

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01879

研究課題名（和文）高ガイド磁場下での磁気リコネクション時の電子加熱機構の解明と制御手法の開発

研究課題名（英文）Elucidation of electron heating mechanism during magnetic reconnection in the presence of high guide field and development of its control technique

研究代表者

井 通暁（Inomoto, Michiaki）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：00324799

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：トラスプラズマ合体実験において発生する高ガイド磁場下での磁気リコネクション現象に対して、下流域の電氣的境界条件を変化させる手法を開発し、荷電粒子の直接加速をもたらす磁力線方向電場を高速制御することに成功した。磁力線方向電場の増加が荷電粒子の加速効果を促進することを確認し、磁気リコネクションに伴うエネルギー変換過程を変容させつることを実証した。磁力線方向電場はリコネクション誘導電場と、それを打ち消す面内静電場の合成であるが、下流域の面内静電場は上流域の影響を強く受けていることから、磁気リコネクション現象を巨視的に捉える必要があることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気リコネクション現象において、静電場は受動的な役割を果たすと考えられることが多かったが、本研究は室内実験の利点を活かして静電場を主体的に取り扱うことによって、その役割を明確化し、磁気リコネクションにおけるエネルギー変換機構の解明に寄与できた。また、高ガイド磁場下での磁気リコネクションにおいて解放された磁気エネルギーを、磁力線に平行方向の電子/イオンの運動エネルギーへと変換させつることは、磁場閉じ込め核融合プラズマの初期加熱やフロー形成への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In the magnetic reconnection under high guide magnetic field generated in the torus plasma merging experiment, we developed a novel method to change the electrical boundary condition in the downstream region, and succeeded in controlling the electric field component parallel to the magnetic field that directly accelerates the charged particles within a short period. We confirmed that an increase in the electric field component parallel to the magnetic field enhances the acceleration effect of charged particles, and demonstrated that the energy conversion process associated with magnetic reconnection can be transformed. The electric field component parallel to the magnetic field consists of the inductive reconnection electric field and the in-plane static electric field that cancels it. Since the in-plane static electric field in the downstream region is largely affected by the condition in the upstream region, the importance of macroscopic understanding of reconnection was pointed out.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：磁気リコネクション 電子加速 球状トカマク

1. 研究開始当初の背景

互いに反平行な磁力線がつなぎ変わることによって、磁場トポロジーの変化ならびに蓄積された磁気エネルギーの突発的解放をもたらす磁気リコネクション現象は、太陽系内最大のエネルギー解放現象である太陽フレアや、地球磁気圏尾部で加速された高エネルギー粒子が地球の極域に到達することで発生するオーロラなど、多くの天体現象の起点となっている。また、高温プラズマの定常維持を目的としたトカマクなどの核融合プラズマでも、磁気リコネクションによる性能劣化が発生する一方で、そのエネルギー変換機構をイオン加熱に応用する研究などが実施されており、基礎物理、天文学、核融合研究にまたがる重要な課題である。

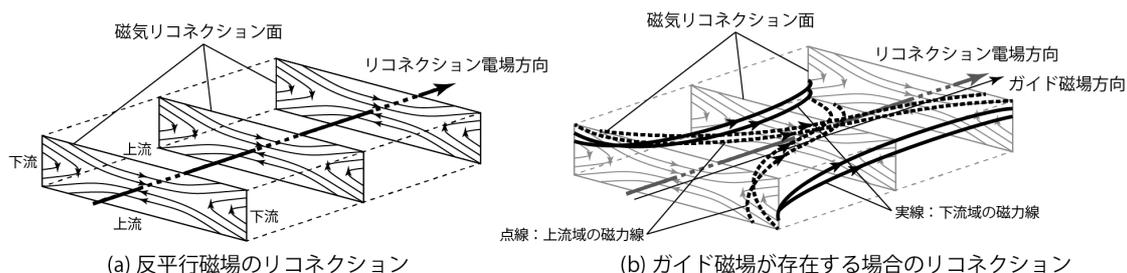


図 1：反平行磁場のみの場合とガイド磁場が存在する場合のリコネクション構造

トカマク型の核融合プラズマで生じる磁気リコネクションの特徴は、強いガイド磁場(つなぎかわる反平行磁場に直交する磁場成分 = トカマクにおいてはトロイダル磁場)が存在することであり、同様な状況は天体現象でも普遍的に存在する。図 1 に、反平行磁場のみのリコネクションと、ガイド磁場が存在する場合のリコネクションの磁力線の模式図を示す。(a) 反平行磁場のみの場合には、磁力線がつなぎかわる点(磁気中性点、X 点)には磁場が存在せず、その近傍で荷電粒子が磁化されなくなる。さらに、磁気リコネクションによって生じる電場と磁場は常に直交するので、荷電粒子は巨視的には  $E \times B$  ドリフト運動を行う。

