

| | |
|------|--------------|
| 報告番号 | ※ 甲 第 11074号 |
|------|--------------|

主 論 文 の 要 旨

論文題目 電子サイクロトロン共鳴加熱時の吸収電力評価及び熱・粒子輸送メカニズムの解明

氏 名 牧野良平

論 文 内 容 の 要 旨

核融合プラズマの閉じ込め性能向上と制御のためには、プラズマの粒子及び熱輸送の物理機構を解明することが必須である。特に将来の核融合炉心プラズマ内で想定されているアルファ加熱が主に電子加熱であることから強い電子加熱がある場合の輸送の研究が重要である。電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)は、プラズマ中の電子を直接局所的に加熱できる手法であり、核融合炉心プラズマに外挿しうる輸送研究を行う上で極めて有効な手法である。

ECRH時の輸送特性解析をするためには、プラズマに吸収されるECRHパワーの空間分布評価が必要不可欠である。これまでは入射したEC波のレイトレーシング計算結果を基に加熱分布を評価していたが、近年の研究の進展により、実験条件によっては従来のレイトレースでは実験結果を正しく再現できない場合があることが明らかになり、輸送研究を進める上でも、プラズマ加熱の最適化の面でも大きな問題となっている。本研究では、ECRHの加熱電力を正確に評価した上でECRH時の輸送メカニズムを解明することを目的としている。

具体的には、大型ヘリカル装置(LHD)において以下の4点について研究した。

- (1)入射EC波の電力及び偏波実時間計測モニターの開発(第4章)
- (2)新しいECRH吸収電力評価法の確立(第5章)
- (3)ECRH時の電子掃出し現象の解明(第6章)
- (4)ECRH時における水素及びヘリウムプラズマの熱輸送特性比較(第7章)

以下では本論文の各章で述べた内容についてまとめる。

第1章では核融合研究の現状及び本研究の意義について述べた。核融合を実現するために必要となる高温、高密度、長閉じ込め時間を達成するためには、核融合プラズマの熱及び粒子輸送特性を把握し制御する必要がある。将来の核融合炉で主となると考えられているアルファ加熱が主に電子加熱であること、さらにECRHが局所加熱性を持つため能動的なプラズマ制御法として期待されていることから、ECRH時の輸送メカニズムの解明は重要である。ECRH時の輸送解析のためにはECRH電力を評価することが必須であり、この加熱電力評価を用いて輸送解析を行ったECRH時の電子掃出し現象の明確化と水素及びヘリウムプラズマ輸送特性の差異の明確化の重要性について述べた。この議論の中で、本研究で行った上記の(1)~(4)の内容の相関関係についても記した。

第2章では本論文に関わる理論であるECRHの特徴、伝搬、吸収の原理とECRH時にお

ける輸送の原理について記した。Cold及びHotプラズマでの誘電率及び誘電率を用いた波動の伝搬、吸収計算について述べ、正常波と異常波のそれぞれについて吸収効率を示した。その上で、入射ミリ波の偏波状態に依存して波動がどのように正常波と異常波に結合するのかを述べた。これにより、入射ミリ波の偏波を適切な状態で入射することが如何に重要であるかを示した。ECRH時の輸送原理については粒子軌道とクーロン衝突だけによって決まる新古典輸送と、その他の異常輸送を説明し、特にECRHで特徴的であると思われる磁場リップルへの捕捉粒子増加が要因であるものの理論に重きを置き説明を行った。

第3章ではLHDの磁場構造など基本パラメータと計測装置、ECRHシステム、基本となる解析手法、理論・解析コードについて述べた。計測装置については、本研究で特に使用したトムソン散乱計測、電子サイクロトロン放射計測、X線結晶分光計測、X線イメージング結晶分光計測、荷電交換分光計測、反磁性磁束計測、重イオンビームプローブ計測、FIRレーザー干渉計について簡潔に原理とLHDにおけるシステムを説明した。解析手法はアーベル変換、条件付き平均化法とその応用について述べた。さらに、本研究で用いたレイトレーシングコードLHDGauss及びTRAVISコード、LHD実験輸送解析コードTASK3D-aとその中のパワーバランスを評価するモジュールTRsnapについて述べた。ECRHシステムについてはジャイロトロン、準光学的結合器(MOU)、コルゲート導波管、偏波器、パワーモニターの原理とLHDにおけるシステムを簡潔に説明した。

