

JAERI-M
9599

JT-60中性粒子入射装置における
残留イオンビームの漏洩磁場対策

1981年8月

松岡 守・伊藤 孝雄・堀池 寛
松田 慎三郎・田中 茂

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JT-60 中性粒子入射装置における残留イオンビームの漏洩磁場対策

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

松岡 守・伊藤 孝雄・堀池 寛

松田 慎三郎・田中 茂

(1981年7月16日受理)

JT-60 中性粒子入射装置においては中性化セルを通したあと中性化されずに残ったイオンビームを偏向磁石によって曲げ、偏向磁石を保護するウォータージャケットとビームダンプの表面で熱化させる。JT-60 のポロイダル電流群よりの漏洩磁場があるとイオンビームはこれによっても曲げられ、このままでは上述の受熱機器の熱負荷が局部的に過大となってしまう。対策として当初磁気シールドにより漏洩磁場を小さな値に抑えることを考え設計を開始したが、検討が進むにつれ磁気シールドを設置する空間の制限のため磁気シールドによる方法では十分に磁場値を抑えるのが困難なことが明らかとなった。そこで代案として打消コイルにより漏洩磁場を打ち消す方式を考え検討を行った。その結果、効果的に磁場の打ち消しが行えることが明らかとなりこの方式を採用することとした。

Countermeasure for Unneutralized Ion Beam in JT-60
NBI against the Leakage Magnetic Field from JT-60

Mamoru MATSUOKA, Takao ITOH, Hiroshi HORIIKE,
Sinzaburo MATSUDA and Shigeru TANAKA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 16, 1981)

Unneutralized ion beam in JT-60 neutral beam injector will be magnetically bent by the reflecting magnet and will impinge on the surface of the water jacket protecting the magnet and on the surface of the beam dump. When the JT-60 Tokamak operates, leakage magnetic field generated by the poloidal currents will be superposed on the above magnetic field. As a result, the trajectory of the ion beam will be displaced and the heat loading of the water jacket and the beam dump will exceed a permissible level unless careful attention is paid to the magnetic field design. As one of the countermeasures against the leakage field, we first considered the magnetic shielding. After the numerical and experimental study, however, it was found difficult to obtain the satisfactory shielding factor due to lack of space. As another countermeasure, the cancellation of magnetic field by a set of additional coils (Cancellation Coils) was proposed and studied. The result showed that the cancellation was effective to reduce the leakage field to a sufficiently low value. Therefore we decided to adopt it in the JT-60 NBI design.

Keywords ; Magnetic Shield, JT-60 Neutral Beam Injector, Beam Dump,
Reflecting Magnet, Heat Loading, Leakage Magnetic Field,
Unneutralized Ion Beam

目 次

1. はじめに.....	1
2. JT-60 からの漏洩磁場と JT-60 NBI における許容磁場値	1
3. 中性化セル磁気シールドおよびイオン源磁気シールドの形状.....	2
4. 漏洩磁場磁気シールド.....	3
4.1 概 説.....	3
4.2 漏洩磁場磁気シールドの形状.....	3
4.3 漏洩磁場磁気シールドの効果の 1/10 モデルによる検証.....	4
5. 打消コイル.....	5
5.1 概 説.....	5
5.2 第 1 打消コイル.....	5
5.3 第 2 打消コイルの併用.....	6
5.4 2 次元磁場解析コードによる打消コイルの評価.....	7
5.5 打消コイル電流の制御.....	8
6. まとめ.....	8
謝 辞.....	9
参 考 文 献.....	9

Contents

1.	Introduction	1
2.	Leakage Magnetic Field from JT-60 and the Permissible Value for NBI	1
3.	Magnetic Shield Structure for Neutralizers and Ion Sources	2
4.	Magnetic Shield against Leakage Field	3
4.1	Outline	3
4.2	Magnetic Shield Structure against Leakage Field	3
4.3	Experimental Confirmation of Magnetic Shield against Leakage Field Using 1/10 Model	4
5.	Cancellation Coils	5
5.1	Outline	5
5.2	Cancellation Coil #1	5
5.3	Addition of Cancellation Coil #2	6
5.4	Evaluation of the Effect of Cancellation Coils by 2 Dimensional Magnetic Field Analysis Code	7
5.5	Control of Cancellation Coil Currents	8
6.	Conclusion	8
	Acknowledgements	9
	References	9

1. は じ め に

JT-60 中性粒子入射装置(JT-60 NBI)は第1図に示すようにJT-60 本体のまわりに上下7ユニット計14ユニット設けられ、トロイダル断面で見てほぼ垂直、ポロイダル断面で見て斜めに中性粒子を入射するものである¹⁾。本装置はトーラスに近接して設置されるため本体のプラズマ電流、ポロイダルコイル電流を発生源とする漏洩磁場にさらされる。この磁場によるソースプラズマやイオンビームへの影響を避けるため、イオン源、中性化セル、中性化セル出口よりビームダンプに至る空間ではこの漏洩磁場を低い値に抑える必要がある。このうちイオン源と中性化セルについては、電磁軟鉄と μ メタルからなる二重磁気シールド構造により漏洩磁場をシールドする事ができる。しかし、中性化セル出口よりビームダンプに至る空間に対しては、これら全体を覆う、例えば主排気タンクそのものを電磁軟鉄製とすると必要な磁気シールドの効果を得るには6 cm厚以上のものとなりその重量が大きくなりすぎ非現実的である。そこで当初磁性材を制限した磁気シールドの検討を行ったが必要なシールド係数を得るのが困難と判明したため、その後打消コイルにより磁場を打ち消す方式について検討を進めた。

磁場分布の検討には磁場解析コードによる方法、磁性材の縮尺モデルによる実測による方法がある。現在原研で利用できる磁場解析コードには2次元(TRIM)²⁾、および3次元(FEM3D)³⁾のものがある。2次元コードTRIMは磁性材の非線形な磁化特性が考慮できるもので空間分割もここで必要とするより細かくとる事ができ計算精度も高いものである。しかしながらプラズマへの中性粒子の入射角が斜めであるため、漏洩磁場の分布と、イオン源、中性化セル、偏向磁石の位置関係、形状は複雑な3次元的なものである。そのため2次元近似がむずかしく、例え強引な近似を行い、2次元コードを用いて計算してもその評価がむずかしい。一方上記の3次元磁場解析コードFEM3Dは円筒対称用で、また形状の比較的簡単な問題を解くのに限られる。そのため今回の目的には不十分と考えられる。磁性材の縮尺モデルを用いた実験による方法は3次元的なものに対し有効な手法である。しかしながら、作業性から実験できるのはたかだか数種のものに限られてしまう。以上のように計算、実験それぞれに制約がある。そこで解析的方法および2次元磁場解析コードによりある程度設計を詰めそれに基づき1/10 縮尺のモデルを製作し実測を行なった。縮尺1/10 は、前述の漏洩磁場対策の2方式の是否が判定可能な測定のできる最小のものとして選んだ。さらに実験で不足な部分を2次元コードによって補い漏洩磁場の対策を決めた。本報告はこの中性化セル出口よりビームダンプに至る空間の漏洩磁場対策についての検討結果を記したものである。

2. JT-60からの漏洩磁場とJT-60NBIにおける許容磁場値

JT-60 からはポロイダルコイルに流れる電流およびプラズマ電流による漏洩磁場がある。運転条件によりこれらの電流値は様々な値をとる。また1ショットの間にもその値は刻々変化

1. は じ め に

JT-60 中性粒子入射装置(JT-60 NBI)は第1図に示すようにJT-60 本体のまわりに上下7ユニット計14ユニット設けられ、トロイダル断面で見てほぼ垂直、ポロイダル断面で見て斜めに中性粒子を入射するものである¹⁾。本装置はトーラスに近接して設置されるため本体のプラズマ電流、ポロイダルコイル電流を発生源とする漏洩磁場にさらされる。この磁場によるソースプラズマやイオンビームへの影響を避けるため、イオン源、中性化セル、中性化セル出口よりビームダンプに至る空間ではこの漏洩磁場を低い値に抑える必要がある。このうちイオン源と中性化セルについては、電磁軟鉄とルメタルからなる二重磁気シールド構造により漏洩磁場をシールドする事ができる。しかし、中性化セル出口よりビームダンプに至る空間に対しては、これら全体を覆う、例えば主排気タンクそのものを電磁軟鉄製とすると必要な磁気シールドの効果を得るには6 cm厚以上のものとなりその重量が大きくなりすぎ非現実的である。そこで当初磁性材を制限した磁気シールドの検討を行ったが必要なシールド係数を得るのが困難と判明したため、その後打消コイルにより磁場を打ち消す方式について検討を進めた。

磁場分布の検討には磁場解析コードによる方法、磁性材の縮尺モデルによる実測による方法がある。現在原研で利用できる磁場解析コードには2次元(TRIM)²⁾、および3次元(FEM3D)³⁾のものがある。2次元コードTRIMは磁性材の非線形な磁化特性が考慮できるもので空間分割もここで必要とするより細かくとる事ができ計算精度も高いものである。しかしながらプラズマへの中性粒子の入射角が斜めであるため、漏洩磁場の分布と、イオン源、中性化セル、偏向磁石の位置関係、形状は複雑な3次元的なものである。そのため2次元近似がむずかしく、例え強引な近似を行い、2次元コードを用いて計算してもその評価がむずかしい。一方上記の3次元磁場解析コードFEM3Dは円筒対称用で、また形状の比較的簡単な問題を解くのに限られる。そのため今回の目的には不十分と考えられる。磁性材の縮尺モデルを用いた実験による方法は3次元的なものに対し有効な手法である。しかしながら、作業性から実験できるのはただ数種のものに限られてしまう。以上のように計算、実験それぞれに制約がある。そこで解析の方法および2次元磁場解析コードによりある程度設計を詰めそれに基づき1/10 縮尺のモデルを製作し実測を行なった。縮尺1/10 は、前述の漏洩磁場対策の2方式の是否が判定可能な測定のできる最小のものとして選んだ。さらに実験で不足な部分を2次元コードによって補い漏洩磁場の対策を決めた。本報告はこの中性化セル出口よりビームダンプに至る空間の漏洩磁場対策についての検討結果を記したものである。

2. JT-60からの漏洩磁場とJT-60NBIにおける許容磁場値

JT-60 からはポロイダルコイルに流れる電流およびプラズマ電流による漏洩磁場がある。運転条件によりこれらの電流値は様々な値をとる。また1ショットの間にもその値は刻々変化

する。第2図(a)に磁気リミッタ非運転時（運転時よりNBI まわりでは漏洩磁場が大）の漏洩磁場の時間変化を、同図(b)にJT-60 NBI 主排気タンクまわりの漏洩磁場分布を示す⁴⁾。これらは最大定格運転時のものである。同図(a)より本体プラズマの放電終了間際が最も漏洩磁場が大きいの。運転条件により漏洩磁場ベクトルの大きさはこれより小さな値もとるが向きはあまり変わらず、トーラスと原点を同じくする円筒座標で $R=8\text{m}$, $Z=\pm 4\text{m}$ の位置で 4° 程度しか変化しない。但しこれらは偏向磁石、磁気シールドがない場合のものである。

JT-60 NBI において漏洩磁場を低く抑える必要のある空間は以下の3箇所である。

	許容磁場値	シールド係数
イオン源	0.5 G	～ 200
中性化セル	0.1 G	～ 1500
中性化セル出口 ー偏向磁石間	5 G	～ 40

イオン源内ではソースプラズマの安定な放電、引き出し電極面へのプラズマの一樣かつ十分な拡散および発散が小さく精度の高いイオンビーム引き出しを維持するために外からの磁場を抑える必要がある。中性化セル内はイオンビームが中性化される前に磁場により曲げられてしまうのを防ぐために必要とされる。中性化セル出口ービームダンプ間には、中性化セルで中性化されなかったイオンビーム (H^+ , H_2^+ , H_3^+) が漏洩磁場で予期しない方向に偏向される事なくビームダンプに導かれるように、磁場を低く抑える事が必要とされる。中性化セル出口でのイオンビームの熱流束は 7 kW/cm^2 程度であるのに対しビームダンプの許容熱負荷は 600 W/cm^2 程度以下である。そのため偏向磁石によりイオンビームを水平方向に発散させ、さらに斜めに入射させて熱流束が下るようにビームダンプの形状を選ぶ。しかし、水平方向にイオンビームを発散させるようにしたためビームの一部は偏向磁石自身にも当たってしまう。これを防ぐために偏向磁石のイオン源側を冷却水パイプの列からなるウォータージャケットで覆う。ビームダンプの受熱面とウォータージャケットのビームダンプ側への熱負荷は許容限度に近いため、漏洩磁場によりイオンビームが偏向されると熱負荷が局所的に許容値を超えてしまう。粒子軌道の偏向の問題であるから偏向される位置が軌道の上流側（中性化セル出口ービームダンプ間については中性化セル側）であれば下流側で偏向される場合より軌道終端でのずれの程度が大きい。偏向磁石ービームダンプ間は下流にあたる事、また第2図(b)のようにイオンビーム軌道と磁場の方向がほぼ一致する事からこの間の漏洩磁場は問題とはならない。酸素の負イオン (O^-) は同図のように偏向磁石を通り抜ける軌道をとるが、パワーが小さい（全体の数%以下）ため漏洩磁場により多少軌道が曲げられたとしても問題とならない。

以上許容磁場について主に磁場の大きさについて述べたが、漏洩磁場は第2図(a)のように時間変化するものであるため打消コイルを用いる場合、各時刻で許容磁場値以下とするにはコイル電流を磁場変化に追従させることが必要となると考えられる。

3. 中性化セル磁気シールドおよび イオン源磁気シールドの形状

2章に述べたように中性化セルおよびイオン源では磁気シールド係数を大きくとる必要がある

する。第2図(a)に磁気リミッタ非運転時（運転時よりNBIまわりでは漏洩磁場が大）の漏洩磁場の時間変化を、同図(b)にJT-60 NBI 主排気タンクまわりの漏洩磁場分布を示す⁴⁾。これらは最大定格運転時のものである。同図(a)より本体プラズマの放電終了間際が最も漏洩磁場が大きい。運転条件により漏洩磁場ベクトルの大きさはこれより小さな値もとるが向きはあまり変わらず、トーラスと原点を同じくする円筒座標で $R=8\text{m}$, $Z=\pm 4\text{m}$ の位置で 4° 程度しか変化しない。但しこれらは偏向磁石、磁気シールドがない場合のものである。

