

Characteristics of beam phase in the JAEA AVF cyclotron

Nobumasa Miyawaki¹, Susumu Okumura, Satoshi Kurashima, Hirotsugu Kashiwagi, Ken-ichi Yoshida, Yosuke Yuri, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka, Ikuo Ishibori, Takayuki Nara, Watalu Yokota

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

Abstract

The characteristics of the beam phase for three of acceleration harmonic modes ($H=1, 2, 3$) were investigated in the central region of the JAEA AVF cyclotron. Experiments were made to clarify relations of the beam phase to the spatial displacements of ion beam orbits in the radial direction at the phase defining slit, and also to the initial condition of the beam phase at the exit of the inflector defined by the phase shift of the beam buncher. Some correlation of the beam phase to both of the position of the phase defining slit and the phase shift of the beam buncher were observed in the case of $H=1$, but no correlation was found in the case of $H=2$. And in the case of $H=3$, only correlations of the intensity of the beam phase to them were observed with larger phase width than that in case of $H=2$. It is expected that optimization of the injection system and the central region of the cyclotron can be made according to these characteristics of the beam phase depending on H , so as to obtain higher transmission of high quality ion beams.

JAEA AVFサイクロトロンの中のビーム位相の特性

1. はじめに

原子力機構AVFサイクロトロン($K=110$)では、 $1\mu\text{m}$ 以下のビーム径及び照準位置精度を有する重イオンマイクロビームの形成が可能となり、微小領域でのイオンビームによる生物学的影響の研究や宇宙用半導体のシングルイベント効果等の材料科学の研究への予備的な照射実験を行っている。マイクロビーム形成は、4連四重極電磁石によるビーム集束方式を用いており、集束電磁石でのビームの色収差による広がりを抑えるため、ビームエネルギー幅を $\Delta E/E \leq 0.02\%$ (FWHM)にする必要がある^[1]。そこで、均一なエネルギー利得が得られる加速位相幅の拡大が可能フラットトップ(FT)加速システム^[2,3]を導入するとともに、ビームバンチの時間幅をこの均一なエネルギー利得のrf位相幅内に制限するために、図1に示すような中心領域に改造した^[4]。

従来、ビーム位相分布の測定はサイクロトロン外部でしか行えなかったため、引出し機器でビームの損失が不可避であり、中心領域の位相制限スリットや電極等の配置とビーム位相の関係は分からなかった。そこで、サイクロトロン内部のほぼ全半径にわたって電流計測が可能メインプロブに、プラスチックシンチレータ、光ケーブル、光電子増倍管を取り付けた新たなプロブの開発^[5,6]を行った。そこで、サイクロトロン内部において上記関係を明らかにするため、このプロブを用いたビーム位相分布の測定を行った。

AVFサイクロトロンにおけるビーム位相幅の制限は、入射ビームラインに設置したビームバンチャーシステム(BB)で入射ビームをバンチングし、必要と

しない位相範囲のビームを位相制限スリットでビーム軌道を制限することで行われる。2組ある位相制限スリットは、加速RF位相の違いによって得られたエネルギーに対応するビーム軌道が相対的に最も半径方向に広がる1ターン目に設置されており、互いに2つのピラーでビーム軌道を制限することにより、ビームのRFに対する位相を制限する。イオンの回転周期とrf加速周期の比である加速ハーモニック(H)1,2,3に対して、それぞれ引き出しまでの回転数が総計550,265,220になるようにコンスタントオービット法によってディー電極の加速電圧が決められており、 H が同じであればビーム軌道はほとんど変わらない。そこで位相制限スリットを用いたビーム位相幅の制限は、 H 毎の位相制限スリット位置、言い換えればビーム軌道位置とビーム位相の関係を

