

## Measurement of the beam phase structure inside the AVF cyclotron and improvement of the radial probe

Nobumasa Miyawaki<sup>1</sup>, Susumu Okumura, Satoshi Kurashima, Hirotsugu Kashiwagi, Ken-ichi Yoshida, Yosuke Yuri, Takahiro Yuyama, Tomohisa Ishizaka, Ikuo Ishibori, Takayuki Nara and Watalu Yokota

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

### Abstract

The beam phase structure in the JAEA AVF cyclotron was measured for three acceleration harmonic modes with a radial probe equipped with a plastic scintillator to investigate the relation between the beam phase and the position of the puller electrode or two pairs of beam-phase-defining slits in the cyclotron central region. A number of simulations on the beam phase structure were also performed for confirmation of the experimental results. The beam phase structure measured inside the cyclotron was agreed with the simulation result. The radial probe has been improved for increasing the detection efficiency of accelerating ions with a short range in the plastic scintillator. The improvement was confirmed for 75MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>4+</sup> beam.

## AVFサイクロトロン内部のビーム位相測定とプローブの改良

### 1. はじめに

原子力機構AVFサイクロトロン(K=110)では、微小領域における宇宙用半導体のシングルイベント効果等の材料科学研究や生物細胞への局所照射による生体機能解明研究などのために、1 $\mu$ 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形成技術の開発を進めている<sup>[1]</sup>。マイクロビーム形成装置は4連四重極電磁石を用いたビーム集束方式のため、集束電磁石での色収差による影響が現れることから、サイクロトロンから引出されたビームのエネルギー幅を $\Delta E/E \leq 0.02\%$ (FWHM)にする必要があった<sup>[2]</sup>。そこで、フラットトップ(FT)加速システム<sup>[3]</sup>を導入して、均一なエネルギー利得が得られる加速位相幅を拡大するとともに、ビームパンチの時間幅をこの均一なエネルギー利得の位相幅<sup>[4]</sup>内に制限するために、中心領域の改造を行った<sup>[5]</sup>。

中心領域では、2組のスリットとプラー電極を用いてビーム位相幅の制限が行われるが、サイクロトロン内部でビーム位相幅を測定する手段が無かった。そこで、スリット等の位置に対するビーム位相幅をサイクロトロン内部で測定するため、半径方向に走査する電流計測用プローブの一つに、プラスチックシンチレータ、ライトガイド、光ケーブル、光電子増倍管を付加した新たなプローブ(CMP)を開発した。CMPを用いてサイクロトロン内部のビーム位相幅を計測したところ、これまで測定に用いていたサイクロトロンから引出し直後のビーム診断ポート(CS0)に設置したシンチレーション検出器で得られたビーム位相幅よりもかなり広がっており、主に引出し機器によるビーム損失で位相幅が狭くなっていること

がわかった。引出し後のビーム位相測定だけでは、FT加速に必要な位相幅をモニターできていない可能性が高いことが示された<sup>[6]</sup>。

本稿では、さらにビーム位相制御方法を検討するため、軌道の異なる3つの加速モード(H=1,2,3)に対して、プラー電極位置とビーム位相との関係について、CMPを用いてサイクロトロン内部でのビーム位相測定を行うと共に、シミュレーションとの比較も行った。また従来のCMPでは困難であった、エネルギーが低く飛程が短い重イオンの高精度な位相測定を目的としたCMPの改良結果についても報告する。

### 2. シミュレーションとビーム位相測定

サイクロトロンの最初の加速ギャップは、アース電位のインフレクター電極用固定RFシールドと可動式でディー電極と同電位のプラー電極で作られ、プラー電極位置を半径方向外側に移動すると加速ギャップは広がる。サイクロトロンに入射されるビームは、イオン源の引出し電場で得られた低いエネルギーのため、最初の加速ギャップでのエネルギー利得の割合が他のギャップに比べて相対的に最も高い。従って、最初の加速ギャップ通過中に受ける電場強度の時間変化が、その後のビーム加速に大きく影響するため、プラー電極位置とビーム位相分布の関係を知ることは重要である。

