

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20921

研究課題名(和文)合体生成高ベータ球状トカマクのマクロ-ミクロスケール加熱構造の解明

研究課題名(英文) Study of macro- and micro-scale plasma heating during merging/reconnection startup of high beta spherical tokamak

研究代表者

田辺 博士 (Tanabe, Hiroshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：30726013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では磁気リコネクションを核融合研究に応用した、トロイダルプラズマの合体過程における加熱を焦点として、東京大学の実験室プラズマと世界最大の球状トカマク実験MASTで連携しながら研究を推進し、エネルギー解放の起点となるX点近傍まわりのミクロな領域において極度に局在化した電子加熱が存在すること、合体下流においてイオンがグローバルに加熱されることを明らかにした。東京大学では、リコネクション磁場の直接測定と合わせて、さらに詳細な空間分布測定を推進し、アウトフローが合体生成された球状トカマクの閉じた磁気面上でとらえられ、リング状の加熱分布構造を形成する様子をクリアにとらえることに成功した。

研究成果の概要(英文)：This research project proceeds the study of plasma heating during merging/reconnection of two toroidal plasmas in laboratory experiments at the university of Tokyo and MAST (the world largest spherical tokamak at CCFE, UK). As a new finding, it is found that magnetic reconnection heats electrons locally in microscopic region around X-point and globally downstream of reconnection outflow. In laboratory experiments at the university of Tokyo, more detailed high resolution ion Doppler tomography measurement has been done with in-situ probe measurement of in-plane magnetic field and successfully reproduced the structure of global ion heating which forms high temperature ring on the thick layer of closed flux which is formed by reconnected magnetic field.

研究分野：プラズマ物理・核融合

キーワード：プラズマ・核融合 球状トカマク 磁気リコネクション コンピュータトモグラフィ

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め方式による核融合エネルギー開発の ITER 計画以後の実用化を見据えた取り組みとして、プラズマの熱圧力と閉じ込め磁場との比である「ベータ」を改善し、軽水炉に対する莫大な建設・運用コストを抑え、核融合炉の早期実用化への貢献を目指す「球状トカマク」の研究が近年注目されている。球状トカマク配位は、現状数%のベータが現実的なトカマク方式と比較して、10%以上のベータが各国の装置で報告され、最大で40%を超える高ベータも実現するなど核融合炉として魅力的な特徴を有する(英国カラム研究所 START 装置、東京大学 TS-3 装置等で実績)。しかしながら、プラズマの大半径と小半径の比であるアスペクト比が2を切るような低アスペクト比の配位の代償として、装置中央部のスペースが大幅に制約されるため、超電導 TF コイルと十分な容量のセンターソレノイド(CS)コイルが両立できず、CS-less な立ち上げシナリオの開拓が急務とされている。

こうした問題解決のための一つのシナリオとして、太陽フレア等の高エネルギー現象の基盤物理である、磁気リコネクションと呼ばれる磁力線のつながりかわりの際のエネルギー解放現象を応用した、合体法による球状トカマクの CS-less 立ち上げ手法が近年注目を集めている。同方式は、東京大学 TS-3 装置における最大 200eV 程度の加熱・50%を超える超高ベータが達成に加え、英国カラム研究所の世界最大の球状トカマク実験 MAST では最大 1keV の加熱、100ms を超える準定常運転や H-mode との連結など、1990 年代の提案以降、近年急速に成長を遂げ、米国核融合ベンチャーのトライアルファエナジー社や英国トカマクエナジー社が積極的に採用し、国内でも東京大学小野らによる基盤 S 研究(15H05750) TS-U 計画が始動するなど、国内外で開発競争が活発に行われている。

