

炭素シンクロトロン高周波加速空洞運転制御パターン決定のための粒子トラッキング シミュレーションによる炭素ビーム挙動解析

THE ANALYSIS OF CARBON BEHAVIOR WITH PARTICLE TRACKING FOR DECIDING OPERATION PATTERN OF RADIO-FREQUENCY ACCELERATING CAVITY IN A CARBON SYNCHROTRON

中島裕人^{#, A)}, えび名風太郎^{A)}
Yuto Nakashima^{#, A)}, Futaro Ebina^{A)}

^{A)} Hitachi, Ltd., Research & Development Group, Center for Technology Innovation - Energy

Abstract

Hitachi has been developing a carbon synchrotron system for particle therapy. Acceleration frequency of this system is discretely updated by the B-clock signal, which is produced per a certain amount of change of bending magnetic fields (ΔB). We demonstrated particle tracking simulation to confirm the influence of the amount of ΔB on acceleration efficiency. As the result, the acceleration efficiency of 430MeV/u C^{6+} beam is estimated to be more than 95% under a particular set of conditions including, ΔB and operation patterns.

1. はじめに

日立ではこれまでに、炭素線治療用シンクロトロンの設計を行ってきた[1]。本シンクロトロンは、偏向電磁石の磁束密度の変化 ΔB ごとにパルスを発生させ、そのパルスに基づき加速周波数を離散的に更新する(B クロック制御)。 ΔB の大きさによっては加速効率の低下が懸念される。適切な ΔB の大きさを評価するため、B クロック制御を模擬した粒子トラッキングシミュレーションにより、加速効率を算出した。

2. 粒子トラッキングシミュレーション

炭素シンクロトロンの設計パラメータをそれぞれ Table 1 に示す。本シンクロトロンは、ライナックから入射された運動エネルギー4MeV/u の C^{6+} ビームを 140~430MeV/u まで加速する。ビームはその後、出射用セプタム電磁石を通じて、高エネルギービーム輸送系へと輸送される。

Table 1: Carbon Synchrotron Parameters

Parameters	Unit	Value
Circumference	m	56.8
Injection beam energy	MeV/u	4
Extraction beam energy	MeV/u	140 - 430
Bending magnet bending radius	m	4.011

ビームの進行方向に高周波加速電圧が印加された加速空洞を通過することで、ビームは加速される。加速電圧や偏向電磁石の磁場強度は、各々の運転制御パターンによって制御される。今回実施したシミュレーションは、加速を加味したビーム進行方向の 1 次元粒子トラッキング

[#] yuto.nakashima.cp@hitachi.com

シミュレーションを行った。当コードでは位相空間上での粒子初期分布などの初期パラメータ及び、加速電圧や偏向電磁石の運転制御パターンの読み込み後、それらを初期値として各時刻における粒子の運動を計算する。

解析粒子数は 1000 であり、粒子の位相空間上の初期分布として、運動量偏差 dp/p 方向においては $\pm 1\sigma=0.1\%$ のパラボラ分布、ビーム進行方向においては、一様分布で分布させた。主な初期パラメータの条件を Table 2 に示す。B クロック制御は、偏向電磁石の磁場強度が指定した ΔB だけ変化する毎に、加速周波数を離散的に変化させることで模擬した。また、本シミュレーションでは空間電荷を考慮した。ビームローディングについては考慮していない。

Table 2: Tracking Simulation Parameters

Parameters	Unit	Value
Simulated particle	-	C^{6+}
Simulated particle number	-	1000
Current of beam orbiting in the synchrotron	mA	3.3
Momentum spread of injected beam (1σ)	%	0.1
Maximum ramp rate of bending magnetic field	T/s	3.0

3. 加速効率の ΔB 依存性

まず ΔB としては、当社の従来の陽子シンクロトロンと同じ加速制御機器を用いた場合の最小値である $\Delta B = 2.74 \times 10^{-5}$ [T]を用いた。結果、RF バケットへの C^{6+} 粒子捕獲時に最大 700V、加速時に最大 2300V を印加する加速電圧制御パターン(Figure 1)のもとで、430MeV/u の C^{6+} ビームに対して加速効率 95%以上となることを確認した。

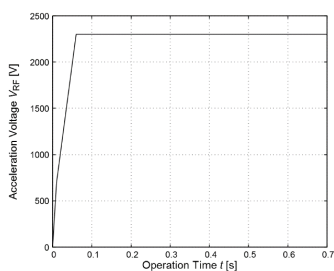


Figure 1: Acceleration voltage pattern.

