

令和元年6月4日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K14279

研究課題名(和文)パルス高出力リコネクション加熱を用いたトカマク点火実験

研究課題名(英文) Pulsed and High Power Reconnection Heating Experiments for Tokamak Plasma Ignition

研究代表者

小野 靖 (Ono, Yasushi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30214191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：トカマク合体加熱の最大化手法を見出し、イオン温度2.2keV(電子密度 $3 \times 10^{13}$ 乗/cc)を達成した。キーとなるイオン加熱のスケーリング則はkeV領域でも合体トカマクの再結合磁場(ほぼポロイダル磁場)の2乗に比例することを初めて実証した。同則は全トカマク合体実験TS-3/6, MAST, ST-40で共通で、その成立条件はX点付近の電流シートの幅をイオンラーマ半径程度まで圧縮してその異常抵抗を高めること、合体中の損失量 $\ll$ 合体加熱量が必要と判明した。成果は2018年アジア太平洋物理学学会基調講演等の多くの招待講演、解説となった他、英国ベンチャー企業ST-40合体実験の共同設立につながった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2個のトカマクを合体させて、その高出力イオン加熱を核融合点火に利用するアイデアは独創的なトカマク立ち上げ法であり、今回、2keVを超えて、再結合磁場の2乗に比例するスケーリング則を実証したことにより、基本的な応用手法が定まった。合体する核融合プラズマが、磁気リコネクション加熱により瞬時にポロイダル磁気エネルギーの半分程度がイオン熱エネルギーに変換されたことで、極めて安価な合体加熱が、従来の追加熱機器に取って代わる可能性がでてきた。成果の多くは招待講演や解説として評価されており、実際に英国ベンチャーのST-40合体実験に発展して可能性が大きく広がり、本手法による核融合点火の実用化が待たれる。

研究成果の概要(英文)：We maximized reconnection heating power of two merging tokamak plasmas, realizing its ion heating up to 2.2keV under its electron density 30 trillion/cc. Using TS-3, TS-6 in Univ. Tokyo, MAST and ST-40 in UK, we verified its key scaling law in the keV regime: the reconnection heating scales with the square of reconnecting (almost poloidal) magnetic field. To obtain this maximized ion heating, we need to compress the current sheet to the order of ion gyroradius, triggering its anomalous resistivity and the following fast reconnection and also to reduce the heating loss much lower than the reconnection heating power. Those experimental results and PIC simulation were introduced by a number of our invited/ plenary talks in 2018 AAPPs, 2017 ICPP meetings etc. and by our journal articles and newspapers, leading us to construction of new merging/ reconnection heating experiment: ST-40 in Tokamak Energy, Inc.(UK).

研究分野：プラズマ工学, 核融合工学

キーワード：磁気リコネクション プラズマ合体 イオン加熱 球状トカマク アルファ加熱 アウトフロー ショック 電子加熱

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の我々のトカマク合体実験によって磁気リコネクションによるプラズマ加熱は、

(1) 再結合磁場の二乗に比例して、主としてイオンを加熱する高出力(高温)加熱、

(2) Sweet-Parker 時間の1/10以下のリコネクション時間で磁気エネルギーを熱エネルギーに変換する高速加熱を特徴とする磁気エネルギーから主にイオン熱エネルギーへの変換であることが0.2keV以下の範囲で明らかになった。東京大学TS-3実験装置でトカマク2個を合体させると、中間にX点が形成され、再結合磁場~ポロイダル磁場に比例するアルヴェン速度に近いアウトフローが生成され、下流で再結合済の磁力線に衝突してファーストショックを形成しつつ、再結合磁場の2乗に比例する選択的イオン加熱を生むとわかった。加熱は大きさによらず、再結合済の閉じた磁力線がX点を厚く取り囲むため、熱エネルギーは殆ど損失なく閉じこめられ(エネルギー閉じ込め時間>>リコネクション加熱時間)、容易に高温イオンが得られる。TS-3実験でイオン温度~0.2keVまで実証し、更に英国MASTでの日英共同高磁場合体実験で1.2keVまで実証し、加熱はトロイダル磁場によらない。桁違いに高出力なりコネクション加熱の発見は、2014年米国物理学学会等の招待講演として評価されている。再結合磁場を現在の0.5kG(TS-3)、1.5kG(MAST)から3kGへ増加させれば、例えば電子密度 $1.5 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ 下でイオン温度~4keV( $3 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ で2keV)を実現できる。追加熱が不要の安価な核融合点火実験を構想するに至った。

