

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)}, 野田耕司^{A)}, 酒井真理^{A)}, 島田博文^{A)},
田代睦^{A)}, Varnava Maria^{A)}, 遊佐顕^{A)}

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

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

Abstract

Carbon beam therapy is carried out in the Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC). 738 patients were treated in 2021, almost the same as in 2020. The total number by 2021 was 5229. In FY2021, some problems such as the injector's phase mismatch and trouble of the synchrotron's sextupole electromagnet power supply caused the delay of the treatment of some patients for one business day. In the experimental beamline (Room D), biological research including FLASH irradiation is being conducted, and the control system for this beamline is being upgraded in three years from FY2021 to FY2023. We report on the statistics of the operation and treatment hours of the accelerator at this facility, as well as the major malfunctions and the measures taken to deal with them.

1. はじめに

群馬大学重粒子線医学センター(GHMC)では、2010年に普及型炭素線治療装置による重粒子線治療を開始した[1]。重粒子線治療を普及していくためには、イオン源、線形加速器、シンクロトロン加速器と、ビームライン、照射システム、X線機器等で構成される施設の稼働率を高め、治療の遅延時間を短くすることが不可欠である。本報告では2021年度の治療実績や運転統計と、主なトラブルとその対処等について報告する。

2. 治療実績

GHMCの治療装置は、10 GHzのECRイオン源、RFQとAPF IH-DTL、周長63.3 mのシンクロトロンを用いてC⁶⁺を核子あたり最大400 MeVまで加速する。治療室はA室が水平、B室が水平垂直、C室が垂直コースで、これらはブロードビームを用いて治療を行っている。他に実験のためにスキヤニング照射を用いる垂直ビームライン(D室)がある。装置の詳細はTable 1に記した。施設は2007年から2009年にかけて建設され、2010年から治療を開始した。また、2016年には保険診療が開始され、その後も保険適用の範囲が広がっている。

年ごとの治療人数をFig. 1に、2021年の部位ごとの治療人数をFig. 2に示した[2-5]。2021年(暦年)では年間738名となった。また、2010年からの累計で5229名となった。また、保険診療が597件と全体の約8割である。治療部位別では、泌尿器(前立腺)が2/3を占め、次いで肝臓、骨軟部、膵臓が多い。前立腺では多くが水平ビームであり、それ以外では水平と垂直がほぼ同じ割合で使用されている。

2021年度までは毎年1月に集中点検を実施していたが、2022年度からは分散点検(部分ごとに金~月の4日間の点検を2ヶ月に1回行い、週末や祝日を利用した点検・修理も従来通り行う)に移行している。治療休止期

間が無くなるため治療人数が増加すると期待される。

Table 1: Specification of GHMC

Ion source	ECR, Permanent Magnet
RF frequency	10 GHz
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

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

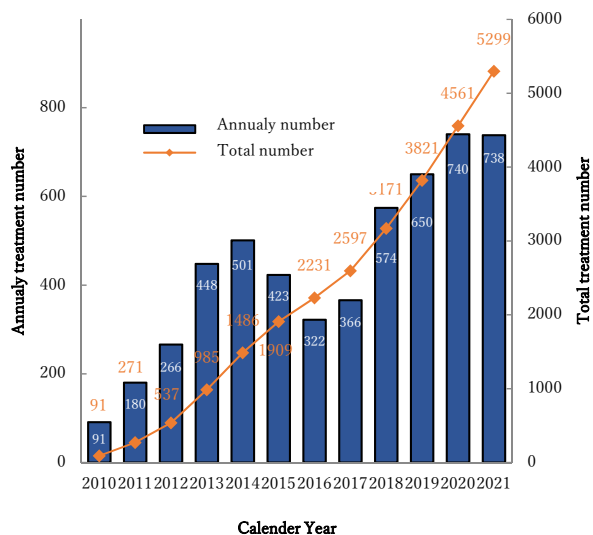


Figure 1: Yearly and total treatment number.

