

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26246043

研究課題名(和文) レーザー駆動光核反応中性子による大型検体非破壊検査技術の開発

研究課題名(英文) Development of nondestructive investigation technology by using neutrons generated by laser driven photo nuclear reaction

研究代表者

西村 博明 (Nishimura, Hiroak)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究中心・教授

研究者番号：60135754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー駆動光核反応中性子の発生機構を解明するとともに、時間分解中性子イメージング検出器を開発することにより、大型検体を対象とした中性子ラジオグラフィへの利用の可能性を調べた。光核反応中性子発生に関しては、大阪大学LFEXレーザーならびに京都大学T6レーザーを用いた実験を行い、主パルス到来前にプレプラズマを発生させることにより発生中性子の増大が可能であることを実証した。時間分解中性子画像装置に関しては、蛍光体からICCDカメラまでの光伝送効率を改善するための像転送用光学系の改善を進めた。従来の手法に比べて改善は見られたが、さらなる「明るさ(出力信号の強度)」が必要であることが判明した。

研究成果の概要(英文)：This is a feasibility study of neutron radiography using fast neutrons generated by photo-nuclear reaction occurring in laser-produced plasma. Neutron imager must have a function of temporal-discrimination (< 10 ns) to exclude useless images caused by bremsstrahlung from the plasma.

First, we tried to increase neutron yield by the use of a preformed plasma generated with a laser pre-pulse arriving in prior to the main drive pulse. LFEX laser (1 kJ/1 ps) at Osaka U. and T6 laser system (0.5 J/35 fs) at Kyoto U. were used to obtain an energy scaling of neutron yield. Missing data for the intermediate laser energies (i.e., from 10 to 100 J) will be successively obtained by the support of a new research grant.

Second, we developed a temporally-gated neutron imager. For this study, LINAC of Osaka U. was used. Photo-transfer efficiency from a scintillation panel to an ICCD camera was improved by a factor of 4, but further improvement is needed for practical application.

研究分野：レーザープラズマ工学

キーワード：中性子ラジオグラフィー レーザー駆動中性子 光核反応

## 1. 研究開始当初の背景

我が国におけるトンネルや道路、橋梁など高度経済成長期につくられた社会インフラの修理・改築が日本全体の喫緊の課題となっている。

高エネルギー中性子シャドウグラフ撮影は、 $\gamma$ 線では透視できないような分厚い金属構造体の内部や、メートル級の鉄筋コンクリート構造体を非破壊で透視できる診断法としてその確立が強く求められている。このような大型検体を中性子透視するためには、①点源、②高エネルギー、③短パルス、かつ④高フラックスな中性子源が必要とされる。図1に、MCNPコードによる中性子透過シミュレーションの結果を示す。20cmのコンクリートと構造鉄筋との隙間に水を含む空洞が生じた場合を想定し、1MeVの $\gamma$ 線および1MeV中性子線による撮影を模擬した。 $\gamma$ 線ではコンクリート内の鉄筋の存在は分かるものの、内部の欠陥は判別できないのに対して、1MeV中性子ではその欠陥の様子がはっきり判別できる事が分かる。

このような大型検体の非破壊検査用中性子源に求められるのは、以下の4条件である：条件①：中性子源の大きさは画像の分解能を決定するため、1mm以下のサイズが必要である。

条件②：メートル級の構造体の撮影には1MeV程度の中性子が必要である。

条件③：検体や周辺の壁や床など遅れて飛来する散乱中性子成分がシャドウ像の鮮明度を著しく低下させるため、これを除外する必要がある。解決策として時間弁別法がある。このため、時間差100nsよりも十分短い1ns程度の時間幅をもつパルス線源が求められる。加えて、減速体を介さず連続的な広帯域スペクトルをもつ1nsパルス幅の高速中性子であれば、時間分解画像計測によって1MeVに対して5%程度のエネルギー分解が可能になり、中性子エネルギー依存性を利用して、物体の厚さや組成に関する情報も取得する

