

審査の結果の要旨

氏名 伊井 亨

本論文は「**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**」と題し、日米のリコネクション実験設備を用いてプラズマ合体法による磁気リコネクションの高出力加熱機構を解明して、超高ベータ球状トカマク(ST)を生成し、さらに高出力中性粒子ビーム入射(NBI)を自主開発して、それを安定維持することに成功した。2次元性を暗黙に仮定した磁気リコネクションについて3次元高速化機構や高ガイド磁場のホール効果を実験的に取り上げるのは初めてであり、初めてワッシャーガンを用いて成功した高出力NBIの開発、さらに磁気リコネクションとNBIを組み合わせた初めての超高ベータSTの生成と安定的維持を行っている。

第1章は、「序論」であり、研究の背景となった磁気リコネクション研究や高ベータ核融合研究を解説している。磁気リコネクション高速化=加熱の重要性を述べた後、核融合プラズマを急速加熱する反面、熱エネルギーの損失を引き起こして善玉にも悪玉にもなる同現象が全ての磁気プラズマの構造形成と加熱の解明に必要不可欠であり、2次元性を暗黙に仮定した従来の磁気リコネクションの解釈を現実に合わせて3次元に拡張することが現象解明の飛躍につながることを述べている。

第2章は、「実験装置・計測系」と題し、東京大学トーラスプラズマ合体実験TS-4実験装置と米国プリンストン大学MRX装置の詳細が述べられており、トーラスプラズマ合体法による磁気リコネクション実験手法をまとめるとともに、現状解明の鍵となる2次元計測として、磁気プローブ計測、イオンドップラー・トモグラフィー計測、CO₂レーザ干渉計測、静電プローブ計測による、それぞれ磁界、イオン温度、電子密度、電子温度の計測について述べている。

第3章は、「磁気リコネクションの高速化機構」と題し、TS-4実験装置内のトロイダル対称性を確保した2つのコイルによって2つのトーラスプラズマを生成して合体させて、磁気リコネクションを発生させ、外部からのインフローの駆動およびガイド(トロイダル磁場)の加減が電流シートの3次元性とリコネクション速度へ与える影響を3次元計測によって明らかにしている。その結果、インフローが大きいと電流シートに3次元性が発生して、リコネクション速度が高速化し、高出力加熱が得られることを明らかにした。また、プリンス

トン大学 MRX 装置を使ったホール領域の磁気リコネクション研究も高ガイド磁場下で初めて行い、さらにリコネクション高速化はアウトフロー速度の増加を通じてプラズマ急速加熱につながることを証明した。

第 4 章 は、「中性粒子ビーム入射装置の開発」と題し、初めてワッシャーガンを用いたプラズマ源を採用して、初めてコンパクトで大電流、高出力、かつメンテナンスフリーの中性粒子ビーム NBI の開発に成功した。これは市販の大型 NBI 装置にワッシャーガンが採用されるさきがけとなった。

第 5 章 は、「高ベータプラズマ配位への中性粒子ビーム入射実験」と題し、合体生成した高ベータ FRC や超高ベータ球状トカマクに開発した高出力中性粒子ビームを入射すると、プラズマの減衰が大きく改善されることを見出している。NBI の加熱パワーを大きく上回る改善は、高速ビームイオンによる高ベータプラズマの安定化に起因することが明らかになった。

第 6 章は、「超高ベータ球状トカマクの生成実験」と題し、これまでの研究を全て組み合わせて、低ガイド磁場のスフェロマックの異極性プラズマ合体によって 3 次元リコネクションを含む高速リコネクションを発生して、大きなプラズマ加熱を得て、超高ベータの FRC を生成した後に、後からトロイダル磁場を印加して第二安定状態の超高ベータ球状トカマクをはじめて生成し、更に開発した高出力 NBI によって超高ベータ状態を数十アルペーン時間維持することに成功した。

第 7 章は、「結論」で成果を整理し、まとめている。

以上要するに、本研究は、磁気リコネクションの高出力加熱が 3 次元リコネクションの高速化に起因することを初めて見出し、それを核融合プラズマに応用して、高ベータ FRC を生成し、トロイダル磁場を後から印加してさらに良好な閉じ込め性能を有する超高ベータ ST へ変換した。さらに初めてワッシャーガンの採用することで高出力が得られた NBI で高ベータ状態を安定化する技術を開発し、得られた FRC や超高ベータ ST の安定維持を実験的に実証した。これは、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物理を実証したものであり、実際に本人も参加した英国の MAST 装置で超大型磁気リコネクション急速加熱実験が行われる先駆けとなった研究といえ、プラズマ理工学、核融合工学、太陽物理学、電気電子工学への貢献は大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。