

サイクロトロンハーモニック加速システムの位相バンチングの評価

EVALUATION OF PHASE BUNCHING FOR A HARMONIC ACCELERATION SYSTEM IN A 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

Influence of the harmonic acceleration system on phase bunching in the central region of a cyclotron was investigated by the calculation using the geometrical orbit analysis model. The phase bunching effects of reducing the beam phase width and the energy spread were weakened by the radial emittance growth due to the space charge effect. The weakened phase bunching effect was improved by the harmonic acceleration with the third and the fifth harmonic voltages at the first and the second acceleration gaps. The ratio of the harmonic voltages to the fundamental one was optimized to minimize the phase width and the energy spread.

1. はじめに

サイクロトロン中心領域で発生する位相バンチングは、第1加速ギャップで基本波である正弦波の加速電圧の時間勾配を用いたエネルギー利得差と第2加速ギャップまでの回転角の相関関係を制御することによって得られる。この発生条件が、ディー電極及び第1と第2加速ギャップの開き角、イオンの回転周期とRFの加速周期の比である加速ハーモニクス(h)、ディー加速電圧とイオン源引き出し等の入射前の加速電圧の比に関係することを、考案した幾何軌道解析モデルによって見出された[1]。そして、量子科学技術研究開発機構(QST)高崎量子応用研究所のイオン照射施設(TIARA)のAVFサイクロトロン(K110)において、入射ビームラインに設置されたバンチャーの加速RFに対する相対位相とプラスチックシンチレーターを取り付けたメインプローブを用いて、位相バンチングの発生は実証された[2]。また、位相バンチングの効果として、サイクロトロン内部の半径方向位相空間中のビームの広がりを抑え、取出し効率を向上させ、結果として取出し後のビームの輝度を高めることも確認された[3]。一方、ビーム強度が高い軽イオンを低エネルギーで輸送してサイクロトロンに入射するような場合、位相バンチングの発生条件においても、空間電荷効果の影響でビーム位相幅が拡大するとともに、ビームの輸送効率が低下することが確認されている。原理的に位相バンチングは、縦方向にビームをバンチングすることによって横方向の広がりが拡大する。そのため、空間電荷効果による横方向への広がりに対する対応が不十分であることが原因と考えられる。そこで、基本波に高調波を重ねて加速電圧の勾配を変えることにより、この影響を低減する方法について検討を行っている。

近年、高温超電導線材の普及によって、高温超電導コイルの組み合わせだけで鉄ヨークを使用せずに必要な磁場分布を作り出すことが可能となり、中心領域に比

較的高い空間自由度を有するスケルトンサイクロトロンが提案され[4]、この中で位相バンチングの適応を検討している。従来の鉄心を用いる磁極一体型のAVFサイクロトロンでは、位相バンチングに必要な中心領域の電極配置や加速条件に対応できる空間が無く、発生条件が限定されてきた。しかし、このサイクロトロンでは、最初にイオンを加速するディー電極の先端部に、通常のディー電極と異なる形状の独立した別電極が設置でき、異なる電圧を発生させる共振器を追加することで、基本波に高次の高調波を重ねさせて任意の加速電圧波形によるハーモニック加速ができる。従来のハーモニック加速は、幅広い位相範囲のエネルギー利得差を小さくし、入射から取出しまでの間で、エネルギー幅を縮小するフラットトップ加速技術として実施された。そこで、ハーモニック加速により第1加速ギャップでの電圧勾配を任意に制御することで、ビーム位相幅を縮減する位相バンチングの効果が高めることにより、空間電荷効果による第2加速ギャップでのビームの広がりを抑制し、エネルギー利得差の拡大を最小限に留めて、空間電荷効果によるビーム品質への影響を低減することが期待される。

本報告では、TIARAサイクロトロンで位相バンチングが発生する $h=2$ の空間電荷効果の影響が小さい $^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeVとその影響が大きな H^+ 20MeV加速条件で、ビーム位相幅の測定結果を基にした空間電荷効果による横(半径)方向位相空間中のビーム広がりについて、幾何軌道解析モデルを用いた計算によって仮定し、最初の加速電極のみにハーモニック加速を行い、位相バンチングへの影響について調べた。

