

HIMAC 可変エネルギー運転のための HEBT チョッパーシステムの設計

DESIGN OF THE HEBT CHOPPER SYSTEM FOR MULTIPLE-ENERGY OPERATION AT HIMAC

水島康太[#], 岩田佳之, 古川卓司, 白井敏之, 鈴木伸司, 片桐健, 原洋介, 佐藤眞二, 野田耕司
Kota Mizushima [#], Yoshiyuki Iwata, Takuji Furukawa, Toshiyuki Shirai, Shinji Suzuki, Ken Katagiri, Yousuke Hara,
Shinji Sato, Koji Noda
National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

Abstract

To realize fast scanning irradiation without the use of the energy absorbers, NIRS has developed multiple-energy operation with more than 200 energy steps. This operation can change the output energy of the synchrotron quickly; however, a part of the circulating particles spills uncontrollably during the procedure of the energy variation. The cause of that is emittance growth due to beam deceleration, and we must prevent the spilled particles from delivering to the patient. For the purpose, we have developed the beam chopping system of the High Energy Beam Transport (HEBT) section. The chopping system will interrupt the beam within 1 ms, and it will allow the quick change of the output energy within 50 ms. This paper describes the system design of the HEBT chopper and its control scheme in multiple-energy operation.

1. はじめに

放射線医学総合研究所（放医研）では、重粒子線がん治療用加速器 HIMAC から得られる炭素イオンビームを用いて、1994 年から 8000 件以上の炭素線がん治療を行ってきた[1]。2011 年からは、より高度な照射線量制御を目指し、スキヤニング照射法[2]を用いた治療も行っている。

スキヤニング照射法では、水平・垂直方向走査電磁石と照射ビームのエネルギー変更によって三次元線量分布を形成する。エネルギーの変更方法としては、エネルギー吸収体を挿入する方法と、シンクロトロンで出射エネルギーを直接変える方法がある。前者は簡易な制御で素早くエネルギーを変更することが可能であるが、散乱によるビーム径の拡大や二次粒子の増加を引き起こす。腫瘍周辺の正常組織への損傷を抑えるためには後者の方法が望ましく、放医研ではシンクロトロンの可変エネルギー運転方式[3]による高速なビームエネルギー変更を目指している。

我々は現在、200 段階以上のビームエネルギーを素早く切り替えることでエネルギー吸収体を使用しない高速スキヤニング照射法を開発している[4]。可変エネルギー運転の実用化のためには、エネルギー変更によるエミッタンス増加で生じるシンクロトロンからの漏れビームを防ぐことが必要となる。さらに、シンクロトロンにおける高速なエネルギー変更にも対応するため、高エネルギービーム輸送システムに遮断機構として新たにチョッパーシステムを導入することを検討している。本発表では、HEBT チョッパーシステムの設計と可変エネルギー運転における制御方法について報告する。

2. HEBT チョッパーシステム

スキヤニング照射用ビームポートは5本あり、それらは全て HIMAC シンクロトロンから出射されたビームが通過する1本のビーム輸送ラインから分岐している。1組のチョッパーシステムで全てのスキヤニング照射ポートに供給されるビームの遮断制御を行うために、チョッパー電磁石は出射ビーム輸送ラインから分岐する前の基幹部に設置する。

チョッパーシステムの機器構成を Fig. 1 に示す。バンブ軌道は4台の電磁石で生成され、ビームの通過・遮断の切り替えは、1台目のチョッパー電磁石（CHP）のみで行われる。安全上の観点から、CHP 電源をオフとした非励磁状態でビーム遮断制御となる構成にしている。CHP の下流にある偏向電磁石（BM）の偏向角はおよそ 12 度であるが、CHP でキックを受けたビームが BM 出口で基準軌道に対して平行に近くなるように、本来の基準値から僅かにずらした励磁電流値に設定する。そのため、CHP でキックを受けなかったビームは、基準に対して外向きの軌道をとることになる。CHP によって作られたバンブ軌道は、最終的にステアリング電磁石（STH1/2）を用いて閉じられる。ビーム遮断時の場合、ビームは STH1 によって基準軌道からより離れる方にキックされ、ビームダンプで止められる。ビームダンプの前には電離箱を設置し、遮断されたビーム量を測定できるようにする。

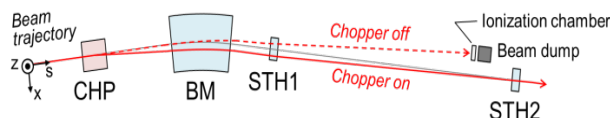


Figure 1: Schematic drawing of the HEBT chopper.

