

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740280

研究課題名(和文) レーザー駆動陽子線の新「追加速」手法：医学応用可能な100MeV級エネルギーへ

研究課題名(英文) Novel post-acceleration method for the laser driven ions: towards 100MeV energy

研究代表者

西内 満美子(高井満美子)(NISHIUCHI, Mamiko)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：70391315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：近年のレーザー駆動イオン加速の発展により、既存の加速器の大幅な小型化がみこめる。レーザー駆動イオン線は、発生点において、既存の加速器の提供するビームとは全く異なる「超小加速領域・高ピーク電流・低エミッタンス」等の優れた特長を持つ。と同時に、「広い発散角・連続したエネルギースペクトル」を持つため、長距離伝搬に伴うビーム密度の低下が避けられない。これまではその効果を無視していた、レーザー駆動プラズマからイオン線に先だって発生する、大電流電子のもつクーロンポテンシャルを、ダイナミックな加速電界として機能させるべく「リサイクル」し、従来のTNSA加速で得られた高エネルギー陽子の追加速/収束を試みた。

研究成果の概要(英文)：The recent progress in the laser-driven ion acceleration field make us possible to achieve compact ion accelerator system. The laser-driven ion have peculiar characteristics, such as, ultra-small acceleration field, high peak current, and low transverse emittance. At the same time the beam shows large divergence angle and broad energy spread, resulting the low density ion beam away from the source position. In this research we try to apply the additional acceleration and focusing fields towards the ions emitted from the source. The additional field originates from the combination between the recycling of the "escape electrons from the target" and the special design target holder.

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：レーザー イオン加速 レーザープラズマ相互作用

1. 研究開始当初の背景

- (1) 2000年に薄膜と超高強度レーザーとの相互作用によって高エネルギーの陽子線の発生が確認されてから、10年以上が経過した。当初は核融合用のシングルショットベースの超大型レーザーでのみ、このようなエネルギーにまで陽子線の加速が可能であった。しかし近年の超短パルス超高強度レーザーの発展によって、比較的小型で繰り返し可能なレーザーでオンターゲットの集光強度が 10^{20}Wcm^{-2} を超えるようになった。これにより、 $\sim \text{TV/m}$ を超える加速電場の形成が可能となり、最高エネルギー数十 MeV の陽子線の発生が達成されている。レーザー駆動陽子線の持つ特徴、すなわち、超高ピーク電流性、極小ソースサイズ、低エミッタンス性、短パルス性を有するため、多くの分野から着目を集めているが、応用に資するという観点では改善すべき点が数多く存在する。例えば、医療応用などを考えた場合には、イオン線のエネルギーの向上が必要不可欠である。さらに、薄膜との相互作用において発生するイオン線のエネルギーは、特段の工夫をしない限りエネルギーブレッドがあり白色であるという問題点もあり、数多くの応用サイドからの要請である「スペクトルの単色性」とはほど遠い状況である。また、空間的な広がりに関しても、特段の工夫をしない限り、半角 10 度程度に広がった分布を持つ。スペクトルの広がり、空間的な広がりが原因となり、ソースから距離が離れるほど、レーザー駆動イオン線の時間空間的密度は減少するのが現状である。この状況を変えるには、レーザー駆動型に特有な方法で、いかに「高エネルギー」の「準単色&小発散角」陽子線を、「発生源」あるいは「発生源に近い小さな領域」に発生させるかがカギとなる。
- (2) レーザー駆動イオン線発生分野においては、高エネルギー化、単色化などシングルショットベースの、チャンピオンデータを狙う研究が現状主流であり、繰り返し安定にイオン線を発生するという観点での研究はあまりなされていない。従って、応用を考えた場合に必要不可欠である、「繰り返し高品質のイオン線を安定に発生させること」の実現が切望されている。
- (3) 現在、レーザー駆動イオン線の研究成果は、ほぼ 90 パーセントが陽子線の加速に関するものである。この陽子線は、ター

