

|             |                                           |
|-------------|-------------------------------------------|
| 氏 名         | もと じま げん<br>本 島 厳                         |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 (エネルギー科学)                             |
| 学 位 記 番 号   | エ ネ 博 第 175 号                             |
| 学位授与の日付     | 平 成 20 年 3 月 24 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 | ヘリオトロン J プラズマにおける非誘導電流に関する研究              |

論文調査委員 (主 査)  
教 授 佐 野 史 道 教 授 長 崎 百 伸 教 授 水 内 亨

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ヘリカル系核融合プラズマ実験装置における高温・高密度プラズマの閉じ込め高性能化を目的として、非誘導電流の駆動機構の解明およびその制御性の実験的検証を、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J 装置を用いて探求した成果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は緒論で、本研究の背景、目的および意義について述べている。磁場閉じ込め装置における非誘導電流のこれまでの研究経緯を述べるとともに、プラズマ閉じ込め高性能化を目的としたヘリカル系装置における非誘導電流制御の必要性について述べている。

第2章では、実験装置を説明している。ヘリカル軸ヘリオトロン配位の特徴を述べるとともに、ヘリカル軸ヘリオトロン配位において特徴的な磁場コンポーネントであるバンピネスの役割、ヘリオトロンJ装置のコイル系、電子サイクロトロン加熱 (ECH) 装置や中性粒子ビーム入射加熱 (NBI) 装置等の加熱装置、非誘導電流計測や磁場揺動計測等の計測装置について説明している。

第3章では、非誘導電流の1つであるブートストラップ電流の理論解析について述べている。ブートストラップ電流を新古典理論に基づいた数値計算コードにより求め、ブートストラップ電流のバンピネス依存性が見出されている。バンピネスが高い配位ではブートストラップ電流はco-方向 (真空回転変換角が増加する向き) に流れるが、バンピネスが減少するにつれて、ブートストラップ電流分布はプラズマ中心領域よりco-方向からcounter-方向 (真空回転変換角が減少する向き) に反転して反転領域を拡大し、最終的にブートストラップ電流の総和がバンピネスにより反転することを明らかにした。以上の成果は、磁場配位によるダイナミックなブートストラップ電流制御の可能性を提示している。

第4章では、ECHプラズマにおけるブートストラップ電流を含む非誘導電流の実験的特性を詳しく述べている。磁場正転・反転実験から各種非誘導電流を分離・評価を試み、各非誘導電流の評価を行っている。これをもとに、ブートストラップ電流が支配的に流れる運転条件において、ブートストラップ電流がバンピネスに強く依存していることを実験的に明らかにした。また新古典理論に基づいた計算結果と比較したところ、実験値はファクター2以内で数値計算と一致を示した。これにより、ヘリオトロン J 配位においてブートストラップ電流は新古典理論で概ね説明可能であることを明らかにした。この成果は、将来のヘリカル型核融合炉のブートストラップ電流の挙動を理解し、予測するうえで、重要な基盤データを提供しているといえる。また、EC駆動電流が支配的に流れる運転条件において、EC駆動電流はバンピネスに強く依存していることを見出し、さらにEC駆動電流の方向がバンピネスによって反転することを実験的に明らかにした。これは、バンピネスによって磁場のリップル構造が変化し、EC電流駆動機構を構成する2つの効果と考えられる、周回粒子に起因したFisch-Boozer効果と捕捉粒子に起因したOhkawa効果とによって定性的に説明できることを示唆するものである。また、EC電流駆動効率 $\zeta_{ec}$ を使って、駆動効率が定量的に評価されている。その結果、最大駆動効率は $\zeta_{ec} \sim 0.05$ となり、他のヘリカル系装置で観測されている駆動効率とほぼ同程度であることが判明した。トカマク系の駆動効率と比べると1/10程度の

駆動効率である。これらの成果は、バンピネスを活かしてEC駆動電流を制御できる可能性を明らかにしたほか、磁場閉じ込め装置におけるEC駆動電流挙動の理解を深めていくうえで、さらには捕捉粒子がEC駆動電流に与える影響について詳細に研究していくうえで、重要な知見を与えるものとなっている。このような非誘導電流の物理特性を活かして、例えばECHプラズマにおいてEC波の共鳴位置とバンピネスの調整により、ブートストラップ電流とEC駆動電流を実質的に相殺させて、正味の非誘導電流値をゼロの状態に制御できることが実験的に示されている。以上の成果は、ヘリカル系装置の多様な磁場配位に適応した非誘導電流制御を行うことが可能であることを明らかにしているほか、装置のコイル系で与えられる磁場配位だけでは到達できない新しい、魅力ある閉じ込め配位を非誘導電流制御により実現できる可能性を示しており、今後のヘリカル型核融合炉の設計指針に大きく貢献するものといえる。

