

COMMISSIONING OF NEW BEAM INTENSITY CONTROL SYSTEM AT HIMAC

Kota Mizushima ^{#A),B)}, Takuji Furukawa ^{A)}, Toshiyuki Shirai ^{A)}, Shinji Sato ^{A)}, Yoshiyuki Iwata ^{A)},
Ken Katagiri ^{A)}, Eri Takeshita ^{A)}, Akihiro Higashida ^{A),B)}, Koji Noda ^{A)}

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

^{B)} Graduate School of Science and Technology, Chiba University,
Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Abstract

NIRS has carried out three-dimensional scanning irradiation for carbon-ion radiotherapy at the HIMAC new treatment research facility since May 2011. In this irradiation, we have adopted a raster scan method to make the lateral dose distribution. For the reduction of the difference between prescribed and delivered dose distribution, it is preferable that the extracted beam-current from the synchrotron ring is low ripple, and the response to the beam-on/off switching is quick. To meet these requirements, we have developed a new beam-intensity control system with the RF-knockout slow extraction and feedback control system. In the system commissioning, we can modulate the beam-intensity in the range of thirty times while keeping the beam-current ripple below 20%.

HIMAC 新ビーム強度制御システムのコミッショニング

1. はじめに

放射線医学総合研究所 (NIRS) [1]では、重粒子線がん治療用加速器 HIMAC を用いて、1994 年の治療開始以来、5000 名以上の患者に対して重粒子線治療を行ってきた。更なる治療照射の高精度化を目指し、これまでの拡大ビーム照射法による治療と並行して、2010 年に完成した新治療研究棟で、2011 年 5 月から 3 次元スキャニング照射法による治療が行われている。

NIRS スキャニング照射[2]では、三次元的な線量分布の形成に、ハイブリッドラスタースキャン法[3]とレンジシフターと呼ばれる複数枚の厚さの異なる PMMA プレートを用いている。ハイブリッドラスタースキャン法では、ターゲット内に配置されたスポットと呼ばれる小領域毎に照射線量を制御し、スポット移動間もビームを停止しないことで、高速なスキャニング照射が可能となる。そのため、スポット間線量を正確に管理することが重要となるが、NIRS スキャニングシステムでは、ビーム強度を一定に保つことで制御可能にしている。レンジシフター駆動中は、ビームを一時停止し、駆動完了とともにビーム出射を再開する。このビームオン・オフの切り替えは 1 回の治療照射で数十回程度行われる。計画線量と実照射線量の分布誤差を減らすために、照射ビーム強度の時間変動を抑え、ビームオン・オフの応答時間を速くすることが求められる。更に、スキャニング電磁石性能を最大限に活かし、照射時間を短縮するためには、ビーム強度をスライス毎に変えられることが望ましい。それら要求に応えるため、過去の研究[4]に基づき、RF ノックアウト (RFKO) 法[5]を用いたビーム強度フィードバック制御システムを新たに開発し、新治療研究棟においてシステムのコミッショニングを行った。

[#] mizushima@nirs.go.jp

2. ビーム強度制御システム

2.1 システムの概要

HIMAC ビーム強度制御システムは、図 1 に示したブロックダイアグラムのように、2 台の RFKO 制御器 (RFC1, RFC2) とシステムシーケンス制御器 (SC) で構成される。それぞれの RFC は、Low-Level RF 信号発生器とフィードバック振幅制御器としての二つの機能を併せ持つ。ビーム強度フィードバック制御のために、照射ポートにある電離箱とビームダンプシャッター手前にある二次電子モニター (SEM) を用いており、それぞれの測定値は IFC 回路を通して 2 台の RFC に入力される。ビーム強度目標値は、照射制御システム (NIRR) によって設定される。また、HIMAC シンクロトロンから供給するビームエネルギーは、可変エネルギーコントローラ (VE) によって制御される。ビームオフ中には、ビーム漏れを防ぐために、リング内の 2 台の高速四極電磁石 (QDS) を励磁して、共鳴条件か