### 2. 研究の目的

合体する2個のトカマクプラズマを小型化することによりポロイダル磁場を3kGまで上げ、リコネクション加熱によってそのポロイダル磁場エネルギーの一部をイオン加熱に使用し、電子密度 $1.5 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ ならば、4keV( $3 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ なら2keV)のイオン温度を実現する。高磁場用のコイルを新設するだけで、既存の電源と計測系を用いて、追加熱が一切無い3kGのポロイダル磁場を持つ合体だけで $\alpha$ 粒子加熱に目処がつくkeV超のイオン温度を実現し、再結合磁場の2乗に比例する加熱スケールを延長する。合体加熱は条件を満たせば、プラズマのサイズやトロイダル磁場に概ねよらず、再結合磁場(おおよそ~ポロイダル磁場)の2乗に比例した選択的イオン加熱が得られるため、大半径18cmのTS-3トカマク合体装置に大半径55cmの中型TS-4トカマク合体実験の電源を集中してポロイダル磁場をMAST実験の1.5kGから3kGまで増加すれば、エネルギー閉じ込め時間>>リコネクション加熱時間の条件下、追加熱なしに $\alpha$ 粒子加熱に手が届くkeV超のイオン加熱が実現できる。これは、①イオン中心の直接加熱であり、②追加熱が不要な安価なトカマク炉立ち上げ法が成立し、恩恵は極めて大きい。第1の課題は高磁場コイルの新設と電源整備による高磁場合体の実現、第2の課題はイオン温度の2次元計測を用いた高磁場合体加熱の検証と最適化である。本申請は瞬時に磁気エネルギーの一定部分をイオン加熱のみに集中し、核融合点火する独創的なトカマク立ち上げ法であり、keV超のイオン温度を実証できれば、極めて安価な合体加熱が、従来の追加熱機器に取って代わる可能性をもち、核融合炉の低コスト化に極めて有効である。

### 3. 研究の方法

第1の課題は、高磁場合体のためのインフラ作りである。予算が申請額の6割に満たないため、大幅に計画を見直し、他予算も併用して、コイルも電源も手作りで対応し、交付申請で生成磁場目標も引き下げ、さらに電源整備も一部にしばって計画した。何とかコイルは現状の1kGから高いコイル磁場3kGに耐える力学強度と電流容量を持つポロイダルコイル2組をほぼ手作りで設計製作し、3kGのポロイダル磁場発生のため、現有の0.05MJのTS-3用電源に代えて、中型ST実験装置TS-4用の0.4MJの半分を集中投入する方針とした。現状のトロイダル磁場コイルは高磁場に耐え、大半径0.55mの合体実験装置TS-4のコンデンサー電源は既設である。STの生成効率が低下せぬよう生成時間(LC回路の1/4周期)を0.1msec程度に保つ。真空容器内のセパトトリクス外の体積が大きいことから密度制御は難しく、当初予定の倍の電子密度 $3 \times 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ の環境下で、ポロイダル磁場3kGの球状トカマクを2個生成し、追加熱無しで核融合燃焼( $\alpha$ 加熱)に目処が付く2keVを実現した。

第2の課題は、高磁場合体加熱の計測と最適化である。リコネクション加熱の大部分であるイオン温度は、独自開発した2次元ドップラー計測によって計測した。これは半径方向に並んだ光ファイバーで視線積分されたライン光のスペクトルを測定し、軸対称性を仮定して波長毎にアーベル変換を行って局所のスペクトルを再構成するもので、同時進行した日英共同のST-40合体実験でも東大側が設置してイオン温度を1次元、2次元で計測した。320chの光ファイバー束を用いて2次元計測を高精細化し、アウトフローのために下流に発生するイオン加熱を詳細な検証した。研究協力者の堀内が行う粒子(PIC: Particle-In-Cell)シミュレーションとの比較を実験に近い境界条件下で行った他、X点領域をカットしたスラブモデルではなく、合体する磁束管全体をシミュレートする粒子シミュレーションの開発も堀内らと協力して行った。また、電子温度(トムソン散乱)計測は、レーザの往復反射と飛行時間差を利用して1次元分の分光器数で経済的に2次元化した。現有16chの集光系、光ファイバー、フィルタ、検出器にレーザの往復反射を組み合わせて、分解能3cmの電子温度計測へ高精細化して、堀内らが行う粒子シミュレーションと比較した。X点中心の加熱に加え、リコネクション下流のイオン加熱が電子温度に徐々に反映される過程が見えるようになった。

