

群馬大学重粒子線医学センターの現状

PRESENT STATUS OF GUNMA UNIVERSITY HEAVY ION MEDICAL CENTER

中尾政夫^{#A)}, 川嶋基敬^{A)}, 松村彰彦^{A)}, 酒井真理^{A)}, 島田博文^{A)}, 田代睦^{A)},
Varnava Maria^{A)}, 遊佐顕^{A)}, 想田光^{B)}, 野田耕司^{C)}

Masao Nakao^{#A)}, Motohiro Kawashima^{A)}, Akihiko Matsumura^{A)}, Makoto Sakai^{A)}, Hirofumi Shimada^{A)},
Mutsumi Tashiro^{A)}, Maria Varnava^{A)}, Ken Yusa^{A)}, Hikaru Souda^{B)}, Koji Noda^{C)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{B)} Yamagata University

^{C)} Wakasa wan Energy Research Center

Abstract

At the Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC), heavy ion therapy has been conducted since 2010, and a total of 8,058 cases had been treated by April 2025. In 2024, the number of treatments reached 832 cases. Urological cancers (prostate cancer) account for approximately 60% of cases, followed by pancreatic cancer, liver cancer, lung cancer, and bone/soft tissue tumors. Irradiation for physics and biology research is also provided—in principle, for internal use—after treatments end on Thursdays or during holidays. Recently, many studies have focused on the FLASH effect.

1. はじめに

群馬大学重粒子線医学研究センター(GHMC)は2005年に設立され、2007年に重粒子線照射施設建設を開始、2010年3月に治療開始し[1]、2016年から保険診療を開始した。2025年4月までに延べ8058症例の治療を行っている。GHMCの治療用加速器と治療室の諸元をTable 1に示した。本発表では主に2024年度の治療状況、運転統計についてまとめた。

2. 治療の状況

GHMCでは、A室が水平、B室が水平と垂直、C室が垂直の合計3室4ポートで照射が可能である。これらのポートは全てブロードビーム照射法、つまりワブラー電磁石と散乱体でビームを拡大し、マルチリーフコリメータとボーラスを使用してビームを成形する方法である。これらの治療室とは別に、スキャニング電磁石でスポットスキャニング照射を行う垂直ポートを持つD室があり、スキャニング照射法の開発を行った後は研究専用の照射ポートとして使用されている。

2025年4月までの歴年と部位ごとの治療件数の統計をFig. 1に示した[2]。2024年度は832件となった。泌尿器(前立腺)が6割を占め、次いで膵臓、肝臓、肺、骨軟部の順となっている。1件あたり照射回数は4-16回であり、基本的に週に4回、1日あたり約50ポート程度の照射を行っている。月曜日がユーザ点検とマシンスタディ、火曜日から金曜日まで治療が基本的なスケジュールである。加速器は7時から立ち上げ8:40に治療開始し、17~20時まで治療を行っている。治療が終了した後は、火・金曜日は新患測定(患者校正深測定)、水曜日は装置QA、木曜日は実験(生物・物理)を行い、23~0時頃に立ち下げている。約半数の週末に点検・メーカ作業があるが、無い場合には実験用ビームタイムになることもある。

[#] nakaom@gunma-u.ac.jp

Table 1: Specification of GHMC

Ion source	ECR, Permanent Magnet
RF frequency	10 GHz
Ion	C ⁴⁺
Extraction Voltage	30 kV
Injector	RFQ, APF IH-DTL
RF frequency	200 MHz
RF Power	140 kW (RFQ), 400 kW (DTL)
Ion energy	600 keV/u (RFQ), 4 MeV/u (DTL)
Synchrotron	
Ion	C ⁶⁺
Ion energy	290, 380, 400 MeV/u
Circumference	63.3 m
Max. extraction particle number	1.0 × 10 ⁹ pps (Typ.) 1.58 × 10 ⁹ pps (Max.)
Max. range in water	25 cm (400 MeV/u)
Irradiation system	
Irradiation method	Broad beam Layer stacking
Irradiation field	15 × 15 cm
Max. SOBP width	14 cm
Irradiation room	A. Horizontal B. Horizontal, Vertical C. Vertical

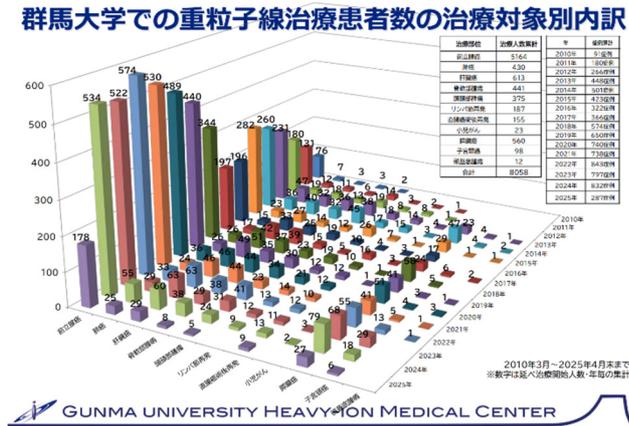


Figure 1: Yearly treatment number by cancer site [2].