磁気リコネクションのエネルギー解放を応用したプラズマ加熱の研究では、リコネクション平面を垂直に貫くラーマー半径を低減させる「ガイド磁場」(トカマクではトロイダル磁場)は、従来その加熱を低減させ応用効率を下げるものと考えられていたが、世界最大の大型球状トカマク実験 MAST におけるトロイダル磁場  $B_t \sim 0.6T$  の運転領域での成功を受け、高ガイド磁場実験条件下(ガイド磁場/再結合磁場の比が3以上)での応用性能が見直されている。トカマクプラズマのトロイダル閉じ込めの効果が加わる系は、その複雑さから従来敬遠されてきた分野であるが、今後のアップグレード計画推進を支える基礎研究として、エネルギー解放の起点である X 点近傍のマイクロな領域だけでなく、トーラス全体のマクロな系における閉じ込め磁場の輸送への影響もふまえた研究が必要である。

## 2. 研究の目的

本若手研究 B では、こうした背景をふまえ、

高ガイド磁場条件下で成功を収めている MAST 実験におけるプラズマ加熱を詳細に診断するとともに、リコネクション磁場のその場計測不在の MAST 実験を補充する実験として、その場磁場計測が可能な東京大学の実験室プラズマの機動性を活かした研究で連携し、基盤物理である磁気リコネクションの X 点近傍のマイクロな領域におけるエネルギー変換のみならず、熱化・閉じ込めまで含めたマクロな過程も対象として研究を実施した。

## 3. 研究の方法

本研究では、英国カラム研究所 MAST 装置との共同研究および東京大学の実験室プラズマを用いた研究を連携させ、それぞれ以下のように研究を行った。

MAST 共同研究では、130 点 YAG トムソン散乱計測および、300 点 Ruby トムソン散乱計測、東京大学が開発した 32CH イオンドップラートモグラフィ計測を連携させ、それぞれ一次元計測として空間分解能を集中させ、大型装置の垂直位置制御の再現性の良さを応用して、Z 方向にプラズマをシフトさせて相対的に X 点に対する計測する位置の Z 座標を変えることによって、二次元計測を実施した。

東京大学の実験室プラズマ研究では、MAST と類似した実験条件における補充実験として、MAST に近いガイド磁場比の高い条件での磁気プローブ計測と合わせた実験および、MAST の超高空間分解計測で得られた結果をフィードバックとして、光学計測の空間分解の拡充に着手した。UTST 実験では、MAST 方式にならった空間分解能 36-50CH の高精細な一次元計測を Z 方向にショットごとにスキャンする方式および、二次元( $R-Z 9 \times 4$  点)に分解能を展開して同時計測する方式を試行。TS-3 では、新しいプラズマ診断の開発に取り組み、マルチスリット分光法を用いて、大コア径のファイバー(400 $\mu$ m)で 96CH( $R-Z 16 \times 6$  点)の情報を一度に取得できる高スループット・高精細イオンドップラートモグラフィ計測を新たに開発、X 点近傍のマイクロな領域と広範囲のマクロな加熱を同時に網羅できる詳細な二次元計測を実施した。

## 4. 研究成果

本研究の成果として、磁気リコネクションを介した高ベータ球状トカマクの合体生成過程における以下の特徴が明らかとなった。

- 磁気リコネクションは、X 点近傍において電子を加熱、合体下流のアウトフロー領域においてイオンを加熱する。
- 電子加熱はイオンスキン長以下のマイクロな領域で急峻なピーク構造を形成する。
- イオン加熱は合体完了後に再結合磁場が形成する、球状トカマクの閉じた磁気面上に伝搬し、グローバルな加熱構造を形成する。
- 高ガイド磁場実験条件では、電子・イオンの特徴的な加熱分布がイオン-電子エ

エネルギー緩和時間以上維持され、時間発展とともに双方の空間分布のエネルギー緩和現象が観測、イオン-電子温度それぞれの特徴的な加熱分布の緩和によってトリプルピーク構造を形成する。

- 合体生成で達成される加熱の最大値は、トロイダル磁場を上げて減少せず、X点近傍のマイクロな領域の加熱分布のみに影響する。
- 装置規模・トロイダル磁場によらず、合体生成で達成される最大加熱は、アウトフロー速度を決める再結合磁場の2乗に比例する。

