

MULTIPLE-ENERGY CONTROL AT THE HIMAC SYNCHROTRONS

Yoshiyuki Iwata^{#,A)}, Eiichi Takada^{A)}, Koji Noda^{A)}, Toshiyuki Shirai^{A)}, Takuji Furukawa^{A)}, Kouta Mizushima^{A)},
Eri Takeshita^{A)}, Tetsuhito Kadowaki^{B)}, Tetsuya Fujimoto^{B)}, Yoshinobu Sano^{B)}, Hiroshi Uchiyama^{B)},

^{A)} Department of Accelerator and Medical Physics, National Institute of Radiological Sciences (NIRS),
4-9-1, Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan.

^{B)} Accelerator Engineering Corporation (AEC), 3-8-5 Konakadai, Inage, Chiba 263-0043, Japan.

Abstract

Multiple-energy operation with extended flattop is being developed at the HIMAC. This operation uses synchrotron operation-patterns having a stepwise flattop. With these patterns, the beam would be primarily accelerated to the maximum energy, and then successively decelerated to the lower energies. Having extended the flattops and extracted the beam during these flattops, heavy ions having various energies can be provided within a single synchrotron cycle. Since the extraction energy can be quickly changed by the accelerator itself, no energy degrader will be required to control a depth dose-distribution. Having applied this multiple-energy operation to our fast raster-scanning irradiation, we can considerably reduce the total irradiation time and concurrently obtain an excellent depth dose-distribution. The beam acceleration and extraction tests using this operation were made. Successful results of the tests proved the effectiveness of this multiple-energy operation.

HIMAC シンクロトロンの変エネルギー制御

1. はじめに

放医研では 1994 年より重粒子がん治療装置 (HIMAC) から得られる高エネルギー炭素ビームを用いたがん治療を行っている^[1]。重粒子線がん治療の更なる高度化に向け、我々は新たに水平・垂直両ポートを有する 2 つの治療室と、回転ガントリー治療室を有する新治療研究棟の建設を進めている^[2]。これら全ての治療室では、高精度な治療照射が可能なスキャニング照射法が採用される。新治療研究棟は既設 HIMAC に接続され、高エネルギー重イオンビームは HIMAC 上シンクロトロンリングから供給される。

スキャニング照射ではビームを患部形状に合わせ、走査しながら患部へ精密に照射するため、高ビーム利用効率、且つ高精度な線量分布が得られる。一方、深部線量分布の形成は、従来、レンジシフタと呼ばれる減速板を用いてきた。しかしながら、スキャニング照射では減速板によるビームの広がりや核反応によるフラグメント生成の影響が無視できない。よって、深部線量分布の形成においては加速器から得られるビームのエネルギーを直接変化させる方が望ましい。

加速器のビームエネルギーを迅速に変化させるため、我々は可変エネルギー制御の開発を進めている。この可変エネルギー制御により、1 シンクロトロン運転周期中に複数の異なるエネルギーを持つビームを次々と取り出すことが可能となる。可変エネルギー制御の概要及び、ビーム加減速・取り出し試験の結果を報告する。

2. 可変エネルギー制御

HIMAC シンクロトロンはビームの入射、加速、

取り出し、減速を約 3.3 秒の一定周期で繰り返し運転を行い、高エネルギー重イオンの供給を行っている。このような従来の運転では図 1(a)に示すようなシンクロトロン主偏向及び主四極電磁石に対する運転パターンが用いられ、ビームは運転パターンのフラットトップ区間に取り出される。ビームのエネルギーは主にフラットトップ部における主偏向電磁石の電流値及び高周波加速空洞の周波数により決定されることから、エネルギーを変更するためには運転パターンを次々と切り替えなければならない。

加速器から得られるビームのエネルギーを迅速に変化させるため、我々は可変エネルギー制御の開発を進めてきた。可変エネルギー制御では、図 1(b)に示したような複数のフラットトップを有する階段状のシンクロトロン運転パターンを用いる。この運転パターンにより、ビームは一度、ある一定エネルギーまで加速された後、順次、減速される。

