

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287146

研究課題名(和文) ナノチューブ加速器を使ったプロトンビーム生成

研究課題名(英文) Proton Beam Generation via Nanotube Accelerator

研究代表者

村上 匡且 (Murakami, Masakatsu)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センタ・教授

研究者番号：80192772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、各国の研究機関において、将来の様々な医療・産業応用を視野に入れた、超高強度レーザーを使ったプロトンビーム生成の研究がしのぎを削って展開されている。本申請者は最近、カーボンナノチューブ内に水素化合物を内挿した構造体に超高強度・超短パルスレーザーを照射することで高品質のプロトンビームが生成されるイオン加速方式「ナノチューブ加速器」を提案した。また、これとは別に、構成物質の配合を最適化させた球状ナノクラスターのクーロン爆発によって単色プロトンを生成できる事を見出した。本研究では、理論・シミュレーションと実験の手法を用い、これらナノ構造ターゲットを使ったプロトンビーム生成の最適化を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Irradiating ultra intense ultrashort laser pulses on nano size cluster targets, protons are accelerated due to Coulomb explosion, the energies of which are of the order of a few MeV. In terms of the reactions between Lithium and the protons, neutrons are generated. optimizing the laser and target parameters, we maximize the coupling efficiency of neutron yields. In particular, the cluster targets are made of two or three atomic components in order to produce quasi-monoenergetic protons. The resultant neutrons are expected to have relatively low temperatures lower than a few 100 keV because the endothermic reactions.

研究分野：レーザーイオン加速

キーワード：ナノチューブ加速器

1. 研究開始当初の背景

照射強度 $10^{18}\sim 10^{21}\text{W/cm}^2$ 、パルス幅 10~100 fs といったパラメータを持つ超高強度・超短パルスレーザーを物質に照射することにより、数十 MeV クラスの高エネルギープロトンが生成することは実験的に良く知られている。特に、エネルギースペクトルがシャープなピークを持つ（いわゆる単色の）高エネルギーのプロトンビーム生成は、プロトンセラピーとしての医療応用、プロトンラジオグラフィによる燃料電池開発、コンパクト中性子源等、極めて魅力的な将来応用に繋がることから、過去十数年、各国の機関がしのぎを削って研究している。応用の観点から生成プロトンに対して要求されるのは、特に、高い指向性とエネルギー均一性（単色性）の2点である。

2. 研究の目的

ナノチューブをイオン加速の道具として使ったプラズマ実験は未だ前例がなく、したがって、ターゲットとレーザーの各種パラメータの組み合わせから得られるプロトン信号（エネルギースペクトル）の実験データベース構築自体が新たな試みとなる。

ナノチューブ内への内挿物質の有無によって得られるプロトン信号を観測する。その際、理論・シミュレーションから予想されるエネルギー帯域に匹敵する有意な信号の差が確認できれば、「ナノチューブ加速器」内部のクーロン場によって加速され原理実証できた事になる。

従来の TNSA 方式では、プロトンの最大エネルギーは平板とレーザー入射方向の成す角度に大きく依存する事が分かっている。一方、ナノチューブ加速の原理で加速されるプロトンエネルギーは入射レーザーの方向に依存しない。したがって、プロトンの最大エネルギーが、レーザーの入射方向にどう依存するかを観測し、依存性が殆ど無い事が確認

されればナノチューブ加速器の原理実証のクロスチェックとなる。

3. 研究の方法

レーザーイオン加速の研究分野においては、癌治療、プロトン（中性子）断層写真、プロトン核融合、コンパクト中性子源といった将来の様々な医療・産業応用が視野に入ることから、超短パルス・超高強度レーザーを使ったプロトンや中性子などの量子ビーム源開発が各国の研究機関でしのぎを削って展開されている。

