

一様なスピルでかつ高速ビーム ON/OFF ができるマルチバンド RFKO による遅い ビーム取出し

SLOW BEAM EXTRACTION WITH MULTIBAND RFKO TO OBTAIN UNIFORM SPILL AS WELL AS FAST BEAM SWITCHING

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

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

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

^{B)} The Wakasa Wan Energy Research Center

Abstract

A slow beam extraction using a multiband RF signal was performed at the WERC synchrotron in detail. The RF signal included many frequency bands around the betatron resonances with third order, and each band had a width equal to a tune spread. The experiment was done with ten bands at maximum. A uniformity of spill intensity improves as the increase of number of frequency band without bunching of a circulating beam, moreover it was also shown that spill switching-off time less than around 100 μ s could be attained if we could use a dose monitor of a fast response time. The spill uniformity was also measured with changing an RF voltage for the bunching, and it was shown that the same effect as the uniform spill can be obtained by bunching with 10 bands. A new all-pass network for a higher frequency was proposed for an RFKO system

1. はじめに

粒子線がん治療装置の主加速器であるシンクロトロンからのビーム取出し法として高周波ノックアウト(RFKO)方式が使われている。この方式は周回粒子に横方向の高周波電界を与えてベータトロン振動を大きくして取出す方法であり、ビーム on/off 制御を高速にできる利点がある。効果的な照射方法であるスポットスキヤニング照射では、特にこの高速制御が必要とされる。しかし、高周波の周波数バンドが一つの共鳴周波数帯だけだと取出しビーム強度の変化が大きくなる問題がある。その解決法として周回ビームをバンチングする方法があるが、ビーム on/off 制御が遅くなる問題が新たに生じる[1, 2]。

これらの問題を解決する方法として高次の共鳴周波数帯を含む高周波信号を使用する方法を提案し、若狭湾エネルギー研究センター(WERC)のシンクロトロンを使って原理実証(POP)試験に成功している[3, 4]。この高周波信号は 1/3 共鳴周波数帯とその高調波成分を含み、共鳴に寄与しない成分は取り除いたマルチバンドスペクトルとしている。

本発表では、本取出し方式のビーム特性を詳細に実験した結果について報告するとともに RFKO システムの All Pass Network (APN)に関して、より高い周波数帯で使用できる回路についても報告する。さらに、スポット照射時間を短くする方法についても述べる。

2. マルチバンド RFKO システムによるシンクロトロンからのビーム取出し

シンクロトロンを周回する粒子は進行方向に対して垂直方向にベータトロン振動をしており、取出すためにはその振幅を増大する必要がある。その方法として、ベ-

ータロン振動数に等しい周波数の高周波電界を粒子に与え共鳴させることにより振幅を増大する RFKO 法がある。振動数は周回する粒子の振幅により異なるため、RFKO の信号源としてはその周波数成分を含んだ信号とする必要がある。Figure 1(上)はそのような信号を用いてビームシミュレーションした結果である。信号はデジタルホワイトノイズからデジタルフィルタ法を用いて必要な周波数帯を含む信号を作り出した。このような信号をチャードノイズ(CN)と呼ぶ。一共鳴周波数帯だけでは同図の 1 バンドに示すようにスピルの強度変化が大きい。

筆者等はこのスピルの変化を小さくする方法として、ベータトロン振動数の高調波成分も含めた信号(マルチバンド CN)を用いる方法を提案した。Figure 1(下)に 10 の共鳴周波数帯を含めた信号による結果を示すが、スピルの変化は明らかに小さくなるのが分かる。

1/3 共鳴を用いた取り出しでは、共鳴周波数は以下の式で表される。

$$f = \left(n \pm \frac{1}{3}\right) f_0$$

ここで、 n は整数、 f_0 は粒子の周回周波数である。上記 10 バンドでは $n=0\sim 5$ とした周波数付近のバンドを用いた。WERC シンクロトロンの実験では、 f_0 は 2.97 MHz で

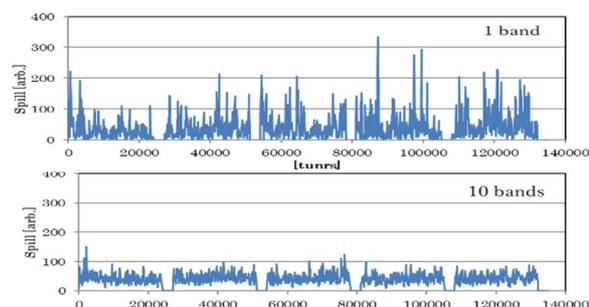


Figure 1: Spill structures with 1 and 10 bands.

