

小型 ECR イオン源を使った重粒子線治療装置用入射器による マルチイオンビーム加速試験

MULTI-ION BEAM ACCELERATION TEST USING AN INJECTOR WITH A COMPACT ECR ION SOURCE FOR HEAVY ION THERAPY

安田浩昌^{#A)}, 大久保遼太郎^{A)}, 川崎泰介^{A)}, 佐古貴行^{A)}, 左古田淳平^{A)}, 佐藤潔和^{A)}, 富田和仁^{A)},
平田寛^{A)}, 龍頭啓充^{A)}, 林崎規託^{B)}, 池田翔太^{B)}, 陶沢^{B)}, 岡村昌宏^{B)},
岩田佳之^{C)}, 片桐健^{C)}, 村松正幸^{C)}, 山田聡^{C)}

Hiromasa Yasuda^{#A)}, Ryotaro Okubo^{A)}, Taisuke Kawasaki^{A)}, Takayuki Sako^{A)}, Junpei Sakoda^{A)}, Kiyokazu Sato^{A)},
Kazuhiro Tomita^{A)}, Yutaka Hirata^{A)}, Hiromichi Ryuto^{A)}, Noriyosu Hayashizaki^{B)}, Shota Ikeda^{B)}, Ze Tao^{B)},
Masahiro Okamura^{B)}, Yoshiyuki Iwata^{C)}, Ken Katagiri^{C)}, Masayuki Muramatsu^{C)}, Satoru Yamada^{C)}

^{A)} Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

^{B)} Institute of Science Tokyo

^{C)} National Institutes for Quantum Science and Technology

Abstract

Heavy ion therapy systems are gaining global attention as a treatment method that preserves patients' quality of life (QOL). Toshiba has developed a compact rotating gantry system equipped with superconducting magnets, enabling 360-degree irradiation to further reduce the burden on patients undergoing heavy ion therapy. To prevent treatment interruptions, we have developed an injector equipped with a compact ECR ion source using permanent magnets. Carbon beam tests indicated the system could meet clinical specifications. To evaluate its applicability to multi-ion therapy, we conducted acceleration tests using helium beams and successfully achieved the target specifications of the helium beam current 400 μA and its energy 2.2 MeV/u.

1. はじめに

重粒子線治療装置は QOL(Quality of Life)を維持したがんの治療方法として世界的に注目されている[1-4]。当社では超電導磁石を用いた小型回転ガントリー[5, 6]を特徴とした重粒子線治療装置を提供している。重粒子線治療装置は主に Fig. 1 に示す入射器、シンクロトロン(主加速器)、高エネルギービーム輸送系(HEBT)、固定照射室または回転ガントリー照射室で構成される。このうち、入射器のトラブルは即時治療中断となってしまうため、より高い安定性が求められている。当社ではこれまで小型 ECR イオン源を用いた入射器を開発してきた[7]。Table 1 に主要な仕様を示す。

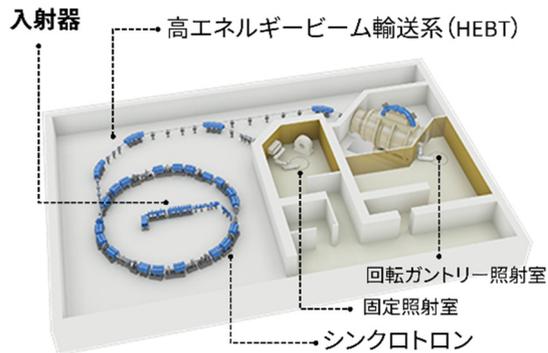


Figure 1: Components of a Heavy ion therapy system.

[#] hiromasa.yasuda.x42@mail.toshiba

近年、従来の炭素線のみを用いた重粒子線治療に加え、ヘリウムや酸素、ネオンなど炭素以外のイオンを照射するマルチイオン治療によって治療効果が向上することが示唆されている[8]。当社でも現在建設中のソウル大学向け重粒子線治療装置からマルチイオンビームの適応を開始する。開発した入射器を用いた安定したマルチイオンビーム治療の提供に向け、ヘリウムビームの加速試験を実施し、加速ビームの電流値、プロファイルおよびエネルギーを評価した。