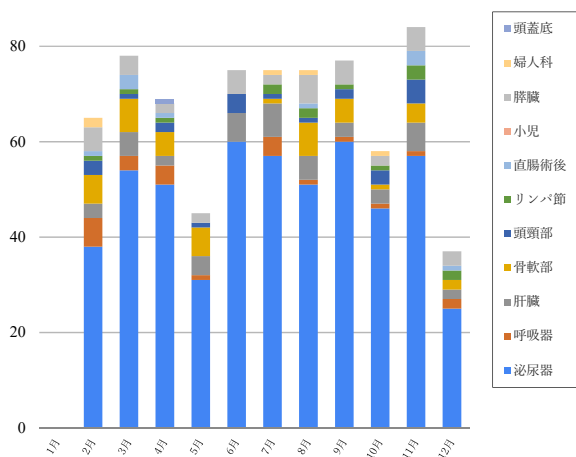


Figure 2: early and total treatment number.

3. 稼働率

GHMC では月曜日をメンテナンス日とし、火～金曜日を治療日としている。加速器は7:00から立ち上げ8:40から治療開始し、17～20時頃まで治療を行う。その後は、月曜日はマシンスタディ、火・金曜日は新患測定、水曜日はQA測定、木曜日は実験のために使用している。立ち下げ、冷却水停止は23時～0時頃になる。各月の稼働時間を Fig. 3 に、治療 (treatment)、準備・測定 (preparation)、実験 (experiment)、故障 (failure) の項目に色分けして表示した。冷却水を始動してから停止するまでの時間を総運転時間とした。

稼働率の定義は、以前との比較を容易にするために2018, 2020年の報告[3, 4]と同じ定義を用いた。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。この定義で求められた月ごとの稼働率を Fig. 4 に示した[5]。

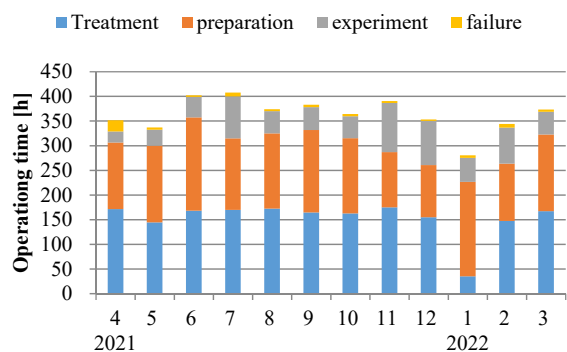


Figure 3: Operating time of accelerator system in GHMC.

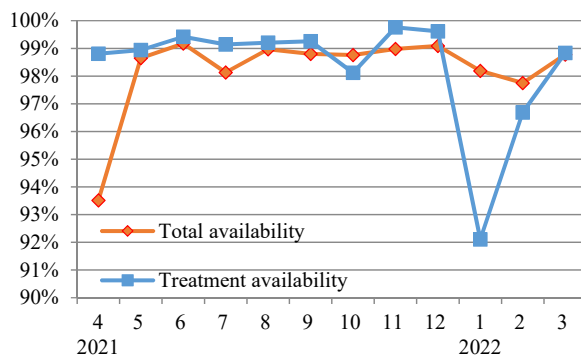


Figure 4: Total availability and treatment availability of the facility of GHMC.

生物分野・物理分野の実験が、木曜日治療終了後または週末(基本的には月末だが点検がなければ他の週末も可能)に行われている。2021年度の課題件数は30件(生物24件、物理6件)であった[5]。

実験で利用できるエネルギーは140～400 MeV (モノエネルギー・SOBP) であり、ビームラインは治療で使用されているA～C室だけでなく、スポットスキャン照射を用いるD室も使用できる。

4. 主な故障

4月19日(月)の月曜点検時に入射器 IHL の50 kW 中段アンプ真空管がフィラメント切れにより動作しないことが判明した。メーカーの技術派遣を受け翌日の午前5

時に復旧した。月曜点検時に故障が発見できたため、治療の遅延は 90 分に抑えることができた。

7 月 10 日(土)に停電が発生し、10 分後に復電した。土曜のため装置停止中であったが、停電により圧縮空気コンプレッサーが停止した影響で入射器ターボポンプのゲートバルブが閉じ、真空が 10^{-6} Pa 台から 10^{-4} Pa 台へ悪化した。これは早期に対処しなければ復旧に時間がかかる可能性のあるトラブルであったが、停電当日中に物理スタッフ、運転員が対処したため治療に影響はなかった。これを機に停電発生時は施設から物理スタッフに確実に連絡する体制を整えた。

