

## SINGLE-TURN EXTRACTION TECHNIQUE IN THE JAERI AVF CYCLOTRON

Satoshi Kurashima<sup>1</sup>, Nobumasa Miyawaki, Susumu Okumura, Ikuo Ishibori, Ken-ichi Yoshida,  
Hirotugu Kashiwagi, Mitsuhiro Fukuda, Takayuki Nara, Takashi Agematsu and Yoshiteru 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 developed to minimize the energy spread of an ion beam mainly for microbeam formation with a spot size of 1  $\mu\text{m}$  in diameter by focusing the beam with a set of quadrupole magnets. A single-turn extraction is an indispensable condition to achieve minimum energy spread of the beam by the flat-top acceleration. In order to save a tuning time for the single-turn extraction by measuring time distribution of the beam bunch, a deflector probe has been developed to observe the turn separation and the radial beam width. In this paper, we report the beam development of 260 MeV  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  and 45 MeV  $\text{H}^+$  beams using the flat-top acceleration technique with the deflector probe.

## 原研 AVF サイクロトロンにおけるシングルターン取り出し技術の開発

### 1. はじめに

日本原子力研究所高崎研究所では、バイスタンダー効果、アポトーシスなどに代表されるイオンビームの生物影響、宇宙用半導体のシングルイベント効果などの研究をミクロンレベルの微小な領域で行う事を目的として、AVF サイクロトロンによって加速される数百 MeV 級重イオンビームを四重極電磁石でスポット径 1  $\mu\text{m}$  以下に集束し、高速でシングルイオンヒットを行うマイクロビーム形成技術の開発を進めている[1]。我々のマイクロビーム形成装置では、培養液に浸された細胞をターゲットとして用いるため、ビームを鉛直上方向から照射するが、建屋の都合上マイクロビームラインの設計に様々な制限がある。与えられたスペースにおいてビームをスポット径 1  $\mu\text{m}$  に集束させるには、四重極レンズでの色収差を低減するために、ビームのエネルギー幅を  $\Delta E/E \leq 2 \times 10^{-4}$  以下にする必要がある。しかし、サイクロトロンでは通常、正弦波型の高周波電場でイオンを加速するために、位相の違いによりエネルギー利得が僅かに異なり、ビームのエネルギー幅は  $10^{-3}$  台程度が一般的である。そこで、エネルギー幅を小さくするために、加速位相内の電圧をほぼ一定にしてエネルギー利得を均一にするフラットトップ加速技術の開発を行っている[2,3]。これを実現するためには、従来の取り出し方法である一つのビームバンチを複数回に分けて取り出すマルチターン取り出しではなく、一度に取り出すシングルターン取り出しが必要である。本発表では、新たに開発したデフレクタプローブを用いたシングルターン取り出し技術の開発について報告する。

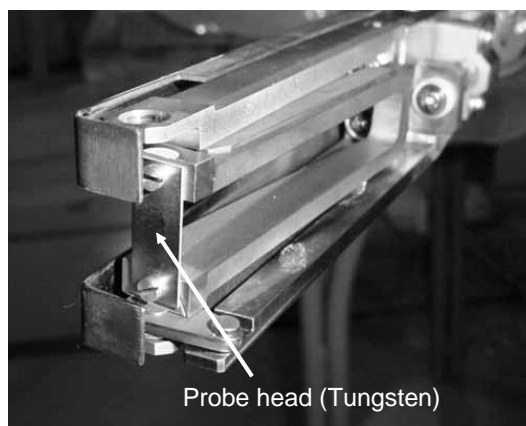
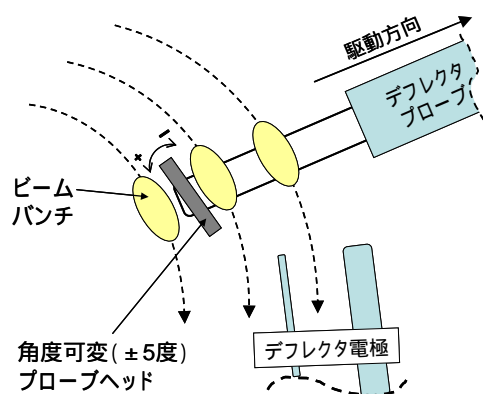


