

氏 名 笹 尾 一

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第522号

学位授与の日付 平成13年3月23日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 LHDにおけるECE計測とそのプラズマ輸送解析への適用

論 文 審 査 委 員

主 査 教授	須藤 滋
教授	岡村 昇一
教授	本島 修
助教授	久保 伸
教授	関子 秀樹 (九州大学)
助教授	渡邊 清政 (核融合科学研究所)

ヘリカル型核融合炉を実現するためには、世界最大のヘリカル装置 LHD(Large Helical Device)においてヘリカルプラズマにおける熱・粒子の輸送特性を明らかにし、より高い閉じ込め特性を得る事が必要である。電子サイクロトロン放射(Electron Cyclotron Emission, ECE)計測は高空間/高時間分解能を持つ電子温度計測として静的な輸送現象の解析ばかりでなく、過渡的な輸送現象の解析にも用いる事ができ、LHDの輸送を解明するためには必要不可欠である。しかしLHDのような3次元構造を持つ磁場配位におけるECE特性はこれまで詳細には議論されておらず、トカマクのような単純な磁場配位との違いがECE計測に影響を及ぼす可能性がある。ECEによる電子温度計測をLHDプラズマの輸送研究に適用するために、本研究では3次元構造を持つ磁場配位においてECE特性を明らかにし、LHDにおけるECEによる温度計測可能領域の特定と拡大を行なった。

LHDの磁場強度分布は鞍部点構造をしており、赤道面上には、一つの電子サイクロトロン周波数に対して共鳴層がトーラス内側、外側と2箇所存在する。これはトカマクとLHDとの最も大きな違いである。プラズマが光学的に厚い場合は内側の共鳴層から放射されたECEは外側の共鳴層で吸収されトーラス外側に設置されたアンテナまで伝播できない。このためトーラス外側に設置したアンテナだけでは二つの共鳴層によるECE伝播モード(XとO)の混合の影響は無視できるが、トーラス内側領域のECE計測を行なう事ができない。そこでECE計測領域の拡大のためトーラス内側にアンテナを設置し内側共鳴層からのECEを用いた電子温度分布計測を可能とした。

LHDでは磁力線が赤道面に対してなす角度は径方向位置に強く依存する(磁力線のシアが大きい)。ECEの電場ベクトルは主に磁力線に対して垂直である(Xモード)が、磁気シアが存在する場合プラズマの中心部と周辺部で放射されたECEの電場ベクトルは異なった角度をもつ。中心部から放射されたECEは磁力線が回転するのを感じながら伝播する。この時、波の電場ベクトルは磁力線と共に回転する事が理論的に示されている。この偏波の回転特性を実験的に明らかにするために、LHDにおけるECEの偏光特性を測定した。実験結果としては以下の4つが挙げられる。

1. 観測されたECEの偏光角は、放射された径方向の位置によらない。
2. トーラス内外の計測から観測されたECEの偏光角は、最外殻磁気面での磁力線の傾きに対応している。
3. 観測されたECE強度のXモードに対するOモードの比率は70%とかなり大きい。
4. XモードとOモードの強度比はECEの放射される径方向の位置によらない。

実験結果の1と2により磁気シアがあるプラズマでのモード変換の理論と矛盾がないことを示した。また、3と4の実験結果と本研究で提案した反射、壁におけるモード変換、モードの混入、二つの共鳴層の影響を考慮した1次元の放射輸送モデルとに矛盾がないことがわかった。特に4はLHDで観測された非常に大きなOモードの強度の要因として壁における反射とモード変換が重要であることを明らかにした。

