

# SuperKEKB メインリング真空系における cRIO による圧力跳ね監視システム CCG Patrol

## MONITORING SYSTEM FOR IMPULSIVE PRESSURE RISING IN VACUUM SYSTEM OF SUPERKEKB MAIN RING

石橋拓弥<sup>#, A)</sup>, 照井真司<sup>A)</sup>, 長久文彦<sup>B)</sup>, 幾田直樹<sup>B)</sup>, 南茂<sup>B)</sup>, 藤田康信<sup>B)</sup>

Takuya Ishibashi<sup>#, A)</sup>, Shinji Terui<sup>A)</sup>, Fumihiko Nagahisa<sup>B)</sup>, Naoki Ikuta<sup>B)</sup>, Shigeru Minami<sup>B)</sup>, Yasunobu Fujita<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> KEK Accelerator Laboratory

<sup>B)</sup> National Instruments Japan Corporation

### Abstract

In SuperKEKB electron and positron ring, approximately 300 cold cathode gauges are installed for each ring. There are cases that we want to identify a CCG and the location in which impulsive pressure rising happens derived from abnormal discharges, beam losses and so on during the commissioning. Therefore, we developed a monitoring system named CCG Patrol to detect the impulsive pressure rising and identify the CCG. We have used 12 compactRIOs (cRIOs) by National Instruments for the pressure logging. CCG Patrol is constructed with the pressure and beam current logging using an embedded Field-programmable gate array (FPGA), a circular buffer in a Real-Time OS (RTOS), a communication about the trigger information between cRIOs and download and display the pressure and beam current data on Windows PC. CCG Patrol detected defective CCGs, impulsive pressure rising with beam aborts and so on. We report a system configuration of CCG Patrol and some examples of the impulsive pressure rising.

### 1. はじめに

SuperKEKB のメインリングは周長約 3 km ある電子・陽電子衝突型蓄積リングで、7 GeV の電子リング (High Energy Ring: HER) と 4 GeV の陽電子リング (Low Energy Ring: LER) から構成されている。ビームパイプ内の圧力を測定するため、リングには約 10 m 間隔で冷陰極型電離真空計 (Cold Cathode Gauge: CCG) が設置されており、各リングで約 300 台、合計約 600 台の CCG を使用している。

加速器の運転中にビームロスや軌道の急変、CCG の異常放電に起因する圧力の跳ねが発生した場合、通常のデータ集録システムではそれが発生した場所や CCG の個体を即座に特定することが困難な場合がある。そこで圧力を常時監視し、圧力の跳ねが起きた場合にはその CCG を即座に特定してオペレータ等にその情報を知らせるシステム、CCG Patrol を開発

した。

CCG Patrol システムの概略を Figure 1 に示す。CCG Patrol は 1) compactRIO (cRIO) に実装されている Field-programmable gate array (FPGA) による圧力およびビーム電流の高速データ集録、2) cRIO 上の Real-Time OS (RTOS) による循環バッファ実装および cRIO 間でのシェア変数によるトリガー情報のやりとり、3) Windows PC での圧力データの取得および表示により実現されている。

CCG Patrol は SuperKEKB Phase-1 および Phase-2 コミッショニングを通して安定的に稼働した。ここでは CCG Patrol のシステム構成やコミッショニング中に観測された圧力跳ねの実例について報告する。

### 2. システム構成

#### 2.1 cRIO によるデータ集録

真空システムにおける各種機器のデータ集録には National Instruments 社の cRIO を使用している。この cRIO は EtherCAT RIO によりシステム拡張されており、このユニットが地上部にある 12 の電源棟制御室に 1 つずつ設置されている (Figure 2)。このユニットでは主に CCG の圧力値、イオンポンプ (IP) の放電電流値、冷却水流量、IP の HV ステータス情報等で最大 416ch のデータ点をスキャン集録している。なお、CCG の圧力値については 1 ユニットの cRIO に対して 64ch 分用意し、合計 768ch 分のデータを集録している。cRIO のメインシャーシは SuperKEKB の制御ネットワークに構築された真空関連機器用 Virtual LAN に接続されている。

CCG Patrol と並行して、cRIO の RTOS 上では

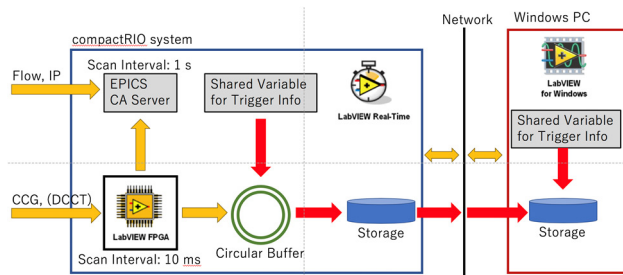


Figure 1: Schematic drawing of CCG Patrol system.

