

HIMAC における可変エネルギー運転の高度化

UPGRADE OF MULTIPLE-ENERGY SYNCHROTRON OPERATION AT HIMAC

水島康太[#], 片桐健, 岩田佳之, 古川卓司, 佐藤眞二, 白井敏之, 野田耕司

Kota Mizushima[#], Ken Katagiri, Yoshiyuki Iwata, Takuji Furukawa, Shinji Sato, Toshiyuki Shirai, Koji Noda
National Institute of Radiological Sciences

Abstract

In scanned heavy-ion therapy, the narrow beam is required to reduce the damage of healthy tissues around the target tumor. The multiple-energy synchrotron operation with stepwise flattops has been developed at HIMAC in NIRS, in order to perform scanning irradiation without using the energy degrader which increases the beam size by the multiple scattering. The operation can vary the extraction beam energy quickly from 430 to 56 MeV/n by gradually decelerating the stored beam in the synchrotron ring. The number of the energy steps required from the scanning irradiation system is about 200. To meet the requirement with a shorter commissioning time, we proposed a method to determine the beam- and device-parameter settings for all energies by an interpolation method. As a result, it was confirmed that it is possible to produce the multiple-energy operation having many energy steps by small manual adjustments for less energy steps.

1. はじめに

放射線医学総合研究所（放医研）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炭素線がん治療を行っている[1]。1994 年の臨床開始からこれまでに 8000 件を超える治療を行い、良好な成果を上げてきた。2011 年からは、より高精度な線量制御を目指し、新たに建設した新治療研究棟[2]においてスキヤニング照射[3]による治療を開始した。

スキヤニング照射は、水平・垂直方向走査用の偏向電磁石 2 台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。ビームエネルギーを変更する方法としては、デグレーダを挿入してエネルギーを下げる方法とシンクロトロンで直接的に出射エネルギーを変える方法がある。前者は制御が非常に簡易であり、素早くエネルギーを変更することが可能であるが、散乱によるビームサイズ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いが、シンクロトロンの運転周期ごとに加速エネルギーを変えるのでは時間がかかり、治療照射の長時間化に繋がってしまう。そのため放医研では、シンクロトロン新しい可変エネルギー運転方式[4]を開発し、高速なビームエネルギー変更を目指した。

エネルギーデグレーダを使用せずにスキヤニング照射で治療を行うためには、200 段階以上のビームエネルギーをシンクロトロンから供給しなければならない。しかし、それらすべてのエネルギーを個別に調整するのは、非常に多くの時間が必要となる。本研究発表では、可変エネルギー運転におけるビームパラメータの決め方と、少ないエネルギー段数での機器パラメータの調整から多段エネルギーに拡張する方法の実験結果について報告する。

2. 可変エネルギー運転の高度化

放医研の炭素線スキヤニング照射がシンクロトロンから供給するビームに対して要求する条件は、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。この条件を満たすシンクロトロンの可変エネルギー運転は、Fig. 1 (a) に示したような励磁パターンになる。この運転パターンでは、最高加速エネルギーを 430 MeV/u とし、計 201 段階で出射エネルギーを 56 MeV/u まで変更することができる。