JT-60 NBI において漏洩磁場を低く抑える必要のある空間は以下の3箇所である。

	許容磁場値	シールド係数
イオン源	0.5 G	～ 200
中性化セル	0.1 G	～ 1500
中性化セル出口 ー偏向磁石間	5 G	～ 40

イオン源内ではソースプラズマの安定な放電、引き出し電極面へのプラズマの一様かつ十分な拡散および発散が小さく精度の高いイオンビーム引き出しを維持するために外からの磁場を抑える必要がある。中性化セル内はイオンビームが中性化される前に磁場により曲げられてしまうのを防ぐために必要とされる。中性化セル出口ービームダンプ間、中性化セルで中性化されなかったイオンビーム (H^+ , H_2^+ , H_3^+) が漏洩磁場で予期しない方向に偏向されることなくビームダンプに導かれるように、磁場を低く抑える事が必要とされる。中性化セル出口でのイオンビームの熱流束は 7 kW/cm^2 程度であるのに対しビームダンプの許容熱負荷は 600 W/cm^2 程度以下である。そのため偏向磁石によりイオンビームを水平方向に発散させ、さらに斜めに入射させて熱流束が下るようにビームダンプの形状を選ぶ。しかし、水平方向にイオンビームを発散させるようにしたためビームの一部は偏向磁石自身にも当たってしまう。これを防ぐために偏向磁石のイオン源側を冷却水パイプの列からなるウォータージャケットで覆う。ビームダンプの受熱面とウォータージャケットのビームダンプ側への熱負荷は許容限度に近いため、漏洩磁場によりイオンビームが偏向されると熱負荷が局所的に許容値を超えてしまう。粒子軌道の偏向の問題であるから偏向される位置が軌道の上流側（中性化セル出口ービームダンプ間については中性化セル側）であれば下流側で偏向される場合より軌道終端でのずれの程度が大きい。偏向磁石ービームダンプ間は下流にあたる事、また第2図(b)のようにイオンビーム軌道と磁場の方向がほぼ一致する事からこの間の漏洩磁場は問題とはならない。酸素の負イオン (O^-) は同図のように偏向磁石を通り抜ける軌道をとるが、パワーが小さい（全体の数%以下）ため漏洩磁場により多少軌道が曲げられたとしても問題とならない。

以上許容磁場について主に磁場の大きさについて述べたが、漏洩磁場は第2図(a)のように時間変化するものであるため打消コイルを用いる場合、各時刻で許容磁場値以下とするにはコイル電流を磁場変化に追従させることが必要となると考えられる。

3. 中性化セル磁気シールドおよび イオン源磁気シールドの形状

2章に述べたように中性化セルおよびイオン源では磁気シールド係数を大きくとる必要があ

る。したがってこれらに係る磁気シールドは外層が電磁軟鉄、内層が μ メタルからなる二重磁気シールド方式が採用されている。第3図に1/10モデルに使用した電磁軟鉄と μ メタルのB-H曲線を示す。第4図に偏向磁石および磁気シールドの1/10モデルの形状を示す。図中番号で①が偏向磁石鉄芯、⑦⑧⑨が中性化セル磁気シールド外層および内層、⑪⑫がイオン源磁気シールド外層および内層である。中性化セル磁気シールドとイオン源磁気シールドとはSUSと電磁軟鉄とがラミネート状となっているイオン源部接続フランジ⑩により外層、内層それぞれ磁氣的に接続される。③～⑥は次章に述べる漏洩磁場磁気シールドである。図中に示されている中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールドの厚みは磁気シールド理論に従い概略設計したのち1/10モデルで確認したもので、これらの厚みで磁気飽和に至らないことが調べられている⁵⁾。

4. 漏洩磁場磁気シールド

4.1 概 説

1章に述べたように中性化セル出口よりビームダンプに至る空間の漏洩磁場対策として採用し得るものの1つは磁性材重量を制限した磁気シールドである。本章ではこの磁気シールド（以下漏洩磁場磁気シールドと呼ぶ）の検討結果を示す。

4.2 漏洩磁場磁気シールドの形状

第4図に設計した漏洩磁場磁気シールドの1/10モデルの形状を示す。図中番号で③～⑥が漏洩磁場磁気シールドである。これらは①の偏向磁石、⑦の中性化セル磁気シールド外層、⑩のイオン源部接続フランジを介して⑪のイオン源磁気シールド外層に磁氣的に結合している。偏向磁石や漏洩磁場磁気シールドが収められる主排気タンクの壁面近くにはクライオポンプが設けられているがクライオポンプのコンダクタンスの確保のため③、⑤には横長の穴があけられている。③は偏向磁石とは下部のみで結合する。この理由は③の上部と偏向磁石との間には③の内側にあるビームダンプと外側にあるビームダンプのマニホールドとを継ぐ多数のパイプを通さねばならないからである。③の上部はビームダンプの位置にあたり、この部分は2章に述べたように磁気シールドをする必要はない。一般に磁気シールドに外部磁場と平行な開口部のある場合、開口部の直径程度の奥行きにわたって外部磁場が侵入する。ビームダンプの部分は大きな開口部となるがこの開口部を通して磁気シールドすべき空間（中性化セル出口－偏向磁石間）に侵入する磁場を抑えるため③は上方まで伸びて開口部と磁気シールドすべき空間との距離を保っている。④はこの内部が磁気シールドすべき部分であるため二重磁気シールド構造としたものである。④は大きさが限られたものであるためクライオポンプへのコンダクタンスを確保するための穴は設けていない。上部が斜めになっているのはこれより上方は偏向磁石により偏向されたイオンビームが通過するので衝突を避けるためである。⑤、⑥は磁気シールド

る。したがってこれらに係る磁気シールドは外層が電磁軟鉄、内層が μ メタルからなる二重磁気シールド方式が採用されている。第3図に1/10モデルに使用した電磁軟鉄と μ メタルのB-H曲線を示す。第4図に偏向磁石および磁気シールドの1/10モデルの形状を示す。図中番号で①が偏向磁石鉄芯、⑦⑧⑨が中性化セル磁気シールド外層および内層、⑪⑫がイオン源磁気シールド外層および内層である。中性化セル磁気シールドとイオン源磁気シールドとはSUSと電磁軟鉄とがラミネート状となっているイオン源部接続フランジ⑩により外層、内層それぞれ磁氣的に接続される。③～⑥は次章に述べる漏洩磁場磁気シールドである。図中に示されている中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールドの厚みは磁気シールド理論に従い概略設計したのち1/10モデルで確認したもので、これらの厚みで磁気飽和に至らないことが調べられている⁵⁾。

4. 漏洩磁場磁気シールド

4.1 概 説

1章に述べたように中性化セル出口よりビームダンプに至る空間の漏洩磁場対策として採用し得るものの1つは磁性材重量を制限した磁気シールドである。本章ではこの磁気シールド（以下漏洩磁場磁気シールドと呼ぶ）の検討結果を示す。

4.2 漏洩磁場磁気シールドの形状

第4図に設計した漏洩磁場磁気シールドの1/10モデルの形状を示す。図中番号で③～⑥が漏洩磁場磁気シールドである。これらは①の偏向磁石、⑦の中性化セル磁気シールド外層、⑩のイオン源部接続フランジを介して⑪のイオン源磁気シールド外層に磁氣的に結合している。偏向磁石や漏洩磁場磁気シールドが収められる主排気タンクの壁面近くにはクライオポンプが設けられているがクライオポンプのコンダクタンスの確保のため③、⑤には横長の穴があけられている。③は偏向磁石とは下部のみで結合する。この理由は③の上部と偏向磁石との間には③の内側にあるビームダンプと外側にあるビームダンプのマニホールドとを継ぐ多数のパイプを通さねばならないからである。③の上部はビームダンプの位置にあたり、この部分は2章に述べたように磁気シールドをする必要はない。一般に磁気シールドに外部磁場と平行な開口部のある場合、開口部の直径程度の奥行きにわたって外部磁場が侵入する。ビームダンプの部分は大きな開口部となるがこの開口部を通して磁気シールドすべき空間（中性化セル出口ー偏向磁石間）に侵入する磁場を抑えるため③は上方まで伸びて開口部と磁気シールドすべき空間との距離を保っている。④はこの内部が磁気シールドすべき部分であるため二重磁気シールド構造としたものである。④は大きさが限られたものであるためクライオポンプへのコンダクタンスを確保するための穴は設けていない。上部が斜めになっているのはこれより上方は偏向磁石により偏向されたイオンビームが通過するので衝突を避けるためである。⑤、⑥は磁気シールド

ルドすべき空間より開口部（中性粒子ビームが出る穴）を遠ざけるために設けたものである。磁気シールドの材料は電磁軟鉄としその厚みは図中に示されているように3mm（実際のスケールでは30mm）前後である。これは磁気シールド断面積の5～10倍の面積を通る磁束が磁気シールドに吸い込まれても磁気飽和しないように概算で決めたものである。

以上のように漏洩磁場磁気シールドは偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールドと一体となって大小の穴のあいた不完全な磁気シールドの形をなす。しかしながら主排気タンク中でクライオポンプより内側にありかつクライオポンプへのコンダクタンスを考慮したもののうちでは最大に近い磁気シールド効果が得られる形状と思われる。この形状の漏洩磁場磁気シールドのみで重量は約2.2トンとなる。

4.3 漏洩磁場磁気シールドの効果の1/10モデルによる検証

4.2節に述べた漏洩磁場磁気シールドの効果を調べるため、イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールド、漏洩磁場磁気シールドおよび偏向磁石の1/10モデルを製作し磁気シールドの効果を調べた。第5図に実験の配置を示す。直径1mのコイルに流す電流でJT-60のポロイダル電流を模擬し、これが発生する磁場に対して磁気シールドの効果を調べた。実験に使用した直流電源では偏向磁石中心位置で9.2G（磁性体がない場合）しか磁場を発生する事ができない。そこで磁性材の磁気特性を線形とみなし、偏向磁石中心の磁場の強さがJT-60 NBIで予想される値である210G（磁性材がない場合）となるよう換算して磁気シールドの効果を評価した。以下実験は種々の電流値を用いたが全てこの換算後の結果を示す。第6図に漏洩磁場磁気シールドがある場合（実線）、ない場合（破線）および磁性材のない場合（一点鎖線）の磁場分布を示す（座標系は第5図のもの。スケールは10倍（mm→cm）し実際のJT-60 NBIと合致するように描いてある。以下同じ）。漏洩磁場磁気シールドがなく偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールドのみの場合、磁性材が磁力線を吸い込むため中性化セル磁気シールド先端近傍では磁場の強さが磁性材がない場合の2倍近くになる。漏洩磁場磁気シールドを取り付けると磁場が全体に約1/4となり中性化セル磁気シールド先端近傍で70Gまで下がるが、この値は2章に述べた許容磁場値（5G）よりかなり大きい。第4図中の番号で③には上部および後方（イオン源側）に大きな開口部が存在しており、この効果のためシールド係数が大きくならないものと考えられる。磁性材のない場合に実際には200G程度となる所を実験では10G程度の磁場を発生させて磁気シールドの効果をみている。実際の磁場の強さに対しては磁性材の透磁率が大きくなり磁気シールドの効果が少しは良くなると期待されるが所望の値（5G）には抑えられそうにない。また漏洩磁場磁気シールドは偏向磁石の発生する磁場をも乱してしまう問題もあり、この方式ではJT-60 NBIの条件に合致するものを設計するのは困難と考えられる。

5. 打 消 コ イ ル

5.1 概 説

第2図(b)の漏洩磁場分布に示されるように中性化セル出口近傍では磁場の向きがほぼ水平である。この漏洩磁場と方向が逆の磁場を必要な部分にのみ局所的に発生させ磁場を打ち消すよう考案したものがここで言う打消コイルである。JT-60 NBIの主排気タンクの中は偏向磁石、ビームダンプ、カロリメータ等の機器が密集しており、さらに中性粒子ビームやイオンビームの通路を避けかつ主排気タンク内壁近くにあるクライオポンプへのコンダクタンスを確保する必要があるため、この磁場打ち消しのためのコイルを巻く空間は非常に限られている。一案として第7図に示すように偏向磁石のまわりに巻く(第1)打消コイルを考えた。さらに2章に述べたように中性化セル出口近傍の漏洩磁場の影響が大きい事に注目し、この付近の磁場の打ち消しが効果的に行なわれるよう中性化セル磁気シールド先端に(第2)打消コイルの設置を考えた。これら両コイルを用いその起磁力比を適当に選べば効果的な磁場の打ち消しが期待できる。一方システムの容易さを考慮すると、いずれか一方のみのコイルで済ませるに越した事はない。そこで第1打消コイルのみの場合についても実験的に評価した。第2打消コイルのみとすると、漏洩磁場の打ち消される空間が狭すぎて所望の効果が得られないと考えられるのでこの場合の評価は行なわなかった。

第7図に示す配置において漏洩磁場コイルのみ、第1打消コイルのみ、第2打消コイルのみの、それぞれの場合における B_x 成分のx方向の分布を第8図に示す(座標系は第7図の通り。)本図のみ1/10モデルでの測定データを換算せずに示す。第1打消コイルのみ、第2打消コイルのみの通電の場合の磁場分布は漏洩磁場コイルのみ通電の場合の磁場分布と少しずつ異なる。第1打消コイルのみでは偏向磁石寄り、第2打消コイルのみでは中性化セル磁気シールド寄りで相対的に磁場が大きくなる。従って第1、第2打消コイルの起磁力を適当に選べば漏洩磁場の分布に近い磁場分布が得られると考えられる。

5.2 第1打消コイル

第1打消コイルのみの場合の磁場分布をさらに詳細に調べた。第9図(a)に漏洩磁場とほぼ同等の磁場となるよう起磁力を選んだ時のx方向の第1打消コイルのみの磁場分布(……), 漏洩磁場の分布(—)および漏洩磁場発生コイルと第1打消コイルをこれらの起磁力比で同時通電したときの磁場分布(—・—)を示す。第1打消コイルの起磁力を多少変化させたとき残留磁場のx方向の成分の最大値と最小値の幅は $y=0$ cm, $z=-46$ cmの位置でいつも40~50 Gとなることが他の一連の測定で確かめられている。第9図(b)に同じ条件の時のx-z面上の残留磁場の分布をベクトルで示す。中性化セル磁気シールド下端付近では偏向磁石と第1打消コイル下端が近くにあるために漏洩磁場と第1打消コイルによる磁場の分布にずれが生ずる。そのため

に下方ほど残留磁場が大きい。モデルが小さいため測定誤差が大きいと思われるが、以上の測定結果をもとに残留磁場を

$$Z \leq 0 \text{ cm}$$

$$B_x = (50 - B_{\text{bias}}) \times \frac{|Z|}{46}, \quad x < 20 \text{ cm}$$

$$= \left\{ \left(\frac{x^3}{3} - \frac{x^2}{0.4} + 0.12x - \frac{0.016}{3} \right) \times (-4687.5) - B_{\text{bias}} \right\} \times \frac{|Z|}{46}$$

$$, \quad 20 \text{ cm} \leq x < C$$

$$= 0, \quad x \geq C$$

(G, cm)

