

SuperKEKB 加速空洞真空統括制御システム

INTEGRATED VACUUM CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB ACCELERATING CAVITIES

西脇みちる^{#,A,B)}, 赤井和憲^{A,B)}, 海老原清一^{A)}, 小田切淳一^{A)}, 可部農志^{A)}, 小林鉄也^{A,B)}, 中西功太^{A,B)},
出口久城^{C)}, 林和孝^{C)}, 西尾淳一^{C)}

Michiru Nishiwaki^{#,A,B)}, Kazunori Akai^{A,B)}, Kiyokazu Ebihara^{A)}, Jun-ichi Odagiri^{A)}, Atsushi Kabe^{A)}, Tetsuya
Kobayashi^{A,B)}, Kota Nakanishi^{A,B)}, Hisakuni Deguchi^{C)}, Kazutaka Hayashi^{C)}, Jun-ichi Nishio^{C)}

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

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^{C)} Mitsubishi Electric TOKKI System Corp.

Abstract

A new digital LLRF control system has been developed for SuperKEKB. It is the system to realize a high-accuracy control of accelerating field with FPGA and PLC. The integrated vacuum control system with PLC has been developed together with digital LLRF system to control vacuum components overall and to build a simple and flexible interlock system. In SuperKEKB, we have six RF sections in the rings and up to eight accelerating cavities with vacuum gauges in an RF section. The gate valves divide the RF section every two cavities and must close when vacuum pressure in a cavity increase. The integrated vacuum control system monitors statuses of vacuum gauges and other components, controls gate valves and outputs signals of beam abort and/or RF off judging from monitored statuses. In this report, we will introduce the detail of the system.

1. はじめに

SuperKEKB は、 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ というルミノシティを目指して、2015 年から稼働予定の加速器であり、現在、アップグレード工事が進められている^[1]。このルミノシティは KEKB 加速器が持つ最高ルミノシティ $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ の約 40 倍であり、これを実現するためには、RF 制御システムにも高い精度と安定性が求められる。そこで SuperKEKB 加速器では、 μTCA 規格の EPICS-IOC 組み込み型 FPGA ボードを基盤としたデジタル LLRF 制御システムを開発した。このシステムでは、既存のアナログ LLRF システムとの互換性に配慮しつつ、SuperKEKB の低エミッタンスかつ大電流のビーム運転に対応するために、高精度、高安定度かつ高い汎用性を実現した。このデジタル LLRF システムの開発の詳細については、他の報告を参照されたい^{[2][3][4]}。

SuperKEKB の運転開始時の RF システムの配置を Figure 1 に示す。SuperKEKB では、常伝導と超伝導の加速空洞を用い、常伝導は OHO, FUJI 直線部 (D4, D5, D7, D8 セクション)、超伝導は NIKKO 直線部 (D10, D11 セクション) に合計 30 ステーションが設置されている。常伝導空洞は、ARES^[5] と呼ばれる特殊な空洞であり、加速空洞と貯蔵空洞が結合空洞で連結されている。1 つの RF セクションに最大 8 式の加速空洞が設置されているが、空洞の台数や配置及び加速空洞とクライストロンの関係は、セクション毎に異なっている。KEKB では、ARES 空洞のステーションは、クライストロン 1 台で ARES

空洞 2 式をドライブし、LLRF 1 式で空洞 2 式を制御する 1 対 2 のステーションであった。SuperKEKB では、ビーム電流増強のため、クライストロンと ARES 空洞を順次 1 対 1 の対応とする計画である^[6]。運転開始時には、Figure 1 で示したように、OHO 直線部の 9 ステーション (1 対 1) に新しいデジタル LLRF システムを導入する。D4 セクションでは、1 対 2 のアナログ LLRF システムと混在する。

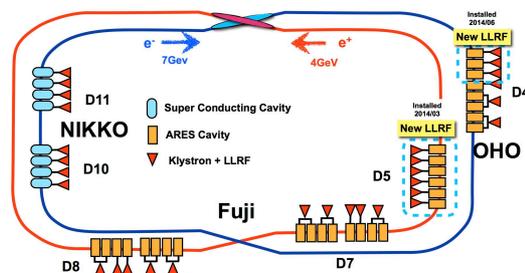


Figure 1: RF system layout of SuperKEKB. New LLRF systems are installed to nine stations in OHO area.

