

氏名	しだ ら ひろ ゆき 設 楽 弘 之
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 100 号
学位授与の日付	平成 16 年 9 月 24 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	Development of a 70 GHz ECRH System on the Heliotron J Device (ヘリオトロン J 装置における 70GHz ECRH システムの開発)
論文調査委員	(主 査) 教授 水内 亨 教授 佐野史道 教授 前川 孝

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高温プラズマ生成・加熱制御、電流分布制御、不安定性制御等に有用な手法である局所電子サイクロトロン加熱 (ECRH) を、エネルギー理工学研究所の高温プラズマ実験装置ヘリオトロン J で実現するため、70GHz ECRH システムの開発、すなわち最適設計・製作、主要要素の性能試験ならびに実機への適用によるプラズマ実験を行ない、その結果をまとめたもので、全 8 章からなっている。

第 1 章は序論で、本研究の背景および目的について記してある。核融合プラズマ研究あるいは高温プラズマ研究における ECRH 法の有用性、特に、プラズマ物性研究やプラズマ制御の観点から ECRH による局所加熱の有用性を述べ、それを可能とするための ECRH システム開発の必要性を述べている。

第 2 章では、ECRH 法の物理的ならびに工学的利点について述べ、次いで ECRH 法に関する、プラズマ中の電磁波伝播・吸収に関する基本理論、ならびに ECRH によるプラズマ電流駆動に関する基本理論を概説している。

第 3 章では、本研究で開発する ECRH システムを適用するプラズマ実験装置であるヘリオトロン J の特徴を概説し、装置の機械的大きさ、プラズマ閉じ込め領域の 3 次元的形状、大きさ、磁場強度分布など、対象となる装置側からの、ECRH システム設計に必要な情報を示している。

第 4 章ならびに第 5 章において、前章の情報を基に、ヘリオトロン J 装置用 70GHz ECRH システムに要求される条件を決定し、それに基づいたシステム設計を行い (第 4 章)、さらに、設計・製作されたシステム主要要素の性能を低電力模擬試験ならびに実負荷試験により検証した結果を記している (第 5 章)。

システムの安全性、制御性、効率などを考慮した結果、システム構成を、準光学伝送方式 (MOU (光学整合器) およびランチャー) と導波管伝送方式 (コルゲート導波管、マイターバンド) を組み合わせたシステムとして設計し、導波管伝送系は内部を減圧し、大電力ミリ波伝送中のアーキングを抑制するようにしている。また、導波管伝送系路上 3 箇所マイターバンド部を利用して、偏波モード制御や実時間電力測定を可能とするものとして設計している。偏波モード制御には、従来の溝付反射板が、大電力では、しばしばアーキングを生ずることに鑑み、これを改善するため、溝形状を波型に変更することを提案し、アーキングの少ない直線偏波ならびに楕円偏波の制御が可能な偏波器の設計・製作に成功した。また、実時間電力測定器として、負圧型導波管で使用可能で、かつミリ波の E/H 両面の同時計測ならびに反射波の計測も可能な信頼性の高い電力測定器の開発に成功している。ミリ波 Gaussian ビーム準光学伝送を用いるランチャー部においては、電力の局所化に必須である焦点深度の深いビーム集束ミラーの設計に際し、等位相設計と楕円体ミラー設計の二つの方法を試みている。両者の低電力試験の結果、等位相設計では良好な集光が得られないことを指摘、楕円体ミラーにより良好な集光が得られることを実証した。また、ビーム方向制御用平面ミラーに関しては、ヘリオトロン J 装置から来る機械的制約を克服し、必要なビーム振り角を確保する手段として、当該ミラーの取替えを容易とする構造とした上で、ミラー背面の傾斜を変えたものとの交換により、必要な範囲の振り角が得られるよう工夫をしている。これらにより、ヘリオトロン J 実験での希求条

件（集束ビーム径／プラズマ径比0.15，ビーム入射角制御範囲として，トロイダル方向には磁気軸に対し $0^{\circ}\sim\pm 90^{\circ}$ ，ポロイダル方向には中心からプラズマ小半径の80%位置まで）を満たし，伝送効率84%（世界最高レベル），入射電力0.4MW（パルス幅0.2秒）の安定した70GHz ECRHシステムを実現している。

