

# 京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器の現状と将来 CURRENT STATUS AND FUTURE PLANS OF FFAG ACCELERATOR IN KURRI

栗山靖敏\*, 森義治、石禎浩、上杉智教、阪本雅昭

Yasutoshi Kuriyama\*, Yoshiharu Mori, Yoshihiro Ishi, Tomonori Uesugi, Masaaki Sakamoto  
Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)

## Abstract

In Kyoto University Research Reactor Institute, a fixed-field alternating gradient (FFAG) proton accelerator complex, which consists of three FFAG rings, had been constructed to make an experimental study of accelerator driven sub-critical reactor system (ADS) with spallation neutrons produced by the accelerator. The world first ADS experiment was carried out in March of 2009. In order to increase the beam intensity of the proton FFAG accelerator, a new injection scheme with  $H^-$  linac had been constructed in 2011 and 100MeV - 10nA proton beam with 20Hz repetition was achieved in March 2012. The beam of KURRI-FFAGs has been used not only for the experiment but also for the irradiation experiment and aiming to get more stability and intensity of the beam, several developments are ongoing. In this presentation, present operation status of the KURRI-FFAGs and future plans for the upgrade have been reported.

## 1. はじめに

京都大学原子炉実験所(以後、KURRI と略)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による委託業務である、「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。

FFAG 加速器 3 台から構成される FFAG 加速器複合系(以後、KURRI-FFAGs と略)が建設され、2009 年 3 月には KURRI-FFAGs により生成された 100MeV 陽子ビームと未臨界核燃料体系を組み合わせた加速器駆動未臨界炉(ADS)の実験が実施された<sup>[1]</sup>。

KURRI-FFAGs は当初 3 つの FFAG リングから構成されていたが<sup>[2]</sup>、電流増強を目的として、2011 年には 11MeV リナックからの負水素イオンビームを 150MeV-FFAG 加速器(以後、主リングと略)に入射する方式に変更を行い<sup>[3]</sup>、2012 年 3 月に 20Hz の繰り返し周期で 100MeV - 10nA のビームを生成することに成功した。この際には入射方式として、負水素イオン荷電変換入射を採用している。

2014 年現在、ADS 実験だけではなく様々なユーザーにビームを提供する一方で、さらなるビーム利用の拡大に向けて、ビーム安定度の向上並びにビーム増強を目指して開発が進められている。

本発表では現在の運転状況、ビーム増強に関する計画等について報告する。

## 2. KURRI-FFAG 加速器複合系

現在、KURRI-FFAGs は、4 台のリング型加速器と 1 台の線形加速器から構成されている。図 1 に KURRI-FFAGs の写真を載せる。また、表 1 にそれぞれの加速器について、放射線防護規定上認可を受けている諸元を記す。

現在は主に  $H^-$  線形加速器を主リングの入射器として利用した運転形態で ADS 実験をはじめ、様々な研究用途にビームが利用されている。ユーザーの要求に応じて、主リングからのビーム利用では 100MeV または



Figure 1: The FFAG accelerator complex in KURRI.

150MeV を選択しビームの取り出し行っている。3. 節にて、ビームを利用した研究事例について紹介を行う。

### 2.1 加速器複合系の運転モード

KURRI-FFAGs では、次の 3 つのモードを設定し、放射線発生装置としての認可を受けている。

#### 1. ERIT モード

ERIT と呼ばれる FFAG 加速器型陽子蓄積リングの運転を行うためのモードで、入射器には  $H^-$  線形加速器が使用される。本蓄積リングは内部に中性子発生のための標的を持ち、中性子発生源として利用される。

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

Table 1: The specifications of the Accelerators That Make Up KURRI-FFAG Complex  
( These values in this table are authorized by the law of the radiation safety protection. )

Name	Type	Number of	Particle	Energy [MeV]	Ave. Current [nA]	Purpose
Ionbeta (Proton injector)	Betatron	1	H <sup>+</sup>	2.5	20	Injector for the booster Irradiation experiment
Booster ring	Synchrotron	1	H <sup>+</sup>	10	1.5	Irradiation experiment
Main ring	Synchrotron	1	H <sup>+</sup>	150 (100)	3	Irradiation experiment ADS experiment
H <sup>-</sup> Linac	Linac	1	H <sup>-</sup>	11	10	Injector for the main ring Irradiation experiment
Storage ring	Synchrotron	1	H <sup>+</sup>	11	10	Proton storage ring (Neutron source)

