

APPLICATION OF EMBEDDED EPICS TO LLRF CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB

Jun-ichi Odagiri^{A)}, Kazunori Akai^{A)}, Hisakuni Deguchi^{B)}, Kiyokazu Ebirhara^{A)}, Kazuro Furukawa^{A)}, Kazutaka Hayashi^{B)}, Atsushi Kabe^{A)}, Tetsuya Kobayashi^{A)}, Kota Nakanish^{A)}, Michiru Nishiwaki^{A)}, Tomohiro Okazaki^{C)}, Kumiko Ooyabu^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Mitsubishi Electric Tokki Systems Corporation

4-11 Techno Park, Sanda, Hyogo, 669-1339

^{C)} East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

1-4-22 Minatomachi, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0034

Abstract

Toward SuperKEKB project, a new digital low-level RF system was implemented and is now under evaluation. The control system of the new low-level RF system features embedded computers running Experimental Physics and Industrial Control System for local control on-site as well as remote control from the central control room. The frontend part of the control system comprises a Programmable Logic Controller and Advanced Mezzanine Cards in a micro-TCA chassis, which serve as Input / Output Controller of EPICS in place of an existing VME-computer and a CAMAC interface crate. The user interface for local control also relies on embedded computers serving as Operator Interface of EPICS-based control system. The adoption of embedded EPICS allowed us to make full use of existing software modules supported by EPICS community. This paper describes the design, implementation and present status of evaluation of the embedded EPICS-based control of the new low-level RF system.

SuperKEKB のための LLRF 制御システムへの組み込み EPICS 技術の応用

1. はじめに

現在、高エネルギー加速器研究機構では 2014 年秋の SuperKEKB の運転開始に向け、加速器サブシステムのアップグレードのための多面的な努力が続けられており、その一環として新しい Low Level RF システム (新 LLRF システム) の開発が進められている^[1]。新 LLRF システムでは、より高い精度と安定度を実現するために、従来、アナログ回路で実現されていた RF フィードバック制御などの高速な制御が、高精度 ADC / DAC と FPGA を用いることによりデジタル化された^[2]。また、RF の立ち上げシーケンスなどの周辺機能についても NIM モジュールを Programmable Logic Controller (PLC) で代替することによりデジタル化することとなった。これらの変更に伴い、新 LLRF システムのためのリモート制御、ローカル制御の双方について全般的な見直しが必要となった。

SuperKEKB の制御システムは、制御ソフトウェアとして Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS)^[3]を採用するという意味において KEKB 制御システムを踏襲するものである。一方、EPICS を実行するプラットフォームについては、ハードウェア、ソフトウェアの両面で最新の技術を採用するべく、多岐に亘る技術について検討と評価が行われている^[4]。その一例として PLC などのインテリジェントなコントローラを Input / Output

Controller (IOC)^[5]として利用する組み込み EPICS がある。組み込み EPICS は IOC コア・プログラムを制御システムのフロントエンドで実行することにより、IOC コア・プログラムが持つ豊富な機能を最大限に活用することを意図した技術である。PLC を利用した組み込み EPICS は、これまでに KEKB 制御システム、J-PARC 制御システムなどにおいて、様々な用途に応用されている^[5]。

新 LLRF システムの制御系は完全な新規開発となるため、Operator Interface (OPI)^[3]上で実行される上位ソフトウェアが参照する EPICS レコードについて既存システムとの互換性を求められることを除けば、採用する技術の選択に関して自由度が高い。また、中央制御室からのリモート制御だけではなく、従来、NIM モジュールにより行ってきた現場でのローカル制御についても新規開発が必要となった。これらの条件を考慮し、新 LLRF システムのラック内に IOC と OPI の両者を組み込むことによってリモート制御とローカル制御の双方に対応した制御システムを実現することとし、そのためのソフトウェア開発を行った^[6]。

新 LLRF システムのプロトタイプ (図 1 参照) は 2010 年度に実装され、現在、KEKB の D8 電源棟において評価作業が進められている。本稿では、組み込み EPICS に基づく新 LLRF システムの制御に用いられるハードウェアの構成、ソフトウェアの設計及びそれらの評価試験の現状について報告する。



図 1 : D8 電源棟に設置された新 LLRF システム。

2. 制御システム各部の構成

2.1 PLC 上の組込み EPICS による制御

従来の LLRF システムの制御では、RF の立ち上げシーケンス、真空度、機器温度によるインターロックは NIM モジュール内のロジック回路により実装されている。NIM モジュールへのパラメータの設定、実行指示、及び状態の読み返しは、IOC として機能する VME 計算機が CAMAC を介して行う。これらの機能の多くは PLC を利用した組込み EPICS を採用することにより、柔軟性と拡張性のあるソフトウェアで代替することができる。このための PLC として横河電機社製 FA-M3 PLC を採用した。同 PLC には、Linux を OS として採用した CPU モジュール (F3RP61) があり、この CPU 上で IOC コア・プログラムを実行することにより、FA-M3 PLC 自体を IOC として利用することができる。

