

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360412

研究課題名(和文) 高速点火レーザー核融合に向けた高速電子エネルギー分布の時間発展計測

研究課題名(英文) Temporal evolution of fast electron energy distribution for fast ignition

研究代表者

羽原 英明 (HABARA, Hideaki)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60397734

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザーが固体物質内部に生成する高エネルギー電子をその場計測するため、物質形状そのものをチェレンコフ光の分光器とする構造とすることを考案し、ターゲット材質やプリズム構造を最適化することによりレーザーから高エネルギー電子流のエネルギー変換効率を精度よく求めた。通常のガラス材、屈折率2の高屈折率ガラス、屈折率3.5のシリコン結晶を用い、チェレンコフ光の計測波長を可視から赤外まで拡大することで、幅広いエネルギー範囲での計測を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：For in-situ measurement of a high-energy electron beam created by ultra intense laser light inside a solid material, Cherenkov emission from the electron beam was investigated using a prism target which can be a spectrometer for the Cherenkov light. Materials with different refractivity were used such as glass ($n=1.5$), high-refractive glass ($n=2.0$), and silicon crystal ($n=3.5$). We successfully obtained the electrons in a broad energy range by extending the observing wavelengths of Cherenkov emissions from visible to middle infrared.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：高強度レーザー 高速電子 高速点火 チェレンコフ光

1. 研究開始当初の背景

高速点火方式レーザー核融合[1]では、レーザー爆縮により高密度に圧縮された燃料コアをその静止時間内(~100ピコ秒)に、外部より超高強度レーザー(強度>10¹⁸W/cm²)パルス(時間幅1-10ピコ秒)を注入し、高密度燃料コア近傍にてレーザーエネルギーを高エネルギー電子に変換、この電子により瞬時に燃料コアを加熱し、高速(瞬間)に点火を行う。そのためコアは密度だけを高くすれば良いので、従来の中心点火方式で最重要課題とされてきたレーザー爆縮時の流体力学的不安定性の回避が本質的に必要なく、数分の1のレーザーエネルギーで核融合点火を達成できると考えられている。代表らのグループは既に高速点火ターゲットとして中空の金コーンを超高強度レーザーパルスの真空ガイドとして使用し、1keVまでイオン温度の加熱を世界で初めて実証した[2]。この成果は世界中から注目を集め、各国がこぞって金コーンの要素研究を開始し、また複数の研究機関において高速点火方式を採用するに至っている。

しかし高強度レーザーと固体ターゲットの相互作用で生成される高速電子流は、平均エネルギーがメガ電子ボルトを超えるような相対論的速度であり、また物質中では落雷の十万~百万個分もの電流値を持つと考えられており、自然界ではなしえないような極限状態となる。この高密度電子流の作る自己磁場は数10万テスラにもなるので、それに誘起された帰還電流が流れるターゲット中では高速電子流は前方に伝搬できるが、ターゲット外部に飛び出した瞬間この自己磁場により電子が後方に曲げられ電流が分裂する。また電荷中性を保つため、電子流が抜け出した瞬間に非常に強い静電場が励起されて電子が引き戻され、外部で計測できる電子量はさらに小さくなることを既に代表らは明らかにしている[3]。そのため、高速電子を直接計測する手法として電子とイオンとの相互作用で生成するX線計測[4]、界面で放出する遷移放射[5]、あるいはターゲット表面での磁場計測などが広く行われているが、電子のエネルギー分布や空間分布などを計算機シミュレーションより仮定しており、時間・空間発展どころか生成の様子も完全には解明されていない。特に電子ビームが伝搬広がりを持つ場合、燃料コアへの加熱効率が低下する事が危惧されているため、ターゲット内部の電子ビーム分布を計測することは高速点火レーザー核融合にとって急務である。

2. 研究の目的

本研究の目的は固体内部での高速電子流を調べることである。報告者は以前、高エネルギー電子が誘電体内で発生するチェレンコフ光に着目し、ターゲットそのものをチェレンコフ光の分光器とする構造とすること

