

シンクロトロンの出射システムの改良

Improvements of Beam Extraction System of the Synchrotron at WERC

栗田哲郎<sup>\*1</sup>、羽鳥聡<sup>\*1</sup>、二宮重史<sup>\*2</sup>、福本貞義<sup>\*1</sup>

Tetsuro KURITA, Satoshi HATORI, Shigeshi NINOMIYA and Sadayoshi FUKUMOTO

Abstract

Beam extraction system at accelerator of The Wakasa Wan Energy Research Center employs RF knockout technology. To improve the shape of the spill, a feedback control of noise amplitude was introduced. Also in order to enhance extraction efficiency, we revamp the matching circuit at the electrodes.

要約

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンでは、ビームの取り出し方法として遅い取り出しの一種である RF Knockout が使われている。シンクロトロンから出射されるビームスピルの時間構造および出射効率の改善を目的とし、出射 RF のノイズ振幅へのフィードバックコントロール及び出射 RF 電極部分の整合器の改造を行った。整合器の改造においては、All-Pass filter を改良した新たな回路を考案した。これは一般的に容量性負荷を RF で駆動する際の電力効率に大きく寄与する。

1. 緒言

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンからのビームは、がん治療および生物照射などに利用されており<sup>1)</sup>、ウォブラー電磁石によって照射野を形成して用いられる。このため、ビーム取り出し方法として遅い取り出しの一種である RF Knockout 法<sup>2)</sup>を用いている。図 1 にビーム取り出し方法の概念図を示す。六極電磁石による3次共鳴によりセパトリクスを形成する。一対の電極 (RF キッカー) に加えられた RF によって横方向のベータトロン振動の振幅を増幅させ、セパトリクス外にはじき出された粒子が出射される。出射 RF には、バンド幅が約 50kHz の周波数変調が加えられている。

従来、スパイル構造の時間構造を調整するために、出射 RF ノイズの振幅パターンを繰り返し変更する必要がある、これは、煩雑な調整作業である。そこで、ノイズ振幅のフィードバック制御を導入した。すなわち、スパイルモニタからのビーム強度信号とリファレンス信号の差分を積分し、この信号によりノイズ振幅信号に振幅変調を加える。

フィードバック制御の導入により、スピルの時間構造の調整が容易になったが、フィードバック制御モジュールは減衰器として働くため出射効率が減少する。リング中の粒子をすべて出射させるために、RF キッカーの駆動電圧を増加させる必要がある。そこで、キッカー電極と電力アンプの間に接続されている整合器 (All-Pass Filter) の改造を行った。そもそも、この整合器は All-Pass Filter として適切に設計されておらず、出射ビーム電

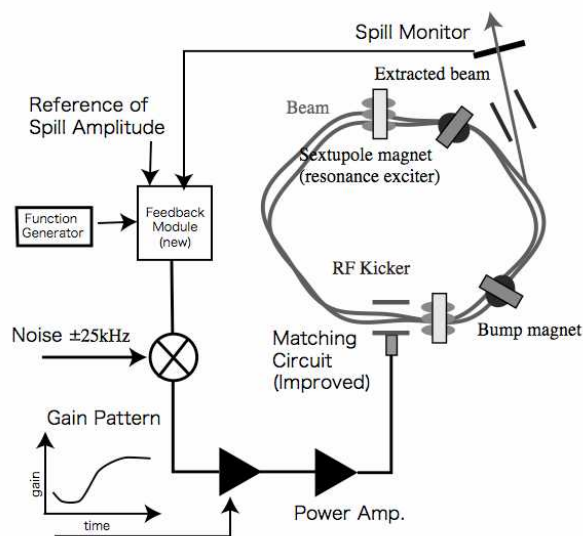


図 1 ビーム出射システムの概念図

<sup>\*1</sup>若狭湾エネルギー研究センター 加速器グループ、<sup>\*2</sup>高エネルギー加速器研究機構

流の減少の原因になっていた。

我々は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)との共同研究により、All-Pass Filter に共鳴特性を持たせた効率的な駆動回路を考案し、キッカー電圧の増強及び出射効率の改善に成功した。

