

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287143

研究課題名(和文) 高エネルギー電子生成機構解明のための高ガイド磁場リコネクション室内実験の構築

研究課題名(英文) Laboratory experiment of magnetic reconnection under strong guide field to investigate generation process of energetic electrons

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・准教授

研究者番号：00324799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では軸対称トーラスプラズマ合体時に発生する高ガイド磁場リコネクションにおける電子加速現象について多角的な観測を実施し、その機構の実験的検証を行った。単一視線軟X線計測および小型エネルギーアナライザにより、200 eV程度の高速電子が発生していることを確認し、さらに軟X線発光分布により加速領域を同定することに成功した。加速された電子が電流フィラメントを形成することによって、大域的な磁場構造への影響を与えうることを確認し、高ガイド磁場リコネクションにおける電子加速の発生機構と寄与を実験的に示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Electron acceleration during magnetic reconnection process under a strong guide field was experimentally investigated by using a variety of diagnostics in axial merging of two torus plasmas. Single sight-line soft X-ray measurement and small energy analyzer revealed that fast electrons with energy higher than 200 eV were generated during the guide field reconnection process. The acceleration region was identified by using the soft X-ray imaging system. The accelerated electrons formed a localized current filament to affect the global magnetic field profile. The acceleration mechanism and its contribution to reconnection process was successfully verified by using axisymmetric experimental configuration.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：宇宙・天体プラズマ 磁気リコネクション 粒子加速

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマ中に蓄えられた磁気エネルギーを短時間に解放する磁気リコネクション現象は、プラズマの加熱をもたらすのみならず、荷電粒子の加速機構として太陽・地球磁気圏あるいは高エネルギー宇宙線分野において盛んに研究が行われている。これらの分野では、直接/間接的な粒子観測によって得られた「べき型」のエネルギー分布を元に、その原因であるリコネクションの加速メカニズムを探るといった方法論が採られている。そのための主たるツールが計算機シミュレーションであり、粒子シミュレーション等の成果が多く報告されている。

一方、磁気リコネクション物理を探究するためのもう一つの有力なツールである室内実験においては、アウトフロー領域でのイオン加熱を中心とした研究が推進されてきており、顕著な粒子加速の兆候が捉えられたことはなかった。室内実験の大きな制約の一つは装置サイズである。高々1mのオーダーの実験装置では、リコネクション領域の大きさは数cm程度となるため、その領域内でのリコネクション電場(現状では100V/mのオーダー)による直接加速はほとんど期待できない。

本研究では、トーラス型の軸対称プラズマ合体実験において、リコネクション磁場に直交する磁場成分(ガイド磁場)が非常に強い状況下でのリコネクション現象を用いることで、顕著な電子加速を詳細に観測することを提案する。軸対称プラズマ合体においてはリコネクション電場が周方向に形成されるため、ガイド磁場の存在は荷電粒子がリコネクション点付近に滞在する時間を大幅に延長し、長時間にわたる加速を実現できると考えられる。過去の実験でも、高速電子由来の不安定性に起因すると考えられる大振幅磁場揺動や高速電子によって励起されたイオンの局所発光が確認されており、高ガイド磁場下の軸対称プラズマ合体におけるリコネクションが効率的な電子加速を実現し、高速電子を発生させていることが強く示唆される。

