

大強度超短パルスレーザーによる高エネルギーイオン生成とその入射器としての応用

野田 章^{1,A)}、岩下芳久^{A)}、白井敏之^{A)}、中村 衆^{A)}、森田昭夫^{2A)}、大道博行^{B)}、林由起雄^{B)}、
松門宏治^{C)}、高橋謙次郎^{C)}、黎 忠^{C)}、山田 聡^{C)}、上坂充^{D)}、木下健一^{D)}、細貝知直^{D)}、渡部貴弘^{D)}、
吉井康司^{D)}、久保田哲夫^{E)}、和田芳夫^{E)}

^{A)} 京都大学化学研究所、〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

^{B)} 日本原子力研究所関西研究所、〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1

^{C)} 放射線医学総合研究所、〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

^{D)} 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設、〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

^{E)} 広島大学先端物質科学研究科、〒739-8526 東広島市鏡山

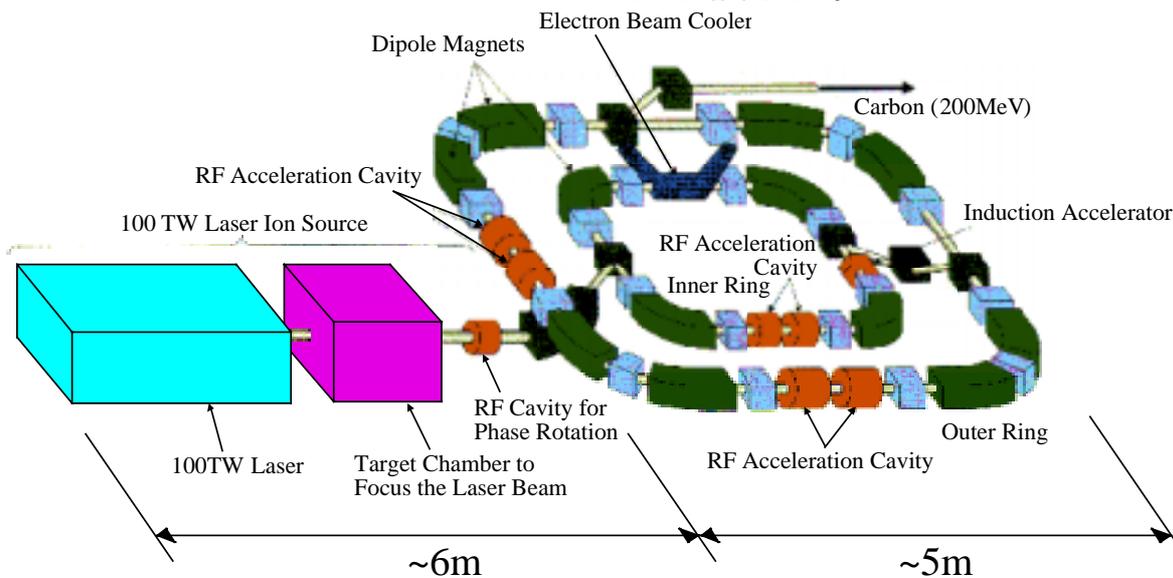
概要

大強度超短パルスレーザーを固体ターゲット上に集束し、レーザーのパワー密度が 10^{18}W/cm^2 を越える状況で生成される高温プラズマからの生成イオンビームを $\pm 5\%$ のエネルギー幅で切り出し、 10^9 イオン/秒のビーム強度を実現し、これをレーザーと位相同期した高周波電場により加・減速することにより位相空間内で回転させてエネルギー幅を $\pm 1\%$ 以下に縮減し、後段のビーム冷却との併用により、パルスシンクロトロンの入射器として応用することを目指す。

1. はじめに

京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設では、

がん治療専用のイオンビーム加速器の小型化を目指して、日本原子力研究所、放射線医学総合研究所、東京大学、広島大学との共同研究により、大強度超短パルス (100TW, 20fs) レーザーにより生成されるイオンビームをがん治療専用のパルスシンクロトロンの入射ビームとして使用する可能性を追求している。具体的にはレーザーで生成される高密度プラズマからのイオンビームをパルスレーザーと位相同期した高周波電場により位相空間内で回転させることによりこのイオンビームのエネルギー幅の縮減を図り、更に後段のビーム冷却によりパルスシンクロトロンエネルギーアクセプタンスと整合を取ることを想定している。ここでは、このうち、線形加速器を置き換えることを目指している、レーザーによるイオン生成とその位相空間回転に関する部分の取り組みを紹介したい。



