

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

環境磁界の研究（I） 三次元積分磁束計の開発

久保田 雄輔、大林治夫
宮原 昭、大野和子
中村光一、堀井憲爾

(1991年6月19日受理)

NIFS-MEMO-2

1991年7月

RESEARCH REPORT NIFS-MEMO Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

NAGOYA JAPAN

環境磁界の研究（I）

三次元積分磁束計の開発

久保田雄輔、大林治夫、宮原昭*

文部省核融合科学研究所

大野和子

愛知医科大学

中村光一

名古屋工業大学

堀井憲爾

名古屋大学**

現在の勤務先： * 帝京大学経済学部
** 豊田高等専門学校

目 次

1章 序論	3
2章 本磁束計の原理	5
3章 本磁束計の仕様	6
4章 本磁束計の構造	6
a) 磁気検出部	
b) プリアンプ部	
c) ポケットコンピューター部	
d) プリンター・ディスク駆動部本体	
5章 本磁束計の操作方法	10
6章 磁束計自身の特性測定	11
a) 長時間動作させた場合の測定値の安定性	
b) 電池電圧の測定値に与える影響	
c) 二次元的に磁界方向を変化させた場合の一次元と三次元磁束計の測定値	
7章 各種磁場発生装置の磁界強度および被曝線量の測定	12
a) 交流電磁石のポールピース間及び漏洩磁界強度測定	
b) 10テスラ発生可能な実験用クライオスタッフの漏洩磁界測定	
c) A C高感度モードを使っての3. 5 kW単相変圧器の漏洩磁界測定	
d) プラズマ実験装置(TPD-1)を使って実験中に研究者が受ける磁界被曝量の測定	
8章 考察	16
a) クライオスタッフ周辺で生じた一次元と三次元磁束計の測定値の開き	
b) 一次元磁束計を使用する場合の測定誤差	
9章 三次元積分磁束計に関するまとめ	17
10章 三次元磁束計によるLHD磁気モニターシステム	18
a) 目的	
b) 磁界管理システムとしての三次元磁束計	
c) 個人の磁気モニターとしての三次元磁束計	
d) 中性子照射および電気的雑音からの保護対策	
[付記] 環境磁界が生体に与える影響について	22
謝 辞	23
参考論文	23
[APPENDIX] 本三次元積分磁束計のベーシックプログラム	

Development of Three-Dimensional Compact Magnetic Dosimeter for Environmental Magnetic Field Monitoring

Yusuke Kubota, Haruo Obayashi and Akira Miyahara

National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan

Kazuko Ohno

Aichi Medical University, Aichi Prefecture 480-11, Japan

Kouichi Nakamura

Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466, Japan

Kenzi Horii

Nagoya University, Nagoya 464-01, Japan

Abstract

A computer-driven, three-dimensional magnetic fluxmeter to be used also for magnetic field dosimetry has been developed. A magnetic monitor applicable to this object should be measurable to an absolute value of local magnetic field strength and also be able to record its time integration as a measure of exposed dose to the magnetic field.

The present fluxmeter consists of signal amplifiers, rectifiers, an A/D converter, and a pocket computer(PC). The signal outputs from the sensors are processed with the PC to compose an absolute strength of magnetic flux density and its time-integrated value. The whole system is driven by a battery and is quite compact in size to be used as a handy portable system.

Further details of the design, idea, construction, specification, and testing result of the fluxmeter are described. The measurable range are from 0.4G to 20,000G in normal mode and 8mG to 400G in high-sensitivity AC mode, and the sensitivity is well independent of the magnetic field direction. These measured data are displayed in real time on the LCD pannel of the PC and memorized in RAM files. Possible application of the fluxmeter are discussed with special attention to the search of the leakage and/or disturbing error fields around LHD (Large Helical Device) and other magnetic systems, the individual dose control to the workers in strong magnetic fields, and the evaluation of the effects of long irradiation of magnetic fields.

[key word] three dimensional, magnetic, fluxmeter, sensor, dose, computer, LHD

1章 序論

電力消費が少なく、高磁界を直流的に発生する事が可能な超伝導マグネットは、MRIなど医療用診断機器を始めとして、核融合実験装置、エネルギー貯蔵装置、あるいはリニアカーラー等の広範囲な分野で使われようとしている。これらの発生する磁界の強さは、使用する磁界は（数テスラに達する）もちろんのこと、それから漏れる磁界強度も、コイルの配位によってはかなり大きな値になる。その為、これらの強い磁界が生体等に与える影響が懸念される。しかし、 α 線、 β 線、 γ 線等の電離放射線の被曝と異なって、磁界の被曝が生体等に与える影響については、明確な結果や結論は得られておらず（特に静磁界に関して）、磁界の影響に関する研究、磁界測定や遮蔽対策は積極的に行なわれていなかった。しかし、前述のように高磁界に被曝する機会が増加するにつれて、重大な影響（特に生体に対し）が生じて来る可能性は否定できず、磁界の被曝に関する真剣な研究、および検討が今後早急に必要となるであろう。

そこで、まず手始めに我々は核融合科学研究所で現在設計を行っている、大型ヘリカル装置LHD^{1, 2)} (Large Helical Device) の漏洩磁界モニターへの応用も可能な、環境磁界測定用携帯型三次元積分磁束計を開発した。

LHDはプラズマの閉じ込め用として、ヘリカルとポロイダルの二種類の超伝導コイルを持ち、最高4テスラ（PHASE IIにおいて）に達する強力な磁界を発生させてプラズマを閉じ込める。結果としてLHDの外側へ漏洩する磁界の強度も大きく、その漏洩磁界が周辺に配置しているターボポンプ等精密機械や、装置近くで作業する作業者に与える影響が懸念される（当然ながら放電実験中は作業者はLHDの実験室内に入れないが、実験していない時は必要に応じて、超伝導マグネットが動作している場合でも作業者が入室し、簡単な作業を行う可能性は有る）。ヘリカルとポロイダルコイルの磁場がバランスしている磁場最小運転モードにおいてLHD周辺の漏洩磁界は弱いが、ポロイダルコイルが不調になったり、あるいはヘリカルコイルの単独運転を行う場合には、急速にその漏洩磁界は増加する。その場合本体の中心より20mの地点でも磁束密度は、最大100ガウス³⁾に達する。その為漏洩磁界が精密機器や人体に影響を与えないよう、磁界強度とその時間積分である被曝線量の両面で安全対策は十分に行われなければならない。その場合、二種類の磁気モニターが必要になる。一つは装置などの管理の為の管理用磁気モニター、そしてもう一つは実験室に出入りする作業者、あるいは研究者の安全の為に必要な磁気個人モニターである。しかし、いずれにしても通常の市販の一次元式磁束計では、複雑なヘリカル系磁場の漏洩磁界を正確にモニターする事は極めて難しい。それは磁力線の方向が複雑に変化していて、正確に測定するため磁気検出器の面を絶えず、磁力線に直交させて測定する必要があるが、それは非常に困難な事による。そこで磁力線に対する磁気の検出器の方向を意識しなくて、正しく磁界強度を簡単に測定できる三次元磁束計が望まれていた。

過去にも三次元磁束計の試作・開発された例として、三次元磁気プローブとマイクロコンピューターを組合せて測定処理し、後で小型計算機（カリキュレーター）にデータを出

力する方式のT.Y.Fujita等⁴⁾や微弱な交流磁界測定可能なC.C.Lo等⁵⁾のドシメーター、そして特殊な方式ではピックアップコイルで検出した交流磁気信号を増幅・積分した後、電気的科学素子であるメモリダイオード⁶⁾にデータをメモリする方式の林等⁷⁾のドシメーター等がある。しかし、いずれも一長一短があり、直流から交流磁界に至る広範囲の磁束密度を長時間測定・記録でき、かつ手軽な線量計としても使用できる例はなかった。

そこで、一般の環境磁界の測定にも使え、LHDの超電導マグネットの発生する漏洩磁界を正確に、かつ迅速に測定でき、更に磁界の被爆線量計(magnetic dosimeter)としても使用可能な、コンピューター制御式三次元磁束計を1昨年来開発して来た。最初に開発した1号機は、3分割方式で取扱いも難しく、かつ性能も十分でなかったため、必要に応じ手軽に磁界測定に使用できる状態では無かった。そこで、今回その1号機の携帯性や性能を大幅に向上させた、一体式の三次元積分磁束計の2号機を開発した。これは三つの高感度なホール素子でX, Y, Z方向の磁界成分を検出し、それらの信号を増幅、検波、そしてアナログをデジタルに変換した後、コンピューターで二乗平均して合成磁界、およびその積分量を求める方式で、実時間で測定結果を画面に表示すると共にラムメモリに記録して、後で測定データを印刷する事が出来るようにしている。

この三次元積分磁束計を使って磁束計自身の特性測定、各種磁場装置の内部磁界および漏洩磁界の測定、更には直流放電型実験装置であるTPD装置⁸⁾の周囲で実験を行っている研究者の被曝量を測定して、本磁束計のLHDの磁気モニターへの応用の可能性を評価した。これらの測定データの中には、測定の意味がはっきりしないと思われるものも含まれているが、本文においては出来るだけ多くの測定データを載せる事により、磁束計が有する可能性や限界を、よりはっきり理解する事が出来るようにしている。

なお、この携帯型三次元磁束計は磁界モニターとして使用するばかりでなく、LHDの不整磁場の1原因になる磁性体等の構造、及び部位検出作業にも使用する事が出来ると思われる。このような携帯型ではなく、機器管理用の磁気センサーの場合には、重水素放電を行う事により生ずる中性子照射が原因で、磁気モニターが誤動作や劣化する事が考えられし、実験に伴って発生する強烈な電気的雑音により、測定誤差が生じる場合があるのでそれらに対する対策についての考察も行っている。

更に、最近では高磁界を発生する装置が、身近でかなり使われるようになったのに、一部の研究者達や一部の一般雑誌など⁹⁾を除けば、磁界の被曝は生体にほとんど影響を与えないのではないかとして、余りその分野の研究もされていなかつたし、問題にされていなかつた。しかし、果たして問題ないのかその点についても、本文の最後に「付記」という形で簡単に議論を進めている。しかし、これには簡単に記述するだけでは済まない重要な問題が含まれているので、本論文の続編として出版予定の「環境磁界の研究(II) 磁界の生体に与える影響」の中で詳しく記述・議論する考えである。

なお、現在は磁束密度の単位としてT(テスラ)が標準的になっているが、本文中では解り易くするため安全基準値の表示等一部を除いて従来のG(ガウス)表示にしている。

2章 本磁束計の原理

磁界センサーとして使われているものには、交流用としてピックアップコイル、交流直用としても使用できるホール素子、ホール素子にアンプを組み込んだホールIC、磁界の強度により抵抗が変化する磁気抵抗素子、それに新しいアイデアとして、磁心入りのコイルで磁界によるインダクタンスの変化を利用するもの等があるが、一般的に磁界センサーとして使われるものはホール素子である。ホール素子は感度が高く、直線性も良く、小型で、そして値段も非常に廉という利点がある。ここでは磁気センサーとして、ホール素子を使った場合について述べる。

図1のように磁気センサーであるホール素子面に磁力線が入射した時、その入射角を θ 、磁束密度をB、ホール素子に流すホール制御電流を I_h 、そしてそのホール素子の感度係数を K_h とすると素子面のホール制御電流方向の直角方向にホール電圧が発生し、その電圧を V_h とすると(1)式が成り立つ

$$V_h = I_h (K_h \cdot B \cdot \cos \theta + K_e) \quad (1)$$

ここで、 K_h および K_e は感度定数と不平衡係数である。この K_e はホール素子の種類により異なり、インジウムアンチモン(In Sb)の場合はほとんど無視でき、(2)式のように簡単になる。

$$V_h = I_h \cdot K_h \cdot B \cdot \cos \theta \quad (2)$$

なお、良好な温度特性を必要とする場合はガリウムヒ素(Ga As)のホール素子を使う。この式から解るようにホール素子面に垂直に磁力線が入射する場合、つまり θ が0の場合出力電圧は最大になり、 θ が大きくなるに従い電圧は減少する。つまり同じ磁束密度のに入射角の増加と共にホール素子の感度が低下したようになる。その為一次元の磁気センサーを使って磁界の強度を正しく測定する為には、絶えずホール素子面を磁力線に垂直になるように方向を調整しなければならない。一様な磁界中の測定においては、このような測定方法でも特に難しい事ではない。しかし、二種類の複雑なコイルを有するLHDや変圧器などの漏洩磁界中においては、磁力線の方向は複雑に変化し、絶えず上記のように磁力線に垂直になるよう、磁気検出センサーの面を調整する事は非常に困難である。

その為に図2のようにホール素子をX、Y、Z方向に向け直角に取り付け、磁界強度を3方向のベクトル B_x 、 B_y 、 B_z に分けて別々に検出し、後で式(3)で示されるように各成分の二乗平均を取って合成すれば、磁力線の方向に関係なく、絶えず正しい磁界の強度が求まる事になる。

$$|B| = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)} \quad (3)$$

この三次元積分磁束計を線量計(dosimeter)として使う場合には、式(4)に示すように、ある周期で繰り返し求められた合成磁束密度 $B(t)$ を時間で積分することによってGS(ガウス・秒)、又はTS(テスラ・秒)単位で表示する。

$$D_b = \int B(t) dt \quad (4)$$

これらの磁束密度や線量等の測定データは、コンピューターを使う方式に於いては、簡単

に内蔵のRAMファイルにメモリする事が出来るが、コンピューターを使用しない林等⁷⁾のドシメーターでは、積分部の後に電気化学的素子⁶⁾を取りつけ、それに記録させる方式を採用している。

3章 本磁束計の仕様

この磁束計の主要な仕様を下に列挙する（なお、カッコ内の数字はAC高感度モード）。

①測定可能最大磁束密度 B_m :	20, 000 G (500 G)
②測定分解能 B_r :	0.4 G (8 mG)
③測定可能磁界	直流及び1 kHz 以内の交流磁界
④測定モード (A) 同上 (B)	AC/DC通常モード/AC高感度モード 单発(必要時のみ磁束密度を測定) 連続(自動的な繰り返し測定でFTとSDモードがある)
⑤測定周期	$T \geq 1$ 秒 (FTモードにて) $T \geq 3$ 秒 (SDモードにて)
⑥測定回数 M :	1000回
⑦ゼロ調整	X, Y, Zを独立に調整可能
⑧表示及び測定項目	X, Y, Z軸成分の磁束密度(零調整と单発モードのみ) 合成磁束密度、磁束の積分値(单発モードの場合はなし)、 測定回数、測定時刻(印刷時のみ)
⑨測定可能時間数約	10時間
⑩測定データの記録	測定中はRAMにメモリし、測定終了後に2.5インチディスクに記録
⑪測定データの出力	測定終了後にプリンターを接続し、データを印刷
⑫使用ホール素子	東芝製THS102A(GaAs)
⑬使用A/Dコンバーター	12ビットのBB製ADC7802
⑭使用コンピューター	シャープ製ポケットコンピューター(PC-1600K)
⑮重量	1 kg (電池を含む)

4章 本磁束計の構造

本磁束計の外観は図3に示しているが、携帯可能なように電池で駆動される小型三次元積分磁束計でそのブロック図及び回路図は図4と図5に示される。ブロック図で解るように本装置は大きく分けると、磁気検出部、信号処理系(便宜上以降プリアンプ部とする)、コンピューター部、そしてデータ印刷・記録系からなる。これら各自について説明すると、
a) 磁気検出部

磁気検出器は磁束計にとって最も重要な部品であり、その選択は磁束計の性能を直接左右するので慎重に行った。その結果感度、制御電流、感度の温度依存性、直線性、そして

直接性能には関係しないがサイズ、価格、入手し易さの点で非常に優れていたガリウムヒ素 (GaAs) タイプのホール素子（東芝製 THS102A）を使用する事に決めた。なお、この素子の特性及び外形は表1及び図6¹⁰⁾に示す。このホール素子の3個を各々が直交するよう6.5×9.0×10.0 mm 角の絶縁ブロックに固定し、配線処理した後に直径16 mm で長さが150mm の透明なアクリルパイプの中の先端部に収納した。

