

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02336

研究課題名（和文）磁場トポロジーと乱流輸送との結合に関する研究

研究課題名（英文）coupling between turbulent transport and magnetic topology

研究代表者

居田 克巳 (Ida, Katsumi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：00184599

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,000,000円

研究成果の概要（和文）：従来、MHD不安定性によるトポロジーの変化に関する研究と、静電揺動による熱・粒子・運動量・電流の径方向の輸送は、各々独立した研究テーマとして扱われてきた。その為に両者の結合に関する研究はほとんどなされてこなかった。大型ヘリカル装置（Large helical Device：LHD）プラズマにおいて、磁場トポロジーと乱流輸送との結合に関する研究を進めた。この研究を通じて「磁気流体力学（Magneto Hydro Dynamics：MHD）不安定性」と「プラズマ乱流による異常輸送」との結合を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場閉じ込めプラズマの「磁気流体力学不安定」と「プラズマ乱流による異常輸送」の二大研究分野を結び、新しいプラズマ物理の研究分野を創造した点において、学術的意義が高い研究成果である。この研究成果は、磁場閉じ込めプラズマの理解に貢献し、将来の核融合の実現を加速するという点において社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In the past, research on topology changes due to MHD instability and radial transport of heat, particles, momentum, and electric current due to electrostatic fluctuation have been treated as independent research themes. Therefore, little research has been done on the combination of the two.

In the large helical device (LHD) plasma, we have studied the coupling between magnetic field topology and turbulent transport. Through this research, the coupling between "Magneto Hydro Dynamics (MHD) instability" and "anomalous transport due to plasma turbulence" was clarified.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：プラズマ乱流 磁気流体力学不安定性 磁場トポロジー 乱流輸送

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来、MHD 不安定性によるトポロジーの変化に関する研究と、静電揺動による熱・粒子・運動量・電流の径方向の輸送は、各々独立した研究テーマとして扱われてきた。その為に両者の結合に関する研究は、ほとんどなされてこなかった。MHD 不安定性と乱流輸送がどのように関連しているかを明らかにする必要性から、本研究を計画した。MHD 不安定性とプラズマ乱流がどのように干渉するかを調べることは、電磁揺動によるプラズマの輸送現象を理解する上で極めて重要である。

2. 研究の目的

大型ヘリカル装置 (Large helical Device : LHD) プラズマにおいて、磁場トポロジーと乱流輸送との結合に関する研究を進め、「磁気流体力学 (Magneto Hydro Dynamics : MHD) 不安定性」と「プラズマ乱流による異常輸送」との結合を明らかにするのが目的である。

3. 研究の方法

磁場変動と同程度のスケールを持つ乱流による電子密度揺動を計測することが、本研究の発点となる。回転式大口径干渉フィルターと多チャンネルアバランシェフォトダイオード (APD) からなるビーム放射分光システムを製作し、大型ヘリカル装置 (Large helical Device : LHD) に取り付けてプラズマの電子密度揺動の計測をビーム放射分光で行った。ビーム放射分光とは、プラズマ中に中性粒子ビームを入射し、中性粒子ビームと視線との交点における密度の変動を放射光の強度変化から計測しようとするものである。