Table 1: Major Specifications

Injector	
Ion species	$^{12}\text{C}^{6+}$, $^4\text{He}^{2+}$
Components	ECR + RFQ + IH-DTL
Kinetic energy	4 MeV/u
Beam current (peak)	200 μA ($^{12}\text{C}^{6+}$), 290 μA ($^4\text{He}^{2+}$)
Repetition rate	0.3 Hz (max. 2 Hz)
Synchrotron	
Circumference	63.3 m
Kinetic energy	55.6 – 430 MeV/u
Energy resolution	600 Energy levels
Particle numbers	$\geq 3 \times 10^9$ PPP ($^{12}\text{C}^{6+}$)
Flattop time duration	≥ 30 s
Repetition rate (max.)	0.2 Hz

2. 試験セットアップ

Figure 2 に当社が開発している入射器の概要図を示

す。入射器はイオン源、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)、Alternative Phase Focusing (APF) 方式を採用した Interdigital H-mode Drift Tube Linac (IH-DTL) で構成されている。イオン源としては従来一般的であった電磁石型ではなく、永久磁石により構成を簡略化した小型 ECR イオン源を開発し、適用した。従来の RFQ・DTL は鍍金加工された空洞に真空管電源を接続して運転していた。今回の試作機では運転時の安定性ならびに運転コスト低減を図り、銅の削り出し加工により形成された空洞に半導体電源を接続する方式とした。従来の DTL は 1 台構成であったが、半導体電源を含めた全体コスト低減のため、DTL を 2 台構成としている。

これまでに IH-DTL1 までを実証試験範囲として、炭素イオンビーム ($^{12}\text{C}^{4+}$) の加速試験を実施し、 $170\ \mu\text{A}$ の加速を確認している [7]。Figure 3 に入射器試作機の全体と、小型 ECR イオン源の拡大写真を示す。本入射器試作機にはビーム電流値を測定するための検出器としてファラデーカップを用いている。加速前のビーム電流波形はイオン源偏向電磁石下流にあるファラデーカップ (FCN1) で測定しており、加速後のビーム電流波形は IH-DTL1 下流にあるファラデーカップ (FCN2) で測定した。また、ビームプロファイルを測定するためのスリットおよびワイヤーモニターを IH-DTL1 下流に配置している。さらに下流では偏向電磁石とファラデーカップを組み合わせたエネルギー分析系を用意しており、IH-DTL1 で加速されたビームのエネルギー分布を測定することが可能となっている。入射器試作機でヘリウムイオンビームを生成・加速し、加速前後のビーム電流値、加速ビームのプロファイルおよびエネルギーを測定した。

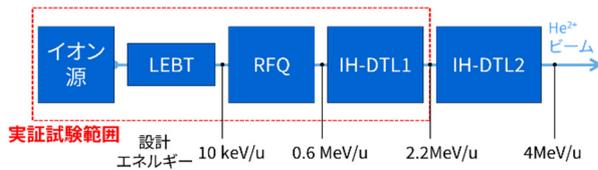


Figure 2: Conceptual diagram of our injector.

3. ビーム加速試験

試作した IH-DTL1 までを加速実証範囲としてヘリウムビームの加速試験を実施した。Figure 4 に加速前後のビ

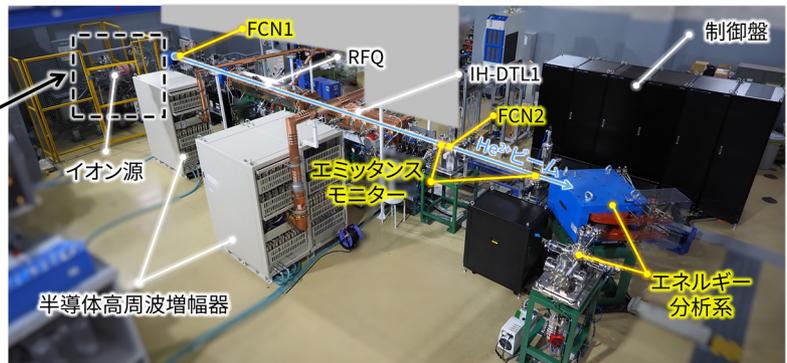
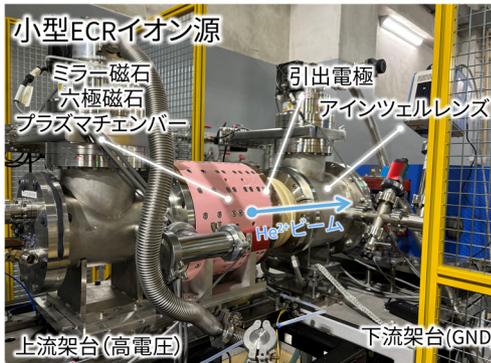


Figure 3: Experimental setup of Toshiba's injector with a compact ECR ion source.

