

JAERI-M
91-223

JT-60の高性能化改造に伴う
JT-60NBIの磁場系の対応

1992年1月

河合視己人・秋野 昇・伊藤 孝雄・栗山 正明
松岡 守・大賀 徳道・薄井 勝富

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し込みください。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）で複写による実費領布をおこなっております。

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

JT-60の高性能化改造に伴うJT-60NBIの磁場系の対応

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

河合視己人・秋野 昇・伊藤 孝雄・栗山 正明

松岡 守・大賀 徳道・薄井 勝富

(1991年12月11日受理)

JT-60の高性能化改造に伴い、JT-60中性粒子入射加熱装置(JT-60NBI)の磁場系(偏向磁石、各磁気シールド)も対応が必要となり、それぞれ検討を行い、その結果を基に改造を行った。

ビームエネルギーをこれまでの100keVから120keVにする高エネルギー化及び重水素ビーム化に伴い、残留イオンビームを偏向するための磁場を約55%増力する必要が生じた。縮小モデル実験による検討の結果、偏向磁石鉄心の磁気飽和の影響はわずかなものであり、この減少分をコイル電流の増加で補正すれば鉄心はそのままで良いことがわかった。トカマクからの漏洩磁場が従来の約2倍となったことにより、既設NBIの漏洩磁場対策を見直す必要が生じた。縮小モデル実験による検討の結果、通常受動的な磁気シールド方式と打消コイルを用いた能動的な磁場打消方式との併用式である従来の設備に、さらに新たな打消コイルをイオン源と中性化セルの各磁気シールドの接続部付近に追加すれば良いことがわかった。また、JT-60NBIの磁気シールド付電離真空計の漏洩磁場増大時の性能についても磁場計算コードを用いて検討した。その結果、この真空計は漏洩磁場の向きに対する取付け角度に一定の制限を加えれば、100mTまでの外部磁場に対しても使用可能なことがわかった。さらに、高速イオンのトロイダル磁場リップルロスが増大することへの対策として従来の14ユニットのうちの4ユニットを準垂直入射から接線入射(接線NBI)に改造することになった。接線NBIの漏洩磁場対策設備のうち、イオン源と中性化セルの各磁気シールドは再利用できるが、漏洩磁場に対するビームラインの相対的な角度が変わることから従来の打消コイルはそのまま再利用することができず、新たな対策が必要となった。磁場計算コードにより、NBIタンク全体を磁性材とする方式及び新たな打消コイル方式の2種について検討を行った。その結果、打消性能及びトカマクプラズマへ与える磁気的影響の両面から、後者のNBIタンクの外側と内側に大小2つの打消コイルを新設する方式が最適なことがわかった。

Modifications of the JT-60 NBI Magnetic System for the JT-60U

Mikito KAWAI, Noboru AKINO, Takao ITOH, Masaaki KURIYAMA
Mamoru MATSUOKA, Tokumichi OHGA and Katsutomi USUI

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

(Received December 11, 1991)

The JT-60 neutral beam injection system (JT-60 NBI) was modified to match to the upgraded JT-60 (JT-60U). As one of the major modifications, the magnetic system, ie, the reflecting magnet and the magnetic shields, on the JT-60 NBI was modified to inject deuterium beams with higher beam energy under the increased stray magnetic field from the tokamak. Since the original JT-60 NBI was designed to inject 100keV hydrogen beams, the field of the magnet has to be increased by 55% to inject 120keV deuterium beams. The magnetic saturation of the magnet core made of mild steel and resultant distortion of the magnetic field profile were examined using the one-fourth model of the magnetic system. We found that the saturation effect was still small and a small correction in the coil current was sufficient to keep linearity in the field strength. The magnetic hysteresis was negligible. The stray field from the tokamak to the beam-line has increased by a factor of two. The saturation of the magnetic shields in the JT-60 NBI was also examined using the same one-fourth model but with simulated stray field. Substantial field leak inside the shields due to saturation was observed under the increased stray field. This saturation could be suppressed by adding the third cancelling coil to a pair of the original cancelling coils. Ionization gauges with magnetic shield have been used in the JT-60 NBI. Performance of the shield against the increased stray field was also examined using 2-D and 3-D computer codes for magnetic field analysis. As a result, the original gauges are

feasible under the field of up to 100mT in strength, though the relative angle between the gauges and the stray field was limited. Four out of fourteen units in the JT-60 NBI are now being modified to inject beams tangentially. Since the relative angle between the beamline axis and the stray field changes, the original cancelling coils do not work any more. A new cancelling coil system has been designed using the 3-D code. With the same code, a passive shielding by making the beamline tanks of iron was found to be unpermissible, since an excessive field distortion would be caused at the surface of the tokamak plasmas.

Keywords: JT-60U, NBI, Increased Magnetic Fields, Magnet, Stray Field, Magnetic Shields, Cancelling Coils, Ionization Gauge, Tangential Injection

目 次

1. はじめに	1
2. 磁場系の概要と外部条件の変更内容	2
2.1 JT-60NB Iの磁場系の概要	2
2.2 偏向磁石と必要磁場	3
2.3 磁気シールド, 打消コイルと漏洩磁場	4
3. 偏向磁場増力への対応	16
3.1 1/4 モデル実験	16
3.2 磁場増力のための具体的対応	17
4. 既設NB Iの漏洩磁場増大対策	25
4.1 定格超過領域での特性	25
4.2 第3打消コイルの効果	26
5. 接線NB Iの漏洩磁場対策	29
5.1 タンク磁性材方式と打消コイル方式	29
5.2 打消コイル方式の詳細	31
6. 磁気シールド付電離真空計の磁場増大時の性能	41
7. まとめ	45
謝 辞	45
文 献	46

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the JT-60 NBI Magnetic System and Alteration in External Magnetic Field Conditions	2
2.1 Outline of the JT-60 NBI Magnetic System	2
2.2 Reflecting Magnet	3
2.3 Magnetic Shields for the Ion Sources and Neutralizers	4
3. Countermeasure Against the Augment of the Reflecting Magnetic Field	16
3.1 Magnetic Field Measurement in the One-fourth Model of the Magnetic System	16
3.2 Details of the Countermeasure Against the Increased Reflecting Field	17
4. Countermeasure Against the Increased Stray Field in the Original Beamlines	25
4.1 Performance of the Original System in the Increased Magnetic Field	25
4.2 Third Cancelling Coil	26
5. Countermeasure Against the Stray Field in the Tangential Beamlines	29
5.1 Comparison of Passive with Active Shielding Methods	29
5.2 Details of the New Cancelling Coil System	31
6. Property of the Magnetic Shield of the Ionization Gauge Against the Increased Stray Field	41
7. Conclusions	45
Acknowledgments	45
References	46

1. はじめに

JT-60は重水素放電を可能とし、かつ、プラズマ断面の大型化によるプラズマ電流の増大などを中心とした高性能化(JT-60U化)の改造を終え、平成3年(1991年)3月に実験を再開した。この改造に対応して、JT-60中性粒子入射加熱装置(以下、JT-60NBIと呼ぶ)¹⁾²⁾も重水素ビーム化・高エネルギー化、漏洩磁場増大対策、それに、一部ユニットの接線入射化³⁾などの改造を行った。これらのうち、高エネルギー化は、断面の大きくなったJT-60Uのプラズマに重水素ビームを入射する場合に、ビームをプラズマ中心にまで到達させるために、ビームエネルギーを従来の100keVから120keVに増大したものである。また、接線入射化はプラズマ断面が大型化する一方でトロイダルコイルの大きさは変わらないため、プラズマ周囲のトロイダル磁場のリップルが大きくなり高速イオンのリップロスも大きくなると予測される。この対策として、既設の準垂直入射の14ユニットのうちの4ユニットを接線入射化(以下、接線NBIと呼ぶ)するもので、平成3年度中の完成予定で改造中である。

以上のJT-60NBIの改造に伴って、磁場関係のシステム(イオン源及び中性化セル用の磁気シールド⁴⁾、打消コイル⁵⁾⁶⁾、偏向磁石⁷⁾の総称で、以下、磁場系と呼ぶ)においては次のような3項目の対応を行った。

①偏向磁場の増力;偏向磁石は中性化されなかった残存イオンビームをビームダンプ方向へ偏向するためのもので、今回の重水素ビーム化・高エネルギー化により、イオン種が H^+ 単独から H^+ または D^+ の選択式へ変わり、かつ、最大加速電圧が100kVから120kVとなるために、磁極中心における最大磁場を0.152Tから0.235Tに増力した。

②漏洩磁場増大対策;既設NBIの漏洩磁場対策はソースプラズマやイオンビームへのJT-60からの漏洩磁場の影響をなくすことを目的としたもので、イオン源と中性化セルには電磁軟鉄とミュンタルからなる2層構造の磁性材を設置した受動的な磁気シールド方式を、また、中性化セル出口より偏向磁石を経てビームダンプに至るまでのイオンビームの通る空間には2個の打消コイルを設置して能動的に磁場を打消す方式を、それぞれ採用している。JT-60の最大プラズマ電流が2.7MAから6MAに増大するのに伴い、最大漏洩磁場が従来の約1.9倍に増大するために漏洩磁場対策を見直した。

③接線NBIの漏洩磁場対策;接線NBIは既設の準垂直入射方式の一部を接線入射方式に改造するもので、磁気シールドも含めた多くのビームライン機器単体は配置を変更して再利用するが、この場合、ビーム軸と漏洩磁場の向きとの相対角度が既設NBIのそれと全く異なり、従来の打消コイルシステムをそのまま使用できないため、新たな漏洩磁場対策が必要となった。

JT-60NBI磁場系は、最大8MW(100kV、80A)×10秒の高パワー、長パルスの残存イオンビームをビームダンプなど所定の位置へ導くなどのために極めて重要な機能を果たしている。このため、上述の磁場系改造の設計・検討を行うために必要な、従来の設計条件以上の領域での偏向磁石や磁気シールド・打消コイルの性能の検証用のデー

タには高い信頼性が要求された。このため、先の3つの検討項目のうち、偏向磁場増力と既設NBIの漏洩磁場増大対策の2つの検討は、磁場系の1/4縮小モデル実験により行った。その理由は、このJT-60NBI磁場系のような複雑な磁性材形状や配置を解析する良い計算コードが手元になかったこと、また、今回の改造前の磁場系の製作設計時にも1/10や1/4の縮小モデル実験の実績があったため、測定手順などのノウハウをそのまま利用することができること、実測データも直接解析の他、イオンビーム軌道/熱負荷計算コード⁸⁾にすぐ使用できるなどの環境が整っていたこと、さらに、磁気飽和、磁気ヒステリシスの影響等が評価できること、などである。一方、新規設計となる接線NBIの漏洩磁場対策の検討は、3次元の磁場計算コード(ELF/MAGIC⁹⁾)を主に使用して行った。その理由は、接線NBIの漏洩磁場対策の検討開始時点で、JT-60NBIの磁場系の解析にも適用可能な新しい磁場計算コードが入手でき、利用可能となったことである。このため、計算により基本方針を決定し、それと1/10縮小モデルによる実測との比較により計算値の健全性を確認したうえで、さらに細部の検討を計算により行うという手順を採った。

また、JT-60NBIのビームライン各部の真空度測定に使用されている磁気シールド付電離真空計¹⁰⁾についても漏洩磁場が増大した場合の性能の評価を磁場計算コードを用いて行った。

本レポートでは、以上の検討の内容及び結果についてその詳細を報告する。

2. 磁場系の概要と外部条件の変更内容

本章では、JT-60NBIの磁場系の概要とJT-60Uへの改造に伴う外部条件の変更内容について述べる。

なお、本レポートでは、言葉の定義として「既設NBI」と「従来の・・・」とを用いているが、その区別は次のとおりとする。

「既設NBI」；接線NBIに対するもので、高性能化の前及び後の準垂直入射のユニットをさす。

「従来の・・・」；今回の改造以前（すなわち、平成元年（1989年）10月迄の運転時）の状態あるいは性能などをさす。

2.1 JT-60NBIの磁場系の概要

既設のJT-60NBIのビームラインの構成をFig. 2.1-1に示す。このうち、磁場系機器とは偏向磁石(MAGNET)、中性化セル磁気シールド(NEUTRALIZER SHIELD)、イオン源磁気シールド(ION SOURCE SHIELD)、それに打消コイル(CANCELLING COIL 1,2)を指すものとする。

偏向磁石は、中性化セルを通過後も中性化されなかった残存イオンビームを磁氣的に偏向し、ビームダンプへ導くための機器である。Fig. 2.1-1の下ユニットの場

タには高い信頼性が要求された。このため、先の3つの検討項目のうち、偏向磁場増力と既設NBIの漏洩磁場増大対策の2つの検討は、磁場系の1/4縮小モデル実験により行った。その理由は、このJT-60NBI磁場系のような複雑な磁性材形状や配置を解析する良い計算コードが手元になかったこと、また、今回の改造前の磁場系の製作設計時にも1/10や1/4の縮小モデル実験の実績があったため、測定手順などのノウハウをそのまま利用することができること、実測データも直接解析の他、イオンビーム軌道/熱負荷計算コード⁸⁾にすぐ使用できるなどの環境が整っていたこと、さらに、磁気飽和、磁気ヒステリシスの影響等が評価できること、などである。一方、新規設計となる接線NBIの漏洩磁場対策の検討は、3次元の磁場計算コード(ELF/MAGIC⁹⁾)を主に使用して行った。その理由は、接線NBIの漏洩磁場対策の検討開始時点で、JT-60NBIの磁場系の解析にも適用可能な新しい磁場計算コードが入手でき、利用可能となったことである。このため、計算により基本方針を決定し、それと1/10縮小モデルによる実測との比較により計算値の健全性を確認したうえで、さらに細部の検討を計算により行うという手順を採った。

また、JT-60NBIのビームライン各部の真空度測定に使用されている磁気シールド付電離真空計¹⁰⁾についても漏洩磁場が増大した場合の性能の評価を磁場計算コードを用いて行った。

本レポートでは、以上の検討の内容及び結果についてその詳細を報告する。

2. 磁場系の概要と外部条件の変更内容

本章では、JT-60NBIの磁場系の概要とJT-60Uへの改造に伴う外部条件の変更内容について述べる。

なお、本レポートでは、言葉の定義として「既設NBI」と「従来の・・・」とを用いているが、その区別は次のとおりとする。

「既設NBI」；接線NBIに対するもので、高性能化の前及び後の準垂直入射のユニットをさす。

「従来の・・・」；今回の改造以前（すなわち、平成元年（1989年）10月迄の運転時）の状態あるいは性能などをさす。

2.1 JT-60NBIの磁場系の概要

既設のJT-60NBIのビームラインの構成をFig. 2.1-1に示す。このうち、磁場系機器とは偏向磁石(MAGNET)、中性化セル磁気シールド(NEUTRALIZER SHIELD)、イオン源磁気シールド(ION SOURCE SHIELD)、それに打消コイル(CANCELLING COIL 1,2)を指すものとする。

偏向磁石は、中性化セルを通過後も中性化されなかった残存イオンビームを磁氣的に偏向し、ビームダンプへ導くための機器である。Fig. 2.1-1の下ユニットの場

合、偏向磁場は紙面に上向きの方向に与えられており、図の右下方向から進行してくる残存イオンビームを反射させるような形で、ビームダンプの設置されている右上方向へ導くことができる。

各磁気シールドと打消コイルは、JT-60からの漏洩磁場がイオンビームの軌道などに与える悪影響を防止するための機器である。このうち、磁気シールドは、イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールド、それに、両磁気シールドを磁氣的に接続するイオン源部接続フランジから構成されている。また、打消コイルは偏向磁石鉄心の外周の第1打消コイルと中性化セル磁気シールド先端付近の第2打消コイルから構成される。打消コイルは、磁気シールドの効果の及ばない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の影響を打消するためのもので、2つのコイルは直列に接続され漏洩磁場の水平成分に対して逆方向の磁場を発生するように制御される。

今回の装置の改造項目とそれに伴う磁場系の設計条件変更項目及び検討項目の概要はTable 2. 1-1に示すとおりであった。

なお、本レポート中の磁場の座標系は偏向磁場で1種類、漏洩磁場関係で5種類あり、後者の内容をFig. 2. 1-2に示す。また、偏向磁場の場合はFig. 2. 2-1中に示すとおり、偏向磁石自身を基準としたもので他と異なっているので注意を要する。

2. 2 偏向磁石と必要磁場

(1) 偏向磁石の構成及び性能

偏向磁石については、文献1)、7)に詳述されているが、ここにその要点を述べる。

偏向磁石の作る磁場とビーム軌道の関係をFig. 2. 2-1に示す。ビームダンプなどの受熱機器と偏向磁石との関係も同図に示すとおりで、イオンビームはビームダンプとウォータージャケットに導かれて熱として処理される。偏向磁石は残存イオンビームを単に反射させて偏向するだけでなく、Fig. 2. 2-1のZ方向にも拡げてビームダンプへの熱流束を下げるため、及び反射点をなるべく偏向磁石から遠ざけてウォータージャケットの熱負荷を軽減させるための2つの目的で、偏向磁石全体から見て磁極をイオンビーム入射方向にずらした構造になっている。磁石の鉄心は電磁軟鉄製で、断面積の一番狭い所は上下のヨーク部の2本分合わせて1505cm²である。励磁用のコイルの電流定格は1300Aで、両磁極に各23ターン巻かれており、2つのコイルは直列通電される。

必要磁場の設計値は加速電圧 $V_{acc} = 75\text{ kV}$ に対して0.132Tで、この時の起磁力は50.6kAT²である。励磁電流 I_{rm} はビームエネルギーやイオン種を変えても残存イオンビームの軌道を一定とするために、 $I_{rm} = 1270 \sqrt{V_{acc}[\text{kV}]/100} \times \sqrt{M}$ [A]より求められる値としている。ここで、 V_{acc} は加速電圧、 M はイオンの質量数である。従来のイオン種及び最大ビームエネルギーは、 H^+ で100keVであり、この時の電流は1270Aで、磁極中心部の磁場は前述のとおり、磁気飽和が全くないとして0.152Tである。なお、鉄心が積層構造ではなくブロック構造であるため、鉄心中の渦電流により、磁場の立上げの時定数はかなり遅い。1例として1270Aを通電した場合には磁場の定常値の63%まで

達する時間は約0.35秒、90%まででは約0.55秒であった。

実際の偏向磁石の磁極中心磁場 B_{z0} と励磁電流 I_{rm} の関係を実測した参考データを Fig. 2. 2-2 に示す。この図によれば、 $I_{rm}=1000$ A 程度を超えるところから磁場値の直線からの減少が生じ始め、1270 A で -2.5%、2000 A では約 -8% となっている。

(2) 重水素化/高エネルギー化による偏向磁場増大

JT-60Uでの重水素放電実験に対応して、JT-60NBIも重水素ビームの運転も可能とすると同時に、最大ビームエネルギーを100keVから120keVまで上げる、高エネルギー化の改造も行った。高エネルギー化は、前述のとおり、プラズマ断面の大型化に加え、重水素ビームのプラズマへの侵入距離は同一ビームエネルギーの水素ビームの場合の半分となるため、以前に比べビームがプラズマ中心に到達しにくくなることへの対策である。これらの改造により、被偏向イオンの質量数と加速電圧がそれぞれ増大するため、偏向磁場も増大する必要が生じた。従来の最大定格の100 keVの水素ビームの時と同じ偏向を、120 keVの重水素ビームに対して行わせるためには、(1)項より、

$$0.152 \times \sqrt{(120/100)} \times \sqrt{2} = 0.235 \text{ [T]}$$

の磁場が必要となり、約1.5倍の増力となる。このための必要励磁電流は、磁気飽和が全く現れないと仮定すると、(1)項の I_{rm} の式より、

$$1270 \times \sqrt{(120/100)} \times \sqrt{2} = 1967 \text{ [A]}$$

となる。

なお、偏向磁石は接線NBIにおいても、NBIタンク内の配置のみ変更して再利用されるため、本件は既設NBIと接線NBIとに共通する内容である。

2. 3 磁気シールド、打消コイルと漏洩磁場

(1) 漏洩磁場対策設備の構成及び性能

磁気シールドと打消コイルの内容については、文献1)、4)、5)、6)に詳述されているが、ここにその要点を述べる。

漏洩磁場対策としては、2種の方式を併用している。つまり、イオン源と中性化セルに対してこれらを電磁軟鉄と μ メタルからなる2層構造の磁性材で取囲むことにより磁気シールドする方式と、中性化セル出口より偏向磁石を経てビームダンプに至るまでのイオンビームの通る空間に対しては打消コイルにより能動的に磁場を打消す方式である。

従来のJT-60からの漏洩磁場の分布を、磁性材がない場合の空間磁場値として Fig. 2. 3-1 に示す。JT-60の最大漏洩磁場発生時には、NBIタンク中心よりやや手前の偏向磁石付近の、トカマク中心からの距離 $R=8.0$ m、トカマク赤道面からの距離 $Z=-4$ m の点で、偏向磁石等の磁性体がない場合で、20.8 mTであった(タンク中心にはほぼ一致する $R=8.5$ m の点への換算では16.8 mTである)。

① 磁気シールド

イオン源及び中性化セルにはそれぞれ外層に電磁軟鉄、内層にミューメタルを用いた2層シェル構造の磁気シールドを設置している。その概略は下表のとおりである。なお、ここでの漏洩磁場の値は全て横磁場(ビーム軸に垂直な方向の、ビーム軌道に大きい影

響を与える磁場) であるとして、安全サイドで設計されている。また、磁気シールド内の横磁場の目標値の根拠は、50kVで加速した H_3^+ がこわれてできた $H^+(50/3\text{keV})$ が100%と仮定したビームがその領域の距離を通る時、その磁場値を一様に受けてもビームの偏向角を 0.1° 以下とし、これによる中性粒子パワーの損失を全体の1%以下にする⁴⁾ことである。

磁気シールド	外層肉厚	内層肉厚	漏洩磁場	目標値	シールドファクター
イオン源	16 mm	5 mm	7.0mT	0.06mT	117
中性化セル	24 mm	5 mm	14.0mT	0.015mT	965

注) この漏洩磁場の値は Fig. 2. 3-1 から求めた磁性材がない場合のもの。

また、イオン源磁気シールド外層の電磁軟鉄肉厚の設計値は15mmであったが、実機では材料の入手が容易な16mmを使用した。

②打消コイル

中性化セルの磁気シールド出口から偏向磁石を経てビームダンプに至るまでの空間には磁気シールドを採用することができないため、偏向磁石の外周と中性化セル磁気シールド先端部の2ヶ所に打消コイルを設置して漏洩磁場の影響を打消すようにしている。その概略は次のとおりである。

	設置位置	ターン数	電 流
第1打消コイル	偏向磁石外周	16ターン×2	1200 A max.
第2打消コイル	中性化セル 磁気シールド 先端外周	10ターン	1200 A max.

