

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03798

研究課題名（和文）アルヴェン速度が波動粒子相互作用による高速イオン輸送・閉じ込めに与える影響

研究課題名（英文）Effect of Alfvén velocity on energetic ion transport due to wave-particle interaction

研究代表者

小川 国大 (Ogawa, Kunihiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90632274

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：重水素ガスを用いたプラズマ実験においては、プラズマの外に出てくる中性子総発生率及び中性子発生分布を計測することで、プラズマ内部の高エネルギー粒子閉じ込め情報及びその時間変化を得ることが出来る。
既設のアルヴェン固有モードの空間分布及び損失高エネルギーイオン束計測器に、中性子計測器を新たに加えた。アルヴェン速度の異なる放電で、アルヴェン固有モードの空間分布、損失高エネルギーイオン束、及び中性子計測機器での同時計測を行い、アルヴェン固有モードが与える高エネルギー粒子閉じ込めへの影響研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られる結果は、国際熱核融合実験炉におけるアルファ粒子による第一壁への熱負荷のピーク値の予測にとって有用である。近年、トカマクにおいても、共鳴摂動磁場の印加等による3次元磁場構造でのアルヴェン固有モード並びにその高エネルギー粒子閉じ込めへの影響が注目されているため、3次元である大型ヘリカルは成果は有用である。また、天体プラズマにおいても、2015年に「ひので」と「IRIS」衛星の共同によってアルヴェン波が観測されアルヴェン波によるコロナ加熱問題解明が進められており、アルヴェン波との相互作用という観点では上記問題の解明に貢献できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In deuterium plasma experiments, measurements of the total neutron emission rate and the neutron emission profile can provide information on the confinement of energetic particles inside the plasma.

A fast-response neutron detector is newly developed and used with the existing spatial distribution of Alfvén eigenmodes and escaping energetic ion diagnostic. Simultaneous measurements of the spatial distribution of Alfvén eigenmodes, escaping energetic ion flux, and the fast-response neutron detector were carried out in discharges with different Alfvén speeds to study the effect of Alfvén eigenmodes on energetic particle confinement.

研究分野：磁場閉じ込めプラズマ

キーワード：磁場閉じ込めプラズマ 高エネルギー粒子 放射線計測

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の成立には、主加熱源としての重水素—三重水素核反応生成物であるアルファ粒子の良い閉じ込めが必須である。しかし、アルファ粒子自身によって励起されたアルヴェン波の一種であるアルヴェン固有モードとアルファ粒子の相互作用によって、アルファ粒子の閉じ込めが劣化することが危惧されている。アルファ粒子損失による核融合炉の第一壁への突発的かつ局所的な熱負荷を防ぐため、アルヴェン固有モードによるアルファ粒子閉じ込め劣化を回避する手段を見つけるために物理機構を解明することが重要である。しかし、現行の実験ではアルファ粒子が主加熱源であるプラズマを生成することはできないため、アルファ粒子模擬の高エネルギーイオンとアルヴェン固有モードの相互作用を解明すべく努力が払われている。ただし、現在は、キーパラメータである高エネルギーイオンの速度 (V_{EP}) / アルヴェン速度 (V_A : 磁場強度に比例し、プラズマ密度の平方根に反比例) が 1 より小さい条件 (高エネルギーイオンとアルヴェン固有モードは環状効果によって共鳴できる) で行われている。そこで、国際熱核融合実験炉或いは核融合炉で想定される V_{EP}/V_A が 1 より大きい場合 (高エネルギーイオンとアルヴェン固有モードは直接共鳴できる) に、アルヴェン固有モードによる高エネルギーイオン輸送 (損失) の時間スケールがどのようになるかが学術的問いである。大型ヘリカル装置 (LHD) は、アルヴェン固有モードと高エネルギー粒子の相互作用を研究する上でキーパラメータである V_{EP}/V_A について現在の実験の領域である V_{EP}/V_A が 1 より小さい領域から ITER 或いは原型炉のアルファ粒子の領域である V_{EP}/V_A が 1 より大きい領域 (磁場強度を下げて V_A を小さくする) をカバーできるという特徴を持っている。このため、LHD で得られる結果、またそれに基づく高エネルギー粒子輸送モデルを作成することは、ITER におけるアルファ粒子による第一壁への熱負荷のピーク値の予測にとって有用であると考えられる。近年、トカマクにおいても、共鳴摂動磁場の印加等による 3 次元磁場構造でのアルヴェン固有モード並びにその高エネルギー粒子閉じ込めが注目されているため、3 次元である LHD の成果は有用である。また、天体プラズマにおいても、2015 年に「ひので」と「IRIS」衛星の共同によってアルヴェン波が観測され [T. J. Okamoto et al., “Resonant Absorption of Transverse Oscillations and Associated Heating in a Solar Prominence. I. Observational Aspects”, 2015, The Astrophysical Journal, 809, 71]、アルヴェン波によるコロナ加熱問題解明が進められており、アルヴェン波との相互作用という観点では上記問題の解明に貢献できる可能性がある。

