

JAERI - M

82-140

JT-60中性粒子入射装置の磁気遮蔽

—設計と試験結果—

1982年10月

田中 茂・堀池 寛・伊藤 孝雄・栗山 正明  
松田慎三郎・松岡 守・小原 祥裕・白形 弘文

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、お申しこしてください。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 いばらき印刷機

JT-60 中性粒子入射装置の磁気遮蔽

— 設計と試験結果 —

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

田中 茂・堀池 寛・伊藤孝雄

栗山正明<sup>+</sup>・松田慎三郎・松岡 守

小原祥裕・白形弘文<sup>+</sup>

(1982年9月17日受理)

JT-60 中性粒子入射加熱装置のイオン源から中性化セル出口までの領域の磁気シールドを設計し、試験を行なった。イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも二層シェル構造とし、外層は電磁軟鉄、内層はミューメタルとした。シールドの1/10と1/4モデルを用いた磁気飽和実験の後、イオン源磁気シールド外層は15 mm厚、内層は5 mm厚とし、中性化セル磁気シールドは各々24 mm厚、5 mm厚とした。イオン源部接続フランジにも、一部電磁軟鉄を使用してイオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドを磁氣的に結合するようにした。

原型ユニットで、模擬漏洩磁場コイルと第1、第2打消コイルに通電した場合の上下ビームライン軸に沿った磁場分布を測定した。その結果、イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも、当初の設計目標であるビーム軸に垂直な磁場に対する遮蔽度120および1500以上の性能を示すことがわかった。ビーム軸に垂直な磁場については、イオン源磁気シールド中心で0.5～0.6 G、中性化セル磁気シールド中心で0.01～0.3 Gの値が得られた。これらの値は、十分許容範囲内に収まっている。

---

<sup>+</sup> 大型トカマク開発部

Magnetic Shields for JT-60 Neutral Beam Injectors

---- Design and Test Results ----

Shigeru TANAKA, Hiroshi HORIIKE, Takao ITOH, Masaaki KURIYAMA<sup>+</sup>  
Shinzaburo MATSUDA, Mamoru MATSUOKA, Yoshihiro OHARA and  
Hirofumi SHIRAKATA<sup>+</sup>

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 17, 1982)

Magnetic shields for the ion sources and the neutralizers for JT-60 neutral beam injectors were designed and tested. The shield for the ion sources consists of the outer shell made of 15-mm thick mild steel and the inner shell made of 5-mm thick mu-metal. The shield for the neutralizers consists of the outer shell of 24-mm thick mild steel and the inner shell of 5-mm thick mu-metal. The thickness of the shells was determined after the experiment on magnetic saturation of the 1/10 and 1/4 models of the shields. The shield for the ion sources is magnetically connected with that for the neutralizers.

Magnetic field distributions along the upper and the lower beam lines of the prototype injector unit of JT-60 were measured when the simulating external field was applied to the unit and the first and the second cancellation coils were operated. It proved from the measurement that the shields for the ion sources and the neutralizers showed satisfactory shielding factors. The field strength perpendicular to the beam axis was 0.5 to 0.6 G in the center of the shield for the ion sources and 0.01 to 0.3 G in the center of the shield for the neutralizers. These values are well below the permissible levels.

Keywords : JT-60, Neutral Beam Injectors, Magnetic Shields, Magnetic Saturation,  
Prototype Unit, Design, Shielding Factors, Cancellation Coils

---

<sup>+</sup> Division of Large Tokamak Development, Tokai Research Establishment, JAERI

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 遮蔽度の決定 .....	2
2.1 外部磁場分布 .....	2
2.2 遮蔽度の決定 .....	3
2.2.1 イオン源磁気シールドの遮蔽度 .....	3
2.2.2 中性化セル磁気シールドの遮蔽度 .....	3
3. 磁気遮蔽の理論 .....	6
3.1 横磁場に関する理論 .....	6
3.2 縦磁場に関する理論 .....	7
4. 設 計 .....	8
4.1 空間的制約条件 .....	8
4.2 材質, 層数, 構造の決定 .....	9
5. モデルを用いた実験 .....	16
5.1 1/10 モデル実験 .....	16
5.1.1 実験装置 .....	16
5.1.2 実験結果 .....	17
5.2 1/4モデル実験 .....	19
6. 原型ユニットでの磁場分布測定 .....	34
6.1 測定条件 .....	34
6.2 測定結果 .....	35
6.3 縦磁場の影響の検討 .....	36
7. まとめ .....	42
謝 辞 .....	42
文 献 .....	42

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Determination of Shielding Factors .....	2
2.1 Distribution of stray field from JT-60 .....	2
2.2 Determination of shielding factors .....	3
2.2.1 Shielding factor of the shield for the ion sources .....	3
2.2.2 Shielding factor of the shield for the neutralizers .....	3
3. Theory of Magnetic Shielding .....	6
3.1 Shielding theory for the field perpendicular to the shield axis .....	6
3.2 Shielding theory for the field parallel to the shield axis .....	7
4. Design .....	8
4.1 Spatial restrictions on the shields .....	8
4.2 Determination of the material, the number of shells, and the structure of the shields .....	9
5. Experiment Using the Models of the Shields .....	16
5.1 1/10 model experiment .....	16
5.1.1 Experimental apparatus .....	16
5.1.2 Experimental results .....	17
5.2 1/4 model experiment .....	19
6. Measurement of the Field Distribution along the Beam Lines of Prototype Injector Unit for JT-60 .....	34
6.1 Conditions for the measurement .....	34
6.2 Measured results .....	34
6.3 Effect of the magnetic field parallel to the beam axis .....	36
7. Summary .....	42
Acknowledgement .....	42
References .....	42

## 1. はじめに

中性粒子入射装置(Neutral Beam Injector, 以下 NBI と略す)においては, 外部からの漏洩磁場の影響を小さくするために, イオン源部から中性化セル出口までの領域および中性化セル出口から偏向磁石を経てビームダンプに至るまでの領域を, 必要に応じて磁気遮蔽しなければならない。JT-60 NBI では, 後者の領域の磁気遮蔽は, 打消コイルにより能動的に行う (active shielding<sup>4)</sup>) こととなり, それについては他の報告<sup>1)</sup>に詳しいので参照されたい。この報告は, 主に前者の領域の磁気遮蔽に関するものであり, 磁性体で領域を囲い, 領域内に侵入する磁場を小さくする受動的方式 (passive shielding<sup>4)</sup>) について記述する。

この領域を磁気遮蔽する理由は, 次の通りである。もしイオン源部に強い外部磁場が存在すると, イオン源のプラズマ生成部においては, 陰極から放出される電子の軌道が影響を受けて, アーク特性が変わったり, プラズマ密度の均一性が悪化したりする<sup>2)</sup>。これにともないビーム発散も悪影響を受ける。また引出し電極部では, 加速部の逆流電子ビームの軌道が大きく影響を受けて, グリッドの熱負荷を増大したり, また加速される途中のイオンが磁場の影響を受けて, 引出されるイオンビームの発散が悪化したり, ビーム軸がずれる<sup>3)</sup>。一方, 中性化セル部に強い磁場があると, セル内のイオン軌道が曲げられてセル壁にビームが入射し, ビーム損失が増加するとともに, その部分の熱負荷が増大して危険になる。また磁場によって曲げられた後に中性化する粒子の一部は, そのまま中性化セルを出てもビームリミターやドリフト管壁に衝突して損失となり, ターゲットに入射する中性粒子パワーが減少する。

磁気シールドの設計は, JT-60 NBI の概念設計の初期(1976年)から開始された。中間報告<sup>3)</sup>でも指摘されたように, JT-60本体からの漏洩磁場は空間分布があり, しかも各点でベクトルの向きが異なっており, 単純に磁気シールド理論のみから磁気シールドの最終構造を決定できるものではない。そのため1/10や1/4の縮尺の磁性体モデルを順次製作し, それらを用いて磁気シールドに関するR&Dを推し進めて来た。即ち, 最初に磁気シールド理論をもとに概略設計し, その1/10モデルを作り実験した。次にその実験結果を参考にして, 手直し設計し, その1/4モデルを製作した。1/4モデルを用いた実験で, 磁気遮蔽効果を確認した後, JT-60 NBI 原型ユニットの磁気シールドの製作に着手した。

原型ユニットでは, 模擬漏洩磁場発生コイルにより主排気タンク付近にJT-60の模擬磁場を印加して, 上下イオン源軸に沿っての磁場分布を測定し, 磁気シールドの効果を検討した。これらR&Dの経過と結果についても報告する。

## 2. 遮蔽度の決定

この章では、外部の磁場はどの程度の強さであり、それをどの位にまで磁気遮蔽しなければならぬかについて説明する。

遮蔽度 (Shielding factor) とは、次式で定義されるものである。

$$S = H_e / H_i, \quad (2.1)$$

ここで、 $H_e$  は外部磁場の強さであり、 $H_i$  は磁気シールド内部の磁場の強さである。即ち、この  $S$  をイオン源部と中性化セル部でどれ位にすべきかを説明する。

### 2.1 外部磁場分布

JT-60 本体からの漏洩磁場には、ポロイダルコイルに流れる電流によるものとプラズマ電流によるものがある。これらの電流値は、トカマクの運転状態によって変わり、しかもトカマク放電の 1 ショットの間にも時間変化する。第 1 図 - (a) に磁気リミッタ非運転時の漏洩磁場の時間変化を、同図 - (b) に入射装置の主排気タンク付近の漏洩磁場分布を示す<sup>5)</sup>。但し、この分布図は、NBI に磁性体が設置されていない場合について計算された結果を示している。電流立ち上げ時の磁場ベクトルは、フラットトップ終了時の磁場ベクトルと方向がほぼ逆で、絶対値は同程度となっている。磁気シールドを設計する立場としては、各点での磁場ベクトルの絶対値が最大となるような場合を設計の対象とすれば良く、第 1 図 - (b) で実線 (長) で表わされている磁場分布を想定して設計を進める。

JT-60 NBI のビーム軸に沿っての漏洩磁場の強度分布は、JT-60 本体に近づくほど磁場が強くなり、離れるにしたがって弱くなっており、イオン源部では、60 ~ 70 G、中性化セル部では、70 ~ 140 G となっている<sup>3)</sup>。中性粒子入射装置に磁性体 (偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源部接続フランジ、イオン源磁気シールド) が配置された場合には、第 1 図 - (b) の磁場分布は変化し、各点での磁場ベクトルの向きと絶対値は、第 1 図 - (b) とは異なったものとなるはずである。それを求めるには、実験によるしかない。しかし、我々の目的は、磁気シールド内の磁場値そのものをある値以下にすることにあるから、外部磁場分布は測定せず、磁気シールド内の磁場値のみを測定する。便宜上は、遮蔽度を定めるための外部磁場は、第 1 図 - (b) の値を基準とする。また磁性体があった場合に、磁場ベクトルの向きがどのように変化するかわからないので、設計上は、横磁場 (ビーム軸に垂直な方向の磁場) に対する遮蔽度を考えるときには、第 1 図 - (b) の磁場の絶対値が全て横磁場として働くと考え、また縦磁場 (ビーム軸に平行な方向の磁場) に対する磁気遮蔽度を考える時にも、やはり同様に考えるものとする。

また磁気シールド内の磁場にも空間分布があり、一般に開放端付近ではかなりの範囲にわたって外部磁場値に近い磁場が存在する。ここでは、遮蔽度は開放端から最も離れた磁気シールド中心付近での磁場値を基準として考えるものとする。



## 2.2 遮蔽度の決定

2.1で外部磁場の強さを決定したので、次にそれを磁気シールド内ではどれ位にまで小さくすべきかについて議論する。

### 2.2.1 イオン源磁気シールドの遮蔽度

デュオピガトロン型イオン源を用いた我々の実験<sup>2)</sup>によれば、イオン源軸に垂直に2G以上の外部磁場をプラズマ生成部に印加すると、イオン飽和電流密度の分布が外部磁場方向に平行移動し、イオン源からの引出し電流が5～10%減少する。外部磁場が1G以下の場合には、そのような現象は見られなかった。

多極ラインカスプ磁場を用いたいわゆるバケット型イオン源の場合、許容外部磁場について実験していない。イオン源内で一次電子がほぼ等方的に飛び交い、中心の弱磁場空間に高密度のプラズマを均一に生成していると考えられるバケット型イオン源は、デュオピガトロンほど外部磁場に対して敏感ではないと思われる。

JT-60 NBIのイオン源は、バケット型イオン源が第1候補であるが、デュオピガトロンとなる可能性も残っていた。従って、磁気シールドを設計する立場としては、外部磁場により敏感であると思われるデュオピガトロンを基準として、許容外部磁場を定め、その値を1G以下とした。但し、実験のところで説明したように、この値は横磁場に関するものであり、縦磁場に関する許容外部磁場値は、もっと大きいはずである。何故ならば、デュオピガトロンの場合、引出し電極付近でも2～5Gの縦磁場が、中間電極に巻かれたソースコイルと軟鉄芯によってもともと作られており、プラズマ生成上重要な働きをしているからである。

イオン源加速部の接地電極を出て、イオン源部接続フランジに至るまでの距離(約52cm)の間には、中性化セルと呼ばれる構造物はないが、この空間は機能上は中性化セルの一部である。従って、この空間でも次節で述べる中性化セル磁気シールドの遮蔽度と同程度の遮蔽度にする必要があるが、4.2節Aを参照すれば理解できるように、その条件を満たすには、イオン源磁気シールドの内外層ともおよそ4倍の肉厚(外層6cm, 内層2cm)としなければならない。これは、重量や加工の難しさから考えて非現実的である。

この空間の長さは、中性化セルの機能を果す長さ(225cm)の約1/4であるから、中性化セル磁気シールド中心での目標磁場である0.145G(次節参照)の4倍、即ち0.6G程度を許容磁場とすれば、中性化セルに対する磁気遮蔽の効果をそれほどこなわないで済むと考えられる。

結局、イオン源磁気シールドが最低保証すべき遮蔽度は、横磁場に対し $70/0.6 = 117$ である。

### 2.2.2 中性化セル磁気シールドの遮蔽度<sup>3)</sup>

中性化セル磁気シールド内の漏洩磁場のうち、主に横磁場がセル内のイオンの軌道を曲げる。イオンが曲げられる途中や曲げられた後に中性化された場合、リミッタや入射ポート壁等にビームがあたり、中性粒子パワーが損失される。この損失を中性粒子パワー全体の1%以下にするには、ビームが横磁場によって曲げられる角度を $0.1^\circ$ 以下としなければならない<sup>3)</sup>。イオンは、中性化セル出口で中性化される時が最もビームの曲がり角度が大きくなる。そのような粒子を想定

し、中性化セルの全長  $L$  (m) にわたって、一様に  $B_{\perp}$  (Wb/m<sup>2</sup>) の横磁場が存在すると仮定する。この時、ビーム軸に垂直な方向へのビームの運動量の変化  $\Delta P$  は、次式で表わされる。

$$\Delta P = e B_{\perp} L, \quad (2.2)$$

ここで、 $e$  はイオンの荷電量 (Coulomb) である。 $B_{\perp}$  によるビームの偏向角  $\Delta \theta$  (radian) は、次式で表わされる。

$$\Delta \theta = \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{e B_{\perp} L}{\sqrt{2 m e E}} = \frac{L}{R_0} \quad (2.3)$$

ここで、 $P_0$  は初期運動量、 $m$  は粒子質量 (kg)、 $E$  は加速電圧 (V)、 $R_0$  はイオンのラーマ-半径 (m) である。この  $\Delta \theta$  が  $0.1^{\circ}$  以下でなければならないから、

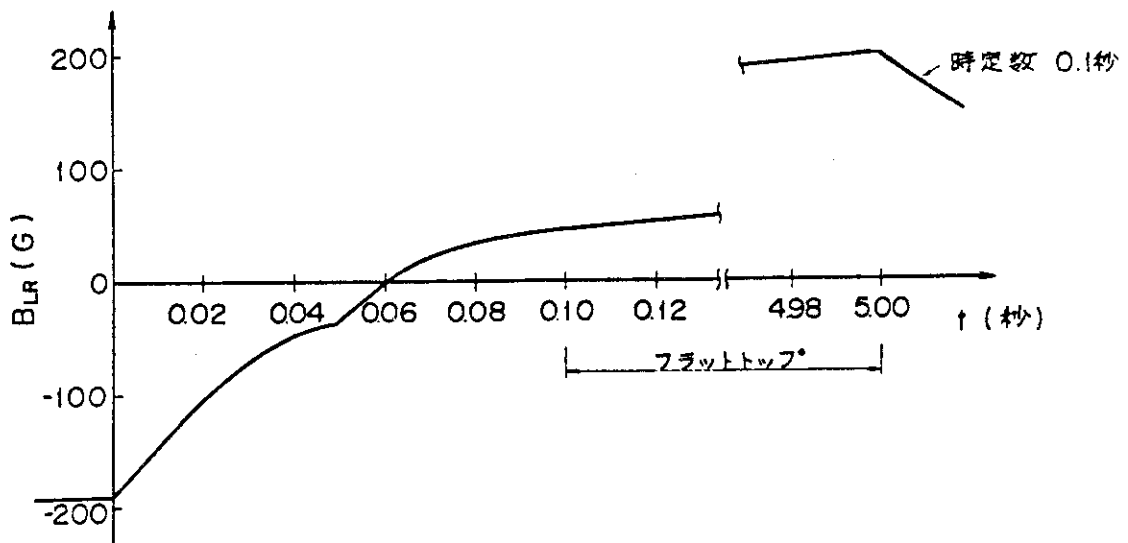
$$B_{\perp} \leq 0.1 \times \frac{\pi}{180} \times \frac{\sqrt{2 m e E}}{e L} \quad (2.4)$$

の条件が導かれる。JT-60 NBI の場合、 $H^+$  の加速電圧は、大体 50 kV から 100 kV までの範囲である。中性化セルの中を走るイオンビームの中には、分子イオン  $H_2^+$ 、 $H_3^+$  が崩壊して出来るエネルギーの小さなもの ( $H^+$  ( $eE/2$ ),  $H^+$  ( $eE/3$ ),  $H_2^+$  ( $2eE/3$ )) も含まれる。その中でエネルギーの最小のものは、加速電圧が 50 kV の場合に  $H_3^+$  がこわれてできた  $H^+$  (50/3 keV) である。従って、 $L = 2.25$  m、 $E = 50/3$  kV とすると、(2.4) 式は、

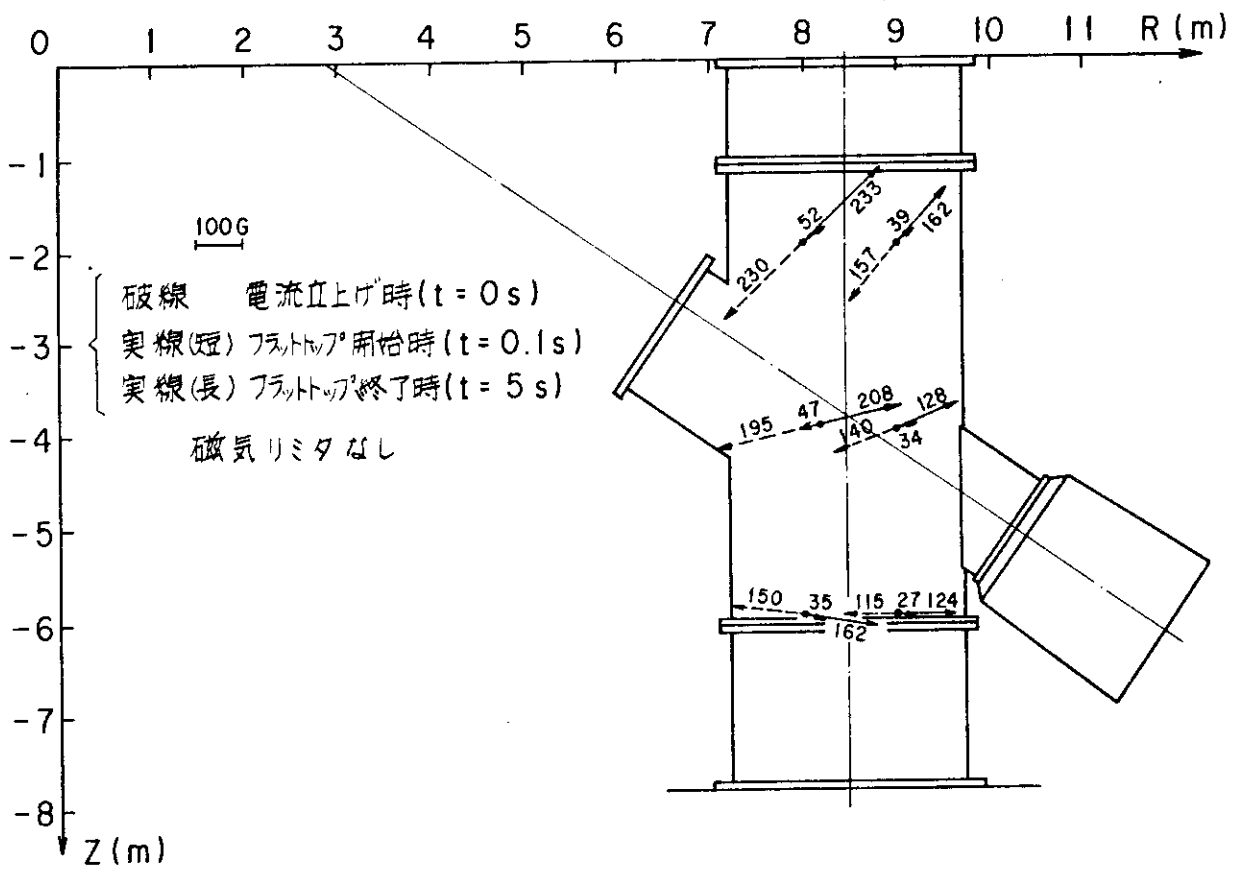
$$B_{\perp} \leq 1.45 \times 10^{-5} \quad (\text{Wb/m}^2)$$

