

## Energy compression and radial focusing of laser produced proton beam by synchronous rf field

M. Ikegami<sup>1</sup>, S. Nakamura<sup>4</sup>, Y. Iwashita<sup>1</sup>, T. Shirai<sup>1</sup>, H. Souda<sup>1</sup>, Y. Tajima<sup>1</sup>, M. Tanabe<sup>1</sup>, H. Tongu<sup>1</sup>, H. Itoh<sup>1</sup>, H. Shintaku<sup>1</sup>, A. Yamazaki<sup>1</sup>, H. Daido<sup>2</sup>, A. Yogo<sup>2</sup>, M. Nishiuchi<sup>2</sup>, M. Mori<sup>2</sup>, H. Kiriyama<sup>2</sup>, S. Kanazawa<sup>2</sup>, A. Sagisaka<sup>2</sup>, K. Ogura<sup>2</sup>, S. Orimo<sup>2</sup>, S. Kondo<sup>2</sup>, Y. Yamamoto<sup>2</sup>, T. Shimomura<sup>2</sup>, M. Tanoue<sup>2</sup>, Y. Nakai<sup>2</sup>, A. Akutsu<sup>2</sup>, S. V. Bulanov<sup>2</sup>, T. Kimura<sup>2</sup>, Y. Oishi<sup>3</sup>, K. Nemoto<sup>3</sup>, T. Tajima<sup>2</sup> and A. Noda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Chemical Research, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

<sup>2</sup> Advanced Photon Research Center, Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency, 8-1 Umemi-dai, Kizu, Kyoto 619-0215

<sup>3</sup> Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Kanagawa 240-0196

<sup>4</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK) 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

### Abstract

The energy spread of a mega-electron-volt proton beam produced by laser-plasma ion acceleration was compressed by a synchronous radio frequency (rf) electric field. Protons were produced by a short-pulse (~210 fsec) high-power (~20 TW) laser which was focused on a thin foil tape target with an intensity over than  $3 \times 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>. The energy spread of the proton beam compressed from 100% to less than 7% by the rf electric field synchronous to the pulsed laser. The focusing and defocusing effect of the transverse direction by the rf field was also observed.

## レーザー生成陽子ビームの高周波電場によるエネルギー幅圧縮と動径方向集束効果

### 1. はじめに

近年、高強度短パルスレーザーを薄膜に照射することによってMeV級のイオンビームを生成できることが報告されている<sup>[1]-[3]</sup>。このような手法で生成されたイオンビームは高い直進性を持ち、横方向エミッタンスは小さい。しかしエネルギースペクトルはMaxwell-Boltzmann分布に従い、運動量広がりほぼ100%であり応用は困難であった。最近様々な研究機関でレーザー生成イオンビームを準単色化する実験が行われている<sup>[4]-[6]</sup>。応用のためには早い繰り返し及びエネルギースペクトルの高い再現性が要求されるが実現していない。

我々はレーザー生成イオンに対して適切なタイミングで高周波電場を作用させることによってエネルギーの準単色化に成功した<sup>[7]</sup>。この手法により1Hzでの繰り返し運転と同時にエネルギースペクトルの高い再現性を実現することができた。

### 2. 位相回転によるエネルギー幅圧縮

パルスレーザーが薄膜に照射され、イオンが発生する過程は極めて短時間で、1 psのオーダーで起こる。そのためレーザー生成イオンは時間幅が極めて小さく、エネルギー幅100%という性質を持つ。これらのイオンが自由空間を飛行すると、エネルギーの高いものほど前方に早い時刻に到達する。ターゲット薄膜下流に図1のように高周波電場空洞を設置するとエネルギーの高いイオンほど、早い時刻に空洞のギャップに到達する。電場の方向がイオンを

減速する向きから加速する向きに変化する時間帯に到達したイオンは電場の加減速によって特定のエネルギー  $E_0$  に集められる。これが位相回転の原理である。位相回転ではレーザー照射のタイミングと高周波電場の相対的な位相を変化させることでエネルギーピークの位置を自由に制御することができる。

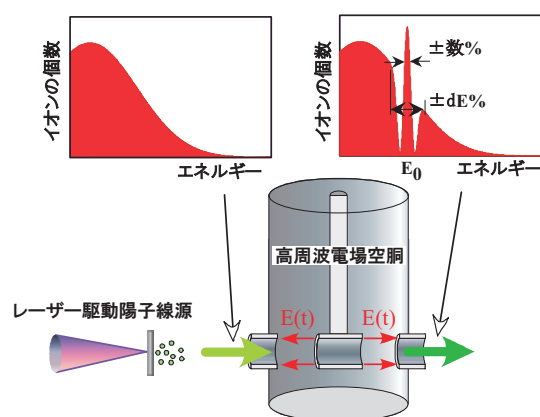


図1. 位相回転によるイオンビームの準単色化の原理。大きな速度を持ったイオンは減速され、遅い粒子は加速されるようにイオン生成と高周波電場の位相を合わせると、エネルギー幅圧縮が起こる。

