

## STATUS REPORT OF KURRI FFAG ACCELERATORS \*

Department of Nuclear Science and Engineering,  
Kyoto University Research Reactor Institute,  
Kumatori, Osaka, Japan

### Abstract

京都大学原子炉実験所では世界初のウラン燃料体系による ADSR 実験を 2009 年 3 月に実施した。さらに 2010 年 3 月にはトリウム燃料体系による実験を実施した。また ADSR 実験の精度向上と加速器中性子源の実現に向けた、FFAG 加速器複合系のビーム強度およびビームエネルギーの増強計画について述べる。

## 京都大学原子炉実験所の FFAG 加速器の現状報告

### 1. はじめに

加速器駆動未臨界炉 (以下 ADSR: Accelerator Driven Subcritical Reactor) は加速器で加速された陽子ビームを原子炉内部に設置されたターゲットに照射して得られる大量の核破砕中性子を用いて、未臨界核燃料体系での核分裂連鎖反応を誘起・維持し、炉中での中性子増倍を通じてエネルギーを発生・増幅させるシステムである。中性子の発生が加速器のビームに由来するため、加速器からのビームを止める事により未臨界状態の原子炉は必然的に停止することから、ADSR はより安全性の高いシステムと考えられる (図 1)。また ADSR で

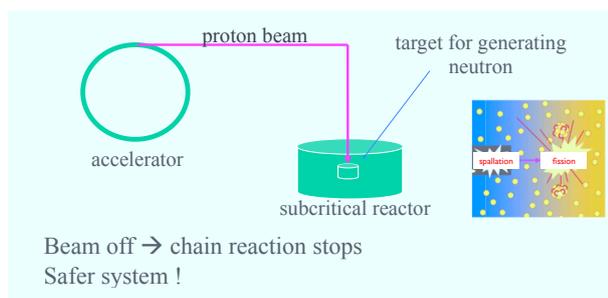


図 1: ADSR 概念図。

は、加速器からのビームパワーを調整することにより、原子炉の出力を制御することが可能である。未臨界炉からの出力  $P$  は中性子源の強度  $S$  および未臨界核燃料体系の実効増倍率  $k_{eff}$  用い、 $P \sim S/(1 - k_{eff})$  と与えられる。実効増倍率  $k_{eff}$  は制御棒等で調整が可能で、 $S$  は加速器のビームエネルギーやビーム電流を変化させることで調整可能となる。

### 2. KUCA と FFAG

京都大学原子炉実験所 (以下 KURRI: Kyoto University Research Reactor Institute) における ADSR 実験は、京都大学臨界集合体 (以下 KUCA: Kyoto University Critical

\*本研究は、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として、国立大学法人京都大学が実施した「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」の成果に基づくものである。

Assembly) と FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) 陽子加速器複合系を結合させて実施されている (図 2)。

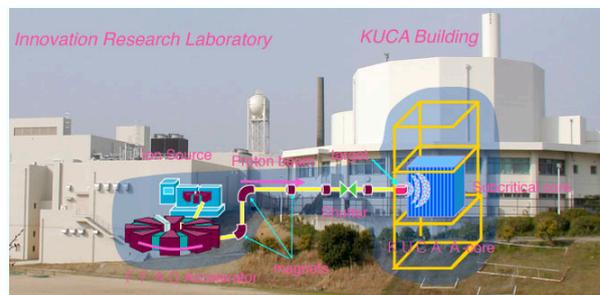


図 2: FFAG 加速器複合系と KUCA を結合し ADSR 実験を実施。

KUCA は、原子炉の核特性に関する基礎研究、開発研究および教育訓練を行うことを目的とした、炉心の組み替えが容易な低出力 (最大出力 100W、短時間に限り 1kW、通常運転時は 10W 以下) の小型研究炉である。

図 3 に示すように、A 架台、B 架台、C 架台 (A, B 架台は固体減速架台、C 架台は軽水減速架台) と呼ばれる 3 つの架台を持つ世界的にも数少ない複数架台方式の装置である。FFAG 加速器からの陽子ビームは A 架台に導入される。表 1 に本実験の基本パラメータを示す。

表 1: The basic parameters for ADSR experiment.

