

SuperKEKB での真空制御ソフトウェアの現状

PRESENT STATUS OF VACUUM CONTROL SOFTWARE SYSTEM FOR SUPERKEKB

芳藤 直樹^{#,A)}, 中村 達郎^{B)}, 小田切 淳一^{B)}, 石橋 拓弥^{B)}, 照井 真司^{B)}
Naoki Yoshifuji^{#,A)}, Tatsuro Nakamura^{B)}, Jun-ichi Odagiri^{B)}, Takuya Ishibashi^{B)}, Shinji Terui^{B)}

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

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

Abstract

The phase-I commissioning of the SuperKEKB accelerator has completed successfully and renovation of various subsystems of the accelerator is now in progress with considerable effort towards coming phase-II operation. In the vacuum control system of KEKB, VME, CAMAC, PLC and data loggers had been used. However, the availability of CAMAC modules is decreasing nowadays. For this reason, we decided to replace VME and CAMAC with F3RP61 CPU of FA-M3 PLC and compactRIO, and a server computer for availability, maintainability and reliability. The devices to be controlled or monitored are gate valves, vacuum switches, ion pumps, NEG pump power supplies, pressure gauges, thermometers, cooling water flow meters, collimators and residual gas analyzers. The upgraded system handles 57,203 channels of EPICS records and 192 EPICS sequencer programs. Although frequent requirements for modifications arose during the phase-I operation, the control software could manage them with ease. This paper describes the development of the software of the vacuum control system and experiences in the phase-I operation and issues to be handled for the phase-II operation.

1. はじめに

SuperKEKB では Phase-I のコミッショニングが完了し、Phase-II に向けて各種サブシステムの更新が進められている。

KEKB においては制御ソフトウェアツールキットとして Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS)^[1] を採用した。SuperKEKB でもこれを踏襲し EPICS により制御システムを構築するが、真空制御の場合、ハードウェアのインターフェースについては後述する大きな変更があったため、制御アプリケーションについても大幅な修正が必要となった。

KEKB の真空制御のフロントエンドシステムは、Input Output Controller (IOC) として VME を使用していた。また、フィールドバスとして CAMAC、そしてインターロックを含むデジタル I/O 制御のために横河電機社製の Programmable Logic Controller (PLC) である FA-M3 コントローラ^[2]を使用していた。

SuperKEKB では、機器の入手性、保守性、信頼性を向上させるために、CAMAC をより新しいインターフェースに置き換える必要があった。近年 FA-M3 コントローラの CPU モジュールで、Linux を実行する F3RP61^[3]が入手可能となった。この CPU を採用することにより、FA-M3 コントローラ自体を IOC として使用することが可能となった。各種真空制御アプリケーションは、この IOC 上で実行している。この F3RP61 は従来型のシーケンス CPU とマルチ CPU 構成を採ることが可能であり、その場合両者はベースモジュール(バックレール)を介して通信する。この通信には独自に作成した F3RP61 Device/Driver Support^[4]を使用している。

真空制御の場合、インターロック等の特に「堅さ」を求

められるロジックについては、従来通りシーケンス CPU 上のラダーで実装されており、その他の機器の ON/OFF 制御等は F3RP61 で実行している。

一方アナログ信号については、チャンネル数が多いため、高密度の入出力モジュールが必要となる。このため 32 チャンネル/モジュールの AD を持つ National Instruments (NI) 社の compactRIO (cRIO)^[5]を採用した。cRIO には Channel Access Server (CA Server) と呼ばれる機能があり、特別な Device/Driver Support を作成することなく Channel Access Client (CA Client) との通信が可能となる。CA Server については既にネットワーク通信の過負荷試験を行い、その安定性が実証されている。

真空制御に関わるソフトウェアの被制御機器としては、Gate valves (GV)、Vacuum switches (VSW)、イオンポンプ電源、Non-evaporable getter (NEG) ポンプ活性化電源、Cold cathode gauge (CCG)、温度計、冷却水流量計、コリメータ、残留ガス分析計などがある。

