

## DEVELOPMENT OF SPILL FEEDBACK CONTROL METHOD FOR PROTON SYNCHROTRON

Nobuyuki Haruna <sup>#A)</sup>, Katsuhisa Yoshida <sup>B)</sup>, Kengo Sugahara <sup>B)</sup>, Masahiro Ikeda <sup>B)</sup>, Hirofumi Tanaka <sup>A)</sup>

A) Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R & D Center,  
8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661, Japan

B) Mitsubishi Electric Corporation, Energy Systems Center,  
1-1-2, Wadamisaki-Chyo, Hyogo-Ku, Kobe, Hyogo, 652-8555, Japan

### Abstract

A Spill feedback method for proton synchrotron for cancer therapy has been developed and evaluated by computer simulation of the slow extraction with third order resonance. In our beam extraction scheme, the separatrix is shrunk by sweeping the RF cavity frequency to increase the momentum of the beam, which causes the beam to be swept to the outside across the separatrix. This means that the spill intensity depends on the rate of change of the separatrix area and the Courant-Snyder invariant distribution inside the separatrix. From this point of view, the rate of change of the RF cavity frequency was selected as the variable in our spill feedback system to control the spill structure. The simulation results show that our proposed feedback method is effective for controlling the spill intensity and for suppressing the fluctuations due to ripples in the bending magnet current.

### 陽子シンクロトロンのスピルフィードバック制御方法の開発

#### 1. はじめに

近年、粒子線治療装置ではがん疾患部の形状に合わせてビームを走査して照射するスキヤニング照射方法の需要が高まっている。スキヤニング照射法は従来のビームを拡大して、コリメータで成形するブロードビーム照射法と比べ、正常組織を避けた高精度な照射が可能である。さらに、症例ごとに必要となるコリメータやボラス等の照射補助具を減らすことができることから治療準備時間短縮や治療コスト低減の効果もある。一方でスキヤニング照射法ではがん疾患部全体ではなく、照射スポットごとに線量管理を行うため、治療時間短縮のための高線量率と線量管理精度を両立させるためには高安定なスピル波形が要求される。シンクロトロンからのビーム取り出し方法は速い取り出しと遅い取り出しに大別される。遅い取り出しには6極電磁石により3次共鳴を励起し、さらに運動量を変化させることでビームを安定領域から共鳴領域に追い出して出射させる方法<sup>[1]</sup>がある。RF加速空洞の周波数を変化させることで運動量を変化させてビームを出射させる遅い取り出しにおいてスピル制御に効果的なフィードバック制御方法を考案し、ビームシミュレーションによる原理検証を行った。

#### 2. シミュレーションモデル

##### 2.1 ビームシミュレーションモデル

計算時間短縮のため入射、加速、出射の一連の過程を6次元トラッキングでは行わず、それぞれを以下のようにモデル化した。

##### ① 入射

入射エネルギー7MeVでマルチターン入射のシミュレーションを行い、各粒子のCourant-Snyder不変量を作成した。

##### ② 加速

断熱減衰を仮定し、入射シミュレーションで得られた各粒子のCourant-Snyder不変量を規格化した。出射シミュレーションの縦方向トラッキングに必要な出射前のフラットトップにおける各粒子のエネルギーと位相は、ハミルトニアン一定でHofmann Pedersen分布<sup>[2]</sup>に従うと仮定し作成した。

##### ③ 出射

出射シミュレーションモデルの概念図を図1に示す。出射シミュレーションはフラットトップの状態から縦方向トラッキングを行い、RF加速空洞の周波数変化による運動量の変化を考慮して水平チューンを求め、さらに水平チューンからセパトトリクス面積を計算して②で得られたCourant-Snyder不変量よりもセパトトリクス面積が小さくなると出射するモデルとした。水平チューンの運動量偏移依存性はあらかじめ、シンクロトロン内の磁場の値から水平、垂直方向の4次元トラッキングにより求め、クロマティシティの非線形性を多項式(5次まで考慮)で表した。セパトトリクス面積は共鳴近似を用い、次式<sup>[2]</sup>で計算した。

$$S = \frac{(\nu - 2/3)^2}{4\sqrt{3}A_{32}^2}$$

( $\nu$ :水平チューン  $A_{32}$ :共鳴励起項の振幅)