各バンド幅としては 100 kHz 以下であった。ちなみに、普及型重粒子線(炭素)装置では約 3.5 MHz である。

3. WERC シンクロトロン の概要

WERC 加速器施設は、タンデム加速器及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[5]。ビーム実験は WERC のシンクロトロン の RFKO 電極にマルチバンド RFKO システムのプロト機を接続して行った。WERC シンクロトロン の平面図を Fig. 2 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 $\frac{\Delta v_x}{\Delta P/P} = -0.42$ 、運動量分散は $\frac{\Delta P}{P} = 6 \times 10^{-4}$ である。

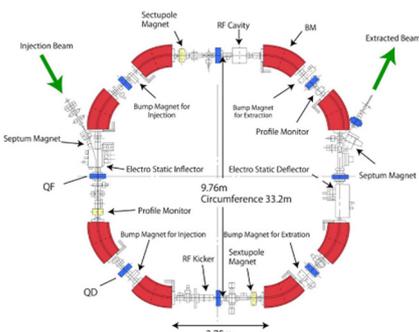


Figure 2: Schematic layout of WERC synchrotron.

4. RFKO システム の概要

ビーム実験に用いた RFKO システムのブロック図を Fig. 3 に、IT および APN の回路図を Fig. 4 に示す。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。今回使用した CN データは、20 万ターン分のデータでビームシミュレーションした中で、スピルの変化が比較的小さい 8 万ターン分を用いて繰返し出力した。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。ここで、使用した DAC(AVAL DATA 社 APX-500/DAM-500)では最大約 600 万ターン分のデータ保存が可能である。

DACを装着した Workstation 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

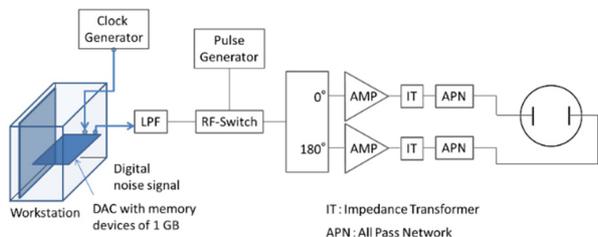


Figure 3: Block diagram of the RFKO system.

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。

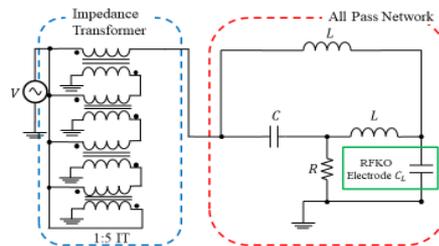


Figure 4: Electric circuit of the IT and APN.

5. ビーム実験結果

5.1 バンド数対スピルの一様性

バンド数 1 の CN で取出しを行ったときのスピルを Fig. 5 に示す。測定は線量モニターで行い、オシロスコープに取り込んだ1ショットのデータをフーリエ変換し、ノイズ成分を取り除いた結果(オレンジ色)と、更に四極電磁石等の電流リップルによる成分を取り除いた結果(青色)である。Figure 6 は同様の処理を行ったバンド数 10 の結果である。Figure 7 はこれらの結果のスピル強度の変動の標準偏差をバンド数に対してプロットしたものである。バンド数に対する変化は計算値とほぼ同じで、電流リップルの影響を取り除くことで、絶対値もより計算値に近づくことが分かる。

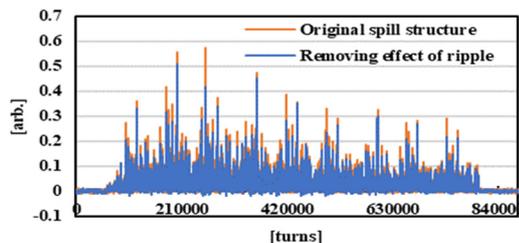


Figure 5: Spill structures when the number of bands is 1.

