

報告番号	※ 甲 第 10613 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 高精度協同トムソン散乱計測のためのミリ波帯大電力ジャイロトロンにおける不要モード発振抑制に関する研究

氏 名 小笠原 慎弥

論 文 内 容 の 要 旨

環状磁場閉じ込め核融合装置では磁場で高温・高密度のプラズマを閉じ込めることによって、核融合反応を起こす。現在、重水素と三重水素（トリチウム）の D-T 核融合反応による核融合発電の実現を目指し世界中で研究開発が行われている。D-T 核融合反応では中性子と高速イオン（ α 粒子）が生成される。中性子エネルギーはブランケットに吸収され熱エネルギーとして取り出され、高速イオンはプラズマ中の他のイオンを加熱し D-T 反応を維持する。したがって D-T 反応を維持するためには高速イオンの安定した閉じ込めが必要不可欠であり、そのために高速イオンの挙動や緩和過程を解明することが重要である。既存のイオン温度計測手法では計測が困難な高温・高密度プラズマに対する有効なイオン温度計測手法として、協同トムソン散乱（CTS）計測が期待されている。

序章では、エネルギーおよび環境問題について述べ、恒久的かつ環境に対する負荷が少ない新しい発電方法として核融合発電がその候補の一つに挙げられることを述べた。磁場によって環状の核融合プラズマを閉じ込める研究が世界中で行われており、トラス装置で大きなエネルギーを持つ α 粒子（高速イオン）を安定に閉じ込めることが重要であり、その挙動と緩和過程を理解することが重要であることを述べた。既存のイオン計測手法では困難が予想される高温・高密度プラズマ領域でも有望な CTS が注目され、大電力ミリ波ジャイロトロンを光源とする ECH システムを利用した CTS が行われていることを述べた。LHD におけるミリ波帯 77 GHz 大電力ジャイロトロンを用いた CTS 計測において大きな障害となっている不要モード発振について記述し、不要モード発振を抑制する手法を開発し、CTS 計測へ適用することが本研究の目的であることを述べた。

第 2 章では本研究を遂行する上で重要なジャイロトロン発振の原理およびモード競合理論について述べた。ジャイロトロンはミリ波からサブテラヘルツ帯で高出力の発振が可能な唯一の電子管である。サイクロトロンメーザー作用によってジャイロトロンが発振する条件について述べると共に、モード競合理論について述べ、電子の運動方程式と電場の運動方程式を交互に計算することにより最終的に共振器内で励起されるモードとその強さが推定できることを述べた。本研究ではモード競合計算コードを用いて 77 GHz ジャイロト

ロンの発振特性を解析し、不要モードの発振メカニズム及び発振する条件を解明し、不要モード発振抑制のための知見を得た。

第3章では本研究で使用する機器について記述した。本研究で行ったジャイロトロンの性能評価試験ではLHDで稼働しているECHシステムとCTS計測で使用しているヘテロダインの受信器を利用した。ECHシステムはジャイロトン出力を効率よく伝送するように最適化されている。本研究においてもECHシステムの伝送系を利用してジャイロトロンの性能評価を行った。また、ジャイロトロンを構成する電子銃や共振器などについて述べるとともに、共振器部および電子銃カソード部磁場、アノード電圧、ビーム電流などジャイロトロンの発振特性を決める基本的なパラメータについて述べた。さらに、ジャイロトロンの性能評価を行う上で重要なジャイロトロンの発振周波数と発振出力の計測方法について述べた。ジャイロトン出力をヘテロダイン受信器によって中間周波(IF)信号に変換し高速デジタイザでIF信号を取り込むことにより、ジャイロトロンの発振周波数の時間変化を詳細に計測した。またパワーモニタおよびダミーロードを用いてジャイロトロンの発振出力を計測し、運転条件による発振出力の変化を実測した。

第4章で不要モードを同定し不要モード発振を抑制するための知見を得るため、発振開始電流計算とモード競合計算を行い77 GHz ジャイロトロンの発振特性を解析した結果について述べた。通常ジャイロトロンの運転条件を考慮して計算を行った結果、 $V_a(\alpha)$ 、 I_b の過渡期では主モードTE_{18,6}モードとは異なる不要モードTE_{17,6}が発振するという計算結果が得られた。また、 V_a 定常期ではTE_{18,6}モード、と共に、TE_{17,6}モードとTE_{19,6}モードが同時に発振するという計算結果が得られた。また、ジャイロトロンの動作パラメータ B_c 、 I_B 、 α 、に対して発振モードやその出力がどのように変化するかを計算した。その結果、77 GHz ジャイロトロンの発振モードや発振出力は B_c や α に大きく依存していることを明らかにした。また、 B_c を高くすることによって、低い α でもTE_{18,6}モードのみが発振するという結果が得られた。一方で高い B_c ではTE_{18,6}モードの発振出力が低下する事が予想された。

