

|           |                                  |
|-----------|----------------------------------|
| 氏 名       | まえ ばら すなお<br>前 原 直               |
| 学位(専攻分野)  | 博 士 (エネルギー科学)                    |
| 学 位 記 番 号 | 論 エ ネ 博 第 11 号                   |
| 学位授与の日付   | 平成 12 年 1 月 24 日                 |
| 学位授与の要件   | 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当          |
| 学位論文題目    | トカマク核融合装置における低域混成波電流駆動システムに関する研究 |

論文調査委員 (主 査)  
教 授 吉 川 潔 教 授 井 上 信 幸 教 授 前 川 孝

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、次期トカマク型実験装置用低域混成波電流駆動 (LHCD) システム開発において、その解決に必要不可欠な高周波源である大出力クライストロンの開発研究、伝送系の簡素化に重要な高周波真空窓の開発、大出力高周波電力のプラズマへの安定入射条件である低ガス放出アンテナの開発、またプラズマからの高熱負荷に対するプラズマ対向用アンテナ先端部モジュールの開発について論じた結果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は、トカマク型実験装置における核融合研究の状況及び次期トカマク実験装置における核融合研究の目的を示し、本研究の背景を示している。また次期トカマク実験装置における LHCD システムの役割及び特性について述べ、現状の LHCD システムと比較して開発に必要な研究課題を提案し、本研究の位置付けと意義を示している。

第2章の大出力クライストロンの開発研究では、安定動作に関して 2 GHz 帯クライストロン電子銃部の高耐電圧化への改良を行うために、低い温度で同等の電流を引出せるイリジウム (Ir) コーティングカソードの採用及び電極表面電界強度の低減化を提案し、実験においてクライストロンの管内放電回数を 10% 以下に低減化することに成功している。またこの電子銃部の高耐電圧化への改良によりビーム電圧を従来の 84 kV から 94 kV まで高めることが可能となり、従来の 1.0 MW-10 秒の最大高周波出力を 1.4 MW-10 秒に更新するとともに、これらの結果から安定動作させるに必要な表面電界強度の設計条件を明らかにしている。次期 LHCD システムで要求されている 5 GHz クライストロンに対しては、低パービアンズ (0.7  $\mu$ P) を採用した高効率化設計を提案し、短パルスクライストロンにおいて、715 kW-63% と 800 kW-61% の高周波出力を実証している。この結果から連続動作するクライストロン開発に対する出力キャビティの設計方針を確立している。

第3章の高周波真空窓の開発では、大電力用高周波真空窓として、ピルボックス部の軸方向を標準サイズである TE<sub>11</sub> モードの管内波長 (約  $\lambda_g/4$ ) の 4 倍、すなわち TE<sub>11</sub> モードの管内波長  $\lambda_g$  の長さ程度にオーバーサイズとすることを提案し、2 GHz 帯における高周波試験において、マルチパクタリング放電のしきい値を標準サイズの 150 kW から 1000 kW に高められることを示し、さらにピルボックス内部に配置される真空仕切板であるセラミックスにかかる電界強度を約 60% 軽減してセラミックスの誘電損失を押さえることにより、温度上昇を約 35% 軽減することを実証している。これらの結果をベースに、5 GHz 帯ピルボックス型高周波真空窓として、軸長さ (約  $\lambda_g$ ) の位置に対して、径方向にもオーバーサイズにした高周波設計を解析コードで設計し、標準サイズピルボックス型高周波窓の約 2.5 倍の 500 kW の定常運転が可能であることを導出している。