東京大学が英国カラム研究所に32CH イオン Dopplart モグラフィ計測を建設し、大型装置実験に直接貢献することで推進した本研究では、現地研究者の理論・計測・制御の各部門の責任者の積極的な協力が得られ、図1が示すようなクリアな結果を得ることに成功した。トロイダル磁場が強く、ガイド磁場比が高いMAST 実験では、X点近傍において電子温度・密度分布が微細構造を形成し、一方合体下流では広範囲な領域でグローバルなイオン加熱、また電子-イオン温度間でのエネルギー緩和現象が起きていることがクリアにとらえられた。リコネクション領域の磁場の直接計測が難しいMAST 実験ではあったが、UTST において同ガイド磁場比の実験において、リコネクション中に類似した分布が形成される過程が確認できた。

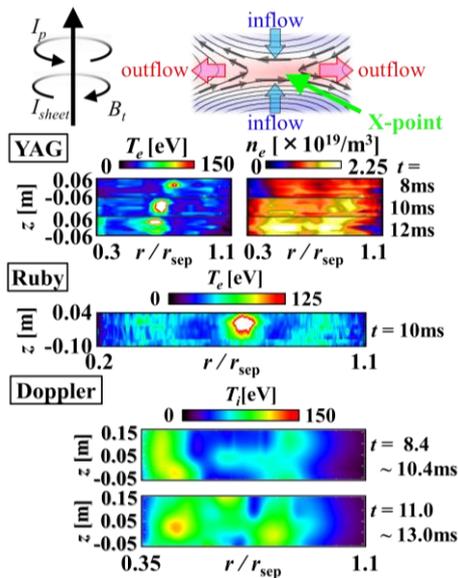


図1 英国カラム研究所 MAST 装置における国際共同実験で得られた磁気リコネクションによる電子加熱・イオン加熱の二次元分布

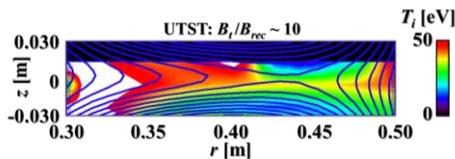


図2 東京大学 UTST 装置における、X点近傍に36CH 二次元イオン Dopplart モグラフィ計測の空間分解能を集中したマイクロスケールイオン温度分布計測

トロイダルプラズマの合体型のリコネクションにおいては、再結合した磁場は合体下流において、合体生成後の閉じ込めに貢献する球状トカマクの閉じた磁気面として堆積する。理学研究ではリコネクションアウトフローへのエネルギー変換過程までの議論にとどまり、完全に熱化される過程までは追跡しないことも多い。しかしながら、核融合プラズマの加熱シナリオとして、工学応用を狙う場合は、磁気エネルギーが運動エネルギーに変換された後、配位内に閉じ込められているうちに熱エネルギーに変換されることが重要であり、X点近傍のマイクロな領域のエネルギー変換過程だけではなく、トーラス全体への輸送過程まで明らかにすることが最終的には必要である。図3は本若手研究Bの補助金を主として投資して開発した、「マルチスリット分光法」を応用してICCD 一台で実現した96CH 高精細イオン Dopplart モグラフィ計測による新しい成果である。インフロー・アウトフロー両方向に2cm以下の間隔の空間分解能を維持して電流シート周辺の詳細な分布の計測精度を維持した状態で、合体下流も広範囲に網羅できるようになったことで、アウトフロー領域の加熱分布がセパトトリクスに沿って輸送されていく様子がクリアにとらえられている。来年度以降は若手研究A(17H04863)の補助を受けて200CH以上にさらに拡張する予定であり、トーラス全体の二次元分布を網羅した上で本格的な熱輸送解析を開始する。

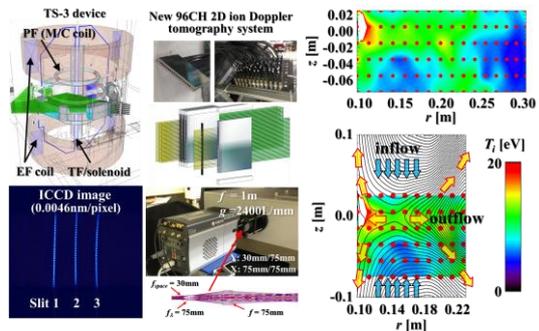


図3 東京大学 TS-3 装置におけるマルチスリット分光法を用いた96CH イオン Dopplart モグラフィによる、マクロ-ミクロスケールを一度に網羅した2次元イオン温度計測

