

# 京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器施設現状報告

## STATUS REPORT OF FFAG ACCELERATOR COMPLEX AT KURRI

石 禎浩 <sup>\*A)</sup>, 上杉 智教 <sup>A)</sup>, 栗山 靖敏 <sup>A)</sup>, 阪本 雅昭 <sup>A)</sup>,  
阿部 侑馬 <sup>B)</sup>, 石井 究 <sup>B)</sup>, 正木 良 <sup>B)</sup>, 武藤 正文 <sup>A)</sup>, 森 義治 <sup>A)</sup>  
Yoshihiro Ishi<sup>\*A)</sup>, Tomonori Uesugi<sup>A)</sup>, Yasutoshi Kuriyama<sup>A)</sup>, Masaaki Sakamoto<sup>A)</sup>,  
Yuma Abe<sup>B)</sup>, Kiwamu Ishii<sup>B)</sup>, Ryo Masaki<sup>B)</sup>, Masayuki Muto<sup>A)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Kyoto University Research Reactor Institute, Kumatori, Osaka, Japan

<sup>B)</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan

### Abstract

At Kyoto University Research Reactor Institute, using the 150 ( 100 ) MeV proton beams from FFAG accelerator, experiments in various fields have been carried out: reactor physics, material science and biological science, which investigates the effects of multiple and hybrid irradiation of protons and neutrons to normal cells in BNCT, irradiating protons to living rats. In this report, current status of beam utilization by these experiments are presented as well as the beam study results and beam upgrade plans aiming a beam current of micro amperes in future.

## 1. はじめに

京都大学原子炉実験所における FFAG 加速器の研究開発は、文部科学省のエネルギー対策特別会計委託事業の課題「FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」として 2002 年度より開始された。加速器複合系は当初、イオンペータ (FFAG ベータトロン)・ブースター (FFAG シンクロトロン)・主リング (FFAG シンクロトロン) の 3 つのリングから構成されていた<sup>[1]</sup>。2009 - 2010 年の期間は、このシステムを用いて京都大学臨界集合体 (以下 KUCA) へビームを供給し、世界初の加速器駆動未臨界システム実験 (以下 ADS 実験) を実施した<sup>[2]</sup>。その後ビーム強度増強の目的で、入射器システムをイオンペータ+ブースターから 11 MeV H<sup>-</sup> リナックへ変更し<sup>[3]</sup>、150 MeV - 10nA のビームを生成することに成功した。本稿では本施設のビーム利用状況及び問題点、ならびに今後のビーム増強計画について報告する。

## 2. FFAG 加速器複合系概要

KURRI FFAG 加速器複合系およびビーム利用系の構成を図 1 に、主要パラメータを表 1 に示す。主リングへのビーム入射には、カーボンフォイルを用いた H<sup>-</sup> 荷電変換法が採用されている。加速とともに軌道がシフトすることを利用してビームをフォイルから逃すため、パルス電磁石 (電極) が不要な極めてシンプルな入射システムが可能となっている。

制御系計算機システムは主リング系と入射器系から構成される。主リング系では、Linux ベースの PC 上で EPICS を用いた制御ソフトウェアが用いられている (図 2)。一方、入射器系 (イオン源・リナック) では、Windows ベースの PC 上で LabView とリナック製造メーカー (Accyss) 提供の専用制御ソフトウェアが共存した形となっている。信頼性・継続性の観点から、今後できる限り、Linux + EPICS のシステムに置き換えていく方

\* ishi@rri.kyoto-u.ac.jp

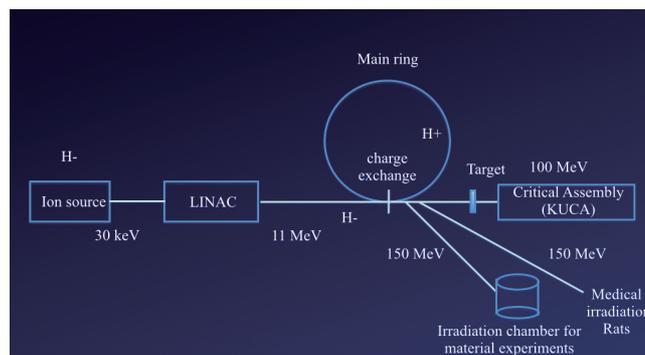


Figure 1: The schematic diagram of KURRI FFAG accelerator complex and its beam facilities.

