

FRC における移送装置金属チェンバーに流れる誘導電流の評価
Evaluation of induced current in the metal chamber of FRC translation device

○山内貴紀¹, 秋本和宏¹, 多田直樹¹, 高橋努²,
 平野洋一², 浅井朋彦², 松澤芳樹²

*Takanori Yamauchi¹, Kazuhiro Akimoto¹, Naoki Tada¹, Tsutomu Takahashi²,
 Youichi Hirano², Tomohiko Asai², Yoshiki Matsuzawa²

Abstract: Translation device of NUCTE-T(Nihon University Compact Torus Experiment Translation) has a metal chamber at both ends, and it is known that reflection process, and an induced current flows on the metal chamber. In order to evaluate how the magnetic field by this induced current influences the confined plasma, a new magnetic probe is installed at the downstream part of a metal chamber, and experiment is performed.

1. はじめに

移送装置 NUCTE-T は両端に金属製のチェンバーを用いる。反射過程においてプラズマがチェンバー内へ進入する際には誘導電流が流れる。この誘導電流による磁場がプラズマの閉じ込めに対してどのような効果を与えるかを評価するため、新たに装置下流部の金属チェンバー内に磁気探針を設置し実験を行った。

2. 実験装置と計測器

移送装置の概形を Figure 1 に示す。放電管は全長 1.4m の透明石英製である。金属チェンバーは内径 267mm のストレート状のチェンバー、ベローズ状のフランジ、内径 267~400mm に広がる形状のテーパ部から構成されていて、肉厚 5mm のステンレス製である。準定常磁場コイルは、同じ径の 8 本のコイル素子からなるソレノイドと、径の異なる上下流各 3 本のコイル素子、および金属チェンバーに直巻されたコイル素子からなるミラー磁場発生コイルで構成されている。本研究においてはこれに加えて、生成部下流側のフランジに巻かれた準定常磁場コイルと直列つなぎのコイルもあわせて考察していく。新しい磁気探針は縦横 6.5mm の木製の棒を 20mm 程に切断し、リード線を巻いて作った。これを金属チェンバー内壁に沿う形状のガラス管内に 12 個設置し、移送装置下流部から挿入した。

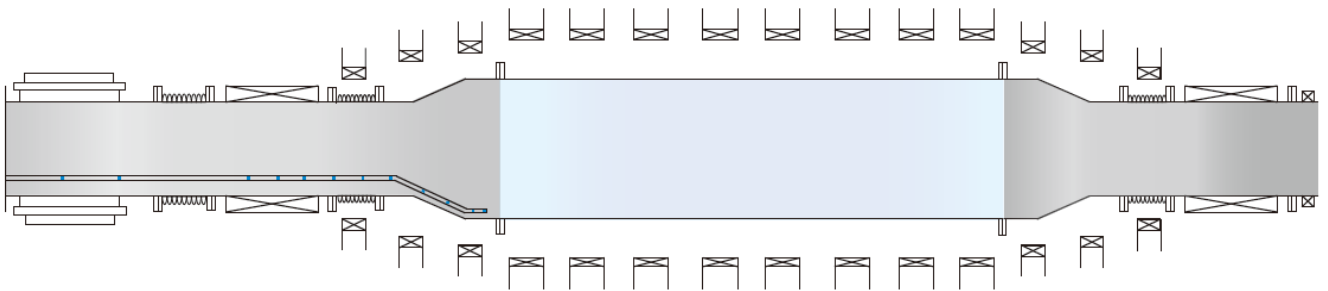


Figure 1. Outline of NUCTE-T and magnetic probe

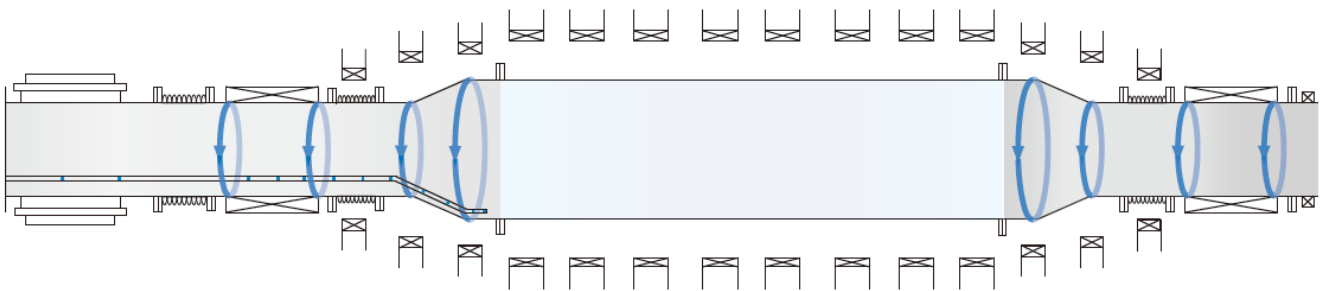


Figure 2. A model of the induced current

1 : 日大理工・院(前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

3. 原理

磁気探針の測定データには、準定常磁場に加えて誘導電流による磁場、移送実験の際にはさらにプラズマによる磁場も含まれている。本研究は、まずプラズマなしの測定データを用いて考察することからはじめる。簡単のため準定常磁場コイルを円環電流の集まりとする。また誘導電流も数本の円環電流に置き換えて Figure 2 のように上流部と下流部それぞれに置いて考察する。

