

報告番号	甲 第 11474 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 プラズマ加熱用大電力ミリ波伝送系の数値シミュレーション

氏 名 藤田 宜久

論 文 内 容 の 要 旨

磁場閉じ込め核融合装置では、長時間の安定的な定常状態維持のために、外部よりプラズマを加熱することが必要不可欠である。プラズマの加熱手法の 1 つである Electron Cyclotron Resonance Heating (ECRH) はミリ波帯の電磁波をプラズマ中電子のサイクロトロン運動に共鳴させることにより加熱している。ECRH 装置では、大電力発振管であるジャイロトロンで発生させたミリ波をコルゲート導波管を用いて核融合装置まで長距離伝送する。この伝送系は、直線的に伝送する導波管と伝送路を直角に曲げるマイターバンドで構成されている。マイターバンドは 2 つの円筒コルゲート導波管を直角に配置し、それぞれの導波管軸と 45 度になるように反射板を入れた構造となっているため軸対称性が崩れている。それ故、理論的な解析は困難である。マイターバンド内を電磁波が伝送する際、入力モードとは異なる高次モードが発生することが知られており、入力モードに最適化された伝送系では高次モードの伝送損失が大きくなる。加えて、基本モードに近いモードは伝送損失が少ないが、基本モードを前提に設計されたアンテナの性能を劣化させるなどの問題点がある。以上の理由から、高次モードの発生を抑えることは ECRH の加熱効率向上に直結する。

効率的にプラズマを加熱するためには、プラズマ中の電磁波伝播に合わせて電磁波の偏波状態を変化させて入射する必要がある。ほとんどの ECRH 装置では偏波状態の制御を行うために、マイターバンドの反射板に導波管とは異なるコルゲード構造を加工したマイターバンド型偏波器が用いられている。従って、通常のマイターバンド以上に偏波器を用いた場合には複雑な高次モードが発生する。平面波近似が成り立つ場合には、反射板の溝の深さが入力波の 1/4 波長と 1/8 波長の 2 種類のマイターバンド型偏波器を組み合わせることによって任意の偏波状態を作り出すことができる。実験や理論計算では、溝のついた反射

板のみを用いて偏波特性が調査されているが、実際に円筒コルゲート導波管と組み合わせでの検証は未だ不十分である。

上記の課題を明らかにするため、本論文ではマイターベンド、並びにマイターベンド型偏波器を含む伝送系をモデル化し、数値シミュレーションを用いて高次モードの発生状況の詳細説明、及び偏波状態の詳細説明を行うことを目的とする。本論文は 5 つの章から構成される。

第 1 章では、本論文の動機付けとなる研究背景、及び目的を述べた。加えて、プラズマの加熱装置と伝送系に用いられるマイターベンド、並びにマイターベンド型偏波器の構造についても言及した。

第 2 章では、電磁波伝播シミュレーションに使用する Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法について説明した。FDTD 法は電磁場の過渡現象を再現することができる数値計算手法であるため、電磁場解析手法として広く使われている。先行研究では導波管の材質を完全導体として扱っていたため、導波管壁上でエネルギー損失は原理的に求められなかった。そこで、本論文では導波管壁の材料(アルミニウム)を扱うため、電気抵抗を Drude モデルを用いて表現した。Drude モデルでは、金属中の抵抗は周波数の関数として表せられるため、逆フーリエ変換を行い時間領域の値に変換し、FDTD 法に組み込んでいる。この改良より、導波管壁でのエネルギー損失を含め、伝送系内で起こる電磁場解析をより正確に扱うことができるようになった。

上記手法の有効性を示すため、金属平面に平面波を入射する数値シミュレーションを行い、振幅反射率の理論値との比較を行った。シミュレーション結果と振幅反射率の理論値がよく一致していることから、Drude モデルを組み込むことにより金属表面で起こる現象を正しく計算できることを確認した。さらに、直線円筒コルゲート導波管の電磁波伝播シミュレーションを行い、入力した HE_{11} モードは崩れることなく伝播することを確認した。この計算結果を近似理論による解と比較することで同手法の正当性について検証した。

第 3 章では、マイターベンドが伝播モードに及ぼす影響を評価した。シミュレーションモデルでは、マイターベンドを用いて二本の直線円筒コルゲート導波管を L 字に接続しており、コルゲートのピッチ、導波管の内径などは実際に実験で使われている導波管の値を用いている。上記モデルに対して HE_{11} モードを一方の端面より入力し、電磁波伝播シミュレーションを行った。定常状態の電場強度空間分布より、解析的に予想されるビートがシミュレーションにおいても確認され、ビート長が約 60 mm または約 120 mm であることがわかった。また、理論値との比較の結果、約 60 mm のビート長は、 HE_{22} モードまたは EH_{23} モード、約 120 mm のビート長は、 HE_{42} モード、 TE_{02} 、モード、または TM_{03} モードが発生していると推定した。

第 4 章では、溝の深さが入力波の 1/4 波長のマイターベンド型偏波器における電磁波の偏波特性を明らかにした。マイターベンド型偏波器の端面より直線偏波の HE_{11} モードを入力し、電磁波伝播シミュレーションを行い、定常状態の電場強度の空間分布を求めると、マ

イターベンドと同様にビートが確認できた。すなわち、コルゲート構造をもったマイターベンド型偏波器でも反射の影響により高次モードが誘起されていると考えられる。続いて、偏波器における偏波特性を同シミュレーションで求め、理論値との比較を行い、両者が導波管軸付近で非常に一致していることがわかった。

最終章では、本論文の総括、及び今後の課題をまとめた。

本論文では、Drude モデルを組み込んだ FDTD シミュレーションにより ECRH の伝送路内の電磁波伝播現象を定量的に計算した。この結果は実験・近似理論計算を再現するもので、シミュレーションの妥当性を保証している。以上により、本研究で開発した数値シミュレーションは、ECRH の電磁波伝搬現象を忠実に再現しており、理論計算だけでは求められない伝送系構造の最適化設計のための強力なツールであることを示すことができた。本シミュレーションコードとそれにより得られた知見により、ECRH における伝送系の高効率化、高性能化、さらには大電力化に貢献できると考える。