Reactor output power	~10 W
Neutron multiplication factor	$\leq 100$
Beam power	$\leq 0.1$ W
Beam energy	100 - 150 MeV
Beam current	$\leq 1$ nA

FFAG 加速器は固定磁場であるため、運転繰り返しを高く設定することが可能で、その結果大電流化が通常のシンクロトロンに比較して容易である。また、強収束系であるため、サイクロトロンに比較して小型かつ高エネルギー化が容易であるという利点を備えている。本研究では ADSR のための加速器として、大電流・高エ

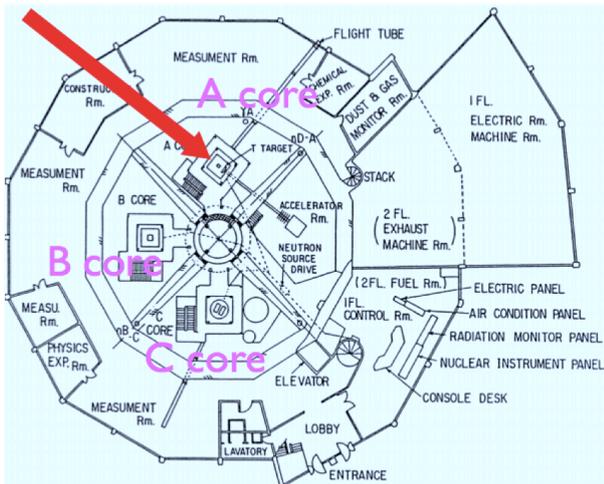


図3: KUCA の内部構造。KUCA は A 架台、B 架台、C 架台からなる複数架台方式の研究炉である。FFAG からの陽子ビームは A 架台に導入される。

エネルギーを同時に満足できる FFAG 方式が採用された。KURRI の FFAG 加速器複合系は入射器、ブースター、主リングの3つのリングから構成されている (図4)。各リングの基本パラメータを表2に示す。本 FFAG システムの詳細については、文献 [1] を参照頂きたい。

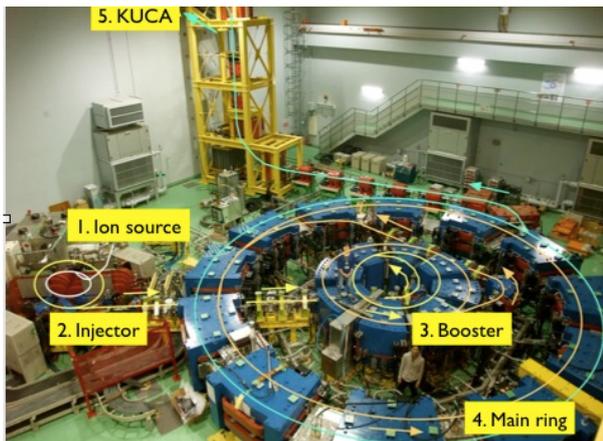


図4: FFAG 加速器複合系。入射器、ブースター、主リングの3つのリングから構成される。

図5および図6にブースターと主リングのビームバンチモニターからの信号を示す。ブースターに関しては、加速過程全域に渡り顕著なビームロスは見られない。一方主リングでは、2種類のビームロスが観測されている。加速過程全領域にわたるゆっくりとしたロスと、入射後約 2.5 ms 付近に見られる急峻なロスである。前者のロスについては、縦方向の位相空間のミスマッチに起因する可能性が考えられる。このため現在、電源増強による RF 電圧向上も含め RF パターンの最適化を実施中である。後者については、加速途中で共鳴 ( $\nu_x - 2\nu_y = 1$ ) を通過する際、ビームロスが発生していると考えられる (図7)。ビームロス低減に向け、チューン補正のための補正磁極を用いた動作点の最適化を検討中である [2]。

