

J-PARCチャームバリオン分光実験用の 連続読み出しシステムの実装

白鳥 昂太郎

for the J-PARC E50 collaboration

大阪大学核物理研究センター (RCNP)

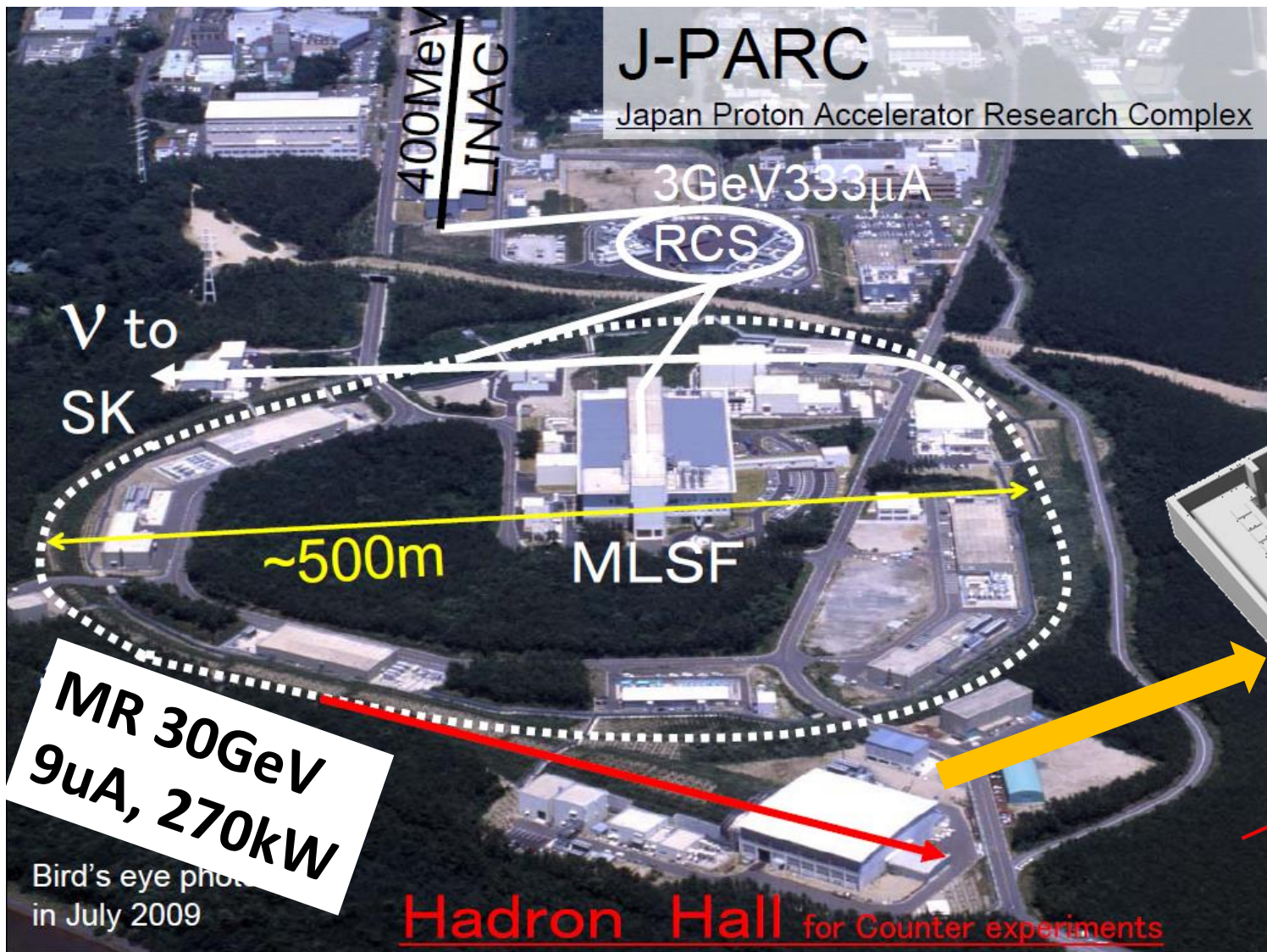
計測システム研究会2023 @ RCNP
～計測システム開発の現状と今後の展開～

2023年11月21日

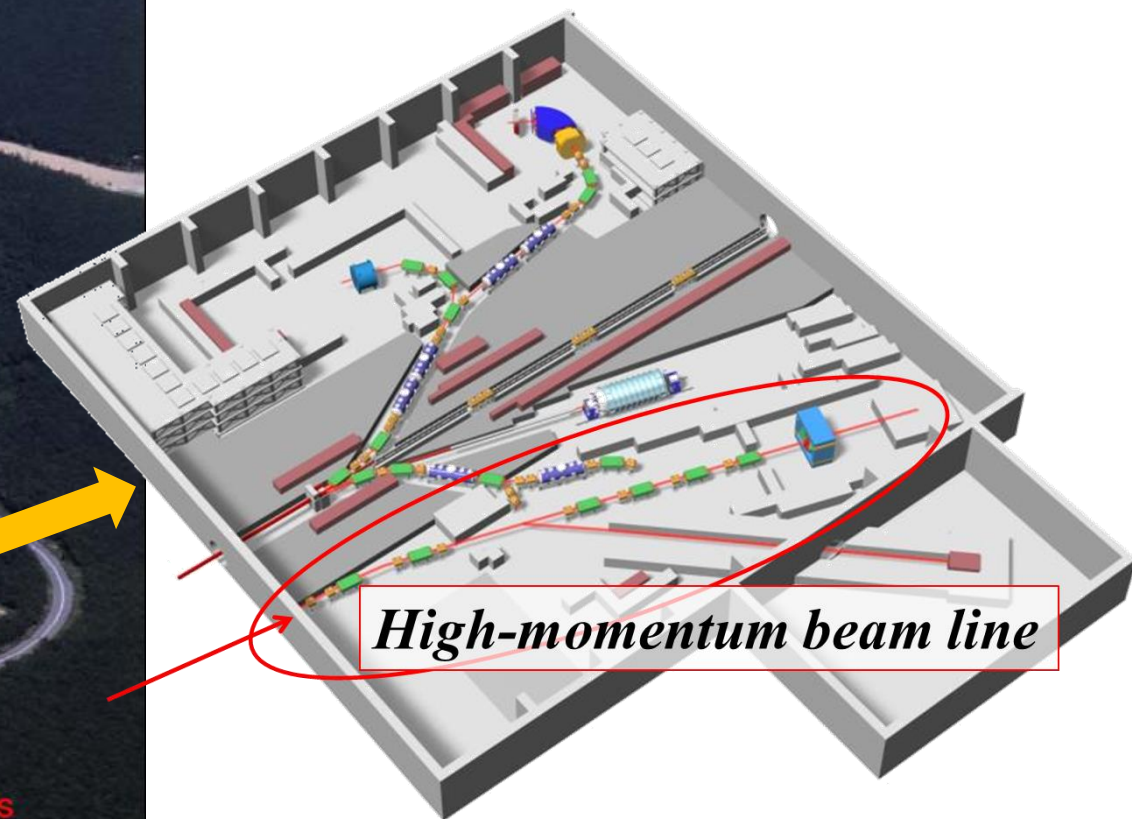
Introduction

J-PARCチャームバリオン分光実験
検出器セットアップとDAQ

J-PARC & ハドロン実験施設



ハドロン実験施設

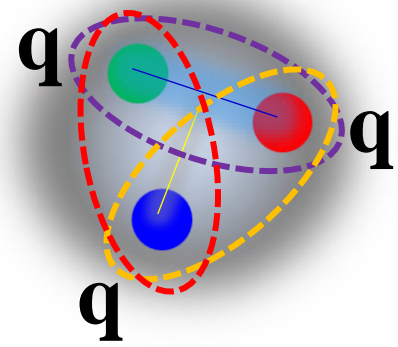


世界最高水準の陽子ビーム強度

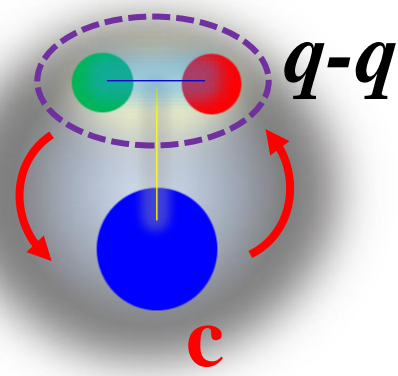
チャームバリオン分光実験: J-PARC E50

- ハドロンの有効自由度の解明: **ダイクォーク相関**
- ⇒ チャームバリオンの励起状態の研究

軽いクォークのみの
バリオン



チャームバリオン

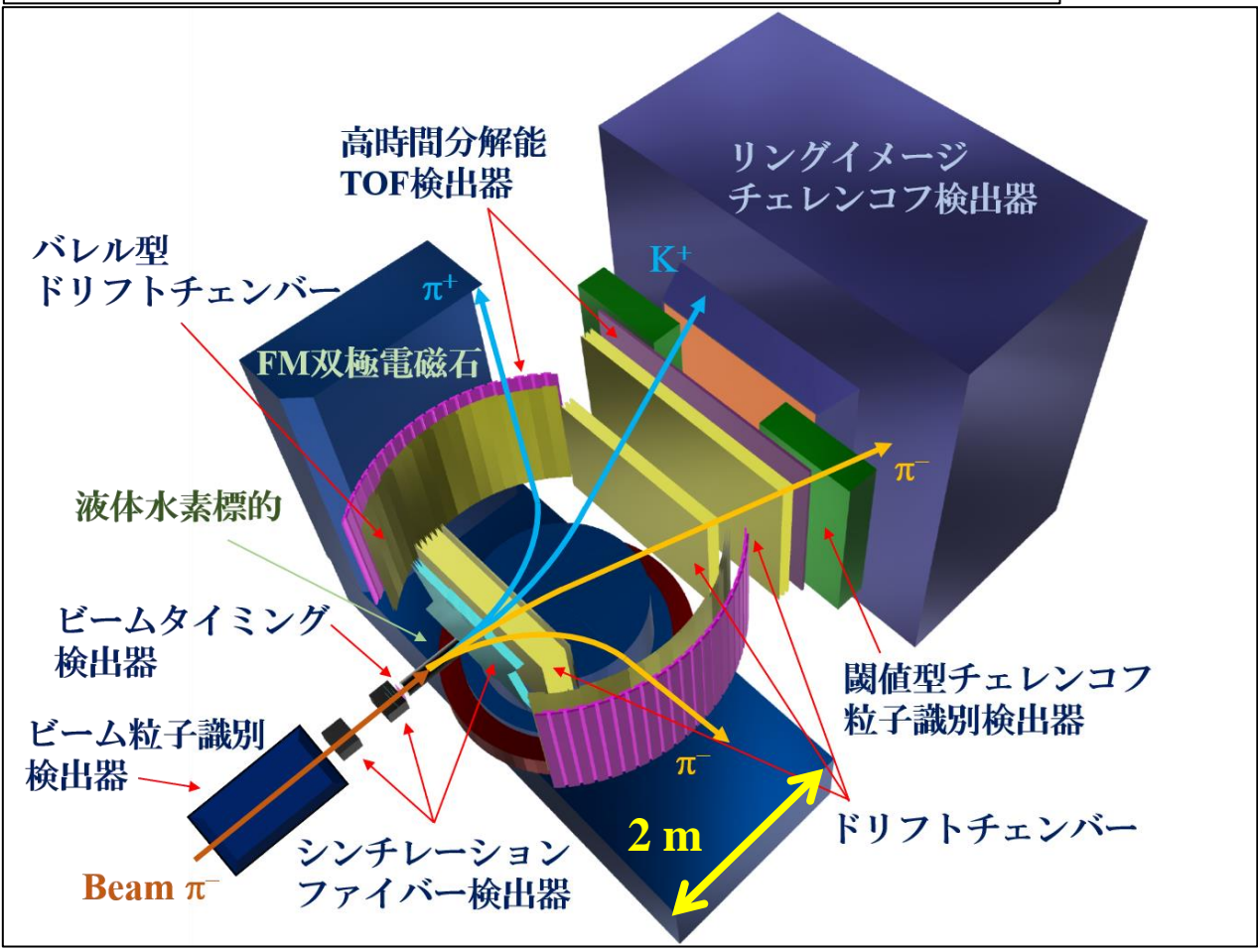


* 実験: 生成率と崩壊幅の測定

- ミッシングマス法: $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$
- 20 GeV/c π^- beam: 30 MHz $\rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$