を与える。即ち、中性化セル内の横磁場は、0.145 G 以下でなければならない。イオンの中性化のほとんどが、ガス圧の高い中性化セルの入口よりの部分で起こることおよび  $H^0$  ( $eE/3$ ) の中性ビーム全体に占めるパワー比が小さい<sup>3)</sup> こと、等を考慮に入れると、0.145 G という値はやや厳し過ぎるが、中性化セル磁気シールドの出口側開放端からかなりの範囲にわたって、漏洩磁場が侵入することも考えて、この値以下の磁場を磁気シールド中心で実現することを目標とする。

結局、中性化セル磁気シールドが最低保証すべき遮蔽度は、横磁場に対して、 $\frac{140}{0.145} = 965$  である。設計上は、余裕をもたせて 1500 を目標とする。



第1図-(a) : 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), 偏向磁石等の磁性体がない場合のトーラス中心よりR=8m, Z=-4m(偏向磁石中心近傍)におけるR成分



第1図-(b) : 磁気リミッタを運転しない場合の漏洩磁場分布(偏向磁石等の磁性体がない場合)

### 3. 磁気遮蔽の理論

前章で、目標とすべき遮蔽度を決定したが、どのようにしたらそれを実現できるかという見当をつけるためには、磁気遮蔽の理論に依らなければならない。理論上、解析的に遮蔽度が得られるのは、一様磁場中にある同心の無限長円筒シェル、同心の球状シェルの場合である。また、有限長の円筒シェルの場合にも、その端部の効果は、理論的または実験的に数式が与えられている。以下にそれらを簡単に紹介する。

#### 3.1 横磁場に関する理論

##### A. 円筒シェル

一様磁場中にある同心の無限長円筒シェルは、縦磁場に対しては遮蔽効果をもたないが、横磁場に対しては効果がある。多重シェルを内側から1、2、3と番号づけ、各シェルの比透磁率を $\mu_i$ 、厚さを $t_i$ 、外半径を $R_i$ とする。通常 $\mu_i \gg 1$ 、 $t_i/R_i \ll 1$ が満たされており、その時横磁場に対する遮蔽度 $S$ は、以下の式で表わされる<sup>6)</sup>。

$$1 \text{ 層の場合； } S = 1 + S_1 \quad (3.1)$$

$$2 \text{ 層の場合； } S = 1 + S_1 + S_2 + S_1 \cdot S_2 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} 3 \text{ 層の場合； } S = 1 + S_1 + S_2 + S_3 + S_1 \cdot S_2 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \\ + S_2 \cdot S_3 \left(1 - \frac{A_2}{A_3}\right) + S_1 \cdot S_3 \left(1 - \frac{A_1}{A_3}\right) \\ + S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \left(1 - \frac{A_2}{A_3}\right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで、

$$S_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_i t_i}{R_i} \quad (3.4)$$

$$A_i = \pi R_i^2 \quad (3.5)$$

である。

端部が開放の有限長の円筒シェルの場合、端部から侵入してくる磁場がある。端面からの距離を $Z$ 、 $Z=0$ での磁場値を $H(0)$ とすると、円筒内の磁場強度 $H_i(Z)$ は、次式で表わされる<sup>7)</sup>。

$$H_i(Z) \cong H(0) \exp(-7.0 Z / 2R), \quad (3.6)$$

$$H(0) = 0.33 H_e, \quad (3.7)$$

ここで、 $R$  は円筒の半径、 $H_e$  は外部磁場強度である。端部開放の円筒シェル内の磁場は、(3.6) 式のもれ磁場と (3.1) ~ (3.5) 式に基づいて計算された残留磁場値の和で与えられる。

### B. 球形シェル

一様磁場中にある同心の球形シェルの場合、その遮蔽度は、(3.1) ~ (3.3) 式で、 $S_i$  および  $A_i$  を次式とすれば求まる。

$$S_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_i t_i}{R_i}, \quad (3.8)$$

$$A_i = \frac{3}{4} \pi R_i^2 \quad (3.9)$$

## 3.2 縦磁場に関する理論

ここでは、外部磁場が有限長の円筒シェルの軸方向に加わる場合を考える。長さ  $L$ 、半径  $R$  の単一シェルを軸比  $P = L/2R$  の回転楕円体とみなした粗いモデルによる近似の結果、縦磁場に対する遮蔽度  $S^{(L)}$  は、次式で与えられる<sup>8)</sup>

$$S^{(L)} = 1 + 4N \cdot S \quad (\text{両端開放}) \quad (3.10)$$

$$S^{(L)} = \frac{1 + 4N \cdot S}{1 + (R/L)} \quad (\text{両端に蓋付}) \quad (3.11)$$

ここで、 $S$  は無限長円筒の横磁場に対する遮蔽度 ((3.1) 式)、 $N$  は軸比  $P (> 1)$  の回転楕円体の反磁場係数であり、次式で表わされる。

$$N = \frac{1}{(P^2 - 1)} \left\{ \frac{P}{(P^2 - 1)^{1/2}} \cdot \ln [P + (P^2 - 1)^{1/2}] - 1 \right\} \quad (3.12)$$

また、端部が開放の場合、端部から外部磁場が侵入してくる。横磁場の場合と表式は同じとして、円筒内の磁場強度  $H_i(Z)$  は、次式で表わされる<sup>7)</sup>。

$$H_i(Z) \cong H(0) \exp(-4.5 Z/2R) \quad (3.13)$$

$$H(0) = 1.3 \sqrt{L/2R} H_e \quad (3.14)$$

端部開放の円筒シェル内の磁場は、もれ磁場 (3.13) 式の値と、(3.10) 式にもとづいて計算された磁場値の合計で与えられる。

(3.13)、(3.14) 式を (3.6)、(3.7) 式と比べるとわかるように、横磁場に対しては、端部での磁場値  $H(0)$  が外部磁場よりも小さくなるのに対し、縦磁場では、大きくなる。さらに、内部へ侵入してくる磁場の減衰も、縦磁場の場合の方 (減衰定数 =  $2R/4.5$ ) が、横磁場の場合 (減衰定数 =  $2R/7$ ) よりもゆるやかである。また、(3.10) ~ (3.12) を (3.1) と比較検討してみてもわかるように、縦磁場に対する遮蔽度は、概して横磁場に対するものより小さくなる。即ち、一般的に言って、縦磁場は横磁場よりも磁気遮蔽しにくい。

## 4. 設 計

磁気シールドを設計する上で留意すべき点は、以下の通りである。

- 1) 目標とする値以上の遮蔽度が得られるように構造、材質を決定する。
- 2) 空間的制約条件を満たすこと。
- 3) 磁気飽和しないこと。
- 4) 可能な限り軽量、コンパクトであること。
- 5) 加工、組立が容易で、安価であること。

NBI 用磁気シールドの場合、入射装置全体の設計のバランス、即ち他機器との取合いから、2) が最も優先し、2) を満たす範囲内で、1)、3)、4)、5) の順位の優先度でそれらを追究するようにする。

### 4.1 空間的制約条件

#### A. イオン源磁気シールド

イオン源磁気シールドの空間的制約条件として以下のものがある。

- 1) 磁気シールド内面の突起物（冷却水ヘッダ）とイオン源の高電位部（最高 100 kV）との距離が電気絶縁上、必要十分であること。
- 2) 磁気シールドのビーム軸と垂直な方向の外形寸法が、イオン源部接続フランジの外形寸法と大きく違わないこと。
- 3) 磁気シールド内部にイオン源用の電気ケーブル、冷却水配管、測定器類、等のための空間的余裕があり、しかもそれらを取り付けたり、取し外したりするための作業上のスペースがあること。

1) に関しては、絶縁距離が 20 cm 以上あるようにする。なお、(3.4) 式や (3.8) 式からわかるようにシールドの内側の寸法が小さいほど遮蔽度は大きくなるので、1)、3) を満たす範囲で、シールドの内側の寸法は小さい方が望ましい。

イオン源磁気シールド内には、二台のイオン源が収められる。これらの設置位置と外形寸法が決まれば、1)、3) の条件からシールドの内側寸法が定まる。即ち、巾 109 cm × 高さ 167 cm × 長さ 190 cm のほぼ箱型とする。またイオン源部接続フランジの寸法は、巾 134 cm × 高さ 152 cm × 厚み 4 cm であるから、イオン源磁気シールドの外形の高さ方向の寸法は、167 cm よりも大きくなければならず、しかもそれをイオン源部接続フランジで 152 cm 程度まで絞り込む必要がある。

#### B. 中性化セル磁気シールド

中性化セル磁気シールドの空間的制約としては、以下のものがある。

- 1) シールド内面は、中性化セル外面より大きいこと。
- 2) シールド外面は、主排気タンクのイオン源部取付ポートの内面より小さく、しかも同ポー-

トにシールドを入れる際、余裕をもって入れられること。

- 3) 中性化セルの長さと同程度以上の長さをもつこと。
- 4) 中性化セル磁気シールドが偏向磁石のつくる磁場分布に顕著な影響を与えないように、かつ磁気シールドが偏向磁石磁場で飽和しないようにセル出口側のシールド端と偏向磁石の間に一定値以上の距離をとること。

1) について；中性化セルの断面形状は、内面が巾 14 cm × 高さ 29 cm の長方形であり、これに 1 cm 厚の銅板とそれに銀ロー付けされる冷却パイプや冷却水マニホールドの寸法が加わり、外面は巾 22 cm × 高さ 37 cm の長方形となる。中性化セルは、上下方向に二つ取り付けられることにも注意しておく必要がある。

2) について；主排気タンクのイオン源部取付ポートの内面の断面形状は、巾 80 cm × 高さ 120 cm の長方形である。

3) について；イオン源部接続フランジの面から中性化セル出口までの長さは、168.75 cm である。

4) について；偏向磁石の作る磁場の影響が及ぶ範囲を示す一つの特性長として磁極間隔（我々の場合 40 cm）があげられる。即ち磁極間隔程度の距離で離せば、磁気シールドは偏向磁石の磁場分布にほとんど影響を与えないと考えられる。実際、モデルによる実験や二次元磁場計算により、ポールピースのイオン源側の面から 47.5 cm の位置に中性化セル磁気シールドの開放端がくるようにすると、偏向磁石の磁場分布は、ほとんど影響を受けないことが確認された。我々の場合、3) により中性化セル磁気シールド開放端の位置を決め、そこから 47.5 cm 離れたところにポールピース面がくるように、偏向磁石の位置決めをしたので、4) は中性化セル磁気シールドの設計に直接的には関係しないこととなった。

#### 4.2 材質，層数，構造の決定

我々が対象としているようなかなり強い外部磁場に対しては、まず透磁率は十分でないが、飽和磁束密度が高く、廉価な純鉄や電磁軟鉄でできた一層シールドの磁気シールドを検討する。その結果、目標とする遮蔽度を達成しようとする、シールドの肉厚が常識的でない値（入手不可、製作困難、または重量過大）になることがある。そのような場合には、二層シールドとし、外層を純鉄や電磁軟鉄とし、内層を純鉄か電磁軟鉄あるいは高透磁率材（JIS 規格の PB や PC）として、検討し直す。それでも遮蔽度達成に無理な点があるときには、三層シールドとする。検討の各過程で、各シールドが磁気飽和しないかどうかチェックすることも設計上、重要である。

磁性体の透磁率は、厳密にはその材料の B-H 曲線から求める。我々の場合、磁性体内部の磁束密度（ $B_{in}$ ）の大きさやその空間的分布は、正確にはわからない。また B-H 曲線測定時の磁性体と、実際に磁気シールドとして使われる磁性体は、製鉄や製鋼過程が同一であっても、切断、曲げ、孔あけ、その他の機械的加工や、衝撃、溶接、焼鈍、等により磁気特性が異なってくる。従って、我々は磁性体が飽和しない範囲内で、B-H 曲線から求まる最小の透磁率、即ち初透磁率を遮蔽度の計算に使うものとする。電磁軟鉄では、初透磁率が 200 ~ 300、最大透磁率は 8000 ~ 10000<sup>9)</sup> であり、両者は 30 ~ 40 倍違うが、同じ磁性体に対し、より小さい透磁

率を使うことは、より安全サイドの設計を行うことを意味する。初透磁率として、電磁軟鉄については $300^9)$ 、ミューメタルについては $25000^9)$ を設計上使用するものとする。

#### A. イオン源磁気シールドの設計

4.1で述べたようにイオン源磁気シールドの内側の寸法は、巾 $109\text{ cm}$ ×高さ $167\text{ cm}$ ×長さ $190\text{ cm}$ である。もし、肉厚 $t(\text{cm})$ の電磁軟鉄の一層シェルとすると、横磁場に対して、磁性体部の磁束通過断面積 $A$ は、およそ

$$A \cong 2 \times (109 + 190) \times t \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

となる。この磁性体部に、外部から巾 $109\text{ cm}$ ×長さ $190\text{ cm} = 20710\text{ cm}^2$ の4倍程度の面積内の磁束が全て流入するとする。即ち、磁束 $\phi$ は、

$$\phi \cong 70 \times 10^{-4} \times 2.071 \times 4 = 5.8 \times 10^{-2} \quad (\text{Wb})$$

となり、これが磁性体部を通過すると、そこでの磁束密度 $B_{in}$ は、

$$B_{in} \cong \phi / A \quad (\text{Wb}/\text{m}^2) \quad (4.1)$$

程度と見積られる。電磁軟鉄が飽和し始める磁束密度は約 $1.0\text{ Wb}/\text{m}^2$ <sup>1)</sup>で、 $B_{in}$ はそれ以下が望ましい。従って、

$$t \geq \frac{5.8 \times 10^{-2}}{2 \times (109 + 190) \times 10^{-4} \times 1.0} = 0.97 \quad (\text{cm})$$

一方、縦磁場についても同様にして、

$$\text{磁性体部の磁束通過断面積 } A^{(\ell)} \cong 2 \times (109 + 167) \times t \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

$$\text{磁束 } \phi^{(\ell)} \cong 70 \times 10^{-4} \times 167 \times 109 \times 10^{-4} \times 4 = 5.1 \times 10^{-2} \quad (\text{Wb})$$

従って、

$$t \geq \frac{5.1 \times 10^{-2}}{2 \times (109 + 167) \times 10^{-4} \times 1.0} = 0.92 \quad (\text{cm})$$

が得られる。即ち、磁気飽和し始めないためには、肉厚は $0.97\text{ cm}$ 以上である必要がある。

これらの値は、磁気シールドが飽和し始める時の肉厚であり、その値をそのまま実際の肉厚として採用するのは危険である。磁気飽和開始に対する安全係数として、約 $1.5$ をとり、電磁軟鉄の肉厚を $1.5\text{ cm}$ とする。

3章でみたように、有限長の矩形断面の磁気シールドに関する厳密な理論はない。従って、巾 $109\text{ cm}$ ×高さ $167\text{ cm}$ の矩形断面を半径 $76\text{ cm}$ の円で近似する。またシールドの軸方向長さは $190\text{ cm}$ で有限であるが、(3.1)式を用いて遮蔽度を見積もってみる。 $\mu_1 = 300$ 、 $t_1 = 1.5\text{ cm}$ 、 $R_1 = 76 + 1.5 = 77.5\text{ cm}$ として、横磁場に対する遮蔽度は、

$$S = 1 + \frac{300 \times 1.5}{2 \times 77.5} \sim 4$$

この値は、目標とする $117$ よりずっと小さい。肉厚を仮に $3\text{ cm}$ としても、 $S \sim 7$ となり状況



はそうかわらない。結局、イオン源磁気シールドを電磁軟鉄一層で作るのでは、仕様を満たせない。

次に二層シェルで検討してみる。外層を電磁軟鉄、内層をミュ-メタルとする。外層の内面を内層の内面から 10 cm 程度 (4.1 節の A の 2) 項からそう大きくは出来ない) 離れたところに想定してみる。この時、外層の内面の寸法は、およそ巾 130 cm × 高さ 190 cm × 長さ 200 cm となる。外層の肉厚を  $t_2$  (cm) とすると、横磁場に対して磁性体部の磁束通過断面積は、

$$A_2 \cong 2 \times (130 + 200) \times t_2 \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

となる。そこへ、

$$130 \times 200 \times 10^{-4} \times 4 = 10.4 \quad (\text{m}^2)$$

の面積内の全ての磁束が流入するとして、電磁軟鉄内の磁束密度は、

$$\text{Bin}_2 \cong \frac{70 \times 10^{-4} \times 10.4}{2 \times (130 + 200) \times t_2 \times 10^{-4}} \quad (\text{Wb/m}^2)$$

となる。Bin<sub>2</sub> は 1.0 Wb/m<sup>2</sup> 以下が望ましいから、

$$t_2 \geq 1.1 \text{ cm}$$

一方、縦磁場についても同様にして、

$$A_2^{(\ell)} \cong 2 \times (130 + 190) \times t_2 \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

$$\phi_2^{(\ell)} \cong 70 \times 10^{-4} \times 190 \times 130 \times 10^{-4} \times 4 = 6.9 \times 10^{-2} \quad (\text{Wb})$$

$$t_2 \geq 1.1 \text{ cm}$$

即ち、磁気飽和し始めないためには、外層の肉厚は、1.1 cm 以上である必要がある。今回は、安全係数として、1.4 をとり、肉厚を 1.5 cm とする。巾 130 cm × 高さ 190 cm の矩形を半径 89 cm の円で近似する。(3.1) 式より、外層のみの遮蔽度  $S_2$  は、以下のように推定できる。

$$S_2 = \frac{300 \times 1.5}{2 \times (89 + 1.5)} = 2.5$$

従って、外層の内側の空間では、 $70 / (2.5 + 1) = 20 \text{ G}$  程度にまで、外部磁場が減衰されているとみなせる。この 20 G の磁場をミュ-メタルの内層で、さらにシールドする。内層の肉厚を  $t_1$  (cm) とする。横磁場に対して、磁性体部の磁束通過断面積は、

$$A_1 \cong 2 \times (109 + 190) \times t_1 \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

となる。この断面積に外層の内面の巾 130 cm × 長さ 200 cm =  $2.6 \times 10^4 \text{ cm}^2$  の面積内の磁束の全てが通過するとする。

$$\phi_1 \cong 20 \times 10^{-4} \times 2.6 = 5.2 \times 10^{-3} \quad \text{Wb}$$

$$\text{Bin} \cong \phi_1 / A_1 \quad (\text{Wb/m}^2)$$

ミューメタルが飽和し始める磁束密度は、約  $0.2 \text{ Wb/m}^2$ <sup>1)</sup>であり、 $\text{Bin}$ は、それ以下が望ましい。従って、

$$t_1 \geq \frac{5.2 \times 10^{-3}}{2 \times (109 + 190) \times 10^{-4} \times 0.2} = 0.43 \quad (\text{cm})$$

縦磁場についても、

$$A_1^{(\ell)} \cong 2 \times (109 + 167) \times t_1 \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

$$\phi_1^{(\ell)} \cong 20 \times 10^{-4} \times 130 \times 190 \times 10^{-4} = 4.94 \times 10^{-3} \quad (\text{Wb})$$

$$\text{Bin}_1^{(\ell)} \cong \phi_1^{(\ell)} / A_1^{(\ell)} \quad (\text{Wb/m}^2)$$

$$t_1 \geq 0.45 \text{ cm}$$

即ち、内層が磁気飽和し始めないためには、その肉厚は  $0.45 \text{ cm}$  以上必要である。飽和開始に対する安全係数を  $1.1$  ととり、肉厚を  $0.5 \text{ cm}$  とする。巾  $109 \text{ cm}$  × 高さ  $167 \text{ cm}$  の長方形を半径  $76 \text{ cm}$  の円で近似すると、内層だけの遮蔽度は、以下のように見積もれる。

$$S_1 = \frac{2.5 \times 10^4 \times 0.5}{2 \times (76 + 0.5)} = 82$$

横磁場に対する2層シェル全体としての遮蔽度は、(3.2)式より、

$$S = 1 + 82 + 2.5 + 82 \times 2.5 \times \left(1 - \left(\frac{76.5}{90.5}\right)^2\right) \sim 145$$

