



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)

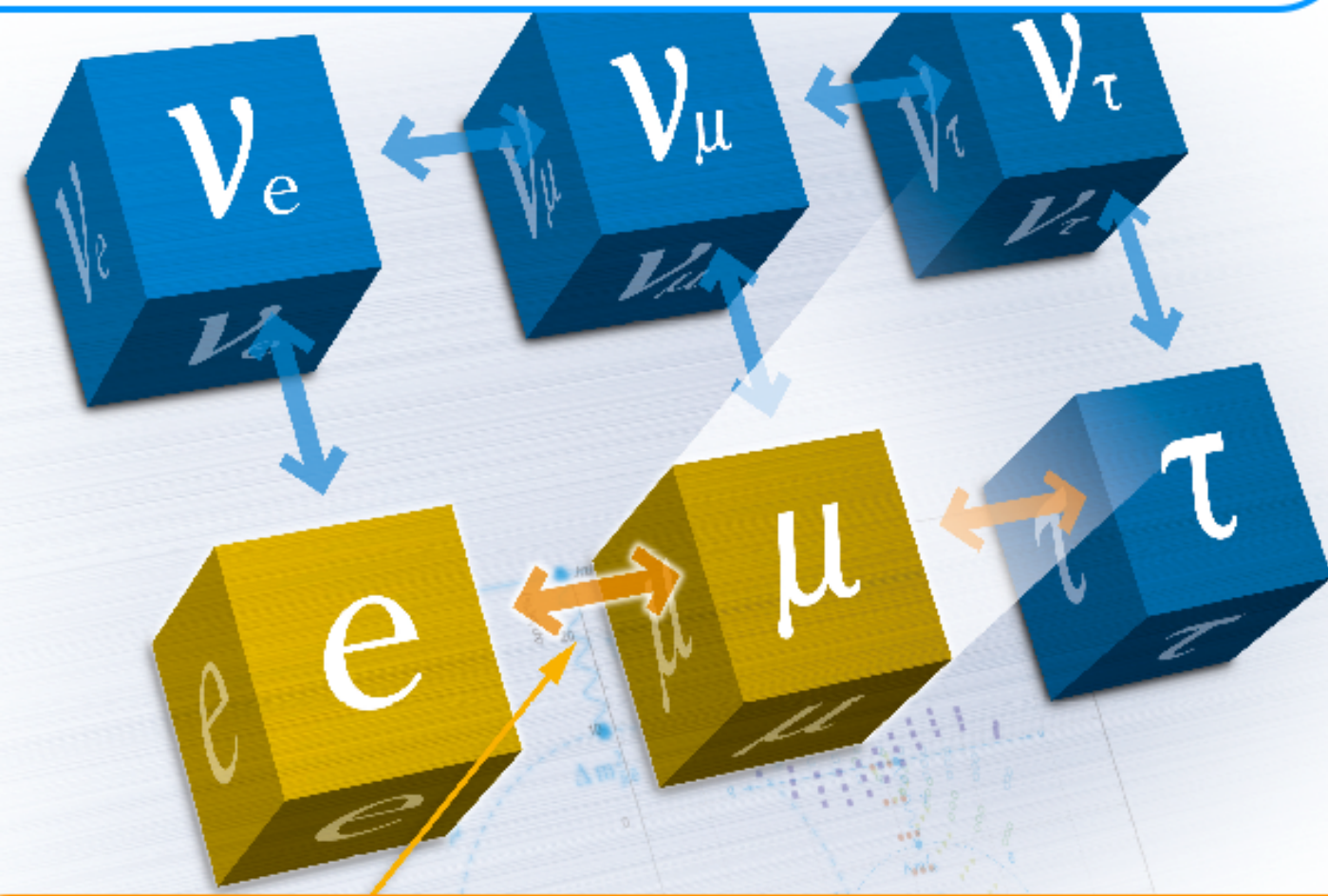
2014年から毎回1~2講演。主に読み出し、トリガー、放射線対策に関する内容

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

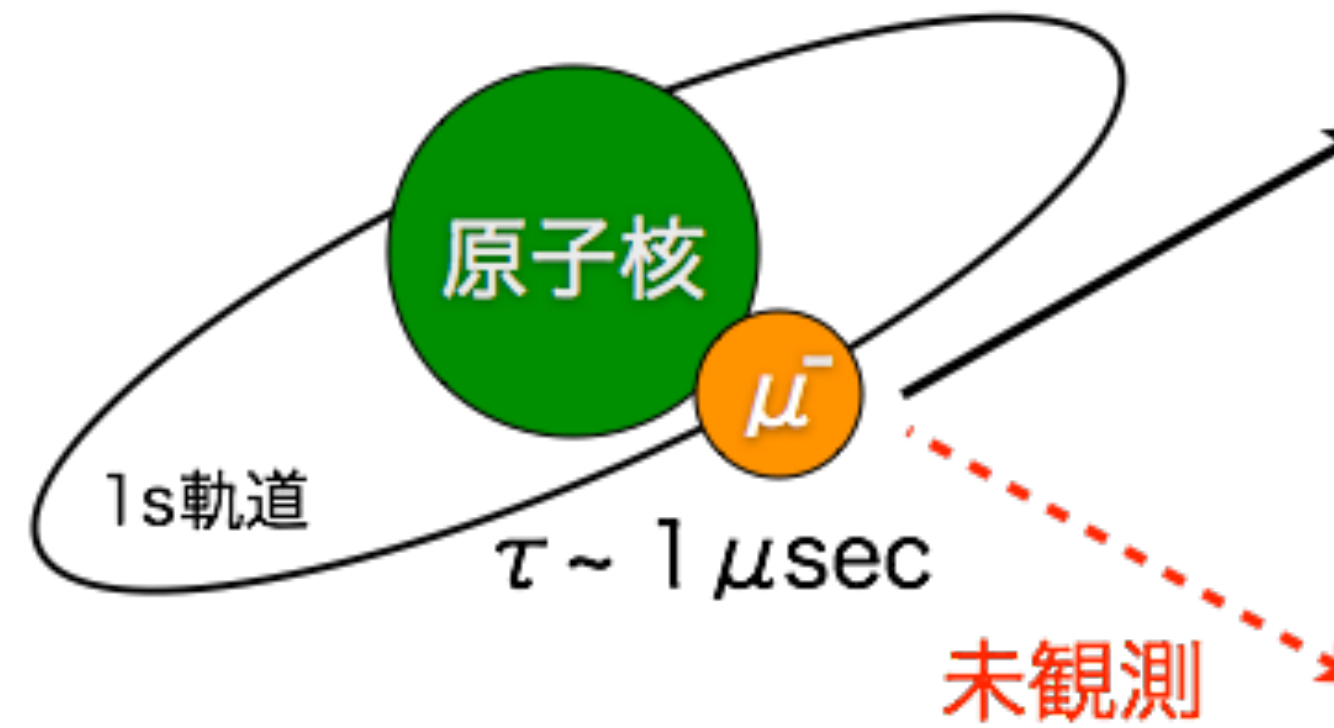
未発見の $\mu - e$ 転換過程

Neutrino Flavor Violation is observed !



charged Lepton Flavor Violation !? (cLFV)

ミュオン原子



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:

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

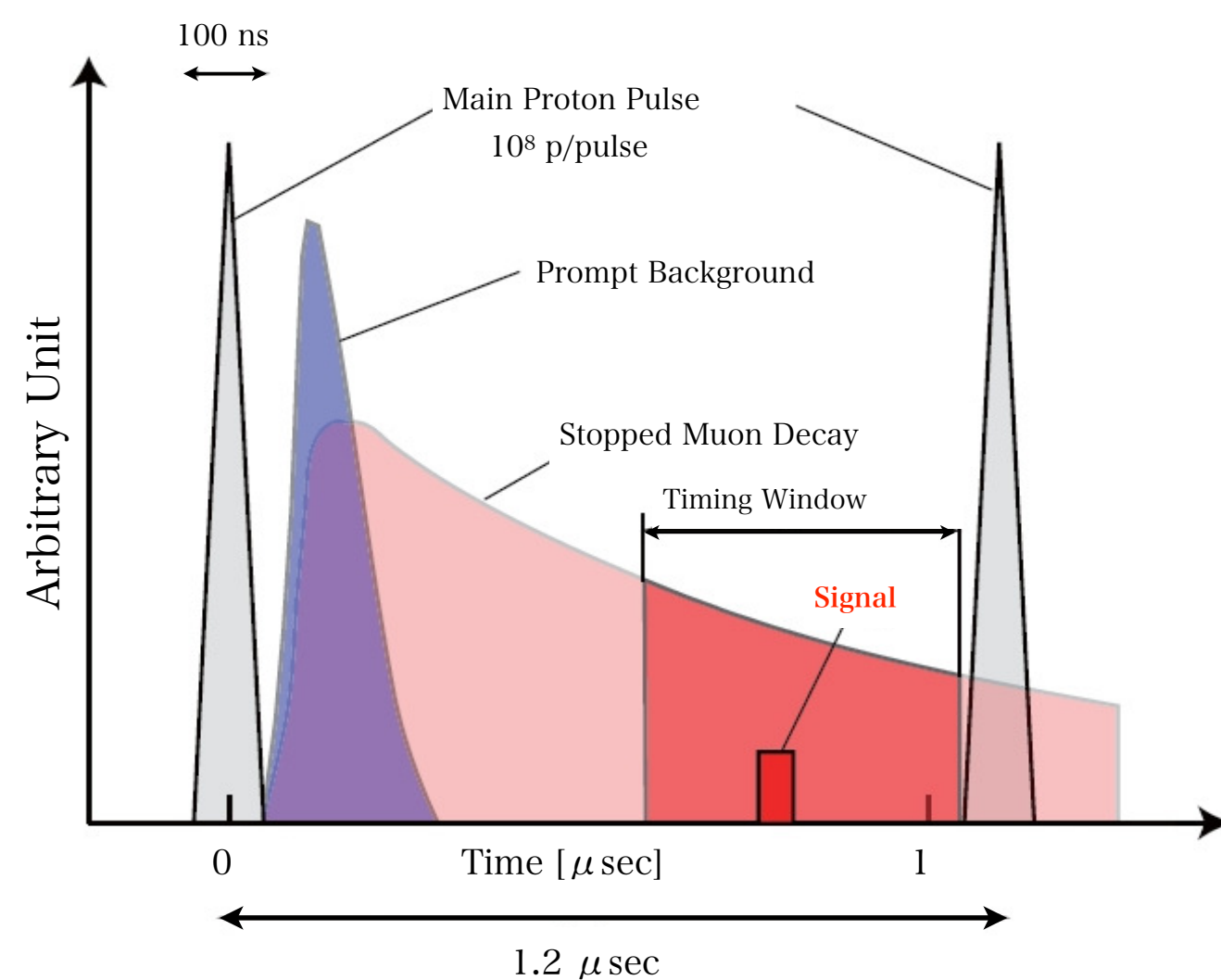
- 標準模型では強く抑制されているcLFV過程
- 超稀崩壊過程でこれまで未発見
- 見つければ新物理を示唆
- SINDRUM IIによる上限値 (2006年)

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

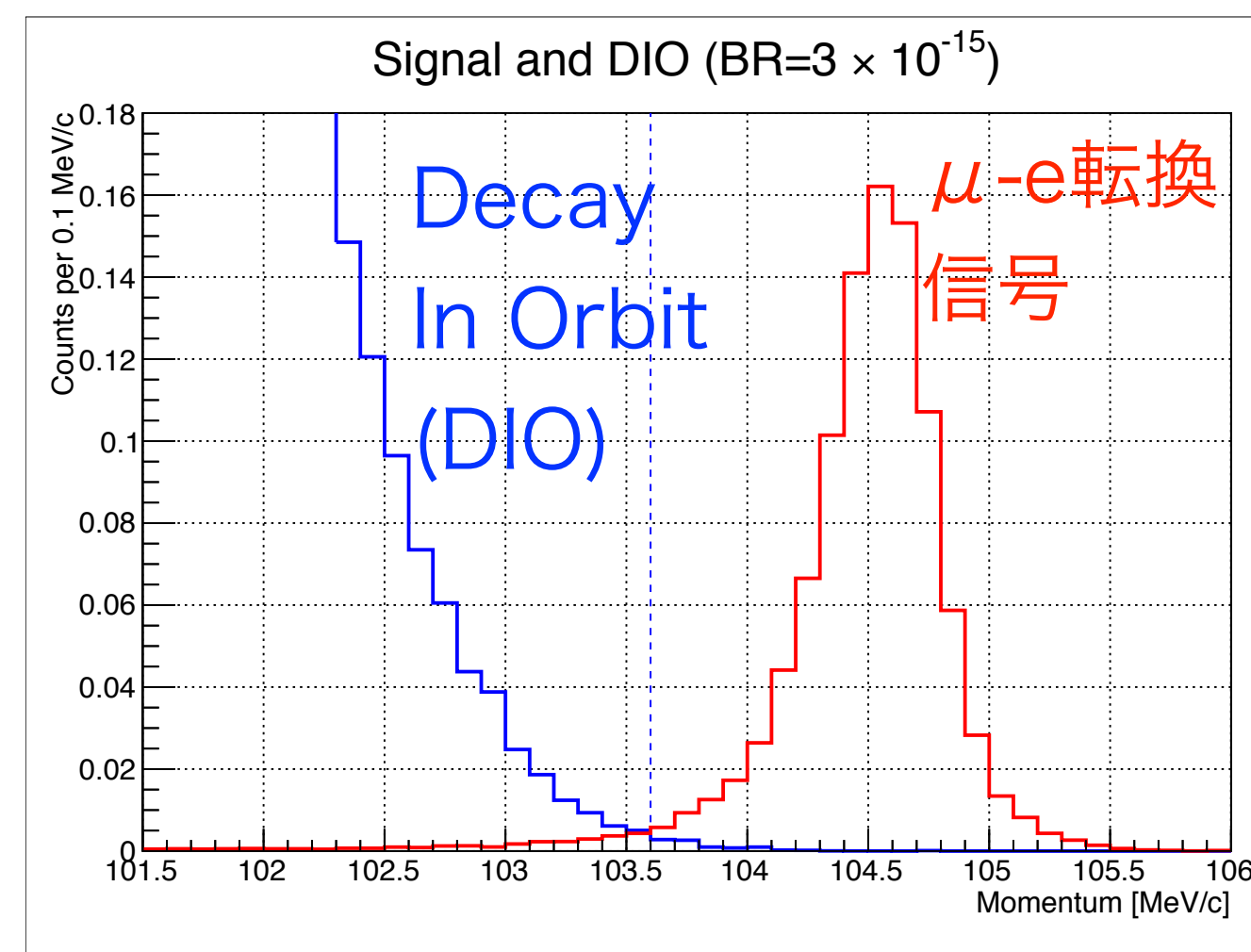
1980年台の実験がいまだに最新結果。これを更新して、より高感度で探索をしたい → COMET

