

様式 I

## 博士学位論文調査報告書

論文題目 Effect of magnetic shear and heating on electromagnetic micro-instability  
and turbulent transport in global toroidal system

(大域的トロイダル系における電磁的な微視的不安定性と乱流輸送に対する磁気シアと加熱の効果)

申請者 秦志豪 (Z. H. Qin)

最終学歴 令和3年9月  
京都大学大学院エネルギー科学研究科基礎科学専攻  
博士後期課程研究指導認定見込

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
(主査) 教授 岸本泰明

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 中村祐司

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 田中仁

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	秦志豪 (Z. H. Qin)
論文題目	Effect of magnetic shear and heating on electromagnetic micro-instability and turbulent transport in global toroidal system (大域的トロイダル系における電磁的な微視的不安定性と乱流輸送に対する磁気シアと加熱の効果)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、トーラス形状のトカマクなどの磁場閉じ込め核融合装置において、先進運転として知られている輸送障壁等を伴った高いベータ値を有する高性能プラズマ実現の方法論の開拓とその理論基盤の構築を目的として、外部加熱効果や磁場構造の制御機能を取り入れた大域的なジャイロ運動論コードによる乱流輸送シミュレーションとその結果の理論的考察をまとめたものであり、5章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、将来の有用なエネルギー源としての核融合研究全般に関する概説の後、特に、トーラス形状の磁場核融合であるトカマクプラズマを対象として、磁場構造や加熱方法を中心に、それらを記述する基本的な理論モデルが述べられている。また、本論文の動機付けとなった内部輸送障壁形成 (ITB) とそれを支配する物理過程について、HL2A トカマク (中国西南物理研究所) における例を中心に紹介した後、本論文の主たる2つの目的 (輸送障壁の形成・消失の素過程と高性能プラズマを支配する磁場構造と乱流構造の関係の解明) とそれぞれに対する研究手法が論じられている。</p> <p>第2章では、トーラスプラズマにおける微視的不安定性とそれによって引き起こされる異常輸送現象を研究するための基本的な理論的枠組として、ハミルトン系における非正準 Lie 摂動論に基づく座標変換論によって導出された位相空間 5 次元のジャイロ運動論方程式系について説明している。その後、京都大学の当該研究室でこれまで開発を行ってきたトカマクプラズマの全領域をイオン系と電子系の双方に対して運動論的なダイナミクスを取り入れて模擬することが可能な大域的なジャイロ運動論コード GKNET の方程式系とそれを解くために用いられている座標系や規格化等について、第3章と第4章で用いる高ベータプラズマを扱うことができる電磁効果を取り入れたバージョンを基本に説明している。</p> <p>第3章では、中性粒子ビーム (NBI) 加熱された HL2A トカマクにおいて観測されたイオン系の内部輸送障壁が電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECRH) 時に消失する現象に着目し、その現象を解析するため、イオンと電子の速度分布関数に非等方性を取り入れることでそれらの効果をモデル的に GKNET に導入する改良を行うとともに、それを用いた低ベータ値の静電領域および高ベータ値の電磁領域における線形シミュレーションによって得られた新たな物理的知見についてまとめられている。特に、本研究では、① HL2A トカマクで形成されている急峻な密度勾配がイオン温度勾配 (ITG) モードと捕捉電子モード (TEM) の両者が融合した実周波数がゼロ近辺の低周波モード (Low Frequency Mode (LFM) として参照) を励起すること、② ECRH によってこの LFM の成長率が增大することなどを明らかにしている。これらの結果は、LFM によって乱流輸送が増大し、ITB が消失した可能性があることを示しており、トカマクの高性能化に不可欠な輸送障壁を生成・</p>			

制御する方法論の開拓につながる成果と位置付けられる。また、③ TEM も ECRH によって不安定化される一方、④ ITG モードに対する影響は弱く、逆に磁場に垂直方向に向けた中性子ビームによる加熱によって安定化されることを見出した。特に後者は、性能向上に直結する外部加熱によるイオン温度の上昇と乱流抑制が共存する可能性を示唆する重要な素過程と位置付けられる。

