

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)}, 菊池 遥^{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)}, 取越 正己^{A)}

Hikaru Souda^{#,A)}, Haruka Kikuchi^{A)}, Ken Yusa^{A)}, Mutsumi Tashiro^{A)}, Hirofumi Shimada^{A)}, Akihiko Matsumura^{A)},
Yoshiki Kubota^{A)}, Tatsuki Kanai^{A)}, Masami Torikoshi^{A)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

Abstract

Operation of cancer treatment has been carried out at Gunma University Heavy Ion Medical Center since March 2010. Total 2369 patients were treated until the end of May 2017. No treatment delay longer than 2 hour due to the accelerator occurred. Nevertheless, several troubles which decrease beam current occurred: gas flow reduction of the ECR ion source, and a deterioration of the charge stripping foil. An energy-saving operation mode of the synchrotron has reduced 10% of the total power consumption.

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2016年5月末までに累計2369名の治療を遂行した。治療人数の推移はFig. 1の通りで、2016年は322人であった。2016年度からは、診療報酬改定により骨軟部腫瘍の保険診療が始まり、これに対応する適応判定のための合同カンファレンス等の環境整備を行った。また保険収載に向けて重点的に評価を行う症例として肝臓、前立腺の高リスク群等について先進医療Bとしての臨床試験が始まっている。

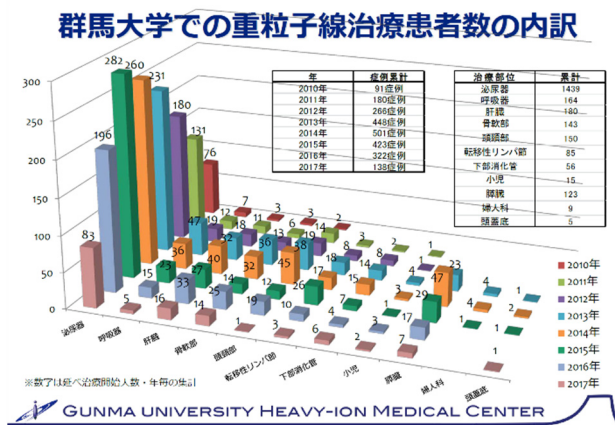


Figure 1: Trend of the total number of treated patients [1].

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

Ion Source (ECR, Permanent Magnet)	RF Frequency	10GHz
	Gas Species	Methane(CH ₄)
	Ion Species	C ⁴⁺
	Ext. Voltage	30kV (10keV/u)
Injector (RFQ+ APF IH-DTL)	RF Frequency	200MHz
	RF Power (Tetrode)	140kW(RFQ) 400kW(IHL)
	Beam Energy	600keV/u (RFQ) 4MeV/u (IHL)
Synchrotron	Ion Species	C ⁶⁺
	Energy	290,380,400MeV/u
	Circumference	63.3m
	Max. Field	1.5T(Bp=38Tm)
	Extraction Method	Slow Extraction 3 rd order resonance +RF Sweep)
	Max. Extracted particle number	1.3x10 ⁹ pps
	Maximum range in water	25cm(400MeV/u)
Irradiation System	Irradiation Method	Broad Beam Layer Stacking
	Respiratory Gating	Available for lung, liver ca. etc.
	Irradiation Field	15x15cm
	Max. SOBP	14cm
	# of Irradiation Room	3(A=Hor, B=Hor, Ver, C=Ver)

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16~20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年数回行っている。また、実験運用として170MeV/u、140MeV/uのRF-KO取り出しビームの調整を行い、実験供給が可能となった[3]。

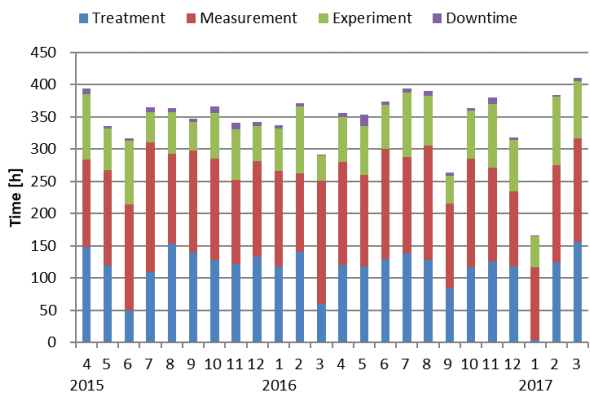


Figure 2: Monthly operation time of the accelerator.

