

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 18 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：23360411

研究課題名(和文) 高速電子テイルのピッチ角制御による ECH 方式プラズマ電流立上げの改善

研究課題名(英文) Improvement of ECH-driven plasma current startup by control of pitch angles of fast tail electrons

研究代表者

前川 孝 (Maekawa, Takashi)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：20127137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000 円、(間接経費) 4,110,000 円

研究成果の概要(和文)：実用炉に向けて建設コストの低減が重要課題である。中心ソレノイド(CS)を小型にして低アスペクト比プラズマを実現することはコスト低減の決め手となる。このときプラズマ電流を立上げる手段が必要となるが、プラズマの近傍に構造物を要しないECH/ECCD方式が炉工学的に最適である。正常波の弱磁場側からの入射によるプラズマ電流立上げ方法として、斜め入射した正常波の内壁での鏡面反射により生じるX波を用いる方式が大型装置で有望であることを理論・実験で示した。加えて、高域混成共鳴層でのモード変換による電子バーンスタイン波を用いる方法も有望であることを小型の低アスペクト比トラス実験装置で示した。

研究成果の概要(英文)：One of issues to realize fusion power plant is reduction of the construction cost. While low aspect ratio torus plasma with a slim center solenoid is promising for cost reduction, non-inductive alternative to start up the plasma current is required. Among various methods of non-inductive start up the ECH/ECCD method is promising since it needs no structure in the vicinity of the plasma. It has been theoretically and experimentally shown that X wave mode-converted upon mirror reflection on the inboard wall from the oblique O wave injected from the lower field side is useful for the start up in large fusion devices. It has been also shown in a small device of the Low Aspect ratio Torus Experiment device that Electron Bernstein waves mode-converted at the upper hybrid resonance layer is useful to start up the plasma current.

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：ECH/ECCD 電子バーンスタイン波 無誘導磁気面形成 プラズマ電流立上げ

### 1. 研究開始当初の背景

将来の実用炉に向けての重要課題の一つが建設コストの低減である。中心ソレノイド (CS) をスリムにして低アスペクト比の高性能プラズマを実現することはコスト削減の決め手となる。このとき従来のフルサイズCSに代わりプラズマ電流を立上げる手段が必要となるが、炉心プラズマ近傍に構造物を要しない電子サイクロトロン加熱・電流駆動 (ECH/ECCD) による方式が炉工学的に最適である。

しかし、ECH/ECCD は電流を運ぶ高速電子が主に磁場に垂直方向に加速されて捕捉軌道に入り易いという弱点を持つ。加えて、トカマク炉の ECH/ECCD は短ミリ波帯の大電力電磁波を弱磁場側から正常波モードで EC 共鳴層に入射して行すが (異常波モードは EC 共鳴層より外側にあるサイクロトロン遮断層で反射され EC 共鳴層に辿り着かない) プラズマ電流起動時は、プラズマの温度が低く、正常波モードの吸収が弱いという難点が予想されていた。

### 2. 研究の目的

通常の正常波の弱磁場側からの入射によるプラズマ起動とプラズマ電流立ち上げ方式の弱点を克服して ECH 方式プラズマ電流立ち上げの改善を達成できる方法を見出すことを目的とした。

### 3. 研究の方法

正確には、EC 共鳴により共鳴電子は磁力線方向運動量とエネルギーを得るが、その比は  $N_{\parallel}/c$  で与えられる。ここで  $N_{\parallel}$  はミリ波の磁力線方向屈折率、 $c$  は光速である。電磁波モードである正常波や異常波では  $N_{\parallel}$  を 1 に近づけることは困難であるが、静電波モードである電子バーンスタイン (EB) 波では 1 を超えることが可能であり、共鳴電子が捕捉軌道に入ることを回避できる。また、EB 波は低温のプラズマでも強く吸収される。

このことを考慮して、本研究開始時には (1) 磁力線方向に大きな屈折率を持つ EB 波による ECH/ECCD によりピッチ角の上昇を抑え、(2) 多重極磁場により捕捉電子の運動に摂動を加えてそのピッチ角を下げて捕捉軌道から周回軌道に送り込む、という二つの着想を小型の低アスペクト比トーラス実験 (Low Aspect ratio Torus Experiment) 装置における実験で検証することを計画した。

