

## REDUCTION OF UNCONTROLLABLE SPILLED BEAM IN RF-KO SLOW-EXTRACTION

Kota Mizushima<sup>A), B)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>A)</sup>, Takuji Furukawa<sup>A)</sup>, Shinji Sato<sup>A)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>A)</sup>, Koji Noda<sup>A)</sup>,  
Hiroshi Uchiyama<sup>C)</sup>, Takashi Fujisawa<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Accelerator and Medical Physics, National Institute of Radiological Sciences,  
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555

<sup>B)</sup> Graduate School of Sciences and Technology, Chiba University,  
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

<sup>C)</sup> Accelerator Engineering Corporation,  
2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba 263-0043

### Abstract

The RF-KO slow-extraction method has been used for fast on/off switching of the beam from the synchrotron during scanning irradiation at HIMAC. However, the controllable low beam rate is limited by a small amount of beam which spilled out without the transverse RF field. We could reduce it to 0.4% compared to the original method by adding the another transverse RF field with a frequency component matched with the betatron frequency of particles near the stopband.

## RF-KO取り出しにおける漏れビーム減少法の研究

### 1. はじめに

1993年、放射線医学総合研究所にがん治療用加速器としてHIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) [1]が建設され、重粒子線、特に炭素イオンを用いたがん治療の臨床試行が1994年から行われている。重粒子線治療の特徴としてブラッグ・ピーク周りの高い線量集中性と生物効果があり、その特徴を最大限に生かすためにHIMACでは、走査型照射野形成法[2]と呼吸同期照射法[3]を用いた3次元スキミング照射法[4]が開発された。その照射法には、位置と線量の高い照射精度と早いビームのオン・オフ制御が求められ、それらに答えるRF-knockout (RF-KO) による遅い取り出し法[5]の開発が行われている。その取り出し法は、三次共鳴と周波数変調 (FM) を用いた横方向高周波電場による拡散によりセパトトリクス内の粒子を取り出すものである。しかし、セパトトリクス近傍に存在する粒子は、シンクロトロン振動による運動量変化や電磁石の電源リップルなどにより、横方向高周波電場がなくても取り出されてしまう。その漏れビームが低い取り出しレートを制限してしまう。

漏れビームを減らすために、セパトトリクス近傍の粒子のベータトロン振動数に合わせた単一周波数の横方向高周波電場を従来の電場に加えることで、照射中にセパトトリクス近傍の粒子を選択的に取り出すことができる[6]。本研究では、シミュレーションと実験によりセパトトリクス近傍の粒子密度が単一周波数電場により下げられ、漏れビームを減らせることを実証した。

### 2. シミュレーションによる検証

単一周波数電場 (Mono-RF field) の効果を調べるために、表1に示したようなパラメーターでトラッキングシミュレーションを行った。FMを用いた高周波電場 (FM-RF field) は六極電磁石によって生み出されたセパトトリクス内部のチューンスプレッドを持つビームを拡散させるために用いる。そのFMの周波数帯域は、3.676 から 3.680 のチューンに対応する。

表1: シミュレーションパラメーター

Beam	$^{12}\text{C}^{6+}$	350 MeV/n
Betatron tune	(3.680, 3.113)	
Momentum spread ( $1\sigma$ )	$2.5 \times 10^{-4}$	
Horizontal chromaticity	-0.5	
Revolution frequency ( $f_{\text{rev}}$ )	1.589 MHz	
Longitudinal RF-frequency	$6.355 \text{ MHz} = 4 \times f_{\text{rev}}$	
Frequency of FM-RF field	1.074 to 1.080 MHz	
Frequency of Mono-RF field	1.069 MHz	
Max kick angle by RF-KO	4.0 $\mu\text{rad}$	

シミュレーションの条件は、(1) 100 ms間ビームを取り出した後、(2) 30 ms間ビームを止める。ビーム停止は、HIMACでの実際の治療と同様に、RF-KO電圧を切るだけでなく高速四極電磁石を励磁することで共鳴条件から引き離して行う。(2)の後、(3) 高速四極電磁石を切り、横方向高周波電場がなくてもセパトトリクスからこぼれる粒子 (漏れビーム粒子) を調べる。単一周波数電場を用いず取り出したときのシミュレーション結果は図1(a)のように

なった。(3)で粒子がわずかにこぼれ、それらはシンクロトロン振動に起因するため、そのパルス幅がシンクロトロン振動数 1.55 kHzに対応する 0.7 msであることがわかる。その漏れビーム粒子を規格化位相空間で見ると、(2)の直前で図 2 (a)のようにセパトリティクス近傍に分布していたことがわかった。さらに、それらの粒子のターンごとの位置をフーリエ変換した結果を図 2 (b)に示した。続いて、図 2 (b)のピークに合わせて決めた単一周波数電場を加えた場合のシミュレーションを行い、その結果は図 1 (b)のように元の方法の 4.5%に漏れビーム粒子を減らすことができた。

