

低域混成波による球状トカマクプラズマの電流駆動

Current Drive in Spherical Tokamak Plasmas by
the Lower Hybrid Wave

高瀬 雄一 (TAKASE YUICHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授



研究の概要

球状トカマクプラズマの閉じ込めに必要なプラズマ電流の生成・増加を中心ソレノイドによる誘導ではなく、低域混成波による電流駆動で実現可能であることを示すのが目的である。この見通しがたてば、球状トカマクを含むトカマク核融合炉の飛躍的な経済性向上が見込める。本研究は世界的にも独自性が高く、波動物理および電流駆動機構の解明に大きく貢献できる。

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学・核融合学

キーワード： プラズマ・核融合、球状トカマク、高周波、電流駆動、自己組織化

1. 研究開始当初の背景

トカマクでは、プラズマ中に流れる電流（プラズマ電流）が不可欠である。トーラス中心部に位置する中心ソレノイド（CS）を用いずにプラズマ電流を生成・維持できればトカマク炉の大幅な経済性向上が可能となる。特に球状トカマク（ST）ではCSの除去は不可欠である。この研究は日本の大学が先導しておきており、世界的に広まりつつある。

2. 研究の目的

高周波（RF）により生成されたSTのプラズマ電流を、低域混成波（LHW）による電流駆動で増大させることが可能なことを示すのが目的である。複数のアンテナを順次用いてLHWを励起し、圧力駆動電流と波動駆動電流の区別を行い、LHW直接励起の必要性を評価する。波動の同時多点計測、電子速度分布関数の計測、プラズマ分布計測、理論に基づくコード計算等の結果を総合し、波動物理および電流駆動機構の解明に貢献する。

3. 研究の方法

実験には東大のTST-2装置および周波数200 MHz、出力400 kWのRF発生装置を用いる。LHWの伝搬を確保するため、プラズマ電流増加中は密度を低く抑える必要がある。電子の速度分布に関してはX線の空間分布およびエネルギー分布計測より情報を得る。波に関する情報は多種類の波動計測（磁場、電場、密度等）を総合して得る。

4. これまでの成果

H21年度には、方向性をもつ進行波を励起できない2ストラップ型ループアンテナを用いて実験を開始した。波動伝搬領域を確保するため、トロイダル磁場を0.3 Tまで増強した。RFによるプラズマ電流立ち上げ時には、開いた磁場配位から閉じた磁気面を持つST配位が自発的に形成される。干渉計を多チャンネル化し、この過程に伴う密度分布の変化を計測した。21 MHzのRF実験で得られた、多チャンネル磁気計測によるRF磁場分布・偏波・波数測定、反射計による局所RF電場の評価、静電プローブによる密度・ポテンシャル揺動計測等の種々のRF波動測定データに相関法を適用した結果、有意な三波結合が観測され、低周波モードは入射されたポンプ波とパラメトリック不安定性により励起された低域サイドバンド波のビートで駆動されていることが明らかとなった。UTST装置では、プラズマ中に挿入した磁気プローブアレイで計測されたRF波動の振幅分布、位相分布を解析した。波の振幅変調に伴う時間遅れの解析より、UTSTプラズマによる吸収は弱く、トロイダル方向に何周も周回していることがわかった。

H22年度には方向性をもつ進行波を励起するコムラインアンテナを用いた実験を開始した。このアンテナはLHWではなく速波（FW）を励起するため、FWをLHWに変換する機構が必要となる。これらのアンテナを使った実験結果より、プラズマ生成直後はプラズマが自

発的に流す圧力駆動電流が支配的だが、更に電流を上昇させるためには、RF が電子を加速する直接駆動電流が重要となることが明らかとなった。これは ST でも LHW による電流駆動が可能であることを示す世界初の成果である。またイオン種 (H/D) によりプラズマ電流立ち上がり特性が異なることも明らかとなった。励起された波の RF 磁場および電場の空間分布および偏波を磁気プローブおよび静電プローブで調べ、パラメトリック崩壊による非線形結合を確認した。また、波動に加速された高エネルギー電子の情報を得るため、X 線エネルギー分布測定用波高分析器の改良等を行った。電流駆動研究にとって重要なバルク電子温度測定用トムソン散乱の性能向上により、OH 放電ではダブルパス方式による温度非等方性も含めた電子温度計測に成功しているが、今後は LHW で立ち上げた密度の低いプラズマでも測れるよう改良を続ける。LHW を直接励起するため、電磁解析コード COMSOL を用いて、アルミナを充填した導波管アレイ (グリルアンテナ) を設計したが、当初予定していた方法では製作することができないことが判明し、製作法の検討に予定以上の時間を要したため、製作は年度を繰り越して行われた。