当初この考えで研究を進めたが、LATE 装置の実験では①入射マイクロ波から EB 波へのモード変換効率を高めることが第一に重要であること、②多重局摂動磁場の方法は必ずしも有効ではないこと、が判明した。

一方、理論解析を進めた結果、弱磁場側からの正常波モードでの入射の場合でも入射波が  $N_{\parallel} \sim 0.3$  程度の入射屈折率を持てば、強磁場側の容器壁では  $N_{\parallel} \sim 0.7$  となり、鏡面反射により高効率で異常波にモード変換し、こ

の異常波が強磁場側から EC 共鳴層に近づくとき、低温のプラズマの場合でも強く吸収されることが判明した。その後大型装置である韓国 KSTAR トカマクにおいてこの方式の実験を行う機会を得て、有効であることが分かった。

### 4. 研究成果

#### (1) 第一伝播領域 EB 波への高効率モード変換 (LATE 実験) :

図 1 に示す様に ECR 層の位置 ( $R_{\text{ECR}}$ ) により放電が大きく異なった [©Uchida et al.]。すなわち  $R_{\text{ECR}}=18.5 \text{ cm}$  の場合に比較して  $R_{\text{ECR}}=21.3 \text{ cm}$  の場合のプラズマ電流値は約 1 kA 大きい 9.5 kA に達し、赤道面上水平コードでの線積分密度は約 3 倍に上昇した。線平均密度で評価すると、プラズマ遮断密度の約 7 倍に達する。

後者の場合、高域混成共鳴 (UHR) 層は基本 EC 共鳴層と第 2 EC 共鳴層の間にあり、第 2 EC 共鳴層を横切って伝わった入射電磁波が UHR 層で EB 波にモード変換し、この EB 波がプラズマ中心にある基本 EC 共鳴層に伝播し吸収されることが期待でき、閉じ込めの良好なプラズマ中心部を加熱する。一方、前者の場合、UHR 層は第 2 EC 共鳴層の外にあり、モード変換した EB 波は第 2 EC 共鳴層近傍で吸収され、プラズマ中央部に伝わらない。

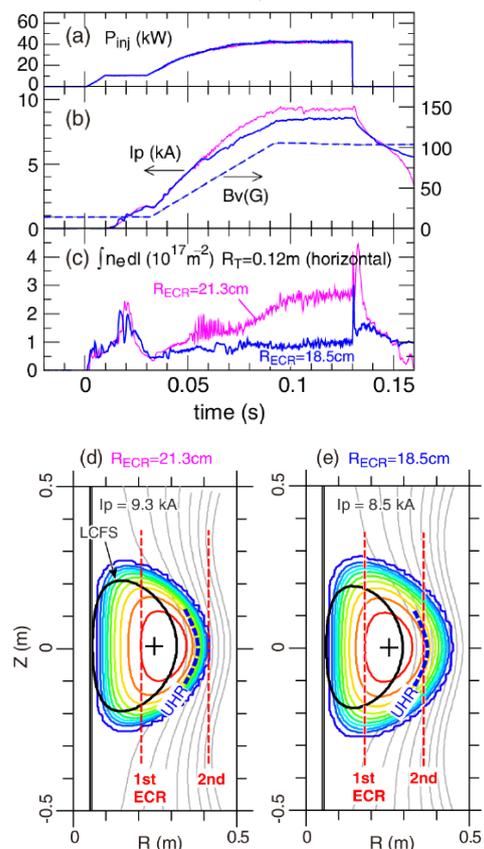


図 1 EC 共鳴層を 21.3 cm に置いた場合と 18.5 cm の場合の放電波形 (a-c) と電流分布 (d, e)

加えて、AXUV 検出器列による超紫外領域での発光分布や不純物線の測定により後者の場合、プラズマ中心部のバルク電子温度は  $T_e \sim 100\text{eV}$  と推定され、電流を運ぶ高速電子のみでなく、バルク電子の加熱も顕著であることが分かった。