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。2015年度は治療室BにCTを設置するため3月に定期メンテナンスを行った。この時、2014年に放電が頻発して磁場測定で六極磁場の低下が示唆されたイオン源永久磁石を、テストスタンドの予備機と交換した。また、入射器IH-DTLのチューナ交換のため入射器大気開放を行い、エージングおよび試験運転は順調に完了して予定通り運転を再開した。

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オ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 1×10^9 pps以上を確保できている。2017年3月以降荷電変換薄膜の劣化の兆候が見えて

おり、入射器電圧調整で対応しているが、薄膜の交換も検討している。

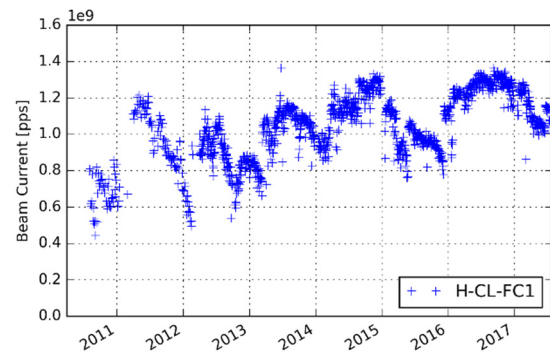


Figure 3: Trend of beam currents at synchrotron extraction.

3. 稼働率とトラブル事例

2016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99.4%であった。各月の稼働率をFig. 4に示す。2016年度は、X線撮像用Flat Panel Detector(FPD)の突発的故障が起これば、1時間以上の全系治療停止も発生しなかったことから、昨年までより治療に関するダウンタイムは小さくなった。しかしながら、真空計故障による臨時大気開放や水漏れによる電源故障などがたまたまメンテナンス日に起こったため治療に影響する前に復旧できたという側面もあり、これらも含めた全体での稼働率は98.2%で昨年と同じである。

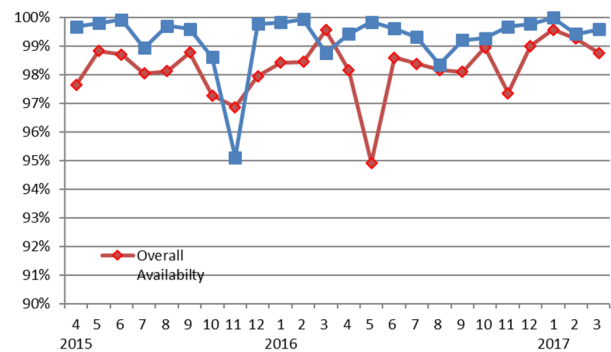


Figure 4: Availability for all-time and for treatment time.

加速器系の大きなトラブルとしては、10月頃から読み値が不安定になっていたイオン源チェンバー直上のペンギン真空計L-PEN1が、11/28朝の装置起動時に突然Over Rangeになり復帰しなくなったことが挙げられる。真空計本体の故障と早期に特定できたため、11:30から臨時大気開放を行い真空計を予備と交換して12:00に復元、真空引きの後に14時からエージング開始して16:20に故障前の90%までビーム量回復し、通常運用に復帰した。真空計故障の原因は内部への炭素粉末(薄膜)の付着による短絡であった。2015年にも同様の読み値の異常が見られていたものの定期点検での交換まで使われ続けたが、今回は急激に状態悪化し使用不可能に

なった。取り外した真空計は超音波洗浄で復活しイオン源テストスタンドで安定動作を確認できたため、今後は読み値の異常が見られた時点で予防的交換を行っていく予定である。

また、治療遅延には至らなかったが、HEBT の C 室垂直コースで、Optics 上 β 関数が大きい H-VL2-Q2 でビーム軸が+2.5mm 程度ずれたことにより、ビームスピルの末端 5%程がダクトに衝突してロスしていたことが 10/28 にわかった。これは、RF 加速によって遅い取り出しを行っており、Dispersion と取り出し中の COD の変化により HEBT での軸変動が起こるものである。ロス発生時のスパイル内のビーム重心位置の変動を Fig. 5 に示す。応急処置としてステアリング磁石で軸調整を行い、ビームロスは起こらないようにできた。今後、当該箇所の β 関数を小さくし、季節変動に対して Robust になるよう Optics の調整を行う予定である。

