

JAERI - M

90-086

JT-60NBIの接線入射化改造

1990年6月

松岡 守・秋野 昇・海老沢 昇・蛭田 和治
河合 視己人・小又 将夫・国枝 俊介・栗山 正明
水野 誠・大賀 徳道・大内 豊・菅原 忠義
堀池 寛・菊池 満・二宮 博正・谷 啓二

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

JT-60 NBIの接線入射化改造

日本原子力研究所那珂研究所 JT-60 試験部

松岡 守・秋野 昇・海老沢 昇・蛭田 和治
河合 視己人・小又 将夫・国枝 俊介・栗山 正明
水野 誠・大賀 徳道・大内 豊・菅原 忠義
堀池 寛・菊池 満⁺・二宮 博正⁺・谷 啓二⁺

(1990年5月11日受理)

JT-60の大電流化に伴い、準垂直入射である既設のNBIの接線化が検討されている。これはJT-60の大電流化において真空容器を大型にし、プラズマ断面積を大型にする一方で、既存のトロイダルコイルをそのまま用いることから、プラズマ周辺でのトロイダル磁場のリップルが大きく、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ると見積もられることによる。接線化の検討に当っては、まず初めに上下合わせて14ユニットからなる既設NBIのうち接線化するユニット数、及びそれら複数のユニットをどのようにまとめ接線入射させるかについていくつかの方法が比較検討された。既存のビームラインの内蔵物を最大限再利用し改造の合理化を図ったが、改造は必ずしも容易な作業とはならない。これは既設NBIが上下方向に±35.5°とかなり傾いたビーム軸に最適化された構造となっており、構造的に傾き角の変更が容易ではないビームライン機器が存在するためである。本報告では、JT-60 NBIの接線化の必要性、その方法の選定及び改造の詳細についての検討結果を示す。

Modification of JT-60 NBI System
from Quasi-Perpendicular to Tangential Injection

Mamoru MATSUOKA, Noboru AKINO, Noboru EBISAWA, Kazuharu HIRUTA
Mikito KAWAI, Masao KOMATA, Shunsuke KUNIEDA, Masaaki KURIYAMA
Makoto MIZUNO, Tokumichi OHGA, Yutaka OHUCHI, Tadayoshi SUGAWARA
Hiroshi HORIIKE, Mitsuru KIKUCHI⁺, Hiromasa NINOMIYA⁺ and Keiji TANI⁺

Department of JT-60 Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 11, 1990)

Modification of the JT-60 NBI system from quasi-perpendicular to tangential injection is studied. The motivation is that the ripple loss of fast ions would be substantial with the present quasi-perpendicular NBI in the upgraded JT-60 since in the upgrading modification the tokamak vacuum vessel is replaced to a larger bore one while toroidal coils are unchanged and hence toroidal field ripples at the periphery of plasmas increase. How many units of the present seven pairs of upper and lower units should be modified, and then how to combine them to inject beams through limited ports are discussed. The modification is optimized to utilize present beam line components as many as possible but is found to be still a complex task. This is because all present components are specialized to the present large slant angle of ± 35.5 degrees. In this report, studies are presented on the necessity and the method of the modification.

Keywords: Re-orientaion, JT-60, Modification, NBI, Upgrade

+ Department of Large Tokamak Research

目 次

1.はじめに	1
2.接線化の必要性	3
2.1 リップル損失の評価	3
2.2 リップル損失の核融合積に対する影響と必要な入射パワーの評価	5
2.3 接線化の意義	7
3.接線化の方式の選定	21
3.1 概略方針の決定	21
3.2 NBI接線化の各方式の比較検討	22
4.改造方法	43
4.1 ガスフロー, パワーフローの検討	43
4.2 漏洩磁場対策	45
4.2.1 漏洩磁場条件	46
4.2.2 対策	46
4.3 ビームラインの設計	49
4.3.1 ビームライン配置	49
4.3.2 主排気タンクとその基礎	49
4.3.3 ビームライン支持構造	50
4.3.4 真空排気設備	50
4.3.5 イオン源	52
4.3.6 イオン源磁気シールド, 中性化セル, 中性化セル磁気シール ド, 偏向磁石, ウォータージャケット, ビームダンプ, カロ リメータ	52
4.3.7 第一, 第二ビームリミタ, ドリフト管, NBIポート	52
4.3.8 金属シールゲート弁, 高速シャッタ	53
4.3.9 打消コイル	53
4.3.10 配管用ヤグラ及び配管, 配線	55
4.3.11 制御系	55
5.おわりに	108
謝 辞	110
文 献	111

Contents

1. Introduction	1
2. Necessity of Modification	3
2.1 Evaluation of Ripple Loss	3
2.2 Decrease in Fusion Product by Ripple Loss and Required Injection Power	5
2.3 Merits in Modification	7
3. Selection of Modification Style	21
3.1 Decision of Basic Concept of Modification	21
3.2 Comparison of Modification Styles	22
4. Modification Method	43
4.1 Gas Flow and Power Flow	43
4.2 Countermeasure against Stray Field from Tokamak	45
4.2.1 Stray Field from JT-60U Tokamak	46
4.2.2 Countermeasure against Stray Field from Tokamak	46
4.3 Design of Beam Lines	49
4.3.1 Geometry of Beam Lines	49
4.3.2 Main Tank and Its Channel Base	49
4.3.3 Support Structure for Beam Line Components	50
4.3.4 Pumping System	50
4.3.5 Ion Sources	52
4.3.6 Ion Source Shield, Neutralizers, Neutralizer Shield, Magnet, Water Jacket, Beam Dump, and Calorimeter	52
4.3.7 First and Second Limiters, Drift Duct, and NBI Port ...	52
4.3.8 Metal Seal Gate Valve, and Fast Shutter	53
4.3.9 Cancel Coils	53
4.3.10 Piping Tower, Piping, and Cabling	55
4.3.11 Controls	55
5. Concluding Remarks	108
Acknowledgements	110
References	111

1. はじめに

1985年に稼働を開始したJT-60は5年に亘る実験を経て現在改造中であり、改造後はJT-60Uとして実験が再開される。この改造はプラズマ電流を増やし、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意図したもので、真空容器の大口径化と放射線遮蔽の強化が主な改造点である。¹⁾これに伴いボロイダルコイルも改造される一方でトロイダルコイルは既存のものがそのまま使用される。従って相対的にプラズマの周辺がトロイダルコイルの内周に近づくことになるため、プラズマ周辺でのトロイダル磁場のリップルが大きくなることになる。既設のJT-60中性粒子入射装置^{2,3)}(以下NBIと言う)はプラズマの磁気軸に対し準垂直に中性ビームを入射するものであるが、このままでは入射された中性ビームが電離してできる高速イオンが、プラズマを十分加熱する前にこのリップルに捕捉され、ドリフトすることにより失われてしまうと予見される。そこでこのリップル損失量をモンテカルロ法を用いた計算機シミュレーションにより見積もったところ相当量のリップル損失が見込まれることが明らかとなった。このことから、既設NBIをリップル損失のほとんどない接線入射に改造することの必要性が出てきた。

JT-60は外側に磁気リミッタコイルがあったことから、NBIはこれを避けて上下各7ユニット、合わせて14ユニットから上下方向に±35.5°の角度でビームを入射する構造になっている。ビームラインの各機器はこの大きく傾いたビーム軸に合うよう最適化された構造となっている。従って、このビーム軸をトカマクの赤道面付近にもってきてほぼ水平にし、接線入射化するのは容易な作業ではない。JT-60 NBIは真空容器の高さが上下ユニット合わせて14.2mにもなる大型構造物であることも改造の容易ではない大きな理由の一つである。このようなビームラインの変更の過去の例としてはDIII-D、ATF、TFTR用のNBIの例がある。DIII-D NBIの改造⁴⁾は、本体トカマクがダブルレット断面のD-I-IIから大型D断面のD-I-I-Dに改造されたことに伴うもので、主な改造点は高プロトン比、長パルスイオン源への変更、及び入射ポート形状変更に合わせるためにビームライン機器をビーム軸を中心回転させたことである。ATF NBIの改造⁵⁾はISX用NBIを流用するためのもので、磁気シールド、ビームリミタ、ATFへの接続部に関するものである。DIII-D NBIのビームライン機器の90度回転に関してはかなりの改造であった旨報告されている。しかし、DIII-D、ATFのNBIのいずれもビーム軸は水平のままであり、中、小型NBIの改造である。またTFTR NBIはバランス入射において最もプラズマの性能が向上するという実験結果⁶⁾を受けてCo入射3ユニット、Counter入射1ユニットであったものを1ユニットについて向きを変更してフルパワー時にバランス入射できるようにされた。これはビームラインの内蔵物はそのままで全体的に向きだけを変えたものである。このように大型のNBIでしかも上

下方向に斜め入射であったものを水平入射に変更することはこれまでに例のない改造である。

既設 N B I の接線化にあたり検討すべき項目としては以下のものがある。

まず第一に 14 ユニットの既設 N B I のうち何ユニットを接線化すべきか決めなければならない。このためにはリップル損失の影響を定量的に評価する必要がある。J T - 60 U でもさまざまな実験が予定されており、それに応じてリップル損失の影響についてもいくつかの考え方がある。J T - 60 U においてなるだけ大きな核融合積を得ることは当然ながら J T - 60 U の一つの大きな使命であることから、ここでは熱的な核融合積を評価関数としてリップル損失の影響を評価し、接線化に必要なユニット数を求めた。この検討結果を 2 章に示した。

次に必要なのは接線化の概略の方針を定めることである。接線化に当たっては、既設の何ユニットを一つの接線ビームラインにまとめるか、イオン源を大型のものに交換するか否か、電源を並列運転するか否か等、各種の方法が考えられる。そこでいくつかの代表的な方法について相互の利害得失を評価し、方法を決定した。この検討結果を 3 章に示した。

以上の検討の下に接線化の各部の細かい検討に入る前に、全体の設計に影響を与える次の 2 つの項目について方針を明らかにしておく必要がある。その一つはビームラインの排気に関するものである。J T - 60 U では重水素運転が予定されており、N B I の性能についても重水素ビームを基本として考えて良い。N B I においては重水素ビームの場合、水素ビームの場合に比して必要なガス流量が変わらないかむしろ低減できる方向であり、かつコンダクタンスが小さくなることから排気容量が小さくても良い可能性がある。排気容量が小さくてもよければクライオパネルの枚数を減らすことができ、ビームラインタンクのサイズを小さくできる。そこで接線化した場合のビームラインのガスフローについてあらかじめ考察した。その結果を 4 章第 1 節にまとめた。またビームラインの概略の形状に加えてガスフローが定まるビームラインにおけるパワーフローも求められるので、接線化した場合の予想されるパワーフローも同じ節に示した。もう一つの検討項目はトカマクからの漏洩磁場に対処する方法である。既設 N B I においては磁性材を用いた通常の受動的な磁気シールドとコイルを用いた能動的な磁気シールドを併用していた⁷⁾が、このうち能動的な磁気シールドに関しては接線 N B I でそのまま用いることはできない。これはビームラインの角度が変わることにより漏洩磁場との相対的な角度も変わってしまうことによる。その対処法として、J E T N B I で採用されたビームライン全体を磁性材で覆う方法⁸⁾も含めて磁場解析コードを用いた計算と磁性材モデルを用いた磁場測定とを組み合わせて検討した。その結果を 4 章第 2 節にまとめた。

以上の検討の上で各部の詳細設計を進めた。これら各部の設計については 4 章第 3 節に項目毎に示した。

2. 接線化の必要性

接線入射化を実施しない場合にはプラズマ配位によっては多大のリップル損失が見込まれ、プラズマの熱成分に対する核融合積 Q_{th} の大幅な低下を招くと予測される。そこでここではまず第1節で代表的なプラズマ配位と入射角の組み合わせについてリップル損失を見積もった。次いで第2節でその結果を元に比例則を用いて Q_{th} の低下を定量的に見積もり、接線化に必要な入射パワーを評価した。第3節には Q_{th} の向上も含めて接線化の意義をまとめた。

2.1 リップル損失の評価

第2.1-1図にJT-60の改造前後の断面形状を、第2.1-1表に代表的なダイバータ放電の場合の装置の主要なパラメータの比較を示す。プラズマの断面積を大きくかつ非円形にすることによりプラズマ電流を飛躍的に増すことができるようになる一方で、プラズマはトロイダル磁場のリップルの大きいトロイダルコイル外側内周にかなり近づくことになる。第2.1-2図にトロイダル磁場のリップル ($\equiv (B_{max} - B_{min}) / (B_{max} + B_{min})$) の空間分布を示す。改造前のJT-60ではプラズマ中のリップルが0.3%以下になるように設計されていたのに対し、JT-60Uでは2%以上にもなる。そこでモンテカルロ法による計算により、NBIで入射され生成された高速イオンのリップル損失量を見積もった。⁹⁾ 計算は以下の4種の入射角について行った。入射角の関係は第2.1-3図a), b)に示した。

準垂直I 第2.1-3図a)で $\phi_j = 15, 137$ 度とした場合。既設NBIのままとしたものに相当。

準垂直II 第2.1-3図a)で $\phi_j = 25$ 度とした場合。既設NBIのビームラインのままで可能なだけ入射角を傾けた場合に相当。

接線I 第2.1-3図b)で $R_{tanj} = 2.7$ mのビーム軸だけの場合。接線NBIの最終案にほぼ相当。但し最終案では $R_{tanj} = 2.679$ mとされた。ここに R_{tanj} はトーラス中心軸から赤道面に射影したビーム軸へ下ろした垂線の足の長さである。

接線II 第2.1-3図b)でビーム軸b)に沿って入射される場合。接線化の検討途中に出されたイオン源を横に並べる案の内、より垂直なビーム軸に相当。3章参照。

リップル損失はプラズマ断面形状やビームデポジション分布に大きく依存するので、断面形状は代表的なもの2種について行い、プラズマ密度についてもスキャンした。

計算結果を第2.1-2表にまとめた。準垂直Iの場合、プラズマ内での最大の

リップル磁場が2.5%以上にもなるような大断面のプラズマでは、リップル損失は40%にも及び得ることがわかる。但しこの表中のリップル損失は磁気井戸に捕捉されて失われる、いわゆるリップル損失と、バナナドリフトをして失われるものとの合計である。この表のデータセットについてリップル磁場とリップル損失との相関をみたのが第2.1-4図である。準垂直I(●)のデータをみると比例もしくは比例よりやや強い相関のあることがわかる。数値にすると磁場のリップルが1%のときリップル損失は10%、2%のとき同20%、3%のとき同40%強となっている。

ケースB～D、K～Mはそれぞれ他の条件をほぼ固定し中心密度を括弧内の3種の値($\times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)に変化させた場合のものである。密度が上昇するとともにリップル損失の大きいプラズマ周辺でのビームの吸収率が高くなるため、相関関係がその他の準垂直Iの相関関係よりも強くなっている。しかしながら密度を下げたとしても、磁場のリップルが2%の場合リップル損失を20%以下に抑えることはできないことがわかる。

密度分布はHモードを想定して $n_e = n_{e0} (1 - \rho^2)^{0.5}$ なる平坦な分布を通常用いたが、分布の効果を見るためケースEに限って $n_e = n_{e0} (1 - \rho^2)$ なるLモード相当の分布を用いて計算した。ケースEをケースBと比較すると、周辺の密度が低くなつて中心で吸収されるようになるため、リップル損失が約半分に減ることがわかる。したがつてLモード相当の密度分布でかつ全体に密度を下げた場合にはリップル損失を10%以下に抑えられる可能性がある。

次に同図で入射角を変えた場合の傾向を見てみる。入射角を少し傾けただけの準垂直IIの計算結果はケースNであるが、リップル損失の低減にはほとんど効かないことがわかる。この状況は入射角をさらに傾けた接線II(ケースP)もほぼ同様である。これらに対し接線Iまで入射角を傾けるとリップル損失が大きく低減できることがわかる(ケースO)。

以上をまとめると、仮にリップル損失を10%以下に抑えることを目標とした場合、既設の準垂直NB Iのままでも密度分布をLモード相当以上にピーキングさせかつ全体に密度を低くした場合に限っては目標値内にリップル損失を抑えることが可能と考えられる。しかしながらこれでは実験上制約が大き過ぎる。リップル磁場が2%を超えてしまうような大断面のプラズマでかつHモード相当の平坦なプラズマ密度分布に対してもリップル損失を10%以下にするには、接線Iに相当する接線化が必要なことがわかる。

参考として、第2.1-5図にケースBの条件で全てのNB Iが準垂直Iで入射された場合のリップル損失粒子による熱負荷分布の計算結果を示した。総入射パワーは40MWとした。a) 図はトロイダル方向に平均化した熱負荷分布で、横軸のポロイダル位置の番号は第2.1-2図の真空容器に付した番号に対応する。b) 図はポロイダル位置#137～139(位置番号はa) 図に対応)における熱負荷のトロイダル方向依存性をプロットしたものである。このようにトロイダル方向に平均化

した熱負荷は 230 W/cm^2 程度であるがトロイダル方向に一様ではないため局所的には 800 W/cm^2 になると見積もられる。この計算例はイオンのドリフト方向が×点と同方向の場合であるが、逆方向の場合には熱負荷の位置も赤道面についてほぼ上下対称な位置となる。

2. 2 リップル損失の核融合積に対する影響と必要な入射パワーの評価

[核融合積の評価の方法]

J T - 60 U における Q_{th} の評価は比例則 Goldston(Archen) 則¹⁰⁾、Shimomura-Odajima 則¹¹⁾ を用いて行われてきている。ここでは Goldston(Archen) 則と J E T の最近のデータから得られるやや楽観的な比例則¹²⁾ の 2 種を用いて評価してみる。 Q_{th} は次式で与えられる。

$$Q_{th} = \frac{P_{fusion}}{P_{ext}}$$

$$P_{fusion} = W_{DT} \int n_D n_T \langle \sigma v \rangle dV$$

P_{ext} : 外部加熱パワー

$W_{DT} = 17.6 \text{ MeV}$

$$\langle \sigma v \rangle = 9.131 \times 10^{-22} \exp \left[-0.5716 \left| \ln \frac{T_i(\text{keV})}{64.22} \right|^{2.137} \right] [\text{m}^3/\text{s}]$$

この式においてプラズマの分布が次式の形で与えられると仮定して Q_{th} を求める。

$$n_{e(r)} = (n_{e0} - n_{eb}) (1 - r/a^2)^{\alpha_e} + n_{eb}$$

$$T_{e(r)} = (T_{e0} - T_{eb}) (1 - r/a^2)^{\alpha_T} + T_{eb}$$

$$n_{i(r)} = f_{ion} n_{e(r)}$$

$$f_{ion} = \frac{Z_{imp} - Z_{eff}}{Z_{imp} - Z_i} \frac{1}{Z_i} \quad Z_{eff} : \text{空間的に一様}$$

N B I を入射してできる高速イオンビームのエネルギー密度は次式で与えられる。

$$w_{b(r)} = \frac{E_b}{2} \tau_s n_f \left[1 - \frac{1}{3x_b^2} \ln \frac{x_b^3 + 1}{(x_b + 1)^3} - \frac{2}{\sqrt{3}x_b^2} \left(\frac{\pi}{6} + \tan^{-1} \frac{2x_b - 1}{\sqrt{3}} \right) \right]$$

E_b : ビームエネルギー

τ_s : 高速イオンの減速時間

n_f : 高速イオンの粒子密度

$$x_b = \sqrt{(E_b/W_c)}$$

W_c : 電子加熱とイオン加熱が等しくなるビームエネルギー

またある Q_{th} を得るために必要となる中心イオン密度 $n_{i(0)}$ とグローバルな閉じ込め時間 $\tau_{E(a)}^G$ と中心イオン温度 $T_{i(0)}$ との積は $T_{i(0)}$ の関数として次式で与えられる。

$$n_{i(0)} \tau_{E(a)}^G T_{i(0)} = \frac{\frac{2}{3} T_{i(0)}^2 \times (1 + 1/f_{ion}) (1 - f_{fast})^{-1}}{(1 + \alpha_n + \alpha_T) (W_\alpha + W_{DT}/Q_{th}) \varepsilon_D (1 - \varepsilon_D) \int_0^1 \langle \sigma v \rangle [1 - (r/a)^2]^{2\alpha_s} d(r/a)^2}$$

$$f_{fast} = \frac{\int w_b dV}{W_{tot}}$$

w_b : 高速イオン蓄積エネルギーの割合

$$W_\alpha = 3.52 \text{ MeV}$$

$$\varepsilon_D = \frac{n_D}{n_i} = 1 - \frac{n_T}{n_i} = 1 - \varepsilon_T$$

NBI の入射パワーを与え、電子温度とイオン温度が等しいと仮定して各スケーリング則から温度を求め Q_{th} を求める。なお各スケーリング則は次に与えるとおりである。

i) Goldston(Archen) 則

$$\tau_E^G = \frac{1}{\sqrt{(1/\tau_E^{OH})^2 + (1/\tau_E^{aux})^2}}$$

$$\tau_E^{OH}(s) = 7.1 \times 10^{-22} \pi_e (\text{cm}^{-3}) R_p^{2.04} (\text{cm}) a_p^{1.04} (\text{cm}) q_{xy}^{0.5}$$

$$\tau_E^{aux}(s) = 6.4 \times 10^{-8} I_p (\text{A}) P_{abs}^{-0.5} (\text{MW}) R_p^{1.75} (\text{cm}) a_p^{-0.37} (\text{cm}) \kappa^{0.5} \times H$$

$$H = 2.0 : L モードに対する H モードの閉じ込め改善係数$$

与えられた加熱入力に対してビームの蓄積エネルギーを繰り返し計算で求め、温度を決める。

ii) J E T スケーリング則

J E T の最近のデータは H モード中の τ_E が τ_E^{OH} を上回り、OH補正のない $\tau_E^G = \tau_E^{aux}$ (Goldston) に一致するとしている。ここではこの経験則を J E T スケーリングと称することとする。この比例則を用いると相対的に低密度域で Q_{th} が大きくなる可能性がある。しかしながら、低密度域では不純物混入により燃料イオン成分が希釈されてしまう問題がある。ここでは JT-60U で Z_{eff} が次式で与えられるとして Q_{th} を求める。

$$Z_{\text{eff}} = 1.5 + \frac{4 \times 10^{19}}{\bar{n}_e (\text{m}^{-3})}$$

以下、リップル損失ありの計算が既設準垂直NBIに、リップル損失なしの計算が接線NBIに対応するものとして評価した。接線Iの場合でも第2. 1-2表に示されるように最大9%程度のリップル損失が見込まれるがここでは無視した。リップル損失の量 f_r は第2. 1-2表からフィットして求めた次式で与えた。

$f_r = 5.7 \times \bar{n}_e [\%, 10^{19} \text{m}^{-3}]$	標準ダイバータ配位の場合
$f_r = 2.7 \times \bar{n}_e [\%, 10^{19} \text{m}^{-3}]$	高非円形ダイバータ配位の場合

[結果]

標準ダイバータ配位及び高非円形ダイバータ配位に対する計算結果をそれぞれ第2. 2-1、2図に示す。標準ダイバータ配位ではいずれの比例則に従うとしても、リップル損失ありとすると、高密度側で大きく Q_{th} が下がってしまう。この状況は高非円形ダイバータ配位では軽減はされるが傾向は同様である。従って高 Q_{th} を狙う場合には Z_{eff} の高くなり易い低密度域で運転しなければならないという困難な状況を招くことになる。またリップル損失を定量的に厳密に押さえる計測法を開発しない限り標準ダイバータ配位と高非円形ダイバータ配位との閉じ込め比較を行うことも困難である。

次に JET スケーリング則において入射パワーを変化させた場合の標準ダイバータ配位、高非円形ダイバータ配位に対する Q_{th} の計算結果をそれぞれ第2. 2-3、4図に示す。いずれの配位でも、リップル損失がない場合は入射パワーが大きいほうが Q_{th} が大きくなるのに対し、リップル損失がある場合は低パワーのほうが Q_{th} が大きくなる。従ってリップル損失がある場合は NBI の高パワー入射の意義が薄れてしまう。第2. 2-4図に一緒に示してある Z_{eff} の予測値から推察されるように、リップル損失の少ない接線NBIを用いる場合も逆にあまりに低パワーであると、 Q_{th} がピークとなる密度が Z_{eff} の増大する密度域にかかってしまうため問題である。このように接線NBIで必要とされる入射パワーには上方にも下方にも制限のあることがわかる。以上の検討結果と JT-60UにおけるHモード遷移パワーが 10 MW程度と予想されていることと考え合わせると、10 MW余の入射パワーが得られるように接線化するのが妥当であると決論付けられる。

2. 3 接線化の意義

JT-60 の高性能化計画は、大電流化、定常化、重水素の導入により、現在の JT-60 と核融合次期装置との間の物理的、工学的ギャップを低減するとともに、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いる。2節に示した Q_{th} の評価結果を踏まえると、NBIの接線化計画は研究上以下のように意義付けられる。

1) Q_{th} 値の向上 :

可能な限り Q_{th} を向上させる立場に立つと、現状予測されているリップル損失に伴う Q_{th} 値の低下を接線化により防ぐことができる。その度合は接線 NBI のパワーを 10 MW とすると、接線 NBI の場合 Q_{th} は第 2, 2-3 図の上側の図より 0.75、準垂直 NBI の場合は同下側の図より 0.6 でその差は 0.15 となる。

2) 閉じ込めの配位依存性 :

標準ダイバータ配位と高非円形ダイバータ配位との閉じ込め特性の比較が密度に関係なく容易となる。現状のままでは特に標準ダイバータ配位で高密度運転時リップル損失の影響が大きい。

3) 準垂直／接線入射加熱特性比較 :

TFTR のスーパーショット⁶⁾ や ASDEX の Counter 入射¹³⁾ 時の閉じ込め改善モードの研究の可能性が接線化により出てくる。また部分的に接線化した場合は準垂直入射との比較により、リップル損失や入射角による閉じ込め特性の差を調べることができる。

4) 負イオン源を用いた NBI 使用時の角運動量バランス :

JT-60 の高性能化実験 (3) で計画されている Co 入射、0.5 MeV、10 MW の負イオン源を用いた NBI¹⁵⁾ を使用する際、接線化ユニットのうち、Counter 入射のものと組み合わせてトロイダル方向の角運動量バランスをとることにより、トロイダル回転の及ぼす閉じ込めへの影響を調べることができる。

なお接線化した場合の一つの問題点として、中性ビームがプラズマに入射されてからプラズマ中心に到達するためのバスが長くなるため、高密度プラズマの場合周辺加熱になってしまう可能性がある。これを評価するために第 2, 1-2 表中のケース B (準垂直 I) とケース 0 (接線 I) に対する高速イオンのバス分布とパワーデポジション分布を比較したのが第 2, 3-1 図である。このように中心密度が $9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と高くかつ H モード相当の平坦な分布であっても、接線入射の場合はプラズマ内部に入るにしたがってビーム軸が磁力線に対しより平行になり長いバスにわたって中心付近を通ることから、むしろ接線入射のほうが中心加熱になっている。この傾向は高非円形ダイバータ放電の場合プラズマ大半径が小さくなり R_{tanj} に近づくためより顕著になると考えられる。

第2.1-1表 代表的なダイバータ放電の場合の装置の主要なパラメータの比較

	J T - 6 0 (改造前)	J T - 6 0 U (改造後)
主半径	3.1m	3.4m
副半径(横/縦)	0.9m	1.1m/1.4m
プラズマ電流	2.7MA	6MA
プラズマ体積	50m ³	100m ³

第2.1-2表 リップル損失計算結果

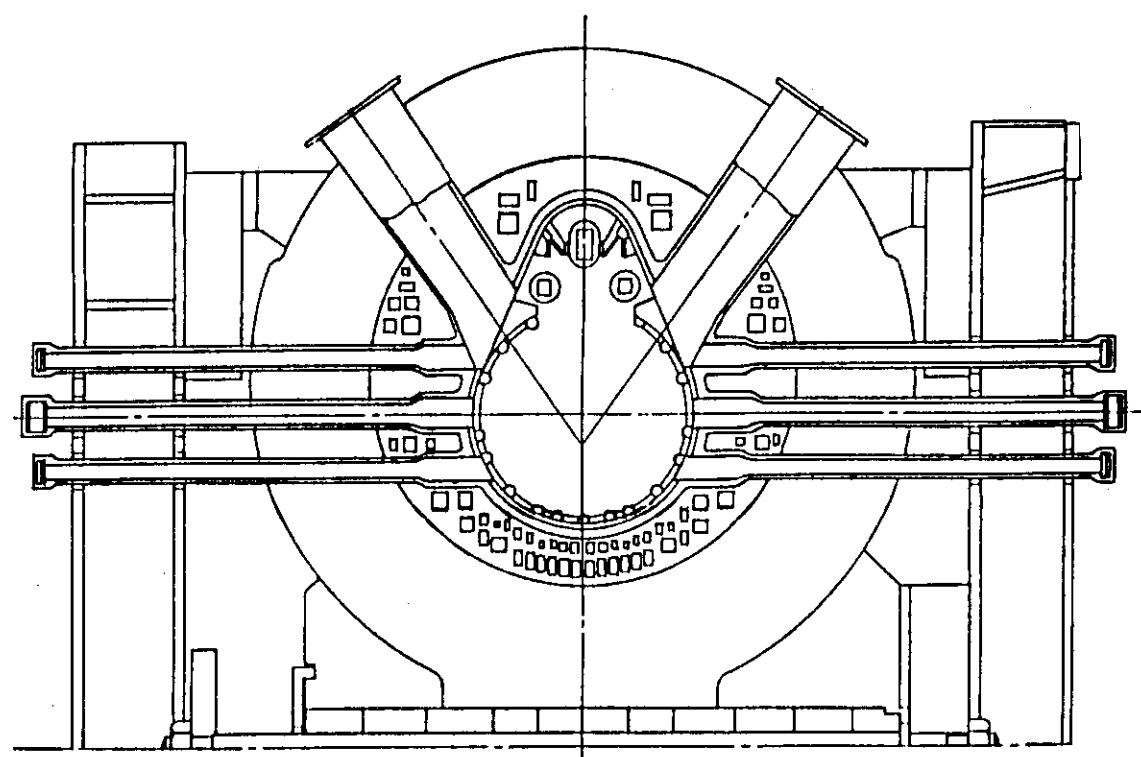
ケース	入射角	中心密度	中心温度	実効電荷	ビーム エネルギー (keV)	プラズマ 電流 (MA)	平衡配位 (L/D) ¹⁾	主半径 (m)	副半径 (m)	非円形度 (%)	リップル 磁场 (%)	リップル 損失 (%)
A	準垂直 I	9	10	2	120	7	L	3.35	1.09	1.4	3.0	40.7
B	準垂直 I	9	10	2	120	6	D	3.36	1.00	1.5	2.26	34.5
C	準垂直 I	7	10	2	120	6	D	3.36	1.00	1.5	2.18	27.3
D	準垂直 I	5	10	2	120	6	D	3.36	1.00	1.5	2.1	21.1
E	準垂直 I	9 ²⁾	10	2	120	6	D	3.36	1.00	1.5	2.2	18.5
F	準垂直 I	9	10	2	100	6	D	3.36	1.00	1.46	2.5	40.3
G ³⁾	準垂直 I	9	10	2	100	6	D	3.36	1.00	1.46	2.5	40.8
H	準垂直 I	9	10	2	100	6	D	3.26	1.00	1.55	1.76	30.8
I	準垂直 I	9	10	2	120	5.5	D	3.25	0.93	1.53	1.0	10.6
J	準垂直 I	9	10	2	120	5	D	3.25	0.9	1.64	0.75	7.1
K	準垂直 I	9	10	2	120	6	高非円形 D ⁴⁾	3.22	0.84	1.76	1.6	18.8
L	準垂直 I	7	10	2	120	6	高非円形 D	3.22	0.84	1.76	1.4	15.8
M	準垂直 I	5	10	2	120	6	高非円形 D	3.22	0.84	1.76	1.3	8.7
N	準垂直 II	9	10	2	120	6	D	3.36	1.0	1.5	2.26	31.1
O	接線 I	9	10	2	120	6	D	3.36	1.0	1.5	2.26	8.9
P	接線 II	9	10	2	120	6	D	3.36	1.0	1.5	2.3	27.2

1) L : リミター、D : ダイバータ

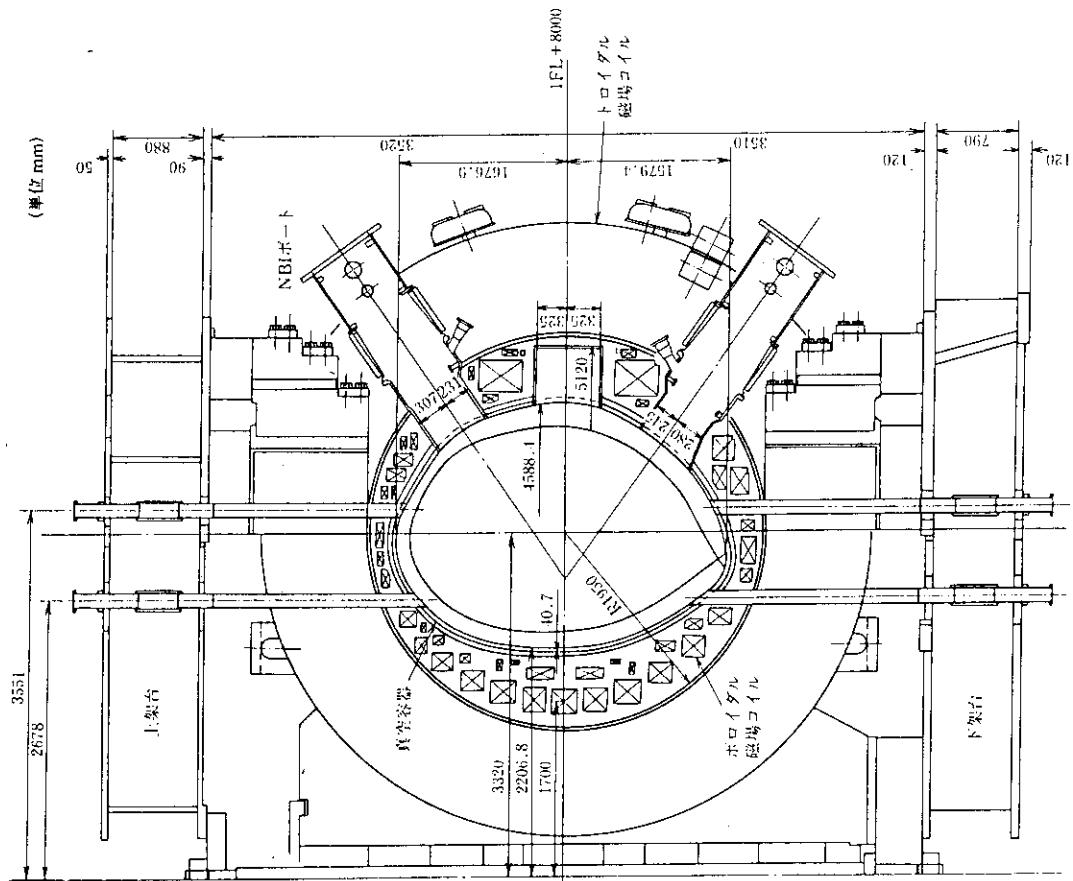
2) ケース E のみ $n_e = n_{e0} (1 - \rho^2)^{0.5}$ 。 n_e : 密度、 n_{e0} : 中心密度、 ρ : トロイダルフラックス関数。温度分布は全て $T_e = T_{e0} (1 - \rho^2)$ の形。

3) ケース G のみ イオンドリフト方向が X 点と逆方向。

4) 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ダイバータ放電。ビームの成分比 ($D(E)/D(E/2)/D(E/3)$) は、ビームエネルギーが 120 keV のとき 85:9:6、100 keV のとき 87:8:5とした。

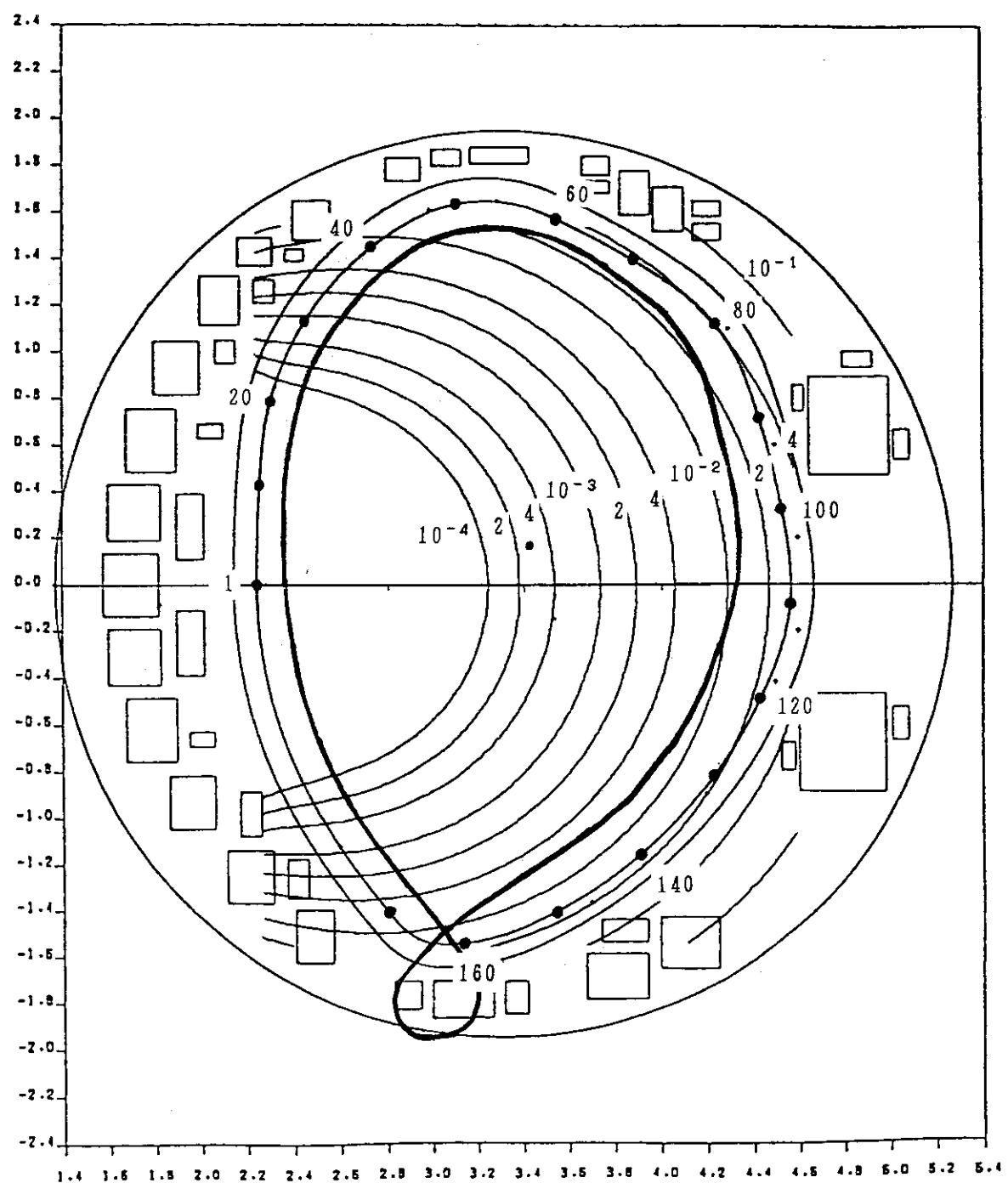


(a) 改造前。

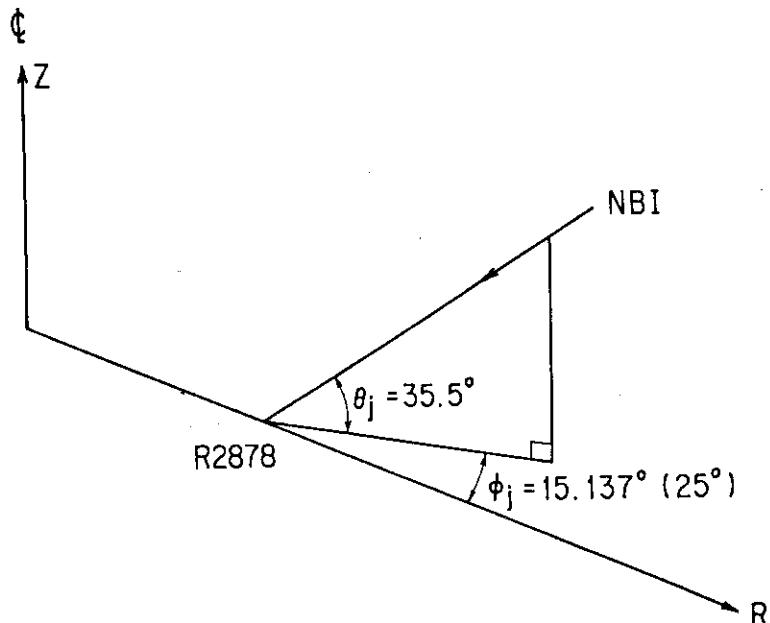


(b) 改造後。

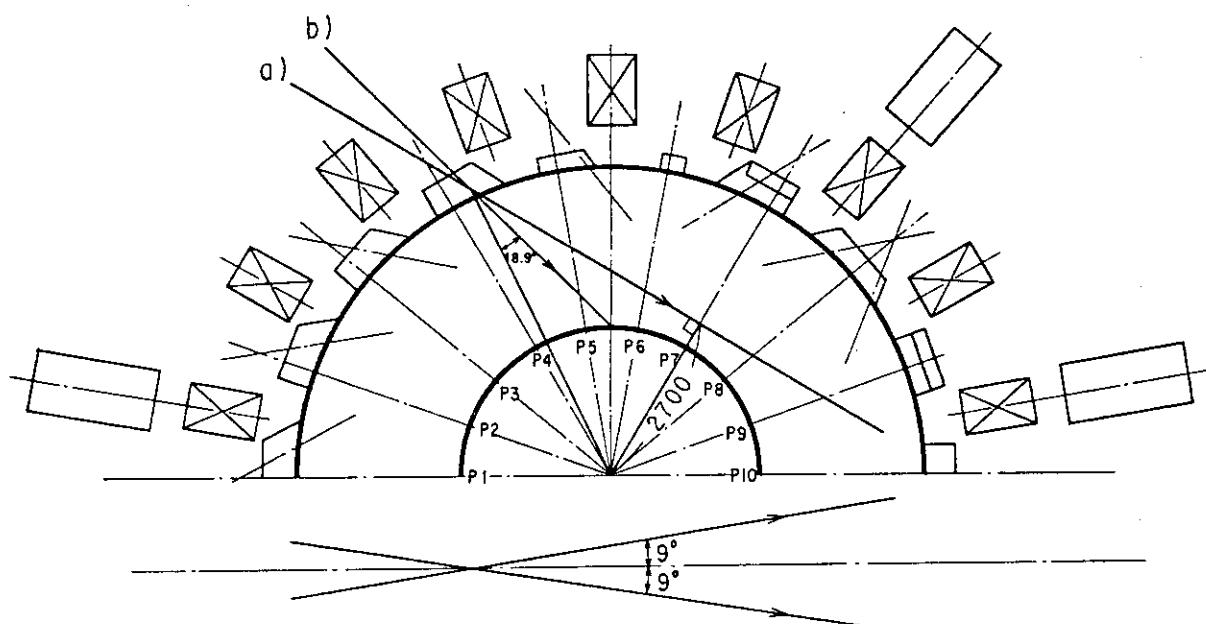
第2.1-1図 JT-60の改造前後の断面形状。



第 2.1-2 図 トロイダル磁場のリップルの空間分布。

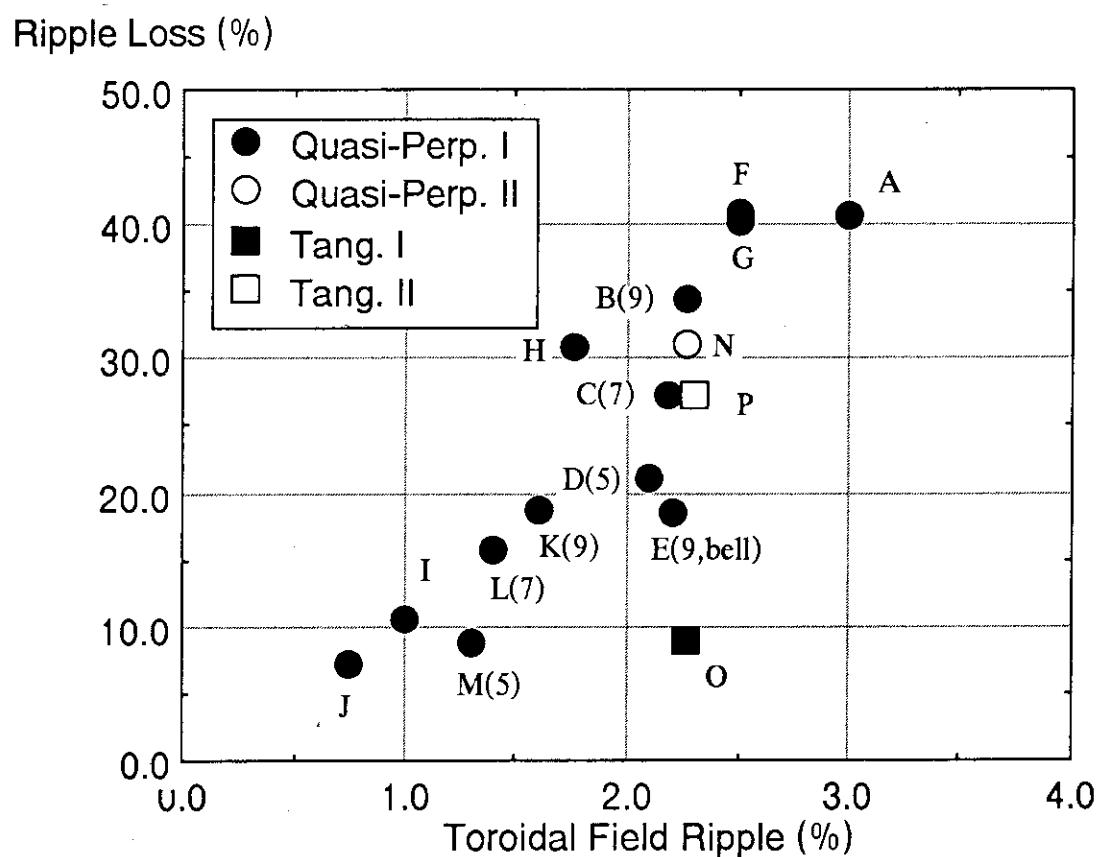


(a) 準垂直 I, 準垂直 II の場合。準垂直 I は $\phi_j = 15.137$ 度とする場合で既設 NBI のままでするのに対応する。準垂直 II は既設ビームラインのままで可能なだけ入射方向を接線化した場合に対応するもので、 ϕ_j だけを 25 度に変更したものである。

