

九州大学 FFAG 加速器における速い繰り返し運転に向けた ビーム捕獲法に関する研究

STUDY OF BEAM CAPTURE METHOD FOR HIGH REPETITION RATE AT KYUSHU UNIVERSITY

○ 稲岡悠士^{#, A)}, 米村祐次郎^{A)}, 有馬秀彦^{A)}, 池田伸夫^{A)},
宮沖貴史^{A)}, 沖田英史^{A)}, 是永 忠志^{A)}, 高木 昭^{B)},
中山 久義^{B)}, 森 義治^{C)}

Yushu Inaoka^{#, A)}, Yujiro Yonemura^{A)}, Hidehiko Arima^{A)}, Nobuo Ikeda^{A)},
Takashi Miyaoki^{A)}, Hidefumi Okita^{A)}, Tadashi Korenaga^{A)}, Akira Takagi^{B)},
Hisayoshi Nakayama^{B)}, Yoshiharu Mori^{B)}

^{A)} Kyushu University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Research Reactor Institute, Kyoto University

Abstract

A rapid cycling acceleration is required to accelerate short-lived particles such as muon and unstable nuclei. We adopt a saw-tooth capture method which is suitable for rapid cycling acceleration because a beam capture is finished in a short period, compared with an adiabatic capture. In this paper, the results of beam simulation, the test of the RF amplifier, and preliminary beam experiment are described.

1. はじめに

近年、原子核・素粒子物理分野の基礎研究、ミュオン触媒核融合などエネルギー分野において、不安定核やミュオンの様な短寿命粒子を高エネルギーまで加速できる加速器に対する要求が高まっている。

短寿命粒子を高エネルギーまで加速するための加速器としては、固定磁場強収束 (Fixed Field Alternating Gradient, FFAG) 加速器が原理的に優れている。FFAG 加速器は磁場が一定であるので、従来のシンクロトロンのように電磁石の磁場と高周波周波数加速電場の位相を同期させる必要がない。従って、高い電場が発生出来る高周波加速空洞を用いれば、速い繰り返し運転が可能な加速器である。

九州大学加速器・ビーム応用科学センター^[1]では、原子核物理、医療基礎をはじめとする様々な科学分野のビーム応用研究の推進を目標として、FFAG 加速器^[2]を主加速器とした加速施設の整備が進められている。現在、新しく開発された高周波加速空洞を主リングに組み込み、ビーム取出しへ向けたビーム加速実験を行っている。

本センターでは、タンデム加速器から陽子や重イオンビームを FFAG 加速器に入射する計画が進められている。タンデム加速器から FFAG 加速器へ入射されるビームはピーク電流が低く、時間幅が広いため、高周波加速を行う前にビームの損失を防ぐことを目的としてビーム捕獲を行い、ビームを動的バ

ケット内に入れる必要がある。しかし、従来の断熱捕獲法では、ビームの捕獲に長い時間が必要となるため、FFAG 加速器の特長である速い繰り返し加速を実現出来ないという課題があった。そこで、本研究では鋸歯状波捕獲法を用いて捕獲時間を短し、速い繰り返し運転を実現する事を目的とした。本稿では、ビーム捕獲・加速シミュレーション、高周波加速空洞試験、ビーム実験について報告する。

2. 鋸歯状波捕獲法の原理

鋸歯状波捕獲法とは、電圧波形に鋸歯状波を用いて入射ビームを位相空間上で回転させて時間幅を最小にした後、動的バケット内に入れる手法である。捕獲時間はシンクロトロン振動の 1/4 周期であり、断熱捕獲法と比較し極めて短い時間でビーム捕獲が完了することになる。

ビームの捕獲時に用いる鋸歯状波電圧は、式(2.1)で表すことができる。 V_{gap} は加速ギャップ電圧である。鋸歯状波電圧を用いた場合、シンクロトロン運動方程式は式(2.2)と式(2.3)となる。式(2.2)は同期粒子と非同期粒子のエネルギー差の時間変化率、式(2.3)は位相差の時間変化率を表している。 ΔE は同期粒子と非同期粒子のエネルギー差、 $\Delta\phi$ は同期粒子と非同期粒子の位相差、 E_s は同期粒子のエネルギー、 β_s は同期粒子の速度と光速の比、 h はハーモ

[#] inaoka@nucl.kyushu-u.ac.jp

ニック数、 ω_{rf} は角回転周波数、 ϕ_s は同期位相、 η_s は位相スリップ係数、 e は電気素量である。式(2.2)、(2.3)を用いてシンクロトロン振動周期は式(2.4)で与えられる。

