

JAERI - M
82-131

J T - 60 N B I の偏向磁石の設計

1982年9月

伊藤孝雄・堀池 寛・栗山正明
松田慎三郎・松岡 守・田中 茂

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。
入手の間合わせは、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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 楢高野高速印刷

JT-60 NBIの偏向磁石の設計

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

伊藤 孝雄・堀池 寛・栗山正明

松田慎三郎・松岡 守・田中 茂

(1982年8月25日受理)

JT-60中性粒子入射加熱装置において、残留イオンビームを偏向し、ビームダンプに導くために反射発散型の偏向磁石が使われている。これを選択した理由は効率的な差動排気ができ、ビームダンプを許容値以下の熱負荷に設計することが容易であり且つビームライン機器を真空容器内に配置できるからであった。しかし、イオン源から引き出されるビームの発散が少し大きくなると、磁極自身を保護しているウォータージャケットに衝突するビームが多くなりやすいという欠点も持っている。

偏向磁石の設計を行うにあたっては偏向磁石の1/10縮小モデルや二次元磁場解析コードを用いた磁場分布の検討を詳細に行った。また、同時にイオンビーム熱負荷計算コードの助けを借りてウォータージャケットやビームダンプの一次設計を行い、これらの機器への熱負荷がどのような条件でも許容値以下であることの確認を行った。

本報告書ではこの偏向磁石の設計について、詳細に述べる。偏向磁石は、昭和57年11月完成の原型ユニットにおいて試験中であり、これまで得られた結果はすべて設計で予想された性能と矛盾しない。

Design of Bending Magnet of Neutral Beam Injection for JT-60

Takao ITOH, Hiroshi HORIIKE, Masaaki KURIYAMA
Shinzaburo MATSUDA, Mamoru MATSUOKA and Shigeru TANAKA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 25, 1982)

A reflecting and diverging magnet has been used to bend residual ion beams and guide them to a beam dump in neutral beam injector for JT-60.

The reasons for choosing this type of magnet were; it provides us with an effective differential pumping system, it makes it easy to design the beam dump subject to a permissible heat flux, and it can contain all beam line components in the vacuum tank. However, this magnet have a disadvantage that the ion beams are apt to hit a part of the water jacket which protected the pole piece of the magnet, if beam divergence increases slightly.

In the design of the magnet, we have carried out detailed researches on the magnetic field by using a 1/10 model of the magnet and a two dimensional magnetic field simulation code.

Basic design of the water jacket and beam dump have been made, by using the simulation code of heat input due to incidence of fast ion beams, to confirm the heat load on their surface to be less than a permissible value under every conditions.

In a present report, the design on the magnet is described in detail.

The performance test of this magnet is under way in the prototype neutral beam injector for JT-60 which was completed in November 1981, and no difference has been found so far between design values and the test results.

Keywords; JT-60, Neutral Beam Injector, Bending Magnet, Design, Prototype Water Jacket, Beam Dump, Residual Ion Beam.

目 次

1. はじめに	1
2. 設計手順	4
3. 設計の境界条件	7
3.1 幾何学的制約条件	7
3.2 電磁氣的制約条件	8
3.3 その他の設計条件	11
4. 偏向磁石の設計と一次設計	14
4.1 偏向磁石の型式	14
(1) 反射型を選んだ理由	14
(2) 反射型の(b)を選んだ理由	14
4.2 偏向磁石の断面形状	19
4.3 一次設計の結果	24
5. おわりに	28
謝 辞	28
参考文献	28

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Procedure of Design	4
3. Condition of Design	7
3.1 Geometrical Condition	7
3.2 Electromagnetical Condition	8
3.3 Other Condition	11
4. Design of Bending Magnet and Primary Design	14
4.1 Form of Bending Magnet	14
(1) Why was Reflecting Magnet chosen ?	14
(2) Why was Case B chosen ?	14
4.2 Crosssectional Shape of Bending Magnet	19
4.3 Result of Primary Design	24
5. Conclusion	28
Acknowledgements	28
References	28

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（以後JT-60と呼ぶ）の中性粒子入射加熱装置（以後JT-60NBIと呼ぶ）に要求されている性能は加速エネルギー75KeVで最高20MWの中性水素原子ビームをJT-60プラズマ中に10秒間入射することである¹⁾。

このJT-60NBIは14基のビームラインユニットから構成されている。ビームラインユニットに使用されるイオン源とイオン源に電力を供給する電源とは将来の運転領域の拡大を予想して最大100KeVで80Aの水素イオンビームを10秒間引き出せるように設計されている。

ビームラインユニットにおける機器の配置は図1.1に示す通りで、これらも100KeV-80Aのビームに対処できなければならない。即ち、ビームラインユニットあたり最大5.8MWの残留イオンビームを処理できることがビームライン機器の設計基準となる。この処理とは、具体的には偏向磁場で曲げられることによって中性ビームから分離された残留イオンビームが衝突するウォータジャケット（以後W-Jと書く）やビームダンプ（以後B-Dと書く）等においてビームの持つ5.8MWの熱負荷を吸収し、室温となった中性ガスをクライオポンプで排気することである。

ここで、残留イオンビームを処理する機器としては偏向磁石、ビームリミター、W-J、B-D、ガスリミター、クライオポンプがある。この内、クライオポンプと偏向磁石以外が残留イオンビームの持つエネルギーを処理する機器（以後除熱機器と呼ぶ）となる。本報告書は偏向磁石の設計と共にこれら除熱機器の一次設計についても述べる。

偏向磁石とこれら除熱機器は他のビームライン機器のように機能別に個々に設計できるものではなく、互いに密接に関係しており一体化した設計を行う必要がある。即ち、偏向磁場分布はその磁石の形状により決定され、W-JやB-Dへ向う残留イオンビームの密度分布は偏向磁場分布に依存し、W-JやB-Dの形状はそのイオンビームの密度分布から決まる。このような一連の設計に際して、パワーが5.8MWで入射時間巾が10secのイオンビームの密度分布を厳密に求めることが必要である。JT-60NBIに用いる反射発散型偏向磁石において、反射される正イオンビームは磁石の間隙水平方向に発散されB-D表面に広げられる。ビームの持つ速度分布の裾野を形成している一部の粒子は図1.2に示すように磁極に向かって走るので磁極側面（正確にはこれを覆うW-J）の熱負荷が過大とならないよう設計するために、その附近のビームの密度分布を詳細に知ることが設計上特に重要であった。

我々は2次元磁場（TRIMコード²⁾により計算から求めた磁場）又は3次元磁場（縮小モデル実験により測定した磁場）を入力すれば残留イオンビームの密度が求まるコード³⁾を開発し、除熱機器の設計にこのコードを使用した。設計は最初偏向磁石の形状の決定、次にW-JやB-Dの形状の決定へと段階的に行なった。前者では2次元磁場入力によるイオンビーム熱負荷計算コード（RIBHL2）を、後者では3次元磁場入力によるイオンビーム熱負荷計算コード（RIBHL3）をそれぞれ使用した。偏向磁石と除熱機器の形状はこれらのコードを用いて、種々のイオンビーム条件について一連のパラメータサーベイを行なって決めた。本報告書では紙面の都合上前者偏向磁石の設計について述べ、後者、W-JやB-Dの設計は別に報告することにする。

ここでは、図1.1に示す座標系を使用する。X-Y平面に関して対称に製作する機器及び対称な現象についてはX-Z平面のZ>0側のみ議論することとする。イオンビームⅠ及びⅡとはそれぞれイオン源Ⅰ及びイオン源Ⅱを起源とする残留イオンビームとする。JT-60NBⅠは水平面に関して全く対称なビームラインをもつ上下2種類のユニットがあり、ここでは特に述べない限り下ユニットを対象として考えている。

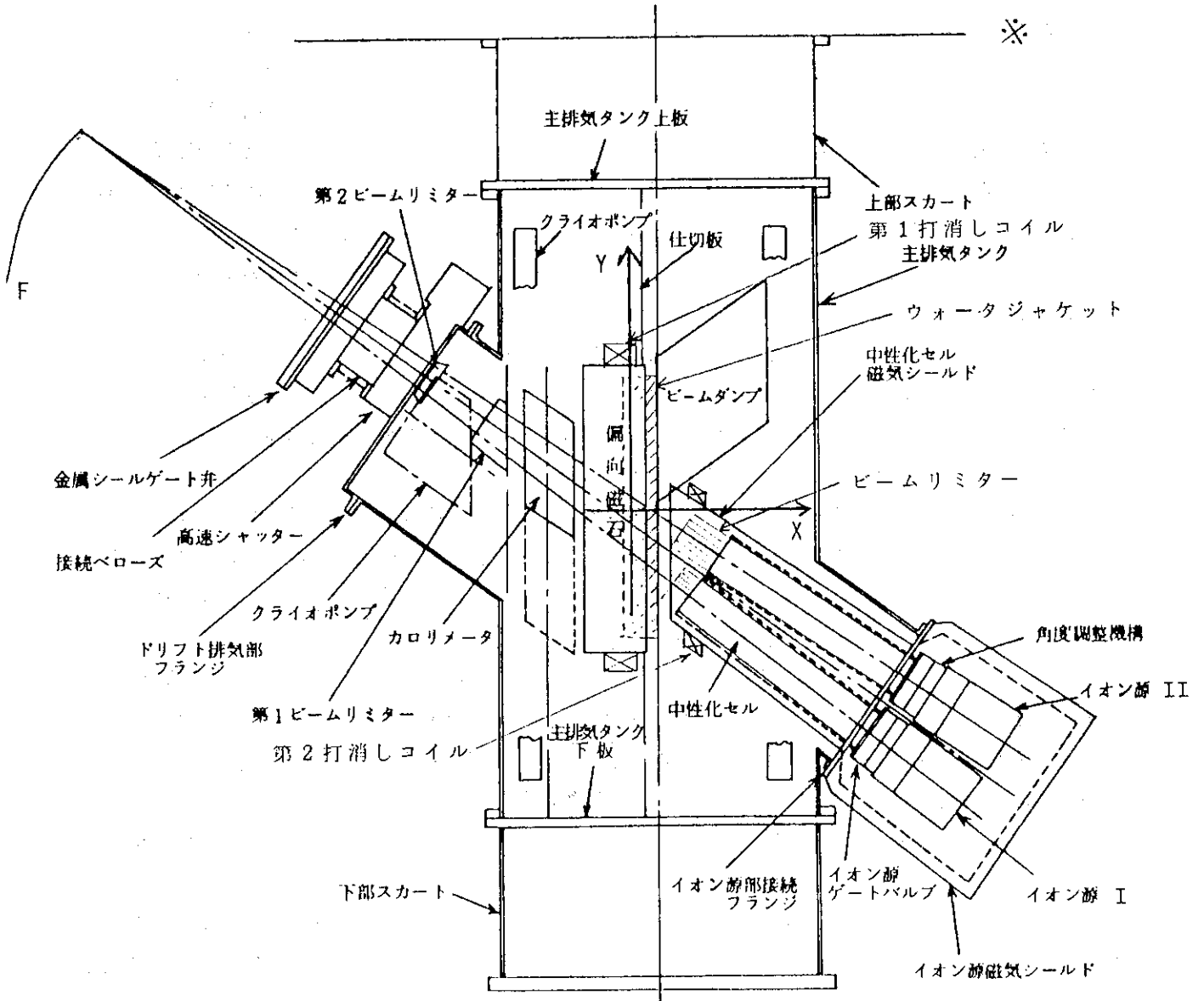
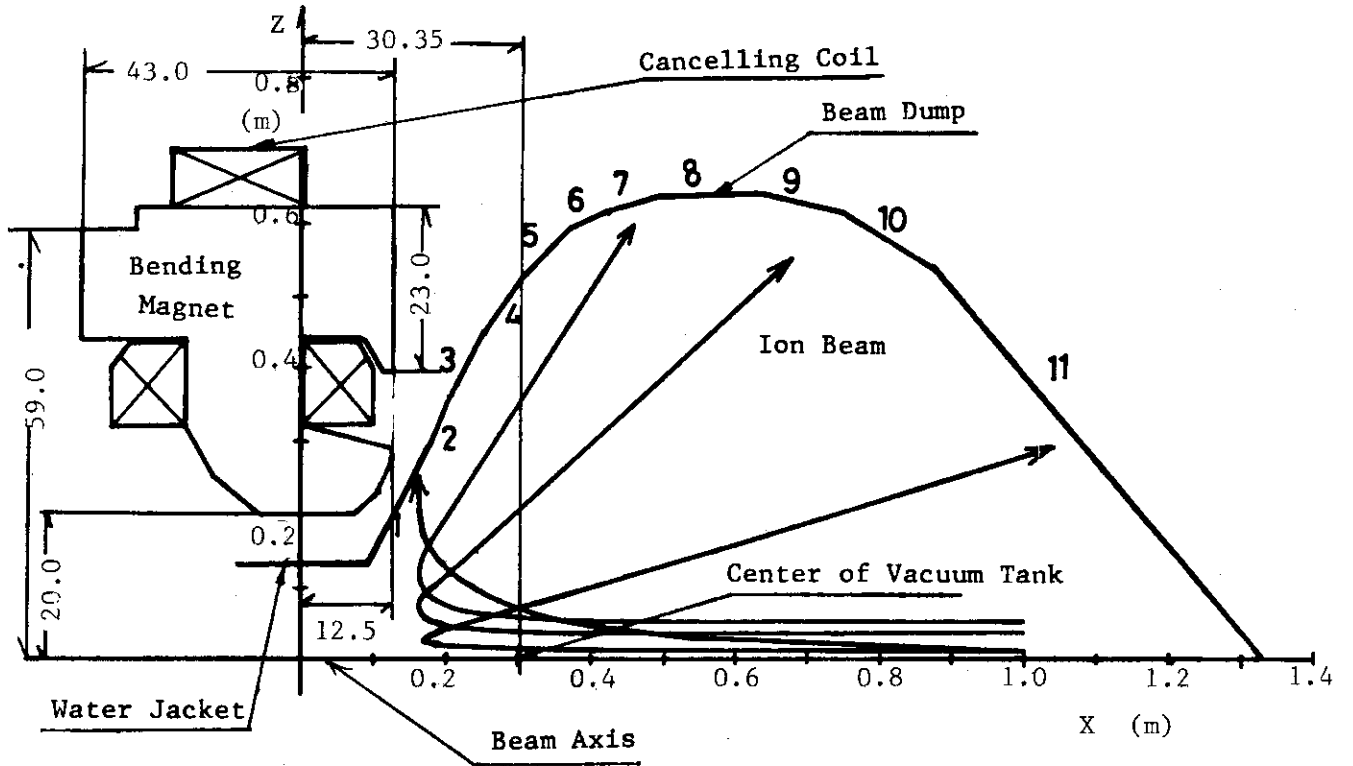


図 1.1 ビームラインユニットにおける機器の配置 (下ユニットの場合)
上ユニットの場合は※について対称の配置となる。

Plane view of the bending magnet and beam dump .
 This system is symmetric with respect to the X axis .



