O-39

逆バイアステータピンチ法によるコンパクトトロロイドの生成
Formation of Compact Toroid by negative biased Theta Pinch

○渡部 慎太郎 [1]　高橋　努 [2]
*Shintarou Watanabe[1], Tsutomu Takahashi[2]

Abstract: To optimize the operation sequence of the Compact Troid formation using Hybrid theta pinch coil, which consists of conical and cylindricalθ-pinch coils and control coils, detail numerical calculations for magnetic field distribution have been performed. Grad-Shafranov equation, without term of plasma pressure and toroidal current function, is converted to a finite difference equation and is solved by iterate approach. The magnetic flux functions of theta pinch coil and the control coil are solved separately and the absolute value for each of flux function is estimated to coincide the calculated coil currents with the measured ones

１．はじめに

逆バイアステータピンチ法は, 容易に高温高密度の磁場反転配位（FRC）型及びスフェロマック（SPH）型のコンパクトトーラスプラズマ（CT）を同じ装置で生成することができる（Fig. 1）。FRC 型は円柱型の θ ピンチコイルで SPH 型は円錐型の θ ピンチコイルを配置することで生成される。現在、FAT 装置の一部を改造して２つの CT を生成して衝突合体させる(Collisional Merging Experiment)ために改造中である。FAT 左側生成部では、これまで基礎的実験研究で開発された円柱−円錐ハイブリッドコイルと制御コイルからなる新しい生成法が試みられる。（Fig.1）この研究では、運転条件の詳細を決定するためにハイブリッドコイルの作る磁束関数分布及び制御コイルの作る磁束関数分布を求め、各コイルの真空磁場分布の計算機シミュレーションを行う。それらの結果から制御コイルとハイブリッドコイルに流すバイアス磁場、主圧縮磁場の放電時間や、制御コイルのクローバスイッチ投入時間などを見積る。

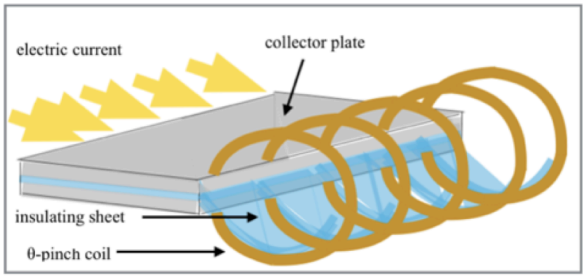

Fig. 1 Field-reversed Theta Pinch (FRTP) method

2. ハイブリッドコイル、制御コイルが作る磁束関数の決定方法

Fig. 2 に今回運転条件を決めるハイブリッドコイルの形状の概略図を示す。右端から順に、半径 13cm, 14cm, 15cm, 16cm, 17cm, のコイルを２ずつ並べ長さ 55cm の円錐テータピンチコイル部を作る。さらに 17cm のコイル１０個並べ、円柱テータピンチコイル部を作る。さらに、17cm コイルを 12 個並べて閉じ込め部を作る。制御コイルは、円錐部及び円柱部のそれぞれの位置に入口、出口部に設置する。また、閉じ込め部の出入り口に移送用制御コイルを配置する。

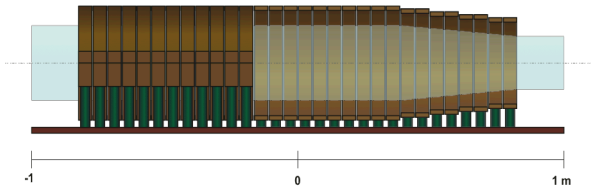

Fig.2 Hybrid theta pinch coil

磁束関数ϕは、円柱対称系の場合、rA_θで表される。ここで、A_θは、ベクトルポテンシャルの θ 成分、r は半径座標である。マックスウェルの方程式および磁束密度とベクトルポテンシャルの関係式

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \qquad (1)$$
$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

および、クーロンゲージ$\nabla \cdot \vec{A} = 0$を用いる。電流は、θ 方向にしか流れていないためにベクトルポテンシャルは θ 成分のみを考えればよい。得られたA_θの関係式に磁束関数の定義式を代入して整理すると以下のような式が得られる。

$$r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial \phi(r,z)}{r\,\partial r}\right) + \frac{\partial^2 \phi(r,z)}{\partial z^2} = \mu_0 J_\theta(r,z) \qquad (2)$$

この式を用いてそれぞれのコイルの作る磁束関数を求める。実際、磁束関数を求める領域は、電流が流れていない領域を解くので、（２）式の右辺はゼロとなる。また、プラズマがある場合は、J_θは、プラズマの圧力勾配やトロイダル電流関数で表される。この方程式はグラッド・シャフラノフ方程式と呼ばれる。また、この方程式の境界条件としては、電流の流れている領域は、磁束関数を$\phi = 1$, 無限大の領域を$\phi = 0$と置く。また、対称軸上（$r = 0$）も$\phi = 0$と置く。重ね合わせの原理を使って θ ピンチ