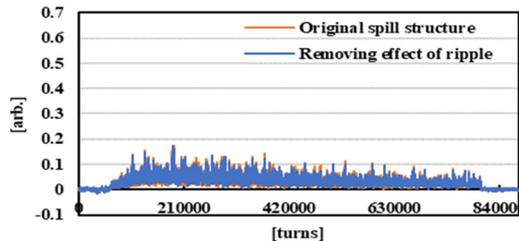


Figure 6: Spill structures when the number of bands is 10.

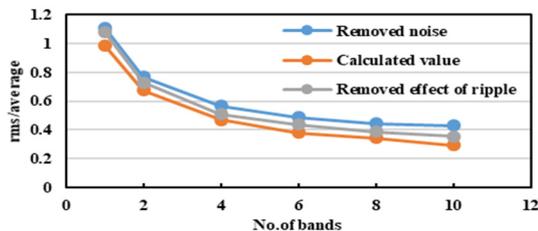


Figure 7: Fluctuation of the spill intensity vs. the number of bands.

5.2 バンチングによるスピルのばらつきの変化

周回ビームをバンチングしたときとしてないときのスピルを Fig.8 に示す(バンド数1)。WERC シンクロトロンの通常運転では、加速空洞の制御を適切に行うためにビーム出射時に僅かに高周波を投入して運転しており、図中のRF10Vはそのときの設定電圧を表す。この場合、周回ビームの殆どはバンチングしていないがRF400Vでは完全にバンチングする。同図からバンチングによりスピルの変動は大幅に小さくなっていることが分かる。8万ターン分のCNデータの繰り返しの周期性がスピルにも見られる。計算でも周期性が見られたが、実験ではより強調される結果となった。さらに、この強い周期性はバンチングしても取り除けていない。ただし、使用したDACのメモリ容量だと250ms分のデータは保存できるので、実用上はこのような問題は生じないと考える。Figure 9 にバンド数10の結果を示すが、周期性は非常に小さくなっている。

Figure10 にバンド数に対するスピルのばらつき標準偏差を示す。2回測定した結果を示した。バンド数1では200V以上ではほぼ一定になることが分かる。完全にバンチングする最低電圧は別の測定において約140Vであることが示されており[6]、実際には140V以上でばらつきの度合いは一定になると考える。標準偏差はバンド数10に比べて大きいですが、Fig. 8 に示した周期性の強調が原

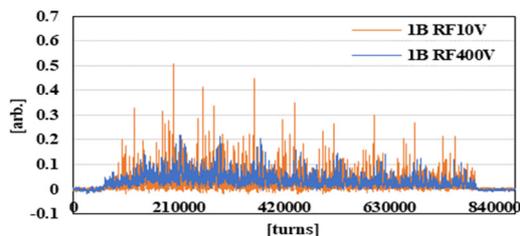


Figure 8: Spill structures using 1 band with longitudinal RF voltage setting of 10 V and 400 V.

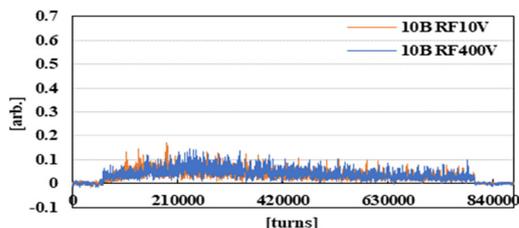


Figure 9: Spill structures using 10 bands with longitudinal RF voltage setting of 10 V and 400 V.

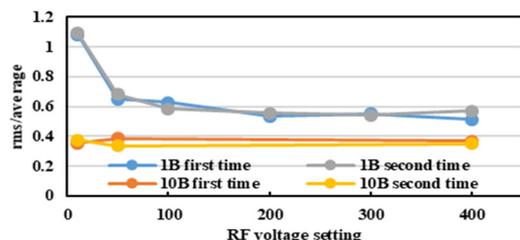


Figure 10: Fluctuation of the spill intensity vs. longitudinal RF voltage setting.

