

## 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<sup>#, A)</sup>, 金井達明<sup>A)</sup>, 山田聡<sup>A)</sup>, 遊佐顕<sup>A)</sup>, 田代睦<sup>A)</sup>, 島田博文<sup>A)</sup>, 久保田佳樹<sup>A)</sup>, 松村彰彦<sup>A)</sup>, 齋藤明登<sup>A)</sup>, 鳥飼幸太<sup>A)</sup>, 藤本哲也<sup>A)B)</sup>, 村松正幸<sup>C)</sup>, 北川敦志<sup>C)</sup>, 竹下英里<sup>D)</sup>, 金澤光隆<sup>E)</sup>

Hikaru Souda<sup>#, A)</sup>, Tatsuki Kanai<sup>A)</sup>, Satoru Yamada<sup>A)</sup>, Ken Yusa<sup>A)</sup>, Mutsumi Tashiro<sup>A)</sup>, Hirofumi Shimada<sup>A)</sup>, Yoshiki Kubota<sup>A)</sup>, Akihiko Matsumura<sup>A)</sup>, Akito Saito<sup>A)</sup>, Kota Torikai<sup>A)</sup>, Tetsuya Fujimoto<sup>A)B)</sup>, Masayuki Muramatsu<sup>C)</sup>, Atsushi Kitagawa<sup>C)</sup>, Eri Takeshita<sup>D)</sup>, Mitsutaka Kanazawa<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center

<sup>B)</sup> Accelerator Engineering Corporation

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Science

<sup>D)</sup> Ion Beam Therapy Center, SAGA-HIMAT Foundation

<sup>E)</sup> Kanagawa Cancer Center

#### Abstract

Operation of cancer treatment has been carried out at Gunma University Heavy Ion Medical Center since March 2010. Total 1233 patients were treated until the end of June 2014. The facility operation was improved to treat more than 50 patients per day. Operation parameters of the synchrotron was improved at the timing of the maintenance of bending magnets and the acceleration efficiency was improved. Serious troubles of the accelerator were deterioration of withstand voltage in the high-power amplifier (HPA) of RFQ and discharge in the power input circuit of HPA of IH-DTL.

For the research of the spot scanning irradiation, the stability of the beam size and the beam position was improved by the optics correction and pattern-excited steering magnets. Animal experiment of mice irradiation has been regularly carried out from April 2014.

#### 1. Introduction

群馬大学重粒子線医学センターでは、普及型炭素線治療装置を用いて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2014年6月末までに累計1233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人と順調に増加を続けている。適応症例の拡大に伴い治療人数が増加しており、2014年度は年間600名の治療を目標としている。

2013年度後半には一日あたりの治療件数が50件以上に達することも多くなり、運用の効率化が急務となった。比較的定型化した前立腺の治療を行っている治療室Aの治療時間枠を、1件30分から1件20分(5件毎に調整枠を設ける)とすることで治療室の利用効率の向上を行った。また、空き時間を減らして各治療室の治療終了時間を均等化するために、治療室の切り替えができるよう部屋互換のための測定を実施し、現在システムの改良の準備を行っているが、システム改造に先んじて、一部の照射について複数の治療室で線量校正測定を行い、スケジュールに応じて空いている部屋で治療を行えるようにしている。

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

イオン源 (永久磁石型 ECR)	RF 周波数	10GHz
	ガス種類	メタン(CH <sub>4</sub> )
	生成イオン種	C <sup>4+</sup>
	引き出し電圧	30kV (10keV/u)
入射器 (RFQ+ IH-DTL)	RF 周波数	200MHz
	RF 投入電力 (四極真空管)	140kW(RFQ) 400kW(IHL)
	加速 エネルギー	600keV/u (RFQ) 4MeV/u (IHL)
	加速イオン種	C <sup>6+</sup>
シンクロ トロン	エネルギー	290,380,400MeV/u
	周長	63.3m
	最大偏向磁場	1.5T(B <sub>p</sub> =38Tm)
	出射方式	遅い取り出し (3次共鳴+RF 加速)
	最大照射粒子数	1.3x10 <sup>9</sup> pps
	最大体内飛程	25cm(400MeV/u)
照射系	照射方式	ブロードビーム 及び積層原体照射
	呼吸同期照射	有り
	最大照射野	15x15cm
	最大 SOBP 幅	14cm
照射室	3 室 A(水平) B(水平/垂直) C(垂直)	

# souda@gunma-u.ac.jp

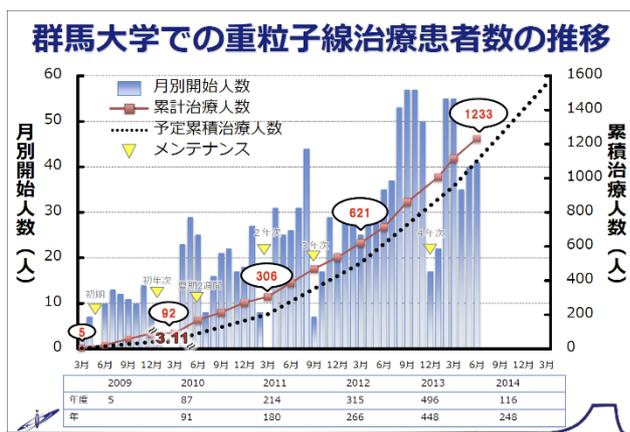


Figure 1: Trend of the total number of treated patients [1].

