



COMET Phase-I

計測システムの開発状況

Contents.

1. イントロダクション
2. COMET Phase-I 計測システム
3. CyDet 近況
4. まとめ

吉田 学立
大阪大学



計測システム研究会とCOMET



* 所属は当時のもの

2014	COMET実験における読み出しシステムの開発	上野 一樹(KEK)
	COMET実験におけるトリガーボード開発	藤井 祐樹(IHEP)
2015	COMET実験のための電磁カロリメータデザイン	大石 航(九大)
2016	COMET実験における計測システム開発	上野 一樹(KEK)
	COMET実験における計測システムの放射線対策	中沢 遊(阪大)
2017	COMET実験に用いるトリガー検出器の開発	中居 勇樹(九大)
2020	COMET実験における計測システム開発の現状	上野 一樹(KEK)
	An FPGA-based Online Trigger System in the COMET Phase-I	中沢 遊(阪大)
2021	COMET実験における計測システムの現状と将来に向けた新規開発	上野 一樹(KEK)
	COMET Phase-I実験オンライントリガーシステムへの機械学習実装研究	宮滝 雅己(阪大)
2022	COMET Phase-I オンライントリガーシステムの研究	宮滝 雅己(阪大)
2023	COMET Phase-I 計測システムの開発状況	吉田 学立(阪大)
	COMET Phase-I CyDetトリガーシステムの性能評価	山田 千尋(阪大)

2014年から毎回1~2講演。主に読み出し、トリガー、放射線対策に関する内容

今回は、Phase-Iの測定システム、主に CyDet (ガス検出器+カウンター) について(吉田)、

CyDet のトリガーシステム開発について(山田) にフォーカス

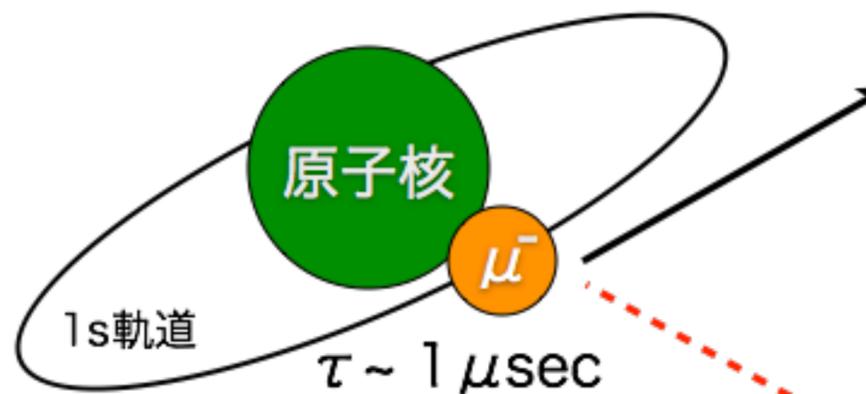
未発見の $\mu - e$ 転換過程

Neutrino Flavor Violation is observed !



charged Lepton Flavor Violation !? (cLFV)

ミュオン原子



未観測

標準理論の枠内

ミュオン崩壊: $\mu^- \rightarrow e^- \nu \bar{\nu}$

原子核ミュオン捕獲:

$\mu^- + N(A, Z) \rightarrow \nu_\mu + N(A, Z - 1)$

標準理論を超える物理

ミュオン - 電子転換:

$\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$

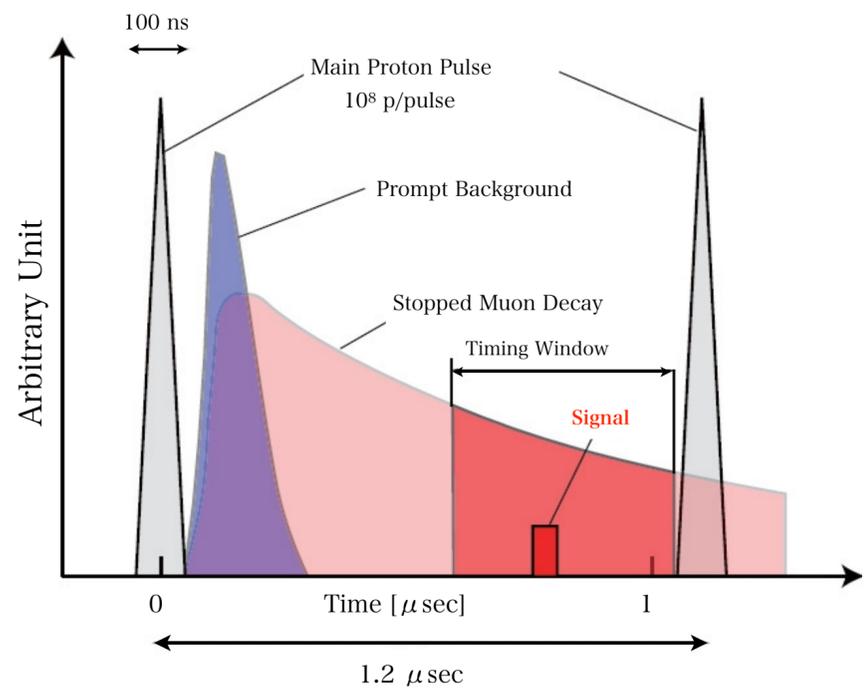
- 標準模型では強く抑制されているcLFV過程
- 超稀崩壊過程でこれまで未発見
- 見つければ新物理を示唆
- SINDRUM IIによる上限値 (2006年)

$$\text{Br}(\mu^- \text{ Au} \rightarrow e^- \text{ Au}) < 7 \times 10^{-13} \text{ @ } 90\% \text{ C.L.}$$

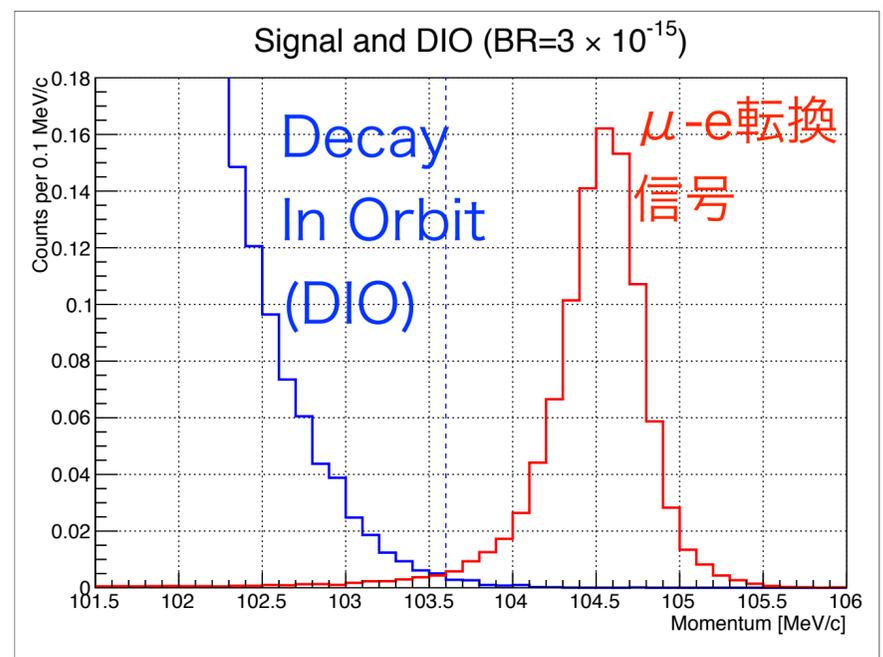
1980年台の実験がいまだに最新結果。これを更新して、より高感度で探索をしたい → COMET

COMET実験

- 東海村 J-PARC E21実験 @ ハドロンホール南実験棟
- 大強度陽子ビームを用いて、世界最高感度で μ -e転換過程探索！
- パルス化 大強度ミュオンビーム
- 高運動量分解能の検出器で信号探索
- SINDRUM-IIの最新結果を10,000倍 更新したい
→ Phase-I / Phase-II の段階的アプローチ



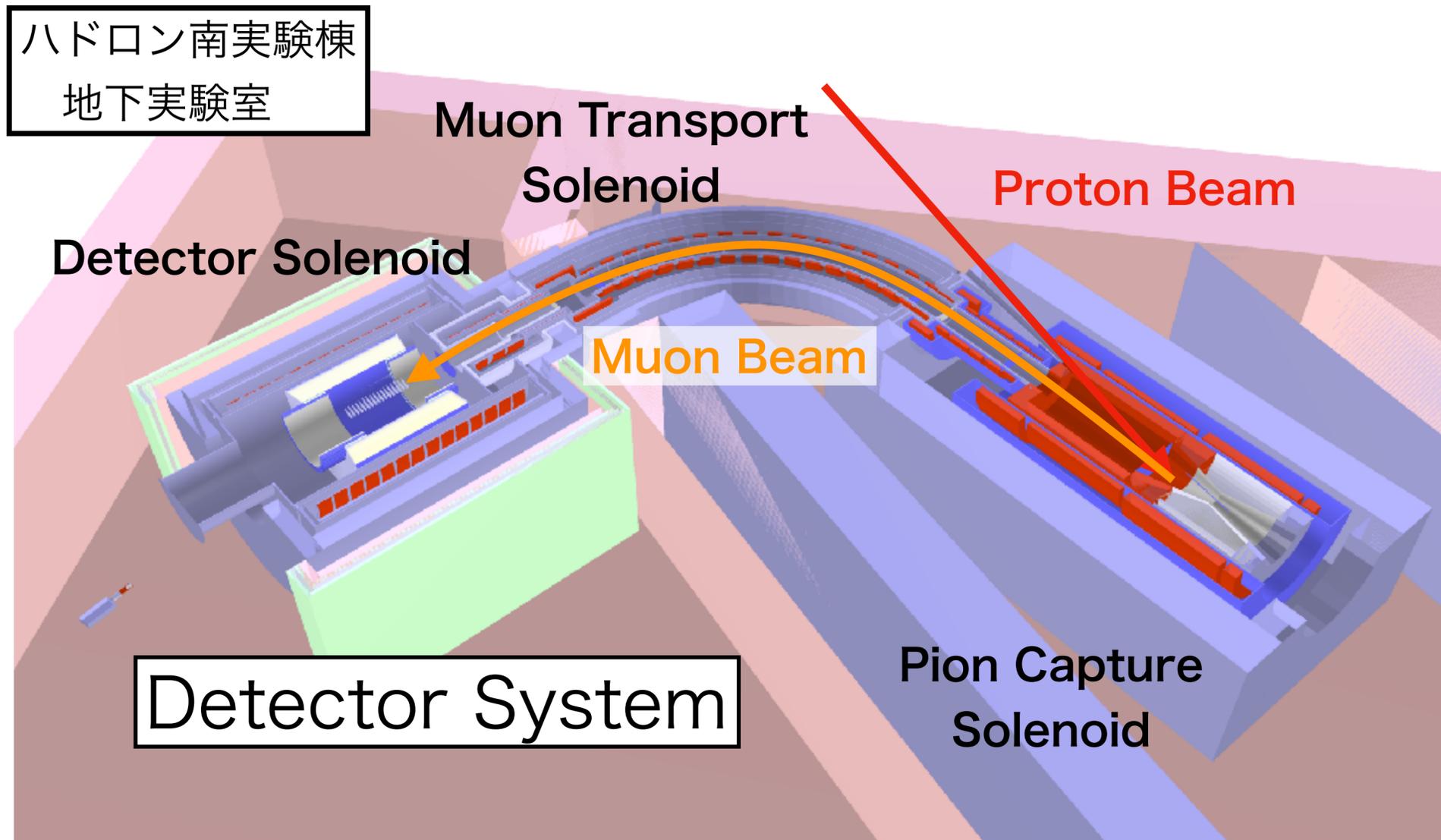
時間窓とバンチ構造



MCで作成した信号とDIOの運動量分布

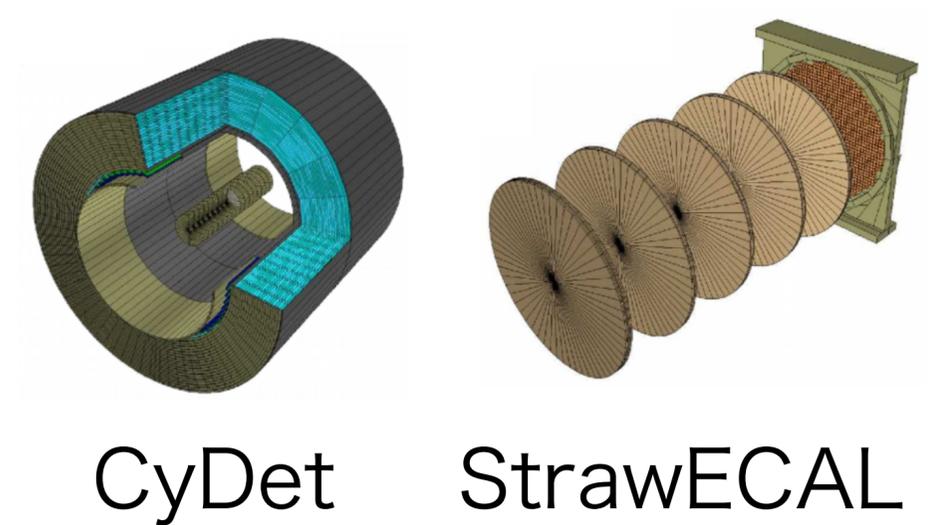
COMET @
ハドロンホール
南実験棟

COMET Phase-I



- ・ **目標感度： 3×10^{-15} (現状の100倍)**
- ・ 3.2 kW 8 GeV 陽子ビーム
- ・ パイオン捕獲超伝導磁石
- ・ 90度 μ 輸送超伝導磁石
- ・ 検出器超伝導磁石と2種の検出器システム
 - 物理測定(CyDet)
 - 背景事象測定(StrawECAL)
- ・ 2022年にビームライン(E21)が完成
- ・ 超電導ソレノイド、シールド等 建造中

