ISSN 2186-5647

2-6

シンクロトロンからのビーム取り出し(QAR法)におけるスピルFB･FF制御の研究(1)

日大生産工(院)　○村岡　遼
日大生産工　中西　哲也

1. はじめに

重粒子線がん治療装置にはシンクロトロンと呼ばれる大型の円形加速器がある。加速されたビームを取り出す方法としてQAR法(beam extraction method using a fast Quadruple magnet Assisted by RFKO)が提案されている[1]。QAR法とは、パルス四極電磁石(PQ)でセパラトリクスの領域を狭めることでビームを取り出し、それによって生じた隙間を高周波ノックアウト装置(RFKO)で拡散させる、という動作を繰り返し行うことで粒子を取り出す方法である。

シンクロトロン内の粒子の密度分布はガウス分布しているため、直線的にPQを立ち上げるだけでは一定の取り出しビーム(スピル)を得ることは出来ない。また、RFKOによる拡散も一様ではないため、取り出しごとにビーム強度も変わってくる。そのためビーム強度を一定にするためには、スピルフィードバック(FB)制御を行う必要がある。FB制御を効果的にするためには、フィードフォワード(FF)制御を組み合わせて行う。

本報告では、FB制御とFF制御を組み合わせてスピルを平坦にする方法について述べる。

2. QAR法による粒子の取り出し

Fig.1に1つの粒子のシンクロトロン内での軌道の例を示す。粒子は中心軌道の周りを振動しながら周回している。粒子を取り出すために、高周波電界(外乱)でその振動振幅を大きくして、セプタムを通してシンクロトロンの外に取り出す。

Fig.2はQARによるビーム取り出しの原理図である。この図はセプタムの位置での粒子の周回ごとの座標を表しており、図の塗りつぶした部分は粒子が存在していることを示している。まず、PQをONすることで粒子の安定領域であるセパラトリクスが収縮する。セパラトリクスをはみ出した粒子は共鳴状態となり、振幅が増大することで取り出される。

Fig.3, 4にQAR法による粒子の取り出しシミュレーションの結果を示す。Fig.3はPQとRFKOが交互に運転していることを表しており、Fig.4にそのときの取り出し粒子数をプロットしたものを示す。図から、PQを直線的に立ち上げた場合のスピルは、徐々に強くなっていることが分かる。これは、周回ビームがガウス分布をしているためである。

ビームを照射する場合、ビーム強度は一定である必要がある。そのためPQは直線的に立ち上げずに、粒子分布を前もって予想したフィードフォワード制御を用いることでスピルの平坦化をはかる。しかし、RFKOによる周回粒子の拡散は取り出しごとに異なるため、FB制御を併用する必要がある。

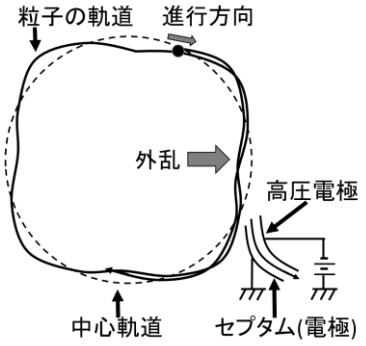

Fig.1 Trajectory of a particle

Study of Spill Feedback and Feedforward Control for the Beam Extraction Method (QAR) from a Synchrotron

