

遅いビーム取り出しにおける高速ビーム制御とビーム取出し量を増やすための マルチバンド RFKO システムに関する研究

STUDY ON FAST BEAM SWITCHING AND INCREASING A BEAM EXTRACTED IN SLOW BEAM EXTRACTION USING A MULTI-BAND RFKO SYSTEM

塩川智也^{#, A)}, 奥川雄太郎^{A)}, 山口輝人^{A)}, 栗田哲郎^{B)}, 中西哲也^{A)}

Tomoya Shiokawa^{#, A)}, Yutaro Okugawa^{A)}, Teruto Yamaguchi^{A)}, Tetsuro Kurita^{B)}, Tetsuya Nakanishi^{A)}

^{A)} College of Industrial Technology, Nihon University

^{B)} WERC

Abstract

It is a key technology to obtain a uniform spill in a slow beam extraction from a synchrotron. The authors have proposed the Radio Frequency Knockout (RFKO) method using multi-band colored noise (CN) signal. This noise signal includes higher betatron resonance frequencies, and simulation and experiment have shown that a uniformity of spill intensity improves with the number of frequency bands. This method is also expected that a beam switching time can be shortened, which is required for spot scanning irradiation. As a result of the beam switching experiment, the spill becomes zero in 140 μ s. The RFKO system to increase particles extracted using a lower power amp. is also studied. The system consists of the CN source, 40W amp., IT, APN, and electrode. The voltage conversion ratio of IT is changed from 1:4 to 1:5, and APN for it is developed. The beam extraction increases by 15 %. However, the frequency characteristics of IT and APN becomes worse. As a result of modifying the original CN signal so as to compensate the frequency characteristics, the spill intensity is improved by 5 %.

1. はじめに

重粒子線がん治療におけるビーム照射に最も適した方法としてスポットスキニング法がある。照射したい部分を数千-数万ブロックに分割しビームを照射するため、高速制御が必要であり、それを目的としたシンクロトロンからのビーム取り出し法として Radio Frequency Knockout (RFKO)法が用いられている。RFKO 法は周回粒子のベータトロン振動数に応じた高周波電界をビーム進行方向と垂直な方向に加えることで振幅を増大させ、ビーム取出しを行う。この方法では、スパイル強度のばらつきが大きく、それを一様化するために周回ビームをバンチングしている。その時ビームの off 時間は 1 ms オーダーと報告されており[1]、その時間はビームをバンチングすることによるものである[2]。そのため筆者らはバンチングをさせなくても出射ビーム強度が一様になる方法を提案した。これは広い周波数帯域で複数のベータトロン共鳴周波数を含んだ、マルチバンドスペクトルのカラードノイズ(CN)を信号源に用いる方法である。その周波数は今回ビーム実験を行った若狭湾エネルギー研究センター(WERC)のシンクロトロンにおいては、1-14 MHz である。

本方式を実現するために、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[3]。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 All Pass Network(APN)回路、昇圧及び APN と CN 源のインピーダンス整合をとるための広帯域 Impedance Transformer(IT)も開発した[4]。

本論文では、ビーム取出し量を増やすために IT の電圧変換比を変えた RFKO システムと、RFKO システムの特性悪化を補償するための CN 信号を用いたときのビーム実験の結果及び、ビーム取出しの高速制御実験の結果について報告する。

2. WERC シンクロトロンの概要

WERC 加速器施設は、タンデム加速器および、それを入射器としたシンクロトロンによって、広範囲のエネルギーのイオンビームを様々な研究に供給している[4]。WERC シンクロトロンの平面図を Fig. 1 に示す。今回のビーム実験のパラメータを以下に示す。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 であった。チューンは $v_x = 1.683$ 、 $v_y = 0.787$ 、周回周波数は 2.97 MHz で、クロマティシティは $\Delta v_x/\Delta P/P = -0.42$ [5]、運動量分散は $\Delta P/P = 6 \times 10^{-4}$ である。

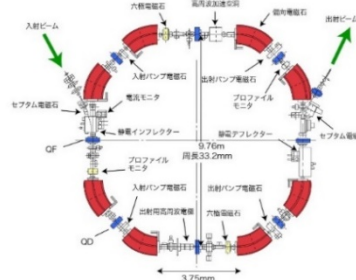


Figure 1: Schematic layout of WERC synchrotron.

