

群馬大学重粒子線医学センターの現状報告

PRESENT STATUS OF GUNMA UNIVERSITY HEAVY ION MEDICAL CENTER

想田 光^{#, A)}, 友 亮人^{A)}, 遊佐 顕^{A)}, 田代 睦^{A)}, 島田 博文^{A)}, 松村 彰彦^{A)}, 久保田 佳樹^{A)}, 金井 達明^{A, B)},
取越 正己^{A)}

Hikaru Souda^{#, A)}, Ryoto Tomo^{A)}, Ken Yusa^{A)}, Mutsumi Tashiro^{A)}, Hirofumi Shimada^{A)}, Akihiko Matsumura^{A)},
Yoshiki Kubota^{A)}, Tatsuaki Kanai^{A, B)}, Masami Torikoshi^{A)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{B)} Osaka Heavy Ion Therapy Center

Abstract

Operation of cancer treatment has been carried out at Gunma University Heavy Ion Medical Center since March 2010. Total 2850 patients were treated until the end of June 2018. Treatment availability of the treatment machine is 98.9 % for the last year. Severe troubles were water leakage of pump room, failure of the power source of vertical beam course, and frequent troubles of scroll pumps.

1. はじめに

群馬大学重粒子線医学センター[1]では、最大400MeV/uの炭素ビームを用いて2010年より癌患者への治療照射を行っている。炭素線治療装置[2]の構成及び主要パラメータはTable 1の通りである。

本施設では、上記装置を用いて2018年6月末までに累計2850名の治療を遂行した。治療人数の推移はFig. 1の通りで、2017年合計では366人であった。2018年4月から、重粒子線治療の保険適用対象が拡大され、前立腺癌と頭頸部癌の一部が新たに対象となったため、特に患者数の多い前立腺癌の治療件数が大幅に増加し、毎日の治療終了時間が遅くなっている。

また、当施設の重粒子線治療装置は三菱電機が製作・納入したものであるが、2018年6月に三菱電機が粒子線治療装置事業を日立製作所に譲渡・統合したため、当施設の運転・保守も日立製作所が担当することとなった。人員はほぼ引き継がれており、2018年8月までの段階では大きな混乱なく運用できている。

Table 1: Table 1: Specification of the Accelerator in Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC)

Ion Source (ECR, Permanent Magnet)	RF Frequency	10 GHz
	Gas Species	Methane(CH ₄)
	Ion Species	C ⁴⁺
	Ext. Voltage	30 kV (10 keV/u)
Injector (RFQ+ APF IH-DTL)	RF Frequency	200 MHz
	RF Power (Tetrode)	140 kW(RFQ) 360 kW(IHL)
	Beam Energy	600 keV/u (RFQ) 4 MeV/u (IHL)
Synchrotron	Ion Species	C ⁶⁺
	Energy	290,380,400 MeV/u
	Circumference	63.3 m
	Max. Field	1.5 T(Bp = 38 Tm)
	Extraction Method	Slow Extraction 3 rd order resonance +RF Sweep)
	Max. Extracted particle number	1.3x10 ⁹ pps
	Maximum range in water	25 cm(400MeV/u)
Irradiation System	Irradiation Method	Broad Beam Layer Stacking
	Respiratory Gating	Available for lung, liver ca. etc.
	Irradiation Field	15 × 15 cm
	Max. SOBP	14 cm
	# of Irradiation Room	3(A=Hor, B=Hor,Ver, C=Ver)

群馬大学での重粒子線治療患者数の治療対象別内訳

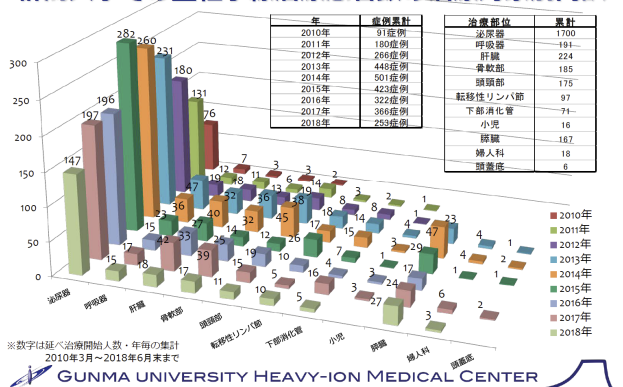


Figure 1: Trend of the total number of treated patients [1].