図1 ターンセパレーション計測の概念図 (上)と新型デフレクタプローブ先端部の写真 (下)。プローブヘッドとして、厚さ 0.5 mm のタングステン片が取り付けられている。

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

## 2. デフレクタプローブの開発

フラットトップ加速では、加速に用いる正弦波（基本波）電圧に整数倍の高調波を加え、限られた位相で電圧を一定にする。原研 AVF サイクロトロンでは、高調波を励振する共振器の省エネルギー、省スペースの観点から有利である 5 倍波を選択した [2]。

原研 AVF サイクロトロンのような大型の AVF サイクロトロンにおける基本波電圧のみの加速では、引き出し半径付近での、ビームバンチの半径方向への拡がりに比べてターンセパレーションが小さいため、シングルターン取り出しは困難である。フラットトップ加速にすると、同じビームバンチ内におけるエネルギーのばらつきが小さくなるのでビームバンチの半径方向の拡がりを抑えることができ、個々のターンを識別することが出来る。その結果、1 バンチが一度で引き出されるシングルターン取り出しが可能となる。

これまでにフラットトップ加速のための共振器改造、サイクロトロン中心領域の改造を完了し、基本波電圧と高調波電圧の同時励振およびビーム位相幅を制御できることを確認した。次の段階として、ターンセパレーションの状態を簡便に確認するために、新たにデフレクタプローブを開発した。一般的なデフレクタプローブはワイヤー方式を採用しているが、ワイヤーでのエネルギー損失による温度上昇によりワイヤーが切断する、二次電子が放出されにくい軽イオンビームの場合には感度が低下するなどの問題があり、ビームパワーの制限や保守性・利便性の低下などが生じる。図 1 に、ターンセパレーション計測の概念図と今回開発されたデフレクタプローブの実機の写真を示す。プローブの先端には、電流を検出するためのセンサーとしてワイヤーに比べて溶融・切断しにくい厚さ 0.5 mm のシート状のタングステン片もしくは直径 0.5 mm のグラファイ

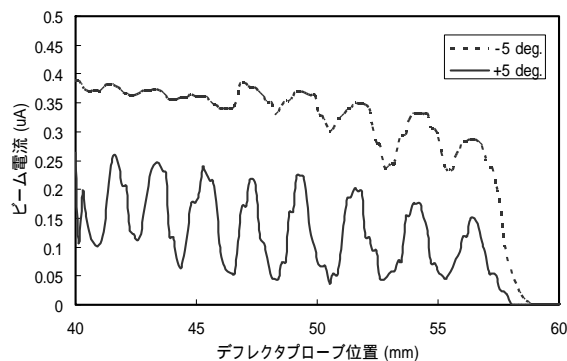


図 2 プローブヘッドの角度を変えて測定したデフレクタプローブのビーム電流パターン。加速ビームは 260 MeV -  $^{20}\text{Ne}^{7+}$ 。加速ハーモニクスは 2、総ターン数は設計上 265 である。

トロッドを装着できる構造となっている。タングステン片は、主に飛程の大きい軽イオンビームを完全に停止して高感度でビーム電流を測定する時に用いられる。ビームバンチはある角度を持ってデフレクタ電極に入るが、図 1 の概念図から分かるように、入射の角度によっては回転数が異なるバンチが同時にプローブヘッドに当たり、分解能が非常に悪化する。そこで、プローブヘッドの角度を全幅で  $10^\circ$  遠隔可変とする設計にした。フラットトップ加速調整時に、タングステン片プローブヘッドを用いて、ヘッドの角度を変えて測定したビーム電流パターンを図 2 に示す。角度設定が  $-5^\circ$  の場合にはほとんどターンセパレーションは確認できないが、 $+5^\circ$  でははっきりと確認できた（角度  $0^\circ$  は、任意の原点である）。

## 3. シングルターン取り出し実験

現在、生物細胞照射で用いられている 260 MeV -  $^{20}\text{Ne}^{7+}$  ビームのフラットトップ加速を行い、マイクロビーム形成実験を行っている。シングルターン取り出しを実現するためには、デフレクタプローブで測定を繰り返しながら十分なターンセパレーションが得られるようにサイクロトロンの運転パラメータを調整する必要がある。全体磁場、ハーモニックコイル、基本波および高調波の電

