

JAERI-Tech  
2005-060



JP0550513



## JFT-2Mにおける3次元磁場計測装置の開発

2005年 9月

山本 正弘・都筑 和泰・木村 晴行・佐藤 正泰  
柴田 孝俊・岡野 文範・鈴木 貞明

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

## JFT-2Mにおける3次元磁場計測装置の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

山本 正弘・都筑 和泰<sup>+</sup>・木村 晴行<sup>++</sup>・佐藤 正泰<sup>+</sup>  
柴田 孝俊・岡野 文範・鈴木 貞明

(2005年8月11日受理)

低放射化フェライト鋼は、核融合原型炉の構造材候補の一つである。しかしながら、フェライト鋼は強磁性材料であり、プラズマの閉じ込めや安定性が誤差磁場によって損なわれる恐れがある。

そこで、プラズマとフェライト鋼との適合性について調査するためにトカマク型プラズマ実験装置「JFT-2M」において先進材料プラズマ試験(AMTEX)が実施された。AMTEXは、低放射化フェライト鋼板を段階毎に設置して実施した。第3段階において、フェライト鋼板がブランケット壁を模擬して、真空容器の内壁の殆ど全部を覆うように設置された。

この試験に於いて、フェライト鋼板の設置の前・後における磁場強度分布の正確な測定が要求された。フェライト鋼板設置後において、トロイダル磁場リップルは、約0.5%以下であった。また、磁場センサーの位置の誤差は、磁場が主半径方向に勾配を持っているために非常にセンシティブである。それ故、3次元磁場計測装置の設計製作の段階において、測定精度0.1%以下(トロイダル磁場1Tにおいて)、及び三次元の位置精度1mm以下を満たす3次元の磁場計測装置が開発された。

---

那珂研究所（東海駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+ : 炉心プラズマ研究部

++ : 企画室

## **Development of the Device for 3D-Measurement of the Magnetic Field Profile in the Toroidal Direction**

Masahiro YAMAMOTO, Kazuhiro TSUZUKI<sup>+</sup>, Haruyuki KIMURA<sup>++</sup>, Masayasu SATO<sup>+</sup>,  
Takatoshi SHIBATA, Fuminori OKANO and Sadaaki SUZUKI

Department of Fusion Facilities  
(Tokai Site)

Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 11, 2005)

The low activation ferritic steel is one of the candidate for structural material of a demo-reactor. However, it was afraid that the plasma confinement and stability might degrade due to the error field by the ferromagnetic property of the ferritic material. So, on JFT-2M tokamak Advanced Material Tokamak EXperiment program (AMTEX) has been carried out to investigate about the conformity with the plasma and ferritic steel. AMTEX was performed by introducing low activation ferritic plates (FPs) step by step. At the third stage, the FPs were installed to cover almost whole inside wall (FIW) of the vacuum vessel (VV) as a simulation of the blanket wall. In this experiment the accurate measurement of the distribution of the magnetic fields strength was required before and after the installation of the FIW. Therefore, the device for 3D-measurement of the magnetic field profile along the toroidal direction was developed. After the FIW are installed, the ripple of toroidal fields is smaller than about 0.5%. And, the deviation of the position of the magnetic sensor is sensitive because magnetic fields have a gradient in the major radial direction. Therefore, as a condition of the design and fabrication, less than 0.1% of the measuring precision (in the toroidal fields 1T) and less than 1mm of the precision of the three-dimensional position are required with the device for 3D-measurement of the magnetic field profile.

Keywords: JFT-2M, Fusion Device, Measurement of Magnetic Field,  
Magnetic Ripple of Toroidal Direction, Ferritic Plate

---

+ Department of Fusion Plasma Research

++ Office of Planning

## 目 次

1. 概要 -----	1
2. 構造と性能 -----	2
2.1 台車 -----	2
2.2 レール及び支持脚 -----	2
2.3 磁場センサー及びセンサー治具 -----	3
2.4 コントローラ及び位置検出モニター -----	3
2.5 データ収集系 -----	3
3. 真空容器内設置作業 -----	3
4. 真空容器の変形量の測定 -----	4
5. 磁場計測 -----	4
6. まとめ -----	5
謝辞 -----	6
参考文献 -----	6

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Structure and Performance -----	2
2.1 Cart -----	2
2.2 Rail and Support Leg -----	2
2.3 Magnetic Sensor and Jig for Sensor -----	3
2.4 Controller and Monitor for the Position -----	3
2.5 Data Collection System -----	3
3. Installation Works in the Vacuum Vessel -----	3
4. Measurement of Deformation of Vacuum Vessel -----	4
5. Measurement of Magnetic Field -----	4
6. Summary -----	5
Acknowledgment -----	6
References -----	6

## 表リスト

- Table 1.1 磁場の変化量（単位距離、スパン当たり）  
Table 3.1 レールとセンサー治具の試験検査結果

## 図リスト

- Fig.1.1 JFT-2M の鳥瞰図  
Fig.2.1 3 次元磁場計測装置の鳥瞰図  
Fig.2.2 3 次元磁場計測装置の走行台車、磁場センサー  
Fig.2.3 レールを一定方向に押し付ける機構  
Fig.2.4 円環状レールの対角寸法  
Fig.2.5 磁場センサーホルダー  
Fig.2.6 位置検出用小型カメラと位置表示目盛  
Fig.2.7 データ収集系の構成  
Fig.3.1 走行中におけるセンサー治具の揺れの測定  
Fig.4.1 TFC-1 直下の真空容器断面の変形測定結果  
Fig.5.1 真空容器内の 3 次元磁場計測装置設置状況（フェライト鋼板設置後）  
Fig.5.2 リップル率の測定結果  
Fig.5.3 トロイダル磁場リップル及び真空容器の偏心量の評価概念

## 1. 概要

低放射化フェライト鋼は、将来の核融合原型炉における構造材の有力材料である。しかし、低放射化フェライト鋼は、強磁性体であることから、閉じ込め磁場配位を乱しプラズマの生成や閉じ込めへの悪影響が懸念される。一方、フェライト鋼の持つ強磁性を利用してトロイダル磁場リップルを低減し、高速イオンの損失を低減することが考えられる。

そこで、原研の所有する中型のトカマク型プラズマ実験装置「JFT-2M」( $R=1.31\text{m}$ 、 $a \leq 0.35\text{m}$ 、 $\kappa \leq 1.7$ 、 $B_{t0} \leq 2.2\text{T}$ )を使用して、トカマクプラズマに対するフェライト鋼の適合性について調査するために、「先進材料プラズマ試験」を三段階に分けて、段階的に実施した。第一段階 [1~3] では、真空容器外側にフェライト鋼板 (F82H) [4]を設置し、リップル低減試験を実施し、第二段階 [5~7] では、フェライト鋼板を部分的に設置し、第三段階のフェライト鋼板を真空容器内壁に全面設置する前の予備的な試験を実施した。

第三段階 [8~11] では、ポート開口部を除く真空容器の内壁全面にフェライト鋼板を設置して、フェライト鋼のプラズマに対する適合性に関する試験を実施した。本試験において、トロイダル磁場リップルを低減するために、6mm、8mm、10.5mm の3種類のフェライト鋼板を磁場解析結果に基づき設置し、プラズマの生成、閉じ込め、制御及び真空的な問題等、プラズマに対する適合性を総合的に評価した。また、本プラズマ適合性試験においては、トロイダル磁場リップルの低減効果を実証するために、フェライト鋼板の設置前と設置後に磁場強度の分布を正確に測定する必要があった。

本報告は、第3段階において、この磁場強度分布を測定するために開発した3次元磁場計測装置について述べる。3次元磁場計測装置は、真空容器内においてトロイダル方向、主半径方向、垂直方向の測定を可能とする。

