

|         |                                                                                              |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名     | すず 木 康 浩                                                                                     |
| 学位の種類   | 博 士 (エネルギー科学)                                                                                |
| 学位記番号   | エネ博第 75 号                                                                                    |
| 学位授与の日付 | 平成 15 年 7 月 23 日                                                                             |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当                                                                             |
| 研究科・専攻  | エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻                                                                       |
| 学位論文題目  | Free-Boundary MHD Equilibria of Non-Axisymmetric Torus Plasmas<br>(非軸対称トーラスプラズマの自由境界 MHD 平衡) |

論文調査委員 (主 査) 教授 近 藤 克 己 教授 佐 野 史 道 教授 前 川 孝

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、境界条件や現実の実験条件に即した計算方法に問題が残されている非軸対称トーラスプラズマの電磁流体力学 (MHD) 平衡解析について、その計算手法を開発・改良するとともに、非軸対称 MHD 平衡に関する新たな知見を得ることを目的として、リップル磁場を含むトカマクとヘリカル系プラズマの非軸対称性が MHD 平衡に与える影響をまとめたものであり、6 章からなる。

第 1 章は序論で、研究の背景と目的を論じた後、第 2 章から第 5 章までの構成をまとめている。まず、核融合炉実現のための MHD 平衡解析の必要性、非軸対称トーラスプラズマの MHD 平衡を考察するにあたっての問題点、および本論文で考察したリップルトカマクとヘリカル系プラズマの平衡解析におけるこれまでの研究結果がまとめられている。さらに、これらの背景を踏まえ、非軸対称トーラスプラズマの MHD 平衡を 3 次元自由境界条件のもとで解析する重要性和意義を論じている。

第 2 章では、解析の基礎となる MHD モデルの導入と MHD 方程式系の導出が行われている。次に、このプラズマの一流体近似である MHD 方程式を出発点とし、MHD 平衡方程式を導出している。また、第 3 章以降の解析で用いられる 3 次元自由境界 MHD 平衡計算コード VMEC と HINT の基本的な特徴と数値計算のスキームをまとめている。

第 3 章では、磁場にトロイダルリップルがあるトカマクの 3 次元自由境界 MHD 平衡に関する解析結果をまとめている。トカマク配位の MHD 平衡は、通常軸対称性を仮定して解析されている。しかし、現実のトカマク装置は、トロイダルコイルの離散性によりトロイダル磁場 (TF) リップルと呼ばれる非軸対称性が存在し、完全な軸対称配位ではない。この TF リップルの解析はアルファ粒子の軌道損失をもたらし、第一壁の局所的な熱負荷など核融合炉に深刻な問題をもたらし可能性がある。通常、TF リップルの解析は軸対称性を仮定した平衡に真空の TF リップルを重ねて解析が行われる。しかし、この方法では有限プラズマ圧力効果が TF リップルそのものに与える影響は考慮されていない。本論文では、VMEC コードとコイル磁場計算・磁力線追跡コード KMAG コードを組み合わせることにより、トカマクプラズマの 3 次元自由境界平衡計算を行っており、有限のプラズマ圧力を考えると、プラズマ平衡電流のリップルにより、トロイダル磁場とトロイダル磁場の非軸対称成分が変化することをはじめて定量的に示した。さらに、高いプラズマ圧力を持つトカマクでの粒子軌道損失を評価するために、磁力線に沿った磁場強度の変化を考察し、プラズマ圧力が高い場合、磁場リップルが変化することと磁力線のピッチが変化することにより高エネルギーイオンの軌道損失が大きく変わることを指摘している。

第 4 章では、ヘリカル系プラズマの 3 次元自由境界 MHD 平衡を、VMEC コードで矛盾なく解析するための計算手法とその応用について論じている。VMEC で自由境界 MHD 平衡計算を行う場合、境界条件としてプラズマの全トロイダル磁束を与える必要がある。多くの計算では、便宜上、全トロイダル磁束として外部コイル電流によって作られた真空磁気面の最外殻におけるトロイダル磁束を用いている。しかし、高いプラズマ圧力が存在する場合、この近似に妥当性はない。本論文では、有限プラズマ圧力下でのプラズマ境界を求めるために、MHD 平衡磁場配位において磁力線追跡を行い、閉じた最外殻