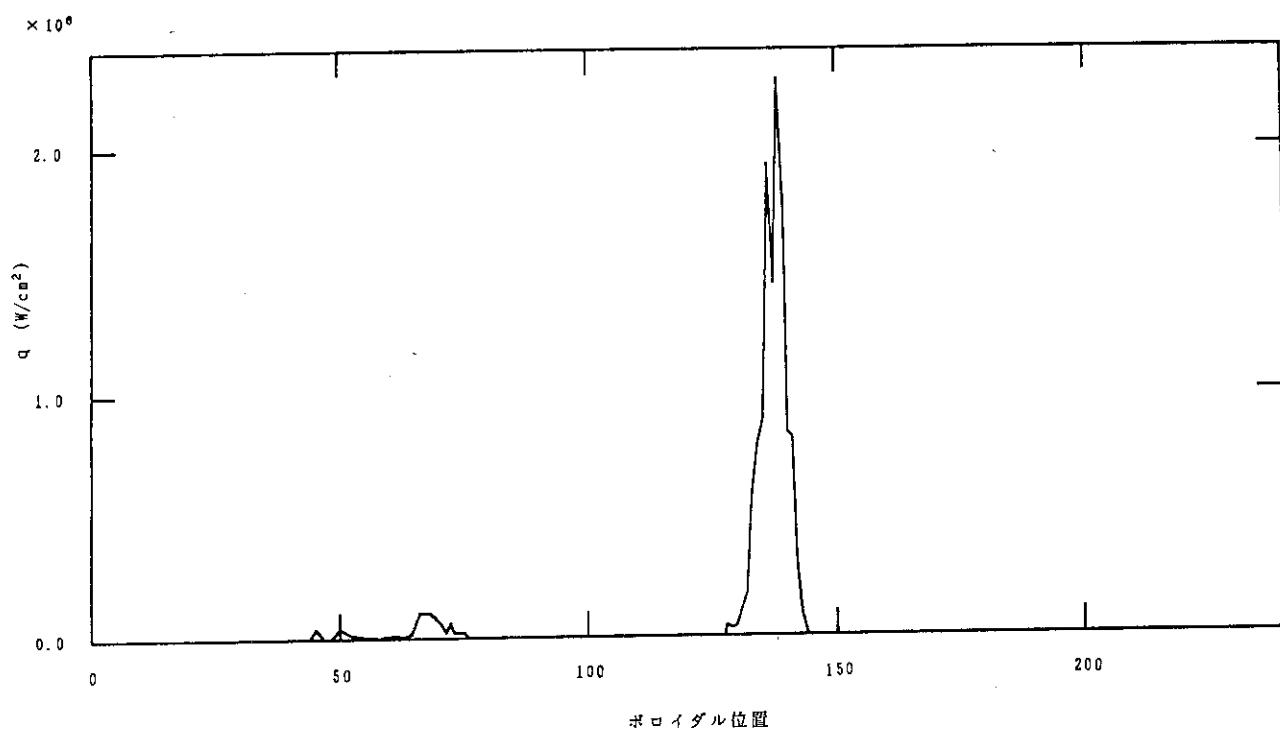


(b) 接線 I, 接線 II の場合。接線 I は $R_{\tan j} = 2.7$ m のビーム軸に沿って入射する場合で、接線化の最終案にはほぼ相当するものである。接線 II はビーム軸 b) に沿って入射される場合で、接線化の検討途中に出されたイオン源を横に並べる案の内、より垂直なビーム軸に相当するものである。

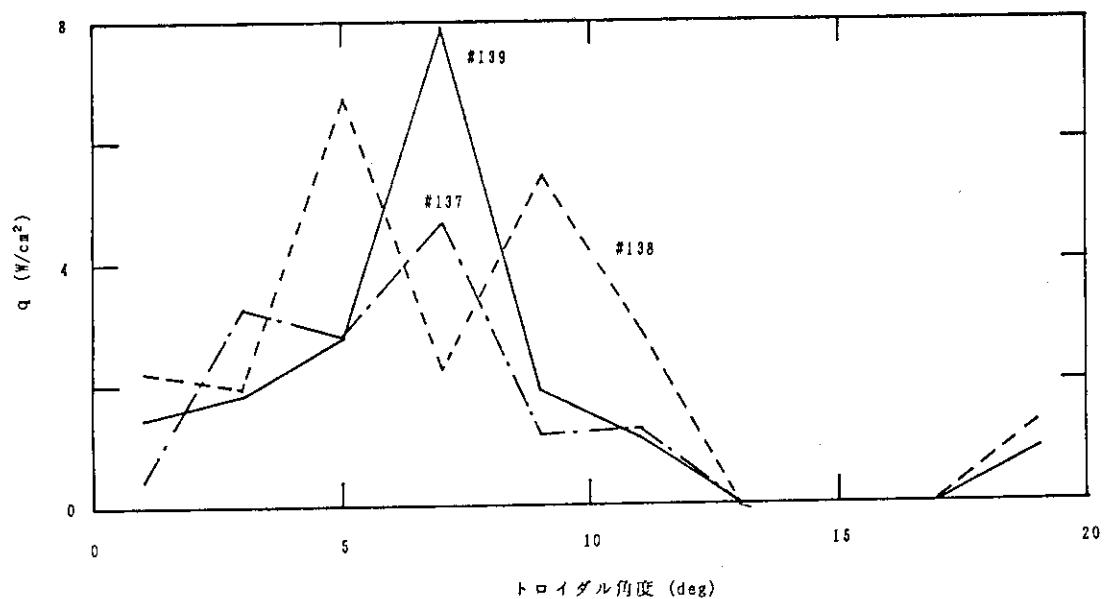
第 2.1-3 図 JT-60 U における NBI の入射方向。



第 2.1-4 図 リップル磁場とリップル損失との相関。アルファベットは第 2.1-2 表のケースに対応している。

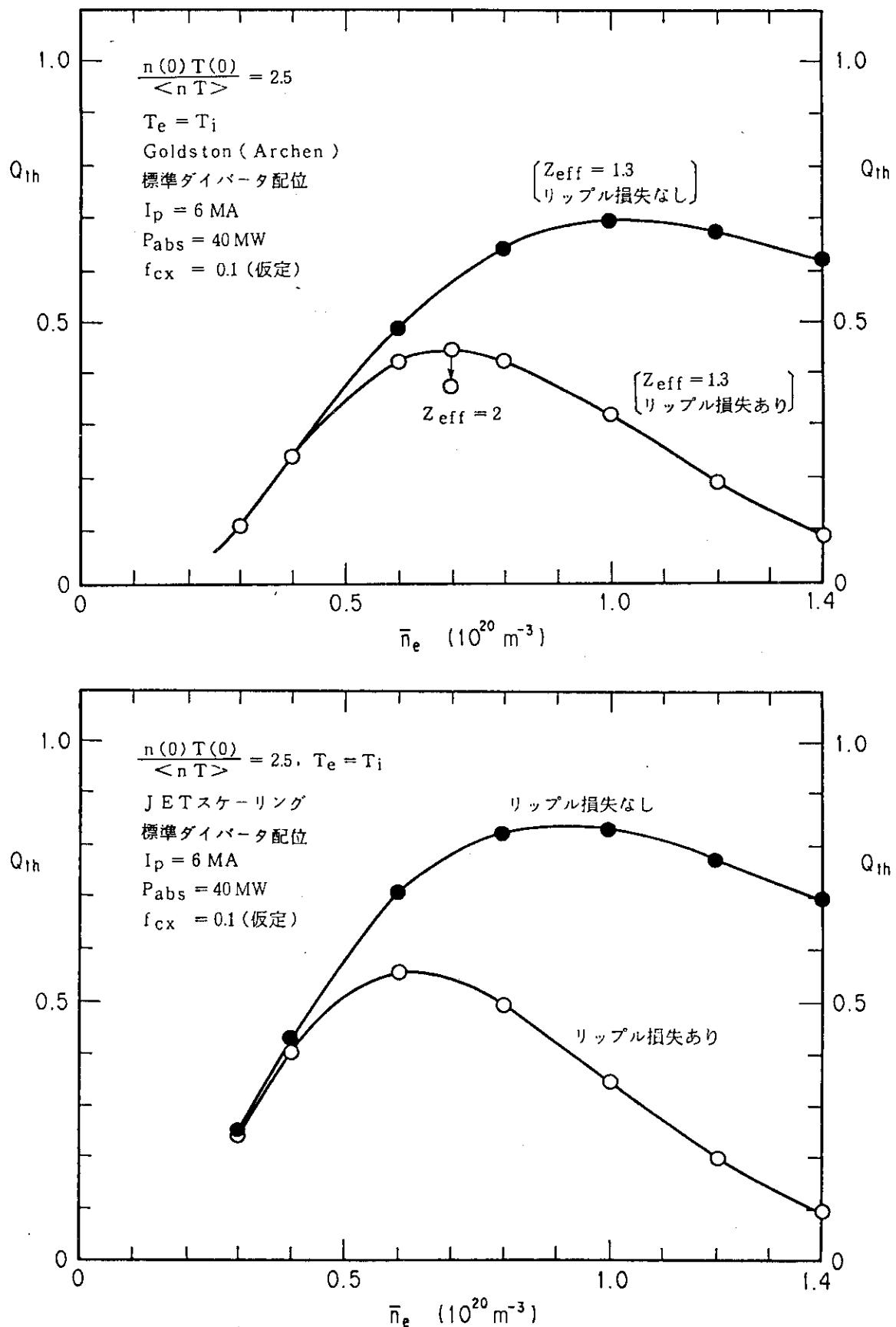


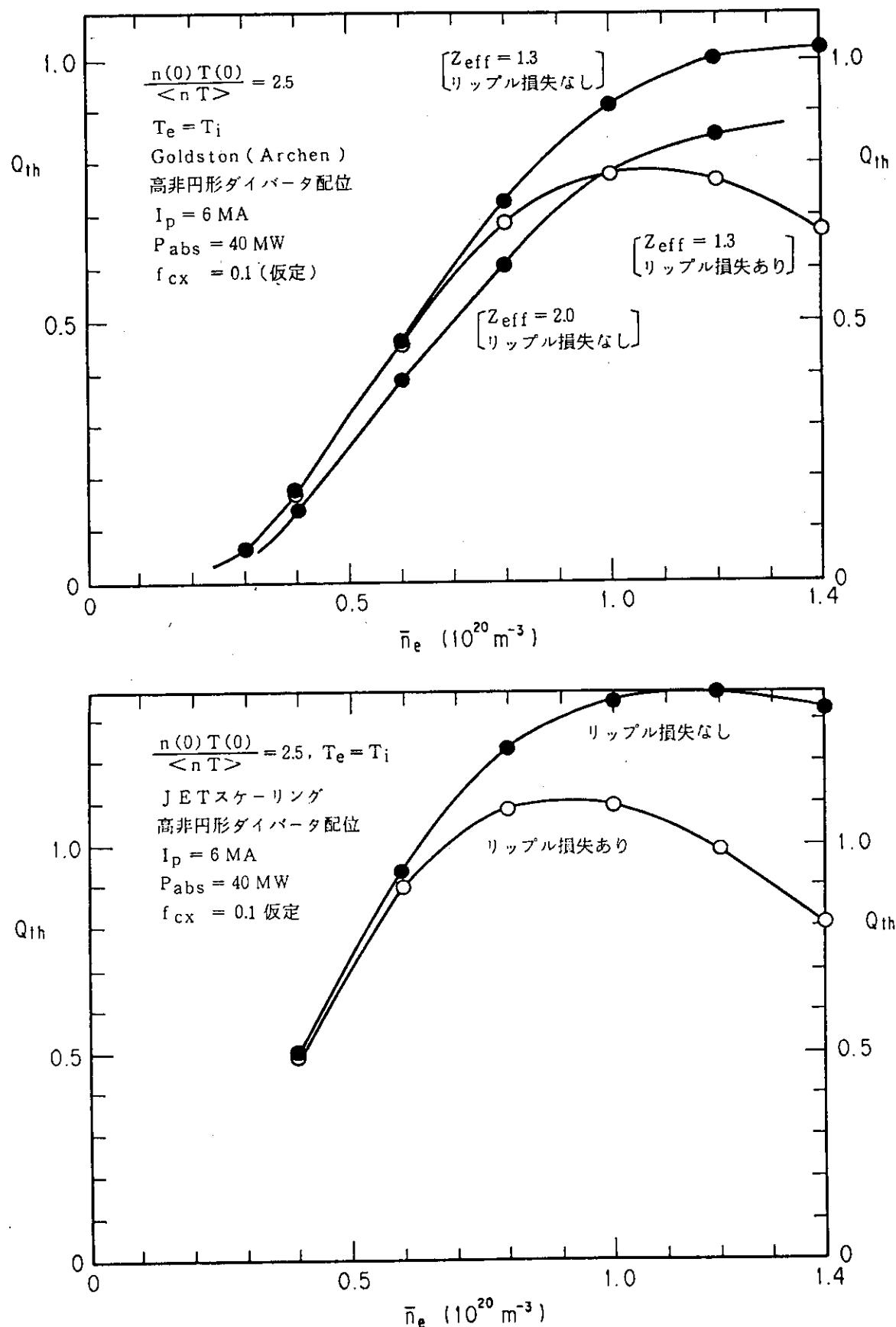
トロイダル方向に平均化した熱負荷分布。ポロイダル位置の番号は
第 2.1-2 図の真空容器に付した番号に対応。

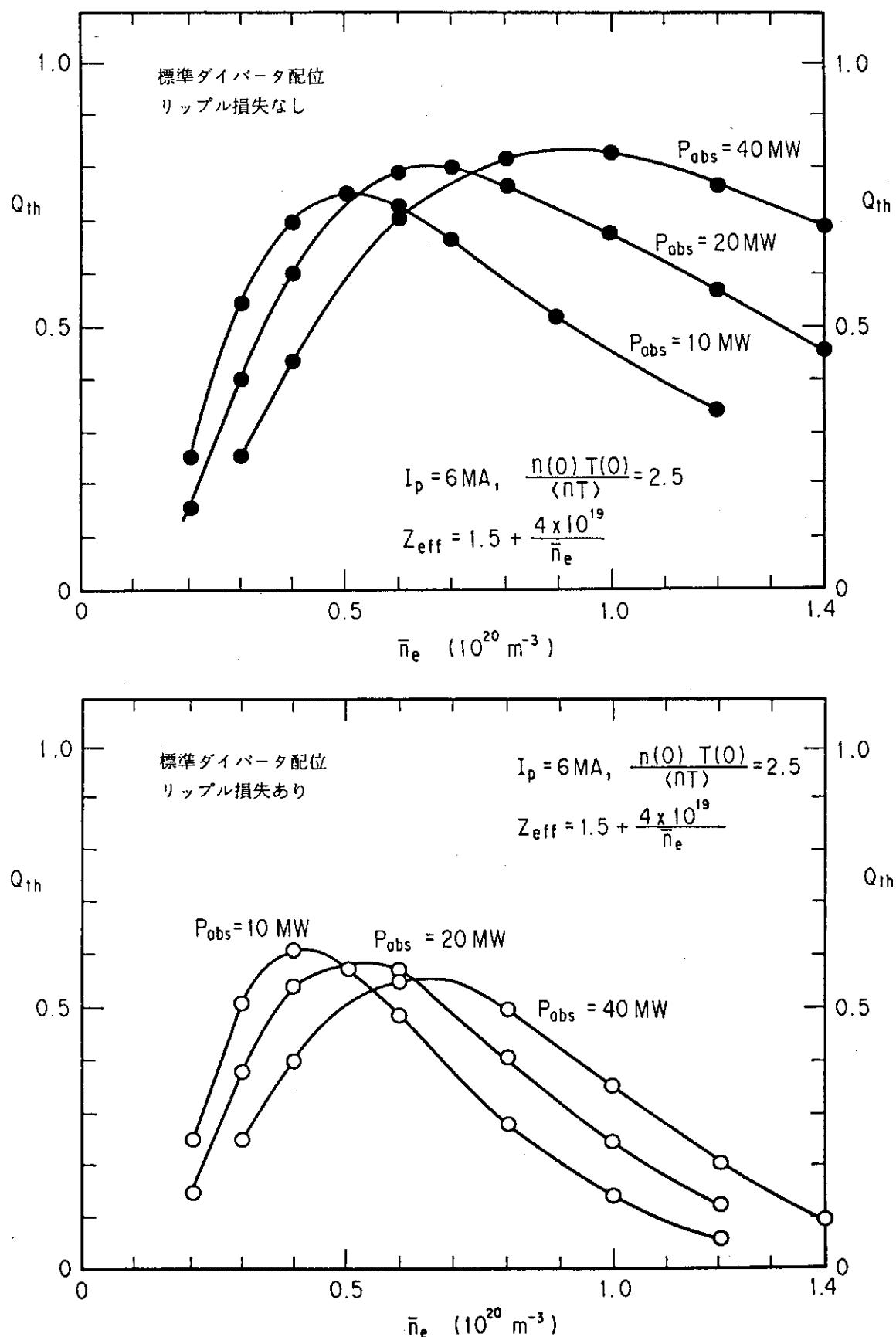


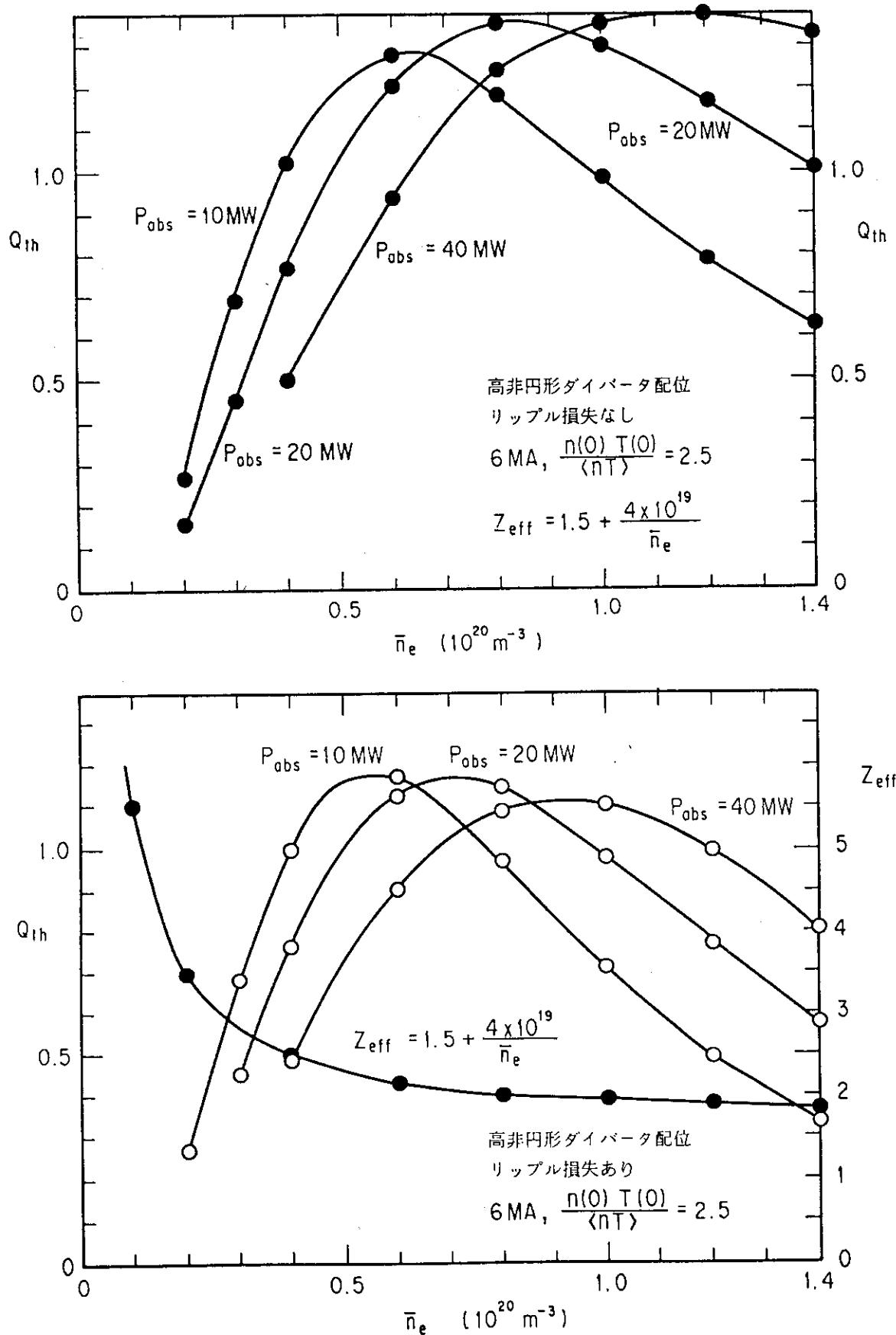
ポロイダル位置 #137 ~ 139 における熱負荷のトロイダル方向依存性。

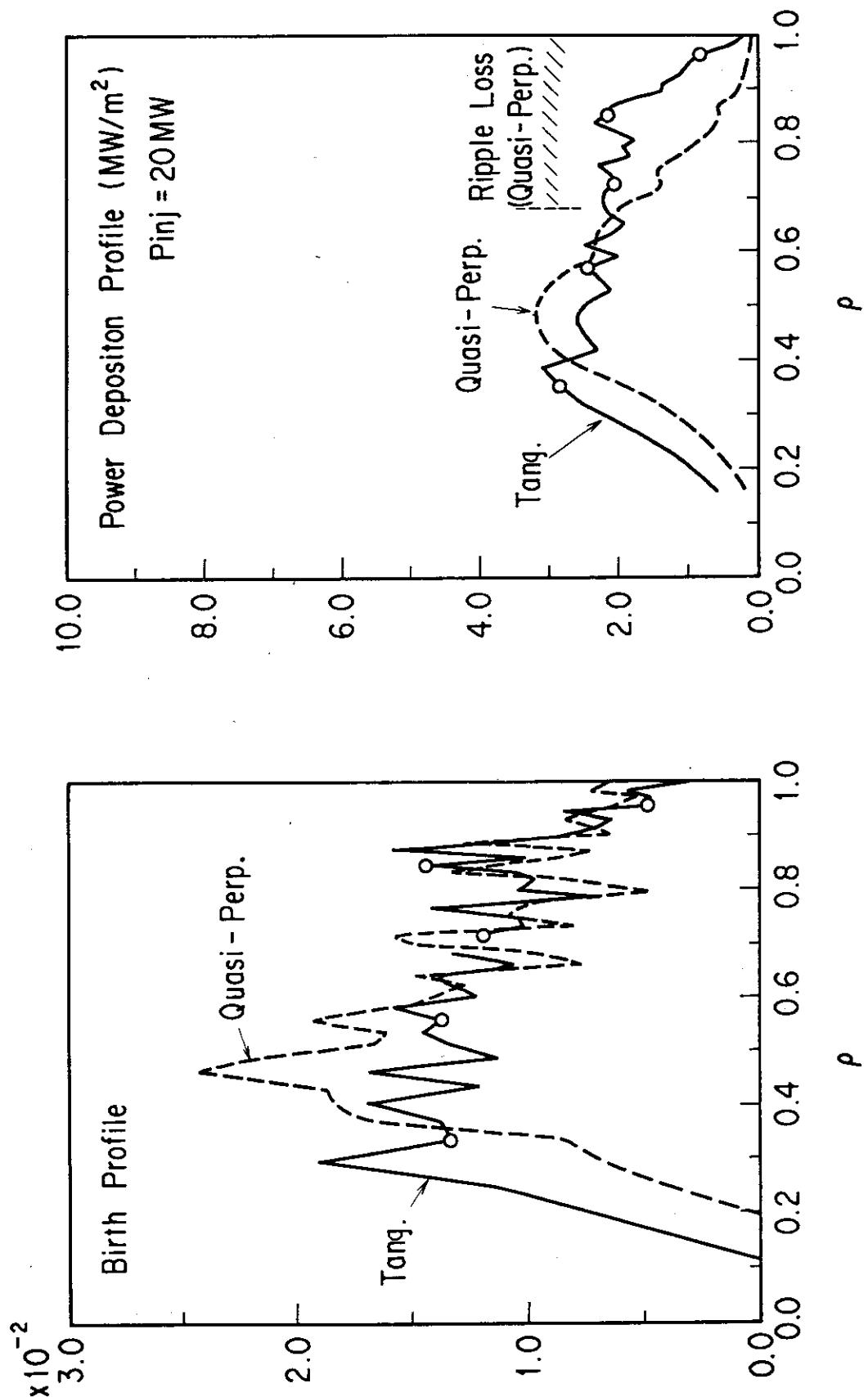
第 2.1-5 図 ケース B におけるリップル損失粒子による熱負荷分布。

第 2.2-1 図 標準ダイバータ配位に対する Q_{th} の計算結果。

第2.2-2図 高非円形ダイバータ配位に対する Q_{th} の計算結果。

第 2.2-3 図 標準ダイバータ配位において入射パワーを変化させた場合の Q_{th} の計算結果。

第 2.2-4 図 高非円形ダイバータ配位において入射パワーを変化させた場合の Q_{th} の計算結果。



第2.3-1図 準垂直 I と接線 I の場合の高速イオンのバース分布とパワーデポジション分布の比較。点線が準垂直 I, 実線及び白丸が接線 I の場合である。計算条件はそれぞれ、第2.1-2表中のケース B とケース O に対応している。なお、プロットが滑らかでないのは、モンテカルロ計算の粒子数が少ないとによる計算上のノイズである。

3. 接線化の方式の選定

3. 1 概略方針の決定

既設NBIの入射角は第2. 1-3図a)に示したとおりである。1章にも書いたようにプラズマ中心でビームがよく吸収されるような有効な接線入射とするには、単にこの図の ϕ_j を大きくするだけでなく、 θ_j を小さくする必要がある。既設NBIの概略の構造は第3. 1-1、2図に示した立面図と平面図に示すとおりである。最も単純には既設NBIのビームラインのままで第3. 1-1図の面内でビーム軸が赤道面近くなるまで回転させるか、あるいは既設NBIの縦長の円筒の真空容器を横倒しにして使うことが考えられるが、これらは以下の点で困難である。

- 1) 既設のクライオポンプは、真空容器が鉛直に立っていることを前提にして吊り下げ式となっている。また液体ヘリウムの流れそのものも上部に気液分離器を配した熱サイフォンを利用しているので横倒しできない。
- 2) 偏向磁石等のビームライン内蔵物は鉛直であることを前提に真空容器底面からの自立構造になっているので横倒しできない。
- 3) カロリメータは鉛直方向を前提としたスライド構造になっているので横倒しきれない。
- 4) 多数の水冷パイプからなるビームダンプは柔い構造であり、大きな据え付け角度変更に耐えられるか検討が必要。
- 5) 既設の真空容器は直径2. 54m、長さ5mあることから、一つの水平ポートに2ユニット以上取り付けることは空間的な制約上不可能である。

2) ~ 4)については比較的小規模の改造で対応可能と考えられるが、1)に対応するには大幅な改造を要する。このような大幅な改造は5)のデメリットを考え併せてと得策ではないと考えられる。以上の考察から、まず真空容器については既設の複数ユニットのビームライン内蔵機器をまとめて収納できるものを新設することとする。

次にビームライン内蔵機器のまとめ方について検討する。JT-60NBIに用いられている偏向磁石は下(上)ユニットの場合斜め下(上)方から入射されるイオンビームを反射し、斜め上(下)方のビームダンプに導く反射型である。このような偏向方法ではイオンビームが水平方向に大きく広がることから、これに合わせてビームダンプの形状を第3. 1-2図のようにお椀型とし、熱流速の低減を図っている。従って偏向磁石とビーム軸との相対角度を変更するとビームダンプの形状まで変更する必要が出てくる。これを避けるためには、イオン源、中性化セル、偏向磁石及びビームダンプを一体物としてビーム軸の変更を行う必要がある。これらの機器を一体

として考えると、既設NBIでは第3. 1-3図の点線に示すようにビームダンプがビーム軸から飛び出しており、ビーム軸をこのまま水平に持ってくると上下ユニットで空間的に干渉してしまう。そこで同図に示すように上下ユニット入れ替える形で配置することとした。このほかにこれらの機器をビーム軸について90度回転して水平に持ってくることも考えられるが、第3. 1-2図に示されるようにビームダンプの冷却パイプは横幅も広く寸法にして1. 93mもあることから、このようにしても上下ユニットのビーム軸を格別に近づけることはできない。またビームラインが左右非対称のものになり、かつカロリメータも水平化する必要が生ずることから、この方式はこれ以上検討しないこととした。

既設NBIの場合は上下ユニットは真空的に独立した構造になっているが、以上のように接線化する場合は共通の水平ポートから入射するために分離することは困難で真空的に共通となる。しかしながら以下には便宜上、従来どおり上下を区分して上ユニット、下ユニットと言うように呼称することとする。

3. 2 NBI接線化の各方式の比較検討

既設NBIは第3. 1-1図に示されるように1ユニットについて2イオン源が上下方向に並べて取り付けられている。1個のイオン源はビームの引き出し面が高さ27cm、幅12cmであるのに対し、絶縁セラミックがあるためイオン源全体の外形は高さ55cm、幅52cmもある。従って接線化する際にイオン源と中性化セルを大口径のものに改造することになると、既設NBIの1ユニット相当のビームラインに2ユニット分のイオン源を取り付けられる可能性がある。ビームライン機器の熱負荷はその分増大することになる。しかしながらJT-60Uでは中性化効率の良い重水素ビームを主体に考えて良いことからビームダンプの熱負荷にはある程度余裕が出てくる。また必要であれば一次冷却系に昇圧ポンプを追加してビームダンプの冷却パイプ内の流速を増し、限界熱流速を向上させることも考えられる。既設NBIのイオン源用電源は2台のイオン源に対し2式のアーク、フィラメント電源が用いられている一方、加速電源は1式でイオン源は並列接続されている。イオン源を大型化する場合はこれらのイオン源用電源も対応させて並列運転する必要がある。このようにどのサイズのイオン源を取り付けるかによって設計にいろんなバリエーションが生ずるが、具体的に検討した方式は以下の4種である。

1) 大型イオン源案 :

既設の1ユニット相当のビームラインに2ユニット相当の大型イオン源（既設イオン源4個相当）を1個取り付ける案。イオン源用電源は2ユニット相当の物をまとめて供給する。

2) 中型イオン源案 :

1 ユニット相当のビームラインに 1 ユニット相当の中型イオン源（同 2 個相当）を 2 個取り付ける案。イオン源用電源は 1 ユニット相当の物を 1 イオン源に供給する。従ってアーク、フィラメント電源はまとめることになる。

3) 既設イオン源案：

1 ユニット相当のビームラインに既設のイオン源を縦方向に 2 個、横方向に 2 個計 4 個並べる案。

4) 既設イオン源 2 台案：

1 ユニット相当のビームラインに既設のイオン源を縦方向に 2 個並べる案。即ちイオン源や中性化セルも既設のものをそのまま用いる。ビームラインあたりの入射パワーは 1) ~ 3) の案の半分である。

以上の案について概略のビームライン機器の配置を設計した。その結果を第 3. 2-1 ~ 4 図に示す。いずれも上下のビームラインを少しでも水平に近づけるためにビームライン機器を互いに少しずらしている（但し最終的な設計では上下対称とされた）。上下方向の入射角は大型イオン源案の場合だけが ±8 度で他は ±9 度である。大型イオン源案以外の場合は 1 ユニット毎に上下に必要な距離をおいてイオン源が並ぶので、赤道面から離れたイオン源の入射角が更に大きくなってしまう。特に中型イオン源案の場合は上下イオン源に制御の独立した加速電源を接続することを想定しており絶縁距離があけてあるため、既設イオン源案に比べて入射角が大きくなっている。一方既設イオン源案ではイオン源を水平方向にも並べているため、一方のビーム軸は接線というよりは準垂直に近いものとなってしまう。総じて言えることは、プラズマの物理的な側面からは案 1) 、 4) が最も良く、 2) ~ 3) の順に劣る。但し 4) はポート数の制約がある場合入射パワーが不足することになる恐れがある。一方改造は案 4) が最も容易で、 3) ~ 1) の順に難しくなる。各案それぞれ利害得失があるが、これを第 3. 2-1 表にまとめた。以下主な項目について表記載の順に補足説明する。

(真空容器)

真空容器は空間的な制約から既設 N B I と異なり、平面からなるトカマク側が先細りとなった大型ボックスとなる。一般に平面は大気圧に弱いのでこれに抗するためのリブ構造を設ける必要がある。特にビームライン内蔵機器の位置の基準となる底面とイオン源の取り付けられる側面の変位は最小限に収めねばならない。既設 N B I では上下ユニットが真空的に切り離されており、据え付けも別々に行われた。しかしながら接線 N B I では水平ポートが中央にあり、また側壁には既設 N B I と同じくクライオパネルが取り付けられることから、真空的に分離どころか、構造的にも分割が難しい。既設イオン源案の場合は縦方向のみならず幅も大きいことから工場からの輸送に支障をきたす恐れがある。

(イオン源)

イオン源については大型化する場合電極構造についてのR & Dが必要である。既設イオン源ではビームレットの収束を減速電極の穴のシフトだけに依っていた。したがって電極はすべて平行であるので電極位置の調整構造は比較的単純である。一方中、大型イオン源となると収束は穴のシフトだけでは困難で、電極を曲面にするか、複数の平面に分割する必要がある。この場合電極の穴合わせとギャップ調整のために新たな工夫が必要である。

中、大型イオン源案の場合ビームが上下方向に長くなるため、これに各機器も対応させる必要がある。特に既設のビームダンプは冷却水流量節約のために熱負荷の低い部分の冷却パイプに入っているオリフィスを取り除く必要がある。これは既設のビームダンプをほぼ完全に分解することを意味する。既設のビームダンプは加工度を維持した製法により強度を得ていたが、長期に亘る繰り返し熱応力により脆弱化が進んでいると考えられる。従ってこのような分解改造と取り付け角の変更に強度的に耐えられるかどうかは明らかではない。

(打消しコイル)

トカマクからの漏洩磁場を能動的に打ち消す打消しコイルはビームラインの角度が変わるために既設のままでは使用不能で新設する必要がある。既設の打消しコイルの設計にはかなりの時間を要したことから、当初は真空容器自体を軟鉄製とし磁気シールドすることが考えられたが、プラズマにおけるエラーフィールドが問題であることがわかったので、計算コードと磁場関係の1／10モデルを用いた測定との併用により新たな打消しコイルのR & Dを行い、ほぼ設計が完了している。これについては4.2節で詳説する。

(クライオポンプ)

クライオポンプは既設のパネルを接続変更して再利用するが、これらは液体ヘリウム製造設備に対する高圧ガス取締法の適用を受けており、同法に基づいて改造を行う必要がある。

(配管用ヤグラ)

既設の配管用ヤグラは接線のNBIのビームラインと空間的に干渉することから撤去し、新設する必要がある。配管用ヤグラには数多くの配管、配線と共に各現場盤が組み込まれており、新設はかなりの作業量となる。

(加速電源)

大型イオン源案の場合には既設の2式の加速電源を並列運転する必要があるが、これには以下に示すようにかなりの困難が伴う。

イオン源は加速電源から見ると定電流特性を持つ負荷である。このような負荷に安定に電力を供給できるように、加速電源は定電圧特性を有したものとなっている。一般に定電圧特性を有する電源を並列接続するのは困難である。それは相互にわずかな電圧アンバランスがあると一方から他方に電流が流れ込んでしまうことによる。これを防ぐためには抵抗やインダクタンスを負荷側に直列に挿入する等して電流のバランスをとる必要がある。既設NBIの加速電源の定格は高エネルギー化改造後は120kV、100Aとなるが、この電流バランスの必要分を考えて並列運転時の定格を120kV、150Aに低減して並列化の方式を検討した。並列接続する箇所についても、交流側で、DCフィルタの出力で、あるいは負荷端でとバリエーションが考えられたが、結局改造量の最も少ない負荷端での並列接続が妥当と結論付けられた。その改造案の一例を第3.2-5図に示す。出力に直列に入れられているインピーダンスZが電流バランスの為の要素で交流側の電流計測と直流側の電圧計測を基に出力のバランスを取る。NBIの加速電源は単に高電圧直流を供給するだけでなく、負荷であるイオン源内での放電破壊時、出力を $100\mu s$ 程度で高速遮断する機能が要求される。並列運転する場合にはこの高速遮断も連携させなければならず、GTOやRT-Aの制御も改造する必要がある。特にGTOの担う高速出力遮断は加速電源の心臓部とも言える機能であり、その開発には多大な時間と労力を要しているもので、このような重要な要素の制御に手を入れるのは技術的な危険を伴う。また電源を並列化するとサージの源である浮遊容量も倍になるので、サージブロックコアの増力等イオン源の損傷、機器の誤動作を防ぐ対策の強化も必要となる。

(アーク電源)

アーク電源やフィラメント電源の並列化も基本的には加速電源と同様であるが、電源容量が小さくまた電圧も低いため改造は加速電源に比べれば格段に容易である。

(制御盤、計算機)

大型イオン源案の場合は制御盤や計算機も大改造となる。これは電源の並列運転に伴うものである。特に既設NBIを部分的に残す場合は、運転のための計算機のソフト上の定数テーブルが既設NBI用と接線NBI用とで合わせて倍となるため、計算機の増設あるいは上位計算機への交換が必要となる。

以上のように各方式の利害得失を洗い出してみると、まず大型イオン源案はポートの利用効率が良く入射角もベストではあるが必要な改造の量が多過ぎて現実的でない。また既設イオン源案は改造後もその半分のビーム軸は既設の準垂直と同等で得策でない。このようにして中型イオン源案と既設イオン源2台案が候補として残された

が、結局リスクが少なく早期改造が可能かつ経済的な既設イオン源2台案が選択された。接線NBI用のポートとしては当初は全ユニットの改造を想定して4ポートが用意されていたが、本体真空容器の設計製作が進み、接線化の方式決定時は2ポートに削減されていた。それでも 40 MW^* $\times 4$ ユニット／14ユニット～11MWの入射パワーが期待でき、これは2.2節で検討した必要な入射パワーを満足している。十分とは言えないが現実的な選択として次章に示すように既設イオン源2台案について詳細な検討が進められた。

* JT-60Uでは重水素運転が予定されており、これに併せNBIも重水素ビーム運転もできるように偏向磁石の増力等の改造が並行して進められている。重水素ビームは軽水素ビームに比べ同エネルギーではプラズマへの侵入距離が短くなるため、これまでビームエネルギーが100keVまで可能であったものを120keVまで可能とする高エネルギー化の改造も行われている。重水素化により中性化効率が良くなるとのこの高エネルギー化改造により、全14ユニットの総入射パワーはこれまでの実績値26MWに対し、40MW程度まで増力できると予想されている。¹⁶⁾

第3.2-1表 接線化方式の比較（その1）

項目	大型イオン源案	中型イオン源案	既設イオン源案	既設イオノン源2台案
入射角	良	上下方向に拡がり有り	左右に拡がり有り	良
ユニット集約度	4ユニット	同左	同左	2ユニット
(1水平ポート当たり)				
真空容器	大型新設 強度設計要	同左	大型新設 強度設計要	大型新設 強度設計要
イオン源	120cm×12cm 加速部の設計要 R & D要(～1年)	60cm×12cm(2台) 同左	27cm×12cm(4台) 既設	27cm×12cm(2台) 同左
角度調整機構	内径127cm×19cm 設計に時間要	内径67cm×19cm×2台 同左	既設 内径67cm×19cm×2台 現状のスケールアップ 大型を新設 製作のR & D要	同左
イオン源 ゲートバルブ	内径127cm×19cm 設計に時間要 大型を新設	同左	既設 現状のスケールアップ 大型を新設 製作のR & D要	同左
接続フランジ	新設(構造は現状と 同様)	同左	既設	同左
イオン源 磁気シールド				

第3.2-1表 接線化方式の比較（その2）

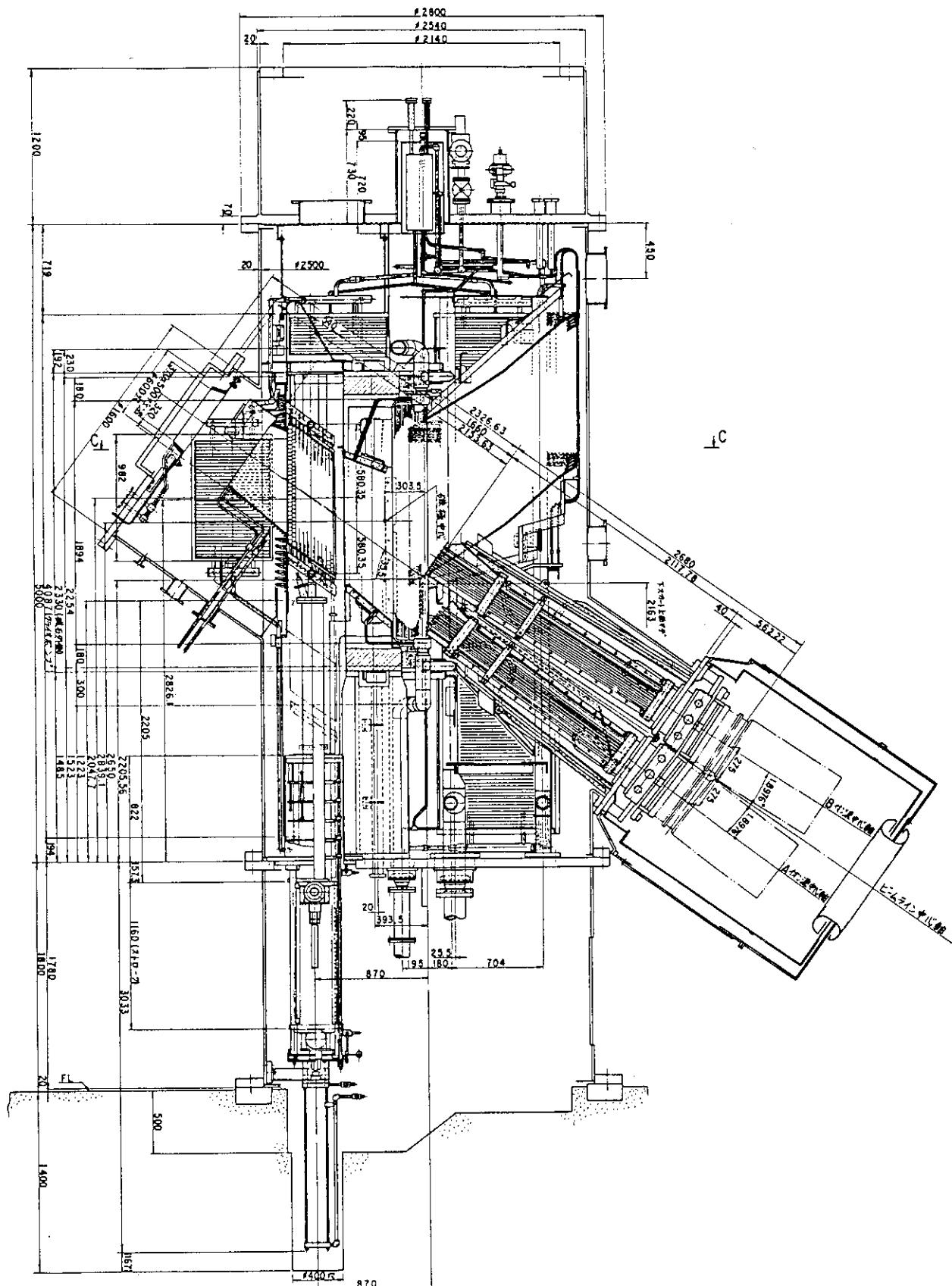
項目	大型イオン源案	中型イオン源案	既設イオン源案	既設イオン源2台案
中性化セル	新設（大型化）	同左	既設	同左
中性化セル	新設（大型化）	同左	既設	同左
磁気シールド	改造（プロック追加、コイル新設）	同左	既設	同左
偏向磁石	改造要？	改造（大型化）	既設 サポート構造変更	同左
ウォーター	ジャケット	部分改造	既設 配管変更	同左
ビームダンプ	（オリフィス除去、上下受熱板追加）	同左	既設	同左
イオンビーム	熱疲労の問題	再計算要	不要	同左
軌道計算	打消しコイル	新設 (R & Dはぼぼ済)	同左	同左
カロリメータ	部分改造	同左	既設	同左
	（上下冷却板追加） (R & Dはぼぼ済)			

第3.2-1表 接線化方式の比較（その3）

項目	大型イオン源案	中型イオン源案	既設イオン源案	既設イオン源2台案
クライオポンプ	配管改造	同左	同左	同左
仕切板	ガラスモデル試験済 新設	同左 大型新設	同左 熱、応力設計要 大型新設	同左 形状変更 部分改造
第一、第二 ビームリミッタ 高速シャッタ	高圧ガス申請変更要 R & D 要	65cm×160cm R & D 要	65cm×170cm 大型新設	65cm×140cm 大型新設
ゲート弁	大型新設	65cm×170cm	120cm×140cm	65cm×140cm 同左
真空容器周り	全面変更	同左	同左	同左
配管、配線	同左	同左	同左	同左
配管用ヤグラ	新設	同左	同左	同左
床貫通孔の干涉 (Tコイルフィーダー線)	有り	同左	同左	ソールプレートの 設計要 埋め込み法検討の
基礎	アンカーボルトの 埋め込み法検討の	同左	同左	

