

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01866

研究課題名(和文)高ベータ球状トカマク合体生成過程における熱エネルギー輸送過程の解明

研究課題名(英文)Elucidation of heat transport process during high-beta/merging spherical tokamak formation

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・准教授

研究者番号：30726013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽フレア等の爆発的エネルギー開放現象の基盤物理として知られる磁気リコネクションの加熱を応用した高ベータ球状トカマク合体生成実験のエネルギー変換過程について、イオン・電子系の加速・加熱の2次元イメージング計測装置の開発、再結合成分の磁場がなす平面に垂直成分の磁場が存在するガイド磁場リコネクションの系のイメージング計測の2点に重点を置き、計測装置の整備およびそれを応用した実験研究を推進した。ガイド磁場存在下において、電子系は低電位領域に加速・加熱、一方でイオンは逆方向に主として加速・加熱を受け、その後ガイド磁場の影響を受けた熱輸送係数のもと磁力線方向に熱輸送が進行することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で主として取り組んだガイド磁場リコネクション現象は、太陽フレア等の爆発的エネルギー解放現象の基盤物理の理解という理学的側面の他に、工学的には球状トカマクの効率生成・加熱法として近年核融合ベンチャー等で応用が進む、合体法の基盤物理となる物理現象として重要である。応用を意識した時、既に解明済みの加熱スケール特性の他、加熱後にどのような構造が形成され、閉じ込め・輸送がどのようになるのかを理解しておくことが重要である。電子・イオンがどこでどのように加速・加熱を受け、輸送されるのか、今回特にシミュレーションで予測されなかった高電位領域のイオン加熱が実験主導で新たに発見されたことは特筆に値する。

研究成果の概要(英文)：We investigated the explosive energy conversion process of magnetic reconnection as in solar flare with our facility of high-beta/merging-startup spherical tokamak experiment in the university of Tokyo. We mainly carried out the following two projects: (1) development of 2D imaging measurement of electron and ion acceleration/heating and (2) investigation of electron and ion acceleration/heating during "guide field" reconnection which has perpendicular toroidal component to reconnecting/anti-parallel poloidal magnetic field.

We mainly carried out those two projects and found that electrons are accelerated/heated in the lower potential region, while ion temperature increases at higher potential side. Then, both electrons and ions are affected by collisional relaxation/transport process in the downstream and finally their structure is aligned with the magnetic field lines of closed flux surface of the spherical tokamak plasma after the end of merging.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマ・核融合 プラズマ診断 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

本研究は太陽フレア等の基盤物理として知られる磁気リコネクション(磁力線のつながり)を介した爆発的なエネルギー解放現象について、それを地上で実現可能な東京大学のプラズマ合体実験装置を用いて、そのエネルギー変換過程の解明および、それを核融合実験に応用した高ベータ球状トカマク生成実験に貢献することを目的として研究を開始した。エネルギー変換過程の研究について、プリンストンプラズマ物理研究所ではガイド磁場 0 の系統は比較的理解が進んでいる一方、再結合成分の磁場がなすリコネクション平面に対して垂直成分のガイド磁場の比が大きな高ガイド磁場 ($B_t > 3B_{rec}$)の条件は先方では実験装置の限界でほとんど研究されていない。同領域は東京大学が得意とする実験領域として、それを応用した高ベータ球状トカマク実験が 1990 年代の TS-3 実験をベースに、以後 2000 年代に TS-4、UTST(TS-5)、過去 5 年間では TS-6 (2018 年ファーストプラズマ)と進展が続いてきた経緯があり、類似装置としては英国カラム研究所 START におけるベータ 40%を超える高ベータ球状トカマクプラズマ生成、MAST における合体実験での 1keV 達成、核融合ベンチャー ST40 における 2keV の合体加熱や中性粒子ビームによる追加加熱を加えた 1 億度(~10keV)の達成など、世界的にもその応用がよく知られている。応用実験のパラメータ増進が進展する一方で、ガイド磁場リコネクションの加熱過程の詳細は、詳細な温度・密度計測で世界をリードした MAST 実験でも合体中の磁場計測が不在のために特徴的な微細構造形成物理の解明はなされていない状況であり、磁場計測をはじめとした計測系のアクセスに柔軟な大学実験室研究における詳細解明が求められている状態である。

2. 研究の目的

本研究では、以上の状況を考慮し、大学実験室プラズマのプロープ計測にも柔軟な実験環境を活用するとともに、MAST 実験の高精細なイオン・電子温度イメージング計測成果を再現しうる強力なイメージング計測基盤を東京大学 TS-6 実験に構築し、より体系的にエネルギー変換過程を解明しうる計測基盤の整備を目的として研究を推進した。MAST 実験では熱エネルギーの評価はできても時々刻々と変化する合体中のポロイダル磁気面の計測系が不在であり、また面内電場や電位分布が不明であることによって、二流体现象・運動論効果を示唆する結果が得られても、形成原理を詳細に議論可能な他の物理量が不明であることにより、業界への新たな問いとしての open question を投げかけることはできても、その解釈を単一装置では解明できない問題点を有していた。2018 年度ファーストプラズマの TS-6 装置は、磁気プロープ計測とイオン温度計測は前進となる若手 A 研究終了段階でも整備が進みつつあったが、本研究ではさらに開発を進め、電子系のイメージング計測拡充および、面内電場測定のためのポテンシャル分布測定などを推進、統合的な議論の可能な実験基盤を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、同目的に対応した研究開発として以下の計測装置を開発するとともに、それを応用した実験を推進した。