☒ 1.2

2. 設 計 手 順

残留イオンビーム処理機器は一体化した設計が進められるが、それは偏向磁石の方式を決めた後の手順である。考えられる偏向磁石の方式としては図 2.1 に示すように、透過型(a)、反射発散型(b)、反射集束型(c)がある。これらの方式によって、除熱機器の配置、形状が大きく異なる。よって、この方式を設計途中で変更することは困難であり、本設計を始める以前に偏向磁石の確かな選定が重要であり、これについては 4.1 節で詳細に述べる。

この一連の設計において、偏向磁石、中性化セル磁気シールド及びイオン源磁気シールド（以後磁気系機器）も一体化した検討が必要である。偏向磁石と中性化セル磁気シールドとはビームラインの空間的制約から十分距離を保つことができず磁気回路を作る。このため、偏向磁石の起磁力は中性化セル磁気シールドを通る磁束も考慮しておく必要がある。又、JT-60 からの漏洩磁場のような規模で見た場合、これら磁気系機器は一体の磁性体と見なせる。これら磁気シールドによる磁場の乱れはビーム軌道へ影響を与えるため、除熱機器の熱負荷を正確に知る上で、偏向磁場や漏洩磁場はこれら磁気シールドによる乱れを含んだものが必要である。

偏向磁石や磁気シールドの形状の検討には磁場解析コードによる方法、磁気系機器の縮小モデルの実測による方法とがあるが、計算、実測それぞれに制約がある。よって、それぞれの制約を補足するように図 2.2 に示すフローチャートに従って設計を進めた。この図の点線で分けられた上側の設計を一次設計と呼び、計算コード「TRIM」、「RIBHL2」を用いて 2 次元磁場分布で偏向磁石の形状および除熱機器の大略形状を決めた。次に、点線下側に進み、これらを基に磁気系機器の 1/4 モデルを製作し磁場分布を詳細に測定し、この結果を「RIBHL3」の入力とし 3 次元磁場分布における除熱機器の形状を確定すると共に一次設計で決めた偏向磁石形状の妥当性の確認を行なう事とした。又、一次設計では磁気系 1/10 モデルと「TRIM」により漏洩磁場の大略を調べその対策も検討した。

一次設計において、W-J 及び B-D の設計は採用した偏向磁石によって得られる磁場分布を用い、3.3 節で想定している最もきびしい条件下でのイオンビーム密度分布においても熱負荷が許容値以下となる W-J や B-D の形状が存在することを確認することにある。この確認ができると偏向磁石の設計は終了することになる。同時に漏洩磁場対策についての確認も行った。漏洩磁場の対策としては打消コイルを用いることにした⁴⁾。打消しコイル磁場を漏洩磁場に重ねた時の磁場分布（以後残留磁場）は、一次設計の段階で 1/10 モデルの測定、「TRIM」による計算から 2 次元的にはあるが得ることができた。この残留磁場によりイオンビームが偏向されても W-J や B-D の熱負荷は許容値を越えないことも一次設計の段階で確認した。

このような手順で一次設計が終了するとそれをもとに偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールド、第 1、第 2 打消しコイル及び模擬漏洩磁場発生コイル（以後これらをビームライン磁気系と呼ぶ）の 1/4 縮小モデルを作り、これらのモデルを使用して三次元的に磁場を測定し、その磁場分布をもちいて B-D 形状等の最終設計を行った。

ビームライン上には偏向磁場を乱す中性化セル磁気シールド等の磁性体があり、これらは一次設計でも2次的には考慮されているが、実際にはこれら磁性体は有限長であり偏向磁場にはこれらの端効果も表われ、その分布は3次元である。この端効果について定性的には残留イオンビームを磁石の間に平行な方向に集束させる効果があるということがわかっていたが定量的にはわからなかった。さらに残留磁場も3次元的な磁場分布となる。これら3次元的な効果が入った磁場を計算から求めることはこれまでのところ不可能であった。しかし、これら3次元的な磁場の乱れによる熱負荷の変化を定量的に求められるほど磁場分布が詳細にわかっているとB-Dの形状等の最終設計が行えない。以上のような理由により図2.2に示すような手順で設計を進めることとした。ここではこの一次設計について報告し、W-JやB-Dの詳細設計については別に述べることとする。

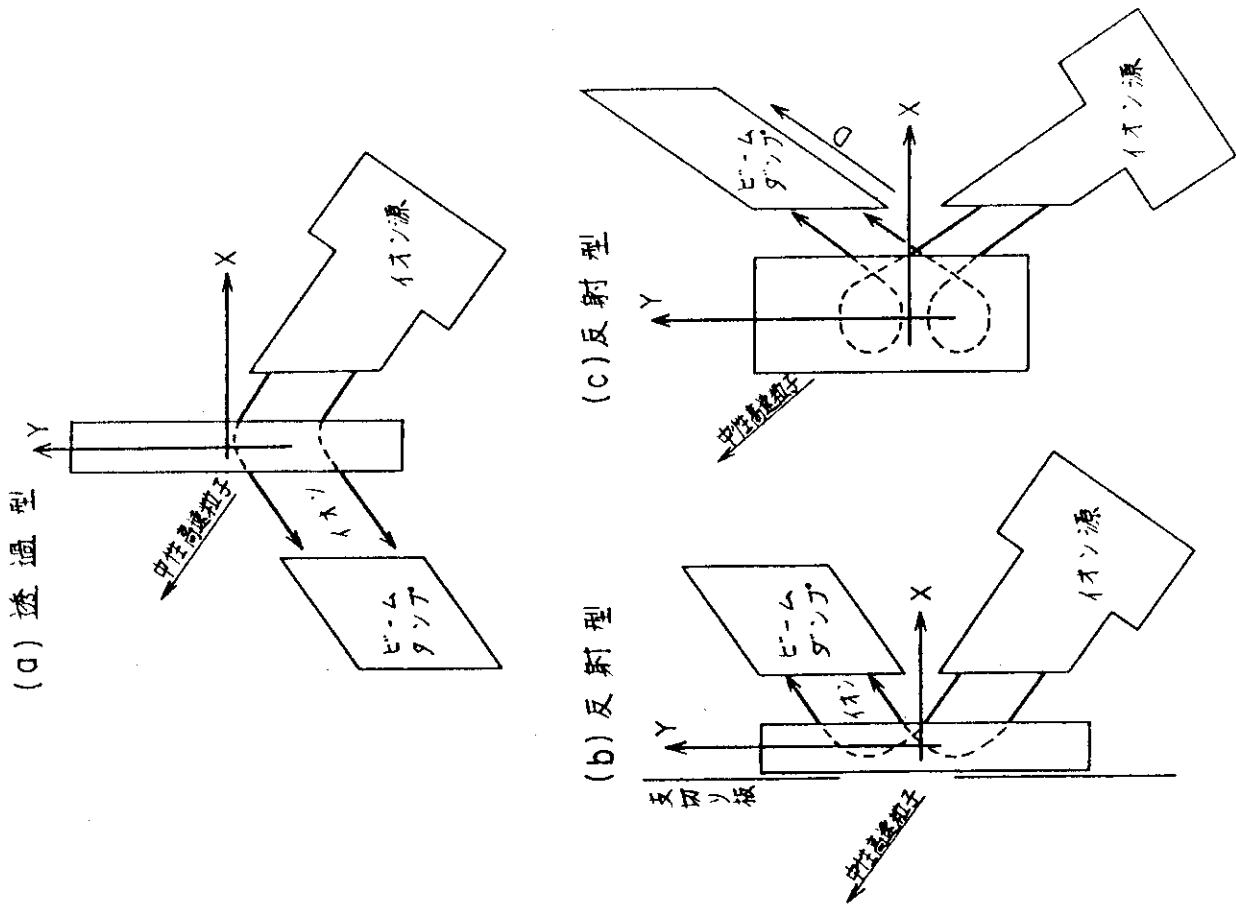


図 2.1 偏向磁石の方式

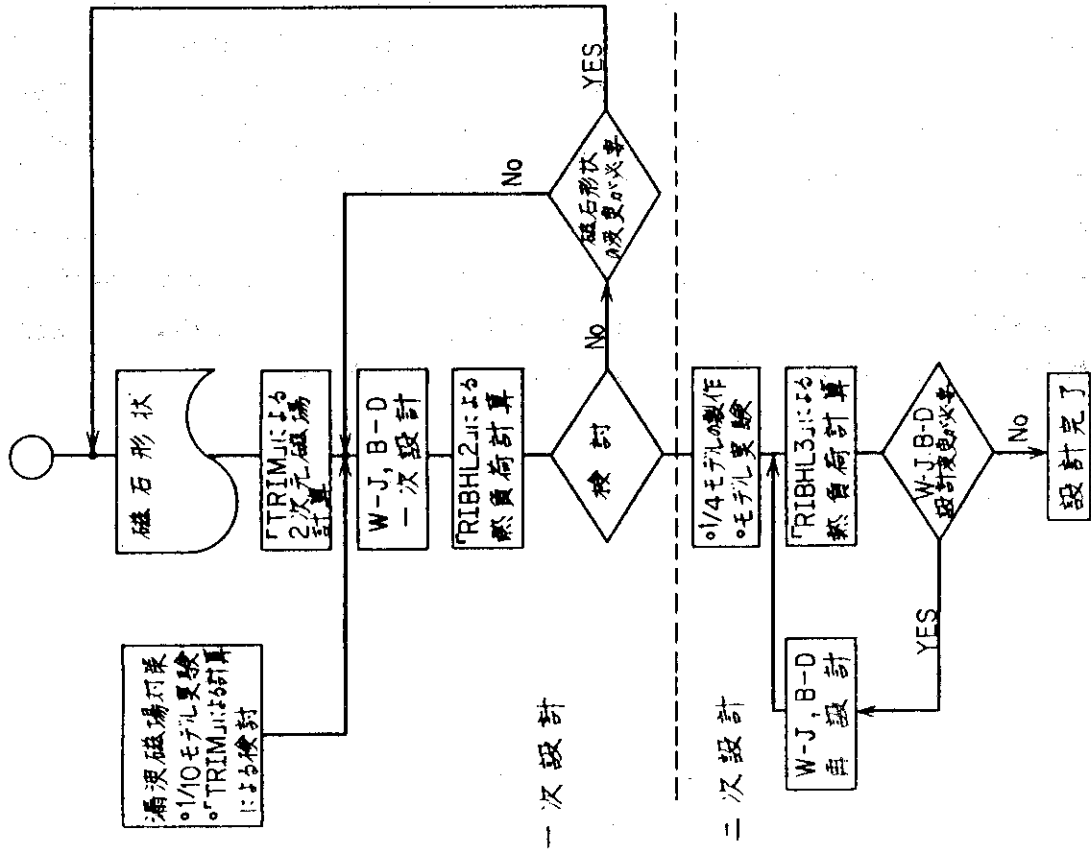


図 2.2 残留イオン処理機器設計手順

3. 設計の境界条件

JT-60 NBIを設計するにあたって、JT-60との関連で規定される各種の制約条件があり、残留イオンビームを処理する機器の設計にあたっては、幾何的制約条件と電磁氣的制約条件などがある。

3.1 幾何学的制約条件

NBIのビームラインの基本寸法は図3.1.1に示されている通りで、これはJT-60との関連で決っている¹⁾。即ち、残留イオンビームを処理する機器にとって、この基本寸法が幾何的制約条件となり、各機器を主排気タンク内にむだなく納まるように設計することが必要となる。このことが機器の大きさや配置の制約条件となり、特に偏向磁石の型式を決める要点となった。その詳細は4.1節で述べる。図3.1.1は上ユニットに対する寸法であるが、下ユニットもP平面に対して対称な寸法となる。