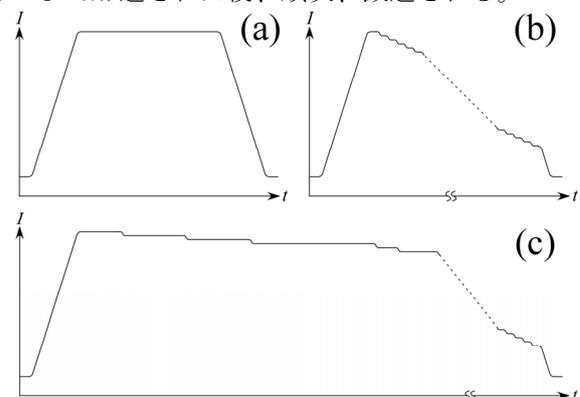


図 1 (a) 通常のシンクロトロン運転パターン、(b) 可変エネルギー制御における運転パターン、(c) 可変エネルギー制御における拡張フラットトップ運転。

[#] y_iwata@nirs.go.jp

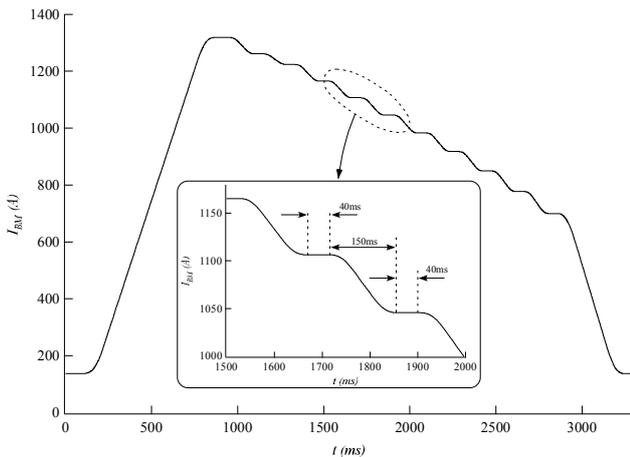


図 2 主偏向電磁石の電流パターン。核子あたり 430~140 MeV に相当する 11 フラットトップを有する。

この運転パターンは短いフラットトップ区間しか持たないが、可変エネルギー制御ではフラットトップ区間を自由に延長することができる。つまり、要求されるエネルギーのフラットトップに至るとフラットトップは図 1(c)に示すように延長され、そこでビーム取り出しが実施される。よって、上記階段状のパターンを作成し、可変エネルギー制御を適応することで、取り出されるビームのエネルギーを連続的に変化させることが可能となる。

3. ビーム加速・取り出し試験

可変エネルギー運転の原理を実証するため、階段状の運転パターンを用いたビーム加減速及び取り出し試験を実施した。試験で用いた主偏向電磁石の電流パターンを図 2 に示す。リング内の主四極電磁石や六極電磁石及び取り出し機器に関しても同様な運転パターンが用いられている。この運転パターンは 11 フラットトップを有し、各フラットトップは 430, 400, 380, 350, 320, 290, 260, 230, 200, 170, 140 MeV/u に相当する。リングに入射されたビームは一度、