因と考える。同図に示すバンド数10の結果は、電圧に関係なく一定であることがわかる。これは、バンド数を増やすことがバンチングによるスピルのばらつきを減らす効果と同じであることを示す。

5.3 ビーム off 特性

RF スイッチにより CN-off した後のスピルの変化について測定した結果を Fig. 11 に示す。測定はオシロスコープで32回の平均化を行った。設定電圧は10Vであり、バンチングしているビームは僅かである。スイッチをオフした後、60μs出射が続いた後に急激に減少し、その後緩やかに減少する。計算では、CNをoffしてもセパトリクス枝の部分にいた粒子によりそれまでと変わらない取出しが行われ、その後、セパトリクス周辺にいた粒子が徐々に取り出され、それらの時間は10μsと16.5μsであり、この測定結果は長すぎる。原因としては、線量モニタとその信号処理回路の応答速度[6]が考えられるが、それでも長すぎるため、他にも原因があると思われる。

ちなみに、RF設定電圧を高くしてバンチングビームを増やすと、80μsの間に半分くらいになり、その後は設定電圧により変わるがmsのオーダーでゆっくりと減少する[6]。

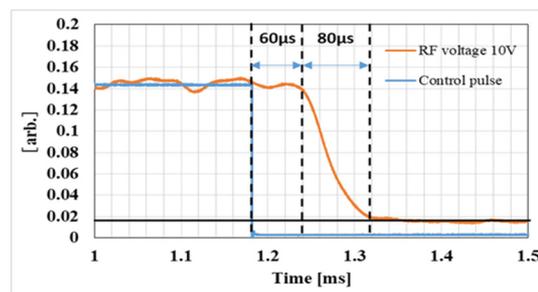


Figure 11: Spill structure after CN-off (20 μs/div).

6. 高い周波数帯用 APN の提案

6.1 通常の APN

通常の APN 回路は Fig. 12 の C3, C4, L3 のない回路である。その回路では以下の条件のときに入力インピーダンスは周波数に関係なく R4 に等しくなる。

$$L1 = L2 = \frac{C1 R4^2}{2}, \quad C2 = \frac{C1}{4} \quad (1)$$

このとき、入出力電圧比は下式で表される。

$$F(\omega) = \left[1 + \frac{j\omega C1 R4}{2} + \frac{(j\omega C1 R4)^2}{4} \right]^{-1} \quad (2)$$

この式は、 $1 \gg \omega C1 R4$ のとき出力電圧は周波数に関係なく入力電圧に等しくなることを示し、APN の名前通りの特性が得られる。しかし、RFKO システムでは以下に述べるようにこの条件が満たせない。

Figure 12 の C1 は RFKO 電極の静電容量で、図中の値は POP 実験を行った WERC の電極と構造を同じくしたプロト機の静電容量である。また $R4 = 1250 \Omega$ は、前段の IT で電圧を5倍(インピーダンスは25倍)に昇圧することを前提にした値で、必要な電極電圧は決まっているため

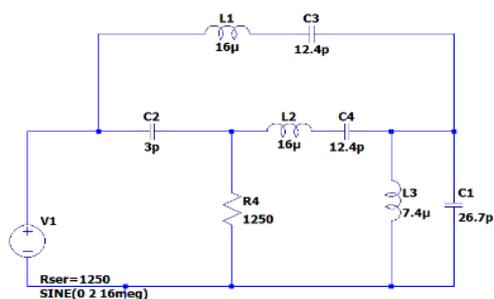


Figure 12: Equivalent C reduction circuit.

R4は大きいほど消費電力を小さくでき、高周波アンプの負担も小さくできる。必要な周波数帯は、バンド数を10とすると炭素線がん治療装置に用いられるシンクロトロンでは0.8~16.3 MHz、小型陽子線シンクロトロンでは1.6~37.5 MHzである。これは $F(\omega) = 1$ となる条件を満たさない。そのため、L1, L2, C2は入力インピーダンスの変化を考慮しながら出力電圧ができるだけ一定となるように調整した。

R1=1250 Ωの結果をFigs. 13, 14に示す。Equations (1), (2)で計算した値を用いた場合、Zinは周波数に関係なく一定であるが、電圧は大きく変化することが分かる。橙色はL1 = L2の条件で最適化した結果である。電圧は16 MHzで0.53 Vに低下しているが、Zinは0.6以上であり、入力電流と電圧の位相差から全周波数にわたって実数部が支配的である。このパラメータはPOP試験用に試作した回路とほぼ同じであり、広帯域高周波アンプに接続して問題なく動作している。ちなみに、POP試験では必要な周波数帯は1から14 MHzであった。これに対して、L1とL2を独立に変化させて最適化した結果を黒線で示すが、電圧は16 MHzで0.7に改善しているが、Zinは0.2程度まで減少しており、アンプに接続したときに正常に動作しない可能性がある。

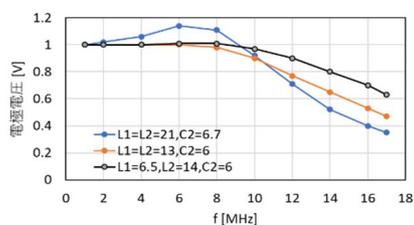


Figure 13: Frequency vs. electrode voltage.

