

## O-2

## 磁化プラズモイドの超音速・超アルヴェン速度衝突合体過程における磁場構造計測

### Magnetic field structure measurement in super sonic/Alfvénic velocity collisional merging process of magnetized plasmoids

○原島大輔<sup>1</sup>, 小林大地<sup>3</sup>, 渡邊達大<sup>2</sup>, 巽ありさ<sup>2</sup>, 染谷紘希<sup>1</sup>  
三浦圭介<sup>2</sup>, 山中拓人<sup>2</sup>, 高橋努<sup>4</sup>, 浅井朋彦<sup>4</sup>

Daisuke Harashima<sup>1</sup>, Daichi Kobayashi<sup>3</sup>, Tatsuhiro Watanabe<sup>2</sup>, Arisa Tatsumi<sup>2</sup>, Hiroki Someya<sup>1</sup>  
Keisuke Miura<sup>2</sup>, Takuto Yamanaka<sup>2</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>4</sup>, Tomohiko Asai<sup>5</sup>

Abstract: In a Field-Reversed Configuration (FRC) generated by collisional merging of plasmoids in the FAT-CM device, the relative velocity at the impact exceeds the ion sound and Alfvén velocities. Therefore, the FRC experiences “shock heating” due to the excited shock wave during and after collisional merging. In this work, an internal magnetic probe array was developed to measure the radial distribution of three-components of magnetic field across the cross-section of the device. This realizes direct measurement of the internal magnetic field structure and its time evolution in the vicinity of the collision surface. The observed magnetic structure has been compared with the electron density and bremsstrahlung profile.

#### 1. 研究背景・目的

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) は、装置中心軸に対し円筒対称な構造をしており、外部の開いた磁力線領域と、内部の閉じた磁力線領域によって配位が形成されている。この閉じた磁力線の最大の特徴は、プラズマ中を流れる自己電流がつくるポロイダル磁場のみで構成されていることである。ここで、開いた磁力線と閉じた磁力線のトポロジカルな境界をセパトトリクスと呼ぶ。このセパトトリクス内には磁気中性点 (磁気軸) があり、その外側と内側で磁場の向きが反転している。このような磁場構造のため FRC は、閉じ込め効率の指標である体積平均ベータ値 (≡プラズマ圧力/磁気圧) が内部の広い領域で極限的に高い値 ( $\langle\beta\rangle\sim 1$ ) を持つ特異的な配位である。また、プラズマと鎖交する構造物がない単連結構造をしており、装置中心軸方向への磁気圧差を利用した加速や衝突な

どの制御が可能である。

日本大学理工学部の FAT-CM 装置 (Figure 1) は中央断面に対して対称な構造であり、中央に金属製真空容器で構成された閉じ込め領域、そしてその両端に誘電体である石英ガラス製の真空放電管で構成された生成領域を持つ。そのため、両生成領域で逆磁場シータピンチ (Field-Reversed Theta Pinch : FRTP) 法によって生成されたプラズモイドを磁気圧差 (Figure 1) による加速で、イオン音速やアルヴェン速度を超える衝突速度で衝突・合体させることが可能である。また、合体生成後の FRC において、レーザー干渉計により観測された線積分電子密度の不連続な変化 (Figure 2) や衝突合体生成された FRC における磁束の大幅な増幅<sup>[1]</sup>が観測されている。これは衝撃波の励起及び、それによるプラズマ加熱を示唆している。

本研究では、3 方向の磁場成分の径方向分布を装置

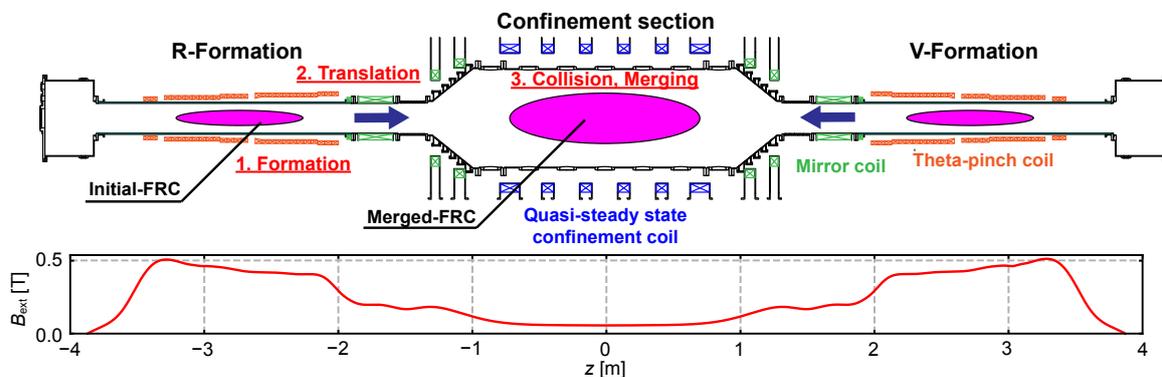


Figure 1. Schematic diagram of FAT-CM and axial profile of the external guide magnetic field.

