

Simulation of a beam extraction using a fast Q-magnet assisted with RFKO

Tetsuya Nakanishi¹, Kohei Tsuruha
College of Industrial Technology, Nihon University
1-2-1 Izumicho, Narashino-city, Chiba, 275-8575

Abstract

A slow beam extraction from a synchrotron ring has been proposed, based on controlling a quadrupole field with a fast response (FQ), assisted by a transverse RF-field (RF-knockout). This method can extract prescribed particles at required timings quickly and precisely, because it is controlled with only the fast Q-field. A simulation program for this method has been developed, and results of the simulation corresponded roughly to the experimental results using the HIMAC synchrotron.

高速四極とRFKOを用いたビーム取出しのシミュレーション

1. はじめに

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(QAR法: slow extraction method using a fast Quadrupole magnet Assisted by Rfko)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、高速四極電磁石でセパトリ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という動作を繰り返す方式である。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。

これまで、放医研HIMACシンクロトロンを使った原理実証試験、RFKOによる周回ビーム拡散特性に関するビーム実験について報告した[1] [2]。それと並行して、本手法のシミュレーションプログラムの開発を進めており、実験結果との比較によりプログラムの有効性を検証している。今回は、RFKOの信号源として、カラードノイズ(フィルタードノイズ)を使ったビームシミュレーション結果と実験結果の比較について報告する。

2. シミュレーション方法

シンクロトロンラティスとしては、ビーム実験を行ったHIMACシンクロトロンを用いる[3]。ラティスは、セプタム、セパトリス形成用六極電磁石、RFKOおよびチューン補正四極電磁石(本取出し法における高速四極)のある位置で分割し、その間はトランスフォーマトリクスで与える。六極電磁石およびRFKOは、その中心位置でローレンツ力による傾きの変化だけを与える近似を用いた。

六極電磁石による傾きの変化 x' 、 y' は次式で与える。

$$\Delta x' = \frac{l}{2} K' (x^2 - y^2), \quad \Delta y' = -l \cdot K' xy \quad \dots(1)$$

また、RFKOによるx方向キック角は次式で与えた。
[4]

$$\delta_i = 2 \sum_{k=1}^N \sqrt{S(\bar{\nu}_k)} \Delta \bar{\nu}_k \cos\{2\pi \bar{\nu}_k (N_{rev} + \frac{i}{N_s}) + \theta_k\} \quad (2)$$

$$\Delta \bar{\nu}_k = \bar{\nu}_k - \bar{\nu}_{k-1}, \quad \bar{\nu}_k = \frac{\nu_k + \nu_{k+1}}{2}$$

ここで、Sは各周波数成分の大きさを、全ての周波数成分に対して一定とした。 ν_k は周回周波数あたりのRF周波数、 N_{rev} は回転数、Nは周波数成分を分割した数、 ν_k は0~2のランダムな値。粒子の進行方向の分布は、シンクロトロンを N_s 個(ビン数)に等分割し、分割点に粒子を集中させ、それぞれのビン中の粒子は全て同じキック角を受けるとした。ここでiはビン番号である。計算では、このキック角と後で述べる高速四極のK値は、全ターン数に対して予め計算しておく。

各区間のトランスフォーマトリクスは、CERNで開発されたAGILEで計算し、本プログラムの入力データとして与えた。但し、各トランスフォーマトリクスにおいてdeterminantが1となるように一つのマトリクス要素を僅かに変えている。

セパトリスを形成するための六極電磁石(SXFr, SXDr)は2対あり、最初の60ms(10万ターン)の間に直線的に立ち上げ、その後一定とする。RFKOと高速四極の運転パターンは実験パラメータと合わせ、RFKOを11ms運転後に高速四極のK値を11msの間に直線的に立ち上げる。高速四極の立下り時間は0.33msである。計算では、この運転パターンを繰り返す。セパトリスは高速四極のK値の増大により縮小するが、セパトリスの変化の小さい領域では、その面積の変化率はK値にほぼ比例する。従って、スピルの時間構造を出力させた場合、横軸

¹ E-mail: t2nakani@cit.nihon-u.ac.jp

はセパトリクス境界の位置に相当することになり、RFKOにより拡散されたビームの強度分布が見えることになる。

実験において、RFKOと高速四極の運転時間のデューティはそれぞれ50%となるように設定したが、結果として高速四極のコイル電流がピークに達する少し前にRFKOの運転がスタートしていた。シミュレーションにおいてもそれも考慮した。

3. シミュレーションの基本パラメータ

ビーム実験条件に合わせて以下のように決めた。なお、ビーム実験条件を表1にまとめる。

カラードノイズの周波数バンド幅

実験におけるカラードノイズの周波数バンド幅は、RFKOシステムのキッカー電極直前のall-pass network (APN) の周波数特性できまっており、約0.2 MHz-2 MHzである。シンクロトロン周波数が1.653 MHzであることから、式(1)の k は0.12-1.2となる。

