

機関番号：82110

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20244065

研究課題名 (和文) 「光速飛翔鏡」による新しい X 線発生機構の研究

研究課題名 (英文) A novel X-ray generation mechanism by relativistic flying mirror

研究代表者

ブランフ セルゲイ (BULANOV SERGEI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門・客員研究員

研究者番号：00391318

研究成果の概要 (和文)：

高強度レーザーとプラズマの相互作用により励起されるカusp状の電子密度を生成し、これにレーザー光を反射させドップラー効果により短パルス X 線の生成する飛翔鏡法について研究を行った。我々は2つのレーザー光をプラズマ中で対向入射させる実験システムを新たに構築し、飛翔鏡による X 線生成実験を行った。その結果、入射レーザー波長 820 nm に対して短縮化された 12 - 20 nm の X 線を観測した。このときの反射率は、 $2 \times 10^{-5}$  であり、ほぼ理論値通りであった。これにより飛翔鏡法が理論通りに効率的に X 線を生成できることを実証した。また、単一のレーザー光をガスプラズマに集光した場合に、相対論的集光強度でありながら、レーザー進行方向に 300 次以上の高次高調波を観測した。この高調波は直線偏光、円偏光でも観測され、また奇数次と偶数次のどちらの場合でも観測された。この現象は以前に知られている放射機構では説明ができない。我々は、高強度レーザーによって作られる船首波とバブル壁が交叉する領域でカusp状の極めて高密度の電子が生成されることを示し、このカusp電子がレーザーと協同的に相互作用することで高次高調波を作る機構を考案し、シミュレーションで実験のスペクトルを定性的に再現することに成功した。また、飛翔鏡の理論研究では、波が壊れる際の色々な電子分布に対する反射率を解析的に導いた。さらに、超高強度レーザーによって薄膜を直接加速する新しい飛翔鏡法を提案し、数値シミュレーションによりこの原理が働くことを確かめた。

研究成果の概要 (英文)：

We investigated a novel x-ray generation mechanism (relativistic flying mirror) using the nonlinear interaction of a high-intensity laser with plasma. In an underdense plasma, the laser excites a wake wave and form cusp density profile in the highly nonlinear regime. The cusp partially reflects a counter-propagating laser pulse in the form of X-rays due to the double Doppler effect. We implemented an experimental setup with two counter-propagating laser pulses interacting with the helium gas target. The observed reflected photon wavelength ranged from 12 nm to 20 nm, while the incident laser wavelength was 820 nm. The reflectivity in terms of photon number was  $2 \times 10^{-5}$ . This is close to the theoretical estimate, which proves the feasibility and efficiency of the flying mirror scheme. In addition, with a single laser pulse focused onto a helium gas target with a relativistic intensity, we observed in the forward direction a high-order harmonic radiation with unique properties. The harmonic extend to the 'water window' spectral region and contain more than 300 resolved orders. The harmonics with both even and odd orders of the same intensities are generated by both linearly and circularly polarized laser pulses. We propose a new mechanism of high-order harmonics generation that explains our experimental results. This mechanism is based on catastrophe theory, which predicts structurally stable electron density singularity formation inside the laser pulse. Computer simulations show the singularity formation and associated harmonic emission, in agreement with the experimental results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,200,000	4,860,000	21,060,000
2009年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
年度			
年度			
総計	37,200,000	11,160,000	48,360,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：ビーム物理、高強度レーザー、レーザープラズマ相互作用、非線形ラングミュア波、アト秒 X 線、水の窓 X 線、

1. 研究開始当初の背景

光は生物学、分光学、材料工学等の広い研究領域で重要なツールである。特に、水に対して透過率が高い「水の窓」領域の高輝度かつ極短パルスな特性を持つコンパクト X 線源が 21 世紀の科学の進展に必要不可欠であり、プラズマ X 線レーザー、高次高調波、X 線自由電子レーザーなどが研究開発されている。我々が提案する手法は、既存の提案より優れた性能が実現可能な、高強度レーザーとプラズマの相互作用による新しいコンパクト X 線源である。本手法は、我々が理論的に提案し、既に実験的に可能であることを示している。

