

磁気リコネクションにおけるイオンの静電加速・加熱現象の実験的検証

著者	澤田 明日香
学位授与年月日	2019-03-25
URL	http://hdl.handle.net/2261/00078777

磁気リコネクションにおける イオンの静電加速・加熱現象の実験的検証

学生証番号 47176090 氏名 澤田 明日香
(指導教員 小野 靖 教授)

Key Words : floating potential, magnetic reconnection, spherical tokamak

1 研究背景

1.1 核融合プラズマ

1.1.1 トカマク型磁場配位

核融合発電は温室効果ガスを排出せず、燃料源となる重水素が海中にほぼ無尽蔵に存在する事から、エネルギー問題の解決策の一つとして実現が期待されている。核融合反応を持続させるためには、燃料を一億度以上の高温下で高密度プラズマ状態にし、それを長時間維持する必要があるが、これを直接容器で閉じ込めることは困難であるため、磁場を用いた閉じ込め方式が提案されている。そのひとつにトカマク型磁場方式がある。トカマク型磁場配位はトロイダルコイルにより発生させたトロイダル磁場(TF:Toroidal Field)とプラズマ電流を流すことで発生させるポロイダル磁場(PF:Poloidal Field)を合わせたトーラス型の磁場でプラズマを閉じ込める。

1.1.2 球状トカマク(ST: Spherical Tokamak)

トカマクのうちアスペクト比が 2.0 以下のものを ST と呼ぶ。ST は小型で高い核融合出力が得られるという経済性に優れた特徴を持つ反面、装置中心付近の空間が制限されるため、プラズマを立ち上げるための CS(Center Solenoid)コイルの設置が困難という課題がある。CS コイルを使用しない立ち上げ方法の確立が必要となる。

1.2 磁気リコネクション現象

磁気リコネクション(以下リコネクション)とは、プラズマ中で磁力線がつながり変わる現象である。磁力線の交わる点を X 点と言う。リコネクションが起こるとき、プラズマは磁力線の動きに合わせて X 点に近づき、つながり変わった磁力線とともに加速されて出て行き、下流で粘性やショック等を介して加熱される。

1.2.1 ガイド磁場あり磁気リコネクション

ガイド磁場とは合体面に垂直なトロイダル方向の磁場の事である。核融合発電に用いられる核融合プラズマは、ガイド磁場を用いるものが一般的であるため、将来核融合炉に磁気リコネクション現象を応用するためにはガイド磁場存在下の磁気リコネクション現象を解明することが重要である。

2 目的

磁場閉じ込め方式の核融合プラズマには一般にガイド磁場が存在している。そのためリコネクション現象を核融合へ応用することを考えた場合、ガイド磁場ありリコネクションにおけるプラズマの振る舞いを理解することが必要となる。本研究ではより多くのエネルギーを得ているイオン[1]の挙動を解明すべく、イオンの加速・加熱の要因

- A) リコネクション電界による加速
- B) 合体面内の電界による加速

のうち B) に着目し、合体面内の電位分布がイオンの加速・加熱に与える影響を実験的に検証することを目的とした。

3 実験装置

3.1 プラズマ合体装置 TS-3,TS-6

本研究室のプラズマ合体装置 TS-3,TS-6 では、まず二つの ST を生成する。そして ST の生成に用いた PF コイルへ流す電流の向きを反転させることで二つの ST を中心に押し出して衝突させ合体させる。その際に起きる磁気リコネクション現象によるエネルギー変換を利用し、一つの高温な ST を生成する。これによって CS コイルを用いないプラズマの立ち上げが可能である。

4 計測系の開発

図 1 に示したように、作製した浮遊電位計測プローブアレイを用いてプラズマ中に浮遊した探針と真空容器(アース)との電位差を計測し、プラズマの浮遊電位分布を計測した。浮遊電位とは、プラズマ中に挿入した金属に流れ込む電子電流とイオン電流が釣り合う電位のことを指す。この浮遊電位 ϕ_f とプラズマ電位 ϕ_p との関係は(1)式で与えられる(T_e の単位は eV)。リコネクション時には X 点近傍でのみ電子温度が変化しており、その他の部分においては温度勾配は無視できる。よって電場は(2)式のように浮遊電位から求めることができる。