2. 位相バンチングへの空間電荷効果の影響

TIARAサイクロトロンの中心領域の加速電極の配置は $h=1$ と2で共通であるが、位相バンチングは $h=2$ の加速条件で発生する。加速条件の一例として、 $h=1$ の H^+ 30MeVと $^4\text{He}^{2+}$ 107MeV、 $h=2$ の H^+ 20MeVと $^{20}\text{Ne}^{7+}$

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

260MeV に対するサイクロトロン内部で測定されたビーム位相幅とビーム電流を Table 1 に示す。

Table 1: Measured Beam Phase Width and Beam Current

Condition	${}^4\text{He}^{2+}$ 107MeV	${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV	H^+ 30MeV	H^+ 20MeV
h	1	2	1	2
Phase width (RF deg)	22.69	5.89	20.68	14.78
Current (μA)	7.86	2.64	13.72	18.4

ビーム位相幅の測定は、加速周波数の変化に伴うビーム強度の減少割合から求める方法[5]を用いることで、ビーム強度の制限が無い場合、空間電荷効果の影響がわかる。空間電荷効果の影響が小さい重イオンの $h=2$ の ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV と $h=1$ の ${}^4\text{He}^{2+}$ 107MeV を比較すると、ビーム位相幅が 3 分の 1 以上狭くなり、明らかな位相バンチング効果が得られた。空間電荷効果の影響が大きな H^+ 20MeV と 30MeV のビーム条件では、位相バンチングの有無による比較を明確にするため、イオン源と低エネルギー輸送系のパラメータを共通にした。その結果、 H^+ 20MeV は H^+ 30MeV に比べてビーム位相幅が狭く、位相バンチング効果が確認できるとともに、ビーム電流も多くなった。従って、位相バンチングはビームの質だけでなく強度の増加に対しても効果があることが分かった。一方、 H^+ 20MeV と ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV のビーム位相幅の差は 2 倍以上に広がった。この原因は、両者のビーム電流が $18.4\mu\text{A}$ と $2.6\mu\text{A}$ 、イオン源の引出し電圧が 6.2kV と 12.5kV 、さらに電荷質量比が 2 倍以上の差があり、 H^+ 20MeV に対する空間電荷効果の影響が明らかに大きいことである。従って、大強度ビーム加速では空間電荷効果によって位相バンチングのビーム位相幅の縮減効果が低下するため、これを抑制するための対策が必要である。

3. 空間電荷効果によるビーム広がり

TIARA サイクロトロンでは、イオン源から最大 15kV で加速したビームをサイクロトロンのメディアンプレーン上に入射する狭い間隙のスパイラルインフレクター電極を通過させるため、入射直後の大強度ビームは空間電荷効果によって広がると予想できる。インフレクター出口以降の横方向位相空間のビームの広がりに対して、AVF によって磁極方向に集束力が得られるが、半径方向は集束要素が無い場合、主に空間電荷効果の影響を受ける。一方、入射直後のビームの縦方向位相空間に対する空間電荷効果の影響は、バンチャーによる圧縮効果を打ち消してビーム位相幅が広がったとしても、位相バンチングで狭くなるため、ほとんど変化がないと考えられる。従って、空間電荷効果の影響は半径方向のビームの広がりとして表れると仮定し、半径方向のビームエミッタンスを求めた。しかしながら、入直後のビームエミッタンスは、空間上の制限から測定できないため、間接的に求める必要がある。これまで、サイクロトロン内部のビーム軌道とビーム位相の相関関係の測定結果から幾何軌道解析モデルの計算により、 ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV の半径方向のエミッタ

ンスが $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ 以内であることを前回の年会で報告した[3]。この測定では、プラスチックシンチレーターの使用によってビーム強度を大幅に減衰させるため、空間電荷効果は発生しない。従って、 H^+ 20MeV のような空間電荷効果の影響で広がったエミッタンスを測定することができないため、 ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV のエミッタンスの大きさ $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ から、測定した H^+ 20MeV のビーム位相幅 14.8RF 度と一致する初期エミッタンスを幾何軌道解析モデルから計算によって求めた。