が求まる。この値は、目標とする  $117$  よりもやや大きいのが、設計段階では、大きめの方が安全である。

#### B. 中性化セル磁気シールドの設計

まず電磁軟鉄でできた一層シェルで検討する。JT-60 NBI では、上下のイオン源軸は、イオン源から  $8.3 \text{ m}$  の点で交叉するようになっている。中性化セルは、その軸がイオン源軸と一致するように設置されるので、中性化セルの出口では、上下のセルの外面が約  $3 \text{ cm}$  の距離にまで接近している。従って、上下の中性化セルを個別に磁気遮蔽しようとした場合、磁気シールドの肉厚は、 $1.5 \text{ cm}$  以下に制限される。4.1節のBで説明したように、中性化セル1つ当りでは、外形寸法は、巾  $22 \text{ cm}$  × 高さ  $37 \text{ cm}$  × 長さ  $168.8 \text{ cm}$  である。これを磁気シールドの内側寸法として、個別シールドの可否を検討してみる。電磁軟鉄の肉厚を  $t \text{ (cm)}$  とすると、横磁場に対して、磁性体部の磁束通過断面積は、

$$A \cong 2 \times 168.8 \times t \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

この磁性体部に、外部から巾  $22 \text{ cm}$  × 長さ  $168.8 \text{ cm} = 3714 \text{ cm}^2$  の4倍程度の面積内の磁束が全て流入すると考えると、

$$\phi \cong 140 \times 10^{-4} \times 3714 \times 10^{-4} \times 4 = 2.08 \times 10^{-2} \quad (\text{Wb})$$

電磁軟鉄内での磁束密度は、 $\text{Bin} = \phi / A$ 。これが、 $1.0 \text{ Wb/m}^2$  以下であることが望ましい

から,

$$t \geq 0.62 \text{ cm.}$$

一方, 縦磁場についても,

$$A^{(\ell)} \cong 2 \times (22 + 37) \times t \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\phi^{(\ell)} \cong 140 \times 10^{-4} \times 22 \times 37 \times 10^{-4} \times 4 = 4.56 \times 10^{-3} \text{ (Wb)}$$

$$t \geq 0.39 \text{ cm.}$$

即ち, 電磁軟鉄が磁気飽和し始めないためには, 肉厚は 0.62 cm 以上必要である。肉厚を最大限の 1.5 cm とする。巾 22 cm × 高さ 37 cm の長方形を半径 16 cm の円で近似すると, 磁気遮蔽度は,

$$S = 1 + \frac{300 \times 1.5}{2 \times (16 + 1.5)} \sim 14$$

と見積もれる。この値は, 目標の 1500 に, はるかにおよばない。

次に, 二層シェルで検討する。外層は電磁軟鉄, 内層は当然高透磁率をもったミューメタルでないと目標達成はおぼつかない。また, 二層シェルの効果を最大限に引き出すためには, (3.2) 式で,  $A_1/A_2$  を出来る限り小さくすることが肝要である。即ち, 内層の外形寸法は可能な限り小さく, 外層の外形寸法は大きい方がよい。従って, 4.1 節の B で述べた条件 1), 2) の制約ぎりぎりまで内層を小さく, 外層を大きくする。内層については, 上下の中性化セルを個別に囲うことで, 外形寸法を小さくする。このことは, (3.6) 式と (3.13) 式で表わされる端部からの外部磁場の侵入の影響を出来るだけ小さくすることにも役立つ。また, 外層は上下 2 本の内層を共通に内側に含むようにする。また内, 外層ともセルの出口に向かって先細りとなるような形状として, 端部の効果を小さくすることをねらう。

主排気タンクのイオン源部取付ポートの内面寸法は巾 80 cm × 高さ 120 cm であるが, 中性化セルが上下に二つ配置されているため, 高さ方向にはあまり空間的余裕がない。中性化セル入口では, 外層の高さ方向の寸法を 120 cm ぎりぎりの 111.4 cm とし, セル出口では 95.4 cm とする。このように外層の外側の上下方向寸法を定めると, その面から内層内面までの距離がセル入口で約 8 cm, 出口で約 6 cm となる。巾方向にもこの距離となるように, 外層の外側の巾方向寸法を定めると, セル入口で 44.4 cm, 出口で 35 cm となる。平均として, 外層の外側寸法は巾 40 cm × 高さ 103 cm となる。

外層の電磁軟鉄の肉厚を  $t_2$  (cm) とすると, 横磁場に対して, 磁性体部の磁束通過面積は,

$$A_2 \cong 2 \times 168.8 \times t_2 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

この磁性体部に外部から巾 40 cm × 長さ 168.8 cm = 6752 cm<sup>2</sup> の 4 倍程度の面積内の磁束全てが流入すると, 磁束は

$$\phi_2 \cong 140 \times 10^{-4} \times 6752 \times 10^{-4} \times 4 = 3.78 \times 10^{-2} \text{ Wb.}$$

電磁軟鉄内の磁束密度,  $\text{Bin}, 2 = \phi_2 / A_2$ , は,  $1.0 \text{ Wb/m}^2$  以下が望ましいので,

$$t_2 \geq 1.12 \text{ cm}.$$

一方, 縦磁場についても,

$$A_2^{(\ell)} \cong 2 \times (40 + 103) \times t_2 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\phi_2^{(\ell)} \cong 140 \times 10^{-4} \times 40 \times 103 \times 10^{-4} \times 4 = 2.31 \times 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$t_2 \geq 0.81 \text{ cm}.$$

即ち, 電磁軟鉄が磁気飽和し始めないためには, 肉厚は 1.1 cm 以上必要である。飽和開始への安全係数を 1.1 ととり, 肉厚を 1.2 cm とする。(後述する実験でわかるように, 1.2 cm でも磁気飽和に対して不十分であった。) 外層のみの遮蔽度は,  $40 \text{ cm} \times 103 \text{ cm}$  の長方形を半径 36 cm の円で近似して,

$$S_2 = \frac{300 \times 1.2}{2 \times 36} = 5$$

と見積もれる。従って, 外層の内側の空間では,  $140 / (5 + 1) \sim 23 \text{ G}$  程度まで, 外部磁場が減衰されているとみられる。この 23 G の磁場をミュ-メタルの内層でさらにシールドする。2本ある内層の1つの内面寸法を, 中性化セル出口では, 中性化セル外面寸法ぎりぎりの巾 22.2 cm  $\times$  高さ 38 cm とし, 入口では巾 28.8 cm  $\times$  高さ 44.4 cm とする。平均として, 巾 25.5 cm  $\times$  高さ 41.2 cm となる。内層の肉厚を  $t_1$  (cm) とする。横磁場に対して, 磁性体部の磁束通過断面積は,

$$A_1 = 2 \times 168.8 \times t_1 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

この断面積に, 外層の内面の巾 37.6 cm  $\times$  長さ 168.8 cm = 6347 cm<sup>2</sup> の面積内の磁束全てが通過するとする。

$$\phi_1 = 23 \times 10^{-4} \times 6347 \times 10^{-4} = 1.46 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

ミュ-メタル内の磁束密度  $\text{Bin}, 1 = \phi_1 / A_1$  は,  $0.2 \text{ Wb/m}^2$  以下が望ましい。従って,

$$t_1 \geq 0.22 \text{ cm}$$

一方, 縦磁場についても,

$$A_1^{(\ell)} \cong 2 \times (25.5 + 41.2) \times t_1 \times 2 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} \phi_1^{(\ell)} &\cong 23 \times 10^{-4} \times (40 - 2.4) \times (103 - 2.4) \times 10^{-4} \\ &= 8.7 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$t_1 \geq 0.16 \text{ cm}$$

即ち, 内層が磁気飽和し始めないためには, 0.22 cm 以上の肉厚が必要である。安全係数を 2.3

ととり、内層の肉厚を 0.5 cm とする。25.5 cm × 41.2 cm の長方形を半径 18 cm の円で近似すると、内層のみの遮蔽度は、

$$S_1 = \frac{2.5 \times 10^4 \times 0.5}{2 \times (18 + 0.5)} \sim 340$$

と見積もれる。二層シェル全体として、横磁場に対する遮蔽度は、

$$S = 1 + 340 + 5 + 340 \times 5 \times \left(1 - \left(\frac{18.5}{36}\right)^2\right) \sim 1600$$

この値は、目標の 1500 より、かろうじて大きい。

#### C. イオン源部接続フランジの構造

イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドは、イオン源部接続フランジにボルト留めされる。イオン源から中性化セル出口までの空間は、イオン源部はイオン源磁気シールド、中性化セル部は中性化セル磁気シールドにより磁気遮蔽されるが、両者の接続部分にも磁性体を用いることで、より遮蔽を効果的に行えんと考えられる。即ち、イオン源部接続フランジに磁性体を用いなかった場合、両シールドの間に磁氣的に中断部ができ、そこから外部磁場が侵入する余地を残すこととなる。これを避けるために、イオン源磁気シールドの内、外層を中性化セル磁気シールドの内、外層に、各々独立して磁氣的に接続するようにする。具体的には、非磁性体 (SUS 304) でできたイオン源部接続フランジの中に、2つの電磁軟鉄層をつくり、そこに、両シールドの内外層を各々接続する。

#### D. 開口部の処理

中性化セルの冷却水配管、ガス供給管、真空度測定用配管は、中性化セル磁気シールドを貫通して外部に出て行く。従って、磁気シールドのその場所には孔があげられ、そこから外部磁場がシールド内部に侵入するおそれがある。これを防ぐため、この孔の部分には内外層とも磁気シールドの鞘を取り付けた。鞘の肉厚は、もとの内外層の肉厚と同じとし、円筒型の鞘の内径と同じ長さだけ外側に突き出す構造とした。

イオン源磁気シールドの大きな開孔部にも、外層に同様な処理を施した。イオン源磁気シールドには、イオン源のアーク電力、フィラメント電力を供給するための電気ケーブルとガス供給管を通すために、ビーム軸を中心として直径 80 cm の大きい孔があげられている。この孔からも外部磁場がシールド内に侵入するが、その孔からイオン源プラズマ生成部まで約 120 cm あるので、プラズマ生成部での外部磁場は小さくなると考えられる。従って、この開孔部には磁気シールドの鞘はつけないが、必要となればつけられるように、孔の周囲にボルト孔を加工しておく。

次に、中性化セル磁気シールドの出口側開口部の処理について説明する。ミューメタルの端部を外層の出口側端部と同じ位置まで残しておく、高透磁率部の方が磁力線が通過しやすいので外部磁場はミューメタル部にも大きく流入する。内層は外層に比べて肉厚が小さく、また飽和磁束密度が小さいので、容易に磁気飽和してしまう。このことは、二次元の磁場分布計算の過程で認識された。対策として、内層の出口端を外層の出口端から 10 cm 内側の位置にもってくるとし、その配置で内層が磁気飽和しないことを二次元磁場計算で確認した。

## 5. モデルを用いた実験

### 5.1 1/10モデル実験

4章での設計をもとに、イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールド、イオン源部接続フランジの1/10モデルを製作し、それらを磁場中において主に、磁気飽和について実験した。JT-60 NBI 原型ユニット内の磁性体の配置をより忠実に反映させるために、偏向磁石<sup>10)</sup>の1/10モデルも同時に製作し、対応する位置に配置した。

#### 5.1.1 実験装置

原型ユニット磁気系の1/10モデルとして、製作したものは、以下の通りである。

- ① 偏向磁石モデル：電磁軟鉄製。励磁コイル総巻数= 422 Turns。上下コイル並列接続で、27.8 A 通電でギャップ中心で1.5 KG を発生。コイルは空冷で30秒以下の通電可能。
- ② 中性化セル磁気シールドモデル：外層電磁軟鉄（1.2, 2.0, 2.6 mm厚の三種あり）、内層はミューメタル（0.5 mm厚）。
- ③ イオン源磁気シールドモデル：外層電磁軟鉄（1.5 mm厚）、内層はミューメタル（0.5 mm厚）。
- ④ イオン源部接続フランジモデル：電磁軟鉄製（外層接続用は4 mm厚、内層接続用は1 mm厚）。スペーサは、アルミニウム製。
- ⑤ 磁場発生コイル：絶縁被覆付ホロー導体制。1000 mm $\phi$ のコイル2個を500 mm離して固定したヘルムホルツコイル（第2図参照）。総巻数=  $72 \times 2 = 144$  Turns。水冷で連続通電可能。両コイルに140A通電すると、両コイルの間の空間に184Gのほぼ一様な磁場を発生。第3図-(a)に、同空間での磁場分布を、第3図-(b)に励磁電流と点(0, 0, 0)（偏向磁石のギャップ中心位置）での発生磁場値の関係を示す。結線変更で、片側のコイルにのみ通電することも可能。第4図-(a)に、片側通電の場合の磁場分布を、第4図-(b)に励磁電流と点(0, 0, 0)と点(0, -46 mm, 0)での磁場値の関係を示す。

イオン源磁気シールドモデルと中性化セル磁気シールドモデルは、イオン源部接続フランジモデルにボルト留めされ、一体化している。これら磁気シールドモデルと偏向磁石モデルは、SUS製（非磁性）の支持架台上の実際の設置位置に対応する位置に固定されている（第5図参照）。さらに、これらの磁性体は、支持架台ごと磁場発生コイルの内部空間に設置される（第2図参照）。従って、支持架台を回転したり、水平、垂直方向に平行移動したりする（それらが可能となつて）ことにより、磁性体からみているいろいろな磁場配位が実現できる。

磁場測定器としてホール素子三軸磁気プローブ(f.w.Bell社STJ-0404)とガウスメーター（同、モデル620）を用いた。

### 5.1.2 実験結果

磁気シールドモデルと偏向磁石モデルが固定された支持架台を回転したり、水平移動したりすることおよび磁場発生コイルを両側または片側通電することで、第6図に示されるような(A)～(F)の配置をとり、実験した。片側コイル通電で、1000 mm  $\phi$  のコイルに流れる電流をJT-60本体のプラズマ電流と見たてると、配置(F)が最も実際に近い磁場配位で実験できる。しかし、実験に用いた電源とコイルの仕様の関係上、コイルに通電できる電流値は、200A以下に制限され、磁石のギャップ中心付近に発生できる磁場値(磁性体なしの場合の値)は、実際の場合の値(210G)よりもはるかに小さくなる。縦磁場に対し、磁気シールドが飽和するかしないかをチェックするためには、1.0 Wb/m<sup>2</sup>の磁束密度が磁性体内を通過しなければならないが、配置(A)～(F)の順番でその実現が容易である。配置(F)の場合の磁性体付近の磁場分布(磁性体なしの場合の分布)を第7図-(a)、(b)に示す。なお、図中、S. F. はScaling Factorの略で、図中の磁場値にS. F.の値を乗ずると実際の場合に近い磁場値が得られる。S. F.値は、磁性体がない時、偏向磁石ギャップ中心(0, 0, 0)での磁場の絶対値から定めるものとし、基準磁場値は、210G(第1図-(b)参照)とする。

配置(F)で中性化セル磁気シールドモデルの外層肉厚を2.6 mmとした場合の、上イオン源軸に沿っての磁場分布測定結果を第8図-(a)、(b)に示す。第8図-(a)が縦磁場(ビーム軸に平行な成分)、同(b)が横磁場(ビーム軸に垂直な成分)の分布である。プローブの外形が8 mm  $\phi$ であるのに対し、中性化セル磁気シールドモデルの内面寸法がおよそ巾25 mm×高さ45 mmと小さいため、プローブの位置精度が悪く、また外部磁場が弱いため、測定される磁場値が最大でも0.6 Gとなり、測定誤差が非常にしやすい条件となっている。従って、0 Gに近い測定値のその絶対値と符号には、誤差が含まれている可能性がある。

縦磁場については、S. F.を乗じた後の値で、中性化セル磁気シールドモデル中心で0.9 G、イオン源磁気シールドモデル中心付近で1.4 G、イオン源部接続フランジ付近では、最大16.3 Gとなっている。第1打消コイル<sup>1)</sup>を動作させると、それらが各々、0.3 G、0.7 G、7.6 Gとなる。横磁場については、中性化セル磁気シールドモデル中心付近で0.14 G、イオン源磁気シールドモデル中心付近で0.6 G、イオン源部接続フランジモデル付近で最大3.6 Gとなっており、第1打消コイル動作で、各々0.28 G、0.6 G、1.4 Gとなる。即ち、横磁場については、中性化セル磁気シールドモデルの外層が2.6 mm厚(実際の場合には、2.6 cm厚)の時、第1打消コイルを動作させなくとも、ほぼ磁気シールドの仕様(2.2参照)を満たすと予想される。

縦磁場、横磁場ともイオン源部接続フランジ付近に、他領域よりは大きい値の磁場が存在するが、この理由は、以下の通りと考えられる。中性化セル磁気シールドが磁気遮蔽すべき空間の体積と、イオン源磁気シールドが遮蔽すべき空間の体積を比べた場合、後者の方が6～7倍大きい。また、4.2節で見積もられたように、イオン源磁気シールド外層に流入する縦磁場による磁束は中性化セル磁気シールド外層のその3倍であり、内層については、イオン源磁気シールドには中性化セル磁気シールドの6倍の磁束が流入している。イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドはイオン源部接続フランジで磁氣的に接続されているため、縦磁場に関しては、イオン源磁気シールドが吸い込んだ磁束のかなりの部分が中性化セル磁気シールドにも流入する。しかし、イオン源磁気シールドから中性化セル磁気シールドに接続する部分では、磁性体が急角度で

曲げられ、絞られ、しかも磁束が通過する磁性体部の断面積が急激に減少している。従って、接続部を通過する磁束の一部が磁気シールドのその付近の空間内に漏れ出して、横磁場と縦磁場のピークがその付近に現われている。従って、もし中性化セル磁気シールドがその機能を果さなくなるとしたら、やはりイオン源部接続フランジ付近からということが、第8図-(a), (b)から予想される。

4.2で設計した1.2cm厚の中性化セル磁気シールド外層に相当する1.2mm厚の外層をつけた中性化セル磁気シールドモデルを磁石やイオン源磁気シールドモデルとともに支持架台に取り付け、配置(D)の磁場配位でテストした。上イオン源軸に沿って、軸と平行な方向の磁場分布を測定した。結果を第9図に示す。第1打消コイルを通电しない場合、イオン源部接続フランジから中性化セル磁気シールド中心に至るまでの広い範囲にわたり、磁気シールド内の磁場値が数10～70G(S.F.を乗じた後)にもなっている。これは、明らかに中性化セル磁気シールドモデルが磁気飽和したことを示している。配置(D)は、配置(F)にかなり近く、しかも第9図の場合、実際の磁場値の1/19の外部磁場で飽和していることから、もし中性化セル磁気シールドの外層を1.2cm厚で製作した時、磁気飽和する危険性が十分ある。

磁気飽和に対して安全な中性化セル磁気シールド外層の肉厚を決定するための実験を行なった。配置(A)～(E)の各々について中性化セル磁気シールドモデル外層の肉厚を1.2mm, 2.0mm, 2.6mmの三種に変え、それぞれの場合に、外部磁場を徐々に増加させ磁気シールドが飽和する点を求めた。第9図からわかるように、中性化セル磁気シールドモデルの飽和は第9図で $x = -30 \sim -20$ mm付近の縦磁場の値をモニターしていれば検出できる。従って、 $x = -30$ mmでの縦磁場の値を、磁場発生コイルの励磁電流( $I_L$ )の関数として測定した。配置(A)～(E)での測定結果を各々第10図～第14図に示す。 $I_L$ を増加していくと、 $x = -30$ mmでの縦磁場値は、当初小さな勾配で線形的に増加していくが、 $I_L$ がある値以上を越えると急カーブで磁場が増加する。その値が磁気飽和点である。各配置での飽和点(磁性体がない時の偏向磁石ギャップ中心での磁場値として表わしている)を中性化セル磁気シールドモデル外層の肉厚の関数としてまとめると第15図のようになる。肉厚が大きいほど飽和点は大きくなり、同じ肉厚ならば配置(E)～(A)の順番で飽和点が大きいの。配置(F)では、電源の容量制限から1.2mm厚でも飽和できなかったが、配置(E)に対する曲線よりも急傾斜な曲線になることは明らかである。配置(E)で、飽和時の外部磁場値が210Gの場合の肉厚は、約2.4～2.5mmと予想されるが、配置(F)ではその肉厚よりも小さくて良いはずである。従って、中性化セル磁気シールド外層の実際の肉厚を2.4cmと定める。この時、4.2で予想した中性化セル磁気シールドの横磁場に対する遮蔽度は、外層のみでは、

$$S_2 = \frac{300 \times 2.4}{2 \times 36} = 10$$

二層シェル全体として、

$$S = 1 + 340 + 10 + 340 \times 10 \times \left(1 - \left(\frac{18.5}{36}\right)^2\right) \sim 2850$$