#### 4. 研究成果

磁気リコネクション加熱を最大化する手法を見出し、同加熱のみで電子密度  $3 \times 10^{19} \text{ [m}^{-3}\text{]}$  の条件下でイオン温度  $2.2 \text{ keV}$  を達成した。キーとなるイオン加熱のスケーリング則は、イオン温度が合体するトカマクの再結合磁場（ほぼポロイダル磁場）の2乗に比例することが  $\text{keV}$  を超える領域にわたって実証され、目的を達することができた。

第1に上記スケーリング則は、東京大学 TS-3U, TS-6 (TS-U: TS-3 をベースにコイル系、電源系を中心に高磁場用に改造した装置)、カラム研究所 MAST, トカマクエナジー ST-40 のトカマク合体実験で共通と判明し、スケーリング則通りのイオン加熱を得るには、(1) 電流シート幅をイオンラーマ半径程度まで圧縮してその異常抵抗をオンしてリコネクションを高速化し、(2) リコネクション中の損失  $\ll$  リコネクション加熱となる閉じ込めが必要であるとわかった。

第2にトロイダル磁場がゼロのリコネクション加熱は、再結合磁場程度の場合の2倍程度であるが、トロイダル磁場  $>$  ポロイダル磁場のトカマク領域ではトロイダル磁場に依存しないことが、TS-3, TS-6, MAST, ST-40 の4つの合体実験と PIC シミュレーションの双方で判明した。

第3にリコネクションのイオン加熱エネルギーは、合体するトカマクのポロイダル磁気エネルギーの 40-50% とわかった。

第4に合体実験ではイオン加熱は電子加熱の5倍程度であるが、スラブモデルによる PIC では2倍程度で、境界条件に依存する。

第5に再結合磁場の2乗に比例する加熱スケーリング則の確認の先にあるメカニズムの解明に成功した。  $32 \times 10$  点に高精細化した2次元イオン温度計測を、前述の小型・高磁場のトカマク合体に適用してリコネクション加熱機構を解明し、それを最大にする手法に結びつけた。

具体的には上記結論の物理機構は以下のように説明できることがわかった。

① リコネクション加熱を最大化するキーは、電流シートをイオンラーマ半径程度まで圧縮して高速リコネクションをオンすることで、イオンのメアンダリング運動、さらに Lower Hybrid 不安定とドリフトキンク不安定の誘起により電流シートは大きな異常抵抗を得るため、ポロイダル磁気圧だけで、概ねアウトフロー速度、即ち加熱パワーが決まり、ガイド（トロイダル）磁場への依存性がなくなる点がわかった。これは TS-3, TS-6 合体実験と協力中の核融合科学研究所堀内らの粒子シミュレーションの双方で判明した。この条件でリコネクション加熱が最大化され、再結合磁場  $\sim$  ポロイダル磁場の2乗に比例するイオン加熱エネルギーが得られる。

② この際、大きな役割を果たすのが、リコネクションアウトフローとして先行して流れる電子がリコネクション下流に形成する負の静電ポテンシャルの井戸である。イオンは、

(A) 互いに反平行の再結合磁場が形成するリコネクション電場による加速に加えて、

(B) 先行する電子のアウトフローが形成する負ポテンシャルの井戸による静電加速によって加速されることが静電プローブによる2次元静電ポテンシャル計測によって明らかになった。

興味ある点はその静電ポテンシャルの井戸はリコネクション下流だけでなく、合体するトカマクのほぼ全域にわたって形成されることである。イオンの加速はリコネクション下流領域だけではなく、合体する磁力管全域にわたって行われていることを意味する。これは、リコネクションのエネルギー変換が従来の X 点付近のスラブモデルでは解釈できず、必ず閉じる磁力線の全域、合体する磁束管全体で議論する必要がある。

③ リコネクション加熱によるイオン熱エネルギーへのエネルギー変換は、ポロイダル磁気エネルギーの 40-50% で、再結合磁場の大きさによらないことがわかった。2つのトカマク合体時、ポロイダル磁束は保存するが、電流分布をあまり変えずに1つ分のトカマクのポロイダル磁気エネルギーが変換されることを意味しており、トカマクの磁場配位が自ら安定な分布範囲に近づいていく、いわゆる自己組織化の結果と解釈できる。

