

様式 I

博士學位論文調査報告書

論文題目

Excitation and Direct Measurement of Electron Bernstein Waves in a  
Torus Plasma  
(トーラスプラズマにおける電子バーンスタイン波の励起と直接検出)

申請者 郭 星宇

最終学歴 令和 4 年 3 月  
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻博士後期課程  
研究指導認定見込

学識確認 平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
(主査) 教授 田中 仁

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 中村祐司

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 長崎百伸

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	郭 星宇
論文題目	Excitation and Direct Measurement of Electron Bernstein Waves in a Torus Plasma (トーラスプラズマにおける電子バーンスタイン波の励起と直接検出)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、球状トカマクやヘリカルプラズマにおいて、遮断密度を越えるオーバードレンスプラズマの電子サイクロトロン加熱・電流駆動(ECH/ECCD)が可能となることで注目を集めている電子バーンスタイン波(EBW)について、初めてトーラスプラズマで波動パターンを直接検出することに成功した研究結果をまとめたものであり、以下の6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、これまで行われてきたEBWの検証実験とEBWを用いたECH/ECCD実験を総括し、直接的検証は一様磁場中の円柱プラズマでしか示されていないこと、核融合炉心に適用されるトーラスプラズマではECH/ECCDの結果としてプラズマパラメータが変化したとする間接的検証に過ぎないことを指摘し、本研究の目的と意義を述べている。</p> <p>第2章では、電子サイクロトロン波(ECW)とEBWの分散関係を導出後、ECWからEBWへの線形モード変換理論を紹介し、O-SXとSX-Bの2段階の変換過程を経るO-X-B方式の場合の変換効率をスラブモデルにおいて計算した結果を述べている。特に、電子密度の勾配長だけでなく磁場の勾配長も考慮したモード変換効率の式を導出し、O-SX変換過程における影響を調べた。また、SX-B変換過程においては、電子密度勾配が急峻な場合、右手遮断からプラズマ外部へトンネル効果で透過が起り、モード変換効率が低下することを計算式で理論的に示した。</p> <p>第3章では、実験装置について説明している。最初にトーラスプラズマ実験装置LATEについて説明した後、EBWの励起・受信システムの4つの構成要素、(1)任意の偏波で磁場に斜めにマイクロ波を入射できる入射アンテナ、(2)5ピン構造の受信プローブアンテナ、(3)そのアンテナを真空容器赤道面内のおよそ25 x 30 cmの領域で走査できる2次元駆動機構、および(4)アンテナからの信号を処理してI/Q信号を生成するミキサー回路について詳述し、動作確認試験の結果を述べている。また、電子密度・温度の大半径方向分布を測定するための可動式ラングミュアプローブと70 GHzミリ波干渉計についても説明している。</p> <p>第4章ではEBWの直接検出実験の結果を述べている。まず、2.45 GHzのマイクロ波で生成したトロイダル電子サイクロトロン共鳴(ECR)プラズマをターゲットプラズマとし、可動式ラングミュアプローブと70 GHzミリ波干渉計を用いて赤道面における電子密度・温度の大半径方向分布を測定し、1.5 GHzのマイクロ波に対するプラズマ遮断(PC)層と高域混成共鳴(UHR)層の位置を得た。</p> <p>次に、このターゲットプラズマに1.5 GHzのマイクロ波をOモードで斜め入射した時、UHR層高磁場側すぐそばの大半径方向約3 cm、トロイダル方向約3.5 cmの領域において、波長約</p>			

2 mm の静電的で後進波の性質を持つ波動パターンを検出した。

また、トロイダル磁場強度を変化させて ECR 層ならびに UHR 層の位置を移動すると、それに合わせて検出領域も大半径方向およびトロイダル方向にそれぞれ移動することを見出し、その場所が幾何光学に基づく光線追跡法から予測される ECW の到達点とほぼ一致することを示した。そして、検出領域が狭い理由として、波が伝播する大半径方向には電子温度が低いために衝突減衰が効き、トロイダル方向には磁力線方向屈折率が変わるためにモード変換効率の良い領域に制限されるということを示した。

さらに X モードの斜め入射時にはモード変換効率が悪く、短波長の静電的な波動パターンは観測されないことを確認し、理論的予測と一致する結果を得た。

第 5 章では、1 次元波動シミュレーションの計算結果と実験結果の比較を議論している。まず、衝突周波数を用いた衝突モデルによる減衰効果を考慮した 1 次元波動シミュレーションモデルを説明し、次に実験条件に即した波動解の境界条件のもと、磁場および電子密度・温度分布を与えて波動方程式を数値的に解き、UHR 層で励起された波長約 2 mm の静電波動が約 2 cm の減衰長で減衰してゆくことを示し、実験結果の主要なパラメータを再現することができた。そして、それらの結果も踏まえ、今後の課題・展望について論じている。

第 6 章では本論文の総括として全体のまとめを行っている。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉心として期待される球状トカマクやヘリカルプラズマの遮断密度を越えるオーバードンスプラズマにおいても電子サイクロトロン加熱・電流駆動(ECH/ECCD)が可能である電子バーンスタイン波(EBW)の励起と直接検出を、トーラスプラズマにおいて初めて成功させた研究結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1) EBW 励起の一方法である O-X-B 方式において、電子密度の勾配長だけでなく磁場の勾配長も考慮したモード変換効率の式を導出した。また、電子密度勾配が急峻な場合、右手遮断からプラズマ外部へトンネル効果で透過が起こり、モード変換効率が低下することを計算式で理論的に示し、モード変換機構の詳細を明らかにした。

2) トーラスプラズマ実験装置 LATE において、任意の偏波で磁場に斜めにマイクロ波を入射できる入射アンテナ、5ピン構造の受信プローブアンテナ、そのアンテナを真空容器赤道面内のおよそ 25 x 30 cm の領域で走査できる 2次元駆動機構、およびアンテナからの信号を処理して I/Q 信号を生成するミキサー回路によって構成された励起・受信システムを構築し、動作試験を行って設計通りに機能することを確認した。

3) 2.45 GHz のマイクロ波で生成したトロイダル ECR プラズマをターゲットとし、ラングミュアプローブと 70 GHz ミリ波干渉計を用いて電子密度および電子温度の大半径方向分布を測定し、1.5 GHz のマイクロ波に対するプラズマ遮断(PC)層と高域混成共鳴(UHR)層の位置を得た。

4) このターゲットプラズマに 1.5 GHz のマイクロ波を O モードで斜め入射した時、UHR 層高磁場側すぐそばで、大半径方向約 3 cm、トロイダル方向約 3.5 cm の領域において、波長約 2 mm の静電的で後進波の性質を持つ波動パターンを検出した。

5) トロイダル磁場強度を変化させて UHR 層の位置を移動すると、それに合わせて検出領域も移動すること、X モードの斜め入射時にはモード変換効率が悪く、短波長の静電的な波動パターンは観測されないことを確認し、理論的予測と一致する結果を得た。

6) クーロン衝突による衝突減衰効果を考慮した 1次元波動シミュレーションを行い、UHR 層で励起された波長約 2 mm の静電波動が約 2 cm の減衰長で減衰してゆくことを示し、実験結果の主要なパラメータを再現することができた。

これらの成果は、これまでトーラスプラズマにおいて利用されてきた O-X-B 方式による ECH/ECCD の配位において初めて EBW の波動パターンを 2次元的に直接観測したものであり、その物理的意義は大きい。また、今後の EBW を用いた高ベータ核融合プラズマの ECH/ECCD への貢献も大きい。

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、令和 4 年 2 月 18 日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