

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340174

研究課題名(和文) 磁場構造形成において静電ポテンシャルが果たす役割の解明

研究課題名(英文) Study on the electrostatic potential in the formation of closed magnetic configuration

研究代表者

田中 仁 (Tanaka, Hitoshi)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：90183863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円、(間接経費) 3,960,000円

研究成果の概要(和文)：低アスペクト比トーラス実験装置LATEにおいては、弱い垂直磁場をトロイダル磁場に重畳して電子サイクロトロン(EC)共鳴プラズマを生成した時、トロイダル電流の急激な増加により開磁場構造から閉磁気面構造へと自発的に構造変化が起こる新しい現象が観測されている。この磁場構造変化に伴う静電ポテンシャルの変化を調べるために、重イオンビームプローブシステムを構築し静電ポテンシャルの計測を行った。閉じた磁気面が形成されている時、赤道面のEC共鳴層付近の空間電位は-20～-30Vの負の値になっており、開いた磁場構造時の正の静電ポテンシャル分布が磁場構造変化に伴って大きく変化している事が初めて観測された。

研究成果の概要(英文)：In the Low Aspect-ratio Torus Experiment (LATE) device, there observed a spontaneous formation of closed configuration of magnetic field when a electron cyclotron (EC) resonance plasma is produced under a weak vertical field superimposed on a toroidal field. A heavy ion beam probe (HIBP) system has been developed to measure the electrostatic potential which may play an important role on the transition of the magnetic topology. It is observed at the first time that the electrostatic potential is negative at -20 ~ -30V on the midplane near the EC resonance layer when the closed magnetic field configuration is formed. The result is completely different from the open field configuration case where the electrostatic potential is positive in the entire region. This result suggests that the electrostatic potential changes drastically through the transition from the open field configuration to the closed one.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：磁気再結合 閉磁気面形成 静電ポテンシャル形成 電子サイクロトロン共鳴加熱 重イオンビームプローブ 電位計測

## 様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションは磁場トポロジー変化を伴うプラズマ現象であり、宇宙プラズマならびに実験室プラズマに共通の研究テーマとなっている。磁気リコネクションに関する実験研究は日本のTS-3/4、米国のMRX、VTFなど多くの装置で行われてきており、トカマクプラズマでも鉅歯状振動の際の $q=1$ 磁気面崩壊が磁気リコネクションとして調べられている。

低アスペクト比トーラス実験装置LATEにおいては、弱い定常垂直磁場をトロイダル磁場に重畳して電子サイクロトロン (EC) 共鳴プラズマを生成した時、トロイダル電流の急激な増加 (「電流ジャンプ」) により閉磁場構造から閉磁気面構造へと自発的に構造変化が起こる新しい現象が観測された。この現象は電磁波エネルギーがもたらす磁気リコネクションとして広くプラズマ科学の興味を集めており、更にその応用として核融合をめざしたトカマク装置の無誘導スタートアップの可能性を開くものとしても注目されている。最近、東京大学のTST-2装置、九州大学のCPD装置で追試が行われ、英国カラム研究所のMAST装置、九州大学のQUEST装置でも同様の実験が開始されており、この現象に関する関心は非常に高まっている。

しかしながら、これまでの実験研究では電流駆動、磁束分布の変化、MHD平衡に注目した計測・解析しか行っておらず、静電ポテンシャルが磁場トポロジー変化に対して与える影響については全く考慮されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、電子サイクロトロン (EC) 共鳴で生成したトーラスプラズマにおいて観測される開いた磁場構造から閉じた磁場構造への自発的遷移過程に注目し、この磁場構造形成過程において重要な役割を果たすと考えられる静電ポテンシャル分布をイオンビームプローブ法によりプラズマに擾乱を与えることなく測定し、閉磁気面構造形成において静電ポテンシャルが果たす役割を解明することを目的とする。すなわち、開いた磁場構造から閉磁気面構造への遷移過程において、磁気計測によるトロイダル電流分布計測、軟X線カメラによる高速電子空間分布計測、可視光高速CCDカメラによるバルクプラズマ分布計測に加え、静電ポテンシャル分布計測を同時に行い、それらの時間発展をマイクロ秒の時間スケールで観測して、マイクロ波駆動による閉磁気面構造形成過程の総合的理解、モデルの構築をめざす。