ゲット表面に存在する不純物層である水や hidrocarbon 中の陽子が加速されたものである。陽子線は選択的に加速されるわけではない。陽子線のもつ電荷質量比(Q/M)が高いことから、レーザーのスペックにかかわらず比較的簡単に高エネルギーまで加速を受ける。しかし重イオンになればなるほど、Q/M を高めることが難しいために、加速は難しく、今まではほとんど着目されていなかった。これは、超高強度短パルスレーザーの集光強度が 10^{20}Wcm^{-2} 程度にとどまっていたことが大きな原因と考えられる。

2. 研究の目的

本研究においては、レーザー駆動イオン線の応用に向けて、「繰り返し高品質のイオン線を安定に発生させること」を目的とする。具体的には、高エネルギー化・空間分解能の制御を、特殊なターゲットホルダを用いることで行う。

3. 研究の方法

電子銃においては、ソースより発生する電子群が、それ自身の持つ空間電荷効果によって広がっていくのを抑えるため、電極を円錐状の形状とし、電子群を加速すると同時にコリメートさせる(ウェネルト電極)。これと同様に、本来はターゲットを固定する目的のみをもつターゲットホルダのターゲット装着部下流に円錐状の空洞領域を持たせ、レーザー駆動陽子線に対して、発生直後にその空洞領域においてダイナミックに加速・収束電界を印加する。興味深いことは、この電界は外部から印加しなくても、レーザー照射により発生する大電流の電子群が誘起するクーロンポテンシャルを「リサイクル」すれば、ターゲットホルダ内の円錐状の空洞領域に陽子を追加速・収束するに十分な電界を形成できることである(図1)。

本来ターゲットを保持する目的のみを持つターゲットホルダの設計を最適化することで、ターゲットホルダに、発生した陽子線を追加速、さらに収束・準単色化する first optics の役割を担わせる。ターゲットホルダは、シングルショットで破壊されるターゲット自体と違って繰り返し使用可能な堅牢なデバイスであり、かつ、安価である。さらに、陽子に先駆して発生する電子のもつクーロンポテンシャル(これは本来捨てるしかなかったが、)を「リサイクル」することで、イオンの追加速・収束・準単色化を同時に行うことができる[1]。

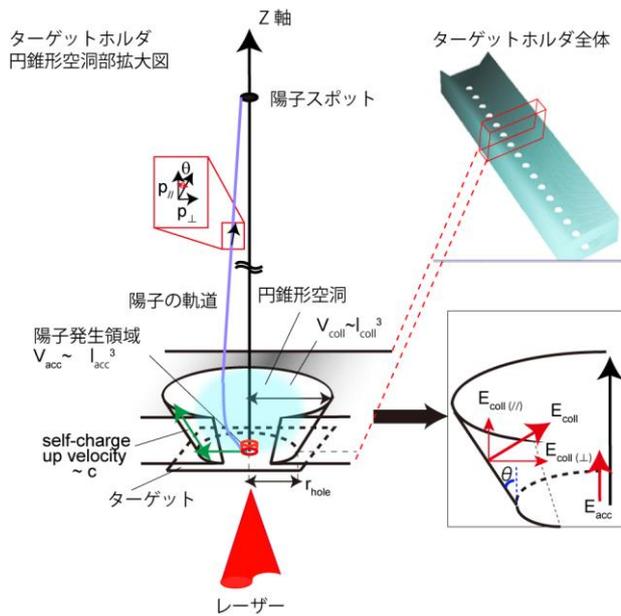


図1：ターゲットホルダのデザインと円錐形空洞部の拡大図。

4. 研究成果

(1) 関西研所有の J-KAREN レーザーのフルスペックをオンターゲット上に実現することに注力し、積極的にレーザーを制御して、レーザーエネルギー8J、パルス幅40fs、 10^{10} のコントラストレベルのパルスを回折限界の約2倍まで絞り込むことで、集光強度 10^{21}Wcm^{-2} を超える状況を常に実現させた[2] (図2)。これにより、100TV/m 近い加速電場の形成が可能となった。結果として、ステンレスのテープターゲットを用いることで、最高エネルギー40MeV の陽子線の加速を計測した[2]。