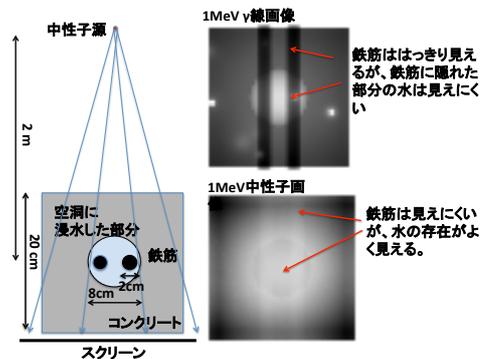


図1. 1MeV $\gamma$ 線ならびに1MeV中性子のシャドウグラフの模擬計算結果

事ができる。

条件④：図1と同一条件でスクリーン内の各1mm $\times$ 1mm画素に10個程度の中性子を観測するためには中性子数 $10^{10}$ 個が必要と成る。これはシングルショットでも、短パルスの高繰り返し、例えば $10^6$ /pulseを10Hzの繰り返しで1000秒間(17分間)露光すれば実現できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は①1mm以下の点源で、②1MeV以上の高エネルギーまで続く連続的な広帯域スペクトルで、③1ns以下の時間幅をもつパルス線源で、かつ④ $10^{10}$ 個の中性子源を実現することである。ここで重要なのは、このような画像検査において、取得された画像と検体の内部状態との対応関係を、様々なケースで予め画像データベース化しておくことであり、必ずしも現場にレーザー駆動中性子源を持ち出すことをしなくても、実験室における利用で社会インフラの再構築に大きく貢献できる。

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心(以下、阪大レーザー研)ではLFEXペタワットレーザーが本格稼働を始め、近年の実験で光核反応によって $10^9$ /pulseの高中性子数発生に成功した。超高強度レーザーをターゲットに集光照射すると、まず高速電子が発生し、重元素からなる高密度プラズマ中を伝搬する間に制動過程によって $\gamma$ 線が放出され、光核反応( $\gamma$ -n反応)によって中性子が発生する。1mm直径、1mm厚の金ターゲットの場合、10MeV以上で最大 $10^9$ 個の中性子を得ており、既に条件①は達成されている。駆動レーザーのパルス幅は1psであることから計算上中性子の発生持続時間は3ps程度になり条件③も満たしている。実用性を考慮し、鉛ターゲットに対してモンテカルロシミュレーションを行うと、発生した中性子のスペクトルは、非常にブロードで数MeVにわたってなだらかなエネルギー分布を持っており、条件②も満たされている。今後の性能向上作業により、集光強度は現状の10倍程度まで向上されると期待されている。そのため、ターゲット素材や形状の工夫、レーザー強度の増大、高速電子の制御などにより、 $10^{12}$ 中性子/pulseまでは達成可能と考えられている。このように条件①②③はすでに達成されており、条件④も達成の目処が立っている。またレーザー駆動光核反応中性子源は、 $\gamma$ 線と中性子を同時に発生するため、時間分解計測によって $\gamma$ 線シャド

ウグラフと任意のエネルギーの中性子シャドウグラフを同時に実現する事が出来る。

本研究においては、第一ステップとしてレーザー強度と中性子発生数の関係を調べ、中性子発生にいたるエネルギー輸送の詳細なメカニズムを解明し、最終的に  $10^{10}/\text{pulse}$  発生を実現した。第二ステップとして、時間分解中性子画像計測システムを開発した。ナノ秒の時間分解能で中性子画像を撮影できる事が必要であり、かつ撮影素子は  $1\text{m}\times 1\text{m}$  サイズ程度の高空間時間分解中性子画像系の開発を進めた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 発生中性子の増大

レーザーとターゲットの結合を増すため、ターゲット表面に金製のコーンを追加することにより、光核反応中性子発生数を増大させる。光核反応による中性子数を決定するのは  $\gamma$  線スペクトル形状と総フォトン数であり、 $\gamma$  線の特性は電子のスペクトルと電子数、ならびにその空間集束性などで決定される。ステップ1をさらに4段階に分け、図2に示したフローチャートに従って研究を推進した。

$\gamma$  線発生についてその強度、スペクトル、指向性、時間幅などを調べる。ここまでの実験は阪大 LFEX のような、ショット数が限られる超大型レーザー装置よりも、高繰り返しレーザーを用いた実験の方が適しており、京大化研(分担：阪部)の「T6 レーザー装置」を用いて研究を行なった。

