

INTENSITY CONTROL METHOD IN RF-KNOCKOUT SLOW EXTRACTION

T. Furukawa^{1,A),B)}, K. Noda^{A)}, T.H. Uesugi^{B)}, T. Naruse^{C)}, S. Shibuya^{D)}, T. Fujimoto^{D)},
M. Kanazawa^{A)}, E. Takada^{A)} and S. Yamada^{A)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

^{B)} Graduate School of Science and Technology, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522

^{C)} Graduate School of Engineering, Seikei University
3-3-1 Kichijojikitamachi, Musashino-shi, Tokyo, 180-0001

^{D)} Accelerator Engineering Corporation
2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba, 263-0043

Abstract

Scanning irradiation method has been developed in order to realize 3-D conformal irradiation. From the studies of scanning method, it has been required for a medical synchrotron to be capable of controlling the beam intensity during a single flattop. The beam intensity control technique with the RF-knockout slow-extraction has been studied and developed at the HIMAC synchrotron for this purpose. Based on the analytical approach, the scheme to control the beam intensity by changing the amplitude of the transverse RF-field has been proposed. Preliminary test result of intensity control at the HIMAC synchrotron is reported in this paper.

RF-knockout取り出しにおける強度変調法の開発

1. はじめに

1993年にがん治療用重粒子線加速器として作られた放射線医学総合研究所のHIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) [1]では、1994年から臨床実験が始まり、現在までに1800名以上の患者の治療が行われてきた。重粒子線によるがん治療は、ブラッグピークの存在による照射線量の患部への集中が可能という特徴を持つ。この重粒子線の利点を最大限に生かすことが出来る画期的な方法として、三次元コンフォーマル照射を目指す走査型照射野形成法が考案され、この開発が国内外で盛んになっている[2-4]。

この走査型照射野形成法では、高い照射位置精度と共に緻密な線量管理が極めて重要な役割を果たすため、シンクロトロンからの取り出しビームには高度な制御が強く望まれてきた。具体的には、ビーム・リップルを±20%以内に低減するだけでなく、スピルの全体的な時間構造を平坦(矩形)にし、擬似直流ビームを実現することが要求される。また、走査型照射野形成における強度変調に対応するために、取り出し期間中においてもビーム強度を高速に変調(ダイナミックレンジ10倍程度)することが望まれている。これらの要求に答えるために、HIMACではRF-knockout遅い取り出し法の開発を行ってきた[5-8]。

時間構造をコントロールするために、位相空間上の粒子分布を1次元化し、解析的に高周波電場の振幅変調(AM)用の関数を決定できるようにモデル化した。このモデルを用いることにより、時間構造の平坦化、および強度の変調を行った。シミュレーション、およびHIMACでの実験結果を報告する。

2. RF-knockout取り出しの1次元モデル

1次元モデルを用いることによって、任意のスパル波形を得るためのAM用関数を、解析的に求めることが可能になる。図1に示すように、正規化位相空間における粒子分布がガウス分布しているとすると、動径方向の分布はレイリー分布として取り扱うことができる[9]。RF-knockoutによる拡散の後も動径方向の粒子分布がレイリー分布に従うと仮定すると、周回当たりの取り出し個数は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} \frac{dN_{ext}}{dn} &= \frac{d}{dn} \left[\int_{r_0}^{\infty} N_0 \cdot p(r) dr \right] \\ &= N_0 \frac{d\sigma^2(n)}{dn} \cdot \frac{r_0^2}{\sigma^4(n)} \cdot \exp \left[-\frac{r_0^2}{\sigma^2(n)} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

¹ E-mail: t_furu@nirs.go.jp

ここで、 σ はレイリー分布の標準偏差、 N_0 は取り出し前の周回強度、 r_0 はセパトリティクスと面積の等しい円の半径を表す。ここで、RF-knockoutによる拡散において、

$$d\sigma^2 = k\theta(n)dn \quad (2)$$

なる関係が成り立つ。 θ は高周波電場による偏向角、 k は拡散に関する係数を表す。これらの関係式を用いることによって、任意の時間構造できるAM用関数を解析的に求めることができる。ただし、拡散に関する係数を表す k は、帯域幅等に依存するために、シミュレーション、もしくは実験によって決める必要がある。本研究では、高周波電場の振幅変調しない場合のスピル構造の実験結果を解析することによってこの値を決定した[10]。

うに決めた。シミュレーションは、この予め決めておいたAM用関数を用いて行った。シミュレーション結果を図2に示す。

シミュレーションと同様のAM用関数を用いて行った実験結果を図3に示す。実験では、kHzオーダーのリップルを低減するために、単一周波数をセパトリティクス近傍のチューンに合わせて印加するSeparate function法[7]を用いている。これにより、kHzオーダーのリップルは $\pm 20\%$ 程度に低減されている。全体のスピル波形はシミュレーション結果と非常に良く一致している。その一方で、スピル後半においてスピル波形がモデル計算による目標値から大きくずれていることがわかる。このことは、シミュレーションと実験の双方に共通している。これは、急激にRF-knockoutの電圧を上げた事により、粒子分布がレイリー分布からずれてしまうことに起因していると考えている。

