

JAERI - M
91-112

MTX用大出力マイクロ波電界測定装置の磁気遮蔽

1991年7月

山田 進一^{*1}・小田島和男・石田 裕康^{*2}・加根魯和宏^{*3}
守 和彦^{*1}・大森 俊道^{*3}・尾田 年充^{*4}・大麻 和美
小川 俊英・星野 克道・James H. FOOTE^{*5}・David NILSON^{*5}

MTX 用大出力マイクロ波電界測定装置の磁気遮蔽

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

山田 進一^{*1}・小田島和男・石田 裕康^{*2}・加根魯和宏^{*3}
守 和彦^{*1}・大森 俊道^{*3}・尾田 年充^{*4}・大麻 和美
小川 俊英・星野 克道・James H. FOOTE^{*5}
David NILSON^{*5}

(1991年6月13日受理)

日米協力MTX計画で、原研はプラズマ中における自由電子レーザー(FEL)からのマイクロ波電界を測定するシステム(LAPPS=Laser Aided Particle Probe Spectroscopy)を製作する。本論文ではそのシステムに使用される磁気シールドの設計及び試験結果についてのべる。

MTXは現在稼働中のトカマクでは最大のトロイダル磁場強度をもつトカマクである。LAPPSではこの近傍にヘリウム中性粒子ビーム源やフォトマルを設置するため、1000 Gレベルの磁場を0.1 Gのオーダーまで遮蔽する必要がある。そのため遮蔽材として1989年日本鋼管で開発された高透磁率鋼フェロパームとパーマロイPCを用いた。

この1000 Gレベルの領域では磁性体は飽和領域にあり、通常の線形計算が出来ない領域である。本論文においては磁性体を多層に分割して遮蔽計算を行う「仮想分割遮蔽計算法」を開発し必要とされる磁性体の厚みを概略決定した。その結果を3次元静磁場解析コードと比較検討し、さらに一様静磁場中での測定結果と比較した。その結果、磁気飽和領域においても「仮想分割遮蔽計算法」はコンピュータシミュレーションを行う前段階での概略寸法の決定に有効であることを示した。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

- * 1 理研イーエムシー(株)
- * 2 東北大学工学部
- * 3 NKK(日本鋼管(株))
- * 4 広島大学工学部
- * 5 ローレンスリバモア 国立研究所, 米国

Magnetic Shielding
for FEL Microwave Electric Field Diagnostic in MTX Tokamak

Shinichi YAMADA*1, Kazuo ODAJIMA, Hiroyasu ISHIDA*2
Kazuhiro KANERO*3, Kazuhiko MORI*1, Toshimichi OMORI*3
Toshiatu ODA*4, Kazumi OHASA, Toshihide OGAWA
Katsumichi HOSHINO, James H. FOOTE*5 and David NILSON*5

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

(Received June 13, 1991)

A diagnostic system for measurement of microwave electric field from free electron laser (FEL) is in preparation at JAERI under JAERI-DOE collaborative program in the Microwave Tokamak Experiment (MTX) being held at Lawrence Livermore National Laboratory in U.S.A.. That is called LAPPS(Laser Aided Particle Probe Spectroscopy). This is consist of helium neutral beam source, a dye laser and viewing optics. It is required that 1000 gauss of the magnetic field must be shielded to less than 1 gauss in order to operate these LAPPS components. New high performance soft ferrous magnetic material " FERROPERM " and PERMALLOY are used on this purpose.

This paper proposes a new method to estimate a required thickness of the magnetic shielding in a saturated region of B-H curve, that is, "magnetic shielding calculation by Virtual Divided Layers Method (VDLM)", where the shielding layer is virtually divided in many layers

*1 Riken EMC Inc.

*2 Faculty of Engineering, Tohoku University

*3 Nippon Kokan K.K

*4 Faculty of Engineering, Hirosima University.

*5 Lawrence Livermore National Laboratory, U.S.A.

in the calculation. The results are compared with a computer simulation using "three dimensional static magnetic field code" and with experimental results in a uniform static field.

Keywords: MTX Tokamak, Laser Aided Plasma Diagnostic, Magnetic Shielding, Magnetic Material

目 次

1. はじめに	1
2. MTX 計画の概要と LAPPS	1
2.1 MTX 計画	1
2.2 LAPPS	3
2.3 外部磁場分布と遮蔽度	3
2.4 フェロパーム (FERROPERM) の磁気特性	4
3. 仮想分割遮蔽計算法による設計	11
3.1 フォトマルの仮想分割遮蔽計算法による設計	12
3.2 中性化セルの仮想分割遮蔽計算法による設計	16
3.3 イオン源タンクの仮想分割遮蔽計算法による設計	19
4. 磁気遮蔽のコンピュータシミュレーション	24
4.1 磁気遮蔽円筒を 3次元 8 節点要素により分割したシミュレーション	24
4.2 対称条件を用いたシミュレーション	25
4.3 メッシュ分割の粗さの影響	26
5. 磁気遮蔽実験	32
5.1 実験装置の概要	32
5.2 磁気遮蔽実験	33
6. まとめと結論	46
謝 辞	48
参考文献	48

Contents

1. Introduction	1
2. MTX Project and LAPPS	1
2.1 MTX Project	1
2.2 LAPPS (Laser Aided Particle Probe Spectroscopy)	3
2.3 Magnetic Field Distribution and Required Shielding	3
2.4 Magnetic Characteristics of FERROPERM	4
3. Shielding Design using Virtual Divided Layers Method (VDLM)	11
3.1 Design of Photomultiplier by VDLM	12
3.2 Design of Neutralizer Cell by VDLM	16
3.3 Design of Ion Source Tank by VDLM	19
4. Computer Simulation for Magnetic Shielding	24
4.1 Simulation of Shielding Cylinder by 8 Azimuthal Mesh	24
4.2 Simulation using Axisymmetric Condition	25
4.3 Effect of Roughness in Mesh	26
5. Experimental Results in Uniform Static Magnetic Field	32
5.1 Description of Experimental Device	32
5.2 Magnetic Shielding Experiments	33
6. Summary and Conclusions	46
Acknowledgements	48
References	48

1. はじめに

核融合プラズマの磁気閉込め実験においては、閉込め装置の近傍にもかなりのレベルの磁場が漏洩する。プラズマの加熱や、計測に用いられる中性粒子入射装置 (NBI) はビームの発散が小さい領域で使用するためできるだけ装置の近くに設置することが要求される。この装置はイオン源と引出したイオンビームを荷電交換によって中性化する中性化セルとからなる。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の密度の均一性が悪化したりする。また引出し電極、中性化セルにおいては磁場の影響により加速されるイオンの軌道がずれ、ビームの軸がずれたり、発散特性が悪化したり、さらには予期せぬ場所にビームがあたり機器を損傷したりする。そのため、イオン源の領域では数 G、中性化セルの領域では 0.1 G 程度まで磁場を落とす必要がある。

フォトマルは光を電気信号に変える電子管で、地磁気レベルの磁場中でも感度が悪化する。核融合実験装置においては分光測定をはじめとしてシンチレーターを用いた X 線計測、中性子計測に用いられ、0.5 G 程度まで磁場を落とす必要がある。

これらの装置が設置される領域は典型的には数十から数百ガウス、時には 1 キロガウス以上にもなる。この磁場領域では純鉄でも磁気飽和領域にあり、外部磁場の増大につれ透磁率が急激に減少していく。このような領域ではこれまで行われてきたように透磁率を一定において磁気遮蔽度を計算することはできない。しかし磁気シールドの設計においてはコンピュータコードで計算する場合でも概略のシールド材の厚みをあらかじめ決定しておく必要がある。

本論文では磁性体を多層に分割して、それぞれの層での透磁率を用いて計算する「仮想分割遮蔽計算法」を開発し、日米協力 MTX 計画に用いる FEL マイクロ波電界測定装置の磁気シールドに適用した。その結果をコンピュータによる 3 次元静磁場解析コードによる計算結果と比較した。さらに実機を製作して一様磁場中でシールド効果を測定して 2 種類の計算結果と比べた。

2. MTX 計画の概要と LAPPS

2.1 MTX 計画

制御核融合をこの地上で実現するためには、炉心を構成するプラズマをある一定時間以上閉込め、温度を 10 keV 以上まで加熱する必要がある。さらに現在核融合炉に最も近いプラズマを達成しているトカマク型の装置ではプラズマの閉込めの平衡磁場を形成するためにプラズマに電流を流す必要がある。このプラズマ電流は通常変流器の誘導電流によっている。すなわちプラズマは変流器の 2 次巻線に相当するわけである。従って通常のトカマクでは原理的に定常電流を流す

1. はじめに

核融合プラズマの磁気閉込め実験においては、閉込め装置の近傍にもかなりのレベルの磁場が漏洩する。プラズマの加熱や、計測に用いられる中性粒子入射装置 (NBI) はビームの発散が小さい領域で使用するためできるだけ装置の近くに設置することが要求される。この装置はイオン源と引出したイオンビームを荷電交換によって中性化する中性化セルとからなる。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の密度の均一性が悪化したりする。また引出し電極、中性化セルにおいては磁場の影響により加速されるイオンの軌道がずれ、ビームの軸がずれたり、発散特性が悪化したり、さらには予期せぬ場所にビームがあたり機器を損傷したりする。そのため、イオン源の領域では数 G、中性化セルの領域では 0.1 G 程度まで磁場を落とす必要がある。

フォトマルは光を電気信号に変える電子管で、地磁気レベルの磁場中でも感度が悪化する。核融合実験装置においては分光測定をはじめとしてシンチレーターを用いた X 線計測、中性子計測に用いられ、0.5 G 程度まで磁場を落とす必要がある。

これらの装置が設置される領域は典型的には数十から数百ガウス、時には 1 キログauss 以上にもなる。この磁場領域では純鉄でも磁気飽和領域にあり、外部磁場の増大につれ透磁率が急激に減少していく。このような領域ではこれまで行われてきたように透磁率を一定において磁気遮蔽度を計算することはできない。しかし磁気シールドの設計においてはコンピュータコードで計算する場合でも概略のシールド材の厚みをあらかじめ決定しておく必要がある。

本論文では磁性体を多層に分割して、それぞれの層での透磁率を用いて計算する「仮想分割遮蔽計算法」を開発し、日米協力 MTX 計画に用いる FEL マイクロ波電界測定装置の磁気シールドに適用した。その結果をコンピュータによる 3 次元静磁場解析コードによる計算結果と比較した。さらに実機を製作して一様磁場中でシールド効果を測定して 2 種類の計算結果と比べた。

2. MTX 計画の概要と LAPPS

2.1 MTX 計画

制御核融合をこの地上で実現するためには、炉心を構成するプラズマをある一定時間以上閉込め、温度を 10 keV 以上まで加熱する必要がある。さらに現在核融合炉に最も近いプラズマを達成しているトカマク型の装置ではプラズマの閉込めの平衡磁場を形成するためにプラズマに電流を流す必要がある。このプラズマ電流は通常変流器の誘導電流によっている。すなわちプラズマは変流器の 2 次巻線に相当するわけである。従って通常のトカマクでは原理的に定常電流を流す

ことができないので、定常的なトカマク型核融合炉を作るためには他の方法で電流を流すことが必要である。

プラズマの加熱・電流駆動の方法としていくつか提案されている。とりわけ電子サイクロトロン共鳴を用いた加熱法 (ECRH) では、導波管が使えてアンテナから放射された波は電磁波モードとしてプラズマ中に伝播するので、プラズマ表面のパラメータに依存せず、他の高周波加熱法で問題となった不純物混入等の問題もなく、加熱入力密度を高くとれる。このように ECRH は非常に有効な加熱法であるが、核融合炉で必要となる 100 GHz 以上の周波数帯には、MW レベルの出力を持つ高出力の発振器がなかった。

自由電子レーザー (FEL) はこれからの ECRH に要求される数百 GHz・MW レベルのミリ波源になりうると同時に、発振周波数が可変、大電力の入射密度が可能などの核融合炉にとって魅力的な特徴を有している。

このミリ波 FEL をトカマクプラズマの加熱と電流駆動に使用する実験的研究が MTX (Microwave Tokamak eXperiment) 計画として米国ローレンスリバモア国立研究所 (Lawrence Livermore National Laboratory = LLNL) において進行中である。¹⁾ これは同研究所で長年にわたって開発してきた線形誘導加速器を用いた高出力ミリ波 FEL の開発見通しがえられ、それをプラズマの加熱に用いてその特性を明らかにし、FEL マイクロ波のトカマクへの応用についての適合性を確認することを目的としている。原研はこの計画のスタート時より参画し、現在は日米協力協定に基づいてこの MTX 計画を一緒に推進している。

図 2.1 に MTX 計画の全体構成を示す。ターゲットとなるトカマクは MIT において数多くの実績を上げてきた超高磁場トカマク ALCATOR-C を LLNL に搬入・再組立てをしてこの目的に用いる。これは大半径 0.64 m、小半径 0.16 m とサイズは小形ながら最大 11 T のトロイダル磁場を持ち、プラズマ電流 550 kA と中型装置なみの性能を持つトカマクである。

また、用いる FEL は線形誘導加速器を用い、ビームエネルギー 10 MeV、電流 2～3 kA、パルス幅 20～50 ns で繰返しは 5 kHz である。ウィグラーは 140 GHz (将来 250 GHz の計画がある)、ピーク電力は 2～10 GW である。

89 年夏、1 ショットあたり 1 パルスの FEL の発振とプラズマのマイクロ波吸収実験が行われた。そのときのパラメータは、5.8 MeV、1.6 kA のビームで、周波数 139.5 GHz、励振電力 20 W の EIO を用いて、約 150 MW のピーク電力の FEL パルスがプラズマに入射された。入射口の対向面に置かれたカロリメーターでプラズマを透過してくるマイクロ波を測定することにより、プラズマによる吸収を推定した。その結果は 1 W レベルの同様の実験結果と比べられ、密度依存性がほぼ同じであることから少なくとも 150 MW レベルまではピーク電力が大きいことによる影響が出ていない事が認められた。このときのパルス幅は 10～20 ns であり、入射エネルギーは 1 ジュール程度でプラズマからの応答は検出できていない。

同時にウィグラーにテーパーをつけて出力を改善する実験も行われ、200～400 MW のピーク電力で出力が飽和していることが認められた。現在当初目的の 1～2 GW のピーク電力で 5 kHz の繰返しパルスモードを達成するべくビームラインの改良、ジャイロトロンを用いて励振電力の増力及びウィグラー、の改善を行っている。

2.2 LAPPS

プラズマ中のギガワットレベルのピーク電力をもつ FEL マイクロ波の電界をレーザー誘起蛍光法を用いて測定する装置で Laser Aided Particle Probe Spectroscopy の略である。この概念図を図 2.2 に示す。ヘリウム中性粒子ビーム源よヘリウム原子をプラズマ中の測定領域に打込む。そこに発振波長が自由に可変できる色素レーザー光を照射して、ヘリウム原子を禁制帯を近くにもつ準位まで共鳴励起し、これより放出される誘起蛍光を光学系により検出する。このときマイクロ波の電界がある場合は、シュタルク効果（光源が電界中に置かれたときスペクトル線が分岐する現象）により本来禁制線である準位間の遷移があらわれる。この遷移の確率は電場の強さに依存するので、禁制遷移の強度測定から電場の強さが決定できる。²⁾

プラズマに入射された FEL マイクロ波はプラズマ中を電磁波モードの波として伝播し、サイクロトロン共鳴層の近傍でプラズマと相互作用を起こし、吸収される。このマイクロ波の伝播路に沿って電界を測定することによりプラズマに吸収されたマイクロ波の空間分布を得ることが可能となる。これは FEL マイクロ波のプラズマによる吸収を直接測定により評価するもので、この MTX 実験において最も重要な測定の 1 つである。

図 2.3 に本測定システムの全体図を示す。ヘリウム中性粒子ビーム源は MTX の下部に設置され、50 keV、0.8 A のヘリウムイオンビームを引出し、中性化セルにおいて荷電交換によりビームを中性化する。ビームはプラズマ中心で約 20 mm 程度に集束させる。色素レーザーはエキシマレーザーで励起され、ミラー、レンズを通して伝送され、原研が設置した計測ボックス後方下部より入射される。ほぼ同方向より FEL マイクロ波ビームが入射される。

MTX トカマクの上下ポートは約 25 mm × 80 mm のいわゆるキーホールが大半径方向に 3 つ並んでいる非常に狭い特殊な配置になっている。光は前後 2 つのキーホールに分割して取入れミラーで光路を曲げ、集光し干渉フィルターによって分光、フォトマルで電気信号に変換する。中央のキーホールは中性粒子ビームが直接当たるため、ビームダンプをもうけてある。

2.3 外部磁場分布と遮蔽度

MTX トカマクはそのサイズは小型ながら中型装置並の磁場・電流を有しているため、漏れ磁場も大きい。図 2.4 は大半径のプラズマ中心の上下方向の磁場強度分布を示したものである。プラズマの条件は、140 GHz の FEL マイクロ波で加熱するときのターゲットプラズマを想定し、トロイダル磁場 5 T、プラズマ電流 320 kA である。大半径方向の磁場強度の変化は垂直方向に比べて小さいのでこの図の磁場強度分布を磁気シールドの設計データとする。図中にフォトマル、中性化セル、イオン源の位置を示した。

磁気遮蔽の設計は以下の設計方針にもとづいて行う。

- 1) 磁場強度はプラズマから遠ざかるほど小さくなり、それぞれの設置位置で均一ではないが、遮蔽の設計には安全をとり最大の値を用いる。図 2.4 より、それぞれ中性化セルは 750 G、フォトマルは 700 G (脚注)、イオン源は 250 G の位置にある。

脚注：フォトマル遮蔽の設計は 1000 G の磁場強度に対して行っている。これは光学系の設計の過程で、初期案よりフォトマルの位置が遠ざかったことによる。

2) 原則的に2層の遮蔽材を想定する。外層は鉄系の飽和磁束密度の高い材料を用い、内層はパーマロイ等の高透磁率材料を用いる。

3) シールドの内部形状、及び目標とする内部磁場

a) フォトマルの磁気遮蔽

内部に収納するフォトマルは外径2インチのものを使用する。従って本遮蔽は内径60φで、長さ100mmの領域を磁気遮蔽する。遮蔽後の内部磁場は浜松ホトニクスのカタログの試験データより、磁場が0の時の信号に対して95%以上の信号が得られる磁場強度を0.5Gとして、さらに小さい値を目指す。

b) 中性化セルの磁気遮蔽

中性化セルのダクトは内寸法、25mm×75mm（この値はビームが通過するMTXのキーホールと同じである）。長さは、MTXの下部に納めるため全長が制限されているので、出来るかぎり長くとることとして、700～800mm程度とする。磁気遮蔽の内部磁場は、イオンビームが磁場によって軌道を曲げられる事による損失を1%以下にするという条件より、目標値を0.15Gとする。³⁾

c) イオン源磁気遮蔽

50kVの高電圧に対する絶縁距離をイオン源まわりに20cm以上とる必要があるため、イオン源の軸に対して850φの空間が確保できるようにする。高さは同様にして、内側で1000mmをとる。内部磁場の目標値は、原研に於けるデュオピガトロン型イオン源での実験より（脚注1）1Gとする。³⁾ ただしこの目標値に対しては比較的根拠が薄く、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考えられる。³⁾ 従って設計計算による厚みが非常に厚くなる場合は10cm程度を限度とする。

2.4 フェロパーム（FERROPERM）の磁気特性

前節でも述べたように今回のLAPPSシステムは厳しい磁気シールドを施す必要がある。特に中性化セル部分と光学系（フォトマル）部分は、限られた空間でトカマクの発生する強磁界を地磁気レベル以下まで有効に抑えなければならないため2層構造により磁気シールドを行う。この場合、まず強磁界に晒される外層で十分な磁気シールドを行わないと、内層に用いるNi基高透磁率合金が飽和し機能しなくなることが考えられる。従って、限られた空間内で有効な磁気シールドを行うためには、外層に用いる磁気シールド材料に高い磁束密度が得られる鉄系磁性材料で、かつ透磁率、保磁力に優れたものを用いることが重要である。この考えから、これらの部分では具体的に、外層にフェロパーム、内層にパーマロイPC（脚注2）を用いた二重構造により磁気

脚注1：デュオピガトロン型イオン源に垂直に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様な現象は見られなかった。参考文献〔3〕。

脚注2：パーマロイPCはJISで規格化されたNi基の高透磁率合金で、通常は板厚1mm以下の薄板形状で流通している。今回使用したパーマロイPCは中性化セル、フォトマルいずれもNKKにより製造された数ミリの厚肉材よりそれぞれ角筒、円筒を作製した後、所定の熱処理を施したものである。

シールドを行うこととした。一方、中性化セル、フォトマルと比べて要求される遮蔽度が緩いイオンタンク部分ではフェロパームのみにより磁気シールドを行うこととした。

フェロパーム (NKK 商品名) は、鉄基 (Ferrous) 合金で、高透磁率 (High Permeability) 材料であることを表す新軟磁性材料である。⁴⁾

フェロパームの直流磁化特性例を表 2.1 に図 2.5, 2.6 にヒステリシス曲線と初磁化曲線をそれぞれ他の軟磁性材料データと比較して示す。これらから明らかなように、フェロパームは、i) 純鉄と同等の高飽和磁化、ii) パーマロイ PB に近い高透磁率 (低起磁力域で高磁束密度)、iii) 純鉄の 1/3 以下の低保磁力、の特徴を有している。

一般に軟磁性材料の特性向上のメカニズムは、物理的方法によるものと冶金的手法によるものに分類することができる。パーマロイ合金やセンダスト合金等の高合金系軟磁性材料は、図 2.7 (a) に示した物理的方法、すなわち磁歪、磁気異方性の低減により磁化が容易になるように合金設計がなされている。しかし、この場合、現状の知見では合金元素を多量に添加する必要があり、ボーア磁子数の減少に伴う飽和磁化 (磁束密度) の低下が必然的に起こる。

フェロパームでは、図 2.7 (b) に示した冶金的手法のうち、主に結晶粒界面積の低減を図ることで優れた直流磁化特性が得られるように合金設計が行われている。更に、最近の製鋼技術において、高純度化の技術進歩は著しく、不純物元素、特にフェロパームの直流磁化特性を阻害する C, N, O の十分な低減が可能となったこともフェロパームを開発するうえで重要な点であった。表 2.2 にフェロパームの化学成分例を示す。

一般には、不純物元素が十分除去された純鉄を高温で長時間焼鈍することにより結晶粒を大きく、すなわち結晶粒界面積を少なくすることができる。しかし、純鉄は約 900 °C に A₃ 変態 (フェライト・オーステナイト変態) が存在するため、900 °C を越える温度で焼鈍を行うと加熱保持の間に FCC 構造であるオーステナイト相の結晶粒成長を図ることはできるが、その後の冷却過程で BCC 構造であるフェライト相に変態する際、結晶の再配列に伴い細粒化する。従って、結果的に純鉄では通常の製造プロセスを用いて顕著な結晶粒の粗大化を図ることは困難である。

フェロパームは 1% の Al 添加により A₃ 変態を抑制した合金である。同様の効果は Si, Cr 等にも認められるが、Al の効果はこれらと比べて極めて強く、僅か 1% の添加で A₃ 変態を消失させ、合金を融点直下までフェライト単相とすることができる。従って、フェロパームでは、目的としているフェライト結晶の粒成長を 900 °C 以上の高温焼鈍により図ることができるので、これにより純鉄では困難であった顕著な粗大化が可能となる。フェロパームと純鉄の結晶粒の大きさを比較するためそれぞれのマイクロ組織写真を図 2.8 に示す。

今回の LAPPS システムの磁気シールドに用いたフェロパームは、1000 °C 以上で焼鈍を施されており、図の写真と同様にフェライト結晶粒の大きさは数ミリ以上に達している。これに対して純鉄では、0.1 ~ 0.3 mm 程度の大きさの結晶粒が得られるに過ぎない。この結晶粒の大きさの違い (粒界面積の差) が磁化過程において阻害度の違いとして、直流磁化特性の有意差をもたらしているものと考えられる。

尚、Al 添加は本質的に純鉄の飽和磁化 (磁束密度) を低下させるが、フェロパームの場合、その添加量は重量分率で 1% と少ないため実質的な影響はほぼ原子量分率に相当する約 2% と

極めて少ない。

以上述べたように、フェロパームは純鉄とパーマロイの長所を併せもった新軟磁性合金であり、今回のように限られた空間内で極めて高い磁界を地磁気レベル程度以下にシールドする、あるいはパーマロイ等と組み合わせて更に厳しい磁気シールド境界を作るうえで最適な磁気シールド材料であると考えられる。

