

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)}

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)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{B)} Yamagata University

Abstract

Carbon beam therapy is carried out in the Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC). In 2020, 740 patients were treated and the total number of treated between 2010 and 2020 was 4561. In FY2020, there were no problems with accelerator that caused stopping treatment for more than one day. On the other hand, X-ray equipment and cameras in the treatment room have occurred frequently. In most cases, restarting the equipment will restore normal operation in a few minutes, but in some cases, some parts need to be replaced. We will report on the statistics of the accelerator operation time and treatment time, and the main malfunctions and their countermeasures.

1. はじめに

群馬大学重粒子線医学センター(GHMC)では、普及型炭素線治療装置による重粒子線治療を 2010 年から行ってきた[1]。イオン源、線形加速器、シンクロトロン等の加速器を用いて治療を行い、また重粒子線治療を普及していくためには、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 2020 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 のシンクロトロンで 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で治療を行っている。これとは別に実験用にスキヤニングの垂直ビームライン(D 室)がある。装置の詳細は Table 1 に記した。施設は 2007 年~2009 年に建設され、2010 年から治療が開始された。また、2016 年には保険診療が開始された。

年ごと、部位ごとの治療人数を Fig. 1 に示す[2]。2020 年(暦年)では年間 740 名と過去最多の治療人数となり、2010 年からの累計で 4561 名となった。また、保険診療が 567 件と全体の 3/4 以上である。保険診療、その他(先進医療など)ともに昨年より増加した。治療部位別では、泌尿器(前立腺)が 2/3 を占め、次いで脾臓、肝臓、骨軟部が多い。前立腺ではほとんど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る。

現在は毎年 1 月に集中点検を実施しているが、今後分散点検(部分ごとに金~月の 4 日間の点検を毎月 1 回程度行う)に移行することを検討している。治療を休止する期間が無くなることを期待される。

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 | 1.3×10^9 pps |
| 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

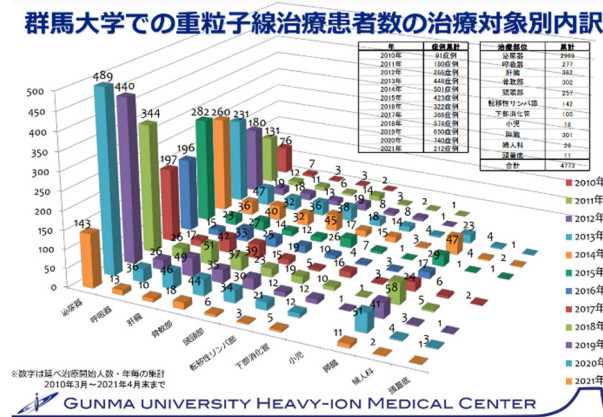


Figure 1: Yearly and total treatment number.

3. 稼働率

GHMC では月曜日がメンテナンス、火～金曜日が治療日で、加速器は7:00の始業時に立ち上げ8:40から治療開始し、終業時に立ち下げるコールドスタート運転を

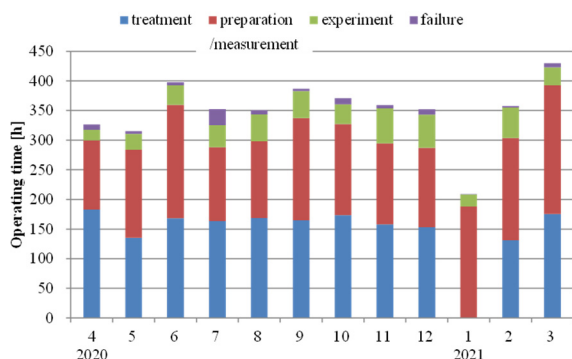


Figure 2: Operating time of accelerator system in GHMC.

行っている。治療終了後は火・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われている。月ごとの稼働時間を Fig. 2 に、治療(treatment)、準備・測定(preparation / measurement)、実験(experiment)、故障(failure)の項目に色分けして表示した。なお、冷却水を使用している時間は全て稼働時間に含めた。

稼働率の定義には色々あるが、以前の統計との比較を容易にするために 2018 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. 3 に示した。

生物・物理の実験が木曜日の治療終了後や点検(加

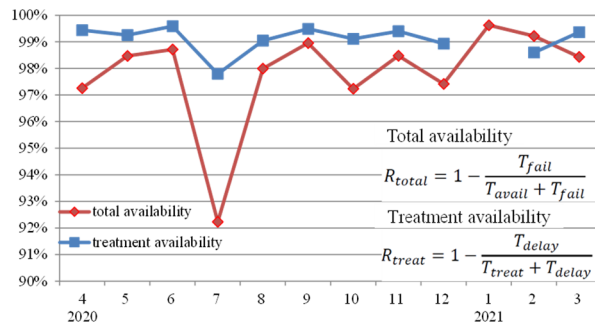


Figure 3: Total availability and treatment availability of the facility of GHMC.

