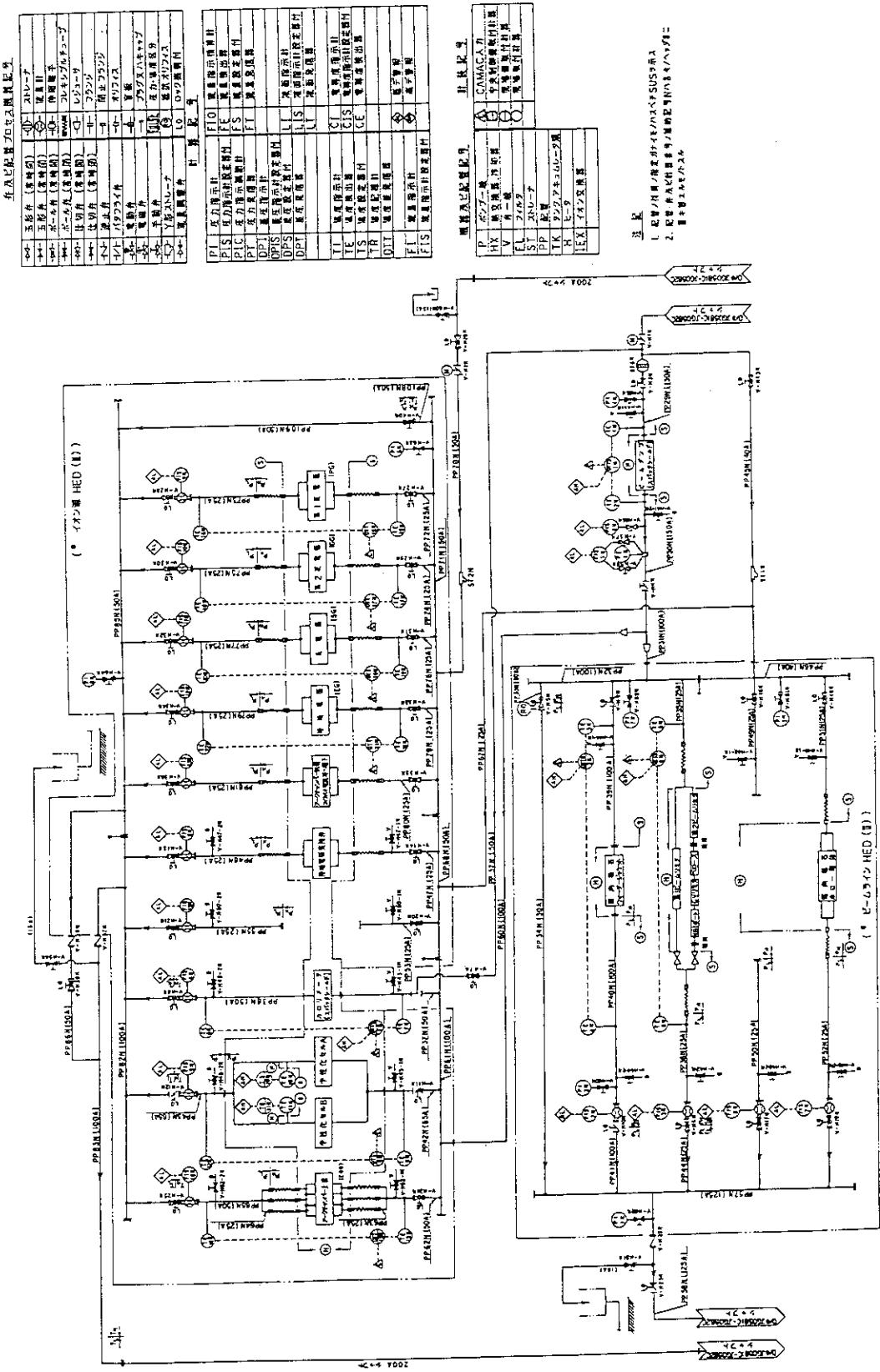
第4.6-1図 1次冷却系・ビームライン循環系系統図

機器及配管記号

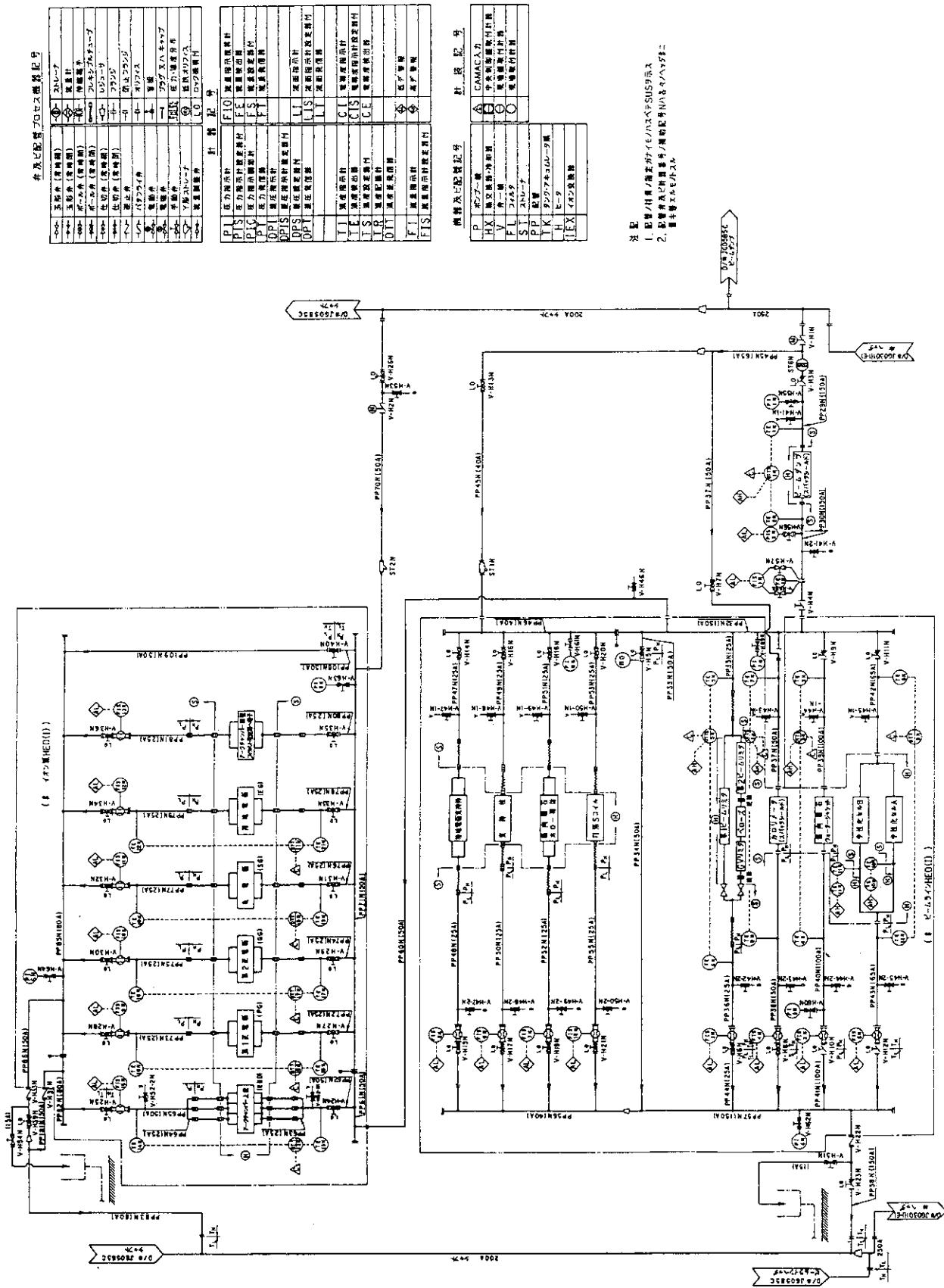




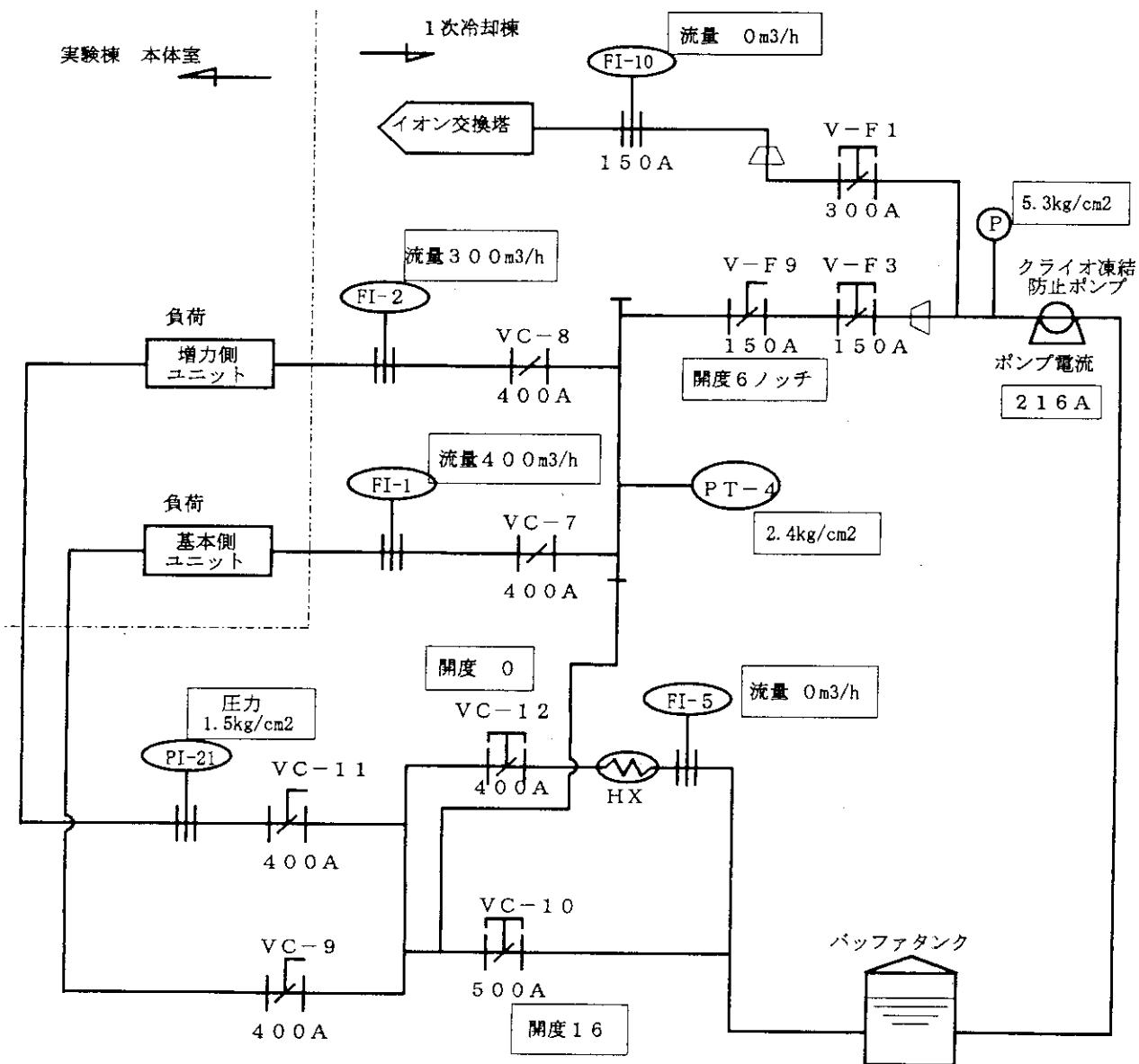
第4.6.1-1図 1次冷却系・本体内配管系統図 (#7)



