

## 高い安定性を持つ重粒子線治療用入射器の開発

### DEVELOPMENT OF A HEAVY ION THERAPY INJECTOR WITH HIGH STABILITY

安田浩昌<sup>#, A)</sup>, 大崎一哉<sup>A)</sup>, 川崎泰介<sup>A)</sup>, 佐古貴行<sup>A)</sup>, 左古田淳平<sup>A)</sup>, 佐藤潔和<sup>A)</sup>, 富田和仁<sup>A)</sup>, 平田寛<sup>A)</sup>,  
龍頭啓充<sup>A)</sup>, 林崎規託<sup>B)</sup>, 池田翔太<sup>B)</sup>, 岡村昌宏<sup>B)</sup>, 岩田佳之<sup>C)</sup>, 村松正幸<sup>C)</sup>, 山田聡<sup>C)</sup>  
Hiromasa Yasuda<sup>#, A)</sup>, Kazuya Osaki<sup>A)</sup>, Taisuke Kawasaki<sup>A)</sup>, Takayuki Sako<sup>A)</sup>, Junpei Sakoda<sup>A)</sup>, Kiyokazu Sato<sup>A)</sup>,  
Kazuhito Tomita<sup>A)</sup>, Yutaka Hirata<sup>A)</sup>, Hiromichi Ryuto<sup>A)</sup>, Noriyosu Hayashizaki<sup>B)</sup>, Shota Ikeda<sup>B)</sup>,  
Masahiro Okamura<sup>B)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>C)</sup>, Masayuki Muramatsu<sup>C)</sup>, Satoru Yamada<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

<sup>B)</sup> Tokyo Institute of Technology

<sup>C)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology

#### Abstract

Heavy ion therapy is attracting worldwide attention as a cancer treatment method that maintains quality of life (QOL). Toshiba Energy Systems and Solutions Corporation supplies heavy ion therapy systems to hospitals in Japan and overseas. The new injector with improved stability is being developed. The prototypes of ECR ion source, RFQ and DTL are manufactured and assembled. We report the results of the stability of this prototype injector.

#### 1. はじめに

東芝エネルギーシステムズ株式会社では、生活の質 (Quality of Life; QOL) を維持するがんの治療方法として重粒子線治療装置 [1-4] を提供している。日本国内での重粒子線治療は放射線医学総合研究所 (現: 量子科学技術研究開発機構) で開発された重粒子線がん治療装置 HIMAC にて本格運用が開始された後、国内の複数施設で展開されており、国外でも多くの計画が進行している。

重粒子線治療装置の構成概要図を Fig. 1 に示した。提供している重粒子線治療装置は入射器、シンクロトロン、高エネルギービーム輸送系 (HEBT)、照射室 (回転ガントリー照射 [5, 6] または固定照射) で構成される。治療時間の確保のために、加速器のダウンタイムによる治療中断を低減する必要がある。特に、入射器の線形加速器部では連続放電による治療遅延が発生した経緯もあったため、安定してシンクロトロンにビームを供給できる入射器を開発している。開発中の入射器構成図を

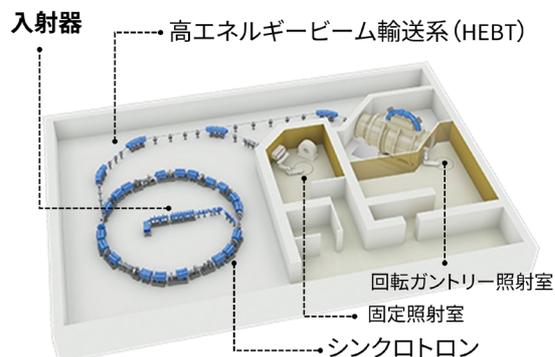


Figure 1: Components of a Heavy ion therapy system.

