

論文審査の結果の要旨

氏名 谷塚 英一

本論文は Wave Characteristics of Electron Cyclotron Range of Frequency in Dipole Confined Plasmas (ダイポール閉じ込めプラズマ中の電子サイクロトロン周波数帯波動の特性) と題している。将来の革新的エネルギー源の候補の1つとして核融合エネルギーが世界各地で精力的に研究されている。磁場閉じ込め方式の核融合においてはベータ値とよばれるプラズマ圧力と磁気圧の比が重要なパラメータの1つであり、木星磁気圏に見られるようなベータ値が100%を超える高ベータプラズマの閉じ込めを実験室で実証すべく、ダイポール閉じ込め方式の内部導体装置 Mini-RT が建設された。高ベータプラズマ生成のためには、高密度化が必須であるが、電子サイクロトロン周波数帯の波動では、遮断密度を超える高密度プラズマの生成が課題となっている。近年、入射した電磁波がモード変換して励起される電子バーンスタイン波が着目されている。この波は遮断密度が無く、磁力線に垂直方向に伝播するため、球状トカマクやヘリカルプラズマ装置でも高い関心が持たれている。ダイポール磁場閉じ込め装置でも、閉じ込め磁場が比較的弱いため、遮断密度が低くなり、電子バーンシュタイン波での高密度化が期待されている。本論文では、ダイポール型のプラズマ閉じ込め装置での電子サイクロトロン加熱実験について述べており、実際に電子サイクロトロン加熱での遮断密度を2倍以上超えた高密度プラズマ生成に成功している。また、ダイポール閉じ込めプラズマでの高密度プラズマ生成のメカニズムが電子バーンスタイン波加熱によるものと推測し、それを実験的に実証することをを行った。論文は以下のように構成されている。

第1章は序論に当てられている。始めに核融合炉に向けた一般的課題を概観し、次に高ベータプラズマの研究の背景と、高ベータ化・高密度化における問題点としてプラズマ自身による加熱用高周波の遮断を指摘している。

第2章はダイポール閉じ込め方式による高ベータプラズマ閉じ込めの概観と、本研究に用いた内部導体型の実験装置 Mini-RT について述べられている。二流体緩和平衡理論によるフローイングプラズマの自己組織化によって高ベータプラズマを動圧の効果で閉じ込めること、それを実証するためのリングトラップ(RT)計画の概観を解説している。また、Mini-RT 装置における磁気浮上高温超伝導コイルの冷却、永久電流の励起、浮上制御の方法についても言及している。

第3章では電子サイクロトロン加熱および、電子バーンスタイン波へのモード変換に関する理論を概観している。特に Mini-RT においては、急峻な密度および磁場勾配があることから、弱磁場側からの異常波垂直入射が最も有望なモード変換の方法であることが示されている。

第4章ではまずプラズマの生成、加熱の手法の詳細が言及され、次に電子温度と電子密度の計測法として、静電プローブと75GHzのマイクロ波透過干渉計について述べられている。静電プローブにより、装置の赤道面上の電子密度と電子温度の分布を計測している。干渉計はMach-Zehnder型のものを用い、電磁ホーンによってプラズマ中へ電磁波を入射し、その透過波の位相変化から平均電子密度を求めている。

第5章は加熱特性として、様々な実験条件の下での電子密度および電子温度の計測結果を論じてい

る。引き上げコイルに通電することにより、セパトリックス位置を変化させることによってプラズマ閉じ込め領域を非接触に変化させることができる。加熱パワーと電子密度分布の特性の比較を行い、加熱パワーが閾値を超えると急激に電子密度分布が上昇し、セパトリックス付近に急峻な密度勾配が形成される現象が見られた。また、内部導体を磁気浮上させることにより、プラズマ生成に必要な背景中性粒子ガス圧の低減とオーバーデンスプラズマ生成の達成、それに伴う電離度の上昇についても言及している。

第6章では電子サイクロトロン周波数帯の電磁場計測器の開発について述べている。プラズマ中にアンテナを挿入することによる電磁場の直接計測を行うための、計測原理の説明、アンテナの較正、計測法の妥当性の検証を行っている。計測には加熱用とは異なる周波数を用いており、放電条件を変えずにオーバーデンスプラズマとそうでないプラズマ両方に対する波動の伝播を調べることができることが述べられている。

第7章では電子サイクロトロン周波数帯の高周波電場の計測結果について述べられている。セパトリックス付近に急峻な密度勾配を生成した状態での短波長信号について詳細に言及されており、その信号が静電的な電場によるものであること、位相速度と群速度が逆向きに伝播する静電波であること、サイクロトロン高調波共鳴層付近で減衰すること、高域混成共鳴層付近で励起されることなど、電子バーンスタイン波の特徴を持っていることを示している。この結果は、内部導体装置 Mini-RT で実験的に観測されたオーバーデンスプラズマの生成メカニズムとして電子バーンスタイン波が有力であることが実験的に直接示されたと言える。なお測定された波長は、理論値とは定量的に必ずしも一致していないが、その理由として高エネルギー電子による影響などが考察されている。

第8章はまとめに当てられている。

以上を要するに、本研究はダイポール閉じ込めプラズマにおける高ベータ化、特に高密度化に着目し、電子サイクロトロン周波数帯の高周波を用いて、プラズマの遮断密度を超えるオーバーデンスプラズマの生成を実験的に実証した。さらに電磁場計測器を駆使し、オーバーデンスプラズマ生成のメカニズムとして、入射した電磁波がモード変換して励起される電子バーンスタイン波が有力であるということを実験的に示した。ここでの知見および研究手法はダイポール方式を始めとする高密度・高ベータプラズマ閉じ込め研究への応用が期待できるものであり、先端エネルギー工学、特に核融合プラズマ工学の発展に貢献するところが大きい。

本論文の第2章、第4章、第5章、第6章、第7章は、小川雄一、三戸利行、柳長門、森川惇二、加藤肇、坂田大輔、金城清猛、田中将大の各氏との共同研究であるが、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って、博士（科学）の学位を授与できると認める。