## 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、治療室ビーム位置を含む)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。

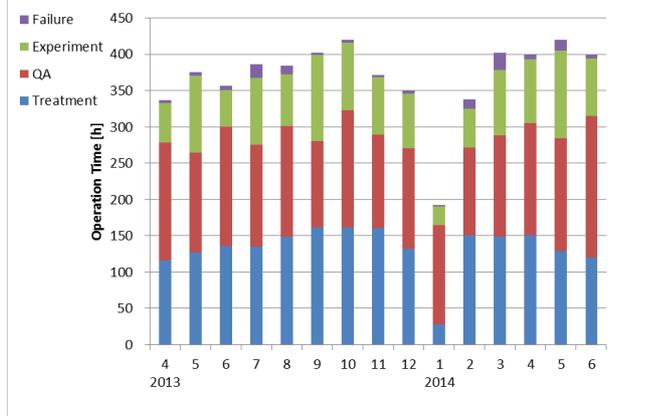


Figure 2: Monthly operation time of the accelerator. QA includes daily QA, Patient dose calibration, and patient QA.

図2に2013年4月からの運転時間を示す。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。1月は定期メンテナンス期間であり、2014年1月は15日まで運転を停止し集中メンテナンスを行うとともにスクリーンモニタシステムの入替を行った。他の月は治療件数に応じて治療時間が増減しており、生物実験やスキヤニング実験などのマシンタイムを一定以上確保するため、治療時間が長くなるとQA測定の件数を絞って調整することになる。積層原体照射のQA測定に1時間以上かかることがあるため、これを短縮する手法を検討中である。

## 3. 稼働率とトラブル事例

2013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98.5%であった。故障による治療遅延について、数的に多いのは制御トラブルや治療室の駆動機器、X線機器のトラブルであるが、影響としては10分以内で復旧できるものが多い。一方、加速器の故障が発生した場合には数時間以上の遅延につながることもあり、このような大規模遅延を防ぐことが運転上重要である。

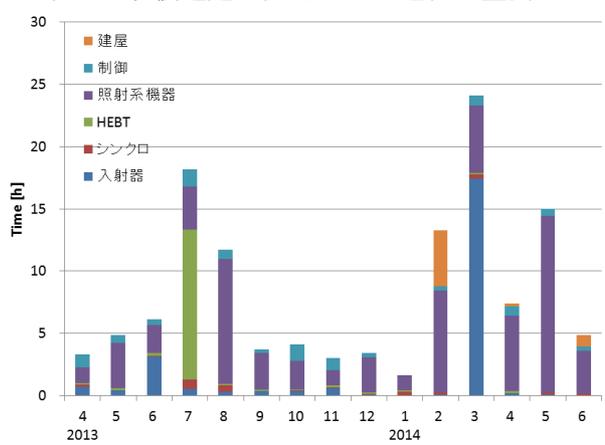


Figure 3: Failure time of each section.

2013年4月以降の故障の部門別内訳を図3に示す。7月30日にHEBT共通ラインのQM制御電源が接触不良により電圧低下を起こして励磁不可能となり、約6時間の治療遅延が発生した。また、治療日ではなかったが2月14日には前橋市で観測史上最高となる73cmの積雪を記録した大雪により、深夜から朝にかけて架線着雪による瞬停が頻発し、当日の実験運転を中止することとなった。また、3月30日にはIH-DTLの後段アンプ(HPA)の入力回路部で放電が発生しビーム加速が不可能となるトラブルがあったが、放電部が当日中に特定でき、点検日である翌月曜日に研磨とカプトンの補修を行って復旧に成功し、治療遅延を防ぐ事ができた。また、入射器アンプの真空管については、6月にのコントロール・スクリーングリッド間(G1-G2間)の耐圧低下によりトリップが頻発し週末に臨時に交換を行ったことに加え、3月の定期点検では納入前の検査では正常であった真空管(THALES RS2042SK)が、装着前の耐圧試験で

G1-G2 間耐圧不良(リーク電流 1.2mA 超)となる等、真空管に起因するトラブルが発生しており、今後試験項目の見直しなどの改善が必要と考えている。

#### 4. ビームパラメータ

2014 年 7 月現在、取り出しビーム量は  $1.1 \times 10^9$ pps 程度で運転を行っている。図 4 にイオン源、シンクロトロン入射、シンクロトロン出射でのビーム電流のトレンドを示す。

