

大阪重粒子線センターにおける初期ビーム調整

BEAM COMMISSIONING AT OSAKA HEAVY ION THERAPY CENTER

野田 文章, えび名 風太郎, 中島 裕人, 宮原 建人, 野村 拓也, 遠竹 聡

Fumiaki Noda, Futarou Ebina, Yuto Nakashima, Kento Miyahara, Takuya Nomura, Satoshi Totake
Hitachi Ltd.

Abstract

Hitachi started first beam commissioning in October 2017 at Osaka Heavy Ion Therapy Center (HIMAK). HIMAK is composed by three treatment room with two ports in each room. All room can be treated with pencil beam scanning and two rooms can be treated with Real-time Image Gated Particle Beam Therapy Technique. In this paper, the progress of first beam commissioning is reported in order to realize the pencil beam scanning at October 2018.

1. はじめに

(株)日立製作所は陽子線治療システムの知見をベースに炭素線治療装置の研究開発を進めてきた[1,2]。その後、大阪重粒子線センター殿の炭素線治療システムを受注、建屋は 2017 年 10 月に竣工し、ほぼ同時期に加速器のビーム試験が開始された。

以下では大阪重粒子線センター殿納めの炭素線治療装置、加速器構成、シンクロトン設計並びにそれらのビーム調整について報告する。

2. 炭素線治療システム概要

大阪重粒子線センターのがん治療装置は重粒子線形加速器とシンクロトンからなる加速器系と水平/45 度ポート1室(治療室1)、水平/垂直ポート2室(治療室2,3)の計3室6ポートのビーム輸送・照射系で構成されるスキャン専用装置である。施設の全体像は Figure 1 に示すとおりである[3]。

さらに水平/45 度ポート1室、水平/垂直ポート1室では動物追跡照射[4]が可能である。

本装置の加速器系の特徴は、機器の機能併用とシンクロトンの2回対称化、出射ラインの四極電磁石を水平発散用のみにすることで周長を短くしている点である。また入射用ライナックをシンクロトン内周側に設置することで加速器全体の設置面積を小さくしている。

またシンクロトンの加速、取り出し、運転制御は陽子線で培った技術を最大限活用したものとなっている。加速では、ファインメット装荷型非同調加速空洞[5]を使用し、取り出しでは拡散共鳴出射法[6]、運転の自由度では、可変加速サイクル、可変フラットトップ[7]、加速サイクル内でのエネルギー変更(可変エネルギー運転)などがその例である。これらの技術によって非常に自由度の高い照射が可能となっている。

HIMAK では 2018 年 10 月から治療室3を使用した治療が開始される。

3. 加速器システム概要

3.1 構成

加速器は C^{4+} を生成する ECR イオン源と、それを

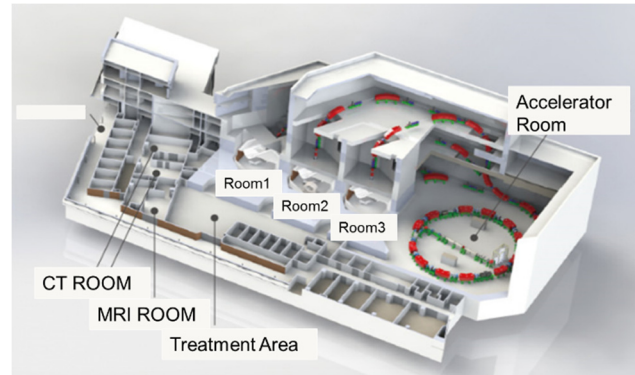


Figure 1: Schematic view of HIMAK.

4MeV/u まで加速する線形加速器である RFQ, DTL[8]、さらにがん病巣の深さに合わせて必要なエネルギーまで加速するシンクロトンで構成される。RFQ, DTL で加速された C^{4+} は荷電変換膜によって C^{6+} に変換されたのち、シンクロトンに多重回転入射法によって入射される。

Table 1 に加速器システムの主要構成、パラメータを示す。

Table 1: Main Parameters of Acceleration System

Ion Source	
Type	10 GHz ECR
Ion	C^{4+}
Energy	10 keV/u
Linac	
Type	RFQ, IH-DTL
Frequency	200 MHz
Energy	600 keV/u (RFQ) , 4.0 MeV/u (DTL)
Synchrotron	
Circumference	57m
Ion	C^{6+}
Energy range	140-430 MeV/u
Particles num.	3.9×10^9 ppp
Repetition	About 1/2 Hz (Typical value)
Injection Scheme	Multi-turns injection
Extraction Scheme	Slow extraction

