

INFLUENCE OF THE BUNCHER ON BEAM INTENSITY AND PHASE WIDTH IN THE JAEA AVF CYCLOTRON

Nobumasa Miyawaki ^{#,A)}, Satoshi Kurashima ^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi ^{A)}, Susumu Okumura ^{A)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Research Agency

1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292

Abstract

Measurements of the beam currents and the beam intensity distributions in acceleration phases were carried out to investigate the influence of external beam bunching on the beam intensity and the beam phase width for each acceleration harmonic mode (H=1, 2) in the JAEA AVF cyclotron. Although the injection efficiencies of the H=2 beam with and without the buncher were higher than those of the H=1 beam, the buncher efficiency of the H=2 beam was lower than that of the H=1 beam because of the phase bunching effect. Using the buncher, the peak intensities of the beams of both H=1 and H=2 were increased by up to several times but the full width of the beam phase were nearly equal to those without using it. The reduction of the full width of the beam phase was unaffected by the buncher even with parameters to maximize the beam current.

JAEA AVF サイクロトロンでのビーム強度と位相幅に対するバンチャーの影響

1. はじめに

原子力機構 AVF サイクロトロンでは、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材料科学の研究のために、 $1\mu\text{m}$ 以下のビーム径及び照準位置精度を有する数百 MeV 級重イオンマイクロビームの形成^[1]を行っている。マイクロビーム形成では、4 連四重極電磁石によるビーム集束方式を用いるため、集束電磁石でのビーム集束で問題となる色収差を低減する必要がある。これに必要とする 10^4 台前半のビームエネルギー幅に近づけるために、加速 RF に対してビームの位相幅を可能な限り狭くしなければならぬ^[2]。一方、マイクロビームラインの像の縮小率が 5 であるため、サイクロトロンから輸送されたビームの断面積に比べて集束電磁石前のオブジェクトスリットで制限する割合が大きい。従って、サイクロトロンから十分な量のビームを取出す必要がある。

サイクロトロンの加速ビーム電流を増加するために、入射ビームライン上に設置されたバンチャーを通常用いる。バンチャーは正弦波等の電圧を発生させてビームに速度差を生じさせ、サイクロトロンの内部で加速可能な RF 位相内にビームを圧縮させる。これを効果的に使用するため、サイクロトロンの内部でのビーム位相の影響を詳細に評価する必要がある。

従来のビーム位相に対する強度分布（ビーム位相分布）の測定は、空間的な制約や磁場や放射線等の計測環境の問題によって、サイクロトロン取出し後ビームライン上で行われてきた。この場合、狭い間隙を持つデフレクター電極などの取出し機器でビームを損失するため、制限された測定結果しか得られない。それに対して現在では、サイクロトロン内部で半径方向に挿入されるプローブにプラスチックシ

ンチレーターを取り付けることで、取出し機器によるビーム損失の影響を受けずにビーム位相分布の測定が可能となった^[3]。このプローブを用いて、サイクロトロン内部のビーム軌道を決めるスリット位置毎やバンチャーの RF の相対位相毎にビーム位相分布を測定した結果、加速ハーモニックによって分布中のピークの位相の変化が異なった^[4]。特に、サイクロトロンで加速するバンチャーの RF 位相を決めるバンチャーの RF の相対位相毎のビーム位相分布の測定では、H=1 の場合はバンチャーの位相変化に対してピークの位相も大きく変化するが、H=2 の場合はほとんど変化が無いという結果が得られ、位相バンシング効果^[5]が生じていることがわかった。一方、マイクロビーム形成のようにビーム電流が最大となる調整をしたバンチャーを用いた場合のビーム位相への影響についての知見は得られていない。

現在マイクロビーム形成は、H=2 のビームに対して $1\mu\text{m}$ 以下まで集束が確認されているが、H=1 のビームに対してはまだ形成できていない。そこで、H=2 と H=1 のそれぞれの場合に対して、サイクロトロンの入射前後でのビーム電流を測定し、さらにバンチャーの有無によるビーム位相分布の変化を測定することで、マイクロビーム形成で必要とするビーム電流の増加とビーム位相の狭小化に対するバンチャーの影響を調べた。

2. 測定条件

ビーム電流と位相分布の測定では、サイクロトロンの半径方向の磁場分布は、 $\pm 3RF$ 度以内の等時性磁場を保つようにトリムコイルへの励磁電流を調整し、バンチャーのパラメーターはビーム電流が最大になるように調整した。