3次元磁場測定に関して、特にフェライト鋼板が設置された後の測定においては、トロイダル磁場のリップル率が約 0.2%と小さく、主半径方向にも磁場勾配があるため、磁場センサーの位置ズレは測定値に顕著に影響する。発生する磁場の変化量を Table 1.1 に示す。従って、3次元磁場計測装置には、トロイダル方向全周に亘って、磁場計測精度が 0.1%以下 (磁場 1Tにおいて)、空間的位置精度 1mm 以下が要求された。

また、3次元磁場計測装置は、装置の持つ機能を活用して、正確に真空容器断面の変形量を測定することができ、その変形データを反映させてフェライト鋼板が設置された。

3次元磁場計測装置は、Fig.1.1 に示す JFT-2M の真空容器内の狭隘な場所に設置され、且つ、測定精度が要求されるので、装置の開発に際しては下記項目の問題解決が図られた。

- ・ 真空容器内への搬入・搬出、および狭隘な内部において容易に組立・分解が可能な構造であること。
- ・ 真空容器内において、工場の組立精度が正確に再現できること。
- ・ フェライト鋼板設置前と後において、組立位置、精度が変わらないこと。
- ・ 計測中に測定センサーが揺動して、測定値にふらつきがないこと。

なお、フェライト鋼板設置前後の一連の作業は、次の順序により実施した。

- ① 3次元磁場計測装置による真空容器断面の変形量の測定
- ② フェライト鋼板設置前の磁場強度の分布測定

- ③真空容器の変形量データを基に、フェライト鋼板の台座高さを調整してフェライト鋼板を設置
- ④フェライト鋼板設置後の磁場強度の分布測定

## 2. 構造と性能

磁場計測装置は、台車、センサー治具、レール、コントローラ、測定系から構成される。また、磁場計測装置は、測定磁場を乱さないように非磁性材料で製作する必要がある。磁場計測装置の鳥瞰図を Fig.2.1 に示す。

以下に各部の構造の詳細を述べる。

### 2.1 台車

台車はレール上をトロイダル方向に走行する台車とその上に搭載された主半径方向に走行する台車から成る。さらに主半径方向走行台車には、磁場測定用センサーが取り付けられた磁場センサー治具が搭載される (Fig.2.2 参照)。トロイダル方向走行台車の駆動は、台車側の小さな歯車とレール側の大きな内歯々車の組み合わせにより、また、主半径方向走行台車の駆動は、スクリュー機構を使用してモーターにより駆動した。モーターは、磁場環境下でも動作可能な超音波モーターを使用した。

走行中のセンサー治具の揺れ防止 (測定中の精度確保) のために、台車に設けられたローラー (レールに沿って走行台車をガイドする) を常にレールの一定方向にスプリングで押し付ける機構を設けた (Fig.2.3 参照)。

### 2.2 レール及び支持脚

円環状の直径約 2.78m のレールは、真空容器の小さなマンホール (開口部寸法 400Hmm × 480Wmm) からの搬入・搬出と組立を考慮してトロイダル方向に 8 分割した構造とした。

また、軽量化と高剛性確保 (台車等の荷重によるたわみを 1mm/脚-脚スパン以下にする) の観点から、レールは、高強度のアルミ合金材 (A5083P) を使用し、その断面形状は曲げ剛性の高い平板にリブを設けた (高下駄に似た形状) 構造にした。

レールは、高精度 (真円度、水平度) に製作するため、溶接による変形を避け、分厚いアルミ板 (仕上がり寸法 : 75Tmm × 240Wmm) から NC マシン (数値制御マシン) により一体物で削り出し加工された。

8 分割されたレールは、接続・位置調整金具により、円環状に接続され、支持脚に支持・固定されるが、各々のレールと接続・位置調整金具との間にガイドピン (上下方向と回転を除いた自由度を完全に拘束する役割をする) を嵌合させて一体化し、工場で組み立てた円環レールの精度が現地で完全に再現できるようにした。

また、接続・位置調整金具は、一体化した円環レール全体をトロイダル方向、主半径方向及び上下方向にボルトねじにより微調整が可能で、調整後に円環レールを強固に支持脚に固定が可能な機構を有している。また、支持脚自身は、JFT-2M 真空容器の下部垂直ポートフランジにボルト・ナットで強固に固定される。

なお、現地組立に於いて、ドーナツ状の真空容器内で一体化された円環レールの直径は、物理的に測定することができないので、工場においては、円環レールの真円度の測定と Fig.2.4 に

示す対角寸法を多角形状に測定した。この対角寸法は、円環レールが真円のときの計算値であり、トーラス中心を通らない測定方法なので真空容器内での測定が可能であり、工場での測定値と比較することにより、円環レールの真円度を間接的に確認することができる。

走行台車駆動用の歯車の歯（大きな内歯々車に相当）は、プラスチック製で、機械加工後、レール内径に沿って、側面にねじで正確に固定された。

### 2.3 磁場センサー及びセンサー治具（兼真空容器断面測定治具）

磁場センサーは、トロイダル方向用磁場センサー $B_t$ 、ポロイダル方向用磁場センサー $B_p$ 、主半径方向用磁場センサー $B_r$ 用から成り、各センサーにはホール素子が使用された。センサーの位置で角度のずれは計測値に顕著に影響するので、センサー同士の相対位置関係及び設定角度はホルダーにより正確に位置決めされ、ユニット化された（Fig.2.5 参照）。磁場計測センサユニットは透明なアクリル樹脂製のセンサー治具に真空容器の赤道面、主半径を基準に上、下各3箇所、計6箇所に正確に取り付けられた。（ただし、準備できた測定素子の都合で、同時測定は3カ所である。）

ホール素子の測定精度は、～0.1%（2T レンジ使用時で 1T 測定時において）である。

センサー治具（真空容器断面測定治具を兼ねる）は、その形状を JFT-2M の真空容器の理想的なポロイダル断面と完全な相似形に正確に製作され、真空容器断面の変形量の測定に用いる。

測定方法は、真空容器内表面と真空容器断面測定治具の外周とのギャップを測定し、それを基準となる理想のギャップと比較し、その差を変形量とする。

### 2.4 コントローラ及び位置検出モニター

コントローラは、トロイダル方向と主半径方向の走行、停止及びトロイダル方向の走行速度の変更を JFT-2M プラズマ制御室から遠隔操作するものである。走行速度は、トロイダル方向が 120mm/分及び 600mm/分の 2 段変速、主半径方向は 120mm/分である。

台車の走行位置は、レールに設けられた mm 単位の目盛りを小型カメラで捕らえ（Fig.2.6 参照）、それを真空容器の外部モニターで、精度±0.5mm で読み取ることができる。また、台車の停止はコントローラからの指令により任意の計測位置に±1.0mm の高精度で停止させることができる。コントローラにはトロイダル方向と主半径方向の走行台車に設けられた補助の位置検出用ポテンショメータにより、位置がデジタル表示され、位置確認が容易となっている。

### 2.5 データ収集系

データ収集系には、バッファーメモリを利用し、測定系チャンネル間の同時性とサンプリング速度～150msec を確保した。また、パソコンを 2 台利用し、磁場のショット間（3 分）の解析を可能にした。データ収集系を Fig.2.7 に示す。

## 3. 真空容器内設置作業

磁場計測の精度は、装置の組立精度に大きく左右されるので、真空容器内におけるレール等の据え付けを次の手順で細心の注意を払って設置した。

①分割されたレールの組立後における円環レールが真円であること。

ガイドピンにより工場における組立精度を忠実に再現して、レールを円環状に一体化した。

一体化後の円環レールの真円度は、Fig.2.4 に示す対角寸法を測定して、工場におけるその値と比較して確認した。

②円環レールは、トーラス中心軸に対して偏心が無く、且つ、センサー治具と真空容器の双方のプラズマ中心軸が一致するように設置した。

真空容器のポートセクション中心とプラズマ中心軸との成す交点から、円環レールの外周までの寸法について、東西南北方向 4箇所の数値が同じ寸法になるように設置した。4点の最大寸法差は 0.5mm であった。

