

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

日大生産工(院) ○山口 輝人,奥川 雄太朗,塩川 智也

日大生産工 中西 哲也

若狭湾エネルギー研究センター 栗田哲郎

1. はじめに

シンクロトロンは陽子線または炭素線によるがん治療に使用されている。シンクロトロンからのビーム出射は、正確な線量制御のために一様であることが望ましい。さらに、スポット照射では照射時間短縮のために高速なビームのon/off制御が必要とされる。いくつかの施設では、シンクロトロンからのビーム取出しにRFロックアウト法(Radio Frequency)が用いられている。

著者らは、出射ビーム強度の変動が小さいRFKO取出し法を開発した[1]。この方法では共鳴周波数帯を複数含むマルチバンドカラードノイズ(CN)をRFKO信号として用いる。シミュレーション結果では10バンドを含むCNでの取出しが、1バンドのCNを用いた取出しよりも明らかに一様であることを示した。

この方法を実験的に確認するために、D/Aコンバータ(DAC)を用いたRF源[2]、APN (All Pass Network)、広帯域IT (Impedance Transformer) [3]を開発した。この試作機はWERCシンクロトロンでの原理実証試験を想定しており、実験で必要とされる周波数帯は1~14MHzである。

この研究の目的は、マルチバンドを用いたビーム取出しで出射強度が一様になることを実験及びシミュレーションで示すことである。本論文では、開発したRFKO装置の周波数特性と、シミュレーション結果との比較を含むビーム実験の結果について述べる

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の84箇所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。

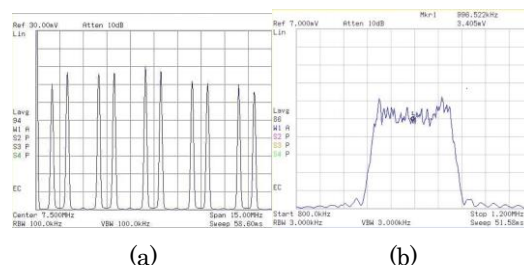


Fig.1 Output signal from the DAC.

Proof-of-principle experiment of slow beam extraction from a synchrotron using a Radio Frequency Knockout System with a broadband

Teruto Yamaguchi, Yutaro Okugawa, Tomoya Shiokawa, Tetsuro Kurita,
Testuya Nakanishi

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 個組み合わせて 16:1 としている。WERC シンクロトロンの接続したものを 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 Ω , 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、RFKO 電極が持つ静電容量が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。

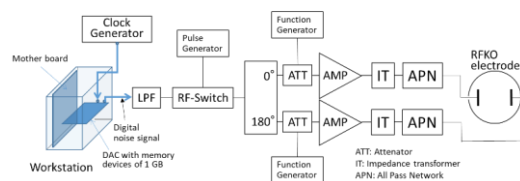


Fig.2 Block diagram of the RFKO system.

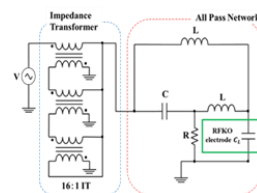


Fig.3 Electric



Fig.4 The IT and

circuit of the IT and APN connected to the WERC synchrotron.

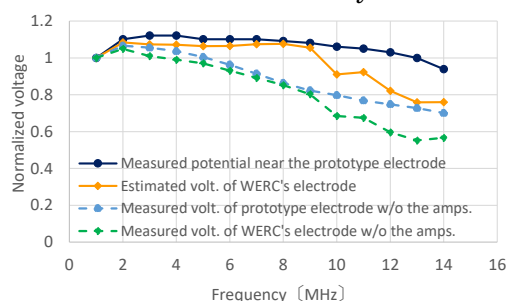


Fig.5 Frequency characteristics of the RFKO.

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ンである。二つを比較すると10バンドのときのスピンの方が、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、いずれのCNデータを用いたシミュレーションでもスピン構造に大きな違いはなかった。参考までに連続データを用いた1バンドのスピンをFig. 9に示す。連続データを用いたこのスピンより、繰り返しデータを用いたスピン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。

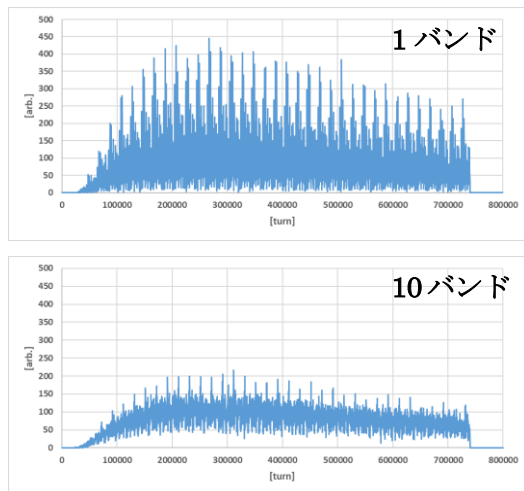


Fig.6 Spill structures simulated using data of 1 -20000 turns.