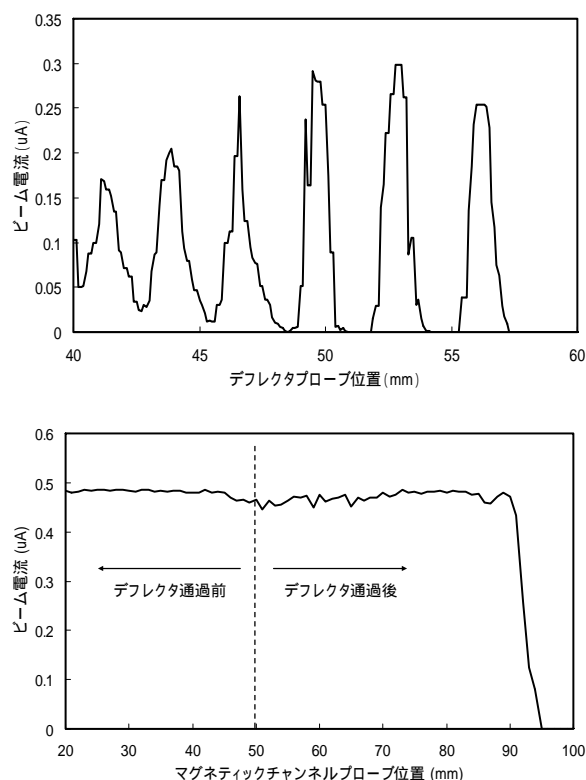


図 3 ターンセパレーションが明瞭になるようにサイクロトロンを微調整した時のプローブパターン。

圧・位相の設定値をターンセパレーションがより明瞭になるように微調整した時の各電流プローブパターンを図 3 に示す。図 3 上はデフレクタプローブ、下はマグネティックチャンネルプローブの電流パターンである。マグネティックチャンネルプローブは、デフレクタ通過前後の全ビーム電流を計測するプローブである。その結果、95 % 以上のデフレクタ透過効率が得られた。この状態で、パルス型ビームチョッパーによりほぼ 1 バンチ分のビームのみをサイクロトロンに入射し、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、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。

主に  $H^+$  の高エネルギービームを加速する加速ハーモニクス 1 は総ターン数 550 であり、加速ハーモニクス 2 に比べてターンセパレーションが小さく、マルチターン取り出しになるためデフレクタ電極放射化の原因になっていた。そこで、加速ハーモニクス 1 の 45 MeV -  $H^+$  ビームについてもフラットトップ加速試験を行った。図 4 に、デフレクタプローブのビーム電流パターンを示す。高調波電圧オフでも若干のターンセパレーションを確認できるが、高調波電圧をオンすることで、より明瞭なターンセパレーションを得ることに成功した。これにより、デフレクタ透過効率は 59 % から 86 % に改善し、フラットトップ加速は、重大な問題であるデフレクタの放射化の低減に非常に有効であることが確認できた。

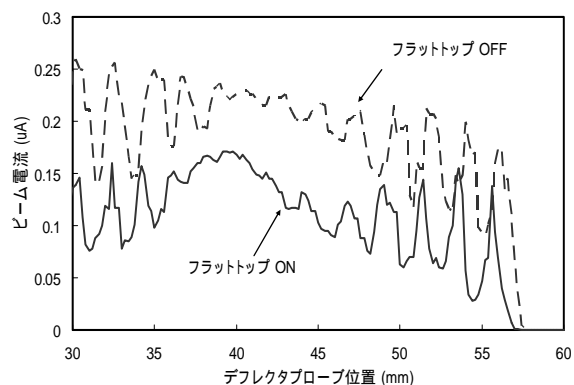


図 4 フラットトップ加速（第5高調波電圧）オン、オフにおけるデフレクタプローブのビーム電流パターンの違い。加速ビームは 45 MeV -  $H^+$ 。加速ハーモニクスは 1，総ターン数は設計上 550 である。

#### 参考文献

- [1] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **210**, 54 (2003)
- [2] M. Fukuda, et al., Rev. Sci. Instrum. **74**, 2293 (2003)
- [3] 倉島 俊, 他, 第1回日本加速器学会年会報告集, p. 266 - 268 (2004)