③トランシットや水準器等を使用してセンサー治具と真空容器の双方の赤道面を一致させ、全周に亘りレールを水平に設置した。

④円環レールを正確に位置調整後、真空容器の下部垂直ポート 8カ所に取り付けられたレールの支持脚に、強固にボルトで固定した。

⑤レール、センサー治具について、水平度、鉛直度等 ( $\pm 1.0\text{mm/m}$ ) の検査を行い、また、駆動試験では、台車の走行中におけるセンサー治具の揺動をダイヤルゲージを使用して測定し、揺れが無いことを確認した (Fig.3.1 参照)。

3次元磁場計測装置の真空容器内における試験検査結果を Table 3.1 に示す。

なお、支持脚（接続・位置調整金具も含め）のみは、フェライト鋼板の設置前と設置後において計測条件が異なるないように、フェライト鋼板設置後の磁場計測が終了するまでの間（約半年間）終始、解体することなく、その状態を完全に維持した。

#### 4. 真空容器の変形量の測定

フェライト鋼板の設置前に、真空容器の断面形状、位置（トーラス中心）を確認するために、真空容器断面のポロイダル断面の変形量の測定を実施した。真空容器の変形量の測定は、センサー治具（兼真空容器断面測定治具）の外周と真空容器内表面とのギャップを測定し、ギャップ値の基準値に対する差を真空容器断面の変形量とした。測定箇所は、ポロイダル断面内が 5~40 カ所（ポートセクション 5、トロイダルコイルセクション 40）および、トロイダル方向に 28 カ所（ポートセクション 14、トロイダルコイルセクション 12、分割部 2）であり、網の目状に測定データを取得した。得られたデータを基準にフェライト鋼板を台座の高さを調整して、設計位置に正確に取り付けた。測定の結果、計測された変形量は最大 10mm である。真空容器断面の変形量の測定結果の一例を Fig.4.1 に示す。

#### 5. 磁場計測

フェライト鋼板設置前後において、トロイダル磁場コイルの磁場強度分布を計測した。フェライト鋼板設置後における 3次元磁場計測装置の設置状況を Fig.5.1 に示す。

磁場測定は、真空容器内のマンホールを開放した状態で、測定条件に合わせて JFT-2M のトロイダル磁場コイル及びポロイダル磁場コイルに単独通電し、これと同期して、プラズマ制御室に設置したコントローラから 3次元磁場計測装置を遠隔操作して実施した。

本測定を行う上で、磁場強度の再現性が重要であるが、電流の安定度は数%であり、また、電流値の読みとり精度は不十分である。そこで、定点ホール素子の値を用いて補正した。さらにホ

ール素子の絶対値のドリフト（室温の変化）を補正するため、定点ホール素子の直近に NMR 素子も設置して、絶対測定も行なった。

なお、定点の主半径方向の距離は、トーラス中心軸を基準に特別に製作した治具を使用して正確に測定した。

#### (1) フェライト鋼板設置前の磁場計測結果

本測定の主要な目的は、測定の健全性を確認することであり、さらに、トロイダル磁場中心に対する真空容器のトーラス中心軸の偏心量を調べることである。

測定は、定常磁場下で台車を走行させながら、全てのトロイダル磁場コイル(16 個)間の磁場強度分布を実測した。

測定の結果、リップル率に関して計算結果と実測値とは良く一致した (Fig.5.2 参照)。このことから、測定の健全性は十分であることを確認することできた。

また、各トロイダル磁場コイル間の中心における磁場強度 (定点ホール素子の値で補正した値) を円グラフ化 (Fig.5.3 参照) することにより、トロイダル磁場中心と真空容器のトーラス中心軸との偏心の有無とその方向が分かる。各トロイダル磁場コイル直下の中心において、主半径方向にスキャンして磁場勾配 ( $dB_T/dR$ ) を測定し、 $(\Delta B_{T\text{measure}} = \Delta B_{\text{Triple}} + (dB_T/dR) \cdot \Delta R)$  の関係から、偏心量 ( $\Delta R$ ) が 3mm であることを求めた。その結果は、フェライト鋼の設置に反映された。

#### (2) フェライト鋼板設置後の磁場計測結果

フェライト鋼板の設置作業終了後、作業中も前の状態を完全に維持したレール支持脚（レール接続・位置調整金具も含め）のガイドピンにレールを装着して、フェライト鋼板設置前と全く同じ状態に 3 次元磁場計測装置を組み立てた。

フェライト鋼板設置後の測定は、設置前測定と同様に、隣接する全てのトロイダル磁場コイル間に台車をトロイダル方向に走行させて、磁場強度の分布を測定した。

リップル率の測定結果の一例を Fig.5.2 に示す。測定箇所は、比較的構造が一様な「真空容器断面の斜め上」の部位であるが、測定値と計算値は良く一致しており、リップル率がフェライト鋼板設置前の 1.7%からその 1/10 の 0.15%に低減した事が確認された。

なお、真空容器の分割フランジ部などのようにフェライト鋼板が他の部分より真空容器の内側方向に出張るなど複雑で非一様な構造部があるので、全体のリップル率は定義が困難であり、全体の標準偏差は 0.5%（赤道部）と設置前の約 1/3 になっている。

## 6. まとめ

- ・ 磁場計測装置は、磁場計測に要求される仕様を十分満足して開発することができた。
- ・ 真空容器内のフェライト鋼板設置前と設置後における磁場計測装置の組立精度は、工場における組立精度をほぼ完全に再現できた。
- ・ 磁場計測精度を左右する磁場計測装置のレールの真円度と水平度、センサー治具の水平度と鉛直度は仕様を十分満足した。また、走行中におけるセンサー治具の揺れもほとんどなく、最大値は 0.6mm であり (Table 3.1 参照)、高精度の磁場強度分布測定を可能にした。

- ・磁場計測装置を使用した真空容器のポロイダル断面の変形測定の結果、最大 10mm の変形量が認められた (Fig.4.1 参照)。
- ・フェライト鋼板設置前のリップル率の測定結果は、測定値と計算値が良く一致し、測定の健全性が確認された。
- ・トロイダル磁場の中心と真空容器のトーラス中心軸との偏心量は 3mm であることが確認された。
- ・フェライト鋼板設置後のリップル率は、一様な構造部においてフェライト鋼板設置前の 1.7% からその 1/10 の 0.15% に低減できたことを確認した (Fig.5.2 参照)。なお、複雑形状部があるので、全体のリップル率の定義は困難であり、全体の標準偏差は 0.5% (赤道部) と設置前の約 1/3 になっている。

### 謝辞

本誤差磁場測定装置の開発に当たり、終始有益な助言とご指導を頂いたプラズマ物理実験研究室及び当時の JFT-2M 試験室の関係者の皆さんに感謝致します。また、磁場強度の分布測定にご協力頂いた東京工業大学 嶋田隆一教授、筒井広明博士（助手）、味川浩樹さん（学生）、伊藤健郎さん（学生）の諸氏に感謝致します。さらに本報告書をまとめるに当たり、有益なコメントを頂いた核融合装置試験部の栗山正明 部長、細金延幸 次長、宮 直之 JT-60 第 2 試験室長に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] M. SATO et al., Fusion Eng. and Design, **51-52** (2000) 1071.
- [2] K. TSUZUKI ,M. SATO, H. KAWASHIMA, Y. MIURA, et al., J. Nucl. Mater. **283-287(2000)** 681-684
- [3] H. KAWASHIMA, M. SATO, K. TSUZUKI et al., Nucl. Fusion **41** (2001) 257.
- [4] M. Tamura, H. Hayakawa, et al., Nuclear Materials 155-157(1988)620-625
- [5] H. KIMURA et al Fusion Eng. and Design, **56-57** (2001) 837.
- [6] K. TSUZUKI, H. KIMURA, H. KAWASHIMA et al, J. Nucl. Mater. **307-311** (2002) 1386.
- [7] T. SHIBATA, H. KIMURA, H. KAWASHIMA et al., Proceedings of 19th IEEE/NPSS Symp. on Fus. Eng., (2002) 360-363.
- [8] S.SUZUKI et al., Proceedings of 20th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (2003) 189-192
- [9] M. SATO et al., Proceedings of 20th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (2003)
- [10] K. TSUZUKI, H. KIMURA, H. KAWASHIMA, M. SATO, K. KAMIYA, K. SHINOHARA et al., Nucl. Fusion, **43** (2003) 1288.
- [11] K. TSUZUKI, M. SATO, H. KAWASHIMA et al., J. Nucl. Mater. **313-316** (2003) 177.

