

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22560819

研究課題名(和文) 高速イオン閉じ込めに対する磁場のトロイダルリップル成分の寄与に関する研究

研究課題名(英文) Study of magnetic toroidal-ripple-component effect on the fast ion confinement

研究代表者

岡田 浩之 (Okada, Hiroyuki)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：50169116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：イオンサイクロトロン加熱を利用して特に磁場に垂直方向に大きな速度を持つ高速イオンを生成し、トーラス磁場のトロイダル方向のリップル成分を変化させ、ヘリカル系磁場閉じ込めで重要となるこの種の粒子の閉じ込めについて調べた。

ヘリオトロンJ装置の磁場を制御することでトロイダルリップル(バンピネス)を変化させたところ、高バンピネスの配位で、30keV以上の高速イオンが閉じ込められていることを計測し、他の配位と比較することによって、バンピネスが高速イオンの生成・閉じ込めに有効であることを実験的に、またモンテカルロ計算によって数値解析によって明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The production and confinement of fast ions which have large perpendicular velocity have been studied. The confinement of such particles is a key issue of the helical devices. For the production of fast ions (protons), ion cyclotron range of frequencies (ICRF) heating is used. The effect of the toroidal ripple component (bumpiness) is examined in the Heliotron-J magnetic field, which has flexibility to control bumpiness.

In the high bumpiness configuration, the fast ions more than 30 keV were measured by the charge-exchange particle analyzer and two dimensional scan of the line-of-sight was done to investigate distribution of fast ions in the torus. Comparing with the results of the other bumpinesses, the better confinement property was confirmed in the high bumpiness. The numerical code using Monte-Carlo method can be developed and partially reproduced the good production and confinement property of fast ions in the high bumpiness.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・核融合 高速粒子 トロイダルリップル ヘリオトロンJ ICRF

1. 研究開始当初の背景

トーラス磁場によるプラズマ閉じ込めを用いた核融合を実現するためには、核融合反応で生成される $\alpha$ 粒子によるバルクプラズマの加熱が効率よく行われるのに十分な $\alpha$ 粒子閉じ込めが達成されなければならない。閉じ込め磁場は高ベータプラズマを安定に維持することが勿論第一義であるが、高速粒子閉じ込め性能が悪ければ追加熱電力の必要量が増加しランニングコストが上がる。したがってこれら2つの条件を両立させることが重要である。これらのうち高速粒子閉じ込めに対して軸対称トーラスであるトカマクではトロイダル方向の磁場リップルは高速粒子損失を増加させるものでありその低減は重要な課題となっている。また、ヘリカル型の閉じ込め装置では補足粒子閉じ込めを改善するため、さまざまな設計概念が提案されている。たとえば準ヘリカル対称性配位、準ポロイダル対称性配位、準トロイダル対称性配位、準アイソダイナミック配位などであり、これらの設計指針に基づいてさまざまな装置が設計されており、あるものはすでに建設され実験が行われている。この中で準アイソダイナミック配位では、トロイダル方向のリップルも粒子閉じ込めの制御パラメータとなっている。トロイダル装置の閉じ込めに対するトロイダルリップルの影響は重要な課題の一つである。