3.2 2 回対称型重粒子線シンクロトロン

本シンクロトロンは長直線部を入射・加速・出射 (2 箇所) の計 4 箇所集約し、シンクロトロンの超周期を二回対称にした。また、出射用バンパ電磁石と水平軌道補正電磁石を共用、共鳴励起用六極とクロマチシティ補正六極を共用するなどして使用機器を削減している。その他、ビーム取り出し系に関しても ESD(Electro-Static Deflector)-SMe(Septum Magnet for extraction)間に QF を配置しない構成とすることでコンパクト化するなどしてシンクロトロンを小型化した。さらに入射用線形加速器をシンクロトロン内に設置することにより加速器システムの設置面積の大幅小型化を実現した。Figure 2 にシンクロトロンの機器配置、Figure 3 に完成した写真[3]を示す。

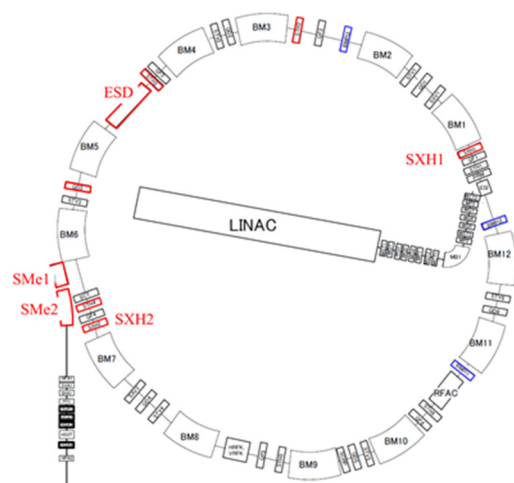


Figure 2: Configuration of Accelerator System.

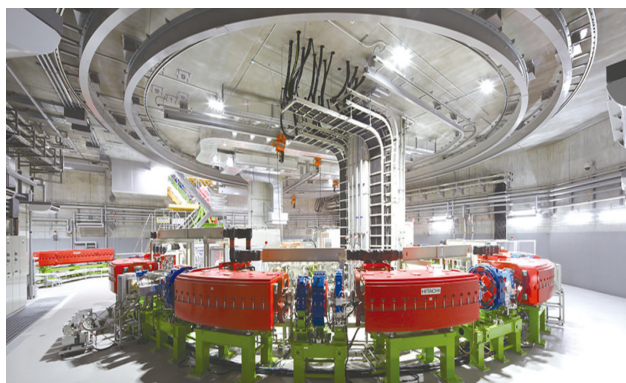


Figure 3: Photo of Synchrotron.

4. 加速器・輸送系ビーム調整

4.1 入射調整

ライナック調整後、多重回転入射の調整を行った。入射用水平方向バンパ電磁石を励磁してローカルバンパ軌道を形成し、静電インフレクタにより軌道調整を行い、バンパ軌道にあわせ、水平方向バンパを下げることで約 250π .mm.mrad の領域に多重回転入射を行う。線形加速器からのパルスビーム終端とバンパ軌道形成終了

タイミングを揃えるよう、バンパ軌道高さとタイミングを調整した。

Figure 4 に入射期間における典型的な各種実測信号を示す。黄色ラインが線形加速器ビーム電流で、最大 $200\mu\text{A}$ である。緑のラインはバンパ電磁石の励磁電流パターン、赤色がシンクロトロンに蓄積された電荷量を示している。最大蓄積時で 4mA 、実行入射ターン数で表すと約 20 ターンという結果を得た。

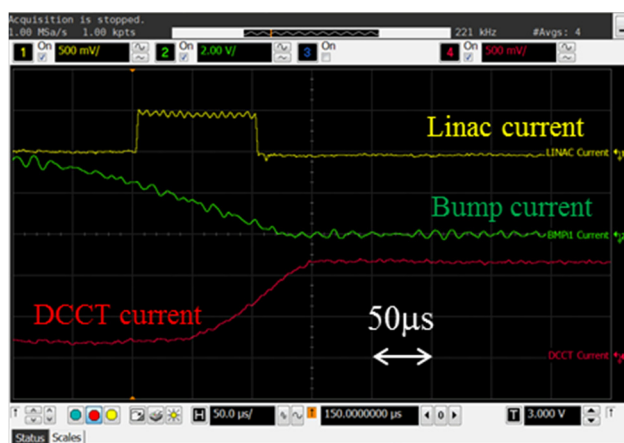


Figure 4: Signals of injection period.

