

パルスコイルを用いた複数のプラズモイド生成と移送タイミング制御の検討

Control multiple plasmoids generation and timing of transferring by the pulse coil

○備後光貴¹, 小林大地², 浅井朋彦², 高橋努²*Mitsutaka Bingo¹, Daichi Kobayashi², Tomohiko Asai², Tsutomu Takahashi²

Abstract: A drastic amplification of magnetic flux has been observed in the collisional merging formation process of a field-reversed configuration (FRC). In this work, a one turn coil that can generate a pulsed magnetic field has been developed to control the magnetic reconnection in formation process of the initial-plasmoid. Hereinafter referred to a one turn coil as the assist coil. Applied pulse magnetic field generated by the assist coils may be possibility to tear the one plasmoid into two plasmoids. The FRC is formed by the collisional merging of the first set of plasmoids. Then, the second plasmoids may be injected into the pre-existing FRC.

1. 研究背景・目的

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) は、トロイダル方向に流れるプラズマ電流が形成する閉じた磁力線とその外部に開いた磁力線で構成されている。そのためプラズマの閉じ込め効率を示す体積平均ベータ値 (≡プラズマ圧力/磁気圧) が、トカマクなど他の磁場閉じ込め方式と比較して高い ($\langle\beta\rangle > 50\%$) 特徴を持つ。

日本大学理工学部の FAT-CM 装置では、対向する二つの生成部において逆磁場シータピンチ (Field-Reversed Theta Pinch : FRTP) 法で生成された磁化プラズモイドを磁気圧差により装置軸方向へ加速し、閉じ込め領域に移送、衝突合体させることで一つの FRC を生成する実験が行われている。これまでに磁化プラズモイドの衝突合体過程において、大幅な磁束増幅が観測されている^[1]。この磁束の増幅という結果は、衝突が起因となって起きている。そこで、衝突合体生成された FRC に対して、さらに FRC を衝突させる手法として、Fig. 1 に示す。まず、片側の生成領域において、二つのプラズモイドを生成、一つ目と二つ目のプラズ

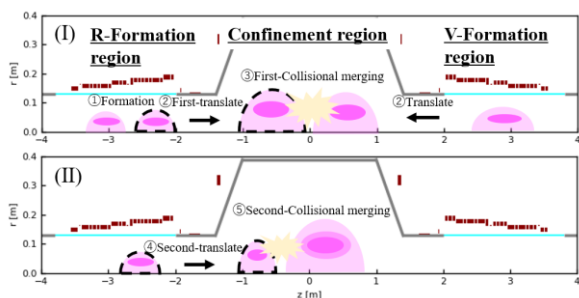


Figure 1. Schematic of multiple collisional merging of FRCs

モイドを移送を別々に行い、衝突合体させる方法を提案する。以降、この手法を「追衝突実験」と表現する。しかし、追衝突実験の重要な課題として、“二つのプラズモイドを生成する”、“移送タイミングを別々に行う”などの制御が重要な課題である。

本研究では、シータピンチコイル内に配置された別駆動のパルスコイル (アシストコイル) を用いて、上記の制御方法を確立することを目的とする。

2. アシストコイルによる能動的制御

アシストコイルは、二つのコイルが一组として構成され、逆向きの電流が流れるようになっている。

アシストコイルは、放電タイミングを調節することで、磁気再結合 (ノンテアリング再結合) 及び局所的な磁場勾配を制御することが可能である。ここで、アシストコイルを Fig. 2 のように配置した場合を考え、追衝突実験を行うために必要な制御について考える。

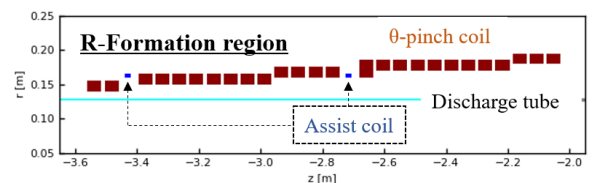


Figure 2. Axial arrangement of the assist coil and the theta pinch coil

(i) 二つのプラズモイドを生成する制御

二つのプラズモイドを形成する上で、生成時の磁気再結合 (ノンテアリング再結合) を制御することが必要である^[2]。

Fig. 3 に示すように、ノンテアリング再結合は、バイアス磁場中にカスプ磁場領域を形成しておき、バイアス磁場と逆向きの立ち上がりの早い磁場 (主圧縮磁

場)を印加した場合、カusp磁場領域で再結合が起こるものである^[3]。

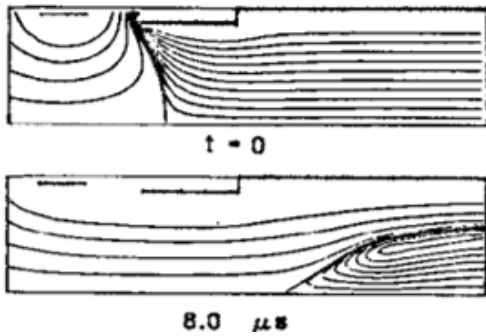


Figure 3. Schematic of non-tearing reconnection during FRC formation [3]