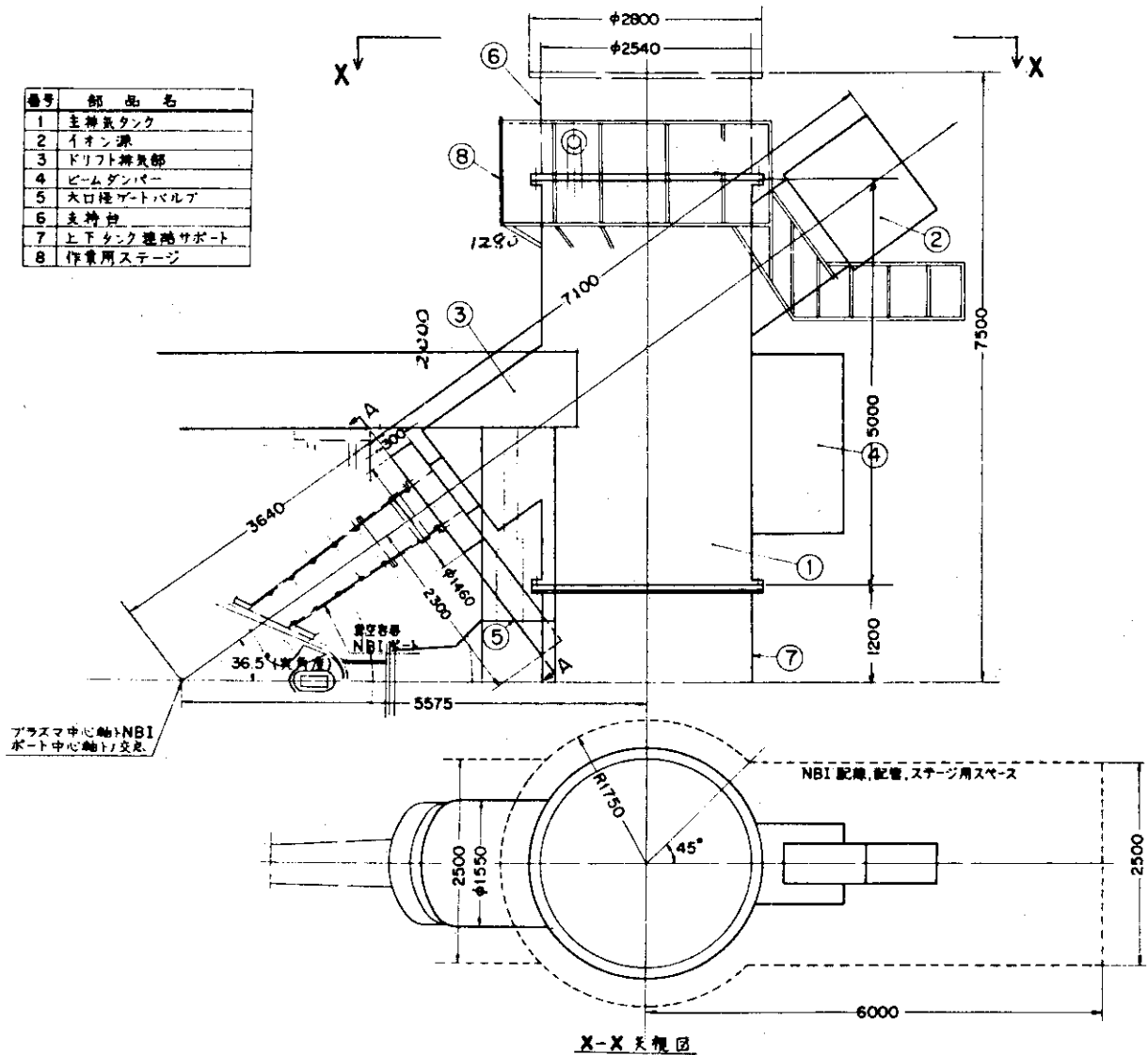


図3.1.1 JT-60 ビームラインP平面で対称する。

3.2 電磁氣的制約条件

ここでは、JT-60のOHコイル電流を主因とする漏洩磁場が問題となる。この漏洩磁場は、主排気タンク附近で図3.2.1に示すようなベクトルとなり、さらに図3.2.2に示すようにOHコイル電流の増加と共に増加することがわかっている。このOHコイル電流は、プラズマ電流を一定に保つためのもので、プラズマ電流の向きを反対とする時は反対の漏洩磁場ベクトルを発生する。この漏洩磁場が残留イオンビーム軌道を図1.1のZ方向に偏向しこのままではビームダンプ等に致命的な損傷を与えることは容易に予想できる。この漏洩磁場をビームラインの一部空間に限って減少させるため、我々は打消しコイル磁場を用いることにした。この打消しコイルの発生する磁場によると漏洩磁場をかなり減少させることができるが、図3.2.3に示すような分布で若干の残留磁場が残ることが1/10モデルの実験から解っている。この残留磁場によってもイオンビームはZ方向に曲げられ、ビームダンプ等の熱負荷が部分的に高くなることが熱負荷計算から確認されている。また、残留磁場は偏向磁石と中性化磁気シールドとの空間でこれら両者の端効果のため乱され、特にイオンビームIとIIとの通過空間では乱れの様子は異っているため、イオンビームIとIIとでは残留磁場による熱負荷への影響は異っている。

ビームラインの各機器は次節で述べる「軸ずれ」を持っており、残留磁場の問題はこの軸ずれと合せて考える必要がある。即ち、各機器の軸ずれによりZ方向に熱負荷がシフトするときこれが残留磁場による熱負荷のシフトと同方向となる場合W-J, B-Dの熱負荷に対して最も厳しい条件となる。詳細は次節で述べる。

偏向磁石の形状を決める一次設計では、この最悪の場合も検討しておく必要がある。我々は漏洩磁場の対策を検討するにあたりビームライン磁気系の1/10モデルを製作した。これらモデルを用いた1/10のモデル実験及び「TRIM」によるパラメータサーヴェイにより得られた結果⁴⁾から図3.3.2に示すような2次元の残留磁場分布を仮定して、これを計算に使用した。なお残留磁場分布は打消しコイル磁場電流によって変化させることができる。この時の残留磁場の変化は図3.3.2のバイアス値 B_b を変化させることで近似できることが解っている。漏洩磁場対策として打消しコイル磁場を用いる方法だと、打消しコイル磁場電流が可変であるので残留磁場の効果の最も少ない状態を作れる。このことは図3.3.3に示すようにイオンの軌道を B_b を変えることで残留磁場の効果が全くない実線の軌道に近づけることができることから予想できる。この一連の検討において B_b を変化させることにより残留磁場の効果の最も少ない状態を捜すことで打消しコイルの起磁力を求めた。また、打消しコイル及びその電源の設計においてこの結果を使用した。

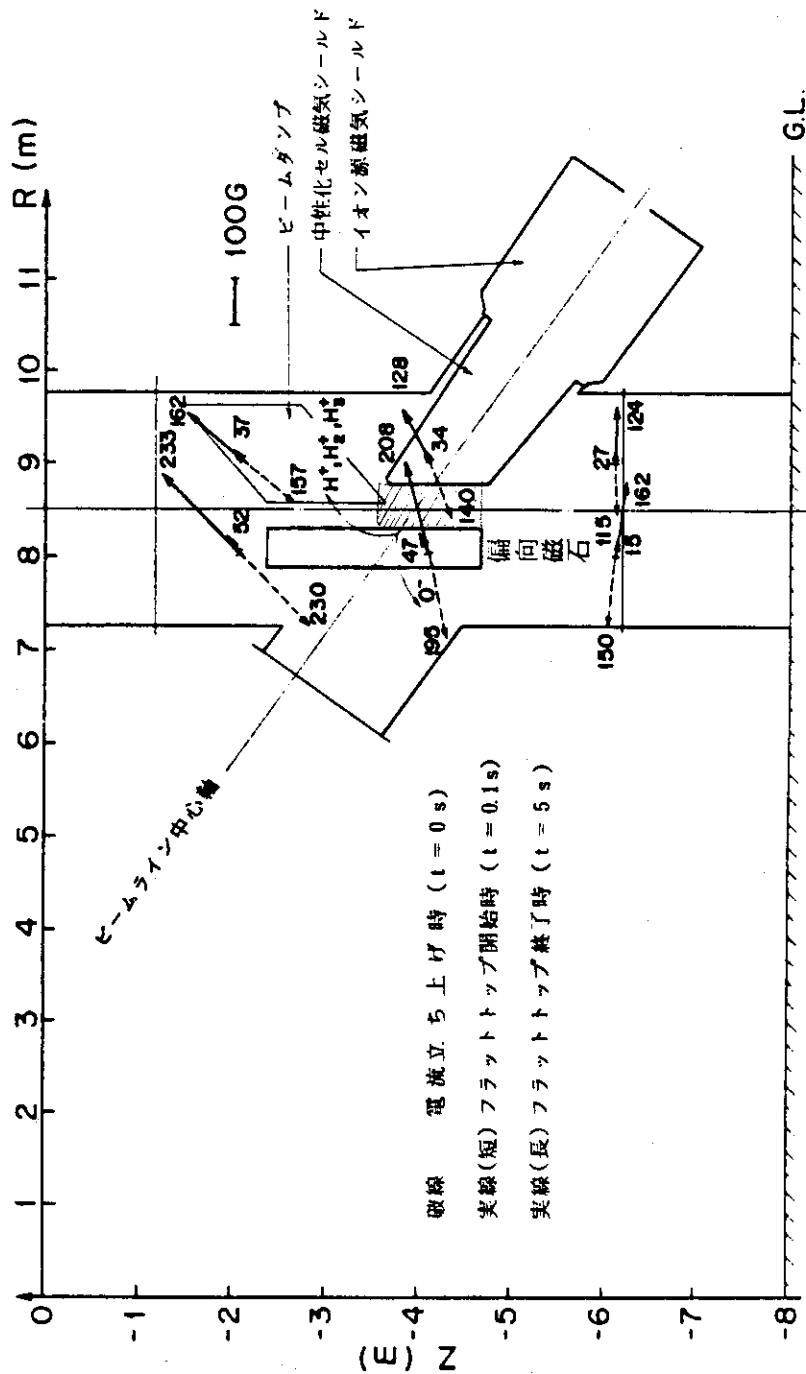


図 3.2.1 磁気リミッタを運転しない場合の漏洩磁場分布
 (偏向磁石等の磁性材がない場合)

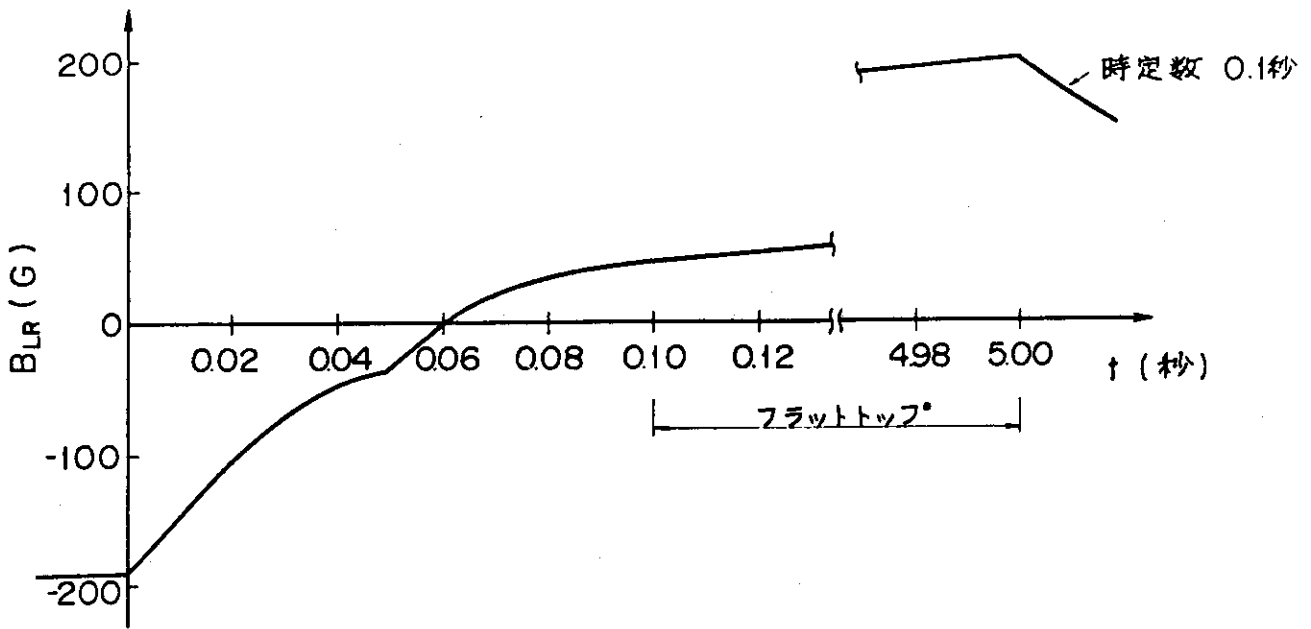


図 3.2.2 JT-60 の漏洩磁場の時間変化 (磁気リミッタを運転しない時)。偏向磁石等の磁性材がない場合のトーラス中心より $R = 8$ m, $Z = -4$ m (偏向磁石中心近傍) における R 成分。