* 汎用実験セットアップの建設を推進

チャームバリオン分光実験用スペクトロメータ



高運動量ビームライン二次粒子ビーム実験の概要

* E50 ⇒ **トリガーレス連続読み出しDAQシステム**によるデータ取得

- ・ 複雑なハードウェアトリガーの構築 ⇒ ソフトウェアによるデータ選別 (フィルタリング)
- ・ E50実験セットアップ: J-PARC高運動量ビームラインにおける**汎用実験セットアップ**
 - ・ トリガーレスDAQによる2–20 GeV/cの高運動量ハドロンビームの効率的な利用

実験	ビーム粒子	運動量 [GeV/c]	強度 [MHz]
チャームバリオン分光実験 (E50)	π^-	20	30
Non-strangeダイバリオン探索実験 (E79)	proton	2.85–4.00	> 1
Ξ バリオン分光実験 (E97)	K^-	5–8	> 0.5
Ω バリオン分光実験 (P85)	K^-	7–10	> 0.5
ϕ 中間子生成実験 (P95)	π^-	1.8–2.4	> 0.5
Exclusive Drell-Yan実験 (LOI)	π^-	15	30
Λ -p散乱実験 (LOI)	π^-	8.5	30
Double-K中間子原子核生成実験 (関連LOI)	proton	8	30
クォークカウンティングルールによる $\Lambda(1405)$ の研究	π^-	5–10	> 0.5

E50実験セットアップ

* 全20,000–25,000 ch (25 GB/spill \Rightarrow 12.5 GB/sec.=100 Gbps)

- Streaming DAQ FEE: TDC(+TOT)情報のみ
- + タイミング同期システム (MIKUMARI)

• MPPC検出器: 15,000–20,000 ch

- ファイバー飛跡検出器
- RICH, Beam-RICH, 閾値型AC

\Rightarrow CIRASAME (ASIC: CITIROC)

- 128 ch/board
- Low-resolution TDC ($\Delta T_{\text{LSB}} \sim 1$ ns)

• タイミング検出器: $\sim 1,000$ ch

- T0, RPC, TOF: アンプ/PMT + Discriminator

\Rightarrow AMANEQ board (HR-TDC mezzanine)

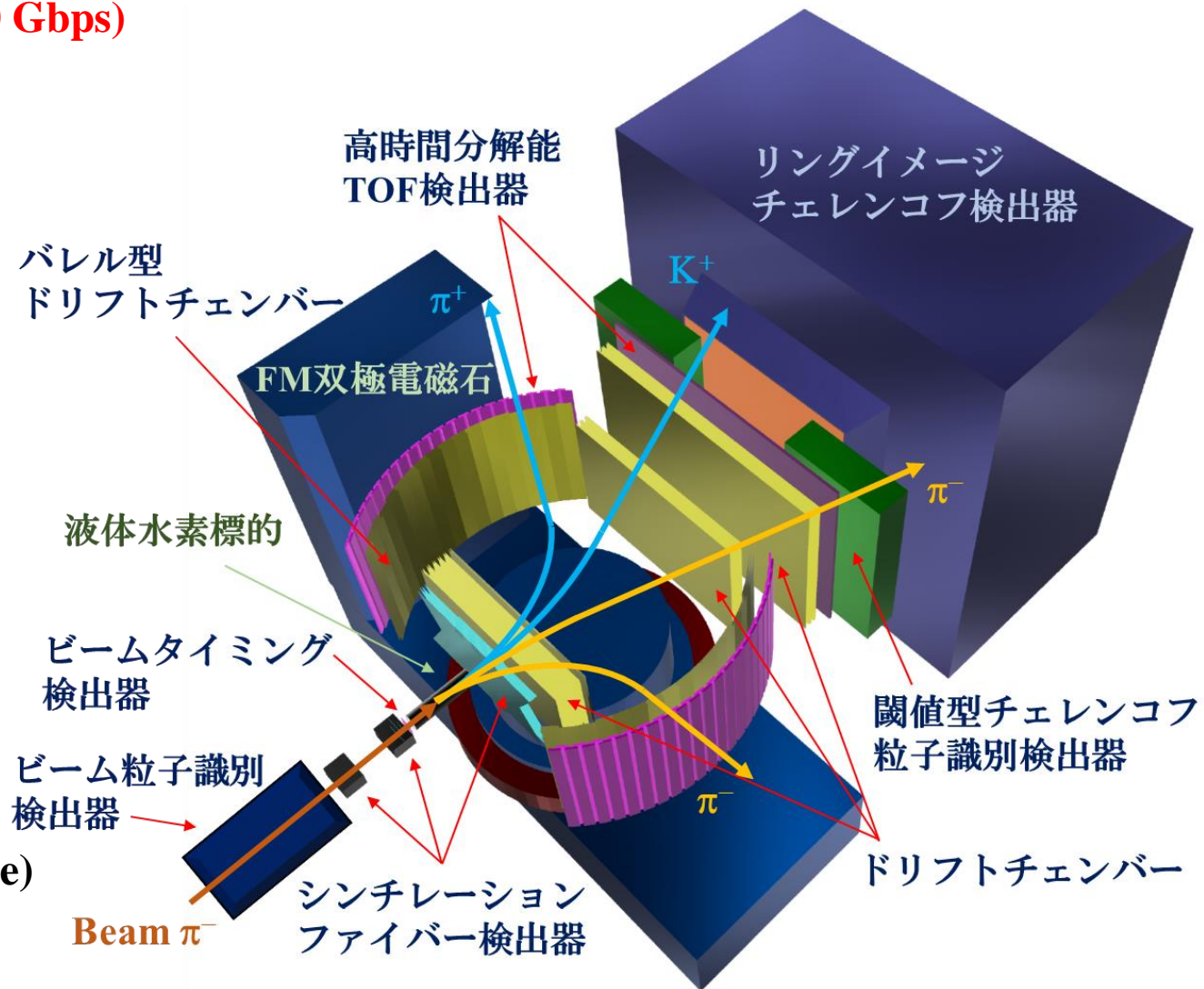
- 64 ch/board
- High-resolution TDC ($\Delta T_{\text{LSB}} \sim 20$ ps)

• ドリフトチェンバー: $\sim 4,000$ ch

\Rightarrow ASAGI ASD card + AMANEQ board (DC mezzanine)

- 128 ch/board
- Low-resolution TDC ($\Delta T_{\text{LSB}} \sim 1$ ns)

* TDCベースFEE, MPPCの利用など要素技術を共通化



E50実験セットアップ

* 全20,000–25,000 ch (25 GB/spill \Rightarrow 12.5 GB/sec.=100 Gbps)

- Streaming DAQ FEE: TDC(+TOT)情報のみ
+ タイミング同期システム (MIKUMARI)

• MPPC検出器: 15,000–20,000 ch

- ファイバー飛跡検出器
- RICH, Beam-RICH, 閾値型AC

\Rightarrow **CIRASAME** (ASIC: CITIROC)

- 128 ch/board
- Low-resolution TDC ($\Delta T_{LSB} \sim 1$ ns)

• タイミング検出器: $\sim 1,000$ ch

- T0, RPC, TOF: アンプ/PMT + Discriminator

\Rightarrow **AMANEQ board (HR-TDC mezzanine)**

- 64 ch/board
- High-resolution TDC ($\Delta T_{LSB} \sim 20$ ps)

• ドリフトチェンバー: $\sim 4,000$ ch

\Rightarrow **ASAGI ASD card + AMANEQ board (DC mezzanine)**

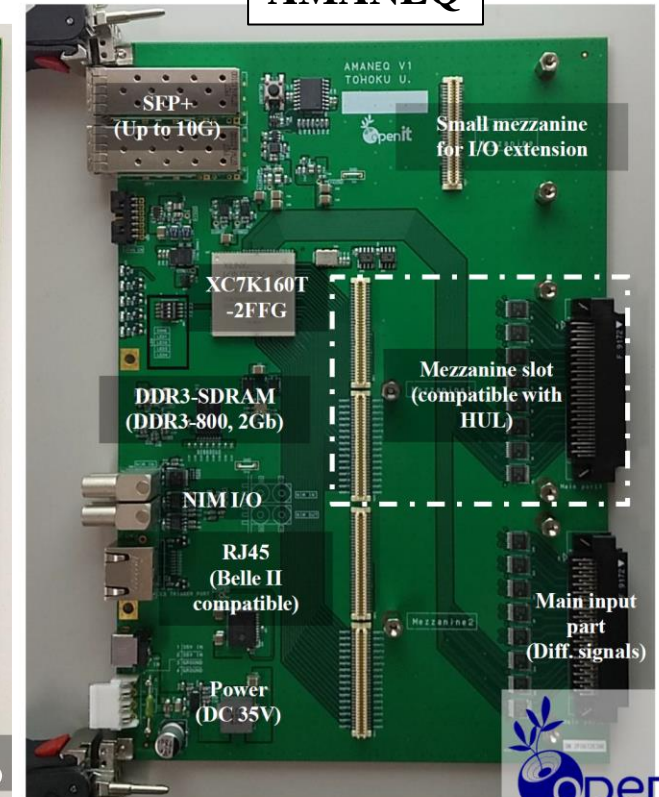
- 128 ch/board
- Low-resolution TDC ($\Delta T_{LSB} \sim 1$ ns)

* TDCベースFEE, MPPCの利用など要素技術を共通化

CIRASAME



AMANEQ



ASAGI ASD card



HR-TDC mezzanine



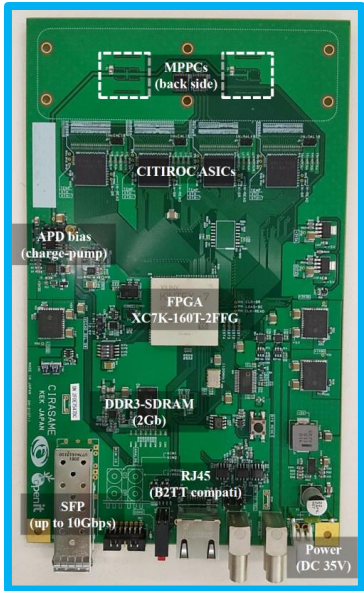
DAQ scheme



FairMQ +

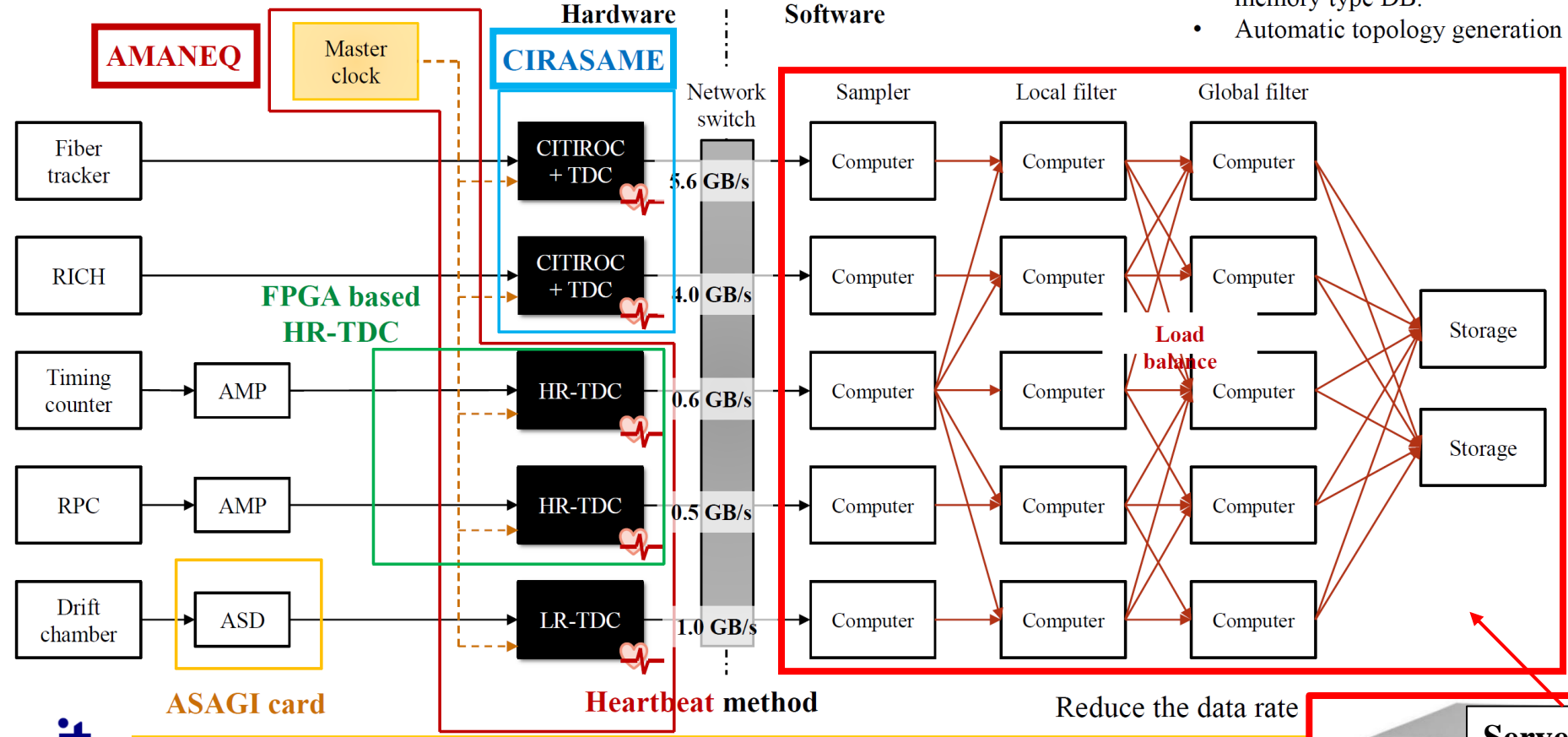
- Process monitor and control via in-memory type DB.
- Automatic topology generation

