

氏名 益 田 伸 一

学位（専攻分野） 博士（学術）

学 位 記 番 号 総研大甲第200号

学位授与の日付 平成8年3月21日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Strong Electron Heating in CHS ICRF Heating
Experiments

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 松 岡 啓 介

教 授 大久保 邦 三

助教授 武 藤 敬

助教授 金 子 修

教 授 渡 利 徹 夫

（核融合科学研究所）

助教授 小 川 雄 一（東京大学）

論文内容の要旨

ICRF加熱法は、多くのトカマク装置においてその有効性が実証されている。ヘリカル装置においても、ICRF加熱の研究は進められているが、成功しているとは言い難い。その理由はヘリカルリップル捕捉粒子と呼ばれるピッチ角の大きな高エネルギーイオンは、閉じ込め領域から急速に逃げていくからである。核融合科学研究所の小型ヘリカル装置であるCHSにおいても2種イオン混成加熱（ICRF加熱の一種）実験の目的のためにアンテナを設置し、大電力ICRF加熱実験が行われた。特に、CHSは低アスペクト比のヘリカル装置であるので、高エネルギーイオンの閉じ込めに関しては不利である。この条件の元で良い加熱を得るためには、電子加熱モードを採用することが有利であり、本研究では、CHSでの電子加熱の物理を研究するとともに、ヘリカル系に特有なヘリカルリップルに捕捉された高エネルギーイオンを検出するための検出器を開発し、ICRF加熱で生じる高エネルギーイオンの損失と加熱特性について研究を行った。この論文で報告している強い電子加熱機構のヘリカル系での存在の可能性と損失イオンの直接測定は、本研究で初めて行われたものである。

実験に用いられた5本のアンテナは、3台の発振器で駆動される。プラズマとのインピーダンス整合をとり、加熱実験を行った。発振器の周波数は全て26 MHzである。CHSではポロイダルコイルの電流値を制御することによって磁場配位を変化させることが可能である。ICRF加熱実験の磁場配位として、総合的に見て閉じ込め特性の最も良い内寄せの磁気軸=92.1 cmに設定した。高エネルギーイオンの閉じ込めにのみ限れば、更に内寄せ配位の方が良い。一方、ICRF加熱に伴う真空壁からの不純物流入を抑えるために、壁のボロンコーティングを行った。

加熱実験は、ECH（電子サイクロトロン共鳴加熱）によって生成されたプラズマにICRF高周波パルスを入射することによって行われた。プラズマを作るためのガスは水素+重水素であるが、水素の割合が少なく、水素はマイノリティイオンと呼ばれる。磁場およびマイノリティ比（水素／（重水素+水素））をスキャンした結果、磁場1.7 T、マイノリティ比30%の時に最大の加熱効率を得た。この時、2種イオン混成共鳴層はプラズマ中心に位置している。この条件の元で、高密度プラズマに高電力ICRF加熱パルスを入射した結果、プラズマの蓄積エネルギーが2.2 kJまで上昇し、パルスの間プラズマを加熱された状態に保持することに成功した。この時、NBI（中性粒子入射加熱）に匹敵する加熱効率が得られた。

プラズマの密度の上昇とともに、電子温度は高くなり、高密度領域では弱磁場側励起にも拘わらず、強い電子加熱が観測された。これに対して、低密度領域ではイオン加熱が支配的になる。2種イオン混成共鳴層において、速波がイオンバーンシュタイン波（IBW）にモード変換し、ランダウ減衰によって電子加熱が生じると考えられるが、モード変換の標準的な理論をCHSに適用してモード変換率を計算した結果、実験結果を説明できるほどの変換率は得られないことが分かった。また、この理論で計算されたモード変換率は密度の上昇とともに減少するので、この点からも実験結果を説明出来ない。

実際のプラズマは、無限に広がっているわけではないので、2種イオン混成共鳴層

の高磁場側に位置するRカットオフ層の存在を考慮しなければならない。弱磁場側から2種イオン混成共鳴層に入射した速波の一部は、トンネル効果によって強磁場側に透過するが、強磁場側に存在するRカットオフ層で反射されてプラズマ中心に戻り、強磁場側から2種イオン混成共鳴層に入射する。Lカットオフ層で反射した速波と強磁場側Rカットオフ層で反射した波が、干渉効果によって打ち消し合うような条件では、モード変換率は大きくなる。逆に、干渉効果によって増幅される条件では、モード変換率は小さくなる。これらの条件は、プラズマパラメータに依存する。このモデルをCHSに適用して速波からIBWへのパワーの変換率を計算した。高密度では、モード変換率は従来の理論の3倍程度にまで改善される。また、プラズマの密度が低い場合は、モード変換率も低く電子加熱は弱くなる。これらの結果、新しいモデルを使うと実験結果をより適切に説明することができる。

