



J-PARC COMET実験における スローコントロール系の開発

大石 航

KEK IPNS

計測システム研究会2024

2024年 11月 18日

東京大学

μ

OMET

e

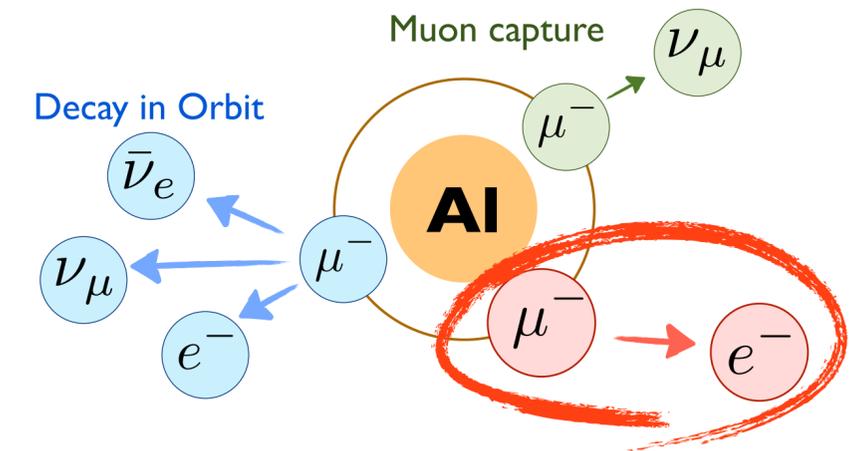
本題の前に...

COMET実験

J-PARC COMET実験

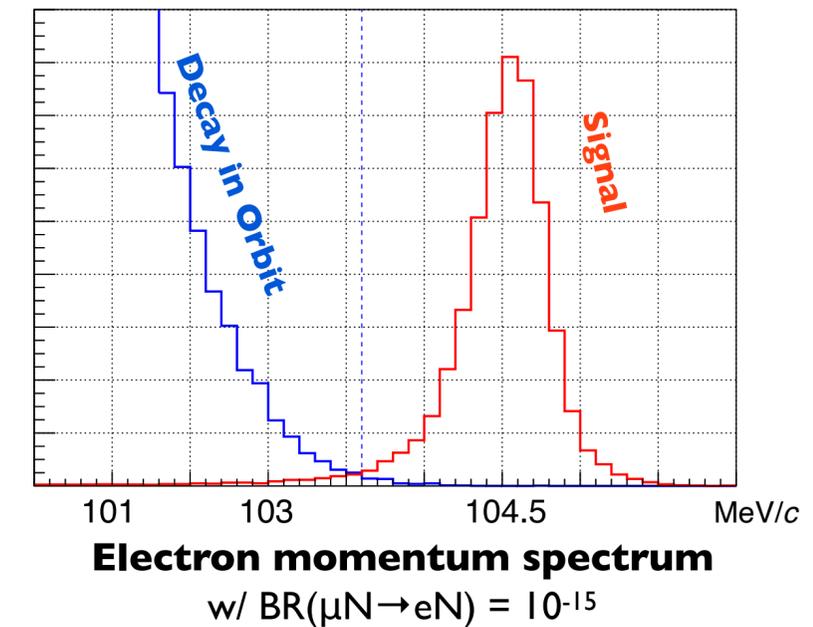
◆ **ミューオン・電子転換過程**（荷電レプトンフレーバ非保存）を高精度で探索する。

- ★ 標準模型では強く制限されている → $O(10^{-54})$
- ★ 数々の標準模型を超える物理模型は探索可能なレベルの分岐比を予測。
- ★ 有意な事象数の観測が即ち新物理発見



◆ Phase-I 実験計画では、 $O(10^{-15})$ の単一事象発見精度が目標。

- ★ 過去のSINDRUM-II 実験による結果を100倍更新する。
- ★ 2026年度のLow-intensity run (コミッションング) 開始を目指して邁進中。
- ★ ビーム起源背景事象を実測・理解するため、独立の**ビーム測定計画**も予定。



それぞれ独立の検出器群 (話がややこしくなる...)

- ◆ CyDet 物理測定用
- ◆ StrECAL ビーム測定用 → 将来はPhase-IIで物理測定

COMET Phase-I

J-PARCによる陽子供給

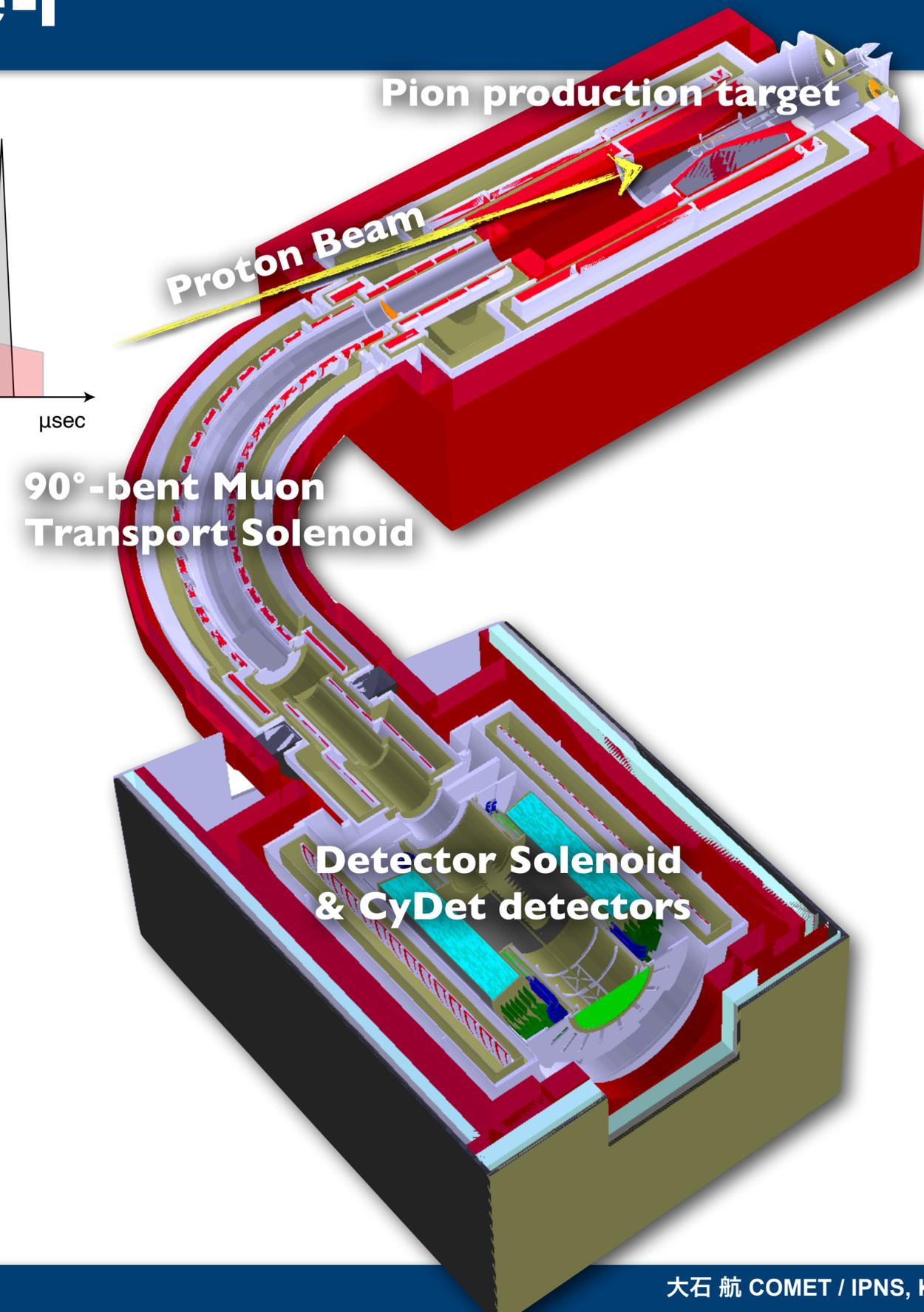
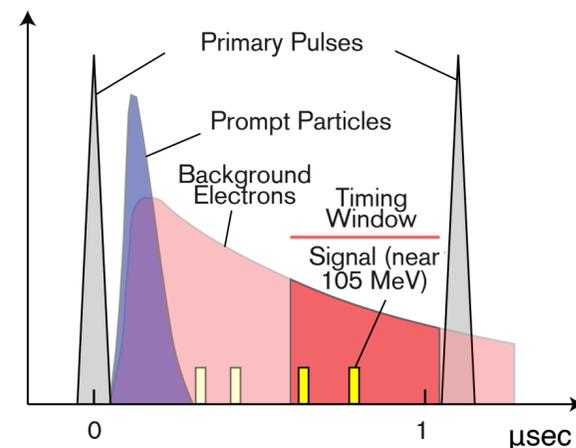
- ◆ Slow-extracted 8 GeV proton beam
 - ★ Phase-Iで最終的には 3.2 kW
- ◆ バンチ構造 $\sim 1.2 \mu\text{sec}$
 - ★ 測定に時間窓を設け、ビーム由来即発背景事象を回避。

ミューオン生成と輸送

- ◆ グラファイト陽子標的 \rightarrow パイオン生成
 - ★ 後方散乱の方が、比較的low運動量のパイオンを選択的に取り出せる。
- ◆ パイオン捕獲ソレノイド(5 T)で効率的にパイオンを下流に輸送。
- ◆ ミューオン輸送ソレノイド
 - ★ 90° 湾曲したソレノイド磁場により、電荷と運動量を選別できる。
 - ★ low運動量の負ミューオンを検出器領域へ。

