トーラス形プラズマ実験装置の空心一次コイルの設計 ——コイルの最適配置およびコイルの最適電流分配法について——

正員 山 口 作太郎 (三菱電機)
 非会員 安 田 英 典 (三菱総研)
 正員 久 野 和 雄 (三菱電機)
 正員 大 藪 勲 (三菱電機)
 非会員 島 田 寿 男 (電 総 研)
 正員 平 野 洋 一 (電 総 研)
 非会員 八 木 康 之 (電 総 研)
 正員 小 川 潔 (電 総 研)

1. はじめに

現在、トーラスプラズマに電流を流してプラズマの閉込めを行う実験は、核融合プラズマ研究において主流になっている。例えば、トカマク、逆磁界ピンチ(RFP)、スフェロマック、逆転磁界ミラー(FRM)、 θ ピンチによる逆磁界配位(FRC)などである。これらのうち、前二者はプラズマ電流を生成維持するためのコイルを備えている。これは、プラズマを二次側とする相互誘導結合した一次側コイル(通常 Ohmic Heating Coil と呼ばれ、以下 OH/coil と略記)である。

トカマクでは、プラズマのベータ値向上のために低アスペクト比の装置⁽¹⁾が指向され、更に閉込め特性の向上のためにプラズマ断面の非円形化および大電流

化⁽²⁾が一般的な傾向になっている。低アスペクト比は OH/coil とプラズマの結合係数を低下させる。このため、更に大きなコイル電流を制御しなければならない。

また、RFP ではプラズマ中のトロイダル磁界もプラズマ電流で発生する。そのため、将来の炉を想定した場合、トカマクに比べてコンパクトな高ベータ装置になることが特長である。しかし、小形のわりにはプラズマ電流が大きく、制御コイル電流も増大する。更に、今までの RFP の実験ではトカマクに比べて約 10 倍ほどの誘起電圧が必要とされている。

以上の理由により、OH/coil の設計はトーラス電流系実験装置の設計において最重要なものの一つである。設計では、種々の拘束条件の下にプラズマとの結合を極大化し、プラズマ発生領域での OH/coil による誤差磁界を極小化する必要がある。前の条件は、より小形電源でプラズマ電流を最大にし、コイルなどに働く電磁力を軽減し、コストの低減につながる。後者はプラズマの特性に関与している。特に RFP においては、この誤差磁界がプラズマの閉込め特性を著しく悪化させ⁽³⁾、ときには配位形成が困難な場合もある。また、トカマクにおいても誤差磁界が大きいと、プラズマ電流立上げ時にプラズマの磁束消費率が大きくなる⁽⁴⁾。

以上、述べた設計条件は OH/coil によって発生する磁界の最適化と考えることができる。最近では計算機による FEM, BEM 法を利用した「場」の最適化が発展させられ⁽⁵⁾、応用例も増えてきている。その意味

Design of Air Core Primary Coil in Toroidal Devices for Plasma Experiments—Optimum Coil Position & Optimum Coil Current Distribution—. By Satarou Yamaguchi, Member (Mitsubishi Electric), Hidenori Yasuda, Non-member (Mitsubishi Research Institute), Kazuo Kuno, Member, Isao Oyabu, Member (Mitsubishi Electric), Toshio Shimada, Non-member, Youichi Hirano, Member, Yasuyuki Yagi, Non-member & Kiyoshi Ogawa, Member (Electrotechnical Laboratory).

山口作太郎：正員，(株)三菱電機

安田英典：非会員，(株)三菱総合研究所

久野和雄：正員，(株)三菱電機

大藪 勲：正員，(株)三菱電機

島田寿男：非会員，電子技術総合研究所

平野洋一：正員，電子技術総合研究所

八木康之：非会員，電子技術総合研究所

小川 潔：正員，電子技術総合研究所

で、本研究もその方向にそったものである。しかし、ここでは考えている空間で透磁率が一定であるから FEM, BEM 法は用いなかった。

ここでの拘束条件の主要なものは以下のようなものである。

(i) 装置全体の大きさの制限から、ある大きさ以上のコイルを作らない。

(ii) 装置の他の部分と干渉しないようにする。

実際の設計法は大きく分けて二つある。一つは、装置設計上許された空間に複数の OH/coil を配置し、前述の装置設計上の種々の条件を満たすように、各々のコイルの最適電流配分を求める方法である。もう一つは、各コイルに流す電流比は一定にして、条件を満たすように各々のコイルの最適配置を求める方法である。線電流を用いた解析的方法と統計計算を重ねたコード⁽⁶⁾⁽⁷⁾、また非線形の統計計算を行うコード⁽⁸⁾が日本原子力研究所で開発されている。また、イタリアでは大形の RFP である RFX の OH/coil の設計のために同様なコード⁽⁹⁾が開発された。