速器・建屋)のない週末に行われている。2020 年度の課題件数は 27 件 (生物 20 件・物理 7 件)であった。実験回数は 68 回、時間は準備も含めて 457 時間であった。これは総運転時間 4238 時間に対して 1 割強に当たる。

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る A~C 室に加えてスポットスキャン照射が可能な D 室も利用できる。

4. 主な故障

2020 年度は 1 日以上治療が停止するような大きなトラブルは起こらなかった。しかしながら、7 月には朝の立ち上げ時に FPD の故障が判明し、急遽他の治療室に振り替えることで治療が行えた事例があった。翌日に FPD の交換が完了するまではこの治療室では治療照射が不可能であったため装置稼働率は大きく低下しているが、治療室の振り替えを行い治療自体は問題なく行えたため治療稼働率の低下は小さい。これは装置のトラブルを治療室の冗長性および事後の対処によってカバーできた例といえる。このようにスタッフの技術・経験の蓄積で高い治療稼働率を維持できているが、直ぐに対処できないような大きな故障の発生を防ぐためにも今後も適切な点検・メンテナンスを実施して事前予防を行っていく必要がある。

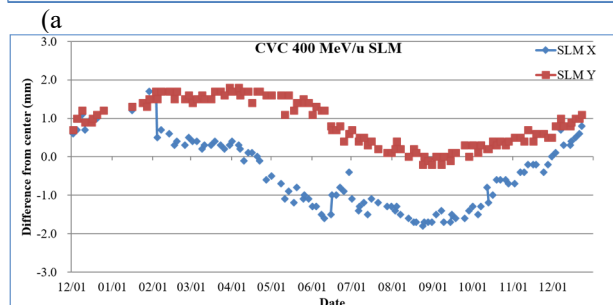
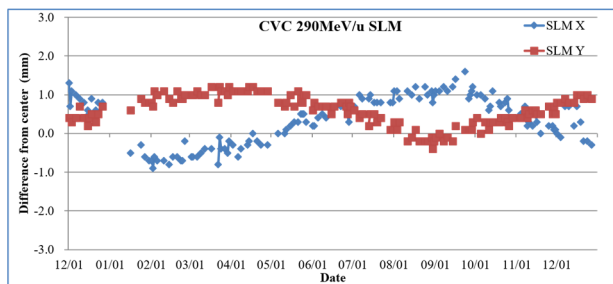
2020 年度のトラブルのうち重要と思われるものを以下に挙げる。自然災害による影響としては、2021 年 2 月 13 日の福島県沖の M7.3 の地震が前橋市昭和町では震度 3(前橋市は震度 4)であったが、地震は土曜日の夜間であり、装置にも影響はなかった。また、2020 年 7 月 30 日の治療中には緊急地震速報が発表されたが、照射を一時中断したものの問題なく治療は再開された。また、2020 年 8 月 4 日には遠雷による瞬停が発生し、45 分治療が遅延した。制御系・真空系は無停電電源装置によ

て電源が維持されているため 1 時間未満で復旧が可能である。

入射器 RFQ の HPA アンプのクローバ異常が 2020 年 9 月～12 月にかけて朝の立ち上げ直後に頻発していたが、治療に影響したのは 1 回であった。2021 年 1 月の定期点検時に真空管の交換によってこの問題は起こらなくなった。大出力の半導体アンプが実用化され、新しい重粒子線施設では採用され始めているので、可能であれば更新していくのが好ましいと考えられる。

治療施設ではないが、D 室のレンジシフトの制御が故障するトラブルが発生した。この制御系は D 室への HEBT, スキャニング磁石、レンジシフト等を制御しているが、10 年前に制作されたもので既に予備部品が手に入らず、メーカーから借用して仮復旧している。故障した IO モジュールは同じ製品を 10 台使用し、以前にも 1 台故障しており、大量に使用しているパーツに関しては予備部品を入手しておくのが良いと思われる。

X 線装置や治療室内のカメラが正しく表示されない異常が頻発している。ほとんどの場合は装置の再起動などで数分後には正常動作するようになるが、部品の交換が必要になることもある。重粒子線施設外では余り起こらない事象なので中性子によるソフトウェア・ハードエラーであると考えられる。



(b)

Figure 4: Beam position difference of center measured in strip line monitor in CVC course in C room in case of (a) 290 MeV/u and (b) 400 MeV/u. The movements are seasonal variations. The axis is adjusted to be closer to the center in February and June in case of (b) 400 MeV/u.

5. ビームの季節変動

気温などによりシンクロトロン・HEBT の長さが変化することなどの原因で、ビーム位置が季節変動する(Fig. 4)。仕様上は ± 3 mm 以内であれば問題ないが、 ± 2 mm に

収まることを目安にしている。これを超えそうな場合はステアリング磁石等で軸調整を行う。Fig. 4 の (b) の場合は、2 月と 6 月の X 方向の位置が大きく変化している点で行っている。(a) のように年間変動が ± 2 mm より充分小さければ軸調整の必要は無い。

ワブラーによるブロードビーム法を使用しているため照射されるビームにほとんど影響はないが、ビームモニタの位置依存性が存在する場合にはビーム量の補正係数が変動することになる。この場合も補正係数をかければ照射ビーム量には影響はほとんどない。

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。

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.