また、このときの偏向電磁石磁場強度パターンを Figure 2 に示す。以降、シミュレーションへ入力する運転制御パターンとして、これらと同じパターンを用いた。

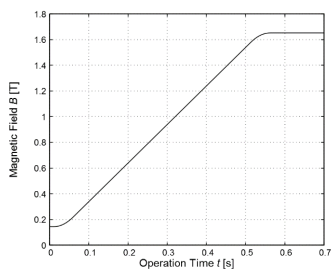


Figure 2: Bending magnetic field pattern.

続いて、 ΔB に対する加速効率の依存性を調べるため、値を 2.74×10^{-5} から増大させた場合の加速効率を求めた。このとき ΔB が 1.00×10^{-4} [T]を超えると、加速効率は 0.95 を下回ることが確認された。以下、 $\Delta B = 2.74 \times 10^{-5}$ [T]、 1.00×10^{-4} [T]の場合におけるビームバンチの挙動から、 ΔB の増大時に加速効率が低下する要因を検証する。

まず、各時刻におけるRFバケット内に含まれる粒子数を $\Delta B = 2.74 \times 10^{-5}$ [T]、 1.00×10^{-4} [T]の場合で比較した。

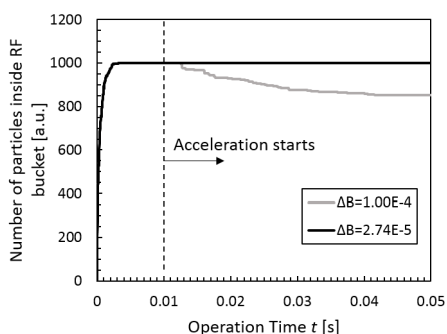
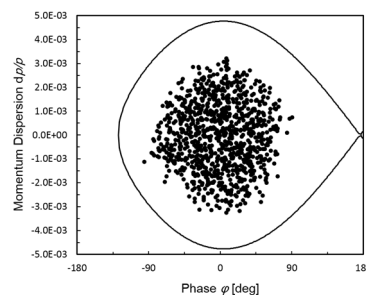
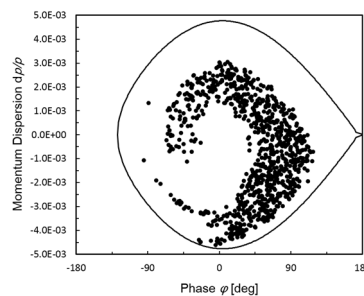


Figure 3: Number of particles inside RF bucket.

Figure 3 より、 $\Delta B = 1.00 \times 10^{-4}$ [T]の場合は、バケット内への粒子の捕獲が終了し、加速が始まる時刻 $t = 10$ [ms]以降で、RFバケット内の粒子が減少し始めることがわかる。続いて、加速開始直後 ($t = 14$ [ms]) の、それぞれの場合の位相空間上での分布を Figure 4 に示す。Figure 4 中の実線はRFバケットを表している。



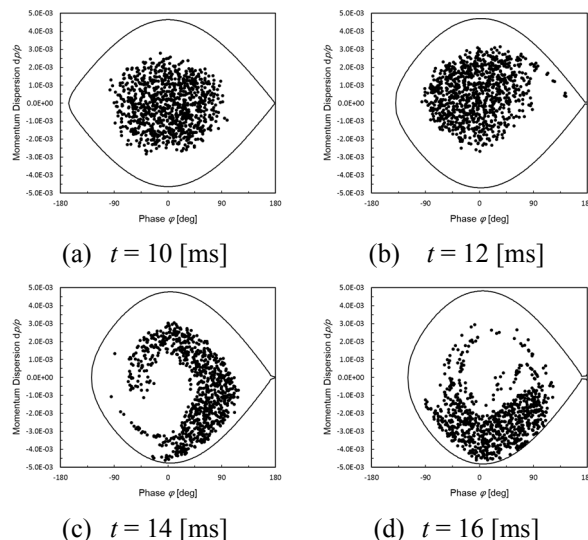
(a) $\Delta B = 2.74 \times 10^{-5}$ [T]



(b) $\Delta B = 1.00 \times 10^{-4}$ [T]

Figure 4: Phase space distribution of particles ($t = 14$ [ms]).

