

シンクロトロンを周回ビームを拡散させるための断続的 スペクトルを用いた高周波源に関する検討

日大生産工(院) ○ 田代 雅嗣
日大生産工 中西 哲也

1. はじめに

重粒子線がん治療は炭素線を使用し、がんだけを強い力で破壊する。また、体の中をまっすぐ進み目的地で止まるので、がん患部周辺の正常細胞への影響が少ないのが利点である[1]。粒子線の効果的な照射法としてスポットスキヤニング照射法があり、患部を数千ブロックに分け細かく照射する方法である。この照射法を行うためのシンクロトロンからのビーム取り出し法として QAR 法を提案している[2]。QAR 法の概略は次の通り: 1) 高速四極電磁石 (FQ) を ON させ、セパトリクスという安定領域を収縮させる、2) セパトリクスからはみ出した粒子を取出す、3) FQ を OFF する、4) RFKO (RF-knockout) を ON させ、セパトリクス境界付近の粒子を拡散、5) 上記の流れを繰り返す。

本研究は、RFKO の効果的な周波数スペクトルとその発生システムに関するものである。本報告ではシミュレーションにより周波数スペクトルの最適化を行い、それに必要な発生源についての検討を述べる。

2. QAR 法

QAR 法はビーム加速の後、次のように行う：
(1) シンクロトロンの主パラメータを従来の 1/3 共鳴出射法の初期状態の値に設定する、(2) 使用者側からのスタート信号によって FQ が励磁され、セパトリクスが収縮を始め、収縮によって出た粒子が取出される、(3) 必要な粒子数が取り出されると使用者側から FQ のストップ信号が送られ、FQ 磁場はゼロに戻され、セ

パトリクスが元の大きさに広がり、ビーム取出しは停止する、(4) その後、RFKO を ON させることで、セパトリクス境界付近まで周回ビームが拡散され、ビーム取出しによってできた空白を埋める。このように FQ と RFKO を交互に運転することにより、少しずつビームを取り出す事ができる。

以上から QAR 法は次のような特徴を持つ：
(1) 必要なタイミングで必要な量だけビームを取り出す事ができる、(2) 取り出し中のビーム強度は、スピルフィードバック制御によって一様になることが期待できる、(3) 待機時にシンクロトロンの主電磁石電源のリプルなどによるビーム出射を抑制できる。(2) (3) の特徴は主電磁石電源のリプルの許容値を緩和できるためコストが低減できる。

3. RFKO の周波数帯域と出射ビーム強度の一様性

シンクロトロンは偏向電磁石と四極電磁石が周期的に配置されており、粒子は中心軌道の周りをベータートロン振動しながら周回している。従って、その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ることができ、ビームを取り出すことができる。しかし、その振動数は振幅により異なるため、単一の周波数では粒子全てを拡散できない。そこで、周波数に幅を持たせたカラーノイズ (CN) を使用する。粒子の振動数は、普及型治療装置のシンクロトロンの場合 1.666...~1.68 (周回周波数で規格化した値)。しかし、この範囲だけでは出射ビーム強度は一

Study on an RF source using a Spectrum Including Many Bands to diffuse a circulating beam
in a synchrotron

Masatsugu TASHIRO, Tetsuya NAKANISHI

様にならないことが分かっており、周波数帯は広いほうが一様性はよくなる。図1はFQを使わずRFKOを連続運転して取出した結果に対して、ビーム強度の変化を標準偏差(σ /平均値)で表した。計算は0.1~fまでの各規格化周波数帯に対して行った。f=4付近から変化が小さくなっていることから、f=5付近までは必要と考えた。しかし、アンプの負担が大きくなる問題があり、アンプの負担を軽減する方法を考えた。