- (1) 静電プロープを利用した二次元電子温度・ポテンシャル分布計測の開発
 - (2) YAG レーザ・Ruby レーザを用いた二次元トムソン散乱計測の開発
 - (3) 軟 X 線、可視光線スペクトル放射分布測定による高エネルギー電子検出システムの開発
- 以上(1)~(3)は所属研究室学生の修士論文・博士論文研究と紐づけて研究開発を推進、(1)は真空装置内で R 方向に掃引が可能な Z 方向分布 1 次元測定系として開発を行い(5CH ダブル/トリプルプロープ、21CH 浮遊電位プロープ)、それを装置径方向に走査することで空間分布を取得、(2)は YAG レーザを装置内で往復反射させることによる光学機器の必要数を削減した経済的 2 次元トムソン散乱計測システムを開発(平行して、研究室に 2000 年代から所蔵されていた故障 Ruby レーザのオーバーホールを実施して TV トムソン散乱計測開発を可能とする環境を整備)、また(3)として受動的的手法による電子系計測として、プラズマから放射される軟 X 線を MCP で可視光に変換し、イメージガイドを利用してフレーミングカメラに伝送、8 時刻を 2 次元で高速撮像するシステムを開発するとともに、高エネルギー帯の線スペクトル放射分布測定系の整備などを合わせて実施した(イオン系の高精細分光システムを応用)。

4. 研究成果

本研究では、助成期間内にコロナ禍の影響による一部遅延も見られたものの、主たる成果として以下のような研究成果が得られた(本報告書末尾にリスト化)。

- (1) 受賞 3 件: 第 36 回プラズマ核融合学会若手学会発表賞 (正会員部門:2019 年)、AAPPS-DPP U40 award (2021)、2022 年度吉川允二記念核融合エネルギー奨励賞 (2023)
- (2) 主著論文 3 編 (Nucl. Fusion×2、Plasma and Fusion Res. ×1)+ IAEA 論文採択 2 件
- (3) 共著論文 18 編(Nucl. Fusion×4、Phys. Plasmas×2、RSI×1、他)
- (4) 招待講演 12 件(AAPPS-DPP×4、ICPP2022、MPCC2019、MR2022、他)

本研究を通じて得られた研究成果をまとめるとイオン系は図 1、電子系は図 2 のようにまとめ

られる。まずイオン系は図1が示すように、プラズマ合体および磁気リコネクションの進行と合わせ、上流側の初期温度数 eV のプラズマの温度がリコネクション加熱過程を経て合体下流において加熱を受け、時刻 475 μ s に最大 60eV 程度まで加熱されている様子が確認できる ($B_{rec} \sim 0.02T$, $B_i \sim 0.1T$ でガイド磁場 $B_i/B_{rec} \sim 5$ 程度の高ガイド磁場条件)。巨視的にはリコネクションを介した上流側の再結合磁場成分の磁気エネルギーが、リコネクションアウトフローに変換され、それが熱化するとするモデルの通り、時間変化とともにイオン温度は合体下流において赤のホットスポットを形成する。このホットスポット領域は、1keV/m 程度のイオン温度勾配を有するが、プラズマ中の熱伝導は $q = -\kappa_{\parallel}^i \nabla_{\parallel} T_i - \kappa_{\perp}^i \nabla_{\perp} T_i + \kappa_{\perp}^i (B/|B|) \times \nabla T_i$ とあらわされるように磁力線に対して平行成分と垂直成分では熱伝導係数が異なる重みをもち、紙面垂直成分のトロイダル磁場が大きくなると磁力線方向への輸送が支配的となる。そのスケールは $\kappa_{\parallel}^i / \kappa_{\perp}^i \sim 2(\omega_{ci} \tau_{ii})^2$ となることから、サイクロトロン周波数 ω_{ci} がトロイダル磁場 B_i の増大に対応して大きくなることから、たとえば今回のような高ガイド磁場 ($B_i \sim 0.1T$, $B_i/B_{rec} \sim 5$) の実験条件では、最大 60eV の領域でも $\kappa_{\parallel}^i / \kappa_{\perp}^i > 1000$ が満足される。したがって、磁力線に平行な方向への熱輸送が支配的となり、リコネクションで得られた加熱が生成する 1keV/m の巨大なイオン温度勾配は、その巨大な径方向成分で排出されることなく、熱伝導ベクトルは主として磁力線に平行な方向を向き、磁力線方向へと熱輸送されることで Z 方向へと高イオン温度領域が伝搬していく。従来の核融合研究では、このような熱輸送過程は熱速度のオーダーで瞬時に進行するために無視して良い現象として、同一磁力線上は全て同一温度と仮定し、計測は $z = 0m$ の径方向分布 1 次元計測で十分であるとする研究が支配的であったが、本結果ではそのような過程は安易に仮定できるものではなく、その平均化過程には有限の遅延時間が存在し、時間的に連続的に輸送過程を介して理解されるものであることが分かってきた。特に実際の磁力線に沿った熱輸送の軌跡は、トロイダル方向の巡回時間を必要とするため、仮に 60eV に相当する 100km/s の熱速度であれば 5 μ s のうちに 0.5 m 進行することができるはずであるが、実際はトロイダル効果の影響でトロイダル方向に一周するのに $2\pi r_{r=0.12m} \sim 0.75m$ の距離が存在するため、5 μ s のうちにトロイダル磁気面上を進行できる距離は 0.1m にも満たず、実際に実験で得られた熱の伝搬領域も 10 μ s の間のトロイダル磁気面上の進行範囲は 0.2m 未滿と、対応する現象を実験的に確認することができた。