第5章では、ECH+NBIプラズマにおける非誘導電流の実験的特性について述べている。ECH+NBIプラズマにおける非誘導電流はブートストラップ電流とNB駆動電流からなる。ECH+NBIプラズマにおいて、高バンピネス配位でNB駆動電流が良く流れることを見出した。NBをco-方向とcounter-方向に駆動することによって非誘導電流を制御し、MHD揺動を用いて非誘導電流が回転変換に与える影響について調べている。その結果、ECH+co-NBIプラズマでは非誘導電流により回転変換が上昇している可能性がある一方でECH+counter-NBIプラズマでは、ブートストラップ電流とNB駆動電流が打ち消しあうことにより、回転変換の変化は小さい可能性があることを明らかにした。以上の成果は、ヘリカル系磁場配位の回転変換の実時間変動計測がMHD挙動を通して、動的Stark効果計測等の大掛かりな計測を用いずに実現できる可能性を示すほか、非誘導電流制御がMHD平衡・安定性の制御に対して大きく貢献できることを示している。

第6章は本論文の総括であり、本論文の全体の内容をまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、ヘリカル系核融合プラズマ実験装置における高温・高密度プラズマの閉じ込め高性能化を目的として、非誘導電流の駆動機構の解明およびその制御性の実験的検証を、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置を用いて探求した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) ヘリオトロンJにおけるブートストラップ電流 (BS電流) の駆動機構を閉じ込め磁場成分の1つであるバンピネスに注目し、理論的・実験的に調べた結果、BS電流がバンピネスに強く依存することを見出した。実験結果を新古典理論に基づいた計算予測と比較した結果、新古典理論で概ね説明可能であることを明らかにした。この成果はヘリカル系装置におけるブートストラップ電流の挙動理解とその定量予測に貢献するとともに、磁場制御によるダイナミックなブートストラップ電流制御の可能性を提示し、今後の先進ヘリカルにおける非誘導電流制御研究に重要な知見を与えるものとなった。
- 2) 電子サイクロトロン駆動電流 (EC駆動電流) のバンピネス依存性についても実験的に調べた結果、EC駆動電流もバンピネスに強く依存していることを見出した。EC駆動電流の駆動方向はバンピネスによって反転し得ることを実験的に明らかにし、これは磁場リップル構造の変化によってEC駆動電流の2つの駆動機構である周回粒子に起因したFisch-Boozer効果と捕捉粒子に起因したOhkawa効果から、定性的に説明できることを見出した。またEC駆動電流効率の定量評価の結果、他のヘリカル系装置で観測される駆動効率とほぼ同程度であることを見出し、トカマク系の駆動効率と比べると1/10程度の駆動効率になることを明らかにした。これらの成果は、ヘリカル型核融合炉の炉設計における非誘導電流制御の基盤データとして貢献するものである。
- 3) 中性粒子ビーム駆動電流を閉じ込め磁場の順方向 (co-方向) と逆方向 (counter-方向) に駆動することにより、全体の非誘導電流を能動的に制御するとともに、閉じ込めプラズマの電磁流体力学的 (MHD) 挙動と非誘導電流駆動の関連性を実験的に調べた結果、順方向駆動時の回転変換の上昇に対し、逆方向駆動時における回転変換の変化が小さいことをMHD挙動計測を通して明らかにした。これによりヘリカル系磁場配位の回転変換の実時間変動計測がMHD挙動を通して実現できる可能性を示し、あわせて非誘導電流制御がMHD平衡・安定性の制御に対しても大きく貢献できることを明らかにした。

これらの研究成果は、ヘリカル系核融合プラズマ実験装置における非誘導電流の定量的な挙動予測と、その有効な制御手

法を実験的に明らかにしたものであり、今後のヘリカル系核融合プラズマ実験装置における閉じ込め高性能化において寄与するところが少なくない。

以上の内容により、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20年2月20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。