検出器ソレノイドと検出器

- ◆ 薄い円形アルミ標的でミューオンを止める。
 - ★ 出てきた信号をCyDetで測定。
- ◆ ビーム測定ではCyDetをStrECALに交換する。



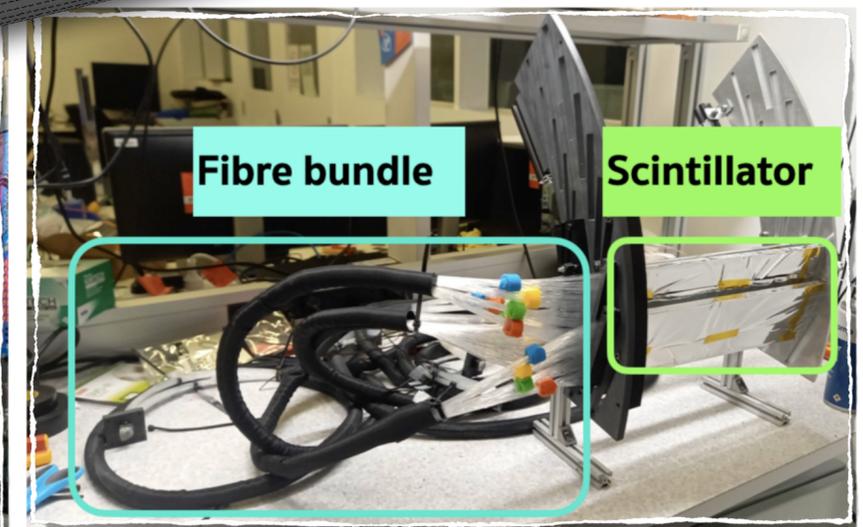
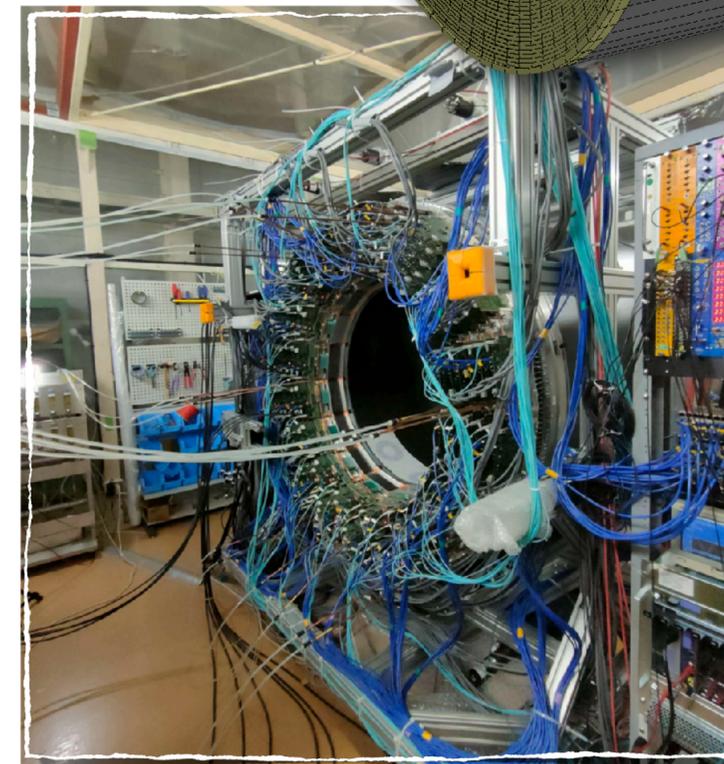
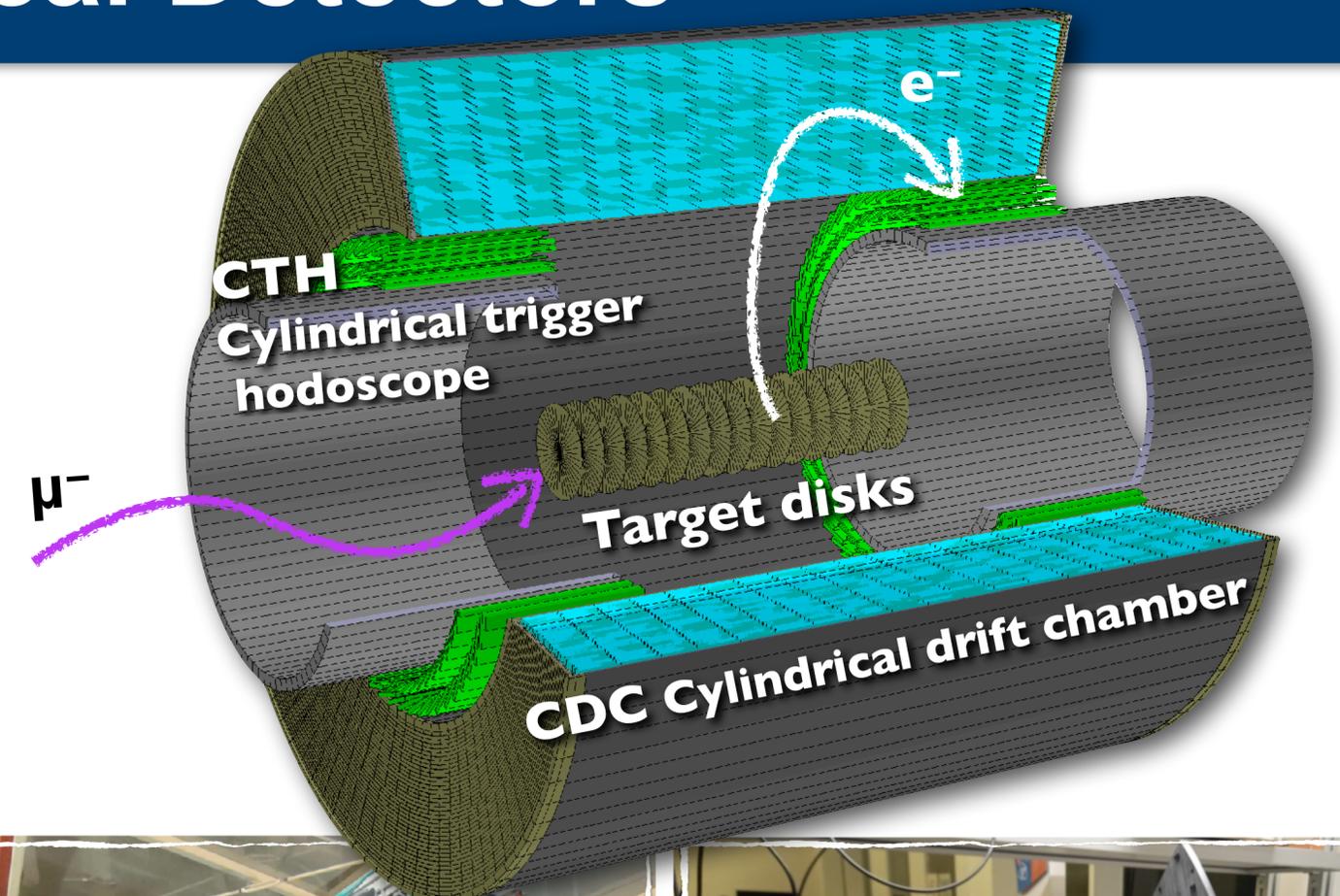
CyDet: Cylindrical Detectors

Cylindrical Drift Chamber (CDC)

- ◆ 空間分解能 $< 200 \mu\text{m}$ \rightarrow 運動量分解能 $< 200 \text{ keV}/c$
- ◆ ガス混合 $\text{He} : \text{iso-C}_4\text{H}_{10} = 90 : 10$
- ◆ 読出しエレクトロニクス(RECBE) は水冷
 - ★ 詳しくは 吉田@計測システム研究会2023 を参照
- ◆ 現在J-PARCにてコミッショニング中

Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH)

- ◆ 大小シンチレータ板2層で、4つの同時ヒットからトリガシードを生成 \rightarrow FPGA内でのオンライントリガ
 - ★ 詳細はこの後宮滝くんの発表にて
- ◆ ファイバを通してMPPC読出し
 - ★ MPPCは放射線対策のため液冷にて -36°C に冷却



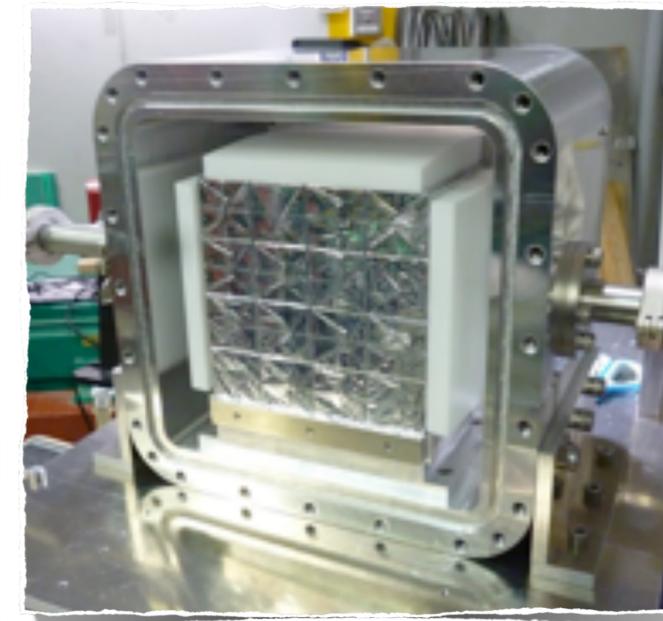
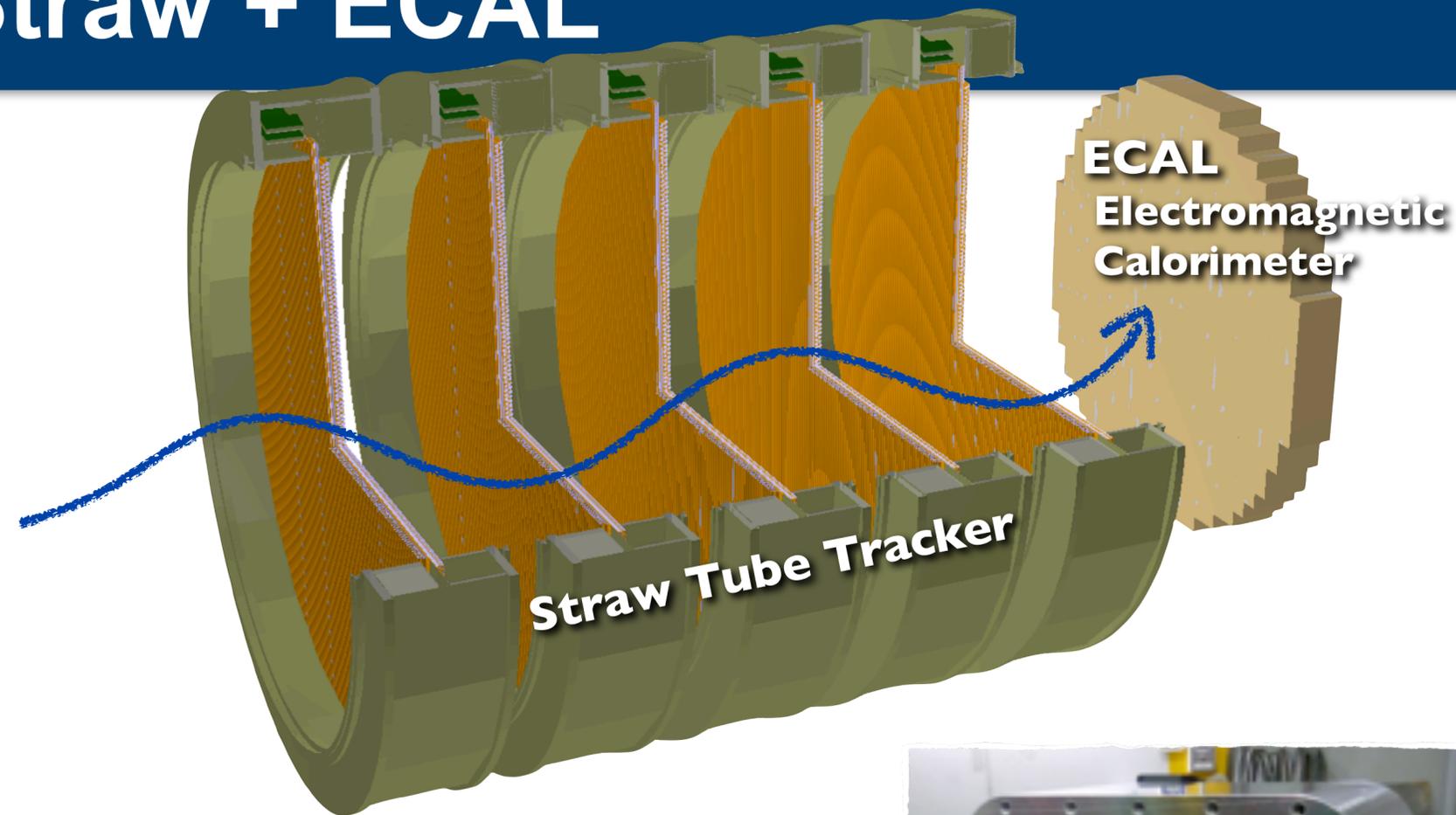
StrECAL: Straw + ECAL