真空制御システムのユーザインターフェースについては、従来は MEDM^[6]等を使用してきたが、SuperKEKB ではより高機能な Control System Studio (CSS)^[7] の BOY を使用して開発を進めている。

Phase-I コミッショニングが完了した時点で EPICS レコードの数は合計で 57,203 点、EPICS シーケンサプログラムは 192 本であった(Table 1)。

Phase-II コミッショニングの開始に向け、制御方法の見直しやパラメータ変更は度々発生しているが、本システムはこれらの要求に迅速かつ柔軟に対応している。本稿では、Phase-I で得られた成果および発生した問題の解決を踏まえて、真空制御ソフトウェア開発の現状を報告する。

[#] hig-yosi@post.kek.jp

Table 1: Number of Records and Sequences

EPICS Application	レコード数	シーケンサ数
GV 制御	747	6
VSW モニタ	66	0
イオンポンプ電源制御	3785	37
CCG 圧力計測制御	6526	14
NEG ポンプ活性化電源制御	4407	40
温度計測制御	33937	37
冷却水流量計測制御	3624	25
コリメータ制御	2941	17
残留ガス分析計制御	898	3
システム生死監視	108	12
アポート監視	144	0
その他	20	1

2. 各真空制御の EPICS ソフトウェア

2.1 GV 制御、VSW モニタ制御

SuperKEKB メインリングの GV は LER に 31 台、HER に 33 台、別途ストッパーも各リングで 2 台ずつあり、合計 68 台が制御対象となる。CSS/BOY から GV アプリケーションへのリクエストは GV 開閉の ON/OFF となる。ステータスは 10Hz の収集速度で GV 開閉状態、GV を動作させるためのコンプレッサの圧力状態、GV 自体のリモート/ローカル状態の信号を FA-M3 コントローラの I/O モジュールから取得している。それらを EPICS レコードに格納し、CSS/BOY 上に LED オブジェクトで表示している。

VSW も LER に 31 点、HER に 33 点あり、GV で挟まれた区間に 1 つずつ設置されている。VSW は圧力値が約 10^3 Pa 程度になると、真空 NG 信号を出力する。この信号も GV と同じく 10 Hz の収集速度で EPICS レコードに格納し監視している。

2.2 イオンポンプ電源制御

イオンポンプは ULVAC 社の PST-400(排気速度 400 l/s)を使用している。LER は 306 台、HER は 300 台が制御対象となっている。このうち LER の 255 台、HER の 251 台は TRISTAN 時代から使用されている電源^[8]を再利用している。この電源は電源のアドレス指定、High Voltage (HV) の ON/OFF、機器のインターロック ON/OFF を一つの 16 bit レジスタで行う必要があった。また、それぞれ ON/OFF には 300 ms 以上の ON/OFF bit の立ち上りエッジで動作する仕様となっていた。実現には FA-M3 コントローラのデジタル出力モジュール F3WD64^[9]を使用して、EPICS の calc レコードと mbboDirect レコード、そして EPICS シーケンサによりマルチビット操作命令を実装した。イオンポンプの放電電流値は、イオンポンプ電源インターフェースからの電圧値を cRIO で測定し、次の式で変換して算出している。ここで I は電流値(A)、E は電圧値(V)を表す。

$$I = \frac{E}{20000}$$

ただし、このイオンポンプ電源は保守性および入手可能性が失われつつあるため、逐次置き換えを行っている。新コントローラには Agilent Technology 社の 4UHV コントローラ^[10]を採用した。4UHV の外部との通信インターフェースは RS232C であるため、制御用のネットワークから MOXA 社のイーサネット・シリアル変換機 NPort5610-16^[11]を介して FA-M3 コントローラと接続した。4UHV を制御するための通信フォーマットはアスキーデータとバイナリデータが混在するため、Device/Driver Support として、複雑な通信フォーマットであってもプログラミング不要で容易に通信可能にすることができる利点を持つ StreamDevice^[12]と、非同期 I/O 全般を扱う asynDriver^[13]の組合せを使用した。前者のイオンポンプも 4UHV も電流値を 1 Hz で取得し CSS/BOY 上に表示している。

