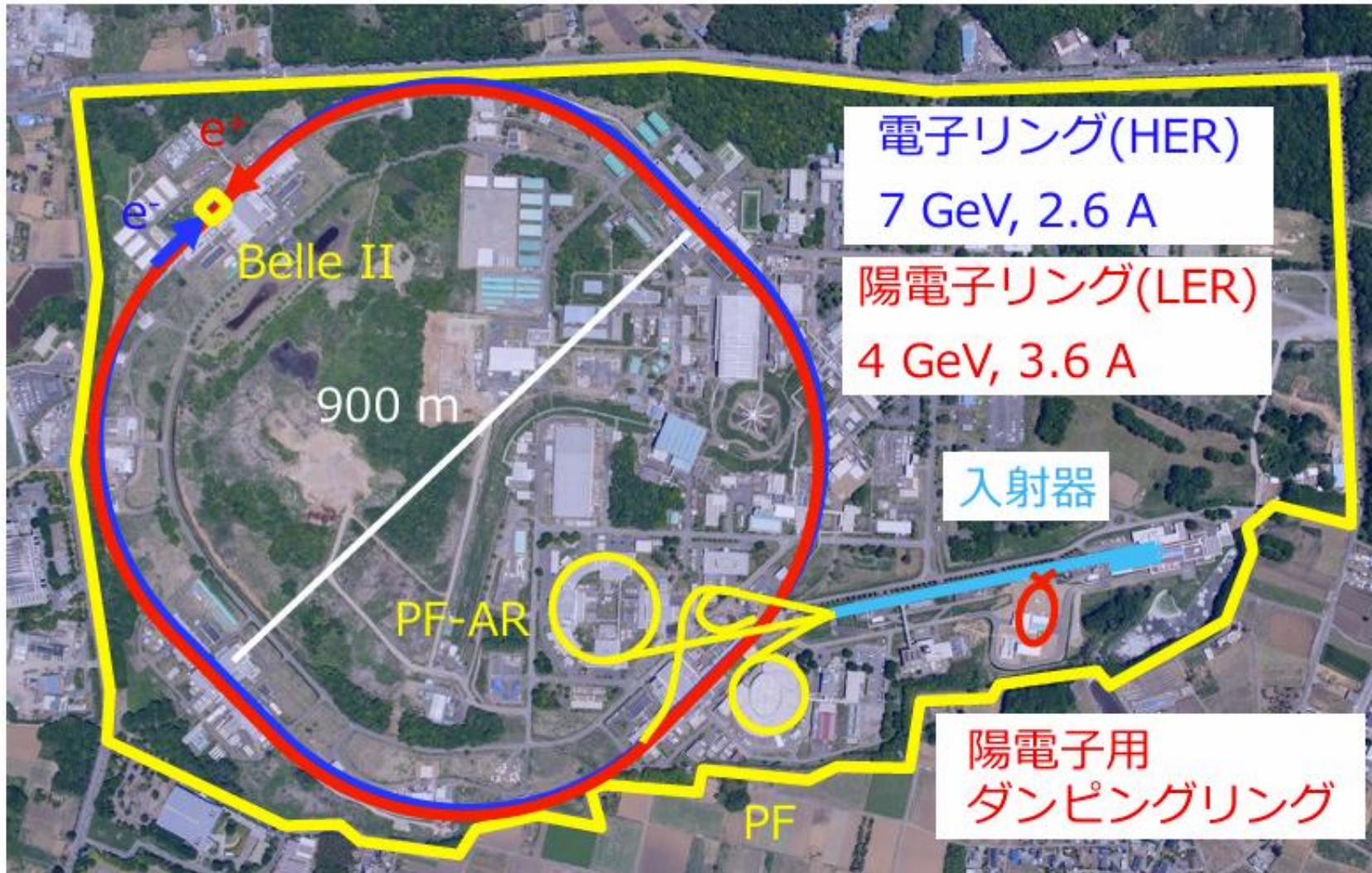


# SuperKEKBの制御システム

KEK 加速器研究施設 杉村 仁志

# SuperKEKB加速器

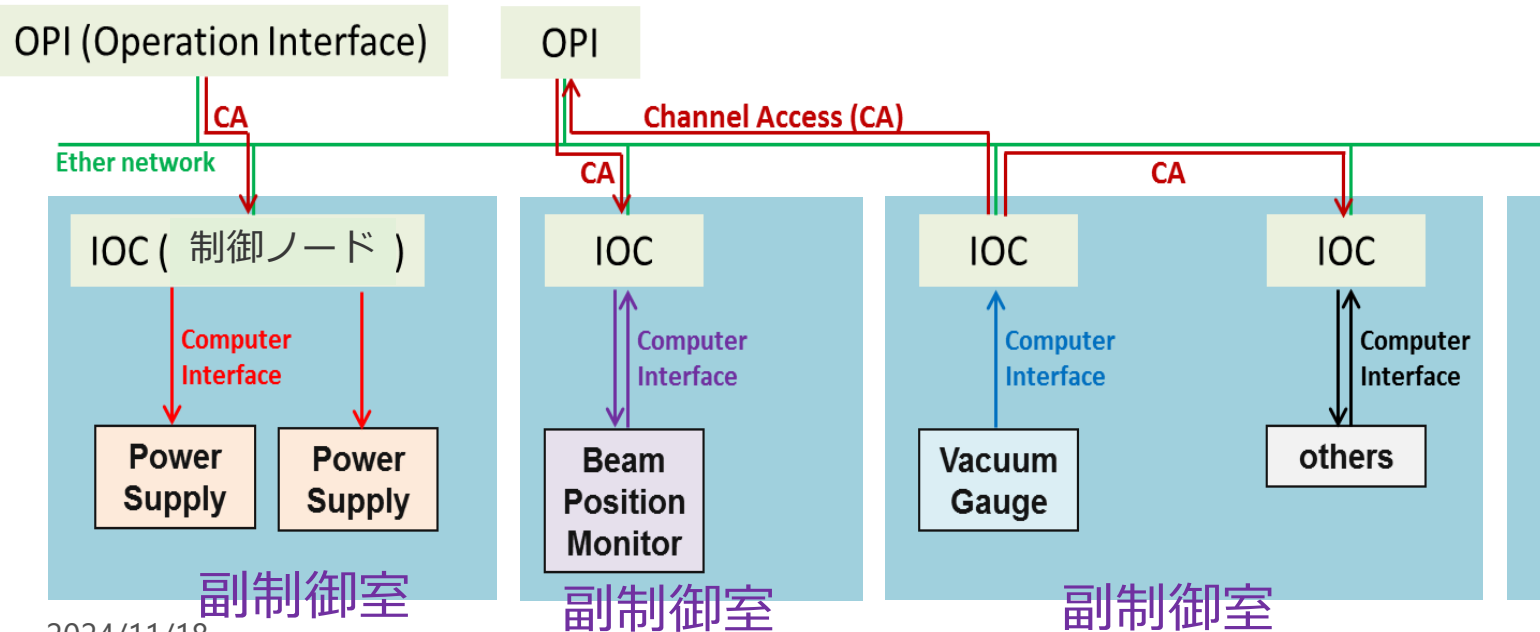
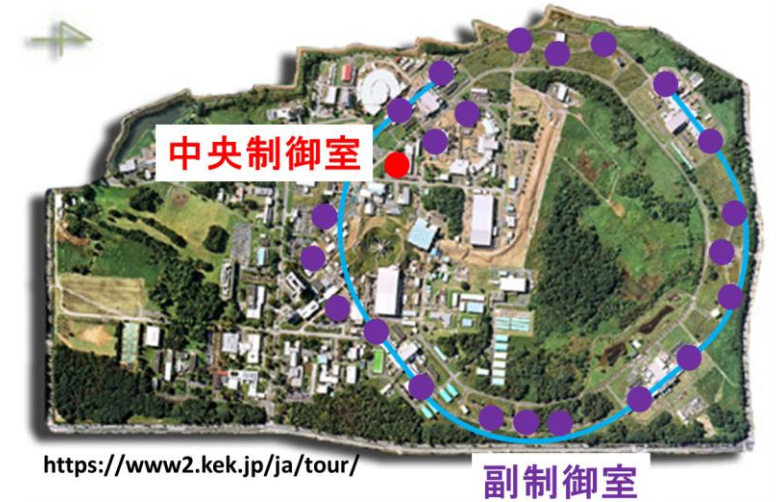
KEKつくばキャンパスにある周長3kmの電子陽電子衝突型加速器



# 制御システム概要

## EPICSを用いたネットワーク分散型制御システム

- 中央制御室からネットワーク越しにOPI(Operation Interface)を利用して全ハードウェアを制御運転