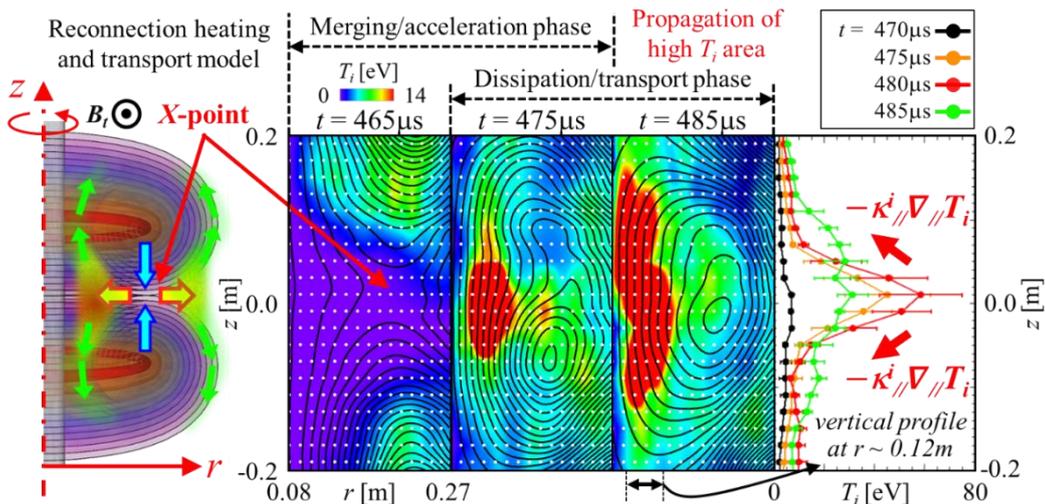


図1 TS-6 装置を用いた合体・リコネクション加熱実験において2次元ドップラートモグラフィがとらえたイオン温度分布の時間発展：磁気リコネクションを通じて磁場構造が大きく変わる時刻465 μ s~485 μ sの間に構造が大きく変化して合体下流でホットスポットを形成・輸送を観測。(H. Tanabe et al., Nucl. Fusion 61 106027 (2021))

このようにイオン系の理解は比較的良好に進んできたため、本研究計画では電子系の構造形成現象の同定も並行して推進した。図2が示すのは水素プラズマ合体実験時の静電プローブの2次元スキャンで得られた電子温度分布と軟 X 線トモグラフィ計測で得られた高エネルギー放射輝度分布やアルゴンプラズマ合体時に得られた ArII 線スペクトルの放射輝度分布を示す。水素プラズマの合体実験ではイオン加熱に対応した衝突緩和現象の履歴としての合体下流の電子温度上昇なども観測される一方、軟 X 線トモグラフィによる高エネルギー電子分布測定ではプラズマのポテンシャルが低い領域側で、より高エネルギー電子の密度が高くなっていることが確認できる。イオンと電子の衝突時間を引き延ばしたアルゴンプラズマの合体実験で得られた ArII スペクトルの放射輝度分布測定では、このガイド磁場リコネクションにおける低ポテンシャル側へのホール効果と対応した加速構造がより顕著に現れ、高輝度領域がより大きな角度を形成して斜めに加速されている状況が確認できる。※(b)はトロイダル磁場が負の実験条件、(c)はトロイダル磁場が正の実験条件であり、この時プラズマポテンシャルの構造と加速極性は逆転。