新 LLRF システムのラック内に組込まれた PLC は、CPU を実装したメイン・ユニットと I/O モジュールのみを実装したサブ・ユニットから構成される (図 2 参照)。メイン・ユニットは IOC コア・プログラムを実行する F3RP61 と、ラダー・プログラムを実行する従来型の CPU の二つを装着し、以下のように目的に応じて使い分ける。

RF の立ち上げシーケンスは処理内容が複雑であるため、PLC (F3RP61) 上の可読性の高いプログラムにより代替することが望ましい。EPICS の拡張機能である Sequencer は State Notation Language (SNL) と呼ばれる独自の言語で記述される^[7]。SNL は、その名が示す通り、状態の定義と状態間の遷移に基づく処理を分かり易く記述する構文を備えている。特に状態間の遷移の契機となるイベント待ちが容易である点が優れている。以上の理由から、RF の立ち上げシーケンスは F3RP61 の上で EPICS Sequencer を用いて実装することとした。

一方、インターロックについては、そのロジックが単純な AND と OR の組合せで表現されるため、ラダー図による表現が適していること、また、IOC をリブートした場合にもインターロックの処理が独立して継続できることが望ましいこと、の二点を考慮して従来型の CPU 上で実行されるラダー・プログラムにより実装した。

これら二つの CPU は同一のメイン・ユニット上の隣り合う最初の二つのスロットに配置され、各々に専用に割り当てられた I/O モジュールを介して制御を行う。IOC コア・プログラムを実行する F3RP61 は、ラダー・プログラムを実行する CPU と共有メモリを介してインターロック状態の読出しとラッチの解除を行い、OPI とラダー・プログラムを仲介する役割を担う。

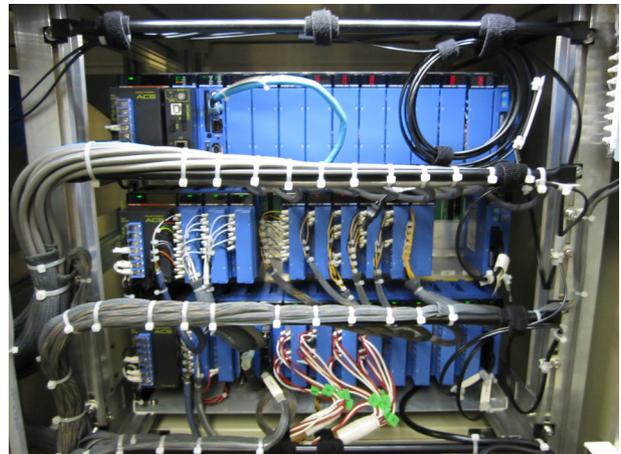


図 2 : PLC を利用した組込み EPICS。最上段左側に位置するイーサネット・ケーブルが接続された CPU モジュールが F3RP61。その左隣はラダー・プログラムを実行する従来型の CPU。

2.2 FPGA と EPICS とのインタフェース

デジタル LLRF システムの開発は cERL、STF でも進められている。これらのプロジェクトとの間で技術を共有することを意図し、RF フィードバックなどの高速な処理を実装するための FPGA として Xilinx 社の Virtex5 が選択された^[8]。FPGA による処理回路は、RF フィードバック、チューナー制御、及び RF のモニタと高速インターロックといった各機能に分割され、各々の Advanced Mezzanine Card (AMC) の上に実装される。これらのカードは Micro-TCA 筐体内でバックプレーンにより相互に接続され、また、Micro-TCA Carrier Hub (MCH) を介して外部と繋がる (図 3 参照)。

これらの FPGA と EPICS をインタフェースする方法については様々な方法が考えられるが、Virtex5 が搭載する CPU 上で Linux が実行可能であること、Micro-TCA のバックプレーンとして Gigabit Ethernet が選択可能であること、の二点を考慮し、以下のソフトウェアの構成を採ることとした。

