

DEVELOPMENT OF INTENSITY MODULATED EXTRACTION SYSTEM IN HIMAC SYNCHROTRON

Shinji Sato¹, Takuji Furukawa, Koji Noda
National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, Japan, 263-8555

Abstract

At HIMAC Synchrotron, we have developed a dynamic intensity control system toward spot scanning irradiation. In this system, the spill structure is controlled dynamically by controlling the amplitude modulation of the RF-knockout. In this paper, generation of amplitude modulation waveform for intensity control, the system for controlling amplitude modulation and experimental result are described.

HIMACシンクロトロンにおける取り出しビーム強度変調システムの開発

1. はじめに

HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)では、治療照射の高精度化のために、小さな照射領域を3次元的に走査しながら腫瘍のみに選択的に照射するスポットスキャン照射法の開発を行っている[1]。この照射法では、各スポットの照射位置及び照射線量を高精度に制御を行う必要がある。このため取り出しビームには、スピルの平坦化や高速ON/OFF、スポットごとの強度変更が求められている。今回、我々は取り出されるビームの強度をダイナミックに変更するシステムを構築し、スポットスキャンを模擬したビーム試験を行った。

2. RF-KOビーム取り出しによる強度変調

HIMACでは、高速にビームをON/OFFできるRF-knockoutビーム取り出し法(RF-KO)を用いてビーム取り出しを行っている。RF-KOは、横方向に周波数及び振幅変調されたRF電圧を印加しエミッタンスを増大させることで、ビームを取り出す[2]。このとき印加するRF電圧によるビーム拡散を考慮した取り出し過程をモデル化し、これに基づく振幅変調関数を決め振幅変調パターンを最適化することにより、取り出しビームスピルの全体構造を制御することができる[3]。この振幅変調関数と、任意のビーム強度要求から、振幅変調パターンを生成し、これを印加することで、任意の取り出し強度を得る。

3. 強度変調AMパターン

強度変調のためのAMパターンは、平坦に取り出すパターンを基本とする。強度の異なる平坦に取り出すパターンは、1/2の強度であれば取り出し時間を2倍にする。求めたパターンを図1に示す。ここでは、1.6秒でリング内のビームを全て取り出すパターンの強度を1としたときの、0.4、0.6、0.8の強度

のパターンを示す。

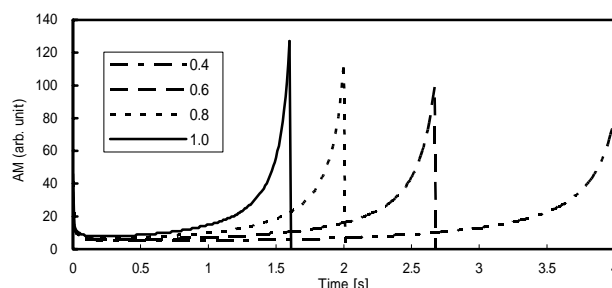


図1 強度ごとの平坦に取り出すAMパターン

強度要求に応じてパターンを切り替えたときは、切り替え前後でリング内のビーム拡散状態が等しくなるようにする必要がある。2段階の強度変調AMパターンの例を図2に示す。強度要求が T_1 で変わった時、それまでに取り出された量を S_1 とすると、次の強度で S_1 だけ取り出された点 T_2 が拡散状態の等しい点となる。次の切り替えでは、 S_1+S_2 が取り出された点 T_4 が、 T_3 と拡散状態の等しい点となる。このようにして複数のパターンを繋ぎ出力パターンを得る。