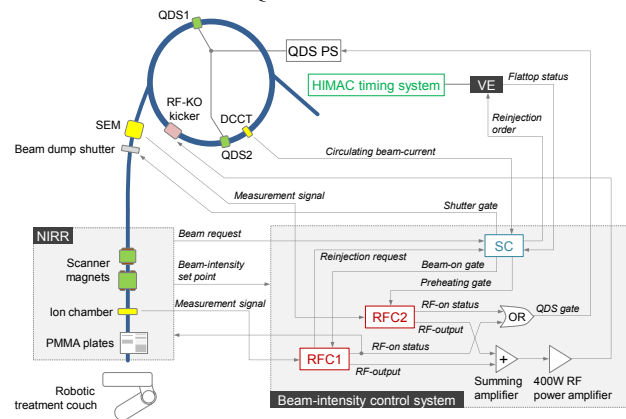


図 1 : HIMAC ビーム強度制御システム

らベータトロン振動数を離している。

2.2 RFKO 制御器

図 2 に示したように、ビームスピルのリップルを低減するため[6]、RFC 内には 3 つの DDS を取り付けている。それぞれの DDS は、主にビームを拡散する 2 つの FM 帯域成分 (DDS1, DDS2) と、出射ビーム電流のリップル、スパイクを低減するための単一周波数成分[7] (DDS3) に役割が分けられている。各 DDS からの出力は、加算器での合成後に、最後段の VCA でフィードバック制御される。VCA ゲインは、PI 制御により 0.1 ms 毎に変調される。DDS1, DDS2 と、DDS3 の電圧比が大きいほど、ビームオン時に生じるビーム電流スパイクが減らせることが分かっていた。だが一方で、フィードバックに対するビーム電流の応答が速くなることから、ビームオン時にオーバーシュートなどによって、ビーム強度が不安定になりやすいことも新たにわかった (図 3 (a))。この不安定性を避けるため、各 DDS の後段に、時間制御で電圧比を変化させるための VCA を設けた。この 3 台の VCA で、RF 出力開始から 1 ms で電圧比が 1:1:1 から 1:1:2 になるようにゲインを変化させている (図 3 (b))。それにより、ビーム強度と RFKO 電圧の滑らかな立ち上がりを実現できた。

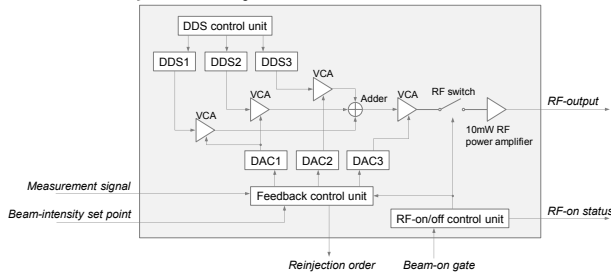


図 2 : RFC 内部ブロックダイアグラム

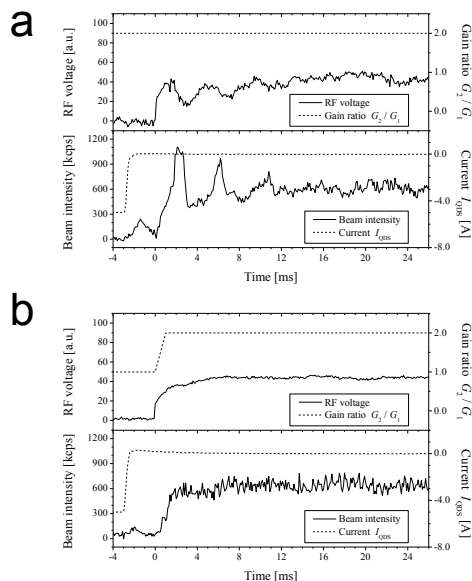


図 3 : DDS ゲイン変調によるビームオン制御

2.3 フラットトップ延長運転

NIRS スキャニング照射は、シンクロトロンのビームエネルギー可変パターンとフラットトップ延長運転を用いている[8] (図 4)。これにより、シンクロトロンのデューティ比を最大限に向上させ、照射時間の短縮化を目指している。現在の治療照射では、図 4 (b)、(c)、(d) のように、照射部位の深さに合わせた 1 エネルギー段のみを使用しているが、将来的には、図 5 に示したように、照射中にシンクロトロンで連続的にビームエネルギー変更を行う。厚いレンジシフターの使用によるビームサイズの増大を防ぎ、最終的には、エネルギー段を増やすことでシンクロトロンでのエネルギー変更のみで治療照射を行うことを目標としている。