<sup>#</sup>takuya.ishibashi@kek.jp

EPICS の Channel Access (CA) Server が構築されており、ここが発行している Process Variable (PV) に各種真空関連機器の生データを 1 秒間隔で渡している。真空機器、特に CCG や IP の放電電流値は通年に渡りデータ集録する必要があるため、このような長いスキャン間隔にしてデータ量をできるだけ小さくしている。

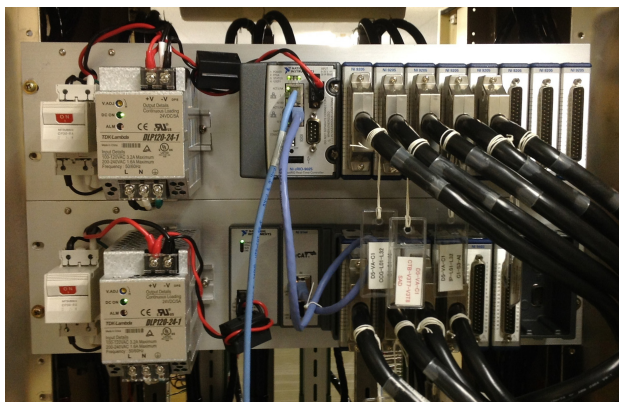


Figure 2: cRIO unit for data acquisition.

真空機器制御システムでは cRIO の他に横河電機社製 PLC 用 Linux CPU モジュールである F3RP61 が制御ネットワークに接続されている[1]。F3RP61 上では EPICS の Input Output Controller (IOC) が構築されており、これが cRIO 上の PV に CA し、取得したデータを IOC 上で各種物理値に換算等している。この物理量を IOC 上で発行している PV に渡している。IOC 上の PV 名はその名前から値がどの機器の何の物理量を指しているのか直感的に理解しやすいように名付けられている。

各 cRIO は SuperKEKB の NTP サーバーと同期しており、サブミリ秒の同期精度で cRIO 間の時刻を合わせている。

## 2.2 CCG

CCG の測定子とコントロールボードはそれぞれ大亜真空社製 C-5 (逆マグネトロン型) と CG-200 を使用している (Figure 3)。1 枚のコントロールボードに 3 kV(DC) の出力チャンネルが 2 つあり、圧力の測定範囲は  $1 \times 10^{-8}$  Pa  $\sim$   $1 \times 10^{-2}$  Pa (放電電流は 0.1 nA  $\sim$  60  $\mu$ A) である。ベースユニット CG-28B、1 台に最大 14 枚のコントロールボードが挿せ、最大 28ch の圧力測定が可能となっている。アナログ出力は 0  $\sim$  7 V(DC) でこれを cRIO のアナログ入力モジュール NI9205 に入力して圧力換算している。

## 3. CCG Patrol

### 3.1 FPGA による圧力値高速集録

加速器の運転中に圧力跳ねを伴うビームアポートが発生した場合、圧力跳ねによりビームロスが発生してアポートしたのか、または何らかの原因でロスしたビームがビームパイプ等に衝突し、圧力跳ねが発生したのか等を判定したい場合がある。しかし、4 節で述べている通り、通常 1 秒間隔のデータ集

録では事象が発生した順序を決定することが困難である。また圧力跳ねが観測された CCG の順序から圧力跳ねが発生した場所を推測したい場合があるが、この場合も通常のスキャン間隔では順序を決定することが困難なことがある。



Figure 3: CCG Controller.