上記両方のイオンポンプ制御ソフトウェアは、特に問題は無く順調に動作している。

2.3 CCG 圧力計測制御

CCG については LER の 306 台、HER の 299 台が被制御対象となっており、これにより圧力を測定している。KEKB で使用していた大亜真空社製コントローラ CG-28 と測定子 C-5 を再利用している。圧力値は、コントローラから cRIO を介して 0-10 V の電圧値を取得し次の通りに算出する。電圧値(E(V))が 1.00 V 未満の場合は、固定で 1×10^{-8} Pa を圧力値(P(Pa))としている。E が 1.00 V 以上で 2.54 V 以下の場合は、下記の演算式の (1) により P を算出する。E が 2.54 V を超える場合は (2)式 となる。

$$P = \left(10^{\left(\frac{(E-1.274)}{1.1765} \right)} \right) \times 133 \quad (1)$$

$$P = \left(10^{\left(\frac{(E-11.61)}{1.0465} \right)} \right) \times 133 \quad (2)$$

この CG-28 コントローラでの測定圧力範囲は 10^{-8} Pa から 10^{-2} Pa となっている。圧力以外に HV の ON/OFF 状態を FA-M3 コントローラの I/O モジュールから取得している。ラダープログラム側でこの信号を GV 区間単位で集計しインターロックに使用しており、ある区間の圧力が悪くなり CCG の HV が OFF になると、その区間にあるイオンポンプの HV を OFF にし、NEG ポンプ活性化電源処理を停止するロジックが組み込まれている。圧力値は電源棟単位で平均値を算出し、真空制御のメインパネルで表示させている。

ビーム運転期間中は、ビームパイプ焼き出し、NEG ポンプの活性化などによって圧力が悪化し、異常判定閾値の変更が頻繁に発生した。真空制御用で扱っている EPICS レコードのアラーム通知は、主に EPICS レコードの標準の機能である Severity で処理したため、閾値の変更などに対して容易に対応できた。

2.4 NEG ポンプ活性化電源制御

NEG ポンプの活性化用サイリスタ電源は LER に 16 台、HER に 24 台ある。同電源は CHINO 社製で、KEKB

から使用されているものを再利用している。電源には容量が 40kW と 2kW の 2 種類があり、周波数は 50Hz、最大出力電圧は 200V である。ビームパイプには様々な種類の NEG ポンプ活性化用ヒーターが設置されており、それらの抵抗値に応じた各種トランスが加速器のトンネル内に設置されている。トランスの電流値はそれぞれ個別に計測しており、LER は 136 箇所、HER は 193 箇所の電流値を CSS/BOY 上に表示させ監視している。

NEG ポンプ活性化電源のソフトウェア制御は、KEKB 時代の実績をもとに、EPICS シーケンサによって実装した。サイリスタ電源の電圧出力経過時間に合わせて 4 つの状態に変化し、段階を踏んだ電圧出力を行えるシーケンス処理を組み込んでいる(Figure 1)。これによりガス放出量に合わせた運転を実現している。この制御用パラメータには、最大出力電圧、各状態での出力電圧、およびその継続時間がある。このパラメータは常時設定変更が可能としており、即時にシーケンス処理に反映される。パラメータを変更された時点で出力していた電圧値と、パラメータで指定された目標電圧値、および電圧出力の継続時間の残り時間を基に、直線補間した結果の出力電圧設定値で印加する。そのためパラメータ変更直後に急激な電圧出力の設定が行われなくなっている。ガス放出量が想定以上となり圧力が悪化した場合は、ガス放出量の増加を抑えるため、その時点での電圧出力状態を維持するポーズ機能も実装されている。