ただし $B_{\text{bias}} = 0 \text{ G}$ のとき $C = 74.5$

10	73
20	71.5
30	69.5
40	67
45	65

$$Z > 0 \text{ cm}$$

$$B_x = 0.41 x \quad (\text{G, cm})$$

B_y, B_z は常に 0 G

と近似しイオンビーム熱負荷計算コード⁶⁾によりイオンビーム軌道のずれを計算した結果、受熱機器への熱負荷は $B_{\text{bias}} = 30 \sim 45 \text{ G}$ においてイオン源の軸ずれ、各機器の設置誤差を考慮に入れて許容限界に近いものとなる。第1打消コイルのみの打ち消しで良いかどうかはより正確な三次元の磁場分布に基づくイオンビーム軌道計算により評価しなければならない。その一方で受熱機器の設計、打消コイルの起磁力の制御に余裕を持たせるために磁場の打ち消しがより良くなされる方法を検討しておく事は意味ある事と思われる。

5.3 第2打消コイルの併用

第1打消コイルのみでは漏洩磁場の打ち消しが一様にはできない事が明らかとなったので、第2打消コイルを併用してより一様な磁場の打ち消しを試みた。第1, 第2打消コイルの起磁力を変化させて最も良く磁場が打ち消されていると思われるケースの磁場分布測定結果を第11図(a)(b)に示す。起磁力は実スケール換算で第1打消コイルが27.5k AT, 第2打消コイルが8.8 k ATに相当するものである。中性化セルを出たイオンビームは偏向磁場により $x = 10 \text{ cm}$ 程で折り返しビームダンプへ向かう。したがって $x \geq 10 \text{ cm}$ の部分の磁場のみが問題となるが、測定した例ではこの領域の磁場を低い値に抑える事ができる。この実験では精度の点で電流値を細かく選ぶ事ができなかったが、第1, 第2打消コイルの起磁力の比を適当に選べばより低い値に抑える事も可能と思われる。

5.4 2次元磁場解析コードによる打消コイルの評価

1/10 モデルの測定結果によれば打消コイルは漏洩磁場対策として効果的と予想されるが測定は実際の磁場の20～30分の1の強さでしかできなかった。磁性材の非線形性のため実際の磁場の強さに対してこれをそのまま適用できるかどうか不安が残る。そこで漏洩磁場、磁性材形状を2次元近似し、2次元磁場解析コードにより第1、第2打消コイルの効果を実際の磁場の強さで評価した。

2次元近似の方法を第12図に示す。まずビームライン中心軸上の中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールド(破線)を水平なもの(実線)に変更する。このとき偏向磁石と中性化セル磁気シールド先端との間隔、ビームライン中心軸でみた中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールドの長さを変えないようにする。この変換をした後の面A-A'の断面形状(2次元)において評価を行った。漏洩磁場は同図中のベクトル B のように3次元的なものであるがこれを面A-A'上の磁場 B_x におきかえて評価する。漏洩磁場の分布に対し、対応する点で $|B_x| = |B|$ とおけば2次元近似の計算は過大評価なものに、また $|B_x| = |B_{\text{軸}}|$ ($B_{\text{軸}}$ は B のビームライン中心軸上への射影)とおけば過小評価なものとなるだろう。そこでこれら2種類の磁場強さに対応した磁場で評価する事とした。2次元計算で漏洩磁場は一方向に磁場強さを変化させる必要がある。これを長方形の計算領域の相対する2辺に流れる電流を適当に分布させて作った。第13図に実際の漏洩磁場の $|B|$ 、 $|B_{\text{軸}}|$ の分布(実線)と計算に用いた磁場分布(破線および一点鎖線)の比較を示す($y=0$ 、いずれも磁性材のない場合)。 $B_{\text{軸}}$ についてはよく模擬されている。一方 B に対応する計算の磁場は $B_{\text{軸}}$ に対応する計算の磁場を単に2倍したものであり、過大評価気味となる。

第14図(a), (b), (c)にそれぞれ漏洩磁場のみ、漏洩磁場+第1打消コイル、漏洩磁場+第1打消コイル+第2打消コイルの場合の磁場分布の計算結果を示す。第14図(a), (b)については $B_{\text{軸}}$ に対応する磁場の強さ、第14図(c)は B に対応する磁場の強さである。また打消コイルの起磁力は中性化セル磁気シールド先端～偏向磁石間の磁場がよく打ち消されるように適当に選んである。2次元計算のため起磁力は実際の2倍程度を必要としている。第14図(a)から中性化セル磁気シールドと偏向磁石があるためこの間の漏洩磁場が強められる様子がわかる。第1打消コイルのみでも同じ領域の漏洩磁場がよく打ち消される事が第14図(b)からわかる。第1打消コイルによる磁場で偏向磁石鉄芯内の磁場が大きくなり、第14図(b)の計算で最大2.5 kGとなる。電磁軟鉄の飽和磁束密度は13,000 G程度(第3図)であるから第1打消コイルの磁場のみでは飽和に至る事はないが、偏向磁石鉄芯には偏向磁石自身の磁束も存在するのでこれらの合成の結果飽和するおそれがある。第14図(a)で磁力線が密となっている偏向磁石鉄芯の内部では偏向磁石自身の磁場は紙面に垂直方向であり、第1打消コイルによる磁場とは直交する。したがって偏向磁石自身の作る磁束密度において飽和磁束密度に対し5%程度余裕をみておけば合成磁場に対しても飽和に至らないと考えられる。

第14図(b), (c)の比較から、第2打消コイルを併用すれば中性化セル磁気シールド先端～偏向磁石間の領域でより一様に磁場が打ち消される事がわかる。2次元形状への置き換え、漏洩磁場の模擬の段階で過大評価となるよう磁場をおいているため漏洩磁場のみの B に対応する磁

場に対しては計算上では中性化セル磁気シールド内層 (μ メタル) が飽和したが, 第14図(c)の場合では飽和していない。磁力線の分布からもわかるが, 第2打消コイルは中性化セル磁気シールドの磁性材内部の磁束密度を減らす効果もある事がわかる。

以上のように偏向磁石鉄芯で磁場が飽和しないように鉄芯断面積を大きくとっておけば, 打消コイルによる磁場の打ち消しは JT-60NBI にとって有効であると2次元磁場計算結果からも予想される。

5.5 打消コイル電流の制御

2章に述べたように JT-60 からの漏洩磁場はその方向はあまり変化しないが大きさが時々刻々変化する。またそれはショット毎に異なる。印加される漏洩磁場に対し打消コイルの最適な起磁力が決まるが, 5.2 節のイオンビーム軌道の計算例のように高い精度で制御を行う必要がある。中性化セル磁気シールド～偏向磁石間で漏洩磁場の B_x は最大 290 G となる (第6図, 中性化セル磁気シールド, 偏向磁石のある時) が, これに対し打ち消し精度の幅は 15 G 程度 (5.2 節), したがって $\pm 2.6\%$ 程度の精度で打消コイルの起磁力を制御する必要がある。一般にホール素子による磁場の測定精度は 0.2% 程度であるので測定そのものは十分に精度があると考えられるが, 単純に漏洩磁場を測定して打消コイルの起磁力を制御するだけでは $\pm 2.6\%$ の精度を出すのは困難である。そうではなく打ち消された磁場を測定して負帰還をかければ要求される精度を出す事ができる。磁場の打ち消しは場所によって不均一であり, 単純に測定点の磁場が 0 となる制御が最適なものではない。イオンビームに対し最適な磁場の打ち消しを行なうには測定点において印加される漏洩磁場の値に比例した値の磁場を残すといった制御を行なう必要がある。したがって打消コイルの制御には印加される漏洩磁場と, 打ち消された磁場を測定する2つの磁気プローブを要する。第15図(a)に磁気プローブの位置の案, 同図(b)に制御のブロックダイアグラムを示す。主排気タンク横においた磁気プローブ1により印加される漏洩磁場の大きさを測定し, それに対する最適な打ち消し磁場の分布で磁気プローブ2 (中性化セル磁気シールド出口) の位置における磁場の目標値を求める。そして合成磁場がその目標となるように打消コイル電源の制御を行なう。第1打消コイルと第2打消コイルの起磁力の比は最適なものに固定しておくのが制御性の点で良いと考えられる。この比と第15図(b)中の定数については実験的に求める必要がある。

6. ま と め

中性化セル内で中性化されなかったイオンビームが漏洩磁場により偏向されてウォータージャケット, ビームダンプへの熱負荷が局所的に過大となるのを防ぐため, 漏洩磁場磁気シールド, 打消コイルによる磁場の打ち消し, の2法について検討した。磁気シールドによる方法は制御が不要で好ましいが形状が制限されるため十分なシールドが行えない事が 1/10 モデルによる実験の結果, 判明した。これに対し打消コイルによる方法は, 特に偏向磁石まわりと,

場に対しては計算上では中性化セル磁気シールド内層 (μ メタル) が飽和したが、第14図(c)の場合では飽和していない。磁力線の分布からもわかるが、第2打消コイルは中性化セル磁気シールドの磁性材内部の磁束密度を減らす効果もある事がわかる。

以上のように偏向磁石鉄芯で磁場が飽和しないように鉄芯断面積を大きくとっておけば、打消コイルによる磁場の打ち消しは JT-60NBI にとって有効であると2次元磁場計算結果からも予想される。

5.5 打消コイル電流の制御

2章に述べたように JT-60 からの漏洩磁場はその方向はあまり変化しないが大きさが時々刻々変化する。またそれはショット毎に異なる。印加される漏洩磁場に対し打消コイルの最適な起磁力が決まるが、5.2節のイオンビーム軌道の計算例のように高い精度で制御を行う必要がある。中性化セル磁気シールド～偏向磁石間で漏洩磁場の B_x は最大 290 G となる(第6図、中性化セル磁気シールド、偏向磁石のある時)が、これに対し打ち消し精度の幅は15 G 程度(5.2節)、したがって $\pm 2.6\%$ 程度の精度で打消コイルの起磁力を制御する必要がある。一般にホール素子による磁場の測定精度は0.2%程度であるので測定そのものは十分に精度があると考えられるが、単純に漏洩磁場を測定して打消コイルの起磁力を制御するだけでは $\pm 2.6\%$ の精度を出すのは困難である。そうではなく打ち消された磁場を測定して負帰還をかければ要求される精度を出す事ができる。磁場の打ち消しは場所によって不均一であり、単純に測定点の磁場が0となる制御が最適なものではない。イオンビームに対し最適な磁場の打ち消しを行なうには測定点において印加される漏洩磁場の値に比例した値の磁場を残すといった制御を行なう必要がある。したがって打消コイルの制御には印加される漏洩磁場と、打ち消された磁場を測定する2つの磁気プローブを要する。第15図(a)に磁気プローブの位置の案、同図(b)に制御のブロックダイアグラムを示す。主排気タンク横においた磁気プローブ1により印加される漏洩磁場の大きさを測定し、それに対する最適な打ち消し磁場の分布で磁気プローブ2(中性化セル磁気シールド出口)の位置における磁場の目標値を求める。そして合成磁場がその目標となるように打消コイル電源の制御を行なう。第1打消コイルと第2打消コイルの起磁力の比は最適なものに固定しておくのが制御性の点で良いと考えられる。この比と第15図(b)中の定数については実験的に求める必要がある。

6. ま と め

中性化セル内で中性化されなかったイオンビームが漏洩磁場により偏向されてウォータージャケット、ビームダンプへの熱負荷が局所的に過大となるのを防ぐため、漏洩磁場磁気シールド、打消コイルによる磁場の打ち消し、の2法について検討した。磁気シールドによる方法は制御が不要で好ましいが形状が制限されるため十分なシールドが行なえない事が1/10モデルによる実験の結果、判明した。これに対し打消コイルによる方法は、特に偏向磁石まわりと、

中性化セル磁気シールド出口の2か所に巻いたコイルを併用すると効果的な打ち消しが可能な事が明らかとなりこの方式を採用する事とした。しかしながら本実験は1/10モデルを用いているため空間的な測定精度が不十分であり、また設備の制限から実際の磁場値の1/20~1/30程度の磁場値で行なったものである点で不完全である。さらに5.5節に述べた制御定数を求めるための詳細な実験が必要である。そこで磁性材(偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールド)の1/4モデルと実際の漏洩磁場相当の磁場を発生させる事のできるコイルを製作し、偏向磁石の磁場も含めて詳細に磁場分布を測定する予定である。この磁場分布に基づいてイオンビーム軌道を計算し、打消コイルの効果と必要な制御定数を求める事とする。

JT-60 NBI に先立ちその1ユニットに相当する JT-60 NBI 原型ユニットが建設されるが、これには1/4モデルに設けられる模擬漏洩磁場発生コイルと同形状のコイルが付加される。このコイルの発生する磁場に対しイオンビーム引き出し、打消コイルの運転を行い、打消コイルの制御の最終的な調整と、その効果の実証を行う予定である。

謝 辞

本開発研究にあたり、有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室の諸氏に対して感謝致します。また終始激励して頂いた白形弘文加熱工学第1研究室長、小幡行雄核融合研究部長及び磯康彦核融合研究開発推進センター長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎, 荒川義博, 堀池寛, 伊藤孝雄, 河合視己人, 近藤梅夫, 森田洋昭, 小原祥裕, 大賀徳道, 奥村義和, 桜庭順二, 柴田猛順, 白形弘文, 田中茂, JAERI-M 7655 (1978)
- 2) John S. Colonias, "TRIM: A MAGNETIC COMPUTER PROGRAM FOR THE CDC 6600", UCRL-18439, 1968
- 3) 二宮博正, 鈴木康夫, 私信
- 4) 吉田英俊, 岸本浩, 私信
- 5) 田中茂他, JAERI-M 投稿予定
- 6) 伊藤孝雄, 堀池寛, 松岡守, 松田慎三郎, 小原祥裕, 田中茂, JAERI-M 9226 (1980)

中性化セル磁気シールド出口の2か所に巻いたコイルを併用すると効果的な打ち消しが可能な事が明らかとなりこの方式を採用する事とした。しかしながら本実験は1/10モデルを用いているため空間的な測定精度が不十分であり、また設備の制限から実際の磁場値の1/20~1/30程度の磁場値で行なったものである点で不完全である。さらに5.5節に述べた制御定数を求めるための詳細な実験が必要である。そこで磁性材(偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールド)の1/4モデルと実際の漏洩磁場相当の磁場を発生させる事のできるコイルを製作し、偏向磁石の磁場も含めて詳細に磁場分布を測定する予定である。この磁場分布に基づいてイオンビーム軌道を計算し、打消コイルの効果と必要な制御定数を求める事とする。

JT-60 NBI に先立ちその1ユニットに相当する JT-60 NBI 原型ユニットが建設されるがこれには1/4モデルに設けられる模擬漏洩磁場発生コイルと同形状のコイルが付加される。このコイルの発生する磁場に対しイオンビーム引き出し、打消コイルの運転を行い、打消コイルの制御の最終的な調整と、その効果の実証を行う予定である。