2022 年 1 月 21 日(金)の治療中、シンクロtron 起動時に六極電磁石が過熱異常を発報し運転が出来なくなった。運転員がメーカーと連絡をとりつつ原因究明を進め、目視確認では過熱しているようには見られず、サーモセンサーに導通が無いことを確認してサーモセンサーの故障と判断し当該センサーをジャンパー処理して 2 時間後に仮復旧した。その後メンテナンス日に電源メーカーがセンサーを交換して復旧した。

一方で仮復旧の前に各職種代表(医師、放射線技師、看護師、物理)で話し合った結果、当日の治療を全て中止して翌治療日に振り替えることにした。当日に復旧させて治療を再開するか当日の治療を延期するかは、患者に待合室で待機してもらうのも負担になるため難しい判断となる。

装置運転員と装置メーカーの連携によって治療稼働率の低下を最低限に抑えることができています。今後も高い治療維持率を維持するために、スタッフの技術・経験を積み重ねるとともに故障の事前予防(点検、交換及び測定データの傾向解析)を行っていく必要がある。

5. FLASH 照射のためのビーム開発

近年、超高線量率(40Gy/s 以上)での放射線照射(FLASH 照射)により従来行われてきた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報告がなされている[6]。このような実験を行うためには、高線量率(FLASH 条件)での照射条件と、その対照実験のために線量率のみを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。シンクロtron に入射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。GHMC でも FLASH 照射の研究が進められている[2]。

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。ベータトロンチューンを共鳴より 5/3 の共鳴より少し高くしておき、セパトリティクスを一定にしたまま RF 周波数を少し増加させ、ベータトロンチューンが下がり 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ティクス外に取り出す RFKO 取り出しも可能になっている。

取り出しの速さを上げるためにこの二つの取り出し方法を組み合わせてみた。Figure 5 のように、DCCT での周回電流の減少速度が増加し、ファラデーカップで取り出し電流が増加していることが見て取れる。この手法で

実際に生物の実験を行った[7]。

しかしながら、加速しつつ RFKO を利用して取り出すことはビーム力学的に複雑であり、これ以上取り出し速度を上げることは困難である。また、RFKO のみを用いて取り出した場合よりもビームの利用効率が低いことも明らかになった。そのため、今後は RFKO の周波数、振幅の最適化を行うことで取り出し速度を向上させる方針である。