## 2. 主リングモード

100MeV または 150MeV に加速されたビームを利用した照射実験などで使用されるモードで、入射器には H<sup>-</sup> 線形加速器が使用される。また、イオンベータ並びにブースターリングを運転する際にもこのモードが使用される。

## 3. CA モード

主リングから取り出された 100MeV の陽子ビームを原子炉炉心まで輸送し、固定標的で中性子を発生させ、ADS 実験を行うために使用される。

# 3. 運転状況

## 3.1 運転時間

KURRI-FFAGs では加速器の性能向上を目的とした開発研究が継続して実施中であるが、随時ユーザーへのビーム供給も行っている。2013 年度では、総運転時間 468 時間の内、ユーザーへのビーム供給が 358 時間、ビームスタディのために 110 時間を使用している。2013 年度の運転時間の内訳について、表 2 に示す。

## 3.2 ビーム利用事例

KURRI-FFAGs では共同利用の形態はとらず、主に学内のユーザーならびにその共同研究者の方にビームを提供している。以下に KURRI-FFAGs でのビーム利用について紹介する。

### 1. ADS 実験

2009 年 3 月の世界初となる ADS 実験を皮切りに、毎年加速器と未臨界炉を組み合わせた実験が行われている。2014 年 7 月現在においても、このような研究を遂行できる施設は他になく、本研究が ADS 研究の要となっている。

### 2. 材料への照射実験

材料の放射線による損傷についての研究を行うために、線形加速器を利用した 11MeV ビームでの照射実験並びに、主リングを利用した 150MeV ビームでの照射実験が行われている<sup>[4] [5] [6]</sup>。図 2 に、照射実験で使用されている取り出しビームライン

並びに照射用チェンバーの写真を載せる。主リン

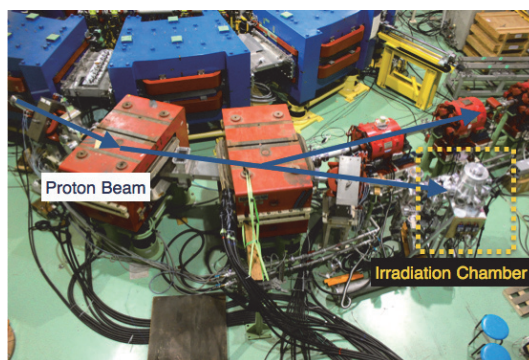


Figure 2: Beam line for the irradiation experiment for the material.

グ下流に設置されている 2 本の取り出しビームラインについては、2 台目の偏向電磁石の励磁を調整することで、ビームの輸送先を選択している。

### 3. 小動物への照射実験

2014 年度より新たな試みとして、小動物（生体）への照射を行うことを計画している。本照射では、ビーム形状の最適化の為、図 2 のこれまで使用されてきた照射ラインではなく、ビームダンプ手前に新たに照射場を構築することを予定している。そのための照射場の評価を目的とし、2014 年 7 月上旬にテスト照射を行った。その際に使用した装置の構成を図 3 に載せる。

## 4. ビーム増強への取り組み

2009 年の ADS 実験開始当初、主リングからの取り出しビームは 100MeV - 50pA であったが、入射器を切り替える等の開発を通して、2012 年 3 月に 20Hz の繰り返し周期で 100MeV - 10nA を実現している。また、2012 年には取り出しエネルギーを 100MeV から 150MeV に向上させることに成功している。現在、目標を繰り返し周期 100Hz、150MeV - 1μA とし、開発研究を鋭意進め



Table 2: KURRI-FFAGs Machine Time in the Fiscal Year of 2013

	'13 / Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	'14 / Jan.	Feb.	Mar.
Irradiation Exp. [hr]	153	9	13	15	31	3	7	0	41	14	3	0
ADS Exp. [hr]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	51	0
Beam Study [hr]	0	0	3	11	8	2	19	19	4	16	0	26