第4章の低ガス放出アンテナの開発では、JT-60 U/LHCD アンテナからのガス放出特性の評価を行い、アンテナからのガス放出率が  $10^{-5}$  Pam<sup>3</sup>/sm<sup>2</sup> 以下でアンテナ独自の真空排気系が不要であることを明らかにしている。また準定常運転を目指した低ガス放出化アンテナの開発として、高温で機械的特性に優れたアルミナ分散強化銅 (DSC) の採用を提案し、準定常運転が可能な高周波出力試験装置において、試作した DSC モジュールのガス放出特性評価を行っており、ガス放出率に関するデータベースを確立している。DSC モジュールからのガス放出率は、モジュール温度 300℃ において  $4 \times 10^{-6}$  Pam<sup>3</sup>/sm<sup>2</sup> 程度の低い値であり、LHCD アンテナとして使えることを明らかにしている。

第5章では、プラズマ対向用アンテナ先端部モジュールとして、耐熱特性に優れた炭素系繊維材 (CFC) を採用したモ

ジュール開発を提案している。試作したモジュールに対する電子ビームによる熱負荷試験では、LHCD アンテナの熱負荷設計条件 ( $1.5 \text{ MW/m}^2$ ) の約 2 倍を 2 分間照射しても、銅メッキの剥離及び接合面の不具合は観測されず、製作技術の健全性を実証している。また高周波出力試験装置での伝送試験では、95 kW–1000 秒の準定常運転を実証し、ガス放出率は、モジュール温度  $130^\circ\text{C}$  において、 $10^{-5} \text{ Pam}^{-3}/\text{sm}^2$  以下の問題ないレベルであることを明らかにしている。

第 6 章では、結果を総括し、今後の研究課題を明記している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、次期トカマク型実験装置用低域混成波電流駆動 (LHCD) システム開発において、その解決に必要な不可欠な大出力クライストロン、伝送系高周波真空窓、大出力高周波電力用低ガス放出アンテナ、耐高熱負荷プラズマ対向用アンテナ先端部モジュールの開発研究について、研究した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. 大出力クライストロンの開発研究では、既存の 2 GHz クライストロン電子銃部の高電圧化に関し、イリジウム (Ir) コーティングカソードの採用及び電極表面電界強度の低減化により管内放電回数 10% 以下の低減化を実現した。これを基に次期 LHCD システムで要求されている 5 GHz クライストロンに対して、低パービアンス ( $0.7 \mu\text{P}$ ) を採用した高効率化設計を提案し、短パルスクライストロンにおいて、715 kW(出力)–63%(効率)と 800 kW–61% の高周波出力を実証した。

2. 大電力高周波真空窓の開発では、ピルボックス部の軸方向を標準サイズである  $\text{TE}_{11}$  モードの管内波長 (約  $\lambda_g/4$ ) の 4 倍、すなわち  $\text{TE}_{11}$  モードの管内波長  $\lambda_g$  の長さ程度にオーバーサイズすることを提案し、これによりマルチパクタリング放電のしきい値が大幅に高められ、かつ温度上昇も軽減できることを実証した。

3. 低ガス放出アンテナの開発では、JT-60 U/LHCD アンテナからのガス放出特性の評価によりアンテナ独自の真空排气系が不要であることを明らかにした。また準定常運転を目指した低ガス放出化アンテナの開発において、高温で機械的特性に優れたアルミナ分散強化銅 (DSC) の採用を提案し、準定常運転が可能な高周波出力試験装置において試作した DSC モジュールのガス放出特性評価を行い、ガス放出率に関するデータベースを確立した。

4. プラズマ対向用アンテナ先端部モジュールとして、耐熱特性に優れた炭素系繊維材 (CFC) を採用したモジュール開発を提案し、電子ビームによる熱負荷試験で LHCD アンテナの熱負荷設計条件 ( $1.5 \text{ MW/m}^2$ ) の約 2 倍の照射に対して健全性が確保できることを実証した。また、高周波出力試験装置での伝送試験では、95 kW–1000 秒の準定常運転を実証し、ガス放出率は十分低いレベルであることを明らかにした。

以上の研究は次期トカマク核融合装置における低域混成波電流駆動システムの構築にはいずれも必要不可欠な要素技術であり、学術上、実用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 11 年 12 月 6 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。