

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)}, 鳥飼幸太^{A)}, 藤本哲也^{A,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)}, 山田聡^{A,D)}, 取越正己^{A)}, 村松正幸^{C)}, 北川敦志^{C)}, 竹下英里^{D)}, 金澤光隆^{E)}
Hikaru Souda^{#,A)}, Kota Torikai^{A)}, Tetsuya Fujimoto^{A,B)}, Ken Yusa^{A)}, Mutsumi Tashiro^{A)}, Hirofumi Shimada^{A)},
Akihiko Matsumura^{A)}, Yoshiki Kubota^{A)}, Tatsuaki Kanai^{A)}, Satoru Yamada^{A,D)}, Masami Torikoshi^{A)},
Masayuki Muramatsu^{C)}, Atsushi Kitagawa^{C)}, Eri Takeshita^{D)}, Mitsutaka Kanazawa^{E)}
^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center, ^{B)} Accelerator Engineering Corporation,
^{C)} National Institute of Radiological Science, ^{D)} Kanagawa Cancer Center, ^{E)} Saga-HIMAT

Abstract

Operation of cancer treatment has been carried out at Gunma University Heavy Ion Medical Center since March 2010. Total 1677 patients were treated until the end of June 2015. An ECR ion source, injector linacs, and the synchrotron have been operated without troubles which continued longer than one day. Serious troubles of the accelerator were breakdown of diode module in a power source of LEBT solenoidal magnet and vacuum interlocks caused by temporal failures of the PLC.

For the research of the spot scanning irradiation, improvement of the spill ripples and intensity modulation is being carried out. Dose rate of mice irradiation was improved by an optimization of irradiation field.

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表1の通りである。

本施設では、上記装置を用いて2015年6月末までに累計1677名の治療を遂行した。治療人数の推移は図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。2014年12月より第2CTシミュレーション室も稼働し、患者数の増加に対応できる体制となっている。

2014年度以降では装置の不具合等によって1日単位で治療が停止するようなトラブルはなかったが、数時間の遅延や1室治療停止による他室への振替が数回発生した。

また、群馬大学医学部附属病院の先進医療全体について、附属病院での腹腔鏡手術の事故に起因して厚生労働省から治療を停止しての自主点検を求められたことにより、2015年6月18日-7月2日の間治療を停止し装置の点検を実施した^[3]。点検内容は通常の日常・週例点検に加え年次点検のうち重要なものを実施し、加速器系としては電磁石の目視・冷却水流量点検、電源の定格運転試験、インターロック試験、全スクリーンモニタビーム軸測定を行い、照射系の試験も含めて問題なく終了し、7月2日の先進医療会議にて重粒子線治療の再開が承認され、現在は平常通り治療運用を行っている。

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(Bρ=38Tm)
	Extraction Method	Slow Extraction 3 rd order resonance +RF Sweep)
	Max. Extracted particle number	1.3×10 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)

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

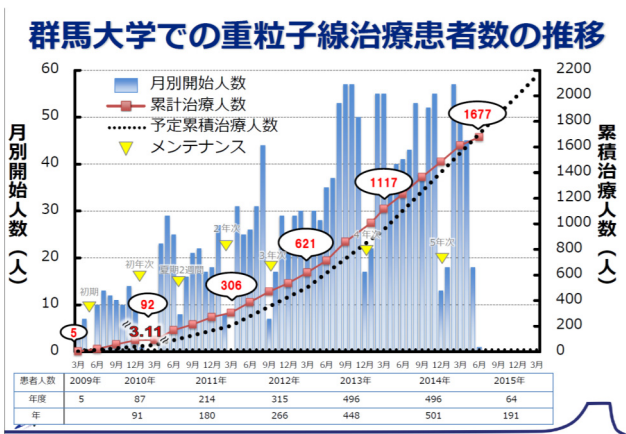


Figure 1: Trend of the total number of treated patients^[1].

