

シンクロトロンからのビーム取り出しにおけるフィードバック制御の基本検討

日大生産工(院) ○新海 晃生

日大生産工 中西 哲也

1. はじめに

重粒子線がん治療では、X線などの従来の放射線治療に比べてがん患部の周りの正常な細胞への影響が少なく、人体への負担が少なく済む[1]。この重粒子線の効果的な照射法としてスポットスキャン照射法があり、それに適したシンクロトロンからのビーム取り出し法として QAR 法が提案されている[2]。これは、RF-knockout(RFKO)装置によりビームを拡散し、パルス四極電磁石(PQ)で取り出す方法である。ビームを取り出す際、四極電磁石・偏向電磁石の励磁電流リップルや、セパトリクス内の粒子密度分布の不均一性により、出射ビーム強度(スピル)が不安定になることが分かっている。

本研究は、ビーム強度を一定にする為に PQ にビーム強度のフィードバック制御することであり、今回ビームシミュレーションを行う為の基本入力パラメータの検討を行った。シミュレーションにあたっては放医研で設計された普及型シンクロトロンのラティスをを用いた [3]。

2. QAR 法

QAR 法とは、セパトリクスと呼ばれる粒子が安定してシンクロトロン内を周回できる領域の大きさを高速で変化させることによりビームを取り出す方法である。Fig. 1 に QAR 法の原理を示す。PQ を ON にすることでセパトリクスが収縮する。それによって、セパトリクス外にはみだした粒子が取り出される。PQ を OFF することでセパトリクスが元の形に戻り取り出しが停止する。そして、粒子が取り出されることによってできた隙間を、RFKO 装置によって周回粒子を拡散し満たす。これを繰り返し粒子を取り出していく。

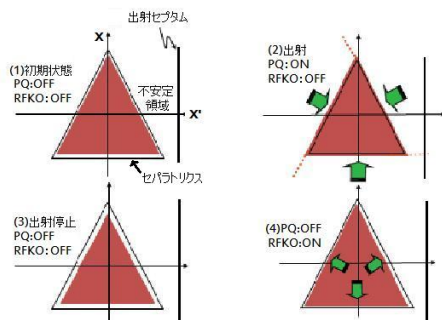


Fig. 1. Conceptual diagram of the QAR method

3. スピルフィードバック制御の概要

Fig.2 は QAR 法により取り出されたスピル強度の図である。ここで PQ は直線的に立ち上がる波形とした。従って、セパトリクスの面積はほぼ直線的に収縮する。Fig. 2 の一部の区間を拡大したものを Fig. 3 に示す。必要とされる 1 回の取り出し粒子分布は Fig. 3 に実線で書かれているような一定の分布である。また、全体の取り出し粒子分布も Fig. 2 の実線で書かれているように一定に粒子取り出しが行われることが望ましい。

スピル強度は PQ 出力の時間変化が大きいほど大きい、また、PQ 出力には上限があるため、RFKO によるビーム拡散力も制御する必要がある。しかし、今回は PQ だけを検討対象として考える。そのために PQ の強度を 1 回の取り出し中にスピルフィードバックにより変化させる。そのブロック線図を Fig. 4 に示す。図において、“PI”は P が比例制御で I が積分動作を表す。P 制御では偏差に比例した一定値の出力を出し、偏差を 0 にしようとするが、定常偏差が残ってしまう。その為に、I 制御を用いて定常偏差を 0 に近づける、I 制御は積分動作で偏差を除去しようとして偏差の累積値に比例した出力を出し続ける、PI はこれらを加算合成したものである。“PQ”は PQ 電源の伝達特性であり、“ビーム取り出し”はセパトリクスから粒子がはみ出して、シンクロトロンから取り出されるまでの遅れを表す伝達関数である。

式(1)は PI 制御部を数式で表したものである。SV は設定値、PV は測定値を表し、第一項は目標値、第二項は比例、第三項は積分を表している。

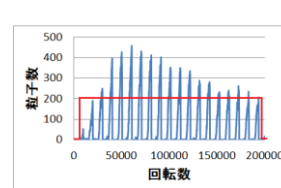


Fig. 2. Spill structure

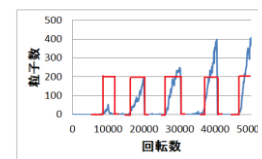


Fig. 3. Expansion of Fig. 2.



