

論文の内容の要旨

Plasma Current Start-up by the Lower Hybrid Wave Using Capacitively-Coupled Compline Antennas on the TST-2 Spherical Tokamak
(球状トカマク TST-2 における静電結合型コムラインアンテナを使った低域混成波によるプラズマ電流立ち上げ)

氏名：矢嶋 悟

トカマク型磁場閉じ込め装置は現在のところ、熱核融合に必要な高いイオン温度と密度を達成するために十分な閉じ込めと安定性を実証しており、核融合炉のために最も有望視されている磁気閉じ込めシステムである。トカマクでは、プラズマ閉じ込めに必要なポロイダル磁場を生成するためにトロイダルプラズマ電流を駆動しなければならない。これについて低域混成波 (LHW) を用いることは、非誘導的にプラズマ電流を駆動し、定常状態でそれを維持するための手段として期待されている。LHW を用いた電流駆動では、ランダウ減衰と呼ばれる波の吸収過程を経て位相速度付近の電子を統計的に加速するという性質を持つ。現在 TST-2 球状トカマク装置では、入射時の磁場方向の屈折率が $N_{\parallel} \sim -5$ になる LHW を用いた電流駆動によるトカマク立ち上げ実験を行ってきた。上側アンテナによる上側入射、またトロイダル磁場を反転した状況で上側アンテナを用いることによる下側入射模擬の三つのケースについて比較を行った。

上側アンテナの導入に際し、アンテナの大きさと真空容器内の上下のスペースの関係からプラズマの上側リミターの高さが $z=450$ mm から $z=300$ mm へ変更された。結果として駆動電流値の大幅な制限が確認され、外側入射は 25 kA の電流値が 18 kA まで抑制された。これは断面積が必要以上に抑制されているためであると考えられ、アンテナの上端を削減し、アンテナとリミターを共に 50 mm 上昇させたところ、外側入射による駆動電流値に 21 kA までの改善が見られた。また、同じリミター位置で上側入射で

は 26 kA、外側入射では 26.7 kA の電流値を達成し、。

GENRAY/CQL3D(raytracing code/Fokker-Planck solver)の計算を用いて波の伝搬・吸収と、これに伴う電子速度分布関数のシミュレーションを行った。これらの計算の結果からは、上側入射の場合は $r/a \sim 0$ (a はトカマクの小半径)の規格化小半径領域で磁力線に沿って進みながら波数を連続的に上昇させる様子が見られ、この領域で高速電子がより多く生成されることが電流駆動に有利にはたらくことが示唆された。下側模擬入射の場合は一度容器の下側領域でカットオフ密度層に反射された後に上側と類似する伝搬を示す。さらに入射直後に初めに波数を減少させる性質を持つことから、より高速の電子を生成し、これが電流駆動の面においても有利にはたらくことがの結果の比較から定性的に示された。

GENRAY の上側入射の場合の計算に見られた磁力線方向の波数(絶対値)の上昇は、アンテナ導入以前に予想されていた磁気シアおよび磁力線方向の磁場勾配による効果では説明できないことがわかり、LHW の波数アップシフトに関する理論的な説明について、コールドプラズマかつ静電近似の枠組みで考察し、磁場の密度・温度・磁場のピッチ角を用いて議論した。平衡の電流値をリスケールすることによって GENRAY によって計算される波数上昇の電流依存性を調べたところ、16 kA 程度を境に $N_{||} = -30$ 程度まで達する急な波数上昇が見られるという点で理論的な予想と数値計算との間に定性的な一致を確認した。また、実験によってプラズマ電流のスキャンを行ったところ、15 kA を超える放電について波数の大幅な上昇によるものと考えられる 200 eV – 300 eV 程度の軟 X 線の放射の増大を確認した。GENRAY/CQL3D の計算でも 16 kA より大きな電流値でこのエネルギー帯の放射が増えることが同様に確認された。

プラズマ存在下でのアンテナのスペクトルを調べるために、COMSOL Multiphysics® を用いた計算を行った。プラズマの過去のプローブデータと実測のアンテナ透過率を元にアンテナ近傍の密度分布を与え、電場を計算した。外側アンテナと上側アンテナのいずれの場合についてもプラズマ中に生じる波数ピークはチューニング時に設定した磁場方向の屈折率 $N_{||} = -5$ (電流方向を正とする)によく一致していたることはないという結果が得られた。外側アンテナの場合、アンテナ近傍の密度を抑制するためのリミターが波の一部を反射する結果、スペクトルのピークが逆方向に現れるという問題点が明らかになり、またこれはリミター位置をトロイダル方向に 70 mm 引き離すことによって大幅に改善できるということもわかった。上側アンテナについては、外側アンテナと同様の密度勾配をアンテナ近傍に与え、アンテナ表面とプラズマのカットオフ密度層の距離についてスキャンを行った。結果として、アンテナ—プラズマ間距離が近づくほどア

アンテナの透過パワーが減少し、プラズマ中への入射パワーが増加するが、距離が必要以上に近くなると、逆方向の短波長成分が励起されることがわかった。アンテナープラズマ間距離は 17 mm–27 mm(アンテナ透過率は 18%–40%)が適切であこの距離に対応するの範囲であることがわかったと考えられた。

本研究は電流立ち上げ過程での LHW の適用可能性について探求することを大きな目標としており、本研究はその中で以下のような意義を持っている。

- ・入射位置ごとの電流駆動の性能を比較し、電流立ち上げ過程での入射位置による特性の違いおよび入射方式の最適化について議論できるようになった。
- ・定常運転状態に比べて比較的電流値の低いトカマク平衡下でみられる特有の波動伝搬の性質について理論から予測し、計算や実験で対応する現象を見出した。現象について無次元量(比誘電率及び磁場ピッチ角)を用いて説明でき、TST-2に関わらず広範な装置パラメータに対して議論が適用できると考えられる。
- ・プラズマ存在下での LHW 入射用アンテナの挙動を調べ、期待される波の構造を維持するための条件を調べた。これによりアンテナの性能改善および将来的なアンテナ設計の指針を得た。