



JAEA-Technology

2007-015



JP0750152

電磁気検出器の開発 —積層型電磁気プローブのJT-60Uへの適用とその結果— (共同研究)

Development of Magnetic Probe
- Application and Result of AT-probes to JT-60U -
(Joint Research)

柳生 純一 笹島 唯之 三代 康彦 榊原 悟*
川俣 陽一

Jun-ichi YAGYU, Tadayuki SASAJIMA, Yasuhiko MIYO, Satoru SAKAKIBARA*
and Youichi KAWAMATA

核融合研究開発部門
トカマク本体機器システム開発グループ

Tokamak Device Group
Fusion Research and Development Directorate

March 2007

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

電磁気検出器の開発
-積層型電磁気プローブの JT-60U への適用とその結果-
(共同研究)

日本原子力研究開発機構
核融合研究開発部門トカマクシステム技術開発ユニット
柳生 純一・笹島 唯之・三代 康彦・榎原 悟*・川俣 陽一

(2007 年 1 月 18 日受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) では、電磁気検出器の信号を基にプラズマ位置・形状のフィードバック制御を行っている。この電磁気検出器は製作コストが高く、次期装置への利用に對してはコストの低減化が求められている。一方、核融合科学研究所では、3 軸方向の磁場成分を同時に計測可能で、軽量・コンパクト、且つ安価な電磁気検出器を開発して、大型ヘリカル装置 (LHD) の電磁気計測に使用している。今回、日本原子力研究開発機構と核融合科学研究所との共同研究に基づいて、LHD で使用されている電磁気検出器のトカマク装置での適用の可能性を探るため、JT-60U 用に本電磁気検出器の取り合い部を製作し、試験的に第一壁直下に設置した。JT-60 実験放電を利用して既設の電磁気検出器との比較検討を行った。出力の妥当性やディスラプション時における耐振動性、耐放射線性等について調べた。その結果は概ね良好であり、トカマク装置環境下においても十分に使用できる見通しを得た。

本研究は日本原子力研究開発機構と大学共同利用機関法人核融合科学研究所との共同研究に基づいて実施したものである。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

*大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所

Development of Magnetic Probe
-Application and Result of AT-probes to JT-60U -
(Joint Research)

Jun-ichi YAGYU, Tadayuki SASAJIMA, Yasuhiko MIYO,
Satoru SAKAKIBARA* and Youichi KAWAMATA

Division of Tokamak System Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received January 18, 2007)

The feedback control of the plasma position and shape based on signals of magnetic probes is performed on JT-60. The fabrication cost of these magnetic probes is very high. Therefore, the cost reduction is required for the use in a next device. On the other hand, the magnetic field measurement in three axial directions with the advanced technology (AT) probes is simultaneously made on LHD of NIFS. The AT-probe has been developed at a low fabrication cost and in compact size and light weight.

The possibility of application of the AT-probe in a Tokamak device (JT-60U) has been investigated in collaboration between JAEA and NIFS. We designed and fabricated the casing and interface for the AT-probe, and installed it under the first wall of JT-60U. A comparison of output signals between the installed AT-probe and a existing magnetic probe was made. Tests have been carried out to evaluate the vibration resistance and the radioactive resistance through about two thousand shots with high performance plasmas including one hundred disruption shots in JT-60U. As a result, the AT-probe has a good performance and an enough usable prospect in environment of the Tokamak device.

Keywords: Magnetic Probe, AT-Probe, JT-60U, Tokamak Fusion Device, Radioactive-ray Resistance, Vibration Resistance, Magnetic Field Measurement

This work has been performed in JAEA as a joint research with National Institute for Fusion Science

* National Institute of Natural Sciences National Institute for Fusion Science

目 次

1. 緒言	1
2. JT-60U における磁場計測	1
3. 電磁気検出器の構造と特徴	2
3.1 JT-60U 用電磁気検出器	2
3.1.1 構造	2
3.1.2 性能	3
3.2 積層型電磁気プローブ	3
3.2.1 構造	3
3.2.2 性能	3
4. 積層型電磁気プローブの JT-60U への適用	4
4.1 機械強度検討	4
4.2 ケーシングの開発	5
4.3 適用試験	6
4.3.1 電気的試験	6
4.3.2 放出ガス測定	6
4.3.3 振動試験	7
4.4 JT-60U への設置	7
4.5 結論	7
5. 結果と考察	8
5.1 耐振動性	8
5.2 耐放射線性	8
5.3 磁場測定結果	8
5.4 結論	8
6. 結言	9
謝辞	9
参考文献	9
図表リスト	10

Contents

1. Introduction	1
2. Magnetic field Measurement in JT-60U	1
3. Structure and Characteristics of Magnetic Probe	2
3.1 Magnetic Probe for JT-60U	2
3.1.1 Structure	2
3.1.2 Performance	3
3.2 AT-Probe	3
3.2.1 Structure	3
3.2.2 Performance	3
4. Application of AT-probe to JT-60U	4
4.1 Evaluation of Mechanical Strength	4
4.2 Development of Casing	5
4.3 Test for Application	6
4.3.1 Electric Test	6
4.3.2 Release Gas Measurement	6
4.3.3 Vibration Test	7
4.4 Installation in JT-60U	7
4.5 Concluding Remarks	7
5. Result and Discussion	8
5.1 Vibration Resistance	8
5.2 Radioactive-ray Resistance	8
5.3 Results of Magnetic Field Measurement	8
5.4 Concluding Remarks	8
6. Summary	9
Acknowledgement	9
References	9
List of Tables and Figures	10

1. 緒言

日本原子力研究開発機構（原子力機構）の臨界プラズマ試験装置（JT-60U）では、数種類の電磁気検出器を用いてプラズマの位置、形状制御やプラズマ平衡配位計算、揺動（Magnetohydrodynamics, MHD：電磁流体力学的）計測等を行っている。その一方で、JT-60U の実験運転においてはプラズマが急速に消滅するディスラプションが稀に発生し、これに伴って真空容器が振動する。その際、電磁気検出器が破損することがあり、対処として真空容器開放時に不具合を起こした電磁気検出器を交換してきた。しかしながら、この電磁気検出器は製作コストが非常に高く、今後、実験運転で破損した場合の交換、さらには次期装置で求められているコスト削減等を考慮すると安価な電磁気検出器の開発が不可欠となっている。現在、国内外の核融合装置においては様々なタイプの電磁気検出器が使用されているが、その中でも核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）で使用されている積層型電磁気プローブ（Advanced Technology probe : AT プローブ）は、コンパクトで安価な上、3 方向の磁場成分の計測が可能といった利点を有している[1]。AT プローブは LHD での使用を前提に開発しているため、トカマク装置で採用する場合、プラズマディスラプション時の耐振動特性等を考慮する必要がある。そこで、原子力機構と核融合科学研究所との共同研究により、AT プローブの専用ケーシングを開発し、耐振動性を向上させた後に AT プローブを JT-60U の真空容器内部に設置し、耐振動性および耐放射線性を含むトカマク装置への適用性を評価した。

2. JT-60U における磁場計測

JT-60U ではドーナツ形状の真空容器内にプラズマを生成し、トロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイルの強力な磁力線によってプラズマが真空容器内壁に接しないようにプラズマ位置・形状制御を行いながら高温・高密度プラズマ閉じ込めを行っている。電磁気検出器はこのプラズマ位置・形状制御と MHD 計測に用いられており、位置・形状制御制御には、同一ポロイダル断面（P-13）に設置した計 33 本の電磁気検出器（Tangential probe for Plasma Control : TC プローブ 17 本、Normal probe for Plasma Control : N プローブ 16 本）が利用されている。一方、MHD 計測にはトロイダル方向 11 カ所に設置した 11 本と、3 ケ所のポロイダル断面に設置した 36 本の計 46 本の電磁気検出器（Tangential probe for MHD analyses : TM プローブ）が利用されている。図 1 に代表的な電磁気検出器の配置を示す。電磁気検出器に関してはその数が多ければ多い程、より正確な位置制御や詳細なモード解析が可能となる。JT-60U では基本的に電磁気検出器のコスト、電流導入端子、設置のための真空容器内の空間等の範囲内で、できるだけ多くの電磁気検出器を設置している。

電磁気検出器の出力は、各真空ポートの電流導入端子を介して外部に取り出している。TC ならびに N プローブにおいては、電流導入端子から中継端子箱を介して全系 CAMAC 盤室にある V/F 変換器に信号を入力し、積分処理を行った後に、整流器棟の IIb 計算機経由で全系制御設備に送信されている。一方、TM プローブの信号は、電流導入端子から直接 CAMAC ヤグラのデー

タ收集系に取り込まれ、AD 変換後に光通信にて計算機室に設置されている大容量データ記憶システム (Transient Mass Data Storage system, TMDS) に送信・格納されている。その結果、中央制御室の専用端末から TMDS にアクセスすることにより、MHD 解析が可能となる。

3. 電磁気検出器の構造と特徴

3.1 JT-60U 用電磁気検出器

3.1.1 構造

JT-60U の実験放電、特に小半径が大きなプラズマでは第一壁近傍までプラズマが近づくため、熱負荷によっても電磁気検出器が破損する恐れがある。これを回避するために、第一壁と真空容器内壁のわずか 25 mm の空間に電磁気検出器は設置されている。因って、JT-60U の電磁気計測器の形状は高さ 20 mm 以内に制限されている。さらに、JT-60U では真空容器のベーキングを 300°C で実施しているため、この温度に十分耐える構造としなければならない。そこで、TC、N、TM プローブとともにコイルはインコネルの二重シースで保護され、コイル線はセラミックコーティングされた白金線を使用し、セラミックのコイルボビンに巻かれている。但し、TM プローブにおいては、渦電流を抑制するためにコイル部分の二重シースに各々スリットを設け、コイルを真空中に露出させる構造としている [2]。また、引き出し線は、耐熱と低ノイズ化を考慮して無機絶縁 (Mineral Insulator, MI) ケーブルが用いられている。MI ケーブルは中心にコンスタンタンのツイスト線、シース部分はインコネルからできており、絶縁材として酸化マグネシウムの粉末が充填されている。コイル信号は、MI ケーブルを用いて真空ポートまで引き出され、MI ケーブルのシース破損による真空リークを想定し、差動排気が行われている。以下に主要な電磁気検出器の仕様を述べる。

(1)TC プローブ (Tangential probe for Plasma Control)

ポロイダル磁場の B_ω 成分 (ポロイダル断面における接線方向の成分) を測定する電磁気検出器である。検出部は、 $\phi 18.6$ mm、長さ 121 mm の保護管に収納されており、コイルは直 径 14.1 mm、内径 5 mm、厚さ 61 mm のセラミックボビンに 53 mm 幅で巻かれている。形状を図 2 に、周波数特性を図 3 に示す。

(2)N プローブ (Normal probe for Plasma Control)

ポロイダル磁場の B_ρ 成分 (ポロイダル断面における半径方向の成分) を測定する電磁気検出器である。検出部は幅 49.4 mm、長さ 72.9 mm の保護ケースに収納されており、コイルは直 径 35.5 mm、内径 22 mm、厚さ 12.5 mm のセラミックボビンに 5.5 mm 幅で巻かれている。形状を図 4 に、周波数特性を図 5 に示す。