2. 研究の目的

本研究では、我々が開発してきた相対論的飛翔鏡（フライングミラー）法によるレーザー光の周波数上昇、パルス圧縮、集束効果を用いることにより、超短パルスで水の窓領域（波長 2.4-4.4nm）の軟 X 線を発生させることである。

3. 研究の方法

飛翔鏡法では、高強度・超短パルスレーザーをプラズマ中に集光することにより非線形なプラズマ波を励起し、その波が壊れようとする領域で生成される電子密度のカusp 状分布を、レーザー光を反射する鏡として用いる。このカusp 状分布の速度は、ほぼレーザーの群速度に等しく、不足密度領域では、ほぼ光速である。このため反射されたレーザー光は、相対論的ドップラー効果により、その周波数は上昇し、パルス幅は短縮される。我々の手法では、対象が高強度レーザーとプラズマの相互作用を用いた複雑系であり、理論と数値シミュレーション、実験を駆使する必要がある。

理論では、基礎方程式（マクスウェル方程式、運動方程式）を基に、簡略化した問題に

おいて数学手法や近似手法を用いて解いた。数値シミュレーションでは、基礎方程式を自己無撞着に扱う粒子法（particle-in-cell）により空間 2 次元、速度空間 3 次元または、空間 3 次元・速度空間 3 次元のフルスケールの実験を模擬する計算を並列型の大型計算器を用いて行なった。特に、我々は水の窓領域などの短波長の電磁波の発生を知る必要があったため、それらの短波長電磁波を記述できるような微細な空間メッシュと時間刻みが必要であった。

実験では、高強度・超短パルスレーザー（典型的には 9 TW, 30-50fs）をヘリウムガスジェットターゲットに集光し ( $>10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>)、発生する X 線 (XUV) を X 線分光器にて計測する。

4. 研究成果

(1) 実験では、以下に挙げる 5 つの主張な成果を挙げた。①飛翔鏡実験を行うための、レーザー装置、アライメント手法、X 線観測手法などの実験技術を新たに開発し、以下に述べる実験成果に繋がった。②新型の X 線計測器によって集光する飛翔鏡からの反射光の幅広いスペクトルの観測に成功し、効率的に動作することを確認した。③ほぼ理論予測通りの飛翔鏡の反射率を達成し、光子数を従来の 5000 倍以上に改善した。④飛翔鏡が微小な破片からなるのではなく、スムーズな反射面を持つことを、反射光の一様性から確かめた。⑤相対論的強度（集光強度  $>10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>）のレーザーをガスターゲットに照射することにより、新しい高次高調波の生成過程を発見した。

①飛翔鏡実験のための実験技術開発

我々は従来の飛翔鏡研究から、2 つのレーザー光を対向入射させる方が実現させやすいと考えた。従来は、対向入射では相互作用点を透過したレーザー光がレーザーシステ

ムに戻り、損傷を与える可能性があるため行うことができなかった。そこで、我々はJ-KAREN レーザー装置に戻り光対策を行ない、対向入射実験を可能にした。さらに、飛翔鏡実験では、適切なレーザー・プラズマパラメータの選択、2つの高出力(>TW)レーザー光の10  $\mu\text{m}$  以下の精度での衝突調整、2つのレーザーパルスのタイミング精度 50 fs 以下、衝突点の選択、対向入射実験での信頼におけるX線計測法が必要となる。

我々の実験セットアップを図1に示す。1つのレーザー光を2つの薄膜ビームスプリッターを用いて3つのレーザーパルス（ドライバー光、ソース光、プローブ光）を作り出した。ドライバー光は、エネルギー400 mJ、パルス幅 27 fs であり、焦点距離 475mm の軸外し放物面鏡 (OAP) によりヘリウムガスジェットターゲットに集光された。ソース光は、エネルギー40 mJ で、パルス幅 34 fs であり、焦点距離 775mm の OAP で集光された。アライメントは、プローブ光による時間分解シャドウグラム、上部散乱光、戻り光の一部を拡大レンズにてモニターする方法などを組み合わせる方法を考案し、10 $\mu\text{m}$  以下の精度で達成した。

