

## 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 ACCELERATORS IN KURRI

石 禎浩<sup>A)</sup>, 森 義治<sup>A)</sup>, 上杉 智教<sup>A)</sup>, 栗山 靖敏<sup>A)</sup>, ラグランジ ジェイビー<sup>A)</sup>, 阪本 雅昭<sup>A)</sup>,  
 山川 恵美<sup>B)</sup>, 酒井 泉<sup>C)</sup>, 高島 麻緒<sup>C)</sup>

Yoshihiro Ishi<sup>A)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>A)</sup>, Tomonori Uesugi<sup>A)</sup>, Yasutoshi Kuriyama<sup>A)</sup>, J-b Lagrange<sup>A)</sup>,  
 Masaaki Sakamoto<sup>A)</sup>, Emi Yamakawa<sup>B)</sup>, Izumi Sakai<sup>C)</sup>, Mao Takabatake<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>Kyoto University Research Reactor Institute, <sup>B)</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>C)</sup>Fukui University

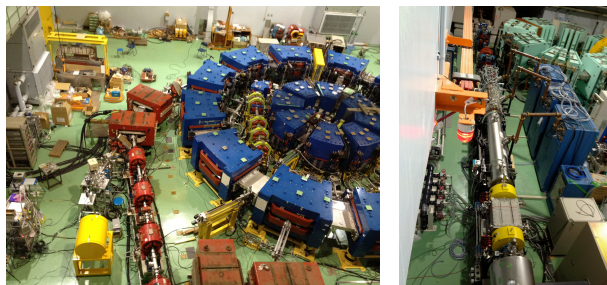
#### Abstract

In Kyoto University Resurch Reactor Institute, ADS experiments and materials irradiation experiments have been carried out using the proton beams from FFAG accelerator since March 2009. In ADS experiments, a large number of neutrons are produced when the proton beam accelerated to 100 MeV by FFAG accelerator hits the *W* target installed in Kyoto University Critical Assembly (KUCA). Using these neutrons, basic data about nuclear reactions in a subcritical fuel system have been collected. In material irradiation experiments, 150 MeV proton beams have been used for irradiation to study of behavior of ADS reactor materials. Aiming at the use as the pulse neutron source, we are carrying out the beam upgrade 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。加速器複合系は当初 3 つのリングから構成されていたが<sup>[1]</sup>、2011 年には 11 MeV リナックからの負水素イオンビームを用いた H<sup>-</sup> 荷電変換入射方式<sup>[2]</sup>の採用による電流増強やエネルギーアップを実施し、現在 150 MeV - 10nA のビームを生成することに成功した。本稿では現在の運転状況、利用者からの要求とビーム増強に関する課題等について報告する。

空気チェンバーへの陽子ビームの照射実験 (Exp.3) である。2012 年 5 月から 2013 年度 4 月までの運転時間内訳を Table 1 にまとめる。KUCA を用いた ADS 実験は原子炉共同利用実験の合間を縫って優先的に実施した。150 MeV の照射ラインは、主リングから KUCA へのビーム輸送系から分岐させて設け、ビームラインには収束のための四極電磁石と終端に照射チェンバーを有する (Figure 2 参照)。夏期は節電のため、できる限りユーザー実験をさげ、機器およびインフラ設備の整備およびビーム増強のためのアップグレードを行い、エネルギーおよび電流増強のための短時間のビームスタディーを適宜行った。



(a) KURRI FFAG ring (b) Injector H<sup>-</sup> Linac

Figure 1: KURRI FFAG

#### 2. 運転状況

KURRI-FFAG 加速器は共同利用の形態をとらず、学内ユーザーおよびその共同研究者の実験にビームを提供している。主な実験は KUCA における ADS に関する炉物理のための基礎実験 (Exp.1) および ADS 未臨界炉用材料挙動解明のための陽子ビーム照射実験 (Exp.2) ならびに加速器運転時の照射室内空气中に生成される放射性・非放射性のエアロゾルを含む化学種定量のための



Figure 2: The irradiation port connected to the 150 MeV proton beam line. It has cryogenics and a traction control machine inside which realize measurements under irradiation of the proton beam.

2012 年度内に、取出しエネルギーを従来の 100 MeV から 150 MeV に拡張した。KUCA での実験については、途中のビーム輸送系電磁石の磁場が十分でないため、従来通りの 100 MeV 運転としている。試料への照射実験に関しては、主リングのビーム取出し近くに設置された照射ポートを用いるため、150 MeV での照射実験が可能である。エネルギーの切り替えは、ビーム取出し機器

ishi@rri.kyoto-u.ac.jp

Table 1: KURRI-FFAG machine time schedule

	unit	May.-Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
Beam Study	hr	77	21	5	3	0	0	0
Exp.1	hr	0	0	28	0	49	0	0
Exp.2/3	hr	0	9	0	14	24	73	153
Extraction energy	MeV	100 / 150	150	100	150	100	150	150