デジタル LLRF システム開発と並行して、RF セクション内の各種真空機器の状態を監視し、総合的に判断して、インターロック信号等を出力する真空統括システムも開発した。各 RF セクションには、各空洞に付随する複数の真空計やポンプ、空洞間に設置されたゲートバルブなどの真空機器があり、その構成は、空洞台数同様セクションによって異なる。また、前述の通り、D4 セクションでは、デジタルとアナログの LLRF が共存しているため、真空制御も複雑になる。そこで真空統括システムは、PLC を

[#] michiru.nishiwaki@kek.jp

用いてセクションにより異なる構成、さらに将来的な RF 増強計画のため空洞台数の変更などに柔軟に対応できるように高い汎用性を持つように設計された。ここでは、実際の真空機器の構成や開発された真空統括システムによる制御ロジックについて報告する。

2. RF セクションの真空機器構成

Figure 2 に、D4 セクションの ARES 空洞と真空機器構成の例を模式的に示す。通常 RF セクションでは、ARES 空洞 2 式毎にゲートバルブ (GV) が設置されている。貯蔵空洞には主排気ポンプとしてイオンポンプ (IP) 2 台、粗排気ポンプとしてターボ分子ポンプとスクロールポンプが 1 セット、真空計として冷陰極型真空計 (CCG) 1 台が備えられている。粗排気ポンプと空洞との間は、アングルバルブで遮断できる。また、2 台に 1 台の貯蔵空洞、つまり GV で区切られた区間内に 1 台のピラニ真空計 (PG) が設置されている。RF セクションとその外側との境界にも GV が取り付けられており、真空グループが管理している。Figure 2 で示した D4 セクションでは、8 式の空洞が並び、さらにダミー区間と呼ばれる空洞の無い区間もあり、4 台の GV で区切った 5 区間から成っている。

各真空機器の制御モジュールは、トンネル内や制御室内にそれぞれ設置されている。GV は、トンネル内に制御用のモジュールが設置されており、GV の開閉状態や機器異常の有無等をモニタし、制御室からの制御信号により開あるいは閉動作の制御電圧を GV に出力する。また、IP や CCG、PG は、制御室の LLRF ラック内に制御モジュールが設置され、駆動用の高電圧等を出力し、同時に状態をモニタしている。これら真空機器の状態を監視して、圧力悪化時の RF 停止や GV 閉操作、ビームアポート等の信号を出力する事が RF セクションの真空制御システムの役割となる。

3. 真空制御システムの基本ロジック

RF セクションにおける真空制御ロジックは、真空悪化から空洞を保護し、同時に真空悪化を拡散しない事を基本としている。すなわち、空洞や境界の外側での真空悪化を検知し、速やかに RF を停止し、

状況によってビームアポート信号を発生させ、GV を閉じて真空悪化の拡散を食い止める事が重要である。ARES 空洞に対しては、真空度に 3 段階の閾値を設定し、悪化の度合いに応じたインターロック機構を設けている。

第 1 段階は、各空洞の CCG の真空度モニタによるものである。CCG の制御モジュールからの圧力モニタ電圧出力をメーターリレーでモニタし、任意の閾値を超えた場合には LLRF 内のインターロックモジュールに接点信号を出力し、真空が悪化した空洞のみ RF を停止する。従来の 1 対 2 のステーションでは、CCG による RF 停止も空洞 2 式に同時に行われる。また、真空悪化に伴う IP の放電電圧低下や CCG の高電圧出力停止を検知し、RF を停止するインターロックもある。これは、真空が悪化しすぎると CCG が自動停止し、高真空の状態と区別が出来なくなることを防ぐ目的で使われている。

第 2 段階は、PG によるものである。PG は、低真空用の真空計であるので、PG が閾値 (1 Pa) を超えた場合 (PG 異常) には大きな真空リークが発生するなどの非常事態が想定される。そのため、RF セクションの中で 1 台でも PG 異常を検知したら、セクション内全ての空洞の RF を停止するだけでなく、ビームアポート信号を出力し、全ての GV を閉じ、セクション外部 (真空グループ) へも真空悪化の信号を送る。また、PG 異常の原因として、一部の冷却水の真空側への漏れも考えられるため、冷却水のバルブも閉じる。他に、RF セクションの外部の真空度や境界の GV の開閉状態も監視し、PG 異常と同様の対処を行う。