COMET Phase-I の実験セットアップ

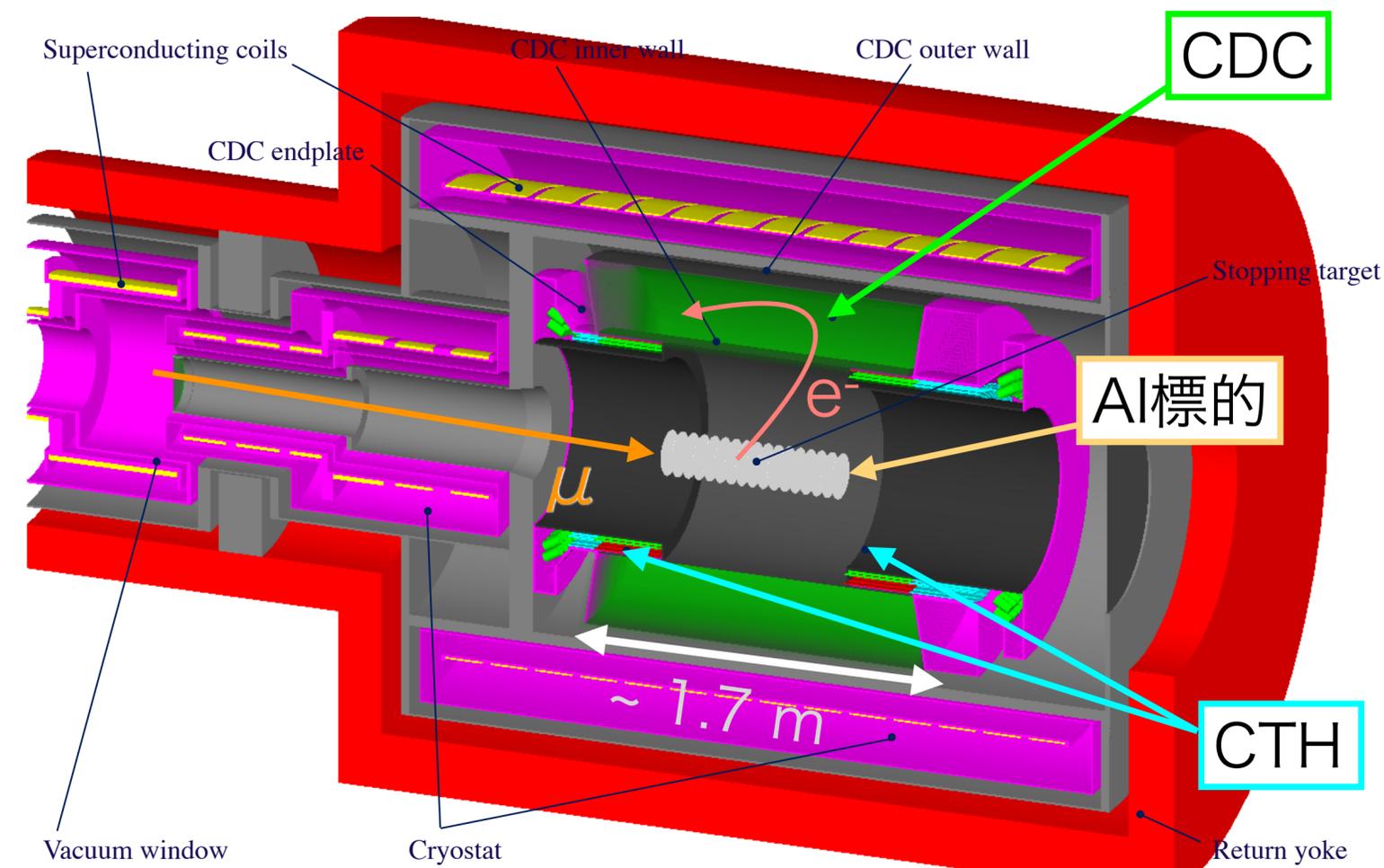


CyDet

StrawECAL

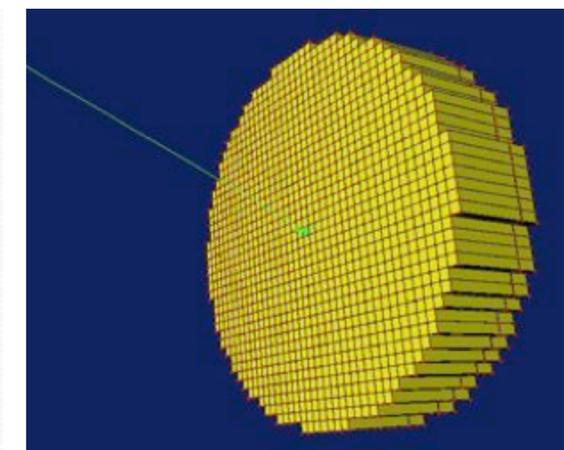
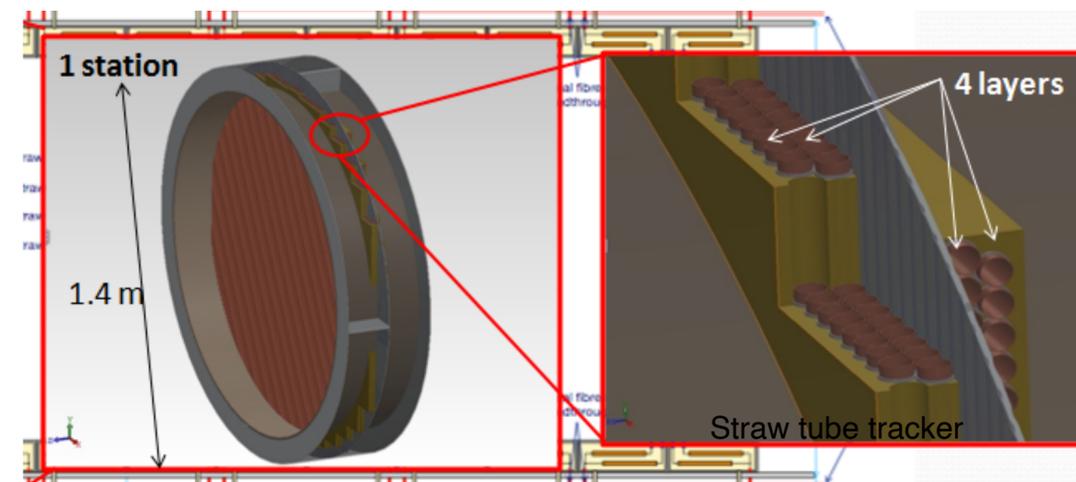
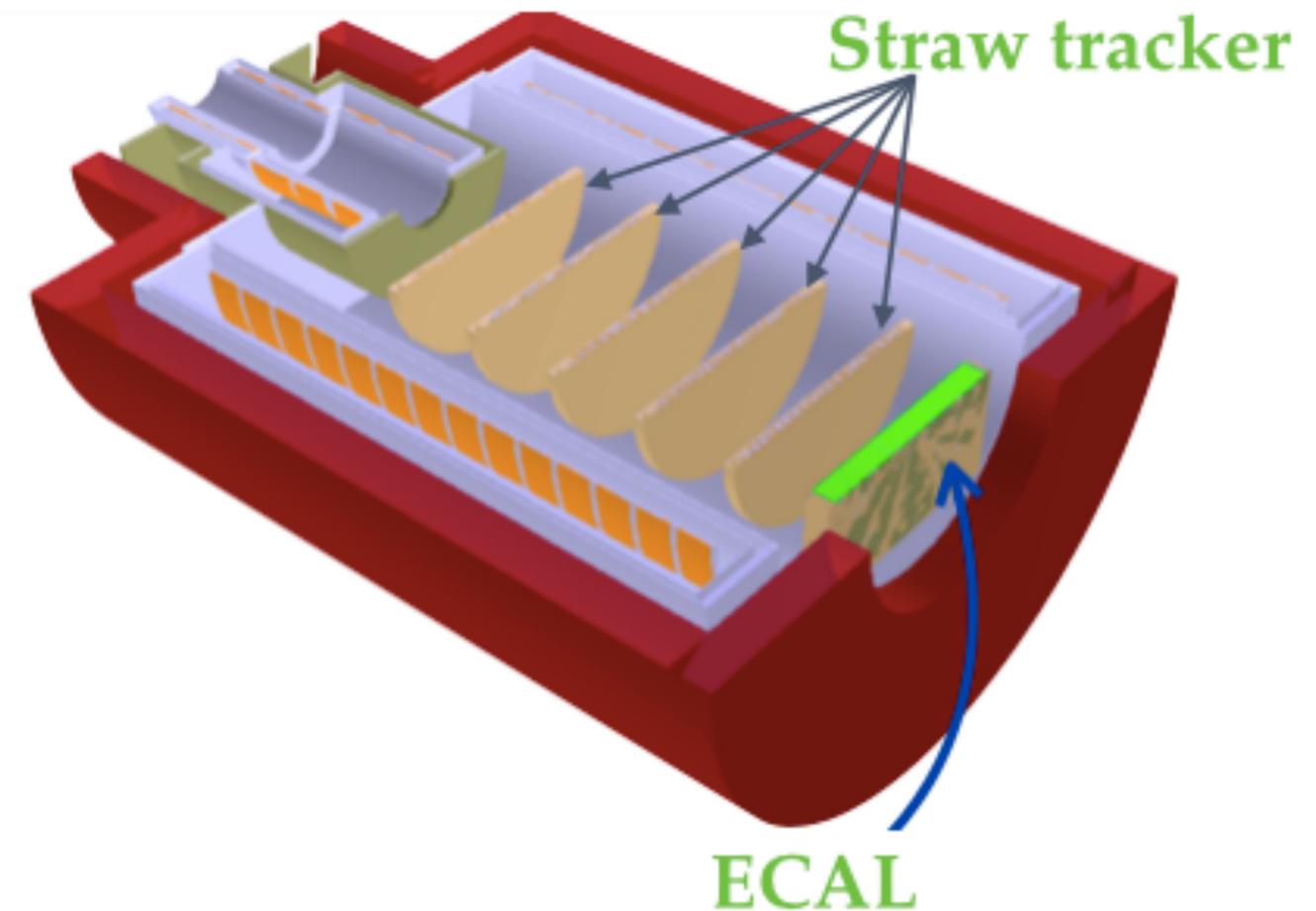
Phase-I 検出器1 : CyDet

- 放出される電子の運動量を精密に測定し信号(μ -e転換)を探索する**Cylindrical Detector (CyDet)**システム
- 飛跡検出器 **Cylindrical Drift Chamber (CDC)**
 - 要求性能 : $\sigma_p < 200 \text{ keV}/c @ 105 \text{ MeV}/c$ (1 T磁場中)
 - ワイヤー数 約2万本(信号約5000 ch)
 - 読み出し電子回路 : RECBE (48ch) x 104 boards
 - チェンバーガス He : iC₄H₁₀ = 90 : 10
- トリガー検出器 **Cylindrical Trigger Hodoscope (CTH)**
 - CDCの内側、ビーム上流/下流にそれぞれ設置
 - 4層のシンチレータで 4-fold coincidence
 - (紆余曲折の末) ファイバーを外まで伸ばしてSiPMで光検出
中性子対策としてSiPMの冷却を検討中
 - 放出電子のタイミング測定とトリガー決定 (時間分解能 < 1 nsec)
- 超電導検出器ソレノイド磁石(Detector Solenoid, **DS**) にCyDetシステムを設置
- 中心にはアルミニウム製の静止標的 (200 μ m厚 直径20cm)を設置



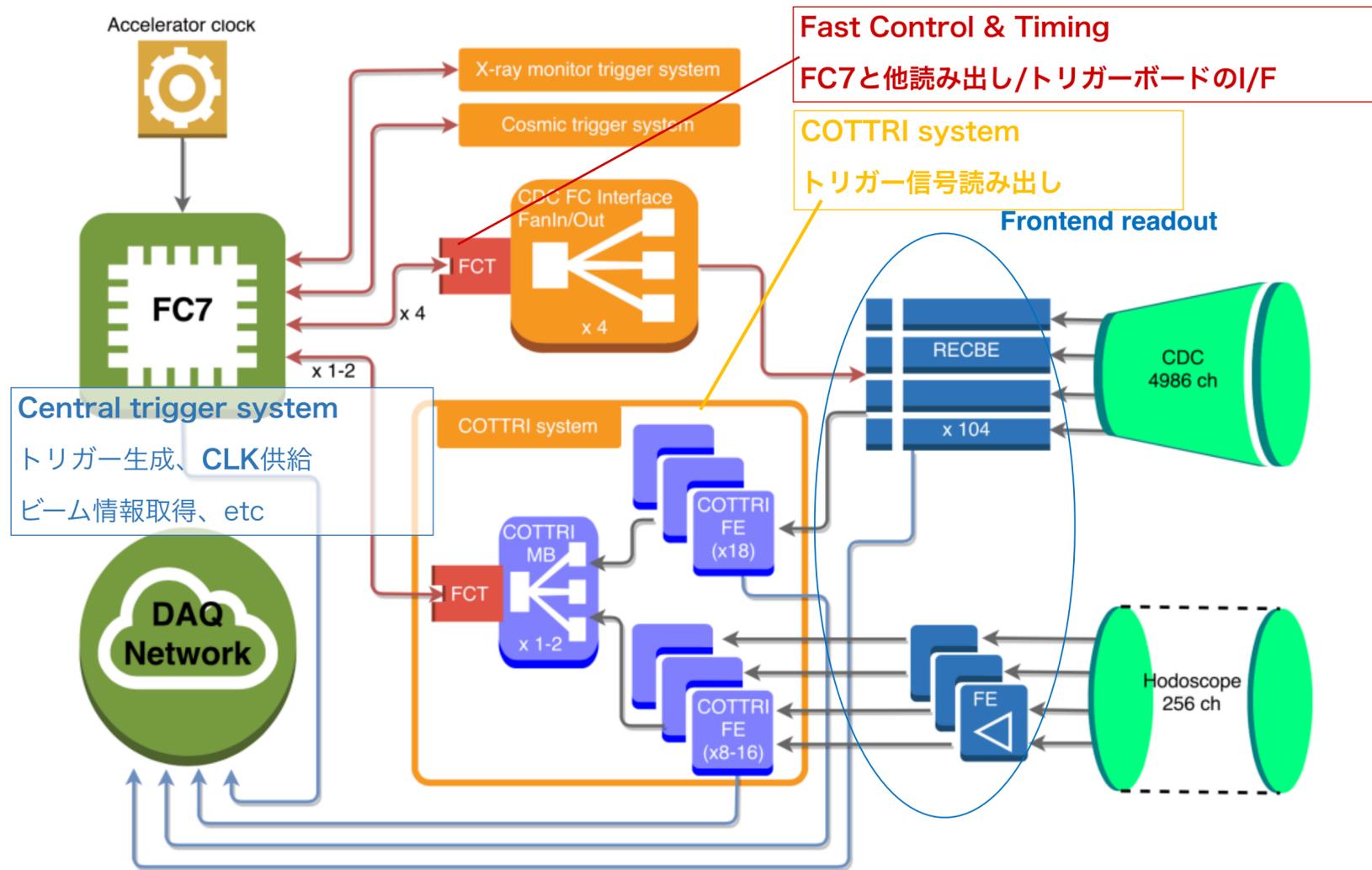
Phase-I 検出器2 : StrawECAL

- 新設ビームラインのバックグラウンド測定用検出器
- Phase-II では主検出器となる。R&Dも兼ねる
- 飛跡検出器 **Strawtube Tracker (Straw)**
 - 要求性能 : 運動量分解能 $< 200 \text{ keV}/c @ 105 \text{ MeV}/c$
 - Strawtubeの外は真空 -> 超低物質質量飛跡検出器
 - 4層構造の1 station x 5台
 - 読み出し電子回路 : ROESTI (DRS4)
 - 現在建設中
- カロリメータ検出器 **Electron CALorimeter (ECAL)**
 - Strawの下流に設置
 - LYZO結晶 + APD光検出
 - 全粒子のエネルギー、タイミング、位置を測る
 - 読み出し電子回路 : EROS
 - 現在建設準備中

