

審査結果の要旨

論文提出者 植田 喜延

本論文は「プラズマ合体を用いた球状トーラスの高性能化」と題し、プラズマ合体・磁気リコネクションの持つ磁束注入効果とプラズマ加熱効果がそれぞれ球状トーラスのダイナモ現象抑制と急速加熱に応用できることを実験及び計算機解析によって立証したものであり、全体で6章から構成されている。

第1章は、序論であって、核融合磁気閉じ込め研究の現状と経済性の向上を目指した球状トーラス研究の必要性和各方式の問題点が述べられている。 q 値が高い順に、球状トカマク、スフェロマック、逆転磁場ピンチ、逆転磁場配位が紹介され、それらのキーとなる問題として、第1に閉じ込めを悪化させるダイナモ現象の解決、第2に経済性の向上のための高ベータ化が必要であることが述べられている。そのための新アイデアとして、プラズマ合体・磁気リコネクションの利用して、電流分布が制御できるポロイダル電流駆動やメガワット以上の大きな加熱を行うことができれば問題解決に有用であることが紹介されている。研究の目的はプラズマ合体を用いた効率的に閉じ込め配位の電流分布制御と高ベータ化を目指すことである。

第2章は「TS-3プラズマ合体実験装置」と題され、本研究に用いた球状トーラスプラズマ合体実験装置とその計測装置について述べられている。球状トカマクから逆転磁場配位までの5種類の球状トーラス配位を単一の装置で生成する手法やそのための実験セットアップが述べられている。プラズマ計測法として磁気プローブを用いた2次元磁場計測やトロイダルモード計測、磁場揺動計測の原理が述べられ、ラインスペクトルのドップラー幅を用いたイオン温度計測や、静電プローブを用いた電子密度、電子温度計測などが紹介されている。

第3章は「プラズマ合体効果の検証」と題され、6つの実験から成っている。

第3.1章は「単一生成球状トーラスの相互比較実験」と題され、5種類の球状トーラスを各々生成して相互比較を行ない、 q 値が大きくなるほど、磁場揺動が小さくなり、磁場減衰時間も長くなる現象が明らかにされている。第3.2章は「プラズマ合体を用いたポロイダル電流駆動実験」と題され、プラズマ合体を用いたポロイダル電流駆動をオーム加熱コイルでトロイダル電流駆動中の各球状トーラス配位に適用すると、ポロイダル、トロイダル両電流がバランスした駆動効果により磁場揺動が30-50%に低減でき、磁場減衰時間も延長できることを結論している。第3.3章は「プラズマ合体加熱効果の実験的検証」と題され、球状トーラスの合体を用いると、それに伴う磁気リコネクションのイオン異常加熱により、小型実験でもメガワットオーダーのプラズマ加熱パワーが得られることが述べられている。加熱パワーは q 値が下がるほど大きいなど、その加熱特性が解析されている。第3.4章は「合体加熱の球状トーラスの高ベータ平衡」と題され、合体により急速加熱された球状トーラスがその高ベータ状態を維持できるかを実験的に解析している。球状トーラスの q 値が高いほど、加熱後の熱エネルギー損失が少なく、高ベータ状態を安定に維持できることを結論している。第3.5章は「球状トカマク合体を用いた第2安定化実験」と題され、球状

トカマク同士の合体の急速加熱により（バルーニング不安定に対する）第2安定状態にある高ベータ球状トカマクを作る試みについて述べている。徐々に圧力勾配を上昇させると磁場揺動の急増と磁場配位の急速な減衰を招く現象が見出され、安定解析計算機コードにより解析を行った結果、平衡がバルーニングモードが不安定な領域に踏み込んだためであることが結論されている。第3.6章は「反磁性球状トカマクによる第2安定化」と題され、スフェロマックの異極性合体により生成された逆転磁場配位に後からトロイダル磁場を印加することにより、第2安定領域の高ベータ球状トカマクを生成できることを述べている。実験結果と安定解析コードによる解析の比較により、この手法による高ベータ球状トカマクが確かに第2安定領域に存在しているものの、その圧力勾配を低減するとバルーニング不安定領域に入ってしまうことが、実験、計算の双方によって結論されている。

第4章は「計算機シミュレーション」と題され、3次元電磁流体シミュレーションにより、第1にコンパクト逆転磁場ピンチのダイナモ現象、第2に高ベータ球状トカマクの電流駆動型不安定の解析を行っている。初めて生成したコンパクト逆転磁場ピンチ配位の解析では、ダイナモ現象の原因となる不安定がトロイダルモード $n=3, 4$ 等となって従来の逆転磁場ピンチに比べてモード数が大幅に低いことを述べている。また、高ベータ球状トカマクの解析では、圧力駆動型の不安定が電流駆動型のそれよりも成長率が高いことを結論し、実験結果を説明している。

第5章は「プラズマ合体の将来性」と題され、第1に現実の大型核融合炉向けのポロイダル電流駆動法として想定される入射プラズマの磁束変化を用いた炉心球状トーラスの電流分布制御実験、第2にプラズマ合体を用いた急速加熱に関するスケーリング則の検証実験について述べている。入射プラズマの磁束を変化させることにより、ターゲットプラズマの q 分布がほぼ理論通り制御できることを明らかにするとともに、磁気リコネクションのイオン温度上昇は理論通り、磁場の2乗に比例することを実験的に証明している。その上でプラズマ合体を用いた電流分布制御と高ベータ化の将来性について述べている。

第6章は「まとめ及び結論」である。

以上を要するに、本研究は、球状トーラス合体のポロイダル電流駆動効果およびプラズマ加熱効果を実験的に見出し、さらにそれらを用いて次世代核融合の課題である球状トーラス磁気閉じ込め配位の電流分布制御とダイナモ現象の抑制、および急速加熱と超高ベータ化を、実験と計算機解析の両面から立証したものであり、電気工学、プラズマ理工学、核融合工学に貢献するところが多い。

よって、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。