フラットトップ延長運転において、一照射完了に

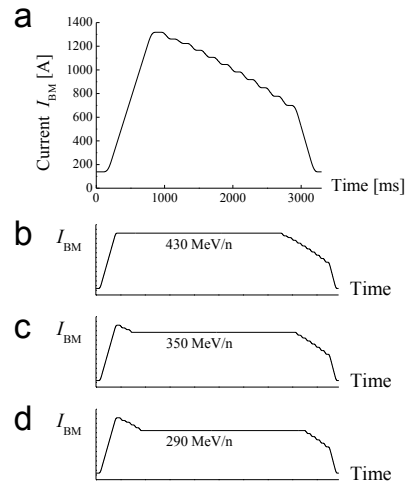


図 4 : 11 段運転パターンとフラットトップ延長運転

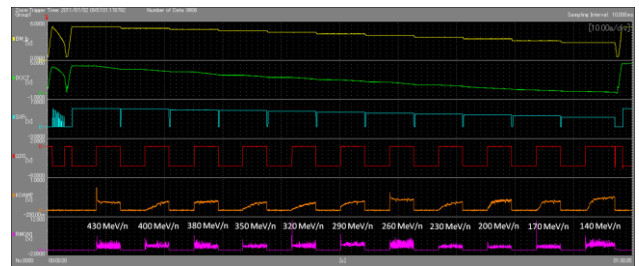


図 5 : 11 段連続ビームエネルギー可変取り出し

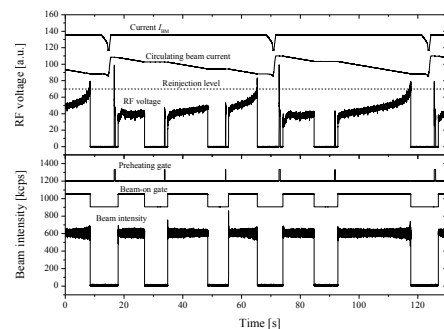


図 6 : フィードバックゲイン閾値による再入射制御

表 1 実験パラメーター

Energy of $^{12}\text{C}^{6+}$	430 MeV/n	350 MeV/n	290 MeV/n
Betatron tune (Q_x/Q_y)	3.679/3.131	3.679/3.128	3.679/3.133
Revolution frequency	1.687 MHz	1.589 MHz	1.497 MHz
Extraction beam rate	$7.6 \times 10^6 - 2.3 \times 10^8$ pps	$8.4 \times 10^6 - 2.5 \times 10^8$ pps	$9.3 \times 10^6 - 2.8 \times 10^8$ pps
FM center frequency of transverse RF-field	1.149 MHz	1.084 MHz	1.021 MHz
Bandwidth of FM	6.0 kHz	7.9 kHz	7.5 kHz
Single frequency of transverse RF-field	1.138 MHz	1.074 MHz	1.012 MHz

必要な粒子数をシンクロトロン一周期で確保できない場合には、ビームの再入射制御を行わなければならない。そのため、ビーム強度制御システムでは、リング内の DCCT モニターを用いて、周回ビーム電流の閾値制御により再入射タイミング制御を行っている。また、図 6 に示したように、フィードバック制御電圧にも閾値を加えることで、様々な状態変化に対してより柔軟に安定した制御を実現している。

2.4 ビームプレヒーティング

これまでのビーム強度フィードバック制御において、加速後のビームエミッタンスの日々、またはパルス毎の変化は大きな弊害となっていた。それは、図 7 (a)、(b) のように、フィードバック制御のオーバーシュートや発振等によりビーム電流スパイクを引き起こす要因となるためである。そこで、新ビーム強度制御システムでは、ビーム加速後の照射