COMET実験

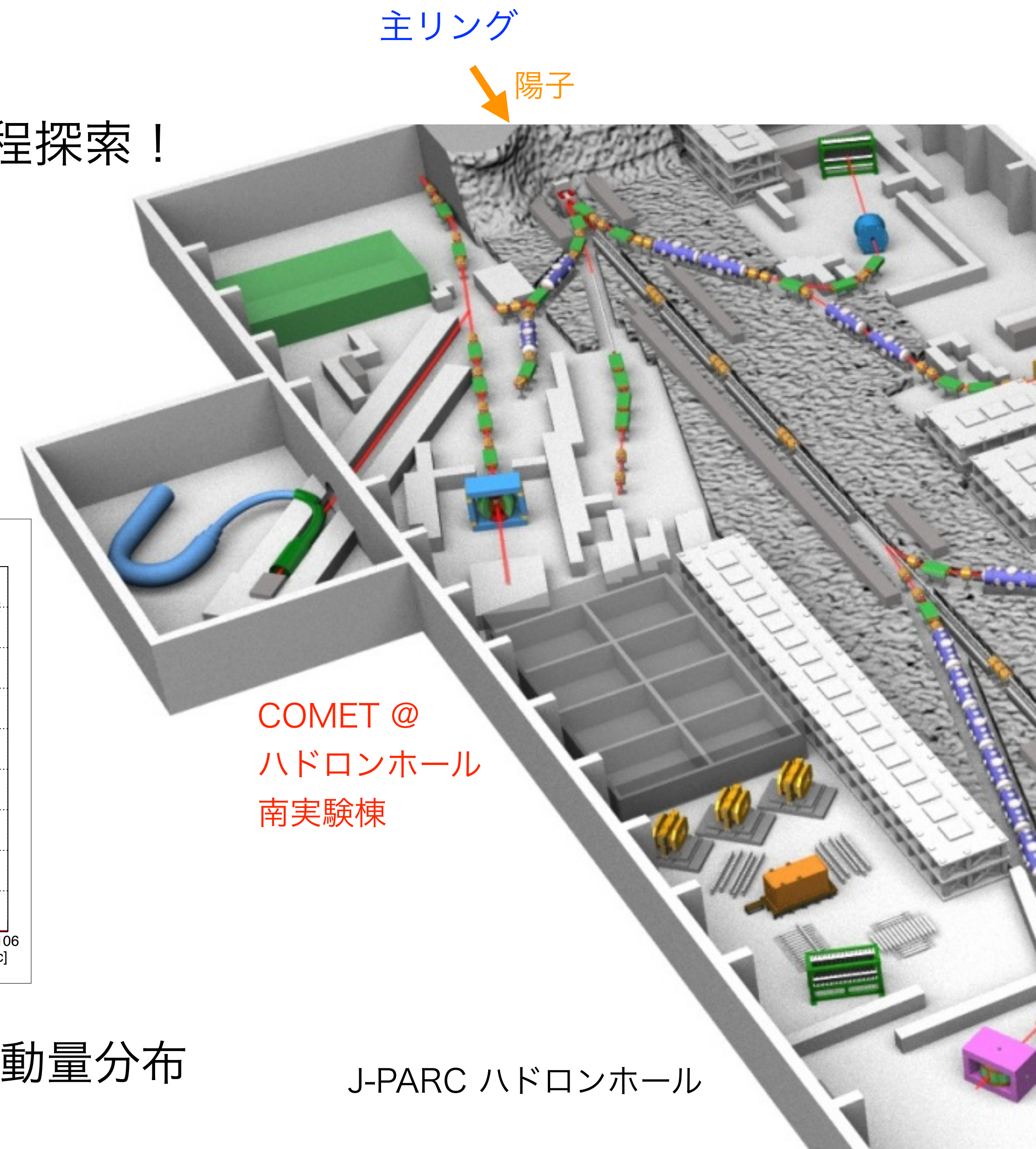
- 東海村 J-PARC E21実験 @ ハドロンホール南実験棟
- 大強度陽子ビームを用いて、世界最高感度で μ -e転換過程探索！
- パルス化 大強度ミュオンビーム
- 高運動量分解能の検出器で信号探索
- SINDRUM-IIの最新結果を10,000倍 更新したい
→ Phase-I / Phase-II の段階的アプローチ



時間窓とバンチ構造

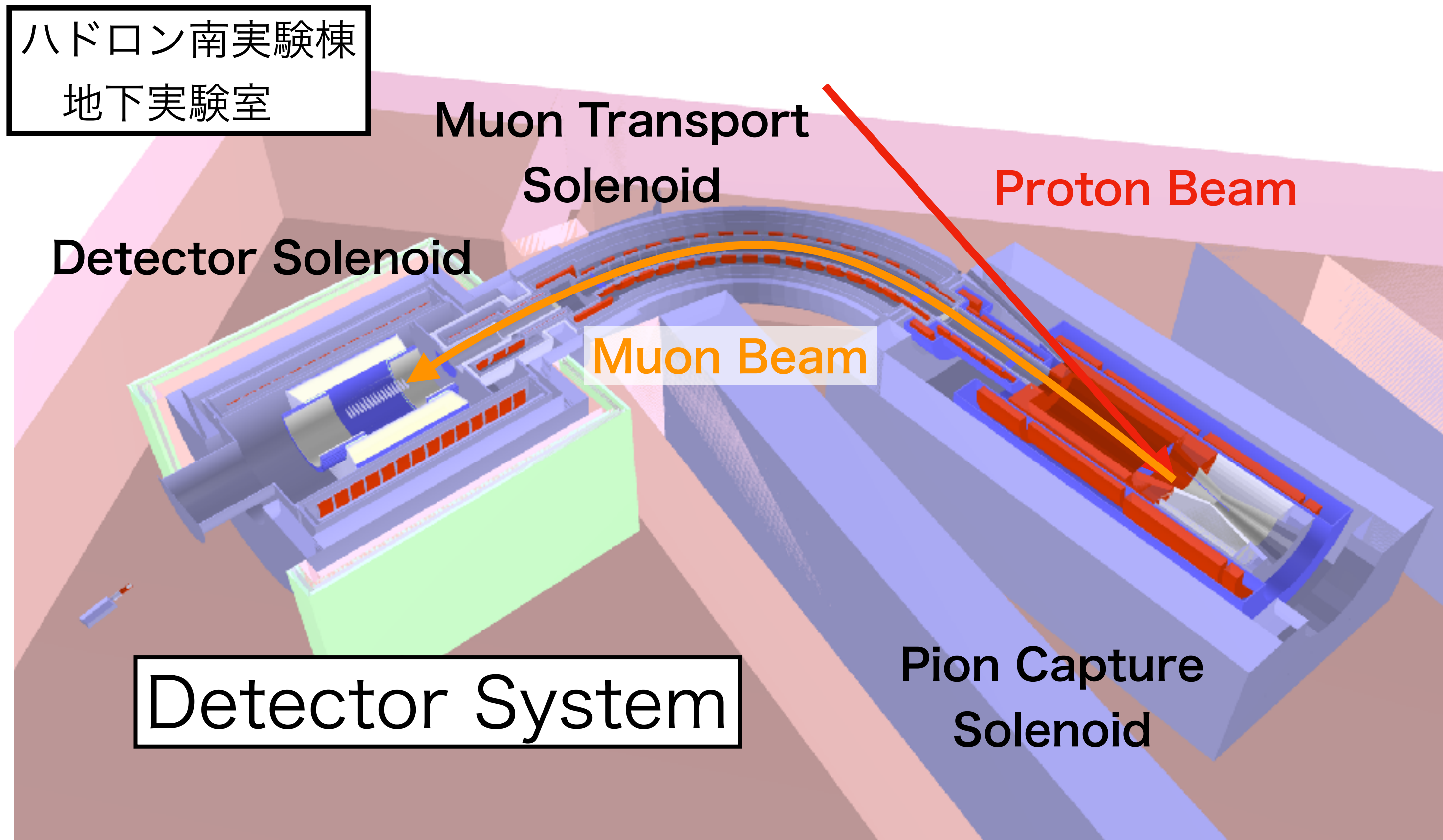


MCで作成した信号とDIOの運動量分布



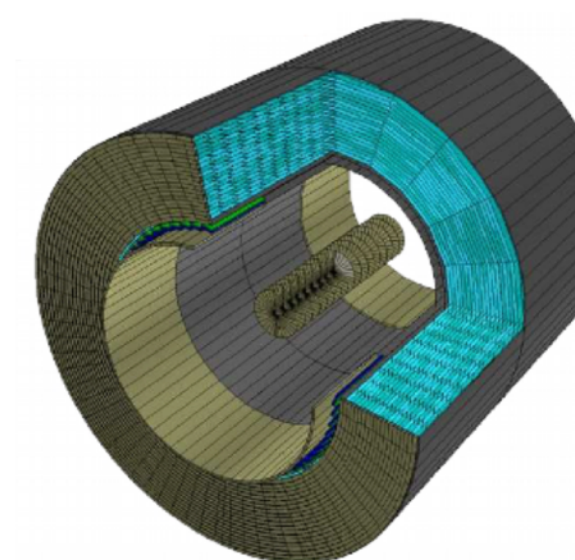
COMET @
ハドロンホール
南実験棟

COMET Phase-I

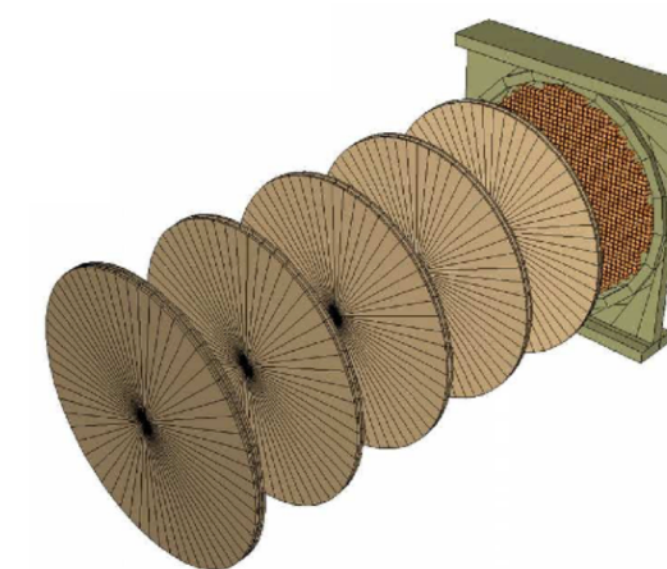


- ・ **目標感度： 3×10^{-15} (現状の100倍)**
- ・ 3.2 kW 8 GeV 陽子ビーム
- ・ パイオン捕獲超伝導磁石
- ・ 90度 μ 輸送超伝導磁石
- ・ 検出器超伝導磁石と2種の検出器システム
 - 物理測定(CyDet)
 - 背景事象測定(StrawECAL)
- ・ 2022年にビームライン(E21)が完成
- ・ 超電導ソレノイド、シールド等 建造中

