

JAERI-Data/Code
2003-005



JP0350061



フェライト磁場計算コード FEMAG の開発

2003 年 3 月

浦田 一宏

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。

入手の問合わせは、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、お申し越し下さい。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行っております。

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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

フェライト磁場計算コード FEMAG の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

浦田 一宏

(2003 年 1 月 31 日受理)

将来の核融合装置の設計において、低放射化フェライト鋼をプラズマ対向材料、およびリップル低減デバイスとして使用することを計画している場合、プラズマに対する誤差磁場評価、およびリップル低減検討を行うために、フェライト磁場の計算が必要となる。しかし、フェライト鋼磁気特性(B-H カーブ)の非線形性から収束計算が不可欠となるため、設計ツールとして要求される計算の高速実行は難しくなる。

トカマク装置の特徴である強いトロイダル磁場中ではフェライトが磁気飽和することから、磁場源である磁荷分布を一意的に決定することができる。さらに実際に使用するフェライト板形状は薄板に限られ、またその薄板の配置がトロイダル磁場に沿うことから、計算の高速化を図ることが可能となる。以上の様なトカマク装置特有の状況を活用することにより、高速なフェライト磁場計算コード「FEMAG」を開発した。

本報告書は、「FEMAG」コードの定式化、「FEMAG」コードの使用法、および「FEMAG」コードの妥当性検討(3次元有限要素法コードとの比較、および JFT-2M 装置における磁場実測値との比較による)を詳述したものである。計算実行例として、現在原研で計画を進めている JT-60 改修装置設計における各種検討結果を示した。

Development of FEMAG : Calculation Code of Magnetic Field Generated by Ferritic Plates
in the Tokamak Devices

Kazuhiro URATA

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

(Received January 31, 2003)

In design of the future fusion devices in which low activation ferritic steel is planned to use as the plasma facing material and/or the inserts for ripple reduction, the appreciation of the error field effect against the plasma as well as the optimization of ferritic plate arrangement to reduce the toroidal field ripple require calculation of magnetic field generated by ferritic steel. However iterative calculations concerning the non-linearity in B-H curve of ferritic steel disturbs high-speed calculation required as the design tool.

In the strong toroidal magnetic field that is characteristic in the tokamak fusion devices, fully magnetic saturation of ferritic steel occurs. Hence a distribution of magnetic charges as magnetic field source is determined straightforward and any iteration calculation are unnecessary. Additionally objective ferritic steel geometry is limited to the thin plate and ferritic plates are installed along the toroidal magnetic field. Taking these special conditions into account, high-speed calculation code "FEMAG" has been developed.

In this report, the formalization of "FEMAG" code, how to use "FEMAG", and the validity check of "FEMAG" in comparison with a 3D FEM code, with the measurements of the magnetic field in JFT-2M are described. The presented examples are numerical results of design studies for JT-60 modification.

Keywords:

FEMAG, Ferritic Steel, B-H Curve, Magnetization, Magnetic Saturation, Ripple Rate, Ripple Reduction, Low Activation Material, Fast Ion Loss, OFMC

目 次

1. はじめに	1
2. 定式化	2
2.1 仮定と基本式	2
2.2 トロイダル磁場のみによる磁化 (ポロイダル辺上磁荷 $\sigma_p=0$)	2
2.2.1 フェライト板 -PLATE 磁場源-	2
2.2.2 フェライト板開口部 -HOLE 磁場源-	3
2.3 ポロイダル磁場の考慮 (ポロイダル辺上磁荷 $\sigma_p \neq 0$)	3
3. FEMAG の機能と計算手順	4
3.1 FEMAG の機能	4
3.2 入出力ファイルと計算手順	5
3.2.1 入出力ファイルの説明	5
3.2.2 計算手順	7
4 FEMAG 計算例(JT-60 改修装置の設計)	8
4.1 ポロイダル断面上空間点(R, Z)におけるリップル率計算	8
4.1.1 リップル率低減用フェライト板設置スペース検討	8
4.1.2 リップル率低減のためのフェライト板厚配置検討	9
4.1.3 リップル率計算結果 (GR 機能)	10
4.1.4 トロイダル磁場分布	10
4.2 不整磁場 B_p 分布 (SE 機能)	10
4.3 不整磁場 B_p フーリエモード解析 (SF 機能)	10
4.4 OFMC による高速イオン損失評価のための磁場データ出力 (GO 機能)	10
5. FEMAG コードの妥当性検討	11
5.1 3次元有限要素法プログラムとの比較	11
5.2 JFT-2M 磁場計測結果との比較	11
6. おわりに	11
謝辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Formalization	2
2.1 Assumption and Numerical Method	2
2.2 Magnetization by Toroidal Field Only (Poloidal Magnetic Charge $\sigma_p=0$)	2
2.2.1 Ferritic Plates — PLATE Magnetic Field Source —	2
2.2.2 Holes in the Ferritic Plates — HOLE Magnetic Field Source —	3
2.3 Consideration of the Poloidal Field (Poloidal Magnetic Charge $\sigma_p \neq 0$)	3
3. Functions of FEMAG and Calculation Sequence	4
3.1. Functions of FEMAG	4
3.2 Input/Output Files and Calculation Sequence	5
3.2.1 Explanation of Input/Output Files	5
3.2.2 Calculation Sequence	7
4. Example of the FEMAG Calculation Results(JT-60 Modification)	8
4.1 Ripple Rate Calculations on Points in the Poloidal Cross-section	8
4.1.1 Setting Space Study of the Ferritic Plates for Ripple Reduction	8
4.1.2 Distribution Study of Ferritic Plate Thickness	9
4.1.3 Calculation Results of Ripple Rates (Function GR)	10
4.1.4 Distribution of Toroidal Magnetic Field	10
4.2 Distribution of Error Field B_p (Function SE)	10
4.3 Fourier Analysis of Error Field B_p on the Plasma Surface (Function SF)	10
4.4 Data Output for the Estimation of Fast Ion Loss with OFMC Code (Function GO)	10
5. Validity Check of the FEMAG	11
5.1 Comparison with a 3D Finite Element Program	11
5.2 Comparison with Measurements of Magnetic Field in JFT-2M	11
6. Conclusions	11
Acknowledgements	12
References	12

1. はじめに

フェライト鋼は、その低放射化性能から、将来の核融合炉プラズマ対向材料として有力候補に上がっている。また、その磁気特性から、リップル率低減効果が期待されている。実際、JT-60 改修装置では、低放射化フェライト鋼の一種である F82H を次の 2 つの用途、すなわち、

- (1) 第一壁、プラズマ安定化板(プラズマに対する影響評価試験のため)
- (2) リップル率低減用フェライト板(高速イオンの損失低減を図るため)

トロイダル磁場コイル(TFC)のつくる磁場は、コイル直下で最大、コイル間で最小となるが、TFC 直下にフェライトを設置することにより、このリップル率低減が図れる。

に用いることが計画された。

フェライト鋼使用を前提とした将来の核融合装置設計には、プラズマに対する誤差磁場評価、リップル率低減検討を行うため、フェライト磁場計算が必要である。しかし、フェライト等強磁性材の磁気特性(B-Hカーブ)は非線形性を持っているため反復収束計算が不可欠であり、計算時間が膨大となる。また、一般的な有限要素法による電磁場解析プログラムでは、磁性体や導体の存在しない空間領域も要素分割する必要があり、板状のフェライト要素とのメッシュ整合性を考えるとモデル化に非常なコストが掛かる。しかし、リップル率低減に有効なフェライトの設計検討を行うためには、いくつかのパラメータを変え数多くのケースを計算する必要があるため、実行速度が高速であることは設計ツールとしての必要条件である。

トカマク装置に特徴的な強いトロイダル磁場中では、フェライトは強く磁気飽和し、フェライト内部の磁化ベクトルはほぼトロイダル方向に向く。同時に、トロイダル磁場に比べ、フェライト自身のつくる磁場が、磁化ベクトルに与える影響を小さいと仮定すると磁場を発生する磁荷分布は一意的に決定でき反復計算が不要となる。さらに、実際に使用するフェライト板形状は薄板に限られ、またその薄板の配置がトロイダル磁場に沿うことを反映することにより、モデル化コストも低減され、設計ツールとして成立すると考えられ、これを「FEMAG」コードとして開発した。本コードの基本原理は、フェライト板の端辺上に発生する磁荷が作る磁場を重ね合わせて任意の空間点の磁場を計算するものである。その後、フェライトのつくる不正磁場のプラズマへの影響を評価するために、平衡ポロイダル磁場による磁化ベクトルのポロイダル方向への偏向も考慮できる様に改良した。

本報告書、第 2 章では、フェライト磁場計算コード「FEMAG」の定式化について述べる。第 3 章では、「FEMAG」コードの機能、計算内容について詳述する。第 4 章で FEMAG の計算実行例を列挙するが、これは現在原研で計画を進めている JT-60 改修装置設計における各種検討結果である。第 5 章では、3 次元有限要素法「EMSolution」コードの計算結果および JFT-2M 装置における磁場実測値との比較によって行った、FEMAG の妥当性検討について述べる。

リップル値を、磁場のトロイダル成分の最大値 B_{tMAX} 、最小値 B_{tMIN} 、および平均値 B_{tAVE} より、

$$(\text{リップル率}) = \frac{B_{iMAX} - B_{iMIN}}{2B_{iAVE}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

と定義する。また、TFCの個数で決まるトロイダル角基本モード n_0 のフーリエ振幅 B_{n0} により、基本モードリップル率を

$$(\text{基本モードリップル率}) = \frac{B_{n0}}{B_{iAVE}} \times 100 [\%] \quad (2)$$

と定義する。

2. 定式化

2.1 仮定と基本式

以下の仮定、

- 強いトロイダル磁場によりフェライト板は磁気飽和している(図1参照)。すなわち、磁化ベクトル $\mathbf{M} \equiv \mathbf{M}_s$ ($|\mathbf{M}_s| = 1.976\text{T}$) となり、ほぼトロイダル方向を向く。これよりフェライト板のトロイダル方向端面がそれぞれN極、S極となり、単位面積当たり $\pm \sigma_s = \mathbf{M}_s \cdot \mathbf{n}_t$ の磁荷が発生する。
- フェライトのつくる磁場は、トロイダル磁場に比べて小さく、フェライト内部の磁化ベクトル \mathbf{M} の向きに影響を与えない。
- フェライト板は、実際の設計を反映して、全て薄板形状とし、ほぼトロイダル磁場に沿って配置されるとし、厚さ方向には磁化しないとする。

を採用することにより、フェライト磁場源である磁荷分布が一意的に決定でき、高速計算が可能となった。これらの仮定は、同時にモデル化コスト低減にも有効であった。

次に基本式について述べる。フェライト板の端辺の線分 dl 上に単位長さ当り $\lambda = \sigma \cdot \Delta t = (\mathbf{M}_s \cdot \mathbf{n}) \Delta t$ の磁荷が発生している時、そこから r 離れた観測点に生じる磁場 dB_{out} は、

$$dB_{out} = \frac{\sigma \Delta t}{4\pi r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} dl \quad (\sigma = \mathbf{M}_s \cdot \mathbf{n}) \quad (3)$$

となる。ここで、 \mathbf{n} は法線ベクトル、 Δt は板厚、 $r = |\mathbf{r}|$ である。トロイダル方向の積分経路が直線であり、 λ が一定であれば、(3)式は積分可能となり磁場は解析的に求められる。

本コードの基本原理は、磁荷のたまったフェライト板の端辺上で(3)式を積分したものを、フェライトの辺ごとに重ね合わせて任意の空間点の磁場を計算するものであるが、上記3つの仮定から、一意的に磁荷分布を決定できるので、収束計算が不要となる。

2.2 トロイダル磁場のみによる磁化 (ポロイダル辺上磁荷 $\sigma_p = 0$)

2.2.1 フェライト板 —PLATE 磁場源—

(3)式を四辺形フェライト板に適用したのが図2の①である。これを本報告書では、PLATE 磁場源として取り扱う。いま、ポロイダル磁場 B_p (TFCのつくるものと平衡磁場 B_{eq} からなる)がTFCのつくる

トロイダル磁場 B_t に比べ無視できる場合、ポロイダル辺上磁荷 $\sigma_p = 0$ となる。 σ_t により、フェライト板を含む平面付近の、フェライト板領域内ではトロイダル磁場と逆方向、フェライト板の領域外ではトロイダル磁場と同方向の磁場が発生する。そこで、各 TFC の直下にフェライト板を配置することにより TFC 直下ではトロイダル磁場が弱められ、TFC と TFC の間のポート部では、強められてリップル率低減が図れることになる。

2.2.2 フェライト板開口部 —HOLE 磁場源—

フェライト鋼を第一壁や真空容器として用いる場合は、トロイダル方向に並べて設置される事になるので、開口部或いは板厚の不連続部に溜まる磁荷により磁場が発生する。フェライト板に開いた四辺形開口部を、逆符号の磁荷が発生する4辺形フェライト板と考えることで(3)式が適用できる(図2の②、ここではやはり $\sigma_p = 0$ とする)。これを本報告書では、HOLE 磁場源として取り扱う。板厚不連続部については、2.3 節に譲る。端辺上に溜まる磁荷の符号が逆であるため、TF コイル間に開口部が来る場合には(板厚が厚過ぎなければ)リップル率低減に寄与する。しかし、接線ポート開口部は TFC 直下に開口部が来るため、リップルを増大させる主因となる。よってリップル計算を行う際は、接線ポート開口部の様に、位置と形状に回転対称性を持たないフェライト板、或いはフェライト板開口部を全て考慮に入れた装置全体の詳細なモデル化を行う必要がある。その結果、モデル化が簡単で、高速計算が可能な磁場計算プログラムが必要となって来る。

2.3 ポロイダル磁場の考慮 (ポロイダル辺上磁荷 $\sigma_p \neq 0$)

本コードはもともとリップル率計算のために開発されたが、フェライトのプラズマ適合性を検討するために、プラズマ表面に垂直な不整磁場のフーリエモード振幅の評価が要求される様になった。この場合、四辺形フェライト板(PLATE 磁場源)、およびフェライト板四辺形開口部(HOLE 磁場源)の、ポロイダル方向端辺上、および安定化板等の、フェライトがトロイダル方向に連続的に設置される場合の上下端辺上に発生するポロイダル磁荷 σ_p による磁場を考慮する必要がある。

この場合、磁化ベクトル M_s は TFC のつくるトロイダル磁場 B_t とポロイダル磁場 B_p (TFC のつくるものと平衡磁場 B_{eq} の和)からなる真空磁場の方向を向くと仮定した(図2参照)。トロイダル磁場を0次オーダー、ポロイダル磁場を1次オーダー、フェライトがつくる磁場を2次オーダーの量と考え、フェライト磁場は磁化ベクトル M_s の向きに影響を与えないと仮定する。TFC の発生する磁場と平衡計算コード MEUDAS の計算結果であるポロイダル平衡磁場 B_{eq} からフェライト板各辺の中心点における真空磁場を求め、 M_s の方向がそれに揃うとして、 M_s の法線方向成分から σ_p 、 σ_t を計算して、これに(3)式の積分形を適用した。この改良により、フェライト板の各辺がトロイダル方向、ポロイダル方向から大きくずれている場合も計算計算可能となった。

四辺形要素として取り扱うフェライト板(PLATE 磁場源)とフェライト板開口部(HOLE 磁場源)のポロイダル方向辺上磁荷 σ_p に加え、トロイダル方向に連続なフェライト製構造物のポロイダル方向単独辺上磁荷 σ_p (図2の③、EDGE 磁場源と呼ぶ)も計算可能とした。これは、安定化板の上下端や、安定化板がポロイダル方向に何枚かの平板で形成されており、それぞれがポロイダル方向に角度を持って接続している場合の接続辺、或いは、2.2.2 項で述べたフェライト板の板厚不連続部にも適用可能である。

