

シンクロトロンからのビーム取り出し(QAR法)における スピルFB・FF制御の研究

STUDY ON SPILL FEEDBACK AND FEEDFORWARD CONTROL FOR A SLOW BEAM EXTRACTION METHOD (QAR) FROM A SYNCHROTRON

村岡遼#, 中西哲也

Ryo Muraoka #, Tetsuya Nakanishi

Nihon University

Abstract

QAR method using a fast quadrupole magnet (FQ) and RFKO has been proposed for a slow beam extraction from a synchrotron. In this method, we expect the beam extraction with a high-precision and a high-speed. The beam extraction is performed by the operation of FQ. To obtain arbitrary beam intensity, coil current of FQ is determined by the feedback and feedforward control. The spill intensity distribution becomes a constant roughly by the feedforward control using a function in consideration of the Gaussian distribution of a circulating beam. It becomes more constant by the feedback control.

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 Quadrupole magnet Assisted by RFKO) が提案されている^[1]。QAR法は、高速四極電磁石(FQ)を用いてセパトリクスを収縮させることで、セパトリク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断続的に取り出して行く。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。

一定のスピル強度を得ることを目的に、古川らによって設計された普及型シンクロトロン^[2]のラティス^[3]を使ってビームシミュレーションの検討を行った。

本論文ではQAR法の概要について述べた後、周回ビームを一様に拡散するためのRFKO信号について述べ、FQのFF, FB制御方法とそのシミュレーション結果について述べる。

2. QAR法による粒子の取り出し

2.1 QAR法の原理

シンクロトロン内のひとつの粒子の軌道の例をFig. 1に示す。粒子は中心軌道の周りを振動しながら周回している。周回する粒子に高周波電界を加えることで振動振幅を大きくできる。

QAR法によるビーム取り出しの原理図をFig. 2に示す。同図はセプタム位置での位相平面図で横軸 x は中心軌道からのずれ、縦軸 x' は中心軌道に対する傾きである。FQをONにするとセパトリクスは収縮する。セパトリクスをはみ出した粒子は共鳴状態となり、振幅が増大し取り出される。

Fig. 3にFQとRFKOのタイミングチャートを示し、Fig. 4にビームシミュレーションでのスピルの例を示す。FQの磁場強度を一定の割合で上げていくと、時間とともにスピルの強度が強くなっていることが分かる。これは、シンクロトロン内の周回粒子がガウス分布しているためである。

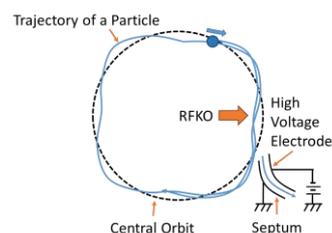


Figure 1: Trajectory of a particle.

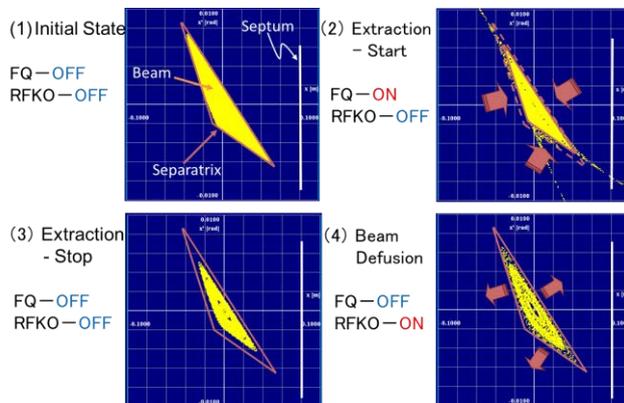


Figure 2: Conceptual diagram of QAR method.

ciry14013@g.nihon-u.ac.jp

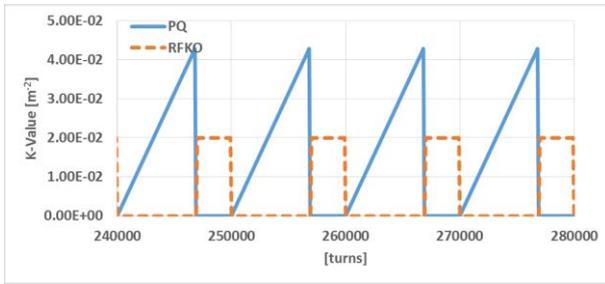


Figure 3: FQ waveform and RFKO signal.

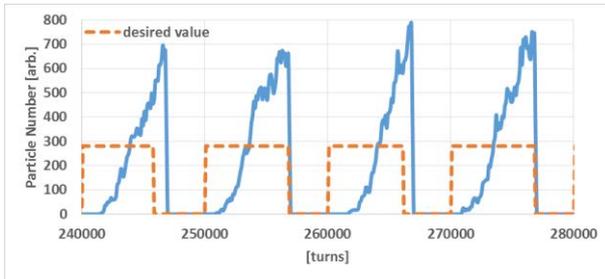


Figure 4: Spill structure with linear increased FQ.

