

## ZrH<sub>2</sub> を用いたレーザーイオン源からの陽子ビームの生成

### PROTON BEAM GENERATION WITH A LASER ION SOURCE USING ZrH<sub>2</sub> TARGET

齋藤嘉人<sup>#,A)</sup>, 岡村 昌宏<sup>B,C)</sup>, 金末 猛<sup>B)</sup>, 池田 峻輔<sup>B)</sup>, 吉田 光宏<sup>D)</sup>

Yoshito Saito<sup>#,A)</sup>, Masahiro Okamura<sup>B,C)</sup>, Takeshi Kanesue<sup>C)</sup> Shunsuke Ikeda<sup>C)</sup>

Mitsuhiro Yoshida<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> the Graduate University for Advanced Studies

<sup>B)</sup> Collider-Accelerator Department, Brookhaven National Laboratory

<sup>C)</sup> Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN

<sup>D)</sup> Accelerator Division, High Energy Accelerator Research Organization, KEK

#### Abstract

Laser ion source (LIS) could potentially be a high current pulsed proton beam source, although it has been known as heavy ion beam provider. In the past, we have confirmed capability of generating proton beam from a LIS using compressed hydride metal targets[1]. In this article, we report proton beam generation performance of an existing LIS which is regularly used for user facilities in Brookhaven National Laboratory (BNL). Obtained beams from a ZrH<sub>2</sub> target showed a clearly separated hydrogen peak from Zr ion beam current in the experiment.

[1] M.Sekine et. al., Review of Scientific Instruments, 2012, p. 83.

#### 1. はじめに

レーザーイオン源は、固体表面に高強度パルスレーザーを照射することでレーザーアブレーションプラズマを発生させ、プラズマ中のイオンを引き出す装置である。このプラズマ生成は主に高強度レーザーに照射された固体表面の電子が逆制動放射吸収過程によって数百 eV(高電荷数発生の場合)まで加熱されることによって引き起こされる[2]。レーザーイオン源はレーザー性能を上限とする高い繰り返し率で、高強度なパルス状のイオンビームを生成できることが特徴である[3]。

然しながら、ターゲット素材は個体である必要があり、気体ベースの核種については普及していない。本研究では最も一般的な水素イオンを安定に発生させる技術を確認することを目標としている。

同一のイオン源からあらゆる核種を発生できれば、より広範な分野での応用が可能となる。例えば、炭素線と陽子線を供給できる粒子線がん治療装置への応用が考えられる。

米国ブルックヘイブン国立研究所(BNL)では、NASA Space Radiation Laboratory(NSRL)へ各種イオンビームを供給するためにレーザーイオン源が実用機として稼働している。NSRL は、NASA(アメリカ航空宇宙局)が行っている宇宙放射線の生体への影響を調査する為の研究施設である。現状、NSRL 用に Li, Al, Ca, Ti, Si, Ta, Au, Th 等のイオンを安定して供給しているが、陽子ビームに関しては同入射器施設内の 200MeV 線形陽子加速器が用いられている。陽子ビームをレーザーイオン源によって供給することができれば、イオン源を一元化することができ、運

転の簡素化に大きく寄与する。そこで、BNL に設置されたイオン源を使って水素イオンビーム発生の実験を行った。水素イオンビーム発生がBNLのレーザーイオン源で実証できれば、他の気体ベースのイオンに関しても応用が考えられる。

#### 2. 実験装置概観

Figure 1 に BNL における入射器施設の概要を示す。これらは主にレーザーイオン源、Electron Beam Ion Source(EBIS)、後段に続く高周波四重極線形加速器(RFQ)から構成される。EBIS はイオン源から供給された 1 価イオンビームから多価イオンビームを生成するための装置である。したがって、本研究ではプロトンビームを一時的に捕獲するためのみに使われることになる。

レーザーイオン源の固体ターゲットとして水素化金属を用いることで陽子ビームが生成されることは先行研究[1][4]によって既に示されている。今回の実験では、実際に BNL の入射器で用いられているレーザーイオン源(BNL-LIS)でZrH<sub>2</sub>固体ターゲットにレーザーを照射し、得られた陽子ビームのビーム電流やパルス幅を計測した。また、ZrH<sub>2</sub>固体ターゲットの耐久性を NSRL で使用されている他のターゲットと比較した。

<sup>#</sup> syoshito@post.kek.jp

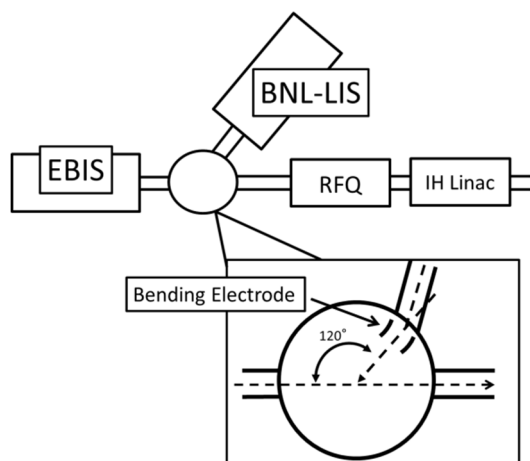


Figure 1: Injection beam line of BNL. Ion beams from BNL-LIS are bent by a pair of bending electrodes in LEBT then guided into EBIS charge breeder.

