

九州大学 FFAG 加速器のビームコミッショニングの現状

PRESENT STATUS OF BEAM COMMISSIONING OF FFAG ACCELERATOR AT KYUSHU UNIVERSITY

米村祐次郎^{#, A)}, 有馬秀彦^{A)}, 池田伸夫^{A)}, 魚住裕介^{A)}, 石橋健二^{A)}, 相良建至^{A)}, 野呂哲夫^{A)}, 是永忠志^{A)}, 稲岡悠士^{A)}, 宮沖貴史^{A)}, 沖田英史^{A)}, 中山久義^{B)}, 高木昭^{B)}, 森義治^{C)}

Yujiro Yonemura^{#, A)}, Hidehiko Arima^{A)}, Nobuo Ikeda^{A)}, Yusuke Uozumi^{A)}, Kenji Ishibashi^{A)}, Kenshi Sagara^{A)}, Tetsuo Noro^{A)}, Tadashi Korenaga^{A)}, Yushi Inaoka^{A)}, Takashi Miyaoki^{A)}, Hidefumi Okita^{A)}, Hisayoshi Nakayama^{B)}, Akira Takagi^{B)}, Yoshiharu Mori^{C)}

^{A)} Kyushu University

^{B)} KEK

^{C)} Kyoto University Research Reactor Institute

Abstract

The beam commissioning of FFAG accelerator has been started since December 2011 at Center for Accelerator and Applied Beam Science of Kyushu University. The beam acceleration was successfully demonstrated July 2013. In this paper, details of the beam commissioning of the FFAG accelerator are presented.

1. 緒言

九州大学加速器・ビーム応用科学センターでは、ビームを利用した教育および原子核科学、医療応用基礎科学等におけるビーム応用研究を推進することを目的として、FFAG 加速器を主加速器とした加速器施設の整備が進められている。平成 23 年 12 月から主リングのビームコミッショニングが開始され、平成 25 年 7 月にビームの加速に成功した。現在、ビーム取出しに向けたビーム加速実験が行われている。本発表では、FFAG 加速器のビームコミッショニングの現状について報告する。

2. 加速器施設の概要

九州大学加速器・ビーム応用科学センターの加速器施設は小型陽子 AVF サイクロトロンと 150 MeV FFAG 加速器によって構成されている。サイクロトロンは 150 MeV FFAG 加速器の入射器として利用される。Table 1 と Table 2 にサイクロトロンと 150 MeV FFAG 加速器の設計パラメータを示す。また、加速器を構成する主な機器の配置を Figure 1 に示す。

Table 1: Design Parameters of Injector Cyclotron

Type	AVF Cyclotron
Extracted Beam Energy	10 MeV
RF Frequency	47 MHz (2 nd harmonics)
Ion Source	PIG-type (cold cathode LaB ₆)
Beam Extraction Radius	0.3 m
Beam Current	2 μA

Table 2: Design Parameters of 150 MeV FFAG

Type	Radial sector (DFD triplet)
Number of Cells	12
Proton Energy	10 - 125 MeV
Revolution Frequency	1.5 - 4.2 MHz
Average radius	4.47 - 5.20 m
Repetition	100 Hz (2 Cavities)
Beam Current	1.5 nA
Betatron Tune (Injection Energy)	3.61 (Horizontal) 1.46 (Vertical)

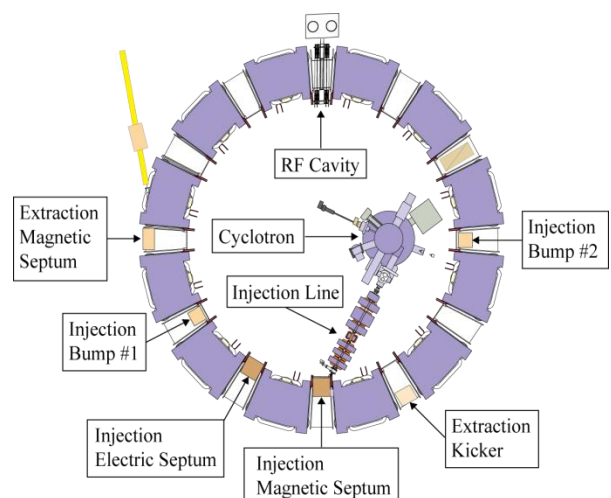


Figure 1: Schematic view of 150 MeV FFAG Accelerator.