トカマクではプラズマに印加する電圧が比較的低いので電源電圧も低くできる。このため、各コイルの電流をサイリスタなどによって個別に制御しやすい。更に、プラズマの平衡、非円形断面化のためにポロイダル磁界が必要である。これらを発生するには、各々のコイル電流を独立に制御するほうが都合が良いので、前者の方法が使いやすい。一方、後者の方法は、RFP の設計⁽¹⁰⁾などの印加電圧の高い装置に使われる。これは、プラズマ生成・維持電圧がトカマクより高く、このため電源電圧が高くなり、コイル電流を制御する安価で適当な半導体素子がないからである。また、RFP の場合はトカマクに比較して高ベータであるため、プラズマの非円形断面化が現在特に必要ないと考えられ、断面制御用コイルがない。このため、OH/coil の占有空間を広くとれるので、この設計法が幸いする。

著者らは、この論文で主に OH/coil の電磁気設計について述べる。すなわち、体積電流均一モデルのコイルを用いて、以上述べた二つの方法を実行するアルゴリズムおよび実際の計算結果を述べる。二つの方法とも使われたアルゴリズムは、線形最小二乗法である。

以下、第 2 章でコイルの最適配置法について述べ、具体的な設計例として、電子技術総合研究所（以下、電総研と略記）の RFP 実験装置 TP-1RM15⁽¹¹⁾をあげる。第 3 章ではコイルの最適電流配分法について述べ、同様に電総研の設計研究の対象である TPE-

RX⁽¹¹⁾について行った計算例を示す。

2. OH/coil の最適配置法

最初に計算法のアルゴリズムを述べ、次に計算例として電総研の TPE-1RM15 の設計を述べる。

〈2・1〉最適配置法のアルゴリズム この設計法は、小形から中形の実験装置において有利である。これは、OH/coil 各々に対応した独立電源が必要でないで、比較的安価に製作できるからである。また、大形装置においてもアメリカ・ロスアラモス研の ZT-H⁽¹²⁾のように、放電初期の周回電圧が高い（約 1 kV）場合には有効である。以上の装置では、ほとんどのコイルは直列に接続され、各々のコイルの巻き数は整数なので、数値計算上それを考慮するためコイル電流値が整数比をもつよう配分する。

具体的な設計法を、図 1 に示された流れ図にそって説明する。最初に実験目的を達成するためのプラズマパラメータなどを決め、次を実現するためのシステム工学的な全体設計を行う⁽¹³⁾。以上によって OH/coil の設計値が決定される。主な設計値はプラズマ電流値、立上げ初期における周回電圧、プラズマ電流立上げ時間などである。以上より、概略の OH/coil の配置およびコイルのターン数が求められ、初期条件となる。次に、誤差磁界を評価するためにプラズマ中の磁界評価点指定、その重みを決める。また、コイルによっては動かせる方向に制限があり、これが拘束条件となる。次に、初期条件、拘束条件に合せて各々のコイルによって発生する磁界の計算をそれぞれの磁界評価点について行う〔磁界計算(1)〕。ここで

図 1 最適コイル配置を求めるための流れ図
Fig. 1. Flowchart for optimum OH/coil positions.