2つの打消コイルは電氣的に直列に接続され、外部漏洩磁場の大きさに比例したコイル電流を流して漏洩磁場を打消すように制御される。この制御系の構成ブロック図を Fig. 2. 3-2 に示す。打消磁場は漏洩磁場の水平成分に対し反対方向であり、これを相対的に大きめにするるとイオンビームはイオン源側から見て右側へ、逆に小さめにするると左側へ行き、この強度を定数Kで調整することにより、ビームをビームダンプの左右方向の中央へバランスさせるようにしている。このため、この制御は単純に測定点の磁場をゼロにするのではなく、漏洩磁場の大きさに比例したわずかな値(例えば、漏洩磁場25mTに対し2mT)を目標値としている。そのために、2つの磁気プローブを次のように設置している。

	設置位置	用 途
磁気プローブ1	NBIタンク外壁面	漏洩磁場検出用
磁気プローブ2	中性化セル磁気シールド 先端中央	残留磁場検出用

以上の、従来の漏洩磁場対策設備の性能試験をJT-60NBI原型ユニットにおいて行った時の結果をFig. 2.3-3に示す。これは漏洩磁場模擬コイルに上述のJT-60の漏洩磁場最大値相当の通電をして、上下のイオン源軸にそった磁場分布を測定したもので、横磁場 B_z' の値はイオン源部で0.06mT、中性化セル部で0.02mTがピーク値であり、平均値としては充分設計目標値以内にある。なお、Fig. 2.3-3や後出のFig. 4.1-2、Fig. 4.2-1で、イオン源部接続フランジ付近の磁場値が大きくなっているのは、この部分の両磁気シールドの接続部からの漏れ磁束があるためである。

また、JT-60からの漏洩磁場を実際に打消している時の動作波形の一例をFig. 2.3-4に示す。t=0はプラズマ励起開始時刻であるが、残留磁場 B_r が極性反転した後、t=3.4秒頃から漏洩磁場 B_s に比例した打消コイル電流 I_c が流れ始める。これにより、打消し後の残留磁場は漏洩磁場に比例したゼロよりわずかに大きい値となるように制御されている。なお、残留磁場は漏洩磁場に比べ極性反転等の時間が遅れているが、これは磁気プローブ2付近の磁性体の残留磁化等の影響と考えられている。

(2) JT-60大電流化による漏洩磁場増大

JT-60Uの最大プラズマ電流は改造前の2.7MAから6MAに大電流化され、これにより、既設NBIタンク付近への漏洩磁場も増大した。JT-60Uの最大漏洩磁場を生ずる運転条件はプラズマ電流 $I_p=6MA$ 、ダイバータ放電、ベータ値 $\beta_p=0.6$ 、Vコイル高非円形モードの場合で、この時の既設NBIタンク周辺の漏洩磁場の分布をFig. 2.3-5に示す。R=8.5m、Z=-4mの点での同様の磁場値は32.9mT ($B_R=32.4mT$, $B_Z=5.9mT$)となり、Fig. 2.3-1に示す従来の16.8mTと比べ1.9倍の増大となる。この磁場増大に対して従来の漏洩磁場対策を見直す必要が生じた。

(3) 接線NBIにおける漏洩磁場対策

接線NBIの設計については文献3)に詳述されており、その概略は次のとおりである。JT-60Uへの改造に伴う、トロイダル磁場のリップル増大による高速イオンのリップロス増大の対策として、既設のNBIの準垂直入射方式の14ユニットのうち、4ユニットを接線入射方式に改造する。この改造後のJT-60NBIの配置図をFig. 2.3-6に、また、接線NBIの断面図をFig. 2.3-7に示す。接線NBIの上下ユニットはFig. 2.3-7のように、主排気タンク及びJT-60Uへの入射ポートを新設して共有するが、その他のビームライン機器は従来の準垂直入射ユニットのものを配置換えして再利用し、イオン源の運転は現状どおり各ユニット毎に行われる。

Fig. 2.3-5に示すように、トカマク中心から偏向磁石までの距離は既設NBIの場合のR= $\sim 8m$ に対し、接線NBIでは $\sim 10m$ と既設NBIより離れた配置となる。このため、偏向磁石付近のJT-60U化後の漏洩磁場値は、既設NBIの場合の約半分となり、最大漏洩磁場の絶対値は既設NBIの改造前の設計値にほぼ等しい。しかし、磁場のベクトルとビーム軸との相関関係は既設NBIとは大きく異なっている。このため、改造前の磁気シールドは磁気飽和などなくそのまま再利用が可能と予想されるが、打消コイルについては既設NBIのものをそのまま再利用することはできず、この打消コイル設備を中心に新たな検討が必要となった。

Table 2.1-1 Required modifications in the JT-60 NBI magnetic system

Changes in operation	Influence to the magnetic system	Items to be checked
Beam energy and species (100keV, H ⁺ → 120keV, D ⁺)	Augment of the magnetic field (0.15T→0.23T At the magnet center)	Influence of the saturation of the magnet core (Distortion, Hysteresis)
Plasma current (I _p =2.7MA→6MA)	Augment of the stray field from the tokamak (17mT→33mT At the beamline tank center)	Saturation of the magnetic shields and effect of the cancelling coils
Injection angle (Perpendicular → Tangential)	Change of the relative angle between the field and the active shield	New countermeasure against the stray field (Passive or active method?)

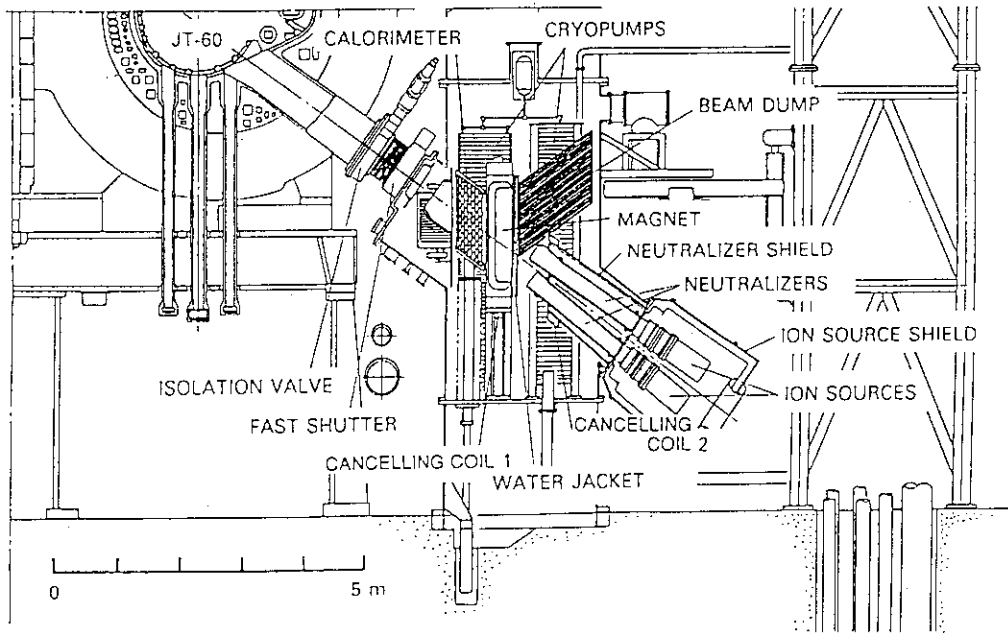


Fig. 2.1-1 One of the lower original beamline units of the JT-60 NBI. The neutralizer shield and the ion source shield consist of two layers (outer layers are made of soft iron of 2.4cm in thickness for the former and 1.6cm in thickness for the latter, and inner layers are made of mu-metal of 5mm in thickness for both shields). Two cancelling coils are wound around the magnet yoke (cancelling coil 1) and around the exit of the neutralizer shield (cancelling coil 2).

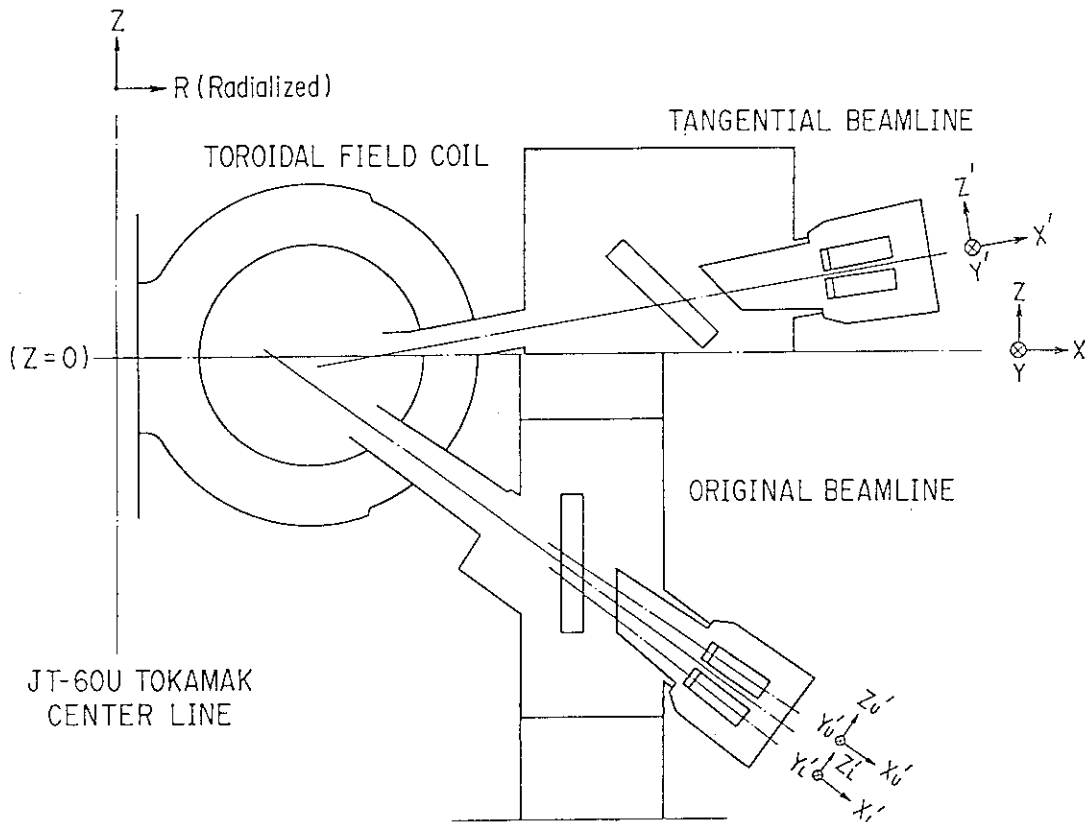


Fig. 2.1-2 Definition of the coordinates.

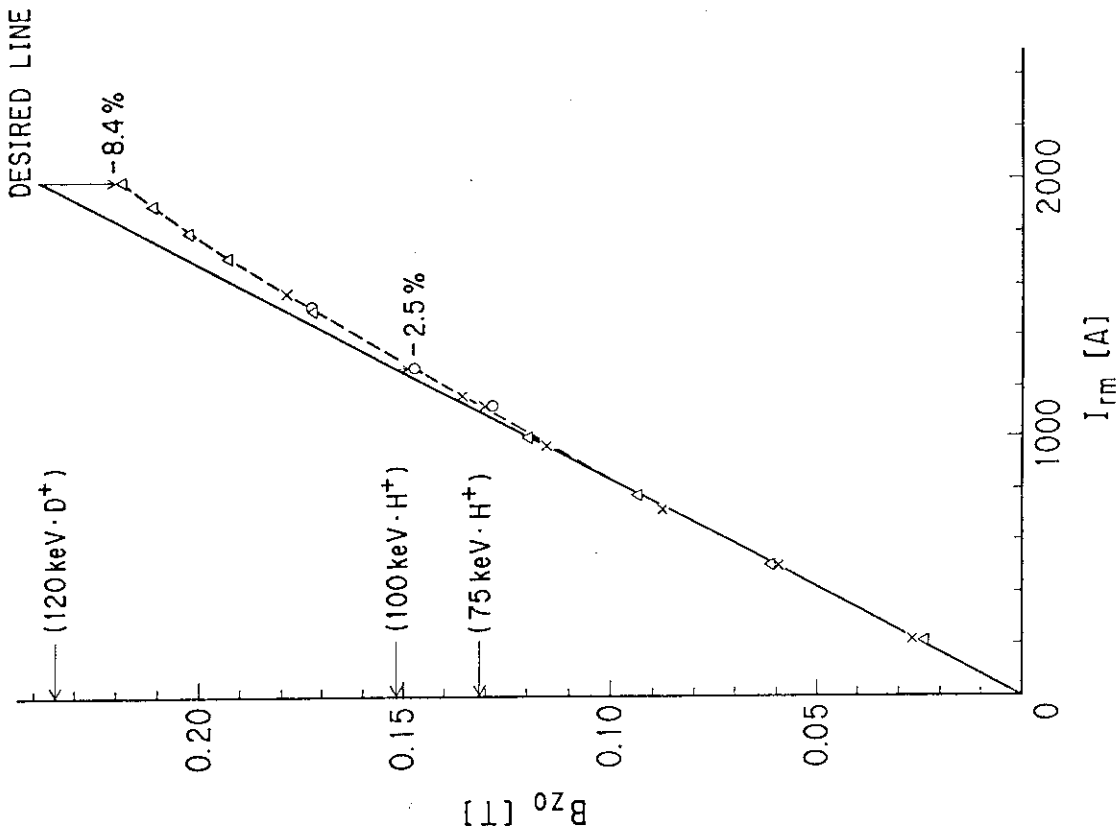


Fig. 2.2-2 Magnetic field (B_{z0}) measured at the magnet center vs. coil current (I_{rm}) in the prototype beamline unit (X), in the beamline units of #2 (Δ) and #4 (O).

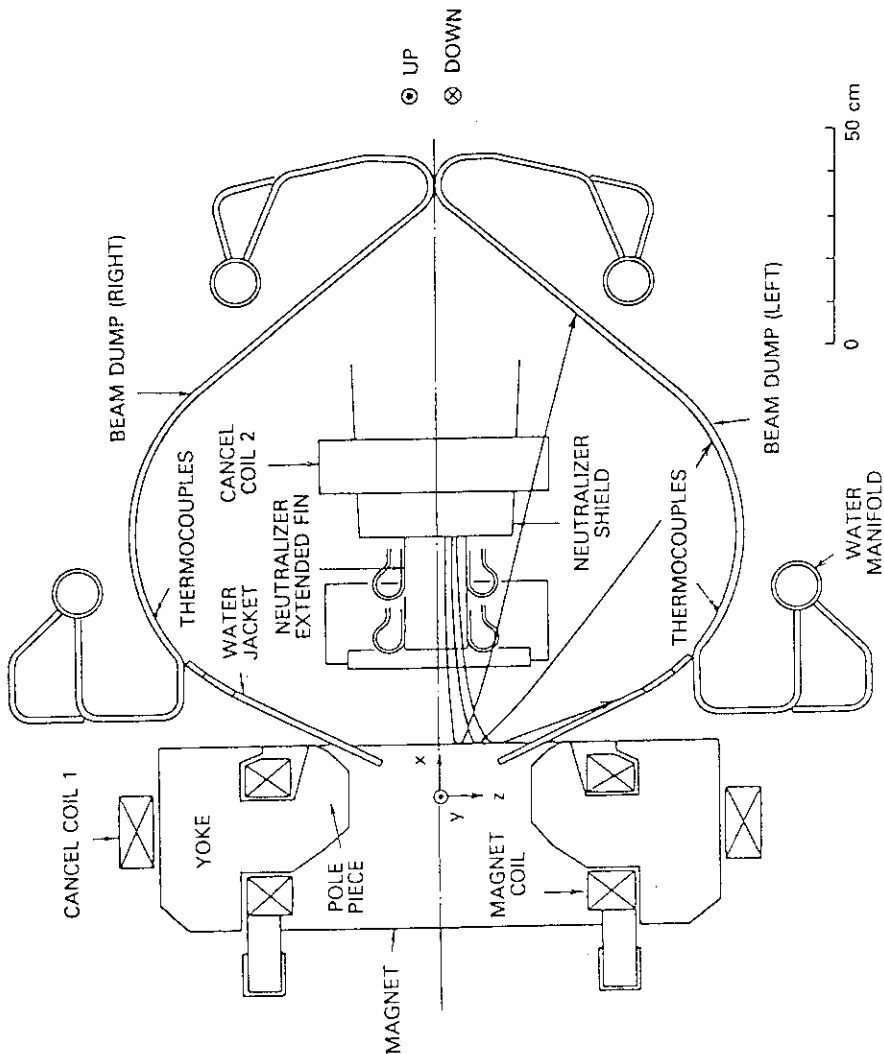


Fig. 2.2-1 Horizontal view of the reflecting magnet, water jacket protecting the magnet yoke, beam dump stopping the unneutralized ion beams, and the beam orbits. This configuration is applicable to both the original and tangential beamlines.

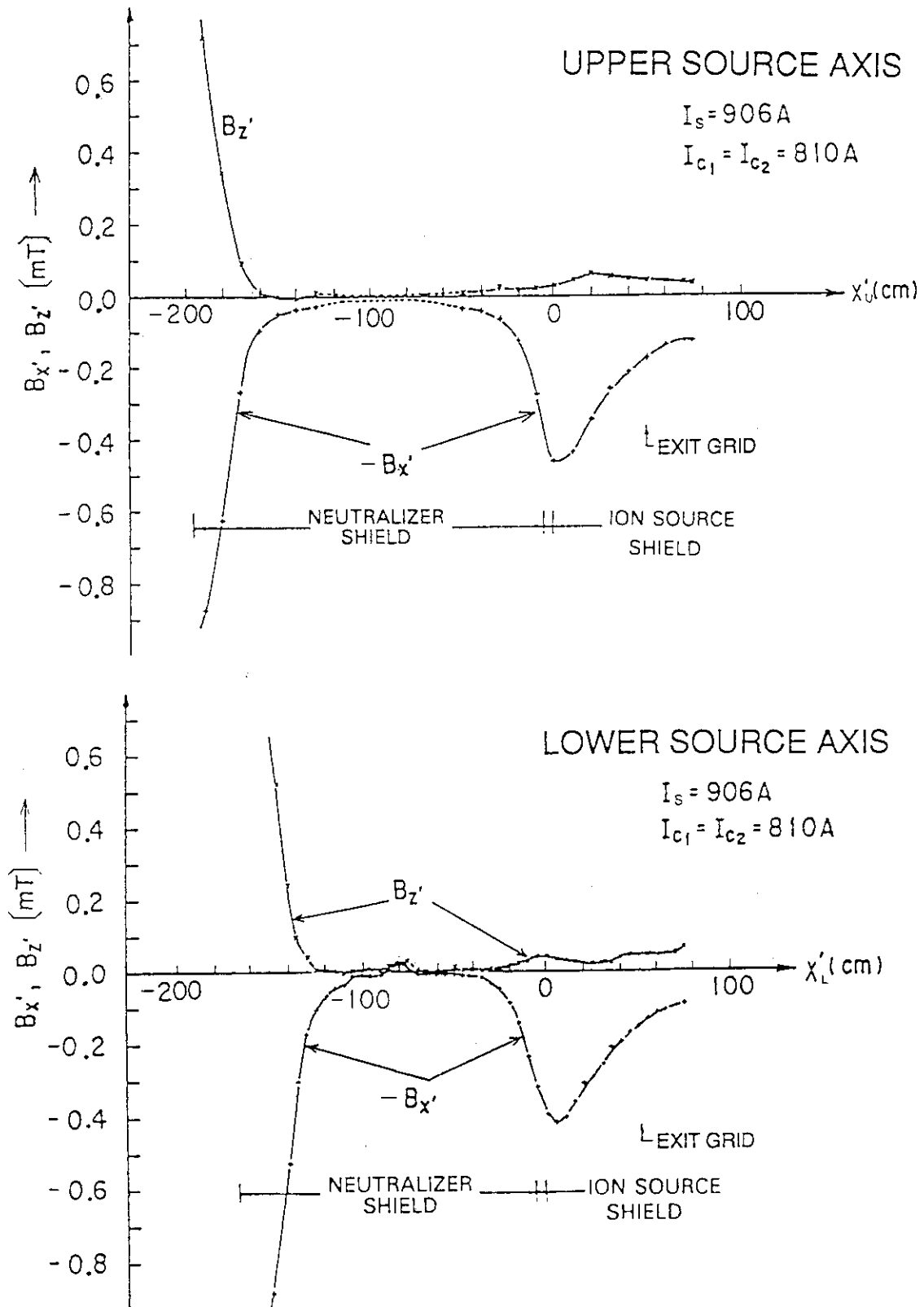


Fig. 2.3-3 Leaking field distribution inside the magnetic shields during the original cancelling coils were energized against the simulated stray field from the JT-60. The measurements were carried out along the ion source axes in the prototype beamline. B_z' shows perpendicular fields to the axis, and they were less than the design value except the region of the exit of the neutralizer shields.