### 3. 研究の方法

(1) 実験はLATE装置を用いて行う。LATE装置の真空容器は内径1m、高さ1mの円筒の中心軸に外径11.4cmの中心柱が刺さった形状となっており、その中心柱の中に60ターンのトロイダルコイルがある。トランジスタで制御され

た定電流電源により、大半径 $R=25\text{cm}$ においてトロイダル磁場 $B_t=480\text{G}$ を定常で、あるいは $B_t=1152\text{G}$ を0.36秒間発生させる事ができる。さらに3対の垂直磁場コイルがそれぞれ独立した定常定電流電源で励磁され、 $R=25\text{cm}$ で最大 $B_z=200\text{G}$ の垂直磁場を発生させる事ができる。

(2) EC共鳴加熱のために周波数2.45GHzのマイクロ波を用いる。マイクロ波発振器は最大出力20kW、2秒のマグネトロンを3台用いる。それぞれの発振出力はトーラス赤道面内でトーラス外側からトロイダル方向に斜めに入射する。マイクロ波の遮断密度 $7.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 以上の密度を持つオーバーデンスプラズマの生成のために電子バーンスタイン波を励起すべく、マイクロ波電場の偏波は0モードに結合するように左回り円偏波あるいは電場がトロイダル磁場方向を向く直線偏波にする。

(3) プラズマ電流計測のために17本の磁束ループを用いる。9つのパラメータで規定される関数を用いて電流分布を表し、その電流分布が17本の磁束ループの位置に作る磁束が計測された磁束に一番合うように9つのパラメータを最小自乗法により決定する。そして、垂直磁場コイル電流の作る磁場も加えて磁場構造を決定する。高速可視光CCDカメラは流入ガスの水素の発光線 $H\alpha$ 光の像を $288 \times 240$ ピクセルの画素で20000fpsのコマ数で記録する。同時に赤道面内にfan状の視線を持つ20chAXUV検出器により軟X線領域の放射分布を得て、逆アーベル変換により大半径方向の放射強度分布を得る。線平均密度は6chの70GHzミリ波干渉計により計測する。

(4) プラズマに擾乱を与えないで静電ポテンシャル分布を計測するために、アルカリ金属 (Na, K, Rb) イオンを用いた重イオンビームプローブ (HIBP) を用いる。このHIBPシステムは本研究の要であり、新たに製作するものである。図1にシステム構成図を示す。アルカリ金属をゼオライトモレキュラーシーブスにドーブし、真空中で約 $1000^\circ\text{C}$ に加熱・焼結してイオンソースを作る。1価のイオンはピアス電極で静電的に引き出され、最大20kVで加速される。そして2つの四重極レンズ (QD1, QD2) を用いてトロイダル方向とポロイダル方向の集束性を調整する。この四重極レンズの導入は本研究における開発過程で導入を決めたものであり、後で示すように到達電流の増大をもたらす効果があった。その後、トロイダルスーパー (TS)、ポロイダルスーパー (PS) により向きを整えられて上部ポートより真空容器内に入射される。以上が入射ビームラインである。プラズマ中の熱電子の衝突により2価に電離した2次ビームはラーマー半径の違いから1次ビームと分離され、下部ポートから検出ビームラインに入る。ポロイダルデフレクター (PD) とトロイダルデフレクター (TD) によって検出ビームラインに沿って向きを変えられ、エネルギー分析器へと導かれる。2次ビームは入射角度

