

FRC 制御過程における SOL プラズマの局所電位・イオン温度の測定方法の開発 Development of Methods for Measuring Plasma Potential and Ion Temperature in SOL Plasma During FRC Control Process

○竹内香貴¹, 菊池龍之介², 小林大地², 高橋努², 浅井朋彦²

*Koki Takeuchi¹, Ryunosuke Kikuchi², Daichi Kobayashi², Tsutomu Takahashi², Tomohiko Asai²

Abstract: Experiments on collisional merging of Field-Reversed Configurations (FRCs) are being conducted in FAT-CM device at Nihon University. The FRC shows rotational instability due to spin-up. One model of the spin-up mechanism is the short-circuiting of the electric field at the device's ends. The FAT-CM device suppresses electric field short-circuiting at the electrodes at the device ends. To evaluate the response of SOL plasma when controlling the FRC, a Ball-pen probe (BPP) capable of measuring plasma potential was developed.

1. 研究背景・目的

磁場閉じ込め方式の一つである磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) は, 閉じ込め効率を表す指標である体積平均ベータ値が極限的に高い ($\langle \beta \rangle \sim 1$) 特徴を持つ. Fig 1 に FRC プラズマの概要図を示す. FRC プラズマは閉じた磁力線領域と開いた磁力線領域によって配位が形成されており, その境界をセパトリクスと呼ぶ. また, 閉じた磁力線領域に存在するプラズマのことをコアプラズマ, 外部の開いた磁力線領域に存在するプラズマ層のことを SOL (Scrape-Off Layer) プラズマと呼ぶ. 日本大学の FAT-CM 装置^[1]では, 2つの FRC 様プラズマモードを生成し, 磁気勾配により Alfvén 速度を超えるまで加速し, 衝突・合体することで単一の FRC プラズマを生成する.

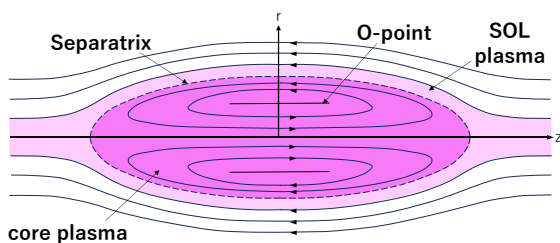


Fig 1. Schematic diagram of FRC

生成直後の FRC プラズマでは, 反磁性方向のスピニングが観測されている. このスピニングの遠心力によって FRC プラズマは楕円の長軸方向に向かって変形し, 配位維持時間が制限される. スピニングのメカニズムについて様々な理論モデル^[2-5]が提唱されており, その一つとして径方向電場の装置端部における短絡を原因とするモデルがある. SOL における電場形成は開いた磁力線に凍結するプラズマの温度や密度に

依存する. そのため, SOL 領域内で比較的高温かつ高密度なコアプラズマ近傍では電位が高く, 外側に向けて電場が形成される. 形成された径方向電場が装置端部に短絡することによって電位差がなくなり電流が流れ, その結果, 軸方向磁場とのローレンツ力により SOL プラズマが回転し, そのトルクが粘性によりコア領域にも伝わるというものである. FAT-CM 装置では装置端部に装置壁と絶縁された電極が設置されており, 部分的に電場短絡を抑制している. また, 電極に電圧を加えることによって, 電極に接触する磁力線に凍結したプラズマに電位の印加し, トロイダル方向へのスピニングの低減を行っている.

本研究では電場短絡を抑制した場合及び, 電極によって電位を印加した場合の SOL プラズマの応答を評価するため, ボールペンプローブ (Ball-pen probe : BPP) を開発し, 電子の密度や温度を測定できるラングミュアプローブ (Langmuir probe : LP) との同時計測を行うことで, SOL プラズマの電位や温度, 密度を直接的に測定する. 本発表では開発した BPP と既存の LP の比較実験を行い, BPP の性能評価を行う.

2. ボールペンプローブ^[6]

Fig 2 に開発したボールペンプローブの概要図を示す. プローブの先端には電極を覆うようにして窒化ホウ素 (BN : boron nitride) 製の遮蔽が設置されている. 電子とイオンは FRC の磁力線に凍結し, ラーモア運動をする. この凍結した粒子がプローブに到達した際に, ラーモア半径の差より電子は部分的に遮蔽され, イオンのみ電極に到達することとなる. そのため, 印加電圧に対するプラズマ電流の応答を示した電流-電圧特性は LP の電子飽和領域より小さく観測される. 電子

