

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247100

研究課題名(和文) 相対論領域におけるクラスター媒質中での相乗的イオン加速機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of a synergetic ion acceleration process in cluster media at a relativistic laser intensity regime

研究代表者

福田 祐仁 (Fukuda, Yuji)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・上席研究員(定常)

研究者番号：30311327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,200,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らが世界に先駆けて開発したクラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速手法を発展させ、前人未踏の100メガ電子ボルト(MeV)を超える準単色イオンを安定発生させる手法の確立を目的として研究を行った。計算機シミュレーションにより、相対論的透明化が有効となるレーザー強度領域においてクラスター内に無衝突衝撃波を立てるといふ、衝撃波加速の原理に基づく新しいイオン加速メカニズムを発見した。また、QST関西研J-KAREN-Pレーザーを用い、マイクロメートルサイズの水素クラスターターゲットを用いたイオン加速実験により、10 MeVを超える高純度陽子線の繰り返し発生に世界で初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：The project aims, by utilizing the advanced ion acceleration method with the use of micron-size cluster targets developed by PI and co-workers, to find a new way to generate quasi-monoenergetic ion beams exceeding 100 MeV, which has a potential to be widely applicable to medical and industrial purposes, but no one has accomplished before. In numerical studies using the 3D-PIC code, we have discovered a new approach for accelerating a quasimonoenergetic proton bunch up to 290 MeV via a hemispherically converging collisionless shock created via laser-cluster interactions at the relativistically induced transparency regime. We have conducted ion acceleration experiments with the PW class J-KAREN-P laser at QST-KPSI. We found that only protons having the energies exceeding 10 MeV were for the first time accelerated in the forward direction with a high repetition rate.

研究分野：レーザープラズマ科学

キーワード：高強度レーザー レーザー加速 クーロン爆発 クラスター 相対論プラズマ 無衝突衝撃波 相対論的透明化 Mie散乱

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高強度レーザーと物質との相互作用研究が急速に進展する中、レーザー駆動イオン加速研究が大きな注目を集めている。例えば、80-250 MeV の陽子線の発生が可能となれば、粒子線がん治療装置の粒子線源として用いることができ、治療装置の小型化による粒子線がん治療普及の一助となると期待できる。

しかし、1990年代後半から始まった、固体薄膜ターゲットを用いたイオン加速実験は、レーザーエネルギーからイオンエネルギーへの変換効率が悪く、既存のレーザー技術を用いてイオンの加速エネルギーを増大させるには、固体薄膜ターゲットに代わる、より高効率の新しいイオン加速手法の開発が必須の状況となっていた。

このような状況下、申請者らは、2009年に世界に先駆けて、数多体系であるクラスターを含むガスターゲット（以下、クラスターターゲットと呼ぶ。）をイオン加速研究に導入し、従来手法による同規模クラスのレーザー装置を用いた場合よりも約 10 倍高いエネルギーまで重イオンを加速出来ることを実証した[1]。

理論・シミュレーション研究により、磁気渦生成、クラスターのクーロン爆発、衝撃波形成、シース電場形成等、の様々なプロセスが相乗的に作用し、高エネルギーイオン加速に寄与することが示唆されている。従って、100 MeV を超えるイオンを安定に発生させるためには、個々のプロセスがどのような条件下で効果的に作用し相乗的効果を生み出すのかを明確にするための研究が必要である。

### <引用文献>

- ① Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 165002 (2009).

### 2. 研究の目的

本研究では、申請者らが世界に先駆けて実証実験に成功した、少数多体系であるクラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速手法に対し、実験研究と理論・シミュレーション研究とを効果的に融合させ、クラスターターゲットにレーザー照射して生成する臨界プラズマ中でのレーザー光の自己収束、磁気渦生成、クラスターのクーロン爆発、衝撃波形成、シース電場形成、ベータトロン X 線発生等、のプロセスが相乗的に機能する複雑なイオン加速機構を支配する物理法則と制御手法の解明をおこなう。これをもとに、100 メガ電子ボルト (MeV) を超える準単色イオンを安定発生させる手法の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1) プラズマ中の電場・磁場計測装置の開発、(2) プラズマ中の衝撃波可視化装置の開発、(3) 電子のベータトロン

