

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)}, 藤本 哲也^{B)}, 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)}, Tetsuya Fujimoto^{B)}, Ken Yusa^{A)}, Mutsumi Tashiro^{A)}, Hirofumi Shimada^{A)},
Akihiko Matsumura^{A)}, Yoshiaki Kubota^{A)}, Tatsuaki Kanai^{A)}, Masami Torikoshi^{A)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

Operation of cancer treatment has been carried out at Gunma University Heavy Ion Medical Center since March 2010. Total 2087 patients were treated until the end of June 2016. 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6月末までに累計2087名の治療を遂行した。治療人数の推移はFig. 1の通りで、2010年度87人、2011年度214人、2012年度315人、2013年度496人、2014年度496人である。2015年は、群馬大学医学部附属病院での手術に関する問題のために、2015年6月18-7月2日の間先進医療を一時停止して自主点検を行った[3]ため、これに伴って患者数が前年より減少して367人となった。2016年度は、診療報酬改定により骨軟部腫瘍の保険診療が始まり、患者数の増加が期待されている。

群馬大学での重粒子線治療患者数の推移



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

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

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	Enabled 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、マウスを用いた動物実験を月1回程度定期的に実施している。また、実験運用として290MeVおよび170MeVのRF-KO取り出しビームの調整も行っている[4]。

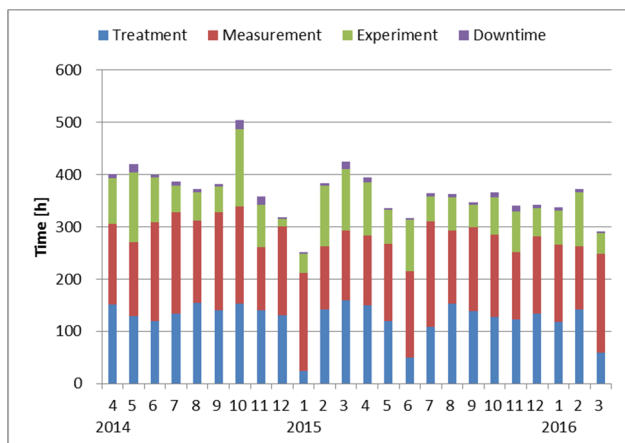


Figure 2: Monthly operation time of the accelerator.

Figure 2に2014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、エイ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。2015年5月頃、イオン源のガス流量が不安定でビーム電流の減少が見られたが、RF出力・周波数の調整により改善した。しかし夏以降シンクロトロン捕獲効率の低下が続き、調査した所荷電変換薄膜の劣化が判明し、12月に交換を行った。これにより出射強度は $0.9 \times 10^9 \text{pps} \rightarrow 1.3 \times 10^9 \text{pps}$ に回復し、以降は良好な

ビーム強度が得られている。

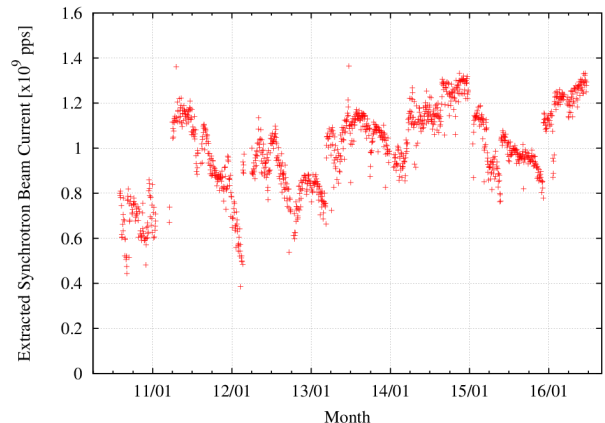


Figure 3: Trend of beam currents at ion source, synchrotron injection, and synchrotron extraction.

3. 稼働率とトラブル事例

2015年度の稼働率($\frac{\text{治療時間}}{\text{治療時間} + \text{遅延時間}}$)は99.1%であった。各月の稼働率をFig. 4に示す。2015年度は、X線位置決め用FPDの故障による1室治療停止があったものの、加速器トラブルによる2時間以上の全系治療停止が発生しなかったことから、昨年までよりダウンタイムを小さくすることができた。

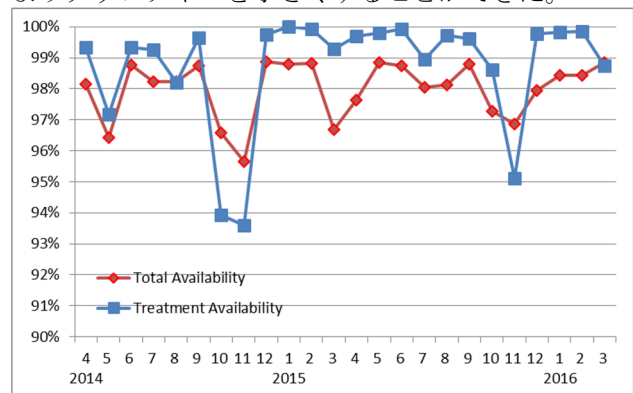


Figure 4: Availability for all-time and for treatment time.

