

SuperKEKB加速器の制御システム

杉村仁志、中村達郎、梶裕志、小田切淳一、
佐々木信哉、内藤孝、秋山篤美（KEK加速器）
中村卓也、吉井兼治（三菱SC）
芳藤直樹、飯塚祐一（東日本技術研究所）
廣瀬雅哉、浅野和哉（関東情報サービス）

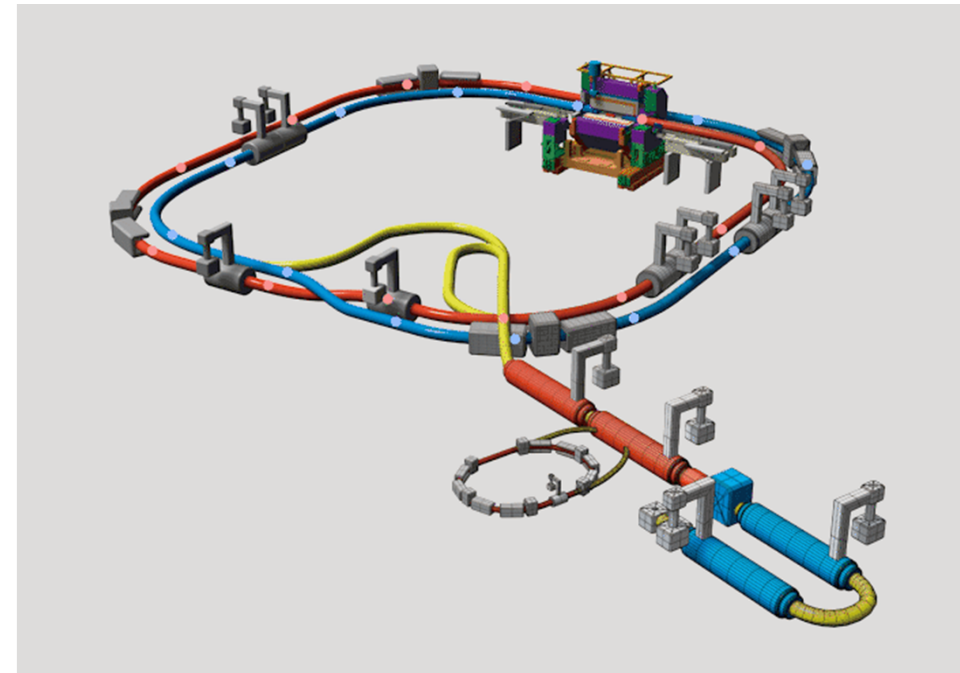
Contents



- 制御システム全般
- 監視システム
- アボートトリガーシステム
- アーカイバー
- タイミング

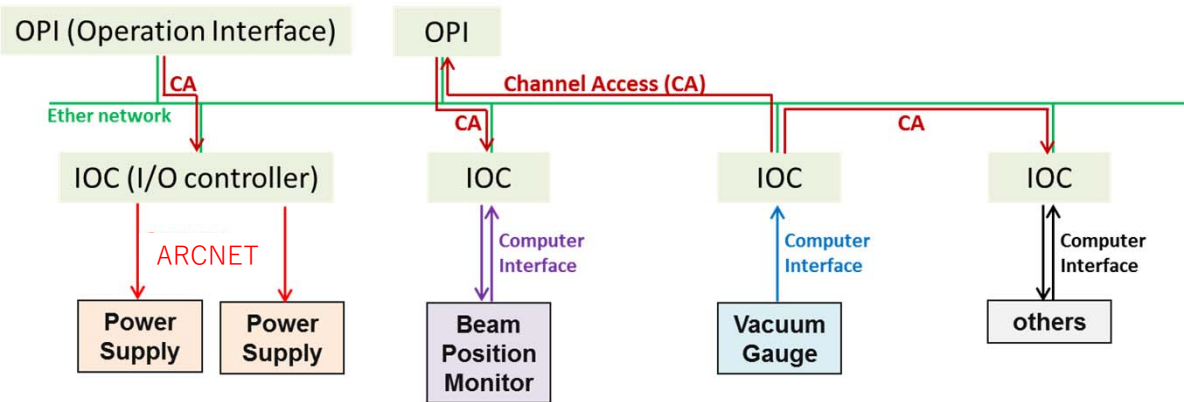
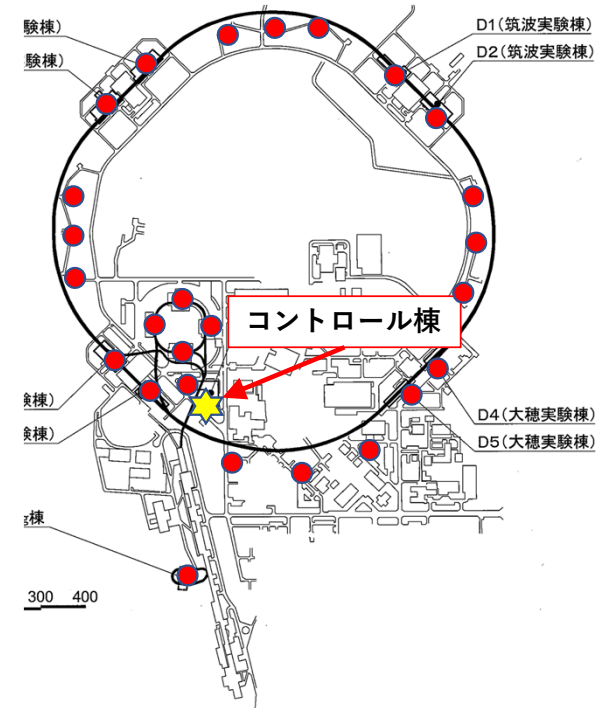
SuperKEKB

- 電子陽電子加速器 ・ ・ **KEKB**の後継加速器
 - e^- : 7 GeV / e^+ : 4 GeV 非対称エネルギーコライダー加速器
- **KEKB**時代のルミノシティの**40倍**($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)を目指す
- Phase-1 (2016.2-2016.6)
- Phase-2 (2018.3-2018.7)