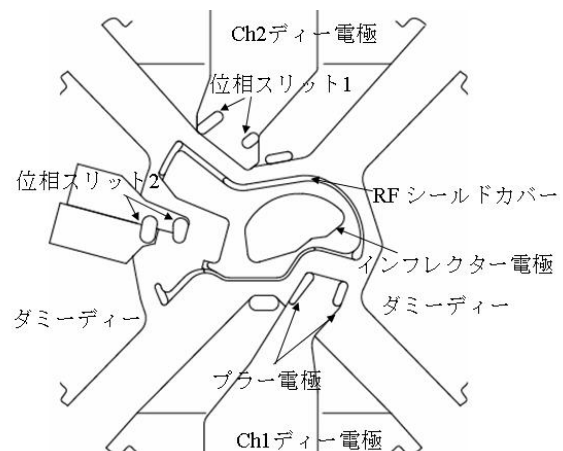


図1 : JAEA AVFサイクロトロンの中の中心領域

¹ E-mail: miyawaki.nobumasa@jaea.go.jp

毎の代表的なビームで調べれば可能となる。

一方、BBはイオン源からの直流ビームを正弦波電圧で速度を変調して、インフレクター電極出口でバンチングすることから、BBの正弦波の位相を変えることで、入射ビームに対する最初の加速rf位相を選択できる。このBB位相と等時性磁場中のビーム位相の関係から、加速領域とは異なる電極配置の中心領域でのビーム位相の特性が分かる。

本稿では、開発したCMPプローブを用いて、位相制限スリット2の位置及びBBの位相についてH毎のビーム位相分布の測定結果について報告する。

2. ビーム位相分布測定

H=3等の低エネルギー重イオンの加速の場合、エネルギーの増加が半径の二乗に比例するサイクロトロン内部では、低半径ほどメインプローブのプラスチックシンチレータ(BC400)の信号強度が低下してS/Nが悪くなるため、ビーム位相分布は引出し半径に近い841mmで測定された。このため、 $\pm 3\text{rf}$ 度以内の等時性磁場を保つように調整を行った。シンチレータからの発光は、光ケーブルで大気中にある光電子増倍管(H6533)へ伝達する。光電子増倍管からの信号は、ファーストタイミングプリアンプ(VT120, Ortec)で増幅された後、加速器から離れた制御室内のコンスタント・フラクシオン・ディスクリミネータ(CFD) (935, Ortec)で、設定した閾値以上の信号のみ選別され、その信号をピコ秒・タイムアナライザー(p-TA) (9308-PCI, Ortec)のスタートパルスとした。一方、サイクロトロンのRF電圧のピックアップ電極から得られたピックアップ信号もCFDで選別され、p-TAのストップパルスとし、この時間間隔をPC上で時間スペクトルとして測定された。

ビーム条件は、各加速ハーモニックで通常使用している45MeV- H^+ (H=1)、260MeV- $^{20}\text{Ne}^{7+}$ (H=2)、75MeV- $^{20}\text{Ne}^{4+}$ (H=3)で各実験を行った。

2.1 位相制限スリット位置とビーム位相

位相制限スリット2のピラーの間隔を固定した状態で、スリット全体の位置を変えながら、ビーム位相分布を測定した。特定のビーム位相に偏らないようにするため、サイクロトロンへの入射はBBを用いなかった。図2にH毎の測定結果を示す。

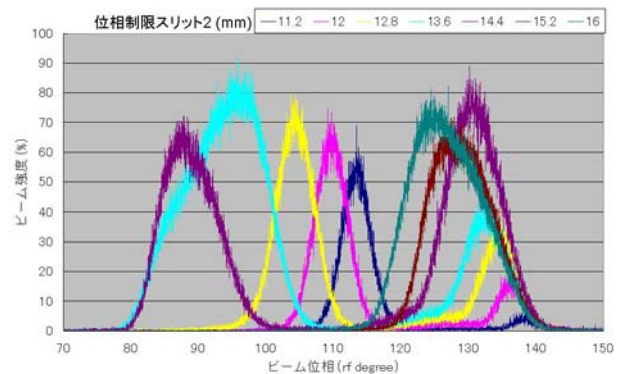
H=1の場合、スリット位置の増加とともに位相が早くなるピークと位相が遅い側で強度が増加するピークが得られた。遅い位相ピークの強度の増加は、入射ビームに対するビーム位相のアクセプタンスが大きいためビーム軌道の広がりがスリットで収まらず、スリット位置を半径外側に移動すると内側の半径のスリットからビームが漏れ出したためである。この場合、より内側の半径でスリット間隔を狭くすることでビーム位相幅を狭くできる。上記より、H=1ではビーム位相位置の選択も容易であることが分かった。