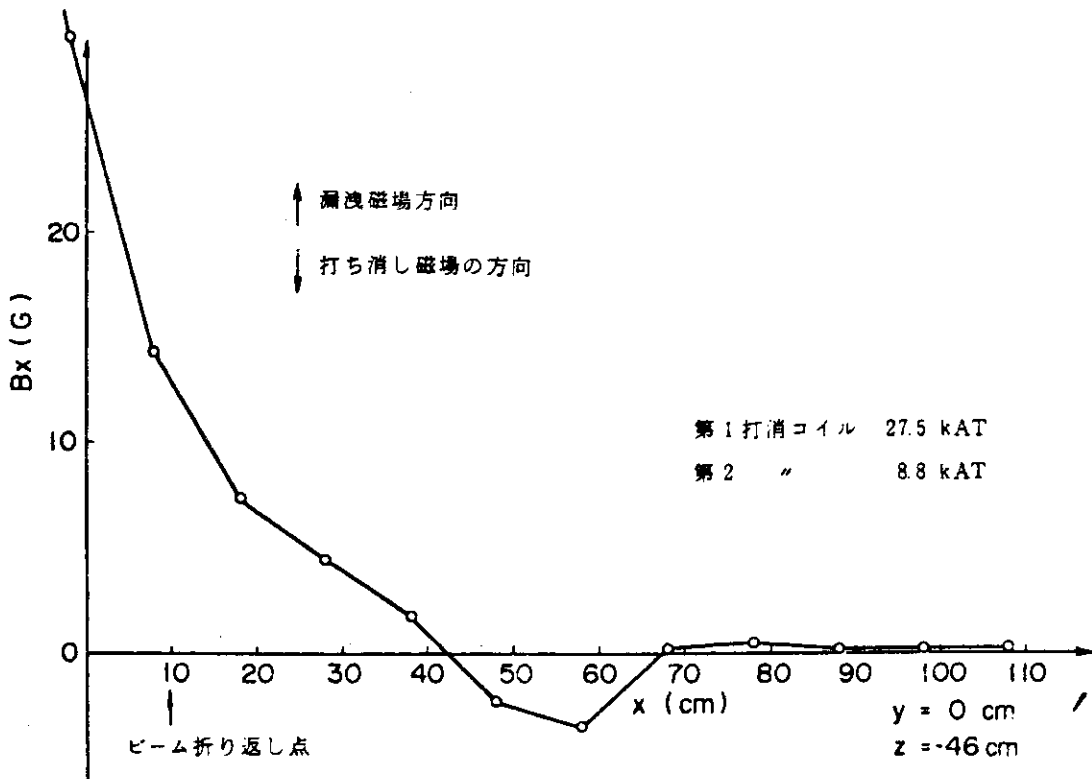


図 3.2.3 第1, 2 打消コイルを併用した時の効果 換算後 (3.5.1 倍)

3.3 その他の設計条件

その他に本設計で考慮しておかなければならないものとして、イオンビームそのものが持つ特性からくる条件がある。それは以下の通りである。

- ① イオンビームは表 3.3.1 に示す成分比からなっている⁵⁾。
- ② イオンビームは引き出し電極の各孔から引き出されるビームレットの束からなっており、各ビームレットの発散は 1.2° から 0.9° までである⁶⁾。
- ③ これらビームレットは電極から 8.3 m の所で集束している。

又、残留イオンビーム処理機器、特にビームの当るビームダンプ等の除熱機器において、その表面に入る熱流束の限界が除熱能力と機械強度条件から 500 W/cm^2 ⁷⁾ となっていることも設計条件である。

このような制約条件とは別に、当然、各機器の持つ設置精度も設計では考慮しておく必要がある。実際には各機器の設置誤差がガウス分布しているとして重ね合せ機器が設置された時のビームラインと理想的なビームラインとのずれ（軸ずれと呼ぶ）で表わすこととした。熱負荷分布の偏りとなって現われる軸ずれは、y 軸周りの回転として表わし一応 $\pm 0.15^\circ$ と決められている⁸⁾。JT-60 NBI では図 1.1 に示す通り 1 ユニット当たり二本のビームラインを持っており、それらが同時に同じ方向に軸ずれしているとは限らない。即ち、主排気タンク中心軸に平行な方向から 2 本のビームライン軸を見た時、理想的なビームライン軸は重なるのであるが、それぞれ理想的なビームライン軸に対して図 3.3.1 示すように対称に軸ずれを起すこともある。軸ずれの方向を示す正負の符号は「RIBHL 2」のコードのデータ入力を行う上で決っており軸ずれが正だとビームは負の方向を向き B-D の負側の熱負荷が高くなる。軸ずれが負の時これと全く反対の現象となる。残留磁場 B_L が B_x 成分のみで、もし $B_L < 0$ でかつ軸ずれが -0.15° の時 B-D の熱負荷分布は最悪となり、また、 $B_L > 0$ でかつ軸ずれが $+0.15^\circ$ の時も B-D の熱負荷分布は最悪となる。なお W-J や B-D の熱負荷から見て許容できる軸ずれを求めるため、実際の検討では 0.3° の軸ずれまで想定した。

表 3.3.1

100 kV で加速した成分比 $H^+ : H_2^+ : H_3^+ = 75 : 20 : 5$ のイオンビーム
を 90% 平衡セルに通したときの 2 次ビーム成分

$H^+(E)$	61.27%	2450.8 KW
$H^+(E/2)$	9.22%	368.8 KW
$H^+(E/3)$	1.47%	58.8 KW
$H_2^+(E)$	0.18%	7.2 KW
$H_2^+(2E/3)$	0.03%	1.2 KW
$H_3^+(E)$	0.00%	0.0 KW
$H^-(E)$	0.07%	2.8 KW
$H^-(E/2)$	0.12%	4.8 KW
$H^-(E/3)$	0.06%	2.4 KW
		2896.8 KW

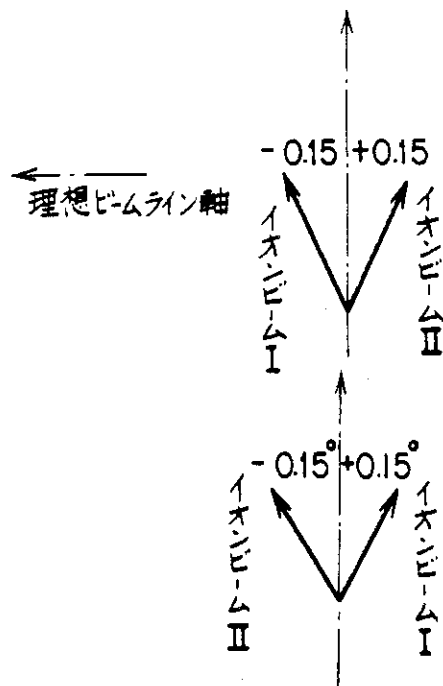


図 3.3.1 イオンビーム I, II の軸ずれ

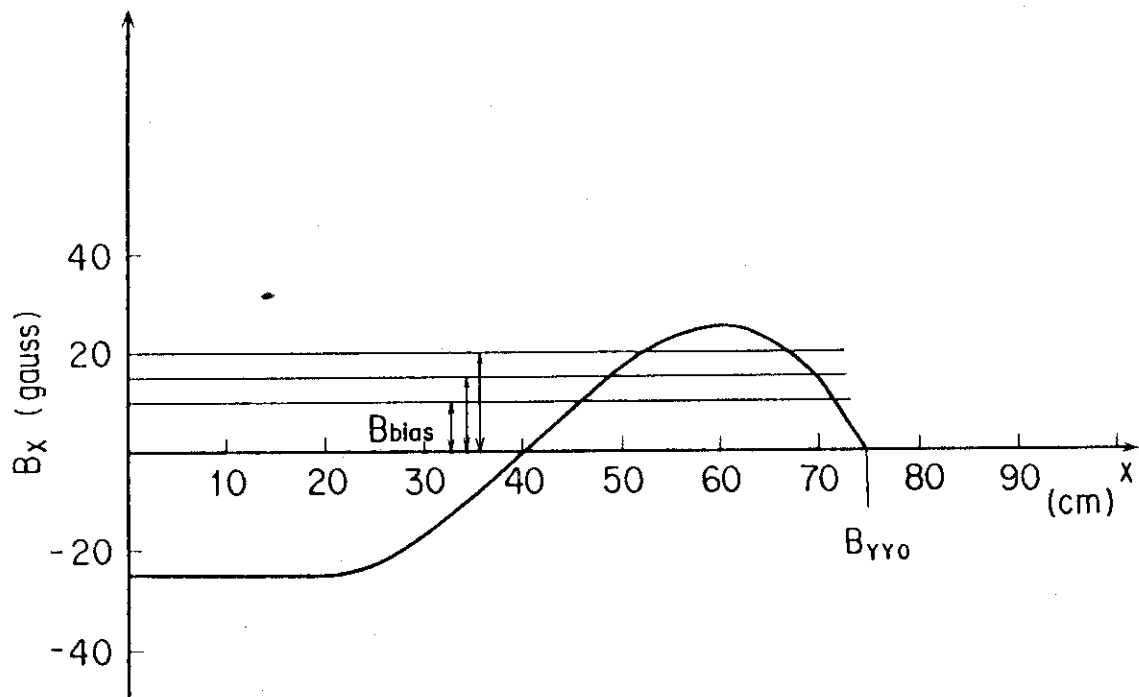


図 3.3.2 残留磁場 (JT-60 からの漏洩磁場 + 打消し磁場) を模擬した磁場分布

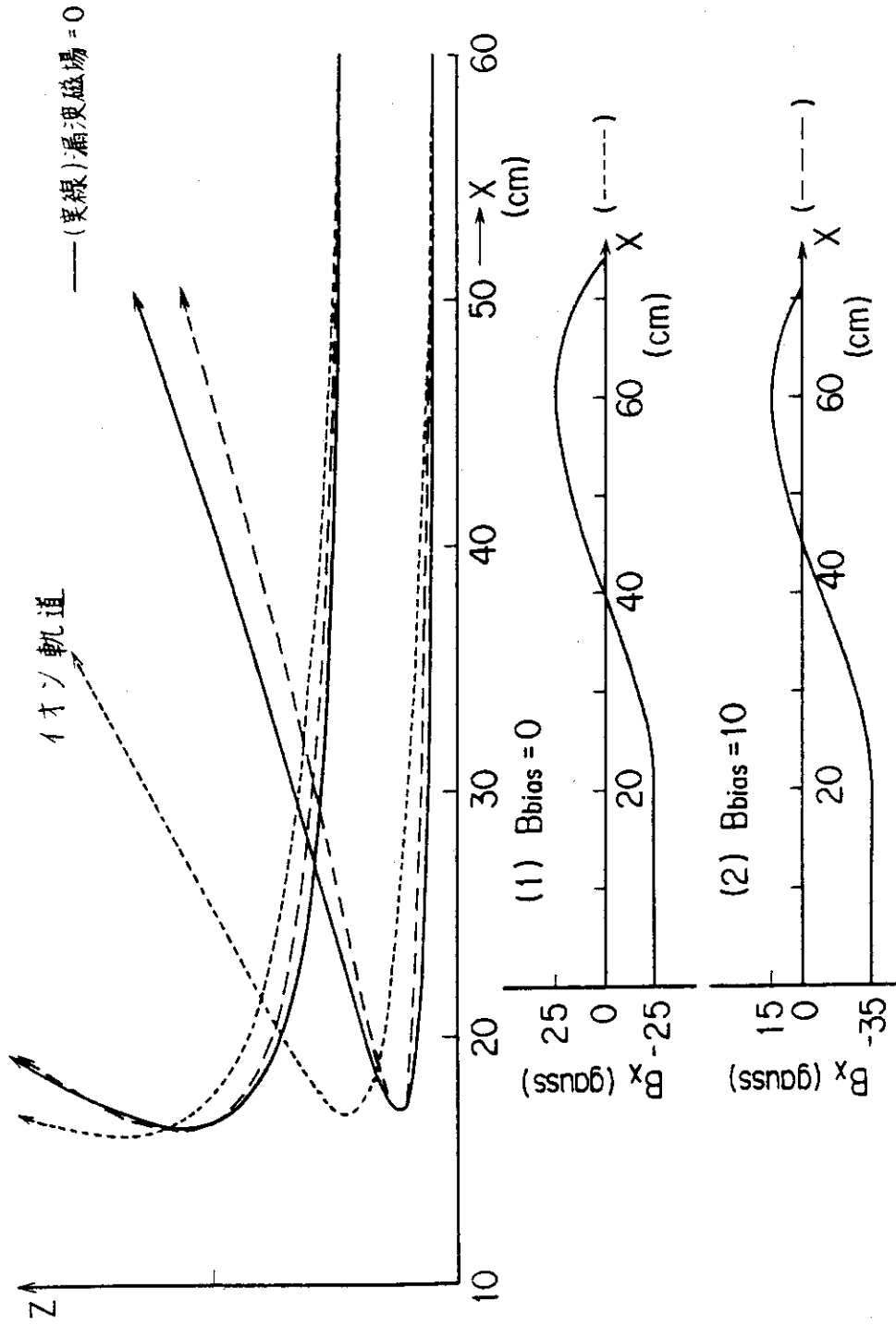


図 3.3.3 残留磁場のバイアス (B_{bias}) とイオン軌道との関係

4. 偏向磁石の設計と一次設計

4.1 偏向磁石の型式

偏向磁石の型式として図 2.1 に示すような透過型(a)と反射型(b)と反射型にも(c)のような型式のものもある。我々はこの3つの型式について検討を行った。その結果、JT-60NB I では以下の理由で図 4.1.1 で示すような反射角が 35.5 度の反射型偏向磁石を採用した。

