トカマクの導体シエルにギャップがある場合の補正について

吉川 允二・藤沢 登
松田 慎三郎，大和春海 ^{*}) (原研)

(昭和 46 年 9 月 7 日受理)

Abstract

Two methods are discussed in correcting field errors at the the azimuthal shell gaps in Tokamak devices. In the first the correction is made by means of hoop currents located concentrically outside the plasma ring. In the second a correction coil is placed at each shell gap. A straightforward procedure that leads to the design of these correct on coils is described. In the present design procedure the image current on the shell induced by the correction coil current is fully taken into consideration.

#) On leave from Tokyo Shibaura Electric Company

1 ま え が き

トカマクには通常プラズマの平衡と安定性の考慮から，導体シエルがプラズマを取り巻くように置かれている。このシエルには，プラズマ中の電流を誘起するためのワンターン電圧を短絡しないように，短周に沿って，カットが設けられている。シエルの厚みは，表皮の厚みより大きい。このため，シエルの内面にはプラズマ電流の鏡像電流が，プラズマ電流と逆方向に流れ，シエルの外面には，そのリターンとしてプラズマ電流と順方向に電流が流れる。

実際の装置では，実験上の便宜のため，短周に沿ってのカットの幅を広げ，測定用のギャップとして用いている。ギャップの幅は通常 10 cm 程度である。ギャップの付近では，シエル表面上の電流分布が乱され，磁場の乱れを作る。^{1), 2)} この乱れ磁場は，一般にポロイダル成分を持つ

ON THE CORRECTION OF FIELD ERRORS AT SHELL GAPS IN TOKAMAK DEVICES

M. Yoshikawa, N. Fujisawa, S. Matsuda, and H. Yamato

^{*}) 東芝総合研究所

トカマクの導体シエルにギャップがある場合の補正について

ているので、回転変換角 ϵ が $2\pi r/m$ の条件を満たす有理磁気面附近で、磁気面の「島」を作る。したがって、このような乱れ磁場を出来るだけ小さくすることが望ましい。

ここでは、乱れ磁場補正コイルについての二つの考え方について述べる。一は補正コイル自身が、トーラスと同じ軸対称性を持つ場合であり、二は補正コイルが、ギャップ附近のみに置かれる場合である。このような方法については、この問題を考えたことのある方々には自明のこととも思われるが、原研グループ内で討論のあったことでもあり、又似た事情は他のプラズマ装置でも遭遇するところであるので、述べて置く。これらの方法では、補正コイルを流れる電流が、シエル表面上に誘起する鏡像電流を考慮に入れていることを予め注意しておく。

2 問題の設定

第 1 図

トカマクの断面

第1図に、トカマクの断面を示す。プラズマの位置は、必ずしもシエルの中心にあるとは限らないので、同図では誇張して外側に寄っている場合を描いてある。シエルの内面及び外面を流れ

る表面電流は、表面上で一様ではなく、副方位角 θ に関する分布は第2図に示すようになる。この電流分布は、第1図に示したシエル附近の磁力線の分布から、定性的に理解されるであろう。

第 2 図

シエル表面上の電流密度

電流分布が、内面と外面とで一致しないので、電流の保存則を満たすために、ギャップの切り口上に表面電流が流れる。この切り口上の表面電流は、第3図に示すように、向い合う切り口上で互いに逆方向であるので、ポロイダル成分を持つ乱れ磁場が出来る。

第3図 シエル表面上の電流分布

トカマクの導体シエルにギャップがある場合の補正について

さて、この乱れ磁場を補正するにはどのようにすればよいであろうか。これについて、以下の節で考える。

3 シエル外部に置かれたリング状コイルによる補正

この問題を考え易くするために、まず次のようなモデルをたてる。第4図のように二重シエル構造を考える。

第4図 二重シエル構造による補正

プラズマ電流と外部シエルがあった場合の真空磁場の磁気面は同図に示したようになる。プラズマの平衡は、磁気面群が外側に押し付けられることによって保たれている。この真空磁場を (ψ, χ, ϕ) 座標で表わした場合、磁気面は $\psi = \text{一定}$ で表わされ、線要素 ds は

$$ds^2 = \frac{d\psi^2}{R^2 B^2 \chi} + \frac{d\chi^2}{B^2 \chi} + R^2 d\phi^2 \quad (1)$$

で表わされる。

さて、このプラズマ電流と外部シエルで定められる真空磁場中にギャップ付き内部シエルを次のようにはめ込む一内部シエルの表面は $\Psi = \Psi_1$, $\Psi = \Psi_2$, 及び $\varphi = \varphi_1$, $\varphi = \varphi_2$ 。即ち、内部シエルは、もともとの磁気面に沿っており、但し $\varphi = \varphi_1$ と $\varphi = \varphi_2$ によって決められる切り口がある。この様子は第五図に示す。