強いガイド磁場の存在はまた、電子の輸送係数の大幅な低減をもたらすと期待できる。これまでの多くのリコネクション室内実験では顕著なイオン加熱が観測されてきたのに対して、電子加熱はさほど明確ではなかった。これは、加熱された電子のエネルギーが短時間で散逸してしまうためと考えられる。実際に、電子エネルギーの散逸が極めて小さいと考えられる大型核融合実験装置における高ガイド磁場下の軸対称プラズマ合体実験では、100eVを超える顕著な電子加熱が観測されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、強いガイド磁場が存在するトーラス型磁気リコネクション室内実験において、ガイド磁場に平行方向の電子加速を直接/間接的に観測することを目的とする。電子加速の発生する位置・時刻およびエネルギースペクトルを測定することによって、磁場エネルギーからの変換効率を評価し、リコネクション電場との相関、ガイド磁場による加速機構の質的变化、イオン加速およびバルクプラズマ加熱との関連性について検証し、磁気リコネクションによる粒子加速機構の解明を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では東京大学 UTST 装置における球状トカマクプラズマの軸対称合体過程を対象とする。2つの球状トカマクプラズマ合体の際に発生する磁気リコネクションでは、リコネクションする磁場に比べてガイド磁場が10倍以上大きいという条件が達成されていることから、本研究の目的であるリコネクション電場による直接的な粒子加速が観測できるものと考えられる。図1にUTST装置におけるプラズマ合体の概念図を示す。上下二つのプラズマが接触する領域において磁気リコネクションが発生し、周方向の電場が誘起されるが、同じく周方向に強いガイド磁場が存在していることから、特に電子が顕著な加速を受けると考えられる。

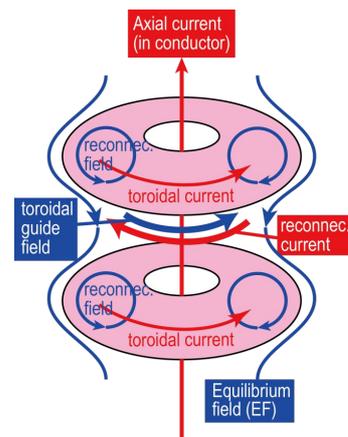


図1 UTSTにおけるプラズマ合体の概要

典型的なプラズマ/リコネクションパラメータとしては、リコネクション点付近のガイド磁場は200 mT以上、リコネクション磁場は20 mT程度、リコネクション電場は150 V/m程度である。電子/水素イオンの慣性長は3 mm / 130 mm程度となることから、整備する計測装置はイオンスケールよりも十分細かい空間分解能を有する必要がある。粒子加速効果を検証するために、本研究では特に加速効果が大きい電子を対象とした4種類の新規計測器(小型エネルギー分析器、軟X線トモグラフィシステム、軟X線イメージングシステム、高精度磁場揺動プローブ)を開発・運用し、粒子加速効果の検証ならびにイオン、波動を含めたエネルギーフローの評

価を行った。

ガイド磁場に加速された電子のエネルギー分布を直接測定するために、ファラデーカップ型の小型エネルギー分析器を製作した。図2にその構造を示す。2枚の減速グリッドに印加した電圧によって特定のエネルギーの電子のみを通過させ、検出する。リコネクション領域内に設置する必要があるため、3 cm 角の小型の分析器を開発した。減速グリッドに印加する電圧を 100 kHz 程度の高速度で掃引することによって、リコネクションイベントの間に複数回のエネルギー分析を実現した。

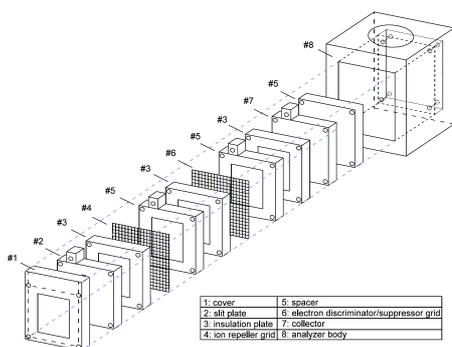


図2 小型エネルギー分析器の構造

軟X線トモグラフィシステムは、紫外線～軟X線に感度を持つ多チャンネルフォトダイオードとスリット、フィルタを組み合わせた計測器複数台で構成され、リコネクション領域を多視線で見込むように設置した。

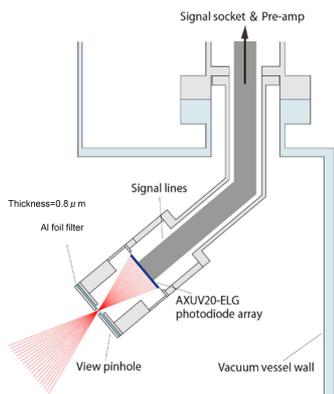


図3 軟X線トモグラフィ用計測器

作成した計測器を図3に示す。スリットと軟X線吸収フィルタを透過した成分を一次元フォトディテクターアレイで検出し、真空容器外部に設置されたプリアンプ・バッファ回路を通してデジタイズで記録する。特に、フォトディテクターとスリットとの間隔を可