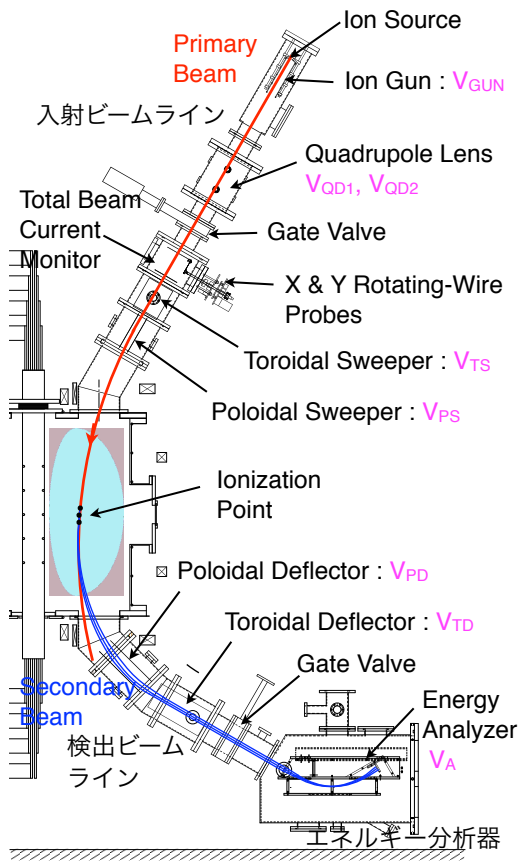


図1：重イオンビームシステム構成図

30° でエネルギー分析器に入り、平行平板電極で偏向され、分割電極板により検出される。静電ポテンシャルの値は分割電極板のそれぞれの電流の差に比例する。また、その計測点は1価から2価に電離した地点であり、ビームの軌道計算より求める。

#### 4. 研究成果

(1) まず、図1に示される重イオンビームシステムの構築を行った。初年度の平成23年度までに検出ビームラインまで完成させ、LATE装置赤道面に可動式ビーム位置検出器、エネルギー分析器スリット位置に3x8マトリクス型位置検出器を設置し、TSおよびPS電圧、ならびにTDおよびPD電圧を制御することにより1次ビームをマトリクス型位置検出器まで導

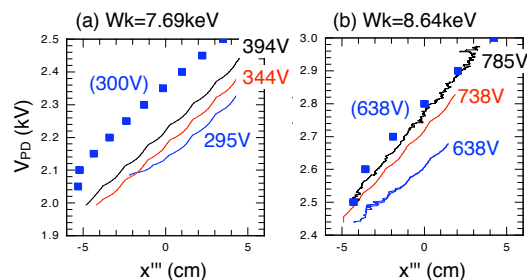


図2：3x8マトリクス型位置検出器でのK+1次ビームの位置（実線）とビーム軌道計算結果（■）の比較

くことができた。図2にマトリクス型位置検出器で得られたビーム位置と数値計算結果の比較を示す。トロイダル磁場480Gの真空中にK+イオンをそれぞれ7.69kV、8.64kVで加速して入射し、PS電圧を図に示すように3通りの値で設定してPD電圧を時間的に変えた時にマトリクス型位置検出器で得られた結果を実線で表している。数値計算はPS電圧がそれぞれ300Vと638Vの場合を四角で表している。両者はおおむね一致している。差はビーム電圧が上がるに従って小さくなってきている。実際に使用するのはビーム電圧が14~20kVであるため、その差はより小さくなると予想される。数値計算精度の向上のために、2次ビームを用いた検証も必要となる。これについては、今後、HeまたはArガスを用いて2次ビームを生成して行く予定である。

(2) エネルギー分析器の設計・製作・組み立ては平成23、24年度に行い、テストベンチでの調整試験は平成25年度に行った。テストベンチではエネルギー分析器全体をスリット位置を中心に±3°回転させて平行平板電極の焦点の位置に分割電極板を設置する調整を行い、合わせてエネルギー分析器の特性値G(分割電極板電流の差がゼロになる時のビーム電圧V\_GUN/エネルギー分析器電圧V\_A)を得た。図3(a)に分割電極板の位置を変えた時のビーム入射角θに対する規格化された分割電極板電流の差をプロットしてある。分割電極板の位置が平行平板電極の焦点位置に設置された時、±1.2°の入射角を持つビームはほとんどずれることなく分割電極板に均等に入る事がわかる。図3(b)ではイオンガン電圧モニターとG=4.88360としてエネルギー分析器で求めたイオンエネルギーの比較をしてある。両者は非常に良く一致していることがわかる。