第3.2-1表 接線化方式の比較（その4）

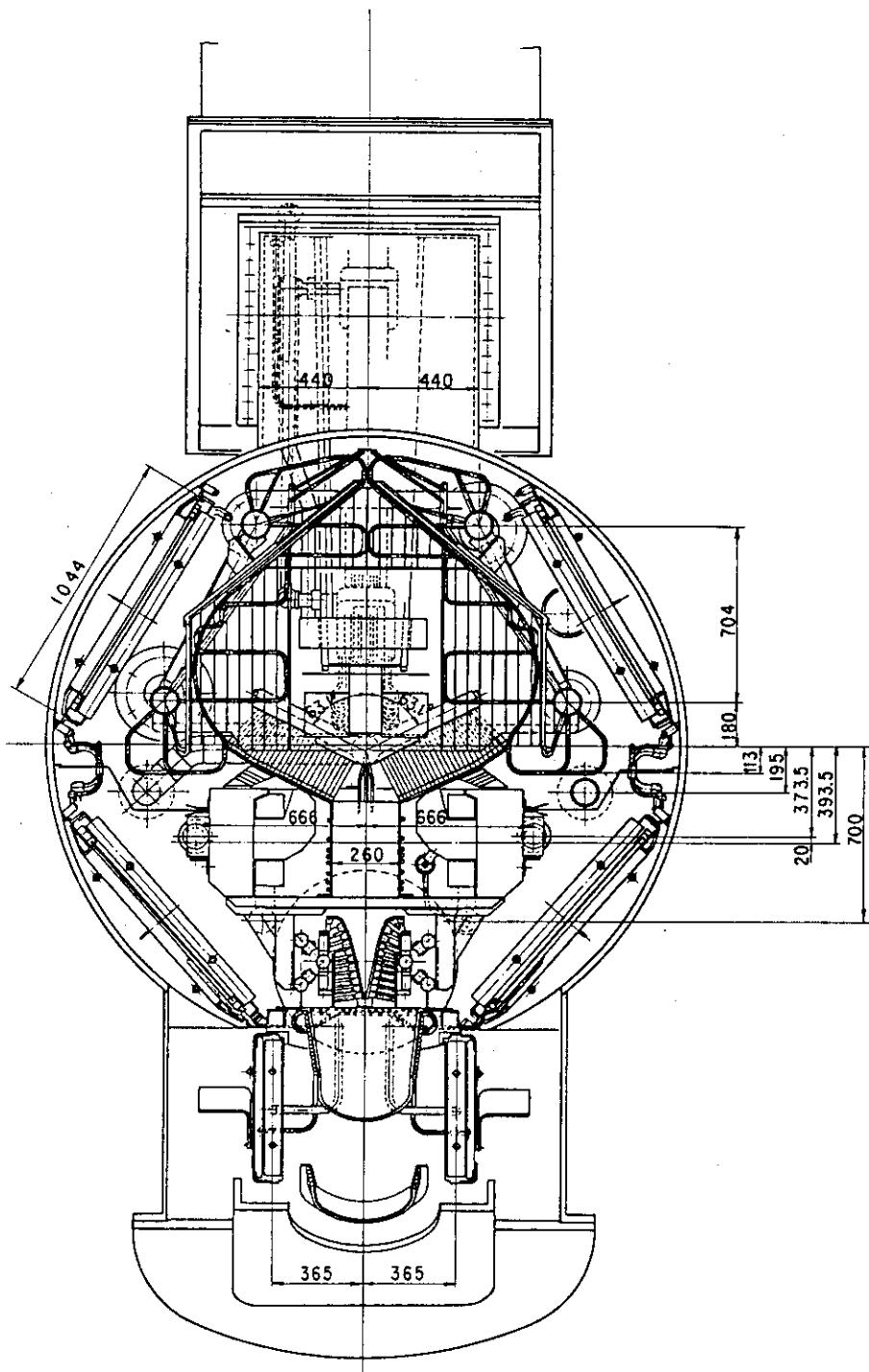
項目	大型イオン源案	中型イオン源案	既設イオン源案	既設イオン源2台案
加速電源	2式並列運転 大改造 リスク大	現状どおり	同左	同左
アーク電源	4式並列運転 大改造	2台並列運転 中規模改造成	現状どおり	同左
保護の見直し				
フィラメント電源	4式並列運転 保護の見直し 引き回し変更	2台並列運転 同左	現状どおり	同左
S F 6 ガスダクト				
サーチプロッカー	増設（容量倍増）	既設	同左	同左
制御盤	大改造	改造	既設	同左
計算機	大改造	改造	既設	同左
		既設 N B I と同時運転の場合 メモリ倍必要		



NBI 内部構造図(下ユニット)

第3.1-1図 既設 JT-60 NBI の下ユニットの側面図。

イオン源側

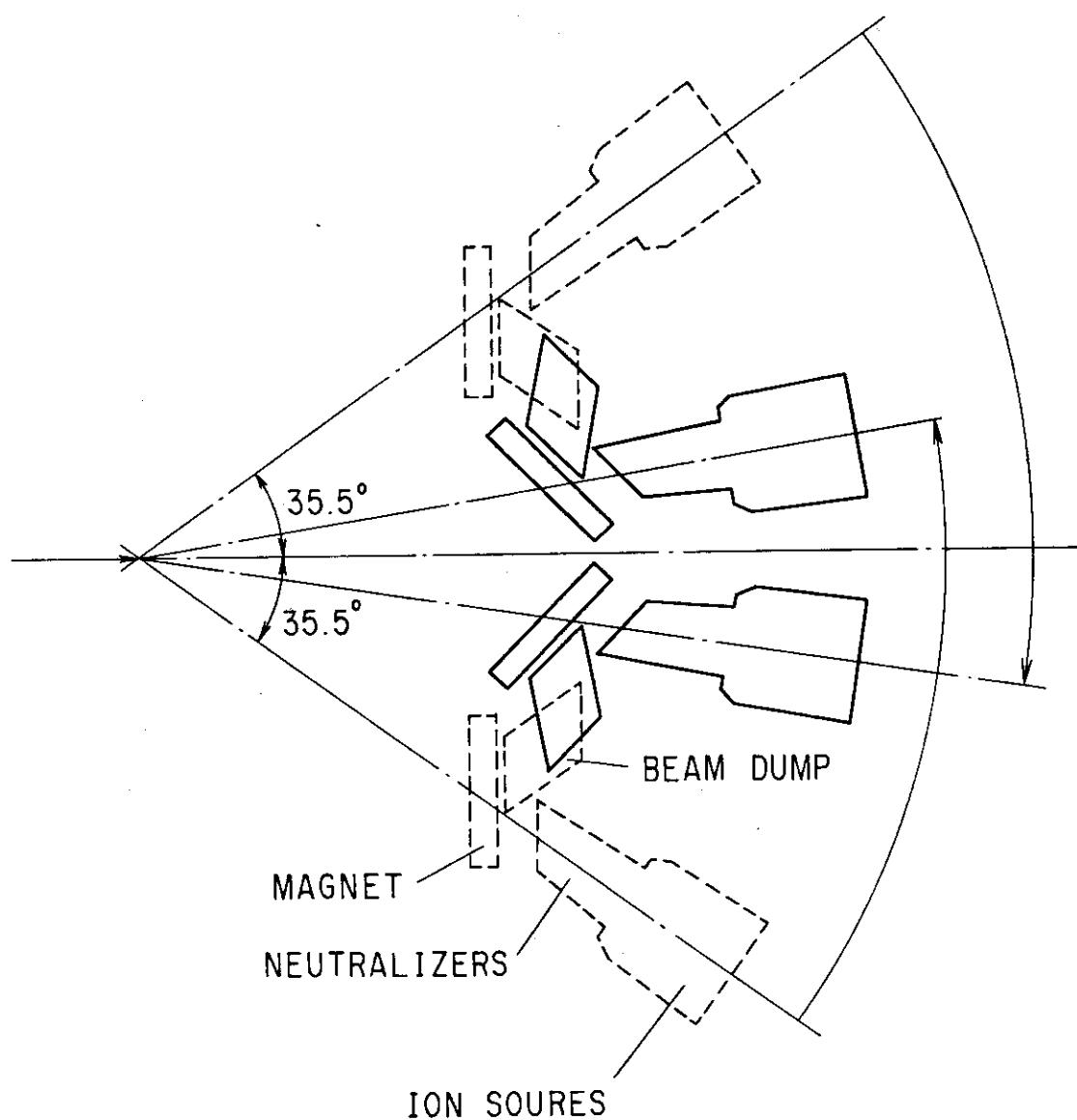


ドリフト排気部側

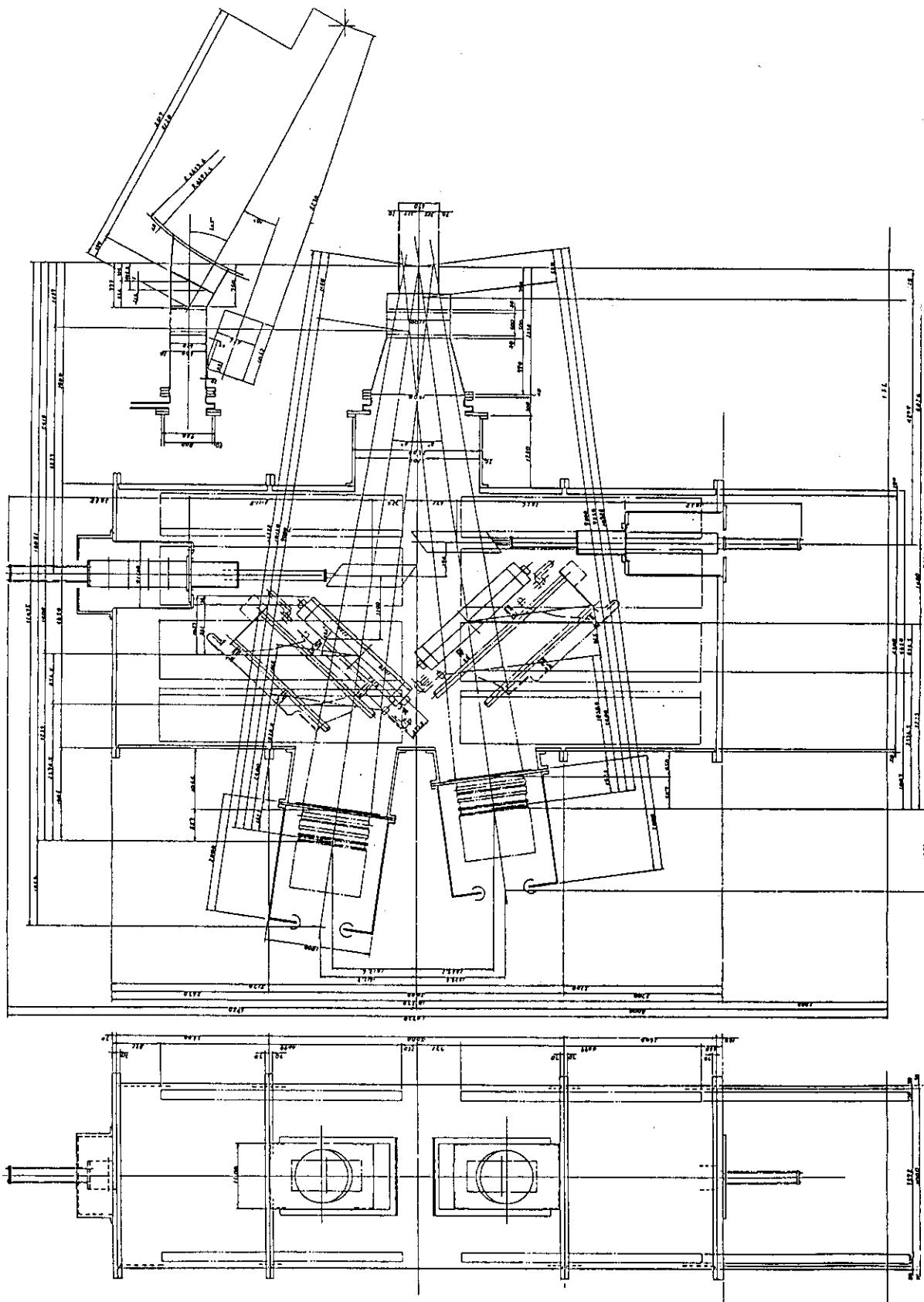
断面 C-C

NBI 内部構造図 水平面断面(下ユニット)

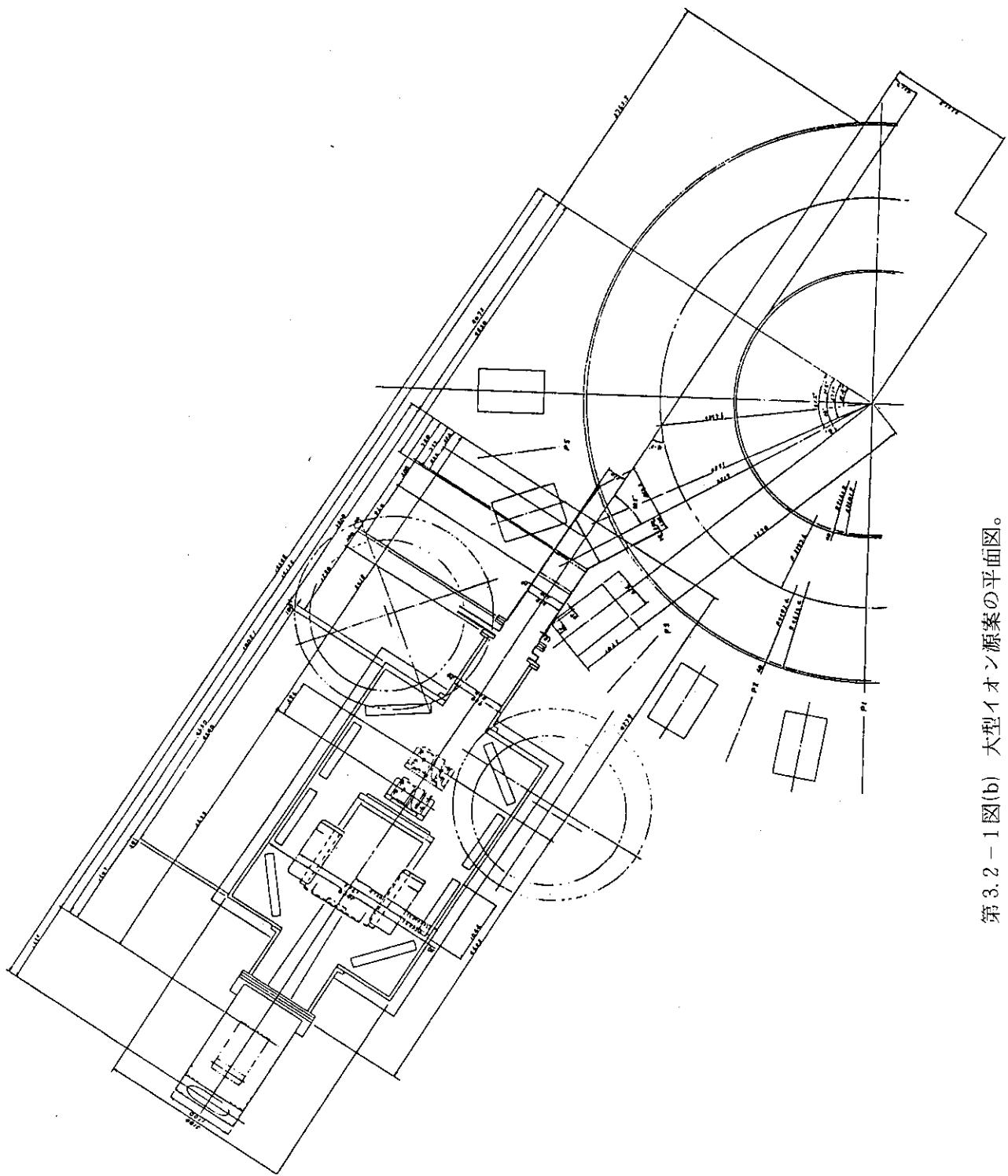
第 3.1 - 2 図 既設 JT-60 NBI の下ユニットの平面図。



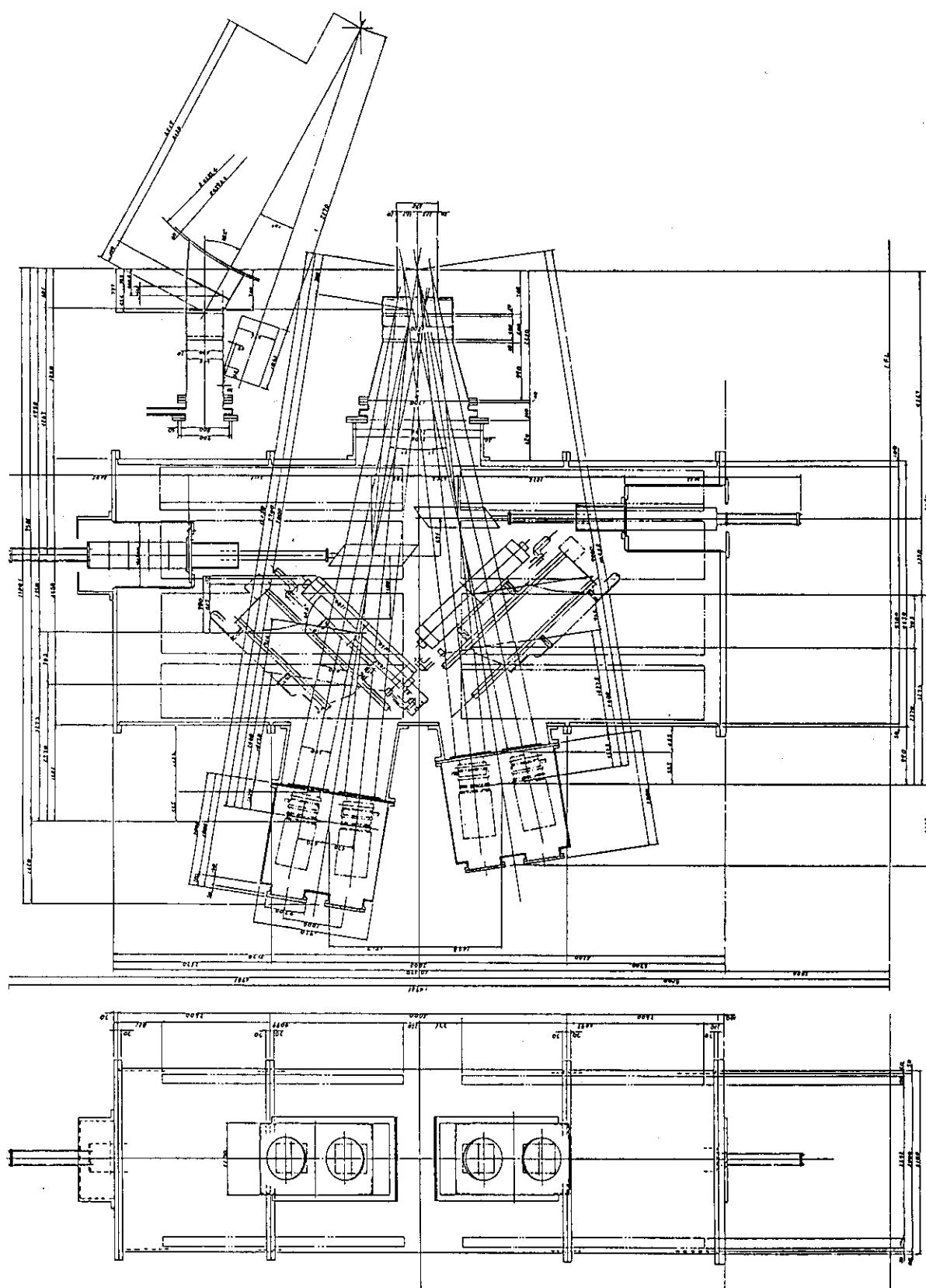
第3.1-3図 イオン源、中性化セル、偏向磁石及びビームダンプの位置の変更方法。



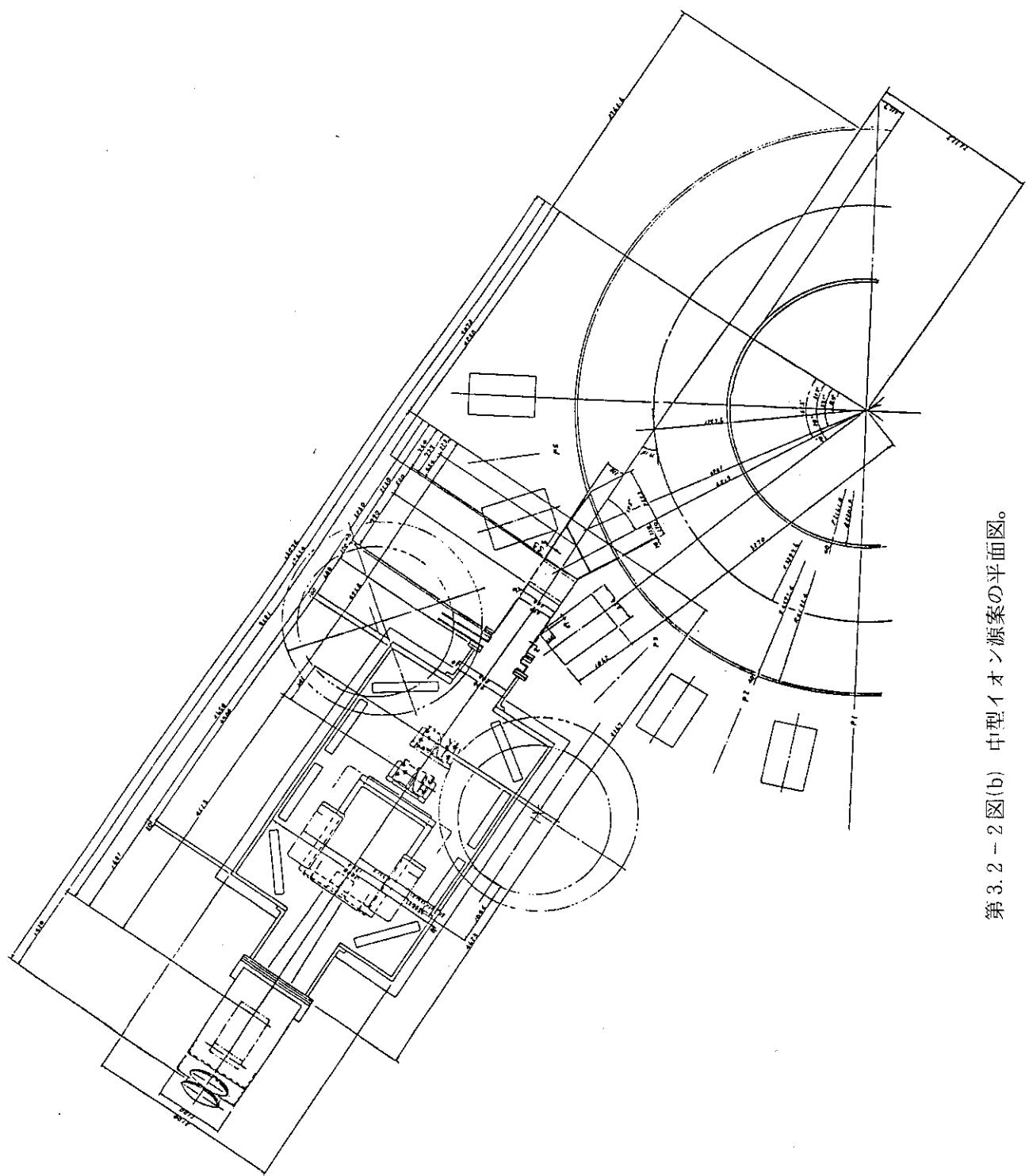
第3.2-1 図(a) 大型イオン源案の側面図。



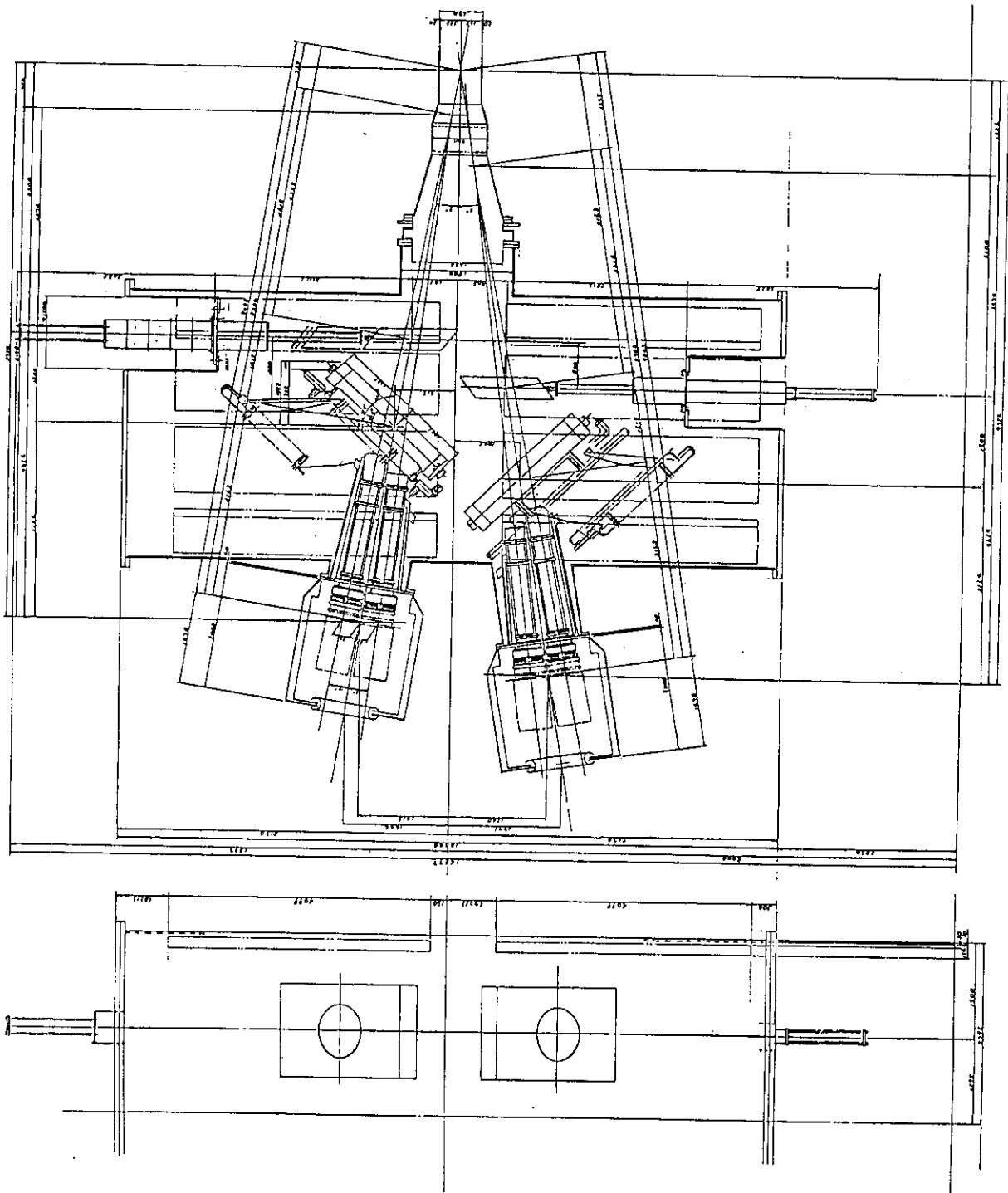
第3.2-1図(b) 大型イオン源案の平面図。



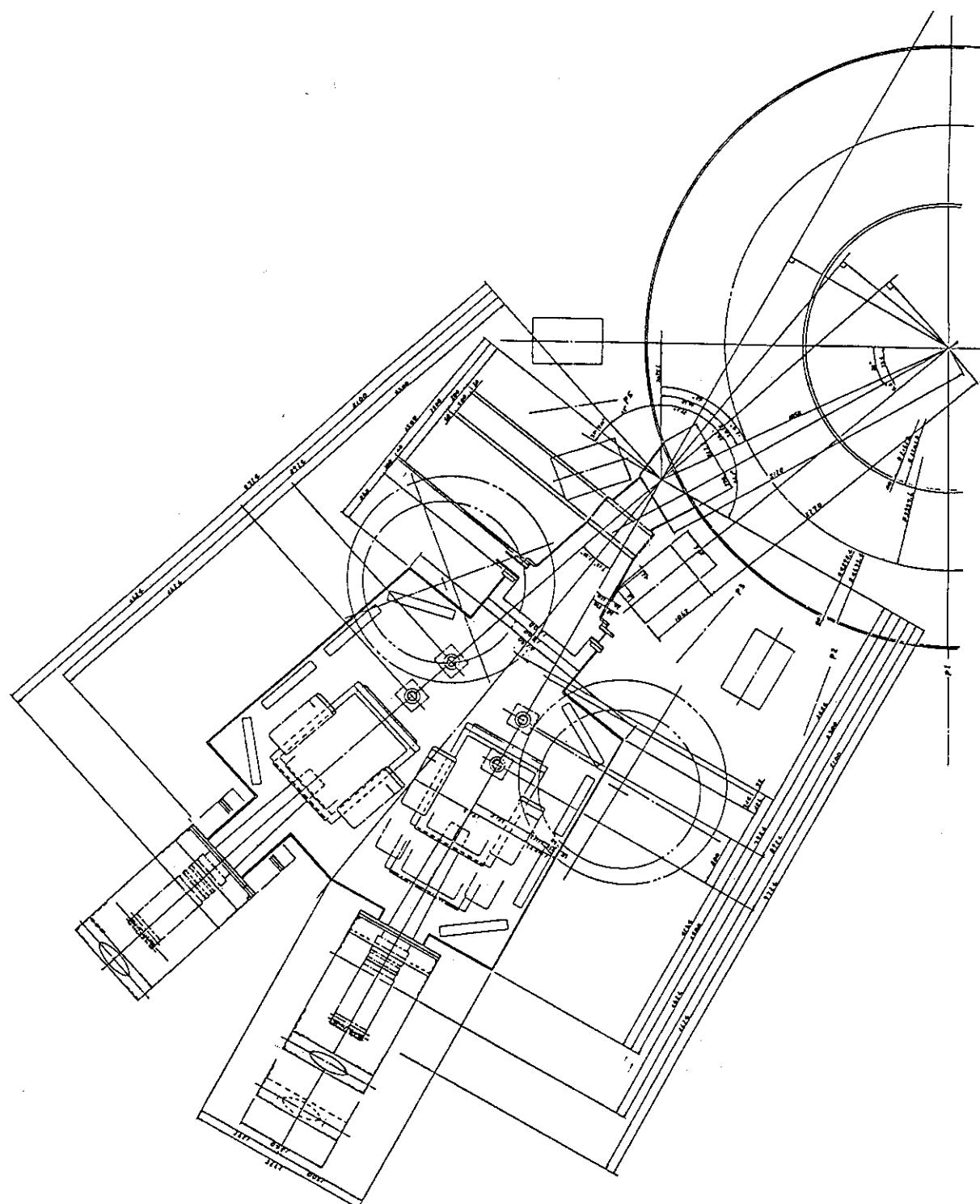
第3.2-2図(a) 中型イオン源の側面図。



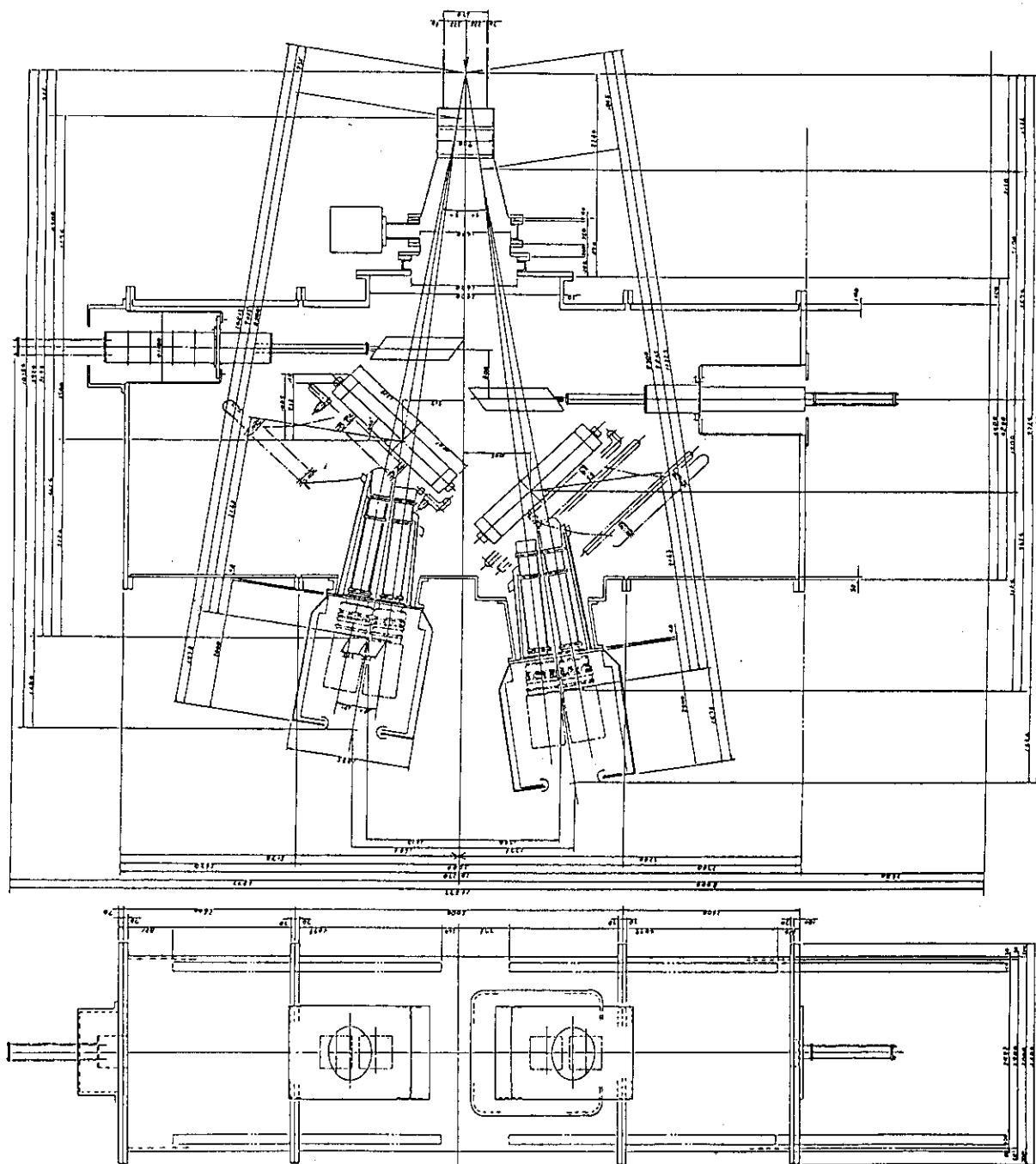
第3.2-2図(b) 中型イオン源の平面図。



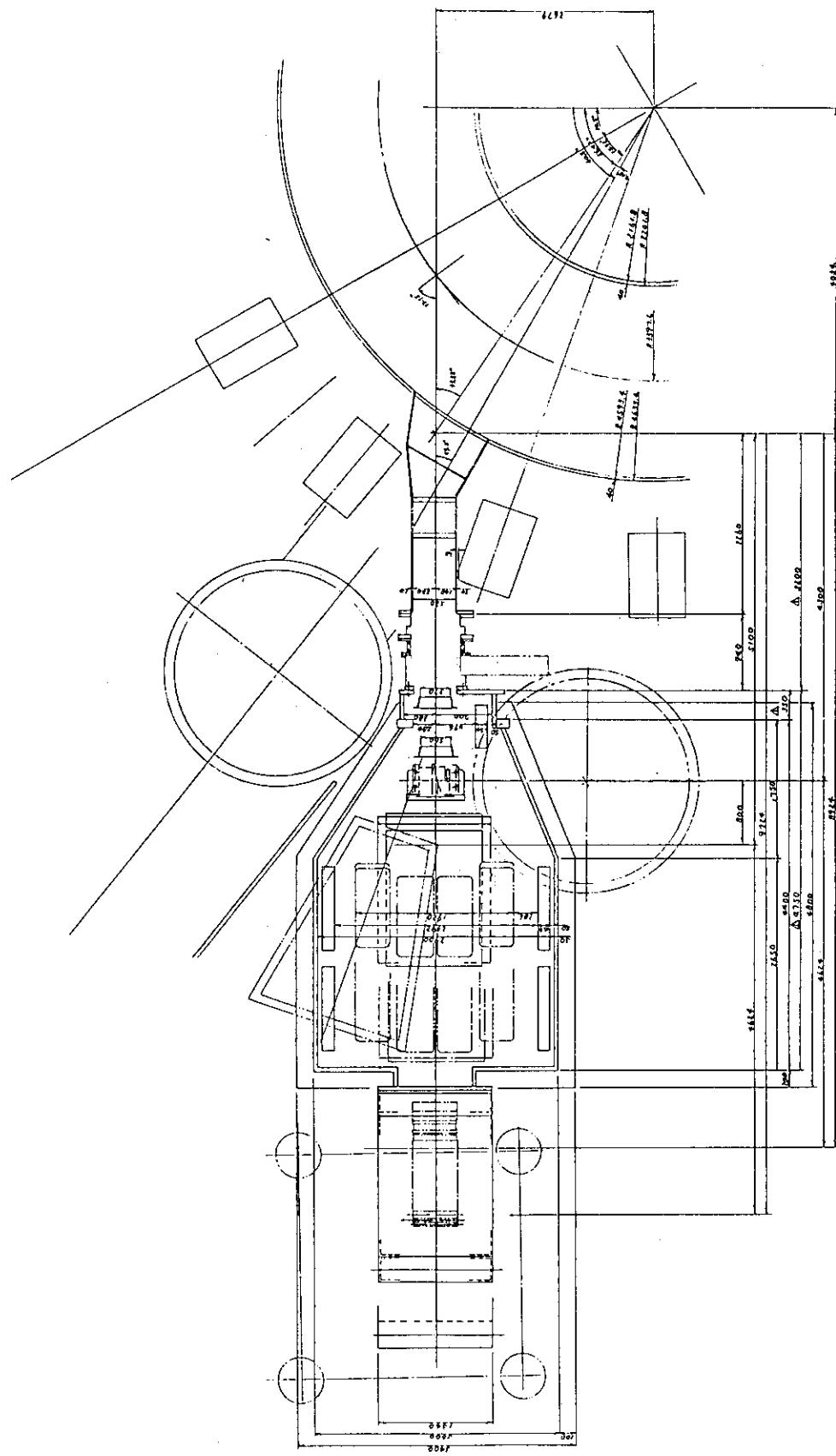
第3.2-3図(a) 小型イオン源素の側面図。



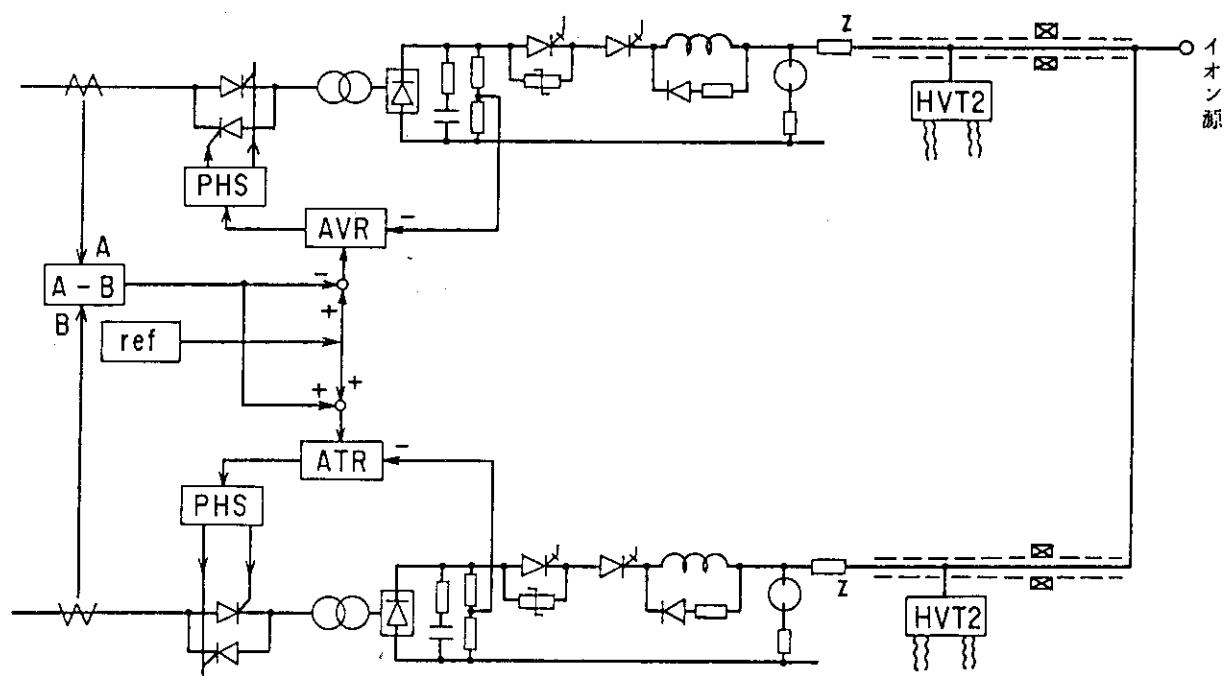
第3.2-3図(b) 小型イオン源の平面図。



第3.2-4図(a) 小型イオン源2側案の側面図。



第3.2-4図(b) 小型イオン源2個案の平面図。



第3.2-5図 加速電源の並列運転化改造法の例。

4. 改 造 方 法

4. 1 ガスフロー、パワーフローの検討

3章に示したように、検討の結果選択された既設イオン源2台案は真空的には一つとなったが基本的には既設の上下ユニットのビーム軸を変更しただけの構造であり、真空的にも既設のクライオパネルをそのまま取り付ければ既設NBIと真空的に等価となる。しかしながらJT-60Uでは、中性化効率が良くかつ中性化セルに必要なガス線密度が低く真空的に楽な重水素運転を主体をして考えて良いことから、ガスフローについて再検討し合理化の余地があるかどうか調べた。

まず初めに接線NBI用に計画されているドリフト管のコンダクタンスを見積る。計画されている接線NBI用のドリフト管の形状は第4.3-13、14図のようである。これを第4.1-1図に示すように近似し粗くコンダクタンスを見積る。結果は図に示すように上下一体にして $5.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、上下ユニット個々に考えるとこの半分の $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ でこれは既設の準垂直NBIのドリフト管のコンダクタンスとほぼ等しい。従ってクライオパネルを既設と同等に配した場合はドリフト管のコンダクタンスも含めて既設NBIと真空的にはほぼ等価となる。

そこで続いて、既設NBIに取り付けられているクライオパネルを全てそのまま取り付けて既設NBIと真空的に等価にした場合の重水素運転の場合のガスフローを考える。高エネルギー化改造によりイオン源用電源としては120keV、96Aまでのイオンビーム引出しが可能であるが接線化されたビームラインの定格としては少なくとも当面は

120 keV、80 A、Dビーム

の引出しを目標とすることとする。この条件と既設NBIの標準的な中エネルギー、高パワー運転条件である

60 keV、80 A、Hビーム

と比較しながら検討する。ガス種を軽水素から重水素に替えると排気速度やコンダクタンスは $1/\sqrt{2}$ になることに注意して両ケースについて運転条件を計算してみると次のようになる。

	Dビーム	Hビーム
$Q_{\text{is}} (\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s})$	1.6	1.8
$Q_n (\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s})$	0.6	1.0
アーク室圧力(Pa)	0.508	0.504
電極出口圧力(Pa)	0.277	0.284
中性化セル平衡度(%)	90.4	91.4

但し Q_{is} 、 Q_n はそれぞれ一ユニット分のイオン源ガス導入量と中性化セルガス導入量である。このように、 Q_{is} と Q_n の和を $2.8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ から $2.2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ に減らして初めて等価な運転となる。第 4. 1-2 図 a)、b) に両ケースの場合の圧力分布を示す。図に示した流量やコンダクタンス、排気速度は 1 ユニット当たりの値である（以下同じ）。本体真空容器へのガス流入量 $Q(t)$ は D ビーム時 $0.053 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、H ビーム時 $0.067 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と、D ビーム時の方が約 20% 少なくなる。但しこの数値は本体真空容器をシンクと考えた場合のもので、具体的には重水素プラズマに H ビームを入射した場合の水素ガスの流入量、 $dilution$ を議論する場合等の量に相当する。プラズマ線平均密度が $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度の場合プラズマ周辺のガス圧力は $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 程度と NBI の出口側の P₃ 室とほぼ同圧力となるので D ビームを重水素プラズマに入射する場合はガス流入は問題とならない。以上を考え合わせると D ビーム運転時は H ビーム運転時に比して真空的に余裕があり、接線化時クライオパネルについて合理化の余地があると言える。

そこでクライオパネルの枚数を低減する合理化案を考える。第 4. 1-3 図に示すように既設 NBI では P₁、P₂ 室に大型のクライオパネルがそれぞれ 2 枚、P₃ 室に小型の物が 2 枚据え付けられている。上下ユニットのこれら全てのクライオパネルを接線 NBI の真空容器に据え付ける場合には、空間的制約から上下ユニットのクライオパネルを縦方向に並べなければならない。従って接線 NBI の真空容器は既設 NBI の上下ユニットを合わせた大きな物となってしまう。この代わりに第 4. 1-4 図に示すように P₂ 室のクライオパネルを 2 枚減らし、大型クライオパネルについては全て水平に並べる案を考える。この案の場合のガスフローを第 4. 1-5 図に示す。第 4. 1-2 図 b) の場合に比して P₂ 室の圧力は 2 倍近くになるが P₂ 室のビーム軸上の圧力 P_{2C} は 14% しか上がらない。これは P₂ 室のビーム軸からクライオパネルまでのコンダクタンス C_2 がクライオパネルの排気速度 S_2 に比してもともと小さいため、 S_2 が半分になってもビーム軸上の圧力にはあまり効かないことによる。再電離損失の増加は偏向磁石内、ドリフト管内とも 10% 程度と見積られる。本体真空容器へのガス流入も 10% 程度の増加となるがこれは第 4. 1-2 図 b) の H ビームの場合よりもまだ 10% 程度少ない。

次にクライオパネルを合理化した場合に対しさらに高速シャッタを合理化できるかどうか検討する。

ビームを入射する直前まではイオン源ガス導入系からだけガスが導入される。1.2 keV、80 A、D ビーム運転の場合 $Q_{is} = 1.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であるからイオン源からのガスの本体真空容器へのガスの流入量は、1 ユニット当たり $0.034 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、接線 NBI 全体（4 ユニット）で $0.136 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ である。これも本体真空容器をシンクと考えた場合であって、同種のガスを用いる場合は問題とならない。高速シャッタがない場合、フラッシング時も本体真空容器にガスが流入する。通常の実験ではあまり問題とならないであろうが、超低密度のプラズマを得たい場合