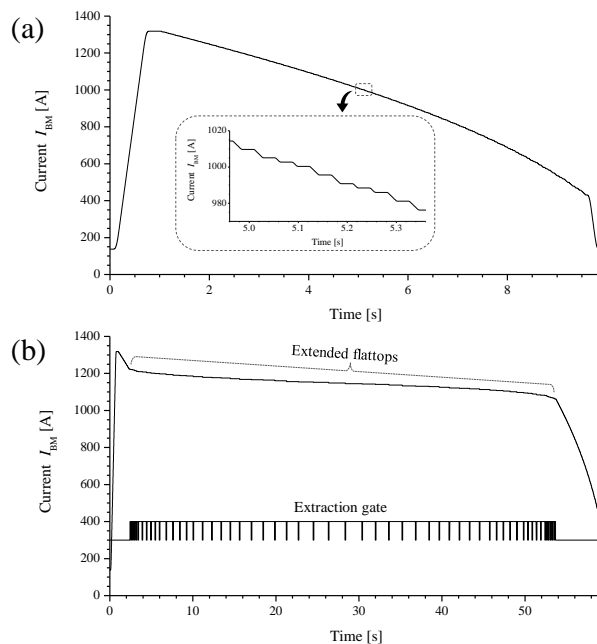


Figure 1: Exciting pattern of the synchrotron bending magnets in the multiple-energy operation: (a) with 201 flattops and (b) with extended flattops.

[#] mizushima@nirs.go.jp

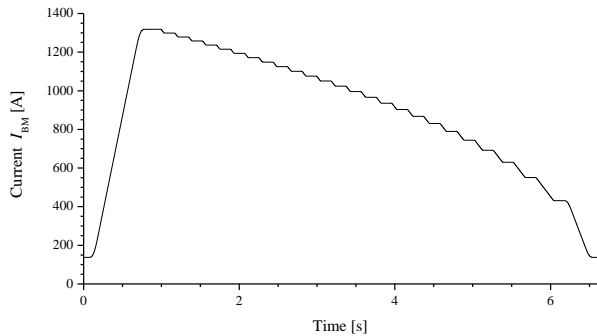


Figure 2: Exciting pattern of the synchrotron bending magnets in the multiple-energy operation with 26 flattops.

各段での出射エネルギーの変更幅は、水中飛程で 2 mm ないし 1 mm の変化になるように決められており、それらを組み合わせることで 2 mm ステップと 3 mm ステップのどちらの照射にも対応できるようになっている。この可変エネルギー運転では、Fig. 1 (b) のように各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更することができる。

初めから Fig. 1 (a) のような運転パターンから各段のエネルギーを順々に調整することも可能であるが、それでは非常に時間がかかり、限られた期間で調整やコミッショニングを行うことを考えれば現実的ではない。そのため、Fig. 2 のようにエネルギー段を間引いた運転パターンを調整し、そこから Fig. 1 (a) の多段運転パターンに拡張することを目指した。Fig. 2 の運転パターンでは、最高・最低出射エネルギーを Fig. 1 (a) と一致させた。また、エネルギーステップごとの水中飛程差は 1.2 mm で統一されており、合計の出射エネルギー段数は 26 である。したがって、調整にかかる総時間としては、201 段のエネルギーを個別に調整する場合と比較して 1/8 程度になると期待できた。

多段エネルギーの運転パターンを作成するにあたり、各エネルギーでのビームパラメータを決めなければならない。HIMAC からのビーム出射では三次共鳴と六極磁場による遅い取り出しを使用しているため、特にベータトロンチューンとセパトリスサイズの決め方が重要となる。Fig. 3 に出射エネルギーごとのベータトロンチューンとセパトリスサイズを示した。ベータトロンチューンは安定な動作点に滞在させるため、水平・垂直ともに各出射エネルギーで変えずに一定とする。HIMAC の遅いビーム取り出しでは、RF ノックアウト法[5]を用いているため、ビーム取り出し中にベータトロンチューンを変化させる必要はない。取り出しのセパトリスは、ビームが減速するのに従って六極磁場強度を下げ、サイズが大きくなるように設定した。これは、減速時のエミッタンスの断熱膨張によって、ビーム出射開始時に大量にビームがこぼれることを防ぐためである。各エネルギーでのエミッタンスの変化量は、ビームの運動量変化に比例するように決められた。