サイクロトロン内部のビーム位相分布測定には、改良前のCMPのプラスチックシンチレータを用いた。サイクロトロンでの加速では、半径外側に向ってエネルギーが高く、入射エネルギーが高いほど多くのシンチレータ光が得られる。そこで、測定位置

<sup>1</sup> E-mail: miyawaki.nobumasa@jaea.go.jp

は取り出し半径に近い約840mmに設定し、できるだけ高い検出効率を確保した。シンチレータ光は、光電子増倍管で電気信号に変換されるが、光電子増倍管は磁場の影響を受けるため、サイクロトロン電磁石外部の大気中に設置されている。このため、シンチレータ光は、光ファイバーを経由して約4m輸送される。得られた光電子増倍管からの信号は、200MHz Constant Fraction Discriminator (Model 935 ORTEC社製)(CFD)を用いて、Picosecond Time Analyzer (Model 9308-PCI ORTEC社製)のスタート信号として、rf電圧のピックアップ信号は、同様にストップ信号として入力し、信号の時間差をPCで記録した。

シミュレーションは、インフレクター電極出口を出発点として、サイクロトロン中央平面上の軌道計算を行った。軌道計算はインフレクター電極出口の中心位置から±2mm (0.5mm間隔) の点において出

射角±80mrad (20mrad間隔) の計81個の粒子で加速可能な範囲で位相を1rf度ずつ変化させて行い、測定位置でのrf加速周期に対する粒子の位相を求めた。

原子力機構AVFサイクロトロンでは、加速電圧の設定にコンスタントオービット法を用いており、同じ加速モードであればビーム条件に関わらず同じ軌道を通るため、評価は同じ加速モードの内の1つのビーム条件を選択すれば良い。そこで、H=1として45MeV-H<sup>+</sup>、H=2として260MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>7+</sup>、H=3として75MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>4+</sup>の加速条件を選択した。プラール電極位置毎のシミュレーションとビーム位相測定結果を図1と図2にそれぞれ示す。通常、入射ラインに設置されたビームバンチャーにより直流ビームに速度変調を加えてバンチングを行うが、ここではサイクロトロンビーム加速位相のアクセプタンスを調べるため、バンチングを行っていない。

H=1のシミュレーション結果を図1(a)に、測定結

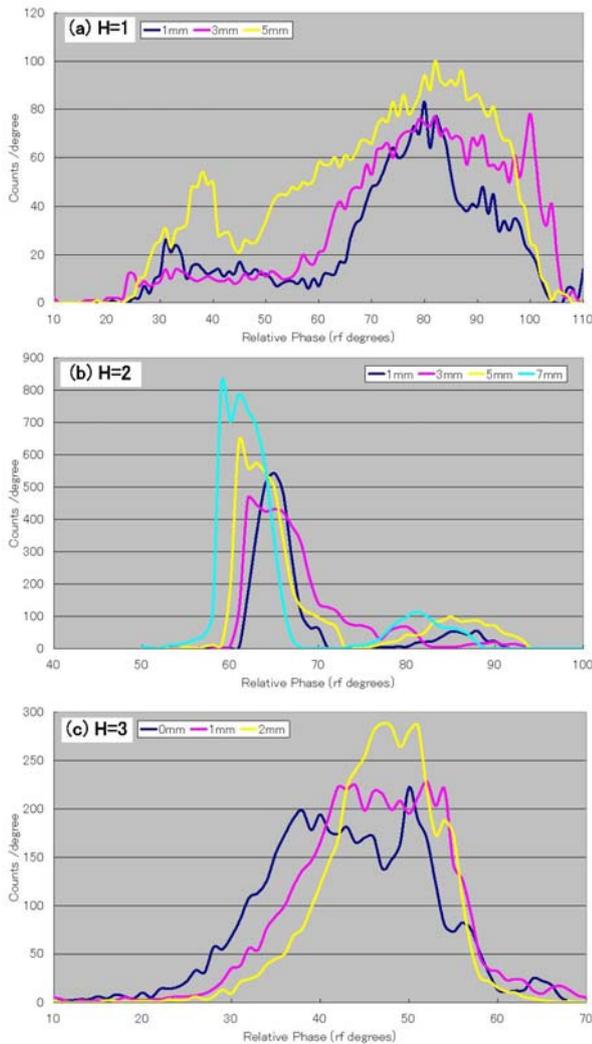


図1：プラール電極位置毎のシミュレーションによるビーム位相分布。(a)45MeV-H<sup>+</sup>(H=1)、(b)260MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>7+</sup>(H=2)、(c)75MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>4+</sup>(H=3)。縦軸はビーム強度、横軸はrf位相(相対値)。