や、徹底的にH e - T D C をしてスーパーショットを狙う場合などには問題となり得る。このような場合には他の大型トカマクで実施しているように、フラッシング時はフィラメント通電と加速電圧印加だけとすることで対処できると考えられる。

また高速シャッタがない場合、プラズマ放電終了毎に本体真空容器から逆にガス流入があるのでクライオの再生周期が短くなる恐れがある。しかしながら本体真空容器へのガス注入量はJ T - 6 0 の実績を見るとプレフィルが $1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \times 1 \text{ sec}$ 程度、放電中のガス注入量は多くのショットでは0で特別に多い場合で $4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \times 4 \text{ sec}$ 程度である。一番多い例で考えても、 $1 \times 1 + 4 \times 4 = 17 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / 20 \text{ 分周期}$ であるのに対し、現在のクライオ運転中のコンディショニング時のガス導入量を考えると、 $1.3 \times 3.7 + 1 \times 3.3 = 10 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / 30 \text{ 秒周期}$ とコンディショニング時の方が格段に多い。従って本体真空容器からのガス流入に依るクライオ再生周期への影響はほとんどないと考えられる。

一方ヘリウムプラズマにビームを入射しようとする場合は、放電終了後タンク内の圧力が一時的に高くなってクライオが不安定になるとされる。従って ${}^3\text{He}$ プラズマに負イオンを用いた 0.5 MeV NBI でDビームを入射して中性子の出ない核反応実験を行う場合等、接線NBIはこのままではアシストできないことになる。但しJ T - 6 0 UはD放電が主体となるであろうから、この実験以外H e プラズマにビームを入射する必要は少ないとと思われる。

以上のように接線NBIのクライオパネルを合理化する案はDビームを主体として考える限り、真空的にはほとんど問題のないことが解った。

ビームラインの配置が変わることから各部のコンダクタンスやビームリミタによりリミットされるビームの量に若干の相違は生じるであろうが、接線NBI内のパワーフローも基本的には既設NBIと同等である。第4. 1-6図a)にJ T - 6 0 NBI原型ユニット¹⁶⁾で測定されたHビーム運転時のパワーフローを、b)にはこれから推定される接線NBI、Dビーム運転時のパワーフローを示す。中性化効率が良くなることと高エネルギー化改造により、接線NBIでのDビーム運転時は原型ユニットにおけるHビーム運転でのパワー測定時に比べ入射パワーが倍近くになると期待され、4ユニットで11MW程度の入射が可能と予測される。。

4. 2 漏洩磁場対策

最終的に選択された既設イオン源2台案は既設NBIの機器類を最大限流用するものであるが、トカマクからの漏洩磁場対策に限ってはビーム軸と磁場との相対角が変わってしまうことから再検討を要する。漏洩磁場対策にはトカマクプラズマに過大なエラー磁場を発生させてはならないという制限条件もあり、漏洩磁場対策は既設イオン源2台案に決定後最もR & Dを要した項目である。このことから漏洩磁場条件とその対策の検討結果について特に節を設けて示す。

4. 2. 1 漏洩磁場条件

プラズマ電流の大電流化に伴い、JT-60Uからの漏洩磁場はJT-60時に比べ倍近くの強さになる。一般にトカマクの漏洩磁場の大きさは運転条件によってさまざまな値をとるが、JT-60Uでは以下の条件で運転する場合に漏洩磁場が最大となると見積もられる。

$$\begin{aligned} I_p &= 6 \text{MA} & (R_p &= 3.3 \text{m}, Z_p &= 0.25 \text{m}) \\ I_f &= -120 \text{kA} & I_v &= 65 \text{kA} & I_d &= 110 \text{kA} & I_h &= 0 \text{kA} \end{aligned}$$

Vコイル：高非円形ダイバータ配位結線

ダイバータ放電

$$\beta_p = 0.6$$

他の条件はこのままでし、プラズマ半径 R_p を 3.2 m として漏洩磁場を大きめにしたものを磁気シールド設計上の標準磁場とした。プラズマ半径を小さくしたことにより漏洩磁場は約 8 % 大きくなっている。第 4. 2-1 図にこの標準磁場の赤道面上の磁場強さを主半径 R の関数として示す。接線 NBI タンクの中心は $R \sim 10 \text{m}$ であり 250 G 程度の磁場に晒されることになる。

4. 2. 2 対策

接線 NBI の磁気シールドの検討項目は次のものがある。通常行われているように磁性材を用いた磁気シールドを施している、イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドについては既設のものをそのまま用いるとして、このように大きくなる漏洩磁場に対して磁気的に飽和しないことと、飽和しないまでも内部に漏れ入る漏洩磁場が許容値内であることを確認することである。一方、中性化セルで中性化されずに残ったイオンビームに対する磁気シールドは既設 NBI ではコイルを用いた能動的な方法が採用されているがこれについては再設計する必要がある。

既設 NBI ではイオンビームに対する磁気シールドとして、偏向磁石の周りに巻いた第 1 打消しコイルと、中性化セルの出口の周りに巻いた第 2 打消しコイルを組み合わせて用いてその電流をフィードバック制御している。⁷⁾ 第 4. 2-2 図 a)、b) に、既設 NBI 内で打消しコイルを作動させない場合と作動させた場合の磁場分布を示す。既設 NBI では中性化セル磁気シールドや偏向磁石鉄芯といった磁性材が存在することも手伝って漏洩磁場はほぼ水平方向となる。従って中性化セル出口と偏向磁石の周りに鉛直に巻いた打消しコイルが有効に働いている。但し、b) 図に示されるように打消し後の磁場は完全に無くなるわけではなく、中性化セル出口の部分では有

効に打ち消されるがビームダンプの領域ではかなり残っている。しかしながらその方向はイオンビームとほぼ同方向であり、イオンビームの軌道に大きな影響を与えない。既設 NBI で打消しコイル電流の制御に要求される精度は b) 図の場合を中心にして ± 5 % であることが計算で確かめられている。接線 NBI のイオンビームに対する磁気シールドを設計するに当っては既設 NBI のこのような設計結果を指標とすることができる。

まず磁場計算コード¹⁷⁾を用いて接線 NBI タンク内の漏洩磁場分布を計算した。計算に用いた配置を第 4. 2-3 図に示す。図中半径 3.4 m の円は JT-60U の真空容器の中心を表わしている。ビーム軸の上下方向の傾きは 9 度とした。この配位で計算した漏洩磁場分布を第 4. 2-4 図に示す。この図は中性化セル磁気シールドと偏向磁石の近傍の磁場分布を拡大して見たもので、a) 図に磁場の強さを、b) 図にその方向の分布が示されている。漏洩磁場の強さは、中性化セル磁気シールドと偏向磁石の間で、100 G 程度、ビームダンプの位置で 200 G 程度であり、第 4. 2-2 図 a) の既設 NBI の JT-60 における漏洩磁場と同程度であるが、その方向は既設 NBI の場合と異なり場所により複雑に変化している。従って中性化セル磁気シールドと偏向磁石の周りに巻かれ電気的に直列接続された既設の打消しコイルそのままでは磁場の打消しは困難と考えられる。そこで漏洩磁場を遮蔽する方式として以下の 2 方式について検討した。

(1) NBI タンクを磁性材にする方式

NBI タンク内はビームライン機器が入り組んでおり、かつビームの通る領域を確保しなければならないことから、NBI タンク内で問題の領域を磁性材で蔽うのは困難である。代りに NBI タンク自体を磁性材である SS 材で製作すれば簡便でかつ安価にできると考えられる。そこでこのような方式が可能かどうか磁場計算コードを用いて評価した。その結果磁性材の磁気的な飽和を避け、NBI タンク内を 10 G 程度以下に抑えるには第 4. 2-5 図に示すような厚みを要することが解った。厚みはプラズマから遠いところで 5 cm、近いところでは 20 cm も必要である。この場合の磁場分布の計算結果を第 4. 2-6 図に示す。a) はタンク中心を通る鉛直面上の磁場分布、b) は水平面 z = 0.919 m 面 (a) 図中の水平方向の実線) 上の磁場分布である。このように NBI タンク内の広い領域で 10 G 以下にシールドできることがわかる。

以上のように NBI タンク自体を磁気シールドに用いる方式は必要な磁気シールドファクターを得るという観点からは可能ということが解った。しかしながら、これだけの磁性材を用いると逆に磁性材が磁化することによりプラズマに与えるエラー磁場が過大になると懸念される。第 4. 2-5 図の形状の場合、その重量は内蔵物を除いたタンクだけで 100 トン以上にも及ぶと見積もられる。プラズマの位置に与えるエラー磁場は同計算から最大 80 G であることがわかった。このような大きなエラー磁場はプラズ

マに主に 2 つの点で重大な影響を与える。一つはプラズマの着火が困難になることがある。もう一つはプラズマ中に磁気アイランドを形成して閉じ込めを劣化させることである。そこで第 4. 2-5 図のような磁気シールドの発するエラー磁場について磁気アイランドの形成状況の計算をした結果が第 4. 2-7 図である。磁気アイランドの幅は小半径の 15 % 程度にも達し、閉じ込め特性に大きな影響を与えると予測される。磁気アイランドの幅はエラー磁場の $1/2$ 乗に比例することから逆に磁気アイランドの許容幅をこの値の半分と置くと、許容されるエラー磁場は 1.7. 5 G と求められる。ビームラインの配置の設計と磁気シールドの設計は実際には並行して進められたもので、第 4. 2-3 図に示したものより約 1 m トカマクから遠い位置にあった当初のビームラインに対しては磁気シールドの厚みが 5 ~ 10 cm で良かったものが、入射ポートのサイズの制約から全体にビームラインをトカマクに近づけたことにより、以上のように結果的に通常の磁気シールド法を用いることができないこととなったものである。

(2) 打消しコイル方式

打消しコイルの場合はプラズマ着火時に電流を切っておけば良いことから、プラズマ着火についての問題は生じない。

新たな打消しコイルの形状は大型のコイルを用いる案と中性化セル磁気シールドや偏向磁石の周りに設置する小型コイルだけを用いた案とが並行して検討されたが、最終的に第 4. 2-3 図に示したような大型の M コイルと、大型コイルの発生する磁場を部分的に補正する小型の S コイルからなる案を採用することとした。本図は上ユニット用のコイルを示したが下ユニットにも上下対称なコイルを設ける。これらのコイルの発生する磁場分布を第 4. 2-8 図に、漏洩磁場を打ち消した場合の磁場分布を第 4. 2-9 図に示す。コイルのアンペアターン数は M コイルが上下各 8.2 k A T、S コイルが各 4 k A T である。残留磁場は中性化セル磁気シールドと偏向磁石の間で 20 G 以下、ビームダンプの位置で 120 G 程度に減少する。このような残留磁場の下でもイオンビームが正しくビームダンプに導かれることをイオンビーム軌道／熱負荷分布計算コード¹⁸⁾ で確認した。またプラズマの位置に発生するエラー磁場は 1.2. 2 G であり、これは上記の許容値内である。

以上のように大小の打消しコイルを用いることにより、漏洩磁場に対処できることが計算上は示された。しかしながら、漏洩磁場、偏向磁石、磁気シールド及び打消しコイルを組み合わせた 3 次元的な形状は磁場計算にとってはかなり複雑と言え、計算結果が本当に正しいか不安が残る。そこでこの案に対応するコイルと磁性材の $1/10$ モデルを製作して代表的な点について磁場を測定し計算と比較した¹⁹⁾。但しコイル電流の制約から磁場の強さを $1/10$ とした。その結果実測値は計算値と概ね良い一致を示し、上記の計算が妥当であることが確認できた。

4. 3 ビームラインの設計

以上のように接線化の方式、クライオパネルの枚数、漏洩磁場の対処法といった接線NBIの全体に関する項目について検討した上で、ビームラインの具体的な設計を行った。その結果を項目に分けて以下に示す。

4. 3. 1 ビームライン配置

第4. 3-1図に接線NBIの配置を示す。接線NBIは既設のNBIの内、#7～10ユニットを撤去して代りに設置する。以後接線NBIもそのまま#7～10と称することとする。既設NBIと同様、奇数ユニットは下ビームラインを指す。#7、8と#9、10とは互いに逆向きでバランス入射ができるようになっている。また平成5年に完成予定の負イオンを用いた0.5MeV NBIはP-2、P-3セクションのポートから#9、10ユニットと同一方向に入射されることから、#7、8ユニットと同時使用することにより、ビームエネルギーの異なるNBIでのバランス入射も可能である。接線NBIはいずれも既設NBIの一部ユニットと同一セクションの水平ポートから入射されることから、特にドリフト管周りの空間的取り合いが厳しい。

第4. 3-2図は接線NBIの側面図である。当初の設計とは異なり、このように上下左右とも対称な構造とされた。上下方向に対称にできたのは、偏向磁石の周りに巻いた既設の打消しコイルが不要となり、偏向磁石のサポート構造が簡略化できたことによる。ビーム軸の上下方向の角度は水平から±9度で、これらのビーム軸に対し上下イオン源のビーム軸は既設NBIと同じく±1.8976度の角度を持っている。カロリメータはビーム軸の中心に置くと上下のカロリメータの先端が干渉するから、少し上下にずらしてある。

ビーム軸を定義する図面を第4. 3-3図に示す。ビーム軸を含む鉛直面にトカマクの中心から下ろした垂線OHの長さ、即ち入射半径は2.679mである。この図の入射ポートの所に定義される赤道面上の点Eを狙って上下方向に9度の入射角が付けられる。

4. 3. 2 主排気タンクとその基礎

第4. 3-4図に主排気タンクの構造図を、また第4. 3-5図に内部構造図を示す。基本寸法は長さ4.55m、幅3.06m、高さ7.8mで、断面は他機器との空間的干渉を避けるために先細りの形をしている。材料は非磁性のSUS304で厚みは3cmであるが、大気圧に耐えるために周りにコの字状のリブが取り付けられる。特にイオン源の取り付けられる側は精度が要求されることから、リブの山を高く

している。第4. 3-6図に主排気タンクの上板を、また第4. 3-7図a)に下板を含む主排気タンク下スカート上部、b)に同下部を示す。いずれもSUS304製とする。下板は偏向磁石やビームダンプ等のビームライン内蔵物を保持するサポート構造の基準となることから、上板の厚みが8cmであるのに対し10cmと厚くしてある。主排気タンクは本体室の床貫通孔をまたぐ所に位置しており、床貫通孔からの本体真空容器ガス冷却配管及び、トロイダルコイルフィーダー線(#9、10のみ)をスカート外に取り出さなければならぬ。スカート下部のポート側の穴はこのためのもので、大きな穴のほうがガス冷用である。第4. 3-7図b)は#9、10用のものであり、#7、8の場合はフィーダー線用の穴はない。またガス冷用の穴は左右反対の位置にある。

第4. 3-8図に主排気タンクの大気圧による変形量の計算結果を示す。²⁰⁾ a) 図は計算モデル、b) 図は変形量の計算結果である。各面の厚みは図a)のようであるとし、リブはこれと等価な強度を有する平板で近似した。b) 図に示されるように最も広い面積を有する平面1で変形量も最大となり、約1cm中央付近でへこむ事になる。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と比較するとかなり低減されている。

第4. 3-9図は主排気タンク用のチャンネルベースである。チャンネルベースは既設NBIで撤去した後及び隣接するユニットのソールプレートや、撤去した既設NBI用ヤグラの基礎にボルト締めする他、床貫通孔を利用して本体室の床をコの字状に挟むことにより固定する。チャンネルベースは床面から高さ8mの位置に中心を有するプラズマから距離があり、プラズマの位置に発生するエラー磁場が小さいことから、磁性材でも良いこととし安価なSS材とした。SS材を用いるとすると重量は15トンにもなるが、チャンネルベースがプラズマに与えるエラー磁場は0.1G以下と見積もられる。

4. 3. 3 ビームライン支持構造

第4. 3-10図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。この自立構造の内部支持柱に上下ユニットの偏向磁石、ウォータージャケット及びビームダンプが固定される。内部支持柱はビームダンプの冷却水配管を兼ねている。これは配管を合理化するためと、内部支持柱の温度を水温程度に固定し熱的な伸縮を抑えるためである。つまり窒素温度のクライオパネルのシェブロンに周りを取り囲まれていることから、放射により内部支持柱が冷えるのを通水することにより避けている。

4. 3. 4 真空排気設備

主排気タンク内の真空排気は4. 1節のガスフローの検討に沿って以下のように構

成する。

クライオパネルは第4. 3-1、2図に示されるように主排気タンクの壁面に沿わせて左右対称に取り付ける。大型クライオパネルが6枚、小型クライオパネルが4枚である。大型クライオパネルのうちイオン源寄りの4枚と残りの2枚とでビームの通る部分を除いて間仕切りをし、それぞれP₁、P₂室とする。また小型クライオパネルの部分についても間仕切りをしこれをP₃室とする。ビームライン機器の区分は偏向磁石がP₁室とP₂室の境界で、P₂室とP₃室の境界はカロリメータ下流の第1ビームリミタである。P₃室の下流は第2ビームリミタで区分され、金属シールゲート弁やドリフト管が下流にある。各室間は0.5mm厚程度のSUS304製の仕切板で区分される。特にP₁室とP₂室の区分はクライオパネルが鉛直に区分されるのに対し、偏向磁石がくの字状に傾いていることから立体的な構造となる。

第4. 3-11図は主排気タンク内の液体ヘリウムの系統図を既設NBIと比較したものである。小型クライオパネルが上下方向に2枚直列接続される以外は既設NBIと同じく全て並列に液体ヘリウムが供給される。予冷ラインについては、既設NBIでは一つの予冷弁の出口を2系統に分けて左右のクライオパネルに供給していたため、左右のクライオパネルで流れにアンバランスの生ずることがあったのを、2系統に分けた後で予冷弁をそれぞれのラインに入れて流れが独立に制御できるように改良が施されている。第4. 3-12図に液体ヘリウム配管の立体的な接続図を示す。各クライオパネル間の接続状況は液体窒素供給系も同様である。但し液体窒素供給系には予冷ラインはない。

クライオパネル関係の改造は配管の接続部の一部以外は気液分離器や弁類も含め全て既設のものを再利用する。クライオパネルは高圧ガス取締法に基づく特定設備の一部であり、改造はこの法律に基づいて実施する必要がある。

クライオポンプの作動領域まで排気するためと、クライオポンプがなくても短バルス運転を可能にするための補助真空排気設備は、基本的には既設NBIのままである。つまり、主排気タンクと各イオン源は地下の加熱ポンプ室に設けられたユニット共通の粗引きポンプ系に接続されている。ユニット毎に各一台設けられていたターボモレキュラーポンプ(TMP)2台はまとめて主排気タンクの上に設置することとした。第4. 3-6図中イオン源側に開けられている400Aの穴がTMPに接続されるものである。主排気タンクの上としたのは漏洩磁場や打消しコイルの発する磁場が比較的弱く空間的に余裕のある位置ということで決められた。TMPの設置予定位置で予想される漏洩磁場値を第4. 3-1表に示す。TMPを磁場の存在する環境で使用すると渦電流によるローター部の発熱がまず問題となるが、デューティが低いことからこの程度の漏洩磁場では問題ない。TMPの背圧も既設NBIと同じく加熱ポンプ室に設けられたTMP背圧ポンプ系に接続する。なおTMPのH₂ガスに対する公称排気速度は一台当たり5500 l/sである。D₂ガスに対してはこの1/√2の値となる。

4. 3. 5 イオン源

イオン源は既設NBIと同様に120 keV、Dビーム運転に対応すべく、電極のギャップを変更して既設のイオン源を取り付ける。電極のギャップはこれまでの経験則と加速電極内のイオンビームの軌道を計算するコードBEAMORBT²¹⁾を用いた計算とから総合的に決められた。電極ギャップと関連するパラメータを既設のイオン源と対比させて第4. 3-2表に示した。

4. 3. 6 イオン源磁気シールド、中性化セル、中性化セル磁気シールド、偏向磁石、ウォータージャケット、ビームダンプ、カロリメータ

イオン源磁気シールド、中性化セル及び中性化セル磁気シールドについては既設のものをそのまま用いる。

偏向磁石はサポートを4. 3. 3項に示した支持柱から取ること以外に変更はない。但しその周りに巻かれていた第1打消しコイルはサポートの邪魔になることから取り外される。

ウォータージャケット及びビームダンプについても冷却配管を変える以外は既設のものをそのまま用いる。

カロリメータは駆動時のガイド構造が鉛直を想定した構造のため既設と同じく鉛直のまます。既設と同じく受熱面の中心をビーム軸に合わせようとすると上下のカロリメータの先端が空間的に干渉することからそれぞれ43 mm上下に偏芯させている。カロリメータの受熱面には上下イオン源のビーム軸を中心に十字状に熱電対が埋め込まれておりこれから概略のビーム軸合わせができるようになっているが、ビーム軸合わせをする際この偏芯とビーム軸との相対的な角度が変わっていることに注意する必要がある。また相対的な角度が変わったため、ビームの一部が受熱面から外れる恐れがあるため、カロリメータの受熱面の前面の上下端にビーム漏れ止め板を追加する。

4. 3. 7 第一、第二ビームリミタ、ドリフト管、NBIポート

第一、第二ビームリミタは空間的制約から既設のものと同様鉛直な形状とする必要から新たなものとするが、ビームをリミットする面とビーム軸との相対的な位置は既設NBIと変わらない。

第4. 3-13図にドリフト管の形状を、また第4. 3-14図にポート部の形状を示す。ドリフト管は既設の金属シールゲート弁が再利用できるように二股構造とする。ドリフト管とポート部の内部の熱流束を下げるには口径が大きいほど望ましいが、いず

れもこれらの図の構造が可能な最大の口径となっている。特にドリフト管の横幅についてはトロイダルコイルの外側の角を幅45mm、奥行き129mmに亘って削って初めて得られた値である。またポート部の壁面がビーム軸に平行でなく、内側に入り込んでいる箇所があるが、この部分の熱負荷を抑えることも難しい。この入り込みは、この部分に本体真空容器のサポートがあることによる。そこでドリフト管内とポート部内にはこれまでと同様第3ビームリミタを分散して取り付けるのに加えて、二股構造が合流した以降の内壁全面を第4. 3-15図a)、b)に示すように厚さ5mmのモリブデン製のタイルで覆う。またベロー内面には第4. 3-16図に示すように既設と同様短冊状の保護板を取り付ける。

第4. 3-17図に計算²²⁾により求めたリミタの位置と中性ビームの熱流束を示す。ビームの条件はDビーム、120keV、80A、ビーム発散1.2度の場合である。熱流束は既設NBIの経験から500W/cm²程度に抑える必要があるが部分的にこれを超えている。従って得られるビーム発散によっては入射パワーやパルス幅を制限する必要がある。

再電離イオンの軌道の計算例を第4. 3-18図に示す。a)はビーム軸を含む面を上より、b)は側面より見た図である。漏洩磁場はトカマクに近づくにつれて強くなることから、再電離イオンの熱負荷の集中する領域が存在するが、その位置はこの計算例では許容熱負荷の低いゲート弁とベローズの間の位置になっている。但し、さらにいろんな運転条件の下で計算を行い、熱電対の取り付けられるビームリミタと熱負荷の位置関係を正確に把握しておく必要がある。

4. 3. 8 金属シールゲート弁、高速シャッタ

既設の金属シールゲート弁を第4. 3-19図に示す。これを第4. 3-13図に示すように限られた空間に上下2式取り付けるために接続部分を交換する。すなわちフランジを小口径にし、かつビーム軸方向の幅を短くした上で取り付ける。

4. 1節に示したように接線NBIとJT-60Uとの間のガスの流れがあまり問題とならないことから、合理化の観点から高速シャッタは取り付けない予定であるが、実験上必要性が出て取り付けようという場合には隣接する機器との空間的干渉を避けるために駆動圧空系ユニットの位置を反転する必要がある。第4. 3-20図は既設の高速シャッタの構造図である。これを改造し、第4. 3-21図に示すように上下に並べて取り付けることになる。

4. 3. 9 打消しコイル

打消しコイルの磁気的な設計は4. 2節に述べたとおりである。

既設のものに比べ打消しコイルは口径がかなり大きくなるが、既設打消しコイル電

源の容量にも余裕があることから、以下のようにコイル抵抗を減らして既設の電源をそのまま用いるようにする。既設の電源の定格は

170 V × 1200 A 13秒(矩型波)

(負荷として抵抗 135 mΩ 以下、インダクタンス 4 ~ 11 mH 及びケーブル抵抗 6.9 mΩ を想定)

である。これに対し導体を並列接続することにより、コイルの抵抗の低減を図り整合をとる。

1) Mコイル

原型ユニット用に作られた模擬漏洩磁場発生コイルの実績を基に同じ 4.5 mm × 15 mm の 2 重ガラス巻平角線を 4 本並列に使用し、62 ターン巻く。このコイルは S コイルと異なり NBI タンクの外側にあることと、デューティが低く自然空冷で対処できることから、冷却は空冷とする。

導体断面積 : 270 mm²

導体重量 : 2.7 ton

導体抵抗 : 9.6 mΩ

インダクタンス : 50 mH

アンペアターン : 1320 A × 62 ターン ~ 82 kAT

2) Sコイル

既設の第 1 打消しコイルと同じホロー導体を用いた水冷式のものを 3 ターン巻く。

導体外径 : 12.5 mm × 10 mm

導体内径 : 9.5 mm × 7 mm

導体断面積 : 58.5 mm²

導体抵抗 : 8 mΩ

アンペアターン : 1320 A × 3 ターン ~ 4 kAT

電流値を既設電源の定格の 10% オーバーの値に設定しているが、漏洩磁場の時間変化が 3 角形状であるので電源の実力上問題はない。また電源の過電流設定値も現状 AC 側 125%、DC 側 120% であるので問題ない。ケーブルを含めた全抵抗は約 1.0 mΩ、インダクタンスはほぼ M コイルで決まり約 50 mH である。抵抗値は既設電源の仕様内となるがインダクタンスが仕様を超えており、そこで電流の立ち上げ時に必要な電源電圧を見積もって見る。5 秒間で 0 から 1320 A まで上げるのを必要な電流の立ち上げ速さとすると立ち上げ終了時に必要な電源電圧は

$$1320 \text{ A} \times 110 \text{ m}\Omega + 50 \text{ mH} \times 1320 \text{ A} / 5 \text{ sec} = 158 \text{ V}$$

これは電源定格電圧以下であるから、通常の滑らかな変化の漏洩磁場に対しては十分追従できることがわかる。

以上から電源は既設のものをそのまま用いることとする。上下ユニット独立してコイルと電源を接続することになるが、一方発生する磁場は上下で干渉することから、電源は連動させて制御する必要がある。例えば上ユニットだけ入射する場合も両方の打消しコイルを運転する必要がある。そこでユニット毎に独立して制御するようになっている既設の制御系を上下連動式に改造する。既設の打消しコイルの制御には漏洩磁場と打消し後の残留磁場をモニタする2つの1軸ホール素子の信号が用いられている。接線NBIも既設NBIとの対応をつけるために漏洩磁場のモニタについては隣接する既設NBIの漏洩磁場モニタ用のホール素子（主排気タンク外壁真横）に並べて取り付ける。残留磁場モニタ用のホール素子はSコイルの中心付近に取り付けられる。

4. 3. 10 配管用ヤグラ及び配管、配線

既設のヤグラは接線NBIユニットと空間的に干渉することから、ヤグラは新設となる。その構造の計画図を第4. 3-22~25図に示す。SF₆ガスダクトからの取り出し口である端子ボックスと端子ボックスからイオン源に至る配線トレーは最大120kVに充電されることから、他機器と60cm以上の絶縁距離を確保するよう留意した。SF₆ガスダクトは地下のPIG電源室から既存の貫通孔を通すことから曲がりが多くなるが、直角に曲げると通線が困難になることから、図に示されるように斜め配管とする。

イオン源はフィラメント交換や再調整等で取り付け取り外しが比較的簡単に見えるよう配慮する必要がある。既設NBIでは上ユニットについては本体室天井走行クレーンを、下ユニットについてはヤグラに取り付けたジブクレーンを用いていた。接線NBIに於ても上ユニットについては天井走行クレーンを用いることができるが、下ユニットについてはイオン源が上下ユニットで近接していることからジブクレーンを使用することができない。そこでヤグラの3階の天井に第4. 3-26図に示すようなレールを取り付け天井走行クレーンの利用できる位置まで引き出す方式を採用することとした。

4. 3. 11 制御系

制御系の必要な改造には以下の項目がある。

- 1) 上下ユニットが真空的につながったことに伴う真空的なインターロックの手直し。
- 2) クライオパネルが上下ユニットでまとめられたことに伴う冷媒循環系（液体ヘリウム、液体窒素）の制御の改造。

- 3) 打消しコイルの形状が変わり、かつ上下連動させることに伴う改造。
- 4) 計算機のモニタに関する改造。

等である。

第 4.3-1 表 TMP 設置位置に発生する磁場の予測値

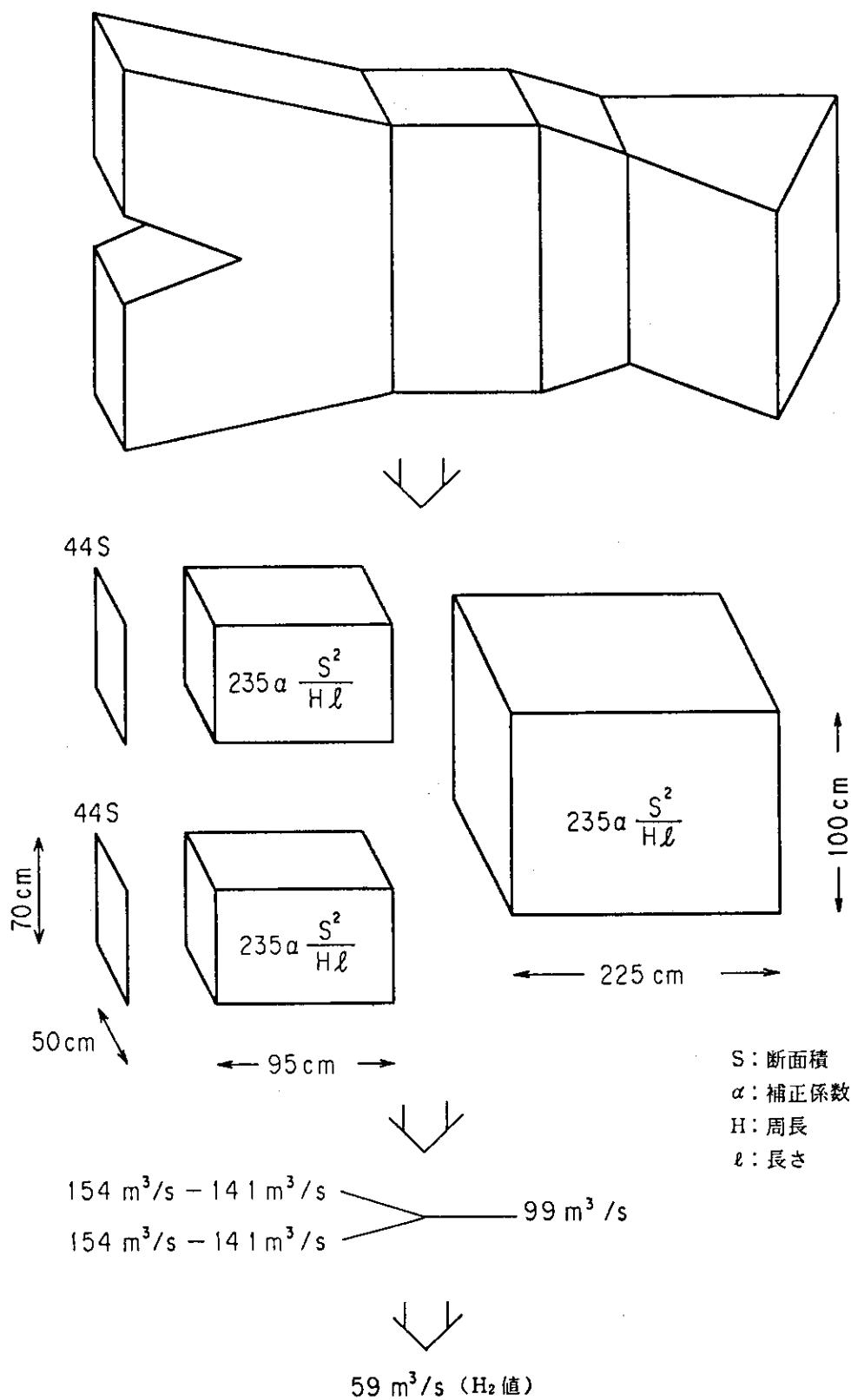
	Bx	By	Bz	B (単位 : G)
漏洩磁場のみ	-124	37	-81	153
打消し磁場のみ	85	76	148	187
磁場打消し時	-39	113	67	137

- 1) 座標系は第 4.2-3 図参照。
- 2) TMP 設置予定位置 : x=-10.6m, y=0.92m, z=4.1m

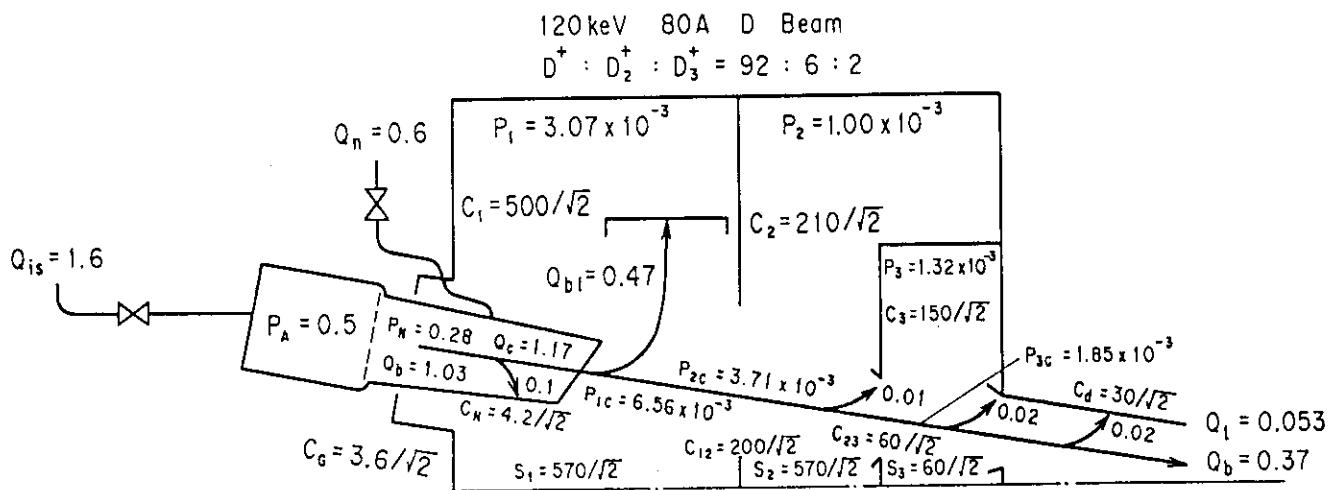
第4.3-2表 イオン源のギャップと関連パラメータの比較

	JT-60NB1イオン源 旧ギャップ ¹⁾		JT-60UNB1イオン源 新ギャップ ¹⁾	
	D.ビーム時	Hビーム時	D.ビーム時	Hビーム時(短バルス) ²⁾
ギャップ長 (mm)				
第1～第2正電極間	5.0	4.0	4.5	
第2～減速電極間	6.5	5.0	10.0	
減速～接地電極間	2.5	2.5	2.5	
運転条件				
ガス種	H	H	H	H
加速電圧 (kV)	100	75	120	120
第2正電極電圧 (kV)	70	48.75	90	80
電圧比	0.7	0.65	0.75	0.7
減速電圧 (kV)	-2	-2	-2	-2
加速電流 (A)	80	90	80	80
電界強度 (kV/mm)				
一段目	6	6.56	6.67	4.44
二段目	11.08	10.15	9.2	10.2
電界比	1.846	1.55	1.23	2.30
焦点距離 (m)	8.3	6.84	11.95	11.21.78

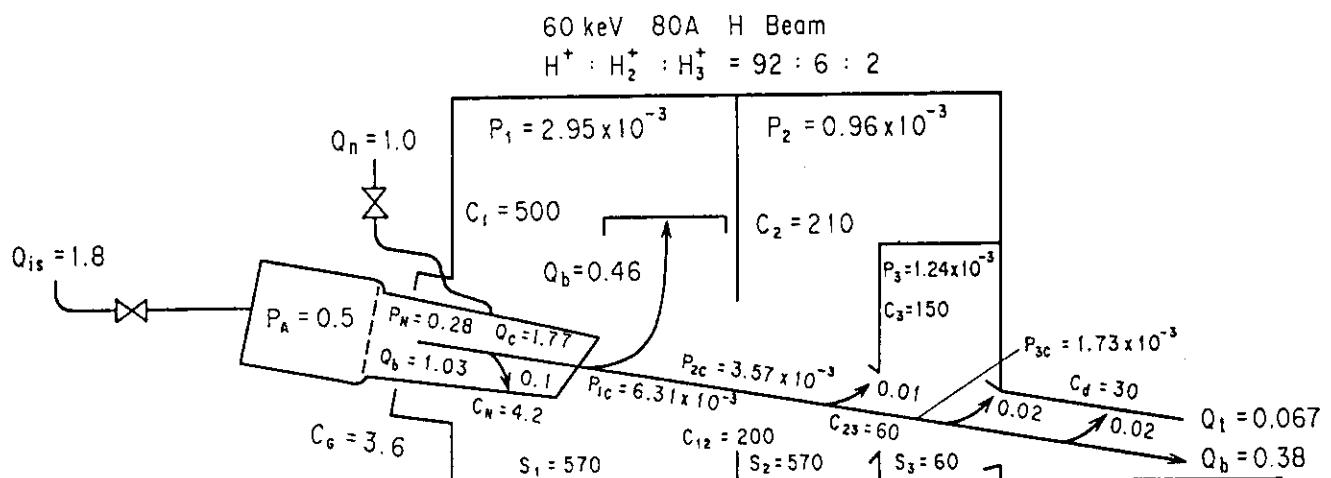
- 1) 旧ギャップは当初設定されたもので100keVまでの運転が可能。新ギャップはビームパワーの増大を狙って変更されたもの。
 2) Dビームに代ってイオン源のコンディショングを行ったための条件。プラズマへの入射は想定していない。



第 4.1-1 図 ドリフト管のコンダクタンスの概算。

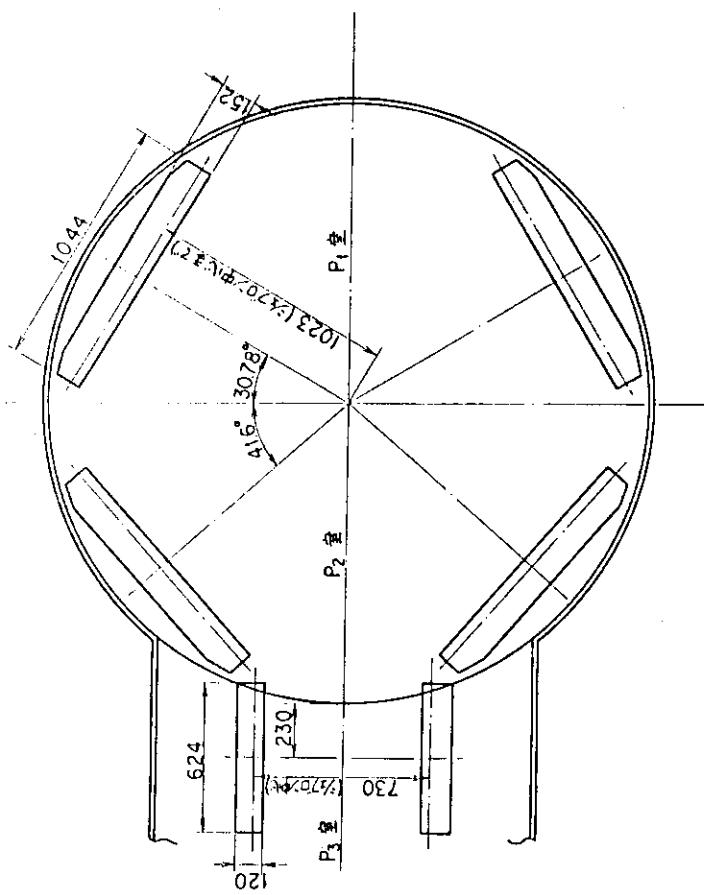
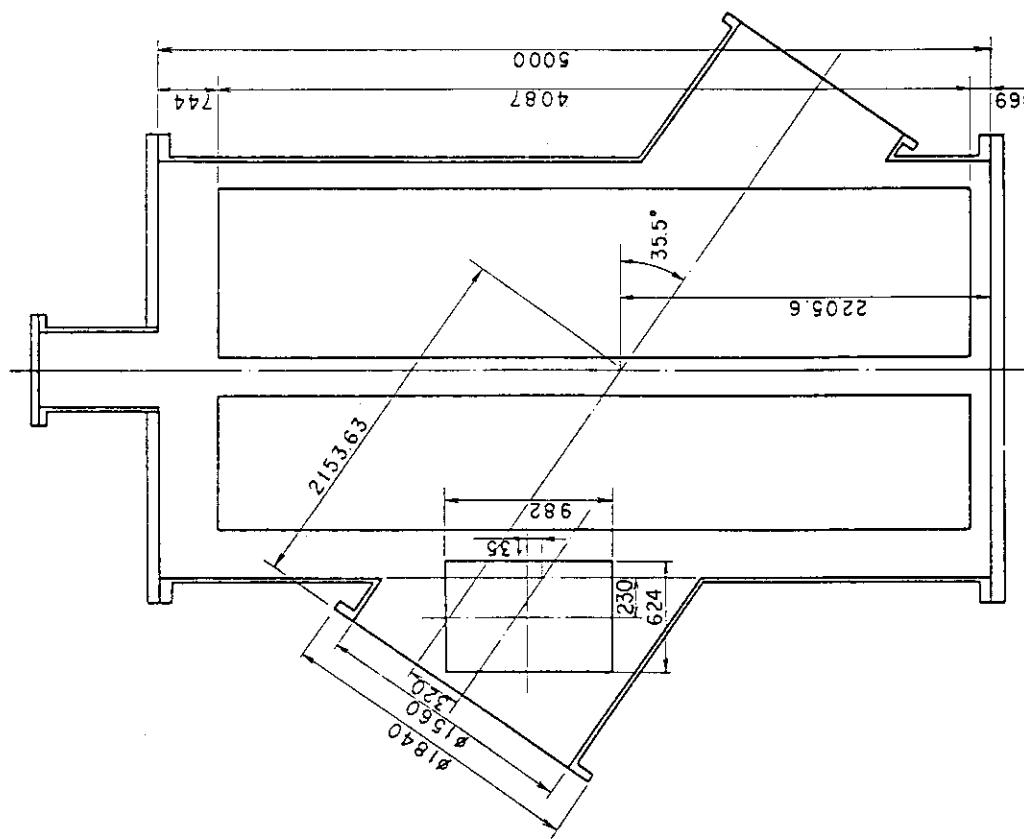