第4.6.1-2 図 1次冷却系・本体内配管系統図 (#8, 10)



第4.6.1-3図 1次冷却系・本体室内配管系統図 (# 9)



第4.6.2-1図 NBI凍結防止ポンプ廻り冷却水系統図

4. 7 補助真空排気系

補助真空排気系（以下、補助排気系と言う）設備は、

- ①クライオポンプが設置されている真空容器（以下、主排気タンクと言う）内を大気圧からクライオポンプ動作領域（約 3×10^{-3} pa 以下）にまで排気すること、
- ②クライオポンプの再生時にパネル面から放出される水素ガスまたは重水素ガスを安全かつ円滑に排気すること。
- ③1ショットあたりのビーム発生時間が0.5秒以下であるコンディショニング運転時など短バルスビーム引出し運転時は、クライオポンプを作動させずに補助排気系のみにて排気すること。などを目的として設置された設備である。

本設備は、メカニカルブースターポンプ（以下、MBPと言う）と油回転ポンプ（以下、RPと言う）およびターボ分子ポンプ（以下、TMPと言う）などの真空ポンプ群から構成され、大気圧からTMPの動作領域（約2 pa 以下）にまでは粗引き排気系にて排気され、TMP動作領域到達後はTMPにて排気される。補助排気系の系統図を第4.7-1図に示す。

粗引き排気系は、MBP 1台とRP2台から構成され、接線入射NBI装置および準垂直入射NBI装置の合計14ユニットを、マニホールドを通じ並行して同時に排気することができる。

TMPは、各ユニット毎に1台づつ設置されている。ただし、接線入射NBI装置の場合は、2ユニットを1つの真空容器にまとめたため、接線入射NBI装置の主排気タンクには、それぞれ2台のTMPが設置されている。

各TMPの背圧側は、粗引き系と同様にマニホールドにて200Aの配管1本にまとめられ、MBPおよびRPへと導かれる。TMP背圧側の真空ポンプは、MBP2台とRP2台から構成され、これらも粗引きポンプと同様に14ユニットに対し共通した設備となっている。

粗引き系やTMP背圧側の真空ポンプは、TMPから約50m離れた実験棟地下の加熱ポンプ室にまとめて設置されている。

上記の設備のうち、接線化に伴って改造した部分は、#7から#10の4ユニットのTMP配置変更と本体室1階床面からTMPまでの配管配線ルートの変更である。ただし系統構成上の変更はない。すなわち、本体室1階床上取り合い点から接線入射NBI装置各ユニットまでの配管配線を新設とし、TMPやバルブおよび一部の配線などは従来のものをそのまま流用することにしたものである。新設配管は、粗引きおよびTMP背圧配管、圧空配管およびリーク系窒素ガス配管である。このうち粗引きおよびTMP背圧配管は、SUS製200A配管とした。

なお、TMPの配置において、TMPを接線入射NBI装置の頂上に配したことおよびその近辺に打ち消しコイルのMコイルが設置されることから、TMPへの打ち消しコイルからの磁場の影響についても検討した。その結果、許容値8.0mT（X-Y成分、連続値）に対し約10mT（計算値）となり許容値よりも若干大きい値となつたが、許容値が連続であるのに対し打ち消しコイルの通電は連続ではないことから許容範囲内とした⁸⁾。第4.7-2図にTMPの配置を示す。

補助排気系設備の主な性能は、以下のとおりである。

(1) 粗引き排気時間（大気圧から2 pa まで）

14ユニットを同時に排気した場合 : 約3時間30分

接線入射NBI装置2ユニット同時に排気した場合 : 約75分

(2) 常温の水素ガスに対するTMPの実効排気速度

TMP単体での排気速度 : 約6000l/s

TMP 1 系統あたりの実効排気速度 : 約2900l/s

(3) TMP背圧ポンプ系の性能

MBP : 排気速度2500m³/h (窒素ガスに対して)、2式

RP : 排気速度600m³/h (窒素ガスに対して)、2式

(4) 粗引きポンプ系の性能

MBP : 排気速度2500m³/h (窒素ガスに対して)、1式

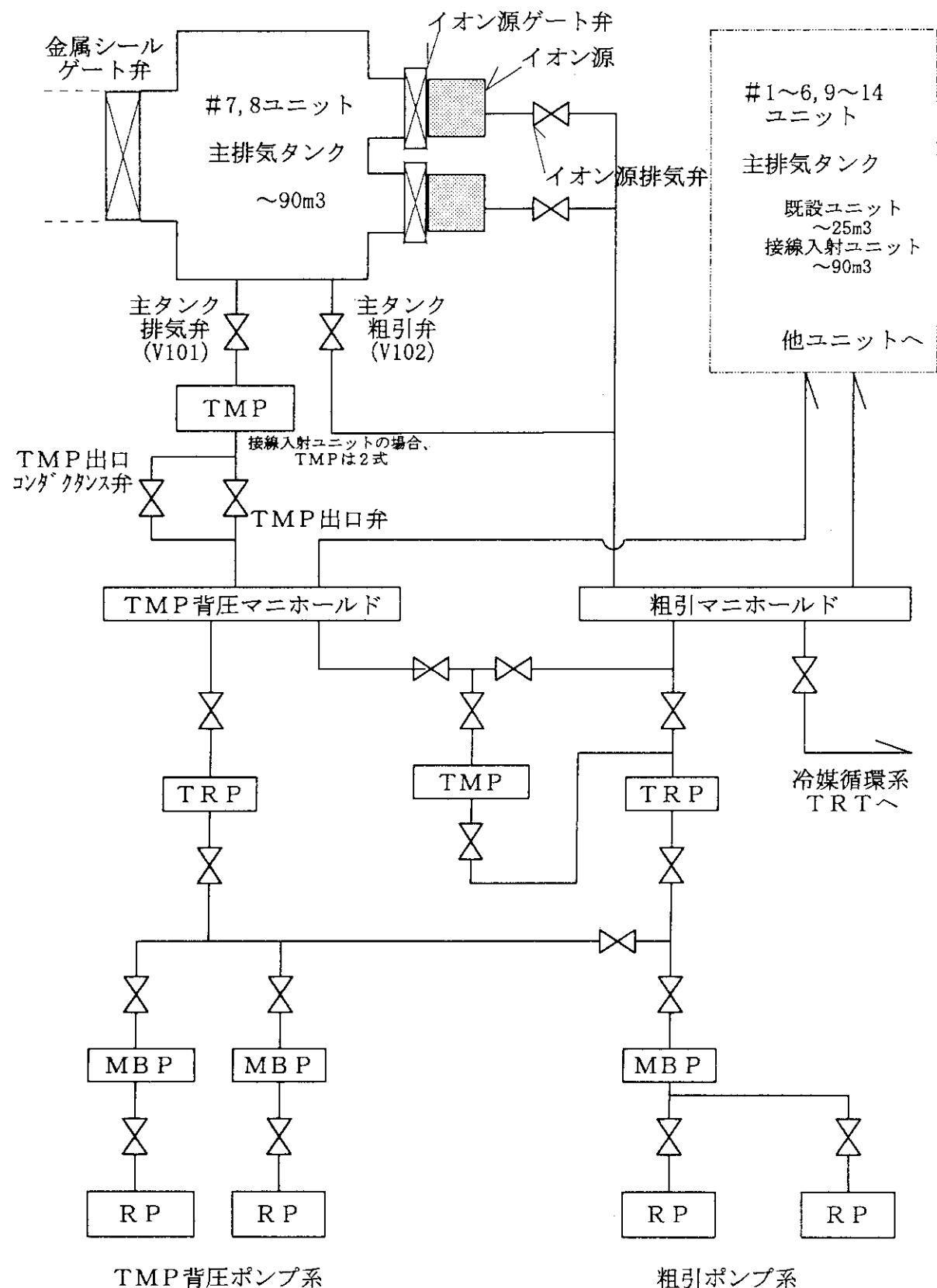
RP : 排気速度600m³/h (窒素ガスに対して)、2式

これらの設備は、従来の制御設備により運転される。

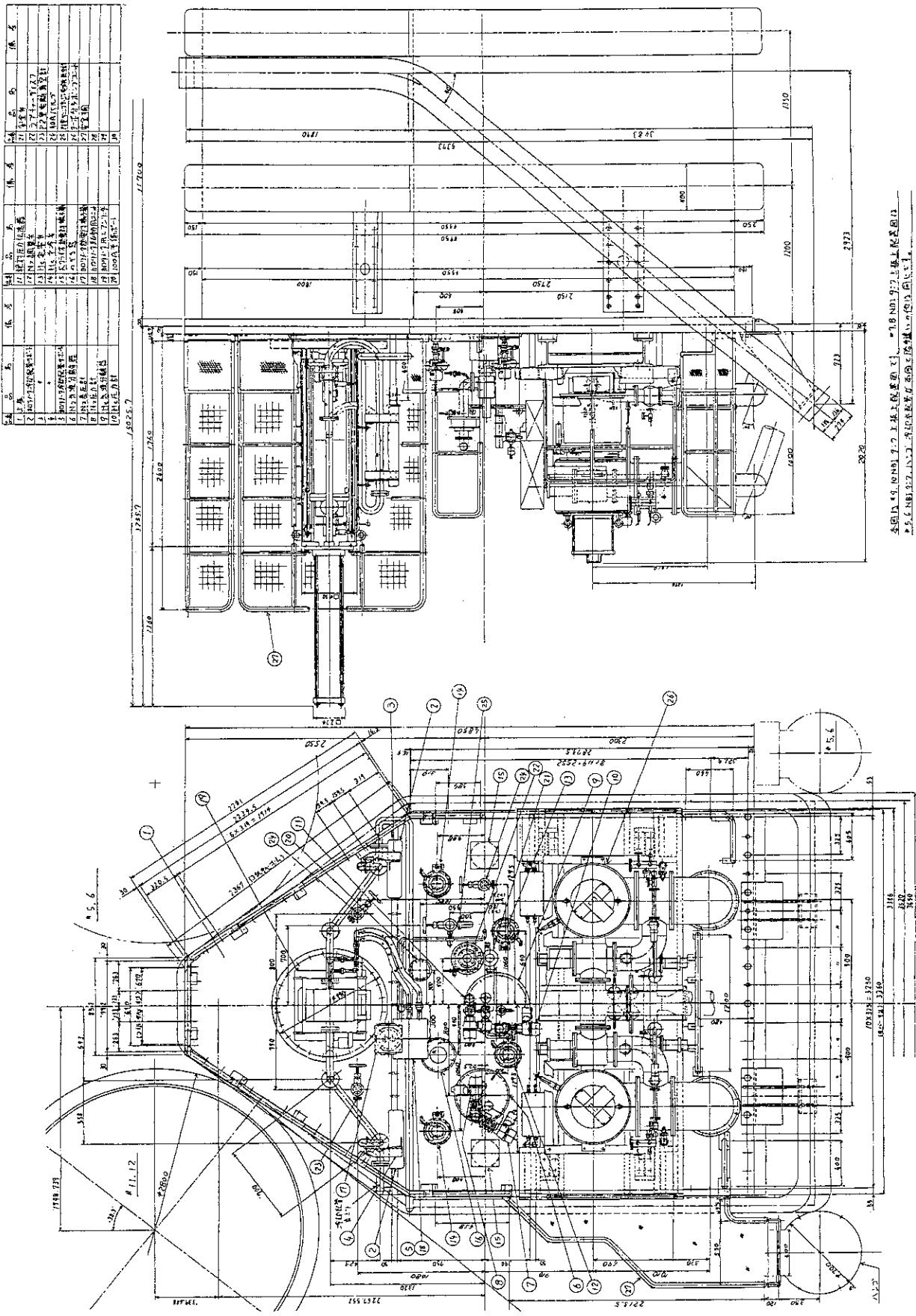
運転方式には、大きく分けて大気排気運転と水素排気運転とがある。また、それの方
式のなかでは更に自動運転と手動運転との選択が可能となっている。