### 2.1 レーザーイオン源(LIS)

Figure 2 に BNL-LIS の概要を示す。BNL-LIS は Nd:YAG 固体レーザー(Quantel 社製 Brilliant B, 発振波長 1064nm, 最大エネルギー850mJ, パルス幅 6ns) とターゲットを配置する X-Y ステージ、真空チャンバー、ソレノイドによって覆われたビームパイプによって構成される。また、後段には低エネルギービーム輸送用ライン(LEBT)が続き、ソレノイドの中を等速直線運動するプラズマは BNL-LIS と LEBT 間に設定された電圧によって引き出される。ソレノイドは空間的に一様に広がるプラズマを軸方向に磁場を加えることで半径方向にプラズマを閉じ込める目的で設置されている。

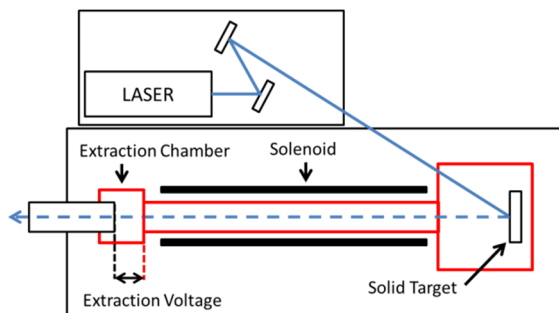


Figure 2: A cross section of BNL-LIS. The area indicated in red always maintains 15kV. Extraction Voltage is modulated by changing the voltage of the Extraction chamber.

### 2.2 ZrH<sub>2</sub>固体ターゲット

Figure 3 に今回の実験で BNL-LIS にインストールした ZrH<sub>2</sub> 固体ターゲットを示す。これは、アルミニウム製の円筒形シェルに粉末状の ZrH<sub>2</sub> を油圧プレスで加圧して固めたものである。円筒形シェルは外径 15.8mm、高さ 12.6mm の円筒から外径 8.6mm、高さ 6.4mm の領域をくりぬいた形状である。

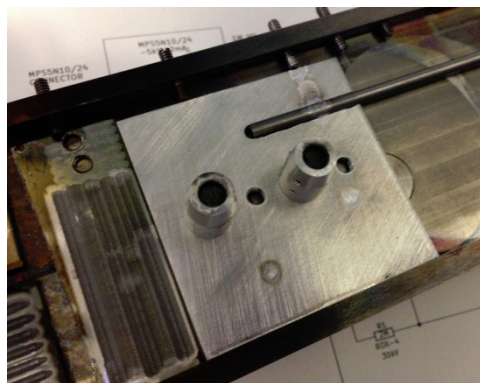


Figure 3: ZrH<sub>2</sub>Solid Target installed in BNL-LIS.

### 2.3 ワイヤビームモニタ

Figure 4 にワイヤビームモニタの概要を示す。ワイヤビームモニタは LEBT 入り口に取り付けられている。ビームが通過した時、各ワイヤ電圧からおおよそのビーム位置が、また全てのワイヤについて電圧を合計することで各レーザーショットに対するイオンビームの安定性を知るために装着されている。バックグラウンドや二次電子の影響を考慮していないため、簡易なビームモニタとして用いられる。

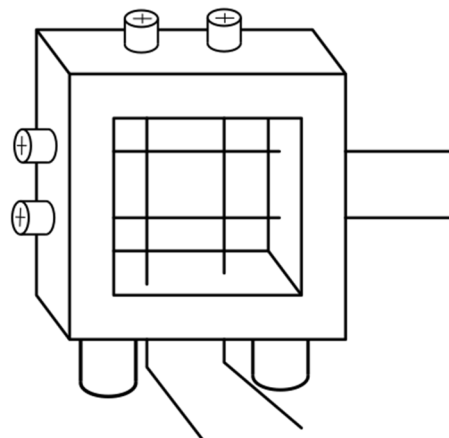


Figure 4: Conceptual diagram of Wire Beam Monitor. This monitor is installed just after the exit of BNL-LIS.

## 3. 陽子ビーム発生試験

BNL-LIS では、NSRL 実験で用いるイオンビームを供給するためにおおよそ 0.2Hz の繰り返しでレーザーを照射している。ZrH<sub>2</sub>ターゲットについても同様のスキームで照射を行った。以降の図に示すように、時間的に早い急峻なピークが水素イオンであり、後に続く母材のジルコニウムの電流波形から独立している。このため、後段の EBIS への入射タイミングを制御することによってプロトンビームのみを切り出すことが可能である事が分かった。