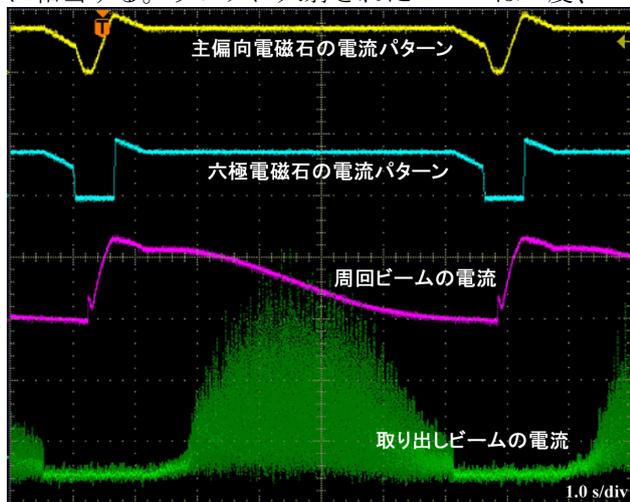


図 3 11 フラットトップを有する運転パターンを用いたビーム加速及び取り出し試験結果。

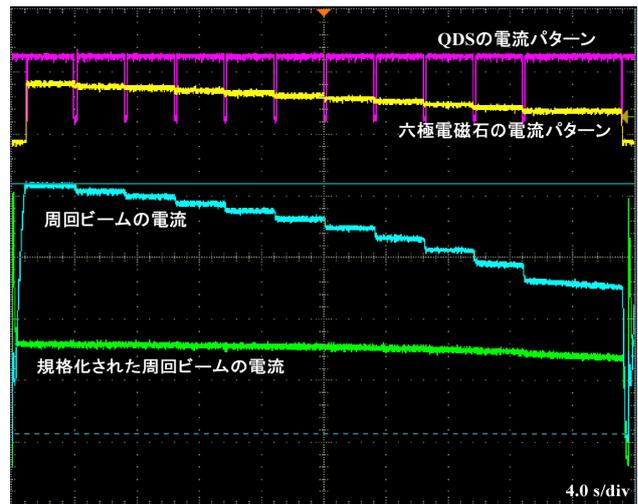


図 4 11 フラットトップを有する運転パターンを用いたビーム加減速試験の結果。各フラットトップは約 3 延長されている。減速中のビームロスは見られない。

430 MeV/u まで加速された後、20 MeV/u 若しくは 30 MeV/u ステップで順次減速されることとなる。各フラットトップ及び減速区間のパターン長はそれぞれ 40ms 及び 150ms である。

ビーム加速及び取り出し試験の結果を図 3 に示す。図の線は上段より、主偏向電磁石の電流パターン（黄色）、六極電磁石の電流パターン（水色）、リング内 DCCT で測定された周回ビームの電流値（ピンク）、リング出射ラインに設置された二次電子ビームモニターで測定された取り出しビームの電流値（緑色）を示す。試験では 6 段目のフラットトップが約 5 秒間延長され、その区間で 290 MeV/u のエネルギーを有するビームが RF-KO 法^[3]により取り出されている。ビームの取り出し効率はリング内 DCCT で計測された周回ビーム強度と、ビーム輸送ラインに設置されたイオンチェンバーにより計測された取り出しビーム強度の比より決定され、その結果、約 90%以上であることがわかった。また、試験では他のフラットトップでも同様のビーム取り出しを行い、良好な取り出し効率を得ている。

全てのフラットトップを約 3 秒間拡張した際の試験結果を図 4 に示す。試験におけるリング周回ビームの粒子数は約 1.2×10^{10} であった。リング内 DCCT で計測されたビーム電流はビームの周回周波数に依存するため、ビームの加減速により変化する。よって、加減速中におけるビームロス量を調べるため、DCCT 出力をビームの周回周波数で規格化した信号も図示した。この規格化された周回ビーム電流は最初のフラットトップ以降、最終フラットトップ区間を除き一定な分布を示していることから、加減速中のビームロス量は殆どないと考えられる。最終フラットトップにおける若干の規格化電流の減少は、試験中、セパトリクス生成用六極電磁石が常時オンされていたため、フラットトップ区間で一部のビームが取り出されていることが原因であると考えられる。これはチューン補正用四極電磁石 (QDS) を用いることで、抑制可能である。

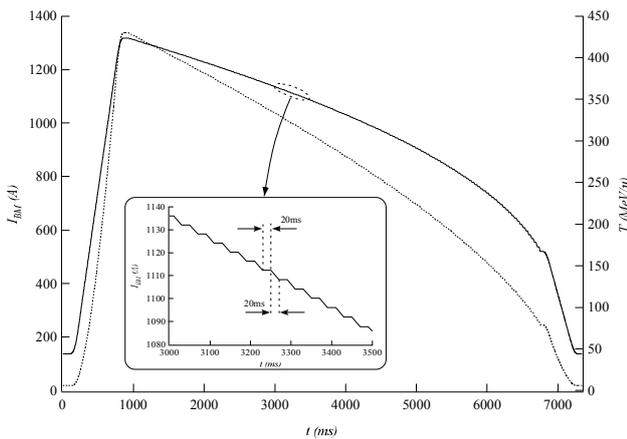


図 5 主偏向電磁石の電流パターン（実線）及び各電流値に相当するビームエネルギー（破線）。核子あたり 430~80 MeV に相当する 147 フラットトップを有する。

前述の通り、可変エネルギー制御及び運転の最終目標は深部線量分布を加速器のエネルギーを変えることで形成することである。そのためには、エネルギーを水等価厚 2mm に相当するステップで変化させなければならない。重粒子線治療で用いる最高及び最低エネルギーは 430 MeV/u 及び 80 MeV/u であり、それぞれに相当する水中飛程は 309mm、17.1mm であることから、147 フラットトップを持つ運転パターン（ユニバーサル運転パターン）が必要となる。この要求を満たす主偏向電磁石の電流パターン及び相当するビームエネルギーをそれぞれ図 5 の実線及び破線に示す。この運転パターンにより、ビームは一度 430 MeV/u まで加速された後、水等価厚 2mm に相当するステップで順次、79.1 MeV/u まで減速される。各減速区間及びフラットトップ区間の時間幅は何れも 20ms である。可変エネルギー制御とユニバーサル運転パターンを組み合わせることで、レンジシフタなどの減速板を用いることなく、きめ細かなエネルギー制御が可能となり、その結果、極めて良好な深部線量分布を得ることが可能となる。