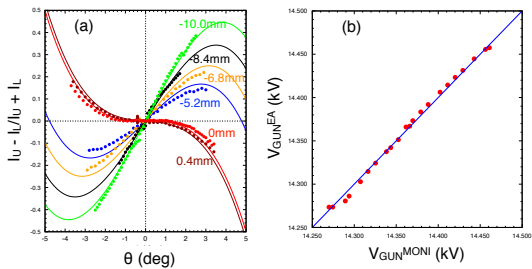


図3：(a) 分割電極板位置を変えた時のビーム入射角θに対する規格化された分割電極板電流の差の変化 (Na<sup>+</sup>, V\_GUN=14.4kV, V\_EA=5.88kV) (b)イオンガン電圧モニターとエネルギー分析器で求めたエネルギーの比較

(3) 平成23年度の1次ビームを用いたビーム入射試験でビームのトロイダル方向の広がりが著しく、ビーム輝度の減少を引き起こす事がわかった。これはLATE装置が低アスペクト比装置であるため、ビームのトロイダル方向のわずかな速度成分でも下部ポートのビーム検出ラインに達する時には大きなトロイダル方向のずれとなってしまうことに起因すると考えられる。そこで、四重極レンズの導入を決

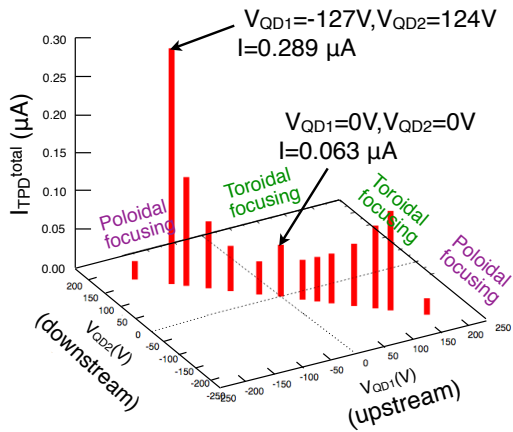


図4：2つの四重極レンズ電圧を変えた時のエネルギー分析器の入射スリットを通過したビーム電流の変化

め、テストベンチでの動作確認試験の後、入射ビームラインに設置した。四重極レンズ電圧の最適化は1次ビームを用い、エネルギー分析器の入射スリットを通過したビーム電流を計測しながら行った。図4に上流側四重極レンズ電圧 $V_{QD1}$ と下流側四重極レンズ電圧 $V_{QD2}$ を変えた時にエネルギー分析器の入射スリットを通過したビーム電流の値をプロットしてある。 $V_{QD1}=-127V$ ,  $V_{QD2}=124V$ の時、通過電流値は四重極レンズ電圧をかけなかった場合の4.6倍に改善された。2次ビームの検出の際にもこれと同じ四重極レンズ電圧を印加して使用する事とした。

(4) 2次ビームの検出ならびに静電ポテンシャル計測は2.45GHzのマイクロ波電力を用いて無誘導で電流を立ち上げたマイクロ波球状トカマクプラズマを作って行った。図5に放電波形を示す。トロイダル磁場は $B_t=744G$ でEC共鳴層は $R=20.2cm$ にある。入射電力は最初6kWであり、垂直磁場を徐々に増加させてプラズマ電流が増加するに従って入射電力も増やし、最大25kW入射している。放電後半の約80msecの間プラズマ電流は7.8kAに保たれている。接線半径12cmにおける線積分電子密度は $1.4 \times 10^{17} m^{-2}$ であり、線平均電子密度は $1.7 \times 10^{17} m^{-3}$ で遮断密度の2.3倍に達している。従って、電子バーンスタイン波によって維持されていると考えられる。使用した1次ビームは $Rb^+$ であり、加速電圧は $V_{GUN}=13.989kV$ である。この放電では $V_{PS}=0V$ ,  $V_{TS}=0V$ ,  $V_{TD}=0V$ の設定で、 $V_{PD}$ だけを周期100msで0から1.5kVまで直線的に変化させている。エネルギー分析器の平行平板電極電圧は $V_{EA}=2.863kV$ である。図に示すようにマイクロ波ノイズとは別に $V_{PD}$ の変化に同期して分割電極に2次ビーム電流が検出された。ここでは時刻 $t \sim 0.156sec$ と $t \sim 0.197sec$ において1つの分割電極板A11で0.7nA程の2次ビーム電流が得られている。分割電極板全体では $\sim 3nA$ であった。横軸に $V_{PD}$ を取り、下側分割電極電流、上側分割電極電流および規格化された分割電極電流の差をプロットしたのが図6である。エ