3. 運転状況

Figure 2 に稼働時間の 2023-2024 年度の毎月の統計を示した。稼働状況は治療 (treatment)、QA、準備 (preparation)、実験 (experiment)、故障 (failure) の項目に分けて表示した。故障時間は、通常は短いが大きなトラブルが発生した際に増大していることが見て取れる。

Figure 3 に 2023-2024 年度の各月の稼働率の変化を示した。稼働率の定義は前年度までと同様である[3-5]。つまり、装置稼働率 R_{total} は、

$$R_{total} = 1 - \frac{T_{fail}}{T_{avail} + T_{fail}}$$

(T_{fail} は故障時間、 T_{avail} は正常稼働時間) で定義される。故障時間は、1 室以上が正常に使用できなかった時間、および使用はできるが異常の調査のために本来の目的に使用できなかった時間を含む。また、治療稼働率 R_{treat} は、

$$R_{treat} = 1 - \frac{T_{delay}}{T_{treat} + T_{delay}}$$

(T_{delay} 治療遅延時間、 T_{treat} は治療時間) で定義され

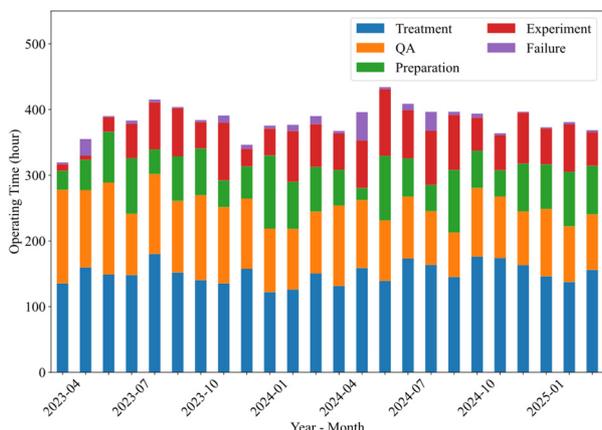


Figure 2: Operating time of accelerator system in GHMC.

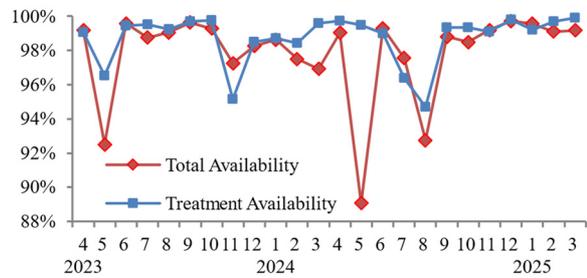


Figure 3: Total availability and treatment availability of the facility of GHMC.

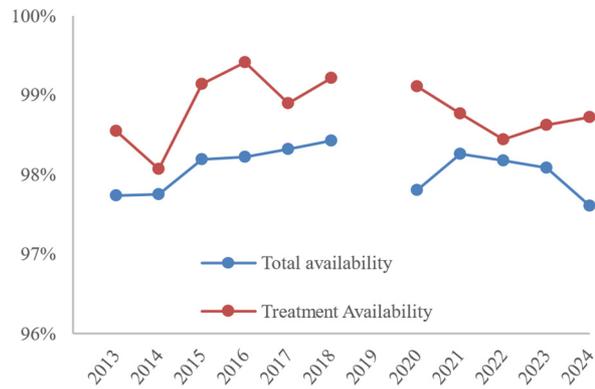


Figure 4: Total availability and treatment availability of the facility of each year. Data for fiscal year 2019 have not been compiled.

る。故障により特定のコースが使用不可能となったが、コース振り替えにより治療を実施した場合は遅延時間に含まれない。Figure 4 に過去の各年度の稼働率を示した。2019 年度は未集計となっている。2024 年度の装置稼働率は 97.6%、治療稼働率は 98.7%となった。例年と変わらない稼働率であった。

4. 主な故障と対処

Figure 3 から 2024 年度の稼働率が落ち込んでいるところを読み取ると、5 月と 7、8 月に大きな稼働率の落ち込みがある。5 月 13 日に B 室の FPD パネルが故障し翌日治療終了後に復旧した。この時は B 室の患者を C 室に振り替えることができたため治療稼働率は低下していない。FPD とは、Fig. 5 の赤丸で示された X 線の Flat Panel Detector であり、患者の位置決めで使用されるため治療には不可欠である。7 月 2 日には 17 時に重粒子センター全体が停電した。これは建屋電気室にある受電設備で不足電圧継電器 (リレー) が、電圧低下を誤認識して作動し、受電を停止したためである。当日の残りの治療を延期して当日に停電からの復旧を行った。また、8 月には A 室で 2 回、C 室で 1 回、FPD の制御の問題によって 1 時間以上治療が遅延するトラブルがあり治療稼働率が低下した。このように、加速器だけでなく受電設備や患者位置決めを使用する FPD も含めて稼働率を上げていくことが重要である。



Figure 5: This photograph shows Treatment Room A; the light blue and black rectangular device is the X-ray flat panel detector (FPD).