Straw Tube Tracker

- ◆ 空間分解能 $< 200 \mu\text{m}$ \rightarrow 運動量分解能 $< 200 \text{ keV}/c$
- ◆ ガス混合 $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 50 : 50$
- ◆ 読出しエレクトロニクス(ROESTI)を内包するマニフォールドは丸ごと真空中に入る。
 - ★ 熱を逃すため大流量低温ガスを用いる。
- ◆ 現在J-PARCにて1号機がコミッショニング中
 - ★ 2, 3号機も現地にて鋭意製作中

Electromagnetic Calorimeter (ECAL)

- ◆ 大型LYSO無機結晶シンチレータを積載
 - ★ 高エネルギー分解能 $< 5\%$ @ 105 MeV , etc
- ◆ 発熱するエレクトロニクスは全て真空外に。
- ◆ 温度計、LEDを用いて各結晶モジュールを較正する。



μ

OMET

e

ここから本題

COMETスローコントロール系の開発

COMETは今の今まで現在進行形で検出器開発製作に大忙し

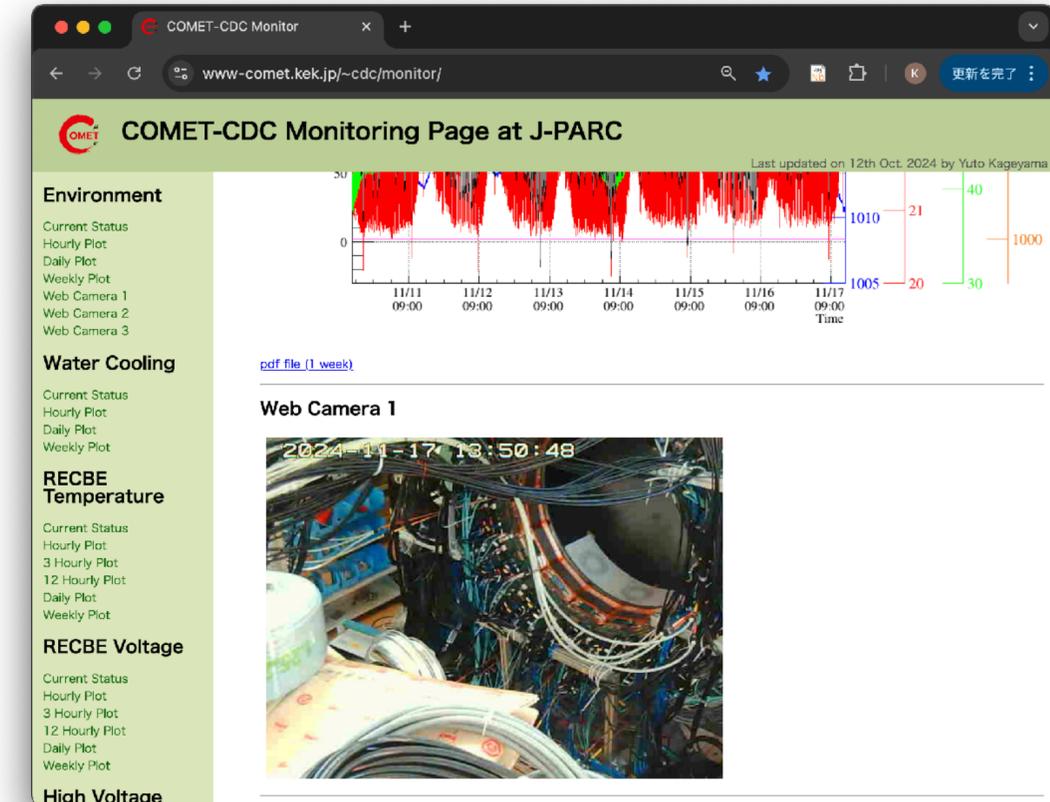
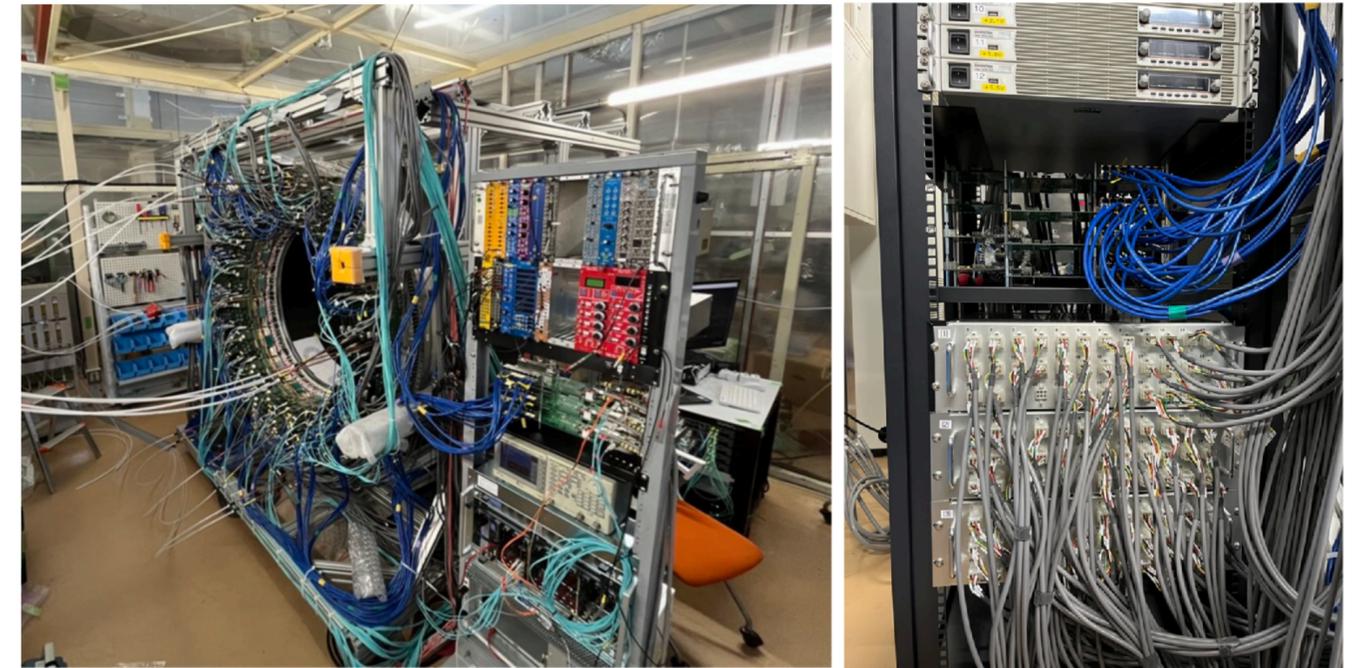
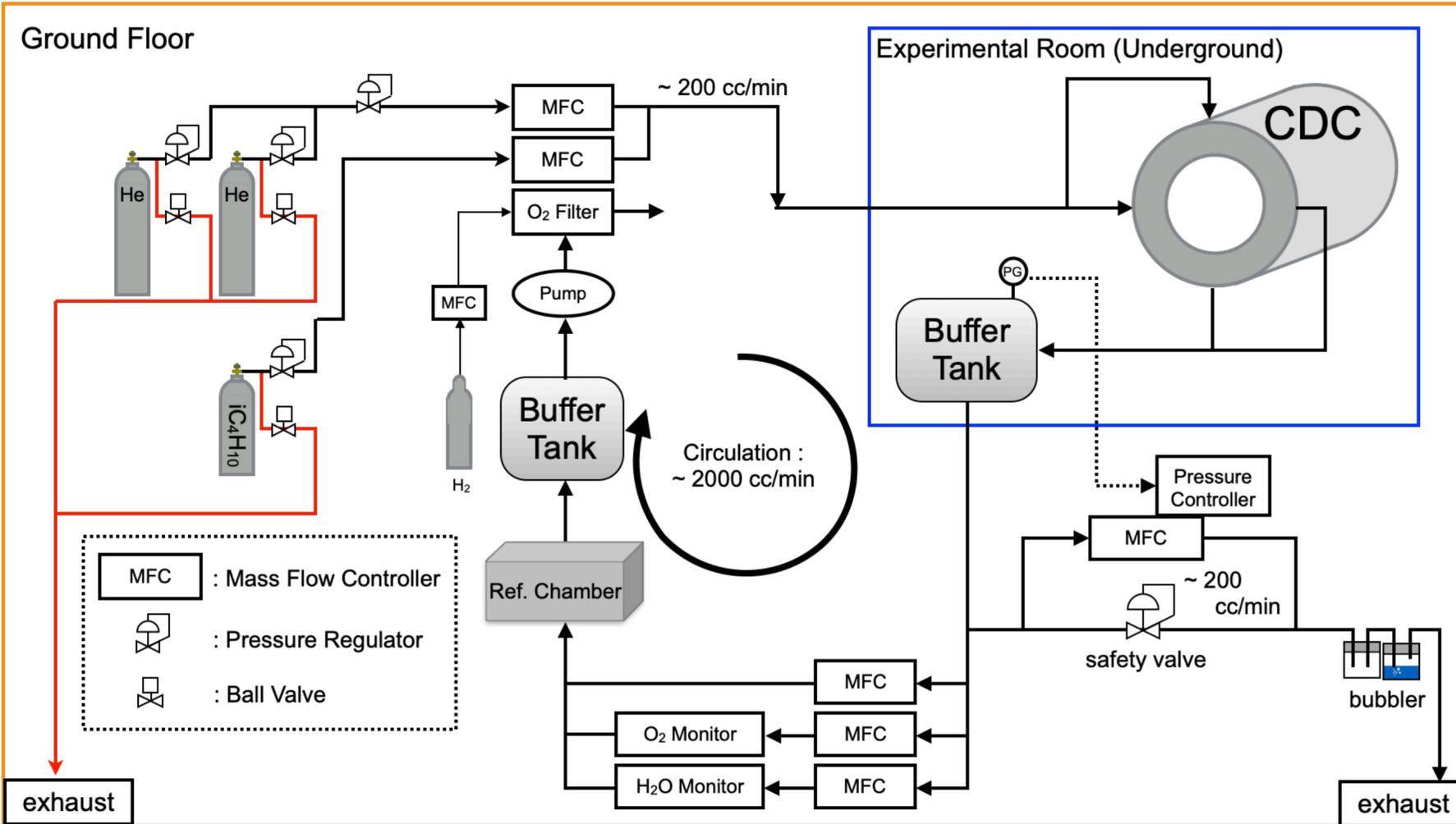
→ DAQとスローコントロール系がどうしてもおざなりに...