ビーム電流測定のビーム条件は、加速ハーモニック

ク毎に、H=1 は 100MeV ${}^4\text{He}^{2+}$ と 45MeV H^+ 、H=2 は 260MeV ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ と 220MeV ${}^{12}\text{C}^{5+}$ を代表例として用いた。測定は、サイクロトロン入射直前のビーム診断ポート (IS5) のファラデーカップとサイクロトロン取出し直前の位置にあるプローブ (Mag0) で行い、バンチャーの有無による Mag0 の電流と IS5 の電流の比である入射効率を調べた。

ビーム位相分布測定のビーム条件は、H=1 では 100MeV ${}^4\text{He}^{2+}$ と H=2 では 260MeV ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ を用いた。測定は、サイクロトロン内部のプローブに取り付けたプラスチックシンチレーター (BC400, Saint-Gobain) で行った。サイクロトロンでは、半径の二乗に比例してエネルギーが増加するため、取出し半径に近いほどシンチレーターの発光強度が増加して S/N が良くなるため、プローブを取出し半径付近に設定した。一方、シンチレーターからの発光は、磁場の影響を避けるために大気中のプローブの他端に設置した光電子増倍管 (H6533, 浜松ホトニクス) へ、光ケーブルによって伝達された。光電子増倍管の信号は、ファーストタイミングプリアンプ (VT120, Ortec) で増幅された後、コンスタント・フラクション・ディスクリミネータ (CFD) (935, Ortec) で閾値以上の信号のみ選別され、その信号をピコセカンド・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 ピックアップ電極から得られた信号は CFD を通して 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記録した。

3. 測定結果

3.1 ビーム電流測定

JAEA AVF サイクロトロンのバンチャーによるビームのバンチングは、計算において H=1 と H=2 とも同じである⁶⁾。そのため、バンチャーを用いた (BB on) 時の入射効率とバンチャーを用いない (BB off) 時と比べて、H による変化が無いと想定される。

表 1 に、H=1 と H=2 のそれぞれの場合に対して、バンチャーの有無に対するビーム電流と入射効率を示す。入射効率はバンチャーの有無に関係なく、H=2 が H=1 より高い。特に、BB off の場合、H=2 が H=1 より約 1.4~2.2 倍も高くなった。一方、バンチャーの有無に対する入射効率の比 (バンチャー効率) は、計算上 H=1 と H=2 とも同じはずであるが、H=1 が最も大きい結果となった。H=2 は BB off でもすでに入射効率が高いため、バンチャー効率は、結果として H=1 より悪くなった。

3.2 ビーム位相分布測定

BB off の場合、時間的に均一なビームをサイクロトロンに入射するので、サイクロトロン内部のビーム電流は位相アクセプタンスに依存すると考えられる。しかし、前節のように H=2 が H=1 の約 1.4 倍以上まで位相アクセプタンスが大きいことは、考え難い。また、ビーム電流測定では、サイクロトロンへの入射後のビームの時間変化の影響も有り得る。従って、サイクロトロン内部でのビーム位相分布の測定は必要である。バンチャーの有無に対するビーム位相分布の測定結果を図 1 の (a)H=1 と (b)H=2 にそれぞれ示す。

BB on、off の両方とも、入射効率の高い H=2 の位相幅は約 30RF 度と H=1 とほぼ等しい。一方で、前節の結果から H=2 の入射効率は H=1 より約 1.4 倍以上大きいため、サイクロトロンへの入射後にバンチングされている。従って、H=2 の条件では位相バンチング効果が生じている。

測定されたビーム位相分布において BB on の場合のピークの強度は、BB off の場合のそれと比べて数倍高くなったが、ビーム位相の全体の幅はほとんど変わらなかった。従って、ビーム電流が最大になる様に調整したバンチャーは、サイクロトロンの位相アクセプタンスの範囲にわたってビーム強度を高くするが、ビーム位相の全幅に対して影響を与えないことがわかった。

表 1：測定されたビーム電流と入射効率、バンチャー効率

加速 ハーモニック	ビーム 条件	IS5 (μA) (a)	バンチャー BB	Mag0 (μA) (b)	入射効率 (%) (b/a)	バンチャー効率
H=1	${}^4\text{He}^{2+}$ 100MeV	3.27	on	1.48	45.26	4.63
			off	0.32	9.79	
	H^+ 45MeV	7.11	on	3.00	42.19	3.66
			off	0.82	11.53	
H=2	${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV	2.93	on	1.52	51.88	3.17
			off	0.48	16.38	
	${}^{12}\text{C}^{5+}$ 220MeV	0.66	on	0.41	62.12	2.93
			off	0.14	21.21	