CIRASAME
(MPPC readout)



Clock/command/timing distribution
(MIKUMARI)

Schema of the DAQ system



AMANEQ

CIRASAME

ASAGI card

Heartbeat method

Reduce the data rate



Server PC

Total data rate: ~12 GB/s (25 GB/spill) (E50 case)

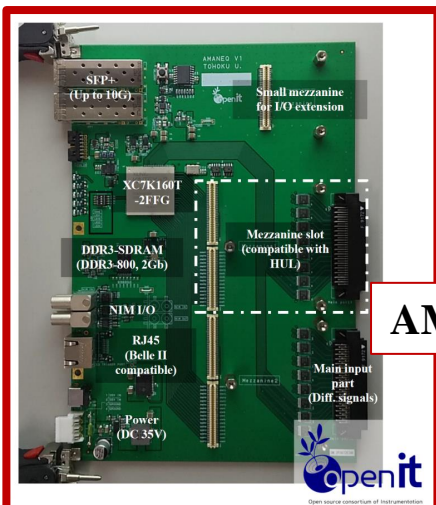
*** 実証試験(テスト実験@ELPH: 2018)に成功**

• R. Honda *et al.*, PTEP2021, 123H01 (2021).

⇒ 検出器システムへの実装と”NestDAQ”の構築(フィルタリング)



AMANEQ



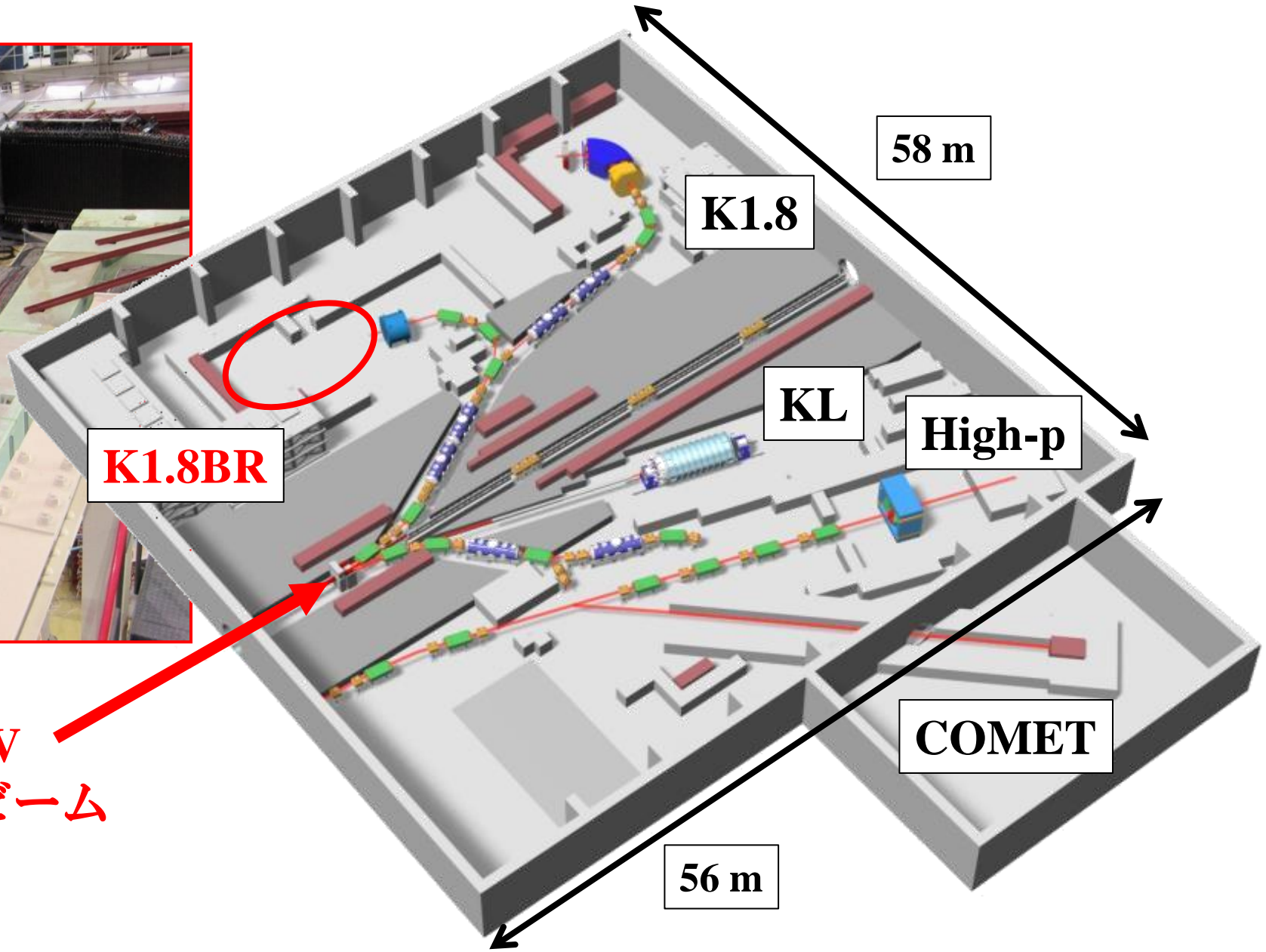
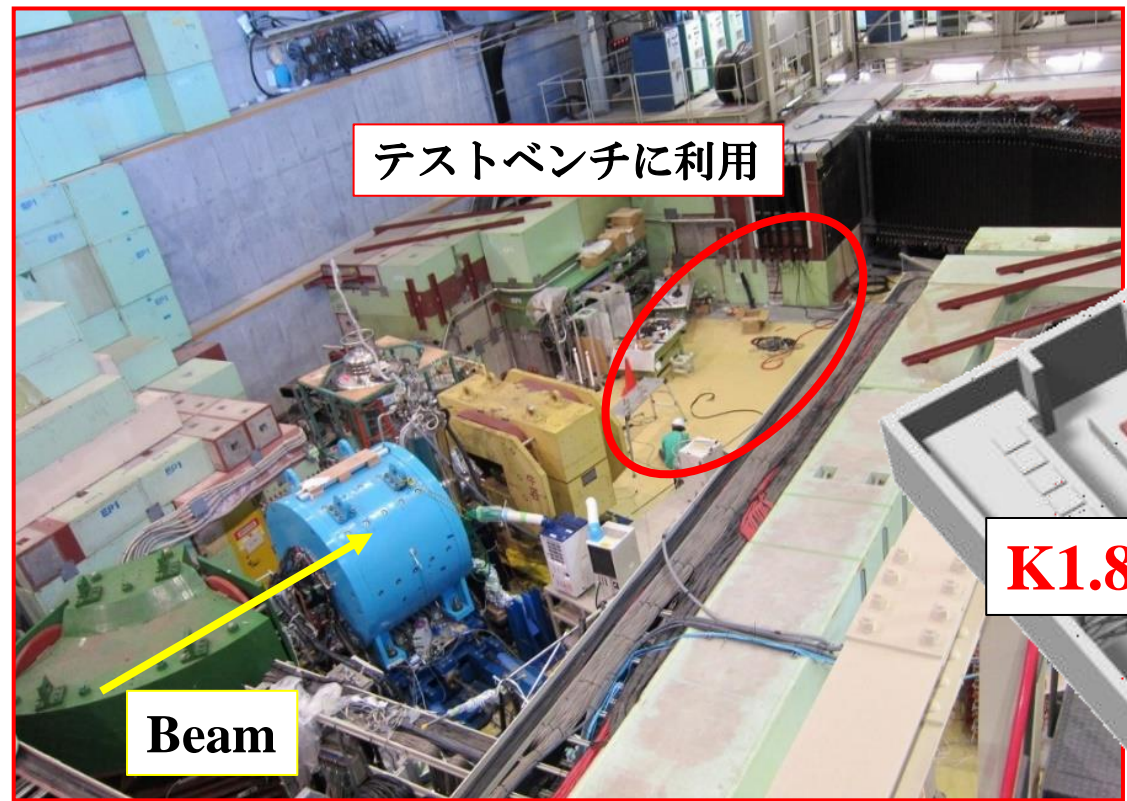
E50テストベンチ