## (2) 偏波調整による EB 波への高効率モード変換 (LATE 実験) :

LATE 装置での実験のようにプラズマ径 (約 30cm) に比べて、入射波の自由空間波長 (約 12.5cm) が十分に短くない場合は、電磁波の斜め入射による EB 波への高効率モード変換は、通常の OXB 法では得られない。この場合、最適偏波は楕円偏波になり、その楕円度、電場回転の向き、楕円軸の傾斜角等のパラメータは UHR 層での密度勾配長等を用いて数値解析で得られる。この偏波の対として EB 波への結合がゼロになるヌル偏波も存在する [⑦ Noguchi et al.]. 偏波の効果を実験するために任意の楕円偏波を得るための偏波器が必要になり、図 2 の原理を用いて、2.45GHz 用偏波器を制作した。

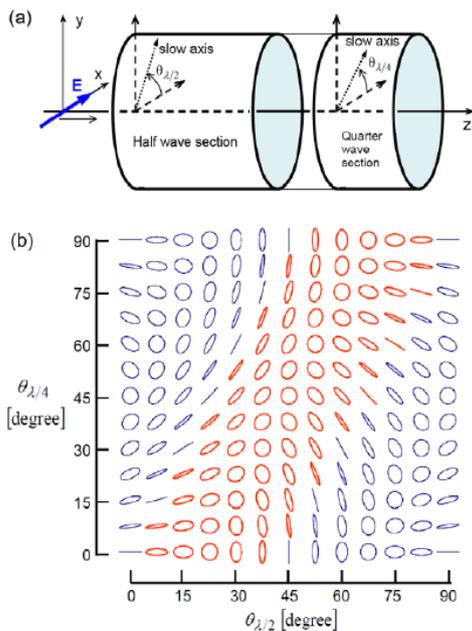


図 2 円形 TE11 モード導波管型楕円偏波器。水平直線偏波の入射波は半波長部と 1/4 波長部を通過し、楕円偏波になる [⑦ Noguchi et al. ]

LATE 装置は 4 台の 2.45GHz マグネトロンからのマイクロ波を 4 系統の導波管で真空容器に導き、4 本の円形導波管開口ランチャーから入射するが、図 3 に示す様にそのうちの 1 系統に、この偏波器を取り付け、最適化した偏波で入射して、偏波の効果をしらべた。残りの 3 系統はすべて直線偏波で電場の向きは赤道面に平行である。

この 3 系統の偏波は、図 4 (b) に示す様に、

放電初期の低密度プラズマに最適の偏波に近い。一方、密度が高い後期のプラズマでは最適偏波は、3 系統の偏波と大きく異なる。

最適偏波の場合は最後まで高密度放電が維持できるが、ヌル偏波の場合は後半に向かって密度が上昇すると放電を維持できない

一方、ヌル偏波で入射した場合は UHR 層から全反射であるが、これが容器壁等で反射して再度 UHR 層に向かう場合はヌル偏波ではなく一部の電力は EB 波へモード変換すると期待できる。図 4 (c) に示す電力は、最初のモード変換によるモード変換電力を示したものである。図 4 (c, d, e) を比較すると、このような多重反射により実効的にモード変換率が上昇していると推察できる。