今回の実験ではレーザーエネルギーとソレノイド磁場、引き出し電圧の順でビーム電流の最大化を

行った。

### 3.1 レーザーエネルギー

Figure 5 にレーザーエネルギーを変化させた際のワイヤビームモニタにおけるビーム電圧の時間的構造を示す。この時のソレノイド磁場は  $4.6 \times 10^{-1} \text{mT}$ 、引き出し電圧は 1.5kV であった。プロトンとジルコニウムの電流強度は共にレーザーエネルギーの増加に対して同等に増加している。(図中における QS はフラッシュランプトリガーに対する Q スwitch の遅延を表す。)

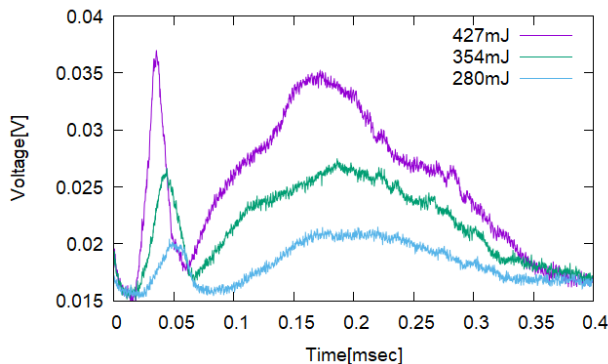


Figure 5: The time structure of proton beam current with varied laser energy.

### 3.2 ソレノイド磁場

Figure 6 に磁場を変化させた際のビームモニタ電圧対時間のプロットを示す。この時、BNL-LIS において連続運転の実績がある最大のレーザーエネルギー(354mJ, QS=260us)を用いた。磁場強度の増加の影響はプロトンの電流値に対して顕著であることが分かる。これは、低磁場領域で、軽いプロトンへの閉じ込め効果が高い事を示している。ソレノイド磁場は  $9.2 \times 10^{-1} \text{mT}$  を採用して実験を続行した。

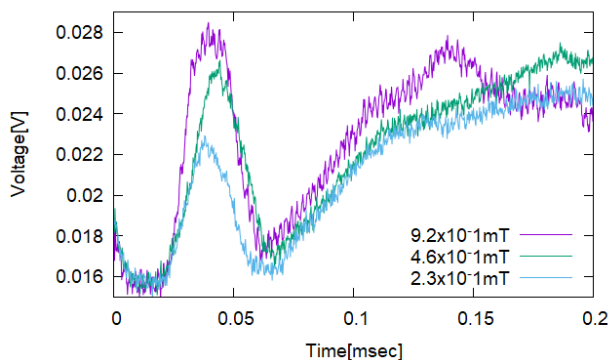


Figure 6: The time structure of proton beam current with varied magnetic field.

### 3.3 引き出し電圧

Figure 7 に引き出し電圧を変化させた際のワイヤディテクター電圧対時間のプロットを示す。引き出し電圧を従来の 1.5kV(図中では 1.4kV)より下げて行き、陽子ビーム電流は 800V で最大化されることを確認した。

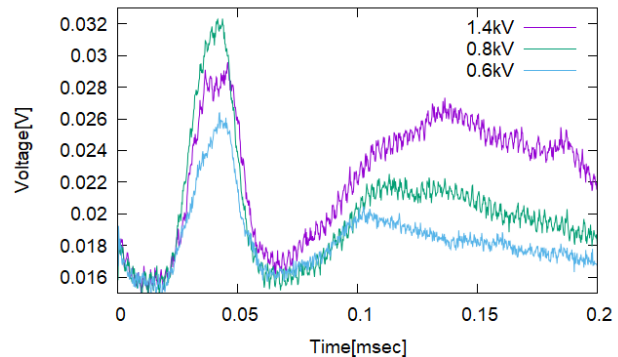


Figure 7: The time structure of proton beam current with varied extraction voltage.

## 4. 結果と考察

この実験では BNL-LIS 出口で電流  $120 \mu\text{A}$ 、パルス幅  $20 \mu\text{s}$  程度の陽子ビームを発生させることに成功した。また、レーザーショット当たりの消費量は  $1.5 \mu\text{g}$  であった。実際に NSRL に供給している Fe イオンビームの場合、Fe ターゲットの消費量は  $0.15 \mu\text{g}/\text{発}$  である。

これは Fe ターゲットが金属平板であるのに対し  $\text{ZrH}_2$  ターゲットが粉末を圧縮したものであるため外部からの衝撃に脆いためであると考えられる。

## 5 まとめ

BNL-LIS に  $\text{ZrH}_2$  固体ターゲットをインストールし、陽子ビームを得ることに成功した。

今後は  $\text{ZrH}_2$  ターゲットの高耐久化を目指すために  $\text{ZrH}_2$  粉末を焼結して固形化する技術開発を行う。

## 謝辞

本研究は科研費 15K1521、米国エネルギー省、NASA の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] M. Sekine *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83, 02B318 (2012).
- [2] B. Sharkov, "Laser Ion Sources" in Ian G. Brown (ed.), *The Physics and Technology of Ion Sources*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, pp.234.
- [3] M. Okamura *et al.*, "Design Study of a DPIS Injector for a Heavy Ion FFAG" LINAC08, Victoria, Canada, MOP045 (2008).
- [4] M. Okamura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 87, 02A906 (2016).