運動に伴う X 線検出装置開発、の 3 つの基盤技術開発を行い、(4) これら装置を用いたイオン加速実験と(5) 理論・シミュレーション研究、とを効果的に融合させ研究を進める。

これをもとに、クラスターターゲットにレーザー照射して生成する臨界プラズマ中でのレーザー光の自己収束、磁気渦生成、クラスターのクーロン爆発、衝撃波形成、シース電場形成、ベータトロン X 線発生等、のプロセスが相乗的に機能する複雑なイオン加速機構を支配する物理法則と制御手法の解明を目指す。初めの 2 年間は、主として基盤技術開発（課題 1-3）とシミュレーション研究（課題 5）に費やし、残りの 2 年間はイオン加速実験研究（課題 4）とその結果を受けたシミュレーション研究（課題 5）を実施する。

### 4. 研究成果

#### (1) 基盤技術開発に関する研究成果

##### ① 水素クラスターターゲット開発

本研究開始以前から、研究代表者らが開発を進めていた温度制御機能付冷却ノズルを用いた水素クラスターターゲット発生装置開発（図 1 参照）、および、Mie 散乱理論を使ったクラスターサイズ評価手法開発を引き続き実施した。平成 26 年度に、ノズル温度 25 K、水素ガス圧 6 Mpa の条件下で、ミクロンサイズ（直径 0.33-2.0  $\mu\text{m}$ 、 $10^8$ - $10^{10}$  個の水素分子で構成）の水素クラスターターゲットの生成に世界で初めて成功した。平成 27 年度には、クラスターサイズ評価において、測定誤差を考慮した応答関数の作成、および、正則化法を取り入れた解析手法の導入により、サイズ評価の精度を大幅に向上させることに成功した[雑誌論文 3]。

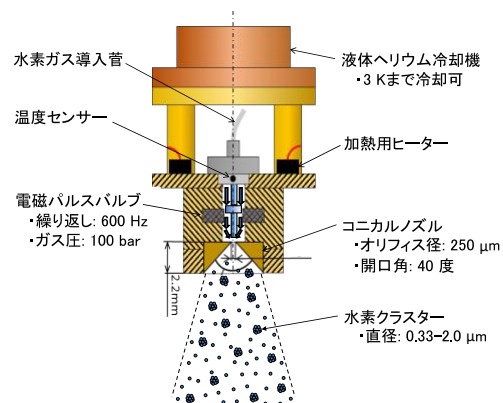


図 1. 本研究で用いる温度制御機能付冷却ノズルを用いた水素クラスター生成装置。直径 0.33-2.0  $\mu\text{m}$  の水素クラスターの生成が可能。

##### ② プラズマ中の電場・磁場計測装置の開発

世界初の試みとして、仏国 François Sylla 博士の協力を得て、シアリング型波面センサーを用いた高感度型磁場可視化システム開発の可能性について検討を行い、平成 28 年度に、これが可能であることを示すシミュレーション結果を得た。平成 29 年度に、仏国 LOA 研究所 (Laboratoire d'Optique Appliquée) に

いて、試作した波面センサーを用いた高感度型磁場可視化システムの原理検証実験を実施し、シグナルの初検出に成功した(図2参照)。

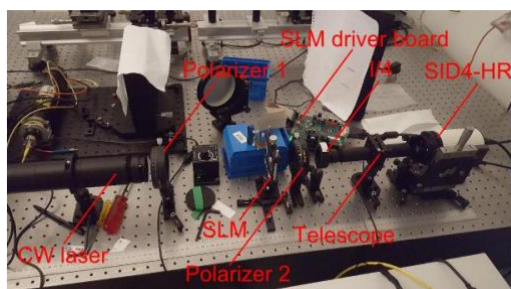


図 2. 波面センサーを用いた高感度型磁場可視化システムの原理検証実験の様子。

### ③ プラズマ中の衝撃波可視化装置の開発

平成 26 年度に、Normarski 型レーザー干渉計を用いた衝撃波可視化装置の設計を終え、干渉画像解析プログラムを作成した。平成 28 年度に、製作した衝撃波可視化装置装置に対し、微小振動を押さえるための改良を実施し、これまで困難であった水素ガスターゲットのレーザー干渉画像の取得に成功した(図 3 参照)[雑誌論文 1]。