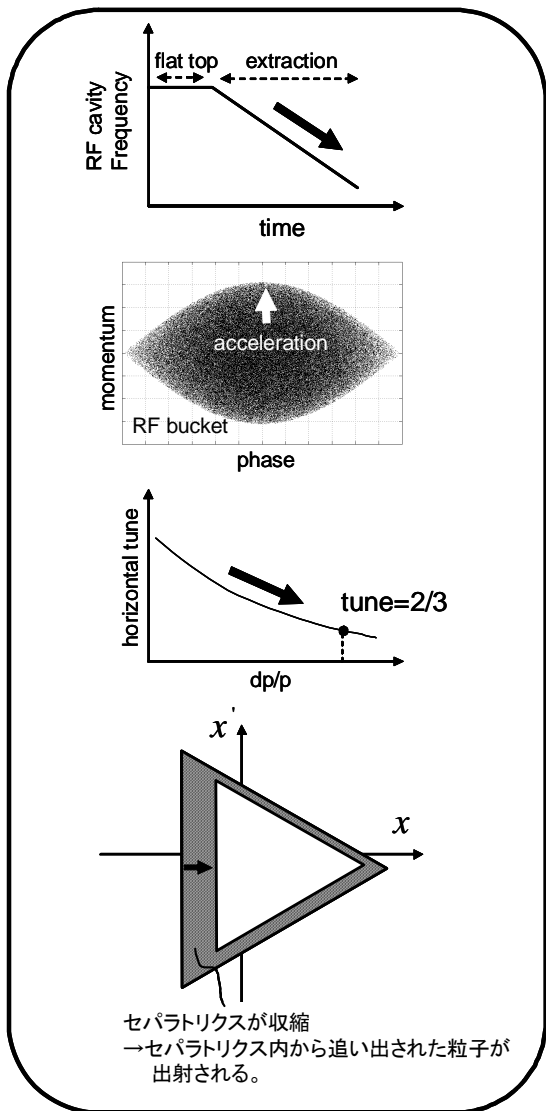


図1 出射シミュレーションモデル (フィードバック制御なし) の概念図

表1に出射シミュレーションの初期条件を示す。

表1：出射シミュレーション初期条件

中心エネルギー	210MeV
Bucket Height ( $\Delta p/p$ )	$\pm 0.0409\%$
水平チューン	0.679
周長	19.862m
R F 加速空洞周波数	8.645MHz
R F 加速空洞電圧	864.783V
シンクロトロン振動数	7.678kHz
momentum compaction factor	2.827
粒子数	20 万個

## 2.2 スピルフィードバック制御モデル

スピルフィードバック制御を考慮できるビームシミュレーションコードを開発した。フィードバック系のブロック図を図2に示す。フィードバック系は①2.1で説明した、縦方向トラッキング+出射のビームシミュレーションブロック②R F加速空洞の周波数演算と電圧(電圧は一定とした。)ブロック③モニター、信号伝送系の遅れ時間ブロックから構成される。R F加速空洞の周波数を変化(減少)させることで運動量を変化(増加)させて出射させる場合、スピル強度は安定領域の面積変化率、つまり運動量の変化率、と Courant-Snyder 不変量分布に依存することになる。よって、ビームを出射し続けるためにはR F加速空洞の周波数を下げ続け、さらにスピル強度を制御するには周波数の値ではなく、周波数の変化率を制御することが効果的となる。周波数の値を次式に従ってフィードバック演算で決定するモデルとした。