で固体内部の電子エネルギー分布の計測に成功した(下図参照)。チェレンコフ光は電子のエネルギーに依存して伝搬方向からの放出角度が決まるため、それを分光し、異なるエネルギーをもつ電子からの放射を空間的に分離し、その強度分布を計測することで高速電子のエネルギー分布及び絶対数を計測することが可能となる。この計測手段を用い、高速電子の固体内部での空間・時間発展を明らかにすることを目標とした。

本研究では以前の結果を踏まえ、ターゲット材質やプリズム構造の最適化により高速電子流のエネルギーごとの空間、時間発展を計測することを試み、それにより高速点火レーザー核融合研究においてどの程度のレーザーエネルギー、パルス幅があれば効率的に燃料コアを加熱することができるかを判断出来ることが可能となり、高速点火実現に向けて大きく貢献することが期待できる。そのため金コーンを用いた計測を通し、将来的な大規模高速点火実験に必要な高速電子流の条件を明らかにする。

また同時にチェレンコフ光計測と他の計測手法、例えば磁場偏向電子スペクトロメータで計測した高速電子分布と比べることでターゲット裏面の静電場形成の様子が理解でき、また高速電子の伝搬距離を変化させつつ高速電子流が自己形成する電場や磁場の時間発展を計測することで、今まで計算機シミュレーションのみで提案されていたレーザープラズマ相互作用に関わる様々な物理プロセスを直接確認することが期待できる。

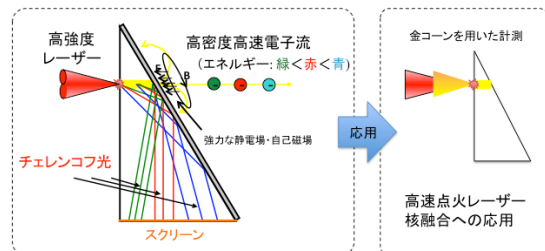


図: プリズムターゲットを用いたチェレンコフ光計測

3. 研究の方法

本研究では、チェレンコフ光を分光出来るプリズム型ターゲットを用いて、高速点火レーザー核融合に必要な、高速電子のエネルギー分布及び空間分布の時間発展を“その場”計測で明らかにする。チェレンコフ光は電子のエネルギーに依存する放出角を持つため、上図のようにプリズム内での反射により異なる放出角度を持つチェレンコフ光が底面において分離され、底面で光強度分布を計測することでエネルギー分布が得られる。明らかにする範囲としては、電子の伝搬距離を変化させることで高速電子流が空間的、時間的に変化する様子を計測し、さらに屈折率の異なるプリズム材料

を用い電子のエネルギー範囲を変化させることで高速電子流分布の空間時間発展の詳細を明らかにする。

4. 研究成果

(1) レーザーで生成される電子流は、流量が非常に大きいターゲットをイオン化しながら伝播する。チェレンコフ光は誘電体にて放出されるので、イオン化しプラズマ化された後は放出されないと考えられる。そのためイオン化の様子を計測することは本研究課題にとって重要である。そこで、高速電子流が作る電磁場を空間分解計測することで、イオン化の様子を計測する手法の開発を行った。計測手段として別のレーザービームを目的ターゲットの横に配置した固体ターゲットに照射し、TNSA(Target Normal Sheath Acceleration)というメカニズム[6]により高エネルギープロトンを生成し、そのプロトンビームをターゲットに照射する。プロトンは電磁場を感じて進行方向が曲げられるため、ターゲット透過後のプロトンビームのイメージを計測することで、電磁場の空間分布を求めることが出来る[7]。この手法を高密度プラズマ中の電子流の伝搬の様子の計測に適応するため、米国ロチェスター大学レーザーエネルギー研究所のOmegaEP レーザー施設にて実験を行った。実験は2cm角、厚み2mmの平板プラスチックターゲットにナノ秒レーザーを照射して大スケール高密度プラズマを形成し、そこに高強度レーザーを照射して高エネルギー電子流を生成する。さらに5mm離れた位置に銅平板ターゲットを垂直に置き、そこに別の高強度レーザーを照射してターゲット裏面よりプロトンビームを生成する。プロトンビームはプラズマ中を透過した後ラジオクロミックフィルム(感光フィルム)で計測した。