一方 (b) ガイド磁場が存在する場合には、磁気中性点においてもガイド磁場が存在するため荷電粒子は磁化状態が保たれることに加え、磁力線が三次元構造を有し、リコネクション電場に平行な磁場成分が存在するため、粒子の運動およびエネルギー変換過程が質的に変容する。

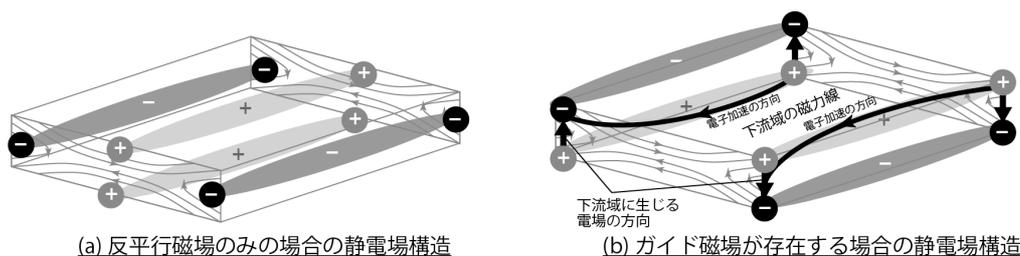


図 2：反平行磁場のみの場合とガイド磁場が存在する場合の面内電場構造

反平行磁場のリコネクションの場合には、イオンと電子は最終的には同じ速度 ( $E \times B$  ドリフト速度) でリコネクション領域から流出することから、解放された磁気エネルギーの大部分が質量の大きいイオンに向かう。このとき、リコネクション領域付近での電子とイオンの軌道の分離により、イオン慣性長以下の微細な空間スケールで図 2 (a) のようなリコネクション面内で磁力線に直交するような電場構造(面内電場)が形成される。ガイド磁場が存在する場合には、図 2 (b) に示すように磁力線に沿った直接的な電場加速が発生することで、質量の小さい電子が大きなエネルギーを得るが、加速に伴って生じる密度差(荷電分離)によって巨視的な面内電場構造が生じ、リコネクション電場の磁力線方向成分の大部分が打ち消されると考えられている。このような磁力線方向電場による電子加速と荷電分離によるキャンセルとは、トカマク型核融合プラズマの放電開始過程でも観測されており、普遍的な現象である。無衝突プラズマ中の磁気リコネクションの三次元粒子シミュレーションでは、ガイド磁場が存在するリコネクションにおける電子加速・加熱機構として、リコネクション電場による磁力線方向直接加速と、つなぎ変わった磁力線が収縮する際に端部で電子が反射されることによる(一次フェルミ加速に類する)磁力線方向の加速機構が支配的であることが示されている。このうち、一次フェルミ加速に類する機構はリコネクション下流の広い領域で発生すると予想されているが、室内実験の時間・空間スケールでは顕著な加速効果を示さないことがわかっている。

## 2. 研究の目的

互いに反平行な磁力線が繋がり変わることによって、磁場トポロジーの変化ならびに蓄積された磁気エネルギーの突発的解放をもたらす磁気リコネクション現象は、高温プラズマの定常維持を目的とした核融合プラズマや多くの天体現象において普遍的に発生する。トカマク型の核融合プラズマで生じる磁気リコネクションは、強いガイド磁場が存在するため、磁力線に平行な電場によって粒子の運動およびエネルギー変換現象が質的に変容する。このような高ガイド磁場下の磁気リコネクションにおける電子加速・加熱のメカニズムとして予想されている電場直接加速機構の実験的検証およびその制御手法の確立を行い、電子加熱源としての応用に結び付けることを目的とする。