加速効率 H 、ビーム強度 U を式(2.5)、式(2.6)に示す通りに定義した。 N_0 は主リングに入射した粒子数、 N は取り出しエネルギーまで加速された粒子数、 f_s は回転周波数である。

$$V_c = \frac{V_{\text{gap}}}{\pi} \phi \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta E}{\omega_{rf}} \right) = \frac{eV_c}{2\pi h} \left[\frac{\phi_s + \Delta\phi}{\pi} - \frac{\phi_s}{\pi} \right] \quad (2.2)$$

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dt} = \frac{\omega_{rf}^2 \eta_s}{\beta_s^2 E_s} \left(\frac{\Delta E}{\omega_{rf}} \right) \quad (2.3)$$

$$T_{\text{syn}} = 2\pi \sqrt{-\frac{2\pi h \beta_s^2 E_s}{\omega_{rf}^2 \eta_s eV}} \times \pi \quad (2.4)$$

$$H(\%) = \frac{N}{N_0} \quad (2.5)$$

$$U = H \times f_s \quad (2.6)$$

3. 高周波加速空洞

Figure 1 に高周波加速空洞の概略図を示した。高周波加速空洞は 2 枚の磁性体合金 (Magnetic Alloy, MA) コアから構成されている。二枚のコアの中心には一箇所の加速ギャップがあり、ギャップ間を絶縁するために FRP 製のダクトが用いられている。高周波加速空洞コアの冷却方式は片側間接水冷方式を採用しており、MA コアはアルミ製の冷却板が取り付けられている。MA コアの外側には、COD 補正用の偏向電磁石と磁気シールドが設置されている。

Figure 2 にネットワークアナライザを用いて測定した高周波加速空洞のインピーダンスを示す。青線は FFAG 電磁石が励磁していないときのインピーダンスであり、赤線は、FFAG 電磁石を励磁した時のインピーダンスである。Figure 2 に示す通り、漏れ磁場によりインピーダンスが 14%低下していることが分かった。

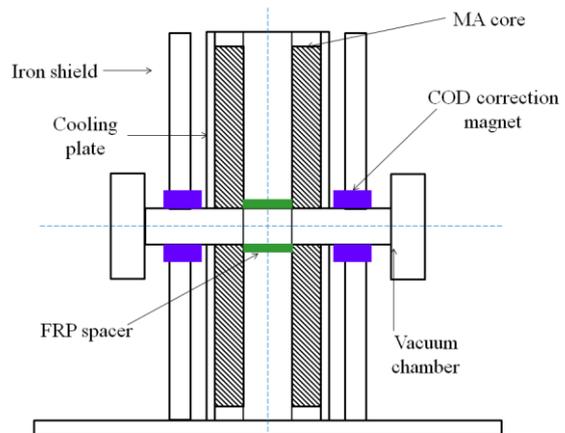


Figure 1: Overview of RF cavity.

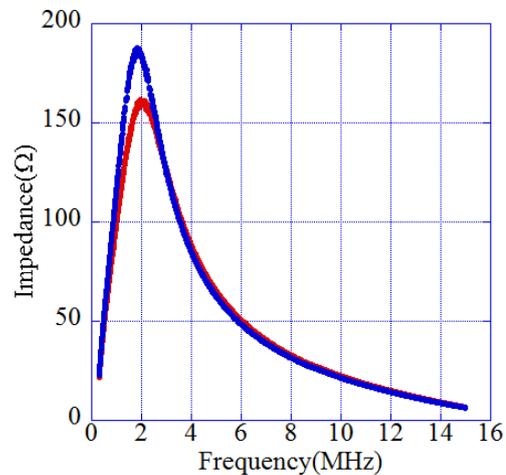


Figure 2 : Measured impedance of RF cavity. Red line is the impedance when FFAG magnets are operated. Blue line is the impedance when FFAG magnets are not operated.

4. 鋸歯状波電圧の出力試験

式(2.7)に示した入力波形を用いて、鋸歯状波波形の出力試験を行った。式(2.7)は鋸歯状波をフーリエ展開した式であり、 $N=\infty$ の時の鋸歯状波になる。 $V(t)$ 、 f_s 、 $A(f_s)$ はそれぞれ、ギャップ電圧、同期粒子の周回周波数、高周波増幅器の増幅率である。Figure 2 に示す通り、高周波加速空洞のインピーダンスは周波数依存性を持っているので、増幅率は周波数の関数である。

$$V(t) = \frac{1}{A(f_s)} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{n} \sin(2\pi f_s t) \quad (2.7)$$

増幅率 $A(f_s)$ を求めるために、各周波数の高周波加速空洞の出力電圧を測定して増幅率の周波数特性を求めた。その結果を Figure 3 に結果を示した。測定した周波数の増幅率の逆数を入力波形の振幅に掛

