

## 二種類の周波数領域の高周波を用いる新たな遅いビーム取り出し法

### AN ADVANCED METHOD FOR SLOW EXTRACTION WITH DUAL BAND RF VOLTAGE

西内秀晶<sup>#, A)</sup>, 平本和夫<sup>B)</sup>, えび名風太郎<sup>A)</sup>

Hideaki Nishiuchi<sup>#, A)</sup>, Kazuo Hiramoto<sup>B)</sup>, Futaro Ebina<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

<sup>B)</sup> Research & Development Group, Hitachi, Ltd.

#### Abstract

We propose “Dual-Step RF Extraction method” (DS-RF method) as an advanced slow extraction method of the ion synchrotron with non-linear resonance of the betatron oscillations. The DS-RF method applies dual band RF voltage, and each RF voltage controls it independently. One of the dual band RF voltages, an extraction RF voltage near the resonance make the beam exceed the separatrix by augmentation of the betatron oscillation amplitude of a circulating beam and extracts it from a synchrotron. The other RF voltage, a diffusion RF voltage far from the resonance is applied to diffuse the beam. A circulating beam is diffused by the RF voltage for diffusion in separatrix, and the beam spread in the separatrix neighborhood is extracted outside a synchrotron with the RF voltage for extraction. The control range of the extraction beam current is enlarged by controlling these RF voltages independently. In this article, we show the principle of the DS-RF method and the characteristic of this extraction method as a result of multi particle beam simulation.

#### 1. はじめに

高エネルギービームの利用分野、例えば、核物理研究や粒子線によるがん治療では、イオンシンクロトロンからの遅いビーム取り出しが用いられてきた。これらのビーム利用では、多くの場合、ビーム電流の一定化が望まれる他、特に粒子線治療では、目標を高精度で照射するため、ビーム位置の変化を抑えた取り出し法が望まれている。遅いビーム取り出し法では、共鳴現象によるベータトロン振動の増加を利用してビームをシンクロトロンからビーム輸送系へ取り出す。ベータトロン振動の共鳴は、ベータトロン振動の変位がシンクロトロンに設置した多極電磁石を励磁して形成するセパトリックスを超えた時に発生する。このような遅いビーム取り出し法のひとつに、セパトリックスを一定に保持し、高周波電圧でセパトリックス内を周回するビームのベータトロン振動を増大することでセパトリックスを越えさせて共鳴を発生する、高周波ビーム取り出し法<sup>[1]</sup>がある。高周波ビーム取り出し法では、セパトリックスを一定にしたままでベータトロン振動に共鳴を発生させるため、取り出しビームの位置・勾配を一定にできる特徴がある。また、取り出しビーム電流は、周回ビームに印加する高周波電圧の振幅値にて容易に制御可能である。

高周波ビーム取り出し法の高周波電圧印加方法として、以下の二つが挙げられる。(1) RF-DE 法<sup>[2]</sup>は、周回ビームに印加する高周波電圧として帯域制限高周波電圧を採用し、高周波電圧の振幅値制御にて取り出しビーム電流を制御する。帯域制限高周波電圧は、複数の線スペクトルで構成される。(2) RF-KO 法<sup>[3]</sup>は、正弦波高周波電圧を FM 変調することで広帯域の高周波電圧を周回ビームに印加する。更に、

RF-KO 法においては、セパトリックス近傍の粒子のベータトロン振動数に合わせた単一周波数の高周波電圧を従来の FM 変調電圧に加えることで、照射中にセパトリックス近傍の粒子を選択的に取り出す制御法が示されている<sup>[4]</sup>。この制御法は、単一周波数の高周波電圧を重畳して印加することでセパトリックス近傍の粒子密度分布を低減し、シンクロトロン振動による周回ビームの運動量変化や電磁石の電源リップルなどにより、高周波電圧を印加しなくても取り出されてしまうビームの発生を抑制できる。