(3)TM プローブ (Tangential probe for MHD Control)

プラズマ周辺の B_ω 成分 (MHD 揺動) を計測する電磁気検出器である。検出部は $\phi 17$ mm、長さ 93 mm の保護管に収納されており、コイルは直 径 12 mm、内径 9 mm、厚さ 23 mm のセラミックボビンに 15 mm 幅で巻かれている。形状を図 6 に、周波数特性を図 7 に示す。

3.1.2 性能

(1)TC プローブ

巻数=6220 ターン,

コイル層数=20 層

インダクタンス (L) =34.6 mH,

鎖交面積 (NS) =0.334 m²

電気抵抗=1300 Ω,

共振周波数 (f_R) =15.6 kHz

(2)N プローブ

巻数=1088 ターン,

コイル層数=34 層

インダクタンス (L) =24.1 mH,

鎖交面積 (NS) =0.659 m²

電気抵抗=752 Ω,

共振周波数 (f_R) =18.7 kHz

(3)TM プローブ

巻数=176 ターン,

コイル層数=2 層

インダクタンス (L) =0.115 mH,

鎖交面積 (NS) =0.012 m²

電気抵抗=41.1 Ω,

共振周波数 (f_R) =380 kHz

3.2 積層型電磁気プローブ

3.2.1 構造

LHDにおいてプラズマ制御に用いられている AT プローブは、プリンストンプラズマ物理研究所の Takahashi 博士が考案し、核融合科学研究所との共同研究の下で開発したものである[3]。AT プローブは、外形寸法 55 mm × 33 mm × 10.5 mm と非常にコンパクトで、耐熱温度は 900°C 以上となっている。内部構造はアルミナ含有率 96% 以上のセラミック板上に、図 8 に示すようにタングステンパターンを金属蒸着させ、それを約 40 枚積層し、焼成している。図 9 に AT プローブの形状を示す。この特徴は、パターンの異なるセラミック板を組み合わせることにより、一つのプローブで X、Y、Z の 3 方向において、それぞれ低周波と高周波の磁場計測が可能である。さらに、パターン化された基板を用いることから製作コストも大幅に抑えられている。

プローブの引き出し線は $\phi 0.5$ mm の MI ツイストケーブルを使用し、真空との取合いはフランジ部にて MI ケーブルのシース部分を銀ロウで埋め、大気側の端末で封じる構造となっている。また、AT プローブと MI ケーブルの芯線はシリコン樹脂で接続されている。これは MI ケーブルの真空封止というよりも、むしろケーブル内の絶縁用粉末 (MgO) の封止、及び MgO の高い吸水性による絶縁悪化を防止する目的で採用されている。

3.2.2 性能

AT プローブは、先に述べた通り一つのプローブ内に 6 つのコイル（低周波、高周波用の三軸コイル）を有している。以下に各々の性能を示す。

(1)低周波用

①X コイル

巻数=227 ターン,
インダクタンス (L) = $313 \mu\text{H}$,
電気抵抗= 513Ω ,

コイル層数=8 層
鎖交面積 (NS) = 0.0315 m^2
共振周波数 (f_R) =>500 kHz

②Y コイル

巻数=268 ターン,
インダクタンス (L) = $217 \mu\text{H}$,
電気抵抗= 348Ω ,

コイル層数=8 層
鎖交面積 (NS) = 0.0329 m^2
共振周波数 (f_R) =>500 kHz

③Z コイル

巻数=252 ターン,
インダクタンス (L) = $252 \mu\text{H}$,
電気抵抗= 277Ω ,

コイル層数=18 層
鎖交面積 (NS) = 0.0291 m^2
共振周波数 (f_R) =>500 kHz

(2)高周波用

①X コイル

巻数=6 ターン,
インダクタンス (L) = $1.2 \mu\text{H}$,
電気抵抗= 16.9Ω ,

コイル層数=8 層
鎖交面積 (NS) = $1.17 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
共振周波数 (f_R) =~1000 kHz

②Y コイル

巻数=12 ターン,
インダクタンス (L) = $2.5 \mu\text{H}$,
電気抵抗= 18.1Ω ,

コイル層数=8 層
鎖交面積 (NS) = $1.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
共振周波数 (f_R) =~1000 kHz

③Z コイル

巻数=4 ターン,
インダクタンス (L) = $0.8 \mu\text{H}$,
電気抵抗= 10.7Ω ,

コイル層数=2 層
鎖交面積 (NS) = $1.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
共振周波数 (f_R) =~1000 kHz

4. 積層型電磁気プローブの JT-60U への適用

4.1 機械強度検討

JT-60U の真空容器は、三次元 20° セクターモデルによる動的応力解析（モーダル時刻歴解析）結果によると、ディスラプション時に最大 80 G にも及ぶ加速度を受ける [2]。JT-60U で使用されている全ての電磁気検出器は、この最大加速度に耐えるように設計されている。しかしながら、セラミック板の積層構造からなる AT プローブを真空容器内部に直接設置した場合、振動によってプローブ端子と引き出し線の接続部（端子接続部）で断線する可能性が極めて高く、さらにはセラミックが割れた場合、その粉末が真空容器内に飛散することも考えられる。そのため、AT プローブを JT-60U での使用に適した構造にする必要がある。

設計にあたっては、まず AT プローブの固有振動について検討を行い、AT プローブの健全性を確認した。固有値については LHD への据付け方法を簡易モデル化し、AT プローブと取り付け治具、台座からなる組立完了の状態で検討した。その結果、AT プローブが破損する値は約 5 kHz と早い周波数帯であることが明らかとなった。JT-60U の振動周波数が 100 Hz であることから、AT プローブをそのまま真空容器内に設置しても共振は起こらず、JT-60U への適用においても問題が無いことが分った。しかしながら、この結果はあくまでも簡易モデルとして評価したものであり、据付け状態、ならびにベーキングやプラズマによる熱負荷等が重なった場合、熱伸び等の問題が生じ、AT プローブが破損することも考えられる。そのため、破損した場合でもプラズマ実験に影響を及ぼさない工夫が必要である。そこで、機械的に一番脆いと考えられるセラミック部と端子接続部を金属製のケースに閉じ込める構造（AT プローブ S タイプ）とした。次に、端子接続部の検討を行った。JT-60U の電磁気検出器においては、超高真空、且つ高温環境下での使用を考慮して MI ケーブルを引き出し線として採用した。AT プローブ S タイプにおいても同様に MI ケーブルを使用し、端子との接続はロウ付けによる接続法を採用した。

4.2 ケーシングの開発

JT-60U に適用させるために AT プローブをステンレス製（SUS316）のケーシング（外箱）で覆い、内部に窒素ガスを充填することで気密構造とした。これによってセラミック板が万一割れた場合でも、プラズマ実験に悪影響を及ぼすことはない。図 10 に AT プローブ S タイプの構造図を示す。引き出し線には $\phi 4.8$ mm の二重シース MI ツイストケーブルを使用し、端子接続部には端子保護用のセラミックブロックを組込み、AT プローブの端子根本部に加わる力を抑制した。さらに AT プローブとケーシングの空間部分にはセラミックセメントを充填することで、絶縁の確保と耐振動補強を図った。しかしながら、セラミックセメントの充填は予想外の問題を生み出した。端子接続部における断線である。この事象は MI ケーブル接続後に流動性のセラミックセメントをケーシング内に流しそみ、硬化させる過程で発生した。セラミックセメントが硬化する前の導通は健全であったことから、セラミックセメントが乾燥収縮に至る際、MI ケーブル周辺のセラミックセメントとその他のセラミックセメントの間で収縮状況が異なり、さらにはセラミックセメントの荷重が MI ケーブルに加わったことで、強度的に最も弱い端子接続部が断線したと考えられる。この結果を踏まえ、セラミックセメントの代用品として綿状のセラミックファイバーを採用した。

セラミックファイバーは、纖維を集積して綿状にしたものである。耐熱温度 1300°C、化学組成は Al_2O_3 (49%) と SiO_3 (51%) からなり、一般には窯度炉の膨張継ぎ手のパッキング材や断熱用充填材に用いられている。セラミックファイバーの仕様を表 1 に示す。これを端子接続部やその周辺に充填し、絶縁を兼ねたケーブル補強材とした。充填に関しては、詰め過ぎによる断線を懸念し、最も MI ケーブルが細く ($\phi 0.3$ mm) なる端子接続部のケーブルを対象にして評価し、その結果に基づいて充填方法を決定した。なお、MI ケーブルについては、AT プローブの端子とケーシングの二点で固定されているため、これを模擬した両端固定のモデルで強度評価を行った。この解析では、発生する応力はケーブル直径が $\phi 0.3$ mm であることから引張応力として評価した。その結果、MI ケーブルに加えることができる荷重は約 4.5 kg であることが明らかになった。次に、

MI ケーブルに負荷がかからないセラミックファイバーの充填量を求めた。端子接続部の周辺にセラミックファイバーを充填した場合、その体積は 9.19 cm^3 であり、セラミックファイバーの密度 0.13 g/cm^3 からその充填量は約 1.2 g となる。しかしながら、実際にセラミックファイバーを充填する際には、耐振動性等を考慮して出来る限り空間がないようにする必要がある。そこで、実際の充填量は 10% 程度多くして、空きをなくした[4]。

4.3 適用試験

4.3.1 電気的試験

(1)導通試験

テスターにて端子間の直流電気抵抗を測定し、AT プローブ S タイプの導通が健全であることを確認した。

(2)耐電圧試験

コイルとシース間の絶縁抵抗を測定し、DC100 V/1 分間に耐え、電気的に異常がないことを確認した。結果を表 2 に示す。

(3)周波数特性試験

周波数特性に対するケーシングの影響を評価するために、AT プローブ S タイプの周波数特性を評価した。試験としては LCR テスターにて 100 Hz から 1000 kHz におけるインピーダンス (Ω) と、100 Hz から 100 kHz までのインピーダンス (Ω)、インダクタンス (H)、静電容量 (C) 及び交流抵抗 (Ω) を測定した。AT プローブの低周波側の共振周波数は 500 kHz 以上 であることから、AT プローブをケーシングで覆い、セラミックファイバーを充填しても、図 11～13 に示すように低周波側の共振周波数は単品と大差なく、ほぼ同等の性能を有している。

(4)鎖交面積特性試験

ヘルムホルツコイルの中心位置に AT プローブ S タイプを取り付け、ヘルムホルツコイルに加えた電流とプローブの出力の関係から鎖交面積を求めた。結果を表 3 に、試験の模式図を図 14 に示す。尚、鎖交面積の値は、400 Hz の正弦波でヘルムホルツコイルに 1～5 A の電流を印加し、プローブから出力されたそれぞれの値を平均化して求めている。