2. 研究の目的

本研究の目的はイオンサイクロトロン加熱を利用して高速粒子を生成し、トーラス磁場のトロイダル方向のリップル成分を変化させ、その結果として高速粒子の閉じ込め特性の変化を実験的に調べると共に解析モデルと比較することで、高速粒子を基礎とした磁場最適化指針を確立することである。この研究にイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱を用いる理由は、プラズマ内に粒子源を持ち込まないこと、さらに加速機構の特性から加速エネルギーに関しては粒子間衝突および軌道損失以外の限界がないことからである。装置として1MW級の高周波発振器を用い、ICRF加熱の少数イオンモードを用いて準アイソダイナミック配位を指向したヘリカル型環状閉じ込め磁場を持つヘリオトロンJ装置(大半径:1.2m、プラズマ小半径:約0.1-0.2m)に適用し、核融合プラズマでの $\alpha$ 粒子を模擬できる程度的高速粒子すなわちヘリオトロンJの典型的な磁場強度1.25Tで50-100keV程度的高速イオンの生成を行い、高速イオンの磁場配位に対する閉じ込め特性を実験的、理論的に解明し、トーラス系プラズマ閉じ込め装置に対するトロイダルリップル成分(これをバンピネスと呼ぶ)の影響を軸対称および準アイソダイナミック配位を対照することにより明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究ではヘリカル型環状閉じ込め装置として、京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置を使用する。装置の大半径は1.2m、プラズマ半径は0.1-0.2mである。プラズマの形状はトーラス方向で、あるいは磁場配位によって大きく変化する。磁場の回転変換については0.49から0.65、バンピネスについては0.01から0.15の範囲で制御することができる。磁気軸上の磁場強度の変化をトロイダル角について示したのが図1である。トロイダル周期が4であるため90度までで示している。

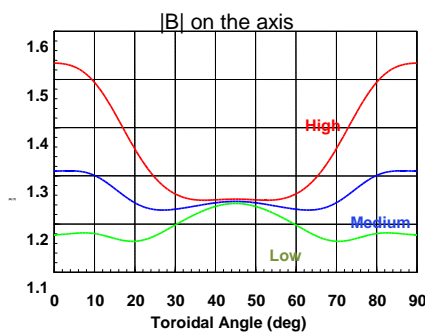


図1 3バンピネスに対する磁場強度のトロイダル方向変化。

る。バンピネス0.15の場合はトロイダル角45で底となる分布を示している。この分布変化により捕捉粒子のトロイダル方向の軌道変化が予想される。

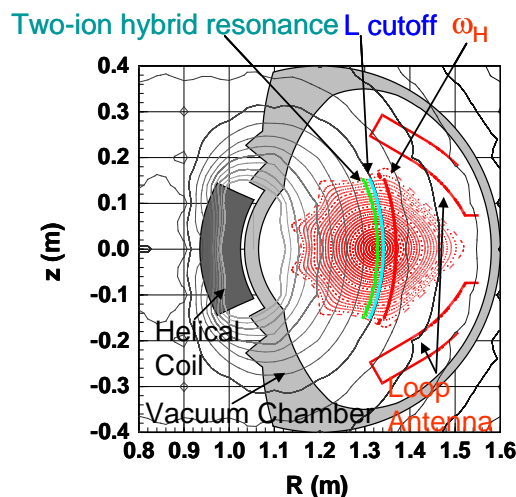


図2 アンテナ設置位置でのプラズマポロイダル断面、Mod-B、アンテナループ位置。

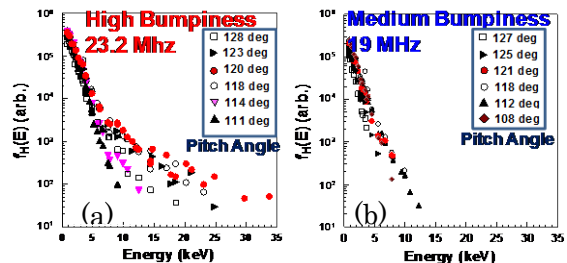
追加熱として使用可能なNBIはポート通過パワーで0.6MW×2、加速電圧最大30kVである。NBIは30kVで入射された高速粒子のICRFによる加速の可能性を試験するため、あるいは高密度のターゲットプラズマ生成に使用する。ICRF発振器については、2基使用する。アンテナはそれぞれの発振器にループアンテナが1本接続され、同一ポートから図2に示すよ

