0-7

# 導体製真空容器における移送 FRC の電子密度計測

## Interferometric Electron Density Measurement of an FRC in an Electrically Conductive Chamber

○関口純一<sup>1</sup>, 小野直人<sup>2</sup>, 石渡淳平<sup>2</sup>, 花島朋弥<sup>3</sup>, 杉本研<sup>3</sup>, 高橋努<sup>1</sup>, 浅井朋彦<sup>1</sup>
\*Junichi Sekiguchi<sup>1</sup>, Naoto Ono<sup>2</sup>, Ishiwata Jumpei<sup>2</sup>, Hanashima Tomoya<sup>3</sup>, Ken Sugimoto<sup>3</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>1</sup>, Tomohiko Asai<sup>1</sup>

Abstract: A long-lived FRC produced by merging of two colliding FRCs, achieving ~10 ms, has been demonstrated by the C-2U facility at Tri Alpha Energy. The FRCs on the C-2 have static plasma with improved confinement, beyond the prediction of the conventional scaling. Merging of two colliding FRCs is an important technique because the significant ion heating and magnetic flux buildup are simultaneously achieved. These two phenomena have not been verified including detailed conditions of each FRC in the formation sections. The FRC translation experiment with an electrically conductive vacuum chamber has been initiated on the FAT facility to demonstrate merging of two colliding FRCs. The electron density of an FRC on the translation process has been measured by He-Ne laser interferometer. The observed velocity of the FRC exceeds Alfvén velocity estimated from the measured electron density.

## 1. はじめに

近年,米国 Tri Alpha Energy, Inc.の C-2 装置において,Field-Reversed Configuration (FRC) と呼ばれる磁化プラズモイ ドをアルヴェン速度以上に加速し、衝突・合体させられた FRC に関する実験が注目されている<sup>[1]</sup>.FRC は体積平均 6 値が他の磁場閉じ込め方式と比較して極めて高く、閉じ込めたプラズマと鎖交するコイルを必要としない単連結構造で あり、核融合炉心としての工学的な利点が多いことが特徴である.従来、FRC における粒子・磁束・エネルギー閉じ 込め時間は Hoffman によるスケーリング則<sup>[2]</sup>に実験結果が沿うことが知られていたが、C-2 装置による FRC は Hoffman スケーリング則を大きく上回る閉じ込め性能を持つ.ここで着目すべき点は、C-2 装置による FRC はイオン平均自由 行程がプラズマ半径よりも大きい無衝突状態にあることであり<sup>[3]</sup>、配位内部の粒子の輸送の状態が従来の FRC と大きく 異なることが推測される.

現在まで FRC への追加熱方法は未確立であり、イオンが無衝突状態となり得るパラメータまでプラズマを加熱する ことが可能な手法は衝突合体法に限られている.しかしながら、衝突合体時のイオン加熱機構と磁気エネルギー増加機 構という重要な点が未解明のままであるため、C-2装置と同様に Field-Reversed Theta-Pinch 法で生成した FRC 衝突合 体実験を行うことで上記の機構を検証する.本研究では、FRC 性能評価に重要となる電子密度計測について報告する.

#### 2. 実験装置および計測原理

FAT (FRC Amplification via Translation)装置は、装置両端の FRC 生成領域と中央部分の衝突・閉じ込め領域で構成 されており、各領域はソレノイドコイルにより覆われた円筒状の真空容器となっている (Fig. 1). FRC 生成時には、立 ち上がり時間が数マイクロ秒の磁場が必要となるため、生成領域の真空容器は誘電体である石英が用いられている.生





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

成された FRC は磁気圧の勾配によってステンレス(SUS304) 製真空容器を持つ閉じ込め領域へ移送されるが,このと きの速度は磁化したプラズマ中のイオンを振動させるアルヴェン波よりも速い.このように FRC の移送・衝突過程は 非常に激しいため,急激な磁場の変化に対して磁束保存管としてはたらく導体製真空容器が磁束の損失を抑制し,その 結果 FRC 内部のプラズマ粒子を低減させる効果が期待される.なお,閉じ込め領域では FRC の配位が維持される時間 スケールと比較して近似的に定常とみなせる低周波磁場が印加されている.

FRC プラズマの密度を計測するために,発振波長 3.39 µm の He-Ne レーザーを用いたマッハツェンダー型干渉計を 製作し,閉じ込め領域に設置した.レーザー光はステンレス製真空容器に設けられた石英製窓から導入される.この干 渉計ではプラズマ内部を透過する探査光と大気中を通過した参照光との位相差の情報を干渉信号から取り出し,FRC 内部における電子密度の探査光上の線績分量が計測可能となる.

#### 3. 計測結果

FRC 衝突合体実験を実施する前に,片側の生 成領域のみを使用した FRC 移送を行った. Figure 2 (a) に,閉じ込め領域へ移送された FRC のセパラトリックス半径 (プラズマ半径) と線 積分電子密度の時間発展を示す.FRC は 110 km/sの速度で閉じ込め領域へ移送され,閉じ込 め領域端部のミラー磁場によって反射された後 に再び中央部分に戻る様子が確認できる.

Figure 2 (b) に示される線積分電子密度と Fig. 2 (a) のセパラトリックス半径から 50 µs 付近 における FRC の平均電子密度は 3×10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup> と粗 く見積もられ,この電子密度と体積平均ベータ 値と外部磁気圧の関係からプラズマ全温度を評価すると約 20 eV となる.さらにアルヴェン速 度は約 40 km/s となり,FRC の移送速度はアル ヴェン速度を超えることがわかる.

ミラー磁場による反射後に FRC が膨張して いると見られるが,線積分電子密度は減少して いる.この原因に関してセパラトリックス半径 評価に用いたピックアップコイルが装置軸に対



Figure 2. An FRC injected from a single CT formation section.(a) Profile of separatrix radius.(b) Line-integrated electron density.The dash line indicates axial position of probe laser light.

して平行にシフトした FRC による磁場出力の影響など考えられるが,詳細を検証するためには今後,例えば FRC プラズマからの制動放射光計測による FRC のシフト運動観測と磁場計測とを併用する必要がある.

### 4. まとめ

CT 衝突合体時に起こるとみられるイオン加熱や磁気エネルギー増加機構を検証する実験が,FAT 装置において進め られている. 片側の生成領域による FRC 移送を行い,レーザー干渉計による閉じ込め領域での FRC 電子密度を計測し た. このときに得られた電子密度からプラズマ全温度とアルヴェン速度を評価し,FRC が超アルヴェン速度で移送さ れることが確認された. レーザー干渉計による計測系が立ち上がったため,今後は衝突合体時の FRC 内部のイオン加 熱機構と磁気エネルギー増加機構に関する検証を進める.

#### 5. 参考文献

- [1] H. Y. Gui et el., Nature Communications 6, 6897 (2015).
- [2] A. L. Hoffman and J. T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993).
- [3] M. W. Binderbauer et el., Phys. Plasmas 22, 056110 (2015).