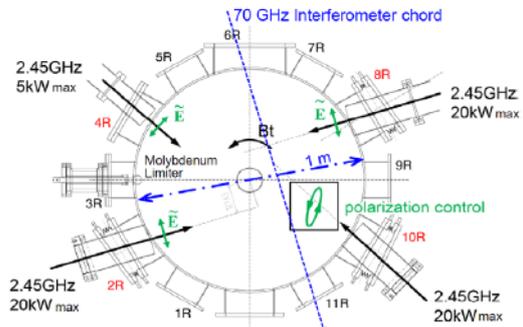


図 3 LATE 装置 2.45GH ランチャー

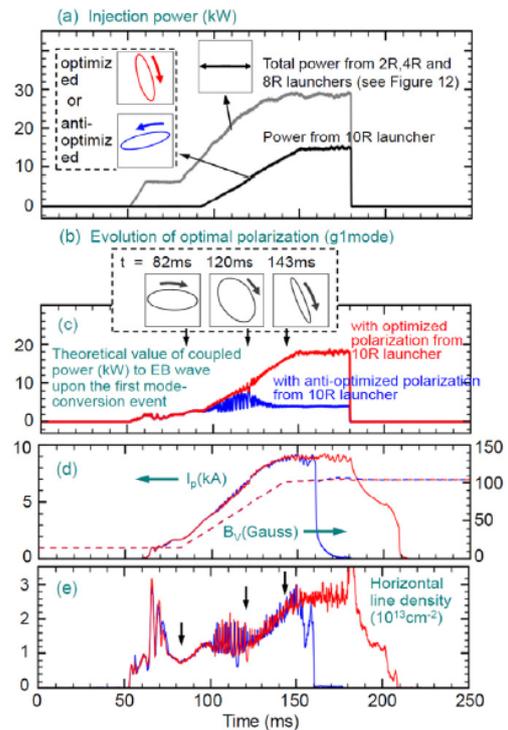


図 4 放電後期の高密度プラズマに最適とヌルである偏波を比較した実験。最適偏波の場合は最後まで高密度プラズマが維持できるが、ヌル偏波の場合、放電は維持できない。

(3) 大型装置での弱磁場側からの正常波の斜め入射 (理論解析) :

図5および図6に示すように、波動の線形理論によると弱磁場側からの正常波(O)モードでの入射の場合でも  $N_{//} \sim 0.3$  程度の入射屈折率であれば、強磁場側の容器壁では  $N_{//} \sim 0.7$  となり鏡面反射により高効率で異常波(X)にモード変換し、この異常波が強磁場側から EC 共鳴層に近づくとき、低温のプラズマの場合でも強く吸収される [④T. Maekawa].

磁場に斜めに伝播する X 波の偏波は大きな左回転成分を持ち、低速の電子であっても基本共鳴で、大きな吸収をうける。

大型装置では新古典テアリングモードの安定化などを目的として弱磁場側からの正常波モードの斜め入射を行う。この標準的な入射法に加え、内壁にミリ波に対して鏡面反射を可能にする滑らかな導体を設置するのは容易であり、この内壁での O X 変換方式は大型装置の電流立ち上げに有望である。

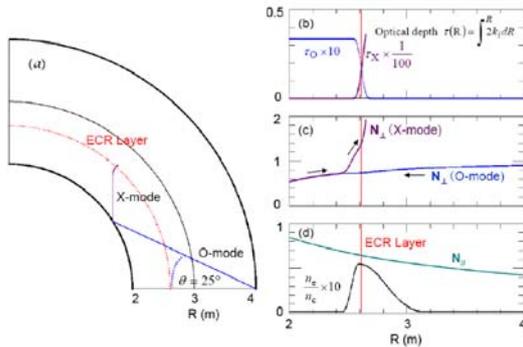


図5 大型装置での正常波(O)モードの斜め入射。内壁での反射で異常波(X)モードに変換され ECR 層で完全吸収される。

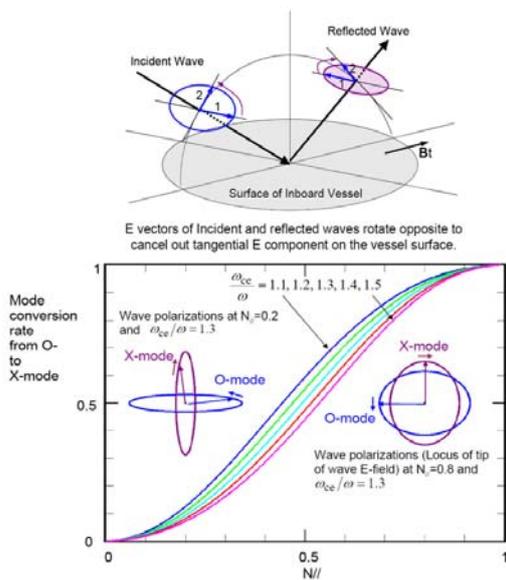


図6 導体壁上での鏡面反射により  $N_{//}$  の大きな正常波(O)モードは高効率で異常波(X)モードに変換される。

(4) KSTAR 装置での弱磁場側からの正常波の斜め入射実験 :