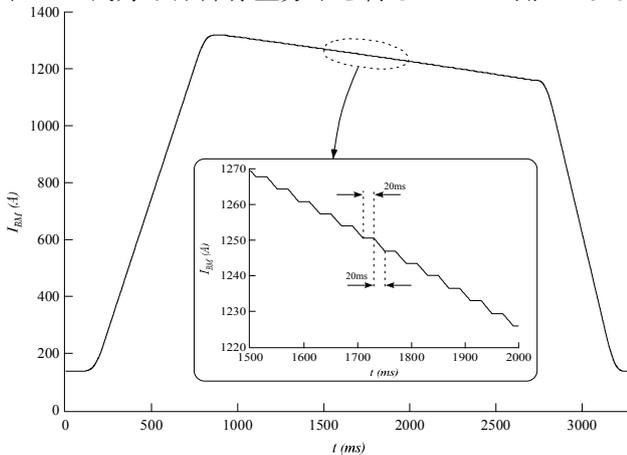


図 6 主偏向電磁石の電流パターン。核子あたり 430~347 MeV に相当する 46 フラットトップを有する。

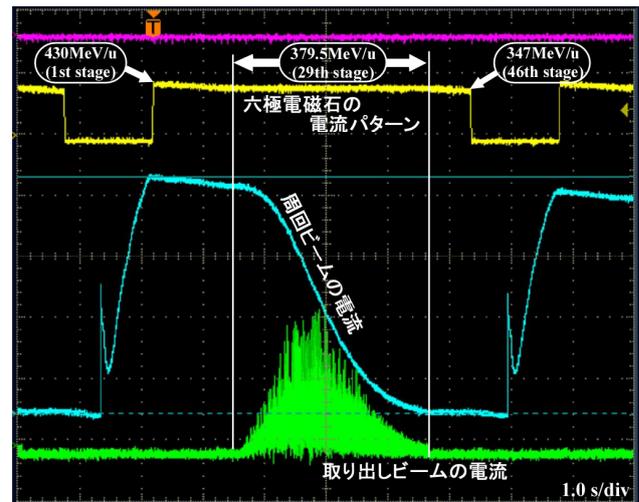


図 7 46 フラットトップを有する運転パターンを用いたビーム加速及び取り出し試験結果。

図 5 に示した 147 フラットトップを有するユニバーサル運転のパターン長は 7 秒以上に及ぶ。一方、現主加速器上位制御系は 3.3 秒以内のパターンしかサポートされていないため、ユニバーサル運転パターンの試験は今の所、実施できていない。しかしながら、ユニバーサル運転パターンの実現性について検証するため、図 6 に示す 46 フラットトップ運転パターンを用意し、ビーム加減速及び取り出し試験を実施した。このパターンはパターン長が 3.3 秒以内に収まるよう、ユニバーサル運転パターンの最初の 46 フラットトップまでを抜き出したものであり、ビームエネルギーとしては 430 MeV/u から 347 MeV/u までをカバーする。この運転パターンを用いたビーム試験結果を図 7 に示す。試験では 29 番目のフラットトップが延長され、379.5 MeV/u のビームが取り出されている。また、ビームの取り出し効率率は 11 フラットトップ運転パターンでの試験同様、90%を超えることが確認された。今年夏に主加速器上位計算機の改造を行うことで、長周期パターンがサポートされる。今後は 147 フラットトップ運転パターンの実証試験を実施する予定である。

4. まとめ

HIMAC シンクロトロンの変エネルギー制御の開発を行ってきた。階段状のシンクロトロン運転パターンを用いることで、1 シンクロトロン運転周期中に様々なエネルギーを有するビームを連続的に取り出すことが可能となる。この可変エネルギー制御によりレンジシフタなどの減速板なくエネルギーをきめ細かく変化させることが可能となるため、極めて良好な深部線量分布を形成できると期待される。

参考文献

- [1] Y. Hirao et al., Annual Report HIMAC, NIRS-M-89.
- [2] K. Noda, et al., Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A562 (2006) 1038.; K. Noda, et al., Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B 266 (2008) 2182.
- [3] T. Furukawa, et al., Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B 266 (2008) 2182.