(キッカー電磁石およびセプタム電磁石)を物理的に半径方向に移動することで対応している。それぞれの取出しエネルギーに応じた取出し軌道上にこれらの機器を設置し、ビームがキッカー電磁石中心を通過するタイミングでキッカー電磁石・セプタム電磁石を点火して取出しを行う。現在は取出しエネルギーを切り替えるごとに主リングの真空を破り機器を設置しなおしているが、切り替えに時間がかかる事や設置作業中の被爆の観点から、今後は真空外から設置位置変更が可能な機構をインストールする計画である。

運転開始当初は Windows ベースの PC 上で LabView により PLC を介して電磁石やモニター等を制御していたが、XP のサポートの期限切れが迫っている事や制御動作安定性確保のため、Linux ベースの PC 上で EPICS を用いた制御システムに置き換えを進めている (Figure 3)。

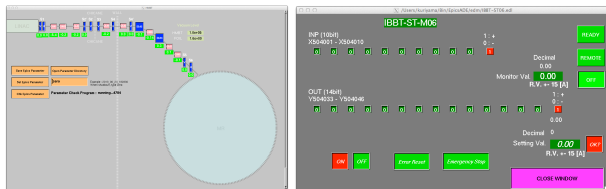


Figure 3: The control system of FFAG accelerator at KURRI has been re-nued with EPICS under collaboration with the KEK accelerator control group. Some parts of the system are using LabView on Windows XP, but they are going to be replaced by EPICS based program for more reliable and secure system.

なお、2011 年および 2012 年については 7-9 月の期間、夏期の節電要請からピーク電力の低減のため昼間の運転をさげ、午後 8 時から翌日午前 9 時までの夜間運転を実施した。

### 3. ビーム増強の経緯

2009 年からの 4 年間のビームエネルギーおよび電流値増強と実施内容を Table 2 にまとめる。ADS 実験開始当初はエネルギーは 100 MeV に到達していたが、FFAG 主リング取出し直後で 50 pA 程度のビーム量しか得られなかった。実験終了後、入射器システムからの輸送効率をアップし、さらに加速空洞の電圧を 2.5 kV から 4 kV にアップしたことにより、翌年 2010 年 3 月にはビーム電流が 100 pA に上昇した。しかしながら、効率アップを進めても入射器からのビーム強度そのものに限界が見られたため、その年の秋から暮れにかけて大掛かりな改造を行った。隣接する施設に設置されていたリナックから主リングまでビームラインを新設し、11 MeV の負水

素イオンビームを直接主リングに入射することで荷電変換入射を行い、2011 年 3 月にはビーム強度を 10 倍に上げることに成功した。さらにその年、詳細なビームスタディーでリナックからの輸送効率のアップおよび入射効率のアップを行い、2012 年 3 月にはさらに 10 倍のビーム強度増強を達成し 100 MeV - 10 nA のビームを取り出した。2012 年はエネルギーを 100 MeV から 150 MeV にアップした。電磁石は設計当初から 150 MeV に対応した物であったが、加速空洞のギャップ部分の水平アパーチャーに余裕がなく、コミッション時に内径方向に移動していた。そのため、110 MeV 付近でギャップ部分のチェンバーとビームが干渉し、それ以上エネルギーが上げられない状況であったが、空洞全体を外径に 5cm 移動することで、150 MeV までのアパーチャーを確保した。

### 4. アップグレードと課題

建設終了から現在まで、ビーム強度は徐々に増強されているが、今後主に大強度パルス中性子を用いるユーザーを想定して、最終的な目標値を 1.5 A に置いている。アップグレードの方策として以下の項目を検討中である。

- アークパルス制御高度化によるイオン源の増強
- リナックから主リングへの輸送系の最適化
- 主リング入射効率の向上
- 高周波捕獲効率の向上
- 高周波空洞追加による運転繰り返し向上 (最大 100 Hz)

上記項目のうち、2012 年度は繰り返し 100 Hz を目指して加速空洞の製作を実施した。ギャップ電圧や周波数変調幅を考慮すると、コア材にはファインメットを用いることが好ましい。コアの新規製作に掛かるコストが高いため、J-PARC で不要となった円形ファインメットコアを 2 枚使い、切断・再接合させ 150 MeV FFAG リングのアパーチャーを確保するコアを製作する事ができた (Figure 4)。このコアの周波数に対するインピーダンスを測定した結果が Figure 5 である。この結果から、現在使用中の加速空洞と同等の加速電圧 4 kV が実現可能となり、100Hz 運転が可能となると期待される。

しかしながら、中性子の TOF 実験でのパルスの頻度は 10 Hz 程度が上限で、それ以上の頻度では減速後の熱中性子のパイルアップが問題となってしまいます。FFAG 加速器では固定磁場の特色を活かし、運転の繰り返し周波数を上げる事によりビーム強度を上げる事ができるが、パルス中性子源として FFAG の利用を考えた場合、10 Hz 以下の繰り返しを要求されると、前述の FFAG のメリットが失われてしまう。そこで、取出しエネルギー