この素子の定格制御電流は10 mAであるが、電池の消耗を考慮して2 mAに押さえているが、素子の内部抵抗は温度と測定磁界の強度により大幅に変化するので、それによる制御電流の変化を防ぐため、通常は定電流回路を使用する。しかし、定電流電源は回路が複雑になるので、本装置では1個当たりの電流容量が0.5 mAの定電流ダイオード（石塚製E-501）を4本並列に接続し、6 Vの電池を通して3個の直列に接続したホール素子に2 mAの定電流を流している。このダイオードは単純であるのにもかかわらず、定電流特性は優れていて、特に図7¹¹⁾の特性で解るように小電流のものほど特性が良い。その為大きな定電流が必要な場合、大電流のダイオードを使うより小電流のダイオードを並列接続して使う方が特性が良い事が解る。この磁気検出部は10 Pのメタルコネクターを使って本体（プリアンプ部）に直接、又は3 mの延長コードを使って接続するようにしている。

b) プリアンプ部

プリアンプ部はホール素子からのアナログ信号を各種の処理を施した後、デジタル信号に変換し、後段のコンピューターに送り込む為の重要な役割を果たしている。この部分は信号増幅部、理想全波整流回路、電流増幅部、A/Dコンバータ、パラレルシリアル変換部、そしてRS-232C インターフェースとなる。なお、AC高感度モードの場合は、信号増幅部と整流回路の間にゲインが約50倍の交流増幅器が挿入される。三つのホール素子は直列に接続し、電池と定電流ダイオードで制御電流を流しているので、ホール素子の各々の出力端子の電位が異なっている。その為、各々の素子の一端を共通のアースとして使用できず、それらの信号増幅には通常の増幅器ではなく、差動増幅器あるいは絶縁増幅器を使わなければならない。又、ホール素子の信号電圧は微弱(10~30mV/mA/kG)で、この増幅器のゲインを高く取る必要がある事から、初期オフセット電圧及び温度ドリフトの極めて小さい増幅器を使う必要がある。その為この増幅器として計測用アンプであるBB製の差動増幅器INA-101を使った。この差動アンプの初期オフセット及び温度ドリフトは、最大で±25 μVと±0.25 μV/°Cと非常に小さい値を示している。

このアンプではLレンジで約100倍、Hレンジで5倍に増幅し、その出力を4つのアンプを内蔵する集積度の高いIC(LT-1079)を使って交流の整流と電流増幅を行っている。このICは集積度が高いばかりでなく、1アンプ当たり50 μAと極めて消費電力が小さく、電池容量を余り大きく出来ない携帯型の本磁束計にとって非常に好都合である。このICで行う整流は、次段で使用するA/Dコンバーターの入力電圧範囲が0~+5 Vと+極性の電圧しか入力出来ないようになっている為、交流の場合の負電圧、そして直流の場合でも磁力線の向きが逆の場合等、負極性の電圧に対して正極性に反転させる目的で行う。

プリアンプ部においては、オペアンプの為に±5Vの両極性の電源が必要であるが、A/Dコンバータ以降のデジタル回路では、+5Vの単極電源だけしか必要としない。これらの電源の安定性は直接測定値に影響を与えるので、単三乾電池4本の電圧の6Vをそのまま使うのではなく、+側にはLP2950(NS製)、そして-側には79MG(NS製)という三端子定電圧素子を挿入し、安定な±5Vの電圧を得ている。+側に使用している素子(LP2950)は最大負荷電流が100mAに対し、無負荷時回路電流が75μA、そして電圧ドロップは0.4V以下と極めて優れた特性を有している。そのため電池電圧の低下に関係なく一定の電圧を供給出来、かつ電池寿命を伸ばすのに貢献している(ただし、本装置では使用していないが、最近セイコー電子が極めて高性能な3端子レギュレーターを発売している。その特性は、無負荷消費電流:25μA、入出力電位差:30~60mV)

3系統のホール素子からのオペアンプで処理されたアナログ信号と電池電圧モニター用の信号は、A/Dコンバータにより順次デジタル信号に変換される。ここで使用しているA/DコンバータはBB製のADC7802(モノリシックCMOSタイプ)の28ピンDIP形状のもので、12ビットの分解能(1/4096)の4CHの入力を有する、消費電力が10mWの極めて高性能なコンバータである。しかし、このA/Dコンバータの出力はパラレルのTTL(Transistor Transistor Logic)信号であり、RS-232Cケーブルを使って信号をコンピューターに送るにはシリアル信号に変換後、0~5VのTTL電圧からRS-232C規格の電圧(-12V~+12V)に変換する必要がある。そのために使用されるのがRS-232Cインターフェイスである8ビットのUSART(Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter)のLSIと電圧変換用のICであり、ここでは前者にインターフェースのIM6402、そして後者としてMAX233Cを使っている。なお、A/Dコンバータの信号は12ビットであるのに対し、USARTは8ビット入力なので、信号を一回で受け取り処理する事が出来ず、LOWとHIGHに別けて2回で読み込み、変換している。このMAX233Cの電圧変換ICは+5Vの電源電圧を加えれば、内部で-12Vと+12Vの電圧を作り、2系統のTTLレベルの電圧をRS-232C規格の電圧に変換する能力があり、従来の変換IC(MAX232等)に比較して使用部品数を大幅に少なくする事が出来る。このようにして変換された信号電圧を使って、ケーブルによりコンピューターと信号のやり取りを行うが、この時の信号伝送方式は調歩同期方式で、通信速度は1.200から9.600Bpsまで5つのポートレートを適当に選択出来るようになっている。

これらA/DコンバータとUSARTはRS-232Cインターフェイスを介したコンピューターの指令信号によって動作するようになっているが、マイクロ秒の微妙なタイミングを必要とする事が多いので、消費電力がLSタイプに比較して大幅に少ないCMOSタイプのロジックIC(HC00, HC04, HC123等)を介して行っている。これらの動作を簡単に説明すると、先ずコンピューターからA/Dコンバータ用のアナログ入力変換開始信号、チャンネル選択指令、及びUSART用のH, L選択信号が図8のパルス波形で示される様にRS-232Cインターフェイスを通して、プリアンプ部に送られる。チャンネル選択信号と変

換開始指令はU S A R Tとロジック I Cを経た後、A／Dコンバータに加えられ、そのコンバータは4系統のアナログ入力信号（この内の1系統は電池電圧モニター用）を順次デジタルに変換する。各系統の変換が終了すると、U S A R Tに読み取り開始信号とL, H選択信号が加えられ、A／Dコンバータの12ビットの信号を読み取り、順次シリアル信号に変換後電圧変換 I Cを通してコンピューターに送る。

c) ポケットコンピューター（P C）

このコンピューターはRS-232C インターフェイスを通して、プリアンプ部に動作指令を出し、その結果得られた磁気センサー等からの4系統の測定データを読み込み、そのデータを解析し、磁束密度、測定回数、磁束の積分を行い、コンピューターの液晶画面にその結果を表示すると共に、RAMファイルに記録する役割を果たす。又、プリンターやディスク駆動装置に接続し、データの印刷及び2.5インチのディスクへの記録を行う事が出来る。この磁束計のソフトは、作成や変更が極めて簡単なB A S I C言語によりプログラムが組まれていて、そのステップ総数は約300行と長いが、必要に応じてプログラムの修正は直ちに出来る。測定データ及び制御プログラムをメモリするRAMのメモリ容量は80 kB（オプション）もあり、大量のデータがメモリ出来るようになっている。ここで使っているシャープ製8ビットポータブルコンピュータ（P C-1600K）は、プログラム中に漢字が使用できる他、各種の機能を有し、汎用の卓上コンピューターに引けを取らない優秀なコンピューターである。又、プリアンプ部より取外しが容易に行えるので、磁束計として使用しない時は、コンピューターとして単独に使用できる。このコンピューターの特徴は下記の如くである。①小型で軽い、②B A S I Cで手軽にプログラムが作成及び変更ができる。又、漢字やカナもプログラム中に使用できる、③液晶画面が大きく、数字等が見やすい、④プログラムの自動スタート及び自動停止が可能、⑤RAMメモリ容量が最大80 kBもある。⑥警報ブザー及び音楽を奏でる事が可能である、⑦RS-232C インターフェイスばかりでなく、アナログ入力や光入力端子を備えている、⑧専用のプリンタ及び2.5インチフロッピーディスク駆動装置に接続し、測定データの印刷及びデータのディスクへの記録が可能である。

d) カラープリンタ／フロッピーディスク駆動部本体

プリンタとディスク駆動部は、本三次元積分磁束計で測定したデータや制御プログラムを印刷、記録したり、又はディスクに記録されている測定データを読み出し、印刷する事と記録されている制御プログラムをコンピューターにロードするのに使用される。プリンタ部(CE-1600P)は4色のカラープロッターとしても使用でき、Aサイズの連続用紙に9種のサイズの数字及び漢字、そしてグラフィックを印刷できる。又、ディスク駆動部(CE-1600F)は2.5インチの小型ディスクを使用し、記憶容量は両面で128 kBである。このようにディスクに制御プログラムが記録されているので、もしコンピューターを操作中に誤ってプログラムを破壊してしまったり、消してしまった場合でも即座にディスクからロードして正常に本三次元積分磁束計を動かす事が出来る。

5章 本磁束計の操作方法

本磁束計の操作フローチャート図は、図9に示されるが、ほとんどPCのLCD画面の指示に従い、数字キーとENTERキー（以後Eキーとする）の操作で行えるようになっている。先ず、ON/BREAKキーを押すとモードがRUNになっている場合は自動的にプログラムは立ち上がり、ファンファーレが鳴り、三次元積分磁束計の表示と共に、モード選択1に移行する。なお、モードがプログラムモードになっている場合は、自動的に立ち上がらないので、その時は電源がONになった状態でRUNキーを押したあと、Eキーを押す。モード選択1では、1：測定、2：印刷、3：記録、4：再生の4のモードがあるが、ここで印刷、記録、そして再生モードはこのPCをプリンター／ディスク駆動部に接続して行うモードで、各々測定データの印刷、ディスクファイルへの記録、そしてディスクからの測定データの読み出しの場合に使う。

1：測定モードを選択すると、次に選択モード2が表示される。ここで、1：AC/DC通常モードは直流と交流のどちらの磁界も測定できるモードで、その測定範囲は仕様に示されているように、0.4-20,000ガウスである。又、2：AC高感度モードは回路の途中に、ゲインが50倍の交流増幅器を挿入し、交流の磁界に対してのみ8mガウス-400ガウスの測定範囲を有するようにしている。

次の選択モード3では単発と連続モードの選択を行う。ここで、連続モードを選択すると、次のモード選択4に移り、FTとSDの表示選択をする事になるが、いずれの場合も後で設定する測定周期で、測定を繰り返し行う。それに対し、単発モードは測定したい時に、本体左横に付いている押しスイッチ、又延長ケーブルを用いて磁気プローブを使用する場合は、そのプローブの根元に付いているスイッチを押した時のみ測定するモードで、次に再びスイッチを押すまで、その測定データが表示され続く。このモードでは表示項目として測定回数、X、Y、Z軸各成分の磁束密度、及び合成磁束密度の3項目である。しかし、このモードにおいては連続モードと異なり、磁束の積分値は意味がないので表示もメモリもしていない。FTモードは1秒以上の周期で連続測定を行う場合のモードで、表示項目としては測定回数と合成磁束密度の二つである。ただし、測定値の積分（被曝線量）計算は測定終了後に行い、最後に他の項目と共に表示するようになっている。それに対し、SDモードは3秒以上の測定周期しか選択出来ないが、表示項目としては測定回数、電池電圧、合成磁束、その積分値の4種類の項目を実時間で表示出来るようになっている。

次の測定回数の設定は、メモリ容量により最大1000回までに限定されているが、その範囲内なら、任意の値で設定を行う事が出来る。ただし、単発モードの場合は、ここでの設定は省略され、自動的に200回が設定される。次に零調整に移行するが、先ず零調整をする／しないの選択を行う。する場合はX、Y、Z軸成分ごとの磁束密度が、電池電圧と共に約30秒間表示される。この時間内に磁界がない場所（ミューメタルパイプ等で磁気遮蔽を行う等して）で、各軸の値が1ガウス以内になるよう、本体右横側に取り付けて

ある3個の半固定のボリウムを使い調整する。もし、この調整が終了しない内に30秒が経過した場合は、次に表示される再零調整をする／しないの選択の所で、するを選択すると、更に30秒間零調整が可能となる。しないを選択すると実際の測定に入る。ただし、モード選択2でAC高感度モードを選択している場合は、零調整の項目は省略されている。なお、零調整中に数十ガウス以上の磁界が存在すると、エラー表示が出てCPは停止し、もう一度最初から各種設定をやり直さなければならない事になる。

単発測定とFT測定の場合は、測定終了と共にデータの計算が自動的に行われ、測定回数によって異なるが、ある時間経過後に結果の表示（測定回数、測定周期、測定開始時間、測定終了時間、測定回数、磁束密度、密度の積分値）が行われる。ただし、単発測定の場合は、測定周期と密度の積分値は0となっている。この測定のあと測定データの印刷、フロッピーディスクへの記録の要／不要の選択があり、いずれも不要の場合は、測定終了の挨拶とメロディーの演奏の後、自動的に電源がOFFになる。

なお、測定途中に測定を中止したい場合で、それまで測定した測定データをメモリし、後で印刷したい場合は、ON/BREAKキーで中止するのではなく、F6キーで中止する必要がある。もしON/BREAKキーで中止すると、測定データはRAMメモリより消失してしまう。なお、測定データを印刷、又はディスクに記録したい場合はPCの電源が切れている状態でPCをプリンタ・ディスク駆動部本体にセットし、その後電源をONして行う。ただし、測定をプリンタ／ディスク駆動部本体に接続した状態で測定を行った場合は、測定終了時に電源をOFFしない状態で行う事が出来る。

6章 磁束計自身の特性測定

a) 長時間動作させた場合の測定値の安定性

本三次元積分磁束計に関する測定値の安定性を測定するため、三次元磁気プローブの近くに強力な角型（10×10×50mm）のコバルト・サマリューム磁石を置き、磁束計の表示値を約1000ガウスにし、その表示値が時間と共にどのように変化するか、繰り返し標準モードであるSDモードにて、2分間隔で40分間測定した。その結果をプリンターへの出力データとして、測定回数、測定時間、そして磁界の積分量と共に表2に示している。この表から解るように表示値の変化は、最大±2ガウスで変化率としては0.2%である。これは無視できるほど小さな値で、ほとんど測定中における表示値は変化しないと言える。なお、この測定中において電池電圧をモニターしていたが、その電圧の変化はほぼ零であった。（電池として電気消費量が大きい+側にはアルカリ型電池を、又-側には通常のマンガン電池を使用した）

b) 電池電圧の測定値に与える影響

携帯型測定器の宿命として大容量の電池は搭載できない。本器の場合プリアンプに関しては+、-側共に小型の単三電池を4本づつ所有している。そのため電池の消耗によって電圧が低下して、測定値に影響が出る事が懸念される。そこで、磁束計の電源の電圧を

強制的に変化させて、測定値への影響を調べた。先ず、磁束計の電源を内蔵の乾電池から電圧を変化させる事が出来る外部電源に交換し、a)の場合と同様に、磁気プローブの近くに磁石を置き、表示値がやはり1000ガウスになるようにして、電源電圧を6.6Vより5.0Vまで0.1V刻みで、変化させた場合における表示値の変化を測定し、その結果を図10に示している。

図から解るように電圧が6.6Vから5.2Vまで低下しても、表示値はほとんど変化していない(<±2ガウス)。電源電圧が5.1Vに下がった時、初めて表示値は急激に増加して、表示値が異常になった事を示している。新しい電池を使う場合、その電圧は約6.3Vで、電圧が5.4V以下に下がると、電圧モニター回路により検出され、電池を交換するよう画面上に指示が出るので、指示に従っている限りは、電池電圧の測定値に対する影響は考えなくて良い。ただし、単発モードでは電圧のモニターを行っていないので、零調整の時、電圧の表示値に気を付け、電圧が5.5Vより低い場合は、あらかじめ新しい電池に交換しておく必要がある。このように電池電圧が大幅に変化しても、測定値が影響を受けないのは、デジタル回路ばかりでなく、アナログ回路にも特性の優れた定電圧素子を使用している事によるものと思われる。

c) 二次元的に磁界方向を変化させた場合の一次元と三次元磁束計の測定値

磁束密度は変えず、磁力線の方向だけを二次元的に変化させた場合、一次元と三次元式磁束計の測定値にどのような違いが出るか測定した。先ず、図11に示す様に18cm離れて固定している二つのフェライト永久磁石(120×100×30mm)の中心部に一次元と三次元磁束計の磁気プローブを近接して固定する(その中心部の磁束密度は約180ガウス)。そして、その永久磁石を360°回転させて、測定値の変化を比較した。その結果は磁石の回転角をパラメーターとして、図12に示している。なお、二つの磁気プローブの間隔は短い方が条件が同一となり好ましいがプローブのサイズが大きい為、最小にしても1cmであった。ここで、三次元磁束計の場合は1秒周期のFTモードで測定した。この図から解るように磁石の回転角度が0から360°に増加するにつれて、磁力線の磁気プローブに対する角度が変化するので、一次元の磁束計の場合、当然ながら0から最大±180ガウスまでサイン状の曲線を描いて変化している。それに対し三次元磁束計の場合は270°の辺りで測定値が数%低下しているものの、角度の変化に関わらず、約180ガウスの一定の値を示している。数%の測定値の変化は3個のホール素子の感度のバランスが充分でない事と、各プローブが正確な磁石の中心にセット出来ない事に起因すると思われる(ポールピース間における磁場強度は、中心から10mm離れると測定値が3%変化する)。