(a) D ビームの場合。

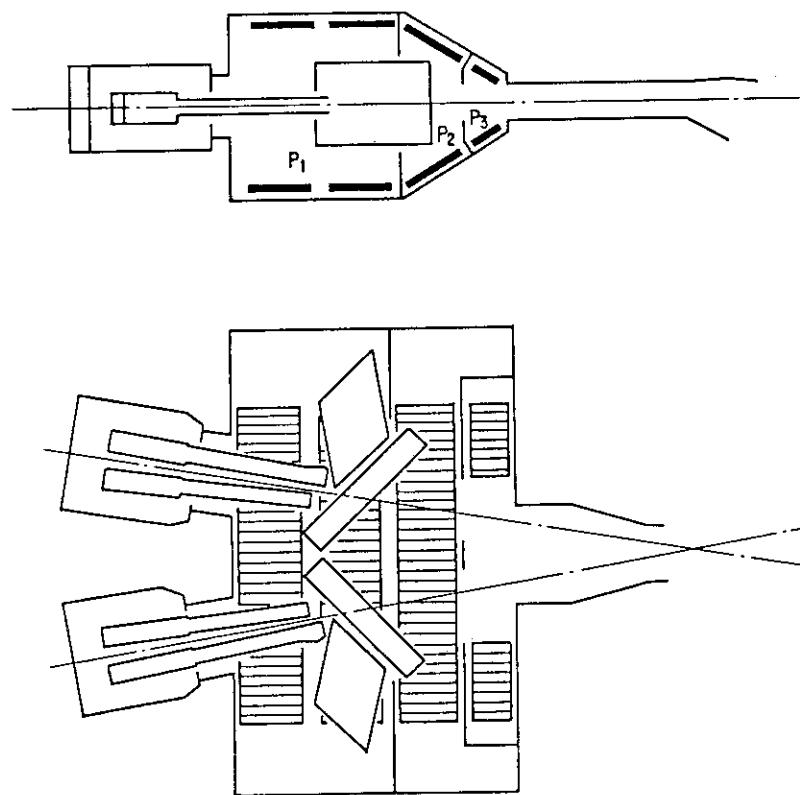


(b) H ビームの場合。

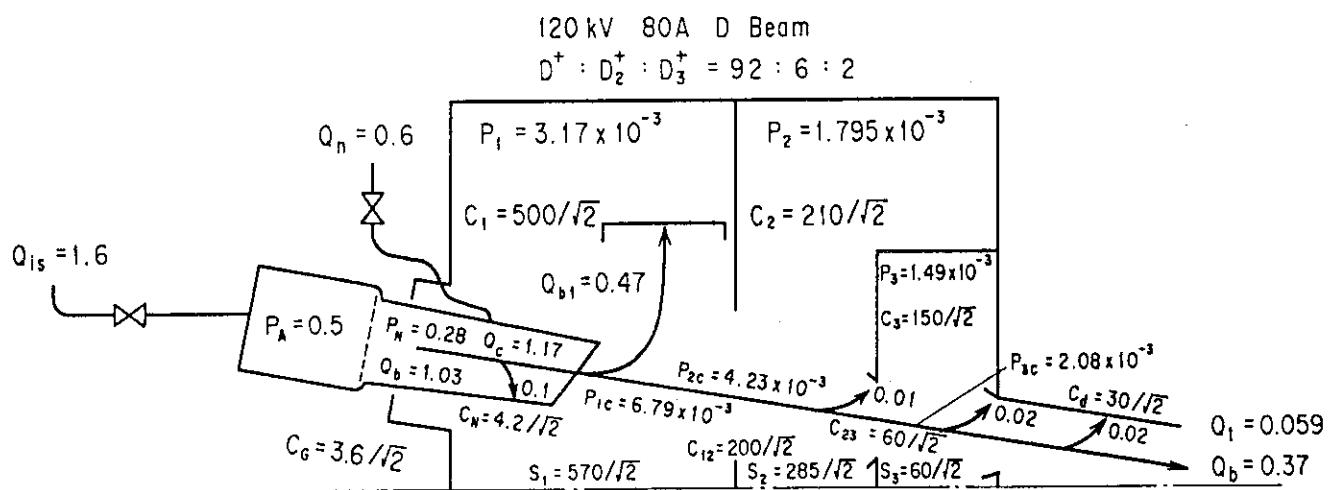
第 4.1-2 図 NBI タンク内のガスフローの比較。



第4.1-3図 既設NBIのクライオオパネルの配置。

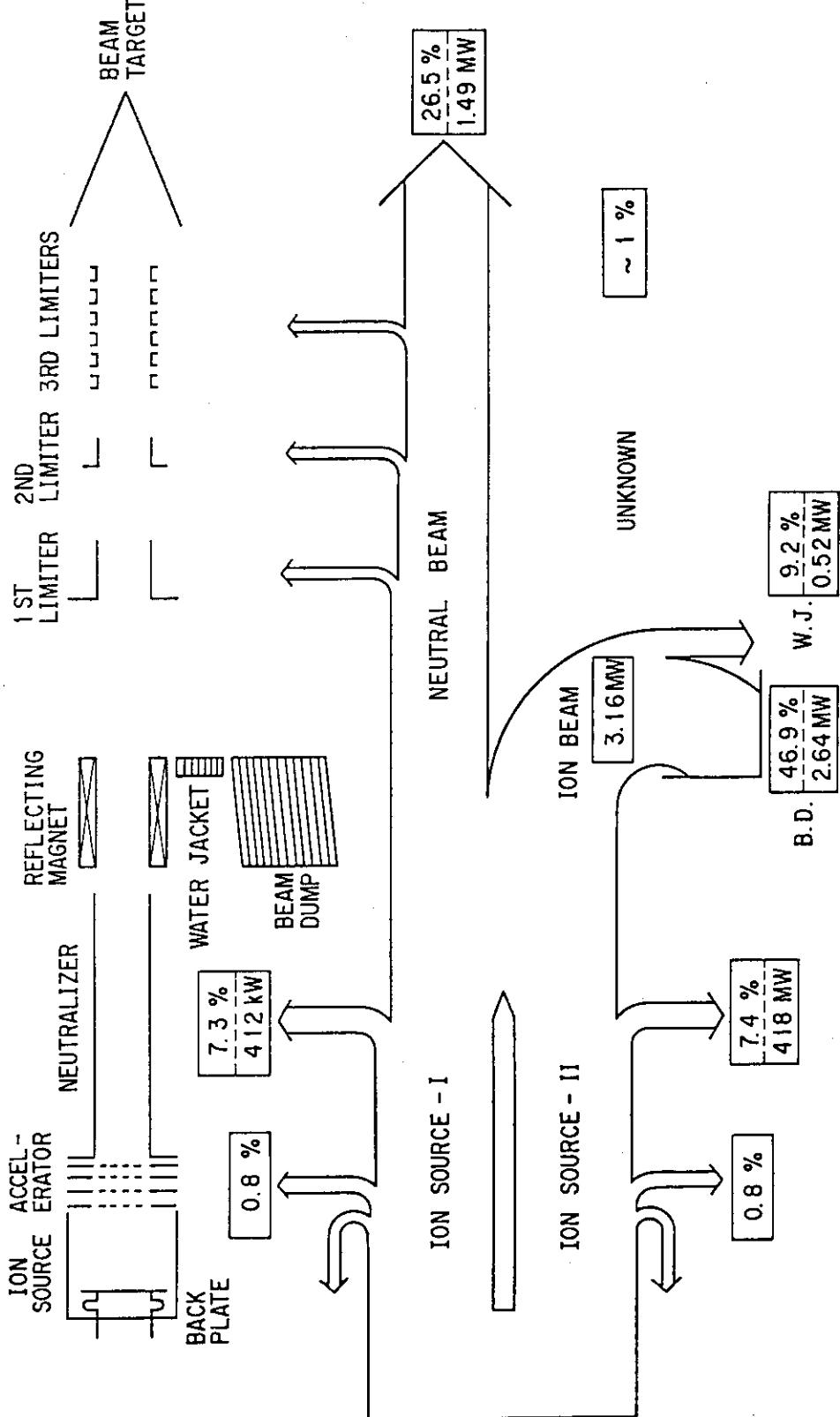


第 4.1-4 図 接線 NBIにおいて合理化した場合のクライオパネルの配置。



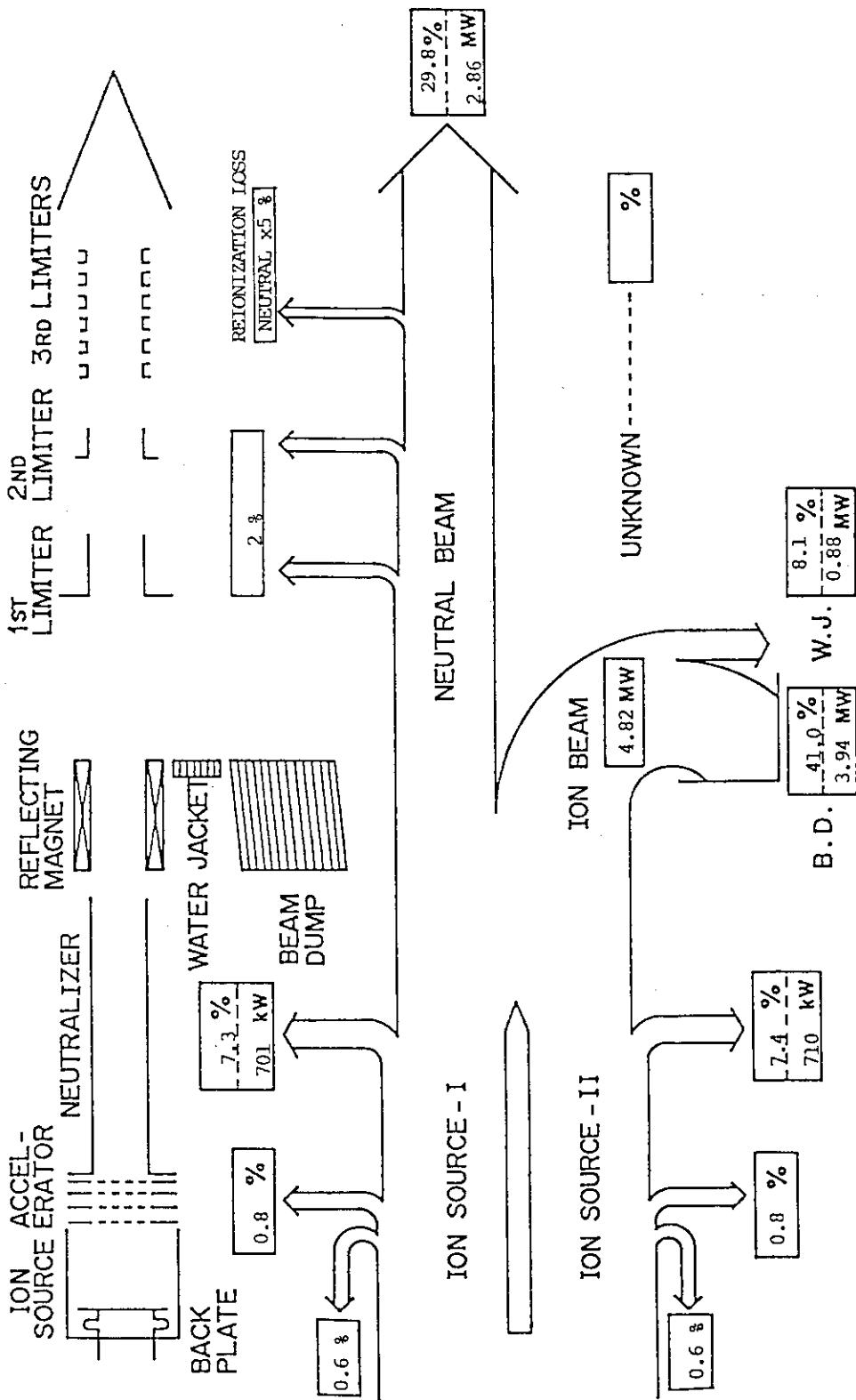
第 4.1-5 図 クライオパネルの枚数を合理化した場合のガスフロー。

POWER FLOW AT 754 kV/74.7 A/9.92 SEC
(WITHOUT STRAY FIELD)

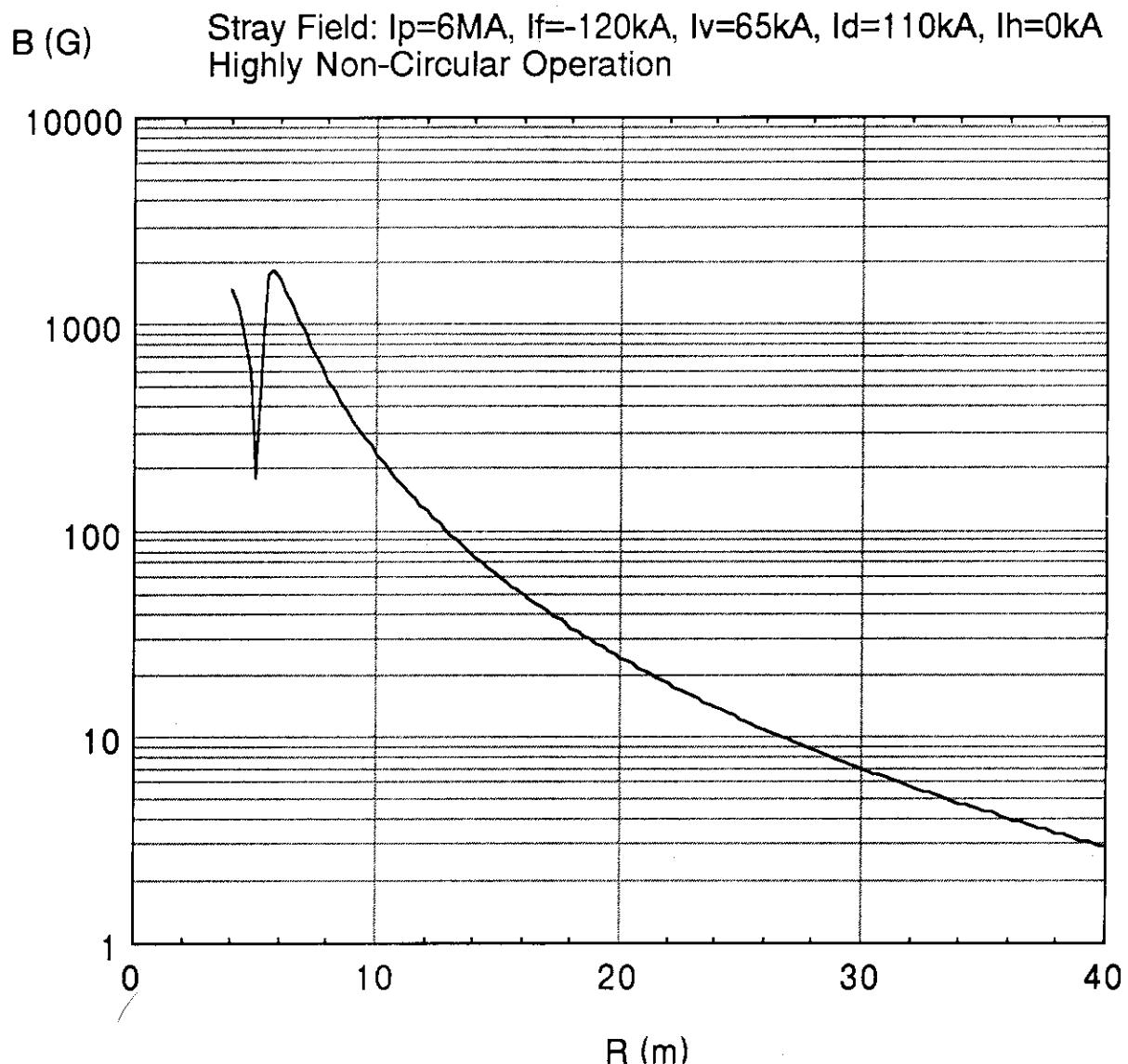


第4.1-6図(a) NBIタンク内のパワーフロー(原型ユニットで測定されたHビーム運転時のパワーフロー)。

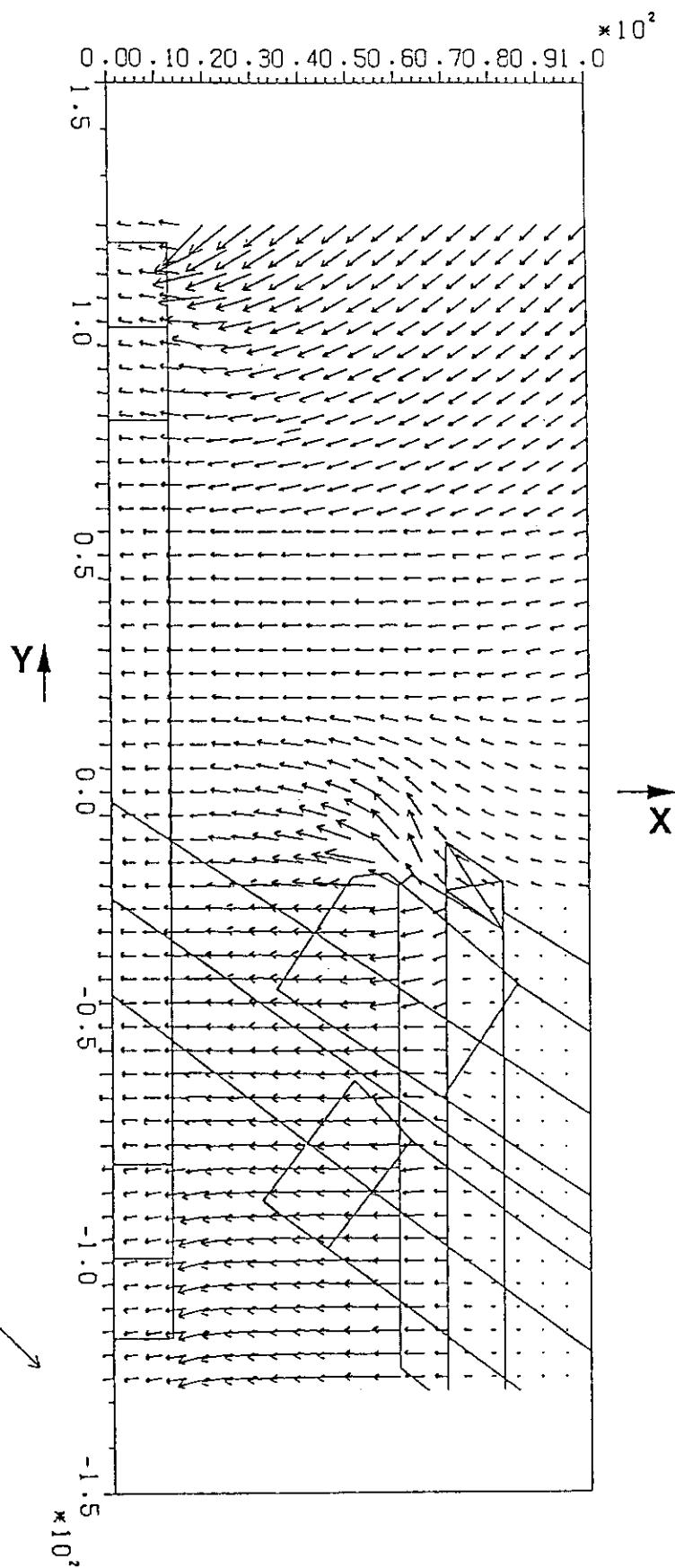
POWER FLOW AT 120keV/80A/D beam (CALCULATED)



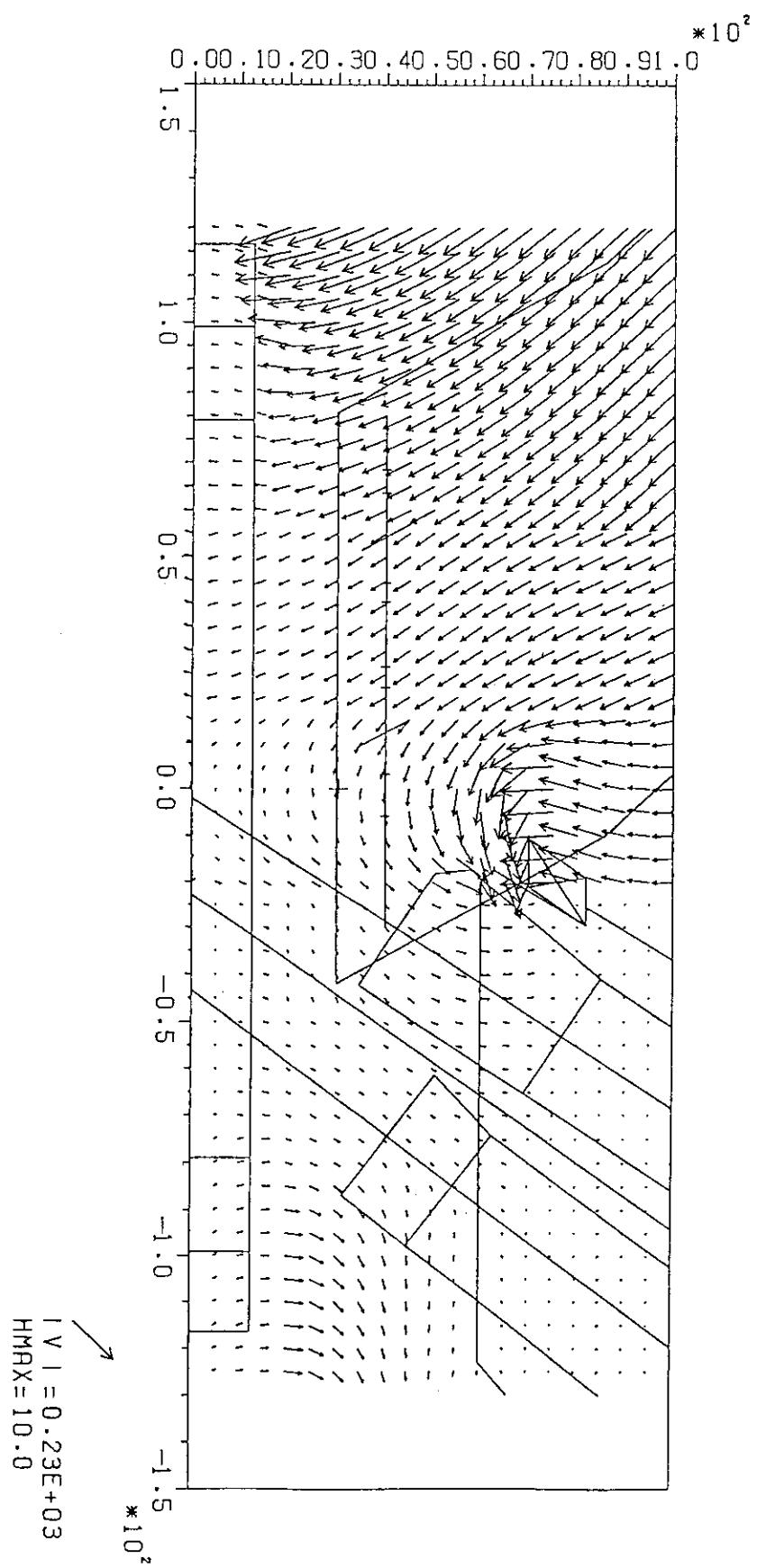
第 4. 1 - 6 図(b) NBI タンク内のパワー フロー (接線 NBI で D ビーム運転をした場合のパワー フロー (推定値))。



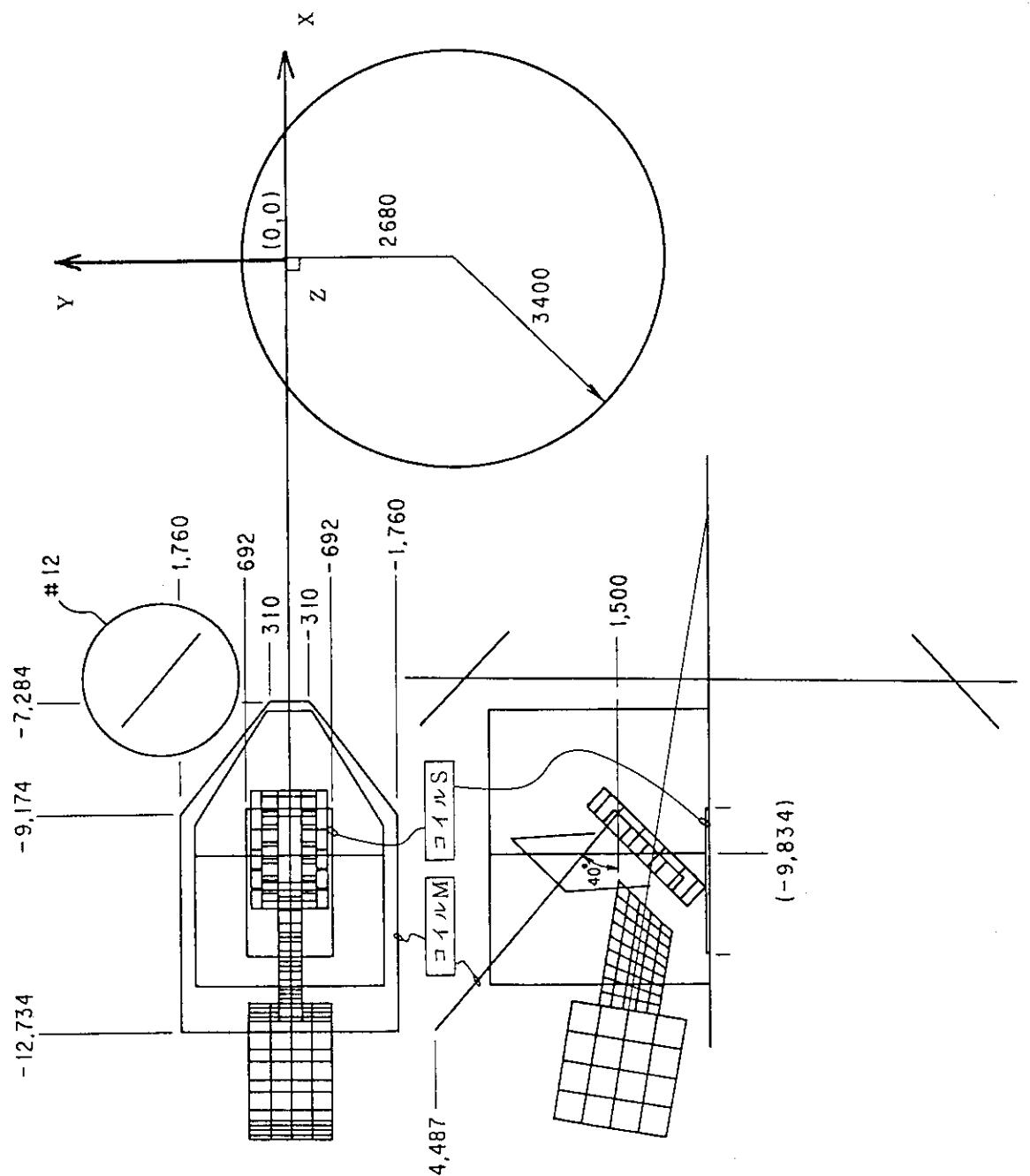
第4.2-1図 磁気シールドの設計に用いた標準漏洩磁場のトカマク赤道面上における磁場強さ。



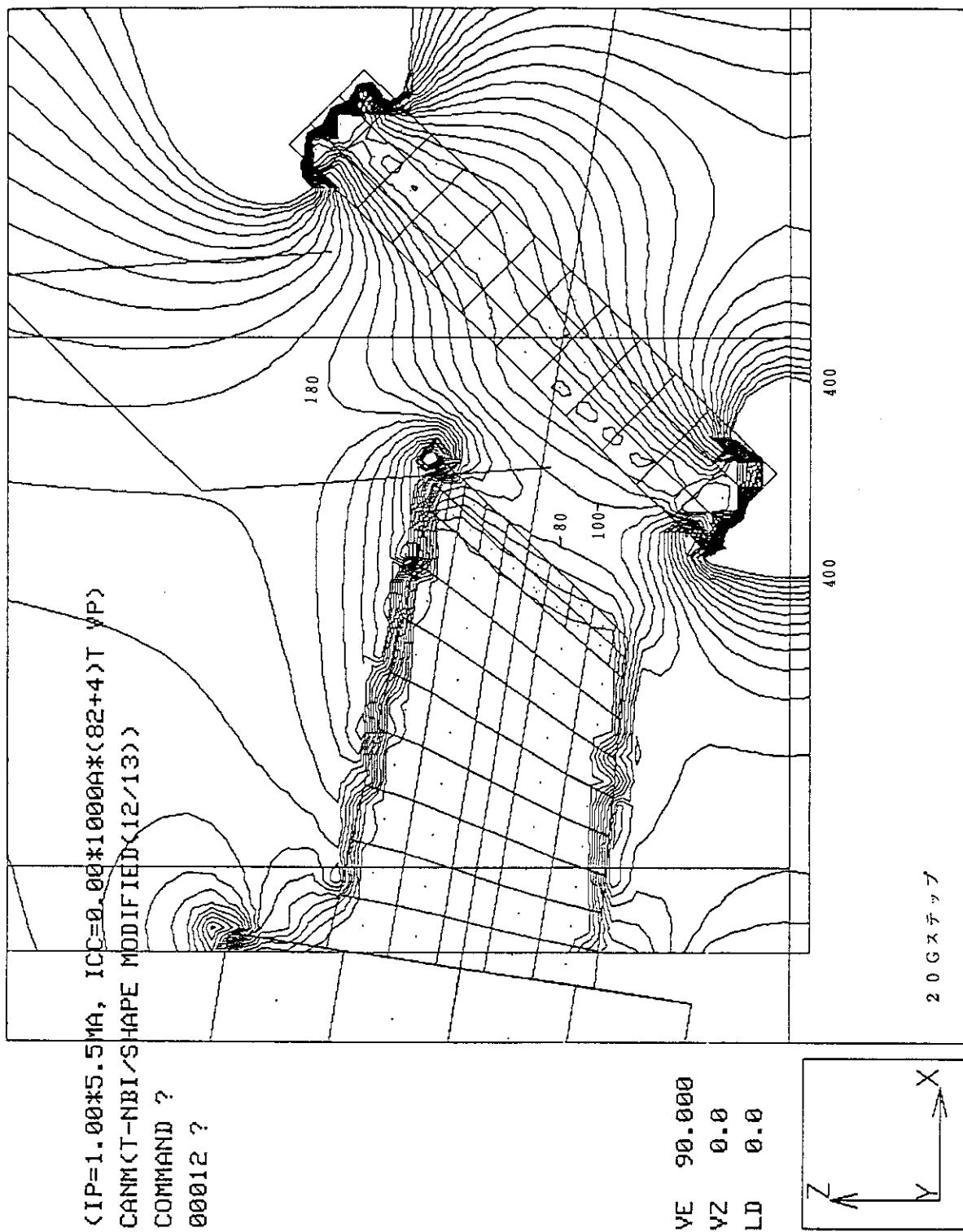
第 4.2-2 図(a) 既設 NBI における磁場の分布（漏洩磁場の分布。
磁場の強さは欄外の基準ベクトルの長さで 600 G)。



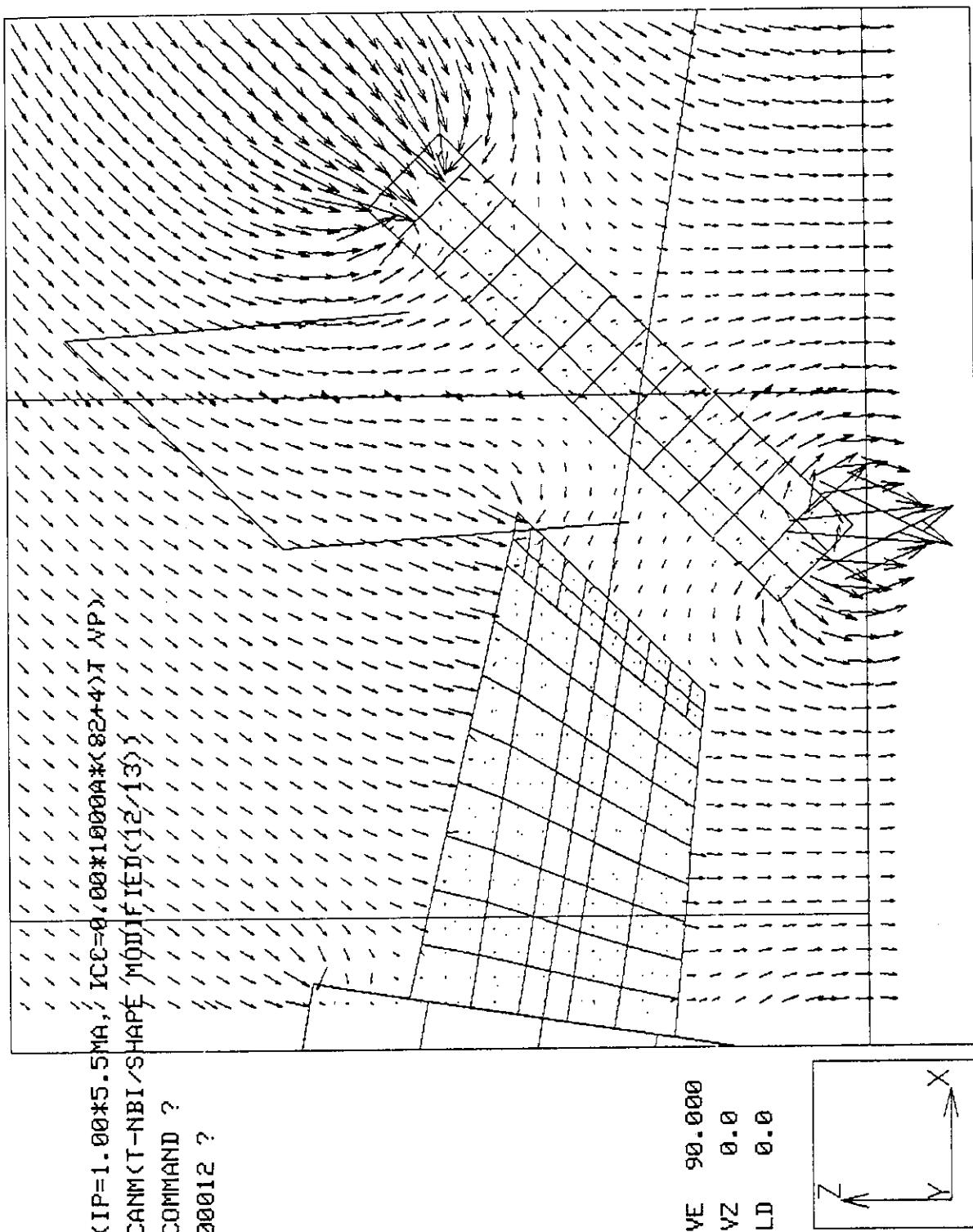
第 4.2-2 図(b) 既設 NBI における磁場の分布 (打消し後の磁場分布。
磁場の強さは欄外の基準ベクトルの長さで 230 G)。



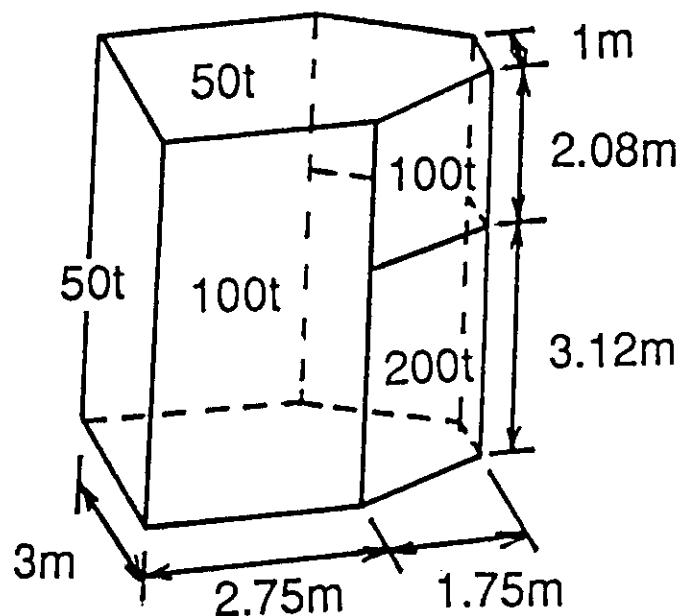
第4.2-3図 接線NBIの磁場計算に用いた配置。



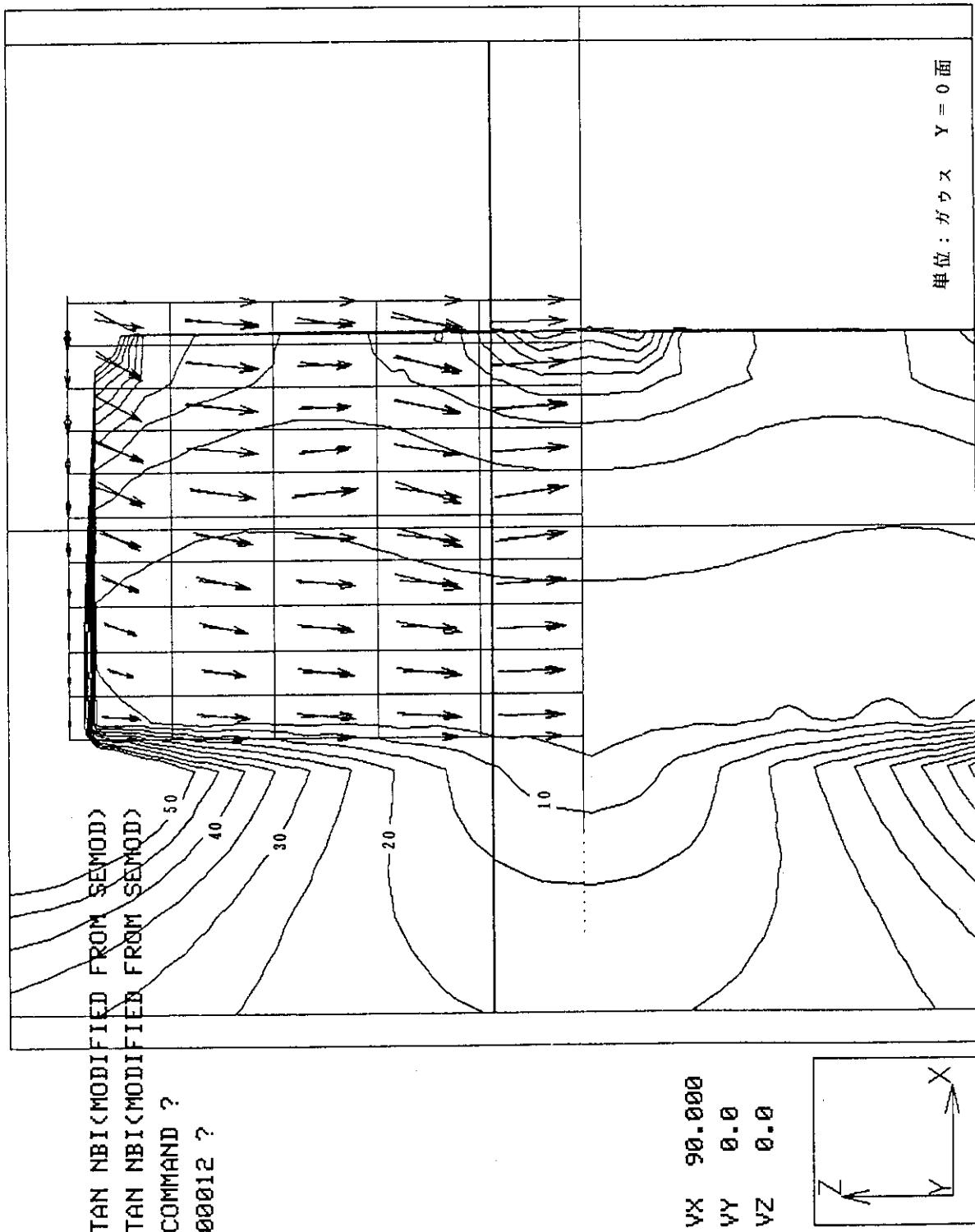
第4.2-4図(a) 接線NBIにおける漏洩磁場の分布(漏洩磁場の強さ)。



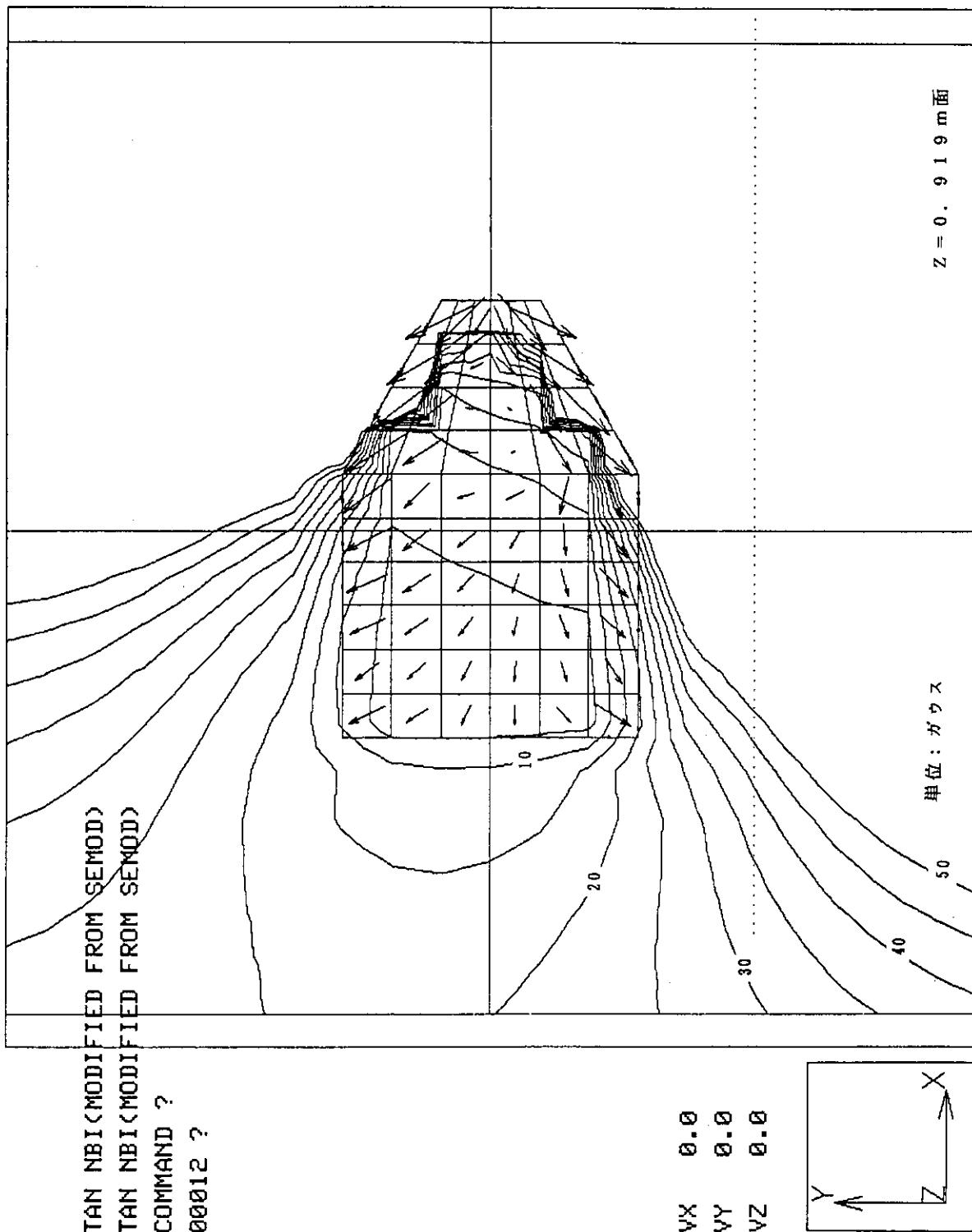
第4.2-4図(b) 接線NBIにおける漏渦磁场の分布(漏渦磁场の方向)。



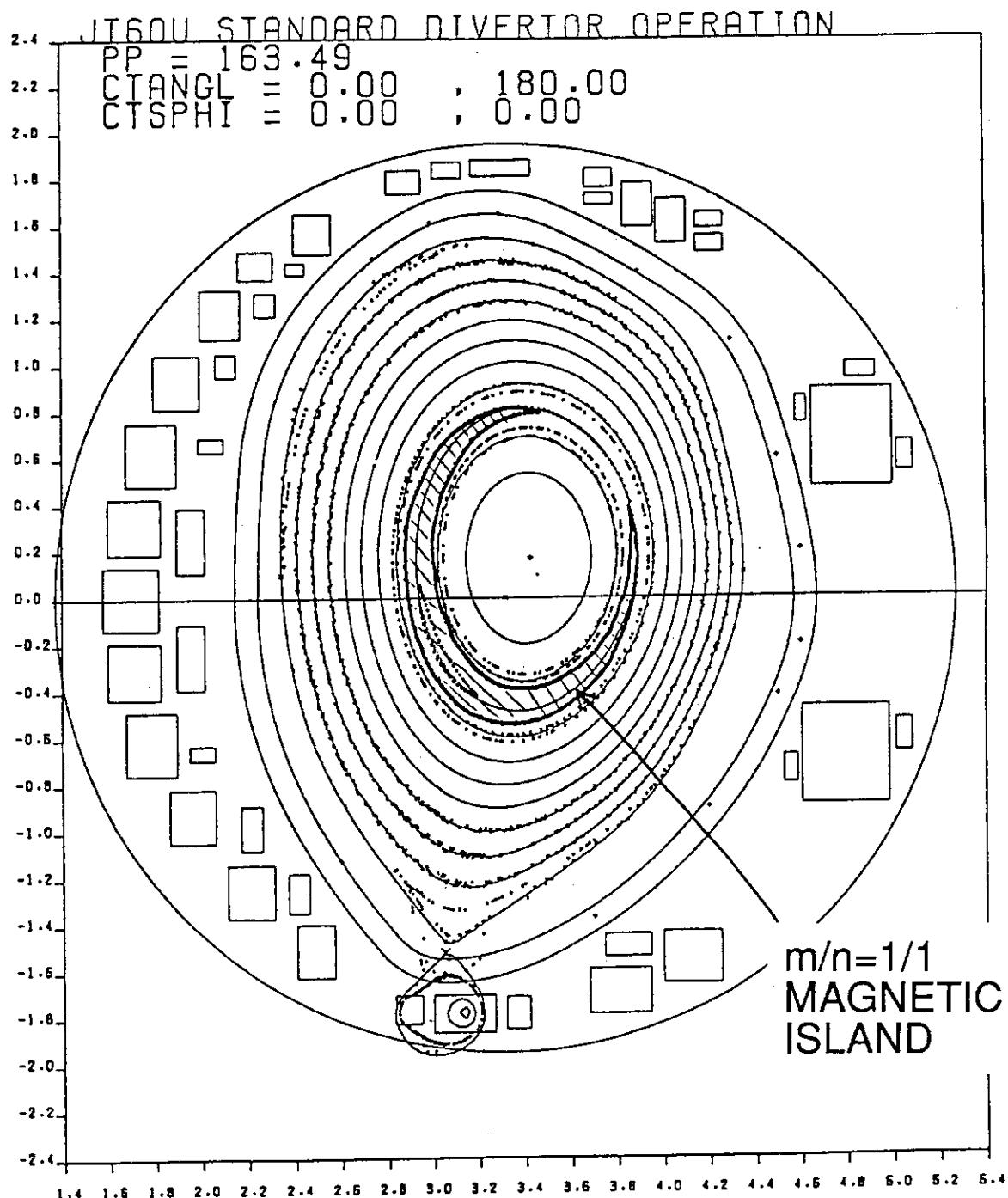
第4.2-5図 接線NBIのタンク自体を軟鉄で製作し磁気シールドを兼ねる場合の必要な厚み。



