

Experimental Study of Beam Control by RF-knockout Slow-Extraction for Medical Synchrotron

Takuji Furukawa¹

National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

Abstract

Studies on scanning irradiation have indicated the requirements to a medical accelerator as follows; (1) time-structure control, (2) fast beam cut-off and (3) beam size control. In order to satisfy these requirements, the study on the RF-knockout extraction method with AM and FM has been carried out. As the results of simulations and experiments, it was found that the synchrotron oscillation contributes to the extraction process. Owing to this new finding, the accelerator technology has been developed in order to satisfy above requirements.

がん治療用シンクロトロンでのRF-KO遅いビーム取り出し法による ビーム制御に関する研究

1. はじめに

放射線医学総合研究所のHIMAC [1]で行われている重イオンがん治療法は、線量分布の高い集中性や高い生物学的効果によって、世界的にも注目されているがん治療法の一つである[2]。一方、粒子線がん治療では、さらに高い照射精度が求められており、複雑な形状の腫瘍のみを選択的に照射することができる走査型照射野形成法の開発・研究が世界的に盛んになっている[3,4]。走査型照射野形成法では、高い照射位置精度と共に、緻密な線量管理が重要な役割を持つために治療用シンクロトロンには、次のようなビーム制御が求められてきた；1) スピル・リップルの制御、2) ビーム遮断時間の短縮、3) ビームサイズの制御。この目的のために、RF-KO取り出し[5,6]によるビーム性状向上に関する研究を行った。RF-KO法では、ベータatron振動との共鳴条件を満たしたRF電場を印加する事によりビームを拡散させてセパトリクスからビームを取り出している。取り出し過程を調べた結果、縦方向の運動がクロマティシティを介して取り出しに寄与することがわかった。この結果に基づきビーム制御法を開発することにより、上述の要求を十分に満たすことが出来た。

具体的には、1) シンクロトロン振動が取り出し過程に寄与することを活かし、スピルの微細構造を平坦化した。また、ゆっくりとした成分についてはモデルを提案し、それにより決まる振幅変調を高周波電場に持たせることによって制御することが可能となった。2) 縦方向の運動を止めることによって、ビーム遮断時間を原理的限界である従来の十分の一以下にすることが出来た。3) これまで測定が困難であった、セパトリクス測定法を考案し、それを用いることによって高速ビームスイッチングの際に

生じるビームサイズの増大を防ぎ、またビームサイズのコントロールをも可能とした。本論文では、HIMACにおいて行ったこれらの研究について述べる。

2. スピル・リップルの低減

2.1 リップル構造と取り出し過程

まず、リップル構造と取り出し過程について述べる。HIMACでのRF-KO取り出しでは、チューンの振幅依存性に対応するために、RF-KO電場に周波数変調(FM)を施している[6]。この取り出し過程は、セパトリクス内部のビームをセパトリクス境界まで拡散する過程と境界から不安定領域に取り出す過程の二つから成ることが、リップル構造との関係からわかった[7,8]。RF-KO電場の周波数がセパトリクス近傍のチューンに対応した時に取り出されるビームが図1中のピーク(A)を形成する。また、周波数がセパトリクス内部のチューンに対応している時には、セパトリクス内部のビームを外側に拡散させる一方で、ビームは取り出されている。これは、セパトリクス近傍にいる粒子が、シンクロトロン振動によってチューンが共鳴に近づき、より小さなセパトリクスを見るために取り出されるからである。シンクロトロン振動によって取り出されるビームが図1中のピーク(B)を形成している。

このように、FM一周期でのスピル構造生成のメカニズムがわかると、RF-KO電場の中心周波数、帯域、クロマティシティを制御する事によりFM一周期のスピルを正弦波的な構造にすることができる。この時、FMの繰り返しの位相を180度ずらしたもう一組のRF-KO信号を導入し、元のRF-KOに加えてやると、原理的には、スピル構造はリップルが無くな

¹ E-mail: t_furu@nirs.go.jp

り直流ビームになる。この方法により、リップル強度を σ で70%から25%まで改善する事ができた[9]。

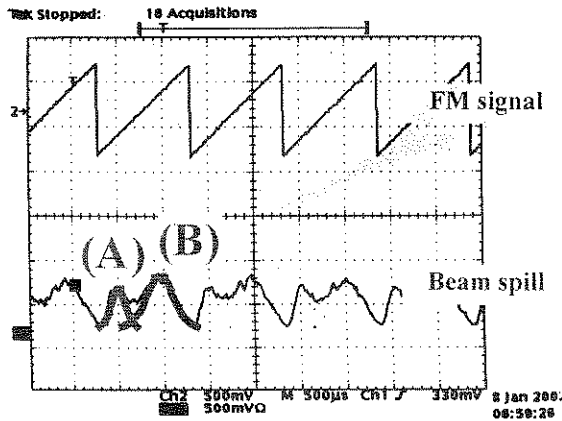


図1：RF-KO法でのスピル・リップル。FMによるRF-KO電場の時間変化とビームスピル。(A)は周波数がセパトリクス近傍のチューンに対応した時に取り出されるビーム、(B)はシンクロトロン振動で取り出されるビーム。0.5ms/div。