7章 各種磁場発生装置の磁界強度および被曝線量の測定

a) 交流電磁石のポールピース間及び漏洩磁界強度測定

本磁束計はホール素子の出力を増幅した後、特殊な整流回路と平滑回路を通す事により交流を直流に変換しているが、その為に直流ばかりでなく、約1kHz以内(ホール素

子とオペアンプの特性により) の交流磁界も測定出来るようになっている。そこで、この三次元積分磁束計を使って、図13に示す名工大中村研所有の交流磁界発生用電磁石のポールピース間と、その外側に漏洩する磁界の強度を、単発モードにより測定した。この電磁石ポールピースの形状は75mmの四角形で、その間隔が30~60mmの間で可変できる構造になっている。その間隔が30mmの時、最大磁束密度1500ガウスを発生する。最初にポールピースの間隔を50mmに調整し、磁界強度がほぼ一様なポールピースの真中に三次元磁束計のプローブを置く。そして、電磁石に加える電圧を増加させながら、そのポールピース間に生ずる磁界を単発モードで測定し、その結果を一次元の磁束計(F.W.Bell社製)で測定した値と比較して、表3に示している。なお、三次元積分磁束計の場合は測定を2回行っていて、1回目の数値の下のカッコ内はX, Y, Z軸の各成分を表している。この結果を見ると、一次元の磁束計と本三次元積分磁束計で測定した2回目の値とは非常に近い値を示していて、最も離れている値でも電圧が100Vの時で4.3%、反対に200Vをえた時は、ほぼ完全に一致している。しかし、1回目の測定値は2回目の測定値に比較して、両者の間の開きが大きく、6.9%となっている。これは1回目のプローブの保持が手持ちであった事に起因すると考えられる。又、電磁石メーカーが仕様書として添付している測定値は、今回測定した値より10%以上小さな値を示していたが、これはポールピース間隔と平行度の設定機構部に問題があり、間隔と平行度が精度良く行えなかった事、そして電流調整ではなく、電圧調整で試験を行っている為に、温度上昇によるコイル抵抗の増加が原因として考えられる。しかし、いずれにしても本三次元積分磁束計の測定値と、一次元磁束計の測定値は数%以内で良く一致している点で、本磁束計は交流磁界の測定に対しても問題がない事を証明した。

電磁石のポールピースの外側における磁界の強さは、ピースの縁から離れるに従い弱くなり、その磁界の強度は通常ポールピース間の距離(この場合は5cm)分だけ離れるにつれて $1/e = 1/2.72$ の割合で減衰していく。しかし、電磁石が飽和現象を呈し始めると、ポールピース間の漏れ磁界の強度が増加し、そのように減衰しなくなる。このような漏れ磁界領域においては、磁力線の方向が定まらず、一次元式の磁束計では測定が困難である。しかし、本三次元磁束計では磁力線の方向に関係なく、正しくその場所の磁界強度を測定出来るので目的に適している。そこで、ポールピース間隔を5cmに調整して、ポールピースの縁からのプローブの距離を、変化させた場合における磁界強度の値を測定してみた。表4に電磁石に加える電圧(この場合、電流で調整するのが本来であるが、精度の良い電流計が無かったため)を75Vと125Vとした場合における、ポールピースからの距離(cm)と磁束密度B(ガウス)の関係を表している。この表からポールピースの間隔である5cm毎に、 $1/e$ に近い $1/3$ に磁束密度は減少している事が解る。又、表5はポールピースの縁から10cmの場所で測定した磁束密度を、電磁石へえた電圧をパラメーターに測定した値を示している。これから磁束密度がえた電圧に、ほぼ比例して増加していく、電磁石はまだ飽和していない事が解る。

b) 10テスラ発生可能な実験用クライオスタッフの漏洩磁界測定

愛知医科大学所有の超電導マグネット（クライオスタッフ）は、中心部で10テスラを発生する実験用としては高磁界を発生する装置で、外形は約80cmの直径で、高さが120cmの形状をしている。装置から1m程度の場所では研究員が研究している。当然ながら磁気遮蔽は行っているが、周辺に漏れ出る漏洩磁界はかなり大きいと思われる。事実一次元の磁束計で測定した値は、装置の外側10cmの場所で100ガウスとされていた。しかし、一次元の磁束計では必ずしも精度の点で充分とは言い切れない。

そこで、本三次元積分磁束計で装置周辺の漏れ磁界を単発モード（必要な時だけ測定し、次の測定までその値が保持される）により測定した。図14に装置の中心を原点として、高さ約1.2mで、放射状に26点を測定した磁束密度分布を示している（ただし、カッコ内の数字はBell社製一次元の磁束計で測定した値）。装置の真下が最も高い値を示し、1.450ガウスにも達していて、磁束計がクライオスタッフに引っ張られる吸引力を強く感じた。装置の外側10cmの場所（装置の中心から約50cm）では、方向によりかなり磁束密度が変化し、222から341ガウスになっている。これらの値は従来の一次元の測定器で測定した値に比較すると、約3倍にも達している。装置の中心から1mの場所でも約50ガウスもあり、この領域内で長く作業をしている研究者や測定器等に影響が出る可能性がある。この漏れ磁界の強度は2mの地点で5ガウス、3mの地点で2ガウス、4mの地点ではガウスまで急速に減衰している。

これら26地点の漏洩磁界測定は、瞬時測定が可能な三次元磁束計により短時間で終了させる事が出来た。しかし、本三次元積分磁束計で測定した値に対し、同じ場所で測定したBell社製の1次元磁束計で測定した値（カッコ内の値）は、クライオスタッフから遠く離れた場所においては余り差がないものの、装置の近傍では1/3と大幅に小さな値を示している。この差が何に起因するかはっきりしないが、いくつかの原因が考えられる。それらについては次章の考察で議論する。

c) AC高感度モードによる小型変圧器の漏洩磁束測定

微弱な交流磁界の測定も可能なAC専用高感度モードの最小分解能は、8mガウスでAC・DC兼用通常モードの50倍である。しかし、使用している交流增幅用のアンプがそれ程安定度が良くない事、又、地磁気などの直流磁界には、本来このモードでは検出されないはずであるが、測定中に測定プローブが動いたりすると、磁束がプローブ中で変化する事により、交流分として一部測定てしまい、測定誤差になる等の理由でAC高感度モードであっても、通常のモードの50倍の感度は期待できない。とは言え、AC高感度モードにより、交流磁界の測定範囲は大幅に広がった事は事実である。

そこで、このモードを使って通常モードでは測定誤差範囲内で、測定出来なかった変圧器周辺の微弱な漏洩磁界の強度分布を測定した。測定に使用した変圧器は図15に示す定格入力電圧が200Vで、出力が3.5kVAの単相絶縁変圧器である。この変圧器の二次側に最大入力が2kWの電熱器を接続し、その負荷電力を測定パラメーターにして磁気

プローブの位置と漏洩磁界強度の関係を、周期2秒の連続FTモードで測定した。変圧器のコイル枠の外側の位置をY軸上の距離零とし、その軸上に沿って磁気プローブを移動して、測定した漏洩磁界のデータを表6に示す。この表から解るように、漏洩磁界の強度は負荷電力と共に急速に増大している。負荷電力が2kWの時にはコイル枠端から5cmの地点で、9.2ガウス、そして10cm離れた地点でも727mガウスであった。

しかし、磁界強度の分布の形は負荷が変化しても変わらなかった。これは負荷の消費電力が変圧器の定格電力以内である事によるが、定格をオーバーして負荷を取った場合は、漏洩磁界の分布も大幅に変化すると思われる。次に負荷の消費電力が1.3kWの時コイル枠の端より5cm離れたX軸上で、磁気プローブを移動して測定した磁束密度の分布を表7に示す。この表を見るとコイルとコイルの中間が磁界強度が弱く、コイル枠の中心に近づくにつれて強くなっている。そして、磁界強度がコイルの中心に対し対称でなく、左側の方が20%ほど強くなっている。その理由は不明であるが、従来の磁束計では測定できなかった微弱な漏洩交流磁界も、本三次元積分磁束計のAC高感度モードにより容易に測定する事が出来た。

d) プラズマ実験装置(TPD-1)を使って実験中に研究者が受ける磁界被曝線量の測定

本来この三次元積分磁束計は、磁界の被曝線量計としても使用で出来るように作られているので、次に核融合科学研究所の図16に示すTPD-1装置⁸⁾を対象として、磁気被曝線量の測定を行ってみた。この装置は1964年に建設され現在も活躍している、直流放電型定常プラズマ発生装置で、プラズマが直接ガラス容器を通してきれいに観測出来るという点で魅力のある装置である。しかし、現在の核融合実験装置の主流である磁場コイルをトーラス上に配列した形式ではなく、直線型に配列したリニア型の装置で、プラズマの閉じ込め実験より、主にプラズマ源の開発や分光に関する実験を行っている。このように磁場コイルを直線上に配列している事から、トーラス状に配列している装置に比較して、コイル端付近における漏洩磁界は大きく、近くに設置している装置や実験している作業者、および研究者に対する影響が懸念される。

そこで、TPD装置を動作させた状態で、プラズマの諸特性測定装置の開発研究をしている研究者の磁気被曝がどの程度になるか、4秒周期のFTモードで測定してみた。この実験での条件は、コイルの中心軸上における最大磁束密度が約2kガウス(5kガウスまで発生可能)、そしてヘリウムの70A(200Aまで放電可能)の直流放電であった。この磁気被曝量の測定を行った時間は計60分で、その間に測定した回数は900回であり、その間の測定データは全て磁束計内のRAMにメモリされた。そして、測定終了後にプリンターを接続してデータを印刷し、時間と共に磁界強度、および被曝線量がどのように変化したか調べてみた。その結果は測定時間を横軸に、そして被曝線量の変化(実線)と100ガウス以上の磁束密度になった場合(黒丸)を縦軸に図17に示されている。

60分間の測定中被測定者である研究者は、大部分の時間をTPD装置から約2.5m離れていて、弱い磁界中(<3ガウス)のコンピューターの前でキー操作を行っていたが、

時々 T P D に取り付けてあるプローブ駆動装置を操作するため、強い磁界が発生している場所 (~ 500 ガウス) に立ち入った。その結果、60分間の実験中に於ける磁界被曝量は約 65, 000 G S となった。この値より単純に秒当たりの平均被曝磁束密度を計算すると、18ガウスと問題になるほど大きな値ではなかった。とは言え、図から解るように 100ガウス以上の強い磁界中に立ちに入る機会は、この測定中 20 回程度あった。今回の測定は 1 時間だけであったが、実際の実験は数時間におよび、その場合の被曝線量は今回の値の数倍にもなる。又、今回は比較的弱い磁場を使った実験であり、今回得られたデータだから被曝磁束密度や被曝線量が少ないと安心する事は早計であろう。

このように測定した最大磁界強度、および被曝線量が装置の近くで作業あるいは研究している人達にどのような影響を与えるか、現在の段階では不明であるが、今後より注目していくなければならない問題である。

8 章 考察

a) クライオスタッフ周辺で生じた一次元と三次元磁束計の測定値の開き

7章の b) でクライオスタッフ近傍での磁界測定で、一次元と三次元磁束計の測定値に、大きな開き（最大約 3 倍）が生じたが、ここではその点について考察する。クライオスタッフの表面近傍は磁力線の方向と磁束密度が大幅に変化している。その為に方式の異なる 2 種類の磁束計を使って測定した今回の場合、次の理由によって測定値に大きな差が出たものと考えられる。

- ①一次元の磁束計を使って正しく磁束密度を測定するには、2章で述べたようにホール素子面を絶えず磁力線に直交するよう調整しなければならないが、磁力線の方向が大きく変化する場所では、その調整が非常に難しい。
- ②クライオスタッフ近傍では磁界の変化が大きい為、場所の僅かなずれによっても、測定値に大きな影響ができる。そのため、一次元と三次元磁束計の測定場所を正しく合わせないと、測定値に大きな差が出る可能性がある。
- ③三次元プローブに内蔵されている 3 個のホール素子の取り付け間隔が、約 5 mm 程度あるので磁力線の変化の激しい場所では、その取り付け間隔が測定誤差となって現れる。このような 2 種類の磁束計で測定値を比較した場合の開きを小さくする為には、以下のような努力をする必要がある。
 - ・一次元の磁束計で測定する時には、なるべくピーク・ホールドモードで測定し、測定値が最高になるような磁気プローブの角度を丹念に探し、そこで得られた値を測定値とする。しかし、このようにする事は場所が限定されている場合難しい事が多い。
 - ・一次元と三次元磁束計の測定比較は同時に、かつ場所を正確に合わせて行う、
 - ・三次元磁気プローブ内の 3 個のホール素子の固定間隔をもっと狭くし、測定誤差が生じないようにする。

b) 一次元磁束計を使用する場合の測定誤差

ここでは a) の場合と異なって、同一機種の一次元磁束計を 3 台 (No. 1~No. 3) 使って同一の磁界中で測定した場合に、どの程度測定値に差が生ずるか調べてみた。この測定で使用した一次元の磁束計は、今回の測定で比較の為にしばしば使っている Bell 社製 4048 型で、磁束密度の校正は各磁束計に与えられている校正定数を、キーインする事により行えるようになっている。これらの磁束計を、磁束密度がほぼ 1000 ガウスになるように調整されている電磁石のポールピースの中心に精度良く固定し、各々 4 回づつ測定し、その平均を取って測定値を比較してみた。その結果一番低い値を示したのが No. 2 の 999.5 ガウス、反対に最も高い値を示したのが No. 3 の磁束計で 1016.0 ガウスであった。なお、No. 1 の磁束計の場合の測定値は 1009.5 ガウスであった。この結果より No. 2 と No. 3 の磁束計の測定値の差は約 1.7 % であり、それほどの差は生じなかった。しかし、今回は磁界が一様な直流電磁石のポールピース間での測定で、かつ慎重に磁気プローブ面を磁力線に直交するように固定したためで、もし磁界が一様でなく、磁気プローブの設定が不正確な状況であったなら、同一機種の磁束計を使用しても、各測定値間には数 % 以上の差が生ずるものと思われる（なお、ホール素子面に入射する磁力線が 10° 傾くと測定値は 2% 下がり、20° 傾くと 6% 減少する）。又、今回の同一機種での測定と異なって、もし他社製の磁束計間で同じような比較試験を行った場合は、この測定値の差は更に大きくなる事も予想される。これらの理由により一次元の磁束計を使用する場合は、特別な配慮をしない限り、数 % 以上の測定誤差が存在する事を認識しておく必要があろう。

9 章 三次元積分磁束計に関するまとめ

本三次元積分磁束計（2 号機）は、1 年前に開発された 1 号機の改良型で、3 体に分離され、測定範囲が狭く、かつ電池の寿命が短かかった 1 号機に比較して大幅に操作性、能力が強化され使いやすくなった。特に電気消費量の非常に少なく、集積度の高い IC 類の大幅な採用は装置を小型化するのに非常に役立ち、磁束計の一体化を可能にした。このため測定が極めて簡単にできるようになった。又、デジタル回路ばかりでなく、アナログ回路にも低消費電力消費の電源 IC を入れた事により、長期間安定して測定が行えるようになった。そのほか消費電力が極めて少なく、かつ高精度の 12 ビット A/D コンバータの採用によって測定範囲が大幅に増加し、測定精度が向上した。

本三次元磁束計を使って、磁束計自身の特性測定や、各種磁場発生装置の磁界測定を行った。その結果、測定器として充分安定して動作する事を確認したほか、一次元式の磁束計に比較して、正確に測定でき、かつ大幅に測定時間を短縮する事が可能であった。また、AC 専用高感度モードを使えば、変圧器などの微弱な漏洩交流磁界も測定も容易に行う事が出来たし、TPD 装置を使って研究する研究者の被曝線量も測定する事が出来て、環境磁界を研究する為の手段である三次元磁束計の開発という本来の目的は、ほぼ達成されたと考えられる。しかし、一方において高磁界発生用のクライオスターの漏洩磁界分布

の測定においては、装置の近傍において、一次元方式と三次元方式の磁束計の測定値の間に大きな差が生じ、その理由が現在の所それほど明白ではなく、今後の課題となつた他、幾つか今後解決していかなければならない点もあった。一つは一体構造になつたとは言え、まだ全重量が1 kgとかなり重いし、サイズも大きいので長時間測定していると、手が疲れる。又、配線のハンド付けが充分でない所もあるので、時々接触不良を起こし、測定が不可能になる場合があるのでプリント配線にして、信頼性を向上させる必要がある。更に磁気センサー等使用部品の一部に磁性体が使われているが、これが原因で強い磁界中の使用においては吸引力が働き、危険な状態になる可能性もあるので、今後は非磁性の部品に置き換える努力をする必要がある（ただし、メーカー品の携帯型一次元磁束計でも、一部に磁性品が使われているため、強磁界中ではやはり吸引力が働く）。