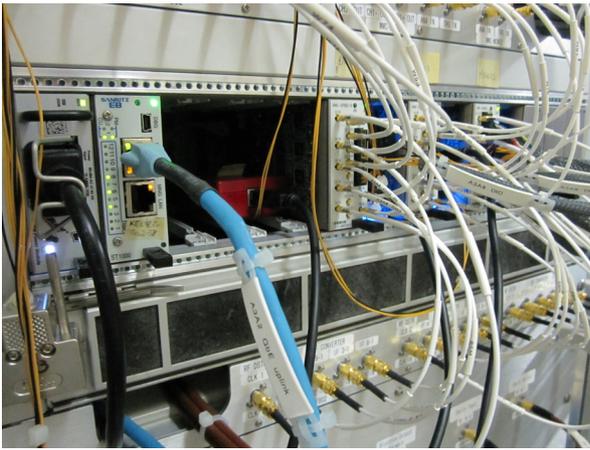


図 3 : Micor-TCA を利用した組込み EPICS。右側の白い RF ケーブルが多数接続された 3 枚の AMC の各々が IOC コア・プログラムを実行する。

- 各々の AMC 上で完全な形で IOC コア・プログラムを実行する。
- バックプレーン (Gigabit Ethernet) 上での通信に EPICS の標準通信プロトコルである Channel Access^[3]を利用する。

上記の構成を採ることにより AMC とラック内の PLC と OPI、及び中央制御室の OPI との通信のために非同期的な複雑なドライバを実装することを避けることができた。また、IOC コア・プログラムと、それを前提とする EPICS Sequencer などの各種拡張機能を必要に応じて自在に利用することが可能になった。これらの実績あるソフトウェアを活用することにより、無用な開発を抑えてアプリケーションの開発に注力することができた。

IOC コア・プログラムを実行するための OS としては WindRiver Linux 2.0 を選択した。まず、Xilinx 社が提供する ML507 評価ボードの上で組込み Linux システムを構築し、EPICS の動作確認まで行い、その後、実機への移植を行った。

FPGA と IOC コア・プログラムとのインターフェースには Linux の mmap メソッドを使用し、FPGA のレジスタ領域を IOC プロセスのメモリ空間にマップする方法を採った。これにより、EPICS のデバイス・サポートは C 言語のポインタを通じて FPGA のレジスタ領域にアクセスすることが可能になる。この方法には EPICS のデバイス・サポートの実装が単純になり、また、点数の多い波形データを効率よく読み書きできる、という利点がある。

2.3 オペレータ・インタフェース

GUI は不安定性を持ち込みやすいため、OPI は機器制御を担う IOC と分離し、GUI の不安定性により機器制御に支障を生ずる事態を招くことのないようにした。ローカル制御のための EPICS の OPI として Linux を OS として搭載した組込み PC を採用した (図 4 参照)。

EPICS コミュニティによりサポートされている GUI 作成ツールは各種ある。それぞれ安定性、機能

性、将来への継続性の面で一長一短あるが、新 LLRF システムの制御ではチューナー制御のためのアップ・ダウン・ボタンなどを簡易に実現する機能が求められたため、特に機能性を重視する必要があった。この観点から、新 LLRF システムの制御系の開発に着手した当時、最も機能性に優れると判断した Extensible Display Manager (EDM)^[9]を選択した。



図 4 : EDM を実行する OPI。

3. ソフトウェア設計上の留意点

3.1 ソフトウェア化に伴う問題点

新 LLRF システムではローカル制御についても組込み EPICS を採用し、また、ハードウェアのソフトウェア化を推し進めた。これに伴い、信頼性の確保と運用上の利便性のために対処すべき幾つかの課題が生じた。以下では、その具体的な項目と解決策について述べる。

3.2 例外処理

例外処理の重要性は制御ソフトウェア全般に共通する一般的な事項であるが、組込み EPICS を採用したシステムでは、ハードウェアに近い処理に Channel Access, Sequencer といった比較的、上位寄りのソフトウェアを使用するため、例外処理の設計の重要性が増す。常にユーザに意識される上位のソフトウェアの場合、不具合が容易に人の目に触れるのに対し、ハードウェアに密着した下位に位置するソフトウェアの場合、不具合の発生をオペレータやシステム設計者が容易に認識できない場合が多いためである。

新 LLRF システムの制御では、複数の IOC が使用され、それらに跨ったランタイム・データベースの上で EPICS Sequencer プログラムが実行される。特に、RF 立ち上げシーケンスでは、出力電力レベルをランプ・アップする際に PLC ベースの IOC から AMC ベースの IOC に対して Channel Access 経由で繰り返し目標値の設定を行う。このようなループ処理では、各ステップで必ず通信の結果を確認し、通

信が失敗した場合は適切な例外処理に移るよう、Sequencer プログラムを実装した^[6]。Channel Access による通信が失敗した場合の処理を Channel Access に頼ることは意味をなさないため、PLC バックプレーンを介してインターロックを掛けるなど、必要に応じて例外発生時の処理をハードウェアにより担保するよう設計した。