H23 年度には、コムラインアンテナを用いた実験を継続し、更に高い電流 (15 kA) までのプラズマ電流立ち上げを達成した。励起された波の RF 磁場や RF 電場の周波数スペクトル、空間分布、偏波等を磁気プローブ・静電プローブで調べた結果、非線形過程による 200 MHz の FW の 200MHz 以下の LHW への変換が示唆された。X 線エネルギー分布測定用の波高分析器の改良等を行い、波に加速された高速電子の速度分布関数に関する情報を得た。プラズマ電流の極性反転、X 線測定視線スキャン、プラズマ電流上昇時の時間変化等より、高速電子の速度分布関数の非対称性や時間変化がわかり、RF 進行波が電子を一方向に加速する波動電流駆動の重要性が確認された。また静電プローブで測定される浮遊電位が大きく負になることが観測されており、高エネルギー電子に関する情報が得られる可能性が検討されている。磁気計測に基づくプラズマ平衡の再構成、プラズマの温度・密度分布計測も改良を加えており、これらの結果を総合して電流駆動の物理機構解明を目指している。LHW のプラズマ中心部への伝搬には、0.3 T 程度の磁場が必要なので、この磁場での予備電離に有用な 8.2 GHz の ECH 装置の設置を行った。H23 年度終盤にはグリルアンテナが TST-2 に設置され、直接励起 LHW による電流駆動実験を開始した。FW 励起と LHW 励起の実験結果を比較することにより、モード変換に関する情報が得られ、LHW 直接励起の必要性を判断することができる。

5. 今後の計画

LHW 進行波直接励起アンテナを使い、100kW 程度のパワーを使った実験を推進する。磁気プローブ、静電プローブ、反射計等、複数の方法による波動の同時多点計測、X 線輻射等による電子速度分布関数の計測、プラズマの分布計測等の結果を総合して、電流駆動の物理機構解明を目指す。これら実験結果を世界最高水準のコードを使った計算結果と対比し、波動物理および波動・粒子相互作用の解明を目指す。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

[1] J. Hiratsuka, A. Ejiri, M. Hasegawa, Y. Nagashima, Y. Takase, ... (計 14 名) “Development of a Double-pass Thomson Scattering System on the TST-2 Spherical Tokamak,” Plasma Fusion Res. 6, 1202133-1~3 (2011).

[2] Y. Nagashima, A. Ejiri, Y. Takase, M. Sonehara, H. Kakuda, T. Oosako, ... (計 16 名) “Evaluation of edge electron temperature fluctuation by the use of fast voltage scanning method on TST-2,” Plasma Fusion Res. 6, 2402036-1~5 (2011).

[3] Y. Takase, A. Ejiri, H. Kakuda, Y. Nagashima, ... (計 15 名), TST-2 Group, “Development of a plasma current ramp-up technique for spherical tokamaks by the lower hybrid wave,” Nucl. Fusion 51, 063017-1~9 (2011).

[4] O. Watanabe, A. Ejiri, H. Kurashina, T. Ohsako, Y. Nagashima, ... , Y. Takase, (計 16 名) “Comparison of Hydrogen and Deuterium Plasmas in ECH Start-Up Experiment in the TST-2 Spherical Tokamak,” Plasma Fusion Res. 5, S2032-1~4 (2010).

[5] T. Wakatsuki, Y. Nagashima, T. Oosako, ... , A. Ejiri, Y. Takase, (計 25 名) “Direct measurements of the high harmonic fast wave profile in the UTST spherical tokamak plasma,” Plasma and Fusion Res. 5, 018-1~3 (2010).

[6] Y. Nagashima, T. Oosako, Y. Takase, A. Ejiri, ... (計 14 名) “Observation of beat oscillation generation by coupled waves associated with parametric decay during radio frequency wave heating of a spherical tokamak plasma,” Phys. Rev. Lett. 104 (24), 245002-1~4 (2010).

ホームページ等

http://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/research/kakenhi_h21.html