平成 24 年秋に韓国 KSTAR において前節で述べた正常波の斜め入射方式の実験を行った。実験では 84GHz、180kW、2 秒のミリ波パルスにより 14kA までプラズマ電流を立ち上げることができた。磁気解析によると直径 50cm の磁気面が形成された。この磁気面の形成は軟 X 線放射分布や平衡解析の結果にも表れていた。しかし残念なことに、ミリ波パルス終了の 0.2 秒前に、内壁上にホットスポットが生じ、放電が中断した。ホットスポットからの不純物ガスの噴出により、プラズマが急速に冷却されたことによると推察される。

このような ECH による立ち上げ放電では、最初に荷電分離を中和すべくバルク電子圧力駆動のプラズマ電流が生成され、外部垂直磁場  $B_v$  にその自己場が加わり、ミラー磁場が形成される。ミラー比の増大と電子圧力の増大が相呼応してプラズマ電流がさらに増えると高速電子の閉じ込めが大幅に改善され、ECH とピッチ角散乱により高速電子群が生じる。その一部は通過軌道を取り、その電流による磁場が加わり初期磁気面が発生する [④T. Maekawa].

一方、初期磁気面を囲むミラー領域において相対論的エネルギーにも達する捕捉電子群が発達し、容器壁に到達してホットスポットを生じると推察される。今後は捕捉電子群の発達を抑制しつつ、得られた磁気面内の ECCD により磁器面を大きくする方法を見つける必要がある。

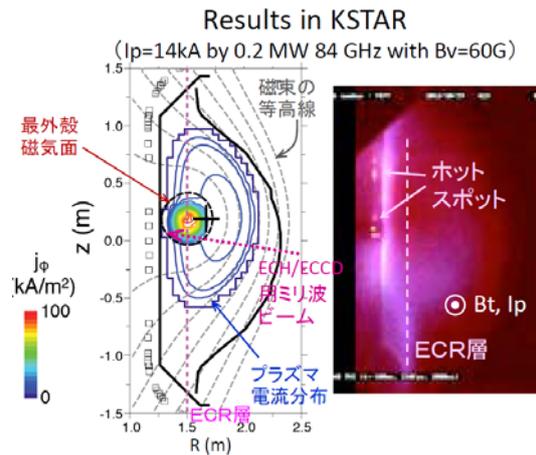


図7 KSTAR での 14kA 放電の中断直前のプラズマ断面とホットスポット。

## 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 7 件)

- ① T.Maekawa, T.Yoshinaga, H. Tanaka, M.Uchida, F. Watanabe, Plasma Science and Technology, 査読有, Vol.13, 2011, pp342-346, DOI: 10.1088/1009-0630/13/3/13
- ② M.Uchida, T.Maekawa, H.Tanaka, S.Ide, Y.Takase, F.Watanabe, S.Nishi, Nuclear Fusion, 査読有, Vol.51, 2011, 063031(9pp) DOI: 10.1088/0029-5515/51/6/063031
- ③ F.Watanabe, M.Uchida, H.Tanaka, T.Maekawa, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.7, 2012, 1202005(3pp) DOI: 10.1585/pfr.7.1202005
- ④ T.Maekawa, T.Yoshinaga, M.Uchida, F.Watanabe, H.Tanaka, Nuclear Fusion, 査読有, Vol.52, 2012, 083008(19pp), DOI: 10.1088/0029-5155/52/8/083008
- ⑤ K.Kuroda, M.Uchida, H.Tanaka, T.Maekawa, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.7, 2012, 1302098(4pp), DOI: 10.1585/pfr.7.1302098
- ⑥ M.Uchida, T.Maekawa, H.Tanaka, F. Watanabe, Y. Noguchi, K. Kuroda, S. Omi, T. Fukunaga, R. Hayashi, T. Kanemitsu, J. Katsuma, H. Mizogami, Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conf. San Diego, 2012 (Vienna: IAEA), 査読有, EX/P6-18,(8pp)
- ⑦ Y.Noguchi, M.Hibino, M.Uchida, H.Tanaka, T.Maekawa, Plasma Phys. Control. Fusion, 査読有, Vol.55, 2013,125005(12pp) DOI: 10.1088/0741-3335/55/12/125005

