

京都大学複合原子力科学研究所 FFAG 加速器複合系制御システムの現状 CURRENT STATUS OF CONTROL SYSTEM FOR THE FFAG ACCELERATOR COMPLEX AT KURNS

栗山靖敏 ^{*A)}、沖田英史 ^{B)}、不破康裕 ^{A)}、上杉智教 ^{A)}、石禎浩 ^{A)}、森義治 ^{A)}

Yasutoshi Kuriyama ^{*A)}, Hidefumi Okita ^{B)}, Yasuhiro Fuwa ^{A)}, Tomonori Uesugi ^{A)}, Yoshihiro Ishi ^{A)}, Yoshiharu Mori ^{A)}

^{A)}Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

^{B)}Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract

Fixed field alternating gradient (FFAG) accelerator complex has been operated as a proton driver for the experiment of accelerator driven system (ADS) at Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University (KURNS). PLC based control system has been developed and the operator interface has been connected to PLC via network. Originally, a LabVIEW based operational interface was chosen to construct the system because of its easiness. However we met an upgrade problem, and a new control system based on EPICS instead of LabVIEW was introduced in 2010. In the spring of 2018, the replacement from LabVIEW to EPICS has been almost completed except for the beam interlock system and the linac control system provided by linac production company (AccSys). Also, the EPICS archiving tool (Archiver Appliance) has been invoked and operated at the end of 2017. This Presentation reports the details of the current control system and also the upgraded GPIB control and storage system.

1. はじめに

京都大学複合原子力科学研究所（旧 京都大学原子炉実験所）における FFAG 加速器複合系の研究開発は、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 [1]。

開発初期において、京都大学複合原子力科学研究所の FFAG 加速器複合系（以下、KURNS 複合系とする）はイオンベータ (FFAG ベータトロン)・ブースター (FFAG シンクロトロン)・主リング (FFAG シンクロトロン) の 3 つのリングから構成されていた。2009 年 3 月には、このシステムを用いて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実験（以下 ADS 実験とする）を実施した [2]。

2012 年にビーム強度増強のため、主リングの入射器を 11 MeV H⁻ リナックへ変更した [3]。変更後には、ADS 実験のための KUCA へ 100 MeV - 1 nA の陽子ビームの供給及び、金属材料等へ 150 MeV - 1 nA または 100 MeV - 10 nA の陽子ビームの供給に成功している。

2015 年 10 月に発生した RFQ の重故障 [4] によって、約 2 年に渡ってユーザーへのビーム供給は停止していたが、2017 年 7 月より線形加速器からのビーム取り出しを開始し、順次ユーザーへのビーム供給を再開している [5]。

また、内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として、2015 年より「核変換処理のための高効率負ミューオン生成法の研究—加速/貯蔵 E R I T リングの開発—」プロジェクトも KURNS 複合系を利用して推進されている [6]。

KURNS 複合系の制御系（以下、KURNS 制御系とする）は、これらの研究に迅速に対応することが求められ

る。また、ADS 実験においては、上記に加えビーム安定性やビーム強度のダイナミックな変更などに対応する必要がある。

本稿では KURNS 複合系における制御系の推移と今後の展開について報告を行う。

2. EPICS への移行

2.1 開発初期の制御系

KURNS 複合系では、開発初期から一貫して加速器の制御に PLC ベースのシステムを採用している [7]。加速器のオペレータは、ネットワーク経由で PLC と通信を行い、電磁石電源等の制御対象機器は、PLC からの指令を受けて操作される。加速器制御系開発の経験がないメンバーによる制御系開発を円滑に進めるため、基本制御ソフトとして National Instruments 社（以下、NI 社とする）の LabVIEW [8] と Windows PC を組み合わせ、自家製による制御プログラムを作成した。これらの制御端末にはノートパソコンが採用され、持ち出しが容易なため、制御系のデバック等の際には機動力を発揮した。制御用ノートパソコンは、制御機器グループ毎に用意されており、10 台程度のノートパソコンで KURNS 複合系全体を制御していた。

2.2 初期制御系の問題点

加速器制御系開発の経験がないメンバーによる制御系開発という問題を解決するために選択した LabVIEW ベースの制御系は、初期の立ち上げに成功し、実際に加速器の運転にも使用され、実環境で十分に使用できることは証明された。ただ、商用ベースの制御環境を選択したことなどから、以下に挙げる問題が発生した。