- ◆ 今年からCOMETは新体制になり、大石がスローコントロール開発対応になっててんやわんや ←イマココ
 - ★ DAQ関係は担当の五十嵐さんがずっとてんやわんやしている。
- ◆ 未だやることはたくさんだが、全く進んでいなかったわけではない（COMETの名誉のため）。

課題

- ◆ **より組織的に統括された開発（当たり前なことなれど....）**
 - ★ CyDetやStrECALの各検出器グループが、その時々で必要に応じて個別で開発してきた。
 - ★ 皆が必要なものをまとめ、共有できるものと資源を集中すべきものを管理しないといけない。
- ◆ **ソフトウェアフレームワークの刷新 →（おそらく）Slowdashへ**
 - ★ DAQで使用予定だったMIDASでは予想されるトリガレートに耐えられない可能性が高く、NestDAQへのスイッチを考えている。
 - ★ スローコントロールもMIDASである必要がなくなったので、Slowdashへの移行を予定している。
- ◆ **DAQや将来の解析フレームワークまで含めた、データフローの刷新**
 - ★ MIDASを使用する前提が崩れたため、一般的なDBの積極的な使用含めて再度デザインし直さないといけない。

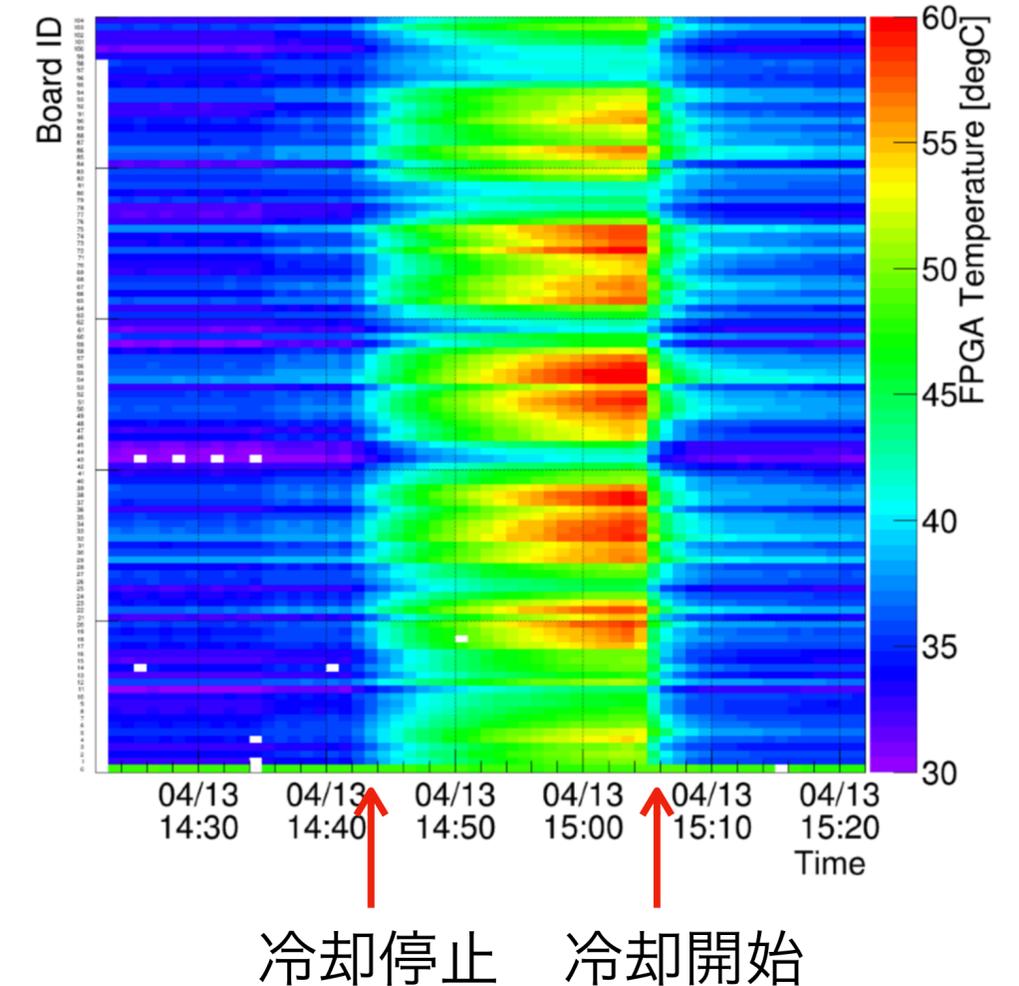
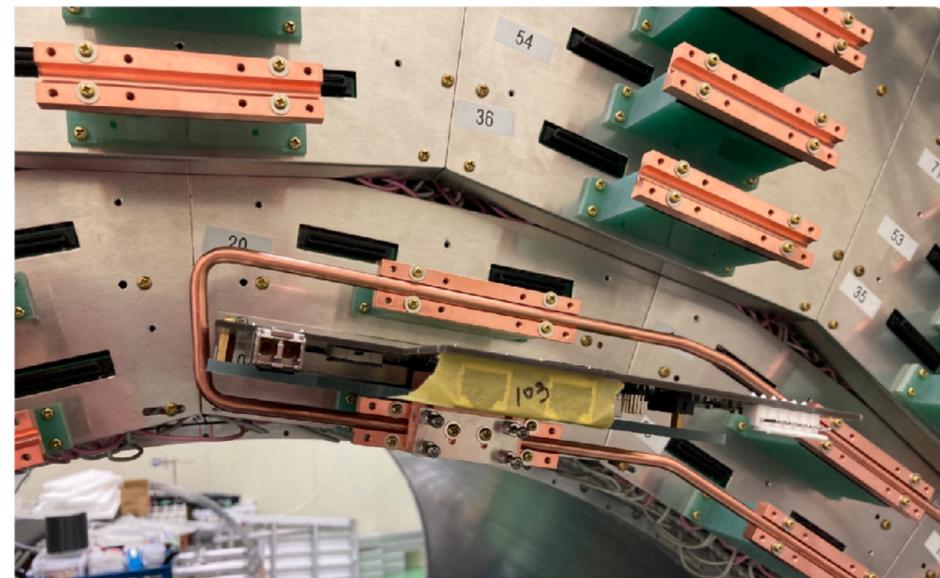
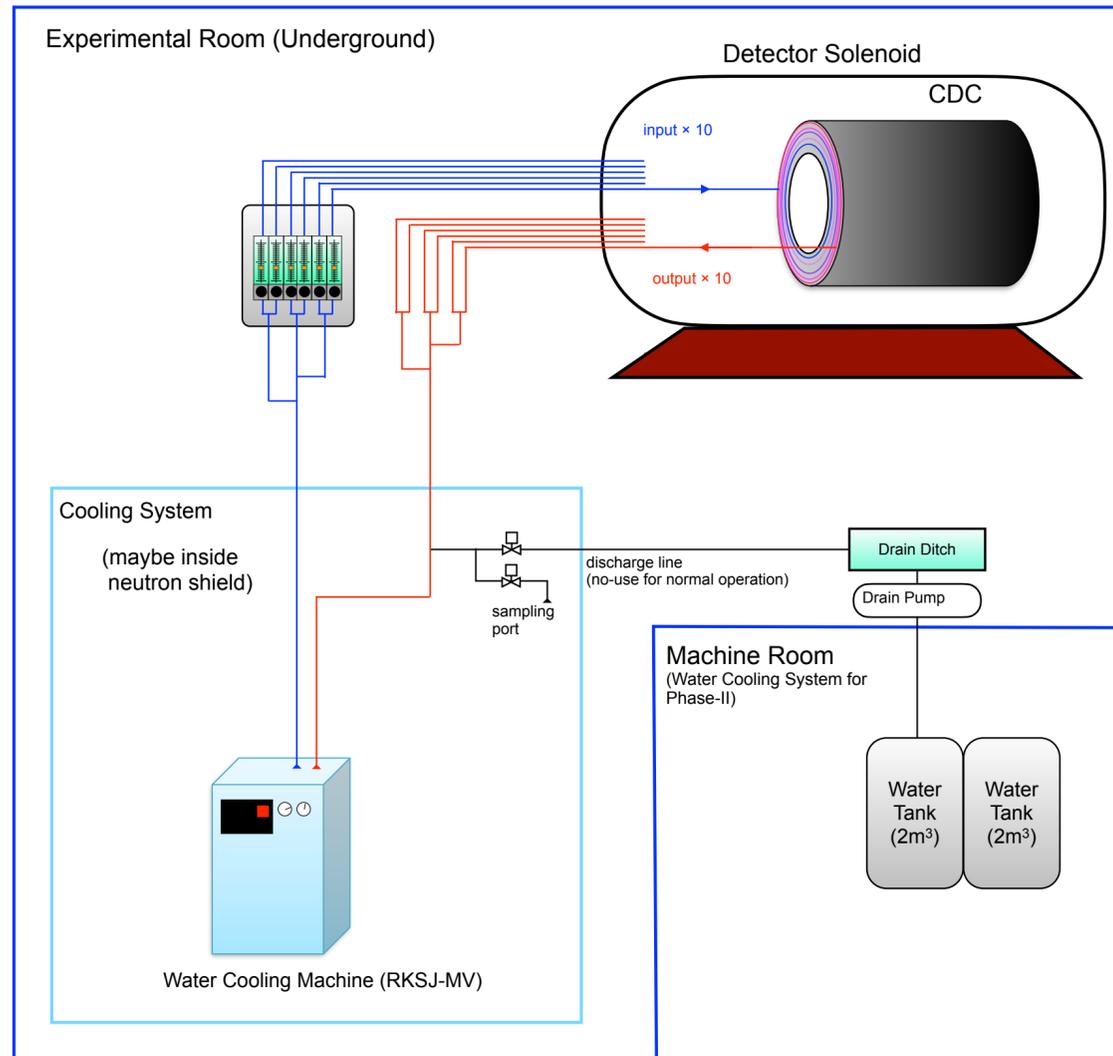
CyDet: CDCのスローコントロール