第 4 章では、3 章で扱った ITB 等を伴う高性能プラズマの磁場構造の多くは磁気シアが消失する平坦あるいは反転した安全係数分布を示すことに着目し、そのような磁場構造下で励起される微視的不安定性と乱流輸送に関する電磁効果を取り入れた GKNET による線形および非線形シミュレーションを行うことで得られた新たな物理的知見についてまとめられている。特に本章では、磁気シアが消失する磁場構造下では、① 共鳴モードの存在を前提とした従前の高トロイダルモード数のバルーニング理論で記述できない非共鳴かつ低トロイダルモード数の運動論的インファernalモードが励起されること、② トロイダルモード数の変化（増加）に対して分散に実周波数レベルの大きな揺らぎ（振動現象）が発生すること、③ 一定の公差を持つ等差数列によってトロイダルモード数のグループ化を行うことにより、揺らぎが除去された独立した複数の離散的な大域的分散関係が定義されること、④ 非線形過程ではこの分散間に方向性を持ったエネルギーの流れが発生し、特定な等差数列の組の特定なモード数に乱流エネルギーが凝集するとともに、それが大きな輸送を引き起こす大域的な構造を持った乱流に発展することなどの現象を見出し、それらについて詳細に議論している。これらは、トカマクの先進運転において観測される磁気シアが消失する磁場構造では、有限な磁気シアを有する通常の場合とは異なった乱流によって乱流輸送が支配されるとともに、内部輸送障壁を伴った先進運転における高性能プラズマ実現・制御の理論基盤を与える成果と位置付けられる。

第 5 章では、以上の先進運転に代表される核融合プラズマの閉じ込め・輸送について行った理論・シミュレーションおよび解析の主な結果と成果を要約するとともに、核融合プラズマの高性能化実現の観点から今後の課題について述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、トカマクなどのトロイダル系の磁場核融合装置において、輸送障壁を伴った高性能プラズマ実現の方法論の開拓とその理論基盤を構築することを目的に、外部加熱効果や磁場構造の制御機能を取り入れた大域的なジャイロ運動論コード (GKNET) による乱流シミュレーションとその結果の理論研究を行ったものであり、得られた主要な成果は次の通りである。

1) 従来のイオン系を対象とした GKNET に、電子系の運動論的なダイナミクスを取り入れるとともに、中性ビーム入射 (NBI) や電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECRH) による輸送制御を目的に、イオンと電子の速度分布関数に非等方性を取り入れることでそれらの効果をモデル化したコード開発を行った。これにより、ECRH では捕捉電子モード (TEM) が不安定になること、NBI 垂直加熱ではイオン温度勾配 (ITG) モードが安定化されることを見出した。後者は、加熱による温度上昇と乱流抑制が共存する可能性を示唆する重要な素過程と位置付けられる。

2) HL2A トカマク (中国西南物理研究所) において観測されたイオン系の内部輸送障壁 (ITB) が ECRH 時に消失する現象に着目し、上記 1) の知見に基づいて実験パラメータによるシミュレーションを行い、① ECRH 印加前においても、ITG モードと TEM の両者が融合した実周波数がゼロ近辺の低周波モード (Low Frequency Mode (LFM) として参照) が急峻な密度勾配によって励起されること、②この LFM は ECH によってより不安定化することから、HL2A 実験ではこれによって乱流輸送が増大し、ITB が消失した可能性があることを示した。これらは、トカマクの高性能化に不可欠な輸送障壁を生成・制御する方法論の開拓につながる成果と位置付けられる。

3) 上記実験を含め、ITB 等を伴う高性能プラズマの磁場構造の多くは磁気シアが消失する平坦あるいは反転した安全係数分布を示すことに着目し、そのような磁場構造下で励起される微視的不安定性とそれによる乱流輸送のシミュレーションを、上記の GKNET を高ベータ値の電磁領域に拡張することで行った。その結果、磁気シアが消失する磁場構造下では、① 共鳴モードの存在を前提とした従前の局所的・非局所的バルーニング理論で記述できない非共鳴の運動論的なインファナルモードが励起されること、② トロイダルモード数に対してその分散に実周波数レベルの大きな揺らぎ (振動現象) が発生すること、③ 等差数列によってトロイダルモード数のグループ化を行うことにより、揺らぎが除去された独立した複数の大域的分散関係が定義されること、④ 非線形過程ではこの分散間に方向性を持ったエネルギーの流れが発生し、それが大きな輸送を引き起こす大域的な構造を持った乱流に発展することを見出した。

以上の研究は、外部加熱や磁場構造の制御による乱流輸送の制御の可能性をはじめとした自己組織化特性の強い輸送障壁を伴った高性能プラズマ放電の理論基盤を与えるものである。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 3 年 8 月 27 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：2022年10月1日以降