

# 論文審査の結果の要旨

氏名 及川 聡 洋

トカマク型装置は熱核融合を目指す高温プラズマの磁気閉じ込め方式のうち、最有力候補の1つである。しかし閉じ込めに必要なプラズマ電流を、変圧器による誘導電場で生成する限り、定常運転ができない。この欠点を克服する方法の1つが、申請者のテーマ「中性ビーム入射による非誘導電流駆動」である。これはイオンを高エネルギーに加速し、それをガス中の荷電交換により、閉じ込め磁場を突破できる中性粒子ビームに変え、トーラス状プラズマに接線方向から打ち込むもので、中性粒子はプラズマ中で再電離し、プラズマ中の電子やイオンとクーロン散乱しつつ減速する。この過程でビームはプラズマを加熱するとともに、トーラスの大周方向に大きな電流を作るので、準定常的にプラズマ電流が維持される。論文の第1章では、こうした概念が説明される。

第2章では、実験の舞台となる原子力研究所の大型トカマク JT-60U の構造、動作、診断方法などが説明される。電流駆動にはエネルギー約 500 keV の重水素ビームが、世界で初めて中性化の容易な負イオン状態を経て作られ、プラズマに打ち込まれる。以下これを N-NB と略す。多彩な診断システムのうち、本研究にとって重要なものは運動シュタルク効果 (MSE) 分光計で、これは N-NB からのイオンが磁場中を高速で走る際、ローレンツ電場を感じることで、そのイオンの発する可視輝線の波長が分裂する効果を用いる。分裂は、輝線光子の電場がローレンツ電場と平行なとき最大になるので、MSE 分光計を用いると局所的な磁場の向きを精密に測定できる。著者は MSE 分光計の較正に貢献しており、結果は 2.2 節に詳述される。

JT-60U ではパルス放電ごとに、MSE 分光計を含む診断装置群から、大量の計測データが得られる。第3章ではそれら計測データから、プラズマの磁気配置、ポロイダル断面における電流密度・圧力・温度の分布、非誘導電流の大きさなどを求める解析手法が説明される。プラズマの磁気流体的な平衡を求めるには、測定した磁場情報やプラズマ電流などを境界条件として、平衡を理論的に記述する Grad-Shafranov 方程式を解く必要があり、それには ACCOME コードと呼ばれる数値計算コードが援用される。他にプラズマ中における高速イオンの軌跡を、単一荷電粒子の立場から計算する OFMC

コードなども用いられ、それらのコードの内容が説明されている。

第4章からは、実際の実験とその結果が詳述される。4.1節では、トロイダル磁場 3.5T、プラズマ電流が百万アンペア (1 MA)、放電継続時間が十数秒という典型的なパルス運転の途中で、2秒間 N-NB を入射し、プラズマの応答を調べた。その結果、中心での電子温度は 2.7 keV から 4.1 keV へと上昇したが、電子密度やイオン温度は影響を受けず、またプラズマ電流の6割が N-NB によって駆動されることが確認された。これらの結果は、ビームとプラズマの相互作用の素過程などから理論的に予測されるものと良く一致し、N-NB による非誘導的な電流駆動が JT-60U で実証された。

プラズマの電子温度が上がると、ビームと電子の相互作用が減り、散乱電子の作る逆向き電流が減るので、N-NB による電流維持の効率が高まると期待される。そこで第4.2節では、電子サイクロトロン加熱で電子温度を 10 keV に高めた状態で N-NB 入射が行われ、1 MA のプラズマ電流の大部分を1秒強の間、N-NB で維持することに成功した。さらに第4.3節では、プラズマ圧が高い状態における N-NB の有効性が確認された。以上の実験結果は、高温・高圧の核融合実証炉において、N-NB を用いた準定常的な運転に明るい見通しを開くものである。

以上で N-NB による非誘導電流駆動の有効性が確認されたが、ビーム入射によりプラズマが不安定になったり、各種の磁気流体的な不安定性が N-NB の効率を悪くする心配が残る。そこで第5章では、N-NB 入射とプラズマの磁気流体的な不安定性の関係が実験的に調べられた。第5.1節では、低密度の放電のさい、N-NB の入射によりプラズマの中心部に磁気流体的な速い (数十 kHz) 揺動が引き起こされ、それにより電流を担う高速イオンが外側へ吐き出される現象が確認されたが、イオンの損失は約7%に留まっている。第5.2節ではプラズマ中に、磁気島を伴う強いテアリング不安定性が発生している状況で N-NB 入射を行った。その結果、N-NB で打ち込んだ高速イオンがプラズマの中心から表面へと強く輸送され、2/3 近くが失われてしまうことが判明した。よって N-NB 入射は、こうした不安定性を抑制した状況で実行すべきである。

以上の成果は、核融合を目指すプラズマの磁気閉じ込め技術、高温プラズマの診断手法、イオンビームとプラズマの相互作用の物理などに、新しい知見をもたらすものであり、博士 (理学) の学位を授与するに値することを、審査員の全員一致により確認した。なお本研究の一部は、鎌田裕氏および諫山明彦氏との共同研究であるが、その中で申請者は中心的な役割を果たしており、両氏からの同意承諾書も完備している。