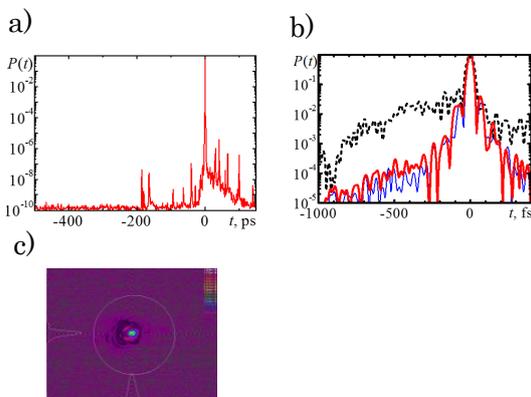


図2：a) レーザーコントラストレベル。b) レーザーパルス幅 c) フォーカススポット。

(2) 次に本研究課題であるターゲットホルダを用いてイオン加速を行った。ターゲットホルダの形状を、具体的には、図1で示す円錐状の穴の角度を45度、60度とし、材質を金属のアルミと非金属のマコールを用いて作成した。同じターゲット材料アルミ0.8μmを45度の角度で作ったアルミ製、マコール製のターゲットホルダに装着し、レーザーショットを行った。レーザーのパラメータは平均でエネルギー8J、パルス幅40fs、 10^{10} のコントラスト、集光強度 10^{21}Wcm^{-2} であった(図3)。マコール製のターゲットホルダを用いた場合、アルミ製のターゲットホルダを用いた場合に比べて若干エネルギーが低い傾向がみられた。一方で本実験においては、レーザーのショット数が限られており、かつレーザーパラメータのふらつきが大きかったので、上述の結果だけでは結論を導くことは困難である。従ってさらなる追試験が必要であると考えます。

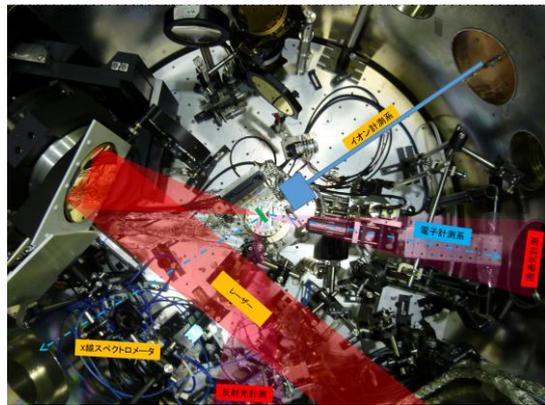


図3：実験のセットアップの様子。

次にアルミ材質のターゲットホルダで、円錐形上の底の穴の大きさを変化させたターゲットホルダを用いて同様に照射試験を行った。穴の直径は、2,3,4mmのものを使用した(図4)。加速された最高エネルギーと穴の大きさの関係を調査しようとしたが、レーザーが途中で調子が悪くなり、ショット数の統計を稼ぐことができず優位な結果を得ることができなかった。これも引き続き検討課題であると考えます。

図4：穴の大きさを2,3,4mmと変化したターゲット



ホルダを用いて実験を行った様子。ショット前

一方で、予想をしていなかったすぐれた結果が得られたので報告する。45度の円錐角度を持ったターゲットホルダにアルミのターゲット0.8 μm を装着し、上記のパラメータのレーザーをショットした。その結果ほぼフルストリップのアルミのイオンが10MeV/u以上に加速できることを確認した(図5、図6)。今までレーザー駆動型のイオン加速で、アルミの程度の重さの元素すら、フルストリップ状態にイオン化し、10MeV/u以上のエネルギーに加速した例はなかった。既存の加速器のイオン源の技術においては、フルストリップに近い状態の重イオンを生成することはほぼ不可能であり、加速しつつ重イオンの電荷を徐々に上昇させていくために、重イオン加速器の巨大化が否めない。そのような背景の中で、超高強度レーザーを用いてフルストリップに近い状態で重イオンの加速に成功したという結果は、重イオン加速器への小型のレーザー駆動型インジェクターの可能性を飛躍的に高める結果であり、重イオン加速器の小型化に多大なる貢献ができることを示す。