COMET Phase-I の実験セットアップ



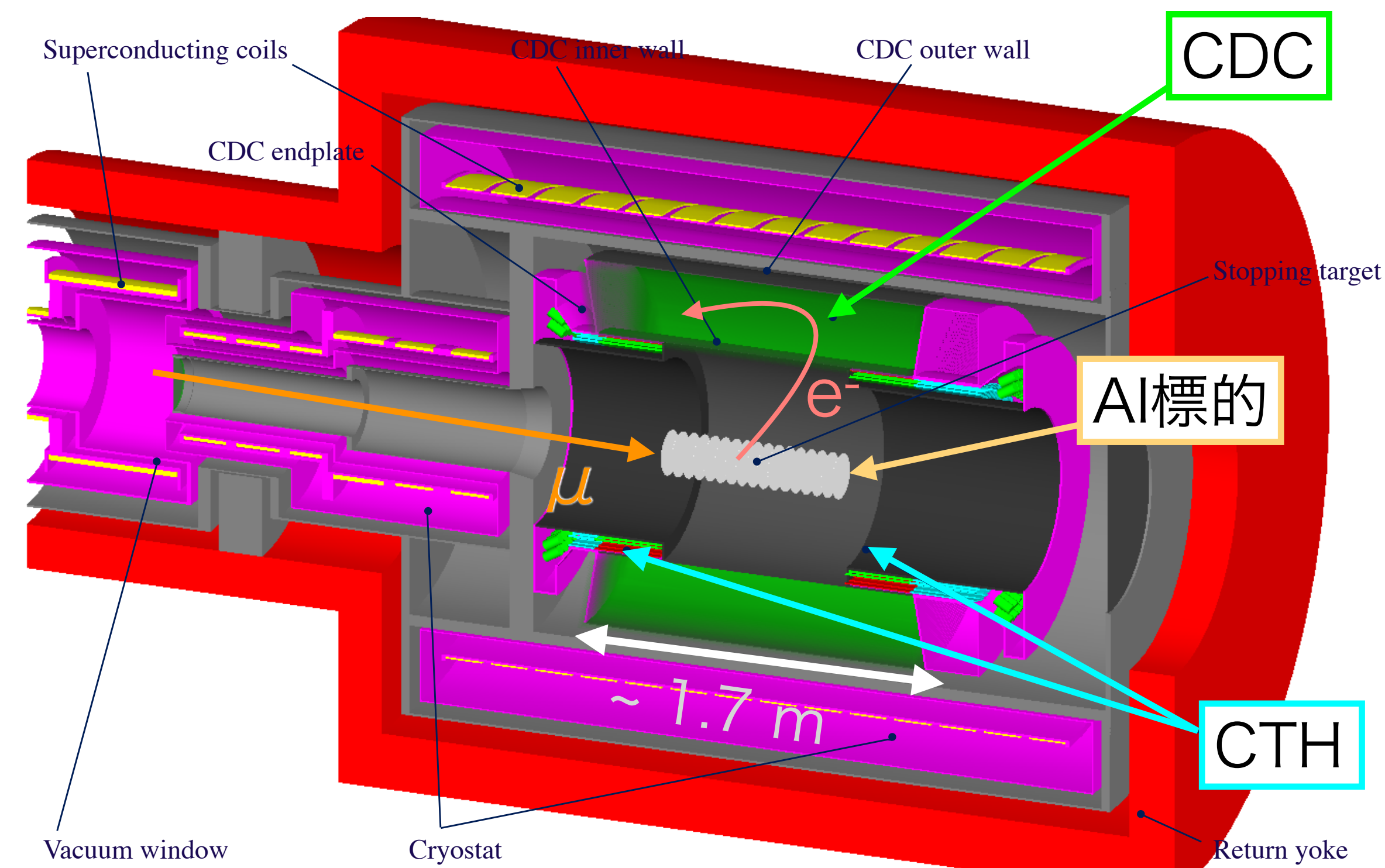
CyDet



StrawECAL

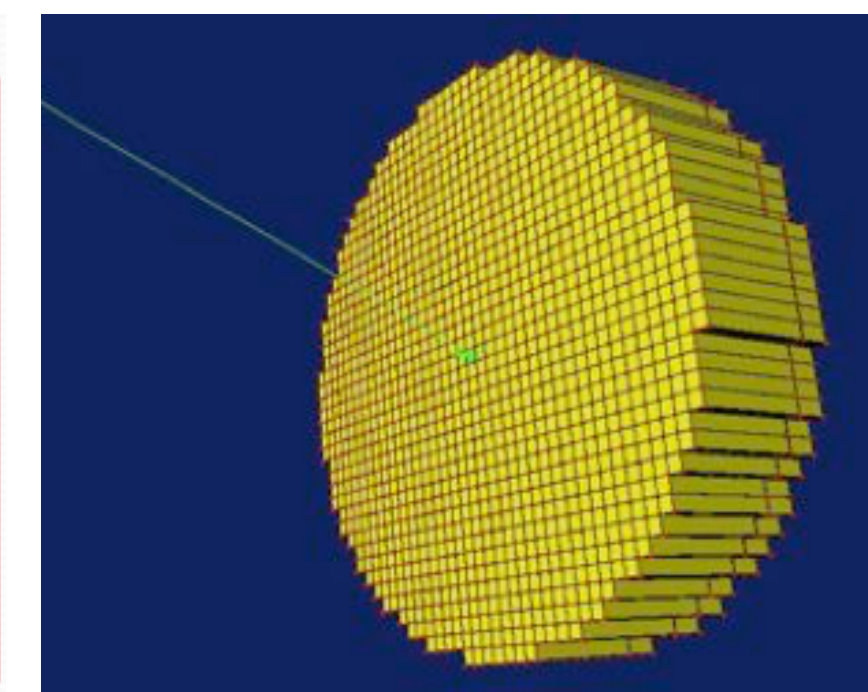
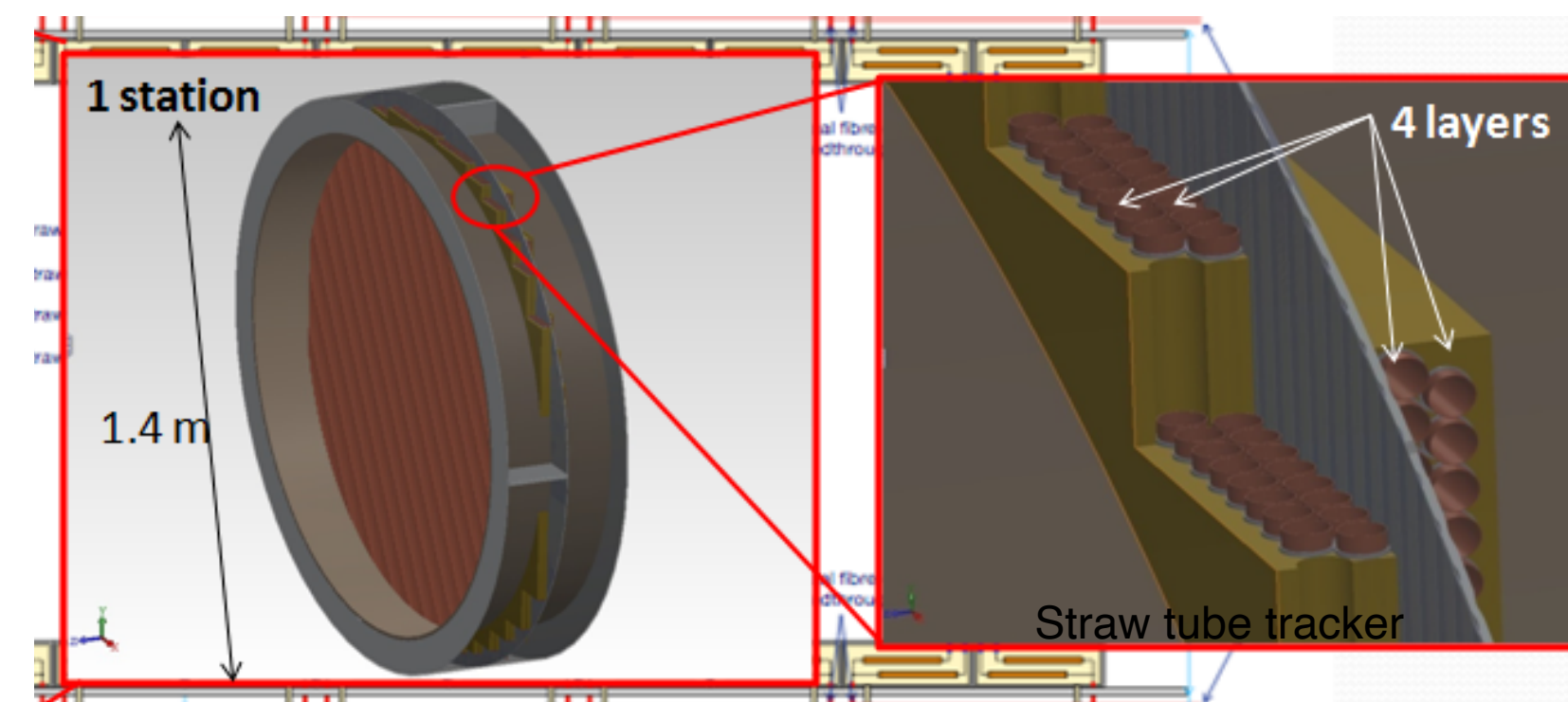
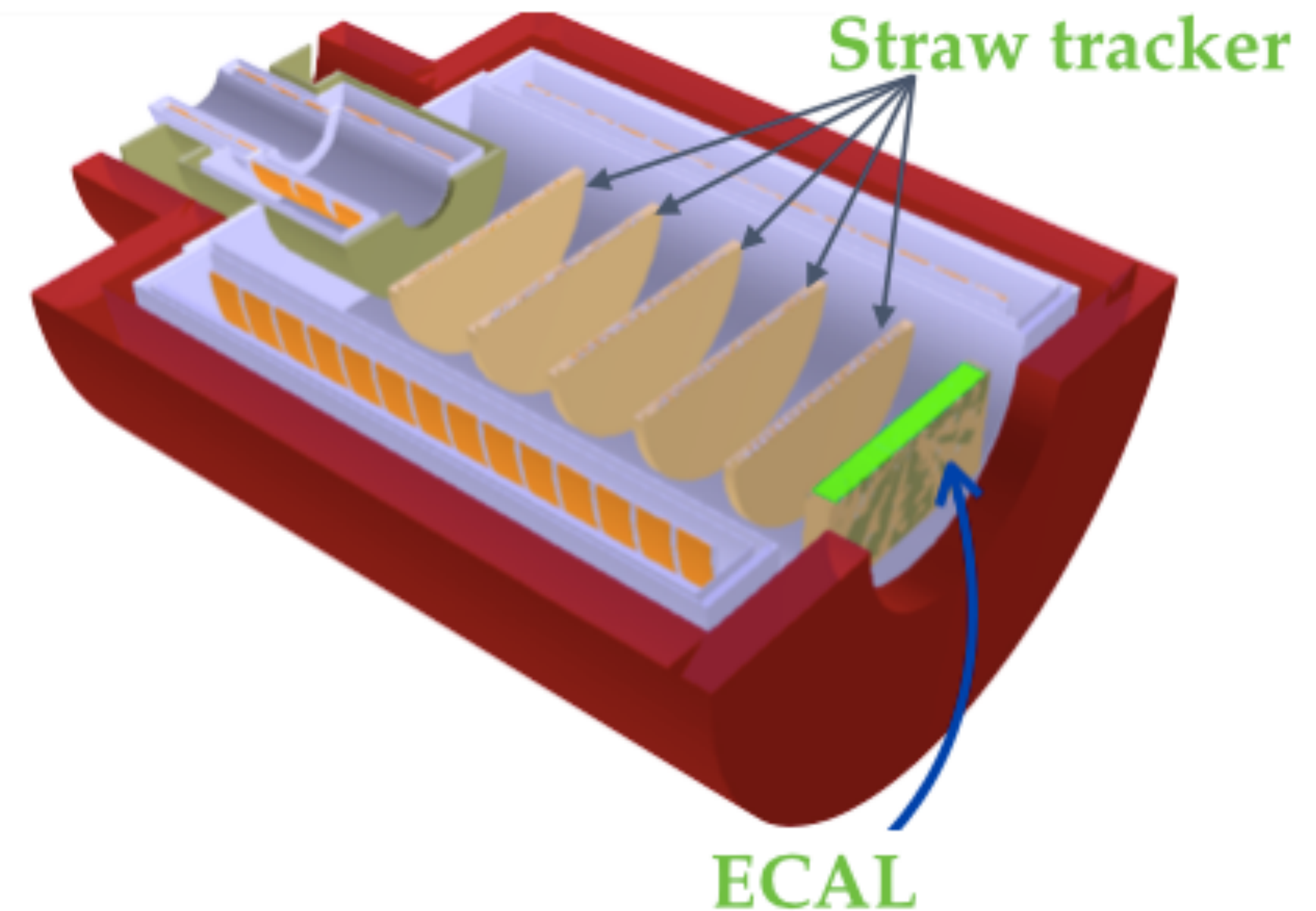
Phase-I 検出器1 : CyDet

- 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



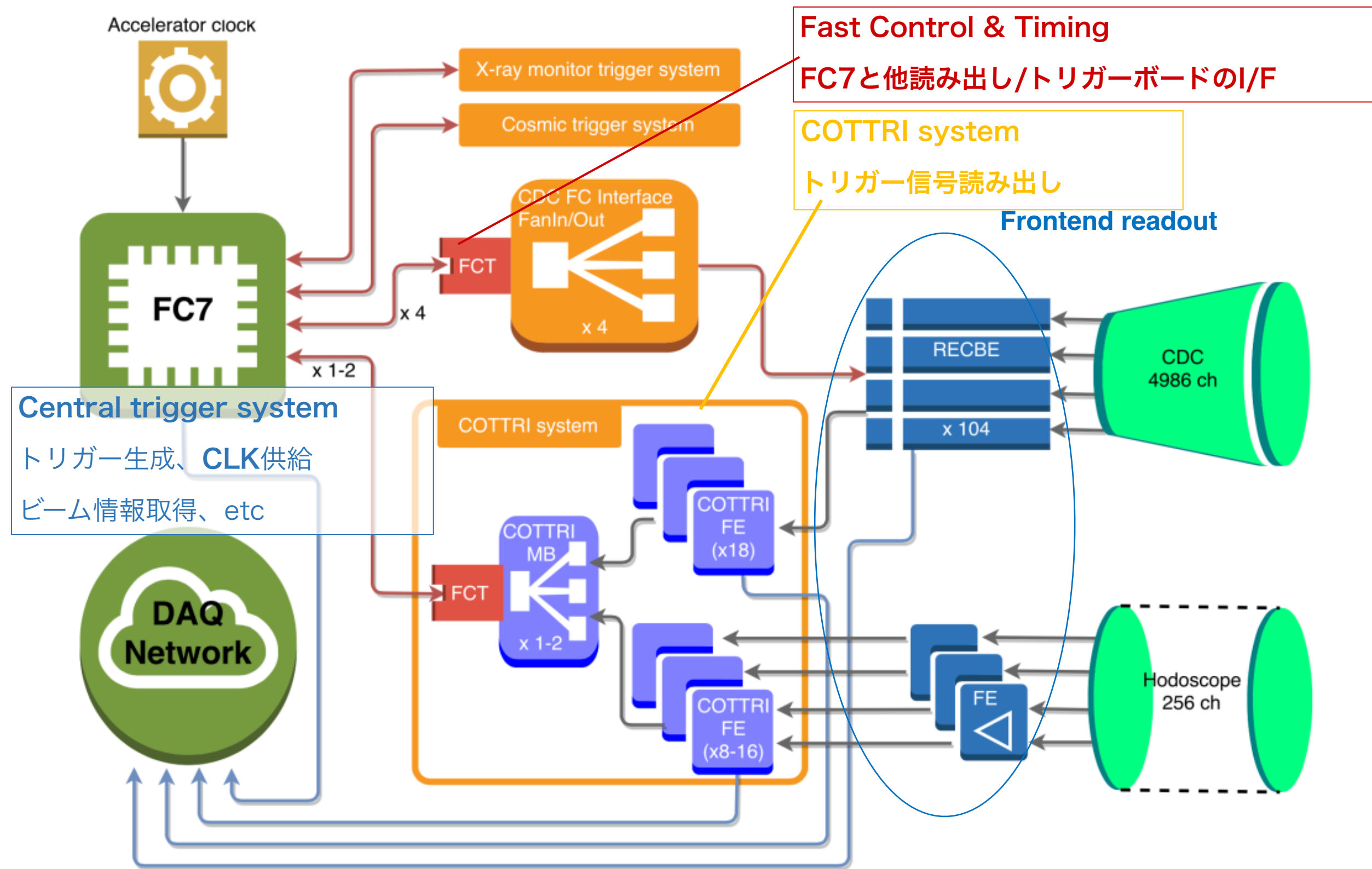
Phase-I 検出器2 : StrawECAL

- 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

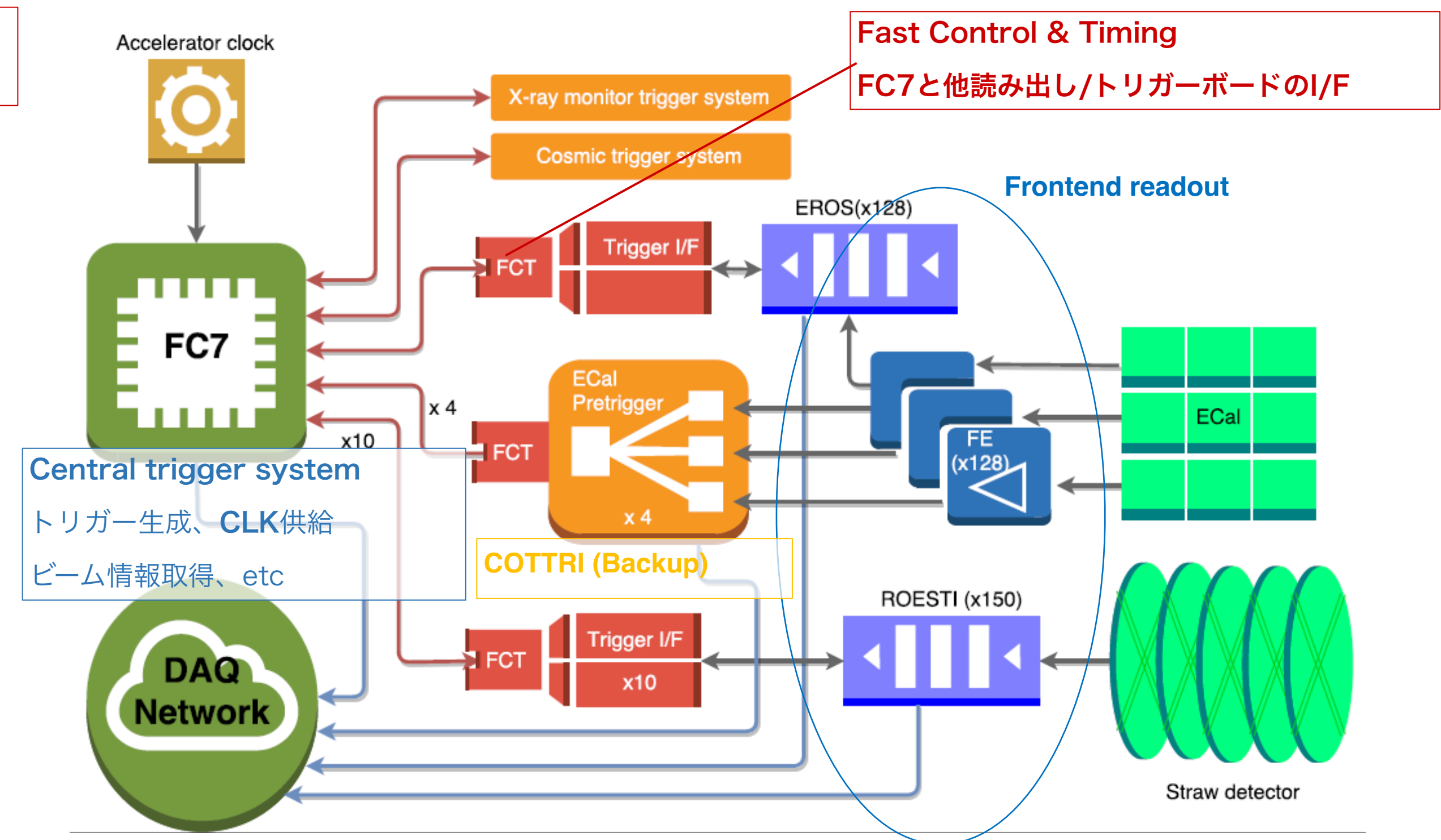


COMET Phase-Iのエレキ

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

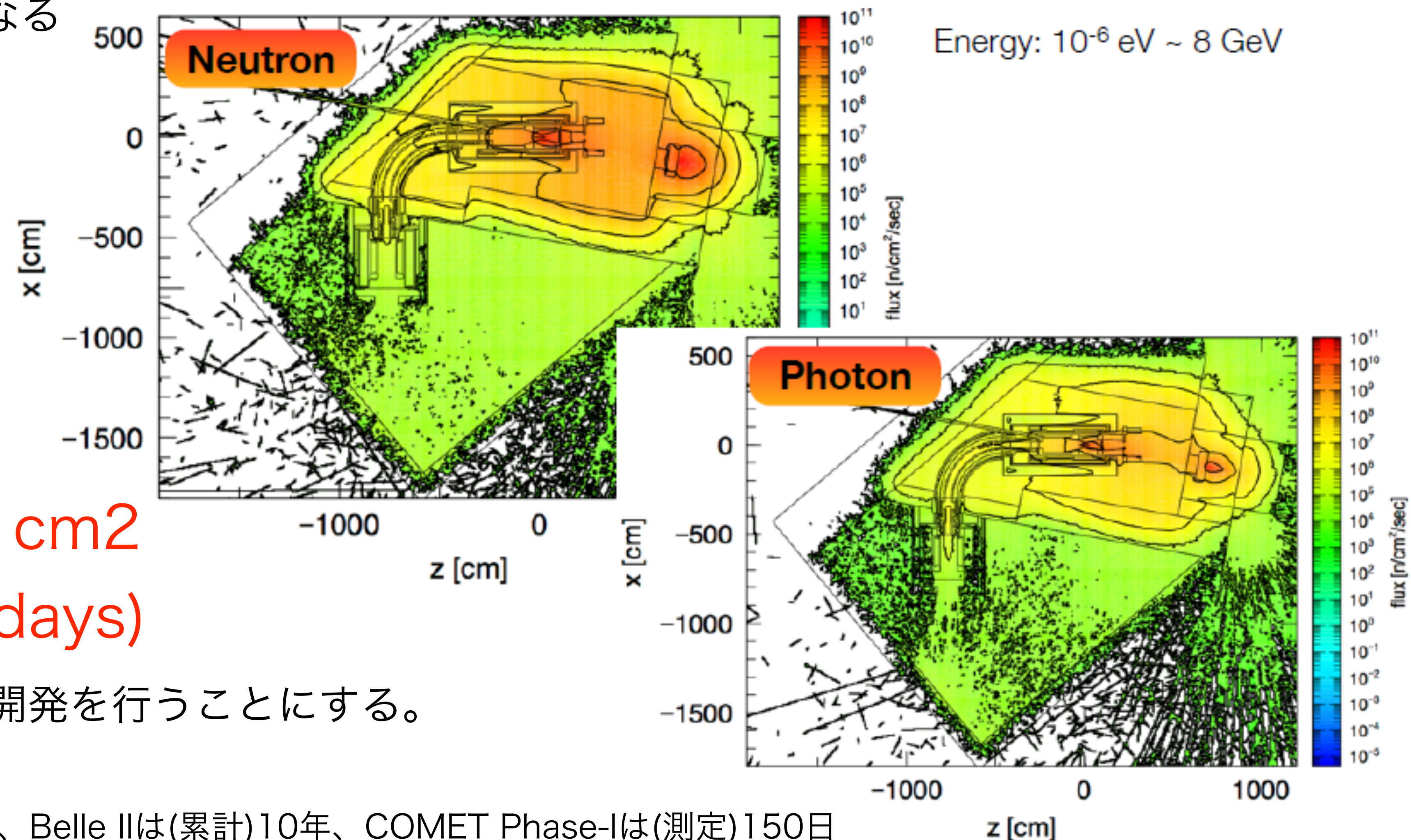
- J-PARCの大強度陽子ビームを用いた(現状)世界最高強度のミュオンビーム
 - 8 GeV p + 陽子標的 $\rightarrow \pi$ (+n/e-/e+/ γ いろいろ) $\rightarrow \mu$ (+ e/ ν / γ など)
 - 当然、放射線レベルは高くなる
- PHITSを用いた計算結果 \rightarrow