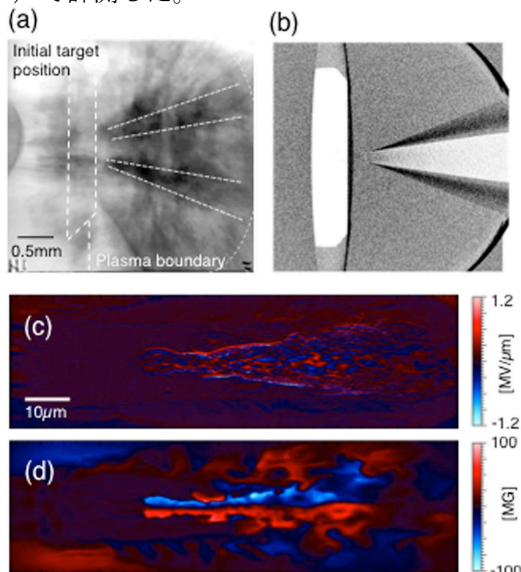


図1 : (a)プラズマ透過後のプロトンイメージ。(b)プロトン軌道計算によって再現したイメージ。(c),(d)2次元粒子シミュレーションによる電場・磁場分布[8]。

図1 (a)は実験結果を示しており、左側に点線で示すターゲットから右側に向かって半円状にプラズマが膨張している。そこに高強度レーザーを右から左に向かって照射し、照射後80ps後にプロトンビームを照射して計測した図である。三角の点線で表されるレーザーが伝搬している領域は比較的色彩が薄いのにに対し、その周辺は濃い領域が存在することが観測された。これはレーザー領域からプロトンがその外側に曲げられたことを示しており、強い電磁場が存在することを明らかにしている。次にプロトンに作用する電磁場の空間分布強度を求めるため、プロトンの軌道計算を行った。その結果が図1 (b)であり、レーザーとプラズマの境界領域に強い電磁場が存在する場合、実験結果と最も一致することが明らかになった。これは2次元粒子シミュレーションの結果(図1 (c, d))と一致し、高速電子が主に境界にそって伝搬していることを実験的に明らかにした初めての結果となった。またその電磁場の強度もレーザー電磁場の10%と、シミュレーションの結果と一致した。プロトンビーム、粒子シミュレーション、プロトン軌道計算の組み合わせにより、極短パルスでプロトンビームを照射できれば、固体ターゲット中での高速電子の挙動を詳細に計測できることが示された。

(2) チェレンコフ光の放出は、誘電媒質中の光の群速度が高速電子の速度よりも遅い場合に衝撃波として放出されるので、電子エネルギー(速度)に対し、誘電率(屈折率)の下限が存在する。したがって、屈折率の大きい物質を用いることで、より低エネルギーの電子をチェレンコフ光計測することが可能となる。そこで以前用いたBK7と物理的に際が少なく、屈折率が2.0のランタン系高屈折率ガラス(S-LAH79, OHARA)を用い、BK7との違いを計測した。プリズム形状で、かつ薄いターゲットを作製するのが非常に困難であるため、厚みを50μm, 100μm, 200μmに変化させ、ターゲット裏面での信号の発光量の計測を行った。実験はインド・タタ基礎科学研究所にて行い、出力20TW、照射強度 10^{19}W/cm^2 のレーザーを照射し、チェレンコフ光を裏面からICCDを用いて計測した。

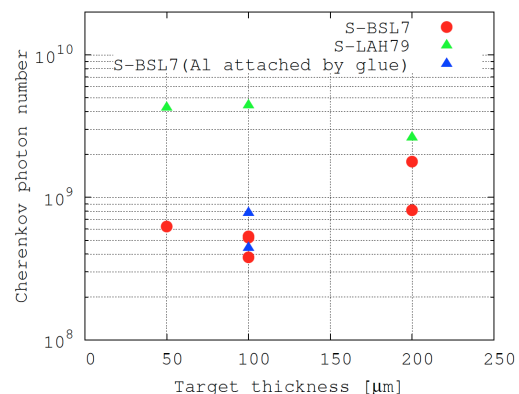


図2 : チェレンコフ光の厚み依存性

図2は裏面で計測したチェレンコフ光強度の厚み依存性であり、明らかに高屈折率ガラスの方が1桁ほど発光強度が上昇したことがわかる。また200 μm 厚では発光強度の低下が観測された。通常、チェレンコフ光は発光媒体の長さが長くなるほど強度が上昇するが、高屈折率ガラスでチェレンコフ光を放出出来る電子の最低エネルギーは80keVであり、そのような低エネルギー電子の飛程を考えると、厚いターゲットでは中ですべて散乱されて発光に寄与しないばかりか、背景信号を上昇させてS/N比を低下させる。さらにガラス内部の透過率も100%ではないことを考慮すると、厚いターゲットでの発光の低下という事実から、発光はチェレンコフ光が主な成分であると見なすことが出来る。