検出器とDAQモジュールの構築
DAQシステムの実装

SPADI

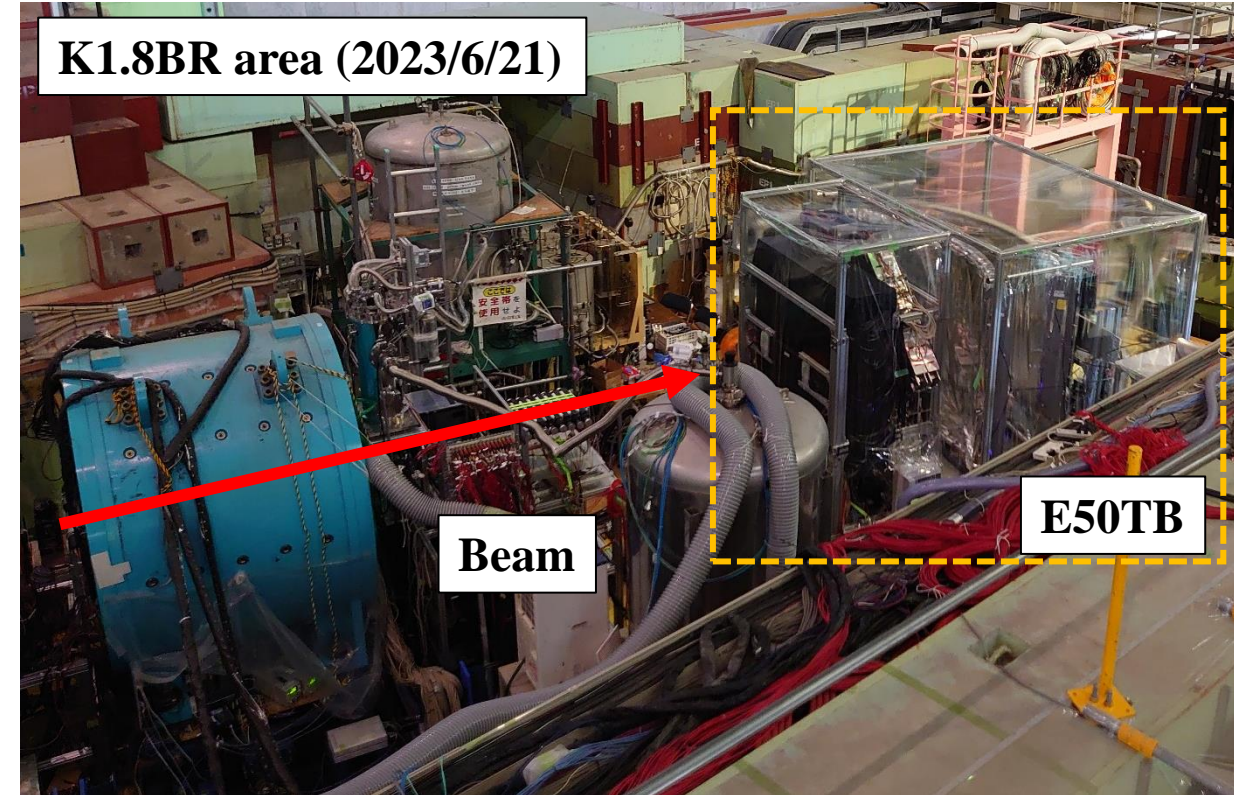
Alliance

E50テストベンチ(E50TB) @ J-PARC K1.8BR



E50テストベンチ(E50TB) @ J-PARC K1.8BR

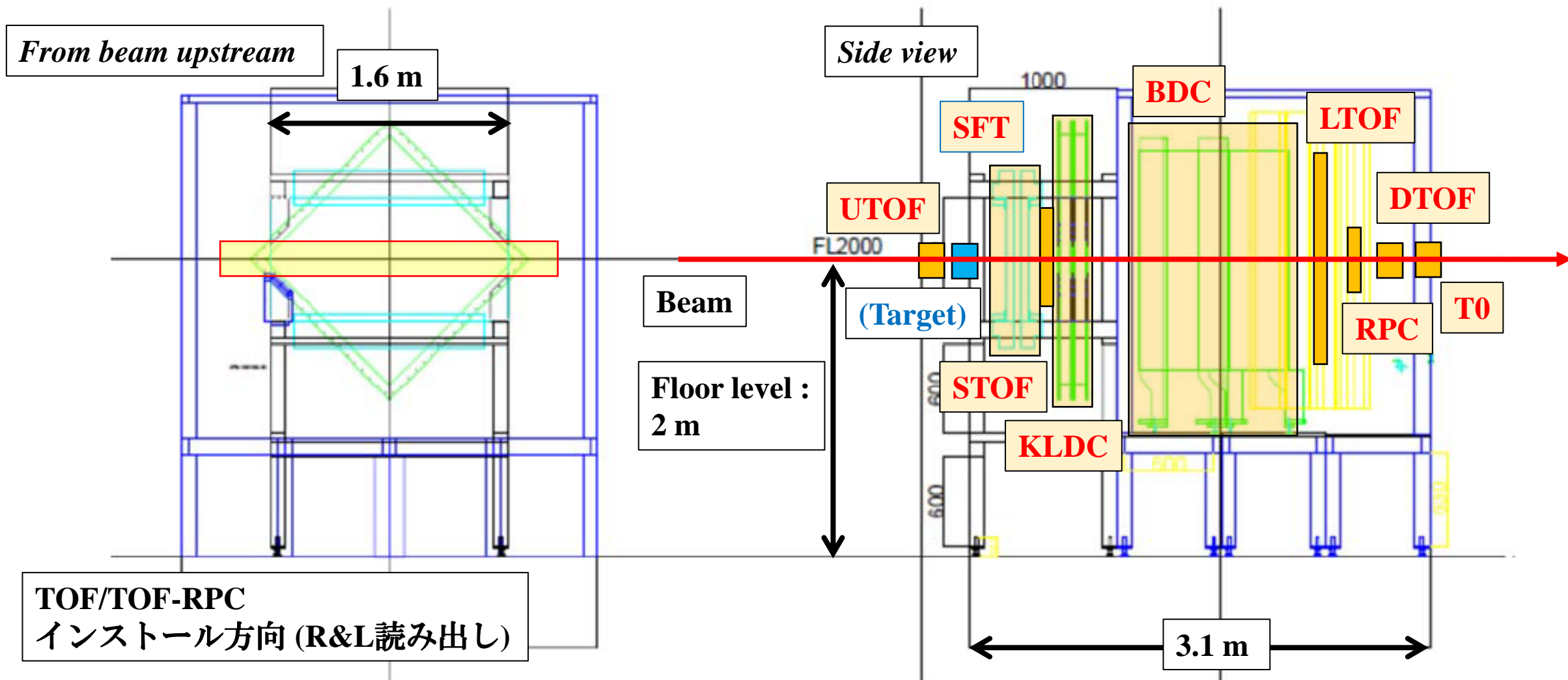
- **ハドロンビームを利用したStreaming DAQとE50検出器の評価試験の実施**
 - ビーム強度 (全荷電粒子): ~ 1 M/spill (2.0秒取り出し, 5.2秒加速サイクル)
 - $K^- \sim 200$ k/spill, $\pi^- \sim 800$ k/spill
- **Streaming DAQ & 検出器テスト**
 - **連続読み出しDAQシステム**
 - FEEのアップデート
 - フィルタリング機能の実装
 - フィルタリング評価データ取得
 - E50検出器の性能評価
 - ドリフトチェンバー, タイミング検出器
- **ビームタイム期間: 6/19–21 (~3日)**
 - ビーム利用は実際には数時間
 - トラブルで実験がかなり限られた...



* 皆さまのご協力ありがとうございました

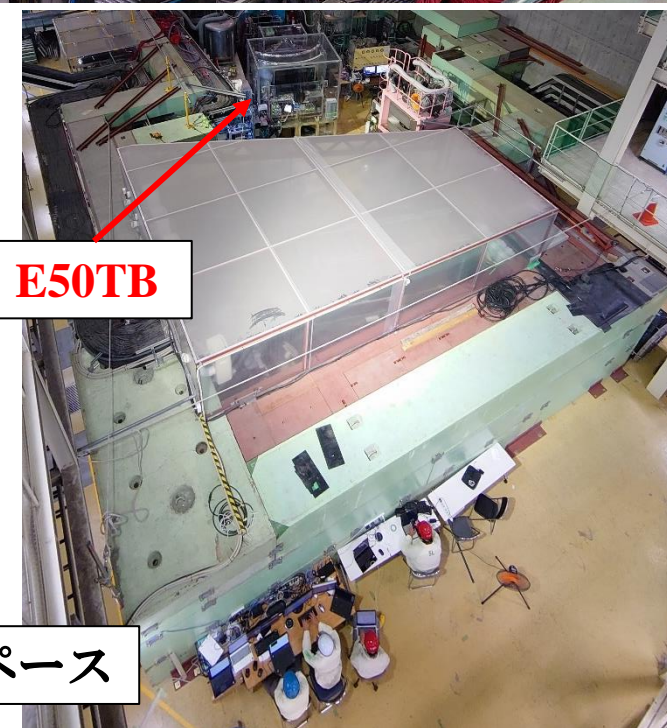
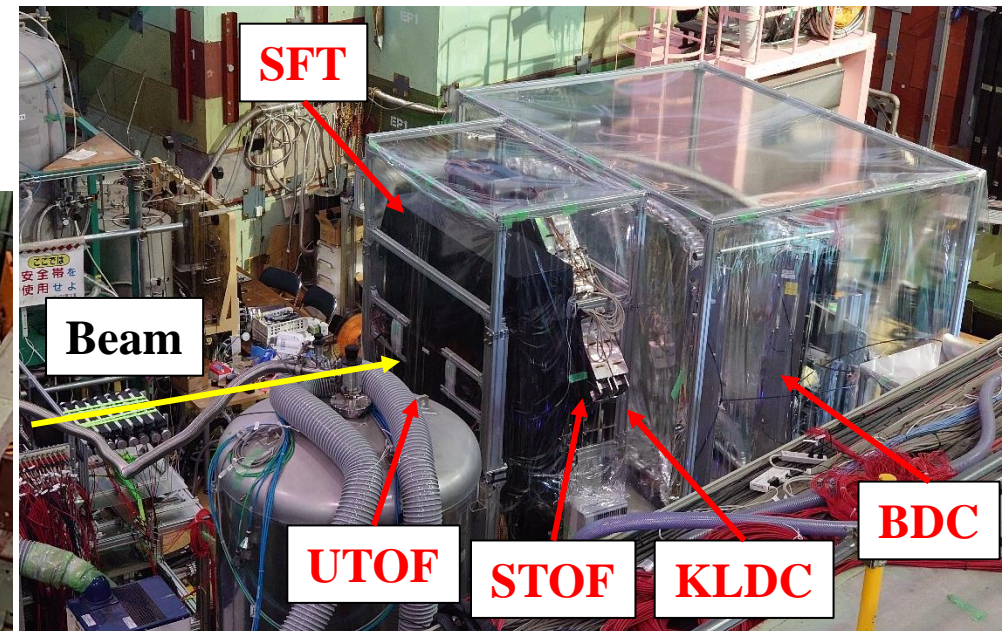
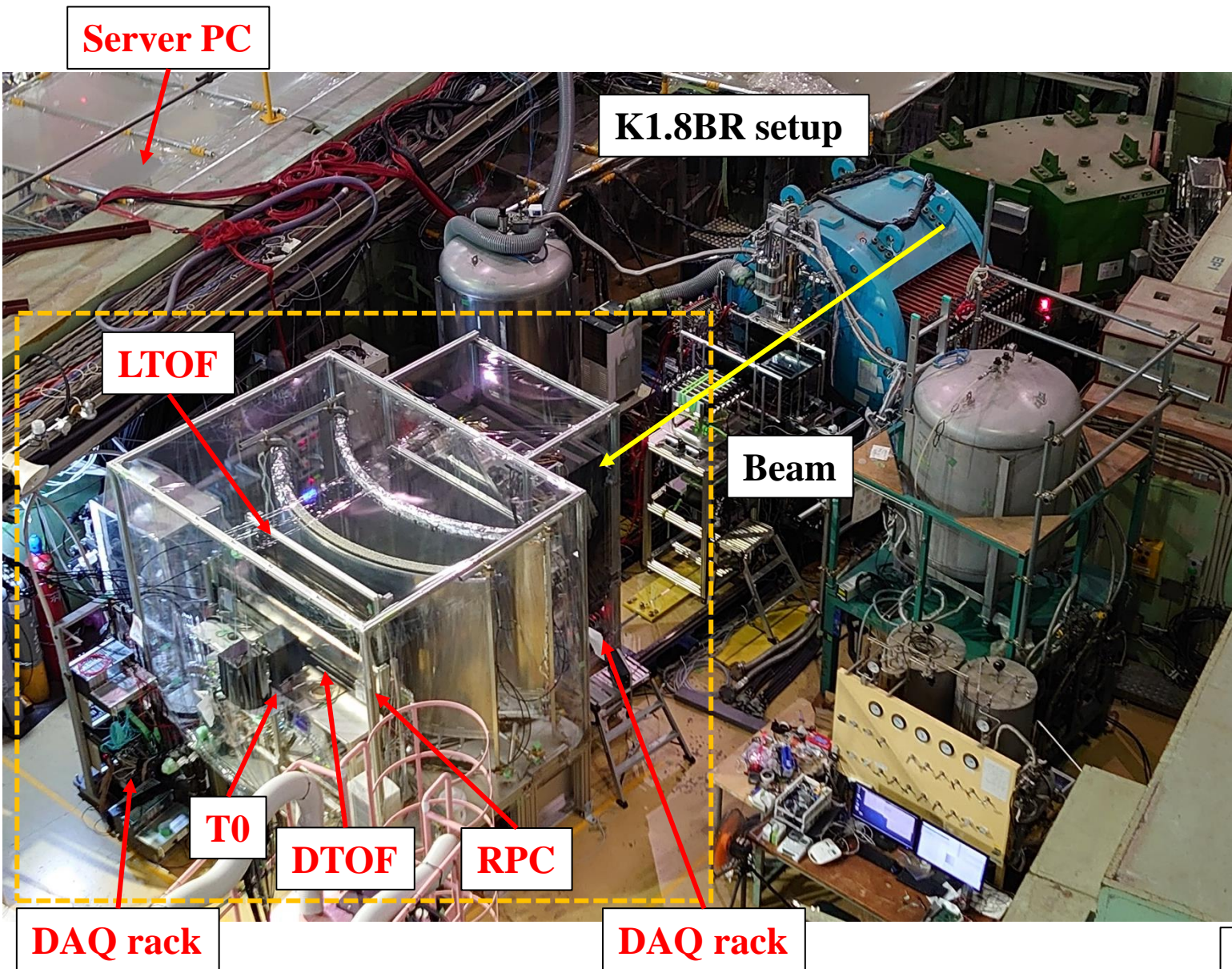
SPADI
Alliance