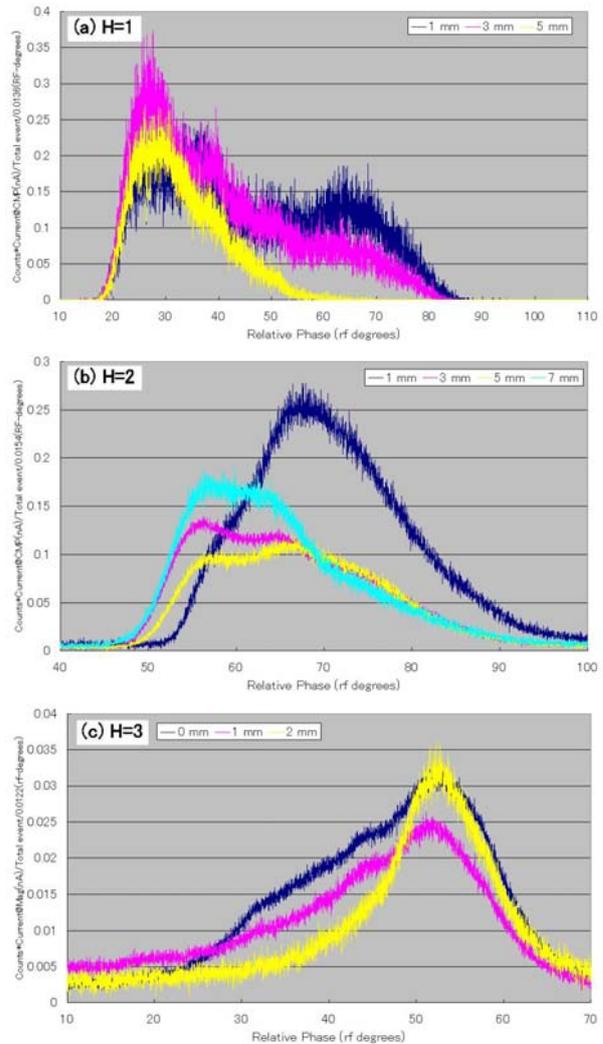


図2：プラール電極位置毎のビーム位相測定によるビーム位相分布。(a)45MeV-H<sup>+</sup>(H=1)、(b)260MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>7+</sup>(H=2)、(c)75MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>4+</sup>(H=3)。縦軸はビーム強度、横軸はrf位相(相対値)。

果を図2(a)にそれぞれ示す。シミュレーションの結果から、加速可能な位相幅は出発点で約90rf度であり、非常に大きな入射ビームに対する加速位相のアクセプタンスを持つことが分かった。この位相幅は測定位置（半径840mm）でも約90rf度のままで変化が無く、プラー電極位置にも相関がなかった。一方、測定結果では、プラー電極位置の増加に伴って位相幅が60rf度から35rf度へと狭くなった。これはシミュレーションではサイクロトロンへの入射ビームが理想的に一樣と仮定しているが、実際は蛇行や大きな広がりを持って入射されている可能性があり、RFシールド等の中心領域の構造物と干渉して位相幅が狭くなると考えられる。両結果から位相幅を狭くするには、加速可能な位相幅は非常に広いので、プラー電極位置を半径外側に設定し、さらに位相スリットでの制限が必要であることが分かった。

H=2のシミュレーション結果を図1(b)に、測定結果を図2(b)にそれぞれ示す。H=1の場合と同様にシミュレーションでの加速可能な位相範囲は、出発点で約140rf度とH=1より大きな入射ビームに対する加速位相のアクセプタンスを持つことが分かった。一方、図1(b)に示すように測定位置では、位相幅が入射の半分以下の約40rf度まで狭くなったが、ビーム強度は高くなった。この現象は、中心領域の幾何学的構造とH=2の初期加速電圧の時間変化との関係により生じると現在考えている。また、測定結果の図2(b)では、図1(b)のように鋭いピークではないが、位相幅はほぼ一致し、プラー電極位置と位相分布に相関関係が認められ、ビーム位相制御にはプラー電極位置を半径外側に設定すれば良いことがわかった。