1:日大理工･学部･物理 2:日大理工･教員･物理

Table 1　Boundary Condition

		Boundary condition	
		Theta pinch coil	Control coil
Calculation	Theta pinch coil	$\phi = 1$	$\phi = 0$
	Control coil	$\phi = 0$	$\phi = 0$

コイルと制御コイルの作る磁束密度の分布を決めるために次の Table1 にまとめるような境界条件を各コイルに考える。それぞれの境界条件で解いた磁束関数を各コイルに流れる電流または磁束密度の大きさを考えて足し合わせることにより両方のコイルが作る磁束関数の分布を求めることができる。さらに、求まった磁束関数から、磁束密度 ***B*** やコイルに流れる電流は次の関係式およびアンペールの法則から求められる。

$$\begin{cases} B_r = -\dfrac{\partial \phi}{r\,\partial z} \\ B_z = \dfrac{\partial \phi}{r\,\partial r} \end{cases} \qquad (3)$$

$$I_C = \frac{\oint_C \vec{B}\cdot d\vec{l}}{\mu_0} \qquad (4)$$

ここでは、差分法を用いて離散化して緩和法、および加速緩和法を用いて磁束関数を決める。(2)および(3)式を差分化すると以下の式となる。

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{4}\left[\begin{array}{l} \left(1-\dfrac{1}{2i}\right)\phi_{i+1,j} + \left(1+\dfrac{1}{2i}\right)\phi_{i-1,j} \\ +\left(\dfrac{\Delta r}{\Delta z}\right)^2\left(\phi_{i,j+1}+\phi_{i,j-1}\right) \end{array}\right] \qquad (5)$$

$$B_r(i,j) = -\frac{\phi_{i,j+1}-\phi_{i,j-1}}{i2\Delta r\Delta z}$$
$$B_z(i,j) = \frac{\phi_{i+1,j}-\phi_{i-1,j}}{i2\Delta r\Delta r} \qquad (6)$$

初期条件として、境界条件以外の $\phi_{i,j}$ をゼロとして、(5)式を用いて各 $\phi_{i,j}$ を計算する。第 k 回目の計算においては、第 $k-1$ 回目の $\phi_{i,j}$ を用いて（５）式を用いて計算するが境界条件上の $\phi_{i,j}$ $\phi = 0$と置く。また、対称軸上（$r = 0$）も$\phi = 0$と置く。重ね合わせの原理を使って θ ピンチコイルと

派、常に境界条件の値を保つように計算を繰り返す。第 k 回目の値 $\phi_{i,j}^{(k)}$ と第 $k-1$ 回目の値 $\phi_{i,j}^{(k-1)}$ の値の差がある値以下になったとき収束したとして磁束関数の値 $\phi_{i,j}$ を解とする。　現在、作成したプログラムのチェックを行うために、Fig.3 に示すような $z=0$, 半径 a の円環電流に電流 I を流した時の一巻きコイルの作る磁束関数の分布

$$\phi = \frac{\mu_0 I}{\pi k}\sqrt{ar}\left[\left(1-\frac{k^2}{2}\right)K(k)-E(k)\right] \qquad (6)$$
$$k = \frac{4ra}{(r+a)^2+z^2}$$

を求めている。ここで、$K(k)$は第一種完全楕円積分、$E(k)$は第一種完全楕円積分とする。この解と繰り返し計算でで得られた解を比較することによって無限大と数値計算の境界の大きさや収束の条件など

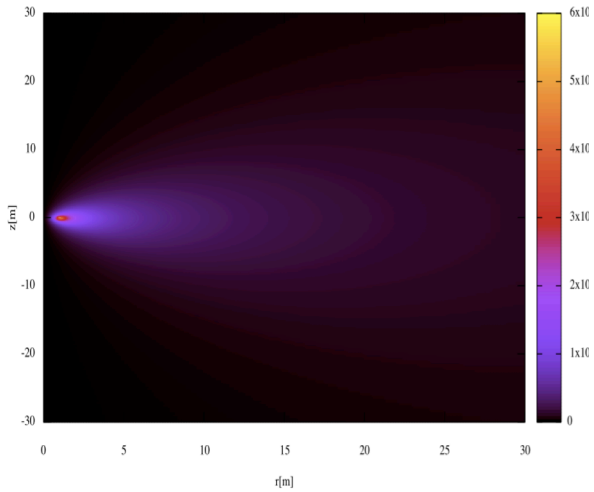

Fig.3 Distribution of magnetic flux function in circler current

の最適化を行っているところである。プログラムのチェック後 Fig.2 コイル形状の磁束関数を求め、制御コイルとハイブリッドコイルに流すバイアス磁場、主圧縮磁場の放電時間や、制御コイルのクローバスイッチ投入時間などを見積る。