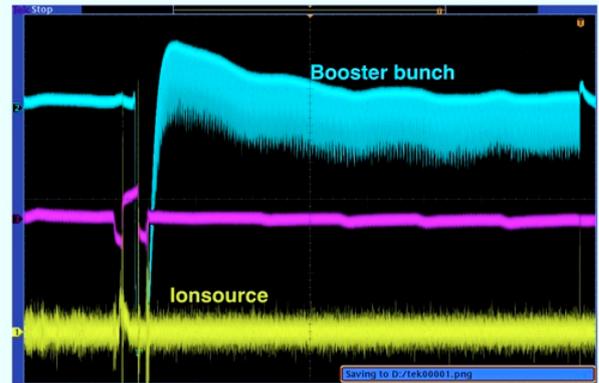


図5: ブースターリングのバンチモニター信号 (青)。加速過程で顕著なビームロスは見られない。

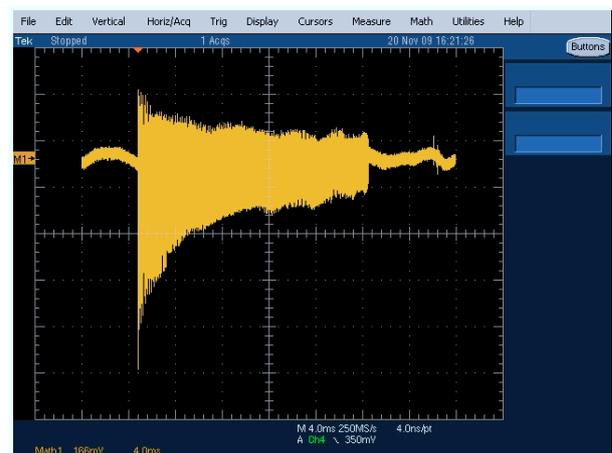


図6: 主リングのバンチモニター信号。加速過程全域にわたる緩やかなビームロスと、入射後 2.5 ms 付近での急峻なビームロスが観測される。

### 3. ADSR 実験

KURRI における ADSR 実験 [3] は 2009 年 3 月と 2010 年 3 月にそれぞれウランとトリウムの2つの燃料体系を用いて実施された。図8はウラン燃料体系でのパルス中性子の時間応答を示している。中性子発生量の時間変化が実効増倍率によって異なる事がわかる。すなわち、ビーム照射直後に指数関数的な減衰を示す即発中性子成分と、時間的にほぼ一定の値を示す遅発中性子成分が観察されているが、実効増倍率が大きくなるに従って、即発中性子成分の減衰が遅くなり、遅発中性子レベルが上昇する傾向が見られる。これにより、加速器からの陽子ビームによる核破砕中性子が、未臨界核燃料体系において核分裂反応により増倍されることを確認した。

図9にトリウム燃料体系での実験結果を示す。ビーム照射前には明瞭でなかった Sr-92 の  $\gamma$  線ピークが4時間の照射後に観測された。

### 4. 将来計画

KURRI では、ADSR 実験精度の向上と将来の加速器中性子源の可能性検討を目的として、FFAG 加速器の

表 2: KURRI-FFAG 加速器の基本パラメーター。

	入射器	ブースター	主リング
ラティス	8-cell spiral	8-cell radial	12-cell radial
加速方式	Induction	RF	RF
Field index $k$	2.5*	2.5	7.5
Energy (max)	1.5 (2.5) MeV	11 (20) MeV	100 (150) MeV
$P_{ext}/P_{inj}$	5.00 (Max)	2.84	2.83
平均軌道半径	0.60 - 0.99 m	1.42 - 1.71 m	4.54 - 5.12 m

