ISSN 2186-5647



2-21

# 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 FF・FB 制御の研究

## －取出し初期の粒子数の増大とそのスピルに対する FF.FB 制御－

日大生産工(院)　○大石　量太
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（FQ）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。この方法は必要とする出射ビーム（スピル）の時間構造を得るために、高速四極電磁石(FQ)の磁場強度を時間的に制御する。FQ 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。一方、周回ビームの横方向の粒子密度分布がガウス分布している場合、取出し初期においては一回で取り出せる粒子は少ない。そこで、加速後にセパラトリクス中心付近の粒子を拡散させてセパラトリクス境界付近の密度を増やす必要がある。

本論文では、QAR 法の概要について述べ、取出し初期の粒子数の増大と理想的なスピル構造実現のための FQ の制御について述べる。

2　QAR 法による粒子の取り出し

まず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について述べる。粒子は Fig. 1 に示す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。それによって、セプタムと呼ばれる電極を超えると高電界により粒子の軌道が曲げられて取り出される。

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境界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。

RFKO の高周波信号は、周回粒子の拡散を一様に行うために n+1/3、n+2/3（n＝0, 1, 2, 3. .）の共鳴周波数付近の周波数帯を含んだマルチバンドスペクトルを用いた。ここで、実際の周波数は周回周波数 3.485MHz をかけた値であり、全周波数帯域は約 1MHz から 17MHz である。このマルチバンドスペクトルにより、それぞれの周波数帯を任意に設定できるため、セパラトリクス境界付近の粒子にはあまり影響を与えることなく、中心付近の粒子を拡散できる。

QAR 法による FQ と RFKO のタイミングチャートを Fig. 3 に示す。まず、30000 ターンまでに六極電磁石によってセパラトリクスを形成させる。そして、FQ と RFKO2 を交互に運転し、FQ を 6800 ターン RFKO2 を 3000 ターンで取出していく。RFKO1 については次章で詳述する。

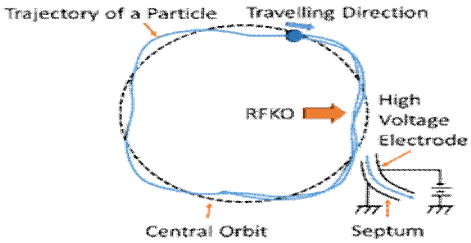


Fig. 1 Trajectory of a particle.

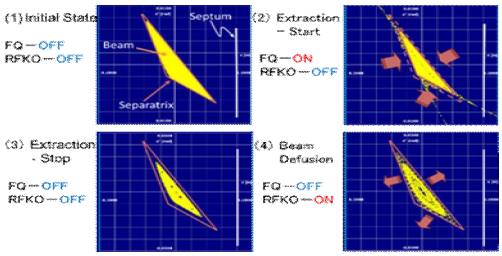


Fig. 2 Conceptual diagram of QAR method.

---

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

## - Increase of particles at early time of extraction and Feedforward and Feedback Control for the spill -

Ryota Oishi, Tetsuya Nakanishi

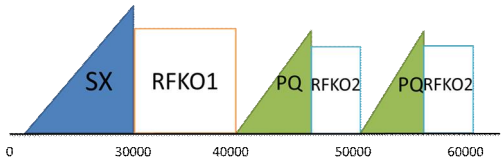


Fig. 3 Timing chart of QAR method

3　取出し初期粒子の取出し

取出し開始前に RFKO1 でセパラトリクス中心付近の周回粒子を拡散しなかった場合の結果を Fig.4 に示す。総粒子数は 200 万個で、この時の RFKO2 のマルチバンドスペクトルの周波数帯は、2/3 共鳴付近では 0.675～0.682 であった。図は 100 回転の間に取出された粒子をプロットし、直線で結んだものである。FQ 波形は直線的に増加する波形を用いた。同図より明らかに取出し粒子数が少ない。これは、セパラトリクスを形成させてからすぐに取出しを始めているためセパラトリクス内の粒子が十分に拡散されていないためである。