ステップ1-4では中性子発生実験を行なう。まずはT6 レーザーで  $10^4/\text{pulse}$  を達成し、本技術が産業技術へ応用可能である事を証明する。次に LFEX レーザーによる実験で  $10^{10}/\text{pulse}$  中性子を実現する。また、中性子スペクトルとその絶対量を計測し、理論予測との比較を行なった。

#### (2) 大口径時間分解中性子画像検出器の開発

観測対象はメートルサイズである事を想定して、 $1\text{m}\times 1\text{m}$  の2次元シンチレーターアレ

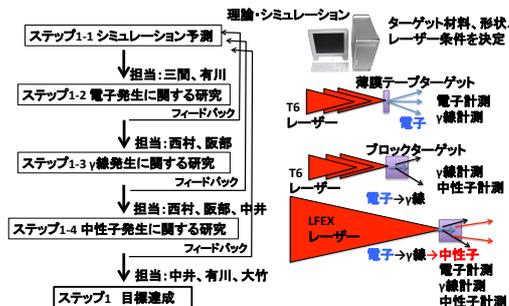


図2. 研究推進フローチャート

ー(以下シンチレーターアレーと略す)と、この出力を撮像するため、数ナノ秒の時間分解能をもつ高速可視画像取得システムを数台並べ、それぞれ異なる時間帯を観測できるようにした。こうする事で、 $\gamma$  線ならびに様々なエネルギーの中性子画像を同時に取得できる。

#### (3) 大型検体の中性子シャドウ撮像

LFEX レーザーを用いて中性子を発生させ、 $1\text{m}$  級鉄筋コンクリート検体とステップ2で開発した画像計測システムを用いて、シャドウグラフの取得実験を行なった。阪大レーザー研激光XII号ならびにLFEX レーザーが導かれた真空チャンバー近傍に、被写体模擬サンプルを設置し、高エネルギー中性子シャドウグラフ撮影の実証実験と性能評価を行った。コンクリート内に既知サイズの鉄筋を埋め込み、さらにその鉄筋には意図的に空房や水を含む部分を設け、解像度の評価を行った。コンクリート内の鉄筋内の欠陥を見つけられる性能を実証して成果と残された課題の整理を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 中性子発生物理シミュレーション

レーザーを金属ターゲットに照射し中性子発生にいたる一連のプロセスの理解が進んだ(分担：三間)。中性子発生率を上げるためには、ターゲット材料として金、タンタル、鉛などがよい事、ターゲット厚さはおよそ  $10\text{mm}$  が最適であることが示された。またターゲット表面にプレパルスを当てるなどして、希薄なプラズマを作っておく事で発生する高速電子のスペクトルが高エネルギー化し、中性子発生効率が格段に向上する事も明らかと成った。

#### (2) 繰り返しレーザーを用いた基礎実験

京都大学化学研のT6 レーザー装置を用い、レーザーから電子への変換効率を

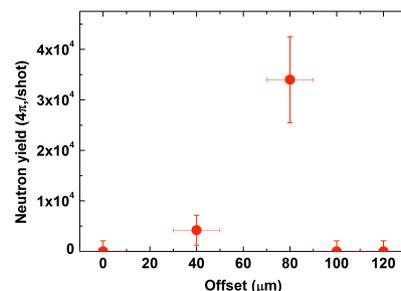


図3. プレプラズマ中でのレーザー焦点位置に対する発生中性子数

向上させるために、10mJ/5ns のレーザー光を超短パルスレーザー入射時刻よりも 1ns 前に入射させ、ターゲット表面にプレプラズマを生成した。生成したプレプラズマはターゲット表面から指数関数的な密度勾配で広がる条件を作り、1/10 から 1 倍の臨界密度のプラズマ領域に超高強度レーザーを集光した時に電子温度は急激に高温になった。この条件で回転ターゲット背後に 10cm の鉛ブロックを置くことで、X 線と鉛の光核反応によって中性子を発生させた。バブル検出器をターゲット近傍に設置し、1000 ショット連続運転した結果、明瞭な中性子バブル信号をえた。図 3 に示すように、ターゲット位置とレーザー集光点との相対距離を最適化したところで、中性子発生数は最大化した。ショットあたり  $3 \times 10^4$  を記録した。今後 5J 程度のレーザー装置を用いれば、同様のターゲットで  $10^6$ /pulse まで中性子発生数を増大させることが可能であり、10Hz 運転も可能と考えられる。この実験により繰り返しで安定に中性子を発生させる技術に目処がついた。