第6章では，本研究で設計・製作されたECRHシステムの有効性を，計算機シミュレーションを用いて解析している。スペイン CIEMAT 研究所で開発されたミリ波伝播・吸収シミュレーションコード TRECE のヘリオトロンJへの移植を行い，入射角，偏波モードの制御により，電力吸収効率が高くかつ局所加熱が可能であることを示した。また，鞍型磁場強度分布を持つトロイダル位置からのミリ波入射を行えば，さらにミリ波電力吸収効率が上がり，100%電力吸収が可能となることを示した。

第7章では，本システムを適用して実施したプラズマ実験結果との比較を行っている。実機での運転により，入射電力0.4MWの安定した70GHz ECRH実験が可能であることを検証し，さらに第二高調波 ECRH によるプラズマ生成・加熱いずれの場合においても，Xモード成分の制御が重要であることを示した。また，ヘリカル軸ヘリオトロン配位において初めて ECRH による電流駆動（ECCD）を検証し，駆動電流値のトロイダル入射角依存性を実験的に示した。また，本研究で可能となった集光ミリ波ビームによるプラズマの中心加熱により，良好なプラズマ閉じ込めが得られることを明らかにした。

第8章は，本研究の総括であり，本研究で得られた成果について要約し，今後の課題を展望している。

#### 論文審査の結果の要旨

本論文は，エネルギー理工学研究所のプラズマ実験装置ヘリオトロンJを対象に，同装置における機械的制約の中で，電子サイクロトロン共鳴加熱法（ECRH）による高温プラズマの生成・加熱制御，プラズマ電流分布制御，プラズマ不安定性制御等を可能とする ECRH システムを開発し，ヘリオトロンJ実験に供し，広い入射角可変範囲を持つミリ波局所入射，ならびに入射電力実時間計測を実現した研究成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) ミリ波 Gaussian ビーム準光学伝送における集束ミラーに関して，等位相設計によるものと楕円体ミラー設計によるものを比較し，前者では良好な集光が得られないことを明らかにするとともに，後者により良好な集光が得られることを実験的に検証した。
- (2) 偏波モード制御用に，矩形溝を波型溝に改良した反射板を用いることにより，高電力においてもアーキングの発生が少なく，直線偏波ならびに楕円偏波の制御が可能なミリ波用偏波器の開発に成功した。
- (3) 導波管伝送系路上マイターベント部を利用して，導波管を伝播するミリ波の E/H 両面の同時計測ならびに反射波の計測を可能とすることにより，これまで容易ではなかった信頼性の高い実時間電力測定器の開発に成功した。
- (4) これらにより，ヘリオトロンJ実験での希求条件（集束ビーム径／プラズマ径比0.15，ビーム入射角制御範囲として，トロイダル方向には磁気軸に対し $0^{\circ}\sim\pm 90^{\circ}$ ，ポロイダル方向には中心からプラズマ小半径の80%位置まで）を満たし，伝送効率84%（世界最高レベル），入射電力0.4MW（パルス幅0.2秒）の安定した70GHz ECRHシステムを実現した。
- (5) ミリ波伝播・吸収シミュレーションコード TRECE を適用して実施したプラズマ実験結果との比較により，第二高調波 ECRH によるプラズマ加熱において，入射ミリ波中の X-mode 成分強度比が重要であることを実験的に示し，入射角，偏波モードの制御により，電力吸収効率が高くかつ局所加熱が実現できることを明らかにした。
- (6) さらに，プラズマ生成時においても，同成分強度比が重要であることを実験的に示し，第二高調波 ECRH によるプラズマ生成機構に関する貴重なデータを提供した。
- (7) ヘリカル軸ヘリオトロン配位において，ECRH による電流駆動（ECCD）を検証し，駆動電流値のトロイダル入射角依存性を示した，また，中心加熱により良好なプラズマ閉じ込めが得られることを明らかにし，ECRH 加熱機構やプラズマ閉じ込めに関する貴重なデータを提供した。

以上要するに，本論文は，高電力 ECRH システム開発上重要な要素である集光システム，偏波制御器，電力測定器に係る有用かつ重要な工学的知見を与えるのみならず，第二高調波 ECRH 加熱機構やプラズマ閉じ込めに関する研究の発展に重要な知見を与えるものであり，学術上，実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16年7月2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。