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

Figure 1 に示す通り、サイクロトロンから取り出されたビームはビーム輸送ラインを通過した後、FFAG 加速器へ入射される。入射されたビームは入射磁場セプタムによって 60° 内側へ偏向された後、入射静電セプタムで 1.5° 偏向される。さらに、2 台の入射バンプ電磁石を用いた多重入射法によって周回軌道へ入射される。その後、高周波加速装置によって最終エネルギーまで加速され、取出しキッカー電磁石と取出しセプタム電磁石によってリングの外側へ取り出される。

Figure 2 に 150 MeV FFAG 加速器のタイミングチャートを示す。加速器の繰り返し周波数は 100 Hz である。入射器サイクロトロンは連続的にビームを加速する性能を有しているが、機器の不必要な放射化を避ける目的から、サイクロトロンの高周波加速装置とイオン源電源はパルス運転を行っている。

イオン源のアーク電流に同期して、入射バンプ電磁石が励磁され、ビームが主リング内に多重入射される。その後、主リングの高周波増幅器の電圧パターンが出力され、ビームの捕獲・加速が開始される。ビームが最終エネルギーに到達した後、ビーム取出しキッカーおよびビーム取出しセプタムが励磁され、ビームは加速器外へ取り出される。

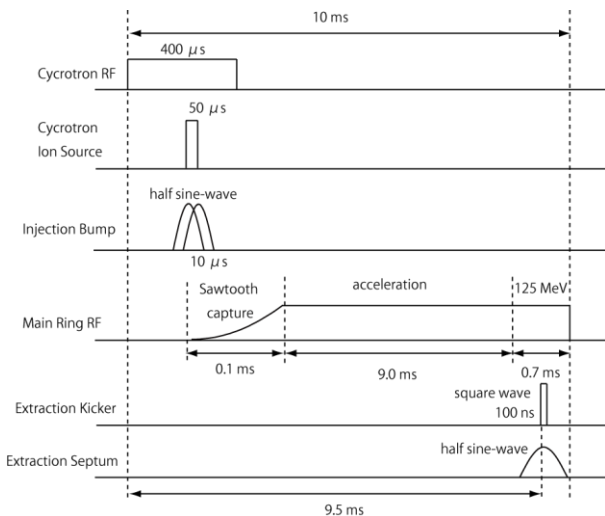


Figure 2: Timing chart of cyclotron and 150 MeV FFAG.

3. ビームコミッションング

3.1 ビームモニター

ビームコミッションングに使用したビームモニターの配置を Figure 3 に示した。サイクロトロンから取り出されるビーム電流はビームプローブによって測定される。主リングへ入射されるビーム電流を測定するために入射ビーム輸送ラインの終端にはビームシャッターが設置されている。

周回ビームのプロファイルを測定するために、主リングには 5 台の破壊型ビーム電流モニターを設置した。これらのモニターは電動アクチュエータの先端に取り付けられた幅 10 mm の電極を半径方向に移動させることで、周回ビームのビームプロファイル

を測定することができる。モニターの位置分解能は 0.2 mm である。

主リングのベータトロンチューンを測定するために、垂直チューンモニターと水平チューンモニターを設置した。チューンモニターは静電ピックアップ型ビームモニターであり、電極の構造をベータトロン振動方向に対して非対称にすることで、ベータトロン振動は電極に誘起される電圧の変動として観測される。