Table 2: History of beam intensity and energy upgrade in resent 4 years

	energy	Current	Method of upgrade
March 2009	100 MeV	50 pA	
March 2010	100 MeV	100 pA	improve transport efficiency
March 2011	100 MeV	1nA	increase the cavity voltage from 2.5 kV to 4 kV H injection
March 2012	100 MeV	10nA	improve the efficiencies ( trans., inj. and ext. )
November 2012	150 MeV	10nA	increase the energy ( shift the cavity outward )

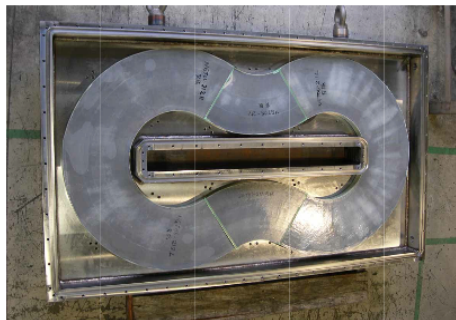


Figure 4: Another rf cavity to obtain higher accelerating voltage ( 4 kV → 2 x 4 kV ). Reuse of damaged circular core for wide aperture cavities.

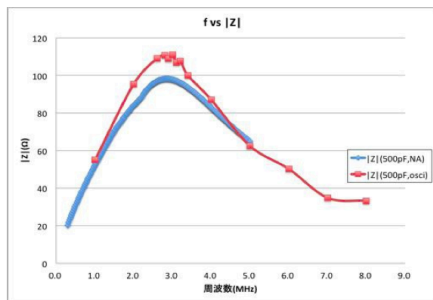


Figure 5: The result of impedance measurements using low power rf.

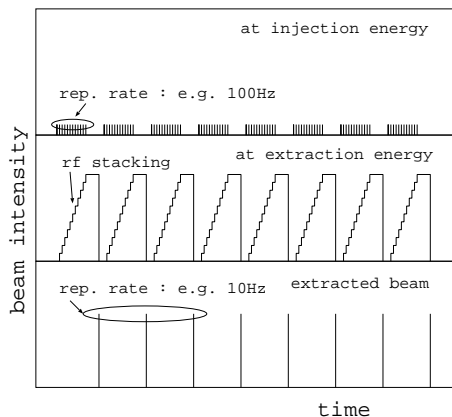


Figure 6: A schematic diagram of rf stacking at the extraction energy.

領域での RF スタッキングの手法を考える [3]。取出しエネルギーでの RF スタッキングを用いた場合、リング内の入射エネルギーでのビーム強度・取出しエネルギーでのビーム強度・および取出し後のビーム強度は Figure 6 に示す様になる。ここで、加速終了後のビームをすぐには取出さず、RF 捕獲からビームを解放し、高エネルギー領域 (FFAG では即ち軌道半径の大きな領域) で周回させておき、次のビーム入射を行う。所定のビーム強度がえられるまでこのプロセスを順次繰り返す、取出し直前に軌道を周回しているビームを RF で再捕獲してキッカー磁場立ち上がりのための空き領域を作り、キッカー電磁石を励磁することによりビームを取出す。この方法では、FFAG の利点である加速終了までの高繰り返し運転 (例えば 100 Hz) を行う事で、空間電荷効果等によるビームロスを抑制しながらビーム強度を増やし、取出しビームについてはユーザーの要求である比較的遅い繰り返し (10 Hz 程度) に対応する事ができる。入射から加速までの過程を高繰り返しで行うことにより、低エネルギー領域で支配的な空間電荷効果を抑制することが可能である。また、空間電荷効果によるチューンシフトは  $2^3$  で低下するため、スタッキングされている高エネルギー領域ではこの効果は大幅に減少するというメリットがある。

## 5. 結論

2012 年度末現在、KURRI-FFAG 加速器は年間約半分の時間をユーザー実験のためのビーム供給に用いている。ビームエネルギーおよび強度増強を行い現在エネルギー 150 MeV、電流値 10 nA のビームを取出している。今後はパルス中性子源をターゲットとしたより高度なビーム供給を目指し、RF スタッキングによる低繰り返しパルスで電流値 1 A 規模のアップグレードを実施する計画である。

## 参考文献

- [1] T. Uesugi, et al. "FFAGS FOR THE ERIT AND ADS PROJECTS AT KURRI", Proceedings of EPAC08, Geneva, 2008.
- [2] K. Okabe, et al. "DEVELOPMENT OF H- INJECTION OF PROTON-FFAG AT KURRI", Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010.
- [3] Y. Ishi, et al., "BEAM STACKING FOR HIGH INTENSITY PULSED PROTON BEAM WITH FFAG", Proceedings of HB2012, Beijing.