謝 辞

本開発研究にあたり、有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室の諸氏に対して感謝致します。また終始激励して頂いた白形弘文加熱工学第1研究室長、小幡行雄核融合研究部長及び磯康彦核融合研究開発推進センター長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎, 荒川義博, 堀池寛, 伊藤孝雄, 河合視己人, 近藤梅夫, 森田洋昭, 小原祥裕, 大賀徳道, 奥村義和, 桜庭順二, 柴田猛順, 白形弘文, 田中茂, JAERI-M 7655 (1978)
- 2) John S. Colonias, "TRIM: A MAGNETIC COMPUTER PROGRAM FOR THE CDC 6600", UCRL-18439, 1968
- 3) 二宮博正, 鈴木康夫, 私信
- 4) 吉田英俊, 岸本浩, 私信
- 5) 田中茂他, JAERI-M 投稿予定
- 6) 伊藤孝雄, 堀池寛, 松岡守, 松田慎三郎, 小原祥裕, 田中茂, JAERI-M 9226 (1980)

中性化セル磁気シールド出口の2か所に巻いたコイルを併用すると効果的な打ち消しが可能な事が明らかとなりこの方式を採用する事とした。しかしながら本実験は1/10モデルを用いているため空間的な測定精度が不十分であり、また設備の制限から実際の磁場値の1/20~1/30程度の磁場値で行なったものである点で不完全である。さらに5.5節に述べた制御定数を求めるための詳細な実験が必要である。そこで磁性材(偏向磁石、中性化セル磁気シールド、イオン源磁気シールド)の1/4モデルと実際の漏洩磁場相当の磁場を発生させる事のできるコイルを製作し、偏向磁石の磁場も含めて詳細に磁場分布を測定する予定である。この磁場分布に基づいてイオンビーム軌道を計算し、打消コイルの効果と必要な制御定数を求める事とする。

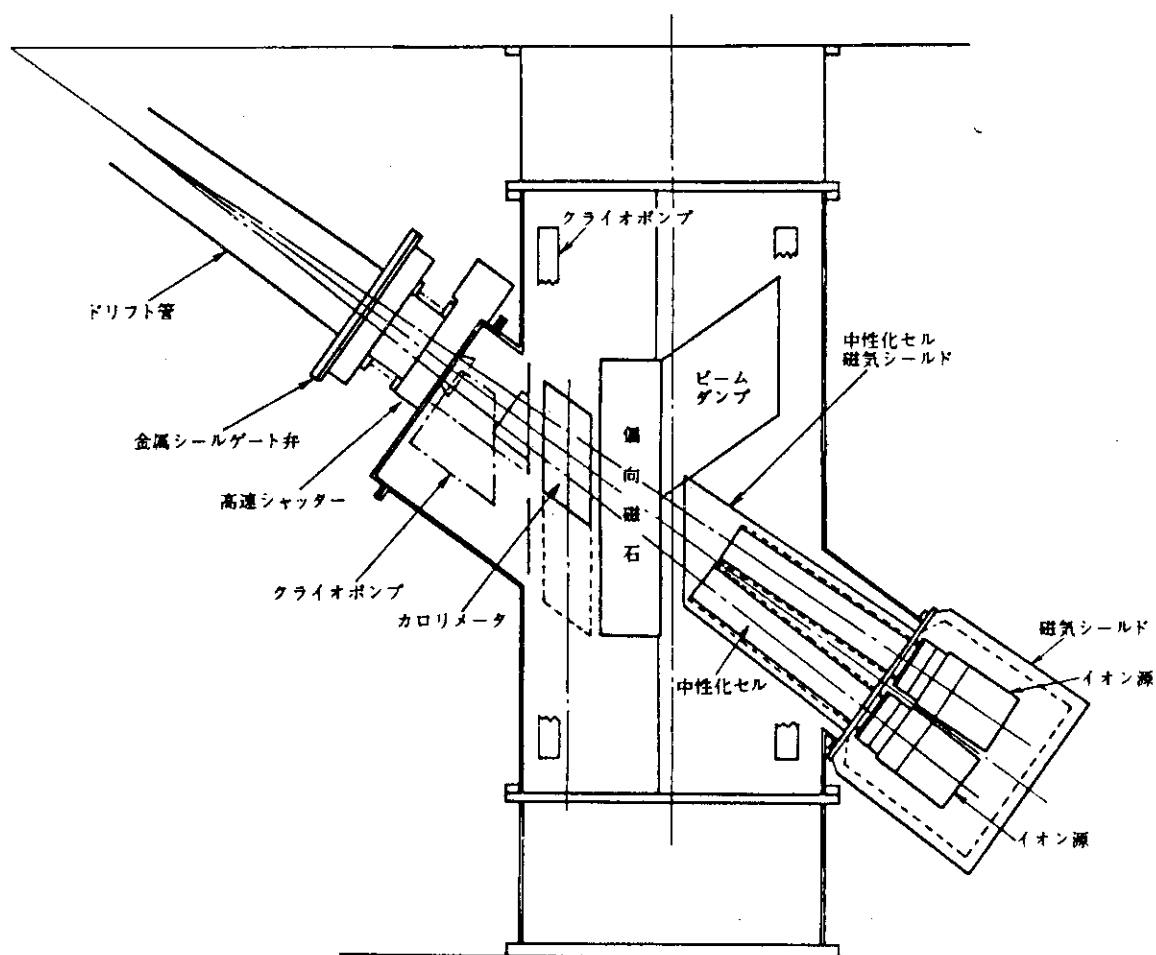
JT-60 NBI に先立ちその1ユニットに相当するJT-60 NBI 原型ユニットが建設されるがこれには1/4モデルに設けられる模擬漏洩磁場発生コイルと同形状のコイルが付加される。このコイルの発生する磁場に対しイオンビーム引き出し、打消コイルの運転を行い、打消コイルの制御の最終的な調整と、その効果の実証を行う予定である。

謝 辞

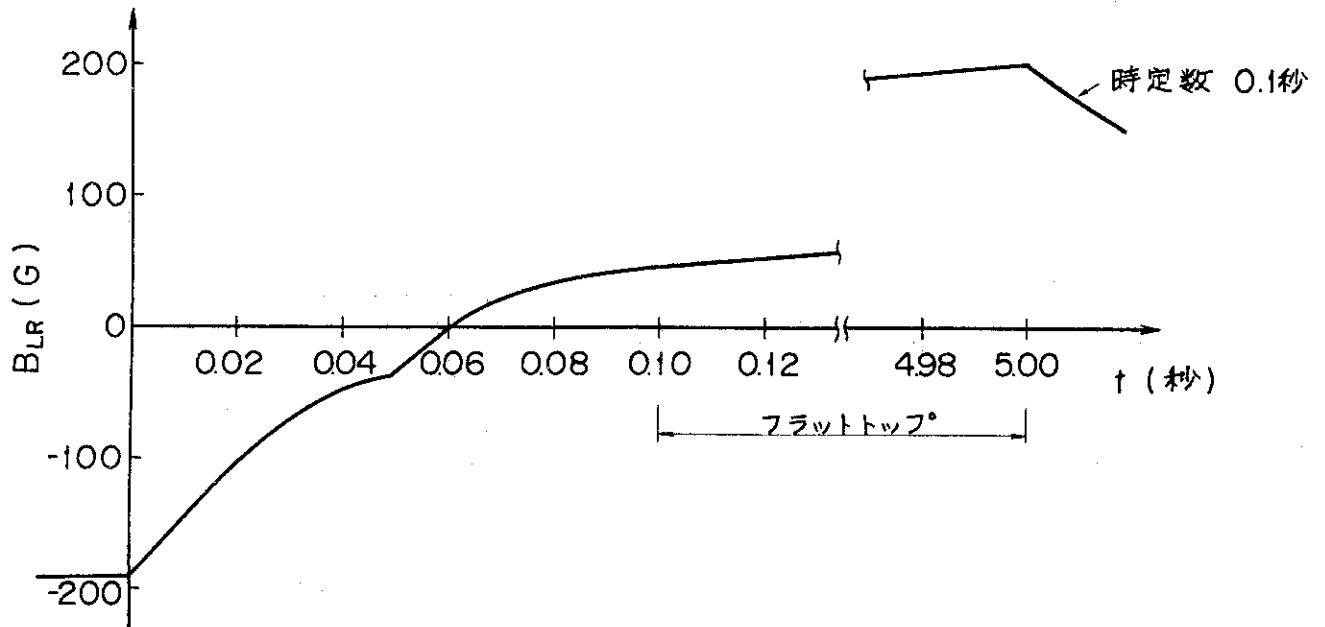
本開発研究にあたり、有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室の諸氏に対して感謝致します。また終始激励して頂いた白形弘文加熱工学第1研究室長、小幡行雄核融合研究部長及び磯康彦核融合研究開発推進センター長に感謝致します。

参 考 文 献

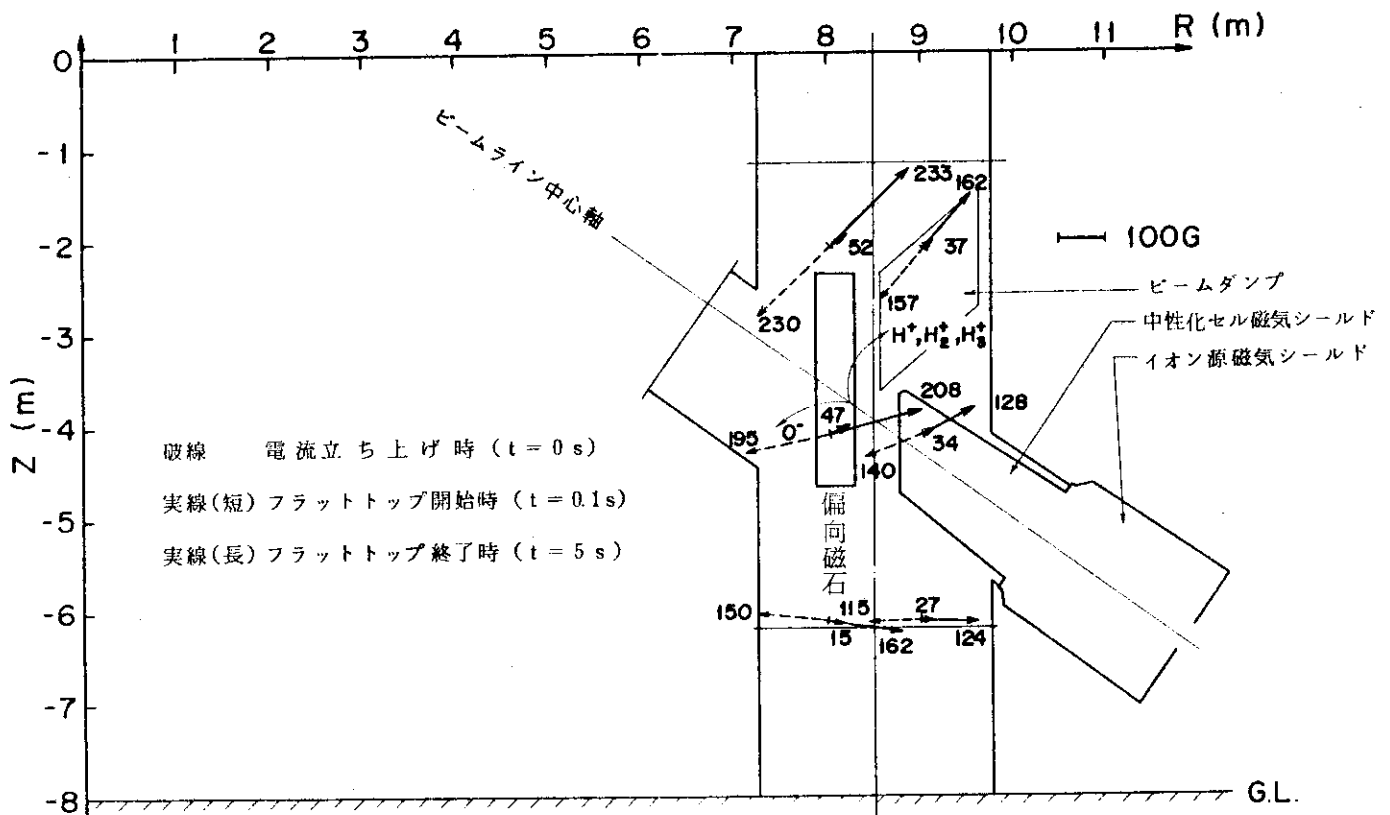
- 1) 松田慎三郎, 荒川義博, 堀池寛, 伊藤孝雄, 河合視己人, 近藤梅夫, 森田洋昭, 小原祥裕, 大賀徳道, 奥村義和, 桜庭順二, 柴田猛順, 白形弘文, 田中茂, JAERI-M 7655 (1978)
- 2) John S. Colonias, "TRIM: A MAGNETIC COMPUTER PROGRAM FOR THE CDC 6600", UCRL-18439, 1968
- 3) 二宮博正, 鈴木康夫, 私信
- 4) 吉田英俊, 岸本浩, 私信
- 5) 田中茂他, JAERI-M 投稿予定
- 6) 伊藤孝雄, 堀池寛, 松岡守, 松田慎三郎, 小原祥裕, 田中茂, JAERI-M 9226 (1980)