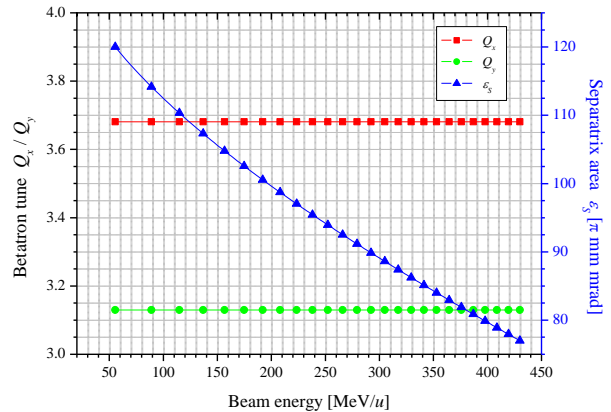


Figure 3: Settings of the horizontal/vertical betatron tunes and the separatrix area in the multiple-energy operation.

3. ビームコミッショニング

コミッショニングでは、Fig. 1 (a) の 201 段可変エネルギー運転への拡張を目的とし、Fig. 2 に示したような 26 段可変エネルギー運転の調整から開始した。各出射エネルギーでのベータトロンチューン、セパトリスサイズなどは Fig. 3 に合うように調整された。また、ビーム取り出し効率向上のための出射バンプ軌道やビームスピル安定性向上を目指した RF ノックアウト周波数の調整を行った。このようにして調整された 26 段可変エネルギー運転の様子を Fig. 4 に示す。430 MeV/u の最高エネルギーまで加速されたビームが 56 MeV/u の最低出射エネルギーまで大きなロスなく減速されているのがわかる。ビーム入射から最大エネルギーまでの加速区間では、偏向・四極電磁石電源のトラッキングエラーによって、予期せぬベータトロンチューンの変動が生じることが考えられる。そのため、Fig. 5 のようにシンクロトロンリング内のポジションモニターの信号を用いて運転周期全域でベータトロンチューンを測定し[6]、加速区間の変動を補正した。

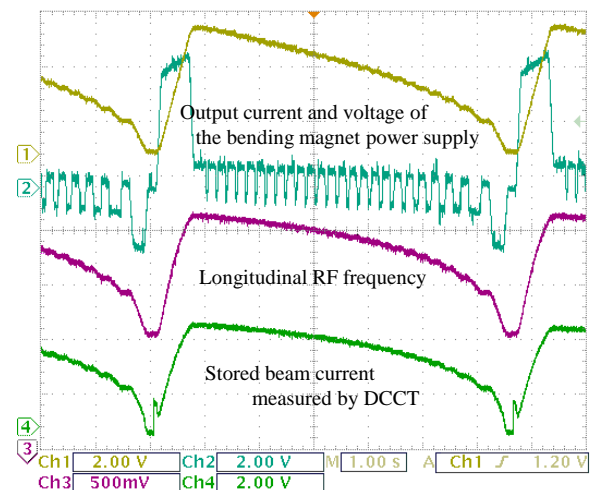


Figure 4: Multiple-energy synchrotron operation with 26 flattops.