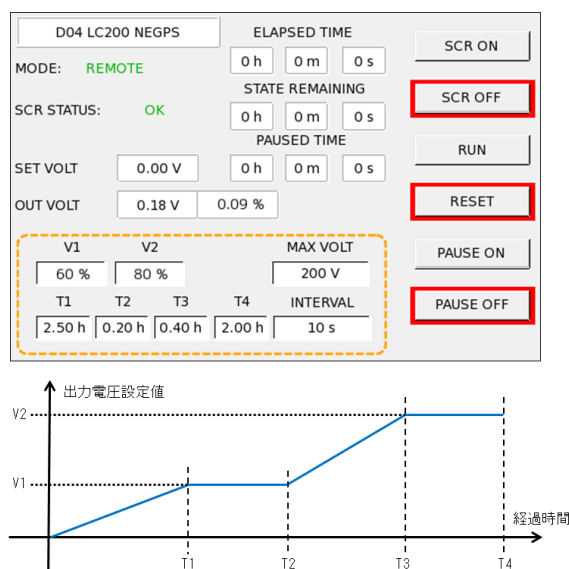


Figure 1: Image of NEG activation sequence.

2.5 温度計測制御

Phase-I の温度計測では LER が 1585 点、HER は 1271 点モニタしている。このうち LER の 1324 点、HER の 1204 点は KEBK で使用していた横河電機社製のデータロガー DA100^[14]を再利用し、5 秒周期で温度情報収集を行っている。DA100 の外部との通信インターフェースは GPIB であり、FA-M3 コントローラに GPIB 通信用モジュールの F3GB01^[15]を搭載して IOC(F3RP61)から温度情報をモニタしている。SuperKEKB では、この F3GB01 モジュールでの GPIB 通信を汎用的に使用する

ことができるよう F3GB01 の Driver Support と DA100 の Device Support それぞれを作成した。

この Device/Driver Support については、運転中に Segmentation fault により EPICS の IOC が停止してしまう現象が相次いだ。頻度は EPICS システムを起動して数分後の場合もあれば 10 日後の場合もあった。この問題を調査した結果、原因は、稀に DA100 から受け取る電文の通信フォーマットが不正になることがあり、温度計測アプリケーションで使用している Device/Driver Support の処理内で、バッファオーバーランが発生するためであることが分かった。Phase-I コミッショニング中に行った対策は、この温度計測のアプリケーションを、別の IOC プログラムとして分け、他のアプリケーションへこの問題の影響が出ないようにした。この対策により、温度計測制御アプリケーション以外の EPICS アプリケーションは異常停止することなく Phase-I を終わることが出来た。

現在は、不正な通信フォーマットを受信した場合にはその電文を破棄する対策を Device/Driver Support に組み込んでおり、全電源棟で長期連続運転させ監視し続けているが本稿執筆時点では全て問題なく動作している。

DA100 での計測に加え、SuperKEKB ではウィグラー電磁石区間の温度計測に、DA100 の後継機種である横河電機社製のデータロガー MW100^[16]を採用して LER の 261 点と HER の 67 点を計測している。MW100 の外部との通信インターフェースはイーサネットポートだけであるため、IOC は Linux サーバ計算機を使用した。また通信フォーマットがアスキーデータであったため、Device/Driver Support には asynDriver と StreamDevice の組合せを使用した。MW100 も DA100 と同じく 5 秒周期での温度情報収集を行っているが、同制御システムは特に問題なく順調に動作している。

2.6 冷却水流量計測制御

流量計のモニタ点数は 689 点あり 5 秒周期で計測している。この流量計は先端に永久磁石を埋め込んだ水車が流量に応じて回転し、ピックアップコイルに生じる交流の起電力を測定する方式である。流量値は、この回転周波数 0-30 Hz から 0-10 V へ変換したデータを EPICS システム側で受け取り、それを基に EPICS の calc レコードで電圧と流量の変換係数を掛けて算出している。

この変換係数は流量計毎に個体差があるため、このアプリケーションでは非常に多くのパラメータを管理する必要があった。SuperKEKB では後述する TXDB^[17]を利用して流量計と変換係数との対応を一括管理することで、パラメータ変更などに対して容易に対応できた。EPICS での流量計測は、現在まで不具合も無く順調に稼働している。