10章 三次元磁束計によるLHD磁気モニターシステム

a) 目的

序論で述べているように、LHDの2種類の超伝導コイルが発生する磁束密度は中心付近で最高4テスラと強く、当然の結果として周辺に漏れ出る漏洩磁界も大きい。この強い磁界の中で動作する種々の測定器、あるいは機械などの中には弱い磁界中でも動作不良を起こしたり、性能が低下するものも少なくない。又、LHDの超伝導コイルは一度励磁すると、数時間以上止められないので、放電実験が行われていない時でも、緊急作業のために作業員あるいは研究員が実験室内に入室し、簡単な作業をしなければならない場合がある。このように精密機械や作業員あるいは研究員の安全を保証するのに、磁束計はぜひ備えなければならない測定装置であるが、前から述べているように一次元の磁束計ではほとんど役に立たず、三次元の磁束計が必要となる。しかし、現在このような用途に適した三次元磁束計の既製品はない。もちろん既製品を改良すれば、使用可能となるであろうが、それは装置管理用の据え置き型に限定され、個人被曝測定用の磁気モニターに関しては、現在あるメーカーが開発している段階であるが、今のところ実用的な性能に達していない。

b) 磁界管理システムとしての三次元磁束計

装置の維持管理の為に三次元磁束計を使用する場合、その磁束計には二つの役割が与えられる。①一つは場所ごとにプログラムされた正しい磁界が発生しているかモニターする役割、②他の一つはコイルの異常動作等により強い磁界が発生した場合、精密機械が故障しないように、即座にコイル電流を下げるか、精密機械を停止させる為のインターロック信号を発生する役割である。

前者の目的の為には、コイルの周辺に10ヶ所程度場所を決めて、三次元磁気プローブを設置し、その信号を制御室のコンピューターにより常時監視し、磁界方向および強度に異常が生じた場合はCRTに異常表示し、警告するようにすれば良い。この目的の為の本体装置としては、市販の据え置き型の磁束計を多少改良し、コンピューターに接続するようすれば良く、設置に大きな問題はない。ただし、磁気プローブ部は後で述べる中性子、

および雑音対策も含めて市販のものの流用は難しく、開発作業が必要であろう。

次に精密機械保護用のインターロック信号源としての役割の場合について考える。強い磁界により影響を受けやすい精密装置としては、LHD装置においてはターボポンプで代表される可動部を有する機械、LSI等半導体を多用している測定器などの装置、そして磁性体を有するリレーを多用している制御盤等がある。

磁界中でターボポンプ等のように高速回転する金属があると、その金属中に渦電流が生じ、金属を加熱させると同時に電磁力で回転を抑制する力が働き、ひどい場合は装置が破壊される。通常のターボポンプの場合、動作限界は数十ガウスであると言われている。LHDの排気の為に設置されるターボポンプは、排気効率の低下を防ぐため、本体の中心から十数m以内の場所に設置するように考えられている。1章で述べたようにヘリカルとポロイダル両コイルが正常に動作する磁場最小運転モードでは問題ないが、コイルの異常動作時やヘリカルコイル単独運転時には、この地点では百ガウス以上に達し、ターボポンプを始めとして精密機械に異常が生ずる可能性は大きい。

このような精密機械の異常状態を未然に防ぐために、各装置に磁気プローブを取り付け、磁界強度があるレベルをオーバーすると警報出力が発生し、精密機械の運転を急遽停止させるか、コイル電源を下げる指令を出すようにするシステムが必要である。しかし、超電導コイルやターボポンプ等は警報出力が発生しても急速に止められない為、警報レベルは安全限界レベルより、かなり低めに設定したり、 $d B / d t$ の出力で警報を発生させるようにする必要がある。精密機械保護用の磁気モニターは、磁界分布観測用の磁場モニターと異なって集中管理する方式より、各精密機械周辺に直接磁気モニターと本体を取り付け、直接精密機械の電源を制御する方が安全である。これは長いケーブルを使って、中央のコンピューターで磁気モニターをコントロールする場合、電気的な雑音を拾い易く、信頼性の面で問題があるからである。このような局部的な部分の制御に使用する三次元磁気モニターとして、今回開発した本三次元積分磁束計を多少改造する事により、使用する事も可能であろう。図18にLHDの周辺に三次元磁気プローブを配置した磁界分布管理用と、精密機械保護用の磁気モニターシステムの概略図を示す。磁界分布管理用の磁気モニターシステムの場合は、LHDの周辺に配置した磁気プローブの出力は、その場で雑音にマスクされないよう電圧増幅された後、ケーブルで中央のマルチプレクサに導入され、中央のコンピューターで計算処理される。その後にその結果は磁界分布の表示やコイル電源のコントロールに使われる。それに対し、ターボポンプ保護用の磁気モニターシステムの場合、ポンプの周辺に磁気プローブを2~3個配置し、すぐ近くで小型のコンピューターで計算処理し、必要に応じターボの電源をコントロールする他、警報出力を中央のコンピューター送り、CRTへの警告表示や、コイル電源のコントロールに使用する。

なお、このような保護用の磁気モニターを使用しないで、強磁界中で精密機械に異常が生じないようにする方策もある。

①ターボポンプに関しては、回転によって渦電流の発生を避けるためのローターがセラミッ

ク方式の物を使用する。しかし、現在セラミックターボポンプは試作段階で、信頼性や価格の面などに問題があり、簡単に使用できない。

- ②精密機械に使われる I C 等半導体はホール効果により、強磁界中で誤動作する可能性があるが、ホール効果の小さい種類の物を使用したり、コイルの異常動作に際しても影響がないように磁気シールドを施す。
- ③制御盤に使用するリレーとして従来の磁性体を使う方式でなく、半導体を使う方式のリレーに変更する。

c) 個人の磁気モニターモニターとしての三次元磁束計

1章で述べたように LHD は二つの超電導コイルを持っているが、それらは立ち上げや、立下げに時間が非常にかかるため、常伝導コイルの場合と異なって、一度あさ電流を流しコイルを立上げると、夕方の実験が完全に終了するまで約 10 時間程電流を下げる。そのため、放電実験が行われていない場合でも、コイルは通電されている状態が続く場合がある。このような時、緊急に実験室に入室し、簡単な作業をやらなければいけない事態が生ずる可能性はある。この場合、磁界分布監視用の磁気モニターは動作しているものの、それほど空間的に細かく監視していない為、入室者は携帯用磁気モニターを持参して、作業場所の磁界強度測定や磁気被曝線量の測定を行い、安全確保に留意しなければならない。そのような目的の為には最終的には下記の条件を満たす必要がある。

- ①三次元方式の被曝磁界と線量を測定出来る磁束計で、小型で軽い事、
- ②測定可能な磁束密度は 1 G ~ 1 T 程度ある事（しかし、実際的には 3 ~ 3000 G 程度あれば充分）
- ③磁性体を一切使用しない構造である事、
- ④連続使用可能時間は数時間以上で、充電可能な電池を使用する、
- ⑤磁束密度および被曝線量の警報レベル設定でき、オーバーした場合はブザー等で作業者に警告する事が可能な構造、
- ⑥測定データの記録が出来、後でそのデータを中央のコンピューターに入力でき、個人の磁気被曝の管理が可能な形式である事、

上記のような条件を完全に備えた個人用磁気モニターは、残念ながら現在まだ開発されていない。しかし、今回我々が開発した三次元積分磁束計は①と③の条件を除けば満足しているし、ある一流精密メーカーが現在開発中の三次元積分磁束計は、極めて小型で軽く (10.3 × 6.5 × 1.2 cm, 60g) 、個人用磁気モニターとしては⑤と⑥を満足していないものの、サイズ的には最適である。現在上記の条件を満足するよう、両者とも努力中なので、近い内に条件を完全に満足する個人磁気モニターが開発されるものと思われる。

d) 中性子照射および電気雑音からの保護対策

放電実験中には個人用磁気モニターは使用しない事から、中性子や電気的雑音からの保護に関しては、磁界分布測定用と精密機械の保護用の磁気モニターシステムについてのみ考慮すれば良い。これらの磁気モニターに障害を与える恐れのある主な要素としては、

次のものが考えられる。①LHDで行う初期の実験段階では水素放電を行う事になっているが、その場合a) 放電ガス入射用プラズマパフ動作時に発生する雑音、b) NBI(中性粒子入射装置)、RF、やECRなどプラズマ加熱手段の入射時、および入射中に発生する雑音、c) それらによって生ずる絶縁破壊による雑音、そしてd) 放電中に発生するX線等である。

これらの雑音によつて影響を防ぐためには、磁気プローブと精密機械保護用の磁気モニターの場合は、小型コンピューター部も厚さ20mm程度の鉛と薄い銅板で作られたシールド箱に格納する。そして、それらの磁気信号、および警報信号は銅パイプ中に配線したソリッドケーブルでマルチプレクサ、あるいはコンピューター部に送るようにする。ただし、 dB/dt を検出する必要がある場合は、磁気センサーのシールドに溝を設ける必要がある。このようにして水素放電実験の場合は、ほぼ問題なく雑音の影響は除去できる。しかし、最終的には重水素放電を行う事が検討されているが、その場合中性子が発生し、それによる磁気センサーへの影響が懸念される。

LHDの場合1放電当たりの重水素放電により $2 \cdot 4 \times 10^{17}$ 個の中性子が発生する³⁾と推定されている。これが一様に空間に発散すると仮定すると、ターボポンプが設置されている場所(装置の中心から15mとして)での面積当たりの中性子照射量は、 $2 \cdot 8 \times 10^7$ 個/cm²となる(ただし、ターボポンプより装置の中心に近い場所に配置されている、磁界分布測定用の磁気センサーの領域では、この値より1桁以上大きな値になっている)。ここで、磁気センサーの断面積は1個当たり約0.1cm²なので、磁気センサーに照射される量は $2 \cdot 8 \times 10^6$ 個となる。この中性子の照射量が磁気センサーに与える影響がどの程度になるか判明しないが、ここで、中性子量を更に1桁減衰させる中性子遮蔽を考える。

D-D反応によって発生する中性子のエネルギーは高速中性子に属する $2 \cdot 45\text{MeV}$ であり、この高速中性子を減衰させる為には、先ず鉛など重い元素との非弾性衝突により中性子のエネルギーを、 $0 \cdot 5\text{MeV}$ 程度のエネルギーに変換する。その後、この中性子を更に軽い元素からなるパラフィン等により弾性散乱させ、遅い中性子に変える。このように減速された中性子は大抵の元素に吸収される。ここで、 $0 \cdot 5\text{MeV}$ 程度の中性子を1桁減衰させるに必要なパラフィンの厚さは資料^{1,2)}によれば約20cmである。

これらの事から磁気センサーの遮蔽箱としては、図19に示すように、先ず厚さ約20cmのパラフィンでケースを構成し、その外側を中性子を減速させる為、厚さが1cm程度の鉛板でカバーする。そして、パラフィンの内側にも、遅い中性子の吸収や非弾性散乱により発生するγ線、そして放電によって発生するX線の遮蔽を兼ねて、やはり1cm程度の鉛板で内張りする。このような遮蔽構造によって、磁気センサーに入射される中性子のフラックスは、磁気センサーに障害を与えない程度に減衰すると考えられる。なお、磁気センサーからの信号及び警報信号用のケーブルの遮蔽に関しては、水素放電の場合と同じ構造で問題ないだろう。

なお、この10章で述べた事は、LHD本体設計グループが装置管理用として考へてゐる磁気センサーシステムとは関係がなく、全く個人的な考へに基づいたシステムである事を、お断わりしておきます。

[付記] 環境磁界が生体に与える影響について

最近になって磁界が生体に与える影響に関する関心が高まり、各地で研究会が開かれ、研究や実験も活発に行われるようになってきている。しかし、電離放射線の被曝の場合と異なって、磁気被曝によってどのような影響が生体に現れるかについて、明白な実験結果や結論が出ていないのが実状であろう。それは電離放射線と異なって、磁力線と生体組織とのカップリングが血流や一部の組織を除くと少ない事に起因すると考えられる。

しかし、磁気被曝が生体に与える影響は無いわけではなく、弱い磁界や短い期間の実験、あるいは不適切な観察や測定方法により、その影響が他の要因によって遮蔽され、検出できないとも考えられる。もちろん強力な静磁界や交流磁界を使っての動物や人体実験などでは、磁気被曝により生体に明らかな影響が現れたとする報告は幾つかある。しかし、交流磁界の被曝に関しては磁気被曝そのものによるのではなく、変動磁界によって生ずる生体内の誘起電流に起因する影響と考えられるし、静磁界の実験では数T以上の我々が通常被曝しない強力な磁界であり、環境磁界中の生体への影響とは言い難い。

環境磁界の強度の定義ははっきりしていないのが現状であるが、常識的には静磁界に関しては数百ガウス以下（医療用のMRIは除く）、そして交流磁界に関しては数十ガウス以下と見られる。このような環境磁界での被曝が生体に与える影響について、研究実験するのが実状にあった姿勢であろう。しかし、前述のように強力でない環境磁界中の生体へ与える影響を明確にさせるのは極めて困難であるが、測定固体数を増加させ統計的誤差を小さくする、他の要因を排除するため測定環境を一定にする、測定期間を長くする、そして正確な測定が可能な測定方法の確立などの努力により不可能では無いと思う。

このように磁気被曝量の生体へ与える影響がはっきりしていないため、公式な形の磁界に関する安全基準は現在ない。しかし、近年、WHO、IRPA、UNEPの国際機関を中心に磁界に対する安全性の検討とガイドラインの提言が行われている^{14, 15)}。各國においてもそれぞれの安全基準を設定の動きが出てきている。例えば、非公式な形ではあるが、アメリカの場合には短時間と長時間に分け、頭部及び全身に関しては各々200mTと20mTに、腕及び手については200mTと2Tと定めている（ただし、静磁場に関して）。しかし、これらの値に明白な根拠があるわけではなく、あくまで目安と考えるべきであるが、人工材料を体内外に使用している場合は、上記基準よりかなり低いレベルに押さえなければならない場合がある。ペースメーカーが1.7mTで動作異常を生じた例もある事から、特に厳しく0.5mT以下に押さえている事が多い。根拠ある安全基準の設定の為にも、確実な実験データとそれを支える測定方法の確立が、今後益々重要になると考へられる。

なお、最近「磁場の生体への影響」と言う本¹³⁾が出版され、一般に余り知られていない

かったこの分野に関する内容が系統的に紹介されていて、磁場の生体への影響を研究している研究者にとってはもちろんのこと、一般の人達にとっても参考になり、この分野の今後の研究の進展に大変役立つと思われる。

謝辞

この開発・研究は予想以上に困難が多く、大変な時間、資料そして情報が必要でした。そのために、この開発を遂行するに当たっては、大勢の方々のご協力やご支援を仰ぐ事になりました。難しいそれらの要請を快く引き受けて下さり、ご協力していただいた方々に深くお礼申し上げます。

特に、核融合科学研究所技術室の幅駿一郎氏と秀熊茂氏には、ICを使った複雑な回路構成について有益なコメントをいただき、又、TPD装置を使っての磁気被曝線量の測定の場合には、実験で忙しいにもかかわらず、この測定を快く許可していただいた石井和重氏には心よりお礼申し上げます。

参考論文

- 1) 大型ヘリカル設計グループ：「大型ヘリカル装置の基本設計」，平成1年3月
- 2) Iiyoshi, Fujiwara et.al: 「Design study of the Large Helical Device」，ORG issuing report, 1 REC(1990)34.
- 3) 大型ヘリカル実験棟作業委員会：「実験棟作業委員会 活動報告書」，平成3年2月
- 4) T. Y. Fujita and T. S. Tenford: Rev. Sci. Instrum. 53, 7(1982)326.
- 5) C. C. Lo, T. Y. Fujita, A. B. Geyer and T. S. Tenford: IEEE, NS-33, 1(1986)643.
- 6) 三洋電機：「固体電解質を応用した電位記憶素子の実用化」，Denki Kagaku, 44(1976)824.
- 7) 林則行等：「三次元磁界ドシメーター」，電気学会放電研究会資料、ED-91-(1991).
- 8) M. Otsuka: Internal Report, Ann. Rev. IPPJ, April 1986 ~ March 1987.
- 9) Quark: 「電磁場が体にフルさする」，12号(1990)P. 25.
- 10) 東芝のホール素子に関する資料
- 11) SEMITECの定電流ダイオードに関する資料
- 12) 江藤秀雄他：「放射線の防護」中性子線のしゃへい (260P)、丸善出版
- 13) 志賀健、宮本博司、上野照剛：「磁場の生体への影響」てらpei a出版
- 14) WHO : Magnetic Fields, EHC-69, (1987).
- 15) WHO : Magnetic Fields Health and safety Guide, HSG-No. 27(1989).