Table 1: KURRI-FFAG Main Parameters

取出しエネルギー	100 - 150 MeV
入射エネルギー	11 MeV
ビーム電流	10 nA
運転繰り返し	20 - 30 Hz
パルス幅	< 100 ns
リング周長	34 m
k 値	7.8
動作点	$(\nu_x, \nu_y) = (3.85, 1.2)$
対称性	12
基本セル	DFD ラディアル

針である。

## 3. ビーム利用

図 3 に過去 3 年間の KURRI-FFAG のマシンタイムの内訳を示す。KURRI-FFAG の主なユーザー実験はこれまでの、ADS 実験・エアロゾル照射実験・材料照射実験に加え、2014 年度から新たにラットへの照射が実施された。この実験では、KURRI で研究開発中の中性子

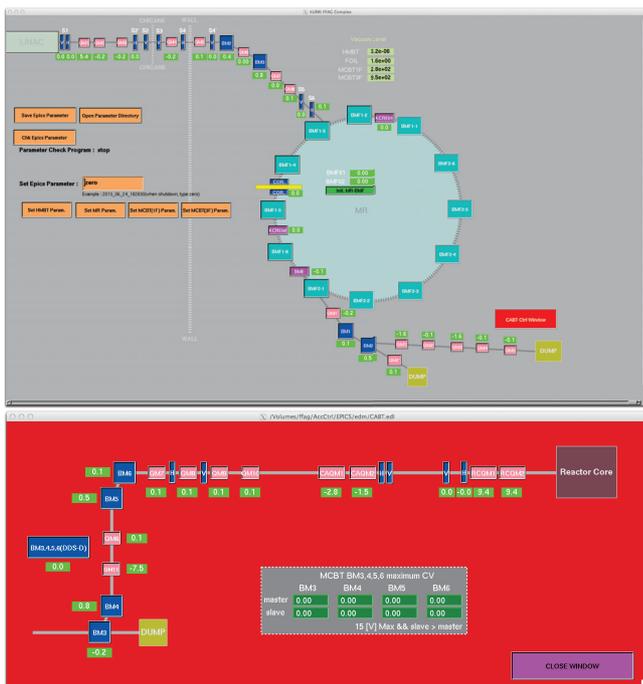


Figure 2: Screen shots of the control system using EPICS based software on Linux PCs.

捕捉療法 (BNCT) に関わる基礎研究として、正常組織への放射線の影響を調査するため、生体ラットの正常細胞への 150 MeV の陽子ビーム照射を行う。この実験に先立ち、Bragg ピークの測定・SOBP の形成確認等の予備実験が行われ、2015 年 2 月にラットへの照射が開始された (図 4)。なお、原子炉の新規制基準への対応のため、KUAC での ADS 実験は 2014 年度は実施されず、次年度以降へ見送られることとなった。

### Summary of Machine Time

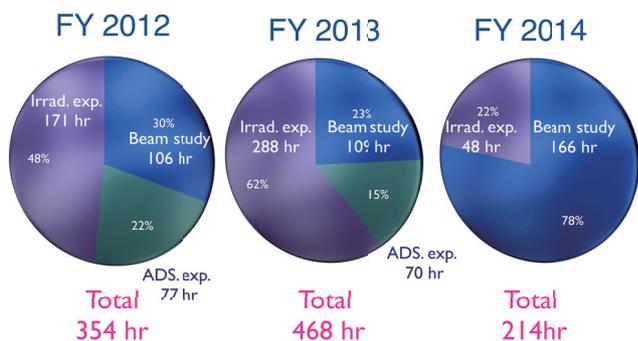


Figure 3: The machine time breakdown of KURRI-FFAG facility in recent 3 years.

