

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	黒田賢剛
論文題目	トロイダル ECR プラズマの基礎研究 ー 低アスペクト比トーラス実験装置 LATE における実験と解析 ー		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、核融合発電を目指したトカマク型磁場閉じ込め装置での放電立ち上げ時に利用される電子サイクロトロン共鳴(ECR)プラズマの生成・維持機構を明らかにすることを目的とし、電子温度・密度、空間電位等の綿密な分布計測とその実験データに基づいたモデル計算を行った研究結果をまとめたものであり、以下の 5 章と 2 つの付録から構成される。</p> <p>第 1 章は序論である。核融合プラズマの研究を目的とした大型トカマク装置においては、マイクロ波を入射して ECR を用いたプラズマの初期形成がよく行われる。特に超伝導コイルを用いたトカマク装置では、中心ソレノイドコイルによる誘導電場を大きくすることができず、磁力線の結合長を長くとりざるを得ないため、垂直磁場が無い単純トロイダル ECR プラズマが用いられる。また、より先進的な球状トカマク装置においては、中心ソレノイドコイル無しでの無誘導立ち上げを目指しており、この場合は弱い外部垂直磁場を重畳した ECR プラズマが用いられる。いずれの場合においても、これまでは、初期ターゲットプラズマとしての ECR プラズマについて詳しい研究がほとんど行われてこなかった。このような背景を説明し、本研究の目的と意義を述べている。</p> <p>第 2 章では実験装置について説明しており、低アスペクト比トーラス実験装置本体、ならびにその真空容器内に設置した電流検出用上下パネルとアレイ電極、そして 3 台の可動式 2 次元プローブ等について詳述している。</p> <p>第 3 章は単純トロイダル ECR プラズマでの実験とその解析結果について記述し、議論を行っている。まず、外部垂直磁場が印加されていない単純トロイダル磁場配位で ECR プラズマを生成し、上下パネル電流、アレイ電極電流を測定して垂直循環電流の保存を示している。また、静電プローブによる測定からトロイダル面における電子温度、電子密度、空間電位分布を求め、特異な形状の、およそ 40 V の正の空間電位の丘が形成されていることを示している。そして、これらの実験データをもとに電子圧力分布、電子の真空トロイダル(VTF)ドリフト流、<math>E \times B</math> ドリフト流、電子衝突電離による電子およびイオンの生成分布を求めている。次に電子とイオンの軌道計算を行い、生成層から境界に至る電子とイオンの流れ、および上部パネル近傍での電子 VTF ドリフト電流からイオン VTF ドリフト電流への置き換わりを確認している。更に、上部パネル表面のイオン主要シース、下部パネル近傍での電子 VTF ドリフトの加速、生成層への種電子の供給についての考察も行っている。議論では、</p>			

これらを総じて、ECR層でのプラズマ生成領域から上下パネルおよび真空容器壁へ至るプラズマ流の全体像を明らかにし、その放電維持機構を論じている。

第4章は弱い垂直磁場を重畳したトロイダルECRプラズマでの実験とその解析結果について述べ、議論を行っている。この場合、磁力線は螺旋状になるので磁力線に沿って電子の帰還電流が流れることになり、それがトロイダル電流となる。しかし、圧力駆動の荷電分離電流のすべてがトロイダル電流になるわけではなく、残りは真空容器を経由した垂直循環電流となる。この実験では、上下パネル電流、アレイ電極電流の測定に加え、フラックスループによるトロイダル電流の算出も行っている。平衡圧力計算も行い、磁力線に沿って上下パネルに流入する電子流によるトロイダル電流の存在を明らかにしている。また、定常垂直磁場下の発展放電においては、初期磁気面形成に至るまでの過程で、電子温度が上昇して圧力駆動電流全体は増加するが、垂直循環電流はほとんど変化せず、トロイダル電流が増加してゆくことを示している。議論では大型装置での考察を行っている。

第5章は本論文の総括として全体のまとめを行い、最後に今後の課題・展望について論じている。

付録AおよびBでは、単一粒子軌道に基づく数値シミュレーション手法についてと、フラックスループ信号からトロイダル電流分布を算出する方法について詳述している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合発電を目指した超伝導トカマクや球状トカマクでの放電立ち上げに利用される ECR プラズマの生成・維持機構を明らかにすることを目的とし、綿密な分布計測と実験データに基づくモデル計算を行って明らかにした研究成果をまとめたものである。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 LATE において、円筒状真空容器内の広い空間を利用して電流検出用上下パネル、アレイ電極等を設置し、可動式 2 次元プローブ等により電子温度・密度、空間電位、垂直方向電流、トロイダル磁束等の同時かつ綿密な分布計測を初めて行った。

(2) 外部垂直磁場の無い単純トロイダル磁場配位の ECR プラズマにおいて、ECR 層に平行して弱磁場側に電子圧力の高い尾根ができてプラズマ生成層を構成する一方、上部パネルと ECR 層の間の角に向かって伸びた特異な形状の静電ポテンシャル丘が形成されていることを見出した。

(3) 粒子束分布計算、粒子軌道計算等により、電荷を分離する垂直方向の VTF ドリフトに等ポテンシャル線に沿った  $E \times B$  ドリフトが加わり、プラズマ全体の電荷中性条件を保つように電子とイオンの流れが生ずること、特にイオンは温度が低く VTF ドリフトも小さいが、 $E \times B$  ドリフトにより上部パネル近傍まで持ち上げられ、そこで強いポテンシャル勾配により VTF ドリフトを加速させ、下部パネルに流れ込む電子電流と等しく上部パネルに流入することがわかった。

(4) 弱い垂直磁場を重畳したトロイダル ECR プラズマでは、荷電分離電流の一部が磁力線に沿って帰還電流となり、トロイダル電流を発生させるが、そのトロイダル電流と垂直循環電流のそれぞれに対する平衡圧力を求め、磁力線に沿って上下パネルに流入する電子流によるトロイダル電流の存在を明らかにした。

(5) 初期磁気面形成に至るまでのトロイダル電流増加過程では、電子温度が上昇して圧力駆動電流が増加するが、垂直循環電流はほとんど変化せずにトロイダル電流が増加してゆき、平衡電流成分の移行が起こることを初めて見出した。

これらの知見はこれまでにない総合的なものであり、トロイダル ECR プラズマ生成と維持機構を初めて基礎から理解できるようにした。また、大型トカマク装置での初期立ち上げ研究の進展にも大いに寄与するものである。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 28 年 1 月 28 日に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。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：            年            月            日以降