

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)}, 石橋 拓弥^{B)}, 小田切 淳一^{B)}, 照井 真司^{B)}, 中村 達郎^{B)}, 久松 広美^{B)}
Naoki Yoshifuji ^{#,A)}, Tatsuro Nakamura^{B)}, Jun-ichi Odagiri^{B)}, Takuya Ishibashi^{B)}, Shinji Terui^{B)}, Hiromi Hisamatsu^{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 the 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, 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 control software of the main rings has gone through the Phase-I operation without any serious problems and we are shifting our axis to the control of the damping ring and beam transport lines. After the Phase-I operation, development of the control software of the damping ring is in progress steadily. This paper, describes the present status of software development of vacuum control system and the problems to be solved towards the Phase-II operation.

1. はじめに

SuperKEKB のコミッショニングは Phase-I が成功裡に完了し、現在 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 制御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しているが、真空制御システムの場合、ハードウェアインターフェースについては大きな変更があったため、制御ソフトウェアについても大幅な改修が必要となった。

KEKB の真空制御のフロントエンドシステムは、IOC として VME 計算機を使用していた。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 PLC[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、VME と 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 PLC 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 PLC 自体を IOC として使用することが可能となった。各種真空制御ソフトウェアは、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[4,5]を使用している。

真空制御ソフトウェアの場合、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[6]、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った。このため 32 チャンネル/モジュールの AD を持つ National Instruments 社の CompactRIO[7] を採用した。CompactRIO には Channel Access Server (CA Server) と呼ばれるオプション的な機能があり、Device/Driver Support を作成することなく、Channel Access(CA)で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 Operator Interface (OPI)については、従来は MEDM[8]等を使用してきたが、SuperKEKB ではより高機能な Control System Studio (CSS)[9]/ The Best OPI, Yet (BOY) を使用して開発を進めている。

真空制御ソフトウェアの開発については、Phase-I から現在に至るまで、順調に開発が進んでいる。現在、制御ソフトの開発の軸足はメインリング[10,11,12]からダンピングリング[13,14]、beam transport (BT) Line へと移行しつつある。

本稿では、真空制御システムのソフトウェア開発の現状と、Phase-II 運転までの課題について報告する。

2. メインリングの真空制御

メインリングは、Low Energy Ring (HER) と High Energy Ring (LER) の 2 つのリングが並んで設置されている。

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

SuperKEKB におけるメインリングの真空制御システムは、16 台の FA-M3 PLC と中央制御室にあるサーバ計算機で制御している。このうち FA-M3 PLC は、12 箇所ある電源棟それぞれに配置し GV、VSW、CCG、イオンポンプ電源、NEG ポンプ活性化電源、温度計、冷却水流量計を制御している (Figure 1)。残りの 4 台については、D06、D09、D12 電源棟にコリメータ制御用として 3 台、D02 電源棟にビームストッパー制御用として 1 台の FA-M3 PLC が配置されている。

真空 OPI のメインパネル (Figure 2) にはメインリング、ダンピングリング、BT Line の全 GV と全 VSW の状態、及びリング単位と電源棟単位の平均圧力、最大温度、冷却水流量を表示している。このメインパネル1つで主だった真空状態を確認することができる。各被制御機器の操作及びモニタは、メインパネルから電源棟単位のサブパネルを立ち上げることで GV 開閉やイオンポンプ、CCG の High-Voltage 印加を操作することができる。サブパネル立ち上げには、安全面を考慮し、特定のユーザのみが操作を行えるようパスワードの入力が求められる。この真空 OPI と FA-M3 PLC、及び Linux サーバ計算機は EPICS レコードを介してデータのやり取りを行っている。

メインリングの各被制御機器の総数を Table 1 に示す。真空制御ソフトウェアはこれら被制御機器毎に構築されている。Phase-I 終了から現在に至るまで、真空制御ソフトウェアは、被制御機器の交換に対応する程度にとどまり、これらの要望に対して柔軟に対応している。加えて、

