

# Beam commissioning of FFAG accelerator at Kyushu University

Yujiro Yonemura <sup>#A)</sup>, Hidehiko Arima <sup>A)</sup>, Nobuo Ikeda <sup>A)</sup>, Yusuke Uozumi <sup>A)</sup>, Kenji Ishibashi <sup>A)</sup>, Tetsuo Noro <sup>A)</sup>,  
 Tadashi Korenaga <sup>A)</sup>, Shogo Kuratomi <sup>A)</sup>, Mutsuhito Yonekura <sup>A)</sup>, Yushi Inaoka <sup>A)</sup>, Daijiro Morokuma <sup>A)</sup>,  
 Takashi Miyaoki <sup>A)</sup>, Akira Takagi <sup>B)</sup>, Hisayoshi Nakayama <sup>B)</sup>, Yoshiharu Mori <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University  
 2-1010, Asashiro-Nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494

## 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 commissioning of injection was successfully performed in February 2012. In this paper, details of the beam commissioning of the FFAG accelerator are presented.

## 九州大学 FFAG 加速器のビームコミッショニング

### 1. 緒言

九州大学では、伊都キャンパスへの移転を機に、加速器・ビーム応用科学センターを発足させた<sup>[1]</sup>。本センターでは、ビームを利用した教育および原子核科学、医療、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、固定磁場強集束 (FFAG) 加速器を主加速器とした加速器施設の整備を進めている。主リングのビームコミッショニングは平成 23 年 12 月から開始され、平成 24 年 2 月に主リング内を周回するビームが観測された。現在、入射ビーム調整と並行して、ビーム加速へ向けて高周波加速システムの運転調整が行われている。

### 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。表 1 と表 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図 1 に示す。

表 1 : 入射器サイクロトロンの基本パラメータ

タイプ	AVF サイクロトロン
ビームエネルギー	10 MeV
RF 周波数	47 MHz (第 2 高調波加速)
イオン源	PIG 型負イオン源 (LaB <sub>6</sub> )
ビーム取出し半径	0.3 m / 静電デフレクター
取出し平均電流	2 μA (100Hz 運転時)

表 2: 150 MeV FFAG 加速器の基本パラメータ

タイプ	Radial セクター型 (DFD triplet)
セル数	12
ビームエネルギー	10~125 MeV (陽子)
周回周波数	1.5~4.2 MHz
平均軌道半径	4.47~5.20 m
運転周波数	100 Hz
取出し平均電流	1.5 nA

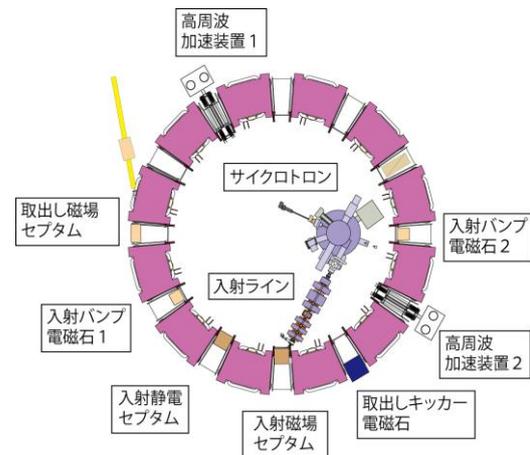


図 1 : 150 MeV FFAG 加速器の機器配置図

図 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

<sup>#</sup> ynmr@nucl.kyushu-u.ac.jp

セプタムによって  $60^\circ$  内側へ偏向された後、入射静電セプタムで  $1.5^\circ$  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<sup>[2]</sup>。その後、2 台の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。

### 3. ビームコミッショニング

#### 3.1 タイミングシステム

ビームコミッショニングを開始する前にタイミングシステムを構築した。図 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。図 2 に示す通り、サイクロトロンの高周波増幅器は出力電圧が安定するまでに約  $80 \mu\text{s}$  必要であるので、最初にトリガー信号が与えられる。

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が可能である。サイクロトロンの高周波加速電圧とイオン源のアーカ電流が出力される時間幅はそれぞれ  $400 \mu\text{s}$  と  $50 \mu\text{s}$  である。

イオン源のアーカ電流に同期して、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。

図 3 に 150 MeV FFAG 加速器のタイミングシステムの概略図を示した。図 3 に示す通り、タイミングシステムはディレイモジュール等を用いずに、安価な任意波形発生器のみで構成されている。ビームタイミングシステムの出力信号のジッターは  $4 \text{ ns}$  以下であった。

