

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420885

研究課題名(和文) オーバーデンスプラズマにおけるBX0モード変換を用いた電子温度分布計測

研究課題名(英文) Measurement of Electron Temperature Profile using BX0 Mode Conversion in Overdense Plasmas

研究代表者

長崎 百伸 (Nagasaki, Kazunobu)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号：20237506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマにおいて、電子サイクロトロン波周波数帯域の電磁波はカットオフ密度と呼ばれるアクセス密度上限を克服すべく、電子バーンスタイン波(EBW)を用いた高密度領域での電子温度分布計測法の可能性を探った。有限ベータ効果を含む3次元磁場配位を考慮に入れたレイトレーシング計算コードKRAYを開発し、既存アンテナシステムを用いてOXモード変換効率のモード変換効率として100%に近い値が得られることを明らかにした。この計算結果を基にEBW検出用8チャンネルラジオメータシステムを製作し、Heliotron Jプラズマ実験装置においてnWレベルの電子サイクロトロン波を検出できるシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：We have studied the possibility of electron temperature profile measurement using electron Bernstein waves (EBW) in order to overcome accessible density limit, so called cut-off density. A ray tracing code, KRAY, has been developed to trace the BX0 mode conversion, which includes three dimensional magnetic configuration with finite beta. The calculation results show that the OX mode conversion efficiency of nearly 100% is available with current ECRH antenna system. Based on this calculation, we have designed and constructed a 8-channel radiometer system for EBW detection. We confirmed that the electron cyclotron waves of nW level power can be measured.

研究分野：核融合学

キーワード：電子バーンスタイン波 カットオフ モード変換 電子温度計測

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマにおいて、電子サイクロトロン波の吸収と放射は電子加熱・非誘導電流駆動や電子温度分布計測等に広く応用されている。従来、正常波 (O-mode) や異常波 (X-mode) といった電磁波が用いられているが、電磁波にはカットオフ密度と呼ばれるアクセス密度上限が存在し、カットオフ密度以上での電磁波の利用は困難なものとなっている。高密度領域における電子温度計測としてはトムソン散乱法を用いた分布計測法があるものの、10msec 程度毎のパルス的な計測のため、H-mode や内部輸送障壁などのタイムスケールの速い遷移現象の時間発展を追うことができない。高密度プラズマの閉じ込め・輸送特性を調べるためには高密度プラズマに利用可能な高時間分解能をもつ計測手法を開発することが望まれている。

高密度領域における電子温度分布計測の手法の一つとして、電子密度に関係なくプラズマ中を伝搬できる電子バーンシュタイン波 (Electron Bernstein Waves, EBW) の利用が提案されている。EBW は、カットオフ密度が存在しない、低電子温度 ($\sim 10\text{eV}$) においても 100% 近い 1 回通過吸収がある、という長所を有する。しかしながら、EBW は静電波であるため直接計測することができず、モード変換を介して電磁波の形で計測される。モード変換の一つである EBW-slow X-mode-O-mode (BXO) の場合、共鳴層から放射された EBW が高域混成共鳴層にて slow X-mode に変換され、さらにカットオフ層で O-mode に変換されてプラズマ外部へと伝搬する。

高密度プラズマにおけるモード変換を介した EBW の実験的実証は 1997 年に H. Laqua によりドイツ・マックスプランク研究所の W7-AS 装置において初めて行われた (H. Laqua, Phys. Rev. Lett. 1997)。その後、大型装置における EBW による加熱の検討が行われた (K. Nagasaki, Plasma Phys. Control. Fusion 2002)。低磁場のため通常の ECE 計測が困難な球状トラスにおいても EBW を用いた電子温度計測が試されているが、周波数が低く局在化した計測がしづらいことなどの問題点があり、確立した計測手法とは言えない状況にある。カットオフ密度を超えた電子密度領域での電子温度分布計測としての有用性は依然、実験的な検証が待たれている。

2. 研究の目的

プラズマ実験装置において EBW を用いた電子温度分布計測を行い、大型実験装置や核融合原型炉における高密度領域電子温度分布計測法としての可能性を探ることを本研究の目的とする。BXO モード変換を介して電子サイクロトロン共鳴層から放射される