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回程度定期的実施している。

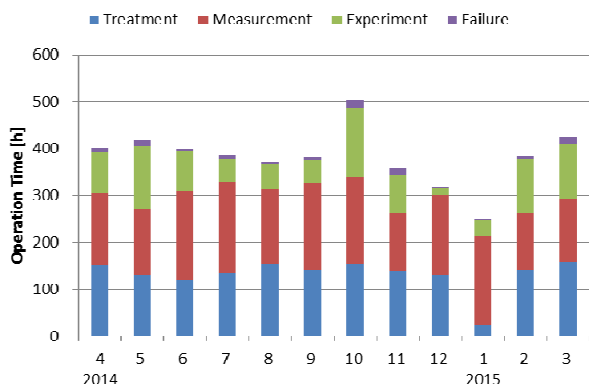


Figure 2: Monthly operation time of the accelerator. QA includes daily QA, patient dose calibration, and patient QA.

図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。1月は定期メン

テナンス期間であり、2015年1月は18日まで運転を停止し集中メンテナンスを行い、入射器 IH-DTL のチューナ駆動不良の調査およびシンクロトロン入射部のビューポート交換のためこれらの大気開放を実施した。エージングは順調に進み、予定通りビーム運用を再開できた。また、2014年10月には、ベルギー・ルーバンキリスト教大学との共同研究によるカロリメータ実験のため週末24時間運転を実施したため運転時間が多くなっている。

イオン源引出電流量、シンクロトロン入射・出射電流量の推移を図3に示す。2015年1月に入射器 IHL のチューナ調整・3月にイオン源開放点検を行った後、線形加速器の位相が変化したためビーム量の回復調整に時間を要した。シンクロトロン側については2014年夏以降無調整で運用できているが、今後加速・出射効率の改善のため調整を予定している。

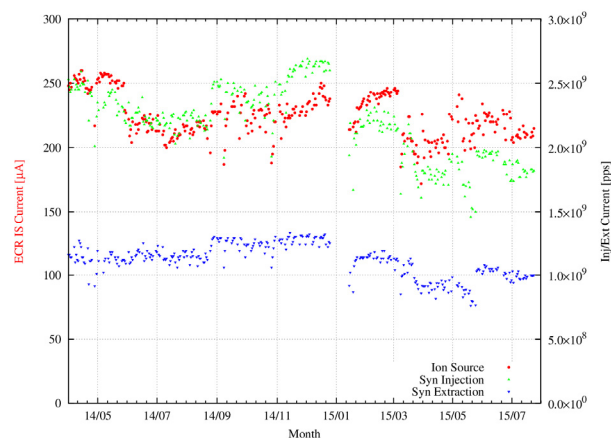


Figure 3: Trend of beam currents at ion source, synchrotron injection, and synchrotron extraction.

3. 稼働率とトラブル事例

2014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98.1%であった。2014年4月以降の故障の部門別内訳を図4に示す。

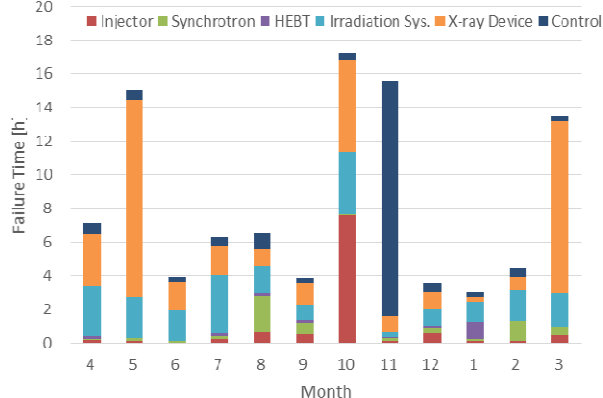


Figure 4: Failure time of each section.

8月14日にシンクロトロン内の真空現場盤 PLC の

CPU が異常停止し(放射線によるメモリ異常と推測)、GV が閉鎖されビーム周回不可となったが制御上で PLC CPU 異常を検出できず、原因特定と復旧に 2 時間を要するトラブルがあった。2015 年 5 月に制御の改修を行ったが、それまでに同種の事象が 2 回発生しそれぞれ復旧に 30 分を要した。

また、10 月には LEBT のソレノイド電磁石電源の出力回路ダイオードモジュールが OPEN 状態で故障し、電流が定格の半分程度しか出なくなったため、応急的に LEBT 集束系を調整し平常時の 1/4 のビーム強度まで回復したため、呼吸同期以外の治療を実施し、同日夜間にダイオードと IGBT の交換を実施して復旧した。