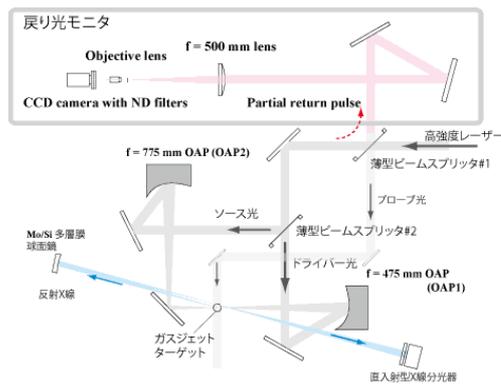


図1 飛翔鏡実験のセットアップ

## ②新しいX線分光器の開発

飛翔鏡で反射されたX線の波長は、飛翔強度の相対論因子 $\gamma$ の2乗に反比例する。さらに極端紫外光や軟X線領域の通常的光分光器の計測波長範囲は、設計や、フィルターなどにより制限を受け、本研究のように、発生する波長範囲が広い場合には不都合である。そこで、我々は、軸外し方向でX線を計測する直入射結像型分光器を開発した。この計測器は、Al/Zr の多層膜フィルターと、広帯域多層膜球面鏡（波長範囲 12.5~22.0nm）、透過型回折格子（4 mm x 10 mm, 5000 1/mm）から構成される。この計測器は、反射角度 $7^\circ \sim 17^\circ$ に散乱されたX線を、波長 12.4~20 nm 範囲で、空間分解能  $\sim 16 \mu\text{m}$  で検出可能である。これにより、飛翔鏡の相対論因子 $\gamma$ が 4~20

の幅広い範囲で信号を検出できる。

## ③飛翔鏡の高反射率の実証

②に記述したX線検出器にて計測された飛翔鏡の反射光のスペクトルを図2に示す。この実験では、入射された波長 820nm のソース光が $\gamma=6$ の飛翔鏡にて反射され、波長 12 ~ 20 nm の極端紫外光に変換された。この反射率は、 $2 \times 10^{-5}$  であり、理論的に予測される値  $4 \times 10^{-5}$  の半分程度と、ほぼ理論通りの反射率を持つことが実証できた。これにより、本手法で得られるX線の強度はほぼ理論通りに得られることが示された。これは飛翔鏡法による実用的なX線源開発への大きな進歩と言える。

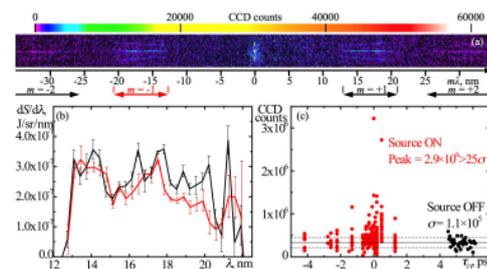


図2 飛翔鏡で得られたX線スペクトル

## ④飛翔鏡の反射率の一様性の実証

飛翔鏡の品質について、反射率も重要であるが、それに加えて生成された飛翔鏡が一様であるかというのは実用上大きな問題である。我々が③の図2に示したスペクトルは、波長 12~20nm の範囲（反射方向で $9^\circ \sim 17^\circ$ に相当する）ではほぼ一様なスペクトル強度が得られている。これはこの範囲に反射する曲率を持つ飛翔鏡は少なくともスムーズな分布を持ち、一様な反射率を持つと言える。これは飛翔鏡による集光強度の向上を実現する可能性を示唆するものである。

## ⑤新しいX線発生機構の発見

①で示したJ-KAREN レーザー(0.5 J,  $\sim 30$  fs)をヘリウムガスに集光する実験において、レーザー進行方向に高強度の高次高調波を観測した。引き続いて、英国ラザフォードアップルトン研究所のAstra Gemini レーザー(3~10 J, 50 fs)を用いて再現実験を行なった。どちらの実験においても、ほぼ元のレーザー周波数の奇数と偶数次の高調波を 300 次以上まで観測できた。ここで、「ほぼ元の周波数」といったのは、レーザー光の周波数がプラズマ中で低周波にシフトし、その周波数に対しての高調波であるという意味である。またこの高調波は、レーザー光が直線偏光、円偏光のどちらでも観測された。さらに、ある特定のショットでは、変調されたスペクトルを観測した。また、9 TW のレーザーを用

