

SuperKEKB 入射器コントロールシステムの現状 CONTROL SYSTEM UPGRADE FOR SUPERKEKB INJECTOR LINAC

佐藤政則^{#, A, B)}, 工藤拓弥^{C)}, 草野史郎^{C)}, 市川智浩^{C)}, 水川義和^{C)}, 久積啓一^{C)}, 高木誠^{D)}, 早乙女秀樹^{D)},
清宮裕史^{A, B)}, 宮原房史^{A, B)}, 三川勝彦^{A)}, 諏訪田剛^{A, B)}, 古川和朗^{A, B)}

Masanori Satoh^{#, A, B)}, Takuya Kudou^{C)}, Shiroh Kusano^{C)}, Tomohiro Ichikawa^{C)}, Yoshikazu Mizukawa^{C)}, Keiichi
Hisazumi^{C)}, Makoto Takagi^{D)}, Hideki Saotome^{D)}, Yuji Seimiya, Fusashi Miyahara, Katsuhiko Mikawa, Tsuyoshi

Suwada, and Kazuro Furukawa

^{A)} Accelerator Laboratory, KEK

^{B)} Department of Accelerator Science, SOKENDAI

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

^{D)} Accelerator Group, Kanto Information Service (KIS)

Abstract

The KEKB project has successfully completed its decade operation in the June of 2010. SuperKEKB main ring is currently being constructed for aiming at the peak luminosity of $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. The electron/positron injector linac upgrade and beam commissioning are also going on for increasing the intensity of bunched charge with keeping the small beam emittance. The key upgrade issues are the construction of positron damping ring, a new positron capture system, and a low emittance photo-cathode rf electron source. The injector linac beam commissioning started in the October of 2013. The control system performance determines the beam operation efficiency of injector linac, and it eventually has a strong impact on the experimental results of physics. In this decade, the linac control system has gradually transferred from the in-house system to the Experimental Physics and Industrial Control System based one for improving the availability of beam operation. In this paper, we present the detailed present status of the SuperKEKB injector linac control system.

1. はじめに

SuperKEKB 電子/陽電子入射器 (入射器) のビーム制御システムは、標準的なクライアント/サーバモデルに準じた三階層構成となっている。すなわち、オペレータインターフェース部に当たるクライアント部、中間層に相当するサーバ部、および機器を直接制御するローカル制御部から構成される。従来の入射器制御システムは、Remote Procedure Call (RPC) を利用し、独自開発のライブラリ群を基盤として開発された。オペレータインターフェース(OPI)部には、シェルスクリプトによるコマンドラインインターフェース(CLI)および Tcl/Tk スクリプト言語によるグラフィカルユーザインターフェース(GUI)が用いられてきた。

KEKB 運転の中期頃、これら既存のシステムは、Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) ^[1]を基盤とした制御システムへ徐々に移行してきた。KEKB 主リングは、当初より EPICS を基盤とした制御システムを構築していたため、入射器およびリング制御システム間の親和性を高めることができた。すなわち、双方にまたがるパラメタ間の相関解析などを容易におこなうことが可能となり、障害発生時の原因究明に要する時間を短縮化することに威力を発揮した。また、EPICS 環境導入後には、GUI および CLI 開発に Python スクリプト言語を導

入し、アプリケーション開発の時間短縮やより高度なアプリケーションの開発を容易にした。また、KEKB 主リングと放射光源 PF リングの同時トップアップ運転のために、イベントタイミグシステムを導入し、パルスごとに異なるエネルギーのビームを入射するという高度なビーム制御を実現した ^[2, 3, 4, 5]。

2. 制御システム

2.1 計算機システム

入射器の制御システムは、標準的なサーバクライアントモデルを基盤としているため、多種多様なローカルコントローラを用いたシステムを実装するには有益な構成である。KEKB 運転開始時には、サーバ計算機として 6 台の Compaq Alpha 計算機を運用していた。その内の 2 台は、Tru64 UNIX OS 上のクラスタ機能および RAID を用いた冗長化ファイルサーバとして運用してきた。これにより、一方の計算機に障害が発生した場合においても、他方がファイルサービスを提供し続けることが可能である。実運転においても本機能を採用していたため、幾度かの計算機障害時においても、ビーム運転の停止を避けることができた。

