

| | |
|----------|--|
| 氏名 | 伊 神 弘 恵 |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (エネルギー科学) |
| 学位記番号 | エネ博第 130 号 |
| 学位授与の日付 | 平成 18 年 3 月 23 日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当 |
| 研究科・専攻 | エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻 |
| 学位論文題目 | 電子バーンスタイン波への高効率モード変換のためのマイクロ波の最適入射法の研究 |

| | |
|--------|---------------------------------|
| 論文調査委員 | (主査) 教授 前川 孝 教授 近藤克己 教授 岸本泰明 |
|--------|---------------------------------|

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱・電流駆動に関連して近年注目されている電子バーンスタイン波への高効率モード変換を図るためのマイクロ波の最適入射法の定式化と解析結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章は序論であり、以下のことを述べている。すなわち、近年高効率の核融合炉の実現を目指して高 β プラズマの閉じ込めと加熱の研究が活発になっている。マイクロ波による電子サイクロトロン加熱はプラズマ加熱と制御の重要な手段であるが、高 β プラズマにおいてはプラズマ密度も高く、電磁波モードはプラズマ中心に侵入不可能になり、静電波モードである電子バーンスタイン波が唯一の伝播可能モードとなる。この場合、入射マイクロ波電力がプラズマ表層にある高域混成共鳴層において電子バーンスタイン波にモード変換され、これがプラズマ中心部に伝播し、電子サイクロトロン共鳴吸収される。問題はいかに入射マイクロ波電力を高効率で高域混成共鳴層に送り込むかである。従来のX波の垂直入射法はプラズマ密度勾配が急峻な場合のみ有効であり、OXB法と称せられているO波の斜め入射法は逆に密度勾配が緩やかな場合のみ有効である。O波とX波の適切な混成による干渉効果を用いれば高域混成共鳴層に送り込めるマイクロ波電力を最大にできると着想し、最適混成法を定式化して、従来の方法では対応できなかった中間密度勾配領域においてもほぼ100%の変換効率が得られることを示した。

第2章においてプラズマスラブモデルを用いて最適混成モード導出の定式化を行っている。電力直交する二つの基本電磁波モードと電子バーンスタイン波間の散乱行列を導入し、モード変換効率が最大になる最適混成モードを導出した。さらに、モード変換過程における電力保存性から散乱行列がユニタリーであることを示し、この関係を用いて電力直交する基本電磁波モード間の散乱行列成分のみにより最適混成モードと最適変換効率を記述できることを導いた。加えて、時間反転波動解を考察して散乱行列の非対角成分間の関係式を得、この関係式を用いて、プラズマ中の電子バーンスタイン波からモード変換を経て真空中に放射される電磁波が上記の最適混成モードと同一の偏波をもち、モード変換効率も最適変換効率に等しくなることを明らかにした。

第3章において、z軸方向に一樣な磁場が印加され、x軸方向に電子密度が直線的に増加するプラズマスラブを導入し、z-x面に沿ってマイクロ波を入射した場合の結果を述べている。散乱行列成分はプラズマ波動方程式を数値解析して得た。密度勾配長が入射波の自由空間波長より十分短い場合は磁場に垂直に入射したX波のみが大きなモード変換効率を持ち、密度勾配長が入射波の自由空間波長程度まで長くなれば斜め入射したO波が大きなモード変換効率を持つが、これらの中間の密度勾配領域では、どちらも大きな変換効率を持たない。この中間領域において最適混成モードはほぼ100%の変換効率をもつことを示した。さらに、最適混成モードは高効率モード変換効率を得られる入射角の範囲が広く取れることを示し、入射角を変えることにより電子バーンスタイン波の吸収領域も変えることができるので、プラズマ制御に有利であると論じ