いた場合に、この電磁放射は、3.5 nmの波長まで延びており、水の窓領域のX線が生成された。これらの電磁放射は、今までに知られているガス高次高調波やベータトロン放射、非線形トムソン散乱などの機構では説明ができないものであった。我々はこの実験で観測された高次高調波を説明できる新しい発生機構を考案した。この詳細については、理論の結果(2)④にて詳しく記述するが、高強度レーザーによって生成された集群した電子が集団的に放射するコヒーレント放射である(飛翔鏡とも言える)。我々の考案した理論モデルでは、このX線放射は、通常の高次高調波と異なり、高強度までスケール可能であり、数keVのコヒーレントX線源と成り得る可能性がある。このようなX線は、分厚い生体試料などのコントラストイメージングや回折イメージング、高密度プラズマ診断などに応用できると考えられる。

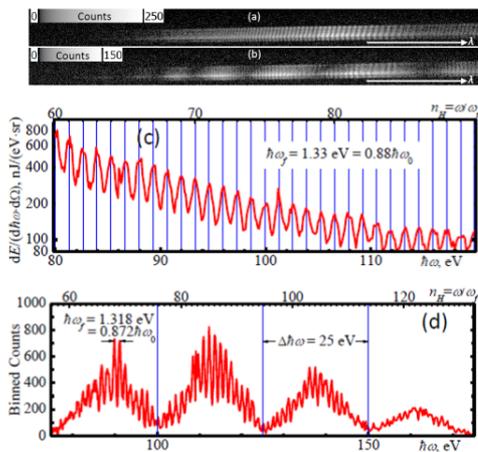


図3 高次高調波のスペクトル

(2) 理論・数値シミュレーションの結果

理論研究においては、以下の主要な成果を得た。

①非線形プラズマ波の破壊と caustics による反射

不足密度領域での非線形プラズマ波の破壊と caustics からの光の反射率について、1次元の波動方程式を解析的に解き、電子密度分布が色々な特異性を持つ場合の反射率の表式を求めた。これらは実験を先導するだけでなく、非線形なプラズマ波の位相速度を光の反射スペクトル計測により求めることができる。

また、電子密度分布が非一様であるとその地点で波の破壊が起き、高エネルギーの電子の生成が起きることを解析的に示し、また2次元、3次元のPICシミュレーションにより確かめた。これにより波の破壊に関して理解

が深まり、飛翔鏡法の制御性が高まると期待できる。

②船首波の生成

高強度・超短パルスレーザーがプラズマ中を伝播する際に、レーザー先端部から斜め後ろに波面を持ち、斜め前方に進行する船首波が生成することを発見した。これはレーザーが横方向に拡がりを持つことに起因する。船首波は、プラズマ電子密度の変調を起こす際にはカस्पカastropheを生成する。これは実験で観測された高次高調波の生成と深く関連している。

③加速両面鏡の提案

当初考えていた飛翔鏡は、不足密度領域プラズマ中に励起される非線形プラズマ波がカस्प状となることを利用したものであった。我々は、より高い強度のレーザー光を薄いフォイル(固体密度プラズマ)に照射すると、レーザー光の放射圧によって直接高密度プラズマを加速する手法を考案した。これは図4に示したように、ドライバー光によって薄いプラズマが加速され、ドライバー光のエネルギーは消耗する。一方、この鏡の反対側に入射されたソース光は鏡の速度が高くなるにつれ、高周波の波へと変換される。ガスプラズマよりも高い密度で動作するので、反射率が高いこと、高密度スラブからの反射により、反射光の高次高調波が生成されるという特長を持っている。図5にPICシミュレーションにより生成された反射光のスペクトルを示す。

