

## マルチバンド RFKO 電界による遅いビーム取り出しの原理実証実験

### PROOF-OF-PRINCIPLE EXPERIMENT OF SLOW BEAM EXTRACTION FROM A SYNCHROTRON USING A RADIO FREQUENCY KNOCKOUT SYSTEM WITH A BROADBAND

山口輝人<sup>#, A)</sup>, 奥川雄太郎<sup>A)</sup>, 塩川智也<sup>A)</sup>, 栗田哲郎<sup>B)</sup>, 中西哲也<sup>A)</sup>

Teruto Yamaguchi<sup>#, A)</sup>, Yutaro Okugawa<sup>A)</sup>, Tomoya Shiokawa<sup>A)</sup>, Tetsuro Kurita<sup>B)</sup> Testuya Nakanishi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> College of Industrial Technology, Nihon University

<sup>B)</sup> WERC

#### Abstract

A simulation study on an RFKO beam extraction has shown that the spill with the CN including many bands around the betatron resonances is clearly more uniform than that with the CN by one band. In order to realize this method, a prototype of the RF-knockout system with a frequency band of 1-14 MHz is developed for a proof-of-principle experiment at the WERC synchrotron. The beam experiment shows that a uniformity of spill intensity improves with the number of frequency band as predicted in the beam simulation. The standard deviation of spill fluctuation to the average value with ten bands becomes 57% of that with one band.

#### 1. はじめに

RFKO 法によるシンクロトロンからの遅いビーム取り出しにおいて、周回ビームをバンチングしなくても一様なスピルが得られる取出し法について研究している[1]。この方法では、ビーム出射の on/off 制御は基本的には RFKO 電極の on/off 制御だけなので高速の制御が期待できる。この方法ではバンチングをする代わりに、共鳴周波数帯を複数含むカラードノイズ(CN)を RFKO の高周波信号として用いる。10 個の共鳴周波数帯を含む CN を用いたシミュレーション結果は、1 つのバンドよりも強度が明らかに一様になることを示した。今回ビーム実験を行った WERC シンクロトロンにおいては、その周波数帯は 1-14 MHz である。

この方式を実現するため、CN を発生させるための D/A Converter (DAC)を用いた CN 源を開発した[2]。その必要周波数帯全てにおいて一定の電圧を印加するための APN 回路、APN (All Pass Network)と CN 源のインピーダンス整合をとるための広帯域 IT (Impedance Transformer)も開発した[3]。

本論文では、開発した RFKO 装置の周波数特性と、実際に WERC のシンクロトロンに接続して行ったビーム取り出し実験の結果について報告する。

#### 2. 高周波信号源

CN 源として DAC を用いた CN 発生方式を既に開発している。その模式図は次章で示している。この方式は次のような手順で信号を発生する。まず、マルチバンド (MB) スペクトルのデジタル CN データを、あらかじめコンピュータで計算する。次に、計算されたデジタルデータを DAC のメモリに保存する。最後に、CN データは電圧として外部クロックに同期して出力する。

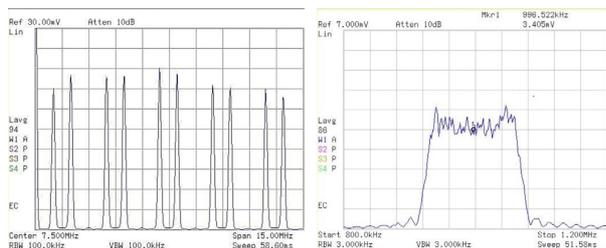
CN データを出力するクロック周波数は、必要な最大

周波数 14 MHz を考慮して決定した。ある波形を正しくサンプリングするには、波形の持つ周波数成分の最大値の 2 倍以上の周波数でサンプリングする必要がある。この値が高いほど精度は良くなるが、使用した DAC に適用することができるクロック周波数は最低で 250 MHz であるため、サンプリング周波数はこの値とした。CN データは、このサンプリング周波数で必要な周波数帯の信号が得られるようにデジタルフィルター法で計算して作成した[4]。シンクロトロン一周当たりのサンプリング数はサンプリング周波数を粒子の周回周波数 (2.97 MHz) で割ると 84 となる。ビームシミュレーションでは粒子がシンクロトロン 84 箇所等に等間隔に集中しているとしてこのデータを蹴り角として与え計算を行った。