## 3. 研究の方法

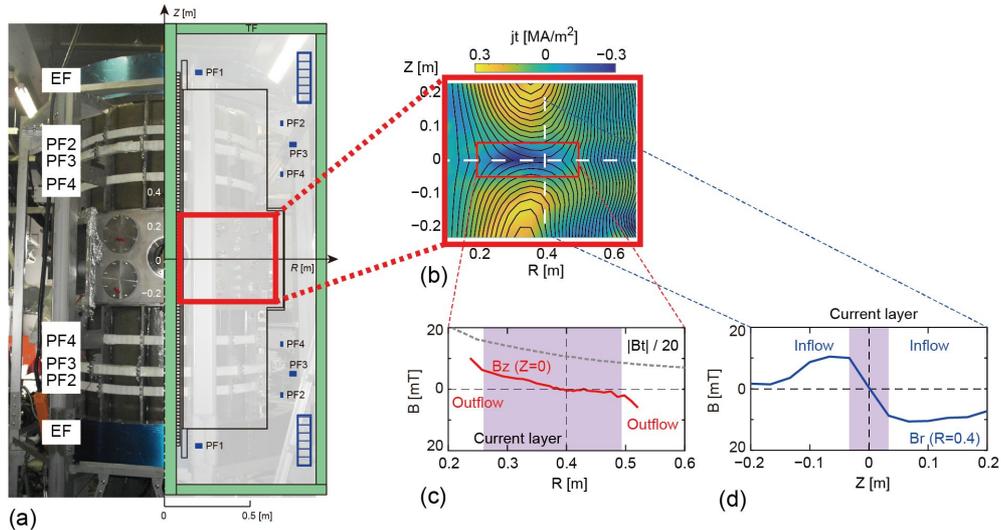


図3：(a) UTST 装置概要、(b)磁気リコネクション領域の磁場構造、(c) $B_z$  および  $B_t$  の径方向分布、(d) $B_r$  の軸方向分布

本研究では、球状トカマク合体実験装置 UTST において発生する高ガイド磁場下の磁気リコネクション現象を対象とし、計測機器および制御機器を導入した。図3に UTST 装置の全体像ならびに観測される磁場構造の概要を示す。図3(a)に示す UTST 装置の上部および下部にて2つの球状トカマクプラズマを同時に形成し、それらが装置中央で合体する際に磁気リコネクションが発生する。装置中央部のポロイダル磁気面およびトロイダル電流密度を図3(b)に示す。負方向の電流密度が誘導されているリコネクション電流層において、上流のリコネクションする径方向磁場 ( $B_r$ ) の軸方向分布(d)および下流のリコネクションした軸方向磁場 ( $B_z$ ) の径方向分布(c)から、およそ  $10 \text{ mT}$  の磁場がリコネクションしているのに対し、(c)に示すようにガイド磁場(トロイダル磁場)は  $200\text{-}400 \text{ mT}$  となり、ガイド磁場がリコネクション磁場の  $20\text{-}40$  倍となる高ガイド磁場条件が満たされている。リコネクション電流層の幅 ( $\sim 5 \text{ cm}$ ) に比べ、電流層内部でのイオンジャイロ径は  $5 \text{ mm}$  程度となり、荷電粒子は磁気中性点でも磁化された状態が維持されている。

図4に、(a)プラズマ電流、(b)上流および磁気中性点の磁束、(c)リコネクション電場、(d)リコネクション電流密度および(e)軟X線発光強度の典型的な時間波形を示す。磁気リコネクションはプラズマ電流の立ち上げ中に発生し、その持続時間は  $0.05 \text{ ms}$  程度である。磁気中性点では、数十  $\text{V/m}$  のリコネクション電場が発生しているが、電流層内部ではほぼトロイダル方向を向く磁場とリコネクション電場とが平行に近い状態となっているため、荷電粒子は磁力線に巻き付いたジ