磁気面を探す方法を提案している。この磁力線追跡計算と VMEC による平衡計算を繰り返すことにより、自由境界平衡を矛盾なく求める計算ツールを開発し、LHD 配位を対象に自由境界 MHD 平衡解析を行っている。その結果、高ベータ LHD プラズマでは、有限ベータ効果により周辺磁場の構造が崩れ、磁力線構造はストカスティックな振る舞いを示すことを明らかにしている。

第 5 章では、Heliotron J プラズマの自由境界 MHD 平衡解析について論じている。本論文では Heliotron J 装置の平衡解析に HINT コードを用いているが、HINT は従来低磁気シア配位の計算には莫大な計算機資源を要する。ここではこの問題を克服するため、計算スキームの改良を提案している。この改良により計算効率の劇的な改善と、精度の向上が得られている。この改良された HINT による Heliotron J プラズマの解析から、プラズマ中に低次の有理面が存在する場合、圧力が増加すると磁気島が成長し始め、周辺磁力線構造が乱れるおそれがあることを明らかにした。さらに、圧力分布やプラズマ電流が平衡磁気面の乱れに及ぼす影響について議論している。

第 6 章では、非軸対称トーラス配位であるリップルトカマクとヘリカル系プラズマに対して、本研究で行った 3 次元自由境界 MHD 平衡解析結果のまとめと今後の展望が述べられている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、境界条件や現実の実験条件に即した計算方法に問題が残されている非軸対称トーラスプラズマの電磁流体力学 (MHD) 平衡解析について、その計算手法を開発・改良するとともに、非軸対称 MHD 平衡に関する新たな知見を得ることを目的として、リップル磁場を含むトカマクとヘリカル系プラズマの非軸対称性が MHD 平衡に与える影響をまとめたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 磁場にトロイダルリップルがあるトカマクの 3 次元自由境界 MHD 平衡を、VMEC コードを用いて矛盾なく解析することにより、有限のプラズマ圧力を考慮すると、磁場の非軸対称成分が変化することをはじめて定量的に示した。有限プラズマ圧力におけるプラズマ平衡電流は、プラズマ境界近傍の磁場リップルを低減するが、プラズマコア領域のリップルを増大する。また、磁場リップルが変化する物理的メカニズムを詳細な解析から明らかにした。さらに、磁力線に沿った磁場強度の変化の考察から、プラズマ圧力が高い場合、磁場リップルが変化することと磁力線のピッチが変化することにより高エネルギー粒子の軌道損失が大きく変わることを指摘している。
- (2) ヘリカルプラズマの自由境界 MHD 平衡を矛盾なく求めるために、VMEC-DIAGNO コードを新しく開発した。この手法は、実験に即した平衡の再構築、不安定性解析、粒子軌道解析などにおいて、簡便に自由境界平衡を求める手法として有用である。これを用いて LHD プラズマの高ベータ平衡について考察した結果、有限プラズマ圧力効果により周辺部の磁力線構造が乱れ、最外殻磁気面が小さくなることを明らかにした。
- (3) LHD 装置より複雑で VMEC の適用が容易でない Heliotron J プラズマの自由境界平衡を、HINT コードを用いて解析し、Heliotron J の標準配位では、プラズマ圧力の増加とともにプラズマ中に磁気島が発生することを見出した。また、磁気島の大きさと周辺磁場構造は圧力プロファイルの影響を強く受けることを明らかにした。さらに、プラズマ電流を含む平衡を計算し、磁気島発生におけるプラズマ電流の影響を明らかにした。本論文では、これらの解析を進めるにあたり、低磁気シアプラズマの解析に問題があった HINT コードの数値スキームを改良し、高精度化を達成している。

以上要するに、本論文は、非軸対称トーラスプラズマの 3 次元自由境界平衡の解析手法を向上し、非軸対称性が MHD 平衡に与える影響に関する新しい知見を示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 15 年 6 月 9 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。