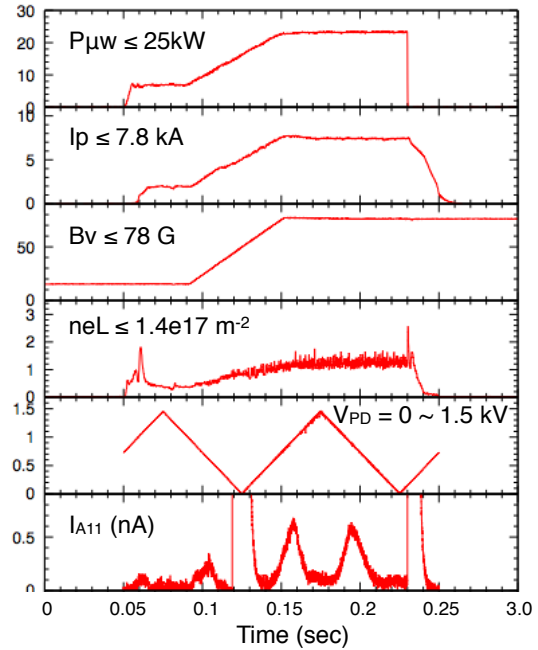


図5：典型的な放電波形。上から入射マイクロ波電力、プラズマ電流、印加垂直磁場、接線半径 $R=12cm$ における線積分電子密度、ポロイダルデフレクタ電圧、分割電極板A11で得られた2次ビーム電流を表す。

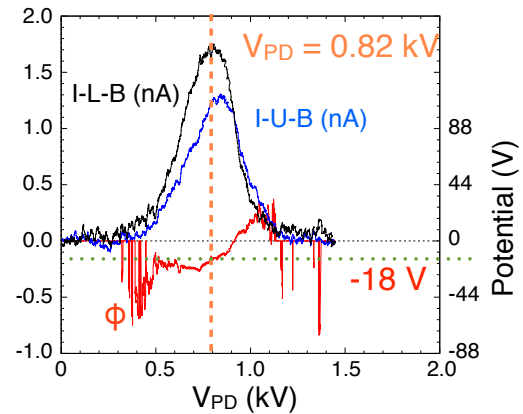


図6： $t \sim 0.197sec$ においてBの分割電極板で得られた2次ビーム電流の $V_{PD}$ 依存性。黒線は下側分割電極板、青線は上側分割電極板の電流を表す。赤線は規格化された電流差であり、右側の目盛りにより静電ポテンシャルの値を読み取る事ができる。

ネルギー分析器のゲインから計算される静電ポテンシャルの値は $t \sim 0.197sec$ において2次ビーム電流が最大となる所で $-18V$ となっている。この時 $V_{PD}=0.82kV$ であった。

(5) このポテンシャルの計測点はビーム軌道計算で求める電離点の位置に相当する。磁気計測からプラズマ電流分布を求め、それと垂直磁場コイル電流が作るポロイダル磁場分布の中で $Rb^+$ イオンおよび電離後の $Rb^{+2}$ イオンの軌道を計算した。実験条件と同じく $V_{PS}=0V$ ,  $V_{TS}=0V$ ,  $V_{TD}=0V$ の設定で、 $V_{PD}$ だけを変えて2次ビームがエネルギー分析器のスリットを通過するような電離点を求めると、図7のよう