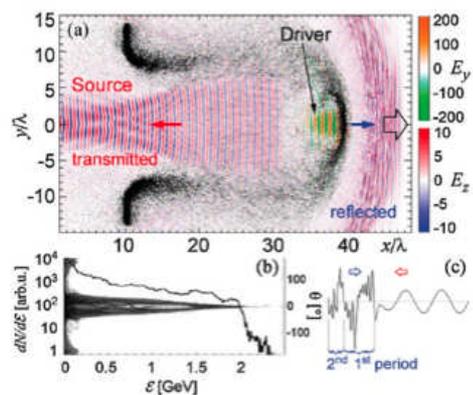


図4 加速両面鏡のシミュレーション結果

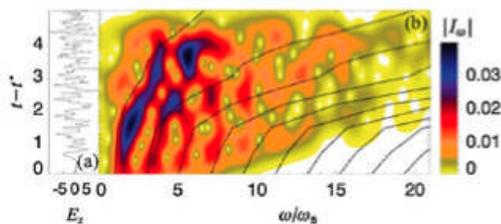


図5 加速両面鏡で得られた反射光のスペクトルの時間発展

④ 相対論的高次高調波生成

②に述べたように、高強度レーザーにより船首波が励起される。また、レーザー電場によりレーザー後方に空洞部を生成する。カタストロフィー理論によれば、これらはそれぞれフォールドカタストロフを生成するが、この2つが交わるころでは、より高次の特異性を持つカスプカタストロフが生成される。この様子は3次元のPICシミュレーションによっても確かめられた。図6(a)には、3次元のPICシミュレーションで得られた電子分布を示す。軸対称な電磁放射が得られている。図6(b)には、カタストロフィー理論による位相空間での電子分布の折り畳みによりPICで得られた電子分布のフォールドやカスプが計算できることがわかる。この電子が極めて小さい領域に集積し、高強度レーザー光と相互作用すると、協同的な散乱(コヒーレント放射)が生じると予測される。我々は、実験で観測された高次高調波の電磁放射はこの機構によるものと考えた。

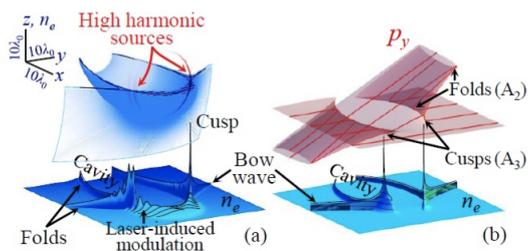


図6 3次元シミュレーション(a)とカタストロフィー理論(b)によって計算された電子密度分布

この放射機構を確かめるために、高分解能の2次元PICシミュレーションを行った。この結果、図7に示すように、100次を超える高調波が、カスプ周辺に生成されることを示した。この放射機構は、これまでに知られておらず、相対論的強度のレーザーを利用することにより、数keVコヒーレントX線源と成り得る。

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40件)

① S. S. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, A. G. R. Thomas, J. K. Koga, and S. V. Bulanov, “Schwinger Limit Attainability with Extreme Power

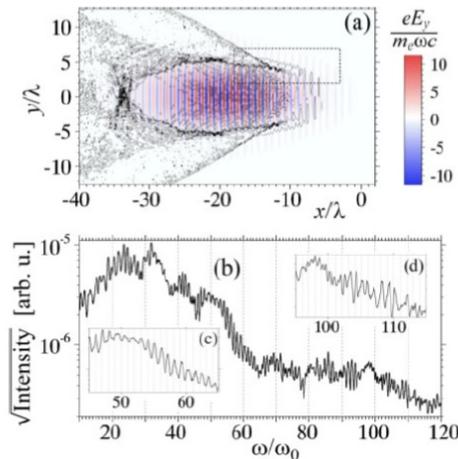


図7 2次元高分解能シミュレーションによって得られた電子密度とレーザー電場 (a)、高次高調波スペクトル (b)。

Lasers”, Phys. Rev. Lett. **105**, 220407 (4pages) (2010).

② S. V. Bulanov, E. Yu. Echikina, T. Esirkepov, I. N. Inovenkov, M. Kando, F. Pegoraro, G. Korn, “Unlimited Ion Acceleration by Radiation Pressure”, Phys. Lett. **104**, 135003 (4pages) (2010).

③ H. Kiriya, 他20名, Opt. Lett. **35**, 1497-1499 (2010).

④ K. Kawase, M. Kando, A. S. Pirozhkov, T. Homma, T. Kameshima, I. Daito, Y. Hayashi, H. Kotaki, Y. Fukuda, T. Zh. Esirkepov, J. K. Koga, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz, E. N. Ragozin, S. V. Bulanov, and T. Tajima, “Method of Observing the Spot Where Full-Power Counter-Propagating Laser Pulses Collide in Plasma Media,” Appl. Phys. Express **3** (1), 016101(3pages) (2010).