<sup>#</sup> hiromasa1.yasuda@toshiba.co.jp

Fig. 2 に示した。本入射器は ECR イオン源、低エネルギービーム輸送系 (LEBT)、高周波四重極線形加速器 (RFQ) および Alternative Phase Focusing (APF) 方式を採用した Interdigital H-mode Drift Tube Linac (IH-DTL) [7] で構成されている。それぞれの加速管には高周波電源として、真空管ではなく半導体アンプを使用することで電源の安定性向上およびランニングコスト・フットプリントの低減を目指している。入射器全体と各機器の主要な仕様については Table 1 に示した。炭素 4 価の粒子源として、10 GHz ECR イオン源を採用した。線形加速器については運転周波数を 200 MHz とし、入射器出口において炭素 6 価のビーム電流値 200  $\mu$ A 以上および加速ビームエネルギー値 4 MeV/u 以上を目指す。

今回、入射器試作機のビーム試験を実施し、加速ビーム電流値・エネルギー分布の安定性および各加速管の安定性について評価した。

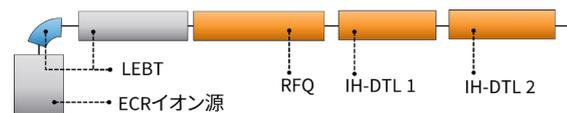


Figure 2: Conceptual diagram of the injector configuration under development.

#### 2. 試験セットアップ

本開発にあたり、入射器試作機として、ECR イオン源から IH-DTL1 までを試作した。各装置の要素試験を実施した後、各機器を組み合わせたビーム試験を実施した。ビーム試験時のセットアップを Fig. 3 に示す。IH-DTL1 直下にファラデーカップを設置し、IH-DTL1 までで加速されたビーム電流値を測定している。また、IH-DTL1 下流には偏向電磁石を含む、加速ビームのエネルギー分布を測定するための分析系を用意した。



Figure 3: Experimental setup.

Table 1: Target Specification of the Prototype Injector

Ion species	$C^{4+}$
Repetition frequency	0.3 Hz (max. 2Hz)
Beam pulse width	40 ~ 120 $\mu\text{sec}$
Ion source	
Ion source type	ECR
Frequency	10 GHz
RFQ	
Frequency	200 MHz
Input energy	10 keV/u
Output energy	0.604 MeV/u
IH-DTL (2tanks)	
Frequency	200 MHz
Output energy	2.155 MeV/u @ tank1 ext. 4.115 MeV/u @ tank2 ext.
Beam current	> 147 $\mu\text{A}$ @ tank1 ext. ( $C^{4+}$ ) > 200 $\mu\text{A}$ @ tank2 ext. ( $C^{6+}$ )
Output beam emittance	$\leq 1.0 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (norm.)
Momentum spread	$\leq \pm 2 \times 10^{-3}$

本ビーム試験では、Table 1 に示す IH-DTL1 出口での目標ビーム電流値およびエネルギー値を満たすように各機器を調整したうえで、1日を通したビーム電流値の連続測定を実施し、加速ビーム電流値およびエネルギー分布の安定性を評価した。また、加速管内の加速電圧が定格運転時よりも高いときに連続して運転できるかを評価し、加速管の安定性についても検証した。

### 3. 連続運転試験

入射器の安定性評価試験として、1日を通したビーム電流値およびエネルギー分布測定を行った。この際、RF パルス運転の条件は 1 Hz-500  $\mu\text{sec}$  とした。加速ビーム電流値の連続測定結果を Fig. 4 および Fig. 5

に示した。Table 1 に示す IH-DTL1 出口の目標ビーム電流値 147  $\mu\text{A}$  を上回るビーム電流値を加速でき、1日を通したビーム電流値の平均値は 168.2  $\mu\text{A}$ 、標準偏差は 6.6  $\mu\text{A}$  であった。この際、加速管の放電によるインターロックダウンはなかった。また、連続運転中におけるエネルギー分布の変動について評価した結果を Fig. 6 に示す。本測定は分析系偏向電磁石下流のファラデーカップにおいて、測定ビーム電流値の偏向電磁石磁場依存性から評価した。この際に測定ビーム電流値の最大値で各エネルギー値におけるビーム電流値を規格化した結果を示している。運転中および立下げ時のエネルギー分布測定結果から、エネルギー分布の変動は見られず加速ビームのエネルギー分布が安定していることが示された。

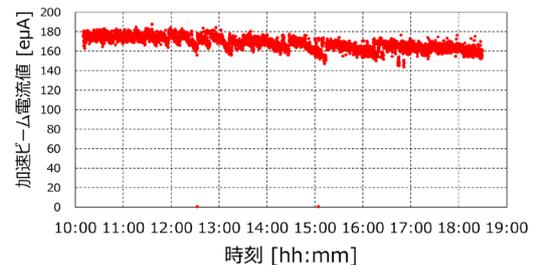


Figure 4: Beam current trend after the IH-DTL1.