2.2.1 操作性 複合系では、主リングが設置されている加速器室と加速器室下にある地下階や一旦管理区域を出てアクセスする必要のある電源冷却器室などに機器が

* kuriyama@rri.kyoto-u.ac.jp

分散されて配置されている。また、主リングの入射器である線形加速器は加速器室とは別の部屋に設置されており、機器のテスト時などにおいては、各部屋を往来する必要がある。そのため、制御室設置のノートパソコンを持ち出し運用することになるが、持ち出し者以外のは、同制御グループに属する他の機器を制御することが不可であり、効率が良いとは言えなかった。

2.2.2 セキュリティ KURNS 複合系のような小規模施設においては、ビーム利用者と共同で加速器を運転し、ビーム実験を遂行することは不可欠である。そのような場合、共同研究者や学生といった不特定多数の人間が制御室に出入りすることになり、制御端末に直接触れる機会が発生する。このような状況に置かれている制御端末のオペレーティングシステムとして広く普及している Windows を使用することは、ウイルス等に対して非常に脆弱であると言える。実際に、2008 年にはウイルスに感染していた USB メモリを制御端末において使用した事例が発生したため、加速器の運転を 1 日停止させ、全端末のウイルススキャンを実施した。

2.2.3 継続性 制御プログラムの開発時期の違いから、初期の KURNS 複合系の制御プログラムには LabVIEW7 系と LabVIEW8 系が混在しており、管理の煩雑さを低減するために使用するバージョンを統一する必要があったが、LabVIEW8 系についてマイナーバージョンアップを実行したところ、使用している制御プログラムが起動できなくなる事例が発生したため、マンパワー（制御担当専任者不在）の問題もあり、新バージョンの LabVIEW に制御プログラムを適応させることは難しいと判断した。また、KURNS 複合系設立当初に制御端末のオペレーティングシステムとして採用した Windows XP から新しいバージョンの Windows への移行を考えると、LabVIEW のメジャーアップデートが必須であるため、大幅な制御プログラムの改修が必要になると考えられた。また、2008 年の段階において、制御系で使用している LabVIEW の年間保守料金は、KURNS 複合系に認められていた年間予算の約 10% 相当であり、加速器グループ全体の大きな負担となっていた。

2.3 制御プログラム環境の移行

これらの問題を解決することを目的として、2009 年より KEK/J-Parc 制御グループの協力を得て、LabVIEW から EPICS [9] への移行を進めることとなった [10]。

EPICS はネットワークベースであり、分散制御環境を実現できる。この利点を生かして、複数のオペレーター端末より機器の制御・監視が可能となる。

また、KURNS 複合系で使用している EPICS バージョンは、2018 年時点においては 3.14 系であるが、本バージョンの開発は 2000 年にスタートし現在も継続されており、移行のタイミングや移行先について、ユーザー自身が決定できる。これは商用ソフトウェアを使用しない大きなメリットである。

EPICS への制御系移行作業は、主に夏季の加速器停止期間を利用して実施され、専任ではない制御担当者が 1 名で行った。2016 年の夏の時点で線形加速器の制御及び、ヒューマンプロテクションのためのビームインター

ロック系以外については、EPICS での置き換えが完了している [4]。

3. 現状の制御系

3.1 構成

休止中のものも含めると、イオン源 2 台、入射器 1 台、円形加速器 4 台、それらを接続するビームライン及び取り出しビームラインが制御の対象である。図 1 に、KURNS 複合系加速器の概略図を示す。

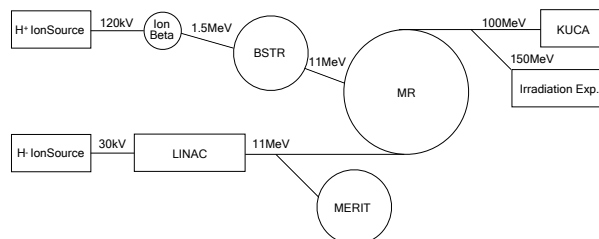


Figure 1: Layout of the KURNS FFAG Complex.

加速器のオペレートモードによって数字は前後するが、PLC-CPU モジュール数は約 20 個、Linux PC 約 20 台、Windows PC 約 5 台、ボード型コンピューター 2 台、ファイルサーバー 2 台を使用している。また、USB カメラ約 20 台、監視カメラ約 15 台も機器監視やビームプロファイル観測用のカメラとして使用している。これらの制御機器が独立した加速器制御系ネットワークで接続されている。現状では、すべての機器は同じレベルのネットワークに接続されているため、ネットワーク負荷が高いことが問題となっている。図 2 に現状の制御系を構成する主な機器について示す。

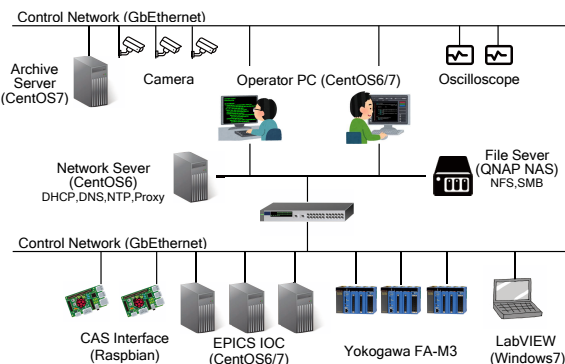


Figure 2: Schematic view of KURNS Control.