(1) 反射型を選んだ理由

反射型では、一部の重いイオン (O^{+} 等)を除き、図 4.1.2 に示す通り残留イオンビームパワーの 99.7% を占める正イオンを同一方向に偏向でき、図 2.1 (b) のように磁石を境とする仕切り板を設けることによって、中性高速粒子ビーム (入射ビーム) と高速イオンがビームダンプ等に衝突して生じる室温中性ガスとを簡単に分離できる。即ち、JT-60NB I の真空排気系ではクライオポンプの負荷をなるべく軽減するように差動排気系を採用する必要¹⁾があるが、この仕切り板により有効な差動排気が行えることになる。

(2) 反射型の(b)を選んだ理由

(b)の場合、磁石のフリンジング磁場を用いて図 4.1.3 に示すようにイオンビームを磁石のギャップ方向 (Z 方向) に発散でき、B-D 等に入射する熱流束の密度を透過型や反射型の(c)に比べて大巾に緩和できる。B-D に入射する熱流束が小さいため、残留磁場やビームの軸ずれ及びビームの発散角等の変化による熱流束分布の変化は(a)や(c)に比して大きくないと考えられる。又、(b)の場合、B-D を図 4.1.4 に示す排気タンク内に納めるとして B-D の表面積が最大となるのは、B-D の置かれる空間で他の機器と干渉のない図 4.1.4 に示すような最大の円の時と概略考えられ、その円周は約 400 cm で、B-D 上の熱負荷の帯の巾を 30 cm とするとイオン源あたり

$$2,800,000 \text{ w} / 400 \times 30 = 233 \text{ w/cm}^2 (\leq 500 \text{ w/cm}^2)$$

の熱負荷で許容条件を十分満足することがわかる。よって(b)の場合 B-D が主排気タンク内に十分納まると予想できる。

透過型や反射型の(c)で B-D 等に入射するビーム束を残留磁場や軸ずれを考慮して許容値まで下げるようにビームダンプ等を設計した場合 B-D の奥行 (ビームの進行方向の長さ図 2.1 (c) の D 方向) が非常に長くなり、主排気タンクから B-D がはみ出ることになる。このため(c)の場合、主排気タンクそのものの構造も複雑となる。又、偏向磁石も(b)より(c)の方が起磁力を大きく必要とし磁石の重量及び容積も大きくなる。

反射型(b)において、イオンビームは中性化セル磁気シールドから偏向磁石に入るまでの空間 (図 3.2.1 斜線部参照) の漏洩磁場に非常に敏感であることがわかっており、打消しコイルでこの狭い空間の磁場のみを最小にすればよいため図 4.1.1 に示すような位置にこれらのコイルを配置した。B-D のある空間、即ち、反射後のイオンビームが通る空間では図 3.2.1 からわかるようにイオンビームの進む方向と漏洩磁場のベクトルとがほぼ平行であるためイオンビームは漏洩磁場の影響を受けにくいと予想される。4.1 (2) で述べたようにこの領域のビームは漏洩磁場や軸ずれ及びビームの発散の変

化に対して影響を受けにくいほど発散しているということと考え合せると、この領域の漏洩磁場対策はほとんど必要ないと考えられる。

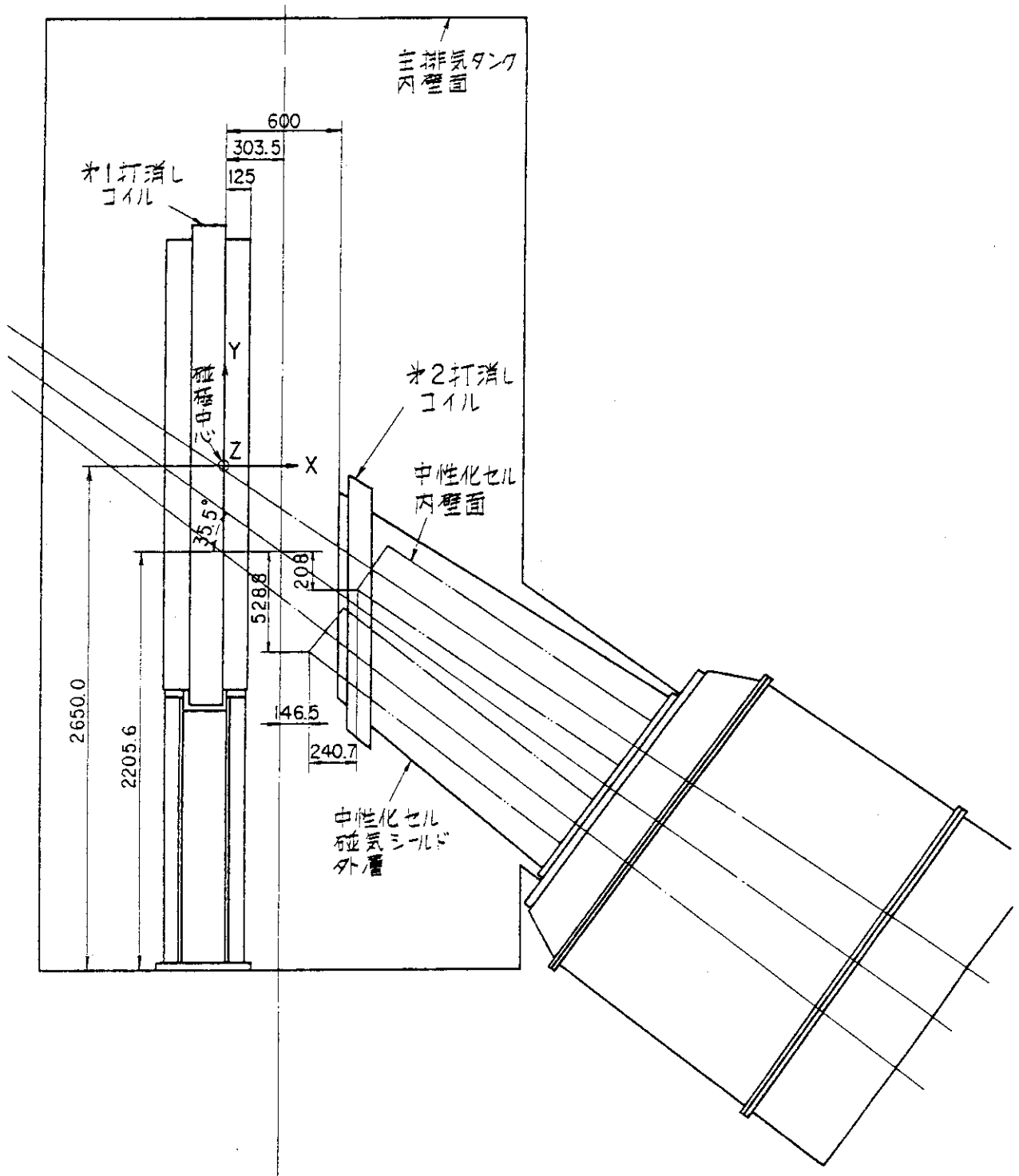


図 4.1.1 偏向磁石の配置 (S = 1/20)