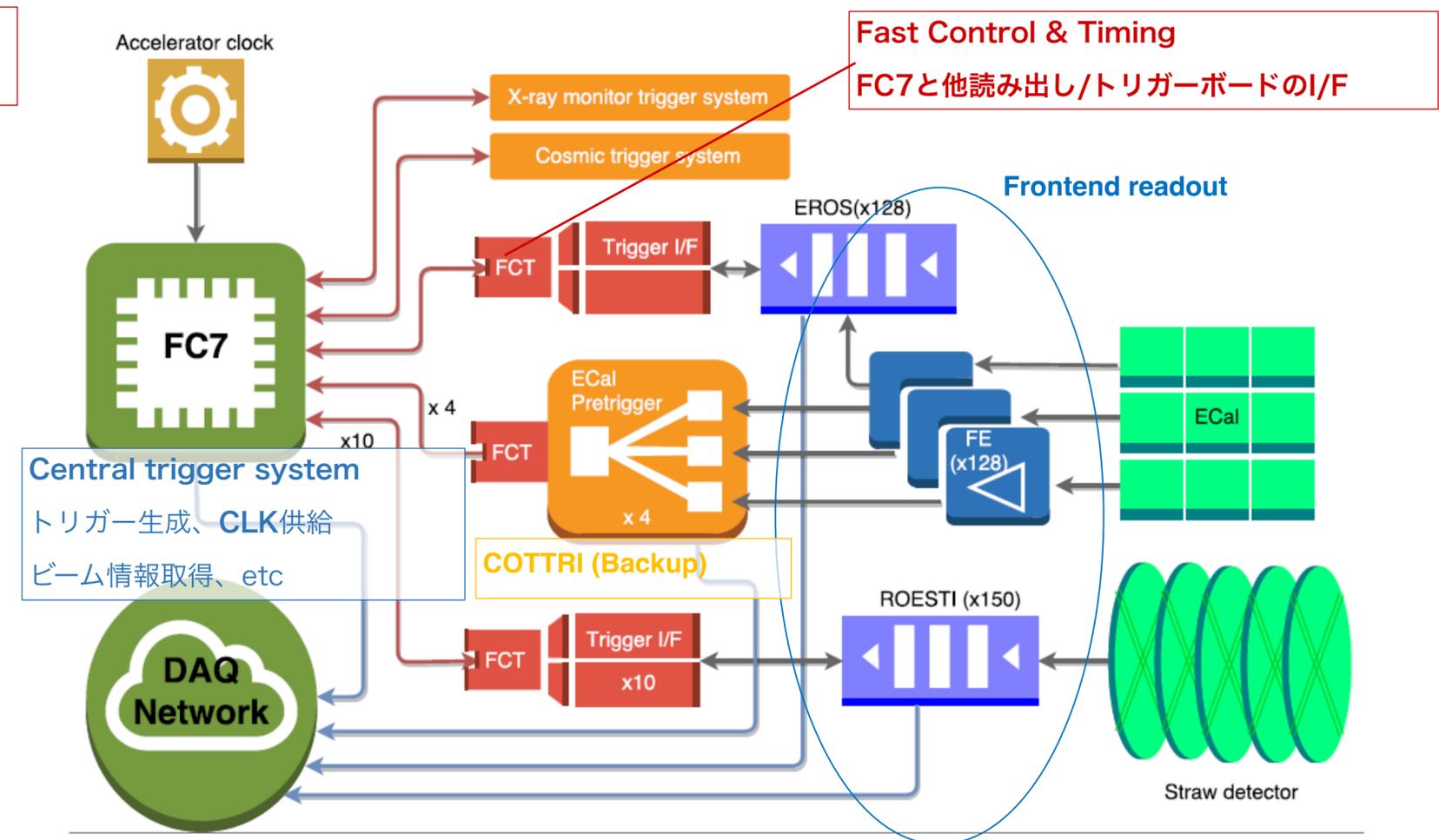


COMET Phase-Iのエレキ

CyDet DAQ/Trigger Scheme



StrawECAL DAQ/Trigger Scheme



- ・ フロントエンドのエレキたち： 検出器に近いので放射線耐性の要求が高い
- ・ Open-Itを活用したり、過去の技術資産を利用しながら、放射線耐性のあるエレキを新規開発
- ・ CyDet トリガーシステムについては次講演(山田)で詳細

COMET Phase-Iの放射線レベル

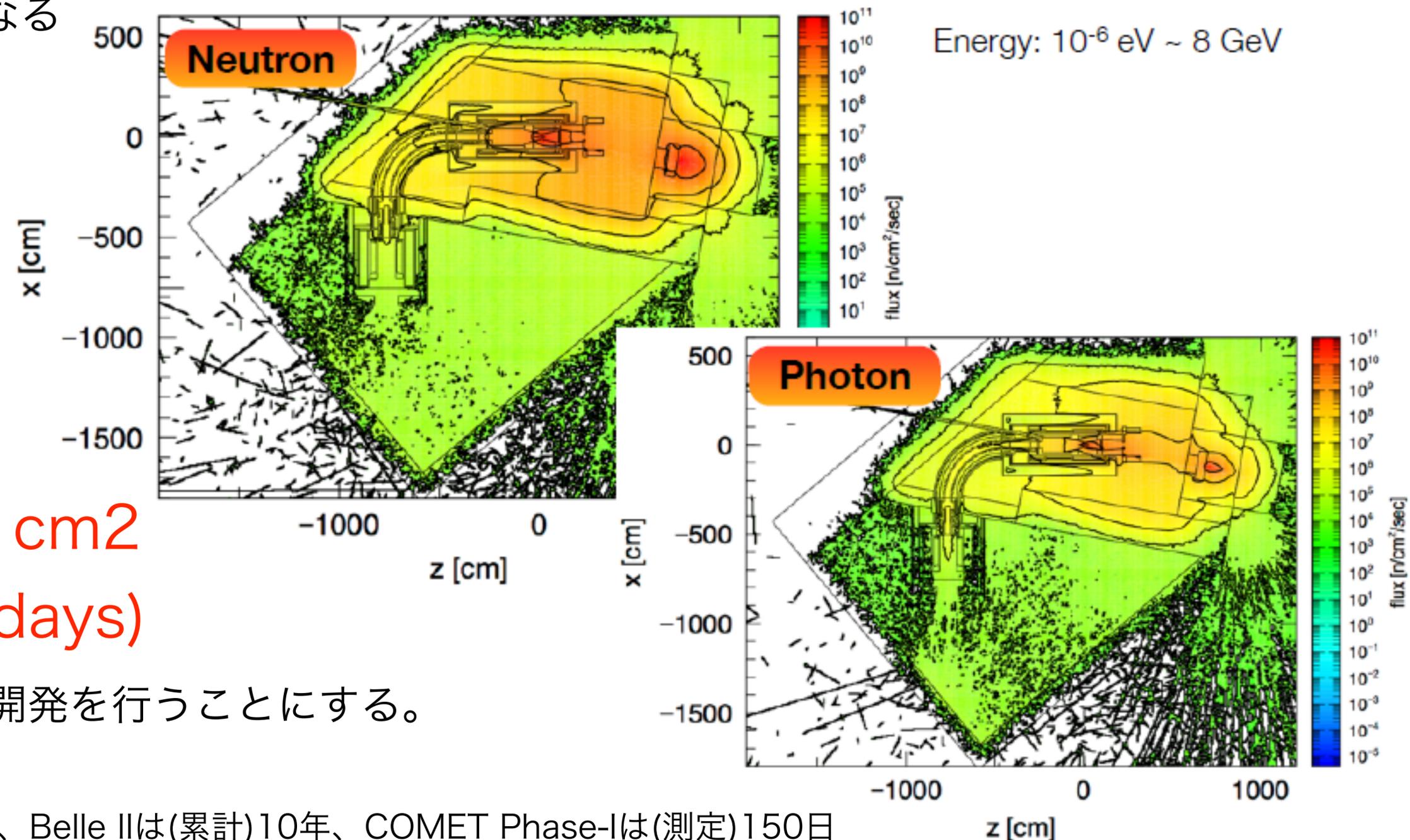
- J-PARCの大強度陽子ビームを用いた(現状)世界最高強度のミュオンビーム
 - 8 GeV p + 陽子標的 $\rightarrow \pi$ (+n/e-/e+/ γ いろいろ) $\rightarrow \mu$ (+ e/ ν / γ など)
 - 当然、放射線レベルは高くなる
- PHITSを用いた計算結果 \rightarrow

検出器領域において、
安全ファクターを考慮して、

中性子： $10^{12} \text{ n}_{1\text{MeV eq.}} / \text{cm}^2$

ガンマ線： 1 kGy (150 days)

を要求し、性能評価や開発を行うことにする。



※ Belle II と同レベルくらいの要求。ただし、Belle IIは(累計)10年、COMET Phase-Iは(測定)150日

エレキの放射線耐性対策

ざっくり分けると...

	中性子	ガンマ線
永久損傷	全電子部品・モジュールなど	全電子部品・モジュールなど
ソフトエラー	主に電子回路に搭載したFPGA その他(Flashメモリやマイコン等)	-

←対策は簡単ではない

←技術的に軽減が可能、期待できる。

COMETグループでの放射線対策方針

永久損傷：放射線防護の三原則(時間・遮蔽・距離)で放射線量を減らせないか検討

放射線耐性の高い市販品を探して使用 (放射線耐性を謳う製品は高級&入手性が悪い)

ソフトエラー：FPGA内でリアルタイムエラー検知・修正 / 修正不可->再プログラム、三重化など

エラーレート等からDAQデッドタイムの見積もり -> 次の講演で詳細

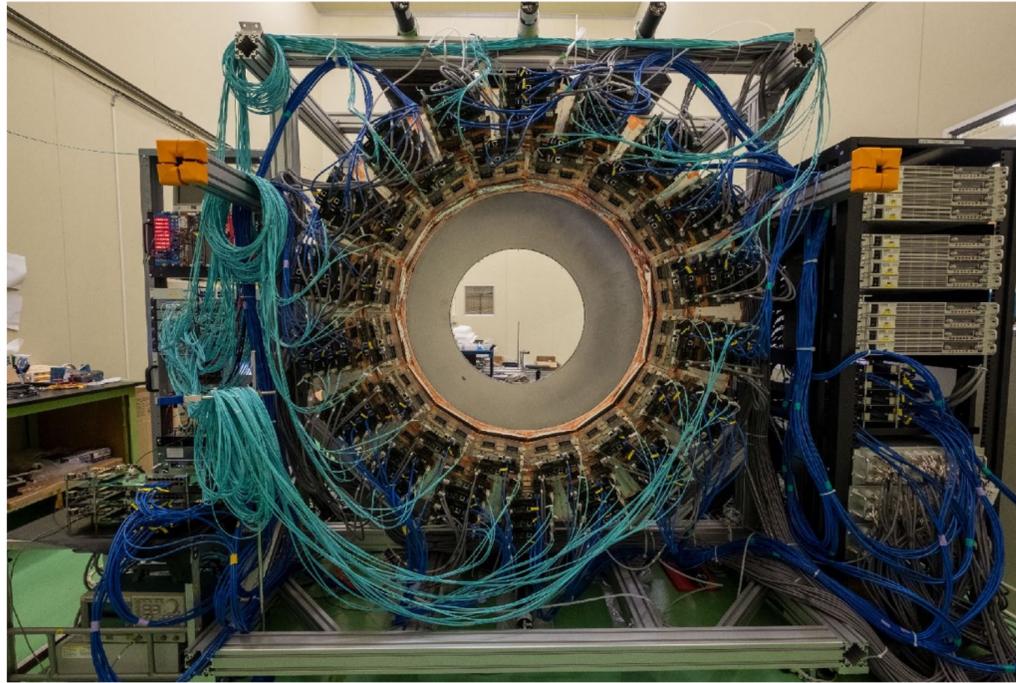
計測システム研究会や日本物理学会、耐放射線エレキ研究会、論文などでこれまでの試験は報告済みだが、最近も継続して、中性子・ガンマ線の照射試験を実施中 (直近は中性子照射試験を予定)

放射線耐性評価の実験サイト

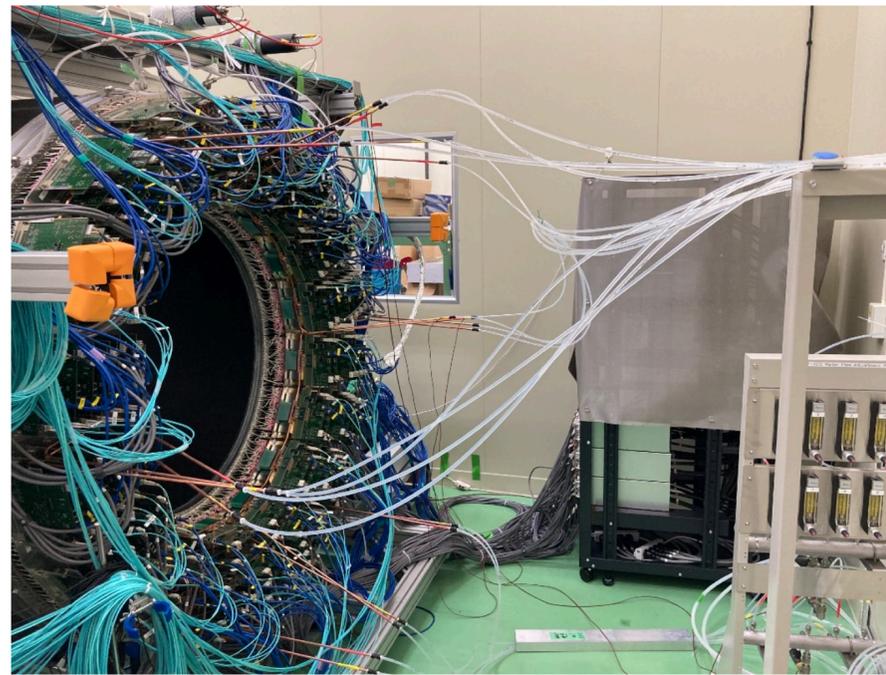
中性子：神戸大学 (タンDEM静電加速器)、稀に京大KURNS など

ガンマ線(^{60}Co)：主に東工大、たまに大阪大・高崎QSTなど...

COMET-CDC検出器のこれまでの状況



CDC検出器宇宙線試験のセットアップ



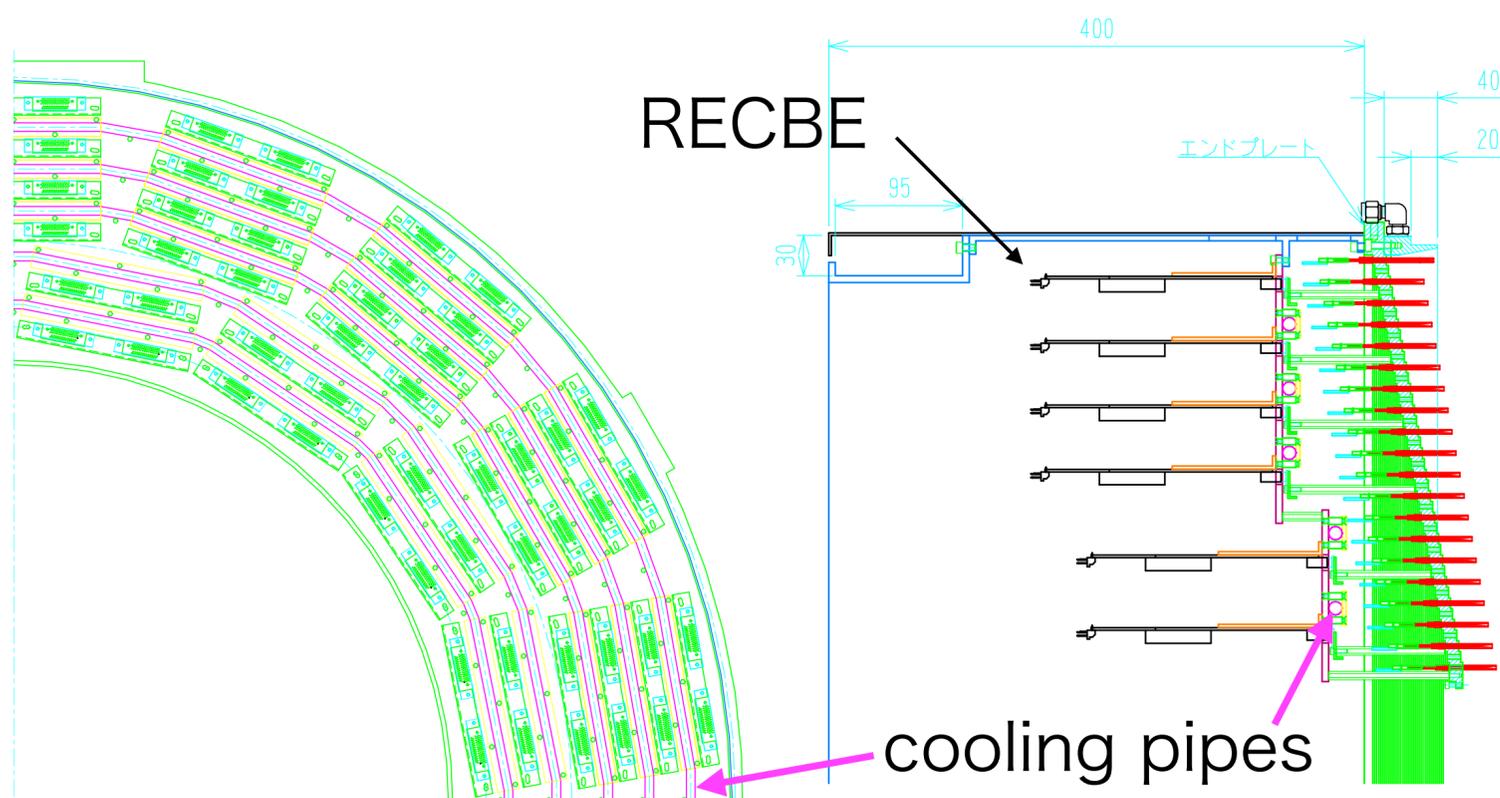
水冷システムの導入@つくば

- ワイヤー2万本(4986ch)張った円筒形のドリフトチェンバー
- 宇宙線を用いた性能評価/動作試験@ KEKつくばキャンパス 富士実験棟B4
- 2020年から全チャンネルが稼働中
電源や電子回路、トリガーシステム、宇宙線用カウンター、ケーブル、光スイッチなど増設
- 電子回路の冷却は、クリーンルームのエアコンと扇風機(5台)の空冷
-> 水冷にアップグレード
- DAQ / Slow Control Systemも開発継続中
- 宇宙線 μ の実測データとシミュレーションから検出器応答を解析ツールへ導入