うに導入されている。入射位置では磁場は大半径方向に強度が減少するトカマク型に近い分布を持っている。2本のアンテナ間の高周波電流の位相は制御可能であり、ポロイダル方向のモード構造を変化させることができる。周波数帯は17.8MHzから23.2MHzまでの発振が可能である。最大パワーはプラズマ負荷でそれぞれ0.4MW程度である。プラズマは電子サイクロトロン加熱 (ECH、パワー250kWから350kW) で生成し、ICRFパルスを重畳する。加熱は少数イオンモードであり、少数イオンとして水素、多数イオンとして重水素を用いる。少数イオン比は0.1で固定である。主な計測器である荷電交換中性粒子エネルギー分析装置はE/B型であり、印加電場、磁場を変えることにより水素に対して最大80keV、重水素に対し最大40keVまでのエネルギー範囲を有し、トロイダル方向、ポロイダル方向に角度スキャンが可能である。これによってピッチ角情報を含めたエネルギー分析を行い、高速イオン閉じ込め特性を調べる。この装置はバルクである重水素のスペクトルも同時に測定可能で、バルクイオンの温度評価にも使用する。そのほかにはVUVをはじめとした複数の分光器、プラズマエネルギー測定のための反磁性ループ、電子密度測定用マイクロ波干渉計、トムソン散乱計測装置、荷電交換再結合分光 (CXRS) 装置、ポロメータなど通常の計測器が稼動中で利用可能であり、閉じ込めの基本パラメータを得ることができる。

#### 4. 研究成果

トーラス系磁場閉じ込め装置における高速イオン閉じ込めに対し、磁場リップルの一つであるトロイダル方向のリップル (バンピネス) の依存性について実験的、理論的に明らかにすることが目的である。ピッチ角が90度に近い粒子が特にこの問題には重要であるため、磁場に垂直方向の加速を行い、且つ粒子源を有しないイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) の波動加熱装置を用いて生成された高速イオンを利用して研究を行った。生成された高速イオンはヘリオトロンJ装置に設置されている視線移動可能な荷電交換中性粒子エネルギー分析装置 (CX-NPA) によって測定した。バンピネスの値については次の3つの場合について調べた。B04/B00 (B04がバンピー成分、B00が平均磁場成分) で表して、規格化平均半径0.67でそれぞれ0.15 (高)、0.06 (中)、0.01 (低) である。また、中バンピネスはヘリオトロンJ装置の標準磁場配位であり、他の配位もプラズマ体積、回転変換、磁気軸位置、バンピネスを除く磁場の主要フーリエ成分はほぼ同一である。低衝突領域での高エネルギー粒子測定を行うため線平均電子密度としては  $0.5E19m^{-3}$  以下、入射パワー0.3MW程度で、3種類のバンピネスに対し、高速粒子の生成・閉じ込め挙動を調べた。ターゲットプラズマのイオン温度は0.2keV程度である。

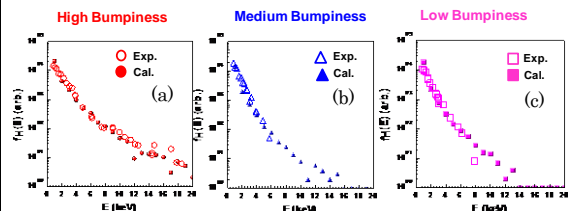
- (1) 磁気軸を含む視線でCX-NPAのトロイダル角を変え、異なるピッチ角の少数イオンのエネルギースペクトルを計測したところ、図3にあるように、ほとんどのピッチ角で、少数イオンの高エネルギーテールは高バンピー配位で最大であった。高バンピネスでは最大34keVまでの水素イ



オンが計測された。定量的な比較のため

図3 高バンピーの場合のエネルギースペクトルのピッチ角依存性 (a) と中バンピーの場合 (b)。

1-7keVのエネルギー範囲で実効温度を評価してもこの傾向は認められる。ヘリオトロンJの真空磁場では多くの場合ピッチ角90度付近に損失領域があるため、計測されたエネルギースペクトルも単純に90度の角度で成長しているわけではない。高バンピーの場合は120度付近に実効温度の極大が現れる。バルクイオンの加熱



についても高バンピー配位が最も効率的であることも分かっている。

図4 少数イオンエネルギースペクトルのバンピー磁場成分に対する依存性。左から高バンピー、中バンピー、低バンピーの各場合に対応するデータ。それぞれに対し、実験値 (白抜き) と計算値 (塗りつぶし) とを示す。

