

# 京都大学複合原子力科学研究所 FFAG 加速器現状報告

## STATUS REPORT ON FIXED FIELD ALTERNATING GRADIENT ACCELERATORS IN KURNS

上杉智教<sup>\*A)</sup>、石禎浩<sup>A)</sup>、栗山靖敏<sup>A)</sup>、沖田英史<sup>B)</sup>、菅啓大<sup>B)</sup>、森義治<sup>A)</sup>  
Tomonori Uesugi<sup>\*A)</sup>, Yoshihiro Ishi<sup>A)</sup>, Yasutoshi Kuriyama<sup>A)</sup>, Hidefumi Okita<sup>B)</sup>, Keita Suga<sup>B)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University (KURNS),

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

### Abstract

Current status of the Fixed field Alternating gradient (FFAG) accelerators complex at KURNS is reported.

## 1. はじめに

京都大学複合原子力科学研究所(旧原子炉実験所)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。当初はそれぞれ低中高エネルギー領域を担う三機の FFAG 加速器の複合系として開発され [1]、2008 年には 100 MeV までのビーム加速に成功、翌年には京都大学臨界集合体 (KUCA) ヘビームを供給し、世界初の加速器駆動未臨界システム (ADS) 実験を実施した [2]。2011 年には新たに 11 MeV の線形加速器から FFAG 主リングへ直接ビーム入射する方式に変更し [3]、これによってビーム強度が 10 nA (20 Hz 運転時) に増強された。またこの頃ビームエネルギーが最大 150 MeV まで増強され、ADS 実験のみならず、各種の照射実験のためにビームを供給している。2015 年秋には線型加速器の重故障 [4] が発生し、その後 2 年間停止していたが、現在では同型機との交換によって再び運転を再開している [5,6]。

本稿では、KURNS における FFAG 加速器施設の概要と、現在のビーム品質、ユーザー実験を含む運転状況、今後の課題について述べる。

## 2. 施設概要

施設の概略図を Fig. 1 に示す。負水素イオンで作られたビームは三段の線型加速器によって順次 3.5 MeV、7 MeV、11 MeV まで加速され、内部標的型 FFAG 加速器 (MERIT 原理検証機 [7, 8])、または 150 MeV の FFAG 主リングに荷電変換入射される。主リングの出射エネルギーは、出射キッカー及びセプトム電磁石の位置と励磁タイミングによって 100 ~ 150 MeV の範囲で選択でき、ADS 実験を含む多様な実験ユーザーのためにビームを供給される。ただし KUCA ヘビームを輸送する場合は放射線規制により最大 100 MeV に制限されている。当初の入射

器として使用されていた二段の FFAG リングは現在休止中である。

昨年報告以降、加速器スタディ・ユーザー実験を問わず、加速器室の環境が著しく悪い(湿度が 70% を超える等)場合は運転を見合わせており、以降目立った重故障は発生していない。軽微な故障や消耗品の交換については、電磁石電源の修理・交換 (5 件)、冷却水の熱交換器修理 (2 件)、線型加速器の増幅器の真空管の交換 (2 件) 程度である。

Table 1: Main Parameters of Main Ring

Particle	proton
Energy	11 – 100 or 150 MeV
Cell	12×DFD (FFAG)
Revolution frequency	1.6 – 4.4 MHz
Repetition	20 Hz
Output beam current	10 nA (100 MeV), 1 nA (150 MeV)

## 3. 運転状況

### 3.1 ビーム利用実験

7 月末時点での運転状況を Fig. 2 にまとめた。昨年度報告以降のユーザーへのビーム提供としては、KUCA と組み合わせた ADS 実験 (48 時間) の他に、医療照射の高度化のための照射実験 (100 MeV–0.5 nA、総計 8 時間)、金属材料への照射による放射化生成物の作成 (120 MeV–0.1 nA、総計 14 時間)、さらに粒子検出器の校正を目的とした陽子ビーム照射 (11 MeV および 7 MeV、極小強度、総計 27 時間) などが実施された。

放射化生成物の作成実験では、可能な限り高いエネルギーでの照射が要求された。特に出射エネルギーが大きいときには、最終エネルギー付近で大きなビーム損失が起きる傾向にある。これは出射セプトムが閉軌道のアパーチャーを制限することに加え、セムタム磁極による磁場の擾乱がもたらす閉軌道の変動、およびチューンの変動が原因と考えられ