水冷システムのデザイン

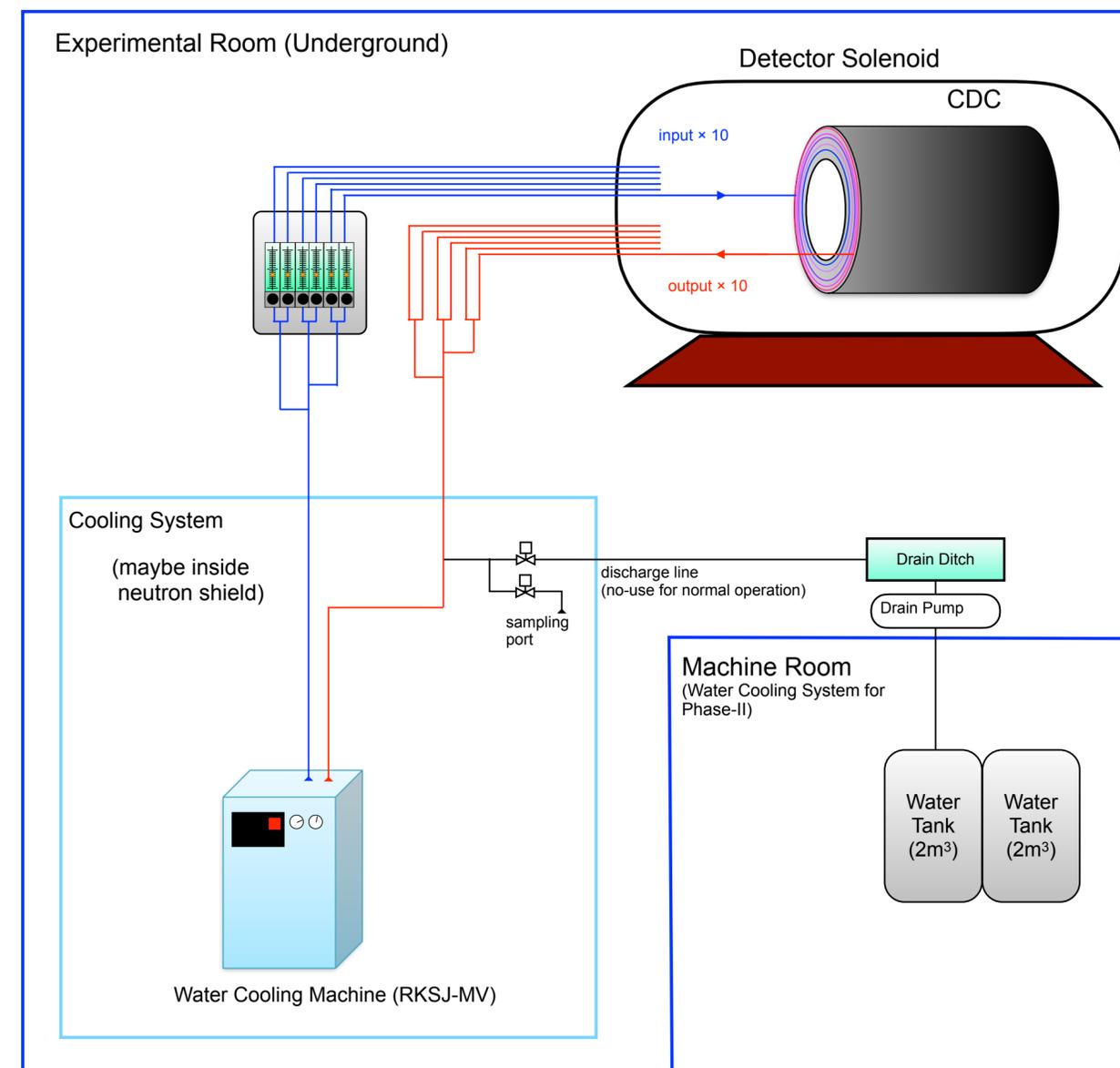
- CDCの主な熱源は、エンドプレートに設置する読み出し電子回路RECBE 104枚の発熱
- $\sim 2.2 \text{ kW} / 104 \text{ 枚}$ を超伝導磁石の中で冷やす必要がある \rightarrow 水冷

Belle-II CDCの水冷システムを元に作成した
COMET-CDCの水冷デザイン (2015年)



固定用のアルミ板を冷却 \rightarrow RECBEを間接的に冷やす

実験ホールでの水冷システムの概念図

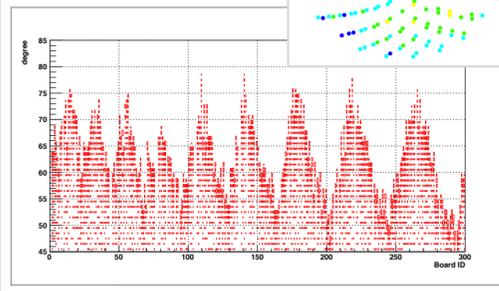
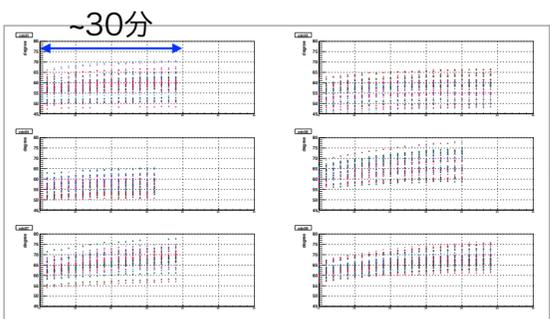
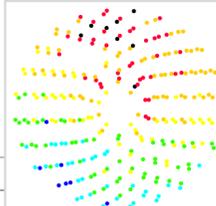


Belle II CDCグループからの報告

冷えない

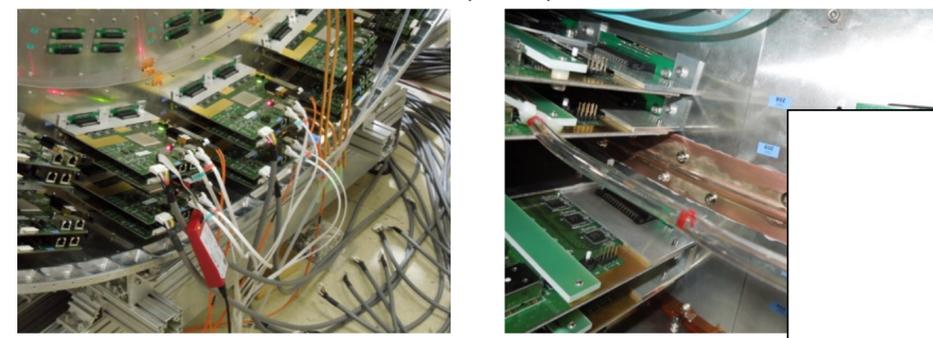
- ・ 温度はFPGAの機能を使ってモニターできる
- ・ 結果：50~75度
 - ・ エレキ自体は問題ない温度
- ・ 少しずつだが温度は上昇傾向にある
- ・ 平衡状態に達しない = 熱を取りきれていない

温められた空気が上にいくため
上側のエレキの温度が高い (65-80度)
下側はそれなりに冷えている (<60度)



冷えない

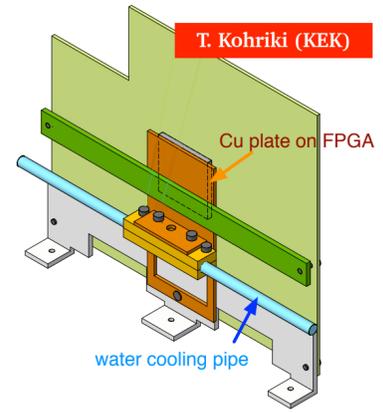
- ・ 冷却を根本的にやり直すことになった
- ・ 全ての配線、全てのボードを取り外した
- ・ ボードはサポート板にL字のアンクルでとりつけられている
- ・ サポート板に水冷パイプがとりつけられていた
- ・ 問題点
 - ・ 熱源であるFPGAから冷却パイプの距離が遠い
 - ・ サポート板の熱伝導率が良くない(アルミ)



by 谷口さん (KEK)
計測システム研究会2017

冷えない

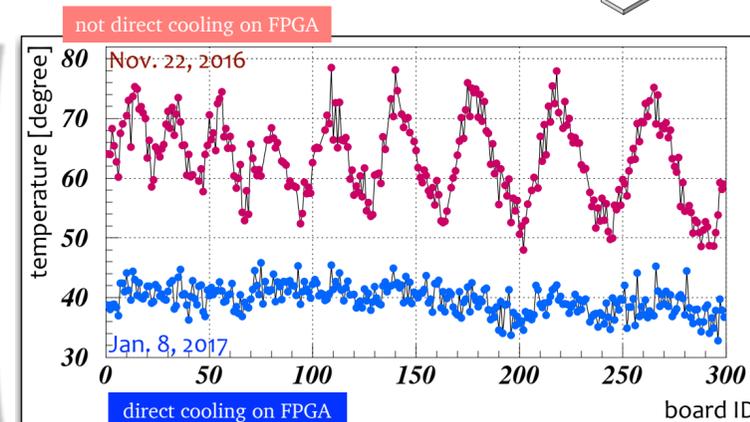
- ・ FPGAに銅板を**で貼り付ける
- ・ 銅板と冷却パイプを接続
- ・ 再びボードの設置と配線をやりなおし
- ・ 冷却試験 → O.K



RECBEを固定するアルミ板を冷やすだけだと冷却が不十分であることが判明。

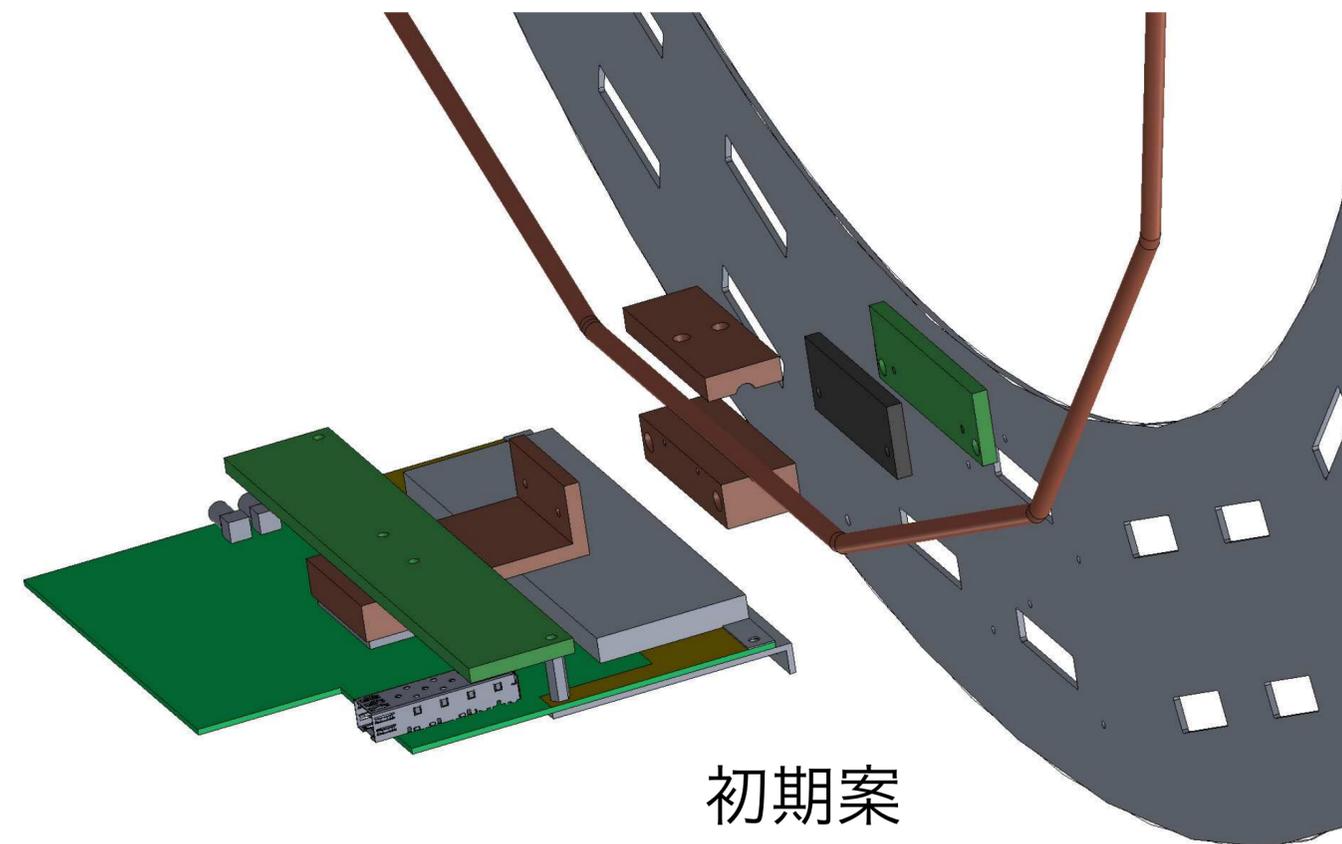
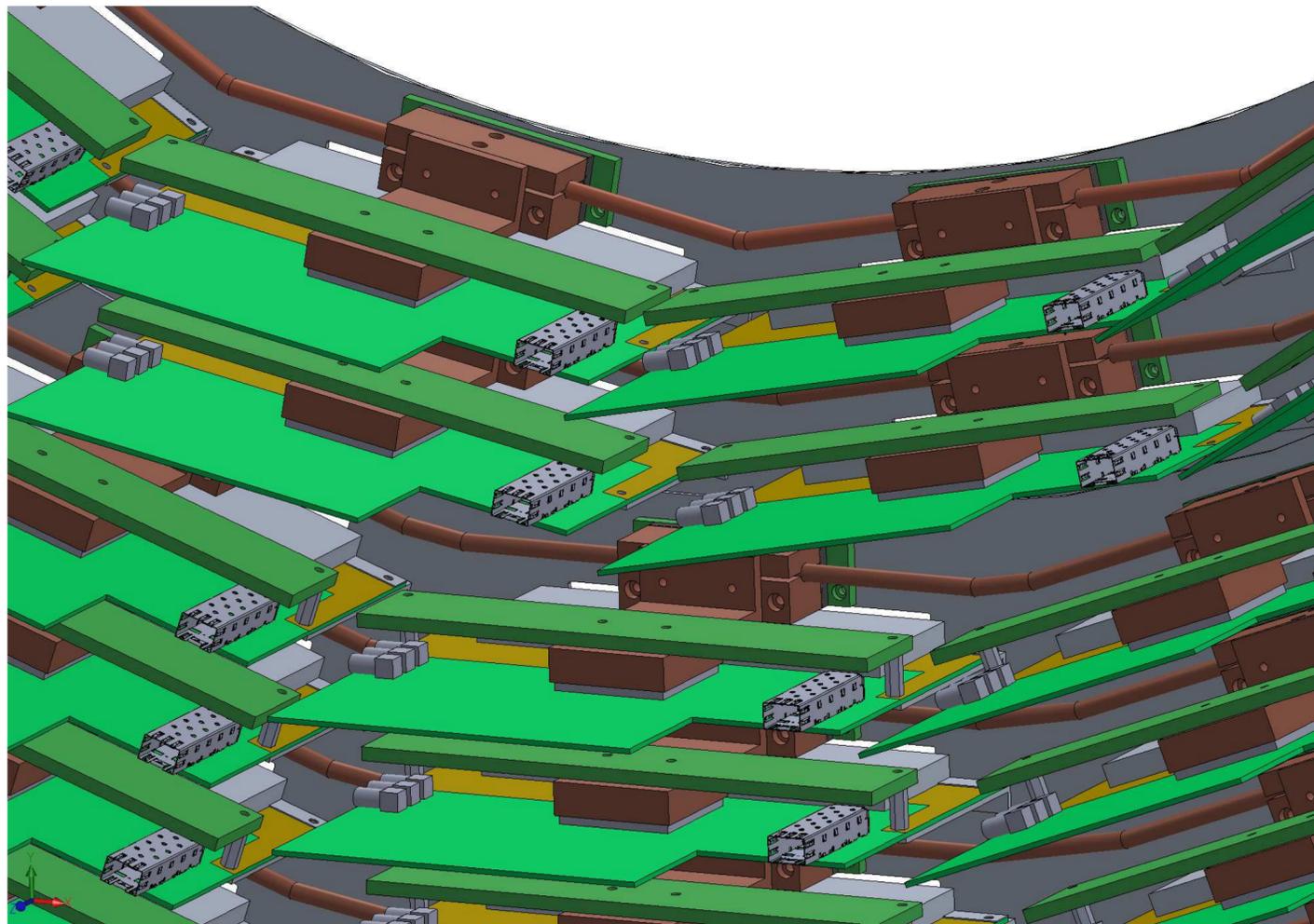
冷却パーツの改良により解決

