

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 7 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709071

研究課題名(和文) 高速イオン励起アルベン波の外部制御による高速イオン異常輸送抑制法の開発

研究課題名(英文) Control of anomalous transport of fast ions via external control of Alfvén eigenmode

研究代表者

永岡 賢一 (Nagaoka, Kenichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：20353443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,000,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー粒子計測と波動計測の位相統計解析装置を開発し、波動粒子相互作用解析を国内外の磁場閉じ込め核融合実験で行った。LHD、Heliotron J、TJ-II装置では、位相統計解析に成功したが、波動粒子相互作用の同定には至っていない。現在実施中のLHDの高速イオン計測器の回路系の改造により、近い将来に波動粒子相互作用の実験的同定ができる予定である。

一方で、アルベン固有モードの外部制御の実験では、電子加熱(ECH)、及び電流駆動(ECCD)により、高速イオン励起のアルベン固有モードの安定化を再現良く観測できた。磁気シアによる安定化効果など、物理機構の解明においても進展ができた。

研究成果の概要(英文)：A wave-particle interaction analyzer was developed for identification of interaction between Alfvén eigenmode and fast ions in magnetically confined fusion plasmas, and applied to the plasma experiments in LHD, Heliotron J and TJ-II devices. The interaction between Alfvén eigenmodes and fast ions was not identified yet, but it will be available in near future due to upgrade of electric circuit for fast ion detector in LHD.

The external control of fast-ion-driven Alfvén eigenmodes was achieved in LHD, Heliotron J and TJ-II with application of ECH and ECCD. The understanding of physical mechanism of stabilization of Alfvén eigenmode such as magnetic shear effect was also progressed.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：高速イオン 波動粒子相互作用 アルベン波 磁場閉じ込め核融合

1. 研究開始当初の背景

エネルギー開発を目指した核融合燃焼プラズマ実証において、核融合反応により生じる高速イオン(粒子)をプラズマ中に閉じ込めることが必要である。ところがプラズマ中に励起される電磁流体波動(アルベン波)が高速イオンを損失させてしまうことが知られており、その制御手法の開発が急務の課題となっている。

2. 研究の目的

上記1のような背景の中、近年、観測されたプラズマ中の局所電子加熱によるアルベン波の安定化現象の物理過程を解明し、アルベン波の外部制御による高速イオン損失の抑制法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

高速イオン駆動アルベン波を外部制御するために、本研究では次の2点を柱として3年間の研究を計画する。エネルギー分解能をもつ高エネルギー粒子分析器に新たな“位相統計解析”を導入し、その原理実証を行う。また、位相統計解析を自動化・多チャンネル化したシステムを開発し、高速イオンとアルベン波の相互作用(位相関係)を全エネルギー領域で評価する方法を構築する。大型ヘリカル装置のプラズマ実験において、局所電子加熱に対する電子の応答、及び高速イオンとアルベン波の相互作用を同時計測することによって、アルベン波安定化の物理過程を解明する。得られた知見を基に、アルベン波の外部制御性を多様なトラスプラズマ実験で検証し、高速イオン異常輸送の抑制法を確立する。

4. 研究成果

(1) 半導体型高速イオン検出器の出力信号から位相統計解析を可能とするための波動粒子相互作用解析装置の開発を行った。計測対象のアルベン波の周波数より1桁以上高時間分解能で16chのデータ収集を行い、FPGA技術を用いたパルス検出等の自動解析機能を組み合わせた装置を製作した。既存の波高解析(PHA)手法との比較により、装置性能を確認した。図1に波動粒子相互作用解析の概念図を示す。

(2) 大型ヘリカル装置(LHD)の18サイクル実験で、半導体検出器ベースの中性粒子分析器を取り付け、プラズマ中の高速イオン計測、及び波動粒子相互作用解析を行った。開発したシステムは、LHD実験のショット番号でファイル名を管理する手法や計測の自動化を行った。

(3) 本計画の3年目のLHD実験が延期されたことを受けて、波動粒子相互作用解析

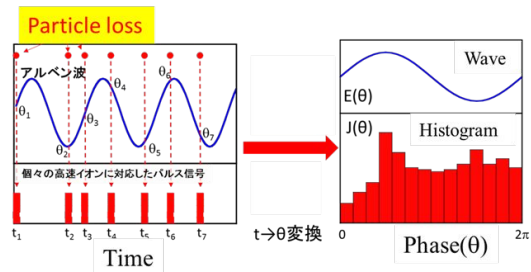


図1. 高速イオン検出器のシグナルを直接デジタル化し、個々の高速イオンの飛来時刻を記録することにより、高速イオンのアルベン波の位相に対するヒストグラムを作る。相互作用がある場合は、正弦波的な構造が予測されている。

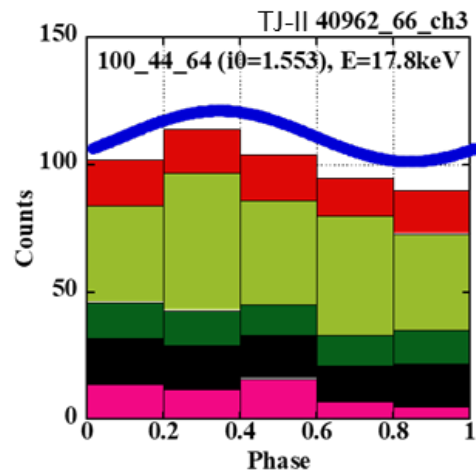


図2. TJ-II 装置で得られた高速イオン束のヒストグラム。横軸は、高速イオン励起アルベン波の位相である。正弦波的な構造が見られるが、統計精度としては、ぎりぎりであり、現状では、波動粒子相互作用の同定を結論できていない。