## 4. ビーム安定性

ビームユーザーからの共通する要求として、照射中のビーム強度の安定性があげられる。図 5 は ADS 実験

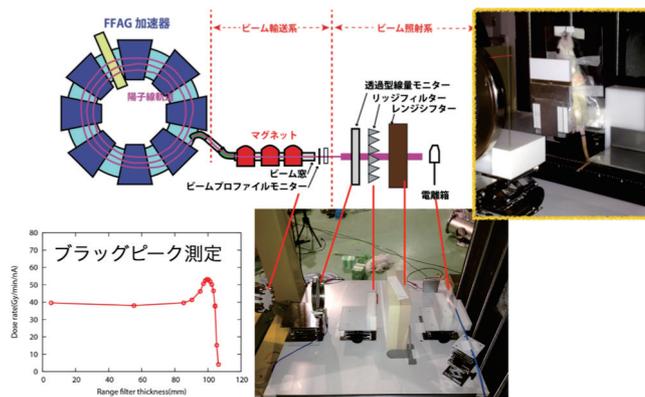


Figure 4: The irradiation to living rats for basic studies of BNCT. The picture placed upper right is the rat supposed to be irradiated.

中における、中性子発生ターゲットでのビーム電流測定値の一例である。リナックからの入射ビームのパルス幅を変更することで、ユーザーへの供給電流を調整可能である。入射ビームのパルス幅はイオン源とリナックの間に設置された DC チョッパーのゲート幅で決定される。図 5 の実験におけるビーム安定度は 9% 程度である。現状でユーザーからは「利用可能レベル」と評価されているが、今後は測定電流値を用いたゲート幅のフィードバック制御で、より安定したビーム供給の可能性を検討中である。

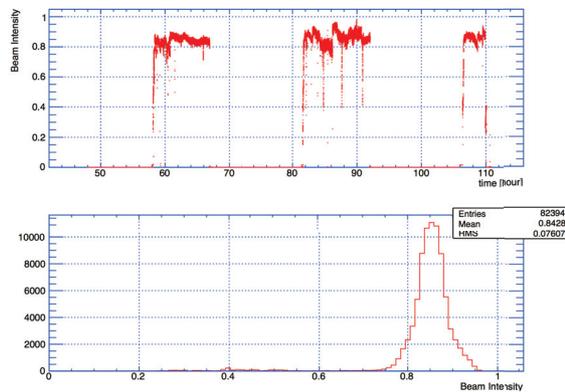


Figure 5: The stability of the beam current. The upper plot shows the beam current as a function of time. The lower one is the histogram of the beam current. The stability of the beam current is ~ 9%.

## 5. ビームトリップ

測定結果にビームトリップが深刻な影響を及ぼすユーザー実験がある。例えば ADS 実験では、通常 1 時間程度の照射時間であるが、トリップ後の再スタートが 1 分を超えると、それまで蓄積されたデータが使用不能となるケースがある。表 2 に 2012・2013 年度に行った ADS 実験でのビームトリップの発生頻度を示す。トリップの原因はリナックと主リングの RF に関するものであった。主リングの RF がトリップすると、復旧には 15 分

Table 2: The Summary of Beam Trip Events

年度	ビーム供給時間	要因	トリップ回数	再スタート時間
2012	77	主リング RF リナック RF	10 0	約 15 分 -
2013	71	主リング RF リナック RF	3 7	約 15 分 1 分以内

程度要する。主リング RF トラブルのうち、2012 年度に発生した 10 件については、ローレベル RF と初段半導体アンプまでの伝送経路から混入するノイズが原因であったことが判明した。また、2013 年度に発生した 3 件は終段アンプの冷却水流量低下が原因であった。このため、ローレベル系の半導体アンプ直近への移設、ならびに冷却水配管の増設工事を実施した。一方リナック RF トリップは、真空管の経年劣化によるもので、実験期間終了後に交換作業を行った。これらの是正措置後、2014 年度以降のビーム供給時にはビームトリップは発生していない。