H=2の場合、スリット位置を変えてもビーム位相分布のピークの位相はほとんど変わらず、両者に全く相関が無かった。これは、入射した直流ビームが

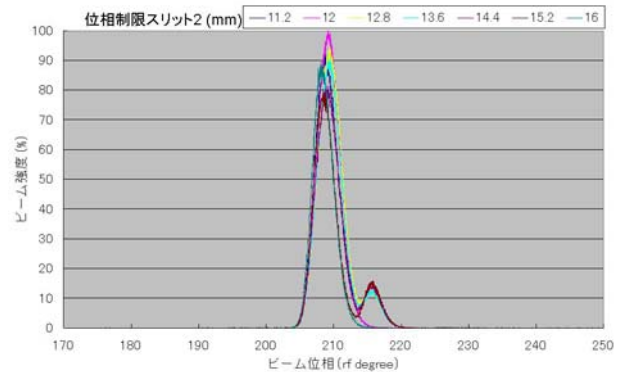
位相スリットの駆動軸方向に軌道が異なってもほぼ同時に通過することを示している。一方、ピークの位相幅は既に狭いので位相スリットによる制限は不必要に見えるが、半径方向の広がりが最終的にマルチターン引出しによるエネルギー幅の増加などの原因となるため、ビーム軌道の制限は必要である。

H=3はH=2と同様に位相制限スリット位置を変えても、ビーム位相分布のピークの位相はほとんど変わらないため、スリットによるビーム位相の選択はできない。一方で、H=2の場合と異なり、半径方向に強度分布を持つとともにピークの位相幅が広く、

(a)ビーム位相分布 (H=1)



(b)ビーム位相分布 (H=2)



(c)ビーム位相分布 (H=3)

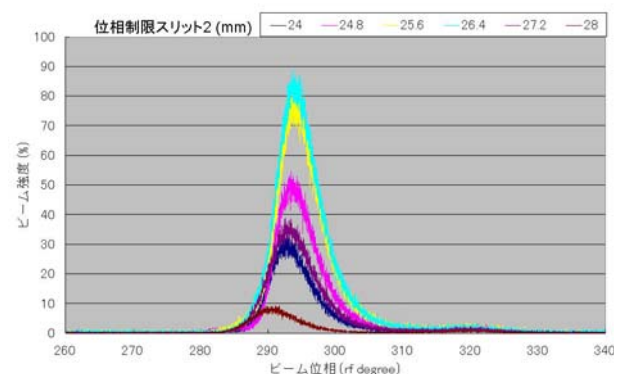


図2：位相制限スリット2(CPS2)の位置毎に測定したビーム位相分布。スリットギャップを、2mm(H=1,3)、4mm(H=2)で測定した。スリット位置は半径外側のピラーの中心位置。

位相制限スリット2でのビーム位相の制限は困難であることがわかった。

2.2 バンチャー位相とビーム位相

入射ビームを加速rf位相に対して変化させるため、BB位相を変えてビーム位相分布を測定した。BB位相の変化により、ビーム軌道が変わることを想定して、位相制限スリットはビームに影響を与えない位置に退避した。H毎の測定結果を図3に示す。