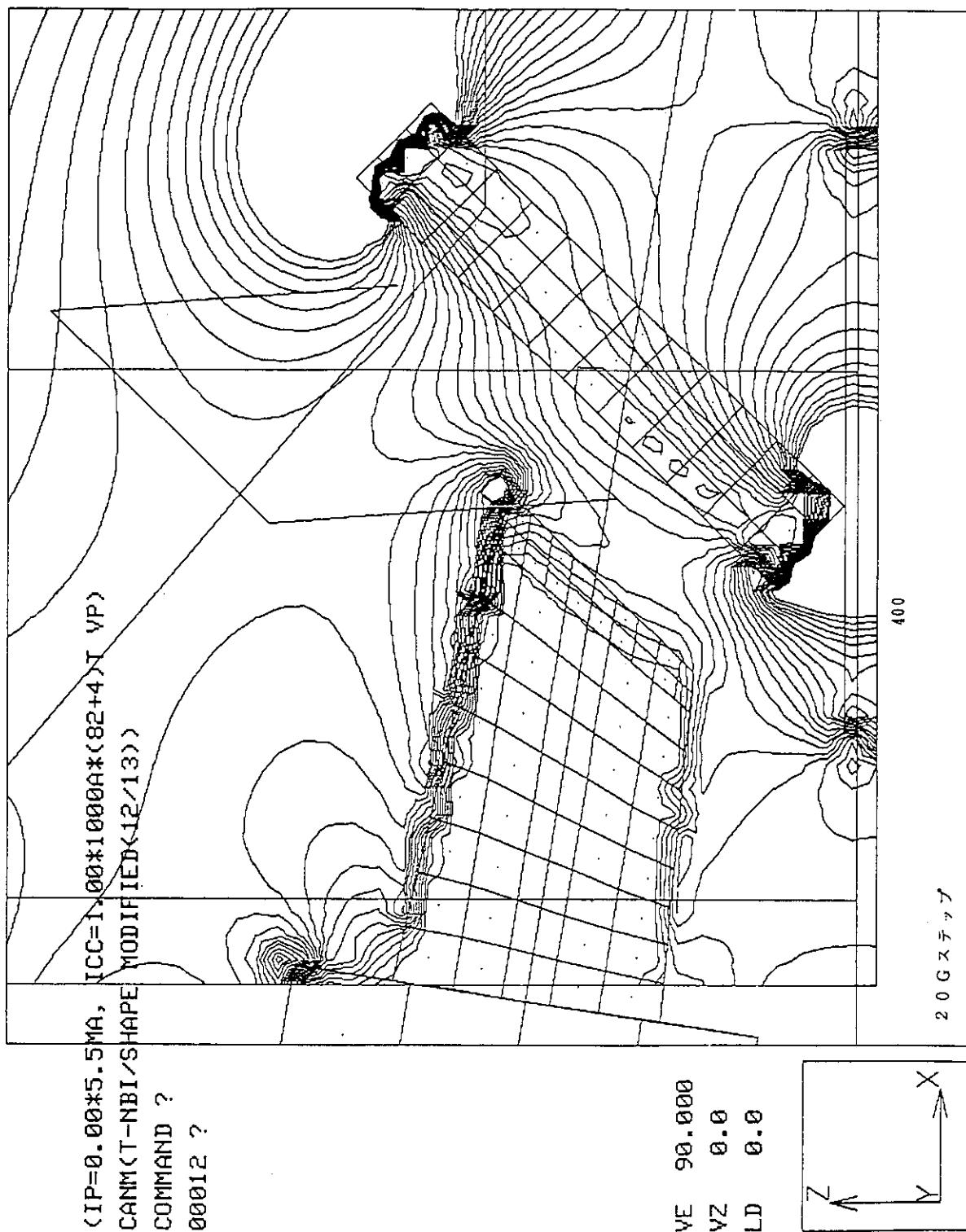
第4.2-6図(a) 接線NBIのタンク自体を軟鉄で製作し磁気シールドを兼ねる場合の磁場分布の計算結果
(タンク中心を通る鉛直面上の磁場分布)。



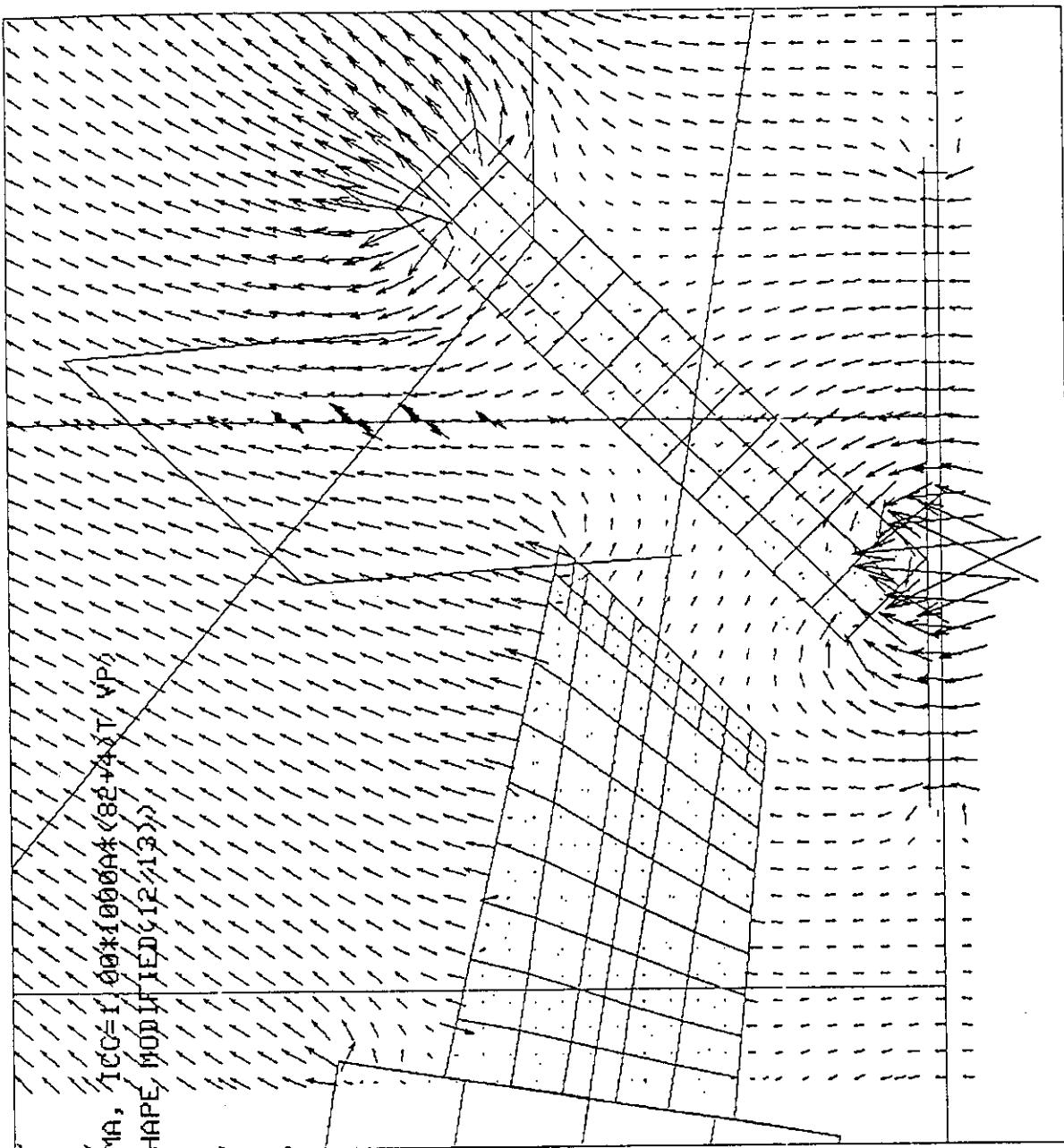
第4.2-6 図(b) 接線 NBI のタンク自体を軟鉄で製作し磁気シールドを兼ねる場合の磁場分布の計算結果。
(水平な $z = 0.919 \text{ m}$ 面 ((a)図中の水平な実線の位置) 上の磁場分布)。



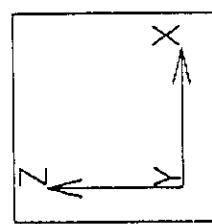
第4.2-7図 第4.2-5図の磁気シールドの発するエラー磁場による磁気
アイランドの形成状況。

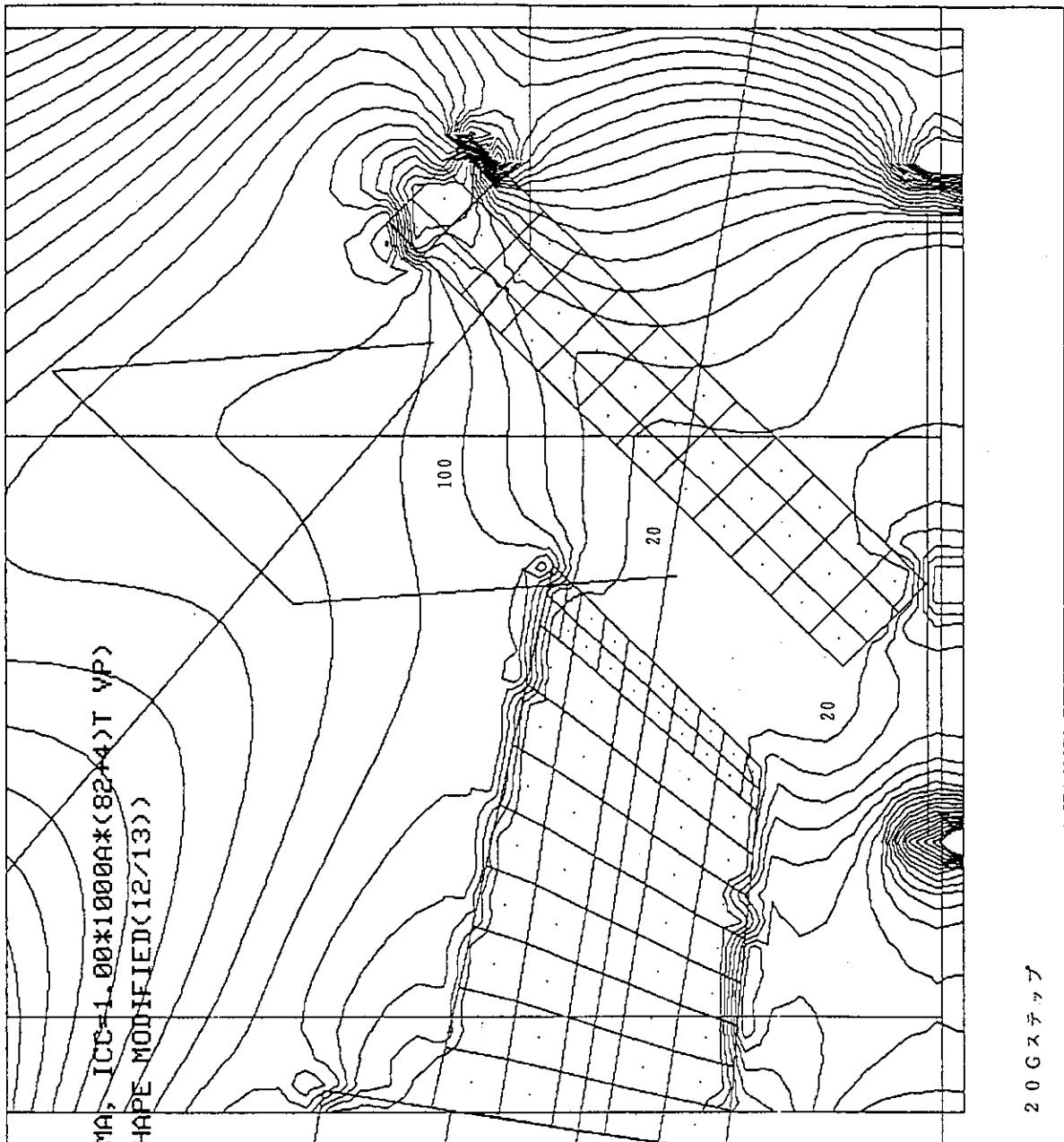


第4.2-8 図(a) 接線 NBI 用打消しコイルの発生する磁場分布（磁場の強さ）。

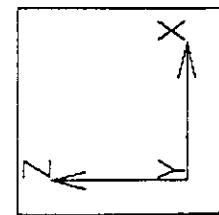


第4.2-8図(b) 接線NBI用打消しコイルの発生する磁場分布(磁場の方向)。

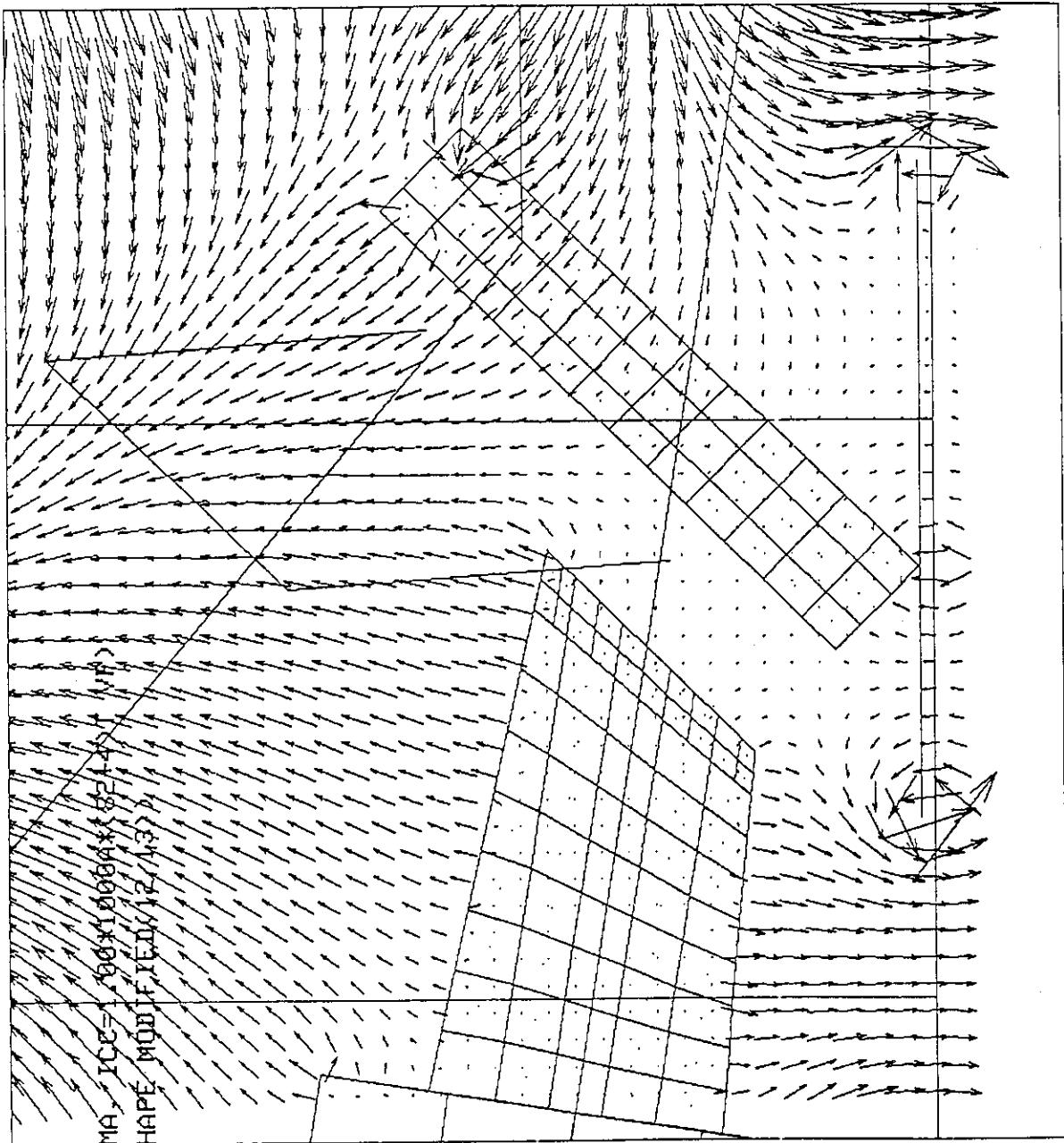




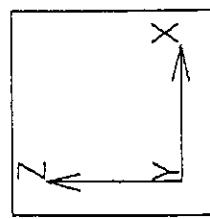
VE 90.000
 VZ 0.0
 LD 0.0



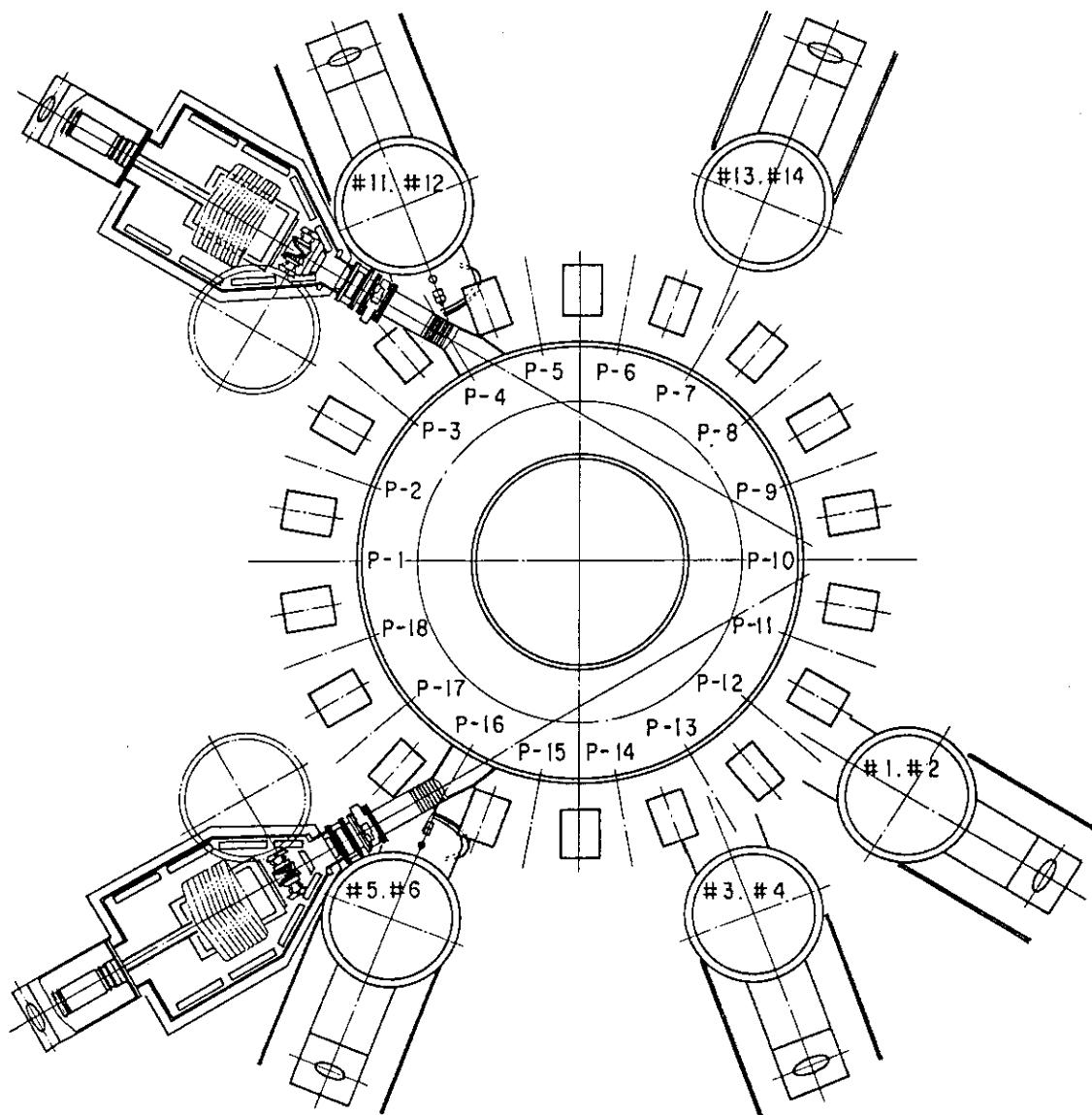
第4.2-9図(a) 打消しコイルにより漏れ磁場を打ち消したときの磁場分布
(磁場の強さ)。



YE	90.000
YZ	0.0
LD	0.0

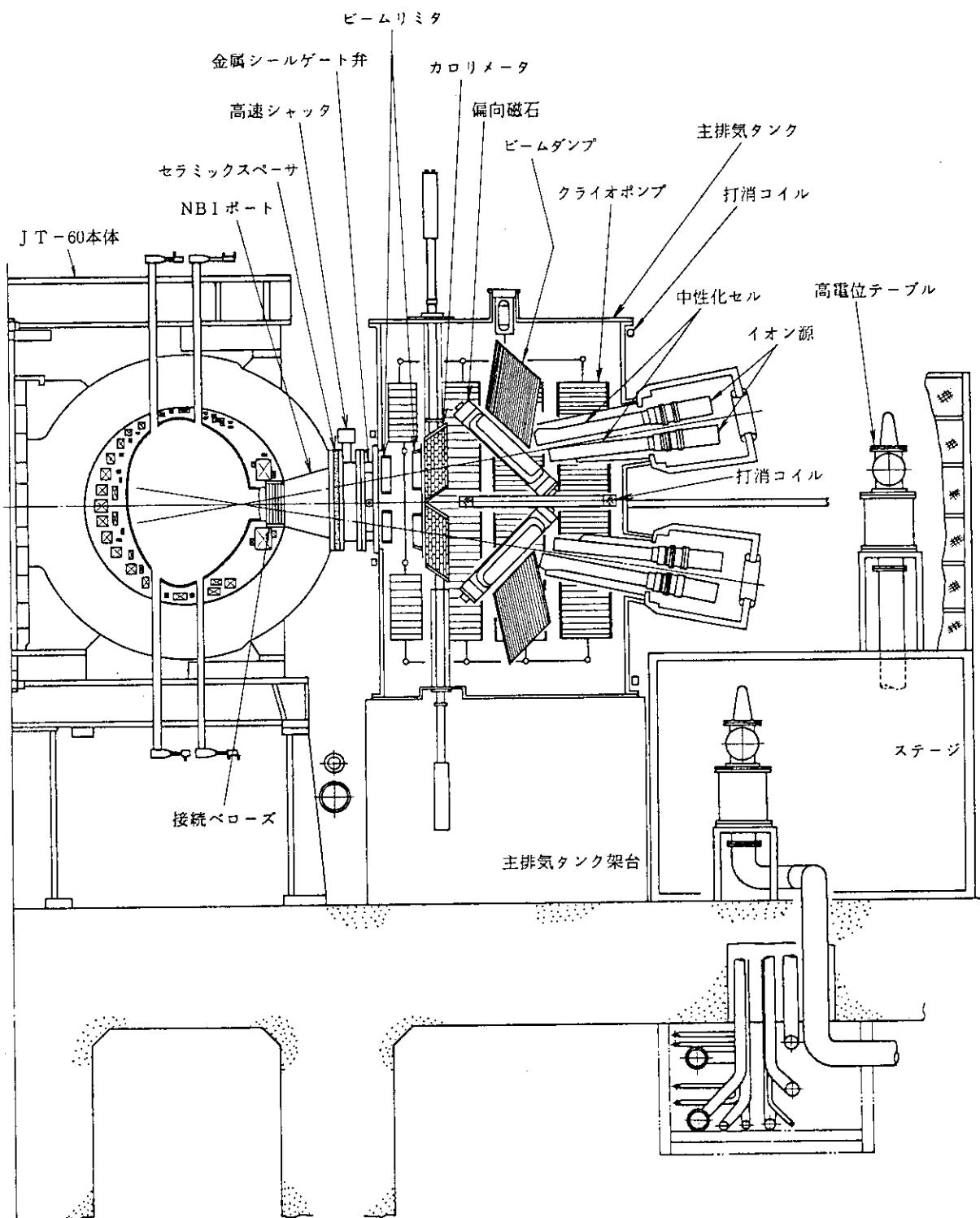


第4.2-9図(b) 打消しコイルにより漏洩磁場を打ち消したときの磁場分布
(磁場の方向)。



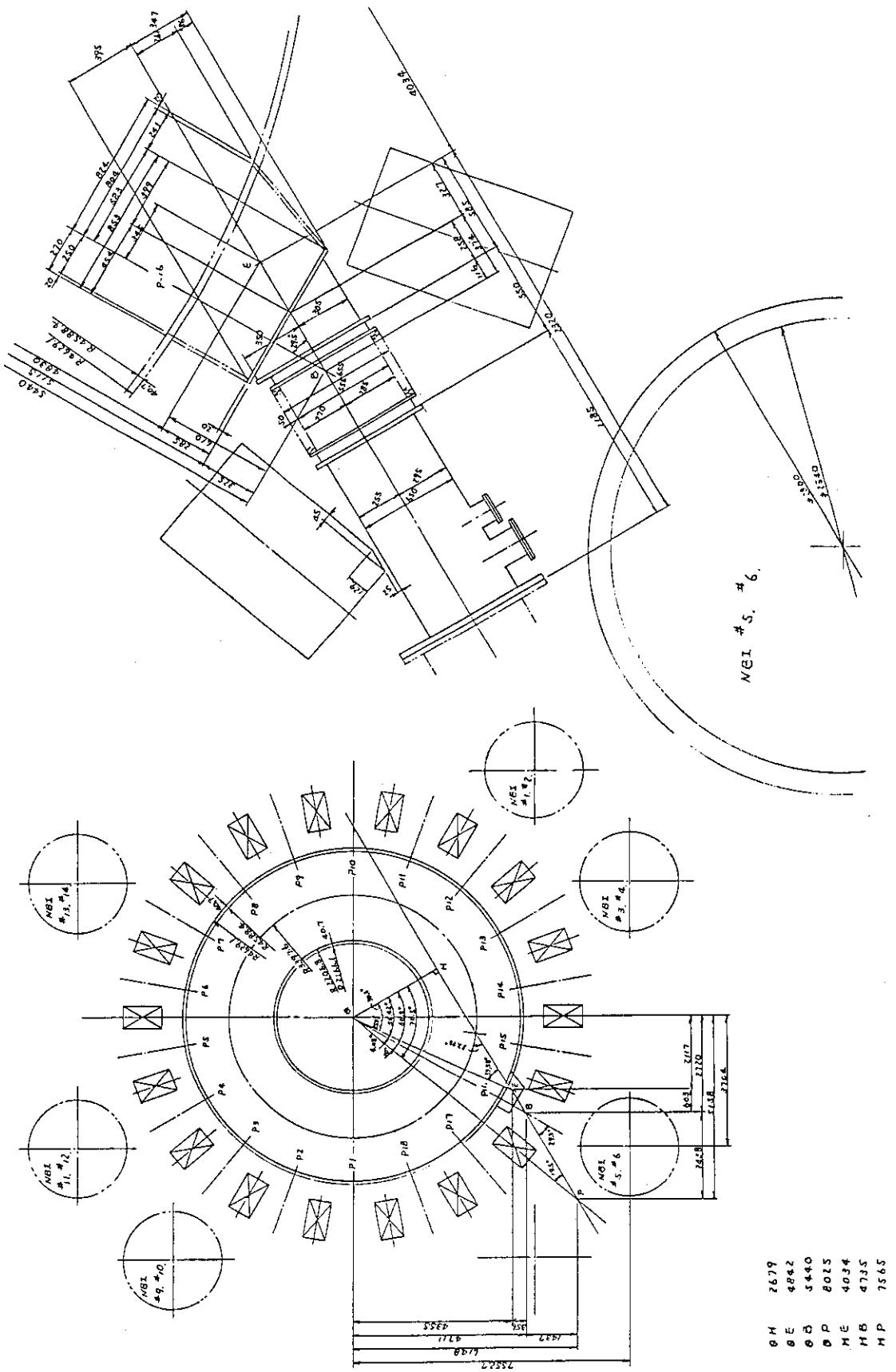
J T - 60 U 接続化 N B I 入射セクター

第 4.3-1 図 接線 NBI の配置。

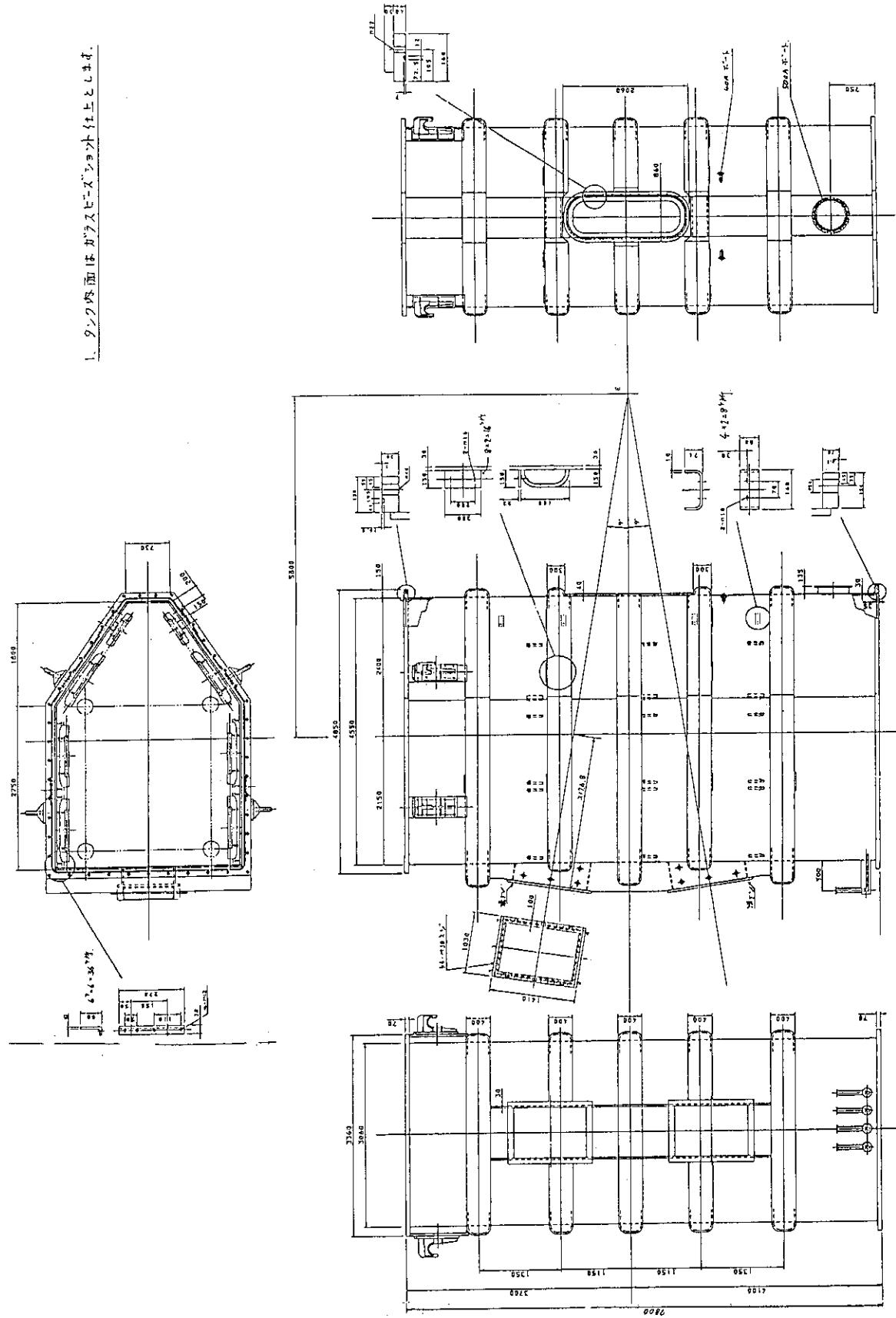


JT-60U 接続化NBI断面図

第4.3-2図 接線NBIの側面図。

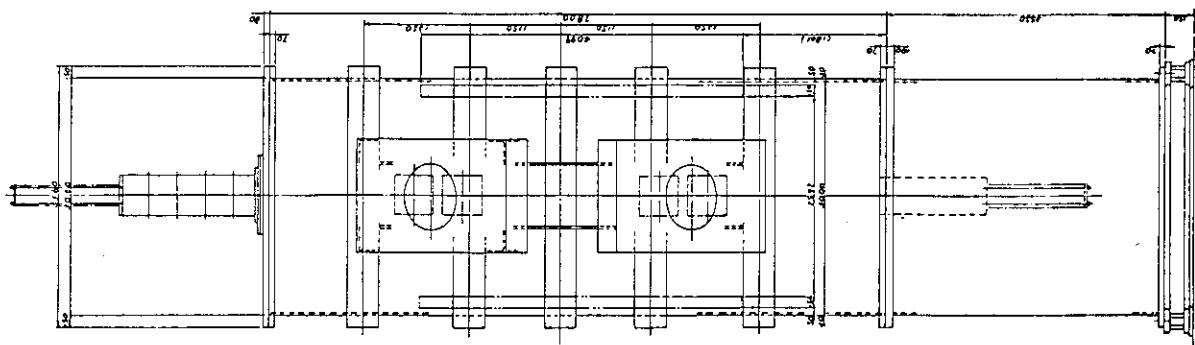
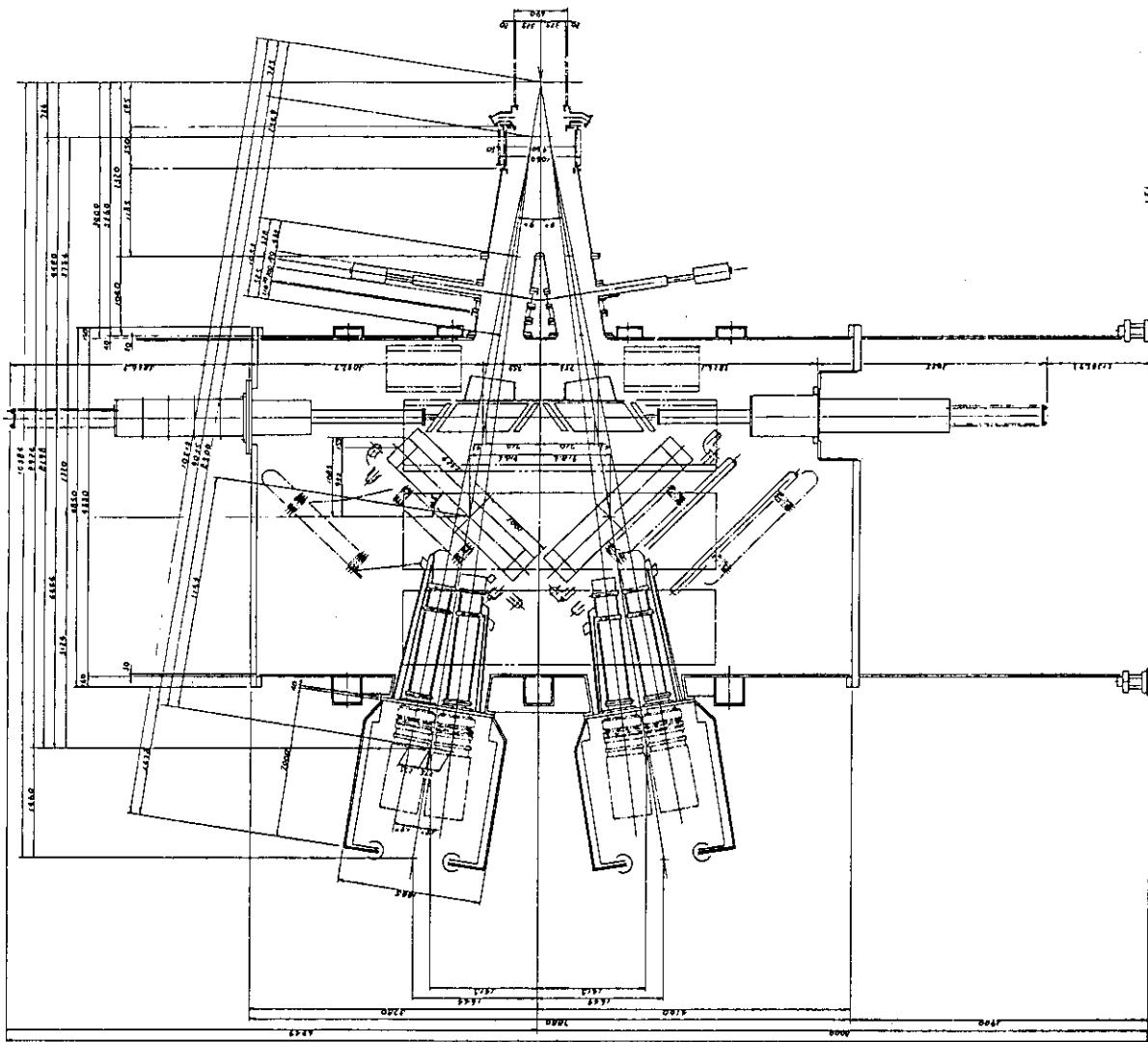


