

JAEA AVF サイクロトロンでの位相制限スリットによるビーム位相制限の評価 EVALUATION OF BEAM PHASE RESTRICTION WITH BEAM PHASE DEFINING SLIT IN THE JAEA AVF CYCLOTRON

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

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

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

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

Abstract

The beam phase restriction with the beam phase defining slit was evaluated by the geometric trajectory analysis and measurements of the beam phase distribution inside of the JAEA AVF cyclotron. The geometric trajectory analysis model, which was produced to investigate the phase bunching effect, was modified to obtain the correlation between the radial beam position (r) and the beam phase (ϕ). The calculated correlations by the model for the acceleration harmonic number (h) 1 and 2 were consistent with the measurement results of the beam phase distribution in the cyclotron. The beam phase and its width for $h = 1$ varied greatly with the slit position. The beam phase and its width for $h = 2$ varied a little according to the slit position. The r - ϕ correlation was closely related with the phase bunching condition.

1. はじめに

JAEA 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]などのビーム応用のために、エネルギー幅が狭く、強度の高い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できる。そのため、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や、サイクロトロンの中心領域で加速位相差から生じるエネルギー利得差に応じて半径方向に広がるビームを制限する位相スリットを用いる。位相スリットによるビーム位相幅の制限は、すでに MSU の K1200 サイクロトロンにおいて、シミュレーションによって得られた位相スリット位置とビーム位相の (r - ϕ) 相関関係を用いて、スリットの制限前のビームに対して約 25% から 30% のビーム強度で半値幅で 8RF 度以内に最小化している^[3]。この様に、位相スリットによるビームの制限はビーム位相幅の縮小に有効である。

JAEA AVF サイクロトロンでは、ビーム位相幅を縮小する方法として上記以外に、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する位相バンチングが生じる^[4]。位相バンチングの発生条件は、考案した幾何軌道解析モデルによって、電極配置等の幾何条件と加速ハーモニックモード (h) や加速電圧等の加速条件に依存することを見出し、このモデルを JAEA AVF サイクロトロンに適用すると、 $h=1$ の条件では発生せず、 $h=2$ の条件でその効果が得られた^[5]。実際に位相バンチングの効果を調べるため、加速 RF 位相に対するバンチャーの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、ビーム位相幅が約 1/3 程度に縮小することを確認した^[6]。一方、位相バンチングが生じない $h=1$ の条件ではビーム位相幅が広いと、位相スリットの制限によってビーム位相幅を狭くする必要があった。また、位相バンチング効果が得られる $h=2$ の条件でも、位相スリットの制限による位相幅の更なる縮小化の可能性についてわかっていない。そこで、位相スリットでの r - ϕ 相関関係を求める必要があった。

本報告では、位相バンチングの評価に用いた幾何軌道解析モデルによって、一般化したサイクロトロンに対して r - ϕ 相関関係を導出した。さらに、JAEA AVF サイクロトロンでの位相スリットでの r - ϕ 相関関係について、位相スリットの位置毎にサイクロトロン内部のビーム位相分布の測定を行い、幾何軌道解析モデルによる解析結果と比較し、位相スリットによるビーム位相幅の縮小化について検討を行った。

2. 幾何軌道解析による r - ϕ 相関関係

これまでの幾何軌道解析モデルでは、サイクロトロン中心領域で生じる位相バンチングを解析するために、初期位相差と第 2 加速ギャップでの位相差の相関関係を求めてきた。一方、JAEA AVF サイクロトロンでは位相スリットを第 2 と第 3 加速ギャップの間に設置しており、Figure 1 のように従来モデルを拡張することによって、位相スリットの半径方向の軸上を通過する粒子の半径と位相の相関関係を求めた。第 1 から第 2 加速ギャップまでの粒子の偏向角 θ は、参考文献[7]から以下のように求められる。

$$\theta = \theta_p + \varepsilon_i + \sin^{-1} \left[\frac{r_i}{r_1} \sin \theta_p - \sin(\theta_p + \varepsilon_i) \right] \quad (1)$$