souda@gunma-u.ac.jp

2. 現在の運転状況

現在の施設運用については、毎朝の立ち上げと終業時シャットダウンを行うコールドスタート運転を行っている。毎週月曜日は週例点検として、日常点検では確認できない加速器の現場確認及びビームパラメータ(COD、治療室ビーム軸を含む)の測定を行っている。火曜日から金曜日までの4日が治療日で、朝7時から立ち上げを開始し、各治療室でのビーム位置測定に加え、基準エネルギー(380MeV/u)で照射量の校正基準となる標準測定を行っている。治療は8時40分から17~20時まで行われ、治療後は火曜・金曜を新患・QA(Quality Assurance)測定に充てており、水曜および木曜は照射系での物理実験もしくは細胞等への照射による生物実験を行っている。加速器自体に関するマシンスタディは主に月曜日の夕方以降に行っている。

2014年6月より、治療室Dのスキヤニング照射ポートを用いて、マウスを用いた生物実験を月1回程度定期的の実施しており、年数回は分割照射の生物学的影響を調べるため、金土日月の連続4日間を利用した生物連続照射実験を行っている。また、実験運用として170MeV/u、140MeV/uのRF-KO取り出しビームが安定的に実験供給可能となっており[3]、コリメータを利用して直径1mmのビームを生成するマイクロビームの試験などに利用している。

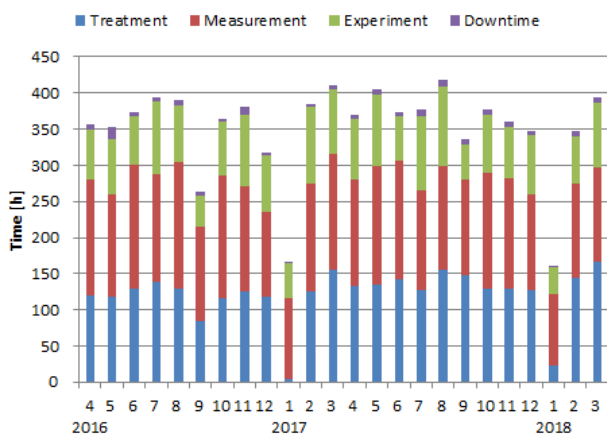


Figure 2: Monthly operation time of the accelerator. Machine maintenances were carried out on January 2017 and January 2018.

Figure 2に2015年4月以降の運転時間を示す。運転内容は、治療運転(治療照射およびその待機時間)、治療に必要な準備測定運転(立ち上げ確認、新患線量校正、QA測定(深部/軸外線量分布測定))、治療に直結しない実験運転に分類できる。2017年度は例年通り1月に定期点検を実施した。大幅な装置改造は行っていないが、2018年3月にはイオン源のアノード電極を位置調整用の穴を塞いだものに変更し、引き出し部へのガス流入を低減した。これにより、これまで用いていた180-200 μ Aより多い250 μ A程度の電流量で約半年間の運転が可能となった。

シンクロトロン出射電流量の推移をFig. 3に示す。ビー

ム電流量が大きく減少する原因はマスフローコントローラのアフセット変動によるイオン源の出力減または線形加速器直後の荷電変換薄膜の劣化によるシンクロトロン捕獲効率低下であり、これらの調整が安定してできるようになった2016年以降は 1×10^{10} pps以上を確保できている。2017年後半からは、イオン源や入射器の点検直後を除いて 1.2×10^{10} pps程度の高い水準で安定したビーム量が得られている。