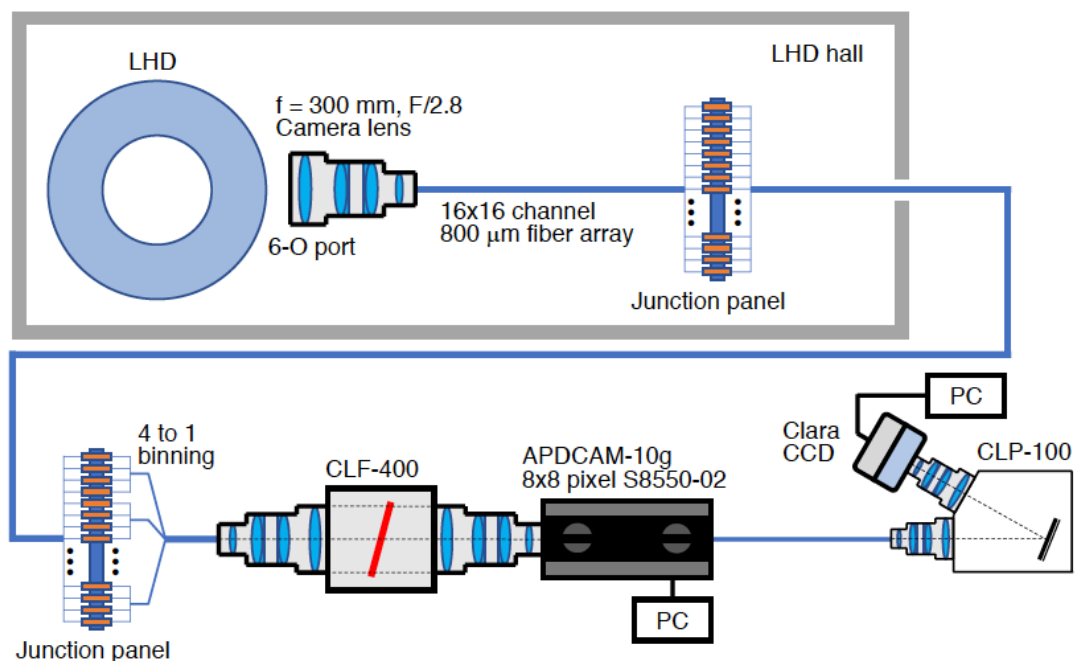


図1 回転式大口径干渉フィルター分光システム

図1は分光システムの概要を示す。プラズマの像を256本(16x16)の直径800ミクロンの光ファイバーバンドルを使い、2箇所のジャンクションパネルを通して計測室まで伝送する。この光ファイバーバンドルの像を回転式干渉フィルターからなる分光器(CLF-400)を使い、ビーム放射による光のみを通過させ、64チャンネル(8x8)からなるアバランシェフォトダイオードアレイ(APDCAM)で像のわずかな強度変化を検出する。ビーム放射による光のみが検出されているかを、レンズ分光器(CLP-100)にて常時モニターしている。プラズマの像のわずかな強度変化からプラズマの各地点の密度揺動を計測する。

プラズマ圧力と磁場圧力との比をベータ値と呼んでいるが、ベータ値が高くなるにつれて、プラズマ中の磁場揺動が大きくなる。そこで、ベータ値が高いプラズマにおいて、磁場揺動を磁気プローブアレイで密度揺動を本システムで計測した。

4. 研究成果

磁場揺動と密度揺動の周波数スペクトル解析を行った結果、磁場揺動が観測された周波数帯において、磁場トポロジーの変化に伴う密度揺動が観測されていることを確かめた。磁場揺動では同定できない、揺動発生場所をビーム放射分光システムで同定した結果、プラズマの極めて周辺部でこの揺動が発生していることを明らかにした。図2は磁場揺動と密度揺動の周波数スペクトル解析の結果であるが、3つのピークが観測されている。もっとも低い周波数のピークが基本波と呼ばれるもので、その周波数の2倍、3倍の周波数のピークを2倍高調波、3倍高調波と呼ぶ。基本波の相関係数は0.7と高い値を示すが、2倍高調波の相関係数は0.3と小さくなり、3倍高調波の相関係数はほとんどゼロになっている。