Fig. 4(a)は生成部におけるFRTP法の典型的な磁場波形を示す。ここで、 $t = 0$ は主圧縮磁場印加時とした。Fig. 4(b)に示した電流値は回路シミュレーションを用いて得た値であり、今回はその電流がアシストコイルに流れるものと仮定した。また、Fig. 4(c)に示すのは、シータピンチがつくる磁束関数分布とアシストコイルがつくる磁束関数分布を足し合わせた磁力線構造になる。Fig. 4(c)によれば、黒破線で示した領域でカusp磁場が形成されている。水色の線は石英の放電管を示す。これにより、本来一つで生成されるプラズモイドを分けて生成することが出来ると考えられる。

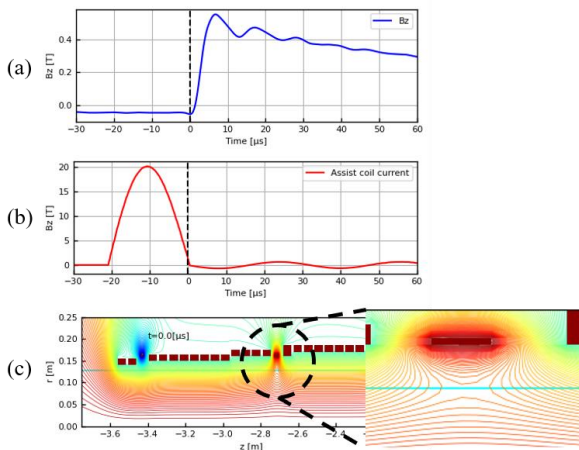


Figure 4. Time of evolution of (a) the typical magnetic field produced by the theta-pinch coil and (b) the assist coil current, and (c) contour map of computed magnetic flux function in formation

(ii) 移送タイミングを別々にする制御

移送タイミングを一つ目と二つ目のプラズモイドでずらすために、二つ目を一つ目が衝突合体するまで生成領域に留めておけるような磁場勾配を考える。例として、Fig. 5(i)に示すように、アシストコイルに電流を

流したとした時、ある時刻の磁場勾配の変化を Fig. 5(ii)に示す。黒破線は、アシストコイルを駆動せず、シータピンチコイルのみがつくる ($t = 4 \mu\text{s}$) 磁束密度分布である。また、赤線は、アシストコイルとシータピンチコイルがつくる ($t = 4 \mu\text{s}$) 磁束密度分布である。最後に、青線は、アシストコイルとシータピンチがつくる ($t = 10 \mu\text{s}$) 磁束密度分布である。以上より、 $t = 10 \mu\text{s}$ 前までは、赤線のように磁束密度分布が隆起し、FRCの移送速度が遅くなる、または、その場でとどまり、その後、勾配が形成され、移送されることが期待される。

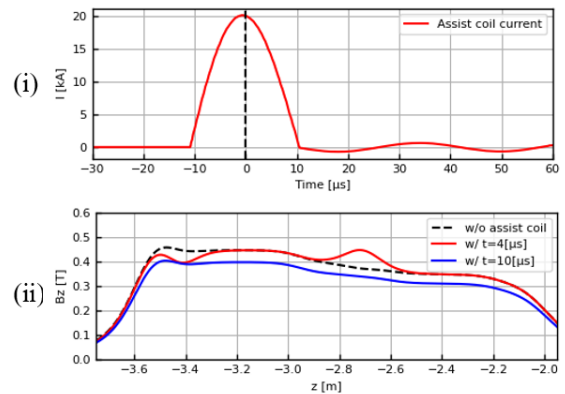


Figure 5. (i) Time of evolution of the current on the assist coil and (ii) the axial profile of external magnetic field controlled with the assist coil

3. まとめと今後の展望

アシストコイルを用いて磁気再結合や局所的な磁場勾配を制御することで、追衝突実験の重要な課題である、“二つのプラズモイドを生成する”、“移送タイミングを別々にする”の二つが制御できる可能性を示した。今後、アシストコイルを実際に駆動してすることで、上記の制御を行い、追衝突実験に向け、オペレーションの最適化などを旨す。

4. 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).
 [2] Y. Matsuzawa, et al., : “Effects of background neutral particles on a field-reversed configuration plasma in the translation process”, *Phys. Plasmas* **15**, 082504 (2008).
 [3] M. Tuszewski, et al., : “Axial dynamics in field-reversed theta pinches. I: Formation”, *Phys. Fluids B* **3**, 10 (1991).