[学会発表] (計 12 件)

- ① 打田正樹、田中仁、前川孝 他 10 名、「LATE での遮断密度の 10 倍の電子密度領域での球状トカマク形成」、Plasma Conference 2011、2011 年 11 月 22 日、金沢市石川県立音楽堂
- ② 前川孝、田中仁、打田正樹、渡辺文武、吉永智一、「磁場を横切る高速通過電子群による初期磁気面形成」Plasma Conference 2011、2011 年 11 月 22 日、金沢市石川県立音楽堂
- ③ H.Tanaka, M.Uchida, F.Watanabe, Y. Noguchi and T.Maekawa, "Production of High Energy Tail Electrons by Electron Bernstein Waves during the Current Start-up Discharges in the LATE Device", 19th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas, Newport, Rhode Island, USA, June 1-3, 2011
- ④ H.Tanaka, T.Maekawa, M.Uchida, F. Watanabe, Y. Noguchi, "Initiation of closed flux surfaces and subsequent current ramp-up by ECH/ECCD in the LATE

device", The 8th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", H10, Nizhny Novgorod, Russia, July 9 - 16, 2011

- ⑤ M.Uchida, T.Maekawa, H.Tanaka, F. Watanabe, Y.Noguchi, "Formation of spherical tokamak at ~10 times the plasma cutoff density by electron Bernstein wave in the LATE device" 36th EPS Conference on Plasma Physics, Strasbourg, France / 27 June - 1 July 2011
- ⑥ 前川孝、黒田賢剛、「磁場を横切る両極性電位：トロイダル ECR プラズマにおける流れの調整役」、プラズマ核融合学会、クローバープラザ (福岡県春日市)、2012 年 11 月 29 日
- ⑦ T.Maekawa, R.Hayashi, F.Watanabe, H.Tanaka, M.Uchida, "Fast magnetic activity accompanied with plasma ejection across last closed flux surface in an EC started up plasma in the LATE device" 17th International Spherical Torus Workshop, September 16-19, 2013, at the York Plasma Institute, York, UK
- ⑧ T.Maekawa, "Recent Progress in ECH/ECCD Experiments on LATE", 9th Asian Plasma and Fusion Association Conference, November 5<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>, 2013, Hotel Hilton, Gyeongju City, Korea
- ⑨ H.Tanaka, "CS-less Tokamak Start-up by ECH/ECCD in KSTAR", 9th Asian Plasma and Fusion Association Conference, November 5<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>, 2013, Hotel Hilton, Gyeongju City, Korea
- ⑩ 前川孝, 「プラズマ波動とモード変換の物理」、日本物理学会 秋の大会、2013 年 9 月 25-28 日、徳島大学工学部
- ⑪ H.Tanaka, M.Uchida, T.Maekawa, Y-S. Bae, M. Joung, J. H. Jeong, "Non-inductive Current Start-up by Electron Cyclotron Heating and Current Drive in KSTAR", 18th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, April 22<sup>nd</sup>-25<sup>th</sup>, 2014.
- ⑫ M.Uchida, T.Maekawa, H.Tanaka, Y. Noguchi, "Noninductive formation of an extremely overdense spherical tokamak by electron Bernstein wave heating and current drive on LATE" 18th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, April 22<sup>nd</sup>-25<sup>th</sup>, 2014.

〔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

Title: Electron cyclotron wave can startup tokamak

<http://iopscience.iop.org/0029-5515/labtalk-article/46687>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 孝 (MAEKAWA Takashi)

研究者番号：20127137

(2) 研究分担者

田中 仁 (TANAKA Hitoshi)

研究者番号：90183863

(3) 研究分担者

打田正樹 (UCHIDA Masaki)

研究者番号：90322164