ガス系は最低限のハード・ソフト両面が開発済み。

- ◆ HV/LV/ガス系は簡素なGUIを用いてリモートコントロール可能。
- ◆ Webページでパラメタや監視カメラ画像がリアルタイムで監視。
- ◆ ただしガス循環系のみまだハード含め未実装なのでCDCグループと協力する。

CyDet: CDCのスローコントロール (Cont'd)



フロントエンドエレキ水冷系

- ◆ ハード面は吉田学立氏による開発が完了しており、現在CDCコミッショニングで使用されている。
 - ★ 詳しくは2023年の計測会での資料を参照されたい。
- ◆ ガス系と同じく、冷凍機やドレインのリモート監視・制御についてはまだ課題が残る。

CyDet: CTHのスローコントロール

MPPCなのでHVの安定が重要

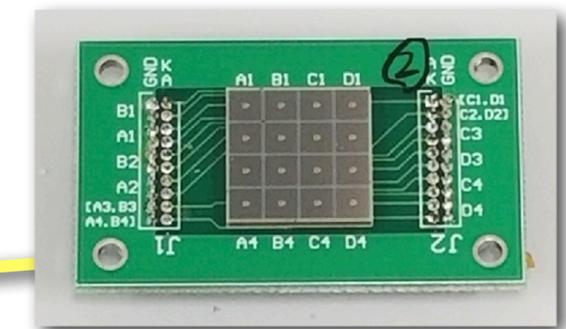
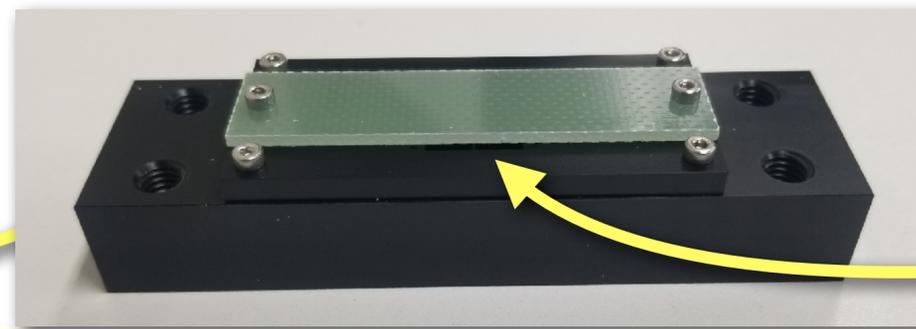
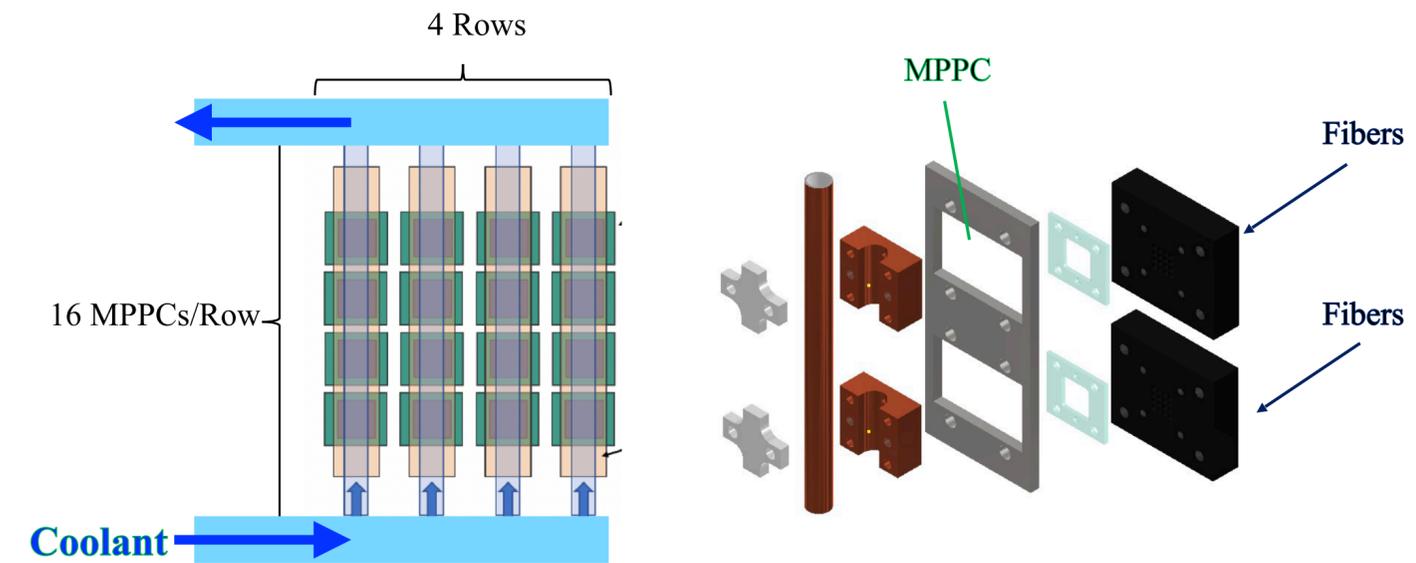
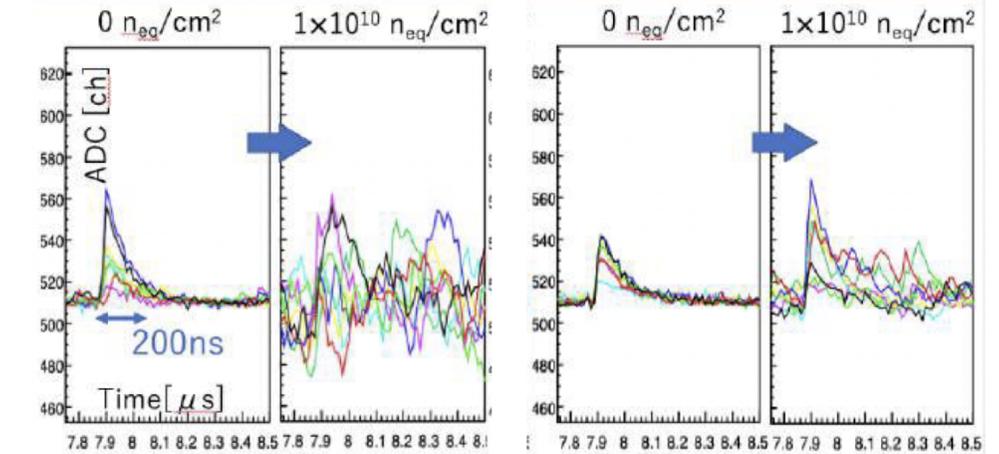
- ◆ ECALのAPDのためのHVを共有して使用する（後述）。