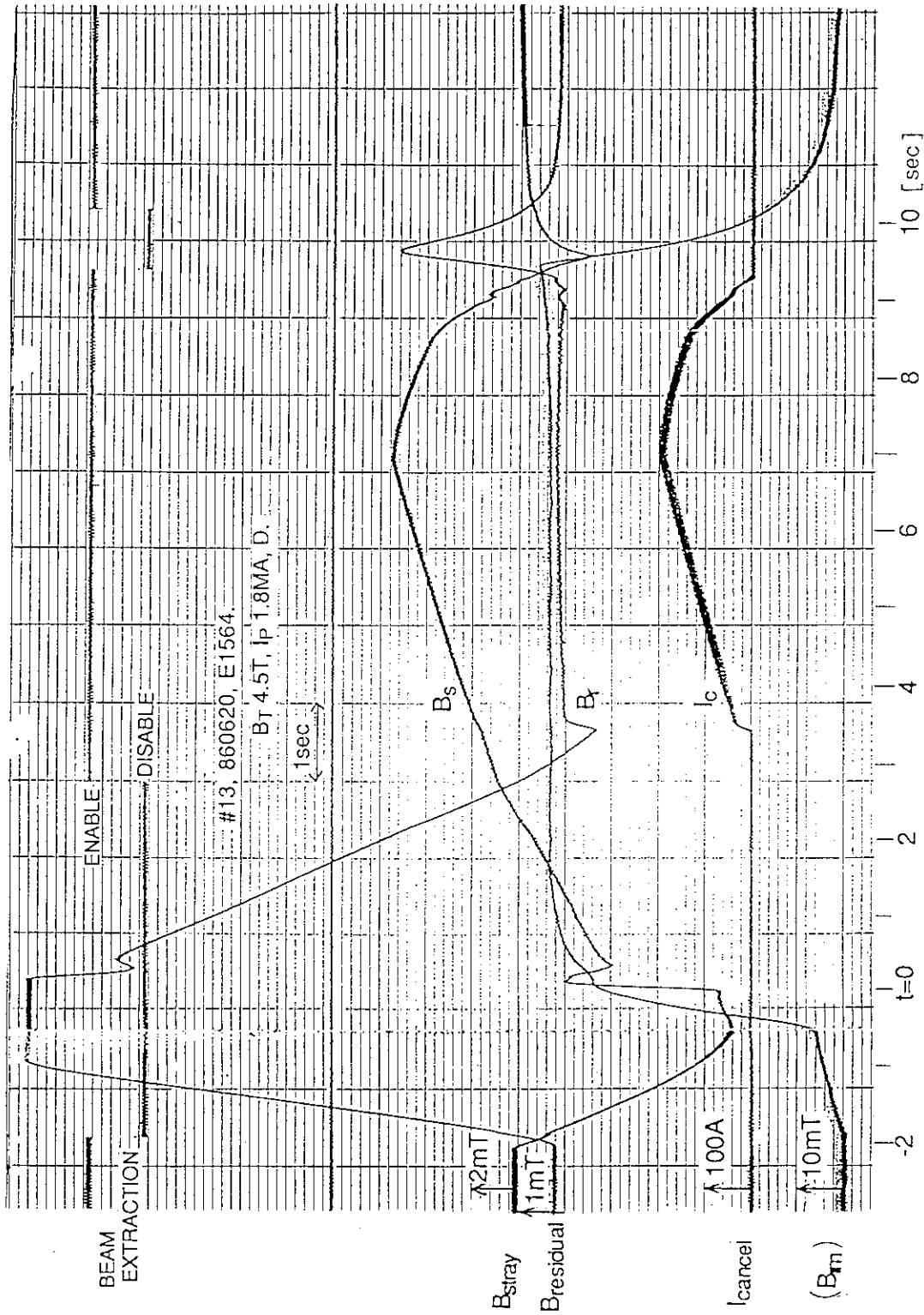


Fig. 2.3-4 Time traces of the stray field (B_s), residual field (B_r), cancelling coil current (I_c) when the original cancelling coils were energized for a 1.8MA tokamak plasma shot. The coil current started flowing in proportion to the stray field after the polarity of both fields have changed to reverse.

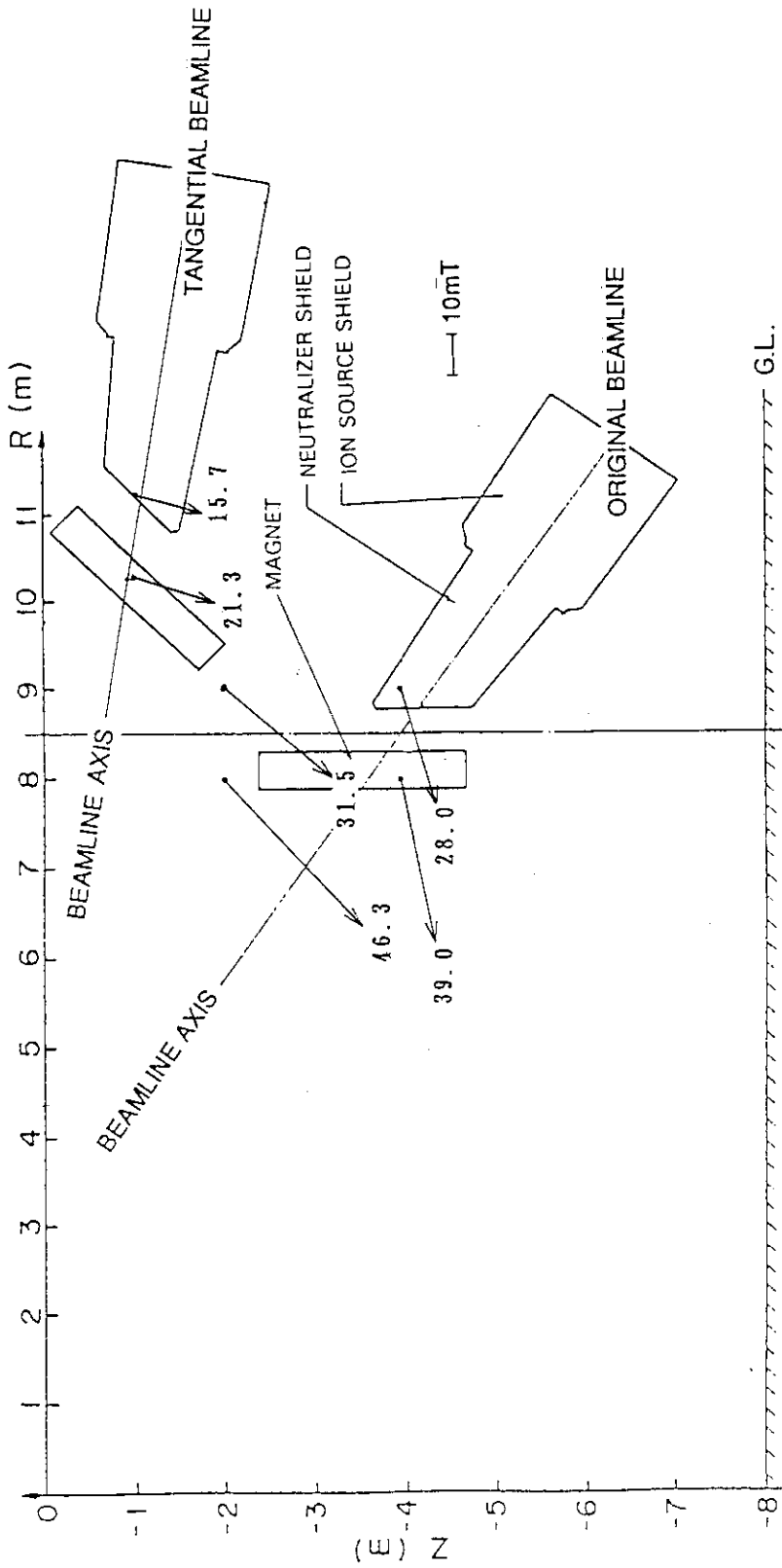


Fig. 2.3-5 Predicted maximum stray field distribution from the JT-60U without the magnets and the shields. The arrows show the stray field at the end of the flattop of a discharge. Rough locations of both the original and tangential beam-line axes are shown for reference. Strength of the stray field at the magnet for reference. Strength of the stray field is larger by about a factor of two than that from the JT-60 (Fig. 2.3-1).

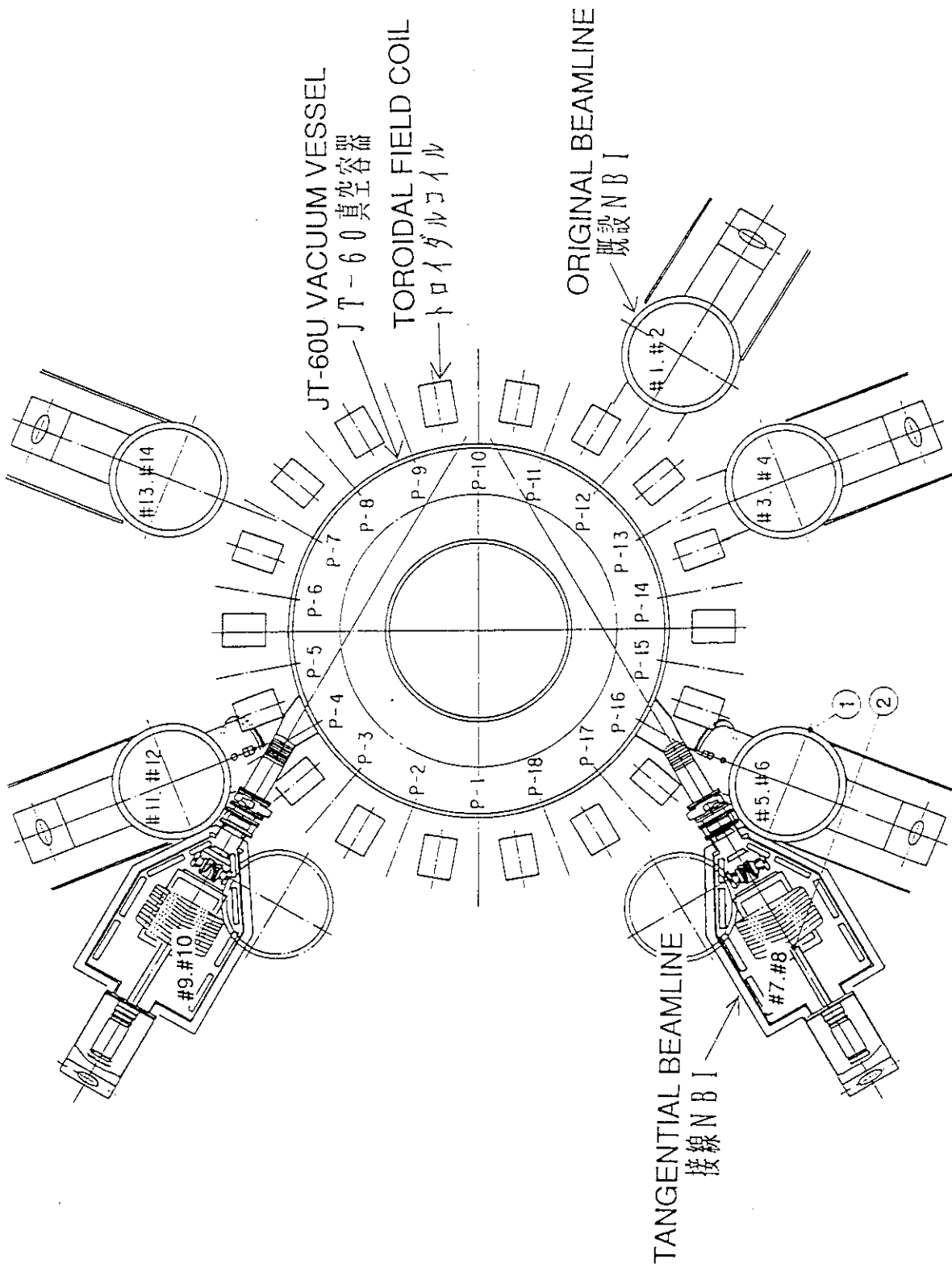
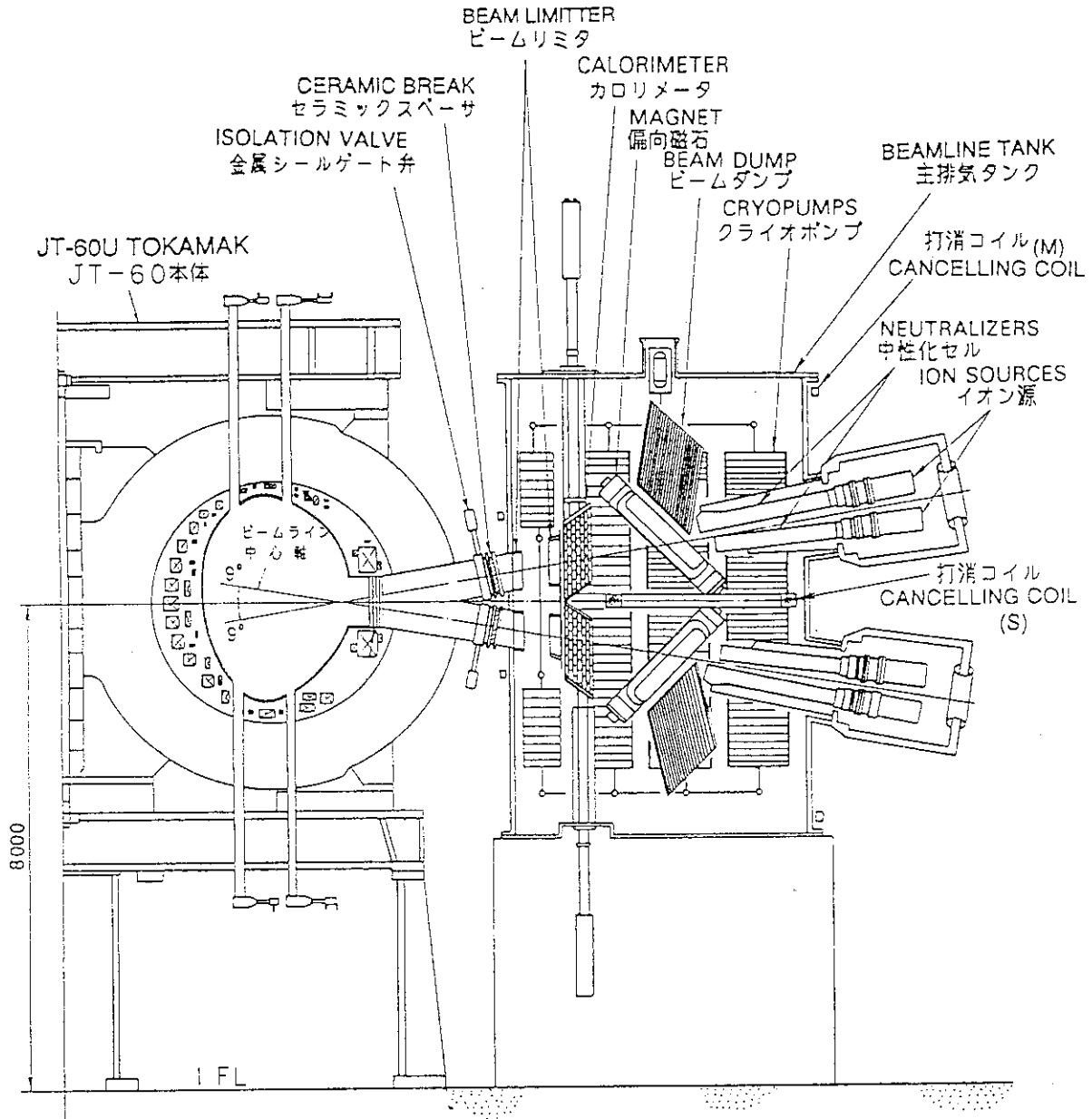


Fig. 2.3.6 Plan view of the beamline units and the JT-60U.
Two pairs of them are the tangential beamline units.



JT-60 接線 NBI 断面 図

Fig. 2.3-7 A pair of the upper and lower tangential beamline units. One beamline tank contains both the upper and lower beamline units and most of the beamline components will be recomposed from those of the original beamline units.

3. 偏向磁場増力への対応

第2.2節に述べた必要とする偏向磁場の増大に対し、偏向磁石は例えばFig. 2.2-4の磁極中心磁場のように、鉄心の磁気飽和の影響が現われることがわかっており、これに伴う磁場分布の歪みや磁気ヒステリシスの発生などが心配された。これらへの具体的対応を決定するために、磁場増大時の偏向磁石の特性や対策案の有効性を確認するための磁場系の1/4縮小モデル実験を行った。本章ではその結果について述べる。

3.1 1/4モデル実験

(1) 1/4モデル実験の概要

本章及び第4章の既設NBIの漏洩磁場対策の検討は磁場系の1/4縮小モデル実験を中心に行った。使用したモデルの構成をFig. 3.1-1に示す。図のように、既設NBIの磁場系を忠実に1/4に縮小したものに、漏洩磁場を模擬するための3個のコイルを付加したもので、他に、第4章で述べる漏洩磁場増大対策の試験用の第3打消コイルの取付けも可能としたものである。1/4縮尺は、測定した磁場分布を用いてイオンビーム軌道計算を行う場合に必要な精度を得ることができる最小の尺度として決められた。各コイルへ通電するための電源は、JT-60NBIのイオン源用電源のうちの偏向磁石電源、打消コイル電源を使用した。

磁場測定は、ガウスメーターの3軸プローブを3次元の位置決め装置にセットして行った。なお、後述のイオンビーム軌道計算では3軸プローブの各測定素子の位置的なずれ(～2mm)の補正をソフト的に行った。3軸プローブからのX、Y、Zの各軸の磁場信号はコイルへの通電と同期して自動的に読み込み、プリントアウト及びパソコンへ書込むことのできる回路を製作して効率化を図った。電流測定はレコーダーの波高値を読み取る方法とした。

(2) 偏向磁石の定格超過領域での特性

120keVのD⁺ビームの時の必要磁場0.235T相当までの磁場増大に対し、偏向磁石がどのような特性を示すかの詳細を、1/4モデルを用いて実験した。

まず、励磁電流 I_{rm} を増加させた時の、発生磁場の直線性の程度、ヒステリシスの有無などを調べるため、励磁電流と磁極中心付近及びその周辺の数点の磁場値の関係を測定した。座標系及び測定点の詳細をFig. 3.1-2に示す。測定の結果をFig. 3.1-3に示す。 $I_{rm}=300A$ 程度を超える付近から、発生磁場 B_z は飽和傾向を示し始めるが、直線からのずれの程度は測定位置により異なっている。図の上部のグラフは、①の測定点と他の各測定点との磁場値の比を $I_{rm}=300A$ で規格化してプロットしたもので、⑤の点や⑥の点などで差が大きく、飽和の程度が各測定点により異なっていることがわかる。また、図には示されないが、励磁電流を増大していく時と減少していく時の発生磁場の比較では、0～600Aの範囲で一致しており、磁気ヒステリシスの影響による有意差は見られなかった。

(3) 発生磁場の直線性及び実機参考データとの比較

磁極中心部付近の測定点である①のカーブと Fig. 2. 2-2 の実機参考データとの比較を Fig. 3. 1-4 に示す（なお、Fig. 2. 2-2 のデータの測定点は Fig. 3. 1-2 の $x = y = z = 0$ の点に相当し、今回と同一ではないが、磁場値の差は～1%以下となる点である）。第2. 2節に述べた設計上の必要磁場（ $V_{acc}=75kV$ すなわち、 $I_{rm}=1100A$ で $0.132T$ ）と原点を通る直線を基準として比較すると、実機参考データは $I_{rm}=1000A$ 程度以下で基準線と良く一致しているのに対し、①のカーブは $I_{rm}=350A$ （実機 $1400A$ 相当）以下で基準よりわずかに大きく、基準を下回るのは $I_{rm}=400A$ （実機 $1600A$ 相当）を超える付近からになる。このように①のカーブが全体的に実機参考データよりわずかに大きくなっている原因としては、何等かの測定上の誤差により1/4モデルの実測値が実際より電流値で小、あるいは磁場値で大となっていた可能性が考えられる。この仮定に基づいて、例えば、1/4モデルの電流値を1.05倍すると①のカーブが $I_{rm}=0\sim 500A$ （実機 $2000A$ 相当）の全領域で実機参考データとほぼ一致するようになる。このような補正を加えた①のカーブより $120keV$ の D^+ ビームの時の発生磁場の飽和分を電流増大で補償しようとする、励磁電流は $492A$ （ $1967A$ の $1/4$ ）から約 $560A$ （実機 $2240A$ 相当）とする必要がある。なお、①のカーブの測定誤差が5%というのは小さなものではないが、この原因としては、1/4モデルの磁性材の個性によるもの、ガウスメータの3軸プローブの3個のホール素子の位置決め精度、電流の読取り精度などが考えられ、データの再確認を行ったがその詳細は不明であった。

また、漏洩磁場が発生磁場の直線性に与える影響の程度を調べるために、測定点①において漏洩磁場模擬コイル及び第1、第2の各打消コイルに通電しながらの複合通電の場合について測定した。なお、複合通電の条件は第4章の漏洩磁場増大対策の検討結果を反映する前の、JT-60Uの最大漏洩磁場相当を第1、第2の打消コイルのみで打消そうとした場合に相当する。その結果を Fig. 3. 1-3 の①'のカーブに示す。図のように、単独通電時の①のカーブに比べ、複合通電時の①'のカーブは $I_{rm}=250A$ を超える付近から磁場値がわずかに小さくなる傾向が現われている。その程度は $I_{rm}=400A$ で-4%、 $I_{rm}=600A$ で-2%と、減少幅が I_{rm} に比例するものではなかった。この複合通電時に発生磁場が減少する原因は漏洩磁場と打消し磁場が磁石の鉄心内を通る磁束に影響を与えているものと考えられる。