Table 1.1 磁場の変化量（単位距離、スパン当たり）

		磁場の変化量 G/mm (Bt=1.3T のとき)	
		フェライト鋼板設置前	フェライト鋼板設置後
主半径方向		6.6G/mm	6.6G/mm
トロイダル方向		~220G 2.2% / section	~10G 0.1% / section
上下方向		測定上無視できる値	測定上無視できる値

\* リップル低減後のリップル分布測定には、センサーの 1mm 程度のふらつきでも問題となる。

Table 3.1 レールとセンサー治具の試験検査結果

		3 次元磁場計測装置のレール		
		真円度	真円度の再現精度	水平度 (1 m 当り)
仕様値	D ± 3.0mm		± 1.5mm	D ± 1.0mm
実測値	D ± 0.3mm		± 0.3mm	-0.5 ~ +0.6mm
		センサー治具の倒れ (1 m 当り) & 走行中の揺れ		
		トロイダル方向	主半径方向	
仕様値	± 1.0mm		± 1.0mm	
実測値	倒れ : 0.0mm、揺れ : 0.0mm		倒れ : 0.6mm、揺れ : 0.0mm	

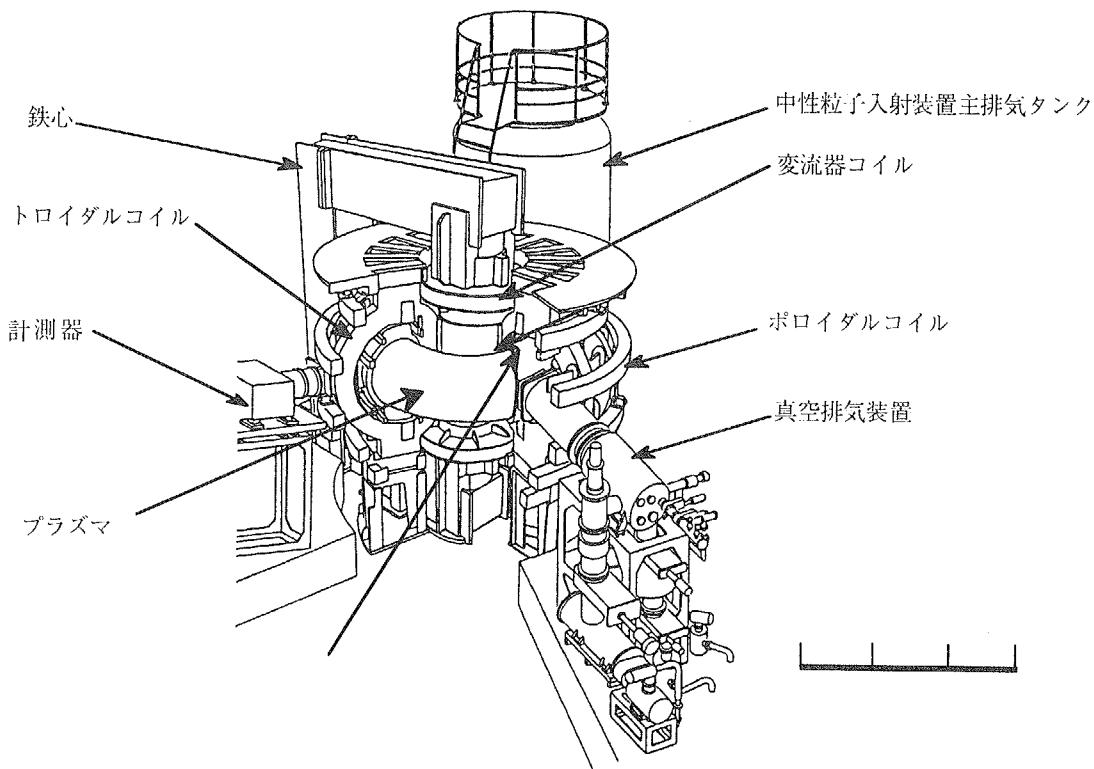


Fig.1.1 JFT-2M の鳥瞰図

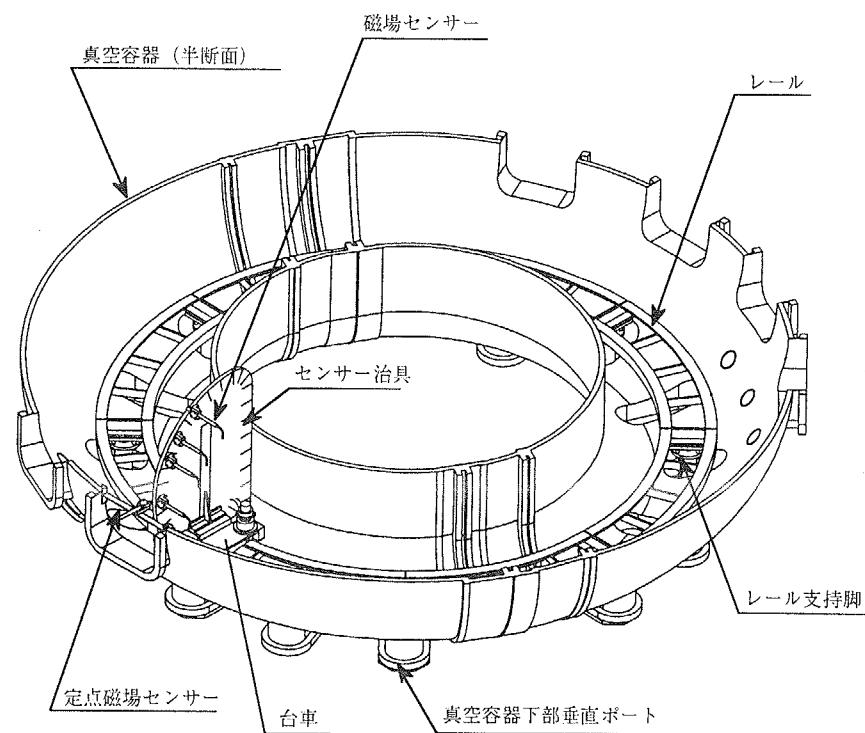


Fig.2.1 3 次元磁場計測装置の鳥瞰図

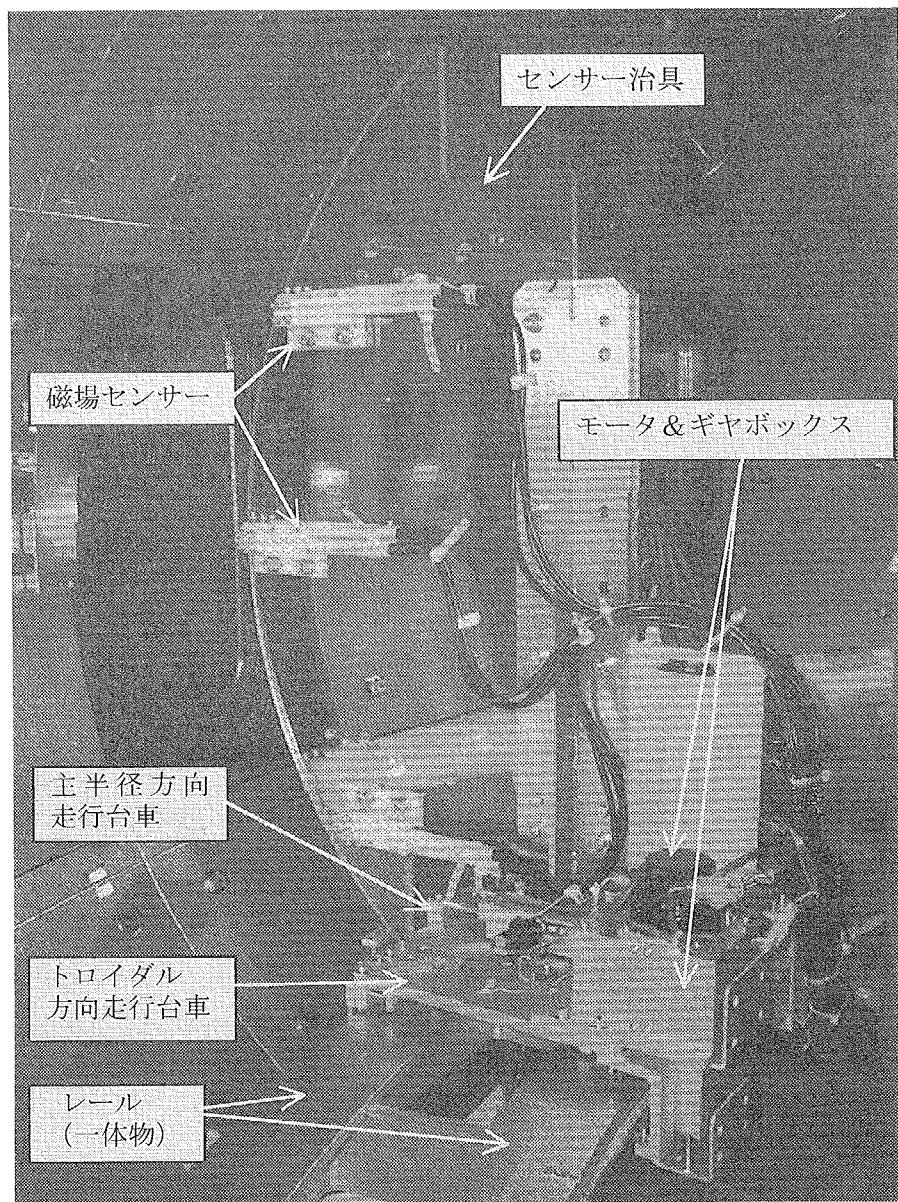


Fig.2.2 3次元磁場計測装置の走行台車、磁場センサー

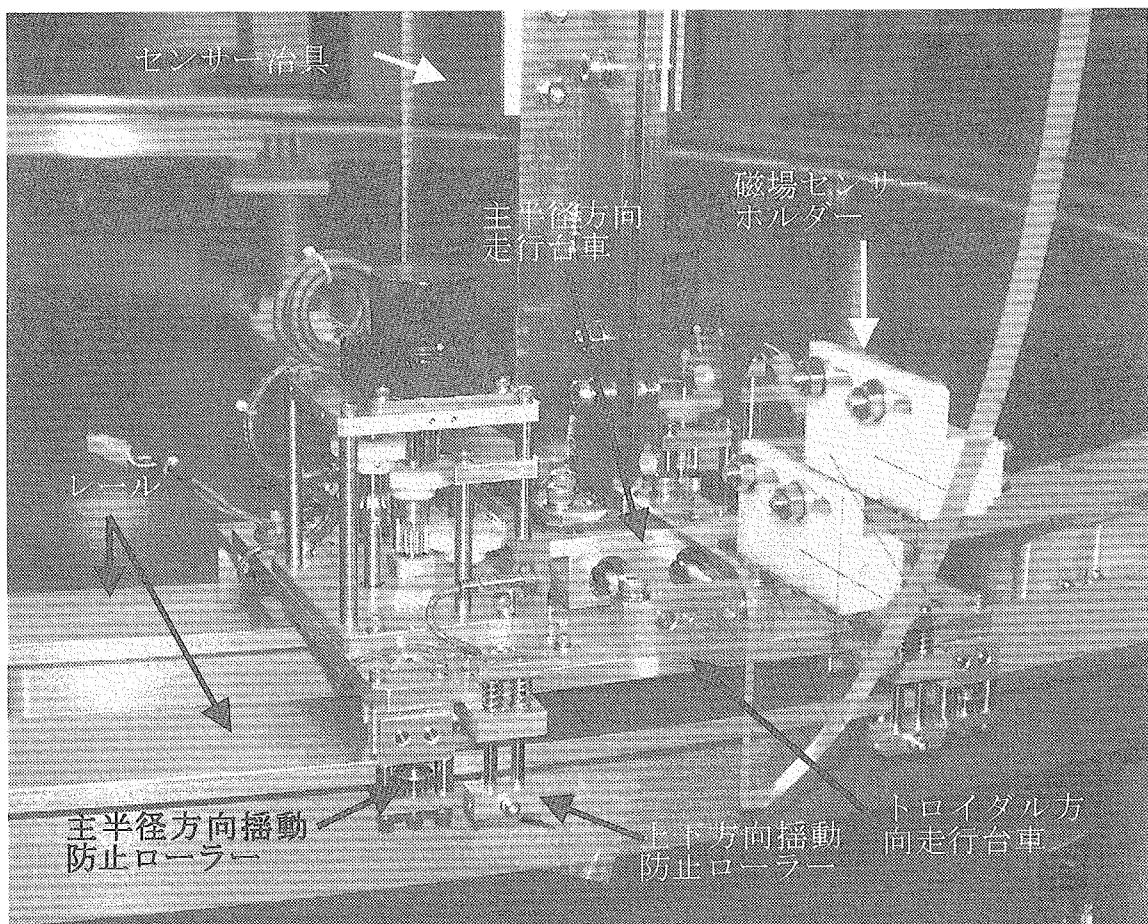


Fig.2.3 レールを一定方向に押し付ける機構

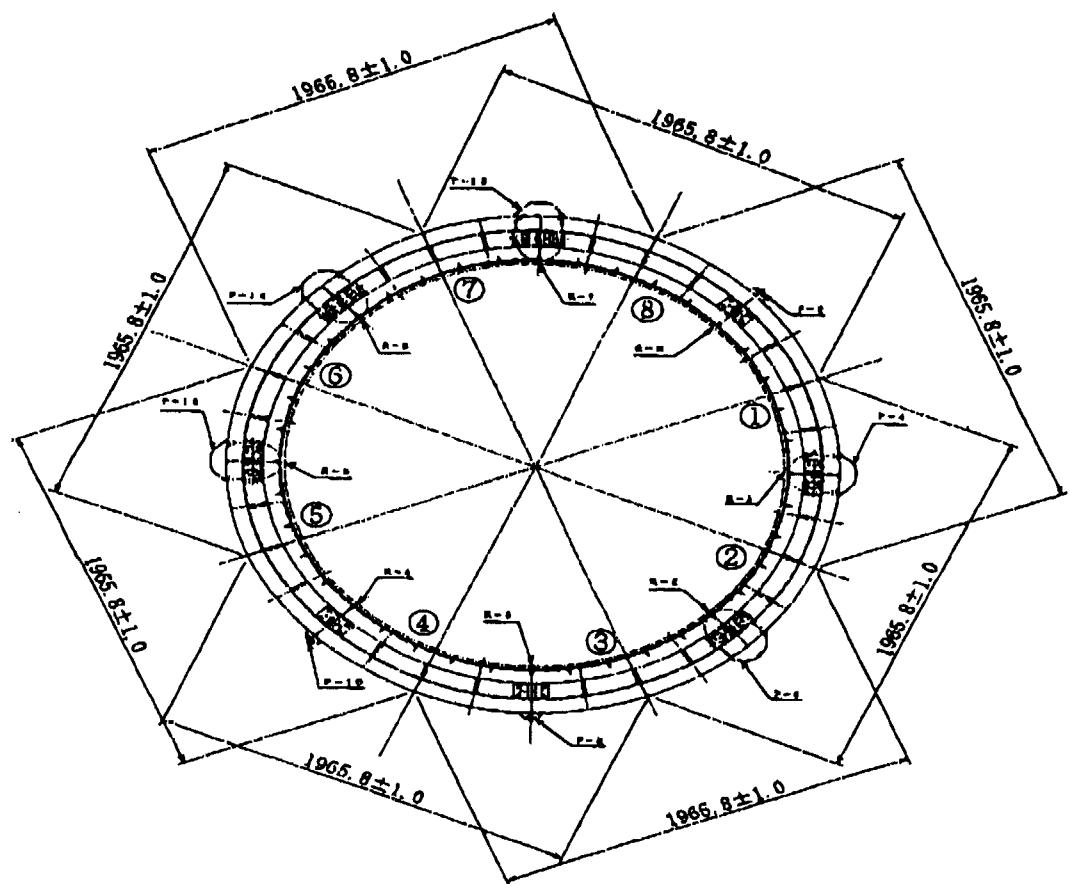


Fig.2.4 円環状レールの対角寸法

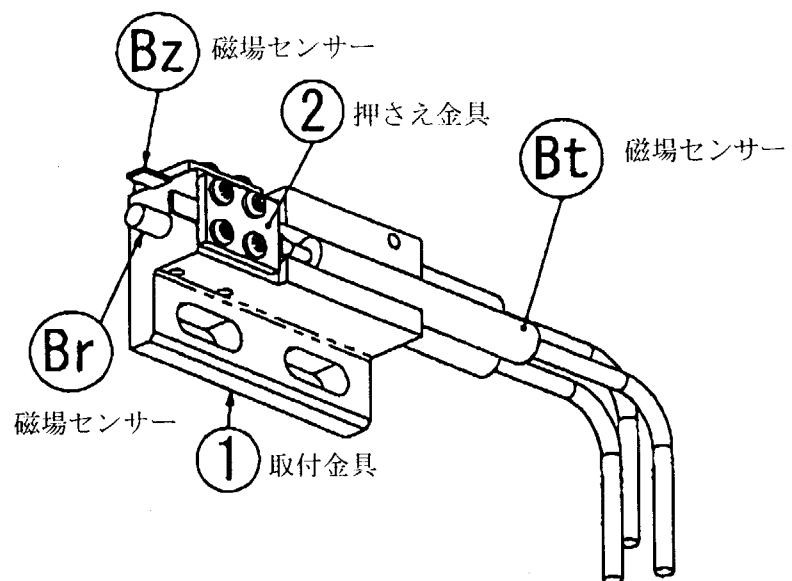