変とすることにより、実験パラメータに合わせて空間分解能を調節できるような構造とした。軟X線のエネルギーを分別するフィルタについては、各種金属薄膜や高分子薄膜を使用し、異なったエネルギー帯の軟X線を検出した。本検出器を同一ポロイダル断面上に2台設置することで、計40視線での計測を行った。

前述のトモグラフィシステムは高い時間分解能を有する反面、視線数によって軟X線発光分布再構成像の空間分解能が制約を受ける。そこで、より高い空間分解能に特化した軟X線イメージングシステムを開発した。

図4にイメージングシステムの概要を示

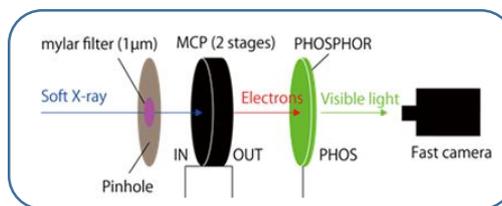


図4 軟X線イメージングシステム概観

す。真空容器本体とは軟X線吸収フィルタを貼付したピンホールで切り離された高真空領域にマイクロチャンネルプレートを設置し、軟X線により発生・増幅された電子が蛍光面に衝突することによって生じる可視光を真空窓越しに高速カメラで撮影する。ピンホールの配置によって、発光領域を俯瞰で見下ろす視野と、水平視野を選択することができる。

加速された電子は、局所的な電流フィラメントを形成し、磁場構造を変化させる可能性がある。そこで、リコネクション領域内の磁場変動を計測するための高精度磁場揺動プローブの開発・製作を行った。イオンサイクロトロン周波数が1.5～3 MHz程度であることから、10 MHz程度までの帯域を有する超小型ピックアップコイルを10 mm間隔で半径方向に並べたアレイを作成し、磁気中性面上の異なった周方向位置に設置することにより、揺動の空間構造を直接計測した。

これらの新規開発した計測器に加え、UTST装置既存の計測装置として、二次元広範囲磁場計測、トムソン散乱計測システム（電子温度・密度）、分光計測システム（イオン流速・温度）を運用し、磁気リコネクション時の基礎プラズマパラメータおよび加熱の評価を行った。

#### 4. 研究成果

高ガイド磁場リコネクションにおける高エネルギー電子の生成を検証するために、UTST装置において約200 mTのガイド磁場下で進行する20 mT程度の対向磁場のリコネクション過程に対して、各種計測を実施した。

(1) 単一視線軟X線計測では、200eV以上の軟X線を透過するフィルタを用いた表面障壁ダイオードにおいて、リコネクション期間の初期のみ信号が検出され、高エネルギー電子の生成を含むリコネクション過程が非定常であることが示唆された。また、70eV以上のエネルギー帯の軟X線を透過するフィルタにおいては、図5に示すように信号がリコネクション電場とガイド磁場の双方に正の相関を有していることから、電子がリコネクション領域に滞在している期間リコネクション電場による直接加速を受けていることが示唆される。

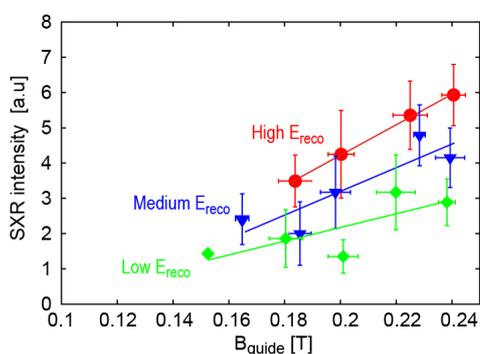


図5 軟X線強度のガイド磁場依存性

(2) プラズマ中の熱的な電子が加速され、20-50 eV程度のエネルギーになった場合には、プラズマ中のイオンを励起し、特定の線スペクトル発光をもたらす可能性がある。リコネクション地点から発生するヘリウムおよび炭素の線スペクトル強度の時間発展計測を実施し、その強度比から電子エネルギーの時間発展を推定したところ、リコネクション初期と後期の二回に高エネルギー電子の割合が増加する傾向が確認された。このうち前者が電場による電子直接加速に、後者が高エネルギー電子の熱化に起因するものと考えられる。