周波数バンドの分割数

20000とした。この場合、チューン換算で 5×10^{-4} の分解能となり、十分に小さいと考える。各周波数成分の振幅は一定で、一回のRFKO運転(11ms)による拡散率が実験値と大体同じ値とした。

位相平面上における粒子の初期座標

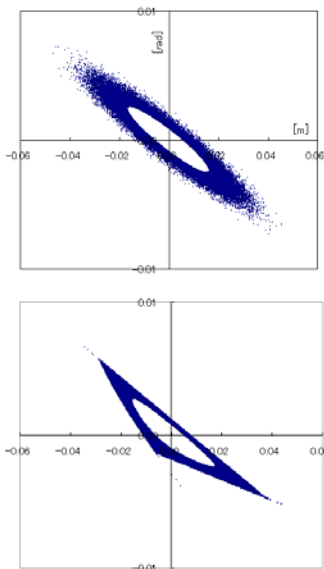


図1. 粒子の初期座標分布(a)と出射開始直線の分布(b)。計算対象回転数では出射されない部分には粒子を存在させていない。

ガウス分布を仮定した。今回のスピン計算においては、出射開始から0.24 s程度(40万ターン)を対象としたため、その間には出射されることのない中心部付近

には粒子は分布させず、図1(a)に示すドーナツ状の分布とした。これにより、計算時間の短縮およびセパトリクス境界付近の粒子数の増大が可能となった。

図1(b)は10万ターン後の出射直前の粒子分布であり、セパトリクスが形作られていることが分かる。

実験値に合わせて37% (63%に縮小する)とした。従って、一回目は多くの粒子が取り出される。2回目以降はRFKOによる拡散率で決まるが、結果的に、セパトリクスの変化率で約6%の間にある周回粒子が取り出された。

なお、運動量分散はゼロとし、70のピンに等しく粒子を分布させた。セプタムの位置は中心軌道から0.05mの位置であり、セプタムギャップは10mmである。六極電磁石のK'値(m^{-2})は(SXFr1, SXDr1)=(-1.7, -2.0)、(SXFr2, SXDr2)=(1.7, 2.0)とした。また、クロマティシティ補正用六極電磁石は無視した。

4. シミュレーション結果

図2(a),(b)は取出し開始から4番目から8番目に取出されたスピルの時間構造である。ここで、スピン強度がゼロになる直前にスパイク状の強度変化が見られるが、これは、高速四極のコイル電流がピークに達する前にRFKOがONすることによるもので、高速四極とRFKOの運転期間を完全に切り離せばこのような現象は発生しないことをシミュレーションで確認している。図の(a)と(b)の違いは、式(2)における k を変えて(異なる乱数)計算した結果である。ショット毎にスピン構造は多少異なり、また、乱数

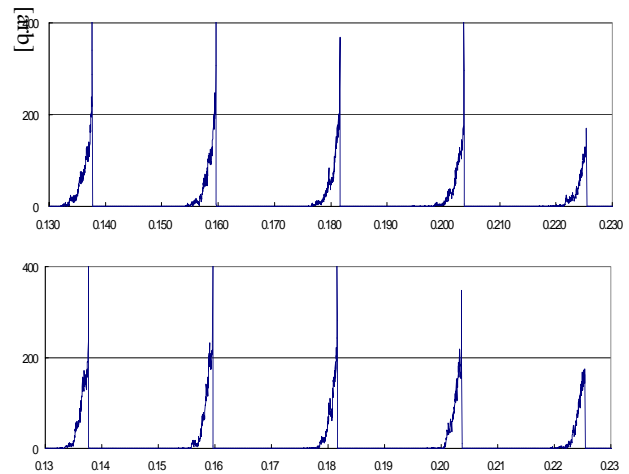


図2. シミュレーション結果。(a)と(b)の違いは k の乱数列を変えて計算したものの。

を変えた場合でもスピン構造は少し変化する。図3に実験結果の一例を示すが、実験でもスピン構造が少し変化していることが分かる。ここで、実験におけるデータはデジタルオシロにランダムに取り込んでおり、取出し開始からの時間は計算値のそれとは一致しない。

これに対して、図3(a),(b)は $k=0.12 \sim 5$ に広げてホワイトノイズにより近い信号で計算した結果である。スピン構造の変化が小さくなっていることが分かる。また、粒子密度の強度分布が滑らかに変化していることが分かる。即ち、スピンフィードバック制御で1ショット内のスピン強度分布を平坦に近

