

衝突合体 FRC 生成法における衝突速度制御コイルの開発

Development of Acceleration Coils for Collision-Velocity Control in the Collisional-Merging Formation of FRCs

○牧野爽生¹, 武内志賢², 小林大地³, 高橋努³, 浅井朋彦³

*Akira Makino¹, Yukimasa Takeuchi², Daichi Kobayashi³, Tsutomu Takahashi³, Tomohiko Asai³

Abstract: Experiments on field-reversed configuration (FRC) formation using the collisional merging method have been conducted on the FRT-CM device at Nihon University. Based on these experiment results, a new experiment has been started to form FRC by injecting plasma into a Mirror field orthogonal to the injection axis. This experiment requires injecting plasmoids into collision beyond the magnetic pressure barrier created by the orthogonal magnetic field. Further acceleration of the plasmoid is required. The developed coil system for controlling the velocity of the plasma is reported.

1. 研究背景・目的

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) とは、トロイダル電流が生成するポロイダル磁場によってプラズマを閉じ込める磁場配位であり、閉じ込め磁場の利用効率が非常に高い (体積平均 β 値 $\langle \beta \rangle \approx 1$) という特徴を持つ。さらに、プラズマと鎖交する構造物を必要としないため、軸方向への移送が容易である^[1]。

日本大学理工学部の FAT-CM 装置^[2]では、逆磁場シータピンチ (Field-Reversed Theta-Pinch : FRTP) 法^[3]を用いて、磁場反転配位 (FRC) 様プラズモイドを生成し、その後 Figure 1 (a) に示す磁束密度による磁気圧差により両端からプラズモイドを磁束密度に沿って中央部へと加速・移送し、閉じ込め部において2つのプラズモイドを衝突合体させ新たなプラズモイドを再生成する軸対称衝突実験を行っている^[2]。また、Figure 1 (b) に示すような磁場勾配で加速・移送したプラズモイドを赤点線で示す入射軸に対して直交する磁場中へ入射し衝突合体する直交磁場入射衝突合体実験も進められている。両者の衝突合体実験を比較すると直交磁場入射では、赤点線で示す直交磁場の作る磁気圧障壁に打ち勝って入射するため衝突時の相対速度が減少することが分かっている。相対速度の減少は衝突合体後再生されるプラズモイドの性能に大きな影響を与える。

本研究では、軸方向入射磁場装置と同様の磁場勾配差を形成してプラズモイドを加速して直交磁場に入射することを目的として、開発している衝突速度制御コイルの設計・製作について報告する。開発した速度制御コイルを垂直入射装置にを組み込んだ際の概略図および典型的な B_z および B_x 分布を Figure 2 に示す。

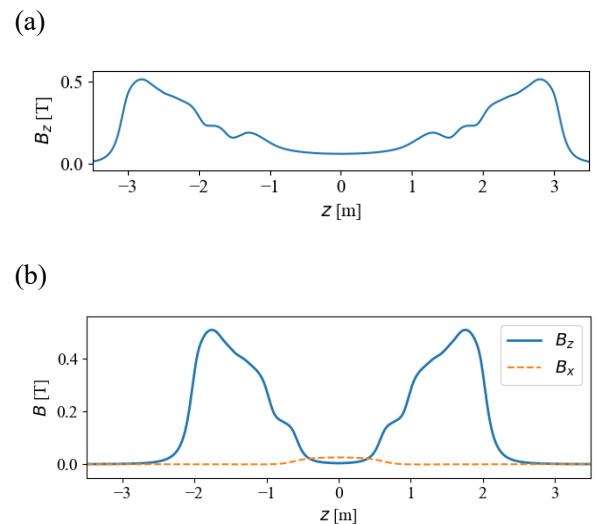


Figure 1. Magnetic flux density distribution for (a) axial collisional merging, and (b) orthogonal collisional merging.

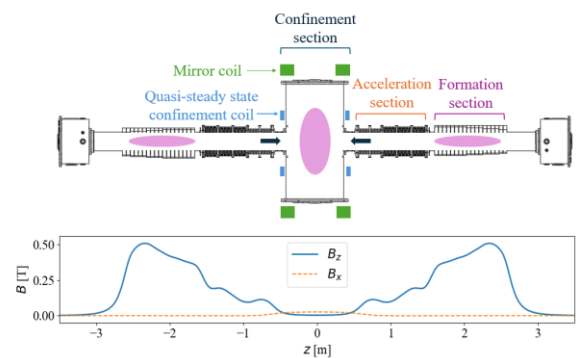


Figure 2. Schematic diagram of the FRC collision generation

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

2. 磁場計算について

磁場計算ではビオ・サバルの法則から円環電流ループの磁場の解を基礎として計算した。円形半径 r_c 、電流 I を流すループの軸上磁場 B_z は、次式より与えられる。

$$B_z = \frac{\mu_0 I r_c^2}{2(r_c^2 + z^2)^{3/2}} \quad (1)$$

ここでは μ_0 真空の透磁率、 z はループ中心からの軸方向距離である。(1)式より楕円積分を用いて複数ループからなるコイルは各ループの寄与を線形重ね合わせることで全体の磁場分布を数値的に計算した。