表 2.1 FERROPERM, 純鉄, パーマロイ PB の直流磁化特性例

Materials	Thick. (mm)	μ max	Hc (Oe)	$B_{0.3}$ (G)	$B_{0.5}$ (G)	B_1 (G)	B_5 (G)	B_{25} (G)	B_{250} (G)
1 % alloy	15	66500	0.16	13200	14200	15000	15900	16900	20400
Pure iron	15	9600	0.76	300	1100	9600	15800	17000	20600
Permalloy B	0.6	76000	0.08	10800	11400	11800	13400	—	—

表 2.2 FERROPERM の化学成分例 (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	T.N	T.O
0.0020	0.09	0.04	0.007	0.0006	1.13	0.0010	0.0007

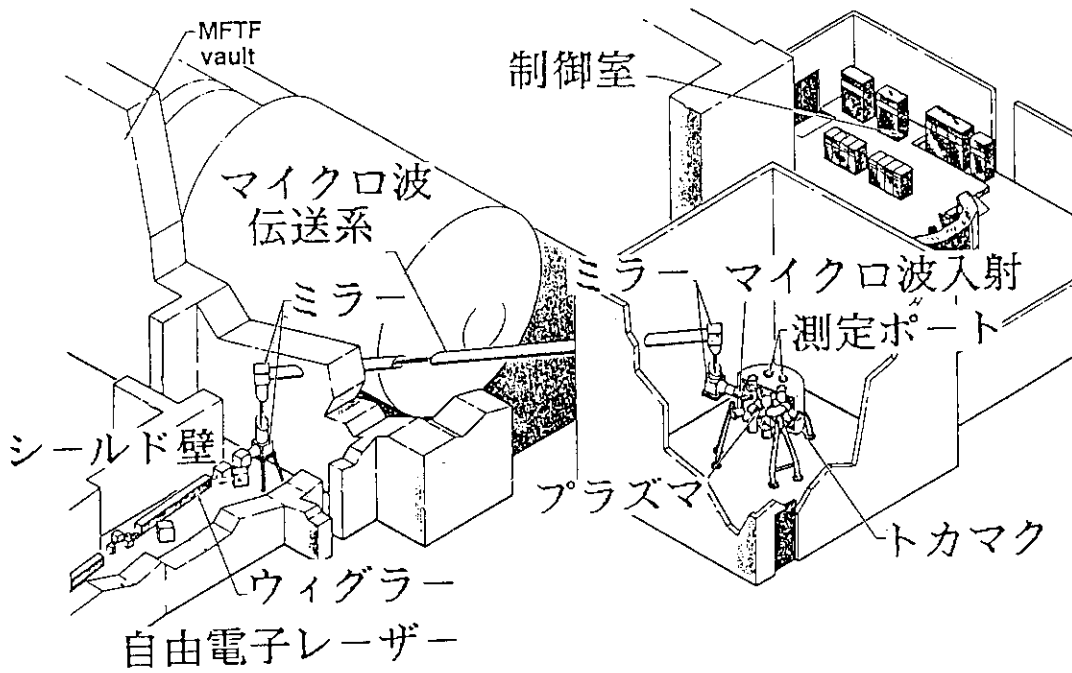


図 2.1 Microwave Tokamak Experiment (MTX) 構成図

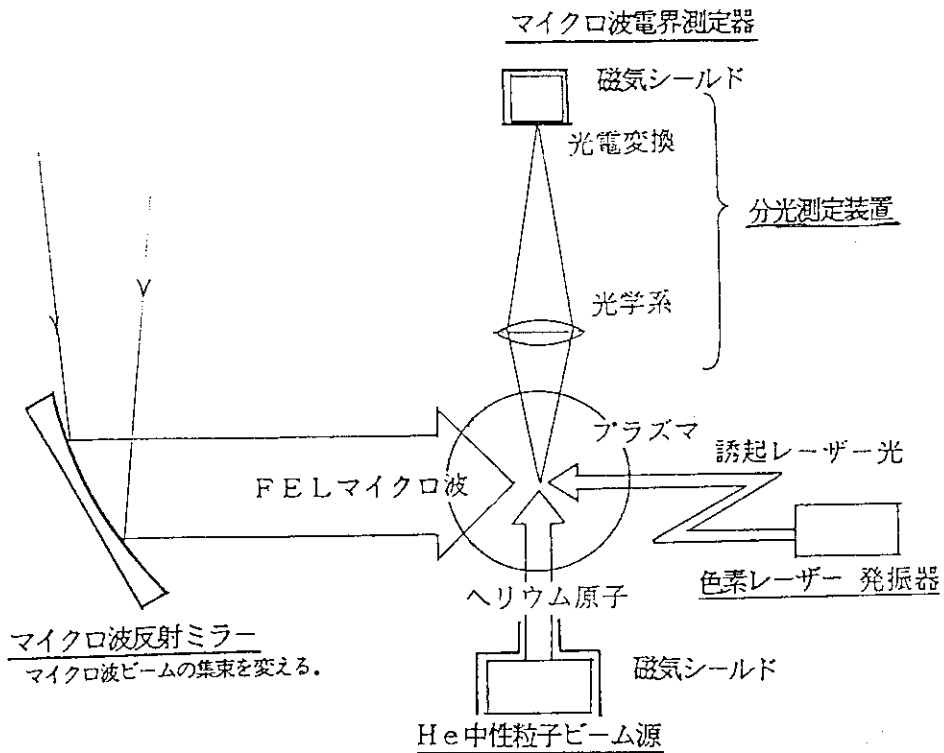


図 2.2 LAPPS の概念図

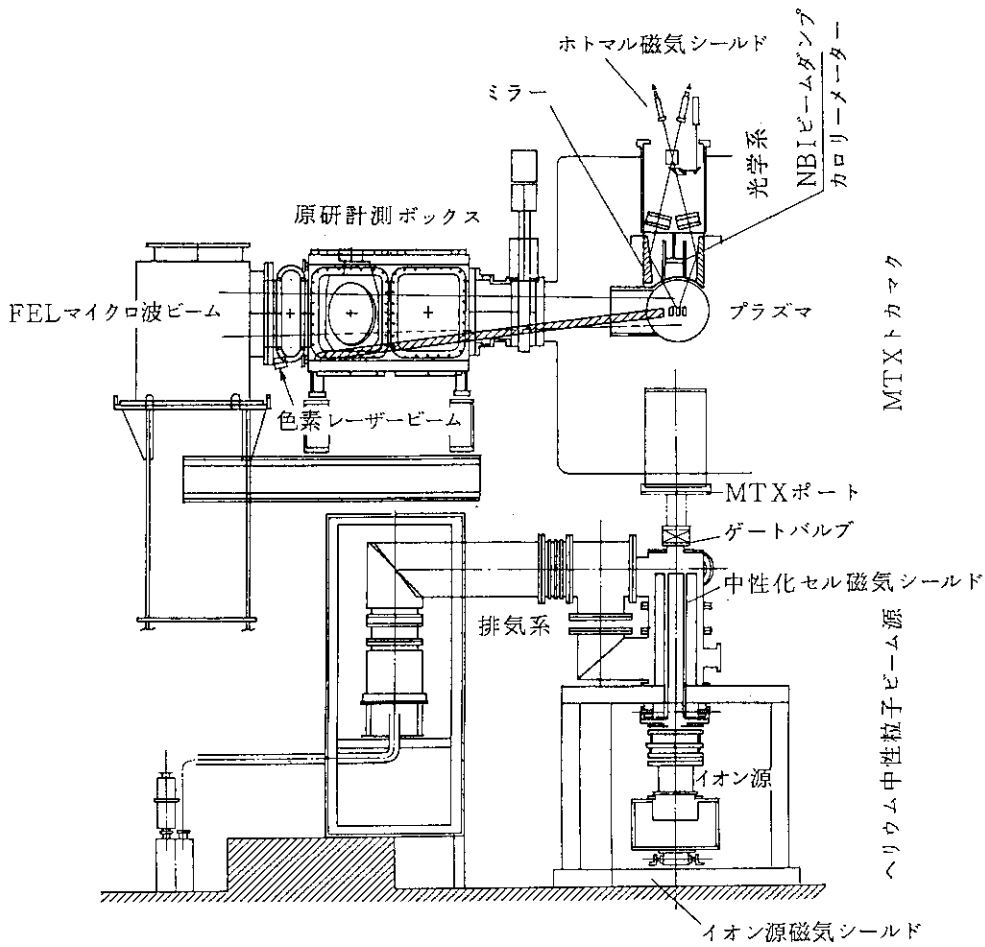


図 2.3 FEL マイクロ波電界測定システム (LAPPS) 全体図

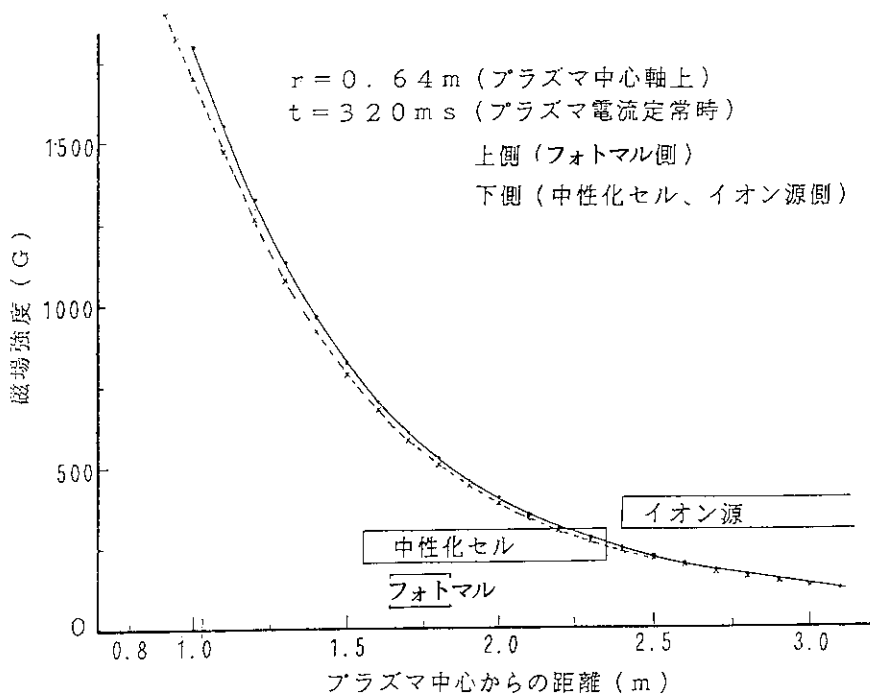


図 2.4 MTX トカマク磁場分布

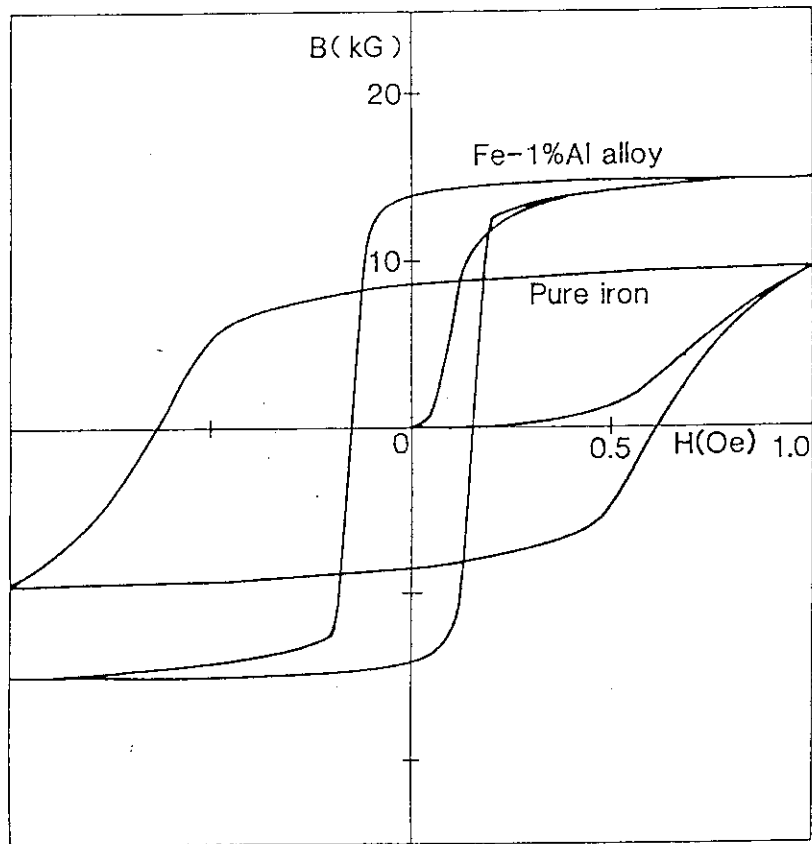


図 2.5 FERROPERMと純鉄のB-H曲線

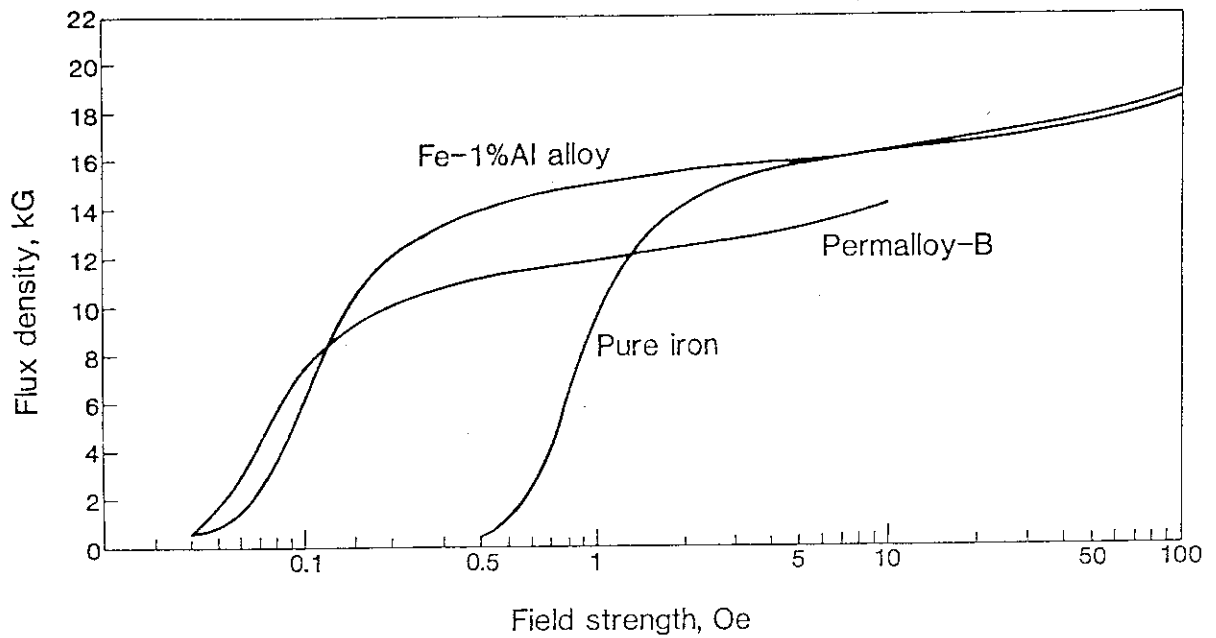
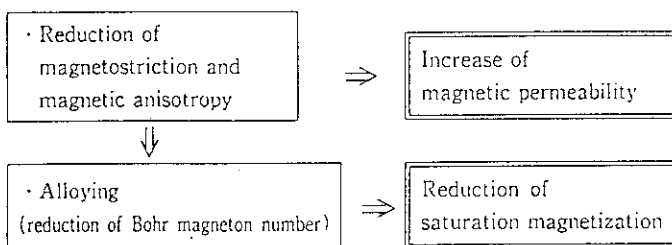
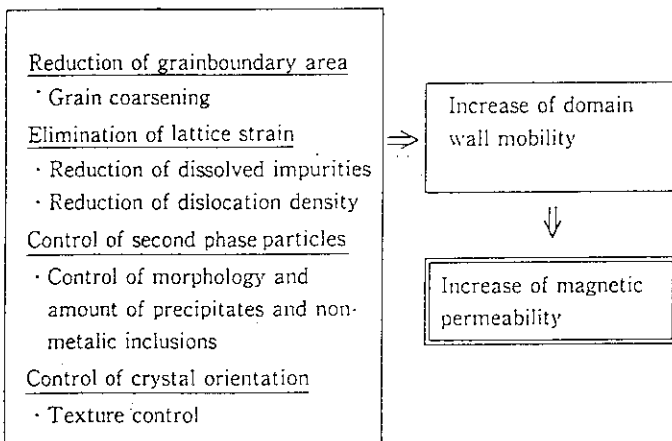


図 2.6 FERROPERM, パーマロイPB, 純鉄の初磁化曲線



(a) Physical approach



(b) Metallurgical approach

図 2.7 優れた磁化特性を得るための物理的・冶金的手法

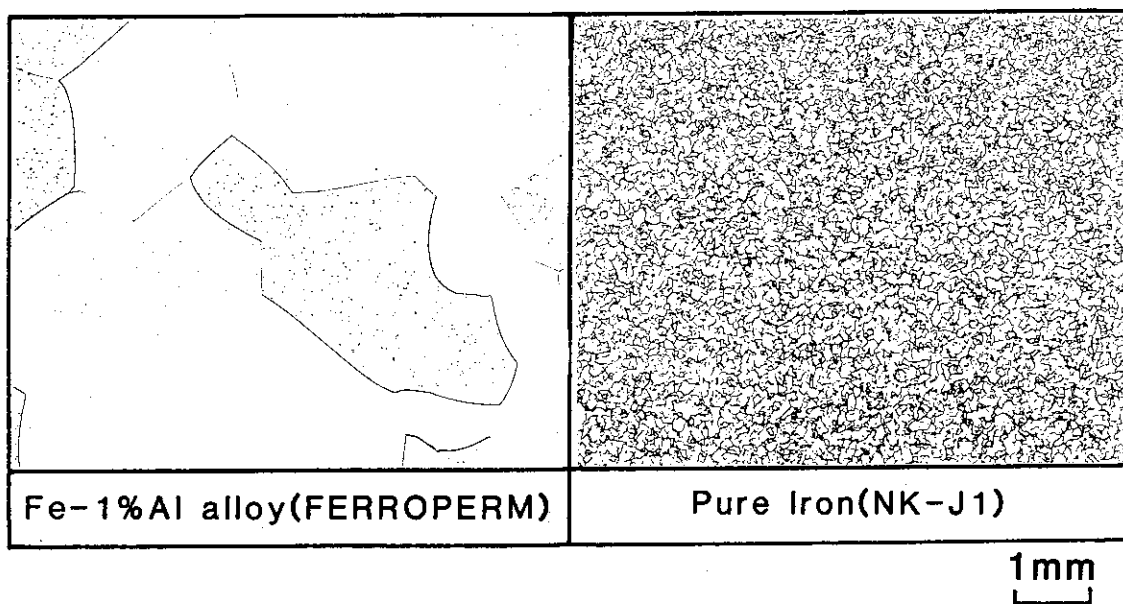


図 2.8 FERROPERMと純鉄のマイクロ組織

3. 仮想分割遮蔽計算法による設計

磁気遮蔽体の設計に際しては、外部磁場を遮蔽した低磁場空間を創出するための遮蔽、または、内部の強磁場をある制限された空間領域に閉じ込めるための遮蔽の区別があり、対象となる磁界強度、磁束量、要求される磁界の水準、空間の大きさ、形状によって選択すべき磁気遮蔽体の材質、厚さ、及びその配列順序、層間距離の最適解が異なるので単純にコンピュータシミュレーションを以て最適設計が容易に得られるものではなく、多分に経験的要素、各種設計の蓄積データの量とバリエーション等が問題となる。

直流または極めて低い周波数における磁界の遮蔽式として実際に磁気遮蔽体設計に有用な式はあまり見当たらないようである。たとえば、磁界の遮蔽に電磁界理論の近傍界における遮蔽体の反射及び吸収損失の式を適用してみると、低周波磁界では周知のごとく反射損失は非常に小さく、吸収損失が遮蔽の主役となるので遮蔽効果 A は

$$A = 3.34 t \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r} \text{ (dB)} \quad \dots\dots\dots 3-1$$

t : 厚さ (inch)

μ_r : 比透磁率

σ_r : 比導電率 (銅 = 1.0)

f : 周波数

で表される。しかし、一見してわかるようにこの式は直流または極めて低い周波数では、損失がなくなり実用的でない。実際の設計ではいくつかの施行例から現実に合致する式を選んで利用するのがよい。

実際の磁気遮蔽体の初期設計では、如何なる式を使うにしても透磁率の扱いが最も問題となるところであり、遮蔽体の厚み方向の各位置において磁界は逓減するので μ_r は材質による固定した定数として扱うことはできない。また実用高透磁率材料では、加工及び運搬、施行の各段階で有効な μ_r は変化するので実効透磁率として、 $\alpha \cdot \mu_r$ を考え、場合により α の値を適宜設定使用するのがよい。また、遮蔽式は球状遮蔽を想定しているので実際の磁気遮蔽体の形状が球から離れるほど補正係数 β は大きくとらねばならない。

遮蔽体内部の磁界逓減に対応した透磁率の変化を一つの実験式に盛り込むことは煩雑で実用的でない為、筆者等は仮想分割遮蔽計算法を考案した。これは厚みのある同一材質の磁気遮蔽体の場合に応じて整数個の層に仮想分割し高磁場側の層から順次その磁界に対応した μ_r を代入して遮蔽効果を計算し、得られた層の磁界から次の層の μ_r を設定する方法である。

各層の必要な厚みは 3-2 式によって算出する。

$$d_i = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\gamma_i}{\mu_i} \left(1.0^{\frac{S_i}{20}} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots 3-2$$

d_i : 第 i 番目の仮想分割層の必要厚さ (m)

- α : 実行透磁率係数 ($0 < \alpha < 1$)
- β : 形状補正係数 ($\beta > 1$)
- μ_i : 第 i 番目の層における比透磁率
- r_i : 第 i 番目の層の遮蔽半径 (m)
- S_i : 第 i 番目の層に必要とされる遮蔽効果 (dB)

次にこの設計法によるフォトマル遮蔽体の初期設計例を示す。

以下の計算においては、各磁場強度における透磁率は表 3-3 (フェロパーム)、表 3-4 (パーマロイPC) の値を用いた。

3.1 フォトマルの仮想分割遮蔽計算法による設計

製作物のうち最も小型のフォトマル遮蔽体を試作し、実際に均一な高磁場中に入れて遮蔽性能を測定し、設計計算と実測値との差から全ての遮蔽体の設計基準を修正する方針をとることとした。

初期設計は手計算にて所要の遮蔽厚みを算出し遮蔽体を試作する一方、遮蔽体を手計算よりも細かくマトリックス分割しコンピューターにて遮蔽後の磁場を推定、実測された遮蔽後の磁場との比較を行う。