H=3のシミュレーション結果を図1(c)に、測定結果を図2(c)にそれぞれ示す。H=3では、H=1,2に対してサイクロトロンへの入射位置が180度回転した反対側のため、プラー電極のピラー形状や動作位置が異なる。加速電場に直接影響するH=3のプラー電極のストロークは約2mmで、H=1,2の約9mmより少ない。シミュレーションの入射での加速可能な位相幅は、プラー電極位置によって異なり、約70~100rf度であった。この原因は、プラー電極を半径外側へ移動するとピラーを通過できるビームが減少するため、約50rf度から30rf度へとビーム位相幅を制御できることが分かった。図2(c)の測定結果でもほぼ同じであり、ビーム位相制御にはH=2と同様にプラー電極位置を半径外側に設定すれば良いことがわかった。

### 3. プローブの改良

図2(c)のようにH=3等の核子当たりの引出しエネルギーが低い加速条件や低半径での測定の場合、シンチレータ中での飛程は短く、しかも発光量が少な

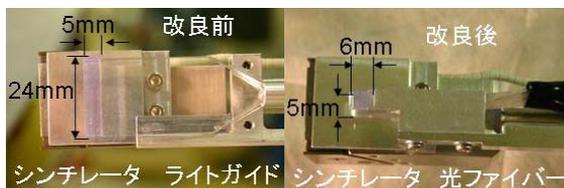


図3：CMPの改良前(左)と改良後(下)。ビーム進行方向は図の奥から手前。

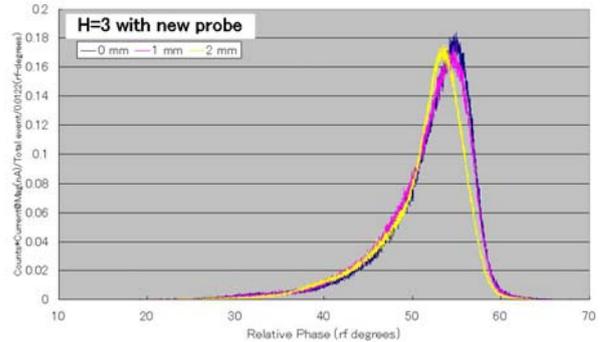


図4：CMP改良後75MeV-<sup>20</sup>Ne<sup>4+</sup>(H=3)の条件でプラー電極位置毎のビーム位相測定によるビーム位相分布。縦軸はビーム強度、横軸はrf位相（相対値）。

い。このため、前節で用いたCMPでは光電子増倍管に到達するシンチレータ光が少なく、検出感度が非常に低かった。また、シンチレータのサイズがビームに比べて大きいので、ビーム以外の放射線も検出してしまい、S/N比が悪かった。一方、ライトガイド部もビームの方が小さいために集光に寄与しておらず、逆に接続部での透過効率を低下させている可能性が高い。そこで、飛程が短く表面付近で発生するシンチレータ光を効率的に収集するために、シンチレータの先端形状を矩形から半円筒形に変更すると共に大きさをビームサイズ程度として、光輸送中心軸で発生するシンチレータ光を増加させ、さらに、ライトガイドを用いず、直接シンチレータと光ファイバーを接続する改良を行った。これにより光の透過効率が約1.4倍に増加した。また、測定回路において、光電子増倍管出力へプリアンプ(VT120 ORTEC社製)を付加することで検出信号を増幅し、CFDの閾値を上げることで信号からノイズを除いた。これらにより、核子当たりのエネルギーが低いH=3の条件の測定においても、図4に示すとおり図2(c)に比べ、S/N比の改善が確認できた。

### 参考文献

- [1] M. Fukuda, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B210, 33 (2003)
- [2] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B210, 54 (2003)
- [3] S. Kurashima, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B260, 65 (2007).
- [4] M. Fukuda, et al., Rev. Sci. Instrum. 74, 2293 (2003).
- [5] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 913 (2006).
- [6] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 604 (2007).