E50TB: セットアップ概略図



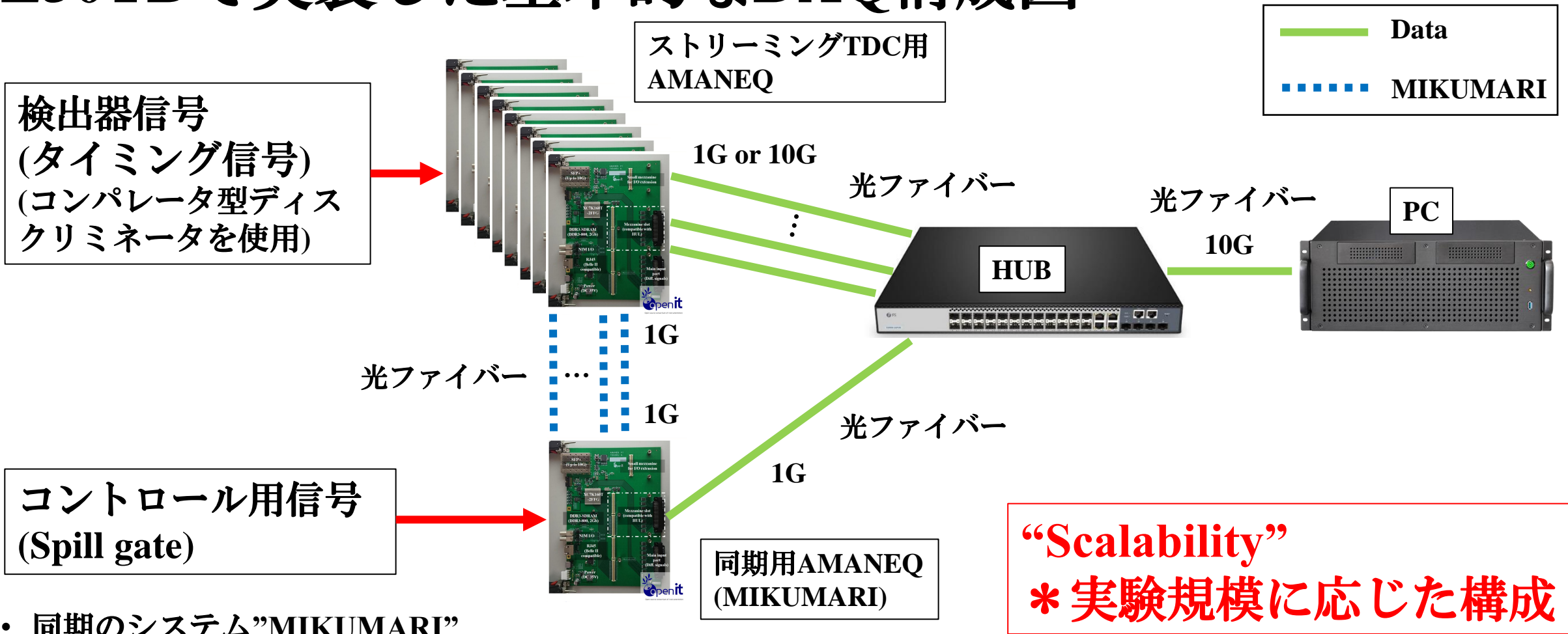
- 飛跡検出器: **SFT**(ファイバー検出器), **KLDC&BDC**(ドリフトチェンバー)
- タイミング検出器: **UTOF**, **STOF**, **LTOF**, **DTOF**, **RPC**, **T0**

E50TB: 写真



計測スペース

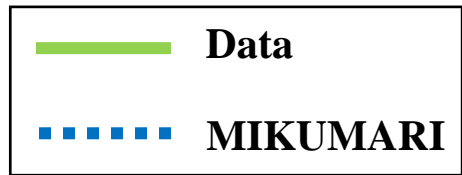
E50TBで実装した基本的なDAQ構成図



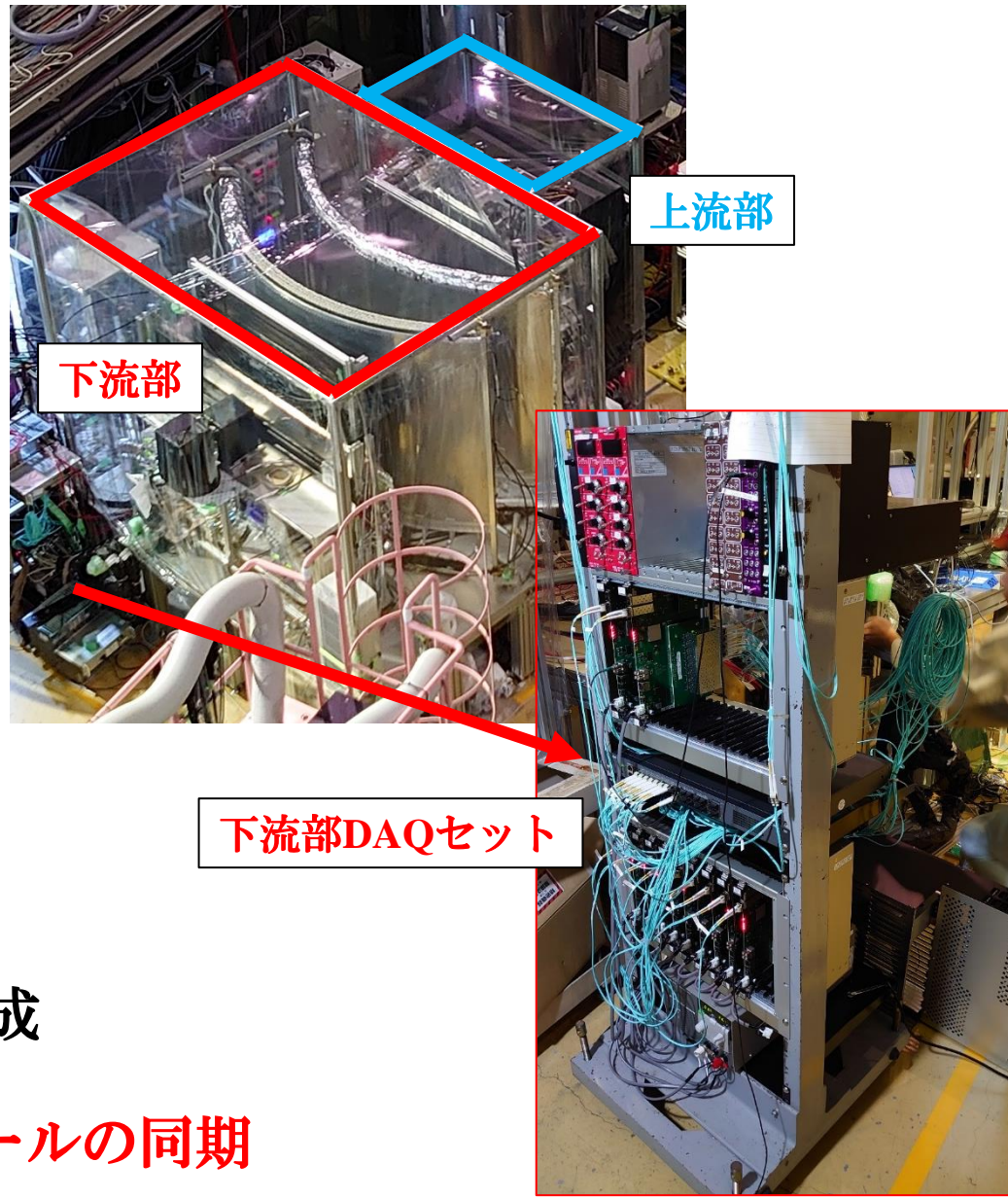
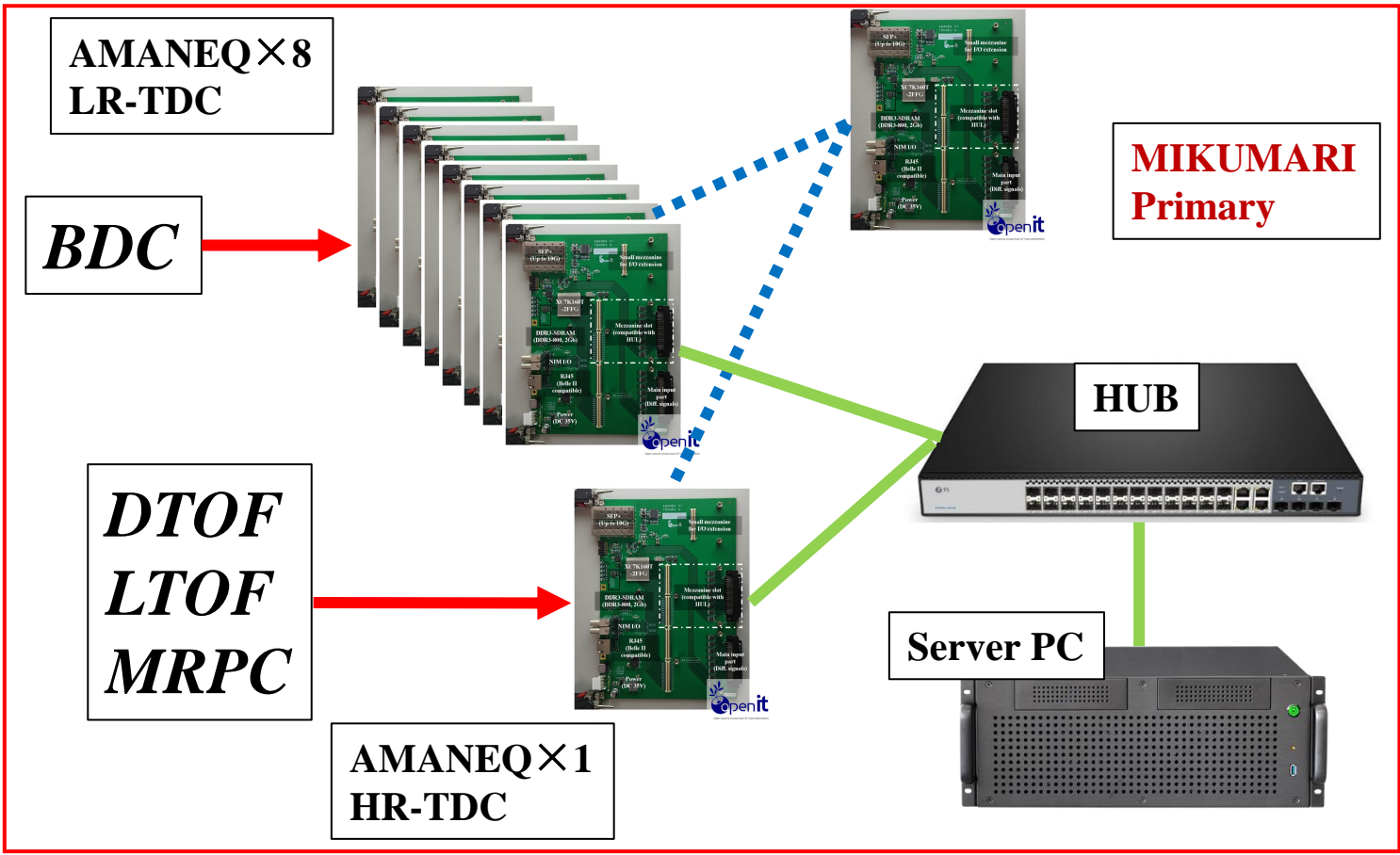
- 同期のシステム”MIKUMARI”
- ストリーミングTDC (AMANEQモジュールのみ)
 - HR-TDC: HUL mezzanine HR-TDC×2台 (64 ch), 10Gbps SiTCP
 - LR-TDC: HUL mezzanine DCRv2×2台 (128 ch), 1Gbps SiTCP
- PC (システムワークスPOWER MASTER Vision S5725: AMD EPYC 74F3 24 core, 3.2 GHz, Mem. 64GB)
- HUB (FS S5860-20SQ, 10Gbps port×24, 25Gbps×4, 40Gbps×2)