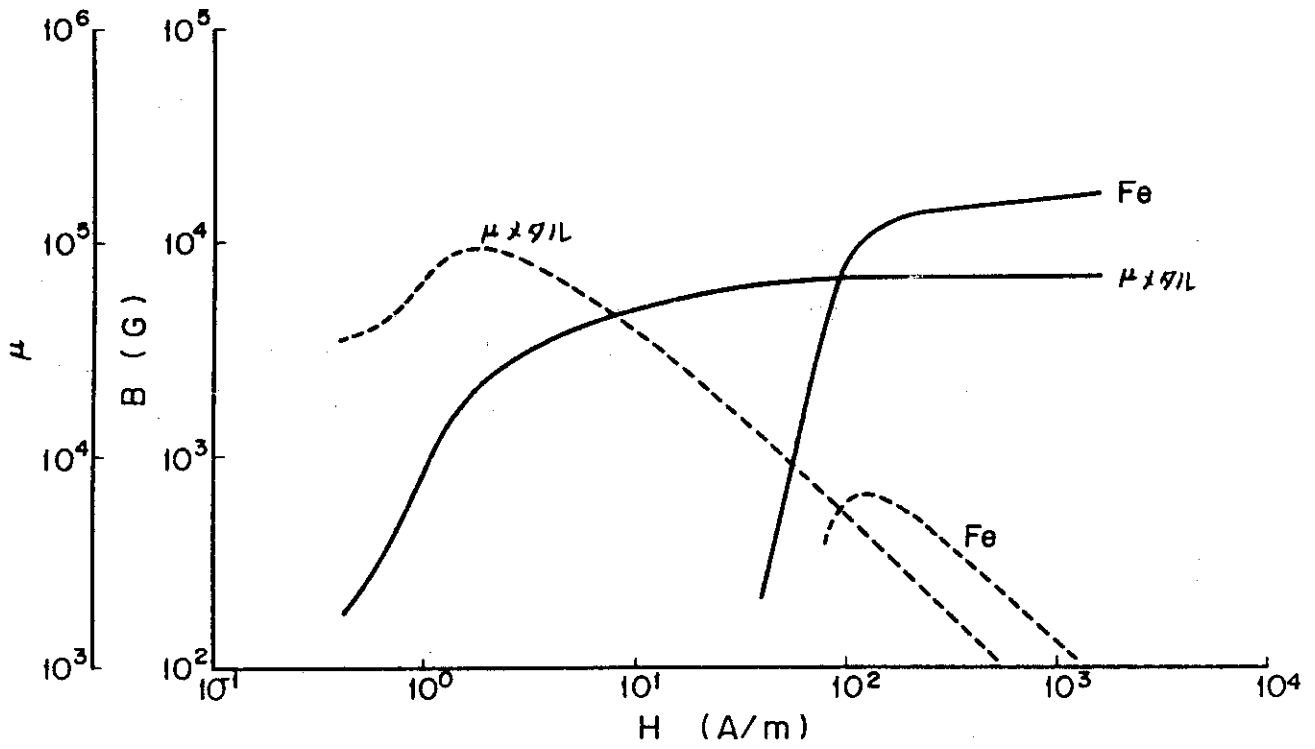
第1図 JT-60 中性粒子入射装置ユニット



第2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)。偏向磁石等の磁性材がない場合のトーラス中心より $R=8\text{ m}$, $Z=-4\text{ m}$ (偏向磁石中心近傍) における R 成分。

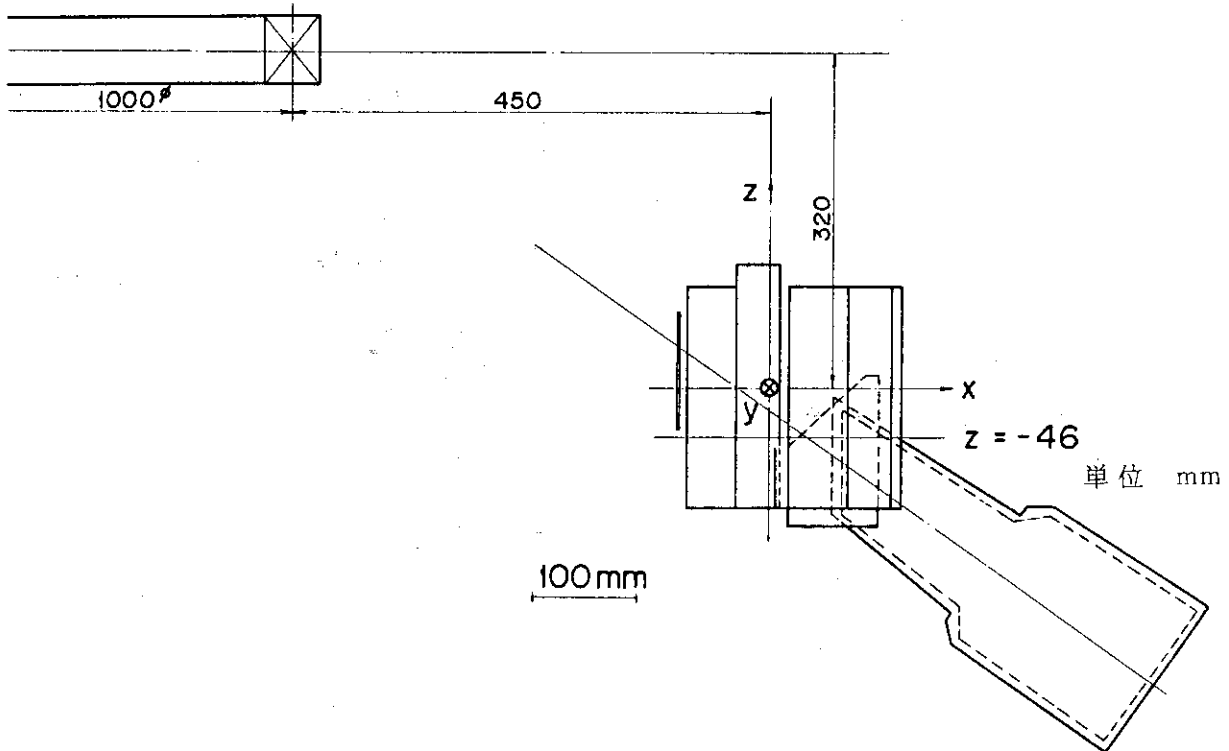


第2図 (b) 磁気リミッタを運転しない場合の漏洩磁場分布
(偏向磁石等の磁性材がない場合)

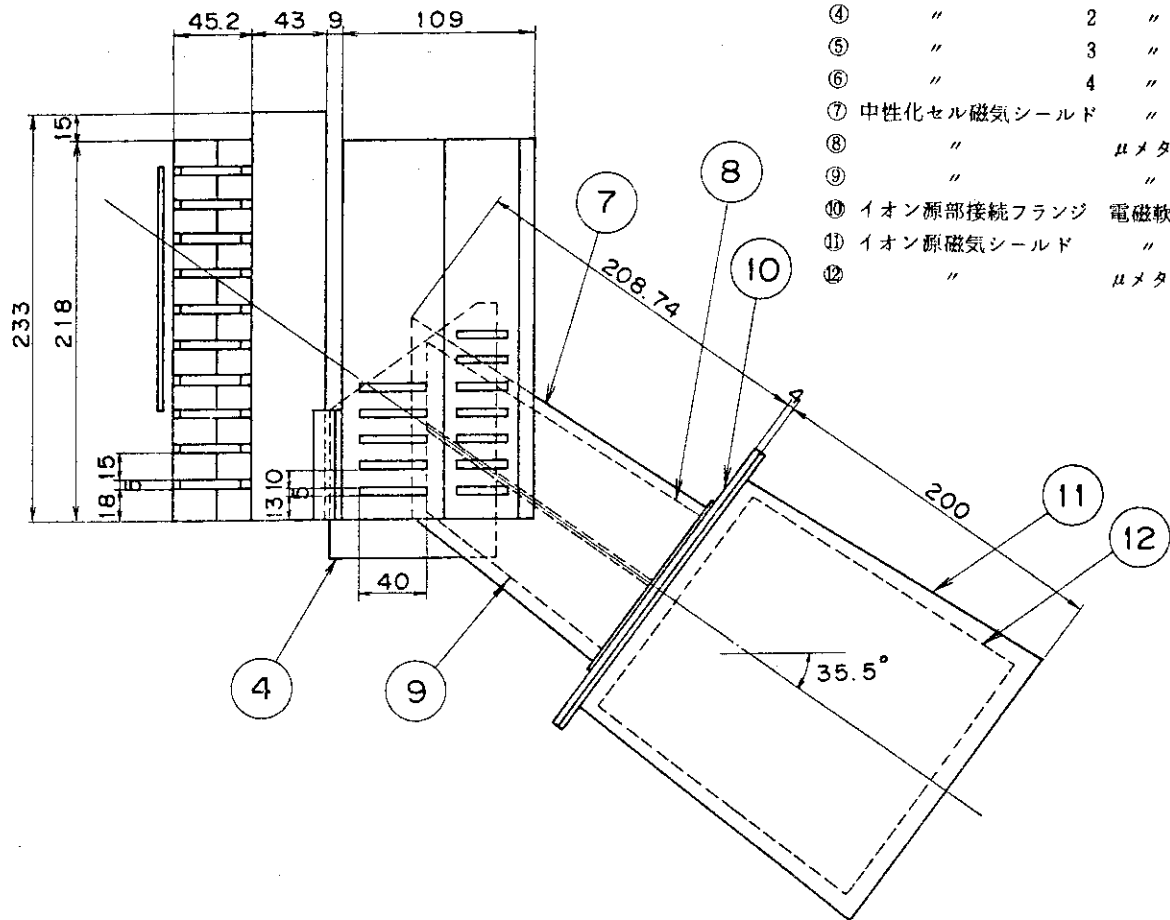
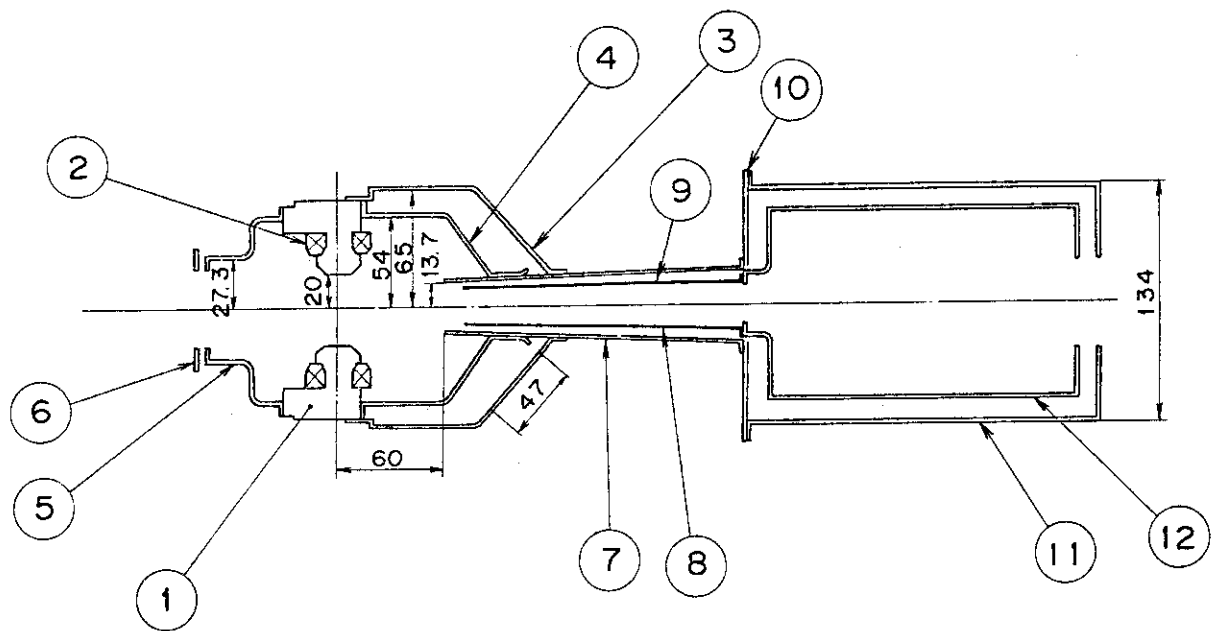


第3図 $\frac{1}{10}$ モデルに用いた電磁軟鉄, μ メタルの $B-H$ 曲線(実線)と $\mu-H$ 曲線(点線)

漏洩磁場発生コイル(L)