大気排気運転は、主排気タンク内を大気圧またはそれに近い圧力からクライオポンプの作
動領域にまで排気する運転で、被排気ガスは空気である。水素排気運転は、主排気タンク内
のクライオパネル活性化時に、パネル面より離脱した水素ガスまたは重水素ガスを排気する
運転である。大気排気運転と水素排気運転とは同時に両立させることはできない。

運転方式、制御方式も従来のままである。



第4.7-1図 補助真空排気系ブロックダイヤグラム



第4.7-2図 TMP配置図

4. 8 配管用ヤグラ

4.8.1 目的

JT-60実験棟本体室内に接線入射NBI装置用配管配線及び現場盤を収容固定するために、またイオン源、高電位テーブル、TMP及びゲート弁や計測装置のメンテナンスのために、接線入射NBI装置後方に配管用ヤグラ及びステージングを設けた。

4.8.2 性能及び構造

配管用ヤグラ組立図を第4.8.2-1~4図に示す。本ヤグラは、既設のヤグラでは改造後の接線入射NBI装置と空間的に干渉することから、既設のヤグラを撤去し接線入射NBI装置用として新設したものである。

配管用ヤグラの柱及び主な梁は、荷重及び耐震条件（クラスB）としての水平地震力（0.3G）を考慮した静的解析結果により200mm×200mmのH形鋼とし、プレスは150mm×75mmのみぞ形鋼とした。

鋼材はSS材が磁化することによるエラー磁場の影響を考慮して、2F+150mm以上の接線入射NBI装置タンク側ヤグラはSUS材とし、他の部分はコストを低減させるためにSS材とした。SUS材の範囲を第4.8.2-5図配管用ヤグラモデルに示す。

4.8.3 配管用ヤグラの静的解析

配管用ヤグラは梁要素でモデル化した。計算は汎用構造物の静的解析プログラムSAP-Vにより行った。計算条件としては水平地震力を0.3Gとしヤグラにかかる荷重を以下のとおりとした。

階高	機器名	荷重 (kg)
2 F	イオン源用ヘッダー (I)	750
2 F	1次冷却系電気盤	500
2 F	1次冷却系計装盤	500
2 F	受熱部温度監視盤	500
2 F	ビームモニター現場盤	500
2 F	受熱部温度監視盤	500
2 F	ビームライン現場盤	500
2 F	ガス導入装置	500
3 F	イオン源ヘッダー (II)	1200
3 F	サージブロッカー	3000

解析結果の判断基準は以下の2点とした。

- ① 各軸方向のたわみ：±5mm以内
- ② 最大応力：1400kg/cm²

第4.8.3-1図及び-2図にヤグラ変形後の状態を示す。また、第4.8.3-1図中にたわみの計算結

果を、第4.8.3-2図中に応力の計算結果を示す。たわみ及び応力ともすべて判断基準以下であった。

この解析の結果から、接線NBI用配管ヤグラは静的には安全上問題がないことを確認した。

4.8.4 接線入射NBI装置用ヤグラのSS材使用可能範囲の検討

コスト低減の観点からはヤグラの材質としてはSS材を使用することが望ましいが、SS材は磁性材であることから磁化することによるエラー磁場が問題となる。そこで、どの範囲までSS材が使えるか計算コードMAGICにより評価した。

(1)計算形状（第4.8.4-1図）

#9・10ユニット相当のヤグラについて計算をした。簡単のためヤグラを6本の柱で近似した。実際には柱はこの様に真直ぐではない。また、柱間をつなぐ構造物もあるが、これらの構造物については計算上無視した。ただし、ヤグラ本体の重量に等価な柱の太さとした。ヤグラ本体の重量は約15トンである。

すなわち、ヤグラを一辺1の正方形の断面とすると、

$$W = 7.86[\text{ton}/\text{m}] \times 1 \times (4.75[\text{m}] \times 2 + 8.2[\text{m}] \times 4) = 15[\text{ton}]$$

$$1 = 15 / \{7.86 \times (4.75 \times 2 + 8.2 \times 4)\} = 0.212 [\text{m}]$$

となる。

漏洩磁場と打消し磁場を考慮するが、簡単のため、イオン源／中性化セル磁気シールドと偏向磁石はないものとして、プラズマ端、磁極中心、及びイオン源の電極の位置におけるエラー磁場の大きさを評価した。

ヤグラが強く磁化したとしてもトカマクプラズマからは遠いことから、プラズマにはあまり影響を与えるないと予想されるが、一方では、接線入射NBIタンクがヤグラに非常に近接しており、接線入射NBI装置自身に悪影響を与える可能性が高い。

(2)計算結果

ヤグラ全体をSS材で作った場合に相当する計算結果を第4.8.4-2及び-3図に、ヤグラの後方3FのフロアレベルまでをSS材で作った場合に相当する計算結果を第4.8.4-4図に示す。

ヤグラ全体をSS材で作った場合、打消しコイルに近接する部分は1.6Tと磁気的に飽和している。近接しない柱も高さ方向中央部はかなり磁化することがわかる。また、鉛直断面の磁場強度の分布を見ると、中性化セル出口からビームダンプに至るまでの空間における磁場強度が上下ユニットで少し非対称になっている。打消しコイルは、上下ユニットで若干異なるようにフィードバック制御するので、この非対称性がすぐさま打消し不能につながるわけではないが、評価のしにくい部分を打消しコイルの制御関係に背負い込むことになる。

第4.8.4-1表はこの状況を数値的に見たものである。(1)-(2)は打消しコイルの効果、あるいは打消しコイルによるエラー磁場を表し、(2)-(3)は全体をSS材としたヤグラによるエラー磁場を表している。表によれば、ヤグラによるプラズマ端のエラー磁場は0.63Gであり無視できる。一方、磁極中心におけるBX成分を見ると、上下で $6.88 + 7.69 = 14.57\text{G}$ だけ非対称となっている。電極における非対称はさらに激しいが、実際は磁気シールドされているので問題にならない。(2)-(4)はヤグラの後方3FのフロアレベルまでをSS材で作った場合のエラー磁場である。この場合は磁極中心におけるBX成分の非対称の度合は $0.34 + 0.47 = 0.81\text{G}$ となり軽減される。

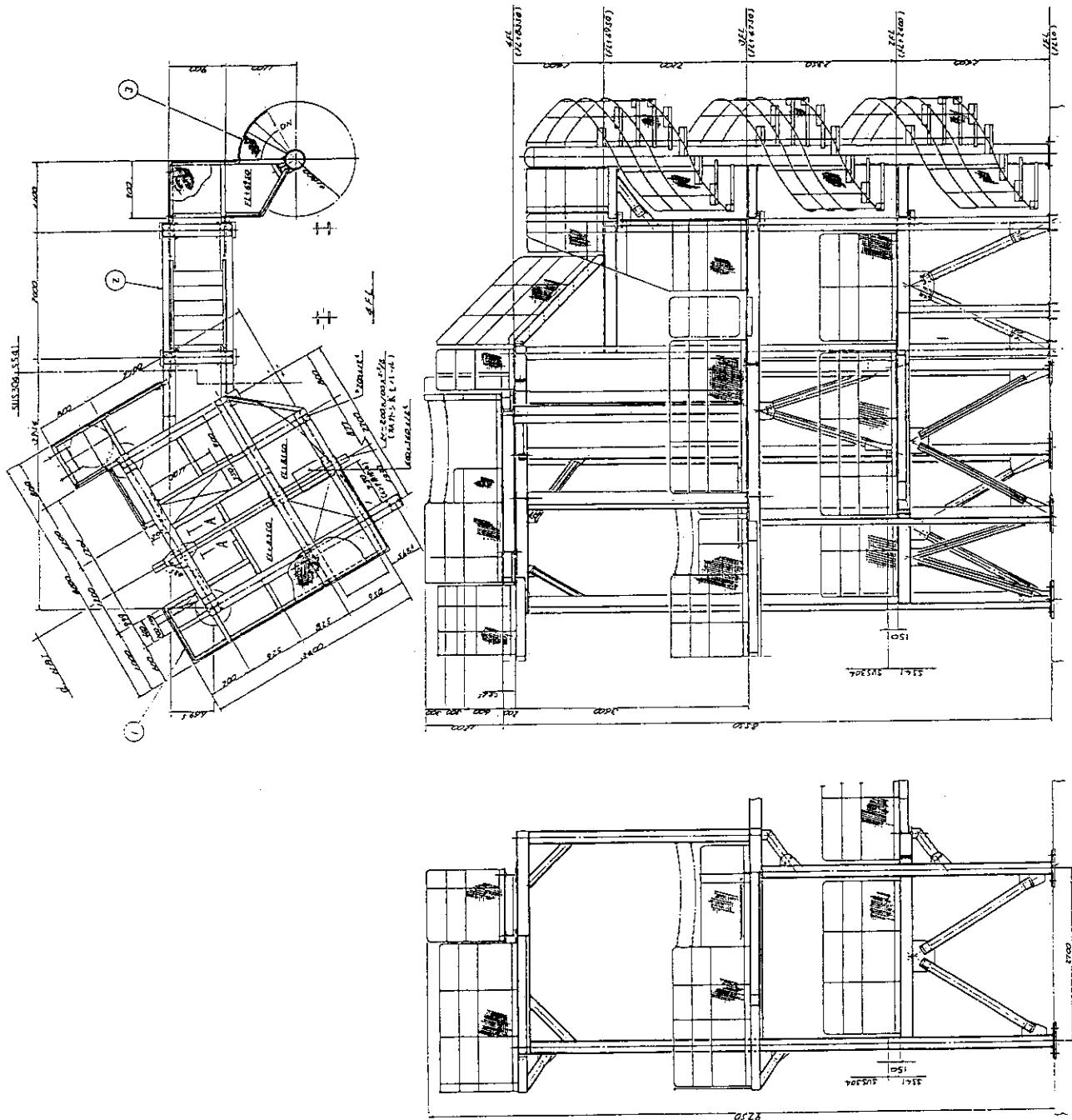
(3)結論

以上の計算結果より、SS材の使用可能領域は、第4.8.4-5図、-6図に示すようにヤグラ後方のIFLから2FL+150mmまでとした。これは、打消しコイルの制御に難しい問題を導かないという点で最も好ましいと考えるからである。