MPPCなので放射線にめっぽう弱い。

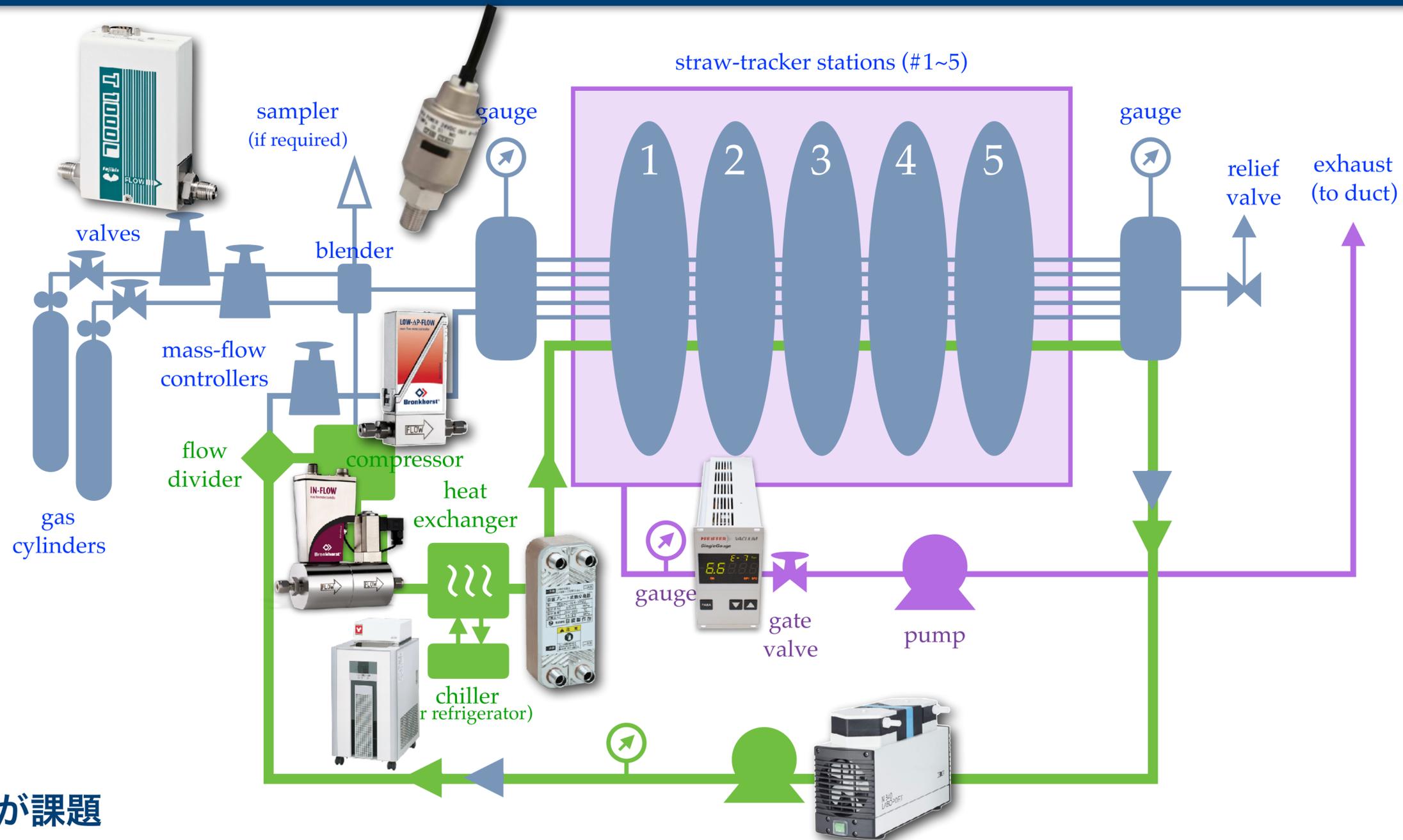
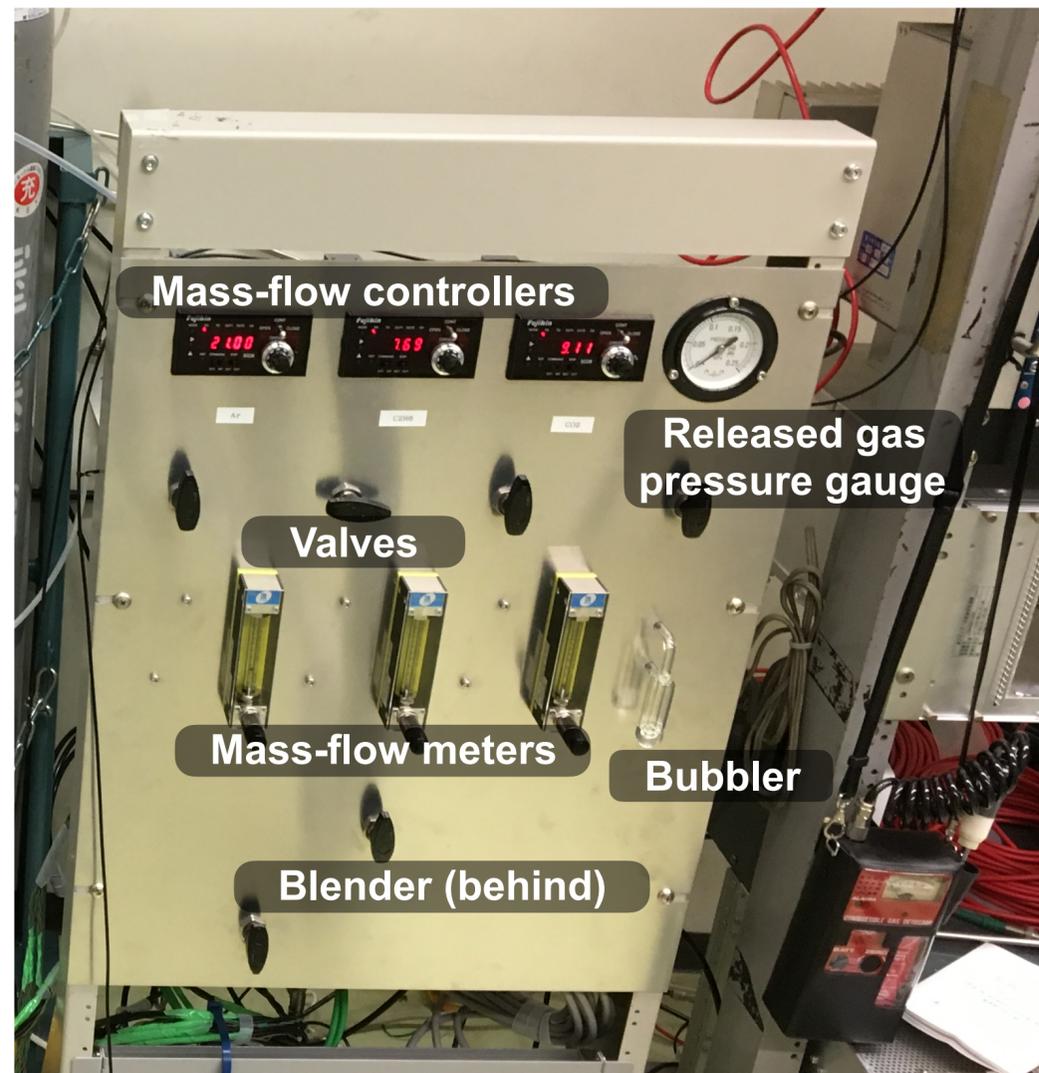
- ◆ COMETでは全期間で $10^{11} \text{ n}_{1\text{MeV-eq}}/\text{cm}^2$ 程度が見積もられている。
 - ★ 常温ではMPPCは熱ノイズが増加して信号も何も見えなくなる。
- ◆ 積極的に冷却することで熱ノイズを抑えS/Nを良くする。

冷却系はテストベンチでのR&Dが進行中

- ◆ プロトタイプでは -36°C 程度まで冷却に成功 → 実機デザインへ
- ◆ CTHグループと共同で制御系の開発も進める。



StrECAL: Straw Tracker のスローコントロール



スローコントロールとしてのパッケージ化が課題

- ◆ 端末ハードウェアは揃っているが、リモート監視・制御が手作りおもちゃレベルに留まっている。要開発。
- ◆ 冷却ガスは流量が必要 → 同じ混合ガスを大流量/小流量 Mass flow controller を制御して分流する。
 - ★ 基礎R&Dは技術職員の協力で完成している → 実装に向けたデザインが急務....

StrECAL: ECAL のスローコントロール

APDのHVの供給と電圧電流値のモニタ

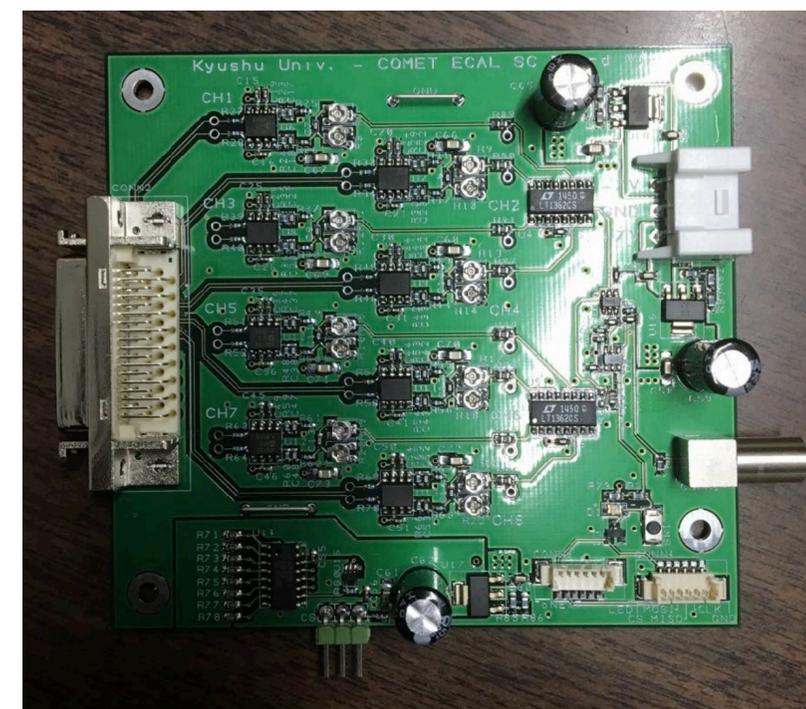
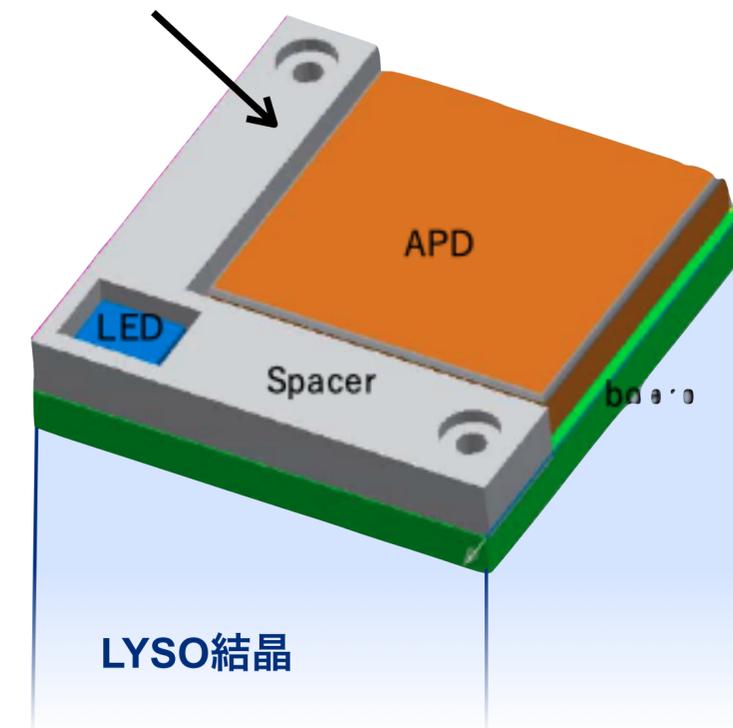
- ◆ ECALグループが林REPICと協力して、カスタムHVモジュールを開発中。
- ◆ 皆が知っている赤/黒色モジュールの亜種になる予定。
- ◆ 安くないので、CTHのMPPCでの使用も可能にする方向で進めている。