④ リコネクション加熱は、実験的にはイオン加熱が電子加熱の5倍程度であることが判明した。スラブモデルを用いた粒子シミュレーションではその比が2倍程度であるものもあり、一見、不一致であるが、軽い電子が先行加速されてリコネクション下流に負の静電ポテンシャルを形成する際、スラブモデルではその範囲が境界を超えるため、小さな値になると考えられる。

合体トカマクが電流シート幅をラーマ半径程度まで圧縮して得られる高い異常抵抗の発生による高速リコネクションによって、ポロイダルアルベーン速度程度のアウトフローとその熱化によって再結合（ポロイダル）磁場のみによるスケーリング則が得られることを見出した。スケーリングが再結合（ポロイダル）磁場のみにより、ガイド（トロイダル）磁場によらない理由がはじめて説明できたことは、本研究の本質に迫る大きな進展と言える。

以上、予算制限によるコイルの強度不足もあり、本研究としては電子密度  $3 \times 10^{19} \text{ [m}^{-3}\text{]}$  で  $2 \text{ keV}$  程度までであるが、リコネクション加熱のスケーリング則を  $\text{keV}$  領域で実証した。合体・リコネクション加熱単独で核融合炉を点火するアイデアの実証は内外の注目を集め、第1回アジア太平洋物理学学会年会の基調講演となった他、ICPP 国際会議の基調講演 Magnetic Reconnection 2019 国際会議の基調講演、IPELS 国際会議等をはじめとする 37 件の招待講演、IAEA Fusion Energy 2018 会議の日本代表論文への採択も 8 件に達した。査読付き論文は 39 件、関連する解説 2 件である。特に本研究のリコネクションによる核融合点火のアイデア実証が注目され、2016 年日本政府主催の CO2 削減を目指した第3回 Cool Earth Forum に核融合研究として初めて招待され、新聞でも日経産業新聞 2016 年 9 月 30 日「先端技術：テクノトレンド プラズマ合体で超高温に：核融合発電の実用化へ」、日刊工業新聞 2016 年 8 月 12 日「CO2 排出ゼロ 革新技術で挑む 経済的な人工太陽は実現できるか 出つつある“原型炉の芽”」等で取り上げられた。

特筆すべき点は、このリコネクション加熱による核融合炉点火の実証は、英国のベンチャー企業 Tokamak Energy 社の主プロジェクト ST-40 実験を生む新しい動きにつながったことである。東京大学が協力して実験を計画し、実際に 2019 年 1 月に実験をスタートした。キーとなるイオン温度計測も我々が担当し、本研究の一部として日英共同実験を展開することとなり、リコネクション加熱による核融合炉点火の実用化に向けてインパクトのある新展開を生んだ。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 41 件) (4)(5)の解説論文を除いて全て査読有