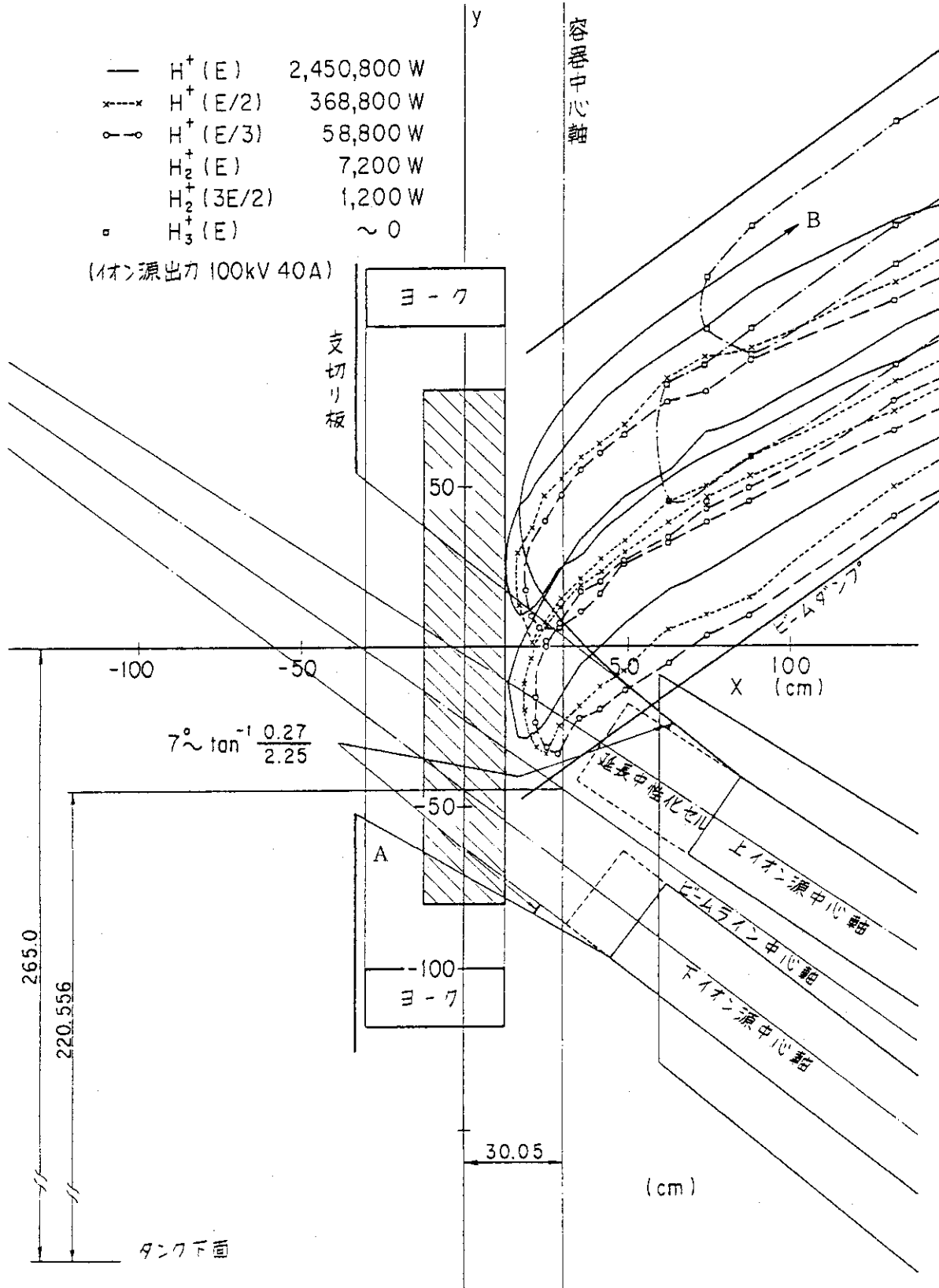


図 4.1.2 正電荷を持つ水素の成分別ビームダンプにおける衝突位置

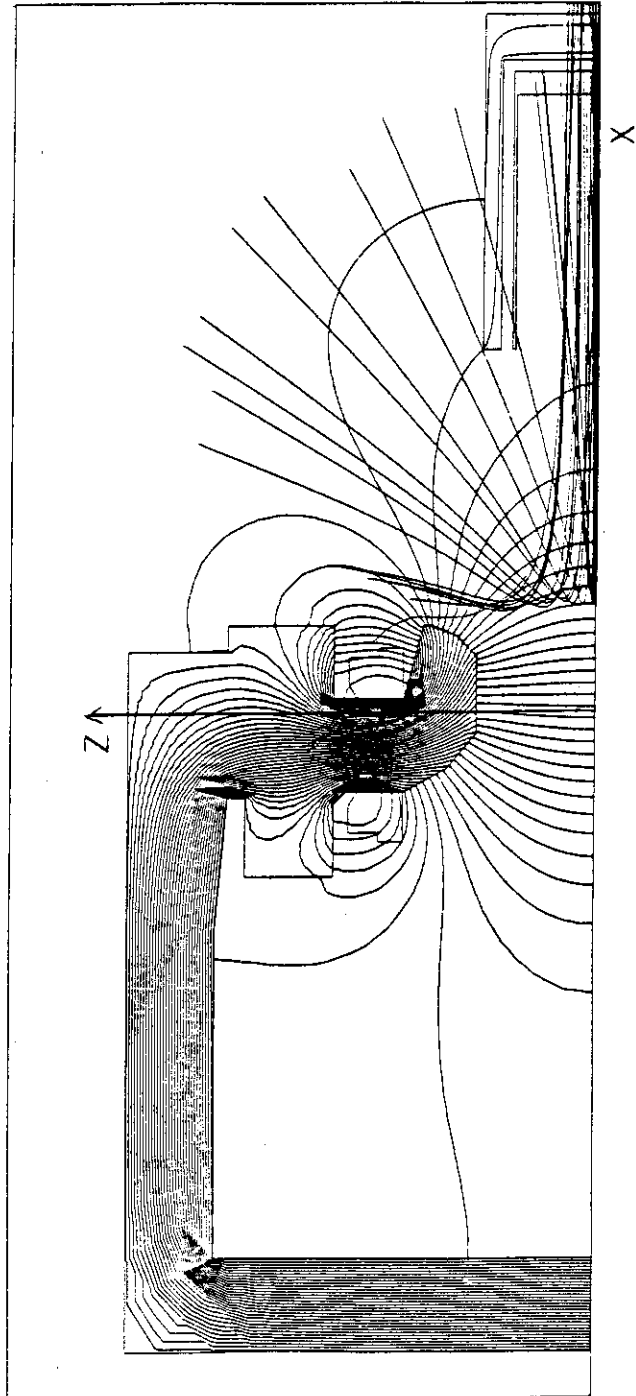
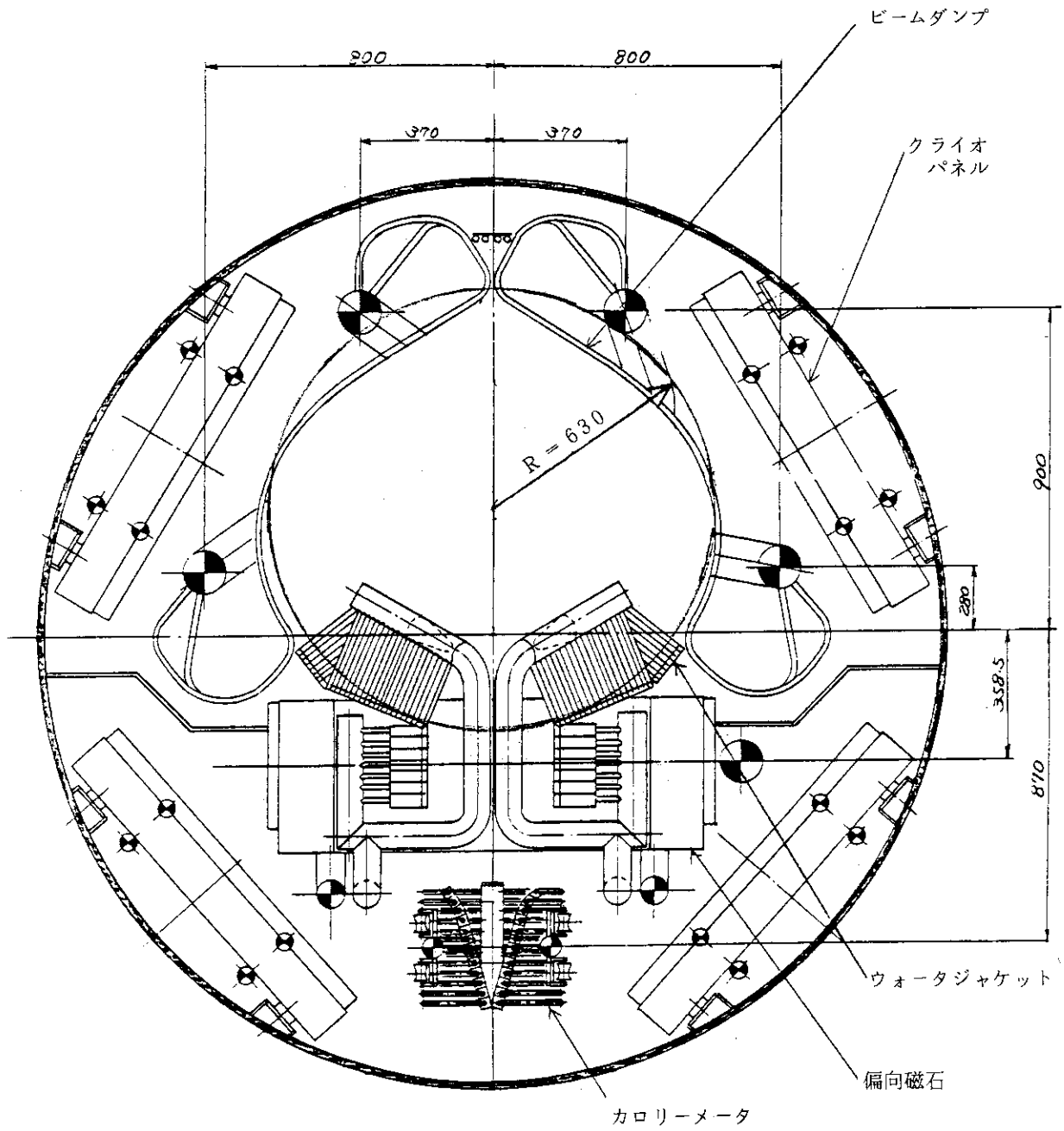


図 4.1.3 偏向磁石フリッジング磁場とビーム軌道



単位：mm

図 4.1.4 主排気タンク断面

4.2 偏向磁石の断面形状

イオンビームの軌道を決める磁場分布は偏向磁石のX-Z平面における形状によっていると考えて、ここでは、2次元的な磁場分布のみにより考察を進める。

ここでは、設計の初期において検討していた磁極形状の一例図4.2.1を用いて説明を進めることとする。磁力線はこの図に示す通りで、前述のように反射型偏向磁石では、ビームは反射されると同時に間隙方向(Z方向)にも広げられる。反射点が磁極間隙にあると、間隙部の磁極を保護するW-J.A部に熱負荷の集中が生じる。又、反射点が磁極間隙ある場合だけではないが、励磁コイルの近傍で磁場の B_z 成分が逆転している空間を横切るビームは図の*印を付けた軌道のように磁極方向に曲げられる。このような軌道をえがくビームはW-J.B部の一部に集中して衝突する。W-J部のこれら局部的熱負荷の集中が反射型偏向磁石の不利な点であり、工夫が必要となる。W-Jに局所的な熱負荷を与える粒子はビームレットに発散があること及び残留磁場と軸ずれがあるため存在し、無視できない。ここでは、W-J部の熱負荷の集中が生じて、許容値以下にするように、偏向磁石及びW-Jを設計した。

このように反射型偏向磁石の形状設計において、W-Jの熱負荷が重要な問題となる。まずA部について考える。W-J.A部の熱負荷が高くなった場合、A部の空間が磁極間隙であること及び高速中性粒子ビームの通過空間でもあるため、W-J.B部やB-Dのように傾配を持たせてビームの入射面積を大きくして熱負荷を下げることはほとんど不可能である。よって、W-J.A部のイオンビームによる熱負荷を全くなくす方がよい。又、これは問題の対象を減らすということからも設計をする上で必要となる。

このW-J.A部の熱負荷を無くすためには、フリンジング磁場を大きくしてイオンビームの反射点を磁石間隙から離すこと、即ち、反射点のX座標を図4.2.1の X_c より大きくすることが望まれる。このフリンジング磁場を増加させるために、我々は磁極中心(O点)の磁場を一定に保つよう起磁力を増しつつ磁極間隙を広げることにした。

このようにフリンジング磁場を大きくした場合、第1に偏向磁石と中性化セル磁気シールドの距離が問題となる。偏向磁石と中性化セル磁気シールドとの距離を少なくとも磁石間隙より長くして、偏向磁石磁極から中性化セル磁気シールドを通る磁路の磁気抵抗を大きくして中性化セル磁気シールドに吸込まれるフリンジング磁場の量を抑える必要がある。これによって、イオンビームをZ方向に広げる原因となる B_x 成分の増加を少なくしW-Jへの熱負荷のよけいな増加を防ぐことができ、且つ、中性化セル磁気シールドに使用する電磁軟鉄の肉厚 α を必要以上にとることも避けることができる。しかし、この偏向磁石と中性化セル磁気シールドとの距離は3.1で述べた幾何学的制約条件により制限され、図2.1.1のビームラインの寸法に影響を与えるほど長くはできない。

次に、間隙中心の磁場を一定にして間隙距離を増す場合、磁石のヨークの太さと励磁コイルの巻数を増す必要が生じてくる。即ち、偏向磁石全体寸法が大きくなることが予想できる。以上のことを考慮して、パラメータサグューを行った結果図4.2.2に示すような偏向磁石断面形状が得られた。

これは、この時点における最適結果であったが、残留磁場と軸ずれを考慮した最悪の条件下ではW-J.B部の熱負荷が許容値を越えていた。

W-J.B部の熱負荷を下げるためには、励磁コイルとイオンビームの通る空間(図4.2.2斜線部)との距離 l を離すことにより磁極方向に向うイオンビームの数を減らすことと、入射面積を増すよ

うにW-J. B部の傾配を大きくすることが必要となる。このW-J. B部の傾配を大きくする時、図4.2.3から解かるように、励磁コイルが障害となる。

又、 Δl を大きくすることも考え合せると図4.2.3に示すように矢印方向に励磁コイルを移動させること（点線参照）が有効となる。W-J. B部はW-J. A部とは異り、ここへの熱負荷を無くすわけにはいかない。ここである程度の残留イオンビームを処理しないと、処理できなかったビームがB-Dの一部に集中することがわかっている。即ち、W-J. BとB-Dとに残留イオンビームが一樣に当るような設計を考えなければならない。

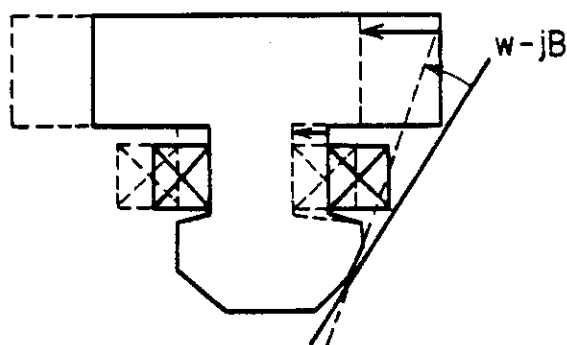


図4.2.3 偏向磁石断面形状とW-J. B部との関係

また、実際のビームではガウス分布の裾野部分を形成しているイオンも有り（熱負荷計算では発散 1.2° のビームでも $\tan^{-1} V_{\perp}/V_{\parallel} = 2.16^\circ$ 以上のイオンは無視されている。なおここで V_{\parallel} はイオンの加速方向に平行な成分の速度で V_{\perp} はそれに垂直な成分の速度である）、そのようなイオンは軸ずれと残留磁場の両者が伴う場合、W-J. B部の一部に集中し約 800 w/cm^2 以上の熱負荷となることもわかっている。特にイオン源と偏向磁石の間の距離が長いイオンビームⅡでは、この熱負荷が多くなる。この様な熱負荷を減らすため中性化セルの側板を延長することにした。当然のことながらこの側板の延長の長さはイオン源Ⅰよりイオン源Ⅱの方がより長くなる。この延長部をビームリミターと呼ぶ（図1.1参照）。ここでガウス分布の裾野を形成するイオンを一部当てて処理することにした。

以上のような考察とパラメータサーヴェイによって得られた偏向磁石等の断面形状は図4.2.4に示す通りで、この図では一部除熱機器との位置関係も示している。図4.2.5に図4.2.4に示した磁極形状における磁場分布を示す。