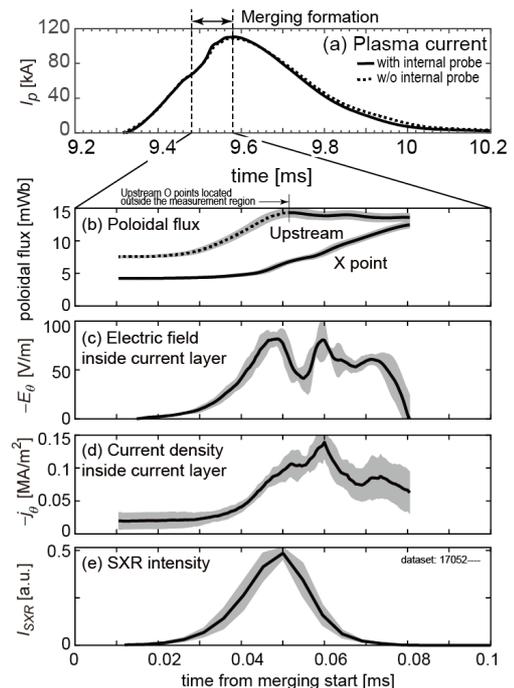


図4：(a) プラズマ電流、(b)磁束、(c)リコネクション電場、(d)リコネクション電流密度、(e)軟 X 線発光強度の時間変化

ヤイロ運動をしながら、磁力線に沿って加速されるものと考えられる。

高ガイド磁場下での磁気リコネクションによる電子加速・加熱機構を解明するための基幹計測として、磁場分布の高時間分解能計測、面内電場分布計測を整備した。また、高エネルギー電子を検出するための軟 X 線分布計測、電子の速度分布関数を測定するための静電アナライザ計測、イオンの磁力線方向加速を検証するための線スペクトル分光計測を実施した。

前述したように、磁気中性点近傍では磁場と電場がほぼ平行となるため、磁力線方向の荷電粒子加速の効果が顕著に現れると考えられる一方で、リコネクション上流域および下流域では理想 MHD 条件を満たすためにリコネクション面内に静電場が成長し、定常状態では磁力線方向電場がキャンセルされているものと推測される。この面内静電場の成長は、上流下流のプラズマの運動および磁力線の形状によって決定されると考えられるが、定常状態ではリコネクション電場の数十倍 (~ガイド磁場/リコネクション磁場比) 程度に達すると予想されることから、リコネクション領域に流入/流出するプラズマ速度の決定において支配的な影響を有しているとみなすことができる。

本研究では、プラズマ中に挿入した電極を用いた面内静電場制御手法を提案し、そのための分割型電極およびスイッチング回路を開発・運用した。図 5 左は UTST 装置内部の高速度カメラ画像であり、装置上部と下部に初期生成球状トカマクの発光を確認することができる。リコネクション下流域における面内静電場を制御するために、径方向に 4 分割された電極対をトロイダル方向に 90 度おきに設置した。図 5 右に磁力線の様子と電極の位置を示す。4 対の電極は、真空容器外部で高電圧大電流の IGBT 素子にそれぞれ接続され、開放状態/短絡状態を磁気リコネクションの時定数よりも十分高速に切り替えられるように制御部を構築した。

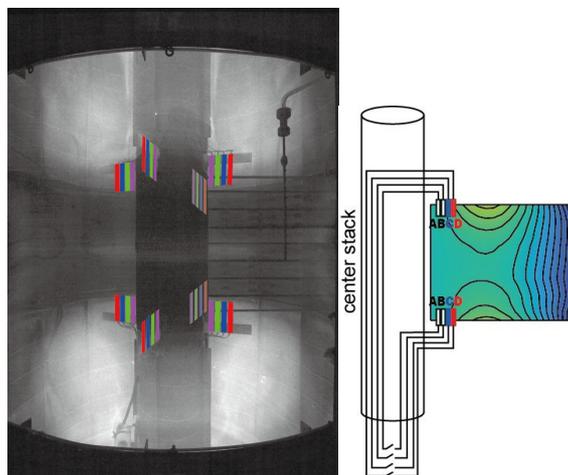


図 5 : UTST 装置内部の様子と分割型電極の挿入位置 (左) 分割型電極の接続 (右)