第5図 シエル上、切り上上の表面電流分布

この場合、 $\psi = \psi_1$ の表面では $J_\varphi = \mu^{-1} B_\chi(\psi_1, \chi)$, $\psi = \psi_2$ の表面では $J_\varphi = -\mu^{-1} B_\chi(\psi_2, \chi)$, $\varphi = \varphi_1$ の表面では $J_\psi = \mu^{-1} B_\chi(\psi, \chi)$, $\varphi = \varphi_2$ の表面では、 $J_\psi = -\mu^{-1} B_\chi(\psi, \chi)$ なる面密度を持つ表面電流が流れる。この表面電流は、内部シエル中の磁場を零とし、外部の磁場には影響を及ぼさず、表面での境界条件を満たし、表面電流の保存則を満たす解となっている。上を示す過程のうち、やゝ自明でないのは $\varphi = \varphi_1$ (或いは $\varphi = \varphi_2$) の表面上での電流の保存則である。これは次のようにして示される。式(1)より、

$$\varphi_1 + \varepsilon$$

$$\int_{\varphi_1 - \varepsilon}^{\varphi_1 + \varepsilon} R d\varphi \operatorname{div} \mathbf{j} = \int R d\varphi B_\chi^2 \frac{\partial}{\partial \Psi} \left(\frac{R j_\Psi}{B_\chi} \right) = R B_\chi^2 \frac{\partial}{\partial \Psi} \frac{J_\Psi}{B_\chi} = 0$$

トカマクの導体シエルにギャップがある場合の補正について

ここで
$$J_{\psi} = \int_{\varphi_1 - \varepsilon}^{\varphi_1 + \varepsilon} j_{\psi} R d\varphi = \mu B \chi$$
 である。

外部シエルの作用は、リング状コイル群によって近似されうる。従って次のような結論が得られる。外部に補正リング状コイルを配置し、そこにプラズマ電流に同期した電流を流し、真空磁気面に沿ったギャップのあるシエルを置けば、ギャップのために磁場が乱れることはない。

4 シエル附近に局部的に置かれた補正コイル

2で述べたように、ギャップ附近ではポロイダル磁場がプラズマにかかる。従って、この附近にのみ、補正用のコイルを配置すればよからう。しかし、補正コイル中を流れる電流の鏡像電流がシエル中に誘起されるおそれがある。以下では、考え方としてどのような補正コイルを置けばよいかを検討し、同時に、補正コイル電流はシエルの表面上に電流を励起しないことを示そう。

今、第3図に示したギャップに、再び短いシエルをはめ込んだとしよう。(第6図)

第6図 第3図にはめ込みシエルを入れた図、
はめ込みシエル表面上の電流分布を示す。

このはめ込みシエルと、もともとのシエルの間には、無限に狭いギャップをまだ残して置くものとする。はめ込みシエルの表面を流れる電流は第6図に示されている。その θ 一方向の分布は第2図に示されている。従って、第6図で示されたような電流分布を近似的に補正コイルで作ってやれば、電流分布、及び磁場分布はもとのままである。

このような補正電流分布はもう少し実際にやり易い形にもって行くことが出来る。そのためには、

任意のトロイド上に表面電流を流し，その内部のみ磁場を作り，外部には全く洩れないようにすることができることに注意する。特に第7図のような磁場配位が第8図に模式的に示した電流分布によって作ることが出来る。

第7図 シェル状トロイドの中に限られて存在する磁場の分布，トロイドの外には磁場を作らない。

第8図 トロイド表面上の電流密度

トカマクの導体シエルにギャップがある場合の補正について

この電流分布は外部は全く磁場を作らないので、シエル表面に新たに電流を誘起しない。従って、第2図の電流分布と第8図の電流分布を加えて出来る電流分布（第9図、第10図）は、補正コイルで取り囲まれたシエル状の空間を別とすれば、磁場の分布を全く変えないし、シエル表面上の電流分布も変えない。この意味で、この補正電流分布は理想的である。

第9図 実際に使える補正電流分布

第10図 実際に使える補正電流密度

ここで更に、補正電流の外表面での分布（第9図、第10図参照）は、内面の分布に比して、小さいことに注意しておく。特にシエルの形状が、円環電流が真空場で作る磁気面に沿って形成されている場合、補正電流の外表面での電流密度は零である。

ここに述べた電流分布は主として、中心面附近と、シエル切り口附近に限られたくら形のものである。このような補正コイルの設計計算は容易であり、製作もそれほど困難ではあるまい。このコイル形状は、上下に測定のため開いたスペースを与える。

5 ま と め

トカマク装置に通常あるシエルギャップ附近での磁場の乱れを除くための二つの方法について述べた。一はプラズマの外に外部シエル又はこれを近似するリング状コイルを設ける方法であり、二はシエル附近に補正コイルを設ける方法である。後者は二つのくら形コイルを上下に向い合わせた形をしており、大きな測定用のスペースを上下に設けることが出来る。このくら型コイルに流すべき電流の分布は容易に与えられる。補正コイルを流れる電流が、シエル上に誘起する表面電流は考慮に入れられている。

6 謝 辞

ここに取扱った内容は、静岡大学染谷太郎助教授、原研核誘合研究室、及びガルフジェネラルアトミック核融合研究室の諸氏との討論のうちに進められたものであり、ここに上記の諸氏に感謝したい。

文 献

- 1) M.A. Leontovich: Plasma physics and the problem of controlled thermonuclear Fusion Vol. 1 p.272-278 (Permgamon Press 1961)
- 2) 染谷太郎, 伊藤智之, 日本物理学会核融合分科会(1971年6月, 東京) 16p-F-4;
submitted to Japanese Journal of Applied Physics.