

論文審査の結果の要旨

氏名 矢嶋 悟

核融合を実現するための手法として最有力視されているトーラス型プラズマ閉じ込め方式を採用したトカマク装置のうち、プラズマの主半径と小半径の比で定義されるアスペクト比が小さな球状トカマクは、高い規格化プラズマ圧力を安定に維持できる長所をもつが、プラズマ電流の立ち上げとその維持が課題となっている。一方、プラズマを閉じ込めるために必要なトロイダル方向のプラズマ電流を駆動する手法として、非誘導的にプラズマ電流を駆動し、かつ定常的に維持することのできる低域混成波 (Lower Hybrid Wave: LHW) の利用が有力視されている。

論文提出者は、東大柏キャンパスに設置された球状トカマク装置 TST-2 (Tokyo Spherical Tokamak-2) を用い、従来から設置されていた外側アンテナに加え、新たに静電結合型コムラインアンテナを上側に設置し、LHW の励起方法として外側入射、上側入射、及び、トロイダル磁場を反転した上側入射 (以下、下側模擬入射と呼ぶ) の三つの場合について、比較実験を行った。また、光線追跡コードと軌道平均フォッカー・プランクコードを用い、実験結果を解析するとともに、効率的な電流立ち上げに関する有益な知見を得た。

本論文は英文で全6章と付録からなる。第1章は序論であり、核融合、トカマク装置、球状トカマク装置について概説した後、先行研究の経緯と本研究の目的を述べている。第2章では、プラズマ波の基礎的理論を要領よく解説している。第3章では、実験装置について、TST-2 球状トカマク装置、LHW 励起実験のための高周波システム、米国 General Atomics 社と共同で新たに開発した静電結合型コムラインアンテナ、LHW で加速された高エネルギー電子に関する情報を得るための軟X線検出器について説明している。

第4章で、主要な実験結果についてまとめている。まず、典型的なプラズマ形成の時間発展について述べている。因みに中性ガスは 2.45 GHz の電子サイクロトロン波を用いてイオン化され、電子サイクロトロン共鳴に対応する磁場は 0.088 T である。続いて、上記の三つの場合の結果をまとめている。上側リミターの位置が 350 mm のとき、外側入射で 21.1 kA、上側入射で 26.0 kA、下側模擬入射で 26.7 kA の電流値を達成した。下側模擬入射で達成した 26.7 kA は、TST-2 の研究で達成した最高電流値である。また、高周波パワーの入射開始時から最大電流値を達成するまでの電流立ち上げ速さについては、主半径 0.32–0.33 m のときの放電に対して、外側入射で 0.53 MA/s、上側入射で 0.76 MA/s、下側模擬入射で 0.91 MA/s を達成した。併せて、プラズマ電流値約 16 kA 以上で、LHW の波数の急激な上昇を示唆する 200–300 eV の軟X線放射強度の増大も観測した。

第5章では、光線追跡コード GENRAY と軌道平均フォッカー・プランクコード CQL3D を用いた数値計算に基づいて実験結果の考察をまとめている。まず、

上側入射の優位性は、プラズマの内側での波数の上昇により、電子速度分布のうち、non-Maxwellian 部の高さと幅が確保されるためと説明した。また、下側模擬入射のさらなる優位性は、入射直後の波数の減少により、上側入射よりもさらに高速の電子を生成できるためと説明した。上側入射時の波数の上昇と下側模擬入射時の波数の減少は、トロイダルモード数の保存により説明できることを理論的に示した。1箇所からの入射により、電子速度分布の non-Maxwellian 部の高さと幅の両方を最適化することは困難であることから、高さの確保に有利な上側入射と幅の確保に有利な下側（模擬）入射が最適な組み合わせであることを指摘した。さらに、3次元電磁場シミュレーションに基づいて、アンテナープラズマ間の適切な距離（17-27 mm）、及び、それに対応するアンテナパワー透過率（18-40%）を明らかにした。

続く第6章では、本研究のまとめと今後の展開について簡潔にまとめている。なお、付録では上側アンテナの設置とチューニングに関する補足説明が与えられている。

以上の様に本研究では、TST-2 における静電結合型コムラインアンテナを使った LHW によるプラズマ電流の立ち上げに関し、最高電流値を達成するなど優れた実験結果を得ただけでなく、数値シミュレーションに基づいて、よりよい結果が得られた物理の考察と TST-2 のさらなる性能向上のための有益な知見を得ることに成功した。本研究は指導教員の高瀬雄一氏らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験、データ解析、数値シミュレーション、及び、考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、審査委員全員が博士（理学）の学位を授与できると認める。