3. FEMAG の機能と計算手順

3.1. FEMAG の機能

FEMAG は入力ファイル control.txt の MODE パラメータ(表 1 参照)に、実行モード名を設定することにより、以下(1)~(5)の 5 種類の機能、すなわち、

- | | |
|---|----------------------|
| | 実行モード名 (略称) |
| | ↓ |
| (1) 空間点(R,Z)におけるリップル率計算
ポロイダル断面上数点の空間点座標 (R_i, Z_i) を入力し、この点でのリップル率を計算する。 | SURFACE_RIPPLE (SR) |
| (2) ポロイダル断面格子点上のリップル率計算、コンター表示
ポロイダル断面の格子点のリップル率を(1)と同様に計算し、リップル率のコンター表示用データ (I-DEAS および EXCEL 用)を出力する。 | GRID_RIPPLE (GR) |
| (3) 特定磁気面(プラズマ表面)上の不整磁場分布
プラズマ表面等、同一磁気面上の数点の座標 (R_i, Z_i) を入力し、この各点をトロイダル方向に小角度づつ一周回転させ、各点の不整磁場 B_θ を計算する。これらより、入力点をつないだ線分をトロイダル方向に回転した曲面上に不整磁場 B_θ のコンター図を表示する I-DEAS データを出力する。入力空間点が同一磁気面上にないと不正磁場の定義があいまいになるので注意が必要である。 | SURFACE_ERROR (SE) |
| (4) 特定磁気面(プラズマ表面)上の不整磁場フーリエモード振幅計算
プラズマ表面等、特定の磁気面上の、磁気座標について等間隔の数点の座標 (R_i, Z_i) を入力し、不整磁場成分 B_θ の 2 次元フーリエモード解析を行い、各モードの振幅を EXCEL のワークシート用データとして出力する。 | SURFACE_FOURIER (SF) |
| (5) ポロイダル断面格子点上の磁場データ出力
基本モードを n_0 (=TFC の個数)とした時、 $1/n_0$ の回転対称性を持たない磁場における OFMC 計算を行う場合、磁場データの取り扱いにより 3 次元磁場 OFMC ^(*) 、フーリエモード OFMC ^(**) の 2 つの計算モジュールがあり、それぞれの入力用磁場データを出力する。 | GRID_OFMC (GO) |

が使用できる。(1)、(2)はリップル率を計算するもので、(3)、(4)は不整磁場を計算するものである。ここで、不整磁場 B_θ とは、TFC およびフェライトのつくる、プラズマ磁気面に垂直な磁場成分である。(5)は OFMC による高速イオン損失計算用に磁場分布を出力するものである。

(*) 3 次元磁場 OFMC

入力したポロイダル断面の格子点をトロイダル方向に小角度づつ一周回転させた、各点(R_i, θ_i, Z_i)の磁場データを入力する。基本モード n_0 の高調波以外の成分も考慮できるがデータ量が膨大になる。

(**) フーリエモード OFMC

3次元磁場をトロイダル角についてフーリエ分解し、基本モード n_0 の高調波モードの振幅、およびトロイダル角シフト量を入力する。

3.2 入出力ファイルと計算手順

3.2.1 入出力ファイルの説明

図3にFEMAGによるフェライト磁場計算のフローチャートを示す。図3に示される入力ファイル、出力ファイルの概要をそれぞれ表1、表2に示す。ここで、入力ファイルのうち、計算制御データ入力ファイル control.txt と、フェライト形状データ入力ファイル ferrite.txt を除いたファイルはテキストデータの単純な羅列であり、表1中にフォーマットが示されている。control.txt、ferrite.txt のフォーマットは、FEMAG固有のものであり、以下に設定パラメータ名について説明する。

計算制御データ入力ファイル control.txt で設定するパラメータ名とその設定値を以下に列挙する(表1、表3参照)。

OMODE パラメータ

FEMAGの機能(3.1節参照)を選択する。

ORUN パラメータ

FEMAG 1st RUN か 2nd RUN か(3.2.2項参照)を選択する。

OMAGNET パラメータ

磁荷の計算方法を選択する。設定値とその機能は以下のとおりである。

- ・VACUUM: 磁荷磁場=0となる。TFCが本来持っているリップル率の計算に使用する。
- ・APPROX0: ferrite.txtにて入力したフェライト板(PLATE磁場源)、フェライト開口部(HOLE磁場源)の第1辺に $-\sigma = -M_s$ 、第3辺に $+\sigma = M_s$ の磁荷が発生していると仮定する。
- ・APPROX1: フェライト各端辺の中心点(フェライト形状データ ferrite.txt より FEMAG 1st RUN で計算され、xedge.dat ファイルに出力される)における磁荷 σ を、 $\sigma = M_s \cdot n$ (M_s は TFC 磁場に平行)より計算する辺(EDGE磁場源)上の磁荷も同様に計算される。
- ・FULL: 平衡磁場データ(Bvp.dat)を読み込んで、TFC磁場(Bvtfe.dat)と合わせて磁場方向を決定し、APPROX1と同様の計算により磁荷 σ を求める。

この他、チェック計算用に以下の設定が可能である。

- ・POL_ONLY: FULLと同様の計算を行うが、フェライト板(PLATE磁場源)、およびフェライト開口部(HOLE磁場源)のフェライト第1辺および第3辺の磁荷を0とする。
- ・TOL_ONLY: FULLと同様の計算を行うが、フェライト板(PLATE磁場源)、およびフェライト開口部(HOLE磁場源)のフェライト第2辺、第4辺の磁荷とEDGE磁場源の磁荷を0とする。

OSYMMETRY パラメータ

TFCの個数 n_0 でトロイダル方向基本モードとなる。TFC磁場は $1/n_0$ 回転対称性を持つ。

○NDIVTOR パラメータ

トロイダル方向1セクター(360° / SYMMETRY)間の空間磁場計算点数である。リップル率を決めるトロイダル方向磁場成分 B_t の最大値、最小値が含まれる様に、十分な計算点数が必要である。Bvobs.dat 作成のためには、surface.txt (SR、SE、SF モード時)、grid.unv (GR、GO モード時)に含まれる 1 計算点(R,Z)に対し、NDIVTOR 個の点($R \cos \theta_j$, $R \sin \theta_j$, Z) ($\theta_j = 360^\circ$ / SYMMETRY / NDIVTOR $\times j$) ($j=0 \sim$ NDIVTOR-1)上の TFC 磁場を計算する必要がある。

○DVPGRID パラメータ

平衡磁場データのポロイダル断面内、R 方向、Z 方向格子点数で、 (2^n+1) 個 ($n=1,2,\dots$)である。OFMC 用磁場データを作成する格子点数は、現在 R 方向 129 点、Z 方向 129 点に固定されており、変更できない。

○OFMC_JT60 パラメータ

OFMC コードでは gradB ドリフトの方向を z 軸の正方向とする円柱座標を用いている。JT-60 では gradB ドリフトの向きは下方となっており、OFMC_JT60 オプションを選択した場合、Z 軸を逆転した磁場データを作成し出力する。

次にフェライト形状データ入力ファイル ferrite.txt で設定するパラメータ名とその設定値を以下に列挙する(表1、表4 参照)。

フェライト磁場は、フェライト板の板厚に比例し、各磁場源の線形和で表現できるため、フェライト板形状データは入力を簡潔にするために、3 つのパラメータ、すなわち、回転対称性あり/なし、磁場源の種類(PLATE 磁場源、HOLE 磁場源、EDGE 磁場源、図2 参照)、およびシフト量により、いくつかのグループに分けて入力することにする。各グループともに、1行目のヘッダー行に、そのグループのパラメータとそのグループに含まれる磁場源の数が指定される。その後各磁場源の形状データを1磁場源当り2行で列挙する。

「回転対称性あり」(=CYCLIC)を指定した場合、そのグループ内の磁場源1つで回転対称の位置にある SYMMETRY 個(control.txt 参照)の磁場源入力に相当するので、入力を簡略化できる。これに回転対称性のない部分を別グループとして追加するようにする。

○回転対称性の有無(CYCLIC, NON-CYCLIC)

表 4(1/3)が回転対称性のある場合(CYCLIC)の例で各 TFC 直下に置かれるリップル率低減用フェライト板データである。また、表 4 (2/3)が回転対称性のない場合(NON-CYCLIC)の例で、接線 NBI が入射している TFC 直下だけ、リップル率低減用フェライト板の板厚を増やしている(詳細は 4.1.2(b)項参照)。

○磁場源の種類(PLATE 磁場源、HOLE 磁場源、EDGE 磁場源)

本報告書では、図2①の四辺形フェライト板端辺に磁荷がたまる場合を PLATE 磁場源、図2 ②のフェライト板四辺形開口部に磁荷がたまる場合を HOLE 磁場源、単独辺に磁荷がたまる場合を

EDGE 磁場源としている。EDGE 磁場源は、具体的には、トロイダル方向に連続的に設置されるフェライト板(安定化板等)の上下端や、安定化板がポロイダル方向に何枚かの平板で形成されており、それぞれがポロイダル方向に角度を持って接続している場合の接続辺(接続しているフェライト板各々の端辺をそれぞれ EDGE 磁場源とする)、或いは、2.2 節で述べたフェライト板の板厚不連続部である。表 4(3/3)が EDGE 磁場源の例である。

○シフト量

シフト量のうち、DISP の前の 3 つのパラメータは、フェライト板の平行移動量(x, y, z)であり、真空容器中心と TFC 中心のズレの影響を検討する際に用いる。DISP の後の 1 つのパラメータは、トロイダル方向回転角(単位°)であり、形状が同じで、設置トロイダル角のみ異なる磁場源を入力する際に使用する。シフトの順番は、トロイダル回転の後、平行移動が行われる。

SR機能(空間点リップル率計算)を選択した場合、出力ファイル output には、表 5(JT-60 改修装置、基本モード=18)の例の様に、入力した磁場計算点の座標と、リップル率、基本モード(n_0)リップル率、さらにそれらを求めるのに必要な B_{tMAX} , B_{tMIN} , B_{tAVE} , B_{n0} 、および基本モードの TFC 磁場からの位相差 $\Delta\theta$ が出力される。フェライトがある場合、基本モードは、 $\cos(n_0\theta + \Delta\theta)$ の形を仮定する(TFC 直下をトロイダル角 θ の原点とする)。TFC 直下にフェライト板を対称性よく配置し、その板厚を増していくと、TFC のつくるリップル磁場よりもフェライト板のつくる逆位相リップル磁場の方が大きくなり、基本モードの位相差変化が π に近くなる(オーバーキャンセルの発生)。さらに板厚を増加させていくと最終的にリップル率が増大してしまう。位相差の変化を見ることでオーバーキャンセルの発生がチェックできる。
.unv で終わる出力ファイルは、I-DEAS 用描画ファイルである。

OFMC 用データについては、OFMC のマニュアルに記述されている。

3.2.2 計算手順

計算は 3 つのステップに分けられる。このうち、STEP1 と STEP3 は FEMAG の「1st RUN」と「2nd RUN」で行う。第 2 ステップは TFC 磁場が精度よく計算できる既存の磁場計算コードを使用する。以下、各ステップの詳細を説明する。

○STEP1: FEMAG 1st RUN

まず、フェライト板の形状データである ferrite.txt を作成(表 1 参照)し、FEMAG 1st RUN によって、磁場源各端辺中心の座標を計算する。フェライトのない場合、および $\sigma_p=0$ の近似計算を行う場合には、このステップは不要である。

○STEP2: 外部プログラムによる TFC 磁場計算

次に、FEMAG 2nd RUN (STEP3)で参照する空間点における TFC 磁場を計算するが、その際、計算精度の高い(誤差 $1.0 \times 10^{-5} T = 0.1$ Gauss 程度)外部プログラムを使用する。ピオ-サバール則に、体積電流の解析積分を適用しているものが望ましい。本報告書では、EMSolution [1]を使用している。

○STEP3: FEMAG 2nd RUN (本計算)

各機能(MODE オプションで指定)により、磁場計算点(ポロイダル断面内座標)入力データ、surface.txt (SR、SE、SF モード)、grid.unv (GR、GO モード)が異なる。図4にサンプルを示す。

入力される各空間点(R,Z)をトロイダル方向に $360^\circ / (\text{SYMMETRY} \times \text{NDIVTOR})$ ずつ、一周回転させた3次元空間点上でフェライト磁場を計算(MAGNET オプションで計算方法を選択)し、入力トロイダル磁場、平衡磁場と合わせて、リップル率、不整磁場の計算および図出力、或いは OFMC 用磁場データ出力を行う。

任意の磁気面(プラズマ表面)上の不整磁場分布出力計算(SE)では、surface.txt で与えるポロイダル断面上の点をつないだカーブ(図4(a)では、点 No.1~No.12をつないだもの)をトロイダル方向に一周回転させて三次元曲面(磁気面)をつくり、その上の不正磁場分布を出力する。

4 FEMAG 計算例 (JT-60 改修装置の設計)

JT-60 改修装置設計のため、FEMAG コードを用いて、リップル率低減のためのフェライト配置検討、プラズマに対する誤差磁場影響評価を実施した。この結果を FEMAG 計算例として示す [2-5]。本装置には、プラズマのアウトボード側に近接させてプラズマのMHD不安定性を抑えるフェライト鋼製安定化板(板厚 10mm)がトロイダル方向に連続に設置されている。一般ポートによる安定化板開口部はTFCとTFCの間にあるため、リップル率低減に寄与しているが、4本の接線NBIポートによる安定化板開口部はTFC直下にあるために、逆にリップル率を上昇させている。TFC直下の真空容器内部、安定化板の裏側領域にリップル率低減用フェライト板を挿入して、リップル率の低減を図るが、トロイダルコイルの運転領域は B_t (@2.8m)=2.0T~3.8Tと広いため、強磁場側(3.8T)でのリップル率低減を追求しすぎると、弱磁場側(2.0T)でオーバーキャンセルが発生し、リップルが大きくなる場合がある。最終的には、OFMC コードによりリップル補正前後の磁場中で高速イオンの損失割合を比較して、リップル率低減効果を評価した。

4.1 ポロイダル断面上空間点(R,Z)におけるリップル率計算

本機能を使って、全オペレーション領域 $B_t=2.0\text{T} \sim B_t=3.8\text{T}$ において、「プラズマ領域のリップル率 0.4%以下」が達成可能か、検討した。他の真空容器内部品と干渉しない様に、3D-CAD を利用してリップル率低減フェライト板設置可能スペースを決めた。その領域に収まる範囲で、試行錯誤的にフェライト板厚の増減を行い、最もリップル率が低減されるフェライト板厚配置を求めた。この検討によって得られたフェライト板配置に対し、トロイダル磁場分布、プラズマ表面上不整磁場 B_p 分布、 B_p フーリエモード分布を計算した。

4.1.1 リップル率低減用フェライト板設置スペース検討

3D-CAD を利用し、以下、

- ・フェライト板のトロイダル方向幅は、TFC 中心面に対し対称で最大 10° 分とする(TFC の発生する 18 モードリップルを効果的に低減するため)。
- ・接線 NBI との干渉を避けるため、水平ポート領域($Z=-350\text{mm} \sim +350\text{mm}$)には設置しない。