- 副制御室に設置した制御ノード(I/O Controller, IOC)が各ハードウェアを制御
- 制御ノード間は統一規格プロトコル(Channel Access)で通信



中央制御室

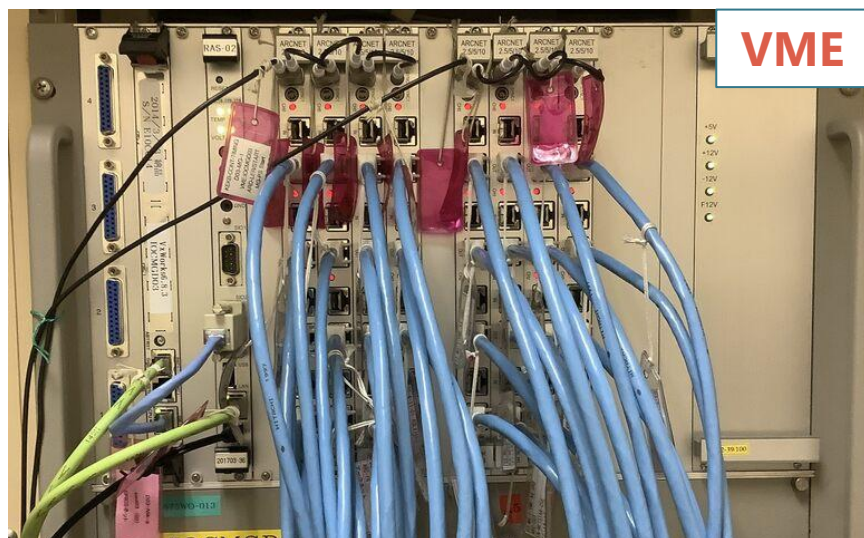
# 制御ノード

## 中央・副制御室に合計300以上の制御ノードを構築

- 多くは産業用（工場等で利用される）のVME, PLCや $\mu$ TCAを利用。CAMACも一部残存。
- 組み込み型の開発や小型PC(RaspPi, RedPitaya)も利用