あり、アメリカ・ローレンスリバモア研究所で開発された EFFI⁽¹⁴⁾ を一部改良して使いやすくしたものである。これは、ビオ・サバルの方程式を利用した体積電流による磁界コードである。この磁界計算では、最小二乗法の計算を行うための、評価点での各コイルの形状の変化による磁界の変化率も計算される。計算機による磁界計算精度が約 6 けたあるので、けた落ちなどの不都合は生じない。各コイルによって発生する磁界は、プラズマ発生領域で大きいので、コイル形状の変化によって生じる磁界値の差も大きくなるからである。また、数値計算上も磁界値の差が有効数字内に入るよう、形状変化の幅をとる。

次に、コイルの最適位置を求めるための最小二乗法の計算を行う。方法は、誤差磁界を最小にするために以下の式を評価する。

$$S_n = \sum_{j=1}^M \{ \omega_j \sum_{i=1}^N (F_{ij}^{(n-1)} + \partial_r F_{ij}^{(n-1)} \Delta r_i + \partial_z F_{ij}^{(n-1)} \Delta z_i)^2 \} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $F_{ij}^{(n-1)}$ ：プラズマ生成領域の磁界評価点 j における第 i コイルによる $(n-1)$ 回目の反復計算時の磁界、 $\partial_r F_{ij}^{(n-1)}$ ：磁界評価点 j における第 i コイルによる $(n-1)$ 回目の反復計算時の磁界のコイルの半径方向微分係数、 $\partial_z F_{ij}^{(n-1)}$ ：磁界評価点 j における第 i コイルによる $(n-1)$ 回目の反復計算時の磁界のコイルの垂直方向微分係数、 Δr_i ：第 i コイルの半径の変化量（最小二乗法の解）、 Δz_i ：第 i コイルの垂直方向位置の変化量（最小二乗法の解）、 N ：OH/coil を成す独立のコイルの数、 M ：プラズマ生成領域内の磁界評価点数（ここで、 $M > N$ である）、 ω_j ：磁界評価点 j での重み

従って、 S_n は n 回反復計算後のプラズマ生成領域の磁界（＝誤差磁界）の平方和となる。（1）式の最小二乗法の計算は、 Δr_i 、 Δz_i に対して一次式になっている。しかし、コイル位置と磁界の関係は一次式ではないので、大きい Δr_i 、 Δz_i については S_n の誤差が大きくなる。従って、各々のコイルのコイル半径 r_i および垂直方向位置 z_i に対して、以下の条件を満足するように計算を行う必要がある。

$$\Delta r_i \ll r_i \dots \dots \dots (2)$$

$$\Delta z_i \ll z_i \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 r_i と z_i は第 i コイルの半径および z 座標である。これらは線形最小二乗法を用いたために生じるが、（1）式のような線形最小二乗法を用いる有利な点もまた多い。一つは、（1）式が線形であるため、最小

図 2 第 i コイルの位置とプラズマおよび座標系

Fig.2. Position of i -th coil & plasma, and coordinate system.

二乗法の計算は連立多元一次方程式を解くことに帰着し⁽¹⁵⁾、数値計算はほぼ確実に収束する。更に、 $F_{ij}^{(n-1)}$ 、 $\partial_r F_{ij}^{(n-1)}$ 、 $\partial_z F_{ij}^{(n-1)}$ を反復計算するため、どのコイルがどのような磁界を発生しているかがわかる。これは設計上見通しを良くする。図 2 は座標系などを示したものである。同図は ϕ ＝一定の断面でのプラズマと、OH/coil の第 i コイル断面を示したものである。誤差評価点の選択は任意であるので、プラズマの形状は任意にとれる。

磁界評価点での重み ω_j は、主に物理的要請からくる。例えば、プラズマ発生領域内で特定の点の誤差磁界がプラズマの閉込めに強く関与するときがある。重みは通常 1 であるが、特にその点での誤差磁界を減らしたいときには大きな値にする。以上より、 S_n が減少したコイル配置が求まる。そして、新しいコイル配置での磁界計算を再度行う〔磁界計算（2）〕。これによって、（1）式によって求めた新しいコイルの配置の磁界分布誤差が含まれなくなる。新しい磁界分布が設計条件を満たすかどうかを調べ、必要に応じて再度求められたコイル配置を初期条件にして反復計算を行う。

以上からわかるように、このアルゴリズムで必ずしも得られた結果は S_n を最小にする Δr_i 、 Δz_i を与えない。これは拘束条件のほかに（2）、（3）式によって解を探す範囲が制限されるからである。これは、得られる解が初期条件に強く依存していることを意味する。