[#] mizushima@nirs.go.jp

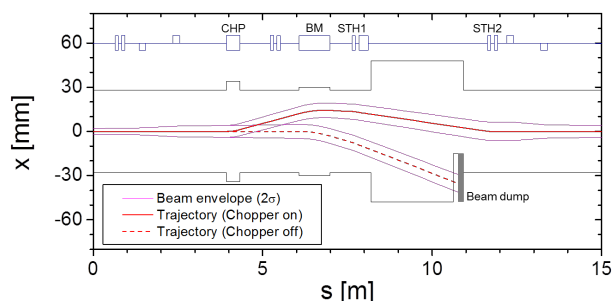


Figure 2: Beam trajectories and envelopes in the HEBT chopper section. The solid and the dotted lines represent the trajectories of the passing and the interrupted beams, respectively.

チョッパーシステムによるビーム通過・遮断制御時のビーム軌道とエンベロープの例を Fig. 2 に示す。CHP から STH2 までのバンプ軌道生成部は 7.6 m で、その区間に四極電磁石は配置されていない。遮断時のビームは、CHP から 6.5 m 進んだ位置で真空ダクトから大気中に取り出され、電離箱を通過したのちにビームダンプに当たる。Fig. 2 の軌道計算条件は 208 MeV/u の C^{6+} ビームのものであるが、治療に用いる出射ビームエネルギーは 56-430 MeV/u まで様々であるため、どのエネルギーでもビームサイズ ($\sim 3\sigma$) を考慮してロスなく通過、ないしは、残らず遮断できるようにする必要がある。チョッパー電磁石の設計諸元は、Table 1 に示した値となった。ビーム通過制御時のチョッパー電磁石での偏向角は、エネルギーなどに依らず 6.2 mrad の固定値とする。ビーム通過・遮断の切り替えに際して速い磁場変化が求められるため、電磁石の構造は 0.35 mm 厚の珪素鋼板を用いた積層型とした。また同様に、渦電流の影響を低減するため、電磁石部には FRP 製のビームダクトを採用した。チョッパー電磁石の写真を Fig. 3 に載せる。

Table 1: Chopping Magnet Specifications

Effective magnetic length	400 mm
Gap height	40 mm
Cross section	H-type
Maximum magnetic field	0.103 T
Number of coil turns	24
Resistance	5.9 mΩ
Inductance	0.93 mH

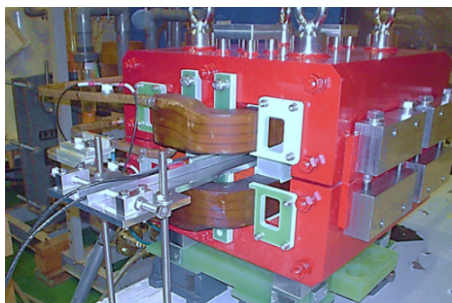


Figure 3: Photograph of the chopping magnet.

3. 可変エネルギー運転における制御

可変エネルギー運転におけるシンクロトロン主偏向電磁石の励磁パターンを Fig. 4 に示す。可変エネルギー運転方式では、任意のタイミングで電磁石電源の出力電流値をホールドすることにより励磁パターンの短いフラットトップを延長することができ、ビームの出射時間をエネルギーごとに自由に変えられる。また、出力電流値のホールドとパターン運転の再開を交互に行うことにより、非常に短時間で複数のエネルギーのビームを供給することができ、様々な照射条件に対して高速に対応することが可能となる。