KURNS 複合系における制御系は、大きく以下の 4 つのセクションに分かれている。

- ビームインターロック系
- ビーム診断系
- タイミング系
- デバイス制御系

以下、それぞれのセクションについて説明する。

3.2 ビームインターロック系

ビームインターロック系では、PLC ラダーをメインプログラムとしている。インターロックステータスについては、ネットワーク経由で LabVIEW と EPICS が参照している。オペレーターは LabVIEW を用いて制作されたインターロック管理プログラムを操作して、加速器運転モードの切り替え及びインターロックのクリア作業を行う。図 3 に、LabVIEW を用いて作成されたインターロック管理用プログラムの操作画面を示す。



Figure 3: Operator interface for the interlock control based on LabVIEW.

3.3 タイミング系

商用電源同期装置を利用して、商用電源周波数 60 Hz に同期したトリガー信号を生成している。分周器を利用して、60 Hz のトリガー信号から現在の複合系の基本繰り返し周期である 20 Hz のマスタートリガー信号を生成している。生成されたマスタートリガー信号をもとにエヌエフ回路設計ブロックの波形発生装置を利用して、加速器を構成する各種装置のためのタイミング信号を生成している。また、リング型加速器 (MR (150 MeV 主リング)、MERIT リング) のための LLRF については、Tektronix 社製の任意波形発生装置 (AWG5002C) を 2 台使用して生成している。図 4 に、MR リングモードでオペレートする際のタイミングチャートを示す。

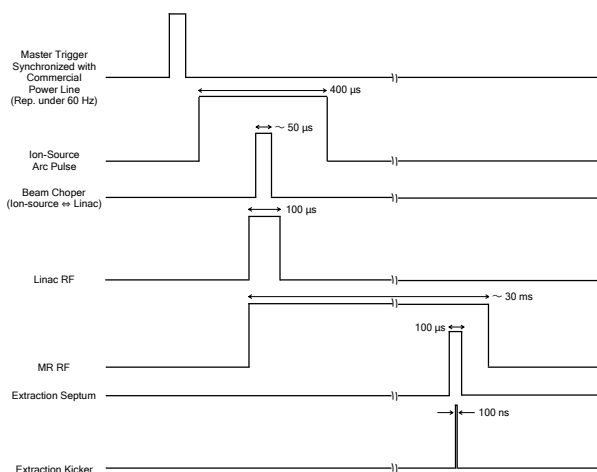


Figure 4: Timing chart of KURNS Complex with the MR-Operation mode.

3.4 ビーム診断系

ビーム診断系としては、蛍光板と CCD カメラを使用したビームプロファイルモニターと静電ピックアップ型のバンチモニター及びファラデーカップを主に使用している [11]。それぞれのモニターからの読み出しには、画像解析用の計算機端末またはオシロスコープを使用している。現状では加速器制御とは独立しており、ビーム診断系と制御系の統合が今後の課題である。

3.5 デバイス制御系

デバイス制御系には、EPICS ベースのものとは GPIB 制御のものが混在している。EPICS-IOC は、横河電機の PLC FA-M3 と計算機端末に CentOS [12] バージョン 6 またはバージョン 7 をインストールしたもので構成されている。EPICS-IOC についてを担当する LINUX-PC の台数は 15 台ほどで、必要な処理能力という観点からはこれを数台に集約することが可能であるが、KURNS 複合系は構成する加速器コンポーネントの入れ換えが随時発生しており、それらの構成変更に対応するために、リングやビームライン等細かいセクション毎に EPICS IOC を用意している。

4. ファイルサーバーの更新

2017 年 12 月に使用中のファイルサーバーの継続使用期間が 5 年を超えたため、ファイルサーバー更新のための検討を始めた。これまで KURNS 制御系では、この 10 年の間に Linux ベースのファイルサーバー 1 台、Mac OS ベースのファイルサーバー 2 台を乗り換えながら使用してきた。Mac OS には、Time Machine と呼ばれる高機能なバックアップ機能があり、タイムスタンプや外部ストレージからのシステム全体の復元にも対応している。この Time Machine を使用することで、ファイルサーバーにトラブルが発生した場合においても、早期の復旧が可能であり、ファイルサーバーの乗り換えも容易に実施できた。Time Machine 機能を利用するために KURNS 制御系では計 2 台の Mac mini をファイルサーバーとして使用してきたが、Mac mini にはその筐体設計の問題から排熱処理に問題があることがわかっている。また、排熱処理との関係性については不明だが、Mac mini を使用したファイルサーバーを運用中に複数回 HDD トラブルを経験したこともあり、ファイルサーバー更新時には、Mac mini 以外を検討することとした。