本研究では、ベータトロン振動の非線形共鳴を用いるイオンシンクロトロンの新たな遅いビーム取り出し法として、Dual-Step RF Extraction 法 (DS-RF 法) を提案する。DS-RF 法では、二種類の周波数領域の高周波電圧を用い、それぞれ独立に制御する。二種類の周波数領域のうち、共鳴に近い側の周波数を持つ高周波電圧 (取り出し用高周波電圧) により、ベータトロン振動の振幅を増加させることでセパトリックスを越えさせ、シンクロトロンからビームを取り出す。この際、共鳴から離れた側の周波数領域の高周波電圧 (拡散用高周波電圧) を合わせてビームに印加する。この拡散用高周波電圧により周回ビームがセパトリックス内で拡散し、この拡散されたビームが取り出し用高周波でシンクロトロン外に取り出される。このような二種類の周波数領域の高周波電圧各々を制御することで取り出しビーム電流の制御範囲を広げるとともに、従来の一種類の高周波電圧で取り出した際に生じる取り出しビーム電流の時間構造が抑制可能となる。本論では、DS-RF 法の原理と、多粒子ビームシミュレーション結果より本取り出し法の特徴を示す。

<sup>#</sup>hideaki.nishiuchi.un@hitachi.com

## 2. DS-RF 法の原理

DS-RF 法の原理を従来法と比較しながら説明する。図 1 に DS-RF 法の原理を示す。

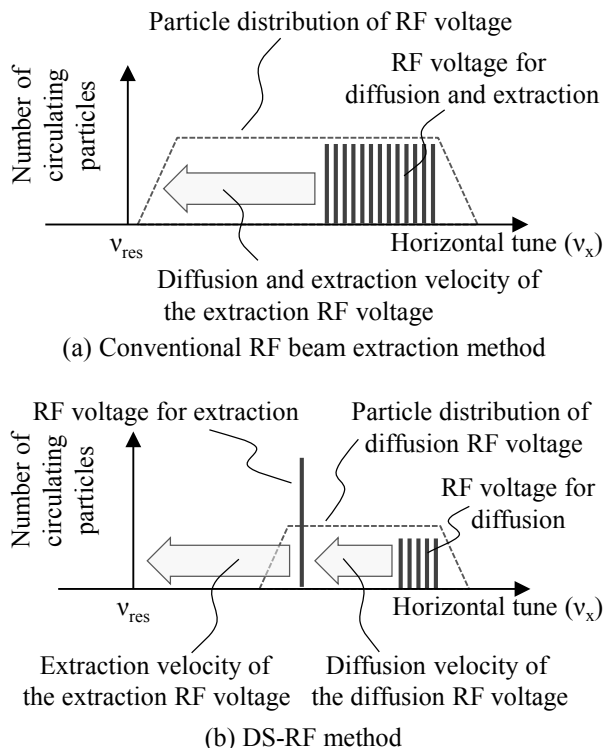


Figure 1: Principle of DS-RF method.

従来の高周波ビーム取り出し法<sup>[1]</sup> (図 1(a)) では、高周波電圧の印加範囲によりビームの拡散速度を調整し、振幅値により取り出しビーム電流を調整している。しかし、これらの機能は完全に分離できない。図 1(a)に点線で示したように、ビーム停止直後のシンクロトロン内のビーム分布は、セパトリックス限界まで広く分布している。取り出しビーム電流の高精度かつ取り出しビーム電流制御範囲を広げる制御を実現するには、セパトリックス内のビーム分布に応じてビームの拡散速度と高周波電圧の振幅値を独立かつ高精度に制御する必要がある。