RFKO1 を変化させた時の最初の取出し粒子の計算結果を Fig.5 に示す。この時の RFKO1 のマルチバンドスペクトルの周波数帯は、RFKO2 より狭い 2/3 共鳴付近では 0.6752～0.682 に設定した。同図より目標値である 1%の粒子を取り出せる強度は 3.2 のときであった。これ以上大きくすると、目標値以上取り出せるが、RFKO1 より前の区間で多量の粒子が取出されてしまう。この計算結果を受けて、RFKO1 を取出し開始前に運転して、行った結果を Fig.6 に示す。Fig.4 と比較すると、大幅に粒子が増えていることがわかる。

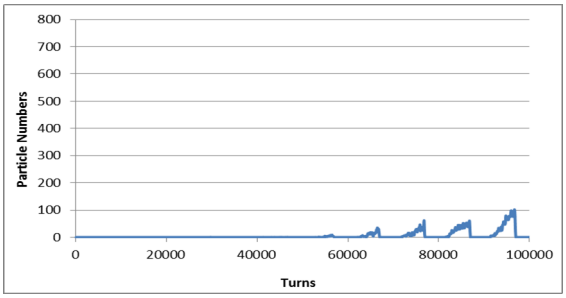


Fig.4　Particles vs. turns without RFKO1

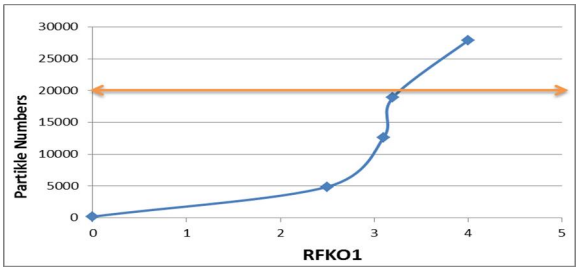


Fig.5 Particles extracted at the first extraction vs. the strength of　RFKO1

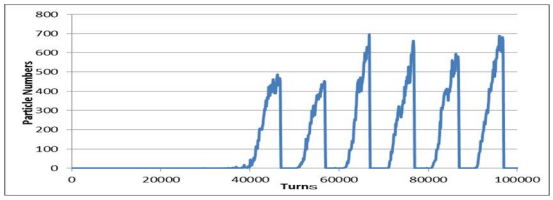


Fig.6　Particles vs. turns with optimized RFKO1

4 スピルの FF, FB 制御

ビーム取り出しは FQ の操作によって行われるので、FQ の FB 制御によりスピル構造の平坦化を目指す。加速ビームの横方向の粒子密度分布がガウス分布しているため、初期の偏差は非常に大きくなり目標の分布を得ることは難しい。そのため、目標とする構造に近い構造が得られるように FQ 波形を予め最適化（FF 制御）し、それに FB 制御する。
FB 制御の K 値の変化のさせ方を下式に示す。この計算は 100 ターン毎に計算し、その 100 ターンの間では直線的に変化させる 2)。

$$K_{quad} = K_{FF} + K_P \times e_i + \sum_{i=1}^{n} K_P \times e_{i-1}$$

ここで、$K_{FF}$ は FF 制御、$K_p$ は比例係数、$e_i$ は目標値からの偏差を表す。

Fig.7（a）は、Fig.6 のスピルに対して FF 制御した結果である。平坦に近いスピル構造が得られていることがわかる。Fig.7（b）は、Fig.7（a）のスピルに対して FB 制御した結果である。より平坦な構造に近づいていることがわかる。

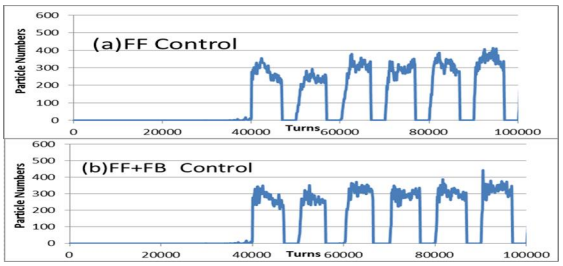


Fig.7　(a)Particles vs. turns with FF Controls
(b) Particles vs. turns with FF+FB Controls

5　まとめ

QAR 法取出しにおいて、取出し初期の粒子を増やすために、取出し前に RFKO を運転して周回粒子を拡散させて行った結果、目標値の粒子を取出すことができた。さらに、FF,FB 制御により、平坦なスピル構造にできることがわかった。

[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.

2)　R. Muraoka, T. Nakanishi, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 5-7, (2015), pp.48-50.