従って、この図 1 では示されていないが、反復計算を繰返しても誤差磁界が要求される設計基準より小さくならない場合がある。このときは初期条件、拘束条件を変更する。

〈2・2〉 TPE-1RM15⁽¹¹⁾ の OH/coil の配置 前節で述べた方法で TPE-1RM15 の OH/coil の配置を求めた。プラズマ断面は円形であり、プラズマは大半径 $R_p=700$ mm、小半径 $a_p=135$ mm である。また、プ

配置は $Z=0$ に対して対称。下図はプラズマ部を拡大し、磁界評価点を示している。×印は重みを 50 とした。

図 3 TPE-1RM15 の OH/coil の初期配置 (□) と最終配置 (■)

Fig. 3. Initial distribution (□) & final distribution (■) of OH/coil in TPE-1RM15.

ラズマ電流立上げ初期の周回電圧 ≤ 1 kV, 立上げ時間 ≥ 1 ms, コンデンサ電源電圧は直列接続で最大 20 kV である。

以上より、概略の OH/coil の構成配置などが求められ、コイル数は 18 個、各コイル 2 ターンの全 36 ターンとなった。コイルは上下 9 個ずつを直列または並列に接続する。図 3 に内部がブランクになっているコイルが初期配置である。また、OH/coil の自己インダクタンス $L_{OH/C} \approx 510 \mu\text{H}$ であり、プラズマとの相互インダクタンス $M_{POH/C} \approx 12 \mu\text{H}$ であった (上記の値は直列接続時)。

コイルとプラズマは $Z=0$ の面に対して対称なので、 $F_{iR}^{(n-1)}$, $\partial_r F_{iR}^{(n-1)}$, $\partial_z F_{iR}^{(n-1)}$ を計算するとき、2 個の $Z=0$ に対称なコイルを数値計算上一つのコイルとして扱った。従って、(1) 式におけるコイル数 $N=9$ になり、数値計算上の煩雑さが減少し、求められるコイル配置も自動的に $Z=0$ の面に対して対称になる。磁界評価点も $Z \geq 0$ の領域にとり、磁界評価点数 $M=60$ とし、ほぼ均一に分布させた。

今回の設計では物理工学上の理由から、以下の拘束条件が設定された。

- (1) OH 1 の半径 $r_1=415$ mm として固定した。
- (2) OH 1 の垂直位置 $Z_1 \geq 56$ mm とする。
- (3) OH 1, OH 2, OH 3 のコイル半径は同じ値とする。
- (4) OH 4, OH 5 のコイル半径も同じ値とする。
- (5) すべてのコイルの垂直位置は $|Z_i| \leq 755$ mm とする。
- (6) プラズマ断面での周辺部磁界評価点の重みと

中心部の重みの比を 50 とした (図 3 参照)。

以上の条件の理由を以下に述べる。

(1) 項は、OH/coil とプラズマの間には他の機器 (トロイダルコイル、シェル、真空容器など) がある。相互インダクタンスを大きくするために、それらの占める空間を除いて最大にできる半径である。この種の条件は一般的に計算上必要である。なぜなら、誤差磁界が零になる自明な解は、すべてのコイル半径が零である。拘束条件 (1) は数値計算上、自明な解に収束しないことを保証する。

(2) 項は、真空容器に測定用などのための水平ポートがあり、それに干渉しないようにするためである。

(3) 項の条件は製作上の理由による。OH 1, OH 2, OH 3 のコイルは、他の OH/coil に比べてプラズマに近いので、製作上の小さな誤差でも大きな誤差磁界が発生する。例えば、OH 1 の位置が 1 mm ずれると約 10 G/50 kAT の誤差磁界が新たに加わる。従って OH 1, OH 2, OH 3 のコイルの半径を同じにして、一体化するほうが、実際により低い誤差磁界が得られると考えられるからである。

(4) 項についての理由も、(3) 項の理由と同じである。しかし、コイル半径も最小二乗法のパラメータであるので、最初に OH 4, OH 5 のそれぞれ上下四つのコイルを数値計算上、一つのコイルとして扱った。次に、それによって求められた半径を固定して、垂直方向の最適位置を探した。