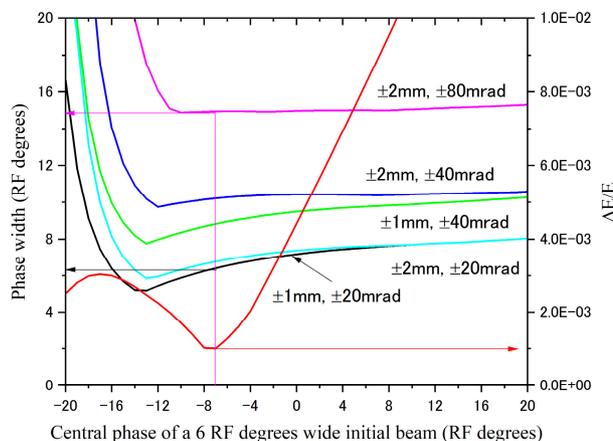


Figure 1: Calculated phase width and energy spread before extraction with the geometrical orbit analysis model for the ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV condition.

測定によって得られた ${}^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV のビーム位相幅約 6RF 度を初期位相幅と仮定し、6RF 度の初期位相幅の中心位相に対する取出し前の半径方向の初期エミッタンス毎のビーム位相幅と $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ の条件のエネルギー幅の計算結果を Fig. 1 に示す。初期エミッタンスの増加によって、ビーム位相幅は増加した。一方、初期エミッタンスが等しい $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 40\text{mrad}$ と $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ の条件では、後者の方がビーム位相幅は小さくなることから、位相バンチングの条件下では出射角を小さくする、すなわち入射ビームを平行ビーム化することで、

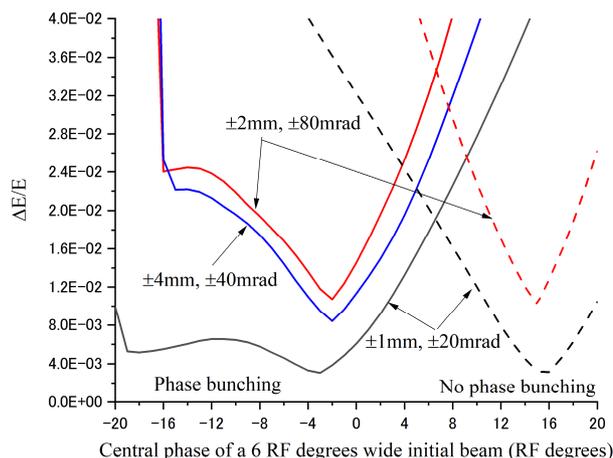


Figure 2: Calculated energy spread before extraction with the geometrical orbit analysis model for the H^+ 20MeV condition.

ビーム位相幅の最小化が可能である。一方、 $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ のビームエネルギー幅は、初期位相幅の中心位相が -7RF 度で極小値 1×10^{-3} であった。また、この中心位相 -7RF 度は、 $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ の条件でビーム位相幅が約 6RF 度であり、測定結果と一致する。この結果から、中心位相 -7RF 度に対して、空間電荷効果によって半径方向に広がると仮定した H^+ 20MeV の条件で測定されたビーム位相幅 14.8RF 度に一致する初期エミッタンスは、 $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mrad}$ であった。そこで、得られた H^+ 20MeV の半径方向の初期エミッタンス $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mrad}$ と空間電荷効果のない場合の初期エミッタンス $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ 、更に初期エミッタンスが同じで幅が広く、出射角が小さい $\pm 4\text{mm}$ 、 $\pm 40\text{mrad}$ の場合に対する 6RF 度の初期位相幅の中心位相とビームエネルギー幅の関係をモデル計算により求め、その結果を Fig. 2 に示す。また、位相バンチングが生じない場合として、TIARA AVF サイクロトロンと同じ 86 度ディーでプラール電極が無い条件での計算結果を破線で図中に示す。

$^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeV の磁場と加速電圧が異なるため、エネルギー幅が極小となる中心位相は -3RF 度であった。位相バンチングが無い場合、プラール電極の開き角の差によって極小となる中心位相は異なる。初期エミッタンスの増加によって、エネルギー幅が増加し、エネルギー幅が等しい中心位相の範囲も狭くなった。また、初期エミッタンスが同じ場合では、ビーム位相幅と同様に射出角が小さいほどエネルギー幅が小さく、位相バンチング状態では射出角への依存性が確認できる。一方、位相バンチングの有無でエネルギー幅の最小値に変化はないが、位相バンチングでエネルギー幅が等しい中心位相の範囲は広がる。従って、位相バンチングが発生する条件において空間電荷効果は、サイクロトロン入射直後に半径方向のビームエミッタンスを増加させ、ビーム位相幅とエネルギー幅を増加させることがわかった。