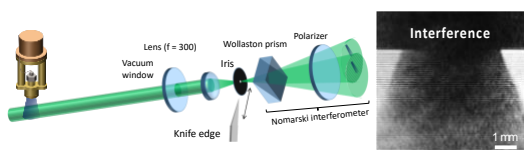


図 3. Normarski 型レーザー干渉計を用いた水素ガスターゲットのレーザー干渉画像の取得

### ④ イオン検出器の開発

これまでに研究代表者らが開拓してきたイオン計測手法をさらに発展させ、平成 28 年度に固体飛跡検出器 CR-39 の間に適切な厚さの減速材を挿入し、1 つの陽子線が複数の層の CR-39 にエッチピットを形成することを制限することで、エッチピットを計数するだけで 100 MeV を超えるレーザー加速陽子線のエネルギースペクトルを精密に再構成出来る、新たな CR-39 スタックの開発を行った。平成 29 年度には、設計・製作した CR-39 スタックに対し、放医研 HIMAC にて較正実験を実施し、100 MeV のプロトンに対して、7% 以下の誤差でエネルギー計測が可能であることを確認した(図 4 参照)[学会発表 4]。今後、この検出器を用いて、200 MeV を超える準単色陽子線の検出を試みる。

また、平成 28 年度には、本研究開始以前から研究代表者らが開発を進めていた 10 MeV 級リアルタイム型トムソンパラライオンエネルギー分析装置(イオン検出部に蛍光板付 MCP(=Micro channel plate)と CCD カメラを具備)の高度化を実施し、実験中にオンラインでイオン種・イオンエネルギーに関する

情報を表示できるよう、プログラムの改良を行った[雑誌論文 5]。平成 29 年度に、10 MeV 級リアルタイム型トムソンパラボラシステムのエネルギー較正実験を実施し、誤差 5% 以下の精度でイオンエネルギー評価が可能であることを確認した[学会発表 6]。

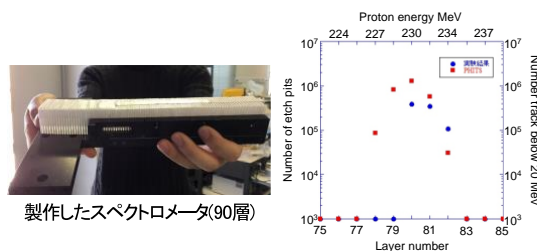


図 4. 新たに開発した 260 MeV 陽子線を検出可能な CR-39 スタック(左)。HIMAC230 MeV 陽子線を用いた較正実験の結果(右)。

### (2) 理論・シミュレーション研究

平成 26 年度に、粒子コード(EPIC3D)[2]を改良し、クラスターターゲット中の背景ガスイオンの加速機構を探るシミュレーションを実施し、背景ガスイオンの加速メカニズムを明らかにした[R. Matui et al., submitted to Phys. Rev. E (2017). 学会発表 3]。さらに、平成 27-28 年度にかけて、水素クラスターにレーザー照射した際、200 メガ電子ボルト(MeV)を超える単色性の高い陽子線を発生させる条件を新たに見だし、特許出願を行った。位相図を用いた解析により、クラスター表面のレーザー照射側で生じた無衝突衝撃波が、クラスター中央に内向き衝撃波として伝播し、この衝撃波に駆動された準単色イオン加速が起こるといふ、衝撃波加速(CSA)の原理に基づく新しい加速機構であることを明らかにした(図 5 参照)[R. Matui et al., submitted to Phys. Rev. Lett. (2018). 学会発表 8]。

一方、平成 26 年度に高エネルギー電子の放射減衰による  $\gamma$  線発生がイオン加速に及ぼす影響を評価するシミュレーションを実施し、レーザー集光強度が放射減衰が支配的となる領域(レーザー集光強度  $> 10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>)に達すると、イオン加速が抑制されることを新たに見出した[雑誌論文 6]。