電子バーンシュタイン波にアクセスし、多チャンネルラジオメータを用いて電子温度分布の計測システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

高密度炉心プラズマにおける EBW を用いた電子温度分布時間発展計測に向け、数値解析コード及び計測システムを開発する。電磁波および静電波のための何光学近似を用いたレイトレーシングコード開発し、OX モード変換窓、EBW 放射位置の特定を行う。また、レイトレーシング計算結果をもとに、電子温度分布計測のための ECE 計測システムを設計・構築するとともにその動作を確認する。Heliotron J プラズマ装置におけるオーバードレンスプラズマでの電子温度分布を計測することを試みる。

4. 研究成果

4.1 O-X-B モード変換のためのレイトレーシングコード開発

トロイダル磁場閉じ込め配位において、低磁場側から入射された O-mode は入射角が最適角近傍のときカットオフ層において slow X-mode へと変換される。O-mode カットオフは次の式で与えられる。

$$\cos \theta^{opt} = \sqrt{\frac{Y}{1+Y}} \quad (1)$$

ここで、 θ は波数ベクトルと磁場ベクトルがなす角、 $Y = \omega_{ce}/\omega$ 、 ω_{ce} は電子サイクロトロン各周波数、 ω は波の角周波数である。

O-X モード変換窓を求めめるため、まず、電磁波のレイトレーシングコード TRAVIS を用いた。TRAVIS code は任意の 3 次元磁場配位における ECH/ECCD や ECE 計測のために開発されたコードである。磁場配位は VMEC code によって与えられる。GUI 等の良さから、カットオフ位置における平行、垂直双方の屈折率を比較的簡単に求めることができる。

O-X モード変換効率はこの式によって与えられる。

$$T(N_y, N_z) = \exp \left\{ -\pi k_0 L_n \sqrt{\frac{Y}{2}} \left[2(1+Y)(N_{z,opt} - N_z)^2 + N_y^2 \right] \right\} \quad (2)$$

ここで、 $N_{z,opt}^2 = \cos^2 \theta^{opt} = Y/(1+Y)$ 、 L_n は密度のスケール長である。図 1 は 35GHz での O-X モード変換効率の等高線図である。50% 以上のモード変換効率は、電子密度 $n_e = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ において、トロイダル角 8 度、ポロイダル角 3 度の範囲で得られている。実験でのアクセス可能トロイダル角はアンテナミラーの駆動範囲やポート境界で制限されるものの、50% 以上の変換効率はアクセス可能角の範囲で得るこ

とができる。モード変換効率は密度スケール長の関数であるので、O-X 変換窓は密度分布形状が変わらずに密度が高くなると広くなり、O-X 変換ポイントを探るうえでは、有利となる。

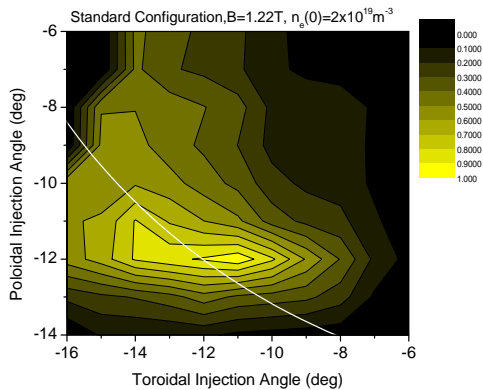


図1 O-Xモード変換窓の等高線図

Heliotron J 装置における O-X-B モード変換を調べるため、B-RAY code からアップグレードしたレイトレーシングコード KRAY を開発した。B-RAY code からの改良点は、一つには VMEC code によって与えられる磁気面、磁場データを用いていることである。これにより、有限ベータでの磁場データ、磁気面を取り扱うことができるようになり、より正確な EBW 放射位置を求めることが可能となった。

K-RAY code は幾何光学近似を用いた放射輸送方程式を解いており、電磁波の分散関係は冷たいプラズマ近似で与え、静電波の分散関係は熱いプラズマ近似で与えている。