第 3 段階は、PG がさらに悪化 (4 Pa) した場合で、CCG の高電圧を停止する。通常は、CCG の自己保護機能により既に高電圧は停止しているが、確実に機器を保護するための措置である。また、これらのインターロックが稼働した場合は、仮に CCG や PG の値が正常に戻ったとしても、インターロック発報状態を保持し、オペレータによる確実なリセット操作が無ければ解除されない措置が必要である。

これらの制御を行うために、従来のシステムでは、LLRF の機能として、各真空機器の制御モジュール、

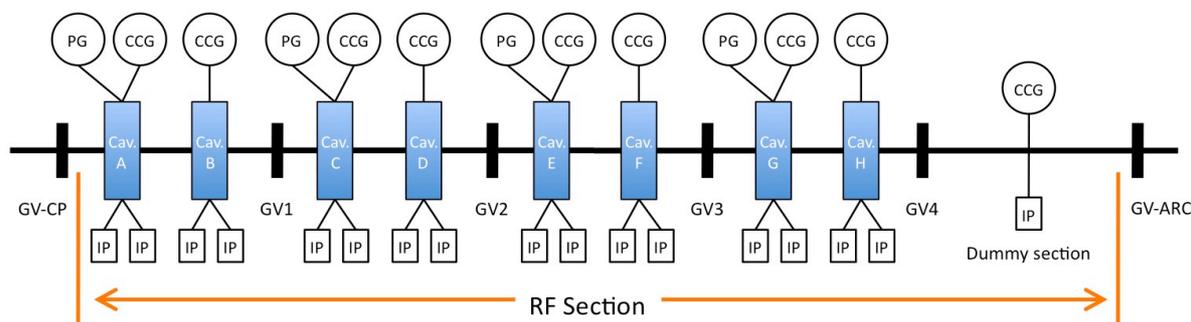


Figure 2: Schematic view of vacuum components in RF section (D4) of SuperKEKB.

メーターリレー、GV コントローラと呼ばれるロジック回路ユニット、外部真空と境界 GV の状態監視モジュール、PG 異常の監視モジュールなど複数の真空インターロック用アナログモジュールを組み合わせ、お互いに信号をやりとりしてインターロック信号を発していた。Figure 3 に GV コントローラの前面パネルと機器接続概念図を示す。図示した通り、GV コントローラは 2 台の GV 制御とその両側の空洞についての真空監視を行っている。Figure 2 の D4 セクションの例では 2 台の GV コントローラが必要である。KEKB でも RF セクション毎に空洞台数や配置が異なっていたため、それぞれに対応したモジュールの設定や複雑な配線などが制御室内の各 LLRF を渡ってなされていた。これらのシステムは、KEKB での運転経験を積み重ねて改良が進められ、2010 年の運転終了まで安定に動作した。

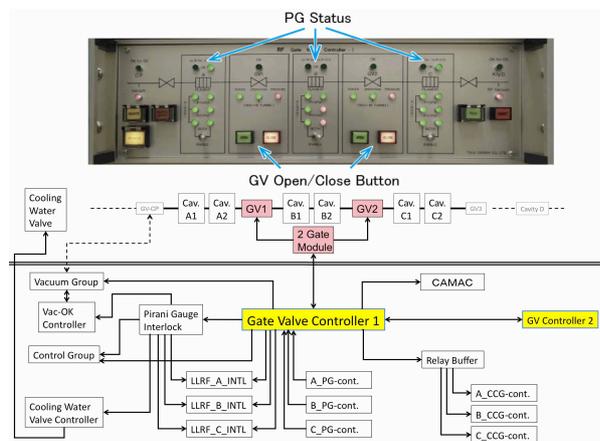


Figure 3: Front panel and wiring of GV controller. Two GVs were controlled and vacuum (PG) statuses of both side of GVs were monitored by this controller. And interlock and beam abort signals were sent to LLRF and other control systems.

4. 真空統括制御システムの開発

SuperKEKB 運転開始時の新デジタル LLRF システム導入に合わせ、真空機器による総合的なインターロックシステム構築のために PLC を用いた新しい真空統括制御システムを開発した。この新システムでは、PLC 1 式を用いて RF セクション全体の真空機器監視と GV 制御、RF 停止やビームアポート信号などインターロックの発報を担う。PLC にはラダー CPU と Linux-CPU を用いた EPICS-IOC が組み込まれており、状態監視、異常診断、インターロック発報及び遠隔操作が容易に行える^[7]。また、新 LLRF システムを空洞設置位置に依存しない単一構成とするために、RF セクション毎の違いを吸収し、LLRF に影響を与えない真空統括システムを実現しなければならない。