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
ソフトウェア	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)

ソフトウェア：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

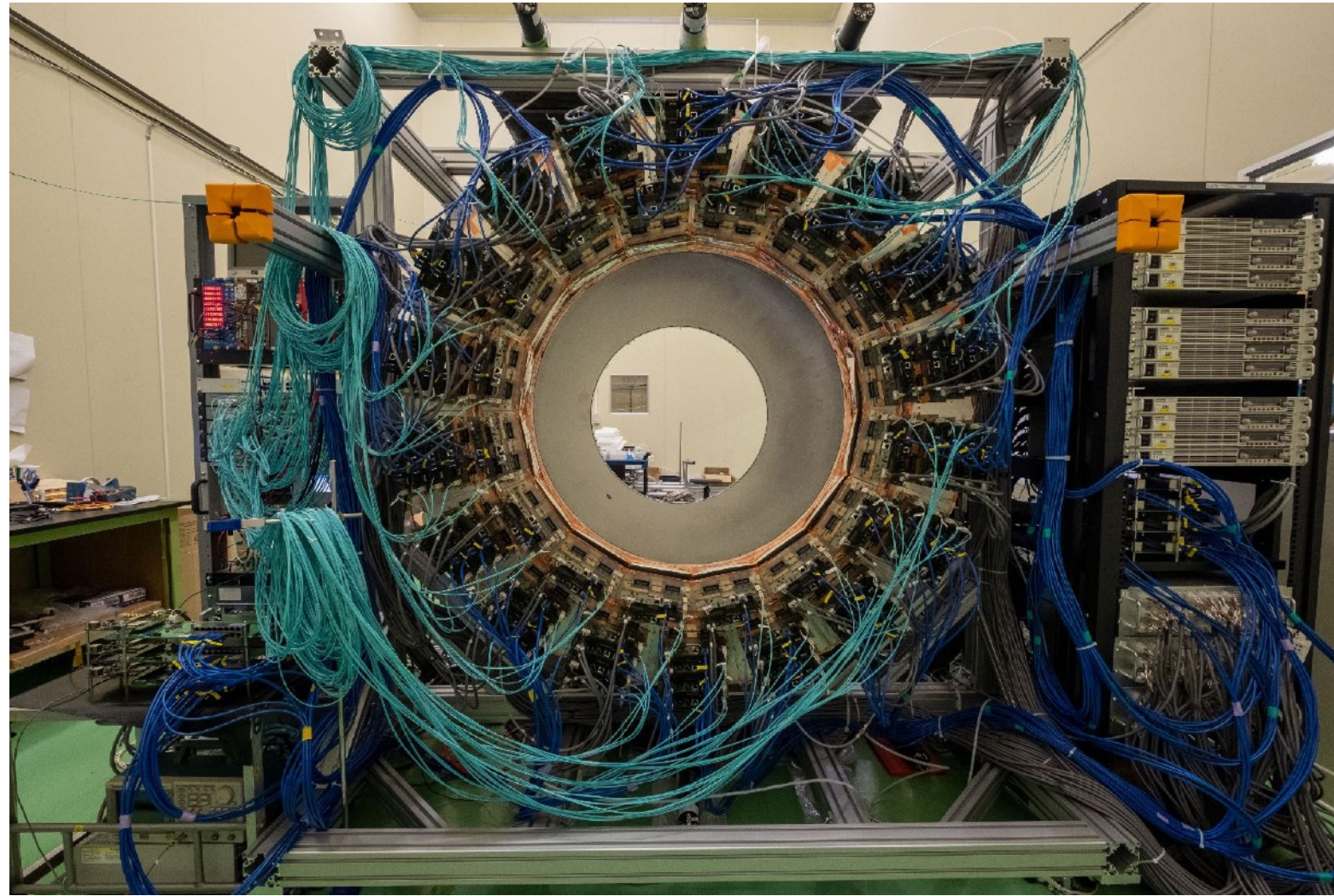
計測システム研究会や日本物理学会、耐放射線エレキ研究会、論文などでこれまでの試験は報告済みだが、最近も継続して、中性子・ガンマ線の照射試験を実施中 (直近は中性子照射試験を予定)

放射線耐性評価の実験サイト

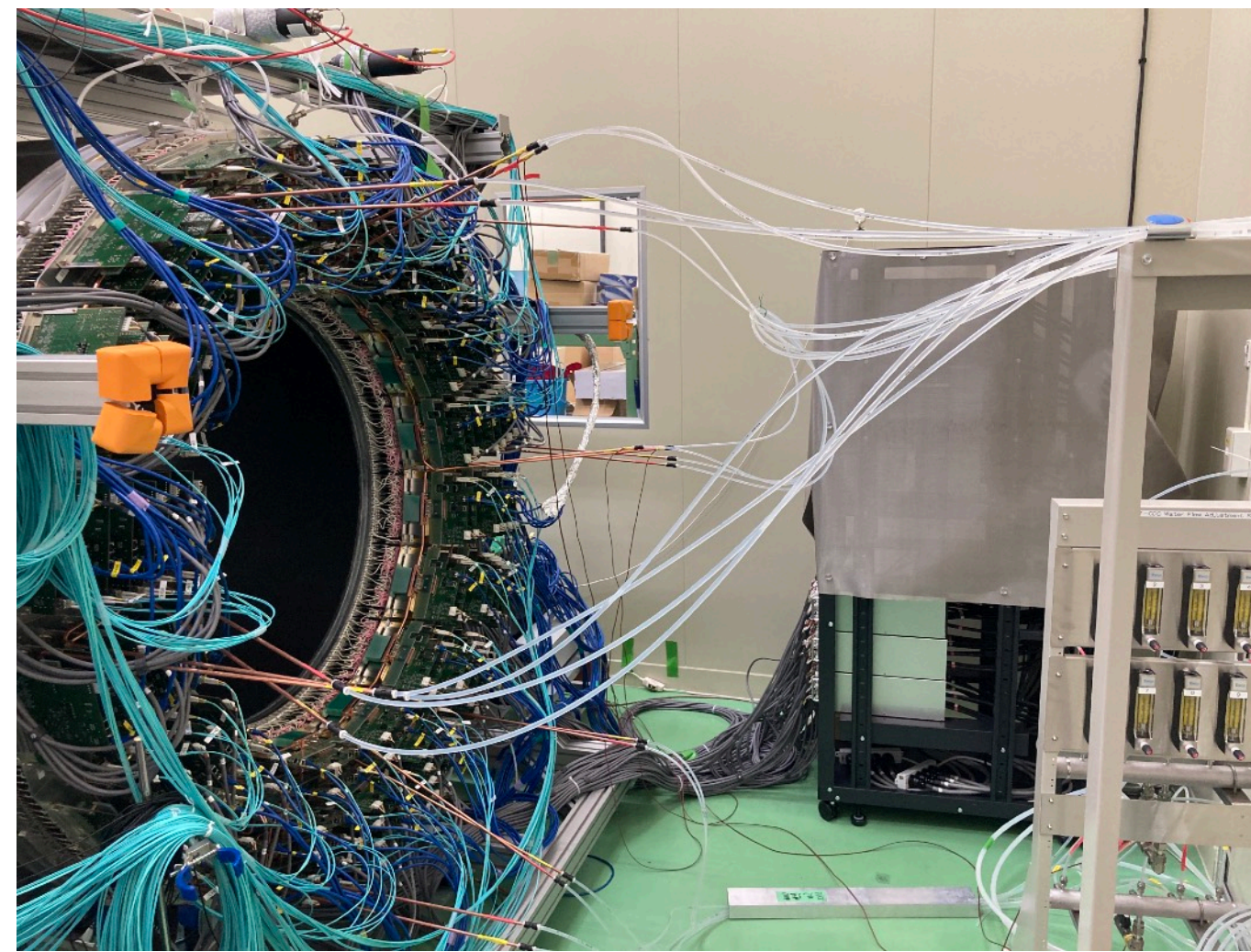
中性子：神戸大学 (タンデム静電加速器)、稀に京大KURNS など

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



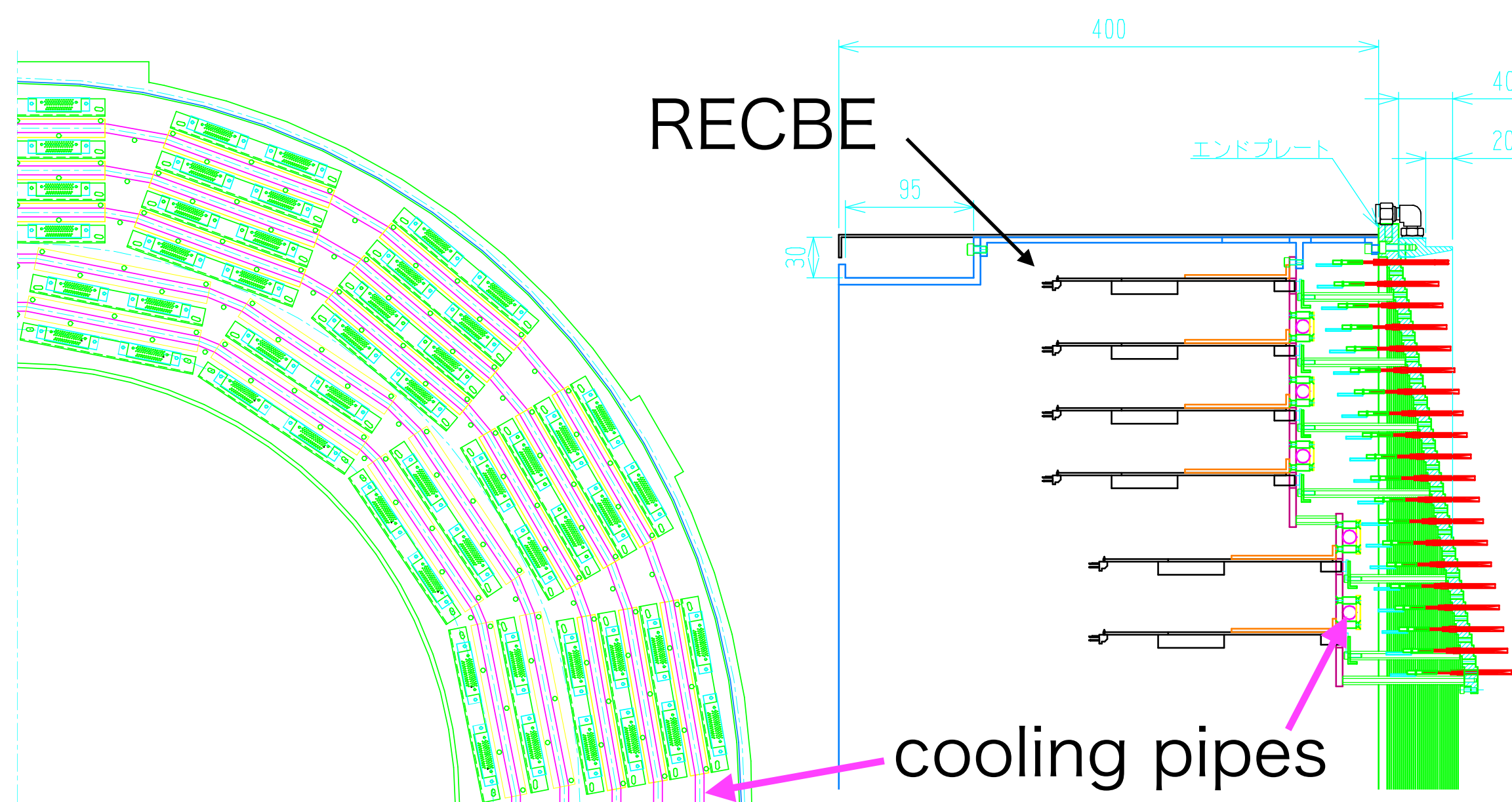
水冷システムの導入@つくば

- 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

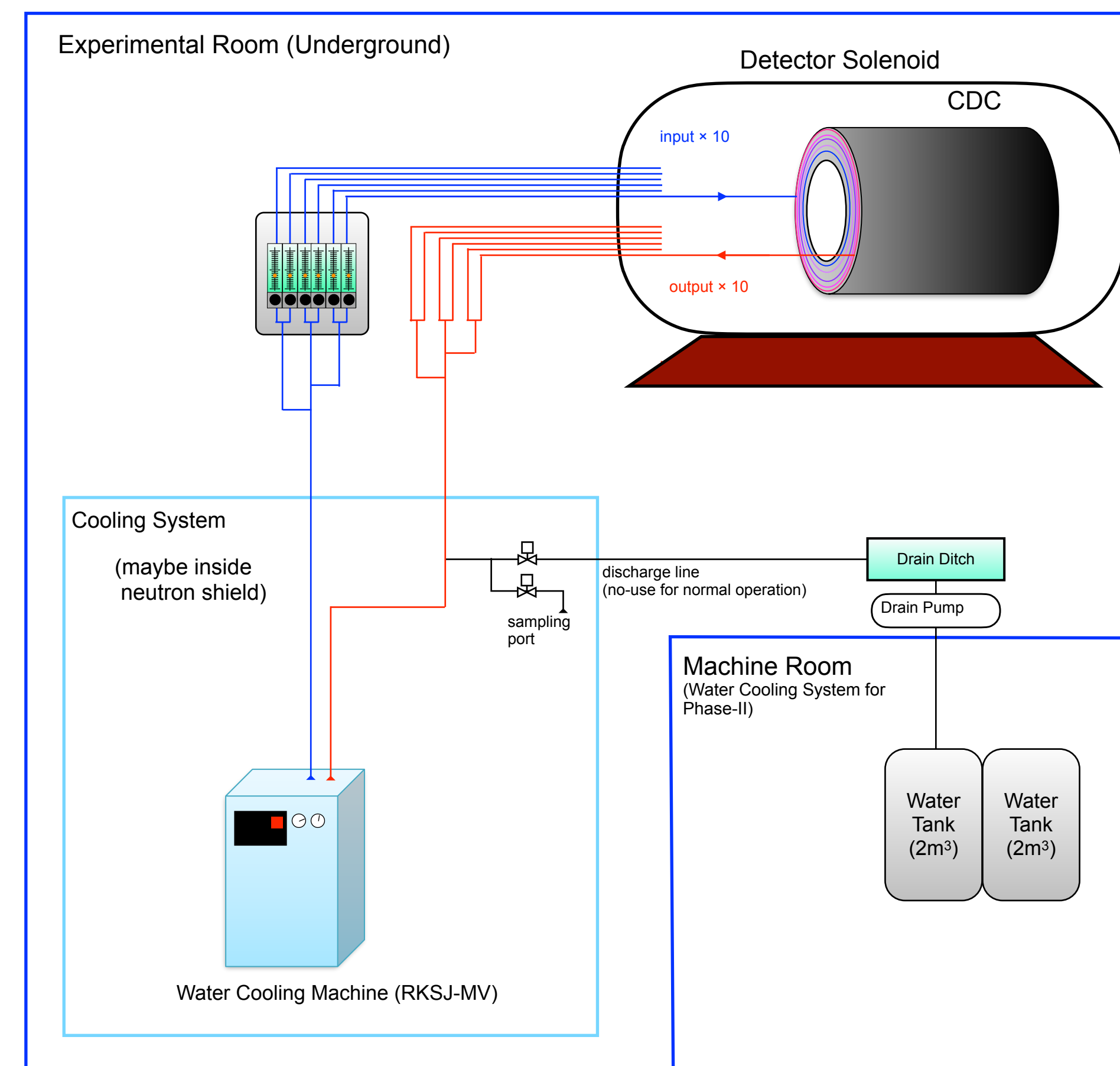
- CDCの主な熱源は、エンドプレートに設置する読み出し電子回路RECBE 104枚の発熱
- $\sim 2.2 \text{ kW} / 104 \text{ 枚}$ を超伝導磁石の中で冷やす必要がある \rightarrow 水冷

