

## アシストコイルによる磁気リコネクションの制御

## Control of magnetic reconnection by the assist coil

○石井里佳<sup>1</sup>, 松本匡史<sup>2</sup>, 高橋努<sup>3</sup>Rika Ishii<sup>1</sup>, Tadafumi Matsumoto<sup>2</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>3</sup>

A high temperature field-reversed configuration (FRC) plasmas will be produced on the NUCTE-III (Nihon University Compact Torus Experiment) device by collision and merging two high- $\beta$  compact toroids (CTs). To form two FRCs in the NUCTE device, several pairs of assist coil are installed inside the theta pinch coil at the formation region. Magnetic reconnection for the FRC formation and gradient of the magnetic field for the translation are controlled by each of assist coil current.

## 1. 磁場反転配位プラズマ

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) プラズマは, 閉じ込め磁場の大部分をトロイダル方向に流れるプラズマ電流が担う. そのため多くの磁場閉じ込め方式の中でも極端に高い平均ベータ値, すなわち閉じ込め効率の高さを有しており, 比較的高温( $T_i + T_e \sim$ 数百 eV)で高密度( $n_e \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )のプラズマが数 $\mu$ 秒の生成時間で得られる.

FRC プラズマは, 極めて高いベータ値に加え, コンパクトな幾何的構造などの工学的なメリットを併せ持ち, 中性子の発生の極めて少ない D-3He 核融合炉が成立し得る数少ない方式の一つでもある.

しかし, 配位に崩壊をもたらす巨視的不安定性を抑制する決定的な手法がなく, 閉じ込め性能の向上もなかった. また, 追加熱装置などの近接性が悪く, 実験研究の進展が阻まれていた.

最も重要な課題の1つがトロイダルモード数  $n = 2$  の交換型不安定性 (回転不安定性) の抑制である. FRC プラズマの特徴は単連結構造であり, FRC プラズマは準安定領域への移送が可能である. FRC プラズマを移送することにより交換型不安定性の抑制があるという報告がされた. これにより, 性能向上に加え, 多様な実験研究が可能となった.

## 2. プラズマ合体によるプラズマの再加熱

FRC プラズマの移送速度は秒速 1000km 超の移送速度を実現できており, ITER クラスのトカマクの中心部への粒子補給法としても応用が可能であるということが示されている. ターゲットとなるコンパクトトロイドが衝突を起こす場合, 磁気再結合によって失われる磁気エネルギーが熱エネルギーに変換さ

れる. プラズマ合体はアルフヴェン時間のオーダーで進行する速い現象であることから非常に高い加熱パワーが期待でき, 低温から高温へ短時間で移行させることができる.

## 3. 磁気再結合

磁場は,  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  より磁力線は, 途中で生成・分岐はしない. しかし, プラズマを介した時には磁力線が“つなぎ換わる”ことがある. FRC プラズマの生成においては, この磁気再結合が利用され, 開いた磁力線の中に高温プラズマを閉じ込める閉じた磁力線が形成される.

この時使われる磁気再結合は大きく分けて二種類ある. テアリングリコネクション (自発的磁気再結合) とノンテアリングリコネクション (強制磁気再結合) である. 以下に, 各磁気再結合についてまとめる.

## (i) テアリングリコネクション

自発的磁気再結合ともいい, プラズマの閉じ込め磁場のエネルギーに起因し, ミラーバイアス磁場によって誘導される. 磁場の不安定生により自発的に磁気再結合が起きる (Figure 1.参照). プラズマを介

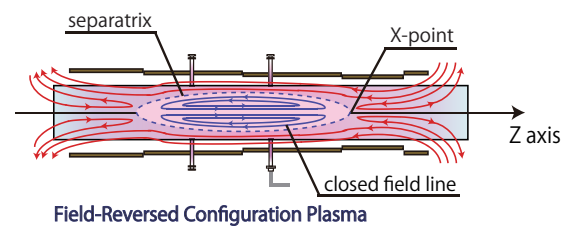


Figure 1. Tearing reconnection

して発生するため、再結合の完了までの時間が比較的長く、制御が難しい。逆磁場テータピンチ法は FRC プラズマ生成に用いられる最も典型的な生成法である。数アルヴェン時間の生成、 $\theta$  ピンチ放電による電子電流の駆動、磁気再結合による配位形成（磁場反転）とプラズマ加熱（経方向圧縮、軸方向収縮、衝撃波加熱）を同時に実現する。