### (3) 中性子画像計測器の試作

60cm×40cm の大型中性子シンチレーションパネルを開発した(図 4)。液体シンチレーターを充填したアルミハニカムを容器に封入した物を開発した。阪大産研 LINAC 電子加速器において、電子ビームを鉛ブロックに照射して  $\gamma$  線および中性子を発生させ、ハニカムシンチレーターで計測を試みた。 $\gamma$  線で 60cm 級サイズの画像撮影に成功した。また時間分解計測によって  $\gamma$  線と中性子を分離し、中性子の画像計測に成功した。

理研小型中性子源 RANS (分担：大竹) において  $\gamma$  線が少ない中性子ビームを発生させ、

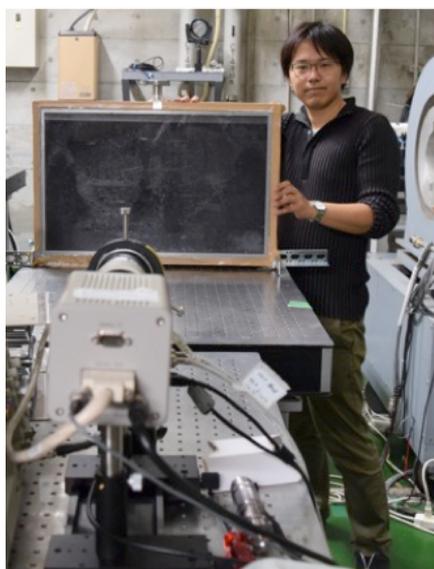


図 4. 中性子画像装置

コリメーターを用いて 20cm×20cm の平行中性子ビームを作った。中性子エネルギーは数 eV から数 MeV までのブロードなスペクトルであるが、計測器の感度が 100keV 以上に高いため、高速中性子の画像計測が出来る。30cm 厚のコンクリートの背後に 30cm 厚さ、5mm 幅の鉄骨を置き、中性子によって透視撮影を行った。図 5(1)に中性子ビームのみの画像、同(2)にコンクリートブロックの影絵、同(3)コンクリートブロックの背後に鉄骨を置いた影絵を示す。30cm コンクリート背後の鉄骨の影が見えており、鉄骨と鉄骨の間である 1cm 以下の分解能が達成できている事が分かる。本来画像解像度はハニカムピクセルサイズで決まる 1mm 程度であるが分解能が優れなかったのは原因が二つあると考えている。一つは RANS で発生している高速中性子フラックスが不足しているためである。もう一つは、中性子ビームはほぼ連続流であり、この実験では 600 秒の時間積分を行なった。このような計測法では鉄骨で小角度散乱した中性子による画像が計測画像に混入し、画像が不鮮明になる事を逃れる事が出来ない。将来のレーザー駆動中性子では中性子ビームのパルス幅が極めて短いため、時間的にゲートをかけることで小角度散乱中性子成分を除去する事が出来るためより鮮明な画像に成る事が期待される。レーザー駆動中性子の場合、短パルスの繰り返しが可能であるため、パルス当たりのフラックスが不十分であっても、繰り返しで重ね取り撮影する事で鮮明な画像をえることができると期待される。

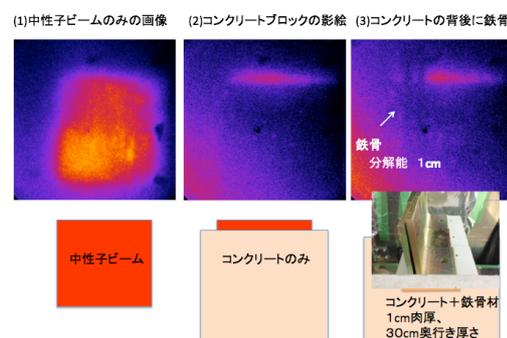


図 5. 理研 RANS 中性子ビームによって得られた画像。(1)中性子ビームのみ、(2)コンクリートブロックの影絵、(3)コンクリートブロックの背後に置いた鉄骨材の影絵