セパトリクス最大縮小率

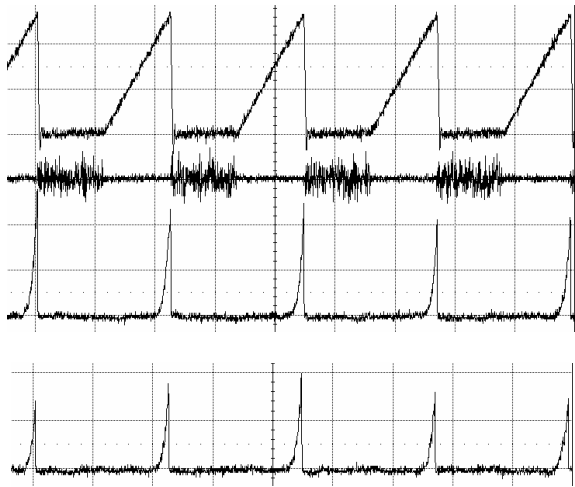


図3．実験結果。上から高速四極コイル電流[2V/div]、RFKO信号[5V/div]、スピル[0.5V/div]。最下段は別のタイミングで取ったスピル構造。横軸[10ms/div]

づける場合、カラードノイズの周波数バンドはより広い方が制御が容易になると思われる。また、この結果の方が実験結果に近いと思われることから、実際のAPNの通過周波数帯域は2 MHzよりも高い可能性がある。

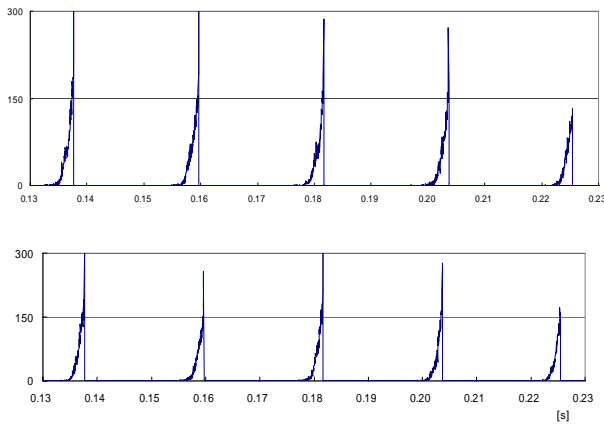


図5は拡大したスピル構造を実験値と計算値で比較したものである。これらの構造はランダムに発生するため、同じ条件で比較はできないが、実験と同じようなスピル構造が計算でも得られていることが分かる。

図4．カラードノイズの周波数バンドを0.12~5に増やした結果。(a)と(b)の違いは k の乱数列を変えて計算したものの。

5．結論

QAR法のビームシミュレーションプログラムを開発し、ビーム実験で得られたスピル構造とほぼ同様の結果が得られた。また、カラードノイズの周波数バンド幅は、実験における0.12~1.2よりも更に広げた方が、スピル構造の変化を小さく出来ることが

分かった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(独)放医研の野田耕司氏、古川卓司氏には多くの貴重なご意見を頂きました。また、ビーム実験においても両氏ならびにAECの皆様にご多大なるご協力を戴きました。ここに深く感謝します。

参考文献

- [1] T. Nakanishi, T. Furukawa, K. Yoshida, and K. Noda, Nucl. Instr. and Meth. A553 (2005) 400-406.
- [2] T. Nakanishi, T. Furukawa, K. Yoshida, and K. Noda, Nucl. Instr. and Meth. B266 (2008) 2169-2172.
- [3] K. Noda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A374 (1996) 269-277.
- [4] K. Hiramoto and M. Nishi, Nucl. Instr. and Meth. A322(1992) 154-160.

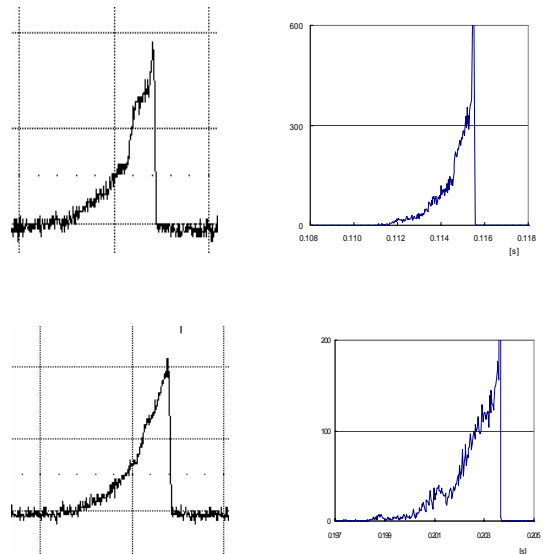


図5．スピル構造が実験値と計算値で同じような構造をしているスピルを拡大したもの。実験値横軸 2ms/div。