(3) リコネクションX点位置に小型エネルギー分析器を設置し、ガイド磁場方向の電子エネルギー分布を測定した。図6にリコネクション初期と中期における電子のエネルギー分布を示す。リコネクション初期には70%以上の電子が50eV以下の低エネルギー状態であり、ほぼ熱平衡とみなせたのに対し、リコネクション電場が最大になる中期では、ビーム状の高エネルギー電子が生成されており、電子が磁場方向に強く加速されていることがわかる。

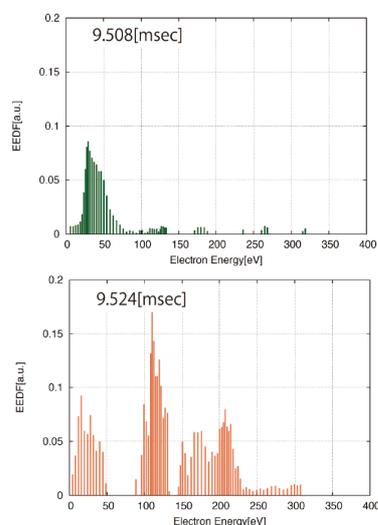


図6 電子のエネルギー分布 (上:初期、下:中期)

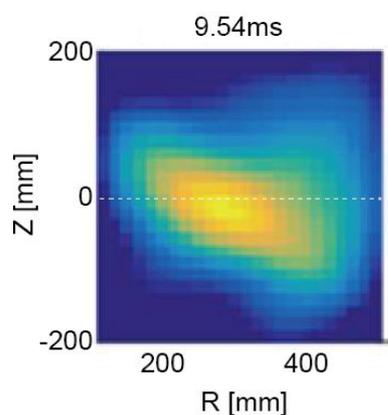


図7 トモグラフィによる軟X線発光分布

(4) 以上の計測結果から、リコネクション期間中に電場によって加速された高エネルギー電子が発生していることが確認されたが、その空間構造を観測するためには多点計測を行う必要がある。そこで、およそ70eV以上の電子が発する制動放射光の空間分布を軟X線トモグラフィによって再構成したところ、図7に示すように高エネルギー電子はリコネクションX点を中心とした領域に局在して発生することが明らかとなった。本トモグラフィ手法は1マイクロ秒程度の高い時間分解能を有しているが、視線数の制約のため空間分解能が30 mm程度と低く、微細構造を同定するには至らなかった。そこで、より高い空間分解能を得るためのイメージング計測システムを構築し、実験を行った。

(5) ピンホール、マイクロチャンネルプレートおよび高速カメラで構成される軟X線イメージングシステムを用いて、リコネクション点付近からの軟X線発光分布の変化を5マイクロ秒程度の時間分解能で捉えることに成功した。領域全体からの軟X線発光量は、プラズマ合体過程の前半に最大となり、その後は単調に減少する。これは、リコネクシ

ン領域のプラズマ密度増加に伴い、電子が十分な加速を受ける前に衝突によってエネルギーを失うためであると考えられる。

軟 X 線発光が最大となる時刻では、リコネクション点からの磁力線の向きが電子加速方向と一致する領域に発光が局在していることがわかった。一方、軟 X 線発光量が最大値となるまでの期間は、その発光領域はむしろ下流側に広く分布していることが観測された。プラズマ合体現象はおよそ 30 マイクロ秒程度で完了するが、その間上流側の条件も変化するため、最初期にプラズマ同士が接触した瞬間から過渡的な構造形成が進展する。一般的な定常リコネクション状態では、リコネクション電場によって逆方向に加速されたイオンと電子の運動は、面内に誘起される電場によって抑制されることになるが、実験における過渡状態では面内電場が十分に形成されておらず、下流領域においても電子の加速が発生していると考えられる。