・全内部機器、全ポート視野との干渉が無い様にする。

を仮定して、リップル率低減フェライト板設置可能スペースを決めた。JT-60 改修装置の真空容器は、トロイダル方向に TFC 直下を角部とした 18 角形状のため、TFC 直下からポート中心に向かっていくにつれ、空間的な余裕が無くなることに注意した。設置可能領域を R1～R16 の小領域に分けて、それぞれの領域毎に板厚を変化させ、リップル率の変化を見ることにする(図 5 参照)。

4.1.2 リップル率低減のためのフェライト板厚配置検討

リップル率低減のためのフェライト板の板厚配置検討を以下、(1)、(2)、(3)の手順で行った。リップル評価点は、図 4 (a) に○印で示す、12 点である。

(1) 安定化板のみを考慮したリップル値の計算

フェライト磁場源として、安定化板を考慮してリップル値の計算を行った。安定化板に属する磁場源としては、開口部、すなわち HOLE 磁場源(表 4 (2/3)PART3)と EDGE 磁場源(表 4 (3/3)、PART4)がある。安定化板は、トロイダル方向には 4 枚の平板から形成されており、それぞれが角度を持って接続している。よって、その上下端や、接続辺を EDGE 磁場源とする。特に接続辺の場合には、接続している2枚のフェライト板の端辺を、それぞれ EDGE 磁場源とする必要がある(表 4 (3/3)中の図参照)。

安定化板の接線 NBI ポート開口部が、TFC 直下にあるため、リップルは増大するが、それ以外の 1/18 回 回転対称のポート開口部の影響で、18 モードリップルは低減している。

(2) 1/18 回 回転対称にリップル率低減用フェライト板板厚を配置

1/18 回 回転対称にリップル率低減用フェライト板板厚を配置した(表 4 (1/3) PART1 参照)。JT-60 改修装置 TFC のオペレーション領域は B_t (@R=2.8m) = 2.0T~3.8T と広い。フェライトの作る磁場はほぼ B_t に依存しないので、高磁場側でフェライトの板厚を増やして十分なリップル率低減を図ってしまうと、弱磁場になるとオーバーキャンセルが発生することに注意が必要である。バップル板がプラズマに接近する、斜め上ポート付近では、バップル板開口部により十分リップル率低減効果が上がっており、フェライト板は設置しないことにする。

(3) 接線 NBI ポート直下へのフェライト板厚追加(表 4 (2/3) PART2)

B_t のトロイダル方向分布をみると、接線 NBI ポート部において、バップル板開口部が逆位相の磁場を作っているため、この部分だけリップル率低減用フェライト板の板厚を増やし、さらなるリップル率低減を図る。TFC-3, TFC-4, TFC-7, TFC-18 の 4 セクションだけ、以下の 5 領域(図 5 参照)に板厚を追加した。

R4 +40mm.

R5 +20mm

R11 +50mm

R12 +70mm

R13 +20mm

配置検討結果のうち、NBI ポートを含まない標準セクターのフェライト配置鳥瞰図を図 6 に、JT-60 改修装置全体のフェライト配置を図 7 に示す(FEMAG 出力ファイル out3d.unv より図示)。ここで安定化板上のポート開口部も、リップル率低減用フェライト板同様、四辺形で示されている。

4.1.3 リップル率計算結果 (GR 機能)

フェライト設置前、すなわち TFC 磁場の元々のリップル率分布を図 8 (a)に、フェライト配置検討を行った後のリップル率分布を図 8 (b)に示す。表 5 に、オペレーション領域の最大磁場 $B_t=3.8\text{T}$ 、最小磁場 $B_t=2.0$ における FEMAG 出力ファイル output を示す。上記検討手順 (1), (2), (3) によるリップル率の変化を表 6 にまとめる。最終的に、最大リップル値は 0.5%を切ったものの、目標の 0.4%を達成することはできなかった。ポロイダル方向、トロイダル方向に、フェライト板を細分割し、最適配置に向けて、さらなる検討を行うことも可能であるが、ここでは、OFMC による高速イオン損失評価(検討手順(4))に判断を委ねることにした。

4.1.4 トロイダル磁場分布

図 9 に表 6 の最大リップル率となるプラズマ表面上リップル評価点(No.7)の検討手順 (1), (3) に対応するトロイダル磁場 B_t 分布の変化を示す。

4.2 不整磁場 B_p 分布 (SE 機能)

図 10 (a), (b), (c)に、表 6 の検討手順 (0), (1), (3) それぞれに対応する、プラズマ表面に垂直な不整磁場 B_p 分布を示す。

4.3 不整磁場 B_p フーリエモード解析 (SF 機能)

プラズマ表面上の等磁気座標間隔 200 点(図 4 (b)参照)上の不整磁場を計算し、磁気座標に関してフーリエモード分解を行った。mをポロイダルモード数、nをトロイダルモード数とする。小 m, n 範囲のフーリエ振幅分布を図 11 に示す。n = 18 と n = 0 モードが 1 Gauss(=1.0 × 10⁻⁴T)を越えるがそれ以外は小さいことが分かる。設置誤差を考慮して、全フェライト板を TFC から 10 mm程度シフトしても、(m, n) = (2, 1) モードは高々 3.7 Gauss となり、問題となる高β locked mode の発生につながる誤差磁場予想強度限界 7.6 Gauss の 1/10 以下であった。

4.4 OFMC による高速イオン損失評価のための磁場データ出力 (GO 機能)

FEMAG コードで計算した磁場データを OFMC コードに持っていき、各種 NBI ビームを入射した場合の(軌道+リップル)損失が評価可能である。解析例として、フェライトのない場合に最も損失の大きい(25.0 %)負磁気シアプラズマ中に P-NBI (Perp) を入射した場合の安定化板、ダイバータ上の損失分布を図 12 に示す。フェライトによってリップル率を低減することにより、その損失は 2.0 %まで低減できた。

5. FEMAG コードの妥当性検討

3次元有限要素法プログラム計算結果との比較、及び JFT-2M 装置における磁場実測結果との比較により、FEMAG コードの妥当性を確認する。

5.1 3次元有限要素法プログラムとの比較

FEMAGコードの妥当性を確認するために、ソリッド要素を用いた3次元有限要素法電磁場解析プログラム(EMSolution)とクロスチェックを行った。解析対象は、第4章と同様の JT-60 改修装置とする。但し3次元有限要素法電磁場解析プログラムでは、空間も含めたメッシュ分割を行う必要があるため、モデルを簡略化して標準ポートセクション(1/18回 回転対称性あり)を解析対象範囲とした(図13参照)。

その結果、リップル率は両者でよく一致した。トロイダル磁場の分布を比較すると、両者の差は、有限要素法3Dコードの計算誤差1 Gaussの範囲に入った(図14参照)。フーリエモード振幅比較では、両者ともに、プラズマに悪影響を与えるようなモードは発生していなかった(図15参照)。但し、FEMAGでフェライト板の板厚方向の磁化を考慮していないためか、 $n=0$ モード振幅に2倍程度の差(例えば(2,0)モードで2.43 Gauss/4.74 Gauss)があった。両者ともに、(0,0)モードが $\neq 0$ となる($\text{div}B=0$ が破れる)が、計算精度、モデルを変えても他のモードへの影響はなかった。

5.2 JFT-2M 磁場計測結果との比較

JFT-2M装置の真空容器内部に、トロイダル方向に一周するレーンと、その上を移動する3次元誤差磁場計測装置を持ち込んで、フェライト磁場測定が行われた[6]。図16(a)にフェライト板の配置を示す。図16(b)にトロイダル磁場の実測値とFEMAGによる計算結果との比較を示す。両者はよく一致しているが、トロイダル角 $\pm 90^\circ$ にある真空容器半割部付近で差が大きくなっている。これは、半割部では、フランジを跨ぐ形でフェライト板が設置されており、フェライト板設置誤差が他の部分に比べて大きくなる可能性があり、また、フェライト鋼と測定点との距離が他の部分の約半分と短く、その影響が大きくなるためであると考えられる。

6. おわりに

フェライト材をプラズマ対向材料、リップル率低減デバイスとして用いる将来の核融合装置の設計には、プラズマに対する誤差磁場評価、リップル率低減検討を行うため、フェライト磁場の計算が不可欠である。

トカマク装置に特徴的である強いトロイダル磁場中では、フェライト鋼は強く磁気飽和している。フェライト自身の作る磁場は比較的小さいとし、さらに実際に使用するフェライト板形状は薄板に限られ、その薄板の配置はほぼトロイダル磁場に沿う。以上の様なトカマク装置特有の状況を活用することによって、設計ツールとしても十分高速なフェライト磁場計算コード「FEMAG」を開発した。3次元有限要素法電磁場解析コードおよび JFT-2M 装置における磁場実測結果との比較により、その妥当性も確認できた。

本報告書は、フェライト磁場計算コード「FEMAG」の定式化、「FEMAG」コードの機能、計算内容、計算実行例、3次元有限要素法「EMSolution」コードの計算結果および JFT-2M 装置における磁場実測結果との比較による妥当性検討結果をまとめたものである。本報告書で使用した計算実行例は、JT-60 改修

装置設計のために行った検討結果であり、その検討結果から、JT-60 改修装置では、フェライトによる補正によりリップル率は 0.5 %まで低減すること、フェライト鋼のつくる不整磁場のプラズマへの影響は小さいことが確認された。さらに、本コードで計算した磁場データを OFMC コードに入力することにより、リップル率低減磁場中では、高速イオンの損失が、リップル補正のない場合の 1/10 になることが確認された。

現在ポロイダル断面上磁場計算点(R, Z)ごとに OpenMP を用いた並列化を行うことで、実行時間が並列 CPU 数にほぼ反比例して減少することを確認しているが、並列化の詳細については、本報告書の範囲を越えるので割愛する。JT-60 改修装置の設計検討結果の詳細、OFMC コードを用いたリップル損失の物理的検討に関しては、今後、報告を予定している。

謝辞

本報告書執筆の機会を与えて下さった、核融合装置試験部 清水部長、JT-60 第 2 試験室 宮室長、炉心プラズマ計画室 石田室長、逆井章氏に感謝致します。また、数々の貴重な助言を頂いた、炉心プラズマ実験計測開発室 三浦室長、JT-60 第 1 試験室 松川誠氏、炉心プラズマ計画室 栗田源一氏、プラズマ物理実験研究室 篠原孝司氏、ならびに児玉幸三氏を初めとする JT-60 第 2 試験室の方々に感謝致します。

参考文献

- [1] A.Kameari and R.C.Popa, "EMSolution: A program for three-dimensional electromagnetic analysis", Proceedings of 2nd Japanese-Bulgarian-Macedonian Joint Seminar on Applied Electromagnetics, (1999), Sapporo.
「EMSolution Handbook」サイエンスソリューションズ(株)
- [2] 浦田一宏、栗田源一、三浦幸俊、石田真一、逆井章、松川誠「JT-60 改修装置のフェライト誤差磁場解析」第 4 回核融合エネルギー連合講演会予稿集 2F034、2002 年 6 月 13 日～14 日、大阪大学コンベンションセンター
- [3] A. Sakasai, S. Ishida, M. Matsukawa, Y. Kudo, K. Urata, et al., "Advanced Fusion Technologies Developed for JT-60 Superconducting Tokamak", Proc. 19th IAEA Fusion Energy Conf., Lyon, (2002), IAEA-CN-94/FT/P2-09.
- [4] M. Matsukawa, S. Ishida, A. Sakasai, K. Urata et al., "Design and Analysis of the Plasma Position and Shape Control in Superconducting Tokamak JT-60SC", to be published in Fusion Eng. Des.
- [5] A. Sakasai, S. Ishida, M. Matsukawa, K. Urata, et al., "Engineering Design Study of JT-60 Superconducting Modification", Proc. 19th Symp. Fusion Engineering. Atlantic City, (2002).
- [6] K.Shinohara, H.Kawashima, K. Tsuzuki, K. Urata, et al., "Effects of complex magnetic ripple on fast ions in JFT-2M ferritic insert experiments", Proc. 19th IAEA Fusion Energy Conf., Lyon, (2002), IAEA-CN-94/EX/P2-14.

表1 FEMAG 入力ファイルの概要(1/2)

ファイル名	入力データの説明
control.txt	<p>制御データ入力用ファイル。計算モード、近似計算の種類等を選択する。詳細な説明は3.2.1項を、入力サンプルは表3を参照。行頭*はコメント文。以下のオプションは順不同。</p> <p>(1) MODE FEMAGの機能(3.1節参照)を選択する。</p> <p>(2) RUN FEMAG 1st RUNか2nd RUNを選択する(3.2.2項参照)。</p> <p>(3) MAGNET 磁荷の計算方法を選択する(3.2.1項参照)。</p> <p>(4) BTOFAC 入力TFC磁場データ、Bvobs.dat、Bvtfe.datに掛ける係数。</p> <p>(5) SYMMETRY TFCの個数=リップルの基本モードn_0。</p> <p>(6) NDIVTOR トロイダル方向1セクター(360° / SYMMETRY)間の磁場計算点数。</p> <p>(7) BVPGRID 平衡磁場データの格子点数。</p> <p>(8) OFMC_MODE フーリエモードOFMC用の磁場データ高調波成分数。</p> <p>(9) OFMC_JT60 OFMC磁場Z方向指定(3.2.1項参照)。</p>
ferrite.txt	<p>フェライト板形状データ入力用ファイル。(1)回転対称性の有無、(2)磁場源の種類、(3)シフト量別にグループ分けする。表4に例を示す。各グループごとに1行のヘッダ行と1磁場源に対し2行のデータ行からなる。</p> <p>1. グループのヘッダ行(1行) (*で開始されるとコメント文になる。)</p> <p>(1) 回転対称性の有無(CYCLE/NON-CYCLE) CYCLEとすると、1要素の入力で、SYMMETRY(control.txt)個分の入力となる。</p> <p>(2) 磁場源の種類 図2の磁場源①~③に対応して、以下3種類の入力ができる。</p> <p>① PLATE(4辺に磁荷がたまる板) ② HOLE(4辺に磁荷がたまる開口部)</p> <p>③ EDGE(磁荷がたまる1辺)</p> <p>(3) フェライト板枚数 NF</p> <p>(4) シフト量 (トロイダル回転後に平行移動される。)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ トロイダル回転角 θ_0 ・ DISP(ラベル) ・ 平行移動(x_0, y_0, z_0) <p>2. フェライト形状(2行×NF)</p> <p>①(PLATE)、②(HOLE)</p> <div data-bbox="922 1444 1422 1697" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>①(PLATE)、②(HOLE)の形状データ</p> </div> <p>[1行目] ID, フェライト板板厚 フェライト板端点座標(円柱座標) $R_{i1}, \theta_{i1}, Z_{i1}, R_{i2}, \theta_{i2}, Z_{i2}$</p> <p>[2行目] $R_{i3}, \theta_{i3}, Z_{i3}, R_{i4}, \theta_{i4}, Z_{i4}$</p> <p>③(EDGE)</p> <div data-bbox="858 1839 1422 1966" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>③(EDGE)の形状データ</p> </div> <p>[1行目] ID, フェライト板板厚 フェライト板端点座標(円柱座標) $R_{j1}, \theta_{j1}, Z_{j1}, R_{j2}, \theta_{j2}, Z_{j2}$</p> <p>[2行目] n_r, n_z</p>

表 1 FEMAG 入力ファイルの概要(2/2)