- (2) 数値解析ではモンテカルロ法を用いて、500000個のテスト粒子により20keVまでのエネルギースペクトルを計算し、実験との対比を行いエネルギースペクトルの再現が可能であることを示し、且つピッチ角に対する依存性もほぼ再現されることが分かった。ただし、ICRFのパワー吸収分布については現時点では放物線分布などを仮定しており、これらの検討は今後の課題である。

これまで磁気軸中心を通る視線で、CX-NPAを用い高速イオンのバンピネス依存性を調べてきた。しかし、中バンピネスにおいて、サイクロトロン共鳴層の位置を変化さ

せると、少数イオンモード加熱であるにもかかわらず高速イオンの生成とバルクイオンの加熱効率に対して、依存性が異なっており、磁気軸コードの実験値が平均的な高速イオンの振舞いを示しているかどうかと呼応する必要があったことが分かった。このため3種類のバンピネスに対し CX-NPA の水平角を変え様々なポロイダル断面での高速イオンのエネルギースペクトルの視線に対する依存性を調べた。ここでは加熱条件を一定にするため共鳴層が磁気軸を通る場合について調べた。

- (3) 少数イオンである水素のエネルギースペクトルの1keVから6keVまでの傾きから評価した実効温度の水平角、垂直角依

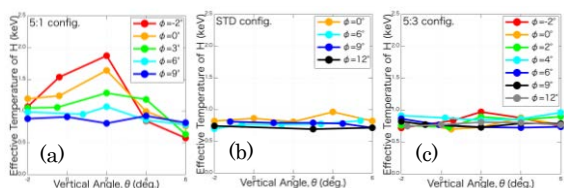


図5 少数水素のエネルギースペクトルから評価した実効温度の水平角、垂直角依存性。(a)は高バンピネス、(b)は中バンピネス、(c)は低バンピネスにそれぞれ対応。

存性を図5に示す。CX-NPAの垂直角の6°では規格化平均半径で約0.4に接する視線となる。磁気軸を通る視線は水平角によって異なるが0度付近となる。高バンピネス(a)では水平角-2°から3°までの範囲で垂直角2°で実効温度の最大を観測した。水平角-2°で実効温度の最大値は2keVに達した。水平角6°以上ではこの傾向はほとんど見られない。中バンピネス、低バンピネスでは垂直角に対する変化はほとんど観測されず、計測範囲で高速イオンは水平方向にも垂直方向にもほぼ一様に分布している。これらの結果から、空間位置に対する依存性を十分含めた解析が必要であること、この傾向は配位によって異なることなどが明らかになった。また、バルクイオンの加熱については高バンピネスが最大で、中、低の順番である。

- (4) 2つのアンテナに対する依存性を調べるために片方ずつのアンテナを使用して高速イオンについては調べた。図6は高バンピネス配位での下側アンテナ使用時の少数イオンである水素のエネルギースペクトルである。(a)はCX-NPAの水平角を0°での結果、(b)は水平角6°の結果である。それぞれの水平角に対して垂直角を変えてエネルギースペクトルを調べた。垂直角0°がほぼ磁気軸を含む視線であり、垂直角6°は規格化小半径で約0.4に接する視線である。ICRF入射前のターゲットプラズマのイオン温度は0.2keV以下である。(a)では垂直角

0°で最も傾き小さく、高速イオンが多く生成・閉じ込められていることが

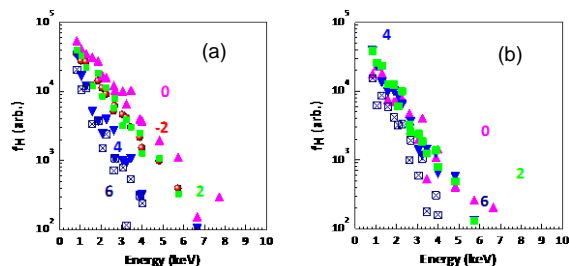


図6 下側アンテナのみを用いた場合の少数イオン(水素)のエネルギースペクトル。(a)は水平角0°の場合、(b)は水平角6°の場合。図中に各エネルギースペクトルに対する垂直角を示した。