2.2 一様な拡散のための RFKO 信号

周回ビームを拡散させるためには、周回ビームのチューンスプレッドに相当する高周波信号を RFKO に加えることが必要である。ビームシミュレーションによる検討では、それだけでは一様な拡散はできなく、また高周波信号の周波数帯域が広ければ広いほど拡散が一様になることが確認された^[3]。普及型シンクロトロンを用いたビームシミュレーションではその周波数帯として Fig. 5 の破線部に示す約 0.3-4.7(規格化周波数)が必要であった。しかし、同図の破線部のような幅広いカラーノイズ(CN)では、高周波アンプへの負担が大きくなってしまう。そこで、同図実線部のように共鳴周波数帯だけを有するマルチバンド(MB)スペクトルを提案した^[3]。これにより実質的な周波数幅は約 1/10 に低減された。また、この MB スペクトルを用いることで各バンドの周波数帯域を任意に変更できるため、一回のスピル量を増やせるという特徴がある。

MB スペクトルを発生させる方法として、高速 DAC (D/A Converter)を用いた方式が提案された^[4]。この方式はパソコン上で予め MB スペクトルの時間波形のデジタルデータを作成し、そのデータをパソコンのマザーボードに組み込まれた DAC のメモリに書き込み、それらを外部クロックにより出力する。この方式により狭帯域のバンドを有する必要な MB スペクトルを発生できることが確認されている^[4]。

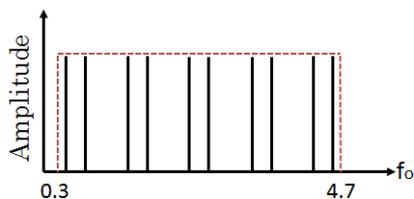


Figure 5: Colored noise & multi-band spectrum.

3. FQ のフィードフォワード制御の検討

RFKO の高周波信号の周波数帯域を広げることで周回粒子の拡散を一様に近づけられるが、十分な一様性は得られていない。Fig. 4 におけるそれぞれの取り出しでスピル構造が一定になっていないのはそのためである。また、FQ を直線的に立ち上げる方法では、ビームオフ時にスピル強度が最も大きくなるため、スポットスキニング照射への適用に不向きである。そこで任意のスピル構造を得るために、FQ の FB 制御を行う。また、それを効果的に行うために、FF 制御と併用する。

本論文ではスピル構造としてフラットな分布を得ることを目標にした。スピルを平坦にするためには一回の取り出しの前半部では FQ を早く変化させ、後半部にいくにしたがってゆっくりと変化させる必要がある。平坦なスピル構造を得られるように、FQ のコイル電流波形として様々な関数を試した結果、(2)式が最適であった。

$$K_{ff}(n) = \frac{K_{\max}}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\left(\frac{\log(n)}{\log(N_{FQ})}\right)^{10} + \frac{n}{N_{FQ}}} \quad (2)$$

ここで、K 値は FQ の磁場勾配に比例した値であり、コイル電流にも比例した値である。K_{max} は FQ の最大値で、N_{FQ} は FQ の 1 運転区間の回転数、n は回転数(変数)である。FF 制御をしたときの FQ 波形を Fig. 6 に示し、それを用いたビームシミュレーションの結果のスピル構造を Fig. 7 に示す。同図は各 100 ターンの間に取り出された粒子数をプロットしたもので、その計算方法については参考文献[5]にて詳述している。

今回行ったシミュレーション条件は以下の通りである。FQ の運転区間は 6900[turn] (1.95[ms])で、RFKO の運転区間は 3000[turn] (0.86[ms])である。FQ の運転区間に関しては、スキニング照射における線量モニタの応答速度を 70[μs]と仮定すると、それによって生じる線量誤差を 1%以下にするためには 7[ms]程度が妥当であるが、今回は FF, FB 制御の効果を確認するために FQ の運転区間を短く設定した。また RFKO の運転区間は、RFKO の強度を弱めて長く運転した方がより一様な拡散を行える。しかし、全体の運転時間を考慮して 1[ms]程度とした。シミュレーションする粒子数は 200 万個とし、1 回のビーム取り出しで全粒子数の約 1%を取り出せるように、RFKO の強度や周波数帯を設定した。また、セパトロックスの収縮率は 20%である。

Fig. 7 から FF 制御を行うことでスピル構造は平坦に近づいていることが分かる。ただし、取り出しによってスピルの形状に差があるため、FF 制御に加えて FB 制御を用いることで更なるスピル構造の平坦化をめざす。

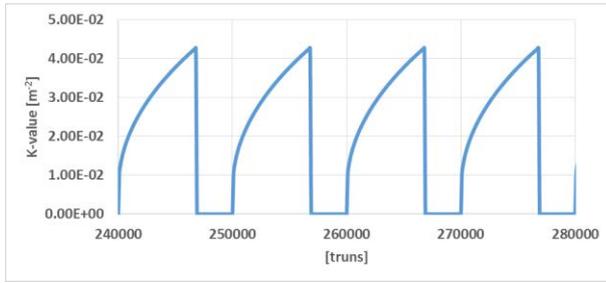


Figure 6: FQ waveform with feedforward control.