Compact Heavy-Ion (Carbon Ion) Synchrotron

図1 レーザーイオン源の採用により小型化を目指すがん治療専用シンクロトロンの概念図

¹ E-mail: noda@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

² Present address: KEK, Oho 1-1, Tsukuba-city, Ibaraki, 305-0801, Japan

2. 大電力レーザーによるイオンビーム生成の現状

近年のレーザー技術の発展により達成可能なレーザーのパワー密度は飛躍的に増大し、 10^{21}W/cm^2 を超える状況にまで到達しつつある。こうした状況の下、米国の Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) や英国の Rutherford Appleton Laboratory (RAL) からパワー密度が 10^{19}W/cm^2 を超えるレーザーを固体薄膜に集束することにより生成した高密度プラズマから数十 MeV に及ぶ高エネルギーイオンが生成される事が報告されている。LLNL では幅 500fs の 1PW 電力のレーザーの照射（パルス当たりエネルギーは $\sim 500 \text{J}$ ）により、 $3 \times 10^{20} \text{W/cm}^2$ のパワー密度を実現し、レーザーと反対側のターゲットの法線方向への最大 55MeV に及ぶエネルギーのイオン放射を観測している^[1]。一方、RAL では幅 1ps の 50TW レーザーを $5 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ まで収束し（パルス当たりエネルギーは $\sim 50 \text{J}$ ）、 45° 方向の照射により、レーザー側へのイオンの放射を観測しており、そのエネルギーは陽子で最大 30MeV、 Pb^{46+} では $430 \pm 40 \text{MeV}$ に達している^[2]。また、LULI の 100TW、500fs レーザー（パルス当たりのエネルギーは $\sim 30 \text{J}$ ）を用いた実験では、通常の加速器で得られるビームよりも良い $0.06 \pi \text{mm mrad}$ という normalized emittance がレーザー生成イオンビームについて報告されている^[3]。これらのレーザーは慣性核融合向けに開発された大強度レーザーで、繰り返しは数十分に一回と極めて遅いので、実用化の段階には至っていない。我々はこの状況を改善する目的で、がん治療専用のシンクロトロンの入射器に要求される仕様を表 1 に示したようなものと仮定して、実用化可能な程度にまで繰り返しを高める目的から、以上述べたようなイオン生成が実現可能なパルス当たりのレーザーエネルギーの下限を調べることを主要な研究項目として設定し、大電力超短パルスレーザーによるイオン生成実験を開始した。

表 1 レーザー生成イオンビームに要求されるパラメータ

イオン種	$^{12}\text{C}^{6+}$
中心エネルギー	2 MeV/u
目標強度	10^9 /秒
エネルギー幅	
レーザーイオン源出力	$\pm 5\%$
位相回転後	$\pm 1\%$
電子ビーム冷却後	$\pm 0.1\%$

3. レーザーによるイオン生成実験

3.1 原研・関西研の 100TW, 20fs レーザーによる実験

日本原子力研究所関西研究所の量子科学センターの 100TW, 20fs レーザーは繰り返しが 10Hz と高く、このパルス当たりエネルギーが $\sim 2 \text{J}$ のレーザーでも上述のような高エネルギーイオン生成が確認で

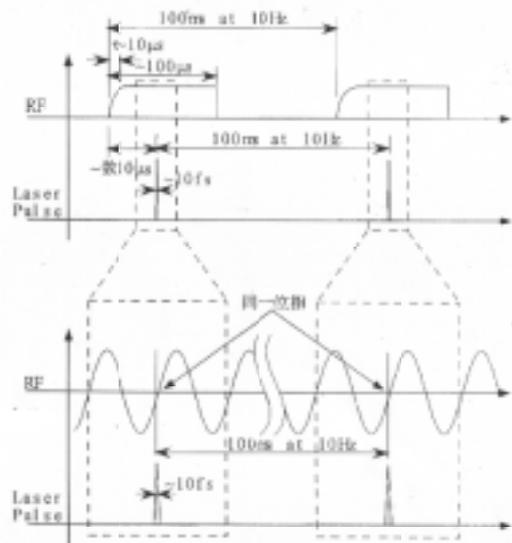


図 2 高周波電場とパルスレーザーの位相同期系

ければ、実用化という観点から大きく前進することになる。こうした認識の上で、我々はイオン生成のために最適化したターゲット、レーザーのパルス形状等の条件を探ることを目指している。

前章で述べた大電力レーザーによる生成イオンビームのエネルギー分布は、エネルギーの増大とともに指数関数的にビーム強度が減少しており、これが実用化の上での大きな障害となっている。この状況の改善のため、我々はパルスレーザーと位相同期した高周波電場でレーザー生成イオンビームの加・減速を行うことによりイオンビームのエネルギー幅の縮減を行い、同一エネルギー幅内のイオンビーム強度の増大を図ることを提案した^[4]。図 2 にパルスレーザーと高周波電場の同期系の概念図を示す。ここではレーザーの原発振の 2 倍の周波数の高周波電場を用いることとし、図 3 に示したような 160MHz 近辺の $\lambda/4$ -Two Gap 共振器の設計を進めている。

3.2 東大・工学部・原子力研究施設の 12TW レーザーによる実験

関西研の 100TW, 20fs レーザーによる実験に先立ち、イオン生成のためのレーザー集束、最適ターゲット条件及び高繰り返しを想定したターゲット駆動方式の確立等を目指して、平成 13 年 10 月及び 12 月に東大・工学研究科原子力工学研究施設の 12TW