⇒ 我々もデザインを更新する必要が出てきた



水冷デザインの改良

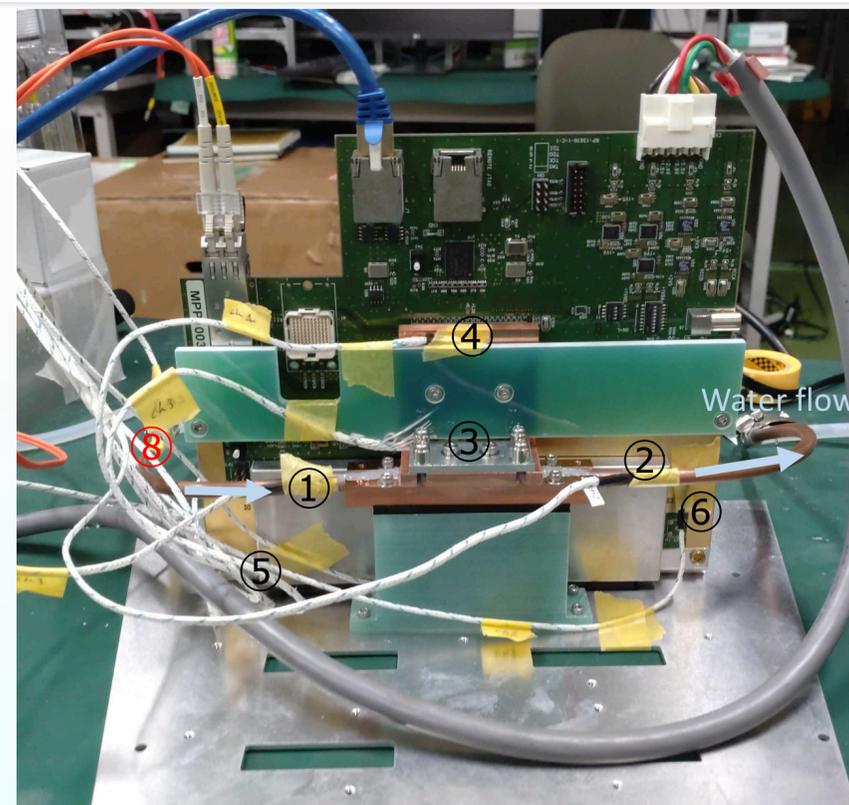
- RECBEのFPGAを直接冷却するように銅ブロックをFPGAに密着させる構造
- 水冷配管を残したまま、RECBEの交換が可能な構造を要求



初期案をベースに試作機を作り、性能評価と組み立ての試験を行った。

電子回路の水冷システム試作機

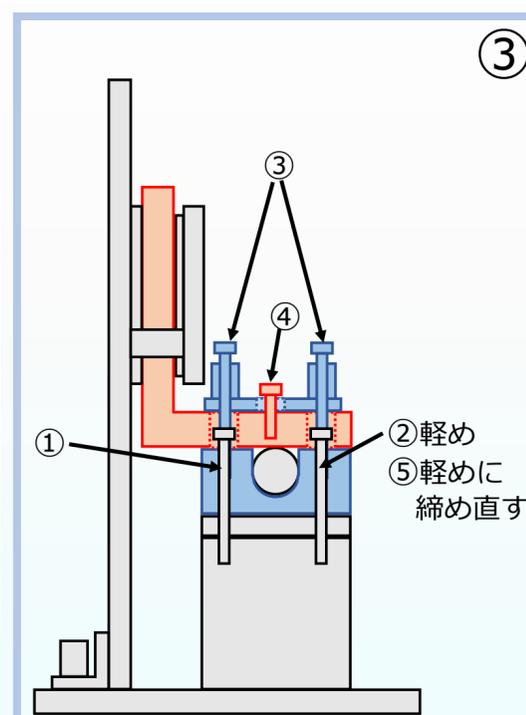
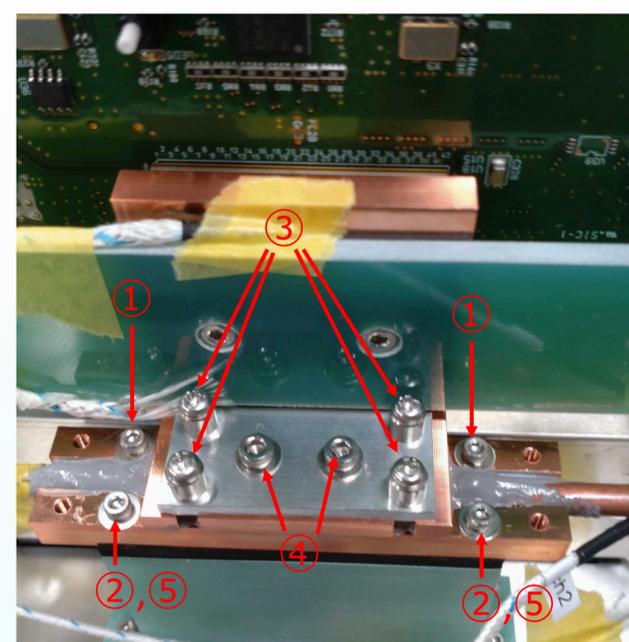
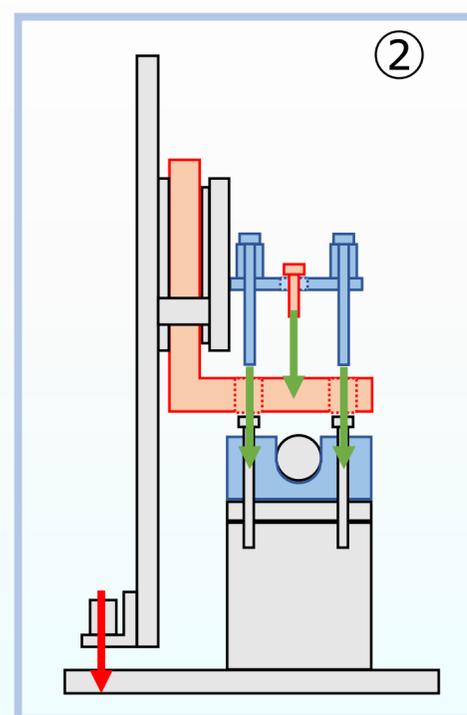
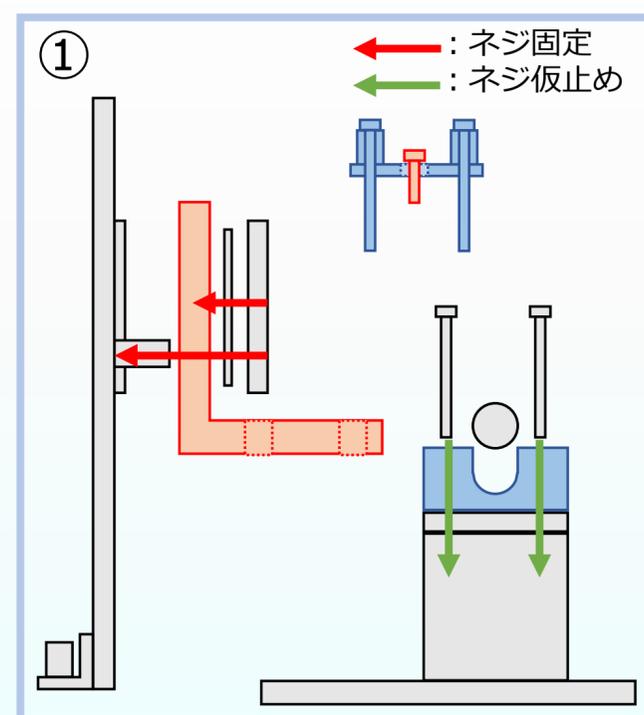
- ・ 試作機で水冷能力と組み立ての試験@大阪
- ・ 実際にチラーで冷水を流して温度測定を実施
RECBE稼働させた状態で、流量や水温を変え、温度を測定
- ・ 試作三号機で、十分な冷却性能を確保した上で、組み立て上の問題も解決 -> 量産へ



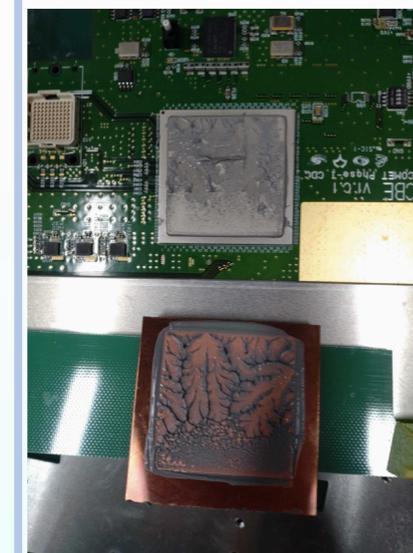
Took temperature data

- ① Water pipe (input)
 - ② Water pipe (output)
 - ③ Copper block on the FPGA (lower)
 - ④ Copper block on the FPGA (upper)
 - ⑤ ASD (in the shield)
 - ⑥ Board
 - ⑧ Water pipe (input upstream)
- ⑦ temperature inside the box
 ・ temperature of the FPGA

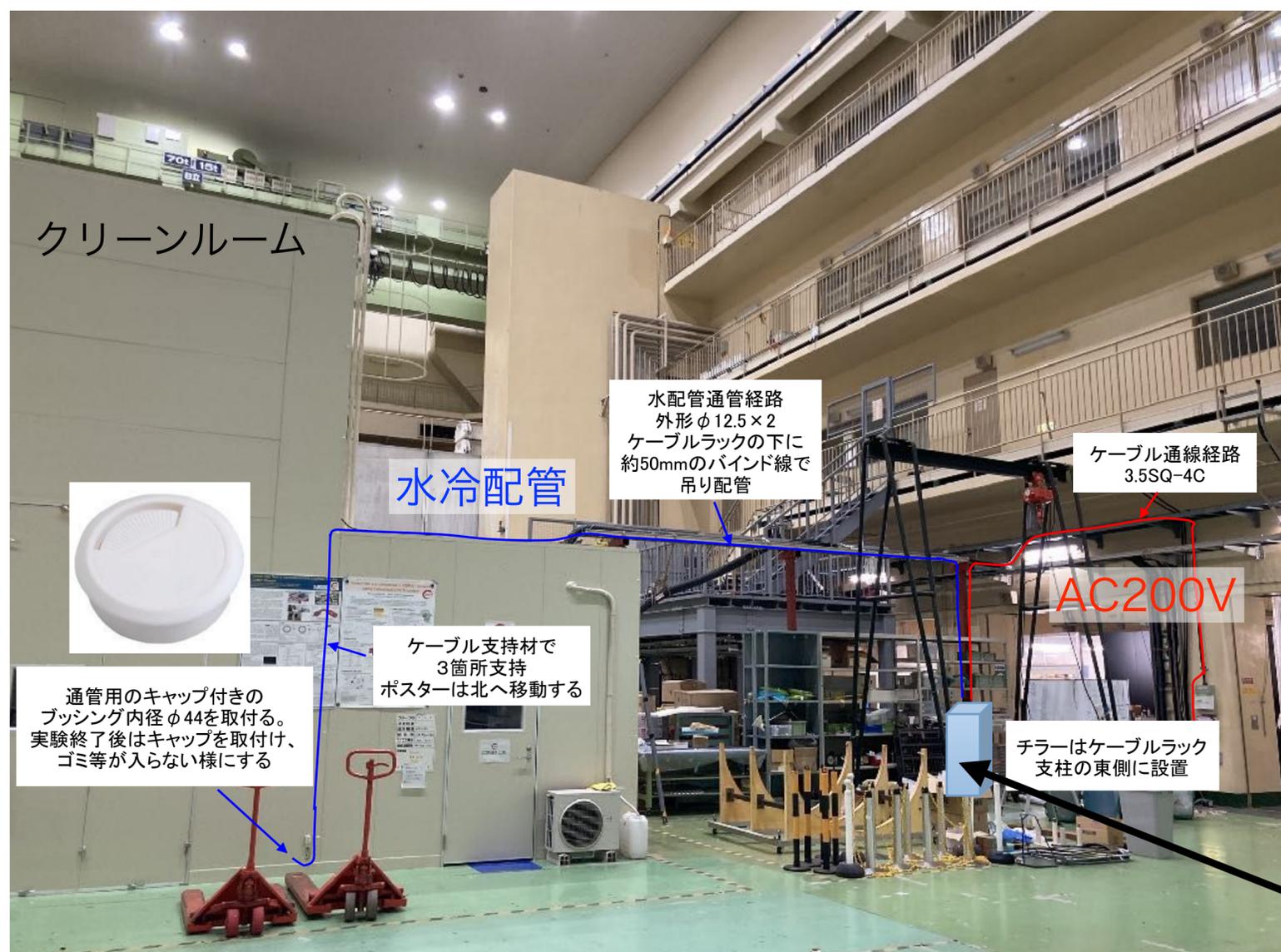
Test at water temperature
 30°C, 27°C, 25°C
 Water flow : 0.7 & 0.9L/min



Checking the grease after the cooling test



水冷試験@KEK富士B4



- 水冷チラー(デモ機をレンタル)で冷水を循環
- 約3 m の高低差有り (循環ポンプの試験)
- クリーンルーム内で10系統に冷水を分配し流量調整
- 水温は室温以上で運転(結露防止)



ORION 小型水槽付きチラー (RKS-1503J)

- 5.3 kW 冷却能 (空冷式)
- 水冷温度 : 5~40 °C (精度 : ± 0.1 °C)
- 最大流量 : 18 L/min (揚程 : 60 m)