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

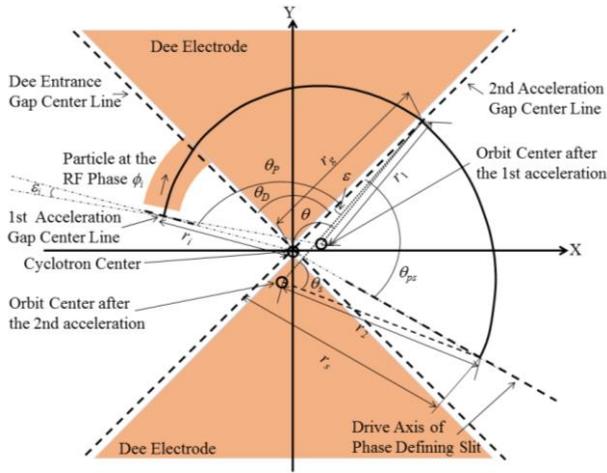


Figure 1: Layout of geometric analysis model.

ここで、 r_i は粒子の第 1 加速ギャップの半径、 ε_i は第 1 加速ギャップとサイクロトロン中心を通る直線の垂線に対する粒子の入射角度、 θ_p は第 1 と第 2 加速ギャップの開き角である。また、第 1 加速ギャップ後の軌道半径 r_1 は次の通りである。

$$r_1 = \frac{\sqrt{2m_0c^2}}{300B} \sqrt{\frac{M}{Q}(V_i - V_d \sin \phi_i)} \quad (2)$$

ここで、 m_0 (MeV/c^2) は原子質量単位、 B (T) は 磁場強度、 M/Q は粒子の質量電荷比、 ϕ_i は第 1 加速ギャップでの加速位相、イオン源引出し電圧 V_i と加速電圧 V_d は MV 単位とする。これらの結果から第 2 加速ギャップでの粒子の半径 r_g は、次のように求められる。

$$r_g = \frac{r_1 \sin \theta + r_i \sin \varepsilon_i}{\sin(\theta_p + \varepsilon_i)} \quad (3)$$

第 2 加速ギャップでの加速は、従来モデルと同様に瞬間的に加速ギャップに対して垂直な方向であると仮定する。第 2 加速ギャップ後の軌道半径 r_2 は、次の通り表すことができる。

$$r_2 = \frac{\sqrt{2m_0c^2}}{300B} \sqrt{\frac{M}{Q}(V_i - V_d \sin \phi_i + V_d \sin \phi)} \quad (4)$$

ここで、第 2 加速ギャップでの加速位相 $\phi = h\theta + \phi_i$ である。第 2 加速ギャップの垂線に対する粒子の出射角 ε は正弦定理より次の通りである。

$$\varepsilon = \sin^{-1} \left[\frac{r_i}{r} \sin(\theta_p - \theta + \varepsilon_i) \right] \quad (5)$$

第 2 加速ギャップと位相スリットの開き角を θ_{ps} とすると、この間の粒子の偏向角 θ_s は正弦定理を用いて

以下のように求めることができる。

$$\theta_s = \theta_{ps} + \varepsilon + \sin^{-1} \left[\frac{r_g}{r_2} \sin \theta_{ps} - \sin(\theta_{ps} + \varepsilon) \right] \quad (6)$$

従って、位相スリットでのビーム位相は、

$$\phi_s = h\theta_s + \phi \quad (7)$$

である。また、位相スリット駆動軸上の粒子の半径は、次の通りである。

$$r_s = \frac{r_2 \sin \theta_s + r_g \sin \varepsilon}{\sin(\theta_{ps} + \varepsilon)} \quad (8)$$

式(7)と(8)より、位相スリットでの $r-\phi$ 相関関係を得ることができた。加速ギャップの通過をさらに増やすことにより、任意の位置での相関関係を得ることが可能である。

