# SINGLE-TURN EXTRACTION TECHNIQUE IN THE JAERI AVF CYCLOTRON

Satoshi Kurashima<sup>1</sup>, Nobumasa Miyawaki, Susumu Okumura, Ikuo Ishibori, Ken-ichi Yoshida, Hirotsugu 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  $\mu$ 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 <sup>20</sup>Ne<sup>7+</sup> and 45 MeV H<sup>+</sup> 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

义 1

# 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 µm 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 μm 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。

Probe head (Tungsten)

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。

ビーム
 デフレクタ電極

 角度可変(±5度)
 デフレクタ電極

 プローブヘッド
 デンレクタ電極

<sup>&</sup>lt;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 - <sup>20</sup>Ne<sup>7+</sup>。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°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°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°で ははっきりと確認できた(角度0°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 - <sup>20</sup>Ne<sup>7+</sup> 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<sup>+</sup>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<sup>+</sup> 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<sup>+</sup>。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)