# 金属容器中の FRC プラズマへの排除磁束法の適応

## Application of an Excluded Flux Measurement onto a FRC Plasma in a Metal Chamber

○菱田大暉<sup>1</sup>, 石渡淳平<sup>2</sup>, 関口純一<sup>3</sup>, 高橋努<sup>3</sup>, 浅井朋彦<sup>3</sup> \*Daiki Hishida<sup>1</sup>, Junpei Ishiwata<sup>2</sup>, Junichi Sekiguchi<sup>3</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>3</sup>, Tomohiko Asai<sup>3</sup>

Abstract: Field-reversed configuration (FRC) is a compact-torus purely with poloidal magnetic field and therefore extremely high beta value. Separatrix radius ( $r_s$ ) of FRC plasma is approximately equal the excluded flux radius ( $r_{\Delta \phi}$ ) which is evaluated by an excluded flux measurement. On the FAT facility at Nihon University, confinement chamber was recently replaced with a metal one, but it cannot be considered an ideal flux conserver because of flux leakage. Therefore, excluded flux measurement is needed to be optimized. We install new  $B_z$  probes outside of the metal chamber to measure flux leakage and calculate an excluded flux radius considering flux leakage.

## 1. 研究目的·背景

磁場反転配位(Field-Reversed Configuration: FRC)プ ラズマは、閉じ込め磁場がポロイダル成分のみで構成 されるコンパクトトーラスプラズマである.単連結構 造で外部磁場を生成するコイルと鎖交しないため、軸 方向への移送が可能である<sup>III</sup>.このため、プラズマを生 成領域から準定常的な閉じ込め磁場を持つ閉じ込め領 域へと移送が可能である.

これまで石英製の閉じ込め容器への移送実験を行っ ていたが、衝突合体実験において大幅な捕捉磁束の増 大が予想されたことから、金属製のものに変更した. FRCの評価法の一つとして磁場計測が挙げられ、後述 する排除磁束法によりセパラトリックス半径を求める ことが一般的である.しかし、配位持続時間が伸長す ることで金属容器壁から磁束が漏れ出すことが考えら れ、一般的な排除磁束法を適用した際の排除磁束半径 は過小評価となる可能性がある.本研究では、新たに 増設した移送部において、漏れ磁場を考慮した排除磁 束法を適用し、より正確に排除磁束半径を導出するこ とを目的とする.

#### 2. 実験装置

本実験を行った FAT の概略を Figure1 に示す.生成 領域は、外径 256 mm、長さ 2 m の石英放電管と、一巻 きの銅製シータピンチコイルから構成されている.移 送領域は、内径 775 mm、長さ 2 m、肉厚 6 mm の金属 容器、コニカル形状の接続部、準定常磁場を発生させ るための多層巻きコイルで構成されている.金属チャ ンバー内には  $B_z$ プローブが z=0、±15、±45、±75 cm の位置に設置されている.また、金属チャンバー外壁 には、内部プローブと同じ位置にプローブを設置し、 漏れ磁場の計測を行う.

#### 計測原理

磁気プローブはファラデーの電磁誘導の法則に従い 磁束密度の微分信号を出力する.



1:日大理工・学部・物理 2:日大理工・院(前)・物理 3:日大理工・教員・物理

$$V_{out} = -NS \frac{dB}{dt} \tag{1}$$

ここで、Nは巻き数、Sは断面積である.この出力電 圧について、積分回路を用いて積分信号を得るか、計 測した微分信号を数値積分することで磁束密度の信号 を得ることができる.

### 4. 排除磁束法

磁束保存管内の磁束密度 $B_z$ は径方向分布が一様であると仮定する. FRC プラズマが移送される前は Figure 2(a) のようにチェンバー内の磁場は一様で、磁束 $\varphi_v$ は

$$\Phi_{\nu} = \pi r^2 B_0 \tag{2}$$

と書ける. ここで r は理想的な磁束保存管の半径である.

移送後は, Figure 2(b) のように FRC プラズマにより 磁場が押しのけられ,磁気プローブで計測される磁束 密度を  $B_p$ とすると,磁束  $\Phi_p$ は次のように表される.

$$\Phi_{\nu} = \pi (r^2 - r_{\Delta \Phi}) B_p \tag{3}$$

移送前後で全磁束は変化しないことより,排除磁束半 径は以下のように求めることができる.

$$r_{\Delta\Phi} = r \sqrt{1 - \frac{B_0}{B_p}} \tag{4}$$

しかし,漏れ磁場の影響も考慮するため,これでは不 十分である.



Figure 2. Schematic of Excluded Flux Measurement.

### 5. 解析法[2][3]

この手法では、金属容器は磁束保存管としてみなす ことはできないが、閉じ込めコイルに流れる電流が準 定常であるため内部の磁束は一定となることを用いる. 
$$\Phi_{v} = \pi r_{w}^{2} B_{in,v} + \pi (r_{c}^{2} - r_{w}^{2}) B_{ex,v}$$
(5)

$$\Phi_p = \pi (r_w^2 - r_{\Delta\Phi}^2) B_{in} + \pi (r_c^2 - r_w^2) B_{ex}$$
(6)

ここで, r<sub>c</sub> は閉じ込めコイルの半径, r<sub>w</sub> は閉じ込め容器の半径, B<sub>in</sub>, B<sub>ex</sub>はそれぞれプラズマが移送された時の金属容器内,および金属容器外壁とコイルの間の磁 束密度である. B<sub>in,v</sub>, B<sub>ex</sub>, はそれぞれプラズマが移送される前の磁束密度である.

閉じ込めコイル内で磁束が一定であり、 $\Phi_{v=}\Phi_{p}$ が成 り立つと仮定しているので、セパラトリックス半径は 近似的に以下のように求められる.

$$r_{\Delta\Phi} = r_{w} \sqrt{1 - \frac{B_{in,v} - (r_{c}^{2} / r_{w}^{2} - 1)(B_{ex} - B_{ex,v})}{B_{in}}}$$
(7)



**Figure 3.** Sectional View of Translated FRC in the Confinement Region.

6. 参考文献

浅井朋彦,井通暁:「極限的高ベータプラズマ閉じ込め:FRC研究の新展開 3.FRC研究の現状」, J. Plasma
Fusion Res. Vol.84, No.8, pp.511-513, 2008.

[2] M.C. Thompson, J. D. Douglass, P. Feng, K. Knapp, Y. Lou, R.Mendoza, V. Patel, M. Tuszewski, A. D. Van Drine : "Magnetic diagnostic suite of the C-2 field-reversed configuration experiment confinement vessel", Review of Scientific Instruments 83, 10D709, 2012.

[3] T. Roche, M. C. Thompson, R. Mendoza, I. Allfrey, E. Garate. J. Romero, J. Douglass : "Enhanced magnetic field probe array for improved excluded flux calculations on the C-2U advanced beam-driven field-reversed configuration plasma experiment", Review of Scientific Instruments 87, 11D409, 2016.