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

日大生産工(院) ○塩川 智也 ,奥川 雄太郎 ,中西 哲也 WERC 栗田 哲郎

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 してスポットスキャニング法がある。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、スピル強度のばらつき 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[5]。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 $\Delta v_x / \Delta P / P = -0.42$ [6]、運動量分散は $\Delta P / P = \pm 6 \times 10^{-4}$ である。



Figure 1: Schematic layout of WERC synchrotron.

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。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 カインピーダンスを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 Ω 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 MΩ、*C*=15 pF)を接続して行った。

Study on Fast Beam Switching and Increasing a Beam Extracted in Slow Beam Extraction Using a Multi-Band RFKO System

Tomoya SHIOKAWA, Yutaro OKUGAWA and Tetsuya NAKANISHI and Tetsuro Kurita — 441 —

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。Figure9 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。



APN : All Pass Network

Figure 3: Block diagram of the RFKO system.



Figure 4: Electric circuit of the IT and APN.





Figure 5: Photograph of Figure 6: IT and APN RFKO system.

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).

1:4 と 1:5 RFKO システムを使用したビーム取 5. 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、取出し量が比較的多い前半 の部分で約20%増加し、計算値に近い結果になった。

スピル強度のばらつきは標準偏差を平均値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。



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

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関係するため、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とり、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、計算には 50000-100000 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。 この原因として、補償が十分ではなかったことが考えられる。 本来、10 バンド目では約 2 倍のスペクトルの強度が必要となるが、計算ミスで約 1.5 倍の強度しか補償されていなかったことを確認した。 このことから、 各バンドに適切な補償倍率がかかっていれば計算値に近い値を示すことが期待できる。

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 µs 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 µs の間にセパラトリクスの枝の部分にいた粒子が出射され、そ の後 80 µs かけてセパラ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 µs、16.5 µs 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 µs 遅れて減少が始まり、その 後 25 µs 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 化するためセパラ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±6.0 × 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±4.7 × 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 μs 以下でスピルはゼロになると考える。



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 μ s/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%スピル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 クロトロン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、一様なスピ ル強度かつ、100 μs 以下でスピルをゼロにすることが期待でき る。

参考文献

- 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 proceedinds.
- [7] T. Kurita (private communication).