4. ハーモニック加速による位相バンチングへの影響

位相バンチングが発生する第1と第2加速ギャップのみに高調波を重畳するハーモニック加速を用いて、空間

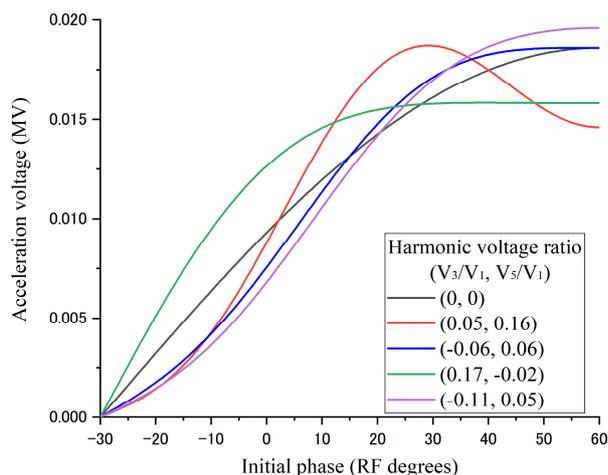


Figure 3: Calculated acceleration voltage waveform at the first acceleration gap for the H^+ 20MeV condition.

電荷効果によるビーム位相幅やエネルギー幅の増加を抑制する方法について検討を行った。基本波に複数の奇数次の高調波を使用するハーモニック加速は、任意の位相における加速電圧波形を基本波と異なった勾配や電圧値に変えることが可能であり、これにより位相バンチング効果を高める可能性がある。そこで、前章において空間電荷効果によって半径方向へ広がるとして見積もられた H^+ 20MeV の $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mrad}$ の初期エミッタンスの条件で、ビーム位相幅やエネルギー幅を最小化できる第3と第5高調波と基本波の電圧比の組合せ (V_3/V_1 , V_5/V_1) をモデル計算により求めた。

計算で使用した第3と第5高調波と基本波の電圧比の組合せ毎に第1加速ギャップでのハーモニック加速の電圧波形を Fig. 3 に示す。今回計算に使用した電圧比の組合せは、基本波 (V_3/V_1 , V_5/V_1) = (0, 0)、勾配が急な条件 (0.05, 0.16)、基本波の最大電圧が同じにフラットトップ条件 (-0.06, 0.06)、最も広い位相範囲でフラットトップ条件 (0.17, -0.02)、基本波の最大電圧より高いフラットトップ条件 (-0.11, 0.05) の5つであり、相対的な位相差は無い。第1加速ギャップでは H^+ 20MeV の条件でエネルギー幅が極小となる初期位相 -3RF 度を中心とした電圧で加速され、第2加速ギャップでは正弦波のトップ付近の位相で加速される。第1加速ギャップの電圧は、(0.05, 0.16) が基本波とほぼ等しく、基本波に比べて (0.17, -0.02) が高く、(-0.06, 0.06) と (-0.11, 0.05) が低い。第2加速ギャップでは、(-0.06, 0.06) が基本波と同じで、基本波に比べて (-0.11, 0.05) だけが高く、(0.05, 0.16) と (0.17, -0.02) が低い。これらの場合に対して、 H^+ 20MeV の $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mrad}$ の初期エミッタンスで 6RF 度の初期位相幅の中心位相と取出し直前のビーム位相幅及びエネルギー幅をモデル計算によって求め、Fig. 4 と Fig. 5 に示す。

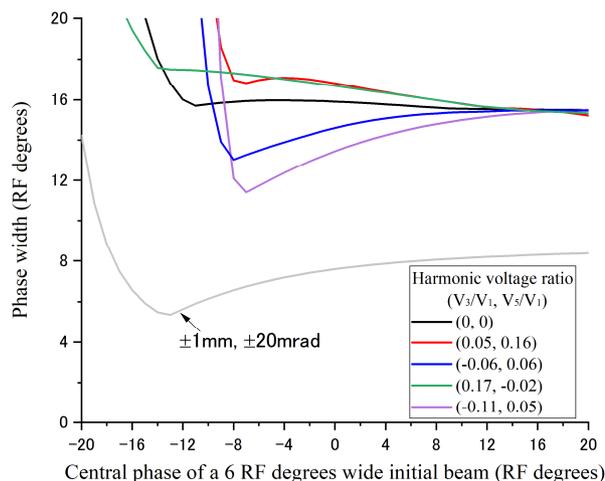


Figure 4: Calculated phase width using the harmonic acceleration with the geometrical orbit analysis model for the H^+ 20MeV condition.