DS-RF 法 (図 1(b)) では、周回ビームの拡散速度を制御する高周波電圧 (拡散用高周波電圧) とビームを取り出す高周波電圧 (取り出し用高周波電圧) の二つを用いる。拡散用高周波電圧は、ビームが取り出されない範囲で拡散速度を調整する。つまり、拡散用高周波電圧は、図 1(b)に点線で示したように、ビームを拡散するがセパトリックスを越えさせないように、高周波電圧の印加範囲と振幅値を調整する。そのため、従来の高周波ビーム取り出し法と比較すると拡散用高周波電圧の印加範囲は狭く、振幅値も低い。また、取り出し用高周波電圧は、拡散用高周波電圧で拡散したビームを安定に取り出せるように、拡散用高周波電圧よりも共鳴側に印加し、振幅値で取り出し速度を制御することでシンクロトロン外にビームを取り出す。さらに、取り出し用高周波電圧に単一周波数の高周波電圧を用いることで、ビーム

に印加する高周波電圧の周波数構造が取り出しビーム電流に重畳されにくくなり、高精度な取り出しビーム電流の制御が実現できる。

図 2 に従来法と DS-RF 法でのセパトリックス内のビーム分布を示す。従来法 (図 2(a)) ではセパトリックス内のビームは、図 1(a)に点線で示したように、セパトリックス近傍まで広く分布している。一方、DS-RF 法 (図 2(b)) では、ビームはセパトリックス近傍まで広がっておらず、取り出し用高周波電圧を印加しないとビームが取り出されない分布を実現している。

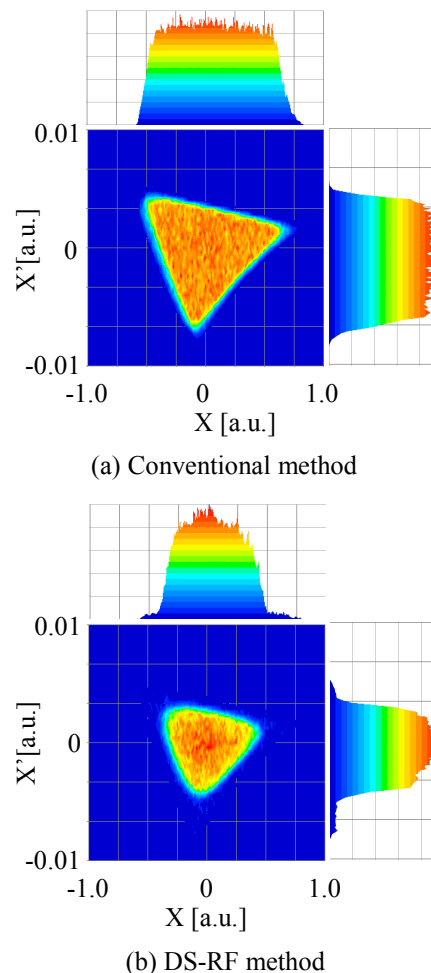


Figure 2: Comparison of the beam distribution of conventional method and DS-RF method.

図 3 に DS-RF 法での高周波電圧の印加周波数を示す。図 3 では、高周波電圧の印加周波数を水平チューン  $v_x$  に換算している。DS-RF 法では、拡散用高周波電圧  $V_{dif}$  をスペクトル間隔  $v_{div}$  の帯域制限高周波電圧とし、帯域の中心  $v_{cd}$  は周回ビームのベータatron 振動周波数の重心値、帯域幅  $v_{wd}$  は周回ビームのベータatron 振動の周波数分布よりも狭く設定する。また、取り出し用高周波電圧  $V_{ext}$  は、正弦波発振器から出力される高周波電圧とし、拡散用高周波電圧  $V_{dif}$  により拡散された周回ビームを効率良く取り出し可能な周波数  $v_{ce}$  を設定する。

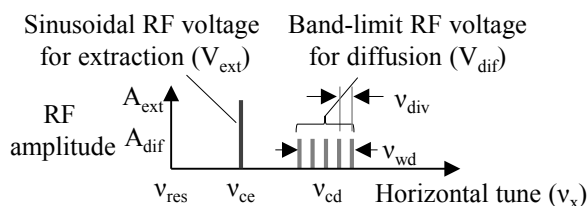


Figure 3: Applied band of the RF voltage on the horizontal tune.