Fig.2.5 磁場センサー ホルダー

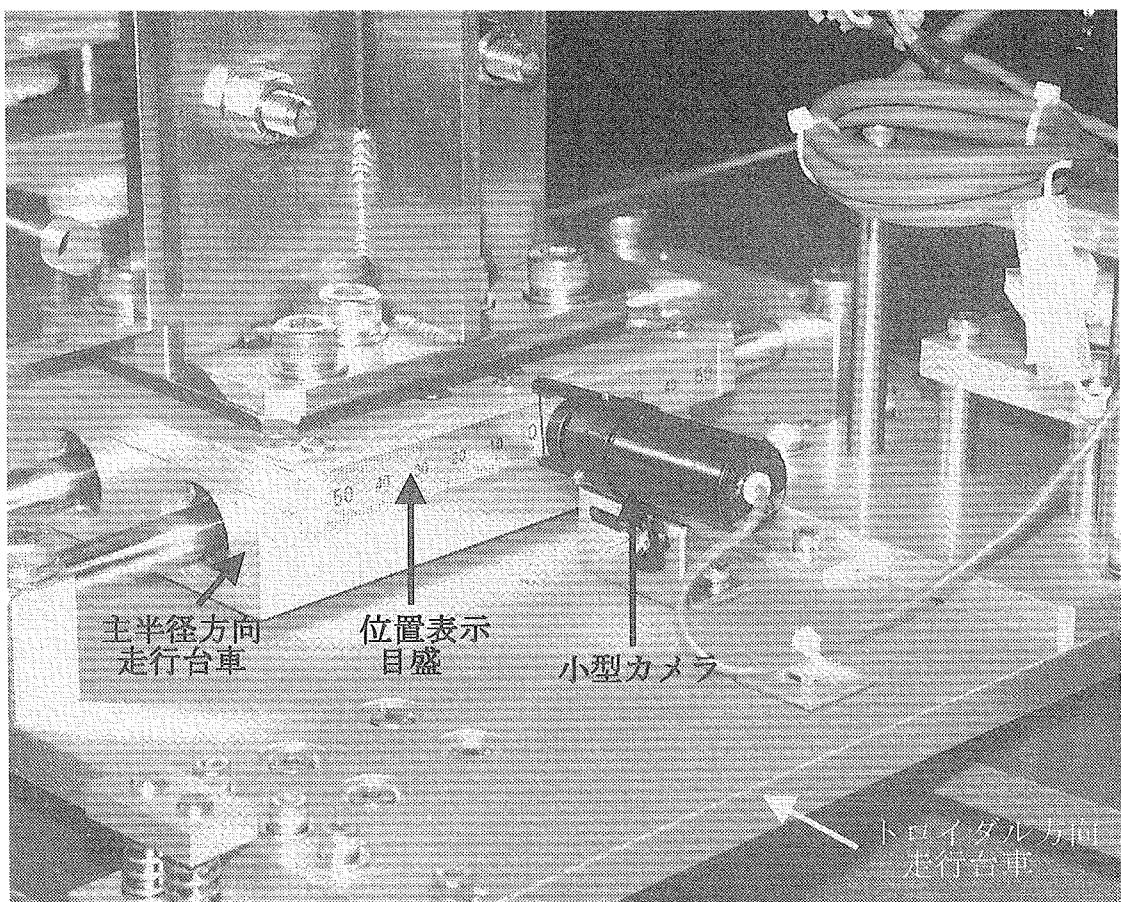


Fig.2.6 位置検出用小型カメラと位置表示目盛

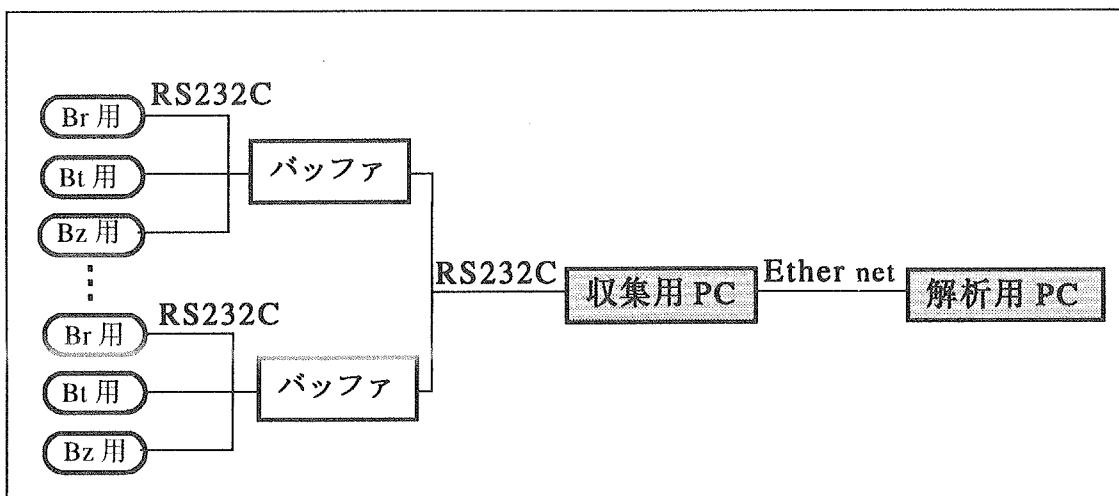


Fig.2.7 データ収集系の構成

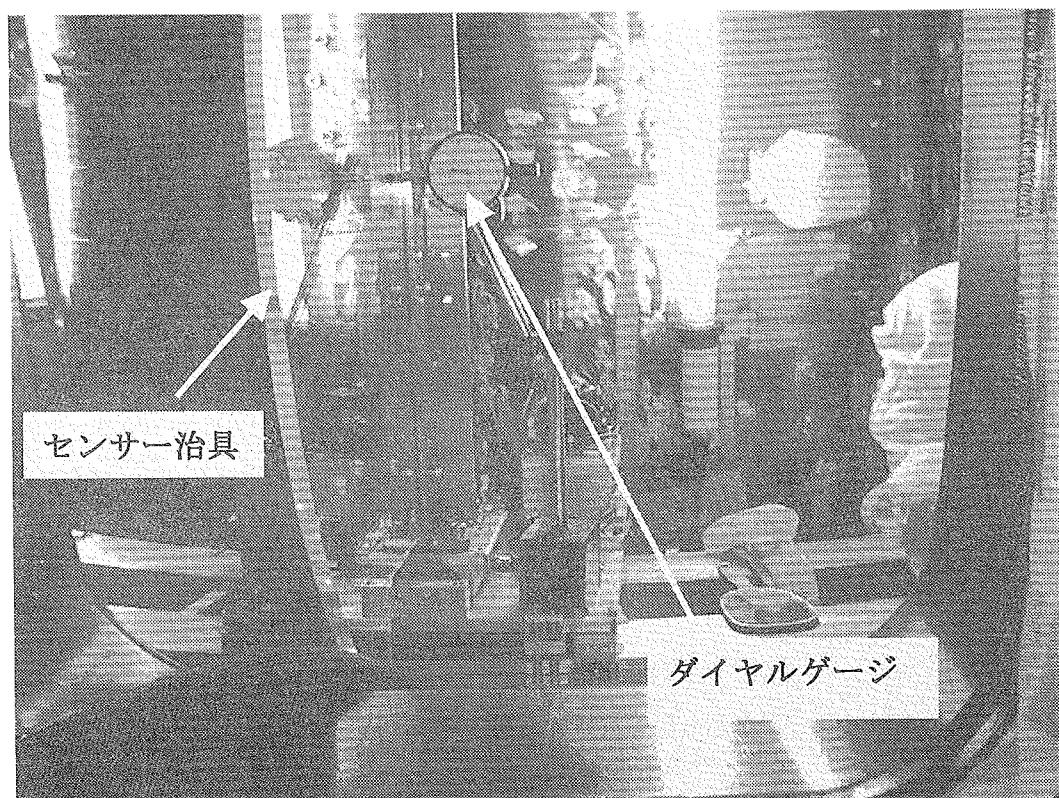


Fig.3.1 走行中におけるセンサー治具の揺れの測定

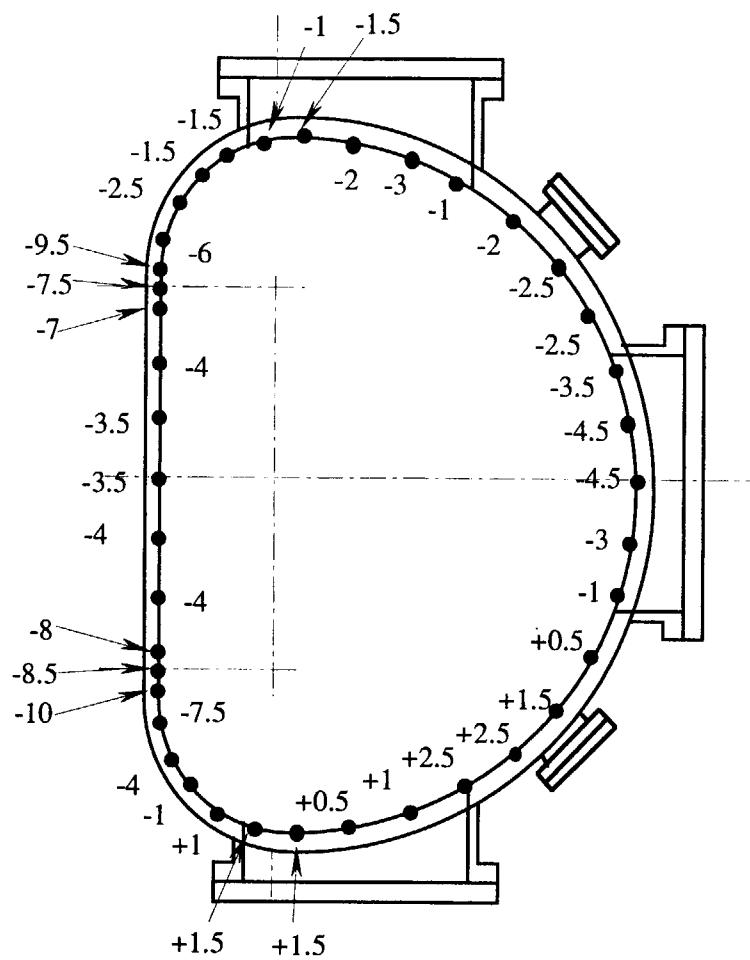


Fig.4.1 TFC-1 直下の真空容器断面の変形測定結果

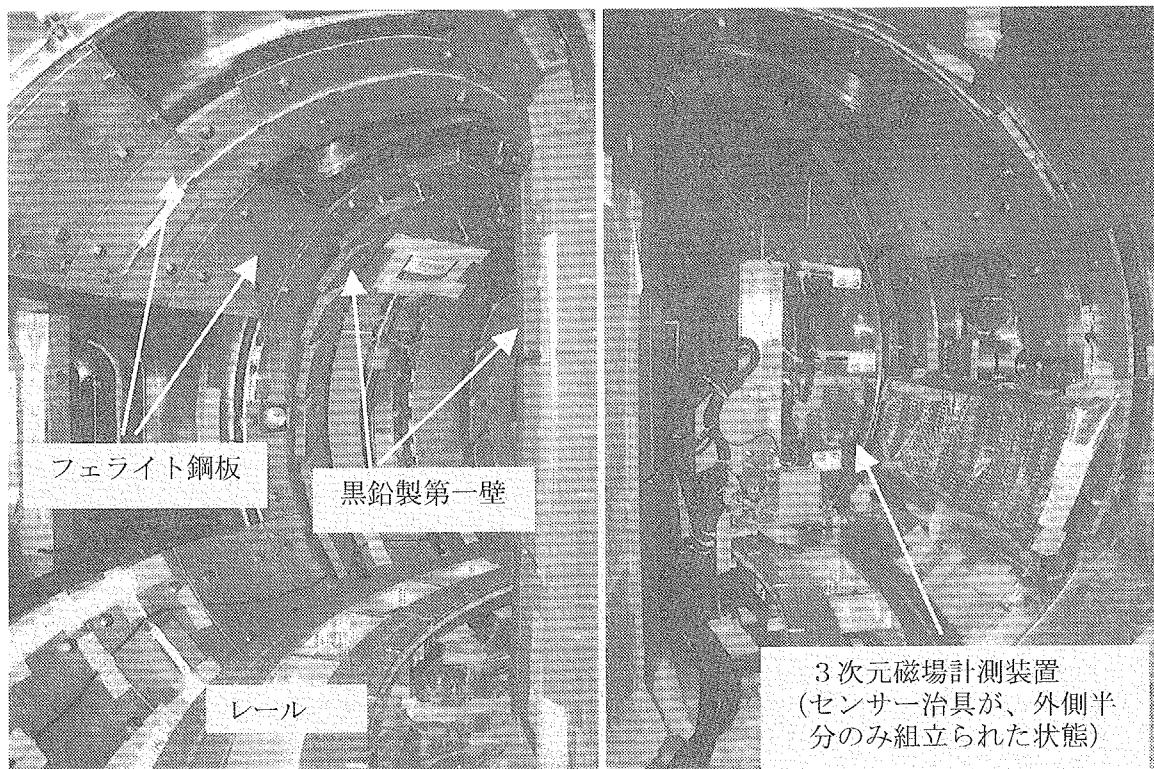


Fig.5.1 真空容器内の3次元磁場計測装置設置状況（フェライト鋼板設置後）

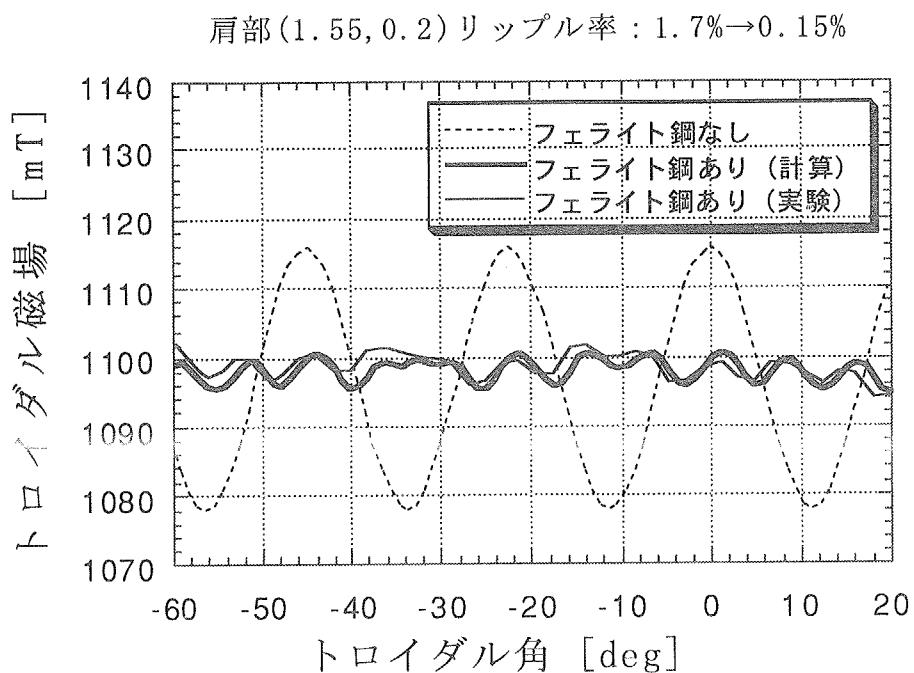


Fig.5.2 リップル率の測定結果