## 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 29 件)

1) Y. Abe, H. Hosoda, Y. Arikawa, 中 9 名、M. Nakai, 他 4 名 “*Characterizing a fast-response, low-afterglow liquid scintillator for neutron time-of-flight diagnostics in fast ignition experiments*”, 査読有、*Review of Scientific Instruments*, **85**, 11E126-1~3 (2014). DOI: 10.1063/1.4896957

2) Y. Arikawa, T. Nagai, Y. Abe, S. Kojima, S. Sakata, H. Inoue, M. Utsugi, Y. Iwasa, T. Murata, N. Sarukura, M. Nakai, 他 3 名、”*Development of multichannel low-energy neutron spectrometer*”, 査読有、*Review of Scientific Instruments*, **85** (11), 11E125-1~3 (2014). DOI: 10.1063/1.4895826

3) Y. Arikawa, 中 9 名、M. Nakai, H. Shiraga, H. Nishimura, H. Azechi, “*High-Intensity Neutron Generation via Laser-Driven Photonuclear reaction*”, 査読有、*Plasma and Fusion Research*, **10**, 24040031~3 (2015).

4) Qing Jia, K. Mima, H. Cai, T. Taguchi, H. Nagatomo and X. T. He, “*Self-generated magnetic dipoles in weakly magnetized beam plasma*”. 査読有、*Physical Review E*, **91**, 023107 (2015). DOI:10.1103/PhysRevE.91023107

5) S. Kojima, T. Ikenouchi, Y. Arikawa, S. Sakata, Z. Zhang, Y. Abe, M. Nakai, H. Nishimura, 他 7 名”*Development of Compton X-ray spectrometer for high energy resolution single-shot high-flux hard X-ray spectroscopy*”, 査読有、*Review of Scientific Instruments* **87**, 043502 (2016). DOI:10.1063/1.4944864

6) A. Yogo, S. V. Bulanov, M. Mori, K. Ogura, T. Zh. Esirkepov, A. S. Pirozhkov, M. Kanasaki, H. Sakaki, Y. Fukuda, P. R. Bolton, H. Nishimura, K. Kondo, “*Ion Acceleration via Nonlinear Vacuum Heating by the Laser Pulse Obliquely Incident on a Thin Foil Target*” 査読有、*Plasma Physics and Controlled Fusion* **58**, 025003 (2016). DOI:10.1088/0741-3335/58/2/025003

7) Y. Arikawa, 中 4 名、A. Yogo, H. Nishimura, M. Nakai, 中 3 名、Y. Otake, K. Mima, Y. Honda, “*Large aperture fast neutron imaging detector with 10-ns time resolution*”, 査読無、*Proceedings SPIE 10328, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed*

*Imaging and Photonics*, 103280T (February 20, 2017)

8) A. Yogo, K. Mima, 中 3 名、Y. Arikawa, 中 3 名、H. Nishimura, 中 4 名、M. Nakai, 他 10 名、”*Boosting laser-ion acceleration with multi-picosecond pulses*”, 査読有、*Scientific Reports* **7**, Article number: 42451 (2017). DOI: 10.1038/srep42451

9) A. Taketani, 中 9 名、Y. Otake, 他 3 名、”*Visualization of water in corroded region of painted steels at a compact neutron source*” *ISIJ International* vol.1 pp.155-161 (2017), DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2016-448

10) 大竹淑恵 「高速中性子の応用 — インフラ予防保全へ—」 査読無、*レーザー研究* **43**, pp.71-76 (2015).

11) 阪部周二、橋田昌樹、 「高強度短パルスレーザー駆動ナノ微粒子クーロン爆発による発生中性子数のレーザーエネルギー則」 査読無、*レーザー研究* **43**, pp.82-87 (2015).

12) 中井光男 有川安信 宇津木卓 西村博明 他3名、 「高強度レーザーを用いた光核反応中性子発生」、査読無、*レーザー研究* **43**, pp 98-102、(2015).

13) 有川安信、中6名、西村博明、中井光男 疇地宏、 「超高強度レーザーを用いたレーザー核融合中性子計測技術」、査読無、*レーザー研究* **43**, pp103-107 (2015).

14) 大竹淑恵、 “放射線による社会インフラ・産業プラントの健全性評価 量子ビームによる非破壊健全性診断へ向けて- 小型中性子源システム RANS-“、査読無、*非破壊検査* **64**, p.221-224 (2015).