その後 Tru64 UNIX のサポートが終了し、ハードウェアとしてのサーバ計算機の保守も困難になってきたため、汎用性の高い Linux OS を基盤としたサーバ計算機への移行をおこなってきた。Linux

[#] masanori.satoh@kek.jp

サーバ計算機においても高信頼性を維持するため、数種類の高可用性クラスタシステムの試験運用をおこなった。試験的なフェールオーバーでは概ね問題は無かったが、実運用中の予期せぬ障害時には、フェールオーバーを正常におこなうことができない場合があった。このため、クラスタシステムの採用を見送り、サーバ計算機単体での可用性を高めるため、ブレード型計算機を導入した。OS として、パッケージの更新頻度の高い CentOS を採用し、現在、主に 5.11 x86_64 を運転に使用している。また、将来の OS 更新を考慮し、CentOS 6.6 および 7 についても試験的に導入している。

クライアント部に相当するオペレータ端末として、Tektronix X 端末および PC9801/DOS PC を用いた独自開発のタッチパネルシステムを利用してきた。これらについても保守が困難になったため、Linux PC および Windows PC への置き換えをおこなった。Windows PC 上では、ASTECH-X や Reflection X といった X サーバソフトウェアを使用し、サーバ計算機上で実行する GUI を表示している。

2.2 ネットワークシステム

近年の加速器施設においては、多数のネットワーク接続機器が使用されているため、ネットワークシステムは加速器制御システムの最重要構成要素の一つになっている。ネットワークシステムの重障害は、計算機障害とともに、加速器運転の停止をもたらす可能性が高い。このため、KEKB 運転時には、Cisco Catalyst4506 および 3750 をアクティブ/スタンバイ冗長化コアスイッチとして運用していた。45 台のエッジスイッチには、Catalyst2950 を使用していた。コアスイッチおよびエッジスイッチ間の光ファイバ接続は、スター型トポロジを採用し、ネットワーク帯域幅は 100 Mbps であった。また、コアスイッチおよびエッジスイッチ間のみならず、エッジスイッチおよび Programmable Logic Controller (PLC) などのローカルコントローラ間も光ファイバ接続を用いている。これは、大電力クライストロンが発するノイズの影響を極力回避するためである。

SuperKEKB 計画に向けて、カメラや電磁石電源などのネットワーク接続機器が増加してきたため、ネットワーク増強の必要性が高まってきた。そのため、2013 年に、より高性能なコアスイッチとして Cisco Catalyst3750X を 6 台導入した。これらは、アクティブ/アクティブ冗長化システムとしてエッジスイッチと接続されている。また、これと同時にエッジスイッチの更新もおこない、47 台の Catalyst2960S を導入した。本構成における通常運用時には、エッジスイッチにおけるアップリンク帯域幅は 2 Gbps となっている。

2.3 ローカル制御部

入射器制御システムのローカル制御部では、VME や PLC を始めとした多様な機器が使用されている。Table 1 に、ローカル制御機器ごとの使用目的および使用機器数をまとめた。ラダー PLC は電磁石電源、

Table 1: List of Local Controllers Used for the Linac Control System

Devices	Accelerator components (# of components)	# of local controllers
VME64x	Event based timing system (MRF EVG-230, EVR-230RF)	25
PLC	Magnet (363)	59
	Vacuum (333)	26
	Klystron (5)	5
	Charge interlock	3
Network attached power supply	Magnet (105)	105
Linux based PLC	Profile monitor (100)	30
Embedded Linux	Klystron (66)	66
Data logger	Temperature (690)	28
Oscilloscope	Beam position monitor (90)	23
NIM modules	Timing watchdog (15)	15
Total		385