異なった高磁場 (1000G 及び 350G) で使用されるフォトマルを動作可能な磁場まで遮蔽する A, B 2 種類の磁気遮蔽体の設計

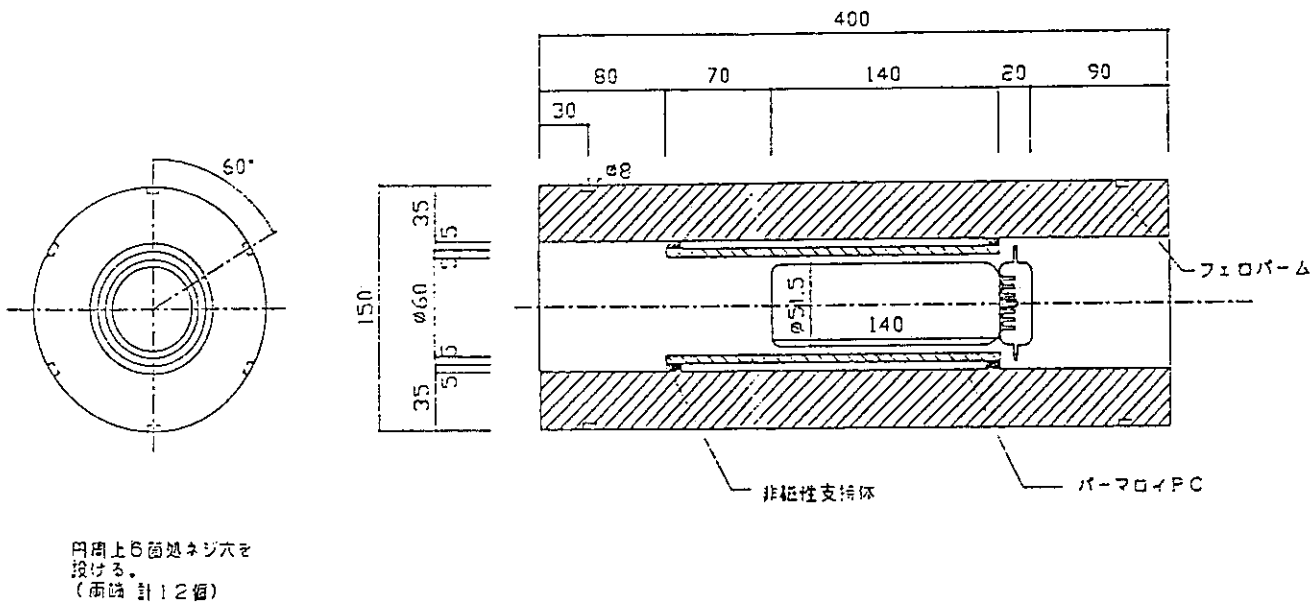


図 3.1 フォトマル遮蔽体 A

フォトマル遮蔽体Aは外部磁場 1000 G に対して外部遮蔽磁場を 1 G 以下のオーダーに遮蔽する為に設計された。この遮蔽体Aの外部遮蔽フェロパームの肉厚 35 mm は簡単な手計算により仮想4層分割法で設計計算された。この肉厚設計値はコンピュータシミュレーション及び製作された遮蔽体を 1000 G の均一な平行磁場中に入れて内部遮蔽磁場を測定した結果とかなり良い一致を見ており、初期設計における肉厚は変更される事がなかった。

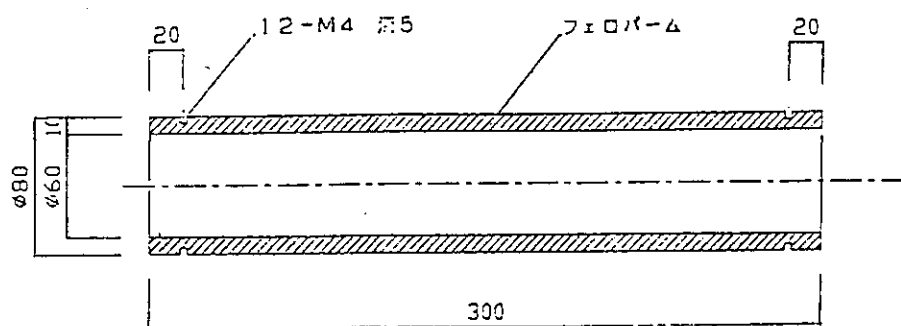
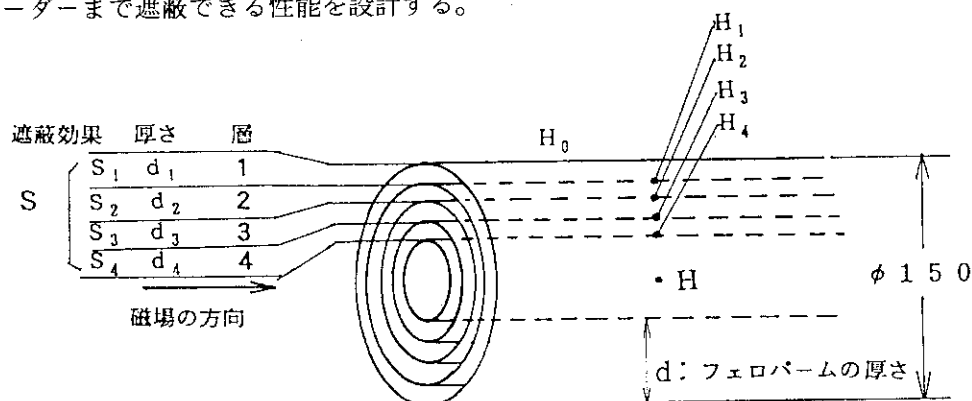


図 3.2 フォトマル遮蔽体B

フォトマル遮蔽体Bは、外部磁場 350 G 程度の低い磁場で使用されるフォトマルの磁気遮蔽体である。内部磁場を 1 G 以下（地磁気程度）に遮蔽するためフェロパームの肉厚 10 mm に設計された。このものの仮想分割法による初期設計とコンピュータシミュレーション及び実測データを示す。

フォトマル遮蔽体Aの初期値設計計算

遮蔽体は、フォトマルを動作させる光の径路を確保し、フォトマルの位置を前後に移動調整し易くするためシンプルな円筒形状を採用した。また、遮蔽体を設置する空間に制約があるため、外径を 150 mm φ、円筒の長さを 400 mm とし、材質は軟鉄より低磁場まで透磁率の高いフェロパームを外部遮蔽に採用することとし、その必要肉厚を算出した。外部遮蔽は 1000 G の磁場を 1 G オーダーまで遮蔽できる性能を設計する。



4層の仮想分割を行って外部から1層、2層、3層、4層の順とすると、全体の遮蔽効果

$$S = -20 \log_{10} \frac{1}{1000} = 60 \text{ dB} \quad \text{厚さ } d = \sum_{i=1}^4 d_i \text{ である。}$$

経験的に外層から内層にかけて順次 S_i を増加するように分割し、また安全のため遮蔽率を割増して下記のように設定した。

第1層 (フェロパーム) → 6 dB	ΣS = 68 dB
第2層 (") → 12 dB	
第3層 (") → 20 dB	
第4層 (") → 30 dB	

厚みの算出は式 3-2 において $\alpha = 0.8$, β はシンプルな円筒形の場合 2.0 である。
従って、 i 番目の層の厚さは

$$d_i = \frac{2.0}{0.8} \times \frac{0.5 \times 150 \times 10^{-3} - \sum_{i=1}^4 d_{i-1}}{\mu_i} (10^{\frac{S_i}{20}} - 1)$$

である。但し、 $i = 1$ の時 $d_{i-1} = d_0 = 0$ とする。

第1層

$$\mu_1 = \frac{B_{1000}}{H_0} = \frac{21,700}{10^3} \approx 20, S_1 = 6$$

$$d_1 = 2.5 \times \frac{(0.075 - 0)}{20} (10^{\frac{6}{20}} - 1)$$

$$= 0.00933 \approx 0.01 \text{ m}$$

従って第1層は 1 cm 必要である。遮蔽磁場は

$$H_1 = 1000 \times 10^{-\frac{6}{20}} \approx 500$$

第2層

$$\mu_2 = \frac{B_{500}}{H_1} = \frac{21,700}{500} \approx 40$$

$$d_2 = 2.5 \times \frac{(0.075 - 0.01)}{40} (10^{\frac{12}{20}} - 1)$$

$$= 0.0121 \approx 0.013 \text{ m}$$

従って第2層は 1.3 cm とする。そのとき、

$$H_2 = 500 \times 10^{-\frac{12}{20}} \approx 125$$

第3層

$$\mu_3 = \frac{B_{125}}{H_2} = \frac{18,500}{125} \approx 140$$

$$d_3 = 2.5 \times \frac{[0.075 - (0.01 + 0.013)]}{140} (10^{\frac{20}{20}} - 1)$$

$$= 0.0080357 \approx 0.009 \text{ m}$$

従って第3層は0.9 cm とする。

$$H_3 = 125 \times 10^{-\frac{12}{20}} \approx 13$$

第4層

$$\mu_4 = \frac{B_{16}}{H_3} = \frac{16,300}{13} \approx 1200$$

$$d_4 = 2.5 \times \frac{0.075 - (0.01 + 0.013 + 0.009)}{1200} (10^{\frac{30}{20}} - 1)$$

$$= 0.002743 \approx 0.003 \text{ m}$$

従って第4層は0.3 cm とする。

$$H_4 = 13 \times 10^{\frac{30}{20}} \approx 0.4 \text{ G}$$

仮想4層遮蔽で外部磁場 1000 G 以下となりその為の必要なフェロパームの厚み d は

$$d = \sum_{i=1}^4 d_i = 0.01 + 0.013 + 0.009 + 0.003$$

$$= 0.035 \text{ m}$$

従ってフェロパームの厚みは初期設計として3.5 cm とする。

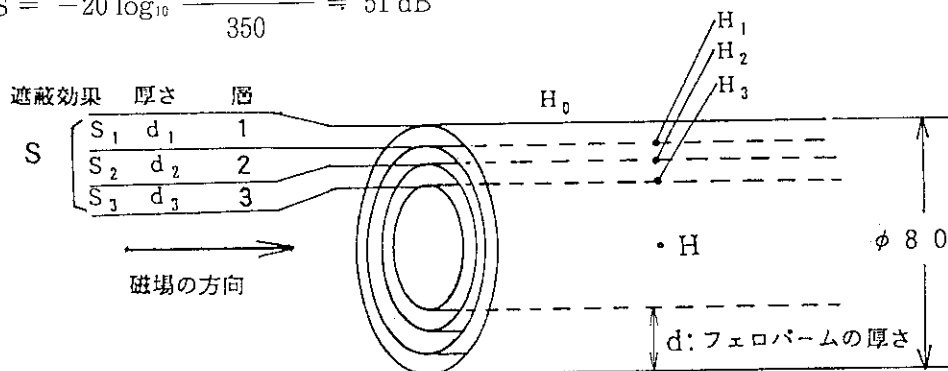
実際のフォトマル遮蔽体Aは3.5 cm のフェロパーム外部に5 mm のパーマロイ PC 内部遮蔽を設けている。その理由は実際に1000 G もの磁場を0.1 G オーダーまで遮蔽する工事の経験に欠けることと、フェロパームが開発されたばかりの新素材であるため、万一初期設計通りの性能が得られなかった場合の安全策を見ている。

パーマロイ遮蔽に関する計算は省略する。

フォトマル遮蔽体Bの初期値設計計算

遮蔽体Bは、外部磁場 350 G を1以下に遮蔽する。この場合外径 80 mm φ、長さを 300 mm の円筒形遮蔽とし、必要な肉厚を算出した。

$$S = -20 \log_{10} \frac{1}{350} \approx 51 \text{ dB}$$



3層の仮想分割を行って外側から1層、2層、3層とする。

$$\begin{array}{l} \text{第1層 (フェロパーム)} \rightarrow 8 \text{ dB} \\ \text{第2層 (")} \rightarrow 16 \text{ dB} \\ \text{第3層 (")} \rightarrow 28 \text{ dB} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{第1層} \\ \text{第2層} \\ \text{第3層} \end{array}} \right\} 52 \text{ dB}$$

第1層

$$\mu_1 = \frac{B_{350}}{H_0} = \frac{20,200}{350} \approx 55$$

$$d_1 = 2.5 \times \frac{0.04 - 0}{55} (10^{\frac{8}{20}} - 1)$$

$$= 0.00275 \approx 0.003$$

従って第1層は0.3 cmとする。

$$H_1 = 350 \times 10^{-\frac{8}{20}} \approx 140$$

第2層

$$\mu_2 = \frac{B_{140}}{H_1} = \frac{18,500}{140} \approx 130$$

$$d_2 = 2.5 \times \frac{0.04 - 0.003}{130} (10^{\frac{16}{20}} - 1)$$

$$= 0.00377 \approx 0.004$$

従って第2層は0.4 cmとする。

$$H_2 = 140 \times 10^{-\frac{16}{20}} \approx 22$$

第3層

$$\mu_3 = \frac{B_{22}}{H_2} = \frac{16,300}{22} \approx 740$$

$$d_3 = 2.5 \times \frac{0.04 - (0.003 + 0.004)}{740} (10^{\frac{28}{20}} - 1)$$

$$= 0.00268 \approx 0.003$$

従って第3層は0.3 cmとする。

$$H_3 = 22 \times 10^{-\frac{28}{20}} \approx 0.875$$

この遮蔽体に関しては

フェロパーム厚みは1 cmとする。

3.2 中性化セルの仮想分割遮蔽計算法による設計

中性化セルは、下部イオン源タンクから加速電極で引き出されたヘリウムイオンビームをクセノンとの反応に依り、中性化する領域でセル本体はパーマロイ PC 製の矩形断面管で、内部磁気

遮蔽体を兼ねており、外部磁気遮蔽は厚い円筒状のフェロパーム構造体とすることにした。この円筒状遮蔽体には左右2箇所の枝管を設け、一方の細い枝管にはキセノンガスを導入するチューブを通しガスは遮蔽体本体（円筒）内部に設けた電磁弁を経て中性化セル内に導入される。また、他方のより太い枝管は余分なヘリウムイオンガスを排出する目的で設置される。中性化セル外部磁気遮蔽を図3.3、中性化セル本体を図3.4に示す。

磁気遮蔽体は、別に設計された真空容器内に収まるように設計される必要があり、自ずから許容される最大の直径（ ϕ 280）と長さ（ l 678）が定まっている。また、枝管の太さも真空容器のポートサイズにより最大太さが制約される。一方遮蔽体内部には中性化セル本体（ 85×35 断面）を収容する必要があるため最小内径も定まっている。設計計算は、この許容された体積内でフェロパームが所定の遮蔽性能を達成するか、確認することとなる。

中性化セル外部遮蔽体に関して、仮想分割遮蔽計算法により定まった外径と長さ（ ϕ 280 \times 687）の円筒状遮蔽体が750 Gの円筒軸に平行な磁場中に置かれた場合、内部中心磁場が1 G以下（究極的には中性化セル本体内部磁場が0.15 G以下）となる肉厚を計算した。

フェロパーム製外部遮蔽（円筒形の本体）についての計算結果を表3.1に示す。

但し	α	=	0.9	
	β	=	2.0	
	d	:	全肉厚	} 単位 (m)
	d_i	:	第 i 番目の層の肉厚	
	γ	:	遮蔽半径	
	γ_i	:	第 i 番目の層の遮蔽半径	

計算結果

全肉厚は7.5 cmとなる。

表 3.1 中性化セルの仮想分割法による計算結果

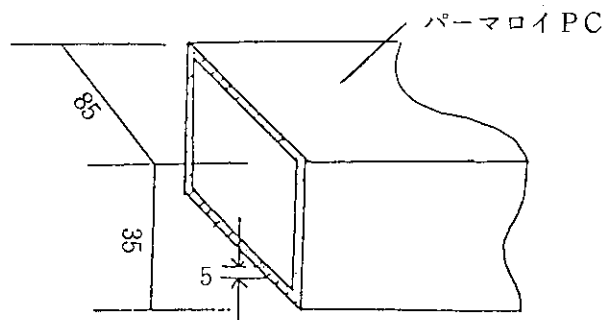
		1層目	2層目	3層目	4層目
各層の遮蔽性能と磁場	S_i	15.6 dB	15.6 dB	15.6 dB	15.6 dB
$S = -20 \log \frac{H_{i+1}}{H_i}$	H_i	750 G	125 G	20.8 G	3.5 G
	H_{i+1}	125 G	20.8 G	3.5 G	0.6 G
実行透磁率	$\alpha \cdot \mu_i \approx$	25	130	700	3500
各層の半径 (m)	$\gamma_i = \gamma - \sum_{n=1}^{i-1} d_n$	0.13	0.072	0.066	0.065
各層の厚さ (m)	$d_i = 2.22 \frac{\gamma_i}{\mu_i} (10^{0.78 S_i} - 1) \approx$	0.058	0.0065	0.0011	0.0002
厚さ設計値 (m)	d_i	0.06	0.01	0.005	
	$= \sum d_i$	0.075			

この厚みは、内部遮蔽体を所定の体積内に収容出来る寸法である。

中性化セル遮蔽体はサイズが大きすぎてこのものを収容する均一磁場装置が無い。従ってフォトマル遮蔽体と異なり、計算結果を実験で確認することができない。念の為、コンピュータシミュレーションにより精密な推定を行うと共に、内側遮蔽（パーマロイ PC 製中性化セル本体）の肉厚を充分にとって内部磁場 0.15 G 以下を達成する。

パーマロイ PC 製中性化セル本体（矩形断面角筒）について計算結果を下に示す。

（単層計算）



$\alpha = 0.9$

$\ell = 0.085$

$\beta = 5.5$

$w = 0.035$

$d = 0.005$

$\mu_i = 7,400$

$$\gamma = \sqrt{l \cdot w / 2} = 0.0386$$

$$S = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\alpha \cdot \mu \cdot d}{\beta \cdot \gamma} \right) \dots\dots\dots 3-3$$

$$\approx 43.9 \text{ dB}$$

外部遮蔽内部磁場 1 G のとき、内部遮蔽内磁場 H_i は

$$H_i = H_0 \cdot 10^{-\frac{S}{20}} \approx 0.0064$$

従って 0.15 G の目標はクリアする。

しかし、外部遮蔽内部磁場が 10 G まで上がった場合、 $\mu_{10} = 760$ であるから、

$$S \approx 24.7 \text{ dB} \text{ で遮蔽効果は約 } 1/2 \text{ に低下する。}$$

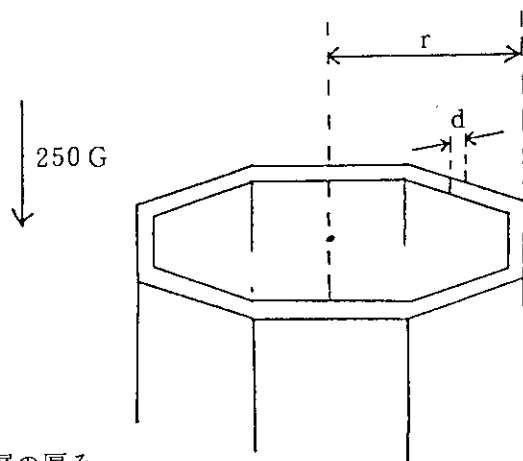
内部磁場の推定 H_i は

$$H_i = 10 \times 10^{-\frac{24.7}{20}} = 0.58 \text{ G}$$

となって目標値 0.15 G をオーバーしてしまう。従って 5 mm の肉厚は割合、臨界的な厚みであり、それほど余裕のある設計では無いと云える。

3.3 イオン源タンクの仮想分割遮蔽計算法による設計

イオン源タンクの磁気遮蔽は、タンク上部磁場 250 G、下部 100 G の領域を最大限に遮蔽する目的で行われる。遮蔽の厚さは設置スペース（隙間）の制約から最大 10 cm である。遮蔽構造体の形状は β を小さくするため正八角形とした。内部磁場が 1 G となる遮蔽厚みが 10 cm を超えるとき、設計厚みは 10 cm になる。



- $\alpha = 0.9$
- $\beta = 2.8$
- $d \leq 0.1$
- $\gamma = 0.6$

- d_i : 第 i 層の厚み
- γ_i : 第 i 層の遮蔽半径

計算結果

設計厚みは 10 cm とする。

図 3.5 にイオン源タンクの図を示す。

表 3.2 イオン源タンクの仮想分割法による計算結果

		1 層目	2 層目	3 層目	4 層目
各層の遮蔽性能と磁場	S_i	13.6	13.6	13.6	13.6
$S = -20 \log \frac{H_{i+1}}{H_i}$	H_i	250	60	14.4	3.5
	H_{i+1}	60	14.4	3.5	0.6
実行透磁率	$\alpha \cdot \mu_i \approx$	72	260	1,000	3,900
各層の半径 (m)	$\gamma_i = \gamma - \sum_{n=1}^{i-1} d_n$	0.6	0.502	0.479	0.477
各層の厚さ (m)	$d_i = 3.11 \frac{\gamma_i}{\mu_i} (10^{0.68} - 1) \approx$	0.098	0.0227	0.00149	0.00038
厚さ設計値 (m)	d_i	0.121		0.002	
	$= \sum d_i$	計算厚さ 12.3 cm \rightarrow 10 cm とする。			

遮蔽体内には数十 G の洩れ磁場が浸入するおそれがあるが、当初の制約から設計厚みを 10 cm とした。

表 3.3 フェロパームの各磁界における透磁率

H (Oe)	B (G)	μ	H (Oe)	B (G)	μ
0.02	100	5,000	0.36	13,500	37,500
0.04	500	12,500	0.40	13,800	34,500
0.06	1,500	25,000	0.50	14,100	28,200
0.08	3,500	43,700	0.60	14,400	24,000
0.10	6,000	60,000	0.80	14,700	18,400
0.12	8,500	70,800	1.00	15,000	15,000
0.14	10,000	71,400	1.50	15,200	10,100
0.16	11,000	68,700	2.00	15,500	7,700
0.18	11,500	63,900	5.00	15,900	3,200
0.20	12,000	60,000	10.0	16,300	1,600
0.22	12,300	55,900	25.0	16,900	680
0.24	12,500	52,000	50.0	17,500	350
0.26	12,800	49,200	100.0	18,500	190
0.28	13,000	46,400	250.0	20,200	80
0.32	13,300	41,500	500.0	21,700	40

表 3.4 パーマロイ PC の各磁界における透磁率

H (Oe)	B (G)	μ	H (Oe)	B (G)	μ
0.005	1,700	340,000	0.6	7,200	12,000
0.01	3,500	350,000	0.8	7,300	9,100
0.02	4,500	225,000	1.0	7,400	7,400
0.03	5,000	166,700	2.0	7,500	4,900
0.04	5,300	132,500	5.0	7,500	1,500
0.05	5,500	110,000	10.0	7,600	760
0.1	6,000	60,000	15.0	(7,600)	(500)
0.2	6,500	32,500	20.0	(7,600)	(380)
0.4	6,900	17,200	25.0	(7,600)	(300)

