# 粒子線がん治療用シンクロトロンからの新ビーム取出法の研究 - 原理実証試験 -

日大生産工	中西哲也	
放医研	古川卓二、	野田耕司

1 まえがき

シンクロトロンからの遅い取出し法として 既にいくつか開発されている<sup>1,2)</sup>。その中でも セパラトリクス一定のもとで、RFKO法によっ て周回ビームのベータトロン振動振幅を増大 させて取り出す方法<sup>3,4)</sup>は、出射ビームの位置 およびサイズを一定にでき、更にビーム出射 のon/off切り替えが高速にできるため、HIMAC 等で開発されている<sup>5)</sup>。

このRFKO取出し法の研究を基に、RFKO装置 と高速四極電磁石を使った新たな取出し法を 提案する。本方式は、より高速に精度良くビ ームを取出すことができるため、究極の照射 法といわれるスポットスキャニング照射等に 有効と考えられる。本報告では,原理および HIMACを使った原理実証試験の結果について 報告する。

2 新ビーム取出し法の概略 高速四極電磁石(出射四極、FQ)とRFKO装置 を使った新たな取出し法 (QAR法: beamextraction method using a fast Q-magnet Assisted by Rf-knockout)のアウトラインを 図1,2に示す。ビーム加速の後、シンクロ トロンの主パラメータは従来の1/3共鳴出射 法の初期状態の値に設定する(図1(a))。ユ ーザ側からのスタート信号によりFQが励磁さ れ、セパラトリクスが収縮を始める。そして、 セパラトリクスを出た粒子が取出される(図 1(b))。必要な粒子数が取り出されると、ユ ーザ側からストップ信号が送られ、FQ磁場は ゼロに戻され、セパラトリクスが元の大きさ に広がることによりビーム取出しは停止する (図1(c))。その後、RFKOがonされ、周回ビ ームが拡散され、取出されたビームが存在し ていた領域を埋める(図1(d))。このように、 FQとRFKOを交互に運転することにより、断続 的に少しずつビームを取出すことができる。



以上のように本QAR法はFQにより取出しを 行うため、次のような特徴を持つ:(1)必 要なタイミングで必要な量のビームを精度良 く取り出すことができる、(2)シンクロト ロンの主電磁石電源リプル等に起因する出射 を防止できる、(3)取り出し中のビーム強 度は、スピルフィードバック制御により一様 になることが期待できる、(4)主電磁石電 源のリプル許容値を緩和できるためコストが 低減できる。本取出し法はセパラトリクスの 大きさを変えるため、出射ビームの位置変化 が生じるが、一回の取出し量が少ないため、 無視できると考える。

A Beam Extraction Method for a Medical Synchrotron - Experiment for Proof of Principle -

Tetsuya NAKANISHI, Takuji FURUKAWA, and Koji NODA

## 3 実験結果とディスカッション

#### 3.1 実験装置

実験条件を表1に示す。HIMACシンクロトロン は繰り返し周期が3.3s、フラットトップが2sで 運転される(C、400MeV/u)。ビームスピル はプラスティックシンチレータ(厚さ0.2mm) とフォトマル(含プリアンプ)からなるビーム スピルモニタで測定した。

FQは積層鉄心でできており、真空チェンバー は3mm厚のSUS304である。FQコイルにはゲート 信号に同期した矩形波を供給したが、実際のコ イル電流は図4(c)に示すように立上り時間 0.3ms、フラットトップ1msであった。繰り返し は、RFK0と同じ100Hzである。シンクロトロ ンのフラットトップで繰り返される取出し機 器の運転回数はそれぞれ170回である。

表1. Experimental conditions

Beam	$: C^{6+} 400 MeV/n$
Bare tun	(; 3.6865/3.130
$f_{RF}$	: 6.6118 MHz: Longitudinal RF freque
f <sub>rev</sub>	: 1.6530 MHz: Revolution frequency
V <sub>RF</sub>	: ±4 kV: Longitudinal RF voltage
f <sub>s</sub>	: 1.46 kHz: Frequency of synchrotron osillation
$\mathbf{f}_{\mathbf{k}}$	: 1.1197 - 1.1323 MHz: Transverse RF frequency
ξx	: -1: Horizontal chromatic

#### 3.2 ビーム実験

ビーム取出しのゲート幅は1.3ms、2.6ms、5.3ms で行った。FM一周期に相当する1.3msの結果を 図3に示す。図から明らかなように、ビームは FQ-onの時だけ取出され、RFKO-onでは取出され ていないことが分かる。ゲート幅が5.3msの場 合も同様であった。各ショットのスピル強度 は、短時間のレンジではほぼ一定である(図3 (b))。また、スピルの全体構造はAM変調がされ ていないために指数関数的に減少している。

スピルの詳細構造を図3(c)に示す。周回ビ ームの強度分布が一様な場合、スピル強度は FQ磁場の時間変化(dG/dt)に大体比例す るはずだが、本結果ではビーム取出しはFQのコ イル電流が最大値に達した後に始まっている。 また、詳細構造は、RF空胴のon/offやゲート幅、 FQなどの運転パラメータにより大きく変わる ことが分かった。FQコイル電流が最大値に達し た後取出される理由としては、コイル電流波形 と磁場波形の違い、セパラトリクスを出てから 取出しチャネルに達するまでの周回時間など が考えられる。

図3にはFQのコイル電流を1/2倍、ゲート幅 を2倍にした結果も示した。一回の取出し量が 少ないため、比較的一定の取出しができてい る。



図3 QAR法によるビーム取出し結果。右列 はFQコイル電流を半分に、RFKO運転時間を2 倍にした結果。各写真の下から、the spill structure, the FQ current, the RF-KO signal, the DCCT signal of the synchrotron. (a) whole structure with 0.5 s/div, (b) expansion of (a) at 130 ms from the extraction start (5 ms/div), (c) more expansion with 1 ms/div

### 5 まとめ

シンクロトロンからのビーム取出しに関 して、新しい方式を提案し、HIMACシンクロ トロンを使ってその原理実証試験が成功裡 に行われた。FQ-on時だけビームは取出され、 RFKO-onでは取出されないことを示した。こ れは予め決められた量のビームを必要なタ イミングで取出せることを示す。本方式は粒 子線がん治療装置の究極の照射方法に対す るキー技術になると考える。

- 「参考文献」
- P. Strolin, CERN/ISRTH/66-40, (1966).
   Y. Kobayashi, Nucl. Instr. Meth. 83 (1970) 77-87.
- 2) S. van der Meer, CERN/PS/AA/78-6, (1978).
  W. Hardt, et al., The XI th Int. Conf. on High En. Accel.
- 3) K. Hiramoto and M. Nishi, Nucl. Instr. and Meth. A322(1992) 154-160.
- 4) M. Tomizawa, et al., Nucl. Instr. Meth. Res. A326 (1993).
- 5) K. Noda, et al., Nucl. Instr. Meth. Res. A374 (1996).