となる。



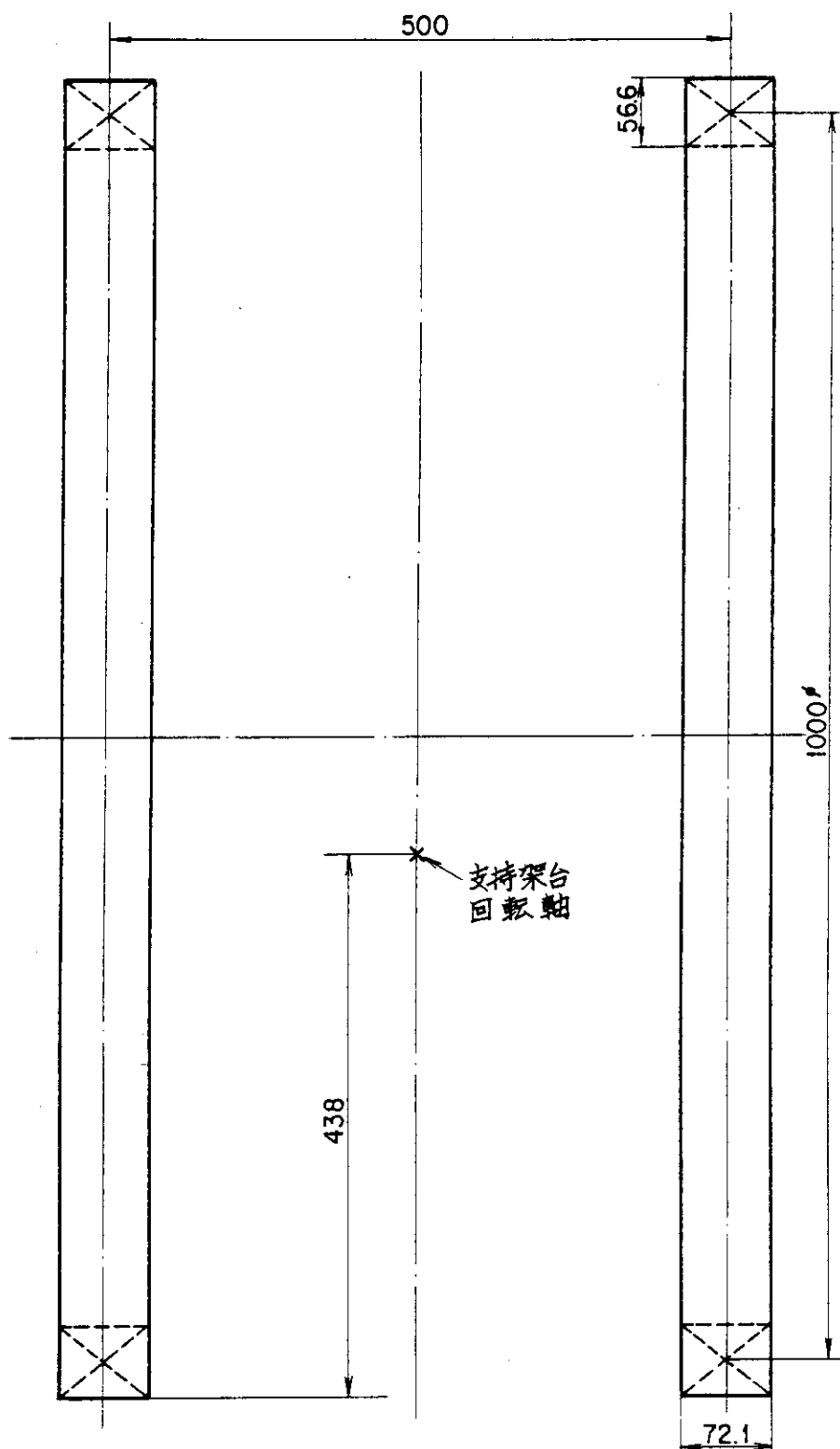
## 5.2 1/4 モデル実験

5.1で説明した実験の結果、中性化セル磁気シールド外層の肉厚を2.4cmに変更することとし、中性化セル磁気シールドとイオン源磁気シールドの最終的形狀を各々第16図、第17図に示すように決定した。偏向磁石<sup>10)</sup>、イオン源部接続フランジ、第1、第2打消コイルの配置と構造、原型ユニットにおける漏洩磁場発生コイルの仕様もほぼ決まっていたので、これら原型ユニット磁気系の1/4モデルを一括して製作し、主に中性化セル磁気シールドと偏向磁石の間の空間の磁場分布とシールド内の磁場分布を測定し、原型ユニット製作前の確認をした。

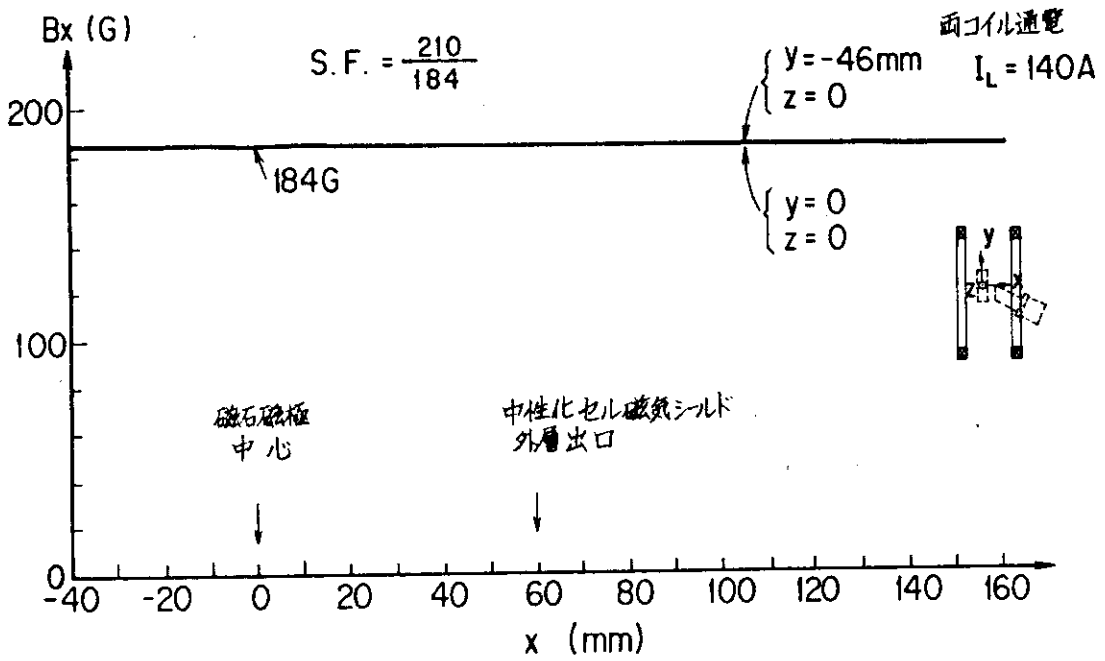
ここでは、その1/4モデルを用いて、中性化セル磁気シールド外層を2.4cm厚にした場合の磁気飽和実験の結果について述べる。

イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールド、イオン源部接続フランジ、偏向磁石の1/4モデルを実際と同じ位置関係に配置し、原型ユニットの漏洩磁場発生設備の3つのコイルと同じ位置に配置した漏洩磁場コイル1/4モデルに通電して、中性化セル磁気シールド内の定点での磁場を測定した。測定点は、1/10モデルでは第9図の $x = -30$  mmに相当する位置である

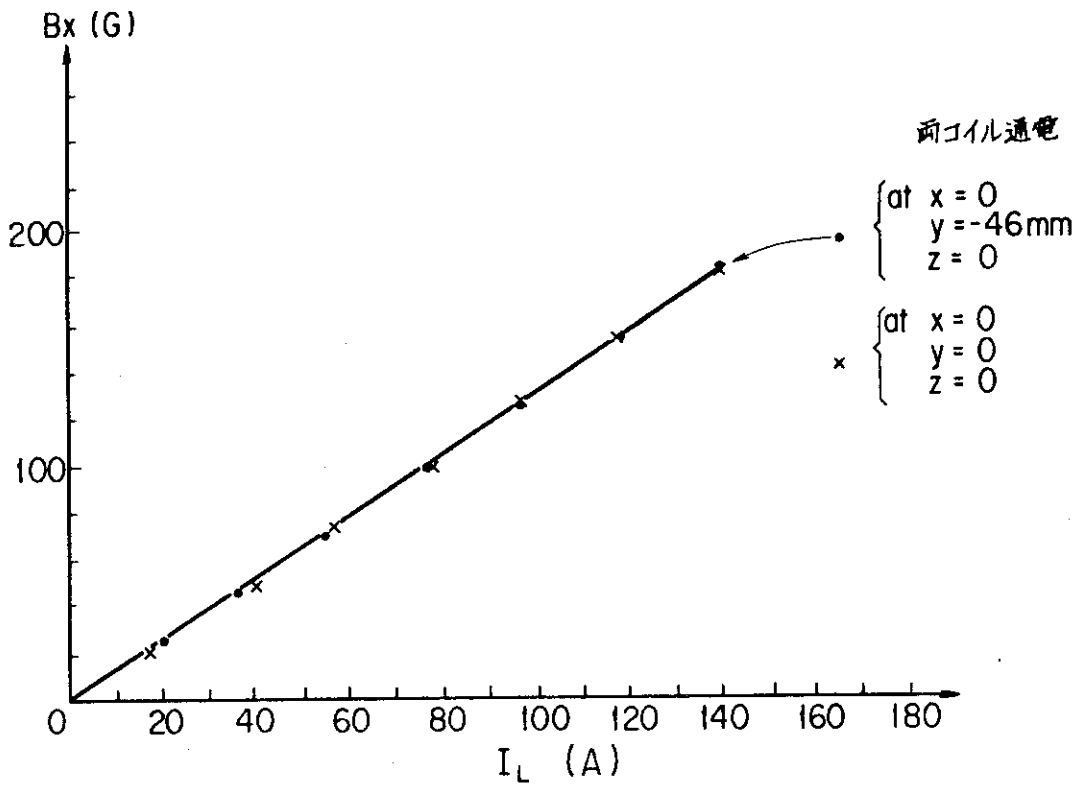
(第18図参照)。測定結果を第18図に示す。漏洩磁場コイルの1/4モデルに通電する電流とともに、磁場の三成分は増加しているが、ビーム軸と平行な磁場成分は絶対値も大きく、しかも非線形的に増加している。即ちコイル電流が220Aを越えたあたりから急激に磁場値が増加し始める。磁性体がない場合、偏向磁石の中心付近での磁場が210Gとなる時の漏洩磁場コイル電流は約280Aであるが、そのコイル電流値でのビーム軸に平行な磁場の値は2Gである。この値は、第9図の場合の50～70G(S.F.を乗じた後の値)の約1/30であり、中性化セル磁気シールドが磁気飽和していないことは明らかである。またこの実験では、漏洩磁場コイルにしか通電していないが、実際には第1、第2打消コイルとも通電されるので、より低い磁場値となるはずである。従って、外層の肉厚を2.4cmとすれば、中性化セル磁気シールドが磁気飽和しないことが1/4モデルで確認できたこととなる。



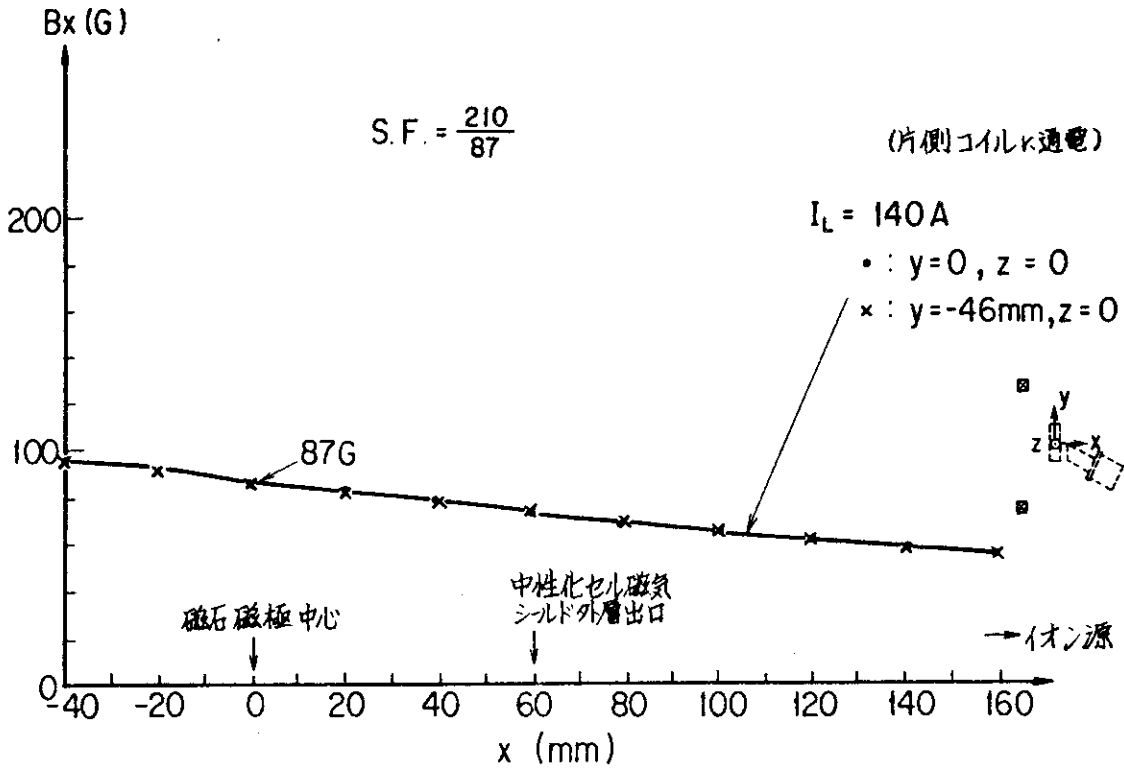
第2図：1/10モデル実験での磁場発生コイル



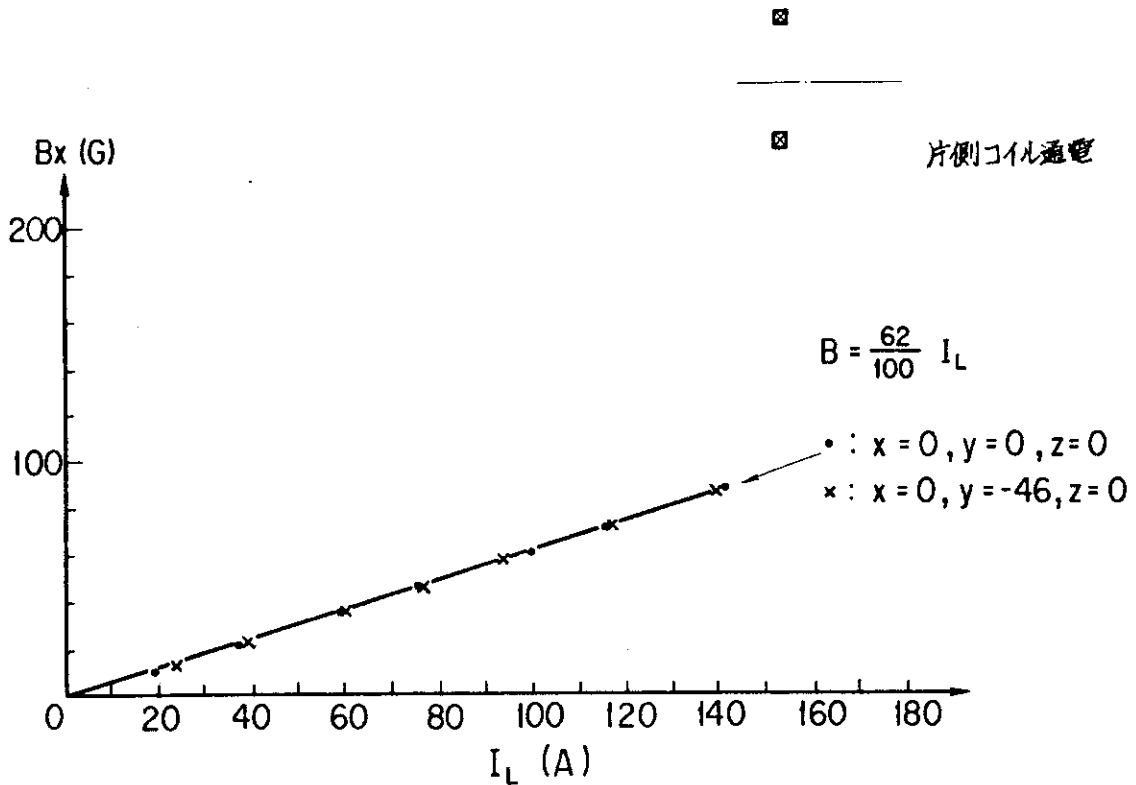
第3図- (a) : 磁場発生コイルの両コイルに 140 A を通電した場合の磁場 ( $B_x$ ) 分布



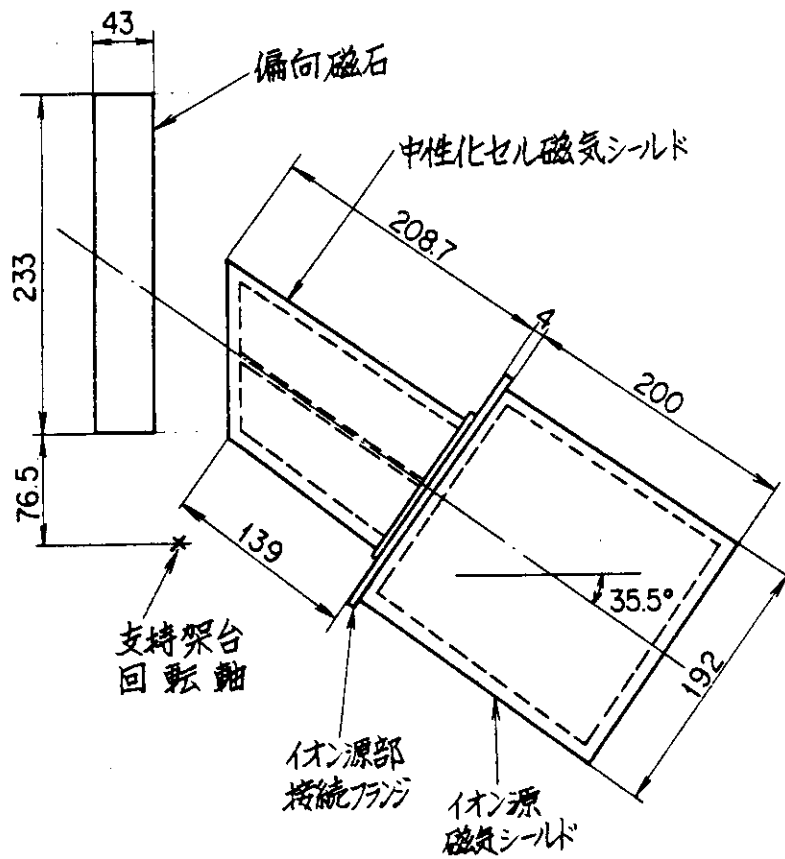
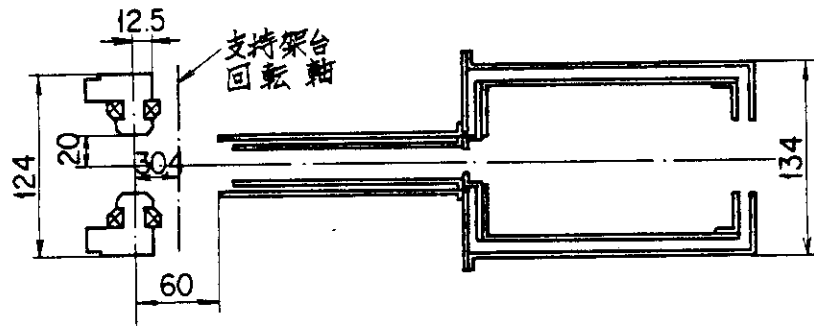
第3図- (b) : 磁場発生コイルの両コイルに通電した場合の励磁電流と点  $(0, 0, 0)$  と点  $(0, -46, 0)$  での磁場 ( $B_x$ ) の関係