圧力の高速データ収録のため、cRIO のスキャンモードによる 10 ms 間隔のデータ集録を試験したところ、CPU 使用率が常に約 100% に張り付いてしまった。高速データ収録は圧力データを収録している 64ch に対してのみ適用すれば良いが、cRIO のスキャンモードではスキャン間隔をチャンネルごとに設定することができず、全 416ch に対してスキャン間隔が適用されてしまう。このモードによる高速データ収録は非常に高負荷であるため、システムの長期に渡る安定的な運用には適さないと判断した。

そこで cRIO の FPGA モードを CCG に割り当てられたチャンネルのみに適用して 10 ms 間隔でデータ集録することにした。これにより最終的なシステムにおける CPU 使用率は約 40% となっている。なお、できる限りビーム電流と圧力値との間の時間同期を取るために DCCT のアナログ出力も CCG に割り当てたチャンネルの 2 つ (LER と HER のビーム電流値) に入力している。

### 3.2 RTOS 上での循環バッファとトリガー

10 ms 間隔で収録した圧力値を cRIO 上に全て保存することは現実的でないため、RTOS 側に一時保管バッファである循環バッファを用意し、そこに FPGA で集録したデータを保存する。循環バッファには直近 3 分間のデータを保存し続ける。データの保存量は可変である。

圧力値が  $1 \times 10^{-7}$  Pa 以上、かつその変化が 15%/s 以上になった場合にトリガーがかかる。RTOS 上でトリガー情報を受け取ると、それを受け取った後の 3 分間のデータを収録する。トリガー後のデータ集録が終了した後にこれと循環バッファに入っているデータとマージして合計 6 分間分のデータとして cRIO に Technical Data Management Streaming (TDMS) 形式でファイル保存される。なお、保存するデータ量は可変である。また各 CCG の個体名称とそれらにそれぞれに対するトリガー閾値等の情報は cRIO 上

に保存された Comma-Separated Values (CSV)形式のファイルで管理されている。

トリガー情報にはローカルトリガーとネットワークトリガーの2種類ある。前者はcRIO内で検出されたトリガーである。後者はネットワークを介して接続された他のcRIOで検出されたトリガーで、各cRIOおよびWindows PCでシェア変数を用いて共有されている。

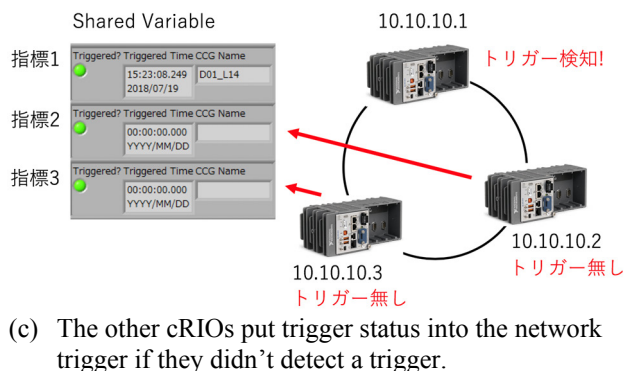
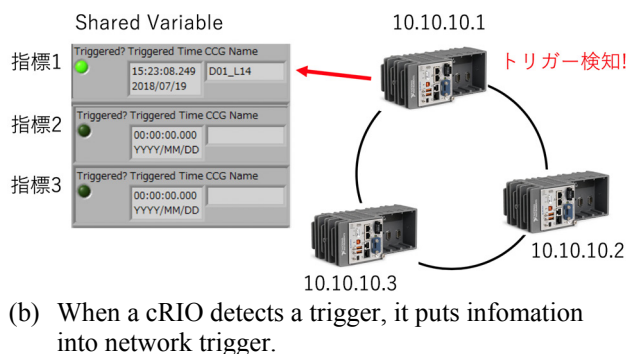
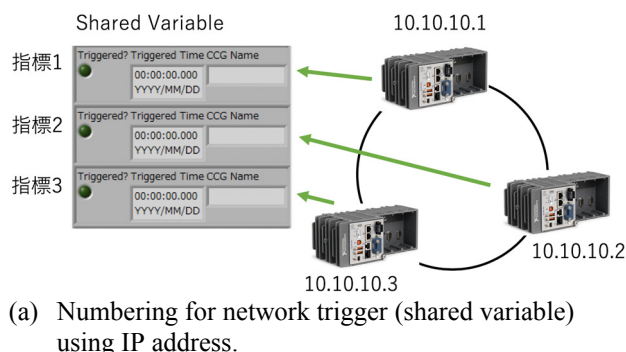


Figure 4: Network trigger sequence.