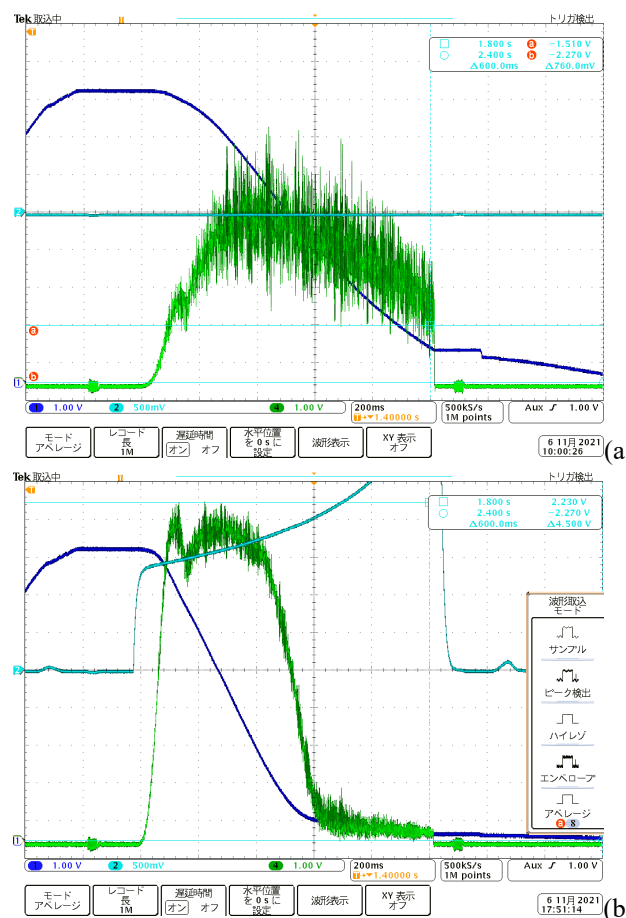


Figure 5: The beam spill of 290 MeV/u (a Acceleration extraction method (daily use) and (b) both acceleration and RFKO method. The blue line shows the beam current circulating the synchrotron measured by DCCT, the green line shows the beam current at the Faraday cup and light blue line shows the RF signal amplitude to RFKO amplifier.

6. イオン源テストスタンド

群馬重粒子線産学官共同研究センターとして GHMC で用いられているのと同様の KeiGM2 イオン源のテストスタンドが整備されている。企業との共同研究に用いられると共に、重粒子線医学センターの予備機としての役割もある。

昨年度から、従来のワイヤースリット型のエミッタンスモニタに加えてペッパーポットエミッタンスモニタを制作中である(Fig. 6)。測定時間が大幅に短縮するためイオン源のエミッタンスの時間変化を測定できると考えている。

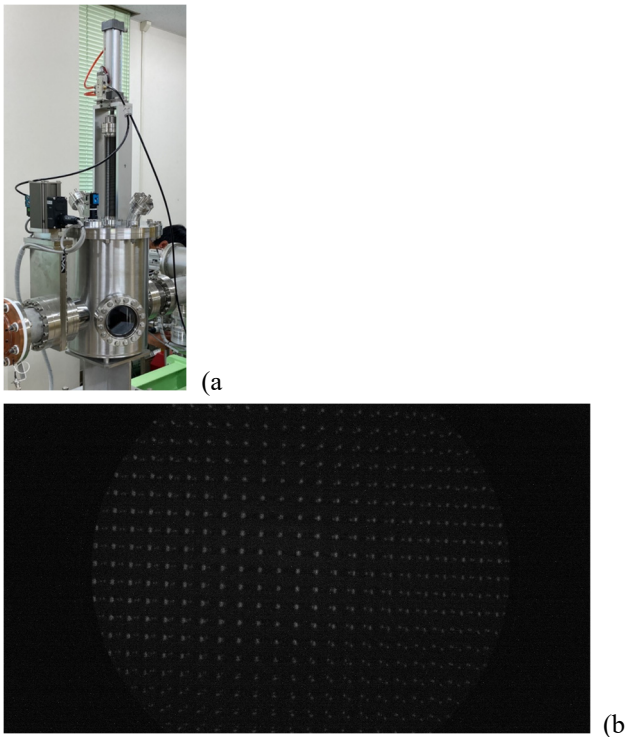


Figure 6: (a) External view of the pepper pot emittance monitor. (b) The fluorescence light from the MCP taken by the CCD camera. Analysis is needed to determine emittance and phase space plot.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H04454 の支援を受けて実施しました。また、重粒子線治療装置の運転記録の取得について、日立製作所、三菱電機プラントエンジニアリング(株)の運転技術員および加速器エンジニアリング株式会社の皆様の多大なご協力を頂きました。また、山形大学の想田光氏には加速器の運用や調整の多岐にわたるアドバイスを頂きました。イオン源を利用した共同研究では住友重機械工業株式会社および住友重機械イオンテクノロジー株式会社にお世話になりました。ペッパーポットエミッタンスモニタの制作に当たって大阪大学 RCNP の依田哲彦氏、宮脇信正氏にアドバイスいただき、理研の長友傑氏の制作したペッパーポット原板を使用させていただきました。

参考文献

- [1] T. Ohno *et al.*, *Cancers*, 3, 4046 (2011).
- [2] <https://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/page.php?id=11>
- [3] 2018 GHMC annual report.
- [4] 2020 GHMC annual report.
- [5] 2021 GHMC annual report.
- [6] U. A. Weber *et al.*, *Medical Physics* 49;3:1974-1992. (2021).
- [7] M. Tashiro *et al.*, *Anticancer Research* 42;5. (2022).