AT プローブ単品の鎖交面積は先に述べたように、 $0.0291\text{--}0.0329 \text{ m}^2$ であるのに対し、AT プローブ S タイプのそれは $0.0281\text{--}0.0309 \text{ m}^2$ であり、ほぼ同様の結果を示している。しかしながら、これらの値は JT-60U で使用している電磁気検出器に比べると明らかに小さく、AT プローブ S タイプの X 軸の鎖交面積は、TC プローブの 1/10 である。

4.3.2 放出ガス測定

昇温脱離ガス分析装置 (Thermal Desorption Spectrometry : TDS) を用いてセラミックファイバーを昇温加熱し、そこから放出されるガス種とその温度依存性を測定した。試験条件は常温から 55°C ステップで 450°C まで昇温し、1 時間その状態を保持した後、最終的には 760°C まで昇温した。その結果、セラミックファイバーには 300°C と 600°C に真空度変化のピークが現れるが、これらの質量スペクトルはいずれも水であり、セラミックファイバー形成時に表面ならびに内部に閉じ込

められた水が、昇温に伴って脱離したものと考えられる。しかしながら、その量は試料重量に対して高々1%程度であり、他に特別なガスが検出されないことから、JT-60Uでの使用には特に問題がないことが分った。

4.3.3 振動試験

ATプローブSタイプの耐振動性能を確認するため、加振機を用いて振動試験を行った。振動試験は、加振力1000 kgfの加振機に図15(a)に示すような状態でATプローブSタイプを取り付け、(b)のように加振方向をZ軸及びY軸の2軸として実施した。尚、試験条件は振動周波数100 Hzにおいて加速度を10 Gから110 Gの範囲内で20 Gステップずつ上昇させ、各5秒間加振した。結果を表4に示す。各ステップ後に行った導通は良好であり、110 Gまで加振してもATプローブSタイプの健全性は保たれている。

4.4 JT-60Uへの設置

ATプローブのディスラプションに対する耐振動性と耐放射線性、さらにはプラズマ計測時のシグナルノイズ(SN)の状況を確認するため、ATプローブSタイプをJT-60U真空容器内に設置した。設置箇所はP4のインナーボード側で、信号線の引出しにはP6斜上の電磁気引出しポート(IN-1D-b)を利用した。ATプローブSタイプからの出力信号は、実験棟本体室内の中継端子箱(TB4-4)を経由して全系CAMAC盤室の高精度長時間デジタル積分器(V/F変換器)に入力し、10倍に増幅信号処理した後で全系制御設備に転送される。尚、V/F変換器は、トカマク型核融合装置における磁場変動信号を時間積分する方式として原子力機構が開発したものであり、電圧周波数変換器(VFコンバータ)・昇降計数器(アップダウンカウンター)を採用した高精度、長時間デジタル積分器である[5-8]。図16にATプローブSタイプの敷設ルートを、図17にV/F変換器の原理図示す。P4のインナーボード側にATプローブSタイプを設置した理由は、トロイダル方向に離れているが、比較用のTCプローブ(PBTC08-13)が同じポロイダル断面上に存在し、さらには、設置位置の近くに使用していない3本のTCプローブ(PBTC08-4～PTBC10-4)の引き出し線があって、これが転用できるためである。図18にATプローブSタイプとTCプローブの配置を示す。ATプローブSタイプの取り付けにおいては、電磁力ならびにプラズマからの入熱等を考慮し、既存の電磁気検出器と同じ方法で取り付け座ごと第一壁の裏側にクリート止めで固定している。また、引き出し線は既存のMIケーブルを切断し、これとATプローブSタイプのMIケーブルを真空容器内で中間接続端子を使って接続している。尚、電気絶縁はMIケーブルとセラミックにて確保し、アースは計測器側で取ることとした。

4.5 結論

LHDで使用しているATプローブをJT-60U用に取り合い部を製作し、耐振動性能を向上させる構造に改良した。その結果、JT-60Uで必要とされている加振力80 Gを上回る耐振動性能を得ることができた。さらに電気的試験、放出ガス測定でも良好な結果が得られており、構造的にはJT-60Uでも十分に使用できる見通しを得た。

5. 結果と考察

5.1 耐振動性

AT プローブ S タイプは、据付け後 8 ヶ月の実験運転で 1896 ショットのプラズマにさらされている。その内、最初の 3 ヶ月の約 600 ショット（ディスラプション約 100 ショットを含む）までは確認し、出力に異常は認められていない。従って、耐振動特性も良好である。

5.2 耐放射線性

据付け後 8 ヶ月の実験運転では 9.67×10^{18} 個の中性子発生量、最初の 3 ヶ月間では 3.38×10^{18} 個の中性子発生量があり、その極一部が AT プローブに照射されることになる。従って、上記期間の 1 ショットあたりの平均中性子発生量は、 5.1×10^{15} 個である。しかしながら、先に述べたように出力に異常は認められていない。因って、耐放射線性能についても問題はないと言える。

5.3 磁場測定結果

実験運転において、AT プローブ S タイプと TC プローブ（PBTC08-13）の出力信号を比較した。先に述べた通り AT プローブ S タイプと PBTC08-13 ではトロイダル方向の設置位置は異なるが、ポロイダル断面においてはほぼ同座標（インボード側、水平面上 50 cm）上にある。

AT プローブ S タイプと PBTC08 の積分結果波形ならびにプラズマ位置の関係を図 19 に示す。プラズマ位置の変化に対応して、各々の検出器の出力が変化していることがわかる。また、両者の波形は極めて類似しており、波形拡大部の勾配からも応答性能はほぼ同じであることが確認できた。AT プローブの鎖交面積は PBTC の 1/10 ではあるが、V/F 変換器で増幅してもノイズ等に起因する振動成分は見られない。さらに、据付け後 3 ヶ月間の実験期間を経ても安定した測定結果が得られており、再現性も保たれている。しかしながら、特定のプラズマ放電、例えば、瞬時にプラズマの蓄積エネルギーが開放され、結果としてスパイク状の信号が検出された場合、AT プローブ S タイプと PBTC の出力に差が生じている。これは周波数特性 (L) の違いにより、急激な変化に追従しきれていないためと考えられる[9]。

5.4 結論

JT-60U の真空容器内部に AT プローブ S タイプを設置し、約 2000 ショットにおよぶプラズマ放電にさらした。その結果、ディスラプションを経験しても機械的特性が損なわれることはなく、長期にわたる中性子照射に対しても出力の経時変化は皆無であった。また、V/F 変換器を介して信号処理することにより、既存の TC プローブとほぼ同等の出力値が得られており、AT プローブをトカマク装置に適用出来るかどうかについて、期待できる良好な初期データが得られている。

6. 結言

AT プローブのトカマク装置での使用の可能性を探るため、JT-60U 用に取り合い部を製作し、110 G にもおよぶ耐振動試験を経て試験的に本プローブを第一壁直下に設置した。その後、既設の電磁気検出器との比較による出力の妥当性やディスラプション時における耐振動性、耐放射線性について検証した。その結果は良好であり、トカマク装置の環境下においても十分に使用できる見通しを得た。今後、さらに AT プローブの課題を抽出し、それを踏まえた改良型の試作を行う予定である。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有意義なコメント及び御指導を戴いた逆井章トカマク本体機器システム開発グループリーダー及び細金延幸トカマクシステム技術開発ユニット長、宮直之研究主席に深く感謝します。また、磁場計測にあたり、データ収集ならびに解析に対して有益な議論をして頂いた栗原研一トカマク放電システム開発グループリーダーに感謝します。

参考文献

- [1] 柳原悟、栗原研一：「最近の磁気計測事情」Journal of Plasma and Fusion Research Vol.80, No.5 (2004), pp.364~371
- [2] 関谷譲、細金延幸他、私信
- [3] T. Takahashi, S. Sakakibara et al., Rev. Sci. Instrum. 72, 3249 (2001).
- [4] 笹島唯之、柳生純一他：「積層型プローブの JT-60 設置」平成 15 年度 高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告 (KEK Proceedings 2003-16, 4-011)
- [5] 栗原研一、川俣陽一、JAERI-Research 97-072
- [6] K. Kurihara, Y. Kawamata, "Development of a Precise Long-Time Digital Integrator for Magnetic Measurements in a Tokamak," Proceedings of 19th Symposium on Fusion Technology, (Lisbon, 1996) pp.1530-1533.
- [7] K. Kurihara, Y. Kawamata, "Development of a Precise Long-Time Digital Integrator for Magnetic Measurements in a Tokamak," Proceedings of IEEE 17th Symposium on Fusion Engineering, (San Diego, 1997) pp.799-802.
- [8] Y. Kawamata, et.al., "Development of an Intelligent Digital Integrator for Long-Pulse Operation in a Tokamak", IEEE 19th Symposium On Fusion Engineering, (Atlantic City, 2002) pp.172-175.
- [9] 三代康彦、柳原悟他：「積層型電磁気検出器の JT-60 への適用」第 5 回核融合エネルギー連合講演会（仙台、2004）予稿集 p.58

図表リスト

表リスト

- 表 1 セラミックファイバー仕様
- 表 2 耐電圧試験結果
- 表 3 鎮交面積特性試験結果
- 表 4 振動試験結果

図リスト

- 図 1 電磁気検出器の配置
- 図 2 TC プローブの形状
- 図 3 TC プローブの周波数特性
- 図 4 N プローブの形状
- 図 5 N プローブの周波数特性
- 図 6 TM プローブの形状
- 図 7 TM プローブの周波数特性
- 図 8 AT プローブ・セラミック板構造
- 図 9 AT プローブの形状
- 図 10 AT プローブ S タイプ構造図
- 図 11 AT プローブ S タイプ・X 軸周波数特性
- 図 12 AT プローブ S タイプ・Y 軸周波数特性
- 図 13 AT プローブ S タイプ・Z 軸周波数特性
- 図 14 鎮交面積測定試験模式図
- 図 15 AT プローブ S タイプの振動試験模式図
- 図 16 AT プローブ S タイプの敷設ルート図
- 図 17 V/F 変換器の原理図
- 図 18 AT プローブ S タイプと TC プローブの配置
- 図 19 AT プローブ S タイプと PBTC08 の積分結果波形ならびにプラズマ位置の関係