[学会発表] (計 39 件)

1) Y. Arikawa, 中9名、M. Nakai, 他3名、”*Development of multichannel low-energy neutron spectrometer*”, 20<sup>th</sup> Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, Atlanta 1 June, 2014.

2) Y. Arikawa, 中15名、H. Nishimura, “*High intensity  $\gamma$ -ray and neutron generation by ultra intense laser*”, *America Chemical Society*, 2 Aug. 2014.

3) A. Yogo, 他9名, “*Ion acceleration via stochastic vacuum heating*”, Int. cong. On Plasma Physics (招待) Lisbon, 15-19 Sep. 2014.

4) Y. Otake, “*Success of Non-destructive visualization with fast and slow neutrons by RIKEN compact neutron source*”, Material Research Society Fall meeting and exhibit, Boston, 30 Nov. ~5 Dec. 2014.

5) Y. Otake, KEY-NOTE: “*RIKEN Compact neutron source RANS and its application with iron and steel field*”, 2nd Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering, Sydney, Australia 19-23 July, 2015

6) Y. Arikawa, 中4名、A. Yogo, H. Nishimura, M. Nakai, 中3名、Y. Otake, K. Mima, “*10-ns time resolution fast-neutron imaging detector*”, International Conference on High Speed Imaging and Photonics, 9<sup>th</sup> Nov. 2016, Osaka Japan,

7) A. Yogo, K. Mima, 中3名、Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Nishimura, 以下18名、(招待) “*Anomalous Electron Heating and Ion Acceleration with High-Contrast laser pulses on LFEX*”, The 34<sup>th</sup> ECLIM2016, Moscow, 19 Sep 2016.

8) M. Nakai, Y. Arikawa, A. Yogo, 中8名、K. Mima, Y. Otake, S. Miyamoto and H. Nishimura, “*A New Research Project on Laser-Driven Neutron sources and applications at ILE, Osaka University*”, Nuclear Photonics 2016, October 16-21, 2016, Monterey, UAS

9) K. Mima. “*Ion acceleration by collision-less shock driven by laser radiation pressure*” (招待) 2<sup>nd</sup> MRE International conference, 深圳 China, 2016, 5.8-10

10) S. Sakabe, “*Ultrafast electron diffraction and deflectometry with laser accelerated electrons*”, (招待) OPIC2016, HEDS2016, Yokohama, 2016.5.17-20

11) 余語 覚文 (招待講演) 「高強度レーザーイオン加速における電子加熱機構の時間依存性」、レーザー学会第36回年次大会、名城大学 2016/01/11

12) 有川 安信, 長井隆浩, 安部勇輝, 宇津木卓, 山ノ井航平, 清水俊彦, 猿倉信彦, 西村博明, 中井光男, 疇地宏、(受賞者記念講演) ”超高強度レーザーを用いたレーザー核融合

中性子計測技術”, 第37回レーザー学会、徳島大学 2017/1/17

13) 大竹淑恵, “小型中性子源システムが開くものづくり産業一鉄鋼材料を中心に”、“日本鑄造工学会「鑄鉄品の評価技術研究部会シンポジウム」東京 2016/11/22

〔産業財産権〕  
該当無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西村 博明 (NISHIMURA Hiroaki)  
大阪大学レーザーエネルギー学  
研究センター・教授  
研究者番号: 60135754

### (2) 研究分担者

中井 光男 (NAKAI Mitsuo)  
大阪大学レーザーエネルギー学  
研究センター・教授  
研究者番号: 70201663

余語 覚文 (YOGO Akifumi)  
大阪大学レーザーエネルギー学  
研究センター・準教授  
研究者番号: 50421441

有川 安信 (ARIKAWA Yasunobu)  
大阪大学レーザーエネルギー学  
研究センター・講師  
研究者番号: 90624255

三間 圀興 (MIMA Kunioki)  
光産業創成大学院大学・特任教授  
研究者番号: 30033921

阪部 周二 (SAKABE Shuji)  
京都大学化学研究所・教授  
研究者番号: 50153903

大竹 淑恵 (OTAKE Yoshie)  
理研光量子工学研究領域・チ  
ームリーダー  
研究者番号: 50216777

### (3) 連携研究者 該当無し

### (4) 研究協力者 該当無し