

京都大学原子炉実験所における 加速器駆動未臨界炉のための FFAG 加速器の開発*

石 禎浩、森 義治、井上 信、上杉 智教、栗山 靖敏 (京都大学原子炉実験所)、
Thomas Planche、Jean-Baptiste Lagrange、高島 将、山川 恵美 (京都大学大学院工学研究科)、
酒井 泉、岡部 晃大、今津 英樹、高鋒 良浩 (福井大学大学院工学研究科)

Abstract

京都大学原子炉実験所では加速器駆動未臨界炉のための FFAG 加速器の研究開発を行い、2009 年 3 月には世界初となる、陽子加速器のビームによる核破砕中性子を用いた ADSR 実験を開始した。この実験では、FFAG からの陽子ビームをタングステンターゲットに照射することにより発生する中性子を京都大学臨界集合体装置に構築した未臨界核燃料体系に導入し、この中性子が核分裂反応により増倍される事を確認した。ここでは、加速器システム、ビーム調整とビーム特性および ADSR 実験の概要について報告する。

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いえることができる。

ADSR の特徴として、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という点があげられる。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、式 1 で与えられる。

$$P \sim \frac{S}{1 - k_{eff}} \quad (1)$$

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。

KURRI における ADSR 計画

京都大学原子炉実験所 (以下 KURRI: Kyoto University Research Reactor Institute) で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、「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」を実施した。この計画は KURRI に設置された京都大学臨界

*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。

集合体 (以下 KUCA: Kyoto University Critical Assembly) と陽子加速器を結合させ、中性子エネルギーに依存した中性子増倍特性を中心とした未臨界炉特性に関する実験的研究を核設計計算との比較・検討を行うとともに、エネルギー発生装置としての基本的な成立性評価を主目的としている。

現時点で、D-T 反応 (核融合反応) によって発生する 14MeV のエネルギーの中性子によって駆動される ADSR の実験は既になされているが、100MeV 級のエネルギーの陽子をターゲットに当てて発生させた中性子によって駆動される ADSR の実験は未だなされていない。したがって、高エネルギーの陽子加速器による ADSR 実験は本研究が世界初の試みである。

KUCA は最大出力 100W (短時間に限り 1kW、通常運転時は 10W 以下) の小型研究炉で、動力炉や大型の研究炉と比較して低出力であるため炉心の組み替えが容易で、原子炉物理や放射線物理等の基礎研究に利用されている。ADSR に用いる加速器システムに関しては、エネルギー可変性を確保しつつ、高いビーム強度が得られる固定磁場強収束型 (以下 FFAG: Fixed Field Alternating Gradient) シンクロトロン方式を採用した。FFAG は磁場が一定であるため、運転周期を通常のシンクロトロンに 100 - 1000 倍程度上げる事が可能となり、空間電荷効果による電流値の制限を大幅に改善する事ができる。表 1 に KURRI での ADSR 実験パラメータを示す。

表 1: FFAG-KUCA による ADSR 実験のパラメータ

原子炉出力	~10W
中性子増倍率	≤ 100
ビームパワー	≤ 0.1W
ビームエネルギー	100 - 150MeV
ビーム電流	≤ 1nA

FFAG 加速器システム

ADSR 実験で KUCA に結合する加速器システムはイオンベータ、ブースター、主リングと呼ばれる 3 つの円形加速器から構成され、これらのリングにはすべて FFAG 型の収束系がもちらわれている。このうち、イオンベータにはスパイラル型の FFAG 収束系、トリムコイルによる磁場形成、誘導加速方式が用いられており、これらは陽子 FFAG 加速器としては世界初の試みである。表 2 に FFAG 加速器複合系の基本パラメータを示す。

ゼロクロマティシティーを実現するために FFAG リ

表 2:FFAG 加速器複合系基本パラメーター

	Injector	Booster	Main Ring
Focusing	8-cell spiral	8-cell radial	8-cell radial
Acceleration	Induction	RF	RF
Field index k	2.5*	4.5	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
Average orbit radii	0.60~0.99 m	1.42~1.71 m	4.54~5.12 m

* Output energy of the injector is variable

ングでは磁場 B が軌道半径 r に $B(r) = B_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^k$ の依存性をもつ様に設計される (ここで、 B_0, r_0 は定数)。ブースターおよび主リングではこの磁場分布を磁極の形状によって実現しているが、イオンベータでは主コイルの他に、上下平行かつ平坦な磁極面に 32 本のトリムコイルを配置し、電流を独立に調整することにより、上記の磁場分布を実現し、かつ可変な k 値を得ることができる。この k 値を変化させる事により、取出しエネルギーを可変にすることができ、さらにブースター及び主リングの磁場を調整することで、最終的に主リングからのビームの取出しエネルギーを調整する事が可能となる。図 1 に KURRI に建設された FFAG 加速器複合系を示す。

