

# 博士論文(要約)

中性粒子ビーム入射と磁気リコネクションの高  
出力加熱を用いた超高ベータトーラスプラズ  
マの生成と維持

平成 25年12月2日提出

指導教員 小野 靖 教授

東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻

学籍番号 37-117070

伊井 亨

中性粒子ビーム入射 (NBI) と磁気リコネクションの高出力加熱を用いて超高ベータトーラスプラズマである磁場反転配位 (FRC) や球状トカマク (ST) を生成・維持することを目的として、磁気リコネクションの高速化機構の実験的検証、NBIの開発とFRCへの入射実験、および超高ベータSTの生成実験を行った。リコネクションによるイオン加熱が最も期待される異極性合体により高ベータなFRCを生成し、それをNBIによる加熱効果や高エネルギー粒子の安定化効果を利用した維持を行い、さらに良好な閉じ込め性能を有するSTへの合体後の急速緩和を実験的に示したことで、将来の経済的な核融合炉に必要な高ベータプラズマの立ち上げ手法の基礎を提案した。

まず、TS-4トーラスプラズマ合体実験において電流シートの3次元構造を直接計測することにより、高速化機構として考えられる3次元磁気リコネクションを調査した。磁気リコネクションは定常2次元モデルで考えられてきたが、現実のリコネクションは3次元構造を持つため、電流シートの3次元構造とリコネクションの関係特に高速化との関係の理解は重要な研究課題である。また速いリコネクションは効率的な加熱に結び付くと考えられる。実験的検証を行った結果、リコネクションを外部から強く駆動することによって、リコネクションの間、電流シートのトロイダル非対称性が大きくなった。電流シートの自発的な3次元変形がリコネクション電場やリコネクション・アウトフローを増加させていると考えられる。それは電流シートがイオンラーマー半径以下の厚さまで局所的に圧縮されると考えられるからである。従って、3次元リコネクションはリコネクションの高速化機構の1つであるといえる。

プラズマの乱流や微視的不安定性による異常抵抗による磁気リコネクションの高速化の他に、MHDモデルを拡張した2流体モデルから導かれるホール効果によるリコネクションの高速化が、無衝突領域のプラズマに対して特に重要である。また、リコネクション速度とガイド磁場の関係についても、合体加熱を想定した場合に明らかにすべきことである。そこで、MRX装置での実験室プラズマ実験において、ガイド磁場がホール磁気リコネクションに与える影響を調べた。ヌル・ヘリシティの状態から段々ガイド磁場を加えていくスキャン実験において、ホール効果が減衰することと下流領域でのガイド磁場パイルアップによってリコネクション速度が減少することが分かった。また四重極磁場構造が非対称的に崩れ、ポテンシャル分布も非対称的に変形し、イオンを静電加速するポテンシャルの井戸の深さが減少し、それに伴ってリコネクションフローが減少した。リコネクションフローの減少によって下流領域でのイオン加熱も小さくなった。

次に、高ベータプラズマ実験用の低エネルギーで大電流のパルス型NBI装置を開発し、プラズマ源にワッシャーガンを新規に採用することで実現した。ワッシャーガンの採用により、経済性のあるメンテナンスフリーのイオンビームを提供し、従来用いられてきたフィラメントと水冷システムを取り除くことができた。ワッシャーガンにより生成されたプラズマは約5 eVの電子温度と $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ のピーク電子密度であり、イオンビーム引き出しに適したものである。引き出されたビーム電流の加速電圧に対する依存性は空

間電荷制限電流にほぼ一致し、約8 kV以下では加速電圧の $3/2$ 乗にほぼ比例することが分かっている。そしてプラズマ生成を最適化することによって、ビーム電流40 A、ビームエネルギー15 keV、そしてパルス幅が0.25 msを超えるビームの引き出しが達成された。その低エネルギーで大電流のパルスビームは低い閉じ込め磁場で特徴付けられる高ベータなコンパクトトラスプラズマへの入射を可能にするものである。

開発した低エネルギーで大電流のNBIをオブレートFRCに初めて適用した。NBの高速イオンによってオブレートFRCにおいて危険な低 $n$ のトロイダルモードの成長率を減少させ、FRCプラズマの寿命を改善した。FRCにおいて、NBIにより減った5 MWの損失パワーはNBIのパワー0.5 MWよりも非常に大きいので、NBIはFRCプラズマを加熱するだけでなく、安定性や閉じ込めも改善しているといえる。NBIはまたFRCの高い圧力分布と電流密度分布を維持し、磁束やエネルギーの減衰時定数を2倍に改善した。OHコイルによる長時間維持を試みた実験においては、OHコイルにより磁束が供給されている間、NBIと組み合わせることによって、プラズマの磁束や電流は比較的一定に保たれ、エネルギー減衰が非常に低くなっていることが分かった。

最後に、オブレートFRCやスフェロマックから超高ベータなSTを形成する実験を行った。FRCから高速立ち上げモードでSTを形成した場合、反磁性なトロイダル磁場分布を示し、絶対極小磁場配位が形成されていることが分かった。このときベータ値は体積平均ベータが約50%、トロイダルベータが約100%、ポロイダルベータが約100%、規格化ベータが約20という超高ベータ状態が約50  $\mu$ s間維持された。またスフェロマックから高速立ち上げモードでSTを形成した場合は、体積平均ベータが約30%、トロイダルベータが約50%、ポロイダルベータが約30%、規格化ベータが約10というFRCから形成されたSTよりは低い十分に高ベータな状態がより長く約100  $\mu$ s間維持された。外部トロイダル磁場の印加により、低次トロイダルモードの成長が抑制され、プラズマのエネルギー減衰が改善した。

実験で得られた高ベータSTのMHD平衡をMEUDASコードを用いて再構成し、バルーニング安定性解析を行ったところ、スフェロマックから高速立ち上げモードでSTを形成した場合、わずかにバルーニング不安定な領域があるものの、圧力勾配の強いプラズマ端では安定であった。一方、FRCから高速立ち上げモードでSTを形成した場合には、リコネクション加熱由来と思われる磁気軸付近の強い圧力勾配により、バルーニング安定限界を超えている。バルーニングモード由来と考えられる磁場揺動を直接計測する実験を行ったところ、FRCから高速立ち上げモードでSTを形成した場合に最大約1 mTの振幅のコヒーレントな波が発生し、スフェロマックから高速立ち上げモードでSTを形成した場合のその振幅よりも大きいことが分かった。

以上まとめとして、磁気リコネクションによる加熱を最大限利用したプラズマ合体によるFRCの生成を開発したNBIで安定維持し、また外部トロイダル磁場を急速印加することで超高ベータで閉じ込めの良いSTを生成することができた。磁気リコネクション加熱

の核融合炉への工学的応用を示しただけでなく、電流シートの構造を詳細に計測することによって、3次元構造やホール効果などの高速化機構を明らかにし、現実で起きるリコネクションの理解により近づいた。また、合体加熱を用いて生成された高ベータ配位に特化した低エネルギー・大電流の経済的なNBI装置を開発し、合体加熱後の高ベータFRCに対して、閉じ込め性能を高める外部トロイダル磁場を急速印加し、高ベータの特徴を活かしたままSTを安定維持する手法は、経済的な核融合炉に必要な高ベータプラズマの立ち上げに取り入れることが可能であると考えられる。