 - ダンピングリング運転開始
 - 初衝突
- Phase-3 (2019.3-)
 - Belle2 シリコンVertex検出器インストール
 - ビーム電流の増加(e^- : 2.6 A, e^+ : 3.6 A)



制御システム概要

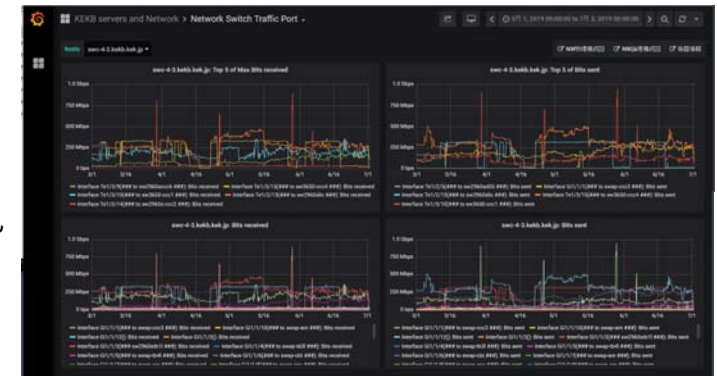
- EPICSを用いたネットワーク分散型制御
- 26箇所 of 制御棟でIOC(VME, PLC, μ TCA)を設置
- 電磁石制御ではARCNETをフィールドバスとして使用
- スクリプト言語(Python, SAD)を用いた運転用アプリケーションを開発している
- Bladeサーバー(14台)と単体サーバー(5台)でアプリケーションを実行している



監視システム

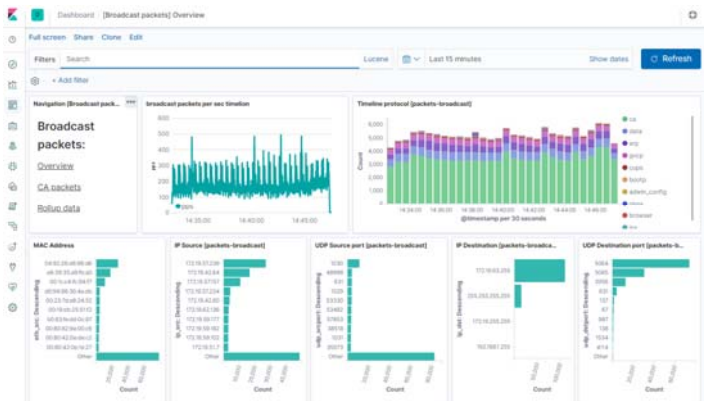
Grafana上でのネットワーク負荷の表示

- Zabbixを用いたメトリクス監視
 - メトリクスの収集および障害発生時のアラートの送信
 - 23台の計算機と88台のネットワークスイッチを監視
 - Grafana上での可視化