わかる。また垂直角に対して傾きが大きく変化する。両アンテナを用いた昨年度の結果と比較すると、水平角0°での磁気軸に対する非対称性は見られない。磁気軸付近の垂直角0°で最も傾きが小さく高速イオンが多く観測されている。-2°、2°の傾きはほぼ同等である。(b)については垂直角0°から6°に対してほとんど変化がない。この結果に関しては両アンテナを用いた時と同様である。

実験ではバンピネスのみを変化させた磁場配位で高速イオンの生成閉じ込めについて調べ、計測範囲すべてにおいて高速イオン分布を計測し、高バンピネス配位での高速イオン生成・閉じ込めの優位性が確認された。30keVを超える高速イオンも観測された。これらによって、バンピネスは高速粒子閉じ込めに対し有効な制御ノブであることが分かった。ここでは述べていないがバルク粒子の加熱という面でも高バンピネスは最も効率的であった。ただ、その分布に対しては高バンピネスの場合にコーナー部付近で中心コード付近に極端にピークする分布が観測されている。

モンテカルロによる計算では磁気軸を含む視線の実験値を再現する結果が得られた。ただし、トロイダル角を変えた場合のポロイダル面での高速粒子分布については十分な解析が行われていない。初期的な結果では高バンピネスではトロイダル角に対する分布変化が認められており、今後さらに解析を進める予定である。これらの結果から特に垂直方向に加速された高速イオンに対し、最適なバンピネスを求められると考えている。

### 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)

- ① H. Okada, K. Nomura, S. Kobayashi, H. Y. Lee, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, T. Minami,

S. Yamamoto, S. Ohshima, M. Takeuchi, S. Konoshima, T. Mutoh, K. Mukai, K. Yamamoto, M. Suwa, H. Yashiro, H. Yoshino, Y. Nakamura, K. Hanatani, F. Sano, "Numerical Analysis of ICRF Minority Heating in Heliotron J", 査読有, Plasma Fusion Res. 6 (2011) pp.2402063-1-5, DOI: 10.1585/pfr.6.2402063

[学会発表] (計 10 件)

- ① 岡田浩之、村上弘一郎、小林進二、水内亨、長崎百伸、南貴司、山本聡、大島慎介、武藤敬、木島滋、史楠、臧臨閣、沙夢雨、劍持尚輝、笠嶋慶純、原田伴誉、佐野匠、大谷芳明、丸山正人、野口正樹、中村祐司、佐野史道、'ヘリオトロンJにおけるICRF加熱で生成された高速イオンの解析'、第30回プラズマ・核融合学会年会、2013年12月3日—6日(03aE58P)、東京工業大学。
- ② H. Okada, H. Watada, K. Murakami, S. Kobayashi, H. Y. Lee, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, T. Minami, S. Yamamoto, S. Ohshima, T. Mutoh, S. Konoshima, N. Shi, L. Zang, Y. Sugimoto, H. Fukushima, S. Arai, M. Sha, N. Kenmochi, Y. Nagae, K. Kasashima, T. Harada, K. Hashimoto, Y. Nakamura, F. SANO, "Two-Dimensional Distribution of Fast Ions Generated by ICRF Minority Heating in Heliotron J", 19<sup>th</sup> ISHW, Sep.16 - 19, 2013 (K7), Padova, Italy.
- ③ 和多田泰士、岡田浩之、小林進二、李炫庸、原田伴誉、水内亨、長崎百伸、南貴司、山本聡、大島慎介、本島滋、臧臨閣、荒井翔平、杉本幸薫、福島浩文、安田圭祐、劍持尚輝、永榮蓉子、橋本紘平、中村祐司、笠嶋慶純、沙夢雨、佐野史道、'ヘリオトロンJにおけるICRFによる高速イオンエネルギースペクトルの空間・磁場配位依存性'、第29回プラズマ・核融合学会年会、2012年11月28日—30日(30E22P)、春日市クローバープラザ。
- ④ 岡田浩之、和多田泰士、村上弘一郎、小林進二、大島慎介、武藤敬、木島滋、史楠、臧臨閣、杉本幸薫、福島浩文、荒井翔平、沙夢雨、劍持尚輝、永榮蓉子、笠嶋慶純、原田伴誉、中村雄一、橋本紘平、中村祐司、佐野史道、李炫庸、水内亨、長崎百伸、南貴司、山本聡、'ヘリオトロンJにおけるICRF加熱で生成された高速イオンの解析'、第29回プラズマ・核融合学会年会、2012年11月28日—30日(30E10P)、春日市クローバープラザ。
- ⑤ H. Okada, H. Watada, Y. Wada, S. Kobayashi, H. Y. Lee, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, T. Minami, S. Yamamoto, S. Ohshima, T. Mutoh, S. Konoshima, K. Mukai, L. Zhan, H. Yashiro, T. Minami, T.