ファイル名	入力データの説明
surface.txt	<p>磁場計算点の座標データ(R_i, Z_i)。SR、SE、SF モード時に使用する。SE モード時は同一磁気面上の点とし、SF モード時は、同一磁気面上の等間隔磁気座標点とする。(図 4 参照)</p> <p>[ファイルフォーマット]</p> <p>(i 行目) R_i, Z_i (フリーフォーマット)</p>
grid.unv	<p>磁場計算格子点の座標、要素データ(コンター図作成にはデータ補間のため、格子点を節点とする 4 辺形要素定義が必要)。GR(リップルコンター出力)、GO (OFMC)モード時に使用する。I-DEAS universal 形式とする。</p>
Bvp.dat	<p>MEUDAS で計算された平衡磁場データ(BR, BZ)。格子点数は control.txt の GVPGRID で指定する。以下の順番に格納する。</p> <p>(1) 格子点 R 座標</p> <p>(2) 格子点 Z 座標</p> <p>(3) 格子点プラズマ電流分布(計算には使用しない。含まれている場合は skip する。)</p> <p>(4) 格子点上 BR: ($BR(R_i, Z_j) i=1, BVPGRID, j=1, BVPGRID$)</p> <p>(5) 格子点上 BZ: ($BZ(R_i, Z_j) i=1, BVPGRID, j=1, BVPGRID$)</p> <p>(1)~(5)まで各 1 行とする(改行コードなし)。</p>
Bvobs.dat	<p>TFC が磁場計算点(3次元)につくる真空磁場データ。</p> <p>ピオサパール則を適用する際に、体積電流を解析的に積分している計算精度の高い(誤差 $1.0 \times 10^{-5} T = 0.1 G$ 程度)計算プログラムを使用する。本報告書では、EMSolution を使用している。</p> <p>Bvtfe.dat 計算時とコイル電流値を揃えておく。磁場強度は control.txt 内の FACTOR で定数倍するため。計算したい2次元磁場計算点(R_i, Z_i)(surface.txt 参照)1 点に対し、これをトロイダル方向に回転した3次元磁場計算点、すなわち、</p> $(x_i, y_i, z_i) = (R_i \cos \theta_j, R_i \sin \theta_j, Z_i)$ $\theta_j = (2\pi / \text{SYMMETRY} / \text{NDIVTOR}) * j \quad (j=0 \sim \text{NDIVTOR}-1)$ <p>における TFC のつくる磁場成分。</p> <p>[ファイルフォーマット]</p> <p>(l 行目) $x_i, y_i, z_i, B_{xi}, B_{yi}, B_{zi}, B _i$</p> <p>トロイダル方向1セクター計算点 NDIVTOR は 40 程度とする。</p>
Bvtfe.dat	<p>TFC がフェライト辺中心につくる磁場データ。</p> <p>Bvobs.dat と同様、精度の良い外部プログラムで計算する。計算すべき磁場計算点は、フェライト板各辺の中点であり、1st RUN の出力ファイル、xedge.dat に出力される。フォーマットは Bvobs.dat と同様。</p>

表 2 FEMAG 出力ファイルの概要

ファイル名	入力データの説明
xedge.dat.	フェライト板端辺の midpoint 座標。1st RUN 時、ferrite.txt より計算される。この座標に TFC がつく磁場を計算し、Bvtfe.dat ファイルを作成する。フェライト板ポロイダル方向端辺上の磁荷 σ_p を考慮する際必要となる。
contour_xls.dat	EXCEL 用リップルコンターデータ。
Bvpout.unv	3D 表面上真空磁場分布。
Bt.dat	surface.txt で入力された(R,Z)円周上のトロイダル磁場分布。
out2d.unv	grid.unv に対応するリップルコンター。(GR 機能)
out3d.unv	フェライトの 3 次元表示(図7参照)、およびプラズマ表面(軸対称任意表面)上の不整磁場分布(SE 機能)。
OF_dc.dat	フーリエモード OFMC 用 DC 成分データ。
OF_acXXX.dat	フーリエモード OFMC 用 AC 成分データ。control.txt で入力される基本モード、SYMMETRY(=TFC の個数)の整数倍(1 倍から OFMC_MODE 倍まで)の高調波成分が出力される。XXX は 3 桁の整数であり、高調波成分のフーリエモード数が入る。ファイルには、各格子点上のフーリエモード振幅と、トロイダル角シフト量が出力される。高調波以外のモードを考慮したい場合は、次の OF_all.dat を使用して 3 次元 OFMC で計算する。
OF_all.dat	3 次元磁場 OFMC 用磁場データ。

表 3 FEMAG 計算制御データファイル control.txt 例 (3.2.1 項参照)

```

*****
*   FEMAG control.txt   *                               (*開始行はコメント)
*****
*(モード: 1つ選択)
MODE    GRID_RIPPLE           (GR 機能)
*MODE   GRID_OFMC            (GO 機能)
*MODE   SURFACE_RIPPLE       (SR 機能)
*MODE   SURFACE_ERROR        (SE 機能)
*MODE   SURFACE_FOURIER      (SF 機能)
*(1stラン、2ndランのどちらかを選択)
*RUN (FIRST/SECOND)
*RUN    FIRST
RUN     SECOND
*(磁荷計算法の選択)
*MAGNET VACUUM
*MAGNET APPROX0   Bvtfe NO NEED }  $\sigma_p = 0$ 
*MAGNET APPROX1   Bvtfe NEED!  }
*MAGNET POL_ONLY }
*MAGNET TOR_ONLY }  $\sigma_p \neq 0$ 
MAGNET FULL
*(TFC のつくる真空磁場 Bvobs.dat, Bvtfe.dat の係数)
* BT0FAC  0.59090909=1.3/2.2
* BT0FAC  0.526315789=2.0/3.8
BT0FAC   1.0
*(TFC の個数)
* SYMMETRY
SYMMETRY 18
*(1セクター分割数)
*NDIVtor (20/24)
NDIVTOR 20
*(平衡磁場計算格子点数 NR,NZ)
*BVPGRID
BVPGRID 513 513
*(OFMC に出力するフーリエモード数)
* OFMC_MODE
OFMC_MODE 8
*(gradB drift の向き)
* OFMC_JT60 (gradB drift -> -z)
OFMC_JT60
*
*END

```

表 4 FEMAG フェライト板形状入力データファイル ferrite.txt 例 (1/3) 回転対称性のある部分

(リップル低減フェライト板 1/18 回回転対称部分)

*No.1 (CYCLIC/NON-CYCLIC)-(HOLE/PLATE)-N
CYCLIC PLATE 16 0.0 DISP 0.0 0.0 0.0

* UP

*No.+/-thick	r1	theta1	z1	r2	theta2	z2	
1	0.100	4.1540	-5.00	0.3500	4.1540	-5.00	0.4362
		4.1540	5.00	0.3500	4.1540	5.00	0.4362
2	0.100	4.1540	-5.00	0.4362	4.1540	-5.00	0.5225
		4.1540	5.00	0.4362	4.1540	5.00	0.5225
3	0.090	4.1443	-5.00	0.5422	4.1302	-5.00	0.5710
		4.1443	5.00	0.5422	4.1302	5.00	0.5710
4	0.000	4.1302	-4.01	0.5710	4.0670	-4.01	0.7000
		4.1302	4.01	0.5710	4.0670	4.01	0.7000
5	0.000	4.0670	-3.76	0.7000	4.0037	-3.76	0.8290
		4.0670	3.76	0.7000	4.0037	3.76	0.8290
6	0.060	4.0037	-3.51	0.8290	3.9404	-3.51	0.9580
		4.0037	3.51	0.8290	3.9404	3.51	0.9580
7	0.060	3.9404	-3.31	0.9580	3.8772	-3.31	1.0870
		3.9404	3.31	0.9580	3.8772	3.31	1.0870
8	0.060	3.8772	-5.00	1.0870	3.8270	-5.00	1.1893
		3.8772	5.00	1.0870	3.8270	5.00	1.1893

* DOWN

*No.+/-thick	r1	theta1	z1	r2	theta2	z2	
9	0.100	4.1540	-5.00	-0.3500	4.1540	-5.00	-0.4362
		4.1540	5.00	-0.3500	4.1540	5.00	-0.4362
10	0.100	4.1540	-5.00	-0.4362	4.1540	-5.00	-0.5225
		4.1540	5.00	-0.4362	4.1540	5.00	-0.5225
11	0.040	4.1443	-5.00	-0.5422	4.1302	-5.00	-0.5710
		4.1443	5.00	-0.5422	4.1302	5.00	-0.5710
12	0.020	4.1302	-4.01	-0.5710	4.0670	-4.01	-0.7000
		4.1302	4.01	-0.5710	4.0670	4.01	-0.7000
13	0.060	4.0670	-3.76	-0.7000	4.0037	-3.76	-0.8290
		4.0670	3.76	-0.7000	4.0037	3.76	-0.8290
14	0.000	4.0037	-3.51	-0.8290	3.9404	-3.51	-0.9580
		4.0037	3.51	-0.8290	3.9404	3.51	-0.9580
15	0.000	3.9404	-3.31	-0.9580	3.8772	-3.31	-1.0870
		3.9404	3.31	-0.9580	3.8772	3.31	-1.0870
16	0.000	3.8772	-5.00	-1.0870	3.8270	-5.00	-1.1893
		3.8772	5.00	-1.0870	3.8270	5.00	-1.1893

(PART1)

表 4 FEMAG フェライト板形状入力データファイル ferrite.txt 例 (2/3) 回転対称性のない部分

(リップル低減フェライト板 NBI ポート追加部) (TFC-18)							
*No.1 (CYCLIC/NON-CYCLIC)-(HOLE/PLATE)-N							
NON-CYCLIC PLATE 5 20.0 DISP 0.0 0.0 0.0							
*No.+/-thick r1 theta1 z1 r2 theta2 z2							
*TFC-18 1.000 20.0000							
4	0.040	4.1302	-4.01	0.5710	4.0670	-4.01	0.7000
		4.1302	4.01	0.5710	4.0670	4.01	0.7000
5	0.020	4.0670	-3.76	0.7000	4.0037	-3.76	0.8290
		4.0670	3.76	0.7000	4.0037	3.76	0.8290
11	0.050	4.1443	-5.00	-0.5422	4.1302	-5.00	-0.5710
		4.1443	5.00	-0.5422	4.1302	5.00	-0.5710
12	0.070	4.1302	-4.01	-0.5710	4.0670	-4.01	-0.7000
		4.1302	4.01	-0.5710	4.0670	4.01	-0.7000
13	0.020	4.0670	-3.76	-0.7000	4.0037	-3.76	-0.8290
		4.0670	3.76	-0.7000	4.0037	3.76	-0.8290
(TFC-18)と同様のフェライトを(TFC-7)(TFC-4)(TFC-3)にも追加している。							
(安定化板 ポート開口部)							
*No.1 (CYCLIC/NON-CYCLIC)-(HOLE/PLATE)-N							
NON-CYCLIC HOLE 50 0.0 DISP 0.0 0.0 0.0							
*P-1 0							
*No.+/-thick r1 theta1 z1 r2 theta2 z2							
1	0.010	3.9090	15.14	0.3500	3.9090	15.14	-0.3500
		3.9090	4.86	0.3500	3.9090	4.86	-0.3500
*P-18 1							
2	0.010	3.9090	26.27	0.3500	3.9090	26.27	-0.3500
		3.9089	15.75	0.3500	3.9089	15.75	-0.3500
3	0.010	3.5920	34.15	0.8702	3.8746	33.85	0.4291
		3.5920	25.85	0.8702	3.8746	26.15	0.4291
4	0.010	3.8782	33.84	-0.4321	3.5095	34.25	-0.8008
		3.8782	26.16	-0.4321	3.5095	25.75	-0.8008
				.			
				.			
				.			
*P-2 17							
48	0.010	3.9090	355.14	0.3500	3.9090	355.14	-0.3500
		3.9090	344.86	0.3500	3.9090	344.86	-0.3500
49	0.010	3.5920	354.15	0.8702	3.8746	353.85	0.4291
		3.5920	345.85	0.8702	3.8746	346.15	0.4291
50	0.010	3.8782	353.84	-0.4321	3.5095	354.25	-0.8008
		3.8782	346.16	-0.4321	3.5095	345.75	-0.8008

(PART2)

(PART3)

表 4 FEMAG フェライト板形状入力データファイル ferrite.txt 例 (3/3) EDGE 磁場源

(安定化板 ポロイダル方向エッジ) (PART4)
 *No.1 (CYCLIC/NON-CYCLIC)-(HOLE/PLATE)-N
 CYCLIC EDGE 32 0.0 DISP 0.0 0.0 0.0

*No.+/-thick	r1	theta1	z1	r2	theta2	z2
1	0.010	2.6328	-2.50	1.8228	2.6328	2.50 1.8228
		-0.6004	0.3692			
2	0.010	2.6328	2.50	1.8228	2.6328	7.50 1.8228
		-0.6004	0.3692			
3	0.010	2.6328	7.50	1.8228	2.6328	12.50 1.8228
		-0.6004	0.3692			
4	0.010	2.6328	12.50	1.8228	2.6328	17.50 1.8228
		-0.6004	0.3692			
5	0.010	3.2332	-2.50	1.4536	3.2332	2.50 1.4536
		0.6004	-0.3692			
6	0.010	3.2332	2.50	1.4536	3.2332	7.50 1.4536
		0.6004	-0.3692			
7	0.010	3.2332	7.50	1.4536	3.2332	12.50 1.4536
		0.6004	-0.3692			
8	0.010	3.2332	12.50	1.4536	3.2332	17.50 1.4536
		0.6004	-0.3692			
9	0.010	3.2332	-2.50	1.4536	3.2332	2.50 1.4536
		-0.6895	1.0734			
10	0.010	3.2332	2.50	1.4536	3.2332	7.50 1.4536
		-0.6895	1.0734			
11	0.010	3.2332	7.50	1.4536	3.2332	12.50 1.4536
		-0.6895	1.0734			
12	0.010	3.2332	12.50	1.4536	3.2332	17.50 1.4536
		-0.6895	1.0734			
						.
						.
						.
29	0.010	2.8425	-2.50	-1.4848	2.8425	2.50 -1.4848
		-1.0802	-1.0804			
30	0.010	2.8425	2.50	-1.4848	2.8425	7.50 -1.4848
		-1.0802	-1.0804			
31	0.010	2.8425	7.50	-1.4848	2.8425	12.50 -1.4848
		-1.0802	-1.0804			
32	0.010	2.8425	12.50	-1.4848	2.8425	17.50 -1.4848
		-1.0802	-1.0804			

表5-1 リップル値(トロイダル磁場@2.8m=3.8T)

フェライト板配置 →			①フェライトなし	②バツフル板のみ		③バツフル板+リップル低減用フェライト		④バツフル板+リップル低減用フェライト+フェライト真空容器	
No	R[m]	Z[m]	Rvac	Ripple	R18	Ripple	R18	Ripple	R18
1	3.04	1.311	0.170	0.181	0.167	0.161	0.146	0.171	0.143
2	3.151	1.202	0.227	0.240	0.217	0.193	0.169	0.205	0.162
3	3.269	1.049	0.304	0.315	0.272	0.206	0.162	0.220	0.145
4	3.386	0.841	0.394	0.385	0.285	0.185	0.083	0.202	0.049
5	3.49	0.575	0.490	0.471	0.310	0.228	0.076	0.248	0.031
6	3.56	0.262	0.570	0.609	0.433	0.369	0.231	0.349	0.181
7	3.578	-0.066	0.593	0.712	0.460	0.492	0.283	0.492	0.229
8	3.531	-0.372	0.521	0.565	0.350	0.318	0.151	0.311	0.105
9	3.43	-0.628	0.383	0.406	0.177	0.275	0.048	0.298	0.013
10	3.298	-0.827	0.248	0.261	0.162	0.201	0.109	0.208	0.089
11	3.162	-0.974	0.154	0.172	0.128	0.154	0.109	0.167	0.100
12	3.037	-1.079	0.098	0.113	0.089	0.107	0.082	0.118	0.078