- (1) Y. Ono, S. Inoue, H. Tanabe, C. Z. Cheng, H. Hara and R. Horiuchi, “Reconnection Heating Experiments and Simulations for Torus Plasma Merging Startup”, Nuclear Fusion (in press).
- (2) M. Inomoto, H. Tanabe, Y. Ono et al., “Effects of Reconnection Downstream Conditions on Electron Parallel Acceleration during Merging Start-Up of Spherical Tokamak”, Nuclear Fusion (in press).
- (3) H. Tanabe, M. Inomoto, Y. Ono et al., “Investigation of fine structure formation of guide field reconnection during merging plasma startup of spherical tokamak in TS-3U”, Nuclear Fusion (in press).
- (4) 小野靖, “核融合の現状と動向: 核融合ベンチャー企業設立の動き~国際協力から国際競争への流れ~”, 電気評論 2019 年 5 月号, pp.77-81, (解説論文).
- (5) 小野靖等「小特集 プラズマが作る磁場トポロジー: 磁気島とプラズモイド: 5. リコネクションにおけるプラズモイド」プラズマ・核融合学会誌, 第 94 巻, p.410, (2018), (解説論文)
- (6) S. Usami, R. Horiuchi, Y. Ono and H. Tanabe, “Effective Proton Heating through Collisionless Driven Reconnection in the Presence of Guide Field”, Plasma and Fusion Research 13, 3401025 (2018).
- (7) Y. Ono et al., “Scaling Study of Reconnection/ Merging Heating of Spherical Tokamak Plasmas for Direct Access to Burning Plasma”, Fusion Energy 2018, 1-8, EXP/P3-24, (2018).
- (8) M. Inomoto et al., “Effects of reconnection downstream conditions on electron parallel acceleration during merging start-up of spherical tokamak”, Fusion Energy 2018, 1-8, EXP/P7-17, (2018).
- (9) H. Tanabe et al., “Investigation of fine structure formation of guide field reconnection during merging plasma startup of spherical tokamak in TS-3U”, Fusion Energy 2018, 1-8, EXP/P3-22, (2018).
- (10) M. Akimitsu, Y. Ono et al., “High-Resolution 2D Magnetic Field Measurement of Magnetic Reconnection Using Printed-Circuit Board Coils”, Plasma and Fusion Research 13, 1202108, (2018).
- (11) 秋光萌, 小野靖 等, 「プリント回路技術を用いた 2 次元高精度磁気計測システムの開発」, 電気学会論文誌 A Vol. 138, No.9, 480-481, (2018).
- (12) S. Kamio, M. Inomoto, K. Yamasaki, T. Yamada, C. Z. Cheng, and Y. Ono, “Magnetic island dynamics in magnetic reconnection in UTST experiments”, Physics of Plasmas 25, 012126, (2018).
- (13) X. Guo, R. Horiuchi, C. Z. Cheng, Y. Ono, “Energy Conversion Mechanism for Electron Perpendicular Energy in High Guide-Field Reconnection”, Physics of Plasmas 24, 032901, (2017).
- (14) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Investigation of merging/reconnection heating during solenoid-free startup of plasmas in the MAST Spherical Tokamak”, Nuclear Fusion 57, 056037, (2017).
- (15) Y. Kaminou, Y. Ono et al., “Numerical study of Hall effects on counter-helicity spheromak merging by two-dimensional Hall-MHD simulations”, Physics of Plasmas 24, 032508, (2017).
- (16) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Recent progress of magnetic reconnection research in the MAST spherical tokamak (招待論文)”, Physics of Plasmas 24, 056108, (2017).
- (17) T. Ushiki, M. Inomoto et al., “Reconstruction of plasma shape and eddy current profile based on modified cauchy condition surface method”, Fusion Engineering and Design 122, 35-41, (2017).
- (18) K. Kondo, M. Inomoto, H. Tanabe, Y. Ono et al., “Separated Double-Current Layers in a High-Guide-Field Reconnection Experiment”, Plasma and Fusion Research 12, 1202033, (2017).
- (19) S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, “Effective Heating of Nonadiabatic Proton in Magnetic Reconnection with a Guide Field”, Physics of Plasmas 24, 192101, (2017).
- (20) Y. Ono, M. Inomoto, R. Horiuchi et al., “Reconnection Heating Experiments and Simulations for Torus Plasma Merging Startup”, Fusion Energy 2016, EX/P3-38 (8pp), (2016).
- (21) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Application of Tomographic Ion Doppler Spectroscopy to Merging Plasma Startup in the MAST Spherical Tokamak”, Plasma and Fusion Research 11, 1302093, (2016).
- (22) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Investigation of Merging/reconnection Heating during Solenoid-free Startup of Plasmas in the MAST Spherical Tokamak”, Fusion Energy 2016, EX/P4-32, (8pp), (2016).
- (23) T. Yamada, H. Tanabe, R. Imazawa, M. Inomoto, Y. Ono, M. Gryaznevich, et al. “Localized electron heating during magnetic reconnection in MAST”, Nuclear Fusion, 56, 106019 (2016).
- (24) R. Yanai, M. Inomoto, “Characteristics of Magnetic Fluctuations during Magnetic Reconnection in Counter-Helicity Spheromak Merging Experiment”, Plasma and Fusion Research 11, 2401069 (2016).
- (25) T. Ushiki, M. Inomoto et al., “Generation of Energetic Electrons during Spherical Tokamak Merging in UTST”, Plasma and Fusion Research 11, 2402100, (2016).
- (26) A. Kuwahata, M. Inomoto, Y. Ono et al., “Energy Flux due to Electromagnetic Fluctuations during Guide Field Magnetic Reconnection”, Plasma and Fusion Research 11, 1301087 (2016).
- (27) 桑波田晃弘, 神納康宏, 矢内亮馬, 井通暁, 小野靖, 「異極性プラズマ合体におけるイオン温度とイオンフロー分布」, 電気学会論文, A Vol.136, pp.212-213 (2016).
- (28) 門脇 和丈, 石田 俊介, 小野 靖, 「局所計測を併用したレーザ干渉計のための新しい分布

再構成法の開発」, 電気学会論文誌 A Vol.136, pp.535-540, (2016).