次に高密度領域におけるECE強度のふるまいを実験的に調べたところ、密度の上昇につれてECE強度が減少する現象が観測された。この減少はプラズマが光学的に

十分厚い場合にも生じ、小半径方向、集光系、周波数、伝播モードによらずカットオフ密度よりもかなり低い密度で生じる。これらの実験結果は、トカマクプラズマにおけるカットオフ近傍で ECE 強度が急激に減少するという実験結果とは大きく異なり、ヘリオトロン型実験装置においても LHD プラズマではじめて観測された現象である。ECE 強度の密度増加に伴う減少は偏光角特性の解析で用いた反射、壁でのモード変換、モードの混入、二つの共鳴層の影響を考慮した拡張放射輸送モデルでは説明できなかった。そこで磁場配位の 3 次元構造の影響を明らかにするために、有限な大きさを持つアンテナに集光される ECE ビームをマルチレイにより模擬したレイトレーシング解析法を適用した。LHD とアンテナの視線方向の密度分布が同じで、共鳴位置が同じとなるような円断面トカマクについてもレイトレーシング解析法を適用した計算を行い、これを参照データとした。レイトレーシング解析の結果は以下のとおりである。波が共鳴層を通過するまでの軌跡について着目すると、両者ともカットオフ密度直前ではカットオフ面を形成する点では共通である。両者の違いは LHD では、密度が高くなるにつれ徐々に波の曲がりが大きくなるのに対し、トカマクではカットオフ密度近くまで波の曲がり LHD と比べて非常に小さいことである。この違いを定量的に評価するために入射レイの内、共鳴層の径位置でアンテナの視野の拡がりを通るレイのパワーの密度依存性を調べると、トカマクでは密度に対する依存性は現れなかった。このことはこれまでのトカマクの実験結果と矛盾しない。一方、LHD では密度の増加と共に通過パワーは徐々に減少する。この結果は、定性的には LHD の実験結果と良い一致を示す。更に、LHD とトカマクで ECE のふるまいの違いが生じる原因を調べるために、トカマクの断面形状を縦長、円、横長としてレイトレーシングを行った。ここで、3 種のトカマクともアンテナの視線方向の密度分布、磁場分布は共通にしてあり、異なるのは垂直方向の密度分布のみである。レイトレーシングの結果から縦長、円、横長の順に密度が上昇するほど、共鳴層の径位置でアンテナの視野の拡がりを通るレイのパワーは小さくなる事がわかった。これら 3 種のトカマクにおけるレイトレーシングの結果と LHD のレイトレーシングの結果から LHD とトカマクで屈折の違いが生じる主因は、波の進行方向に垂直方向の密度勾配が、一般的なトカマクに比べて LHD では大きいことである事が分かった。

上記の研究に基づき、LHD において ECE 計測を電子温度計測に適用できる領域を特定した。適用範囲において得られた ECE による電子温度計測結果を輸送特性解析に用いた。長時間放電中の新古典熱輸送係数と径電場の振る舞いを調べるため、ECE の実験データを用いて、新古典論による径電場及び熱輸送の予測を行ったところ、LHD のヘリウムガスパフ NBI 長時間放電において、実験的に観測されたプラズマ周辺領域での径電場の正から負への遷移が理論的にも再現できた。また、正の径電場生成時、イオンの新古典輸送が減少することが数値的に示された。しかし、その振る舞いは密度、温度だけでなく水素とヘリウムの量の比率に依存し、ヘリウム放電における NBI による水素の増加は径電場分布に重要な影響を与え、径電場の極性には水素の量に閾値があることを示した。

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、ヘリオトロン型プラズマ閉じ込め装置 LHD における ECE(電子サイクロトロン放射)を用いた電子温度計測とその結果を用いた輸送解析に関するものである。ECE 計測は高空間/高時間分解能を持つ電子温度計測手法として、過渡的な輸送現象の解析にも用いることができ、LHD の輸送特性を解明するための重要な計測器の一つである。LHD のような3次元構造の磁場配位を持つヘリオトロン型装置における ECE 特性は軸対称系のトカマクとは異なる可能性がある。本論文では、LHD の ECE 計測において計測器の設計・製作及び計測を行ない、ECE 計測データを解析することにより、ECE による温度計測可能領域の特定を行なっている。また、電子温度計測結果と電子密度など他の計測データを基に輸送解析を行なっている。

