

## FLAT-TOP ACCELERATION SYSTEM FOR THE JAERI AVF CYCLOTRON

S. Kurashima<sup>1</sup>, M. Fukuda, N. Miyawaki, S. Okumura, T. Nara, T. Agematsu, I. Ishibori, K. Yoshida,  
K. Arakawa and Y. Nakamura

Advanced Radiation Technology Center, Japan Atomic Energy Research Institute  
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma, 370-1292, Japan

### Abstract

A flat-top acceleration system for the JAERI AVF cyclotron has been designed to minimize the energy spread mainly for a microbeam production. The energy spread of the cyclotron beam is required to be reduced to  $\Delta E/E = 0.02\%$  to produce a microbeam with a spot size of  $1\ \mu\text{m}$  by focusing the beam with a set of quadrupole magnets. The flat-top acceleration using fundamental and fifth-harmonic frequencies for an acceleration voltage is an excellent technique to reduce the energy spread. In this paper, we report the beam development of  $260\ \text{MeV}\ ^{20}\text{Ne}^{7+}$  using the flat-top acceleration technique and the development of a new buncher system for highly efficient beam injection.

### 原研 AVF サイクロトロンにおけるフラットトップ加速

#### 1. はじめに

原研 AVF サイクロトロンでは、マイクロアパーチャーを用いたコリメーション方式による生物細胞へのマイクロビーム照射[1]が実用化されているが、マイクロアパーチャーの製作精度やエッジでの散乱のために、得られるビーム径及び照準位置精度は  $5\sim 10\ \mu\text{m}$  が限界である。細胞の狙った部位を正確に照射するためには数 $\mu\text{m}$  以下の照準精度が要求されている。そこで、高精度の四重極レンズを用いた集束方式のマイクロビーム形成技術の開発によりビームスポット径・照準位置精度  $1\ \mu\text{m}$  を目指している[2]。サイクロトロンによって加速されたビームをスポット径  $1\ \mu\text{m}$  に集束させるためには、四重極レンズでの色収差の影響を考慮すると、ビームのエネルギー幅を  $\Delta E/E \leq 0.02\%$  以下にする必要がある。しかし、従来のサイクロトロンのエネルギー幅は  $\Delta E/E = 0.1\%$  程度である。そこで、加速電圧波形を平坦化してビームのエネルギー利得を均一化するフラットトップ加速技術の開発を行っている[3]。さらに、フラットトップ加速により均一なエネルギー利得が得られるビーム位相幅  $\pm 8^\circ\ \text{RF}$  以内に入射ビームを高効率で圧縮するための鋸歯状波型バンチャーの開発も行っている。 $260\ \text{MeV}\ ^{20}\text{Ne}^{7+}$  のフラットトップビーム加速実験を行い、大型の AVF サイクロトロンでは困難とされていたシングルターン引き出しに成功した。

#### 2. フラットトップ加速に必要な技術開発

原研 AVF サイクロトロンでは、 $11\ \text{MHz} \sim 22\ \text{MHz}$  の高周波を基本波加速電圧として用いている

(加速ハーモニクス 1, 2および3)。フラットトップ加速とは、基本波に整数倍の高調波を加えることによりビームのエネルギー利得分布の平坦化を図り、イオンビームのエネルギー幅を小さくする手法である。低消費電力化、省スペース化を実現する第5高調波電圧励振用共振器を開発し、基本波との同時励振に成功した[4]。共振器開発に加えて、ビームパルス時間幅を  $\pm 8^\circ\ \text{RF}$  以下に制限するためのサイクロトロン中心領域電極形状・配置の最適化[5]、磁場・電場の高安定化、高効率ビームバンチャー及びエネルギー幅測定技術の開発などを行っている。フラットトップ加速によりビームのエネルギー幅を  $\Delta E/E \leq 0.02\%$  にするために必要な開発項目と目標値を表1に示す。なお、磁場及び電場の高安定化に関しては、それぞれ必要な安定度  $\Delta B/B \leq 0.002\%$ 、 $\Delta V/V \leq 0.02\%$  を既に達成している。

表1: フラットトップ加速によりビームのエネルギー幅を  $\Delta E/E \leq 0.02\%$  にするために必要な開発項目(共振器開発を除く)

Requirement	Goal
Stability of acceleration voltage	$\Delta V/V \leq 0.02\%$ for fundamental Voltage $\Delta V/V \leq 0.1\%$ for the 5th harmonic Voltage
Stability of cyclotron magnetic field	$\Delta B/B \leq 0.002\%$
Beam phase width	$\Delta\phi \leq \pm 8^\circ\ \text{RF}$
High performance beam buncher	80% compression of injected beam within $10^\circ\ \text{RF}$
Measurement of the beam energy spread	$\Delta E/E \leq 0.01\%$

