

氏 名	うちだ まさき 打 田 正 樹
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号	論エネ博第 53 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 2 項 該 当
学位論文題目	電子サイクロトロン電流駆動による球状トカマクの無誘導形成法の研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 前 川 孝 教 授 近 藤 克 己 教 授 岸 本 泰 明

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、電子サイクロトロン (EC) 電流駆動による球状トカマクの無誘導形成法に関する実験とその解析結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章は序論であり、以下のことを述べている。近年、建設コストの大幅な低減が期待できる中心ソレノイドを省いたコンパクトな球状トカマク型核融合炉が注目されている。このとき、中心ソレノイドによる電磁誘導の代わりにプラズマ電流を立ち上げて球状トカマクを形成する手段が必要となり、幾つかの無誘導方式が研究されている。なかでも、プラズマから十分離れた位置に置いたアンテナからマイクロ波を入射することで遂行できる EC 電流駆動方式は、過酷な環境にあるプラズマ近傍に構造物を一切必要としないので炉工学的に有利であるが、実験的検証がほとんど無かった。通常の EC 電流駆動においてはマイクロ波の EC 共鳴吸収により高速電子を磁場にほぼ垂直方向に加速してバルク粒子との衝突減衰率を低下させることにより、背景のマックスウェル速度分布の上に電流を運ぶ高速電子群を形成・維持する。この方法は定常電流の維持には有効であるが、電流立ち上げの場合、衝突減衰に加えて自己誘導電圧による制動が加わるので高速電子群を形成することが困難になり、適切でない。しかしながら、EC 共鳴吸収に際して共鳴電子が得る磁力線方向の運動量とエネルギーの比が波動の屈折率の磁力線方向成分 ($N_{\parallel}$) に比例することに着目すれば、高 $N_{\parallel}$ 領域の電子バーンスタイン波による EC 電流駆動を用いることにより自己誘導電圧による制動に十分抗して共鳴電子を駆動することができ、電流を運ぶ高速電子テイルを形成させ得ると予測される。

第2章は実験装置について述べている。すなわち、低アスペクト比トーラス実験装置本体 (大半径 $\sim 0.3\text{m}$, トロイダル磁場 $\sim 1000\text{G}$)、プラズマ断面形状制御用の磁場コイルシステム、EC 電流駆動用マイクロ波発生・入射システム、および主な計測装置について述べ、加えて、プラズマ電流を運ぶ高速電子テイルの速度分布を定量的に明らかにするための磁気解析法と制動輻射 X 線スペクトルの測定・解析法について詳述している。

第3章は球状トカマクの無誘導形成に成功した電流立ち上げ放電の全体像を述べている。トロイダル磁場に加えてプラズマ平衡用に弱い垂直磁場 ($B_v = 20 \sim 70\text{G}$) を印加した磁気構造のもとで、装置の真空容器内に水素ガスを 10^{-2}Pa 程度に充填した後、高 $N_{\parallel}$ 電子バーンスタイン波を励起すべくマイクロ波を磁力線に斜めに入射する。EC 共鳴により放電が開始され、最初、電流ジャンプと呼ばれる機構によりプラズマ電流が急増し、 B_v 値に比例した定常電流 ($I_p = 2 \sim 7\text{kA}$) が得られ、初期磁気面が形成される。その後マイクロ波電力を適宜増力するとともに、より大きな電流でのプラズマ平衡を確保すべく垂直磁場を増大すると、プラズマ電流も増大する。5 GHz, 130kW, 60ms のマイクロ波入射の場合は、 $I_p = 15\text{kA}$ までプラズマ電流が立ち上がり、球状トカマク形成に成功した。この電流値はトロイダル磁場コイルの総電流値の20%に達している。また、磁気解析およびプラズマ発光像によるプラズマ断面形状と、この断面を貫く2本の弦に沿った線積分密度の情報により、このときのプラズマ電子密度は入射マイクロ波に対するプラズマ遮断密度を超えていることを明らかにした。電磁波モードは遮断密度を超えたプラズマ中には進入できないので、入射電磁波モードからモード変換により生じた電子バー