CN データは、DAC のメモリに限りがあるため、計算したある回転数のデータを繰り返し使用することにした。今回は、スピル強度の周期的変化が少ない 1-20,000 ターン、ターン数の違う 1-50000 ターン、使う部分が異なる 70000-120000 ターンを使用した。

作成したデータを用いて出力した CN の周波数スペクトルを Fig. 1 (a) に示す。1-14 MHz の間の必要な共鳴周波数帯が 10 個含まれていることを確認した。図中のスペクトルの強度変化はスペクトルアナライザのサンプリングの問題であり、実際には一定である。Figure 1 (b) はその中の 1 バンドを拡大したものであり、周波数幅は 0.925-1.068 MHz であり、設計値に一致した。

<sup>#</sup> cite18014@g.nihon-u.ac.jp



(a) (b)  
Figure 1: Output signal from the DAC.

### 3. RFKO システム

RF-Knockout systemのブロック図をFig. 2に示す。WSから出力したCNはLow pass filterを通してRFスイッチに入力され、ビーム取り出し時間の間だけ出力される。そして分配器により、位相が180度異なる信号として、それぞれ40Wの広帯域アンプ、IT、APNを通して各電極に入力される。

ITとAPNの回路図をFig. 3に示す。APNは電極に周波数に依らず一定の電圧を印加するための回路である。APNの入力インピーダンスをRとしたとき、Rで消費される電力は $V^2/R$ で与えられることより、APNの入力インピーダンスが高ければ高いほど電力損失を小さくすることができる。しかし、Rが大きいほどITとAPNの周波数特性は悪化する。これまでの実験結果から、 $R=800\ \Omega$ 、ITの変換比は16:1とした。ITはフェライトコアを用いて、10 kV耐圧のケーブルを1次側と2次側それぞれ8巻したトランスを3個組み合わせるとして16:1としている。WERCシンクロトロンに接続したものをFig. 4に示す。

Figure 5は、WERC電極の設計図を基に試作した電極を用いたときの電圧(アンプ無し)と電極付近の電位(アンプあり)の周波数特性、とWERCの電圧(アンプなし)の周波数特性またはWERCの電位の推定値を示す。後者は高周波プローブ(1 M $\Omega$ , 15 pF)に小さな銅板をつけ、電極付近の電位を測定した。高周波プローブを直接電極につけるとプローブのCの影響で高周波側の電圧が低下し正しく測定できないためである。この測定では、入力信号は正弦波を用いた。

電極電圧は、試作電極を用いた場合に対し、WERC電極を用いた場合では高周波側で電圧が低下した。これは試作電極よりも、WERC電極の静電容量が高いことが原因と考えられる。一般にAPNは、大きいと高周波側で電圧は大きく低下するが、この結果はそれを表している。同軸コネクタを含む静電容量は、2 MHzのとき、試作電極は25 pF、WERC電極は32.5 pFで、周波数の増加と共に大きくなる。

推定値は、試作電極とWERCの電圧の測定結果の比を、試作電極の電位の測定結果にかけて求めた。

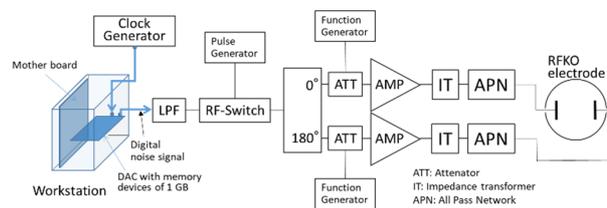


Figure 2: Block diagram of the RFKO system.

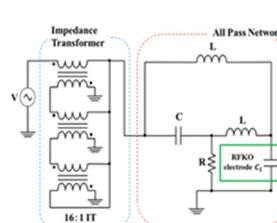


Figure 3: Electric circuit of the IT and APN.



Figure 4: The IT and APN connected to the WERC synchrotron.

