

# 重粒子線がん治療装置用 C<sup>6+</sup>イオン源・高周波四重極線形加速器の ビーム加速試験

## BEAM ACCELERATION TEST OF C<sup>6+</sup> ION SOURCE AND RFQ LINAC FOR CARBON ION RADIOTHERAPY

佐古貴行<sup>#, A)</sup>, 山口晶子<sup>A)</sup>, 竹内猛<sup>A)</sup>, 佐藤潔和<sup>A)</sup>,  
後藤彰<sup>B)</sup>, 岩井岳夫<sup>B)</sup>, 根本建二<sup>B)</sup>, 嘉山孝正<sup>B)</sup>, 野田悦夫<sup>C)</sup>  
Takayuki Sako<sup>#, A)</sup>, Akiko Yamaguchi<sup>A)</sup>, Takeuchi Takeshi<sup>A)</sup>, Kiyokazu Sato<sup>A)</sup>,  
Akira Goto<sup>B)</sup>, Takeo Iwai<sup>B)</sup>, Kenji Nemoto<sup>B)</sup>, Takamasa Kayama<sup>B)</sup>, Etsuo Noda<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba Corporation,

<sup>B)</sup> Yamagata University,

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Sciences

### Abstract

A prototype of C<sup>6+</sup> injector using a laser ion source and a 4-vane RFQ linac has been developed for a compact synchrotron dedicated to carbon ion radiotherapy. Ion beams are extracted from plasma and directly injected into the RFQ. The RFQ is designed to accelerate high-intensity pulsed C<sup>6+</sup> beam. A solid-state amplifier capable of providing 150 kW was used to power the RFQ. In beam acceleration and energy analysis tests applied less than 100 kW RF power, C<sup>6+</sup> ions were accelerated to 0.60MeV/u, and the number of accelerated ions was  $1.8 \times 10^{10}$ . Requirements for the energy and number of accelerated ions for carbon ion radiotherapy system were achieved.

### 1. はじめに

従来、重粒子線がん治療装置の入射器では ECR イオン源で C<sup>4+</sup>イオンを生成、後段の高周波四重極線形加速器 (RFQ) およびドリフトチューブ線形加速器 (DTL) で加速後に C<sup>6+</sup>イオンへと変換している。イオン源で C<sup>6+</sup>イオンを直接生成することができれば、加速効率が向上し、入射器の短尺化もしくは省電力化が可能となる。

その多価イオン源として固体標的からのレーザーアブレーションを利用するレーザーイオン源が開発されてきた。レーザーイオン源は効率的な多価イオン生成が可能であるが、大強度重イオンビームの空間電荷効果のために後段加速器への入射効率の向上が課題となる。この課題を解決するため直接プラズマ入射法が開発されてきた [1-4]。本研究では、直接プラズマ入射法を採用した省電力型 C<sup>6+</sup>レーザーイオン源および RFQ を開発した。ビーム加速試験を実施し、重粒子線がん治療装置の入射器としての成立性を検証した。

### 2. レーザイオン源

Figure 1 にレーザーイオン源および RFQ のビーム試験セットアップを示す。波長 1064nm、最高エネルギー1.7J、パルス幅 10ns (FWHM) の Nd:YAG レーザをミラーを介して真空容器内の焦点距離 150mm のレンズで収束、固体炭素標的に照射してプラズマを生成した。レーザーアブレーションにより生成されたプラズマは RFQ での輸送

効率向上のためピーク電流値低減・パルス幅拡大を目的として 700mm のソレノイドコイルを巻いたノズルを介して RFQ へと入射される。イオン源チャンバーと RFQ 間に 40kV を印加し、プラズマ中から多価イオンをビームとして引き出した。

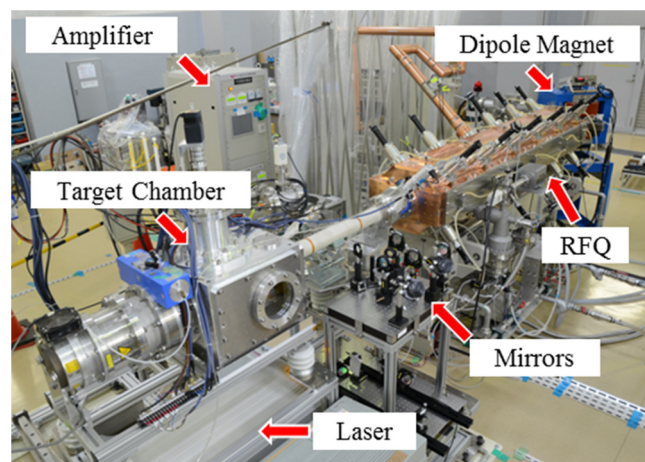


Figure 1: Photograph of the ion-source and RFQ.

