

CONSTRUCTION OF FFAG ACCELERATOR COMPLEX IN KURRI

Minoru Tanigaki^{*A)}, Yoshiharu Mori^{A)}, Tomonori Uesugi^{A)}, Akihiro Taniguchi^{A)},
Koichi Takamiya^{A)}, Akihiro Osanai^{B)}, Kaichiro Mishima^{A)}, Seiji Shiroya^{A)}, Makoto Inoue^{A)},
Shinji Machida^{C)}, Yoshihiro Ishi^{D)}, Shintaro Fukumoto^{D)}

^{A)}Research Reactor Institute, Kyoto University, 2-1010 Asashironishi, Kumatori, Osaka, 590-0494

^{B)}Graduate School of Engineering, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

^{C)}CCLRC/RAL, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0QX. UK

^{D)}Mitsubishi Electric Corporation, 1-1-2 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-8555

Abstract

Kumatori Accelerator driven Reactor Test project (KART) has been started at Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI) from the fiscal year of 2002 and an 150 MeV proton Fixed Field Alternating Gradient (FFAG) accelerator complex is now under construction as a neutron production driver. We have succeeded the extraction of proton beam from the spiral sector type FFAG injector.

京大炉における FFAG 加速器システムの建設

1. はじめに

京都大学原子炉実験所は 5MW 原子炉を中性子源として 40 年間に渡りさまざまな研究を展開してきた。その 5 MW 原子炉は 2006 年 2 月に高濃縮ウラン燃料による 5MW での運転を終了した。約 2 年後をめどに低濃縮燃料への切替えを終え、最大 1MW (医療照射時のみ 5MW) の運用を最大 2020 年まで行う予定である。

原子炉でのこれまでの研究活動を継承しさらに発展させていくため、5MW 原子炉に代わる将来的な中性子源として加速器駆動未臨界炉による中性子源が提案された^[1]。以降、京大炉では加速器駆動未臨界炉の概念設計や臨界集合体 (KUCA) と 300 kV コッククロフト型加速器での基礎実験^[2, 3]が進められ、特に陽子エネルギーが 20~150 MeV の領域で実効増倍係数 k_{eff} の見積に必要な核データや計算コードの精度が十分でない事が明らかになってきた。

一方、加速器駆動未臨界炉のための陽子ビーム源には 1) 高いビーム強度 2) 省電力 3) 高い安定性が求められる。大河によって 40 年前に提唱された FFAG 原理に基づく加速器^[4]はこれらの条件を満たす可能性を秘めているが、広帯域・高電圧の加速空洞がないこと、ビームの入出射に必要なスペースが確保できない事が妨げとなっていた。最近になって森らが FINMET を用いた広帯域高電圧加速空洞を開発^[5]し、500keV の FFAG 実証器で陽子加速に成功^[6]した。またビームの入出射に必要なスペースが十分に確保できる“ヨークフリー”マグネットの開発も行われ、これを用いた陽子 150MeV FFAG 加速器^[7]の建設が進められた。2005 年 3 月に初めてビーム取出に成功している。

このように FFAG が ADS の陽子ビーム源として実用化できる素地が整ってきた事をうけ、KART プロ

ジェクトが文部科学省によって採用され 2002 年より開始された。このプロジェクトでは実用機としての 150MeV 陽子 FFAG 加速器の開発、及び KUCA を組み合わせ陽子エネルギー 20~150 MeV の領域での実効増倍係数決定に必要な核データや炉物理の実験を行う事である。

この KART プロジェクトで現在製作中の FFAG 加速器システムの概要と現状を報告する。

2. FFAG 加速器システム

今回の加速器システムは、入射器、ブースタ、主加速器の 3 段構成で全てが FFAG 加速器である。うち入射器が誘導加速を採用したスパイラルセクタ型の FFAG、残りが RF 加速によるラディアルセクタ型 FFAG で、最大エネルギー 150 MeV、繰り返し周波数 120 Hz のパルス運転を行う。今回の FFAG 加速器群の構成を図 1 に、仕様を表 1 にまとめる。