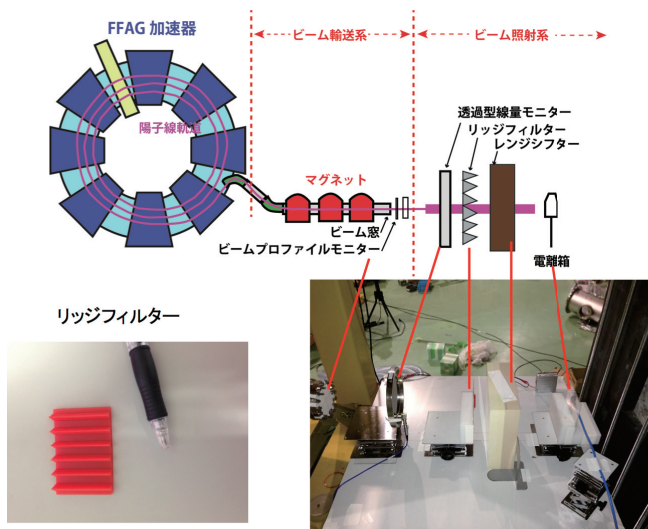


Figure 3: Irradiation experiment. The aim of this experiment is to construct the irradiation area for a living body.

ている。本節では、現在重点的に取り組んでいる項目について紹介する。

#### 4.1 主リング入射効率の改善

主リングへの入射では、入射される  $H^-$  ビームにたいして、薄膜を利用した荷電変換入射方式を採用している。現在、入射ビームと主リングとの間でミスマッチがあることが観測されているため、入射ラインの最適化を目的とし、入射ビームパラメータの精密測定を実施している。

#### 4.2 主リング加速効率の改善

主リング内では加速に伴いビームロスが観測されている。図4に主リング加速中のビーム強度の変遷を示す。

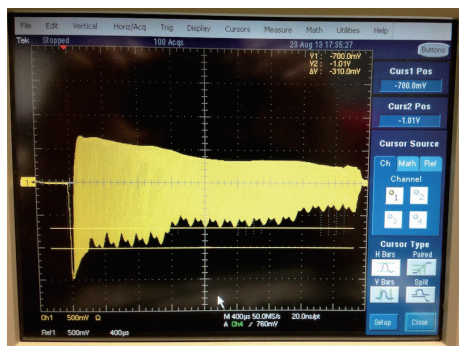


Figure 4: Beam loss during acceleration with the 150MeV-FFAG main ring.

本事象の原因を追求するためにベータトロン振動振動数の測定を実施した。図5に本測定の結果を示す。

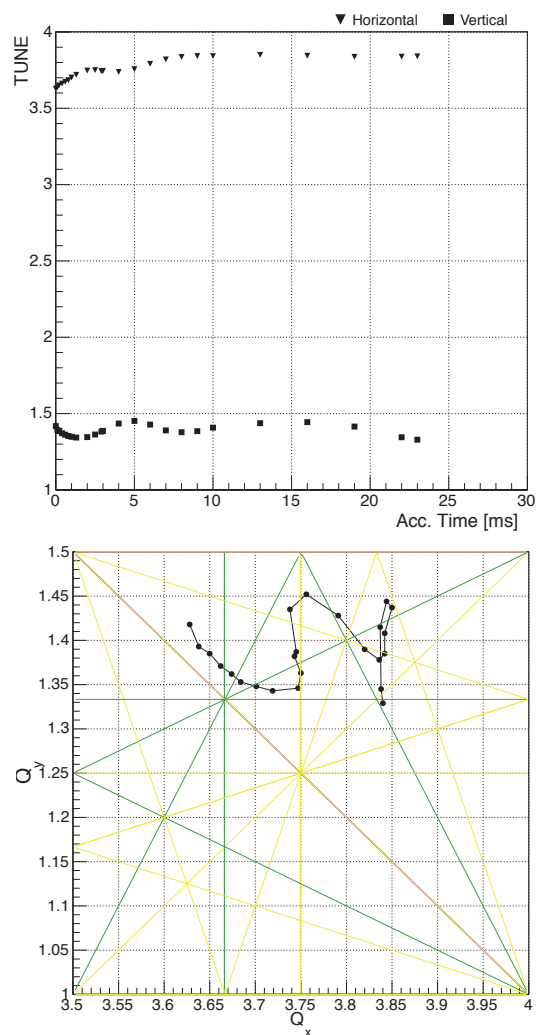


Figure 5: The measurement results of betatron tune in the 150MeV-FFAG main ring. In the upper figure, 0ms corresponds to the injection timing to the main ring and 22ms corresponds to 100MeV.