損失イオンを測定するために新たに考案した検出器は、ピッチ角75度で5 keVのエネルギーのイオンを検出できるように設計され、最外殻磁気面の外側の捕捉粒子の軌道上に設置された。ICRF加熱電力を変化させて行った測定では、イオン損失は加熱電力とともに増加した。放射損失の増加によって、プラズマの崩壊が生じる放電では、放射損失が増加する少し前にイオン損失の急激な増大が観測された。従って、ICRF加熱で生じた捕捉粒子が真空壁を叩き、不純物の流入を引き起こしている可能性が高い。また、プラズマの密度が低い時に、高い密度の時よりも多くのイオン損失が観測された。これは、2つの観点から定性的に説明される。イオン加熱は低密度の時の方が強いので、より多くの高エネルギーイオンが生じる、更に、ICRF加熱で生じた高エネルギーイオンは、バルクプラズマ粒子との衝突によって熱化されるが、この効果は低密度では小さいので、高エネルギーイオンは衝突でエネルギーを失う前に、閉じ込め領域から逃げやすい。この結果、イオン損失が大きくなる。

電子加熱と高速イオン損失の抑制はCHSでは良い加熱結果を得るために必須の条件であるが、本論文ではこれらの物理機構を解析的、実験的に明らかにした。大型のヘリカル装置（LHD等）において良い加熱条件を考察するためにも、本研究の結果は応用できるものである。

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、トロイダルヘリカル磁場に閉じ込められたプラズマのICRF（イオンサイクロトロン共鳴周波数帯）加熱に関するものである。ICRF加熱は電磁波を用いるため、核融合プラズマからの中性子を遮へいする上で伝送経路を比較的自由に設定することができる利点がある。また、加熱出力あたりのコストが安いこともあり、ICRF加熱はトカマクでは精力的に行われて来た。ヘリカル装置でのICRF加熱においては、磁力線に垂直方向に加速されたイオンが閉じ込め磁場のヘリカルリップルに捕捉され、トロイダルドリフトにより閉じ込め領域から逃げてしまうという困難がある。この困難は装置が小型であるとより厳しくなるため、現在までのヘリカル装置ではICRF加熱は成功しているとは必ずしも言い難い。

益田君は本論文において、コンパクトヘリカルシステム（CHS）と呼ばれる小型ヘリカル装置において、水素（少数イオン）と重水素の2種イオンプラズマへのICRF加熱実験を行った。ヘリカル装置としては世界で初めてICRF加熱のみによってプラズマの保持に成功するとともに、従来の約2倍のプラズマ加熱効率を達成した。これらは、ICRFによって主に電子を加熱した結果である。これらの実験において得られた主な成果は次の通りである。

1) プラズマの密度を比較的低密度($2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)から高密度($4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)までスキャンした結果、低密度では主にイオンが、また、高密度では主に電子が加熱されたことが分かった。これらは、イオン、電子のパワーバランスを考察することによって説明されている。

2) ICRFによって磁力線に垂直方向に加速されたイオンは、CHSでも同様に、磁場のヘリカルリップルに捕捉されトロイダル方向に局在している間にトロイダルドリフトによって逃げてしまうので、それらの損失イオンを測定する検出器を製作した。密度が低い場合には、損失イオン検出器の信号が大きく、その信号レベルはプラズマ中の代表的な不純物である酸素量及びプラズマからのふく射パワーと良い相関がある。この結果は、損失イオンが壁を叩き、壁に付着していた不純物がプラズマ中に混入し、ふく射損失パワーが加熱パワーに匹敵するようになると、プラズマはふく射崩壊によって保持されなくなるという描像を支持する。

3) 小型ヘリカル装置のICRF加熱では電子を加熱する方が得策であることに着目しつつ、高密度の場合の電子加熱の機構を解明した。速波が低磁場側から2種イオン混成共鳴層に接近することのみを考える従来の理論では、電子加熱に寄与するイオンバーンシュタイン波への高いモード変換率は得られない。考察を一步進め、高磁場側のRカットオフ層からの反射波とプラズマ中のLカットオフ層からの反射波との干渉を新たに考えることにより、高いモード変換率を説明することが出来た。また、この考えに基づき、LHDでの電子加熱のための条件を提示している。

本論文では、ICRF加熱の機構を実験的、理論的に系統立てて研究している。特に、ヘリカル装置におけるICRFによる電子加熱の考察はこれからの研究に新しい知見を提供するものである。論文内容からは、本論文は学位論文としてふさわしい学術内容を持っていると認められる。

益田君の学位論文に関して、専門分野、基礎分野について口述により試験を行った。高周波パワーの伝送、プラズマ中の波の伝搬、吸収、反射、ヘリカル磁場配位の特徴、プラズマパラメータの計測、などについての広範囲な質問に的確に答えた。これにより、研究を行う上で十分な知識を有するものと判断できた。また、論文は英語で書かれており、質疑応答の結果、英語についての学力も十分であると認められた。