炭素線スキヤニング照射のために求められるビームの条件は、水中で最大 30 cm 程度の飛程があり、深さ方向に 2 mm または 3 mm のステップでエネルギーを変更できることであった。そのため、Fig. 4 に示したシンクロトロンの運転パターンは、Table 2 のようなパラメータとなった。出射エネルギーは計 201 段階あり、各段でのエネルギーの変更幅は水中飛程で 2 mm、ないし、1 mm となっている。実際の治療では、それらのエネルギー変更を組み合わせることで、2 mm/3 mm ステップのどちらの照射にも対応できる。シンクロトロンでの水中飛程 2 mm 分のエネルギー変更にかかる時間を表した図を Fig. 5 に示す。

実際のエネルギー変更時には、ビーム減速によるエミッタンス増加で生じるシンクロトロンからの漏れビームを防ぐため、HEBT チョッパーシステムを動作させる必要がある。そのため、Fig. 5 の時間にチョッパーシステムがビーム通過・遮断を切り替える時間を足したものが実用上のエネルギー変更時間となる。

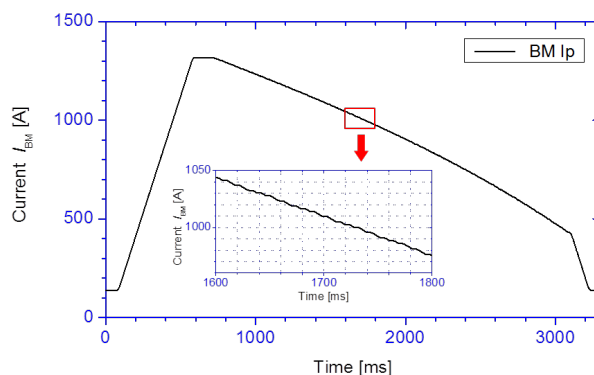


Figure 4: Exciting pattern of the synchrotron bending magnets in multiple-energy operation with 201 flattops.

Table 2: Parameters of Multiple-energy Operation

Injection energy	6 MeV/u
Output energy	56-430 MeV/u
Number of energy steps	201
Range interval	1-2 mmWEL
Transition time	< 50 ms / step
Reference operation cycle	3.3 s

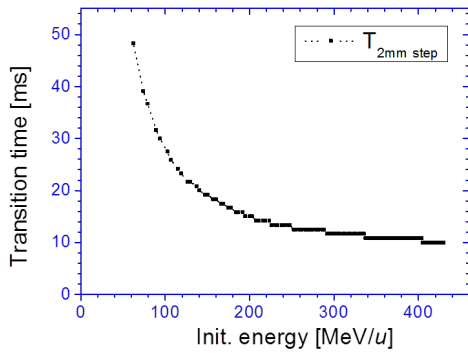


Figure 5: Correlation between initial beam energy and time to change a beam range of 2mmWEL.

HEBT チョッパーシステムは、シンクロトロン
の運転状態や照射シーケンスに同期して制御されなければ
ならない。シンクロトロン・照射制御システムと HEBT
チョッパーシステムの関係を表すブロック図を Fig. 6
に示す。チョッパー電磁石電源は、シンクロトロン
制御システムの中にある可変エネルギーコントローラ
によって制御される。可変エネルギーコントローラは、
照射制御システムからビームエネルギー、ビーム強度、
ビーム照射などの要求指令を受け、それらに合わせて
タイミングシステムや電源制御システム、出射制御シ
ステムなどを管理する。シンクロトロンの運転状態と
照射制御ステータスのどちらの情報も可変エネルギー
コントローラは監視しているため、照射シーケンスに
同期した HEBT チョッパーシステムの制御も問題なく
行うことが可能である。ビーム照射シーケンス例にお
けるチョッパーシステムのタイミングチャートを Fig. 7
に示す。