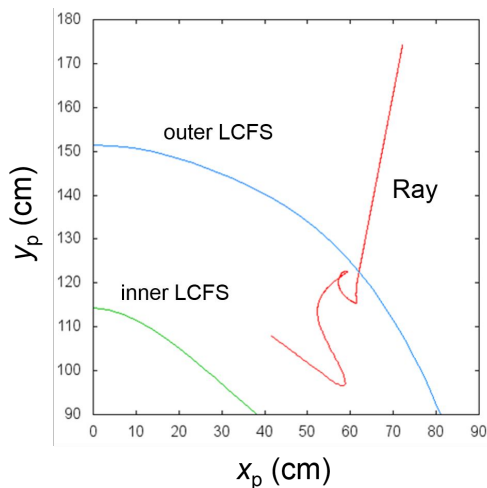


図2 O-X-Bモード変換過程でのレイの軌跡

図2は Heliotron J 標準磁場配位における O-X-B モード変換過程でのレイの軌跡の一例である。また、図3はレイの軌跡に沿った屈折率の径方向分布を示している。K-RAY code においても、O-X モード変換角を求めたところ、TRAVIS code を用いた計算結果と良い一

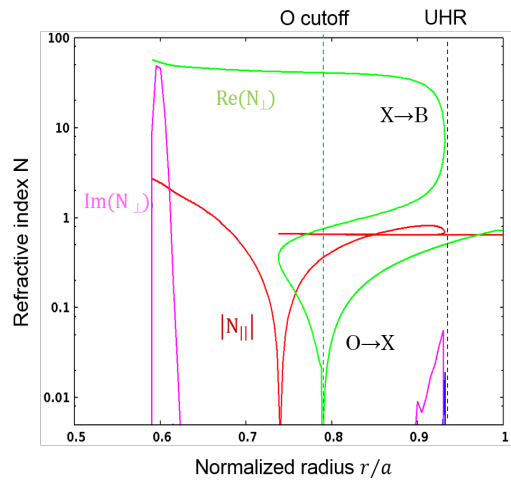


図3 屈折率の径方向分布

致が見られた。O-mode カットオフにおいて磁場に垂直方向の屈折率はゼロとなり、O-mode は slow X-mode へと変換される。返還後、X-mode は高域混成共鳴 (UHR) 層に到達し反射するまで高密度領域へと伝搬する。X-mode が UHR 層に近づくにつれて屈折率の垂直成分が急激に増大し、その結果、波の位相速度が低下する。このプロセスでは、X-mode の電場は磁場ベクトルとほぼ平行となり、静電波である EBW へと変換される。生成された EBW は高密度領域へと伝搬し、ドップラーシフトサイクロトロン共鳴条件を満足する位置において垂直屈折率の虚数成分が急激に大きくなり、結果、波のエネルギーは電子の運動エネルギーへと移行する。

図4は EBW の吸収位置を示しているが、O-X-B モード変換の可逆性から、EBW の放射位置を反映している。プラズマベータ値が増大するにつれて磁気軸はシャフラノフシフトによりトラス外側へと移動し、放射位置もそれに合わせて移動する。計算結果によれば、プラズマ中心領域の放射周波数は $B=1.20\text{T}$ において 37GHz であり、その場合、 $r/a=0.1$ からの放射となる。本計算では放射位

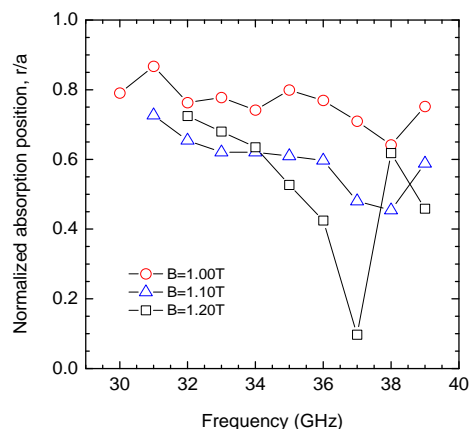


図4 入射波吸収位置の周波数依存性

置は最適入射条件で決定されるレイによって求めているが、O-X 変換窓は有限の領域であり、そのため、放射分布のより正確に求めるには、最適化されていないレイの軌跡のデータも含める必要がある。