### 3. RFQ

C<sup>6+</sup>イオンを直接生成可能なレーザーイオン源の特長を活かした省電力型 RFQ を開発した。空洞長を重粒子線がん治療装置の従来型 RFQ と同等の 2.5m [5]とすることで消費電力低減を目指した。目標投入 RF パワー

<sup>#</sup> takayuki1.sako@toshiba.co.jp

100kW 以下に対し、90kW で設計した。セルパラメータの最適化には R. A. Jameson 氏により開発された LINACS v2 を用いた。RFQ の主要パラメータを Table 1 に示す。RFQ は電極と空洞を一体化し、上部ベインと上部空洞、中央の水平 2 ベインと中央空洞、下部ベインと下部空洞の 3 ピース構造で製造し、アライメント精度と Q 値向上の両立を図った。パワー投入時の安定性向上を目的として、3 ピース共に無酸素銅削り出し、鍍金レス工法とした。組立後のネットワークアナライザーによる測定の結果、Q 値 12000 を達成した[6]。

RFQ の高周波源には半導体高周波増幅器を採用した。公称定格出力 150kW、消費電力は 10kVA 以下であり、従来型 RFQ の真空管高周波増幅器に比べ 1/4 以下の省電力化が可能である。8 時間連続 90kW-500  $\mu$ sec-1Hz RF パワー投入試験では無放電運転を実証しており、本 RFQ の安定性が示された。

Table 1: RFQ Specifications [6]

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| Injection energy     | 20 keV/u           |
| Extraction energy    | 600 keV/u          |
| Operating frequency  | 200 MHz            |
| Electrode type       | 4-Vane             |
| Charge to mass ratio | 1/2                |
| Tank length          | 2520 mm            |
| Tank width           | 487 mm             |
| Tank height          | 407 mm             |
| Synchronous phase    | -30 degree         |
| Minimum bore radius  | 2 mm               |
| Material             | Oxygen-free copper |

#### 4. ビーム加速試験

RFQ 下流にカレントランス(CT)、偏向電磁石、ファラデーカップ(FC)を順に配置し、ビーム加速・価数分離試験を実施した。Figure 2 に試験体系を示す。

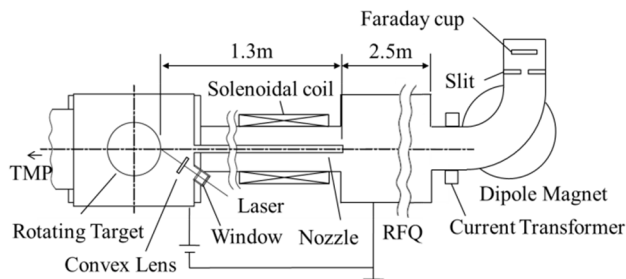


Figure 2: Configuration of the laser ion source, the RFQ and beam measuring instruments.

Figure 3 に RF パワー設計値 90kW での RFQ 加速ビーム信号をスリット無挿入でファラデーカップにより測定した結果を示す。以降の議論ではファラデーカップもしくはカレントランスで得られた TOF スペクトルを積分してイオン個数を導出した。

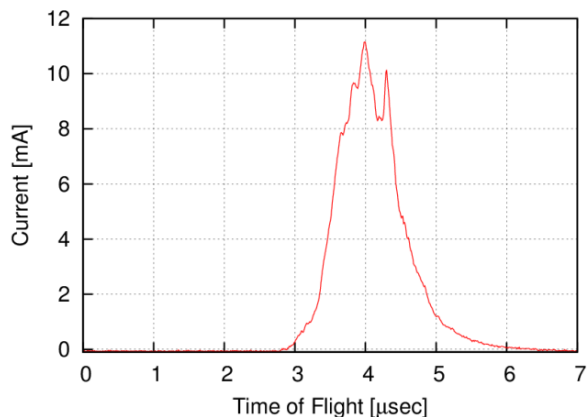


Figure 3: Beam signal obtained after the RFQ and the dipole magnet without slits.

Figure 4 に RFQ 投入パワーをパラメータとして、ソレノイドコイルで 9mT の磁場[6]を発生させた場合のイオン個数測定結果を示す。電磁石分離前のカレントランスでは  $C^{6+}$ 、 $C^{5+}$ などの価数が混在したビームが測定される。電磁石分離後のファラデーカップでは 0.6MeV/u  $C^{6+}$  イオンを選択するよう磁場強度を設定した。

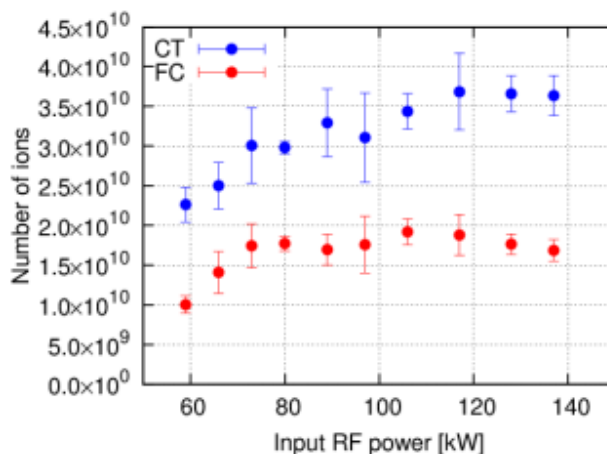


Figure 4: Numbers of accelerated ions after the RFQ. CT means Current Transformer before the dipole magnet, and FC means after the magnet. Error bars mean only statistical errors.