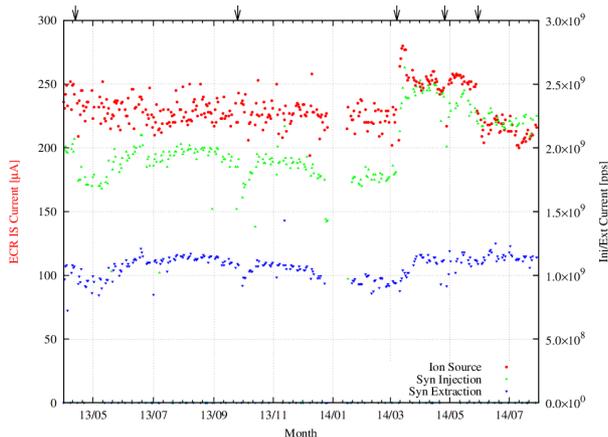


Figure 4: Trend graph of the beam current on Ion Source, synchrotron injection, and synchrotron extraction.

イオン源および入射器の状態はビーム量およびその安定性に大きく影響するため、テストスタンドも利用して大電流化・長寿命化の試験を行っている[2][3]。2014 年 3 月の定期点検(イオン源大気開放)後の調整でイオン源の引き出し電流を  $220 \mu\text{A}$  から  $250 \mu\text{A}$  に向上でき、さらに 3/21 に、シンクロトロン偏向磁石 B-11(B クロック基準電磁石)のイオン対策でスペーサを挿入したことに伴うシンクロトロン運転パラメータの調整を行い、出射ビーム量を 10%以上向上できた。

しかし、4 月 12 日以降イオン源引き出し電極での放電が頻発し、真空外の冷却水や配線には放電箇所が見つからなかったため、大気開放を行って調査したところ引き出し電極に放電痕があり、これを研磨して一旦放電は解消した。しかし 5 月 25 日から放電が再発したため再度開放点検を実施し、電極を新品予備と交換した。この際、アノード電極と引き出し電極の距離が設計より 1mm 短くなっていたのを設計値に戻し、以後は放電なく運転を継続できている。ビーム量の増加自体が放電に寄与している可能性が疑われたため、ビーム量を  $210 \mu\text{A}$  まで 15%ほど絞るようにガス流量およびバイアス電圧を下げたが、シンクロトロン入射ビーム量は 10%程度しか減っておらず、出射ビーム量については変化していない。これは、イオン源での電流増加による空間電荷効果とでのエミッタンス増大を MEBT やシンクロトロン

加速過程で十分に抑えきれていなかったことを示唆しており、今後イオン源の安定を維持しつつビーム量を増やし、シンクロトロンでの加速効率を高められるよう調整を行う予定である。

#### 5. スキャンング照射開発

実験用スキャンング照射ポートを用いて行っているスキャンング実験[4]については、2013 年度のビーム位置・サイズ安定化により均一照射の平坦度が上昇したこと、線量モニタの低線量領域での線形性が向上したことにより、総投与線量に依存せず一律の校正係数(Gy/Average Count)で線量の調整ができるようになった。また、線量制御と照射パターンファイルの検索性を向上させるよう実験用制御プログラムの改造を実施した。これらの改良により、定期的な実験運転が可能となり、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いる。また、回転式エネルギー吸収体を用いたビームエネルギー変動の抑制についても原理検証試験を行い[5]、照射の高度化に向けた研究を進めている。

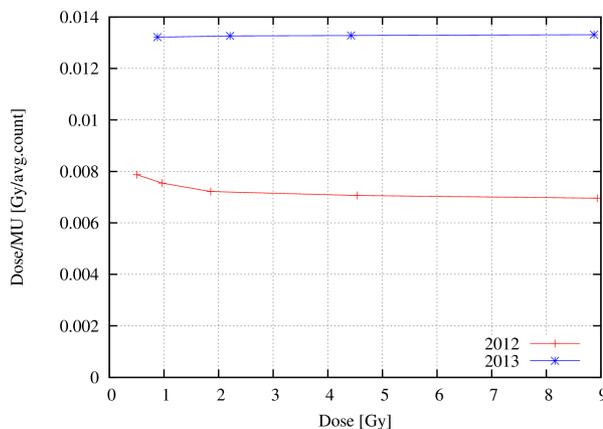


Figure 5: Calibration factor between dose and monitor count value. The deviation was improved from 8% to 0.7%.

#### 6. 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」による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] H. Souda *et al.*, Proc. of PASJ10, 363 (2013)
- [3] H. Souda *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 02A934 (2014)
- [4] H. Souda *et al.*, in this proceedings, SAP126
- [5] T. Fujimoto *et al.*, in this proceedings, SUOL07.