2.7 コリメータ制御

各電源棟に設置されている FA-M3 コントローラベースの IOC には、空きスロットが無かったため、コリメータ制御には、別途、同 IOC を用意した。HER に設置されているコリメータは、水平方向コリメータ 8 台、垂直方向コリメータが 8 台あり、KEKB 時代の機器を再利用している。これらについては、FA-M3 コントローラに 1 モジュールで 2 軸まで制御可能な F3NC02^[18]を搭載して、モータ制御を行っている。コリメータヘッド位置の取得には、ポテンシ

メータとデジタルマルチメータを使用し、得られた位置情報を基にフィードバック制御を行っている。

LERには新方式の水平方向コリメータ2台が追加された^[19]。従来型は水平または垂直方向の片側からコリメータヘッドがビームヘアプローチする仕組みであったが、新方式では水平または垂直方向の両側からビームヘアプローチする。モータ制御には1モジュールで15軸制御可能であり、インターフェースにMECHATROLINK-III通信^[20]の機能をもつF3NC97^[21]を採用した。コリメータヘッド位置の取得は差動トランスと差動トランス用シグナルコンディショナを使用し、10 μm 単位での測定結果をもとにフィードバック制御を行う。

F3GB01モジュールと同様に、F3NC97モジュールの通信を汎用的に使用するため、Driver Supportと、被制御対象機器に特化したDevice Supportをそれぞれ作成した。SuperKEKBでのコリメータ制御では位置決め精度を $\pm 50 \mu\text{m}$ に収める必要がある。目標位置付近でのモータのバックラッシュを極力無くするため、モータ運転速度を目標位置までの距離に応じて2段階に分けて運転させる方式とした。目標値付近ではモータ運転速度を低速とする仕組みにより、要求される位置決め精度を達成することができた。

Phase-I期間中にあったアクシデントの1つに、運転停止中のモータの励磁が弱く、大気圧に押されて、コリメータヘッドがビームパイプ中心へ移動してしまう現象が発生した。モータ変更が必要となりモータドライバへ渡すパラメータも変更となったが、TXDBでのパラメータ管理により制御プログラム変更の必要はなく、運転への影響は僅かであった。

2.8 残留ガス分析計制御

SuperKEKBのメインリングで使用している残留ガスの分析計は2台あり、MKS社のMicrovision2^[22]を採用し、制御している。外部との通信インターフェースはイーサネットポートだけであるため、IOCにはLinuxサーバ計算機を選択し、Device/Driver SupportにはasynDriverとStreamDeviceの組合せを使用した。Phase-Iコミッショニング開始時から、残留ガス分析のスキャンを続けているが、特段の問題も無く順調に動作している。

3. TXDBを利用したパラメータ管理

SuperKEKBの真空制御では、EPICSシステムのアプリケーションを構築する情報管理のためにTXDBを導入した。TXDBとはKEKで開発されたデバイス・コンフィギュレーションをテキストファイルで管理するツールであり、Pythonで扱うことの出来るライブラリを提供している。TXDBにはEPICSアプリケーション毎に必要な機器情報やパラメータを格納してあり、目的に応じてTXDBにアクセスしデータを取得することで、EPICSレコードやEPICSシーケンサに各種パラメータを反映させることができる。

Phase-Iでは各アプリケーションでパラメータ変更が度々発生したが、TXDBのデータは、EPICSアプリケーション毎に機器情報およびパラメータを一括して1ファイルで管理しているため、パラメータの反映を忘れること等による手戻りも無く、順調な運用ができた。特にデータ量

が多く、機器などの変更が頻繁に発生する温度計測アプリケーションに対して、即時に対応でき、大きな効果を発揮することが実証された。

4. まとめ

SuperKEKBの真空制御のために、GV制御、VSWモニタ、イオンポンプ電源制御、CCG圧力計測制御、NEGポンプ活性化電源制御、温度計測制御、冷却水流量計測制御、コリメータ制御、残留ガス分析計制御についてEPICSアプリケーションを実装した。同アプリケーションは、Phase-Iコミッショニングにおいて実用に供された。運転期間中、温度計測制御アプリケーションで不具合が発生したが、迅速な問題の切り分けと、適切な対策を講じることができた。

