

移送FRCプラズマの反射過程における金属チェンバーの役割

The role of metal chamber in the reflection process of translating Field-Reversed Configuration plasmas

○岡島奨¹, 山内貴紀¹, 松本昂大¹, 笹沼宣之¹, 高橋努²Susumu Okajima¹, Takanori Yamauchi¹, Kouta Matsumoto¹, Takayuki Sasanuma¹, Tsutomu Takahashi²

Abstract: To understand the effect of a metal chamber for reflection process, experimental data analysis and computer simulation are performed. An induced current is produced in the end metal chamber when the FRC plasma injects the chamber. The interaction between the induced current and the plasma current assists the reflection process. One-dimensional magnetic diffusion equation is solved and the magnetic skin time is compared with the experimental one. The experimental results of the straight chamber region is consistent with the simulation one, but two-dimensional region doesn't. Two dimensional simulation will be developed.

1. はじめに

当研究室では、磁場反転配位 (FRC) 装置を用いた研究を行っている。FRCプラズマ^[1]はプラズマの自己電流によって閉じた磁場配位を形成し、プラズマの閉じ込めにおける磁場利用効率 β の値が100%に近いプラズマを円筒状の単純な装置内に保持できる単純な方式である。また、閉じ込めコイルとプラズマトラスが鎖交していないため、生成したプラズマを閉じ込め磁場の勾配に沿って移送することが可能であり、核融合炉としての性能向上が期待されている。

2. 研究目的

Figure1.に FRC 移送実験装置 NUCTE-III/T の概略図を示す。右側の逆バイアスシータピンチで生成された FRC プラズマは、磁場勾配により左側の閉じ込め領域に移送される。移送部の上流、下流にはミラーコイルが設置されている。この領域は、SUS304 製の金属チェンバーとなっている。

従来 FRC プラズマの移送実験では、プラズマパラメーターの決定にあたって、金属チェンバー内にプラズマが進入する際に金属チェンバーを磁束保管管として、金属チェンバー内の FRC プラズマ滞在時間より磁場のしみ込み時間のほうが十分に遅いと仮定し、移送 FRC プラズマのプラズマパラメーターを決めてきた。

しかし、実際には SUS304 製の金属チェンバーは有限の電気抵抗を持つため、FRC プラズマが金属チェンバー内を通過する際に磁束の変化により、磁場のしみ込みが発生し、それに伴い金属チェンバーに誘導電流が発生する。この誘導電流と電磁流体である FRC プラズマの相互作用を評価し、金属チェンバーの役割を調べることがこの研究の目的である。

3. 金属チェンバーの磁場しみ込み時間

金属チェンバーの誘導電流と電磁流体である FRC プラズマの相互作用を評価するためには、金属チェンバーの磁場しみ込み時間を調べる必要がある。しかし、金属製の真空容器は複雑な形状をしているため計算により等価的な電気抵抗 R とインダクタンス L から推測することは困難である。そこで、金属チェンバーを Z 方向に無限に長い薄肉円筒と仮定した場合での磁場のしみ込み時間を解析的に算出し、金属チェンバー内に磁気プローブを設置し、実験的に時定数 τ を決める。解析的に求めた時定数 τ は金属外側の磁場 B_{out} と内側の磁場 B_{in} の最大値の間隔と一致した。この結果を用いて実験的に金属チェンバーの時定数を決め、解析的に求めた値を理論値、実験的に求めた値を理論値として比較したものをFigure2に示す。