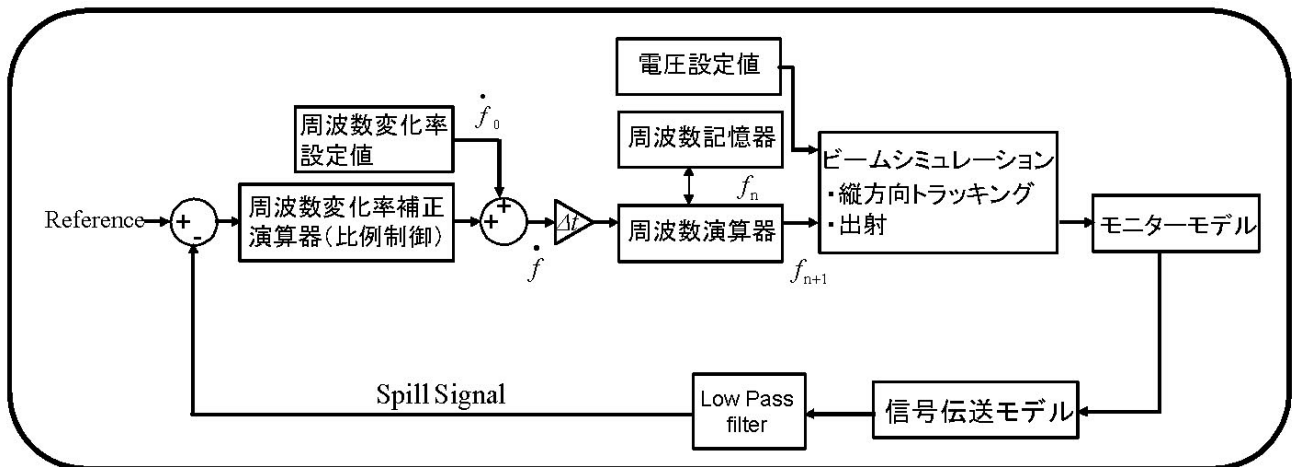


図2：スピルフィードバック制御シミュレーションのブロック図

$$\dot{f} = \dot{f}_0 + (\text{Reference} - \text{Spill Signal}) \times \text{Gain}$$

$$f_{n+1} = f_n + \dot{f} \times \Delta t$$

- $\dot{f}$  : RF 加速空洞の周波数変化率
- $\dot{f}_0$  : RF 加速空洞の周波数変化率設定値
- $f$  : RF 加速空洞の周波数
- $\Delta t$  : フィードバックループの周期

周波数変化率をフィードバック制御の操作量とし、 $n$  番目の周波数から  $n+1$  番目の周波数を決定するため、周波数記憶器を制御系に備えることが特徴である。

### 3. シミュレーション結果

#### 3.1 スピルの強度制御

図3にスピル強度制御のシミュレーション結果を示す。スピル強度は 1msec ごとに平均化した。フィードバック制御なしの出射は周波数変化率設定値からフィードフォワード制御のみで周波数を決定している。フィードバック制御の効果を知りやすくするために、フィードバック制御なしでは出射開始後、急激にスピルが立ち上がるよう周波数変化率設定値を決めた。フィードバック制御例は目標強度 0.05、0.1 に対してそれぞれ±10%程度でスピル強度を制御できた。運動量を変化させて出射する取り出し方法において周波数変化率を操作量とするスピルフィードバック制御は効果的であり、強度制御に対応可能であることがわかった。

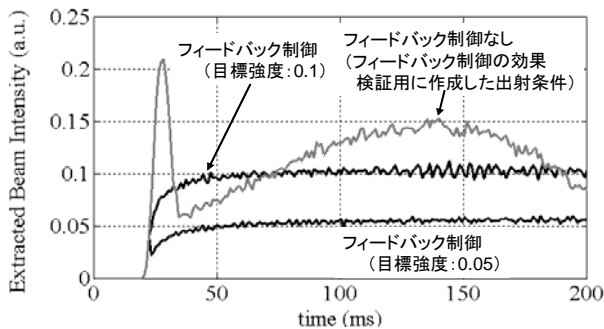


図3 : 出射シミュレーション結果 (スピル強度制御)

#### 3.2 周波数変化率設定値の補正

図4は1回目の出射中に、フィードバック制御後の周波数変化率の時系列データを記憶しておき、そのデータを2回目の出射の周波数変化率設定値として出射シミュレーションを行った結果である。シンクロトロン内の Courant-Snyder 不変量の分布は1回目と完全に同じとしたため、同じ周波数の値で出射

を行えばスピルが完全に再現する理想的な条件である。フィードバック利得は1回目の出射シミュレーション (図3) の半分の値とした。2回目のスピル波形は1回目のスピル波形と比べ、立ち上がりが早くなり、さらに目標強度 (0.05) に対して±5%以下に抑えることができた。1回目に比べて、小さいフィードバック利得で出射を行えることから制御の安定性も増すと考えられる。周波数変化率設定値の補正は安定したスピル波形を得るためのビーム調整の期間短縮にも効果的であると考えており、実機試験での検証を予定している。

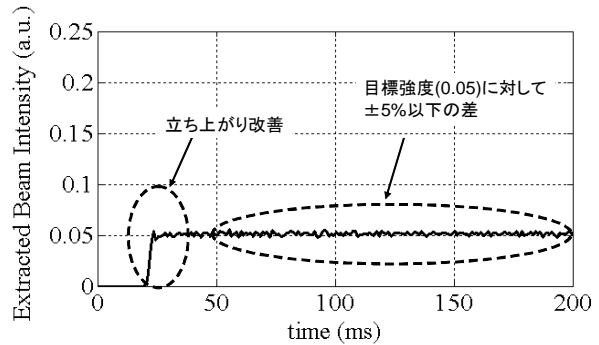


図4 : 出射シミュレーション結果 (周波数変化率補正後)