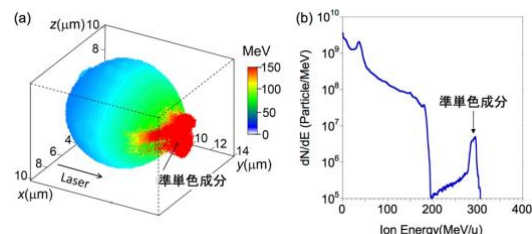


図 5. 高強度レーザーと水素クラスターとの相互作用シミュレーション結果。(a)イオンエネルギーの空間分布。準単色イオンがレーザー進行方向に加速。(b)イオンエネルギースペクトル。準単色イオン(290 MeV にピーク)が生成。



### (3) レーザーイオン加速実験

平成 29 年度に、量研関西研 J-KAREN レーザー施設[3]において、研究代表者らが独自開発したマイクロメートルサイズの水素クラスターターゲットを用いたイオン加速実験を実施した(レーザー集光強度  $1 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>) (図 6 参照)。その結果、レーザー進行軸から 57.4 度方向に設置したリアルタイム型トムソンパラボラを用いて、0.1 Hz 動作する J-KAREN レーザーに同期して、最大 7 MeV の高純度陽子線のリアルタイム検出に世界で初めて成功した(図 7 参照)[雑誌論文 1、学会発表 5]。一方、レーザー進行方向に設置した CR-39 スタックを用いたイオン計測において最大約 12 MeV の高純度陽子線のシグナルかを観測した[学会発表 1, 2]。さらに、素粒子物理学実験や宇宙線ミュオングラフィックで使用される原子核乾板をレーザー進行方向に設置し、最大 12 MeV 陽子線の検出に世界で初めて成功した[学会発表 4]。

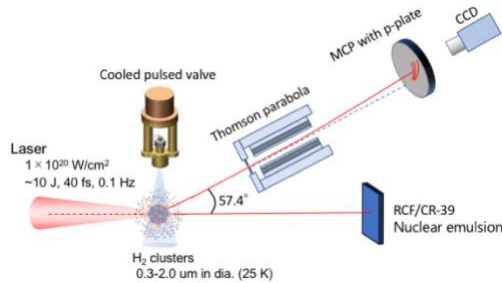


図 6. 水素クラスターを用いた高純度陽子線加速実験の概略図。

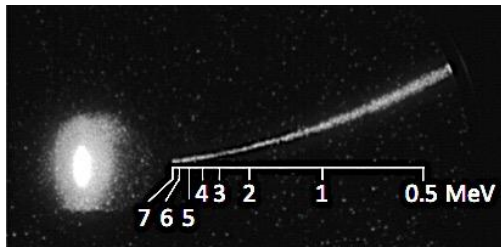


図 7. オンライントムソンパラボラで捉えたレーザー加速陽子線のシグナル。陽子以外の不純物は見られない。

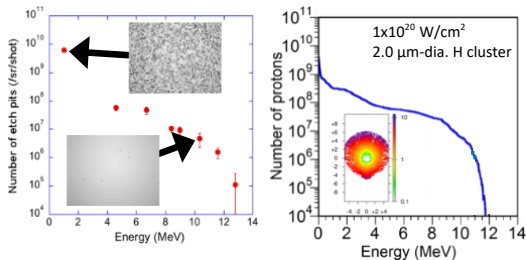


図 8. CR-39 によるイオン検出結果から得られた陽子線のエネルギースペクトル(左)。実験を模擬した三次元プラズマシミュレーションから得られた陽子線のエネルギースペクトル(右)。

実験を模擬した三次元粒子コードシミュレーションからは、直径 1.2-2.0 マイクロメートルの水素クラスターの不完全クーロン爆発[4]により、約 13 MeV の陽子線がレーザー進行方向に加速されることを示す結果が得られ、実験とシミュレーションはよく一致する結果となった[学会発表 1, 2]。