図 4 に DS-RF 法での高周波電圧の制御方法を示す。拡散用高周波電圧  $V_{dif}$  を構成する帯域制限高周波電圧は、逆フーリエ変換で生成した複数の線スペクトルで構成される<sup>[2]</sup>。この帯域幅  $f_{wd}$ 、線スペクトル周波数間隔  $f_{div}$  の帯域制限高周波電圧は、帯域制限高周波電圧の中心周波数  $f_{cd}$  となる正弦波高周波電圧と乗算する。この乗算処理での中心周波数  $f_{cd}$  の調整により、周回ビームのエネルギーに応じた拡散用高周波電圧の印加範囲を容易に切り替えられる。

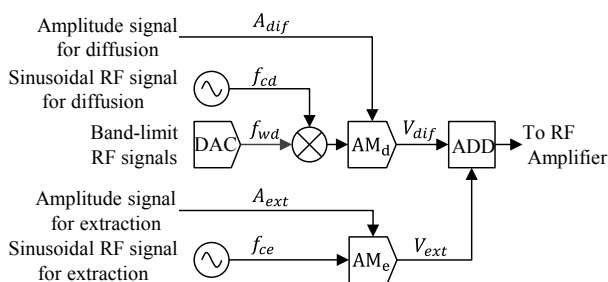


Figure 4. Block diagram of the RF signal generator for DS-RF method.

更に拡散用高周波電圧  $V_{dif}$  の振幅値  $A_{dif}$  は、振幅変調回路  $AM_d$  で周回ビームのベータatron振動振幅がセパトリックスを越えない範囲に制御する。取り出し用高周波電圧  $f_{ce}$  は、ビームの取り出し効率が高くなるように調整する。取り出し用高周波電圧  $V_{ext}$  の振幅値  $A_{ext}$  は、振幅変調回路  $AM_e$  で取り出しビーム電流を制御する。これら振幅値が制御された拡散用高周波電圧  $V_{dif}$  と取り出し用高周波電圧  $V_{ext}$  を加算器で加算し、電力増幅器で増幅した後に高周波電極に印加する。我々は DS-RF 法を多粒子ビーム取り出しシミュレーションで評価し、拡散用高周波電圧と取り出し用高周波電圧の印加条件を整理した。詳細を以下に示す。

### 3. ビームシミュレーション

DS-RF 法の原理は、六次元位相空間( $x, x', y, y', \varphi, \Delta p/p$ )での多粒子トラッキングシミュレーション<sup>[5]</sup>で評価した。表 1 に示す医療用陽子シンクロトロン<sup>[6]</sup>の運転条件を示し、表 2 に高周波電圧の印加条件を示す。これらのシミュレーション条件において、DS-RF 法での取り出しビームの周波数成分を評価した。高周波電圧の蹴り角は、周回ビームの 50% 程度のビームを 500ms で取り出すことを想定し、拡散用高周波電圧による蹴り角を 0.3 $\mu$ rad、取り出し用高周波電圧による蹴り角を 0.7 $\mu$ rad でそれぞれ固定とした。

ビームシミュレーションの初期粒子数は、FFT 解析時の統計量を考慮し 50 万点とした。

Table 1: Simulation Conditions of the Medical Proton Synchrotron

Beam	H <sup>+</sup> 200MeV
Circumference of synchrotron	18m
Extraction tune ( $v_x, v_y$ )	(0.68, 1.46)
Chromaticity ( $\xi_x, \xi_y$ )	(-2.0, 2.78)
Emittance ( $\epsilon_x, \epsilon_y$ )	(5 $\pi$ mm $\cdot$ mrad, 2 $\pi$ mm $\cdot$ mrad)
Momentum spread ( $\Delta p/p$ )	0.05%
Frequency of synchrotron oscillation	6.1kHz

