

# 論文審査の結果の要旨

氏名 魏 啓為

本論文は「発電炉の経済性向上を目指した球状トカマク核融合炉の先進設計」と題し、球状トカマク炉の高ベータ特性を経済性向上に生かす新たな設計法と背景となるプラズマ物理を明らかにした論文である。

第1章は、「序論」であり、実験炉：国際熱核融合炉（ITER）の先にある核融合発電炉では経済性が求められ、先進的な磁場配位である球状トカマク ST を用い、実現可能なデータを用いた核融合発電炉設計と、信頼できる自発電流モデル構築、プラズマ立ち上げシナリオの必要性を紹介している。

第2章は、「トカマク核融合炉設計のためのプラズマ自発電流割合モデル」である。ブートストラップ電流は低衝突領域の新古典効果のために流れる自発電流で、外部の非誘導電流駆動消費電力を下げ、定常運転核融合炉が十分なエネルギー増倍率を得るために有用である。同電流は、同電流割合  $f_{BS}$  のスケーリング式で与えられるが、現状のものは1990年代に導かれ、STへの適用が難しかった。そこで、任意のアスペクト比および衝突領域で有効な Hirshman-Sigmar モデルを用い、シンプルなパラボリック形式の密度・温度分布を使って、ブートストラップ電流割合のデータベースを構築した。最小二乗法を用いて、システムコードで明示的な変数を説明変数としたスケーリング式について係数フィッティングを行い、STに適用可能な新モデル導出を行った。導出した  $f_{BS}$  スケーリングと IPDG モデルは、現状で最も優れた Wilson 式と比べても、正磁気シアと弱負磁気シアプラズマに対しては、アスペクト比によらず  $f_{BS}$  値を正確に予測できることが分かった。

第3章は、「超電導球状トカマク核融合発電炉設計」である。従来の冒険的な ST 核融合炉概念（ARIES-ST、STPP）では、高いブートストラップ電流割合（ $f_{BS}=95\%$ ）、安定な高ベータという先進的なパラメータを使う一方で、常電導トロイダル磁場コイル、センターソレノイド（CS）コイルシステムの排除、高中性子壁負荷等の高リスクな核融合炉工学を仮定して、既存の研究成果と大幅なギャップが存在した。本研究では、実現可能なトカマク炉設計の炉工学の条件に、大型実験で明らかになった ST 特有の先進的特性を組み合わせ、現実的な超電導 ST 核融合発電炉設計を行った。その結果、将来のトカマク核融合炉のオプションとして、新しい大型・低磁場の球状トカマク核融合発電炉概念設計を提案した。新たに導出した  $f_{BS}$  スケーリングモデルとシステムコードを用いて、全ての超電導 ST 核融合炉を包括した広範囲スキャンを行った。最適で実現可能な設計点の決定アルゴリズムを構築するため、核融合発電炉の実現可能制約：(i) 発電炉プラズマ制約、(ii) ブランケット制約、(iii) ベータ限界制約、(iv) 閉じ込め達成制約、(v) ダイバータ熱負荷制約を設定した。コスト計算とブレイクイーブン価格の推定から、経済的に競争可能な核融合発電炉の条件を明らかにした。

第4章は、「球状トカマク立ち上げシナリオの構築」である。まず、ランプアップ平衡を計算し、2基の中性粒子ビーム NBI によるランプアップシナリオを検討した。また、先進的なブランケットの可能性を評価し、既存のトカマク炉概念設計および ITER とのプラズマパラメータと

コスト比較を行った。一方、TS-4 装置で初めて高ベータ合体 ST への高パワー-NBI 実験を行い、合体前の 2 つの初期プラズマ生成条件を調整することで、安定な合体 ST を生成することを実証した。実験計測で得られた分布を用いた平衡再構成と圧力駆動型不安定性解析の結果、安定な合体 ST が得られることが示された。MAST 装置では、M9 キャンペーンで計画された磁気リコネクション実験において、CS コイルを用いない ST プラズマ合体実験を実証した。

第 5 章は、「結論」である。

以上要するに、本論文は、ブートストラップ電流のスケーリングの精度を大幅に改善した上、壁への熱・中性子負荷が無理なく受容できるまで炉サイズを確保しつつ、高ベータ・高  $f_{BS}$  特性を低磁場化に用いて経済性向上を図る新しい超電導球状トカマク核融合発電炉の概念を導いた。核融合炉設計にとって先駆的成果といえ、残された球状トカマク立ち上げも、ソレノイドコイルと中性粒子ビームを用いた保守的なシナリオを作成すると共に、加熱等にメリットの大きい合体立ち上げ実験を東京大学 TS-4 装置から最大規模を持つカラム研究所 MAST 装置で行って目処をつけ、先端エネルギー工学、特に核融合工学に貢献するところは少なくない。よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上、1918 字