3. 2 磁場増力のための具体的対応

(1) 磁気飽和傾向の影響の評価

前節までの実験結果より、基本的なこととして、励磁電流の大きい領域では磁場の空間的一様性が悪くなっていること、 $600A$ （実機 $2400A$ 相当）までの電流増大に対してヒステリシスは認められず消磁の必要はないこと、 $120keV$ の D^+ ビームの時（励磁電流は $492A$ （ $1967A$ の $1/4$ ））の発生磁場は飽和がない時の-8%前後とそう大きくはないが、この飽和分を補正するためには励磁電流を $560A$ （実機 $2240A$ 相当）に増大する必要のあることなどがまず明らかとなった。そこで、これらの結果を基にさらに詳細な検

討を行った。

磁場の空間的一様性の若干の乱れを含め、磁気飽和傾向がイオンビームの軌道、ひいてはビームダンプの熱負荷分布にどのような影響があるかの検討を行った。このために、合計2140個の測定点の磁場分布を75keVのH⁺ビーム相当（実機1100A相当）と120keVのD⁺ビーム相当（磁気飽和分を補正した実機2160A相当、ただし、測定の都合から上述の2240Aより小さい条件で行った）の2つのケースについて1/4モデルで測定し、この2つのケースの磁場分布データをイオンビーム熱負荷計算コード⁸⁾に入力してイオンビーム軌道を計算し、これらからビームダンプ上の各熱流束分布を求めて比較した。その結果をFig. 3. 2-1に示す。上側(a)は75keVのH⁺ビーム相当の偏向磁場によるビーム軌道とH⁺ビームの最大定格である100keV, 80A(H⁺: H²⁺: H³⁺=91:6:3)のビームパワーとから求めたビームダンプ、ウォータージャケット上の熱流束分布を示す。同様に、下側(b)は120keVのD⁺ビーム相当の磁場によるビーム軌道と最大定格120keV, 80Aのビームパワーとから求めた熱流束分布を示す。100keV, 80A(プロトン比91%)のH⁺ビームの場合、熱流束の最大ピーク値は左右平均で557W/cm²で、その左右の差は±12W/cm²であるのに対し、120keV, 80AのD⁺ビームの場合は435W/cm²、±5W/cm²であった。なお、H⁺ビームのプロトン比91%の場合、ビームダンプの一部でその許容最大熱流束(500W/cm²)を左右の計5ヵ所で超過している。しかし、これらのピーキングは計算上のビームの出発点の指定の粗さによるもので、実際はよりなだらかな分布になるため、余裕はないが許容範囲内と判断しているものである。以上の結果から、励磁電流を増大して磁気飽和分を補正した120keVのD⁺ビーム相当の場合は100keVのH⁺ビーム相当の場合に比べ、熱負荷の分布的にまったく問題なく、ピーク値で見ても充分余裕があり、磁場の空間的な一様性の乱れは熱負荷的に影響のないことがわかった。

また、漏洩磁場、打消磁場のある状況下で、発生磁場が最大4%程度減少することについて、磁場計算コードを用いて偏向磁石の鉄心内の磁束の漏洩磁場の影響を検討した。その結果、鉄心内の最大磁束密度はJT-60Uの最大漏洩磁場発生時には約0.6T、これを第4章の検討結果を反映させた第3打消コイルを使用して最適条件で打消した場合には約0.7Tとなり、漏洩磁場単独よりも打消磁場もある場合の方が若干大きくなることがわかった。

(2) 偏向磁石電源の対応内容

前項までの検討結果より、偏向磁石鉄心の磁気飽和の影響の程度は小さく、その飽和による磁場減少分を電流増大により補正すれば、イオンビームの軌道への影響はほとんどなく、ビームダンプ上の熱流束も許容範囲内であることがわかった。このため、具体的対応としては、偏向磁石の鉄心やコイルはいっさい改造することなく、偏向磁石電源の最大定格の増力、励磁電流の磁気飽和分を補正する回路の追加、それに励磁電流の5%増大の3項目のみを行うこととした。

電源の最大定格の増力は従来の65V、1500Aのものを69V、2300Aに改造し、飽和分補正は電流値制御回路に非線形回路を追加するもので、その回路の特性をFig. 3. 2-2に示す。基本的には、Fig. 3. 1-3の①のカーブに前述の補正を加えたもの（すなわち実機参考データのカーブとほぼ同じ）を基に、発生磁場が直線となるように

飽和領域の電流を増加するための2折点をもつ非線形回路である。また、漏洩磁場がある場合の偏向磁場の減少傾向への対応として、非線形回路全体のゲインを従来よりも約5%アップさせて励磁電流を増大するようにした。

以上の対応により、実際の通電電流は第2.2節の加速電圧に対する励磁電流の関係式 ($I_{rm} = 1270 \times \sqrt{V_{acc}[kV]} / 100 \times \sqrt{M}$) より求めた I_{rm} の値に応じて次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} I_{rm} \leq 1100A \text{ の時} & \quad ; \quad 1.05 \times I_{rm} \\ 1100A \leq I_{rm} \leq 1730A & \quad ; \quad 1.22 \times I_{rm} - 200 \\ 1730A \leq I_{rm} \leq 2000A & \quad ; \quad 1.715 \times I_{rm} - 1060 \end{aligned}$$

例えば、100keVのH⁺ビームの時には1350A、120keVのD⁺ビームの時には2310Aの電流で励磁することになる。後者の値は電源定格の2300Aをわずかに超過するが実用上の問題とはならない量である。なお、コイルの電流定格は1300Aであるが、実際のコイル構造より、その倍近い2300Aを5分間隔で15秒間通電しても発熱その他の問題無く使用できることを確認済である。

(3) 実機の通電試験

前項の対応を行った実機の偏向磁石について、実際に通電を行い、励磁電流と偏向磁場の関係を測定した。その結果、今回の実測データはFig. 2.2-2の実機参考データ及びFig. 3.1-3の①のカーブに前述の補正を加えたものと良く一致しており、非線形回路の特性の決定法が妥当であると確認できた。また、実際の運転状態である、30秒周期で3.3秒パルスの2250A通電の繰返しを行い、通電休止中に鉄心の磁気ヒステリシスの影響が現れないことを確認した。

No.	DESCRIPTION
1	ION SOURCE SHIELD
2	CONNECTION FLANGE
3	NEUTRALIZER SHIELD
4	MAGNET
5	CANCELLING COIL 1
6	CANCELLING COIL 2
7	STRAY FIELD SIMULATION COILS
8	CANCELLING COIL 1
9	CANCELLING COIL 2
10	CANCELLING COIL 3

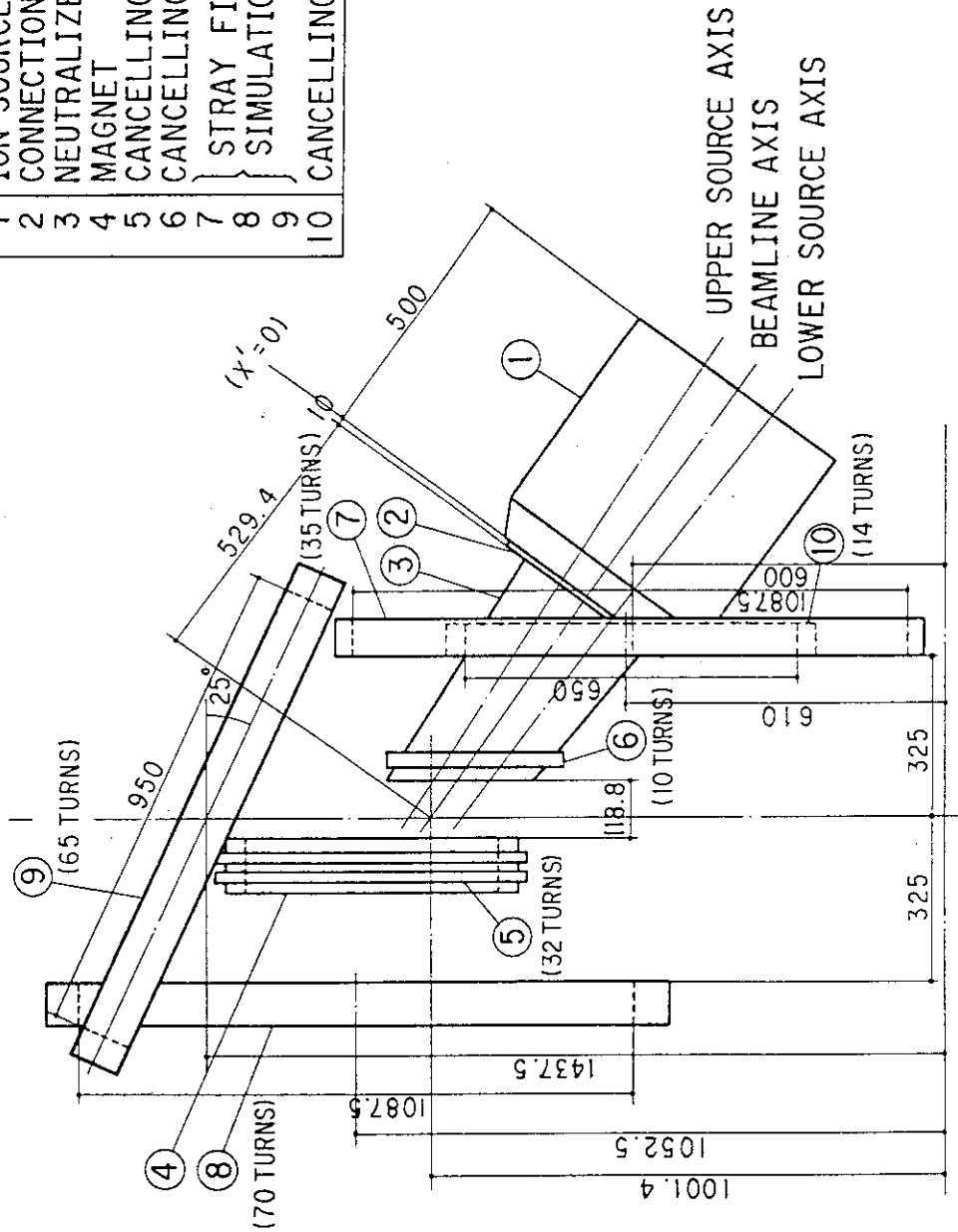


Fig. 3.1.1-1 One-fourth model of the magnetic system for the original beamline. The cancelling coil 3 was a later addition tested during some of measurements in chap.4, but was not in the configuration of the original beamline unit.

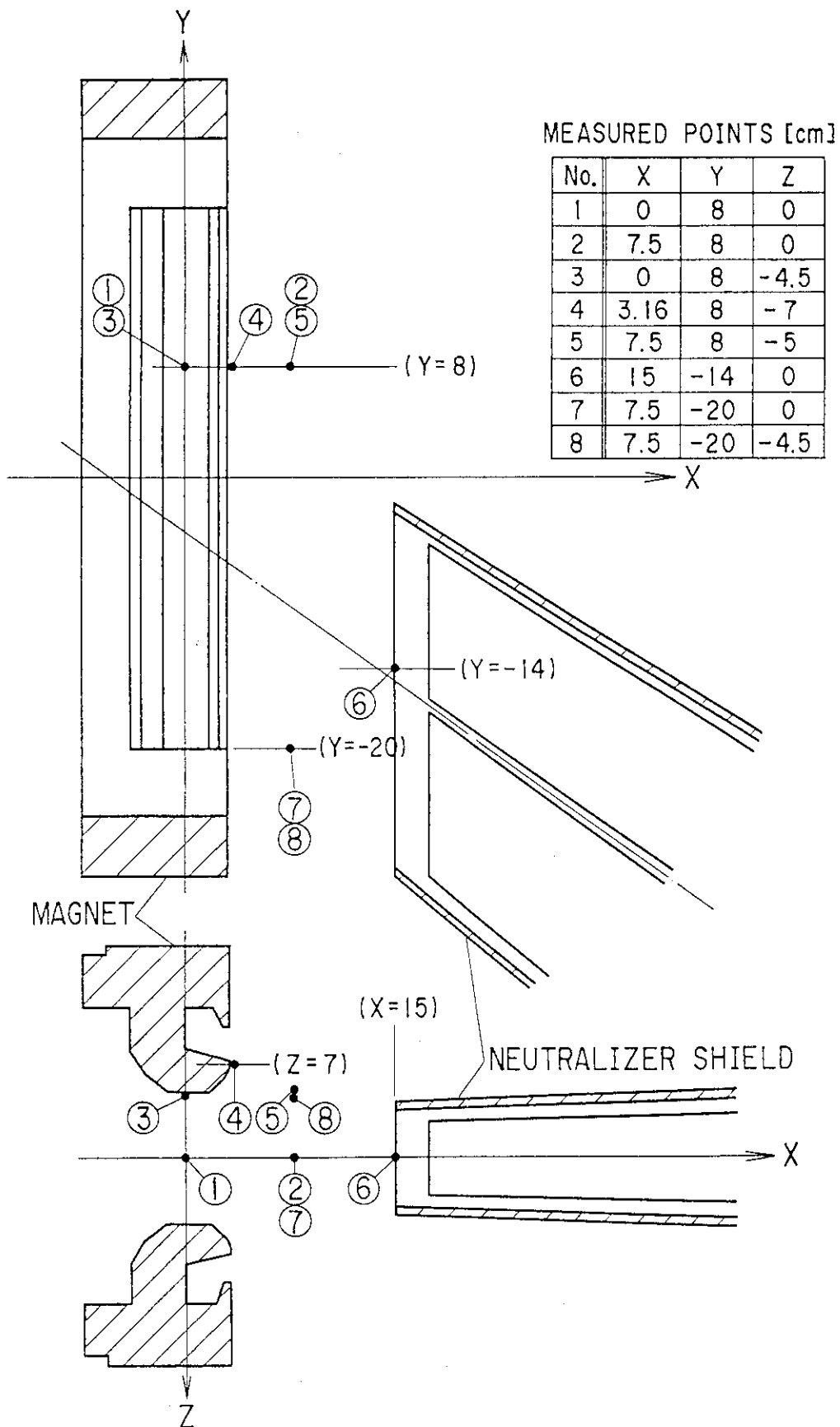


Fig. 3.1-2 Measured points in the one-fourth model when the magnet was tested.

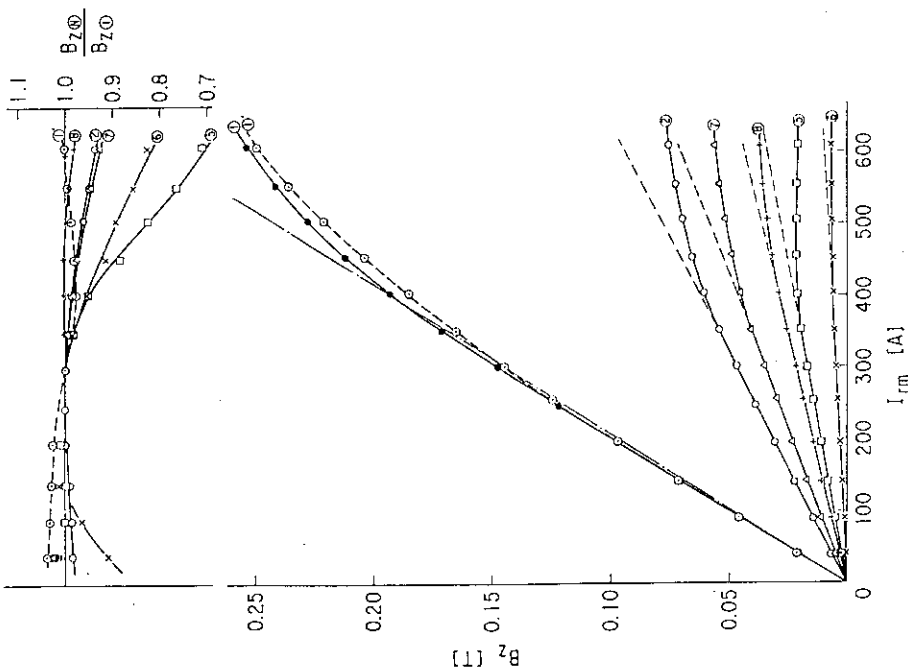


Fig. 3.1-3 Induced magnetic field (B_{z0}) vs. coil current (I_{rm}) of the magnet in the one-fourth model. Numbers in plot correspond to the measured points (Fig. 3.1-2). Saturation of the field appeared in the region of the current of more than from 300A to 400A. Dotted curve (①) shows the field measured at the point no. 1 when both stray field simulation coils and two cancelling coils were energized. Upper plot shows the ratio of the field strength at each point and current to the strength of the point of the magnet center with the current of 300A.

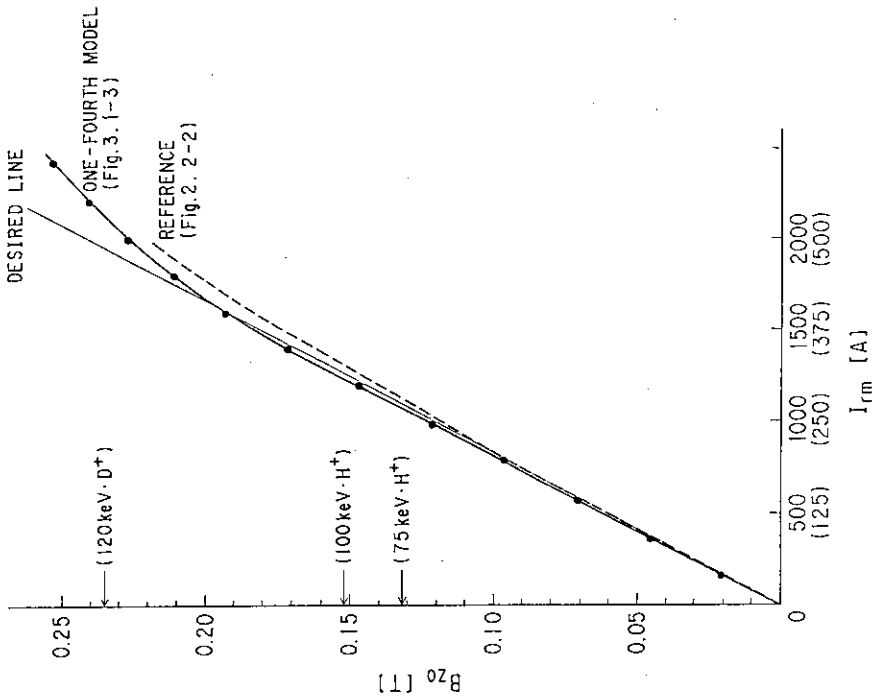


Fig. 3.1-4 Comparison of the induced magnetic fields at the magnet center. The solid and dotted curves show the data measured in the one-fourth model and in the original beamline unit of #2, respectively.