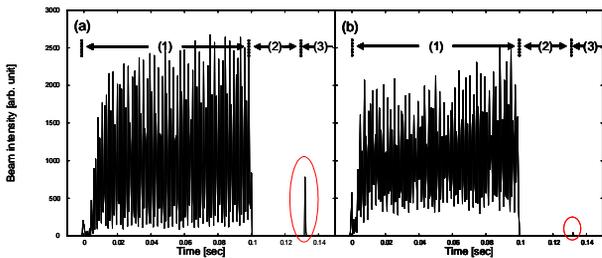


図 1 : (a) 単一周波数電場を加えなかった場合と、(b) 単一周波数電場を加えた場合におけるビームスピルのシミュレーション結果。

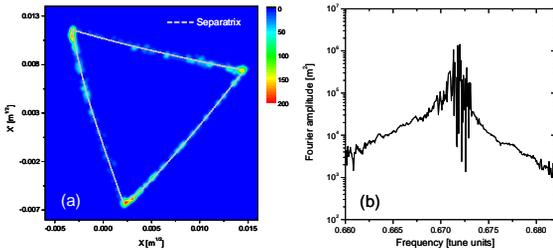


図 2 : 漏れビーム粒子の(a) 規格化位相空間分布と (b) フーリエ空間分布。

### 3 . HIMACにおける実験結果

実際には、電磁石の電源リップルなども漏れビームに影響するが、シミュレーションでその効果を見積もることは難しいので、HIMACでの 350 MeV/nの  $^{12}\text{C}^{6+}$  ビームを用いた実験により単一周波数電場を加える効果を調べる。リング内の周回粒子数は  $1 \times 10^{10}$  個で、取り出しビームレートは  $5 \times 10^8$  pps (particles per second) である。シミュレーションの条件のように、(1) 1 s間ビームを取り出した後、(2) 1 s間ビームを止め、(3) 高速四極電磁石を切ってから 100 ms間にこぼれる粒子を測定シタ。FMの周波数帯域は 1.079 MHzから 1.082 MHzで、その他のパラメーターは表 1 と同じである。図 3 に示されたブロックダイアグラムのように、二つの電離箱をビームラインの終端に置いた。一つは漏れビーム粒子数を

測るために、そして、もう一つは取り出しビーム強度のフィードバック制御[7]のために置かれた。そのフィードバックシステムは、RF-KO電圧を制御することで取り出しレートを一定に保つ。従来の単一周波数電場を用いない取り出し法によるビームスプルが図 4 に示され、その漏れビームレートは  $7.6 \times 10^8$  ppsであった。

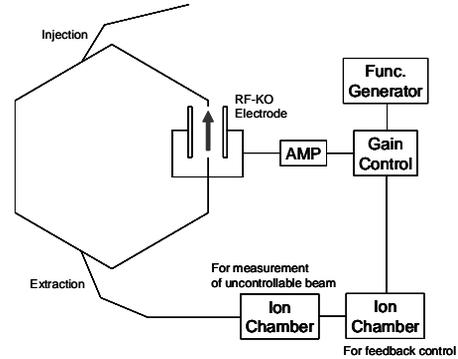


図 3 : 実験セットアップのブロックダイアグラム

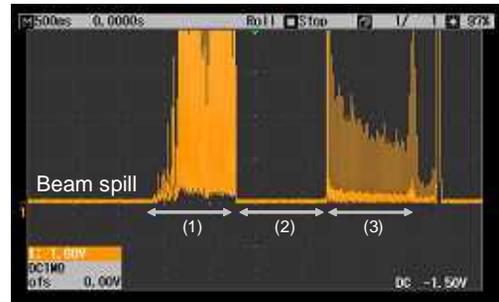


図 4 : 単一周波数電場を用いない従来の取り出し法でのビームスプル。

図 5 に、高周波電場の周波数を 1.072 MHzから 1.075 MHzの間で、チューンにすると 3.675 から 3.677 の間で変えたときの漏れビームレートの変化を示した。単一周波数電場とFM高周波電場の電圧比は 1 : 1 である。図中の破線は、単一周波数電場を加えなかったときの漏れビームレートを示している。漏れビームを少なくできる最適な高周波電場の周波数は 1.074 MHzであった。さらに図 6 に、1.074 MHzの単一周波数電場のFM高周波電場に対する電圧比を上げていったときの漏れビームレートの変化を示した。単一周波数電場の電圧比が 5.3 倍のとき、漏れビームレートは  $3 \times 10^6$  ppsで、従来の取り出し法の 0.4%に抑えることができた。図 7 に電圧比が 4 倍のときのビームスプルを示す。

