

山形大学医学部東日本重粒子センターの現状 (6)

CURRENT STATUS OF EAST JAPAN HEAVY ION CENTER, FACULTY OF MEDICINE, YAMAGATA UNIVERSITY (6)

想田光^{#, A)}, 宮坂友侑也^{A)}, 柴宏博^{A)}, 石澤美優^{A)}, 小野拓也^{A)}, イ ソンヒョン^{A)}, 金井貴幸^{B)}, 岩井岳夫^{A)},
橋本勝則^{C)}, 李潤起^{C)}, 澤村駿^{C)}, 永井恭平^{C)}, 菅藤洋平^{C)}, 盛道太郎^{C)}, 田口貴之^{C)}, 大内章央^{C)},
佐藤亜都紗^{C)}, 勝間田匡^{C)}, 小林泉^{C)}, 佐藤啓^{A)}, 土谷順彦^{A)}, 上野義之^{A)}, 根本建二^{A)}
Hikaru Souda^{#, A)}, Yuya Miyasaka^{A)}, Hongbo Chai^{A)}, Miyu Ishizawa^{A)}, Takuya Ono^{A)}, Sung Hyun Lee^{A)},
Takayuki Kanai^{B)}, Takeo Iwai^{A)}, Katsunori Hashimoto^{C)}, Junki Lee^{C)}, Shun Sawamura^{C)}, Kyohei Nagai^{C)},
Yohei Kanto^{C)}, Michitaro Sei^{C)}, Takayuki Taguchi^{C)}, Fumihisa Ouchi^{C)}, Azusa Sato^{C)}, Masashi Katsumata^{C)},
Izumi Kobayashi^{C)}, Hiraku Sato^{A)}, Norihiko Tsuchiya^{A)}, Yoshiyuki Ueno^{A)}, Kenji Nemoto^{A)}

^{A)} Yamagata University

^{B)} Tokyo Women's Medical University

^{C)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

Faculty of Medicine, Yamagata University started carbon ion radiotherapy on February 2021. The accelerator consists of 4 MeV/u RFQ+IH-DTL injector and 430 MeV/u synchrotron. There are no physical range shifter and the beam range is controlled by synchrotron energy with 0.5 mm steps realized by 600 beam energy. A newly designed scanning irradiation system realized the world smallest carbon ion gantry. The rotating gantry started treatment irradiation by 2 angles on March 2022. The available angles gradually increased to 24 angles by March 2023. Continuous measurement of quality assurance is carried out to ensure the safety of treatment irradiation. Beam positions and beam sizes are kept within 30 % and 1 mm, respectively for the beam energy commonly used. Machine availability in the treatment time is 96.0 %.

1. はじめに

重粒子線治療は、炭素イオンの高い LET による強い治療効果と、ブラッグピークによる良好な線量分布を併せ持つ放射線治療である。長らく先進医療として実施されていたが一般に普及している X 線治療に対する優位性が示され、2016 年に骨軟部腫瘍が保険適用になったことを皮切りに多くの部位を保険診療として治療できるようになり、2024 年には新たに初期の肺がん等も保険適用となった。これによって治療対象患者数が増加し、重粒子線治療は現代の医療において欠かせない一翼を担うようになっている。

山形大学医学部東日本重粒子センター(EJHIC)は、このような保険適用拡大の流れの中で山形大学医学部附属病院に建設された国内7施設目の重粒子線治療施設である[1]。施設の特徴は、世界最小となる 45×45 m の建屋に、小型化された超伝導回転ガントリーを備えていることであり、治療室は水平ポートのみで主に前立腺の照射を行う固定照射室と、複数角度から様々な部位の照射を行うガントリー照射室の 2 室である。施設の模式図を Fig. 1 に示す。

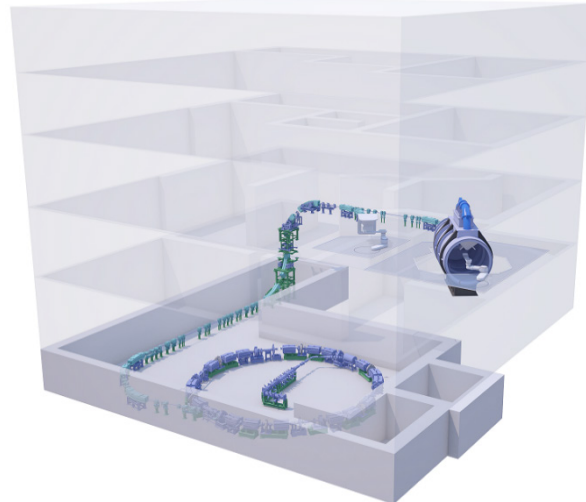


Figure 1: Schematic view of EJHIC.