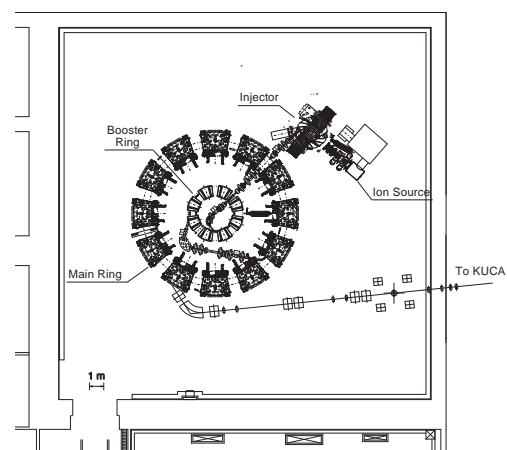


図 1: FFAG 加速器の配置図。

* E-mail: tanigaki@rri.kyoto-u.ac.jp

表 1: FFAG 加速器の仕様。

	Injector	Booster	Main
Focusing	Spiral	Radial	Radial
Acceleration	Induction	RF	RF
k	2.5	2.45	7.6
E_{inj}	100 keV	2.5 MeV	20 MeV
E_{ext}	2.5 MeV	20 MeV	150 MeV
p_{ext} / p_{inj}	5.00	2.84	2.83
r_{inj}	0.60 m	1.27 m	4.54 m
r_{ext}	0.99 m	1.86 m	5.12 m



図 3: FFAG 入射器のスパイラル型磁極に取り付けられた FFAG 磁場生成用コイル。

2.1 イオン源

イオン源は典型的な体積カスプ型イオン源を採用している。ここで発生させた H^+ イオンは 100 keV まで加速され入射器へと向かう。今回の FFAG はパルス運転であり、イオン源のアーケ電圧もパルス化して効率化と不要な X 線等の発生を防いでいる。入射器への輸送ビームラインに静電チョッパが置かれ、 $\sim 50\mu s$ にパルスを整えた上で次段に入射させる。

2.2 誘導加速型 FFAG 入射器

入射器には誘導加速型 FFAG 加速器を採用した。FFAG 磁場は 12 個のスパイラル型電磁石（スパイラル角 42 度）と、それぞれに 32 個取り付けられたコイルによって作られる。コイルの電流値を変えることで k 値を変え、加速エネルギーを 400 keV から 2.5 MeV の間で変更可能である。FFAG 入射器を図 2 に、スパイラル型電磁石へのコイルの実装の様子を図 3 に示す。

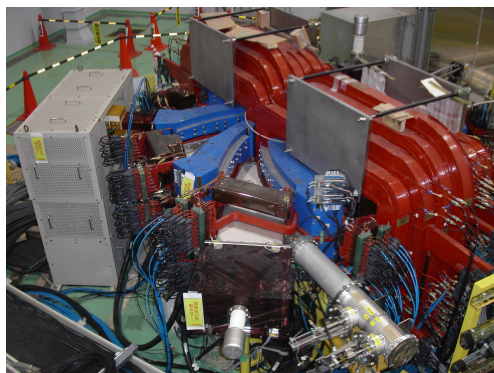


図 2: FFAG 入射器の外観図。

2.3 RF 加速型ブースター FFAG

入射段から入射した陽子ビームは、このブースター段の FFAG 加速器で最大 20 MeV まで加速される。この FFAG 加速器はラディアルセクタ型で、8 組の発散 (D) - 収束 (F) - 発散 (D) 電磁石からなる。FFAG 磁場の k 値は固定で 2.45 であり、磁極のカーブによって定められている。D 電磁石の外側には漏れ磁束を抑えるための磁気シールドが用意されている。

2.4 RF 加速型終段 FFAG

最終段の FFAG 加速器は RF 加速でラディアルセクタ型の FFAG 加速器である。基本的に KEK で開発中の 150 MeV 陽子 FFAG 加速器^[7] と同一で、電磁石も KEK の“ヨークフリー”タイプと基本的に同一である。ただし将来最高エネルギー 200 MeV で繰り返し周波数 1 kHz を目指せるよう、高周波加速空洞の追加を考慮した機器配置やヨークに透磁率の高い鉄を使っている。

2.5 制御システム

この FFAG 加速器では、TCP/IP ベースネットワークを利用して PC と PLC を用いた制御システムを開発した^[9]。機器構成の概念図を図 5 に示す。このシステムでは人間のためのインターフェースや高度な制御シーケンスは PC 上の LabView で構築され、機器側に密着したシーケンスは PLC（横河 FA-M3R）のラダーで記述されている。この PLC と PC は LAN によって結ばれている。機器のステータスや制御パラメータはすべて PLC 上のレジスタに展開され、PC と PLC の間で単純なテキストデータとして LAN を介して一定周期で交換される。PLC はレジスタ上に展開された PC からのパラメータに応じて機器を制御する事になる。通信の不確実性や上位のソフトウェアの