本研究では、ナノ構造ターゲットを使ったプロトンビーム生成とその最適化に主眼を置いて研究を進めた。例えばカーボンナノチューブ内に水素化合物を内挿した構造体に超高強度・超短パルスレーザーを照射することで高品質のプロトンビームが生成されるイオン加速方式「ナノチューブ加速器」（図1）を使い、そのイオン加速機構の解明とともに将来の応用に資するべく理論・シミュレーション及び実験手法により研究を進めた。また、ナノチューブ加速器と並行して、構成物質の配合を最適化させた球状ナノクラスターのクーロン爆発（図2）による準単色プ

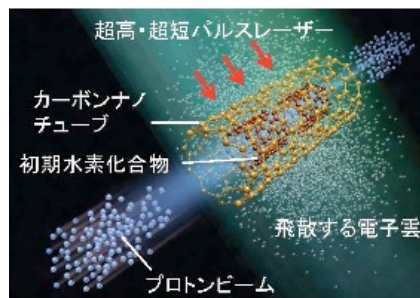


図1：ナノチューブ加速器

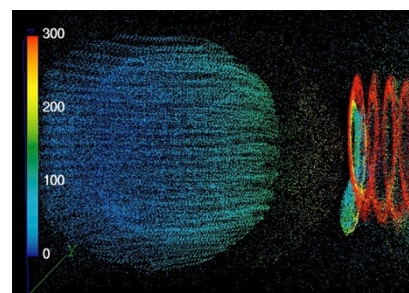


図2：クーロン爆発

ロトン生成の研究も行った。

4. 研究成果

ナノ構造を介したレーザーイオン加速物理を究明すべく理論シミュレーション及び実験研究を行った。

(A) ナノクラスタを使ったクーロン爆発によるプロトン加速

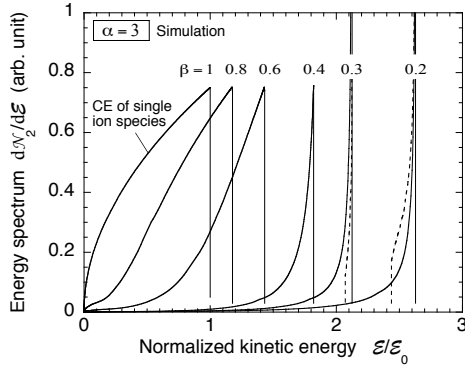


図3 クーロン爆発の単色化

クーロン爆発によるイオン加速は物理機構が明確であり、単色化も比較的容易であることから、実用化にも近い手法である。単一イオン種のクーロン爆発では、よく知られているようにプロトンのエネルギースペクトルはブロードなものとなる。そこで我々は、クラスター中に、異なる二種の異なるイオンを一様に混ぜ合わせることを考えた。これにより、加速の度合いが違うイオンフラックスがナノスケールの空間に共存し、重いイオン（ここでは炭素）が軽いイオン（プロトン）の加速を増大させ、結果として軽いイオンの準単色化（等エネルギー化）が可能であることを理論的に導いた。さらに、その理想的な