SuperKEKB では TXDB[15] という各種制御パラメータを管理するテキストベースのコンフィギュレーション・ファイルを導入しているため、制御ソフトウェアの変更があった場合でも反映漏れなどのリスクを最小限に抑えることができ、確実なソフトウェア管理が実現できている。

Table 1: Number of Main Ring Vacuum Control Devices

被制御機器	LER 対象数	HER 対象数
GV	31	33
VSW	31	33
CCG	306	299
イオンポンプ電源	306	300
NEG ポンプ活性化電源	16	24
温度計	1585	1271
冷却水流量計	LER,HER 合計 689	
コリメータヘッド	4	8
ストッパー	2	2
残留ガス分析計	2	0

3. ダンピングリングの真空制御

ダンピングリングの概略図を (Figure 3) に示す。ダンピングリングは、高いミノンシティを得るために、メインリングに入射する陽電子ビームを低エミッタンス(1/50 ~ 1/500)にする装置である。

ダンピングリングの真空制御システムは 6 つ GV により区分けされており、制御ソフトウェアは、OPI を含め、この GV 区間毎に構築している。ダンピングリングの真空制御システムは、2 台の FA-M3 PLC とサーバ計算機で構築されている。FA-M3 PLC のうち、1 台は GV、VSW、粗排気、イオンポンプ電源、NEG ポンプ活性化電源、温度計、冷却水流量計を制御している(Figure 4)。残り 1 台はビームストッパー制御を担っている。残留ガス分析計はメインリングと同様に FA-M3 PLC を介さずサーバ計算機から直接制御している。ダンピングリングの各被制御機器の総数を Table 2 に示す。

ダンピングリングでは新規に Gamma Vacuum 社製のイオンポンプ電源 QPCe[16]、NEG ポンプ活性化電源として KIKUSUI 社製の PAG600-4[17]、そして ULVAC 社製の残留ガス分析計 Qulee[18] を採用した。

イオンポンプ電源 QPCe は、排気に加えてリング内の圧力計測も可能であり、同電源 1 台でインポンプ 4 台に High-Voltage 印加が可能である。圧力値は真空計を用いず、QPCe の放電電流から算出しており、1E-7 Pa 程度(放電電流の測定精度は 10 nA)までの低い圧力を測定可能である。QPCe との通信は、テストベンチでの単体動作試験を行った結果、最も安定して通信できた RS232C を採用した。Moxa 社製イーサネット・シリアル変換機 NPort5610-16[19]を用いてサーバ計算機と接続している。真空制御ソフトウェア構築では、このダンピングリングに限らず RS232C シリアル通信や RS485 平行通信の

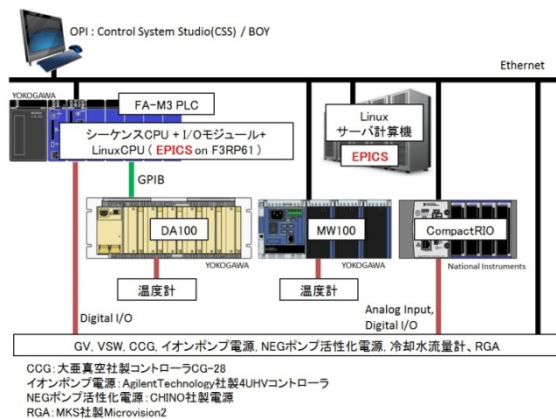


Figure 1: Main ring vacuum control system.

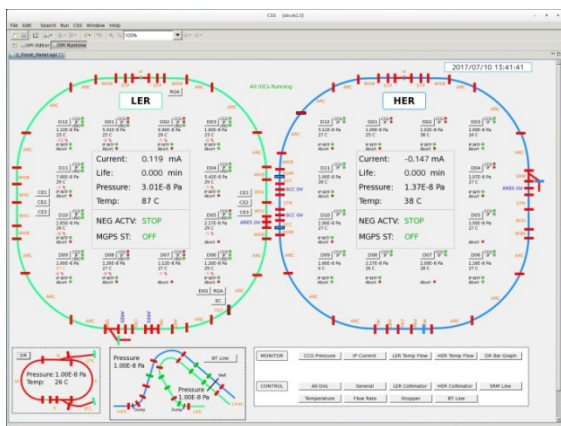


Figure 2: Vacuum system OPI main panel.