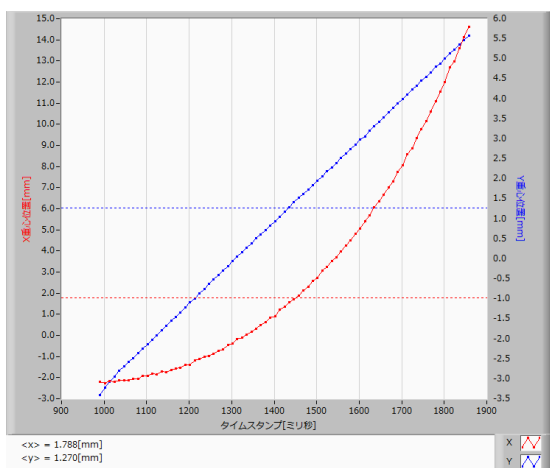


Figure 5: ロスしていた点の手前の H-VL2-SC1 でのビーム重心位置のスパイル内時間変動。

また、昨年には建屋系のトラブルも少なくなく、7 月には空調機械室の空調配管から夜間に水漏れがあり、階下の装置電源室にある電源盤が水濡れし、HEBT 共通ラインのステアリング電磁石 H-CL-ST1X が遠隔制御不能となった。電源内部への浸水は見られず、半日程度の乾燥措置の後正常に動作したが、深夜のシャットダウン直前に再発した。幸い励磁量がほぼゼロの電源であったため、再発に備えて動作確認しておいた現場制御として制御から除外する運転方法を用いて翌日の治療照射を完了した。治療後に調査を行い、端子台の導通が切れていて Ready 信号が制御に上がらなくなり操作不可能となっていたことがわかり、予備品と交換して復旧した。

8 月には、高崎地区での送電線への直撃雷によって病院全体が 15 分間停電した。本来は発電機によって緊急用電力は確保されるはずであったが、遮断器の閾値設定ミスにより過電流と検出され、発電機からの給電が遮断された。その結果計算機はシャットダウン信号が走って停止していた。真空系は建屋 UPS に接続しており、この UPS によって復電まで稼働しており装置への悪影響はなかった。

4. 治療室でのビーム軸変動の要因調査

ブロードビーム照射においても、治療室でのビーム軸の変動は線量分布の悪化をもたらすため、 $\pm 2\text{mm}$ を越えた場合には HEBT のステアリングで軸調整を行っている。しかし、特にエネルギーの低い 290MeV/u での運転時に、シンクロトン初期化から数分間でビーム軸が大きく変動する現象が見られるため、原因の調査を行った。短期間での変動の要素は冷却水温度の変動に伴う磁極ギャップ・磁極長の変化か、初期化以降パターン運転を繰り返すことによるヒステリシスの影響が考えられる。今回、放医研から借用したテスラメータ(Lakeshore 421)を用いてシンクロトン初期化後の磁場の変化を測定し、その変化による COD の大きさを求め、初期 COD による HEBT 軸変動を MAD8 で計算した所、Fig. 6 のように測定結果とよく一致する結果が得られ、ヒステリシスによる磁場の変化が治療室でのビーム軸の短時間変動の主要因であることがわかった[4]。

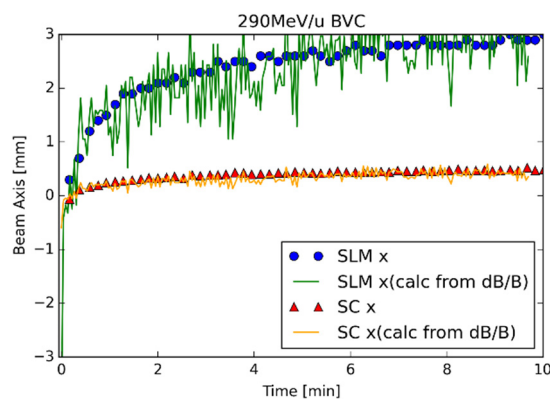


Figure 6: Measured and calculated beam axis with time after initialization of the synchrotron.

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、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、シンクロトン偏向電磁石の磁場測定においては放医研の村松正幸さんに機材を提供いただきました。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三菱電機株式会社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**, 4046 (2011).
- [3] H. Kikuchi *et al.* *Proc. of PASJ13*, 182-186 (2016).
- [4] H. Souda *et al.* *医学物理* **36** Sup.3, 184 (2016).