()内は推定値, 実測は 10 Oe まで

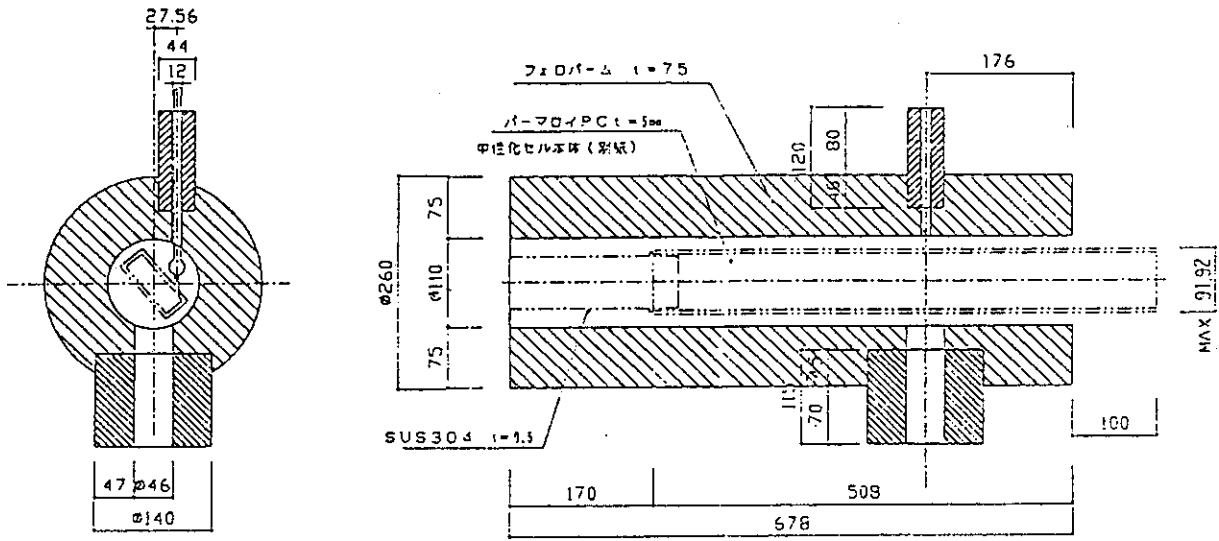


図 3.3 中性化セル領域磁気遮蔽体

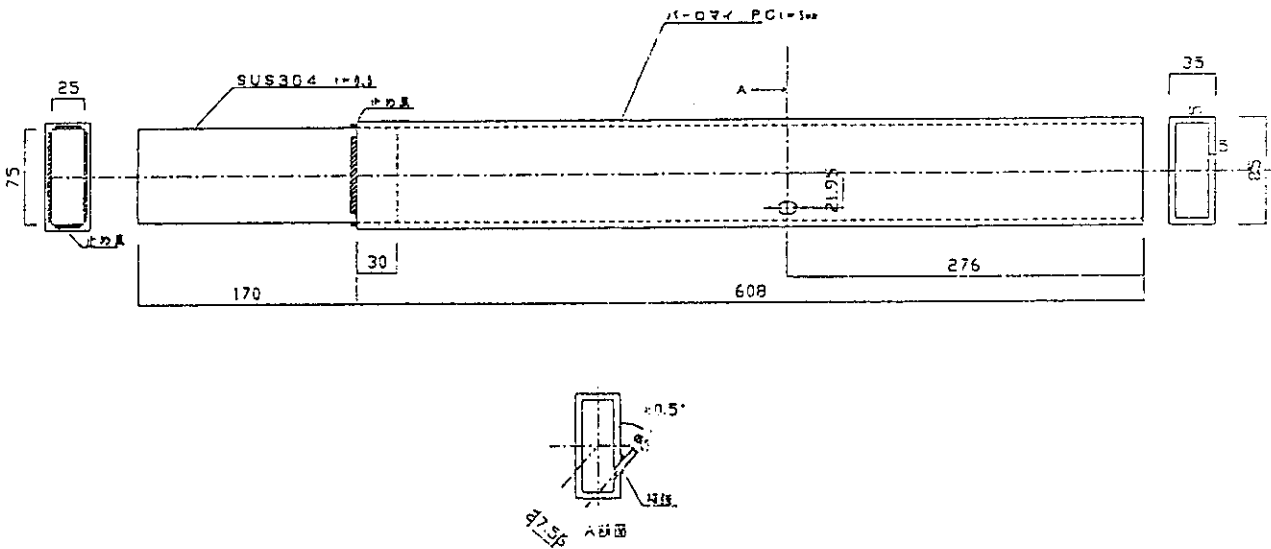


図 3.4 中性化セル本体

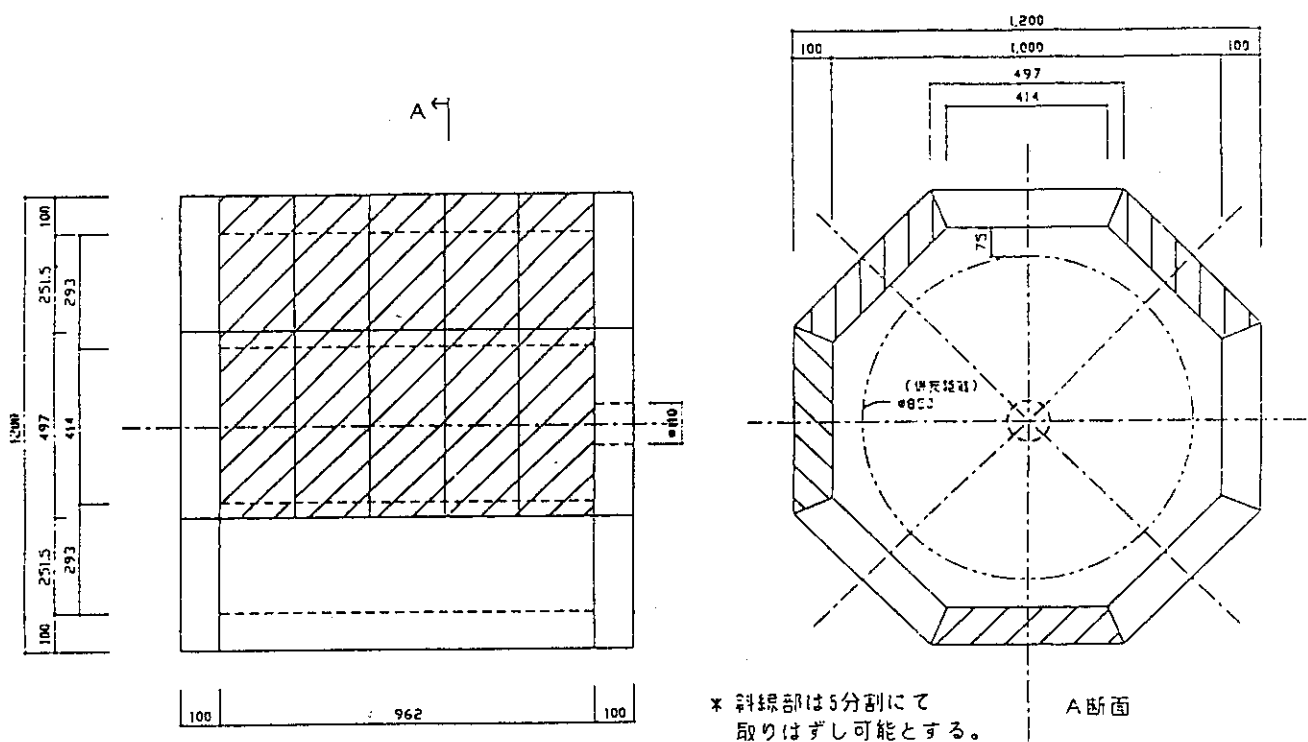


図 3.5 ヘリウムイオン源領域磁気遮蔽体

4. 磁気遮蔽のコンピュータシミュレーション

磁気遮蔽設計は、磁気モーメント法による3次元静磁場解析プログラムを用いたコンピュータシミュレーションによっても行った。

まず、円筒型磁気遮蔽体内部においてどのような磁場分析が生ずるかを理解するために、

(1) 円筒を3次的に分割しシミュレーション計算し、円筒内の等磁場曲線から、磁場分布を理解する。

しかし上記計算は、計算時間がかかるため、計算条件に対称条件を追加し、

(2) 軸対称及び鏡像対称条件にて、メッシュ分割を増加させて、精度の高い計算を行い、第5章の同様磁場内での磁気遮蔽実験データとの比較を行った。

4.1 磁気遮蔽円筒を3次元8節点要素により分割したシミュレーション

計算はフォトマル用磁気遮蔽円筒について行った。

シミュレーション条件は、

- 磁気遮蔽円筒 : PMS2 (フォトマル遮蔽体)
 内径 80 mm, 外径 150 mm
 (t = 35 mm)
- 材 質 : フェロパーム
- 外部印加磁場 : 軸方向 1000 Gauss 一様磁場 (図 4.2)
 径方向 1000 Gauss 一様磁場 (図 4.3)
- 磁気遮蔽円筒 : 周方向 8 分割
- メッシュ分割 : 径方向 4 分割
 軸方向 8 分割
- 要素数 : 256 個 (8 節点要素)

である。

図 4.1 は、このシミュレーションに用いたメッシュ分割である。

図 4.2 は、円筒の軸方向に 1000 Gauss の一様磁場を印加した場合のシミュレーション結果で、磁気遮蔽円筒内部に等磁場曲線を描かせている。

図 4.3 は、径方向に 1000 Gauss の一様磁場を印加した場合のシミュレーション結果である。

メッシュ分割が粗い計算ではあるが、等磁場曲線から、

- ① 円筒の中心付近では、数 Gauss 程度にまで遮蔽された空間が存在している。
- ② 円筒の中心から軸方向に両端に近づくと、急激に磁場強度が増加する。
- ③ 印加磁場方向に関しては、径方向印加磁場よりも軸方向印加磁場の方が、中心付近での磁場強度が低い。即ち、軸方向印加磁場の方が遮蔽効果が高い。

- ④ 径方向印加磁場の場合、円筒内部空間内の磁性体に近い部分即ち、径方向に磁性体に近づくとき、急激に内部磁場強度が増加する。

等の事が推測される。これらの事は、実施設計にフィードバックされた。

4.2 対称条件を用いたシミュレーション

4.1 のシミュレーションは、非常に計算時間を費やすため、計算条件に対称条件を取り入れて、精度の高い計算を行った。

用いた対称条件は、

- ・円筒中心軸に対し、軸対称（外部印加磁場は軸方向のみ）
- ・円筒中心を含む中心軸に垂直な面に対し、面对称

である。即ち、2次元軸対称及び面对称計算を行った。図4.4から図4.7に行ったシミュレーション結果を示す。シミュレーション対象は第5章で記述する各磁気遮蔽体であり、磁気遮蔽円筒中心軸における磁場強度を計算した。

また、黒丸は、第5章で述べる実験での実測値である。図はそれぞれ、

〔図4.4〕

- 磁気遮蔽円筒 : PMS 1 (フォトマル用遮蔽体)
 内径 60 mm, 外径 80 mm
 (t = 10 mm)
- 材 質 : フェロパーム
- 外部印加磁場 : 345 Gauss 軸方向一様磁場
- メッシュ分割 : 径方向 5 分割
 軸方向 23 分割
- 要 素 数 : 115 分割 (2次元 4 節点要素)

〔図4.5〕

- 磁気遮蔽円筒 : PMS 2 (フォトマル用遮蔽体)
 内径 80 mm, 外径 150 mm
 (t = 35 mm)
- 材 質 : フェロパーム
- 外部印加磁場 : 900 Gauss 軸方向一様磁場
- メッシュ分割 : 径方向 7 分割
 軸方向 16 分割
- 要 素 数 : 112 分割 (2次元 4 節点要素)

〔図4.6〕

- 磁気遮蔽円筒 : PMS 3 (フォトマル用遮蔽体)
 内径 60 mm, 外径 80 mm
 (t = 5 mm)
- 材 質 : パーマロイ PC

外部印加磁場 : 115 Gauss 軸方向一様磁場
 メッシュ分割 : 径方向 5 分割
 軸方向 26 分割
 要素数 : 130 分割 (2次元4節点要素)

〔図4.7〕

磁気遮蔽円筒 : 中性化セル用遮蔽体
 内径 110 mm, 外径 260 mm
 (t = 75 mm)
 材 質 : フェロパーム
 外部印加磁場 : 1000 Gauss 軸方向一様磁場
 メッシュ分割 : 径方向 8 分割
 軸方向 34 分割
 要素数 : 272 分割

となっている。

シミュレーションと実測値は、概ね一致している。しかし、磁気遮蔽円筒中点付近では、磁場強度の不一致が見受けられる。計算に用いたメッシュ分割の収束は確認しているため、原因としては材質の B-H 特性が、弱磁場で実機と多少ずれている事が考えられる。

しかし、基本設計の手段として、この磁場シミュレーションは、充分使用できると思われる。

4.3 メッシュ分割の粗さの影響

磁気シールドのコンピュータシミュレーションを行う際、円筒型磁気シールドのメッシュ分割(径方向及び軸方向)の粗さと計算結果との関係を検討する計算を対称条件を用いて行った。計算は磁気遮蔽体 PMS1 について行い条件は：

フォトマルシールド円筒 : 内径 60 mm, 外径 80 mm (肉厚 t = 10 mm)
 材 質 : フェロパーム (表 3.4 の透磁率のデータを用いる)
 外部印加磁場 : 軸方向 383 G 一様磁界

である。

6 種類のメッシュ分割法における磁気シールドの軸方向の磁場分布の計算結果について、それぞれの場合において遮蔽された中心点の磁場がメッシュ分割方法によってどのように変化するかをまとめたものを表 4.1 に表す。

この結果より、径方向については計算例が少なくはっきりとしたことは言えないが、軸方向に関しては、分割が粗いほど見かけ上の磁気遮蔽効果は向上し、中心磁場が低くなる傾向が見られる。特に中心に向かうほど細かく分割したほうがより安全サイドのシミュレーションになっている。

表 4.1 PMS1 のメッシュ分割法による磁気遮蔽度の違い
 (軸方向 383 G 一様磁場を印加した場合)

ケース	径 方 向 外側←————→中心		軸 方 向 (端 部)←————→(中 心)			遮 蔽 後 の 中心磁場強度
a	2 mm 均等		20 mm 均等			1.4 G
b	2 mm 均等		15 mm 均等			1.8 G
c	2 mm 均等		10 mm 均等			2.0 G
d	2 mm 均等		10 mm (7個)	5 mm (16個)		2.2 G
e	2 mm 均等		2 mm (5個)	5 mm (4個)	10 mm (12個)	2.0 G
f	2 mm (3個)	1 mm (4個)	20 mm 均等			1.5 G