Figure 4 に真空統括システムの外観写真と D4 の構成における機器接続概念図を示す。このシステムでは、これまで制御室内の各 LLRF に分散していた GV コントローラやその他真空インターロック用アナログモジュールの機能を LLRF から分離して真空統括システムに集約した。すなわち、空洞台数や配置の条件を含め、RF セクション全体に関わる情報は真空統括システムが一元的に取り扱うため、LLRF には影響しない。これにより、新 LLRF システムは単一構成とすることが出来た。

インターロックの条件は、3 章で述べた 3 段階と同様である。新 LLRF では、CCG、IP、PG など空洞に付随する真空機器のみを取り扱い、状況に応じて自らの RF 停止の処理を行う（上述の第 1 段階の制御）。同時に PG 異常の信号は真空統括システムに集約する。GV の状態も全て真空統括システムで監視し、PG の状態と合わせて診断し、GV 閉、全 LLRF へ RF 停止、CCG オフ、真空など他グループの制御系への真空異常やビームアポートなどの信号を送出する（第 2、第 3 段階）。

D4 セクションのようなデジタルとアナログ LLRF の混在にも対応出来るよう、従来の GV コントローラによる制御系との互換性を保っている。さらに、真空統括システム前面に配置したディップスイッチを操作することで、空洞の配置を自由に設定可能とした。

RF セクション全体の PG 状態モニタ及び GV の制御、インターロック発報後のリセットなどの操作は、真空統括システムのラックに収められた EPICS モニタ PC 画面（リモートモード、Figure 5(a)）、操作盤（ローカルモード、Figure 5(b)）のどちらからでも可能である。また、リモート制御は、制御ネットワークに接続されたいずれの PC でも可能である。Figure 5 は、D4 セクションで試験を実施した例である。GV や PG の状態は、正常時には緑、異常時には赤や点滅で示される。また GV 本体を示す部分は、赤が閉、緑が開を意味する。Figure 5 の例では、左側 2 区間の PG は正常、その間の GV1 は開、3、4、5 区間は PG 異常、GV2、3、4 は閉かつ GV3 には機器異常が示されている。ディップスイッチの設定は、システム起動時に読み込まれ、使用しない区間については、リモート画面中ではマスク（黄色縁取りや灰色）を掛け、ローカル操作盤では LED を消灯することで示す。

このように真空統括制御システムは、RF セクション毎に異なる空洞台数や配置、あるいは 1 対 1、1 対 2 のステーションやアナログとデジタルの LLRF が共存する場合でも、さらには将来的な空洞台数の変更の際にも、同じシステムで対応可能であり、柔軟で汎用性の高いインターロックシステムが実現されている。