2. 研究の目的

高い計数率と時間分解能が得られる高速中性子シンチレーション検出システムを開発し、高エネルギーイオンとアルヴェン固有モードが環状効果によって共鳴する現行の装置の条件 (V_{EP}/V_A が 1 より小さい) と高エネルギーイオンとアルヴェン固有モードが直接共鳴する核融合炉での条件 (V_{EP}/V_A が 1 より大きい) において、アルヴェン固有モードによる高エネルギーイオンの輸送の時間スケールがどのように異なるかを明らかにする。また、中性子分布と損失イオンの計測結果を数値シミュレーションと組み合わせ、広い V_{EP}/V_A 範囲にわたるアルヴェン固有モードによる高エネルギーイオン輸送モデルを構築する。

3. 研究の方法

重水素ガスを用いたプラズマ実験においては、プラズマの外に出てくる中性子総発生率及び中性子発生分布を計測することで、プラズマ内部の高エネルギー粒子閉じ込め情報及びその時間変化を得ることが出来る。高エネルギー粒子によってアルヴェン固有モードが励起された際に、既設のアルヴェン固有モードの空間分布計測器及び損失高エネルギーイオン束計測器に、中性子計測器を加えることでプラズマ内部に閉じ込められている高エネルギー粒子の輸送の様子を取得する。

4. 研究成果

まず、本研究において必要な中性子検出システムの開発を行った。システムは、高速中性子検出用シンチレータ (EJ-410)、光電子増倍管 (H7195)、速い時間応答を持つ電流増幅器、並びにデータ収集系で構成した。従来の中性子検出システムに用いられているよりも大きなシンチレータ容量のものを採用することで、高速中性子に対する感度を一桁高くする。東北大学の加速器型高速中性子発生装置において、中性子検出器の応答取得実験を実施した。実験及びモンテカルロ 3 次元中性子輸送計算コードによる中性子束計算より、LHD のアルヴェン固有モード実験において 1 msec の時間分解能が十分得られるようなシンチレータ容量を決定した。シンチレータ容量については、直径が 2 インチ、厚さが 0.625 インチとした。

開発した中性子検出システムを LHD に設置した。比較的高磁場のフル重水素ビーム加熱重水素プラズマ条件でアルヴェン固有モード励起実験を行った。アルヴェン固有モードの空間分布、損失高エネルギー粒子束、及び中性子総発生率の時間変化を計測した。遠赤外線レーザー干

渉計を用いたアルヴェン固有モードの空間分布については、線形固有モード解析コードである米国・オークリッジ国立研究所で開発されたAE 3Dコードとの比較を進め、定性的な一致を得た。高エネルギーイオン励起電磁流体力学的不安定性が与える高エネルギー粒子閉じ込めへの影響研究の内容で、16th Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems - Theory of Plasma Instabilitiesにおいて、“Energetic Particle Transport and Loss Induced by Helically-trapped Energetic-ion-driven Resistive Interchange Mode in the Large Helical Device”と題する招待講演を行った。損失高エネルギー粒子束及び中性子束の時間変化について、実験結果と比較するため、トロイダルアルヴェン固有モード揺動を考慮した軌道追跡数値シミュレーションの整備を行った。高エネルギー粒子励起不安定性による高エネルギー粒子輸送に係る内容で、Nuclear Fusion誌及びPlasma Fusion Research誌において論文を1編ずつ出版した。中性子分布計測を用いた高エネルギー粒子の空間分布に係る内容で、Plasma Physics and Controlled Fusion誌において論文を出版した。2020年度において、本課題の成果を含んだ中性子計測器を用いたLHDにおける高エネルギー粒子閉じ込め実験の総括として、第37回プラズマ・核融合学会年会において、“大型ヘリカル装置の重水素実験における中性子計測と高エネルギー粒子閉じ込め研究の進展”と題する招待講演を行った。また、LHDにおける中性子計測を用いた高エネルギーイオン励起電磁流体力学的不安定性が与える高エネルギーイオン輸送への影響研究に関する成果について、日本物理学会第76回年次大会において、“大型ヘリカル装置における高エネルギーイオン励起不安定性による高エネルギーイオン輸送の研究”と題する招待講演を行った。