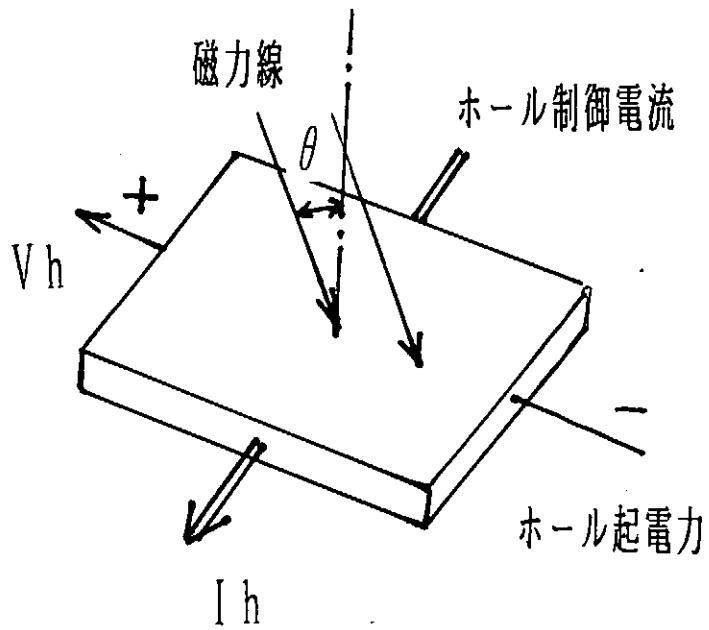


図1 磁感素子としてのホール素子の原理図

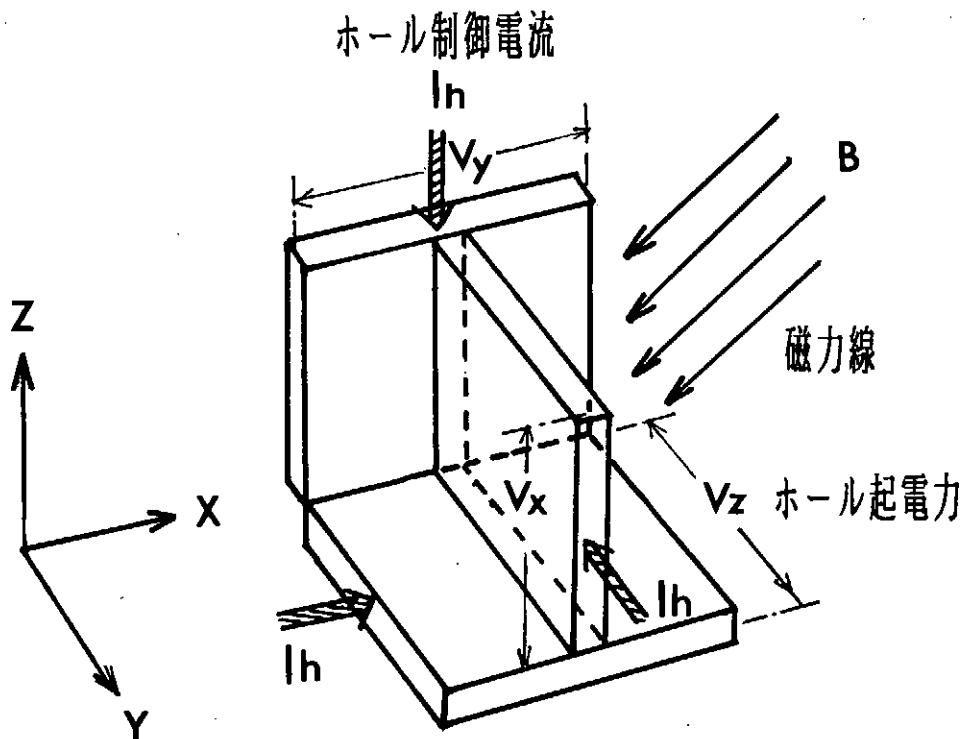


図2 3個のホール素子を使用した3次元磁気プローブの原理

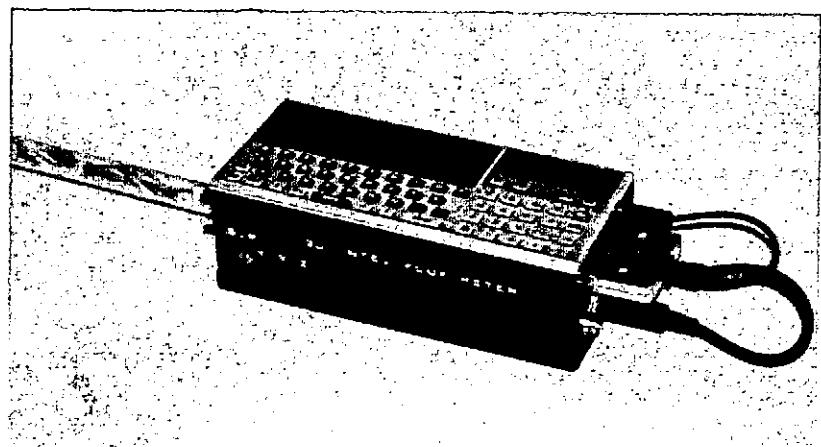


図3 三次元積分磁束計の外観

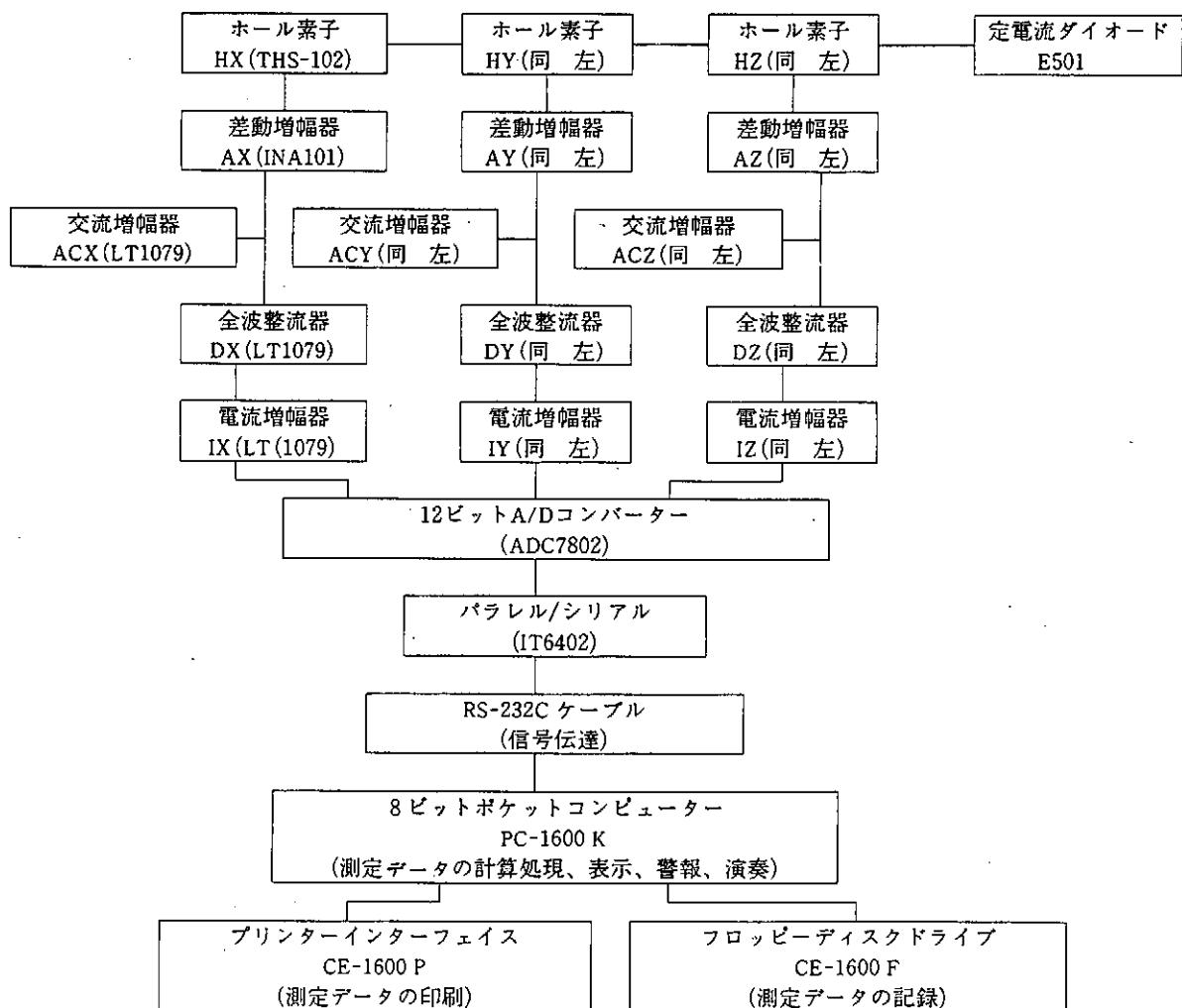


図4 三次元積分磁束計のブロック図

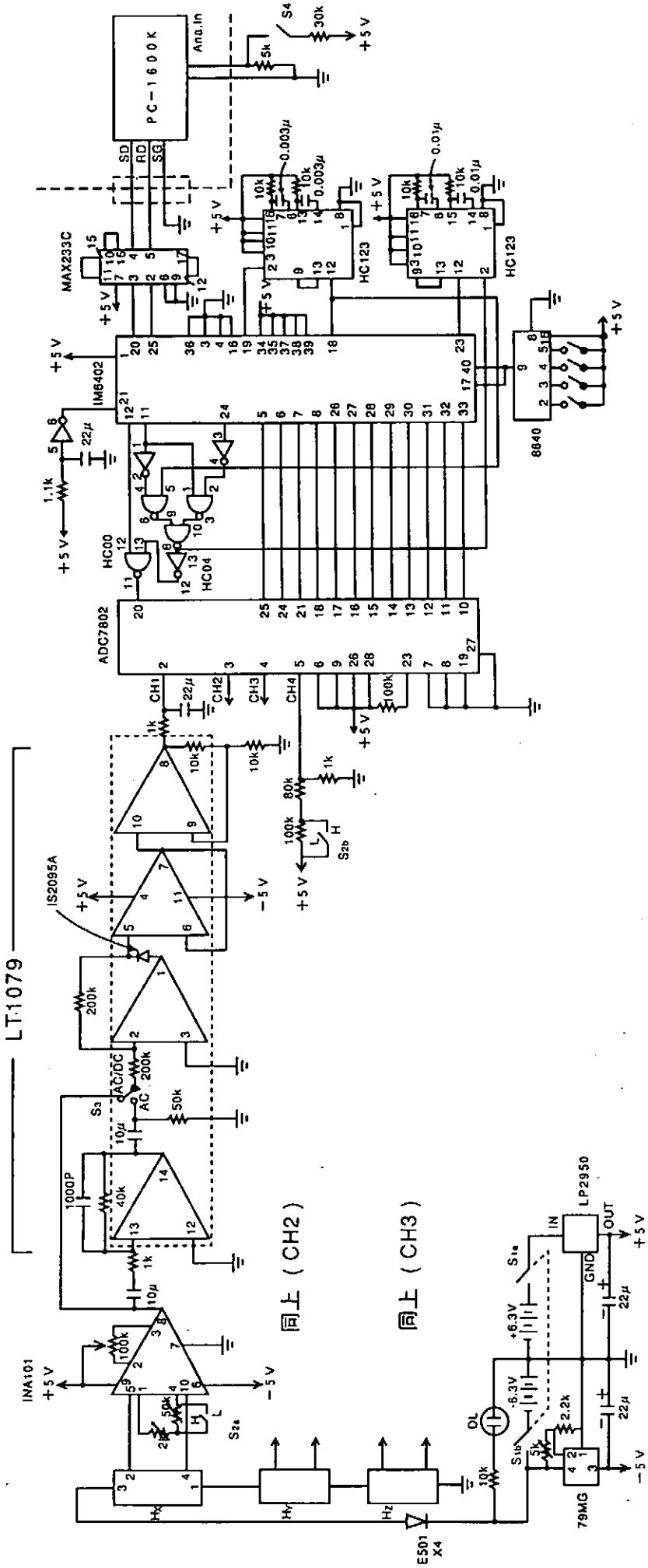


図5 三次元積分磁束計の回路図

表1 ホール素子THS102Aの特性表

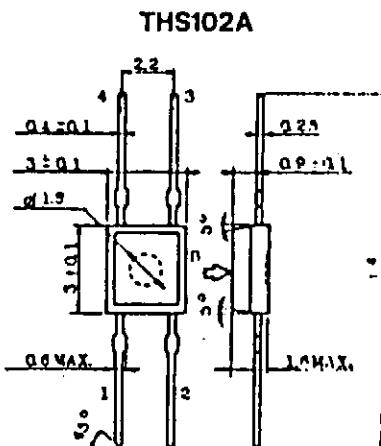
A) 最大定格

項目	記号	定格
制御電流(直流)	I _c	10 mA
制御電流(1秒)	I _c	15 mA
許容損失	P _D	150 mW
動作温度	T _{OP}	-55~125°C
保存温度	T _{STG}	-55~150°C

B) 電気的特性 (T_a = 25°C)

項目	記号	測定条件	最小	最大	単位
内部抵抗	R _D	I _c = 1 mA	450	900	Ω
不平衡率	V _{HO} / V _H	I _c = 1 mA, B = 0 / B = 1 kG		±10	%
ホール電圧	V _H	I _c = 1 mA, B = 1 kG	10	30	mV
ホール電圧	V _{HT}	I _c = 1 mA, B = 5 kG		-0.006	%
温度係数		T ₁ = 25°C, T ₂ = 125°C			
積感度直線性	ΔK _H	I _c = 1 mA, B ₁ = 1 kG B ₂ = 5 kG		2	%

(単位: mm)



1(+)-3(-) I_c (入り)
2(+)-4(+)-V_H (出力)

図6 三次元積分磁束計の磁気センサーとして使用したホール素子の形状

最大定格

最高使用電圧	定格電力	熱抵抗	逆方向許容電流	動作温度範囲
100V	300mV	300°C/W	50mA	-30~+150°C

動特性

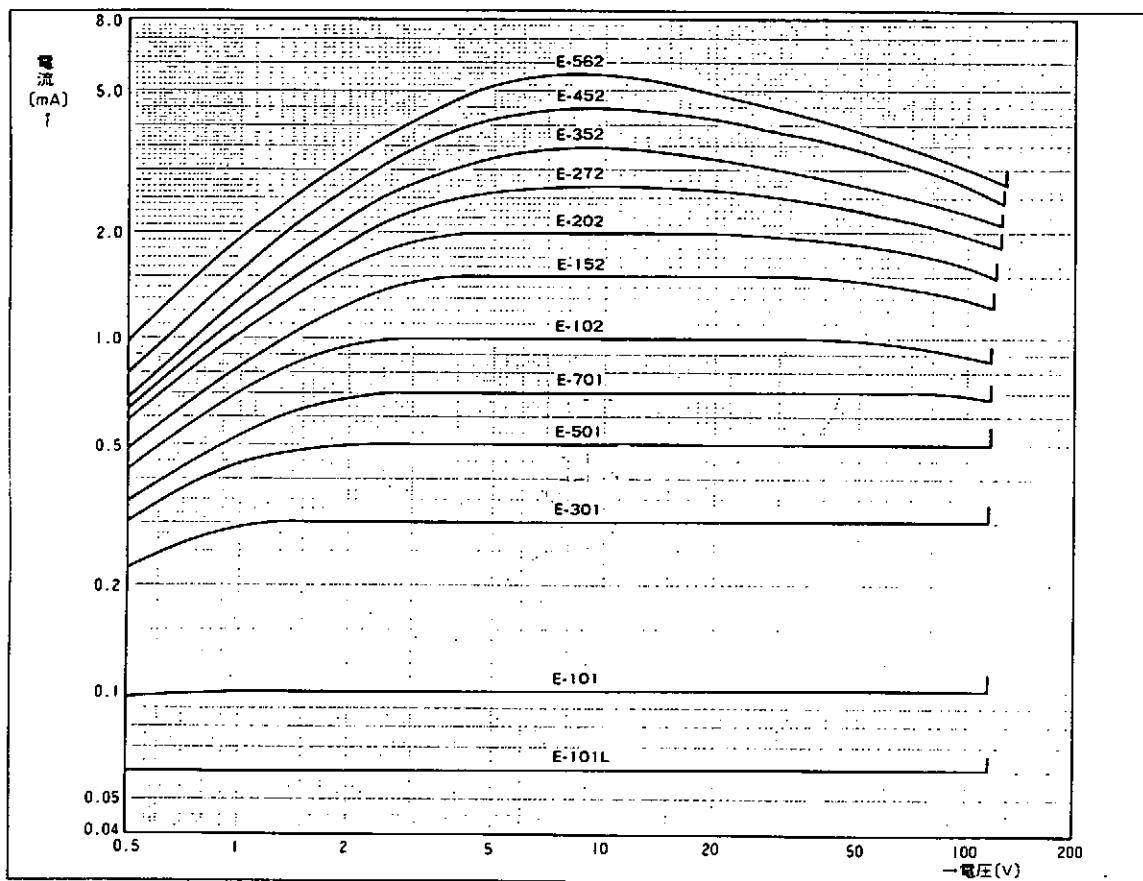


図7 各種電流容量の定電流ダイオードの特性図

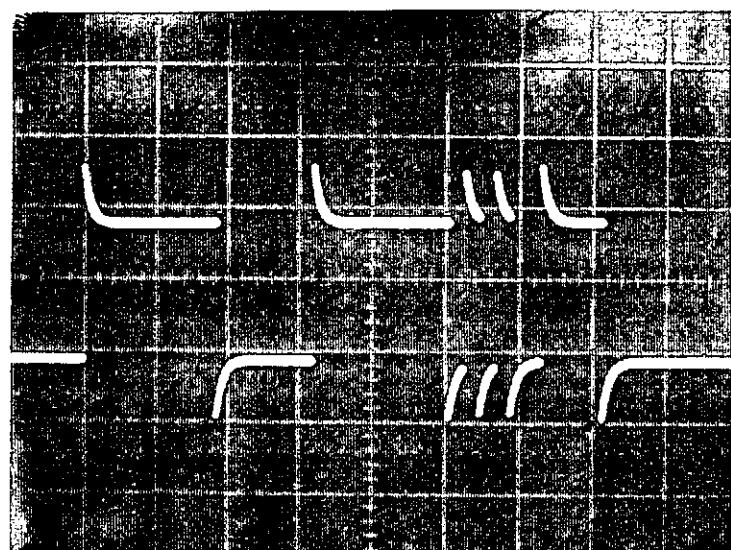


図8 RS-232C ケーブルを通してコンピューターからプリアンプ部に
送られる信号電圧波形 V : 5 V / d i v. H : 2 m s / d i v