[#] cito19011@g.nihon-u.ac.jp

3. マルチバンド CN 信号源

CN 源として DAC を用いた CN 発生方式は既に開発している。マルチバンドスペクトルの CN 信号は次のような手順で信号を発生させる。まず、デジタルフィルタ方式で CN データを作成後、DAC のメモリに保存し、そのデータを外部クロックにより出力する。CN データは、DAC のメモリに限りがあるため、計算したデータを繰り返し使用することにした[4]。今回、CN データには、スピル構造の変化が比較的小さい 80000 ターン分を使用した。また、シンクロトロンの一周期当たりのサンプリング数は 84 とした。

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. 2(a)に示す。1-14MHz の間に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、一定であることを確認している。Figure 2(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、設計値と一致している。

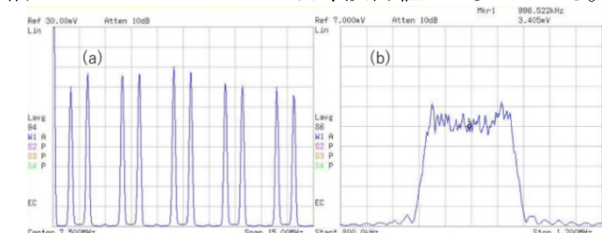


Figure 2: Multi-band spectrum and an enlarged view of one band observed by spectrum analyzer. (a) Horizontal frequency is 1-14 MHz. (b) Frequency width is 0.143 MHz.

4. RFKO システムの概要

RFKO システムのブロック図を Fig. 3 に示す。Workstation から出力した CN は Low pass filter を通して RF スwitch に入力され、ビーム取り出し時間の間だけ出力される。その後位相分配器により、位相が 180 度異なる信号として、それぞれ 40 W の広帯域高周波アンプ、IT、APN を通して各 RFKO 電極に入力される。

IT と APN の回路図を Fig. 4 に示す。APN は周波数に依らず電極に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 で表されることより、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。今回は、ビーム取り出し量の増加を目的としているため、IT の電圧変換比を 1:5、 $R=1250 \Omega$ とした。IT はフェライトコアを使用し、10 KV 耐圧のケーブルを一次側と二次側でそれぞれ 9 巻きしたトランスを四個組み合わせて 1:5 としている。実際に WERC のシンクロトロンに接続した RFKO システムの全体図と IT と APN を Fig. 5、Fig. 6 に示す。

RFKO システムの周波数特性の測定方法を Fig. 7 に示す。図中の左に示している電極電圧の測定は同軸コ

ネクタの内導体に高周波プローブ ($R=10 \text{ M}\Omega$, $C=15 \text{ pF}$) を接続して行った。この時、高周波プローブの C の影響により高周波側で正しく測定ができないため、合わせて図中の右に示している電極付近の電位の測定も行った。電極電圧と電位の測定結果と計算結果を Fig. 8 に示す。図から、測定値と計算値が大体一致していることがわかる。この結果から、電極に印加される電圧の特性は電位の特性に等しいと考える。Figure 9 に試作電極の電極電圧、電位の測定結果、Fig. 10 に WERC 電極電圧の測定結果と電位の推定値を示す。結果は周波数 1 MHz の値を 1 として規格化した。

WERC 電極電位の推定値は、試作電極と WERC 電極の電圧の測定結果の比を求め、試作電極の電位の測定結果にその比を掛けたもの推定電圧とした。WERC の推定値は試作電極の測定結果と比べ、1:4、1:5 とともに高周波側での悪化が大きく、14 MHz のとき 1:4 では約 50 %、1:5 では約 60 % 電圧が低下した。電極の静電容量が大きいほど電極電圧が低下することが分かっているため、試作電極に比べ、WERC 電極の方が静電容量が大きいことが考えられる。

また、ビームの取出し量は RFKO 電極に入力されるパワーに比例する。1:4 と 1:5 の WERC 電極電圧の結果を相対値で表したものを Fig. 11 に示す。各バンドに該当する周波数の電圧を二乗し、その総和の比より、1:4 から 1:5 にすることで 23 % 取出し量が増加すると考えられる。また、後の章に説明する f 特性補償データには昨年度の周波数特性の測定結果を用いたので同図にそれを示す。

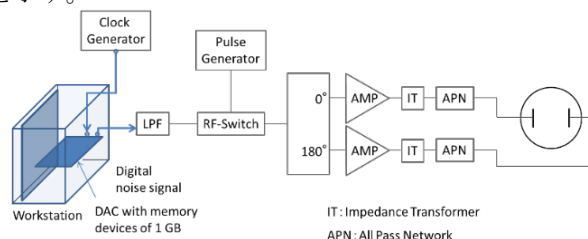


Figure 3: Block diagram of the RFKO system.