一方、仏国 LULI 研究所(Laboratoire LULI)において、レーザー照射されたクラスターターゲットから生成する Blast Wave (爆風波) の特性を調べる共同実験を実施した[雑誌論文 2]。平成 28 年度は、クラスターターゲットにレーザー照射したプラズマに対するトムソン散乱スペクトルを測定し、プラズマの電子温度、および、イオン温度の計測に成功した。平成 29 年度は、Blast Wave 生成過程における外部磁場の影響を評価する実験を実施し、初データの取得に成功した。現在、シミュレーションと比較し、Blast Wave 生成とイオン加速との関連について調べている。

### (4) まとめ

以上のとおり、研究目的である、100 MeV を超える準単色イオンを安定発生させるための条件については、H28 年度のシミュレーション研究によりこれを見いだすことが出来た。H29 年度に、J-KAREN レーザーを用いたイオン加速実験を実施し、10 MeV を超える高純度陽子線の繰り返し発生に世界で初めて成功した。

### (5) 成果の国内外における位置づけとインパクト

現在、レーザー加速で、単色のイオンを生成可能な有望なイオン加速手法として、輻射圧加速(RPA)と無衝突衝撃波加速(CSA)が精力的に研究されている。しかしながら、100 MeV を超える準単色イオン加速のためには、RPA 法ではプレパルスを抑え、CSA 法では特殊な高密度ターゲットの開発が必要といった問題点を抱えている。

このような状況の中、我々は、独自開発したマイクロメートルサイズの水素クラスターターゲットを用いることで、クラスター内に無衝突衝撃波を立てるという、衝撃波加速の原理に基づく新しいイオン加速メカニズムを発見した。この手法は、上記の 2 つの手法が持つ問題点をクリア出来る手法として位置づけられる。この手法について、2016 年 3 月に特許申請を行った。また、2017 年 3 月の日本物理学会年会での発表[学会発表 8]に対して、学生優秀発表賞が授与されるなど、この成果は高く評価されている。

応用の観点からは、短パルス性(fs-ps)というレーザー駆動陽子線の特徴を利用して、XFEL 等と組み合わせることで鋼材の脆性破壊のメカニズムを探る新しい研究分野の開拓が期待され、このための実験体系の検討を開始したところである。

(6)当初予期していない事象が起きたことにより得られた新たな知見

本研究を進める中で見出した準単色イオン発生方法(=クラスター内に無衝突衝撃波を立てるといふ、衝撃波加速の原理に基づく新しいイオン加速メカニズム) [R. Matui et al., submitted to Phys. Rev. Lett. (2018). 学会発表8、特許申請中]は、当初全く予想していない加速メカニズムであった。この新たな加速手法の発見が、本研究の目的である「100 MeV電子ボルト(MeV)を超える準単色イオンを安定発生させる手法の確立」につながった。現在、このシミュレーション研究で予測された、200 MeVを超える準単色陽子線を発生させる実験の準備を進めている。

<引用文献>

- ② Y. Kishimoto et al., J. Plasma Phys. **72**, 971 (2006).
- ③ H. Kiriya et al., Opt. Lett. **43**, 2595 (2018).
- ④ Y. Kishimoto et al., Phys. Plasmas **9**, 589 (2002).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 24 件)

- ① S. Jinno, M. Kanasaki, M. Uno, R. Matsui, M. Uesaka, Y. Kishimoto, Y. Fukuda, "Micron-Sized Hydrogen Cluster Target for Laser-Driven Proton Acceleration", Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 044021 (9pp) (2018).  
査読有 DOI 10.1088/1361-6587/aaafa8
- ② A. Marocchino, A. Rivasio, A. Levy, L. Lancia, Y. Fukuda, S. Jinno, S. Atzeni, D. Doria, C. Prigent, E. Lamour, D. Vernhet, M. Borghesi, and L. Romagnani, Transition from Nonlocal Electron Transport to Radiative Regime in an expanding blast wave, Appl. Phys. Lett. (accepted 2018).
- ③ S. Jinno, H. Tanaka, R. Matsui, M. Kanasaki, H. Sakaki, M. Kando, K. Kondo, A. Sugiyama, M. Uesaka, Y. Kishimoto, Y. Fukuda, "Characterization of micron-size hydrogen clusters using Mie scattering, Opt. Express **25**, 1877418783 (2017).  
査読有 DOI 10.1364/OE.25.018774
- ④ A. S. Pirozhkov, Y. Fukuda, M. Nishiuchi, H. Kiriya, A. Sagisaka, K. Ogura, M. Mori, M. Kishimoto, H. Sakaki, N. P. Dover, K. Kondo, N. Nakanii, K. Huang, M. Kanasaki, K. Kondo, M. Kando, "Approaching the diffraction-limited, bandwidth-limited Petawatt", Opt. Express **25**, 20486-20501 (2017).  
査読有 DOI 10.1364/OE.25.020486
- ⑤ 神野智史, 福田祐仁, "リアルタイム型トムソンパラボラスペクトロメータによるレーザー加速イオンの計測", 放射線化学 **104**, p41-45 (2017).  
査読有 DOI なし