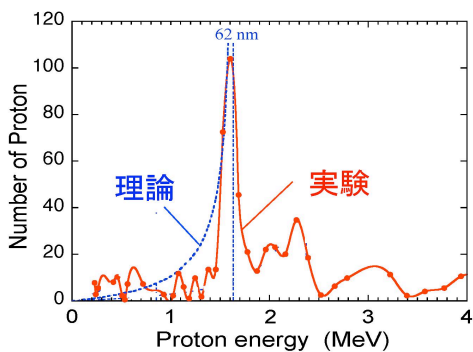


図4 水を使ったクーロン爆発実験

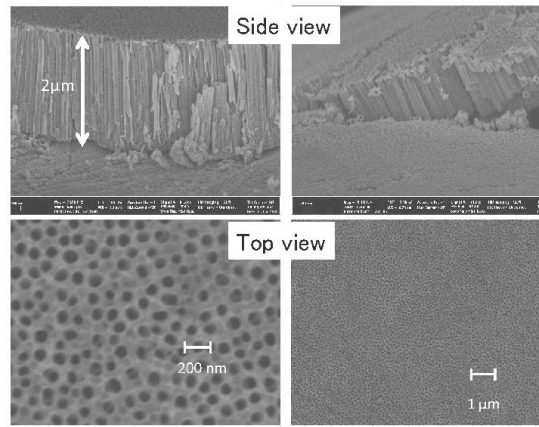


図5 ナノターゲットのSEM画像

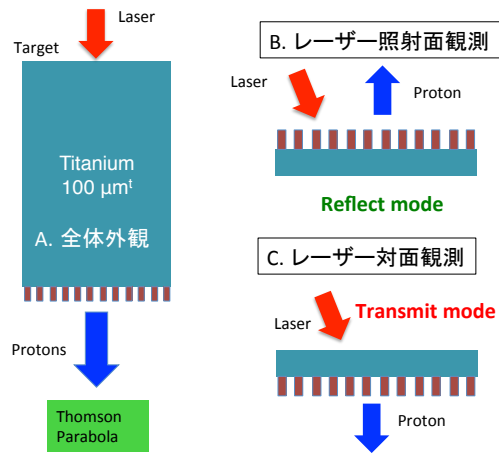


図6 実験のレーザー照射配置

配合比として水分子が近い値を持っていることを見出した。図3は、重元素のドーピング量を変化させると、プロトンのエネルギースペクトルが次第に単色化していく様子を表している。次いで、直径100ナノメートル程度の水クラスター噴霧装置を使ってレーザー実験を行なった。その結果、図4のようにエネルギーが1.5メガ電子ボルト付近にシャープな分布を持つプロトンを得ることに成功した。これは通常の平板ターゲットでは決して得られないエネルギースペクトルである

(B) ナノチューブを使ったクーロン爆発によるプロトン加速

図1に示したナノチューブ加速器の原理図には単体のナノチューブしか描かれていないが、実際の応用を考えた場合、遥かに多くのナノチューブによるプロトンが必要と

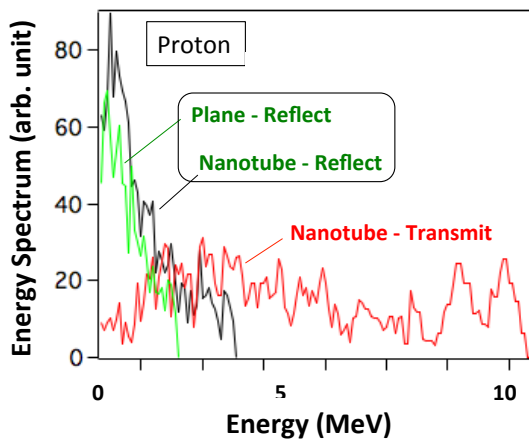


図7 ナノチューブターゲット実験で観測されたプロトンのシグナル

なる。ナノチューブ加速器の原理実証を行うべく、韓国光州科学技術院 (APRI) との共同研究として国際共同実験を行なった。同施設には、現在、世界最高レベルの超高強・超短パルス実験の実施体制が整っている（同施設とは平成 25 年 8 月、部局間の研究協力協定を締結し、本研究課題の共同実験の準備を開始）。こうして平成 26 年 2 月と 8 月の 2 回に渡って「ナノチューブ加速器」の実証実験が韓国 APRI との共同実験によって行われた。

図 5 は実験で使用されたナノチューブターゲットの SEM 画像を示す。酸化チタニウムを素材として、その基板上にどう材質による無数のナノチューブが見て取れる。各々のナノチューブは内径 70 ナノメートル、外径 100 ナノメートル程度であり、軸方向の長さは 2 ミクロンであった。

図 6 はレーザー、ターゲット、観測（トムソンパラボラ）の異なる配置を示している。B 配置はレーザー照射面と同じ側でプロトンシグナルを観測しようというもの、C はレーザー照射の対面（裏面）から出てくるプロトンを観測しようとする配置である。

実験の結果、プロトン信号は、B 配位において、ナノ構造が「ない場合」に比べ「ある場合」は吸収率の増加が観測されたが、最大エネルギーは高々 4 MeV 程度であった。この