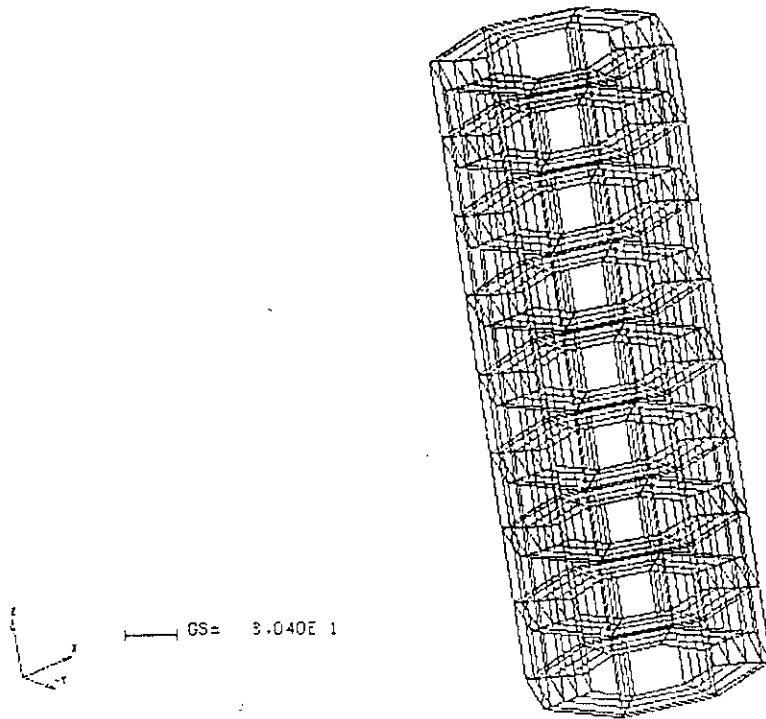


図 4.1 シミュレーションに用いたシールド円筒等の要素分割図

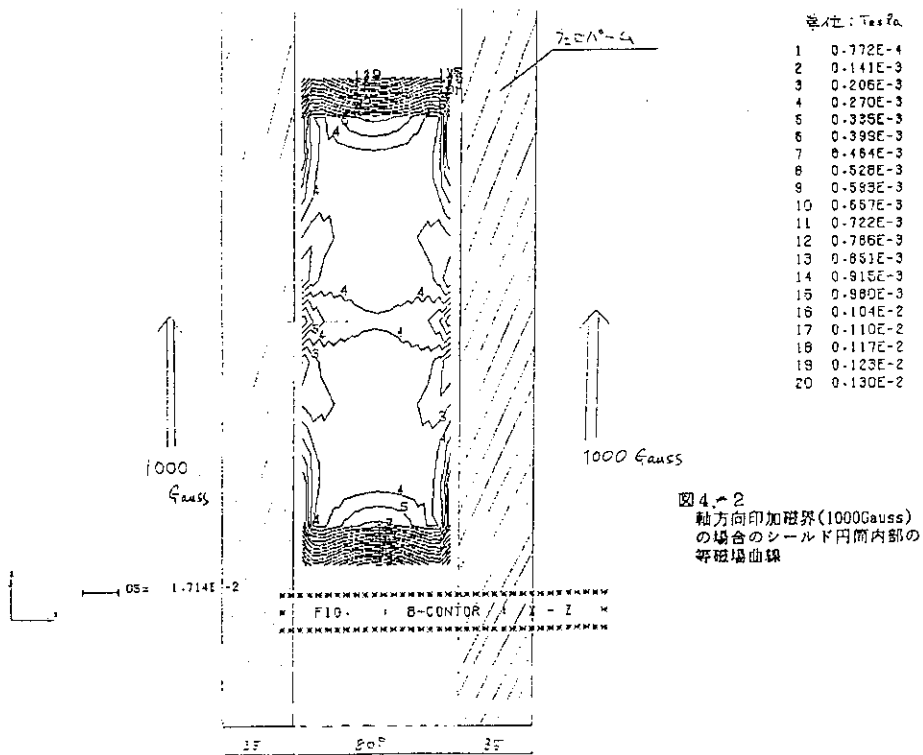


図 4.2 軸方向印加磁界(1000Gauss)の場合のシールド円筒内部の等磁場曲線

図 4.2 軸方向印加磁界 (1000 Gauss) の場合のシールド円筒内部の等磁場曲線

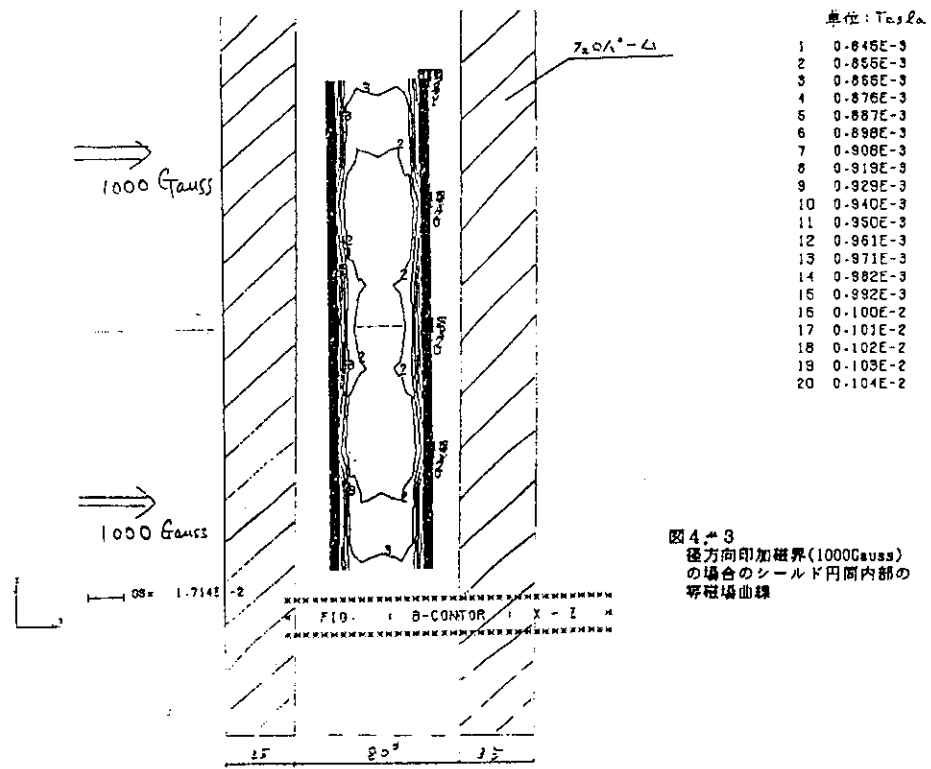


図 4.3 径方向印加磁界 (1000 Gauss) の場合のシールド円筒内部の等磁場曲線

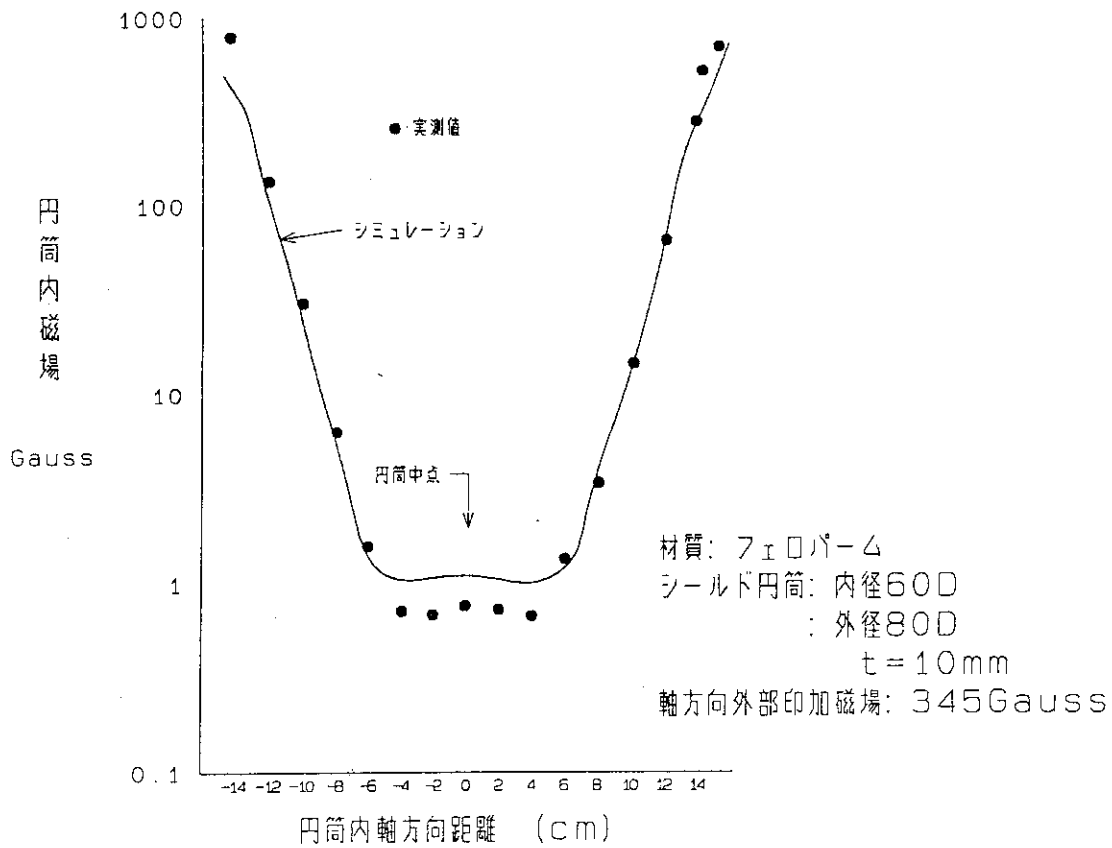


図 4.4 PMS1 磁気遮蔽シミュレーション

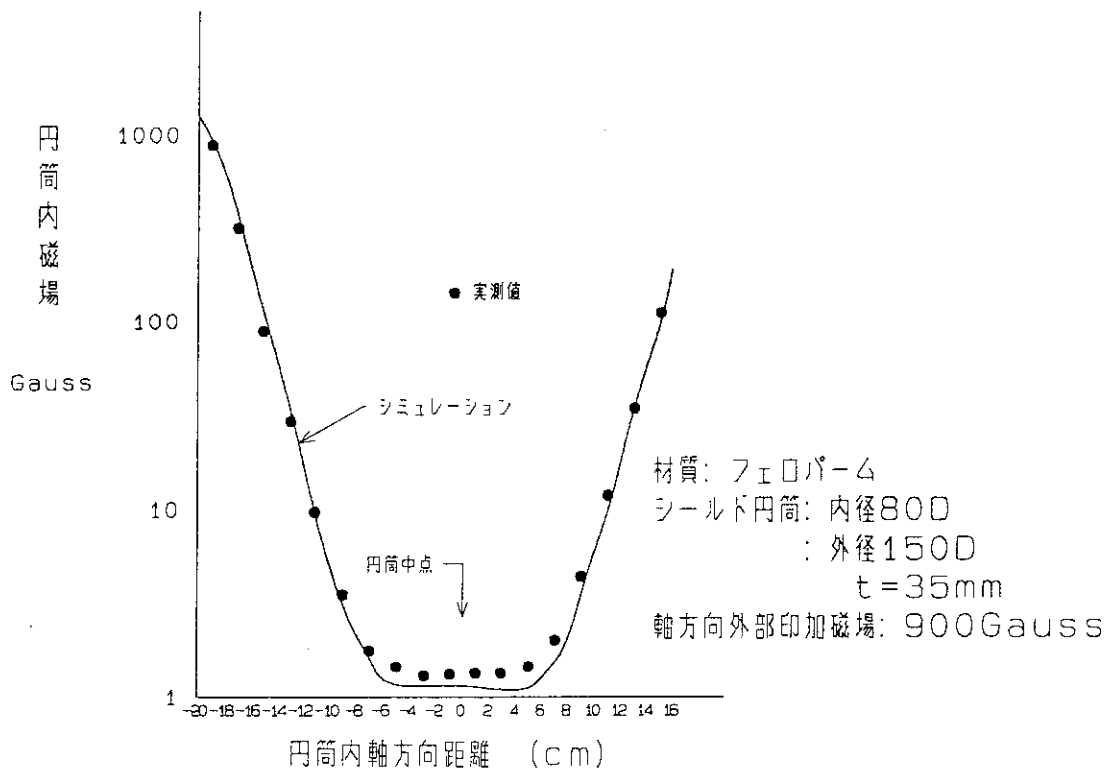


図 4.5 PMS2 磁気遮蔽シミュレーション

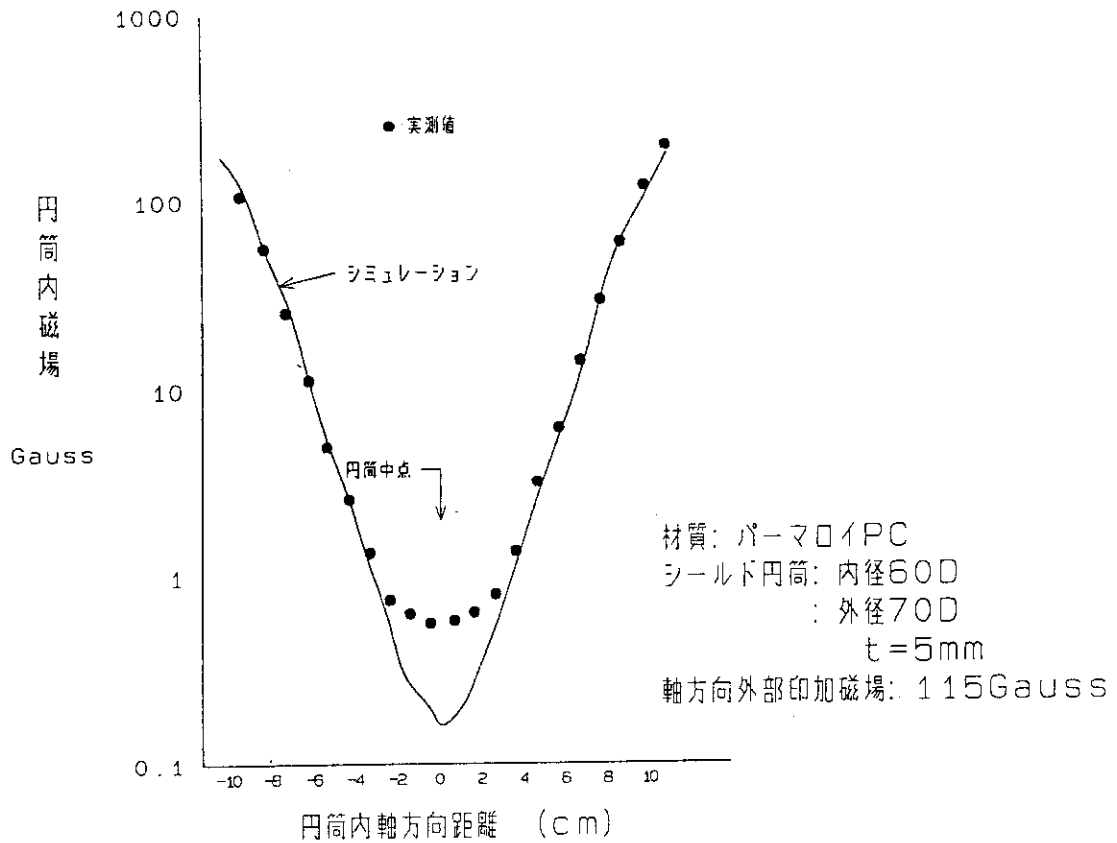


図 4.6 PMS 3 磁気遮蔽シミュレーション

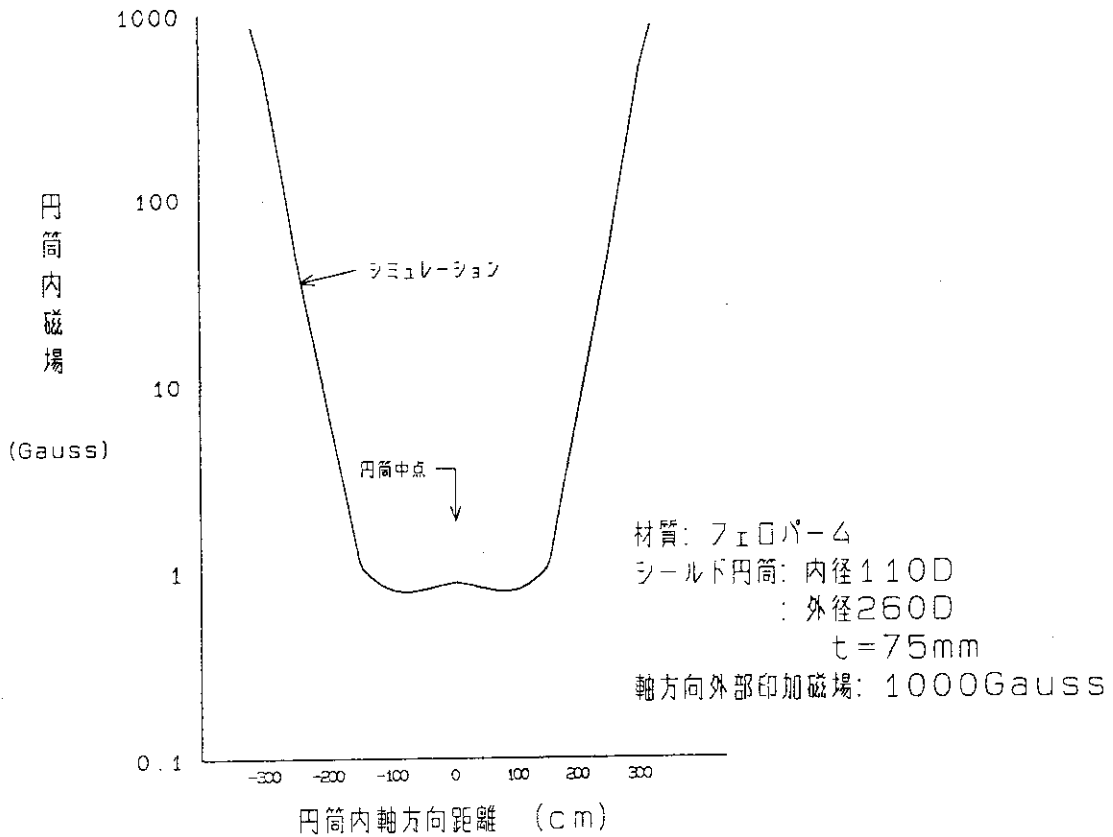


図 4.7 中性化セル遮蔽体の磁気遮蔽シミュレーション

5. 磁気遮蔽実験

仮想分割遮蔽計算法により設計したフォトマル遮蔽体 (A, B) について、コンピュータシミュレーションにより内部の遮蔽磁場分布を推定したが、このものを実際に均一な高磁場中に設置して遮蔽された磁場を計測し、計算やシミュレーションが実現と一致するかどうか確認することが本実験の最終目的である。中性化セルやイオン源タンクは寸法が大きく適当な実験設備が見当たらないが、フォトマル遮蔽体 ($\phi 150 \times 400$) を収容する空間と非常に均一な平行の高磁場を発生する装置が東北大学工学部電子工学科にあり、佐藤徳芳教授の御好意により、これを借用して実験することが出来た。

本章における表は本論文の最後にまとめた。

5.1 実験装置の概要

東北大学工学部電子工学科 佐藤 (徳) 研究室の特殊電磁界荷電粒子実験施設のうちの一種、QT-Upgrade Machine (以下 QUM と略称する。) は容器内径 208 mm を有し、長さ 550 mm 以上に互って非常に均一な数 KG の平行磁場を発生する装置である。この装置の主要部で実験に使用する箇所の構造図を図 5.1 に示す。本装置の内部磁場はコイルに流す電流で調整する。電流と内部磁場の関係及び一定電流を流したときの装置内各位置における磁場変動 (軸方向) ならびに装置の残留磁化などについて測定した結果をつぎに示す。

QUM の印加電圧—電流—磁場の関係は当然既知であるが、厳密を期するため同一の機器、同一のセンサーを使用して外部磁場、遮蔽後の内部磁場を計測することとした。磁場測定器は米国 F. W. BELL 社製スーパー・ガウスメーター 640 型でプローブは標準型 SAB 4-1802 (ホール素子による磁気センサー) を用いた。

電流を流さない時の QUM の容器中心の残留磁場を軸方向各位置について計測した。

図 5.2 に示すように、装置端面から円筒内部に 100 cm 入った断面の中央点 (× 印) から測定をはじめ 5 cm ピッチで内側に向った各点のコイル電流を流さないときの磁場を計測し、その結果を表 5.1 に示した。

観測された磁場は、地磁気より若干高いレベルであるが 0.8 G 未満であり、問題となるような残留磁気は認められない。

つぎに、一定の電流を流したときの装置内の磁場の均一性を調べるため、装置中央部の磁場を 1 kG, 3 kG とした場合の装置の円筒軸方向の磁場変動を測定した。

磁気センサーを非磁性支持体で中心軸上軸方向に固定し、支持体を軸方向に移動させながら磁場を計測した。

1 kG の設定磁場に対し、変動が $\pm 0.5\%$ の範囲に入る均一な磁場の領域は、入口からの距離が 110 ~ 170 cm の間である。また、入口から 50 ~ 100 cm の間は漸増する傾斜磁場となっている。(表 5.2) 3 kG の設定において均一磁場の範囲を調べたところ、設定 ± 0.3 の磁場は 115 ~

170 cm の間であり、磁場強度が変わっても均一な区間はさほど変化しないことが判明した。(表 5.3)

一定電流下での装置円筒軸上の磁場分布とフォトマル用磁気遮蔽体の設置位置を図 5.3 に示す。なお、このグラフの縦軸は一樣な磁場の値で規格化した

センサーの位置、中心部 (155 cm) に固定して電流 I を変化させたときの磁場強度 H_0 の変化を調べた結果、両者はほぼ一次の関係にある。(図 5.4)

$$H_0 \text{ (G)} = 3.86 I \text{ (A)}$$

電流 777 A のとき、ちょうど 3 kG の磁場が得られ、再現性があることが認められた。

また、均一磁場からすこし外れた位置 (195 cm) で電流を 0 から増加して 800 A にしたときと、1000 A から減少させて 800 A にしたときの磁場は、2960 ~ 2970 G ($\pm 0.2\%$ 以内) でヒステリシスは認められなかった。(表 5.4)

5.2 磁気遮蔽実験

MTX の LAPPS に使用する高磁場用及び中磁場用の 2 種類のフォトマル用磁気遮蔽体を用いて、QUM の磁場中で磁気遮蔽実験を行った。使用した 4 種類の遮蔽体 (Photomaltirlier Magnetic Shield - PMS) を図示したものを図 5.5、また磁場中での設置位置を図 5.3 に示す。

PMS 1 は中磁場用の遮蔽体で、外部磁場 350 G を 1 G 以下に遮蔽する目的で製作したものである。材料は低磁場まで透磁率の高いフェロパームを使用した。

PMS 2 は高磁場用のフォトマル遮蔽体で、外部磁場 1000 G で使用するよう設計したもので、フェロパームを使用している。LAPPS で実際に使用する場合は、パーマロイで作った PMS 3 を 5 mm の隙間をとって PMS 2 の中に入れ、PMS 4 の形にして用いる。

遮蔽実験ではまずそれぞれの遮蔽体を磁場発生装置 QUM の均一磁場中心において、ガウスメートルのプローブを遮蔽体中央の中心に設置して、外部磁場を 0 から漸増しながら内部磁場の変化を測定することにより、磁気遮蔽の飽和が生ずる外部磁場を求めた。その結果を表 5.5 から表 5.8、図 5.6 から図 5.9 に示す。図より磁気飽和が生ずる限界磁場は、PMS 1 で 345 G、PMS 2 で 900 G、PMS 3 で 120 G、PMS 4 で 1000 G である。

次に均一磁場中に置かれた遮蔽体の軸方向に沿って遮蔽体内部の磁場分布を測定した。PMS 1 ~ PMS 3 では中心軸のほか径方向に 2 点についても軸方向分布を測定した。測定点の位置を図 5.10 に示す。

外部磁場については磁気飽和前、磁気飽和点、磁気飽和後の少なくとも 3 種類測定するようにした。この実験結果を表 5.9 から表 5.24、図 5.11 から図 5.19 に示す。

それぞれの遮蔽体について、磁気飽和前は内部磁場は 1 G 程度まで遮蔽されている。一方、飽和後は軸方向の中央付近から磁束が漏れだして磁場強度が上がって来ることがわかった。また遮蔽体の端の付近では、磁性体が磁束を集めるため、むしろ外部磁場よりも強い磁場が生じている。

実際にはこの遮蔽体は、均一磁場よりもむしろ距離とともに磁場強度が減少していく傾きのある磁場中で使用される。従って、飽和磁場強度はこの上に述べた実験結果よりも高くなることが予測される。そこでその傾向を見るために、均一磁場の外側の傾きのある磁場中に遮蔽体を置き

そのときの磁気飽和の生ずる磁場強度を測定した。遮蔽体の設置位置と磁場の傾きは 図 5.3 に示した。PMS1 については、均一磁場中での飽和点 345 G に対して、傾きのある磁場中では高磁場端 430 G, 低磁場端 145 G で飽和が生じている。また PMS 2 では均一磁場中での飽和点 900 G に対して、傾きのある磁場中では高磁場端 1300 G, 低磁場端 250 G で飽和が生じている。電流を変えたときの傾きのある磁場は、電流 251 A のときの傾斜磁場プロフィールが維持されるものとして計算した。実験結果を表 5.25, 26, 図 5.20, 21 に示した。

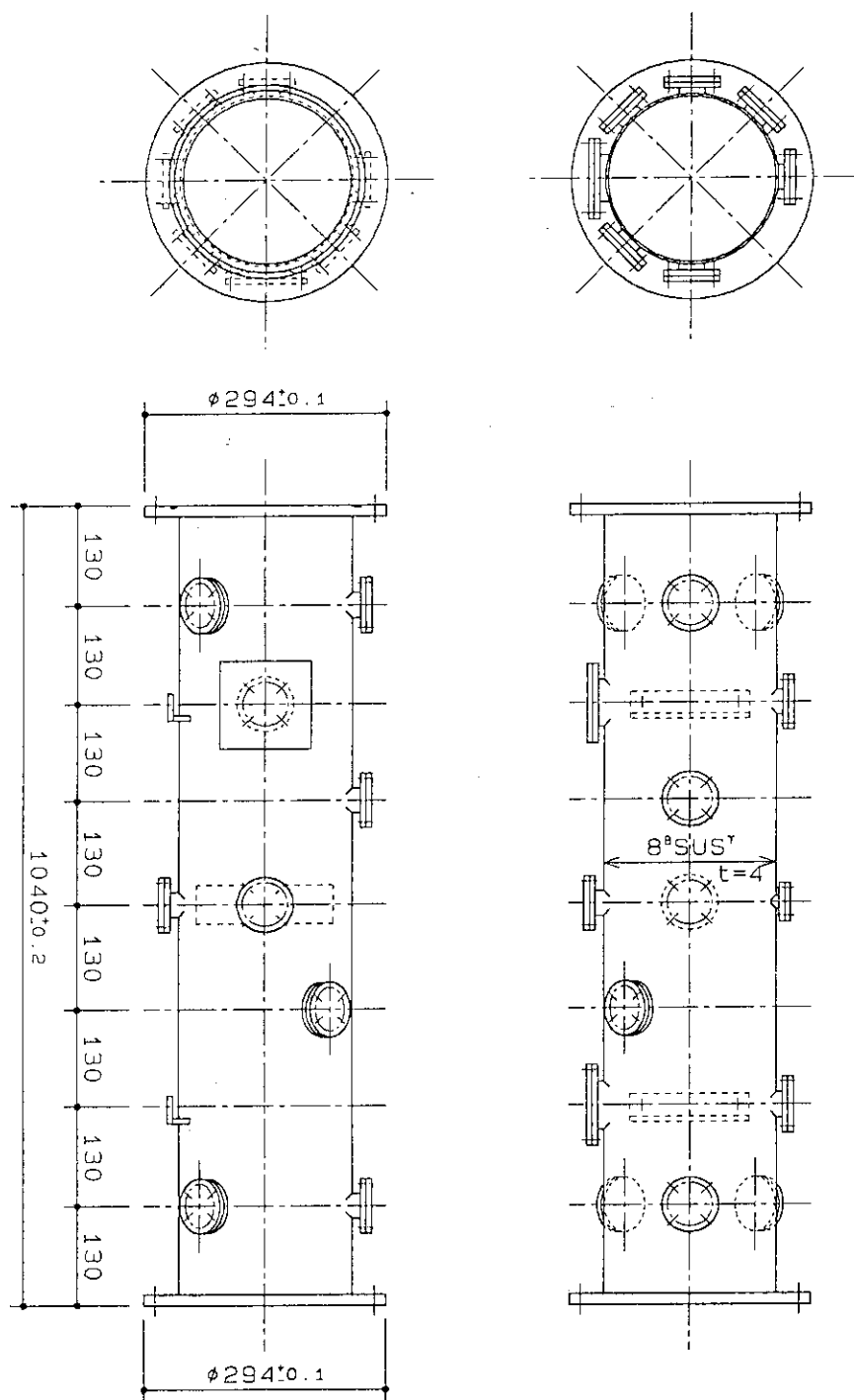


図 5.1 QT-U 装置の真空容器の構造図

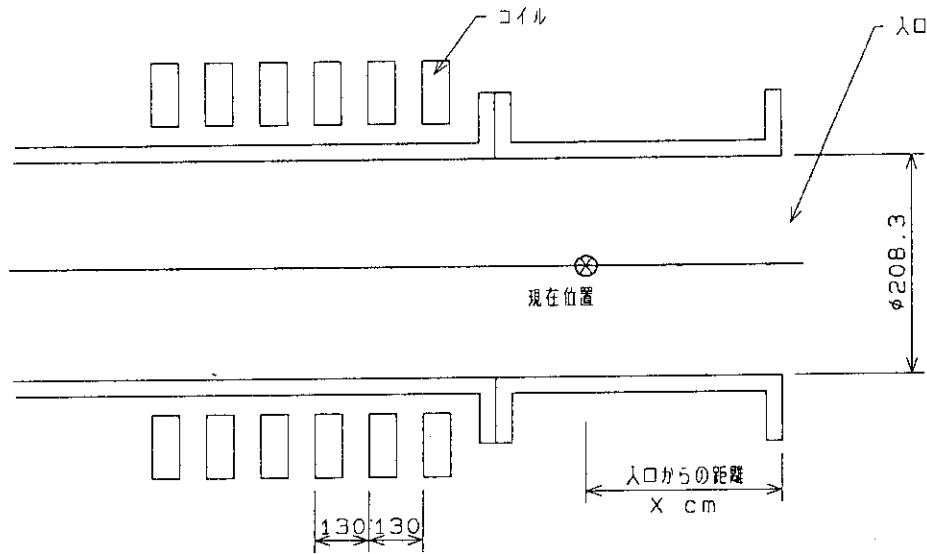


図 5.2 磁場測定装置の概念図

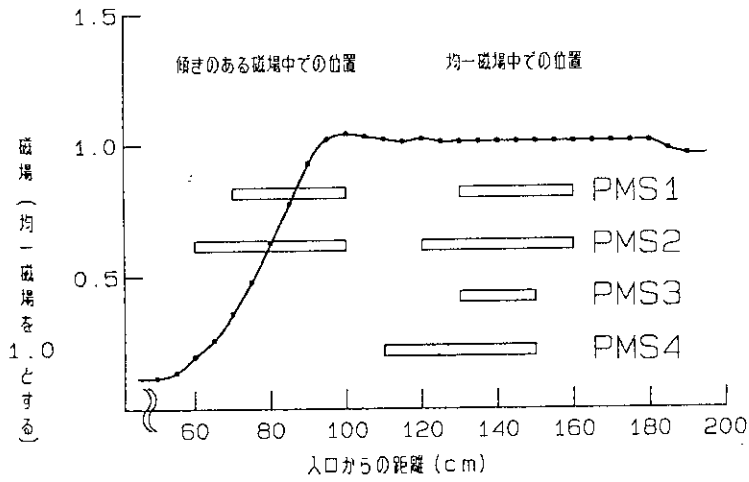


図 5.3 容器内の中心軸上の磁場強度分布測定結果

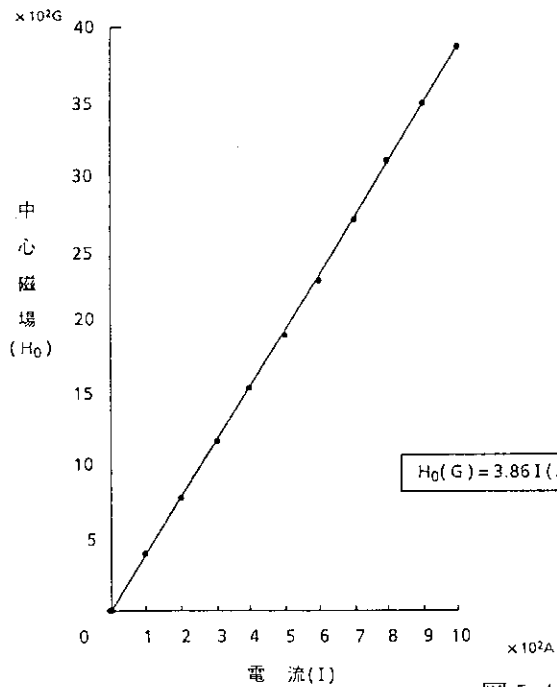


図 5.4 一様磁場中の中心軸上での磁場電流と磁場強度の関係

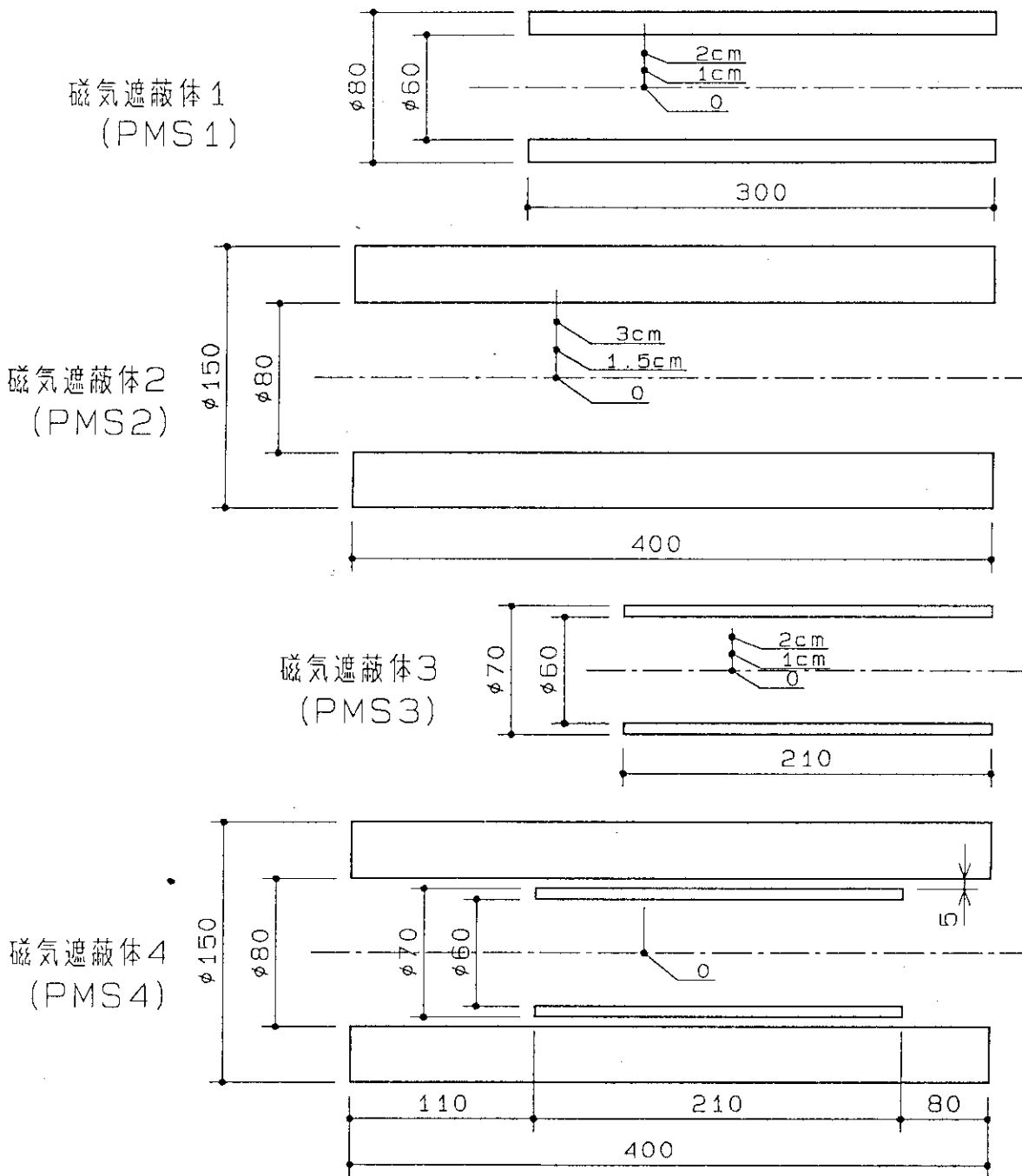


図 5.5 測定に用いた4種類のフォトマル用磁気遮蔽体, PMS 1, 2の材質はフェロパーム, PMS 3はパーマロイPC, PMS 4はPMS 2とPMS 3を組み合わせたもの