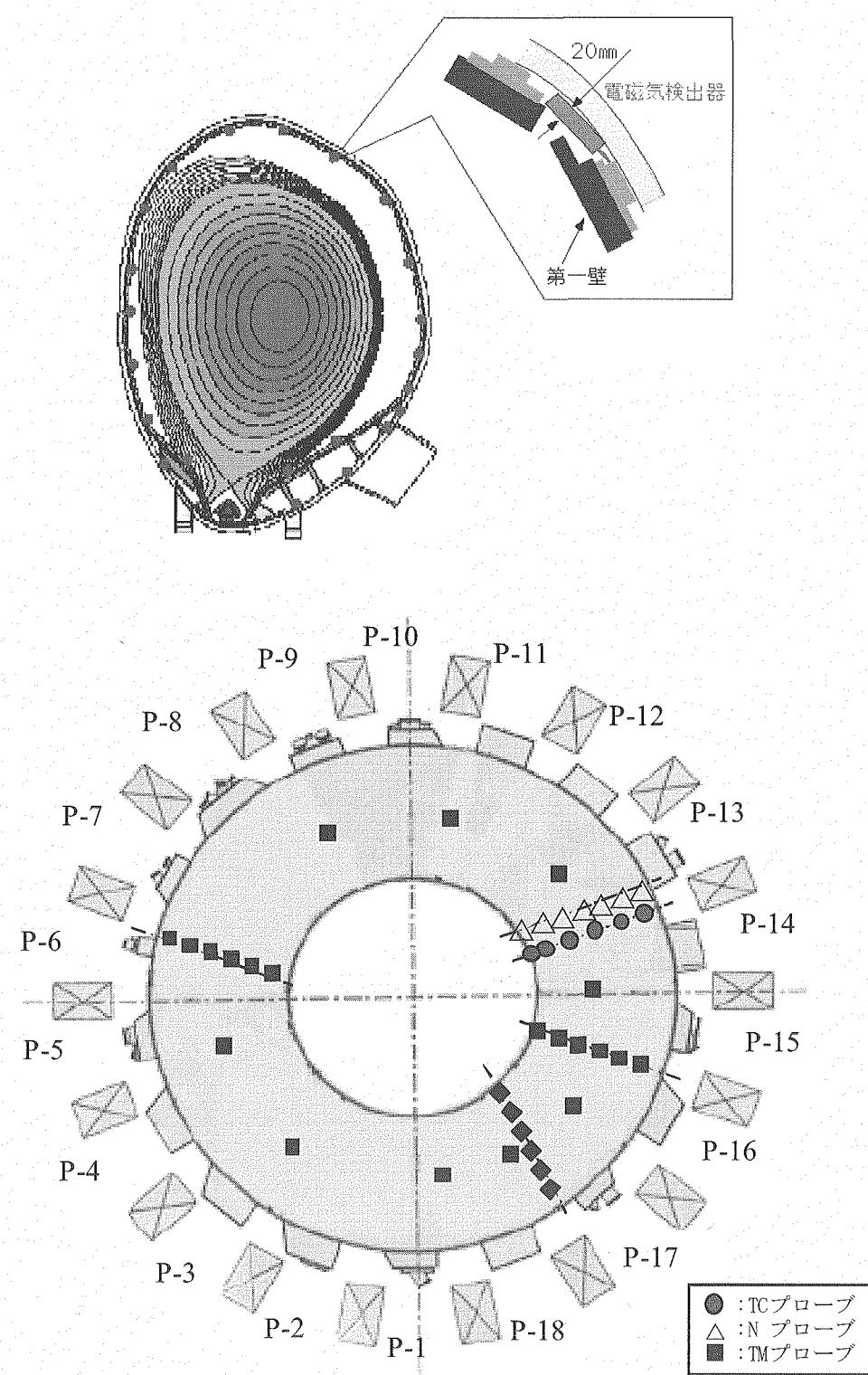


図1 電磁気検出器の配置

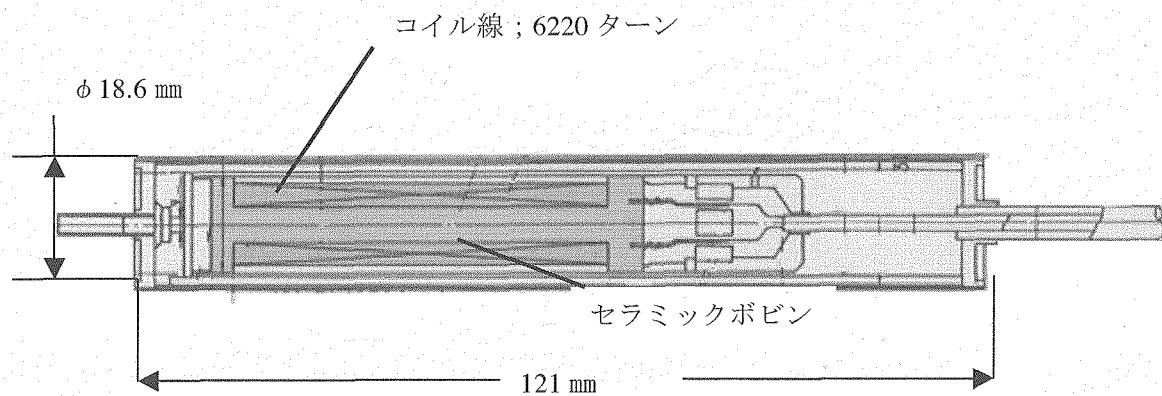


図2 TCプローブの形状

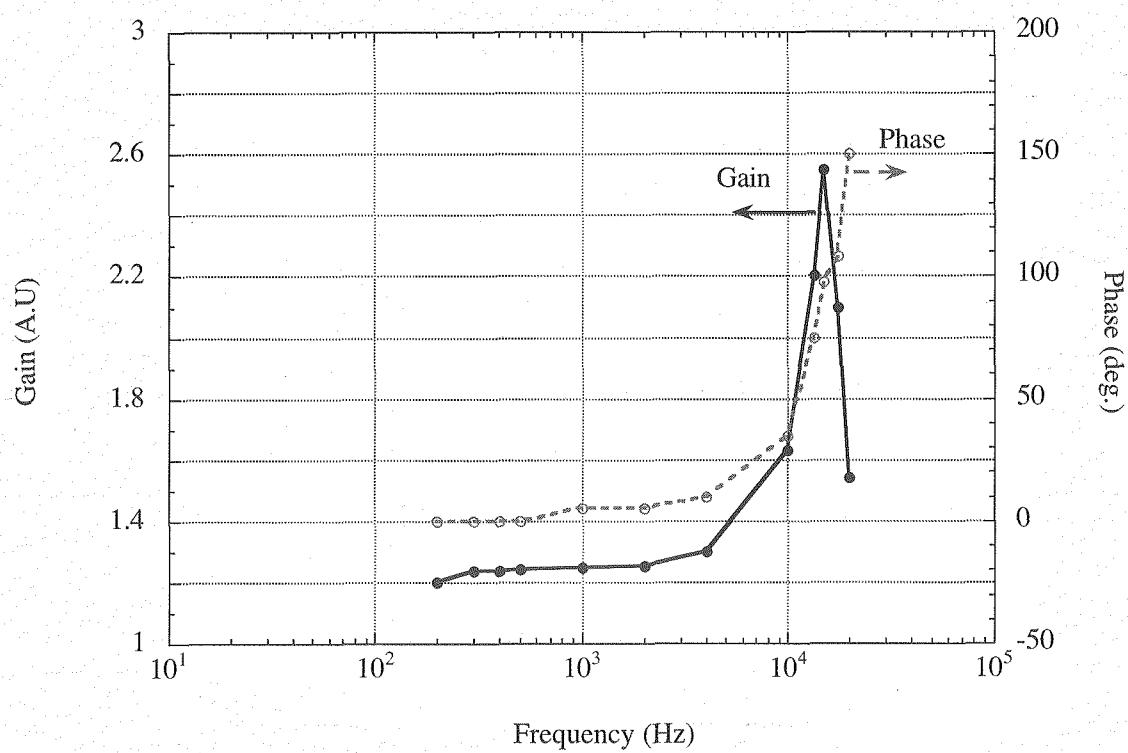


図3 TCプローブの周波数特性[2]

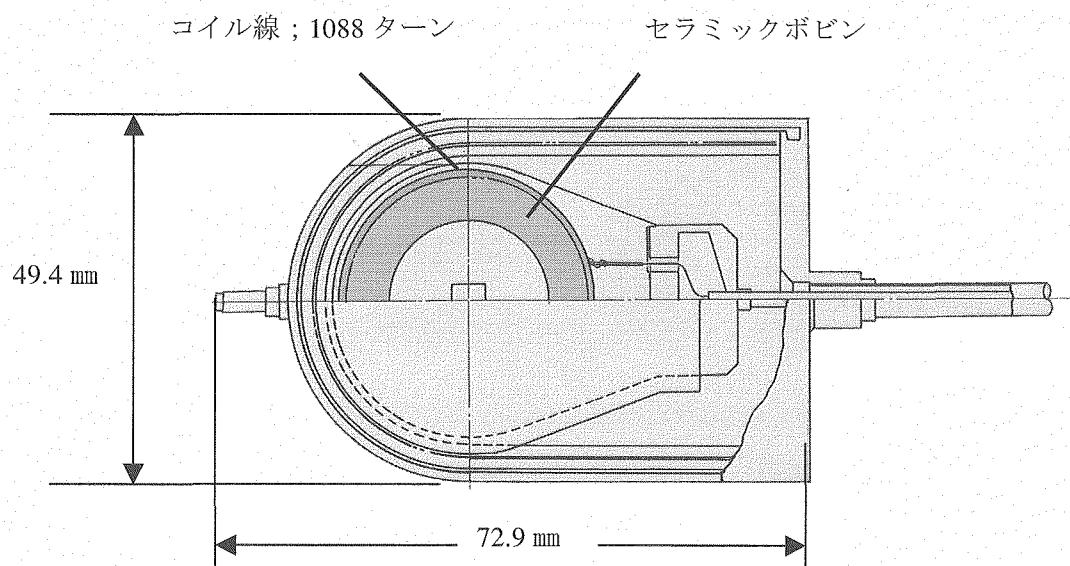


図4 Nプローブの形状

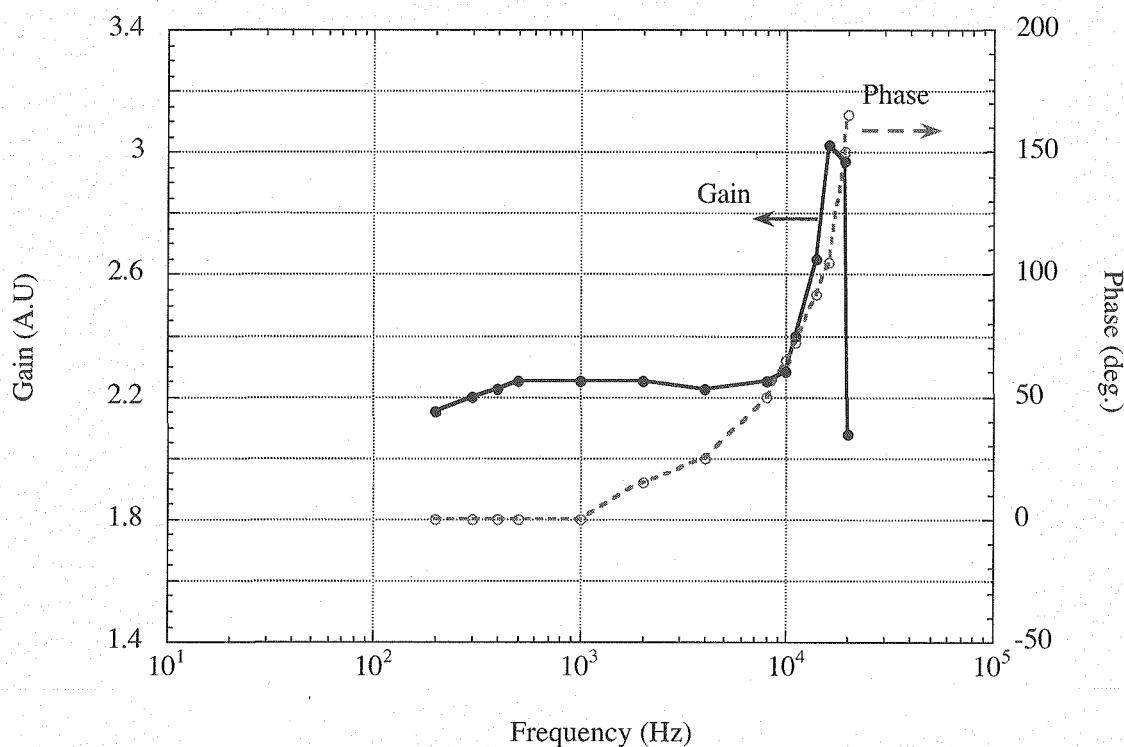


図5 Nプローブの周波数特性[2]