## 制御点数

- 装置数：約1万個
- 制御情報数：約20万個



電磁石電源制御用ノード



LLRF制御用ノード

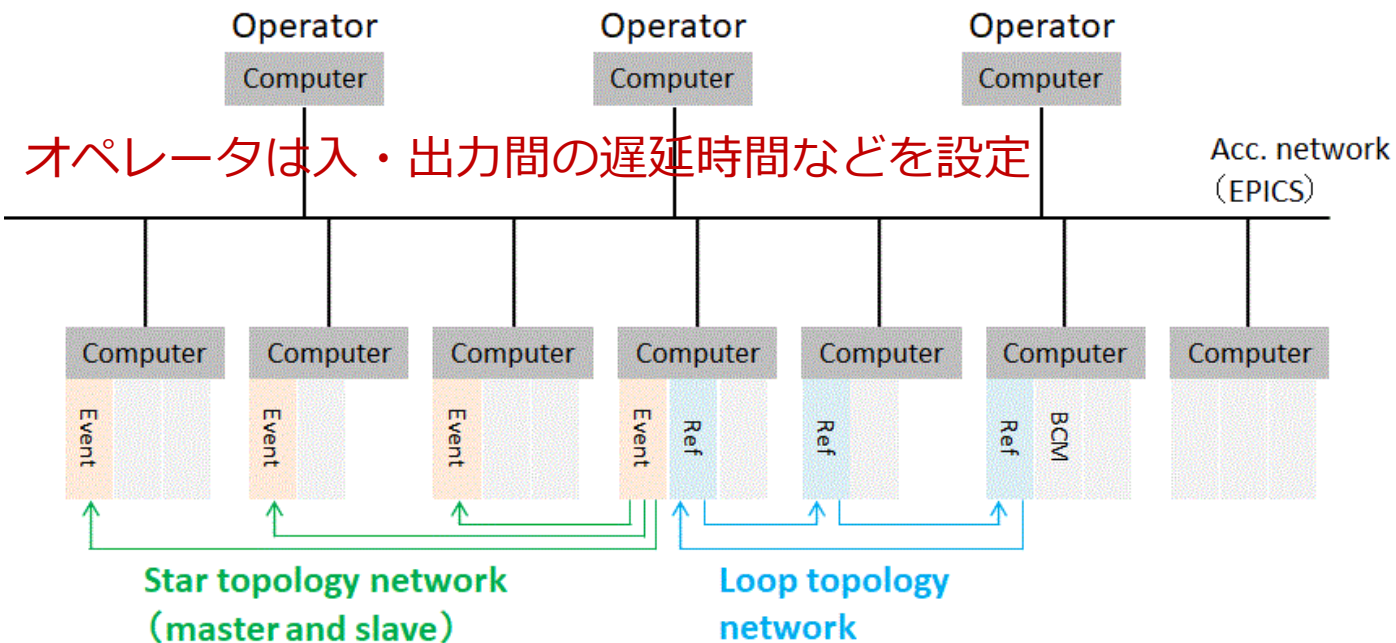


ロスモニター制御用ノード

# 高速分散制御システム

タイミングシステムやMachine Protection Systemは、  
ノード間的高速かつ堅牢な通信が必要

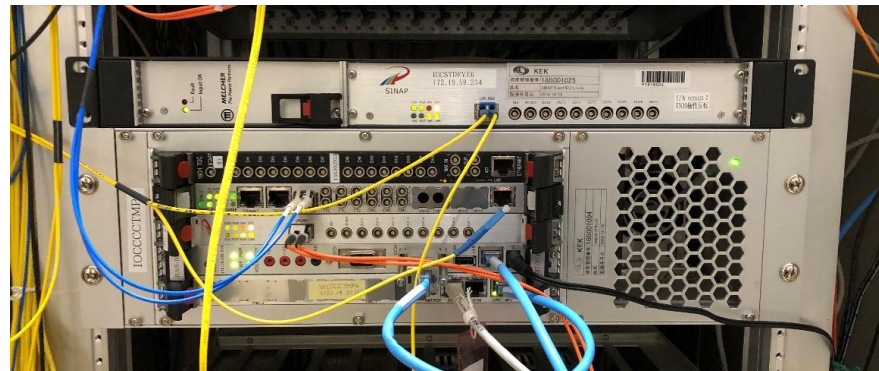
- 機能ごとに専用光配線ネットワークを構築



「入力」「ノード間通信」「出力」過程の仕様はFPGA等に予め実装

2024/11/18

## タイミングシステム



## Machine Protection System (アボートトリガーシステム)



# タイミングシステム

イベント信号受信モジュール (EVR)

## パルス機器駆動のための精度の良い(~10ps)信号を出すシステム

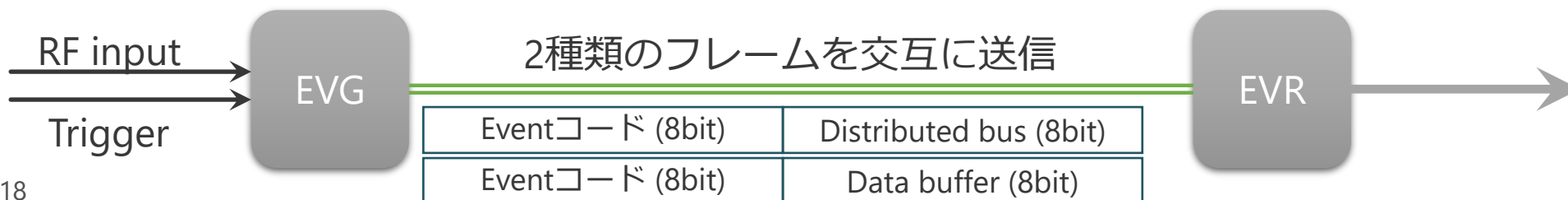
- 電子銃、パルス電源、RF、キッカー、セプタムなどに供給
- ビーム(RF)と同期
- ビームモニターにも利用