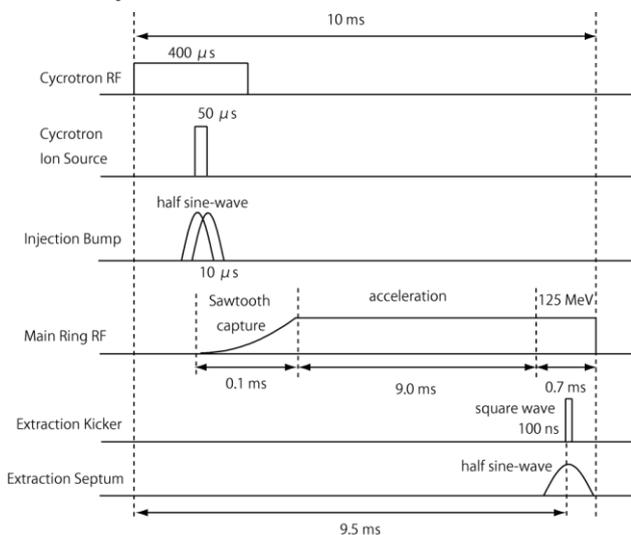


図 2 : 150 MeV FFAG 加速器のタイミングチャート

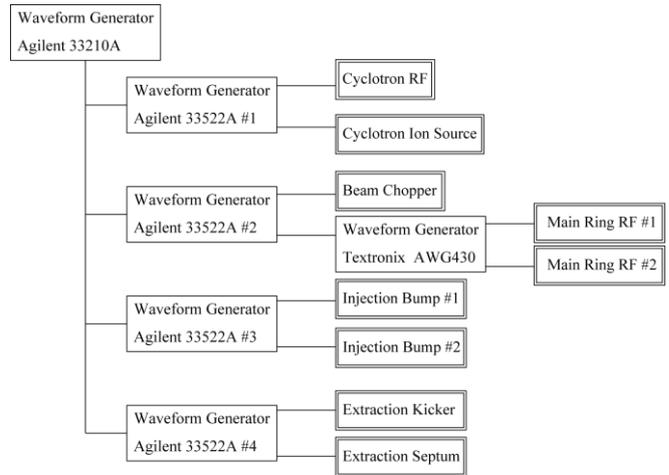


図 3 : 150 MeV FFAG 加速器のタイミングシステム

#### 3.2 ビームモニター

ビームコミッショニングで使用したビームモニターの配置を図 4 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する。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 3 台の破壊型ビーム電流モニターが設置されている。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  $10 \text{ mm}$  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  $0.2 \text{ mm}$  である。

主リングのベータatron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atronの振動方向に対して非対称にすることで、ベータatron振動は電極に誘起される電圧の変動として観測される。チューンモニターは電極に誘起される信号が大きいため、ビームバンチを観測の際にも利用できる。

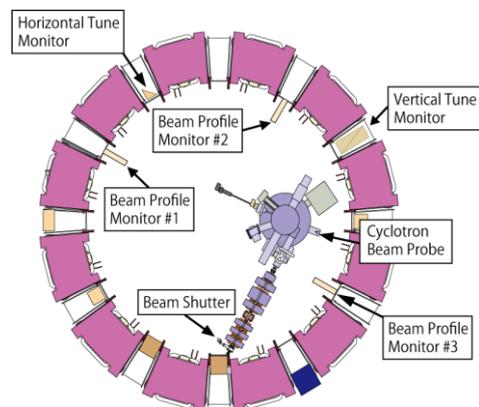


図 4 : ビームモニターの配置

### 3.2 入射ビーム調整

150 MeV FFAG 加速器へのビーム入射は平成 23 年 11 月から開始された。最初に、ビーム損失による機器の放射化を低減するために、運転の繰り返し周波数を 100 Hz から 20 Hz に変更すると同時に、サイクロトロンイオン源電源と RF 電源をパルス的に運転するための改造を行った。

サイクロトロンの運転調整後、平成 23 年 12 月から FFAG 加速器にビームを多重入射するための実験が開始された。入射ビーム輸送ラインの四極電磁石と偏向電磁石は、輸送ライン終端に設置したビームシャッターの平均電流が最大になるように調整した。