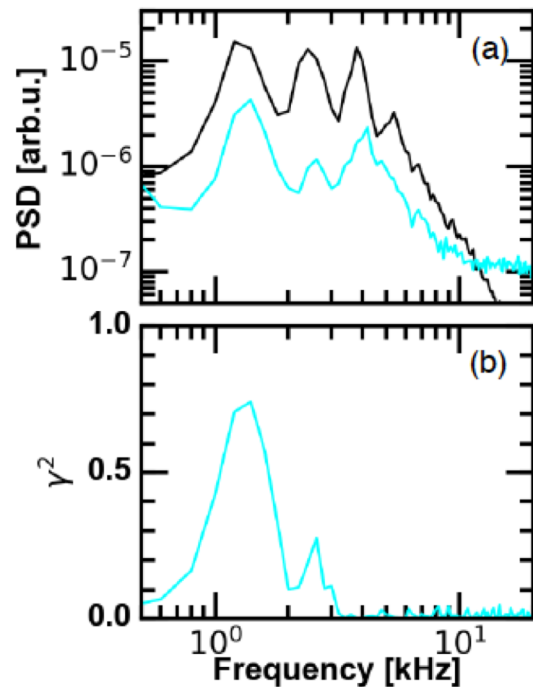


図2 磁場揺動と密度揺動の周波数スペクトルと両者の相関係数

磁場揺動はプラズマの磁気面と呼ばれる磁場構造の変動を示し、密度揺動はプラズマの等密度面の変動を示している。磁気面と等密度面が完全に一致していれば、相関係数は、基本波、2倍高調波、3倍高調波で一定になるはずである。このように高調波になるにつれて、相関係数が減るという実験データは、磁気面と等密度面がわずかにずれていることを示している。プラズマ乱流は、磁気面と等密度面がプラズマ中に発生した静電揺動により、ずれることで生じるものである。このようにして、観測された磁気面と等密度面のずれから、MHD不安定性と乱流輸送の結合を調べる手がかりが得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 K. Ida, T. Kobayashi, M. Ono, T. E. Evans, G. R. McKee, and M. E. Austin	4. 巻 120
2. 論文標題 Hysteresis Relation between Turbulence and Temperature Modulation during the Heat Pulse Propagation into a Magnetic Island in DIII-D	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 245001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.245001	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 K. Ida, T. Kobayashi, T. Tokuzawa, T. Akiyama, H. Tanaka, M. Yoshinuma, K. Itoh	4. 巻 58
2. 論文標題 Exhaust of turbulence cloud at the tongue shaped deformation event	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 112008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aab971	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 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, T. Akiyama, T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, K. Itoh & S.-I. Itoh	4. 巻 8
2. 論文標題 Trigger mechanism for the abrupt loss of energetic ions in magnetically confined plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-21128-z	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 -
1. 著者名 K. Ida, R. Sakamoto, M. Yoshinuma, K. Yamazaki, T. Kobayashi, Y. Fujiwara, C. Suzuki, K. Fuji, J. Chen, I. Murakami, M. Emoto, R. Mackenbach, et. al.,	4. 巻 59
2. 論文標題 The isotope effect on impurities and bulk ion particle transport in the Large Helical Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 56029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab0e41	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 K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, Y. Fujiwara, J.Chen, I. Murakami, M. Kasaki, M. Osakabe	4. 巻 14
2. 論文標題 Verification of Carbon Density Profile Measurements with Charge Exchange Spectroscopy Using Hydrogen and Deuterium Neutral Beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402079
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1402079	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 K. Ida T. Kobayashi, T. Tokuzawa, T. Akiyama, H. Tanaka, M. Yoshinuma, K. Itoh	4. 巻 58
2. 論文標題 Exhaust of turbulence cloud at the tongue shaped deformation event	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K. Ida, T. Kobayashi, M.Yoshinuma, T.Akiyama, T.Tokuzawa, H. Tsuchiya, K.Itoh & S.-I. Itoh	4. 巻 8
2. 論文標題 Trigger mechanism for the abrupt loss of energetic ions in magnetically confined plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21128-z	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 -

1. 著者名 K. Ida, and T Fujita	4. 巻 60
2. 論文標題 Internal transport barrier in tokamak and helical plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 33001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1088/1361-6587/aa9b03	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 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, T. Akiyama, T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, K. Itoh,	4. 巻 24
2. 論文標題 Observation of distorted Maxwell-Boltzmann distribution of epithermal ions in LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 122502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1063/1.4999644	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 K. Ida, M. Yoshinuma, H. Tsuchiya, T. Kobayashi, C. Suzuki, M. Yokoyama, A. Shimizu, K. Nagaoka, S. Inagaki, K. Itoh,	4. 巻 57
2. 論文標題 Response of plasma toroidal flow to the transition between nested and stochastic magnetic field in LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 76032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1088/1741-4326/aa6f84	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 K. Ida, T. Kobayashi, K. Itoh, M. Yoshinuma, T. Tokuzawa, T. Akiyama, C. Moon, H. Tsuchiya, S. Inagaki & S.-I. Itoh	4. 巻 6
2. 論文標題 Abrupt onset of tongue deformation and phase space response of ions in magnetically- confined plasmas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 36217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.1038/srep36217 (2016)	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 -