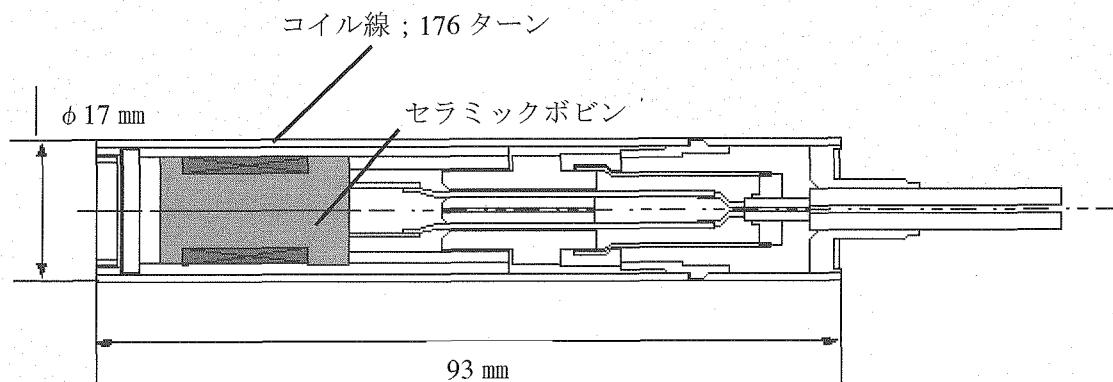


図6 TMプローブの形状

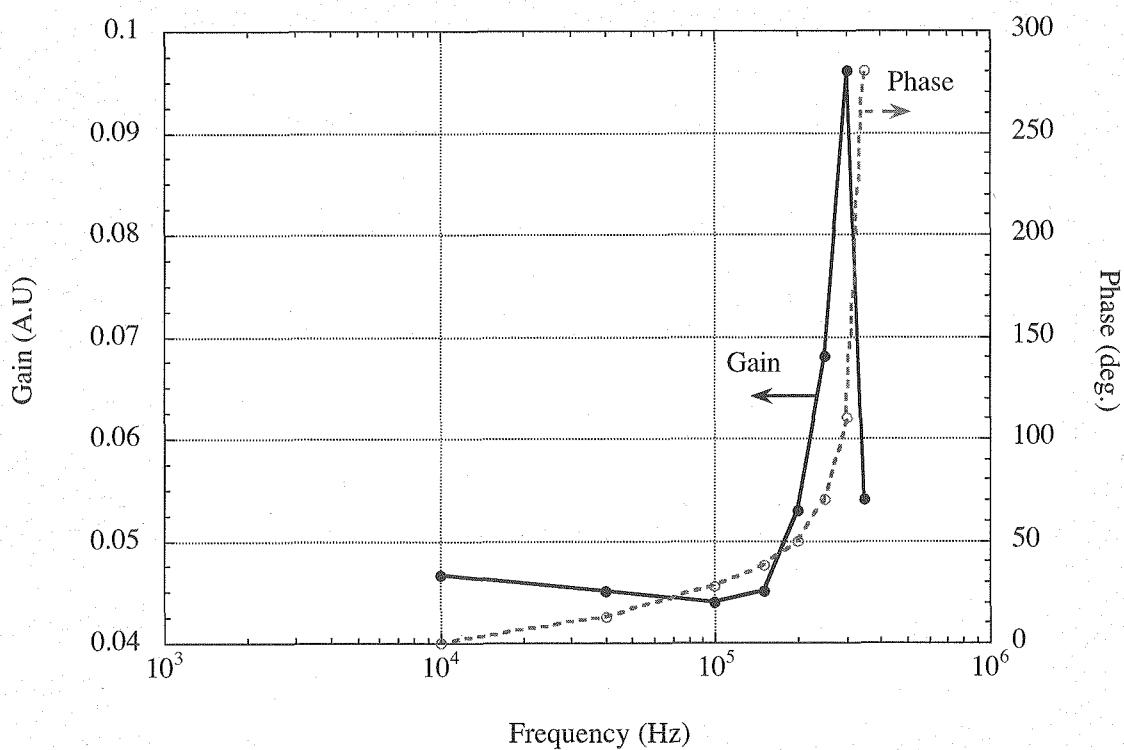


図7 TMプローブの周波数特性[2]

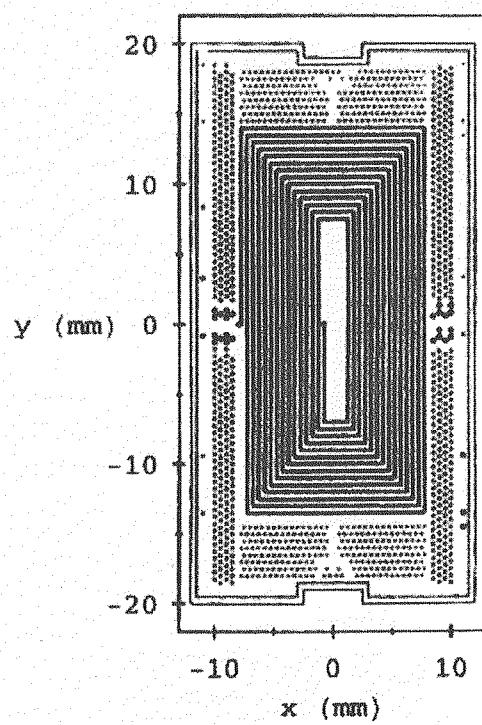
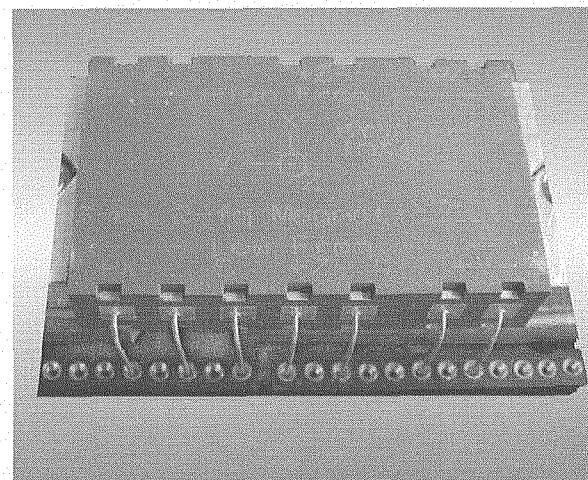


図 8 AT プローブ・セラミック板構造[1]