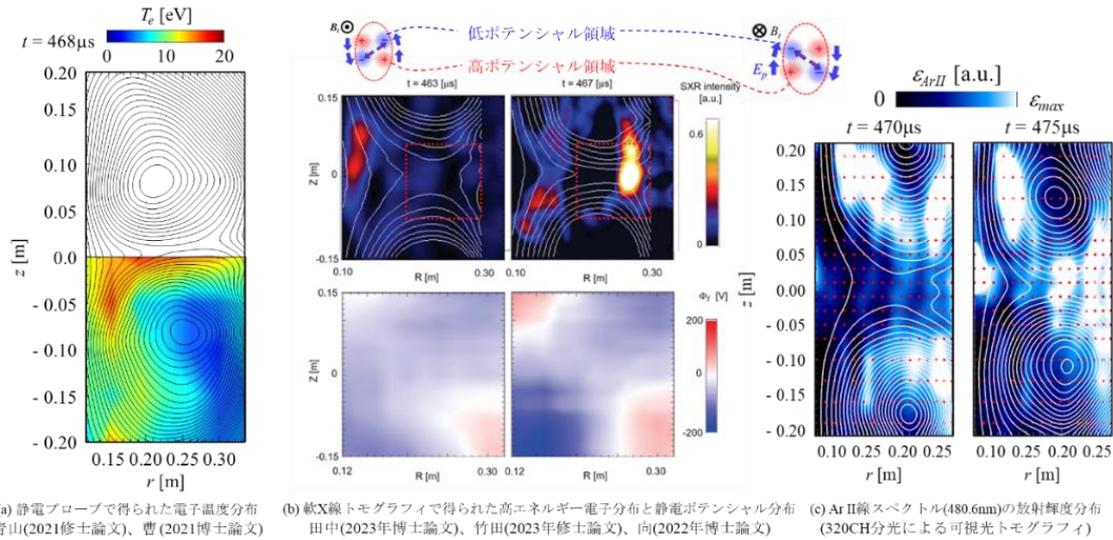


図 2 TS-6 装置を用いた合体・リコネクション加熱実験において、(a)静電プローブ、(b)軟 X 線トモグラフィ、(c)可視光線スペクトル計測でとらえられた電子系の構造形成現象。Z 方向から流入して R 方向に排出される基本構造の他、ガイド磁場の極性に対応してポテンシャルの低い領域、あるいは $j_{Hall} \times B_r$ の方向(b)と(c)上部の簡易モデル指示の方向)に特徴的な構造を形成。

以上図 1 および図 2 は研究計画策定時からある程度予測されていた結果であったが、実験を通じていくつか次期研究の芽となる興味深い実験結果が得られ始めた。図 3 はガイド磁場成分であるトロイダル磁場の方向を逆転させたときに得られたイオン温度分布の構造を示す。従来、自発的に進行する磁気リコネクションの系では、二流体・運動論効果の影響として電子・イオン密度が一致しない領域が発生してプラズマ電位が四重極構造を形成、その結果として負のポテンシャル領域に向かう面内電場の効果が支配的となり、イオン温度は主として低電位領域で上昇するとするのが従来数値シミュレーションでは予測されてきた。しかしながら、実験で得られたイオン温度の構造は明らかに逆極性である。この構造形成現象は従来型の解釈では数値シミュレーションのモデルを MHD から二流体や粒子コードに変えても再現されてこなかったものであり、実験結果主導で「なぜこのような特徴的な加熱構造が形成されたのか」という新たな時期研究の芽が生まれることになった。本研究最終年度は、延長期間も含めて主としてこの現象解釈を目的とした実験を遂行、コロナ禍末期の延長期間に研究成果の対外発表を積極展開した。

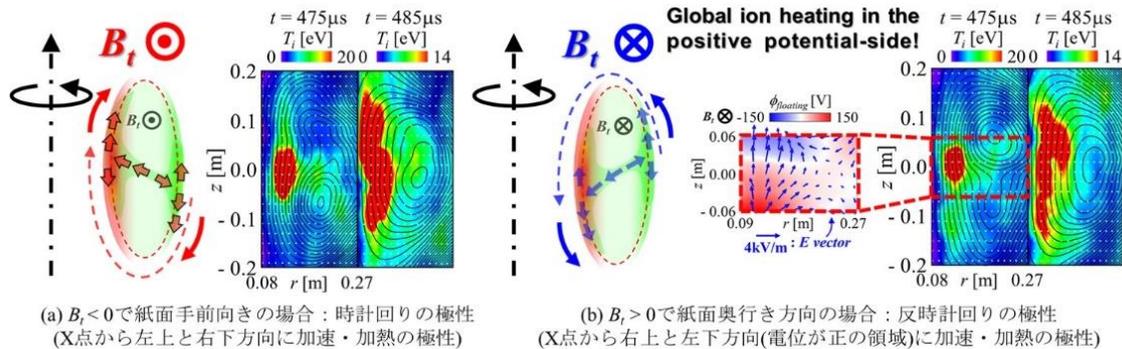


図 3 トロイダル磁場の極性を逆転させた時に観測された特徴的なイオン加熱構造：加速・加熱領域は X 点を境に径方向に対して斜めに傾いた高温領域の構造を形成。合体完了後はさらにポロイダル方向への熱輸送現象と結合して、それぞれポロイダル方向について時計回り、反時計回り方向に大域的に回転するような現象が観測された。特に、リコネクション中に正のポテンシャル領域に加熱が現れる現象は従来のシミュレーション予測と逆であり、同構造の形成原理説明という新たな時期研究の芽が生まれた。(H. Tanabe et al., Nucl. Fusion 61 106027 (2021))

同現象解釈にあたってはプリンストンプラズマ物理研究所の C. Z. Cheng 博士も交えて、このような構造を形成しうる原理についての議論を実施。一般的なシミュレーションの”自発的”なリコネクションと異なり、合体型の磁気リコネクションはプラズマのインフローを能動的に”駆動”している系であり、*Driven Reconnection* の系に特徴的な現象を見つけた可能性があるとして、背景物理の調査を実施した。近年ガイド磁場リコネクションでは二流体・運動論効果による四重極ポテンシャル構造形成に注目が集まりがちであり、そのポテンシャル構造を起源とした面内電場が加速・加熱の支配的な成分とする考え方が主で、それを支持する数値シミュレーションが多い。しかしながら、実際の系ではインフロー駆動が加わっており、実験の先行研究