エネルギー変更時や入射・加速時などのビーム照射
を行わない状態では、チョッパー電磁石電源の出力電
流値を 0 A にすることでビーム遮断状態を保持する。
また、ビーム照射に移る場合には、チョッパー電磁石
の偏向角が 6.2 mrad になるように電流値を立ち上げ
る必要がある。そのため、実用上のエネルギー変更時
間には、チョッパー電磁石電源出力の電流立ち下げ、
立ち上げ時間が加わることになる。目標のエネルギー
変更時間は 50 ms 以下であることから、チョッパー電
源の立ち上げ (0 A から定格電流値)、立ち下げ (定格
電流値から 0 A) 時間の目標値を 1 ms とし、電源の
定格電流・電圧値は 150 A, ± 150 V とした。

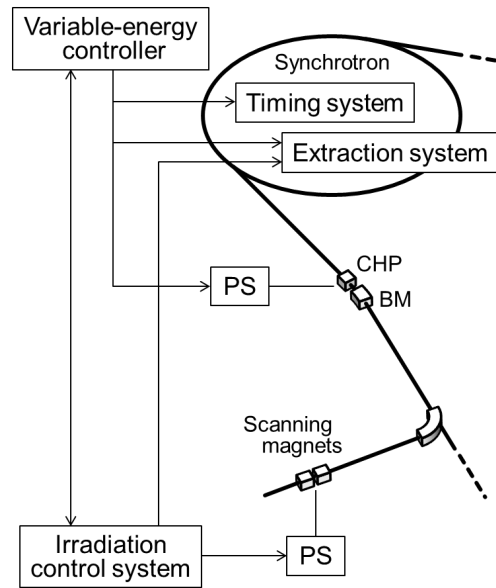


Figure 6: Block diagram of the HEBT chopper and other systems at HIMAC.

4. 結論

放医研は、エネルギー吸収体を使用せず、シンク
ロトロンの可変エネルギー運転方式によって 200 種
類以上のビームエネルギーを素早く切り替える高速
エネルギースキッピング照射の実現を目指しており、
そのためには、エネルギー変更時に生じるシンクロ
トロンからの漏れビームを防ぐことが必要となる。
現在、チョッパーシステムを高エネルギーラインに
導入することで、1 ms 程度でのビーム通過・遮断制
御の切り替えを可能にし、50 ms 以内にビームエ
ネルギーを変更できるシステムの設計および製作を進
めている。HEBT チョッパーシステムは 2015 年 2 月
に完成し、ビーム試験を行ったのちの 2015 年 4 月
から高速エネルギースキッピング照射の治療運用を
開始する予定である。

参考文献

- [1] Y. Hirao et al., Nucl. Phys. A 538 (1992) 541-550.
- [2] T. Furukawa et al., Med. Phys. 37, 5672-5682 (2010).
- [3] Y. Iwata et al., Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. A 624 (2010) 33-38.
- [4] K. Mizushima et al., Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. B 331 (2014) 243-247.

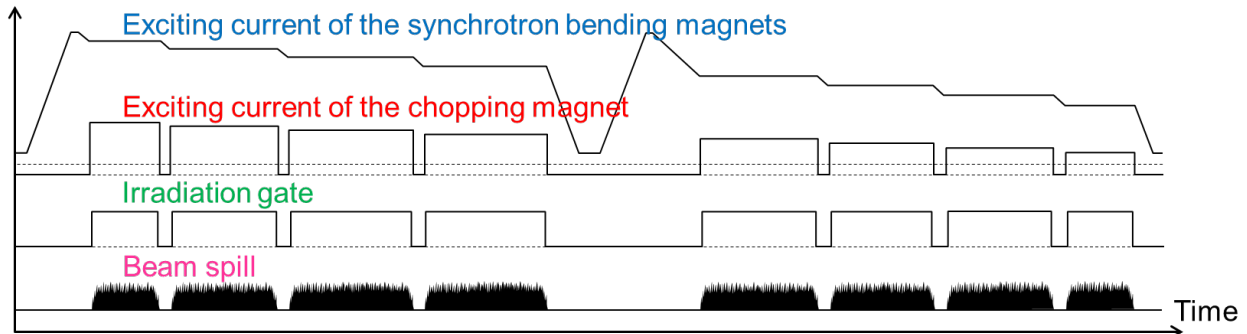


Figure 7: Time chart of the HEBT chopper during irradiation.