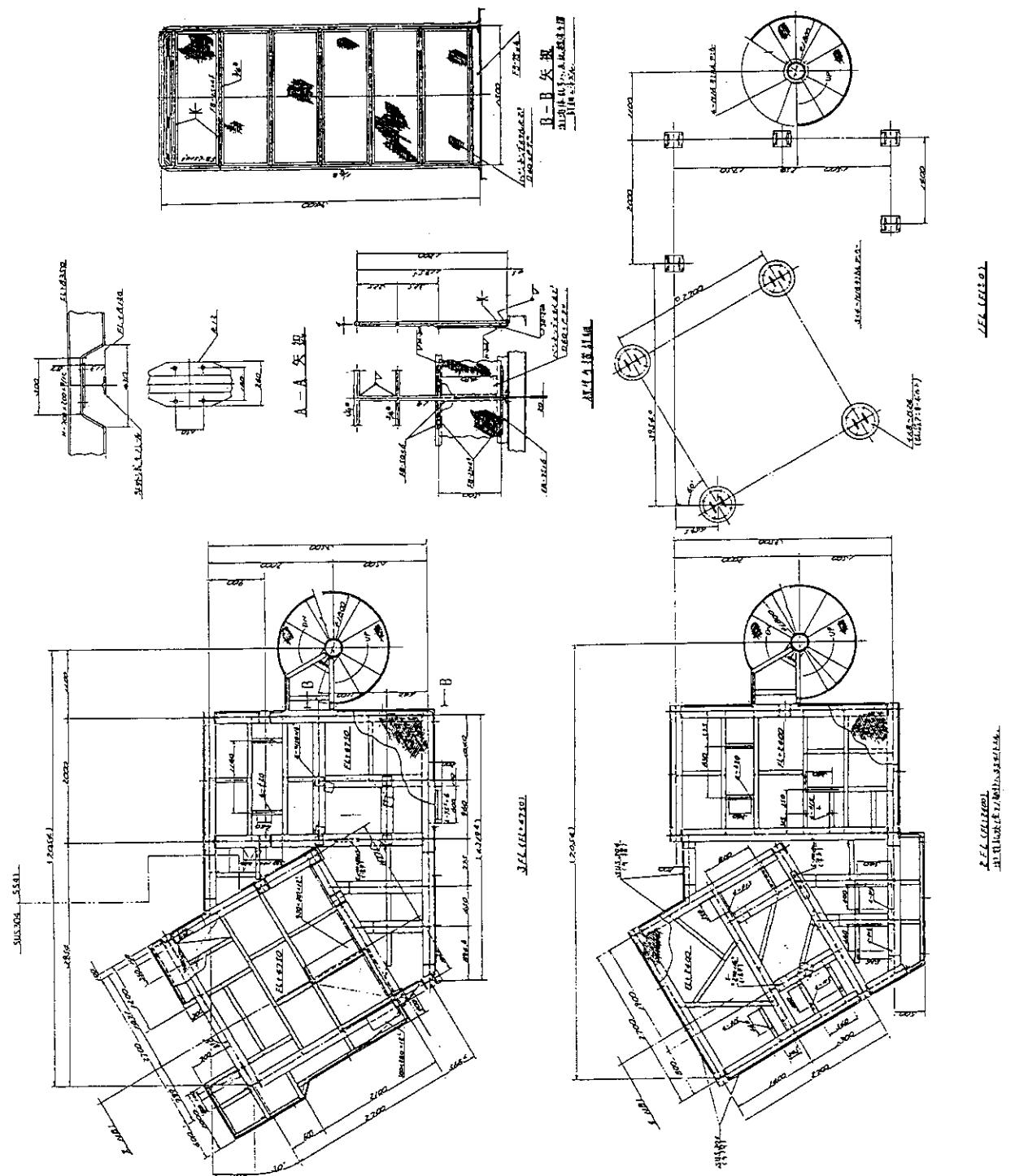
第4.8.4-1表 SS材使用範囲と各部の磁場強度(計算結果)

	漏洩(1)	(1)-(2)	(2)- 漏洩+打消し(2) +ヤグラ(3)	(2)-(3)	(2)-(4)	漏洩+打消し +ヤグラ(4)
プラスマ端						
Bx	0.00	0.00	0.00	0.78	0.08	-0.08
By	0.00	0.00	0.00	-0.12	0.02	-0.02
Bz	-4865.79	10.66	-4876.45	-0.63	-0.04	-4876.41
B	4865.79	-10.56	4876.45	0.69	0.04	4876.41
磁極(上)						
Bx	-59.45	30.03	-29.42	6.88	-36.30	-29.76
By	-16.19	6.00	-16.19	0.61	-16.80	-16.27
Bz	-204.44	-231.94	27.50	1.03	26.47	27.41
B	213.52	170.12	43.40	-4.56	47.96	43.61
磁極(下)						
Bx	59.45	30.03	29.42	7.69	21.73	28.95
By	16.19	6.00	16.19	0.58	15.61	16.11
Bz	-204.44	-231.94	27.50	-3.82	31.32	27.54
B	213.52	170.12	43.40	2.21	41.19	43.08
電極(上)						
Bx	-29.58	-74.19	44.61	4.93	39.68	44.18
By	-6.12	0.00	-6.12	0.12	-6.24	-6.28
Bz	-87.34	-65.11	-22.23	15.97	-38.20	-22.73
B	92.41	42.19	50.22	5.21	55.43	50.08
電極(下)						
Bx	29.58	74.19	-44.61	6.66	-51.27	-46.14
By	6.12	0.00	6.12	-17.26	23.38	5.79
Bz	-87.34	-65.11	-22.23	-19.53	-2.70	-22.82
B	92.41	42.19	50.22	6.19	56.41	51.8

