OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	核融合プラズマ加熱電流駆動用大電力ミリ波帯高周波入射システムに関する研究
Author(s)	高橋, 幸司
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/45960
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

氏名	高橋幸司
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	第 18923 号
学位授与年月日	平成16年5月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文名	**核融合プラズマ加熱電流駆動用大電力ミリ波帯高周波入射システムに関する研究**
論文審査委員	（主査） 教授 岡田 成文 （副査） 教授 西川 雅弘　助教授 上田 良夫

論文内容の要旨

核融合プラズマの高性能化や定常運転を達成するために必要な誘導加熱電流駆動手段として、ミリ波帯高周波加熱電流駆動装置が有効である。本論文では、加熱電流駆動及びミリ波帯高周波入射システムの高効率化と核融合炉に適した入射システムの開発を目的として行ってきた研究及び得られた成果を纏めたものであり、7章構成になっている。

第1章では、本研究の背景と核融合プラズマにおける加熱電流駆動の役割・必要性について述べ、研究の意義を示した。

第2章では、大電力ミリ波帯高周波入射システムとプラズマへの結合性能の高効率化研究、核融合炉用大電力入射システムの開発課題について記述し、研究目的を明確に示した。

第3章では、システム効率向上を目的とした2軸可動入射システム（アンテナ）の開発とその実用性について、アンテナの設計・製作、トカマクプラズマを用いた性能確証実験を通して探求した。シンプルなPush-Pull機構を応用して2軸可変性を確立すると共に、プラズマ消滅時に発生し得る電磁力の低減が可能な窒化珪素を用いたアンテナミラーを開発した。設計通りの高周波放射の実証とプラズマ加熱電流駆動特性の取得を達成し、2軸可動アンテナによる幅広い加熱電流駆動の可能性を実験的に示した。

第4章では、ミリ波の高効率伝送とプラズマへの高効率結合に関する研究について述べた。コルゲート円形導波管を採用した低損失伝送システムを開発し、国際熱核融合実験炉（ITER）等の核融合炉における伝送システムの設計条件にもなっているMWレベルでの伝送を世界で初めて実証した。また、高効率結合のためのミリ波の入射偏波の最適化条件の取得とその条件を用いたプラズマ加熱の高効率化に成功し、高効率結合の手法を確立した。

第5章では、入射システムを構成する最重要機器の一つである真空窓について、1MW定常伝送が可能な真空窓開発を目的として行ったサファイア窓とダイアモンド窓の開発について述べた。サファイア及びダイヤモンドの誘電特性や熱伝導特性等について、高温や中性子照射下での変化を明らかにし、サファイア窓では0.5 MW、ダイアモンド窓では 1MW の定常伝送が可能であること示した。

第6章では、3～5章で述べた開発結果を反映した核融合炉（ITER）用先端可動型入射システムの設計、その入射システム全体やシステムの構成機器であるフロントシールド、設計上最もクリティカルである可動ミラー、冷却配管等の熱解析、応力解析、電磁力解析、核解析データの取得、更に、それらのデータを用いた最適設計や可動ミラー用特殊ベアリングの開発などについて詳細に記述した。

第7章では、ITER と比べてプラズマからの熱流速や中性子照射条件が更に厳しくなる発電実証炉のような将来炉用として、角形コルゲート導波管と導波管入射側に設置する可動ミラーから成る遠隔駆動型入射システムを提案した。その新方式のプロトタイプの製作と大電力試験を実施し、角度可変範囲+/−12° で伝送効率 95%の性能を達成し、遠隔駆動方式の原理実証に成功した。

総括では、本研究で得られた成果のまとめを記述した。

論文審査の結果の要旨

核融合によるエネルギー生産の研究において、現在、投入パワーの 10 倍以上の出力を 100 秒間以上取り出すことのできる国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor ; ITER）の建設の準備が進められている。本論文は、核融合炉のためのプラズマの立ち上げ、加熱、プラズマ維持のための電流駆動、プラズマ制御等に必要不可欠なミリ波帯大電力高周波入射システムを ITER で要請される仕様に従って構成するための開発研究にかかわる成果をまとめたものであり、以下のように要約される。