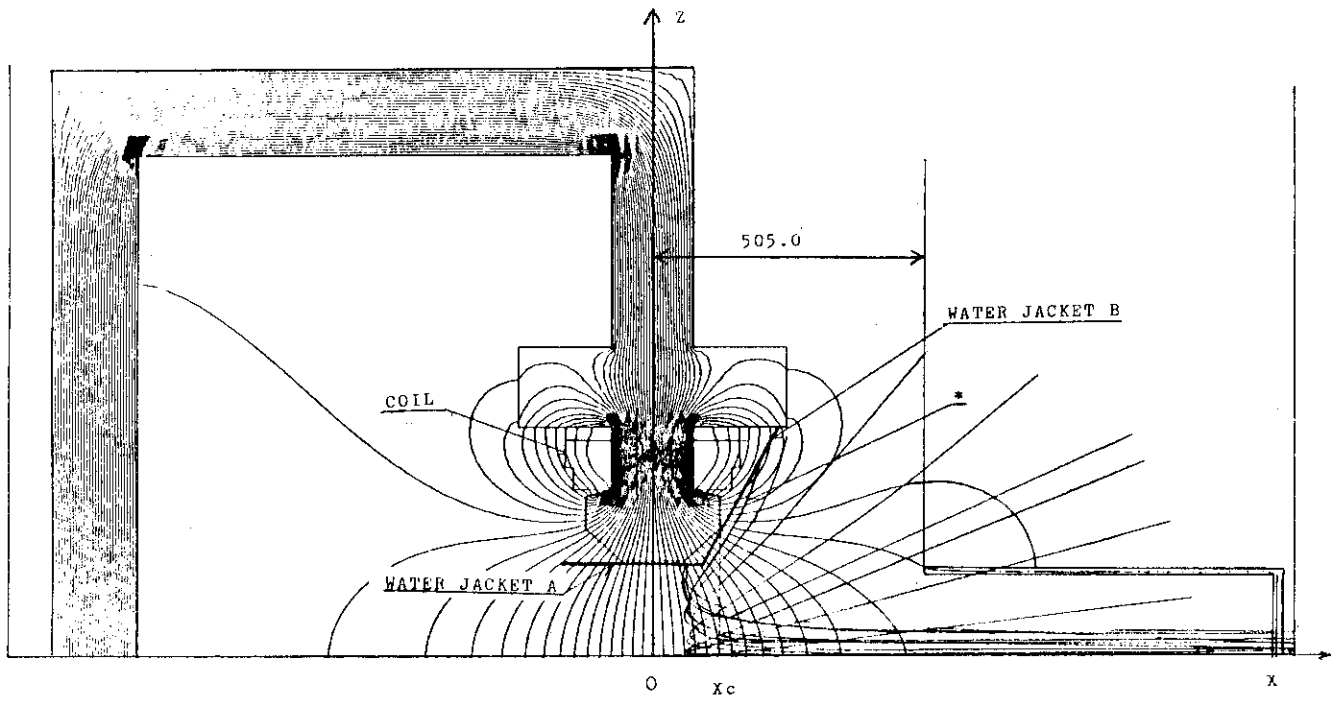


図 4.2.1 偏向磁石断面形状の一例

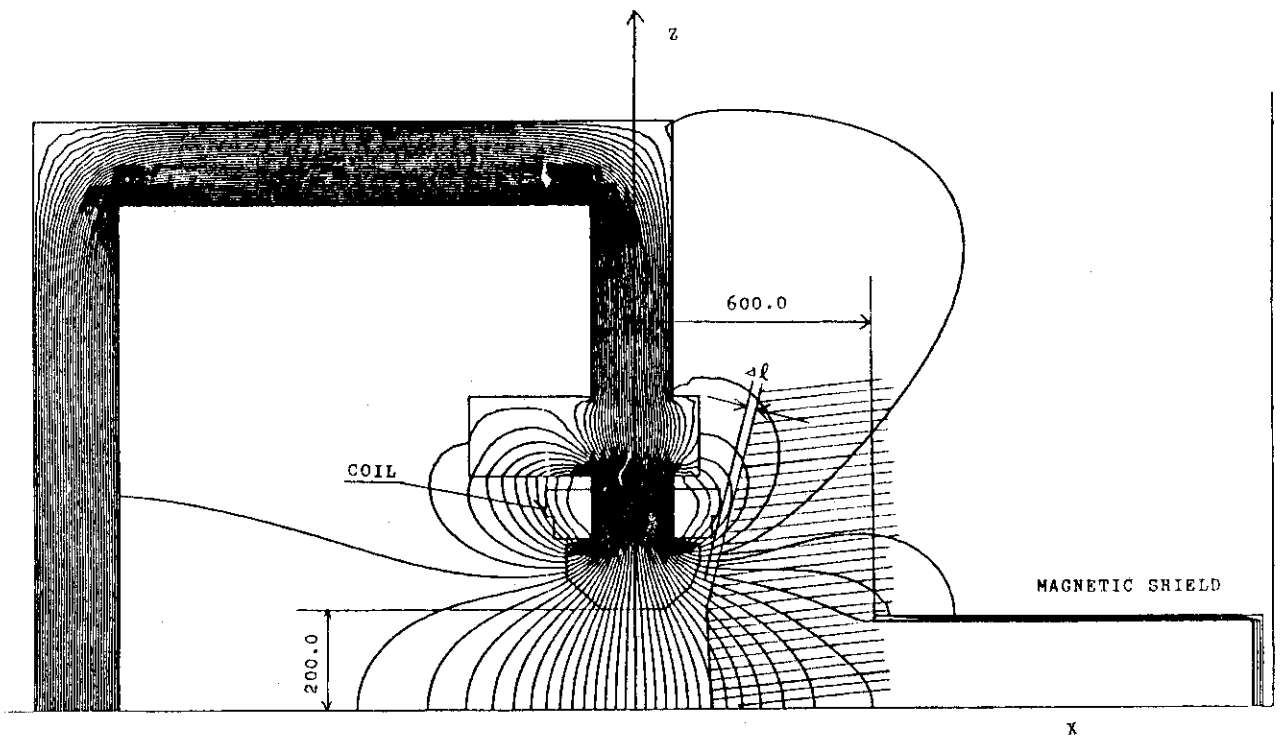


図 4.2.2 偏向磁石断面形状

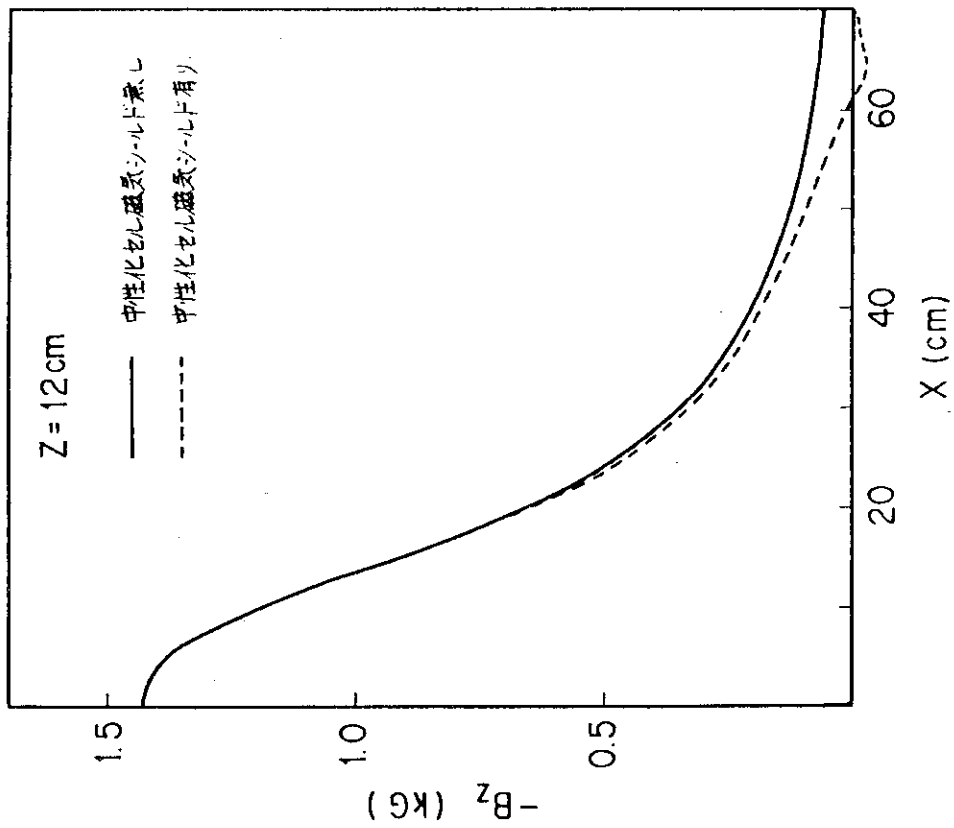


図 4.2.5 (a) 偏向磁気 B_x 成分の分布
(TRIMにより計算)

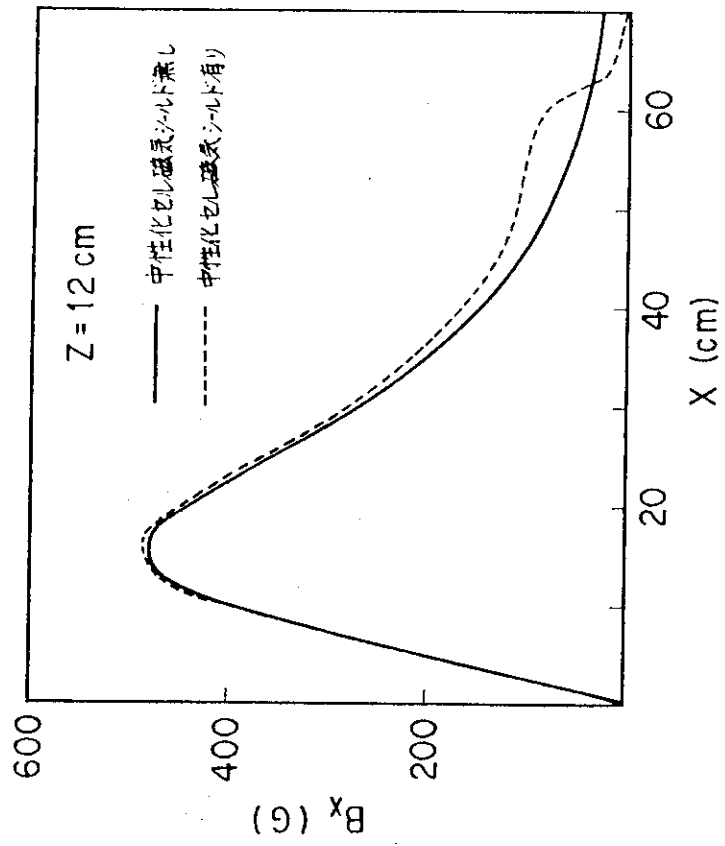


図 4.2.5 (b) 偏向磁場 B_x 成分の分布
(TRIMにより計算)

4.3 一次設計の結果

図 4.2.4 に示す偏向磁石において 3.3 節で述べた最悪条件でも、中性化セルのビームリミターへの最大熱負荷が 300 w/cm^2 以下となるようにその長さをきめた。即ち、イオン源 I においては中性化セルの側板を 17.1 cm 、イオン源 II においては中性化セルの側板を 48 cm それぞれ延長することにした。(図 4.3.1 参照)

熱負荷の最も厳しいのは W-J であることが予想通り計算結果に表われており、この W-J の熱負荷を許容値以内にするようにパラメータサーヴェイした結果、図 4.2.4 に示すような W-J 及び B-D の形状を得た。この時、最も熱負荷が大きかった W-J への熱負荷分布を図 4.3.2 に示す。これにより熱負荷が許容値以下となるような W-J 及び B-D が設計可能であることが確認された。

偏向磁石の磁極の位置及び y 方向の磁極の長さは図 4.1.2 に示す通りである。これらは、最も下側を通る H^+ が (図 4.1.2 で A 線) 磁極の最下端に入ること、又、最も上端を通る H^+ の軌道 (B 線) が磁極の最上端において十分 B-D の存在する方向に偏向されていることを軌道計算によって確認して決定した。偏向磁石の寸法の詳細は図 4.3.3 に示す通りである。偏向磁石は、巻数 23 ターンの 2 個の励磁コイルにより、イオン源の加速電圧が 75 KV に対して、間隙中心で 1.32 KG の磁場を発生する。この時、起磁力は 50.6 キロアンペアターンである。なお偏向磁石のヨークの太さは偏向磁場による磁束のみだけでなく JT-60 からの漏洩磁場が加わっても磁性材 (電磁軟鉄) が飽和しないように決めた。

B-D の y 方向の大きさは図 4.1.2 に示すように全ての水素の正イオンについて熱負荷を計算し、それらが B-D から洩れないように決めた。また、この一連の計算から中性化セル磁気シールドに H^+ (E/3) の一部が当たることがわかった。

W-J 及び B-D の最高熱負荷を許容値 500 w/cm^2 までとした時、図 4.3.4 の斜線部に示すような軸ずれと残留磁場の範囲内ではイオンビームを本除熱機器で安全に処理できることがわかった。このことから、打消しコイル電流は約 $\pm 3\%$ の精度で制御すればよいこともわかった。