磁場計算におけるコイルの設定値として、シータピンチコイルの磁場最大値を 0.5 T、速度制御コイルおよびミラーコイルの電流値を 450 A、ヘルムホルツコイルの電流値を 100 A とした。生成部軸方向分布 (B_z) は青色実線、閉じ込め部の垂直磁場 (B_x) は赤点線で示した。それぞれは、 z 依存性の分布である (Figure 1 (a),(b), 2,3(b)の分布図)。

3. 速度制御コイルの設計

Figure 3 に示す加速コイルを設計・製作した。新たに製作した加速コイルは、両側の 2 つの側面コイルと中央部の 1 つの中央コイルから構成されており、各コイル間には軸方向の観測窓を 90 度毎、4 方向に追加してある。これにより、既存装置と比較して各コイル通過後のプラズマの移送速度やプラズマの半径や長さ等を、観測可能となる。

巻き数は、側面コイル(Side coil)で径方向 8 巻・軸方向 21 巻、中央コイル(Central coil)で径方向 8 巻・軸方

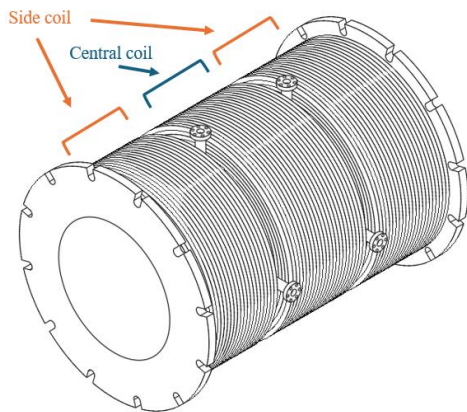
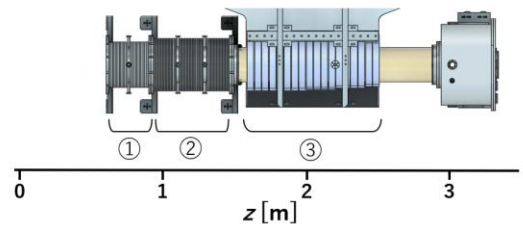


Figure 3. Schematic diagram of the Acceleration Coils

向 22 巻である。既存の既存のコイルと比べ、径方向巻き数は 4 巻から 8 巻に、軸方向巻き数は 34 巻から合計 65 巻へと増加したため、より強い磁場を形成することが可能となった。さらに、本コイルは径方向巻き数をそれぞれ独立に調整できるため、磁場分布を柔軟に制御可能であり、高い自由度を有する。

また、Figure 4 (a) では速度制御コイルを組み込んだ際の装置の生成部 V 側断面図である。②が新設された速度制御コイル、①は既存のコイル、③はシータピンチコイルである。Figure 2 (b) では加速コイルを導入した際の磁場分布の計算値である。

(a)



(b)

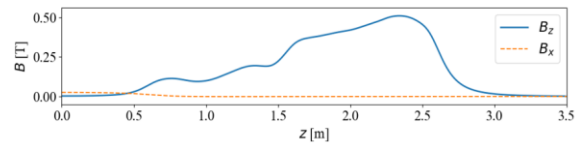


Figure 4. (a) Acceleration, New Acceleration, Formation coil and (b) Confinement field (red dashed)

4. 今後の展望

今後、速度制御コイル組み込み、磁束密度を詳細に磁気プローブにより計測を行い、計算値と比較する。速度制御コイル通過中の、プラズモイドの半径、移送速度を調べ、速度制御コイルの磁場分布との関係性を評価する。また、速度制御コイル中に加わる垂直磁場 (Figure 4 (b)の赤実線) が、プラズモイドの加速・移送に与える影響を定量的に評価する。これらの評価をもとに、垂直入射に最適な加速領域の磁場分布を明らかにする。

5. 参考文献

[1] M. Tuszewski: "Field reversed configurations", *Nuclear Fusion*, Vol.28, No.12, 1988
 [2] T. Asai *et al.*: "Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment", *Nuclear Fusion*, Vol.61,096032,2021.