## 運転パラメータを変更するための情報も同時に配信する

- ビームの供給先を変更する必要があるため
  - 陽電子ビーム用のタイミングなのか、電子ビーム(SuperKEKB HER, PF, PF-AR)用のどのタイミングなのか
- それぞれのRFの位相、Shot-IDなど50Hzで切り替える
- ビームモニターのデータの同期

## ⇒これらを統合したイベントタイミングシステムを採用している

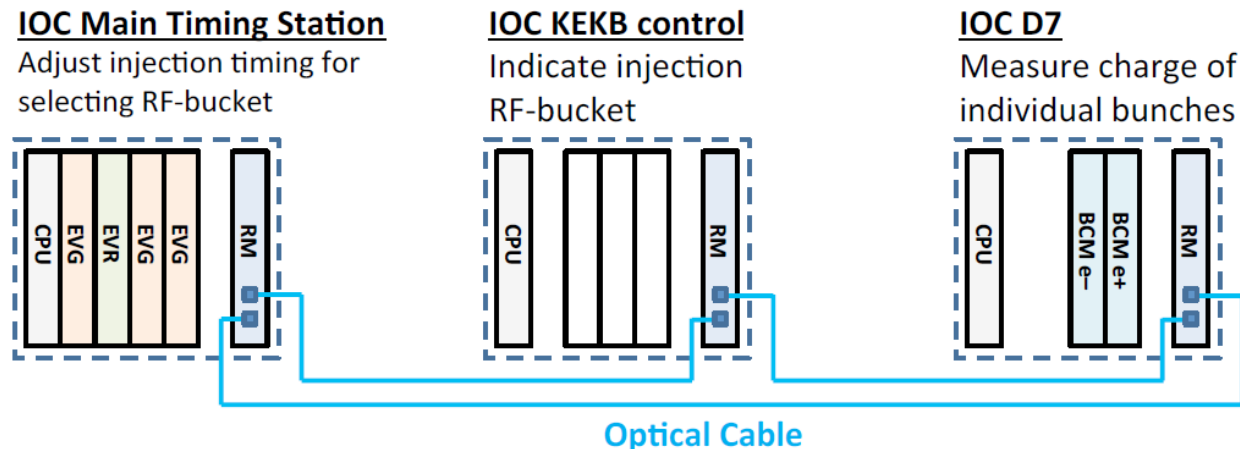
- FPGA GTXトランシーバーを利用したデータの送信



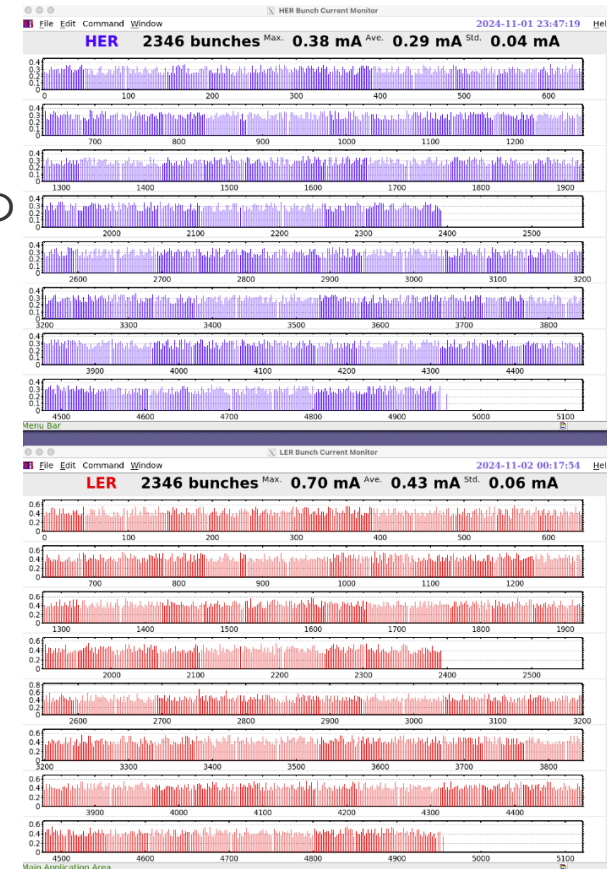
# バケットセレクションシステム

リング内のRFバケットの中から入射を行うバケットを選択し、そのバケットに入射できるタイミングを計算するシステム

- 5120個のRFバケットのうち、入射したいバケットのパターン(FillPattern)をあらかじめ設定
- バンチ電流モニター(BCM)でバンチ毎の電流情報を取得し専用の分散共有メモリ(RM)に書き込むことで、タイミング計算用のIOCへ情報を送る
- バンチ電流の小さいバケットに優先的に入射できるように入射バケットを選定する。
- 選定されたバケットに入射するタイミングを計算し、その情報をRMを利用してタイミング送信モジュール(EVG)に書き込む