本申請者はトラス内側の ECE 集光アンテナを設計・製作・設置を行なうことにより ECE の計測領域をトラス内側へと拡大し、通常一つの集光系では小半径方向全域に渡った温度分布計測は難しいというヘリオトロン磁場配位特性に対してトラス内外に2つの独立な集光系を設置することで克服した。

LHD では磁気シアが大きいいため磁力線が赤道面に対してなす角度は径方向位置に強く依存する。ECE の電場ベクトルは X モードの場合、磁力線に対して垂直であるため、磁気シア存在下では、プラズマの中心部と周辺部で放射された ECE の電場ベクトルは異なった角度を持つ。中心部から放射された ECE は磁力線の傾きの変化(回転)を受けながら伝播する際に、波の電場ベクトルが磁力線とともに回転することが理論的に示されている。ECE の偏光角(電場ベクトルの方位角)の回転特性を明らかにするために、LHD における ECE の偏光特性を実験的に調べた。実験結果として、放射された ECE は伝播とともに偏向角が回転し、集光アンテナでは放射位置によらずにほぼ同一の偏向角を持つことがわかった。従って、検出器の検波角を適切に選べば、密度が $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上のプラズマでは、ECE 強度の同時分布計測におけるモード混入の影響を抑制することが可能である。更に偏光特性計測実験により光学的に薄い 0 モードが黒体と同程度の放射強度を持つことが明らかになった。また、壁での反射、モード変換、モード混入、二つの共鳴層の効果を取り込んだ拡張した一次元放射輸送モデルを導出・適用し、0 モード強度の大きさと 0 モードと X モードの強度比の小半径方向依存性の実験結果を説明するためには壁での反射とモード変換が不可欠であることを示した。

LHD の高密度実験では、ECE 強度の減少がカットオフ密度よりも十分小さい密度で生じ、トカマクプラズマにおける高密度実験での ECE 強度の密度依存性とは異なる結果を得ている。この性質は、ECE の輻射位置、運転磁場、モード、トラス内外集光系によらずに現れる。この原因を解明するために拡張した一次元放射輸送モデルとレイトレーシング法を適用し、EC 波の二つの共鳴層の存在、0 モードの混入、壁での反射・モード変換、軌跡の曲り、計測視野の広がりについて調べた。EC 波の二つの共鳴層の存在、0 モードの混入、壁での反射・モード変換の効果については、計測 ECE 強度の密度依存性への影響は極めて小さいことがわかった。一方、軌跡の曲り、計測視野の広がりについては、有限の視野の広がりをガウス光学近似の導入とマルチレイの適用により解析し、レイの曲りの効果が LHD における ECE 強度の密度依存性の

原因の有力な候補であることを示した。数値計算結果により LHD とトカマクの違いが生ずるのは、主に視線方向の密度勾配と視線垂直方向の密度勾配の大きさが反映されるためであると解釈した。

LHD における ECE 温度計測の適用範囲の特定を踏まえて、LHD のヘリウムパフ、水素 NBI の長時間放電の輸送解析を行なった。研究の動機はヘリウムパフ、水素 NBI の長時間放電では放電の間に水素とヘリウムの比率が変わり、この原因によって輸送特性が変わる可能性に着目したものである。数値計算は新古典理論に基づき行ない、径電場の計測結果との比較において、イオン種比が重要なファクターとなりうることを示した。

本論文で、申請者は LHD において ECE 計測器の設計・製作・設置及び計測実施を行ない、ECE の偏光特性・伝播特性、ECE 強度の密度依存性を実験的、数值的に解析し、ECE 計測の確立に大きく貢献している。一方、この研究を通じて、密度依存性や伝播特性についてヘリオトロン装置のような磁気シアの強い系においての特有な現象の発見とその原因の物理的な解明を行なっている。また、単に計測に留まること無く計測結果を用いて輸送解析も行い、電場形成におけるイオン種比の重要性を指摘した。従って、本審査委員会は、新しい知見を得た成果と当該分野への貢献の程度から判断して、本論文が博士学位論文として十分な資格があると認めた。