真空ポンプ、真空ゲートバルブ、安全系システムなど、幅広い用途に用いている。約 170 台使用していた CAMAC および VME 基板の信号遅延モジュールは、VME64x を基盤としたイベントタイミングシステムへ更新した。これは、20 ms 間隔で各種タイミングを変更し、KEKB および PF リングへ同時トップアップ入射をおこなうためである。同時に、タイミング関連のモジュール数が大幅に削減されたため、制御システムの可用性が向上した。クライストロン制御用 PLC は、徐々に組み込み Linux システムへの移行を進めている^[6]。本システムでは、組み込み制御機器上で EPICS Input/Output Controller (IOC) を動作させることが可能である。Windows を基盤とした高速デジタルオシロスコープは、ビーム位置モニターデータ収集系として使用している。本システムは、現在開発中の VME モジュールに更新される予定である^[7]。新システムは、10 μm 以下のビーム位置測定精度を目指し、精密なビーム軌道制御、ひいては低エミッタンスビーム保存を実現するために必要である。

3. EPICS 環境

3.1 概要

Table 2 に、サブシステムごとに使用している EPICS IOC の数をまとめた。入射器制御システムでは、EPICS 導入当初、base R3.14.9 を基盤として IOC の開発をおこなった。これは、既存制御ソフトウェアへのラッパーとして開発したものである。しかしながら、制御機器情報更新時のソフトウェア変更作業が繁雑となり、制御対象機器数の増加による

Table 2: Number of EPICS IOCs Used for Each Subsystem

Subsystem	# of IOCs
Safety	2
Monitor	48
RF	57
Magnet	19
Vacuum	1
Operation	3
Timing	21
Temperature	2
Total	153

制御速度低下が問題となってきた。このため、PLCなどのローカル制御機器を直接制御するための IOC を開発し、真空制御系については既に更新をおこなった。電磁石およびクライストロン制御系に関しては、秋からのビーム運転時に更新をおこなう予定である。これらの開発には、EPICS base R3.14.12 を使用した。

3.2 アラームシステム

入射器制御システムでは、サブシステムごとに異なるアラームシステムを開発し、運用してきた。入射器制御システムの EPICS 化にともない、包括的なアラーム管理を目指し、EPICS Control System Studio (CSS) [8] alarm 3.0.0 を採用した。本システムでは、バックエンドデータベースとして PostgreSQL 9.1.4 を用いている。現在、約 1000 個の Process Variable (PV) をアラームに登録している。Figure 1 に、Python によって実装されたアラームシステム用 GUI の表示例を示す。本 GUI は、アラームの現在状況を表示するものであり、上段半分は各サブグループのアラームサマリを示している。アラームを発報している PV を含んだサブグループは、バックグラウンドカラーが赤く点灯している。同図の下段半分は、アラームが発報している具体的な PV 名が列記されている。さらに、より詳細なアラーム発報履歴については、別のウィンドウにおいて詳しく表示されることが可能である。

登録 PV の総数は、SuperKEKB 運転に向けて増加すると考えられる。このため、大規模なアラームシステムを構築した際の、スピード性能および堅牢性に関する評価を進めている [9]。



Figure 1: Example of EPICS CSS alarm status GUI.

3.3 データアーカイバシステム

入射器既存の制御システムでは、独自開発のパラメタロギングツールを用いてきた。本システムは、テキストファイルを基盤とした単純なものであり、サブシステムごとに異なるフォーマットが用いられている。そのため、ビーム位置および RF 位相の相関解析など、横断的なログ分析が簡便ではなかった。そこで、EPICS 基盤の制御システムの導入後、EPICS チャンネルアーカイバ^[10]および CSS アーカイバ 3.2.2 を導入し、運用を開始した。CSS アーカイバのバックエンドデータベースとして、PostgreSQL 9.1.4/9.3.3 を用いている。システムの可用性を高めるため、二つの独立した CSS アーカイバエンジンを、異なる計算機およびストレージを用いて運用している。現在、アーカイバに登録されている PV 数は 44063 である。サブシステムごとの登録数については、Table 3 に示すとおりである。1 日当たりに消費するストレージ容量は、チャンネルアーカイバおよび CSS アーカイバで、それぞれ、2 GB および 4.5 GB になっている。