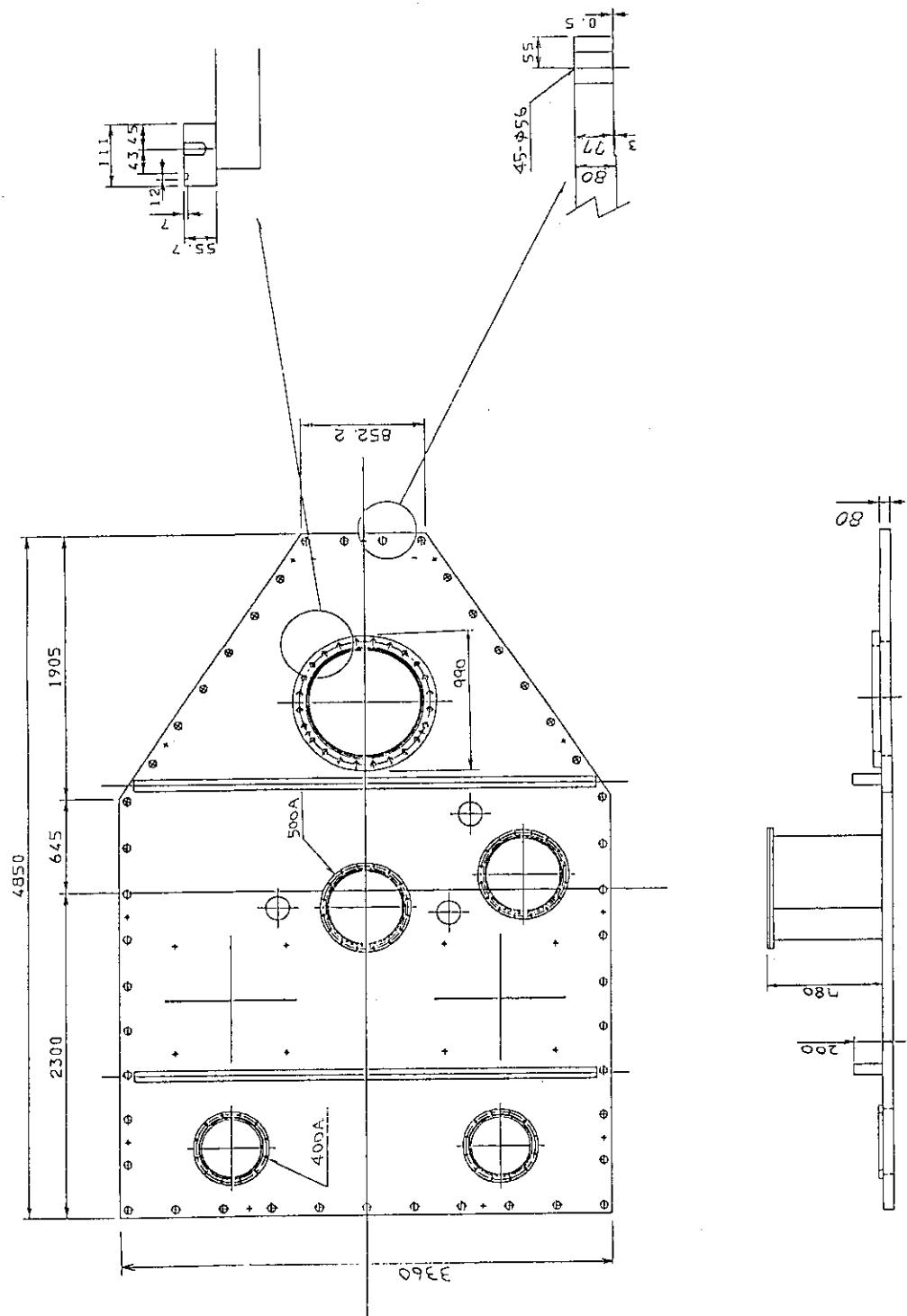
第4.3-3 図 ビーム軸の定義。



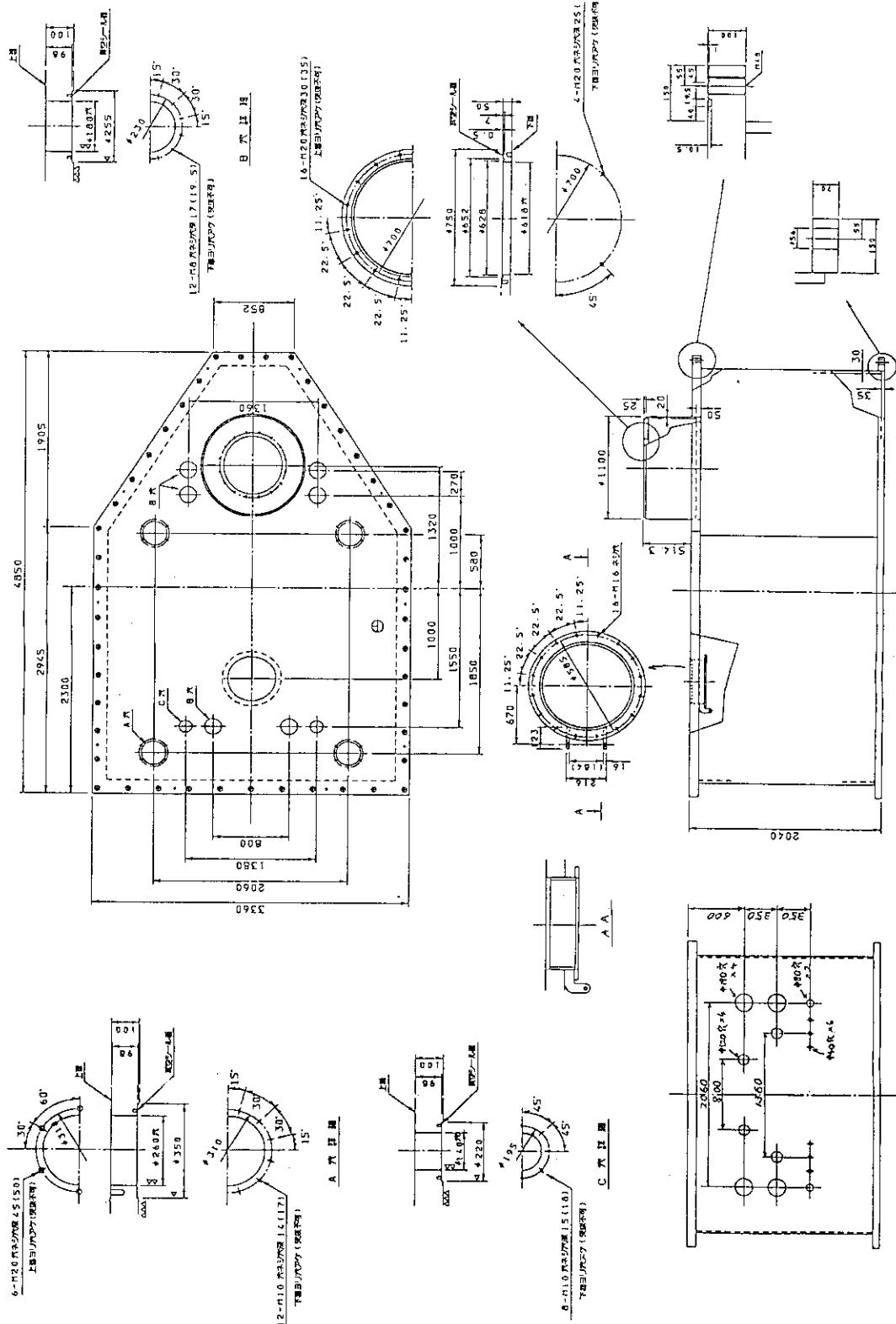
第4.3-4図 主排気タンク。

第4.3-5図 主排気タンク内部構造図。

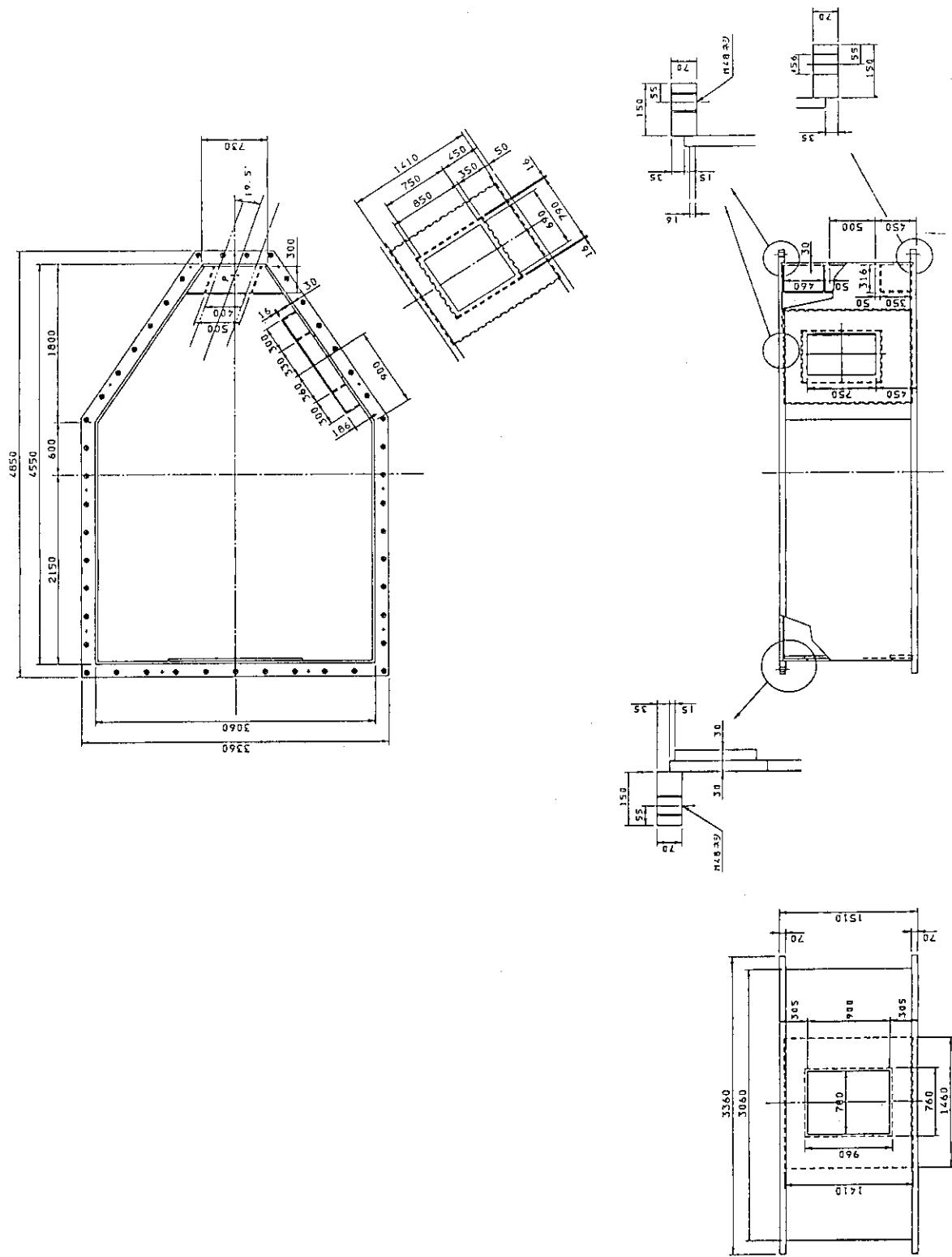




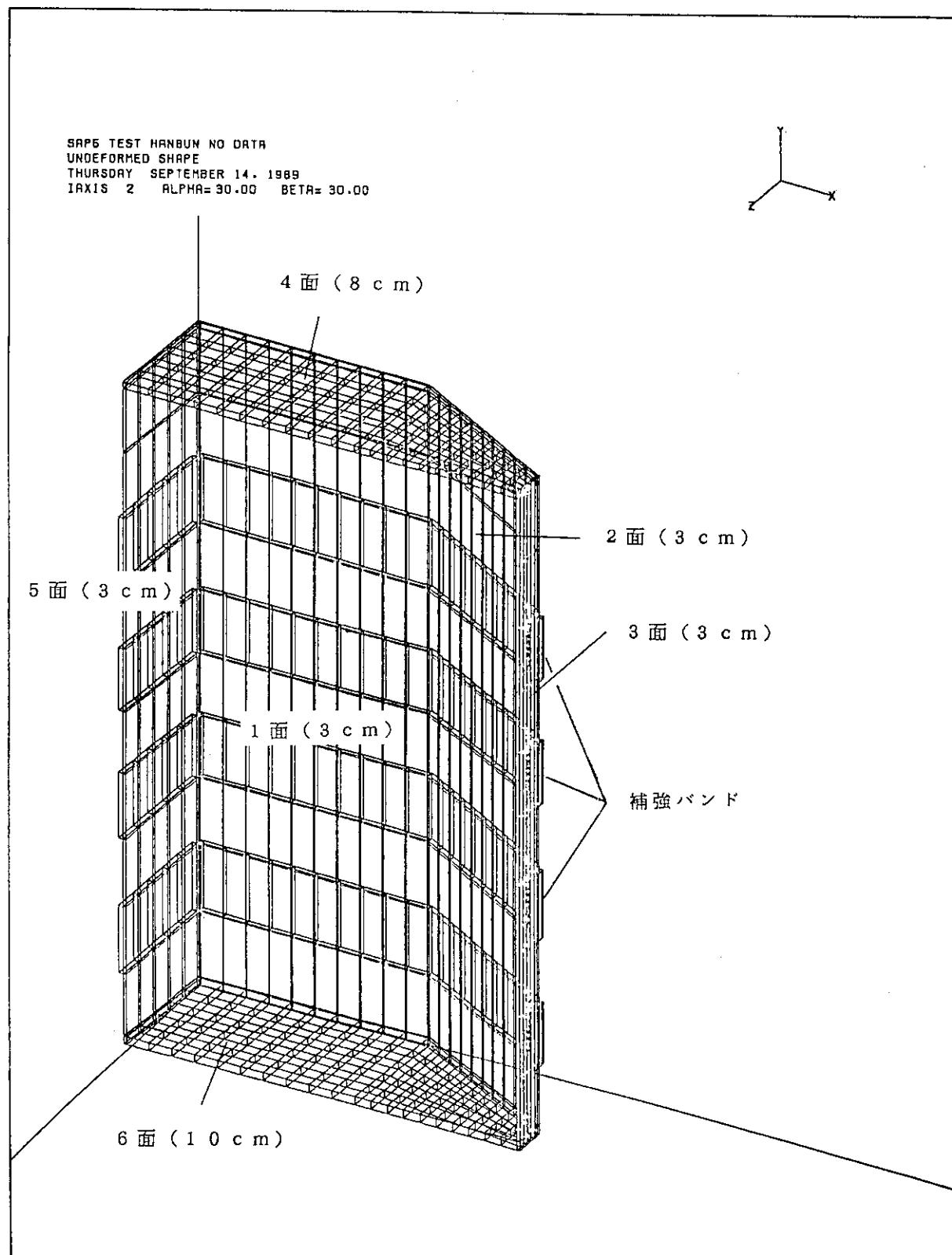
第4.3-6図 主排気タンク上板。



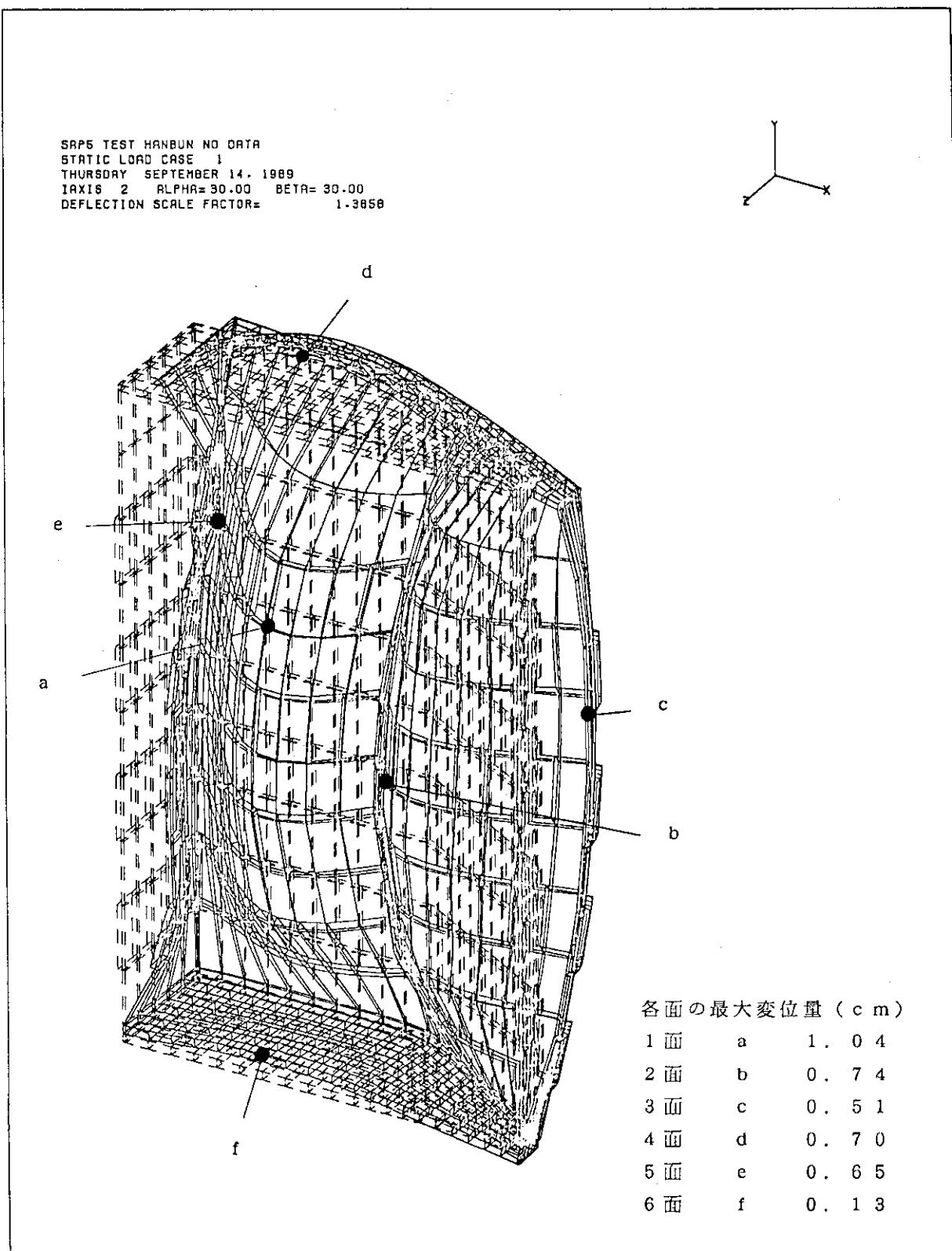
第4.3-7 図(a) 主排気タンク下スカート(上部)。



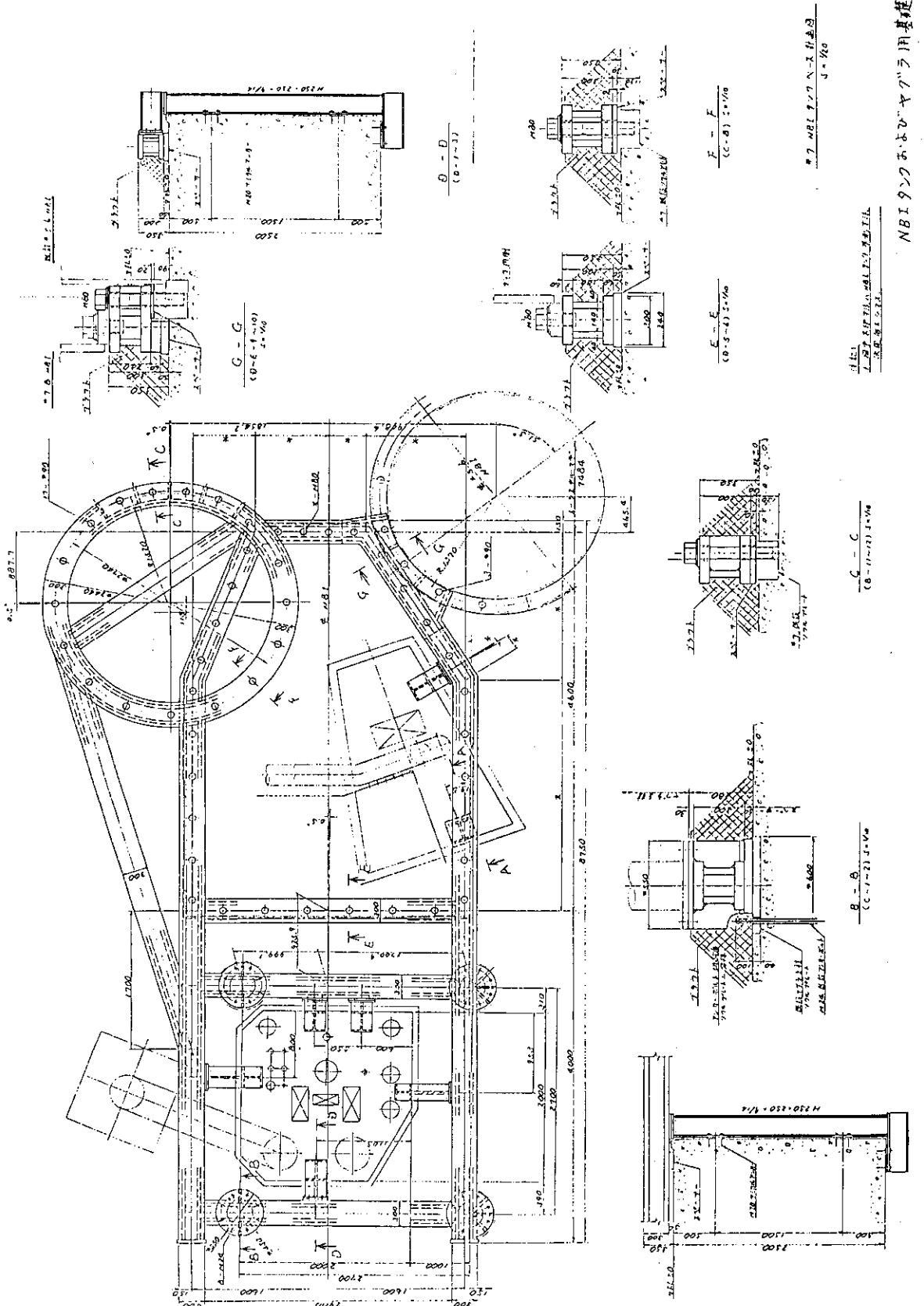
第4.3-7 図(b) 主排気タンク下スカート（下部、#9、10ユニット用の場合）。



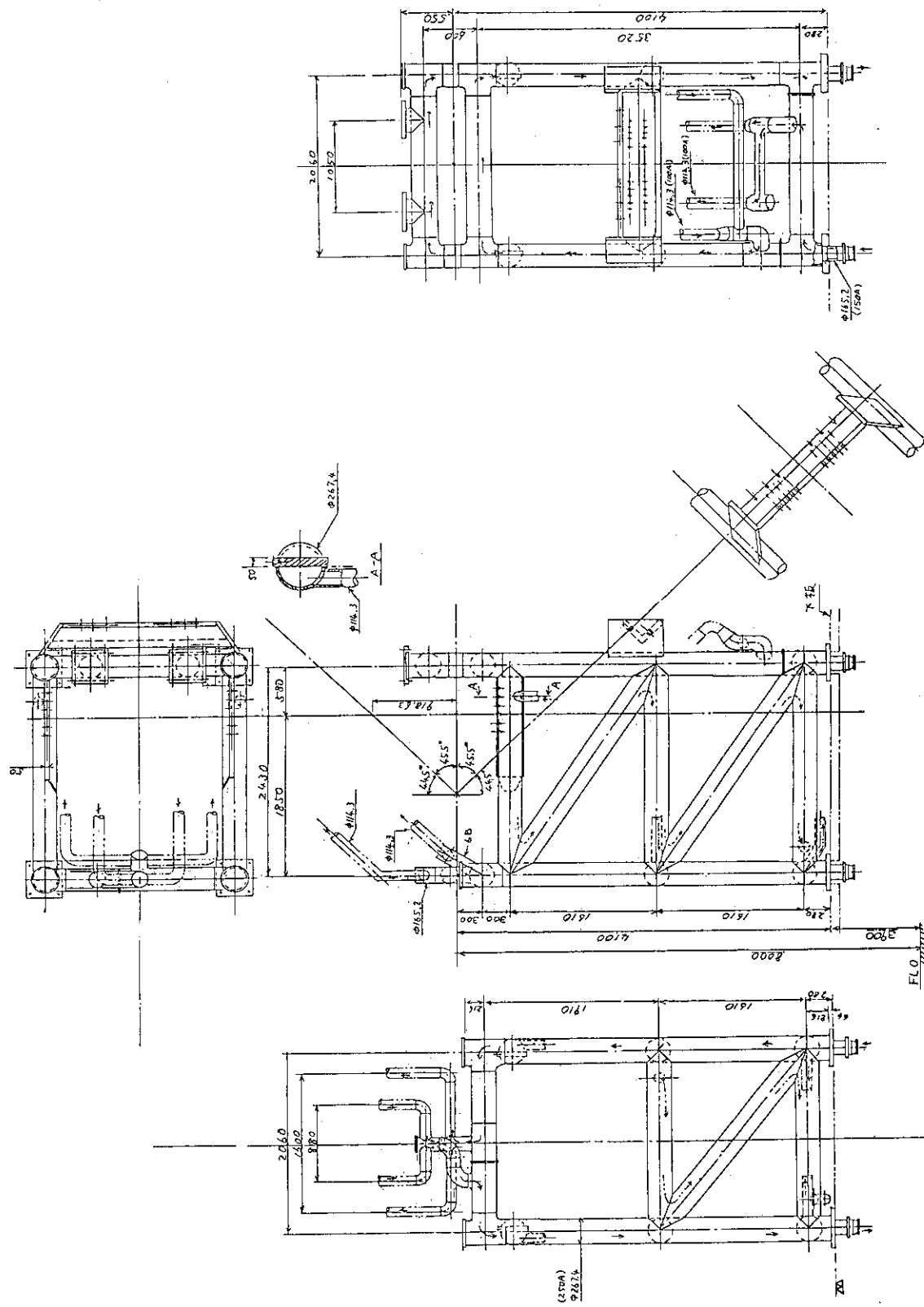
第4.3-8図(a) 主排気タンクの大気圧による変形量の計算(計算モデル)。



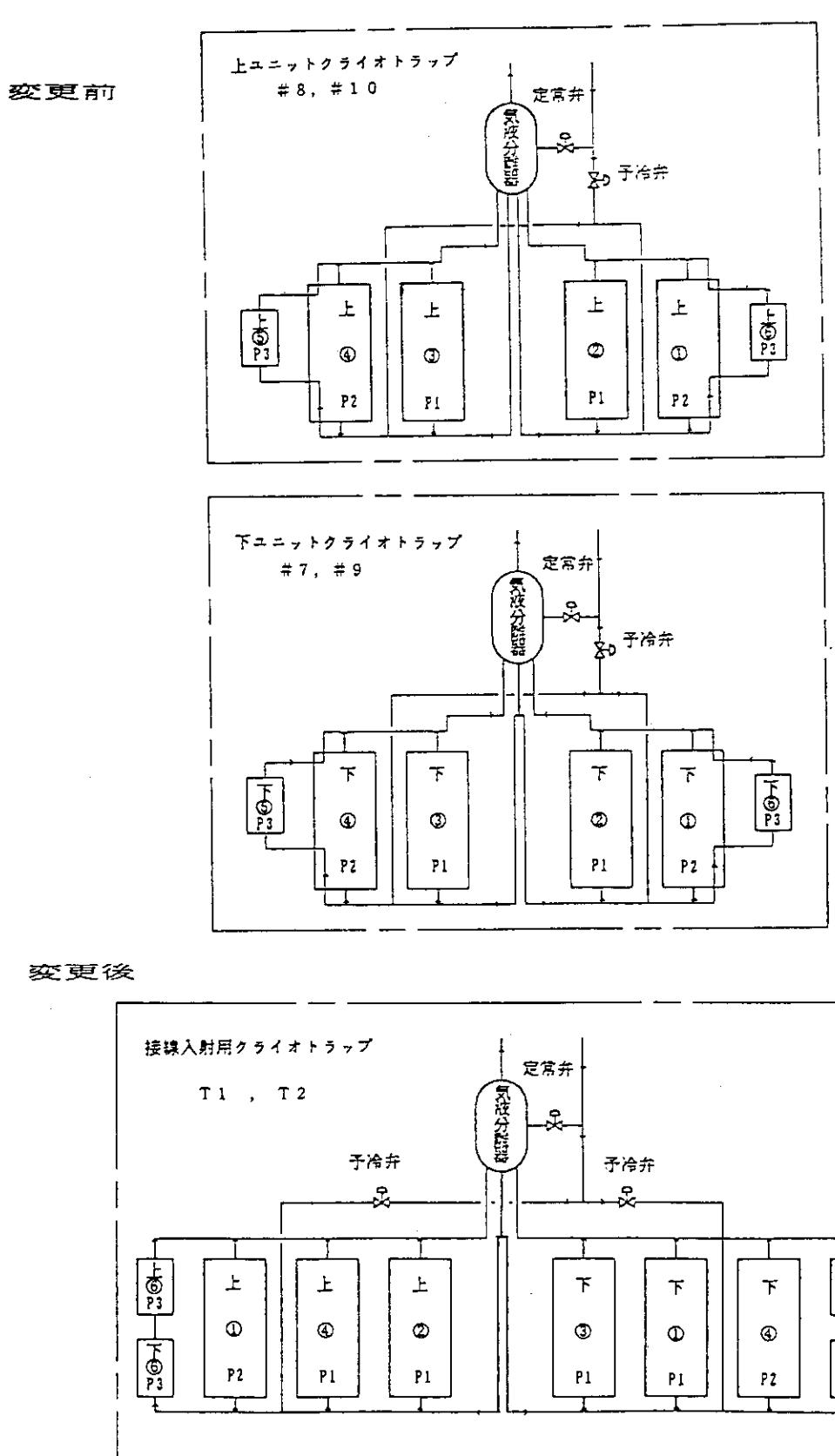
第4.3-8図(b) 主排気タンクの大気圧による変形量の計算(変形図)。



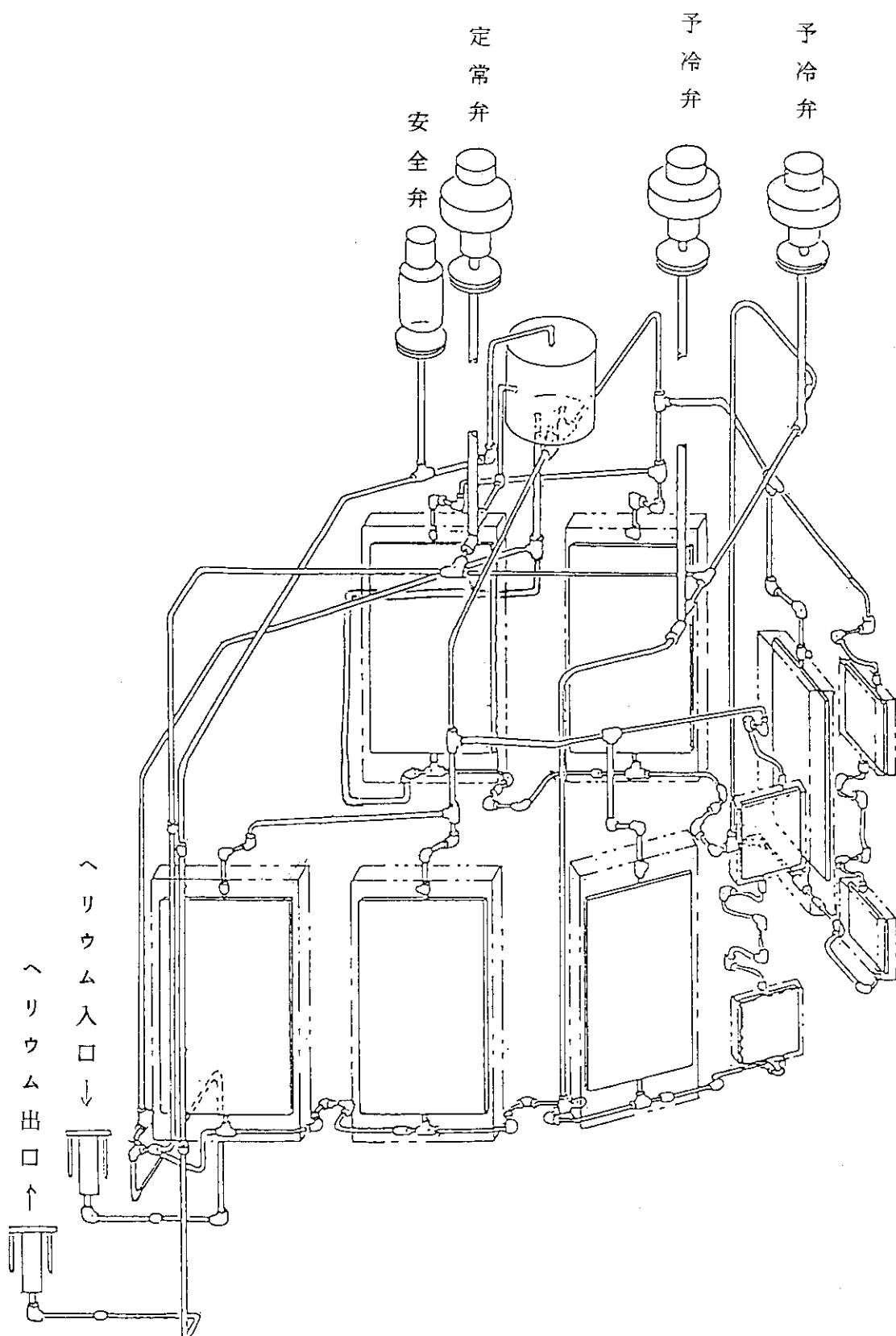
第4.3-9図 主排気タンクのチャンネルベース（#7, 8用の場合）。



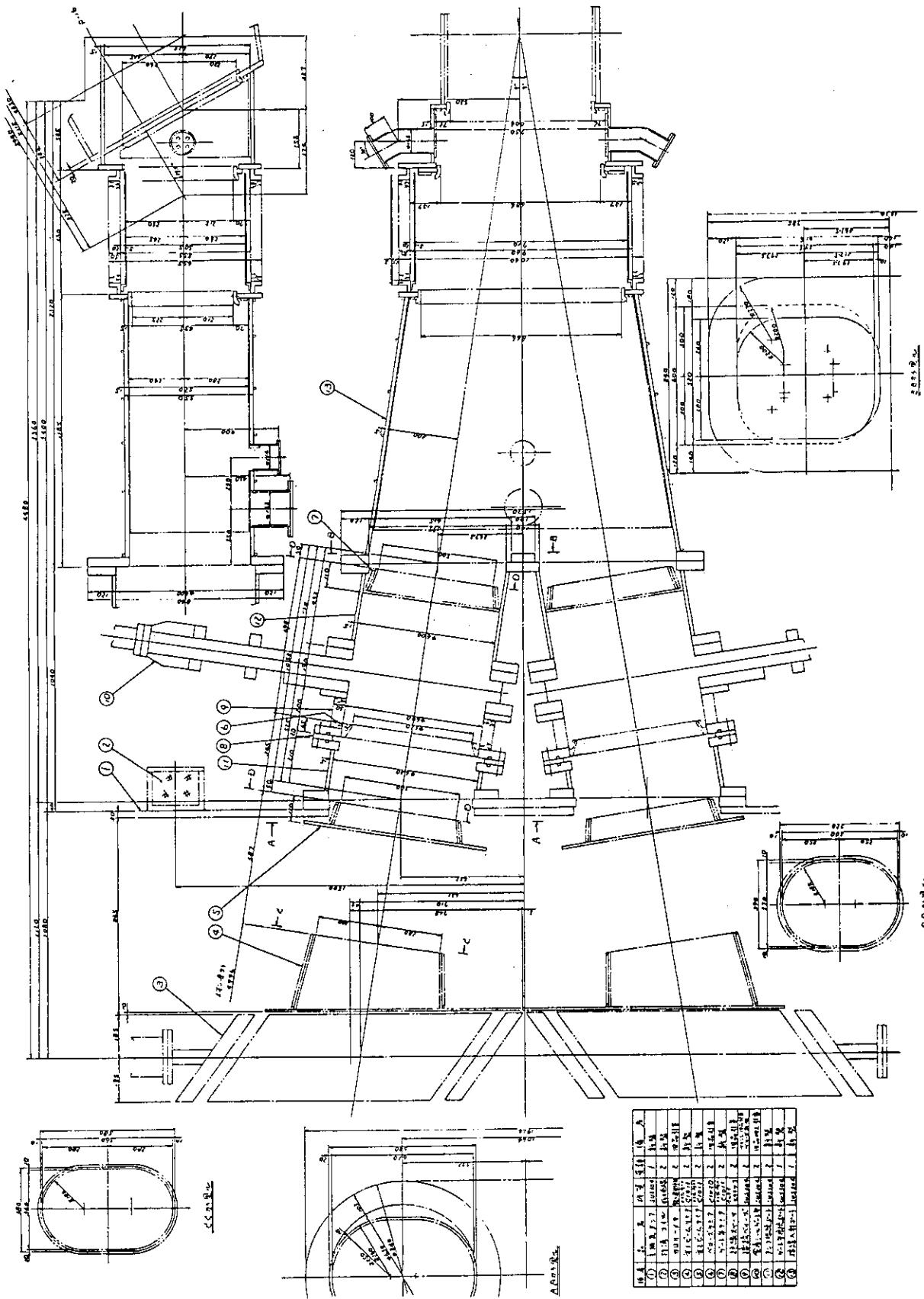
第4.3-10図 内部支持柱。



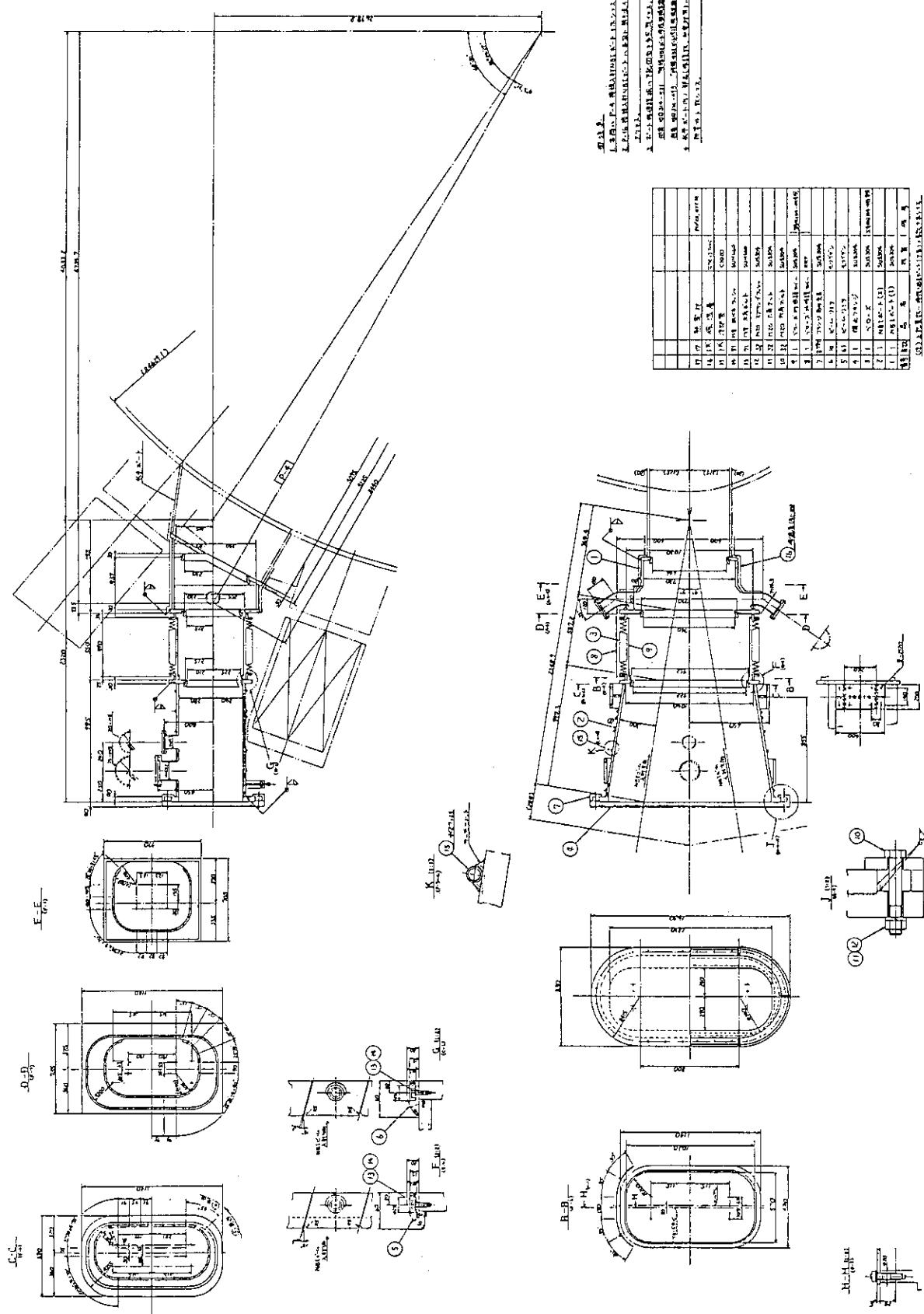
第4.3-11図 主排気タンク内の液体ヘリウム系統の比較。



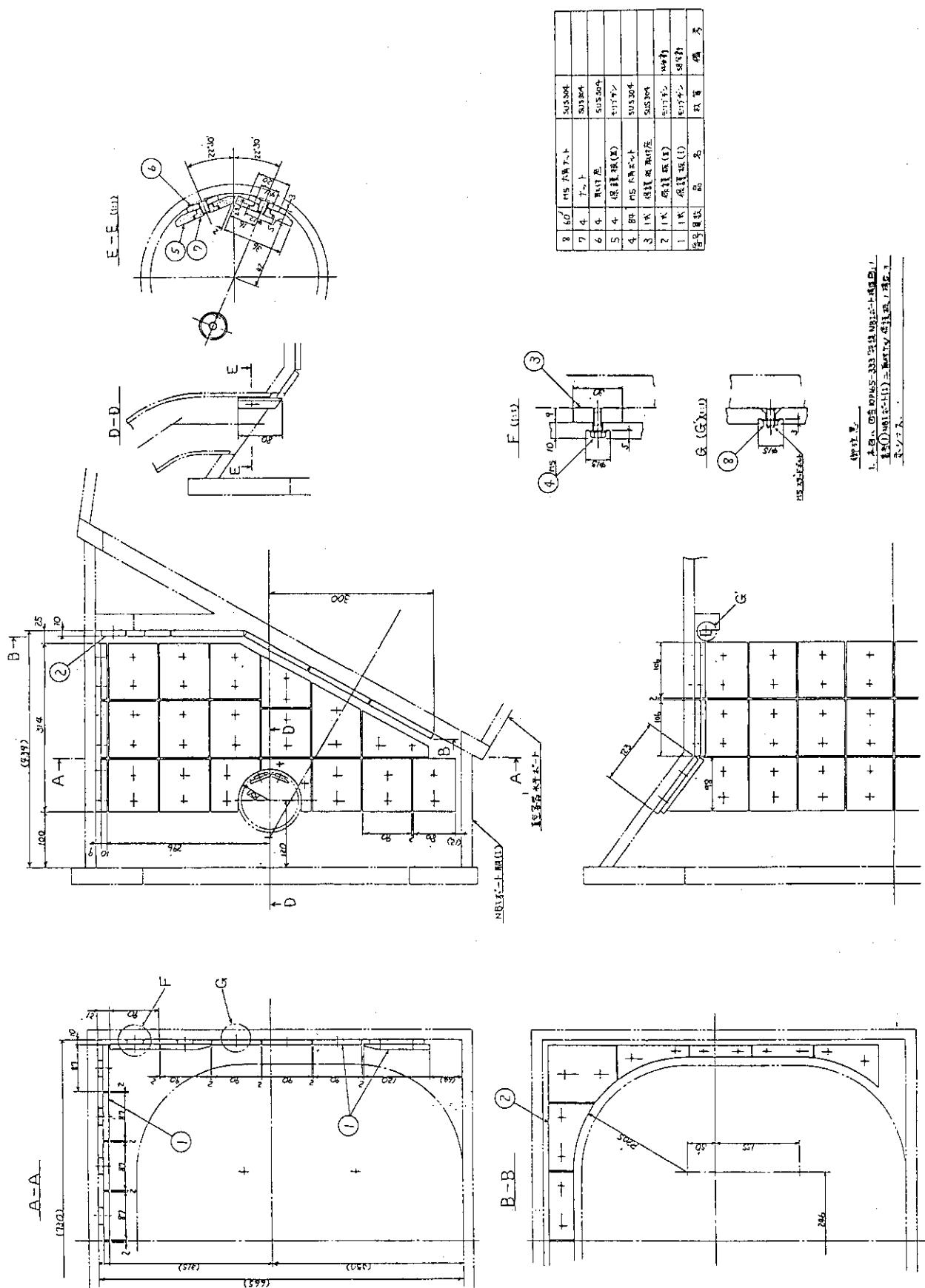
第4.3-12図 液体ヘリウム配管の立体的な接続図。



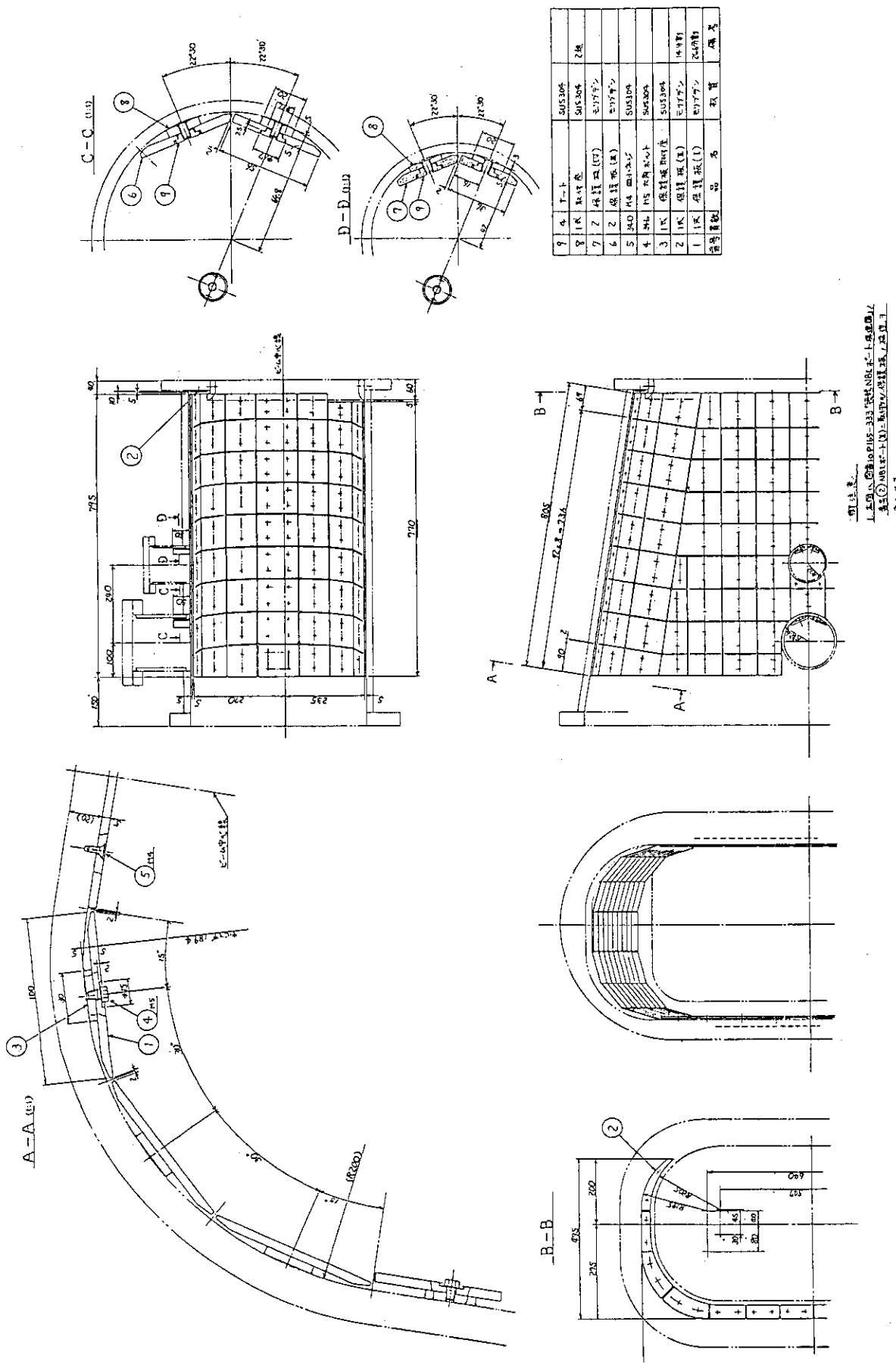
第4.3-13図 ドリフト管の形状。本図は#7, 8ユニット用の場合である。#9, 10用は左右対称の構造となる。