#### 4. 研究成果

高ガイド磁場下でのリコネクション下流域における電子加速を促進することを目的とし、複数の IGBT スイッチによる分割設置型電極の高速制御実験を実施した。図 6 (a) にリコネクション電場の時間発展を示す。電場が特に大きくなる時間帯で、図 6 (b) に示すように磁気中性点の磁束が急激に増加し、リコネクションが進展していることがわかる。このとき、下流域に挿入した電極 D の位置の磁束の時間変化と比較すると、 $t = 9.505 \text{ ms}$  付近で磁気中性点の磁束と交差していることから、この時刻に電極 D がリコネクション上流域から下流域へと移動したことがわかる。図 6 (c) に上下の電極 D 間の電位差を示す。このケースでは電極は開放のままとなっているが、電極が上流域に含まれている時間帯からすでに電位差が発生しており、荷電分離が進行していることが観測された。

本研究の実施に当たり、当初は全時間帯を通して開放あるいは短絡とすることによって、リコネクション下流域の面内静電場を制御できると考えていたが、このように上流域においても大きな静電場が発生していることから、電極が下流域に移動した後に短絡操作を行うことが必要であると判明した。そこで、IGBT 素子を用いた高速スイッチング回路を導入し、短絡実験を実施した。図 6 (d) に電極が下流域に移動したと同時に短絡を行った場合の電極間

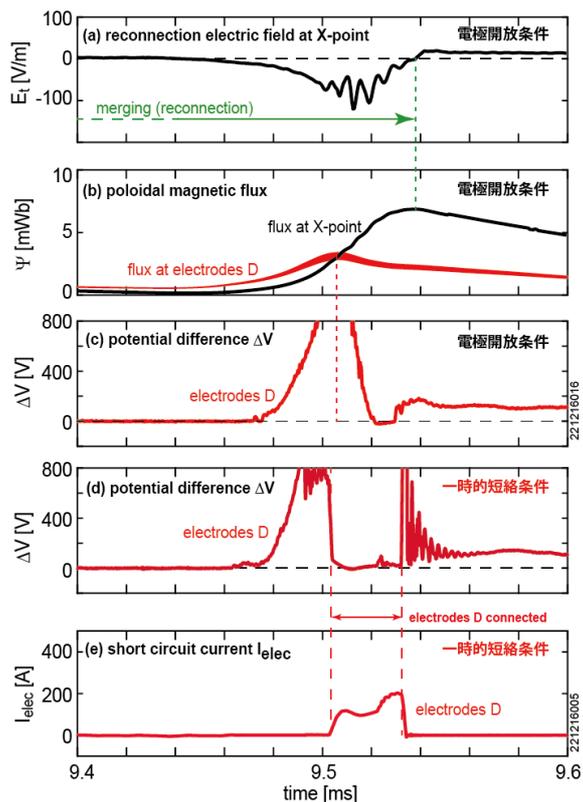


図 6 : (a) リコネクション電場、磁気中性点および電極位置の磁束、(c) 電極間の電位差 (開放時) (d) 電極間の電位差 (一時的短絡時) (e) 電極短絡電流の時間変化

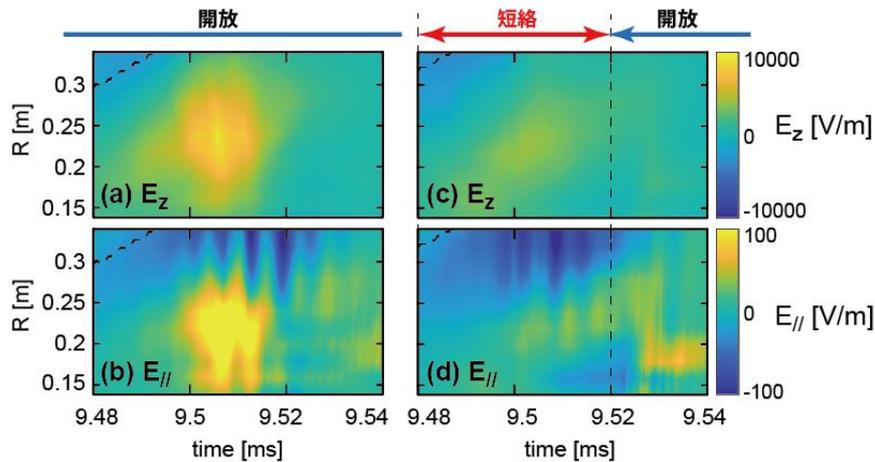


図7：軸方向電場および磁力線方向電場の時空間分布。(a)(b)は電極開放条件、(c)(d)は一時的短絡条件。

電位差を示す。短絡を行うことによって **0.01 ms** 以内に電極間電位差がほぼ消失しており、同時に図6(e)に示すように **100 A** 程度の電極間電流が立ち上がっていることから、リコネクション下流域内部に限定された面内電場制御を実現することができた。