(5) 項の条件は、装置の経済性の点から考えられた理由である。プラズマから遠く離れたコイルによるプラズマ生成領域での磁界値は小さい。従って、誤差磁界を少し減少させるために、大きなコイルを利用するのは得策でない。

(6) 項の条件は、RFP プラズマの閉込めは周辺部の誤差磁界が特に重要と思われるからである。しかしながら、すべて同じ重みの計算結果と大幅には変わらなかった。すなわち、各々のコイル座標値の約 2% の差で納まった。これは、コイルに近い周辺部の磁界値が必然的に大きくなるからである (図 4)。また、これは磁界評価点の分布にも依存する。すなわち、磁界評価点をプラズマ周辺に多くとつてもよい。

以上の拘束条件を考慮に入れて約 5 回の繰返し計算を行い、最終的に得られた OH/coil の配置が図 3 に ■印で示したコイル群で示されている。また、このとき、各々コイルに 100 kAT 流したときの誤差磁界の絶対値の等高線図が図 4 である。同図からわかるように、プラズマ生成領域での最大誤差磁界は、約 16 G である。そして、この領域から出ると急激に誤差磁界

コイル電流は 50 kA が 2 ターンより 100 kAT

図 4 TPE-1RM15 の OH/coil による誤差磁界分布

Fig. 4. Error field contour of OH/coil in TPE-1RM15.

が増大する。なお、等高線が滑らかでないのは、計算精度のけた落ちと考えられる。これは、すべてのコイルによる磁界を計算するので、大数どうしの引算になるからである。

この計算例のほかにも、幾つかの拘束条件について行った。誤差磁界は、拘束条件(2)を取除いたとき大幅に減少し約 1/5 になり、誤差磁界の減少には、これらの拘束条件が互いに等価でないことがわかる。装置の最大コイル電流は約 120 kAT と想定しているの、このときプラズマ生成領域の最大誤差磁界は約 8 G である。以上は数値計算の結果であるが、実際にはコイルの製作精度および設置精度によって制限され、誤差磁界は、それほど小さくはならないであろう。OH 1 ~OH 3 の製作・設置精度を ± 0.7 mm とし、OH 4 ~OH 5 のそれは ± 1.0 mm, OH 6 ~OH 8 は ± 2.0 mm を保証基準値として、最大誤差磁界を約 50 G と見積った。プラズマ電流によるポロイダル磁界は約 2.5 kG, また OH/coil の中心磁界は 14 kG であり、誤差磁界はこれらに比べて十分小さいと考えられる。

このような誤差磁界を最小にすることは、また OH/coil とプラズマの相互インダクタンスを極大化する。実際初期値に比べて、相互インダクタンスは約 10% 向上した。その意味で、誤差磁界を極小化する設計は、結合係数を極大化する OH/coil の設計の一つと考えられる。装置完成後、誤差磁界の測定⁽¹⁶⁾が行われた。これについては後述する。

実際のコイルの設計では、電磁力および電流のフィードを考えなくてはならない。電磁設計上コイルの断面形状がある程度任意に決めることのできるパラメータになっている。このため、最初に概略の電磁力を求め、応力的に製作可能な断面形状を決める。今回の設計ではフープ力に対する平均応力として約 2.5 kg 重/mm²とした。また Z 方向の電磁力については装置の支持柱で支える。実際の製作においては、コイルの電

流フィード部の電磁力支持が厳しい。これは、フィード部で発生する誤差磁界を小さくするために、サンドイッチ構造を用いたからである。

3. OH/coil の最適電流分配法

最初に計算法のアルゴリズム(図 5)を述べ、計算例として電総研の TPE-RX の設計について述べる。

〈3・1〉最適電流分配法アルゴリズム 〈2・1〉節で述べたように、プラズマパラメータを決め、システム工学的な全体設計を行う。次に、電源容量やコストなどより独立電源の数などが決まり、これらが初期条件・拘束条件を決める。ここでの新たな拘束条件としては、各コイルの電流配分比を正の実数値とし、更に電流配分比に上限を設けた。電流配分比が零であれば、そのコイルは存在しないことと同等である。また負であれば、逆方向に電流を流すことになり、好ましくない。更に、電源容量より電流配分比に上限が生じる。