## II. 新しい整合器の設計

All-Pass Filter の概念図を図 2 に示す。ここで、 $C_L$  は容量性の負荷である。容量  $C$  とインダクタンス  $L$  が、それぞれ  $C_L/4$  及び  $C_L R^2/2$  であるときに入力インピーダンスがすべての周波数にわたって、一定値  $R$  になる。この時の伝達関数は、式(1) のようになる。

$$F_{APF}(\omega) = \frac{\omega_H^2}{(j\omega)^2 + \omega_H(j\omega) + \omega_H^2} \quad (1)$$

$$\omega_H = 2 / (C_L R)$$

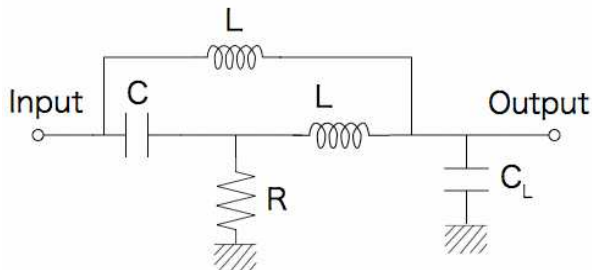


図 2 All-Pass Filter

式(1)より、All-Pass Filter はローパスフィルタの周波数特性を有しており、 $Q$  値が 1 であることを意味している。

周波数が  $\omega_H$  より低く、バンド幅が広くない用途においては  $Q$  値を増加させ、共鳴特性を持たせることができる。 $C = C_L/4$  の条件のもと、F-matrix を使って、図 2の回路の伝達関数を導くと式(2)のようになる。

$$F(\omega) = \left[ 1 + j\omega L \frac{1 + j\omega C_L R/2 + (j\omega)^2 LC_L/2}{R + j\omega L + (j\omega)^2 LC_L R/2} + (j\omega)^2 LC_L/2 \right]^{-1} \quad (2)$$

式(2)より共振周波数は、 $\omega_0 = \sqrt{2/(C_L L)}$  であり、 $Q$  値は近似的に以下のように求まる。

$$F(\omega_0) \cong [j\omega_0 C_L R/2]^1 = Q \quad (3)$$

$$\text{or } Q \cong \frac{1}{R} \sqrt{2L/(C_L)}$$

式(3)より、 $Q$  値を増加させるには、 $L$  を増加させれば良いことがわかる。

しかし、図 2の回路のままだと、入力インピーダンスは一定に保たれない。そこで、図-3 のように、並列共振回路を追加した。追加した並列共振回路の共鳴周波数と  $Q$  値は、式(3)で与えられる物と同程度であるはずであるから、回路素子の定数  $L_2$ 、 $C_2$  のおよその値は以下の式で与えられる。

$$L_2 \approx \frac{R}{\omega_0 Q}, \quad \text{and} \quad C_2 \approx \frac{Q}{\omega_0 R} \quad (4)$$