新ファイルサーバーを立ち上げる際に、検討した項目は以下の通りである。

- NFS、SMB プロトコルに対応していること。
- ユーザーの誤った操作によるデータ損失を復旧できること。
- 複数の外部ストレージへのバックアップ機能があること。
- RAID6 に対応し、ストレージ交換時のホットスワップに対応すること。
- 交換用ストレージの入手性が良いこと。
- 安価であること。

上記の検討項目を実現するために、PC ベースではな

く、NAS 専用機に移行することとした。導入した機種は、QNAP [13] 製の TS-431P2-4G である。Arm ベースの CPU と 4 GB のメモリ、4 つの HDD 格納ベイを持っている。ネットワークポートは 2 個あり、対応したネットワークハブと組み合わせることで、データ転送速度を向上させることができる。表 1 に本 NAS の仕様を載せる。

Table 1: Specifications of File Server

Model	QNAP TS-431P2-4G
OS	QTS 4.3.4
CPU	1.7 GHz Quad Core Arm Cortex-A15
Memory	4 GB (DDR3) x 1
Storage	3 TB x 4 (RAID6)
LAN	GbE x 2 (Link Aggregation)

当面はこれまで使用してきた Mac OS ベースのものも読み込み専用として使用を継続し、新しいファイルサーバーの耐久性・信頼性について、評価していくことを予定している。

5. EPICS ARCHIVER の導入

これまでは自家製のシェルスクリプトを使用して、各種パラメーターの保存を行っていた。保存のタイミングは、オペレーターの判断に任せており、当然ながら、非運転時のパラメーター保存はできていなかった。この問題に対処するために”The EPICS Archiver Appliance [14]”の試験的な使用を 2017 年 12 月より開始した。試験使用の際には、約 140 個の PV を最短周期 0.1 秒にて記録させた。

取得したデータの表示には、Archive Viewer [15] を使用している。図 5 に 2018 年 1 月 1 日から 2018 年 2 月 1 日までの複合系の真空度を表示させたデータを示す。



Figure 5: Vacuum data from 2018/01/01 to 2018/02/01 taken by “The EPICS Archiver Appliance”. The viewer is “Archive View”.

3 ヶ月に渡ってテストを行ったが、データの抜け等無く、動作も安定していたため、2018 年 4 月より専用端末を用意し、310 個の PV について記録をさせている。使用している端末の仕様を表 2 に示す。

Table 2: Specifications of Archive Server

OS	CentOS7
CPU	4 GHz Quad Core (i7 6700K) x 1
Memory	16 GB (DDR4 PC4-17000) x 4
Storage	1 TB SSD x 1 6 TB NAS (RAID6)

本 Archiver で取得したデータはローカルストレージではなく、直接 NAS に保存するようにしている。イベントレートは 65、データレートは 0.1 GB/day となっている。

6. GPIB 制御環境の更新

KURNS 制御系では、旧式の電源やステッピングモータの制御に GPIB を使用している。2008 年から 2010 年にかけて制御プログラムを作成したものが多く、CentOS5 の環境下において GUI 作成のためのプログラム Glade2 [16] を利用して制御プログラム及び操作画面を作成していた。

2017 年 3 月に CentOS5 のサポート期間が終了するため GPIB 制御環境の移行が必要となった。KURNS 制御系では、GPIB で制御されるデバイスと PC との接続には NI 社製の GPIB-USB-HS を使用しているが、GPIB-USB-HS のデバイスドライバーは CentOS5 までの対応であったため、CentOS6 以降のバージョンを使用するためには、デバイスドライバーの変更が必要となった。そのため、オープンソースとして開発が進められているデバイスドライバー GPIB-Linux-Package [17] の使用を決定した。また、本デバイスドライバーは、Python との連携が可能であったため、制御プログラム及び操作画面は、Python の標準ライブラリである Tkinter を使用することとした。表 3 に、GPIB 制御環境の移行前と移行後について、また図 6 に、Glade で作成した GTK [18] ベースのステッピングモータ操作画面と Tkinter を使用して作成したものを示す。