(6) 磁場揺動計測では、ほぼイオンサイクロトロン周波数程度の揺動が X 近傍で励起され、電流シート内部を下流方向に伝搬する様子が確認された。電子加速の結果生じた局所電流フィラメントが閉じた磁気面を形成した可能性が新たに示された。

以上、本研究では軸対称トーラスプラズマ合体時に発生する高ガイド磁場リコネクションにおける電子加速現象について多角的な観測を実施し、その機構の実験的検証を行った。単一視線軟 X 線計測および小型エネルギーアナライザにより、200 eV 程度の高速電子が発生していることを確認し、さらに軟 X 線発光分布により加速領域を同定することに成功した。加速された電子が電流フィラメントを形成することによって、大域的な磁場構造への影響を与えうることを確認し、高ガイド磁場リコネクションにおける電子加速の発生機構と寄与を実験的に示すことができた。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

S. Kamio, M. Inomoto, K. Yamasaki, T. Yamada, C. Z. Cheng, Y. Ono, “Magnetic island dynamics in magnetic reconnection in UTST experiments”, *Physics of Plasmas*, 査読有, 25, 2018, 012126.

DOI : 10.1063/1.5006092

T. Ushiki, M. Inomoto, M. Itagaki, “Reconstruction of plasma shape and eddy current profile based on modified cauchy condition surface method in merging spherical tokamak”, *Fusion Engineering and Design*, 査読有, 122,

2017, pp. 35-41.

DOI : 10.1016/j.fusengdes.2017.09.012  
K. Kondo, M. Inomoto, X. Guo, T. Ushiki, T. Sugawara, T. Mihara, S. Kamio, H. Tanabe, Y. Ono, “Separated Double-Current Layers in a High-Guide-Field Reconnection Experiment”, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, 12, 2017, 1202033.

DOI : 10.1585/pfr.12.1202033

A. Kuwahata, M. Inomoto, R. Yanai, Y. Ono, “Energy Flux due to Electromagnetic Fluctuations during Guide Field Magnetic Reconnection”, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, 11, 2016, 1301087.

DOI : 10.1585/pfr.11.1301087

R. Yanai, A. Kuwahata, M. Inomoto, “Characteristics of Magnetic Fluctuations during Magnetic Reconnection in Counter-Helicity Spheromak Merging Experiment”, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, 11, 2016, 2401069.

DOI : 10.1585/pfr.11.2401069

T. Ushiki, M. Inomoto, K. Yamazaki, X. Guo, T. Sugawara, K. Matsuyama, H. Koguchi, T. Yamada, “Generation of Energetic Electrons during Spherical Tokamak Merging in UTST”, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, 11, 2016, 2402100.

DOI : 10.1585/pfr.11.2402100

S. Imada, I. Murakami, T. Watanabe, “Observation and numerical modeling of chromospheric evaporation during the impulsive phase of a solar flare”, *Physics of Plasmas*, 査読有, 22, 2015, 101206.

DOI : 10.1063/1.4932335

S. Imada, M. Hirai, M. Hoshino, “Energetic ion acceleration during magnetic reconnection in the Earth’s magnetotail”, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 67, 2015, 203.

DOI : 10.1186/s40623-015-0372-2

X. Guo, M. Inomoto, T. Sugawara, K. Yamasaki, T. Ushiki, Y. Ono, and TS Group, “Localized Electron Heating by Strong Guide-Field Magnetic Reconnection”, *Physics of Plasmas*, 査読有, 22, 2015, 101201.

DOI : 10.1063/1.4932339

K. Yamasaki, S. Inoue, S. Kamio, T. G. Watanabe, T. Ushiki, X. Guo, T. Sugawara, K. Matsuyama, N. Kawakami, T. Yamada, M. Inomoto, Y. Ono, “Laboratory study of diffusion region with electron energization during high guide field reconnection”,

Physics of Plasmas, 査読有, 22, 2015, 101202.