またBK7と高屈折率ガラスで得られた発光強度を各ターゲットの厚みごとに比較することで高速電子のエネルギースペクトルを推定し、平均エネルギーが70keVと見積もられ、実験と同条件で行った2次元粒子シミュレーションの結果と一致し、平板ターゲットにおいても高速電子のエネルギー分布を推測することが可能となった。

(3)上記のように、屈折率の高い誘電体を用いることでより低エネルギーの電子を計測することが可能となる。可視領域では屈折率が2程度のガラス材料が最も屈折率が高い材質であるが、赤外線領域まで範囲を広げると、ゲルマニウムやシリコンが高い屈折率を持つ。例えばシリコンを用いると、その屈折率は3.5であるので、計測可能な電子のエネルギー下限は25keVとなる。

高エネルギー電子をターゲット内部で計測するもう一つの手法として、高速電子がターゲット原子に衝突する際に原子を励起し、脱励起する際に放出する特性X線を計測する手法がある[4]。これらのX線のエネルギーはkeV領域であるので、レーザープラズマ相互作用で放出される軟X線領域の制動放射X線の背景ノイズと容易に分離できる。またこの相互作用断面積は電子のエネルギーが数10keVでピークを持ち、10MeVを超えるようなところでまた再び単調に増加していく。現在想定している30fs程度のレーザーではそれほど高いエネルギーの電子が生成されないため、特性X線を放出するのは主に数10keVの電子となる。そのため、本研究にてシリコンターゲットを用いた赤外チェレンコフ光計測と特性X線の同時計測を行うことによって、特性X線計測手法の信憑性を正確に計測することが出来るようになる。

さらに、レーザーから高速電子へのエネルギー変換効率は、通常シミュレーションの値や、電子分光器などによる高エネルギー成分のみの計測から低エネルギー部を外挿して全エネルギー分布を仮定し、求めてきた。本研究課題を実施することで、低エネルギー領域の電子の数を正確に見積もることが可能

となり、それによってエネルギー変換効率をより正確に見積もることが可能となる。

より正確な計測のためにはシリコンを加工し、プリズム形状にする必要があるが、加工が著しく困難であることから、予備実験として(2)と同様にシリコンの薄膜を用いた赤外チェレンコフ光計測実験をタタ基礎科学研究所にて行った。実験セットアップなどは(2)と同様である。その結果、BK7での結果に比べ、ターゲット裏面で非常に大きい発光パターンを計測した。これは低エネルギー電子の散乱が大きいということと、また低エネルギー電子にとって電子流が作る自己磁場は強すぎるため、自己磁場によって低エネルギー電子が散乱されることに起因すると考えられ、これらは2次元の粒子シミュレーションの結果とよく一致した。

(4)1つの高速電子から放出されるチェレンコフ光は通常微弱であり、高エネルギー物理の分野などでは繰り返し計測を行い、信号を統計的に処理する。一方、本研究課題においてはシングルショットが基本であるため、レーザーから高速電子へのエネルギー変換効率が数10%と高いとはいえ、ICCDなどのイメージ増幅技術を用いなければチェレンコフ光を計測することが困難である。可視領域ではICCD、EMCCDなどの製品を使用できるが、特に赤外領域などは信号増幅が非常に困難である。そこで、近年研究が盛んに行われている、高強度レーザーをナノ構造体に照射することで発生X線や高エネルギー粒子が増大するという報告を本研究課題に適用し、発生する高速電子の生成を増加させることでチェレンコフ光量を増大させることを試みた。