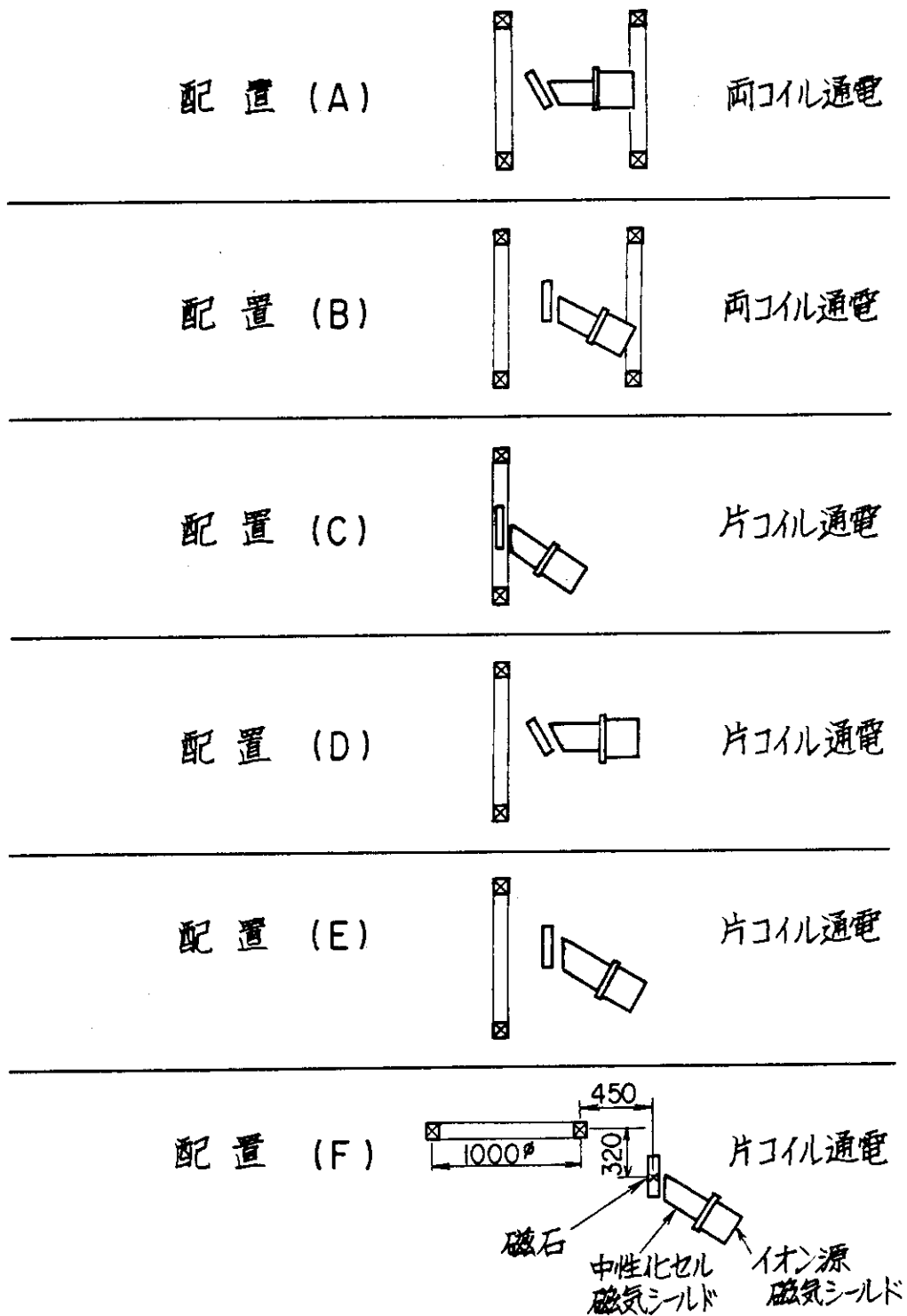
第4図一 (a) : 磁場発生コイルの片方のコイルにだけ 140A 通電した場合の磁場 (Bx) 分布



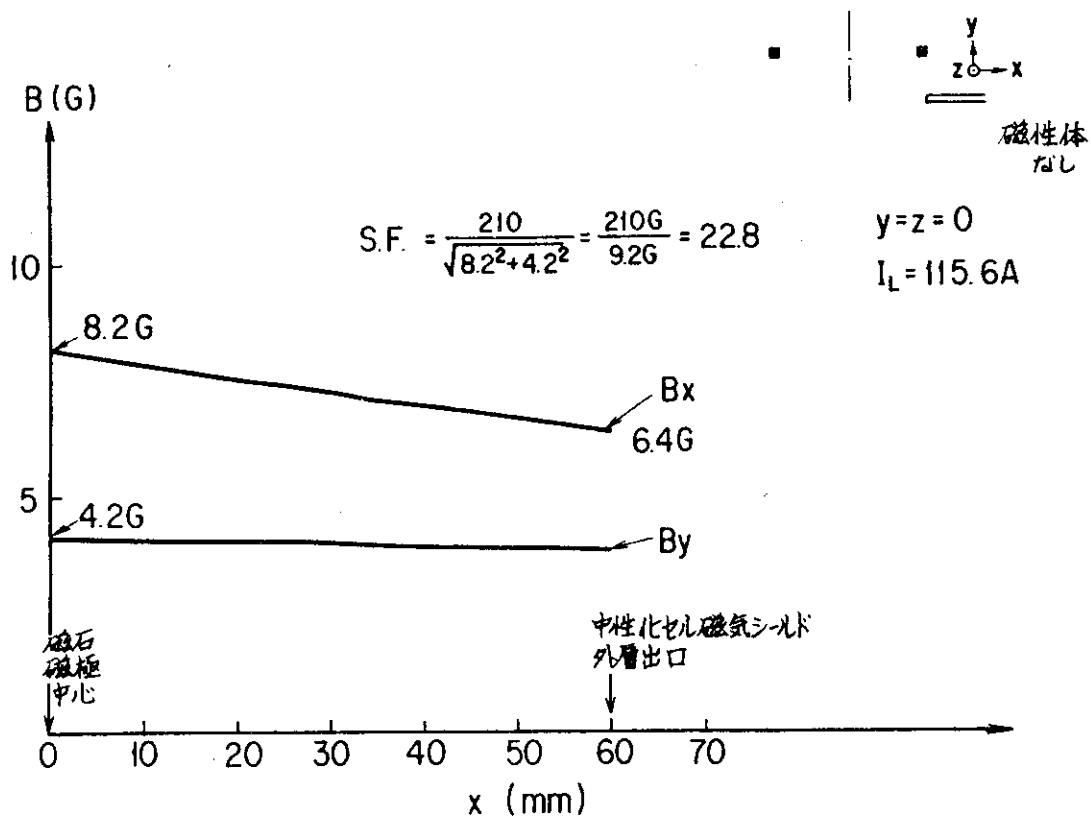
第4図一 (b) : 磁場発生コイルの片方のコイルにだけ通電した場合の励磁電流と点 (0, 0, 0) と点 (0, -46, 0) での磁場 (Bx) の関係



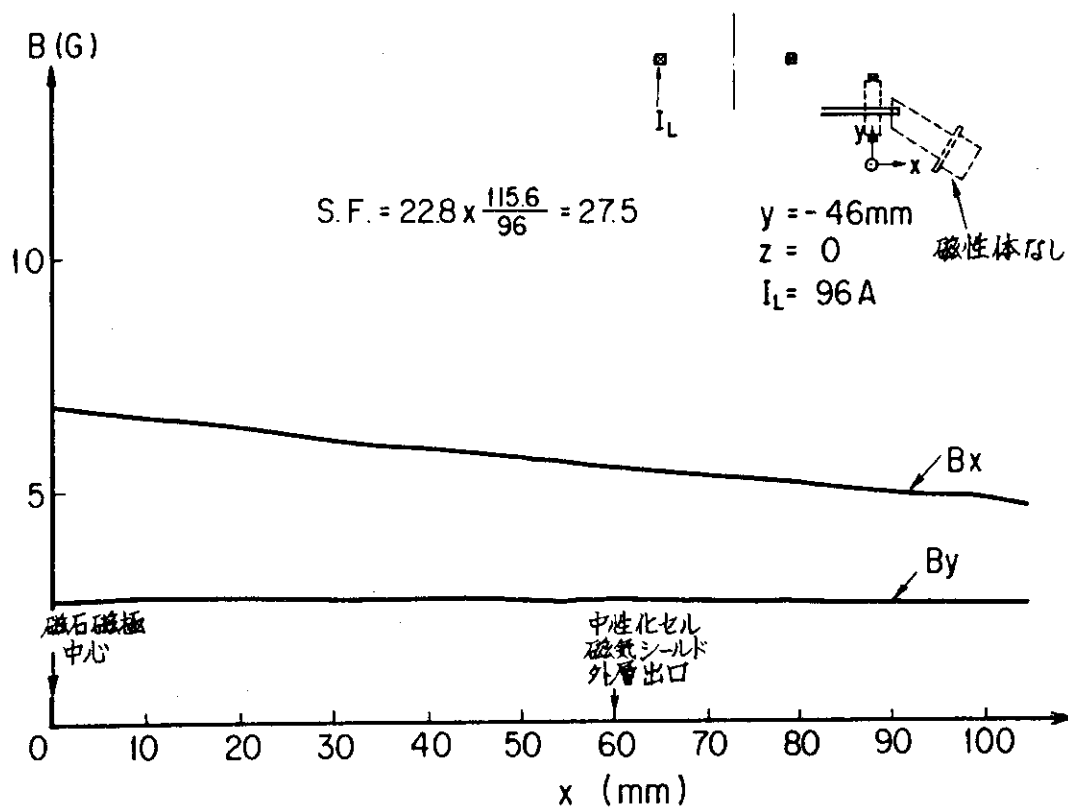
第5図：1/10モデルの各磁性体の配置関係



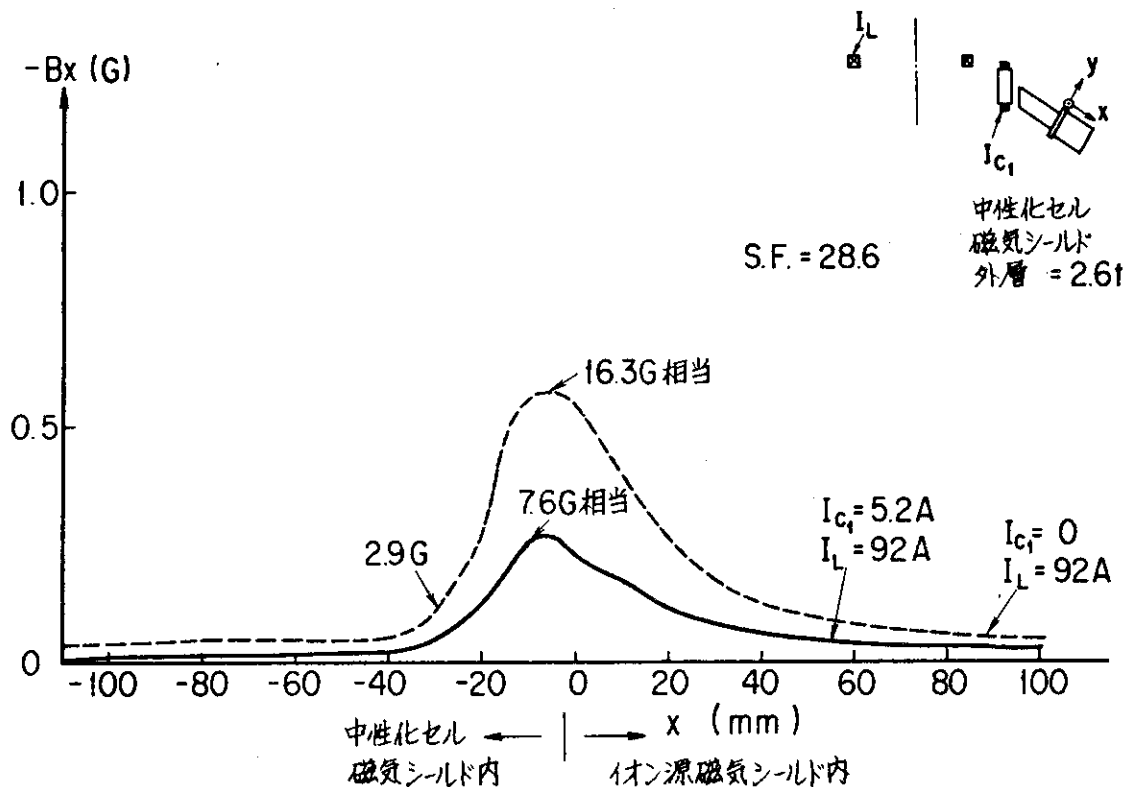
第6図：1/10モデルを用いて磁気飽和実験する際の各種配置



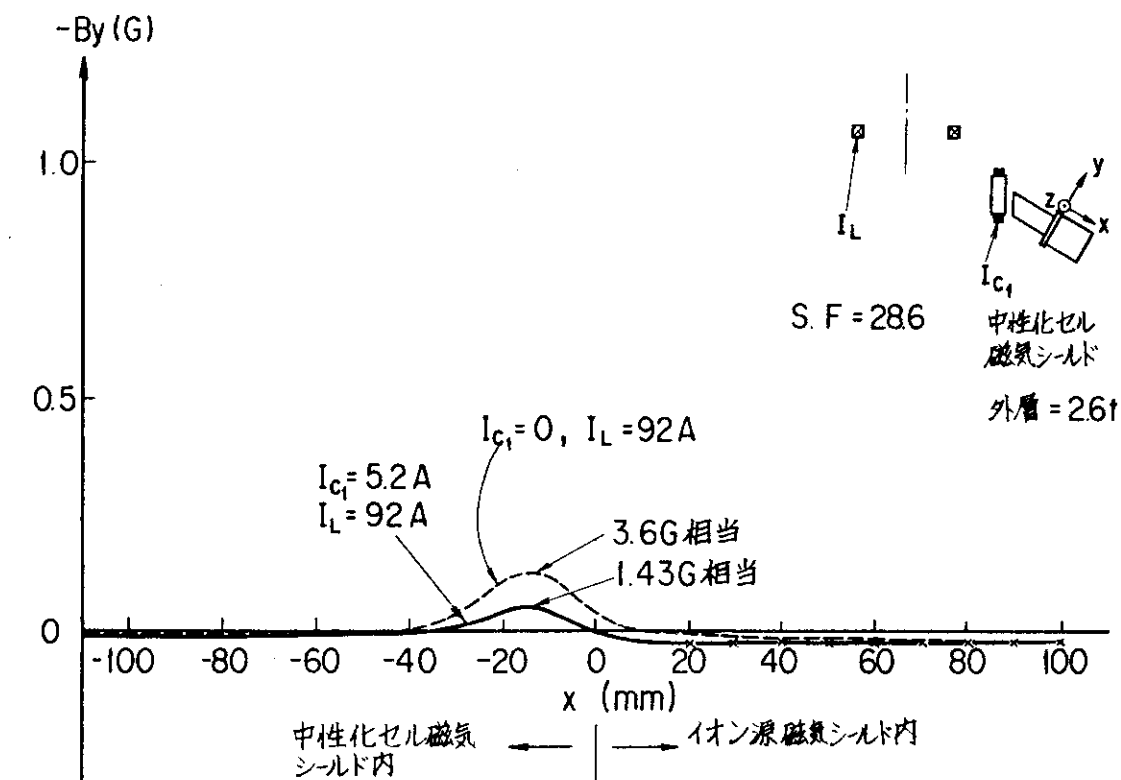
第7図-(a) : 配置 (F) の場合の磁性体位置での磁場分布 (磁性体なしの場合の分布)。y = 0, z = 0 で x 軸に沿った分布である。



第7図-(b) : 配置 (F) の場合の磁性体位置での磁場分布 (磁性体なしの場合の分布)。y = -46mm, z = 0 で x 軸に沿った分布である。

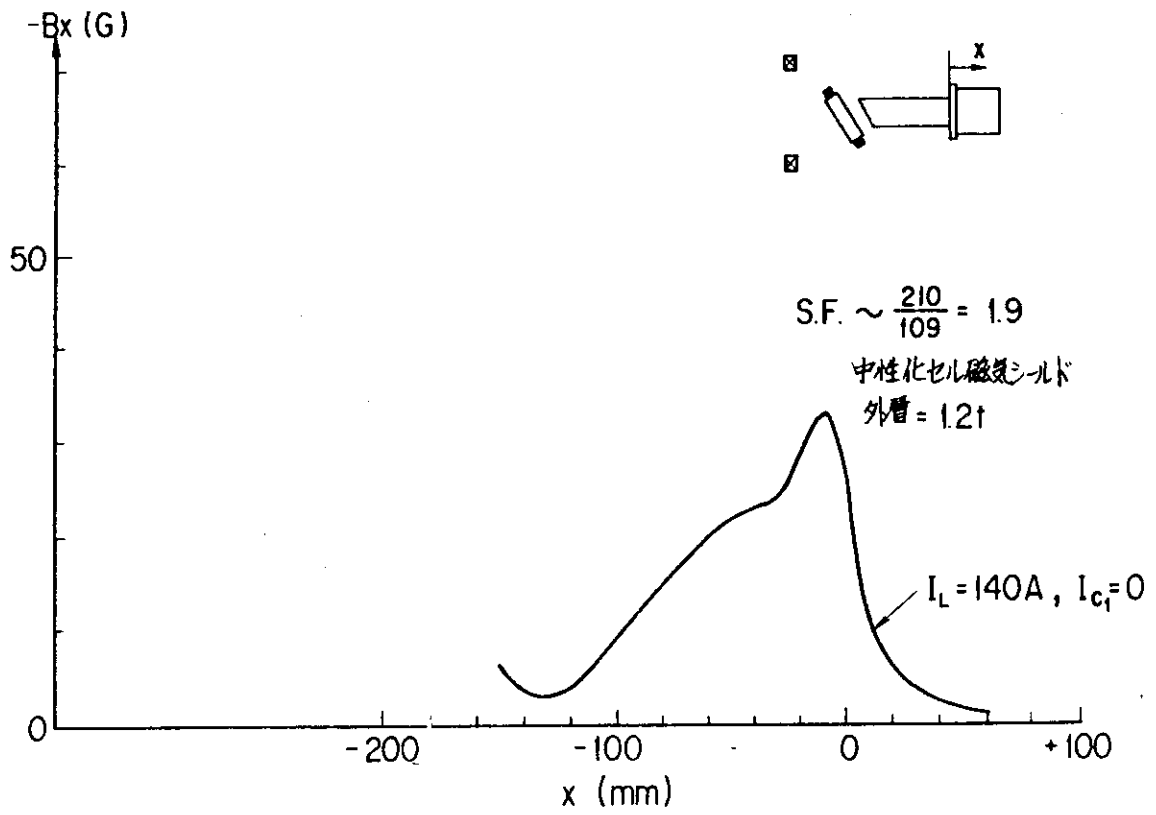


第8図一(a)：配置(F)で、中性化セル磁気シールドモデルの外層の肉厚を2.6mmとした場合の、上イオン源軸に沿っての磁場(ビーム軸に平行な成分)分布測定結果。実線は磁場発生コイルにのみ通電した場合、点線は第1打消コイルにも通電した場合の分布を表わす。