高磁場実験における高エネルギーイオン励起電磁流体力学的不安定性が発現した放電において、中性子発生率の時間変化を取得した。高エネルギー粒子に係るIAEA技術会合において招待講演を行った。招待講演の内容に基づき、Nuclear Fusion誌において論文を出版した。その後、低磁場条件におけるアルヴェン固有モード励起放電において、本課題で開発した中性子検出システムを用いた中性子発生率の時間変化及び損失高エネルギーイオンプローブを用いた損失高エネルギーイオン束の時間変化を同時に取得した(図1)。高エネルギー粒子励起電磁流体力学的不安定性による高エネルギー粒子輸送研究に関する成果で、The 28th IAEA Fusion Energy Conferenceにおいて、“A Comprehensive Study of Energetic Particle Transport Due to Energetic Particle Driven MHD Instabilities in LHD Deuterium Plasmas”と題した口頭発表を行い、Nuclear Fusion誌において論文を出版した。また、中磁場強度領域における多数のアルヴェン固有モードによる高エネルギー粒子輸送解析を行い、17th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles and Theory of Plasma Instabilities in Magnetic Confinement Fusionにおいて、“Energetic Ion Transport due to Energetic Particle Continuum Mode in Deuterium LHD Plasmas”と題した口頭発表を行い、Nuclear Fusion誌へ論文投稿を行い、出版が決定した。また、LHDにおける高エネルギー粒子閉じ込めの成果について、International Conference on Frontiers of Physics-2022において、“Energetic Particle Confinement Study Using Integrated Neutron Diagnostics in the Large Helical Device Deuterium Plasmas”と題した口頭発表を行った。高エネルギー粒子閉じ込め研究を纏めた論文“Progress on Integrated Neutron Diagnostics for Deuterium Plasma Experiments and Energetic Particle Confinement Studies in the Large Helical Device During the Campaigns from FY2017 to FY2019”が、プラズマ・核融合学会 第29回論文賞に選ばれた。また、本課題を含む中性子計測の研究開発について、受賞テーマ“核燃焼プラズマ診断のための高性能中性子計測の研究開発”で2021年度 吉川允二記念核融合エネルギー奨励賞 優秀賞を受賞した。

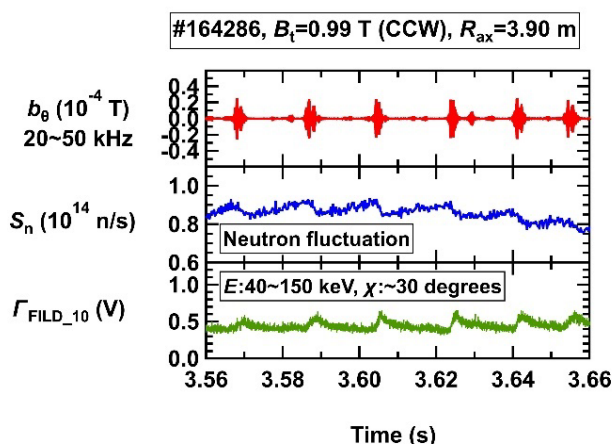


図1 アルヴェン固有モードバースト発生時の高エネルギーイオン輸送の観測。上段：磁気プローブで観測したアルヴェン固有モードの磁気揺動振幅。中段：本課題で開発した中性子検出シ