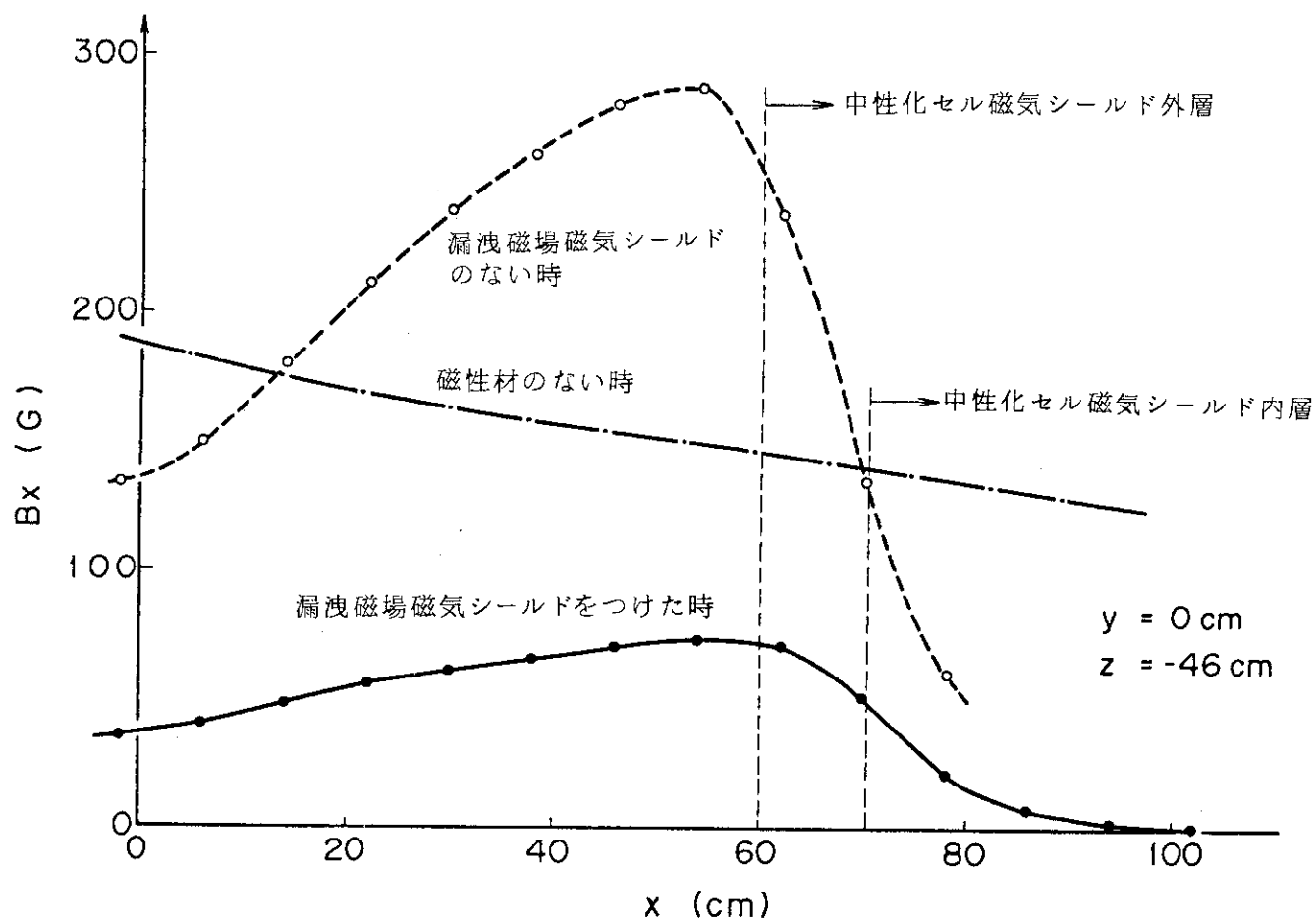


第5図 漏洩磁場磁気シールドの実験の配置



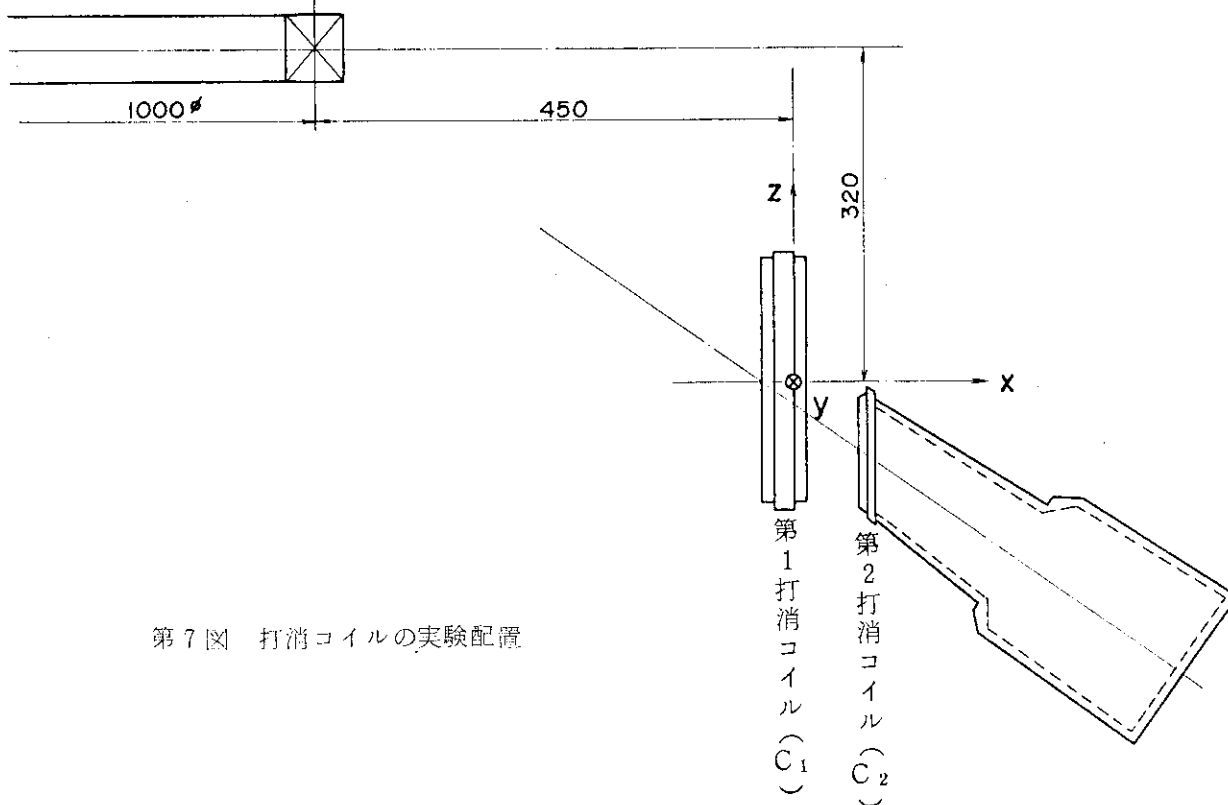
① 偏向磁石鉄芯	電磁軟鉄	
② コイル		
③ 漏洩磁場磁気シールド 1	電磁軟鉄	3 t
④ "	2 "	3.1 t
⑤ "	3 "	"
⑥ "	4 "	2.6 t
⑦ 中性化セル磁気シールド	"	"
⑧ "	μメタル	0.5 t
⑨ "	"	"
⑩ イオン源部接続フランジ	電磁軟鉄	4 t
⑪ イオン源磁気シールド	"	1.5 t
⑫ "	μメタル	0.5 t

第4図 偏向磁石および磁場シールドの $\frac{1}{10}$ モデル形状

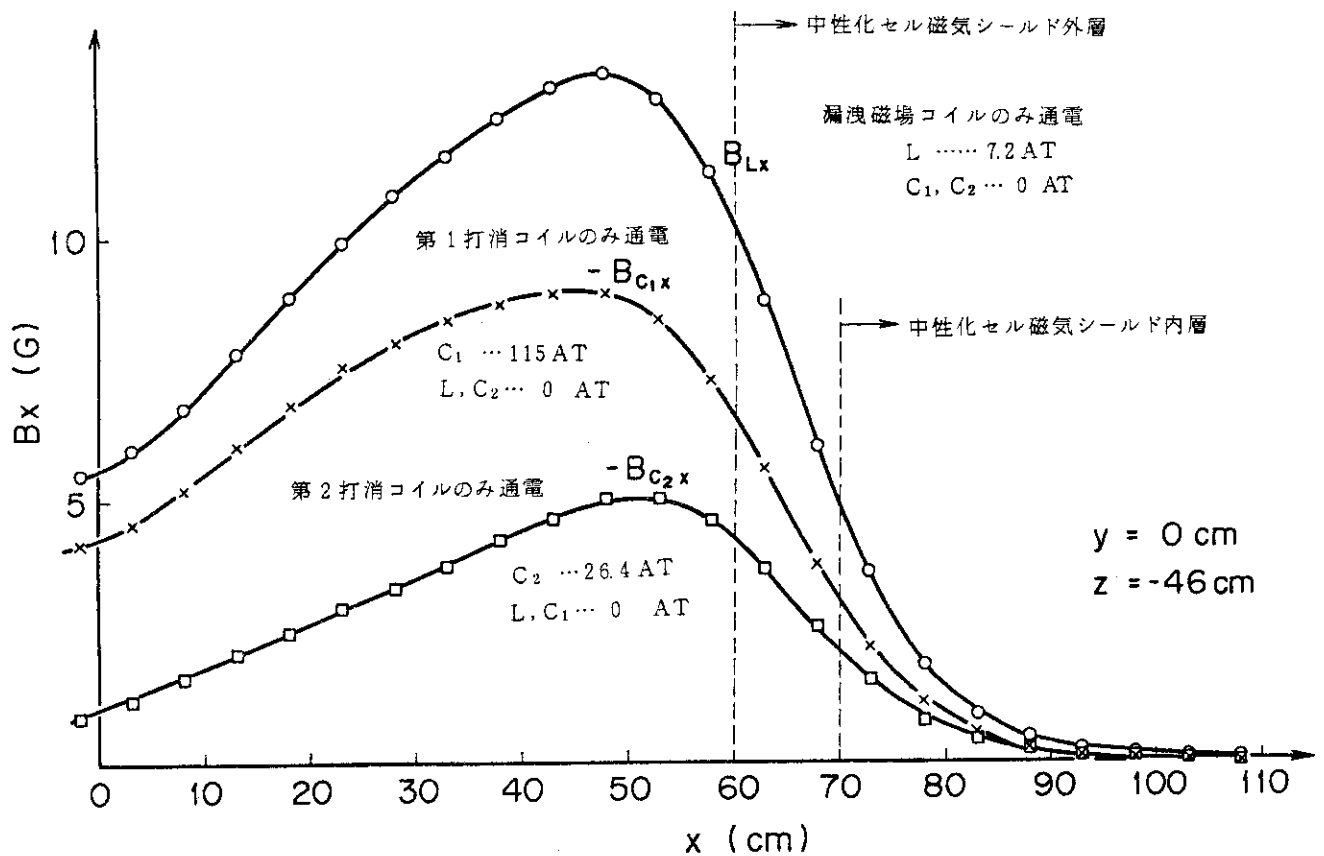


第6図 漏洩磁場磁気シールドの効果 換算後(… 27.5倍, -28.6倍)

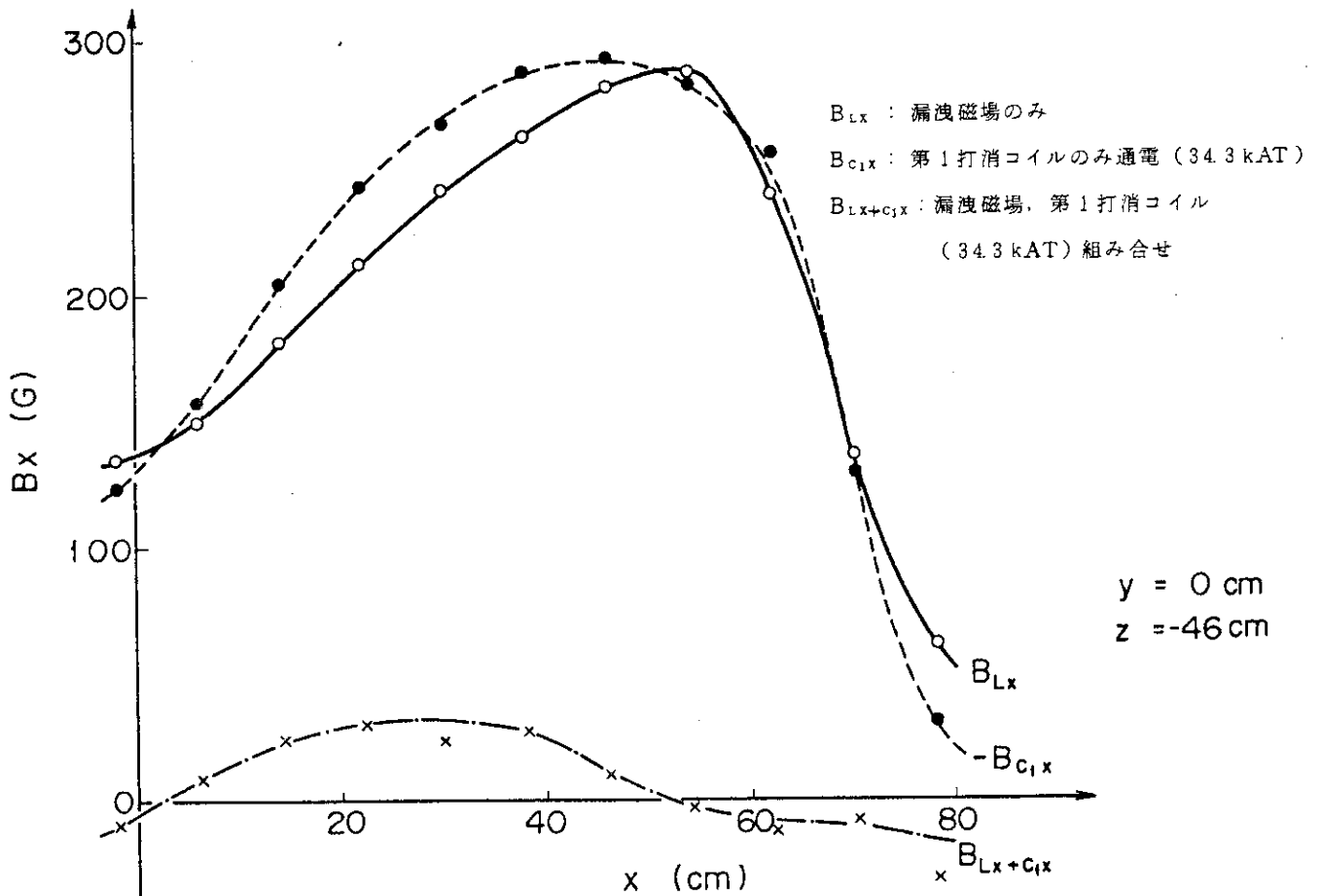
漏洩磁場発生コイル(L)