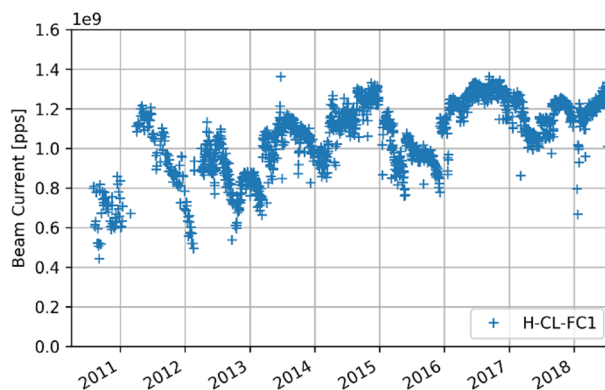


Figure 3: Monthly operation time of the accelerator.

3. 稼働率とトラブル事例

2017年度の治療稼働率($\frac{\text{治療時間}}{\text{治療時間} + \text{遅延時間}}$)は98.9%であった。各月の稼働率をFig. 4に示す。2017年度は、ワームによる加速器制御計算機障害や、空調機械室での水漏れによる火災報知器誤動作などによる数時間単位での治療停止が発生したため、このような大規模障害がなかった前年度より低い治療稼働率となった。実験や点検中も含めた全体での装置稼働率は98.3%で前年度と同程度であった。

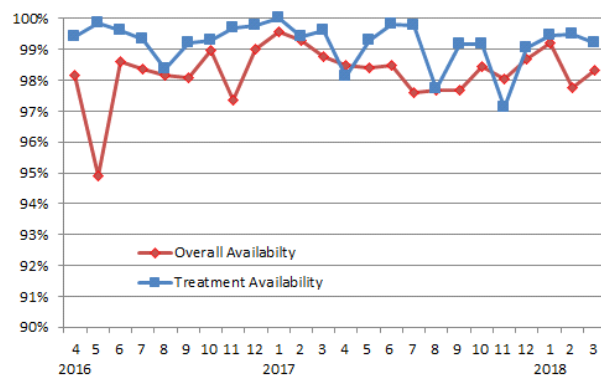


Figure 4: Monthly operation time of the accelerator.

加速器系の大きなトラブルとしては、Conficker.B ワームがUSBメモリ経由で加速器制御計算機に感染し操作不能となる障害があった。治療遅延時間こそ1時間程度と短かったもののワーム駆除後予備機との交換や再イン

ストール、その後の検査などに相当の時間を要した。根本的には OS が Windows XP など古いままになっていることが原因であり、制御改修の準備を進めている。

入射器系では、2017 年 9 月に LEBT のチョッパー電極が放電して定格 4.1kV の印加が不可能となる障害があり、SHV コネクタにタール状の汚れが付着していた。応急処置としてエタノールで清掃したところ復旧したが、フィードスルー側も汚れや焦げが見られたため、1 月の定期点検でケーブルおよびフィードスルーを交換した。また、2018 年 2 月以降、スクロールポンプが相次いで排気能力低下し、一時はターボ分子ポンプが排気不可能となり RFQ タンク内の真空度が 1Pa 台にまで悪化する重篤な状態になった。延べ 8 台のスクロールポンプで排気能力低下が起こっており、原因はまだ特定できていないがチップシールの封止力が低下しておりロット不良などの可能性を調査している。

建屋系では、排水口の詰まりによる水漏れで階下の電源室で火災報知器が誤動作し、当日午後の治療が中止となる大きなトラブルがあった。カメラ等による漏水の監視を行って再発を警戒するとともに、排水ドレインの高圧洗浄を行いスライム状の汚れを清掃した。また、空調・冷却水制御計算機の HDD 故障で遠隔制御が不可能となる障害もあり、建屋系の制御についても更新を検討している。