以上のように、本研究では磁気リコネクションを核融合研究に応用した、トロイダルプラズマの合体過程における加熱を焦点として、東京大学の実験室プラズマと世界最大の球状トカマク実験MASTで連携しながら研究を推進した。英国カラム研究所に32CH イオン Dopplart モグラフィ計測を開発する形で現地実験にも貢献した本共同研究では、現地研究者の理論・計測・制御の各部門の責任者の積極的な協力を得ることができ、その成果はPhysical Review Letters誌をはじめとして、プラズマ核融合学会の学術奨励賞、査読付き国際会議であるIAEAおよびNuclear

Fusion 誌、米国物理学会招待講演をはじめとした国内外合計 6 件の招待講演に採択されるなど、国内外で高い評価を受けた。

#### 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 10 件)

- ① H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. J. Conway, C. Michael, B. Crowley, I. Fitzgerald, A. Meakins, N. Hawkes, K. G. McClements, J. Harrison, T. O’Gorman, C. Z. Cheng, Y. Ono and The MAST Team, “Investigation of merging/reconnection heating during solenoid-free startup of plasmas in the MAST Spherical Tokamak”, Nucl. Fusion **57**, 056037 (8pp) (2017) 査読あり  
DOI: 10.1088/1741-4326/aa6608
- ② H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, C. Michael, B. Crowley, N. J. Conway, R. Scannell, J. Harrison, I. Fitzgerald, A. Meakins, N. Hawkes, K. G. McClements, T. O’Gorman, C. Z. Cheng, Y. Ono, and MAST Team, “Recent progress of magnetic reconnection research in the MAST spherical tokamak”, Phys. Plasmas **24**, 056108 (7pp) (2017) 査読あり  
DOI: 10.1063/1.4977922
- ③ T. Yamada, H. Tanabe, T. G. Watanabe, Y. Hayashi, R. Imazawa, M. Inomoto, Y. Ono, M. Gryaznevich, R. Scannell, C. Michael and The MAST Team, “Localized electron heating during magnetic reconnection in MAST”, Nucl. Fusion **56**, 106019 (7pp) (2017) 査読あり  
DOI: 10.1088/0029-5515/56/10/106019
- ④ H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, K. Kadowaki, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. J. Conway, B. Crowley, K. G. McClements, I. Fitzgerald, C. Michael, J. Harrison, A. Meakins, N. Hawkes, T. O’Gorman, C. Z. Cheng, Y. Ono, and the MAST Team, “Application of Tomographic Ion Doppler Spectroscopy to Merging Plasma Startup in the MAST Spherical Tokamak”, Plasma and Fusion Res., **11**, 1302093 (4pp) (2016) 査読あり  
DOI: 10.1585/pfr.11.1302093
- ⑤ H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, K. Kadowaki, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, C. Michael, B. Crowley, N. J. Conway, R. Scannell, J. Harrison, I. Fitzgerald, A. Meakins, N. Hawkes, K. G. McClements, T. O’Gorman, C. Z. Cheng, Y. Ono, and the MAST Team, “Electron and Ion Heating Characteristics during Magnetic Reconnection in the MAST Spherical Tokamak”, Phys. Rev. Lett. **115**, 215004 (5pp) (2015) 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.215004
- ⑥ S. Inoue, Y. Ono, H. Tanabe, R. Horiuchi and

