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(2)

1. はじめに

重粒子線がん治療装置に用いられるシンク ロトロンからのビーム取り出しにおいて、 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、高速四極 電磁石(PQ)と高周波ノックアウト(RFKO)装 置を組み合わせて、ビームを取り出していく 方法である。任意の出射ビーム(スピル)構造 を得るために、PQ の磁場強度を時間的に制 御する。PQ の制御方法としてフィードバッ ク(FB)制御と、それを効果的にするためにフ ィードフォワード(FF)制御とを併用して行う。 本論文では、QAR 法の概要について述べ、 任意のスピル構造実現のための PQ の制御方 法とシミュレーション結果について述べる。

2. QAR 法による粒子の取り出し

円形加速器であるシンクロトロン内の一つ の粒子の軌道の例を Fig.1 に示す。粒子は同 図のように中心軌道の周りを振動しながら周 回している。周回する粒子に高周波電界を加 えることによりその振動振幅を大きくできる。

QAR法によるビーム取り出しの原理図を Fig.2に示す。同図はセプタム位置での位相 平面図で、横軸xは粒子の中心軌道からのず れ、x'は中心軌道に対する傾きを表している。 PQにより粒子の安定領域であるセパラトリ クスを収縮させると、セパラトリクスの外に はみ出した粒子は共鳴状態になり、その振幅 が増大し取り出される。次にRFKO装置で周 回粒子を拡散させて、取り出された粒子が存 在していた領域を埋める。これらの操作を繰 り返し、シンクロトロンからビームを断続的 に取り出していく。この方法により高速で精 度の良いビームの取り出しが期待できる。

Fig. 3 に QAR 法のタイミングチャートと、 そのときのシミュレーション結果の例を示す。 同図から PQ の磁場強度を一定の割合で上げ ると、時間とともにスピル強度が強くなるこ とが分かる。これは周回粒子がガウス分布を しているためである。この PQ の磁場強度を 制御して任意のスピル構造を得る。 日大生産工(院) 〇村岡 遼 日大生産工 中西 哲也



3. PQ の FF, FB 制御方法

Fig. 3 の結果より PQ の変化量が同じでも 取り出しによってスピル構造が異なっている のは、RFKO による粒子の拡散が一様でない ためだと考えられる。ビーム取り出しは PQ の操作によって行われるので、PQ の FB 制御 によりスピル構造の平坦化を目指す。FB 制 御を効果的に行うためにFF 制御と併用する。

スピル構造を平坦にするには一回の取り出 しの前半部では PQ を早く変化させ、後半に 行くにしたがって緩やかに変化させる必要が ある。この考えに基づいて PQ のコイル電流 波形として様々な関数を用いて FF 制御を検 討したところ、次章で詳述するように以下の (1)式のときに最適なスピル構造が得られた。

Study of Spill Feedback and Feedforward Control in the Beam Extraction Method (QAR) from Synchrotron (2)

Ryo MURAOKA and Tetsuya NAKANISHI

$$K_{FF}(n) = \frac{K_{MAX}}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\left(\frac{\log(n)}{\log(N_{PQ})}\right)^{10}} + \sqrt{\frac{n}{N_{PQ}}} \quad (1)$$

ここで K 値とは PQ の磁場勾配に比例した値 で、コイル電流にも比例した値である。K_{MAX} は PQ の K 値の最大値、N_{PQ}は PQ の 1 運転 区間における回転数、nは回転数(変数)である。

上記の FF 制御だけでは粒子数を目標値に 収束させることはできないので、取り出され た粒子数と目標値を比較し、そのときの偏差 に応じて制御を行う FB 制御と併用する。今 回使用した PQ の制御信号を(2)式に示す。

$$K_{quad} = K_{FF} + K_P \times e_i + \sum_{i=1} K_P \times e_i \quad (2)$$

ここで K_{quad} は最終的な PQ の K 値で、 K_{FF} は FF 制御により最適化された関数、 K_P は比例 係数、 e_i は偏差である。比例係数 K_P は一定の 値ではなく、取り出しの後半になるにつれて 減少させる。これは、シンクロトロン内を周 回している粒子の分布はガウス分布をしてお り、取り出し後半部での偏差に対する感度を 弱めるためである。第三項に示す履歴の積分 値は、比例動作だけで制御を行ったときより も制御を安定させるために用いた。

4. シミュレーション結果

(1)式を用いて FF 制御を行ったときのスピ ルを Fig. 4 に示す。同図からスピル構造が平 坦に近づいたといえる。取り出し前半部で粒 子数が少ない区間が見られるが、これを改善 するために PQ 波形の立ち上がりを急にした ところ、粒子数がオーバーシュートする区間 が見られたため、(1)式の緩やかな PQ 波形を 用いた上で FB 制御により補正を行う。

次に FF 制御と FB 制御を併用したときの スピルを Fig. 5 に示す。同図を Fig. 4 と比較 すると、FB 制御の働きによりスピル構造が 更に平坦に近づいていることが分かる。

次に取り出し後半部でスピル強度を減少さ せるスピル構造が得られるかを確認する。こ れは次に示す理由で有用である。実際のビー ム照射では線量モニタで観測し、必要な線量 が照射されたら出射を停止する。しかし線量 モニタには約70 μ sの応答時間があるため、 モニタ上で観測している線量は実際に照射さ れた線量の70 μ sだけ遅れたものになってし まう。したがってその分が照射誤差になる。 その照射誤差が全体の1%以下になるように 照射時間を決定する。Fig. 6 (a)のようなスピ ル構造では、一回の照射時間は7ms以上にす る必要がある。そこで照射時間の短縮のため に Fig. 6 (b)のスピル構造が提案された。 上記のスピル構造を得るために、取り出しの 前半部に対して後半部のスピル強度を 1/4 に 低減するスピル波形を目標とした。そのため に、FF 制御では取り出し後半部の PQ 波形の 変化を緩やかにして、FB 制御では取り出し 後半部での粒子数の目標値を変更し、比例係 数を調整した。このときのスピル構造を Fig. 7 に示す。同図から目標としていたスピル構 造に近い形状が得られた。



Fig. 4 Spill structures with FF control.



Fig. 5 Spill structures with FF and FB control.



Fig. 6 Relationship between spill structures and irradiation time.



Fig. 7 Spill structures with changed intensity.

5. まとめ

シンクロトロンからのビーム取り出し方法 である QAR 法において、スピル構造を平坦 にするために PQ のコイル電流波形の制御を 行った。また FF 制御と FB 制御を併用する ことで、任意のスピル構造が得られた。 [参考文献]

1) T. Nakanishi, et al., "Slow beam-extraction method using a fast Q-magnet assisted by RF-knockout", Nuclear Instruments and Method. A553, (2005) p.400-406.