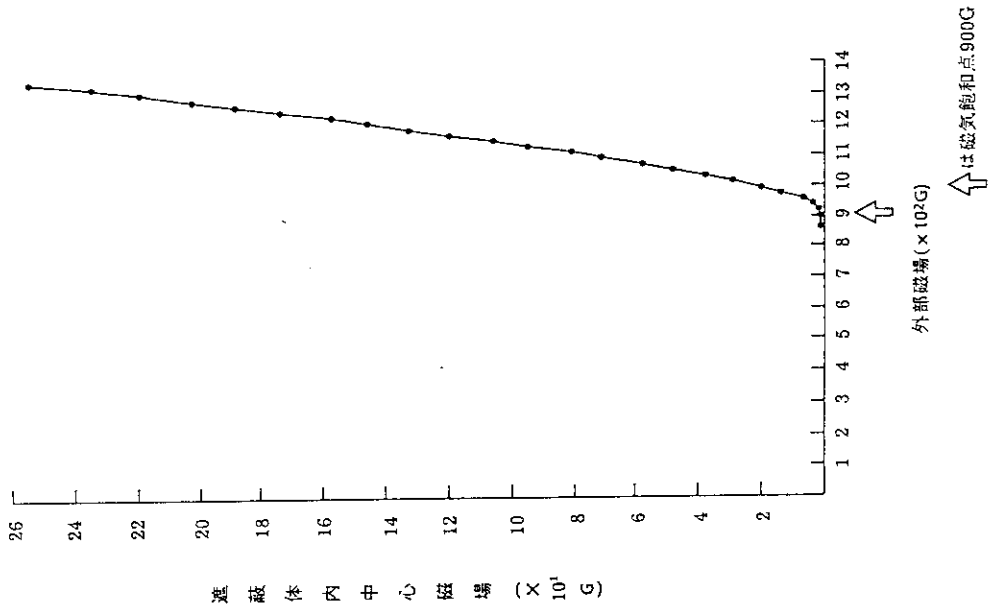


図 5.7 PMS 2 の磁気飽和

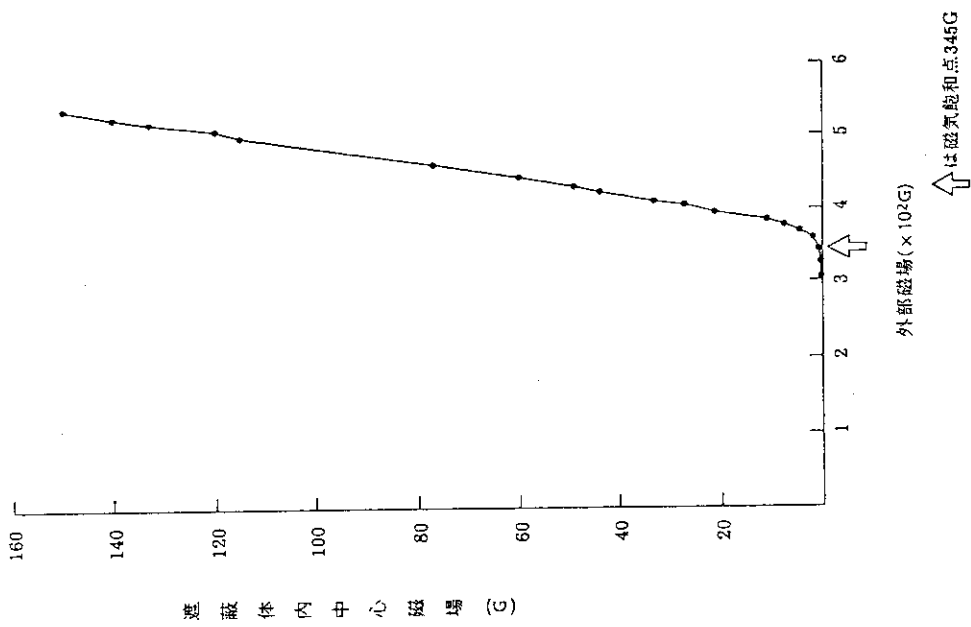


図 5.6 PMS 1 の磁気飽和

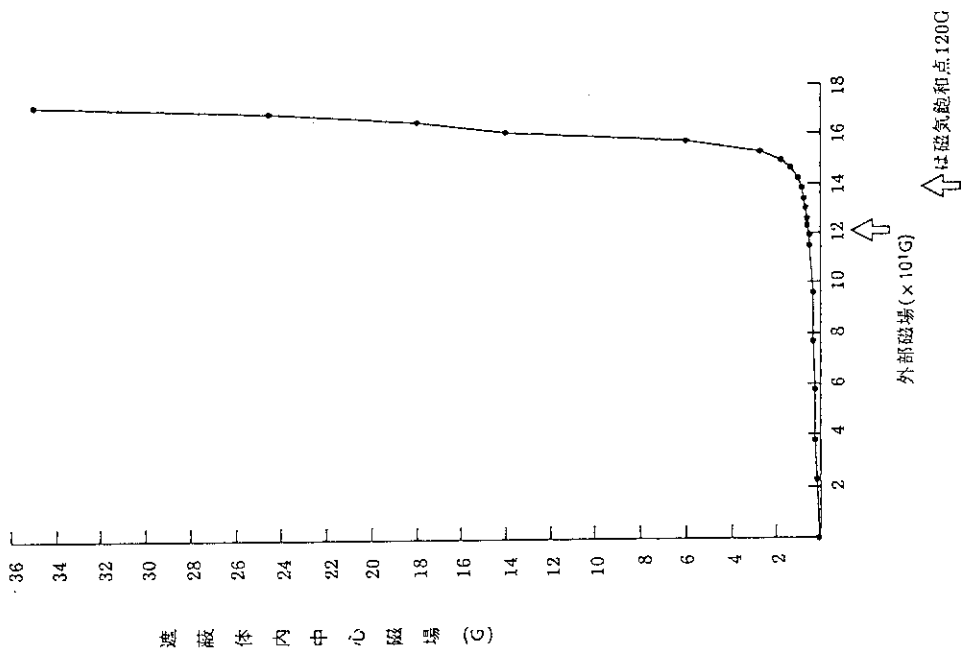


図 5.8 PMS 3 の磁気飽和

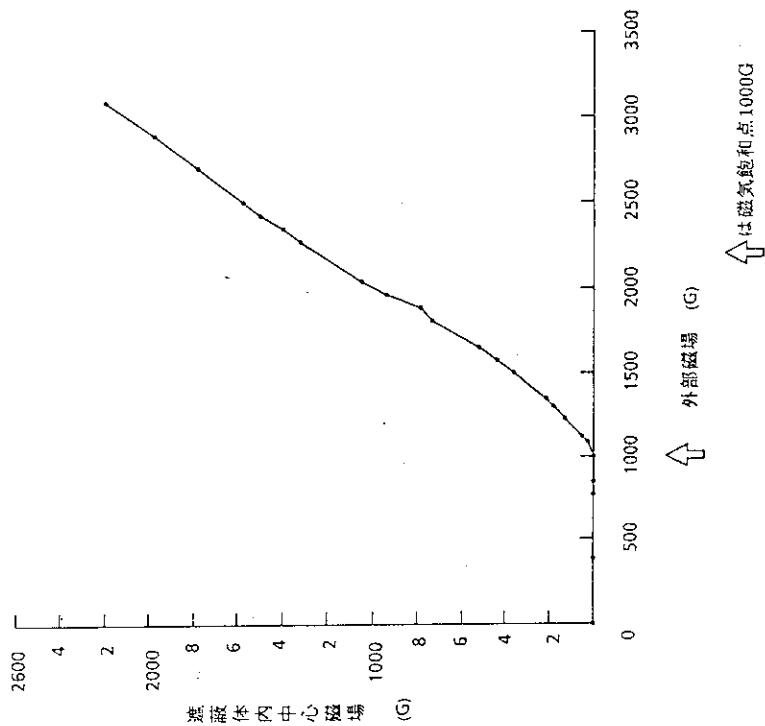


図 5.9 PMS 4 の磁気飽和

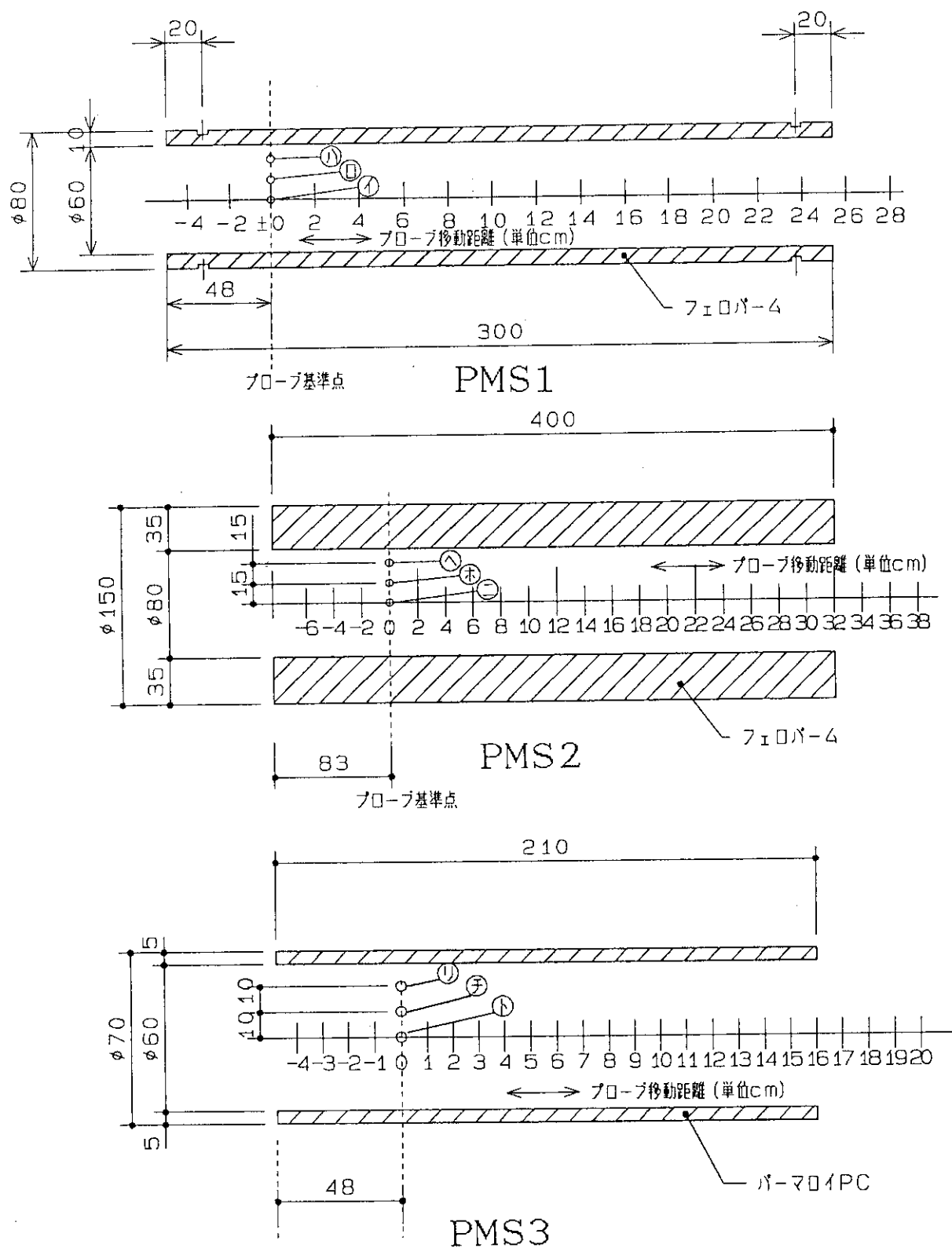


図 5.10 均一磁場中に置かれたフェロマル遮蔽体の内部磁場分布の測定

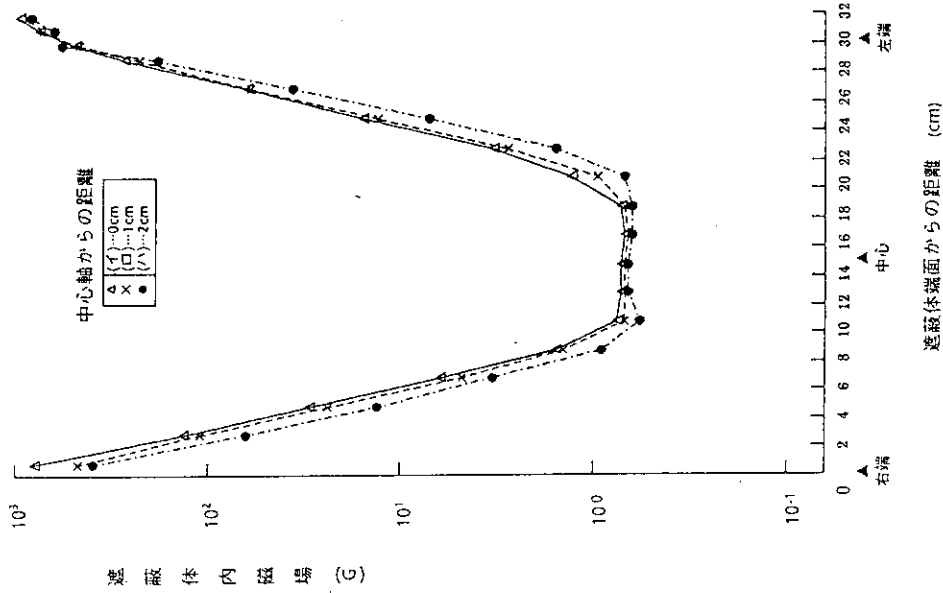


図 5.12 PMS 1 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場 345 G)

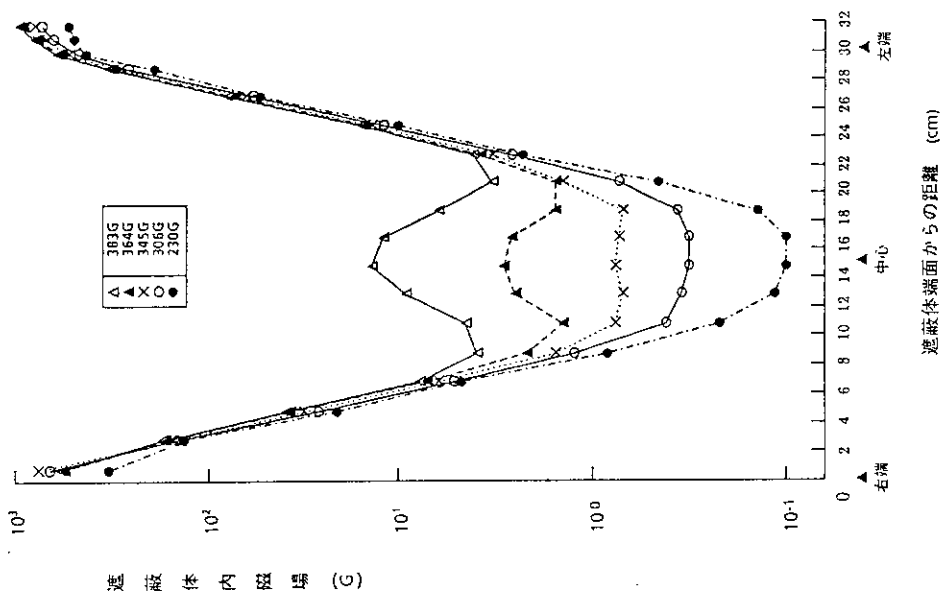


図 5.11 PMS 1 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場の变化
(位置(1)…中心軸上))

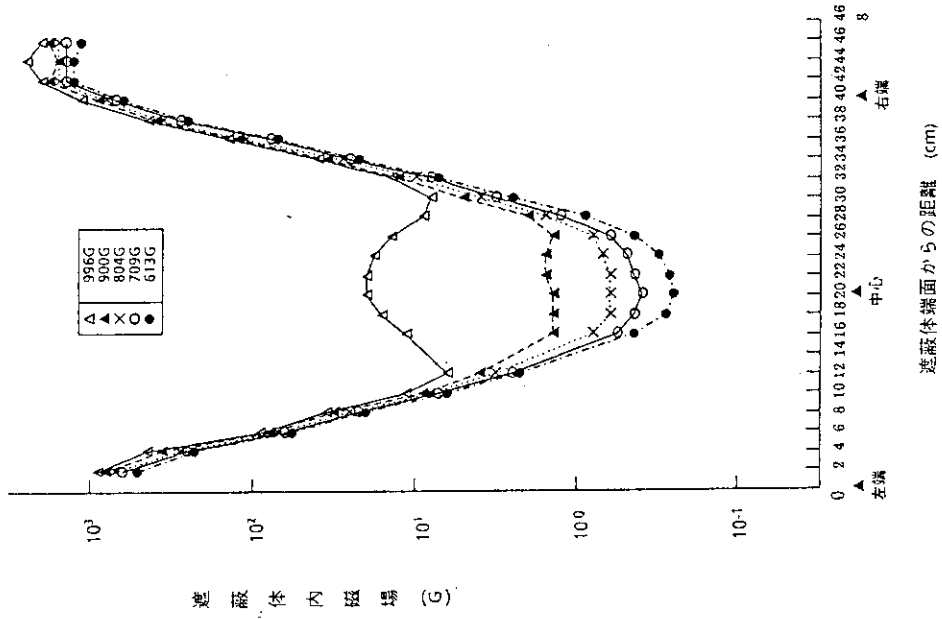


図 5.14 PMS 2 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場の変化, 位置(一)……中心軸上)

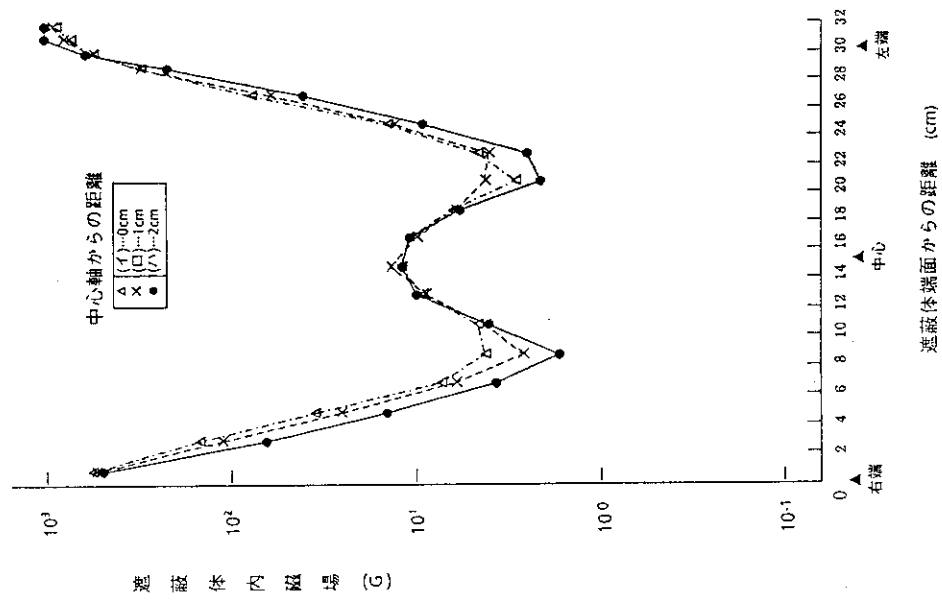


図 5.13 PMS 1 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場 383 G)

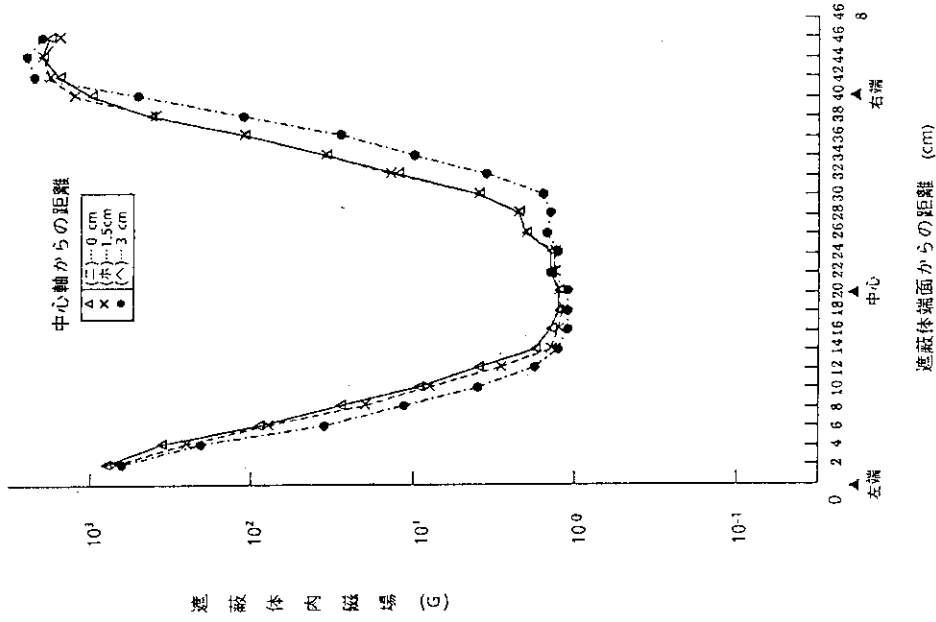


図 5.16 PMS 2 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場 900 G)

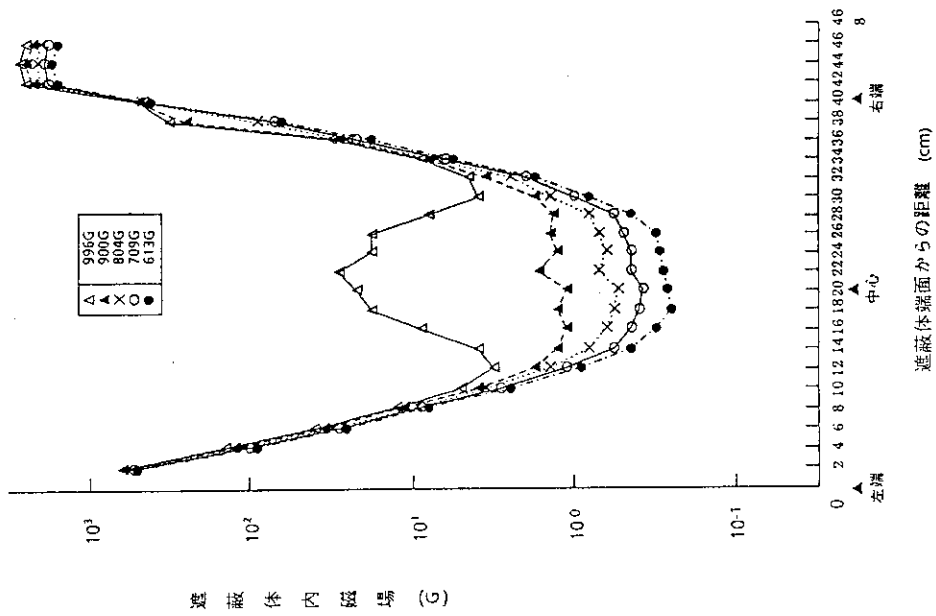


図 5.15 PMS 2 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場の变化, 位置(△)… 3 cm外)

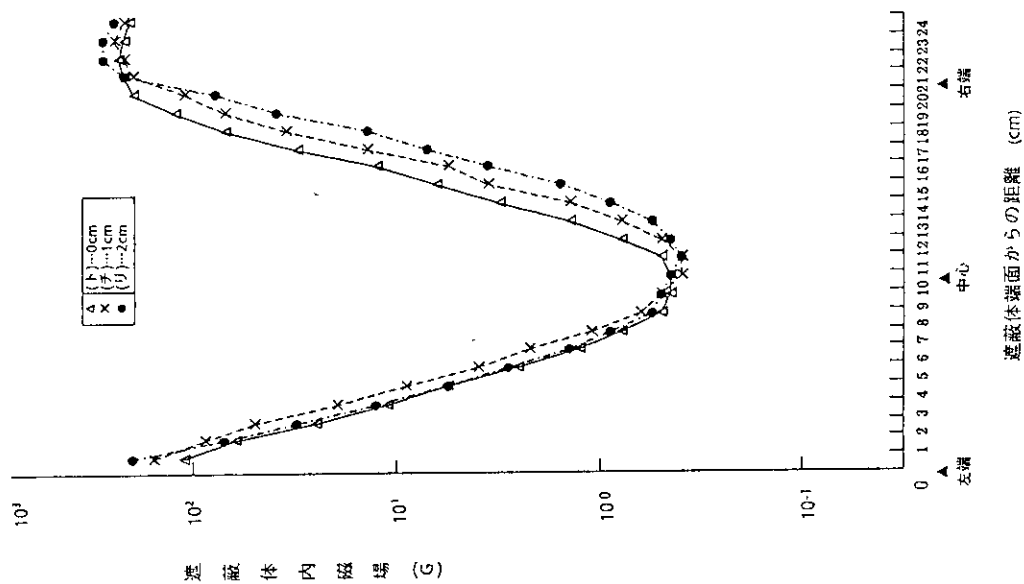


図 5.18 PMS 3 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場 115G)