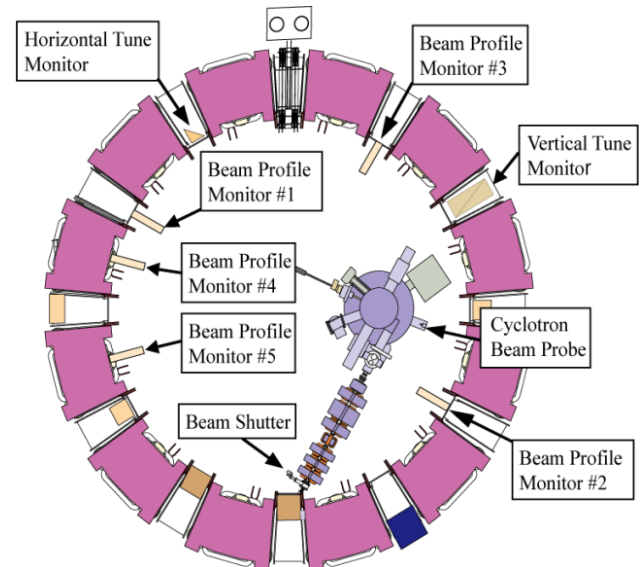


Figure 3: Schematic layout of beam monitors.

3.2 閉軌道の歪みの補正

主リングの加速器直線部には約 0.04 T の漏れ磁場があるため、高周波加速空洞のような磁性体によって構成されている機器を加速器直線部に設置した場合、閉軌道の歪みが発生する。閉軌道の歪みを補正するために、高周波加速空洞の側面に 2 台の偏向電磁石(以下、補正電磁石と記す)を設置した。

Figure 4 に高周波加速空洞の設置前後のビームプロファイルの測定結果を示す。Figure 4 に示す通り、高周波加速空洞が設置されていない場合、閉軌道(ベータトロン振動の中心)の位置はビームプロファイルモニター#1~#3 が設置されている加速器直線部において 4400 mm、ビームプロファイルモニター#4, #5 が設置されている電磁石の中央では 4600mm であった。一方、高周波加速空洞が設置された場合、Figure 4 に示す通り、補正電磁石を励磁した状態で約 10mm ビーム軌道が変化していることが分かった。補正電磁石の偏向量が不足しているため、閉軌道の歪みを完全に補正できておらず、今後、補正電磁石を改良し、偏向量を増加させる必要がある。また、各周回数 of ピークの位置関係が異なっている原因は、入射静電セプタムの位置における閉軌道の位置と角度が変化した結果、ビームの入射位置と角度が相対的に変化したからであると考えられる。

