

山形大学医学部東日本重粒子センターの現状 (7)

CURRENT STATUS OF EAST JAPAN HEAVY ION CENTER, FACULTY OF MEDICINE, YAMAGATA UNIVERSITY (7)

想田 光^{#,A)}, 宮坂 友侑也^{A)}, 柴 宏博^{A)} 石澤 美優^{A)}, 小野 拓也^{A)}, 岩井 岳夫^{A)}, 橋本 勝則^{B)}, 李 潤起^{B)},
永井 恭平^{B)}, 菅藤 洋平^{B)}, 大内 章央^{B)}, 佐藤 亜都紗^{B)}, 小林 泉^{B)}, 佐藤 啓^{A)}, 小藤 昌志^{A)}
Hikaru Souda^{#,A)}, Yuya Miyasaka^{A)}, Hongbo Chai^{A)}, Miyu Ishizawa^{A)}, Takuya Ono^{A)}, Takeo Iwai^{A)},
Katsunori Hashimoto^{B)}, Junki Lee^{B)}, Kyohei Nagai^{B)}, Yohei Kanto^{B)}, Fumihisa Ouchi^{B)}, Azusa Sato^{B)},
Izumi Kobayashi^{B)}, Hiraku Sato^{A)}, Masashi Koto^{A)}

^{A)} Yamagata University

^{B)} 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. 600 energies are available in the synchrotron to control the beam range with 0.5 mm steps. A newly designed scanning irradiation system realized the world smallest carbon ion gantry. The rotating gantry started treatment irradiation on March 2022. The available angles gradually increased to 24 angles by March 2023. Machine availability in the treatment time is 96.4 % from February 2021 to June 2025. 684 Patients were treated in Japanese Fiscal Year 2024.

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、ブラッグピークおよび小さい側方散乱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、2016 年に骨軟部腫瘍が保険適用になったことを皮切りに、X 線治療に対する優位性が示された部位について保険診療が適用されるようになり、前立腺、頭頸部、膵臓、肝臓などに加えて 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(EJHC)は、このような重粒子線治療普及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 m×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。

2. 装置の特徴

EJHC の加速器は 10GHz ECR イオン源、4 MeV 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大幅に長寿命化し、C⁴⁺ビーム

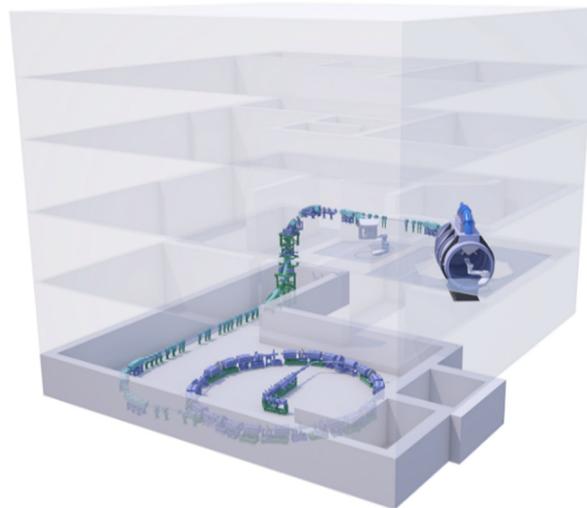


Figure 1: Schematic view of EJHC.

電流 170 uA 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。表面処理をバフ研磨から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

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

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に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[5]を有しており、加減速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い、ビームを破棄せずに次々とエネルギーを変更し照射を継続することができる。利用可能なエネルギーは600段階であり、飛程を0.5 mm刻みで調整可能である。

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[6]。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: 3×10 ⁷ - 1×10 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. 装置の運転状況

建屋及び装置の完成は2019年で、加速器及び照射装置の調整の後に治療用の様々なパラメータの測定を行い、2021年2月に固定照射室の水平ポートで治療を開始し2022年3月には回転ガントリーでの治療を開始した。ガントリーは当初は最低限の角度で運用を開始し、その後、ユーザー側で精密軸調整やビームサイズ・平坦