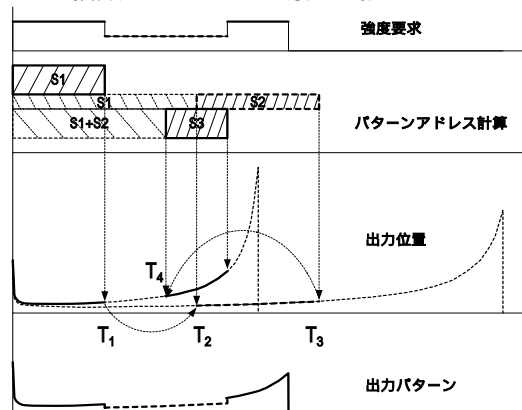


図2 強度変調AMパターンの生成

¹ E-mail: shin_s@nirs.go.jp

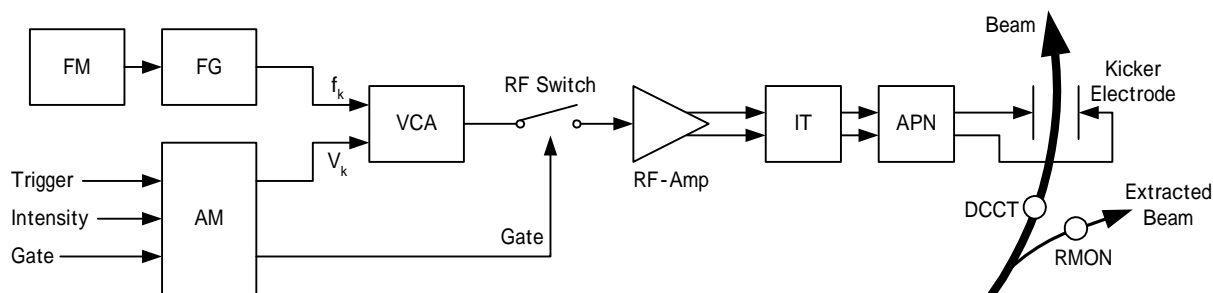


図3 RF-KOシステム構成

4. 強度変調RF-KOシステム

システム構成を図3に示す。ファンクションジェネレータ(FG)でFM変調されたRF信号と、AMパターン生成器(AM)で生成したAMパターンを電圧制御増幅器(VCA)に入力し、振幅変調されたRF信号を得る。RFアンプで増幅した後インピーダンス整合器(IT)、広帯域通過回路(APN)を経てキッカー電極に印加する。周回ビーム強度はDCCTで、取り出されたビームはリップルモニタ(RMON)でモニターされる。

AMパターン生成器は、シンクロトロンマスタートリガ信号(Trigger)、要求強度信号(Intensity)、取り出しゲート信号(Gate)を入力として、AMパターンの演算、RFスイッチのゲート信号を生成し出力する。生成器には16個のAMパターンを持たせており、16段階の取り出し強度が得られる。取り出しビーム量は、要求強度信号を積算することで求めている。取り出しビーム量から、対応する強度パターンのアドレスを計算し、AM出力値を得てD/Aコンバータよりパターン電圧出力を行う。これらの処理を、シングルチップマイクロコンピュータ(RENESAS製H8/3052B)で行っている。ハードウェアは、DIO、A/D、D/Aコンバータ、タイマ、カウンタが全てマイコンに内蔵されているため、D/Aコンバータ出力にバッファアンプを付けたシンプルなものとなっている。ソフトウェアは、全ての処理を10 kHzのタイマに同期して行うように製作した。製作したAMパターン生成器を図4に示す。

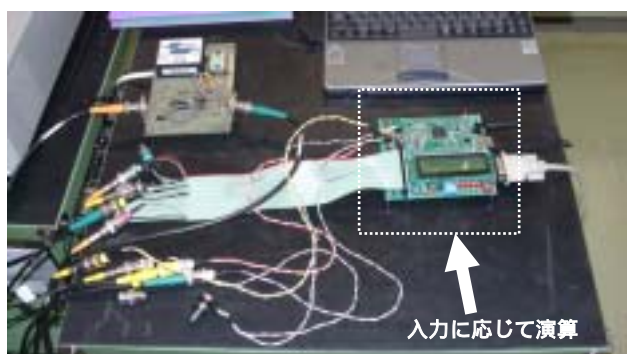


図4 製作したAMパターン生成器

5. ビーム試験

システムの動作確認のために、 C^{6+} , 400 MeV/n ビームの取り出し試験を行った。フラットトップ中の取り出し時間は1.6秒である。

スポットスキャン照射を模擬した取り出しを行った結果を図5, 6に示す。各図の波形は、上から周回ビーム強度(DCCT)、強度要求信号、AM変調波形、取り出されたビームスビル(RMON)である。図5は、取り出し期間内に3段階の強度で平坦な取り出しを行っている。図6では、図5の強度要求信号とゲート信号により、各強度での取り出しのON/OFFを行い、スポットスキャン照射時の取り出しを模擬している。ビームの平坦な取り出し、高速ON/OFF、強度変更を行うことが出来ている。