ネットワークトリガーはネットワーク内の各cRIOのIPアドレスを取得し、cRIO同士の順番(指標)を決める(Figure 4(a))。ローカルトリガーが発生すると、ネットワークトリガーの自分の指標にタイムスタンプ、トリガーステータス、最初にトリガーをかけたCCGの個体名称を入力する(Figure 4(b))。ネットワークトリガーにデータが入力されたことが他のcRIOで確認されたら、各cRIOは現在のローカルトリガーの状況を確認し、ローカルトリガーがかかっていなかった場合はトリガーステータスのみネット

ワークトリガーに入力する(Figure 4(c))。ネットワークトリガーのトリガーステータスが全てのcRIOに対してアクティブになったら、ネットワークトリガーの各指標間のタイムスタンプ情報を比較し、各cRIOとWindows PCはネットワークトリガーの最も古い情報を共有する。

### 3.3 Windows PCによるファイル取得とデータ表示

CCG PatrolのOPERator Interface (OPI)をFigure 5に示す。トリガーが発生するとWindows PC上ではそのことをトリガーをかけたCCGの名称と共にオペレーターに知らせる。トリガー発生後のデータ集録が終了すると、Windows PCは各cRIOから当該データが納められているTDMSファイルをローカルに保存し、cRIOからはそれらファイルを削除する。その後、CCGの名称からLER, HERどちらで圧力跳ねが発生したかを判断し、トリガーを最初にかけたCCGおよびその近傍の圧力値と当該リングのビーム電流を自動的にプロットする。トリガーが発生した時刻、トリガーをかけたCCGの名称はアーカイブされ、これらをプロットすることもできる。

またcRIOの状態を監視するため、ネットワークハートビートを実装している。Windows PCはメッセージの受信者、cRIOは送信者となっており、受信者はハートビート周期で指定した周期内にメッセージが届かなかった場合はカウンタを増分し、これがタイムアウトとなるとそのことをオペレーターに知らせるようにしている。

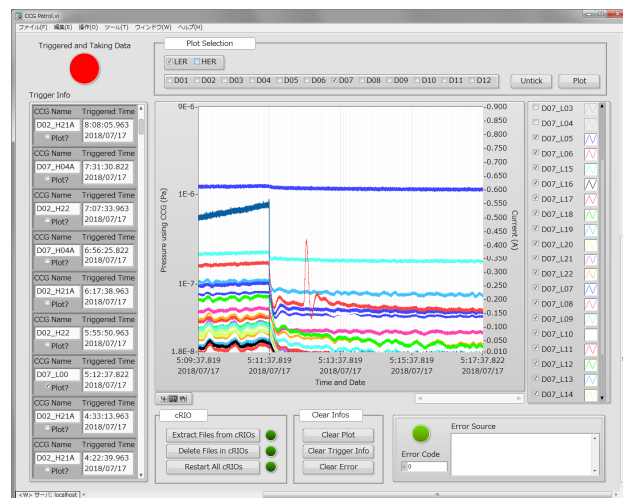


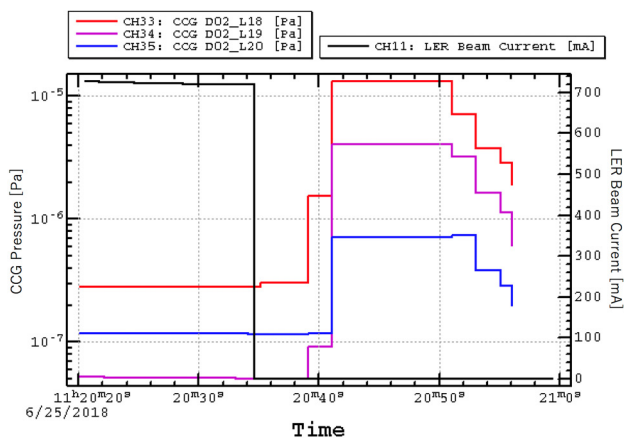
Figure 5: CCG Patrol OPI on Windows PC.

## 4. CCG Patrolにより検出した圧力跳ねの実例

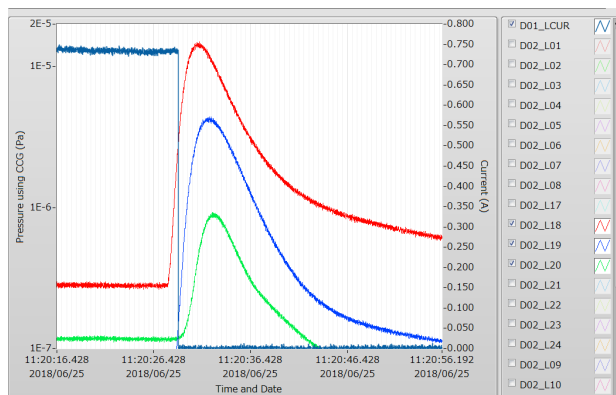
2018年6月25日11時20分頃にLERで発生したQCSクエンチを伴ったビームアポートのビームカレントと圧力跳ねの様子をFigure 6に示す[2, 3]。通常のデータ集録(Figure 6(a))ではビームがアポートされた後に圧力跳ねが起きたように見えるが、CCG Patrolによるデータ収録(Figure 6(b))ではビームがアポートされる約2秒前からCCG D02\_L18の圧力値が