横断面にわたり計測可能な磁気プローブアレイを新たに開発した。これを用いて衝突面付近の磁場構造およびその時間発展を直接計測し、電子密度や放射光分布との比較を試みる。

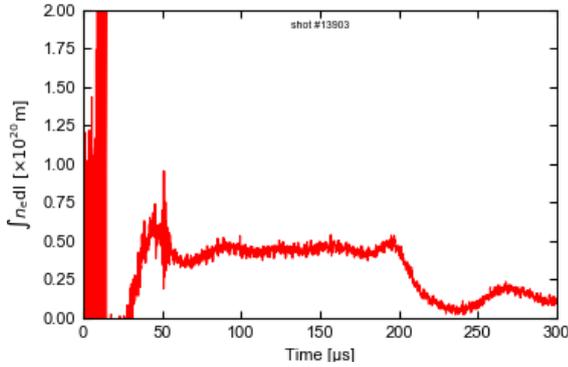


Figure 2. Typical time evolutions of line-integrated electron density at mid-plane.

## 2. 内部磁気プローブ

開発した内部磁気プローブは、3方向の磁場成分が計測できるように、各方向を向いた3つのチップインダクタ（村田製作所，LQW2UAS4R7J00L）を1組とし（Figure 3(a)）、計12組が断面半径方向に4 cm 間隔でプローブベース上に配置されている（Figure 3(b)）。この磁気プローブアレイを閉じ込め領域の衝突面付近に設置することで、径方向にわたって磁場構造を計測可能である。また、電磁ノイズをシールドするために、プローブベースはステンレス鋼製の管で被覆されており、その外側にプラズマと絶縁するためのBN製のジャケットを被せた。

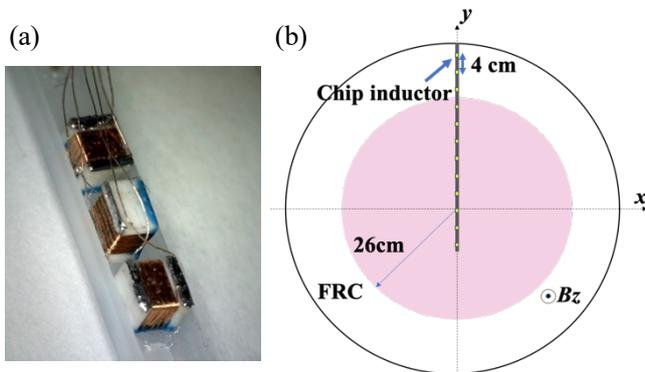


Figure 3. (a) A set of three axes chip inductor axially arranged on the probe base. (b) Illustration of a cross-sectional view of the installed probe in the mid-plane of the FAT-CM device.

FAT-CM 装置では、これまでに  $x$  方向と  $z$  方向の径方向磁場分布を内部磁気プローブで計測している。このプローブで計測した衝突面での磁場  $B_z$ （装置軸方向磁場）の径方向分布から、FRC 様の反転配位が形成されていることを明確に示す結果を得ている [1]（Figure 4）。

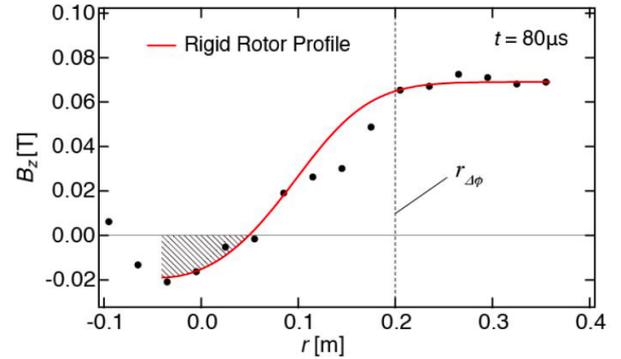


Figure 4. Position-shifted  $B_z$  radial profile of collisional merging FRC at a quiescent phase ( $t = 80 \mu\text{s}$ ). Hatched area indicates integration region to evaluate poloidal flux.

今回新たに開発した内部磁気プローブでは、上記の2方向に加え、 $y$  方向を合わせた3方向の磁場計測が可能である。そのため、衝撃波加熱に起因すると考えられている磁束の増幅等を含め、衝突合体時の磁場構造をより詳細に観測することができる。そして観測した磁場構造から磁気再結合などの局所的情報を得ることで衝撃波や周辺の構造の解明を目指す。

## 3. まとめと今後の展望

新たに内部磁気プローブを開発したことにより、3方向の磁場成分の同時計測を可能とし、再現性の乏しいFRCの超音速衝突時の局所磁場情報の観測を実現した。

この観測結果を電子密度や放射光分布など多視点における計測と比較することで、FRCの衝突合体時における衝撃波形成やその様相について考察する。

## 4. 謝辞

本研究は、日本大学理工学部プロジェクト研究助成金、JSPS 科研費 JP20H00143 および JP19K21868 の助成を受けたものである。

## 5. 参考文献

[1] T. Asai, et al., : “Collisional merging formation of a field-reversed configuration in the FAT-CM device”, *Nucl. Fusion* **59**, 056024(2019).