LED駆動と温度計のモニタ

- ◆ 専用基板を大昔に開発（したまま...）
- ◆ 温度計は白金抵抗をLYSO結晶モジュール2×2ごとに1つ搭載
 - ★ 真空内部へ導入するワイヤ数を減らすため、2線式読出しが限界。
 - ★ 読出し線の抵抗を比較的無視できるPt10kを使用。
 - ★ 予め温度較正すれば、要求される0.1°Cの精度で読み出せることは確認。
- ◆ 較正用LEDは各結晶に搭載。
 - ★ 真横にあるAPDへのノイズを抑えるため、差動信号でLEDを駆動。
 - ★ 電流駆動回路にした方がやっぱりいいのだろうか？ でも時間はない。

この内部に白金抵抗



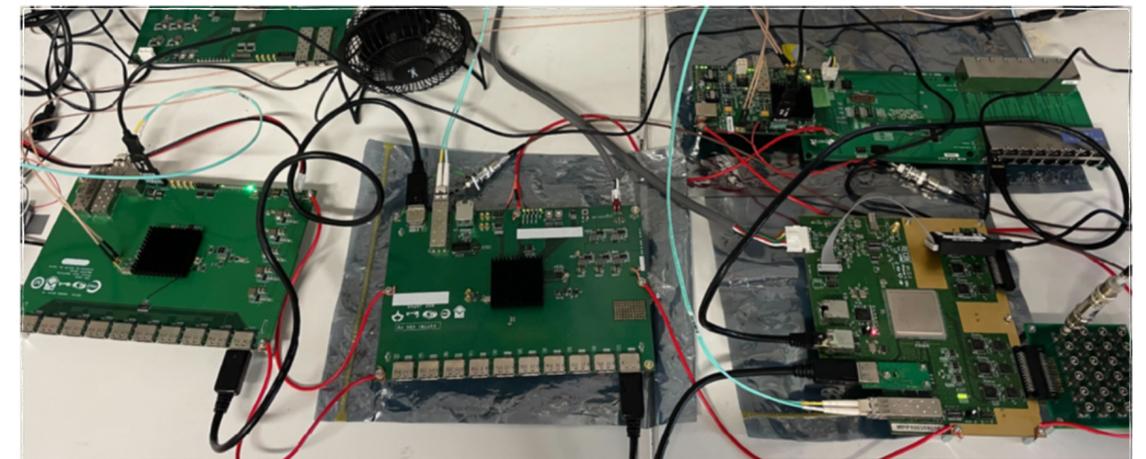
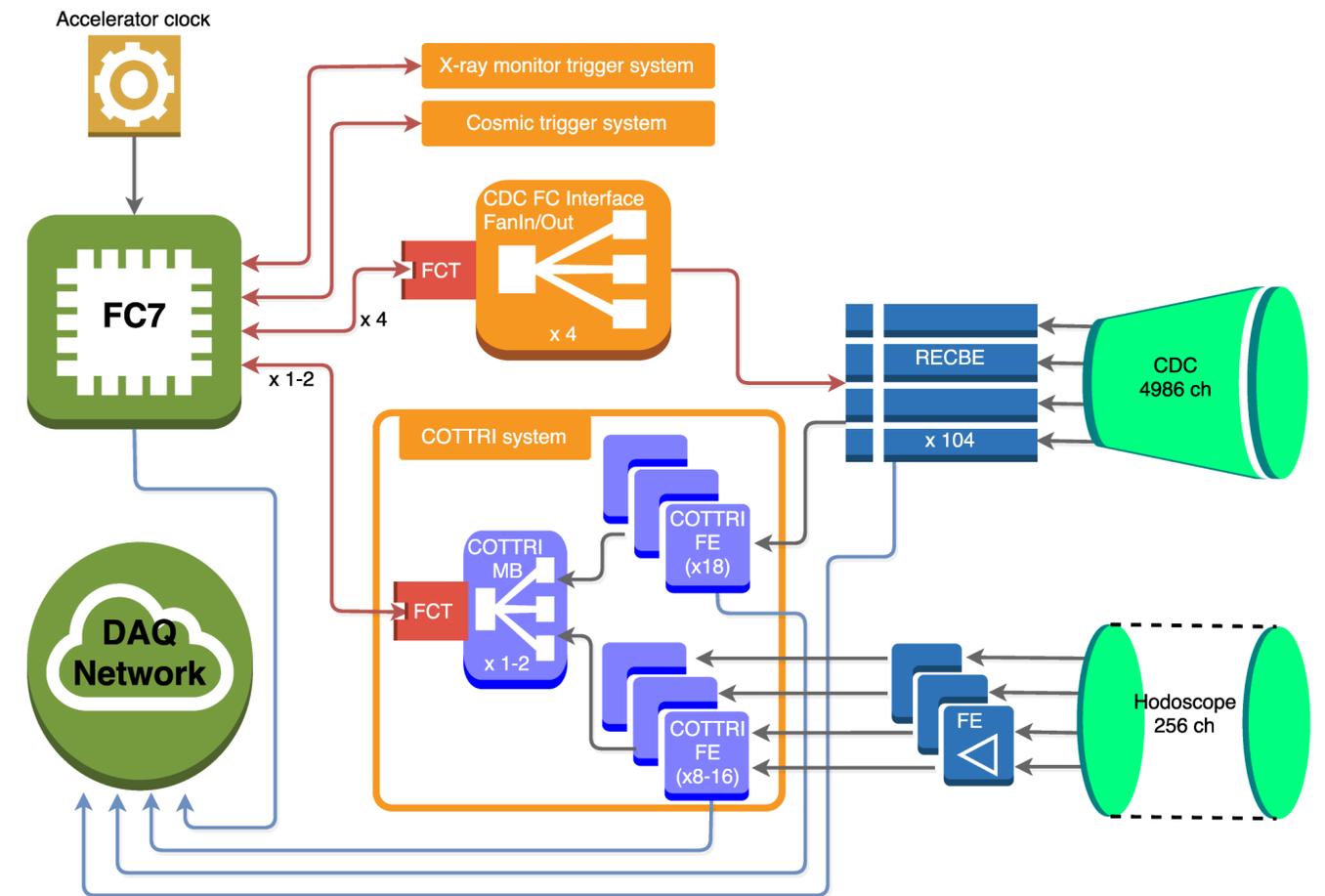
トリガ系のスローコントロール

マザーボード'FC7'が全てを統括

- ◆ トリガー生成・分配、クロック分配などなど
- ◆ FPGAへのFirmwareのDLも中間基板 (FCT) を用いて各モジュールに分配
 - ★ 中性子によるSingle event upset対策
 - ★ 放射線損傷があるため、メモリ上にも保存しておけない。

スローコントロール系の開発項目

- ◆ ハードは基本揃っている。
 - ★ ファームウェア・ソフトウェア開発に集中する。
- ◆ トリガ設定の制御
- ◆ トリガレートなどの監視・記録
- ◆ FC7やSiTCPを通して各モジュールの状態の監視や制御
 - ★ SEU発生を検知、FWの再DLの制御
 - ★ なるべく全体のDAQを止めないで行いたい。