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

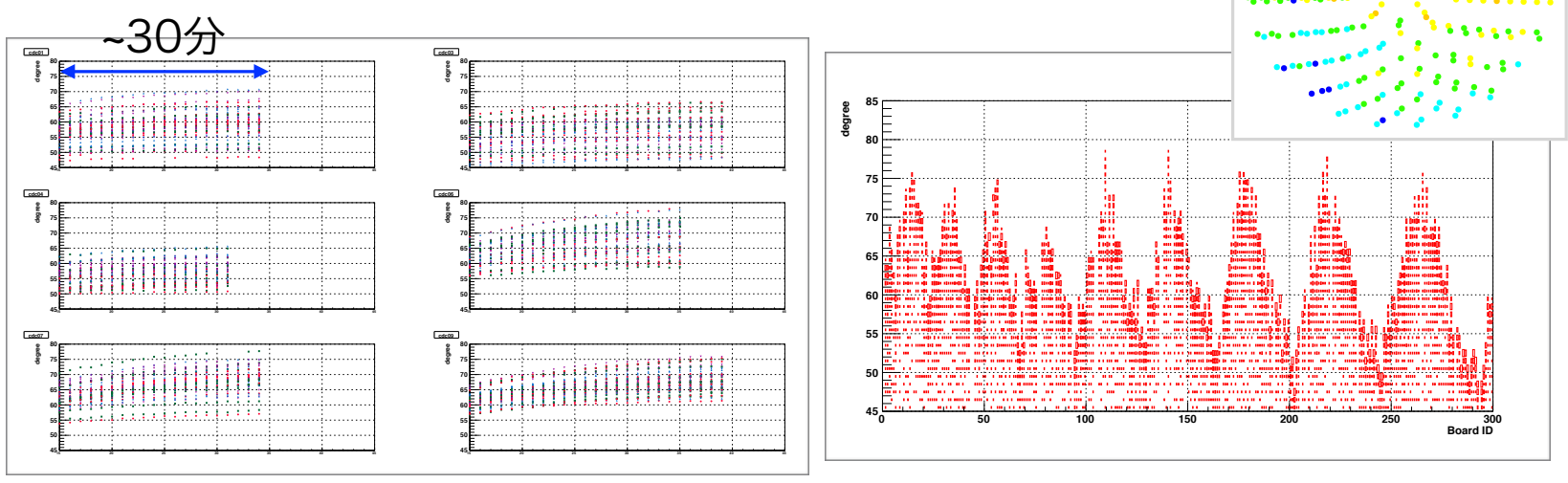
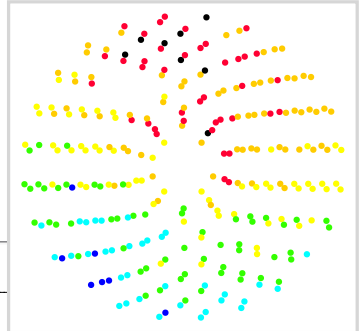


Belle II CDCグループからの報告

冷えない

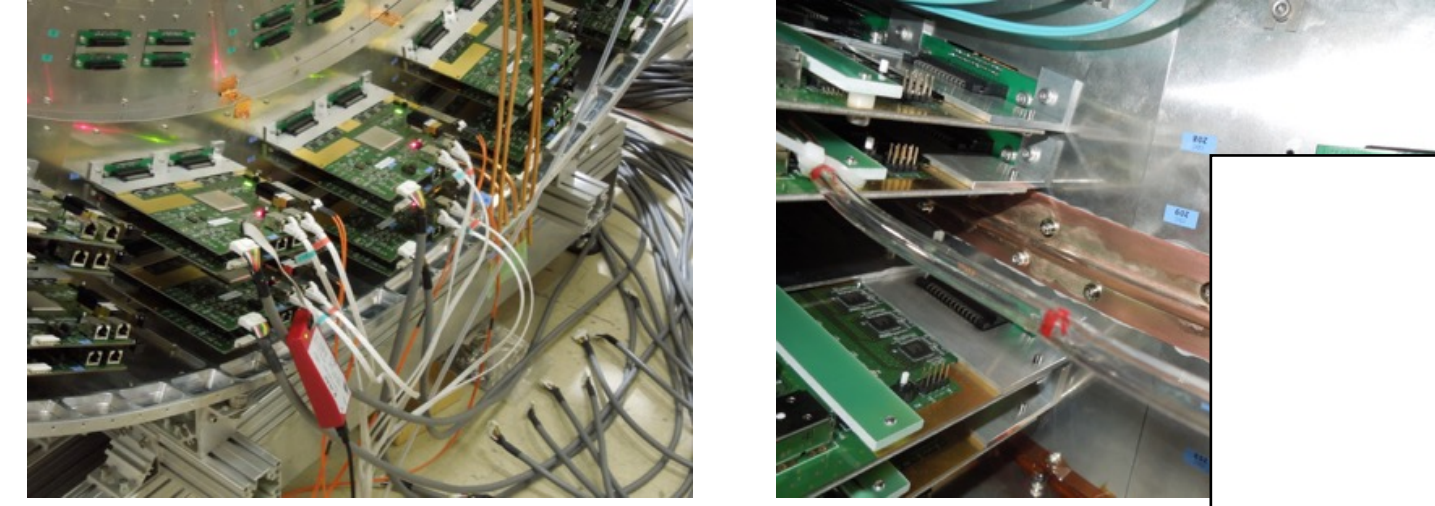
- ・ 温度はFPGAの機能を使ってモニターできる
- ・ 結果：50~75度
 - ・ エレキ自体は問題ない温度
- ・ 少しずつだが温度は上昇傾向にある
- ・ 平衡状態に達しない = 熱を取りきれていない

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

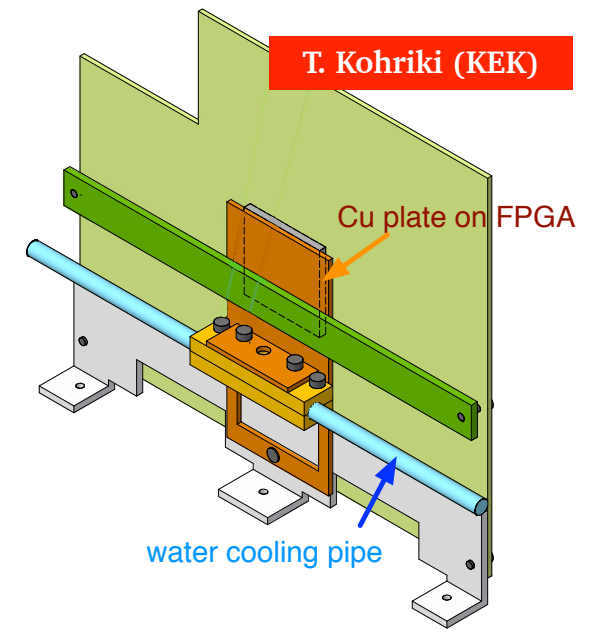
- ・ 冷却を根本的にやり直すことになった
- ・ 全ての配線、全てのボードを取り外した
- ・ ボードはサポート板にL字のアンクルでとりつけられている
- ・ サポート板に水冷パイプがとりつけられていた
- ・ 問題点
 - ・ 熱源であるFPGAから冷却パイプの距離が遠い
 - ・ サポート板の熱伝導率が良くない(アルミ)



by 谷口さん (KEK)
計測システム研究会2017

冷えない

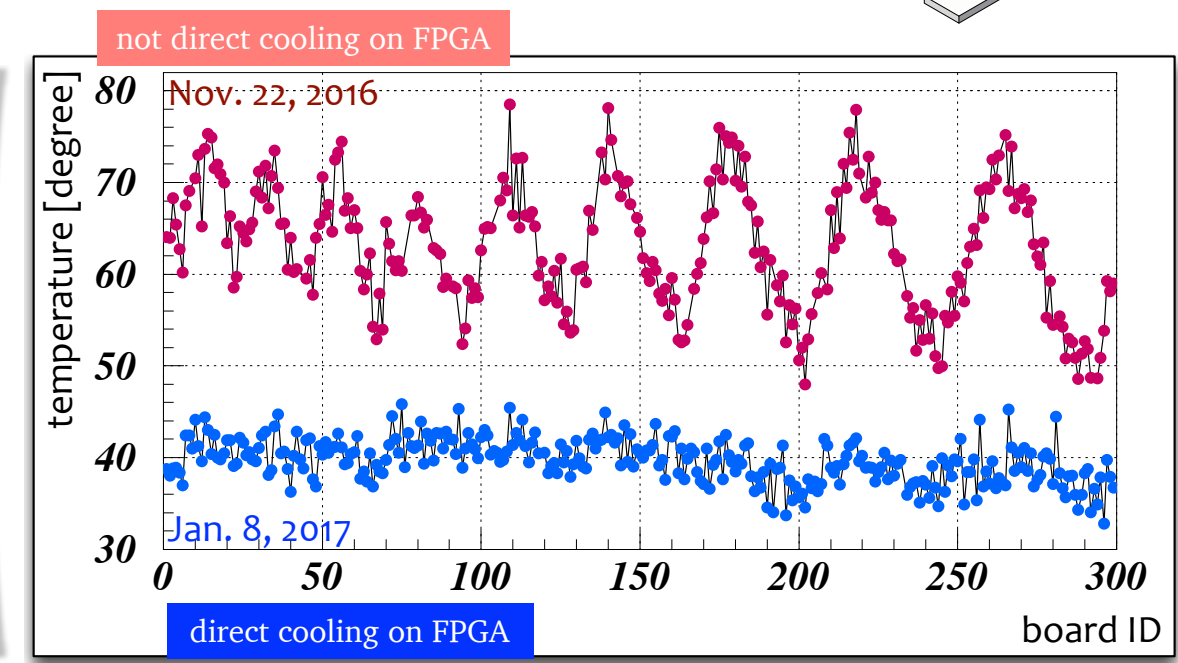
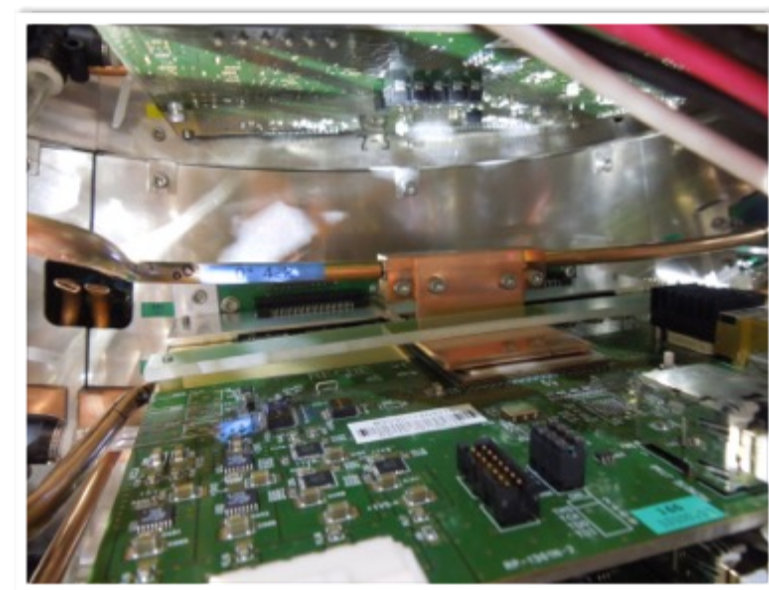
- ・ FPGAに銅板を**で貼り付ける
- ・ 銅板と冷却パイプを接続
- ・ 再びボードの設置と配線をやりなおし
- ・ 冷却試験 → O.K



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。

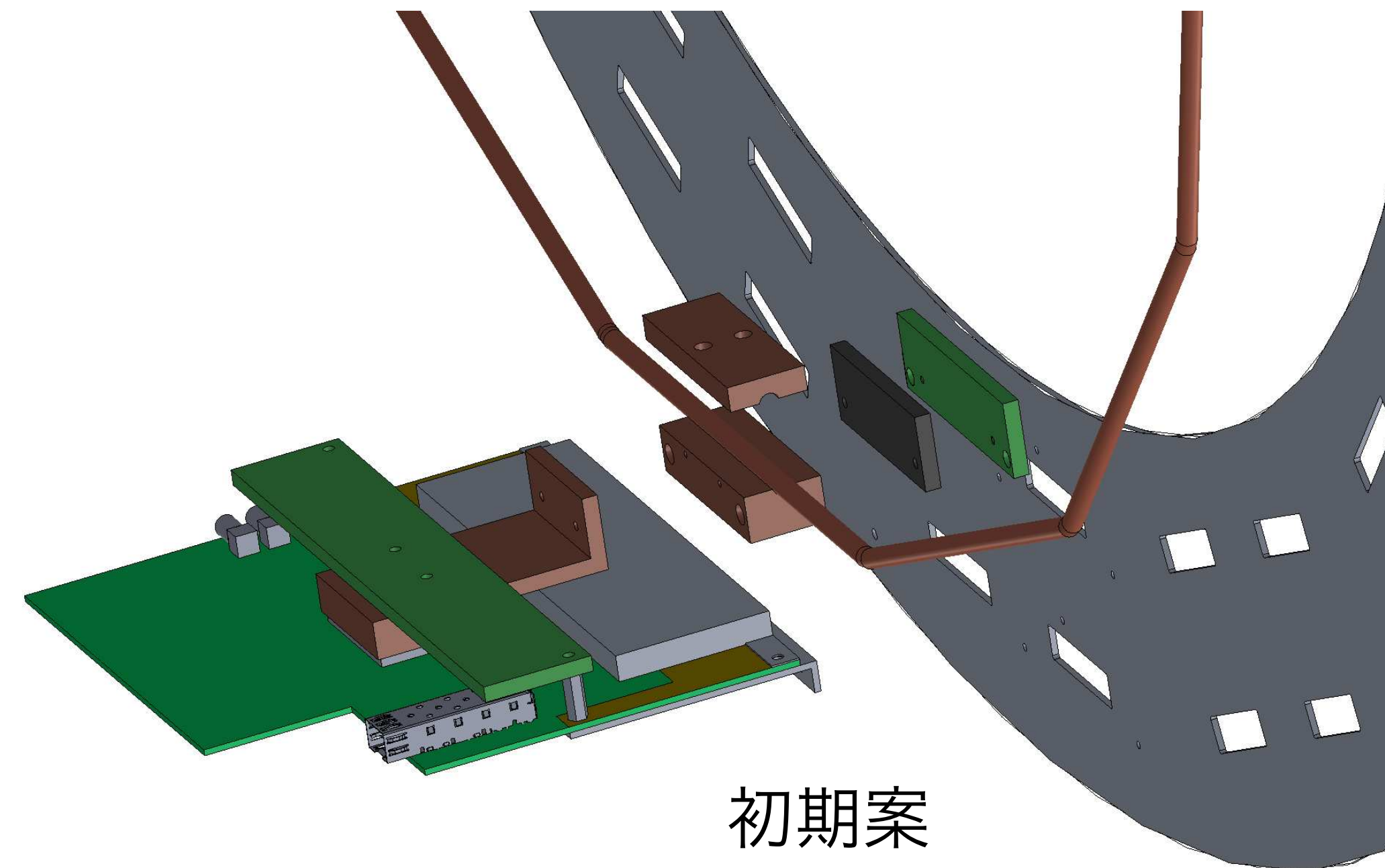
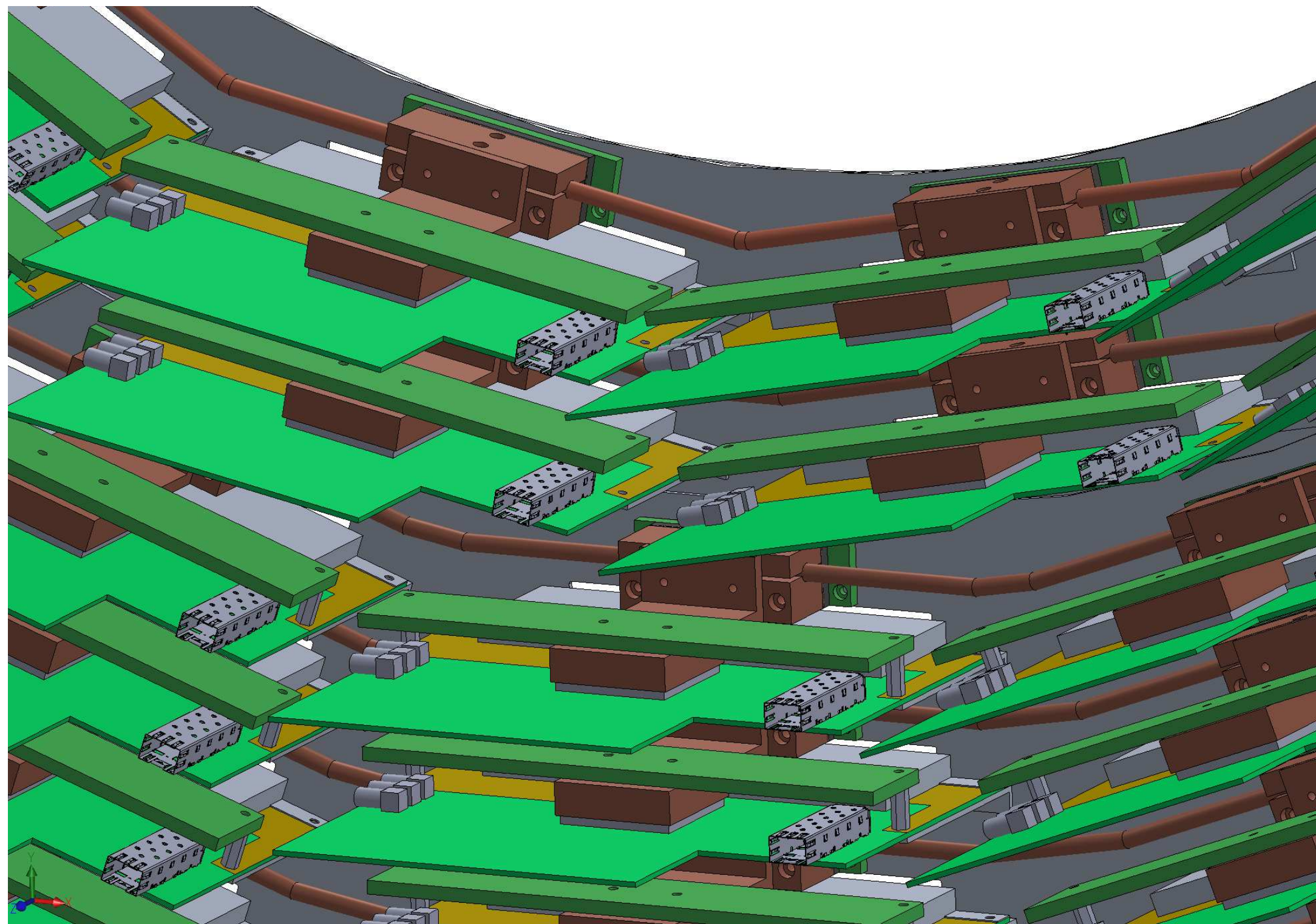
冷却パーツの改良により解決