また、高出力の主モード発振が得られる B_c では不要モードが励起されることによって主モードが定常状態まで成長することができるという非常に興味深い計算結果が得られた。さらに α の上昇に伴い不要モードから主モードへ遷移する過程を追跡するためにモード競合計算の拡張を行い、 α の変化と共振器内の電場の履歴を考慮した計算を行った。低い α で励起された不要モードによって主モードがノイズレベル程度の強度で励起され、 α が上昇することにより、主モードが高出力で励起される条件を満たし不要モードのエネルギーのほとんどを奪い高出力で発振するという過程を計算で再現した。また、同じ B_c 、 α でも共振器内で励起されている電場によって発振の振る舞いに変化するという結果が得られた。

第5章では述べたモード競合計算の結果に基づきジャイロトロンの運転試験を行い、不要モード発振抑制の実験的検証を行うと共に、CTS計測へ適用可能なジャイロトロンの運転手法の開発を行った結果について述べた。第一段階としてCTSヘテロダイン受信器および高速デジタイザを用いて77 GHz ジャイロトロンの周波数計測を行い不要モードの発振特性を調査した。計測で確認された不要モードの周波数とほぼ同じ共振周波数であるTE_{17,6}モードは他のモードより発振開始電流は低い値であり発振しやすい事が判明した。またモード競合計算との比較から計測で確認された不要モードの一つをTE_{17,6}モードと同定した。

また、アノード電圧の過渡期、つまり低いピッチファクターの条件下では $TE_{17,6}$ モードが発振し、アノード電圧の上昇に伴いピッチファクターが増加すると $TE_{18,6}$ モードが $TE_{17,6}$ モードとの競合の結果発振する計算結果と 5 章で述べた周波数計測の結果は定性的に一致していると言える。

さらにモード競合計算の結果に基づく不要モード発振抑制試験の結果、共振器部磁場を上昇させることにより不要モードの発振の抑制に成功した。しかしながら主モードの発振出力は通常運転時の 3 割程度まで大きく低下した。この問題を解決するために共振器部磁場コイル電流、電子銃カソード部磁場電流およびアノード電圧の最適化を行うことにより、発振出力は向上した。しかし発振出力は通常運転時の 5 割程度に留まり、発振効率の低下によるコレクタへ負荷の増大により、発振パルス幅が大幅に制限されることが判明した。

この問題を解決するために磁場の上昇を最小限にすることにより、発振出力の低下を最小限に抑えた状態でジャイロトロン定常時に発振する不要モードを抑制し、完全な抑制が困難なアノード電圧の過渡期に発振する不要モードは PIN スイッチを用いて不要モード信号をブロックするという手法を考案した。その結果、発振出力は通常運転時の 9 割程度で CTS 計測に必要な発振パルス幅の条件を満たすことに成功した。CTS 計測においてこの手法は実際に適用され、不要モードによる障害を受けない計測が可能となった。CTS 計測では受信アンテナの掃引に伴い予想されるアンテナ位置でバルク領域からの散乱信号を取得することに成功した。これによって不要モード信号による CTS 受信器のアンプの飽和やノイズの混入を回避し、散乱信号の取得が可能になったことは本研究の成果であるといえる。今後の課題として高速イオンからの散乱信号の検出のために、発振出力を犠牲にせずに V_0 過渡期に発振する不要モードを抑制する運転手法の実用化が望まれる。現時点では通常運転と同じ発振出力で V_0 過渡期の不要モードを完全に抑制することは困難であると予想される。一方で発振のヒステリシス特性が確認された B_0 では CTS 計測に適用可能な発振出力やパルス幅を維持してジャイロトロン OFF 直前直後の信号を用いた精度の良い差し引きが行えることが期待される。

以上の述べたように本研究では LHD における CTS 計測で大きな障害となっていた不要モード発振のメカニズムを解明し、不要モード発振を抑制する手法の適用に成功した。また、現在開発中の CTS 計測への応用を目的としたサブミリ波帯ジャイロトロンにおいても本研究で得られた不要モード発振に関する知見が今後のサブミリ波ジャイロトロン設計・開発に大きく貢献できるものであると考えている。