

氏名	よしながともかず 吉永智一
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 156 号
学位授与の日付	平成 19 年 3 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	電子サイクロトロン加熱・電流駆動によるプラズマ電流の生成と磁気面形成
論文調査委員	(主査) 教授 前川 孝 教授 近藤克己 教授 水内 亨

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、電子サイクロトロン加熱・電流駆動によるプラズマ電流の生成と磁気面形成に関する実験と解析結果をまとめたもので、8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、中心ソレノイドの代わりにプラズマ電流を立ち上げる手段が必要となり、幾つかの方式が研究されている。なかでも電子サイクロトロン加熱・電流駆動 (ECH/ECCD) による方法は、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みて将来性があり、幾つかの実験および理論的研究がなされてきたが、いずれも断片的で不十分であった。このような状況において、定常垂直磁場の下での ECH により電流ジャンプと名づけた急速な自発的電流上昇が起き、外場が主な開いた磁力線構造から閉じた磁気面を有する磁力線構造に到達することを見出すとともに、磁気面形成機構の統合的理論モデルを提案した。

第2章では、実験装置である低アスペクト比トーラス実験装置本体、ECH/ECCD 用マイクロ波入射システム、および、主な計測装置について述べている。特に、立ち上げ時のプラズマ電流分布の導出のための磁気解析法を新たに開発し、それが妥当であることを示す実験結果を詳述している。

第3章で電流ジャンプにより磁気面形成に至る放電の主な特性をまとめている。すなわち、トロイダル磁場  $B_t$  と垂直磁場  $B_v$  で構成される外部定常磁場の螺旋状磁力線構造の下でマイクロ波を入射すると、ECH により放電が開始し、プラズマ電流が流れ始める。最初プラズマ電流はゆっくり増大するが、プラズマ電流の作る自己磁場  $B_p$  の強度が  $B_v$  の半分程度に到達すると、急速な上昇に転じ (電流ジャンプ)、閉じた磁気面が形成され、その後プラズマ電流はマイクロ波入射パルスの間一定の値に保たれる。電流ジャンプ後の準定常状態でのプラズマ電流値  $I_p$  は  $B_v$  に比例した。より大きな  $B_v$  下で電流ジャンプを得るためにはより大きな入射電力を要した。実験は 2.45GHz あるいは 5GHz のマイクロ波を用いており、クライストロンによる 5GHz の場合は、130kW に上る入射電力により、 $B_v=85\text{Gauss}$  において 7kA のプラズマ電流を得た。ここで、プラズマ密度は入射マイクロ波の遮断密度より高く、さらに加えて、2倍あるいは3倍の高調波 ECH であった。これらのことは、ECH が電磁波モードの吸収によるものではなく、入射電磁波からプラズマ表面においてモード変換されて生じた電子バーンスタイン波が、プラズマ中央部へ伝播し、高調波共鳴サイクロトロン吸収を受けたことによるものであることを示す。

第4章では電流ジャンプによる磁気面形成過程に関する理論モデルを提案し、実験による検証を行っている。まず電流立ち上げ過程におけるプラズマループの平衡特性の変移が重要であることに着目し、プラズマ電流値  $I_p$  が小さい電流ジャンプ前の放電初期では、プラズマ圧力によるバルーニング力が  $I_p$  と  $B_v$  による  $J \times B$  力と釣り合う圧力バルーニング領域にあり、一方電流ジャンプ後では、プラズマ電流環の電流フープ力が  $I_p$  と  $B_v$  による  $J \times B$  力と釣り合う電流フープ力領域となることを実証した。外場が主な圧力バルーニング領域ではトロイダルドリフトによる荷電分離を抑制する圧力駆動電流とし

て、プラズマ圧力の上昇とともにプラズマ電流も上昇し、プラズマ電流が作る自己磁場が  $B_v$  の半分程度に至ると、電子速度空間での閉じ込めの非対称性が顕著になり、これに起因する電流が急速に成長し、電流ジャンプとなる。電流ジャンプにより閉じた磁気面が形成されると速度空間非対称性は無くなるが、代わりに ECCD が有効になり、電子バーンスタイン波の共鳴吸収で高速電子テイルが生じてプラズマ電流を定常維持する。すなわち、電流ジャンプをともなう磁気面形成過程においては、磁力線構造、平衡特性、電流生成機構が互いに密接に関連して発展することを明らかにした。