ンスタイン波による EC 電流駆動であるとの結論を得ている。

第4章は初期磁気面形成後から球状トカマク形成にいたる時間帯での電流増大に焦点をしばって解析を行った結果を述べている。最初に、フラックスループによる磁気計測データに基づいた磁気解析、平衡解析から電流キャリアが磁力線に沿って一方向に走っている高速電子テイルであることを明らかにしている。この時間帯では、第1章で述べたように、自己誘導電圧による制動が高速電子テイルに加わっている。この状況における高速電子テイルの成長機構を明らかにするためには、その具体的な速度分布の時間発展を追跡することが必要である。長時間の2.45GHzマイクロ波パルスにより形成した球状トカマクプラズマを対象に、制動輻射により高速電子テイルが運動方向に放射するX線スペクトルとその逆方向に放射するX線スペクトルを、波高分析法を用いて同時に計測し、両者のX線スペクトルのデータから高速電子テイルの速度分布を推定した。そのエネルギー領域は100keVを超えて広がり、ピッチ角は順方向から $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ まで広がっていて、本質的には一方向の速度分布であることを明らかにした。また、高速電子テイルのエネルギーの上限はプラズマ電流値にほぼ比例して上昇するという結果を得るとともに、これが磁気解析結果や高速電子の粒子軌道解析結果と整合していることを確かめている。特に、5GHzマイクロ波入射による早いプラズマ電流立ち上げ実験を解析し、自己誘導電圧による制動に抗して高速電子テイルを順方向に駆動する機構が確かに存在することを示すとともに、電子の速度空間におけるEC共鳴加熱過程を解析して、高N//領域の電子バーンスタイン波による駆動であることを示した。最後にこの方式を大型装置に適用する場合を展望し、必要なマイクロ波電力を見積もった。

第5章で全体の結果をまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、中心ソレノイドを省いたコンパクトな球状トカマク型核融合炉の実現に資するために、炉工学上有利な電子サイクロトロン（EC）電流駆動方式による球状トカマクの無誘導形成法に関する実験とその解析結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. 低アスペクト比トーラス実験装置において、2.45GHzあるいは5GHzのマイクロ波パルスを入射し、EC共鳴加熱によりプラズマ電流を発生させ、入射マイクロ波電力と平衡垂直磁場の適切な制御によりこれを増加させて、その電流値がトロイダル磁場コイルの総電流値の20%に達する球状トカマク磁場配位を得た。すなわち、EC電流駆動による球状トカマクの無誘導形成に成功した。
2. 磁気解析およびプラズマ発光像によるプラズマ断面形状と、この断面を貫く2本の弦に沿った線積分密度の情報により、プラズマ電子密度が入射マイクロ波に対するプラズマ遮断密度を越えていることを明らかにし、入射電磁波モードからのモード変換により生じた電子バーンスタイン波のEC共鳴吸収による電流駆動であることを示した。
3. 磁気解析により求めたプラズマ圧力値と、プラズマ電流値、プラズマ断面形状および線平均電子密度から推定した電子の平均ドリフト速度の情報をもとに、プラズマ電流が高速電子テイルにより運ばれていることを示した。これに加えて、高速電子テイルからの方向性を持つ制動輻射X線スペクトルを計測、解析して、高速電子テイルの速度分布を明らかにした。
4. 電子の速度空間におけるEC共鳴加熱過程を解析し、上記の高速電子テイル速度分布の形成機構をしらべた。その結果、高N//領域の電子バーンスタイン波のEC共鳴吸収であれば、N//に比例する順方向運動量を共鳴電子に与えるので、自己誘導電圧による制動に抗して高速電子テイルを順方向に駆動できることを明らかにした。

以上、本論文は電子サイクロトロン電流駆動方式による球状トカマクの無誘導形成法の原理実証を与えるとともに、その物理機構についても明確な描像を与えたものであり、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。