- Elastic Stackを用いたログ監視
 - Logstash, Elasticsearch, Kibanaを使用したログの収集、分析、可視化
 - ps, caSnooper, caswなどのコマンド出力を監視

KibanaでのBroadcast Packetの監視

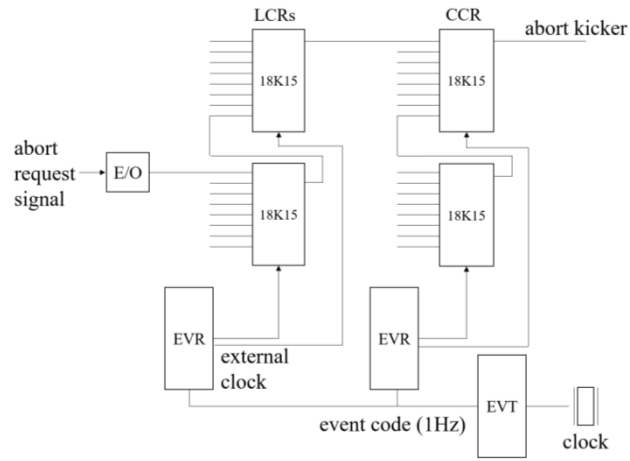


関連発表 THPH005 佐々木信哉「SuperKEKBにおけるZabbixを用いた監視システムの構築」

アボートトリガーシステム

- 164本のアボート要求信号を収集
 - 8箇所のローカル制御室で部分的に集約し、中央制御棟で再び集約
- タイムスタンプ機能により、最小時刻単位100nsでアボート受信情報を記録
- アボート発生の原因や過程を究明する手がかりになっている

RING	MESSAGE	DATE	DELTA
LER	Belle2 VFD diamond	2019-06-09 22:11:06.494983800	0.000000000
HER	Belle2 VFD diamond	2019-06-09 22:11:06.494984000	0.000000200
LER	RF D5-F	2019-06-09 22:11:06.494991800	0.000008000
LER	Loss Monitor D4-3	2019-06-09 22:11:06.494992800	0.000016000
LER	Loss Monitor D1-1	2019-06-09 22:11:06.495000300	0.000016500
LER	Loss Monitor TSUKUBA B4	2019-06-09 22:11:06.495023700	0.000039900
LER	Loss Monitor D4-1	2019-06-09 22:11:06.495032100	0.000048300
HER	Loss Monitor D7-3	2019-06-09 22:11:06.495034200	0.000050400
LER	Loss Monitor D7-1	2019-06-09 22:11:06.495044600	0.000060800
LER	RF D7-E	2019-06-09 22:11:06.495057600	0.000073800
HER	Loss Monitor D4-4	2019-06-09 22:11:06.495076800	0.000093000
HER	RF D10-C	2019-06-09 22:11:06.495264300	0.002856500
HER	RF D10-D	2019-06-09 22:11:06.495283200	0.002869900
HER	RF D11-D	2019-06-09 22:11:06.498001900	0.003018100
HER	RF D11-C	2019-06-09 22:11:06.498020500	0.003036700
HER	RF D11-A	2019-06-09 22:11:06.498239600	0.003275800
HER	RF D10-B	2019-06-09 22:11:06.498478300	0.003484500
HER	RF D11-B	2019-06-09 22:11:06.498989800	0.004066000
HER	RF D10-A	2019-06-09 22:11:06.501305200	0.006321400
HER	QCS Quench I/L	2019-06-09 22:11:06.511791800	0.016718000
LER	QCS Quench I/L	2019-06-09 22:11:06.511792000	0.016718200
LER	QCS PS OFF I/L	2019-06-09 22:11:06.544460700	0.049476900
HER	QCS PS OFF I/L	2019-06-09 22:11:06.544472200	0.049488400
HER	Soft Abort	2019-06-09 22:11:06.918139400	0.223115500
LER	Soft Abort	2019-06-09 22:11:06.930530000	0.225562000
LER	CCG D2	2019-06-09 22:11:07.901607000	1.406623400