ナノ構造ターゲットとして、以前制動放射X線の増大を確認したナノサイズの泡構造をもつナノフォームターゲット[9]を用いる。本研究で用いたナノフォームターゲットは

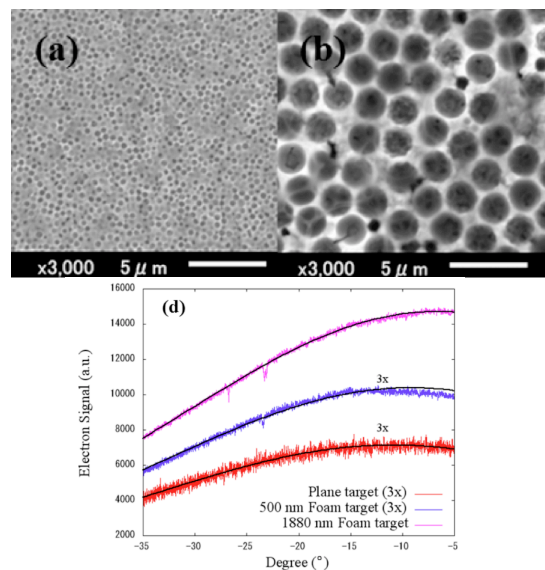


図3:500nmフォーム(左上)と1.8 μm フォーム(右上)のSEM画像。ターゲットから放出された高速電子の放出強度分布。

厚さ 20 μm の銅平板の上に、ナノサイズまたはミクロンサイズのプラスチック球を堆積させ、隙間をメッキした後にプラスチック球を取り除くという、テンプレート法を用いて作成した。またフォームサイズを変えて、高速電子生成がどのように変化をするのかを計測した。図3の上左右の図は500nmと1.8 μm 径のフォームターゲットのSEM画像である。

このターゲットを用いて、インド・タタ基礎科学研究所で実験を行った。レーザー条件などはチェレンコフ光実験と同じである。生成されたターゲットから抜けて来た高速電子を電子エネルギー分光器とイメージングプレートで角度分布を計測した。高速電子の角度分布を計測した結果を図3下に示す。ターゲットによって顕著な差が見受けられ、平板ターゲットに比べ、1.8 μm フォームターゲットは信号強度が20倍増大した。さらに500nmフォームに比べても10倍程度増大した。2次元粒子シミュレーションの解析の結果、不連続的なナノ構造上に電界集中が起こることによってエネルギー吸収率が増大することに加え、1.8 μm のフォームターゲットでは構造効果によるレーザー光の集光がレーザー吸収に大きく影響することが明らかになり、また計算された増大率も実験結果と定量的に一致し、フォーム構造における特異なレーザー吸収を初めて明らかにした。