\* tousugi@ri.kyoto-u.ac.jp

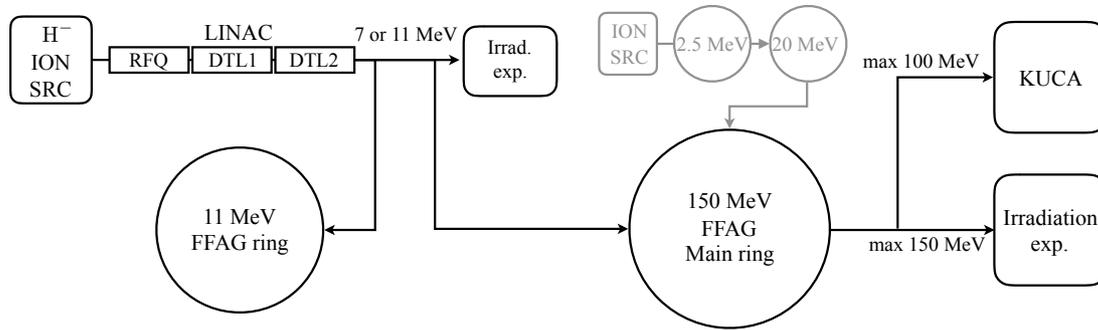


Figure 1: Layout of the KURNS FFAG complex.  $H^-$  beams are injected to 11 MeV FFAG (MERIT) ring or 150 MeV main ring. Output beams from the main ring are delivered to KUCA for ADS experiments or to irradiation chamber for other experiments such as material sciences. Original injector, composed of two FFAG rings, are disconnected.

る。磁場の擾乱に対しては追加磁極による補正が有効であるが、数多くの試行が必要であるため、時間的制約とビーム強度との兼ね合いによって現実なところで妥協された。

粒子検出器の校正実験では、1パルスあたり陽子1個、かつバックグラウンド事象を極小にとどめるという過酷な条件が要求されたが、照射場を線型加速器下流の偏向電磁石後に設けたこと、イオン源アークパルサーの電圧を低めに設定し、かつイオン源直後の収束系電磁石強度を大幅にデチューンして早い段階でビーム強度を落とすことによって実現された。Figure 3はそのときのシンチレータからの出力波形の一例である。イオン源と同期したトリガーゲート内におよそ2~3回に1回程度の頻度で、1陽子がつくるパルス出力が得られた。また、まれに2個の陽子によって引き起こされる2つのパルスが観測された。

さらに、ユーザーの要望に応じて加速器の運転繰り返しを早めた運転も行った。通常運転では商用電源に同期した60 Hzの基準信号を間引いてつくられた20 Hzのトリガーで運転しているが、100 MeVモードでは30 Hz、主リングを用いない11 MeV/7 MeVモードでは60 Hzでの運転に成功した。100 MeVモードで30 Hz運転の場合、加速高周波のデューティはおよそ80%である。

### 3.2 その他

現在FFAG主リングでは、二種類のビームロスが問題となっている。一つは入射後1 ms以内に起こる数10分の1におよぶロスで、これは荷電変換膜との複数回の衝突による emittance growth によるものと考えられている [9]。もう一つは1 ms以降の加速途中にベータトロンチューンが共鳴を横切ることによって起きる段階的なビームロスであり、こちらについては追加磁極や追加コイルで局所的なチューン変動を補正することで対処する予定である。

FFAG主リングでのビームロスを加速開始から終了まで定量的に測定するために、ビーム強度検出に特化したバンチモニタ (Fig. 4) をインストールした。

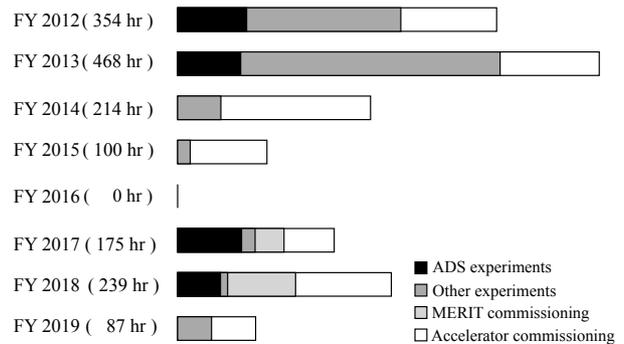


Figure 2: Machine time summary.

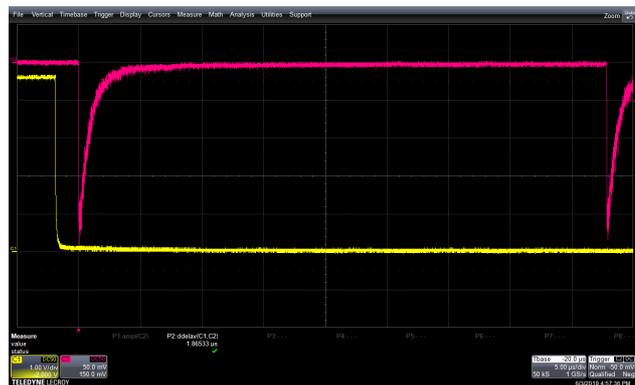


Figure 3: Output signal from scintillator across low energy beam transport line. Two single proton events are separately detected within the gate pulse of the ion source.