加速器系の大きなトラブルは、10/31の休日実験中にRFQ-HPAのトリップが多発し一時定格印加不可能となったことがあるが、何度か再起動を繰り返すうちに3時間程度で回復し治療への影響はなかった。他には、8/23の実験中にLEBTソレノイド電源が半導体温度異常を発報して非常停止となり、調べると盤背面のファンが1基停止していた事があった。これは定期点検から漏れていた項目であった。2014年度に20分以上の遅延が3回発生した真空現場盤PLCのCPU異常については、制御改修によって正しい原因を検知できるようになったので、2回発生したがいずれも5分程度で復旧できている。

また、10/14以降、治療時間中に380MeV・400MeVのビーム軸が2mm程度変動するという異常が発生した。高エネルギーで発生し、直前に冷却水の流量低下が頻発していたことからストレナーの清掃など冷却状態の見直しを行ったが解決に至らず、10/19には治療前にスト

リップラインモニタでの確認ビーム軸が 3mm を超過し、治療中断、昼休みに臨時軸調整を行って対応した。その後は軸変動が発生しても基準超過しないよう軸調整するという対症療法を行いつつ原因を調査した。結局、1月の電源定期点検において出射バンプ S-BME3P の特定ビットが出力されない状態(ビット抜け)が判明し、当該ビットを使用する 380MeV,400MeV で電流が 3%下がって COD が変化し、ビーム軸に影響を与えていたものであった。ビット抜けは 3 月の点検中にも H-VL2-Q1P でも発見された。いずれも素子および基板の交換により復旧した。

2014 年に放電が頻発したイオン源の磁場測定を行った所、治療施設の磁石では六極磁場の局所的な低下が見られており、また予備機であるテストスタンドの磁石では磁極が脱落してプラズマチャンバーを締め付けていた。これについて、まず 2015 年 6 月にテストスタンド磁石を修理し、脱落の再発防止処置として磁極間にシムを挿入した。修理後ビームが正常に出ることを確認した後、2016 年 3 月にこの修理した磁石を治療施設側のものと交換した。治療施設側の磁石は下部の磁極が脱落して 1mm 程度中心に向けて飛び出していた。磁場測定の結果は減磁の兆候はなく、以前見られた磁場の低下はチャンバーの軸がずれていてその内側で磁場測定をしたため、偏心のため角度によって半径方向位置が変わっていたことが原因と推測される。今後、同様に修理してテストスタンドの磁石として運用を再開する予定である。

4. シンクロトン省エネルギー運転

治療用シンクロトロン運転として、治療時間中(当日の治療が全件終了していない)には治療を再優先で運転しているが、位置決め時間および空き時間は待機時間となるため、シンクロトロンを一定のパターンで運転しておく必要のない電力消費が発生する。そこで、消費電力を低く抑えかつ治療要求に即座に対応できるよう、2016 年 6 月に、加速器のフラットベース待機運転 [5]ができるよう制御改造を行った。

改造後は、治療室でのビーム利用が終了すると即座に入射エネルギーに相当する 4MeV 一定での運転パラメータファイルを起動し、フラットベース待機モードに入るようにした。当初は 1 分間の待ち時間を置いてからフラットベース待機に入っていたが、より省電力効果が高いことから待ち時間を最小に変更した。

これにより、Fig. 5, 6 に示すように、消費電力量は治療時間では 30%の削減となり、測定運用も含めた 24 時間の総消費電力としては 10%削減できるようになった。これは年間の電力料金として 1000 万円程度の削減につながるため、今回の調査を契機に運用に影響を与えず電力消費の削減を行う検討を進めている。

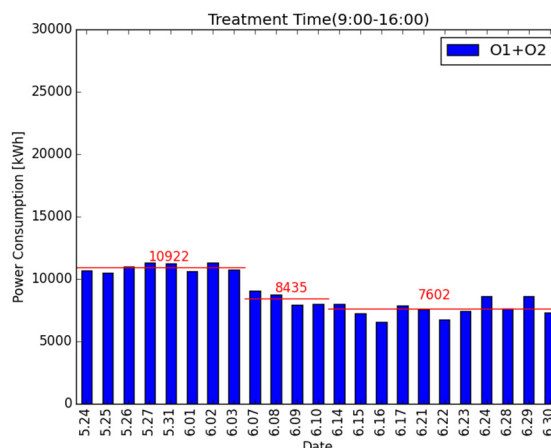


Figure 5: Daily power consumption in the treatment time with and without energy saving operation.

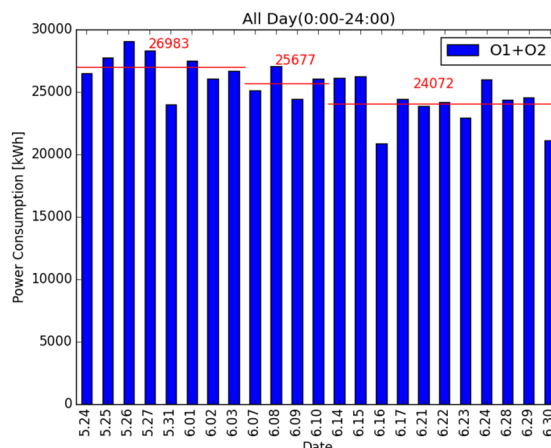


Figure 6: Daily power consumption (sum of 24 hours) with and without energy saving operation.

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。特に、イオン源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] 先進医療の実施状況に関する自主点検等結果報告書 http://hospital.med.gunma-u.ac.jp/wp-content/uploads/2015/07/jisyutenkenn_houkokusyo.pdf
- [4] H. Kikuchi *et al.*, WEOL03, in this proceedings.
- [5] M. Kanazawa *et al.*, *Proc. of PASJ11*, 874-877 (2014).