電子密度揺動はビームの発散を引き起こす可能性があり、O-X 変換効率を低下させる要因となりうる。ポロイダル方向のベクトルを持つ揺動を考えてみる。カットオフ層粗さの静的記述は、下記の確率密度関数によってなされる。

$$p(N_y) = \frac{\lambda_y}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left\{-\frac{N_y^2\lambda_y^2}{(1-N_y^2)2\sigma_x^2}\right\} (1-N_y^2)^{-3/2}, \quad (3)$$

ここで、 σ_x は揺動の振幅標準偏差、 $\sigma_x = L\tilde{n}_e/n_e$, λ_y はポロイダル相関長である。この密度揺動を考慮に入れた修正 O-X 変換効率 T_{mod} は次のように記述される。

$$T_{\text{mod}}(N_z) = \int_{-1}^1 T(N_z, N_y) p(N_y) dN_y \quad (4)$$

図 5 は修正された O-X モード変換効率 T_{mod} の視野角依存性である。ここで、 ω_{ce} は ω に等しいと仮定した。電子密度揺動は最適角においてもモード変換効率を低下させる。Heliotron J においては電子密度揺動に関する詳細なデータが得られていないものの、本計算結果 8% の電子密度揺動が 20% の変換効率の低下を引き起こす。電子密度勾配がゆるやかになるにつれて電子密度揺動の効果はより強くなることから、急峻な電子密度温度勾配をもつプラズマが O-X モード変換には有利である。この吸収な電子密度勾配はヘリカル系での ECH プラズマの周辺領域で典型的に観測されており、電子密度揺動の影響が抑えられている可能

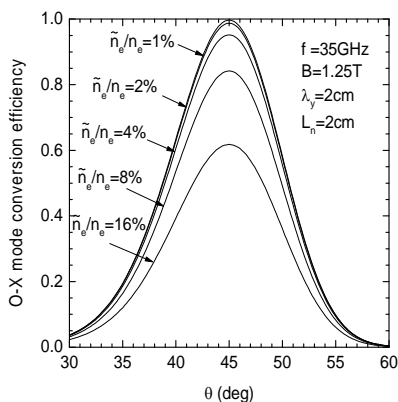


図 5 O-X 変換効率に対する電子密度揺動の効果

性はある。

4.2 EBE 計測システムの開発

レイトラシング計算結果を基に、ECE 計測システムの開発を行った。設計した EBE 計測システムは、駆動機構付きアンテナ、導波管伝送ライン、そして、ヘテロダインラジオメータから構成される。既存の 70GHz ECRH/ECCD のランチャー及び伝送系を流用することで予算を抑えるとともに、計測ポートの確保を行うことが可能となった。既存の ECRH/ECCD システムとの共存を図るため、導波管切替器をランチャーの手前 3m の位置に取り付けた。ECRH/ECCD システムと ECE 計測システムの切り替えは手動で行うが、安全のため ECRH/ECCD システム用インターロックも取り付けしている。導波管からの放射は Gauss 光学アンテナによって集光し、また、直交偏波を同時計測できるようにも工夫している。Gauss 光学アンテナの後は Ka-band (24-42GHz) 矩形導波管を用いており、SPDT PIN スイッチを取り付け、バイアス電圧によって直交偏波をプラズマ放電中に切り替えることができる。