(29) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Electron and Ion Heating Characteristics during Magnetic Reconnection in the MAST Spherical Tokamak”, *Physical Review Letters* 115, 215004 (2015).

(30) C. Z. Cheng, S. Inoue, Y. Ono, and R. Horiuchi, “Physical processes of driven magnetic reconnection in collisionless plasmas: Zero guide field case”, *Physics of Plasmas* 22, 101205 (2015).

(31) M. Inomoto, H. Tanabe et al., “Centre-solenoid-free merging start-up of spherical tokamak plasmas in UTST”, *Nuclear Fusion*, 55, 033013 (2015).

(32) Y. Ono and H. Ji, “Preface to Special Topic: Advances in Magnetic Reconnection Research in Space and Laboratory Plasmas. III”, *Physics of Plasmas* 22, 101101 (2015).

(33) K. Gi, Y. Ono et al., “Conceptual design of the moderate-size superconducting spherical tokamak power plant”, *Nuclear Fusion* 55 (2015) 063036 (14pp).

(34) X. Guo, M. Inomoto, Y. Ono et al., “Localized electron heating by strong guide-field magnetic reconnection”, *Physics of Plasmas* 22, 101201 (2015).

(35) K. Yamasaki, M. Inomoto, Y. Ono et al., “Laboratory study of diffusion region with electron energization during high guide field reconnection”, *Physics of Plasmas* 22, 101202, (2015).

(36) X. Guo, M. Inomoto, Y. Ono et al., “Two-Dimensional Electron Temperature and Density Measurement during Strong Guide-Field Reconnection by using Slide-Type Thomson Scattering System” *Plasma and Fusion Research* 10, 3402017, (2015).

(37) S. Inoue, Y. Ono, H. Tanabe, R. Horiuchi et al., “Numerical study of energy conversion mechanism of magnetic reconnection in the presence of high guide field”, *Nucl. Fusion* 55, 083014 (10pp), (2015).

(38) S. S. Henderson, H. Tanabe et al., “Charge dependence of neoclassical and turbulent transport of light impurities on MAST”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 95001 (2015).

(39) I. T. Chapman, Y. Ono, et al., “Overview of MAST results”, *Nuclear Fusion* 55, 104008 (2015).

(40) 西田賢人, 桑波田晃弘, 斎藤航哉, 小野靖: 「外部平衡磁場分布を用いた電流シート内のプラズマ生成実験」, 電気学会論文誌, A Vol.135, No.8, p.498, (2015).

(41) Y. Ono, H. Tanabe, M. Gryaznevich, R. Scannell, et al., “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Merging Tokamak Experiments (Invited)”, *Physics of Plasmas* 22, 055708 (2015).

[学会発表] (計 77 件) 以下, 招待講演のみを掲載する。

(1) Y. Ono, “Reconnection Heating Experiments in TS-6, MAST and ST-40 (Invited)”, 5th UNIST-Kyoto Univ. Workshop, Pusan, Korea, Apr. 22 - 23, 2019.

(2) Y. Ono, “Recent progress of reconnection heating experiments in ST-40 and TS-6 (Invited)”, MPPC Workshop 2019, University of Tokyo, Tokyo, Feb. 18-21, 2019.

(3) Y. Ono, “Direct Access to the Burning Plasma by High-Power Reconnection Heating of Merging Tokamaks (Invited)”, 2nd Asia-Pacific Conf. on Plasma Physics, F-I13, Kanazawa, Nov. 12-17, 2018.

(4) C. Z. Cheng, Y. Ono et al., “Electron and Ion Heating/Acceleration in Driving Magnetic Reconnection (Invited)”, 2nd Asia-Pacific Conf. Plasma Physics, F-I14, Kanazawa, Nov. 12-17, 2018.

(5) S. Usami, Y. Ono et al., “Particle Simulation Studies on Effective Ion Heating during Magnetic Reconnection (Invited)”, 2nd Asia-Pacific Conf. Plasma Physics, F-I15, Kanazawa, Nov. 12-17, 2018.

