

論文の内容の要旨

論文題目 A study of electron Bernstein wave for diagnosis and heating of spherical tokamak plasmas
(電子バーンシュタイン波による球状トカマクプラズマの計測と加熱の研究)

氏 名 白 岩 俊 一

球状トカマク (ST) は従来型のトカマクのアスペクト比 (R/a , R : 大半径, a : 小半径) を小さくしたものである。ST は高 β (プラズマ圧力/磁場の圧力) を効率よく閉じ込めることができ、小型で経済的な核融合炉になりうると期待されている。ST のこのような特徴は 1990 年代に英国 START 装置での実験を通じて実証され、近年はさらに大型の MAST (英), NSTX (米) を用いてより核融合炉プラズマに近い条件での研究が進められている。

プラズマを伝播する高周波(RF)波動(プラズマ波動)は古くからプラズマの計測、加熱、および、電流駆動といった目的で様々な周波数が利用されてきた。しかし、ST は従来型のトカマク、ヘリカルと異なりプラズマのほとんどが **overdense** ($\omega_{pe} > \omega_{ce}$, ω_{pe} : 電子プラズマ周波数, ω_{ce} : 電子サイクロトロン周波数) であるという特徴があり、これまで用いられてきたプラズマ波動は利用することができない。例えば、電子サイクロトロン (EC) 波、低域混成波はプラズマ中心まで電波することができず、イオンサイクロトロン周波数帯の速波も比較的低いイオン β で短波長モードにモード変換すると考えられている。このような背景から ST に適したプラズマ波動の利用方法の確立というのが近年重要なテーマとなってきた。事実、START ではプラズマ加熱はオーミック加熱と中性粒子入射によって行われており RF を用いた加熱は未着手の領域であった。

ST において有用なプラズマ波動の一つが本研究のテーマである電子バーンシュタイン波(EBW)である。EBW は電子サイクロトロン周波数帯の波動で、密度カットオフがないので **overdense** のプラズマを伝播することができ、かつ、電子サイクロトロンダンピングで効率よくプラズマに吸収される。これらの特徴から EBW は、**underdense** なプラズマで EC 波が担ってきた役割 (EC 輻射計測、EC

加熱、EC 電流駆動) を果たすことができると期待されている。

EBW を利用する上で課題となるのは、EBW は電場の方向が \mathbf{k} ベクトルほぼ平行な静電波であり、真空中を伝わる電磁波 ($\mathbf{k} \perp \mathbf{E}$) によって直接励起することはできないということである。このため、モード変換を用いる必要がある。モード変換とは、空間的に分布のある媒質中のある点で二つの波動の分散関係が一致すると、その点で二つの波動の間でエネルギーのやり取りが生じることである。電磁波はプラズマに入ると X-mode と O-mode と呼ばれる波動として伝わるので、これらと EBW とのモード変換が必要になる。これまでいくつかのモード変換方法が提案されてきているが、ここで注目したのは弱磁場側からの X-mode の垂直入射という方法 (X-B シナリオ) である。この方法は 1980 年代に比較的低温のプラズマでの報告がなされたが、ST 研究の進展にともない overdense なプラズマの波動加熱が注目されるなかモード変換効率の計算などが見直され、モード変換領域の密度勾配が適切であれば変換効率が 100 % にちかい良好なモード変換が可能になると予測されていた。本研究はこの X-B シナリオをもちいた電子温度計測および電子加熱に関する実験研究である。

本研究は 3 つのステップを経て進められた。まず EBW の実験に先立ち、実験をおこなう ST プラズマ装置、TST-2 を設計建設した。TST-2 は、ちょうど世界的に研究がたちあがろうとしていた ST におけるプラズマ波動の実験を、従来の TST-M 装置とほぼ同じ寸法の小型の実験装置で行うべく設計された。設計に際しては、EBW と並んで ST において有望視されていた高次高調波速波 (HHFW) によるプラズマ加熱も期待できるよう目標とするプラズマパラメータを決めた。実現されたパラメータはプラズマ電流 $I_p \sim 100$ kA、電子温度 $T_e = 200\text{--}400$ eV、イオン温度 $T_i \sim 100$ eV、線積分密度 $n_e \sim 10^{19}$ m⁻³ でありアスペクト比がやや犠牲になったもののプラズマ性能は大きく向上することができた。また、プラズマ加熱実験で加熱効果を検証する上で必須となるプラズマ平衡計測を整備した、それによるとエネルギー閉じ込め時間は 1.5 – 3 ms であり設計時に期待していた範囲であった。

次に TST-2 において EBW による電子温度計測をおこなった。前述のように EBW は電子による吸収が非常に強いため、その輻射は黒体輻射になっている。プラズマ中には磁場分布があるため、輻射強度の周波数スペクトルから温度分布が測定できる。ここでは X-B 過程によって生じた X-mode の輻射強度を測定した。

モード変換効率がわからないと輻射強度から温度を求めることができないので、モード変換効率を支配する密度勾配の計測と輻射強度計測を同時に行う測定器 (Radio-reflectometer) を開発した。Radio-reflectometerにより5-16GHz (基本波から3次高調波に対応する)の電子温度分布を求めたところ、中心温度が200-300 eVで中心がピークした温度分布を得た。基本波、2次高調波、3次高調波から得られた3つの温度分布はつじつまがあっており、または中心温度はX線波高分析器によるエネルギースペクトラムから求めた温度と一致していた。TST-2での実験と平行して米国CDX-UでのEBWの研究にも参加し、そこでは密度勾配を制御することでモード変換効率を能動的に変えることができることを確認した。最後にEBWによる加熱実験を行った。加熱には高電力のマイクロ波源が必要であるので、TST-2を一時的に九州大学に移設し(TST-2@K とよぶ)、そこに設置されている8.2 GHz, 200 kWの発振器を用いた。弱磁場側からX-Bシナリオによる加熱を試みた結果、顕著な加熱効果を確認できた。プラズマ蓄積エネルギーから求めた加熱効率は50%以上であり、又、1 keV以上のsoft X線のマイクロ波入射にともなう増加から高エネルギーの電子が生成されていることが示された。一方、soft X線の分布計測からsoft X線の増加はプラズマ中心部で起きていることが確認できた。光線追跡計算によるとそこはEBWが吸収されると予測される領域にあたる。さらに、モード変換領域の密度勾配が適切でない場合には、加熱効率が下がることも観測された。1次元のfullwave計算より、測定された加熱効率は、モード変換領域の密度分布の変化を考慮すると矛盾なく説明できることが判った。これらの結果から、プラズマ加熱は確かにX-Bシナリオで生じたEBWによってなされており、これがプラズマ中心部まで伝播してサイクロトロン吸収されることで加熱が行われたと結論づけられる。