⇒ 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

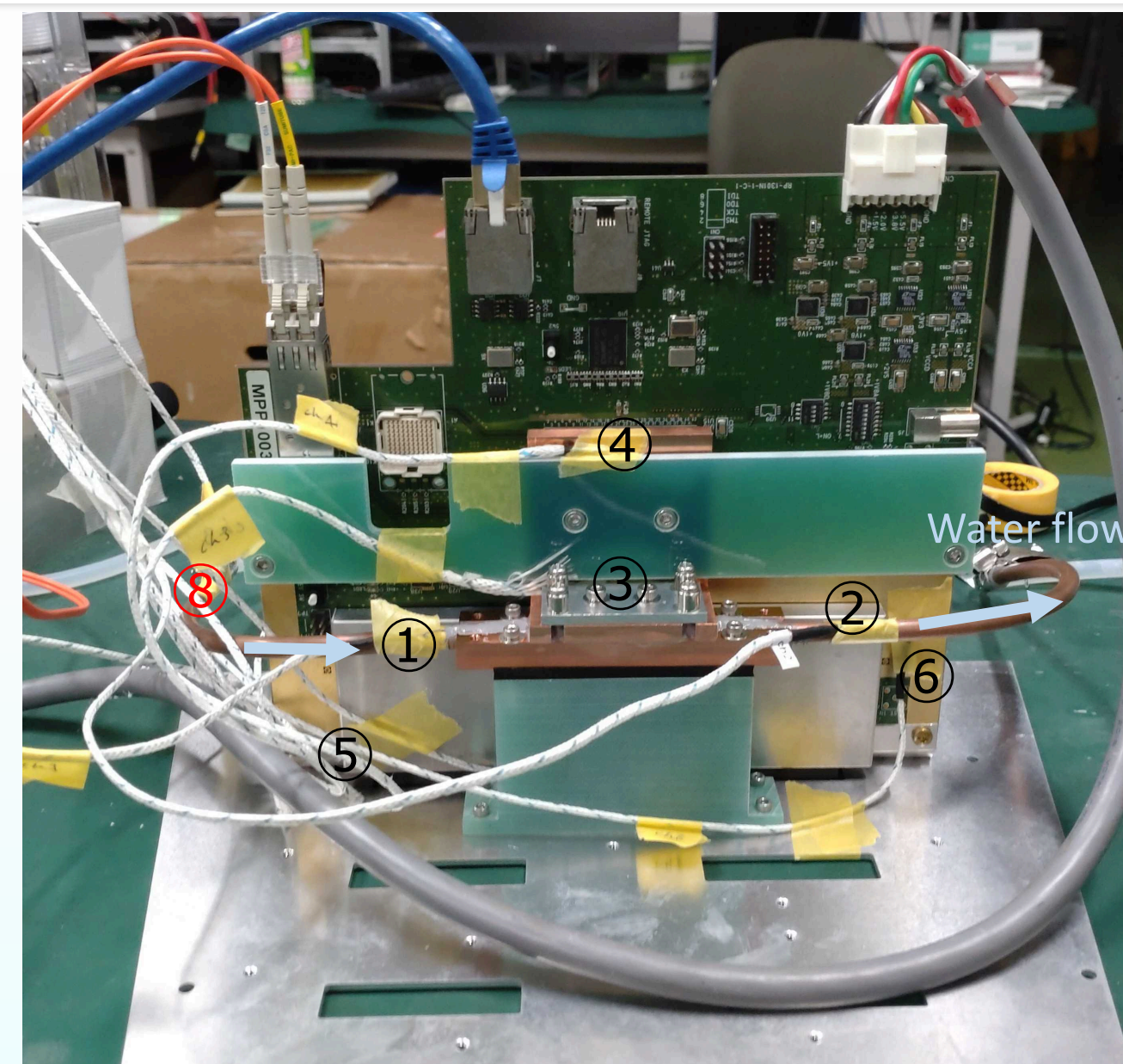
- RECBEのFPGAを直接冷却するように銅ブロックをFPGAに密着させる構造
- 水冷配管を残したまま、RECBEの交換が可能な構造を要求



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

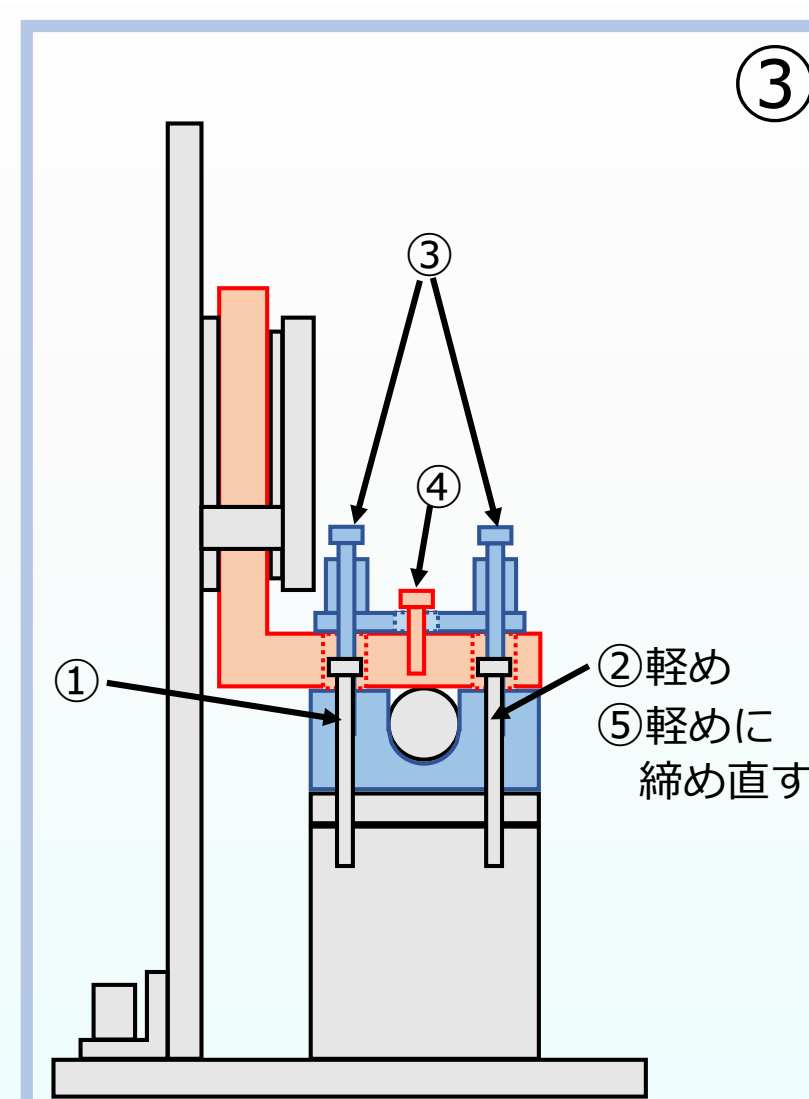
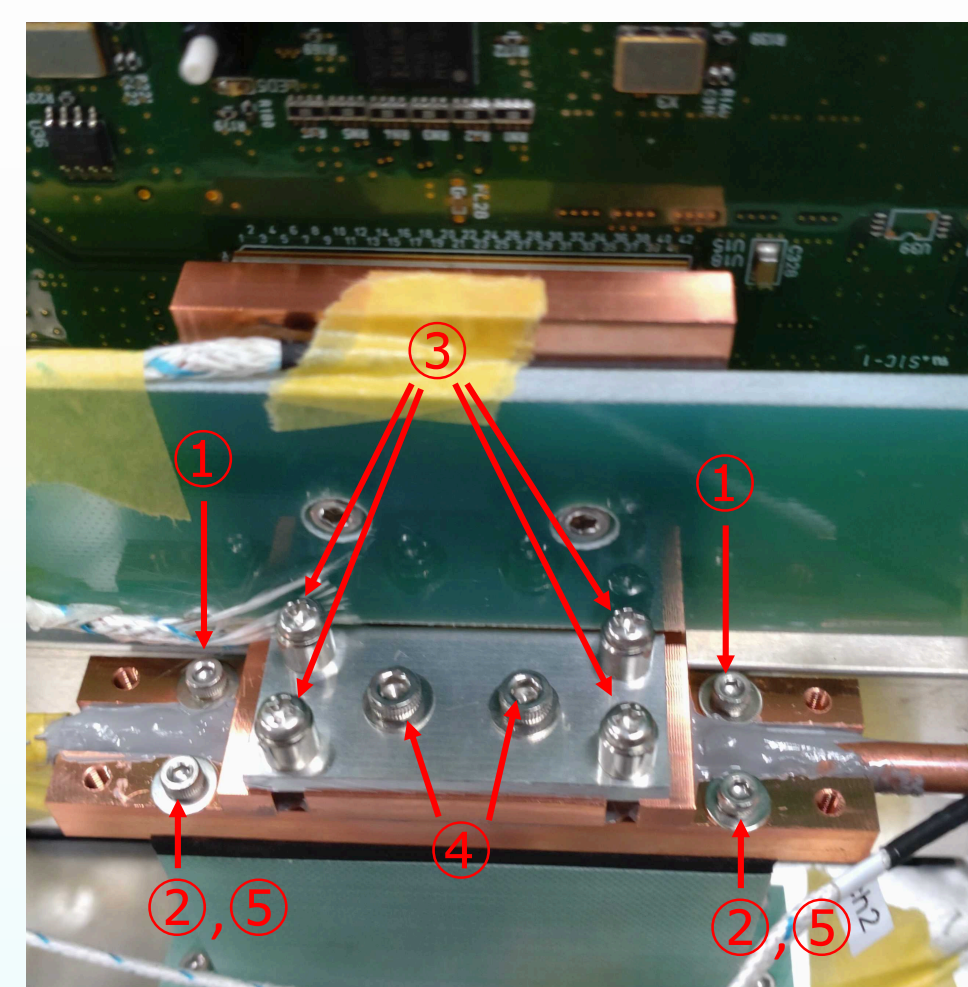
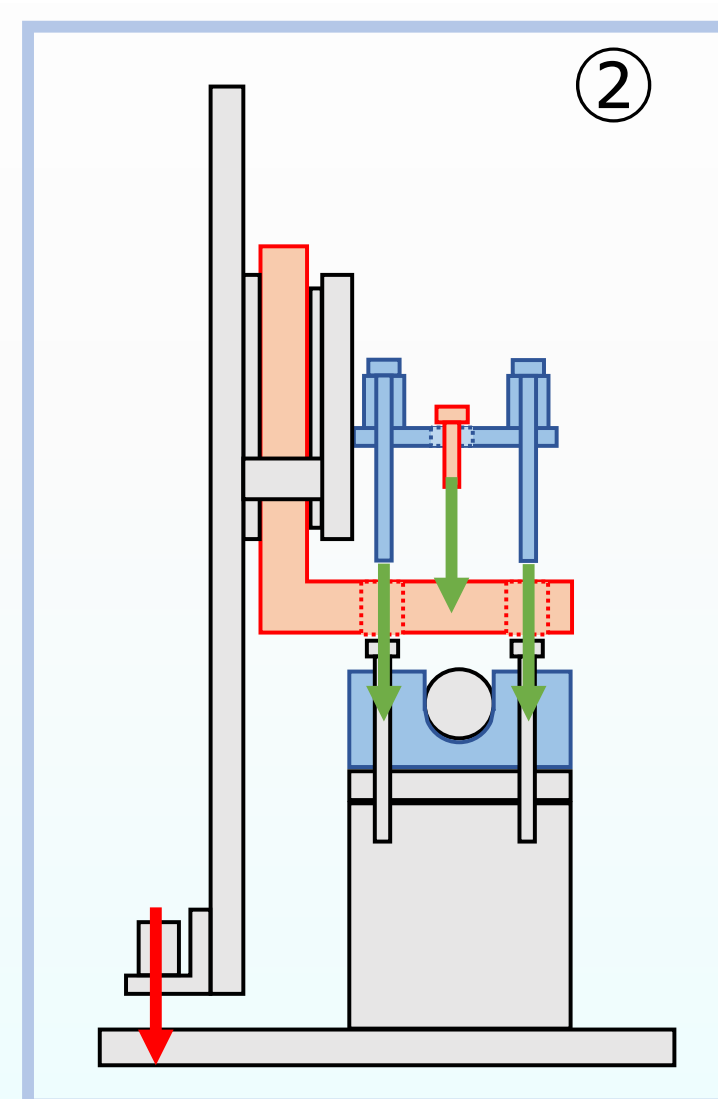
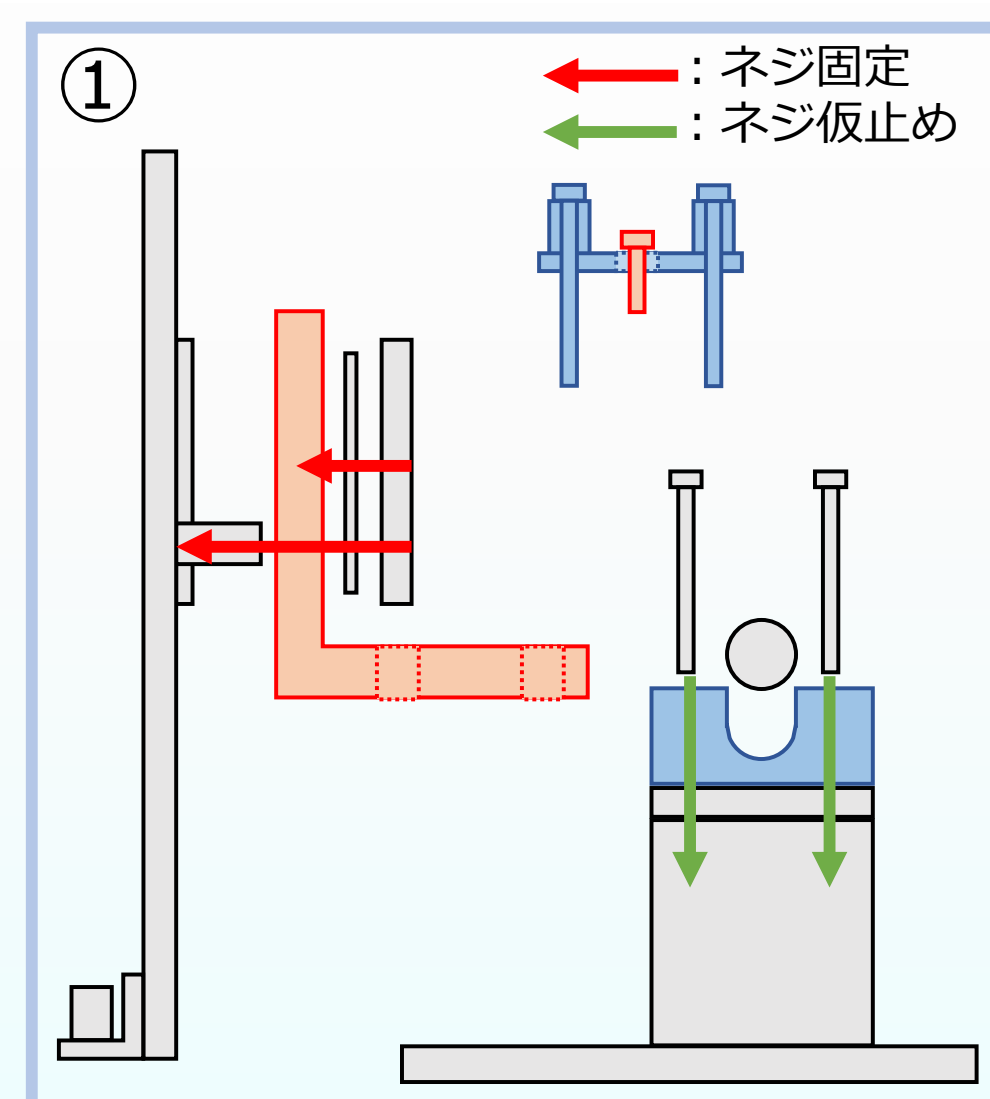
- ・ 試作機で水冷能力と組み立ての試験@大阪
- ・ 実際にチラーで冷水を流して温度測定を実施
RECBE稼働させた状態で、流量や水温を変え、温度を測定
- ・ 試作三号機で、十分な冷却性能を確保した上で、組み立て上の問題も解決 -> 量産へ