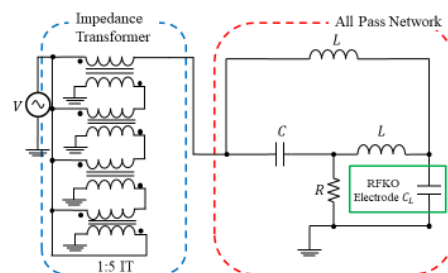


Figure 4: Electric circuit of the IT and APN.



Figure 5: Photograph of RFKO system.



Figure 6: IT and APN connected to the WERC synchrotron.

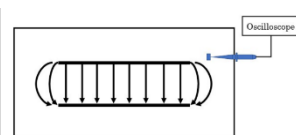
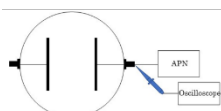


Figure 7: Measurement of electrode voltage and potential.

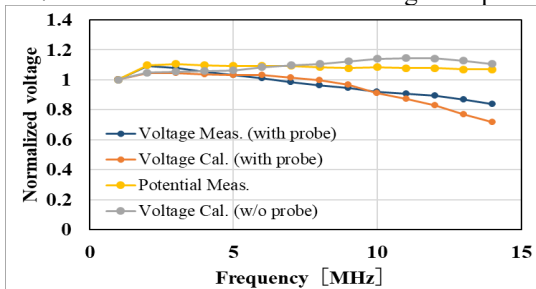


Figure 8: Frequency characteristics of RFKO system (measured and calculated values).

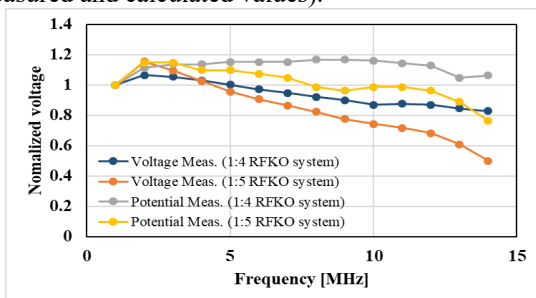


Figure 9: Frequency characteristics of RFKO system (prototype electrode).

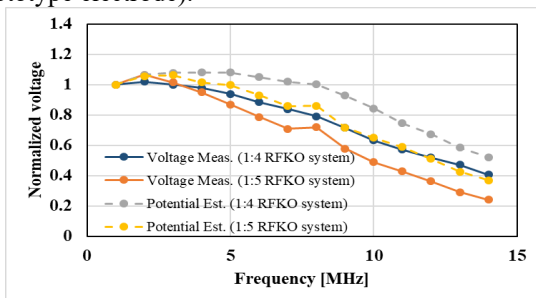


Figure 10: Frequency characteristics of RFKO system (WERC's electrode).

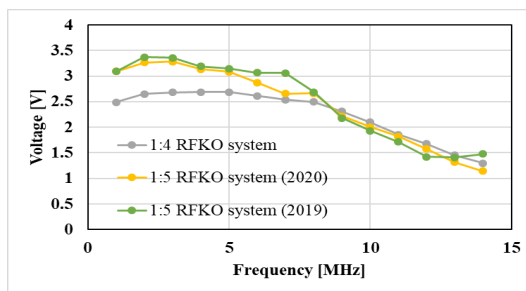


Figure 11: Estimated voltage of RFKO system (WERC's electrode).

5. 1:4 と 1:5 RFKO システムを使用したビーム取出し実験

開発した RFKO システムを WERC のシンクロトロンに接続してビーム取出し実験を行った。1:4 及び 1:5 RFKO システムのビーム実験結果を Fig. 12 に示す。この時使用した CN データのバンド数は 10 であり、最大値/実効値の比が 2 になるように部分的に変更したデータである[6]。ビーム取出し量は電圧変換比を 1:4 から 1:5 にしたことで、全体で約 15 %に増加した。計算値(23 %)との差については、計算値は WERC の電極電圧の周波数特性から推測した取出し量であり、実際にそれを考慮したシミュレーションから求めた値ではないためであると考えられる。