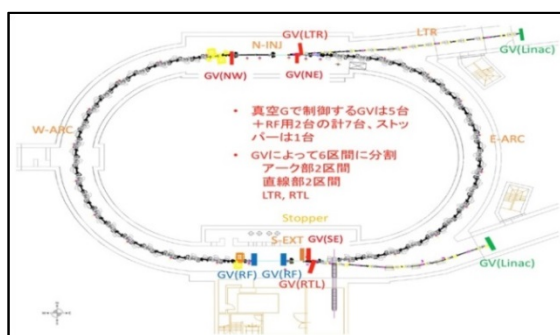


Figure 3: Overall view of Damping ring.

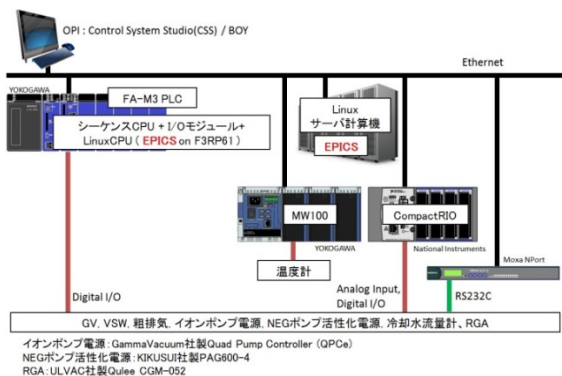


Figure 4: Damping ring vacuum control system.

実装には、Device/Driver Support として、Phase-I でも実績のある StreamDevice[20]と asynDriver[21]を利用している。現在までの約 6 ヶ月間、QPCe の運用をしているが、特段の問題なく順調に稼動している。

Table 2: Number of Damping Ring Vacuum Control Devices

被制御機器	対象数
GV	7
VSW	6
粗排気	33
イオンポンプ電源	11
NEG ポンプ活性化電源	6
温度計	30
冷却水流量計	20
CCG	6
ストッパー	1
残留ガス分析計	1

NEG ポンプ活性化電源 PAG600-4 の制御は、後述する理由により、これまでメインリングで採用してきた NEG ポンプ活性化シーケンスを使用することができず、EPICS シーケンサの処理を新規に検討し作成する必要があった。

ダンピングリングのビームパイプは、マグネットのボア

半径が狭いため、ビームパイプ内が狭く、コンダクタンスが小さい。メインリングで実装した NEG ポンプ活性化の電源制御シーケンスは、経過時間に応じて出力電圧値を上げ続ける処理となっているが、同じ活性化の処理をダンピングリングで実行すると、NEG ポンプに吸着していたガスの放出量が想定より多い場合、排気が間に合わず、短時間で急激に圧力が上昇し、機器故障のリスクがあることが分かった。このことから、ダンピングリングの NEG ポンプ活性化の電源制御シーケンスでは、任意に設定できる圧力の上下限值を設け、ビームパイプ内の圧力を常時監視し、圧力に応じて出力電流値を制御する方針とした。上限として設定した値を超えて圧力が悪化した場合は、自動的に出力電流値を一定に保つ処理に切り換えてガスの排気を待ち(自動ポーズ機能)、下限として設定した値まで圧力が良くなると、再び設定した目標の電流値まで徐々に出力設定値を上昇させるシーケンス処理を実装した。Figure 5 は上限値を 5E-5 Pa、下限値を 4E-5 Pa に設定してテストした結果である。NEG ポンプ活性化の処理開始から約 6 時間後にガス放出量が急激に増え、圧力が悪くなっているが、自動ポーズ機能により、最も圧力が悪化したときでも 1E-4 Pa 程度に抑えた状態で NEG ポンプ活性化を継続できている。その後も NEG ポンプ活性化を中断することなく、処理を完了させることができている。この長期間の NEG ポンプ活性化の実現により、現在一部区間ではあるが 1E-7 Pa 以下を実現している。