吸収率の増加に関しては、欧州の研究グループからの報告もある。物理的な理由として、超高強度レーザーの照射面が実質的に増大するとともに、レーザーの反射損失を抑えるという二重の物理効果によって吸収率が増大するものと推測される。これに対し C 配位では、ナノ構造がない場合、信号はほとんど得られなかったが、ナノ構造がある場合、プロトンは最大 10MeV まで広範囲に渡って生成されることがわかった（図 7 参照）。これはナノチューブという特殊構造によって静電場が増幅されたためである。現実には図 1 で説明した、ナノチューブ開口端の正電荷によるクーロン反発効果に加えて、真空中に飛び出した電子雲による電場加速 (TNSA 効果) も協働しているものと推察される。図 7 に示される韓国との共同実験によりナノチューブ加速器の原理実証が達成された。

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 J.J.Honrubia, A.Morace, M. Murakami, "On Intense Proton Beam Generation and Transport in Hollow Cones", Matter and Radiation at Extremes, 査読有, Vol.2, 2017, pp.28-36.
- ② M.Liu, S-M.Weng, Y.T.Li, D.W.Yuan, M.Chen, P.Mulser, Z.M.Sheng, M.Murakami, L.L.Yu, X.I.Zheng, and J.Zhang, "Collisionless Electrostatic Shock Formation and Ion Acceleration in Intense Laser Interactions with Near Critical Density Plasmas", Phys. Plasmas, 査読有, Vol.23, 2016, pp.1-8.
- ③ S-M.Weng, M.Liu, Z.M.Sheng, M.Murakami, M.Chen, I.L.Yu, and J.Zhang, "Dense Blocks of Energetic Ions Driven by Multi-Petawatt Lasers", Scientific Reports, 査読有, Vol.6, 2016, 22150 (pp.1-5).

- ④ J.W.Wang, W.Yu, M.Y.Yu, H.Xu, J.J.Ju, S.X.Luan, **M.Murakami**, M.Zepf, and S. Rykovanov, "High-energy-density electron beam from interaction of two successive laser pulses with subcritical-density plasma", Phys. Rev. Accel. Beams, 査読有, Vol. 19, 2016, 021301 (pp.1-9).
- ⑤ A. L. Velikovich, **M. Murakami**, B. D. Taylor, J. L. Giuliani, S. T. Zalesak, and Y. Iwamoto, "Stability of stagnation via an expanding accretion shock wave", Phys. Plasmas, Vol. 23, 2016, 052706 (pp.1-16).
- ⑥ **M. Murakami** and D. Nishi, "Optimization of laser illumination configuration for directly driven inertial confinement fusion", Matter and Radiation at Extremes Vol. 2, 2017, pp.55 – 68.

[学会発表] (計 4 件)

- ① **M.Murakami**, A.Yogo, K.Mima et al "Efficient Proton Acceleration by Long Pulse Laser", 13rd Direct-Drive & Fast-Ignition Workshop, 2017年03月22日, サラマンカ/スペイン.
- ② **M. Murakami**,K.Mima, A.Yogo et al. "Anomalous Electron Heating and Ion Acceleration with High-Contrast Laser Pulses on LFEX", 37th International Workshop on High Energy Density Physics with Intense Ion and Laser Beams, 2017年02月02日, ヒルシェック/オーストリア.
- ③ **M. Murakami** and M.A.Zosa, "Efficient Neutron Generation by Coulomb Explosions of Multi-component Targets", American Physics Society (APS), 2016年11月02日, サンノゼ/米国.
- ④ **M. Murakami**, H. Azechi, S. Fujioka et al., "High Energy Density Physics Research at ILE, Osaka", "28th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases", 2016年09月01日, ベオグラード/セルビア.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上匡且 (MURAKAMI Masakatsu)
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：80192772

(2) 研究分担者

金子 俊郎 (KANEKO Toshiro)
東北大学工学研究科・教授
研究者番号：30312599

(3) 研究分担者

加藤 俊顕 (KATO Toshiaki)
東北大学工学研究科・助教
研究者番号：20502082

(4) 研究分担者

山ノ井 航平 (YAMANOI Kohei)
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・助教
研究者番号：30722813