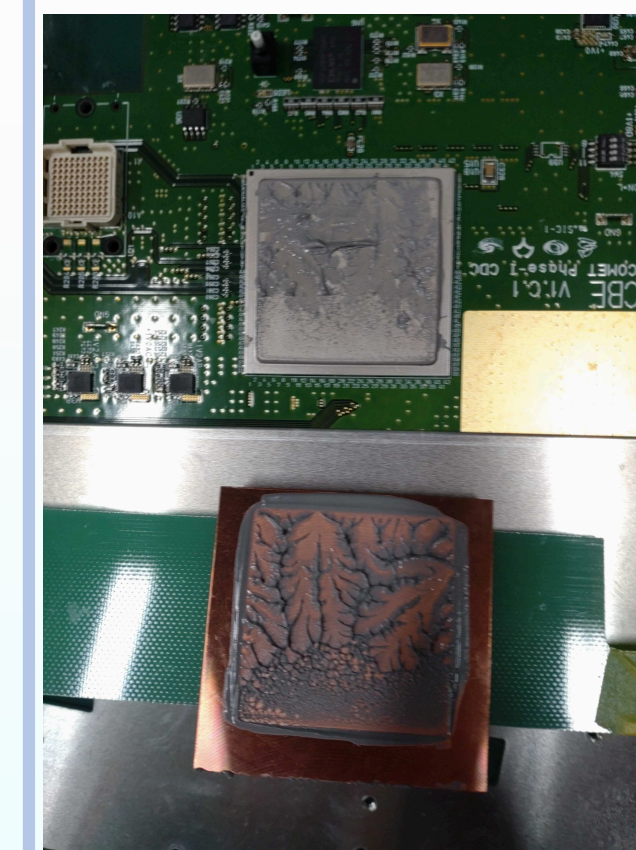
Took temperature data

- 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

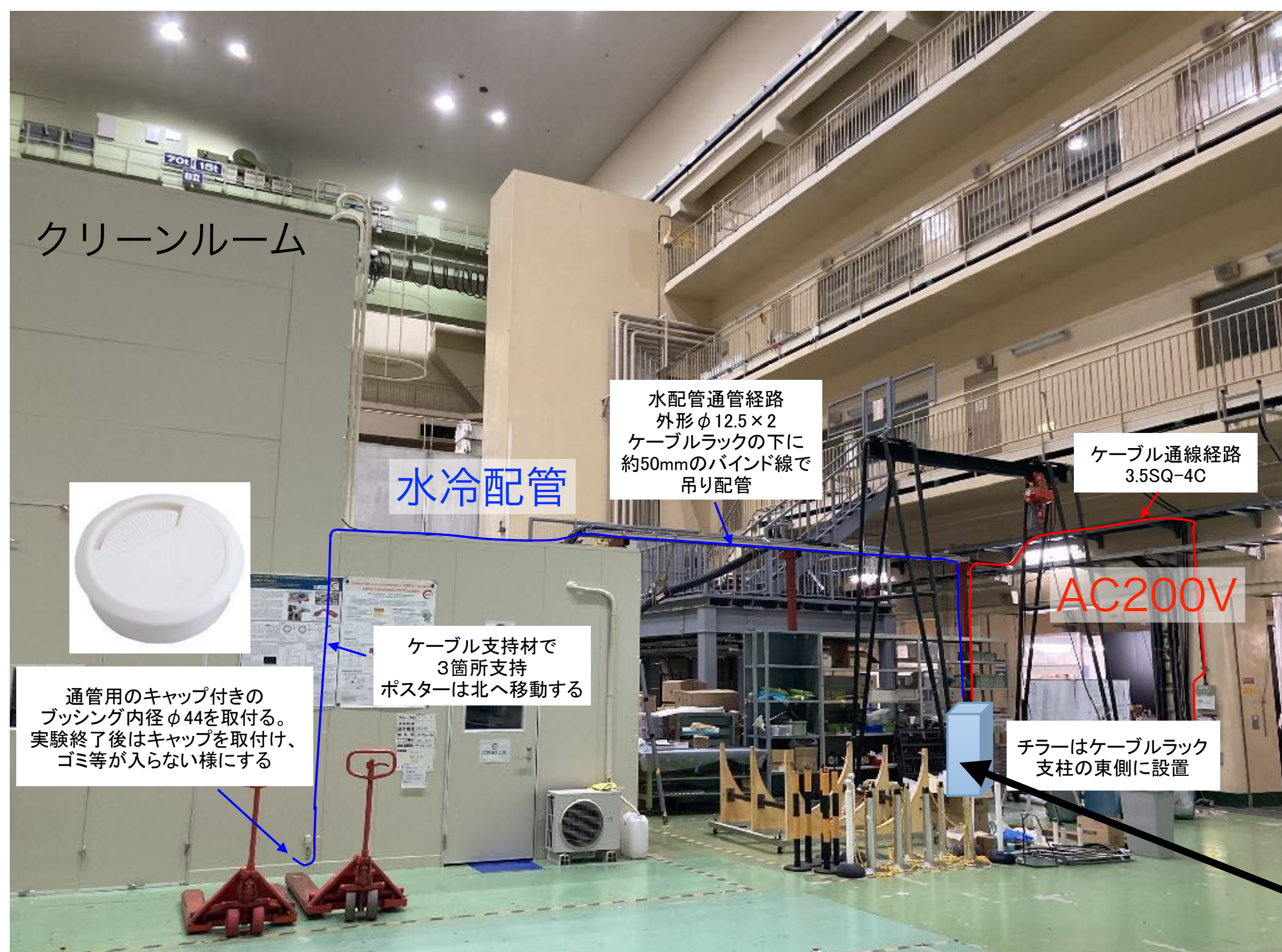
Test at water temperature
30°C, 27°C, 25°C
Water flow : 0.7 & 0.9L/min



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)

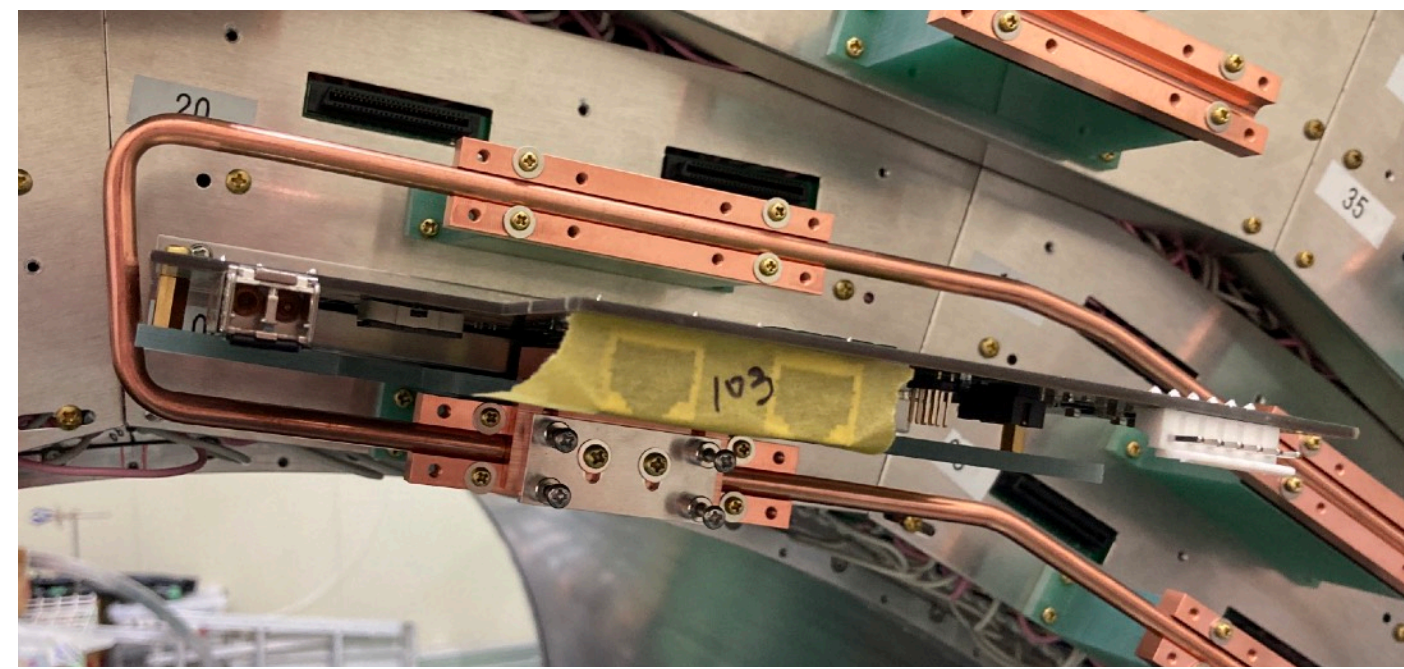
- 5.3 kW 冷却能 (空冷式)
- 水冷温度 : 5~40 °C (精度 : ± 0.1 °C)
- 最大流量 : 18 L/min (揚程 : 60 m)