表5-2 リップル値(トロイダル磁場@2.8m=2.0T)

フェライト板配置 →			①フェライトなし	②バツフル板のみ		③バツフル板+リップル低減用フェライト		④バツフル板+リップル低減用フェライト+フェライト真空容器	
No	R[m]	Z[m]	Rvac	Ripple	R18	Ripple	R18	Ripple	R18
1	3.04	1.311	0.170	0.190	0.163	0.153	0.124	0.172	0.118
2	3.151	1.202	0.227	0.252	0.208	0.163	0.117	0.185	0.104
3	3.269	1.049	0.304	0.325	0.245	0.118	0.034	0.149	0.002
4	3.386	0.841	0.394	0.386	0.186	0.283	<i>0.196</i>	0.353	<i>0.261</i>
5	3.49	0.575	0.490	0.472	0.148	0.441	<i>0.297</i>	0.524	<i>0.383</i>
6	3.56	0.262	0.570	0.644	0.309	0.272	<i>0.076</i>	0.350	<i>0.171</i>
7	3.578	-0.066	0.593	0.819	0.340	0.401	<i>0.013</i>	0.435	<i>0.102</i>
8	3.531	-0.372	0.521	0.606	0.197	0.340	<i>0.183</i>	0.444	<i>0.269</i>
9	3.43	-0.628	0.383	0.514	<i>0.008</i>	0.455	<i>0.253</i>	0.526	<i>0.321</i>
10	3.298	-0.827	0.248	0.299	0.085	0.201	<i>0.015</i>	0.240	<i>0.054</i>
11	3.162	-0.974	0.154	0.188	0.105	0.154	0.069	0.179	0.052
12	3.037	-1.079	0.098	0.127	0.081	0.115	0.067	0.136	0.060

斜字はオーバーキャンセルを示す。

表6 リップル低減検討手順と代表評価点のリップル率変化 (検討対象プラズマは図8参照)

検討手順	フェラライト設置状況	評価点 No.7 リップル率		評価点 No.4 リップル率		備考
		トータル	18モード	トータル	18モード	
(0)	フェラライトなし	0.59%		0.59%		
(1)	安定化板(10mm) 単独設置 $B_t=3.8T@R=2.8m$	0.71%	0.46%	0.38%	0.29%	<ul style="list-style-type: none"> ←(評価点 No.7) ほぼ赤道面上のプラズマ表面。フェラライトのない場合に最もリップル率が高く、リップル低減用フェラライト板からの距離も大きいので、最もリップル低減が難しい。 ←(評価点 No.4) プラズマ上層部にあり、(軌道+リップル)損失への寄与が大きい。
(2)	リップル低減用					<ul style="list-style-type: none"> ・一般ポート開口部により 18 モードリップル率低減 ・接線 NBI ポート(4 本)によりトータルリップル率増加 <ul style="list-style-type: none"> ・安定化板厚さ>30mm →18 モードオーバーキヤンセル発生
(3)	フェラライト板配置検討後 $B_t=3.8T@R=2.8m$ ($B_t=2.0T@R=2.8m$)	0.50% (0.44%)	0.29% (0.06%)	0.19% (0.29%)	0.09% (0.19%)	<ul style="list-style-type: none"> ・TFC 磁場オペレーション領域($B_t=2.0T\sim3.8T@R=2.8m$)全体、全プラズマ領域においてリップル率 0.4%以下を目標に板厚調整した。 ・1/18 回回転対称部分+接線 NBI ポート部板厚追加
(4)	OFMC による高速 イオン損失評価					<ul style="list-style-type: none"> ・より損失の大きい負磁気シニアプラズマを対象とした。 ・リップル率 0.5%でも高速イオンの損失は 1/10 に

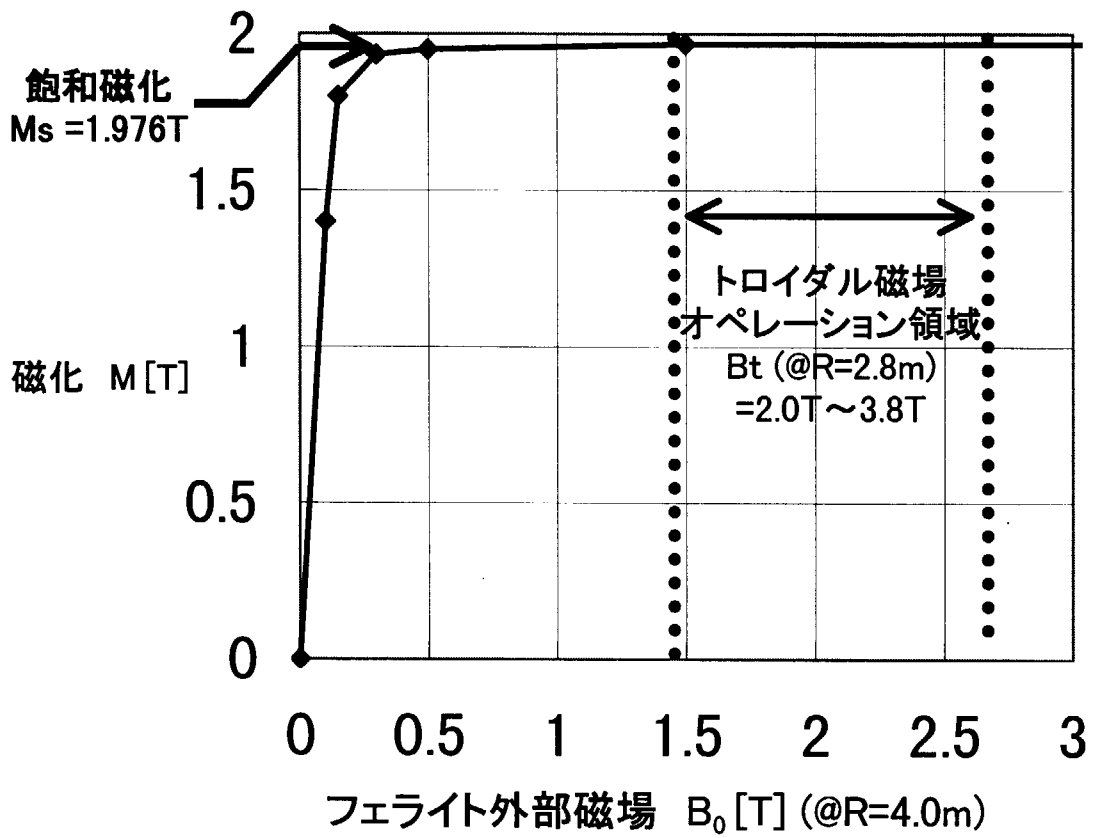


図1 フェライト鋼(F82H)の磁気特性

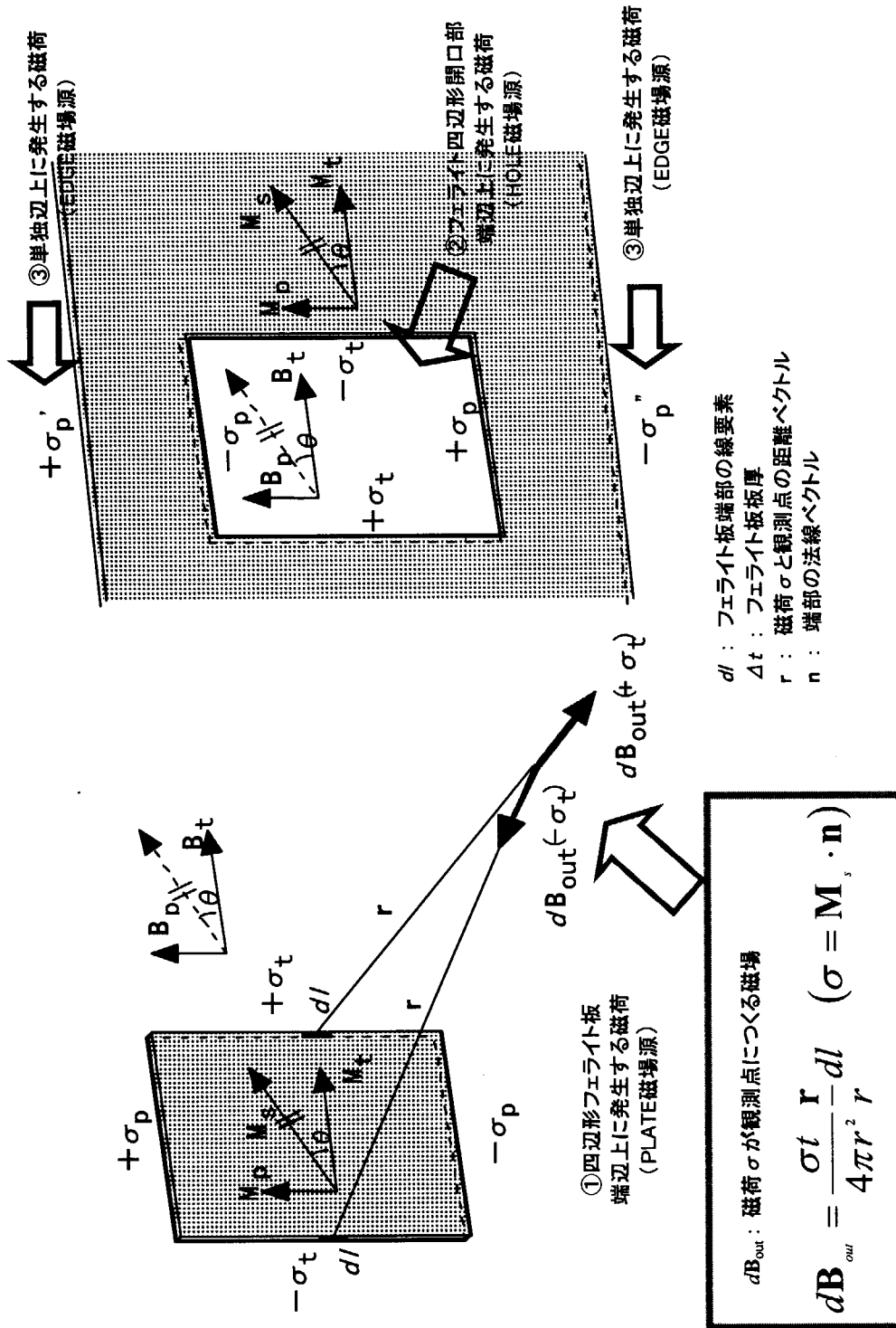
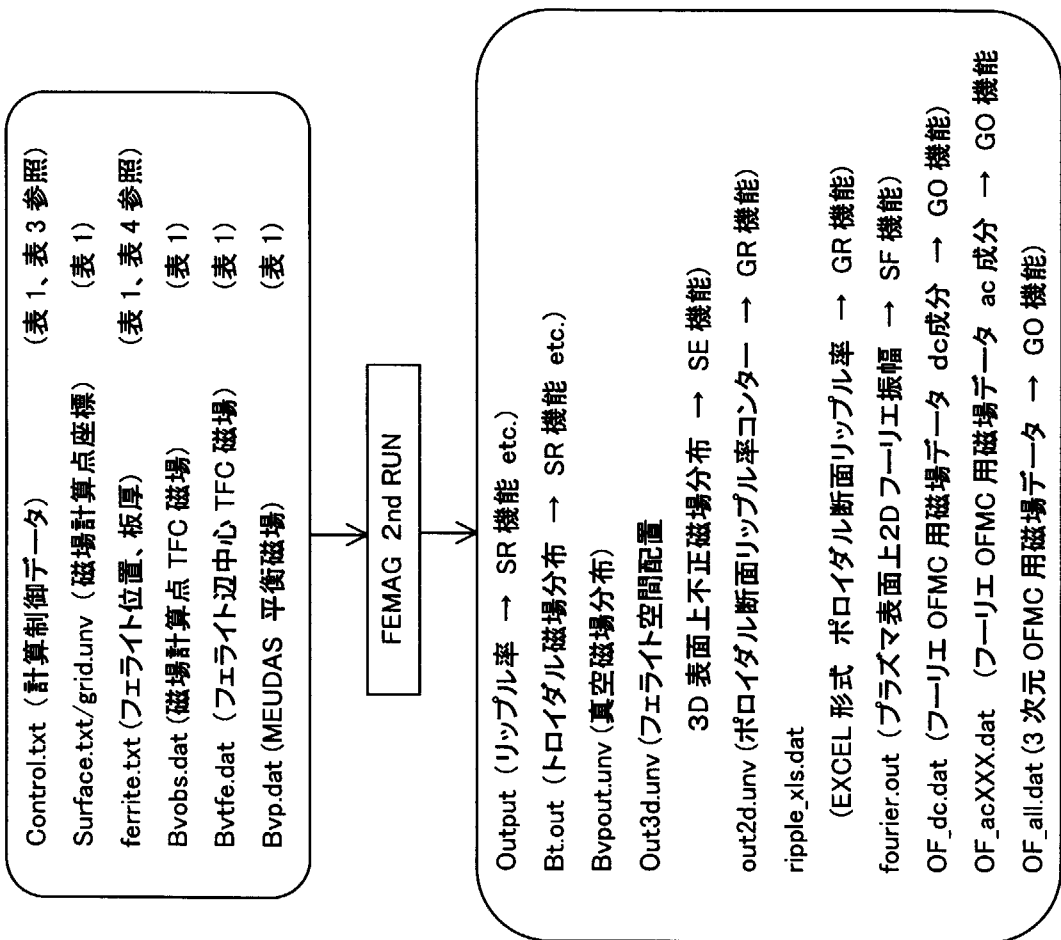


図2 FEMAG フェライト磁場計算手法

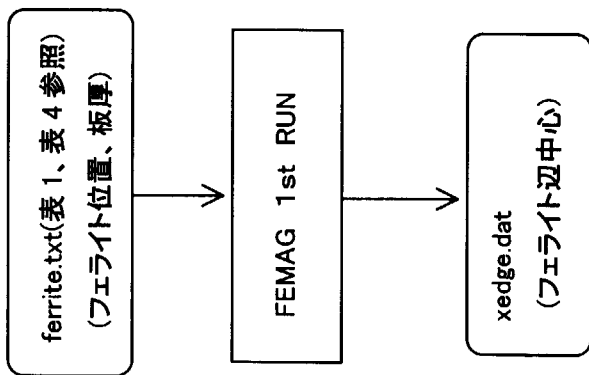
STEP3. FEMAG 2nd RUN(本計算)



STEP1.フェライト端辺中心座標計算

(FEMAG 1st RUN)