さらにリップルを低減するために、セパトリクス近傍のチューンに対応した単一周波数のRF-KO電場を印加する方法をテストした。この結果、図2に示すように、リップル強度を15%まで低減できた[9]。この時、印加する単一周波数RFの周波数は、ビートを避けるために、帯域を持たせた拡散のためのRF成分と離しておく必要がある。また、振幅に関しても取り出し速度を除去すべきリップル周波数に応じて制御する必要がある。

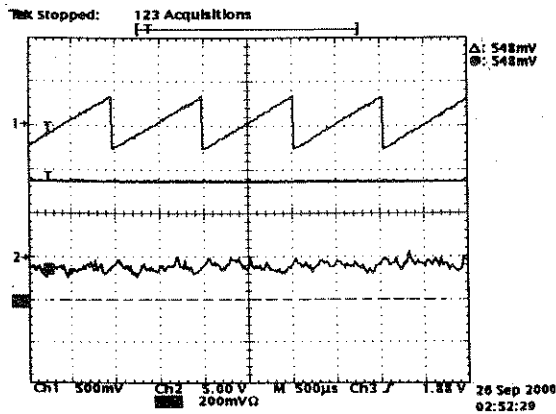


図2：ダブルRF-KO法に単一周波数のRF-KO電場を加えた場合のスピル構造。0.5ms/div。

2.2 ゆっくりとしたスピル構造の制御

ゆっくりとしたスピル構造を制御するために、位相空間上の粒子分布を1次元化し、RF-KO電場の振幅変調(AM)用の関数を解析的に決定できるようにモデル化した。このモデルでは、粒子はRF-KOによる拡散の後レイリー分布に従うとした。この結果得られたAM関数を用いることにより、ゆっくりとしたスピル構造を矩形に近くすることが出来た。

ずれば、20%程度であった。さらに、フィードバックを行うことによって、ずれば5%程度まで小さくなった[10]。この結果を図3に示す。

また、このモデルを用いたAM波形算出の演算を取り出し期間中に動的に行うことにより、スピル波形を正弦波や三角波など任意の波形にすることに成功している[11]。

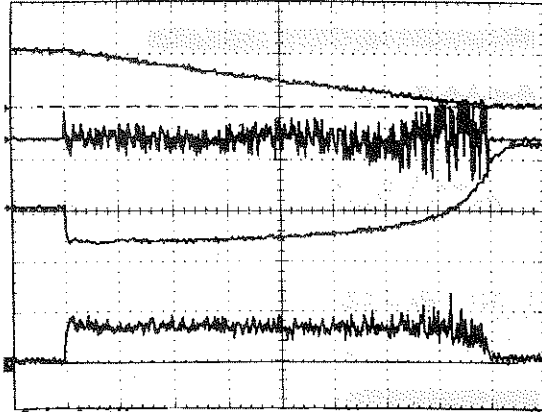


図3：平坦化されたスピル。上から、周回強度、RF-KO電場、AM波形、スピル。0.2s/div。

3. ビーム遮断時間の短縮

前節で述べた取り出し過程を考慮すると、高速ビーム遮断をおこなうためには、RF-KO電場の停止と同時に縦方向の高周波電場(加速空洞)も停止する必要があることがわかる。加速空洞を停止すると、パンチビームは即座にシンクロトロン振動を停止するので、シンクロトロン振動によってセパトリクスを飛び出することは出来なくなる。このことを、シミュレーションとHIMACにおける実験によって確認した。実験結果を図4に示す。シミュレーションと実験の結果は非常によく一致し、縦・水平両方向の高周波電場を同時に停止することにより、停止信号から60 μ s以内にビームを停止することができた[7]。この遅れは、セパトリクスを飛び出した粒子がリングを出るまでに要する解析解である約100ターンによく一致している。従って、この方法でビームを遮断したことにより、遅い取り出しにおいて物理的に決まっている限界を測定することが出来たといえる。また、RF-KO電場のみ停止した場合の停止時間は、最大でシンクロトロン振動の1周期である700 μ secになることがわかった。また、シミュレーションによって、RF-KO電場のみ停止した場合、停止信号以降に取り出される粒子が、シンクロトロン振動によってセパトリクスを飛び出した粒子であることを確認した。

一方、このようなビーム遮断を行うとビームはデパンチしてしまう。スピル・リップルを悪化させないために、次のビームONの時には再度RF捕獲しなければならない。これを繰り返すと縦方向のエミッ

タンス増大を招いてしまう。50回のON/OFFの後に、運動量幅が $\pm 0.4\%$ に増大してしまうが、ビームサイズが一定ならば線量分布に与える影響は小さい[12]。後に述べるビーム輸送系との整合を行った結果、運動量幅が $\pm 0.4\%$ に増大しても、輸送効率とビームサイズを一定に保つことが出来ることを確認した。