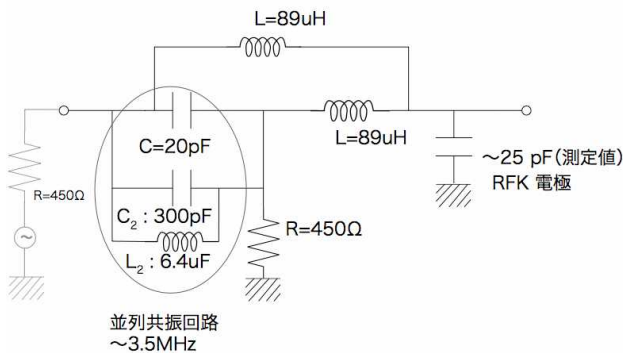


図 3 改造後の整合器

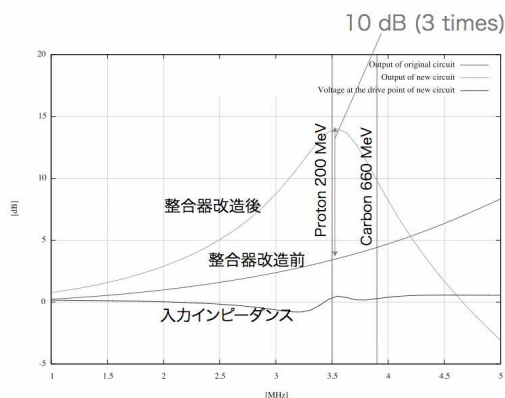


図 4 周波数特性のシミュレーション結果

実際の値は、回路シミュレータ SPICE を用いて決定した。このシミュレーション結果を図-4 に示す。Proton 200MeV 出射時に使用される周波数である、3.5MHz 付近において、14.5dB の増幅が得られている。これは、従来の回路から比べて、約 10dB 大きく、3 倍の電圧が得られることを意味する。また、drive point における電圧変動は 1dB 以下であり、入力インピーダンスは、ほぼ一定値に保たれていることを意味している。

### III. 実験結果

図-5 に、フィードバック制御 ON/OFF 時及び整合器改造前後の 200MeV proton のスピルの時間構造の比較を示す。このときの、出射 RF ノイズのバンド幅は  $\pm 25\text{KHz}$  に設定した。

スピル信号によるフィードバック制御がある場合(図-5(b))とフィードバック制御が無い場合(図-5(a))を比較すると、明らかに射出期間中により一様な電流強度が得られている。しかし、いずれの場合も 350msec の射出期間中にすべての粒子が射出することができない(最後までビームが射出され続けている)。

整合器の改造後は(図-5(c), (d))、射出効率の改善により射出期間中にすべての粒子を射出することができる。あわせて、フィードバック制御により、一様なスピル構造が実現されている(図-5(d))。

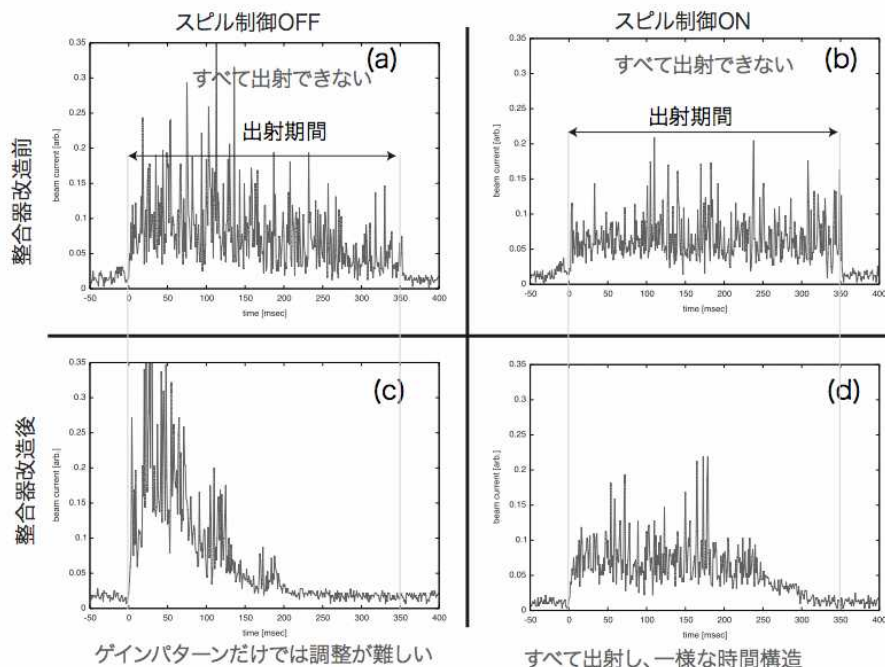


図 5 フィードバック制御及び整合器改造の効果

### IV. まとめ

KEK との共同研究により、射出 RF ノイズ振幅へのフィードバック制御の導入及び整合器の改造を行った。

新しい整合器は、新規性のある All-Pass filter に共鳴特性を付加した派生回路であり、一般的な容量性負荷の駆動の電力効率の改善に有効である。これによって、射出効率が大きく改善した。

フィードバック制御の導入により、スピルの時間構造が改善され、またその調整も容易になった。

### 参考文献

- 1) S. Hatori et al., in: "Proceedings of the 16th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry", (AIP, 2001) p. 86.
- 2) K. Hiramoto et al, Nucl. Instr. and Meth. A322 (1992), p.154