外観

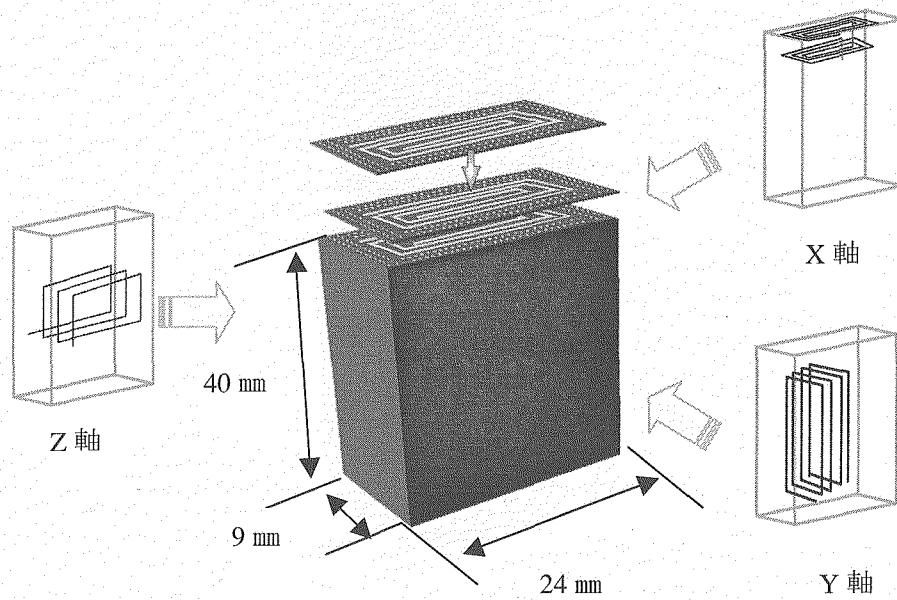


図9 AT プローブの形状

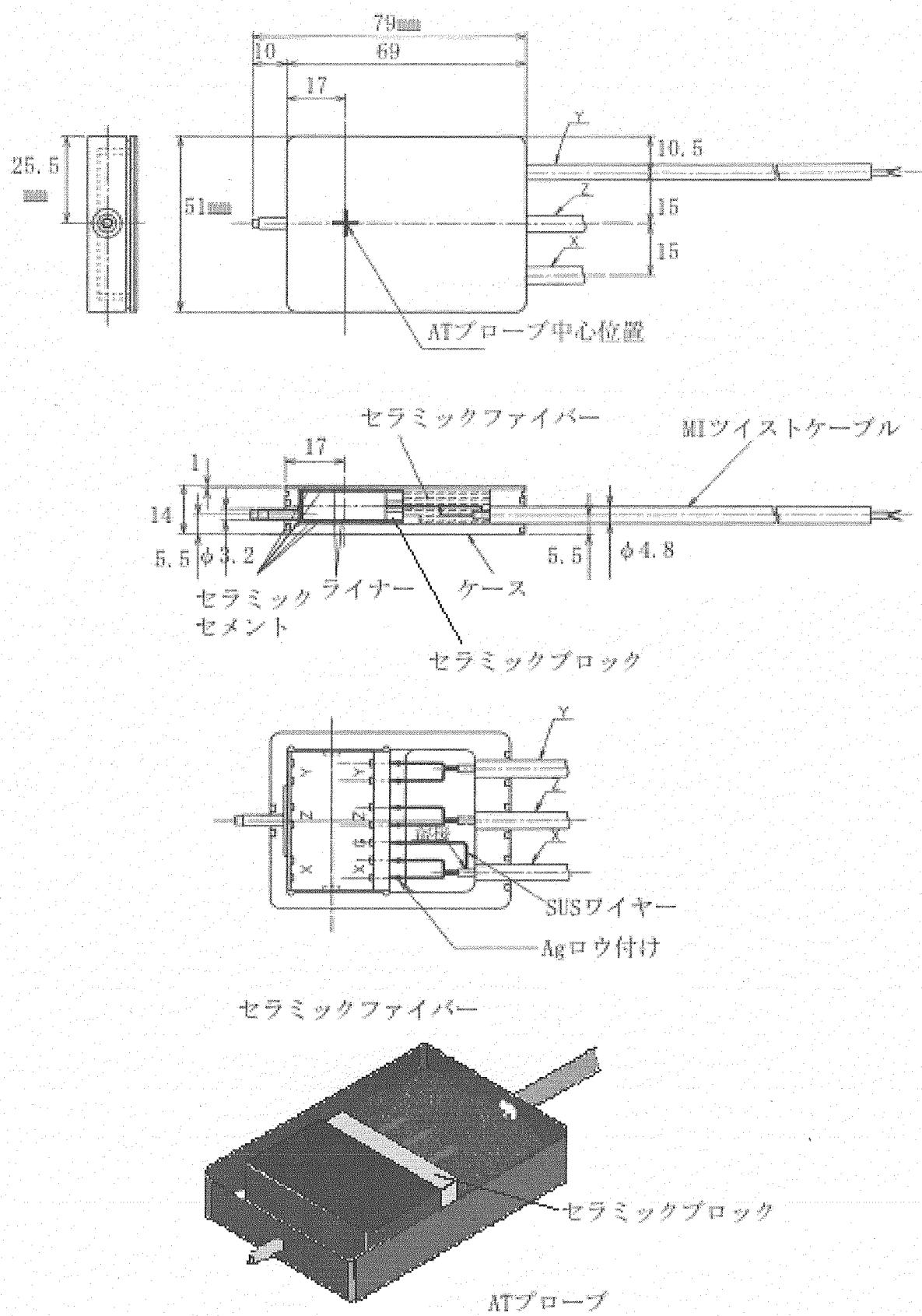


図 10 AT プローブ S タイプ構造図

表1 セラミックファイバー仕様

色調	純白
平均纖維径 (μm)	2.5
充填密度 (kg/m^3)	60~250
真比重	2.63
比熱 (100°C) $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{°C}$	1.0×10^3
最高使用温度 (°C)	1300
化学組成 (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2=49:51$
熱伝導	
平均温度 (°C)	熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$)
400	0.08
600	0.12
800	0.17
1000	0.23

表2 耐電圧試験結果

項目 AT-S タイプ	耐電圧前絶縁抵抗試験		耐電圧試験		耐電圧後絶縁抵抗試験		導通 (Ω)
	芯線と内 シース間	内シースと 外シース間	芯線と内 シース間	内シースと 外シース間	芯線と内 シース間	内シースと 外シース間	
X軸	20M Ω 以上	20M Ω 以上	異常なし	異常なし	20M Ω 以上	20M Ω 以上	508
Y軸	20M Ω 以上	20M Ω 以上	異常なし	異常なし	20M Ω 以上	20M Ω 以上	360
Z軸	20M Ω 以上	20M Ω 以上	異常なし	異常なし	20M Ω 以上	20M Ω 以上	275

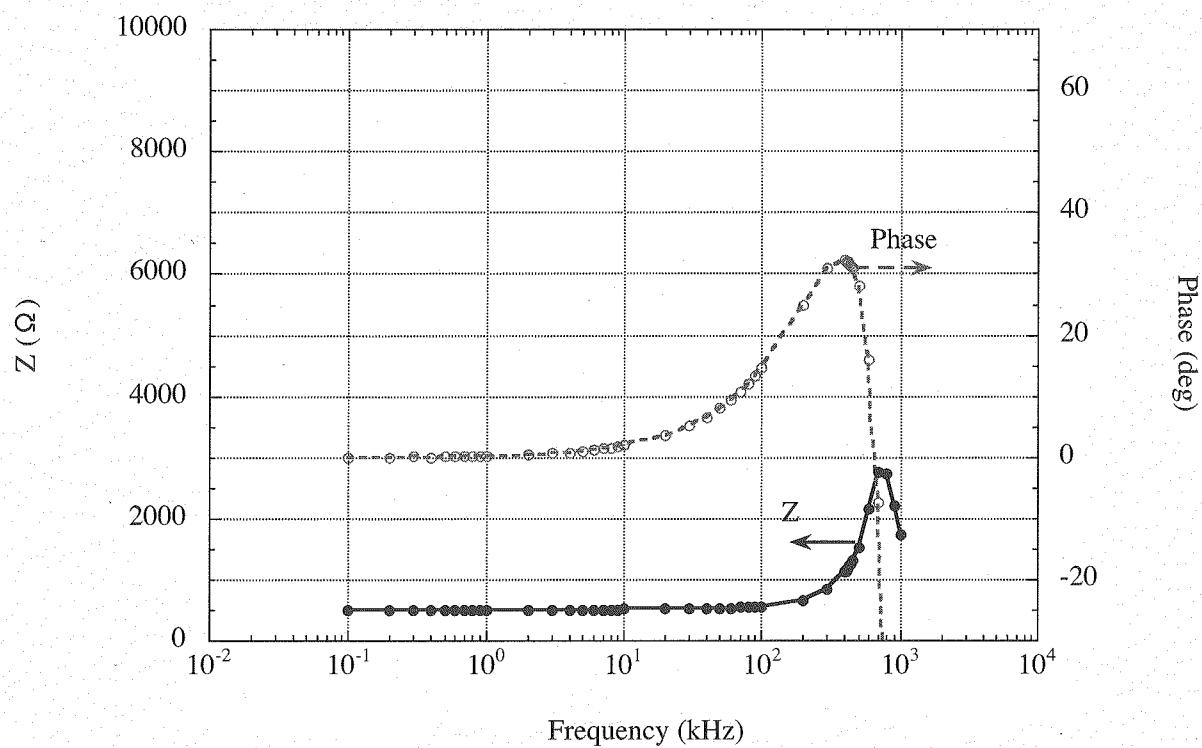


図 11 AT プローブ S タイプ・X 軸周波数特性

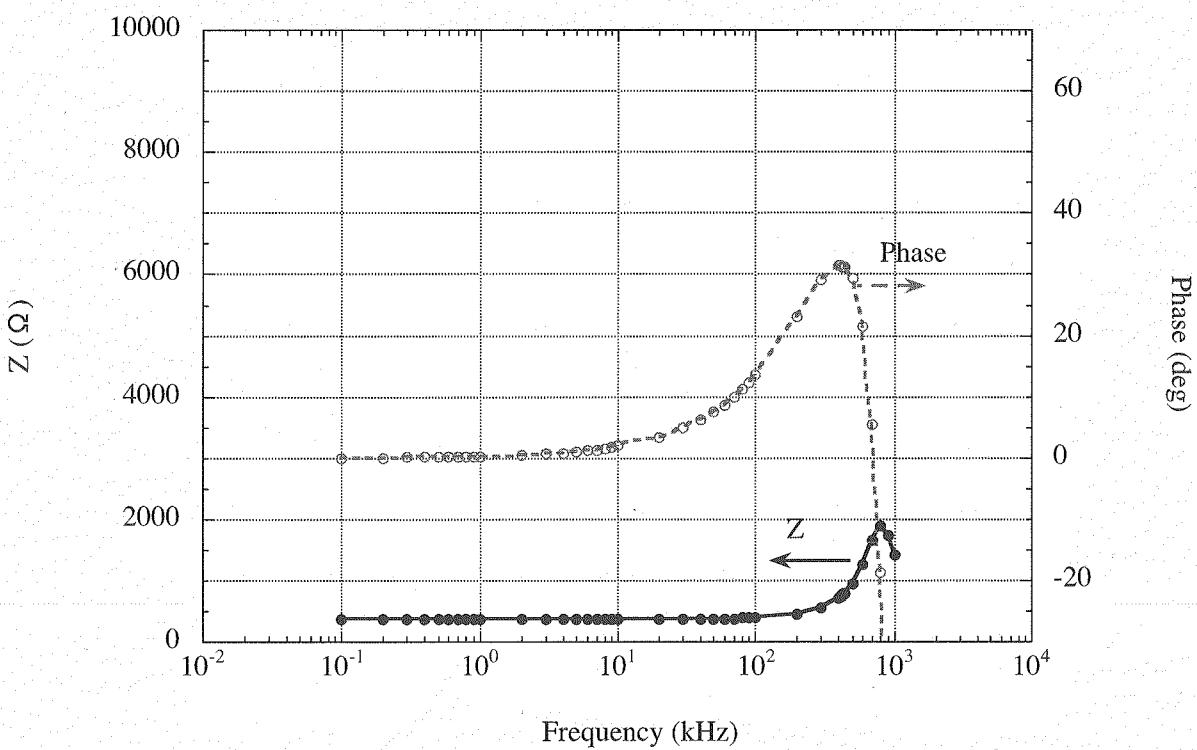


図 12 AT プローブ S タイプ・Y 軸周波数特性

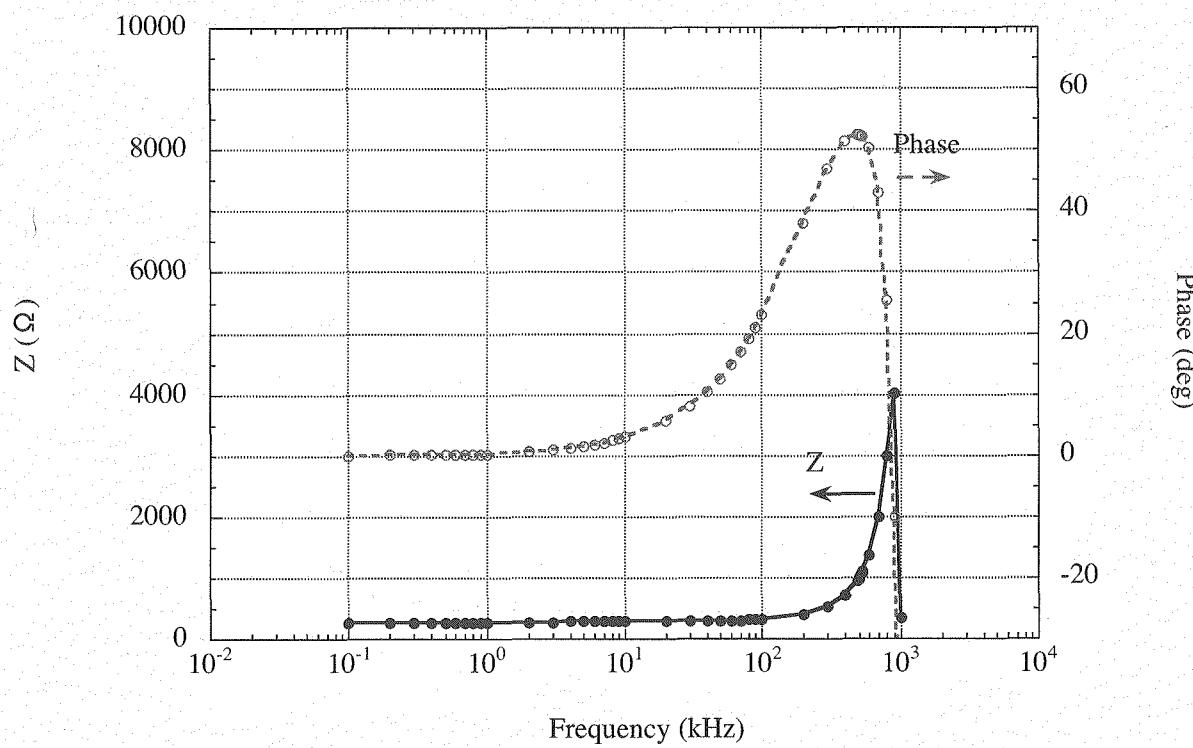


図 13 AT プローブ S タイプ・Z 軸周波数特性

表3 鎮交面積特性試験結果

	ヘルムホルツコイル の設定電流 (A)	1	2	3	4	5	平均値 (mV/A)	鎮交面積 (m ²)
X軸	実測電流値 (A)	1.001	2.006	3.002	4.002	5.007	8.34	0.0304
	プローブ出力 (mV)	8.31	16.71	25.07	33.46	41.91		
Y軸	実測電流値 (A)	1.006	2.007	3.006	4.005	5.018	8.48	0.0309
	プローブ出力 (mV)	8.53	17.03	25.51	33.97	42.55		
Z軸	実測電流値 (A)	1.003	2.005	3.005	4.005	5.008	7.72	0.0281
	プローブ出力 (mV)	7.74	15.48	23.2	30.93	38.65		