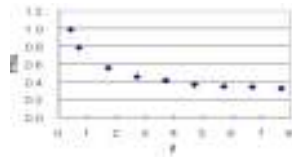


図1.各周波数帯に対する標準偏差

4. 断続的スペクトルによるシミュレーション

様々な周波数帯で計算した結果、n+1/3、n+2/3付近の周波数帯だけ拡散に寄与することが分かった。ここでn=0,1,2...である。そこで、図2に示すような断続的スペクトルを使用した。従来の連続的スペクトルでは指定した周波数帯で一樣な電圧としたが、断続的スペクトルを使用することで拡散に寄与しない周波数帯を除くことができアンプへの負担を小さくできる。計算した結果、0.1~4.7までの連続的スペクトルで計算した結果とほぼ同様の一様性が得られた。このスペクトルによりアンプの負担を約90%軽減できる。また、このようなスペクトルにすることでセパトリクス内の任意の領域に存在する粒子群に力を与えることができる。低域周波数の値を大きくすることで、セパトリクスの境界内部の粒子を拡散できる。その結果、境界付近の粒子密度は高くなる。図3は周波数帯を変化させた時の取り出された粒子強度分布である。ベータートロン振動をカバーする周波数帯(0.65~0.7)の時に比べ、約10倍取り出された。

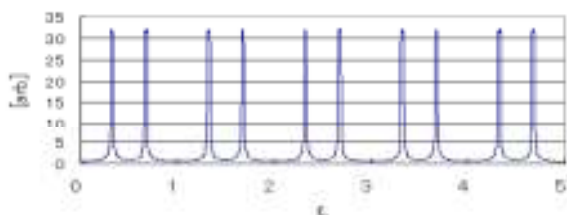


図2.断続的スペクトル

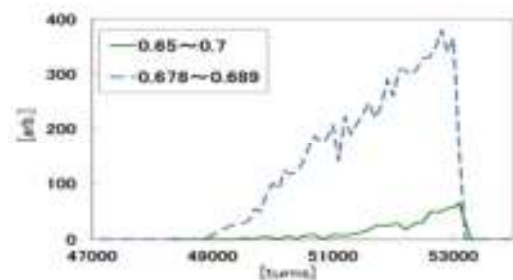


図3.スピルの拡大図

5. 周波数帯及びCN強度の最適化

5.1 条件

断続的スペクトルを用いて各パラメータの最適化を行った。周波数帯は低域遮断周波数(f_l)をn+0.672から0.001ずつn+0.678まで大きくして行う。その際、高域遮断周波数(f_h)はn+0.680に固定した。1/3共鳴付近も同様。図4にスピル波形の一例とFQ,RFKOの振幅波形を示す。はじめにRFKOを2000ターン運転し、次にFQを2000ターン直線的に立ち上げ、500ターン直線的に立ち下げる。1周期4500ターンを繰り返す。本シミュレーションでは全回転数20万ターン、セパトリクスの収縮率は20%、15%で行った。また全粒子数20万個とした。最適化の条件は以下の2つである。

- ① 出射粒子数が全粒子数の1.0%以上(出射率)
- ② 誤出射粒子数が出射粒子数の0.1%以下(誤出射率)

出射率はFQ部で取出される割合となり、誤出射率はRFKO部+余裕部で取出された割合となる。余裕部というのは粒子の存在領域とセパトリクス境界の空白部を示し、四極電源のふらつきによるセパトリクスの変動分に相当する。

5.2 計算結果

図5はシミュレーションによるスピル分布である。出射率、誤出射率を調べる回転数は5万~20万ターンとした。5万ターン以前はスピル量が安定せず、5万ターンまでスピル量が増え続けているため計算には含まなかった。セパトリクスの収縮率15%の時の f_l に対する出射率[%]を図6に示す。この図から最も出射率

が高い周波数帯は 0.676~0.680 であることが分かる。表 1 に収縮率 15%、20%での最適化条件を満たす時と出射率 1.0%を超えた時の CN 強度、f_l を記載した。最大出射率で比べると収縮率 20%の方が 13%多く取出されるが、CN 強度は 16%増えている。また、出射率 1.0%を超えた時の値を比べると収縮率 15%のほうが CN 強度は 9%増えた。しかし、その程度の差なら収縮率が小さいほうが良いと考え、周波数帯は n+0.675~n+0.680 なので収縮率 15%での最適 f_l は n+0.675 であると考えた。