イオンベータではビームは、硅素鋼板でできた誘導コアを励磁することで得られる誘導電場で加速され、静電電極で引き出される。引き出しの効率を上げるため、水平方向のコヒーレント振動を用いているが、入射時の振幅に依っては取出されるビームが複数ターンに及ぶ場合があり、この場合はブースターへの入射及び加速効率が下がることになる。このため、ブースターへの入射および加速 (場合によりブースターからの取出し) 効率を観測しながらイオンベータの入射電極の電圧を調整している。

ブースターおよび主リングでは RF 加速を行う。イオンベータのコア励磁波形およびブースター・主リングの RF 波形を図 2 に示す。現在、3つのリングは 30Hz で



図 1:KURRI に建設された FFAG 加速器複合系

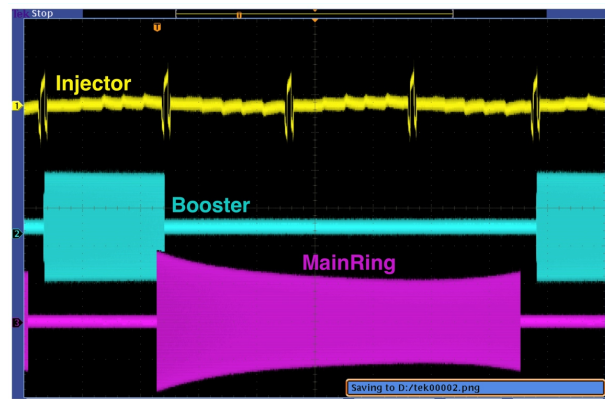


図 2: 3つのリングの加速電圧パターン

加速器運転・ビーム調整

全ての DC 電磁石を初期化することから日常の加速器運転が開始される。初期化の値は各電磁石で想定される最大励磁量とした。ビーム入射及びビーム取出し用のパルス電磁石ならびに高圧電極については初期化を行っていない。イオン源の本体および高圧デッキには 124.4kV の電圧を印加する。ブースター入射以降のビーム調整を容易にする目的で、イオン源から取出されたビームはイオンベータの入射以前にビームチョッパーによってチョップされる。チョップ後のビームパルス幅は、ブースターでのマルチターン入射に必要なパルス幅にあわせて約 $7\mu\text{s}$ で運転している。

運転されている (コア電源は安定性の観点から 120Hz で運転)。ブースターから主リングへのビーム入射はバンチ・バケット入射を行っているため、それぞれの加速位相の同期をとる必要があるが、2つの RF パターンを 1 台の任意波形発生器 (Tektronix AWG430-3ch) で生成することにより、独立な RF パターンを共通のクロックで制御する事が可能となった。ブースター入射以降の立ち上がりの速いパルス機器は、RF と同期をとる必要があるため、AWG430 で生成したトリガーで励磁されている。また、マスタートリガーは商用 60Hz に同期して生成されている。なお RF 加速のためのフィードバックはブースター・主リングともに用いていない。

ブースターおよび主リングのバンチモニターからの出力波形を図 3 に示す。ブースターでは顕著なビームロスはないが、主リングにおいてビームロスが発生が観測される。主リングから取出されたビーム強度は現時

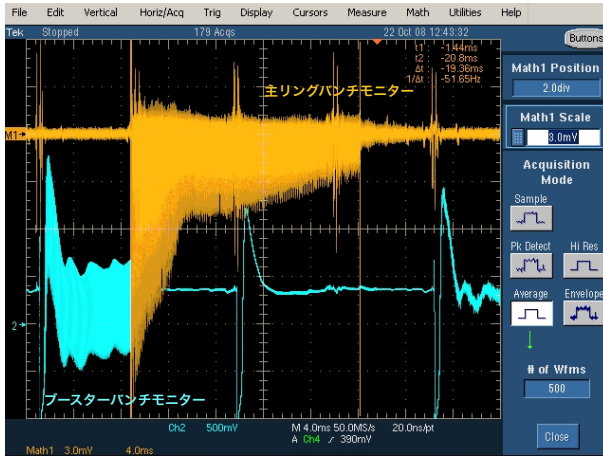


図3:ブースター・主リングバンチモニターの波形

点での放射線管理上の規制値である 0.1nA に到達しているが、今後計画されるビーム増強に向けて、このビームロスの原因を究明中である。なお、KURRI における FFAG システムとビーム調整に関するより詳細な記述については文献 [1] を参照されたい。