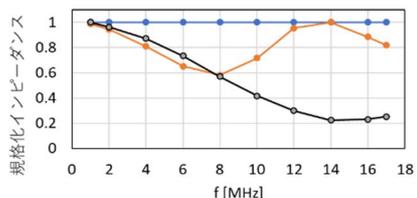


Figure 14: Frequency vs. input impedance.

6.2 電極容量を等価的に小さくする方法

電極電圧の周波数特性が高域側で悪化する原因は、 $\omega R4C1$ が1よりも十分に小さくないことであることは前節で述べた。R4を小さくすることは高周波アンプ出力を大

きくする必要があるため、C1を回路的に小さくする方法を提案する。

電極に並列にコイルを接続すると、そのインピーダンスは下式で表せる。

$$Z = \frac{1}{j\omega C \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC}\right)} \quad (3)$$

この式は、共振周波数よりも高い周波数では()内は正の1以下の値となり、等価的にはキャパシティブとなりCよりも小さい静電容量となることを示す。ただ、必要な最大周波数で等価的Cを決めたとき、それ以外の周波数ではCが変化するため、その変化に合わせてL1, L2を変える必要がある。そのため、Lに直列にCを接続する。そのインピーダンスは下式で与えられるが、Cと同様に周波数が低くなるほど等価的Lは小さくなるのがわかる。

$$Z = j\omega L \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC}\right) \quad (4)$$

C2に関しては電圧特性への影響は小さいため補正はしない。

炭素線シンクロトロンへの適用を考え、C1を16 MHzで等価的に半減するパラメータを計算する。Equation (3)の括弧内が16 MHzで0.5となるLを計算すると7.4 μHとなる。L1, L2については、通常回路の先の値を2倍にする必要があり、それらの値から計算した直列CはC3 = C4 = 12.4 pFであった。

この回路で計算した周波数特性をFig. 15に青線で示す。8~17 MHzで平坦な分布が得られている。但し、入力インピーダンスから実用的下限は9 MHz程度と思われる。同図には実験結果も橙色で示すが、計算に近い特性が得られていることが分かる。

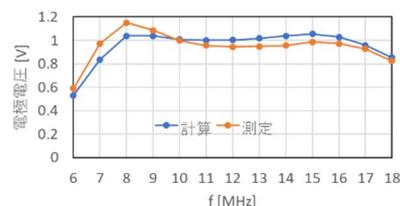


Figure 15: Frequency vs. electrode voltage for a circuit shown in Fig. 12.

この回路を使用する場合は、9 MHz以下の周波数帯に対しては、通常のAPNを使用する必要があるため、電極とIT+APNは2セット必要となる。

7. スポットスキヤニング照射の照射時間を短縮する方法

スポット当たりの照射時間は線量モニタや取出しの応答時間を考慮して決める必要がある。それらの応答時間は照射線量誤差となるため、例えば、スポット当たりの照射線量誤差を1%以下にする場合、スパル強度が完全に

一様だった場合、スポット当たりの照射時間は上記応答時間の約 100 倍とする必要がある。応答時間を 100 μ s とすると、スポット当たりの照射時間は約 10 ms となる。全スポット数が数万となると、照射時間だけで数百秒となる。スピル強度の変動が大きいと最後の応答時間に相当する時間帯にスピル強度が強くなることもあるため、この時間はさらに長くする必要がある。

この時間を短くする方法として、各スポットへの照射線量が満了となる前にスピル強度を下げる方法が考えられる。線量誤差はおおよそ前記応答時間 \times スピル強度 / 必要線量に比例するため、線量満了となる前のスピル強度を下げれば、その前のスピル強度を上げることができ、照射時間を短くすることができる。