第4章ではECRHのために開発した大電力入射ミリ波電力及び偏波実時間計測モニターについて、その構造及び試験結果について述べた。レイトレーシングコードLHDGaussによりECRH吸収電力分布を求めるためには、入射EC波の電力及び偏波の情報が必要である。LHDにおいて、今まで理論計算に頼っていた入射電力及び偏波状態を実験的に確認できるように、入射ミリ波電力及び偏波実時間計測モニターを開発した。ECRH伝送系の一部であるミリ波の進行方向を90°曲げる機器マイターバンドに一系列のカップリングホールを開け、漏れ出したミリ波を垂直二成分の電場に分け、ヘテロダイン法により位相及び振幅を計測可能なようにした。副導波管の内形を正方形にして波動電場の垂直二成分両方を一系列のカップリングホールで取り出せるようにすることで、今まで問題となっていたアーク放電が起きにくいようにした。さらに、検出器としてFPGA (Field Programmable Gate Array)付高速ADCを用いてミリ波コンポーネントの複雑化を避けることにより、LHDに実装しやすいようにした。LHDのECRH伝送系に設置し試験を行った結果、入射ミリ波の電力及び偏波計算に必要な垂直二成分の電場の振幅及び位相差の検出に成功した。本モニターにより、LHDにおいて実験的にECRHの入射電力及び偏波を計測することが可能となった。本研究で開発したFPGAを用いた大電力ミリ波入射電力及び偏波実時間計測モニターは、将来的にはECRHの偏波及び電力調整のフィードバック制御に繋げることも可能であり、今後のECRHシステムの基準計測と成り得ることを示した。

第5章では加熱吸収電力評価法について、反磁性磁束計測を用いた従来法の問題点を指摘し、新たな方法の提案及びその妥当性の検証を行った。現状LHDなどで主に使われている、ECRH開始直前直後における反磁性磁束計測で測定したプラズマ蓄積エネルギーの時間微分値から求める従来法が反磁性磁束計測の時間遅れに起因して加熱吸収電力を過小評価していることを示した。これは反磁性磁束計測に対するインダクタンス補正不足に起因しているものであり、インダクタンス補正不足の影響が出ない新しい評価法を提案した。新手法で評価した実験において、電子サイクロトロン放射計測とトムソン散乱計測で測定された電子温度・密度を用いてECRH吸収パワーを評価し比較したところ、同等の値となり新手法の妥当性を示した。また、それぞれの吸収電力評価法の特徴をまとめ、加熱位置評価するためのヒートパルス伝搬解析についても説明した。一方で、従来法は解析が非常に簡潔な手法であるため今後も便宜的に使用されることが考えられる。そのため、従来法を用いる場合の過小評価を抑えることができ解析の任意性も小さくなるようにする改良案も示した。

第6章ではECRH時に起きる電子掃出し現象について述べた。特に磁場リップルによる

捕捉粒子の増加が粒子輸送に及ぼす影響を明確にするために、捕捉粒子が生成されやすい磁場リップルのボトムと、捕捉粒子がほとんど生成されないトップ、その中間のニアトップに同電力でECRH入射してプラズマ応答を解析・比較した。本実験では加熱位置が非常に重要となり、ヒートパルス伝搬解析とECRHアンテナスキャンにより正確に加熱位置を調整した。その結果、MW級の大電力ECRH時に、加熱開始直後に加熱位置から局所的な外向き粒子束が生成され、同時に電位上昇していることを初めて観測した。しかしながら、トップ加熱時とボトム加熱時で電子温度・密度・粒子束の変化に違いは見られなかった。以上よりECRH時における捕捉粒子増加に起因する輸送は乱流輸送等と比べ十分に小さいことを明らかにした。

第7章では水素及びヘリウムECRHプラズマの熱及び粒子輸送特性比較について述べた。トカマク型装置では水素、重水素、三重水素と同位体質量の増加に伴い閉じ込め改善することが一般的であるが、ヘリカル型装置では輸送特性に対する同位体効果、質量効果は明確に報告されておらず明らかにすべき点である。LHDでは2016年より重水素実験が予定されている。そこで、重水素実験前に同位体効果、質量効果、荷電効果の明確化及び解析手法・コード整備のために水素及びヘリウムプラズマの熱及び粒子輸送特性を比較した。熱輸送特性比較実験解析ではECRH吸収電力を評価し、その得られた吸収分布をインプットパラメータの一つとしてパワーバランスをTASK3D-a中のモジュールTRsnapを用いて解き、熱拡散係数を比較した。その結果、水素及びヘリウムECRHプラズマで電子熱拡散係数に差がないことを明らかにし、低密度領域において同電子密度では質量が大きいヘリウムの方がイオンの熱拡散係数が小さく熱輸送特性が良いことを示した。粒子輸送特性比較実験ではガスパフを用いた密度変調実験により、粒子拡散係数及び対流速度を求めて比較した。その結果、粒子拡散は周辺部でヘリウムの方が大きいことが明らかになった。本内容は今後の重水素実験及び同位体効果、質量効果、荷電効果の明確化のための参考データとなる。

第8章では本論文のまとめ及び今後の課題と展望について述べた。