“Scalability”
*** 実験規模に応じた構成**

DAQ構成



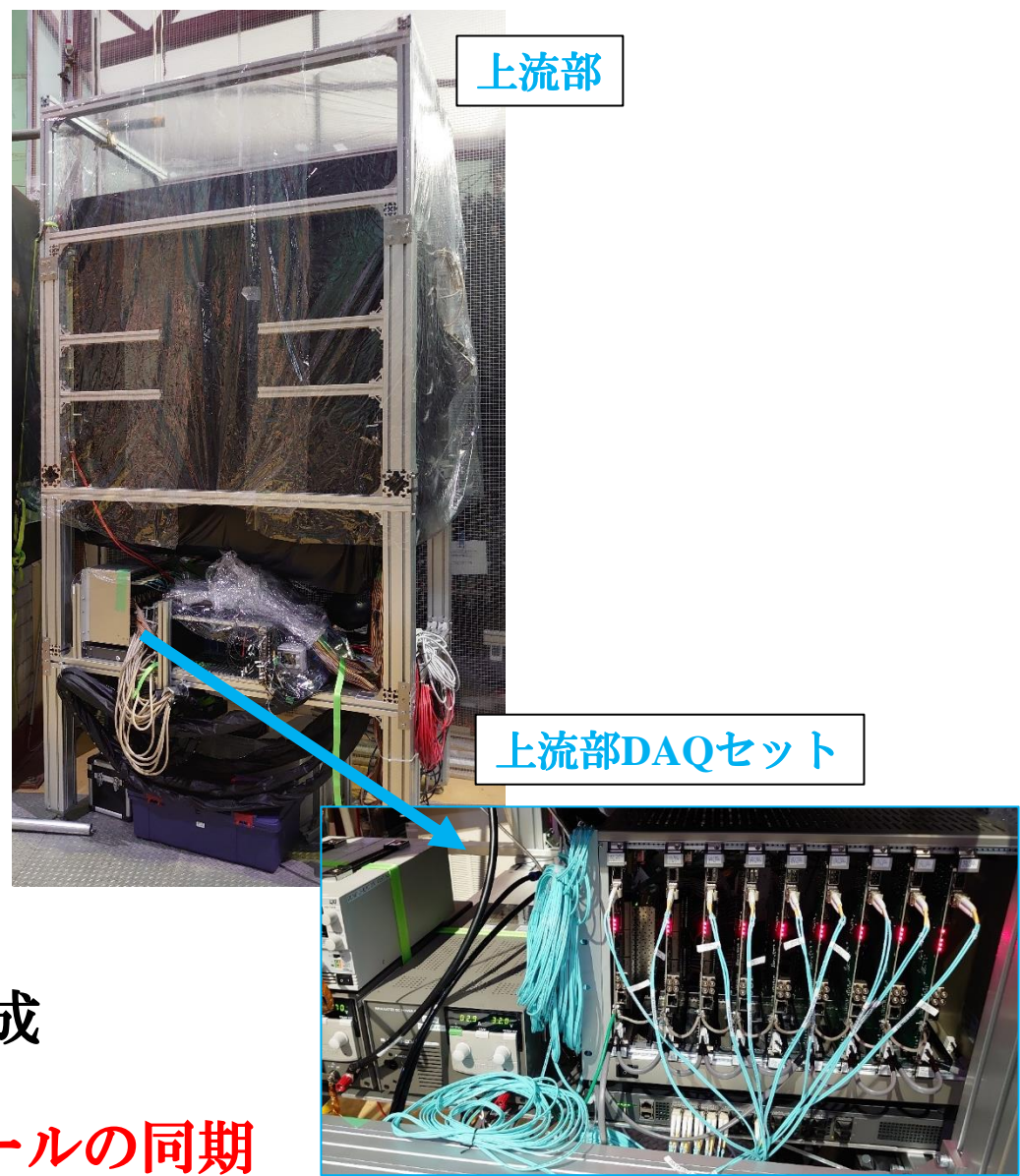
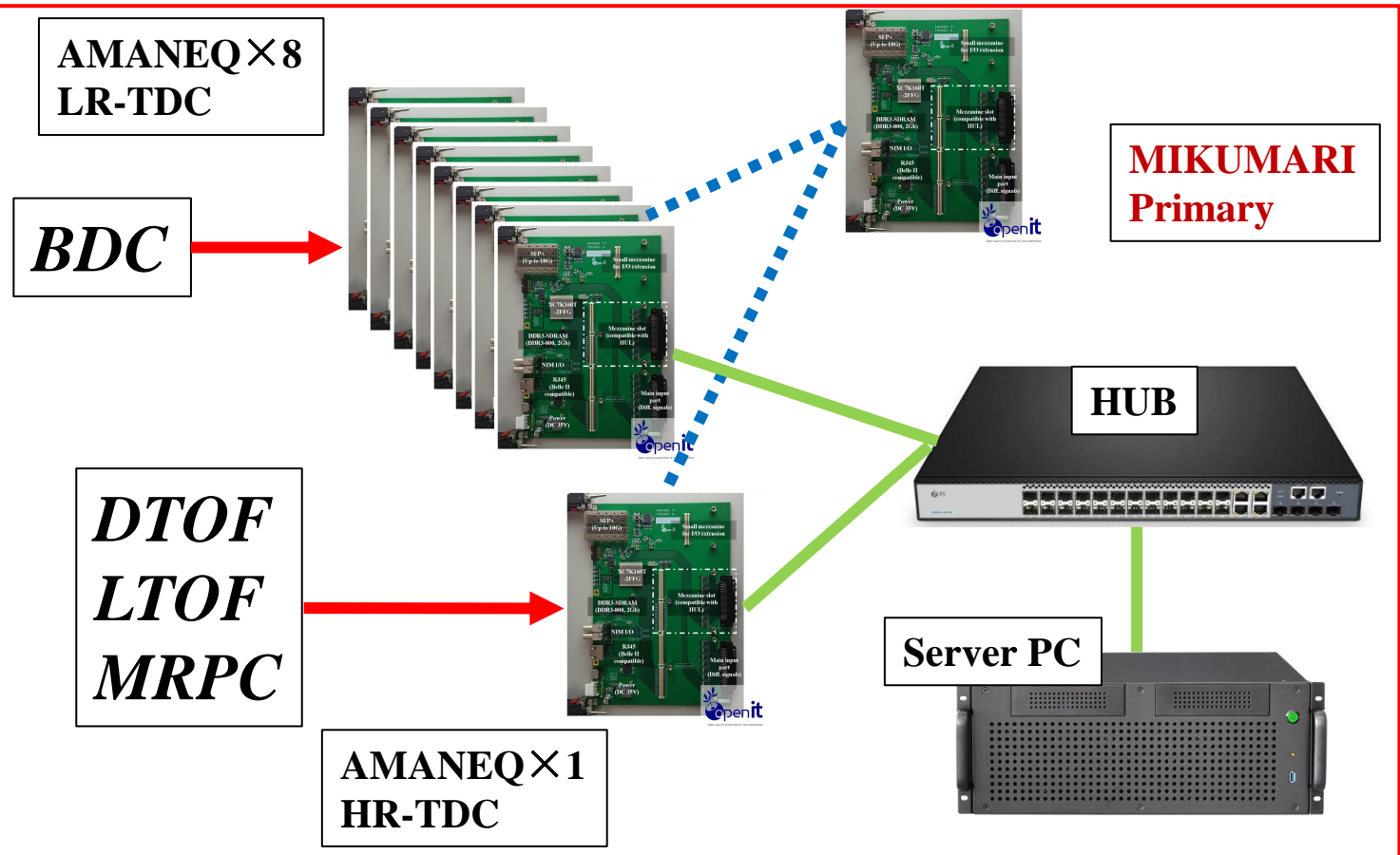
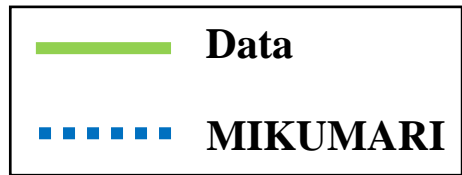
- * DC: ASD(GNA-200) ⇒ LR-TDC
- * SFT: NIM-EASIROC ⇒ LR-TDC
- * タイミング検出器: ディスクリ ⇒ HR-TDC



- 下流部DAQセット + 上流部DAQセットの2系統の構成
 - 3 VME crates + 1 NIM-BINで構成
- MIKUMARI FanOutによる20台のAMANEQモジュールの同期

DAQ構成

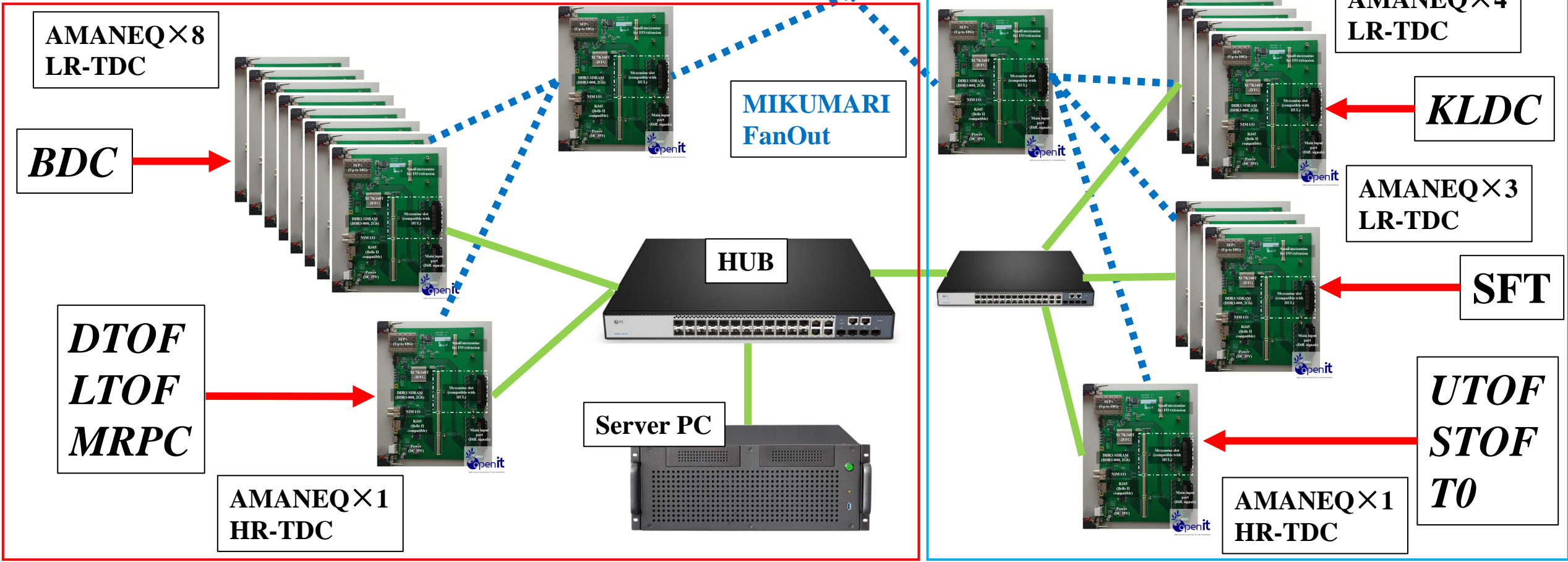
* DC: ASD(GNA-200) ⇒ LR-TDC
* SFT: NIM-EASIROC ⇒ LR-TDC
* タイミング検出器: ディスクリ ⇒ HR-TDC



- 下流部DAQセット + 上流部DAQセットの2系統の構成
 - 3 VME crates + 1 NIM-BINで構成
- MIKUMARI FanOutによる20台のAMANEQモジュールの同期

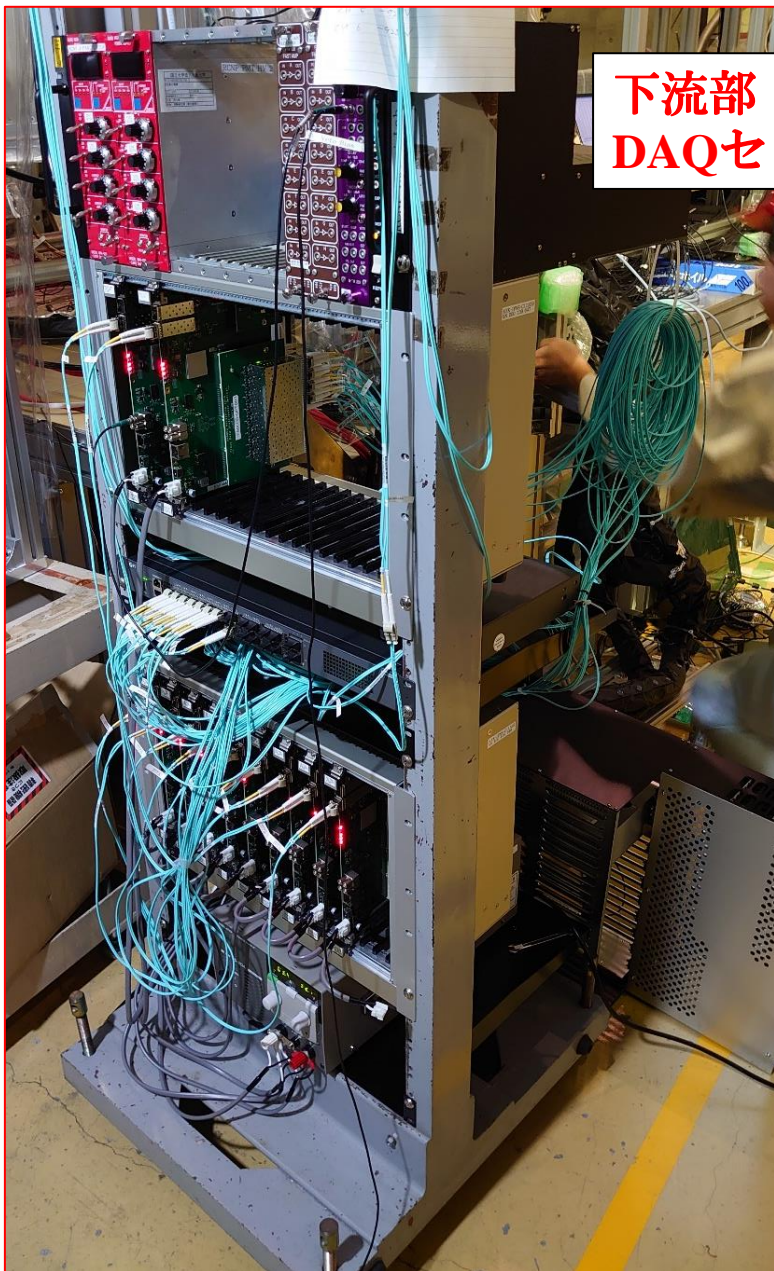
DAQ構成

* DC: ASD(GNA-200) ⇒ LR-TDC
 * SFT: NIM-EASIROC ⇒ LR-TDC
 * タイミング検出器: ディスクリ ⇒ HR-TDC