Fig. 4. Block diagram of the spill feedback control

$$MV = K_s \times \sqrt{SV} + K_p \times (SV - PV) + K_i \times \int (SV - PV) dt \dots (1)$$

4. ビームシミュレーションのための基本パラメータの検討

4.1 最適な周波数帯

セパトリクス内の粒子を拡散させるためには RFKO の運転周波数に幅を持たせる必要がある。その方法として様々な周波数成分を持つカラードノイズ (CN) を用いる。周波数帯が広すぎると、セパトリクスの収縮率 20%では目標の 1%が取り出せない。ここで 1%とは、初期粒子数に対する比である。また、周波数帯が狭くなると、粒子の取出しは増えるが CN 強度を強くする必要がある。そこで、CN 強度を最低と出来る周波数帯を調べた。その結果が Fig.5 である。最適な周波数の求め方としては、0.676 から 0.001 ずつ 0.670 まで周波数を変化させ、粒子の取り出しが 1%になる CN 強度を求めた。ここで周波数は粒子の周回周波数 (3.483MHz) で規格化した値である。その結果、0.671 が最適な周波数であることがわかり、また、最適な CN 強度が $8.0E-06$ であることがわかった。その時のスピルを Fig.6 に示す。

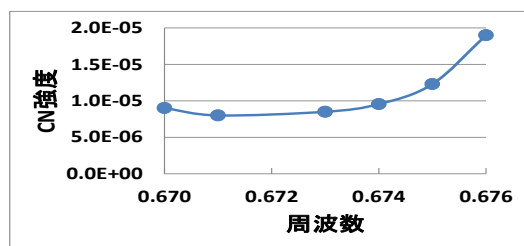


Fig. 5. CN strength as a function of frequency

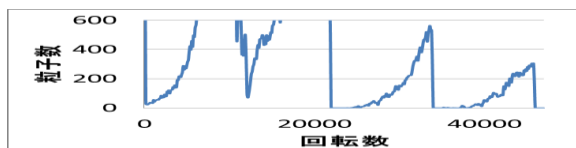


Fig. 6. Spill structure

4.2 初期粒子分布のバラつき

シミュレーションに用いる粒子数は有限である為、粒子分布はなめらかでなくそれによるバラつきがある。そのバラつきは本来フィードバックの制御量にすべきものではないので、粒子数に対してどの程度のバラつきが生じるか調べた。計算は RFKO を OFF にし PQ のみで取り出しを行った。その結果が Fig.7 であり、粒子数は 40 万である。初期粒子分布は Fig.8 に示す様に楕円状に分布し、Fig.9 は Fig.8 を楕円と相似形のリング状に一定間隔で輪切りにし、それぞれのリング内に存在する粒子数をプロットしたものである。これらの結果から、それぞれの粒子のバラつきの標準偏差を求め、粒子数を 10 万(実質約 40 万)から 50 万(実質約 200 万)までの間で変化させた結果を Fig.10 に示す。この結果から、実際の取り出しのバラつきが初期粒子分布のバラつきによるものであることが分かった。また、粒子数が 40 万以上だと偏差を 10%以下に出来ることが分かった。

が分かった。また、粒子数が 40 万以上だと偏差を 10%以下に出来ることが分かった。

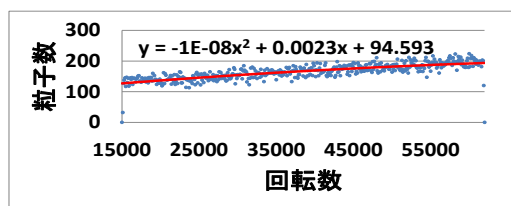


Fig. 7. Variation of intensity

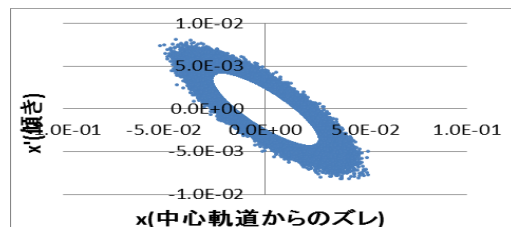


Fig. 8. Initial particle distribution in the x-x' plane

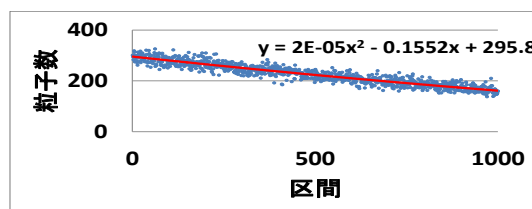


Fig. 9. Initial particle distribution in the Fig.8 for each section

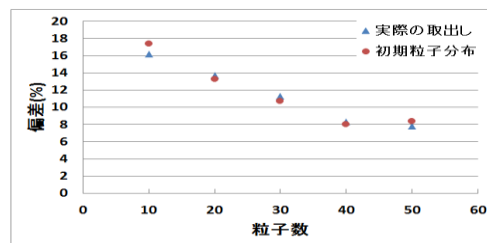


Fig. 10. Standard deviation of particle distribution

5. まとめ

フィードバック制御を行うにあたり入力パラメータの調整を行った結果、最適な周波数が 0.671、CN 強度が $8.0E-06$ であることが分かった。また、理想的な状態での PQ を用いた取り出しビームのバラつきは、初期粒子分布と一致することが分かった。偏差は 40 万個以降は 10%以下となり、今後の計算は、40 万個で行うこととした。

[参考文献]

- [1]辻井博彦、遠藤真宏:「コモンズ」(2004)
- [2]中西哲也、他:日本大学生産工学部第 39 回学術講演会,pp.51-52(2006)
- [3]T.Furukawa et al. : Pro. of the 2nd Annual Meeting of Accelerator Society of Japan (Tosu Japan) p.625(2005)