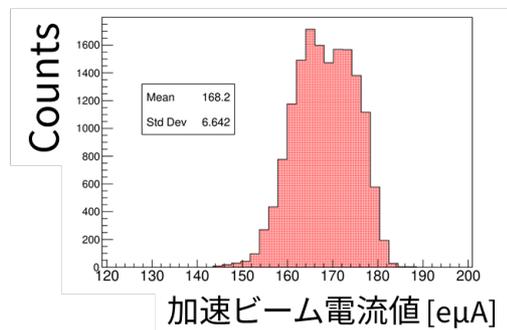


Figure 5: Histogram of beam current.

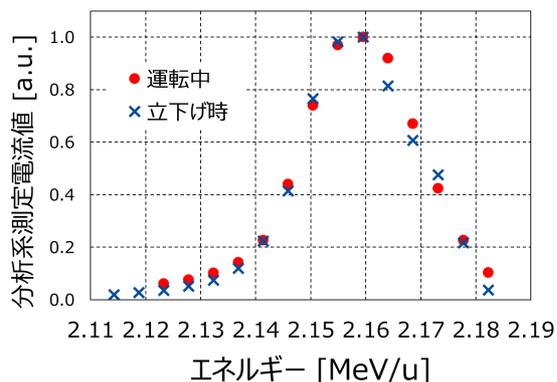


Figure 6: Energy distribution after IH-DTL1.

#### 4. 加速器高電界試験

本入射器試作機での高電界試験を実施した。加速管内に挿入しているピックアップアンテナから取得できる電圧を測定し、定格運転時に比べて 1.1 倍以上の加速電圧(電界)になるように高周波電力を投入し、1時間の連続運転を行った。各加速管のピックアップアンテナから得られた電圧比を Fig. 7 に示した。RFQ および IH-DTL1 それぞれにおいて、ダウンタイムなく安定して加速電圧を印加できることを確認できた。以上のことから、必要に応じ、高い電界を印加して運転も可能である。

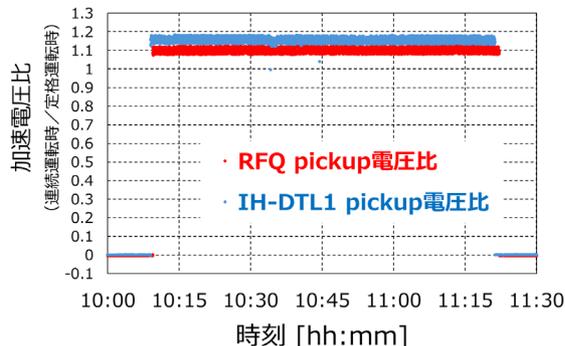


Figure 7: Acceleration voltage ratio trend of the cavities.

#### 5. まとめ

加速器のダウンタイムによる重粒子線治療中断を低減するため、高い安定性をもつ入射器試作機を開発している。ECR イオン源から IH-DTL1 までを試作し、ビーム試験を実施した。連続運転試験として、1日を通した加速ビーム電流値およびエネルギー分布を測定した。ビーム電流値については、目標仕様である 147  $\mu\text{A}$  を上回るビーム電流を安定に加速し続けたことを確認した。エネルギー分布についても運転中/立下げ時で比較し、変動がないことを確認した。加速器の高電界試験としては、RFQ・IH-DTL1 それぞれに対して加速電圧 1.1 倍以上に相当する高周波電力を1時間入れ続け、ダウンタイムなく運転できることを確認した。以上のことから、入射器としての高い安定性を実証できた。

#### 参考文献

- [1] Schulz-Ertner, Daniela *et al.*, J. Clin. Onco. 25.8(2007), 953-964.
- [2] 平田寛 *et al.*, 日本原子力学会誌 ATOMOS 61.8 (2019), 597-601.
- [3] Y. Iwata *et al.*, “加速器” 14, 2, 2017(58–65)
- [4] K. Sato *et al.*, Advances in Accelerators and Medical Physics, 1st edition, Elsevier, 2023, pp.111-127
- [5] Y. Iwata *et al.*, PRAB 15.4 (2012), 044701.
- [6] S. Takayama *et al.*, Physics Procedia 67 (2015), 879-884.
- [7] S. Minaev and U. Ratzinger, Proc. of the 18th PAC(1999).
- [8] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 569, 685 (2006).