- ⑥ N. Iwata, H. Nagatomo, Y. Fukuda, R. Matsui, and Y. Kishimoto, "Effects of radiation reaction in the interaction between cluster media and high intensity lasers in the radiation dominant regime", Phys. Plasmas **23**, 063115-1-17 (2016).  
査読有 DOI 10.1063/1.4954152

- ⑦ 福田祐仁, "レーザー駆動粒子加速とその医療応用への可能性", 医学物理 **36 Sup.2**, p40-49 (2016).  
査読有 DOI なし

- ⑧ M. Kanasaki, S. Jinno, H. Sakaki, K. Kondo, K. Oda, T. Yamauchi, Y. Fukuda, "The precise energy spectra measurement of laser-accelerated MeV/n-class high-Z ions and protons using CR-39 detectors", Plasma Phys. Control. Fusion **58**, 034013 (6pp) (2016).  
査読有 DOI 10.1088/0741-3335/58/3/034013

- ⑨ M. Kanasaki, S. Jinno, H. Sakaki, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz, M. Nishiuchi, H. Kiriya, M. Kando, A. Sugiyama, K. Kondo, R. Matsui, Y. Kishimoto, K. Morishima, Y. Watanabe, C. Scullion, A. G. Smyth, A. Alejo, D. Doria, S. Kar, M. Borghesi, K. Oda, T. Yamauchi, Y. Fukuda, "Observation of MeV inhomogeneous spatial distribution of the hydrodynamic ambipolar expansion of clusters", Radiat. Meas. **83**, 12-14 (2015).  
査読有 DOI 10.1016/j.radmeas.2015.06.011

- ⑩ S. Jinno, Y. Fukuda, H. Sakaki, A. Yogo, M. Kanasaki, K. Kondo, A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev, T. A. Pikuz, A. S. Boldarev, and V. A. Gasilov, "Development of an Apparatus for Characterization of Cluster-Gas Targets for Laser-Driven Particle Accelerations", Progress in Ultrafast Intense Laser Science XI, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p215-233 (2015).  
査読有 DOI 10.1007/978-3-319-06731-5\_10

- 他 査読有 14 件

[学会発表] (計 88 件)

- ① (Invited talk) Y. Fukuda, "High-Repetitive, Multi-MeV, Impurity-free Proton Beams via Coulomb Explosion of Laser-irradiated Micron-Size Hydrogen Clusters", The 10th Asian Symposium on Intense Laser Science (ASILS10), Dubai, UAE, March 2018.
- ② 福田祐仁, 金崎真聡, 神野智史, ピロジコフアレキサンダー, 匂坂明人, 小倉浩一, 宮坂泰弘, 中新信彦, 宇野雅貴, 高野雄太, 森井厚作, 浅井孝文, 坂本溪太, 清水和輝, 森島邦博, 小平 聡, 岡本祐樹, 松井隆太郎, 岸本泰明, 小田啓二, 山内知也, 上坂充, 近藤公伯, 河内哲哉, 神門正城, 桐山博光, "マイクロメートルサイズ水素クラスターのクーロン爆発による multi-MeV