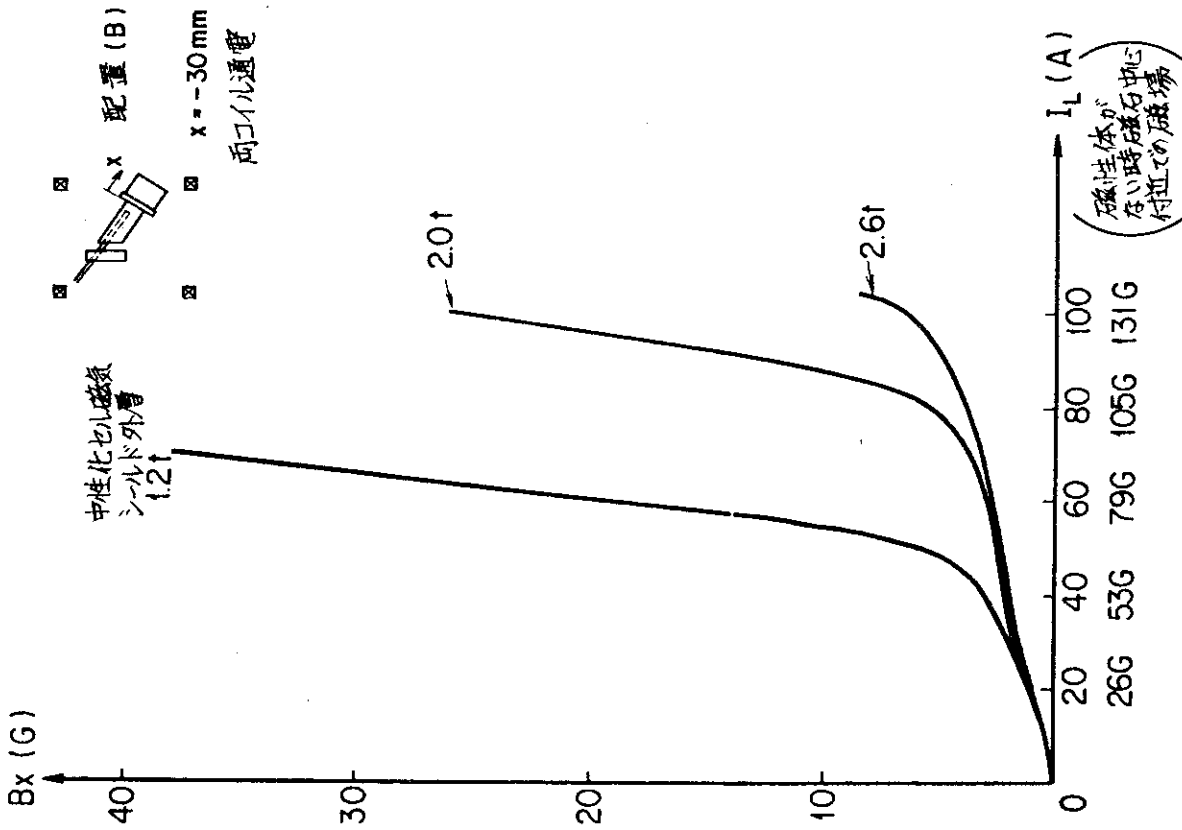


第8図一(b)：第8図一(a)と同条件で、上イオン源軸に沿っての磁場(ビーム軸に垂直な成分)分布測定結果。

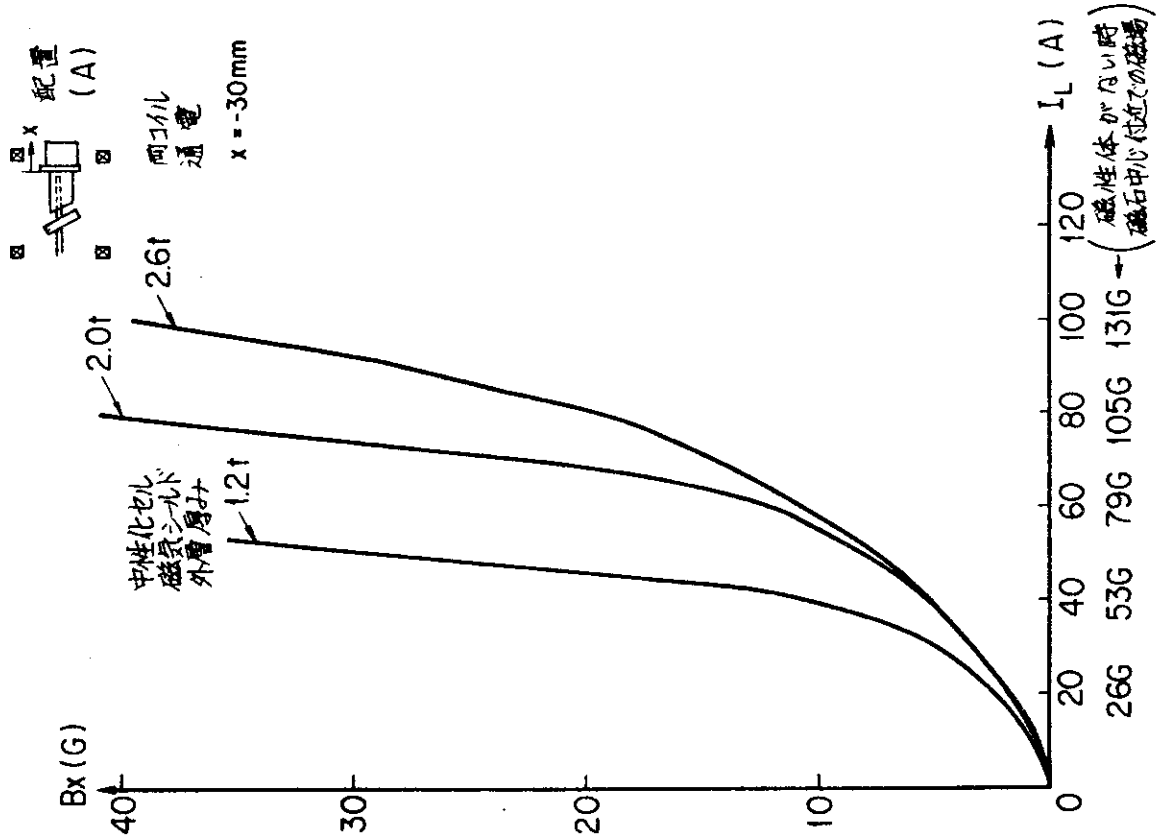




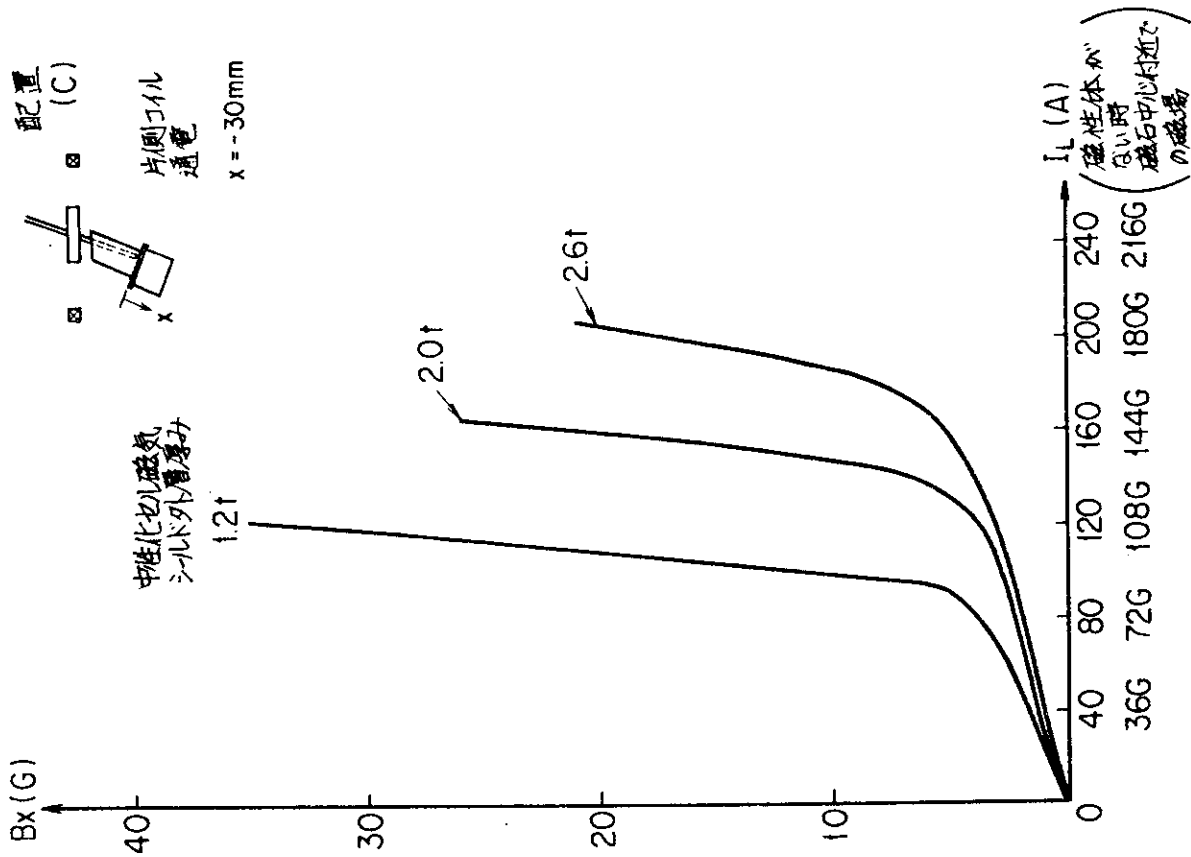
第9図：配置（D）で，中性化セル磁気シールドモデル外層の肉厚を1.2mmとした場合の，上イオン源軸に沿っての磁場（ビーム軸と平行な成分）分布測定結果。



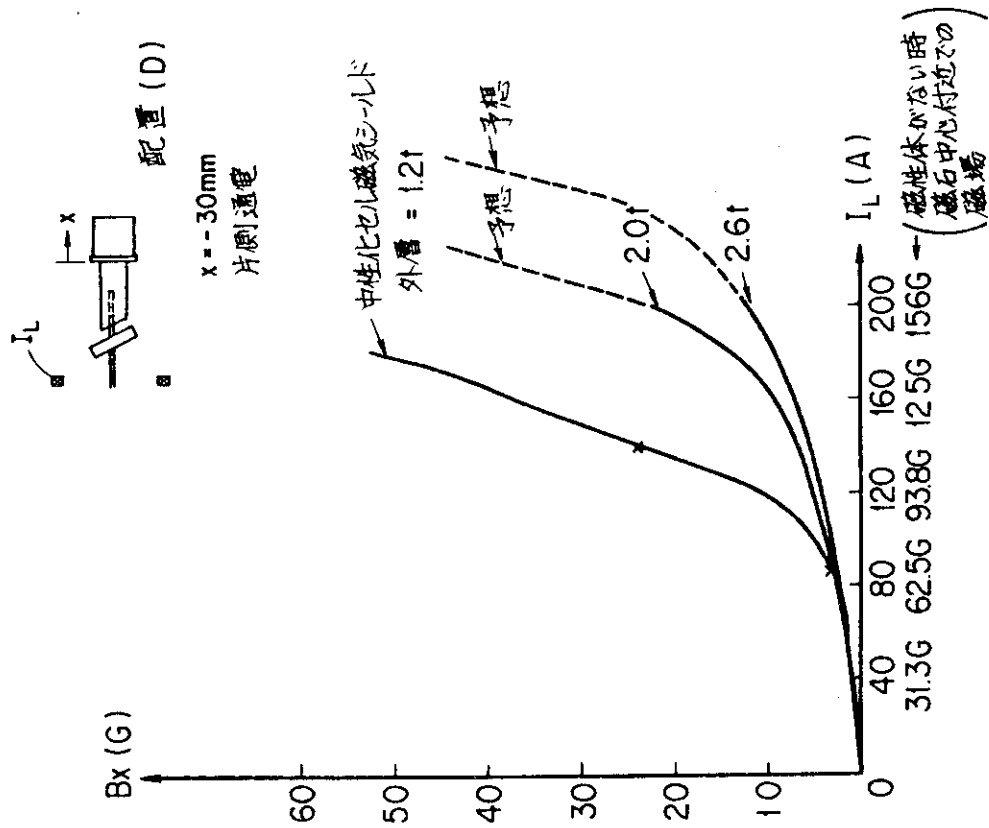
第11図： $x = -30 \text{ mm}$ での $B_x$ と磁場発生コイル電流の関係。配置 (B) の場合である。



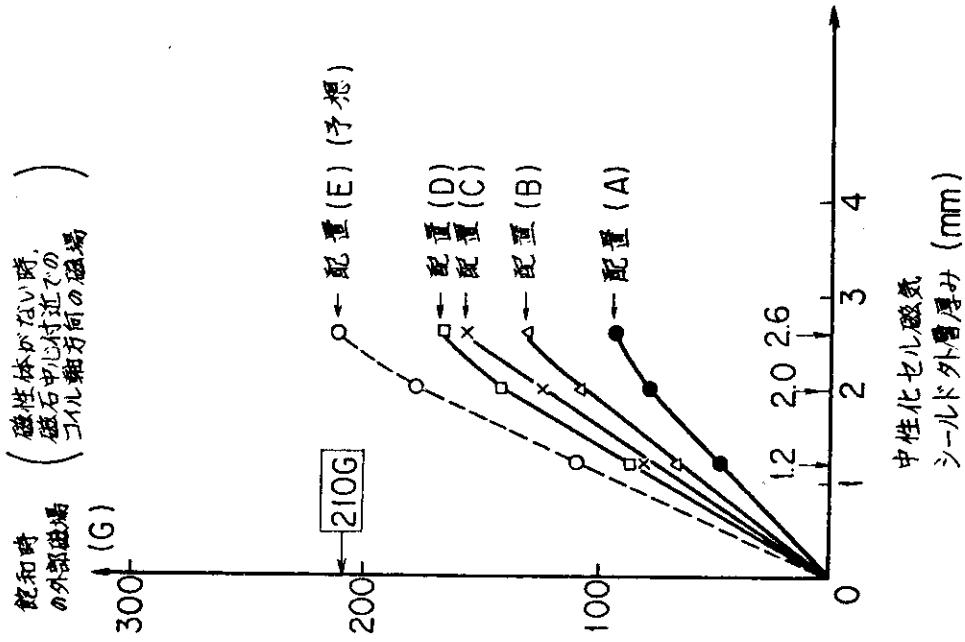
第10図： $x = -30 \text{ mm}$ での $B_x$  (ビーム軸に平行な磁場成分と磁場発生コイル電流 ( $I_L$ )) の関係、配置 (A) の場合である。



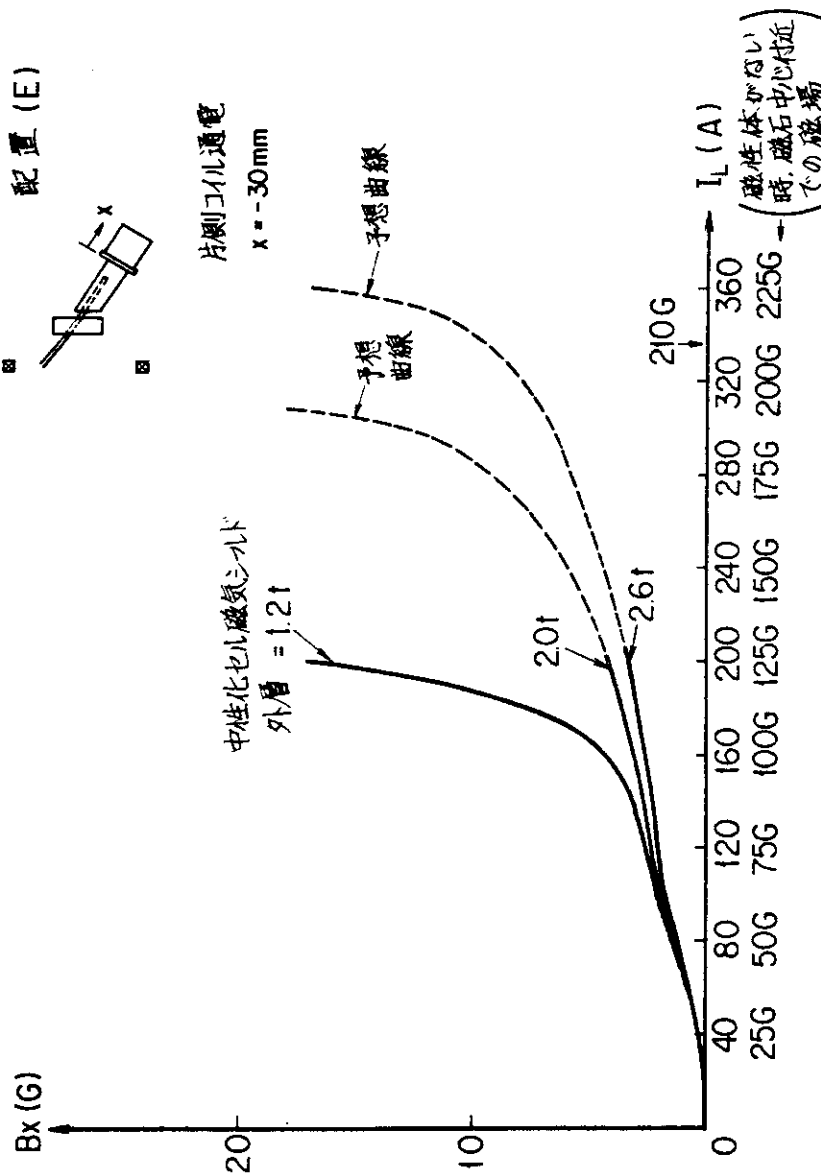
第12図： $x = -30\text{mm}$ での $B_x$ と磁場発生コイル電流の関係。配置 (C) の場合である。



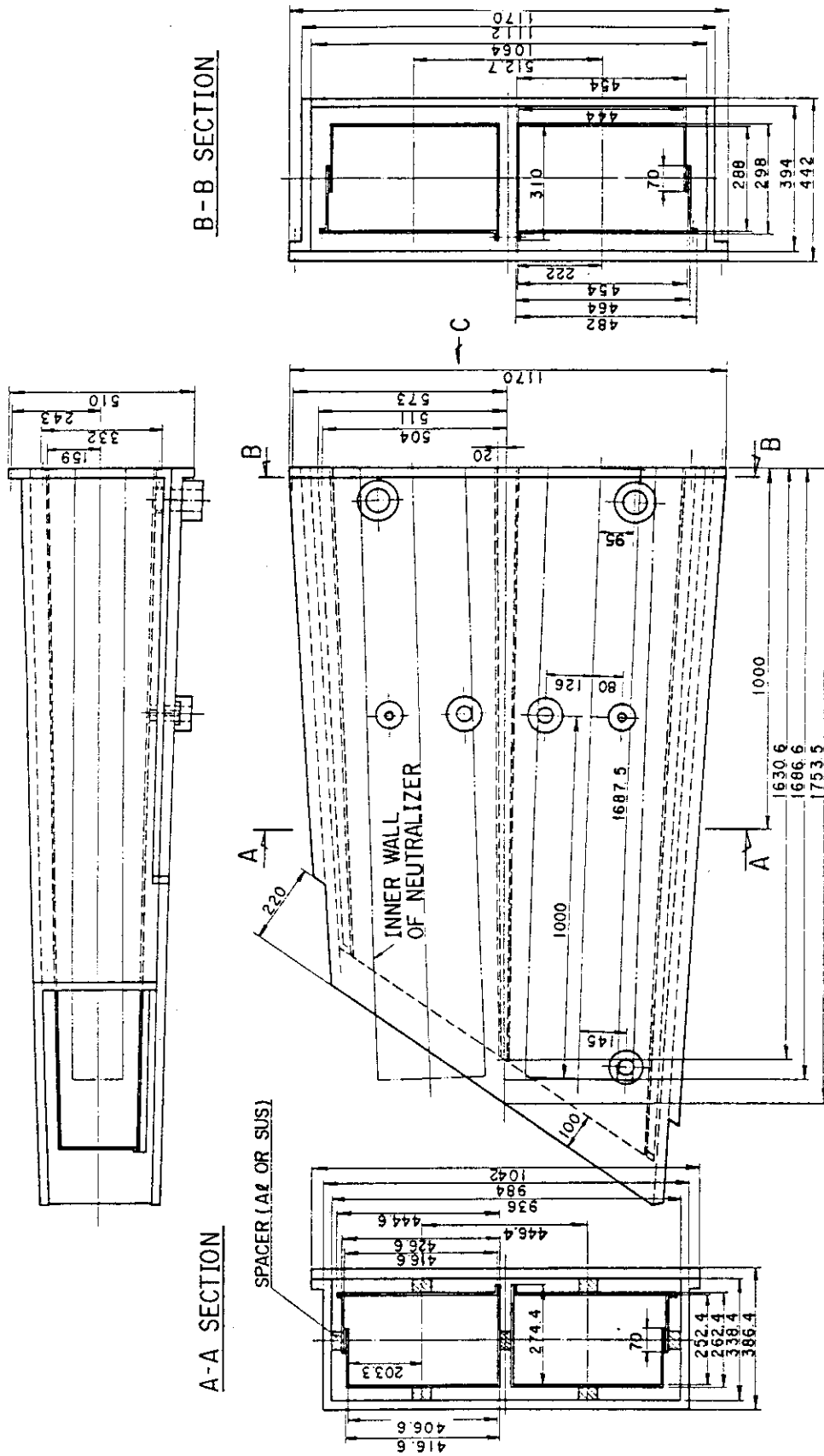
第13図： $x = -30\text{mm}$ での $B_x$ と磁場発生コイル電流の関係。配置 (D) の場合である。