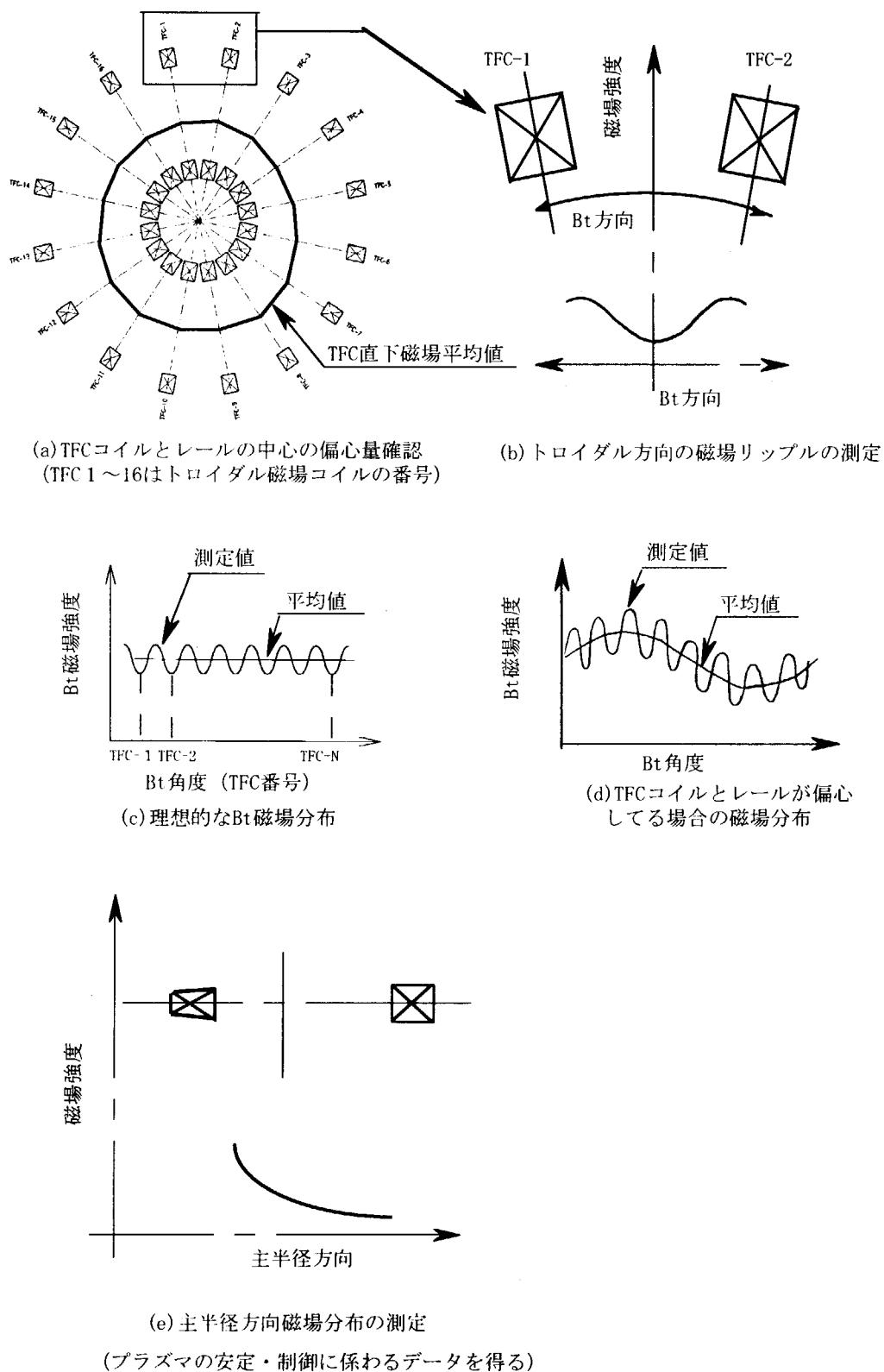


Fig.5.3 トロイダル磁場リップル及び真空容器の偏心量の評価概念

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
J率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、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	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トノ	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	4.184 J(熱化学)
3.6 × 10 <sup>6</sup>	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1855 J(15 °C)
	4.18605	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1868 J(国際蒸気表)
1055.06	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1.35582	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W	
	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	

吸収線量	Gy	rad
	1	100
0.01	1	

昭射線量	C/kg	R
	1	3876
2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	

線量当量	Sv	rem
	1	100
0.01	1	

(86年12月26日現在)



吉原電機製作所  
吉原度90%角生紙を使用しています