ている。

第4章は、マイクロ波の入射波数ベクトルが z - x 面に垂直な成分も持つ一般的な場合について解析を進め、広いパラメータ範囲におけるモード変換特性を概観した。すなわち、入射角を屈折率ベクトルの y 成分 N_y と z 成分 N_z で表し、 N_y - N_z 面上にモード変換効率を等高線表示したモード変換透過窓の特性を、自由空間波長で規格化した密度勾配長とサイクロトロン周波数で規格化した入射波周波数の広いパラメータ範囲にわたって調べ、モード変換透過窓が4種類の型に分類できることを示した。密度勾配長が非常に短い領域では、モード変換透過窓は「磨りガラス」型となり N_y - N_z 面で幅広い透過分布を持つが、そのピークでも変換効率は100%以下である。密度勾配長が次に短い領域では「垂直X」型となり、ここではX波の磁場に垂直入射($N_z=0$)が完全なモード変換を与える。密度勾配長が自由空間波長程度になると、「OXB」型になり、従来のOXB法が完全なモード変換を与えるが、100%のモード変換効率を得られる入射角の範囲は非常に狭い。「垂直X」型と「OXB」型の中間の密度勾配長領域が「最適混成モード」領域であり、最適混成モードにより広い入射角範囲で100%に近いモード変換効率を得られることを明らかにした。さらに、入射周波数が高くなるとともにモード変換透過窓が順次「磨りガラス」型、「垂直X」型、「最適混成モード」型、最後に「OXB」型に移り変わることを示し、これらの数値解析結果の実験への適用を論じた。

第5章は総括であり、本研究をまとめたものである。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱に用いられる電子バーンスタイン波への高効率モード変換を図るためのマイクロ波の最適入射法の定式化と解析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. プラズマスラブにおけるモード変換過程を解析するために、電力直交する二つの基本電磁波モードと電子バーンスタイン波間の散乱行列を導入し、電力直交する入射基本電磁波モードの適切な混成による干渉効果によりモード変換を最適化できることを示し、最適混成モードの定式化に成功した。

2. モード変換過程における電力保存性から散乱行列がユニタリーであることを示し、この関係を用いて電力直交する基本電磁波モード間の散乱行列成分のみにより最適混成モードと最適変換効率を記述できることを導いた。さらに時間反転波動解を考察して散乱行列の非対角成分間の関係式を得、この関係式を用いて、プラズマ中の電子バーンスタイン波からモード変換を経て真空中に放射される電磁波が上記の最適混成モードと同一の偏波をもち、モード変換効率も最適変換効率に等しくなることを明らかにした。

3. z 軸方向に一樣な磁場が印加され、 x 軸方向に電子密度が直線的に増加するプラズマスラブについて z - x 面に沿ってマイクロ波を入射した場合を数値解析し、密度勾配長が入射波の自由空間波長より十分短い場合に有効なX波の垂直入射法や、密度勾配長が長い場合のO波の斜め入射法(OXB法)など、従来の方法では対応できなかった中間密度勾配領域の広い範囲にわたって最適混成モードがほぼ100%の変換効率を持つことを示した。さらに、最適混成モードは高効率モード変換効率を得られる入射角の範囲が広く取れることを示した。

4. マイクロ波の入射屈折率ベクトルが、 z 成分(N_z)に加え y 成分(N_y)も持つ一般的な場合について N_y - N_z 面上にモード変換効率を等高線表示したモード変換透過窓を導入し、入射波の自由空間波長で規格化した密度勾配長とサイクロトロン周波数で規格化した入射波周波数の広いパラメータ空間において、モード変換透過窓が大きく4種類の型に分類できることを示し、入射周波数が高くなるとともにモード変換透過窓が、 N_y - N_z 面の全領域にわたって完全なモード変換が得られない「磨りガラス」型から順次、100%の変換効率を得られる領域を持つ「垂直X」型、「最適混成モード」型、「OXB」型に移り変わることを明らかにし、実験での周波数の選択に有用な知見を与えた。

以上、本論分は高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱に用いる電子バーンスタイン波への高効率モード変換を図るためのマイクロ波の最適入射法を明らかにしたもので、学術上、實際上、寄与するところが少なくない。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、平成18年1月24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。