(1) 大電力ミリ波帯高周波はプラズマを誘導方式電流駆動のタイムスケールより長時間維持し核融合炉を実現するために必要不可欠であることを述べている。また長時間のプラズマ加熱、電流駆動、プラズマ制御を行うために、大電力ミリ波帯高周波システムは導波管伝送システム、真空窓、先端駆動型入射システムから構成され、それぞれの開発研究課題を明らかにしている。

(2) 大電力ミリ波帯高周波システムの導波管伝送システムとして、コルゲート円形導波管に HE_{11} モードを用いる事により、高周波源であるジャイロトロンからの 0.96 MW の高周波電力を、マイターベントや方向性結合器、偏波器等を含む 40 m にわたるシステムの出力端まで 88%の効率で 2.0 秒間伝送できることを実証している。これは HE_{11} モードがジャイロトロンから出力されるガウスモードとの結合効率が高いこと、また、このモードの高周波電界が導波管壁で小さく伝送損失が小さいこと、他のモードより広い周波数帯域を有する導波管が製作可能であることに起因することを明らかにしている。

(3) ミリ波のプラズマへの結合効率はプラズマ中の空間位置、磁場強度、磁場及びミリ波伝播の方向、偏波等に依存する。このため可動平面ミラーを用いてミリ波の伝播方向をトロイダル方向、ポロイダル方向の 2 方向に可変とし、また、フォーカスミラーを用いて特定の空間位置への集光を実現している。また、偏波制御は溝付反射板を用いて実現している。このように開発したミリ波入射システムを実際にプラズマ装置に適用し、結合効率を測定している。一方、光線追跡コード及びフォッカープランクコードを組み合わせて結合効率を計算により求め、実験と良い一致が得られることを示している。プラズマの急激な消失時に可動ミラーに働く電磁力を軽減させるためにセラミック板上に銅をコーティングしたミラーを開発し、冷却水導入機構もスパイラル状の配管を用い、ミラーの運動に伴ってこれが伸縮する際の応力も解析により許容値以下にできることを確認している。ミラーの軸受けのボールベアリングについては中性子照射試験により照射後の健全性を確保できることを示している。

(4) 真空窓に関しては開発を進めてきたサファイアディスクに関して温度上昇に伴って誘電損失率が増加する上に誘電率の実数部の変化により、無反射設計が阻害されジャイロトロンの運転に障害が生じ、透過パワーは直径 180 mm のディスクに対して冷却機構を用いても 0.5 MW に限られることを示している。これに対し、ダイヤモンドディスクでは直径 100 mm、厚さ 1.85 mm に対して 1 MW の長時間使用が可能なことを示している。また材料照射実験炉（JMTR）により 0.1 MeV 以上のエネルギーを持つ中性子照射試験を行い、誘電率、及び、強度に関してはフルーエンスが ITER で想定される量の 10^3、熱電導率に関しては 10^2 倍でも劣化が見られず、真空窓材、及び電力ミリ波伝送材としての健全性が確保されることを示している。

(5) 大電力ミリ波のプラズマ導入装置をプラズマからの中性子や熱流束に対して遮蔽するための構造物を含め、全システムの設計を行い、これに対して電磁力解析、熱解析、核解析を実施し、システムとしての成立性を示している。

(6) 今後 ITER より過酷な環境を持つ発電実証炉に適用できる入射システムとして、遠隔駆動型ミリ波帯高周波入射システムを提案し、モックアップの試作、及び、その原理実証を行い、また、高周波伝送性能、及び、高周波照射性能を明らかにしている。これにより、更なる開発課題を明らかにし、将来の入射系の設計指針を示している。

以上のように、本論文では ITER に対する大電力ミリ波帯高周波入射システムの成立性を明らかにし、核融合炉実現に対して寄与するところが大きい。よって本論文は、博士論文として価値のあるものと認める。