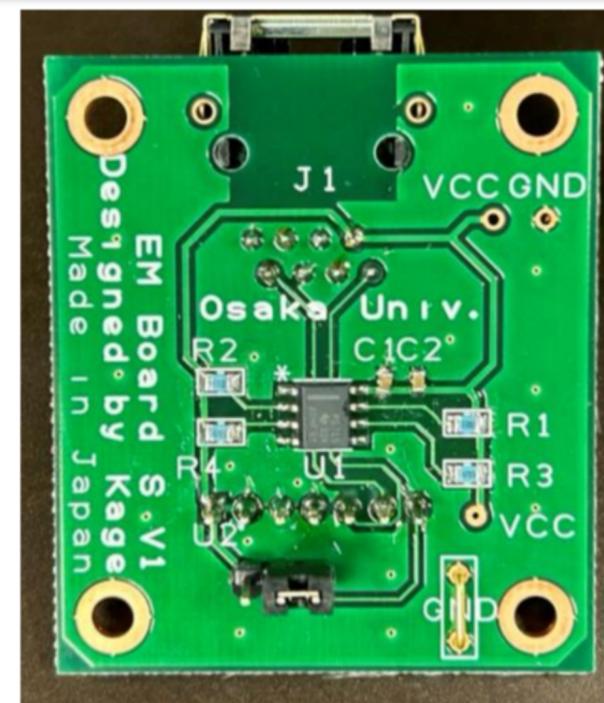


CyDetのトリガーエレクトロニクス

その他

環境モニタ

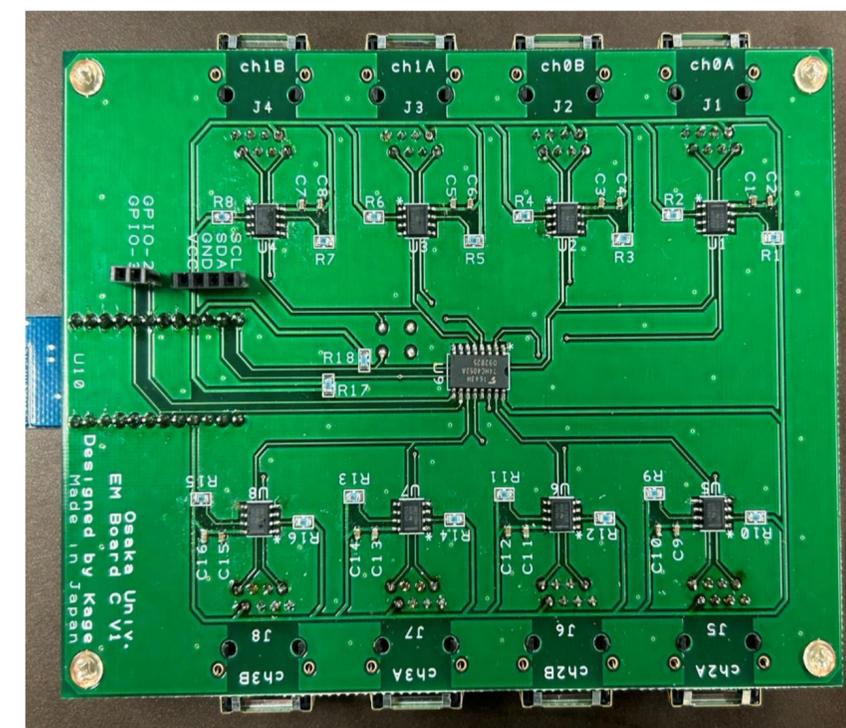
- ◆ 温度・湿度・大気圧計が一体になったBME280チップを採用
 - ★ 放射線耐性もあることを γ 線・中性子照射試験を通して確認。
- ◆ BME280を多数一度に駆動できる回路系を阪大学生が開発。
- ◆ CDCのコミッショニングや、検出器製作現場でも活躍できる。
- ◆ ちゃんと後述するデータフローを考慮し、初めてデータベースを導入してみた。



センサボード

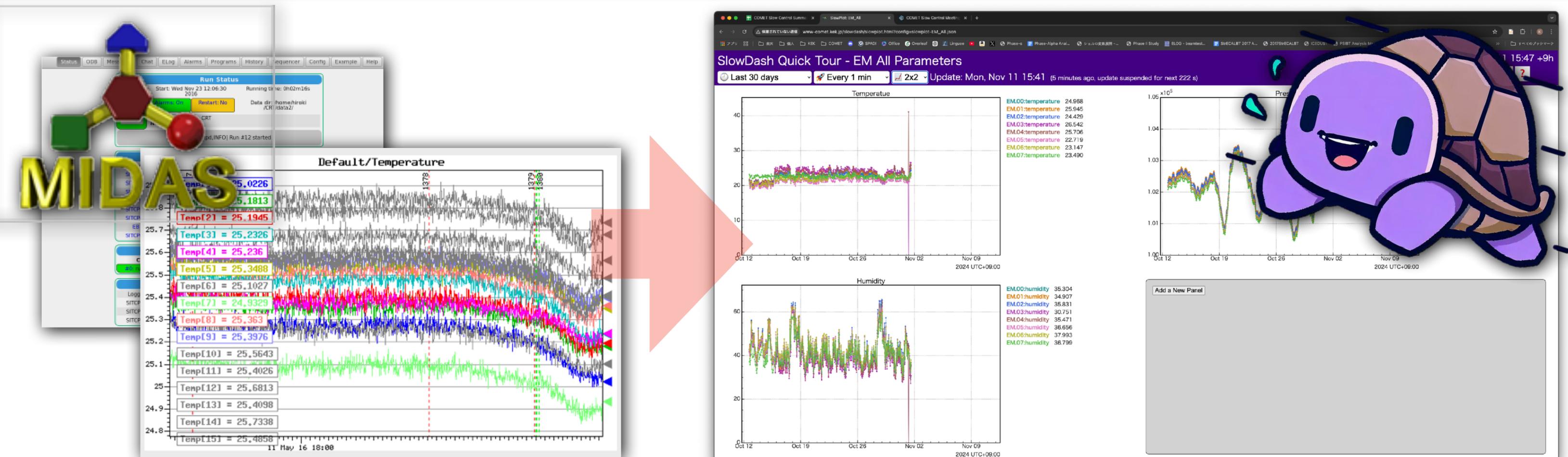
インターロックシステム

- ◆ 環境に異常が起きた時（地震など）にガス・HVなどの安全な自動停止機構。
- ◆ 真空破壊の際はポンプや検出器を保護するため、即座に経路遮断が必要。
 - ★ PCなどのソフトウェアを通さず、電気的なスイッチのみで実装したい。
 - ★ 真空からの切り離しを行うバルブの試験などはプロトタイプで昔試験した。



マザーボード (合計8ch駆動)

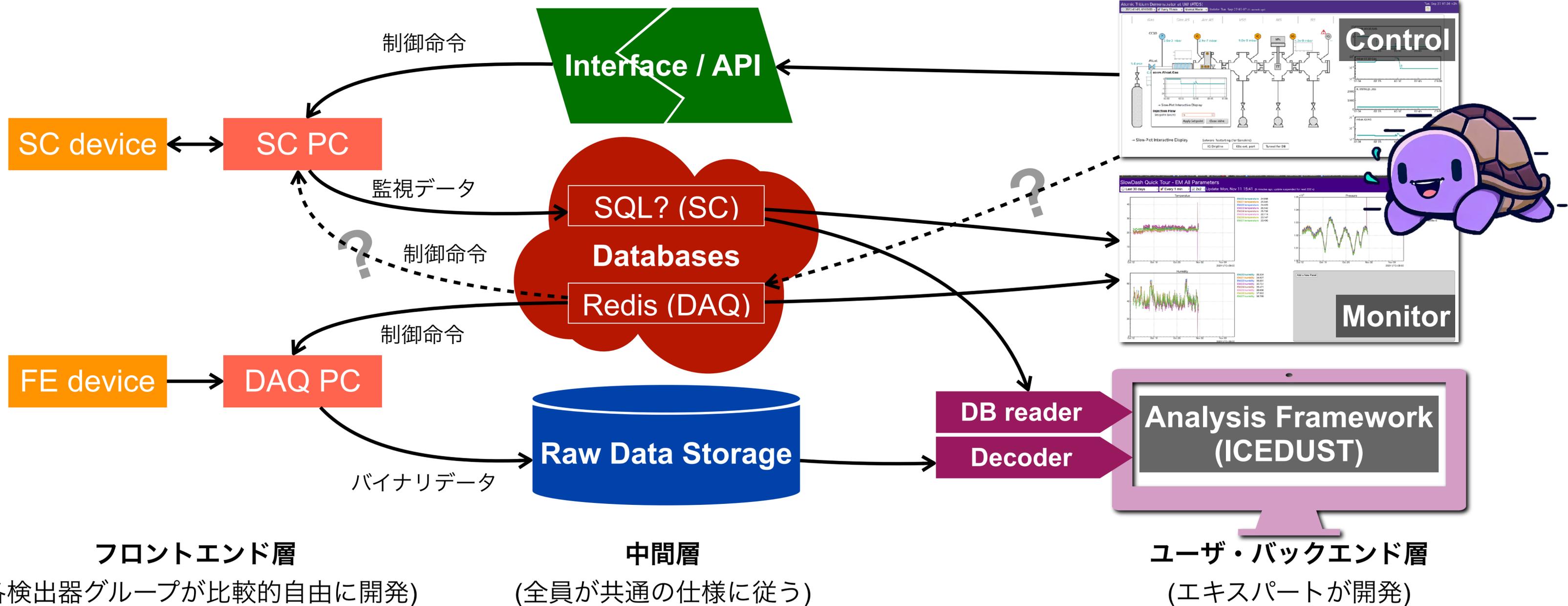
Slowdashへの移行(計画)



DAQのNestDAQへの移行計画に伴い、スローコントロールも（恐らく）

- ◆ MIDASはDAQとスローコントロールが一つにまとまる（コントロールもモニタも）ので便利だったのだが...
 - ★ ただし独自のDB (ODB) の使用が前提で、SQLなどとの連携が弱く、各モジュール開発時にはMIDAS自身の知識が必要 → 私と五十嵐さんが死ぬ。
- ◆ Slowdashは外部DBにさえデータがあれば、ほぼ開発項目なしで読めて表示できる。
 - ★ 各検出器側ではこちらが指定するDBのフォーマットを守ってくれたら基本的には好きにして良い → 開発の効率化。
 - ★ すでに先述した「環境モニタボード」の出力をSlowdashを用いてモニタ中。

DAQ・スローコントロールの層構造/データフロー(草案)



各モジュールのソフトウェア開発がいよいよ始まるまでに中間層の仕様を早急に決めないといけない。

- ◆ データベースの命名規則やフォーマットなど
- ◆ スローコントロールの制御は各モジュールにAPIを作ってもらう。あるいはDAQのようにDB (Redis?) で統一するか？

まとめと展望

COMET実験は2026年度開始を目指している...けども。

- ◆ ミューオン・電子転換過程を世界最高感度で測定するためには、最高の検出器だけでは当然足りない。
- ◆ DAQ-スローコントロールのテコ入れを（遅れながらも）大々的に開始。

今回は主要検出器のスローコントロールを中心に紹介しました。

- ◆ ハードウェアレベルではそこそこ出来上がってきている。
- ◆ ガス・真空系、電源系など、共有できるものを増やせるように情報を整理中。
 - ★ 物理測定とビーム測定では検出器がごそっと入れ替わるので、共有できるのは多い。

これからの課題

- ◆ 考えるだけでいっぱい...
- ◆ 特にソフトウェアはこれから本気出さないといけない。
 - ★ データの取り扱いも含めて統制して、開発が散乱しないようにしないといけない。
- ◆ データフローも真面目に考えないと後で苦労する。
 - ★ まだまだ叩き台の段階....
 - ★ 提案や意見あれば大歓迎です。
- ◆ 独立した施設側（ビーム運転や磁石）からのパラメタの取り扱いも必要 → インターロックにも影響する。