

## シンクロトロンからのビーム取り出し (QAR 法) の スピルフィードバック制御に関する研究

### STUDY ON SPILL FEEDBACK CONTROL FOR THE BEAM EXTRACTION METHOD (QAR) FROM A SYNCHROTRON

中西哲也<sup>#</sup>, 大石量太, 地引隆之, 菅原千里

Tetsuya Nakanishi<sup>#</sup>, Ryota Ohishi, Takayuki Jibiki, Chisato Sugawara

Nihon University, College of Industrial Technology

#### Abstract

A feedback control of the spill structure for the slow-beam-extraction from the medical synchrotron using a fast quadruple and radio frequency (RF)-knockout (QAR method) is studied to obtain the designed spill structure. In addition the feed-forward control is used so that the feedback control is performed effectively. In this extraction method, the spill width of several ms are extracted continuously with an interval time of less than 1 ms. These controls are used to increase spill intensity at beginning of the extraction after beam acceleration. Beam simulation shows that a desired spill intensity is obtained by operating the RF-knockout with a narrower frequency band for a longer time before the first extraction, and a flat spill structure is obtained by the feed-forward and feedback controls.

#### 1. はじめに

シンクロトロンからのビーム取り出しにおいて、スポットスキヤニング照射法に適したビーム取り出し方法として QAR 法 (beam extraction method using a fast Quadruple magnet Assisted by RFKO) を提案している[1]。QAR 法は、高速四極電磁石 (FQ) を用いてセパトリス境界付近にあるビームを必要量取り出し、高周波ノックアウト (RFKO) 装置で周回ビームを拡散させて取り出されたビームが存在していた領域を埋める。これらの操作を繰り返し行い、シンクロトロン内のビームを取り出して行く。この方法により高速で精度のよいビーム取り出しが期待できる。

QAR 法では FQ によりビームを取り出すため、任意のビーム (スピル) 構造の実現には FQ の磁場を制御する必要がある。FQ の制御方法としてスピルフィードバック (FB) 制御と、それを効果的にするためにフィードフォワード (FF) 制御とを併用して行う[2]。一方、加速ビームの横方向の粒子密度分布がガウス分布をしている場合、取出し初期においては一回で取出せる粒子数は少ない。そこで、加速後にセパトリス中心付近の粒子を拡散させてセパトリス境界付近の密度を増やす。

本研究はこれらをビームシミュレーションで行ったもので、本論文ではビームシミュレーションの概要を述べた後、初期取出しビームの増加、一回の取出しスピル構造の平坦化について検討した結果について述べる。

#### 2. ビームシミュレーションの概要

ビームシミュレーションは NIRS で設計された炭素ビーム用コンパクトシンクロトロン [3] を使って行った。取出し時のベアーチューンは  $\nu_x=1.68$ ,  $\nu_y=1.13$  である。RFKO の高周波信号は、周回粒子の拡散を一緒に行うために  $n+1/3$  と  $n+2/3$  ( $n=0,1,2,3,4$ ) の 10 個の共鳴周波数付近の周波数帯を含んだマルチバンドスペクトルを使

用した[4][5]。ここで、実際の周波数は周回周波数 3.485 MHz をかけた値であり、全周波数帯域は約 1 MHz から 17 MHz である。このマルチバンド方式により、それぞれの周波数帯域を任意に設定できるため、セパトリス境界付近の粒子にはあまり影響を与えることなく中心付近の粒子を拡散できる。即ち境界付近の粒子密度を増やすことができる。

セパトリスはビーム加速終了後に六極電磁石群を直線的に 30000 turns の時間を掛けて立ち上げ形作られる。その後、セパトリス境界付近の粒子密度を高めるために、10000 turns 掛けてセパトリス中心付近の粒子を RFKO1 により拡散する。その後、FQ と RFKO2 を交互に連続で運転することでビームを断続的に取り出して行く。タイムチャートを Figure 1 に示す。FQ の一回の運転は、FB 制御をしない場合は立上り 6800 turns + 立下り 100 turns ( $0.29 \mu s/\text{turn}$ )、RFKO2 は 3000 turns である。FQ と RFKO2 の運転周期は 10000 turns である。

一回の取り出し粒子数は、FQ によるセパトリス収縮率 20% で初期粒子数の約 1% が取り出されるように RFKO1,2 の蹴り角と 1 バンドの周波数帯は決めた。この時の RFKO2 のマルチバンドスペクトルの周波数帯は、2/3 共鳴付近の端数部は 0.675~0.68 であった。RFKO1 は 0.6752~0.68 が最適であった。FQ は長さ 7.14cm と設定し、 $K=0.0428 \text{ m}^{-2}$  で収縮率 ( $dA/A$ ,  $A$  は面積) が 20% であり、これを最大値として設定している。

セパタムは中心軌道から 5.5cm 外側に設定されており、セパタムギャップは 1cm でその中に入った時点で取り出

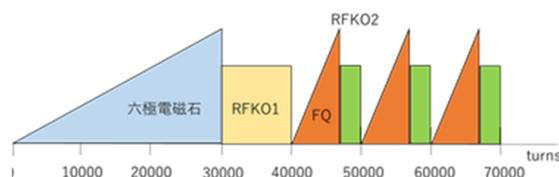


Figure 1: Timing chart of SX, RFKO, and FQ.