Kagawa, S. Arai, K. Mizunoa, F. Sano, "Characteristics of ICRF Minority Heating for the Bumpiness and Resonance Position in the Magnetic Field of Heliotron J", 18<sup>th</sup> ISHW and APPTC, Jan.29—Feb.1, 2012 (P3.14), ANU, Australia.

- ⑥ 和多田泰士、岡田浩之、小林進二、李炫庸、水内亨、長崎百伸、花谷清、南貴司、山本聡、大島慎介、武藤敬、木島滋、向井清史、臧臨閣、荒井翔平、香川輔、南貴之、和田善信、水野浩志、佐野史道、'ヘリオトロンJにおけるICRF加熱での高速イオンピッチ角及び空間位置依存性'、第28回プラズマ・核融合学会年会、2011年11月22日—25日(23P035-P)、金沢県立音楽堂。
- ⑦ 岡田浩之、和多田泰士、和田善信、小林進二、李炫庸、水内亨、長崎百伸、南貴司、山本聡、大島慎介、武藤敬、木島滋、臧臨閣、杉本幸薫、福島浩文、荒井翔平、沙夢雨、劍持尚輝、永榮蓉子、笠嶋慶純、原田伴誉、中村雄一、橋本紘平、中村祐司、佐野史道、'ヘリオトロンJにおけるICRF加熱の共鳴位置による加熱特性の変化'、第28回プラズマ・核融合学会年会、2011年11月22日—25日(23P026-P)、金沢県立音楽堂。
- ⑧ H. Okada, K. Nomura, S. Kobayashi, H. Y. Lee, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, T. Minami, S. Yamamoto, S. Ohshima, M. Takeuchi, S. Konoshima, T. Mutoh, K. Mukai, K. Yamamoto, M. Suwa, H. Yashiro, H. Yoshino, Y. Nakamura, K. Hanatani, F. Sano, "Heating Position Dependence of Energy Spectra of Fast Ions Generated by ICRF Heating in Heliotron J", 20th International Toki Conference on the Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science December 7—10, 2010 (P1-68), Ceratopia Toki, Toki.
- ⑨ 野村航大、岡田浩之、和多田泰士、小林進二、李炫庸、水内亨、長崎百伸、花谷清、南貴司、山本聡、大島慎介、竹内正樹、武藤敬、木島滋、向井清史、山本健士、諏訪勝重、八代浩彰、吉野隼生、佐野史道他、'ヘリオトロンJにおけるICRF加熱での高速イオンのピッチ角及び空間位置依存性の実験的考察'、第27回プラズマ・核融合学会年会、2010年11月30日—12月3日(02P53)、北海道大学学術交流会館。
- ⑩ 岡田浩之、野村航大、和多田泰士、小林進二、李炫庸、水内亨、長崎百伸、南貴司、山本聡、大島慎介、竹内正樹、武藤敬、木島滋、向井清史、山本健士、諏訪勝重、八代浩彰、吉野隼生、佐野史道、'ヘリオトロンJにおける少数イオンモードでのICRF加熱の数値解析'、第27回プラズマ・核融合学会年会、2010年11月30日—12月3日(02P52)、北海

道大学学術交流会館.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡田 浩之 (OKADA, Hiroyuki)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：50169116

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：