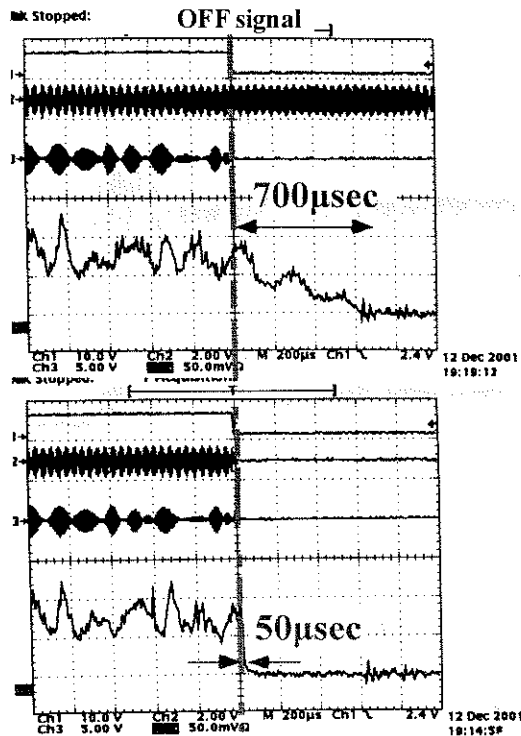


図4：ビーム遮断実験の結果。上図は、RF-KO電場のみ停止、下図はRF-KO電場と加速空洞を同時に停止した場合。0.5ms/div。

4. ビームサイズの制御

精密なビームサイズ制御を実現するためには、エミッタンスが非常に小さく、位相空間上でひも状の分布を持つ遅い取り出しビームがビーム輸送系と光学的に整合している必要がある。ビーム輸送系の計算開始点となる静電デフレクター入口での取り出しビームの光学的性状（初期条件）を決めるために、静電デフレクター前後に設置された2本のタンタル製ロッドを用いてセパトリクス足を測定した[13]。測定結果とシミュレーションの比較を図5に示す。この測定結果とシミュレーション結果を用いて決めた取り出しビームのツイスパラメータ、ディスプレイに整合するように、ビーム輸送系のビーム光学の再設計を行った。その結果、整合を確認し、ビームサイズを任意に制御できることを実証した[14]。この一例として、30mのドリフトスペースの後に、1mm程度しか広がらないビームオブティクスを確認した。

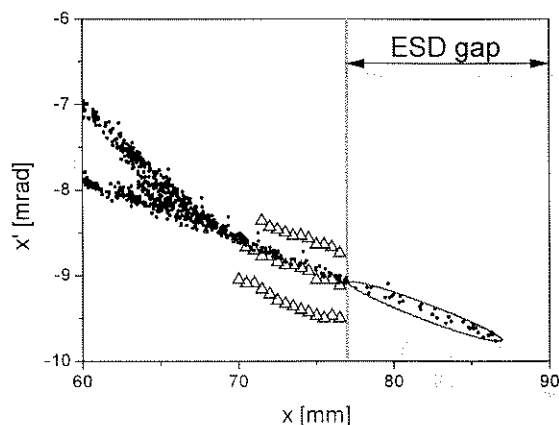


図5：静電デフレクター入口での位相空間の様子。測定結果（三角）とシミュレーション（黒点）。

5. まとめ

走査型照射野形成法の要求に答えるため、RF-KO取り出しによるビーム性状向上に関する研究を行い以下の結果を得た。1) リップルを15%に低減した。2) ビーム遮断時間を原理的境界である50 μ sに短縮した。3) 輸送系との光学的整合をとることによってビームサイズを任意に制御できることを示した。

6. 謝辞

本研究を行うにあたって、放医研・加速器物理学部の方々には多くの御指導、御協力をいただきましたことを深く感謝します。また、本研究に協力して頂いたAECの皆さんに深く感謝いたします。本研究はHIMAC共同利用研究の一環として行われました。

参考文献

- [1] E. Takada et al, Proc. PAC 2005, in press.
- [2] J.R. Alonso, Proc. EPAC 2000, pp.235.
- [3] T.R. Renner et al, Proc. 1st Symp. on Hadrontherapy, (1993) 453.
- [4] Th. Haberer et al, Nucl. Instr. Meth. A330 (1993) 296.
- [5] M. Tomizawa et al, Nucl. Instr. Meth. A326 (1993) 399.
- [6] K. Noda et al., Nucl. Instr. Meth. A374 (1996) 269.
- [7] T. Furukawa and K. Noda, Nucl. Instr. Meth. A489 (2002) 59.
- [8] K. Noda et al, Nucl. Instr. Meth. A492 (2002) 241.
- [9] K. Noda et al, Nucl. Instr. Meth. A492 (2002) 253.
- [10] T. Furukawa et al, Nucl. Instr. Meth. A522, (2004) 196.
- [11] S. Sato et al, in these proceedings.
- [12] T. Furukawa et al, Nucl. Instr. Meth. A503 (2003) 485.
- [13] T. Furukawa et al, Nucl. Instr. Meth. A515 (2003) 861.
- [14] T. Furukawa et al, Proc. EPAC 2004, pp.267.