けることで、周波数によらず加速電圧を一定にすることが出来る。

周波数が高くなるに従って、波形の歪みが大きくなりおり、出力電圧が正弦波として出力されるのは、基本周波数の4倍までであることが分かった。従って、次節では式(2.7)のNは4とし、鋸歯状波捕獲のシミュレーションを行った。

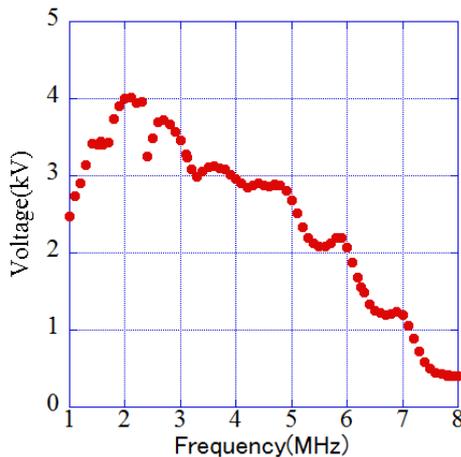


Figure 3: Output voltage of RF power amplifier as a function of frequency.

5. ビーム捕獲・加速シミュレーション

加速時間とビーム損失を定量的に評価するため、縦方向のビームシミュレーションを行った。シミュレーションでは、加速時間を計算し、式(2.6)で定義したビーム強度Uが最大となる運転条件を求めた。

Table 1 にシミュレーションの初期条件を示した。式(2.5)、式(2.6)で定義した加速効率、ビーム強度U、及び繰り返し周波数を用いた。捕獲電圧として、式(2.1)で表した鋸歯状波と、前節で実験的に得られた波形を用いてそれぞれシミュレーションを行った。

Figure 4、Figure 5 は捕獲電圧に鋸歯状波を用いた場合と実験で得られた出力波形を用いた場合の加速効率、繰り返し周波数、ビーム強度Uについて比較した。Figure 4 はシミュレーションで得られた加速効率と繰り返し周波数である。Figure 4 に示す通り、鋸歯状波を用いた場合とは異なり、加速効率は100%にならず、全体的に加速効率が低下していることが分かる。また、繰り返し周波数は、共に単調に増加しており、ほぼ等しいことが分かる。

Figure 5 は、各同期位相におけるビーム強度Uである。ビーム強度が最大になると、式(2.1)で示される鋸歯状波を捕獲電圧として用いた場合は、同期位相、加速効率、繰り返し周波数、ビーム強度はそれぞれ、48度、95.3%、186.9Hz、178.2であった。高周波加速空洞の出力波形を用いた場合は、同期位相、加速効率、繰り返し周波数、ビーム強度はそれぞれ、

48度、88.2%、186.7Hz、164.5であった。加速効率は7.1%減少し、ビーム強度は7.7%減少した。

Figure 6、Figure 7 は捕獲なしの場合の時と加速効率、繰り返し周波数、ビーム強度Uについて比較している。捕獲なしの場合にビーム強度が最大となるときは、同期位相、加速効率、加速周波数、ビーム強度はそれぞれ、39度、44.1%、136.4Hz、60.1であった。加速効率は2.0倍、繰り返し周波数は1.4倍、ビーム強度は2.7倍になった。

Table 1 Condition of Injection and Acceleration

Particle	Proton
Injection Energy	10 MeV
Injection Phase spread	$-\pi \sim \pi$
Injection $\Delta p/p$	$\pm 0.23\%$
Gap voltage	8 kV _{pp} (4kV _{pp} /1 cavity × 2)
Final energy	100 MeV
Revolution Frequency	1.5 – 4.0 MHz

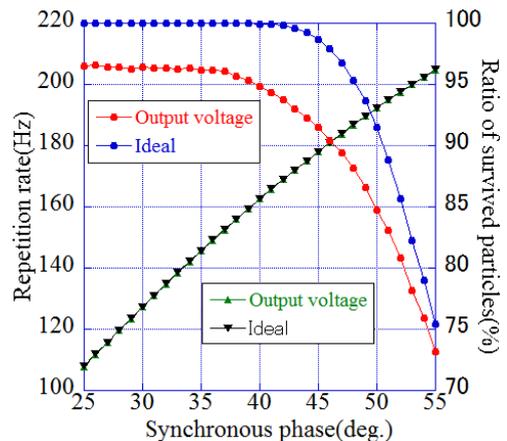


Figure 4: Repetition rate and ratio of survived particles.