図7に、電極開放条件と一時的短絡条件における面内静電場  $E_z$  の時空間分布(a,c)と磁力線方向電場  $E_{||}$  の時空間分布(b,d)を示す。電極の接続条件に応じて  $E_z$  の強度に大きな変化が観測された。電極開放条件では面内静電場の最大値が約 **8 kV/m** であるのに対し、短絡条件では最大値が約 **4 kV/m** と半分程度に抑制することに成功した。当初は、電極開放時にはリコネクション下流域の面内静電場とリコネクション電場の磁力線方向成分がそれぞれ釣り合っており、電場と磁場が直交する条件が満たされていると予想していた。そのため、面内電場の抑制は磁力線方向電場の増大を意味すると考えていたが、実際には図7(b)に示すように、電極開放時には磁力線方向電場を打ち消す以上の面内静電場が形成されており、電流層内部 ( $R > 0.25 \text{ m}$ ) の磁力線方向電場と、下流域 ( $R < 0.25 \text{ m}$ ) の磁力線方向電場は向きが逆転していることがわかった。この磁力線方向電場の逆転は、リコネクション電場によって流れた電流を減少・反転させる働きを有していることとなる。一方で、図7(d)のように下流域内部での電極短絡を行った場合には、電流層内部 ( $R > 0.25 \text{ m}$ ) では磁力線方向電場が増強されているのに対し、下流域 ( $R < 0.25 \text{ m}$ ) の大部分で磁力線方向電場がほぼ打ち消された状態となった。ただ、 $R < 0.2 \text{ m}$  の最下流領域では、面内静電場がほぼ完全に消失したため、リコネクション電場の磁力線方向成分が残存しており、この領域における荷電粒子加速が発生していると考えられる。これらの結果は、軟 X 線発光分布計測結果とよい整合を示しており、高ガイド磁場下での磁気リコネクション下流域における粒子加速の全体像を解明することができた。

本研究成果は、トラス型室内実験特有の空間構造、すなわち、磁力線が真空容器内部を何周も周回するという状況を活用し、磁気リコネクションによるエネルギー変換過程の制御可能性を実証したものであり、磁場閉じ込め核融合プラズマの形成に際して、イオン/電子の加熱効率を変化させる、あるいは、イオンフローを駆動するといった応用が期待される。

一方で、開放条件において磁力線方向電場を打ち消す以上の面内静電場が形成されていることを明らかにしたことも本研究の大きな成果の一つである。過剰な面内静電場の原因は、図6(c)に示されるように、リコネクション上流域でのプラズマの定常的な運動を維持するために発生した径方向電場由来によるものと考えられる。このことは、上流側のプラズマ同士が接触する磁気中性点の位置、リコネクション領域へのプラズマ流入速度と流出速度の比、電流層形状のアスペクト比等によって、プラズマが下流域に移動した瞬間の面内静電場の大きさが決定されることを意味している。この結果は、高ガイド磁場下の磁気リコネクションの下流域電場構造および粒子加速は、上流域からの影響を強く受けることを示唆しており、磁気リコネクション現象を巨視的に捉えることの必要性を示すものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inomoto Michiaki, Kondo Kyohei, Kawamori Eiichirou, Igami Hiroe	4. 巻 91
2. 論文標題 Direct Measurement of Electron Cyclotron Emission during High Guide Field Magnetic Reconnection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.094501	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 SUZUKI Taiju, INOMOTO Michiaki, JIN Hailin, NAKATSUKASA Kei	4. 巻 18
2. 論文標題 Control of Transient Static Electric Field in the Magnetic Reconnection Experiment with Large Guide Field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402033 ~ 2402033
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.2402033	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 M. Inomoto, T. Mihara, K. Kondo, H. Kaneko, K. Kusano, K. Kaneko, Y. Maeda, A. Shinohara, H. Jin, T. Suzuki, H. Tanabe, Y. Ono, S. Kamio and E. Kawamori	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
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16件（うち招待講演 3件/うち国際学会 12件）