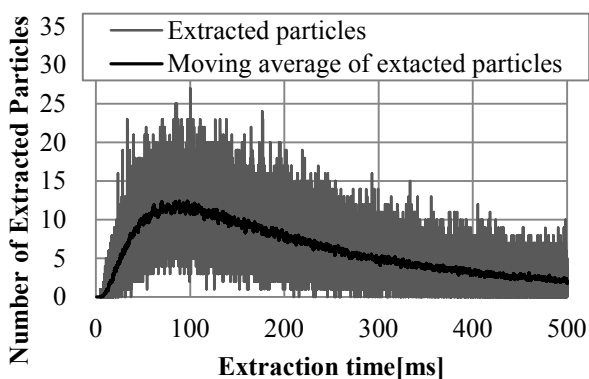
Table 2: Simulation Conditions of the DS-RF Method

$f_{dif}$ (convert to $v_x$ )	0.679-0.680
$f_{ext}$ (convert to $v_x$ )	0.677
$A_{dif}$	0.3 $\mu$ rad
$A_{ext}$	1.5 $\mu$ rad
$f_{div}$	1kHz
$N_{init}$	500kpts
Extraction time	500ms

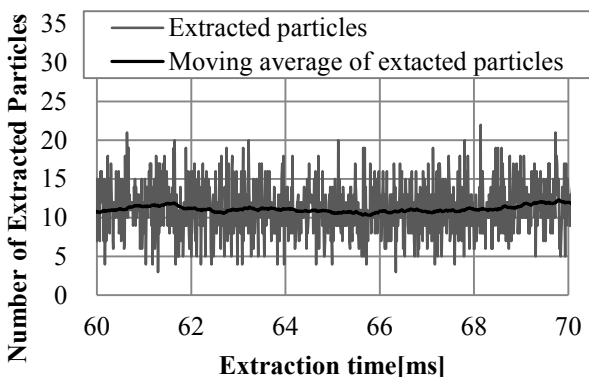
### 4. DS-RF 法での取り出しビーム特性評価

図 5 にシミュレーション結果を示す。DS-RF 法での取り出し粒子波形は穏やかな変化を示しており (図 5(a))、時間構造が密である。また、拡散用高周波電圧の線スペクトル間隔に対応する 1ms 周期の時間構造は生じていない (図 5(b))。

図 6 に取り出し粒子波形の FFT 演算結果を示す。FFT 演算結果でも、拡散用高周波電圧の線スペクトル周波数間隔に対応した 1kHz とその整数倍の周波数成分は見えず、一方で 20kHz から 30kHz の帯域に 1kHz 間隔の周波数成分が僅かに確認できる。この 20kHz から 30kHz の周波数成分は、取り出し用高周波電圧の周波数と拡散用高周波電圧の線スペクトル周波数によるビート成分である。このビート成分のスプリアスレベルは DC 成分に対して 42.3dB と十分低く抑えられており、取り出し粒子波形への影響も少ないことが分かる。このように、DS-RF 法では、従来の高周波ビーム取り出し法で生じていた、取り出し用高周波電圧の周波数に起因する低周波数のスプリアス成分が生じない。



(a) Overview



(b) Detail view

Figure 5: Extracted particle waveform with DS-RF method. (a) is overview of extraction waveform and (b) is detail view of extraction waveform from 60ms to 70ms.