でもインフロー駆動の影響のもとでは、能動的な電流シート圧縮で高ガイド磁場でもメアンダリング運動が発現可能な条件を満たせばリコネクション速度や加熱の低下は抑えられることが確認されており、ポロイダル磁束 Ψ の時間変化に比例する紙面垂直(トロイダル方向)成分のリコネクション電場 $E_t = -1/(2\pi r) \cdot \partial \Psi / \partial t$ の効果に再度注目する必要があるとして再評価を行った。図4は再評価に用いた面内電場および、 $E \times B$ ドリフト、パラレル電場の空間分布の3つのカラーコンターと、それぞれに対する解釈の追記を示す。実験条件はトロイダル磁場 $B_t > 0$ の極性のケースである。この系ではイオン温度の測定結果では、径方向に対して時計回り方向に傾いた、X点を起点に紙面左下と右上方向で加熱が発生している。図4(top)は電位分布と電場の分布、等電位面の等高線がプロットされており、単純な面内電場あるいはポテンシャルドロップによるイオン加速であれば、イオンがエネルギーを得るのはポロイダル平面上で左上と右下のはずであるが、この領域ではイオン温度は上昇しておらず面内電場シナリオでは説明できない。図4(middle)は流速の主成分である $E \times B$ ドリフト速度の絶対値のカラーコンターとベクトル場であるが、これは径方向内側で加熱が大きい傾向との対応は見られるものの傾いた加熱極性の根拠とはならない分布である。特に $E \times B$ ドリフト速度は等ポテンシャル線に沿った軌跡のため、面内電場存在領域を数 μs で通過する状態では面内電場の拡散領域におけるイオンのエネルギーゲインへの貢献は小さいことが分かる。図4(bottom)は主たる形成原理として考えられるパラレル電場の空間分布である。パラレル電場 E_{\parallel} は $E_{\parallel} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} / |\mathbf{B}|$ で定義される磁力線に沿った成分である。高ガイド磁場条件 $B_t/B_p \sim 5$ の状況では全体的にトロイダル電場 E_t の効果が大きく、特にX点近傍で $B_p \sim 0$ となる領域では $E_t B_t$ を主成分としたパラレル電場では、粒子はトロイダル方向に何度も周回することが可能となる。衝突時間内に得られる加速に対応するエネルギーを考慮すると観測された最大 60eV の加熱や極性効果の理解が可能となり、図3で得られた結果を説明づけることができる。

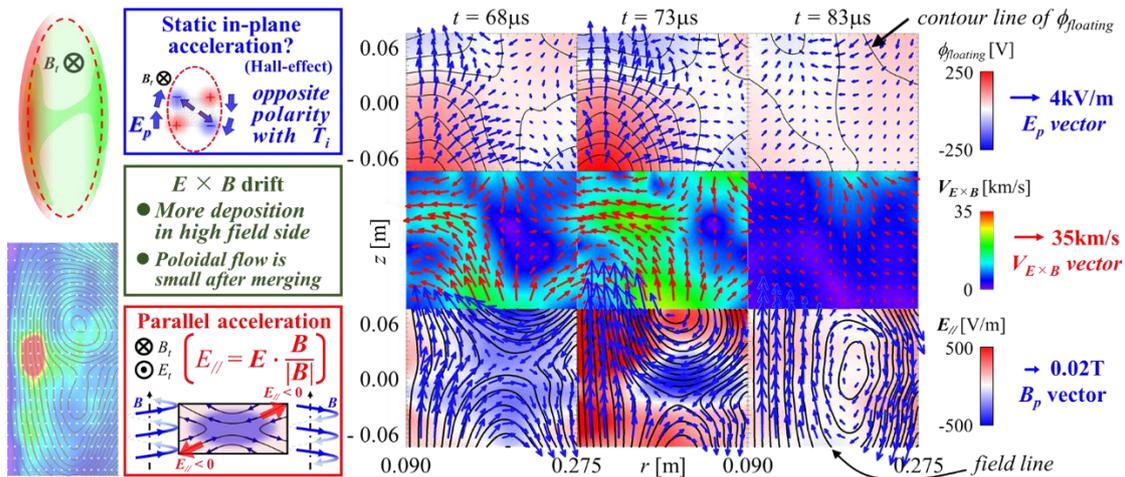


図4 トロイダル磁場の極性効果を解明するための電場の効果の検証実験：紙面左から観測されたイオン温度の構造と簡略化モデル(左)、検証した3つの加速・加熱モデル(左から2列目)、右はそれぞれに対応した電位・面内電場分布(top)、 $E \times B$ ドリフト速度の分布(middle)、パラレル電場 E_{\parallel} (bottom)の分布の時間発展を示す。(H. Tanabe et al., Nucl. Fusion 61 106027 (2021))