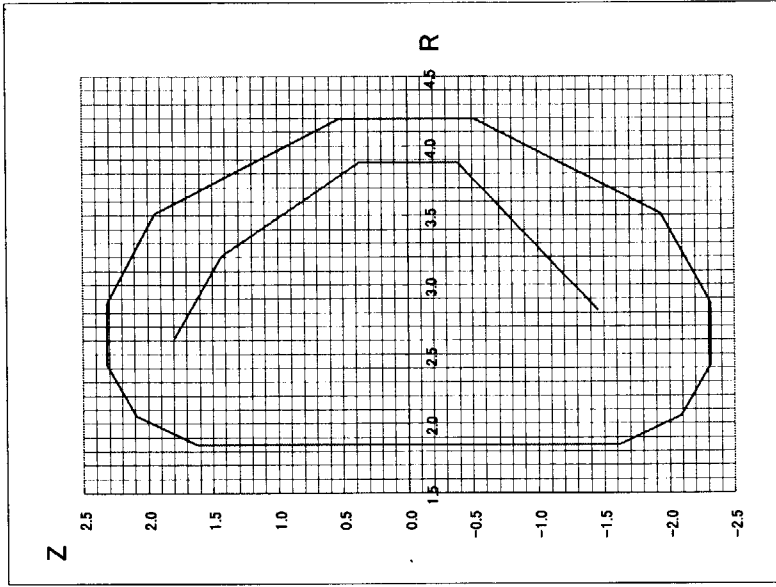
* σ_p を考慮しない近似計算では不要。



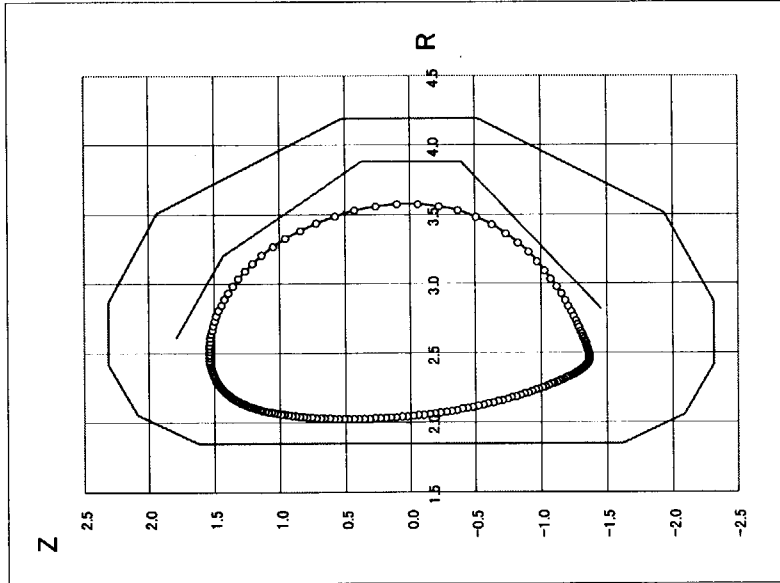
STEP2.TFC 磁場計算

TFC 磁場計算は既存磁場計算コード (EMSolution 等)で行う。

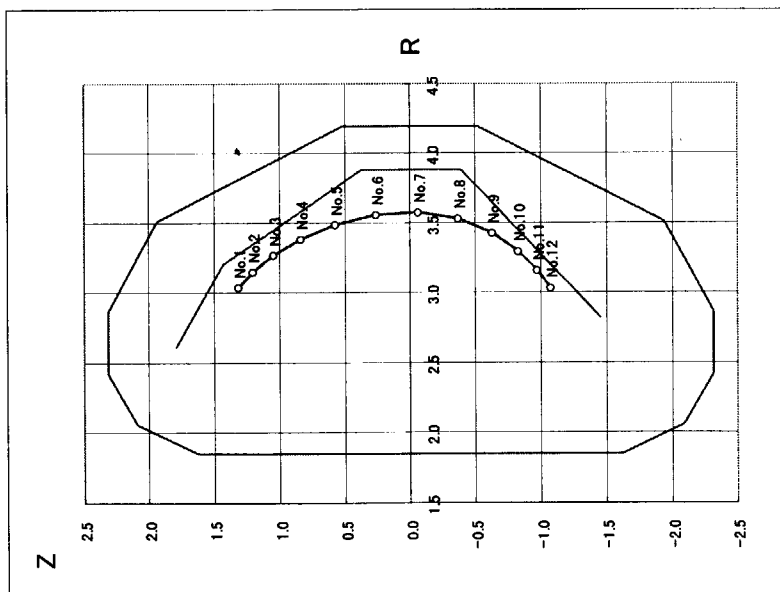
図3 FEMAG 計算フローチャート



(c) GRID_RIPPLE 用 } 磁場計算点(格子点上)
 GRID_OFMC 用 } grid.unv



(b) SURFACE_RIPPLE 用磁場計算点
 surface.txt (磁気面上等距離点)



(a) SURFACE_RIPPLE 用 } 磁場計算点
 SURFACE_ERROR 用 } surface.txt

图 4 FEMAG 磁場計算点入力例

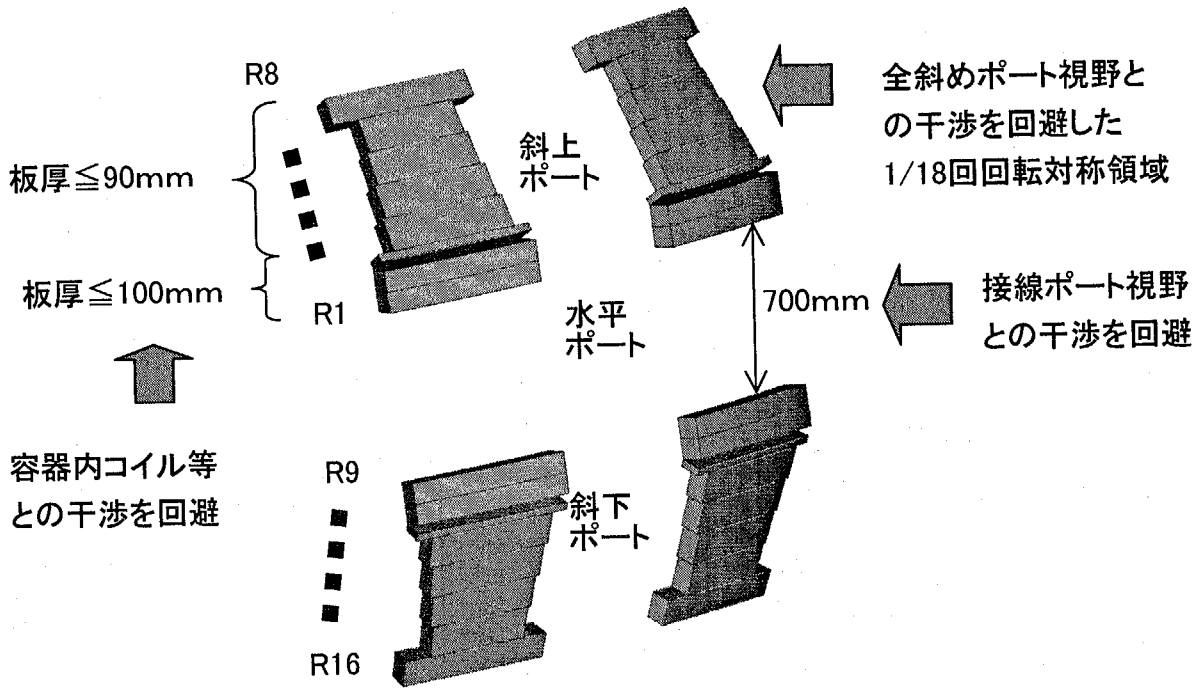


図5 JT-60改修装置 リップル率低減用フェライト板設置可能領域

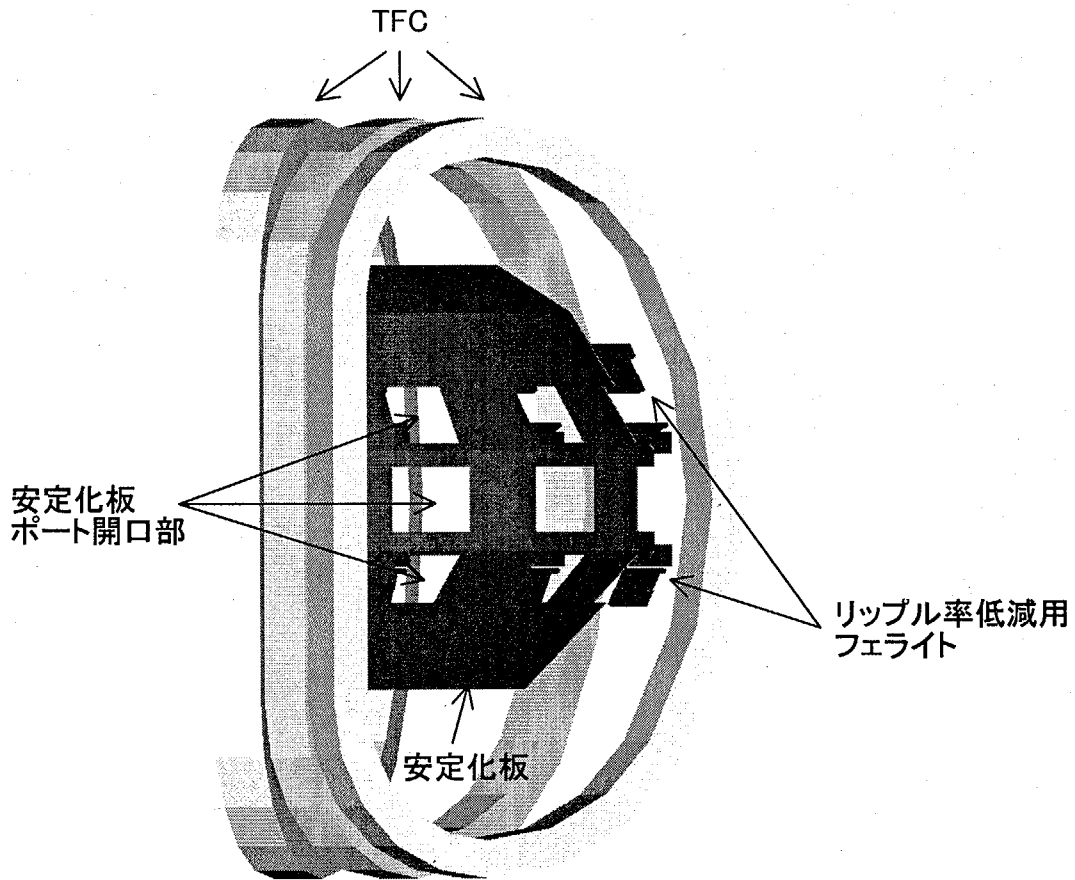


図6 JT-60改修装置 フェライト板配置(標準セクター)

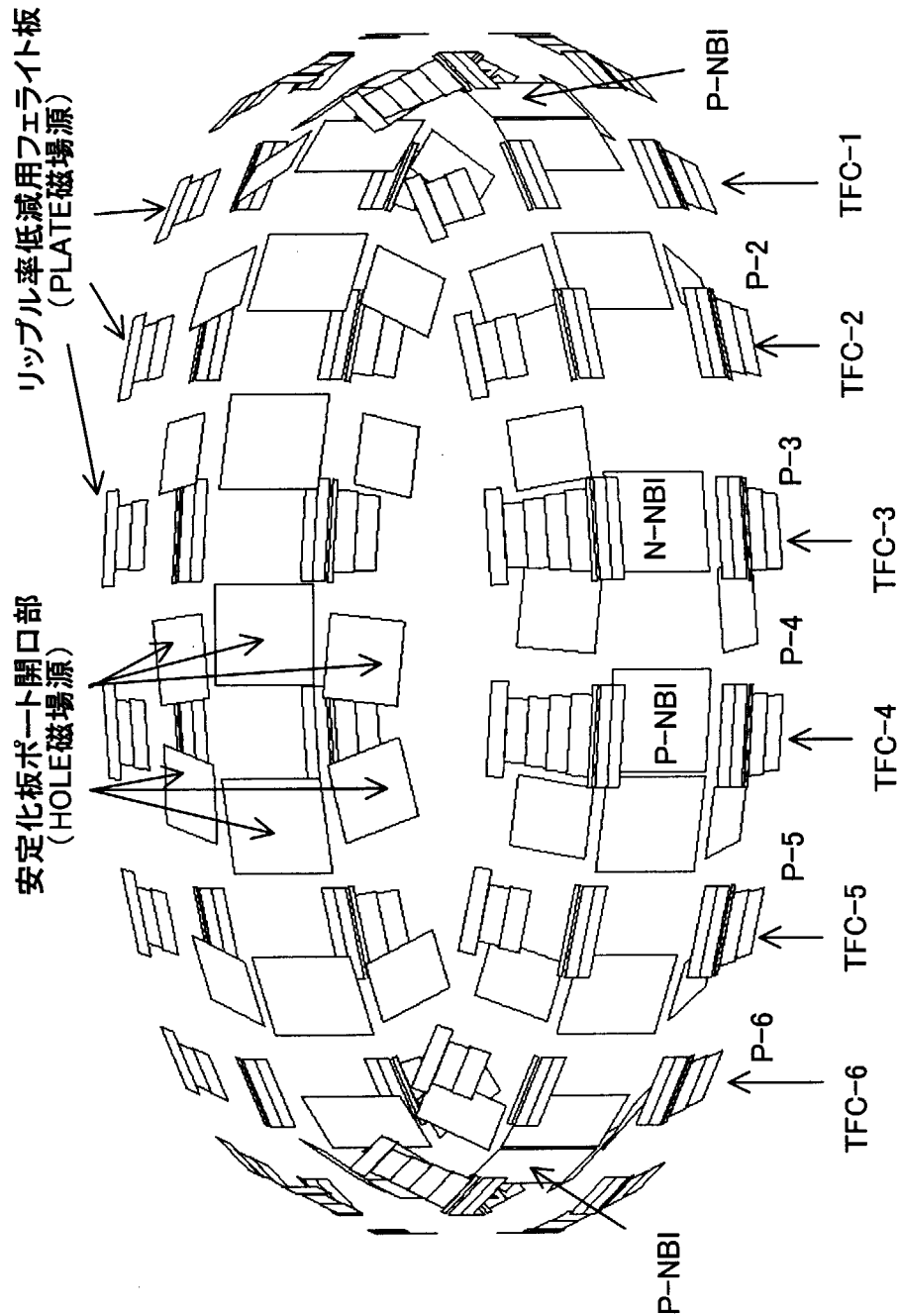
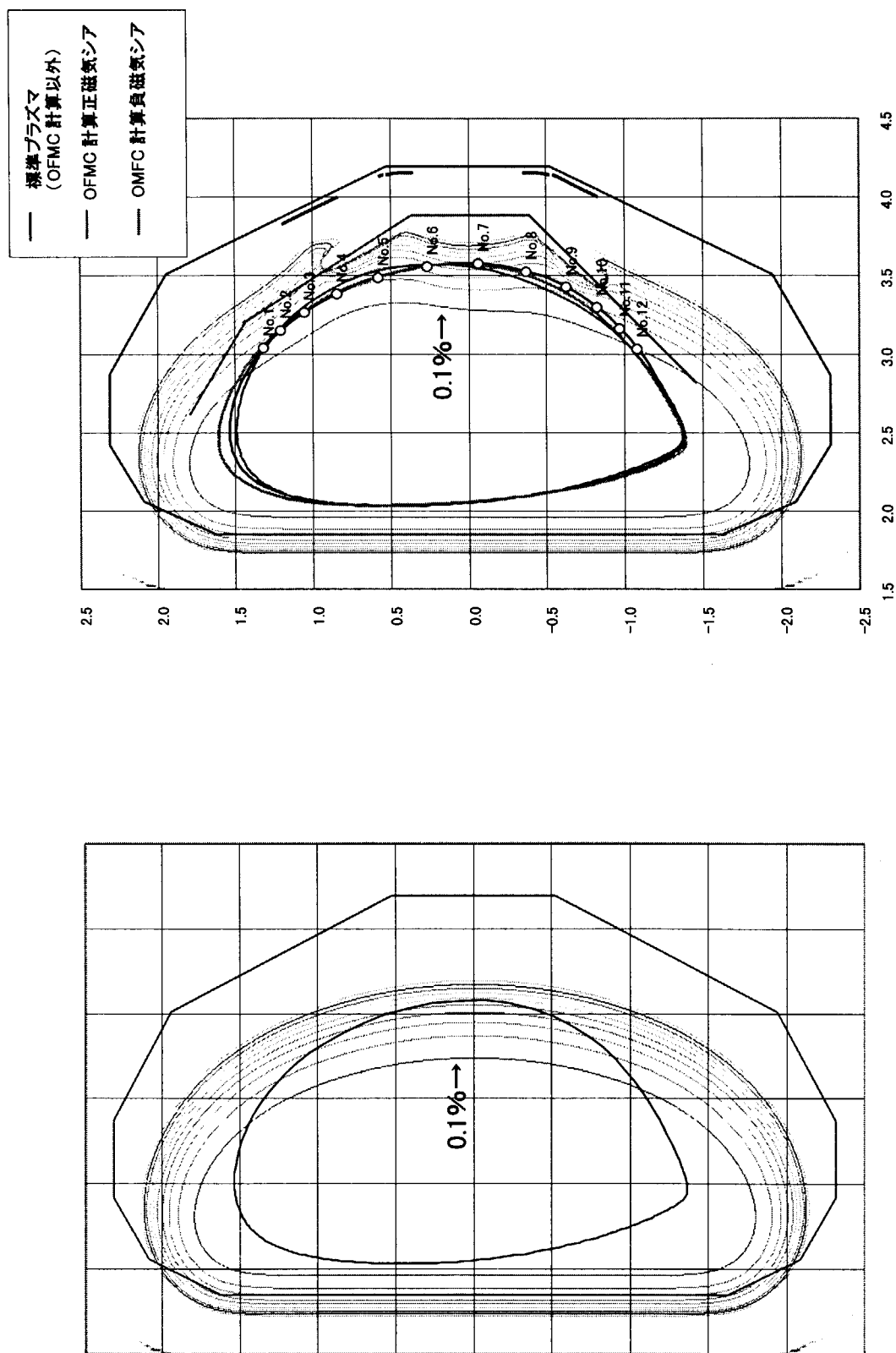