本測定の結果から、 $Q_x - 2Q_y = 1$  の共鳴線を通過する際にビームロスが発生していることが判明しており、チューンの変位量を抑制するために磁場形状を補正するなどの救済手法を検討している。

縦方向では加速効率の改善を目的として、加速電圧パターンの最適化を行っている。FFAGの磁場は  $B(r) = B_0(r/r_0)^k$  で表現される。従来、加速電圧パターンを作成する際には  $k$  値を定数として取り扱っていたが、最

適化のために半径  $r$  に依存する変数  $k(r)$  として取り扱い、加速電圧パターンを作成した。加速電圧パターンの作成に使用している  $k$  値をビームのエネルギーに対してプロットしたものを図 6 に示す。

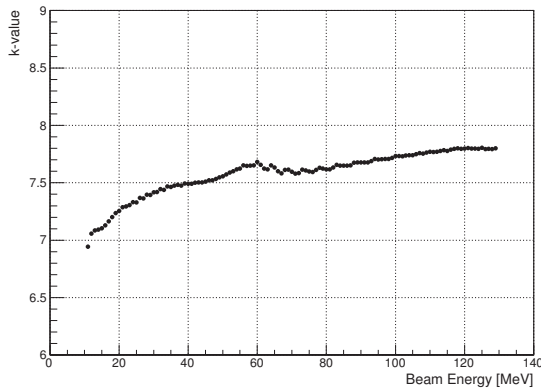


Figure 6: The field index  $k$  of the 150MeV-FFAG main ring. These values has been obtained from the tracking simulation.

また合わせて加速同期位相の最適化も実施した。これらの最適化の結果、ビーム強度が約 3 倍に向上することを確認している。

#### 4.3 加速繰り返しの向上

主リングへの加速空洞の追加を予定している。現在 1 台の加速空洞が主リングにインストールされているが、1 台を追加することを本年度に予定している。加速電圧の増強により、加速繰り返しを 100Hz 以上に向上させることを念頭に置いている。加速繰り返しの向上による平均ビーム電流の増強とベータatron振動の共鳴を横切るスピードの上昇から、1 加速サイクルにおけるビーム強度の増強を期待している。

## 5. まとめ

2009 年の 3 月からスタートした ADS 実験を皮切りに、KURRI-FFAGs からのビームを利用した研究が盛んに行われている。2013 年度では総運転時間 468 時間の内、ユーザーに 358 時間のビームを提供した。今後も主リング取り出しビーム電流  $1\mu\text{A}$  の実現に向けてさらなる加速器の性能向上を目指した開発研究を遂行していくとともに、ユーザーへの安定したビーム供給を継続させるための開発を行う計画である。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] T.Uesugi, et al., “FFAGS FOR THE ERIT AND ADS PROJECTS AT KURRI”, Proceedings of EPAC08, Genova, 2008.
- [3] K. Okabe, et al., “DEVELOPMENT OF H- INJECTION OF PROTON-FFAG AT KURRI”, Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010.

- [4] T. Yoshiie, et al., “Studies on ADS as a neutron source at the Kyoto University Research Reactor Institute”, Journal of Nuclear Materials 450 (2014) 16–19.
- [5] T. Yoshiie, et al., “Comparison between in-situ and post-irradiation cyclic deformation structures in Ni by 150 MeV proton irradiation”, Materials Transactions, Vol.55 No.03 (2014) pp.434-437
- [6] Y. Oki, et al., “Particle Size Measurement for Radiation-induced Aerosols Using a Graded Screen Array”, Proceedings of 第 15 回環境放射能研究会, Tsukuba, 2014.