(ii) ノンテアリングリコネクション

強制磁気再結合ともいい、プラズマを介さずに真空領域磁気再結合を発生させる。(Figure 2.参照) カスプバイアス磁場によって誘導される。再結合に要する時間が短く、制御も比較的容易である。

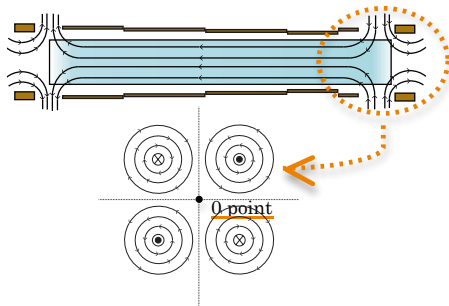


Figure 2. Non-tearing reconnection

4. アシストコイルの設計

プラズマ合体によりプラズマを再加熱するために、FRC プラズマの移送・衝突実験を計画中である。逆バイアス  $\theta$  ピンチ装置 NUCTE-III の生成部内に、同時に二つの FRC プラズマを生成し、それぞれ別々に移送し、閉じ領域内で衝突合体させる。(Figure 3.参照)

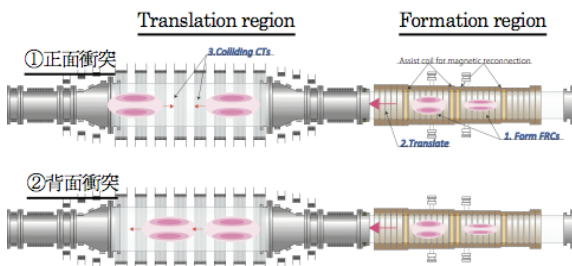


Figure 3. Schematic of colliding and merging

この際、 $\theta$  ピンチコイルの内部に数組の別駆動のアシストコイルを設置することにより、 $\theta$  ピンチコイル内

部の磁場を局所的に変化させてカスプ磁場を生成し、磁気再結合（ノンテアリング再結合）を引き起こしプラズマを 2 個生成し、アシストコイルで作られる磁場勾配によって移送される。

2 組のアシストコイル及び  $\theta$  ピンチコイルの配置を Figure 3. に示す。このような配置の磁力線様子を知らるために、真空の Grad-Shafranov 方程式を差分法を用いて解き磁束関数を求める。計算は先ず、テータピンチコイルのみが作る磁束関数を求める。次に、アシストコイルが作る磁束は、 $\theta$  ピンチコイルにはしみ込まないと仮定して磁束関数を求め、それぞれを加え合わせることで求める磁束関数とした。アシストコイルは、 $\theta$  ピンチコイルの作る磁束をキャンセルするためにそれぞれ逆向き電流が流れるコイルを一組としている。アシストコイルと  $\theta$  ピンチコイルの電流比を変えていくと、様々な磁場配位（カスプ磁場からミラ-磁場）を作ることができる。Figure 4. に、電流比を 1:-1.5 にした場合の等磁束面を示す。上流側のアシストコイル付近でカスプ磁場、下流側のアシストコイル付近でミラ-磁場を作れることがわかった。Figure 3. に示したように  $\theta$  ピンチコイル内にアシストコイルを 4 つ設置した場合のミラ-磁場からカスプ磁場へ変わる閾値を求めた。このとき  $\theta$  ピンチコイルの電流値に対する 2 組 4 個のアシストコイルの電流比は NUCTE-III の下流部側から -0.95:0.95:-1.38:1.38 である。

Figure 4. に示す磁場配位において、上流側でノンテアリングリコネクション、下流側でテアリングリコネクションを起こすことにより、FRC プラズマの生成が可能であると考えられる。Figure 3. に示した 2 組 4 個のアシストコイルを用いて、FRC プラズマの 2 個生成を試みる。そのために、現在  $\theta$  ピンチコイルとアシストコイルの形状、位置関係の最適化を行なっている。

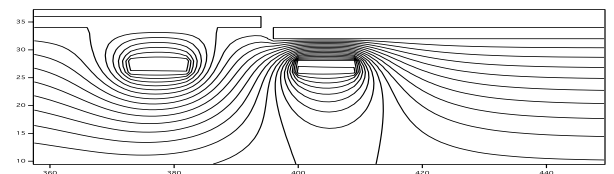


Figure 4. Cusp-bias magnetic field

5. 参考文献

[1] M. Tuszewski : “Axial dynamics in field-reversed theta pinches. I :Formation”, Phys. Fluids B, Vol.3, No.10