

高速四極電磁石とRFKOを使ったビーム取り出し法のビーム特性

日大生産工
放医研

中西 哲也
古川 卓司、野田 耕司

1 まえがき

シンクロトロンからのビーム取り出し方法として、高速四極電磁石とRFKO機器を使った方法を提案した¹⁾。この方法は、断続的に少しずつビームを取り出すもので、高速四極電磁石(PQ)でセパトリクスを瞬間的に僅かに縮めてビームを取り出し、その後、減少した周回ビームのエミッタンスをRFKOにより元の大きさに拡大する。特徴として、高速でビームON/OFFを制御できる、電磁石電源のリップルを補正できる等が挙げられ、粒子線照射や出射のタイミングを正確に制御する必要のある物理実験等への適用が考えられる。

前回、放医研HIMACシンクロトロンを使って行った原理実証について報告した。今回の報告では、RFKOの信号源として、FM信号やホワイトノイズを使った場合の出射ビーム特性についてビーム試験結果を報告する。

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)の概要

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される(図1(a))。ユーザ側からのスタート信号によりPQ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、PQ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しは停止する(図1(c))。

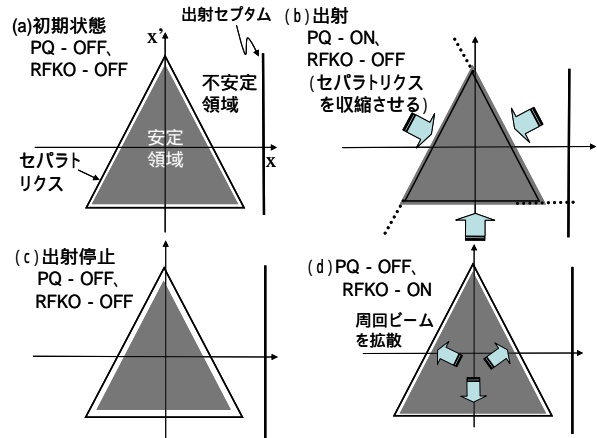


Fig.1 QAR法のアウトライン

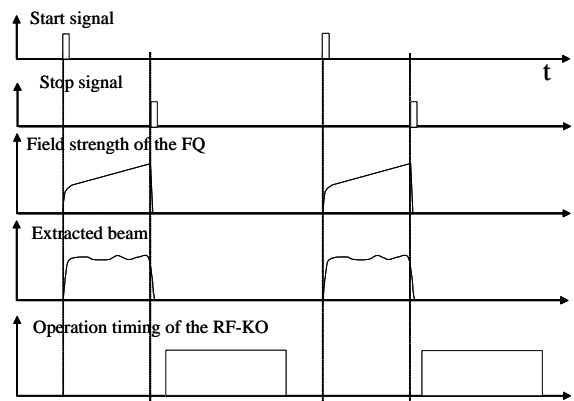


Fig.2 QAR法のタイミングチャート

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、PQ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り出すことができる。

Characteristics of extracted beam from a synchrotron using a pulse Q-magnet assisted by RF-knockout

Tetsuya NAKANISHI, Takuji FURUKAWA and Koji NODA

以上のように本QAR法はPQの動作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) 待機時にシンクロトロンの主電磁石電源のリプル等によるビーム出射を抑制できる、(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。(2)(3)の特徴は、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。一方、本取出し法はセパトトリクスの大きさを変えるため、出射中にビーム位置変化が生じる。しかし、一回の取出し量が少ないため、その変化は小さい。補正する場合でも、変化量が小さいためHEBTに空芯のステアリングコイルを設置して、PQのコイル電流に同期して運転することで、比較的容易に補正できると考える。

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で測定した。

表1. Experimental conditions

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

RFKOシステムの信号源としては、FMの場合ファンクションジェネレータ(HP3314A)が用いられ、1.1197MHzから1.1323MHzまで直線的に約1.3msで掃引した。掃引開始周波数は常に同じ値である。カラードノイズ信号源としては、ホワイトノイズ源と帯域フィルタを用いて作った。これらのRF信号の出力時間はゲート信号で制御され、アンプで増幅後、キッカー電極に送られる。

PQ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積層型四極電磁石(QDS)を使った。真空チェンバーは3mm厚のSUS304である。コイル電流は、ファンクションジェネレータで三角波を発生させ、アンプで増幅してコイルに導いた。

3.2 ビーム実験

図3はビーム取り出しの全体像である。取り出し機器はフラットトップで1.6s間運転した。FQとRFKOの運転周期は20msである。RFKO信号は、周回ビームの残存率を減らすためにAM変調している。また、運転時間は1.3ms、即ち掃引回数は

一回である。RF加速空洞はoffしている。図4は出射開始から0.8s後を拡大したもので、図5は1.4秒後である。PQのコイル電流波形は常に同じで、電流最大の時にセパトトリクスは初期状態から半分まで収縮する。その後、セパトトリクスは初期状態に戻され、ビームエミッタンスがRFKOにより拡散される。従って、スピル信号が出始めるコイル電流値から、拡散後の最外周のビームエミッタンスが計算できる。この値は、一定であることが望ましいが、出射開始1.4s後では大きく変化することが分かる。これに対して、RFKOの信号源をカラードノイズとした結果を図6に示すが(実験日は異なる)、変化は非常に小さい。

4 結論

周回ビームを拡散するRFKO信号源としてFM変調信号とカラードノイズ信号を使って実験した結果、拡散幅はカラードノイズを使うとほぼ一定値が得られることが分かった。

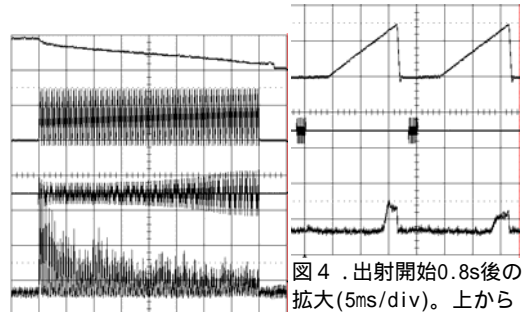


図3. 上からシンクロトロンDCCT (5V/div)、PQコイル電流(5V/div)、RFKO信号(FM)(5V/div)、スピル(0.2V/div)。横軸は0.2s/div

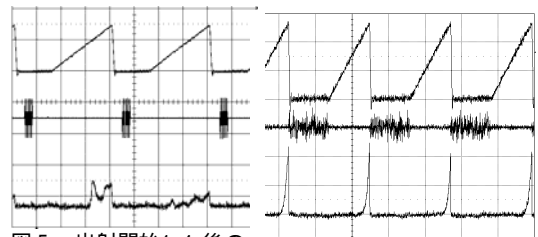


図4. 出射開始0.8s後の拡大(5ms/div)。上からコイル電流、RFKO、スピル

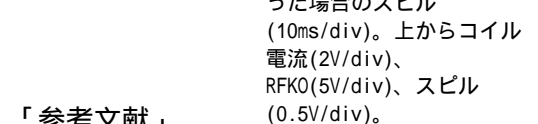


図5. 出射開始1.4s後の拡大(5ms/div)。

図6. カラードノイズを使った場合のスピル(10ms/div)。上からコイル電流(2V/div)、RFKO(5V/div)、スピル(0.5V/div)。

「参考文献」

- 1) T. Nakanishi, T. Furukawa, K. Yoshida, and K. Noda, "Slow beam-extraction method using a fast Q-magnet assisted by RF-knockout", Nucl. Instr. and Meth. A553 (2005) 400-406.