1. 発表者名 M. Inomoto, H. Tanabe, Y. Ono
2. 発表標題 Overview of UTST/TS-6 ST merging startup experiments
3. 学会等名 21st International Spherical Torus Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Inomoto, T. Suzuki, H. Jin, K. Nakatsukasa, H. Tanabe, Y. Ono
2. 発表標題 Transformation of energy conversion process during ST merging start-up
3. 学会等名 FY2022 US-Japan Workshop on "Progress of the Innovative and Alternative Confinement Concepts (IAC)" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Suzuki, M. Inomoto, H. Jin, K. Nakatsukasa
2. 発表標題 Active Control of Reconnection Downstream Condition for Enhancement of Electron Acceleration in the UTST device
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木大樹、井通暁、キン海林、中務敬
2. 発表標題 UTST装置における高ガイド磁場リコネクション下流域でのパラレル電子加速への面内電場の影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木大樹、井通暁、キン海林、中務敬
2. 発表標題 球状トカマク合体立ち上げにおいて発生する過渡的電場がリコネクション過程にもたらす影響
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Inomoto, H. Tanabe, Y. Ono
2. 発表標題 Overview of UTST/TS-6 ST merging startup experiments
3. 学会等名 21st International Spherical Torus Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Inomoto, T. Suzuki, H. Jin, K. Nakatsukasa, H. Tanabe, Y. Ono
2. 発表標題 Transformation of energy conversion process during ST merging start-up
3. 学会等名 FY2022 US-Japan Workshop on "Progress of the Innovative and Alternative Confinement Concepts (IAC)" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Suzuki, M. Inomoto, H. Jin, K. Nakatsukasa
2. 発表標題 Active Control of Reconnection Downstream Condition for Enhancement of Electron Acceleration in the UTST device
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC31) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木大樹、井通暁、キン海林、中務敬
2. 発表標題 球状トカマク合体立ち上げにおいて発生する過渡的電場がリコネクション過程にもたらす影響
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Inomoto, T. Mihara, K. Kondo, H. Kaneko, K. Kusano, S. Kamio, E. Kawamori
2 . 発表標題 Control of Electron Acceleration Process during Merging Start-up of Spherical Tokamak
3 . 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Inomoto, A. Shinohara, K. Kaneko, Y. Maeda, H. Jin, T. Suzuki, H. Tanabe, Y. Ono
2 . 発表標題 Electron acceleration in downstream region of high guide field magnetic reconnection in toroidal plasma merging experiment
3 . 学会等名 10th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (EASW-10) ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Inomoto, A. Shinohara, K. Kaneko, Y. Maeda, H. Jin, T. Suzuki, H. Tanabe, Y. Ono
2 . 発表標題 Control of in-plane electric field during guide field magnetic reconnection in torus-type laboratory experiment
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 M. Inomoto, A. Shinohara, K. Kaneko, Y. Maeda, H. Jin, T. Suzuki, H. Tanabe, Y. Ono
2 . 発表標題 Control of in-plane electric field during merging formation of spherical tokamak
3 . 学会等名 2022 US-Japan Woershop on Compact Tori ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Inomoto, T. Mihara, K. Kondo, K. Kusano, T. Tanabe, Y. Ono, S. Kamio
2. 発表標題 Role of parallel electron current channel in high guide field magnetic reconnection
3. 学会等名 AAPPS-DPP 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Inomoto, K. Kondo, T. Mihara, K. Kusano, A. Shinohara, Y. Maeda, K. Kaneko, H. Tanabe, Y. Ono
2. 発表標題 Effect of Self-generated Poloidal Electric Field during Merging Start-up of Spherical Tokamak
3. 学会等名 US-Japan Workshop on Compact Tori 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井 通暁、三原卓巳、近藤恭平、草野一、金子健一郎、篠原淳志、前田陽平、田辺博士、小野靖、河森栄一郎
2. 発表標題 高ガイド磁場下でのリコネクションにおける沿磁力線電子加速
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020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	小野 靖 (Ono Yasushi)  (30214191)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授  (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	神尾 修治  (Kamio Shuji)  (80705525)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教    (63902)	削除：2021年12月24日

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			