Figure 4 (a)に示すように、 $\Delta B = 2.74 \times 10^{-5}$ [T]の場合は、バンチがバケット中央付近にまとまって存在している。一方、 $\Delta B = 1.00 \times 10^{-4}$ [T]の場合は、Figure 4 (b)に示すように、バンチはテールを引いていることがわかる。この分布の違いが生じる過程を詳しくみるため、加速開始時刻からの 2[ms]ごとの位相空間上での粒子分布の時間変化を $\Delta B = 1.00 \times 10^{-4}$ [T]の場合について確認した (Figure 5)。



(c) $t = 14$ [ms]

(d) $t = 16$ [ms]

Figure 5: Phase space distribution of particles just after acceleration started ($\Delta B = 1.00 \times 10^{-4}$ [T]).

Figure 5 (b)より、加速開始後バンチ端部から徐々にテールを引いていることがわかる。偏向電磁石磁場強度の時間変化率が同じ条件において、より大きな ΔB を設定した場合は、加速周波数更新頻度がより低くなるため、RF バケツ中心に対するバンチの dp/p 方向のずれがより大きくなる。その結果、バンチに振幅の大きなダイポール振動が生じ、バンチ端部にテールが生じたと考えられる。その後、バケツ端部の付近の粒子からバケツから溢れていき、最終的な加速効率が低下している。

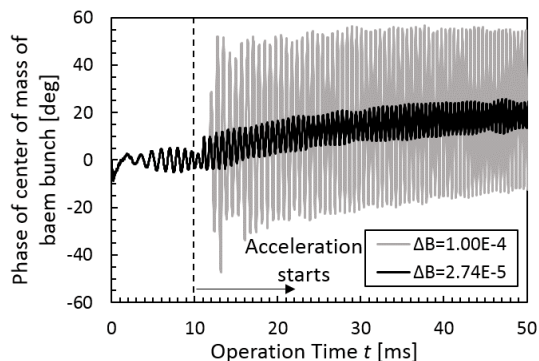


Figure 6: Center of mass of beam bunch oscillation.

Figure6 にビームバンチの重心位相の振動の様子を示す。 $\Delta B = 2.74 \times 10^{-5}$ [T]、 1.00×10^{-4} [T]のどちらの場合も、バンチ重心位相は同期位相を中心にダイポール振動しているが、後者については振幅がより大きい。後者の場合は、テールの発達に伴いバンチ重心がバケツ端部に偏ることで、振幅がより大きくなっていると考えられる。

最後に、 $\Delta B = 2.74 \times 10^{-5} \sim 2.00 \times 10^{-4}$ [T]の場合の加速効率を Figure 7 に示す。 ΔB の増大に伴い加速効率が低下する傾向がみられる。この要因としては、 ΔB の増大に従い低下していく加速周波数更新頻度の影響により、RF バケツに対する dp/p 方向のバンチのずれが、より大きくなっていったためと考えられる。

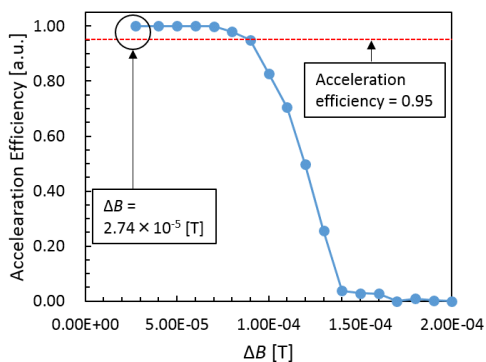


Figure 7: Acceleration efficiency of 430MeV/u C^{6+} for each ΔB value.

4. まとめ

炭素シンクロトロンについて、B クロック制御時の加速効率を求めるため、粒子トラッキングシミュレーションを実施した。結果、当社の従来の陽子シンクロトロンと同等の加速制御機器を用いることで達成される最小の ΔB のもとで、95%以上の加速効率で C^{6+} ビームを 430MeV/u までする加速可能な見込みを得た。また、 ΔB と加速効率の依存性を調べ、 ΔB の増大に従って加速効率が低下することを確認した。

今後は、 C^{6+} ビーム減速時におけるB クロック制御の影響を調査する予定である。

参考文献

- [1] F. Noda *et al.*, “炭素線治療用小型シンクロトロンの概念設計”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011, WELH03.