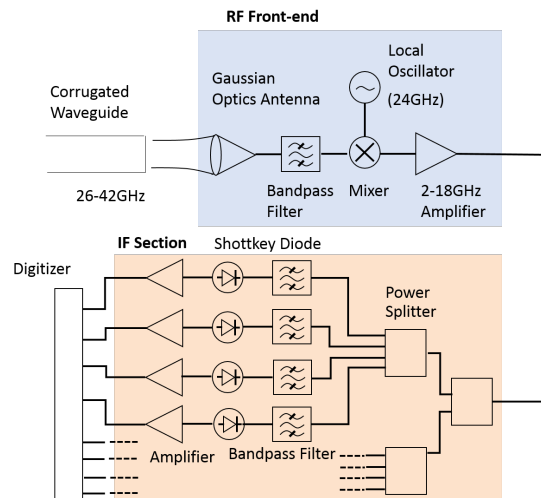


図 6 EBE ラジオメータ概要図

構築したヘテロダインラジオメータシステムを図 6 に示す。Ka-band をカバーしており、カットオフ密度領域 $0.86-2.25 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ に相当する。ラジオメータは 24 GHz がん発振器、バランス型ミキサー、ステップ減衰器、低ノイズアンプ、パワー分配器、バンドパスフィルター、ショットキーバリアダイオードから構成されている。バンドパスフィルターは 1GHz のバンド幅を持ち、26-41GHz の周波数で 8 チャンネル出力である。バンドパスフィルターの中心周波数は 2.5GHz, 4.5GHz, 6.5GHz, 8.5GHz, 10.5GHz, 12.5GHz, 14.5GHz and 16.5GHz を選択した。

このラジオメータの相対感度校正は 2 種類のマイクロ波源を入力信号として用い

て行った。一つは Ka-band ノイズソース (Hewlett Packard R347B, 26.5-40 GHz)であり、広帯域のホワイトノイズを放射する。もう一つは 26-40 GHz 周波数帯域の可変マイクロ波源で、パワー校正された 12-20 GHz 固体信号発生器 (Vaunix LMS-203, 10-20 GHz)からの出力を active frequency doubler (SAGE SFA-282SF-S1, 26.5-40 GHz)によって2 通倍し、24-40 GHz のマイクロ波を生成する。前者のマイクロ波発振源の場合、ラジオメータ出力は高域ホワイトノイズ放射入力を反映したものとなり、一方、後者のマイクロ波源の場合是不連続周波数放射となる。

図 7 は相対感度校正の結果である。2 つのマイクロ波入力源の結果は、同様の傾向を示していることがわかる。完全に一致しないのは、マイクロ波入力源の周波数特性によるものである。不連続周波数源における出力信号のゆらぎの理由は明確ではないが、ラジオメータの構成コンポーネント、特に、ミキサー、低ノイズアンプ、パワー分配器、バンドパスフィルターの特性によるものと思われる。構築したラジオメータは nW レベルのマイクロ波を検出することが可能であることを確認した。2.4GHz と 4.5GHz のバンドパスフィルタは 11-12 GHz、13.5-15 GHz の高周波成分を十分に除去できておらず、より良いフィルタに交換する必要がある。

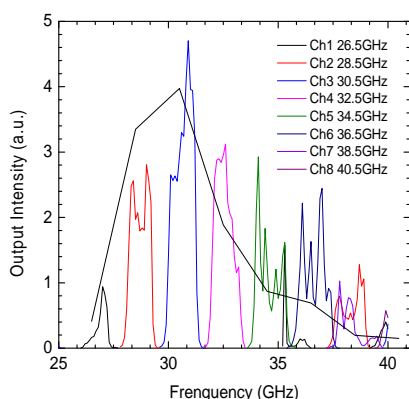


図 7 ヘテロダイナミックラジオメータの相対感度校正結果。黒の線がノイズソースを用いた校正結果、他の線が周波数スキャンしたマイクロ波源による校正結果を示している。

今後、この EBE 計測システムを用い、Heliotron J 装置においてオーバードンスプラズマでの OXB モード変換による電子温度分布計測を進めてゆく予定である。

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 6 件)