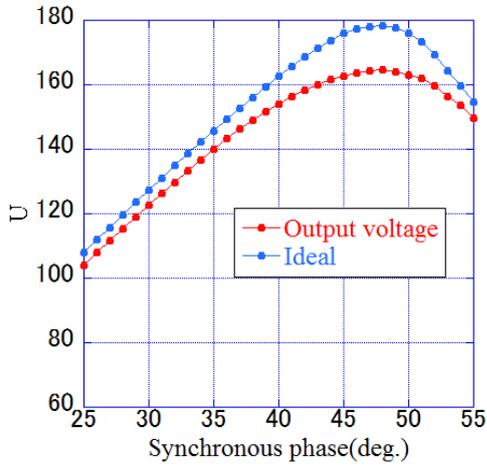


Figure 5 : Beam intensity U.

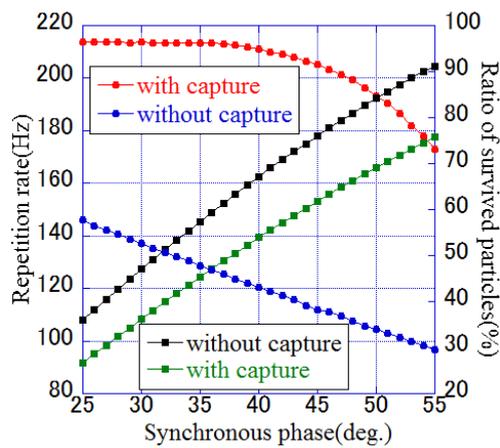


Figure 6 : Repetition rate and ratio of survived particles.

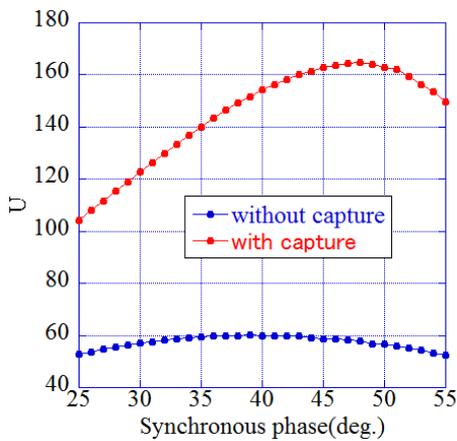


Figure 7 Beam intensity U.

6. ビーム実験

ビーム実験を行い、鋸歯状波波形でビームを捕獲した時のシンクロトロン振動を計測した。Figure 8 はバンチモニターで観測されたバンチ波形である。Figure 8 に示した通り、シンクロトロン周期は $396\mu\text{s}$ である。シミュレーションではシンクロトロン振動周期は $394\mu\text{s}$ であり、測定誤差の範囲内で実験値と一致してことが分かった。今後はビームを 100MeV まで加速してビーム電流を測定して、加速効率がシミュレーションと一致しているか調べる予定である。

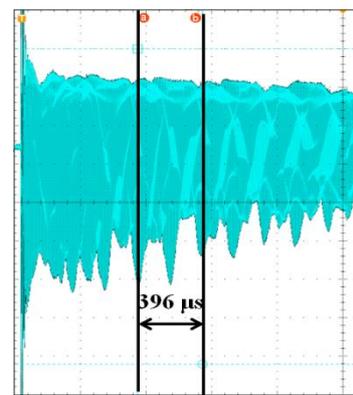


Figure 8 : synchronous oscillation.

7. まとめ

鋸歯状波捕獲法を用いて速い繰り返し運転を実現する事を目的として、縦方向のビームシミュレーション、高周波加速空洞で鋸歯状波出力試験、ビーム実験を行った。ビームシミュレーションの結果、同期位相 48 度の時、加速効率は 88.2% 、繰り返し周波数は 186.7Hz であった。鋸歯状波捕獲法を用いることで、加速効率が 2.0 倍になることがわかった。

今後はビーム調整を行い、 100MeV までビームを加速することを達成し、鋸歯状波を用いることで短時間に大強度ビームを加速できることを実証する。

参考文献

- [1] Y. Yonemura, H. Arima, N. Ikeda, K. Ishibashi, H. Ishikawa, K. Maehata, T. Noro, T. Okai, K. Sagara, N. Shigyo, Y. Uozumi, G. Wakabayashi, S. Fukumoto, Y. Kimura, H. Nakayama, A. Takagi, Y. Mori, and T. Tomimasu, "Status of Center for Accelerator and Beam Applied Science of Kyushu University", Proc. of EPAC08, pp3521-3523, (2008)
- [2] K. R. Symon, D. W. Kerst, L. W. Jones, L. J. Laslett, and K. M. Terwilliger, "Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators", Physical Review, Vol.103, No.6, 1837, (1956)