以上のように、本研究では合体生成高ベータ球状トカマク実験において、磁気リコネクションのエネルギー解放現象を介して発生する加熱やその輸送現象、特徴的な構造形成現象の解明を狙い、計測基盤拡充を並行しながら実験を推進、ガイド磁場リコネクションの加熱の基本描像のクリアな計測に加えて、実験主導の新たな構造形成現象発見などの成果が得られた。加速現象では磁力線方向成分のパラレル電場が大きく貢献することが分かり、また合体後に生成された加熱構造はプラズマ中の熱輸送係数の磁場依存性の特徴を受けた輸送特性となり、ポロイダル磁気面内に合体加熱が閉じ込められることが分かった。今回先進課題として発見されたパラレル電場を起源とした特徴的な加速・加熱構造形成の新規物理課題は次期研究の芽として22H01193(基盤B)に引き継がれ、トロイダル方向・ポロイダル方向異なる加速起源に伴う温度異方性形成検出を狙う新規実験に続く予定である(研究課題「合体生成球状トカマクにおけるポロイダル非対称性を有する大域的構造形成現象の解明」)。図4で得られた加速・加熱原理に基づけば、トロイダル・ポロイダル方向成分のイオン温度はそれぞれ異なる加熱分布を形成するはずであり、今後は本研究課題で実験主導で切り開かれた新たな物理フロンティアの理解をさらに深化させていくことが期待されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Someya Ryo, Tanaka Haruaki, Cao Qinghong, Cai Yunhan, Tanabe Hiroshi, Ono Yasushi	4. 巻 140
2. 論文標題 Development of Doppler Probe Array with Two Pairs of View-lines for 1D Ion Flow Vector Measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 502 ~ 503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.140.502	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 Cao Qinghong, Cai Yunhan, Akimitsu Moe, Xiang Junguang, Ahmadi Tara, Tanaka Haruaki, Tanabe Hiroshi, Ono Yasushi	4. 巻 15
2. 論文標題 Spontaneous Formation of Plasmoid during Early Magnetic Reconnection Phase of Two Merging Tokamaks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1403 ~ 1404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23208	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 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, A. Sawada, C. Z. Cheng and Y. Ono	4. 巻 EX/P7-20
2. 論文標題 Global ion heating/transport during merging spherical tokamak formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020)	6. 最初と最後の頁 1-8
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Ono, M. Inomoto, H. Tanabe, H. Yamaguchi, M. Akimitsu, M. Gryaznevich, S. McNamara, P. Buxton, J. Kompulla, J. Wood, V. Nemytov, K. McClements, C. Z. Cheng, S. Usami and R. Horiuchi	4. 巻 IAC/P4-3
2. 論文標題 Overview of Merging Spherical Tokamak Experiments and Simulations for Burning, High-Beta and/or Absolute Minimum-B Plasma Formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020)	6. 最初と最後の頁 1-8
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Usami, R. Horiuchi, T. Moritaka, Y. Ono, M. Inomoto and H. Tanabe	4. 巻 TH/P5-13
2. 論文標題 Particle Simulation on Merging Processes of Two Spherical Tokamak-Type Plasmoids in a Conducting Vessel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020)	6. 最初と最後の頁 1-8
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 Tanabe H., Tanaka H., Cao Q., Cai Y., Akimitsu M., Ahmadi T., Cheng C.Z., Inomoto M., Ono Y.	4. 巻 61
2. 論文標題 Global ion heating/transport during merging spherical tokamak formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106027 ~ 106027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac217c	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 Tanabe H., Cao Q., Tanaka H., Ahmadi T., Akimitsu M., Sawada A., Inomoto M., Ono Y.	4. 巻 59
2. 論文標題 Investigation of fine structure formation of guide field reconnection during merging plasma startup of spherical tokamak in TS-3U	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086041 ~ 086041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab1cdf	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 TANABE Hiroshi, CAO Qinghong, TANAKA Haruaki, AHMADI Tara, AKIMITSU Moe, SAWADA Asuka, INOMOTO Michiaki, ONO Yasushi	4. 巻 14
2. 論文標題 Recent Progress in High Resolution 2D Imaging Measurements of Reconnection Heating during Merging Plasma Startup in TS-3	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401110 ~ 3401110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3401110	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 Tanaka Haruaki, Ono Yasushi, Tanabe Hiroshi, Cao Qinghong	4. 巻 139
2. 論文標題 First Global Doppler Tomography Measurement of Ion Heating of Merging Tokamak Plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 358 ~ 359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.139.358	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 Ono Y., Inoue S., Tanabe H., Cheng C.Z., Hara H., Horiuchi R.	4. 巻 59
2. 論文標題 Reconnection heating experiments and simulations for torus plasma merging start-up	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 076025 ~ 076025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab14a4	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 Inomoto M., Ushiki T., Guo X., Sugawara T., Kondo K., Mihara T., Minami Y., Inai Y., Kaneko H., Yanai R., Takahata Y., Tanabe H., Ono Y., Sanpei A., Kamio S.	4. 巻 59
2. 論文標題 Effects of reconnection downstream conditions on electron parallel acceleration during the merging start-up of a spherical tokamak	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086040 ~ 086040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab1e0f	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 Usami Shunsuke, Horiuchi Ritoku, Ohtani Hiroaki, Ono Yasushi, Inomoto Michiaki, Tanabe Hiroshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Dependence of the pickup-like ion effective heating on the poloidal and toroidal magnetic fields during magnetic reconnection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102103 ~ 102103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5099423	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 Takeda Shinjiro, Xiang Janguang, Cai Yunhan, Tanabe Hiroshi, Ono Yasushi	4. 巻 141
2. 論文標題 Development of Soft X-ray Stereo Imaging System for Time-evolution Measurement of High-energy Electron Distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 604 ~ 605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.604	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 TANAKA Haruaki, TANABE Hiroshi, CAO Qinghong, ONO Yasushi	4. 巻 16
2. 論文標題 Global Ion Heating during ST Merging Driven by High Guide Field Reconnection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402068 ~ 2402068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2402068	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 SOMEYA Ryo, TANAKA Haruaki, FUNATO Yugo, CAI Yunhan, AKIMITSU Moe, TANABE Hiroshi, ONO Yasushi	4. 巻 16