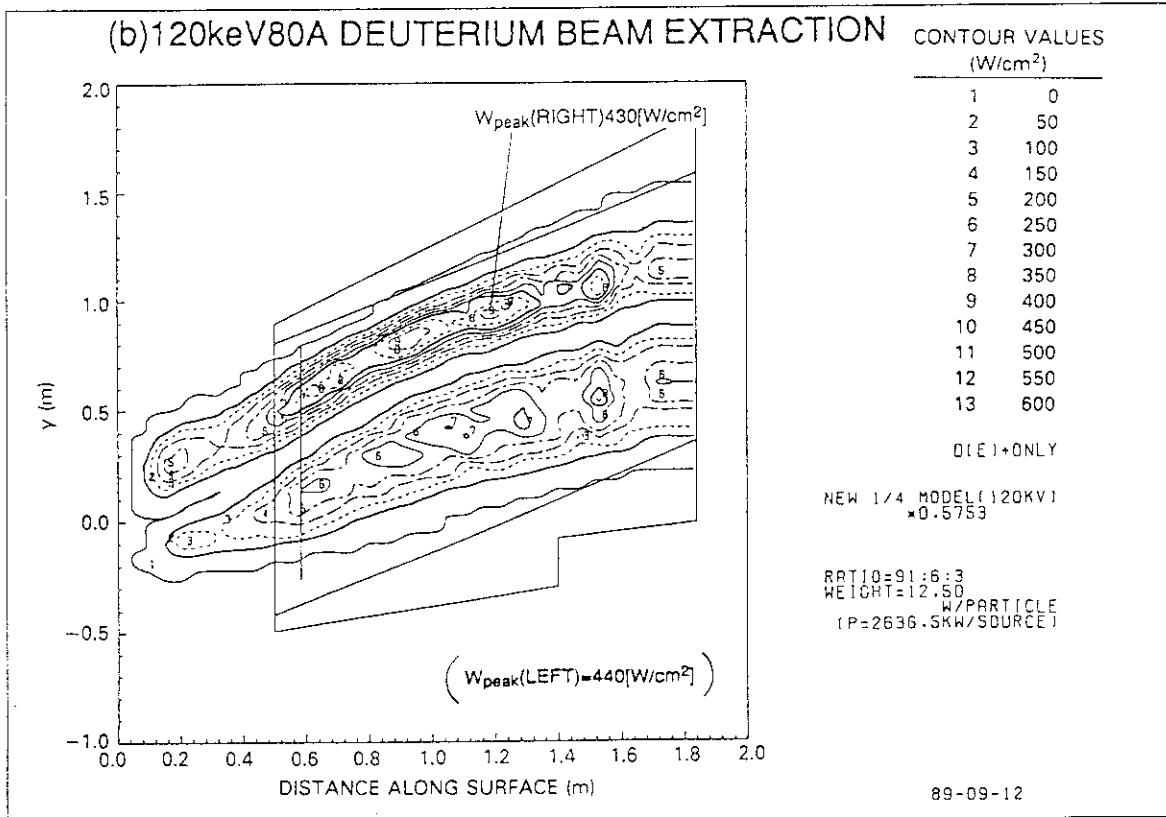
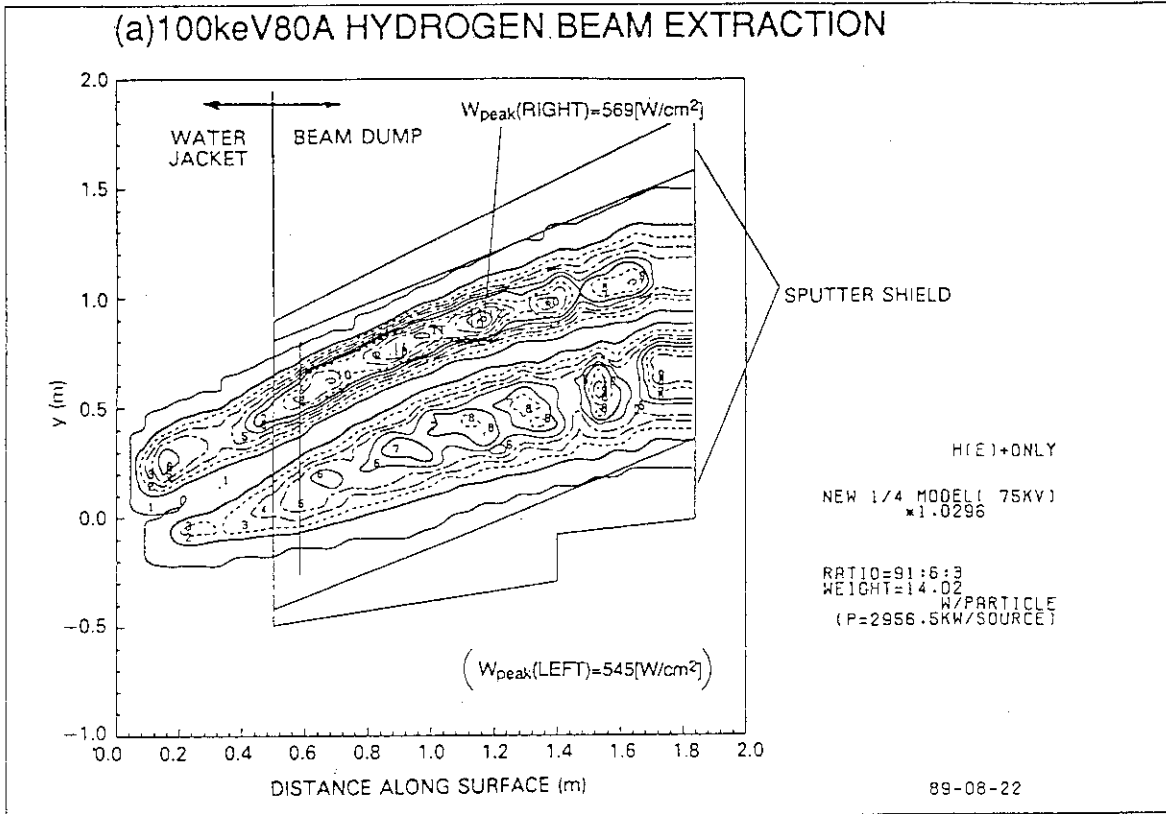
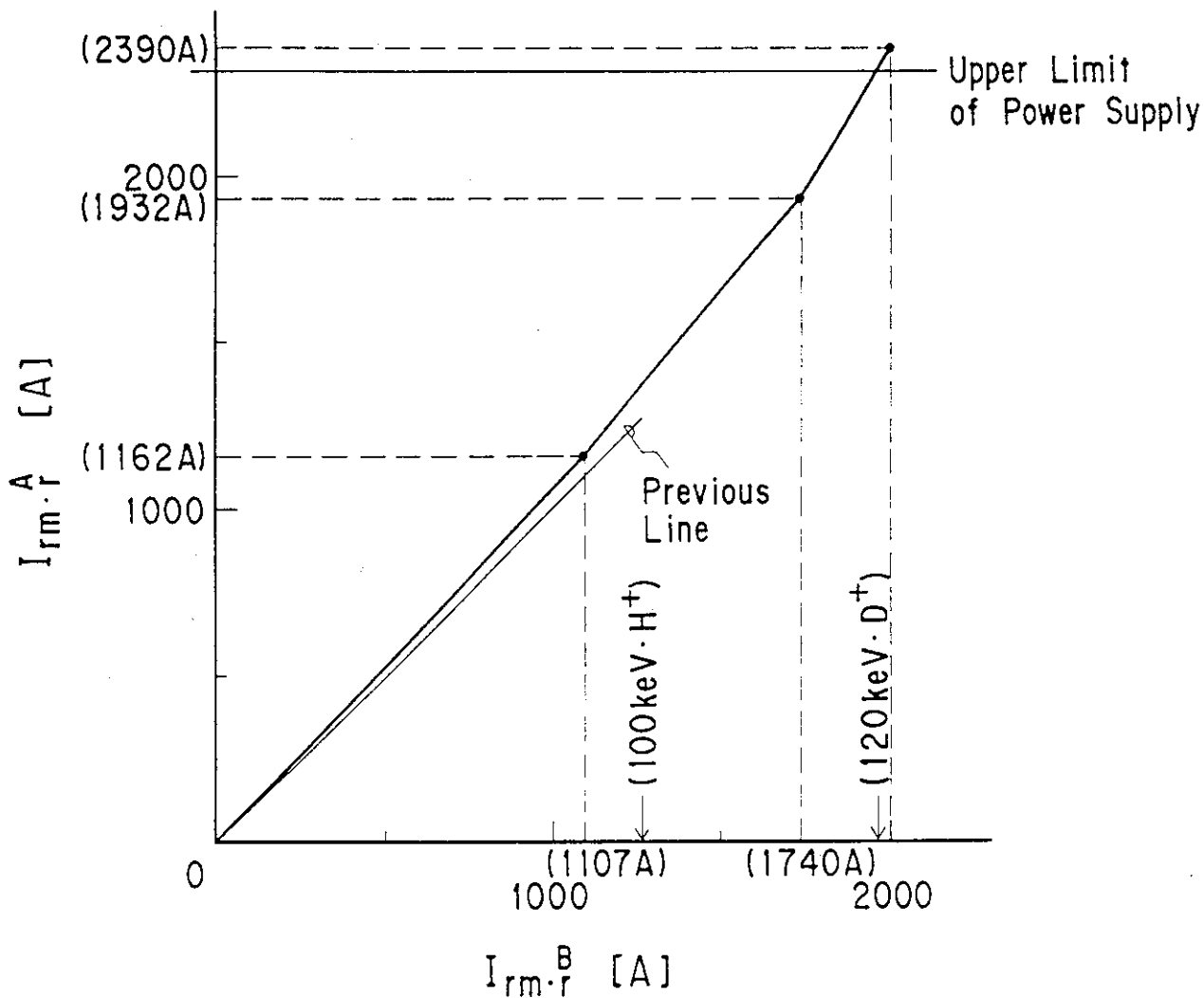


Fig. 3.2-1 Heat flux distributions on the water jacket and the beam dump for hydrogen (a) and deuterium (b) beam extractions.



$I_{rm.r}$; Reference Input for the Magnet Current.
 ("A" stands for after the correction.
 ("B" stands for before the correction.

Fig. 3.2-2 Property of the non-linear circuit of the power supply correcting the saturation of magnetic field. The whole gain was increased by 5% at maximum.

4. 既設 N B I の漏洩磁場増大対策

第2.3節(2)項で述べた漏洩磁場の増大に対し、従来の漏洩磁場対策用設備は磁気シールド材の磁気飽和と打消コイルの打消機能不足が予想された。これらへの具体的対応を決定するために、漏洩磁場増大時の特性や対策案の有効性を確認することを目的とした1/4縮小モデル実験を行った。本章ではその詳細について述べる。

4.1 定格超過領域での特性

従来の漏洩磁場対策用設備の磁気シールド材がどの程度の大きさの外部磁場から磁気飽和し始めるかを見るために打消コイルを不使用とし、漏洩磁場模擬コイル電流と中性化セル磁気シールド内の一点($x_{\text{U}}' = -7.5\text{cm}$ 、座標系はFig. 2.1-2のとおりで $x' = 0$ の点はFig. 3.1-1中のとおり)の磁場値の関係を調べた。漏洩磁場模擬コイルはその通電電流を230Aとした時にJT-60相当の、同じく455Aの時にJT-60U相当のそれぞれの最大漏洩磁場を模擬できる。測定の結果をFig. 4.1-1に示す。この図のように、ビーム軌道に影響を与える横磁場 Bz' の値はJT-60の最大漏洩磁場相当の約1.3倍までの外部磁場に対して直線性があるが、それ以上のところではシールド材の磁気飽和の影響が出始め、JT-60Uの最大漏洩磁場相当の時には磁気飽和のない場合の約10倍近くの値となることがわかった。

次に、JT-60Uの最大漏洩磁場を既設の第1、第2の各打消コイルで打消した場合の磁気シールド内の磁場分布を調べた。漏洩磁場模擬コイルと第1、第2打消コイルにそれぞれJT-60相当の通電をした場合及びJT-60U相当の通電をした場合の2条件について、上イオン源軸上の磁場値を測定した。その結果をFig. 4.1-2に、前者を△、▲印で、後者を□、■印で示す。JT-60相当の場合はFig. 2.3-3の原型ユニットでの実測値である○、●印の分布とほぼ一致していることがわかる。一方、JT-60U相当の場合のデータは、横磁場 Bz' がイオン源の接地電極(Exit Grid=E G)から中性化セル磁気シールドの境界付近($x_{\text{U}}' = 0 \sim 30\text{cm}$ の範囲)にかけて0.06mTの許容値を大きく上回っているのに対し、中性化セル磁気シールド出口付近($x' = -40 \sim -50\text{cm}$)では打消過大となっている。このような状態は、打消コイル電流を増減しても改善することはできなかった。

以上の結果より、磁気シールド材の磁気飽和はJT-60Uの最大漏洩磁場値の60~70%前後から現れ始めること、また、JT-60Uの最大漏洩磁場を第1、第2打消コイルを用いて打消そうとすると、これらの打消コイルは中性化セル出口部以降の空間を対象にしているため、この近くでは打消過大となってもイオン源磁気シールド内では打消不足となり、従来のままでは今回の漏洩磁場増大には対応できないことがわかった。

4. 2 第3打消コイルの効果

(1) 第3打消コイルの基礎実験

前節の具体的な対策としてはシールド材の肉厚追加あるいは打消コイルの追加などが考えられるが、実機に適用する時の改造の容易さから、まず、打消コイルを追加した場合の特性試験を行った。このための新たな打消コイルを従来の第1、第2打消コイルに対して、第3打消コイルと呼ぶものとする。このコイルを追加設置する場合、なるべく小さな改造で済むように、NBIタンクの外側の中性化セル磁気シールドとイオン源磁気シールドの結合部付近を囲むような配置、具体的にはFig. 3. 1-1中の⑩に示される位置に設置して特性を試験した。この位置はコイルの追加設置工事が比較的容易であるとともに、イオン源と中性化セルの各磁気シールド内の磁束の流れを阻止する方向の磁場を発生できる配置でもある。実験に使用したコイルの形状寸法は内径で45cm \times 65cmH、ターン数は30ターン（タップ位置は10, 12, 14, 23各ターン）で、冷却水使用のため中空導体を用いた。

まず、第3打消コイルのタップを14ターンに選び、第1、第2の各打消コイルと直列接続して通電し、JT-60相当の時及びJT-60U相当の時の各最大漏洩磁場を打消した時の、上イオン源軸に沿った磁場分布の測定結果をFig. 4. 2-1に△、▲印及び□、■印でそれぞれ示す。△印で示すJT-60相当時の横磁場 B_z' はFig. 4. 1-2中に示した第3打消コイルのない場合のJT-60相当時のデータより小さいがほぼ一致していると言える。□印で示すJT-60U相当の B_z' はイオン源EG付近の最大値が約0.1mTと第3打消コイルのない場合の約1/4となっている。これをイオン源軸に沿った平均値で見れば、磁気シールド内の B_z' の許容値以内であり、従来のJT-60相当時のシールド性能よりわずかに大きいだけであることがわかる。この B_z' の許容値は、第2. 3節(1)項のようにビームエネルギーの低い成分が多いという実際と比べて厳しい仮定に基づく横磁場の設計値である。JT-60Uでは漏洩磁場がほぼ倍増しているにも拘らず、Fig. 4. 2-1の結果は、ほぼJT-60時のシールド性能と同等であり、第3打消コイルをこの配置で使用することは十分な効果を期待できることを示している。

(2) 第3打消コイルの細部検討

第3打消コイルの有効性が認められたため、この方式を採用することとし、最適なターン数や形状寸法などの詳細検討をさらに1/4モデルを用いて行った。

まず、上下イオン源軸について、ターン数を14、16、18と変化させた時の測定結果を比較した。その結果、下イオン源軸については14ターンが最適であり、上イオン源軸については14ターンまたは16ターンが適当であった。この上下の差は、Fig. 3. 1-1の第3打消コイルの配置を見ればわかるように、上イオン源軸はコイルがイオン源磁気シールドからかなり離れており、下イオン源軸に比べ、不利な配置になっているためである。第3打消コイルは現状の打消コイルの不足する分のみをカバーするものであること、また、電源との関係では抵抗値は小さい方が有利であり、実機への据付け時など

の面からは少しでも軽量の方が良いなどの理由により、ターン数はなるべく小とするために14ターンを選択した。

以上の1/4モデルの実験結果をもとに、実機に適用する場合の形状寸法、配置を決定した。寸法は既設周辺機器との干渉を避けるためなどの目的から、1/4モデル実験用のコイルを4倍したものの一部を変更して、内ので214cm^W×254cm^Hとした。また、コイル配置も上イオン源軸に対し、コイルがイオン源磁気シールドから遠いという不利を少しでも改善するため及び既設機器との干渉を避けるなどのために、Fig. 3. 1-1のタンク中心からの距離に相当する325mmの寸法を右へ43mm（実機では172mm相当）移した位置に設置することとした。さらに、コイルの必要アンペアターン数より、水冷の必要はないため、空冷とすることとした。なお、打消コイル電源は既設のものをそのまま使用することができ、第1、第2、第3の3つのコイルは直列に通電される。

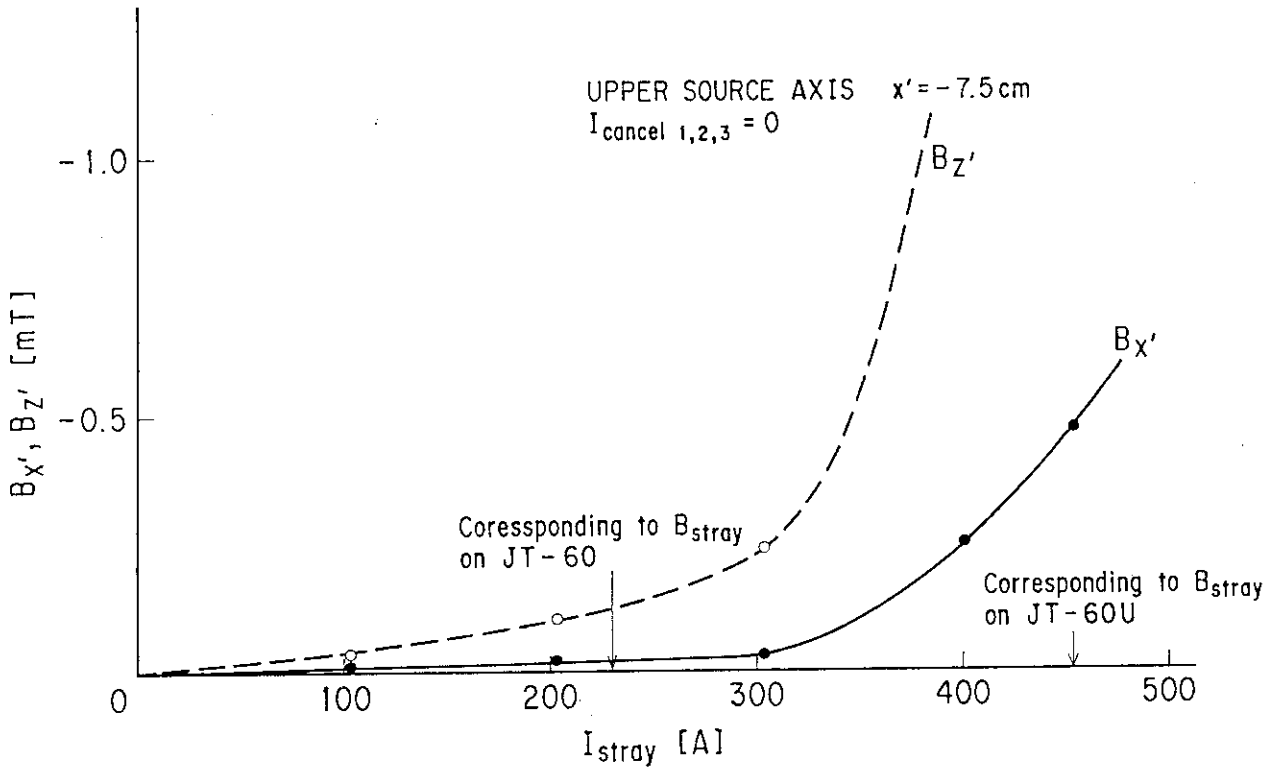


Fig. 4.1-1 Leaking field strength inside the neutralizer shield as the function of the stray field.

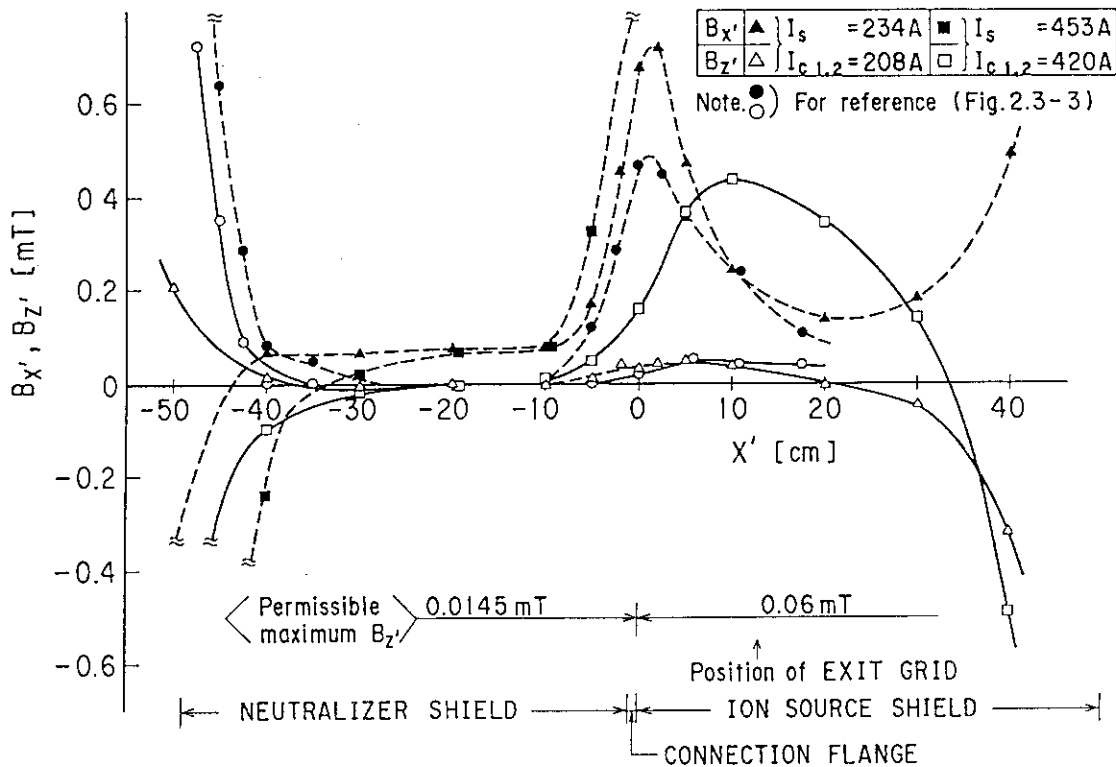


Fig. 4.1-2 Leaking field distribution inside the magnetic shields during only two original cancelling coils were energized against the simulated stray field from the JT-60U. The fields were measured along the ion source axes in the one-fourth model. The average of the perpendicular fields ($B_{z'}$) was larger than the design value.