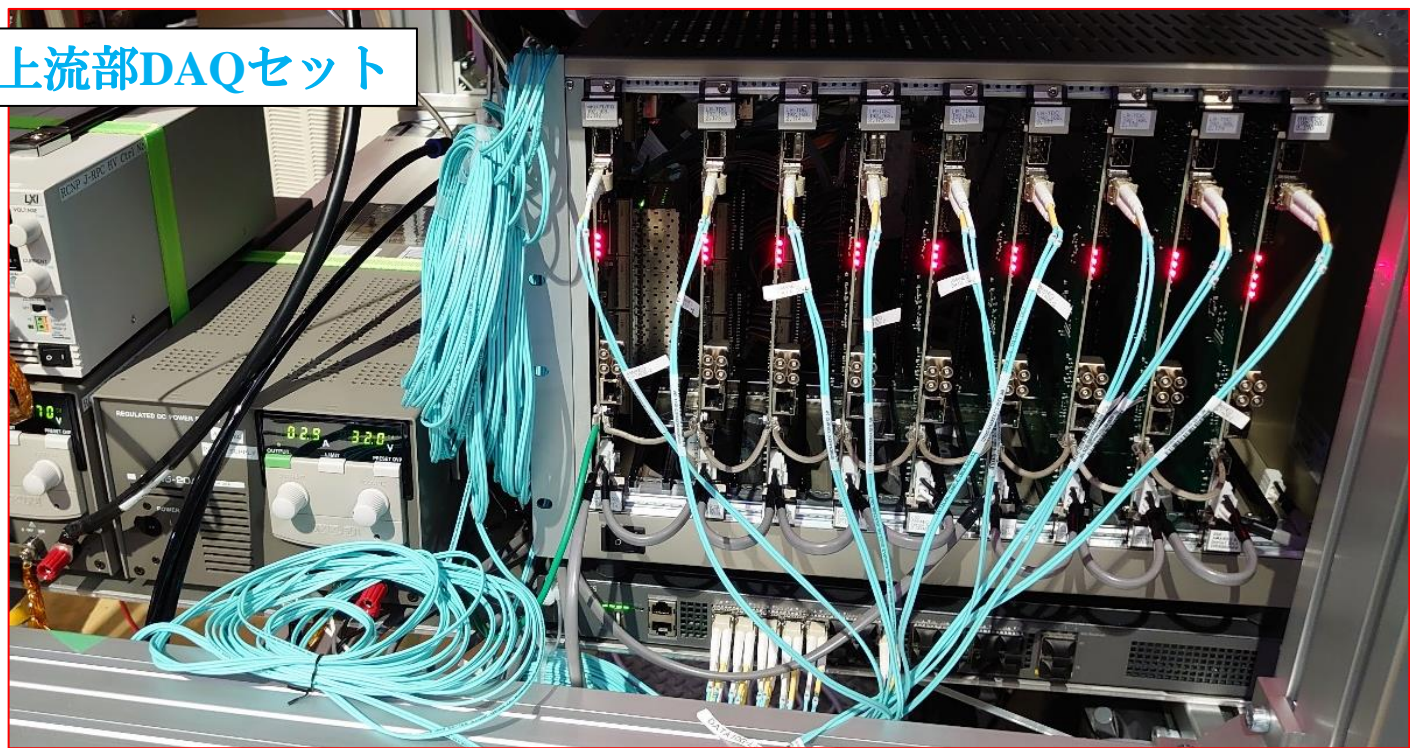
- 下流部DAQセット + 上流部DAQセットの2系統の構成
 - 3 VME crates + 1 NIM-BINで構成
- MIKUMARI FanOutによる20台のAMANEQモジュールの同期

構築したDAQ



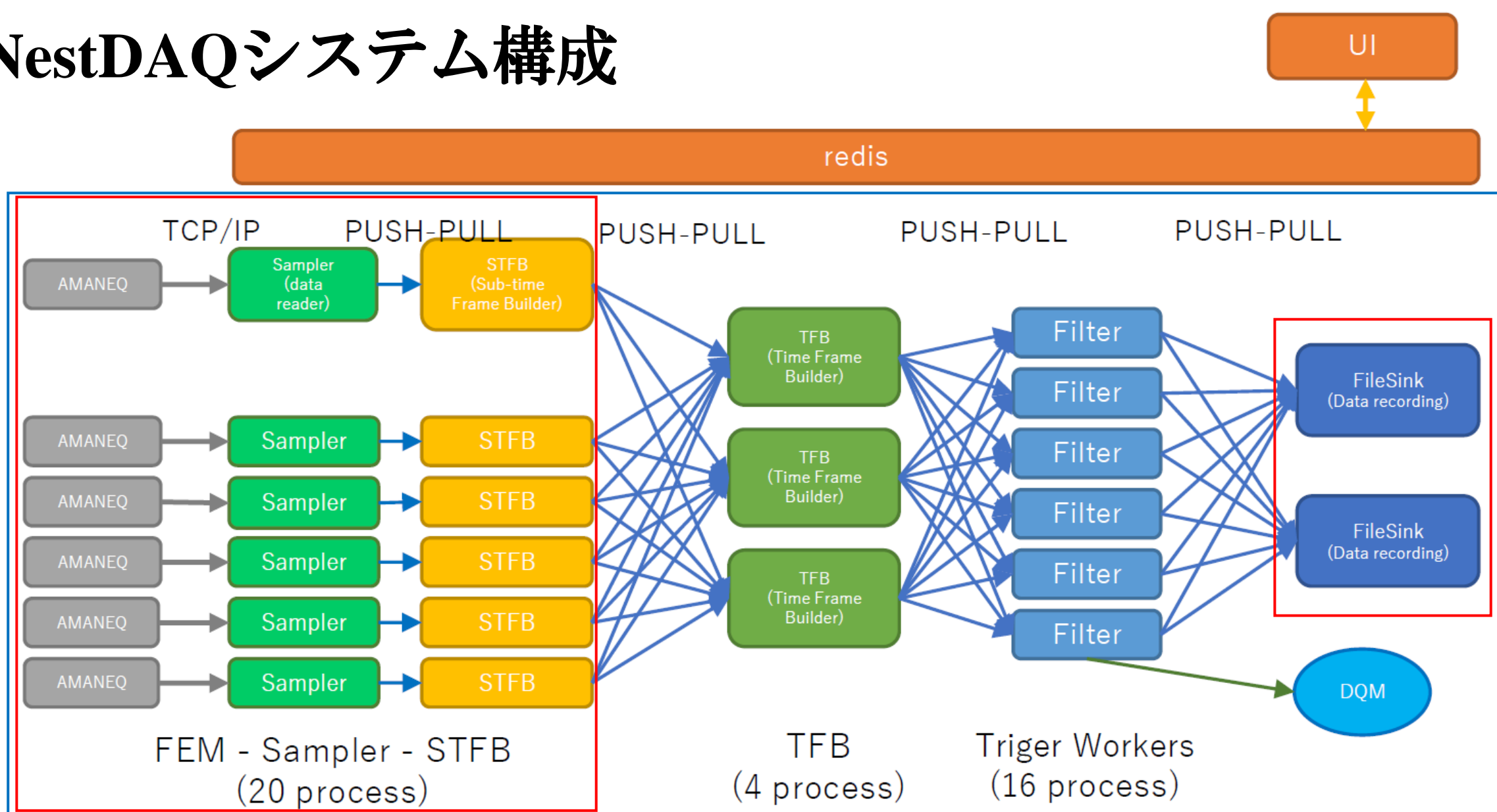
下流部
DAQセット

上流部DAQセット



- 検出器
 - BDC: 900 ch + KLDC: 512 ch
 - SFT: 384 ch
 - TOF, MRPC, タイミング検出器: 62 ch
 - DAQ: AMANEQ × 20 (Streaming TDC × 17 + MIKUMARI × 3)
 - LR-TDC AMANEQ × 15
 - HR-TDC AMANEQ × 2
 - MIKUMARI Primary × 1 + Fanout × 2
 - データ取得用PCサーバー × 1
- ⇒ 標準的な原子核実験規模 (コンパクトなサイズで達成)

NestDAQシステム構成



- **フィルタリング無し:** Sampler → STFB → FileSink × 20 プロセス
- **フィルタリング有り:** UTOF × DTOF coincidence (20 ns time window)

データ取得コンディション

- **Time-Over-Threshold (TOT)フィルター for DC**

- AMANEQによるハードウェアフィルタ
⇒ **TOT > 50 nsのみ取得**
- DCノイズやクロストーク事象の除去

- **Free streaming data: フィルタリング無し**

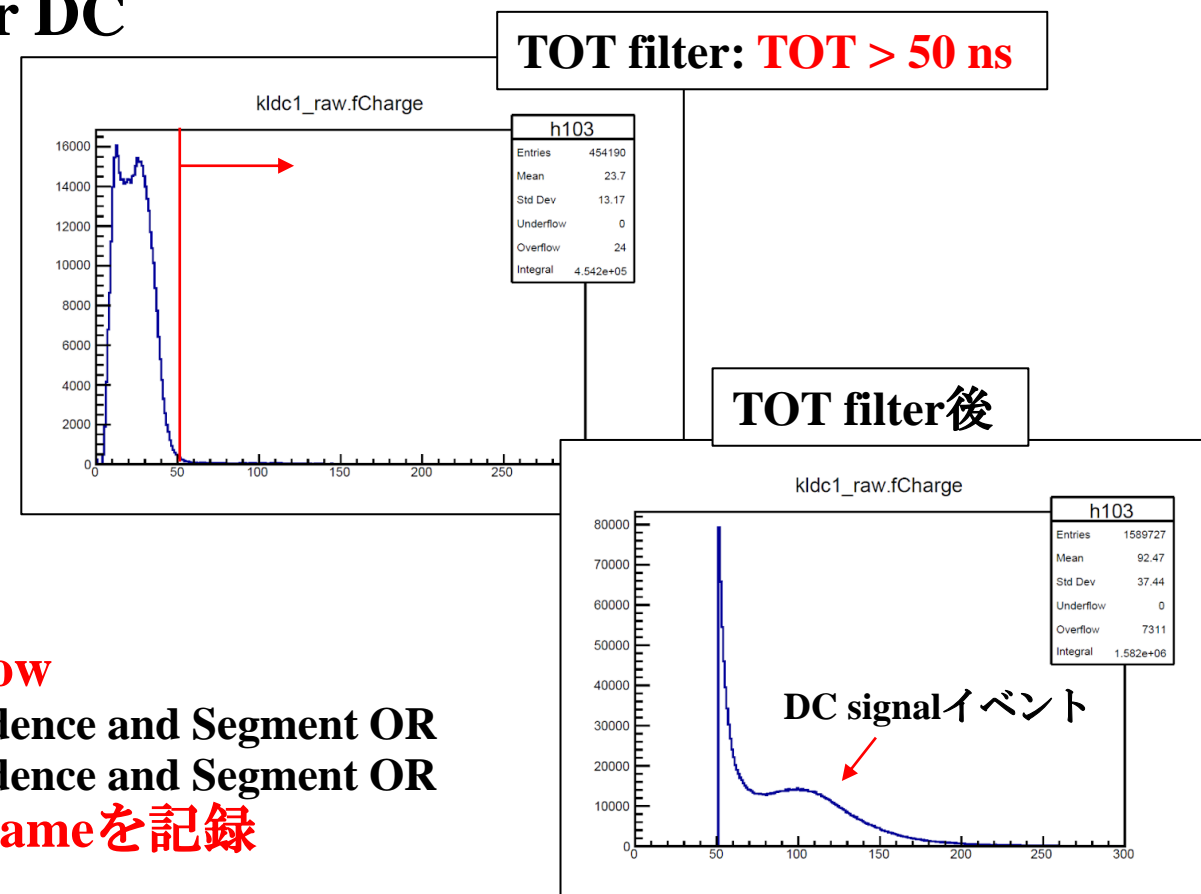
- HDDのIOキャッシュが効く間のみ取得可能
 - Several Gbpsのデータフロー
- ~10 spill程度のデータは取得

- **Beam TOFコインシデンフィルター**

- **UTOF × DTOFコインシデン: 20 ns time window**
 - UTOF: 2 segments w/ L&R readout ⇒ L&R coincidence and Segment OR
 - DTOF: 3 segments w/ L&R readout ⇒ L&R coincidence and Segment OR
- ⇒ **UTOF × DTOF コインシデンスがあるtime frameを記録**