照射系では呼吸同期信号のコネクタでチャタリングが起こり、ゲート OFF と判定されてすぐ射出停止し実質的に照射できなくなる障害があった。本来、一定時間 ON 信号が来た時に初めてゲート ON となる設計であったが実装の段階でこのチャタリング防止ロジックが機能しておらず、コネクタの接触を改善してチャタリングを解消するとともに、FPGA 内のロジックを修正して再発を防止した。また、2018 年 5 月には治療室 A の水平コースでコリメータ等を搭載しているスノート(照射ポート)を駆動するためのボールねじが根本で破断した。加工時のミスで常に力が加わっていたことが原因であったが、同様の破断が垂直コースで起こるとスノート落下してくる可能性があるため、破断した場合でも回転を止めて落下を防止できる機構の追加を行った。

4. 微小ビーム照射試験

治療室 D のスキャニングポート[4]と小径コリメータを用いて全幅 1mm 程度のビームを生成し、脳腫瘍等の微小標的の照射を目指す微小ビーム照射の試験を行った。

開口直径 1mm、厚さ 20mm の真鍮製コリメータをポート最下部に設置して、RF-KO 取り出しによる 140MeV/u のビームを中心位置精度 0.1mm で照射し、電離箱線量計による線量評価、蛍光膜と冷却 CCD カメラによるサイズ評価を行った[5]。また、飛程終端まで細いビーム径を保っているかどうか視覚的に確認するため、ゲル線量計(日産化学工業 P-11 ポリマーゲル線量計)を用いて 3 次元の照射範囲の測定を行った。Figure 5, 6 に 1Gy(入射面)照射後のゲル線量計と MRI(Siemens Magnetom

Avanto 1.5T)で測定した緩和時間 T2 値のピーク深さでの 1 次元プロファイルを示す。この測定により FWHM で 1mm 程度の細い状態のまま飛程終端 35m まで到達していることを確認できた。現在は帝京大学との共同研究により、色素ゲル等を使用しより正確に線量を測定することを目指して実験を行っている。

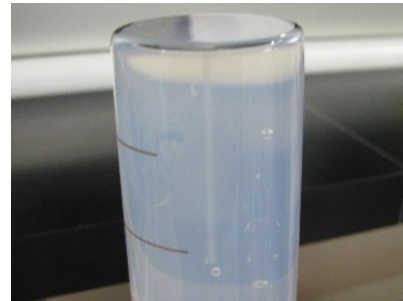


Figure 5: Photograph of a polymer gel dosimeter after irradiation.

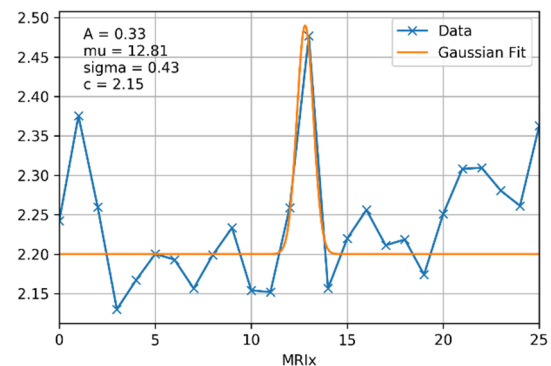


Figure 6: Profile of T2 value at the peak depth. Fitted beam size is 0.43 mm in 1σ (1.0mm in FWHM).

謝辞

本施設の運営および本発表に含まれる研究は放射線医学総合研究所、三菱電機株式会社、株式会社日立製作所、加速器エンジニアリング株式会社の協力により行われ、JSPS 科研費 26860395 の助成および博士課程リーディング教育プログラム「重粒子線医工学グローバルリーダー養成プログラム」の支援をいただきました。また、日々の運転およびデータ取得に貢献いただいている日立製作所の運転技術員の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] <http://heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp/>
- [2] T. Ohno *et al.*, *Cancers*, **3**, pp. 4046-4060 (2011).
- [3] H. Kikuchi *et al.*, *Proc. of PASJ13*, pp. 182-186 (2016).
- [4] H. Souda *et al.*, *Proc. of IPAC'16*, pp. 1914-1916 (2016).
- [5] M. Tashiro *et al.*, *57th PTCOG*, P102 (2018).