<sup>1</sup> E-mail: kura@taka.jaeri.go.jp

### 3. 鋸歯状波型ビームバンチャー開発

フラットトップ加速では、目標とするエネルギー幅  $\Delta E/E \leq 0.02\%$  を得るためにビームパルス の時間幅を  $\pm 8^\circ$  RF 以下に、さらに入射するビームの エミッタンスを制限する必要がある。この場合、現在使用 している正弦波型のビームバンチャーでは圧縮が不十分な ため、ビーム強度は従来の半分以下に減少してしまう。 そこで、高効率な圧縮が可能な鋸歯状波型ビームバンチ ャーの開発を行った。従来の鋸歯状波型バンチャーでは、 基本波に第2、第3高調波を重畳する方法を用いているが、 この方式ではそれぞれの周波数に専用の増幅器、制御回路が 必要となるためコストが高く、装置が大型化する上に操作 が複雑といったデメリットがあった。これらの問題を解消す るために、回路構成を簡略化でき、操作性に優れた充放電 型の電圧発生回路[6]の設計・製作を行った。設計には回路シ ャミュレータ“PSpice”を使用した。PSpice でのシミュレ ーションに用いた回路図を図1に示す。1) スイッチ S1 を開 の状態で高圧電源をオンするとシングルギャップのバンチ ャー電極 C1 (対向したメッシュ) に充電が開始される、2) ある時点でスイッチ S1 を閉じるとバンチャー電極に蓄積され ていた電荷はアースに落ちる、3) スイッチ S1 を開けると、 バンチャーは再び充電される。シミュレーションの結果から、 充電路の自由振動数を小さく、放電路の自由振動数を大きく することで直線性の良い鋸歯状波を発生できることが分か った。スイッチング素子として真空管を用いるが、バンチ ャー電極の静電容量は極力小さくして蓄積エネルギーを抑 え、放電時の真空管における電力消費を小さくすることが望 まれる。バンチャー電極の形状や配置に起因して  $\sim 50$  pF の静電容量が生じることから、回路設計においては電極の静電容量を 50 pF として回路の各パラメータの最適化を行った。実機の パワーテストを行い、オシロスコープと高電圧プローブを用 いて計測した鋸歯状波型バンチャーの電圧波形を図2に示す。 集束方式による生体細胞へのマイクロビーム照射を要請さ れている 260 MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  イオンビームで性能試験を行っ たこ

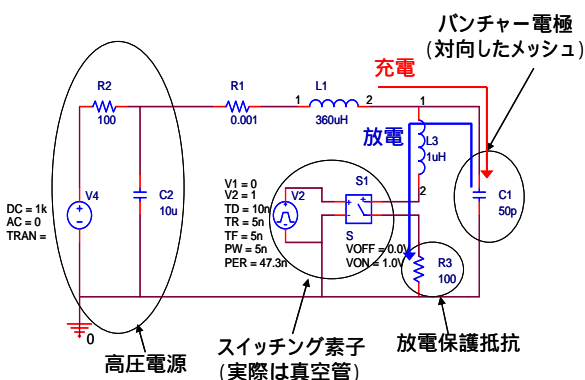


図1: PSpice でのシミュレーションに使用した充放電型鋸歯状波発生回路

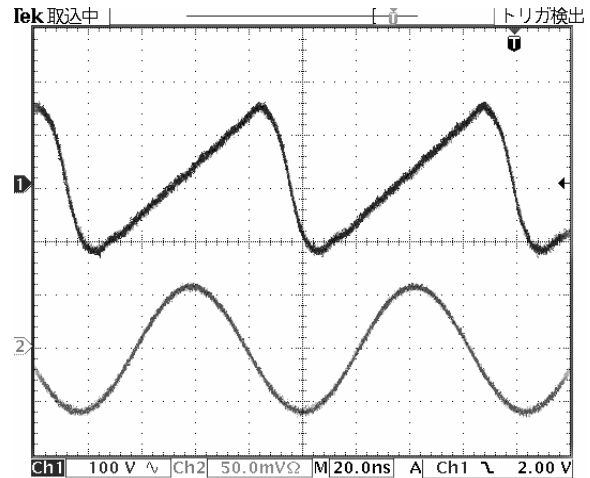


図2: ビームバンチャーの電圧波形 (上: 鋸歯状波型, 下: 正弦波型。RF周波数: 12 MHz)

る、従来の正弦波型バンチャーでは、バンチャーを 使用しない場合に対してサイクロトロン引き出し直 後のファラデーカップでのビーム電流の増加は 3.8 倍であったが、鋸歯状波型バンチャーでは 5倍に向 上させることができた。さらに、両バンチャーを同 時に運転することにより 6.3倍に増大させる事に 成功した。しかし、現時点では、1) 繰り返し周波 数が変わっても放電時間は変わらないために効果 的な時間幅(位相幅)は加速周波数により異なる、2) バンチャー電極間のギャップは固定なので電極間 のトランジット時間は加速ハーモニクスにより異なり、 バンチャーの効果に差が生じる、といった問題を抱 えている。放電時間に関しては、これ以上短くす る事は難しいので、電極デザインを最適化するこ とにより、いずれの加速ハーモニクスにおいても高効率 バンチングを実現することが今後の課題である。