	0	7:00	7:30	9:00	12	13	15	18	22
Monday				Weekly QA				Beam Tuning	Shutdown
Tuesday		Startup	Machine QA	Treatment				Patient QA	Shutdown
Wednesday		Startup	Machine QA	Treatment				Machine QA	Shutdown
Thursday		Startup	Machine QA	Treatment				Machine QA	Shutdown
Friday		Startup	Machine QA	Treatment				Patient QA	Shutdown
Saturday				Maintenance					
Sunday				Maintenance					

Figure 2: Weekly operation schedule.

度検証を行った上で順次利用可能な角度を開放し、2023年3月からは15度刻み24角度での治療を行っている[7]。

週間の運用スケジュールはFig. 2の通りである。装置は毎日コールドスタートであり、朝7時に装置を立ち上げて、入射器・シンクロトロンからのビーム電流量測定後、治療室の位置モニターでのビーム位置確認と出力確認測定を行って固定照射室は8:30-9:00で治療開始、回転ガントリー室はビーム位置確認を4角度で行い9:00-9:30で治療開始という流れである。治療は固定照射室での前立腺の照射が25人程度、それ以外の部位のガントリーでの照射が15人程度で、概ね17時には当日の治療照射が完了している。以降21時の装置停止までは、月例のビーム軸・ビームサイズ測定や、患者ごとの治療計画検証測定などに充てている。月曜日は治療を行わず装置の点検および時間のかかる測定や調整に充てており、この時間を利用して実験照射を行うこともある。

年間治療人数は2024年度で684人であり、2024年度末までの累計治療人数は2,235人となった。大部分の部位は保険診療として治療を行っており、件数の多い部位は前立腺、肝臓、膵臓である。

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418.5 MeV/uであり、膵臓を側方から照射するビームや全骨盤照射等で高いエネルギーを使用している。最小エネルギー55.6 MeV/uは特に頭頸部で頻りに皮膚近くの照射で用いている。ガントリー角度はFig. 4に示す通り上方からの照射が多く、下方は180, 150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。

また、ユーザー実験運用として以下のような実験を実施した。ユーザーからの低強度ビームの要望に対して、主にイオン源の出力調整による100 particles/s程度の超低強度ビームで照射することも可能となっている。

- 学外共同研究として、JAXAとの宇宙機用放射線検出器動作検証、群馬大学とのFPGAソフトウェア発生頻度測定
- 学内共同研究として、農学部との作物品種改良照射
- 内部研究として、心臓ペースメーカー照射実験、ゲル線量計照射実験

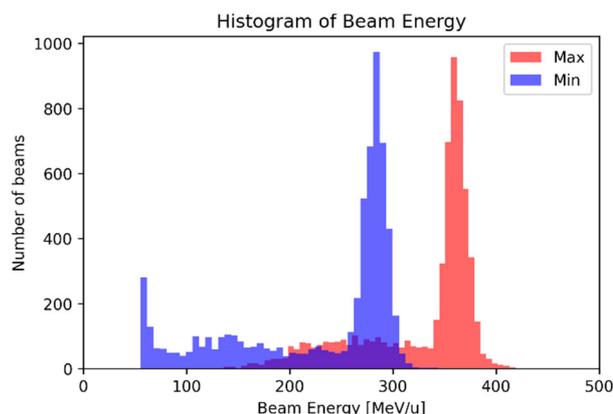


Figure 3: Histogram of beam energy used for treatment.