4.2 加速調整

シンクロトロンにビームを蓄積したのち、偏向電磁石、四極電磁石、加速 RF 等の同期運転を開始する。ビーム蓄積直後の段階では、ビームはコースティング状態となっているため、断熱捕獲により RF バケット内にビームを取り込む。

Figure 5 にシンクロトロン偏向電磁石の励磁電流 (黄色)、高周波加速空洞のギャップ電圧 (基本波: 緑、2 倍高調波: 青)、シンクロトロンの周回電流 (赤色) を示す。RF には基本波の他に 2 倍高調波をおよそ 1:0.5 の割合で加速初期段階に印加している。これは空間電荷力緩和と捕獲効率向上を狙ったものである。ハーモニックスは 2 である。

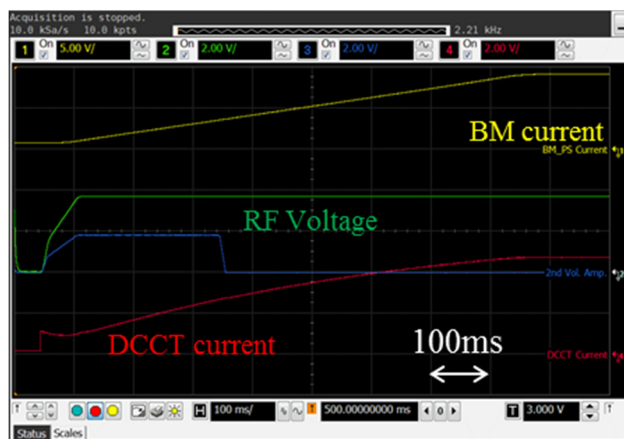


Figure 5: Signals of acceleration period.

4.3 出射調整

出射時にはチューンを3次共鳴線に近づけるとともに、六極電磁石を励磁してセパトリックスを形成する。その後ビーム拡散用電場を励振しビームサイズを広げることによって一定の軌道に安定したビームを取り出す。

その後、高速四極とビーム出射用 RF の ON/OFF により、高速のビーム ON/OFF 制御を実現する。これらの結果を Figure 6 に示す。シンクロトン偏向電磁石の励磁電流(黄色)、ビーム ON/OFF 信号(青色)、シンクロトンの周回電流(赤色)、出射ビーム電流(緑色)をあらわしている。拡散共鳴出射と高速四極を組み合わせた場合のビーム遮断時間は $100\mu\text{s}$ 以下であることを確認した。また出射電流制御も可能であることを確認できた。Figure 6.からわかるように出射電流値によらずビームリップルはほぼ一定であることが分かった。

Figure 7 には最大電流時の 1 スピル内の電流変動を示した。シンクロトン偏向電磁石の励磁電流(黄色)、ビーム ON/OFF 信号(青色)、シンクロトンの周回電流(赤色)、出射ビーム電流(緑色)をあらわしている。1kSample/s(1ms データ)で平均ビーム電流に対して、 $\pm 5\%(1\sigma)$ 程度の変動に抑えられていることがわかる。

Figure 8, 9 には治療室 3 のアイソセンタ(IC)における各エネルギーでのビームサイズをプロットしたものである。実線は計算値、実測水平サイズ、垂直サイズをそれぞれ

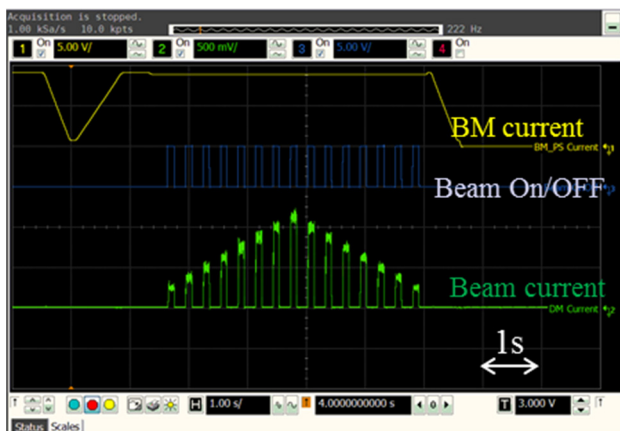


Figure 6: Signals of extraction period.

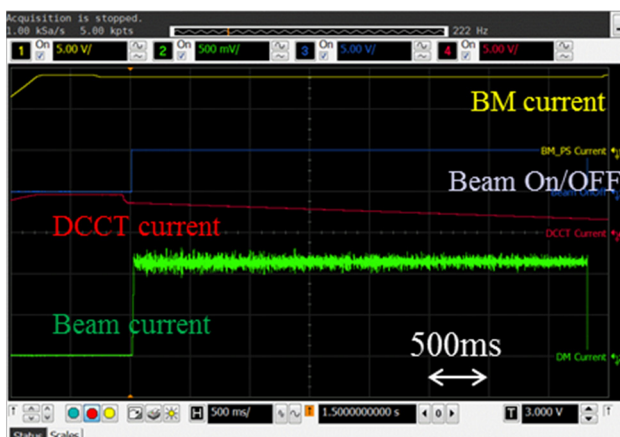


Figure 7: Signals of extracted Beam.

