

SLOW BEAM EXTRACTION METHOD USING A FAST Q-MAGNET ASSISTED BY RFKO

Tetsuya Nakanishi^{1,A)}, Takuji Furukawa^{B)}, Katsuhisa Yoshida^{A)}, Koji Noda^{B)}
^{A)} Mitsubishi Electric Corp., 1-2-1, Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe
^{B)} National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba

Abstract

A new method for slow beam extraction from a synchrotron ring is proposed, based on controlling a quadrupole field with a fast response (FQ), assisted by a transverse RF-field (RF-knockout). This method works as follows: 1) particles of a circulating beam are diffused by RF-knockout to just inside the boundary of a separatrix produced under a resonant condition, 2) exciting the FQ shrinks the separatrix to a certain size, and the particles outside the separatrix can be extracted, 3) the fast Q-field is turned off, and 4) the above process is repeated until all of the circulating beam is completely extracted. This method can extract prescribed particles at required timings quickly and precisely, because it is controlled with only the fast Q-field. A proof-of-principle experiment was carried out at the HIMAC synchrotron. As a result, it was verified that the beam was extracted only with exciting the FQ, but not with turning the RF-knockout on.

高速四極とRFKOを用いたシンクロトロンからの遅い取り出し法

1. はじめに

シンクロトロンからの遅い取り出し法として既にいくつか開発されているが、最も早く開発された方法は、四極磁場をゆっくり変化させることでセパトリクスを収縮して取り出す方法である[1]。また、有限のクロマティシティのもとでビームの運動量をゆっくり変化させることでセパトリクスを収縮する方法も開発された[2]。一方、セパ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atron振動振幅を増大させて取り出す方法も開発されている[3,4]。この方法は、出射ビームの位置およびサイズを一定にできる特長がある。また、ビーム出射のon/off切り替えが高速でできるため、HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)では、AM変調およびFM変調を用いたRFKO取り出し法を開発し、呼吸同期照射に現在使用している[5]。

このRFKO取り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り出し法(QAR法: beam-extraction method using a fast Q-magnet Assisted by Rf-knockout)を提案する。QAR法の概略は次の通り: 1) 周回ビームをRFKOによりセパトリクス境界付近まで拡散させる、2) RFKOをoffする、3) 高速四極電磁石(FQ)をonすることによりセパトリクスを僅かに縮める、4) セパトリクスからはみ出したビームが取り出される、5) FQをoffする、6) 上記プロセスを周回ビームがゼロとなるまで繰り返す。

この方法は、FQの制御だけでビーム取出しができる

ため、必要なタイミングで必要なビーム量を高速で精度良く取出すことが期待できる。取出し中のビーム強度は、FQ電源をスビルフィードバック制御することにより一定にできると考えられる。それぞれの取出し時間(出射ビーム量)は容易に変えることができ、その際の出射位置変化は十分に小さいと考える。一方、FQがoffの時は、セパトリクスは周回ビームのエミッタンスより十分大きく設定できるため、電磁石電源リプルによるセパトリクスの変動によるビーム出射を完全に防ぐことができる。従って、この方法はスポットスキニング照射やワプリング法における呼吸同期照射などに有効と考えられる。

筆者らは、HIMACシンクロトロンを使ってQAR法の原理実証実験を行った。この論文では、原理および実験結果について述べる。

2. 高速四極電磁石とRFKO装置を使ったビーム取り出し法(QAR法)

QAR法のアウトラインを図1および図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、セパトリクスが収縮を始める。そして、セパ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、セパトリクスが元の大きさに広がることによりビーム取出