KEKつくばキャンパス富士実験棟B4フロア

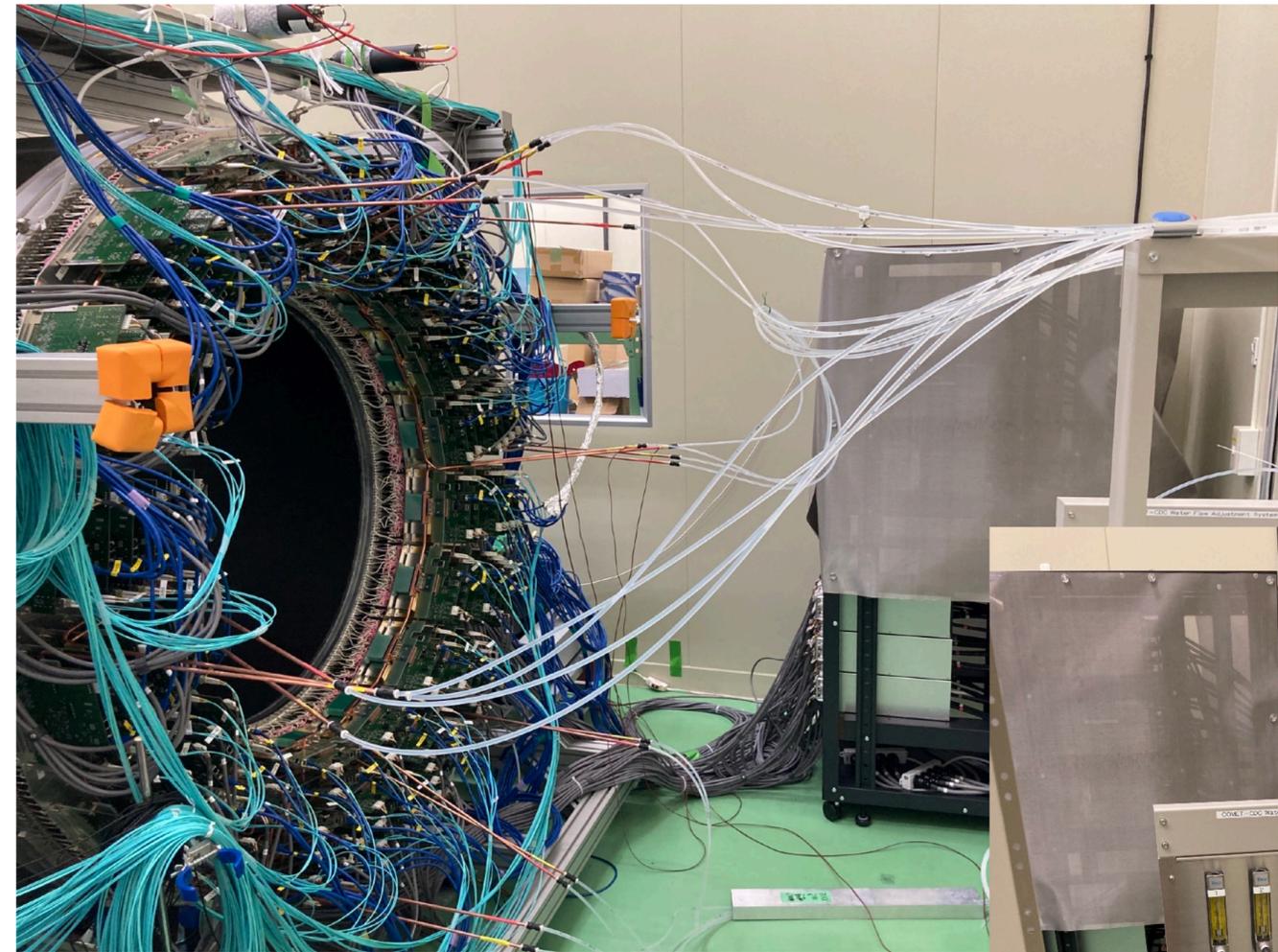
CDC水冷システムの導入



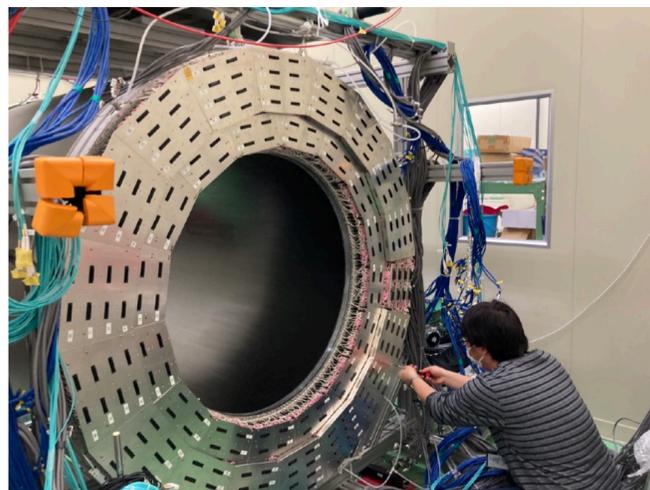
水冷チラー



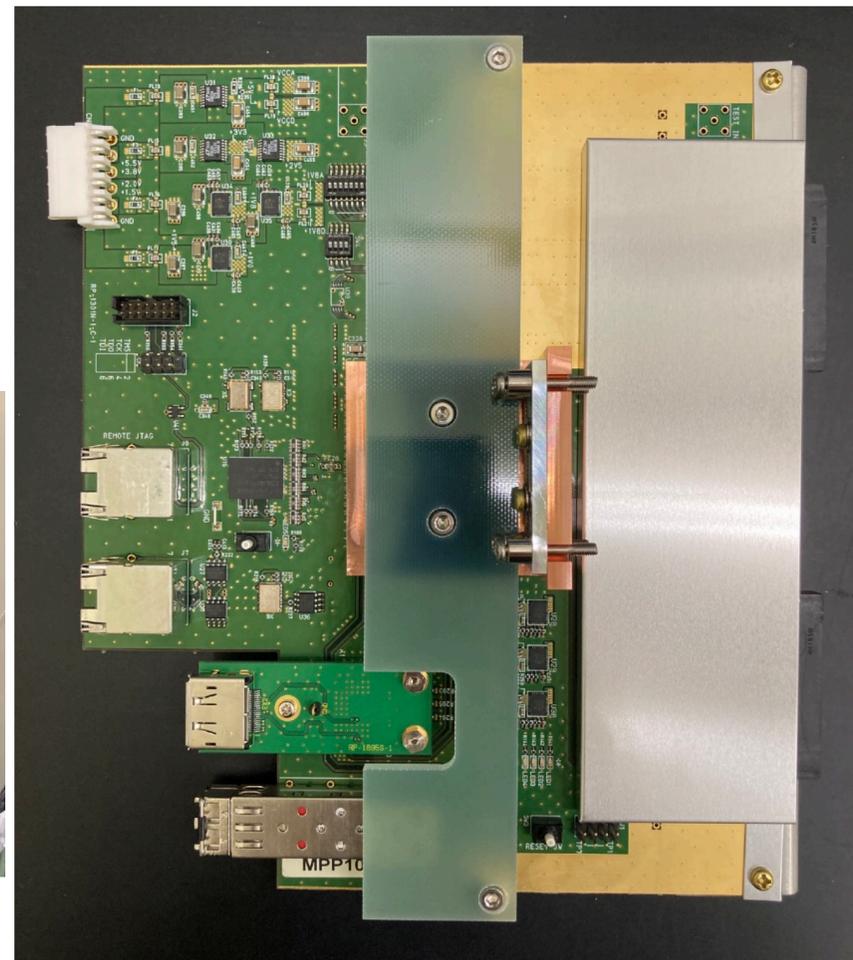
水冷銅パイプの固定治具



CDC + 水冷システム



導入前の解体



RECBE + 水冷パーツ

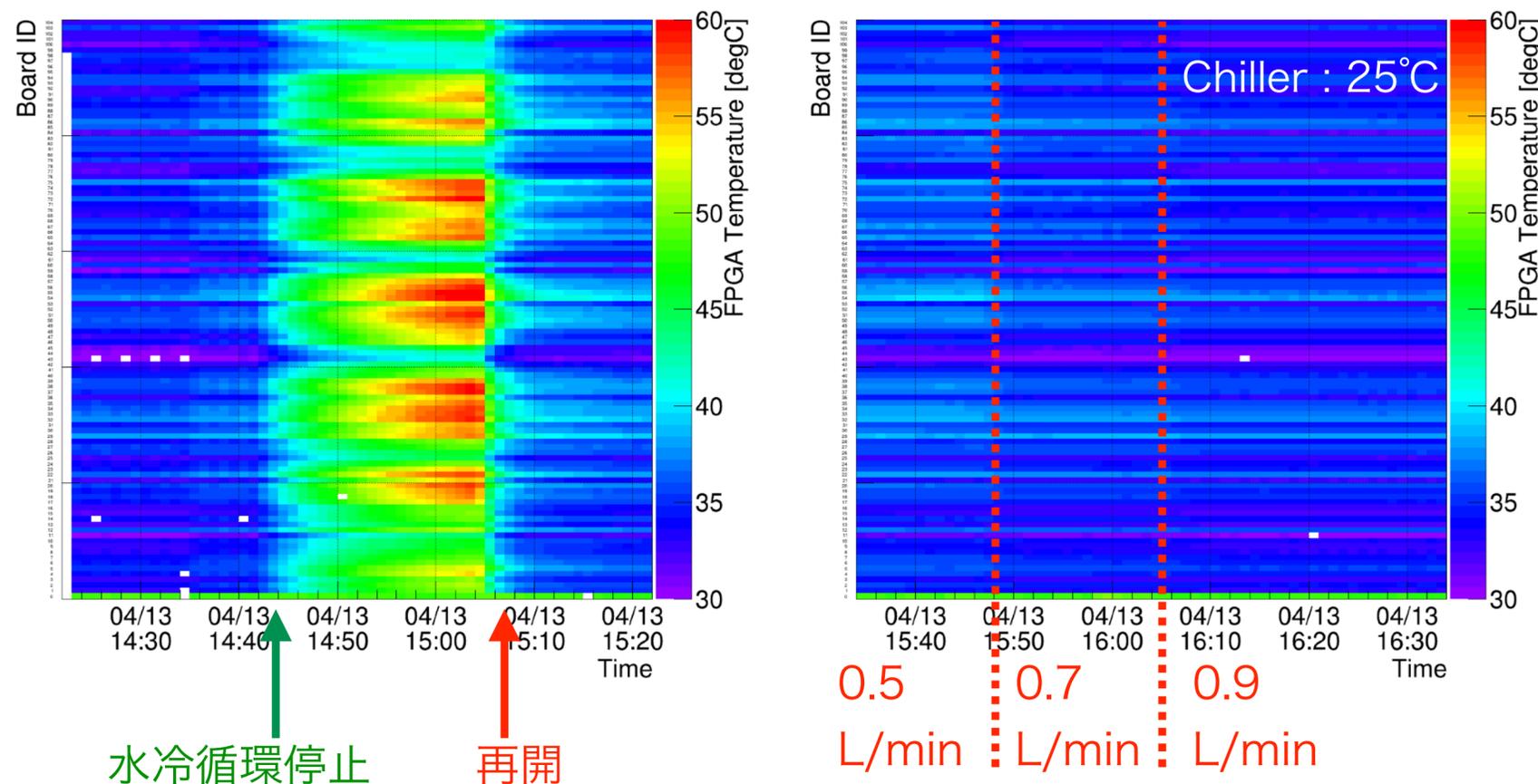
- 脱落防止対策済のボルト7本
- 水冷銅パイプを外さずにRECBE着脱が可能



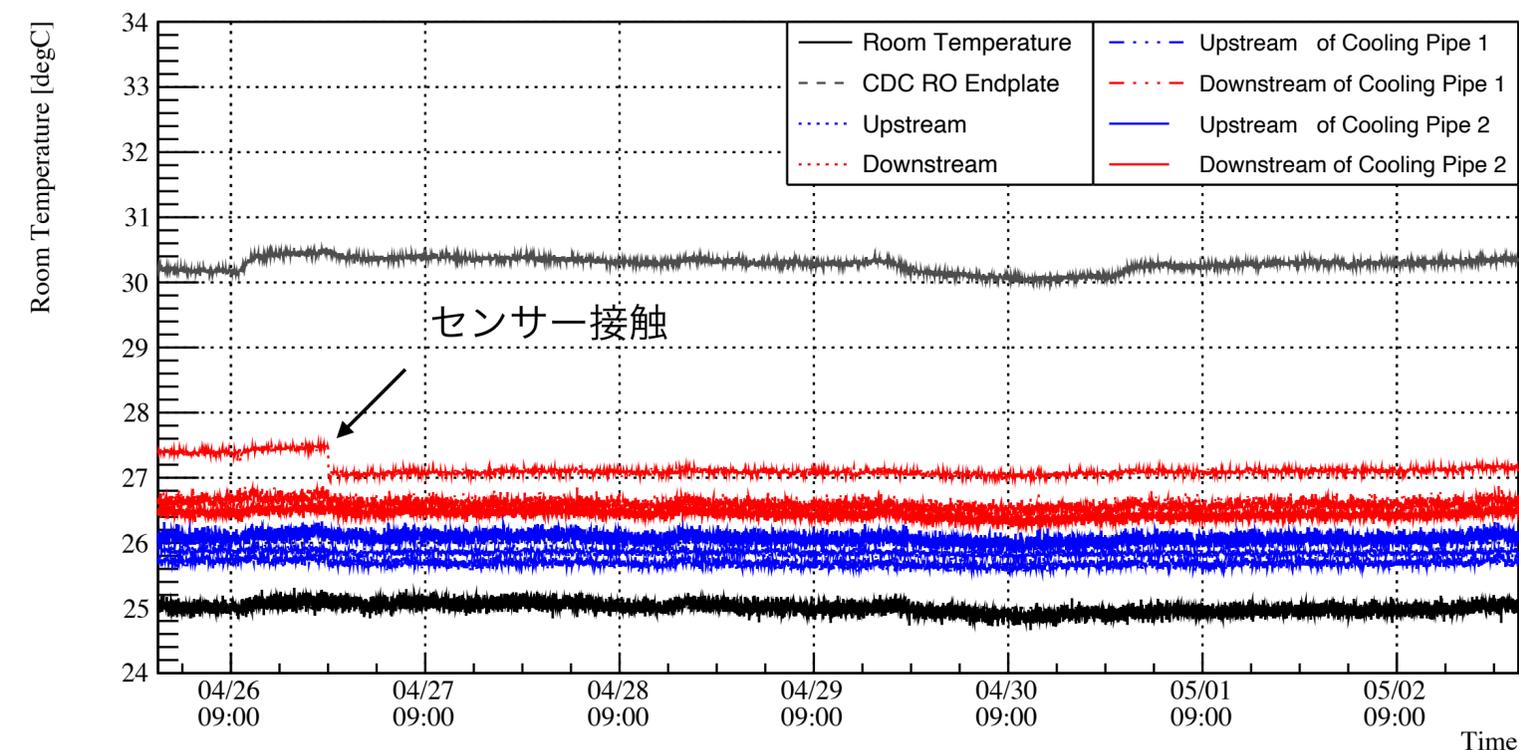
冷却水分配&流量調整

水冷性能評価

RECBEのFPGA温度の推移



1週間の温度推移



- 水冷循環を開始後すぐに冷却効果が見えている (50-60 °C → 40 °C以下)
- 流量依存性や水温依存性も確認
- 長期安定性試験を実施 → 1ヶ月以上の安定稼働を確認。
- 水冷性能は要求を十分満たしている
- 水冷システムのモニター類の整備と冷却水の放射化(見積りによるとかなり十分少ない)対策が必要