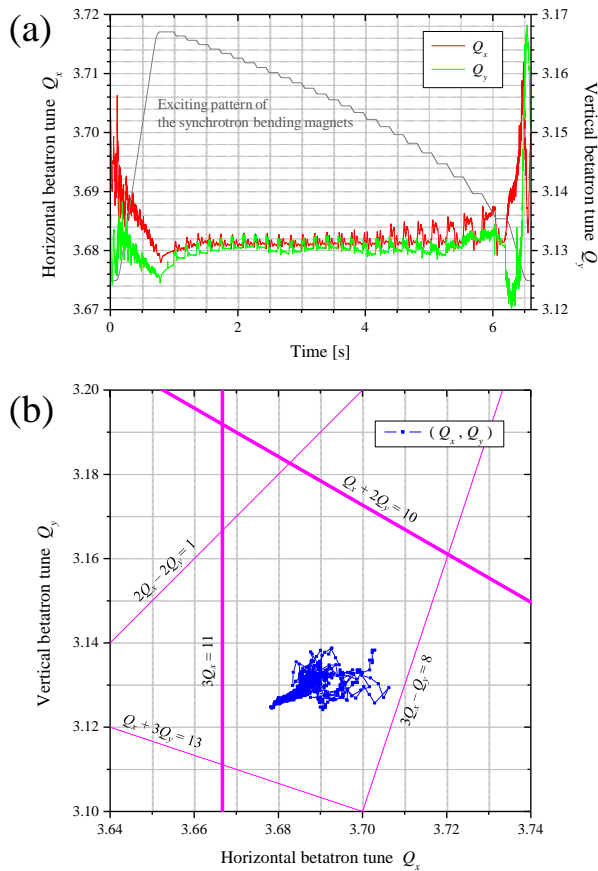


Figure 5: Measurement result of the betatron tune fluctuation (a) in the multiple-energy operation and (b) plotted on the tune diagram in the injection and acceleration periods.

26 段可変エネルギー運転の調整結果から各電源の電流・電圧パターンを拡張して作られた 201 段可変エネルギー運転の様子を Fig. 6 に示す。26 段と 201 段可変エネルギー運転における加速・最終減速区間の磁場変化速度やフラットボトム区間の時間長などは統一しているため、最終減速から加速に渡る区間での偏向・四極電磁石電源や加速 RF 周波数などのパターンはそれぞれ同一のもとして問題なく、201 段可変エネルギー運転においても加速区間のベータトロンチューンは Fig. 5 を再現する。各機器パラメータは、201 種類のビームエネルギーの中で既に調整された 26 エネルギー分の結果を、調整を行わない他の 175 エネルギーに対して補間によって適用した。結果として、調整を行っていないビームエネルギー段でも高いビーム取り出し効率は保たれており、ビームスピルについても調整されたエネルギーと同程度の安定性を示した。

さらに、Fig. 7 のような実際の治療を模擬した照射により、補間を用いた多段可変エネルギー運転作成法の検証を行った。Fig. 7 に示した試験照射は、実際の前立腺がん腫瘍に対する照射を基にしたものであり、深さ方向に 2 mm ステップでエネルギーを照射している。照射ビームのエネルギーは 349 MeV/u から開始され、エネルギーをスライス

射を完了するごとにビーム出射を一時停止し、飛程を変えるためにビームを減速する。エネルギーをスライスの照射と段階的なビーム減速を繰り返すことで、照射シーケンスは進められる。Fig. 7 に示された結果から、調整されたビームエネルギーと調整されていないものでビームスピルなどに違いは見られず、多段可変エネルギー運転への拡張がうまく行われていることがわかる。その他のビームエネルギーに対しても同様に模擬照射で検証し、可変エネルギー運転多段化方法の有効性を確認した。

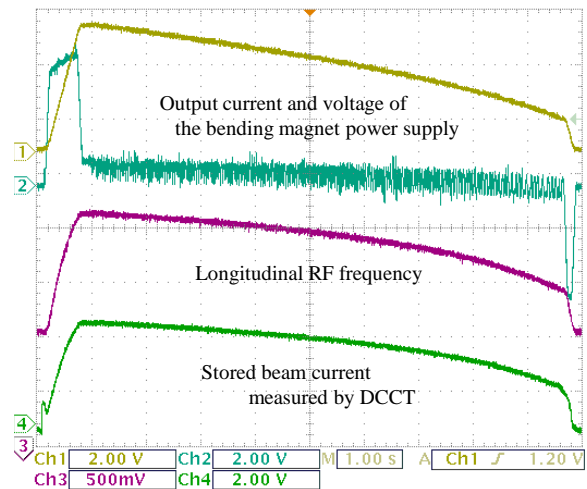


Figure 6: Multiple-energy synchrotron operation with 201 flattops.