第15図：磁気飽和時の外部磁場（磁性体がない時、磁石中心位置付近でのコイル軸方向の磁場）と中性化セル磁気シールド外層の厚みの関係。

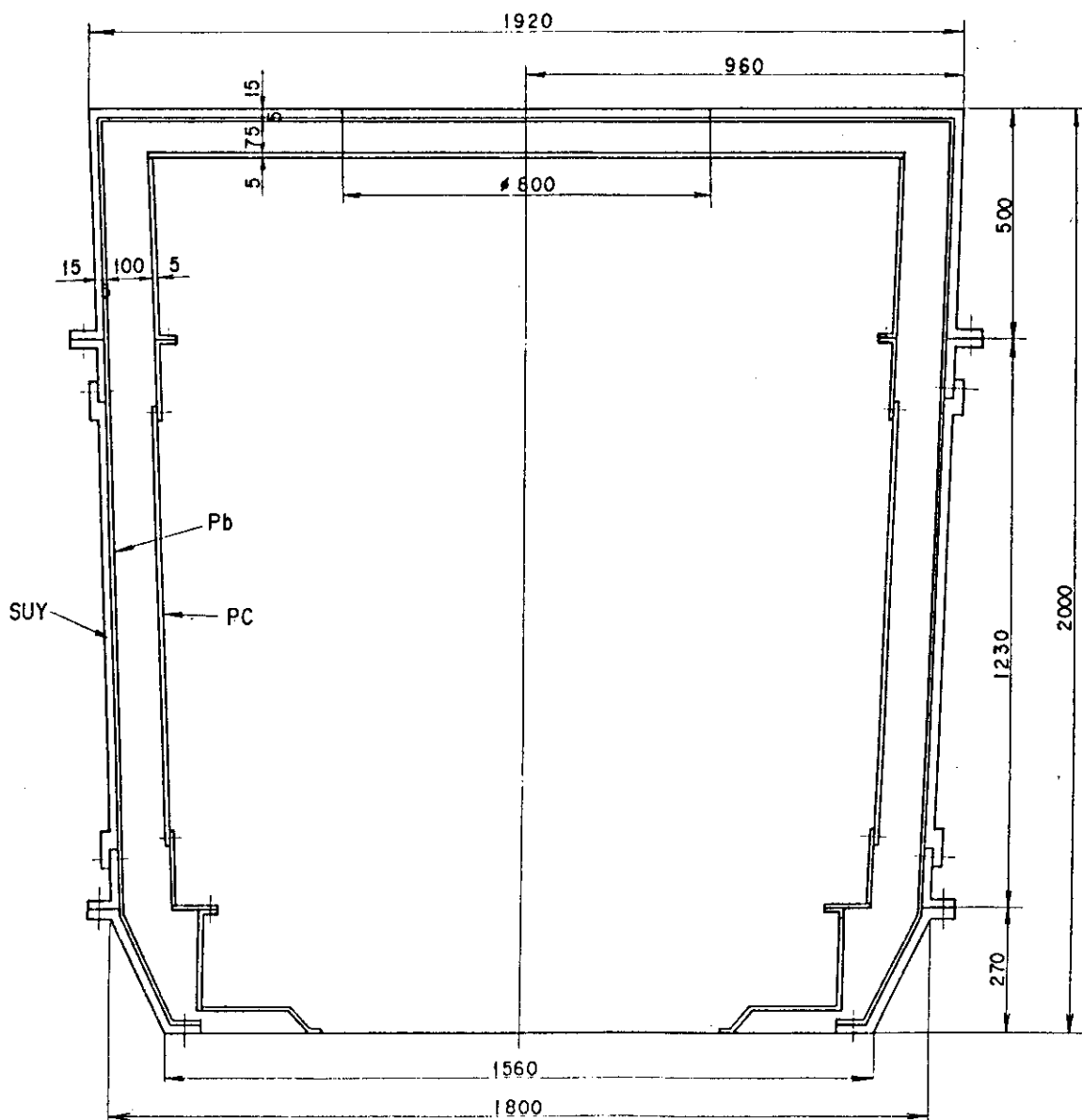


第14図： $x = -30\text{mm}$ での $B_x$ と磁場発生コイル電流の関係。配置 (E) の場合である。



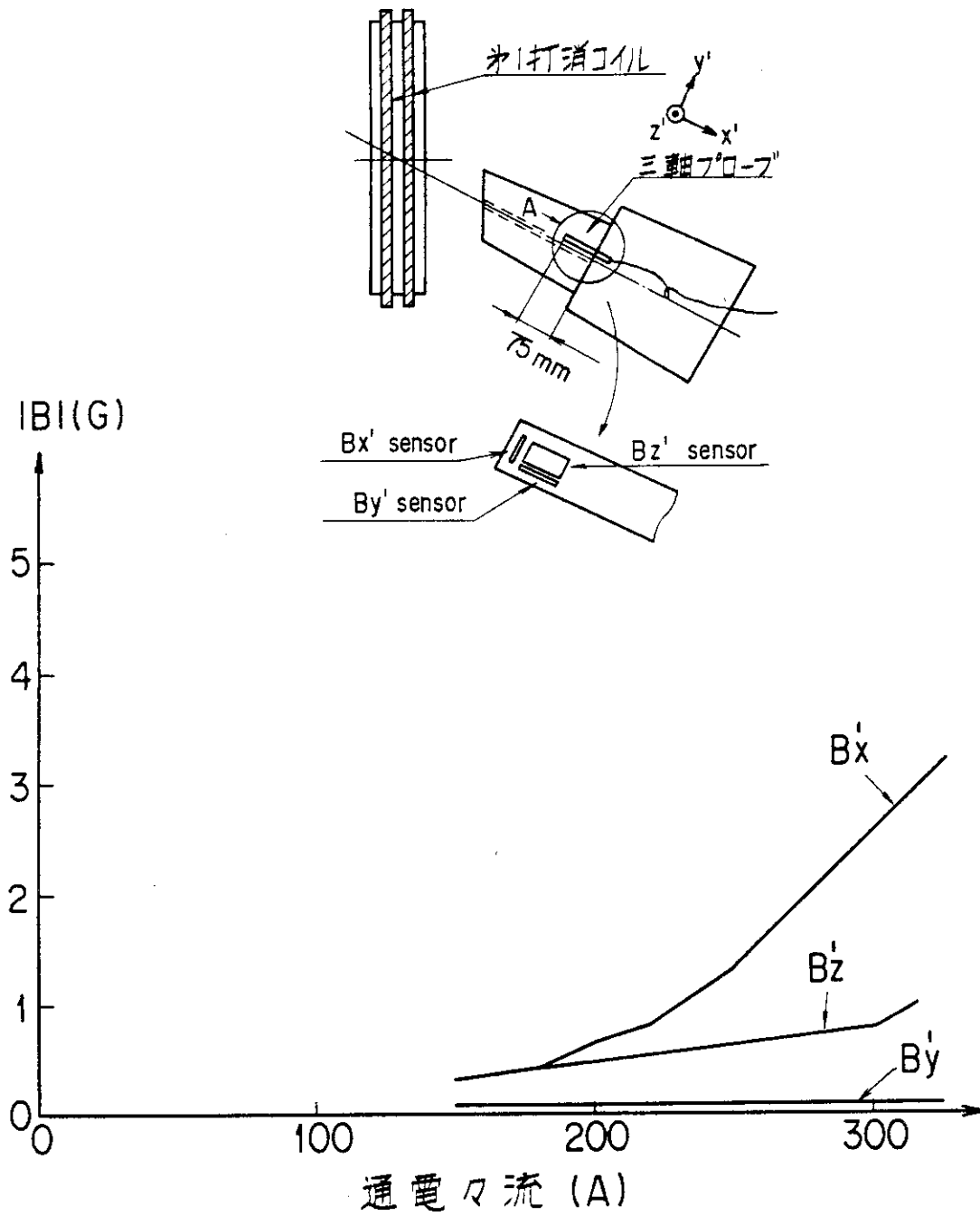
OUTER SHELL : SOFT IRON 24 mm<sup>t</sup>  
 INNER SHELL : μ-METAL 5 mm<sup>t</sup>

第 16 図 : 中性化セル磁気シールドの最終形状



第17図：イオン源磁気シールドの最終形状

漏洩磁場コイル通電時の磁気飽和チェック



第18図：1/4モデルを用いた磁気飽和実験結果。中性化セル磁気シールドの外層肉厚は6mmである。

## 6. 原型ユニットでの磁場分布測定

原型ユニットは、昨年 11 月に完成したが、原型ユニット磁気系の構成要素は全てそれ以前に据え付けられていた。我々は、原型ユニットの完成に先だて、上下イオン源軸に沿っての磁場分布を測定し、磁気シールド効果の最終確認を行なった。

### 6.1 測定条件

磁場分布を測定する前に、既に原型ユニットで磁場に関係する全てのもの（偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源部接続フランジ、イオン源磁気シールド、第 1、第 2 打消コイル、模擬漏洩磁場発生コイル）が、正規の位置に設置されていた（第 19 図参照）。模擬漏洩磁場発生コイルは、主排気タンクまわりの 3 つのコイルとドリフト管部の 2 つのコイルから成るが、後者は、ドリフト管部での中性粒子の再電離損失を発生させるもので磁気シールドとは関係がない。主排気タンクまわりの 3 つのコイルは、第 20 図のように固定されており、磁性体がない時、JT-60 本体からの漏洩磁場の分布に近い磁場を主排気タンク付近に発生するように設計されている。

磁場分布の測定領域は、上下のイオン源軸に沿って以下の範囲である。イオン源部接続フランジ（4 cm 厚）のイオン源側の面を基準面として、そこから 52.25 cm 行った点を座標の原点  $Z' = 0.0$  cm（イオン源接地電極面に対応）とする。さらにイオン源内に入る方向を  $Z'$  の負の方向とする。 $-25$  cm  $\leq Z' \leq 425$  cm の範囲を 5 cm 刻みで測定する（第 21 図参照）。また座標軸を第 21 図で示されているように定義する。即ち、イオン源軸方向を  $Z'$  軸、それに垂直な 2 軸を各々  $x'$  軸、 $y'$  軸とする。

測定器は、ホール素子三軸磁気プローブ(f.w. Bell, STJ-0404)とガウスメーター（同、モデル 620）を用いた。プローブには、長さ 9 m の拡張ケーブルが接続されており、これによるガウスメーターの指示値の変動は、較正されている。第 22 図に示すように、プローブをアルミニウム棒（直径 13.8 mm、長さ 225 cm、ガイド用の溝あり）に固定する。このアルミニウム棒を真チウ製のガイドパイプ（内径 14.3 mm、外径 21.7 mm、長さ 490 cm）の中に入れ、イオン源軸に沿って掃引する。ガイドパイプは、自重によるたわみを小さくするために、イオン源部接続フランジとドリフト排気部出口に設けられた金属板とナットにより、張力がかけられている。アルミニウム棒は、二分割可能であり、その掃引はイオン源磁気シールド内の測定員が行なった。ガウスメーター出力は、A-D 変換され用紙に印字される。磁場の三軸方向の切換えはシーケンサーにより自動的に行なわれた。また測定値採取時間は、各コイルに通電し始め、磁場値が定常に達した後にくるようにシーケンサーをセットした。



## 6.2 測定結果

模擬漏洩磁場発生コイルに453A、第1、第2打消コイルに405A通電（パルス巾5秒、パルス間隔1～5分）して測定した。上、下イオン源軸に沿っての磁場分布の測定結果を各々第23図-(a)、(b)に示す。下イオン源軸では、5cmピッチで、91点全てについて測定したが、それにより分布の様子が大体つかめたので、上イオン源軸ではピッチを10cmとし、また中性化セル磁気シールド内の一部の領域の測定を省略した。第23図-(a)、(b)に示されている測定値は模擬漏洩磁場発生コイルに906A、第1、第2打消コイルに810A通電した場合に相当する値となっている。

模擬漏洩磁場発生コイルに906A通電すると、JT-60からの漏洩磁場と同程度の強度の磁場が主排気タンク付近に発生している。

まず、シールド内の横磁場 ( $B_x'$ ) 分布について説明する。中性化セル磁気シールド出口から内部に向かって、下イオン源軸では42cm、上イオン源軸では36cm程度、外部磁場が侵入している。上イオン源軸の方が、侵入距離が小さいのは、上イオン源軸に対応する磁気シールドはより長いため、シールド出口がより小さくなっているためであり、(3.6)式からもそのことが予想できる。さらに磁気シールドの奥に入ると、磁場値は非常に小さくなる。下イオン源軸では、中性化セル内部でイオン源部接続フランジから75～76cmの位置で、0.3G程度のピークがある。この位置には、中性化セル中心付近のガス圧を測定するためのパイプと、そこへガスを供給するためのパイプがあり、内外層の磁気シールドには、それらを通すため2個の孔があげられている。これらの孔により、その付近の遮蔽度が低下したものと思われる。この付近と出口から42cmの間の領域、さらにイオン源部接続フランジ付近の領域を除けば、中性化セル磁気シールド内の横磁場は、0.01～0.16Gであり、2.2.2で決めた値をほぼ満たしている。イオン源部接続フランジに近づくと  $B_x'$  は増加し、イオン源部接続フランジの位置で0.4Gのピークをもつ。さらにイオン源側に進むと一旦減少してから増加し、イオン源加速部とプラズマ生成部では0.5～0.6Gとなっており、2.2.1で決定した値より小さい。上イオン源軸の場合も似たような横磁場分布となっていて、イオン源部接続フランジからイオン源側に入った  $Z = 30$  cm のところで、ピーク値 (0.6G) をもっている。

次にシールド内の縦磁場 ( $B_z'$ ) 分布について説明する。中性化セル出口から内部へ向かって、下イオン源軸では62cm、上イオン源軸では56cm程度外部磁場が侵入している。横磁場に対する侵入距離よりも長いのは、(3.6)と(3.13)式から予想できる。これらの距離は、中性化セル磁気シールドの全長175.35cmの約1/3にもなっていることに注意する必要がある。下イオン源軸での分布で中性化セル磁気シールドの中心付近で0.3G程度のピークをもつのは、横磁場の場合と同じく、内外層にあげられた2個の孔のせいであると考えられる。中性化セル磁気シールド内の縦磁場の最小値は、0.05Gである。さらにイオン源側に向かうと  $|B_z'|$  は増加し、イオン源部接続フランジ付近でピークをもつ。ピーク値は、下イオン源軸で4.15G、上イオン源軸で4.6Gに達する。このピークが発生する理由は、5.1.2で1/10モデルを使用した実験でもピークが表われたが(第8図-(a))、その理由と同じである。但し、今回は第1打消コイルも使用されたために、ピーク値は、第8図-(a)、(b)の時より小さく、縦磁場、横磁場とも約

半分になっている。さらにイオン源磁気シールド内に入ると縦磁場は減少し、下イオン源軸ではイオン源接地電極で 1.5 G , プラズマ生成部で 1 G となっており、上イオン源軸では各々 1.75 G , 1.25 G となっている。

### 6.3 縦磁場の影響の検討

前節でみたように、横磁場についての測定結果は、設計時の目標を満たしており問題ない。縦磁場は、イオンビーム全体の走る方向と平行であるから、ビーム全体の軌道に影響を与えるとは考えられない。しかし、微視的に考えると、イオン源加速電極の各孔から出るビームレットは種々の方向を向いたイオン粒子から構成されており、それらの粒子の大部分はイオン源軸とは平行でない方向の速度成分ももつ。従って、縦磁場は個々のイオン粒子のイオン源軸と垂直な方向の速度成分に作用して、その軌道に影響を与え、ビームレットの発散を大きくするように働く。その程度を見積もってみる。

初速  $v_0$  (m/s) で、イオン源軸と  $1^\circ$  の角度で、イオン源電極孔から出たイオンが、第 23 図 - (a) のような磁場中を通過したら、イオン源部接続フランジ付近の比較的大きい  $Bz'$  によりどの程度角度が増加するか計算する。

$$\text{初期条件: } \vec{v}(t=0) = (v_0 \sin 1^\circ, 0, v_0 \cos 1^\circ) \quad (6.1)$$

$$\text{運動方程式 } m \frac{d\vec{v}}{dt} = e (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (6.2)$$

磁場は、 $0 \leq z' \leq 80$  cm の範囲で平均として、

$$\begin{cases} Bx' \simeq 0.5 \text{ G} \\ Bz' \simeq 3 \text{ G} \\ By' = 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

とする。(6.1), (6.3) の条件で (6.2) を解くと、

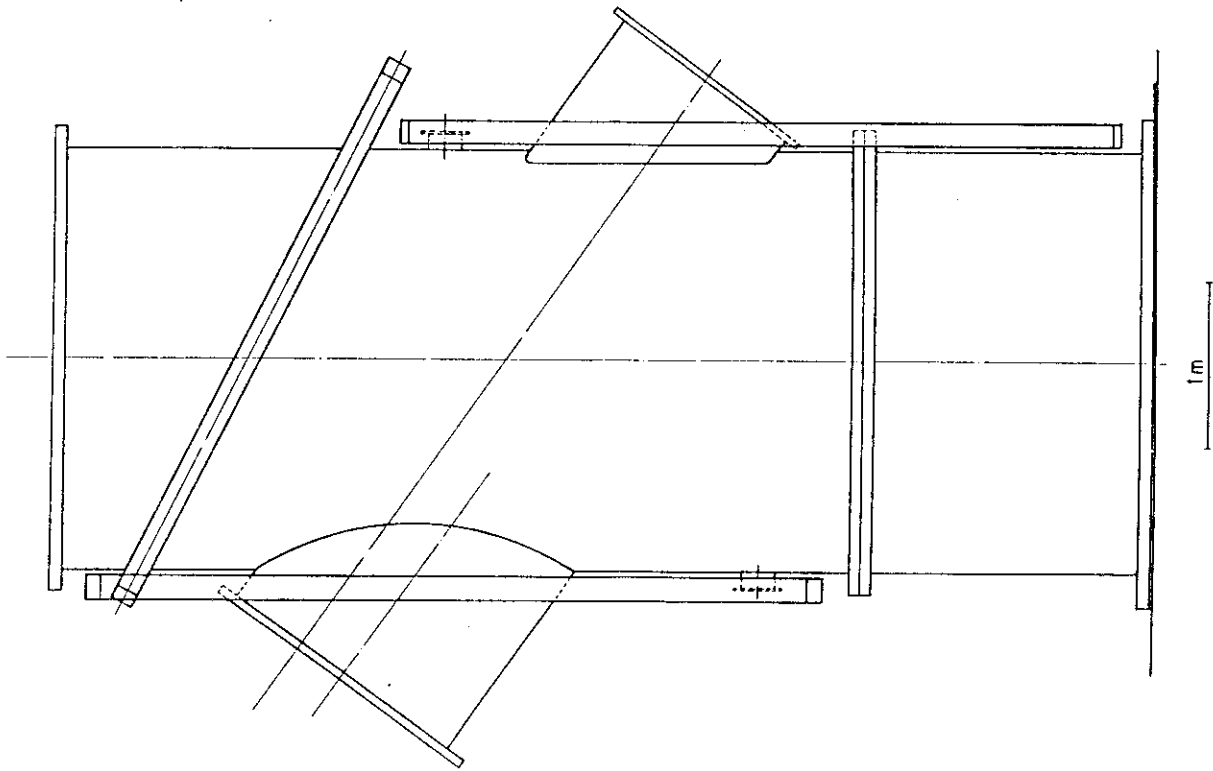
$$\begin{cases} v_x' = v_0 \left[ \left( \sin 1^\circ - \frac{Bx'}{Bz'} \cos 1^\circ \right) \cos \omega_z t + \frac{Bx'}{Bz'} \cos 1^\circ \right] \\ v_y' = -v_0 \left( \sin 1^\circ - \frac{Bx'}{Bz'} \cos 1^\circ \right) \sin \omega_z t \\ v_z' = v_0 \cos 1^\circ \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\omega_z = \frac{e Bz'}{m} \quad (6.5)$$

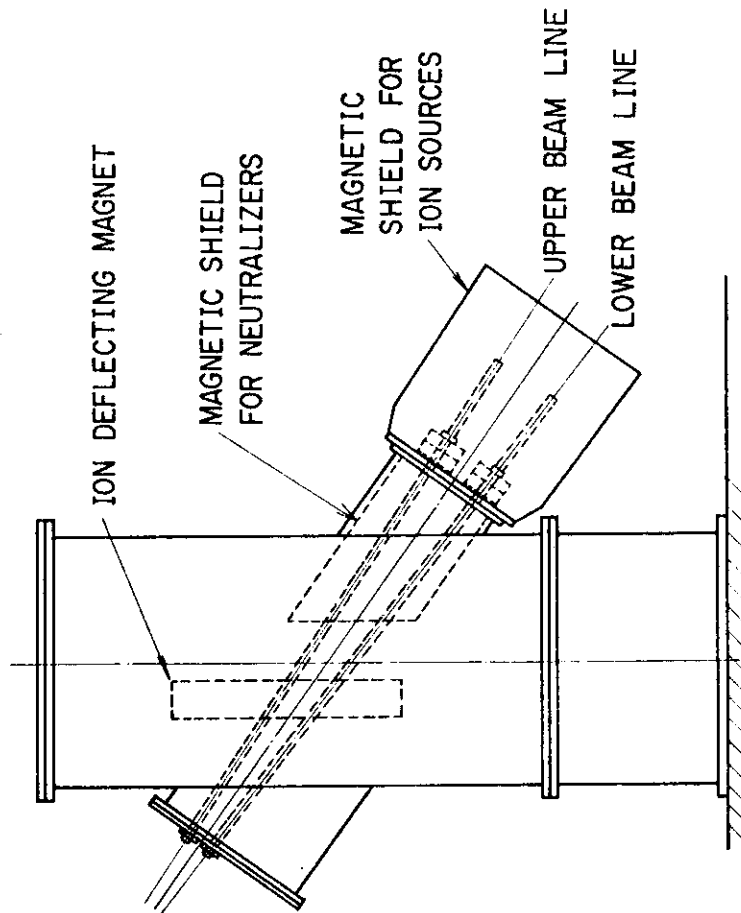
となる。加速エネルギー 75 keV の水素原子イオンが 80 cm の距離を通過した時に、イオンの速度がイオン源軸となす角度を  $\theta$  とすると、

$$\cos \theta = \frac{v_z}{|\vec{v}|} = \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \quad (6.6)$$

となる。この式から、 $\theta = 1.01^\circ$  が求まる。即ち、第 23 図 - (a) のようなイオン源部接続フランジ付近の  $Bz'$  により、イオン源から  $1^\circ$  の角度で出発したイオンの角度は  $0.01^\circ$  程度増加する。この程度の発散の増加は、実用上問題とならない。