J-PARCへの輸送

つくばCでのCOMET-CDC 評価試験は、ほぼ完了

→ J-PARC(東海村)への輸送 (2022年9月14日)、約 80 kmの輸送

1. 富士B4クリーンルーム → 輸送用トラック

現在のCDC回転架台から輸送用架台に載せ替えて、搬入口の縦坑から
地上の輸送用トラック(エアサス)へ移動

アルミニウムバッグをつなぎ、輸送中の内圧の変動を吸収

2. つくば → 東海 80 kmの大移動

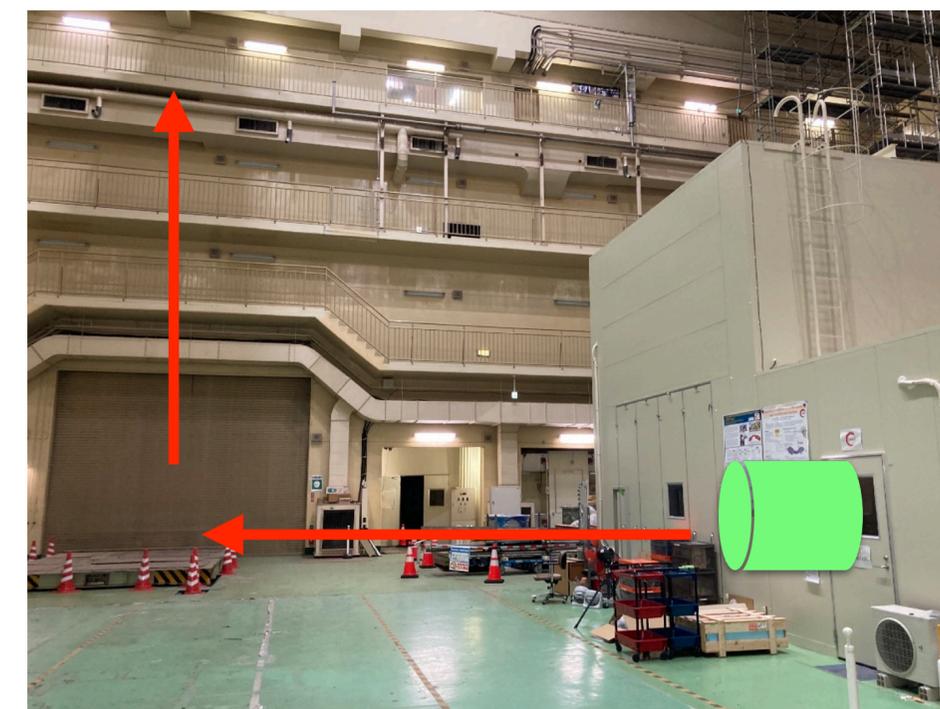
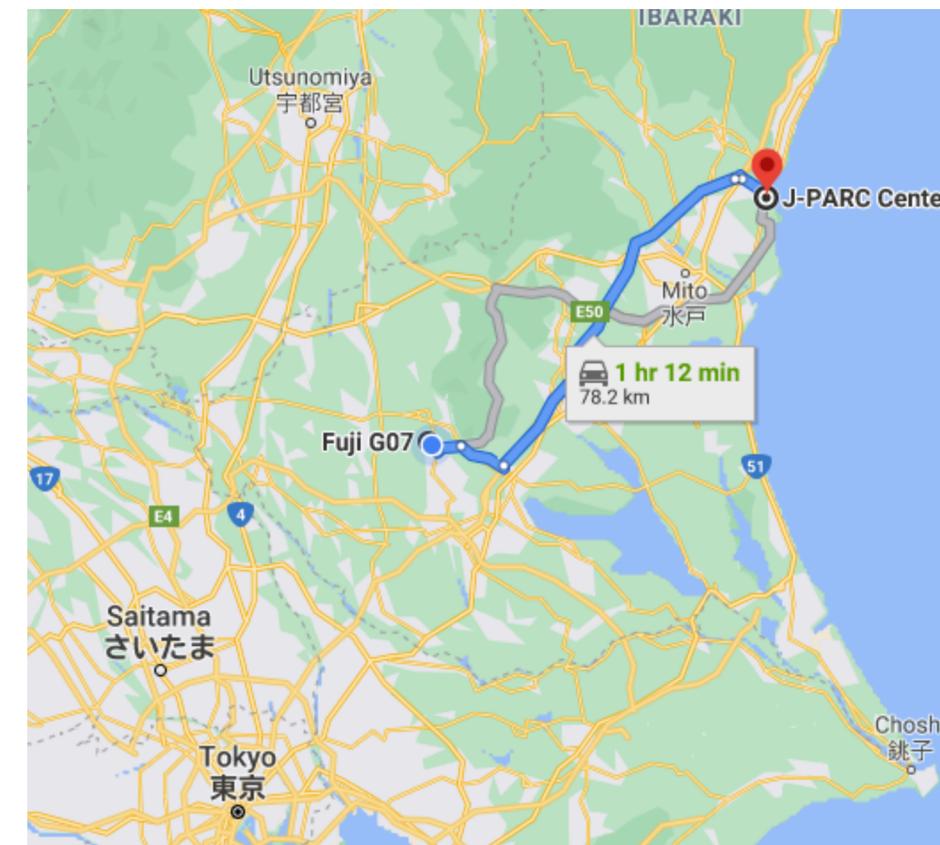
エアサス車 + ユニック車 + 10トントラック 1台 (関連機器の運搬)

午前中につくばで搬出、午後は東海へ搬入

3. 輸送用トラック → ハドロンホール実験準備棟2Fテント

再度、クレーンで回転架台へCDCを載せ替えてCOMET実験テントに搬入

CDC再稼働に向けて準備開始



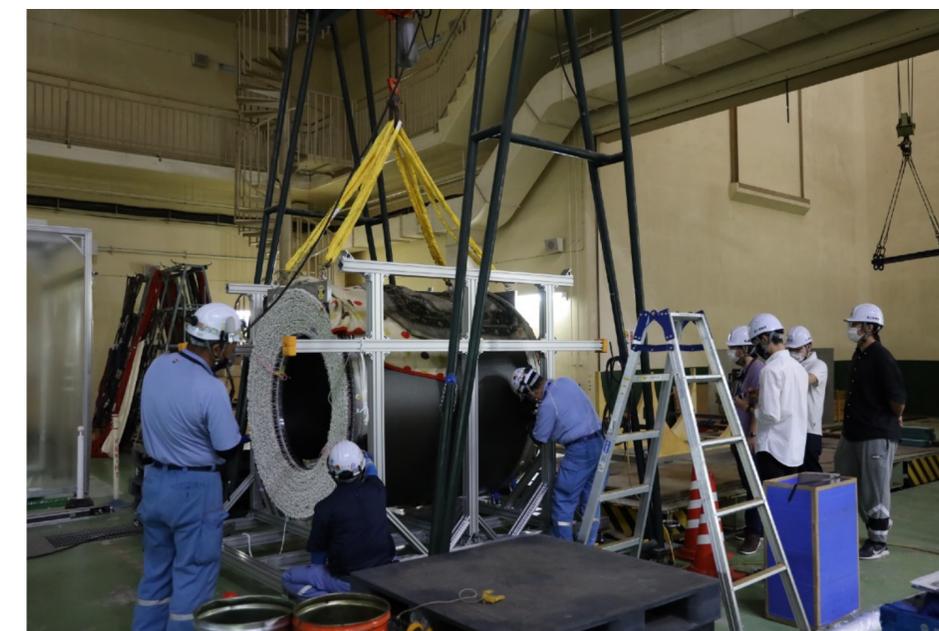
つくばからの搬出



関連物品の梱包



クリーンルーム内のCDC移動開始前



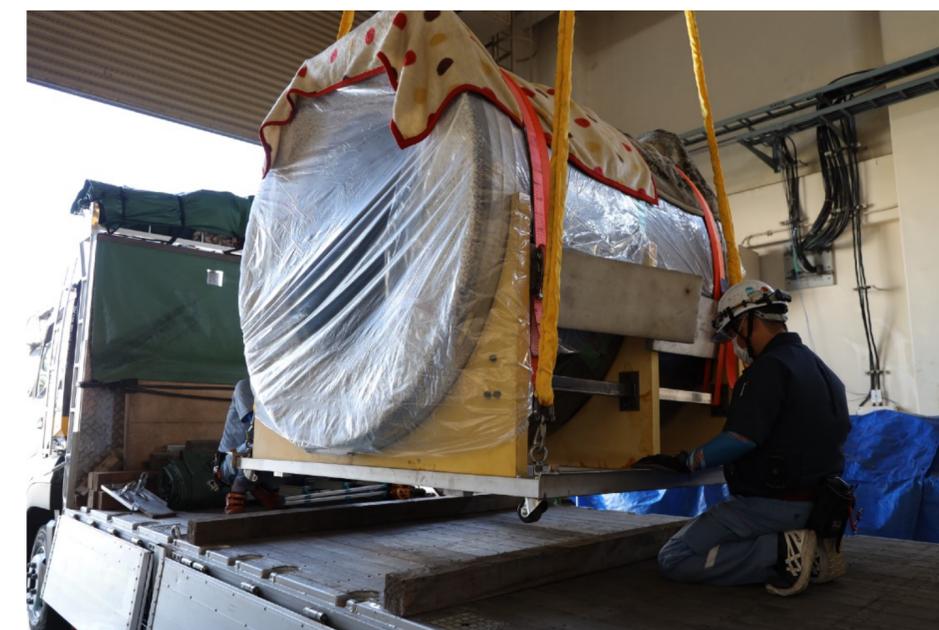
輸送用架台への載せ替え準備



輸送用架台への載せ替え



地上への吊り上げ(縦坑シャフト)



エアサス車への搭載

J-PARCに到着



J-PARCハドロン実験施設前に到着



実験用回転架台の積み下ろし



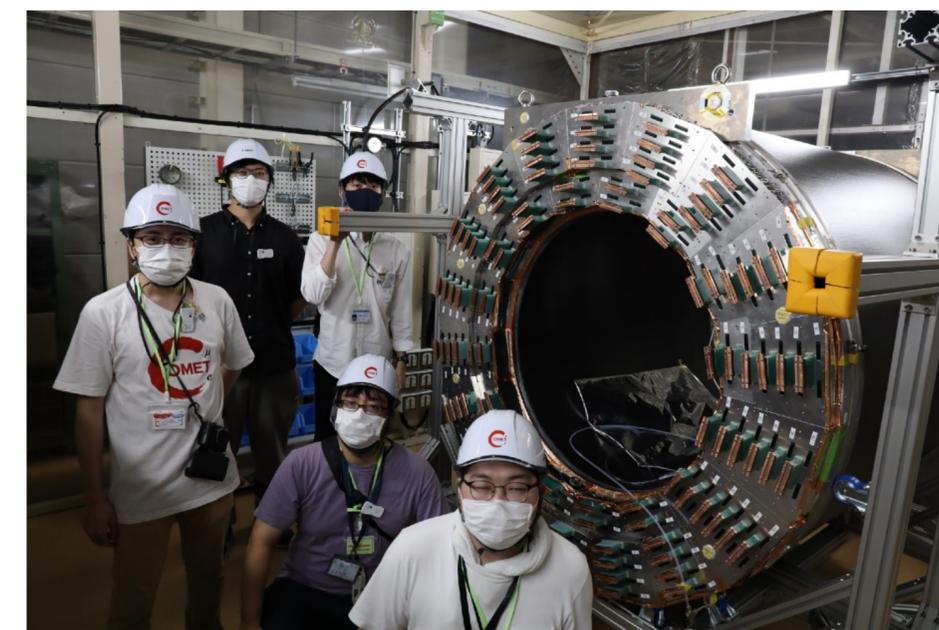
CDC検出器の積み下ろし



再度、回転架台へ載せ替え



テント内へ物品の搬入

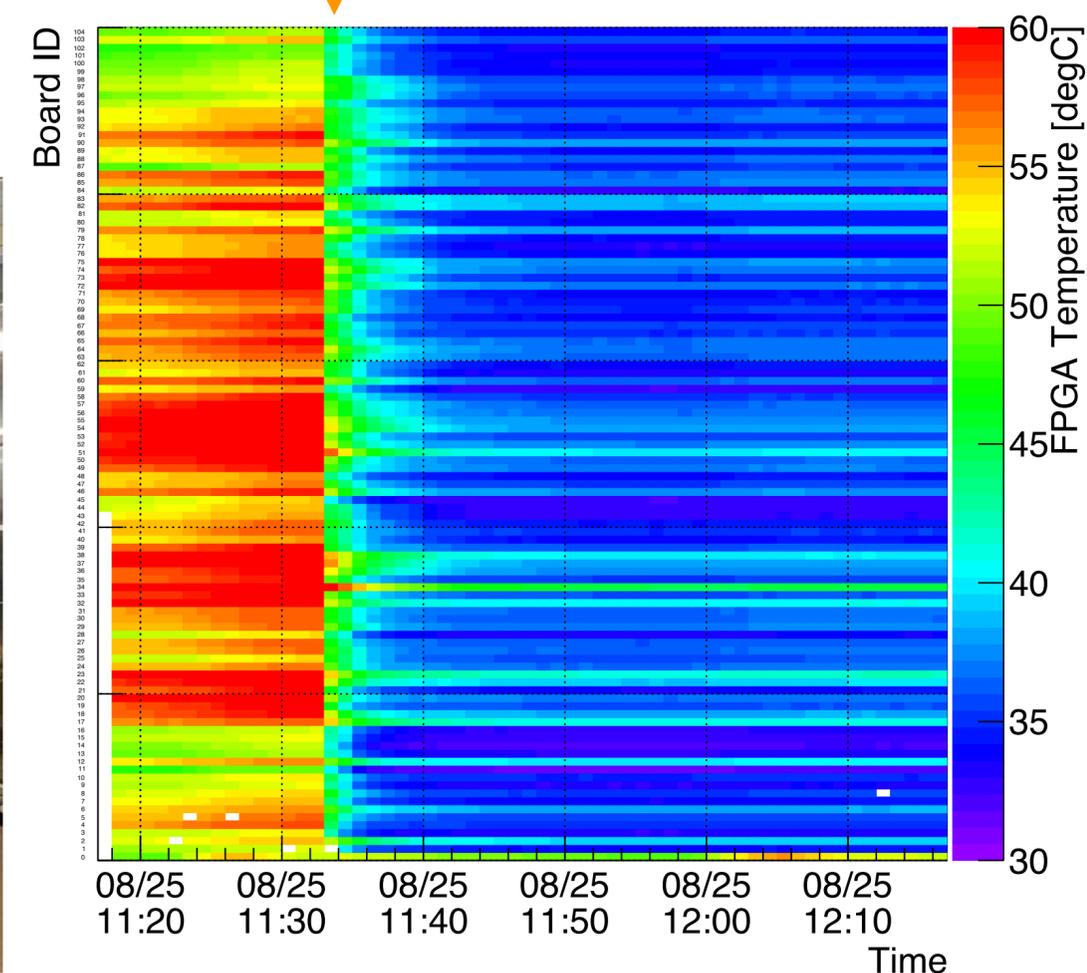


ミッションコンプリート！

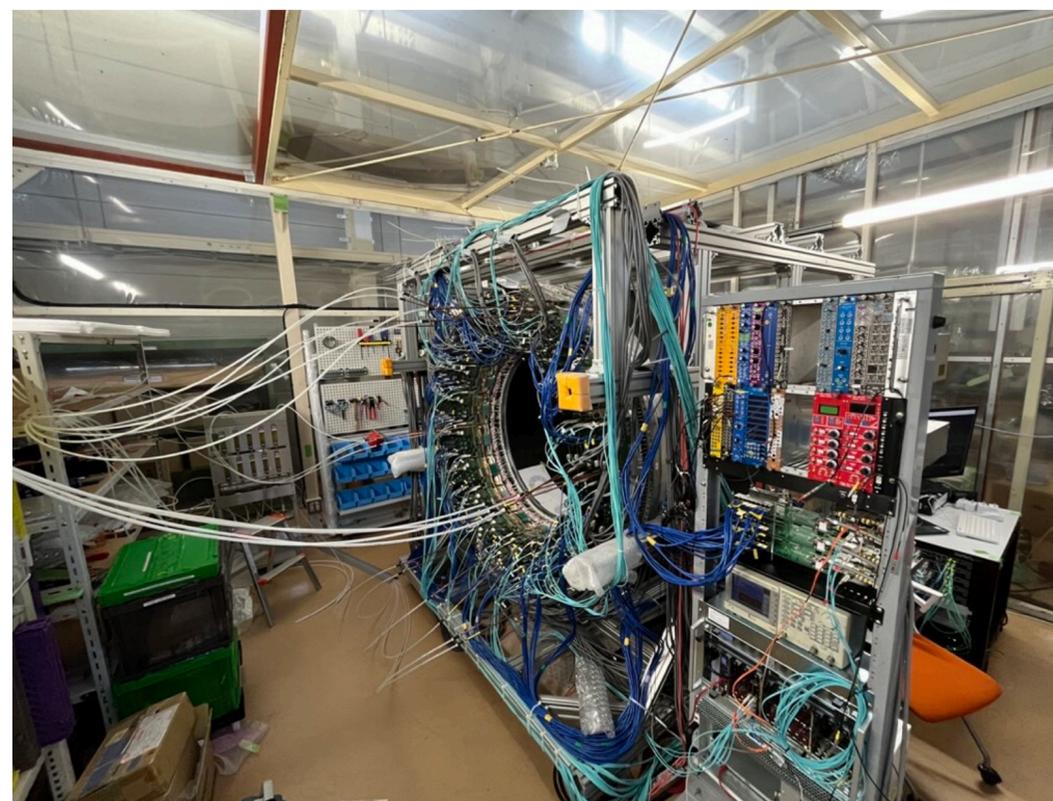
J-PARCでのCDC再稼働

- ・まずはインフラ(電気,ガスなど)整備
- ・ワイヤーのチェック -> 問題なし! 輸送でのダメージは現時点でなし
- ・宇宙線試験用のトリガーカウンターのセットアップ
- ・読み出し電子回路RECBE 104枚の設置、ケーブル配線
- ・実機用水冷チラーを導入し、水冷システムの稼働
- ・現在、DAQの再立ち上げ中。DAQの改良、開発も進行中。