上がり始めているのがわかる。

通常のデータ集録ではビームアポートより後に圧力跳ねが起き始めているように見えてしまうのは、1) ビーム電流のPVを発行しているIOCとCCGのPVを発行しているIOCとの間で時間同期が取れていない、2) スキャン間隔が1秒のために圧力の立ち上がりを捉えられていない、3) IOC上では並行して他の処理も走っていることから厳密に1秒間隔でPVの値が更新されておらず、アーカイバーが周期的にデータを取得した場合にタイミングによっては同一の値を記録してしまう、という複合的な原因が考えられる。



(a) Standard data logging.



(b) Data logging with CCG Patrol

Figure 6: Impulsive pressure rising and LER beam current in a beam abort.

この圧力跳ねが起きたCCGは垂直方向コリメータ近傍に置かれたものであり、ビーム軌道が何らかの原因で動き、ビームがコリメータに直撃して圧力が上昇したと推測している。またビームがコリメータに衝突したことにより発生したシャワーがQCSに突入し、QCSクエンチが起きたと考えられている。この事象の後にビームコリメータ先端のタングステン部に傷が入っていることを目視で確認している。

Phase-1での大電流コミッションング時にもこれと同様のビームアポート前の圧力跳ねを度々観測して

いる。この圧力跳ねの原因はビームチェンバー内のダストとビームが衝突したものと考えられている[4]。

CCG PatrolでCCGの異常放電を検知したときの様子をFigure 7に示す。CCG D03\_L22が示す圧力値がビーム電流と相関なくばたついていることから、原因はCCGの異常放電と判断して当該CCGのHVをオフした。このような異常放電が起きた場合は、隔週で設けられているメンテナンス日に加速器トンネルへ入域し、当該CCGに10.5 kVの高電圧をパルス的に印加してクリーニングを実施することによりほとんどの場合は異常放電が治まる。

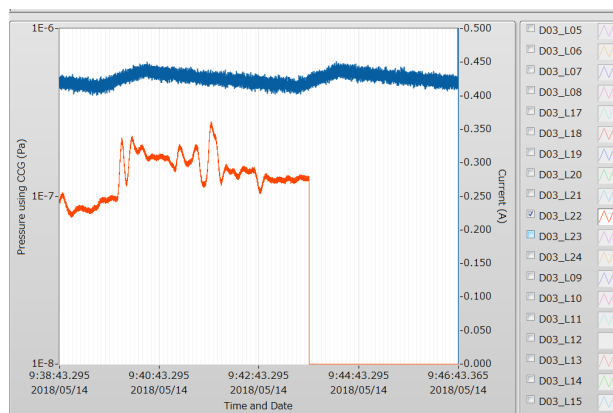


Figure 7: Abnormal discharge in a CCG with LER beam.

## 5. 今後の展開

現状のCCG Patrolは最初に圧力跳ねが生じたCCGの個体を特定するまでの機能しか有していない。しかし、加速器におけるCCGの設置位置および電磁石等各種コンポーネントの設置位置をデータベースとして用意しておけば、CCGで取得した圧力分布から加速器のどの位置、どのコンポーネント近くで発生しかを原理的には見積もることができる。今後はこのような機能を追加することを検討している。

## 参考文献

- [1] N. Yoshifuji *et al.*, “SuperKEKBでの真空中制御ソフトウェアの現状”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, TUP097, pp. 613-616.
- [2] S. Terui *et al.*, “SuperKEKBメインリングのコリメータヘッドの開発”, Abstracts of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP114.
- [3] T. Ishibashi *et al.*, “SuperKEKB Phase-2 コミッションングにおけるコリメータの開発と稼働状況”, Abstracts of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP113.
- [4] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB 陽電子リングにおけるビームロスを伴う圧力バーストの観測”, Abstracts of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP112.