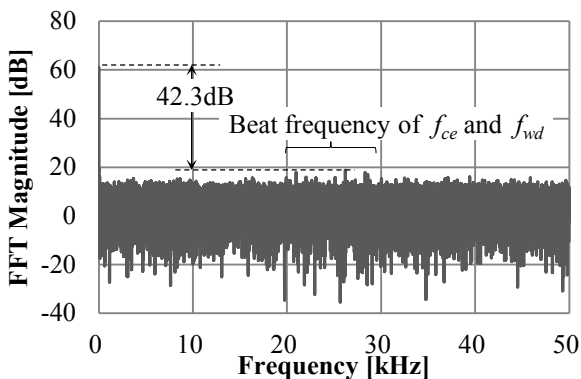
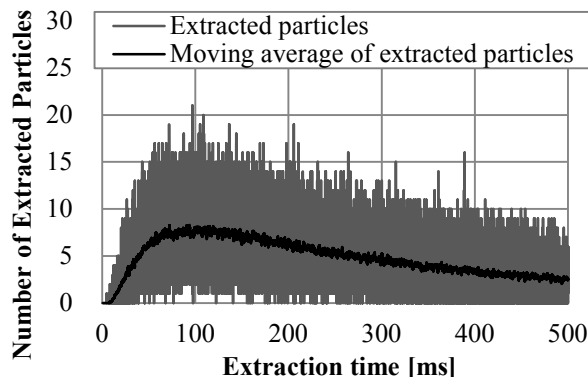


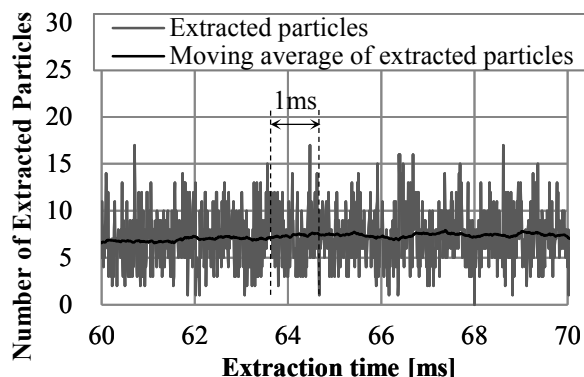
Figure 6: FFT operation result of the extraction particle waveform of figure 5. Frequency division of FFT is 5Hz.

ここで、取り出し粒子の時間構造に拡散用高周波電圧の線スペクトル間隔に対応した 1kHz の整数倍の周波数成分が生じない原因を考察するため、取り出し用高周波電圧の周波数を拡散用高周波電圧の周波数から離れた条件で同様にシミュレーションした。取り出し用高周波電圧の印加周波数は、拡散用高周波電圧の印加周波数から水平チューン換算で 0.677 ( $\Delta v=0.002$ ) から 0.675 ( $\Delta v=0.004$ ) に離し、図 5 のシミュレーション結果と同程度の粒子数が取り出せるよう、取り出し用高周波電圧の蹴り角を  $3.9\mu\text{rad}$  と

した。図 7 に取り出し用高周波電圧を水平チューン換算で 0.6750 に印加した場合の取り出し粒子波形を示し、図 8 に図 7 に示した取り出し粒子波形の FFT 演算結果を示す。



(a) Overview



(b) Detail view

Figure 7: Extract particle waveform when an extraction RF signal set in 0.675 by DS-RF method. (a) is overview of extraction particle waveform and (b) is detail view of extraction particle waveform from 60ms to 70ms.

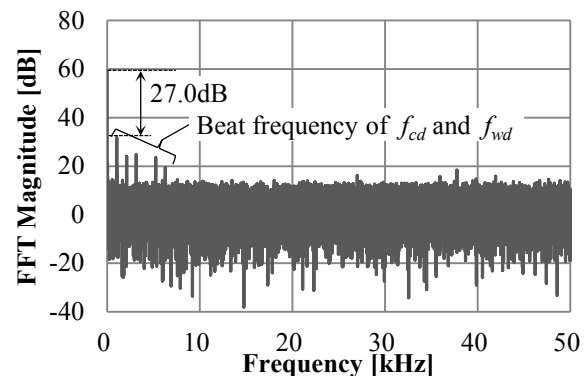


Figure 8: FFT operation result of the extraction particle waveform of figure 7.