このモニタは、(1) ビーム周回軌道に鎖交して全体を覆っているために入力のビーム位置依存性が小さいこと、(2) 入射される負水素イオンの軌道をも覆っているために同じ係数で入射ビームと周回ビームの強

度を比較できること、が特徴である。Figure 5 に、典型的な運転状態で測定されたビーム強度を、加速開始から終了まで示した。

その他加速器のスタディとして、入射捕獲から荷電変換膜通過にかけて誘起される縦方向のコヒーレント振動をトモグラフィ解析によって測定し、これを抑制するように高周波パターンを改良してビームロスを軽減する試みが行われている [10]。

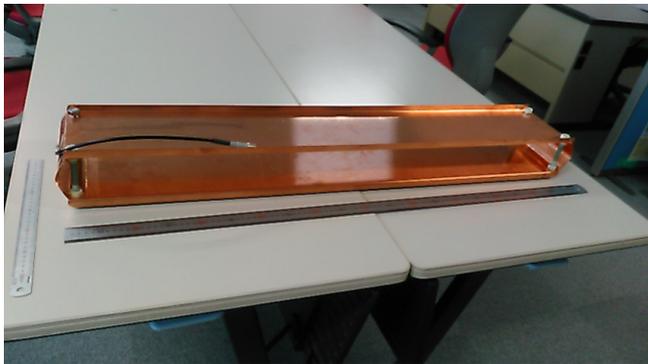


Figure 4: Full-aperture bunch monitor.

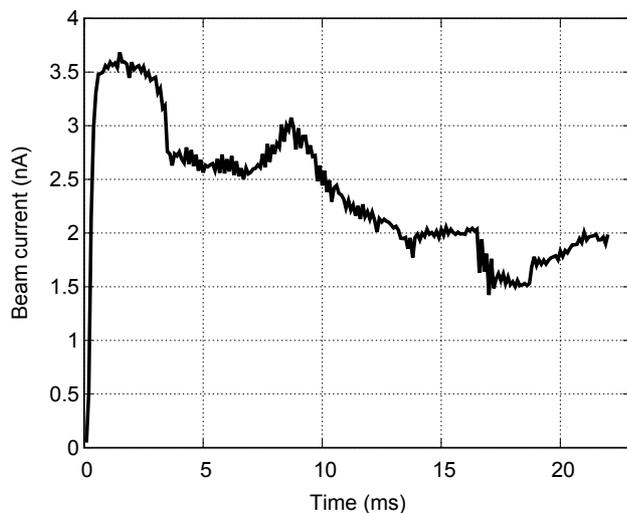


Figure 5: Circulating beam current measured by full aperture bunch monitor.

## 4. 将来計画

150 MeV-FFAG 主リングに関しては、ミューオンの大量生成を目的としたパイオン生成リング現在精力的に設計が進められている [11]。

## 参考文献

- [1] T. Uesugi *et al.*, “FFAGS FOR THE ERIT AND ADS PROJECT AT KURRI”, Proc. of EPAC08, Genova, 2008, p. 1013.
- [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 Tech, Vol. 46 (2009), No. 12, p. 1091.
- [3] K. Okabe *et al.*, “Development of H- Injection of Proton-FFAG at KURRI”, Proc. of IPAC10, Kyoto, 2010, p. 3897.
- [4] Y. Kuriyama *et al.*, “Status Report on FFAG Accelerator Complex at KURRI”, Proc. of PASJ16, Makuhari, 2016, p. 1348.
- [5] Y. Ishi *et al.*, “Status Report on KURRI FFAG”, Proc. of PASJ17, Sapporo, 2017, p.1351.
- [6] T. Uesugi *et al.*, “Status Report on Fixed Field Alternating Gradient Accelerators in KURNS”, Proc. of PASJ18, Nagaoka, 2018.
- [7] H. Okita *et al.*, “Beam Optics Study on FFA-MERIT Ring”, Proc. of IPAC19, Melbourne, 2019.
- [8] Y. Mori *et al.*, “Study of Efficient Negative Muon Source MERIT for Muon Nuclear Transformation”, Proc. of PASJ17, Sapporo, 2017, p. 1301.
- [9] T. Uesugi *et al.*, “Emittance Growth at Charge-exchanging Multi-turn Injection in KURRI FFAG”, Proc. of IPAC17, Copenhagen, 2017.
- [10] D. J. Kelliher *et al.*, “Longitudinal Tomography in a Scaling FFA”, Proc. of IPAC19, Melbourne, 2019.
- [11] K. Suga *et al.*, “Remodeling of 150 MeV FFAG Main Ring at KURNS to Pion Production Ring”, in this proceedings.