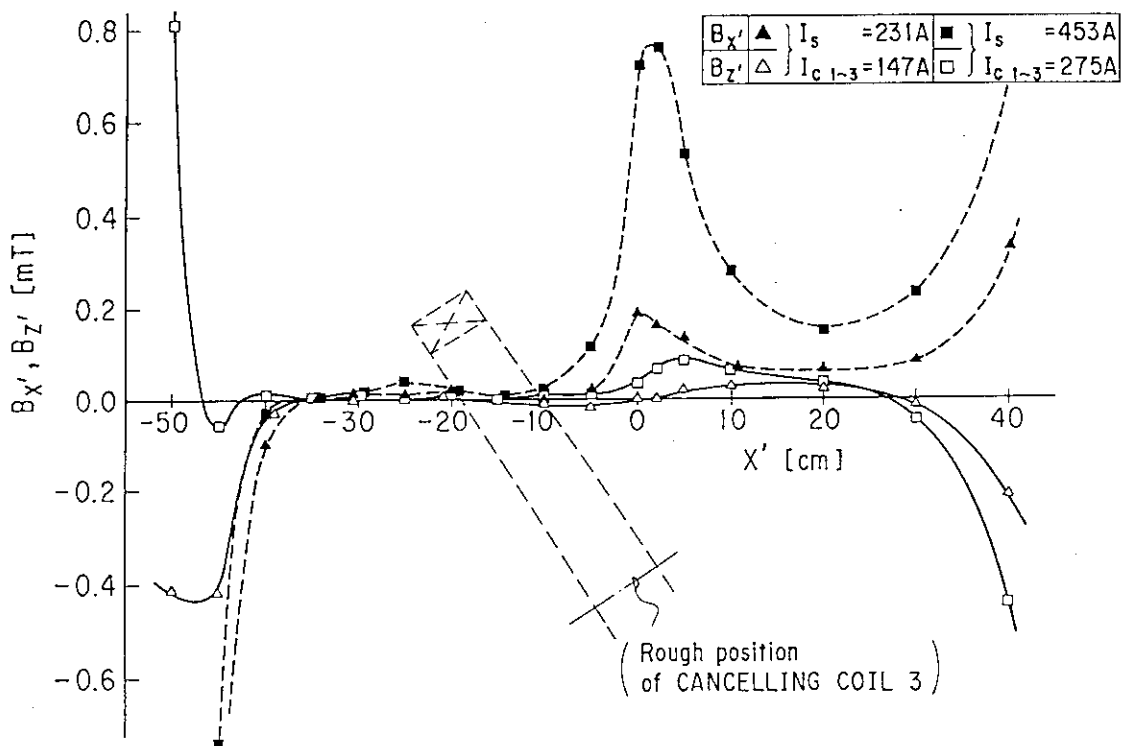


Fig. 4.2-1 Leaking field distribution inside the magnetic shields during two original and a third cancelling coils were energized against the simulated stray field from the JT-60U. By adding the new coil, the average of $B_{z'}$ was suppressed below the design value.

5. 接線 N B I の漏洩磁場対策

接線 N B I に対する漏洩磁場対策の検討を、前述の 3 次元の磁場計算コード (E L F / M A G I C) ⁹⁾ を主に用いて行った。まず計算で対策案の基本方針を定め、それをもとに計算精度のチェックも含め 1/10 モデルによる実測を行い、実測と計算が一致することを確認のうえ、さらに計算で細部の検討を進めるという方法をとった。本章ではその詳細について述べる。

5. 1 タンク磁性材方式と打消コイル方式

第 2. 3 節 (3) 項のとおり、接線 N B I では既設 N B I の漏洩磁場対策設備をそのまま再利用できないと判断され、これに代わる対策が必要となった。このため、接線 N B I の主排気タンク自身を磁性材とし、タンク内全域をシールドする方式 (以下、タンク磁性材方式と呼ぶ) と、既設のものとは異なる打消コイルを設置して打消す方式 (以下、打消コイル方式と呼ぶ) との 2 つの方式について、磁場計算コードを用いて比較検討した。なお、本章での検討に用いた計算モデルは、実際の磁気シールド部が外層と内層の 2 層構造であるのに対し、外層のみ 1 層の簡略化したものである。また、座標系は F i g. 2. 1 - 2 中に示すとおりである。

(1) 漏洩磁場の分布と対策後の目標値

接線 N B I で再利用する磁気シールド及び偏向磁石などの磁性材が実際と同じ配置にある場合の、中性化セル出口部付近における J T - 6 0 U の最大漏洩磁場分布の計算結果を F i g. 5. 1 - 1 (a)、(b) に示す。中性化セル出口から偏向磁石までの空間がビーム軌道への影響の一番大きい所であるが、その磁場値は 10 m T 前後である。漏洩磁場対策としてはこれを 1 m T 以下とする必要がある。なお、この計算結果より、磁気シールド材は J T - 6 0 U の最大漏洩磁場に対しても、打消コイル不使用の状態でも磁気飽和することなく機能することが確認できた。

(2) タンク磁性材方式

この方式は後述の打消コイル方式に比べ、コイル電流の制御の必要がないためにその機能が安定しており、安全確実で、経済的にも有利な方法と言える。なお、タンク全体でなくもっと狭い必要な範囲のみをシールドするのが理想であるが、N B I タンク内にはビームライン機器類とこれへの配管、配線、支持構造などで既に空間的余裕のない状態であり、検討の対象外であった。

まず、F i g. 2. 3 - 7 などの主排気タンクの材質をすべて軟鉄製とし、各部肉厚をいくつとすれば前項の目標シールド性能を満たせるかを計算した。その結果を F i g. 5. 1 - 2 に示す。図は上ユニット側のみ示すもので、必要肉厚は J T - 6 0 U に対向する側で 20 cm、反対側の最も薄い所で 5 cm であった。必要な磁気シールド性能を満たす解のあることはわかったが、この最大 20 cm もの厚みの軟鉄を使用すると、これが磁化されることによりプラズマ周辺の磁場の一様性を乱すことが予測された。この一様性の

乱れを、トカマク中心からの半径 $R = 4.6\text{m}$ 、高さ方向 $Z = 0$ (トカマクの赤道面) の円周上において上下方向の磁場成分 B_z の最大と最小の差をとり、これを不整磁場と定義する。この不整磁場がどの程度かを計算により見積もったところ 2 個分の NBI タンクの寄与として $\sim 7.5\text{mT}$ に達することがわかった。この大きさの不整磁場はプラズマの着火に悪影響を与える他、この磁場によりプラズマ側の磁場平衡配位に影響を及ぼし、プラズマ小半径の 15% 程度にも達する大きさの磁気島が形成され、これがプラズマの閉じ込めの性能にも障害を与える可能性が高いことがわかった。逆に、この結果から、プラズマ実験上、許容し得る不整磁場の最大値として、磁気島の幅がこの半分以下となる 1.5mT とすることが決められ、この値を設計の目標とした。

以上の結果を受けて、上ユニットのみのタンクの高さを Fig. 5. 1-2 では 5.2m で計算したところを、実際の高さに合せて 4.1m にするなど、さらに検討を行ったが肉厚は多少薄くできるものの不整磁場値は目標値からは程遠いままで、必要なシールド性能と小さな不整磁場とを同時に満足できる解は得られなかった。このため、タンク磁性材方式の採用は不可能となり、打消コイル方式の検討を行うこととした。

(3) 打消コイル方式

打消コイル方式はコイル電流の制御がかなり複雑となる欠点があり、不整磁場のプラズマ閉じ込め性能への影響についてはタンク磁性材方式と同じであるが、プラズマ着火時にはコイル通電の必要がないので不整磁場の影響がまったくないという長所がある。

打消コイルの設置可能空間も他の NBI の構造物との干渉によりかなり限定されたが、その中で検討を行った配置の代表例を Fig. 5. 1-3 に示す。この図の他にも配置案の検討を行ったが、最終的には図の⑥の配置が最適であることがわかった。これは大型 (Mコイル) と小型 (Sコイル) の 2 つのコイルを用いるもので、JT-60U の最大漏洩磁場相当の時に、必要な領域の磁場値を打消して目標値以下にでき、同時に不整磁場の値を目標値をわずかに超える程度に抑えることができるものである。

以上の結果より、採用することになった打消コイルの基本的構成等は次のとおりである。

- 1) 打消コイルはタンク外の Mコイルとタンク内の Sコイルの 2 つで 1 ユニット用とし、これを JT-60U 赤道面に対し上下対称に設置して上下の 2 ユニット用とする。
- 2) Mコイルは、タンク外周を囲む形で、漏洩磁場を効果的に打消するような向きの磁場を発生でき、かつ、他との干渉の少ない形状、配置を選んで設置する。
- 3) Sコイルは、Mコイルのみでは部分的に打消し性能が不足する領域を補足する目的でタンク内に設置する補助的なコイルとする。
- 4) Mコイルと Sコイルは直列接続して通電する。電源は既設のものを各ユニット毎に独立に用いるが、上下ユニットの 2 式のコイルは常に同時に通電する。

(4) 1/10 モデル実験

以上の計算コードを用いた検討により打消コイル方式を採用することになったが、まだ NBI 磁場系での使用実績の少ないこのコードの計算結果のみで、全てのことを進めるには一抹の不安があった。このため、この計算結果の健全性、信頼性確認のために、計算結果を基にした構成の 1/10 縮小モデルを作成し、計算値と実測値との比較検討

を行った。

1/10モデルの構成をFig. 5. 1-4に示す。磁場計算モデルに合わせるため、磁気シールド部は実際の2層構造を外層のみ1層の簡略化したモデルとした。なお、本モデルは縮尺1/10であるが、漏洩磁場模擬コイルによる磁場値を1/10にするためにはコイルの大きさや除熱に問題があり、漏洩磁場模擬コイルも打消コイルも通電電流を1/100スケールとしなければならなかった。このため、発生磁場が小さく、SN比の悪い測定となった。

このモデルによる実測値と同一条件・同一ポイントの計算値との比較を行った。その結果、全体的には良い一致を示したが、磁性体に近い所を中心に両者の間に若干の相違がみられた。そこで、計算の手順について再チェックを行い、磁性材の要素指定や形状及びメッシュ切りの方法、それにB-Hカーブ入力値などを一部訂正する必要のあることがわかり、再計算を行った。また、実測値については、発生磁場が小さいために1/10モデルの磁性体のわずかな残留磁気の影響が無視できない量となっていることがわかり、この分を補正し再度比較したところ、相違の程度はかなり小さくなった。こうして得られた打消コイル単独通電時のビーム軸上磁場値の両者の結果をFig. 5. 1-5に示す。偏向磁石の近くの空間では、両者のベクトルの向きの差は 10° 以下で、大きさもほぼ一致しているが、中性化セル磁気シールドに近づくと差が大きくなり、磁気シールド先端部では約 25° の差になっている。この原因は、縮小モデルが1/10スケールであることによる実測値の精度と、磁性材形状として中性化セル磁気シールドの方が偏向磁石に比べ複雑であることによる計算値の精度と、それぞれに限界があるためと推測された。なお、Fig. 5. 1-5は打消コイル単独通電時のデータであるが、漏洩磁場模擬コイルの単独通電時にはベクトルの向きはほぼ逆となる。このことは両コイルに同時通電の場合は、計算に若干の誤差があっても互いに相殺することを意味し、結果的に有利な方向に作用するものである。このように、中性化セル磁気シールド先端付近では若干の差が出たが、その他全体としては良い一致を示したことにより、計算値は信頼できるものであると判断した。

5. 2 打消コイルの詳細

(1) コイルの仕様

磁場計算値と実測値とが問題のない程度にほぼ一致することを確認した後、さらに計算により、MコイルとSコイルのアンペアターンの比の最適条件のサーベイを行った。まず、MコイルとSコイルにそれぞれ単独通電した時、その合成ベクトルが各点毎に漏洩磁場のそれと 180° の角度に近くなるのはどのような条件かを検討した。対象の計算点は漏洩磁場の影響の一番大きい中性化セル先端と偏向磁石前面の中間付近の数点とした。その結果、アンペアターン数はMコイルを74kAT、Sコイルを3kATとした時、各点のベクトルの向きが平均として最適なことがわかった。最終的なMコイルとSコイルの形状、配置をFig. 5. 2-1に示す。この構成の打消コイルにJT-60Uの最大漏洩磁場相当を打消するための電流を単独通電した時の、プラズマ近傍の不整磁場な

ど周辺に与える影響の計算結果はTable 5. 2-1に示すとおりであった*)。不整磁場の値は目標値を超過したがその量がごくわずかであったため、検討の結果、許容範囲内とした。なお、ターボ分子ポンプの許容値は水平成分すなわちX-Y平面の成分が連続的に印加される場合の値であり、計算値はこれより大きい、実際の通電は連続ではないことから許容範囲内とした。また、同じ条件で漏洩磁場を打消したときの磁場分布をFig. 5. 2-2に示す。この打消し後の磁場データを用いてイオンビーム軌道/熱負荷計算を行い、ビーム軌道に悪影響のないことと熱負荷的に極端なアンバランスのないことを確認した。この場合、接線NBIではFig. 2. 3-6のように平面的にトカマク半径方向との傾きが大きいため、ビームライン中心軸の左右で漏洩磁場の強度に若干の差が生ずるが、これを考慮した時の左右の熱負荷のバランスも特に問題のないような差のないことを確認した。

以上の結果より、最終的なコイル仕様を決定した。この時、導体の断面積や並列数は、既設の打消コイル電源をそのまま使用できる抵抗値となることを前提とした。コイルの仕様は次のとおりである。

1) Mコイル

アンペアターン; 74ターン × 1000A

使用導体; 2重ガラス巻平角線 (4.5 × 15 mm) を3本並列

重量 ; ~2.3 ton

電気抵抗; ~135 mΩ

冷却方式; 自然空冷

2) Sコイル

アンペアターン; 3ターン × 1000A

使用導体; 中空導体 (12.5 × 10 / 9.5 × 7 mm)

冷却方式; 水冷

両コイルを直列接続した時の抵抗は約140mΩ、自己インダクタンスは約60mHである。既設の打消コイル電源の定格は160V、1200Aであり、最大漏洩磁場を打消す場合の打消コイル電流1000Aを通電した時の電圧余裕は約20Vである。この値は1000Aを10秒間で立上げるとして最小の余裕電圧が6V ($0.06\text{H} \times 1000\text{A} / 10\text{s} = 6\text{V}$)なので、ゆっくりした漏洩磁場の変化に対して充分余裕がある。

プラズマがディスラプションと呼ばれる異常消滅を起こした場合にコイルに誘起される逆起電力 e は、Mコイルの磁束鎖交面積を20m²、磁束密度0.02Tが50ms間にゼロになると仮定した時、

$$e = (20\text{m}^2 \times 0.02\text{T} \times 74) / (50 \times 10^{-3}\text{s}) = 592\text{V}$$

となる。この値は打消コイル電源に使用しているサイリスタ等の回路素子にとって尖頭逆耐電圧などの点で問題のないものである。

*) Table 5. 2-1中の各許容値、目標値の根拠は次のとおりである。

- (1) JT-60連絡シート、整理番号; JNB1950、 “接線NBIの磁気シールド方式についての打ち合せ議事録” H2.6.20付
- (2) 本レポートの第2.1節(3)項(外部磁場値の1/2を採用)
- (3) ㈱大阪真空私信、“TMP (TH5000)の耐磁場について”

(2) 打消コイル電流の制御

接線NBIの打消コイルは前述のように、独立した2台の電源をそのまま用いて上下のユニットを同時運転することが前提である。このため、打消コイル電源への外部からの通電指令は常に上下同時に発信したものを受信するようにし、外部への警報信号は上下の論理和をとって発信するように改造して対応する。その他、上下ユニットの磁場が互いに干渉することの制御上の影響などについてその詳細を検討した。

まず、制御用の漏洩磁場と残留磁場の各信号を検出する磁気プローブ1と磁気プローブ2の配置及び検出の向きは既設NBIに準じた方法で良いかどうかを計算により調べた。両プローブを既設NBIに準じた方法で設置する時の位置を#7、#8ユニットの場合について、Fig. 2. 3-6中の①②に示す。具体的には、プローブ1は既設NBIのタンク側面の $R=8.5\text{m}$ 、 $Z=\pm 4\text{m}$ の位置に設置し、プローブ2は既設の中性化セル磁気シールド先端部に取り付けられたそのままの状態を磁気シールドごと配置を変えて再利用し、 $R=11.2\text{m}$ 、 $Z=\pm 1\text{m}$ の位置となる。この配置の時の計算結果より、プローブ1は打消コイルによる磁場の影響をほとんど受けずに、また、プローブ2は漏洩磁場及び打消コイルによる磁場を打消コイル電流に比例した形で検出できることがわかった。

磁場の相互干渉のある、上下ユニット用の一対のコイルを独立した2台の電源で同時通電するため、上下の電流のバランスがとれずに双方の制御が正常に行われななどの支障をきたす可能性があるが、この対策として上下のコイルを直列通電することは、既設の電源の改造を要することや上下ユニットの打消強度を個別に微調整できなくなるなどの理由から採用できない。このため、プローブ2の位置での漏洩磁場や打消コイルを単独通電した時の各磁場のベクトルがどのようになるかを計算した。その結果をFig. 5. 2-3に示す。図のように、プローブ2は漏洩磁場と上下の打消コイル同時通電の差となる向きの磁場を検知できる。また、上ユニットから見た時、上下一対のうちの相手側にあたる下ユニットのコイルのみ通電した場合のベクトルは漏洩磁場のそれに近いものとなっている。この結果は何等かの原因で上下ユニットの電流のバランスが崩れて相手側ユニットの電流が過大となった場合に自ユニットの電流は増大側に作用してバランスをとろうとすることを意味し、制御系にとって有利な方向であることがわかった。

その他、制御上の問題としては、既設NBIの場合に比べて、Mコイルが大きいいため、自己インダクタンスは約60mHと既設の約6倍になることや、また、プローブ1、2の配置の相互関係も異なることなどがあり、いずれも制御系の定数の再調整を要するものと考えられる。

以上の検討結果より、打消コイル電流の制御は基本方針どおり2台の独立した電源を用いて同時運転するものとし、この場合、既設の打消コイル電源の制御系のゲイン等を再調整して最適な定数を選択するだけで対応できる可能性の高いことがわかった。ただし、据付け終了後の通電試験の結果によっては、さらにプローブ2の磁場の相互干渉の影響を小さくすることのできる対策等が必要となる可能性も考えられる。

T a b l e 5 . 2 - 1 Induced field strength by the cancelling coils
in the tangential beamline.

Locations	Calculated values	Permissible values
(1) Tokamak plasma	1.2mT/2beamlines (0.0, 1.2) 1.7mT/4beamlines (0.0, 1.7)	1.5mT(Bz) (Desiered Value)
(2) Adjacent beamline unit Beamline tank center Ion sources	3.9mT (2.9, 2.4, 1.0) 2.1mT (0.3, 0.2, 0.9)	7.0mT 3.5mT
(3) Turbo-molecular pump	17.0mT (7.0, 7.1, 13.8)	8.0mT(Bx-y, Continuity)

Note). The numerical values in the parentheses indicate Bx, By, Bz.

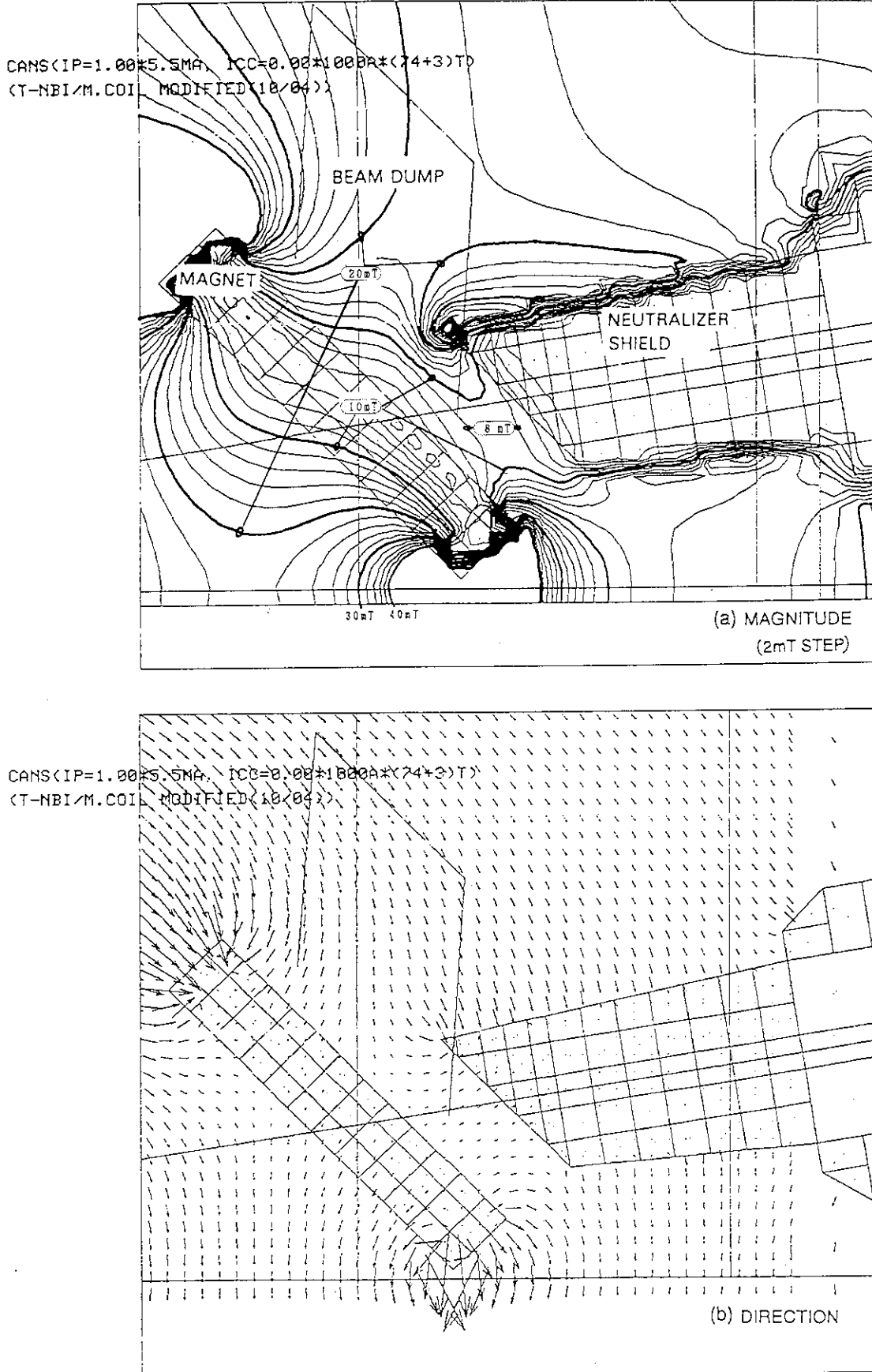


Fig. 5.1-1 Predicted maximum stray field magnitude (a) and direction (b) from the JT-60U with the magnet and the shields in the tangential beamline unit.