アボート光信号集約モジュール (18K15)

アーカイバー

- KEKBLog
 - KEKB時代から引き続き利用されているシステムで、KEKが独自に開発したツール
 - 運転に関わる主要なPVはほぼ全てを記録
 - 制御グループによる集中管理
- CSS Archiver
 - QCSやBelle関係でサブシステムとして使用している
 - ユーザー自身による構築と運用をしている
- Archiver Appliance
 - EPICSコミュニティによって開発
 - 2018年度から試験運用を開始
 - 2019年秋から運用の計画

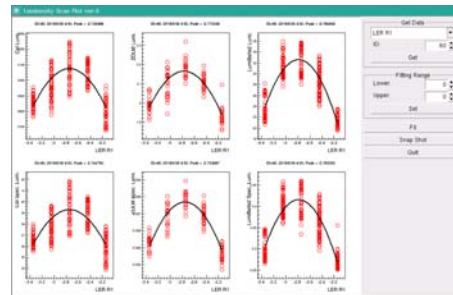
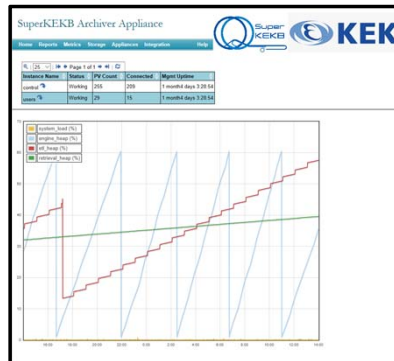
Archiver Appliance

- SLACで開発されたシステムで、日本ではJ-PARCでの運用実績があり、試験運用を進めている
- データの取得が早く、ディスク容量も軽減(CSSの1/4)
- Archiver Appliance付随のAPIで、データのプロットやROOT等を用いたデータの解析に利用
 - KEKBLogとCSSの後継システムとして検討している

J-PARCでの評価 (山田氏)

	CSS	AA
1hour	1.236s	0.136s
24hour	24.229s	0.150s
3days	637.408s	2.408s

プロセス間隔1HzのPVに対するデータの読み出し時間
Ref) pasj2017 WEP100



ROOTを用いたluminosity scanの例



現在2台のサーバーで試験運用中

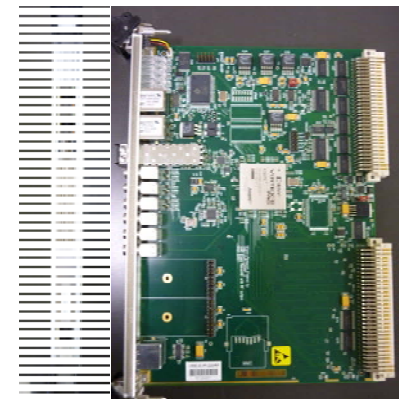
- THPH004 梶裕志 「SuperKEKB加速器におけるEPICS Archiver Applianceの応用」
 関連発表 FRPH002 佐武いつか 「KEK電子陽電子入射器におけるArchiver Applianceの導入」
 FRPH004 中村卓也 「PF-AR 加速器における Archiver Applianceの導入」