## 6. ビーム増強

2011 年に行った H<sup>-</sup> 入射方式への変更を始め、数々のアップグレードにより ADS 実験開始当初に比べ 100 倍以上のビーム増強を行ってきたが、今後、幅広い分野のユーザーの要求に対応するため、マイクロアンペアクラスのビーム増強を計画している。そのため、主リングにおけるビームロスの低減が必須である。図 6 はバンチモニターの波形をバンチごとに積分し、周回ごとのビーム電荷を加速時間の関数として表したものである。この図からビーム加速過程の数箇所ですべて顕著なビームロスが観測される。図 7 は入射から取出しまでのチューンの動きを表したものである。これらのデータから、顕著なビームロスはベータトロン共鳴を通過する際に生じているものと考えられる。特に下記の共鳴によるロスを低減させる必要がある。

$$\begin{aligned} \nu_x - 2\nu_y &= 1 \\ \nu_x + \nu_y &= 5 \\ 2\nu_x + 2\nu_y &= 10 \\ 3\nu_x &= 11 \end{aligned}$$

ビームロスを低減させる方策として、動作点の最適化・補正磁極による局所的なチューン補正・ドライビングタームの抑制・加速スピードの増加等が検討されている。現在、2 台目の加速空洞の組み込み作業を準備中である。加速電圧上昇による加速スピードのアップに加え、対称な位置に空洞を 2 台配置することにより、1 台の加速空洞に起因する COD が作る奇数次ハーモニクスの抑制が期待される。

## 7. まとめ

KURRI-FFAG 加速器のビームは、原子炉工学・材料工学・放射科学・生命科学等の幅広い分野のユーザーに利用されている。今後はパルス中性子源としての利用もターゲットとし、マイクロアンペア級のビーム供給を目指したアップグレードを計画している。

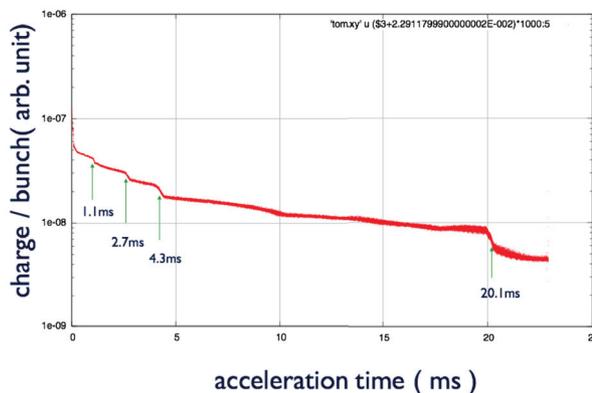


Figure 6: Beam losses during acceleration.

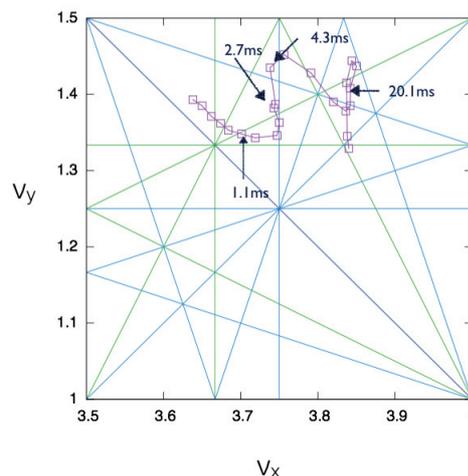


Figure 7: Foot prints of the tune.

## 参考文献

- [1] T. Uesugi, et al. "FFAGS FOR THE ERIT AND ADS PROJECTS AT KURRI", Proceedings of EPAC08, Geneva, 2008.
- [2] C.H. Pyeon et al., "First Injection of Spallation Neutrons Generated by High-Energy Protons into the Kyoto University Critical Assembly", J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 46 (2009), No. 12 p.1091-1093.
- [3] K. Okabe, et al. "DEVELOPMENT OF H- INJECTION OF PROTON-FFAG AT KURRI", Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010.