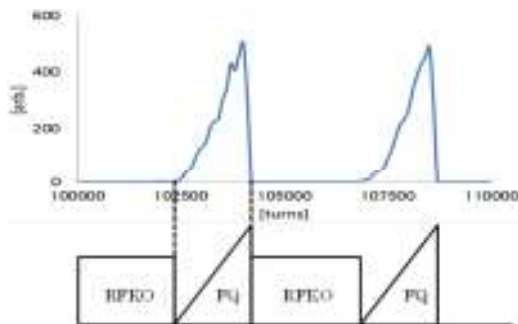


図 4. スピル波形とシミュレーションの流れ

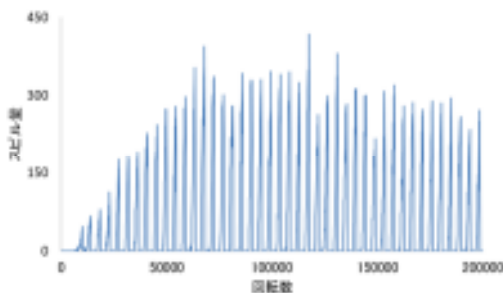


図 5. 回転数に対するスピル量

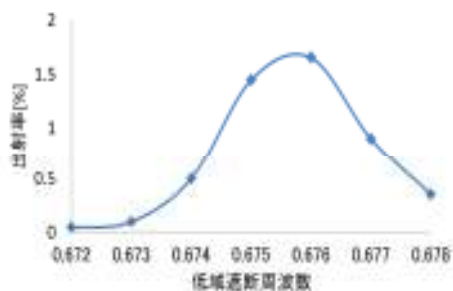


図 6. 各低域遮断周波数に対する出射率のグラフ(15%)

表 1. 各収縮率におけるパラメータ

収縮率 [%]	出射率 [%]	CN 強度	f _l
15	1.65	4.5E-05	0.676
15	1.07	2.4E-05	0.675
20	1.87	5.2E-05	0.676
20	1.06	2.2E-05	0.675

6. マルチバンド RFKO システム

断続的スペクトルを用いた RFKO システムのブロック図を図 7 に示す。従来はホワイトノイズ(WN)を Amp に通し、IT/APN を通してキッカー電極に送るシステムであった。本システムは WN を必要な周波数帯を有する複数の BPF に入力し、それぞれの出力を加算器で合わせ、Amp に通す方法である。図中には低域側 3 つの周波数バンドの例を示している。本報告ではシミュレーションで用いた 10 個のバンドに対する BPF について Mathematica を用いて計算を行った。

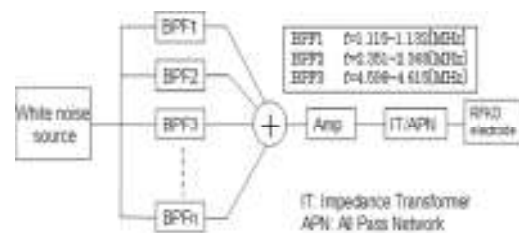


図 7. RFKO システム

7. BPF の回路設計

7.1 設計・原理

図 8 は BPF の回路図である。この回路は 2 次正帰還型 LPF、HPF を直列接続したものである。この回路を使用する利点を以下に示す。

- ① OP アンプ使用の RC フィルタのため、値の小さい L を使用しなくてもよい
- ② 素子数は多いが C を任意の値にできる
- ③ R の値は精度よく設定されなければならないが、可変抵抗が容易に入手でき、固定抵抗との組み合わせで達成できると考える

回路として使用した LPF、HPF の伝達関数 $H(j\omega)$ を以下に示す。

$$\text{LPF: } H(j\omega) = \frac{k \times (j\omega)^2}{(j\omega)^2 + \left(\frac{1}{Q}\right) b_1(j\omega) + (b_1)^2}$$

$$\text{HPF: } H(j\omega) = \frac{k \times (b_2)^2}{(j\omega)^2 + \left(\frac{1}{Q}\right)b_2(j\omega) + (b_2)^2}$$