2. 装置の特徴

EJHIC の加速器は 10GHz ECR イオン源、4MeV RFQ+IH-DTL 線形加速器、最大 430 MeV/u のシンクロトロンからなる。装置仕様は Table 1 の通りである。

イオン源は、Kei2 型[2]永久磁石 10 GHz ECR イオン源で、群馬大学に設置された初期モデルから、引き出し電極径縮小、引き出し部真空改善、He ミキシング運転等の改良を行ったことにより飛躍的に長寿命化し、170 uA

[#] souda@med.id.yamagata-u.ac.jp

で大気開放なしの2年連続運転が可能となった。

線形加速器は4 MeV/u RFQ + APF IH-DTL 線形加速器[3]である。山形から表面処理を電解研磨に変更したことにより、タンク内面状態が飛躍的に改善された。また、RFQ アンプが完全に半導体化されたことにより、受電変動によるタンク電圧の変動が発生しなくなった。これらにより、既存施設で頻発していたRFQの連続放電がほぼ発生しなくなり、これまでの運転でRFQ放電による治療遅延は全く発生していない。

シンクロトロンは普及小型加速器設計[4]に基づく直径20 m、最大エネルギー430 MeV/uのものである。山形では、省エネルギー化のためにシンクロトロン偏向電磁石の磁極間隙を従来機より短くしており、これによって低い偏向電磁石電源の電流で同等の磁場を発生させることができる。また、加減速時間を長くして電源電圧を下げることでよりさらなる省エネルギー化を図っている。加速および減速の時間はそれぞれ2秒と3秒である。シンクロトロンは延長フラットトップ機能を有しており、パターンの任意のタイミングでクロックを停止し、特定のエネルギーで保持したまま出射を行うことができる。これを利用して600段階にエネルギーを変更して照射が可能となっている。

超伝導回転ガントリーは、機能結合型超伝導電磁石6台(最大磁場3.5 T)を用いている[5]。磁石はGM冷凍機による直接冷却で平均3.5 Kを実現しており、液体ヘリウムを直接に用いないことが大きな特徴となっている。クエンチ保護が作動した場合の復旧時間は90分程度であり、朝起動時の初期化でクエンチした場合には治療遅延せずリカバリーが可能な場合もある。

Table 1: Specification of Treatment Facility in Yamagata University

Ion Source	10 keV/u C ⁴⁺ 10 GHz ECR w/ permanent magnet
Linac	0.6 MeV/u RFQ 4 MeV/u IH-DTL
Synchrotron	Energy 55.6 – 430 MeV/u Circumference ~63 m Beam Intensity: $3 \times 10^7 - 1 \times 10^9$ pps Extended flattop operation
Irradiation System	# of rooms: 2 (Fixed Horizontal / Rotating Gantry) Field Size: 200 × 200 mm Dose rate: >2 Gy/min for 1 L Positioning: Crossed X-ray (Gating available)
Building	Size: W 45 m × D 45 m × H 27 m Natural Air Conditioning

3. コミッショニング

建屋及び装置の完成から治療開始までの流れをFig. 2に示す。

装置コミッショニングは2019年11月より実施し、入射機とシンクロトロン初期調整を行って施設検査に合格し、以後は治療に用いられる品質のビームを実現することを目標にメーカーでビーム調整を行った。2020年末からは病院側の医学物理スタッフも本格的に加わって治療計画装置のモデリング検証測定を行い、2021年2月に固定照射室の水平ポートで治療を開始した。

回転ガントリーは、ステアリング出力の不足やビームサイズの角度依存性、シンクロトロン初期条件が大きく異なるため特定のエネルギーを挟むとエネルギー補間が機能しないなどの困難に直面したが、2022年夏よりQSTの助言を受けるとともにメーカー側も体制を強化し、根気強く調整を行うことにより2023年3月に治療を開始した。その後、ユーザー側で精密軸調整やビームサイズ・平坦度検証を行ったうえで順次利用可能な角度を開放し、2023年3月には15度刻み24角度での治療が可能となった[6]。

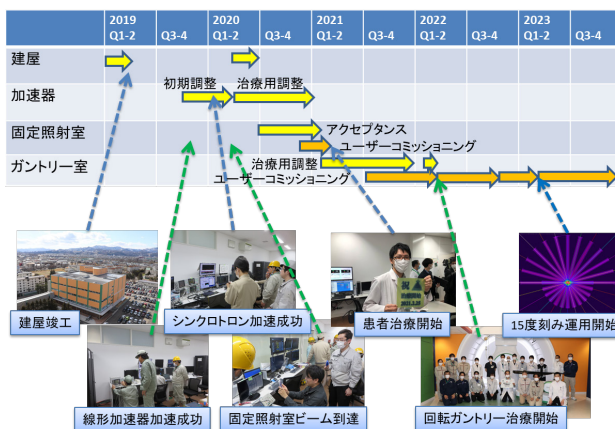


Figure 2: Affiliations of presenters in PASJ8.