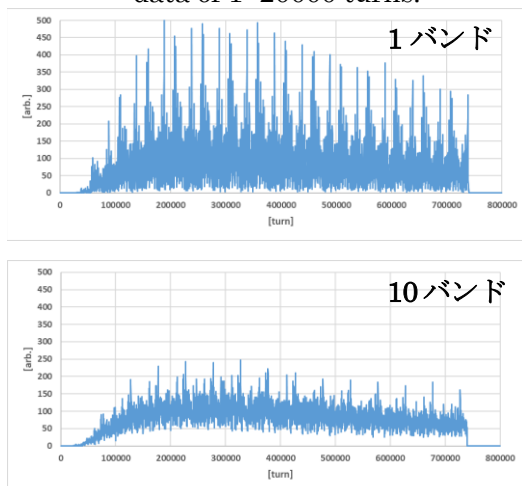


Fig.7 Spill structures simulated using data of 1 -50000 turns.

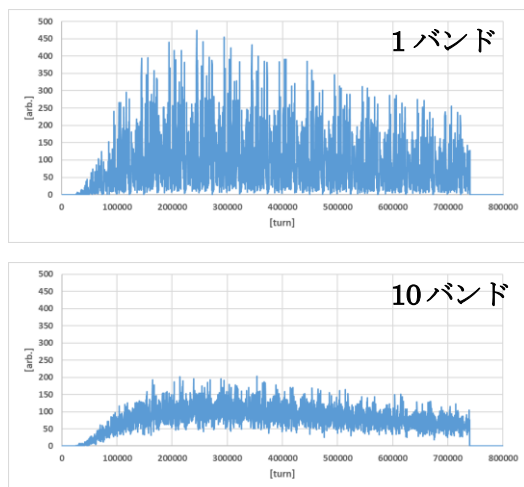


Fig.8 Spill structures simulated using data of 70000 -120000 turn.

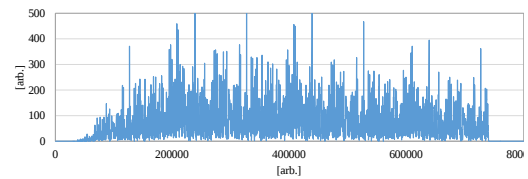


Fig.9 Spill structure simulated with continuous data with 1band.

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事が分かる。このとき、ビーム取出し量は初期周回ビーム量に対して26.6%、10バンドのときに36.5%だった。また、シンクロトロンのセプタムからスパイルモニタまでの通過効率は78%であることから、セプタ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%であると考えられる。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、その度合は小さかった。

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

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

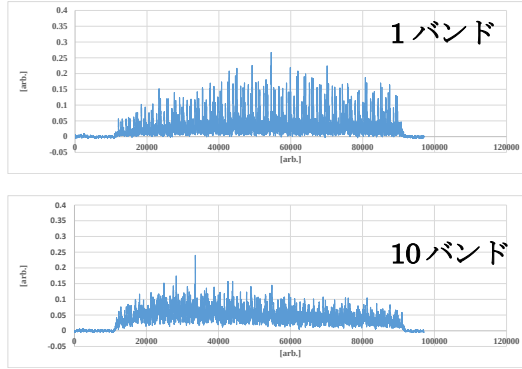


Fig.10 Spill structures measured using data of 1-20000 turns.

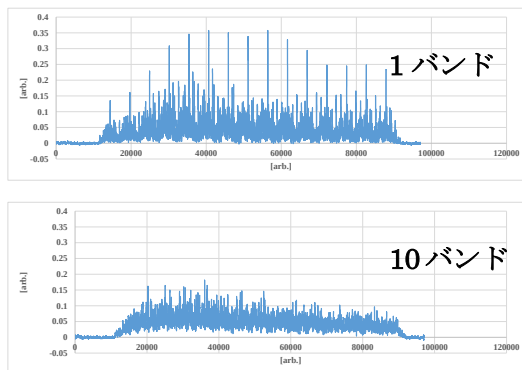


Fig.11 Spill structures measured using data of 1-50000 turns.

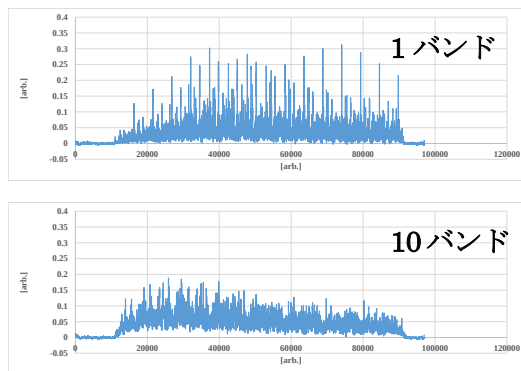


Fig.12 Spill structures simulated using data of 70000-120000 turns.

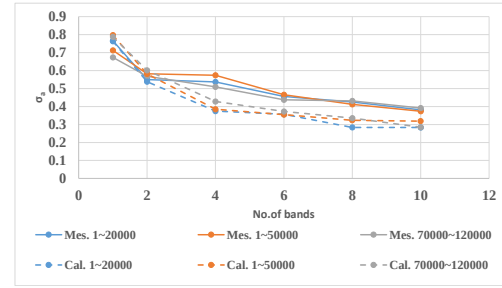


Fig.13 Variation of the spill intensity vs. the number of bands.

6. まとめ

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に含む共鳴周波数帯が増えるとともに、スピル強度の変動は減少していくことを示していた。

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.