## バンチ電流モニタ



# アボートトリガーシステム

各ハードウェアが異常を検知した際に機器を守るため、ビームアボート信号を発行するシステム

- アボート要求信号を収集
  - 8か所のローカル制御室で部分的に集約し、中央制御室で再び集約し、アボートキッカーへ信号を送信

タイムスタンプ機能により、最小時刻単位~8nsでアボート受信情報を記録

- White Rabbitを利用した時刻同期
- 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

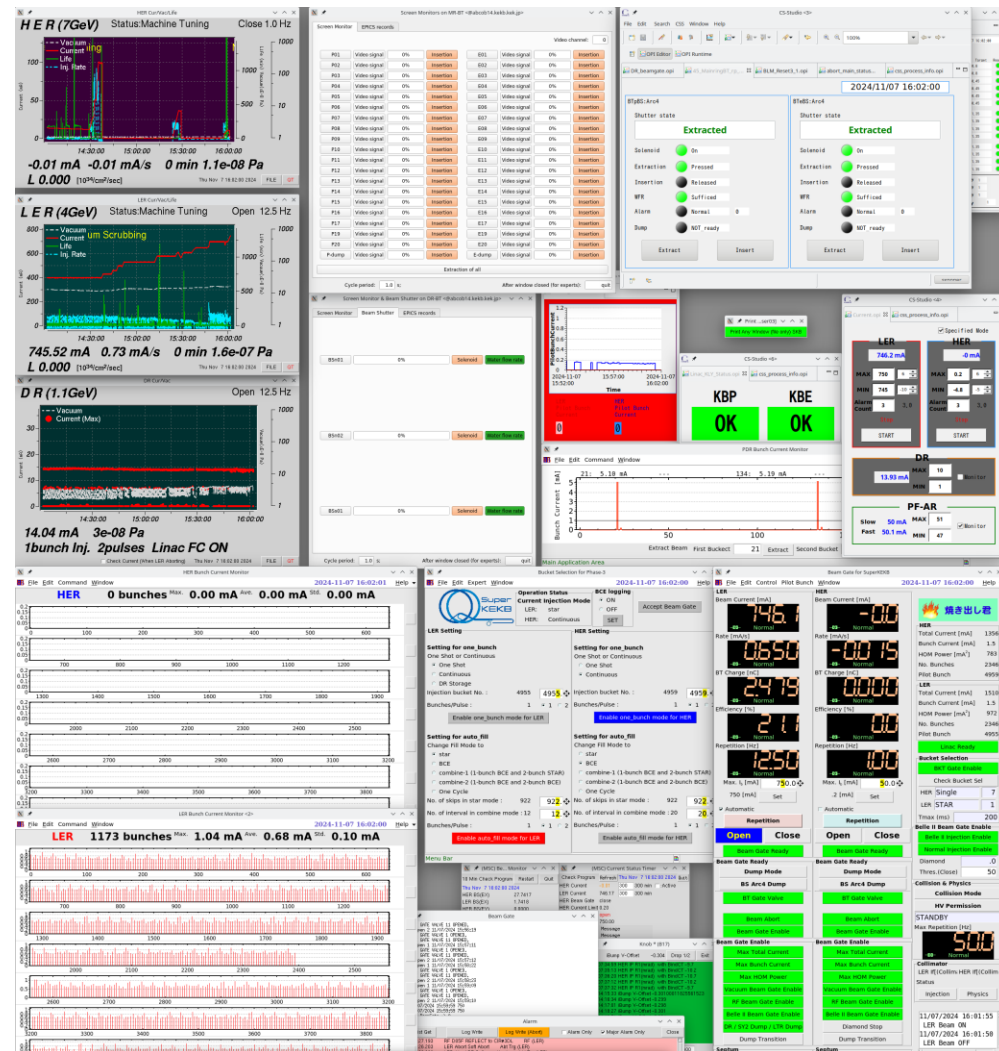




# OPI (Operator Interface)

## 加速器運転を行うための操作パネル

- ボタンやカーソルなどにより、視覚的に誰でも操作できるようなGUIを整備
- 作成者の好みにより複数の種類のパネルで運用
- SAD+Tkinter, CSS, Python+Tkinterが主流。
  - SAD・・・光学計算ツールであり、Mathmaticaベースのソフトウェア
  - CSS (Control System Studio)・・・EPICS コミュニティによって開発されたEclipseベースでのツール
  - sadやpythonでepicsのデータが読み出せるように専用のモジュールを整備



# データ収集系（アーカイバー）

## EPICS Channel Accessにより各制御点のデータ(Process Variable)を収集 2つのシステムを併用している

- KEKBlog
    - KEKB時代から引き続き利用されている独自に開発したシステム
  - Archiver Appliance
    - SLACが中心となりEPICS コミュニティによって開発されたシステム
    - データ量はだいたい50G/日程度
    - 保存期間ごとにデータ領域を分けることで、  
直近データのリアルタイム読み出しをできるようにしている
- STS(Short Term Storage), M(Medium)TS, L(Long)TS



Archiver Appliance用Storage

**Model** : HPE ProLiant DL380 Gen10 12LFF

**CPU** : Intel(R) Xeon(R) Bronze 3104 CPU @ 1.70GHz (2 Processors)

**Memory** : 48 GB (2 x 24GB 2133MHz)

**Storage** : 44TB (9 x 6TB HDD、RAID 5)

# データの書き込み、読み出し・閲覧

## ブラウザ上から収集したいデータを登録

SuperKEKB Archiver Appliance for users

Home Reports Metrics Storage Appliances Integration Help

Super KEKB KEK

This is the archiver appliance management console for the users group. Please contact Hiroshi Kaji and control group for any questions regarding these archiver appliances. To check the status of or to archive some PV's, please type in some PV names here.