以上の条件下に、各々のコイルによって発生する磁界を MEFIA を用いて、それぞれの磁界評価点について求める。

次に最小二乗法計算が行われる。残差の平方和 S として以下の方程式を評価する。

$$S = \sum_{j=1}^M \left\{ \omega_j \sum_{i=1}^N (F_{ij} + \partial F_{ij} \Delta I_i)^2 \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 F_{ij} : プラズマ発生領域の磁界評価点 j での第 i コイルによる磁界、 ∂F_{ij} : 磁界評価点 j での第 i コイルの磁界の電流による微分係数、 ΔI_i : 第 i コイルの変わるべき電流値、 N : OH/coil を成す独立のコイルの数、 M : プラズマ生成領域内での磁界評価点数(ここで、 $M > N$ である)、 ω_j : 磁界評価点 j での重み

(4) 式の最小二乗法計算は、パラメータ ΔI_i について

図 5 最適コイル電流配分を求めるための流れ図

Fig. 5. Flowchart for optimum OH/coil current distribution.

配置は $Z=0$ に対して対称

図 6 TPE-RX の OH/coil の配置

Fig. 6. Distribution of OH/coil in TPE-RX.

ての一次式になっている。コイルによって発生する磁界はコイル電流に比例するので、(4)式の S の計算において誤差は含まれない。従って、前章で述べたような繰返し計算は必要ない。また、 ΔI_i の取り得る範囲についても、コイル電流が負にならないか、電源容量を越さない限り特に制限がない。磁界評価点での重み w_i については、前章の議論と同様である。

以上のように、最適電流分配は前章の最適コイル配置を求めるときのような反復計算がないため、手軽に求めることができる。

〈3・2〉 TPE-RX⁽¹¹⁾ の設計例 TPE-RX は電総研の次世代 RFP として最近数年間にわたって設計研究を行ったものである。プラズマの大半径 $R_p=1.2 \sim 1.5$ m, 小半径 $a_p \cong 0.3$ m, プラズマ電流 $I_p \cong 2$ MA であり、現在イタリアで建設中の RFX に相当する。逆磁界配位の形成のため、トカマクに比べて約 1 kV の初期周回電圧が必要と考えられている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。このため電源電圧も高くなり、例えば同様な装置である ZT-H⁽¹²⁾ では、50 kV $\times$ 4 = 200 kV, 50 kA の電源を制御することが計画されている。しかしながら、このような電源は開発に多大な努力を要するばかりでなく、コストも高いので、個別電源の可能性を追求するのも一手段である。そこで、前節で述べた方法を適用して、設計研究を開始した初期に、誤差磁界を最小にするコイル電流分配を求める検討を行った。そこでのプラズマパラメータは $R_p=1.2$ m, $a_p=0.3$ m とした。

図 6 に TPE-RX の OH/coil の配置およびプラズマの形状を示す。OH/coil の配置は $Z=0$ の面に対して対称であるので、それぞれ対称なコイルは一つの組にして扱う。また、幾つかのコイルを同様に一つの組にして扱えば、互いにコイルのターン数比が一定になったままで最適電流分配が求められる。これによって最適電流分配値が求まると、各コイルのターン数比に

表 1 TPE-RX の各 OH/coil の電流配分比
および図 7 のときのコイル電流

Table 1. Optimum current distribution in TPE-RX & coil currents in Fig. 7.

	radius	Z-position	Turn Number	Current Ratio
OH 1	630.	150.	18	9
OH 2	690.	510.	20	8.597
OH 3	720.	750.	4	13.194
OH 4	750.	940.	4	24.555
OH 5	900.	1,150.	4	8.678
OH 6	1,090.	1,300.	4	0.0019
OH 7	1,470.	1,350.	6	7.936
OH 8	1,830.	1,400.	8	9.059

全コイル電流は 639.7 kAT

図 7 TPE-RX の OH/coil による誤差磁界

Fig. 7. Error field contour of OH/coil in TPE-RX.