単位:ガウス

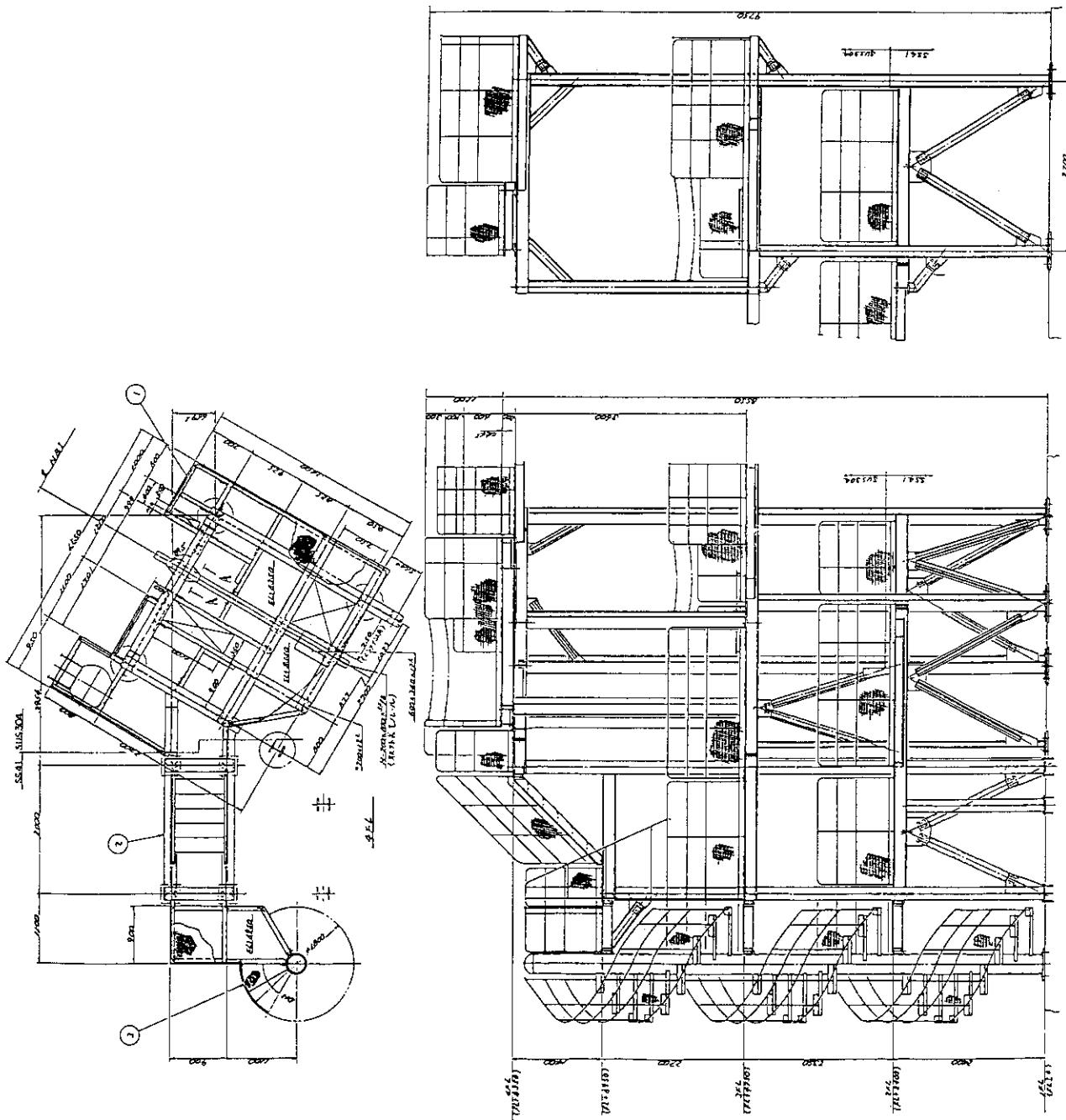


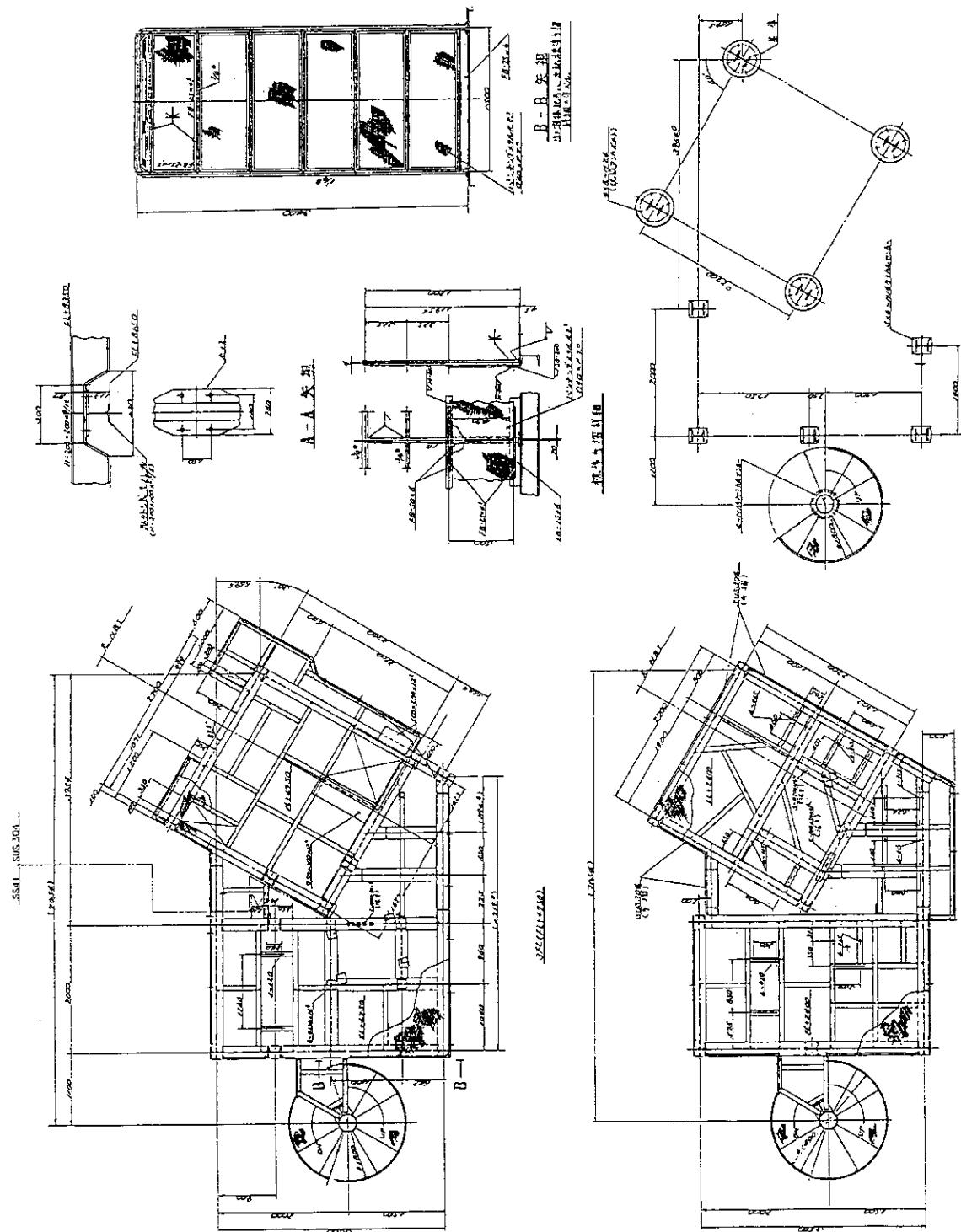
第4.8.2-1図 配管用ヤグラ(1)

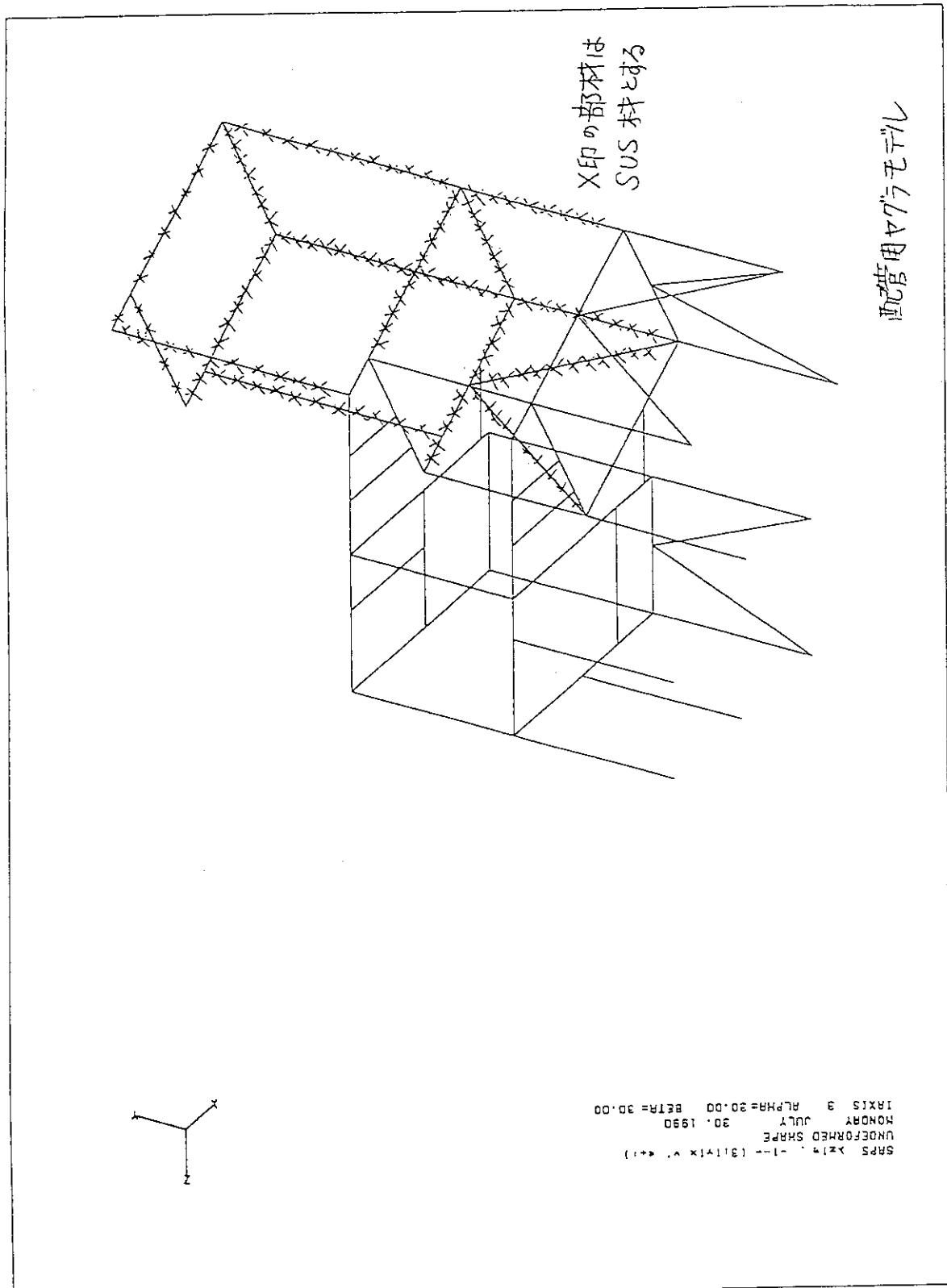


第4.8.2-2図 配管用ヤグラ(2)

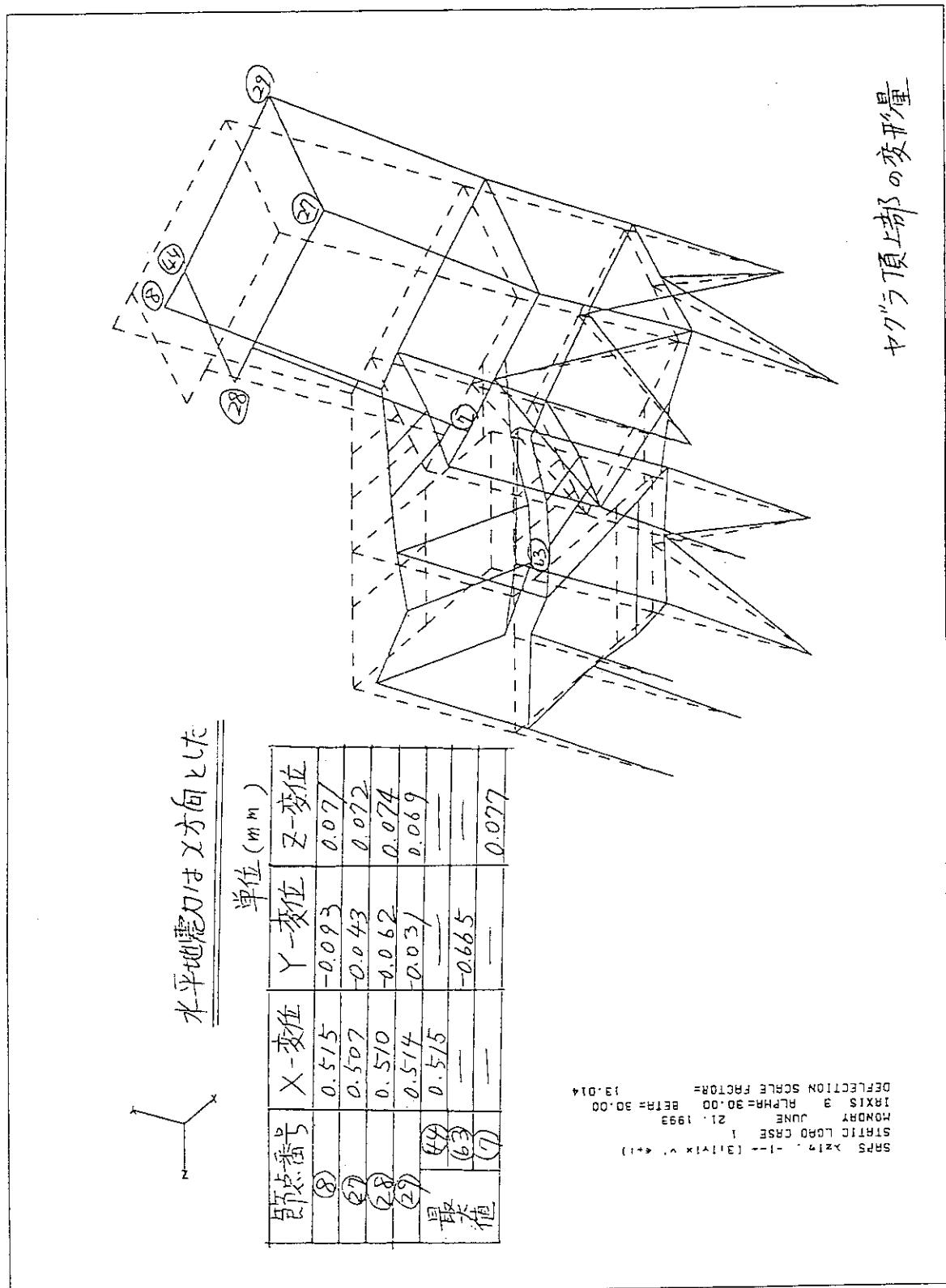
第4.8.2-3図 配管用ヤグラ(3)