2. 論文標題 Development of Glass-Tube-Pair Type Doppler Probe Array for 1D Profile Measurement of Two Component Ion-Flow Vector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202078 ~ 1202078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1202078	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 Inomoto M., Mihara T., Kondo K., Kaneko H., Kusano K., Kaneko K., Maeda Y., Shinohara A., Jin H., Suzuki T., Tanabe H., Ono Y., Kamio S., Kawamori E.	4. 巻 61
2. 論文標題 Control of electron acceleration process during merging start-up of spherical tokamak	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 116069 ~ 116069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac2107	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 Cheng C. Z., Inoue S., Ono Y., Tanabe H., Horiuchi R., Usami S.	4. 巻 28
2. 論文標題 Plasma heating and current sheet structure in anti-parallel magnetic reconnection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 072101 ~ 072101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039818	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 Xiang Junguang, Takeda Shinjiro, Cai Yunhan, Tanabe Hiroshi, Cao Qinghong, Tanaka Haruaki, Ono Yasushi	4. 巻 92
2. 論文標題 Double-filter high-resolution soft x-ray tomographic diagnostic for investigating electron acceleration in TS-6 reconnection merging experiments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 083504 ~ 083504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058112	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 Ahmadi T., Tanabe H., Ono Y.	4. 巻 61
2. 論文標題 Two-dimensional resistive MHD simulation of the optimized plasma formation in the spherical tokamaks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066001 ~ 066001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/abe6ce	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 Tanaka Haruaki, Cai Yunhai, Tanabe Hiroshi, Ono Yasushi	4. 巻 143
2. 論文標題 Investigation of Quadrupole Potential Dependency on Reconnecting Magnetic Field during Tokamak Merging / Reconnection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 63 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.143.63	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 KIM Jungkyun, KAMIYA Shun, YAMAGUCHI Haruka, TANABE Hiroshi, ONO Yasushi	4. 巻 18
2. 論文標題 Development of Cost-Effective Polychromator System with Two Angled Filters for Thomson Scattering Measurement System	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1301015 ~ 1301015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.1301015	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 Ahmadi Tara, Ono Yasushi, Tanabe Hiroshi, Cai Yunhan	4. 巻 17
2. 論文標題 Reconstruction of the Internal Magnetic Configuration of Two Merging Spherical Tokamak Plasmas by External Probe Measurement and MHD Simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1231 ~ 1233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.23614	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 H. Tanabe, H. Tanaka, Y. Cai	4. 巻 1695
2. 論文標題 Ion heating/transport characteristics of merging startup plasma scenario in the TS-6 spherical tokamak	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2023)	6. 最初と最後の頁 1-2
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, R. Someya, M. Gryaznevich, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Global/micro-scale fine structure formation process of magnetic reconnection in high field plasma merging experiments
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tanabe, M. Gryaznevich, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, Y. Cai, R. Someya, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Exploration of high field reconnection heating in merging spherical tokamak formation experiments
3. 学会等名 62th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 田中遥暁, Tara Ahmadi, 秋光萌, 染谷諒, Mikhail Gryaznevich, C. Z. Cheng, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 高磁場合体・リコネクション加熱実験における大域的構造形成
3. 学会等名 第27回ひので・実験室研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 田中遥暁, Tara Ahmadi, 秋光萌, 染谷諒, Mikhail Gryaznevich, C. Z. Cheng, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 ST40・TS-6における高磁場リコネクション加熱を応用した CS-free球状トカマク急速立ち上げシナリオの開拓
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, M. Akimitsu, T. Ahmadi, R. Someya, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Experimental study of energy conversion/transport process during magnetic reconnection in flux tube merging experiments
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, M. Akimitsu, A. Sawada, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Fine structure formation by reconnection heating/transport process in toroidal plasma merging experiments
3. 学会等名 MAX PLANCK PRINCETON CENTER WORKSHOP 2019 (MPCC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 秋光萌, 澤田明日香, 田中遥暎, Tara Ahmadi, 井通暎, 小野靖
2. 発表標題 趣旨説明+リコネクション加熱実験~本郷新実験 TS-3U(TS-6)の動向その他
3. 学会等名 第26回ひので・実験室研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Experimental study of reconnection heating/transport process and its application to high temperature spherical tokamak formation
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas (EASW9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, M. Gryaznevich, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Ion and electron heating characteristics of magnetic reconnection in high field flux tube merging experiments
3. 学会等名 HINODE13/IPELS2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 田中遥暁, Tara Ahmadi, 秋光萌, Chio-zong Cheng, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 実験室リコネクションのドップラートモグラフィ計測
3. 学会等名 宇治リコネクションワークショップ2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, M. Akimitsu, T. Ahmadi, R. Someya, M. Inomoto, Y. Ono
2. 発表標題 Investigation of ion heating/transport process of magnetic reconnection during CS-free merging plasma startup of spherical tokamak in TS-6