チャンネルアーカイバには、既存の Java で開発されたビューアアプリケーションを使用している。一方、CSS アーカイバビューアには、専用の Web アプリケーションを開発し、使用している。本 Web アプリケーションは、Flex 4.6、PHP 5.3.6、および Amfphp 1.9 を用いて構築した。Web アプリケーションを用いることで、モバイルデバイスを含めて、ブラウザが動作する多くの環境からアーカイバ履歴を閲覧することが可能となった。本アプリケーションは、相関プロット、複数垂直軸、PV 名前検索、PV 名オートコンプリートなど、効率的なパラメタ解析のための機能性を有している。

CSS アーカイバの消費ストレージ容量は、チャンネルアーカイバと比較して大きくなっている。これは、リレーショナルデータベース (RDB) である

Table 3: List of EPICS PVs Registered for the EPICS Channel and CSS Archiver Systems

Subgroup	# of EPICS PVs
Klystron	1838
Vacuum	405
Temperature	694
Environment	324
Magnet	5410
PF ring	70
RF phase monitor	808
Safety	690
Operation	45
Timing	6329
Alignment	151
Slow e+ facility	30
BPM	27180
Injector	84

PostgreSQL をバックエンドデータベースに使用しているためである。また同様の理由から、CSS アーカイバからのデータ取得速度は、チャンネルアーカイバ経由と比較して劣る傾向にある。これを改善するために、PostgreSQL のオプションである `pg_reorg` を導入した。この機能により、データベースファイルサイズを約 30%削減することに成功し、読み出し速度に若干の改善が見られた。しかしながら、SuperKEKB 主リングコミショニングのためには、さらなる読み出し速度の改善が必要と思われる。このため、RDB の代わりに、NoSQL 型データベースの一つである `Cassandra` をバックエンドデータベースとして使用する試験を開始した。

また、CSS アーカイバの運用中、エラーステータスを出すことなくアーカイビングが停止することや、データが欠落するなどの問題が見られた。本不具合は、CSS アーカイバエンジンをより高速かつ大容量メモリを備えたサーバ計算機上で動作させることにより、解消されたと思われる。しかしながら、このような障害対策として、チャンネルアーカイバおよび二系統の CSS アーカイバを平行運用し、可用性を高めている。入射器における CSS アーカイバシステムの運用については、別途、詳細に報告される予定である^[1]。

4. アプリケーションソフトウェア

4.1 オペレータインターフェース

入射器既存のオペレータインターフェースには、`Tcl/Tk` スクリプト言語による GUI、シェルスクリプトおよび `C` 言語による CLI を開発し、利用してきた。KEKB 計画開始以降、複数リングへの同時トップアップ入射などの複雑なビーム運転形態に呼応して、より高度な運転ソフトウェアが必要となってきた。そのため、アプリケーション開発環境を `Python` スクリプト言語に移行し、開発期間の短縮化を図ることに成功している。`Python` および `EPICS PV` 間の通信には、KEKB 計画のために開発された `PythonCA` モジュールを用いている。今後、単純なオペレータインターフェースの開発については `CSS` 環境を最大限活用し、さらなる開発効率の向上を目指すことが課題である。

4.2 電子運転ログブックシステム

`Web` を基盤とした電子運転ログブックシステム（運転ログ）は、効率的な加速器ビーム運転において、重要なツールの一つである。これにより、加速器運転員および機器担当者間において、効率的かつ迅速な運転情報の共有が可能となる。入射器では、`Microsoft SQL 6.5` を用いた運転ログを 1995 年に開発し、運用してきた。GUI 部は、`Microsoft Access` および `Visual basic` 言語により実装した。KEKB および PF 同時トップアップ入射を開始した後、頻繁なビー