4. 治療装置の運用状況

重粒子線治療装置は長らく先進医療で行われてきたが、治療効果の優位性が示された部位から順次保険適用が進み、現在では大半の症例が保険診療で行われている。特に放射線抵抗性腫瘍や、重要臓器が近接する症例に有効である。2024年7月現在、前立腺、肝臓、膵臓、骨軟部、頭頸部、直腸、肺、子宮の治療が保険適用となっている。

装置運用については、ガントリーでの全部位の治療を開始した2022年10月以降は、7時立ち上げ、9-17時が治療、22時シャットダウンという運用を行っている。年間運転時間は4000時間程度である。ガントリー角度は15度刻み(24角度)で運用している。年間治療人数は2023年度で662人であり、2024年6月までの累計治療人数は1,718人となった。

装置のパラメータについて、これまで使用したエネルギーをFig.3に示す。これまでに用いた最大エネルギーは414.5 MeV/uであり、金属マーカーが刺入されている前立腺がんや、膵臓を側方反対側から照射するビーム等で高いエネルギーを使用している。最小エネルギーの

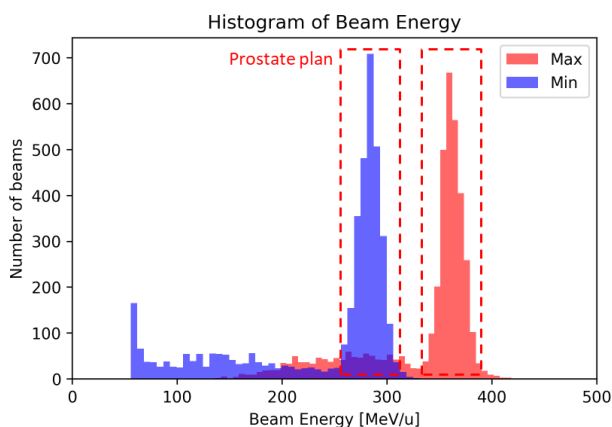


Figure 3: Histogram of beam energy used for treatment.

55.6MeV/u は特に頭頸部で頻りに皮膚近くの照射で用いている。角度は上方からの照射が多く、下方は 180 度が多い。135,225 度は治療台の端部をかすめて正確に飛程が計算できない恐れがあるため使用しにくい角度である。

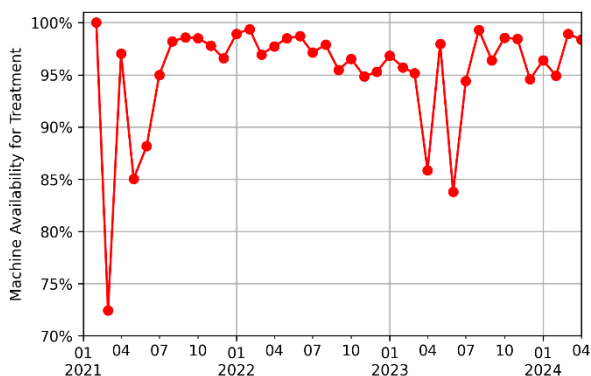


Figure 4: Machine availability in treatment operation.

5. 装置稼働率とトラブル事例

治療時間中の装置稼働率は、式(1)で表される。ここで、 T_{treat} は治療時間、 T_{delay} は遅延時間である。

$$\text{Availability} = 1 - \frac{T_{\text{delay}}}{T_{\text{treat}} + T_{\text{delay}}} \quad (1)$$

これまでの月別装置稼働率を Fig. 4 に示す。全期間

の装置稼働率は 96.0 %である。トラブルの時も、患者あたり 2 週間で 6 回の照射を確保できるように復旧対応を行い、2 日以上の上停止によりこれが確保できない見込みとなった時は休日臨時照射を行った。半日以上の治療遅延が発生したトラブルは、初期の制御トラブル、アインツェル電源故障、真空ベローズリーク、超伝導電源故障(ガントリー室のみ)、スキャンング電磁石故障(固定照射室のみ)、スキャンング電源故障、イオン源マスフローコントローラ故障である。また、治療停止には至らなかったが大きなトラブルとして、位置モニタの劣化、ガントリー冷却水配管水漏れ、ガントリーターボ分子ポンプ回転翼破損、HEBT ビーム位置変動などがあり、調査および対処を行いつつ治療を維持している。

6. まとめ

山形大学医学部東日本重粒子センターでは、2021 年 2 月に固定照射室で治療を開始し、2023 年 3 月までに回転ガントリーのコミッションングを完了してフル稼働状態で治療を実施している。2023 年度は、当初目標を上回る 662 人の治療を完遂した。保険診療の対象疾患拡大により患者数は増加傾向である。装置稼働率は初期トラブルが多かったが改善傾向であり、トラブルへの適切な対応を行い、今後も安定な運用を実現していきたい。

謝辞

回転ガントリー調整において、量子科学技術研究開発機構の白井敏之さん、岩田佳之さん、水島康太さんに数多くの有益な助言をいただきました。また、コミッションングにおける各種測定およびセットアップにおいては、東芝エネルギーシステムズ株式会社の皆様および加速器エンジニアリング株式会社の装置運転員の皆様に多大なご協力をいただきました。

参考文献

- [1] 想田光 他, 加速器, 17, 144-150, 2020.
- [2] M. Muramatsu *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 02A328, 2008.
- [3] Y. Iwata *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A572**, pp. 1007–1021, 2007.
- [4] T. Furukawa *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A562**, pp. 1050–1053, 2006.
- [5] S. Takayama *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **32** 4401204, 2022.
- [6] H. Souda *et al.*, *Proc. of PASJ2023*, 420-423, 2023.