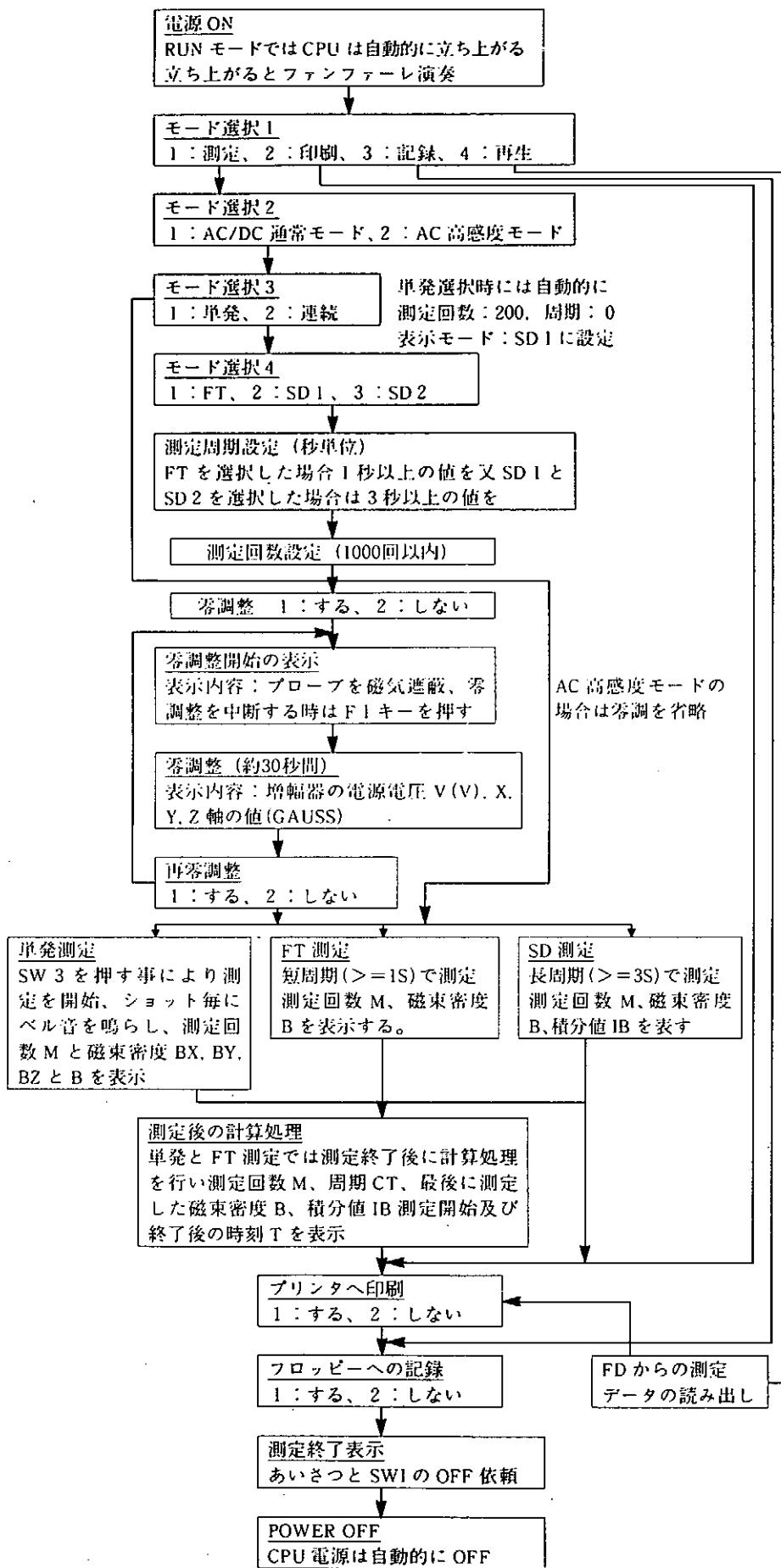


図 9 三次元積分磁束計の操作フロー チャート図

表2 三次元積分磁束計の特性測定

a) 長時間動作させた場合の測定値の安定性

リクテイカイスク M	ジカン T	ジツキミッド B(G)	ミッドノ セキブン IB(GS)
1	13:16:41	994	0
2	13:18:40	995	119,491
3	13:20:40	996	239,053
4	13:22:40	993	358,328
5	13:24:40	995	477,753
6	13:26:40	994	597,077
7	13:28:40	993	716,356
8	13:30:40	994	835,674
9	13:32:40	995	955,092
10	13:34:40	993	1,074,368
11	13:36:40	993	1,193,597
12	13:38:40	996	1,313,156
13	13:40:40	993	1,432,429
14	13:42:40	996	1,551,991
15	13:44:40	993	1,671,169
16	13:46:40	995	1,790,582
17	13:48:40	992	1,909,714
18	13:50:40	995	2,029,181
19	13:52:40	993	2,148,456
20	13:54:40	994	2,267,778

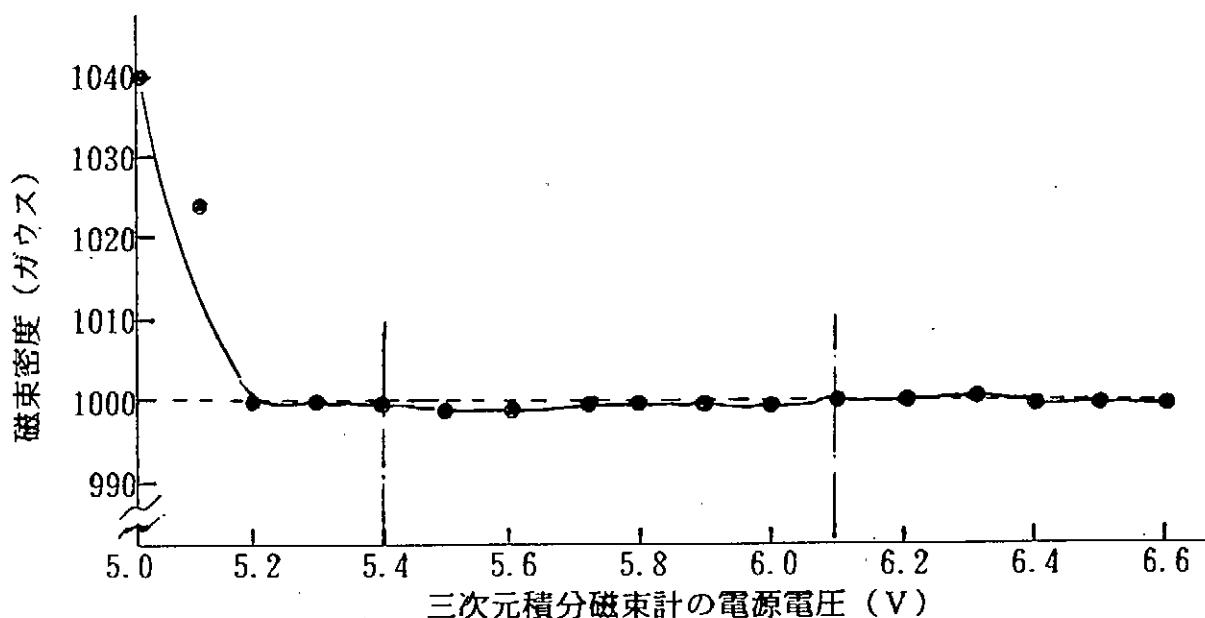


図10 三次元積分磁束計の特性測定

b) 電源電圧が測定値に与える影響

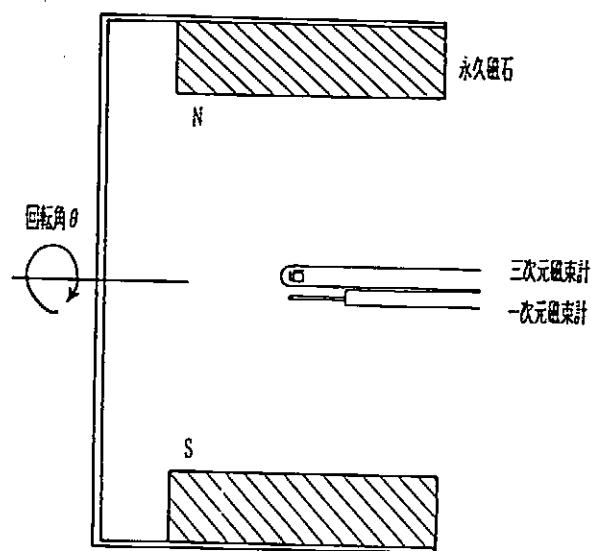


図1 1 永久磁石の中心にセットした一次元と三次元磁気センサー

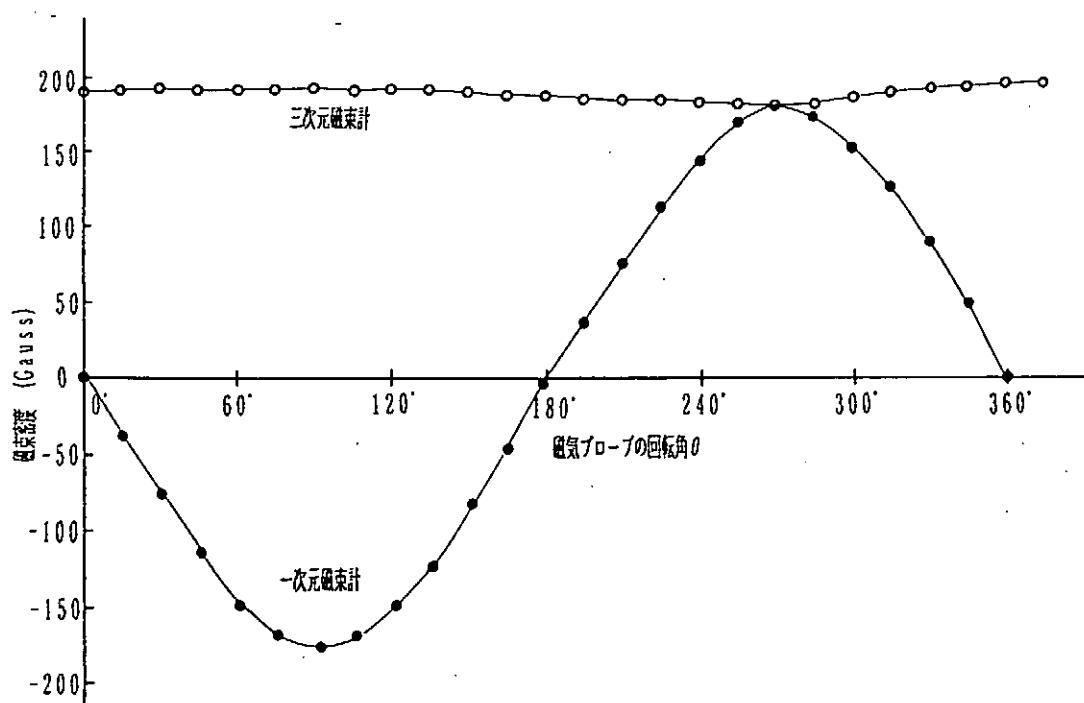


図1 2 永久磁石を 360° 回転させた場合の一次元と三次元磁束計の測定値

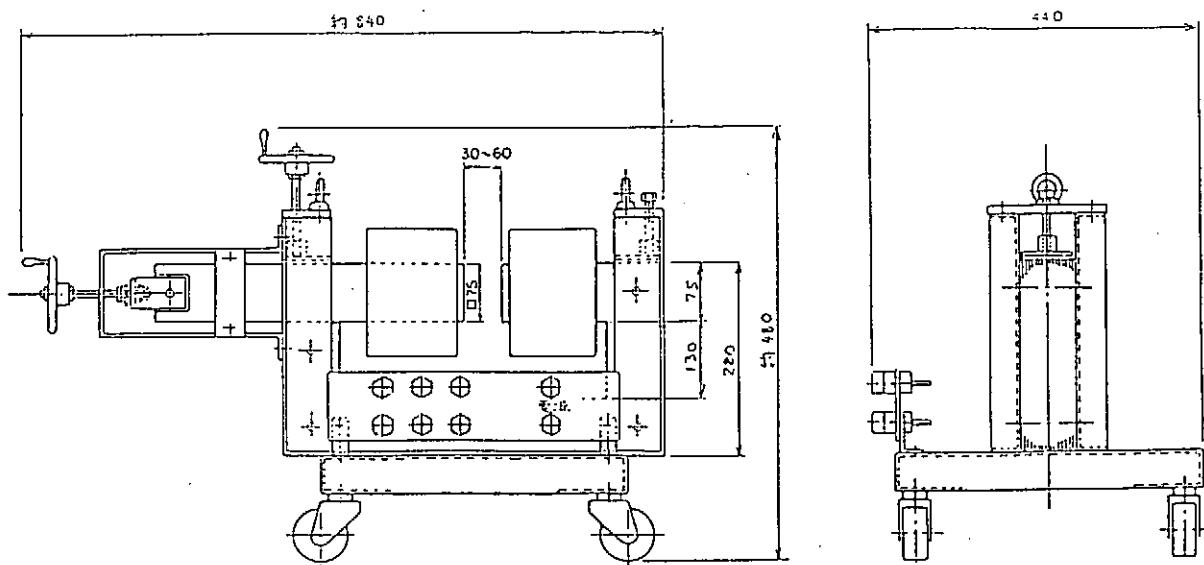


図13 交流電磁石の形状（名工大中村研所有）

表3 交流電磁石ポールピース間の印加電圧に対する発生磁束密度測定

交流電圧 (V)	コイル電流 (A)	測定磁束密度 B (ガウス)		
		F. W. BELL社製	本磁束計(1)	本磁束計(2)
0	0	8.6	8.1 (8, 1, 0)	8.4
25	<5	162.0	167.5 (164, 24, 18)	156.8
50	6	289.0	308.9 (302, 51, 37)	296.3
75	9	450.0	453.2 (431, 120, 71)	454.3
100	12.2	613.2	613.2 (577, 177, 103)	588.8
125	15.2	770.0	782.3	776.6
150	18.3	914.0	963.1 (917, 260, 137)	905.0
175	21.7	1066.0	1007.2	1088.9
200	25.0	1238.0	1175.0	1238.2

表4 電磁石の漏れ磁界分布
(PP: 電磁石のポールピース)

PP端よりの距離 (cm)	印加電圧 (V)	磁束密度分布 (G)
5	75	67.5
10	75	17.9
15	75	5.7
20	75	1.8
5	125	101.6
10	125	30.4
15	125	10.1
20	125	3.6

表5 電磁石漏れ磁界の電圧依存性
(PPより10cmの場所にて)

電磁石印加電圧 (V)	磁束密度 (G)
0	0.6
25	6.8
50	13.6
75	18.6
100	29.1
125	35.7
150	44.9
175	53.5
200	60.6