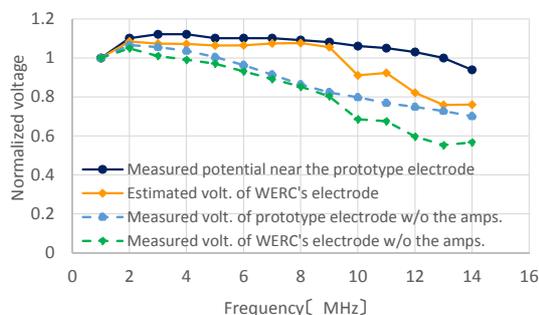


Figure 5: Frequency characteristics of the RFKO.

### 4. ビームシミュレーション

第2章で述べた実験で用いるCNデータを蹴り角としてビームシミュレーションを行った[5]。周回ビームはコースティングビームとした。Figure 6(a)は1-20000ターンの1バンドのCNを用いた場合、Fig. 6(b)は10バンドのCNを用いた場合のスピルである。二つを比較すると10バンドのときのスピルの方が、明らかにばらつきが小さいことが分かる。また、1バンドのときには、繰り返しデータを用いたことにより周期性が現れた。1-50000ターン(Fig. 7)と70000-120000ターン(Fig. 8)のCNを使用した場合も同様に10バンドのほうが明らかにばらつきが小さい。また、使用するCNのターン数と、使用する部分が異なってもスピルに大きな変化はないことがわかる。

参考までに連続データを用いた1バンドのスピルをFig. 9に示す。連続データを用いたこのスピルより、繰り返しデータを用いたスピルの方がばらつきの度合いが小さい。これは繰り返しデータが比較的変動の少ない部分を用いたためだと考えられる。また、1バンドのスピルのばらつきの原因は、繰り返しデータを用いることによるものではないことが分かる。

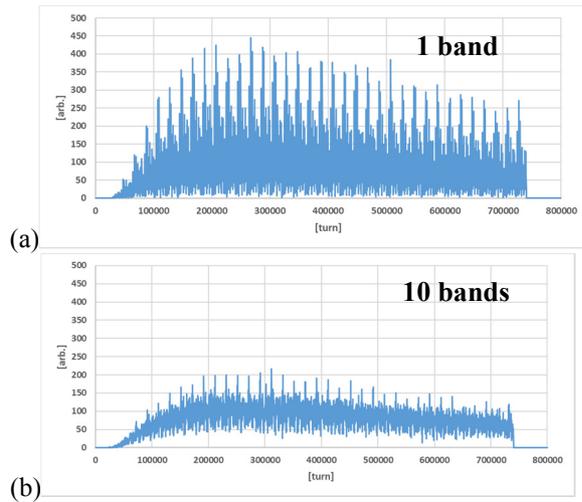


Figure 6: Spill structures simulated using data of 1 -20000 turns.

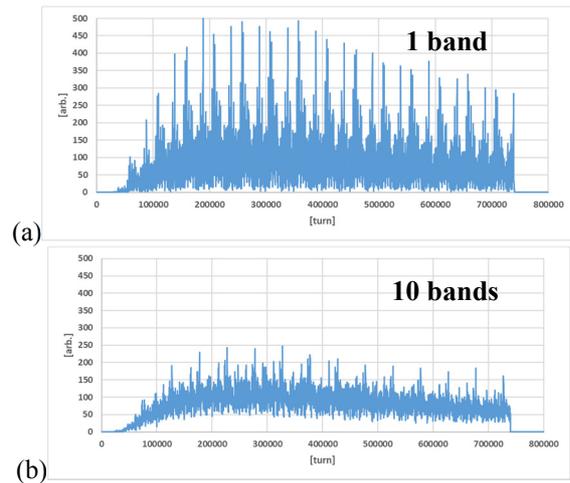


Figure 7: Spill structures simulated using data of 1 -50000 turns.