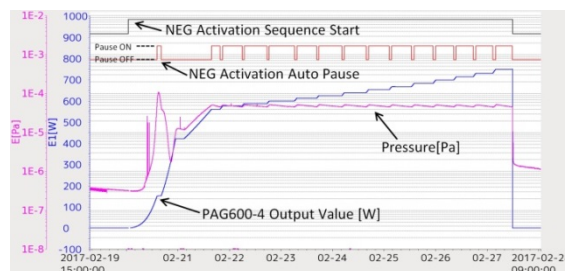


Figure 5: Trends of NEG activation sequence.

残留ガス分析計 Qulee は、KEKBLLog[22]などのデータ・アーカイバ・システムと連動させるため、質量数毎のデータを EPICS レコードで保持する必要があった。またそれら保持したデータは、メーカ指定のグラフ表示ツールと同じように、OPI で表示させる必要があった。真空制御ソフトウェアでは、残留ガス分析計の本体とメーカの表示ツールの間で行われている通信電文を解析し、表示ツールの代わりとなる制御ソフトウェアと OPI を開発した。開発から現在まで、連続スキャンを続けているが、問題なく動作している。

ダンピングリングでは、メインリングにはない被制御機器として、粗排気セット(ターボポンプとスクロールポンプ)がある。加速器運転中は取り外され、必要に応じて特定の GV 区間に設置し排気を行う。真空制御ソフトウェアでは、CompactRIO を介して粗排気セットから AD 値を取得し、ポンプ回転数と圧力値に変換し、OPI で監視する。NEG ポンプ活性化中に、これらポンプの情報に異常が見つかった場合、NEG ポンプの故障リスクを回避するため、NEG ポンプ活性化電源を停止するインターロックがラダープログラムで構築されている。

4. BT Line の真空制御

BT Line は入射器とリングを繋ぐビーム輸送路である。SuperKEKB における BT Line は、メインリングの HER(electron)と LER(positron)にビームを供給する。

現状、BT Line の真空制御システムは、VME と CAMAC のシステムから FA-M3 PLC への置き換えを行っている(Figure 6)。BT Line の各被制御機器の総数を Table 3 に示す。

BT Line のイオンポンプ電源は、新規に Gamma Vacuum 社製の SPCe[23]を採用した。19 台を RS485 通信でパラレル接続し制御する。

BT Line の圧力計測は、ダンピングリングと同様に SPCe の放電電流から算出しており、 $2E-7$ Pa 程度(放電電流の測定精度は 20 nA)までの低い圧力を測定可能である。現在、2 台連結した試験環境で動作させているが、現状何も問題なく動作確認している。

被制御機器の更新に伴い、BT Line 用 OPI も新たに作成している。従来の OPI では、圧力値表示、GV 開閉操作、イオンポンプ操作をするためには、1 つの被制御機器に対して 1 つのパネルを開く必要があった。そのため類似したパネルを多数の表示させる必要があり、人為的ミスリスクがあった。SuperKEKB では 1 つの OPI パネル上に全ての機能を実装し、操作性と視認性を向上させている。

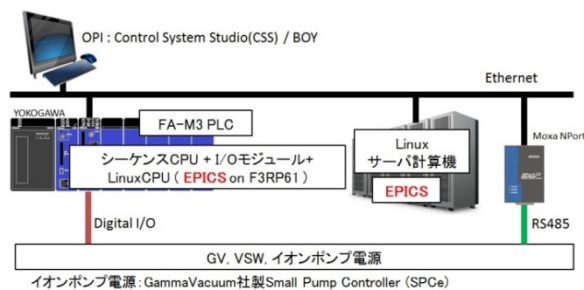


Figure 6: BT Line vacuum control system.