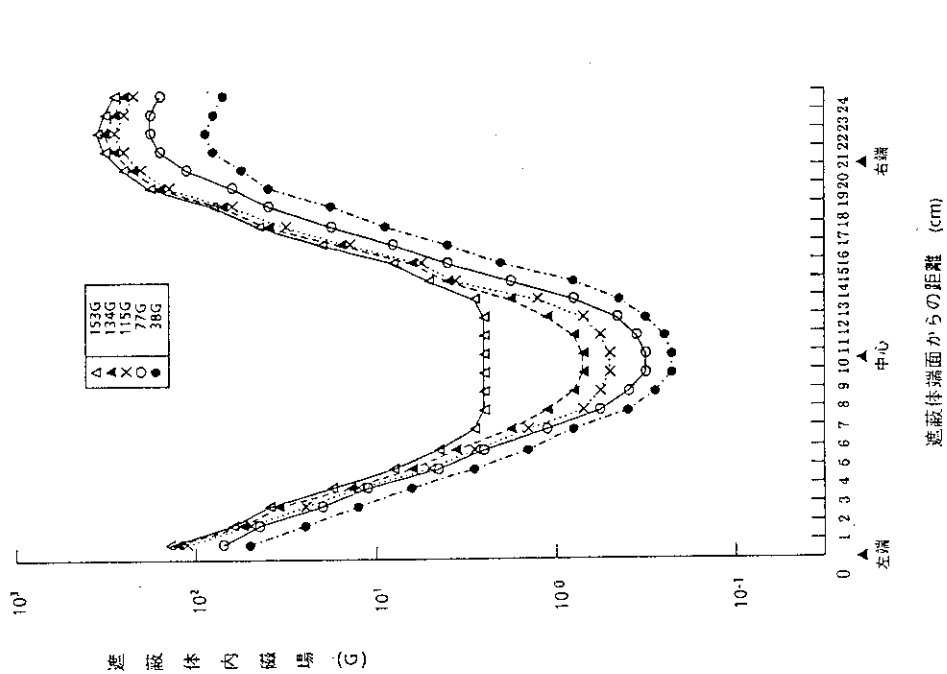


図 5.17 PMS 3 による均一磁場の遮蔽
(外部磁場の变化, 位置(ト)…中心軸上)

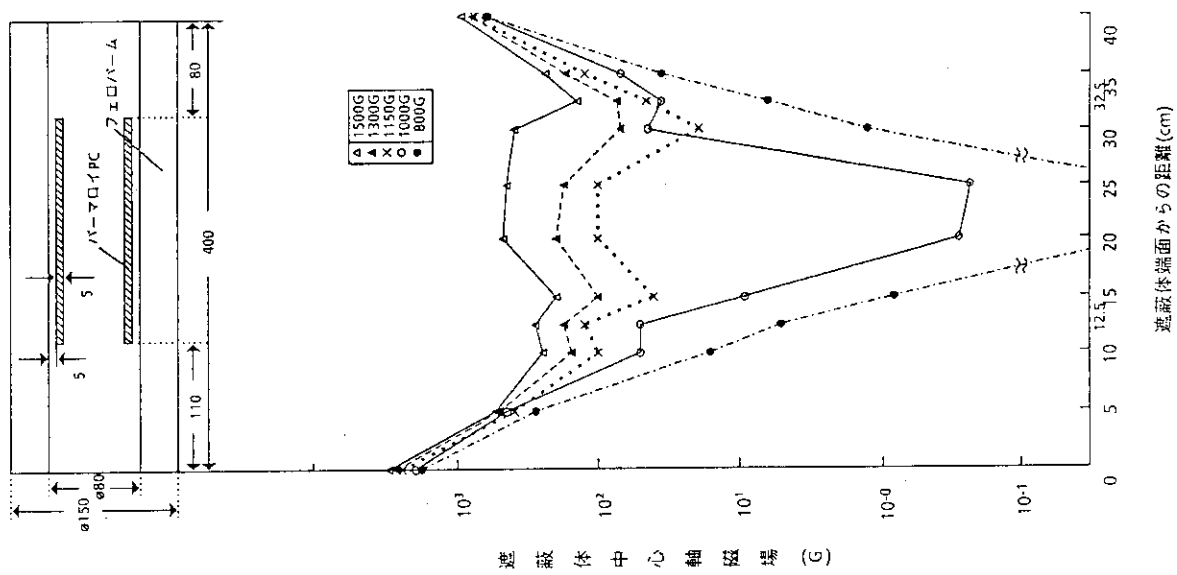


図 5.19 PMS 4 による均一磁場の遮蔽

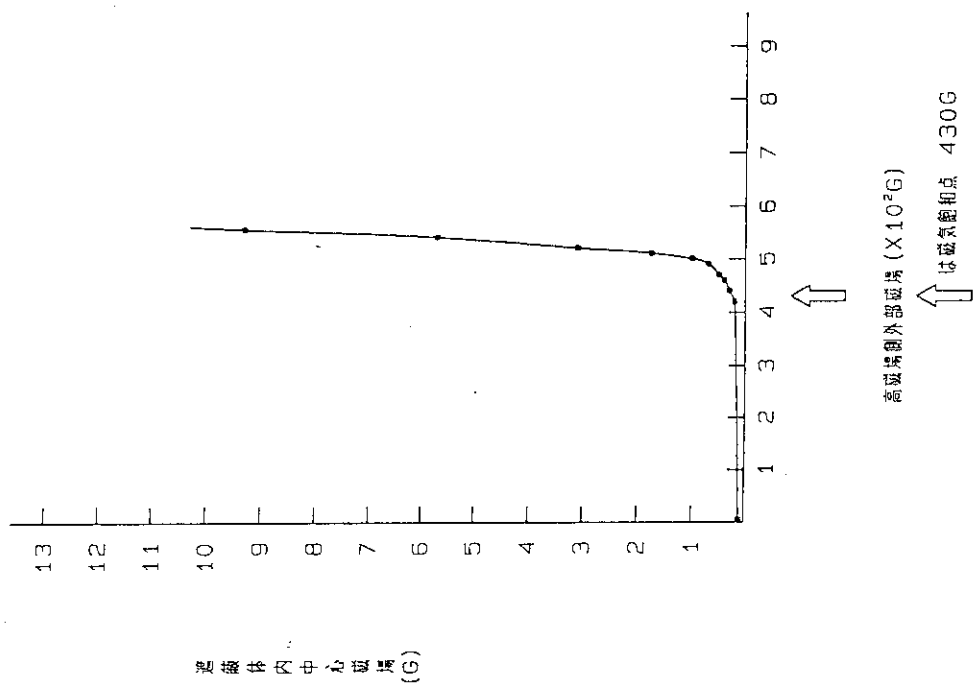


図 5.20 PMS 1 の傾斜磁場での磁気飽和

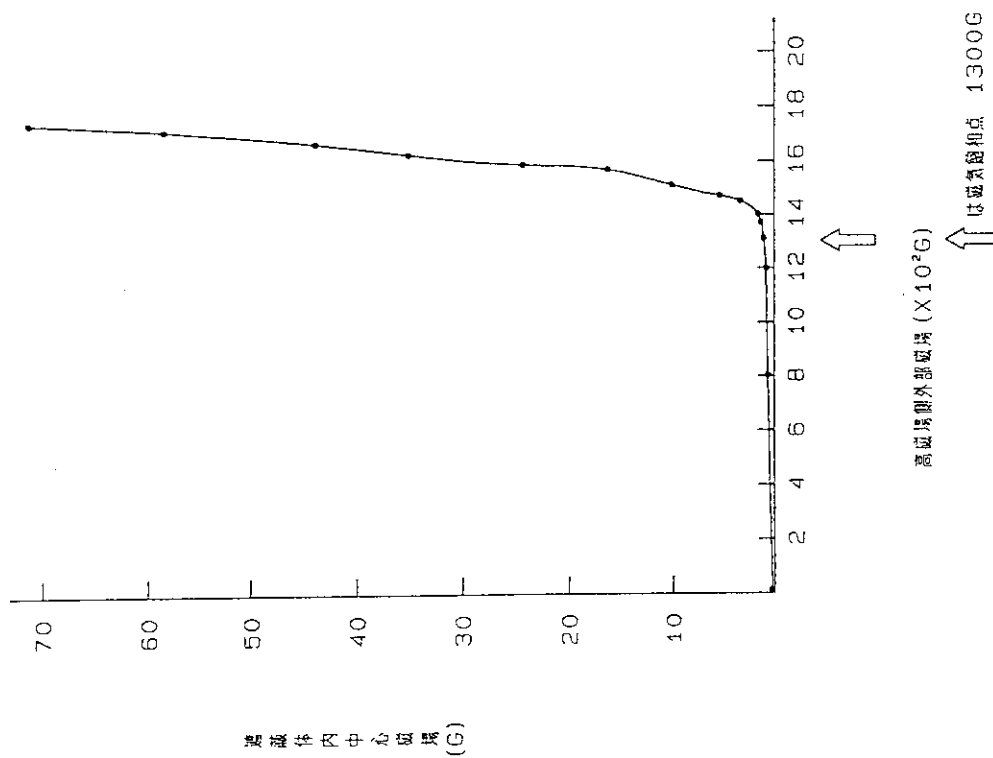


図 5.21 PMS 2 の傾斜磁場での磁気飽和

6. まとめと結論

イオン源タンク、中性化セル、フォトマルの各部分の磁気遮蔽体を設計するに当り、中磁場用 (PMS1)、強磁場用 (PMS2)、内部用 (PMS3) 3種のフォトマル遮蔽体を設計・試作し、①手計算による初期設計で肉厚を算出→②コンピュータシミュレーションにより該肉厚での内部磁場の推定→③試作した遮蔽体を実際に均一平行磁場内に入れて遮蔽された内部磁場を実測、①～③の三階段のデータを比較し中性化セル及びイオン源タンクの設計を適正化するためにこれを参考にした。

フォトマルの初期設計では同一材質の厚肉円筒にて、強磁場 (1000 G) から常磁場 (1 G) まで一挙に低下させようとの試みであった故に、使用される材料は外層から内層にかけて連続的に低下する磁場に遭遇する。このとき、材料の透磁率は遭遇する磁場の低下に応じて外層から内層にかけて連続的に増加する。従来の計算方法では材料の透磁率を固定的に考えて、これを種々の磁気遮蔽計算式に入れ、得られた計算結果と実測値との整合性を評価することにより、採用した計算式及び該式の係数などを論ずることが多かった。ここでは、材料の透磁率の傾斜に対応するため材料を磁気勾配に沿って仮想的に多層分割し、各層の最大磁場に依じた透磁率を夫々の層に適用して遮蔽率を逐次計算する仮想分割遮蔽計算法 (仮想分割法) を考案し、コンピュータシミュレーションの前段階での計算で有用であることを示した。

表 6.1 は、フォトマル遮蔽体 PMS1、PMS2 及び中性化セル遮蔽体について、1. 仮想分割法、2. コンピュータシミュレーション、3. 均一磁場中での実測の三つの場合の内部磁場を比較したものである。

まとめ

1. 内部磁場に関する三者のデータはオーダー的には同じ水準にあり、全般的にはまずまずの推定精度を示していると思われる。この結果より、遮蔽の厚みに対して安全係数がとれる場合は、仮想分割法のみでも有効な設計ベースとなりうる。
2. しかし、PMS2 について、当初このものは外部磁場 1000 G 用として設計したが実測では 900 G で飽和した。また、コンピュータシミュレーションでも 900 G での飽和を示し、この場合、仮想分割法の設計値は若干甘かった事を示している。しかし、結果的に PMS2 はその中に内部遮蔽 PMS3 (パーマロイ PC 製) を設けることになっており、このものは 115 G の外部磁場を 1 G 以下に遮蔽する実測値が得られているので実用的には問題ない。
3. 中性化セルについては実測値が無いが、仮想分割法もコンピュータシミュレーションもともに外部磁場 1000 G を 1 G 以下に遮蔽する推定値を出しており、実際にはこの内部に厚さ 5 mm のパーマロイ PC 製中性化セル本体が設けられ、且つ、傾斜磁場で使用されることから実用上は全く問題ないものと考えている。
4. イオン源タンクの遮蔽について、仮想分割法では 250 G の均一磁場内で、遮蔽体の計算厚みは、12.3 cm であった。しかし、スペースの制約から実際使用できる厚みは最大 10 cm であり、

- 且つ実際は 250 G ~ 100 G の傾斜磁場であること、被遮蔽体であるイオン源の性質などを考慮して、遮蔽体の設計厚みは 10 cm とした。尚、この場合フェロパーム厚板は製造時に 10 cm で圧延され、そのままカットして研磨等の工程を経ず使用されるので $\alpha = 0.9$ とした。また、形状補正係数はなるべく小さくしたいので形状は、正 8 角形の断面形状 ($\beta = 2.8$) とした。
5. 均一磁場と傾斜磁場における遮蔽性能に関して、表 6.2 に PMS 1 と PMS 2 の場合についてそれぞれの比較データをまとめた。傾斜磁場での磁気飽和点の向上の率は、磁場の傾斜率が大きくなるほど大きく、傾斜率 2.9 のとき 25 %、5.3 のとき 44 % のアップとなる。
 6. 円筒形遮蔽に関し、均一な磁場を円筒軸方向にかけた場合と、軸に直角な方向にかけた場合を比べると、遮蔽は後者のほうがより効率が悪いことが判明した。
 7. コンピュータシミュレーションといえども、メッシュの切り方により、大幅に遮蔽後の値が変わってくる可能性があるため、注意を要する。また、パーマロイ等の材料は、加工中のストレスにより、大幅に透磁率が変わってくるため、安全係数のとり方に注意をする必要がある。

表 6.1 仮想分割法, コンピュータシミュレーションと実測値との比較

項 目 \ 遮 蔽 体	PMS 1	PMS 2	中性化セル
材 質	フェロパーム	フェロパーム	フェロパーム
サイズ (mm)			
外 径	80 ϕ	150 ϕ	260 ϕ
肉 厚	10	35	75
長 さ	300	400	678
外部磁場設計値	外部磁場 350 G	外部磁場 1000 G	1000 G
内 部 磁 場 (G)			
1. 仮想分割法	0.875	0.4	0.6
2. コンピュータ シミュレーション	1.1	1.2	0.88
3. 均一磁場内実測値	0.75	1.35	—
飽和外部磁場測定値	345	900	—

表 6.2 傾斜磁場における磁気飽和点の向上

	PMS 1 (比率)	PMS 2 (比率)
均一磁場での磁気飽和点 (G)	345 (100)	900 (100)
傾斜磁場での磁気飽和点 (G)	430 (125)	1300 (144)
傾斜率* (A/B)	2.9*	5.3*
高磁場側 (A)	1.03**	1.03**
低磁場側 (B)	0.35**	0.195**

* 傾斜率とは遮蔽体の低磁場側の外部磁場を 1.0 としたときの高磁場側の磁場の値である。

** これらの値は、均一磁場での磁場強度を 1.0 としたときの規格化された磁場強度を示す。

謝 辞

本論文中の実験は東北大学電子工学科 佐藤 (徳) 研究室の QT-Upgrade Machine を用いて行われた。同装置の使用を快く承諾して下さった佐藤徳芳教授、畠山力三助教授を初めとする佐藤研究室の方々に深く感謝いたします。

本磁気シールドは LAPPS の一部であり、設計に当たっては LAPPS の関係者、LLNL の J. Foote 博士、D. Nilson 技師、広島大学尾田年充教授を初めとして日本鋼管テクノスの真田繁氏、田花製作所の田中日出男社長など数多くの方々に御協力戴いた。また原研加熱工学第 1 研究室の小原祥裕氏、水野誠氏、田中茂氏にはヘリウム中性粒子ビーム源及び磁気シールドの設計にあたり多大のコメントを戴いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- Free Electron Laser Experiments in Alcatraz C, edited by K.I. Thomassen, LLNL Report No. LLL-PROP-00202, 1986.
または小田島和男, 日本原子力学会誌 Vol. 31, (1989) 1093.
- T. Oda, K. Odajima, K. Mizuno, et al., Rev. Sci. Instrum. 61 (1990) 2964.
または K. Odajima, T. Oda, M. Shiho, et al., "MTX Microwave-Electric Field Diagnostic" JAERI-M 90-088 (1990).
- 田中茂, 堀池寛, 伊藤孝雄, 他 "JT-60 中性粒子入射装置の磁気遮蔽", JAERI-M 82-140.
- 大森俊道, 鈴木治雄, 三瓶哲也, 八子一了, 加根魯和宏, 日本金属学会会報 第 29 卷 (1990) 364.

表 6.2 傾斜磁場における磁気飽和点の向上

	PMS 1 (比率)	PMS 2 (比率)
均一磁場での磁気飽和点 (G)	345 (100)	900 (100)
傾斜磁場での磁気飽和点 (G)	430 (125)	1300 (144)
傾斜率* (A/B)	2.9*	5.3*
高磁場側 (A)	1.03**	1.03**
低磁場側 (B)	0.35**	0.195**

* 傾斜率とは遮蔽体の低磁場側の外部磁場を 1.0 としたときの高磁場側の磁場の値である。

** これらの値は、均一磁場での磁場強度を 1.0 としたときの規格化された磁場強度を示す。

謝 辞

本論文の実験は東北大学電子工学科 佐藤 (徳) 研究室の QT-Upgrade Machine を用いて行われた。同装置の使用を快く承諾して下さった佐藤徳芳教授、畠山力三助教授を初めとする佐藤研究室の方々に深く感謝いたします。

本磁気シールドは LAPPS の一部であり、設計に当たっては LAPPS の関係者、LLNL の J. Foote 博士、D. Nilson 技師、広島大学尾田年充教授を初めとして日本鋼管テクノスの真田繁氏、田花製作所の田中日出男社長など数多くの方々に御協力戴いた。また原研加熱工学第 1 研究室の小原祥裕氏、水野誠氏、田中茂氏にはヘリウム中性粒子ビーム源及び磁気シールドの設計にあたり多大のコメントを戴いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- Free Electron Laser Experiments in Alcator C, edited by K.I. Thomassen, LLNL Report No. LLL-PROP-00202, 1986.
または小田島和男, 日本原子力学会誌 Vol. 31, (1989) 1093.
- T. Oda, K. Odajima, K. Mizuno, et al., Rev. Sci. Instrum. 61 (1990) 2964.
または K. Odajima, T. Oda, M. Shiho, et al., "MTX Microwave-Electric Field Diagnostic" JAERI-M 90-088 (1990).
- 田中茂, 堀池寛, 伊藤孝雄, 他 "JT-60 中性粒子入射装置の磁気遮蔽", JAERI-M 82-140.
- 大森俊道, 鈴木治雄, 三瓶哲也, 八子一了, 加根魯和宏, 日本金属学会会報 第 29 巻 (1990) 364.

表 6.2 傾斜磁場における磁気飽和点の向上

	PMS 1 (比率)	PMS 2 (比率)
均一磁場での磁気飽和点 (G)	345 (100)	900 (100)
傾斜磁場での磁気飽和点 (G)	430 (125)	1300 (144)
傾斜率* (A/B)	2.9*	5.3*
高磁場側 (A)	1.03**	1.03**
低磁場側 (B)	0.35**	0.195**

* 傾斜率とは遮蔽体の低磁場側の外部磁場を 1.0 としたときの高磁場側の磁場の値である。

** これらの値は、均一磁場での磁場強度を 1.0 としたときの規格化された磁場強度を示す。

謝 辞

本論文の実験は東北大学電子工学科 佐藤 (徳) 研究室の QT-Upgrade Machine を用いて行われた。同装置の使用を快く承諾して下さった佐藤徳芳教授、畠山力三助教授を初めとする佐藤研究室の方々に深く感謝いたします。

本磁気シールドは LAPPS の一部であり、設計に当たっては LAPPS の関係者、LLNL の J. Foote 博士、D. Nilson 技師、広島大学尾田年充教授を初めとして日本鋼管テクノスの真田繁氏、田花製作所の田中日出男社長など数多くの方々に御協力戴いた。また原研加熱工学第 1 研究室の小原祥裕氏、水野誠氏、田中茂氏にはヘリウム中性粒子ビーム源及び磁気シールドの設計にあたり多大のコメントを戴いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- Free Electron Laser Experiments in Alcator C, edited by K.I. Thomassen, LLNL Report No. LLL-PROP-00202, 1986.
または小田島和男, 日本原子力学会誌 Vol. 31, (1989) 1093.
- T. Oda, K. Odajima, K. Mizuno, et al., Rev. Sci. Instrum. 61 (1990) 2964.
または K. Odajima, T. Oda, M. Shiho, et al., "MTX Microwave-Electric Field Diagnostic" JAERI-M 90-088 (1990).
- 田中茂, 堀池寛, 伊藤孝雄, 他 "JT-60 中性粒子入射装置の磁気遮蔽", JAERI-M 82-140.
- 大森俊道, 鈴木治雄, 三瓶哲也, 八子一了, 加根魯和宏, 日本金属学会会報 第 29 卷 (1990) 364.