図7 JT-60改修装置 フェライト板全配置(安定化板は開口部を四辺形で表示)



(a) フェライトのない場合のリップル分布

(b) フェライトにより低減されたリップル分布

図8 検討対象プラズマおよびフェライト設置によるリップルコンター(0.1%から0.1%刻み)

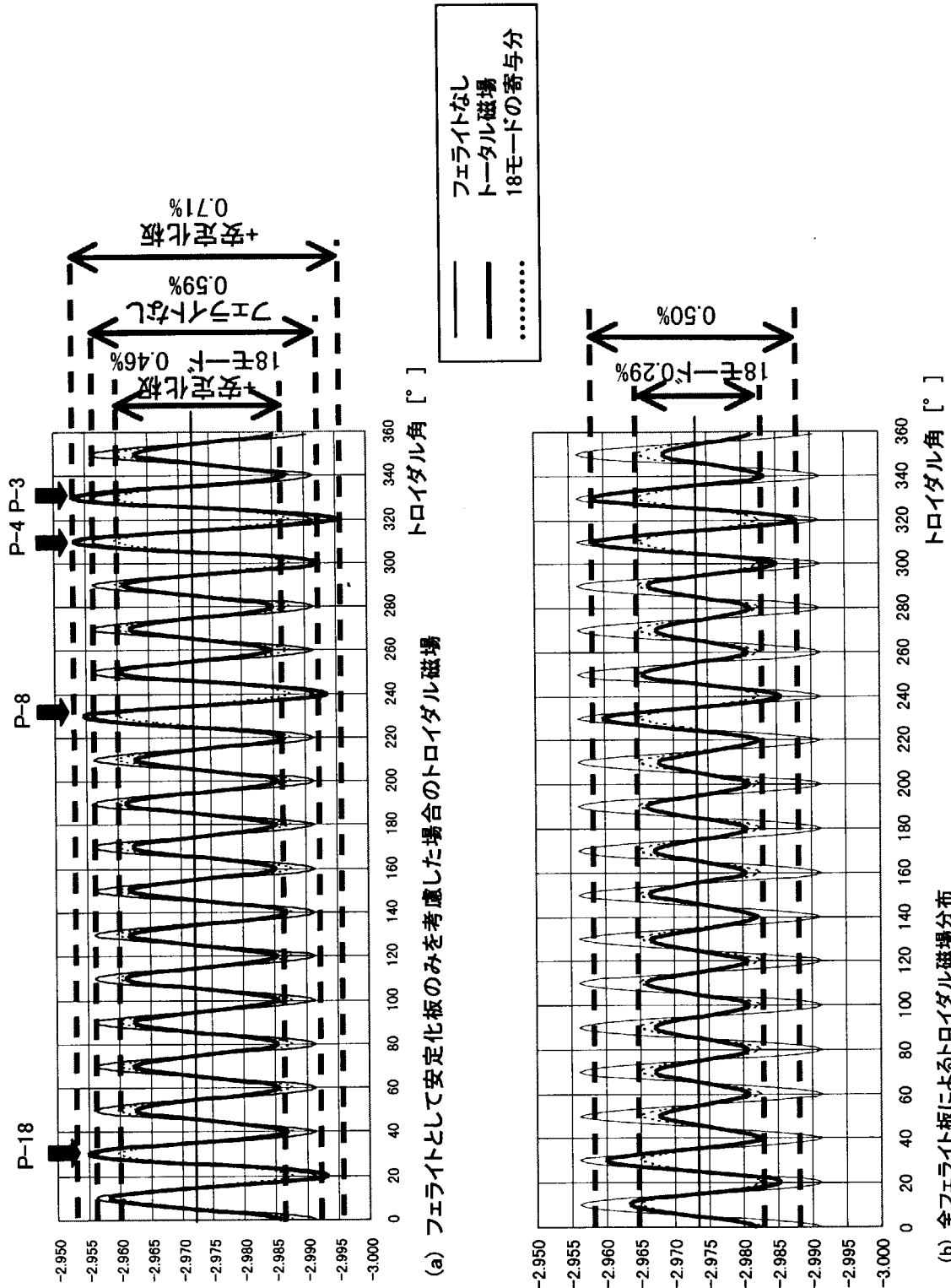


図9 リップル評価点No.7におけるトロイダル磁場分布

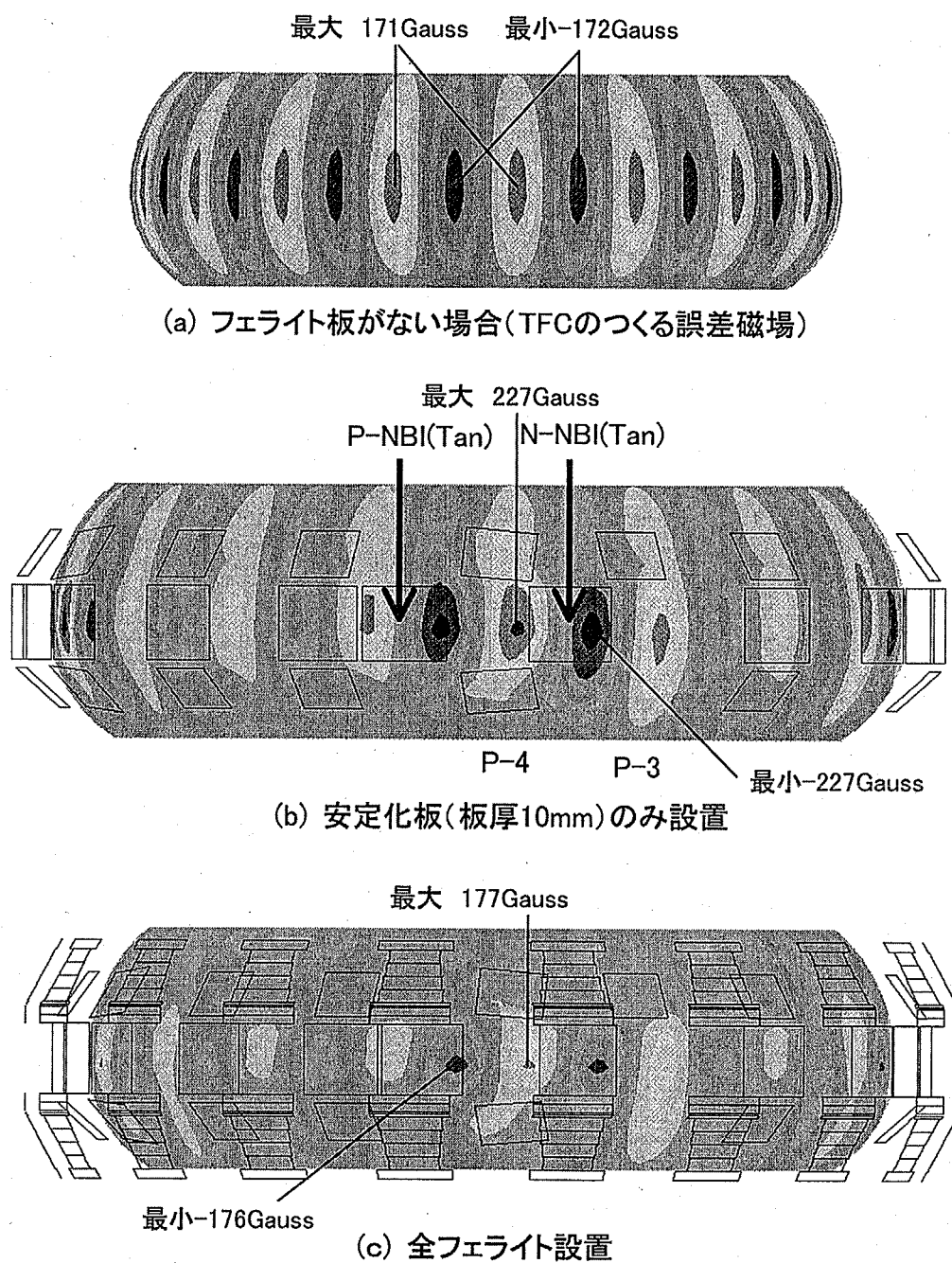


図10 プラズマ表面上磁場垂直成分 B_p 分布

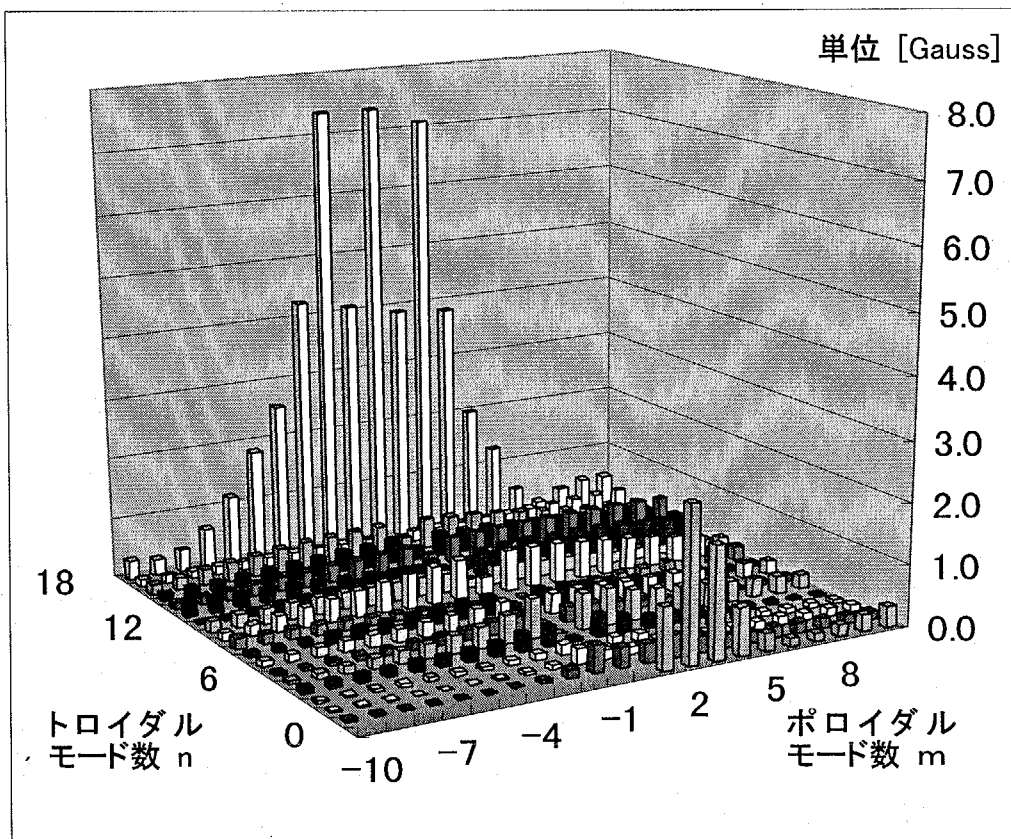
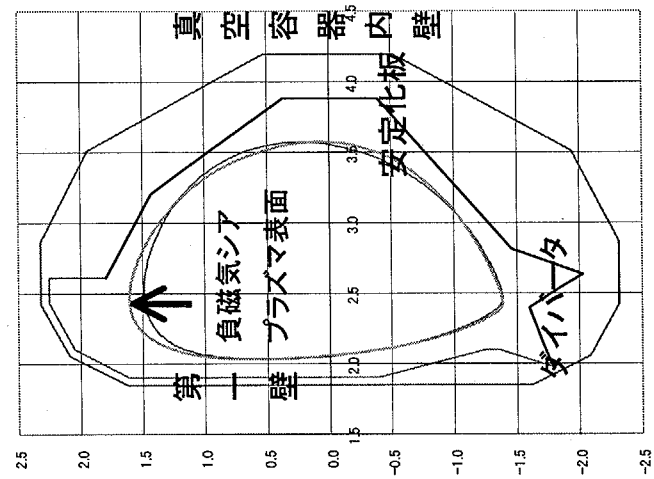
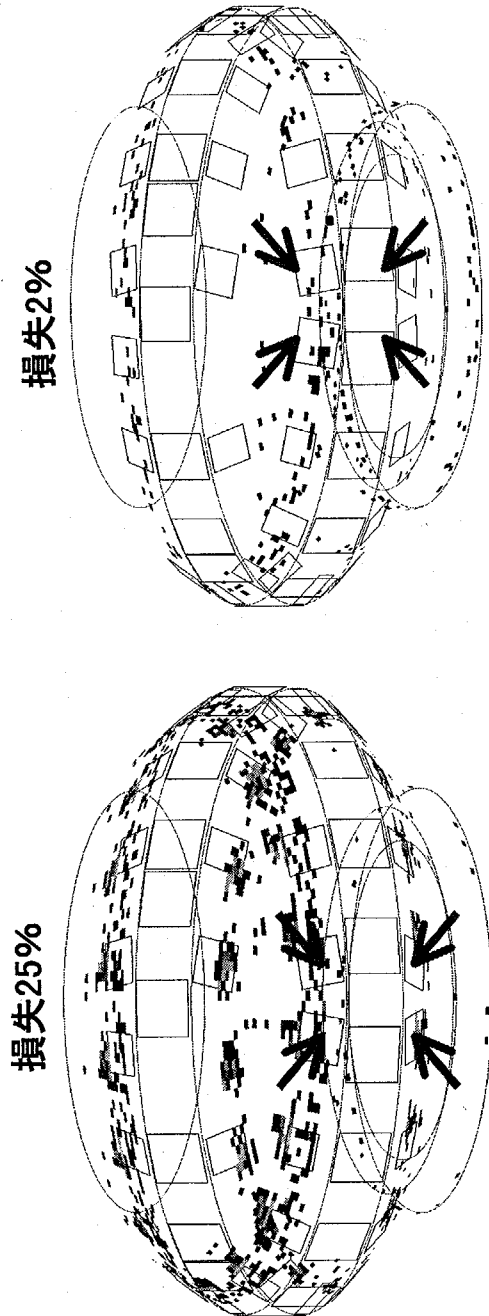