\* 入射器の取出しエネルギーは可変。

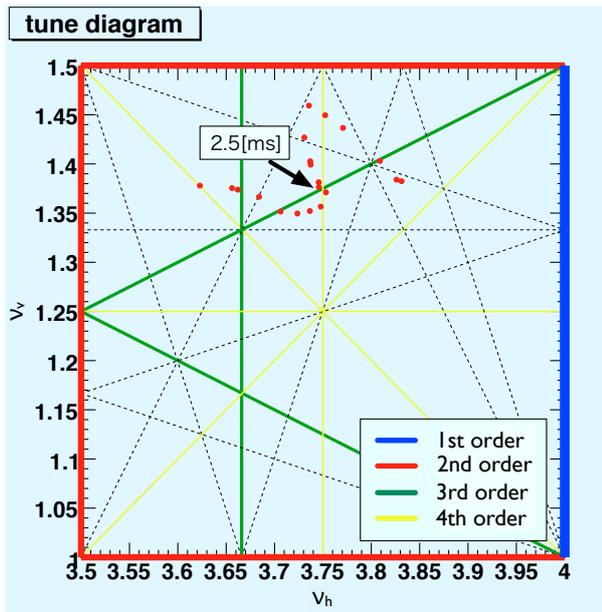


図 7: 主リングのチューンダイアグラム。入射から 2.5 ms 付近で  $\nu_x - 2\nu_y = 1$  の共鳴を通過する。このタイミングは急峻なビームロスのタイミングと一致する。

ビームパワー増強を計画中である。主な増強計画は、始めに入射器システムの新規によるビーム強度の増強、その後さらに核破砕中性子発生量の増加を狙った FFAG リング増設によるビームエネルギーの増強である。

#### 4.1 H<sup>-</sup> injection

通常のマルチターン方式を用いる陽子ビーム入射では、蓄積ビーム強度はインフレクターでの横方向アクセプタンスで制限されてしまうが、H<sup>-</sup> ビームを用いた荷電変換入射では、このような問題を回避できる。空間電荷効果から制限されるビーム強度は 100 Hz 運転を想定した場合 12 μA である。この入射を行うため、ERIT<sup>1</sup> の入射器システムを流用する。この入射器システムは RFQ と DTL から構成される 11 MeV の H<sup>-</sup> 線形加速器で、同一の施設に据え付けられている。図 10 に線形加速器、11 MeV H<sup>-</sup> ビーム輸送系および主リングの配置を示す。ビームラインの設置および入射方式の検証は 2010 年中に実施する予定である。入射方式に関する詳細は文献 [4] を参照頂きたい。

<sup>1</sup>ERIT stands for Energy/Emittance Recovery Internal Target [1].

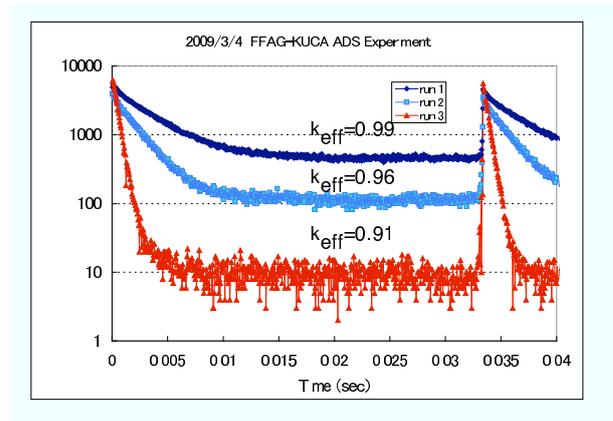


図 8: 異なる  $k_{eff}$  での中性子発生量の時間変化。

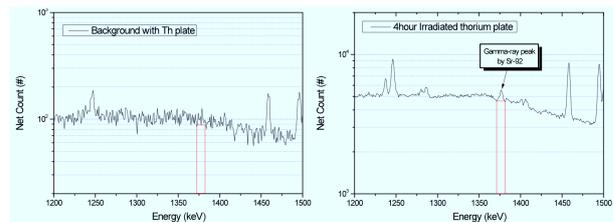


図 9: ビーム照射前 (左) と照射後 (右) のトリウムの HfGe 検出器によるフィッション測定の結果。僅かながら、Sr-92 の  $\gamma$  線ピークが観測された。