スピル強度のばらつきは標準偏差を平均値 \bar{x} で割った値で求めた。標準偏差はスピル強度がほぼ一定となる区間で計算し、その区間を 5 分割し、それぞれの区間で(1)式と(2)式で計算をした。区間は 5000-10000 までの 5000 個のデータを使用した。計算した結果、ビームの偏差は、1:4 から 1:5 にすることで約 2 %悪化した。

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

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

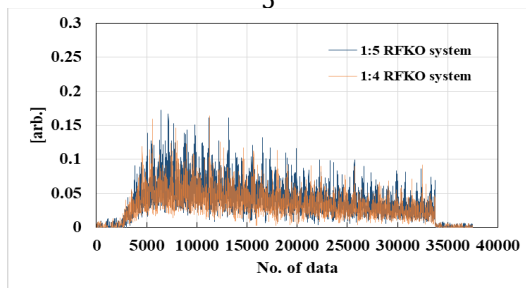


Figure 12: Spill structures measured using 1:4 and 1:5 RFKO system.

6. 1:5 RFKO システムに f 特性補償データを使用したビーム実験

開発した 1:5 RFKO システムは、信号に用いる周波数帯 1-14 MHz において高周波側で特性が大きく悪化し、一定の電圧を電極に印加することができない。高周波での特性の悪化は、スピル強度のばらつきに關係するため、

特性が悪化している分だけ CN データを補償した。f 特性の補償には昨年度 WERC で測定した電圧の測定結果を用いた。Figure 11 の周波数特性の値の逆数を取り、その値を CN データの各バンドにかけて補償データを作成した。

補償の有無によるシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。このときのバンド数は 10 である。偏差の計算は前章と同様である。計算に使用した区間は 50000-10000 までの 50000 ターンを使用した。計算した結果、特性の補償をすることで約 17 %、偏差が改善した。それらの CN データを用いた実験結果を Fig. 14 に示す。偏差は、特性の補償をすることで約 5 %改善したが計算値ほどは改善されなかった。Figure 11 とのスピル構造の違いは使用した CN データの実効値の違いであり、Fig. 11 の実効値の 1.6 倍である。

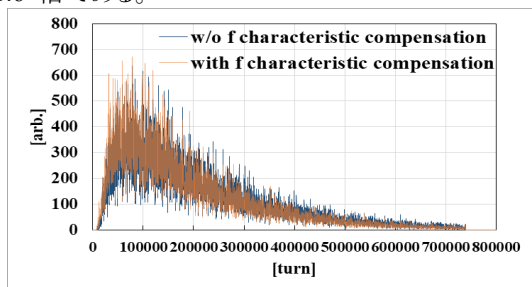


Figure 13: Spill structures simulated using data of frequency characteristic compensation.

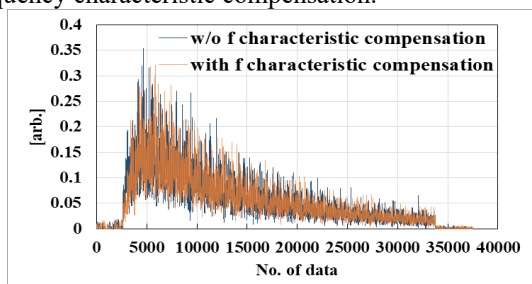


Figure 14: Spill structures measured using data of frequency characteristic compensation.

7. ビームスイッチング実験

RF スイッチにより CN/off した後のスピルの変化について、加速 RF 電圧を変えて測定した結果を Fig. 15 に示す。測定結果はオシロスコープで 32 回のアベレージをかけている。スイッチを off した後、60 μ s 出射が続いた後に、急激に減少し、その後 RF 電圧に関係した時間で徐々に減少する。急激な減少の量は加速 RF 電圧が小さいほど大きく、その後の減少は RF 電圧が小さいほど緩やかである。CN/off 後の通常の取り出しが行われる時間幅と急激な減少波形は加速 RF 電圧に関係していないことが分かる。

加速 RF 電圧の設定値が 10 V の時の測定結果を Fig. 16 に示す。スイッチの周期は 5 ms、off 時間を 4 ms としている。CN/off した直後の拡大図を Fig. 17 に示す。CN/off した後、60 μ s の間にセパトリクス枝の部分にいた粒子が出射され、その後 80 μ s かけてセパトリクス