3. 学会等名 International Spherical Tokamak Workshop (ISTW) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, M. Gryaznevich, T. O'Gorman, J. Wood, R. Scannell, K. G. McClements, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Micro/macro-scale ion heating and transport process of magnetic reconnection during merging plasma startup of TS-6 spherical tokamak
3. 学会等名 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 田中遥暁, Tara Ahmadi, 秋光萌, Thomas O'Gorman, Mikhail Gryaznevich, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 超解像イオンドップラートモグラフィを用いた高磁場合体・磁気リコネクションのイオン加熱・輸送過程の研究
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 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Full-2D imaging measurement of ion heating/transport process during high field merging experiment in TS-6
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺博士
2. 発表標題 英国核融合ベンチャーтокаマクエナジー社の企業活動事例紹介
3. 学会等名 第17回YGN若手勉強会「核融合の早期実現という破壊的イノベーション」(日本原子力学会 若手連絡会) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tanabe, H. Tanaka, Y. Cai, M. Akimitsu, T. Ahmadi, R. Someya, M. Gryaznevich, S. McNamara, C. Z.Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Application study of magnetic reconnection for high temperature spherical tokamak formation
3. 学会等名 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tanabe, M. Gryaznevich, S. Mcnamara, J. Wood, H. Tanaka, M. Akimitsu, Y. Cai, D. Osin, P. Buxton, A. Rengle, O. Asunta, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 High field application of merging/reconnection plasma startup in the ST40 and TS-6 spherical tokamaks
3. 学会等名 AAPPS-DPP 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田辺博士, 吉田麻衣子, 田中遥暎, 若月琢馬, Mikhail Gryaznevich, 井通暎, 小野靖
2. 発表標題 NBIフリーイオン温度計測の高温プラズマシナリオ開発への応用展開
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H.Tanaka, H.Tanabe, Y.Ono
2. 発表標題 Multistage ion heating during high guide field reconnection associated with plasmoid formation
3. 学会等名 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Someya, I. Nakau, Y. Funato, Y. Cai, M. Takeshita, H. Tanabe, Y. Ono
2. 発表標題 Experimental Study of Reconnection Heating and Acceleration by use of Glass-Tube-Pair Type Doppler Probe Array
3. 学会等名 63rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, A. Sawada, C.Z. Cheng and Y. Ono
2. 発表標題 Global ion heating/transport during merging spherical tokamak formation
3. 学会等名 IAEA Fusion Energy Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Usami, R. Horiuchi, T. Moritaka, Y. Ono, M. Inomoto and H. Tanabe
2 . 発表標題 Particle Simulation on Merging Processes of Two Spherical Tokamak-Type Plasmoids Confined in a Conducting Vessel
3 . 学会等名 IAEA Fusion Energy Conference 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Ono, M. Inomoto, H. Tanabe, H. Yamaguchi, M. Akimitsu, M. Gryaznevich, S. McNamara, P. Buxton, J. Kompulla, J. Wood, V. Nemytov, K. McClements, C.Z. Cheng, S. Usami and R. Horiuchi
2 . 発表標題 Overview of Merging Spherical Tokamak Experiments and Simulations for Burning, High-Beta and/or Absolute Minimum-B Plasma Formation
3 . 学会等名 IAEA Fusion Energy Conference 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Tanabe, H. Tanaka, Y. Cai, R. Someya, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2 . 発表標題 Positive potential-side global ion heating during high guide field reconnection in the TS-6 merging spherical tokamak formation experiment
3 . 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Tanabe, H. Tanaka, Y. Cai, M. Gryaznevich, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2 . 発表標題 Global ion heating/transport process of magnetic reconnection in flux tube merging experiments
3 . 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Tanabe, H. Tanaka, Y. Cai, R. Someya, S. Takeda, M. Gryaznevich, C. Z. Cheng, H. Park, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Recent progress of guide field reconnection research in merging spherical tokamak formation
3. 学会等名 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺博士, 田中遥暁, 蔡雲漢, Mikhail Gryaznevich, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 TS-6/ST40における合体加熱型球状トカマク急速生成実験の最近の進展
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Tanabe, H. Tanaka, Y. Cai, M. Gryaznevich, S. Mcnamara, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Recent Progress of Merging Spherical Tokamak Formation Experiments ~ Global-scale Ion Heating/Transport during Magnetic Reconnection ~
3. 学会等名 20th International Congress on Plasma Physics (ICPP2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Doi, M. Akimitsu, Y. Cai, H. Tanabe and Y. Ono
2. 発表標題 Multiple Plasmoid Formation and Current Sheet Dynamics of Two Merging Tokamak
3. 学会等名 20th International Congress on Plasma Physics (ICPP2022)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 R. Someya, I. Nakau, Y. Cai, H. Tanabe, Y. Ono
2 . 発表標題 Experimental Study of Reconnection Heating and Acceleration by Glass-Tube-Pair Type Doppler Probe Array
3 . 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Ono, Shinjiro Takeda, Haruaki Tanaka, Moe Akimitsu, Ryo Someya, Shun Kamiya, Tara Ahmadi, Kurumi Doi, Haruka Yamaguchi, Yunhan Cai, Jungkyun Kim, Hiroshi Tanabe, Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Chio Z. Cheng
2 . 発表標題 High Power Reconnection Heating and Acceleration in UTokyo Tokamak Merging Experiments (invited)
3 . 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Tanaka, H. Tanabe, Y. Ono
2 . 発表標題 Influence of in-plane electrostatic potential on the ion heating characteristi during ST merging
3 . 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics
4 . 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学 小野・井研究室 http://tanuki.t.u-tokyo.ac.jp 第36回プラズマ・核融合学会年会 若手優秀発表賞(正会員部門) (2019) http://www.jspf.or.jp/jspf_annual2019/wakate2019.html AAPPS-DPP2021 U40 award (2021) http://aappsdp.org/DPP2021/prizeawards.html 2022年度吉川允二記念核融合エネルギー奨励賞 https://www.fusion.qst.go.jp/fusion-energy-forum/award/prizewinner/</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			
米国	プリンストンプラズマ物理研究所 (PPPL)			
英国	トカマクエネルギー	カラム研究所		