表 5.2 QUMの軸方向磁場分布
(電流251A)

入口からの 距離 (cm)	磁 場 (G)	入口からの 距離 (cm)	磁 場 (G)
50	115	125	1010
55	145	130	1010
60	195	135	1000
65	255	140	1000
70	350	145	1000
75	470	150	1000
80	620	155	1000
85	780	160	1000
90	920	165	1000
95	1000	170	1000
100	1030	175	990
105	1020	180	990
110	1010	185	980
116	1010	190	960
120	1010	195	--

表 5.1 QUMの残留磁場
(電流0A)

入口からの 距離 (cm)	磁 場 (G)	入口からの 距離 (cm)	磁 場 (G)
100	0.290	150	0.710
105	0.335	155	0.690
110	0.550	160	0.700
115	0.655	165	0.690
120	0.700	170	0.680
125	0.655	175	0.650
130	0.630	180	0.610
135	0.710	185	0.600
140	0.725	190	0.605
145	0.720	195	0.590

表 5.4 QUMの電流と磁場強度

電 流 (A)	中央部(155cm)	端部(195cm)
0	0.82 G ↓	0.59 G
100	390 ↓	↑ 375
200	770 ↓	↑ 790
300	1,160 ↓	↑ 1,100
400	1,540 ↓	↑ 1,520
500	1,910 ↓	↑ 1,850
600	2,300 ↓	↑ 2,210
700	2,700 ↓	↑ 2,600
(777)	(3,000) ↓	↑
800	3,100 ↓	↑ 2,970
900	3,480 ↓	↑
1,000	3,880 ↓	↑

徐々に電流を上げる

表 5.3 QUMの残留磁場

(電流777A)

入口からの距離 (cm)	磁 場 (G)	入口からの距離 (cm)	磁 場 (G)
100	3,000	150	3,000
105	3,080	155	2,990
110	3,080	160	2,990
115	3,010	165	2,990
120	3,000	170	2,990
125	3,000	175	2,980
130	3,000	180	2,990
135	3,000	185	2,910
140	3,000	190	2,890
145	3,000	195	2,880

表 5.6 PMS 2 の磁気飽和

電 流 (A)	外部磁場 (G)	内部磁場 (G)	電 流 (A)	外部磁場 (G)	内部磁場 (G)
0	0	0.11	245	938	3.35
20	77	0.17	250	958	6.5
40	153	0.19	255	977	14
60	230	0.21	260	996	20
80	306	0.23	265	1015	29
100	383	0.23	270	1034	38
120	460	0.24	275	1053	48
140	536	0.25	280	1072	58
160	618	0.33	285	1092	71
170	651	0.39	290	1110	81
180	689	0.46	295	1130	95
185	709	0.50	300	1149	106
190	728	0.55	305	1168	120
195	747	0.60	310	1187	133
200	766	0.65	315	1206	146
205	785	0.70	320	1226	158
210	804	0.75	325	1245	174
215	823	0.82	330	1264	189
220	843	0.94	335	1283	203
225	862	1.04	340	1302	220
230	881	1.17	345	1321	235
235	900*	1.38	350	1341	255
240	919	1.84	—	—	—

※印は磁気飽和点

表 5.5 PMS 1 の磁気飽和

電 流 (A)	内部磁場 (G)	内部磁場 (G)	電 流 (A)	内部磁場 (G)	内部磁場 (G)
22	84	-0.01	105	403	27
40	153	0.015	107	410	33
60	230	0.14	110	421	44
80	307	0.34	112	429	49
85	326	0.44	115	441	60
90	345*	0.69	117	449	67
92	353	1.35	120	460	77
94	360	1.90	130	498	115
96	368	4.4	132	506	120
98	376	7.6	135	517	133
100	383	11	137	525	140
103	395	21	140	536	150

※印は磁気飽和点

表 5.7 PMS 3 の磁気飽和

電流 (A)	外部磁場 (G)	内部磁場 (G)	電流 (A)	外部磁場 (G)	内部磁場 (G)
0	0	0.116	36	138	0.88
6	23.0	0.195	37	142	1.05
10	38.3	0.220	38	146	1.35
15	57.5	0.260	39	149	1.75
20	76.6	0.305	40	153	2.7
25	95.8	0.365	41	157	6.0
30	115	0.485	42	161	14.0
31	119*	0.51	43	165	18.0
32	123	0.56	44	169	24.5
33	126	0.61	45	172	35.0
34	130	0.69	---	---	---
35	134	0.76	---	---	---

*印は磁気飽和点

表 5.8 PMS 4 の磁気飽和

電流 (A)	(H ₀) 外部磁場 (G)	(H ₁) 内部磁場 (G)	電流 (A)	(H ₀) 外部磁場 (G)	(H ₁) 内部磁場 (G)
0	0.8	-0.140	320	1,232	131
100	385	-0.140	330	1,271	155
200	770	-0.135	340	1,303	175
212	816	-0.130	350	1,348	215
220	847	-0.130	370	1,425	280
231	889	-0.128	390	1,500	355
240	924	-0.120	410	1,579	432
250	963	-0.095	430	1,656	520
260	1,000	-0.070	450	1,733	623
270	1,040	+0.25	470	1,810	735
272.5	1,050*	+0.55	490	1,887	782
275	1,059	+1.55	510	1,964	940
277.5	1,068	7.8	530	2,040	1,050
280	1,078	15.0	550	2,113	1,150
282	1,086	22.5	570	2,195	1,240
284	1,093	29.0	590	2,272	1,320
286	1,100	35.5	610	2,349	1,400
288	1,109	41	630	2,426	1,500
290	1,117	47	650	2,503	1,500
295	1,136	61	700	2,695	1,780
300	1,155	75	750	2,888	1,980
310	1,194	102	800	3,080	2,200

*印は磁気飽和点

表 5.9 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS1
 実験条件 : 電流 60A
 外部磁場 (均一) 230G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 内面方向への距離 (cm)		(イ) 0 cm (中心)	(ロ) 1 cm	(ハ) 2 cm
	遮蔽体 後面から	遮蔽体 前面から			
-4	0.8	0.8	330	320	315
-2	2.8	2.8	84	74	42
基準点 0	4.8	4.8	21	15.8	9.1
2	6.8	6.8	3.9	3.8	1.85
4	8.8	8.8	0.81	0.78	0.41
6	10.8	10.8	0.22	0.27	0.17
8	12.8	12.8	0.12	0.16	0.13
10	14.8	14.8	0.10	0.14	0.11
12	16.8	16.8	0.10	0.16	0.11
14	18.8	18.8	0.14	0.21	0.13
16	20.8	20.8	0.43	0.46	0.27
18	22.8	22.8	2.1	1.82	1.02
20	24.8	24.8	9.5	8.2	4.7
22	26.8	26.8	52	44	24
24	28.8	28.8	190	175	145
25	29.8	29.8	430	340	330
26	30.8	30.8	490	500	610
27	31.8	31.8	570	525	620

↓ 遮蔽体の外部

表 5.10 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS1
 実験条件 : 電流 80A
 外部磁場 (均一) 306G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 内面方向への距離 (cm)		(イ) 0 cm (中心)	(ロ) 1 cm	(ハ) 2 cm
	遮蔽体 後面から	遮蔽体 前面から			
-4	0.8	0.8	700	450	375
-2	2.8	2.8	137	135	53
基準点 0	4.8	4.8	24	21.3	11.2
2	6.8	6.8	5.0	4.15	2.6
4	8.8	8.8	1.25	1.35	0.67
6	10.8	10.8	0.41	0.65	0.43
8	12.8	12.8	0.32	0.34	0.31
10	14.8	14.8	0.31	0.31	0.32
12	16.8	16.8	0.31	0.33	0.30
14	18.8	18.8	0.36	0.36	0.34
16	20.8	20.8	0.68	0.67	0.47
18	22.8	22.8	2.4	2.4	1.52
20	24.8	24.8	12.3	10.5	6.6
22	26.8	26.8	57	54	33
24	28.8	28.8	280	230	167
25	29.8	29.8	460	450	460
26	30.8	30.8	660	520	780
27	31.8	31.8	750	525	830

↓ 遮蔽体の外部

表 5.11 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMSI
 実験条件 : 電流 90A
 外部磁場 (均一) 345G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 内周方向への位置 (cm)		(I) 0 cm (中心)	(O) 1 cm	(H) 2 cm
	遮蔽体 端面から	の距離			
-4	0.8		790	485	410
-2	2.8		132	115	62
基準点 0	4.8		30	24	13.5
2	6.8		6.3	4.85	3.1
4	8.8		1.53	1.42	0.90
6	10.8		0.72	0.71	0.57
8	12.8		0.70	0.68	0.62
10	14.8		0.75	0.73	0.67
12	16.8		0.72	0.71	0.63
14	18.8		0.69	0.67	0.60
16	20.8		1.35	0.95	0.68
18	22.8		3.2	2.8	1.60
20	24.8		15.0	12.2	7.4
22	26.8		65	61	36
24	28.8		275	245	192
25	29.8		510	510	540
26	30.8		710	760	890
27	31.8		840	860	930

↓ 遮蔽体の外部

表 5.12 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMSI
 実験条件 : 電流 95A
 外部磁場 (均一) 364G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 内周方向への位置 (cm)		(I) 0 cm (中心)	(O) 1 cm	(H) 2 cm
	遮蔽体 端面から	の距離			
-4	0.8		535	495	480
-2	2.8		149	124	60
基準点 0	4.8		33	42	14
2	6.8		7.3	5.7	4.2
4	8.8		2.1	1.60	0.95
6	10.8		1.42	1.37	0.77
8	12.8		2.30	1.95	1.58
10	14.8		2.80	2.45	2.05
12	16.8		2.40	2.10	1.62
14	18.8		1.60	1.47	1.45
16	20.8		1.40	1.3	0.77
18	22.8		3.2	3.3	1.80
20	24.8		13.5	14.5	8.0
22	26.8		64	57	43
24	28.8		300	270	230
25	29.8		525	520	550
26	30.8		745	800	970
27	31.8		880	900	990

↓ 遮蔽体の外部

表 5.14 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS2
 実験条件 : 電流 160A
 外部磁場 (均一) 613G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 円周方向への位置 (cm)		(ニ) 0 cm (中心)	(ホ) 1 cm	(ヘ) 2 cm
	遮蔽体 表面から の距離 (cm)	遮蔽体 表面から の距離 (cm)			
-6	2.3		530	500	500
-4	4.3		205	172	98
-2	6.3		64	57	23
基準点 0	8.3		21.5	18	7.2
2	10.3		6.3	5.0	2.2
4	12.3		2.3	1.65	0.90
6	14.3		0.80	0.72	0.39
8	16.3		0.41	0.39	0.31
10	18.3		0.28	0.28	0.24
12	20.3		0.25	0.26	0.25
14	22.3		0.26	0.28	0.26
16	24.3		0.30	0.33	0.27
18	26.3		0.43	0.46	0.31
20	28.3		0.88	1.03	0.39
22	30.3		2.5	2.72	0.73
24	32.3		6.7	6.9	1.82
26	34.3		23	19.9	5.1
28	36.3		73	75	17.9
30	38.3		242	210	67
32	40.3		650	720	380
34	42.3		1350	1200	1410
36	44.3		1360	1390	1520
38	46.3		1300	1300	1370

↓ 遮蔽体の外部

表 5.13 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS1
 実験条件 : 電流 100A
 外部磁場 (均一) 383G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 円周方向への位置 (cm)		(イ) 0 cm (中心)	(ロ) 1 cm	(ハ) 2 cm
	遮蔽体 表面から の距離 (cm)	遮蔽体 表面から の距離 (cm)			
-4	0.8		570	540	510
-2	2.8		145	113	67
基準点 0	4.8		35	28	14.5
2	6.8		7.6	5.9	3.6
4	8.8		4.2	2.48	1.75
6	10.8		4.6	4.45	4.4
8	12.8		9.2	9.1	9.6
10	14.8		12.3	13.5	12.5
12	16.8		10.9	10.0	10.7
14	18.8		6.3	6.1	5.9
16	20.8		3.2	4.2	2.2
18	22.8		4.1	4.3	2.5
20	24.8		14.5	14.2	8.9
22	26.8		80	63	42
24	28.8		310	310	235
25	29.8		560	560	635
26	30.8		770	820	1050
27	31.8		920	940	1030

↓ 遮蔽体の外部

表 5.15 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS2
 実験条件 : 電流 185A
 外部磁場 (均一) 709G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 円周方向への距離 (cm)		(一) 0 cm (中心)	(ホ) 1 cm	(ハ) 2 cm
	遮蔽体 前面から	遮蔽体 後面から			
-6	2.3	2.3	720	535	490
-4	4.3	4.3	230	180	95
-2	6.3	6.3	75	58	27
基準点 0	8.3	8.3	25	19.5	8.5
2	10.3	10.3	7.7	5.9	2.6
4	12.3	12.3	2.6	2.0	1.1
6	14.3	14.3	1.04	0.85	0.58
8	16.3	16.3	0.58	0.55	0.45
10	18.3	18.3	0.45	0.41	0.36
12	20.3	20.3	0.39	0.42	0.35
14	22.3	22.3	0.44	0.45	0.45
16	24.3	24.3	0.49	0.50	0.45
18	26.3	26.3	0.65	0.67	0.47
20	28.3	28.3	1.15	1.24	0.57
22	30.3	30.3	2.9	3.10	0.98
24	32.3	32.3	7.7	8.20	2.0
26	34.3	34.3	23.5	26	6.3
28	36.3	36.3	86	95	21.2
30	38.3	38.3	270	300	79
32	40.3	40.3	760	820	410
34	42.3	42.3	1330	1440	1550
36	44.3	44.3	1550	1560	1750
38	46.3	46.3	1510	1470	1590

↓ 遮蔽体の外部

表 5.16 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS2
 実験条件 : 電流 210A
 外部磁場 (均一) 804G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体中心から 円周方向への距離 (cm)		(一) 0 cm (中心)	(ホ) 1 cm	(ハ) 2 cm
	遮蔽体 前面から	遮蔽体 後面から			
-6	2.3	2.3	770	610	560
-4	4.3	4.3	270	190	109
-2	6.3	6.3	82	73	30.5
基準点 0	8.3	8.3	27	23	9.6
2	10.3	10.3	8.3	6.4	3.1
4	12.3	12.3	3.0	2.4	1.37
6	14.3	14.3	1.3	1.1	0.79
8	16.3	16.3	0.78	0.73	0.63
10	18.3	18.3	0.63	0.62	0.59
12	20.3	20.3	0.61	0.62	0.53
14	22.3	22.3	0.65	0.66	0.74
16	24.3	24.3	0.70	0.71	0.63
18	26.3	26.3	0.88	0.89	0.70
20	28.3	28.3	1.50	1.49	0.80
22	30.3	30.3	3.5	3.7	1.25
24	32.3	32.3	10	9.5	2.56
26	34.3	34.3	28.5	30	7.1
28	36.3	36.3	105	105	24.8
30	38.3	38.3	330	350	95
32	40.3	40.3	850	950	435
34	42.3	42.3	1490	1560	1850
36	44.3	44.3	1780	1800	1980
38	46.3	46.3	1700	1680	1800

↓ 遮蔽体の外部

表 5.17 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS2
 実験条件 : 電流 235A
 外部磁場 (均一) 900G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体内から 内面方向への距離 (cm)		(二) 0 cm (中心)	(ホ) 1 cm	(〜) 2 cm
	遮蔽体 端面から (cm)	遮蔽体中心から (cm)			
-6	2.3	2.3	880	725	610
-4	4.3	4.3	330	250	121
-2	6.3	6.3	88	76	33
基準点 0	8.3	8.3	29	22	10.5
2	10.3	10.3	9.5	7.5	3.7
4	12.3	12.3	3.5	2.8	1.78
6	14.3	14.3	1.80	1.50	1.18
8	16.3	16.3	1.42	1.31	1.09
10	18.3	18.3	1.33	1.20	1.18
12	20.3	20.3	1.35	1.30	1.10
14	22.3	22.3	1.40	1.35	1.58
16	24.3	24.3	1.41	1.38	1.22
18	26.3	26.3	1.48	1.50	1.39
20	28.3	28.3	2.0	2.0	1.30
22	30.3	30.3	4.4	4.6	1.53
24	32.3	32.3	11.5	12.8	3.15
26	34.3	34.3	33.5	34.5	8.2
28	36.3	36.3	112	112	26
30	38.3	38.3	390	382	115
32	40.3	40.3	910	1120	505
34	42.3	42.3	1660	1780	2040
36	44.3	44.3	1980	2000	2220
38	46.3	46.3	1900	1850	1990

↓ 遮蔽体の外部

表 5.18 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS2
 実験条件 : 電流 260A
 外部磁場 (均一) 996G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体内から 内面方向への距離 (cm)		(二) 0 cm (中心)	(ホ) 1 cm	(〜) 2 cm
	遮蔽体 端面から (cm)	遮蔽体中心から (cm)			
-6	2.3	2.3	950	760	635
-4	4.3	4.3	410	245	140
-2	6.3	6.3	95	80	39.5
基準点 0	8.3	8.3	33	26	12.4
2	10.3	10.3	11.4	8.0	4.6
4	12.3	12.3	6.0	5.0	3.1
6	14.3	14.3	6.5	6.4	3.8
8	16.3	16.3	11.0	11.0	8.6
10	18.3	18.3	16.7	16.0	16.8
12	20.3	20.3	20.0	20.5	20.0
14	22.3	22.3	19.8	19.8	27
16	24.3	24.3	17.0	16.4	16
18	26.3	26.3	13.1	13.0	16.8
20	28.3	28.3	9.2	8.0	7.9
22	30.3	30.3	7.9	7.9	3.5
24	32.3	32.3	13.5	12.5	4.1
26	34.3	34.3	35	35	9.2
28	36.3	36.3	121	120	29.5
30	38.3	38.3	460	390	120
32	40.3	40.3	1100	1150	530
34	42.3	42.3	1870	1940	2230
36	44.3	44.3	2220	2230	2450
38	46.3	46.3	2120	2120	2200

↓ 遮蔽体の外部

表 5.20 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS3
 実験条件 : 電流 20A
 外部磁場 (均一) 77G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体 内部からの距離 (cm)		(A) 0 cm (中心)	(B) 1 cm	(C) 2 cm
	遮蔽体中心から	中間方向への距離			
-4	0.8		75	102	146
-3	1.8		45	56	46
-2	2.8		22	29	22
-1	3.8		11	13	8.6
基準点 0	4.8		4.5	5.9	4.0
1	5.8		2.45	2.85	2.15
2	6.8		1.13	1.40	1.10
3	7.8		0.57	0.65	0.58
4	8.8		0.38	0.38	0.37
5	9.8		0.31	0.28	0.30
6	10.8		0.29	0.24	0.27
7	11.8		0.33	0.25	0.25
8	12.8		0.47	0.32	0.27
9	13.8		0.82	0.48	0.37
10	14.8		1.68	0.91	0.61
11	15.8		3.85	1.95	1.14
12	16.8		7.9	4.2	2.32
13	17.8		16.5	8.5	4.7
14	18.8		36	18	10.9
15	19.8		71	42	23
16	20.8		111	83	59
17	21.8		152	145	149
18	22.8		165	170	195
19	23.8		164	168	185
20	24.8		149	157	162

↓ 遮蔽体の外部

表 5.19 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS3
 実験条件 : 電流 10A
 外部磁場 (均一) 38G
 測定値 : 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体 内部からの距離 (cm)		(A) 0 cm (中心)	(B) 1 cm	(C) 2 cm
	遮蔽体中心から	中間方向への距離			
-4	0.8		46	57	61
-3	1.8		25	30	22
-2	2.8		13	16	10.5
-1	3.8		6.0	6.9	5.3
基準点 0	4.8		2.85	2.75	2.20
1	5.8		1.35	1.55	1.23
2	6.8		0.76	0.70	0.61
3	7.8		0.39	0.39	0.39
4	8.8		0.27	0.26	0.28
5	9.8		0.22	0.19	0.23
6	10.8		0.21	0.18	0.20
7	11.8		0.23	0.18	0.19
8	12.8		0.29	0.22	0.21
9	13.8		0.48	0.32	0.24
10	14.8		0.82	0.57	0.37
11	15.8		1.76	1.15	0.64
12	16.8		4.1	2.4	1.15
13	17.8		8.4	4.9	2.3
14	18.8		18	10.9	4.9
15	19.8		36	22	11
16	20.8		58	49	23
17	21.8		83	73	73
18	22.8		91	92	102
19	23.8		90	91	95
20	24.8		82	85	85

↓ 遮蔽体の外部

表 5.21 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS3
 実験条件 : 電流 30A
 測定値 : 外部磁場 (均一) 115G
 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体		(4) 0 cm (中心)	(D) 1 cm	(H) 2 cm
	遮蔽体 表面から (cm)	遮蔽体中心から 内面方向への距離 (cm)			
-4	0.8	105	155	185	
-3	1.8	57	90	65	
-2	2.8	26	45	31	
-1	3.8	11.5	19.5	13.5	
基準点 0	4.8	5.0	8.7	5.6	
1	5.8	2.6	3.9	2.8	
2	6.8	1.40	2.0	1.5	
3	7.8	0.76	1.10	0.86	
4	8.8	0.53	0.64	0.58	
5	9.8	0.47	0.49	0.51	
6	10.8	0.47	0.44	0.44	
7	11.8	0.53	0.43	0.41	
8	12.8	0.79	0.56	0.46	
9	13.8	1.32	0.82	0.56	
10	14.8	3.1	1.38	0.92	
11	15.8	6.3	3.2	1.56	
12	16.8	14.0	5.8	3.3	
13	17.8	30	14.9	6.4	
14	18.8	62	33	15.1	
15	19.8	120	64	37	
16	20.8	195	118	84	
17	21.8	240	205	210	
18	22.8	250	250	290	
19	23.8	237	248	267	
20	24.8	228	230	236	

↓ 遮蔽体の外部

表 5.22 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS3
 実験条件 : 電流 35A
 測定値 : 外部磁場 (均一) 134G
 内部磁場 (G)

プロローブの位置 (cm)	遮蔽体		(4) 0 cm (中心)	(D) 1 cm	(H) 2 cm
	遮蔽体 表面から (cm)	遮蔽体中心から 内面方向への距離 (cm)			
-4	0.8	121	186	228	
-3	1.8	59	102	81	
-2	2.8	32	51	38	
-1	3.8	14	24.5	16.2	
基準点 0	4.8	6.2	10.0	7.1	
1	5.8	3.3	4.7	3.7	
2	6.8	1.75	2.7	1.9	
3	7.8	1.20	1.60	1.15	
4	8.8	0.84	0.99	0.92	
5	9.8	0.75	0.78	0.77	
6	10.8	0.75	0.72	0.73	
7	11.8	0.83	0.73	0.73	
8	12.8	1.20	0.82	0.74	
9	13.8	1.85	1.11	0.84	
10	14.8	3.7	1.70	1.21	
11	15.8	6.8	3.70	1.93	
12	16.8	15.6	7.0	3.9	
13	17.8	43	15.5	7.6	
14	18.8	71	35	17	
15	19.8	145	70	37	
16	20.8	210	150	93	
17	21.8	275	233	250	
18	22.8	290	295	335	
19	23.8	275	300	320	
20	24.8	247	273	275	

↓ 遮蔽体の外部

表 5.23 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS3
 実験条件 : 電流 40A
 測定値 : 外部磁場 (均一) 153G
 遮蔽体 : PMS4
 磁場 : 外部 (均一) 磁場 800~1500G
 測定 : 円筒軸上、軸方向の測定

アローの位置 (cm)	遮蔽体中心から 円筒軸上への位置 (cm)		(イ) 0 cm (中心)	(ロ) 1 cm	(ハ) 2 cm
	遮蔽体 表面から	遮蔽体 内部から			
-4	0.8	1.8	1.39	2.07	2.85
-3	1.8	2.8	6.5	1.05	9.5
-2	2.8	3.8	3.5	5.7	3.5
-1	3.8	4.8	17.3	2.6	1.9
基準点 0	4.8	5.8	7.4	12.5	8.4
1	5.8	6.8	4.5	6.1	4.3
2	6.8	7.8	2.8	3.4	2.6
3	7.8	8.8	2.5	2.60	2.15
4	8.8	9.8	2.4	2.5	2.3
5	9.8	10.8	2.5	2.65	2.65
6	10.8	11.8	2.5	2.9	3.1
7	11.8	12.8	2.45	2.9	3.05
8	12.8	13.8	2.45	2.72	2.7
9	13.8	14.8	2.8	2.58	2.25
10	14.8	15.8	4.5	2.95	2.14
11	15.8	16.8	8.4	4.6	2.7
12	16.8	17.8	20.5	8.7	4.2
13	17.8	18.8	39	17.3	8.6
14	18.8	19.8	78	39	18.5
15	19.8	20.8	151	79	41
16	20.8	21.8	250	156	117
17	21.8	22.8	315	268	283
18	22.8	23.8	330	335	400
19	23.8	24.8	310	340	360
20	24.8		285	310	315

↑ 遮蔽体の外部

表 5.24 遮蔽体内の磁場分布

遮蔽体 : PMS4
 磁場 : 外部 (均一) 磁場 800~1500G
 測定 : 円筒軸上、軸方向の測定

電流 (A)	表中は 内部磁場 (G)		遮蔽体内部からの距離 (cm)											
	220	270	0	5	10	12.5	15	20	25	30	32.5	35	40	
220	800	1720	1720	270	15.9	4.4	0.77	0	0	1.2	6.3	34	550	
270	1,000	2050	2050	420	48	48	9.0	0.3	0.22	45	35	75	590	
310	1,150	2420	2420	380	95	112	37	97	88	16	44	120	790	
350	1,300	2850	2850	470	155	180	95	212	198	71	75	162	790	
400	1,500	2900	2900	500	255	285	210	435	420	410	135	240	920	

表 5.25 傾きのある磁場中での遮蔽効果

遮蔽体 : PMS1
 外部磁場 : 遮蔽体をセットしない時の入口からの距離
 (計算値) 70cm (低磁場側)、100cm (高磁場側) の磁場

電流 (A)	外部磁場計算値 (G)		遮蔽磁場 (G) 中心軸上中央部
	低磁場側 0.35X3.86 I	高磁場側 1.03X3.86 I	
0	0	0	0.11
105	142	417	0.20
108	146*	429*	0.25
110	149	437	0.29
113	153	449	0.33
115	155	457	0.37
118	159	469	0.44
120	162	477	0.52
122	165	485	0.68
125	169	497	1.05
127	172	505	1.75
130	176	520	3.1
135	182	537	5.7
140	189	557	9.3

*印は磁気飽和点

表 5.26 傾きのある磁場中での遮蔽効果

遮蔽体 : PMS2
 外部磁場 : 遮蔽体をセットしない時の入口からの距離
 (計算値) 60cm (低磁場側)、100cm (高磁場側) の磁場

電流 (A)	外部磁場計算値 (G)			遮蔽磁場 (G) 中心軸上中央部
	低磁場側 0.195X3.86 I	高磁場側 1.03X3.86 I		
0	0	0	0	0.094
200	150	795		0.23
230	173	914		0.24
260	195	1034		0.36
280	210	1113		0.45
300	226	1193		0.58
310	233	1232		0.66
320	241	1272		0.76
330	248*	1312*		0.94
340	256	1351		1.14
350	263	1391		1.68
360	271	1431		2.9
370	278	1471		5.5
380	286	1510		9.9
390	294	1550		16.0
400	301	1590		24.2
410	308	1630		35
420	316	1670		46
430	324	1710		58
440	331	1749		71

*印は磁気飽和点