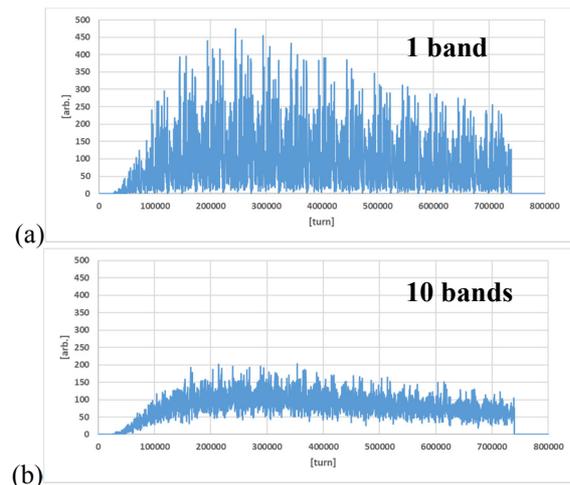


Figure 8: Spill structures simulated using data of 70000 -120000 turn.

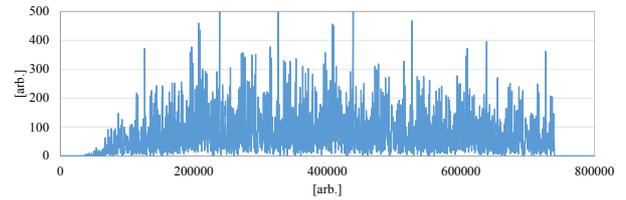


Figure 9: Spill structure simulated with continuous data with 1band.

## 5. ビーム取り出し実験

開発した RFKO system を WERC のシンクロトロン[6] に接続してビーム実験を行った。このときビーム進行方向の高周波電界(RF)は実質的に OFF である。粒子は炭素イオンで出射エネルギーは 55 MeV/u、取り出し時間は 250 ms で周期は 2 s だった。CN データは、その中に含む共鳴周波数帯の数が低周波側から 1,2,4,6,8,10 のものを使用した。Figures 10~12 はビーム実験の結果で、横軸はオシロスコープに取り込んだデータ数を表している。Figure 10(a)は 1-20000 ターンのとときの 1 バンド、Fig. 10(b)は 10 バンドの CN データで行った結果である。シミュレーションと同様に 10 バンドの CN データを使用した方が、1 バンドの場合よりスピルのばらつきは、明らかに小さくなるのが分かる。このとき、出射効率は 1 バンドのときに 26.6%、10 バンドのときに 36.5%だった。また、シンクロトロンセプトラムからスピルモニターまでの通過効率は 78%であることから、セプトラムを通過したビームは、1 バンドのときに 34.1%、10 バンドのときに 46.8%であると考える。Figure 11 は 1-50000 ターン、Fig. 12 は、70000-120000 ターンの CN データを使用した実験結果である。CN データのターン数を変えても Fig. 10 と同様に 10 バンドの方が明らかにばらつきが小さかった。また、1 バンドのスピルに周期性が見られた。これはデータを繰り返し使うことで現れたものだと考えられる。

Figure 13 はそれぞれのバンド数のときのビーム実験で得られたスピルと、シミュレーションで得られたスピルの標準偏差を平均値 $\bar{x}$ で割った値を示す。標準偏差はスピル強度の平均値が一定となる区間で計算するため、全体を 5 分割しそれぞれの区間で(1)式により計算し、それらを(2)式のように平均した。同図の測定値から計算した標準偏差から CN に含まれるバンドの数が多くなるほど、スピルのばらつきの度合いは小さくなっていくことが分かる。また、シミュレーションと比較すると、バンド数が増えるほどばらつきが小さくなる傾向は同じだが、その度合いは小さいことが分かった。

$$\sigma = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N-1}} \dots (1)$$

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_5)}{5} \dots (2)$$

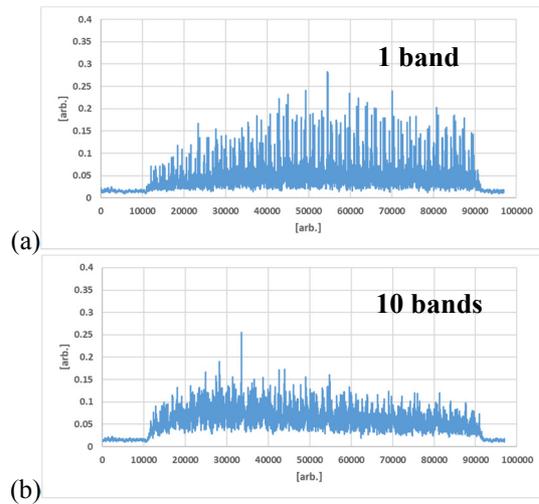


Figure 10: Spill structures measured using data of 1 - 20000 turns.