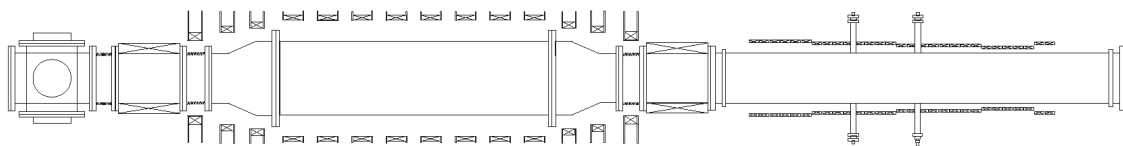


Figure1. Experimental Apparatus NUCTE-III/T

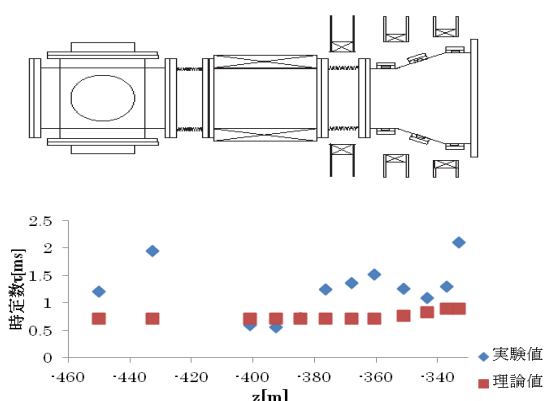


Figure2. Profile of magnetic field in the metal chamber
実験値と理論値には誤差が見られる。ポートやフランジが存在する場所では理論値よりも実験値の方が時定数は大きい、構造物が少ない場所では理論値と非常に近い値を示していることがわかる。

4. 磁場拡散シミュレーション

プラズマ移送実験において、真空容器である金属チェンバー内に磁気プローブをたくさん設置することは、実験装置上の問題やプラズマに悪影響を与えてしまう可能性があるため好ましくない。そこで、磁場拡散シミュレーションにより、金属チェンバー全体に流れる誘導電流の効果を含めた磁場計算を行う。

金属導体中の磁場拡散方程式^[2]はMaxwell方程式により

$$\mu\sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla^2 \mathbf{B} \quad (1)$$

となる。(1)式を円筒座標で考えると、 θ 方向の磁場 B_θ は軸対称性により0となる。 z 方向と r 方向の磁場 B_z 、 B_r は

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}, \quad B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (2)$$

となり、計算すると(1)式は

$$\mu\sigma \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \quad (3)$$

となる。ここで、解析解と比較するため(3)式の z 方向を考えずに、 r 方向の一次元磁場拡散シミュレーションを陰解法^[3]で解く。この計算領域は中心($r=0$)からコイルまでで、境界条件として $\Psi=0$ とコイル近傍には円管電流を与える。閉じ込め部の磁場は磁束関数を用いて、円管電流の磁場の足し合わせで表すことがで

きる。磁束関数は

$$\Psi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{ar} \left\{ \left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right\} \quad (4)$$

である。ここで $K(k)$ 、 $E(k)$ 、 k は

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}}, \quad E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad (5)$$

$$k = \sqrt{4ra/z^2 + (r+a)^2}$$

である。実験データの電流波形を

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t) \exp(-\alpha t) \quad (6)$$

と近似すれば、磁束は電流波形に比例するため、

$$\Psi(t) = \Psi_0 \sin(\omega t) \exp(-\alpha t) \quad (7)$$

とおくことができる。この近似した(7)式の磁束波形をコイル近傍に境界条件として与え、一次元磁場拡散シミュレーションを陰解法^[3]で解いた。シミュレーション結果をFigure3に示す。

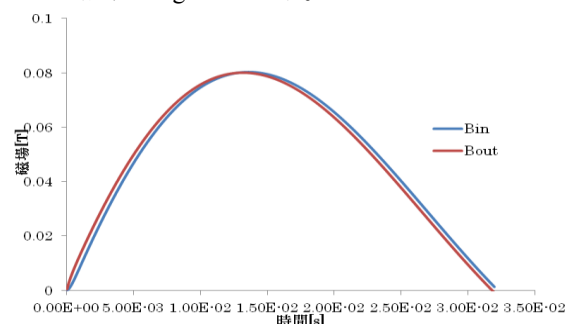


Figure3.one-dimensional simulation for magnetic diffusion

Bout と Bin の最大値を示す時間の差を求めると解析的に求めた時定数とほぼ同じ値が得られた。よって1次元のシミュレーション方法は確立できた。しかし、これまで1次元でシミュレーションを行ってきたが、実際には、(3)式に r 方向と z 方向の2次元のシミュレーションを行う必要がある。そこで、1次元シミュレーションで用いた陰解法を拡張したADI(Alternating Direct Implicit)法^[3]を用いて2次元の磁場拡散シミュレーションを行い、磁場分布や誘導電流を算出した上で金属チェンバーの役割を評価することが今後の課題となる。

参考文献

- [1] 「J. Plasma Fusion Res」, 小特集, Vol.84, No.8, pp.498-499, 2008
- [2] H.Knoepfel, "Pulsed High Magnetic Field" North-Holland Pub, pp46-72
- [3] 矢部孝・井門俊治, FORTRAN & C 言語によるシミュレーション技法入門, 日刊工業新聞社, pp75-85