されたと判断する。初期ビームの水平方向エミッタンスは  $\sigma_x \times \sigma_x' = 3.5$  [ $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ] でガウス分布させている。垂直方向エミッタンスは  $0.5$  [ $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ] とした。

シミュレーションは加速に用いられる RF は off とし、運動量分散 ( $\pm 0.03\%$ ) は計算を簡単にするために無視した。従って、運動量分散によるチューンの変化も無視している。これはクロマティシティ補正ができることも考慮している。

### 3. 取出し初期スピルの増加

取出し開始前に RFKO1 でセパトリクス中心付近の周回粒子を拡散しなかった場合と拡散した場合の結果を Figures 2, 3 に示す。但し、前者の場合、RFKO1 は RFKO2 と同じパラメータで運転した。総粒子数は 200 万個で、図は各 100 回転の間に取出された粒子数をプロットし、その間は直線で結んだものである。FQ 波形はセパトリクス内の粒子分布が分かるように直線的に増加する波形を用いた。両図から明らかなように、取出し前の RFKO1 運転により、1 回目の取出し粒子数が大幅に増えていることが分かる。この粒子数の割合は目標値である 1% にほぼ等しかった。ここで、RFKO1 を使わなかった場合の RFKO2 の蹴り角は、使った場合よりも 1.2 倍の大きさとした。この値は RFKO2 を運転中に粒子が取り出されない最大の大きさとした。

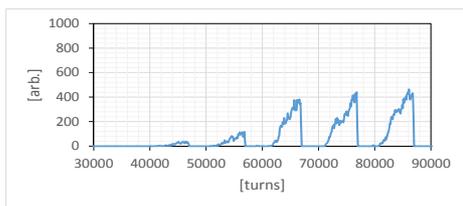


Figure 2: Spills without RFKO1.

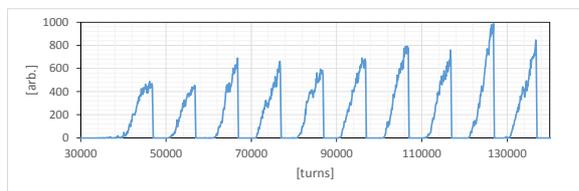


Figure 3: Spills with RFKO1.

Figure 4 は FF 制御をした時のスпил構造である。平坦に近いスпил構造が得られていることが分かる。最初のスпилは、RFKO1 でセパトリクス境界付近の粒子密度が特に高くなっているため、同じ FQ 波形を使った場合、前半部のスпил強度が高くなる。

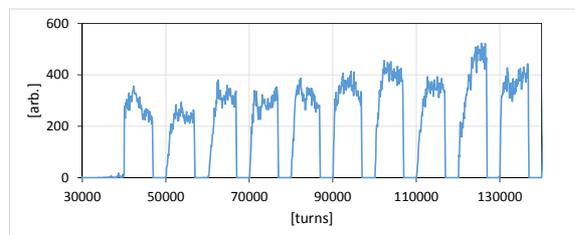


Figure 4: Spills with FF control.

### 4. フィードバック制御

一回の取出しにおけるスпил構造を用途に応じて任意の形にするために、FQ 電源をスпилフィードバック制御する。しかし、周回ビームの横方向密度分布は一般にガウス分布しているため、例えば平坦なスпил構造を得ようとする、初期の偏差は非常に大きくなり目標の分布を得ることは難しい。そのため、目標とする構造に近い構造が得られるように FQ 波形を予め最適化し (FF 制御)、その波形に対して FB 制御する。

FB 制御の K 値の変化のさせ方を下式に示す。この計算は 100 ターン毎に行い、次の 100 ターン後の値を計算し、その 100 ターンの間では直線的に変化させる [2]。

$$K_{quad}(n+1) = K_{FF} + K_P \times e_n + \sum_{j=1}^{n-1} K_P \times e_j$$

ここで、 $K_{FF}$  は FF 制御により得られた FQ 波形、 $K_P$  は比例係数、 $e_n$  は目標値からの偏差である。比例係数は一定の値ではなく、 $K_{FF}$  の値によって変動させており、取り出しの後半になるにつれて減少していく値とした。Figure 5 は Figure 4 に示したスпилに対して FB 制御した結果である。より平坦な構造に近づき、かつ各スпил強度も一定に近づいていることが分かる。

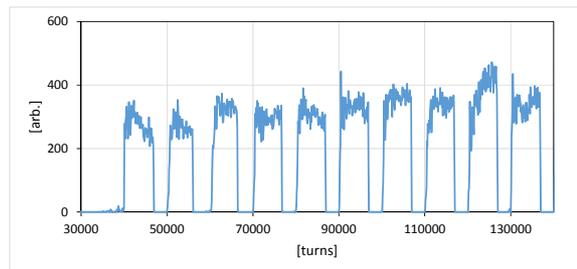


Figure 5: Spills with FF and FB controls.

### 5. 結論

QAR 法取出しにおいて、取出し初期時のスпил強度を上げるために、予め RFKO を運転して周回粒子を拡散した結果、最初のスпилから目標値を達成できた。更に、FF, FB 制御により平坦なスпил構造にできることが分かった。

### 参考文献

- [1] T. Nakanishi, T. Furukawa, K. Yoshida, K. Noda, Nucl. Instr. and Meth. A553 (2005) 400.
- [2] R. Muraoka, T. Nakanishi, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 48-50.
- [3] T. Furukawa *et al.*, Proc. of the APAC 2004, Gyeongju, Korea, pp. 420-422.
- [4] Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A 621 (2010) 62.
- [5] Akio Shinkai *et al.*, Nuclear Instruments and Methods A 769 (2015) 16-19.