<引用文献>

- ① M. Tabak et al., Ignition and high gain with ultrapowerful lasers, *Physics of Plasmas*, 1, 1994, 1626.
 - ② R. Kodama et al., Fast Heating of Ultrahigh-Density Plasma as a Step Towards Laser Fusion Ignition, *Nature* 412, 2001, 798.
 - ③ T. Yabuuchi et al., On the behavior of ultraintense laser produced hot electrons in self-excited fields, *Phys. Plasmas*, 14, 2007, 040706.
 - ④ R. B. Stephens et al., Ka fluorescence measurement of relativistic electron transport in the context of fast ignition, *Phys. Rev. E*, 69, 2004, 066414.
 - ⑤ J. Zheng, et al., Study of Hot Electrons by Measurement of Optical Emission from the Rear Surface of a Metallic Foil Irradiated with Ultraintense Laser Pulse, *Phys. Rev. Lett.*, 92, 2004, 165001.
 - ⑥ S. P. Hatchett et al., Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets, *Phys. Plasmas*, 7, 2000, 2076.
 - ⑦ A. J. Mackinnon et al., Proton radiography as an electromagnetic field and density perturbation diagnostic, *Rev. Sci. Instrum.*, 75, 2004, 3531.
 - ⑧ Y. Uematsu et al., Measuring the strong electrostatic and magnetic fields with proton radiography for ultra-high intensity laser channeling on fast ignition, *Rev. Sci. Instrum.*, 85, 2014, 11E612.
 - ⑨ A. L. Lei et al., Optimum Hot Electron Production with Low-Density Foams for Laser Fusion by Fast Ignition, *Phys. Rev. Lett.*, 96, 2006, 255006.
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 19 件)
- ① W. Theobald, A. A. Solodov, C. Stoeckl, K. S. Anderson, R. Betti et al., Initial Cone-in-Shell Fast-Ignition Experiments on OMEGA, *Phys. Plasmas*, 査読有, 18, 2011, 056305. doi:10.1063/1.3566082
 - ② J. Alvarez, K. Mima, K. A. Tanaka, J. Fernandez, D. Garoz, H. Habara, K. Kikuyama, K. Kondo and J. M. Perlado, Ultraintense Lasers as a Promising Research Tool for Fusion Material Testing: Production of Ions, X-Rays and Neutrons, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, 8, 2013, 3404055, DOI: 10.1585/pfr.8.3404055
 - ③ W. Schumaker, N. Nakanii, C. McGuffey, C. Zulick, V. Chyvkov et al., Ultrafast Electron Radiography of Magnetic Fields in High-Intensity Laser-Solid Interactions, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 110, 2013, 015003. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.015003
 - ④ H. Habara, Y. Mishima, N. Nakanii, S. Honda, M. Katayama, L. Gremillet, L. Willingale, A. Maksimchuk, K. Krushelnick and K. A. Tanaka, Enhanced energy coupling by using structured nano-wire targets, *EPJ Web of Conferences*, 査読有, 59, 2013, 17007, DOI: 10.1051/epjconf/20135917007.
 - ⑤ H. Habara, T. Iwawaki, T. Yabuuchi and K. A. Tanaka, 高強度レーザーによる相対論プラズマの物性, *レーザー研究*, 査読有, 41, 2013, 7.
 - ⑥ A. Okabayashi, H. Habara, T. Yabuuchi,

T. Iwawaki and K. A. Tanaka, Stopping and transport of fast electrons in superdense matter, Physics of Plasmas, 査読有, 20, 2013, 083301, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4816812>.

⑦ T. Iwawaki, H. Habara, S. Baton, K. Morita, J. Fuchs et al., Collimated fast electron beam generation in critical density plasma, Physics of Plasmas (1994-present), 査読有, 21, 2014, 113103, doi: 10.1063/1.4900868.

⑧ D. Nii, H. Sakagami, H. Habara and K. Tanaka, 負荷分散法 OhHelp による粒子コードの並列化, 情報処理学会研究報告, 査読有 2014-HPC-145, 2014, 23, https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=102297&item_no=1&page_id=13&block_id=8

⑨ W. Theobald, A. A. Solodov, C. Stoeckl, K. S. Anderson, F. N. Beg et al., Time-Resolved Compression of a Capsule with a Cone to High Density for Fast-Ignition Laser Fusion, Nature Communications, 査読有, 5, 2014, 5785, DOI: 10.1038/ncomms6785.

⑩ Y. Uematsu, S. Ivancic, T. Iwawaki, H. Habara, A. L. Lei, W. Theobald and K. A. Tanaka, Measuring the strong electrostatic and magnetic fields with proton radiography for ultra-high intensity laser channeling on fast ignition, Review of Scientific Instruments, 査読有, 85, 2014, 11E612, doi: 10.1063/1.4890575.

⑪ H. Habara et al., Efficient propagation of ultra-intense laser beam in dense plasma, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読有, accepted in publication, 2015.

[学会発表] (計 14 件)

① 羽原 英明, Observation of Cu-K α emission in imploded core plasma by direct irradiation of ultra intense laser light, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 15th Nov. 2013, Denver, Colorado, USA

② 羽原 英明, (Invited) Efficient propagation of ultra-intense laser beam in dense plasma, 13th International Workshop on the Fast Ignition and Fusion Targets, 17 Sep. 2014, The Queen's

College, Oxford, UK

③ 羽原 英明, Increase of ultra intense laser absorption by surface plasmon resonance, Plasma conference 2014, 21 Nov. 2014, TOKI MESSE, Niigata, Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽原 英明 (Hideaki HABARA)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60397734

(2) 研究分担者

藪内 俊毅 (Toshinori YABUUCHI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 20397772

(3) 連携研究者

坂上 仁志 (Hitoshi SAKAGAMI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 30254452