3.3 アクセス制御

組込み EPICS を全面的に採用した新 LLRF システムの制御では、以下の二つの理由により、アクセス制限が重要となる

第一に、既存システムではハードウェア（回路）の内部信号線に相当する I/O チャンネルが EPICS レコードで代替されたことにより、本来はオペレータが直に操作すべきではない EPICS レコードに誤って書き込みを行う可能性が生じた。このような EPICS レコードをオペレータの書き込みから保護するためのアクセス制御が必要となる。

アクセス制限が重要になる第二の理由は、リモート制御とローカル制御の排他制御のためである。新 LLRF システムでは、リモート制御とローカル制御の違いは、文字通り、操作者の位置が現場から遠いか、現場に近いのか、のみであり、その手段（EPICS による制御）においては何ら違いがない。このため、現場と中央制御室の間で起こり得る意図しない綱引きを防ぐ仕組みを EPICS で実現することが必要となる。

これらのアクセス制御を実現するために、EPICS のランタイム・データベースには Access Security Group (ASG)^[3] という機能が用意されている。ASG により、EPICS の各レコードについて、ユーザ名とホスト名の組合せによるアクセス制御が可能になるが、新 LLRF システムの制御では、ホスト名のみを参照して上記のアクセス制御を実現している。

3.4 IOC 再起動時の状態回復

ハードウェアで実現されていた機能をソフトウェアで代替した結果として、IOC を再起動する際の運転パラメータの復旧方法も課題の一つとなった。従来はノブなどの位置で保持されていた情報の多くが EPICS レコードに置き換えられたため、IOC のリブートによりオペレータが設定した各種のパラメータが消失し、再起動時に新たに設定をやり直す必要が生じる。この問題に対処するための EPICS の拡張機能として autosave^[10] と呼ばれるライブラリがある。

新 LLRF システムの制御に使用する IOC では、このライブラリを利用して設定パラメータの定期的な保存とリブート時の値の復旧を行っている。設定パラメータの保存先については、現状では外部サーバのファイルシステムを利用しているが、PLC の CPU (F3RP61) が備える不揮発性メモリ上のファイルシステムを利用することも可能である。加速器の運転時の運用方法については、今後の経験に基づき、確実性と利便性のバランスを見て判断する必要がある。

4. 評価試験の進捗状況

従来、ハードウェアで実現されていた機能の多くをソフトウェアで代替した新 LLRF システムの制御における最大の評価項目は安定性と信頼性である。IOC に関しては、PLC ベースの IOC、AMC ベースの IOC の何れについても評価試験中の Linux のカーネル・パニック、IOC プロセスのコア・ダンプなどの深刻な問題は一度も経験していない。組込み PC を用いた OPI については、同時に多数の EDM プロセスを立ち上げた場合でも予想以上に安定して動作している。これまでのところ、X-Window System がマウス、キー・ボードからの入力を受け付けなくなるという症状を一度経験したのみである。最終的な結論は今後の運用実績を待たねばならないが、本稿執筆時においては新 LLRF システムに求められる安定性と信頼性を確保できたと判断している。

5. 結論

新 LLRF システムのための制御システムを開発した。同制御システムは、新 LLRF システムのラック内に組み込まれた IOC (PLC および Micor-TCA 筐体内の AMC)、GUI の実行に特化した OPI (組込み PC) から構成される。中央制御室からのリモート制御のみならず、ローカル制御にも EPICS のアーキテクチャを採用した。これにより、既存の実績あるソフトウェア資源を十分に活用することが可能となった。アプリケーション開発に注力することによって開発工程を最小化し、また、ソフトウェアの信頼性を高めることができた。開発された組込み EPICS ベースの制御ソフトウェアは新 LLRF システムの高周波特性の評価試験に供されており、実用に耐えうる信頼性を持つことが確認された。

参考文献

- [1] K.Akai, et al., "RF System for SuperKEKB", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [2] T.Kobayashi, et al., "Prototype Performance of Digital LLRF Control System for SuperKEKB", in this meeting.
- [3] <http://www.aps.anl.gov/epics/EpicsDocumentation/AppDevManuals/AppDevGuide/AppDevGuide3.13.0b12.pdf>.
- [4] K.Furukawa, et al., "Development of Control System towards SuperKEKB", in this meeting.
- [5] J.Odagiri, et al., "Application of EPICS on F3RP61 to Accelerator Control", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug. 5-7, 2009.
- [6] H.Deguchi, et al., "EPICS Embedding for SuperKEKB LLRF System", in this meeting.
- [7] <http://www-csr.bessy.de/control/SoftDist/sequencer/Reference.html>.
- [8] M.Ryoshi, et al., "LLRF Board in Micro-TCA Platform", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [9] <http://ics-web.sns.ornl.gov/edm/edmUserManual/index.html>.
- [10] <http://www.aps.anl.gov/bcda/synApps/autosave/autosave.html>.