第4.3-14図 ポート部の形状。本図は#9, 10ユニット用の場合である。#7, 8用は左右対称の構造となる。

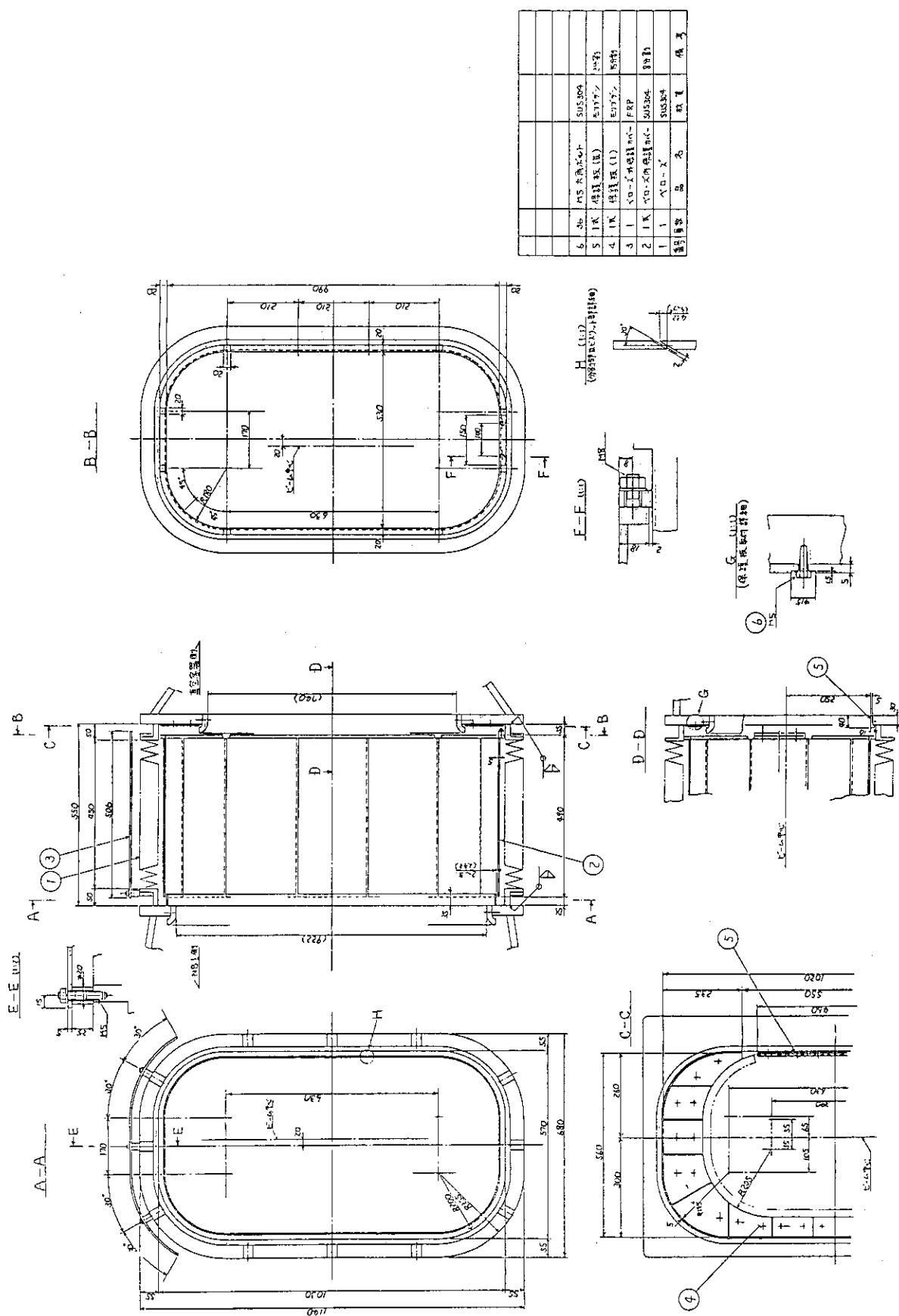


第4.3-15図(a) ポート部保護板の構造図（本体真空容器との接続部）。

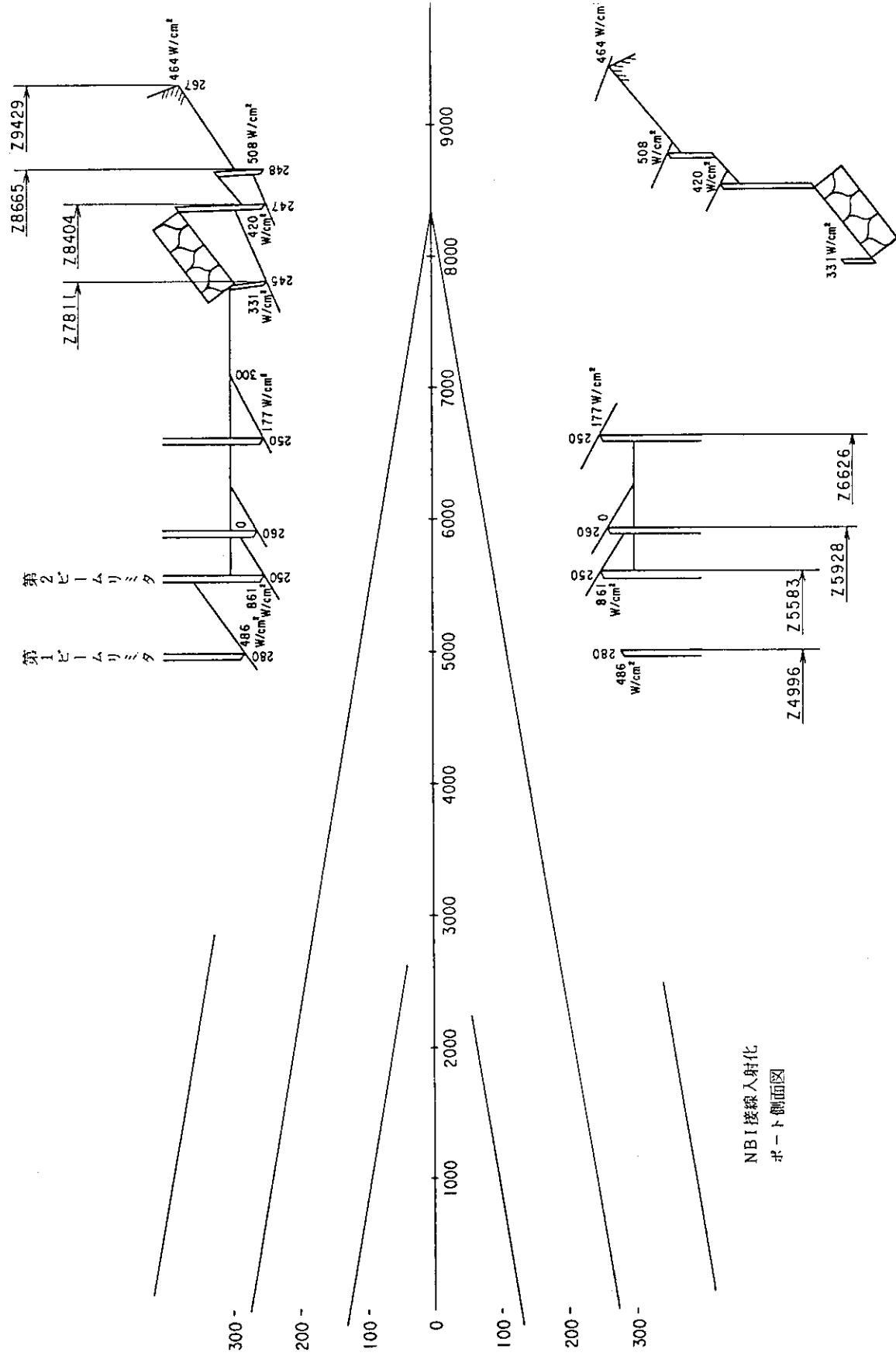


第4.3-15図(b) ポート部保護板の構造図(ドリフト管の合流部)。本図は#9, 10ユニット用の場合である。

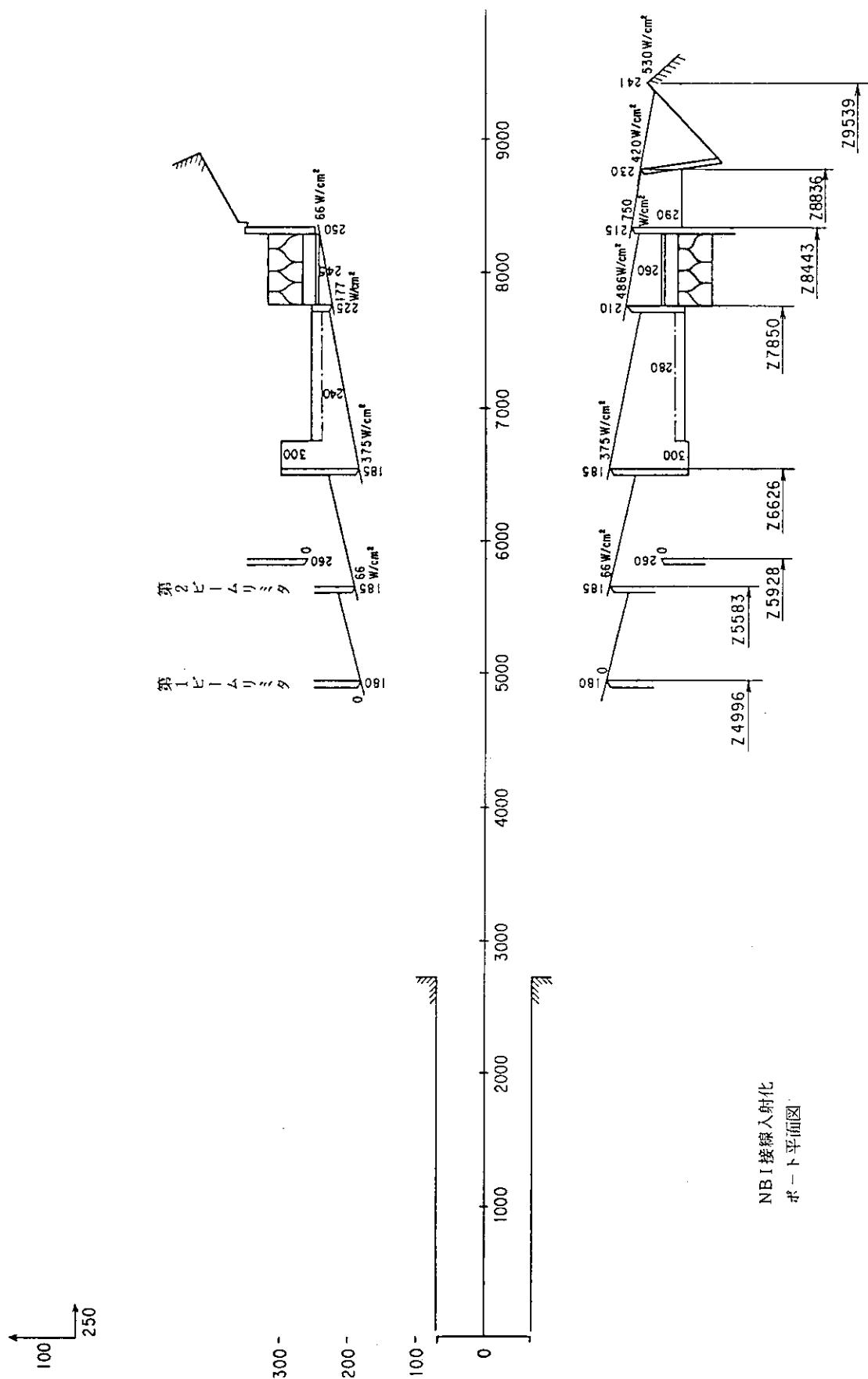
#7, 8用は左右対称の構造となる)。



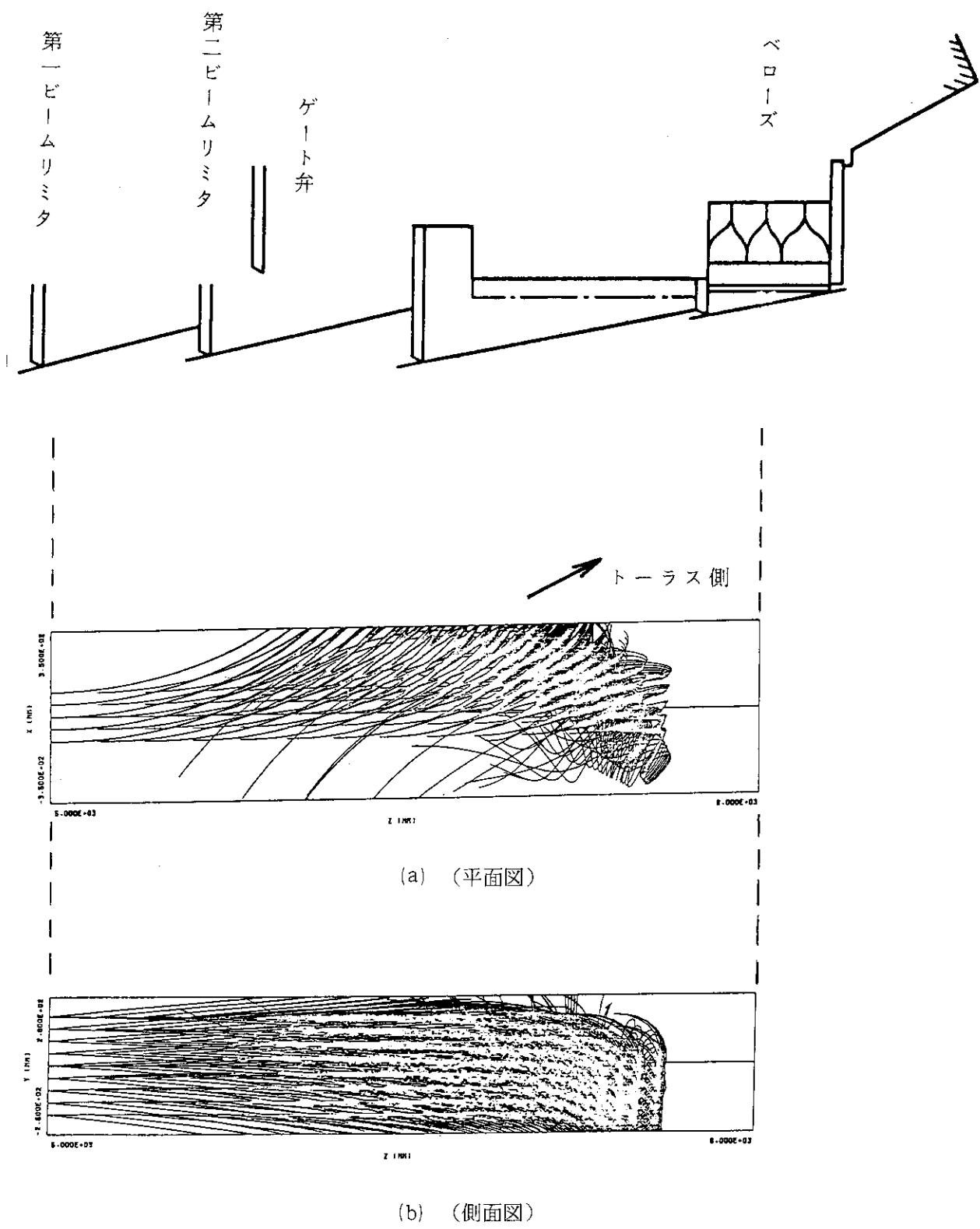
第4.3-16 図 ベローズ部構造図。



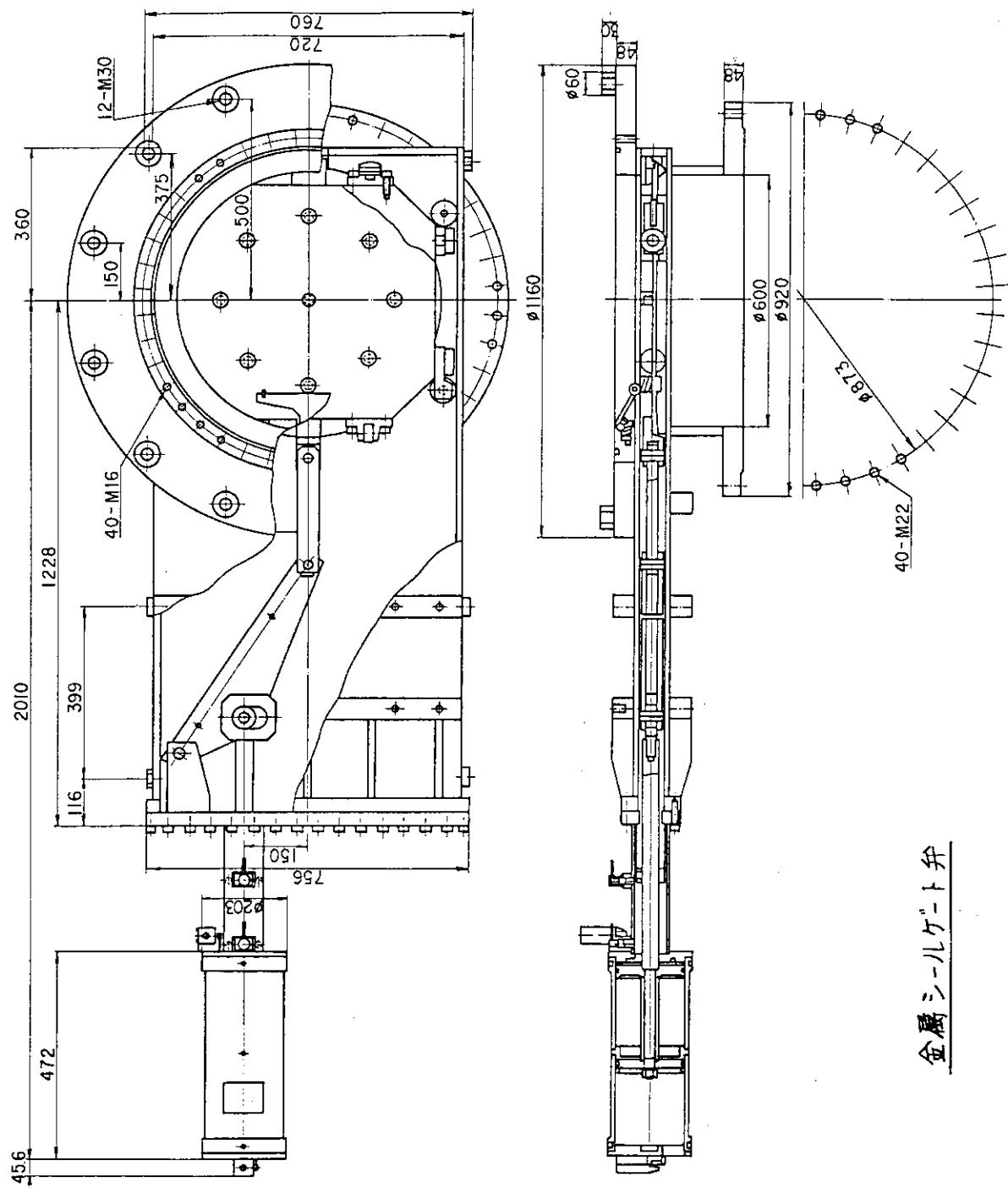
第4.3-17図(a) リミタの配置と中性ビームによる熱流束(側面図)。



第4.3-17 図(b) リミタの配置と中性ビームによる熱流束 (平面図)。

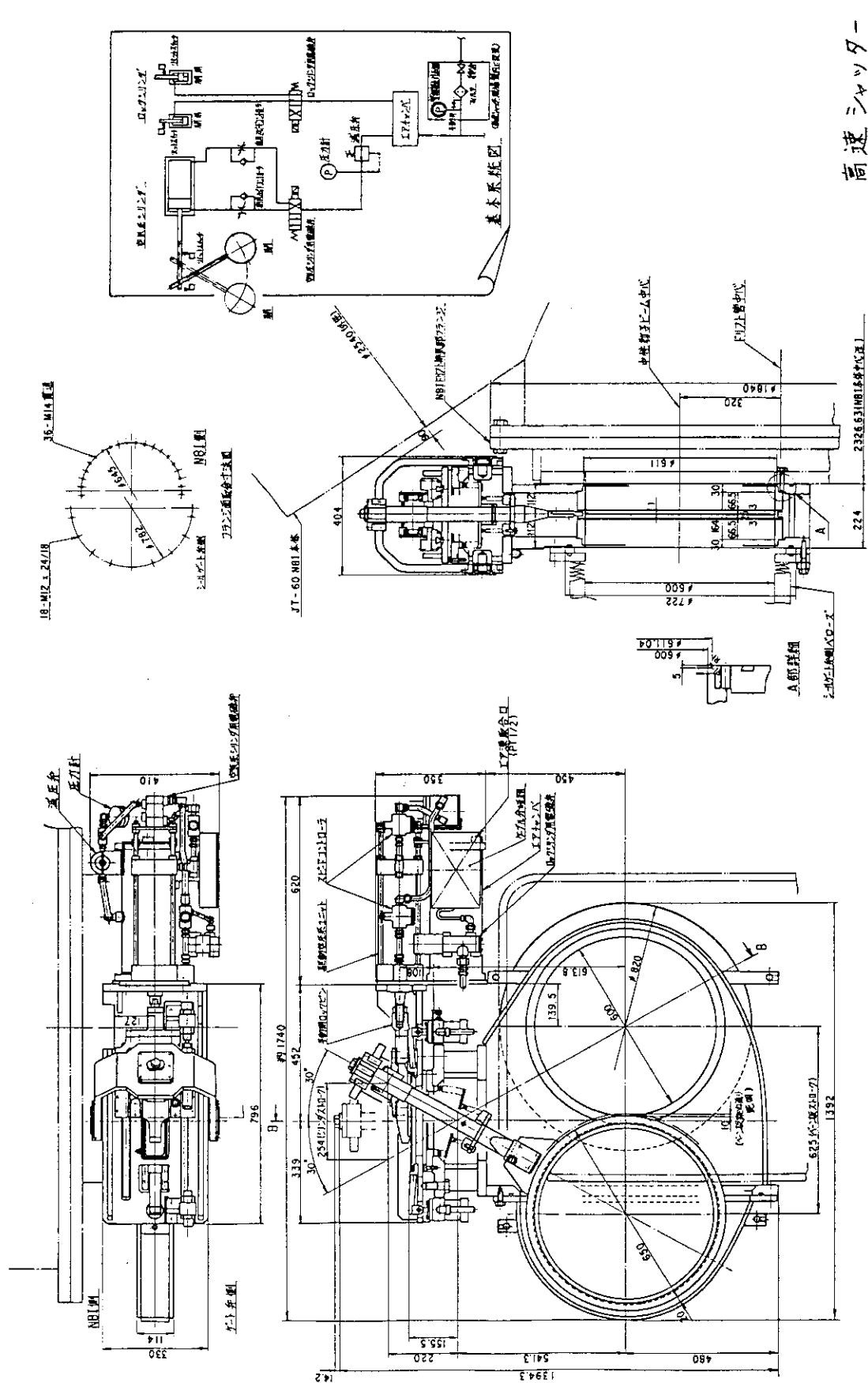


第 4.3-18 図 再電離イオン軌道の計算例。プラズマ電流 6 MA の
ダイバータプラズマに 120 keV, D ビームを入射す
る場合。

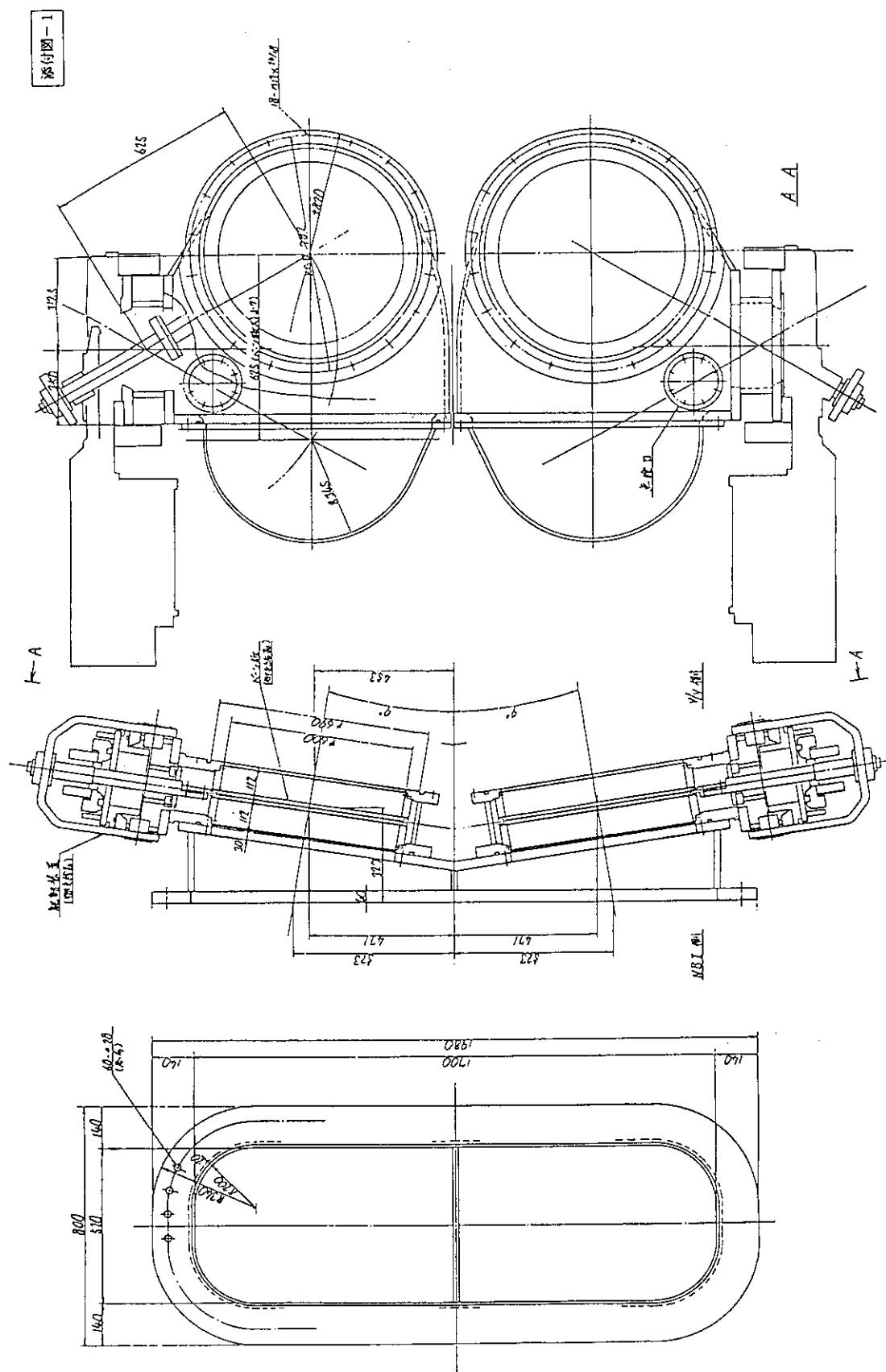


第4.3-19図 既設の金属シールゲート弁の構造図。

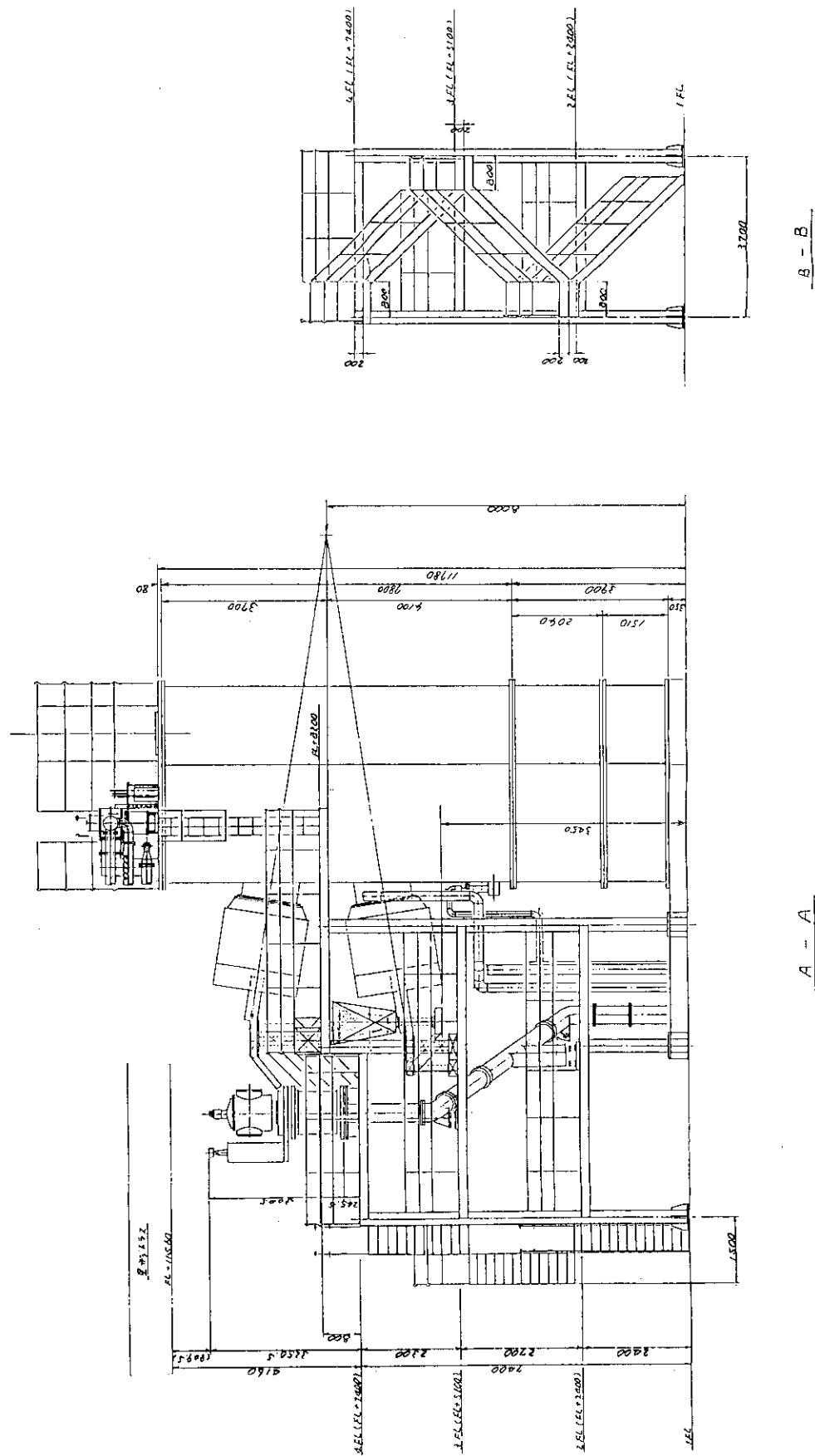
金属シールゲート弁



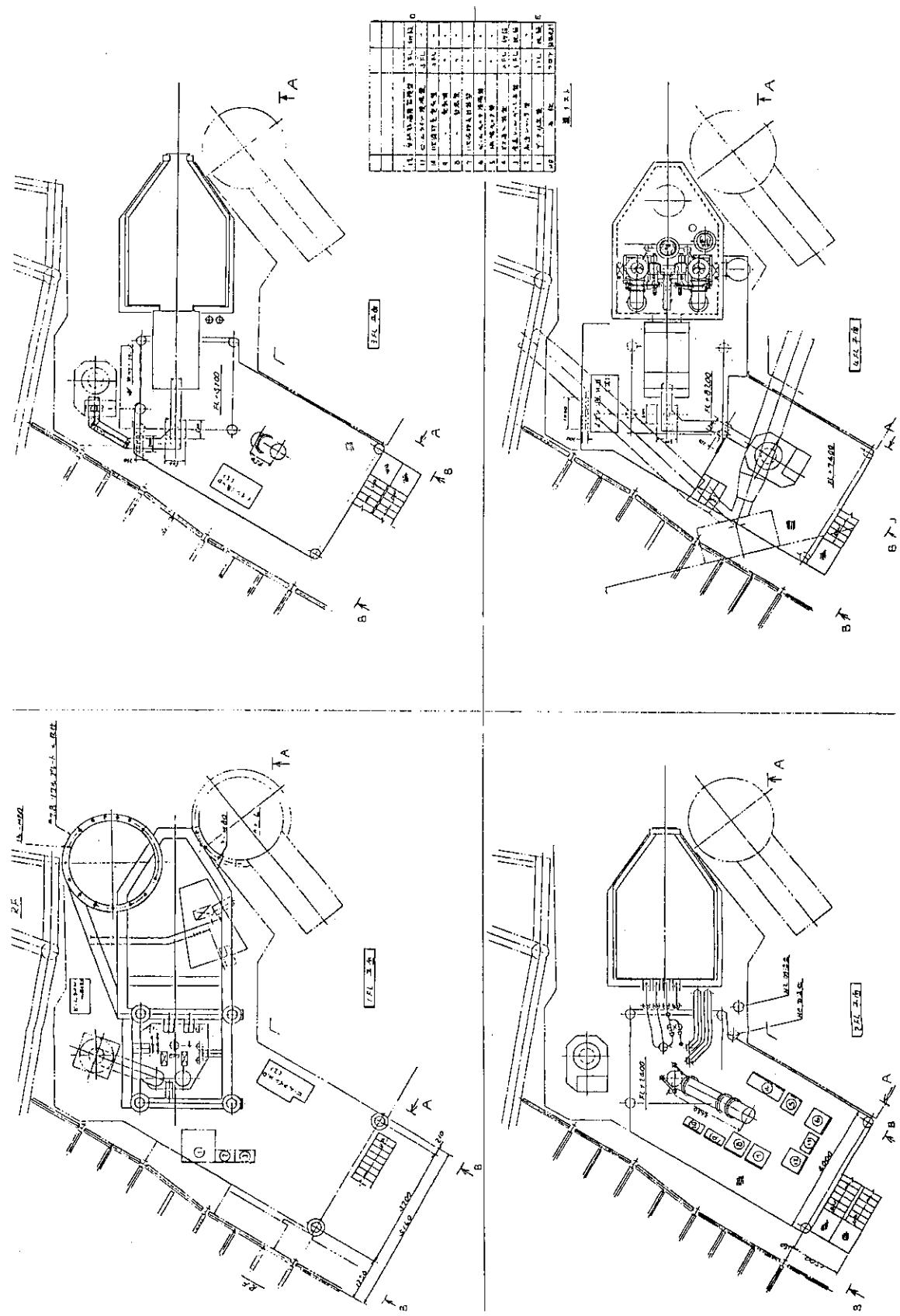
第4.3-20図 既設の高速シャフトの構造図。



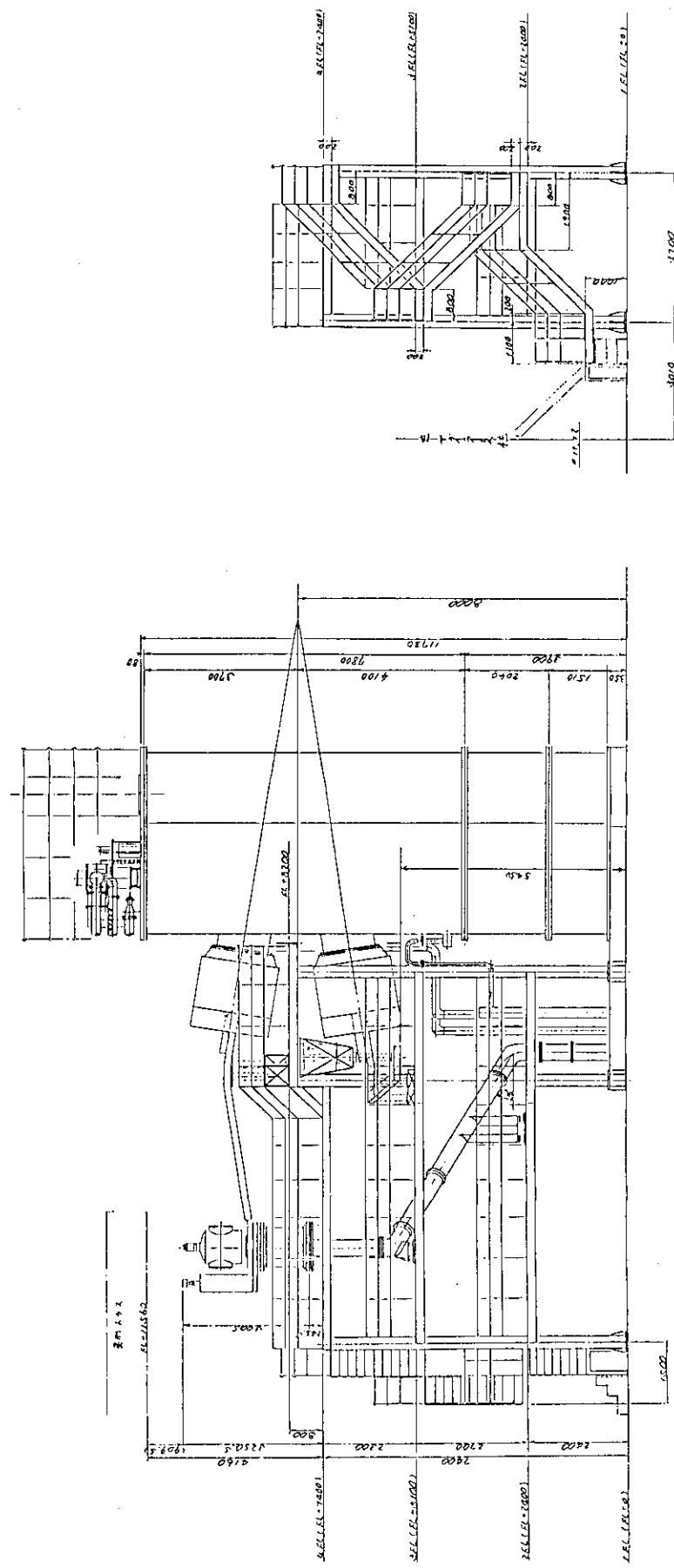
第4.3-21図 高速シャッタの改造後の構造図。但し高速シャッタは現状では接線NBIに取り付けない予定である。



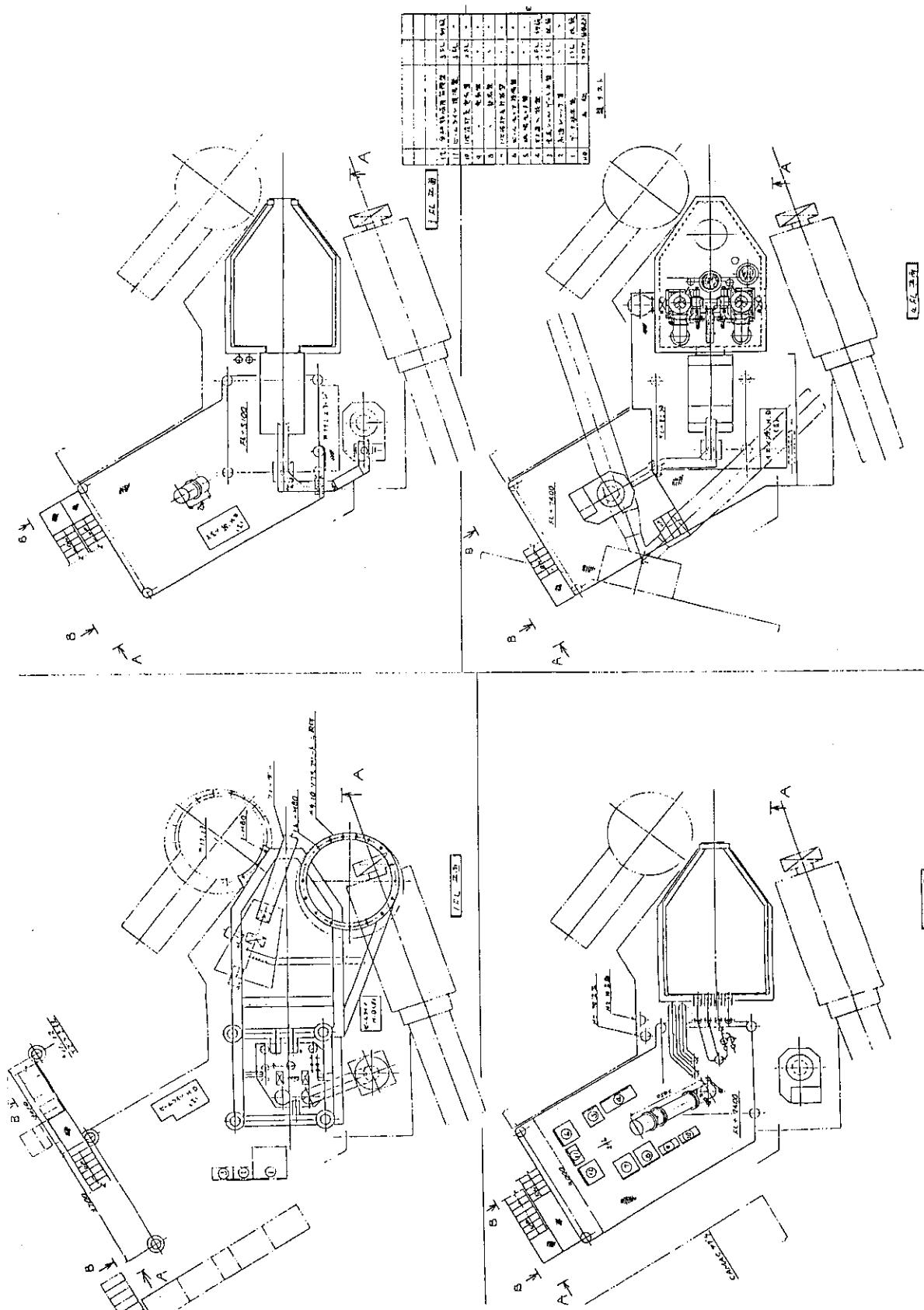
第4.3-22図 ヤグラ・ステージング・プラットフォーム (#7, 8用, 側面図)。



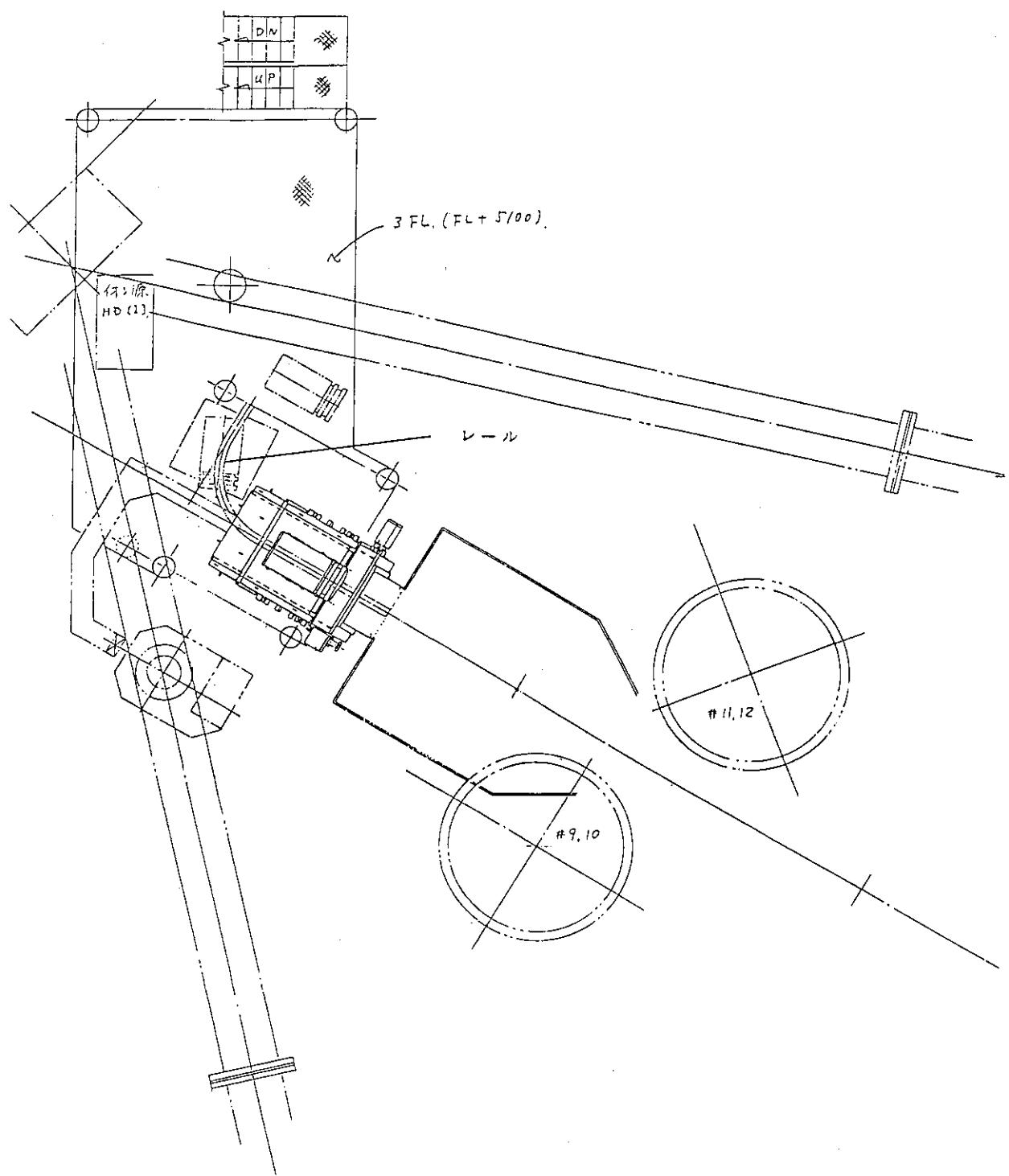
第4.3-23図 ヤグラ・ステーショング配管計画図 (#7, 8用, 平面図)。



第4.3-24図 ヤグラ・ステージング配置計画図 (#9, 10用, 側面図)。



第4.3-25図 ヤグラ・ステージング配置計画図 (#9, 10用, 平面図)。



第 4.3-26 図 イオン源取り出し用レール計画図 (#9, 10用の場合)。

5. おわりに

以上 JT-60 NBI の接線化の必要性、その方式の選定、及び改造方法の詳細について述べた。

接線化する直接の動機となったリップル損失は、既設の準垂直NBIのままですると40%近くにも及ぶが接線NBIとすることにより10%程度以下に抑えることのできることが計算から明らかとなった。また準垂直NBI相当のリップル損失がある場合には既設NBIを重水素ビーム化することにより得られると予測される最大の入射パワーにおいてではなく10MW程度の方が高い核融合積が得られる。接線NBIで入射しリップル損失が無視できたとすると入射パワーが大きい方が良いが、仮に同じ10MWとしてもこれよりさらに0.15程度高い核融合積が得られると見積もられる。NBIの一部接線化の計画は、1) より高い核融合積が得られる他に、2) リップル損失がどのような配位でも低く抑えられることから、閉じ込めの配位依存性が評価し易くなること、3) 準垂直入射と接線入射との加熱特性を同じトカマク装置で直接比較できること、及び4) 将来において計画されている高エネルギーNBIと組み合わせたトロイダル回転に関する実験ができるとの点において意義がある。

既設NBIは上下方向に35.5度とかなり傾いたビーム軸となっており、ビームライン機器はこの角度に最適化された構造となっている。従ってこれをトカマクの赤道面付近に持ってきて接線入射できるようにするのは、入射角等で理想を追うと大改造となる。改造の程度の大小に応じて多くの案が考えられ、接線化するユニット数、イオン源／ビームラインの接線化の仕方、及び電源の構成については、紆余曲折があったと言えるが、結局必要最低限のユニット数(4ユニット)、既設イオン源のままでし、ビームライン機器も最大限既設のまま使うこととし、電源については全く手を加えないような方式とし、コストの低減を図った。その代わりに入射パワー及び入射角の点で十分ではないにしても、必要な最低限の仕様は満たすようにはできたと考える。

このような簡素化を図った上で残された最も大きな問題は漏洩磁場対策であった。当初は接線NBIの真空容器自体を磁性材で製作することにより磁気シールドを兼ねることが検討されたが、これではトカマクプラズマの位置に発生するエラー磁場が課題となることがわかり、既設NBIと同じくコイルを用いた能動的な手法を併用することとした。NBIにこのような能動的な磁気シールド法を採用したのはJT-60の既設NBIが最初であるが、その後、TFTR NBIやJET NBIでも部分的に採用されるところとなった。^{23,24)} こうしてみると空間的制約やエラー磁場について制限の厳しいNBIの漏洩磁場対策には能動的な手法が適しているといえる。

JT-60はJT-60Uへの改造後大電流化と共に重水素運転が可能となる。NBIも既設、接線化ユニットとも重水素ビーム対応とする。放射線の問題はNBIに限らず共通の問題として対処せねばならないが、この問題を除けば重水素ビーム引き出しは

軽水素ビーム引き出しよりもNBIにとっては楽な方向である。それは同じビームエネルギーでは中性化効率が良く、従って残留イオンビーム処理のための受熱機器の熱入力が軽減されることと、中性化のための必要なガス線密度が低く、従って注入ガス流量を減らせることから真空排気量も低減できることによる。前者の点から既設、接線NBIを問わず軽水素ビーム時に比して入射パワーをほぼ倍増できる見込みである。接線NBIに関しては4ユニットで11MW程度入射できる見込みである。また後者の点では接線NBIにおいてクライオバネルの枚数を合理化し、真空容器をコンパクトにすることができた。

接線化の改造は本報告をまとめている最中に実施する方針が固められた。改造後のユニット据え付けの完了は平成3年度内の予定である。

謝 辞

J T - 6 0 プロジェクトの一環として、終始変わらぬ御指導と激励を頂きました吉川允二理事、田中正俊那珂研究所長、飯島勉 J T - 6 0 試験部長、田中裕二 J T - 6 0 試験部次長、田村早苗臨界プラズマ研究部長に感謝致します。また設計検討にあたり有益な議論をして頂きました J T - 6 0 第 4 試験室及び加熱工学第 1 研究室の皆様に心から感謝致します。

更に接線化改造の具体的な設計を進めるに際し、既設 N B I の製作メーカーのうち以下のメーカーの協力を得ました。ここにその社名を記し感謝の意を表します。

(株) 日立製作所

(株) 東芝

(株) 日新電機

(株) 三菱重工業

(株) 岸川バルブ

文 献

- 1) M. Kikuchi, *et al.*, "JT-60 Upgrade Program," *Proc. 15th Symp. Fusion Technology*, Utrecht, Sept. 19-23, 1988, P.287.
- 2) S. Matsuda *et al.*, *Fusion Eng. and Design*, 5, 85 (1987).
- 3) 栗山正明他、「JT-60粒子入射加熱装置の設計及び技術開発」、日本原子力研究所レポート JAERI-M 87-169 (1987年)。
- 4) A. P. Colleraine, "The DIII-D Long Pulse Neutral Beam System," *Proc. 11th Symp. Fusion Eng.*, Austin, USA, Nov. 18-22, 1985, Vol.2, P. 1278.
- 5) M. M. Menon *et al.*, "ATF Neutral Beam Injection System," *ibid.* P. 1269.
- 6) R. J. Hawryluk, *et al.*, "TFTR Plasma Regimes," in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986* (Proc. 11th Int. Conf. Kyoto, 1986), Vol. 1, IAEA, Vienna (1987) 51.
- 7) M. Matsuoka, *et al.*, "Active Shielding System for Removal of a Stray Magnetic Field from Tokamak in JT-60 Neutral Beam Injectors," accepted to *Fusion Technology*.
- 8) G. Duesing *et al.*, *Fusion Technology*, 11, 163 (1987).
- 9) K Tani *et al.*, "Behavior of Fast Ions in a Large Tokamak Plasma during NBI Heating," *Proc. of the Joint Varenna-Grenoble International Symposium on Heating in Troidal Plasmas*, Grenoble, France, July 3-7, 1978, Vol. 1, p. 31.
- 10) R. J. Goldston, *Plasma Phys.*, Vol. 26(1A), 87 (1984) (Proc. Controlled Fusion and Plasma Physics, Aachen, West Germany, Sept. 5-9, 1983).
- 11) Y. Simomura, K. Odajima, *Comments Plasma Phys. Controll. Fus.*, 10, 207 (1987).
- 12) The JET Team presented by M. Keilhacker, "The JET H-mode at High Current and Power Levels," presented at 12th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-50/A-III-2, Nice, France, 12-19 October 1988.
- 13) O. Gehre *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 60, 1502 (1988).
- 14) 松岡 守他、「JT-60U用の負イオン源を用いた中性粒子入射装置の検討」、日本原子力研究所レポート JAERI-M 89-117 (1990年)。
- 15) M. Kuriyama *et al.*, "Construction of Prototype Injector Unit for JT-60," *Proc. 9th Symp. Engineering. Problems for Fusion Research*, Chicago, 1981, P. 1347.

- 16) M. Kuriyama *et al.*, "Operation of JT-60NBI and NBI System for JT-60 Upgrade," presented at 13th Symp. on Fusion Eng., Knoxville, Oct. 2-6, 1989.
- 17) E L F / M A G I C : 改良型積分方程式法を用いた3次元、非線形、静磁場解析コード。 (株) エルフにより開発されたもの。
- 18) 伊藤孝雄他、「イオンビーム熱負荷計算コード」、日本原子力研究所レポート J A E R I - M 9226 (1980年)。
- 19) 河合視己人他、「JT-60の大電流化及びJT-60NBIの一部接線化に伴う JT-60NBI の漏洩磁場対策(仮題)」、J A E R I - M 投稿予定。
- 20) SAP-V.2, "A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems," Univ. South Calif. (1972).
- 21) Y. Ohara, *J. Appl. Phys.*, 49, 4711 (1978).
- 22) 小原祥裕、「3D再電離イオン軌道計算コードNBI 3DGF」、(unpublished)。
- 23) M. D. Williams and the PPPL Neutral Beam Group, "Status of the TFTR Neutral Beam Heating System," *Proc. 11th Sympo. on Fusion Eng.*, Austin, USA, Nov. 18-22, 1985, Vol. 2, p. 777.
- 24) E. Thompson, private communication.