¹ E-mail: t2nakani@cit.nihon-u.ac.jp
Present address: Nihon University

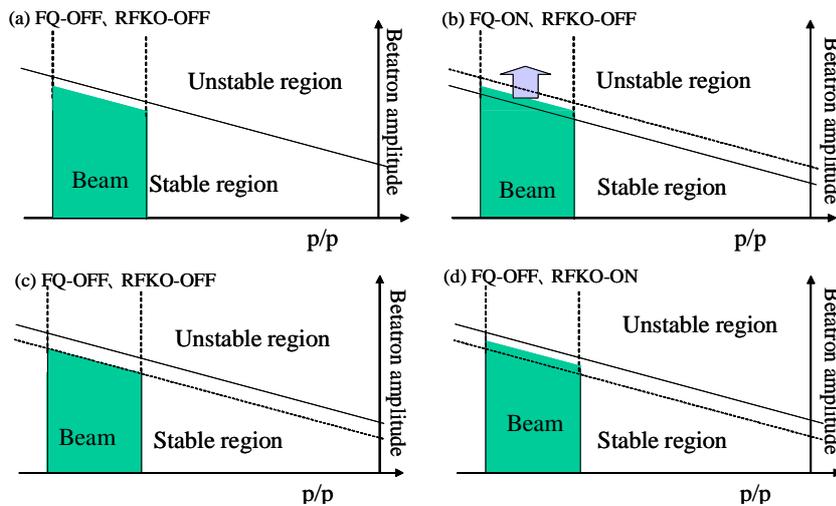


図1. Steinbach diagramsによるQAR法のアウトライン: (a)取り出し前の状態、(b)セパトロクスの収縮によりはみ出したビームが取り出される、(c)FQをoffすることにより取出しが停止する、(d)RFKOにより周回ビームが拡散される。

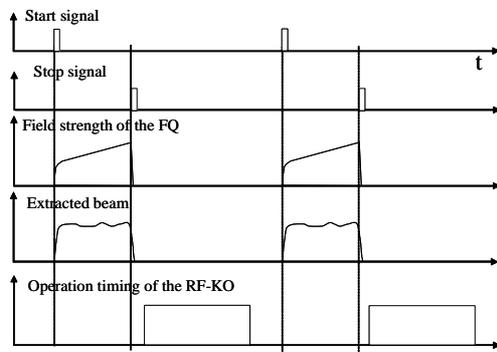


図2. 取出しシステムのタイミングチャート

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。

RFKOシステムでは、セパトロクス中心付近のビームも最終的には境界付近まで拡散できるように、FM変調の中心周波数と変調幅が設定される。AM変調も併用することで、周回ビームが減少しても取出し強度を一定にできると考えられる。

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ッ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)主電磁石電源のリップル許容値を緩和できるためコストが低減できる。本取出し法はセパトロ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。例えば、スポットキャニングに適用した場合、一回に取出すビーム量の最大は、加速ビームの1%程度である。(4)については、主電磁石電源のリップルによるセパトロクス変動で周回ビームが取出されないようにセパトロクスの初期設定を行う。

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、400 MeV/u)。ビームスピルはプラスチックシンチレータ(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ーで測定した。プリアンプの周波数応答は10 kHz以下である。

RFKOシステムのブロック図を図3に示す。RF信号はファンクションジェネレータ(HP3314A)から発信され、AM変調およびFM変調はもう一台のAFG2020で制御される。FM変調は1.1197MHzから1.1323MHzまで直線的に掃引され、掃引周期は約1.3msである。このRF信号の出力時間はゲート信号で制御される。即ち、ゲート幅2.6msは2回の周波数掃引を意味する。また、掃引開始周波数は常に同じ値である。ゲート信号は、RFアンプ上流のRFスイッチのON/OFFにも使用され、ゲート幅以外ではRF信号を完全に遮断した。ゲート信号の繰り返しは100Hzとした。RF信号はアンプで増幅後、キッカー電極に送られ、ビームに最大3-4 μ radのキック角を与える。今回の実験では、AM変調の機能は使用しなかった。

FQは、HIMACシンクロトロンでチューン補正に用いている一組の四極電磁石(QDS:積層鉄心)を使った。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