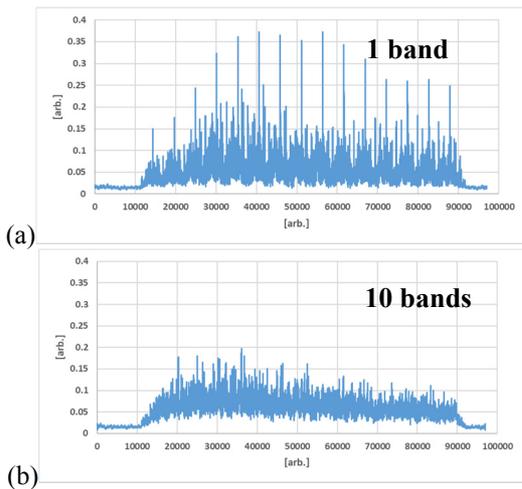


Figure 11: Spill structures measured using data of 1 - 50000 turns.

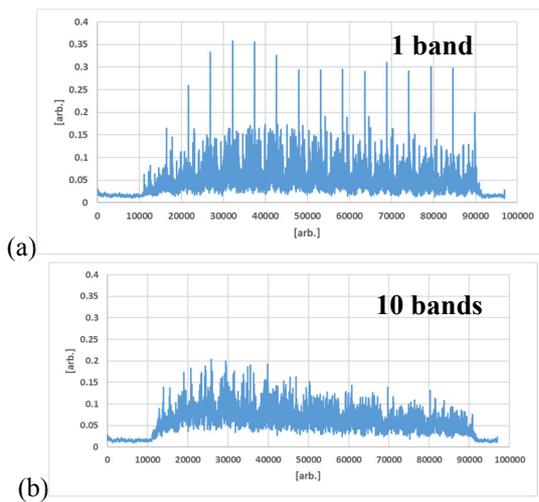


Figure 12: Spill structures simulated using data of 70000 - 120000 turns.

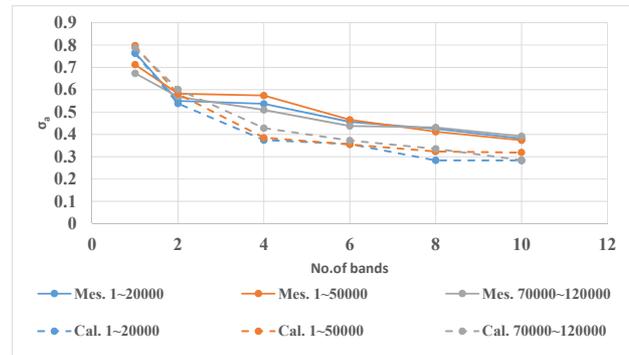


Figure 13: Variation of the spill intensity vs. the number of bands.

## 6. 結論

試作した広帯域RFKO装置をWERCのシンクロトロンに接続して実験を行った。その結果はビームシミュレーションで予測されていたように、CNを含む共鳴周波数帯が増えるとともに、スパイル強度の変動は減少していくことを示していた。これにより、ビーム進行方向への高周波電界を用いなくても、一様で高速なビーム制御が期待できる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、協力をしてくださった若狭湾エネルギー研究センターの加速器オペレーターの方々に感謝します。

## 参考文献

- [1] Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A 621 (2010) 62.
- [2] Akio Shinkai, Soichiro Ishikawa, Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A 769 (2015) 16-19.
- [3] T. Yamaguchi *et al.*, Proc. of the PASJ2018, Nagaoka, Japan, pp.562-565.
- [4] T. Nakanishi, K. Tsuruha, Nucl. Instr. and Meth. A608 (2009) 37.
- [5] Y. Okugawa *et al.*, in these proceedings.
- [6] K. Matsuda *et al.*, Proc. of the PAC2001, Chicago, USA, pp.2590-2592.