H=1の結果では、BB位相の変化とともにビーム位相分布のピークも変化することから、加速rf位相に対してビーム位相を選択できることがわかった。

一方、H=2及び3の場合、BB位相の変化に対して

ビーム位相分布のピーク強度変化はあるが、位相は重心位置が少し変わる程度で、ほとんど変化しない結果となった。

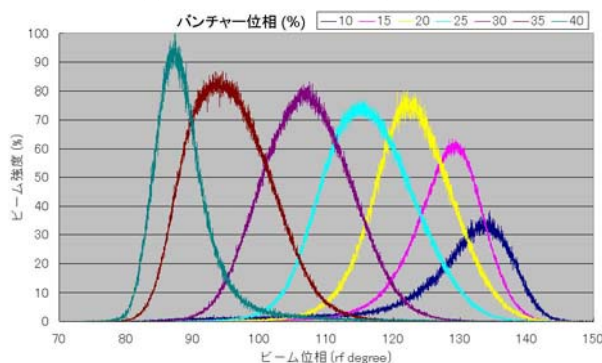
H=3では、H=2と同様にBB位相の変化に対してビーム位相分布のピークはほとんど同じであった。しかし、H=2に比べてピークの強度変化が急であるため、BB位相の調整の選択幅が非常に狭くなっている。

3. 考察

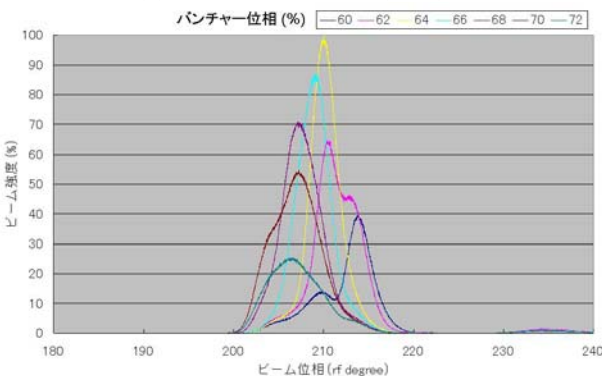
原子力機構AVFサイクロトロンでは、現在H=2の加速条件でマイクロビーム形成に成功している。これは、測定結果の通り、ビーム位相幅の狭小化からビームエネルギー幅が狭くなり、また高いビーム強度が維持できていることが要因の1つになっている。フラットトップ加速位相内にビーム位相を収める必要があるが、ビーム位相がこの範囲から外れても、半径内側のトリムコイル磁場を調整することで、フラットトップ位相内へ収めることが可能である。

今後、マイクロビーム形成をH=1の加速条件で行う場合、BBを用いて位相制限スリットでビーム位相の制御を行う必要があるが、BB位相と加速位相の関係に注意する必要がある。一方、H=3の場合、H=2よりも位相幅が広いいため、サイクロトロンの入射前にスリットでビームを制限してエミッタンスを小さくする等の対策が必要であると考えられる。

(a) ビーム位相分布 (H=1)



(b) ビーム位相分布 (H=2)



(c) ビーム位相分布 (H=3)

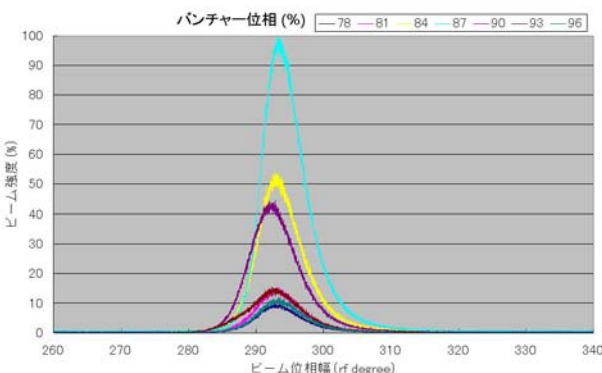


図3：BB位相毎に測定したビーム位相分布。
BB位相は1%=3.78度。

参考文献

- [1] M. Fukuda, et al., "Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B210, 33 (2003)
- [2] M. Fukuda, et al., Rev. Sci. Instrum. 74, 2293 (2003).
- [3] S. Kurashima, et al., Rev. Sci. Instrum. 80, 033302 (2009).
- [4] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 913 (2006).
- [5] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 604 (2007).
- [6] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 400 (2008).