周辺にいた粒子が出射されていると思われる。シミュレーション結果を Fig. 18 に示すが、それらの時間は 10 μ s、16.5 μ s で実験結果に比べはるかに短い。測定値と計算値の違いの理由の一つに線量モニタの応答速度がある。線量モニタの応答速度の測定を Fig. 19 に示す。この測定は線量モニタに接続してある同軸ケーブルをパルス発生器につないで線量モニタの信号処理回路の出力を観測したものである。CN/off した直後 10 μ s 遅れて減少が始まり、その後 25 μ s かけて急激に減少する。従って、これらの原因を考慮しても測定値の時間の遅れは説明できないため、今後も検討する必要がある。

次にスイッチング実験結果から運動量分散を求めた。Figure 15 で説明したなだらかなスピルの減少は運動量分散によるものと考えられる。加速 RF 電圧をかけることで粒子はシンクロトロン振動し運動量分散が変化する。それに伴いチューンも変化するためセパトリクスの内側にいた粒子が出射され CN/off 後になだらかに減少する。この減少の時間はシンクロトロン振動の一周期に等しいことが考えられる。

加速 RF 電圧の設定値が 140 V と 160 V のスピル波形を Fig. 20 に示す。CN/off 後の両波形はよく一致していることが分かる。これは 140 V の時の RF バケットハイトが周回粒子の運動量分散(全幅) $\Delta P/P$ に等しいことが考えられる。140 V の RF バケットハイトは計算から $\pm 6.0 \times 10^{-4}$ となる。WERC でのバンチング波形の測定から評価した値は $\pm 4.7 \times 10^{-4}$ [7] であった。今回の測定から求めた運動量分散と WERC で測定された運動量分散は近い値を示した。

次にシンクロトロン振動の周期を求めた。シンクロトロン振動数は加速 RF 電圧のルートに反比例するため、電圧が高いほど周期は短くなり、スピルがゼロになるまでの時間が短くなる。今回はそれぞれの加速 RF 電圧に対して、なだらかな減少の始点と終点からそれらの時間を求めた。一例として加速 RF 電圧 160 V の結果を Fig. 21 に示す。シンクロトロン振動の周期の測定結果を Fig. 22 に示す。また、今回の実験とは異なる方法の $\Delta \Phi$ 測定の結果 [7] と計算結果を同図に示す。 $\Delta \Phi$ 測定結果とスピル減少から求めた結果が大体一致していることが分かる。

これらの結果からバンチングをしなければ、シンクロトロン振動はしないのでスピルがゼロになるまでの off 時間を短縮できることが分かる。加速 RF 電圧が 0 V で線量モニタの応答速度が早ければ、100 μ s 以下でスピルはゼロと考える。

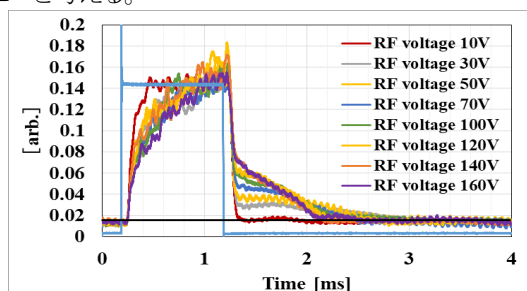


Figure 15: Spill structures with RF voltages.

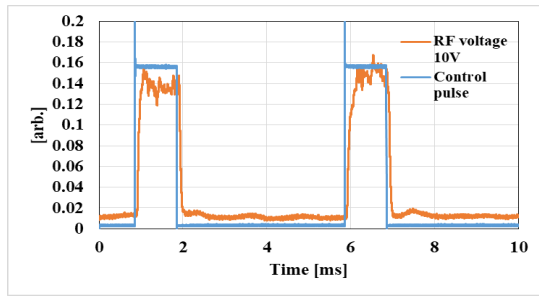


Figure 16: Spill structure with RF voltage setting of 10V.

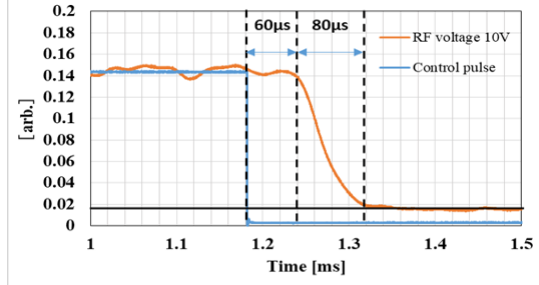


Figure 17: Spill structure with RF voltage setting of 10V (20µs/div).

