



TITLE:

Kinetic-magnetohydrodynamic Hybrid  
Simulation Study of Energetic-particle  
Driven Instabilities in Heliotron J(  
Abstract\_要旨)

AUTHOR(S):

PANITH, ADULSIRISWAD

---

CITATION:

PANITH, ADULSIRISWAD. Kinetic-magnetohydrodynamic Hybrid Simulation Study of Energetic-particle Driven Instabilities in Heliotron J. 京都大学, 2021, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2021-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k23538>

RIGHT:

許諾条件により本文は2022-09-23に公開; Magnetohydrodynamic hybrid simulation of Alfvén eigenmodes in Heliotron J, a low shear helical axis stellarator/heliotron P. Adulsiriswad et al ("Nuclear Fusion" July 2020, Volume 60, Issue 9 096005). doi: 10.1007/s12039-015-0776-3 The final publication is available at Nuclear Fusion via <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab9c4b>.

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Kinetic-magnetohydrodynamic Hybrid Simulation Study of Energetic-particle Driven Instabilities in Heliotron J (ヘリオトロン J における高エネルギー粒子駆動不安定性の運動論的磁気流体力学ハイブリッドシミュレーション研究)

申請者 Panith ADULSIRISWAD

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エネルギー基礎科学専攻博士後期課程  
(研究指導認定見込)

学識確認 平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
(主査) 准教授 門 信一郎

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 長崎百伸

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Panith ADULSIRISWAD
論文題目	Kinetic-magnetohydrodynamic Hybrid Simulation Study of Energetic-particle Driven Instabilities in Heliotron J (ヘリオトロン J における高エネルギー粒子駆動不安定性の運動論的磁気流体力学ハイブリッドシミュレーション研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、低磁気シアのヘリカル軸ヘリオトロン閉じ込め磁場配位を有する Heliotron J における高エネルギー粒子(EP)駆動磁気流体力学(MHD)不安定性と EP との相互作用を数値的に調べ、実験との比較を行った結果をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は研究背景であり、磁場閉じ込め核融合プラズマ実現に必要な条件、およびその達成における、EP 駆動 MHD 不安定性の緩和や制御の重要性を先行研究と共に述べている。ヘリカル軸ヘリオトロン磁場で重要となる粒子-MHD 波動間、および MHD 波動同士の相互作用についてまとめ、本研究の目的を述べている。</p> <p>第2章では、トーラス型核融合装置における EP 駆動 MHD 不安定性の基礎方程式をまとめている。運動論的方程式から理想 MHD 方程式を導出し、1次の摂動として低周波波動を表現する概要を示している。次に、対象とする不安定モードが、不安定性の励起周波数にギャップを有する固有モードと、ギャップのない連続的な周波数領域で励起される EP モード(EPM)に分類されることを示し、前者は結合タイプであるトロイダルアルフベン固有モード (TAE)と極値タイプである大域的アルフベン固有モード (GAE)に分かれることを述べている。さらに、EP と捻じれアルフベン波(SAW)との共鳴による逆ランダウ減衰過程により不安定性が駆動されることを述べている。</p> <p>第3章では、ヘリオトロン J 装置の磁場の特徴、すなわち、低い磁気シア、磁気井戸、バンピー磁場成分の役割を述べている。また、EP の生成源となる中性粒子ビーム入射(NBI)の特徴を述べている。荷電交換型中性粒子分析器 (CX-NPA) で測定された EP のエネルギー分布がバンパ・オン・テール型をしており、第5、第6章の MEGA シミュレーションに採用する根拠としている。最後に、実験的に観測された EP 駆動の MHD 不安定性が <math>n/m=1/2</math> EPM と <math>n/m=2/4</math> GAE であることを述べ、以降のシミュレーションの検証対象としている。ここで <math>n/m</math> はトロイダルモード数/ポロイダルモード数である。</p> <p>第4章では、MEGA コードの概要と適用方法を述べている。MEGA は EP-MHD ハイブリッドシミュレーションコードであり、バルクプラズマには非線形 MHD 方程式を、EP にはドリフト運動方程式を用いている。バルクプラズマと EP はプラズマ電流密度を介して結合されており、MHD 平衡を初期条件とする初期値問題として解かれる。MEGA ではバルクイオンと</p>			