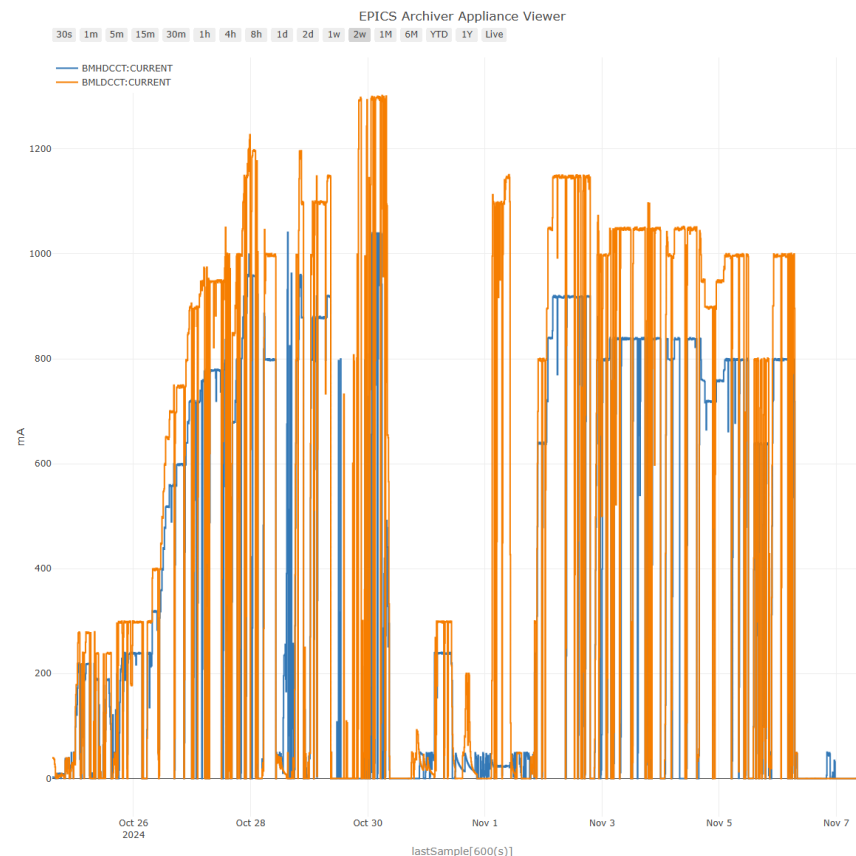
Check Status Archive Lookup Pause Resume

## Http Requestによりデータを取り出す 様々な形式に対応

- json, txt, csvなど

```
$ curl 'http://localhost:17668/retrieval/data/getData.json?pv=BMDCC:CURRENT&from=2019-12-01T09:00:00%2B0900&to=2019-12-01T10:00:00%2B0900'
[
  { "meta": { "name": "BMDCC:CURRENT", "EGU": "mA", "PREC": "3" },
    "data": [
      { "secs": 1575158399, "val": 99.9854915, "nanos": 988745602, "severity": 0, "status": 0 },
      { "secs": 1575158400, "val": 99.9590685, "nanos": 989893974, "severity": 0, "status": 0 },
      :
      { "secs": 1575161997, "val": 160.80893550000002, "nanos": 988587258, "severity": 0, "status": 0 },
      { "secs": 1575161998, "val": 160.98487550000002, "nanos": 989466250, "severity": 0, "status": 0 }
    ]
  }
]
```

## Web Viewerを利用することで ブラウザでデータを閲覧



# インフラの構築

## ネットワーク・計算機・ストレージ

# 制御ネットワークの構築

## コアスイッチ+エッジスイッチの構成

- コアスイッチ(L3)は物理スイッチ2台を論理的に1台のスイッチにして利用
  - Virtual Switching System
- コアスイッチの下に約40台のエッジスイッチ(L2)がぶら下がる
  - コア-エッジ間は10GbE, 1GbEの2ポートを利用  
スパニングツリープロトコルを利用し、通常は1GbEをブロック
- 無線LANの整備
  - 場所によって複数のタイプ(LCX, コリニア)のAPを設置
  - トンネル内には鉛箱で放射線の影響を遮蔽

## FirewallでKEKネットワークと通信を制限

- 基本的にはEPICSでの通信制御に特化
- 特定の機器には特定のポートを空ける
  - 踏み台サーバー等



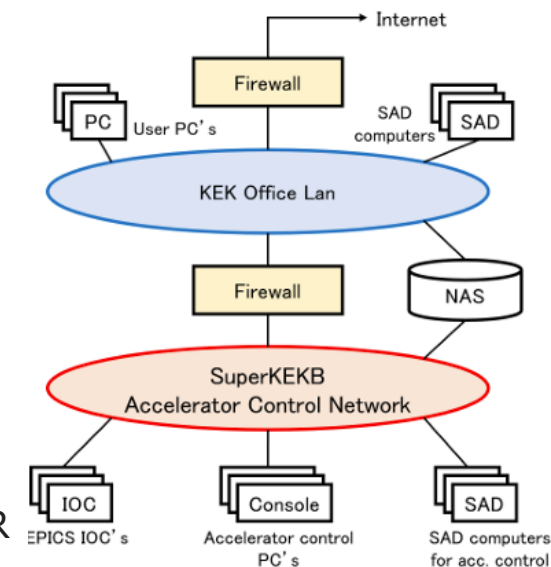
コアスイッチ Cisco C9500-40X



無線LAN(LCX) Buffalo WAPM-AX4R



Firewall Fortigate 100F



ネットワーク概念図

# SuperKEKB制御ネットワークを構成するサーバー計算機

## ラックマウントサーバー計13台で構成

- 障害に強くする
  - 電源の冗長化、ディスクの冗長化(RAID1)

## 各種サービスを立ち上げ、ネットワークの基盤を構築

- DNS, Proxy, DHCP, LDAP, NTP, etc...