ADSR 実験

主リングから取出されたビームをビーム輸送系 (MCBT 系) を通過させ KUCA へ導入し、炉室内に設置されたタングステン・ターゲットに陽子ビームが照射される際発生する中性子発生量が最大となるように、輸送系に配置された偏向電磁石、四極電磁石、ステアリング電磁石の励磁量の調整を行った。具体的には、輸送系最下流の四極電磁石近傍と炉室内上流部およびターゲット近傍3カ所に高感度 ^3He 比例計数管を設置し、上流2カ所での測定値が最小になり、かつターゲット近傍での測定値が最大となるような調整を行った。図4に

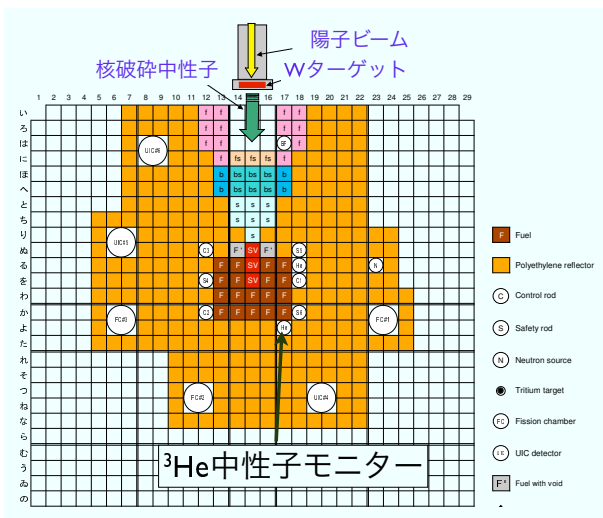


図4:KUCA 内に設置された未臨界炉心

KUCA 炉室内に構築された未臨界炉心を示す。ビーム

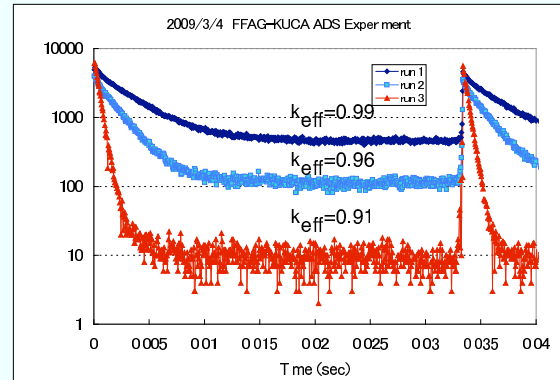


図5:異なる k_{eff} での中性子発生量の時間変化

ラインの終端部にタングステンターゲットが真空中に設置されている。また、炉心近傍には ^3He 検出器が設置されている。この検出器で測定されたパルス中性子の時間応答を図5に示す。この図から、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。

結論

KURRI において3つの FFAG リングから構成される加速器複合系を建設し、ビーム調整の結果 100MeV 陽子ビームを主リングから取出すことに成功した。また、このビームを KUCA に輸送し、炉室内に設置されたタングステンターゲットに照射し核破砕中性子を発生させた。さらに、この中性子をターゲット下流に構築された未臨界炉心に導入し、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。これにより、世界で最初の高エネルギー陽子を用いた加速器駆動未臨界炉の実験に成功した。今後は ADSR 実験の効率を上げるため、ビームエネルギーを現状の 100MeV から 150MeV に上げるとともに、ビーム強度増強をすすめ、建屋の遮蔽能力から決まる制限値である 1nA 達成を目標とする。また、将来的にはシステム成立性の実証のため、FFAG 加速器のビーム強度を空間電荷効果による制限値まで上げることを計画中である。具体的には、大強度線形加速器からの H^- ビームを荷電変換入射により FFAG 加速器複合系の主リングに直接入射し、ビーム強度の増強を測る。空間電荷効果によるチューンシフトの制限値を $\Delta\nu \sim 0.25$ としエミッタンスを $\epsilon_x = 200\pi\text{mm-mrad}$, $\epsilon_y = 100\pi\text{mm-mrad}$ とすると許容されるビーム電流は $12\mu\text{A}$ 程度である。この電流値を目標として、現在 H^- 入射に関する設計・検討を実施中である。

REFERENCES

[1] 森 義治, “京都大学原子炉実験所における FFAG 加速器の開発”, 加速器学会誌, April 2008, vol.5 no.1, p. 27.