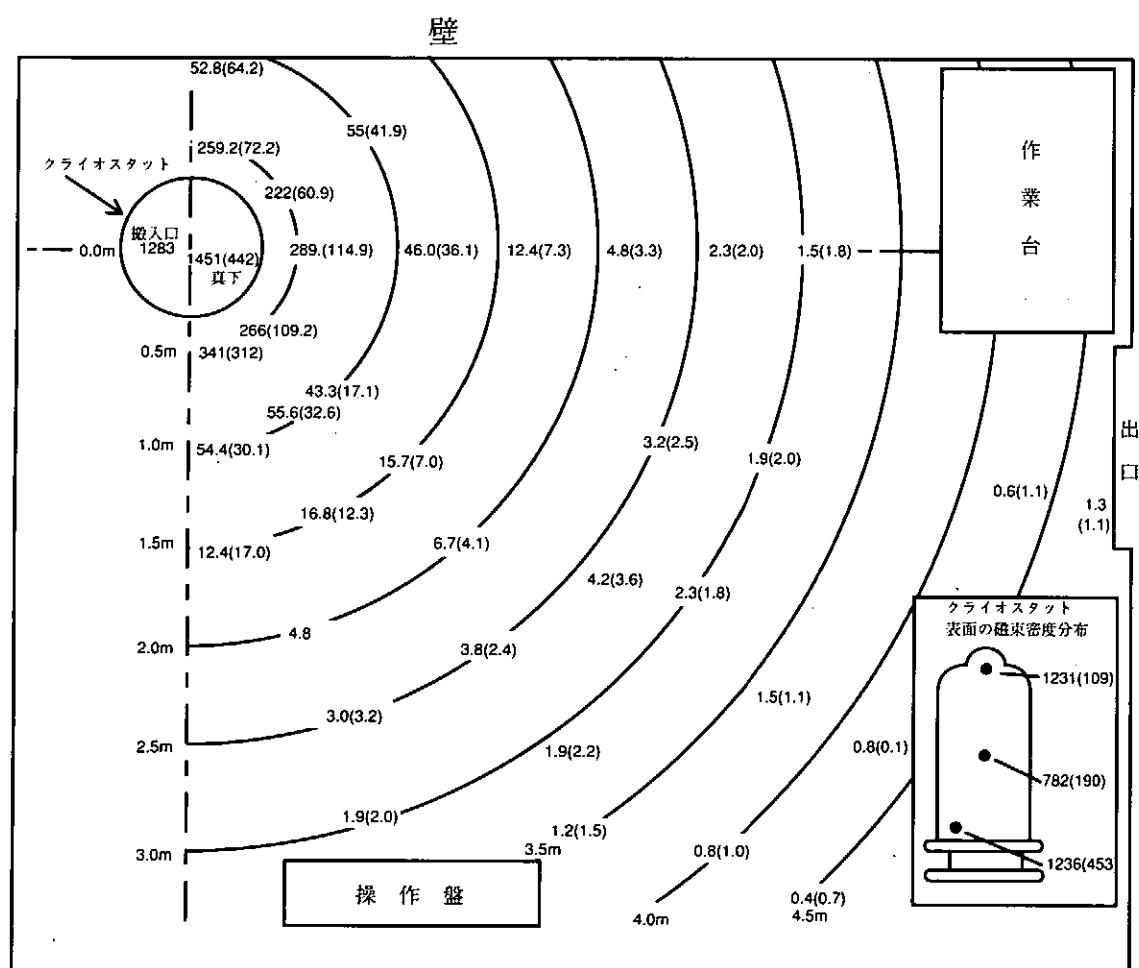


図14 10T実験用クライオスタットの漏れ磁界分布

()内はF.W.BELL社の一次元磁束計の測定値

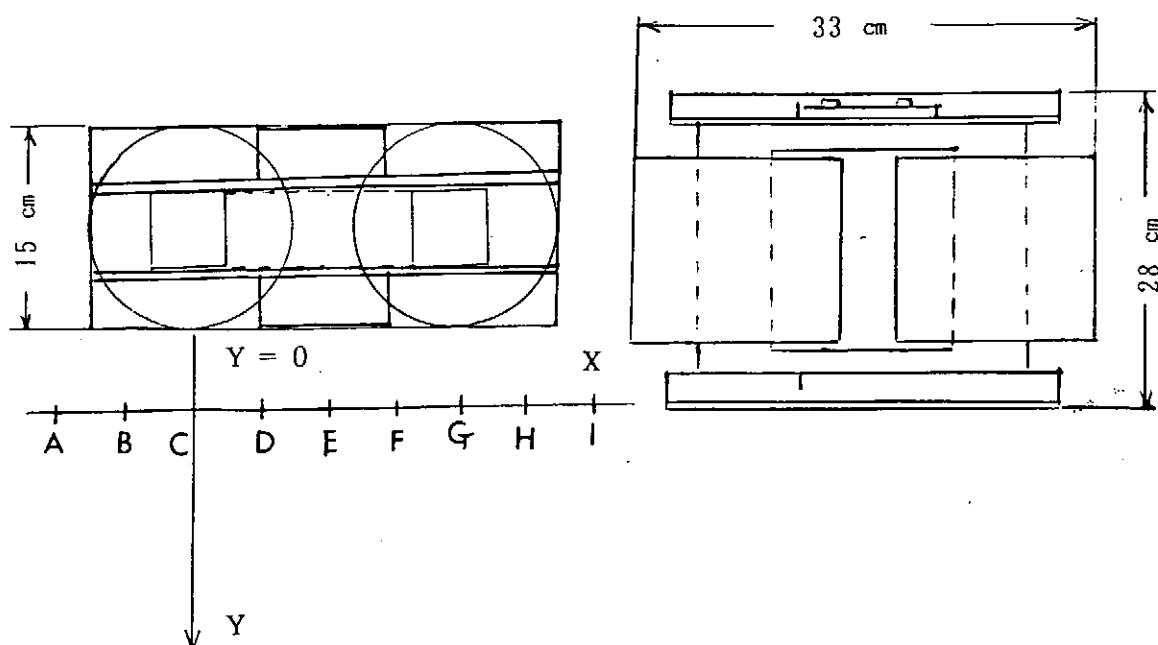


図15 漏洩磁界の測定に使用した単相変圧器と測定点

表6 負荷電力をパラメーターにして測定した漏洩磁束密度

P_h (kW) Y (cm)	0	0. 67	1. 33	2. 0
0. 5	1500 mG	3304 mG	6355 mG	9231 mG
1. 0	1330	2760	5290	7805
1. 5	1109	2324	4485	6883
2. 0	870	1791	3382	5201
5. 0	471	839	1716	2615
7. 0	287	526	1016	1601
10	118	218	487	727
15	51	85	182	311
20	23	40	70	127

表7 変圧器から 5 cm の地点における漏洩磁束密度分布
(負荷電力は 1. 33 kW 時)

地点記号	A	B	C	D	E	F	G	H	I
磁束密度 (mG)	946	1420	1796	1315	805	932	1463	1550	605

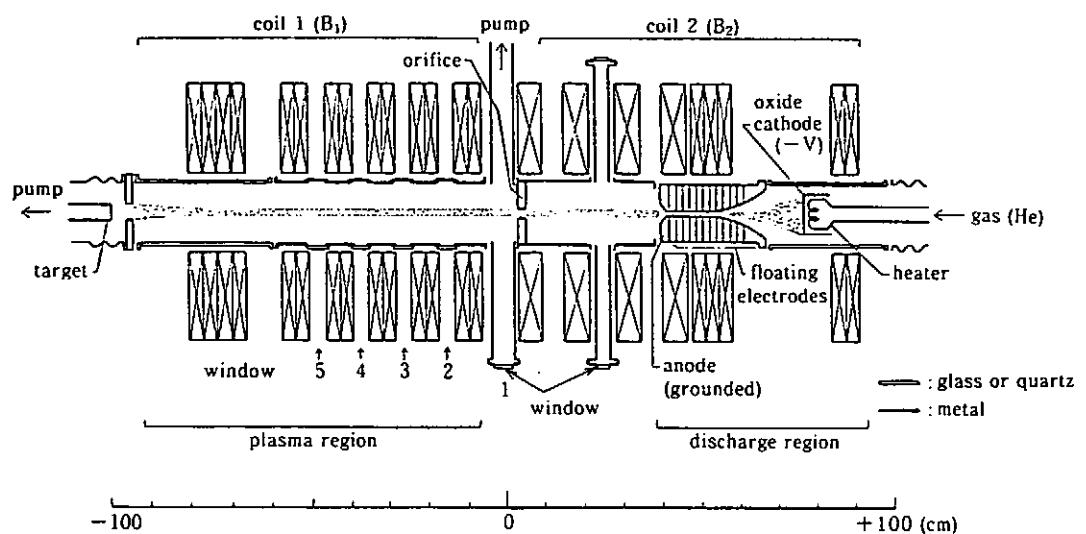


図16 磁気被曝線量測定を行った直流放電プラズマ装置 T P D – 1 の概略図

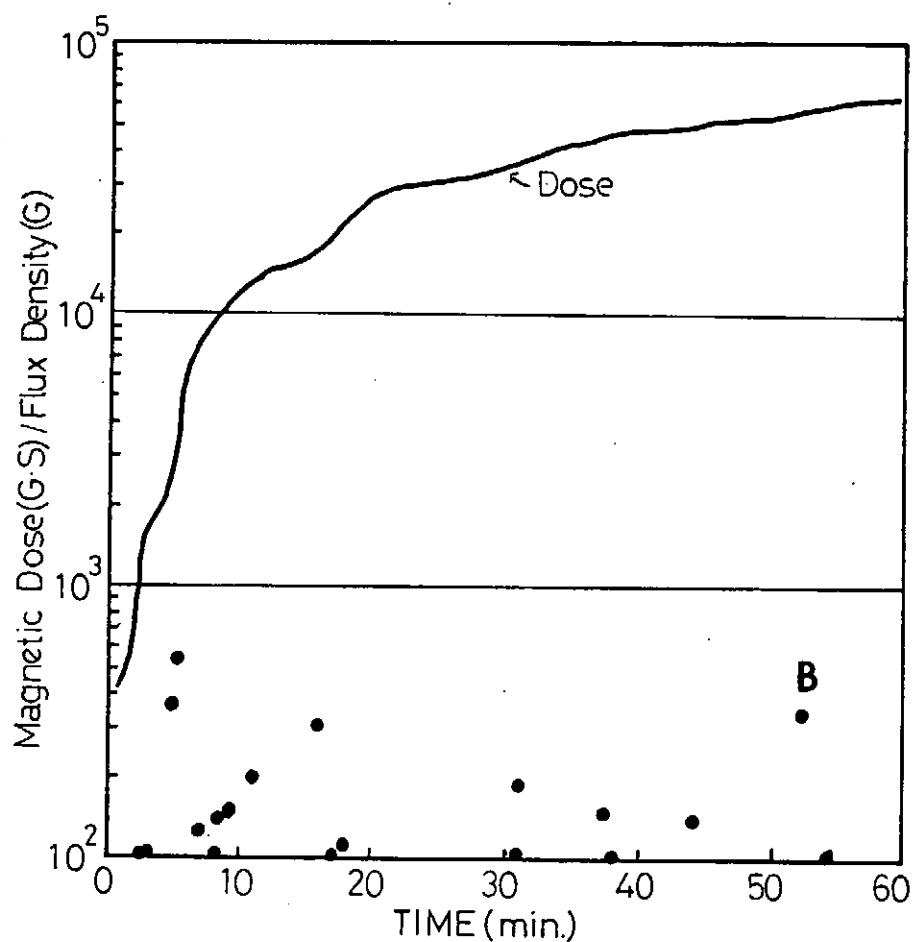


図17 T P D – 1 装置で研究者が実験中（60分間）に被曝した磁束密度(>100G) と線量

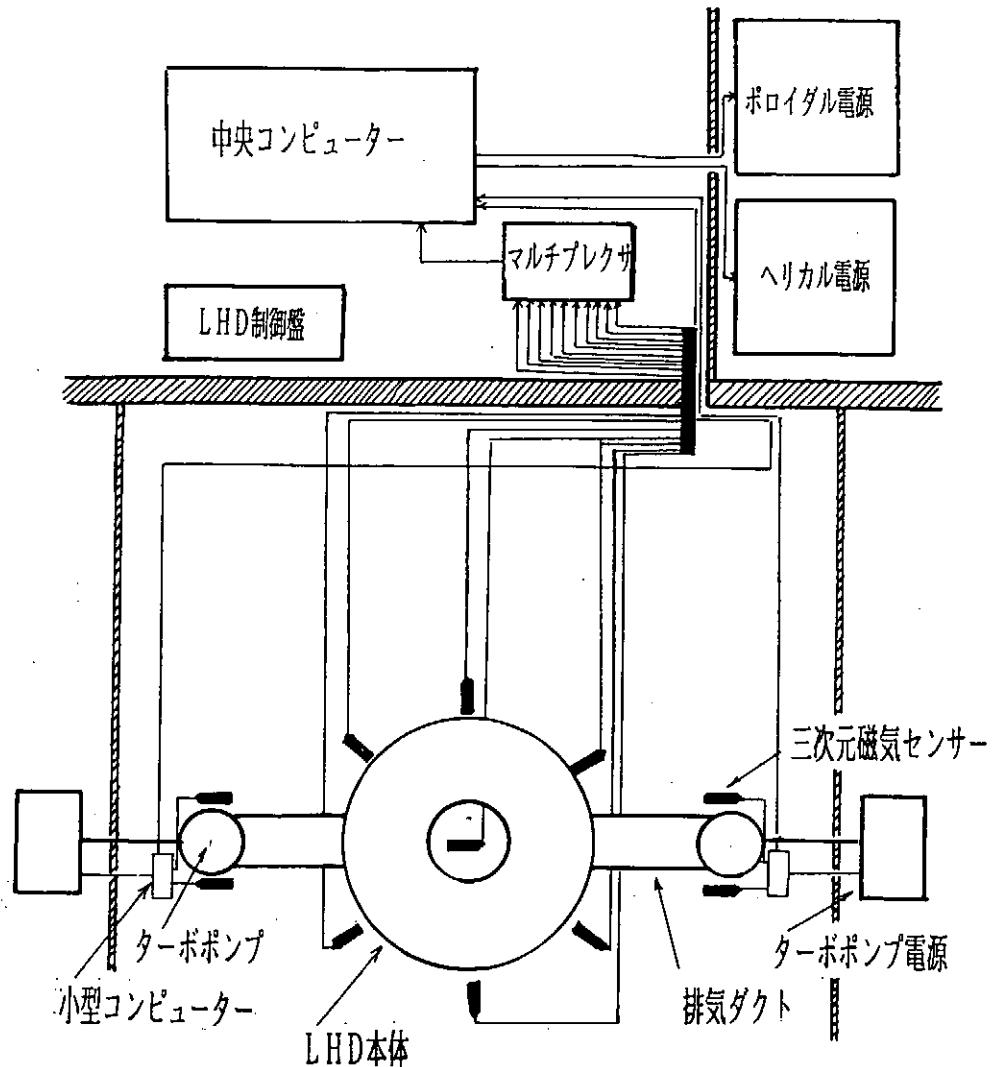


図18 LHD本体とターボポンプ周辺に配置した装置管理用磁気センサーシステム

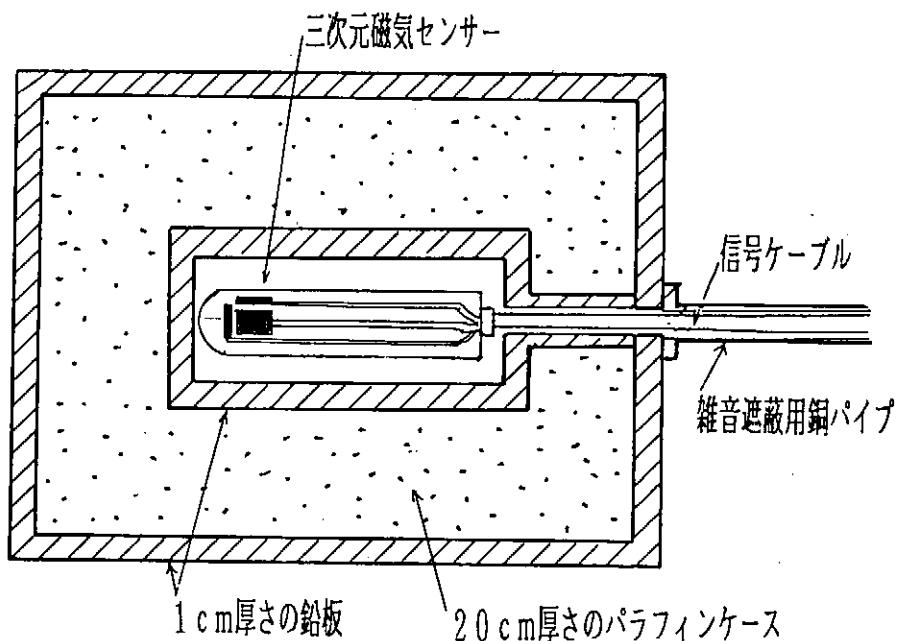


図19 中性子、X線、γ線そして電気的雑音に対する遮蔽対策を施した磁気センサー

APPENDIX

Basic Program for
Three Dimensional Fluxmeter

```

10:ARUN
20:'3DFLUX(1')3/2 /16
30:ON KEY GOSUB 40,40,40,40,40,980
40:BREAK ON
50:WIDTH 26,K
60:CURSOR 0,0:CLS
70:PRINT "<<3";CHR$ &J3C21;CHR$ &J3835;CHR$ &J4051;CHR$ &J3B3B;CHR$ &J3C27;
    CHR$ &J422B;CHR$ &J3757;">>"
80:GOSUB 1990
90:CLS :CURSOR 0,0:WAIT 0,P
100:PRINT "1:";CHR$ &J422C;CHR$ &J446A; ",2:";CHR$ &J3075;CHR$ &J3A7E
110:CURSOR 0,1
120:PRINT "3:テ~タノ";CHR$ &J352D;CHR$ &J4F3F; ",4:";CHR$ &J4649;CHR$ &J3D50
130:CURSOR 18,1:INPUT "";AP
140:IF AP=1GOTO 170ELSE 150
150:IF AP=2GOTO 1660ELSE 160
160:IF AP=3GOTO 2260ELSE 2380
170:CLEAR :AP=1
180:CLS :INPUT " 1:AC.DC      エ-ト"     2:AC      エ-ト";AD
190:AC=80
200:CLS :BEEP 3,15,300:WAIT 150,P:IF AD=1GOTO 210ELSE 220
210:PRINT "S2スイッチ AC.DC      セット      ":"GOTO 230
220:PRINT "S2スイッチ AC      セット      "
230:WAIT 0,P
240:CLS :PRINT "1:";CHR$ &J4331;CHR$ &J482F;"(<200カイ)      2:";CHR$ &J4F22;CHR$ &J4233;"(<1000カイ)"
250:CURSOR 18,1:INPUT SC
260:IF SC=1GOTO 270ELSE 280
270:H=200:CT=0:MD=2:GOTO 470
280:PRINT CHR$ &J422C;CHR$ &J446A;"エ-ト" 1:FT, 2:S1, 3:S2"
290:CURSOR 18,1:INPUT MD
300:CLS :CURSOR 0,0
310:PRINT CHR$ &J422C;CHR$ &J446A;CHR$ &J3C7E;CHR$ &J347C
320:CURSOR 8,0
330:IF MD=1THEN GOTO 340ELSE 350
340:INPUT "(>=1S,セイスウ)= ";CT:GOTO 400
350:INPUT "(>=3S,セイスウ)= ";CT
360:IF CT<3GOTO 370ELSE 410
370:CLS :CURSOR 0,1
380:WAIT 100,P:PRINT " 3";CHR$ &J4943;CHR$ &J304A;CHR$ &J3E65;"テ~オネカ"イシマス"
390:CLS :GOTO 310
400:IF CT<1THEN GOTO 310
410:CLS :CURSOR 0,0
420:PRINT CHR$ &J422C;CHR$ &J446A;CHR$ &J3273;CHR$ &J3F74;"(<=1000カイ)"
430:CURSOR 0,1:WAIT 0,P
440:INPUT " M = ";H
450:CLS
460:IF MD=1GOTO 480
470:CLS
480:WIDTH 26,A
490:DIM U(9),B(10,100),C(10,100),T$(10,100),M(10,100)