1. K. Nagasaki, Y. Nakamura, S. Kamioka, H. Igami, F. Volpe, T. Stange, K. Sakamoto, H. Okada, T. Minami, S. Kado, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Ohshima, G. Weir, S. Konoshima, N. Kenmochi, Y. Otani, Y. Yoshimura, N. Marushchenko, T. Mizuuchi, "Development of Electron Bernstein Emission Diagnostic for Heliotron J", to be published in Plasma and Fusion Research 査読あり
2. K. Nishioka, Y. Nakamura, S. Nishimura, H. Y. Lee, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, H. Okada, T. Minami, S. Kado, S. Yamamoto, S. Ohshima, S. Konoshima and F. Sano, "Neoclassical parallel flow calculation in the presence of external parallel momentum sources in Heliotron J", Phys. Plasmas 23, 032511 (2016) <http://dx.doi.org/10.1063/1.4944913> 査読あり
3. S. Ohshima, S. Kobayashi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, K. Hashimoto, N. Shi, L. Zang, K. Kasajima, N. Kenmochi, Y. Ohtani, Y. Nagae, K. Mukai, H.Y. Lee, H. Matsuura, M. Takeuchi, S. Konoshima and F. Sano, "Edge plasma responses to energetic-particle-driven MHD instability in Heliotron J", Nucl. Fusion 56 (2016) 016009 (9pp) doi:10.1088/0029-5515/56/1/016009 査読あり
4. K. Nagasaki, "Summary of ECRH/ECCD Presentations at EC18", EPJ Web of Conferences 87, 02001 (2015) 査読なし
5. L. Zang, T. Mizuuchi, N. Nishino, S. Ohshima, S. Yamamoto, Y. C. Sun, K. Kasajima, M. Takeuchi, K. Mukai, H. Y. Lee, N. Kenmochi, Y. Ohtani, K. Nagasaki, S. Kado, H. Okada, T. Minami, S. Kobayashi, N. Shi, S. Konoshima, Y. Nakamura, F. Sano, "Interpretation of Plasma Fluctuation Data from Combination Measurement of a Perpendicular-View Camera and a Langmuir Probe in Heliotron J", Fusion Science and Technology, 68 (2015) 758-765, dx.doi.org/10.13182/FST14-862 査読あり
6. K. Nagasaki, S. Yamamoto, S. Kobayashi, K. Sakamoto, Y. Nagae, Y. Sugimoto, Y. I. Nakamura, G. Weir, N. Marushchenko, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, K. Masuda, S. Ohshima, S. Konoshima, N. Shi, Y. Nakamura, H.Y. Lee, L. Zang, S. Arai, H. Watada, H. Fukushima, K. Hashimoto, N. Kenmochi, G. Motojima, Y. Yoshimura, K. Mukai, F. Volpe, T. Estrada and F. Sano, "Stabilization of energetic-ion-driven MHD modes by ECCD in Heliotron J", Nucl. Fusion 53 (2013)

〔学会発表〕(計 3 件)

1. K. Nagasaki, Y. Nakamura, S. Kamioka, H. Igami, F. Volpe, T. Stange, K. Sakamoto, H. Okada, T. Minami, S. Kado, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Ohshima, S. Konoshima, N. Kenmochi, Y. Otani, Y. Yoshimura, N. B. Marushchenko, T. Mizuuchi, "Development of Electron Bernstein Emission Diagnostic for Heliotron J and LHD", 25th International Toki Conference, Nov. 3-6, 2015, Ceratopia Toki, Japan, P1 - 92 (Poster)
2. K. Nagasaki, T. Minami, H. Kenmochi, K. Sakamoto, Y. Nakamura, H. Okada, S. Kado, S. Kobayashi, S. Yamamoto, S. Ohshima, G. M. Weir, S. Konoshima, K. Hada, Y. Ohtani, X. Lu, H. Kishikawa, N. Asavathavornvanit, K. Murakami, Y. Yoshimura, H. Igami, T. Mizuuchi, "3D Magnetic Field Effect on ECRH/ECCD in Helical Systems", 20th International Stellarator-Heliotron Workshop, 5-9 October 2015, Greifswald, Germany, P2S1-13 (Poster)
3. K. Nagasaki, "Issues on ECCD in Negative Triangular Tokamaks and DEMO Reactor", 1st Negative Triangularity Tokamak Concept Reactor Workshop, Hefei, Anhui, People's Republic of China, May 9 - 10, 2015 (Oral)

〔図書〕(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

長崎 百伸 (NAGASAKI, Kazunobu)
京都大学エネルギー理工学研究所・教授
研究者番号：20237506

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

小林 進二 (KOBAYASHI, Shinji)
京都大学エネルギー理工学研究所・助教
研究者番号：70346055

山本 聡 (YAMAMOTO, Satoshi)
京都大学エネルギー理工学研究所・助教
研究者番号：70397529

大島 慎介 (OHSHIMA, Shinsuke)
京都大学エネルギー理工学研究所・助教
研究者番号：00469610