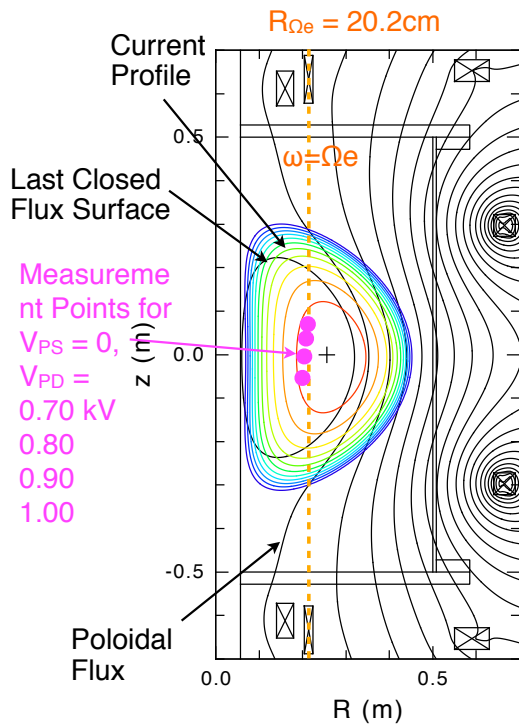


図7:  $t \sim 0.197 \text{ sec}$ における磁場配位においてビーム軌道計算から求めた電離点の位置。

になった。これより、図6で $V_{PD} = 0.82 \text{ kV}$ の時得られた $-18 \text{ V}$ という負の静電ポテンシャルは $R = 19 \text{ cm}$ ,  $z = 3 \text{ cm}$ の地点のものであると見積もられる。プラズマ電流がほとんど流れておらず、閉じた磁気面が形成される前の段階をラングミュアプローブで計測した結果では、静電ポテンシャルは正であり、最も高い所で $30 \text{ V}$ 程になっている。それに対し、閉じた磁気面が形成されている場合、EC共鳴層近傍では負の静電ポテンシャルになっていることがわかった。磁場構造変化に伴って静電ポテンシャルにこのような変化があることはこれまで知られておらず、初めての観測結果である。

## 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1件)

H. Tanaka, S. Omi, J. Katsuma, Y. Yamamoto, M. Uchida, T. Maekawa, H. Iguchi

"Development of an Ion Beam Probe System for Potential Measurement in the Low Aspect-Ratio Torus Experiment Device"  
 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials Vol.132 (2012) No. 7, pp. 567-573

[学会発表] (計6件)

(1) H. Tanaka, S. Omi, J. Katsuma, M. Uchida, T. Maekawa, H. Iguchi

"Ion beam probe system for potential measurement in the Low Aspect-Ratio Torus Experiment device"

16th International Workshop on Spherical Torus (招待講演), 28-2-2, 2011年9月28

日、核融合科学研究所、岐阜県土岐市

(2) S. Omi, H. Tanaka, J. Katsuma, T. Kanemitsu, R. Hayashi, T. Fukunaga, H. Mizogami, Y. Noguchi, F. Watanabe, M. Uchida, T. Maekawa, H. Iguchi

"Development of ion beam probe for the LATE plasma"

Plasma Conference 2011, 22F13, 2011年11月22日、石川県立音楽堂、石川県金沢市

(3) 田中仁, 勝間淳, 重村樹, 打田正樹, 前川孝, 井口春和

"LATEプラズマの電位計測用イオンビームプローブの開発: エネルギー分析"

プラズマ・核融合学会第29回年会, 30D03P, 2012年11月30日、クローバープラザ、福岡県春日市

(4) 勝間淳, 田中仁, 重村樹, 打田正樹, 前川孝, 井口春和

"LATEプラズマの電位計測用イオンビームプローブの開発: 電位計測位置の設定と制御"

プラズマ・核融合学会第29回年会, 30D04P, 2012年11月30日、クローバープラザ、福岡県春日市

(5) 重村樹, 田中仁, 打田正樹, 前川孝, 井口春和

"LATEプラズマにおけるイオンビームプローブによる空間電位計測の試み"

プラズマ・核融合学会第30回年会, 05aE32P, 2013年12月5日、東京工業大学、東京都目黒区

(6) T. Shigemura, H. Tanaka, M. Uchida, T. Maekawa, H. Iguchi

"Preliminary Result of Space Potential Measurement by a Heavy Ion Beam Probe in LATE"

The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus, Tsinghua University, Beijing, China

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他] ホームページ :

<http://plasma47.energy.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 仁 (TANAKA HITOSHI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号: 90183863

(2) 研究分担者

前川 孝 (MAEKAWA TAKASHI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 20127137AAAA

打田 正樹 (UCHIDA MASAKI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教