```

```

500:SETCOM "COM1:",1200,8,N,1,N,N
510:SETDEV "COM1",PO
520:D$=DATE$ :KEY (6)ON
530:IF AD=2GOTO 550
540:GOSUB 2530
550:CLS :WAIT 0,P
560:REM ****FM MODE****
570:COM 1ON
580:S=64*(CT-1)
590:WIDTH 26,K:CURSOR 0,1
600:FT=3600*(DEG TIME )
610:FOR M=1TO H
620:ST=3600*(DEG TIME )
630:LPRINT CHR$ (1);CHR$ (32);CHR$ (129);CHR$ (160);CHR$ (65);CHR$ (96);CHR$ (
    193);CHR$ (232)
640:FOR N=1TO 9
650:U(N)=ASC RXD$
660:NEXT N
670:IF SC=1GOTO 690
680:IF U(7)<24GOSUB 1570
690:IF U(7)>48THEN 710
700:K=0.4:GOTO 720
710:K=8
720:BX=U(1)+U(2)*256
730:BY=U(3)+U(4)*256
740:BZ=U(5)+U(6)*256
750:IF BX>26000R BY>26000R BZ>26000THEN 770
760:GOTO 790
770:CLS :BEEP 1,15:WAIT 130,P:PRINT "***** スケールオーバー - 999 S3スイッチ      セット"
780:CLS :WAIT 0,P
790:M(M)=M
800:T$(M)=TIME$
810:B(M)=K*(SQR ((BX)^2+(BY)^2+(BZ)^2))
820:USING :CURSOR 0,0:PRINT "M=";M(M)
830:IF K=8GOTO 840ELSE 870
840:IF B(M)<200THEN 850ELSE 870
850:CLS :BEEP 1,15:WAIT 130,P:PRINT " S3スイッチ "
860:CLS :WAIT 0,P
870:IF STATUS 258<24000THEN 880ELSE 910
880:BEEP 3,15:CLS :WIDTH 26,K:WAIT 200,P
890:PRINT "
900:GOTO 980
910:IF MD=1THEN 920ELSE 1200
920:IF AD=2GOTO 930ELSE 940
930:USING "#,##,##":CURSOR 0,1:PRINT "B =";B(M)*20-AC;" mG":GOTO 950
940:USING "#,##,##.##":CURSOR 0,1:PRINT "B =";B(M);" G"
950:NT=(DEG TIME )*3600
960:IF NT-ST>CT-0.95GOTO 970ELSE 950
970:NEXT M:GOTO 1000
980:CLS :WIDTH 26,K:WAIT 150,P
990:PRINT CHR$ &J422C;CHR$ &J446A;CHR$ &J4366;CHR$ &J4347:WAIT 0,P

```

```

1000:CLS :PRINT " "
1010:FOR M=1TO H
1020:IF M<M)=0GOTO 1030ELSE 1040
1030:H=M-1:GOTO 1070
1040:C(M)=B(M):C(0)=0
1050:C(M)=C(M)+C(M-1)
1060:NEXT M
1070:CLS :WIDTH 26,A:USING
1080:PRINT " M =";M(H);" カイ,    CT=";CT;" S":CURSOR 1,1:PRINT "TT=";T$(1);", LT=
    ";T$(H)
1090:IF AD=2GOTO 1100ELSE 1110
1100:CURSOR 1,2:USING "##,###,###" :PRINT "B=";B(H)*20-AC;" mG":GOTO 1120
1110:CURSOR 1,2:USING "##,###,###" :PRINT "B =" ;B(H);" G"
1120:IF C(H)*CT>100000THEN 1130ELSE 1140
1130:CURSOR 1,3:USING "##,###.#":PRINT "IB=";C(H)/10000;" TS":GOTO 1170
1140:IF AD=2GOTO 1150ELSE 1160
1150:CURSOR 1,3:PRINT "IB=";C(H)*CT/50-0.001*H*AC*CT;" GS":GOTO 1170
1160:CURSOR 1,3:PRINT "IB=";C(H)*CT;" GS"
1170:CURSOR 25,3:INPUT A$
1180:CLS :WIDTH 26,K:INPUT "テータ インサツ"           1:スル, 2:シナイ";B
1190:IF B=1GOTO 1660ELSE 1970
1200:C(M)=B(M):C(0)=0
1210:C(M)=C(M)+C(M-1):C(1)=0
1220:IF AD=2GOTO 1230ELSE 1250
1230:USING "####,###" :CURSOR 6,0
1240:PRINT "B=";B(M)*20-AC;" mG":GOTO 1270
1250:USING "####,###.#":CURSOR 6,0
1260:PRINT "B=";B(M);" G"
1270:IF STATUS 258<200THEN 1280ELSE 1290
1280:BEEP 1,15:PRINT "メモリカ" アリマセン,ソクティヨ ヤメテウタサイ(F6キー)
1290:IF SC=1GOTO 1380
1300:IB=CT*C(M):IF IB>100000THEN 1360
1310:CURSOR 0,1:USING "##.##":PRINT U(7)*0.216
1320:CURSOR 5,1:USING "####,###" 
1330:IF AD=2GOTO 1340ELSE 1350
1340:PRINT "IB=";IB/50-0.001*H*AC*CT;" GS":GOTO 1420
1350:PRINT "IB=";IB;" GS":GOTO 1420
1360:CURSOR 5,1:USING "##,###.#"
1370:PRINT "IB=";IB/10000;" TS":GOTO 1420
1380:IF AD=2GOTO 1390ELSE 1400
1390:CURSOR 0,1:USING "#####":PRINT BX*K*20-0.6*AC;BY*K*20-0.6*AC;BZ*K*20-0.6*
    AC:GOTO 1410
1400:CURSOR 0,1:USING "#####":PRINT BX*K;"G";BY*K;"G";BZ*K;"G"
1410:IF AIN >20GOTO 1430ELSE 1410
1420:IF <DEG TIME >*3600-ST>CT-0.5GOTO 1440ELSE 1420
1430:BEEP 1,15:ADIN OFF
1440:NEXT M
1450:FOR M=1TO H
1460:IF M<M)=0GOTO 1470ELSE 1480
1470:H=M-1:GOTO 1490
1480:NEXT M

```

```

1490:SETDEV "COM1:"
1500:BEEP 10,20,400
1510:CLS :WIDTH 26,K:USING
1520:CURSOPR 6,0:WAIT 150,P
1530:PRINT CHR$ &J422C;CHR$ &J446A;CHR$ &J3D2A;CHR$ &J4E3B
1540:CLS :WIDTH 26,K
1550:INPUT "テータヨイングツスルカ 1:スル, 2:シナイ";B
1560:IF B=1GOTO 1660ELSE 1970
1570:REM ALARMSUB1
1580:BEEP 2,15,400:CLS
1590:CURSOR 0,0:WIDTH 26,K
1600:PRINT " !!!";CHR$ &J4545;CHR$ &J4353;CHR$ &J4545;CHR$ &J3035;CHR$ &J4463;
    CHR$ &J323C;" !!!"
1610:WAIT 200,P:CURSOR 0,1
1620:PRINT " S1";CHR$ &J244E;"ON";CHR$ &J334E;CHR$ &J4727;,, ハツテリー";CHR$ &J244
    E;CHR$ &J3872;CHR$ &J3439
1630:WAIT 200,P
1640:WAIT .0,P:CLS
1650:RETURN
1660:SETDEV "COM1:"
1670:'*OUTPUT TOPRINTER*
1680:CLS :WIDTH 26,K
1690:PRINT "フリント-ヲセツソクシテクタ"サイ"
1700:INPUT A$
1710:CSIZE 2,K:COLOR 0:TAB 5
1720:LPRINT "3D";CHR$ &J4051;CHR$ &J3B3B;CHR$ &J3C27;CHR$ &J422B;CHR$ &J3757;
    CHR$ &J244E;"テータ"
1730:CSIZE 2,A:COLOR 1:USING
1740:IF AD=1GOTO 1750ELSE 1760
1750:LPRINT "AC/DC ツウシヨウ モード":GOTO 1770
1760:LPRINT "AC コウカントモード"
1770:IF SC=2THEN 1790
1780:LPRINT "タンパツ ソクティ (<ソネニ IB=0 ニナル)"
1790:IF MD=1GOTO 1810
1800:LPRINT "ソクティモード": SO(<ヒヨウシ"コン"):GOTO 1820
1810:LPRINT "ソクティモード": FT(コウソク)
1820:LPRINT TAB 0;"DATE:";D$;", CT:";CT;"SEC, ";M:";H;"カイ, RM:";STATUS 258;"ハ
    イト":LF
1830:USING "##,###,###,###"
1840:IF AD=2GOTO 1850ELSE 1860
1850:LPRINT " ソクティカイスウ M シ"カン T シ"ソクミット" B(mG) ミット"ノセキフ"ン IB(GS)":GOTO
    1870
1860:LPRINT " ソクティカイスウ M シ"カン T シ"ソクミット" B(G) ミット"ノセキフ"ン IB(GS)"
1870:COLOR 2
1880:FOR M=1TO H
1890:IF M(M)=0THEN GOTO 1940
1900:IF AD=2GOTO 1910ELSE 1920
1910:LPRINT TAB 0;M(M);TAB 16;T$(M);TAB 27;B(M)*20;TAB 46;C(M)*CT/50:GOTO 1930
1920:LPRINT TAB 0;M(M);TAB 16;T$(M);TAB 27;B(M);TAB 46;C(M)*CT
1930:NEXT M
1940:WIDTH 26,K

```

```

1950:CLS :PRINT CHR$ &J3075;CHR$ &J3A7E;CHR$ &J3D2A;CHR$ &J4E3B
1960:IF AP=4THEN 2840
1970:CLS :INPUT "テキスクリメモリ" ;B
1980:IF B=1GOTO 2260ELSE 2840
1990:REM SUB MUSIC1
2000:FOR J=0TO 2
2010:FOR I=0TO 5
2020:READ A
2030:LET B=130000/(166+(22*A))
2040:BEEP 1,A,B
2050:NEXT I
2060:NEXT J
2070:BEEP 1,49,1000
2080:DATA 49,37,30,21,30,37
2090:DATA 49,37,30,21,30,37
2100:DATA 49,37,30,21,30,37
2110:RETURN
2120:REM . SUB MUSIC2
2130:FOR I=0TO 43
2140:READ C
2150:LET D=260000/(166+(22*C))
2160:BEEP 1,C,D
2170:NEXT I
2180:BEEP 1,60,1000
2190:DATA 37,40,37,40,37,52,43,49
2200:DATA 60,172,127,105,82,60,52,172
2210:DATA 112,82,64,52,49,172,82,82
2220:DATA 37,40,37,40,37,52,43,49
2230:DATA 60,172,127,105,82,60,52,172
2240:DATA 112,93,49,52
2250:POWER OFF
2260:**DATA TO DISK**
2270:CLS :WIDTH 26,K
2280:PRINT "データ";CHR$ &J244E;CHR$ &J4C3E;CHR$ &J4130;CHR$ &J244F
2290:CURSOR 12,0:INPUT " ";G$
2300:OPEN G$FOR OUTPUT AS #1
2310:PRINT #1,AD;MD;SC;CT;H;D;G$;",";D$
2320:FOR M=1TO H
2330:PRINT #1,B(M);M(M);C(M);T$(M)
2340:NEXT M
2350:CLOSE #1
2360:CLS :PRINT CHR$ &J352D;CHR$ &J4F3F;CHR$ &J3430;CHR$ &J4E3B
2370:GOTO 2840
2380:**DATA FROM DISK**
2390:CLEAR
2400:DIM U(8),B(10,100),C(10,100),T$(10,100),M(10,100)
2410:MAXFILES =1:CLS
2420:PRINT "データ";CHR$ &J244E;CHR$ &J4C3E;CHR$ &J4130;CHR$ &J244F
2430:CURSOR 12,0:INPUT " ";G$
2440:OPEN G$FOR INPUT AS #1
2450:INPUT #1,AD,MD,SC,CT,H,D,G$,D$

```

```

2460:FOR M=1TO H
2470:INPUT #1,B(M),M(M),C(M),T$(M)
2480:NEXT M
2490:CLOSE
2500:CLS :WAIT 300,P
2510:PRINT CHR$ &J4649;CHR$ &J3D50;CHR$ &J3430;CHR$ &J4E3B
2520:GOTO 1670
2530:'PROGRAM FOR CONTROL
2540:WIDTH 26,K
2550:CURSOR 0,0
2560:PRINT "
2570:CURSOR 0,1:INPUT "1:スル, 2:シナイ";B
2580:IF B=2GOTO 2810
2590:CLS :CURSOR 0,0
2600:PRINT "30";CHR$ &J4943;CHR$ &J244E;CHR$ &J4E6D;CHR$ &J4434;"(NO";CHR$ &J22
    2A;"F1)"
2610:WAIT 50,P:CURSOR 0,1
2620:PRINT "プロ-フ";CHR$ &J222A;CHR$ &J3C57;CHR$ &J4A43;,", S2";CHR$ &J222A;"L"
2630:CLS :CURSOR 0,0:WAIT 0,P
2640:PRINT CHR$ &J4E6D;CHR$ &J4434;"      X      Y      Z"
2650:FOR M=1TO 25
2660:LPRINT CHR$ (1);CHR$ (129);CHR$ (65);CHR$ (193)
2670:FOR N=1TO 5
2680:U(N)=ASC RXD$
2690:NEXT N
2700:IF U(4)<24GOSUB 1570
2710:USING "#.#":CURSOR 0,0:PRINT U(4)*0.216;"U"
2720:CURSOR 4,1:K=0.4
2730:USING "###.#"
2740:PRINT U(1)*K;U(2)*K;U(3)*K
2750:NEXT M
2760:CLS
2770:PRINT CHR$ &J4E60;CHR$ &J4434;CHR$ &J4030;CHR$ &J2472;CHR$ &J4233;CHR$ &J3
    954;"スルか?"
2780:CURSOR 0,1
2790:INPUT "1:スル, 2:シナイ ";B
2800:IF B=1GOTO 2630ELSE 2810
2810:
2820:RETURN
2830:CLS :PRINT CHR$ &J4434;CHR$ &J4030;CHR$ &J3D2A;CHR$ &4E3B
2840:CLS :CURSOR 3,0:WAIT 0,P
2850:PRINT CHR$ &J3866;CHR$ &J366C;CHR$ &J4F2B;CHR$ &J4D4D;CHR$ &J2447;CHR$ &J2
    437;CHR$ &J243F
2860:IF AP=1GOTO 2870ELSE 2120
2870:CURSOR 1,1:PRINT " ";CHR$ &J224D;"OFF":GOTO 2120

```

NIFS-MEMOシリーズ出版リスト
(Recent Issues of NIFS-MEMO Series)

- NIFS-MEMO-1 都築哲哉、東井和夫、松浦清剛、「パソコンによる JIPP T-IIU プラズマの平衡位置
フィードバック制御」1991年4月
T.Tsuzuki, K.Toi and K.Matsuura, "Feedback Control of Plasma
Equilibrium with Control System Aided by Personal Computer on the JIPP
T-IIU Tokamak" ; Apr.1991 (In Japanese)