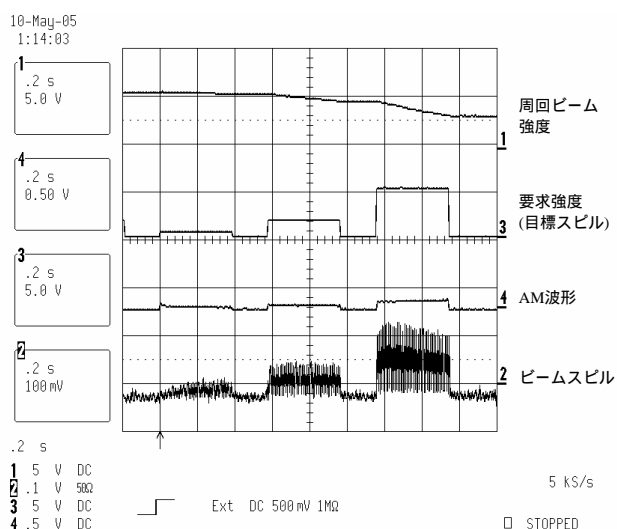


図5 3段階に強度変更

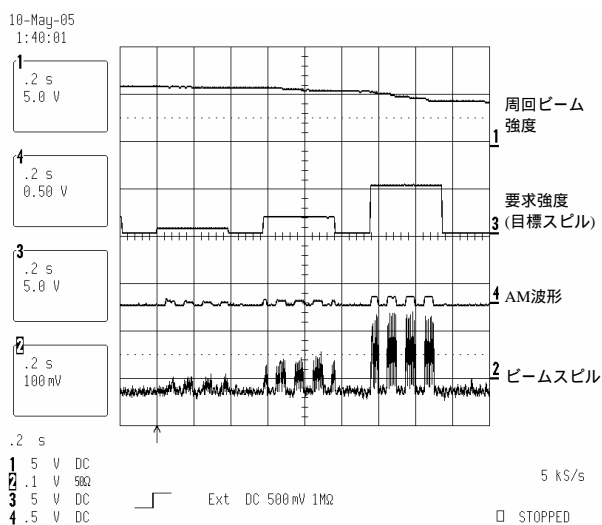
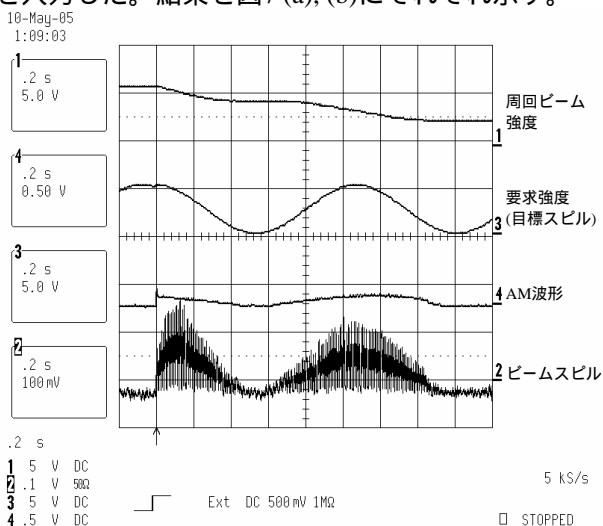
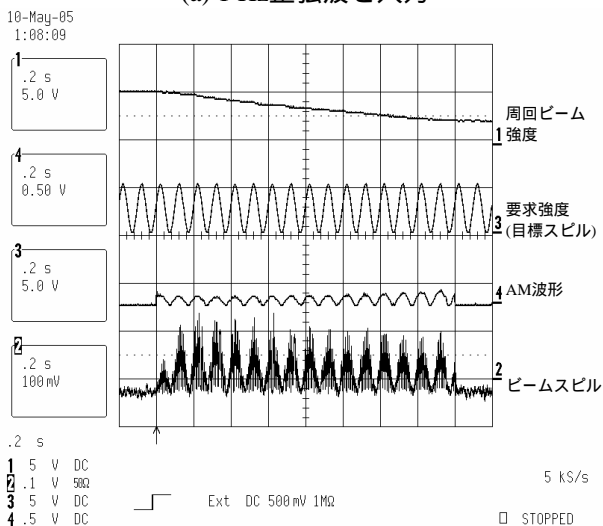


図6 スポットスキャン照射を模擬

次に、全体のスピル制御性が得られているかを試験するため、要求強度信号に1 Hz、10 Hzの正弦波を入力した。結果を図7 (a), (b)にそれぞれ示す。



(a) 1 Hz正弦波を入力



(b) 10 Hz正弦波を入力

図7 周波数を変えた正弦波の強度要求

いずれも、入力した強度要求に応じたスピル波形が得られており、スピルの全体構造を制御できている。

さらに、要求強度信号に鋸波を入力した結果を図8に示す。目標とした鋸波状のビームスピル波形を実現出来ている。

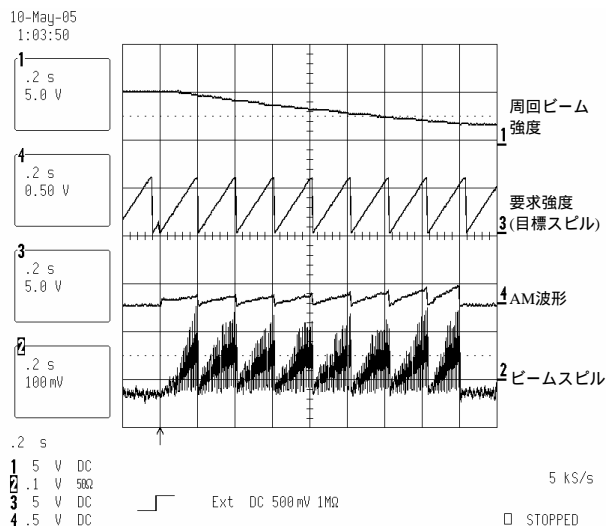


図8 強度信号として鋸波を入力

6. まとめ

スポットスキャン照射の線量制御の高精度化のために、強度変調を行うシステムを製作した。RF-KO電圧の振幅変調パターンを動的に生成することで、ダイナミックに強度変調を行うことができた。スポットスキャン照射を模擬したビーム取り出し試験を行い、ビームの平坦な取り出し、高速on/off、強度変更を行うことが出来た。この結果は、照射線量制御の向上に寄与できるものと考えられる。今後は、取り出しビーム波形をAMパターンにフィードバックすることで、取り出しビーム強度の制御性を向上させる予定である。

参考文献

- [1] E. Urakabe et al., Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 2540.
- [2] K. Noda et al., Nucl. Instr. and Meth. A374 (1996) 269.
- [3] T. Furukawa et al., Nucl. Instr. and Meth. A522 (2004) 196