点で表している。青色は水平方向、赤色は垂直方向を示しており、Figure 8 が治療室 3 の水平ポート、Figure 9 が垂直ポートを示している。いずれも最大エネルギー 430MeV/u で約 2mm 、最少エネルギー 140MeV で約 4mm と計算値とほぼ一致する結果が得られた。またビーム位置精度はアイソセンタで $\pm 0.6\text{mm}$ を達成している。

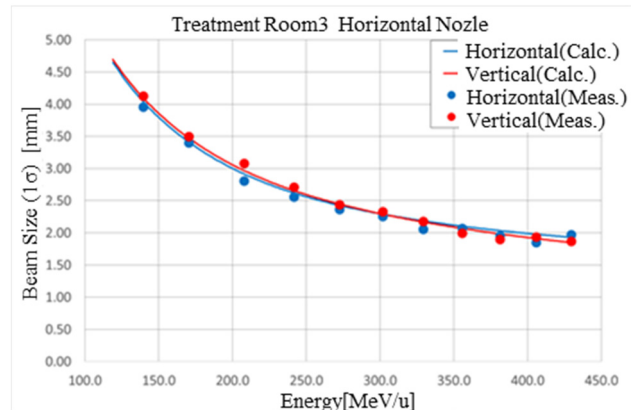


Figure 8: IC beam size at various energies (Horizontal).

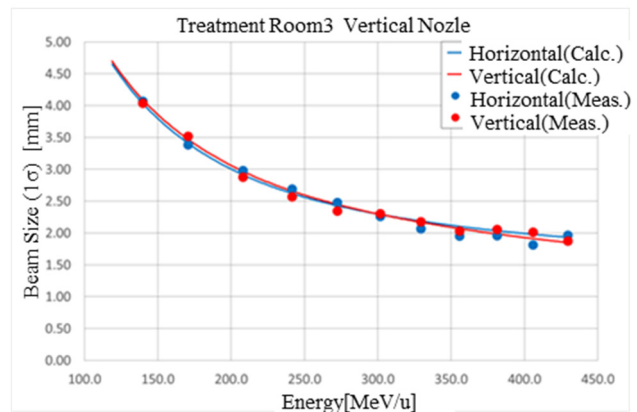


Figure 9: IC beam size at various energies (Vertical).

5. まとめ

大阪重粒子線センター殿向け、がん治療用シンクロトンの設計及び初期ビーム調整を実施した。本装置の特徴はシンクロトロンを二回対称とし、入射器をシンクロトロンの内側に設置することで小型化した点である。

ビーム蓄積、加速ともに想定外のビームロス発生なく無事に 430MeV/u までの加速に成功した。またビームの出射では拡散共鳴出射と高速四極によるビーム ON/OFF (ビーム遮断時間は $100\mu\text{s}$ 以下)、電流制御を実現した。出射時の蓄積粒子数は $5.2 \times 10^9 \text{ppp}$ を達成した。

出射ビームはアイソセンタでサイズ 2mm (1σ 、 430MeV/u)、位置精度 $\pm 0.6\text{mm}$ を達成した。

現在、治療室3はクリニカルコミッションングに移行し、並行して2部屋目以降のビーム調整を実施中である。

謝辞

大阪重粒子センターの皆様、並びに放射線医学総合研究所の皆様に多大なご協力、ご助言をいただいたことをこの場をお借りし感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Noda *et al.*, “CONCEPTUAL DESIGN OF CARBON/PROTON SYNCHROTRON FOR PARTICLE BEAM THERAPY”, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, pp.1300-1302.
- [2] F. Noda *et al.*, “CONCEPTUAL DESIGN OF COMPACT SYNCHROTRON FOR CARBON ION THERAPY ”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, August 1-3, 2011, pp.165-167.
- [3] 大阪重粒子線センター治療設備紹介;
<https://www.osaka-himak.or.jp/about/equipment/>
- [4] M. Umezawa *et al.*, “Development of the compact proton beam therapy system dedicated to spot scanning with real-time tumor-tracking technology”, AIP Conference Proceedings 1525, 360, 2013.
- [5] K. Saito, J. Hirota and F. Noda, “FINEMET-core loaded untuned RF cavity”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 402, Issue 1, 1 January 1998, Pages 1-13.
- [6] K. Hiramoto *et al.*, 'Resonant beam extraction scheme with constant separatrix,” PAC93, 1993, pp.309-311.
- [7] F. Noda *et al.*, “HITACHI Particle Therapy Solution ”, PTCOG48.
- [8] Small Type Ion Linac, Sumitomo Heavy Industries. Ltd.;
<http://www.shi.co.jp/quantum/eng/product/accelerator/smalllinac.html>