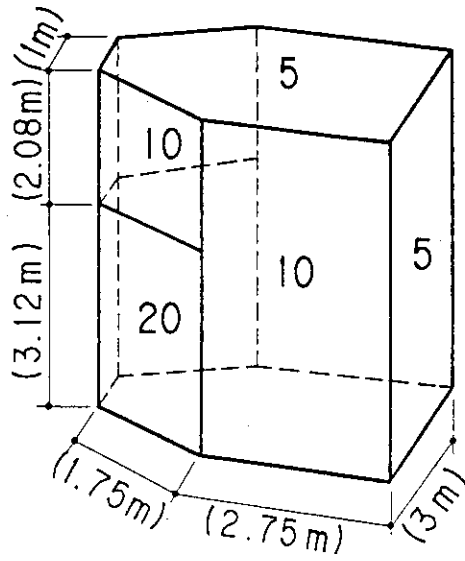


Fig. 5.1-2 Thickness of the wall of the upper tangential beamline tank when the walls are made of soft iron as a passive magnetic shielding.

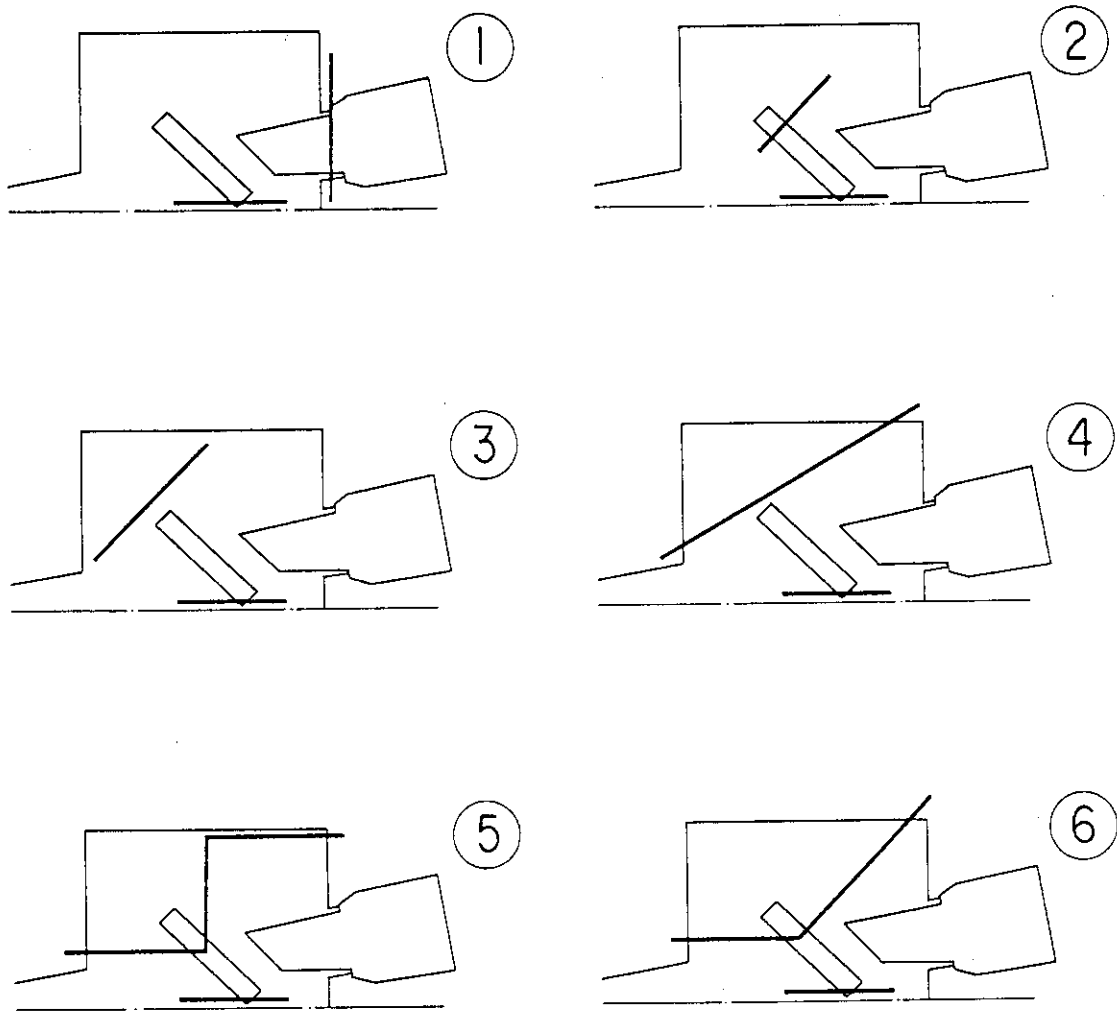


Fig. 5.1-3 Arrangements examined for the cancelling coils of the tangential beamline.

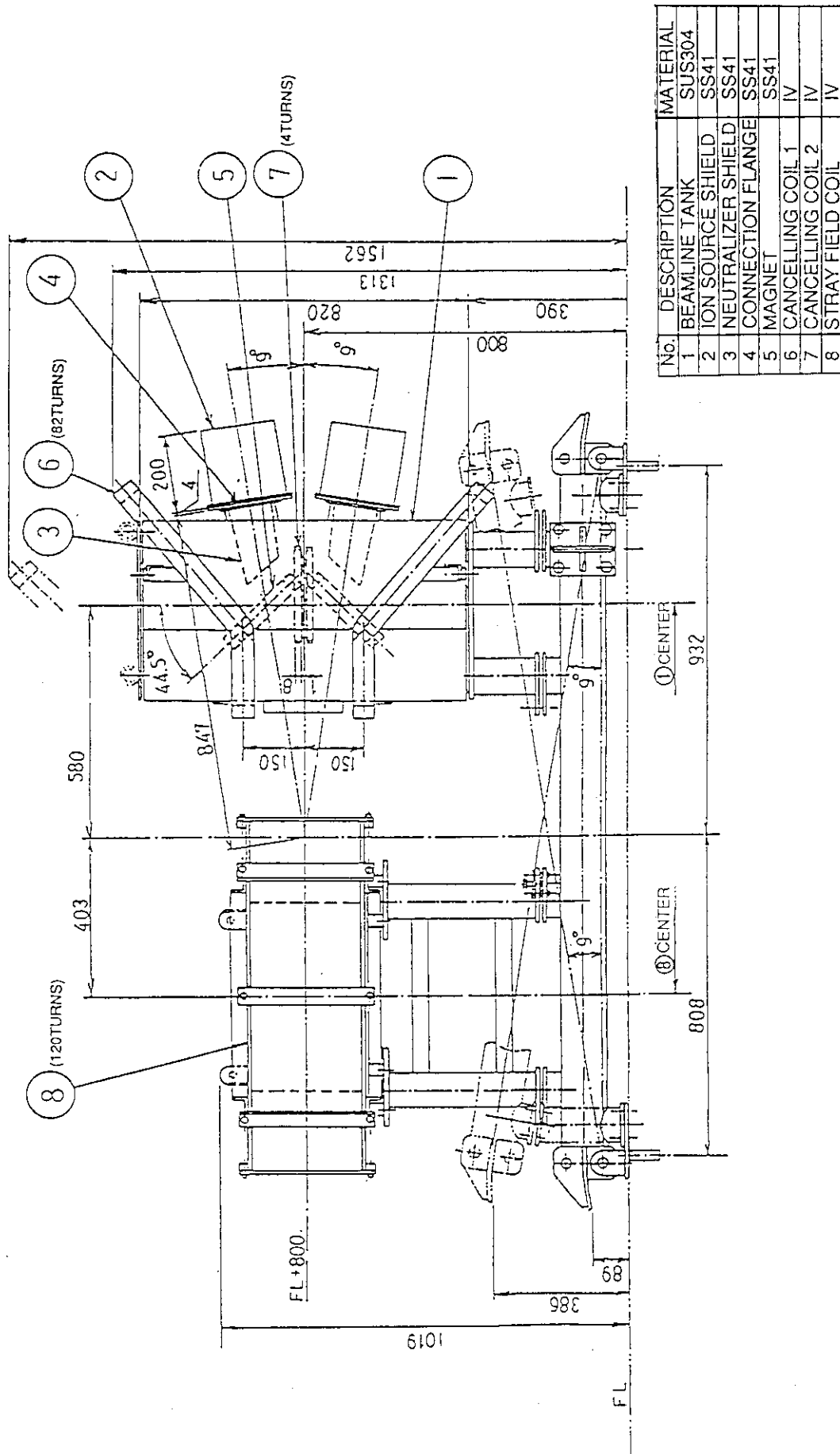


Fig. 5.1-4 One-tenth model of the new cancelling coil system for the tangential beamline.

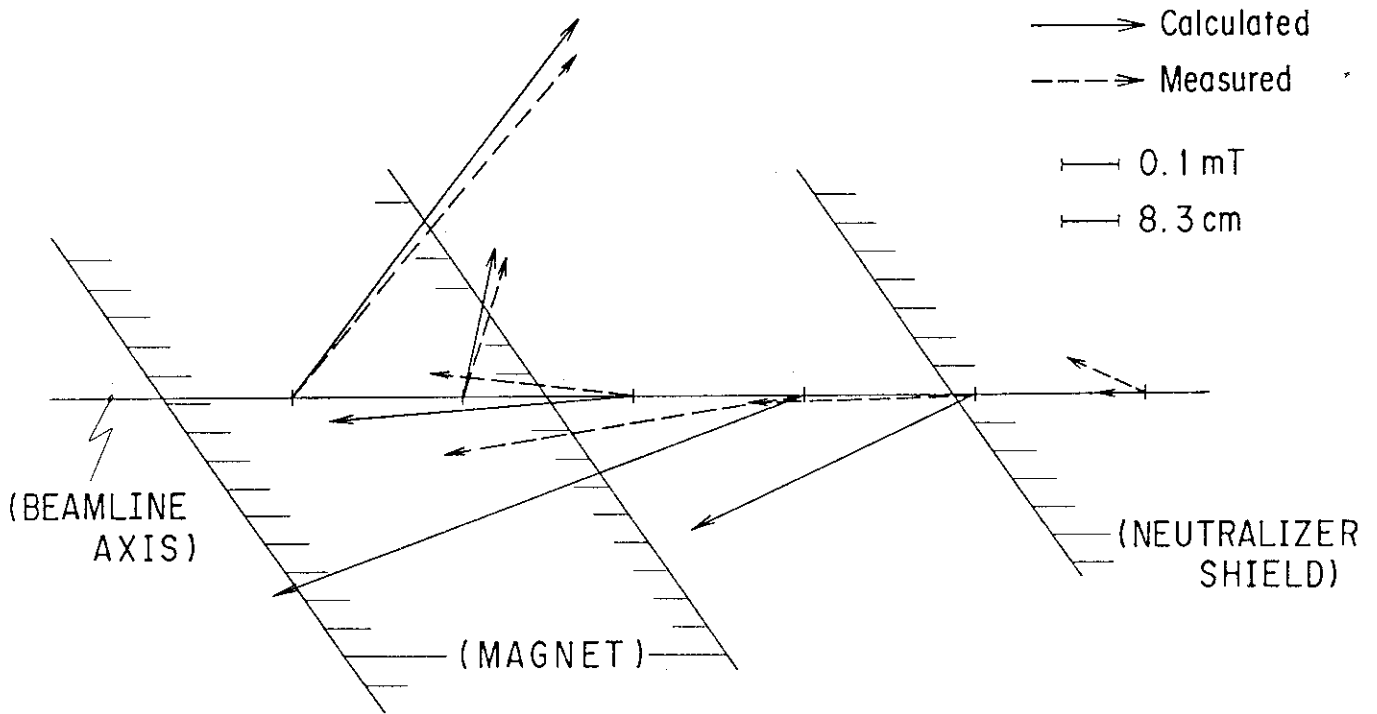


Fig. 5.1-5 Comparison of the calculated with measured magnetic vectors along the beamline axis near the magnet of the tangential beamline.

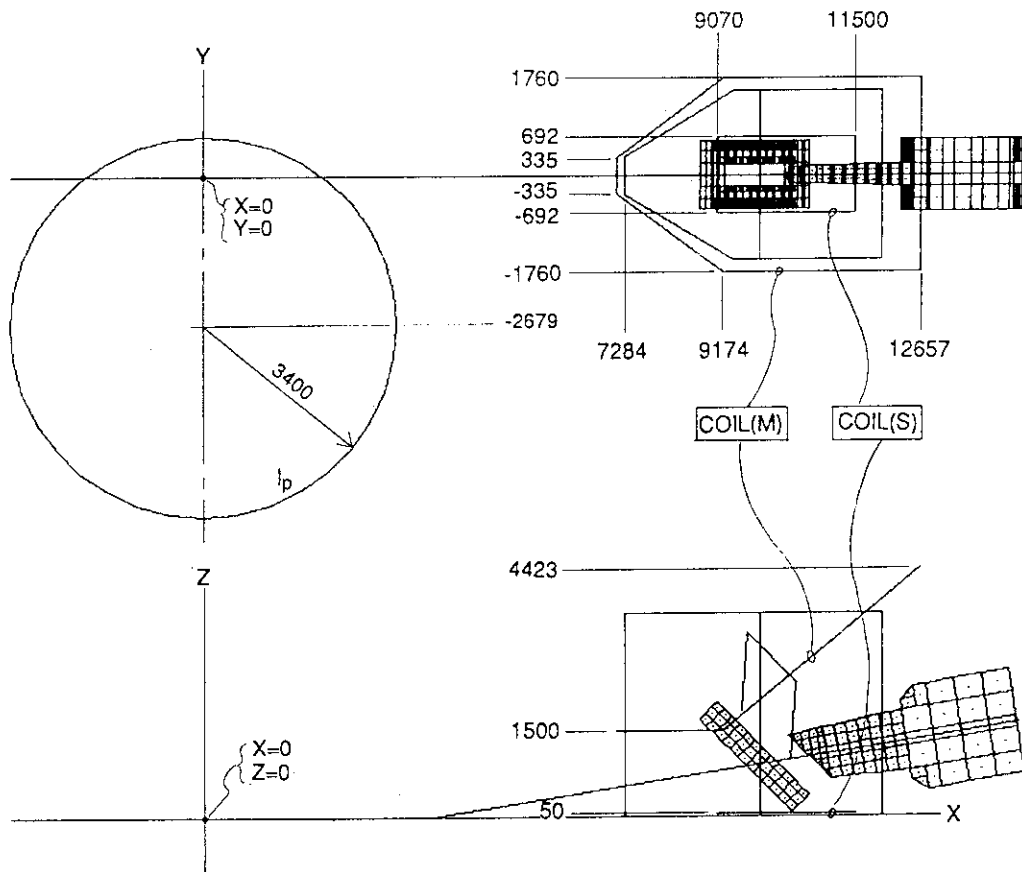
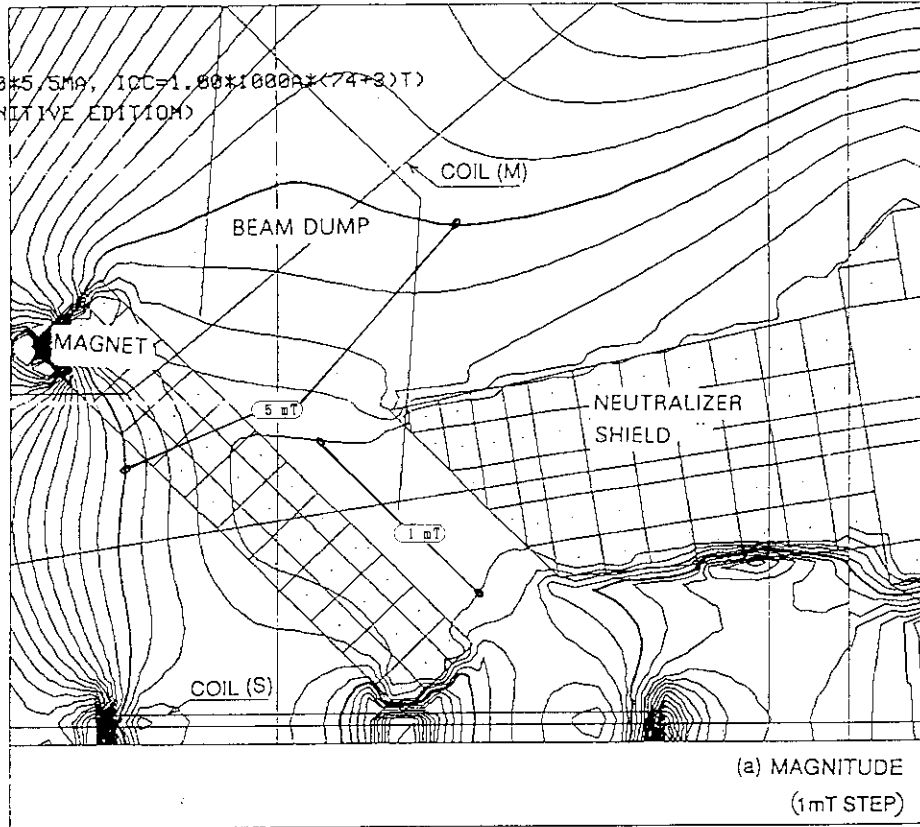


Fig. 5.2-1 Arrangement of the cancelling coils of the upper tangential beamline unit as a simulation model for the computer code of the three dimensional magnetic field analysis. The coils for the lower unit are symmetrical with respect to X-Y plane.

CANS(IP=1.00*5.5MA, ICC=1.00*1000A*(74+3)T)
 (T-NBI/DEFINITIVE EDITION)



CANS(IP=1.00*5.5MA, ICC=1.00*1000A*(74+3)T)
 (T-NBI/DEFINITIVE EDITION)

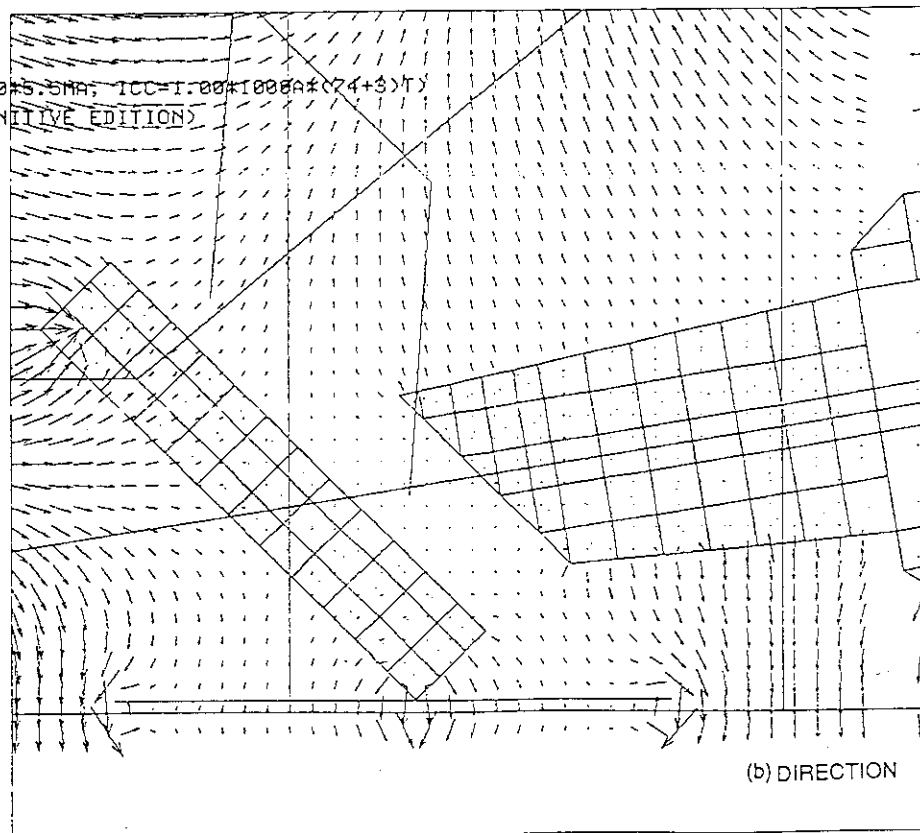


Fig. 5.2-2 Calculated residual magnetic field distribution near the magnet of the tangential beamline when the cancelling coils were energized under an optimum current against the maximum stray field from the JT-60U.