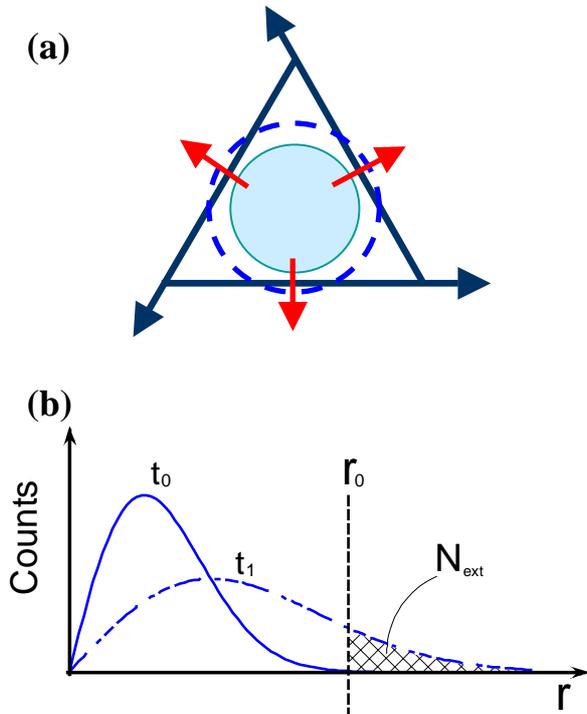


図1：(a) 正規化位相空間上におけるRF-knockout取り出しの模式図、および、(b) これを動径方向粒子分布に書き直したもの。

3. シミュレーションと実験結果

上述のモデルを用いて強度制御のテストを行った。シミュレーション、および、実験のパラメータを表1にまとめる。AM用関数の計算に用いるビームの初期エミッタンスは、非破壊型プロファイルモニター[11]による測定から $20 [\pi \text{ mm mrad}]$ と推定した。AM用関数は、400ms毎に取り出しビーム強度が3倍になり、最終的に全ての周回ビームを取り出すよ

表1：シミュレーションと実験のパラメーター

Energy of C^{6+}	400.0 MeV/u
Tune (Q_x/Q_y)	3.687/3.130
Horizontal chromaticity	-3
Revolution frequency	1.653 MHz
Frequency of RF kicker	1.126 MHz
Full bandwidth of FM	18 kHz
Repetition frequency of FM	977.5 Hz
Max. Kick angle of RF kicker	4.0 μrad

Field strength of sextupole field	
K_2 (SXFr1/2)	1.644 m^{-3}
K_2 (SXDr1/2)	1.978 m^{-3}

$$K_2 = B''/B\rho$$

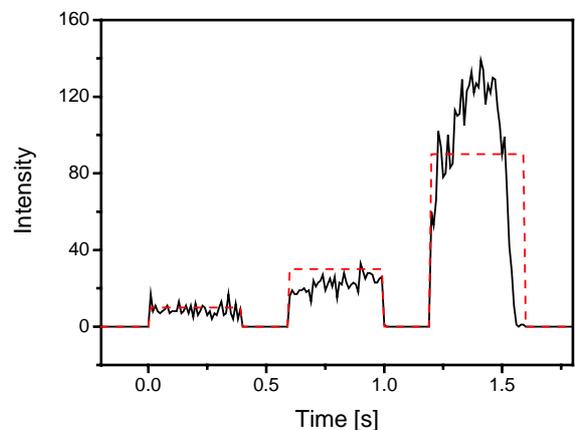


図2：強度変調のシミュレーション結果。点線はモデル計算による目標値。

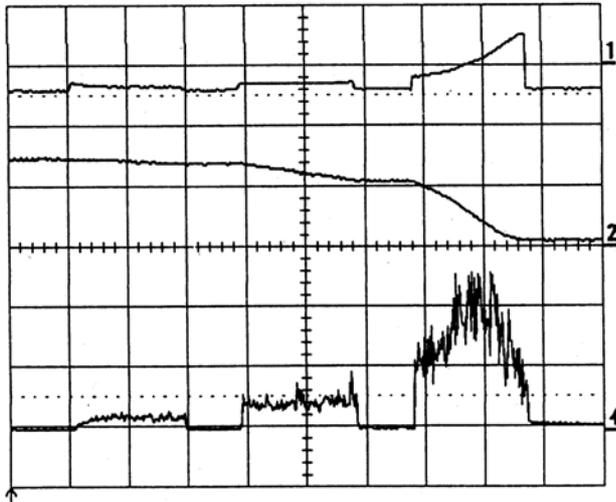


図3：実験結果 (200ms/div)。上から、AM用信号、
周回ビーム強度、取り出しビームスピル。

4．まとめと今後の課題

走査型照射野形成法のための強度変調法の開発を行った。簡略化した1次元モデルを用いてAM用関数を決めることにより、一回のフラットトップ内で一桁程度の強度変調が可能ながわかった。今後はフィードバックシステムとの連携、および、オンラインでの強度変調のためのシステムを開発する予定である。また、入射器チョッパーを用いて多重回転入射を制御することによって、入射エミッタンス

と強度を変化させる方法[12]と組み合わせることも検討している。

5．謝辞

本研究での加速器の運転に協力して頂いたAECの皆さんに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Noda et al, in these proceedings.
- [2] T.R. Renner et al, Proc. 1st Symp. on Hadrontherapy, (1993) 453.
- [3] Th. Haberer et al, Nucl. Instr. and Meth. A 330 (1993) 296.
- [4] E. Urakabe et al, Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 2540.
- [5] T. Furukawa et al, Nucl. Instr. and Meth. A 489 (2002) 59.
- [6] T. Furukawa et al, Nucl. Instr. and Meth. A 503 (2003) 485.
- [7] K. Noda et al, Nucl. Instr. and Meth. A 492 (2002) 253.
- [8] T. Furukawa et al, Proc. 8th EPAC, (2002) 2739.
- [9] P. Strolin, CERN 69-6, 1969.
- [10] T. Furukawa et al, Nucl. Instr. and Meth. A 522 (2004) 196.
- [11] T. Honma et al, Nucl. Instr. and Meth. A 490 (2002) 435.
- [12] S. Shibuya et al, Proc. 8th EPAC, (2002) 2757.