ム入射モード切り替えに起因しデータベースサイズが飛躍的に増加した。既存のシステムでは、大規模データベースの管理が困難であったことや、新たな `OS` への移植にコストがかかることが問題であった。これらの理由より、2010 年、新たな運転ログを開発した。本運転ログは、`Flex 4.6`、`PHP 5.3.6`、および `Amfphp 1.9` を用いて開発し、バックエンドデータベースとして `PostgreSQL 9.4.0` を用いている。

Figure 2 に、新運転ログシステムの画面表示例を示す。本運転ログは、サマリ情報および詳細情報から構成される。**Figure 2 (a)**に示すとおり、サマリ情報では、シフトごとの加速器運転員および安全シフト担当者氏名、機器障害の概略について表示される。また、**Fig. 2 (b)**に示すとおり、より詳細な情報については別画面にて表示が可能である。本運転ログにおいては、旧運転ログと同様、ビーム繰り返しの変更を含む代表的なパラメータ変化情報は自動的に記載される。また、機器障害および対処方法などのより詳細な記述については、加速器運転員あるいは機器担当者が `Web` アプリケーションを用いて記入することができる。

本運転ログでは、オペレータインターフェースのスナップショットなど、画像情報の掲載が可能である。これにより、ビーム調整の詳細な状況を把握することがより容易となった。さらに、本運転ログは複数キーワードを用いた高速情報検索機能を有している。障害発生時には、過去の同様な障害事例を検索し、対処方法を参照することが可能である。今後は、障害情報を運転ログに記載した際、関連する機器担当者へ自動的にメールアラートを送信するなど、さらに運転効率を向上させるための機能を実装していく予定である。



(a) Summary information. (b) Detailed information.

Figure 2: Image example of the linac operation electronic logbook system based on web application.

5. まとめ

入射器のビーム制御システムは、`RPC` を基盤とした独自開発のシステムから、`EPICS` を基盤としたものに更新されてきた。2015 年 2 月に開始予定の SuperKEKB 主リング運転に向けて、アーカイバの速度改善や高機能運転ソフトウェアの開発を精力的に進め、効率的なコミショニングを目指している。また、`VMware vCenter` を用いた仮想運転サーバ計算機を基盤として、堅牢かつ効率的な運転制御システ

ムの構築を目指している。

参考文献

- [1] <http://www.aps.anl.gov/epics/>.
- [2] K. Furukawa, et al., "Pulse-to-pulse Beam Modulation and Event-based Beam Feedback Systems at KEKB Linac", in Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, pp.1271-1273 (2010).
- [3] 佐藤政則, "(話題) 高速ビームモード切り替えのための KEK 入射器アップグレード", 日本加速器学会誌, 日本加速器学会, 第3号, 第2巻, (2005).
- [4] 佐藤政則, "(話題) 高速ビームモード切り替えのための KEK 入射器アップグレード (II)", 日本加速器学会誌, 日本加速器学会, 第5号, 第2巻, (2008).
- [5] M. Akemoto, et al., "The KEKB injector linac", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A002.
- [6] Y. Yano, et al., "RF CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB INJECTOR LINAC", in Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11 2014, Aomori, Japan, pp.624-628 (2014).
- [7] R. Ichimiya, et al., "DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION BEAM POSITION MONITOR READOUT SYSTEM WITH NARROW BANDPASS FILTERS FOR THE KEKB INJECTOR LINAC TOWARDS THE SUPERKEKB", in Proceedings of IBIC2013, Shanghai, China, September 16-19, pp.698-701 (2013).
- [8] <http://controlsystemstudio.org/>
- [9] T. Nakamura, et al., "EVALUATION OF THE CSS BASED ALARM SYSTEM FOR SUPERKEKB", in these proceedings.
- [10] <http://ics-web.sns.ornl.gov/kasemir/archiver/>
- [11] T. Kudou, et al., "PRESENT STATUS OF CSS ARCHIVER AT KEK INJECTOR LINAC", in these proceedings.