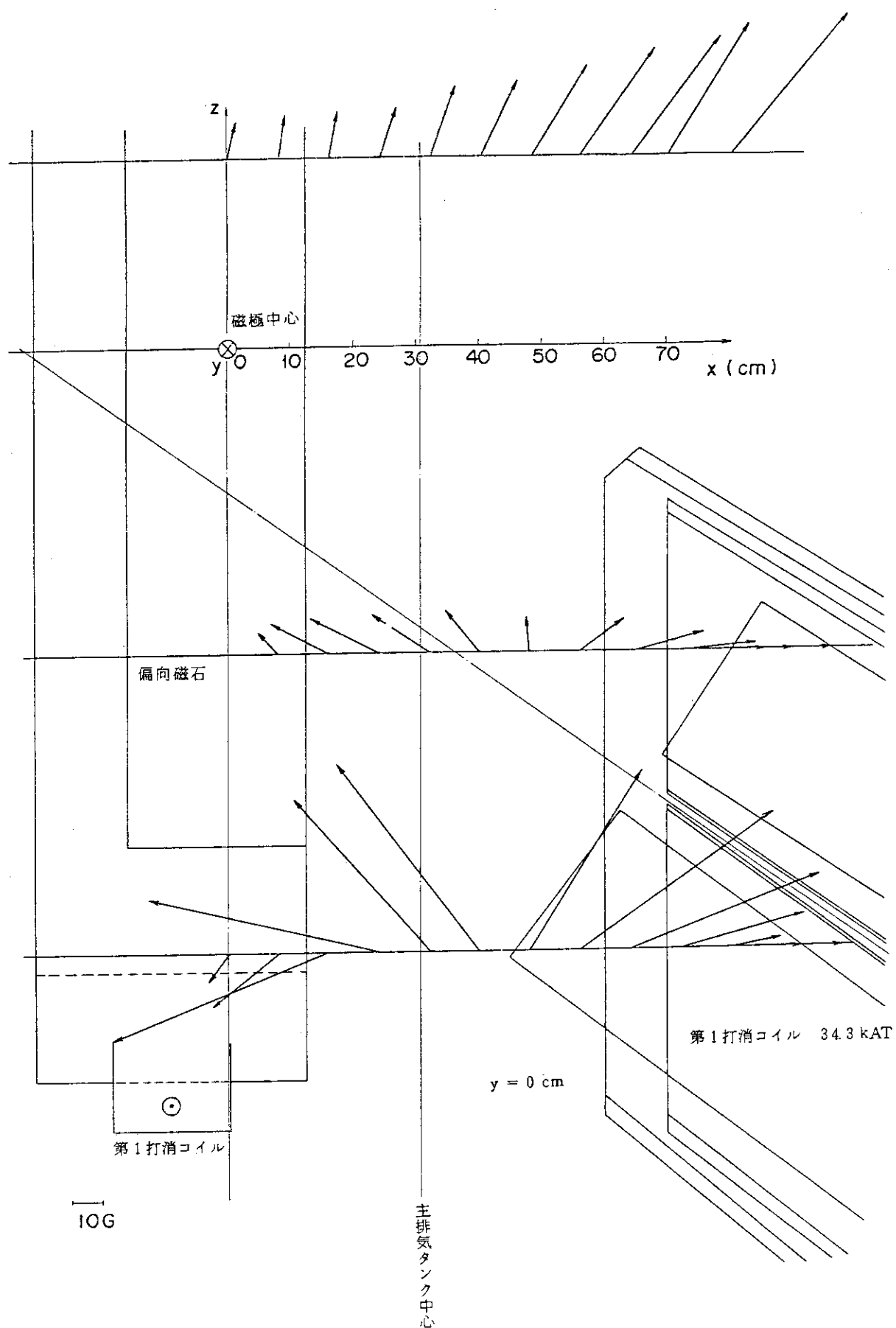
第7図 打消コイルの実験配置



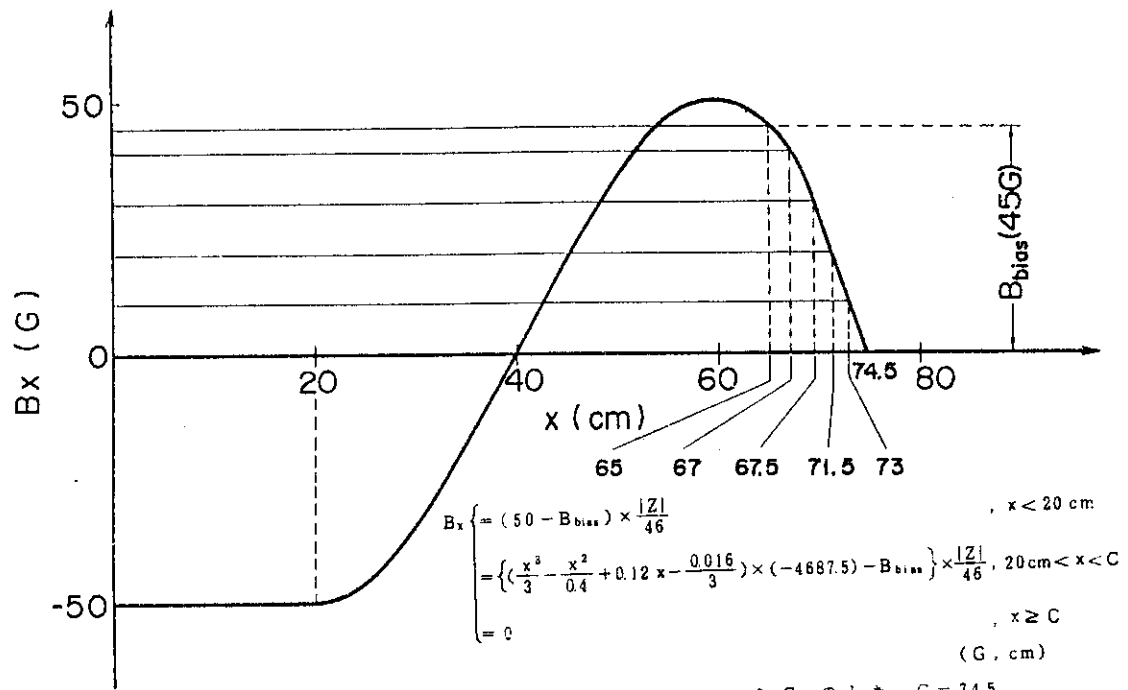
第8図 漏洩磁場発生コイル, 第1, 2打消コイル各通電時の磁場分布



第9図 (a) 第1打消コイルの効果 換算後(28.6倍)



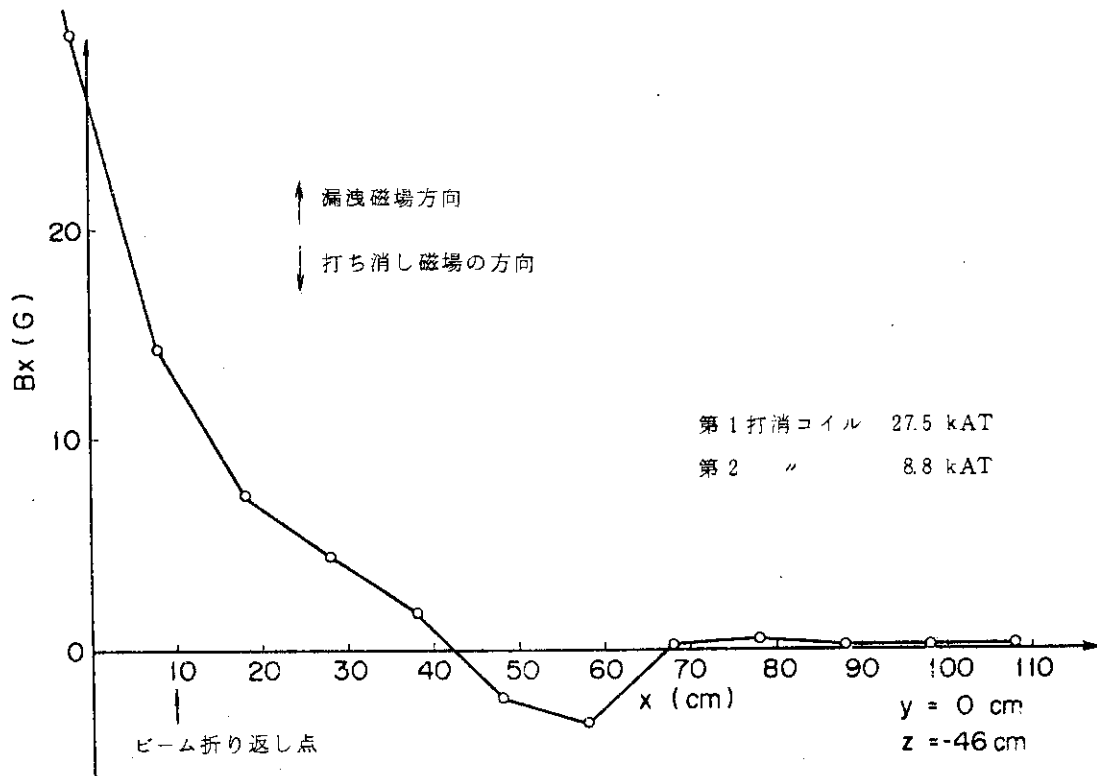
第9図 (b) 漏洩磁場発生コイル, 第1打消コイル両通電時の磁場分布 換算後(28.6倍)



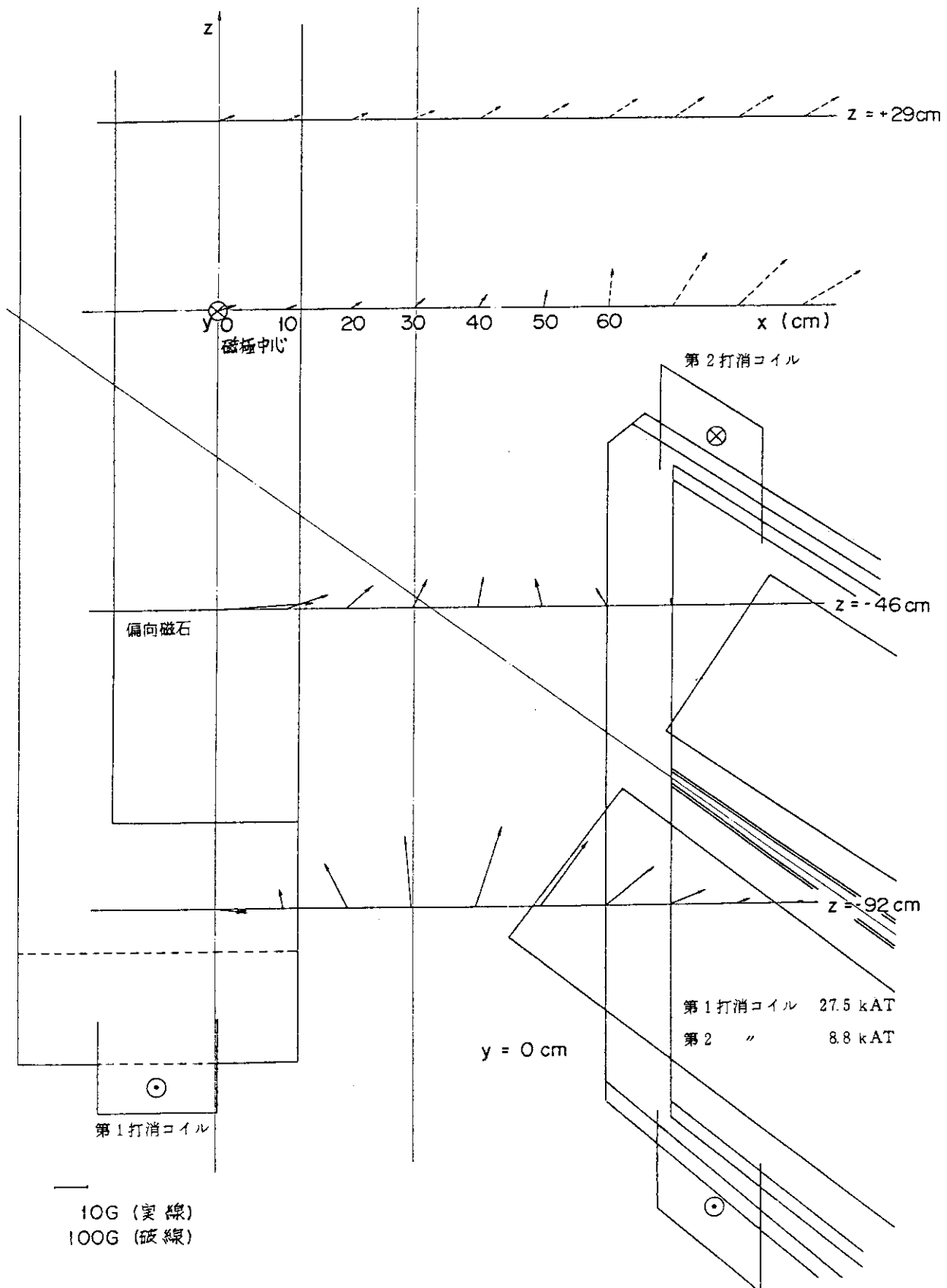
第10図 シミュレーションに用いた第1打消コイルのみを使った時の近似磁場分布 ($Z \leq 0 \text{ cm}$)。

図は $Z = -46 \text{ cm}$ のものを示す。 $Z > 0 \text{ cm}$ では $B_x = 0.41 x (\text{G}, \text{cm})$ とおいた。

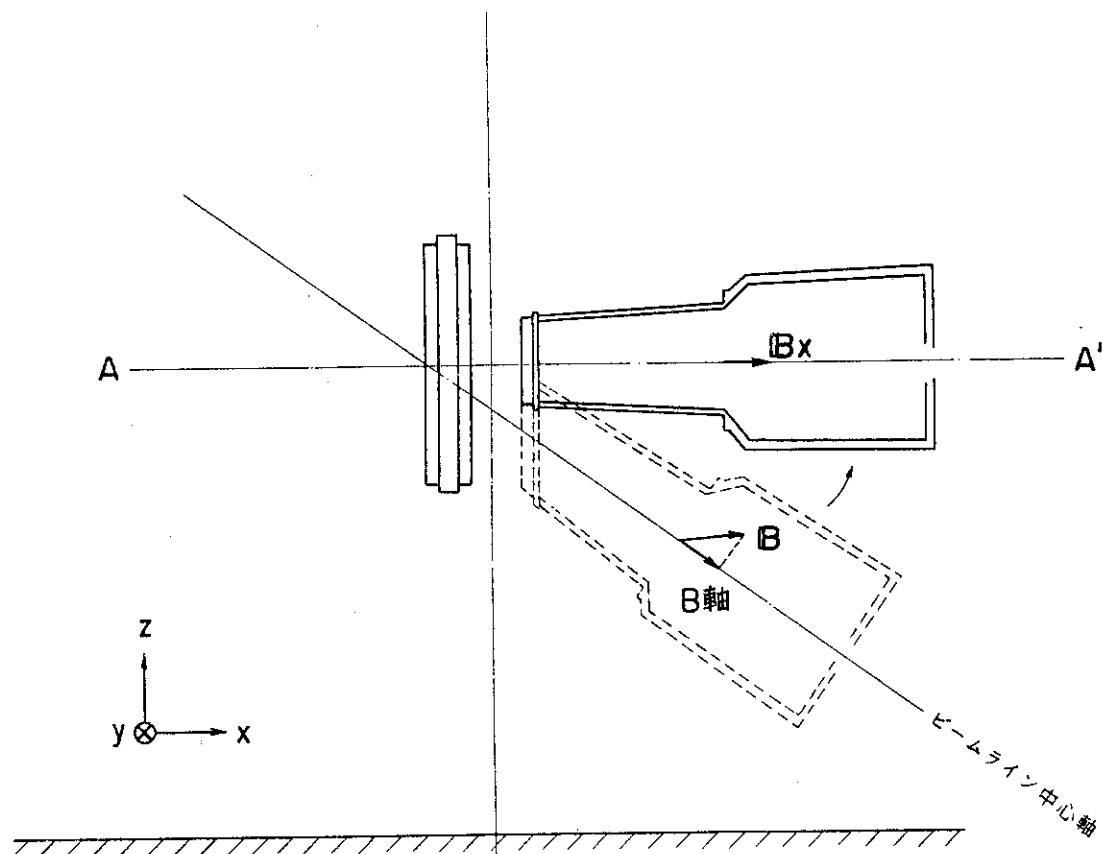
B_y, B_z は常に 0G。



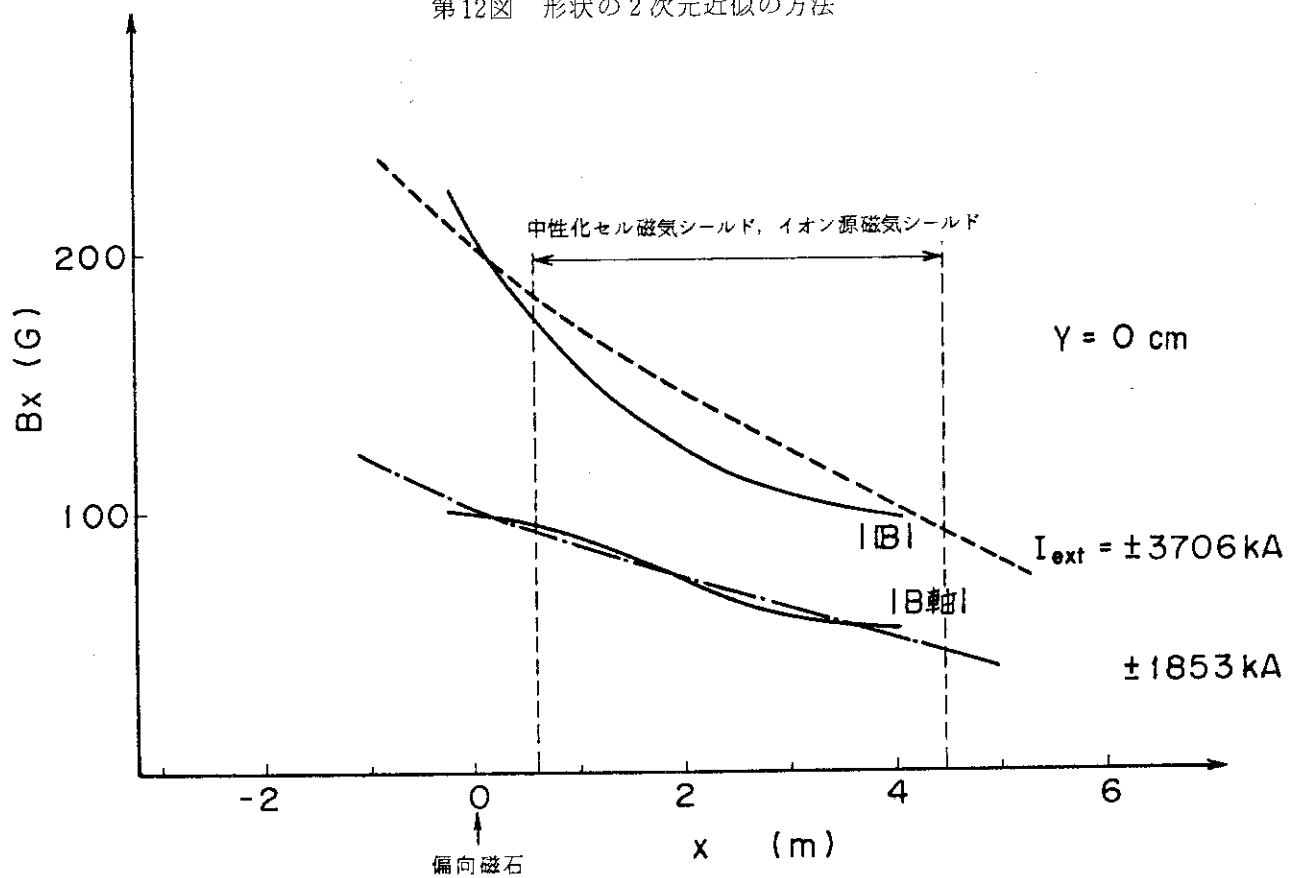
第11図 (a) 第1, 2打消コイルを併用した時の効果 換算後 (35.1 倍)