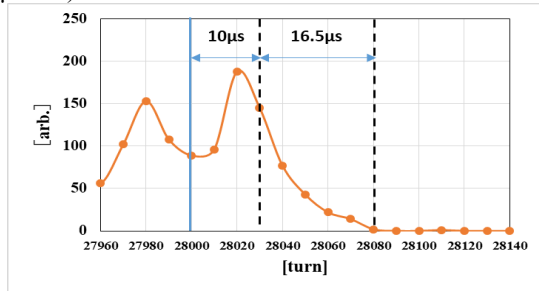


Figure 18: Simulated spill structure when the CN turn off at 28000 turn.

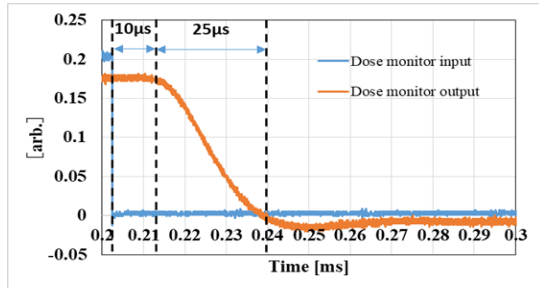


Figure 19: Response speed of dose monitor (10 µs/div).

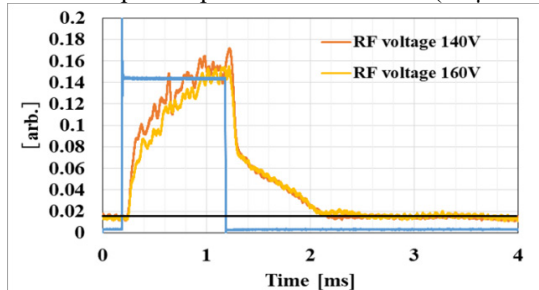


Figure 20: Spill structures with RF voltage setting of 140 V and 160 V.

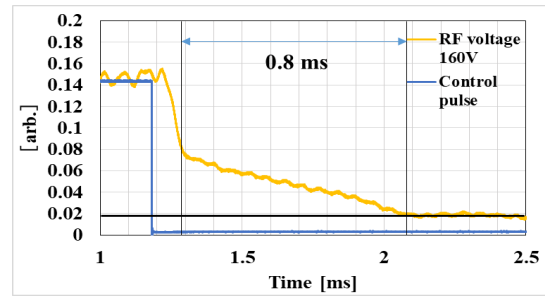


Figure 21: Spill structure with RF voltage setting of 160 V (enlarged view).

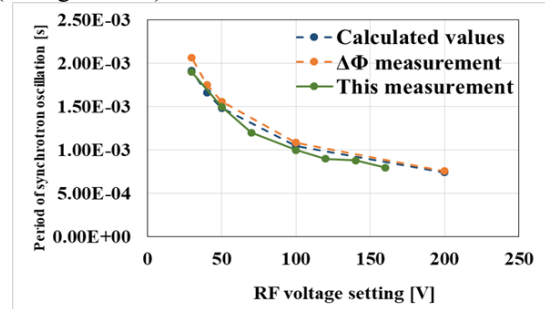


Figure 22: Period of synchrotron oscillation vs. RF voltage setting.

8. 結論

ビーム取り出し量を増やすために電圧変換比の変更、f 特性補償 CN データによるビーム実験を行った。電圧変換比を変えることで実験では約 15 % 取り出し量が増加した。また、周波数特性を補償することで約 5 % スpill 強度の偏差を改善することが出来た。しかし、どちらも計算値との誤差があるため今後も検討する必要がある。

スイッチング実験では、スイッチ off 後のビームの減少がシンクロtron 振動に影響していることを示した。加速 RF 電圧をゼロにして応答速度の短い線量モニタを使うことで、一様な spill 強度かつ、100 µs 以下で spill をゼロにすることが期待できる。

謝辞

本研究を行うにあたり、協力をしていただい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] L.Falbo, "Advanced Accelerator Technology Aspects for Hadron Therapy," Proceedings of the HIAT, pp. 156-162, 2012.
- [2] T. Furukawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A503(2003) 486.
- [3] Akio Shinkai, Soichiro Ishikawa, Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A 769 (2015) 16-19.
- [4] T. Shiokawa *et al.*, Proc. of the PASJ2019, Kyoto, Japan, pp.797-801.
- [5] K. Matsuda *et al.*, Pros. of the PAC2001, Chicago, USA, pp.2590-2592.
- [6] Y. Okugawa *et al.*, in these proceedings.
- [7] T. Kurita (private communication).