5. FLASH 研究のための uHDR 照射

近年、超高線量率(40-100 Gy/s 以上)で放射線を照射することにより、従来の放射線治療よりも正常組織に対する副作用が減少するという FLASH 効果の報告がなされている[6]。GHMC でも FLASH 照射の研究が進められている[7]。この実験を行うためには、高線量率(uHDR; ultra-high dose rate)での照射条件と、その対照実験のために線量率のみを通常の X 線での照射と同程度に下げた照射条件を作成し、それぞれで線量と線量率を測定しておく必要がある。

GHMC では 3 次共鳴を使用した遅い取り出しで約 1 秒でビームを出射している。治療時の取出ではベータトロンチューンを 5/3 の共鳴より少し高くしておき、各磁石の磁場を一定にしたまま RF 周波数を少し増加させ、ベータトロンチューンが下がって 5/3 の共鳴により取り出されるという方法をとっている。一方でチューン測定または実験用に RFKO 用のアンプとキッカー電極も用意しており、RFKO でキックすることでセパトリス外に取り出す RFKO 取り出しも可能になっている。シンクロトロンに注入する粒子数を現在より増やすことは困難であるので、線量率を上げるためには取り出し時間を短縮する必要がある。

ところが、昨年までは線量モニタ計数とアイソセンタに置かれた線量計で測定する線量の比例定数が照射条件ごとに異なり、条件ごとに校正が必要であった。当初はこの原因が線量モニタの飽和によるもので線量モニタ

を改良しなければ解消できないと考えていたが、調査の結果、線量モニタの信号処理回路が飽和していることが判明したため、IF 回路の 1 パルス当たりの電流を増加する等の調整を行った。これにより飽和が起こらなくなり線量モニタとビーム強度に比例するようになった。調整前は、照射条件ごとに、事前測定で照射時間を決めることで線量と線量率を一定にしていたことになる。この方法では線量と線量率を毎日・条件毎に調整しなければならなかった上、線量の誤差が大きかった。調整時間が短くなったことで実験時間も多く取れるようになった。

MAD-X を元にシンクロトロン内の粒子をシミュレーションする Xsuite [8]を用いてシミュレーションによる研究を始めた。今後 RFKO の周波数、振幅を最適化して取出時間の調整やリップルの低減することを目指している。

6. まとめ

2024 年度も群大重粒子線医学センターは高い稼働率を保っているが、加速器のみならず治療に必要な装置や施設のトラブルを防ぎ、復旧時間を短縮することにより、更に高めていくことが必要である。

謝辞

重粒子線治療装置の運転記録の取得について、加速器エンジニアリング(株)の運転技術員および(株)日立ハイテク、三菱電機プラントエンジニアリング(株)の皆様の多大なご協力を頂きました。

参考文献

- [1] T. Ohno *et al.*, “Carbon Ion Radiotherapy at the Gunma University Heavy Ion Medical Center: New Facility Set-up”, *Cancers*, 2011, 3(4), pp. 4046-4060.
- [2] 群馬大学 医学部附属病院 重粒子線医学センター, <https://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/page.php?id=11>
- [3] 想田光, 「重粒子線治療装置の運転統計」, 2018 GHMC Physics Division Report, Mar., 2019, pp. 19-24.
- [4] 中尾政夫 「重粒子線治療装置の運転統計」, 2022 GHMC report, Feb., 2024, pp. 8-12.
- [5] 想田光, 「粒子線治療装置運転・維持管理データベース PT-DOM の開発」, *Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting)*, Japan, Oct., 2022, pp. 146-150.
- [6] U. A. Weber *et al.*, “FLASH radiotherapy with carbon ion beams”, *Medical Physics* 49(3), pp. 1974-1992. (2021).
- [7] M. Tashiro *et al.*, “First human cell experiments with FLASH carbon ions”, *Anticancer Research* 42(5), pp. 2469-2477 (2022).
- [8] G. Iadarola *et al.*, “Xsuite: An Integrated Beam Physics Simulation Framework”, HB2023 (2024), TUA211.