DOI : 10.1063/1.4932345

菅原拓路、郭学瀚、井通暁、中性粒子ビーム入射に向けた合体生成球状トカマクプラズマの電子密度・温度の評価、電気学会論文誌 A, 査読有, 135-A, 2015, pp. 727-728.

DOI : 10.1541/ieejfms.135.727

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", Nuclear Fusion, 査読有, 55, 2015, 033013.

DOI : 10.1088/0029-5515/55/3/033013

X. Guo, M. Inomoto, T. Sugawara, T.G. Watanabe, K. Yamasaki, T. Ushiki, Y. Ono, Plasma and Fusion Research, 査読有, 10, 2015, 340217.

DOI : 10.1585/pfr.10.3402017

S. Imada, Y. Bamba, K. Kusano, "Coronal behavior before the large flare onset", Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 66, 2014, S17-1, S17-11.

DOI : 10.1093/pasj/psu092

〔学会発表〕(計 33 件)

M. Inomoto, T. Ushiki, X. Guo, T. Sugawara, K. Kondo, T. Mihara, Y. Minami, Y. Inai, H. Tanabe, Y. Ono, Center-solenoid free start-up of spherical tokamak plasma in UTST, US-Japan Workshop on Compact Tori 2017, 2017.

R. Yanai, Y. Takahata, M. Inomoto, T. Asai, Development of new experimental device focusing on weakly ionized magnetic reconnection using rotating magnetic field, US-Japan Workshop on Compact Tori 2017, 2017.

Y. Takahata, R. Yanai, M. Inomoto, Measurement of electron energy distribution function in rotating magnetic field plasma source, US-Japan Workshop on Compact Tori 2017, 2017.

M. Inomoto, T. Ushiki, X. Guo, T. Sugawara, K. Kondo, T. Mihara, Y. Minami, Y. Inai, H. Tanabe, Y. Ono, Merging Formation of High- $\beta$  STs in UTST, 19th International Spherical Torus Workshop, 2017

M. Inomoto, K. Yamasaki, T. Ushiki, X.

Guo, S. Kamio, R. Yanai, T. Sugawara, Y. Fukai, H. Yamanaka, R. Tamura, "Formation of Closed Flux Surfaces in Reconnection Current Layer by Accelerated Electrons during Merging Start-up of Spherical Tokamak", 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016. M. Inomoto, K. Yamasaki, T. Ushiki, X. Guo, N. Kawakami, T. Sugawara, K. Matsuyama, A. Sato, K. Noma, Y. Fukai, H. Yamanaka, R. Tamura, A. Kuwahata, H. Tanabe, Y. Ono, Merging formation of high-beta ST as a target plasma for NBI, 2015 US-Japan Compact Torus Workshop, 2015.

M. Inomoto, K. Yamasaki, T. Ushiki, X. Guo, N. Kawakami, T. Sugawara, K. Matsuyama, A. Sato, K. Noma, Y. Fukai, H. Yamanaka, R. Tamura, A. Kuwahata, H. Tanabe, Y. Ono, T. I. Tsujimura, S. Kamio, T. Yamada, Center-Solenoid-Free Merging Start-up of STs by Outer PF coils in UTST, 18th International Spherical Torus Workshop, 2015.

R. Yanai, A. Kuwahata, M. Inomoto, Characteristics of Magnetic Fluctuations during Magnetic Reconnection in Counter-helicity Spheromak Merging Experiment, 25th International Toki Conference (ITC-25), 2015.

T. Ushiki, X. Guo, H. Furui, K. Matsuyama, H. Koguchi, M. Inomoto, Generation of Energetic Electrons during Spherical Tokamak Merging in UTST, 25th International Toki Conference (ITC-25), 2015.

## 6 . 研究組織

### (1)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・准教授

研究者番号 : 0 0 3 2 4 7 9 9

### (2)研究分担者

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 : 3 0 2 1 4 1 9 1

今田 晋亮 (IMADA, Shinsuke)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教

研究者番号 : 4 0 5 4 7 9 6 5

神尾 修治 (KAMIO, Shuji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号 : 8 0 7 0 5 5 2 5