(6) H. Tanabe et al., “Investigation of global ion heating/transport during merging startup of spherical tokamak in TS-3U (Invited)”, 2nd Asia-Pacific Conf. Plasma Phys. F-O8, Kanazawa, Nov. 2018.

(7) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Investigation of Ion Heating/transport Process During High Guide Field Merging Experiment (Invited)”, 27th Int. Toki Conf. Plasma Fus. Research, Toki, Nov. 19-22, 2018.

(8) Y. Ono, “Self-Organizations and Reconnections of Merging Toroidal Flux Tubes (Invited)”, MR 2019 (Magnetic Reconnection in Space and Laboratory Plasmas), Princeton, USA, Sept.4-10, 2018.

(9) Y. Ono, “Scaling Study of Reconnection Heating in Torus Plasma Merging Experiments (Invited)”, 19th International Congress on Plasma Physics (ICPP), Vancouver, Canada, June 4-8, 2018.

(10) Y. Ono, “Magnetic reconnection experiments by use of merging tokamak and spheromak plasmas (Invited)”, 12th Int. Conf. High Energy Density Lab. Astrophys., Kurashiki, Japan, May 27-Jun 1, 2018.

(11) 田辺博士, 「CODEV を応用した高スループット・高精細分光システムの開発」, CODEV 特別セミナー2017, コングレスクエア日本橋, 2017年11月9日(招待講演).

(12) Y. Ono et al., “Merging Formation of FRCs and STs in TS-3, TS-4 and TS-U (Invited)”, US-Japan Workshop on Compact Tori 2017 (CT2017), Yokohama, Japan, Nov. 7-9, 2017.

(13) Y. Ono et al., “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Torus Plasma Merging Experiments (Plenary)”, 1st Asia-Pacific Conf. Plasma Physics, Chengdu, China, Sept. 18-23, 2017.

(14) H. Tanabe et al., “Recent progress of reconnection research in high field merging experiment using 2D imaging diagnostics (Invited)”, 1st Asia-Pacific Conf. Plas. Phys., Chengdu, China, Sept. 18, 2017.

(15) Y. Ono, “Scaling Study of Reconnection Heating in Torus Plasma Merging Experiments (Invited)”, The 19th International Spherical Torus Workshop, Seoul National Univ., Seoul, KOREA, Sep.18, 2017.

(16) Y. Ono, H. Tanabe et al., “Scaling Study of Reconnection Heating in Torus Plasma Merging Experiments (Invited)”, 2015 IPELS Conference, San Diego, USA, Jun. 19-23, 2017.

(17) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Fine structure formation of high field reconnection experiment in MAST and Univ. Tokyo (Invited)”, MR2017 Conference, Matsuyama, Mar. 19-23, 2017.