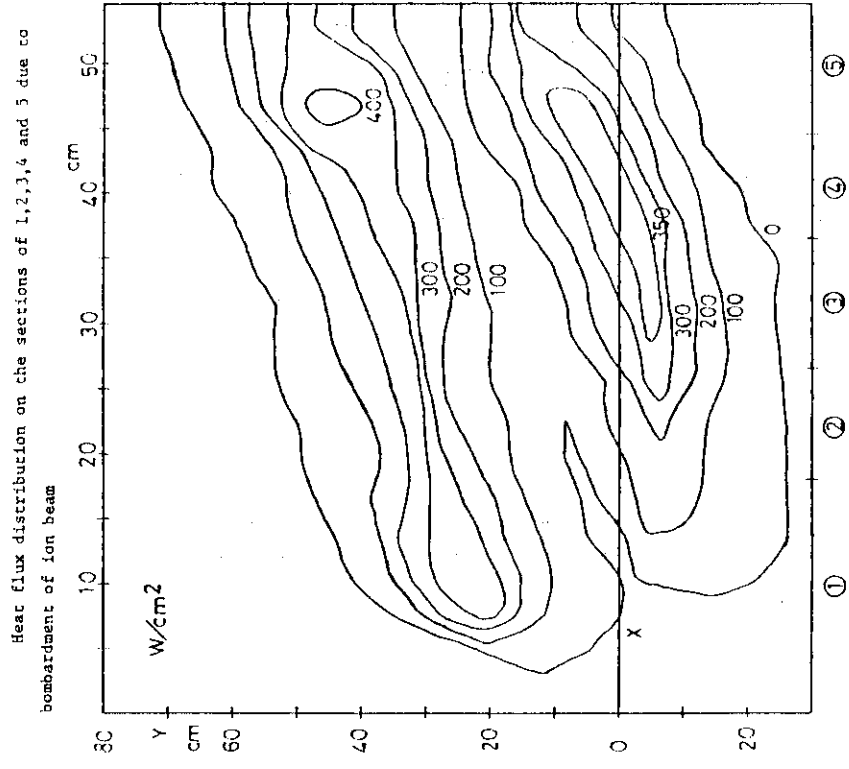


図 4.3.2

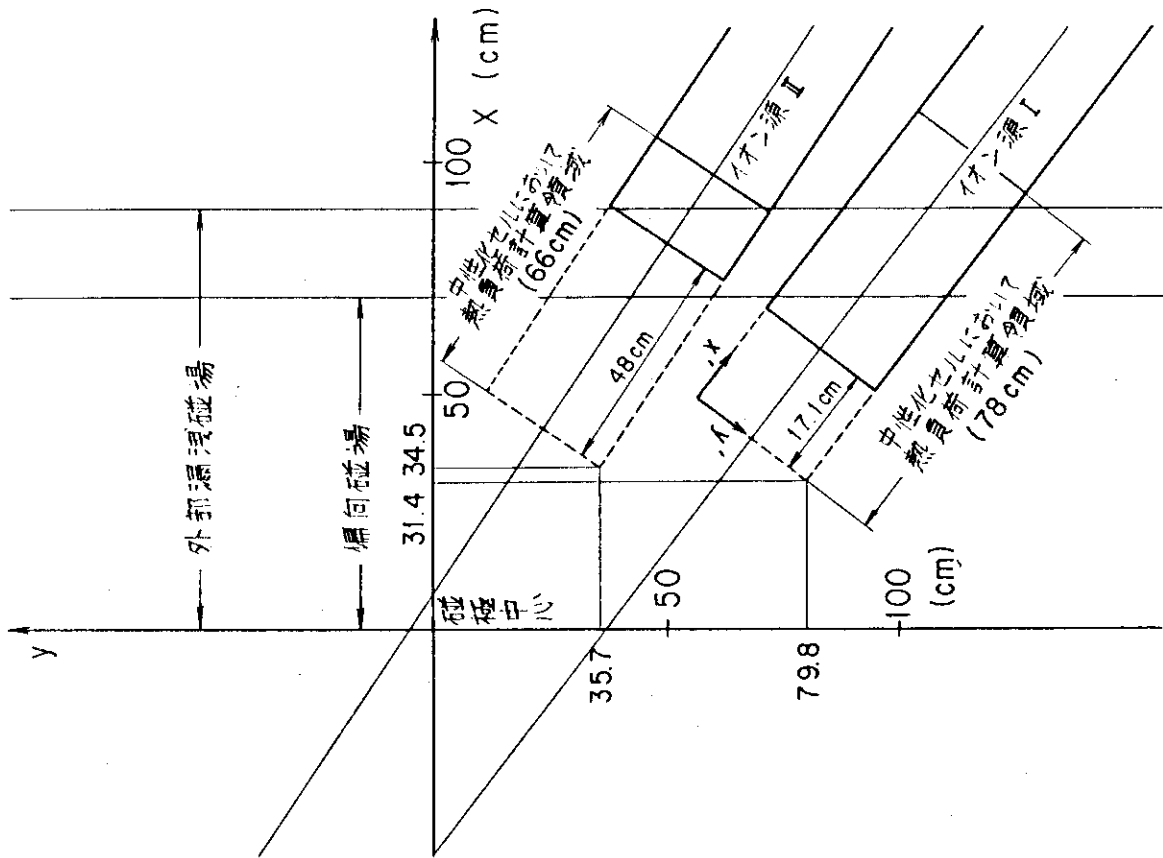


図 4.3.1 中性化セルのビームリミッター寸法

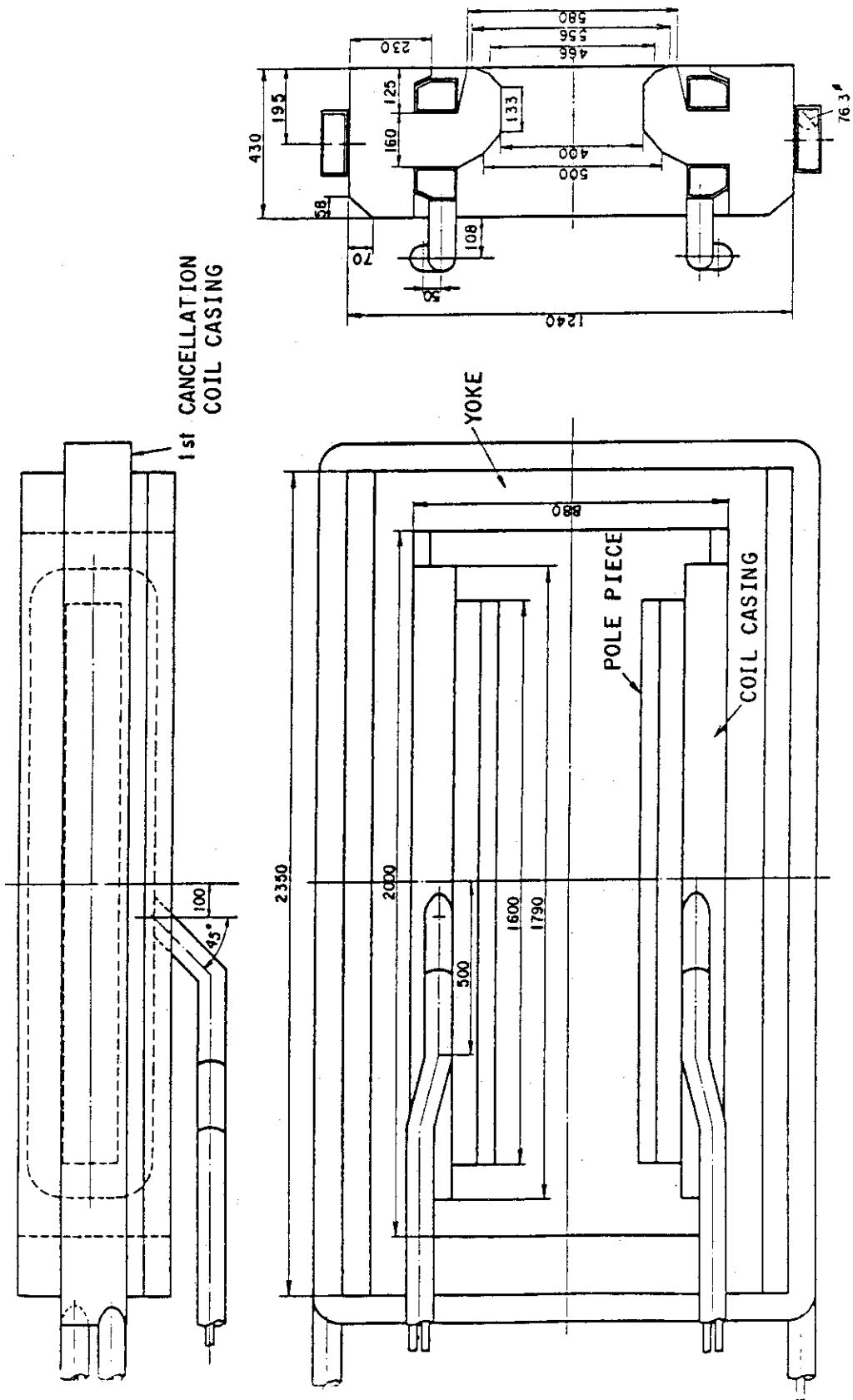


图 4.3.3 偏向磁石寸法

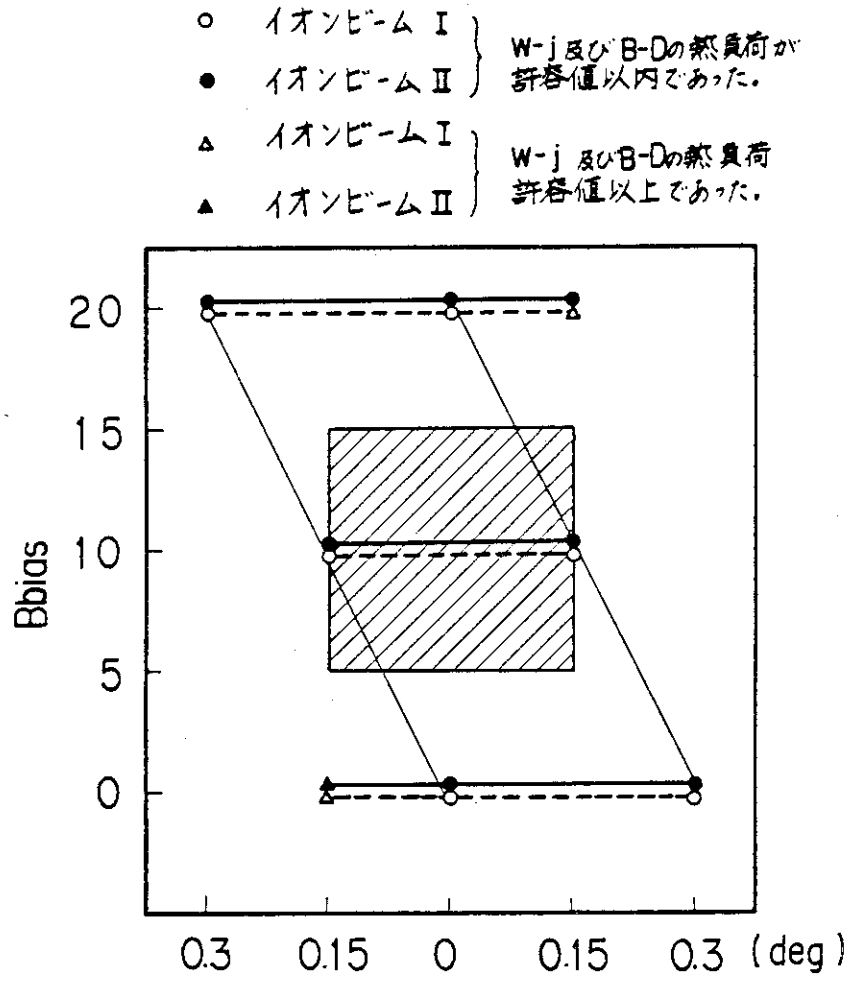


図 4.3.4 W-J 及び B-D の熱負荷から求めた軸ずれと残留磁場の限界

5. お わ り に

以上述べてきたように一次設計が終了するとこれをもとに1/4モデルを製作し、モデル実験、W-J及びB-Dの最終設計へと続く。一次設計によって得た偏向磁石が設計の通りの性能を持っているか否かは、モデル実験で検証しなければならない。モデル実験の結果によると、偏向磁石は所定の性能があることがわかっており、これについては別に報告する。

JT-60NB Iの除熱機器に関する一連の設計が正しいものであったか否かは原型ユニットの実験を持たねば確認できず議論も不可能である。ここでは、偏向磁石の形状設計の過程を述べるにとどめた。

謝 辞

本設計にあたり、終始有益な助言と激励を頂いた白形弘文大型トカマク開発部JT-60第4開発室室長、また、熱心に討議して下さいました加熱工学第1研究室の方々に謝意を表します。本設計の機会を与えて下さいました磯康彦核融合研究開発推進センター長、小幡行雄核融合研究部長、田中正俊次長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎, 他 ; JAERI-M 7655 (1980)
- 2) John. S. Colnias ; UCRL-18439 (1968)
- 3) 伊藤孝雄, 他 ; JAERI-M 9226 (1980)
- 4) 松岡 守, 他 ; JAERI-M 9599 (1981)
- 5) Y. Okumura et al ; Rev. Sci. Instrum. 52 (1981) p. 1
- 6) 小原祥裕 ; 私信
- 7) H. Horiike ; JAERI-M 9853 (1981)
- 8) 栗山正明 ; 私信

5. お わ り に

以上述べてきたように一次設計が終了するとこれをもとに1/4モデルを製作し、モデル実験、W-J及びB-Dの最終設計へと続く。一次設計によって得た偏向磁石が設計の通りの性能を持っているか否かは、モデル実験で検証しなければならない。モデル実験の結果によると、偏向磁石は所定の性能があることがわかっており、これについては別に報告する。

JT-60NB Iの除熱機器に関する一連の設計が正しいものであったか否かは原型ユニットの実験を持たねば確認できず議論も不可能である。ここでは、偏向磁石の形状設計の過程を述べるにとどめた。

謝 辞

本設計にあたり、終始有益な助言と激励を頂いた白形弘文大型トカマク開発部JT-60第4開発室室長、また、熱心に討議して下さいました加熱工学第1研究室の方々に謝意を表します。本設計の機会を与えて下さいました磯康彦核融合研究開発推進センター長、小幡行雄核融合研究部長、田中正俊次長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎, 他 ; JAERI-M 7655 (1980)
- 2) John. S. Colnias ; UCRL-18439 (1968)
- 3) 伊藤孝雄, 他 ; JAERI-M 9226 (1980)
- 4) 松岡 守, 他 ; JAERI-M 9599 (1981)
- 5) Y. Okumura et al ; Rev. Sci. Instrum. 52 (1981) p. 1
- 6) 小原祥裕 ; 私信
- 7) H Horiike ; JAERI-M 9853 (1981)
- 8) 栗山正明 ; 私信

5. お わ り に

以上述べてきたように一次設計が終了するとこれをもとに1/4モデルを製作し、モデル実験、W-J及びB-Dの最終設計へと続く。一次設計によって得た偏向磁石が設計の通りの性能を持っているか否かは、モデル実験で検証しなければならない。モデル実験の結果によると、偏向磁石は所定の性能があることがわかっており、これについては別に報告する。

JT-60NB Iの除熱機器に関する一連の設計が正しいものであったか否かは原型ユニットの実験を持たねば確認できず議論も不可能である。ここでは、偏向磁石の形状設計の過程を述べるにとどめた。

謝 辞

本設計にあたり、終始有益な助言と激励を頂いた白形弘文大型トカマク開発部JT-60第4開発室室長、また、熱心に討議して下さいました加熱工学第1研究室の方々に謝意を表します。本設計の機会を与えて下さいました磯康彦核融合研究開発推進センター長、小幡行雄核融合研究部長、田中正俊次長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎, 他 ; JAERI-M 7655 (1980)
- 2) John. S. Colnias ; UCRL-18439 (1968)
- 3) 伊藤孝雄, 他 ; JAERI-M 9226 (1980)
- 4) 松岡 守, 他 ; JAERI-M 9599 (1981)
- 5) Y. Okumura et al ; Rev. Sci. Instrum. 52 (1981) p. 1
- 6) 小原祥裕 ; 私信
- 7) H Horiike ; JAERI-M 9853 (1981)
- 8) 栗山正明 ; 私信