表1. Experimental conditions

Beam	: C ⁶⁺ 400MeV/n
Bare tune:	3.6865/3.130
f _{RF}	: 6.6118 MHz: Longitudinal RF frequency
f _{rev}	: 1.6530 MHz: Revolution frequency
V _{RF}	: ± 4 kV: Longitudinal RF voltage
f _s	: 1.46 kHz: Frequency of synchrotron oscillation
f _k	: 1.1197 - 1.1323 MHz: Transverse RF frequency
ξ_x	: -1: Horizontal chromatic

トップ1msであった。繰り返しは、RFKOと同じ100Hzであ

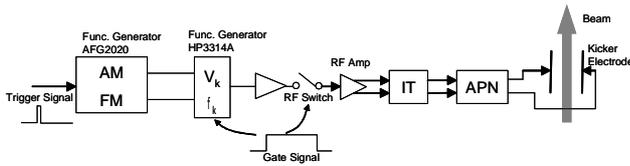


図3 . RFKOシステムのブロック図

る。シンクロトロン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。

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4に示す。RF空胴はフラットトップでoffした時の結果である。初期セパトリクス大きさは、加速後のビームエミッタンスよりも十分に大きい値に設定し、FQではそのセパトリクスを60%まで収縮するようにした。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。ただ、その場合は一回の取出し量が多いため周回ビームは僅か0.5sでゼロになった。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4(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4(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、セパトリクスを出てから取出しチャンネルに達するまでの周回時間などが考えられる。

図4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ている。周回ビームの初期エミッタンスが収縮したセパトリクスよりも小さいために、FQ運転を開始した初期にはビームは取出されていないことが分かる。その後周回ビームはRFKOにより拡散されるため、徐々にスピルが増えていることがわかる。

4 . 結論

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。RFKOの周波数掃引一回(1.3ms)だけでも、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。加速ビームは、FQとRFKOの交互の運転により断続的に少しずつ取出された: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。スピルフィードバック制御と組み合わせることにより、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

[1] 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).

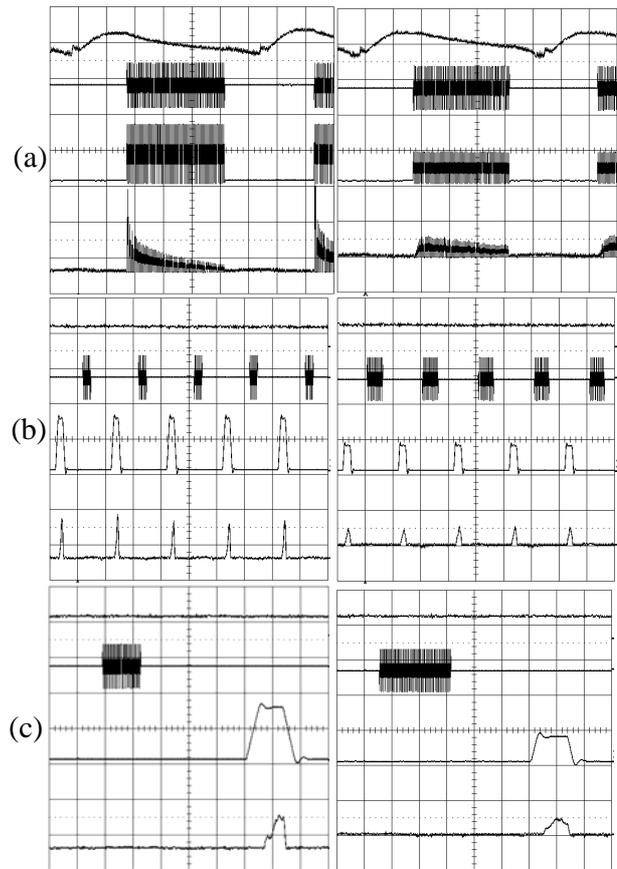


図4 . QAR法によるビーム取出し結果。右列はFQコイル電流を半分、RFKO運転時間を2倍にした結果。各写真の下から、the spill structure, the FQ current, the RF-KO signal, the DCCT signal of the synchrotron. (a) whole structure with 0.5 s/div, (b) expansion of (a) at 130 ms from the extraction start (5 ms/div), (c) more expansion with 1 ms/div