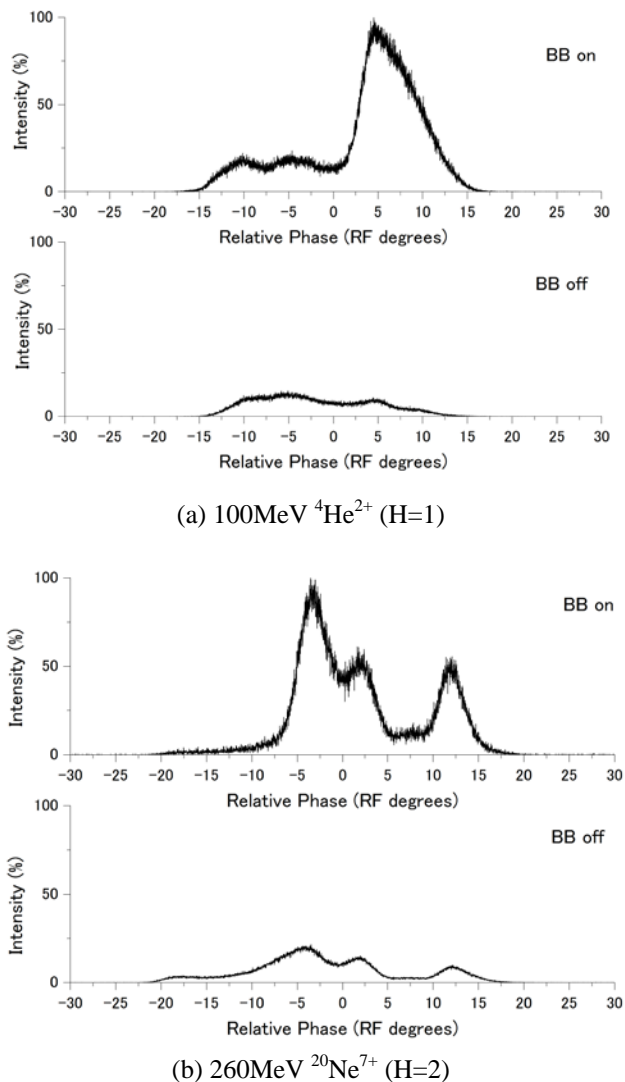


図 1：サイクロトロン内部のビーム位相分布の測定結果。バンチャーの有無に対して(a) 100MeV $^4\text{He}^{2+}$ (H=1)と(b) 260MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ (H=2)の条件で行った。横軸（相対位相）は 1 チャンネル当たり 2.44ps 幅を加速 RF 位相に変換し、縦軸（ビーム強度）は 2.44ps 幅のチャンネル当たりのカウントを総カウント数から割り、BB on の時の最大値からの割合である。

4. まとめと考察

JAEA AVF サイクロトロンにおいて、H=1、2 の条件でビーム電流と位相幅に対するバンチャーの影響をビーム電流測定とビーム位相分布測定によって調べた。入射効率は、バンチャーの有無に関係なく、H=2 が高く、特にバンチャー無しでも高いため、位相バンチング効果が生じたと考えられる。一方、バンチャーによるビーム電流の増加割合であるバンチャー効率、計算上 H=1 と H=2 と同じだが、この位相バンチング効果によって、H=2 では見掛け上低くなることがわかった。ビーム位相分布測定では、ビーム位相分布のピーク強度はバンチャーによって増加するが、全幅への影響はほとんどなく、位相アクセプタンスまで広がっていることを確認した。バンチャーで増加したピークの位相は、H=1 では分布中の一部分に対して、H=2 では全体が増加した。これは、[4]の報告において、H=1 では BB 位相によってピーク位相が変化した、H=2 では位相バンチングによってピーク位相は BB 位相で変化しなかったことから、この差が生じたと考えられる。従って、バンチャーはビーム位相の全幅には影響を与えないので、ビーム位相の全幅を狭くするためには、H=1 と 2 の両方とも、ビーム位相分布のこのピーク位相部分をサイクロトロン内部のスリットで制限して取出す必要があるが、ピーク位相が変化しない H=2 の場合、特定のビーム位相をスリットで制限することは容易である。これらの結果から、JAEA AVF サイクロトロンにおいて H=2 の条件でマイクロビーム形成が可能となった要因の一つと考えられる。

参考文献

- [1] M. Oikawa, et al., Nucl. Instrum. Methods B 260 (2007) 85
- [2] M. Fukuda, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B210 (2003) 33
- [3] N. Miyawaki, et al., Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 913 (2006)
- [4] N. Miyawaki, et al., Proc. 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 183 (2009)
- [5] N. Miyawaki, et al., Nucl. Instrum. Methods A 636 (2011) 41
- [6] K. Arakawa, et al., JAEA-Technology 2008-024