

TIARA AVF サイクロトロン の位相バンチングの比較 COMPARISON OF PHASE BUNCHING IN THE TIARA AVF CYCLOTRON

宮脇信正^{#, A)}, 福田光宏^{B)}, 倉島俊^{A)}, 柏木啓次^{A)}

Nobumasa Miyawaki^{#, A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

The contribution of phase bunching to the beam extraction for the acceleration harmonic number (h) 3 was compared with the contribution for $h = 2$ in the TIARA AVF cyclotron. The measurement result of the beam extraction efficiency, the beam radial width prior to the extraction and the extracted beam emittance for $h = 2$ were superior to the results for $h = 3$. To investigate phase bunching at an arbitrarily position in the cyclotron, the correlations between the initial beam phase and the beam phase at acceleration gaps in the last turn were calculated by the geometric trajectory analysis model. The correlation for $h = 3$ alternated between the phase bunching condition and the debunching condition for a turn, and there was no phase bunching at the extraction. The calculated beam radial spread at the extraction was also consistent with the measurement results, and difference of the beam extraction between $h = 2$ and 3 was obtained.

1. はじめに

TIARA AVF サイクロトロンでは、マイクロビーム[1]やシングルパルスビーム[2]等のビーム応用のために、高強度で狭いエネルギー幅に加速されたビームが必要とされている。一般にサイクロトロンでは、加速 RF に対するビームの位相幅を狭くすることによって、ビームのエネルギー幅を狭くすることが可能である。そこで、最初の加速の位相差で生じたエネルギー利得差によって、第 2 加速ギャップでの位相差を縮小できる位相バンチングについて、検討を行ってきた[3]。

位相バンチングは、電極配置等の幾何条件と加速ハーモニック数(h)や加速電圧等の加速条件に依存し、TIARA AVF サイクロトロンでは、 $h=2$ と3の条件では発生することを幾何軌道解析モデルによって明らかにした[4]。実際に位相バンチングの効果を調べるため、イオン源からの直流ビームを加速可能な RF の位相範囲内にバンチしてサイクロトロンに入射するバンチャーの加速 RF 位相に対する相対位相毎にビームを入射し、サイクロトロン内部のビーム位相分布を測定した結果、ビーム位相幅が $h=2$ と3の条件とも約 1/3 程度に縮小することを確認した[5]。しかしながら、取出し後のビームは、 $h=2$ の条件では高いビーム強度でエミッタンスが小さいが、 $h=3$ の条件ではビーム強度が低く、エミッタンスが大きくなり、2つの条件の間に大きな差が生じている。そこで $h=3$ の条件で取出しビームの改善のために、位相バンチング効果の差について調べた。

本報告では、ビーム取出しの現状として取出し前後のビーム強度測定や取出し後のエミッタンス測定の結果を示し、幾何軌道解析モデルによって加速ギャップ位置毎の位相バンチングの状態の変化やデフレクター電極入口でのビームの広がりについて計算し、 $h=2$ と3の間でビームの取出しの差の原因について検討を行った。

2. ビーム取出しの現状

サイクロトロンからのビーム取出しの現状を確認するため、 $h=2$ の 260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ と $h=3$ の 120 MeV $^{20}\text{Ne}^{6+}$ の加速条件で、取出し前後のビーム電流及びエミッタンスの測定を行った。取出し前後のビーム強度は、サイクロトロンに入射する直前のファラデーカップ(IS5)で測定されたビーム電流を基準として、サイクロトロンから取出す前のマグネチックチャンネル(Mag)プローブと取出し後のファラデーカップ(TS1)で測定されたビーム電流に対する比として Table 1 にまとめた。両条件ともサイクロトロンに入射できるビーム強度比はほぼ同じであるが、サイクロトロンからの取出しでは、 $h=2$ に比べて $h=3$ は約 1/5 となり、ビーム損失が大きいことがわかる。

Table 1: Beam Current Ratio

Particle	IS5	Mag	TS1
260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ ($h=2$)	1	0.56	0.41
120 MeV $^{20}\text{Ne}^{6+}$ ($h=3$)	1	0.53	0.08

取出しでのビーム損失の原因となるビームの広がりを調べるため、Mag プローブとサイクロトロン中心に対してこれと対称な位置にあるメインプローブを用いて、半径位置毎にビーム電流を測定した。メインプローブを取出し方向に移動することによって、半径 855mm に固定した Mag プローブでビーム軌道が徐々に遮られて、メインプローブで検出されるビーム電流は徐々に低下する。このビーム電流の変化を微分することによって求められたビームの幅は、 $h=2$ の条件では 2.3mm、 $h=3$ の条件では 4.6mm であった。また、取出し直前で半径方向のビーム電流分布を測定できるデフレクタープローブによる結果もほぼ同じであることから、 $h=3$ の条件では取出し半径でビームが明らかに広がることを確認した。