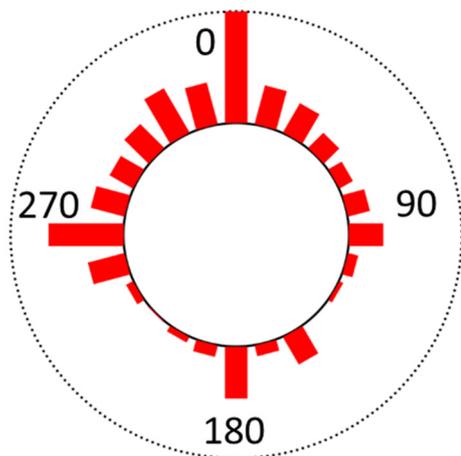


Figure 4: Statistics of gantry angle (normalized by the number of irradiation of 0 degree).

4. 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. 5 に示す。全期間の装置稼働率は 96.4% である。治療開始初期から 2023 年にかけては、制御の通信異常、HEBT スクリーンモニタの真空ベローズリーク、スキャニング電磁石故障、イオン源マスフローメータ故障、スキャニング電源故障などで日単位の治療停止が発生したが、2024 年以降は半日以上の長時間の停止なく運用できている。

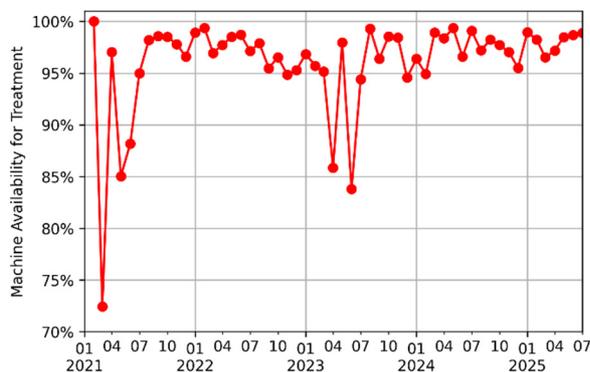


Figure 5: Machine availability for treatment operation.

2024 年以降の大きなトラブルとしては以下のものがある。

- 出射静電セプトム電源のダミー抵抗側配線が放電で損傷し、約半年後に修理が完了するまでダミー抵抗を切り離して運用した。

- 入射器最上流のファラデーカップのベローズが真空リークし、ビーム加速中の LEPT 真空度が 1×10^{-5} Pa $\rightarrow 3 \times 10^{-4}$ Pa まで悪化していた。早期に発見できたためビーム量に影響はなく週内に予備品と交換して復旧した。
- ガントリーの冷却水フレキホースがケーブルスプールから逸脱し、レーザーセンサーで検知され回転が非常停止した。回し続けると損傷や破断のおそれがあったので、固着部を解放して回転試験を行って復旧した。
- 体表面距離をレーザーで測定する呼吸同期装置の制御バグにより、本来照射不可のタイミングでゲートが成立しビームが出射された。位置及び線量誤差を評価し治療としては許容範囲内であった。メーカー側でバグ箇所を特定するとともにユーザー側でも発生条件を総当たり試験し、プログラムの改修を実施し再発しなくなった。
- 2022 年末年に発見された回転ガントリー照射室の多線比例計数管型位置モニタの劣化[8]について、約 2 年半経過後の 2025 年 6 月に再度劣化の兆候が見られ交換を行った。中心線量への影響が 0.5% 程度と小さいうちに対処でき治療への影響はなかったが、Daily ビーム位置測定の照射箇所をずらすなどの対策にも関わらず劣化が進行したため耐久性の向上が今後の課題である。

5. 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。2024 年度は、当初目標を上回る 684 人の治療を実施した。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処を行い、今後も安定な運用を実現していきたい。

謝辞

当施設の運転および保守業務に関して、加速器エンジニアリング株式会社の皆様および東芝エネルギーシステムズ株式会社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] Y. Iwata *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A624**, pp. 33-38, 2010.
- [6] S. Takayama *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **32** 4401204, 2022.
- [7] H. Souda *et al.*, *Proc. of IPAC'24*, 3921-3926, 2023.
- [8] A. Sato *et al.*, *Proc. of PASJ22*, 235-238, 2024.