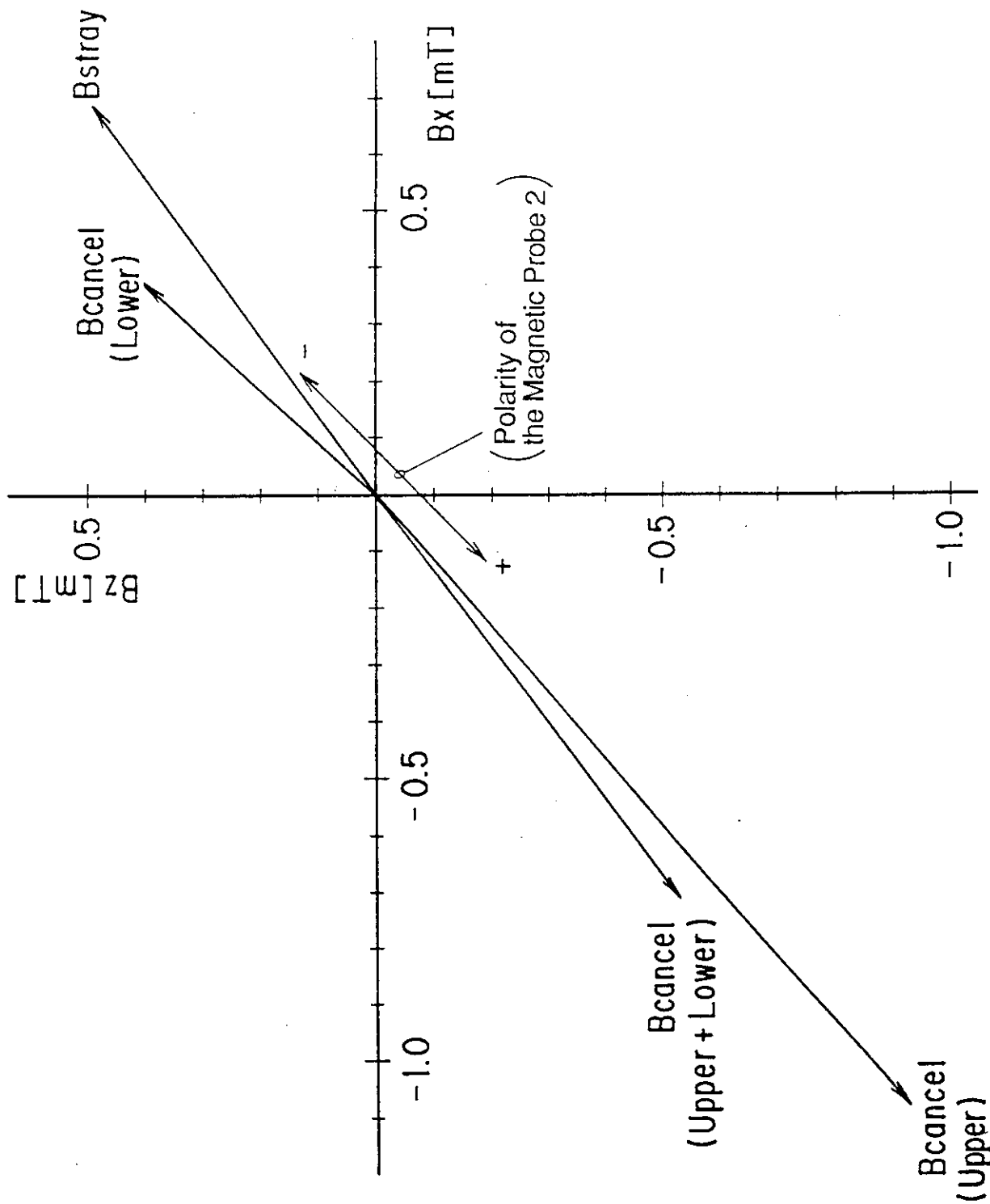


Fig. 5.2-3 Comparison of magnetic fields at the magnetic probe No.2. The cancelling fields induced by the cancelling coils of the upper and/or lower beamline units are shown.

6. 磁気シールド付電離真空計の 磁場増大時の性能

JT-60NBI用の電離真空計はJT-60からの漏洩磁場の強い環境下でもその感度変化を1%以下とするための磁気シールド付のものを使用している¹⁰⁾。今回、漏洩磁場増大対策の一環として、この磁気シールド付電離真空計が外部磁場増大に対し、どのような性能を示すかを磁場計算コードを用いて検討した。本章ではその結果について述べる。

(1) 磁気シールド付電離真空計

ここで扱う磁気シールド付電離真空計はJT-60NBIのためにシールドの設計と試作を行い、実用化されたものである。実使用されている電離真空計の構造図をFig. 6-1に示す。図のように、ヌードゲージのステンレス製パイプの外周にパーマロイ製パイプを内層シールドとし、さらにその外側に電磁軟鉄(SUY)製パイプを外層シールドとした2層構造の磁気シールドを装着したものである。この磁気シールドにより、50mTの漏洩磁場が、電離真空計のどの方向に印加されても感度変化が1%以下となる性能を有している。既設NBIの場合の真空計の設置位置をFig. 6-2に示す。

(2) 使用した磁場計算コード

- ① ELF/MAGIC、3次元(改良積分方程式法)
- ② TRIM、2次元(有限要素法)

(3) 検討項目

a. ELF/MAGICによる計算

ELF/MAGICを用いて外部磁場の向き及び大きさを変化させた時のシールド性能の計算を行った。その結果は次のとおりである。なお、磁場の向きはシールドの長手方向と平行な向き(縦磁場)を0°、直角な向き(横磁場)を90°で表現している。

No	外部磁場		最大磁束密度		シールド内 空間磁場	良否
	大きさ	向き	外層内	内層内		
①	50mT	0°	1.34T	0.66T	≤0.04mT	○
②	100mT	90°	1.19T	0.13T	≤0.03mT	◎
③	100mT	75°	1.15T	0.36T	≤0.02mT	◎
④	100mT	45°	計算不能(収束せず)			×
⑤	80mT	45°	1.54T	0.71T	0.25mT min.	×
⑥	60mT	45°	1.19T	0.54T	≤0.03mT	○

以上の結果から次のことがわかった。

①の結果は、文献10)中のシールド試作時の実験値との比較に相当するもので、外層、内層ともシールド材内部の磁束密度はそれぞれほぼ飽和値であるが、シールド性能はぎ

りぎりて満たしており、実験結果と一致していると言える。②③の結果は、横磁場あるいは真横から $\pm 15^\circ$ 程度以内の角度から100mTの外部磁場を加えた場合であり、この向きからの100mTならシールド材内部の磁束密度の面からもまったく問題ないことがわかった。④～⑥の結果は、 45° の角度で外部磁場の大きさを変えた場合であり、この向きでは60mT前後以下からようやく機能するようになり、完全な縦磁場の場合と大差がないことがわかった。

b. ELF/MAGICとTRIMの比較

磁気シールドの外層の電磁軟鉄を外径90mm、肉厚18mmとし、内層のパーマロイを外径40mm、肉厚1mmとした計算モデルに、横磁場の100mTを加えた場合の3次元のMAGICと2次元のTRIMの各計算コードの比較を行った。

その結果、両者のシールド中央部の空間磁場値は、MAGICで 3×10^{-2} mT、TRIMで 4.9×10^{-4} mTと2桁の差が見られた。しかし、この場合はTRIMの方がコードの性質上、精度が良いと判断できること、さらに計算結果の大きいMAGICの方もシールド性能を満たした値となっていることの2つの理由より、MAGICを用いた前項の結果の信頼性は充分であると判断した。

c. 各測定点の漏洩磁場値

既設NBIの各電離真空計の設置位置におけるJT-60U化後の最大漏洩磁場値をMAGICにより見積もった。計算はプラズマ電流を円電流で模擬した時の空間磁場である。その結果は次のとおりで、下ユニットのP2室用、それに、上下ユニットのP3室用とNBIポート用の各ゲージについては外部磁場値が50mTを超えており、その取付け方向を漏洩磁場の向きに対し、完全な横磁場から $\pm 15^\circ$ 程度以内の角度となるようにする必要があることがわかった。なお、接線NBIの場合にも磁気シールド付電離真空計がP1～P3室とNBIポート用の計4個、上下ユニット共通で使用され、NBIポート用のみ取付け角度に同様の注意を払う必要がある。

計器記号	設置位置	B_R	B_Z	$ B $
PE1I	P1室用 上ユニット	21mT	2.6mT	21mT
	下ユニット	-3.5mT	-32mT	33mT
PE2I	P2室用 上ユニット	28mT	8mT	29mT
	下ユニット	-7.5mT	-55mT	56mT
PE3I	P3室用 上下ユニット	± 81 mT	9.5mT	82mT
	NBIポート用 "	± 81 mT	-30mT	86mT

注) 計器記号、P1～P3室はFig. 6-2に示されるとおり。

また、NBIポート用はJT-60U化後のNBIポートに新規に設置のもので、その概略設置位置は $R = 6.5$ m、 $Z = 2.6$ mである。

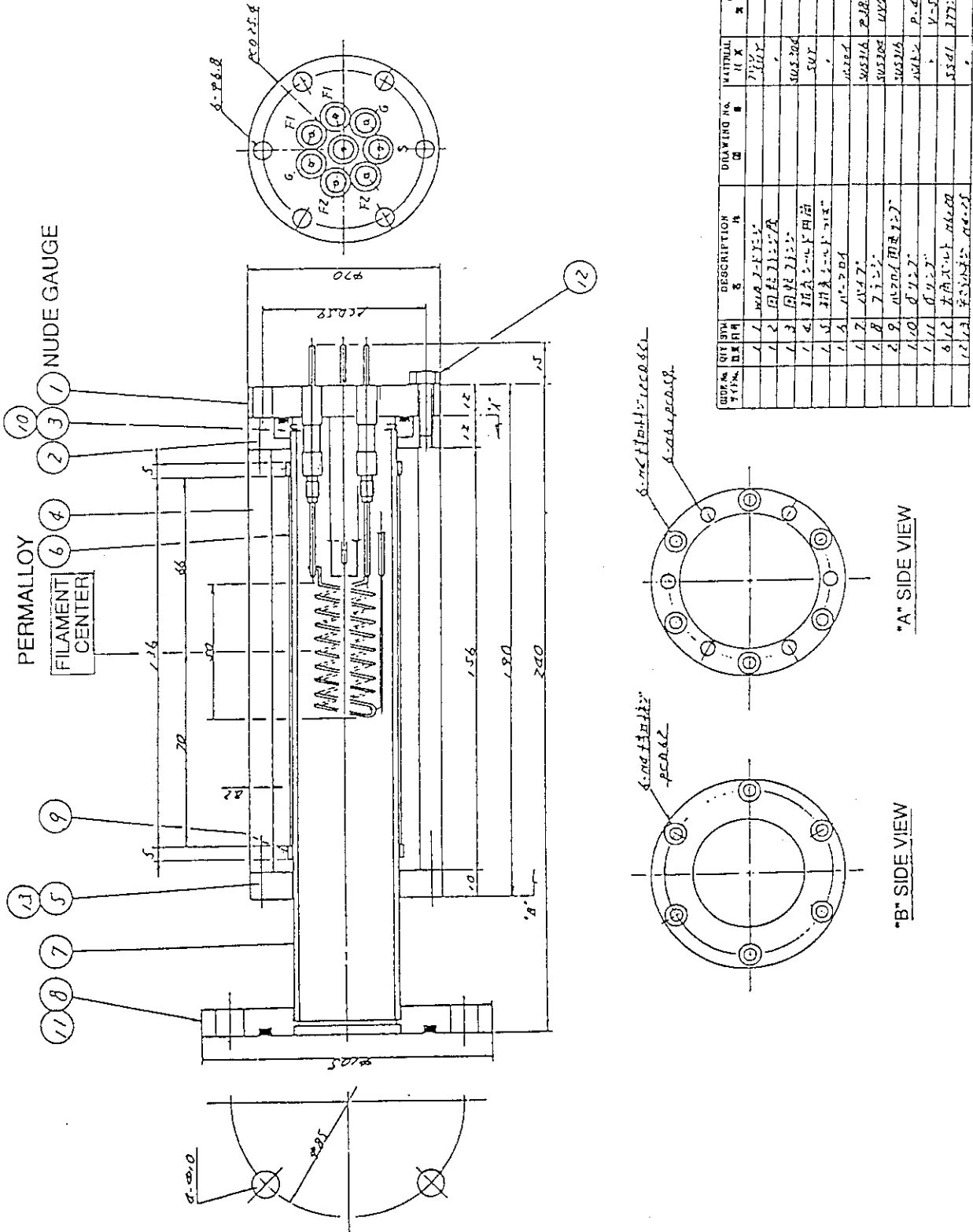


Fig. 6.1 Magnetic shields for the ionization gauge in the JT-60 NBI.

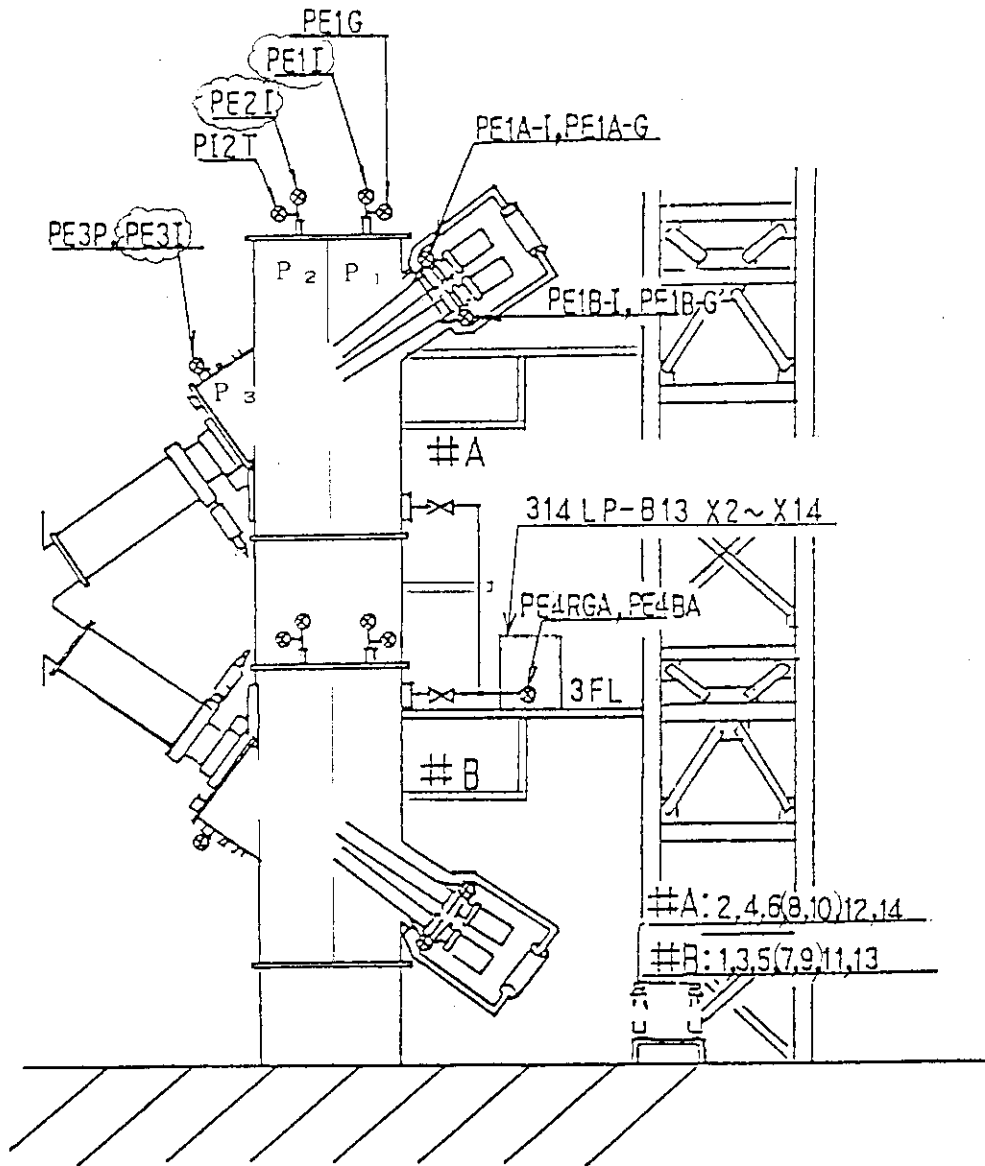


Fig. 6.2 Location of the vacuum gauges in the original beamline units. Tag numbers of PE1I, PE2I, and PE3I indicate the ionization gauges.

7. まとめ

JT-60の高性能化改造に伴う、JT-60NBIの磁場系の対応について検討した。まず、偏向磁場増大の対応は、1/4モデルによる実験とイオンビーム熱負荷計算コードによる計算を用いた検討の結果、磁石鉄心のわずかな磁気飽和分を励磁電流を増大させて補正すれば良く、このために、電流値制御回路に非線形回路を追加することにより、120keVの重水素ビームもこれまでの水素ビームとほぼ同等（熱負荷的には同等以下）の性能が得られることがわかった。次に、既設NBIの漏洩磁場増大対策としては、1/4モデルを用いた実験の結果、改造前の設備に新たに第3打消コイルを追加設置し、既設打消コイルと直列に通電することにより、改造前の漏洩磁場対策とほぼ同等の性能が得られることがわかった。また、接線NBIの漏洩磁場対策は、磁場計算コードを主に用いた検討の結果、タンク外周の大形のコイルとタンク内の補助的な小形のコイルを設置して既設の磁気シールドと組合わせて用いることにより、必要な性能が得られることがわかった。最後に、磁気シールド付電離真空計の漏洩磁場増大時の対策としては、シールド材はそのまま、漏洩磁場の向きに対するシールド付ゲージの取付け角度に制限を加えるのみで良いことがわかった。

以上の結果に基づき、それぞれの対策を実機へ適用することに決定し、接線NBI以外の各項目については平成3年春からの運転再開時より実用に供している。実験の進行上などの理由でまだ最大定格には達していないが、平成3年10月末現在、最大で110keV、57Aの重水素ビームの運転を実施し、プラズマ電流としては最大5MA迄のNBI加熱実験が行われ、偏向磁場や漏洩磁場などの増大に対する各対策が正常に機能していることを確認できた。また、接線NBIについては平成3年11月から12月にかけて現地据付け工事を実施し、その後、実用化の予定となっている。この接線NBIの漏洩磁場対策の実用化にあたっては、計算及び1/10縮尺のモデルを用いた検討であること、上下ユニットの磁気的な相互干渉の影響の正確な事前評価が困難であったこと、それに、昭和61年のJT-60NBIの運転立上げ時のように、原型ユニットによる事前の試験は行えないことなどのため、装置据付け終了後に試験通電を行い、十分な調整、確認をする必要がある。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、有益な議論をしていただいた田中茂氏をはじめとする核融合工学部NBI加熱研究室の皆様へ感謝致します。また、1/4モデル及び1/10モデルの磁場測定の際、御協力いただいた宇佐美広次氏をはじめとするNBI装置試験室の皆様へ感謝致します。

7. まとめ

JT-60の高性能化改造に伴う、JT-60NBIの磁場系の対応について検討した。まず、偏向磁場増大の対応は、1/4モデルによる実験とイオンビーム熱負荷計算コードによる計算を用いた検討の結果、磁石鉄心のわずかな磁気飽和分を励磁電流を増大させて補正すれば良く、このために、電流値制御回路に非線形回路を追加することにより、120keVの重水素ビームもこれまでの水素ビームとほぼ同等（熱負荷的には同等以下）の性能が得られることがわかった。次に、既設NBIの漏洩磁場増大対策としては、1/4モデルを用いた実験の結果、改造前の設備に新たに第3打消コイルを追加設置し、既設打消コイルと直列に通電することにより、改造前の漏洩磁場対策とほぼ同等の性能が得られることがわかった。また、接線NBIの漏洩磁場対策は、磁場計算コードを主に用いた検討の結果、タンク外周の大形のコイルとタンク内の補助的な小形のコイルを設置して既設の磁気シールドと組合わせて用いることにより、必要な性能が得られることがわかった。最後に、磁気シールド付電離真空計の漏洩磁場増大時の対策としては、シールド材はそのまま、漏洩磁場の向きに対するシールド付ゲージの取付け角度に制限を加えるのみで良いことがわかった。

以上の結果に基づき、それぞれの対策を実機へ適用することに決定し、接線NBI以外の各項目については平成3年春からの運転再開時より実用に供している。実験の進行上などの理由でまだ最大定格には達していないが、平成3年10月末現在、最大で110keV、57Aの重水素ビームの運転を実施し、プラズマ電流としては最大5MA迄のNBI加熱実験が行われ、偏向磁場や漏洩磁場などの増大に対する各対策が正常に機能していることを確認できた。また、接線NBIについては平成3年11月から12月にかけて現地据付け工事を実施し、その後、実用化の予定となっている。この接線NBIの漏洩磁場対策の実用化にあたっては、計算及び1/10縮尺のモデルを用いた検討であること、上下ユニットの磁気的な相互干渉の影響の正確な事前評価が困難であったこと、それに、昭和61年のJT-60NBIの運転立上げ時のように、原型ユニットによる事前の試験は行えないことなどのため、装置据付け終了後に試験通電を行い、十分な調整、確認をする必要がある。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、有益な議論をしていただいた田中茂氏をはじめとする核融合工学部NBI加熱研究室の皆様へ感謝致します。また、1/4モデル及び1/10モデルの磁場測定の際、御協力いただいた宇佐美広次氏をはじめとするNBI装置試験室の皆様へ感謝致します。

文 献

- 1) 栗山正明他:JAERI-M 87-169, “JT-60 粒子入射加熱装置の設計及び技術開発”(1987).
- 2) Kuriyama M. et al.: “Operation of JT-60 NBI and NBI System for JT-60 Upgrade”, in Proc. of the 13th Symp. on Fusion Eng., Knoxville, 1989, p.996.
- 3) 松岡 守他:JAERI-M 90-086, “JT-60 NBI の接線入射化改造”(1990).
- 4) 田中 茂他:JAERI-M 82-140, “JT-60 中性粒子入射装置の磁気遮蔽”(1982).
- 5) 松岡 守他: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).
- 6) Matsuoka M. et al.:Fusion Technol., 19, 113(1991).
- 7) 伊藤孝雄他:JAERI-M 82-131 “JT-60 NBI の偏向磁石の設計”(1982).
- 8) 伊藤孝雄他:JAERI-M 9266 “イオンビーム軌道熱負荷計算コード”(1980).
- 9) (株) エルフ編:“ELF/MAGIC リファレンスマニュアル”(1988).
- 10) 柴田猛順他:真空, 30, 350(1987).