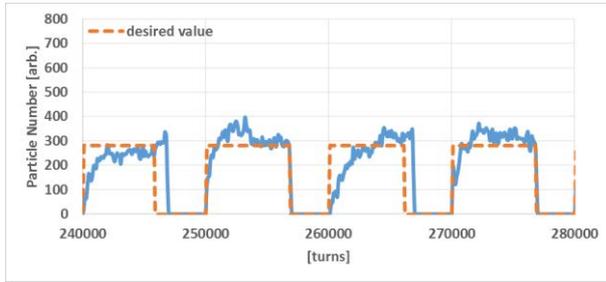


Figure 7: Spill structure with feedforward control.

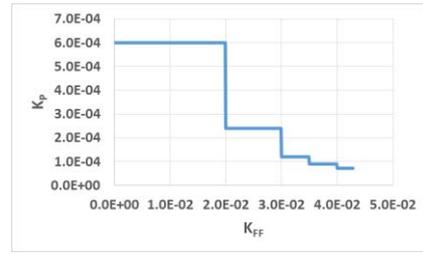


Figure 8: Proportionality constant for feedback control.

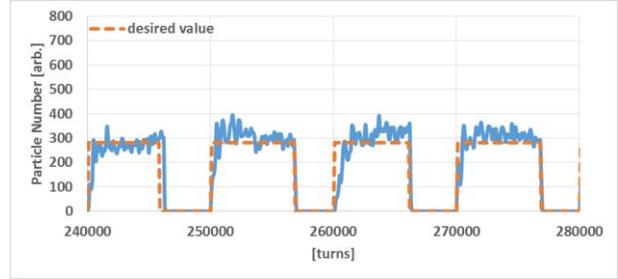


Figure 9: Spill structure with feedback control.

4. スピルフィードバック制御の検討

取り出される粒子数と目標値を比較し、そのときの偏差に応じて FB 制御を行う。今回使用した FQ の制御信号を(3)式に示す。

$$K_{quad} = K_{ff} + K_p \times e_i + \sum_{i=1}^n K_p \times e_i \quad (3)$$

ここで、 K_{quad} は最終的な FQ の K 値で、 K_{ff} はフィードフォワード制御により最適化された関数、 K_p は比例係数、 e_i は偏差である。比例係数 K_p は一定の値ではなく、Fig. 8 のように K 値に応じて変化させる。これは、周回粒子分布はガウス分布をしているため、取り出し後半部で偏差に対する感度を弱めるためである。偏差 e_i は過去 300 ターンの粒子数の平均値を用いて算出している。(3)式は、例えば FB 制御を 100 ターン毎に行うとすると、次の 100 ターン後の FQ の K 値を計算するものである。また、第 3 項に示す履歴の積分値を追加することで、より安定した制御が行えるようになった。フィードバック制御を行ったときのスピルを Fig. 9 に示す。同図を Fig. 7 と比較すると、フィードバック制御により、目標値に更に近づいていることが分かる。

スピルのばらつき度合いについて RMS を平均値で割った値を用いて定量的に評価する。各取り出しに対する結果を Fig. 10 に示す。ここでは 10 回の取り出しに対して計算を行った。同図から FB 制御を併用することで、スピルばらつきが減少していることが分かる。取り出しによっては RMS の変動がほとんど見られない場合があるが、これは FF 制御で十分に効果が出ているからだと考える。

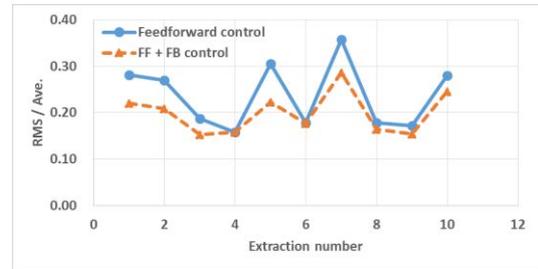


Figure 10: Extraction number vs. RMS / average.

5. まとめ

シンクロトロンからの遅いビーム取り出し方法である QAR 法において、一回の取り出しビーム強度を平坦にするために FQ のコイル電流の FF 制御の検討を行った。ビームシミュレーションの結果、FB 制御と併用することで更に平坦なビーム強度が得られることを確認した。

参考文献

- [1] T. Nakanishi, et al., "Slow beam-extraction method using a fast Q-magnet assisted by RF-knockout", Nuclear Instruments and Methods. A553, pp.400-406, 2005.
- [2] T. Furukawa, et al., "DESIGN OF SYNCHROTRON AT NIRS FOR CARBON THERAPY FACILITY", Proc. APAC 2004.
- [3] T. Nakanishi, "Dependence of a frequency bandwidth on a spill structure in the RF-knockout extraction", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A621 (2010) pp.62-67.
- [4] A. Shinkai, et al., "Generation of a multi-band spectrum using a D/A converter for an RF-knockout system", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A769 (2015) pp.16-19.
- [5] K. Tsuruha, et al., "Simulation study of beam extraction from a synchrotron using colored noise with digital filter", Nuclear Instruments and Methods. A608, pp.37-41, 2009.