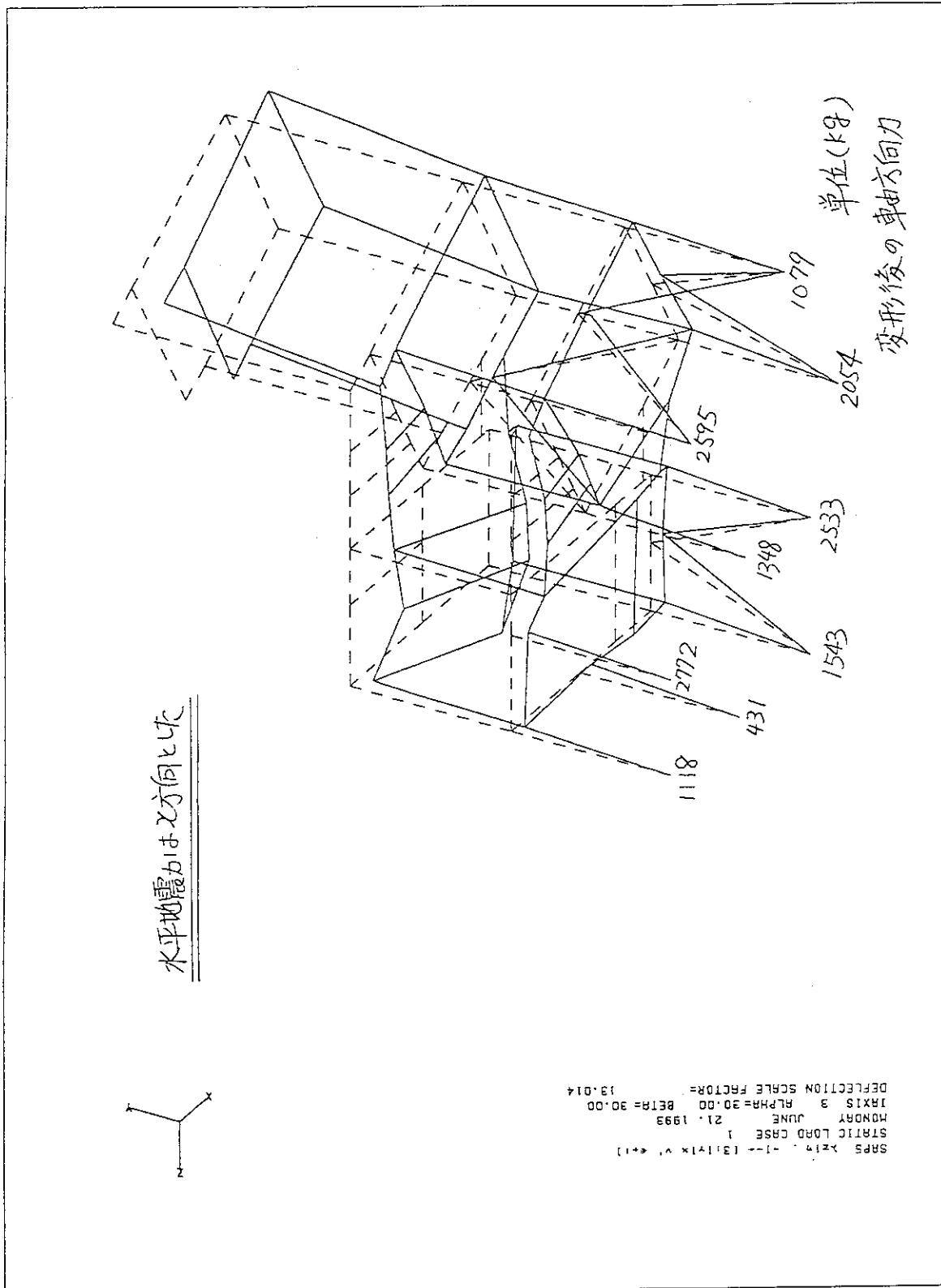




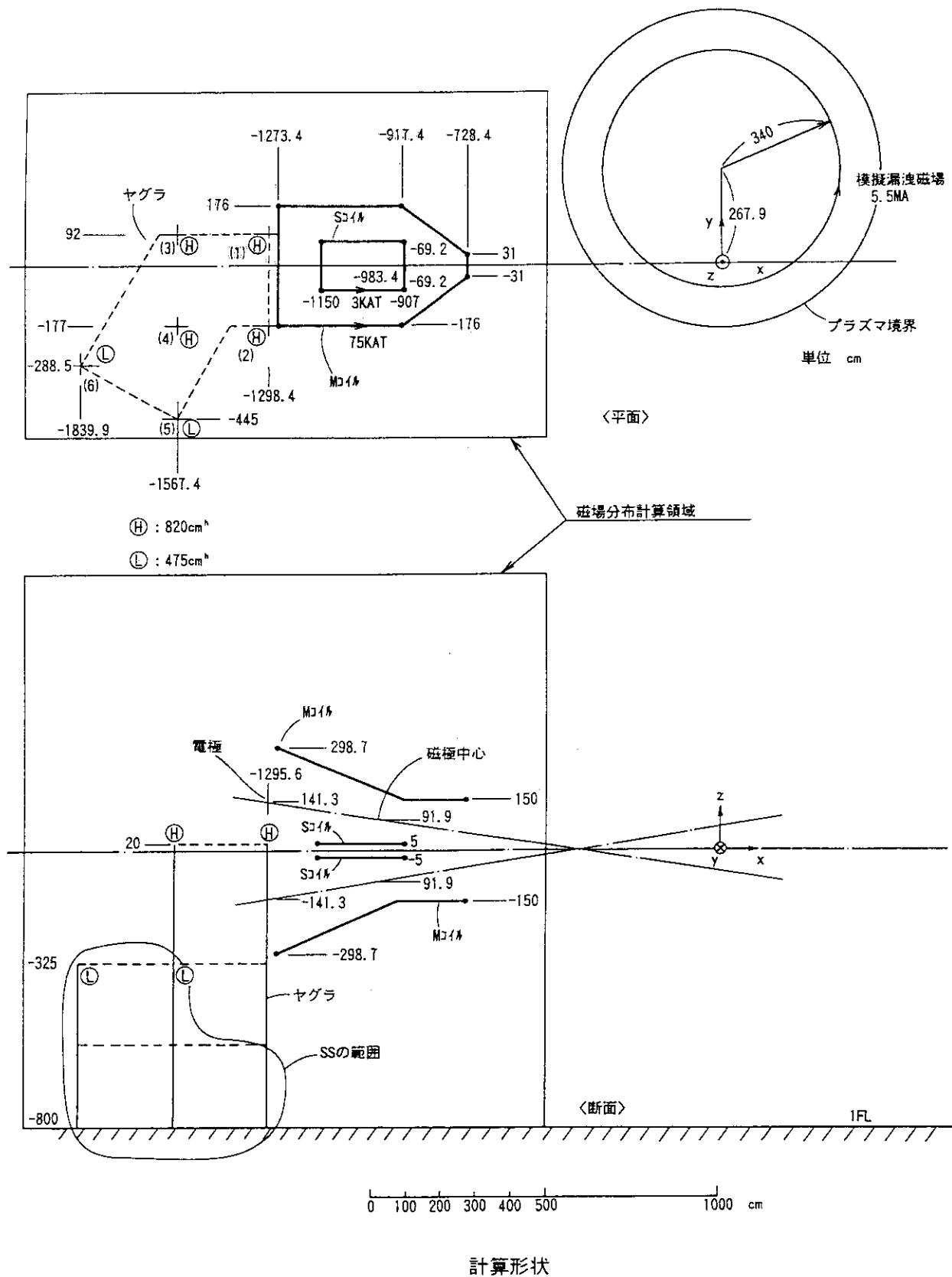
第4.8.2-5図 配管用ヤグラモデル (SS材の範囲)



第4.8.3-1図 ヤグラ変形後たわみ量



第4.8.3-2図 ヤグラ変形後の軸方向応力

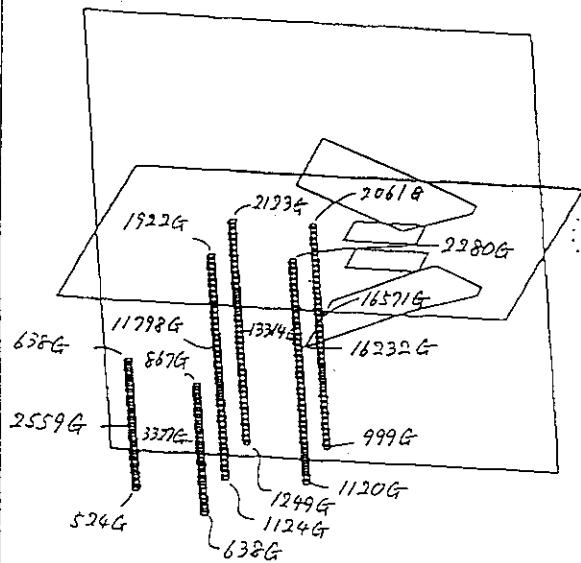
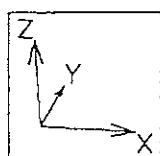


第 4 . 8 . 4 - 1 図 SS材使用範囲の計算形状

COMMAND ?
00012 ?

PIPING TOWER FOR TANGENTIAL NBI
STRAY:5.5MAT CANCEL.(M:75KAT S:3KAT)

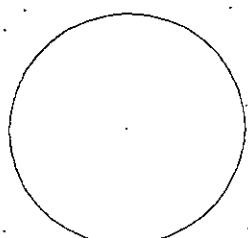
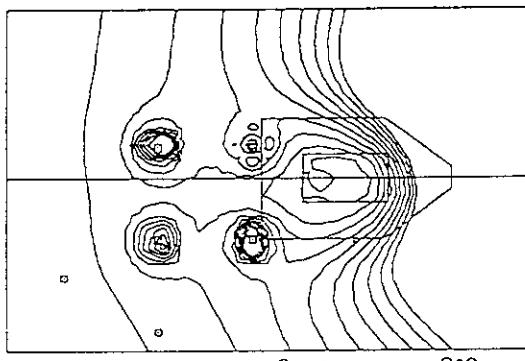
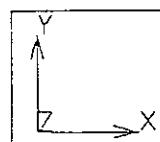
VX 60.000
VY 30.000
VZ 30.000



COMMAND ?
00012 ?
205 * 10

PIPING TOWER FOR TANGENTIAL NBI
STRAY:5.5MAT CANCEL.(M:75KAT S:3KAT)

VX 0.0
VY 0.0
VZ 0.0

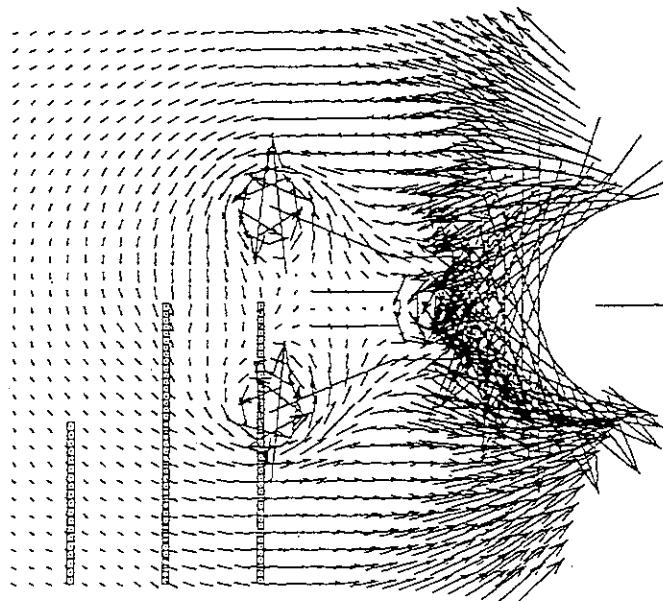
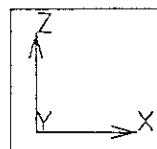


第4.8.4-2図 ヤグラ全体をSS材とした場合の計算結果(1)

COMMAND ?
00012 ?
SG 0.1E3

PIPING TOWER FOR TANGENTIAL NBI
STRAY:5.5MAT CANCEL.(M:75KAT S:3KAT)

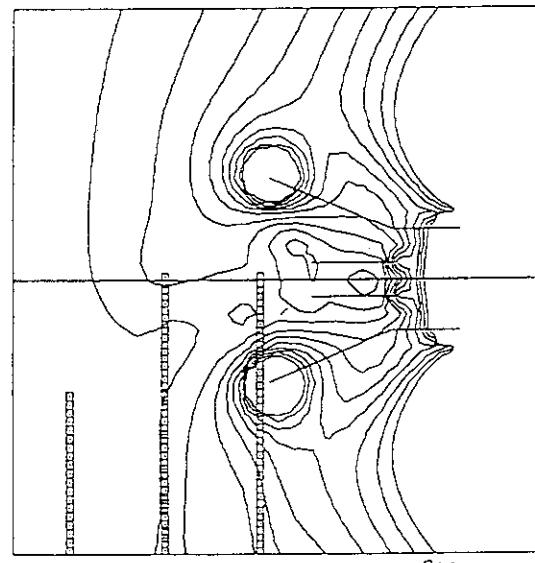
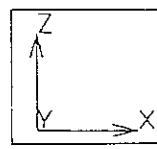
VX 90.000
VY 0.0
VZ 0.0