⑤ M. Kando, A. S. Pirozhkov, K. Kawase, T. Zh. Esirkepov, Y. Fukuda, H. Kiriya, H. Okada, I. Daito, T. Kameshima, Y. Hayashi, H. Kotaki, M. Mori, J. K. Koga, H. Daido, A. Ya. Faenov, T. Pikuz, J. Ma, L.-M. Chen, E. N. Ragozin, T. Kawachi, Y. Kato, T. Tajima, S. V. Bulanov, “Enhancement of Photon Number Reflected by the Relativistic Flying Mirror.” Phys. Rev. Lett. **103**, 235003 (4pages) (2009).

⑥ T. Zh. Esirkepov, S. V. Bulanov, M. Kando, A. S. Pirozhkov, A. G. Zhidkov,

“Boosted High-Harmonics Pulse from a Double-Sided Relativistic Mirror”, Phys. Rev. Lett. **103**, 025002 (4pages) (2009).

- ⑦ A. V. Panchenko, T. Zh. Esirkepov, A. S. Pirozhkov, M. Kando, F. F. Kamenets, S. V. Bulanov, “Interaction of electromagnetic waves with caustics in plasma flows”, Phys. Rev. E **78**, 056402 (13pages) (2008).
- ⑧ T. Zh. Esirkepov, Y. Kato, S. V. Bulanov, “Bow Wave from Ultraintense Electromagnetic Pulses in Plasmas”, Phys. Rev. Lett. **101**, 265001 (4pages) (2008).

[学会発表] (計 41 件)

- ① S. V. Bulanov, “Extreme Field Science with Ultrahigh Power Lasers” (invited), Laser-Plasma Joint Pioneering Session of the Conference of the Korean Physical Society, Apr.13, Daejeon, Korea (2010).
- ② A. S. Pirozhkov, “X-ray radiation from underdense relativistic plasmas”, International Committee on Ultra Intense Lasers Conference (ICUIL) 2010, Sep. 29, New York, USA (2010).
- ③ M. Kando, “XUV and IR electromagnetic radiation from nonlinear laser-plasma interaction”, Apr.22, Prague, Czech Republic (2009).
- ④ T. Esirkepov, “Flying Mirror: future brightest X-ray source”, Extreme Light Infrastructure (ELI) Workshop and School on Fundamental Physics with Ultra-high Fields, Sep.30, Monastery Frauenworth, Germany (2008).

[図書] (計 1 件)

- ① P. Bolton, S. V. Bulanov, H. Daido (Editors), “Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied for Science, Industry, and Medicine”, American Institute of Physics, 458 pages, 2009.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称: レーザー光のコントラスト向上法及びレーザー発生装置  
発明者: 桐山博光、他  
権利者:  
種類: 特許  
番号: 第 4526409 号  
取得年月日: 2010.6.11  
国内外の別: 国内

[その他]  
ホームページ等  
<http://wwwapr.kansai.jaea.go.jp/aprc/beam-la.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

ブラノフ セルゲイ (BULANOV SERGEI)  
日本原子力研究開発機構・客員研究員  
研究者番号: 00391318

### (2) 研究分担者

神門 正城 (KANDO MASAKI)  
日本原子力研究開発機構・研究副主幹  
研究者番号: 50343942  
エシユールケポフ ティムル (ESIRKEPOV TIMUR)  
日本原子力研究開発機構・研究副主幹  
研究者番号: 10370363  
ピロジコフ アレクサンダー (PIROZHKOVA ALEXANDER)  
日本原子力研究開発機構・研究員  
研究者番号: 00446410  
河内 哲哉 (KAWACHI TETSUYA)  
日本原子力研究開発機構・研究主幹  
研究者番号: 40343941  
桐山 博光 (KIRIYAMA HIROMITSU)  
日本原子力研究開発機構・研究副主幹  
研究者番号: 40354972

### (3) 連携研究者

小瀧 秀行 (KOTAKI HIDEYUKI)  
日本原子力研究開発機構・研究副主幹  
研究者番号: 60354974  
福田 祐仁 (FUKUDA YUJI)  
日本原子力研究開発機構・研究副主幹  
研究者番号: 30311327