1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

飽和電流 I_e とイオン飽和電流 I_{ion} の大きさがほぼ等しい ($I_e \approx I_{ion}$) 理想的な BPP におけるプラズマポテンシャル V_p は (1) 式のような関係性を持つ。

$$V_f \approx V_p \quad (1)$$

したがって、フローティングポテンシャル V_f の測定により、プラズマ電位の評価が可能となる。実際には、 $I_e \approx I_{ion}$ の関係を示すことは難しいため、BPP の I_e と I_{ion} の比を補正する必要がある。これらの遮蔽および電極はプラズマに接触することを考慮して設計を行った。また、電極にはケーブルが接続されており、アルミナ管を通り大気中に引き出される。

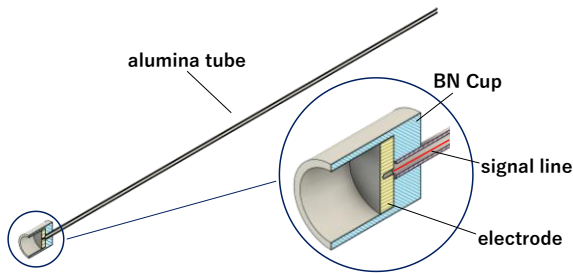


Fig 2. Schematic diagram of BPP

前述したように、電子とイオンのラーモア半径は BPP において重要な要素である。イオンのみを選択して電極に到達させるため、BPP の遮蔽の深さ h は、電子ラーモア半径 r_e より十分に大きく、イオンラーモア半径 r_{ion} より小さくなければならない (2)式)。また、電極の直径 r に関しても、イオンラーモア半径 r_{ion} と同程度かそれ以上が望ましい (3)式)。

$$r_e \ll h \leq r_{ion} \quad (2)$$

$$r_{ion} \lesssim r \quad (3)$$

ラーモア半径 r_L は(4)式のように表される。

$$r_L = \frac{mv}{eB} \quad (4)$$

m は粒子の質量、 v は粒子の移動速度、 B は磁束密度である。 v についてイオンの熱平均速度 $v = \sqrt{8k_B T / \pi m}$ を用いて、電子温度 T_e とイオン温度 T_{ion} が等しい場合の SOL 領域でのラーモア半径を Fig 3 に示す。Fig 3 より、プラズマの定常状態 ($50\mu s \sim$) における電子ラーモア半径、イオンラーモア半径は $r_e \approx$

0.05 cm , $r_{ion} \approx 3 \text{ cm}$ となった。理想的には電極の直径はイオンラーモア半径と同程度以上が望ましいが FAT-CM 装置の構造を踏まえて $r = 25 \text{ mm}$ とし、それに伴い電極の深さ ((2)式) を満たす $h = 20 \text{ mm}$ とした。

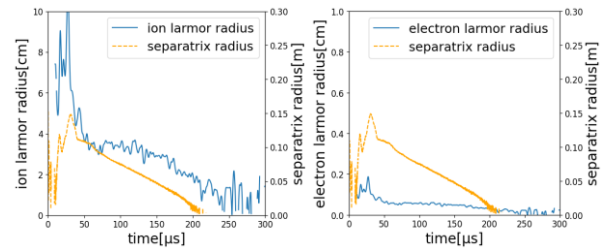


Fig 3. Time evolution of Larmor radius (left: ion, right: electron)

3. まとめ・今後の展望

プラズマ電位を計測できる BPP の製作を行った。今後は既存の LP との同時計測を行い、電流-電圧特性の比較をすることによって、BPP の性能を評価していく。その後、他の LP との併用によってプラズマ電位に加え、イオン温度や電子温度、電子密度を測定し、磁場短絡を抑制させた場合と電位を印加した場合の SOL プラズマへの影響を評価する。実験の際には、BPP の電子飽和電流とイオン飽和電流の比を求め、補正することによってプラズマ電位の評価を行う。

4. 参考文献

- [1] T. Asai *et al.*: "Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment", *Fusion*, Vol.61, 096032, 2021.
- [2] 大熊 康典, 「反転磁場配位プラズマの回転不安定性に及ぼす電場短絡効果の研究」日本大学大学院理工学研究科 博士論文, 1996
- [3] L. C. Steinhauer: "End-shortening and electric field in edge plasmas with application to field-reversed configurations", *Phys. Plasmas*, Vol.9, 3851, 2002
- [4] T. Takahashi *et al.*: "A New Explanation for Toroidal Spin-Up of a Field-Reversed Configuration" *J. Plasma Fusion Res.*, Vol.2, 008, 2007
- [5] Y. A. Omelchenko: "Formation, spin-up, and stability of field-reversed configurations" *Phys. Rev. E*, Vol.92, 023105, 2015
- [6] G. Grenfell *et al.*: "High-heat flux ball-pen probe head in ASDEX-Upgrade" *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.93, 023507, 2022