タイミングシステム

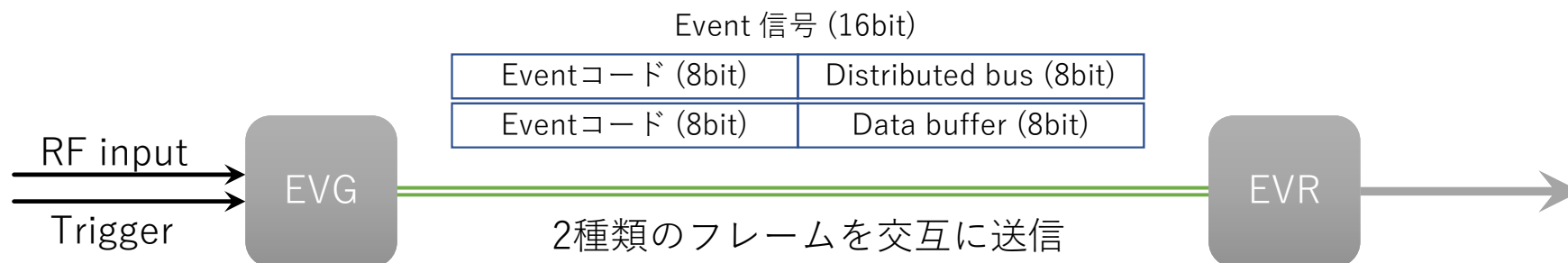
- 電子銃、パルス電源、RF、キッカー、セプタムなどビーム（RF）と同期した「速い(ps)」タイミング信号を扱う必要がある
- 入射器全域の運転パラメータをイベント信号で切り替え、ビームパルスの供給先を変更する制御が必要
 - 供給先は4 (+1) のリング(SuperKEKBメインリング(LER,HER)+ダンピングリング(DR) 及び2つの放射光リング)
 - 切り替え頻度は50 Hz
- これらを統合した**イベントタイミングシステム**を利用し、4リング同時のTop-up運転を実現した。

タイミングモジュール (EVG/EVR)

- MRF社製EVG/EVR230シリーズをメインに利用している。
 - ジッター15ps以下の高精度信号出力
 - メインリングではSINAP製EVO/EVEも利用している(ジッター<10ps)。
- EVG(Event Generator) : RFに同期してイベントコードを送信
 - 2856MHzのRFを114MHzに分周し、入力する
 - MR revolution/49/23でsequenceを開始し、タイミングを計算する。
- EVR(Event Receiver) : イベントコードを受信し、イベントコードに応じて信号のディレイ、幅を設定し出力

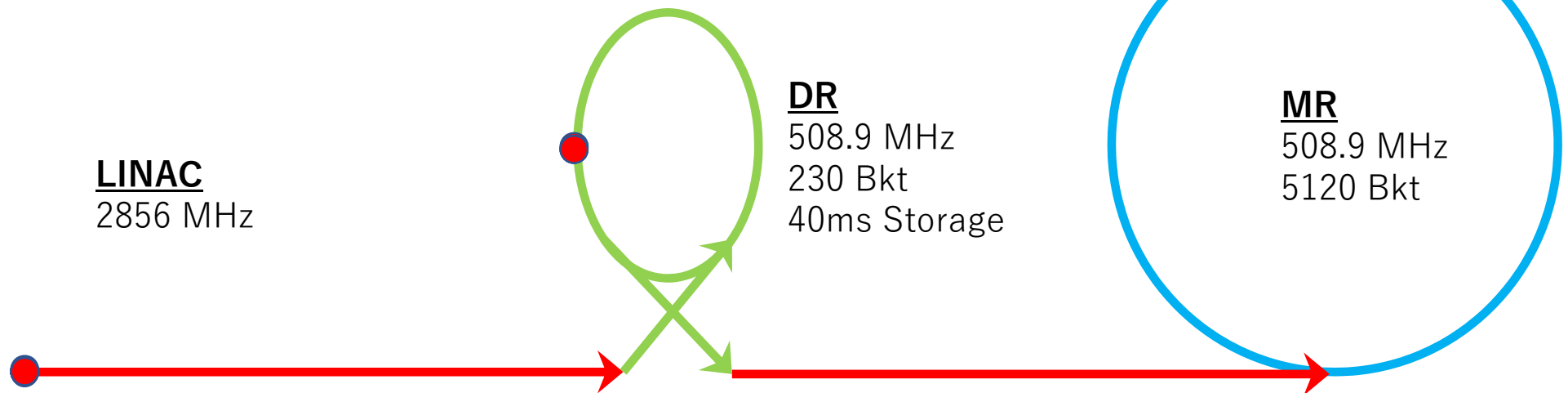


VME-EVR230RF



LINAC/DR/MRでのイベント同期・入射・出射

- 入射繰り返し50 Hz (20 ms)
- LINACとDR/MRで異なるRF周波数を利用
- 入射機会はそれぞれのRF位相がそろった時に訪れる
 - 508.89 MHzと2856 MHzの共通周波数10.38 MHz(96 ns)ごとに訪れる
- 電子ビームはLINAC→MR(HER)へ直接入射
- 陽電子ビームはLINAC→DR, DR→MR(LER)