電子を運動論的に扱わないため、バルクプラズマの運動論効果（例えばイオンと電子のランダウ減衰）は除外される。時間積分は、陽解法である4次のRunge-Kutta法によって行われる。粒子法における重み（マーカー粒子）の時間発展は、ソースとシンクの選択に依存し、 $\delta f$ 法またはfull-f法で記述する。

第5章では、EP駆動のMHDモードを無電流平衡状態で固定境界シミュレーションした結果を述べている。支配的なモードとして $n/m = 2/4$  GAEは再現されたが、 $n/m=1/2$  EPMではなく、弱い $n/m=1/2$  GAEが不安定化し、実験を完全には再現することができないことを示した。EPの速度分布として、比較的低密度で現れ実際に観測されているバンブ・オン・テール型と高密度の理想的状況で現れるスローイング・ダウン型を採用したところ、線形成長率に大きな違いは見られなかった。ただし、前者の場合高エネルギー領域のトロイダル共鳴が強く、後者の場合、低エネルギー領域のヘリカル共鳴が強い。結果、非線形飽和領域では、前者では圧力分布が凹型になるのに対し、後者では平坦になることを明らかにした。

第6章では、自由境界シミュレーションを導入することにより、前章で課題として提起した不一致を解消した成果が述べられている。Heliotron Jは磁気シアが弱いため、低 $n$ のMHD不安定性があれば、最外殻磁気面(LCFS)付近で有限のプラズマ変位を引き起こす可能性がある。その結果、実験的に観測された $n/m=1/2$ のEPMと $n/m=2/4$ のGAEが再現された。コア領域を順方向(co-)に周回するEPとSAWとの相互作用はプラズマ周辺領域で $n/m=1/2$  EPMを不安定にすることを示した。実験で観測された周波数の小刻みな変化(chirping)を再現し、それが順方向周回EPと $n/m=1/2$  EPMとのトロイダル共鳴と解釈できることを示した。さらに、固定境界シミュレーションでは、 $n/m=1/2$  EPMの線形成長率が大幅に過小評価されていることも示され、自由境界を用いる必要性を立証した。

第7章は総括であり、本論文で得られた成果とその展望について要約されている。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、低磁気シアのヘリカル軸ヘリオトロン閉じ込め磁場配位を有する Heliotron J における高エネルギー粒子(EP)駆動磁気流体力学(MHD)不安定性と EP との相互作用を数値的に調べ、実験で観測される MHD 現象と比較することにより、EP の損失や、不安定性へのエネルギー伝達過程について研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 運動論的 EP と MHD のハイブリッドシミュレーションコードである MEGA を Heliotron J の磁場配位に適用し、不安定性の線形成長過程から非線形飽和にいたるプラズマの速度揺動分布や周波数特性を求めることにより、磁気プローブやビーム放射分光法による MHD 揺動計測実験との比較を可能とした。
  - (2) Heliotron J における EP 駆動 MHD 不安定性である巨視的アルヴェン固有モード(GAE)を、固定境界条件において再現することに初めて成功した。さらに、トロイダル/ポロイダルモード数( $n/m$ )=2/4 GAE の周波数や径方向位置がよく再現されるのに対し、計算で得られた 1/2 GAE では、径方向位置の不一致が明らかとなった。
  - (3) GAE の空間構造形成において、同一のトロイダルモード数の揺動成分間のトロイディシティを介した結合が重要な役割を担い、ヘリシティやバンピネスを介した他のトロイダルモード数との結合の寄与は小さいことを明らかにした。
  - (4) MEGA コードを自由境界条件に拡張することで(2)で認識された不一致点を解決した。さらに Heliotron J で観測されている高エネルギー粒子モード(EPM)の再現に成功し、低磁気シアのヘリカル配位において、境界条件の重要性を明らかにした。
  - (5) EP から GAE および EPM へのエネルギー伝達速度空間分布を解析し、主要なエネルギー伝達は高速度領域におけるトロイディシティを介した共鳴から生じるのに対し、低速度領域におけるトロイダル非対称共鳴の寄与は弱いことを明らかにした。
- これらの成果は、磁気シアが比較的弱い他の先進的なステラレーター・ヘリオトロンにも適用できる可能性があり、さらには磁場配位および加熱シナリオの最適化、MHD 不安定性を介したアルファ粒子によるバルクイオンの加熱(アルファチャネリング)等の評価につながる重要な知見を与えるものといえる。

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25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。