$$\phi_p = \phi_f + T_e \ln \sqrt{\frac{m_i}{4\pi m_e}} \quad (1)$$

$$E_p = -\nabla\phi_p \approx -\nabla\phi_f \quad (2)$$

図1に示した計測系は後に改良し、チャンネル数を5から21に、電位差計測用の差動プローブをオープンに変更し、より広範囲で詳細な計測が可能になった。

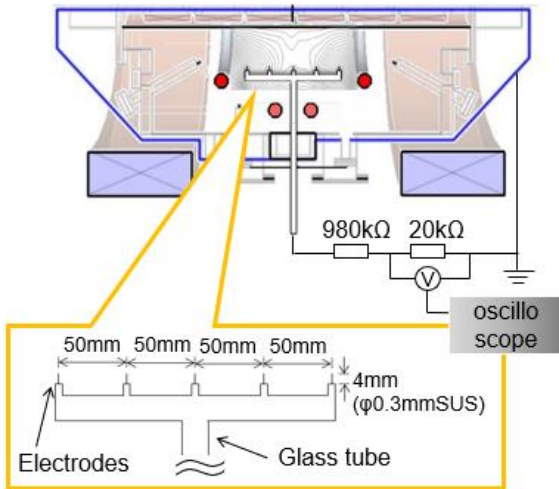


図1 浮遊電位計測系

5 結果・考察

プラズマの合体前後のイオンの温度上昇 ΔT_i は、再結合磁場（合体面内磁場）が増加すれば増加し、反対にガイド磁場が増加すれば減少しガイド磁場比（ガイド磁場/再結合磁場） >2.5 程度で飽和して一定となることが報告されている[2]。また ΔT_i は再結合磁場の二乗と比例の関係になることも実験結果として報告されている[3]。もしイオンの加熱が合体面内の電場によって支配的に引き起こされているとしたら、面内電場形成の大元である電位の分布構造にも ΔT_i と類似した傾向がみられるであろうと考え、再結合磁場、ガイド磁場に対する浮遊電位の最小値の依存性を調査した。また、プラズマ粒子が電場によって得るエネルギーの再結合磁場、ガイド磁場に対する依存性も調査した（図2）。

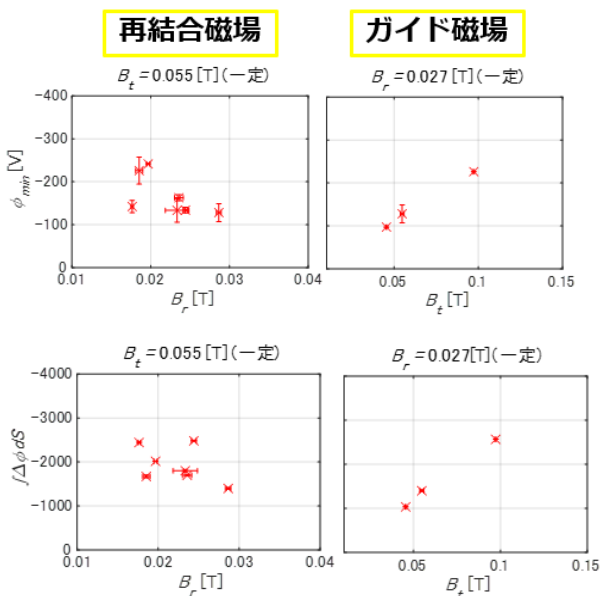


図2 再結合磁場、ガイド磁場に対する依存性

また、リコネクションのX点への流入速度（インフロー速度）において支配的なドリフト速度を、面内電場とガイド磁場から計算した結果、図3に示したようにガイド磁場と正の相関関係があると考えられる結果が得られた。このことから、ガイド磁場ありリコネクションにおいては、合体面内の電場がイオンの加熱に支配的に寄与していない可能性が示唆された。

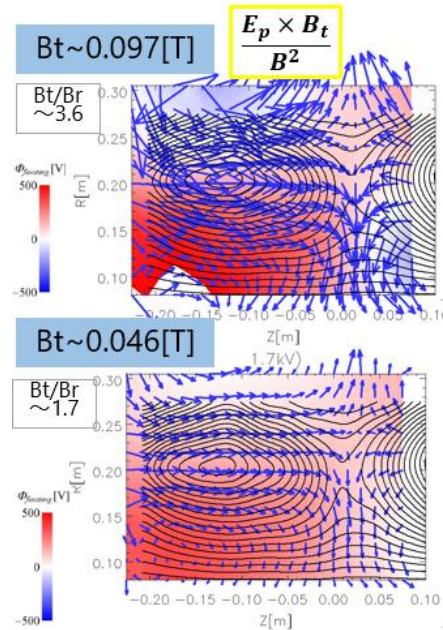


図3 合体面内電場とガイド磁場によるドリフト速度のガイド磁場依存性

6 まとめ

プラズマ合体装置 TS-3, TS-6 を用いて、ガイド磁場あり磁気リコネクションのイオン静電加速・加熱機構の解明に向けて浮遊電位計測実験を行った。合体面内の電場はイン・アウトフロー速度に対して影響を及ぼしているが、イオン加熱の支配的要因ではない可能性が示唆された。これはガイド磁場なし磁気リコネクションの実験結果[1]とは異なる結果であったため、加熱のメカニズムが異なることが予想される。

参考文献

- [1] M. Yamada, J. Yoo, et al., "Study of energy conversion and partitioning in the magnetic reconnection layer of laboratory plasma", Physics of Plasma, Vol.22, No.056501, 2015.
- [2] H. Tanabe, Q. Cao, et al., "Investigation of fine structure formation of guide field reconnection during merging plasma startup of spherical tokamak in TS-3U", IAEA-CN-EX/P3-22, 2019.
- [3] Y. Ono, H. Tanabe, et al., "High power heating of magnetic reconnection in merging tokamak experiments", Physics of Plasmas, Vol.22, No.055708, 2015.