Table 3: Number of BT Line Vacuum Control Devices

被制御機器	electron	positron
	対象数	対象数
GV	13	11
VSW	15	12
イオンポンプ電源	10	9

5. まとめ

SuperKEKB の Phase-II コミッショニング開始に向けて、ダンピングリングと BT Line の真空制御ソフトウェアを実装中である。

メインリングの真空制御ソフトウェアは Phase-I から現在に至るまで被制御機器の交換に対応する程度となっており、制御ソフトウェアの変更はほぼなく、順調に動作している。

ダンピングリングでは、メインリングとは異なる新たな機

種のイオンポンプ電源、NEG ポンプ活性化電源、残留ガス分析計が採用されたため、それぞれ制御ソフトウェアを開発した。特に NEG ポンプ活性化電源の制御ソフトウェアでは、NEG ポンプの活性化の際に、コンダクタンスの小さいビームパイプの影響で発生する急激な圧力上昇に対して、自動ポーズ機能を実装し、一部の GV 区間ではあるが、長期間安定して活性化を行うことができた。

BT Line においては更に異なるイオンポンプ電源が採用されたため、新規に制御ソフトウェアを開発した。BT Line の動作確認は試験環境のみではあるが、現状特に問題なく動作している。

今後、SuperKEKB メインリングでは新方式のコリメータの増設、ダンピングリングではリング全体の真空立ち上げ試験、BT Line についても真空立ち上げ試験が予定されている。Phase-I で培ったノウハウを活かし、更なる保守性、汎用性、安全性、および拡張性を重視したシステムの構築を進めていく。

参考文献

- [1] <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>
- [2] <http://www.yokogawa.co.jp/itc/itc-index-ja.htm>
- [3] <http://www.yokogawa.co.jp/rtos/Products/CPU/rtos-prdcpu2-ja.htm>
- [4] J. Odagiri *et al.*, "Integration of PLC with EPICS IOC for SuperKEKB Control System" Proc. of ICALEPCS2013, San Francisco, US, Oct. 6-11 2013, pp.31-34, (MOCOBAB02)
- [5] <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>
- [6] S. Terui *et al.*, this proceedings.
- [7] <http://www.ni.com/compactrio/ja/>
- [8] <http://www.aps.anl.gov/epics/extensions/medm/>
- [9] <http://www.aps.anl.gov/epics/eclipse/>
- [10] T. Ishibashi *et al.*, "SuperKEKB 真空機器制御システムと総合試験", Proceedings of Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol. 58 (2015) No. 4 p. 126-130, 5-8 May. 2015.
- [11] H. Hisamatsu, T. Momose and H. Ishimaru: Shinku, "低減型電流制限 (フの字) 方式イオンポンプ電源", Vol. 35 (1992) No. 6 P579-582, 10-20 Oct. 1992.
- [12] N. Yoshifuji *et al.*, "SuperKEKB での真空制御ソフトウェアの現状", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP090, Chiba, Japan, 8-10 Aug. 2016.
- [13] M. Kikuchi *et al.*, "DESIGN OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPER-KEKB", Proceedings of IPAC'10, TUPEB0540, Kyoto, Japan, 23-28 May, 2010, p.1641; <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tupeb054.pdf>
- [14] K. Shibata *et al.*, "SuperKEKB 陽電子ダンピングリングの真空システム", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOP107, Chiba, Japan, 8-10 Aug. 2016.
- [15] T. T. Nakamura "Application of a Simple Text Format as a Device Configuration File", ICALEPCS2009, Kobe, 12-16 Oct. 2009, p. 432.
- [16] <http://www.gammavacuum.com/index.php/product?id=65>
- [17] <http://www.kikusui.co.jp/catalog/?model=pag&p=>
- [18] https://www.ulvac.co.jp/products_j/components/process-gas-monitor/qulee-cgm
- [19] http://www.moxa.com/product/NPort_5600.htm
- [20] <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/doc/>
- [21] <http://www.aps.anl.gov/epics/modules/soft/asyn/>
- [22] T. T. Nakamura *et al.*, "Data Archiving System in KEKB Accelerators Control System", Proc of the 10th ICALEPCS, Geneva, Oct. 10-14 2005; <https://accelconf.web.cern.ch/>
- [23] <http://www.gammavacuum.com/index.php/product?id=64>