装置を他のプラズマ装置にも適用する方針で、ソフトウェアの改造をおこなった。その結果、京都大学のヘリオトロンJ装置、及びスペイン国立研究所のTJ-II装置で、波動粒子相互作用解析を実施した。TJ-II装置では、半導体検出器ではなく、チャンネルترون型のエネルギー分析装置が用いられているため、出力信号の時定数等がことになったが、FPGAプログラムの改良により、さまざまなタイプの検出器に対応することが可能となった。図2にTJ-II装置のプラズマ実験で得られた結果の一例を示す。高速イオンエネルギー毎にヒストグラムを作り、相互作用の同定を試みたが、現状では、正弦波的な構造の観測例はあるものの、統計的な制度は十分ではなく、相互作用同定の結論には至っていない。現在、装置改良と実験でのデータ収集を継続している。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計9件)

K. Nagaoka, M. Osakabe, M. Isobe, K. Ogawa, S. Kamio, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Ohshima, T. Mizuuchi, J. M. Fontdecaba, E. Ascasibar, アルペン固有モードと相互作用する高速イオンの位相空間構造の実験観測, 33th プラズマ・核融合学会 年会 (JSPF Annual Meeting) 東北大学青葉山キャンパス、宮城県仙台市、29 Nov. 2016 - 2nd Dec. 2016

Kenichi Nagaoka, Masaki Osakabe, Mitsutaka Isobe, Kunihiro Ogawa, Yasuhiro Suzuki, Shinji Kobayashi, Satoshi Yamamoto, Yoshizumi Miyoshi, Yuto Katoh, Josep Maria Fontdecaba, Experimental Evaluation of Energy Transfer between Fast Ions and Alfven Eigenmodes, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics San Jose, California October 31-November 4 2016

K. Nagaoka, M. Osakabe, M. Isobe, K. Ogawa, Y. Suzuki, S. Kobayashi, S. Yamamoto, Y. Miyoshi, Y. Katoh, J.M. Fontdecaba, M. Shibuya Measurement of Phase Space Structure of Fast Ions Interacting with Alfven Eigenmodes, 57th Meeting of APS Division of Plasma Physics Meeting, Savannah, Georgia, USA, 16-20 November 2015

K. Nagaoka, M. Osakabe, M. Isobe, K. Ogawa, Y. Suzuki, M. Shibuya, S. Kobayashi, S. Yamamoto, Y. Miyoshi, Y. Katoh, J. M. Fontdecaba Wave-particle interaction analyzer for study of Alfven eigenmodes in the Large Helical Device International Stellarator/Heliotron Workshop, Greifswald, Germany, 5-9 October 2015

K. Nagaoka, M. Osakabe, M. Isobe, K. Ogawa, Y. Suzuki, S. Kobayashi, S. Yamamoto, Y. Miyoshi, Y. Katoh, J. M. Fontdecaba, Measurement of Phase Space Structure of Fast Ions Interacting with Alfven Eigenmodes, IAEA Technical Meeting on Energetic

Particles in Magnetic Confinement Systems, VIENNA, Austria, 1-4 September 2015

K. Nagaoka, Experimental Measurement of Phase Space Structure of Fast Ions Interacting with Alfven Eigenmodes, 5th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical plasmas, POSTEC, Korea, 17-22 August 2015

K. Nagaoka, M. Osakabe, M. Isobe, K. Ogawa, K. Saito, Y. Miyoshi and Y. Kato, Direct measurement of wave-particle interactions between energetic ions and Alfven wave in laboratory plasmas, 5th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical plasmas, POSTEC, Korea, 17-22 August 2015

永岡賢一、長壁正樹、磯部光孝、小川国大、斎藤健二、三好由純、加藤雄人、小林進二、山本聡、大島慎介、LHD 実験グループ  
高エネルギー粒子とアルペン波の相互作用の計測  
日本物理学会年次大会、早稲田大学、東京新宿区、2015/3/21-24

K. Nagaoka, E. Ascasibar, T. Ido, T. Kobayashi, A. Cappa, S. Yamamoto, K. Nagasaki, M. Osakabe, S. Ohshima, A. Shimizu, T. Estrada and Y. Takeiri, Observation of Stabilizing Effect of Electron Cyclotron Heating on Fast-ion-Driven Alfven Eigenmodes, 4th Asia Pacific Transport Working Group, Kyushu Univ. Fukuoka, Oonojyo, 10 - 13 June 2014

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永岡 賢一 (NAGAOKA Kenichi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 20353443

(2) 研究分担者

無し

(3)連携研究者

長壁 正樹 (OSAKABE Masaki)  
核融合科学研究所・大型ヘリカル装置計画  
実験統括主幹・教授  
研究者番号：90280601

小林 進二 (KOBAYASHI Shinji)  
京都大学・エネルギー理工学研究所・助教  
研究者番号：70346055

三好 由純 (MIYOSHI Yoshizumi)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・総合解  
析研究部・准教授  
研究者番号：10377781

(4)研究協力者

Enrique Ascasibar  
TJ-II Operations Division  
National Fusion Laboratory  
CIEMAT (Energy, Environment and  
Technology Research Center)