3. 位相スリットを用いたビーム位相分布測定による $r-\phi$ 相関関係

3.1 スリット制限が無い場合のビーム位相分布

ビーム位相分布測定は、ビーム引出しの影響を受けないサイクロトロン内部で、プラスチックシンチレータヘッドを取り付けたプローブ^[6]を用いて行った。入射ビームの位相幅を縮小するバンチャーは、位相スリットでのビームの半径方向の広がりを狭くすると予想されるため使用せず、イオン源からの直流ビームをサイクロトロンに入射した。ビーム条件は、位相バンチング効果が得られない $h=1$ では 107 MeV $^4\text{He}^{2+}$ 、位相バンチング効果が得られる $h=2$ では 260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ を用いた。Figure 2 に位相スリットの制限が無い場合のビーム位相分布測定の結果を示す。

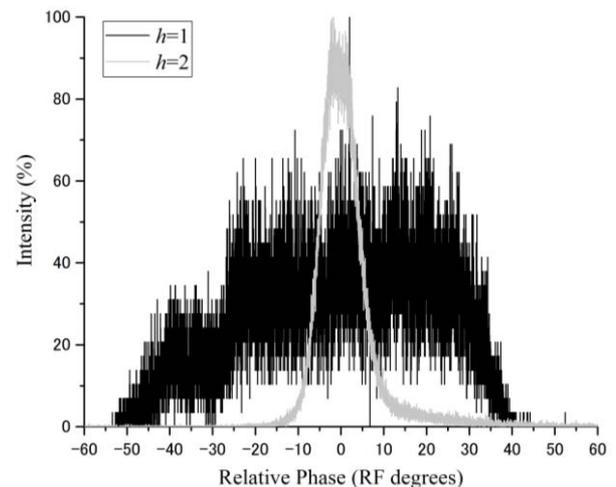


Figure 2: Measured beam phase distributions without the phase defining slits.

$h=1$ の測定結果では全幅で 90RF 度にわたって分布しているが、 $h=2$ では半値幅で 10RF 度に狭まり、位相バンチングの有無が明確に表れた。 $r-\phi$ 相関関係の測定は位相スリットの制限を通過したビームの測定によって得られるため、 $r-\phi$ 相関関係中のビーム位相範囲はスリット制限の無いこれらの測定結果と等しく、 $h=1$ は広く、 $h=2$ は狭いことが予想できる。

3.2 スリット制限の測定結果と計算結果の比較

位相スリットの駆動軸上の $r-\phi$ 相関関係を得るために、位相スリットの位置毎にスリットギャップを通過したビームの位相分布を測定した。位相スリットのギャップは、小さいほど位置に対する位相の分解能は良くなるが、ビーム強度の低下を考慮してギャップは 3mm に固定した。半径方向に対するビーム位相の変化を詳細に測定するため、位相スリット位置の変化量を 0.4mm とした。測定したビーム位相分布を位相スリットの半径毎に並べて相対強度の等高線図を作成し、最大値を白色、最小値を黒色として、Figure 3 ($h=1$) と Figure 4 ($h=2$) に表した。横軸は加速 RF に対する相対位相、縦軸はサイクロトロン中心からの位相スリットのギャップ中心までの距離である。一方、幾何軌道解析モデルを JAEA AVF サイクロトロンに適用した。幾何条件は、ディー電極の開き角 $\theta_D=86$ 度、第 1 から第 2 加速ギャップの開き角 $\theta_P=118$ 度であり、第 2 加速ギャップと位相スリットの開き角 $\theta_{ps}=62$ 度である。これらの計算結果もそれぞれ破線で示した。