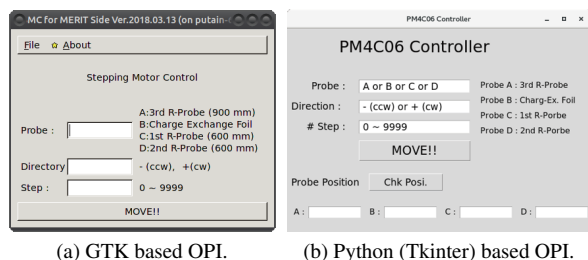
Table 3: Migration of GPIB Control Environment

	Before Migration	After Migration
Hardware	NI GPIB-USB-HS	NI GPIB-USB-HS NI GPIB-USB-HS+
OS	CentOS5	CentOS7
Dev. Driver	NI-488.2	Linux-GPIB-Package
App. Lang.	C (GTK)	Python (Tkinter)

7. 今後の展開

7.1 GPIB 制御機器の EPICS への統合

GPIB で制御されている機器やビーム診断系の機器については、EPICS と連携しておらずそれぞれの機器が独立した制御となっている。そのため異なる操作系が制御に混在しており、加速器の運転を複雑にしている要因と



(a) GTK based OPI. (b) Python (Tkinter) based OPI.

Figure 6: Example of operator interface for the device controlled via GPIB.

なっている。本課題を解決するために、EPICS IOC として振る舞う GPIB 制御を内包したブリッジプログラムの準備を進めている。

7.2 ビーム診断系の EPICS への統合

ビーム診断系によって取得したデータのアクセス性およびデータ保管の一貫性に問題が生じており、Archive サーバーを利用した一括管理を実施したいと考えている。

7.3 線形加速器制御系の更新

2008 年 KURNS 複合系に日立製作所を通して、AccSys 社製の線形加速器を導入した。導入から 10 年以上経過しており、2015 年には RFQ 本体のトラブルも経験している。制御に使用している PC も導入以来更新しておらず、起動時に失敗することや、突然のシャットダウンが発生している。早期のリプレイスが必要だが、製造メーカーにも制御ソフトのソースが残っていないこと、制御 PC に内蔵されている光入出力ボード（線形加速器電源部との通信に使用）を最近の OS で動かすデバイスドライバが存在しないなど、制御 PC の更新作業については不確定な要素が多く、2018 年 8 月の時点においては更新のための費用についても目処がついてない。今後の複合系の継続運転のためには、本更新作業は必須の項目であるため、製造メーカーと緻密に連絡を取りながら進めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] T. Uesugi *et al.* “FFAGS FOR THE ERIT AND ADS PROJECTS AT KURRI”, Proceedings of EPAC08, Geneva, 2008.; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e08/papers/tuobm04.pdf>
- [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. Technol. Vol. 46 (2009), No. 12 pp. 1091-1093.
- [3] K. Okabe *et al.*, “Development of H⁻ Injection of Proton FFAG at KURRI”, Proceedings of IPAC10, Kyoto, 2010.; <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/thpeb009.pdf>
- [4] Y. Kuriyama *et al.*, “京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器施設現状報告”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 1348-1350.;

- https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/FSP0/FSP011.pdf
- [5] Y. Ishi *et al.*, “京大炉 FFAG 加速器現状報告”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1351-1353.; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/FSP0/FSP012.pdf
- [6] Y. Mori *et al.*, “Intense Negative Muon Facility with MERIT ring for Nuclear Transmutation”, 14th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance (μ SR2017), Sapporo, Japan, June 25-30, 2017, vol.011063.; <https://journals.jps.jp/doi/abs/10.7566/JPSCP.21.011063>
- [7] M. Tanigaki *et al.*, “Control system for the FFAG complex at KURRI”, NIM. A Vol. 612 (2010), pp. 354-359.
- [8] <http://www.ni.com/ja-jp/shop/labview.html/>
- [9] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [10] Y. Kuriyama *et al.*, “EPICS Control System for the FFAG Complex at KURRI”, Proceedings of ICALEPCS2013, San Francisco, 2013.; <http://epaper.kek.jp/ICALEPCS2013/papers/thppc036.pdf>
- [11] S. L. Sheehy *et al.*, “Characterization techniques for fixed-field alternating gradient accelerators and beam studies using the KURRI 150 MeV proton FFAG”, PTEP 2016 no.7, 073G01, 2016.
- [12] <https://www.centos.org>
- [13] <https://www.qnap.com/ja-jp/>
- [14] https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/
- [15] https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/archiveviewer.html
- [16] <https://glade.gnome.org>
- [17] <https://linux-gpib.sourceforge.io>
- [18] <https://www.gtk.org>