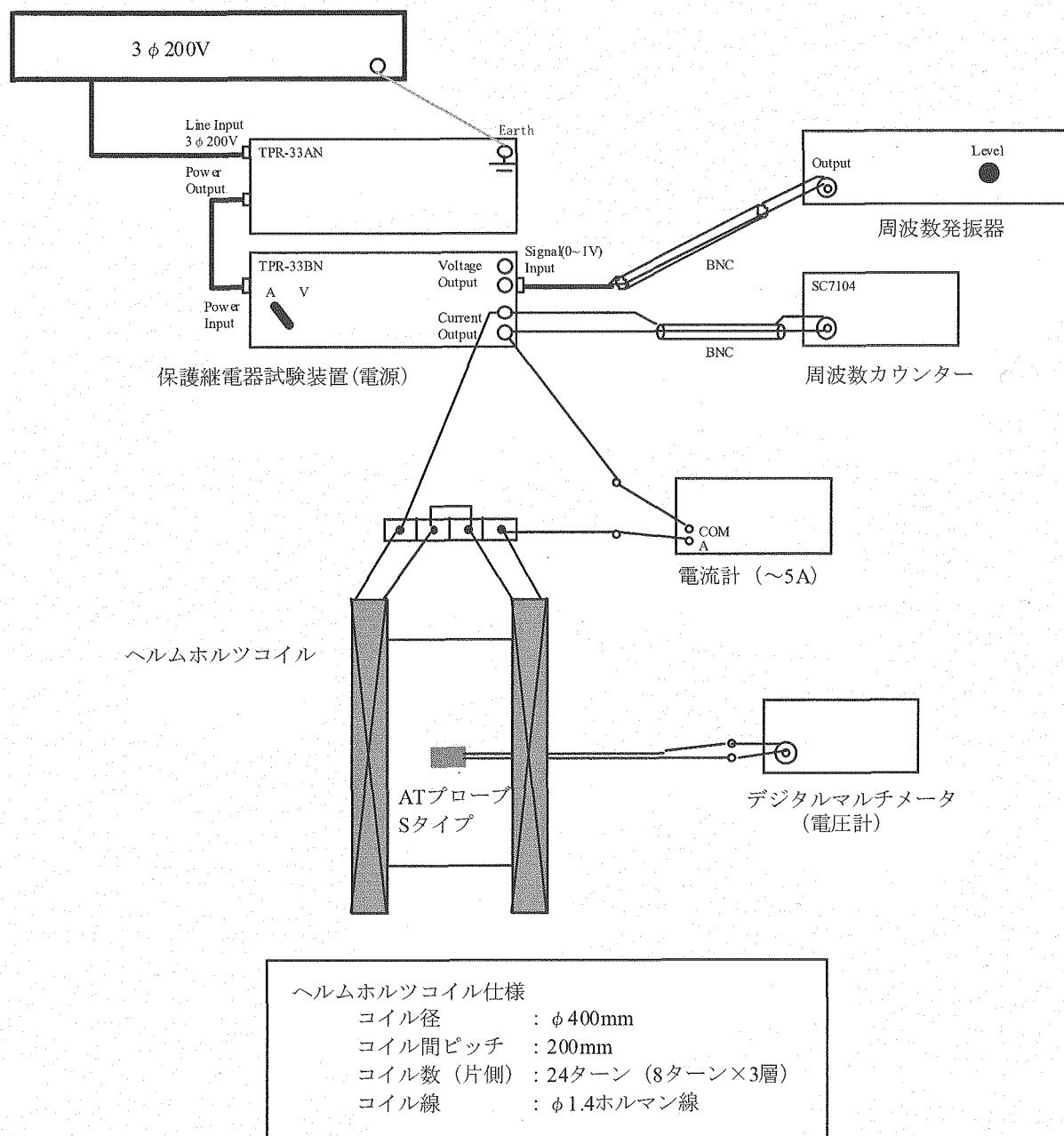
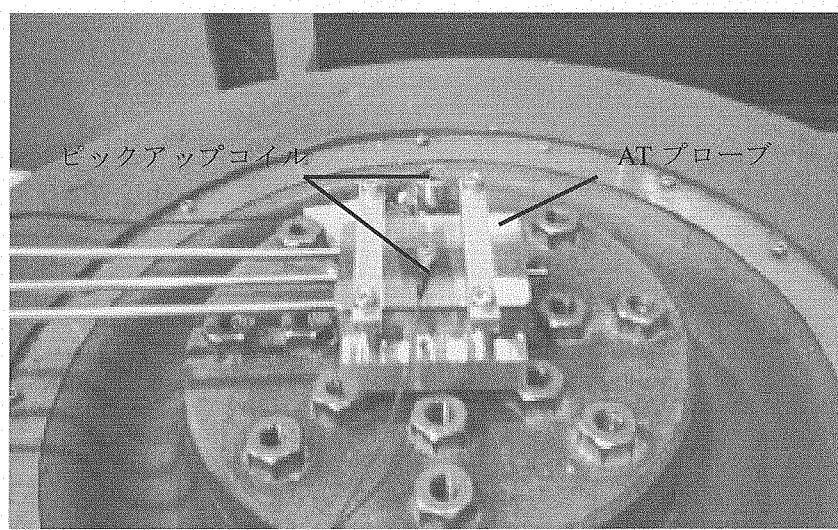
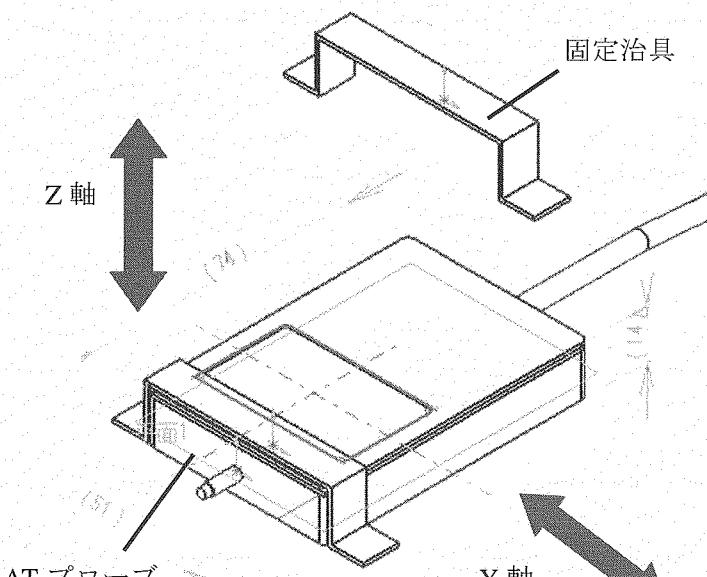


図 14 鎮交面積測定試験模式図



(a) 加振機への据付け状態



(b) 加振方向

図 15 AT プローブ S タイプの振動試験模式図

表4 振動試験結果

1. 加振方向: Z軸

加速度 (G)	ATプローブSタイプ		
	X軸(Ω)	Y軸(Ω)	Z軸(Ω)
試験前	512	277	369
10	512	287	372
30	511	277	369
50	512	276	365
70	511	277	364
90	511	276	365
110	511	276	362

2. 加振方向: Y軸

加速度 (G)	ATプローブSタイプ		
	X軸(Ω)	Y軸(Ω)	Z軸(Ω)
試験前	513	277	369
10	513	277	368
30	513	277	367
50	513	277	368
70	513	277	368
90	513	277	368
110	513	278	368