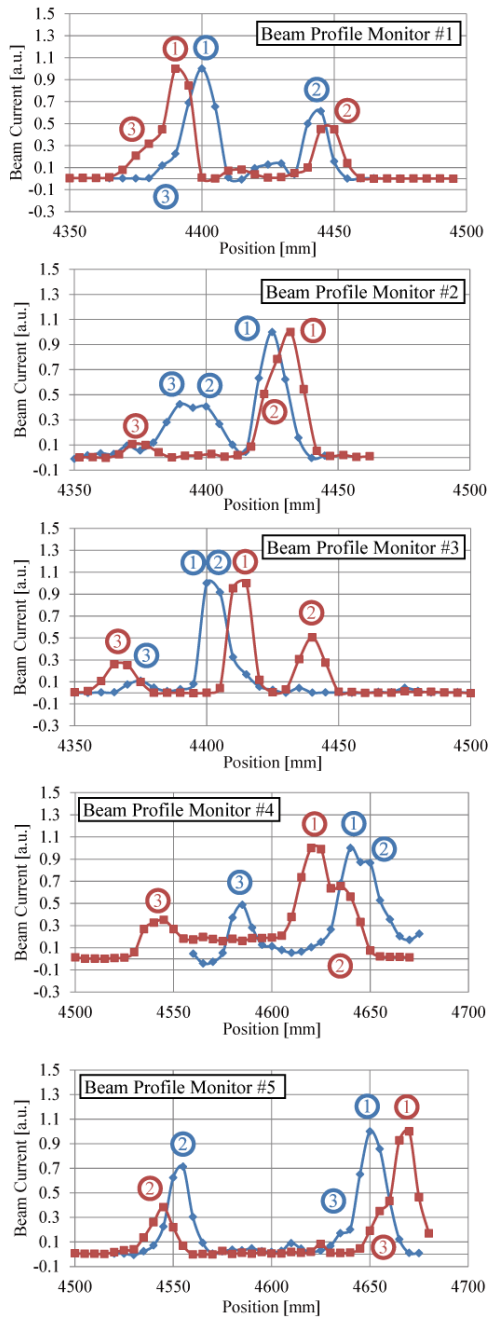


Figure 4: Measured beam profiles. Red lines are beam profiles without RF cavity, blue lines are beam profiles with RF cavity.

3.2 ベータトロンチューン測定

動作点を決定するために、水平・垂直ベータトロンチューンの測定を行った。FFAG 加速器は集束電磁石と発散電磁石の磁場の平坦度の比率(F/D 比)を変化させ、垂直チューンを変化させることができ、動作点を比較的広い範囲で選択することができる。測定では F/D 比を変化させ、ベータトロンチューンの測定を行った。Figure 5 に測定結果を示した。今後、加速中のビーム損失量を測定する実験を行い、動作点を決定する予定である。

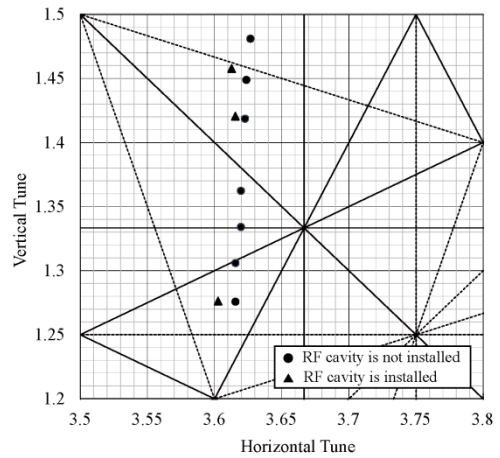


Figure 5 : Measured tunes plotted on tune diagram.

3.3 ビーム加速実験

平成 25 年 7 月にビームの加速に成功した。Figure 6 はビーム加速中の静電ピックアップモニターの信号である。Figure 6 に示す通り、ビームがシンクロトロン振動をしながら加速されていることがわかる。現在、入射エネルギーから段階的にエネルギーを増加させながらビーム加速実験を行っている。ビーム取出しへ向けて、ビーム加速中のベータトロンチューン、位置、ビーム電流の測定を行うためのビームモニターの準備を行っている。

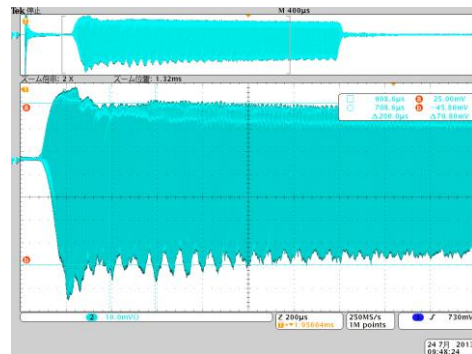


Figure 6: Output signal of monitor during acceleration.

4. まとめ

九州大学加速器・ビーム応用科学センターでは、FFAG 加速器を主加速器とした加速器施設の整備が進められている。平成 23 年 12 月から主リングのビームコミッションが開始され、平成 25 年 7 月にビームの加速に成功した。現在、ビーム取出しへ向けて、電源やビームモニターの準備を行っている。

参考文献

- [1] Y. Yonemura et al., Proc. of EPAC08, pp.3521-3523, 2008
- [2] Y. Inaoka et al., in these proceedings