LINAC/DR/MRでのタイミングシステムの構築

EVGを2段構成にして、上位EVGで正確な50Hzの繰り返しを、下位EVGでバケット選択の遅延がかけられた信号が送られる。

Main timing station (IOC)

EVG

RM

EVR

上流

下流

EVG

EVG

RM

タイミング情報を受け取り、リング内のBPMやキッカー、セプタム電磁石へのタイミングを配る

DR sub-timing station

MR sub-timing station

EVR

EVR

EVR

EVR

EVR

EVR

EVR

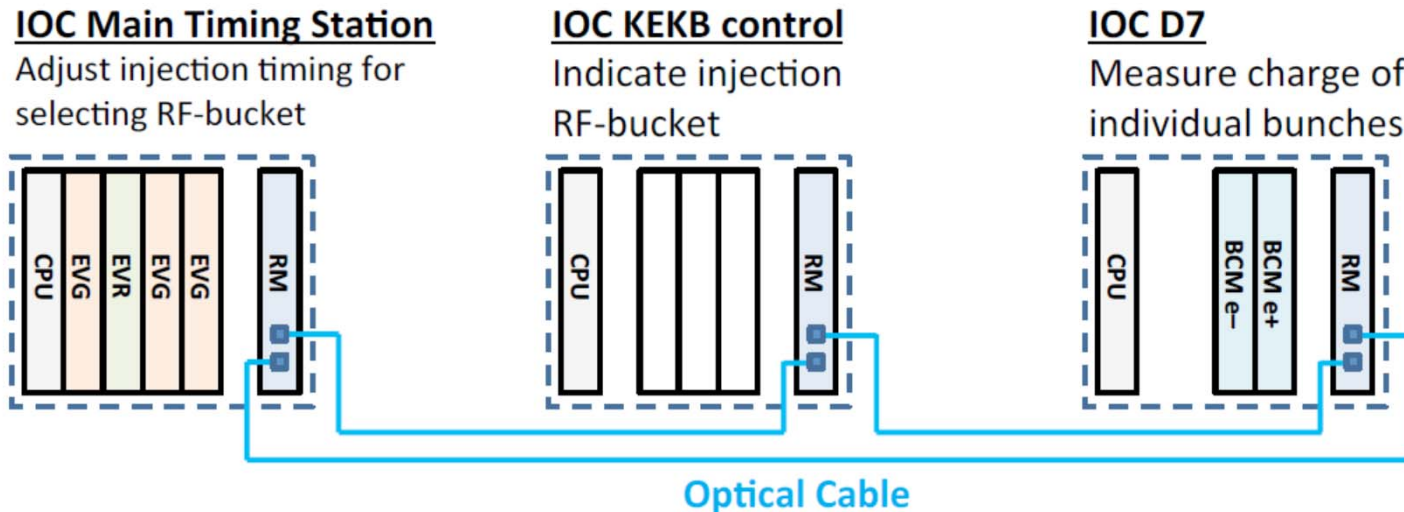
EVR

2018/3/22

12

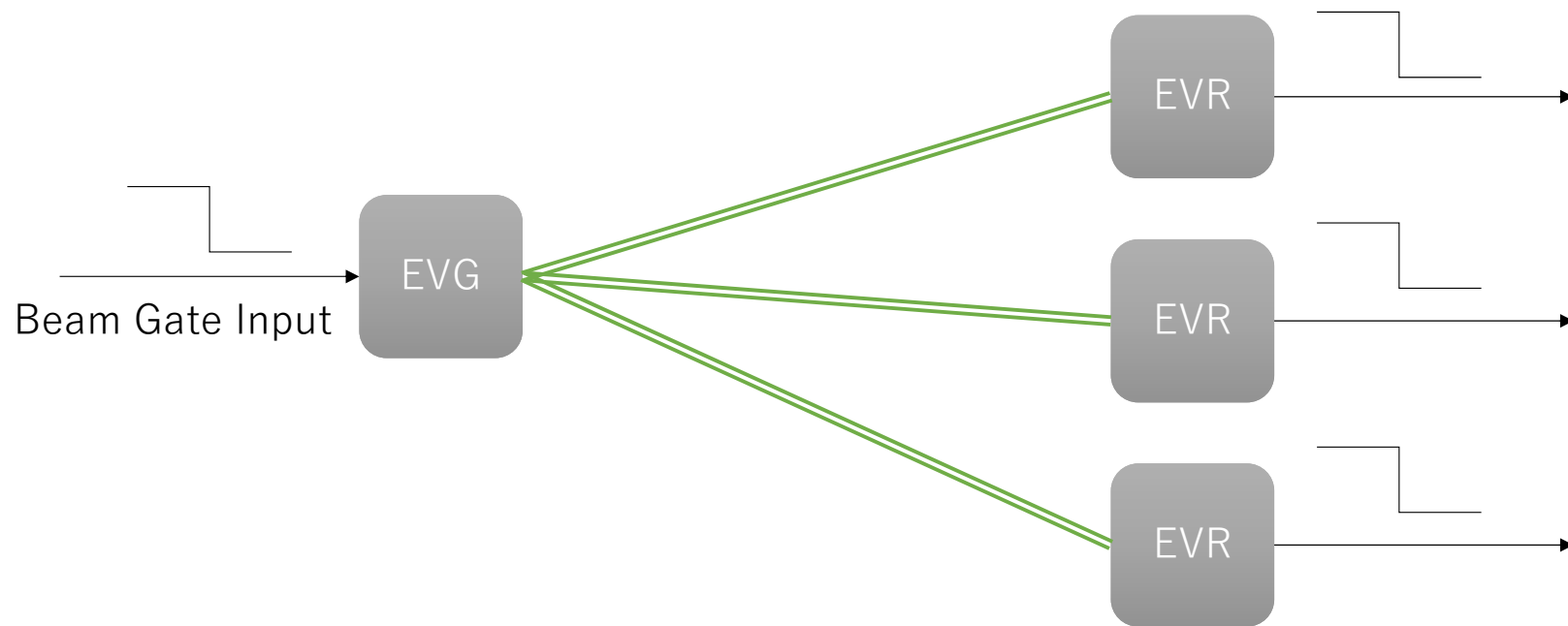
バケットセレクション

- バンチ電流をモニターし、次にどのバケットに入れるかの候補を絞る
- 候補となるバケットのタイミングを計算
 - 繰り返し50Hzの中で遅延時間を1ms以内になるようにする。
- タイミングをEVGに設定する。
- これらのやり取りを分散共有メモリ（Reflective memory）を利用して応答時間を短くする



タイミングシステムを用いた運転許可信号の伝送

- 16bitのEvent信号のうち、8bitを用いて8種類の信号線の役割を持たせる。
- Eventネットワークをそのまま利用することで、回路を単純化
- DRやMRの入射/出射,キッカー/セプタムへの早い動作制御を可能にする



将来に向けた取り組み

- EVRの独自開発
 - Open SourceをもとにしてFPGAを編集することで柔軟に仕様を変更
 - Zynq を利用し、外部バスを用いないモジュールのstandalone化
- μ TCA-EVRの制御システムの構築
 - VMEに変わる世代への対応
- White Rabbitのタイミングシステムの評価



まとめ

- SuperKEKBの制御システムはEPICSを用いた分散制御を行っている
- 監視システムの導入により、計算機やネットワークの不具合を即座に見つけることができるようになった。
- KEKBlogに加えてArchiver Applianceを導入し、運用に向けた準備を進めている
- イベントタイミングシステムを利用して、4リング同時のTop-up運転を行っている。
 - バケット選択システムと分散共有メモリで結び、応答時間を短縮
 - 運転許可信号も同システム内に組み込み、運転制御を簡単化
 - 将来に向けた取り組みも並行して進めている