1. 著者名 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma ¹ , Y. Suzuki, Y. Narushima, T.E. Evans, S. Ohdachi, H. Tsuchiya, S. Inagaki and K. Itoh	4. 巻 56
2. 論文標題 Bifurcation physics of magnetic islands and stochasticity explored by heat pulse propagation studies in toroidal plasmas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 92001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1088/0029-5515/56/9/092001	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 K. Ida, M. Yoshinuma, M. Goto, O. Schmitz, S. Dai, A. Bader, M. Kobayashi, G. Kawamura, C. Moon, Y. Nakamura1 and The LHD Experiment Group	4. 巻 58
2. 論文標題 Helium transport in the core and stochastic edge layer in LHD	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 74010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1088/0741-3335/58/7/074010	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 K. Ida, T. Kobayashi, T. E. Evans, S. Inagaki, M. E. Austin, M. W. Shafer, S. Ohdachi, Y. Suzuki, S.-I. Itoh, K. Itoh	4. 巻 5
2. 論文標題 Self-regulated oscillation of transport and topology of magnetic islands in toroidal plasmas	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep16165	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 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, Y. Suzuki, Y. Narushima, T.E. Evans. Ohdachi, H. Tsuchiya. Inagaki, and K. Itoh	4. 巻 56
2. 論文標題 Bifurcation physics of magnetic islands and stochasticity explored by heat pulse propagation studies in toroidal plasmas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 0
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Overview of 3D effects on the plasma confinement and transport in magnetically confined fusion
3. 学会等名 9th International workshop on Stochasticity in Fusion Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ida et. al.,
2. 発表標題 Isotope effect on impurity and bulk ion particle transport in the Large Helical
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ida et. al.,
2. 発表標題 Observation of distorted Maxwell-Boltzmann distribution of epithermal ions in LHD
3. 学会等名 9th International Symposium of Advanced Energy Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Pioneering work before becoming mainstream research
3. 学会等名 8th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, T. Tokuzawa, T. Akiyama, H. Tsuchiya
2. 発表標題 Trigger mechanism for the abrupt loss of energetic ions in magnetically confined plasmas
3. 学会等名 4th UNIST- Kyoto Univ. Workshop on "Physics validation and control of turbulent transport and MHD in fusion plasmas" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Bifurcation physics of magnetic islands and stochasticity explored by heat pulse propagation studies in toroidal plasmas
3. 学会等名 KSTAR conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, T. Tokuzawa, T. Akiyama, H. Tsuchiya, K. Itoh, & S.-I. Itoh
2. 発表標題 Interaction between resonant and non-resonant MHD: A trigger mechanism of collapse of magnetically confined plasmas
3. 学会等名 The 26th International Toki Conference (ITC-26) & The 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (APFA-11) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ida, T. Kobayashi, W.H.Ko, H.H.Lee, Y. In, H.S.Kim
2. 発表標題 Modulation method as a tool to measure three dimensional magnetic field structures in toroidal plasmas
3. 学会等名 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Decoupling in Transport Channels: Impurity Transport in Stellarators/Heliotrons
3. 学会等名 21th International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, T. Tokuzawa, T. Akiyama, C. Moon, H. Tsuchiya, K. Itoh, S. Inagaki & S.-I. Itoh
2. 発表標題 Abrupt onset of tongue deformation in LHD plasmas
3. 学会等名 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 ;K. Ida, T. Kobayashi, T. Tokuzawa, T. Akiyama, M. Yoshinuma, K. Itoh
2. 発表標題 Exhaust of turbulence cloud at the MHD burst triggered by tongue deformation
3. 学会等名 16th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, T. Akiyama, H. Tsuchiya, K. Itoh
2. 発表標題 Transition from MHD mode to tongue deformation before the collapse events in LHD
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Interaction between Transport MHD and energetic particle
3. 学会等名 643rd Wilhelm and Else Heraeus Seminar on "Impact of 3D magnetic fields on hot plasmas (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ida, T. Kobayashi, T. E. Evans, H. Tsuchiya, S. Inagaki, K. Itoh, M. Yoshinuma, Y. Suzuki, S. Ohdachi
2. 発表標題 Bifurcation physics of a magnetic island and its stochastization in toroidal plasmas
3. 学会等名 6th Asia Pacific Transport Working Group (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Katsumi Ida
2. 発表標題 Explore of a magnetic topology by heat pulse propagation method
3. 学会等名 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ida, and LHD experiment group
2. 発表標題 Beam Spectroscopy in Plasma
3. 学会等名 8th Korea-Japan Diagnostic Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Ida
2. 発表標題 Magnetic island and stochastic magnetic field in toroidal plasmas
3. 学会等名 18th International RFP Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ida, T. Tokuzawa, T. Kobayashi, S. Inagaki, K. Itoh
2. 発表標題 Physics of magnetic reconnection, magnetic islands and stochasticity in fusion plasmas
3. 学会等名 597th Wilhelm and Else Heraeus Seminar on "Stochasticity in Fusion Plasmas" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 居田克巳、小林達哉、稲垣滋、トッド・エバンス
2. 発表標題 トロイダルプラズマの磁気島における輸送とトポロジーの自励振動
3. 学会等名 閉じ込め・輸送研究会 (招待講演)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	吉沼 幹朗 (Yoshinuma Mikirou) (20323058)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	小林 達哉 (Kobayashi Tatsuya) (30733703)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	徳沢 季彦 (Tokuzawa Tokihiko) (90311208)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	