#### 4.2 700 MeV スパイラル FFAG

核破砕中性子の発生量は陽子ビームのエネルギーに強く依存し、陽子ビームのエネルギーが上がる程発生量は増大する。100 MeV と 700 MeV では約 30 倍の差が生じる。現在 700 MeV を目指したスパイラル型 FFAG リング (図 11) の設計を進めている。その基本パラメーターを表 3 に示す。

### 5. まとめ

京都大学原子炉実験所では ADSR 実験のための FFAG 加速器複合系が建設され、KUCA の A 架台に構築された未臨界核燃料体系に 100 MeV の陽子ビームを供給した。2009 年 3 月に実施された世界初のウラン燃料体系における ADSR 実験に引き続き、2010 年 3 月にはトリ

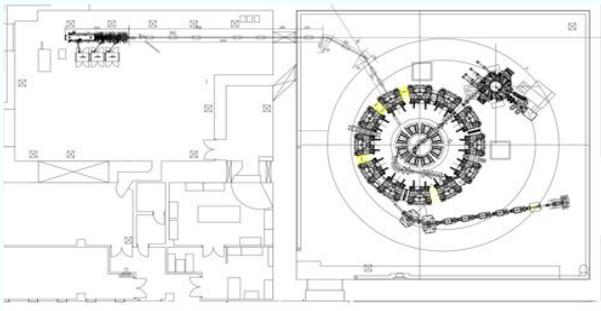


図 10: H<sup>-</sup> 入射用ビームライン。

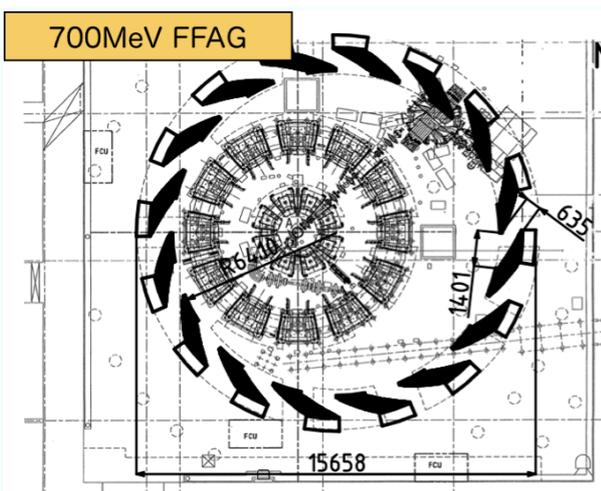


図 11: 新設 700 MeV リングの配置案。

ウム燃料体系での実験も実施された。今後の ADSR 実験の精度向上と将来の加速器中性子源に向けた可能性検討のため、H<sup>-</sup> 入射方式を用いたビーム電流増強計画を実施中である。さらに、エネルギーを 700 MeV まで増強するためのスパイラル型 FFAG リングの増設に向けた設計検討を進めている。

## 参考文献

- [1] T. Uesugi, et al., “FFAGS FOR THE ERIT AND ADS PROJECTS AT KURRI”, Proc. of EPAC08, Genova, 2008.
- [2] Y. Kuriyama, et al., “BEAM STUDY OF FFAG ACCELERATOR AT KURRI”, Proc. of IPAC10, Kyoto, 2010.
- [3] 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 pp.1091-1093.
- [4] K. Okabe, et al., “京都大学原子炉実験所における FFAG 加速器 H-入射システムの設計”, in these proceedings.

表 3: スパイラル型 700 MeV FFAG リングの基本パラメター。

Lattice	16-cell spiral
Field index $k$	12
Energy	150 - 700 MeV
Average orbit radii	6.6 - 7.2 m
Magnetic field	1.5 T