<本体室>

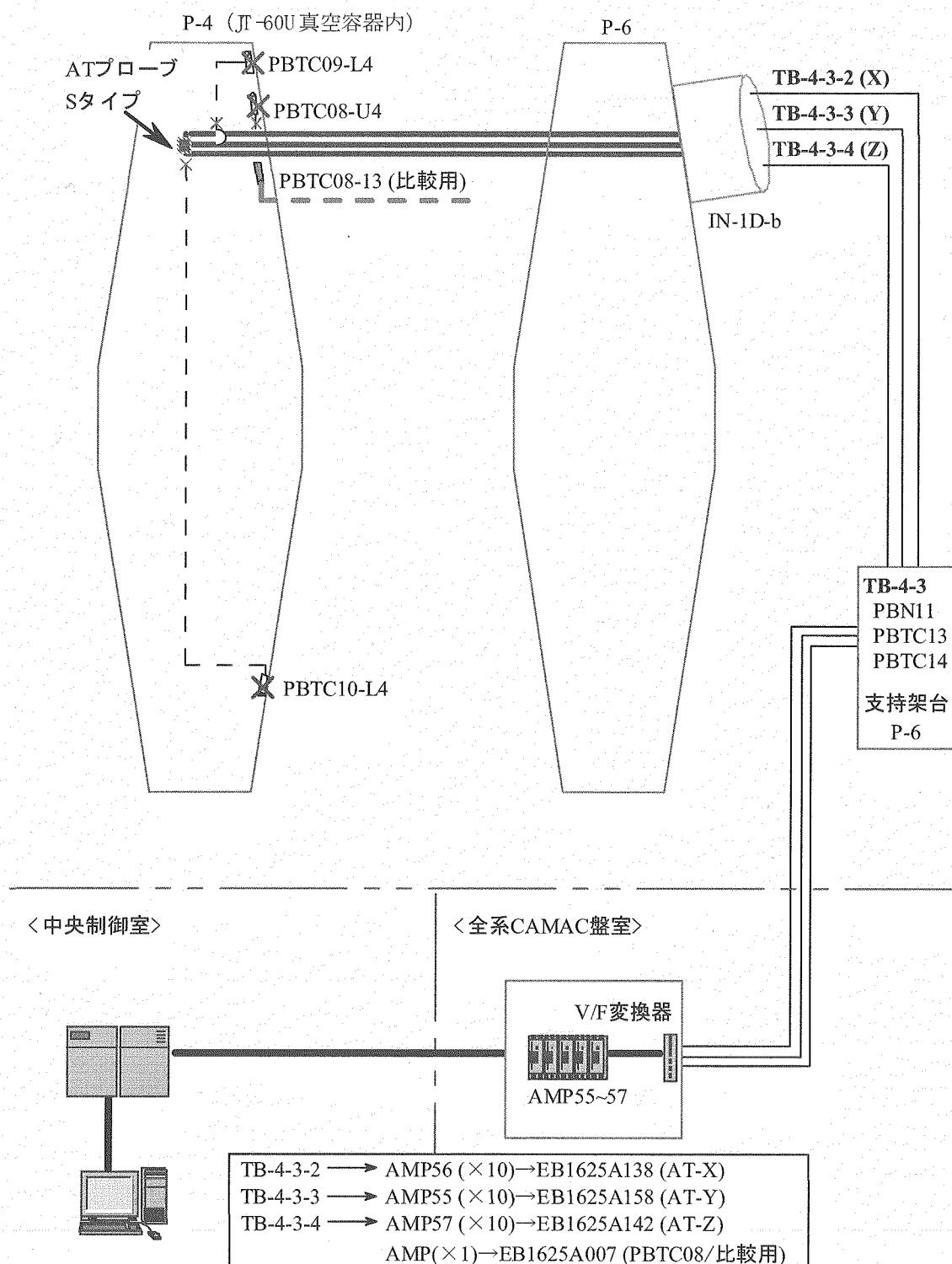


図 16 AT プローブ S タイプの敷設ルート図

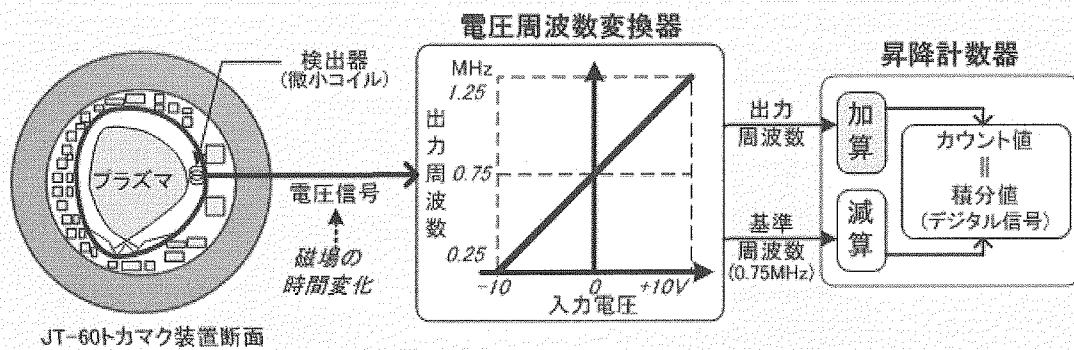


図 17 V/F 変換器の原理図

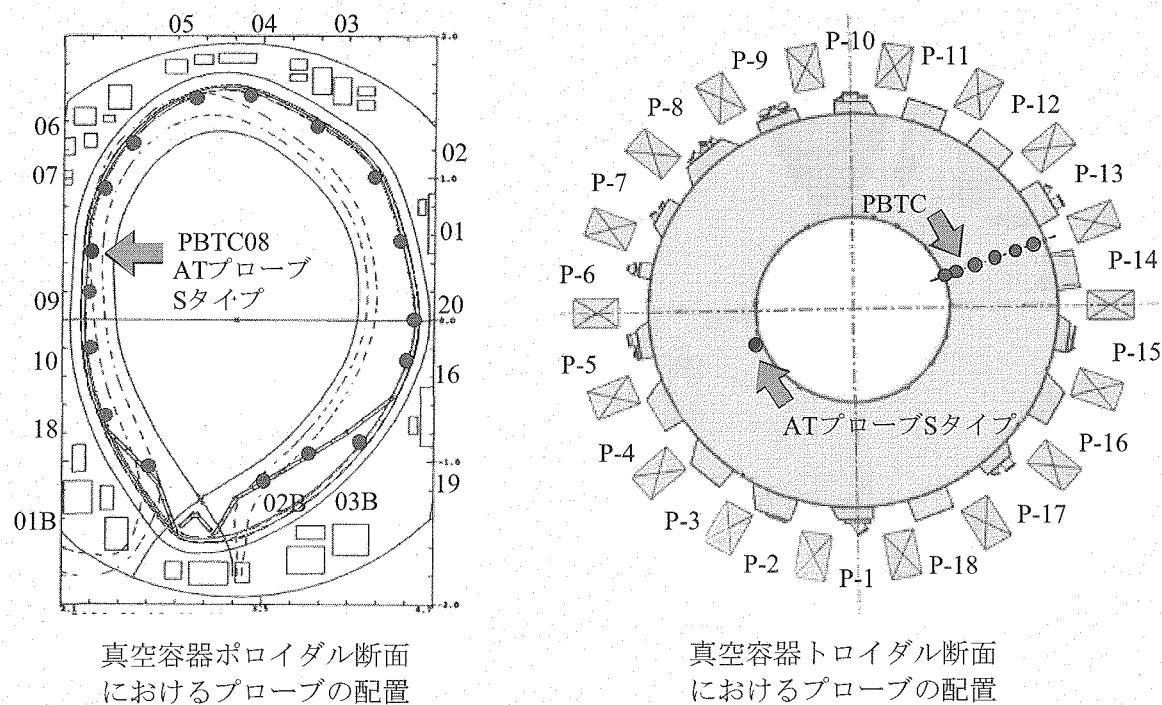
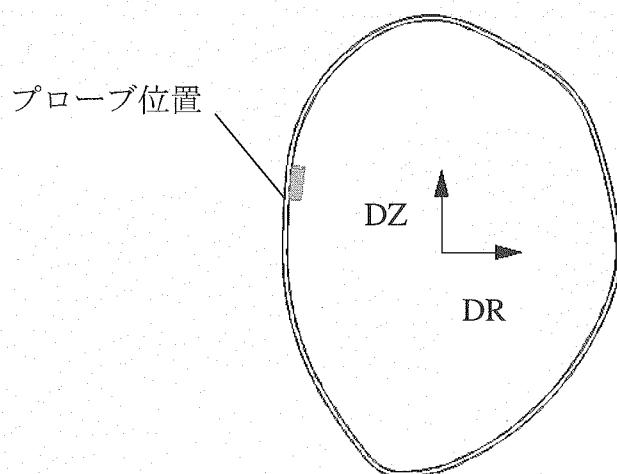


図 18 AT プローブ S タイプと TC プローブの配置



プラズマ位置が
DR方向+で、プローブ出力は+
DZ方向+で、プローブ出力は+

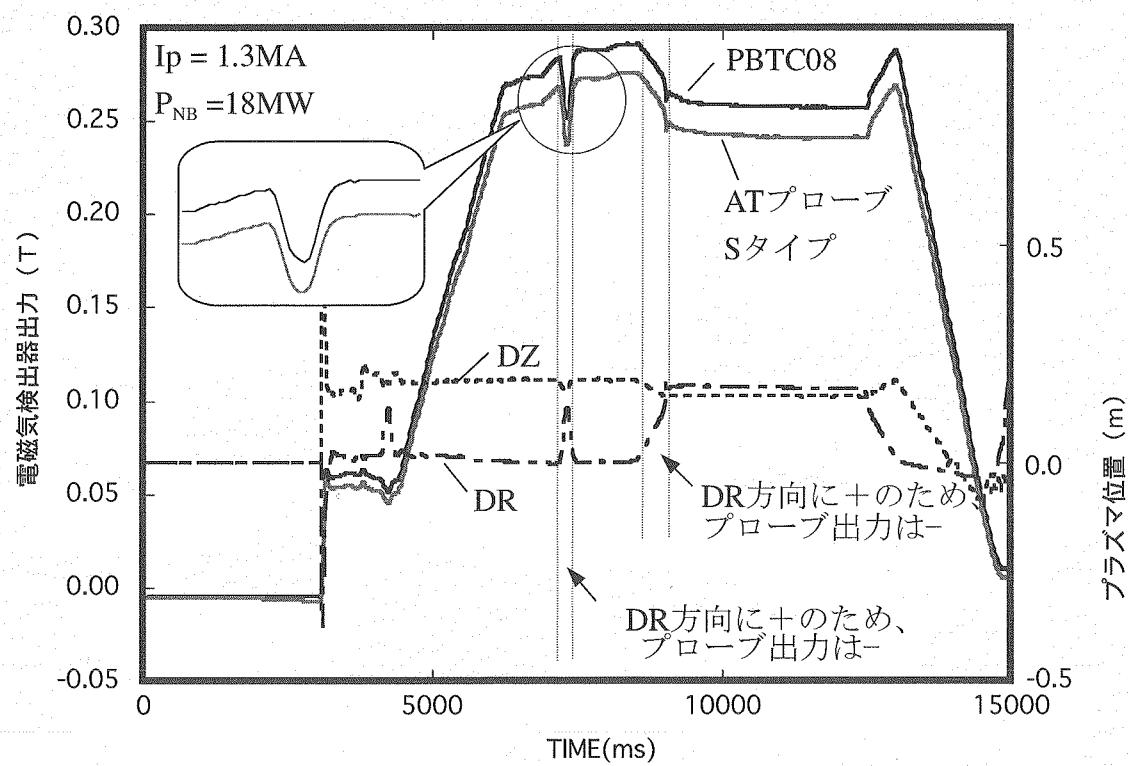


図 19 AT プローブ S タイプと PBTC08 の積分結果波形、ならびにプラズマ位置の関係

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
立体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎メートル	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(数の)	1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}C$	Wb/m^2
光度	ルーメン	lm	Wb/A
(放射性核種)の放射能	ベクレル	Bq	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量、個人線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m^{-1} \cdot s^{-2} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム		
質量エントロピー	一毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	$W/(m \cdot K)$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル		
モル熱容量	ビン	$J/(mol \cdot K)$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アトト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^{\circ}=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^{\circ}=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーパ	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アード	a	$1a=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オングストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$
ペニン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニン	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 \text{ P}=1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2=0.1 \text{ Pa} \cdot s$
ストークス	St	$1 \text{ St}=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガウス	G	$1 \text{ G}=10^{-4} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 \text{ Oe}=(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx}=10^{-8} \text{ Wb}$
スチール	sb	$1 \text{ sb}=1 \text{ cd}/\text{cm}^2=10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$
ホット	ph	$1 \text{ ph}=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 \text{ Gal}=1 \text{ cm}/\text{s}^2=10^{-2} \text{ m}/\text{s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位		$1X \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジアンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
力口リ	cal	$1 \text{ cal}=1 \text{ J}$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu \text{m}=10^{-6} \text{ m}$