

論文審査の結果の要旨

氏名 矢野 善久

惑星などの天体がもつ磁気圏において1に近いベータ値（プラズマの熱エネルギーと磁場エネルギーの比）をもつプラズマが衛星探査により確認され注目を集めている。ベータ値はプラズマを閉じ込めるための磁場の利用効率を示しており、将来の核融合エネルギーにおける経済性を評価する指標となる。現在最も研究開発が進んでいるトカマク型のプラズマ閉じ込めでは、ベータ値は0.1程度であり、経済性を高められない原因の一つとなっている。さらに、D-³He や D-D 核融合反応を利用する先進核融合のためには、10億度を超える超高温プラズマを安定に閉じ込める必要があるが、この場合1に近い高ベータ値をもたないとシンクロトロン放射のために必要な温度に達することが不可能とされる。磁気圏の超高ベータプラズマは、トカマクを超える未来の核融合の可能性を示唆するものとして、その原理の解明と実験的検証が期待されている。

本論文は、磁気圏と同じ磁場構造をもつ Ring Trap-1 (RT-1) 実験装置において行われた装置開発と高ベータプラズマ実験の成果を報告したものである。RT-1 実験装置は、超伝導マグネットを真空容器内部に磁気浮上させることで、閉じ込め領域中にマグネット支持構造物の無い磁場配位を実現してプラズマ閉じ込めを行うことが可能である。本研究は、超伝導マグネットの磁気浮上制御の最適化、その結果としてプラズマ性能の改善、さらに磁場計測によるプラズマ内部構造の解析とベータ値の評価を行ったものである。論文は七つの章から構成され、各章は以下の内容を記述している。

第一章は序論にあてられ、本研究の背景として磁場閉じ込めプラズマによる核融合研究の概論やベータ値の概念などを述べている。

第二章では、本研究の対象である磁気圏型プラズマの特徴や基本的な原理、また超伝導マグネットを用いる他の方式の紹介を行った後に、RT-1 実験装置の概要を説明している。

第三章では、RT-1 実験装置における超伝導マグネット磁気浮上系の最適化研究について述べている。内部導体型の装置におけるプラズマ閉じ込めでは、内部導体を磁気浮上することにより各種構造物を閉じ込め領域から排除でき、大きく閉じ込め性能が向上することが知られている。しかし、ダイポール磁場マグネットを磁気浮上させると位置不安定であるために、マグネットを吊り上げる外部コイルの電流を帰還制御する必要がある。マグネット安定性と帰還制御電流による揺動を低減するために、制御システム全体の解析と実験との比較を通じて信頼性のある浮上系を構築することが重要である。実験結果と一致する伝達関数モデルを構築して、制御パラメータの安定領域を導出し、その領域内にてシステムの応答を実験的に取得し制御パラメータの最適化を行っている。また地磁気による誤差磁場の低減を行うことでプラズマの閉じ込め改善を確認している。

第四章では、RT-1 実験装置において電子共鳴加熱 (ECRH) によって得られた高ベータプラズマの特性について説明している。ECRH 用のマイクロ波 (周波数 2.45GHz および 8.2GHz の 2 系統を有する) のパワー、封入する中性粒子のガス圧によってプラズマの特性がどのように変化するかをまとめている。高ベータプラズマにおいては 10keV 以上の高温電子の存在が確認されており、条件の最適化により最大で 4.0mWb の反磁性信号を観測している。

第五章では、反磁性信号から内部の圧力分布やベータ値を評価するために開発したプラズマ平衡計

算コードについて述べている。プラズマ中の圧力分布を幾つかの関数でモデル化して平衡磁場分布を計算し、これと実験で観測された反磁性信号を比較してプラズマ中のベータ値を推定している。プラズマの近くで計測した反磁性磁束と局所最大ベータ値の換算係数の最低値は約 120[1/Wb]であり、典型的な観測値 4mWb に対応するプラズマのベータ値は 0.5 以上であると結論している。またプラズマ圧力の非等方性や高ベータ化による磁気面の大きな変形を十分考慮したモデルについても検討し、それらの場合には換算係数がより大きくなることから、局所ベータ値が 0.5 を超えているという結論を補強している。

第六章では、プラズマ内部の圧力分布を実験的に推定するためにプラズマ内外の磁場分布を計測した結果について述べている。プラズマの反磁性電流は圧力勾配によって駆動されるために圧力分布に大きく依存する。ホール素子を用いた多点同時計測が可能な磁気プローブを開発し、これを比較的低温・低ベータのプラズマに挿入して内部磁場分布を計測している。また、高ベータプラズマにはプローブを挿入できないため、プラズマの真下の位置で多点計測を行って、内部構造を推定している。これらの計測によって、圧力分布が実験条件(ECRH 周波数、パワー、ガス圧)に応じて変化することを明らかにしている。反磁性信号が 4.0mWb に達する超高ベータプラズマの場合は、圧力分布のピークが $R=0.60\text{m}$ 付近にあると推定され、その局所ベータ値は少なくとも 0.7 以上であると結論付けている。

第七章では、実験結果をまとめ、磁気圏型プラズマ閉じ込めの今後の発展について展望している。

以上を要するに、本論文は磁気圏型プラズマ閉じ込め装置 RT-1 の磁場発生システムの最適化、高精度化によって、安定な超高ベータプラズマの閉じ込めを実証した実験研究の成果を記述したものであり、その研究成果は磁気圏プラズマ物理および磁気圏型配位を利用した先進核融合エネルギーの実現のための基礎として重要であることから、先端エネルギー工学、特にプラズマ物理学に資するところが大きい。

なお、本論文の第三章、第四章および第六章の成果は、吉田善章、小川雄一、森川惇二、齋藤晴彦、林裕之、水島龍徳の各氏との共同研究によるものであり、第五章は吉田善章、古川勝の各氏との共同研究によるものであるが、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(科学)の学位を授与できると認める。