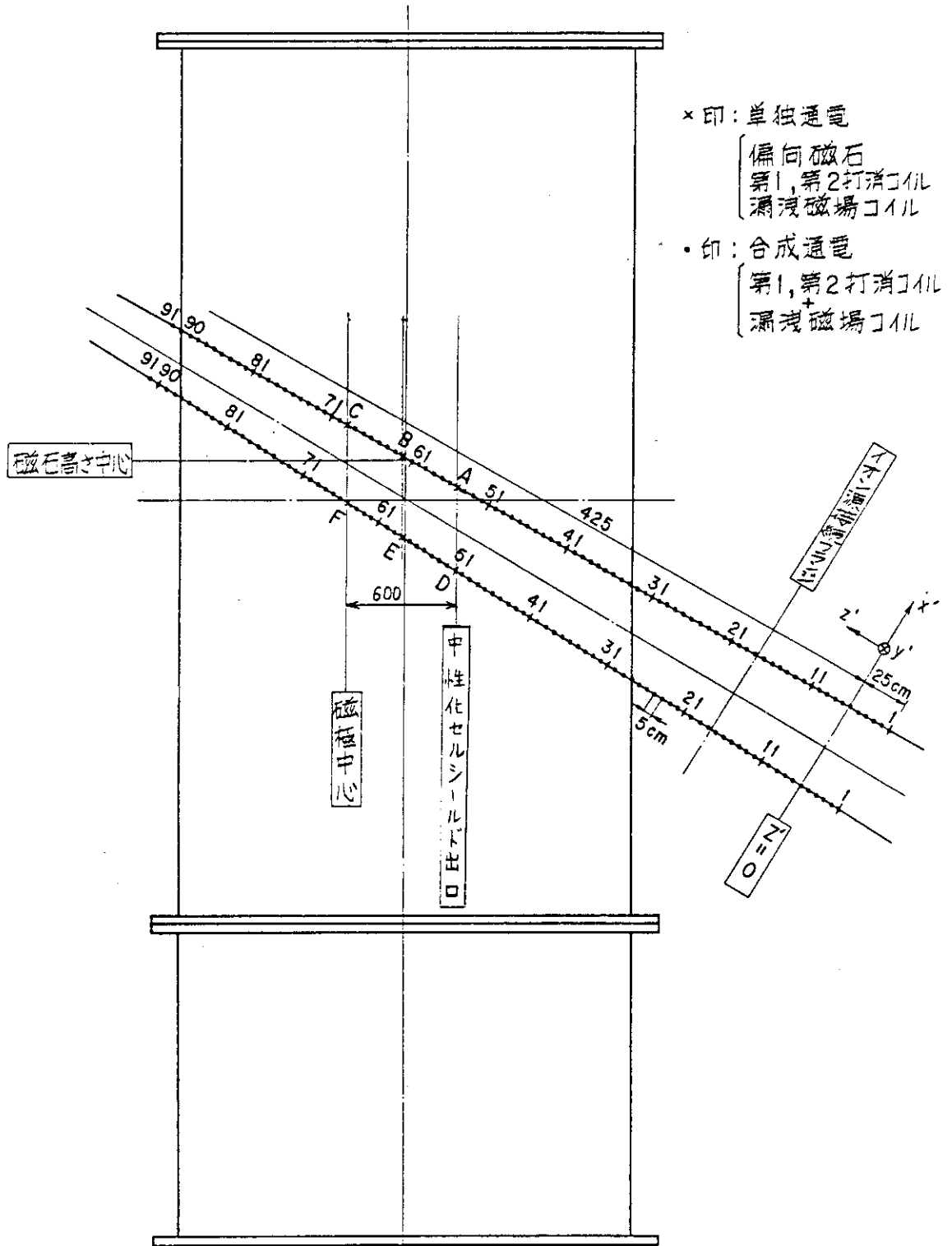


第20図：原型ユニットでの模擬漏洩磁場発生コイルの固定位置

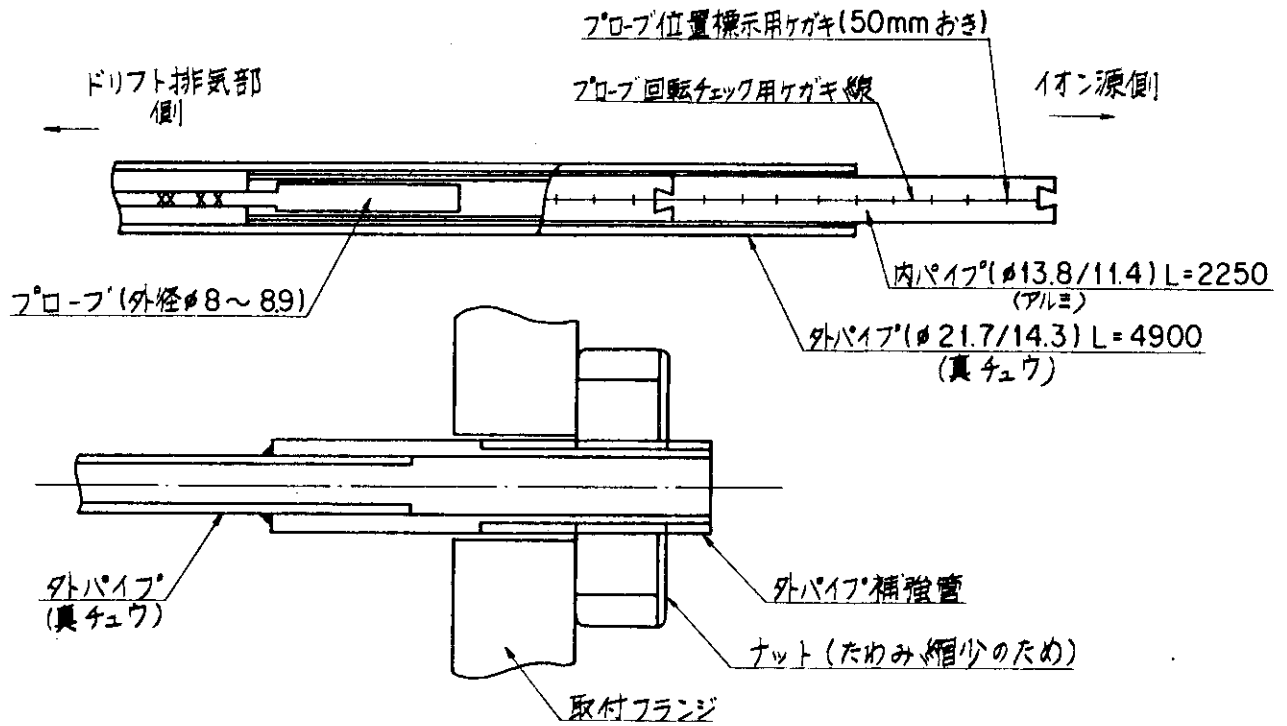


第19図：原型ユニットでの各磁性体の位置関係。

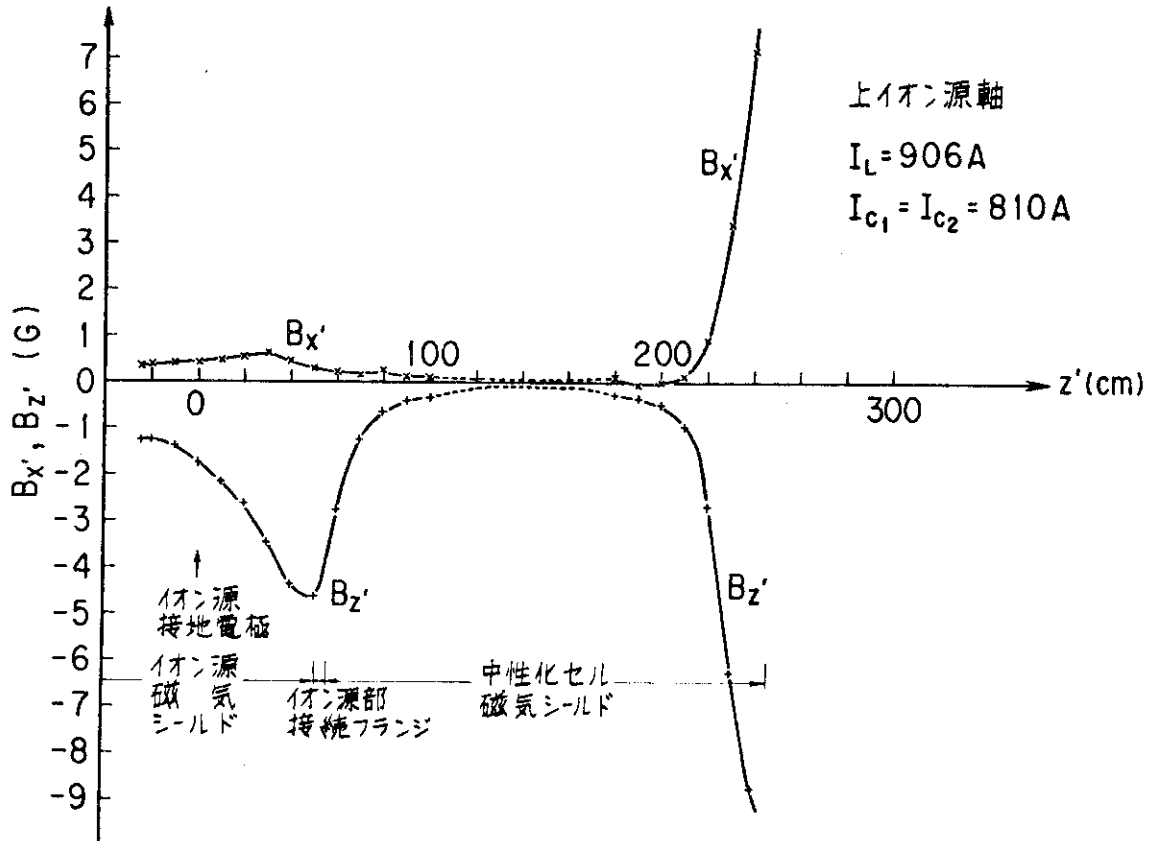
磁場分布測定点



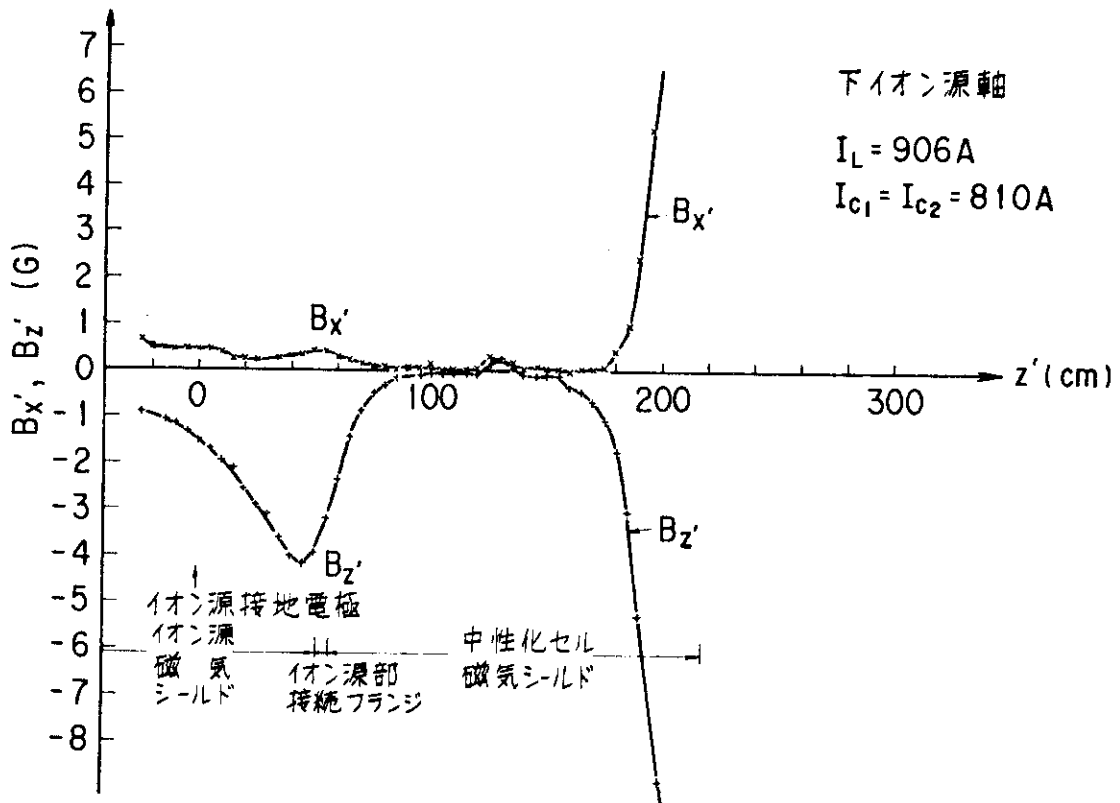
第21図: 原型ユニットでの磁場分布測定点と座標系。



第 22 図：原型ユニットでの磁場分布測定に使用された磁気プローブ掃引用治具。



第23図一(a)：模擬漏洩磁場発生コイルと第1，第2打消コイルに通電した場合の上イオン源軸に沿っての磁場分布測定結果。 $B_{x'}$  はビーム軸に垂直な磁場成分， $B_{z'}$  は平行な磁場成分を表わす。



第23図一(b)：第23図(a)と同条件での下イオン源軸に沿っての磁場分布測定結果。

## 7. ま と め

JT-60用中性粒子入射加熱装置のイオン源から中性化セル出口までの領域の磁気シールドを設計し、試験した。イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも二層シェルとし、外層は電磁軟鉄、内層はミュメタルとした。1/10モデルを用いた磁気飽和実験の後、イオン源磁気シールド外層は15 mm厚、内層は5 mm厚とし、中性化セル磁気シールドについては、各々24 mm厚、5 mm厚とした。イオン源部接続フランジに、一部電磁軟鉄を使用して、イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドを磁氣的に結合するようにした。

原型ユニットで、模擬漏洩磁場コイルと第1、第2打消コイルに通電した場合の上下イオン源軸に沿っての磁場分布を測定した。その結果、イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも設計目標以上の遮蔽度を示すことがわかった。横磁場については、イオン源磁気シールド中心で0.5～0.6 G、中性化セル磁気シールド中心で0.01～0.3 Gの磁場値が得られ、問題のないことがわかった。

### 謝 辞

磁気シールドの設計、試験に際し、協力あるいは有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室、JT-60第4開発室の皆様へ感謝致します。1/10モデル製作に際し、有益な助言と協力を頂いた東京芝浦電機株式会社エネルギー技術研究所の田辺義雄氏、また1/4モデル製作とその磁場分布測定、原型ユニットでの磁場分布測定で終始協力して頂いた日立国分工場の打越祐一氏をはじめ、変検グループ、NXグループの諸氏へ感謝致します。

開発の初期段階から不断の激励を頂いた田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合研究開発推進センター長に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 松岡, 堀池, 伊藤, 松田, 田中: JAERI-M 9599 (1981)
- 2) 伊藤, 奥村, 田中: 物理学会1978年秋の分科会予稿集4, P. 135.
- 3) 松田, 荒川, 堀池, 伊藤, 河合, 近藤, 森田, 小原, 大賀, 奥村, 桜庭, 柴田, 白形, 田中: JAERI-M 7655 (1978).
- 4) 小笠原武: 日本物理学会誌 28, 1041 (1973).
- 5) 吉田英俊, 岸本浩: 私信
- 6) A. P. Wills : Phys. Rev. 9, 193 (1899).
- 7) A. Mager : Z. angew. Phys. 23, 381 (1967).
- 8) A. Mager : ETZ-A 89, 11, (1968).
- 9) 東北金属株式会社カタログ: 「TM合金」 cat. No. MT-03.
- 10) 伊藤, 堀池, 栗山, 松田, 松岡, 田中: JAERI-M 82-131 (1982)



## 7. ま と め

JT-60用中性粒子入射加熱装置のイオン源から中性化セル出口までの領域の磁気シールドを設計し、試験した。イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも二層シェルとし、外層は電磁軟鉄、内層はミュメタルとした。1/10モデルを用いた磁気飽和実験の後、イオン源磁気シールド外層は15 mm厚、内層は5 mm厚とし、中性化セル磁気シールドについては、各々24 mm厚、5 mm厚とした。イオン源部接続フランジに、一部電磁軟鉄を使用して、イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドを磁氣的に結合するようにした。

原型ユニットで、模擬漏洩磁場コイルと第1、第2打消コイルに通電した場合の上下イオン源軸に沿っての磁場分布を測定した。その結果、イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも設計目標以上の遮蔽度を示すことがわかった。横磁場については、イオン源磁気シールド中心で0.5～0.6 G、中性化セル磁気シールド中心で0.01～0.3 Gの磁場値が得られ、問題のないことがわかった。

### 謝 辞

磁気シールドの設計、試験に際し、協力あるいは有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室、JT-60第4開発室の皆様へ感謝致します。1/10モデル製作に際し、有益な助言と協力を頂いた東京芝浦電機株式会社エネルギー技術研究所の田辺義雄氏、また1/4モデル製作とその磁場分布測定、原型ユニットでの磁場分布測定で終始協力して頂いた日立国分工場の打越祐一氏をはじめ、変検グループ、NXグループの諸氏へ感謝致します。

開発の初期段階から不断の激励を頂いた田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合研究開発推進センター長に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 松岡, 堀池, 伊藤, 松田, 田中: JAERI-M 9599 (1981)
- 2) 伊藤, 奥村, 田中: 物理学会1978年秋の分科会予稿集4, P. 135.
- 3) 松田, 荒川, 堀池, 伊藤, 河合, 近藤, 森田, 小原, 大賀, 奥村, 桜庭, 柴田, 白形, 田中: JAERI-M 7655 (1978).
- 4) 小笠原武: 日本物理学会誌 28, 1041 (1973).
- 5) 吉田英俊, 岸本浩: 私信
- 6) A. P. Wills : Phys. Rev. 9, 193 (1899).
- 7) A. Mager : Z. angew. Phys. 23, 381 (1967).
- 8) A. Mager : ETZ-A 89, 11, (1968).
- 9) 東北金属株式会社カタログ: 「TM合金」 cat. No. MT-03.
- 10) 伊藤, 堀池, 栗山, 松田, 松岡, 田中: JAERI-M 82-131 (1982)

## 7. ま と め

JT-60用中性粒子入射加熱装置のイオン源から中性化セル出口までの領域の磁気シールドを設計し、試験した。イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも二層シェルとし、外層は電磁軟鉄、内層はミュメタルとした。1/10モデルを用いた磁気飽和実験の後、イオン源磁気シールド外層は15 mm厚、内層は5 mm厚とし、中性化セル磁気シールドについては、各々24 mm厚、5 mm厚とした。イオン源部接続フランジに、一部電磁軟鉄を使用して、イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドを磁氣的に結合するようにした。

原型ユニットで、模擬漏洩磁場コイルと第1、第2打消コイルに通電した場合の上下イオン源軸に沿っての磁場分布を測定した。その結果、イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールドとも設計目標以上の遮蔽度を示すことがわかった。横磁場については、イオン源磁気シールド中心で0.5～0.6 G、中性化セル磁気シールド中心で0.01～0.3 Gの磁場値が得られ、問題のないことがわかった。

### 謝 辞

磁気シールドの設計、試験に際し、協力あるいは有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室、JT-60第4開発室の皆様へ感謝致します。1/10モデル製作に際し、有益な助言と協力を頂いた東京芝浦電機株式会社エネルギー技術研究所の田辺義雄氏、また1/4モデル製作とその磁場分布測定、原型ユニットでの磁場分布測定で終始協力して頂いた日立国分工場の打越祐一氏をはじめ、変検グループ、NXグループの諸氏へ感謝致します。

開発の初期段階から不断の激励を頂いた田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合研究開発推進センター長に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 松岡, 堀池, 伊藤, 松田, 田中: JAERI-M 9599 (1981)
- 2) 伊藤, 奥村, 田中: 物理学会1978年秋の分科会予稿集4, P. 135.
- 3) 松田, 荒川, 堀池, 伊藤, 河合, 近藤, 森田, 小原, 大賀, 奥村, 桜庭, 柴田, 白形, 田中: JAERI-M 7655 (1978).
- 4) 小笠原武: 日本物理学会誌 28, 1041 (1973).
- 5) 吉田英俊, 岸本浩: 私信
- 6) A. P. Wills : Phys. Rev. 9, 193 (1899).
- 7) A. Mager : Z. angew. Phys. 23, 381 (1967).
- 8) A. Mager : ETZ-A 89, 11, (1968).
- 9) 東北金属株式会社カタログ: 「TM合金」 cat. No. MT-03.
- 10) 伊藤, 堀池, 栗山, 松田, 松岡, 田中: JAERI-M 82-131 (1982)