前に、出射ラインのシャッターを閉めたまま、500 ms 間ビーム出射シーケンスを行うこと（ビームプレヒーティング）で、エミッタンスの非再現性によるフィードバック制御の不安定性を回避した（図 8）。これにより、照射開始のビームオン応答の高速化と安定化を実現できた。また、照射中にビームオフが 5 秒以上行われる場合にも、200 ms のプレヒーティングを行うことで、図 7 (c) のように、ビームオフ中のエミッタンス増加が生じて、ビーム電流スパイクを避けることができる。ビームプレヒーティング中には、ビームシャッター上流に設置されている SEM を用いることで、ビーム強度制御を行っている。

3. コミッショニング

新治療研究棟において、新ビーム強度制御システムのコミッショニングを行い、ビーム強度変調性能とビームオン・オフ切り替えの応答時間を検証した。コミッショニング時の各パラメーターを表 1 に示している。ビームエネルギーは、430、350、290 MeV/n の 3 種類に対して行った。図 9 に、350 MeV/n の炭素イオンビームを 30 倍のレンジで強度変調している様子を示した。HIMAC シンクロトロンでは、ベータトロン振動の三次共鳴と六極電磁石を用いてビーム出射を行っている。図 10 に、ビーム強度毎のビームスピルリップルを示した。縦軸は、50 kHz のサンプリングレートで取得したデータを、1 ms 毎に平均化して求めたビーム強度の標準偏差である。図 10 の各点に記した誤差棒は、リング内ビーム残量に対するリップル幅の変化を評価してい

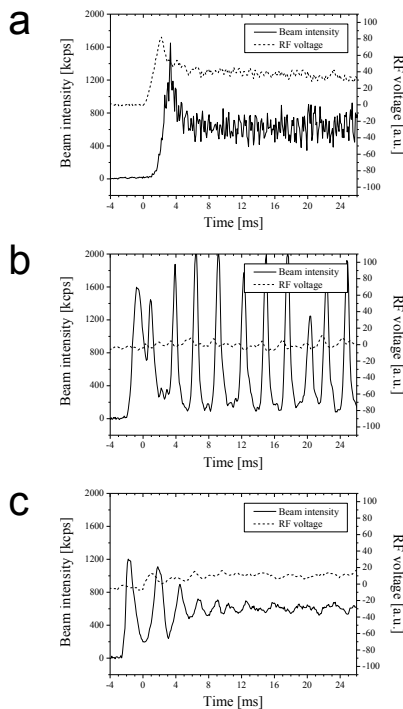


図 7: ビーム電流スパイク

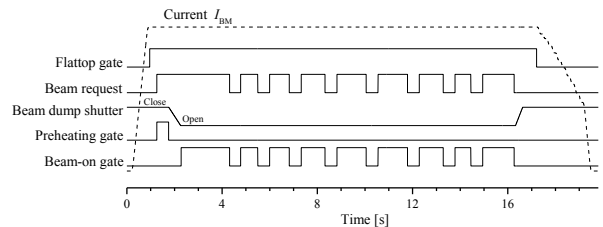


図 8: ビームプレヒーティング制御

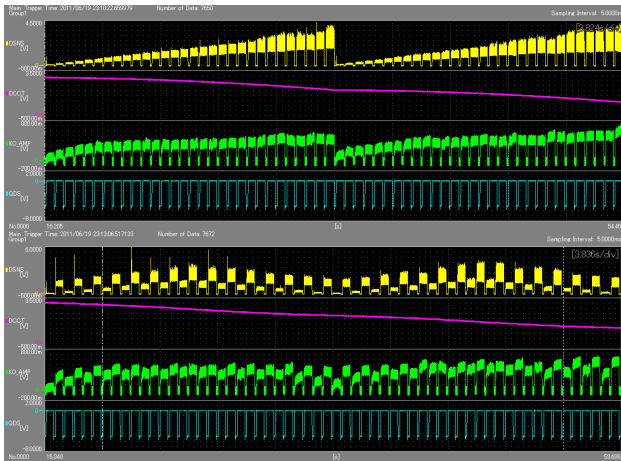


図 9 : ビーム強度変調制御

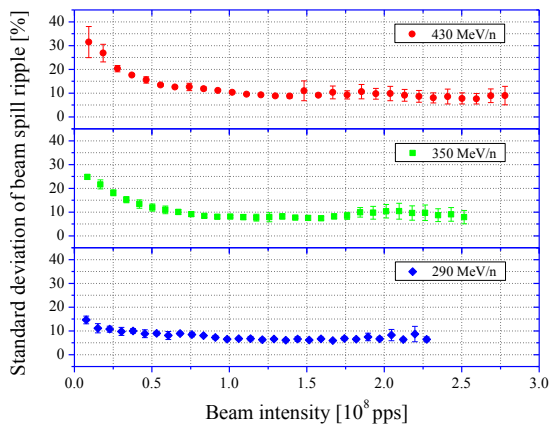


図 10 : ビームスピリプル評価

る。ビームスピリプルは、低ビーム強度を除けば 20%以下に抑えられており、20 倍の強度レンジでは 10%以内であった。

図 11 は、図 9 でのビームオン・オフ切り替え時のビーム電流を、強度毎に規格化して重ねたものである。QDS の整定時間を待つために、RF 電圧は QDS オフ指令から 3 ms 後に印加されている。ビーム立ち上がり時間は RF 電圧の印加から 3 ms 以内で、ビーム停止時間はビームオフ指令から 0.3 ms 程度であった。

4. 結論

NIRS スキャンニング照射では、ハイブリッドラスタースキャン法と PMMA プレートを用いて三次元線量分布を形成している。正確な線量分布形成のため、RFKO 法による遅いビーム取り出しとフィードバック PI 制御を用いた、新ビーム強度制御システムを開発した。システムの検証を兼ねて行われたコミッショニング試験において、20%以下のリップル幅に保ちながら、30 倍のレンジでビーム強度変調を行えることを実証した。ビームオン・オフ応答時間は、それぞれ 3 ms と 0.3 ms 以内であり、NIRS ス

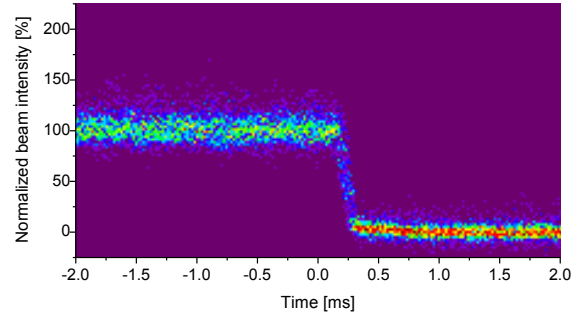
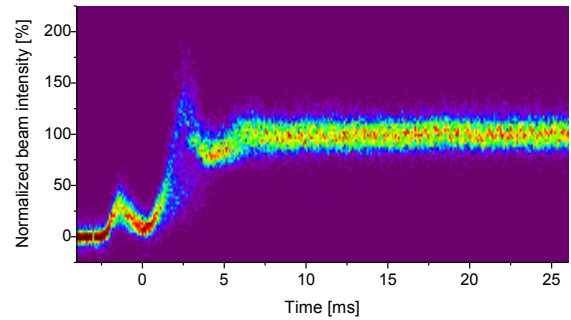


図 11 : ビームオン・オフ応答時間評価

キャンニング照射に求められる性能を十分に実現できていた。

参考文献

- [1] Y. Hirao et al., Nucl. Phys. A 538 (1992) 541.
- [2] T. Furukawa et al., Med. Phys. 37 (2010) 5672.
- [3] Th. Haberer et al., Nucl. Instr. and Meth. A 330 (1993) 296.
- [4] S. Sato et al., Nucl. Instr. and Meth. A 574 (2007) 226.
- [5] M. Tomizawa et al., Nucl. Instr. and Meth. A 326 (1993) 399.
- [6] K. Noda et al., Nucl. Instr. and Meth. A 492 (2002) 253.
- [7] K. Mizushima et al., Nucl. Instr. and Meth. A 606 (2009) 325.
- [8] Y. Iwata et al., Nucl. Instr. and Meth. A 624 (2010) 33.