ここからは円筒座標のみを考える。円環電流による磁場はベクトルポテンシャルを用いて式(1)のようになる。

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \\ 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta) \end{pmatrix} \quad (2)$$

対称性から、磁場は A_θ のみで表せる。

$$A_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{r}} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right] \quad (3)$$

A_θ は式(3)のようになり、したがって軸方向の磁場 B_z は式(4)のように示せる。式中の $K(k)$ と $E(k)$ はそれぞれ第1種完全楕円積分、第2種完全楕円積分という特殊な関数である。

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta) = \frac{\mu_0 I k}{4\pi \sqrt{ar}} \left[K(k) + \frac{(r+a)k^2 - 2r}{2r(1-k^2)} E(k) \right] \quad (4)$$

式(4)において、電流値 I 以外を定数 C に置き換えると以下ようになる。

$$B_z = CI \quad (5)$$

磁場は足し合わせることができるので、式(5)は多数項の式となる。これを行列を用いて表すと式(6)のようになる。

$$\begin{pmatrix} B_{z1} \\ \vdots \\ B_{z12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & \dots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{121} & \dots & C_{12n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & D_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ \vdots \\ I_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

左辺の測定値は新たに設置した 12 個の磁気探針から得られ、右辺第 1 項は誘導電流による磁場を、第 2 項はある時刻での電流値 I_0 による準定常磁場を表している。ここで式中の n は誘導電流のモデル本数を示している。磁気探針の測定値は Figure 3 のような結果が得られている。各行列を文字に置き換えると式(7)となる。

$$B = CI_i + DI_0 \quad (7)$$

求めたいのは各時刻の誘導電流値 I_i で、その導出は最小二乗法のうちの正規方程式を使って解いていく。

まず両辺に C の転置行列をかける。 $C^T C$ は正方行列なのでその逆行列が存在し、この逆行列を両辺にかけることで I_i の係数部が単位行列となり、誘導電流値を求めることができる。最終的な形を式(8)に示す。

$$I_i = (C^T C)^{-1} C^T B - (C^T C)^{-1} C^T D I_0 \quad (8)$$

定数部 C と D は、磁気探針と準定常磁場コイル、誘導電流モデルの位置関係によるため既知であり、磁気探針の測定データと準定常磁場コイルに流れる電流値 I_0 がわかれば I_i が解ける。誘導電流が求まれば、それを差し引くことで準定常磁場のみの結果が得られ、金属チェンバーがどのような効果を与えているのかがわかるようになる。

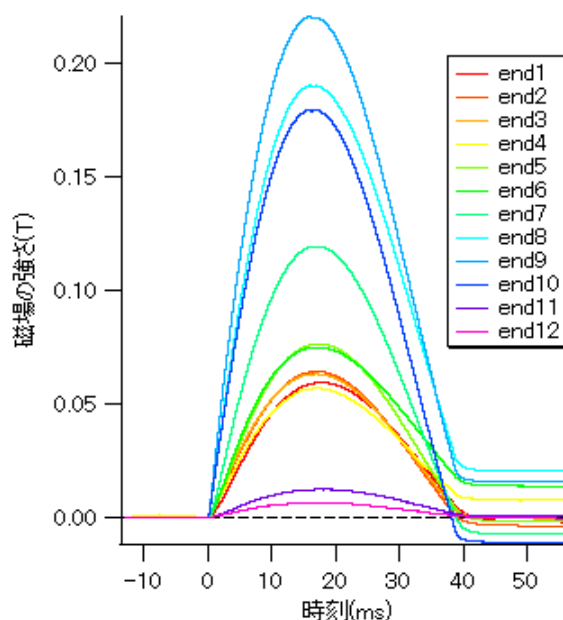


Figure 3. Intensity of the magnetic field from B_z end probe

4. 参考文献

- [1] エリ・ランダウ, イェ・リフシッツ「電磁気学 1 連続媒質の電気力学 ランダウ=リフシッツ理論物理学教程」東京図書, 1982
- [2] 日吉まゆ「移送過程における磁場反転配位プラズマ形状の決定」日大理工修士論文, 2009