取り出し用高周波電圧を拡散用高周波電圧から離れたシミュレーション結果において、拡散用高周波電圧の線スペクトル間隔に起因する 1kHz の整数倍の周波数成分が確認できた。この周波数成分は、実

際にビームに印加している帯域制限高周波電圧の線スペクトル成分同士によるビートで生ずるものである。この時のスプリアスレベルはDC成分と1kHz成分で27.0dBであり、取り出し用高周波電圧を0.6770に設定した場合より14.3dBも強い。

以上のシミュレーション結果に基づき、DS-RF法において1kHzとその整数倍のスプリアス成分が抑制される理由について考える。複数の線スペクトルで構成される拡散用高周波電圧は、それぞれの線スペクトル周波数同士でビートを生じる。今回のシミュレーション条件では、線スペクトル間隔 $f_{div}$ は1kHzであるため、1kHzとその整数倍のビートが取り出しビームにスプリアス成分として重畳する。また、DS-RF法では、取り出し用高周波電圧に拡散用高周波電圧を重畳して印加するため、拡散用高周波電圧の周波数成分と取り出し用高周波電圧の周波数成分によりビートを生じる。今回のシミュレーションにおいて、二つの高周波電圧により生じるビートは20kHzから30kHzの間に1kHz間隔で生じる。

これら二つのビート周波数成分(1kHz帯および、20kHz帯)は、拡散用高周波電圧と取り出し用高周波電圧の拡散速度の差によって、取り出しビームに生じるスプリアス成分が変わると考える。図5、図6に示したシミュレーション結果では、取り出し用高周波電圧を拡散用高周波電圧に近付ける( $\Delta v=0.002$ )ことで、拡散用高周波電圧による拡散速度に対して取り出し用高周波電圧による移動速度が相対的に速くなる。そのため、拡散用高周波電圧と取り出し用高周波電圧によって生じる20kHz帯のビート成分が強く現れ、拡散用高周波電圧により生じる1kHz帯のビート成分が打ち消される。一方、図7、図8に示したシミュレーション結果では、取り出し用高周波電圧の周波数が拡散用高周波電圧かの周波数から離れる( $\Delta v=0.004$ )ことで、拡散用高周波電圧による拡散速度に対して取り出し用高周波電圧の移動速度が相対的に遅くなる。これにより、拡散用高周波電圧により生じる1kHz帯のビート成分が含まれたままビームが取り出される。

以上のことから、DS-RF法において、拡散用高周波電圧に対して取り出し用高周波電圧の拡散速度を高めることで、拡散用高周波電圧の線スペクトル周波数成分を抑制が可能となり、取り出しビームに生じる低周波数の時間構造を抑制できる。

## 5. まとめ

ベータトロン振動の非線形共鳴を用いるイオンシンクロトロンの新たな遅いビーム取り出し法として、DS-RF法を提案する。DS-RF法では、ベータトロン振動振幅を増大させる高周波電圧で直接ビームを取り出さず、拡散用高周波電圧により周回ビームがセパラトリックス内で拡散し、セパラトリックス近傍に拡散されたビームが取り出し用高周波でシンクロトロン外に取り出す。DS-RF法を多粒子シミュレーションにて評価した結果、二種類の周波数領域の高周波電圧各々を制御することで取り出しビーム電流制御範囲を広げるとともに、従来の一種類の高周波

電圧で取り出した際に生じる線スペクトル周波数間隔に起因する1kHzの整数倍の周波数の時間構造の抑制できることを確認した。引き続き、取り出しビーム電流制御性について評価を進める。

## 参考文献

- [1] K. Hiramoto, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 322 (1992) 154-160.
- [2] K. Hiramoto, et al., Proc. of the 16th Particle Accelerator Conference, p113, Dallas, USA, 1995.
- [3] K. Noda, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 374 (1996) 269-277.
- [4] K. Mizushima, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 606 (2009) 324-329.
- [5] F. Ebina, et al., Proc. of the 5th Particle Accelerator Society Meeting, p382, Higashihiroshima, Japan, 2008.