$C^{6+}$  イオンのみが選択されるファラデーカップによるイオン個数測定結果から RF 投入パワー80kW 以上で加速イオン個数の飽和領域が観測された。イオン個数は目標とする 100kW 以下で  $1.8 \times 10^{10}$  個/パルス、RF パワー設計値 90kW では  $1.7 \times 10^{10}$  個/パルスであった。一方で、 $C^{5+}$ などの価数が混在するカレントランスの結果で

は同領域でのイオン個数の飽和は確認できなかった。これは設計  $Q/M=1/2$  より小さい  $C^{5+}$  の加速には電圧が不足することを意味する。

## 5. エネルギー分析試験

偏向電磁石-ファラデーカップ間にスリットを挿入した RF パワー設計値 90kW 投入時のエネルギー分析試験の結果を Figure 5 ( $C^{6+}$ ) および Figure 6 ( $C^{5+}$ ) に示す。イオン源と RFQ 間の印加電圧を 40kV で固定し、 $C^{6+}$  イオンは 20keV/u、 $C^{5+}$  イオンは 17keV/u 入射に相当する。

$C^{6+}$  イオンの中心エネルギーの測定値は 0.60 MeV/u であり、設計値 0.6MeV/u と一致した。 $C^{5+}$  イオンの中心エネルギーは 0.58 MeV/u であった。

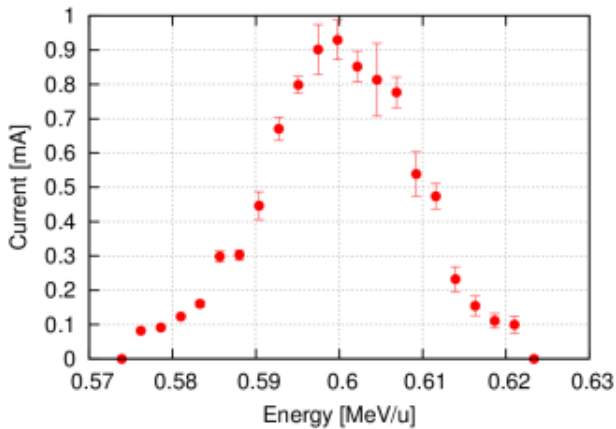


Figure 5:  $C^{6+}$  beam energy distribution measured by a set of the faraday cup, slits and the dipole magnet after the RFQ. Error bars mean only statistical errors.

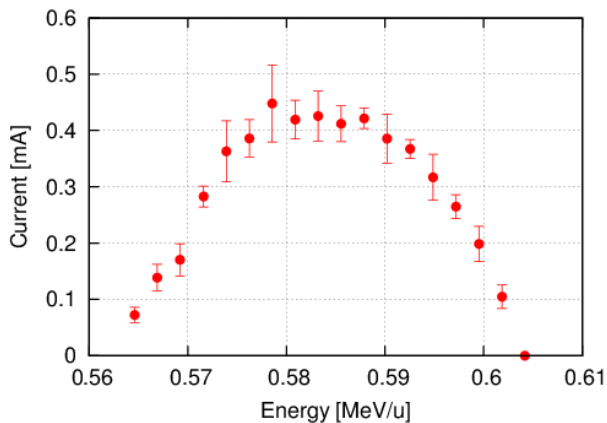


Figure 6:  $C^{5+}$  beam energy distribution.

## 6. まとめ

省電力型  $C^{6+}$  レーザイオン源および RFQ を開発した。RF パワー投入試験の結果、8 時間連続無放電運転を実証した。ビーム加速試験では  $C^{6+}$  イオンを設計通り 0.60MeV/u まで加速できることを確認した。また、目標とする 100kW 以下のパワー投入で加速イオン個数  $1.8 \times 10^{10}$  個/パルスを観測した。重粒子線がん治療装置の入射器に必要なとされるイオン個数  $1.0 \times 10^{10}$  個/パルスを達成しており、基本的成立性を実証した。

今後のレーザイオン源の実用化においては長時間運転時のイオン個数安定性を検証する必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は平成 25 年度補正予算「次世代型重粒子線がん治療装置の開発に向けた革新的技術開発」によって実施されたものである。

## 参考文献

- [1] M. Okamura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 73, 761 (2002).
- [2] T. Takeuchi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 73, 764 (2002).
- [3] T. Takeuchi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 73, 767 (2002).
- [4] H. Kashiwagi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 75, 1569 (2004).
- [5] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 572, 1007(2007).
- [6] T. Sako *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 87, 02C109 (2016).