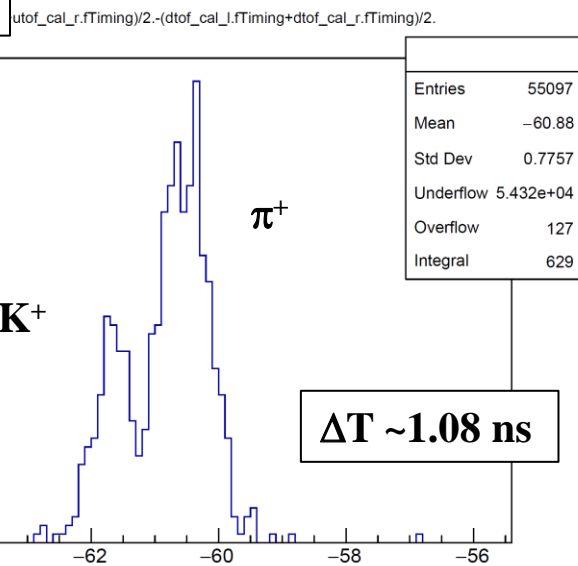
- *** Beam TOFコインシデンフィルターで~600 spill(~1時間)のデータを安定状態で取得**

- DAQパフォーマンス評価
- フィルターの開発(TOFカット, 飛跡検出等): リプレーヤーを使用しての評価

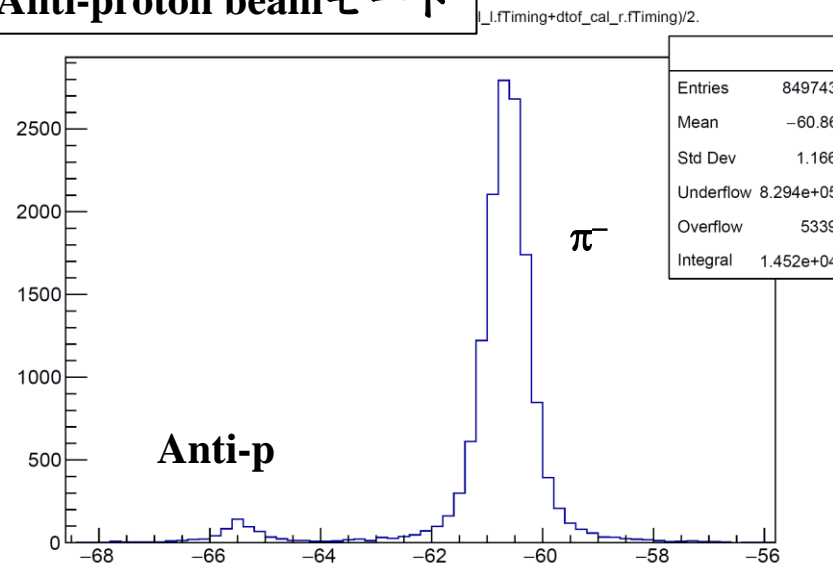


Beam TOF測定データのヒストグラム

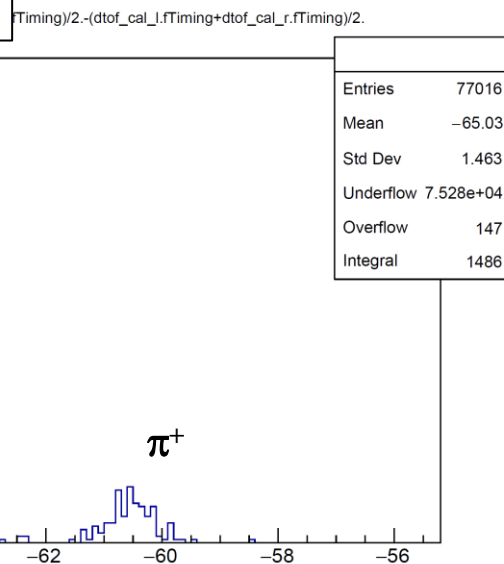
K⁺ beamモード



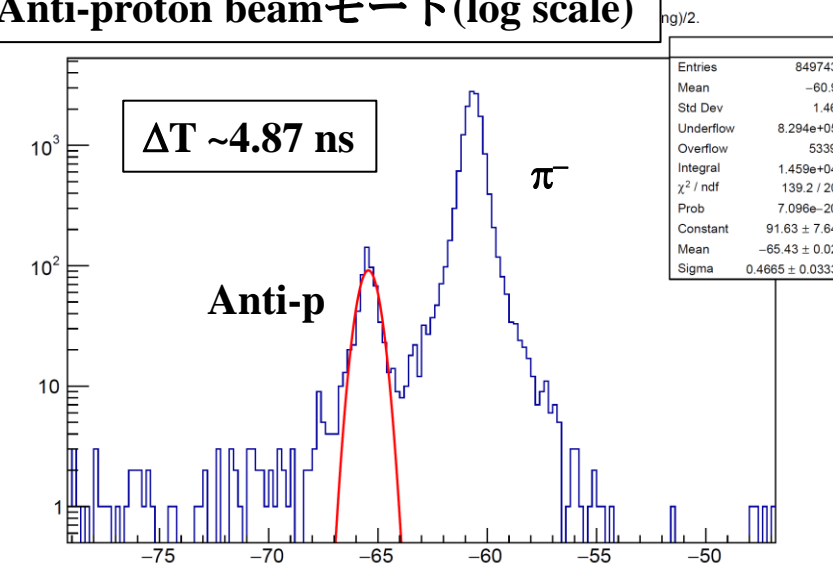
Anti-proton beamモード



Proton beamモード



Anti-proton beamモード (log scale)



* 即時オフライン解析

- 0.1~0.5 spill程度

* Beam条件

- 運動量: 1 GeV/c
- 飛程: ~2.6 m
 - 8.67 ns for $\beta=1$

• K⁺ beamモード

- K/ π ~ 1/3

• p beamモード

- pがドミナント
- バックグラウンドの π^+ が見える

• Anti-p beamモード

- Anti-pが上流検出器でdegradeされている

* フィルタリングでの選別
とイベント同期の確認

FEEとNestDAQへの実装とTo do(＊)

• FEE: AMANEQ & MIKUMARI system

- Time-Over-Threshold(TOT)測定レンジ: 4000 ns
- 全発振対策のためのThrottling機能の実装

• MIKUMARI FanOutの実装

＊ Trigger emulation modeの実装 ⇒ テスト未実施

- Trigger信号を入力 + 2 μ secのbufferを利用

＊ SiTCP 10Gのバグ(?)の発見 ⇒ 調査中

• NestDAQ

• 20台のstreaming TDCの読み出しを安定的に遂行

- Data flow: ~180 MB/s (~1.4 Gbps) (5.2秒サイクルの平均)

⇒ ビーム取り出し時: ~240 MB/s (~1.9 Gbps) (ほぼ HDD の書き込みの最大速度)

• Filterの実装: Look up table (LUT)による自由度の高い組み合わせ

• Data quality monitor (DQM)ポートからのオンラインディスプレイの実装

＊ 達成できなかった事

⇒ TOF/ヒットパターンカットなど高度なfilterの実装, SlowDashの導入,
スケーラー情報の取得(TDCと独立した情報として), UIの改良

- 今後ソフトウェアパッケージのアップデートとインストールを進める

トリガーDAQとの差異 (ユーザー的目線)

• ノイズの影響

• 大きくenhanceされて見えた

* トリガーでは勝手にフィルターされている

• DCノイズ: 1~10 kHz/ch (ToTフィルターが必須)

• Streaming DAQだと全データを取ることになる

• データ転送を圧迫する

• ノイズではない正しい信号(dark currentなど)も全部取得

• 発振対策

• Throttling機能は必須

• GNA-200(32 ch ver.)のクロストーク事象

• どうデータが処理されたかの把握 (efficiencyの評価)

• HBF(時刻)が必ずあれば原理的に分かるが評価は必要

• Event buildの必要性 (解析方法の選定)

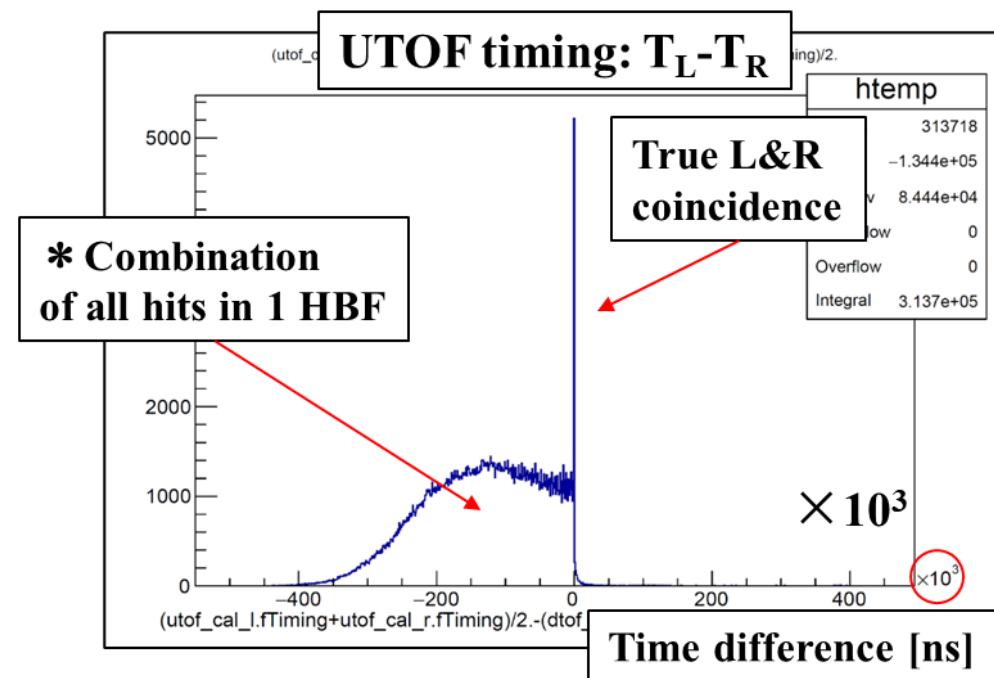
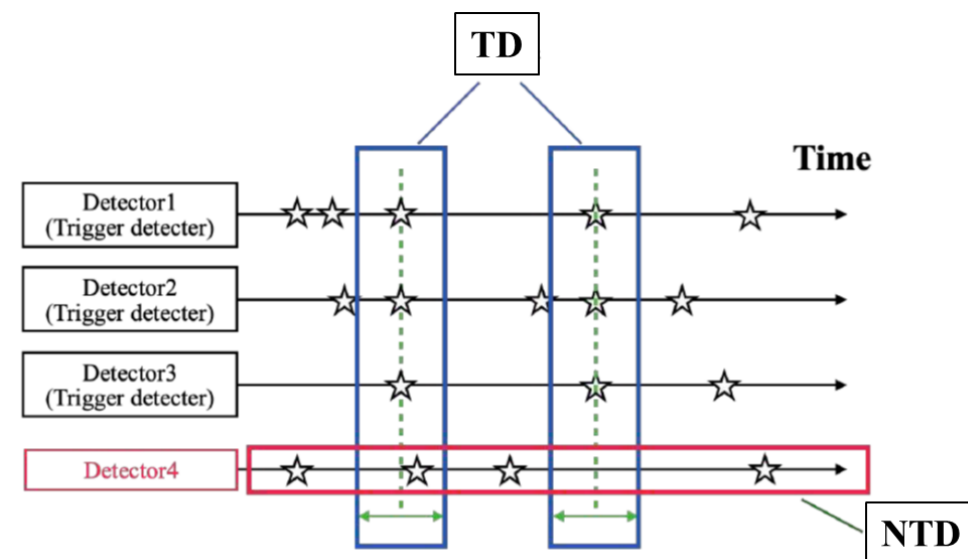
* 1 HBF(525 μ sec.) \Rightarrow 1 eventとして解析

• データ内容(同期)がパッと見で分からない

• ヒットパターンが見えない(ノイズがenhanceされる)

• リアルタイムのデータヒストグラム確認

• 高度なフィルタリング



Summary and to do

- 2023年6月ビームタイム: E50テストベンチのスタート
 - 実際のハドロンビーム + E50検出器を使用してのStreaming DAQテスト
⇒ 実際のビーム環境と検出器セットアップで実践的なテストが行えた
 - E50検出器の評価用データの取得
- To do
 - Streaming DAQの性能評価
 - ハードウェアとソフトウェアアップデートへのフィードバック
 - E50検出器の評価
 - 各種検出器の検出効率, 時間/位置分解能等の評価
 - Streaming DAQや読み出し回路のアップデート
 - NestDAQのソフトウェアアップデート
 - ドリフトチェンバーへのASAGI ASDカードの導入
 - シンチレーションファイバー検出器へのCIRASAMEの導入
- 次回ビームタイム ⇒ スケジュールは未定 (年度末/来年度初め以降?)
 - 本格的な評価試験
 - 物理データの取得 (K^- ビーム反応: $\Lambda \rightarrow p \pi^-$, $K_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $K^- \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+$ など)
 - (SPADI-Aでの共用: テストベンチを利用しての検出器/FEE/DAQ/Softwareの評価)