- C. Z. Cheng, “Numerical study of energy conversion mechanism of magnetic reconnection in the presence of high guide field”, Nucl. Fusion **55**, 083014 (10pp) (2015) 査読あり  
DOI: 10.1088/0029-5515/55/8/083014
- ⑦ M. Inomoto, T. G. Watanabe, K. Gi, K. Yamasaki, S. Kamio, R. Imazawa, T. Yamada, X. Guo, T. Ushiki, H. Ishikawa, H. Nakamata, N. Kawakami, T. Sugawara, K. Matsuyama, K. Noma, A. Kuwahata and H. Tanabe, “Centre-solenoid-free merging start-up of spherical tokamak plasmas in UTST”, Nucl. Fusion **55**, 033013 (8pp) (2015) 査読あり  
DOI: 10.1088/0029-5515/55/3/033013
  - ⑧ S. S. Henderson, L. Garzotti, F. J. Casson, D. Dickinson, M. O’Mullane, A. Patel, C. M. Roach, H. P. Summers, H. Tanabe, M. Valovič and the MAST team, “Charge dependence of neoclassical and turbulent transport of light impurities on MAST”, Plasma Phys. Control. Fusion, **57**, 095001 (10pp) (2015) 査読あり  
DOI: 10.1088/0741-3335/57/9/095001
  - ⑨ Y. Ono, H. Tanabe, T. Yamada, K. Gi, T. Watanabe, T. Ii, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. Conway, B. Crowley and C. Michael, “High power heating of magnetic reconnection in merging tokamak experiments”, Phys. Plasmas **22**, 055708 (8pp) (2015) 査読あり  
DOI: 10.1063/1.4920944
  - ⑩ I.T. Chapman, J. Adamek, R.J. Akers, ... , J. Storrs, Y. Takase, H. Tanabe (146 名中 130 番目) et al., “Overview of MAST results”, Nucl. Fusion **55**, 104008 (19pp) (2015) 査読あり  
DOI: 10.1088/0029-5515/55/10/104008

[学会発表] (計 15 件)

- ① H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, H. Koike, A. Kuwahata, H. Yamanaka, K. Kimura, M. Narita, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. Conway, T. O’Gorman, K. G. McClements, C. Z. Cheng, Y. Ono and the MAST team, “Fine structure formation of high field reconnection experiment in MAST and univ. Tokyo”, The US-Japan workshops and schools on magnetic reconnection (MR2017), I2-5, ひめぎんホール(愛媛県)・松山市, 2017 年 3 月 20 日 (invited)
- ② 田辺 博士, 小池 秀弥, 木村 心, 佐藤 直也, 成田 穂, 小野 靖, “マルチスリット分光法を用いた高スループット・高精度イオンドップラートモグラフィ計測の開発”, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 30aC05, 東北大学(宮城県)・仙台市, 2016 年 11 月 30 日
- ③ H. Tanabe, “Recent progress of magnetic reconnection research in the MAST spherical tokamak”, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics **61**, 18, BAPS.2016.DPP.DI.2, San Jose (USA), 2016 年 10 月 31 日 (invited)
- ④ H. Tanabe, T. Yamada, K. Gi, T. Watanabe, K.

Kadowaki, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. J. Conway, C. Michael, B. Crowley, J. Harrison, I. Fitzgerald, A. Meakins, N. Hawkes, K. G. McClements, T. O’Gorman, C. Z. Cheng and the MAST team, “Investigation of Merging/reconnection Heating during Solenoid-free Startup of Plasmas in the MAST Spherical Tokamak”, 26th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P4-32, 国立京都国際会館(京都)・京都市, 2016年10月19日(査読あり)

⑤ 田辺 博士, 山田 琢磨, 渡辺 岳典, 魏 啓為, 門脇 和丈, 井通 暁, 今澤 良太, M. Gryaznevich, C. Michael, N. Conway, R. Scannell, B. Crowley, K. McClements, C. Z. Cheng, 小野 靖, the MAST team, “合体加熱を応用したCS-less立ち上げ研究の最近の進展”, 「球状トカマク炉のための非誘導電流駆動等の要素技術の開発」研究会, 核融合科学研究所(岐阜県)・多治見市, 2016年9月7日

⑥ H. Tanabe, T. Yamada, R. Imazawa, M. Inomoto, C. Z. Cheng, Y. Ono and the MAST team, “Ion and Electron Heating Characteristics of Magnetic Reconnection in MAST Spherical Tokamak”, 41st COSPAR Scientific Assembly 2016, D2.4-0030-16, Istanbul (Turkey), 2016年8月2日 (invited: トルコ治安情勢により会議開催中止)