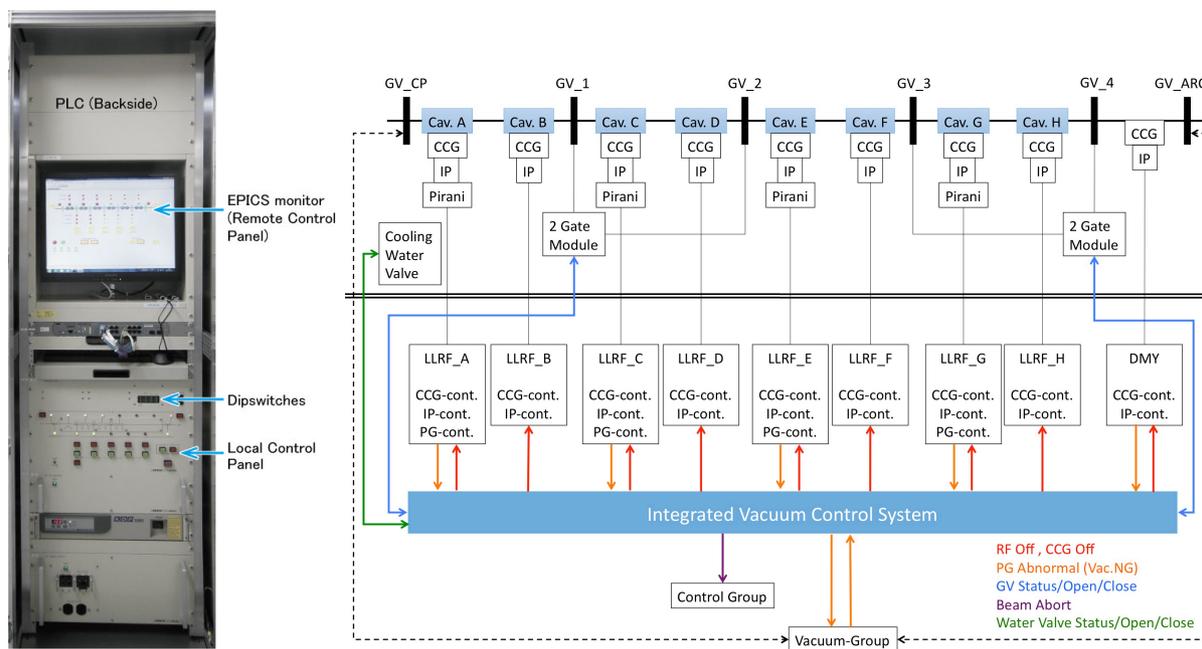


Figure 4: Outline view (left) and logic diagram (right) of new integrated vacuum control system. The system consists of a PLC embedded with EPICS-IOC (back side of upper blank panel). The statuses of GVs and Pirani Gauges are integrated and judged in the system, and then interlock (RF Off, CCG Off and GV close) and beam abort signals are output to LLRFs and other control systems.

5. まとめ

SuperKEKB 用のデジタル LLRF 制御システムに合わせて、真空統括制御システムを開発した。従来のアナログ制御システムとの互換性を維持しつつ、シンプルなロジックと真空機器構成の変更に対応可能なフレキシブルなインターロックシステムを実現した。2015 年の運転開始時には、OHO 直線部の RF セクションに導入し、運用を開始する。また今後は、RF 増強計画にともない、デジタル LLRF システムの順次導入と共に、真空統括制御システムの導入も進める予定である。

参考文献

- [1] N. Ohuchi, et al., "Construction Status of SuperKEKB", Proc. of IPAC14, pp. 1877-1879 (2014); <http://epaper.kek.jp/IPAC2014/papers/weoca01.pdf>
- [2] K. Nakanishi, et al., "Development of LLRF system for SuperKEKB", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, SUP093 (2013)
- [3] T. Hayashi, et al., "Refinements of the new LLRF Control System for SuperKEKB", Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEPS125 (2012)
- [4] T. Kobayashi, et al., "Development and construction status of new LLRF control system for SuperKEKB", Proc. of IPAC14, pp. 2444-2446 (2014); <http://epaper.kek.jp/IPAC2014/papers/wepme071.pdf>
- [5] T. Kageyama, et al., "The ARES cavity for KEKB", Proceedings of APAC98, pp. 773-775 (1998).
- [6] K. Akai, et al., "Design Progress and Construction Status of SuperKEKB", Proc. of IPAC12, pp. 1822-1824 (2012); <http://epaper.kek.jp/IPAC2012/papers/tuppr006.pdf>
- [7] J. Odagiri et al., "EPICS on F3RP61 for SuperKEKB Accelerator Control", to be presented in this Annual Meeting, SAP100, (2014)

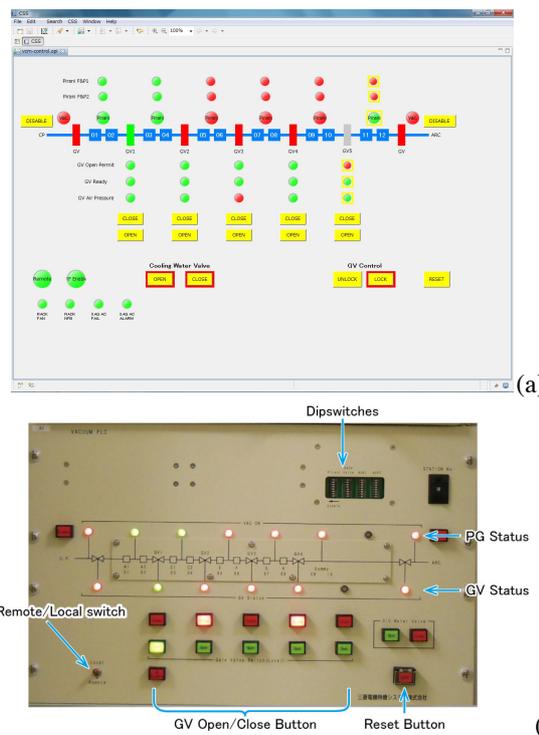


Figure 5: Remote (a) and Local (b) control panel on the integrated vacuum control system. When configuration of the RF section is changed, the system can be used with changing the setting of dials.