ーム電流波形を示す。加速前ビーム電流値は $1.2\ \text{mA}$ 、加速後ビーム電流値は $400\ \mu\text{A}$ であり、透過率 33%であることを確認した。これは入射器の要求ビーム電流値 $290\ \mu\text{A}$ よりも大きく、後段の IH-DTL2 の透過率を考慮しても十分な電流値をシンクロトロンへ供給できる可能性が高い。ただし、本試験においては RFQ 上流の偏向電磁石を用いて $^4\text{He}^{2+}$ に相当する $Q/A=1/2$ の粒子を選別しているが、同一磁気硬度の粒子は識別できないため、He の純度については今後の課題である。

次に、IH-DTL1 下流に設置したエミッタンスモニターを用いたビームプロファイル測定結果について Fig. 5 に

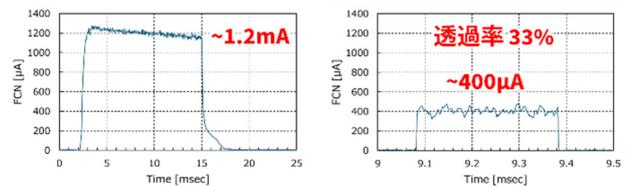


Figure 4: He^{2+} beam current of before acceleration (FCN1) (left) and after acceleration (FCN2) (right).

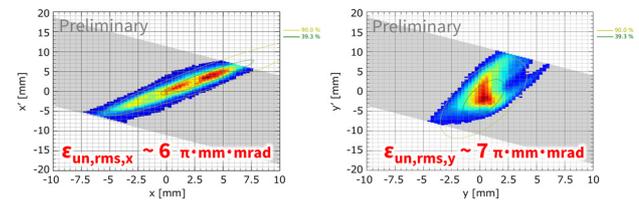


Figure 5: Accelerated beam profile of x-x' plane(left) and y-y' plane(right).

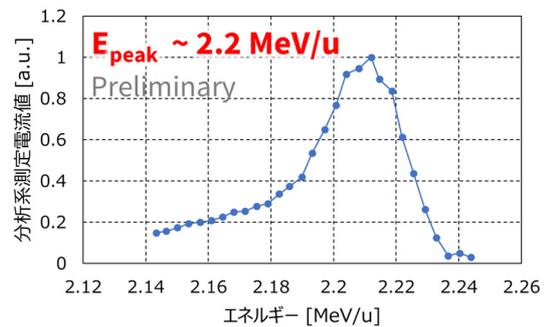


Figure 6: Accelerated beam energy distribution.

示す。非規格化 RMS エミッタンスとして X 方向が $6\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、Y 方向が $7\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ の測定結果が得られた。過去に炭素ビームで測定していた加速ビームプロファイルの非規格化 RMS エミッタンスが $3\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ であったことから、およそ 2 倍のエミッタンス値であることがわかった。

最後に最下流のエネルギー分析系を用いてエネルギー分布を測定した結果を Fig. 6 に示す。本分布の測定結果より、加速ビームのエネルギー値が設計値の 2.2 MeV/u 付近であることから、十分な加速エネルギーが得られたことを確認した。以上の結果より、炭素ビーム向けの本入射器試作機においてヘリウムビームの加速実証に成功した。

4. まとめ

これまで当社では重粒子線治療装置向けの安定した入射器の開発に取り組んできた。炭素ビームの加速実証試験に成功したため、治療効果がより期待できるマルチイオンビーム治療への適応に向け、ヘリウムビーム加速の実証試験を実施した。イオン源からの出力ビーム電

流値として 1.2 mA 、IH-DTL1 の加速ビーム電流値として $400 \mu\text{A}$ が得られた。また、加速ビームエネルギーについては設計エネルギー値である 2.2 MeV/u の加速エネルギー値を確認した。今後は酸素やネオンなど他核種の加速試験を実施し、マルチイオン対応について確認していく。

参考文献

- [1] Schulz-Ertner, Daniela, and Hirohiko Tsujii, J. Clin. Onco. 25.8 (2007), 953-964.
- [2] 平田寛, 萩原剛, 長本義史, 日本原子力学会誌 ATOMO Σ 61.8 (2019): 597-601.
- [3] Y. Iwata *et al.*, 「加速器」Vol. 14, No. 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] H. Yasuda *et al.*, Proceedings of PASJ2024 (2024): 891-893.
- [8] T. Inaniwa *et al.*, Physics in Medicine & Biology, 2017, 62.12: 5180.