また、11 月に加速器-照射系取合い盤の光/電気信号変換ボードのうち 1 チャンネルが故障し、加速器側では照射可能でありビームが出るが照射系では照射可能ゲート OFF に見えて漏れ線量と判定されて照射不可となる不具合があり、当日は B 室使用不可、他室振替えとなった。

また、位置決め系の X 線管、FPD の故障が 1 回ずつ発生した。FPD については経年劣化による絶縁低下と判断されたが、X 線管についてはビーム照射中の放射線に起因する制御誤動作によって瞬間的に大電流が流れフィラメント損耗・断線に至ったと推定されたため、測定・実験運用中は X 線システムの電源を OFF にするよう運用を変更している。

治療遅延には至らなかったが、2014 年 4 月より ECR イオン源の引出電源の放電が 1 日 10 回以上発生し、原因箇所を調査した所真空外部の高圧デッキ等に問題はなく、引き出し電極部で放電が起こっていた。臨時に開放点検を行い、放電痕の研磨と電極の交換を行ったが、その後も 1 か月程度で放電が再発し、4, 6, 10, 12 月に臨時の開放点検を実施した^[4]。12 月の点検時にテストスタンドおよび治療施設のイオン源の磁場測定を実施し、治療施設側では 6 極磁場が真下方向だけ 20%程度低下していることがわかった。テストスタンドでは六極磁場は対称であったがミラー磁場が 14%低下しており、磁極がヨークから剥離して中心に向けて脱落していた。テストスタンドについては修理と脱落防止措置を実施し、運用を再開している。治療施設側については、2015 年 3 月の定期点検以降放電回数の増加は見られず、安定に運転を継続できているが、ベース電流の上昇傾向が続いており、今後テストスタンドの磁石と交換して修理を行うことを検討している。

4. スキャニング照射ポート

実験用スキャニング照射ポートを用いて行っているスキャニング実験^[5]については、2014 年 4 月から定期的にマウスを用いた学内ユーザーの動物実験にビームの供給を開始しており、実験の進展に伴い大線量の照射要求が出てきたことから、線量率の向上を目的とした照射方法の改善を行った。当初は、102x102mm にわたって全スポットに一樣照射し、100x28mm の実験用コリメータを通すことで平坦な

照射野を確保していたが、2014 年 8 月より 102x72mm の一樣照射にして線量率を 15%向上した。さらに、2015 年 4 月より、図 5 のように平面内でウェイトを最適化した 102x42mm の照射野を用いることにより、線量率を 50%向上し、SOBP60mm の中心で 1.5Gy/min の線量率が得られ、最大 75Gy の照射を問題なく実施することができた。

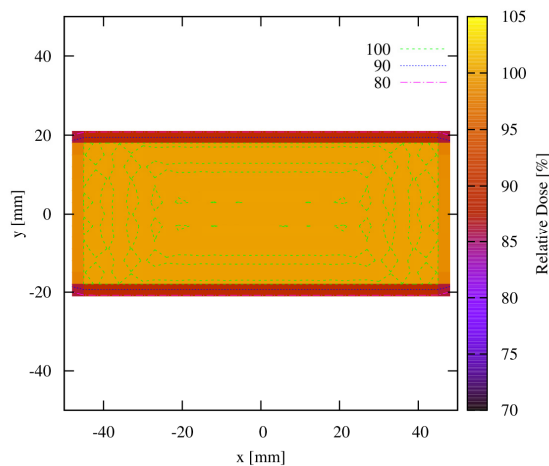


Figure 5: Relative dose map of 2D optimized uniform irradiation field.

スキャニング治療ポートの治療室化に向けては、インターロックにも用いる線量モニタ、位置モニタでの測定において遅い取り出しビームのリップルやスピル内での課題となっているため、現在スピル形状およびリップル改善の試験を進めている。

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」、群馬がん治療技術地域活性化総合特区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/jisyutennkenn_houkokusyo.pdf
- [4] 村松正幸 他, 粒子線治療施設用小型 ECR イオン源の問題点と解決方法について, W-PTFOM2 (2015).
- [5] H. Souda *et al.*, *Proc. of PASJ11*, 890 (2014).