⑦ H. Tanabe, T. Yamada, R. Imazawa, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. Conway, B. Crowley, C. Michael, K. G. McClements, M. Inomoto, C. Z. Cheng, Y. Ono and the MAST team, “Application of high power reconnection heating for solenoid-less startup of spherical tokamak in MAST”, The 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), A2A1-2, Kaohsiung (Taiwan), 2016年6月28日

⑧ 田辺 博士, 山田 琢磨, 渡辺 岳典, 魏 啓為, 門脇 和丈, 井通 暁, 今澤 良太, M. Gryaznevich, the MAST team, C. Z. Cheng, 小野 靖, “磁気リコネクションにおけるプラズマ加熱”, 磁気リコネクション研究の最前線と今後の展望, 国立天文台(東京都)・三鷹市, 2016年3月28日 (invited)

⑨ H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, K. Kadowaki, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, C. Michael, B. Crowley, N. J. Conway, R. Scannell, J. Harrison, I. Fitzgerald, A. Meakins, N. Hawkes, K. G. McClements, T. O’Gorman, C. Z. Cheng and Y. Ono, “Recent progress of high field reconnection heating experiment in MAST”, US-Japan workshop on Magnetic Reconnection (MR2016), Napa (USA), 2016年3月8日 (invited)

⑩ 田辺 博士, 山田 琢磨, 渡辺 岳典, 魏 啓為, 門脇 和丈, 今澤 良太, Clive Michael, Brendan Crowley, Neil Conway, Rory Scannell, Mikhail Gryaznevich, 井通 暁, 小野 靖, “大型球状トカマク合体実験 MAST におけるリコネクション加熱研究の進展”, 第32回プラズマ核融合学会年会, 27aB02, 名古屋大学(愛

知県)・名古屋市, 2015年11月27日 (invited)

⑪ H. Tanabe, A. Kuwahata, H. Yamanaka, M. Inomoto, Y. Ono, “Development of ultra-fast 2D ion Doppler tomography using image intensified CMOS fast camera”, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, YP12.00023, Savannah (USA), 2015年11月20日

⑫ H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, K. Kadowaki, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, C. Michael, N. Conway, R. Scannell, B. Crowley, K. McClements, Y. Ono, “Electron and ion heating characteristics during magnetic reconnection in MAST”, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, BO7.00007, Savannah (USA), 2015年11月16日

⑬ H. Tanabe, T. Yamada, K. Yamasaki, T. Watanabe, K. Gi, M. Inomoto, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. Conway, B. Crowley, C. Michael and Y. Ono, “Application of merging/reconnection heating for spherical tokamak in MAST”, 18th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2015), Princeton (USA), 2015年11月4日

⑭ H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, K. Kadowaki, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, the MAST team, C. Z. Cheng and Y. Ono, “MAST 共同実験における高ガイド磁場リコネクションの加熱”, 第23回ひので-実験室研究会, トピックス2: ~イオン加熱・加速~, 東京大学(東京都)・文京区, 2016年10月12日

⑮ H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, K. Kadowaki, M. Inomoto, M. Gryaznevich, C. Michael, B. Crowley, N. Conway, R. Scannell and Y. Ono, “Electron and ion heating characteristics during merging/reconnection startup of spherical tokamak in MAST”, The 2015 International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS2015), Pitlochry (UK), 2015年8月25日

[その他]

- ① ホームページ(東京大学小野・井研究室)  
<http://tanuki.t.u-tokyo.ac.jp/>
- ② 田辺 博士, プラズマ核融合学会 第20回学術奨励賞受賞: 「スカラー・ベクトルトモグラフィを応用した2次元イオンドップラー温度・流速計の開発」, 第32回プラズマ・核融合学会年会, 名古屋大学(愛知県)・名古屋市, 2015年11月24日  
[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2015\\_10/jspf2015\\_10-697.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2015_10/jspf2015_10-697.pdf)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

田辺 博士 (TANABE, Hiroshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教  
研究者番号: 30726013