#### 3.3 外乱抑制 (偏向電磁石電流リップル)

シンクロトロン偏向電磁石の電流リップルによって発生する偏向磁場外乱によるスピルのスパイク構造抑制効果をシミュレーションにより評価した。偏向磁場外乱を考慮したときの水平方向チューンは次式で表される。

$$\nu = \nu_0 + (\xi_1 - \xi_Q) \frac{p - p_1}{p_1} + \xi_2 \left( \frac{p - p_1}{p_1} \right)^2 + \xi_3 \left( \frac{p - p_1}{p_1} \right)^3 + \xi_4 \left( \frac{p - p_1}{p_1} \right)^4 + \xi_5 \left( \frac{p - p_1}{p_1} \right)^5 + \xi_Q \frac{p - p_0}{p_0}$$

$$p_1 = p_0 \times \left( 1 + \frac{\Delta B}{B} \sin(2\pi f_r t) \right)$$

$\nu$  : 水平方向チューン

$p_0$  : 中心運動量

$\xi_n$  :  $n$  次のクロマチシティ

$\xi_Q$  : 4極電磁石のクロマチシティ

$\frac{\Delta B}{B}$  : 電流リップル強度

$f_r$  : 電流リップル周波数

電流リップル強度を想定される最大の条件(1e-6)で評価を行った。リップル周波数は 180Hz、300Hz、500Hz である。図5に外乱制御のシミュレーション結果を示す。3ケースともフィードバック制御がスパイク構造抑制に効果的であり、目標値に対して±100%以上の振動があるスピルに対してリップル周波数 180Hz、300Hz では±20%以下、500Hz で±50%以下に外乱抑制可能であることを確認した。外乱周波数が高くなるほど、効果が小さくなるのは、制御系にモニタのセンサ部、モニタの信号処理、信号伝送等の遅れ時間があるためである(それぞれ 50 μ sec、10 μ sec、5 μ sec)。外乱抑制時の周波数の急激な変化で非断熱的となり、バケットからこぼれた粒子は全体の 0.1%以下であった。

下、500Hz で±50%以下に外乱抑制可能であることを確認した。

### 参考文献

- [1] W.Hardt, CERN/PS/DL/LEAR Note 79-4, 1979
- [2] Hofmann, F. Pedersen, IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 26 pp. 3526-3528, 1979
- [3] R Symon, NAL FN/130, 1968

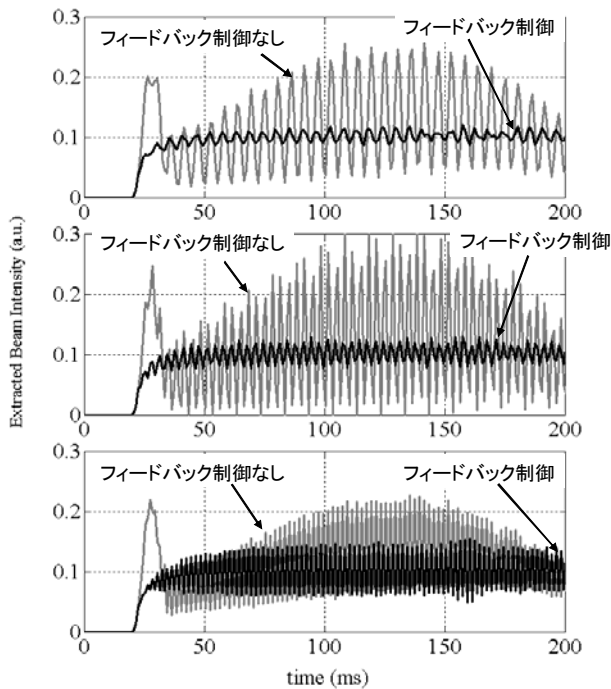


図5：出射シミュレーション結果  
(外乱周波数 上段：180Hz、中段：300Hz、  
下段：500Hz)

### 4. まとめ

粒子線治療装置向け陽子シンクロトロンスピル制御に効果的な RF 加速空洞の周波数変化率を操作量としたスピルフィードバック制御方法を考案し、ビームシミュレーションによる原理検証を行った。スピル強度は目標値の±10%範囲内(スピル波形は1msecごとに平均化)で制御可能であり、ビーム調整時に周波数変化率設定値を補正することでさらに目標値との差を小さくすることが可能と考えられる。また、電流リップルによるスピルのスパイク構造に対しても、目標値に対して±100%以上の振動があるスピルをリップル周波数 180Hz、300Hz で 20%以