各式中の Q は任意の値として決めることができる。また R_f 、 b 、 k は以下のように求め、代入し、それぞれの伝達関数を計算する。この時 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 、 $C_1 = C_2 = C_f$ とした。

$$R_f = \frac{1}{2\pi f C_f}, \quad b = \frac{1}{R_f C_f}, \quad R_4 = R_f \left(2 - \frac{1}{Q}\right), \quad k = 1 + \frac{R_4}{R_f}$$

R_f を求める際に使用する f は各フィルタの遮断周波数である。LPF と HPF で使用する遮断周波数は違うので、それぞれの値を代入し計算を行う。この回路を使用し帯域幅が 17 [kHz] と狭帯域で、その間がフラットになる伝達特性を得る。

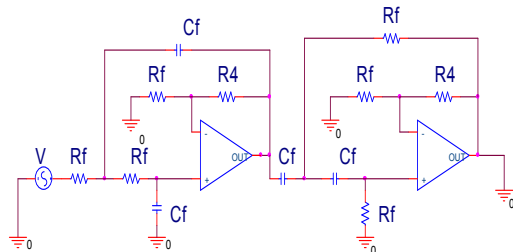


図 8. BPF の設計図

7.2 回路定数の計算結果

Mathematica による計算結果の一例として入出力特性を図 9 に示す。横軸は周波数、縦軸は入出力電圧比となっている。また、表 2 には 10 個の BPF の遮断周波数や素子の計算結果を示す。図 9 に示す波形から遮断周波数帯間の波形がフラットになっていることがわかる。フラットにするためには Q 値をどのような値にするかが重要であることが分かった。各 BPF の最適な Q 値に対して値が小さい時、中心周波数付近の電圧の値が低くなる。逆に大きい時は中心周波数付近の電圧の値が高くなる。表 2 に示した Q 値が最適化された値である。また、この計算から R_f の値によって波形が左右に移動したり、狭帯域にならなくなる事から、理論値通りの R_f を使用する必要がある。しかし、 R_f の設定には高い精度が必要で、固定抵抗と可変抵抗を組み合わせた選定を行う。 C_f は市販のものを選んで使用する。

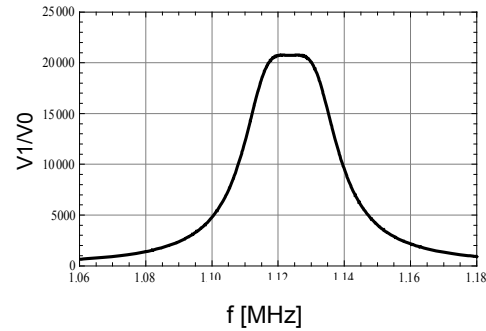


図 9. Mathematica による出力波形

表 2. 計算に使用した値 (理論値)

	遮断周波数 f [MHz]	Cf [F]	Rf [Ω]	R4 [Ω]	Q
BPF1	1.115	0.01	14.27	28.36	70
	1.132		μ	14.06	
BPF2	2.351	3300	20.51	40.89	150
	2.368		p	20.37	
BPF3	4.598	1000	34.61	69.1	300
	4.615		p	34.49	
BPF4	5.834	p	27.28	54.48	360
	5.851		27.2	54.32	
BPF5	8.081	470	41.9	83.72	480
	8.098		p	41.81	
BPF6	9.317	330	51.76	103.44	580
	9.334		p	51.67	
BPF7	11.564	220	62.56	125.03	720
	11.581		p	62.47	
BPF8	12.800	p	56.52	112.96	740
	12.817		56.44	112.81	
BPF9	15.047	68.75	153.85	307.54	930
	15.064		p	153.68	
BPF10	16.283	10	977.43	1953.87	990
	16.300		p	976.41	

8. まとめ

セパトリクスの収縮率 15% の最適化 (周波数帯 0.675~0.68、CN 強度 2.4×10^{-5}) を行うことができた。また、最適化した帯域幅に対応する 10 個の BPF の設計ができた。

文献

- [1] 辻井博彦、遠藤真広、: コモンズ (2006)
 [2] T. Nakanishi, T. Furukawa, K. Yoshida, K. Noda, Nucl. Instr. and Meth. A553 (2005) 400.