第5章と第6章では外部垂直磁場  $B_v$  の形状 (Decay Index) と電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 層の位置が電流ジャンプに及ぼす影響について調べている。Decay Index が小さいときは大きな電流ジャンプにより大きなプラズマ電流が得られること、電流ジャンプによる磁気面形成後の電流分布は、第2あるいは第3共鳴層が存在する限り、ECR 共鳴層の位置に依存せず、真空容器中央部に広く分布するが、電流ジャンプ前の電流分布は、第2あるいは第3共鳴層に局在することを明らかにした。さらに、Decay Index が大きくなると電流ジャンプ前でも電流分布は ECR 共鳴層の位置にあまり依存しないという結果を得ている。さらに Decay Index が大きくなると、数回の電流ジャンプアップとジャンプダウンを交互に繰り返すという二つの平衡間の分岐振動を経た後、安定な電流フープ力領域に入ることが観測された。

第7章で磁気面形成に及ぼすアスペクト比の効果や電子閉じ込めに関する静電ポテンシャルの効果など残された幾つかの問題について議論し、第8章で全体の結果を纏めている。

### 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トカマク型核融合炉の実現に資するために、電子サイクロトロン加熱・電流駆動 (ECH/ECCD) によるプラズマ電流の生成と磁気面形成に関する実験、および解析結果を纏めたものであり、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ける実験で、トロイダル磁場と弱い垂直磁場で構成される外部定常磁場による螺旋状磁力線の下で、ECH/ECCD により電流ジャンプと名づけた急速な自発的電流上昇が起き、外場が主な開いた磁力線構造から閉じた磁気面を有する磁力線構造に到達できることを初めて見出した。
2. ECH 用マイクロ波パルス入射により放電が開始されるが、螺旋状磁力線の下では同時に弱いプラズマ電流が発生する。電子温度の上昇とともにプラズマ電流も徐々に上昇し、その値が一定のレベルに達すると電流ジャンプが起きる。 $B_v=10$  ガウスから85ガウスに亘る幅広い範囲の垂直磁場下での実験により、プラズマ電流が上昇してその自己磁場  $B_p$  の強度が  $B_v$  の半分程度に到達すると電流ジャンプを起動される。すなわち自己磁場の増大によるポロイダル磁場の変形がトリガーになっていることを見出した。
3. 電流ジャンプに伴うプラズマループの平衡特性の変化の重要性に着目し、プラズマ電流値  $I_p$  が非常に小さい、電流ジャンプ前の放電初期では、プラズマ圧力によるバルーニング力が  $I_p$  と  $B_v$  による  $J \times B$  の力と釣り合うバルーニング力領域にあり、一方、電流ジャンプ後はプラズマ電流環の電流フープ力が  $I_p$  と  $B_v$  による  $J \times B$  の力と釣り合う電流フープ力領域にあることを実証した。
4. 実験結果と理論解析によりプラズマ電流生成機構として次のモデルを提案し検証した。バルーニング領域のプラズマ電流はトロイダルドリフトによる荷電分離を中和すべく螺旋磁力線に沿って流れる電流であり、電流ジャンプ時は自己磁場  $B_p$  の成長に伴って顕著になる電子速度空間での閉じ込めの非対称性により生じる電流であり、磁気面形成後はマイクロ波電力の電子サイクロトロン共鳴吸収で生じた高速電子テイルが作る電流、すなわち電子サイクロトロン駆動電流である。

以上、本論文は螺旋状磁力線構造の下で ECH/ECCD により電流ジャンプと名づけた急速な自発的電流上昇が起き、磁気面形成に至ることを初めて見出すとともに、磁気面形成過程において、磁力線構造、平衡特性、電流生成機構が互いに密接に関連して発展するという磁気面形成過程の統合的な描像を与えたもので、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19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。