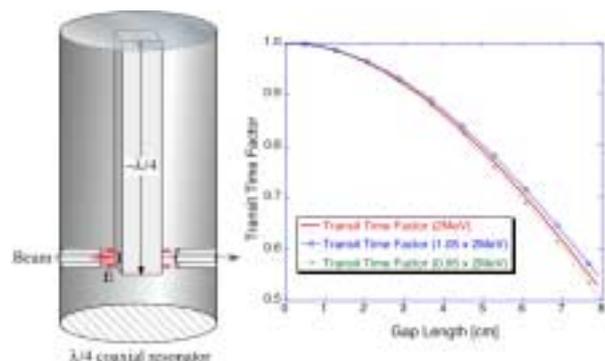


図 3 位相同期のための $\lambda/4$ 高周波空洞



(a) チェンバー外観 (b) チェンバー内部
図4 レーザー照射用チェンバー

レーザーを用いた実験を行った。ターゲットとしては、Al, Ti, Ta, ポリプロピレン及びポリエチレンを使用し、種々の厚さのターゲットに対する照射実験を行った。図4にレーザーの照射に用いたチェンバーの外観及びその内部を示す。実験時には波長 800nm、ピーク強度 4~5TW 時間幅 50fs のレーザーを直径 15 μ m に集束しているためターゲット上でのレーザーのパワー密度は $2\sim 3 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$ に達していたと推定している。またこの実験の場合のパルス当たりのエネルギーは 0.2~0.25J であった。

この条件ではポリエチレンやポリプロピレンのターゲットと比して、Ti 等の金属ターゲットからのイオン生成が多く、またイオンの生成はレーザーの進行方向よりも後方に多くなっていることが観測されている^[5]。また、生成イオンビームのエネルギーも 1MeV に比して低く 500keV 程度以下に止まっている。これに関しては、今後より定量的な研究を進める予定であるが、前述の大強度レーザーで高エネルギーイオン生成を達成している場合の、レーザーと反対面での Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)^[6]はこの実験ではまだ実現するに至って居らず、レーザーと同一サイドの表面のプラズマからの大立体角への blow off が生じているものと理解している。今後、レーザーのプリパルスを定量的に把握した実験を行い、TNSA を達成するための条件を明確にしたいと考えている。

4. レーザーイオン生成からビーム冷却に至る全系評価システムの構築

パルスレーザーで生成したイオンビームは、縦方向のエミッタンスについては位相空間内で回転し、エネルギー幅の縮減を図るが、通常の加速器によりこれを加速可能とするためには、さらに電子ビーム冷却により、縦・横両方向のエミッタンスの縮減を実現する必要がある。こうしたホットイオンビームの電子ビーム冷却に関しては、ドイツ、ハイデルベルグの重イオン蓄積・冷却リング TSR を用いたテスト実験を遂行してきている^[7]、が実用化のためには実際のレーザー生成イオンビームに対して、こうし

た位相空間回転と電子ビーム冷却を適用して所要の特性を有するビームとして実現できることを実証することが不可欠である。この目的のため、京都大学化学研究所、原子核科学研究施設の現有の施設の中に設置可能なサイズ(周長~20m)の小型の冷却リング LSR と 50TW 程度(ピークパワーは TNSA の実現可能な下限に近い値を考えている)を併設し、イオン生成から位相空間回転、電子ビーム冷却に至る全系の実証実験を行う予定である。図5に現在建設を進めつつある LSR を中心とするレーザー生成イオンビームの評価施設のレイアウトを示す。

参考文献

- [1] P. Stephen et al., "Electron, photon and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets", *Physics of Plasma* **7** (2000) pp2076-2082.
- [2] E. L. Clark et al., "Energetic heavy-ion and proton generation from ultraintense laser-plasma interactions with solids", *Phys. Rev. Lett.* **85**(2000) pp1654-1657.
- [3] E. Brambrink et al., "Intense ion beams from relativistic laser plasmas-a promising acceleration mechanism", *Proc. of EPAC2002, Paris, France, June(2002)* in print.
- [4] A. Noda et al., "Collection and cooling scheme of heavy ions produced by a high power pulse laser". *Beam Science and Technology* **6** (2001) pp21-23.
- [5] 松門宏治、「癌治療用超小型陽子・重イオンシンクロトロン開発に向けたイオン発生実験」、日本原子力研究所、関西研究所、光子科学センター「超強度レーザーの切り拓く科学技術」研究会、平成 14 年 2 月 19 日~20 日、資料集
- [6] S.C. Wilks, et al., *Phys. Plasmas* **8** (2001) p.542.
- [7] H. Fadil et al., "Electron Cooling of Ion Beams with Large Momentum Spread", *Proc. of EPAC2002, Paris, France, June(2002)* in print.



図5 レーザーイオン生成から位相空間回転、ビーム冷却に至る全系評価施設のレイアウト