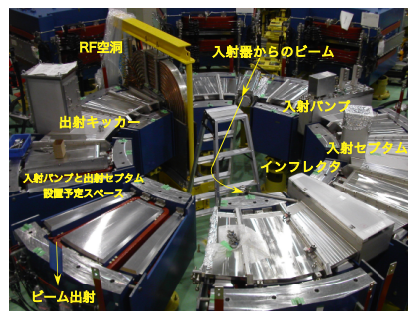


図 4: 電磁石の上半分を外して入射機器の取り付け作業中のブースター段。左手前にラディアルセクタの D-F-D 磁極およびシールド板、出射ビームのためのチャンネルの様子がみられる。

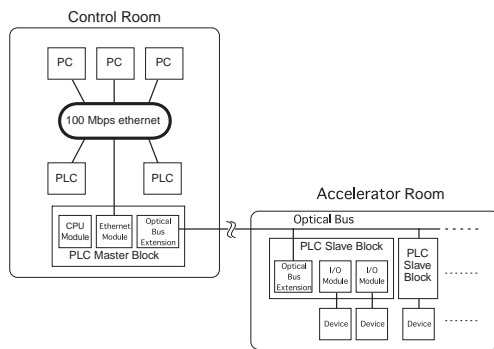


図 5: 制御システムの構成の概念図。

不具合にともなう致命的な事故はおきないよう、各機器は PLC によって保持されるパラメータに従って自律運転を行っている。

このシステムでは通常の LAN を介して制御をおこなっているため、直ちに無線 LAN 等を導入した遠隔操作が可能である。この特徴を活かし、現場に無線 LAN と制御ソフトをいれたノート PC を持ち込んで試験調整を行い、作業効率を大幅に向上させる事が出来た。

3. 現状と今後の予定

現在の加速器室の様子を図 6 に示す。イオン源および入射器については 2005 年に搬入と設置を完了して順次試験調整を進め、2006 年 1 月に施設検査に無事合格した。

ブースター段についてはすでに機器設置が完了しており、現在各部の機器調整および加速試験を進めているところである。終段の FFAG 加速器についても間もなく機器設置が完了し、順次各部の単体試験に入る予定である。これらの作業と加速試験、および FFAG 加速器システム全体としての施設検査を秋までに終える予定である。加速器の機器設置や試験調整と同時に KUCA と加速器システムとのビームライン建設を進め、2006 年秋の加速器駆動未臨界炉に関する基礎研究開始を目指している。

なお、この発表は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、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』の成果を含んでいる。

参考文献

- [1] K. Kawase and M. Inoue, "Neutron Factory Project at KURRI", APAC 1998, Tsukuba, Japan, p. 104
- [2] S. Shiroya, H. Unesaki et al., "Neutronics of Future Neutron Source Based on Accelerator Driven Subcritical Reactor Concept in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)", Int. Seminar on Advanced Nucl. Energy Systems toward Zero Release of Radioactive Wastes, 2nd Fujiwara Int. Seminar, Nov. 6-9, 2000, Shizuoka, Japan, Abstracts p. 58.
- [3] S. Shiroya, H. Unesaki et al., Trans. Am. Nucl. Soc., 2001

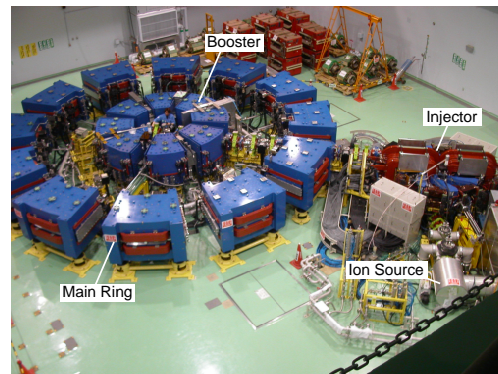


図 6: 加速器室内の様子。右手がイオン源および入射器、左手がブースターおよび主リングである。

Annu. Mtg., June 17-21, 2001, Milwaukee, Wisconsin, p. 78.

- [4] T. Ohkawa, Proc. of annual meeting of JPS(1953)
- [5] Y. Mori et al., "A new type of rf cavity for high intensity proton synchrotron using high permeability magnetic alloy", EPAC 1998, p. 299.
- [6] M. Aiba et al., "DEVELOPMENT OF A FFAG PROTON SYNCHROTRON", Proceeding of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 581
- [7] T. Adachi et al., "A 150MeV FFAG SYNCHROTRON WITH "RETURN-YOKE FREE" MAGNET", PAC 2001, Chicago, the United States, p. 3254
- [8] M. Aiba et al., "Beam Injection and Extraction in 150 MeV FFAG", Proceeding of EPAC 2002, Paris, France, p. 1076
- [9] M. Tanigaki et al., "Control System of a FFAG Complex for the ADSR Project in KURRI", Proceedings of the 5th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls, Hayama, Japan.