Figure 16 は WERC シンクロトロン のラティスで計算したバンド 10 の結果で、応答時間を 100 μ s (300 ターン) とした。スピル強度を下げるタイミングは目標照射ビーム量の 84% (10 bands の場合は 86%) に達した時点とし、CN 強度をその直前の 45% (ビーム強度 20%) に低減している。CN 強度はスピル強度が一定となるようにフィードバック制御しており (CN 低減後は除く)、300 ターンの遅れを考慮している。また、線量満了後から次の出射開始までは 1300 ターンの出射停止区間を設けている。

計算は 95 万ターン行い、Fig. 16 は 15 万ターンまでの結果を示した。また、Fig. 17 は各取出しの粒子数の目標値に対する比をプロットしたもので、誤差は 1% 以下であることが分かる。また、6 バンドの場合、10 バンドに比べて一回の出射時間を長くする必要があるため、取出し回数 は少ない。Figure 18 はバンド数に対する誤差 1% 以下にするための出射時間で、周回周波数を 2.97 MHz としたときの値である。バンド数 10 の場合、1 回の出射時間は平均 2.3 ms であり、平坦な強度分布でスピル強度を下げない方式に対して 1/4 以下にできる。バンド数 1 でも 9 ms 程度であり、スピル強度分布が平坦な場合と同程度の照射時間にできることが分かった。

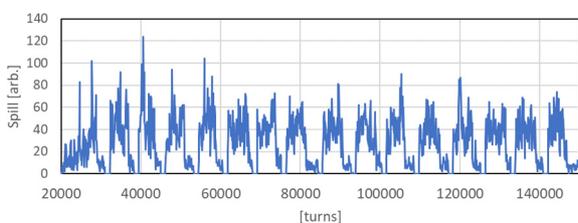


Figure 16: Beam extracted intermittently.

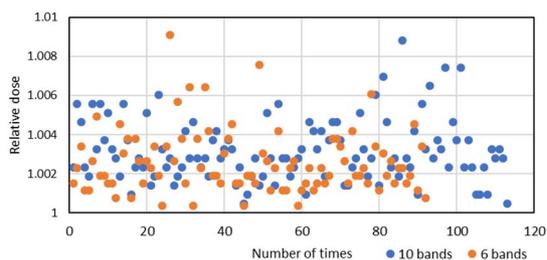


Figure 17: Relative dose for each spot.

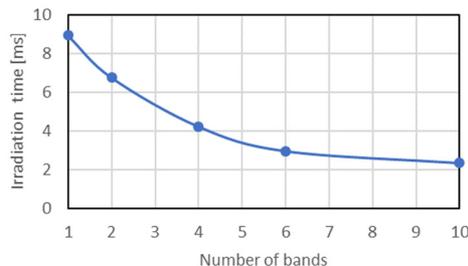


Figure 18: Irradiation time for each spot vs. Number of bands.

8. 結論

スピルを一様にする方法としてマルチバンド RFKO 法は 1 バンドでバンチングする方法と同様の効果が得られることを実験で示した。さらに、バンチングしないことによりビーム off 時間は早い線量モニタを使えば 100 μ s 以下にできることを示唆した。

高周波用 APN を提案し、10 バンドで必要とされる高周波数帯で平坦な電圧特性が得られることを計算と実験で示した。また、スポット照射時間を短くするために線量満了となる直前に CN 強度を下げて取出し粒子数を減らすことで、10 バンドではスポット当たりの照射時間は 2.3 ms、1 バンドでも 9 ms にできることをシミュレーションで示した。

謝辞

この研究は、中西研究室 OB, OG の学生達の協力の下で行われました。特に、CN 信号発生源の開発は大学院生であった新海晃生 (H25 年度修了) が主に行い、ビーム実験のためのプロト機の試作は西原亮輔 (H30 年度修了)、山口輝人 (R1 年度修了) の貢献が大きい。ここに感謝します。また、ビーム実験で御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] T. Yamaguchi *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B462(2020) 177-181.
- [4] T. Shiokawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 1010 (2021) 165560.
- [5] K. Matsuda *et al.*, Proc. of the PAC2001, Chicago, USA, pp.2590-2592.
- [6] T. Shiokawa *et al.*, Proc. of the PASJ2020, Online, pp. 258-262.