- 純陽子線の高繰り返し発生"、日本物理学会第73回年次大会、千葉、2018年3月。
- ③ 松井隆太郎、福田祐仁、岸本泰明、"クラスター媒質中で生成する無衝突プラズマ境界層における準安定非線形波の形成とイオン加速"、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月。
- ④ 金崎真聡、神野智史、森島邦博、小平 聡、宇野雅貴、高野雄太、森井厚作、浅井孝文、坂本溪太、清水和輝、小田啓二、山内知也、桐山博光、福田祐仁、"受動型検出器を用いた水素クラスターから発生するレーザー加速陽子線の計測"、第65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月
- ⑤ 神野智史、金崎真聡、清水和輝、上坂 充、桐山博光、福田祐仁、"リアルタイムトムソンパラボラの開発とレーザー駆動multi-MeV純プロトンビームの0.1 Hz高繰り返し計測"、レーザー学会学術講演会第38回年次大会、京都、2018年1月。
- ⑥ (Invited talk) Y. Fukuda, "Laser-Driven Ion Accelerations with Submicron Cluster Targets: Contributions of Magnetic Vortexes", International Symposium on Topical Problems of Nonlinear Wave Physics 2017 (NWP 207), Moscow-St.-Petersburg, Russia, July 2017.
- ⑦ (Invited talk) Y. Fukuda, "Generation of multi-MeV pure proton beams via Coulomb explosion of laser-irradiated micron-size hydrogen clusters", 2017 US-Japan workshop on High Intensity Laser Matter Interaction, San Diego, USA, December 2107.
- ⑧ 松井隆太郎、福田祐仁、岸本泰明、"相対論的透明化領域におけるクラスター内無衝突衝撃波による290 MeV準単色プロトン加速"、日本物理学会第72回年次大会、2017年3月(学生優秀発表賞受賞)。
- ⑨ (Invited talk) Y. Fukuda, "Development and Characterization of the Hydrogen Microparticle Target for Impurity-Free >100 MeV Proton Acceleration with Advanced Laser Light Sources", The 1st Asia-Pacific User Meeting for the Helmholtz International Beamline for Extreme Field (HIBEF2016), Shanghai, China, June 2016.
- ⑩ (招待講演) 福田祐仁、"レーザー駆動粒子加速とその医療応用への可能性"、第111回日本医学物理学学会学術大会、神奈川、2016年4月。
- ⑪ (Invited talk) Y. Fukuda, "Laser-driven particle acceleration and its applications", International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 14 (ISUILS14), Kauai, USA, December 2015.
- 他 国内学会 48 件、国際学会 29 件

[図書] (計 1 件)

- ① 福田祐仁、"原子分子クラスターと強光子場"、CSJカレントレビュー**18** 強光子場の化学、化学同人、172(116-122) (2015)。

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: イオン加速方法

発明者: 福田祐仁、岸本泰明、松井隆太郎

権利者: 量子科学技術研究開発機構

種類: 特許

番号: 特願 2016-051832

出願年月日: 2016年03月16日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.kansai.qst.go.jp/cluster-research/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

- 福田 祐仁 (FUKUDA, Yuji)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・上席研究員

研究者番号: 30311327

### (2) 研究分担者

- 神野 智史 (JINNO, Satoshi)
- 東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 80596924

- 金崎 真聡 (KANASAKI, Masato)
- 神戸大学・海事科学研究科・助教

研究者番号: 90767336

- 榊 泰直 (SAKAKI, Hironao)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・上席研究員

研究者番号: 00354746

### (3) 連携研究者

- 岸本 泰明 (KISHIMOTO, Yasuaki)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号: 10344441

- 山内 知也 (YAMAUCHI, Tomoya)

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号: 40211619

- 森島 邦博 (MORISHIMA, Kunihiko)

名古屋大学・高等研究院・特任助教

研究者番号: 30377915

### (4) 研究協力者

松井隆太郎(MATSUI, Ryutarou)、田中宏堯(TANAKA, Hirotaka)、岡本祐樹(OKAMOTO Yuki)、岩田夏弥(IWATA, Natsumi)、宇野雅貴(UNO, Masataka)、高野雄太(TAKANO, Yuta)、森井厚作(MORII, Kosaku)、浅井孝文(ASAI, Takafumi)、坂本溪太(SAKAMOTO, Keita)、清水和輝(SHIMIZU, Kazuki)、小平聡(KODAIRA, Satoshi)、小田啓二(ODA, Keiji)、Lorenzo Romagnani、François Sylla