### 3. J-LITEXを用いた実験

位相回転によるイオンビームの準単色化の原理検証のため、原子力開発機構関西研のJ-LITEXレーザーを用いた実験を行った。このチタン:サファイ

レーザーは実験時、ピーク強度2.3 TW、パルス幅210 fs、1パルスあたりのエネルギー350 mJ、1Hzの繰り返しで運転された。レーザーパルスは集光ミラーによって最終的にターゲットであるTi薄膜上に $11 \times 15 \mu\text{m}^2$ のスポットサイズで集光され、この時の集光強度は $3 \times 10^{17} / \text{cm}^2$ になる。Ti薄膜はテープ状に加工されており、これを巻き取ることで繰り返し照射を可能にしている。ターゲットで発生したイオンは直径2 mmのアパーチャーを通り位相回転のための高周波空洞に入射される(図2)。イオンのエネルギーはトムソンパラボラ、TOF検出器<sup>[8]-[9]</sup>で測定される。

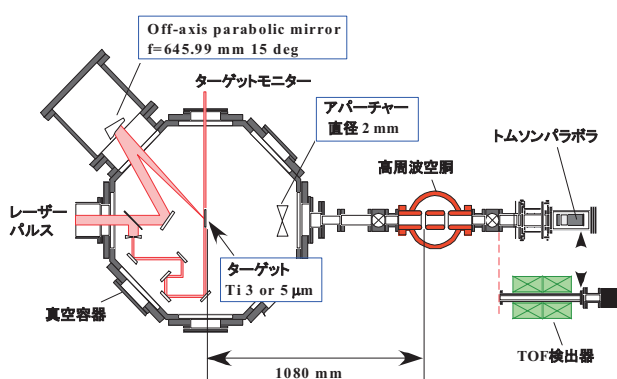


図2. 実験機器の配置。

TOF検出器はイオンの飛行時間からエネルギーを求めるため、位相回転のようなイオンの飛行過程で速度変化が起こる場合の正確なエネルギー測定には使用できないが、リアルタイムでイオンを検出できるという利点がある。そのためTOF検出器は実験の初期のターゲット位置の最適化の際に使用した。そして、ターゲット最適化後の位相回転実験の精密なエネルギー測定では検出器をトムソンパラボラに置き換えた。高周波空洞は2ギャップの $\lambda/4$ 共振器で、周波数は80.7 MHz、電場の振幅は2 MV/mである。高周波電場はパルスレーザーと同期しており、位相回転に最適な電場の位相を実現している。レーザーパルスと高周波電場の位相関係は自由に制御できる。

図3に位相回転の前後の陽子のエネルギースペクトルを示す。位相回転を行わない場合、陽子の最大エネルギーは1 MeV程度であり、高エネルギーのものほど数が少ない連続スペクトルである。位相回転を行うとエネルギースペクトルに明らかなピークが形成され、準単色化が実現していることがわかる。0.6 MeV付近のピークのエネルギー幅は約7%である。図3を見ると、0.6~0.7 MeV付近より低い0.5 MeV付近にもピークが形成され、さらに低いエネルギー領域にも複数のピークが形成されていることがわかる。位相回転の電場は80.7 MHzの高周波であるため、位相回転に最適な位相はこの周期で繰り返される。レーザー生成イオンは高周波空洞に入射するまでの間にある程度時間方向にも広がる。そのため、より

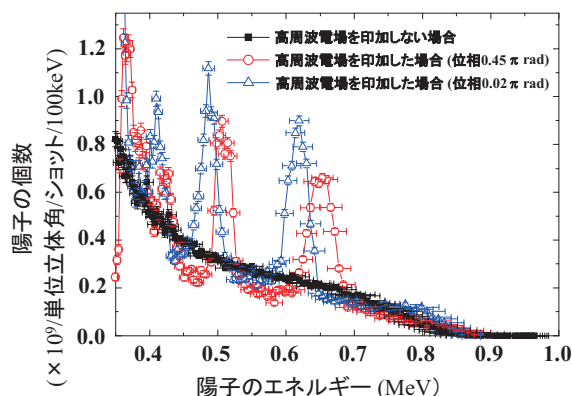


図3. 位相回転の前後でのエネルギースペクトルの比較。高周波電場の相対位相を変化させることによって、エネルギーのピーク位置を調整できる。

遅い時刻に高周波空洞に到達した低いエネルギーの陽子も位相回転に適した位相の電場を経験する。このような理由で複数のエネルギーピークが形成される。最終的に単一のエネルギーの陽子ビームを取り出すには分析磁石で偏向する必要がある。しかし、位相回転なしの連続スペクトルを持ったレーザー生成陽子を直接分析するのと、位相回転を行った後に分析するのでは陽子の収集効率が少なくとも数倍異なるのは図3から明らかである。

図4は高周波電場のレーザーパルスに対する相対位相を系統的に変化させてエネルギースペクトルを測定し、エネルギーピークの位置と位相の関係プロットしたものである。電場の相対位相を変化させることであらゆるエネルギーにピークを形成できることがわかる。