分配する必要はない。従って、新たに誤差磁界も発生しない。これは、最小二乗法計算を行ううえでの一種の拘束条件でもある。

表 1 に各コイルの配置および最適電流配分比を示す。また、図 7 にそのときのプラズマ領域での誤差磁界等高線を示す。誤差磁界は計算上は小さい値になるが、実際には各コイルの電流値をどこまでの精度で制御できるかによって決まるであろう。また、第 2 章で述べたように、各コイルの製作設置精度などの問題がある。このため、装置製作後、各コイルの位置を正確に測ることにより再度上記の計算を行い、誤差磁界を減少させることが可能であろう。これは、最適コイル配置を行う方法にはない特長である。

4. ま と め

上述の二つのコードを、上記以外の装置の設計にも利用した。経験的には最小二乗法を利用する方法の本質的な困難さには直面しなかった。また、ほとんどの評価点の誤差磁界が零近くで、数点でのみ大きい値をとる場合もあろう。このときは、その点の統計的重みを大きくしたり、誤差磁界を最小にする空間を広げた

図 8 TPE-1RM15 の実測された誤差磁界分布 (300 Hz)

Fig.8. Measured error field profile at 300 Hz in TPE-1 RM15.

りして対応できよう。

空心コイルによる磁界を計算するコードは、現在ではほぼ完成されたものと考えられ、入力さえ正しければ実測値と非常によい一致を示す。また、磁界計測は物理学の基準になる定数を求める有用な手段であり、非常に高い精度で求められている。

従って、著者らは TPE-1RM15 の完成後、主にコイルの製作設置精度を検証するために LCR メータを用いて磁界の測定⁽¹⁶⁾を行った。測定用の校正された計測コイルをプラズマ発生領域に設置して、OH/coil との相互インダクタンスを測ることによって誤差磁界が求められた。計測コイルは 50×50 mm 角の断面をもち、低周波、高周波用に巻き数の異なるコイルを作った。ほかのコイルなどの影響を除くために OH/coil と、その支持柱のみで測られたのであるが、プラズマ中心部で約 50 G/100 kAT の磁界が見いだされた。これは、当初予定した誤差磁界より大きい。なお、OH/coil の自己インダクタンスおよびプラズマとの相互インダクタンスは、計算値と 4% 以内の精度で一致した。図 8 に見られるように、この磁界分布はランダムというより、ほぼ一様な垂直磁界であった。図 8 のような測定は 100 Hz 以上 100 kHz まで測定が行われ、それぞれの周波数でわずかに異なったが、傾向は変わらなかった。フィード部近くの断面では分布が多少異なったが、ほぼ大円方向の対称性のある磁界配位であった。これから、コイルの製作設置はほぼ軸

図 9 体積電流、線電流モデルおよび表皮効果を考えたときの $Z=0$ 面の誤差磁界分布

Fig.9. Error field profiles for volume coil current, filament current models and skin effect model.

対称になっていると考えられる。そして、測定された磁界分布と体積電流 (均一モデル) による磁界分布が異なった原因は、コイル導体内の電流分布によると考えられる。コイル導体内についての電流拡散幅は 300 Hz で約 1.2 mm と考えられ、これを OH 1~OH 3 について考慮すると、ほぼ測定された磁界分布を得ることができるからである。

図 9 に TPE-1RM15 のパラメータについて、体積電流 (均一モデル)、線電流および表皮効果 (300 Hz) を考えた $Z=0$ の面の磁界分布を示す。線電流モデルについては、今までに述べた文献 (6)~(9) のいずれもコイル導体内にどのように線電流を分布させるかについての方法が書かれていない。このため、導体中心に線電流を置いて計算した。表皮効果は、導体中の電流分布がコイルの巻き方および通電時間、放電方法に強く依存する。従って、ここでは巻き構造、磁界方向、電流方向を考慮し、その周波数での拡散幅以上にコイル導体内に磁界が侵入しない電流分布を仮定して計算を行った。線電流と体積電流 (均一モデル) の差は、誤差磁界の絶対値として約 5 G 程度であり 50% 程度の差がある。これはプラズマ周辺部で増大する。更にコイルとプラズマの距離が近づくと両者の差が拡大する。一方、表皮効果を考えた分布は前の二つとは大きく外れ、図 8 の分布に近い。従って、この程度の周波数帯では表皮効果による影響が線電流モデルの近似より大きくなるのがわかる。この分布はコイル電流の放電波形に応じて放電時間中に変化するであろう。従って将来、表皮効果が完全に解けても、どの周波数で最適化を行うかの問題が残るであろう。今後

