

核融合炉開発を中心的課題として大きく発展したプラズマ物理学では、主として準中性高温 プラズマの発生・閉じ込めに関する諸問題が研究されてきた。しかし近年では、電離した準中性のガスという従来のプラズマの定義が拡張され、様々な多体系における集団現象を扱う科学として発展している。なかでも、準中性条件のもとでは現れないさまざまな物理現象が、非中性プラズマの研究により明らかになりつつある。本論文は、トロイダル磁気シヤー系という、これまでに例がない新たな磁場配位の非中性プラズマを生成する方法を開発した研究成果をまとめたものである。

第1章は緒論にあてられている。非中性プラズマ物理の基礎的事項および応用について総論が述べられている。トーラス系非中性プラズマ生成法の特徴を、ガス電離による準中性プラズマ生成法や、従来型の直線系における非中性プラズマ生成法と比較しつつ、課題を整理している。トロイダル系における非中性プラズマ生成法の重要な課題は、プラズマ閉じ込め領域の外で生成された荷電粒子が磁場を横切って入射されなければならないことである。このために、粒子運動のカオスを利用するという着想が述べられている。

第2章では、トロイダル非中性プラズマ閉じ込め体系として開発した、内部導体系の装置の概要が説明されている。電子ビーム入射実験や、電子プラズマ生成実験のために、静電プローブ計測器、粒子エネルギー分析器を作製しており、その仕組みが説明されている。また、高密度トロイダル電子プラズマ生成実験（第4章）のために製作した、LaB6 製カソードを用いた電子銃について、構造や性能が記述されている。

第3章では、粒子軌道のカオスを用いた粒子入射法の検討と実験的検証の結果が記述されている。トーラス系の磁場ヌル点近傍から閉じた磁気面領域（セパトトリックス内側）へ入射するカオティックな軌道が存在することが、数値軌道計算により示されている。2 keV のエネルギーで電子を入射する場合（磁場を 100 G 程度とする）閉じ込め領域に数 μ 秒の滞在時間をもつことが軌道計算により予測されている。磁場ヌル点近傍において、電子の滞在時間は入射条件（初期条件）に強く依存しており、非一様磁場中で磁気モーメントの保存が破られて起こる粒子運動のカオスの特徴が示されている。続いて、数値計算により最適化された入射法の検証実験の結果が示されている。カオス軌道を描くときの入射条件を用いることにより、電子銃を閉じ込め領域の外側に設置し、電子ビームを閉じ込め領域へ連続的に入射することに成功している。電子銃を磁場ヌル点近傍に設置した場合、電子銃自身へ回帰して失われる電流は、閉じ込め領域の内側から入射した時の2%以下に減少する。そのほか、実験と軌道計算の結果を綿密に比較し、入射特性は軌道計算によって十分な精度で予測できると結論している。

第4章では、電子銃の大電流化により、高密度の電子プラズマの生成に成功したことが述べられている。得られた電子プラズマの空間電位は、電子の初期加速エネルギーが 1.5 keV のとき、最大約 700 V 程度であった。静電プローブ測定によって、閉じ込められた電子は複数の速度成分をもつことが示されている。主要な成分の電子温度は 100~200 eV 程度である。自己電場によるドリフトの効果を考慮し、またビーム成分による電流値の増加を考慮すると、閉じ込められた電子の密度は 10^{14} m^{-3} 程度となり、円柱プラズマ近似により計算されるブリルアン電子密度に近い高密度電子プラズマが生成されたとしている。また、内部導体に近い領域において、電子銃の加速エネルギーを超えるような高エネルギーの電子が存在することが確認されている。ディレクショナルプローブにより流速を測定し、流れの向きもドリフトの向きにほぼ一致している。ファラデーカップ、ダブルプローブによる測定により、イオン密度は電子密度の 1/100 以下であることが見積もられている。

第5章は、本論文のまとめにあてている。

以上を要するに、本研究は荷電粒子の軌道計算に基づき電子ビーム入射の最適化を行い、トロイダル非中性プラズマを生成するための高効率トラップを実証したものである。この成果は、反物質等の高エネルギー荷電粒子のトラップや、高速流をもつ高性能核融合プラズマ閉じ込めなどに応用される可能性をもつものであり、システム量子工学、とくにプラズマ理工学の発展に貢献するところが大きい。

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。