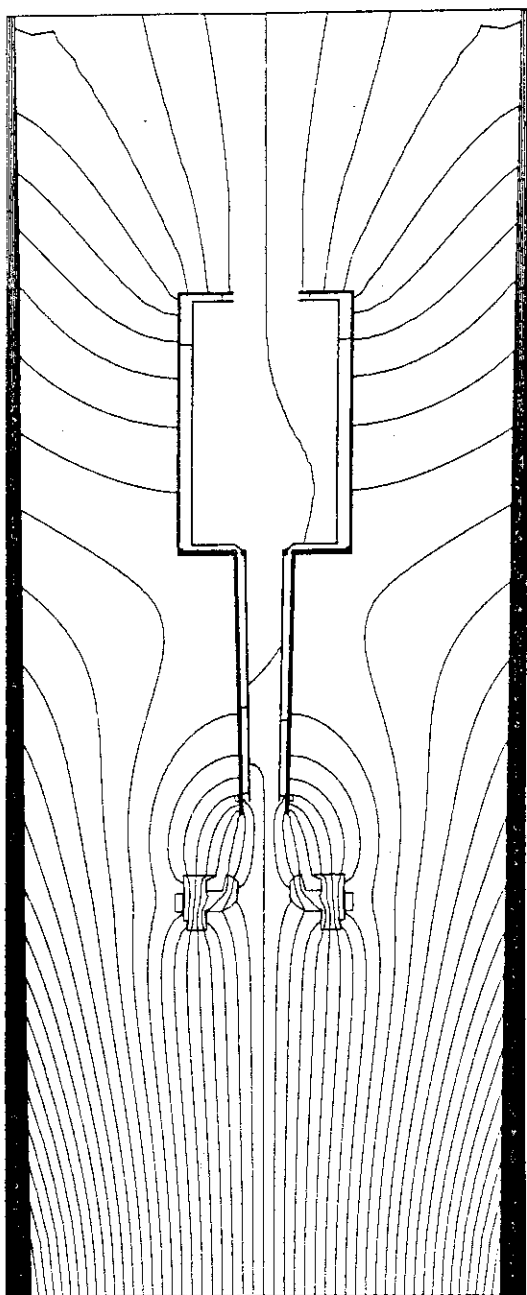
第11図 (b) 漏洩磁場発生コイル, 第1, 2打消コイル通電時の磁場分布 換算後(35.1倍)



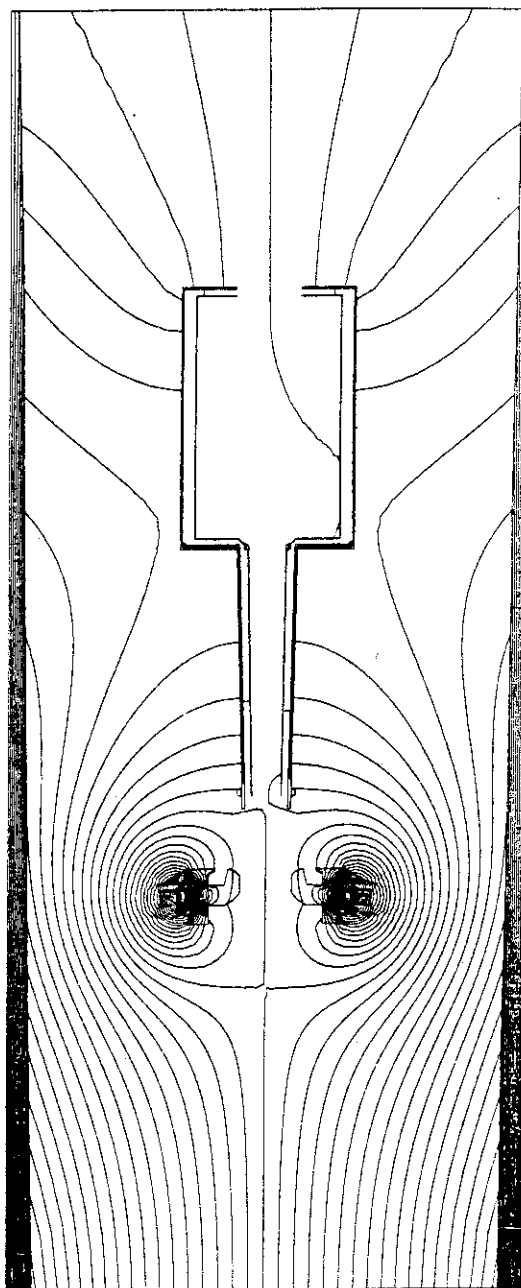
第12図 形状の2次元近似の方法



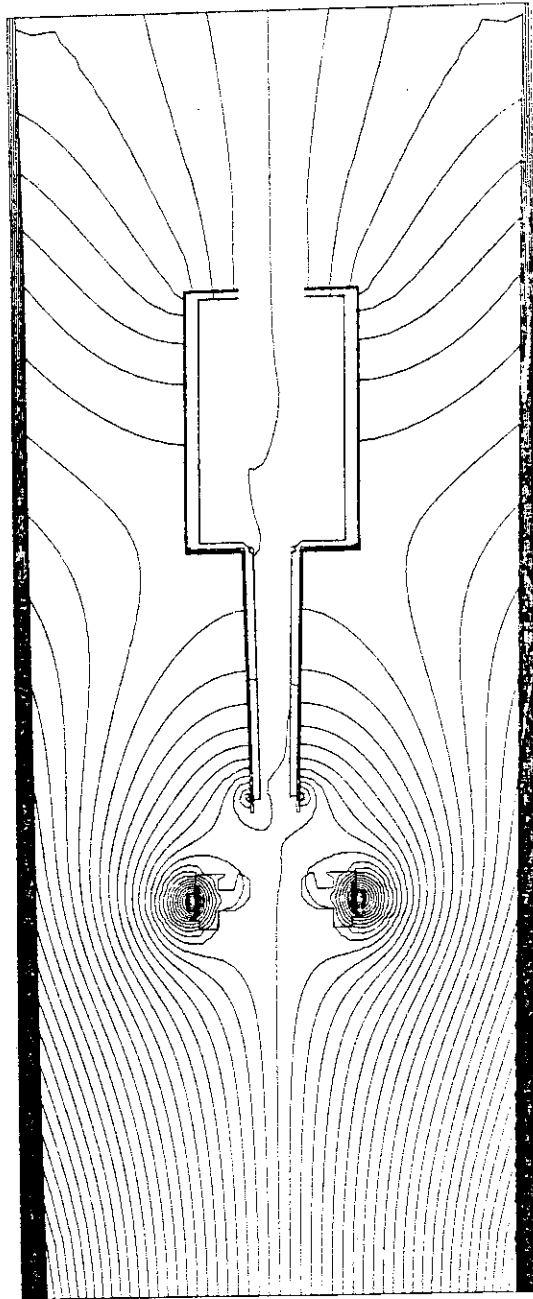
第13図 2次元配置変換後の漏洩磁場分布と計算に用いた磁場分布



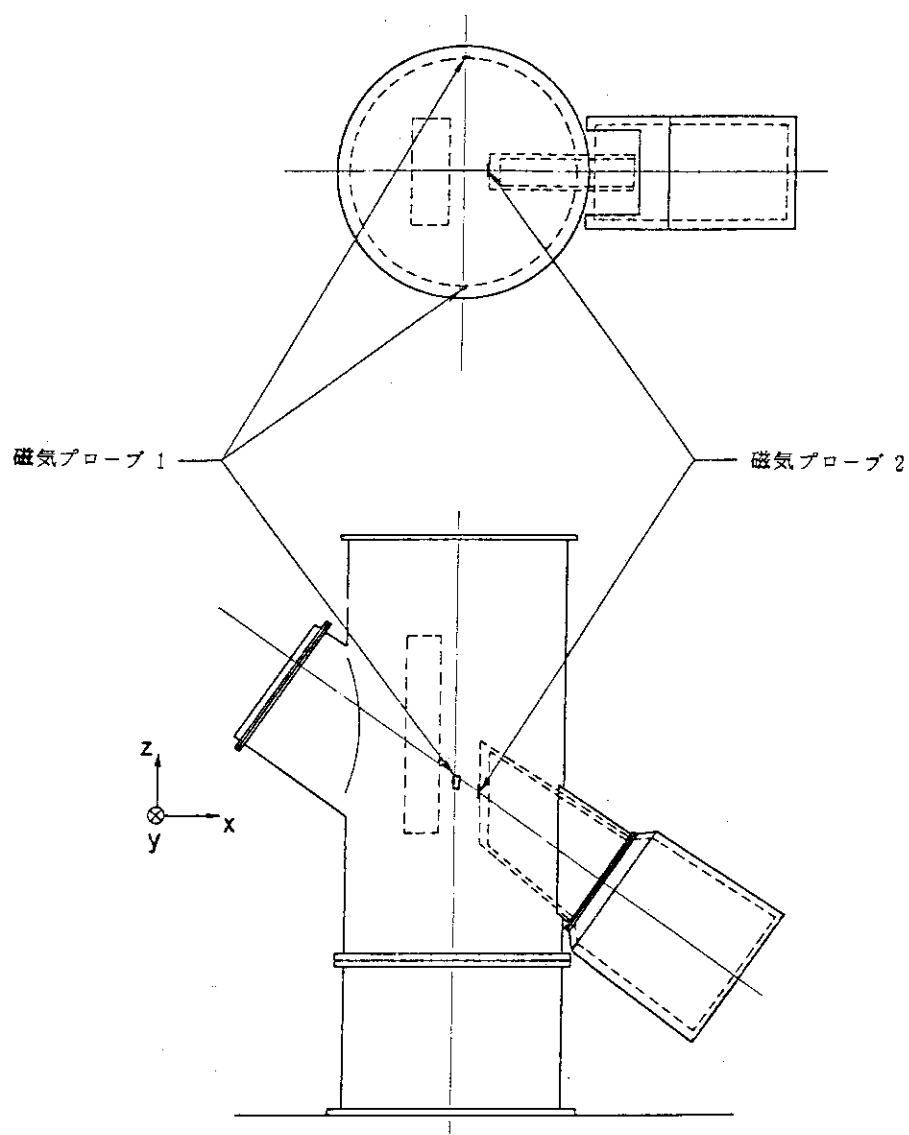
第14図 (a) 漏洩磁場のみ ($\pm 1853 \text{ kAT}$)



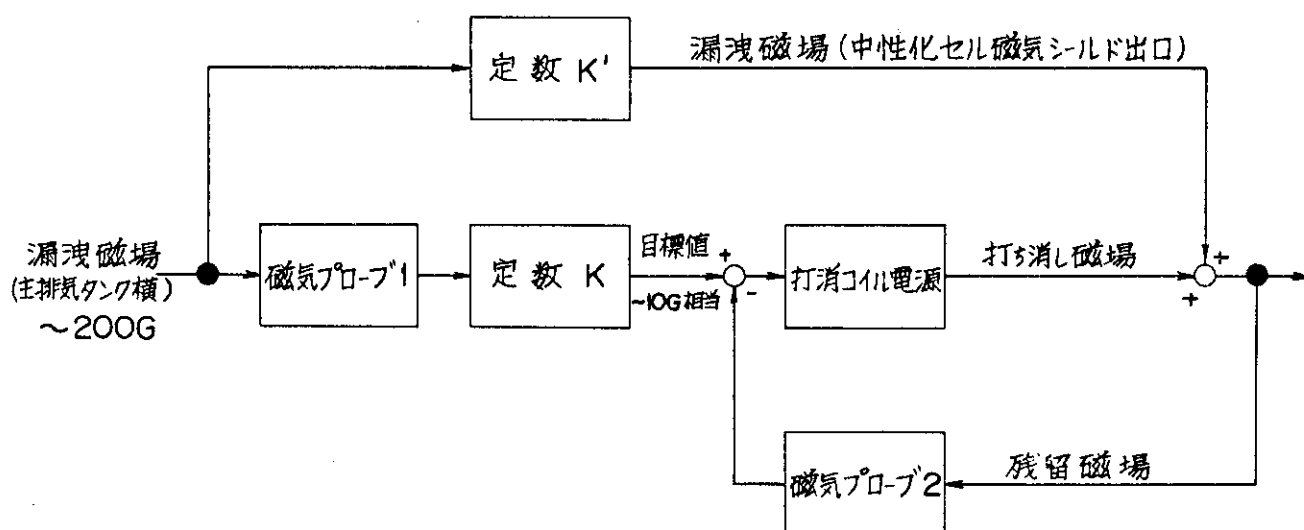
第14図 (b) 漏洩磁場 ($\pm 1853 \text{ kAT}$)
+ 第1打消コイル ($\pm 51 \text{ kAT}$)



第14図 (c) 漏洩磁場 ($\pm 3706 \text{ kAT}$) + 第1 打消コイル ($\pm 50 \text{ kAT}$)
+ 第2 打消コイル ($\pm 12.28 \text{ kAT}$)



第15図 (a) 打消コイル電源制御用磁気プローブの位置。磁気プローブはビームラインユニット毎に左右いずれかとする。



第15図 (b) 打消コイル制御ブロックダイアグラム