次に FFAG 加速器内に設置した 3 台のビームプロファイルモニターを用いて、入射後 3 ターンのビームの水平方向のプロファイル測定し、閉軌道の位置の確認と入射条件の調整を行った。図 5 にビームプロファイルモニターの観測結果の一例を示す。閉軌道的设计値は 4400mm であり、観測されたビームの振動中心と一致していることが分かった。

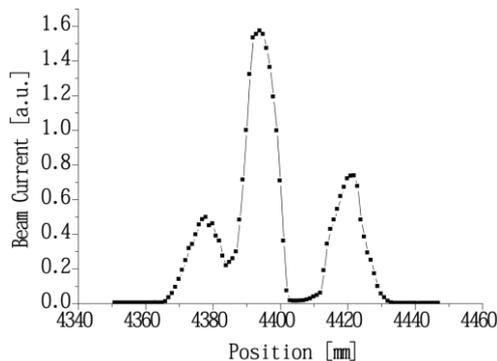


図 5：ビームプロファイルの測定結果

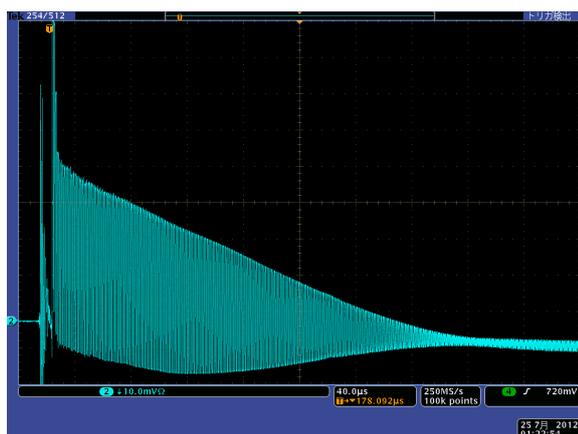


図 6：垂直チューンモニターの出力信号

サイクロトンから入射されるビームの時間幅を入射ビーム輸送ラインに設置したビームチョッパーを用いて主リングの周回周期以下に制限し、静電ピックアップモニターを用いてビームバンチを観測した。平成 24 年 2 月に入射バンプ電磁石を励磁して、主リングへビームを入射した結果、リング内を周回するビームが観測された。図 6 に観測されたバ

ンチ波形を示す。RF 電圧が印加されていないため、図 6 に示す通り、主リングへ入射されたビームがデバンチし、波高が減衰している。波高の減衰時間より入射ビームの運動量拡がり  $\Delta p/p$  は  $\pm 0.2\%$  程度であると見積もられた。

図 7 にチューンモニターの信号に対して周波数解析を行った結果を示す。得られた水平チューンおよび垂直チューンはそれぞれ 3.607 と 1.331 であり設計値と良い一致を示していた。

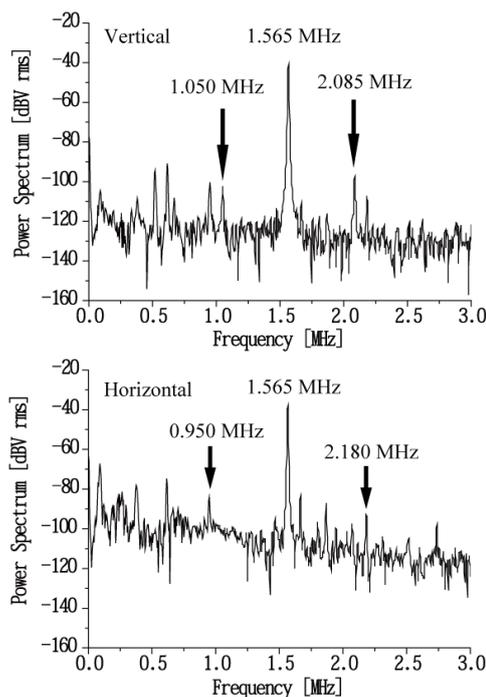


図 7：チューンの測定結果

## 4. 結言

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ニングが開始され、平成 24 年 2 月に入射エネルギーにおいてビームの周回を確認した。ビームコミッショニングの結果、閉軌道の位置とベータatronチューンは設計値と良い一致を得た。現在、ビーム加速に向けて、ビーム入射機器の調整と並行して、ビームモニターと高周波加速空洞の運転試験が行われている。

- [1] Y. Yonemura et al., Proc. of EPAC08, pp3521-3523
- [2] S. Kuratomi et al., in these proceedings