現在、コミッショニングのPhase-II開始に向け、SuperKEKBメインリングでは、新方式のコリメータの増設が予定されている。ダンプリングも新たなイオンポンプ電源、NEGポンプ活性化電源、残留ガス分析計の機器導入が検討されている。そのために、Phase-Iで経験したノウハウを活かし、TXDBの利用およびDevice/Driver Supportの作成など、保守性、汎用性、および拡張性を重視したシステムの構築を進めている。

参考文献

- [1] EPICS Device and Driver Support for Yokogawa's F3R P61; <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>
- [2] Yokogawa Electric Corporation, "PLC(プログラマブルコントローラ)"; <http://www.yokogawa.co.jp/itc/itc-index-ja.htm>
- [3] Yokogawa Electric Corporation, "Linux 対応 CPU モジュール F3RP61-2L"; <http://www.yokogawa.co.jp/rtos/Products/CPU/rtos-prdcpu2-ja.htm>
- [4] F3RP61 Device and Driver Support, "EPICS Device and Driver Support for Yokogawa's F3RP61"; <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>
- [5] National Instruments, "NI CompactRIO コントローラ"; <http://www.ni.com/compactrio/ja/>
- [6] MEDM, "MEDM: Motif Editor and Display Manager"; <http://www.aps.anl.gov/epics/extensions/medm/>
- [7] CSS, <http://www.aps.anl.gov/epics/eclipse/>
- [8] H. Hisamatsu, T. Momose and H. Ishimaru: Shinku, 35 (1992)579.
- [9] F3WD64-4P, "入出力モジュール(短絡保護機能付シンクタイプ)"; <http://www.yokogawa.co.jp/itc/Products/DIO/itc-prddio8-ja.htm>
- [10] Agilent Technologies, "Ion Pumps 4UHV Controller"; <https://www.agilent.com/en-us/products/vacuum-technologies/high-vacuum-pumps/ion-pumps/4uhv-controller>
- [11] MOXA CORPORATION, "NPort 5610"; http://www.moxa.com/product/NPort_5600.htm
- [12] StreamDevice, "EPICS StreamDevice"; <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/doc/>
- [13] asynDriver, "asynDriver: Asynchronous Driver Support"; <http://www.aps.anl.gov/epics/modules/soft/asyn/>
- [14] Yokogawa Electric Corporation, "データアキュイジションユニット DA100"; <http://www.yokogawa.co.jp/ns/daq/acquisition/da100/ns-da100-01-ja.htm>
- [15] Yokogawa Electric Corporation, "GP-IB 通信モジュール F3GB01-0N"; <http://www.yokogawa.co.jp/itc/Products/com/itc-prdcom19-ja.htm>
- [16] Yokogawa Electric Corporation, "DAQMASTER シリーズデータアキュイジションユニット MW100"; <http://www.yokogawa.co.jp/itc/Products/daq/daq-master/mw100-ja.htm>

yokogawa.co.jp/ns/daq/acquisition/mw100/ns-mw100-01-ja.htm

- [17] T. T. Nakamura, "Application of a Simple Text Format as a Device Configuration File", ICALEPCS2009, Kobe, 12-16 Oct. 2009, p. 432.
- [18] Yokogawa Electric Corporation, "F3NC02-0N,位置決めモジュール取扱説明書", "IM34M6H56-01 4th Edition : 2005.12.01-00"
- [19] N. Yoshifuji *et al.*, "Development of collimator control system for SuperKEKB with MECHATROLINK-III communication", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2015), Tsukuba, Aug.5-7, pp.781-786.
- [20] MECHATROLINK 協会; <http://www.mechatrolink.org/jp/mechatrolink/feature-m3.html>
- [21] Yokogawa Electric Corporation, "位置決め (MECHATROLINK-III通信対応) F3NC97-0N"; <http://www.yokogawa.co.jp/itc/Products/Position/itc-prdposi12-ja.htm>
- [22] MKS Instruments, "Microvision 2 Flexible, Integration-ready Residual Gas Analyzer"; <https://www.mksinst.com/product/product.aspx?ProductID=184>