より低い周波数で測るか、コイル導体内電流分布を求めれば、より詳細な比較ができるであろう。また、多ターンコイルを用いることによって、電流分布が一様化されるコイル構造にすれば、この問題は表面化しないであろう。コイル導体中の電流分布を求めるコードの開発は今後の課題である。

TPE-1RM15では、放電時間より長い時定数のシエルをもっていて、これがプラズマを囲んでいるので、この誤差磁界は遮へいされ、プラズマ閉込め特性に大きな影響はないであろう。

以上まとめとして、空心一次コイルの電磁気設計における最適コイル配置問題、また最適コイル電流分布問題をともに線形最小二乗法で解く方法について述べた。その応用として、電総研のTPE-1RM15およびTPE-RXの設計例を紹介した。

最後になりましたが、この研究を行うにあたり、協力していただいた三菱電機核エネルギー開発部、また三菱核融合開発室の皆様にお礼申し上げます。更に、計算コードの実行にあたって助力いただいた斉藤真理、坂部啓子さんに、また乱筆の原稿をワープロに入力していただいた進藤秋子さんに感謝いたします。
(昭和63年4月20日受付, 同63年10月12日再受付)

文 献

- (1) 名古屋大学プラズマ研究所 R 計画デザインチーム: 核融合反応プラズマ実験装置技術報告(V) (昭58)
- (2) 山崎・浜田: 「解説プラズマ断面形状制御」, 物理学誌, 41, 236 (昭61)
- (3) T. Shimada, et al.: "Results from the Reversed Field Pinch Experiment TPE-1RM15 with Programmed Vertical Field", Proc. 11th Int. Conf. on Plasma and Controlled Nucl. Fusion Research, Kyoto Japan, IAEA-CN-47/D-II-6 (1986)
- (4) T. S. Taylor: Private Communication
- (5) 石山・横井・青木・小賢: 「境界要素法と最適化手法の併用による均一磁界発生用マグネットの最適設計」, 電学論B, 106, 969 (昭61-11)
- (6) 小林・田村・谷: 「大型核融合装置の空心変流器コイルおよび垂直磁場コイル配置の最適設計 (臨界プラズマ試験装置設計報告IV)」, JAERI-M5898 (昭49)
- (7) K. Toi & T. Takeda: "Numerical Method to Obtain an Optimum Configuration of External Magnetic Field Coils in Tokamak Device by Non-linear Programming", JAERI-M6018 (1975)
- (8) 小林・谷・竹田・嶋田・田村・吉田: 「大型核融合装置のポロイダル磁場コイル配置の最適設計 (臨界プラズマ試験装置設計報告 XVI)」, JAERI-M6451 (昭51)
- (9) M. Guarnieri & A. Stella: "A Procedure for Axisymmetric Winding Design under Parametric Constraints: An Application to the RFX Poloidal Transformer", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-21, 2449 (1985)
- (10) T. Shimada, et al.: "TPE-1RM15 Reversed Field Pinch Experiment Design and Construction", *Fusion Tech.*, 1, 665 (1986)
- (11) K. Ogawa, et al.: Joint Japan-US Workshop on Experimental Results and Theories of RFP (1986)
- (12) P. Thullen & J. N. DiMarco: "ZT-H Reversed Field Pinch Experiment Executive Summary", LA-UR-84-2601 (1985) Los Alamos National Lab
- (13) G. Rostagni, et al.: "The RFX Project: A Design Review", *Fusion Tech.*, p. 189 (1984)
- (14) S. J. Sackett: "EFFI - A Code for Calculating the Electromagnetic Field, Force, and Inductance in Coil Systems of Arbitrary Geometry", UCRL-52402 (1978) Lawrence Livermore Lab.
- (15) 中川・小柳: 最小二乗法による実験データ解析, プログラムSALS (昭57) 東京大学出版
- (16) 平野, 他: 「TPE-1RM15の完成 IV (不整磁場測定)」, プラズマ核融合学会年会, 25pB7, p. 189 (昭61)