水冷チラーON



RECBE設置作業中



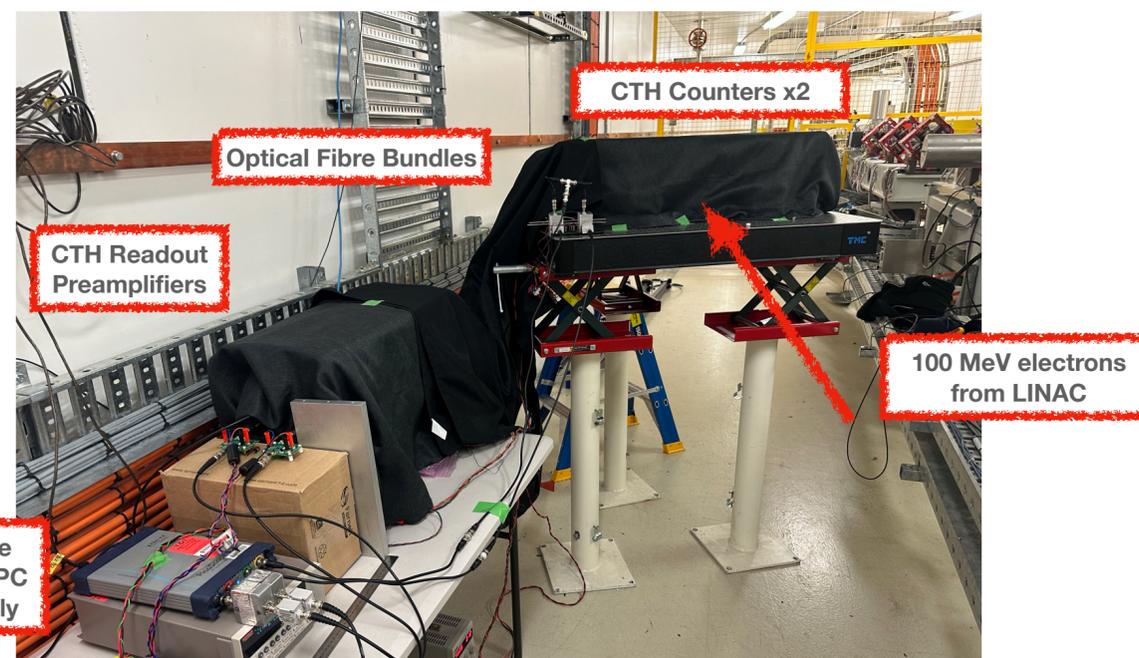
現在の様子

水冷システム稼働時のFPGA温度

CTH の準備状況



試作モジュールの制作



100 MeV e^- ビーム試験 @ 豪

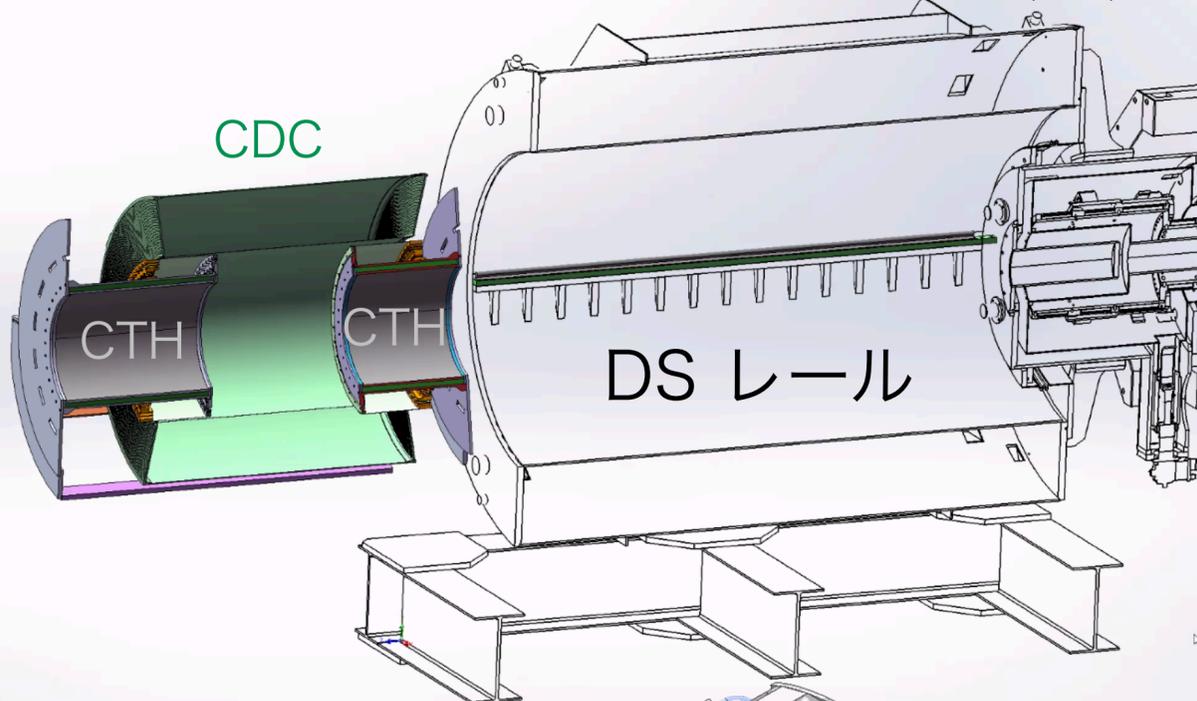


実機用プラスチックシンチレータ

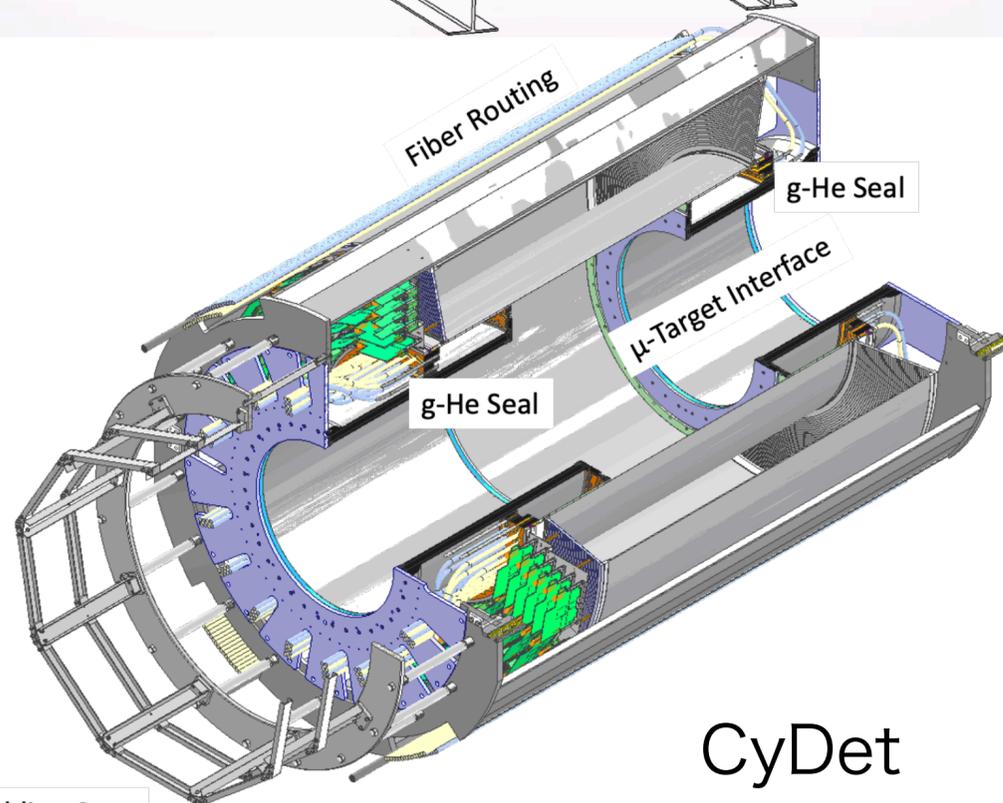
- 検出器デザイン(プラシン+ファイバー+SiPM)はほぼ決定
- ビーム試験を行い、カウンターとアンプの評価試験が完了@Monash
- SiPMの中性子による損傷を軽減するための冷却システムの設計、試作評価試験も継続中 @ 大阪/九州
- 試作機で $\pi/\mu/e$ ビーム試験 @ PSI 2023年11月
- 実機制作に向けて、シンチレータのQC(@九州大)を開始
- 支持機構やファイバーの取り回しなどの具体的な検討も進行中！

CyDet インストール機構

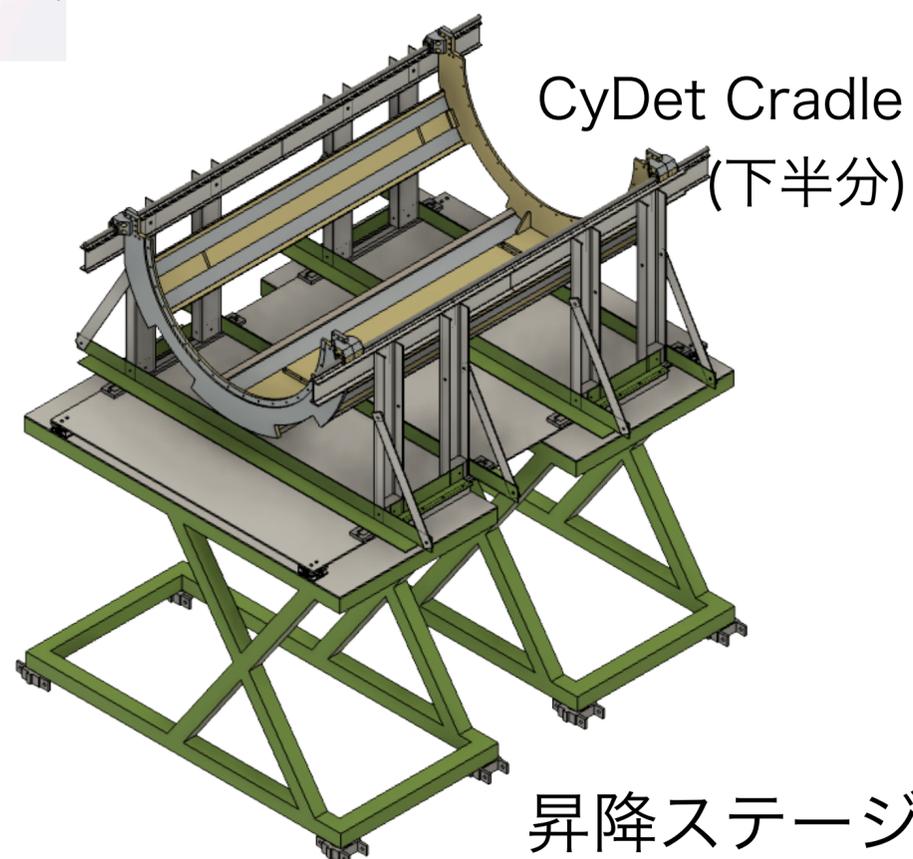
超電導検出器ソレノイド磁石(DS)



- DS内筒にインストール用のレール(igus DryLin)を設置
- CyDet Cradleと呼ぶ円筒形フレームにCDCとCTHを入れ、CyDet Cradleにはレールを掴むキャリッジ4箇所
- 概念設計から始めて、具体的な詳細設計へ
- 組み立て手順、配線取り回しなども検討を開始
- インストール時は、DSレール延長用の昇降ステージを使用
- 強度計算し、変形などの要求をクリア

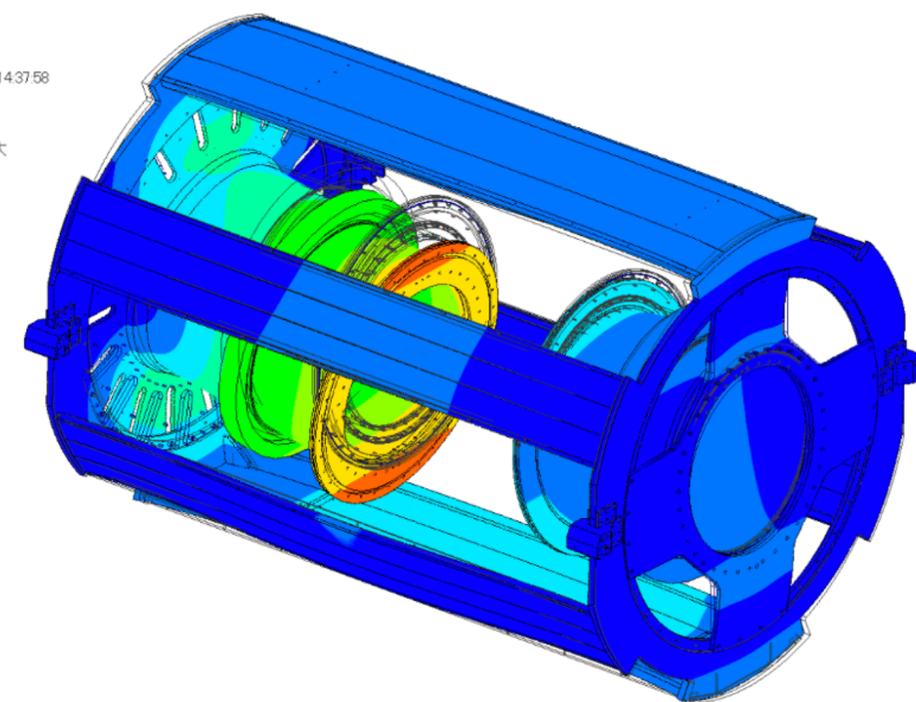
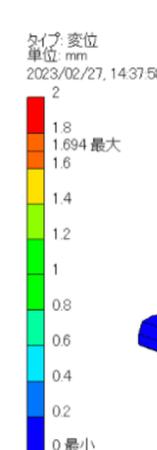


CyDet



CyDet Cradle
(下半分)

昇降ステージ



CTH組み込み時の強度計算

まとめ

- COMET実験は、標準理論で強く抑制されている μ - e 転換過程探索実験@J-PARC
- COMET Phase-I 開始に向けて鋭意準備中
 - 目標感度：S.E.S. 3×10^{-15} (AI) \rightarrow 現在の制限を100倍更新
- 大強度陽子ビームによる高い放射線環境で稼働する計測システムが必要
 - 照射試験を行なって、耐性の高いパーツを使用して電子回路制作
 - ソフトエラーの評価、を低減する試み \rightarrow DAQ効率維持を狙う
- CyDet システムは、実験開始に向けて鋭意準備中
 - CDC検出器本体はJ-PARCへの輸送が完了し、再稼働した
 - CDC読み出し・トリガーシステムもほぼハードは準備完了し、全数試験中(予定)
 - CTH検出器は実機建設に向けて準備中
- 磁石/検出器/ケーブリングなど、測定システム統合/運用
 - 設計や治具製造等が着々と進行中
 - 統合による干渉や弊害がないか、グループ内での議論を継続中