COMMAND ?
00012 ?
?0G * 10

PIPING TOWER FOR TANGENTIAL NBI
STRAY:5.5MAT CANCEL.(M:75KAT S:3KAT)

VX 90.000
VY 0.0
VZ 0.0

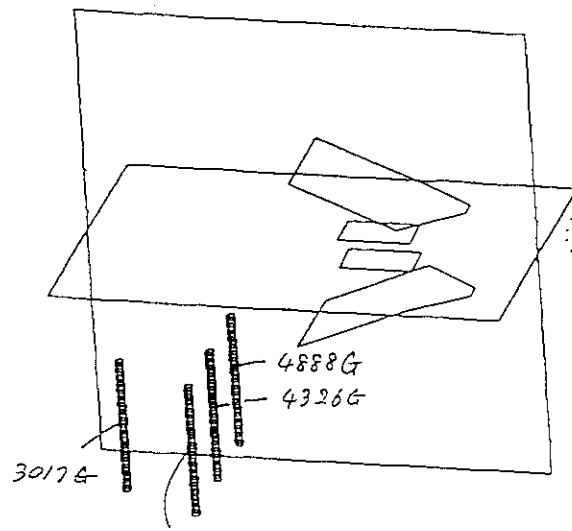
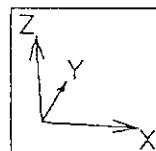


第4.8.4-3図 ヤグラ全体をSS材とした場合の計算結果(2)

COMMAND ?
00012 ?

PIPING TOWER FOR TANGENTIAL NBI(LIMITED USE OF IRON)
STRAY:5.5MAT CANCEL.(M:75KAT S:3KAT)

VX 60.000
VY 30.000
VZ 30.000

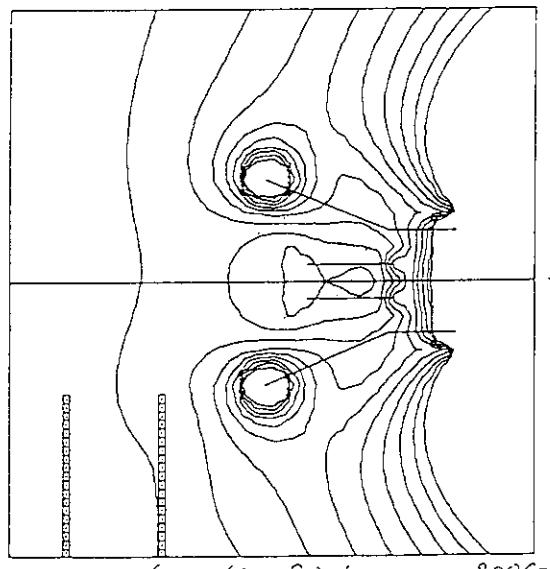
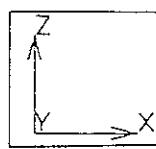


磁化(各最大値)

COMMAND ?
00012 ?
?0G * 10

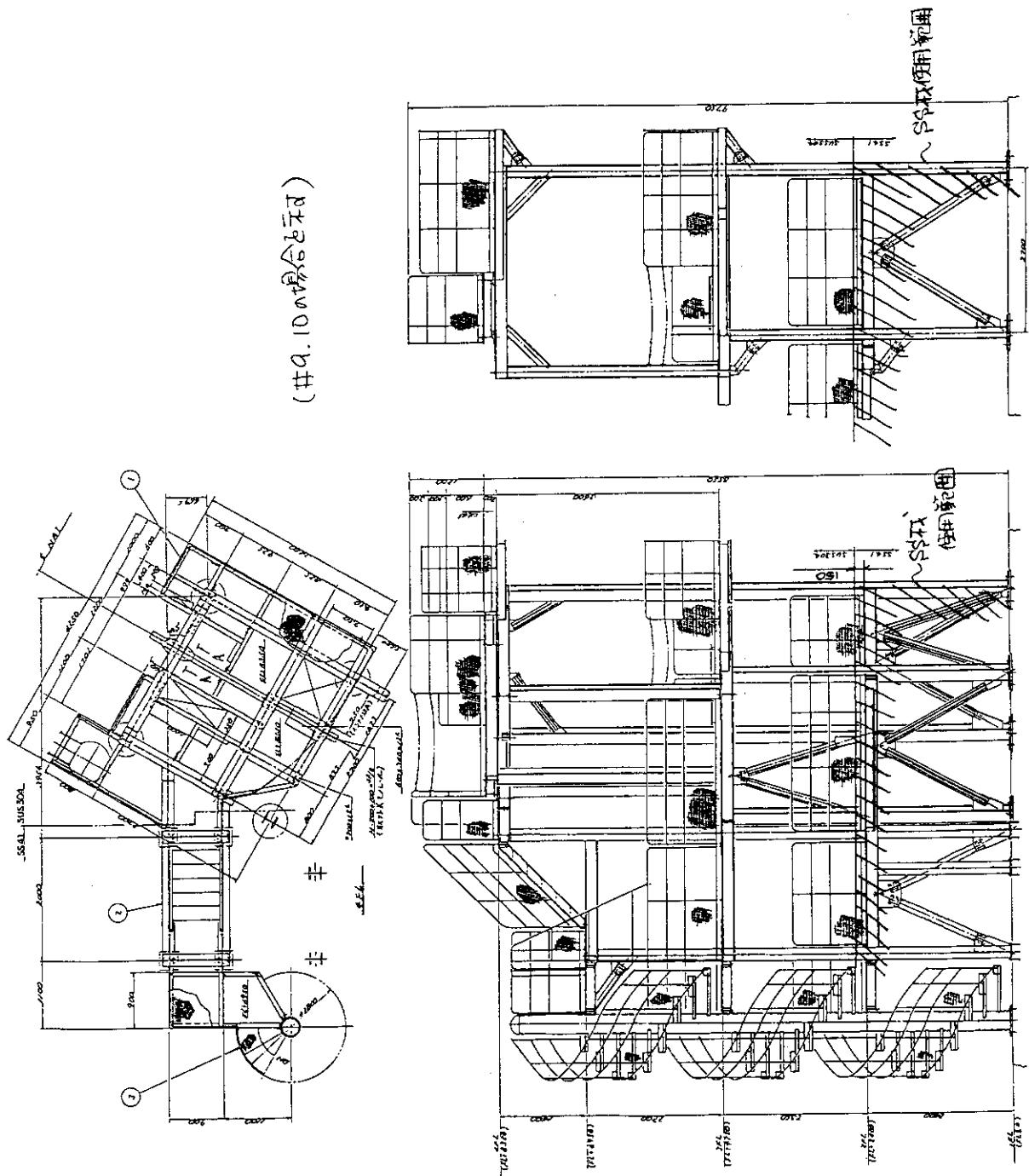
PIPING TOWER FOR TANGENTIAL NBI(LIMITED USE OF IRON)
STRAY:5.5MAT CANCEL.(M:75KAT S:3KAT)

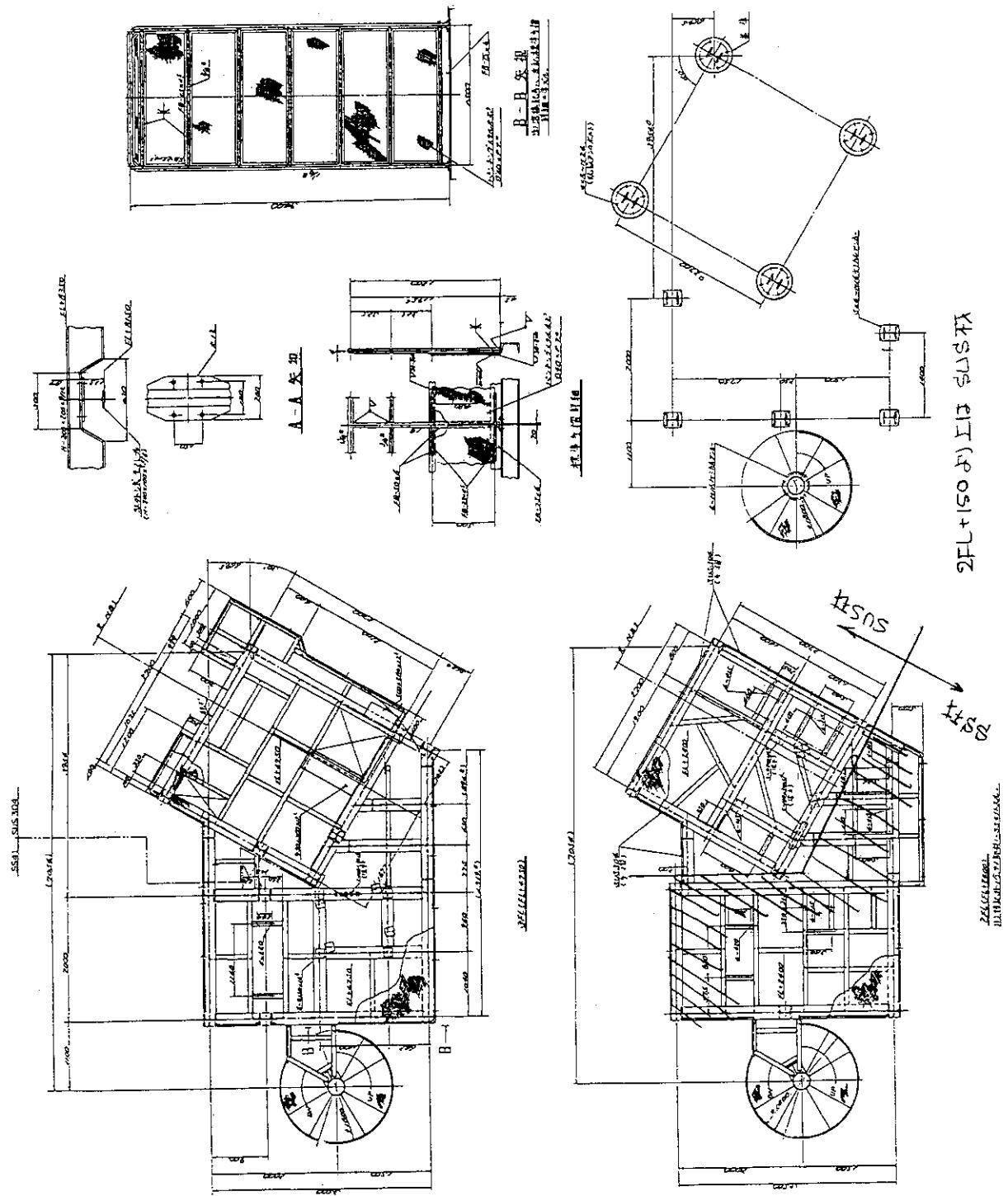
VX 90.000
VY 0.0
VZ 0.0



第4.8.4-4図 ヤグラ後方3FまでをSS材とした場合の計算結果

第4.8.4—5図 配管用ヤグラのSS材使用範囲





第4.8.4-6図 配管用ヤグラのSS材使用範囲

5. 接線入射NBI装置でのポートエージング

5.1 NBIポート製作後の最初のポートエージング

接線入射NBI装置（T-NBI）の運転立ち上げの中で、既設の準垂直NBI装置（P-NBI）と大きく変わったのは、NBI入射ポートのエージング*である。

P-NBIは1入射ポート／1ビームラインであるのに対し、T-NBIは2ビームラインで1つの入射ポートを共有している。このため、ポートを通過する中性ビームパワーはP-NBIに比べて約2倍となり、T-NBIのポートエージングはP-NBIに比べて容易でないことが予想された。