4. 結論

スキャニング照射による重粒子線がん治療においては、標的腫瘍周辺の正常組織への損傷を抑えるために細い照射ビームが求められる。放医研では、エネルギーデグレーダの使用による余計なビームサイズの増大を避けるため、シンクロトロンの変エネルギー運転を用いて、照射システムから要求される 201 種類のビームエネルギーを供給することを目指した。多エネルギーの調整は多くの時間を要するため、より少ないエネルギーでの機器パラメータの調整結果から、補間により多エネルギーの運転パターンへ拡張する方法を提案し、実験的にその方法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] S. Yamada, in: Proceedings of APAC'01, Beijing, China, 2001, 829.
- [2] K. Noda et al., Nucl. Instr. and Meth. B 269, 2924 (2011).
- [3] T. Furukawa et al., Med. Phys. 37, 5672 (2010).
- [4] Y. Iwata et al., Nucl. Instr. and Meth. A 624, 33 (2010).
- [5] M. Tomizawa et al., Nucl. Instr. and Meth. A 326 (1993) 399.
- [6] K. Katagiri et al., in: Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, 2037.

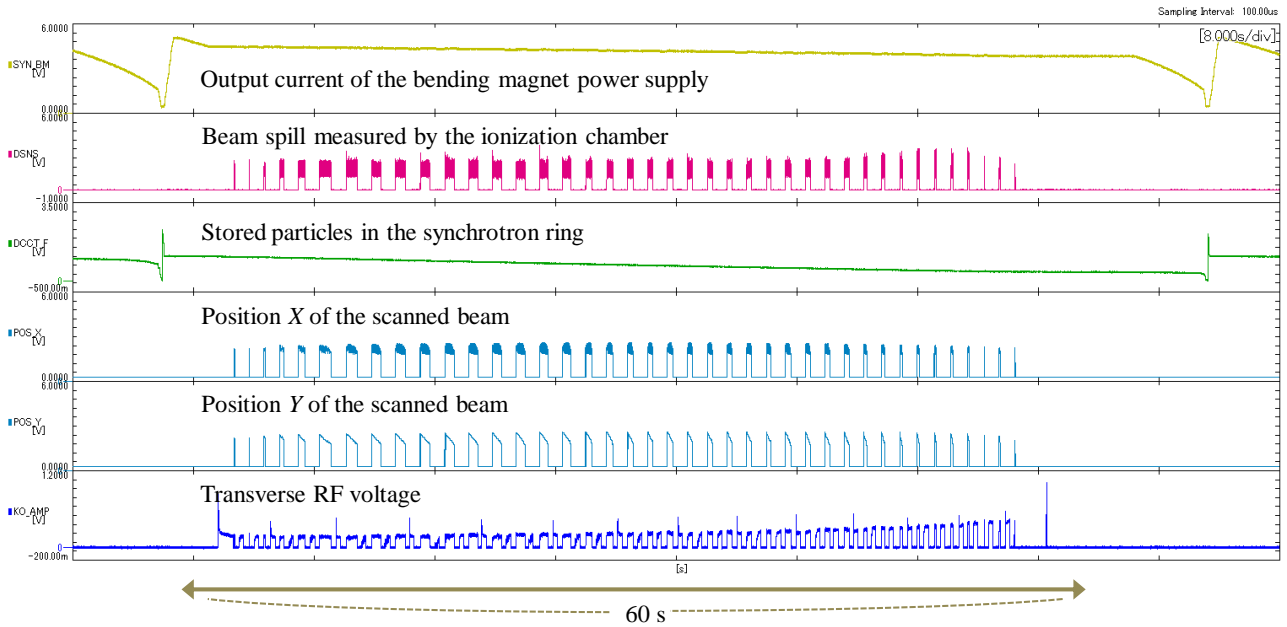


Figure 7: Typical test result of scanning irradiation using the multiple-energy synchrotron operation with 201 flattops. In this test, the irradiation pattern simulated for a prostate cancer tumor was used.