### 4. フラットトップビーム加速実験

コリメーション方式による生物細胞へのマイク ロビーム照射に既に利用されている 260 MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  イオンビームについて、フラットトップ加速技術の 開発を進めている。フラットトップ加速の効果を最 大限引き出すためには、基本波電圧、第5高調波電 圧・位相、ビームパルス幅制御(プラー及び位相ス リットの位置調整)、ビームバンチャー、トリムコ イル及びハーモニックコイル磁場などを微調整して 十分なターンセパレーションが得られるようにパラ メータを最適化する必要がある。フラットトップ加 速の効果を簡易的に確かめるため、厚さ 0.5 mm の シート片状の電極を用いてサイクロトロン引き出し 直前の半径方向の電流分布を測定するデフレクタプ ローブを開発した。このプローブを用いて調整パラ メータの最適化を行った結果、総ターン数が250を 超える大型の AVF サイクロトロンでは初めて引き

出し前のターンを分離させることに成功した。フラットトップ加速時に測定したデフレクタプローブのパターンを図3に示す。基本波のみの加速の場合にはターンの分離は困難になり、サイクロトロンに入射したシングルバンチが分割されて複数回に分けて取り出されるマルチターン引き出しの状態になるのに対し、第5高調波を重畳したフラットトップ加速の場合にはビームバンチ内でのエネルギー幅が小さくなり、半径方向へのビームの拡がりも激減して、シングルバンチがそのまま取り出される、いわゆるシングルターン引き出しに極めて近い状態が形成されているものと考えられる。そこで、サイクロトロン入射ラインに設置されているパルス型ビームチョッパーによりビームを時間的に制限し、ほぼ1バンチ分のビームのみを入射し、サイクロトロンのビーム輸送ラインに設置されているプラスチックシンチレーションカウンターと TAC を用いてサイクロトロンから取り出されたビームパルスの時間分布を測定した結果、ビームパルスは1バンチしか検出されず、フラットトップ加速によりシングルターン引き出しを実現していることを確認した。

現在は、260 MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  フラットトップ加速ビームを試験的に集束方式のマイクロビーム形成装置に輸送し、高精度の4連四重極電磁石による集束実験を行っている。

## 5. 今後の予定

すべてのイオン加速において高効率にバンチングできるように充放電型ビームバンチャー電極デザインの最適化を行う。マイクロスリットと分析電磁石を用いてビームエネルギー幅を測定し[7],  $\Delta E/E \leq 0.02\%$  を実現するフラットトップ加速の最適な調整法を確立する。

## 参考文献

- [1] T. kamiya, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **181**, 27 (2001)
- [2] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **210**, 54 (2003)
- [3] M. Fukuda, et al., Rev. Sci. Instrum. **74**, 2293 (2003)
- [4] 倉島 俊, 他, 第14回加速器科学研究発表会報告集, p. 359 - 361 (2003)
- [5] 宮脇信正, 他, 第14回加速器科学研究発表会報告集, p. 404 - 406 (2003)
- [6] S. Brandenburg, et al., Proc. 16th Int. Conf. on Cyclotron and their Applications, East Lansing, USA, 373 (2001).
- [7] 奥村 進, 他, 第14回加速器科学研究発表会報告集, p. 518 - 520 (2003)

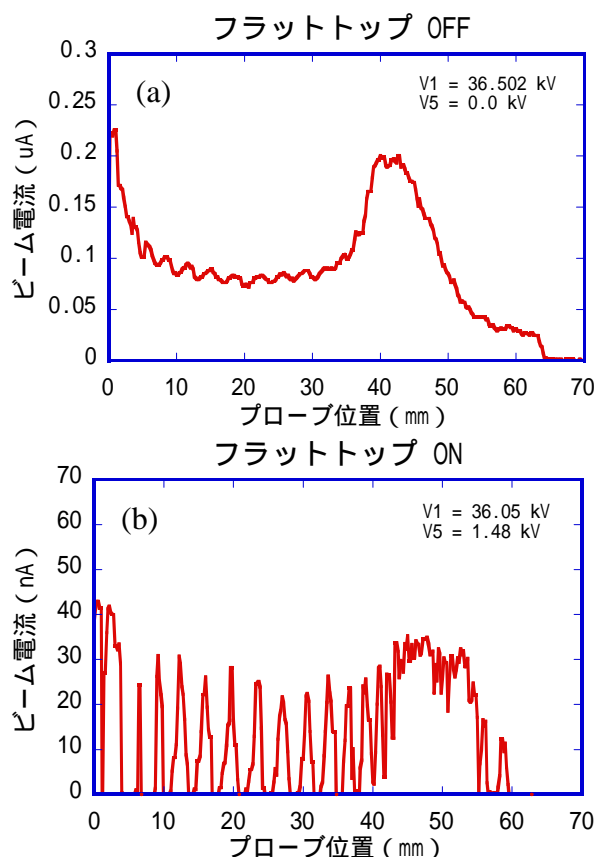


図3：デフレクタプローブで計測した260 MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  の電流パターン。(a) 基本波での加速, (b) フラットトップ加速