- (18) C. Z. Cheng, Y. Ono, R. Horiuchi et al., “Role of Parallel Electric Field in Collisionless Reconnection (Invited)”, MR2017 Conference, Matsuyama, Japan, Mar. 19-23, 2017
- (19) Y. Ono, H. Tanabe et al., “High Power Heating of Magnetic Reconnection in TS, MAST and ST-40 Experiments (Invited)”, MR2017 Conference, Matsuyama, Japan, Mar. 19-23, 2017.
- (20) Y. Ono: “Innovative Approaches to Economical DEMO reactors (Invited)”, “Merging/Reconnection Heating for Direct Access to Fusion Reaction (Invited)”, 3rd Annual Meeting of Innovation for Cool Earth Forum, Concurrent Session “Nuclear Fusion”, Tokyo Japan, Oct. 5-6, 2016.
- (21) Y. Ono et al., “Development of High Magnetic Field Merging Tokamak Experiment TS-U for Reconnection Heating Physics and Applications (Plenary, Invited)”, The 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), Kaohsiung, Taiwan, Jun. 27-Jul.1, 2016.
- (22) Y. Ono, H. Tanabe et al., “Development of High Magnetic Field Merging Tokamak Experiment TS-U for Reconnection Heating Physics and Applications (Invited)”, The 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), Kaohsiung, Taiwan, Jun. 27-Jul.1, 2016.
- (23) N. Nishizuka, Y. Ono et al., “Laboratory experimental modeling of chromospheric jets observed in the solar atmosphere (Invited)”, 18th ICPP Conference, Jun.27-Jul 1, 2016, Kaohsiung, Taiwan.
- (24) Y. Ono et al., “Laboratory Experiments of Merging Tokamaks and Spheromaks for Reconnection-Heating Physics and Applications (Invited)”, Korean Phys. Society, Daejeon, Korea, Apr. 20-22, 2016.
- (25) Y. Ono, et al., “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Tokamak Merging Experiments (Invited)”, MR2016 Conference, Andaz Napa, Napa, CA, USA, Mar. 7-11, 2016.
- (26) H. Tanabe, Y. Ono et al., “Recent progress of high field reconnection heating experiment in MAST (Invited)”, MR2016 Conference, Andaz Napa, Napa, CA, USA, Mar. 7-11, 2016.
- (27) Chio Z. Cheng, S. Inoue, Y. Ono, R. Horiuchi, “Kinetic physics of driven magnetic reconnection in 2-1/2 dimensions”, MR2016 Conference, Andaz Napa, Napa, CA, USA, Mar. 7-11, 2016.
- (28) Y. Ono, “Interdisciplinary Study of Reconnection Dynamics and Energy Conversion (Invited)”, Max Planck/Princeton Center for Plasma Physics General Meeting, Berlin, Germany, Jan. 12-15, 2016.
- (29) Y. Ono, “Recent Topics in Japanese Reconnection Community (Invited)”, Max Planck/Princeton Center for Plasma Physics General Meeting, Harnack-Haus, Berlin, Germany, Jan. 12-15, 2016.
- (30) C. Z. Cheng, S. Inoue, Y. Ono, R. Horiuchi, “Collisionless plasma dynamics in driven magnetic reconnection (Invited)”, The 32nd JSPF Annual Meeting, Aichi, Japan, Nov. 24-27, 2015.
- (31) 田辺博士, 小野靖等, 「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 (招待講演), 名古屋, 2015 年 11 月 24 日-27 日.
- (32) 桑波田晃弘, 井通暁, 小野靖 「ガイド磁場磁気リコネクションにおける磁場揺動の役割」第 32 回プラズマ・核融合学会年会 (招待講演), 名古屋, 2015 年 11 月 24 日-27 日.
- (33) Y. Ono, H. Tanabe et al., “High Power Heating of Magnetic Reconnection in ST Merging Experiments (Invited)”, 18th International Spherical Torus Workshop, Princeton, USA, Nov. 3-6, 2015.
- (34) M. Inomoto, H. Tanabe, Y. Ono et al., “Merging formation of high-beta ST as a target plasma for NBI (Invited)”, 2015 US-Japan CT workshop, Nihon University, Tokyo, Sep. 8-11, 2015.
- (35) Y. Ono: “Reconnection Heating Experiments at University of Tokyo (Invited)”, Second PAC meeting for the SPRF at Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Aug. 15-16. 2015.
- (36) Y. Ono: “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Toroidal Plasma Merging Experiments: TS-3, TS-4, UTST and MAST (Invited)”, Norman Rostoker Memorial Symposium, The Fairmont Newport Beach Hotel, CA, USA, Aug. 24-25. 2015.
- (37) Y. Ono: “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Toroidal Plasma Merging Experiments (Invited)”, 12th Int. Symp. for Space Simulation (ISSS-12), Prague, Czech republic, Jul. 3-10, 2015.

[図書] (計 1 件)

- (1) Y. Ono: “Formation of Field-Reversed Configuration by Use of Two Merging Spheromaks with Opposing Toroidal Field”, 030001-0300013, in “The Physics of Plasma-Driven Accelerators and Accelerator-Driven Fusion”, edited by T. Tajima, ISBN: 978-0-7354-13685, ISSN 0094-243X, (2016).

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：井 通暁 ローマ字氏名：Inomoto Michiaki, 所属研究機関名：東京大学  
部局名：大学院新領域創成科学研究科 職名：准教授, 研究者番号 (8 桁)：00324799

研究分担者氏名：田辺 博士 ローマ字氏名：Tanabe Hiroshi, 所属研究機関名：東京大学  
部局名：大学院新領域創成科学研究科 職名：助教, 研究者番号 (8 桁)：30726013

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：堀内 利得 ローマ字氏名：Horiuchi Ritoku

研究協力者氏名：グリアズネヴィッチ ミカエル ローマ字氏名：Gryaznevich Michael

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。