## サービスごとに仮想マシンを立てる

- KVMを利用し、障害発生時やサーバー更新時に移行しやすくする
  - web, postgres, epics softioc, ユーザー用計算機

## Ansibleを用いた構成管理

- システム構成をコード化し、Gitで管理(GitLab)
- 冪等性を担保



Dell R6515 x10, R340x3  
Memory 64GB, 128GB, 256GB  
OS : AlmaLinux9



# サーバー計算機の管理、監視

## システム監視 – iDRAC

- 計算機のハードウェア監視
  - 電力、温度、CPU、メモリ、ディスクの健全性チェック
  - 電源のOFF/ON制御
  - アラートの送信
  - 仮想コンソールによるリモートデスクトップ

## VMの制御 – cockpit

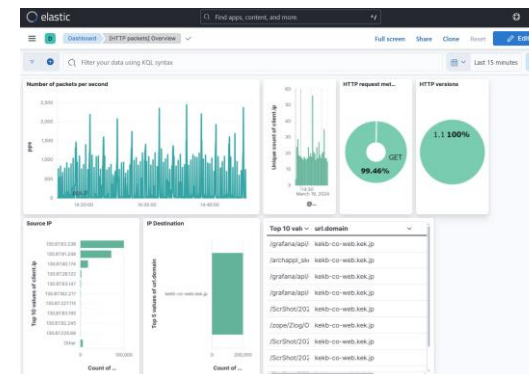
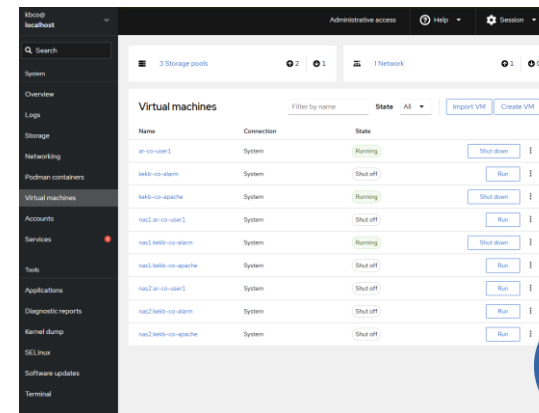
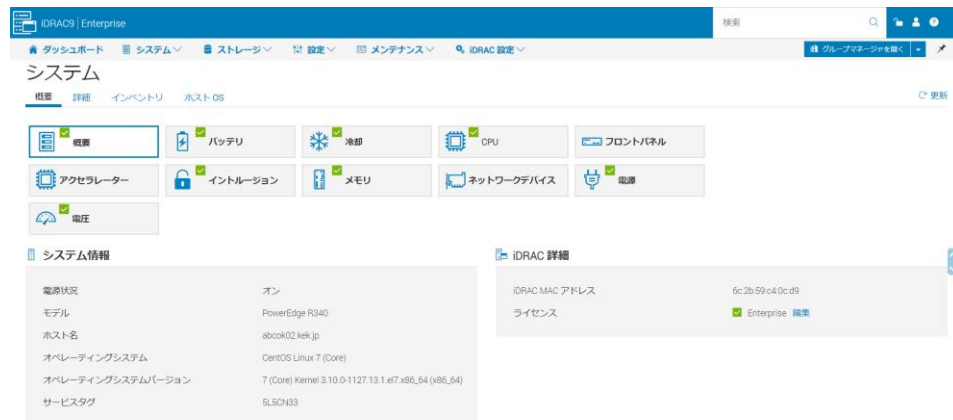
- 仮想マシンの起動、停止、設定変更