Ryo MURAOKA and Tetsuya NAKANISHI

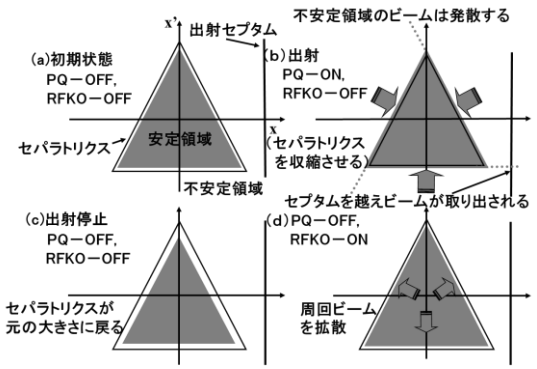

Fig.2 Conceptual diagram of QAR method

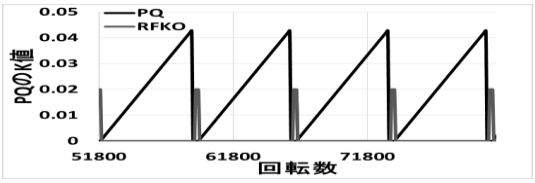

Fig.3 PQ waveform and RFKO signal

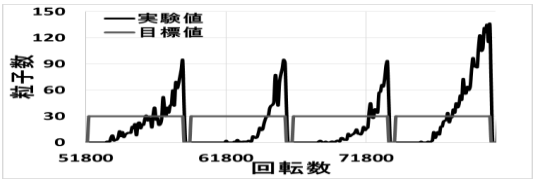

Fig.4 Spill structure

3. PQ のフィードフォワード制御の検討

周回粒子はガウス分布をしていることが分かっている。そこで粒子密度の薄い取り出し初期では急な立ち上がりをして、後半に行くに従って緩やかに増加していくような PQ 波形が望まれる。そのため、いくつかの数式を用いて PQ 波形の最適化を行った結果、(1)式が最適であった。

$$K_{ff}(n) = \frac{(K_{max})\times\sqrt{\left(\frac{\log(n)}{\log(N_{PQ})}\right)^3+\sqrt{\frac{n}{N_{PQ}}}}}{\sqrt{2}} \quad \cdots(1)$$

ここで、K_{max}は PQ の最大値, N_{PQ}は PQ の 1 運転区間の回転数、 nは回転数(変数)を表している。このときの PQ 波形を Fig.5 に、スピルを Fig.6 に示す。スピルは Fig.4 と比べて平坦になっていることが分かる。しかし、立ち上がり時の粒子数が多かったり、少なかったりする区間があった。また、短期間のスピルの強度の変動も見られる。この原因は RFKO による拡散が均一でないためである。それらの問題を解決するために、次章で述べる FB 制御を組み合わせてスピルを平坦に近づける。

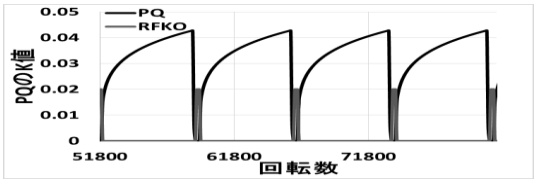

Fig.5 PQ waveform and RFKO signal for FF

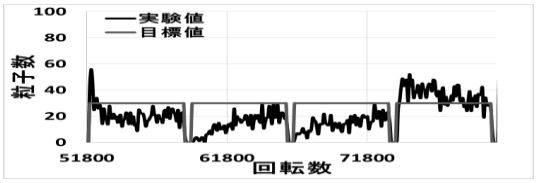

Fig.6 Spill structure with FF

4. スピルフィードバック制御の検討

取り出される粒子数と目標値を比較して、それに応じて PQ を FB 制御する。FB 制御のアルゴリズムを以下に示す。

$$\Delta K(n) = \mathrm{P}\times(\mathrm{e}+\alpha) \quad \cdots(2)$$

$$K_0(n) = K_{ff}(n) + \Delta K(n) \quad \cdots(3)$$

ここで、$\Delta K(n)$は次の PQ の変化幅で、Pは比例係数、eは目標値と検出値の差である。α は PQ が増加し続けるように補正する定数とする。このようにして求めた$\Delta K(n)$に前述の FF 制御の数式$K_{ff}(n)$を足し合わせることで、最終的な PQ の値$K_0(n)$を求める。

5. まとめ

粒子の取り出しシミュレーションにおいて、スピルを平坦にするために FF 制御と FB 制御を組み合わせた方法について述べた。FF 制御だけでは常に均一なスピル構造を得ることは出来ないので、FB 制御と組み合わせることでスピルをより平坦に近づける。

[参考文献]

1) 中西哲也, 古川卓二, 野田耕司, 日本大学生産工学部 第 39 回学術講演会, (2006), p.51