計算されたビーム位相幅は、Fig. 4 に示すように、基本波で横方向の初期エミッタンスが $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mrad}$ から $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mrad}$ に変化すると2倍以上増加し、ハーモニック加速による効果に比べて大きいことが分かった。一方、ハーモニック加速による取出し直前のビーム位相幅

は、基本波より改善した電圧比と悪化する電圧比に結果は分かれた。悪化した電圧比は第1加速ギャップの初期位相 $-3RF$ 度の電圧が基本波より大きい条件(0.17, -0.02)とほぼ等しい条件(0.05, 0.16)であった。改善した条件は、第1加速ギャップで加速電圧が基本波より小さい(-0.06, 0.06)と(-0.11, 0.05)の条件であった。また改善した条件でも、第2加速ギャップで加速電圧が高い(-0.11, 0.05)の条件が最も良く、第1と第2加速ギャップ間の加速電圧の差が大きいほど、ビーム位相幅が最小化できることがわかった。ビームエネルギー幅についても同様に、(-0.11, 0.05)の条件が最も良いが、エネルギー幅が最も狭くなる初期の中心位相の範囲は狭く、初期の中心位相の選択が重要であることがわかった。従って、ハーモニック加速による位相バンチングの最適化は、第1加速ギャップでの電圧と第2加速ギャップのトップの電圧差を大きくする高調波電圧の組合せが必要であることが分かった。

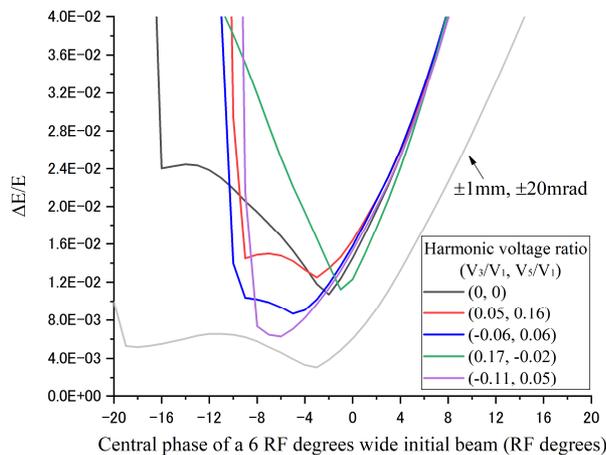


Figure 5: Calculated energy spread using the harmonic acceleration with the geometrical orbit analysis model for the H^+ 20MeV condition.

5. まとめ

サイクロトロンを中心領域で発生する位相バンチングに対するハーモニック加速の影響について検討を行った。位相バンチングが発生するTIARA AVFサイクロトロンの $h=2$ の $^{20}\text{Ne}^{7+}$ 260MeVの加速条件で得られた初期エミッタンスから、同じく $h=2$ の H^+ 20MeVの加速条件で発生する空間電荷効果によって半径方向にエミッタンスが増加することで、位相バンチング効果を弱められることが分かった。特に、取出し前のビーム位相幅及びエネルギー幅が初期の出射角に依存し、位相バンチングによる横方向と縦方向のカップリングが認められた。位相バンチング効果が弱まる初期エミッタンス広がりに対して、第3と第5高調波を用いたハーモニック加速による基本波に対する電圧比の最適な組合せの一例は、 $(V_3/V_1, V_5/V_1) = (-0.11, 0.05)$ であり、第1加速ギャップでの電圧と第2加速ギャップのトップの電圧差を大きくする高調波電圧の組合せが必要であることが分かった。ハーモニック加速は位相バンチング効果の向上に有効であった。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費JP16K09018の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] N. Miyawaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A715 (2013) 126.
- [2] N. Miyawaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A767 (2014) 372.
- [3] N. Miyawaki *et al.*, Proc. 14th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Jpn., (2017) 384.
- [4] M. Fukuda *et al.*, Proc. 11th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Jpn., (2014) 101.
- [5] S. Kurashima *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 033306.