テムを用いた総中性子発生率の高時間分解能測定結果。下段：損失高エネルギーイオンプローブを用いた通過軌道をもつ損失高エネルギー束の時間変化。アルヴェン固有モードの磁気揺動振幅の間欠的な増大に伴う、総中性子発生率の減少と損失高速エネルギーイオン束の上昇が観測された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ogawa K., Isobe M., Sugiyama S., Matsuura H., Spong D.A., Nuga H., Seki R., Kamio S., Fujiwara Y., Yamaguchi H., Osakabe M., LHD Experiment group	4. 巻 60
2. 論文標題 Energetic particle transport and loss induced by helically-trapped energetic-ion-driven resistive interchange modes in the Large Helical Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 112011 ~ 112011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab6da0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 OGAWA Kunihiro, ISOBE Mitsutaka, OSAKABE Masaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Progress on Integrated Neutron Diagnostics for Deuterium Plasma Experiments and Energetic Particle Confinement Studies in the Large Helical Device During the Campaigns from FY2017 to FY2019	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1102023 ~ 1102023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1102023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ogawa K., Isobe M., Sugiyama S., Spong D A., Sangaroon S., Seki R., Nuga H., Yamaguchi H., Kamio S., Fujiwara Y., Kobayashi M I., Jo J., Osakabe M	4. 巻 63
2. 論文標題 Characteristics of neutron emission profile from neutral beam heated plasmas of the Large Helical Device at various magnetic field strengths	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 065010 ~ 065010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/abf575	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ogawa K., Isobe M., Nuga H., Kamio S., Fujiwara Y., Kobayashi M.I., Sangaroon S., Takada E., Seki R., Yamaguchi H., Murakami S., Jo J., Osakabe M.	4. 巻 61
2. 論文標題 A study of beam ion and deuterium?deuterium fusion-born triton transports due to energetic particle-driven magnetohydrodynamic instability in the large helical device deuterium plasmas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096035 ~ 096035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac0d8a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogawa K., Isobe M., Nuga H., Seki R., Ohdachi S., Osakabe M.	4. 巻 78
2. 論文標題 Evaluation of Alpha Particle Emission Rate Due to the p-¹¹B Fusion Reaction in the Large Helical Device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fusion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 175 ~ 185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15361055.2021.1973294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogawa K., Isobe M., Sangaroon S., Takada E., Nakada T., Murakami S., Jo J., Zhong G. Q., Zhang Yipo, Tamaki S., Murata I.	4. 巻 31
2. 論文標題 Time-resolved secondary triton burnup 14 MeV neutron measurement by a new scintillating fiber detector in middle total neutron emission ranges in deuterium large helical device plasma experiments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AAPPS Bulletin	6. 最初と最後の頁 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s43673-021-00023-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 小川国大、磯部光孝、長壁正樹
2. 発表標題 大型ヘリカル装置の重水素実験における中性子計測と高エネルギー粒子閉じ込め研究の進展
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Ogawa, M. Isobe, S. Sangaroon, D. A. Spong, H. Matsuura, H. Nuga, R. Seki, S. Kamio, Y. Fujiwara, H. Yamaguchi, M. I. Kobayashi, J. Jo, and M. Osakabe
2. 発表標題 大型ヘリカル装置における高エネルギーイオン励起不安定性による高エネルギーイオン輸送の研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名	K. Ogawa, M. Isobe, S. Sugiyama, H. Matsuura, D. A. Spong, H. Nuga, R. Seki, S. Kamio, Y. Fujiwara, T. Nishitani, M. Osakabe, and LHD Experiment Group
2 . 発表標題	Energetic Particle Transport and Loss Induced by Helically-trapped Energetic-ion-driven Resistive Interchange Mode in the Large Helical Device
3 . 学会等名	16th Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems - Theory of Plasma Instabilities (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年	2019年

1 . 発表者名	K. Ogawa, M. Isobe, S. Kamio, Y. Fujiwara, S. Sangaroon, R. Seki, H. Nuga, H. Yamaguchi, M. I. Kobayashi, and M. Osakabe
2 . 発表標題	A Comprehensive Study of Energetic Particle Transport Due to Energetic Particle Driven MHD Instabilities in LHD Deuterium Plasmas
3 . 学会等名	The 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020) (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	K. Ogawa, M. Isobe, S. Kamio, H. Nuga, R. Seki, S. Sangaroon, H. Yamaguchi, Y. Fujiwara, E. Takada, S. Murakami, J. Jo, and M. Osakabe
2 . 発表標題	Energetic Ion Transport due to Energetic Particle Continuum Mode in Deuterium LHD Plasmas
3 . 学会等名	17th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles and Theory of Plasma Instabilities in Magnetic Confinement Fusion (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	Kunihiro Ogawa, Mitsutaka Isobe, Siriyaporn Sangaroon, Hideo Nuga, Ryosuke Seki, Shuji Kamio, Eiji Takada, and Masaki Osakabe
2 . 発表標題	Energetic Particle Confinement Study Using Integrated Neutron Diagnostics in the Large Helical Device Deuterium Plasmas
3 . 学会等名	International Conference on Frontiers of Physics -2022 (ICFP-2022) (国際学会)
4 . 発表年	2022年

1. 発表者名 小川国大、磯部光孝、Sangaroon Siriyaporn、Fan Tieshuan、Zhang Yimo
2. 発表標題 Development of Neutron Energy Spectrometer in Large Helical Device
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ogawa, M. Isobe, H. Nuga, R. Seki, S. Ohdachi, and M. Osakabe
2. 発表標題 Evaluation of alpha particle emission rate due to p-11B fusion reaction in the Large Helical Device
3. 学会等名 IEEE Pulsed Power Conference & Symposium on Fusion Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者ページ https://www-app.nifs.ac.jp/cgi-bin/people/member.cgi?id=ogawa_kunihiro</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	Korea Institute of Fusion Energy			
米国	Oak Ridge National Laboratory			
中国	Institute of Plasma Physics			
ドイツ	Max Planck Institute for Plasma Physics			