測定結果と計算結果の $r-\phi$ 相関関係は、 $h=1, 2$ とほぼ一致した。Figure 3 に示すように、 $h=1$ では、上に凸の相関関係が得られ、位相スリット位置が低い側でビームの相対強度が高く、例えば、位相スリット位置を 32mm 付近に設定すると 15RF 度以下の位相幅のビームが得られる。逆に、位相スリットを 35mm 付近に設定すると、ビーム強度が低く 25RF 度以上のビーム位相幅となる。従って、 $h=1$ の条件では、位相スリットの位置でビーム位相幅が変わり、さらに相対位相も大きく変わるため、位相スリットの制限は $r-\phi$ 相関関係を考慮する必要がある。Figure 4 の $h=2$ では、右上がりの大きな傾きの相関関係が得られ、37mm 付近でビームの相対強度が高い領域があった。 $h=2$ では、ビームは位相バンチングによって狭い相対位相の範囲で存在するため、位相スリットの位置を変更しても相対位相や位相幅の変化が小さい。従って、位相バンチングが生じる条件では、より狭いビーム位相幅を得るため、 $r-\phi$ 相関関係を基にした細かな調整が必要である。

4. まとめ

拡張した幾何軌道解析モデルによって計算された JAEA AVF サイクロトロンでの位相スリットでの $r-\phi$ 相関関係は、位相スリット位置毎のビーム位相分布測定の結果と、位相バンチングの有無に関わらず、ほぼ一致した。このことから、本モデルがビーム位相だけでなく、ビーム位置の評価にも有効であることを示した。 $r-\phi$ 相関関係を基にした位相スリット

によるビーム位相の制限は、位相バンチングが生じない場合に対してビーム位相幅の縮小化に極めて有効である。位相バンチングがある場合は、スリット位置で制御できるビーム位相の範囲が限られ、 $r-\phi$ 相関関係が位相バンチングの発生条件に依存する。

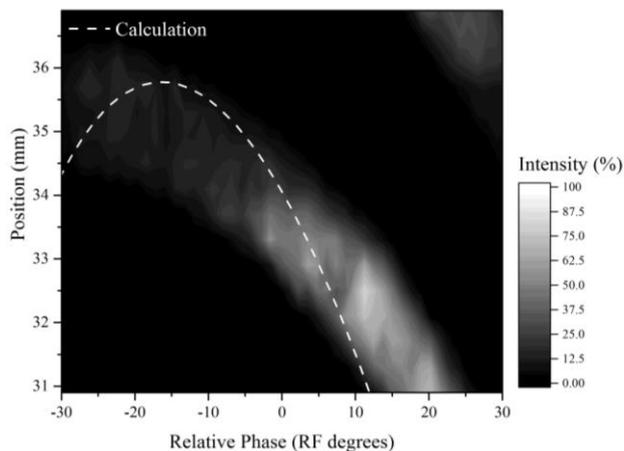


Figure 3: Measured and calculated $r-\phi$ correlations for 107 MeV $^4\text{He}^{2+}$ beam ($h=1$).

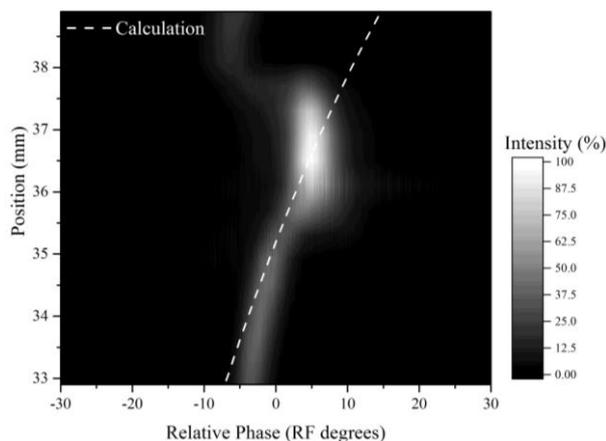


Figure 4: Measured and calculated $r-\phi$ correlations for 260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ beam ($h=2$).

参考文献

- [1] M. Oikawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. B 260 (2007) 85.
- [2] M. Koshimizu, et al., Rev. Sci. Instrum. 86 (2015) 013101.
- [3] J. Bailey, et al., in Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, BC, Canada (1992) 431.
- [4] N. Miyawaki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 636 (2011) 341.
- [5] N. Miyawaki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 715 (2013) 126.
- [6] N. Miyawaki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 767 (2014) 372.
- [7] N. Miyawaki, et al., Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 3-5, 2013, Nagoya, Japan, 500-502.