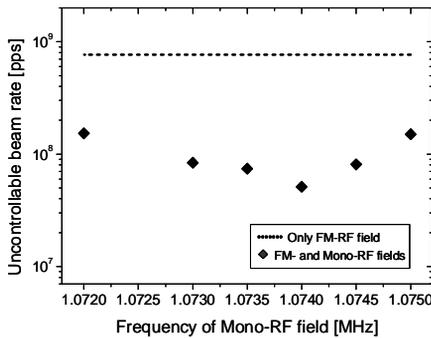


図 5：単一周波数電場の周波数と漏れビームレートの依存性。

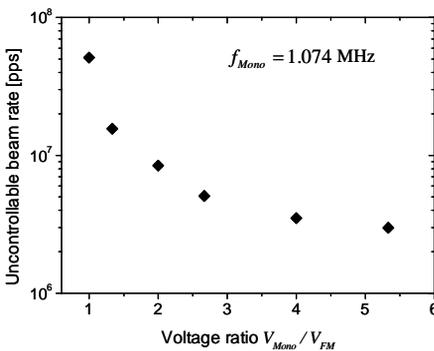


図 6：単一周波数電場と FM 高周波電場の電圧比と漏れビームレートの依存性。

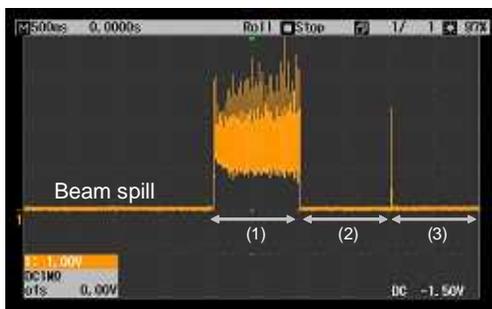


図 7：1.074 MHz の単一周波数電場を FM 高周波電場と 4 倍の電圧比で加えた場合のビームスピル。

リング内の非破壊 2 D ビームプロファイルモニター[8]を用いて、単一周波数電場の粒子密度分布に与える効果を調べた。ビーム取り出し中の 0.3 ms 間にプロファイルモニターにより測定した結果とその水平方向の密度分布を図 8 に示す。図 8 (a) に示された単一周波数電場を加えていない場合のプロファイルに比べ、電圧比が 5.3 倍の単一周波数電場を加えた図 8 (b) の結果は、明らかに端部の粒子密度が下げられている。

#### 4 . まとめと今後

今回の実験で、加える単一周波数電場の周波数最適化と FM 高周波電場との電圧比を上げることで、従来の取り出し法と比較して 0.4% に漏れビーム量を減らすことができた。また、非破壊 2 D ビームプロファイルモニターを用いることで、実際にリング内の水平方向粒子分布端部の密度を単一周波数電場により下げられていることも確認できた。この取り出し法は、何度も加減速を行うエネルギー可変取り出し運転[9]においてエミッタンス増加により生じるビームロスの減少にも、その端部の密度低下により効果があると期待できる。

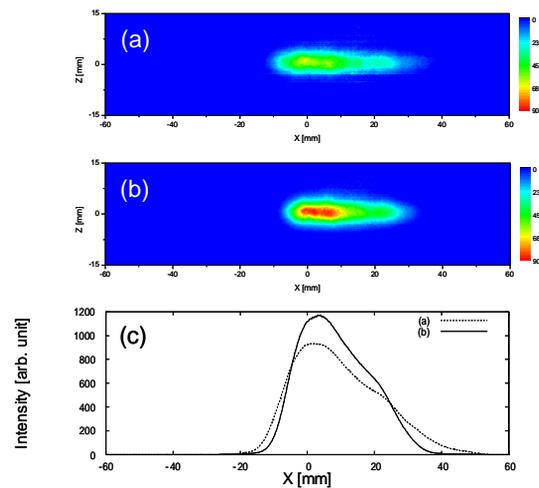


図 8：非破壊 2 D ビームプロファイルモニターによる、(a) 単一周波数電場を加えなかった場合と、(b) 1.074 MHz の単一周波数電場を FM 高周波電場と 5.3 倍の電圧比で加えた場合の測定結果と、(c) それらの水平方向密度分布。

#### 5 . 謝辞

本研究で加速器の運転に協力して頂いた AEC の皆さんと、非破壊 2 D プロファイルモニターに関して協力して頂いた KEK の橋本義徳さんに深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Y. Hirao et al., Nucl. Phys. A, 538 (1992) 541.
- [2] E. Urakabe et al., Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 2540.
- [3] S. Minohara et al., Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 47 (4) (2000) 1097.
- [4] T. Furukawa et al., Proc. of EPAC08, Genoa, (2008) 1794.
- [5] K. Noda et al., Nucl. Instr. and Meth. A 492 (2002) 241.
- [6] K. Mizushima et al., Nucl. Instr. and Meth. A 489 (2002) 59.
- [7] S. Sato et al., Nucl. Instr. and Meth. A 574 (2007) 226.
- [8] Y. Hashimoto et al., Nucl. Instr. and Meth. A 527 (2007) 289.
- [9] Y. Iwata et al., Proc. of EPAC08, Genoa, (2008) 1800.