## メトリクス監視 – Zabbix – Grafana

- サーバーだけでなくネットワークの監視にも利用

## ログ監視、管理 – ELK – Kibana

- アクセスログの記録、検索



# webサービス

## ビデオ配信サービス

- ビデオで常時流れている映像を取り込みweb上で配信する

## Zope

- 運転ログ、シフト管理、機器管理、ネットワーク管理
- バックエンドにPostgresデータベース

## Redmine

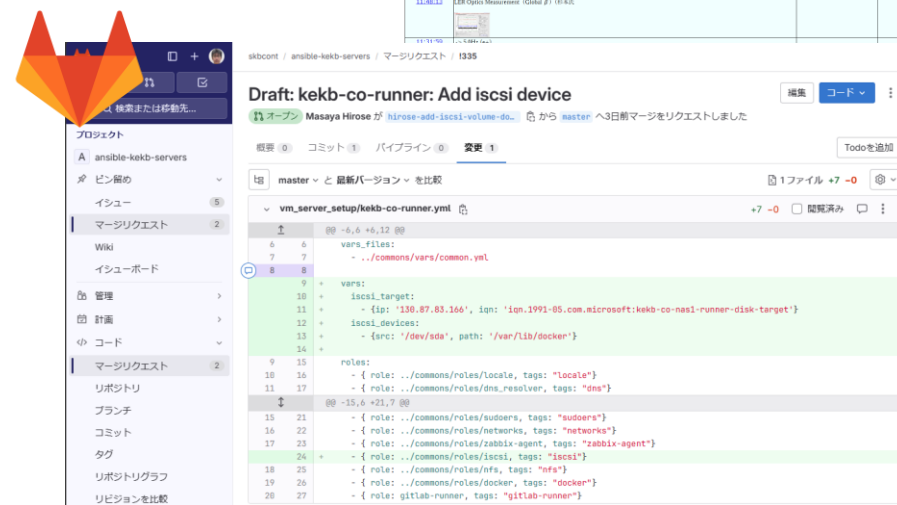
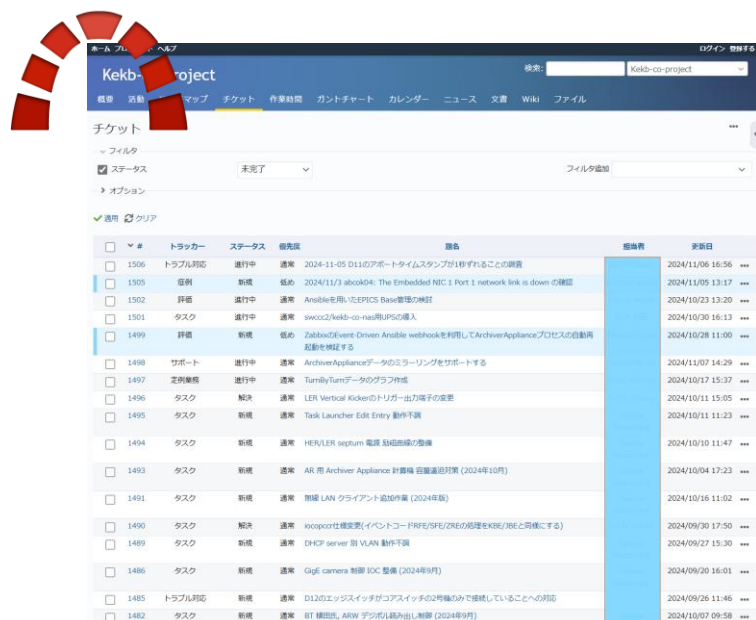
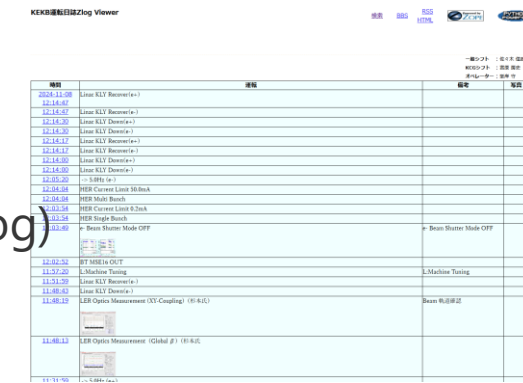
- タスク管理

## GitLab

- バージョン管理
- CI/CDを用いた自動デプロイ
- wiki



## 運転ログ(Zlog)

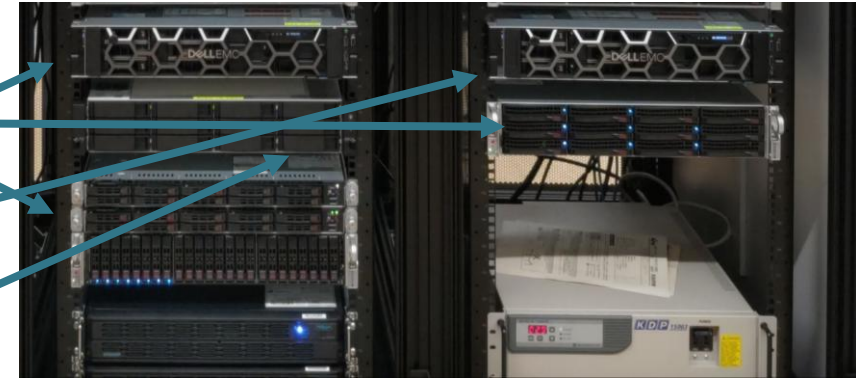




# ストレージシステム

## 用途に合わせて4台のストレージシステムを利用

- 加速器運転で利用するOPIやIOC,フィードバックプログラムなど各種データなどを保存する
  - ほぼすべてのサーバー計算機にNFSマウント
  - zfsシステムを利用、RAIDZ2(double parity), 2-コントローラー
  - SSD 20TB, 15分ごとの差分バックアップ+Snapshot, 電源2台+UPS
  - OS : NexentaStor (Solaris)
- データベースなどの共有しないデータを保存
  - iSCSIで特定のサーバーにマウント
  - HDD (8TBx6) RAID6
  - OS : Windows Server 2019
- データのバックアップ
  - QNAP, 12TBx10 RAID6



# まとめ

SuperKEKBの制御システムはEPICSを用いたネットワーク分散型制御システム

約1万台の制御装置にある20万の制御点を300程度のIOCから読み出す

高速分散制御のために専用の光配線ネットワークを構築

様々なプログラムを利用したOPI

計算機・ネットワークの構築を行い、さまざまなサービスを提供している