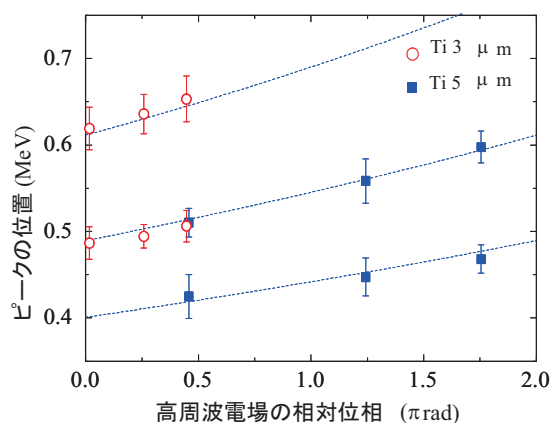


図4. エネルギーピークと高周波電場の相対位相の関係。ターゲットの厚さによらず一定の曲線上に乗る。これは位相回転がターゲット上のイオン生成と無関係な純粋なビーム運動学的現象だからである。

#### 4. J-KARENを用いた実験

別のチタン:サファイアレーザーシステムJ-KARENを用いてさらに高エネルギーの陽子発生、位相回転によるエネルギーの準単色化実験を行った。

このレーザーはピーク強度18 TW、パルス幅25 fs、1パルスあたりのエネルギー450 mJ、1 Hzの繰り返しで運転された。実験セットアップは図2とほぼ同じで、ターゲットには厚さ7.5  $\mu\text{m}$ のポリイミド薄膜を使用し、前回と同様テープ状に加工し連続照射を可能にしている。パルスレーザーは焦点距離325 mmのミラーで集光され、ターゲット上での集光強度は $4 \times 10^{18} / \text{cm}^2$ であった。この実験では、位相回転を行わない場合、最大エネルギー2.2 MeV程度の陽子ビームが発生していることをTOF検出器によって確認した。位相回転の際の高周波空洞の周波数は82 MHz、電場の振幅は4 MV/mに設定した。位相回転を行った場合、エネルギースペクトルにピークが形成されることをトムソンパラボラで確認した。また位相回転時のショット毎のTOF信号は、強度は異なるものの、形状はほぼ同じであった。これは位相回転後のエネルギースペクトルに再現性よくピークが形成されているとことを反映していると考えている。今回の実験では陽子の動径方向分布の位相回転による変化も測定した。測定は位相回転空洞の下流にプラスチックの板状の飛跡検出器CR39をビーム進行方向対して垂直に置き、CR39上に出来たピットの分布を計測することで行った。CR39はエネルギー100keV/u~11MeV/uのイオンに対して高い感度を持つ。一方で照射したレーザーパルス、X線、 $\gamma$ 線、電子に対しては感度が低いため今回の実験の陽子の分布測定には最適であった。測定の結果、位相回転前の陽子の動径方向分布は、測定を行っている立体角の範囲では一様であった。位相回転後には動径方向分布に明らかな2つの成分、つまり収束成分と発散成分が見られた。高周波空洞のギャップ幅が有限であると、ギャップ間に出来る電気力線に歪みが生じ、通過する荷電粒子に対して横方向へのキックを与える。この効果はrf focus, defocusとして知られており、これが位相回転による動径方向の分布の変化を引き起こしたと考えられる<sup>[10]</sup>。

#### 4. まとめ

薄膜に高強度短パルスレーザーを照射することで最大エネルギー約 2.2MeVの陽子ビームを再現性良く1 Hzで発生させることに成功した。このようなイオンビームは通常連続なエネルギースペクトルを持つ。我々は、レーザーに同期した高周波電場を印加する事で、高エネルギーの陽子を減速、低エネルギーのものを加速することによってエネルギースペクトルを準単色化することに成功した。同時に、高周波空洞の動径方向の電場の効果で、陽子ビームは集束、発散を受け空間分布が大きく変化することも発見した。我々が実証した高周波空洞による位相回転法は、シングルショットではなく、繰り返し発生する陽子ビームのエネルギー及び空間分布を再現性良く制御することができ、様々な応用分野への適用が期待される。

#### 謝辞

本研究は文部科学省の先進小型加速器開発の支援を得て遂行された。また、京都大学の21COEプログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」及び「京都大学化学連携研究教育拠点」からもご支援を頂いた。ここに記して謝意を表したい。

#### 参考文献

- [1] A. Maksimchuk *et al.*, Phys. Rev. Lett., **84**, 4108 (2000).
- [2] E. L. Clark *et al.*, Phys. Rev. Lett., **85**, 1654 (2000).
- [3] R. A. Snavely *et al.*, Phys. Rev. Lett., **85**, 2945 (2000).
- [4] B. M. Hegelich *et al.*, Nature (London), **439**, 441 (2006).
- [5] H. Schwöerer *et al.*, Nature(London), **439**, 445 (2006).
- [6] T. Toncian *et al.*, Science, **312**, 410 (2006).
- [7] S. Nakamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, L717 (2007).
- [8] S. Nakamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **45**, L913 (2006).
- [9] A. Yogo *et al.*, Phys. Plasmas, **14**, 043104 (2007).
- [10] M. Ikegami *et al.*, submitted for publication.