平成4年7月に行われたT-NBI製作後の最初のポートエージングの結果を第5.1-1図に示す。この図には、比較のためにP-NBIのポートエージング状況も併せて示してある。

T-NBIでの1ビームラインによるビーム入射では従来のP-NBIのポートエージング時間と比較してあまり変わらなかったものの、2ビームライン同時入射ではP-NBIに比べて約3倍の約150秒のポートエージング時間を要した。

これは、NBIポートを通過するビームパワー密度が増大することにより壁からのガスのたたき出しが急激に多くなって再電離損失が増大するためである。

さらに、JT-60Uのトロイダル磁場あるいはプラズマ電流を急激に変えると、再電離損失が急増するという現象が生じた。これは、T-NBIの入射ポート内壁の再電離ビームに対する保護用としてカーボンタイルを使用したことから、トロイダル磁場あるいはプラズマ電流が変わると再電離ビームの軌道が変化してカーボンタイルのエージングの進んでいない新たな場所にビームが当たるためにその部分からの脱ガスが多くなるからと考えている。

これは、P-NBIではポート内壁保護板としてMo板を使用しているためにこのような現象は起こらないが、T-NBIで使用しているタイル材のカーボンは、ガスの吸収性がよく、またこの吸収されたガスは、ビームが直接当たって温度が上がったところ以外は放出され難いことからビームが当たって初めて多量のガスを放出するためである。

このときの再電離損失は、10%程度から急に50%以上に増大する。この場合、ポート内では約1~2MWのパワーが失われるため、この熱負荷によるポート溶損の恐れがあり再電離損失の増大は、運転上常に注意しなければならない問題である。

ただこのような再電離損失の増大は、一時的なものであってトロイダル磁場あるいはプラズマ電流を変えずにそのままにしてビーム入射を2~3ショット続けると元の値に戻ることが分かっている。

5.2 ポートエージング時間の改善対策

上記のように、T-NBIのポートエージングが長時間をする（日数にすると約1週間程度）ことから、本来のNBI加熱実験時間が大幅に制約されることになる。これを解決するための対策として、NBIによる入射ビーム以外の方法でのポート内クリーニングを試みた。

その手段としてポート内にグロー電極を設置しポート内壁のヘリウムグロー放電によるポートクリーニング法を採用することにした。この方法の有効性比較のために、2カ所あるT-

NBIポートのうち1カ所だけのグロー放電洗浄を行い、他の一つはそのままとした。グロー放電を実施する際、NBIポートグロー電極だけではヘリウムグロー放電の着火がおこらないために、予備電離装置のついているJT-60U本体真空容器のグロー放電と同期してNBIポート内の放電を行った。

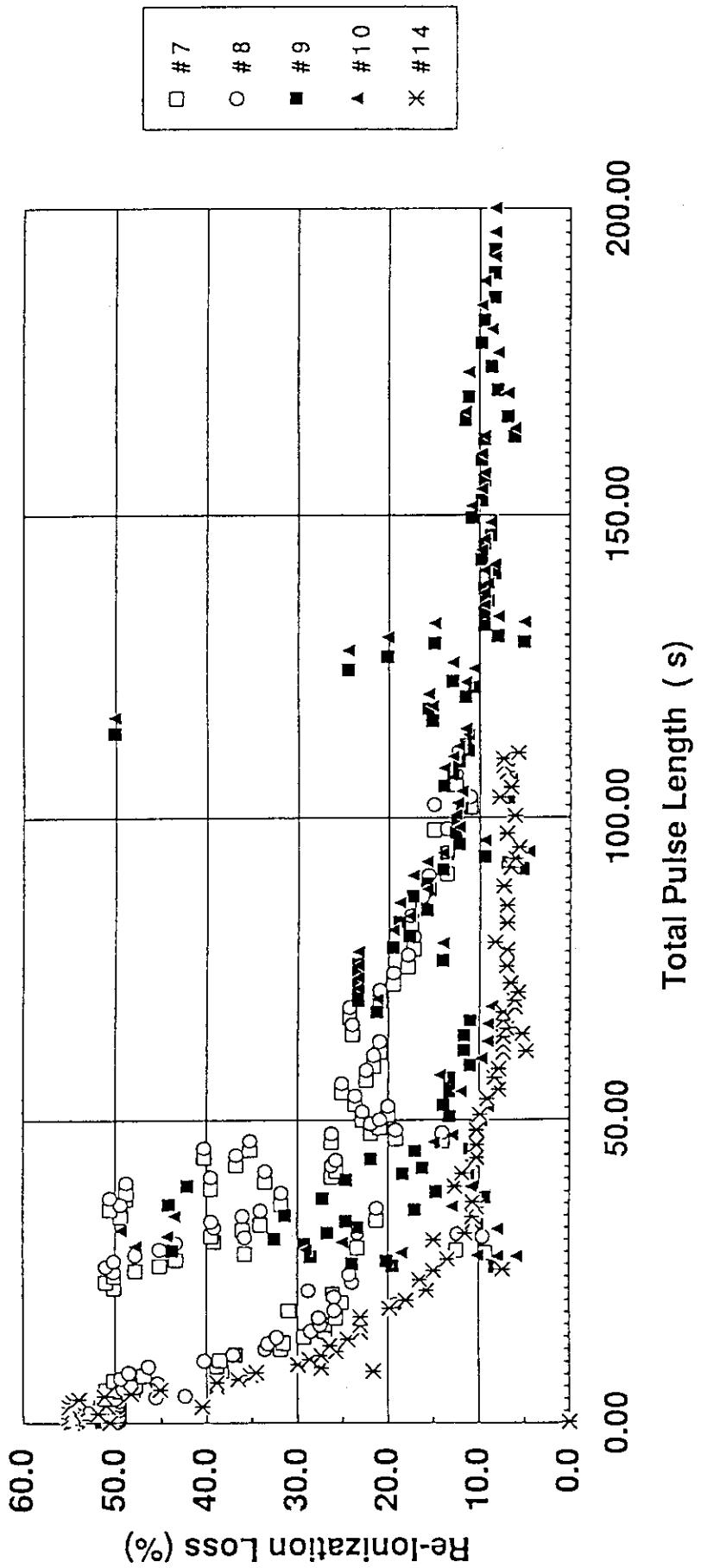
JT-60U真空容器を約2カ月間大気開放していた後の平成5年1月におけるJT-60U装置立ち上げのとき、JT-60U真空容器グロー放電洗浄を約30時間実施した後にNBIポートのエージングを行った。結果は、グロー放電を実施したポートだけではなくポート内放電洗浄を実施していないポートの再電離損失についても最初から大幅に小さくなっておりほとんどポートエージングが必要ない程であった。ポートエージング時間も前回に比べて約1/50の3秒程度に短縮された。これは、今回の立ち上げからJT-60U本体真空容器グロー放電装置の電流容量を4~5倍程度増大させたことにより、真空容器内グローがポート内にも入り込んでポート壁も洗浄したものと考えている。

一方、ポート内に設置したグロー放電は、電流値が真空容器の10%程度しかないために本体のグロー放電にマスクされてしまったものと考えられる。

いずれにしても、NBIポートのクリーニングには、ヘリウムグロー放電洗浄が非常に効果的であることが明らかになった。

*) トカマク装置では、トカマク装置からの漏洩磁場中にて中性ビームを入射した場合、その際ポート内にて発生する再電離ビームを漏洩磁場により偏向してポート壁に当て、ポート壁クリーニングを行うことができる。

再電離損失が10%以下になるまでに入射するビームの入射積算時間をポートエージング時間と呼ぶ。既設の準垂直入射NBI装置での最初のポートエージング時間は約50秒であった。



第5.1-1図 接線入射NBI装置の再電離損失とポートエージング時間

6. おわりに

NBI装置の接線入射化は、JT-60大電流化においてトロイダルコイルのサイズを変えずに真空容器を大きくしたことによるプラズマ周辺でのトロイダル磁場のリップル増大、すなわち従来のNBI準垂直入射のままでは高速イオンのリップル損失が大きくなってしまうと見積もられたことおよびJT-60UでのNBI加熱実験領域拡大を目的として行われたものである。

JT-60大電流化によって、NBIの準垂直入射による高速イオンのリップル損失は約40%にもなるが、接線化することによってこれを10%程度にまで抑えることができると判断されたからである。

接線入射化にあたっては、接線化への改造は4ユニットとし、イオン源をはじめビームラインの主要機器はできる限り既設のものを流用することおよびイオン源用電源はほとんど手を加えないものとすることとした。ただしビームライン真空容器や配管配線用ヤグラは限られた空間に設置する必要があったことから既設のものを撤去し新設とした。

接線入射NBI装置は、平成4年3月に完成し、翌4月から直ちに試験運転に入った。

本設備への改造主目的であるリップル損失の抑制、より高い核融合積の達成、あるいは準垂直入射と接線入射との比較運転などによりプラズマ閉じ込めの性能向上に大きく貢献している。

最後になりましたが接線入射NBI装置建設に関し、終始変わらぬご指導を戴きました船橋昭昌核融合装置試験部長、岸本浩炉心プラズマ研究部長をはじめNBI装置試験室およびNBI加熱研究室並びにJT-60U関係者の皆様に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Kikuchi et al., in Proc. of 15th Symposium on Fusion Technology, Utrecht, (1988) 287.
- 2) 谷 他, 核融合研究 第66卷, (1991) 35。
- 3) K. Tani et al., in Proc. of the Joint Varenna-Grenoble International Symposium on Heating in Toroidal Plasmas, Grenoble, Vol. 1, (1978) 31.
- 4) 松岡 他, 「J T -60N B I の接線入射化改造」, 日本原子力研究所レポート J A E R I -M 90-086 (1990)。
- 5) M. Bell et al., Plasma Physics and Controlled nuclear Fusion Research (Proc. 12th Int. Conf. Nice, 1998), vol. 1, p27
The JET Team (Presented by P.R. Thomas). ikid
- 6) J.D. Strachan, et al., Phys. Rev. Letter 58, 1004 (1987)
- 7) D. Wroblewski, et al., Rev. Sci. Instrum. 63 (1992) 5140
- 8) 河合 他, 「J T -60の高性能化改造に伴う J T -60N B I の磁場系の対応」, 日本原子力研究所レポート J A E R I -M 91-223 (1992)
- 9) SAP-V.2, "A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems", Univ. South Calif. (1972).
- 10) M. Kuriyama et al., Fusion Eng. Design, 9, 237 (1989).
- 11) 松岡 他, 「J T -60N B I におけるドリフト管内の再電離損失の概算法」, 日本原子力研究所レポート J A E R I -M 89-075 (1989)