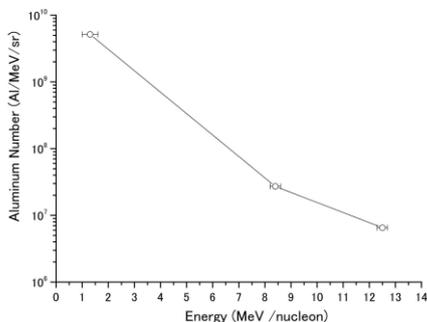


図5：加速されたアルミのエネルギースペクトル

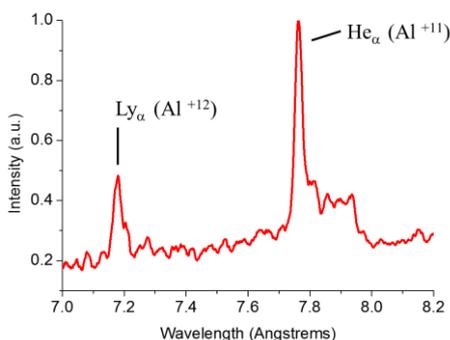


図6：加速されたアルミのイオン化状態。ほぼフルストリップ状態であることを示す。

REFERENCE

- [1] M. Nishiuchi, A.S. Pirozhkov, H. Sakaki et al., Quasi-monochromatic pencil beam of laser-driven protons generated using a conical cavity target holder, *Phys. Plasmas.*, **19** 030706, (2012).
 [2] K. Ogura, M. Nishiuchi, A.S. Pirozhkov et al., Proton acceleration to 40 MeV using a high intensity, high contrast optical parametric chirped-pulse amplification/Ti:Sapphire hybrid laser system, *Opt. Lett.*, **37** 2868 (2012).

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 1 件)

M. Nishiuchi, H. Sakaki, S. Maeda et al., Multi-charged heavy ion acceleration from the ultra-intense short pulse laser system interacting with the metal target *Rev. Sci. Instrum.*, **85** 02B904, (2014) (査読あり)

[学会発表] (計 9 件)

国内学会

- ① 日本物理学会春季大会 (東海大学 2014/3/28-31)
西内満美子等
レーザー駆動型重イオン源の可能性
- ② 日本物理学会秋季大会 (徳島大学 2013/9/25-28)
西内満美子等
高コントラスト・超高強度・短パルスレーザーJ-KARENによるレーザー駆動イオン加速実験
- ③ 日本物理学会春季大会 (広島大学 2013/3/26-29)
西内満美子等 招待講演
超高強度レーザーを用いたイオン加速の現状
- ④ 日本物理学会秋季大会 (関西学院大学 2012/9/18-21)
西内満美子等
原子力機構関西研における薄膜ターゲットを用いた陽子線加速の現状

国際学会

- ⑤ The 8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (Nara, Japan, 2013/09/08--13)
M. Nishiuchi et al.,

Proton and ion acceleration by the 1021Wcm-2 intensity high contrast laser pulses interacting with the thin foil target

⑥ The 15th International Conference on Ion Sources (ICIS'13) (Chiba, Japan 2013/09/09--13)

M. Nishiuchi et al.,
Laser driven multi-charged heavy ion acceleration

⑦ The International committee on Ultra-High Intensity Lasers 2012 (Mamaia, Romania 2012/09/16--21)

M. Nishiuchi et al.,
Proton acceleration to 40MeV using a high intensity, high contrast 200TW Ti:Sapphire laser system

⑧ The 15th Advanced Accelerator Concepts Workshop (Texas Austin U.S. 2012/06/10-16)

M. Nishiuchi et al.,
40MeV Proton Beam Generation with Ultra-High Intensity High-Contrast Ti:Sap Laser System

⑨ International conference on High Energy Density Science 2012 (Yokohama Japan, 2012/04/25-27)

M. Nishiuchi et al.
40 MeV Proton Beam generation with Ultra-High Intensity High-contrast Ti:Sap Laser System

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件) 0 件

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西内 満美子 (NISHIUCHI Mamiko)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：70391315

(2) 研究分担者

なし

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし

()

研究者番号：