図11 プラズマ表面上不正磁場 B_p の2次元フーリエモード振幅



(c) 損失評価面
(インポート側第一壁は熱負荷なし)



(a) フェライトがない磁場中への入射
(b) フェライトによるリップル低減磁場中への入射

図12 OFMC高速イオン損失計算例
負磁気シニアプラズマ中にP-NBI(Perp)を入射した場合の安定化板、ダイバータ上損失分布

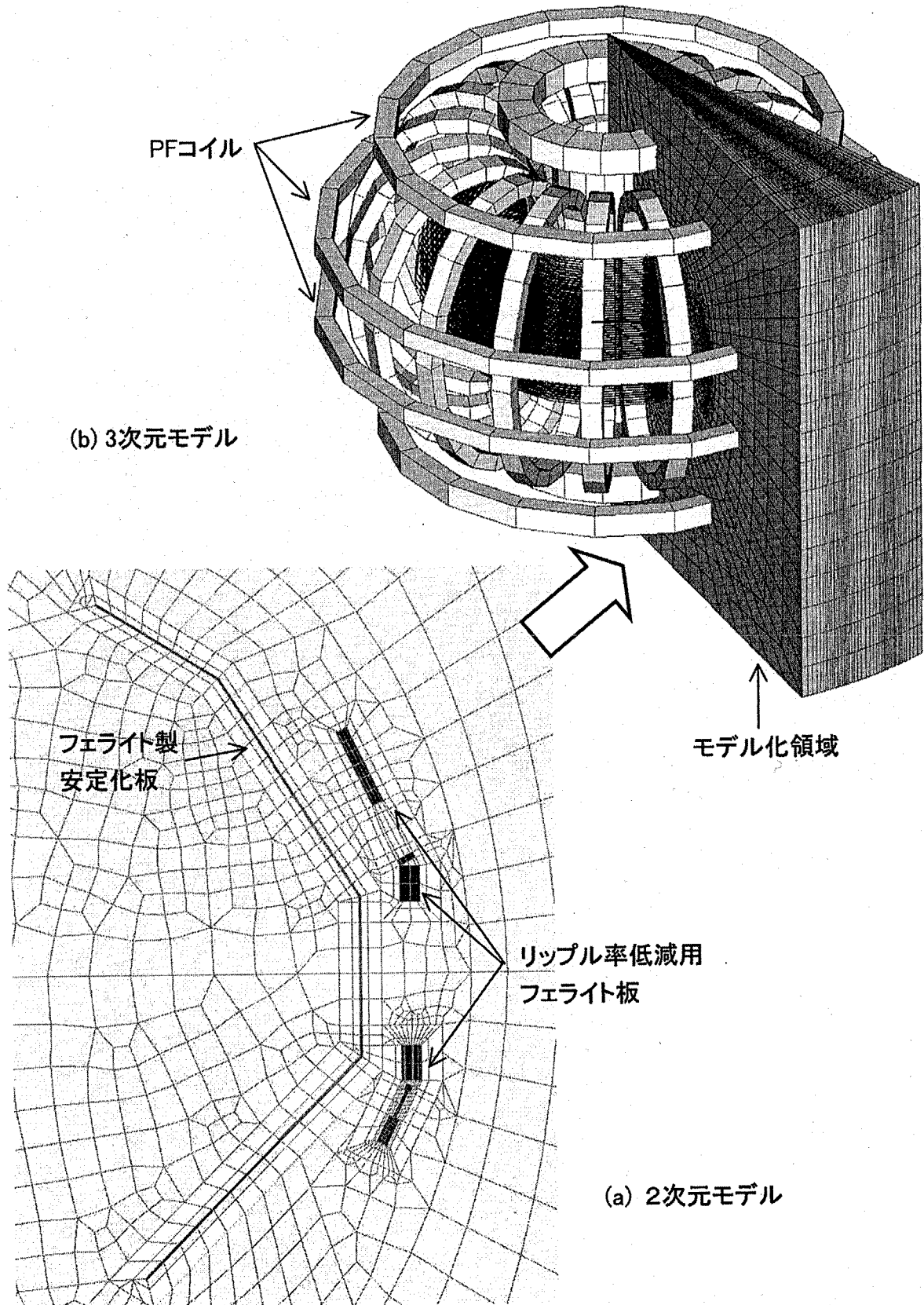


図13 3次元FEMモデルとその解析領域作成のための2次元モデル

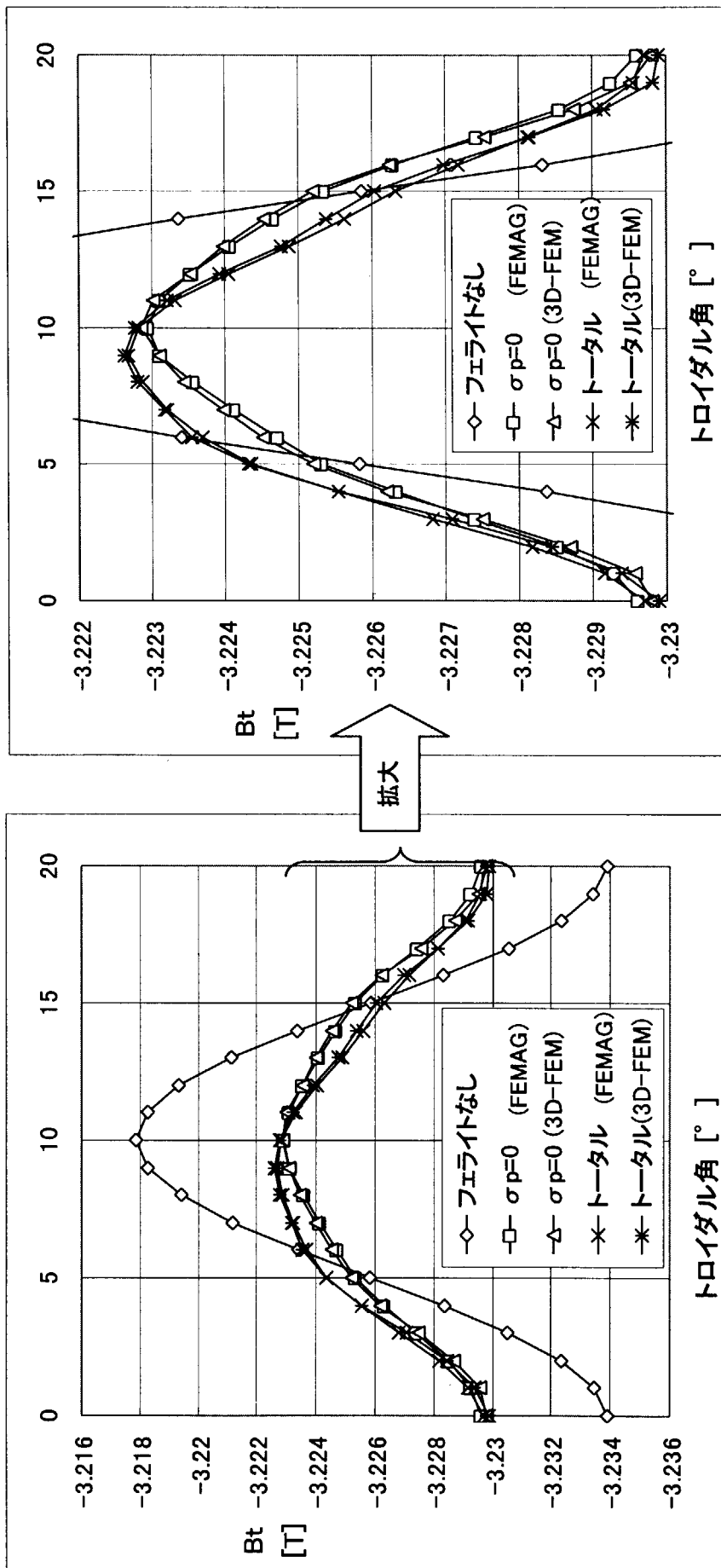


図14 FEMAG、EMSolution間のトロイダル磁場比較

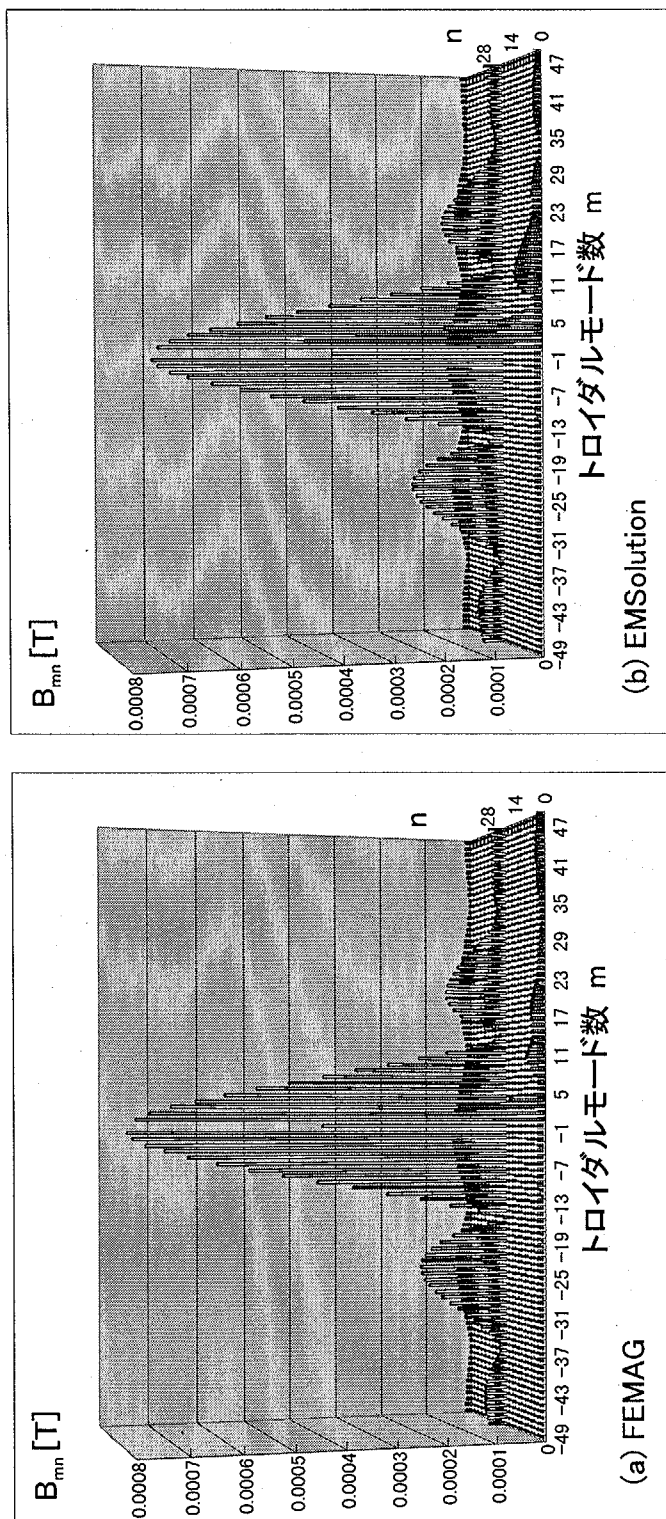


図15 FEMAG、EMSolution間のフーリエモード比較

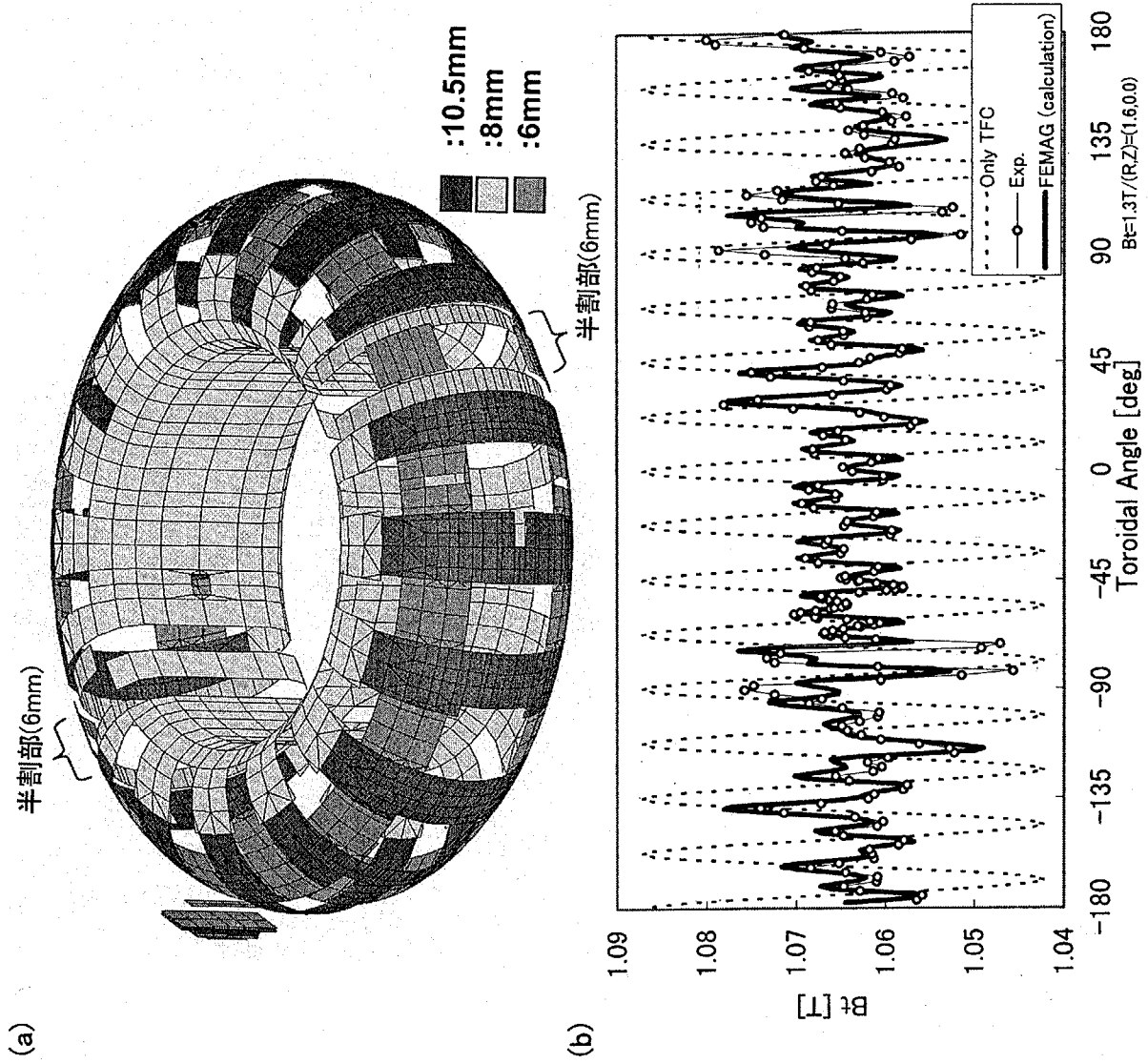


図16 JFT-2M磁場実測結果との比較

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
物質質量	モル	mol
光度	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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 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	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
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	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
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
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	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, 1 eV および 1 u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, ヘクト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わす場合に限り表2のカテゴリ-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-に入れている。

換算表

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

粘 度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	75.0062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

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

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

フェライト磁場計算コードFEMAGの開発

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています