

DEVELOPMENT OF BEAM EXTRACTION CONTROL SYSTEM FOR MEDICAL SYNCHROTRON

Hideaki Nishiuchi^{1A)}, Kazuyoshi Saito^{A)}, Masahiro Tadokoro^{B)},
Futaro Ebina^{A)}, Takamichi Aoki^{A)},
Takeji Sakae^{C)} and Toshiyuki Terunuma^{C)}

^{A)}Energy and Environmental Systems Laboratory, Hitachi Ltd.

7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1221

^{B)}Hitachi Works, Power Systems, Hitachi Ltd.

3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 317-8511

^{C)}Proton Medical Research Center, University of Tsukuba

1-1-1 Tenou-cho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8575

Abstract

Reflecting recent widespread use of particle beam therapy system, customers operating hospital-based facilities strongly request a beam scanning irradiation system dispensing with patient-specific devices and a beam scattering irradiation system with a high-dose-rate. We have developed a beam extraction control system suitable to these irradiation systems. Two kinds of technologies have been developed. The one is an extraction-beam current feedback control technique to achieve a sophisticated beam scanning irradiation system. The other one is the control technique named Dynamic Spill-gain Control (DSC) which performs adaptive control of targeted value of extraction-beam current in order to improve availability efficiency of circulating beam stored in the synchrotron with keeping a desired extraction-beam waveform stably. We carried out a series of beam tests in the University of Tsukuba Proton Medical Research Center. Experimental results show that the deviation of time-average beam current within $\pm 5\%$ was successfully achieved by the feedback control. In addition, by adaptive control of the extraction-beam current with DSC, the availability efficiency of the stored beam of higher than 85% was stably realized even when intensity variations occurred in the stored beam due to injection-beam current fluctuations.

医療用シンクロトロン向けビーム出射制御システムの開発

1. はじめに

粒子線治療の普及に伴い、患者毎の治療補助具が不要なスキヤニング照射法の開発や、散乱体照射法での高線量率化が求められている。スキヤニング照射法には、米国MDアンダーソン病院に適用されたディスクリット・スポットスキヤニング照射法^[1]や、各国の研究機関で開発が進められているラスタースキヤニング照射法^{[2][3][4]}が挙げられる。また、従来から広く利用されている散乱体照射法での高線量率化を実現するには、照射装置にビームを供給する加速器システムとして、蓄積ビーム強度の増加^{[5][6]}と蓄積ビームの利用効率の向上が求められている。

これらの照射法に好適な医療用シンクロトロン向けビーム出射制御システムを開発した。スキヤニング照射法で求められている出射ビーム強度の制御を実現するため、出射ビーム強度フィードバック制御法を開発した。また、散乱体照射法で求められている蓄積ビームの利用効率を向上しか

つ、出射ビームを安定に出力するため、蓄積ビーム強度に応じて出射ビーム強度フィードバック制御時の目標値を制御するDSC (Dynamic Spill-gain Control) 法を開発した。

以下に、各照射法で求められる出射ビーム制御法を整理し、開発したビーム出射制御システムを説明した後、筑波大学陽子線医学利用研究センターで実施したビーム試験結果について示す。

2. 各照射法で求められるビーム出射制御

2.1 スキヤニング照射法

スキヤニング照射法は大きく分けて、ディスクリット・スポットスキヤニング照射法とラスタースキヤニング照射法に分けられる。

ディスクリット・スポットスキヤニング照射法は、照射領域を小さなスポットに分割し、各スポットに対して照射線量を管理しながらビームを照射する。所定のスポット線量に到達後、ビーム照射を停止し、次の照射スポットにビーム位置を

¹ E-mail: hideaki.nishiuchi.un@hitachi.com

移動する。ディスクリット・スポットスキヤニング照射法では、照射した線量が照射スポットの目標線量に到達した際、出射ビームを高速に停止することで、ビーム停止以降に生ずる照射線量（以下、遅延線量）を抑える必要がある。また、この遅延線量の大きさは、出射ビーム強度に応じて変化するため、出射ビーム強度を一定に制御することで遅延線量の管理も容易になり、線量分布の制御を高精度化できる。

ラスタースキヤニング照射法では、ディスクリット・スポットスキヤニング照射法と異なり、照射領域を小さな領域に分けるが、各領域に応じて出射ビームの照射・停止制御を実施せず、ビームを出射しながら走査する。そのため、線量分布の一樣度を実現するには、出射制御中のビーム強度の時間変動を抑制する必要がある。そのため、ラスタースキヤニング照射法の開発においては、出射ビームの強度制御が重要となる。

2.2 RMWを用いた散乱体照射法

RMW (Range Modulation Wheel) を用いた散乱体照射装置は、従来の飛程変調装置であるリッジフィルタの変わりにRMWを用いている。従来法と異なる点は、線量分布を形成する際、SOBP幅の調整をRMWの回転周期構造に合わせた出射ビームのゲート制御で実現する点である。図2-1にRMWの構造とRMW適用時の出射ビーム制御の概要を示す。

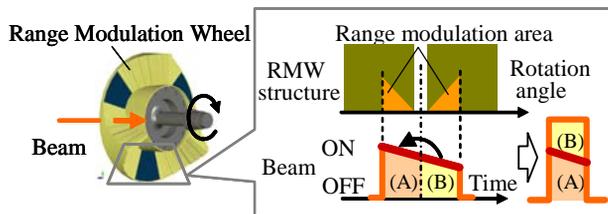


図2-1 RMWの構造とRMW適用時の出射ビーム制御の概要

RMWを用いた散乱体照射法で所定のSOBP幅の線量分布を形成するには、ビームが通過するRMW構造体の厚みを変えることで、ビーム飛程を制御する。そのため、出射ビームのゲート幅を調整することで、ビームが通過するRMWの厚みを制御する。

RMWを適用する効果として、(1)リッジフィルタよりも大きな構造体にてできるため、広いSOBP幅の照射野を形成できる(2)出射ビームのゲート幅を調整することで、一つのRMWで複数のSOBP幅の線量分布を形成できる、等が挙げられる。

RMWは回転周期構造体であるため、RMWを通過するビーム強度は、回転周期構造体を繰り返して

通過することで平均化の効果がある。さらに、RMWの飛程変調構造部の谷を折り返し点として出射ビームのゲート幅調整をするため、線量分布を形成するビームは、折り返し点の重ね合わせとなる（図2-1の(A)部と(B)部の重ね合わせ）。このような特徴から、出射ビーム強度の時間変化は線形的に変化すれば良く、出射初期に大きく、出射後期に小さくすることで、蓄積ビームの利用効率を向上できる。

RMWを用いた散乱体照射法で高線量率化を実現するには、ウォブラー照射法と同様に、シンクロトロン内の蓄積ビームを効率良く利用すると同時に、出射ビーム強度の時間変動を小さくする必要がある。また、RMWを用いた散乱体照射法では、出射ビームのゲート制御が求められるため、出射制御時間に対する実効的なビーム出射時間（以下、Duty比）が短くなり、蓄積ビームの残存が生じてしまう。そのため、出射ビームのDuty比に応じて出射ビーム強度を制御する必要がある。

3. ビーム出射制御システム

ビーム出射制御システムの概要を説明する。シンクロトロンで加速・蓄積されたビームは高周波ビーム出射法^[7]により出射する。拡散共鳴出射法では、出射用高周波電圧の振幅値制御により、出射ビームの強度制御およびビームON/OFF制御が容易に実現できる。図3-1にビーム出射制御システムのブロックダイアグラムを示す。

出射用電極に印加する高周波電圧の制御方法について説明する。まず、出射ビームエネルギーに基づき設定される中心周波数を有する高周波信号と、線スペクトルで構成される帯域制限高周波信号を乗算し、低電力高周波信号を生成する。この高周波信号に対して、フィードフォワード制御用の振幅変調信号とフィードバック制御回路で演算されたフィードバック補正信号との加算結果に基づき振幅変調制御を実施する。

フィードフォワード制御用振幅変調データは、フィードバック制御を実施した際に出力されるフィードバック補正信号を外部に出力しサンプルすることで得られる。この機能により、フィードフォワード制御用振幅変調データを容易に得ることが可能である。

振幅変調された高周波信号は、ビーム出射制御用およびインターロック制御用の高周波スイッチを経由し、電力増幅器で増幅した後、出射用電極に印加する。高周波スイッチは、タイミングシステムより出力される出射制御信号と、照射制御システムから出力されるビームON/OFF信号やビー

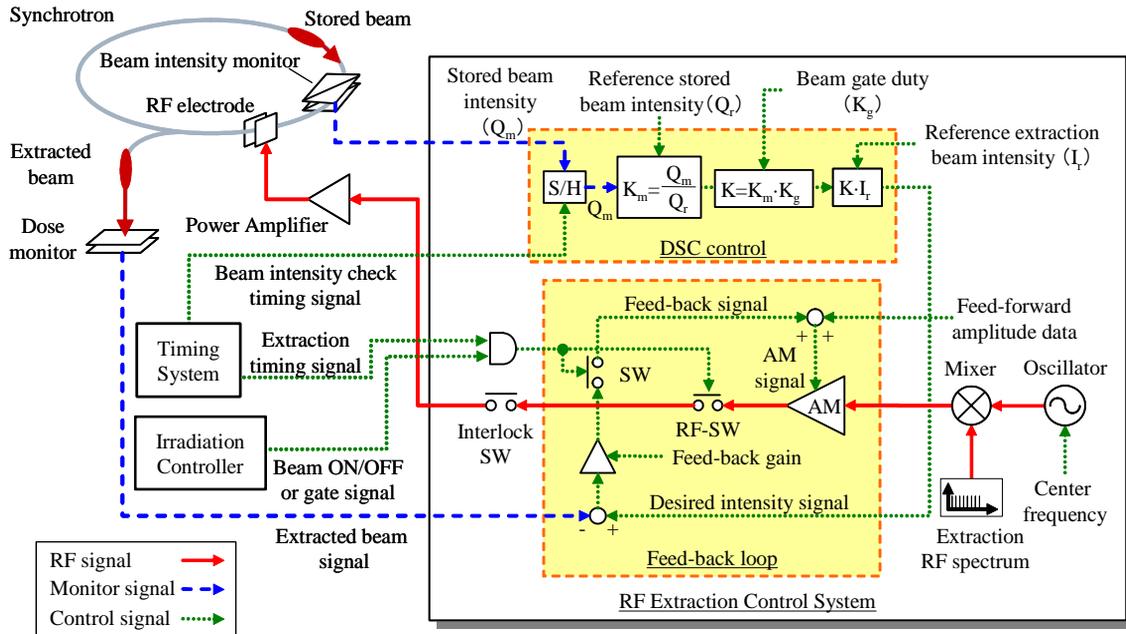


図3-1 ビーム出射制御システムのブロックダイアグラム

ムゲート信号に基づき制御する。

シンクロトロンから出射されたビームは、照射装置に輸送され、照射装置内に設置したビーム強度モニタで出射ビーム強度の時間変化を測定する。この測定結果をビーム出射制御システムのフィードバック制御回路に入力する。

3.1 出射ビーム強度フィードバック制御法

今回開発したフィードバック制御法では、出射制御装置から設定する出射ビーム強度の目標値と、照射装置内に設けてある出射ビーム強度モニタの出力値の偏差量に基づき補正量を演算し、出射用高周波電圧の振幅制御値に対してフィードバック演算することで、所望の出射ビーム強度波形を実現する。

出射ビーム強度フィードバック制御のブロックダイアグラムを図3-2に示す。ビームの伝達関数は、周回ビームが出射用高周波電圧とシンクロトロン振動の効果でセパトリックス近傍まで拡散する際の時定数に対応する一次遅れ要素と、周回ビームがセパトリックス外に拡散されて出射され、出射ビームが照射装置内のビーム強度モニタに到達するまでの遅延時間に対応する単純遅れ要素で表せる。フィードバックループの設計にあたり、照射装置のビーム仕様値から、立ち上がり時間を1ms以下、出射ビーム強度の目標値と実現値の平均偏差を±5%以内の仕様値に定めた。フィードバックループを高い利得で安定に動作させるため、ビーム伝達関数を予め筑波大学との共同研究試験にて測定し、測定結果に基づいて補償回路を設計

した。シンクロトロンの運転条件として、出射ビーム波形に生ずる数kHzのリップル成分の低減と出射ビームのON/OFF時間の短縮を考慮して、シンクロトロン振動数が1-2kHzとなる運転条件を選定した。この運転条件でのビーム伝達関数の測定結果は、一次遅れによる立ち上がり時間が0.5-1.0ms、単純遅れ時間が0.1msであった。

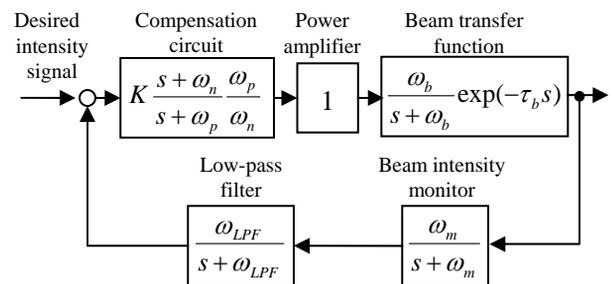


図3-2 出射ビーム強度フィードバック制御のブロックダイアグラム

3.2 Dynamic Spill-gain Control法

出射ビーム強度フィードバック制御を実施する際、出射ビーム強度の目標値はシンクロトロンに蓄積されたビーム強度の平均値に基づき設定する。一方、シンクロトロン内の蓄積ビーム強度は、前段加速器からの入射ビーム電流に伴い変動が生じてしまう。そこで、出射ビーム強度フィードバック制御時のビーム強度目標値を蓄積ビーム強度に基づき補正するDynamic Spill-gain Control法（以下、DSC法）を考案した。図3-1を用いて説明す

る。

まず、シンクロトロン内の蓄積ビーム強度の基準値 (Q_r) を設定する。また、RMWを用いた散乱体照射法の場合はDuty比 (K_g) を設定する。シンクロトロンでのビーム加速制御が終了後、セパトリクス形成等の出射準備制御を実施する。この出射準備制御が完了した時点でシンクロトロン内の蓄積ビーム強度 (Q_m) を測定する。蓄積ビーム強度の基準値に対する上記の測定結果の比率 ($K_m=Q_m/Q_r$) を演算し、これにDuty比を乗じた後 ($K=K_m \cdot K_g$)、これらの演算結果を出射ビーム強度フィードバック制御時の目標値に乘じる ($K \cdot I_r$)。この演算結果を出射ビーム強度フィードバック制御時の目標値として設定する。この目標値に基づき出射ビーム強度フィードバック制御を実施することで、蓄積ビーム強度の利用効率を高め、安定な出射ビーム制御を実現する。

4. ビーム試験結果

開発したビーム出射制御システムによる実ビーム試験を筑波大学陽子線医学利用研究センターとの共同研究にて実施した。以下に試験結果を示す。

4.1 出射ビーム強度フィードバック制御試験

出射ビーム強度フィードバック制御の試験条件を表4-1に示す。

表4-1フィードバック制御の試験条件

Energy of H ⁺	250, 200, 155, 105 MeV
Beam intensity	12-15 nC
Horizontal tune	1.6832
RF spectrum band-width (Tune conversed)	1.6730-1.6825
RF spectrum division	1 kHz
Extraction time	500ms

ビームエネルギーは250MeV-105MeVの間の4種類で実施し、蓄積ビーム強度は12nC-15nCで実施した。出射制御時間はRMWを用いた散乱体照射法を想定した500msで実施した。

まず、ビーム応答性を評価するため、ラスタースキャン照射法を想定した平坦な目標波形での試験結果を図4-1に示す。本稿で示す測定結果は、200MeVのビームエネルギーを代表測定例として示す。

フィードバック制御時の目標電流に対する平均出射電流の偏差を評価した結果、±5%以内を達成できており、フィードバック制御が有効に機能していることが確認できた。また、フィードバック制御時の応答性は、ビームON制御からの遅延

時間は0.15ms、立ち上がり時間は0.5msであった。即ち、遅延時間と立ち上がり時間の合計が設計値1ms以下を満足していることを確認できた。

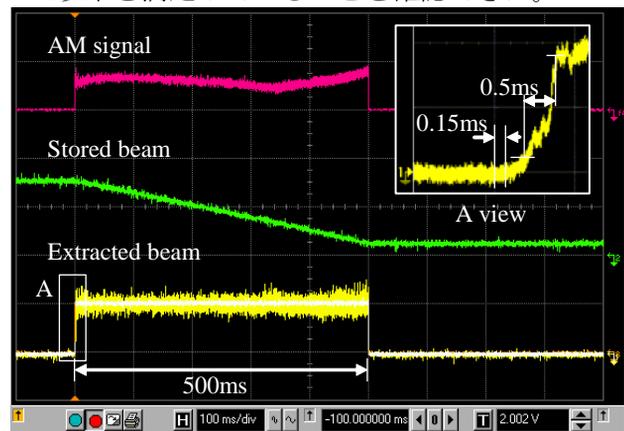


図4-1 ビーム応答性の評価試験結果

次に、RMWを用いた散乱体照射法を想定した試験結果を図4-2に示す。

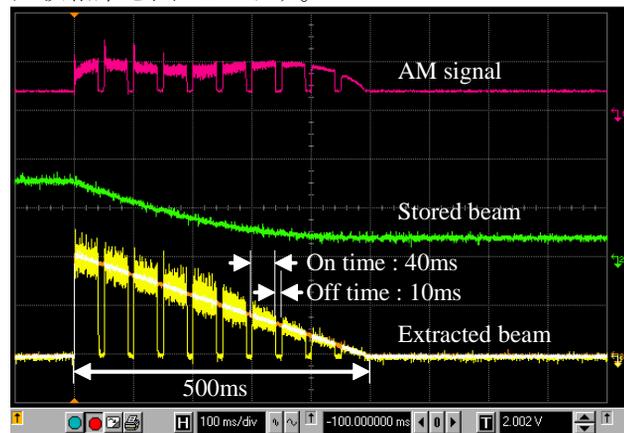


図4-2 RMWを用いた散乱体照射法を想定した試験結果

RMWを用いた散乱体照射法では、ビームのゲート制御の動作が分かりやすいDuty比：80%（SOBP幅：80mm相当）で実施し、出射ビーム強度の目標波形は出射初期に高くし、出射制御の進行に従い低くする線形減少とした。出射制御終了時の蓄積ビーム強度の残存量は、目標波形を線形減少とすることで、Duty比が80%とした場合でも、図4-1のように平坦でかつゲート制御無しの場合と同程度まで低くできることを確認した。

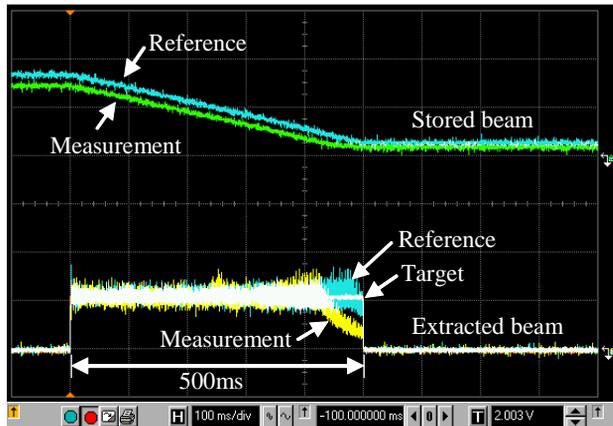
以上に示した結果は、他のビームエネルギーでも同様に制御可能であることを確認済みであり、出射ビーム強度フィードバック制御の適切な動作を確認できた。

4.2 DSC試験

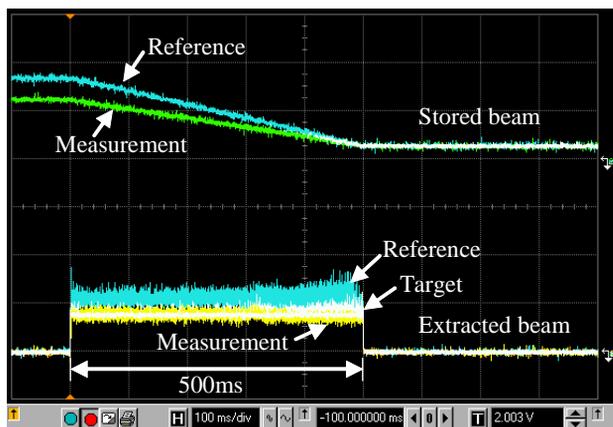
DSC試験の試験条件は、試験エネルギーを

200MeV、蓄積ビーム強度は基準強度を12nCで評価した。本稿では、DSC法の効果を分かりやすくするため、Duty比を1.0（ゲート制御なし）とし、蓄積ビーム強度が基準から減少した場合について示す。

試験結果を図4-3に示す。基準とした蓄積ビーム強度と目標波形から蓄積ビーム強度を変化させ、DSC法が(a)無効の場合と(b)有効の場合の結果を示す。



(a) DSC法が無効の場合



(b) DSC法が有効の場合

図4-3 DSC法の試験結果

まず、基準強度において蓄積ビームの利用効率が85%以上を達成できる目標波形を設定した。この状態で蓄積ビーム強度が基準強度よりも低くなった場合でDSC法の有無による出射ビーム波形の変化を比較する。DSC法が無効の際には出射制御の後半で蓄積ビームの枯渇が生じ、出射ビーム波形が欠けてしまうが、DSC法を有効とすることで、蓄積ビーム強度が減少しても目標波形の強度の補正により、出射ビーム波形に欠けが生じずに制御できることを確認し、DSC法の実証に成功した。

以上の結果より、出射ビーム強度フィードバ

ック制御とDSC法を適用することで、シンクロトロンに蓄積したビームの利用効率が85%以上を達成可能な目標波形の調整を実現し、蓄積ビーム強度が変化した場合でもビーム波形の形状を維持できることを確認した。

5. まとめ

現在の粒子線治療システムで求められているスキヤニング照射法や散乱体照射法に好適なビーム出射制御システムを開発した。出射ビーム強度フィードバック制御を開発し、目標電流に対する平均出射電流の偏差±5%以内を達成した。また、蓄積ビーム強度の変化に伴い出射ビーム強度フィードバック制御時の目標値を補正するDSC法を考案し、本手法の実証に成功した。出射ビーム強度フィードバック制御とDSC法の適用により、蓄積ビーム強度が変化した場合でも、ビーム波形の形状を維持できることを確認し、シンクロトロンに蓄積したビームの利用効率85%以上を達成可能な目標波形の調整を実現した。

参考文献

- [1] H. Nihongi et al., “The Accelerator and Irradiation Field Formation of the MDACC Proton Therapy Center”, Proc. of the 10th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, Jun. 12-13, 2008, pp65-68.
- [2] K. Noda, “Overview of NIRS Accelerator Activity”, Workshop on Hadron Beam Therapy, Erice, Italy, Apr.27, 2009.
- [3] T. Furukawa et al., Nucl. Instr. and Meth. A 522 (2004) 196.
- [4] T. Haberer, “The Heidelberg Ion Therapy Center”, Workshop on Hadron Beam Therapy, Erice, Italy, Apr.27, 2009.
- [5] H. Nishiuchi et al., “Multi-Harmonic RF Acceleration system for Ion Synchrotron”, Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug.4-6, 2004 pp.507-509.
- [6] K. Saito et al., Proceedings of EPAC 2008, Genoa, Italy, 2008, pp. 1827-1829.
- [7] K. Hiramoto et al., Nucl. Instr. and Meth. A 322 (1992) 157.