

氏名(本籍地)	横山 拓郎		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 7249 号		
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理解物質科学研究科		
学位論文題目	Optimization of Ion-Cyclotron Range of Frequency Wave Heating in the Minimum-B Configuration on GAMMA 10 (GAMMA 10 極小磁場配位におけるイオンサイクロトロン周波数帯波動加熱の最適化)		
主査	筑波大学教授	工学 博士	市村 真
副査	筑波大学准教授	理学 博士	片沼 伊佐夫
副査	筑波大学教授	工学 博士	今井 剛
副査	筑波大学教授	工学 博士	中嶋 洋輔

### 論 文 の 要 旨

本研究は、開放端磁場配位 GAMMA 10 の非軸対称磁場アンカー部における、イオンサイクロトロン周波数帯(Ion-Cyclotron Range of Frequency : ICRF)の電磁波を用いた高密度プラズマ生成に関するものである。

アンカー部は、ベースボール型コイルにより形成される非軸対称ミラー磁場配位となっており、装置全体の磁気流体力学的安定性を確保するには、極小磁場配位となるアンカー部に、高ベータプラズマを生成・維持することが必要であることがわかっている。典型的放電では、アンカー部中央面付近に共鳴層を持つ 9.9MHz、10.3MHz の高周波波動をセントラル部に設置されている Type-III アンテナを用いて励起し、セントラル部とアンカー部の間に存在する磁場変換部におけるモード変換を経て、アンカー部での加熱を行っている。このとき、Type-III アンテナで励起される波動は、同時にセントラル部におけるプラズマ生成も担っており、アンカー部加熱を切り離して制御することができない。本研究では、アンカー部加熱の自由度を確保し、合わせてアンカー部の加熱を強化することを目的としている。アンカー部 ICRF アンテナの改良による直接加熱の高効率化や2本のアンテナを用いたアンテナ間位相制御によるアンカー加熱の最適化を行っている。実験と並行して、磁場構造が磁力線方向、磁力線に垂直方向に変化するアンカー部を含む領域における ICRF 波動励起、吸収を解析するため、京都大学福山教授により開発された有限要素法を用いた 3次元波動解析コード(TASK/WF)を導入し、GAMMA10 磁場配位やプラズマ形状に即した計算を行った。さらに、セントラル部からアンカー部に渡って計算するために必要となる要素数の増加、それに伴う計算時間の増加に対応するため、並列化計算コードの導入も行い、短時間で計算を行える環境を構築した。

従来からアンカー部に取り付けられていた直線型アンテナのプラズマ負荷抵抗が極端に小さいことが実験的に明らかとなり、よりプラズマ形状に合わせた2重円弧型(DAT)アンテナを新たに設置した。プラズマ負荷抵抗は、アンテナとプラズマの結合度を表してお

り、3倍以上の改善が見込まれることが計算により示された。実験においても、加熱効果が大きく改善することが観測されている。西側アンカー部では、アンカー部共鳴層を挟んで2組のアンテナを設置し、アンテナの位置による加熱効果の検証を行った。単独周波数 9.7MHz の高周波を用いて行い、セントラル部側にあるとき、顕著な効果を観測した。プラズマは、セントラル部で主として生成され、アンカー部に流れてくると考えられる。加熱の情報に関しては、プラズマから放出される荷電交換中性粒子に感度を持つ2次電子計測器(SED)信号を参照している。既存装置を用いたさらなる加熱強化を目的として、セントラル部に設置されている ICRF アンテナと同一周波数の高周波を用い、アンテナ間位相差を制御して印加する方法を導入した。実験では、西側アンカー部に取り付けられた2組のアンテナについて比較を行い、異なる位相差依存性を持つが、単独入射を超える効率の良い位相差が存在することが明らかとなった。SED 信号の上昇から、アンカー部共鳴層に到達する波動が強くなる位相差において、セントラル部を含めて密度上昇とアンカー部加熱が効率的に起こることが明らかとなった。複雑な磁場構造を持つアンカー部における波動の励起と伝播を解析するために、TASK/WF コードを用いて、2本のアンテナ間位相制御により両アンテナの両側に波動が伝搬する条件、両アンテナ間に波動が局在する条件を、領域ごとの波動の吸収電力を用いて評価した。各領域における吸収電力もアンテナ間位相差に強く依存することが示されている。西アンカー部2組のアンテナについて、どちらもアンカー部中央付近に存在する共鳴層側に波動が伝搬する位相差で実験において観測された SED 信号増大の位相差とほぼ一致することが明らかとなった。セントラル部の密度上昇は、波動のセントラル側へ伝搬する位相差と一致しておらずプラズマパラメタの上昇がアンカー部共鳴層における加熱が主となる位相差で起こることが明らかとなった。また、ガス入射等の調整により、従来の10倍を超す密度上昇も観測されており、位相制御の最適化が重要であることが明らかとなった。

#### 審 査 の 要 旨

〔批評〕 本論文は、タンデムミラー実験において最も重要な課題の一つであるプラズマの高密度化に関して、実験結果と計算結果を検討・比較し、その物理的機構を明らかとするとともに、その解決法の一つを示したものである。実験に即した配位における理論的考察を詳細に行い、また、実験結果との良い一致を示したことは、今後の更なるアンカー部の高密度化を検討する上で有効であることを示唆している。GAMMA10 装置における高密度生成は、エンド部の開放端磁場配位を利用したダイバータ模擬実験におけるプラズマパラメタ制御に多大に貢献することが期待でき、核融合研究におけるタンデムミラー装置の発展に大きく貢献したものと評価できる。

〔最終試験結果〕 平成27年 2月12日、数理解析科学研究所学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕 上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。