[#] miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

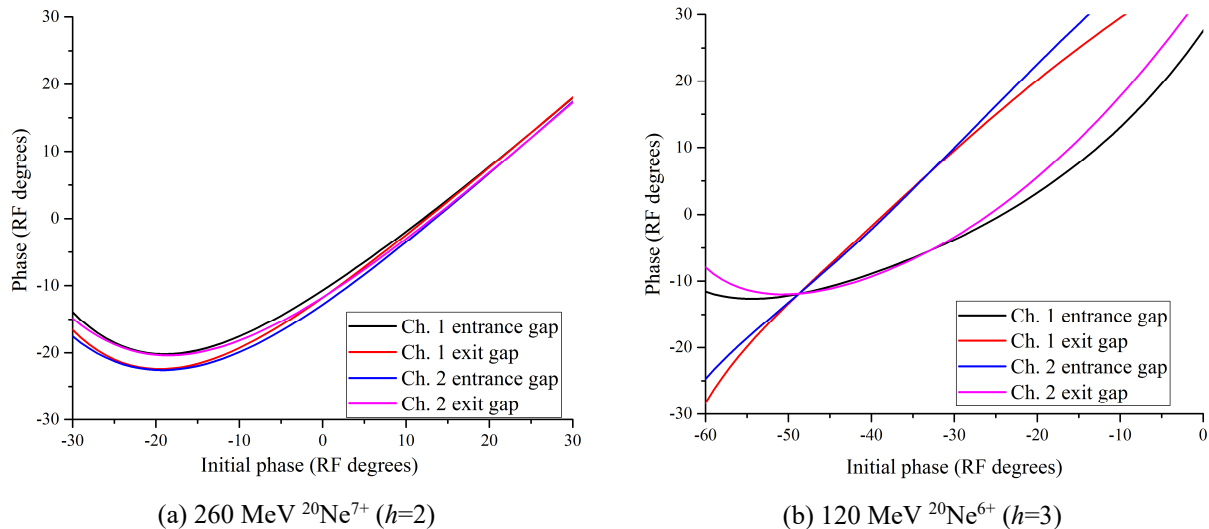


Figure 1: Calculation results of correlation between the initial phase and the phase at acceleration gaps in the last turn for a 260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ ($h=2$) beam and a 120 MeV $^{20}\text{Ne}^{6+}$ ($h=3$) beam.

取出し後のビームのエミッタンスは、スリットとワイヤー検出部からなるエミッタンスモニターによって測定された。水平と鉛直方向の 80%エミッタンスはそれぞれ $h=2$ では 2.9、2.0 (π mm·mrad)、 $h=3$ では 9.6、2.2 (π mm·mrad)であった。従って、 $h=3$ は取出し後のビームの輝度が低いことが分かった。

3. 幾何軌道解析モデルによる位相バンチングの検証

3.1 加速ギャップ位置での位相バンチングの状態

TIARA AVF サイクロトロンにおける位相バンチングの幾何軌道解析モデルの計算とサイクロトロン内部のビーム位相分布の測定は、サイクロトロン内部でビーム位相分布の測定が可能なメインプローブの方位角でのみ行われ、中心領域外の他の方位角でこれまで行われなかった。そこで、4 つの加速ギャップでの最終ターンのビーム位相と入射ビームの位相との相関関係を(a) $h=2$ の 260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ と(b) $h=3$ の 120 MeV $^{20}\text{Ne}^{6+}$ の加速条件でモデルを用いて計算し、Figure 1 に示した。

位相バンチングが生じた場合、Figure 1 の(a)のように極小値を持ち、初期位相幅に対して各位置での位相幅は狭くなる事が分かる。(a)ではすべての加速ギャップで位相バンチングが生じ、位置に依存しないことが確認できる。(b)の位相バンチングの発生が確認できる位置は、チャンネル(Ch.)2 電極出口ギャップと Ch. 1 入口ギャップであった。この加速ギャップ間にはメインプローブがあり、これまでの測定や計算の結果と矛盾しないことが確認できた。しかし、(b)では位相のバンチングとデバンチングが 2 つの加速ギャップごとに交互に生じるため、ビーム位相幅を狭くしてエネルギー幅を狭める位相バンチングの効果は相殺され、結果として (a)よりもエネルギー幅が広く、半径方向にビームが広がると推察される。

3.2 取出し位置でのビームの広がり

取出し位置での(a)と(b)のビームの半径方向の広がり

を見積もるため、水平方向のみで初期条件としてインフレクター電極出口で半径方向に ± 1 mm、 ± 30 mradの9点から1RF度毎に60RF度の合計549粒子を設定し、デフレクター電極入口での半径方向の位置と角度についてモデルによる計算を行った。その結果、(a)の位置の最大の差が1.5mm、角度差が1.1mradであったが、(b)は3.0mmと33mradと非常に大きな広がりがあることが分かった。TIARA AVF サイクロトロンでは、取出しまでの回転数が h で異なり、マルチターン引き出しの場合、回転数が少なく、ターンセパレーションが大きい条件の(b)は、位置の差が(a)より大きくなる。しかし、位置の差はターン数に反比例するが、ターン数の差は2倍もないため、角度方向の差が主に影響したと考えられる。一方、計算上30倍あった角度の差は、狭い取出し機器によって制限されて、取出し効率の測定結果のとおり約1/5まで低下し、取出し後の水平方向のエミッタンス測定の結果である約3倍程度に低減されたと考えられる。

4. まとめ

$h=3$ のビーム位相は1周の間にバンチングとデバンチングを繰り返してその効果は相殺され、ビームの取出し効率が $h=2$ より大きく劣ることが分かった。 $h=3$ の取出し効率の改善について、位相バンチングのパラメーターである第1と第2加速ギャップの間の開き角によって、角度差を低減できる可能性があり、今後も検討を行っていく予定である。

参考文献

- [1] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B 260 (2007) 85.
- [2] S. Kurashima *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 86 (2015) 073311.
- [3] N. Miyawaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 636 (2011) 341.
- [4] N. Miyawaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A715 (2013) 126.
- [5] N. Miyawaki *et al.*, in Proceedings of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, Yokohama, Japan (2015) 62.