KEKつくばキャンパス富士実験棟B4フロア

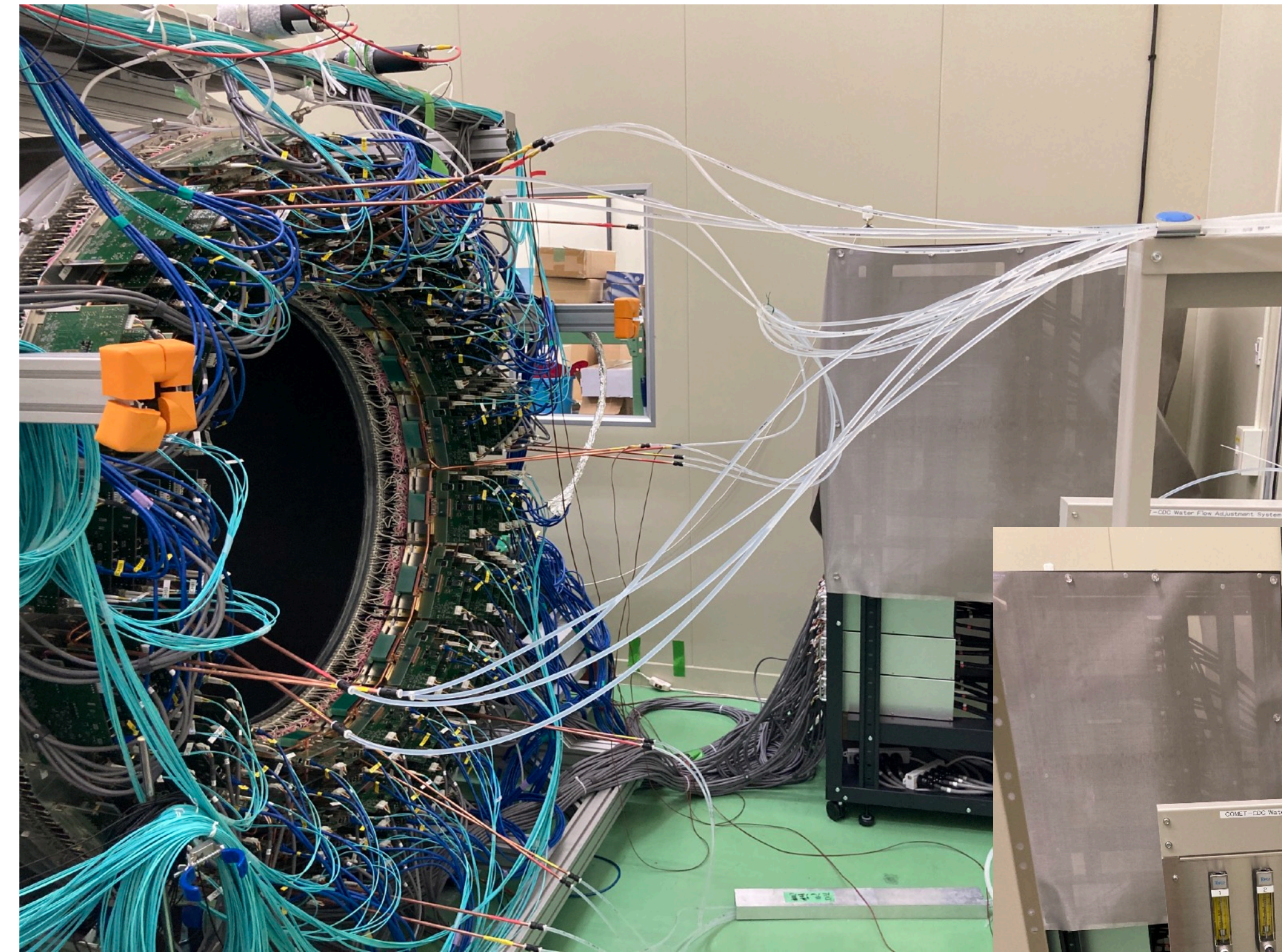
CDC水冷システムの導入



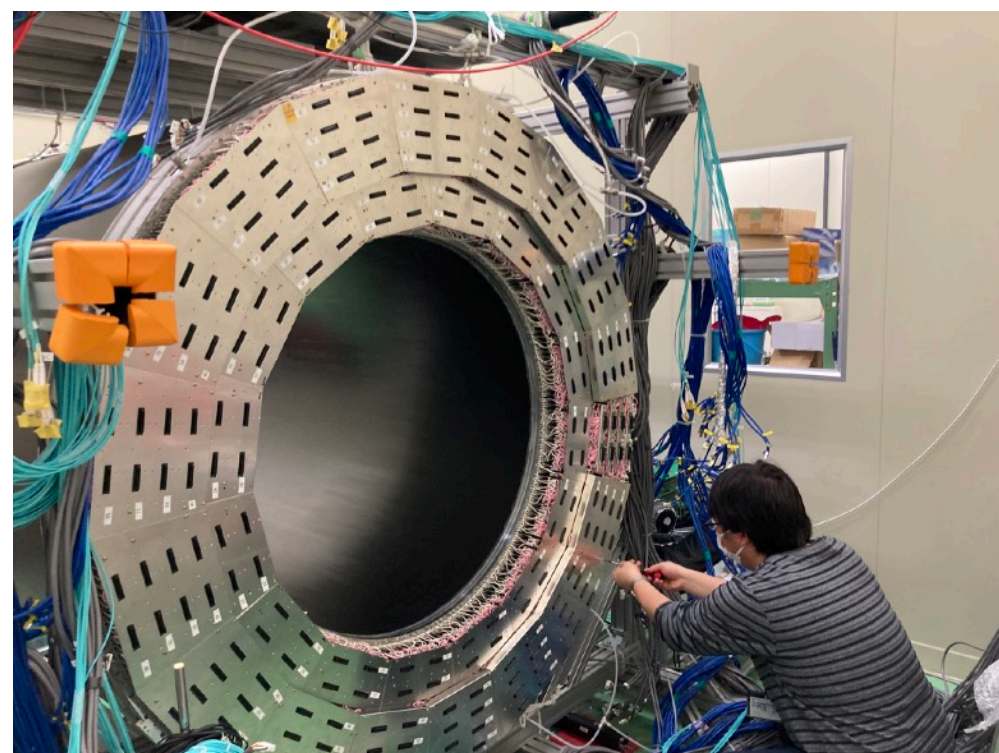
水冷チラー



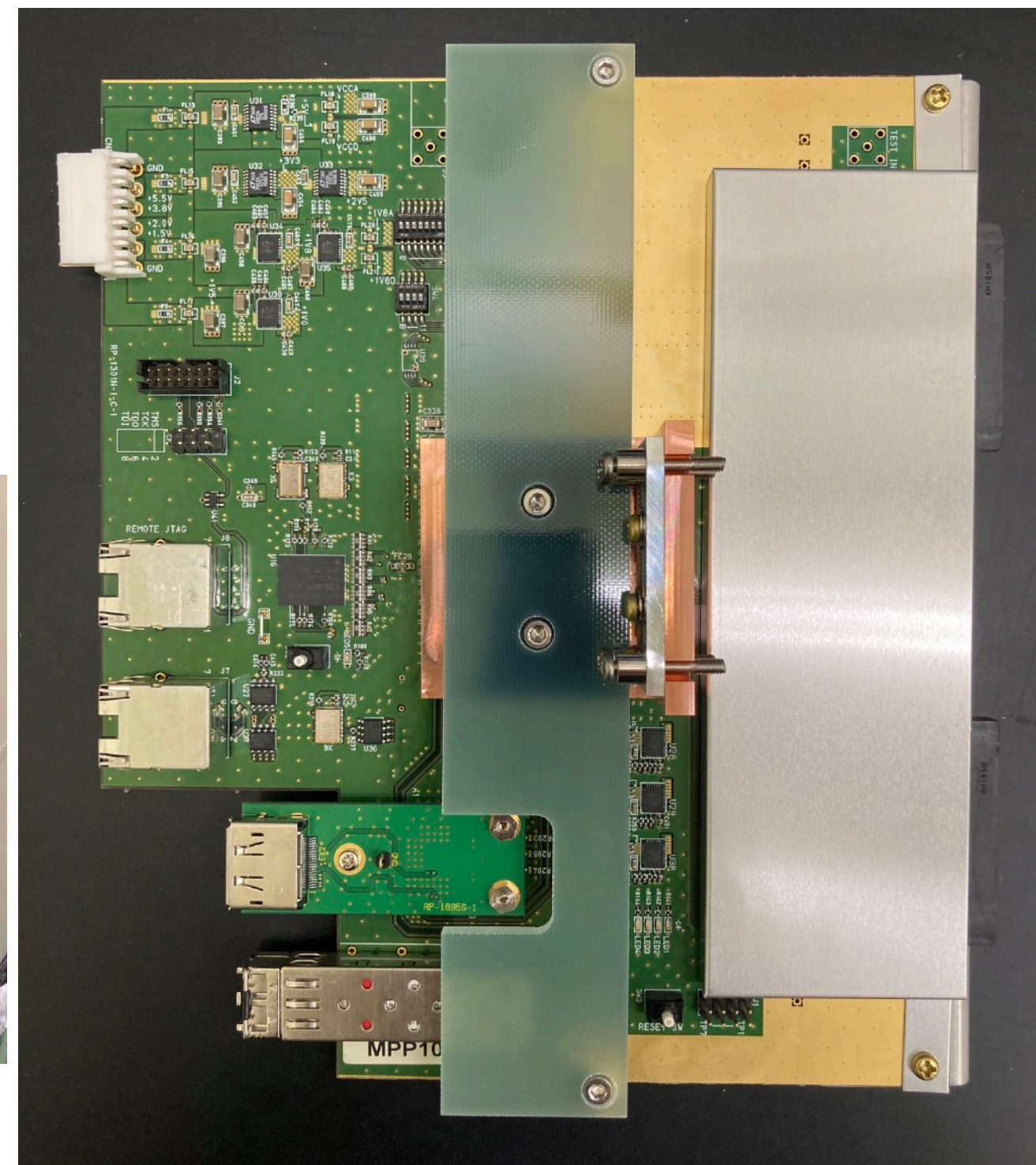
水冷銅パイプの固定治具



CDC + 水冷システム



導入前の解体



RECBE + 水冷パーツ

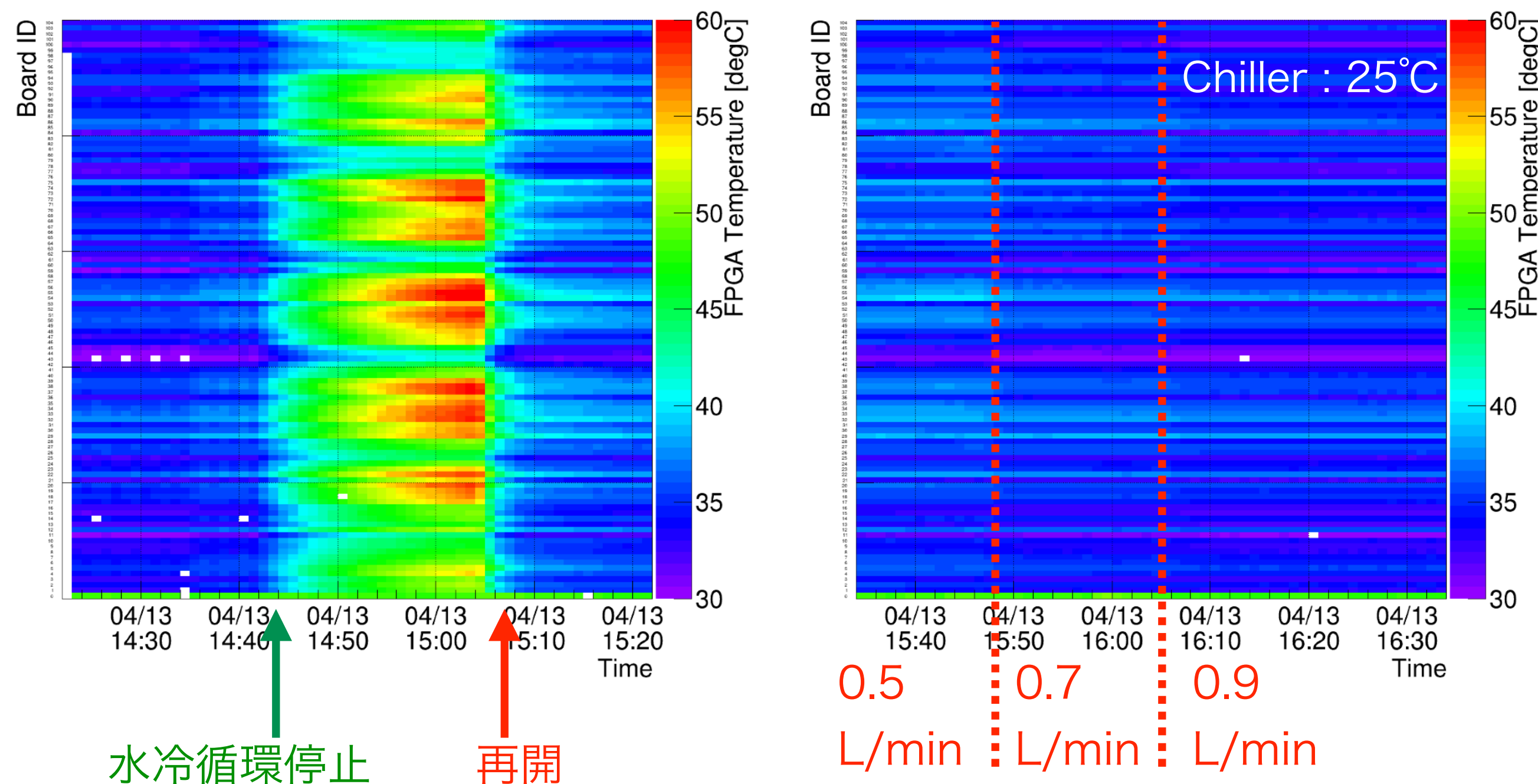
- 脱落防止対策済のボルト7本
- 水冷銅パイプを外さずにRECBE着脱が可能



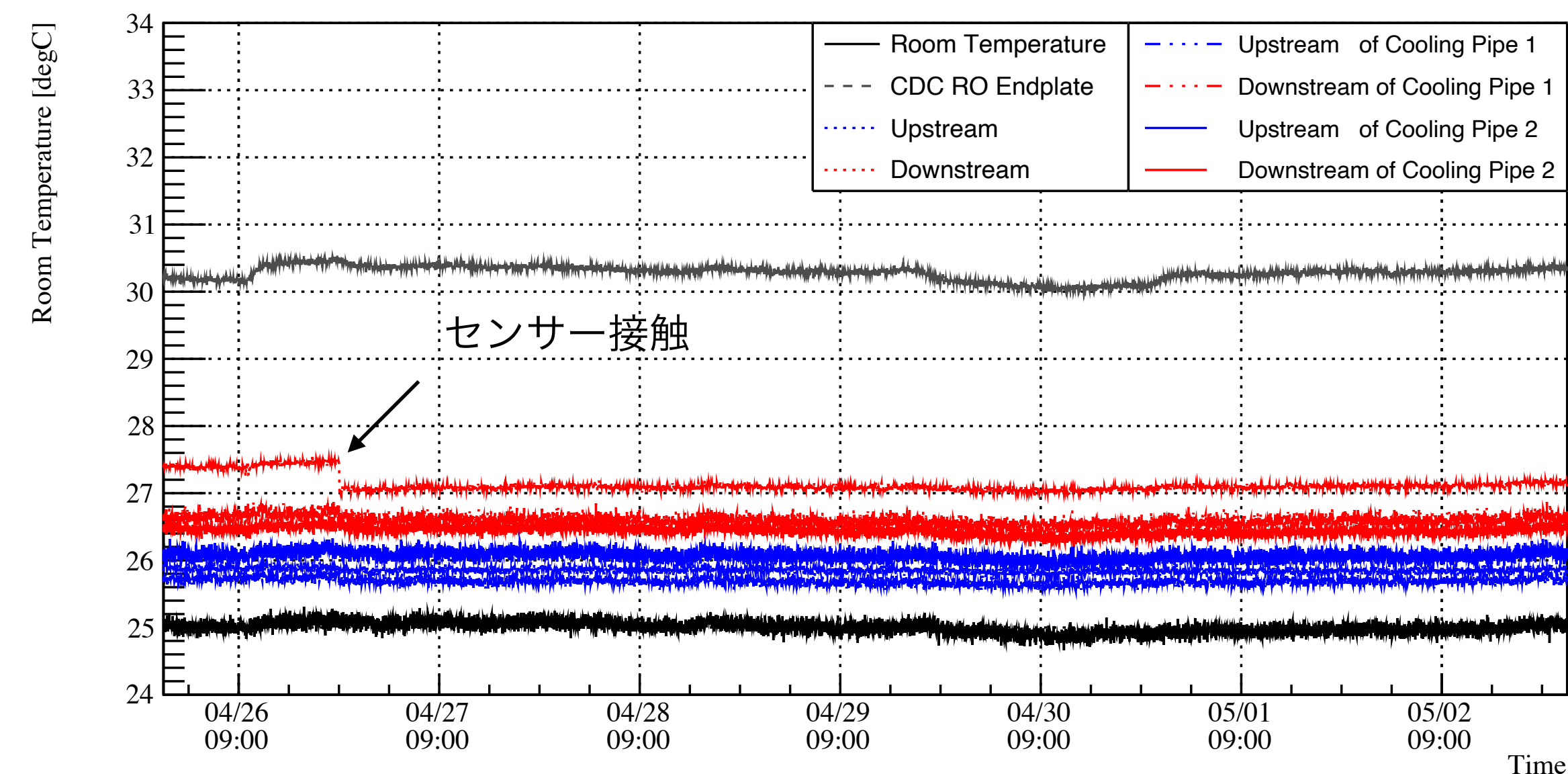
冷却水分配&流量調整

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

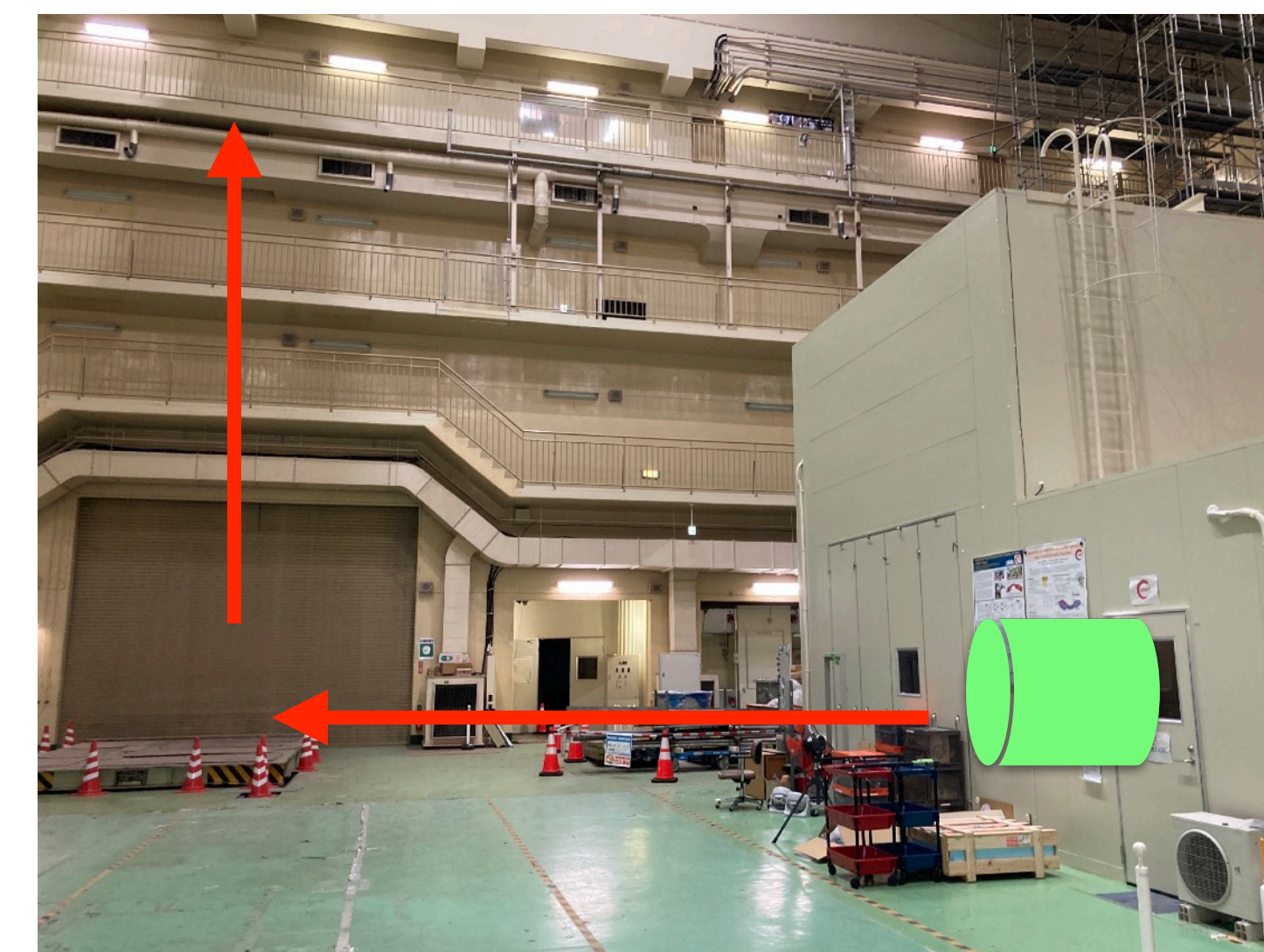
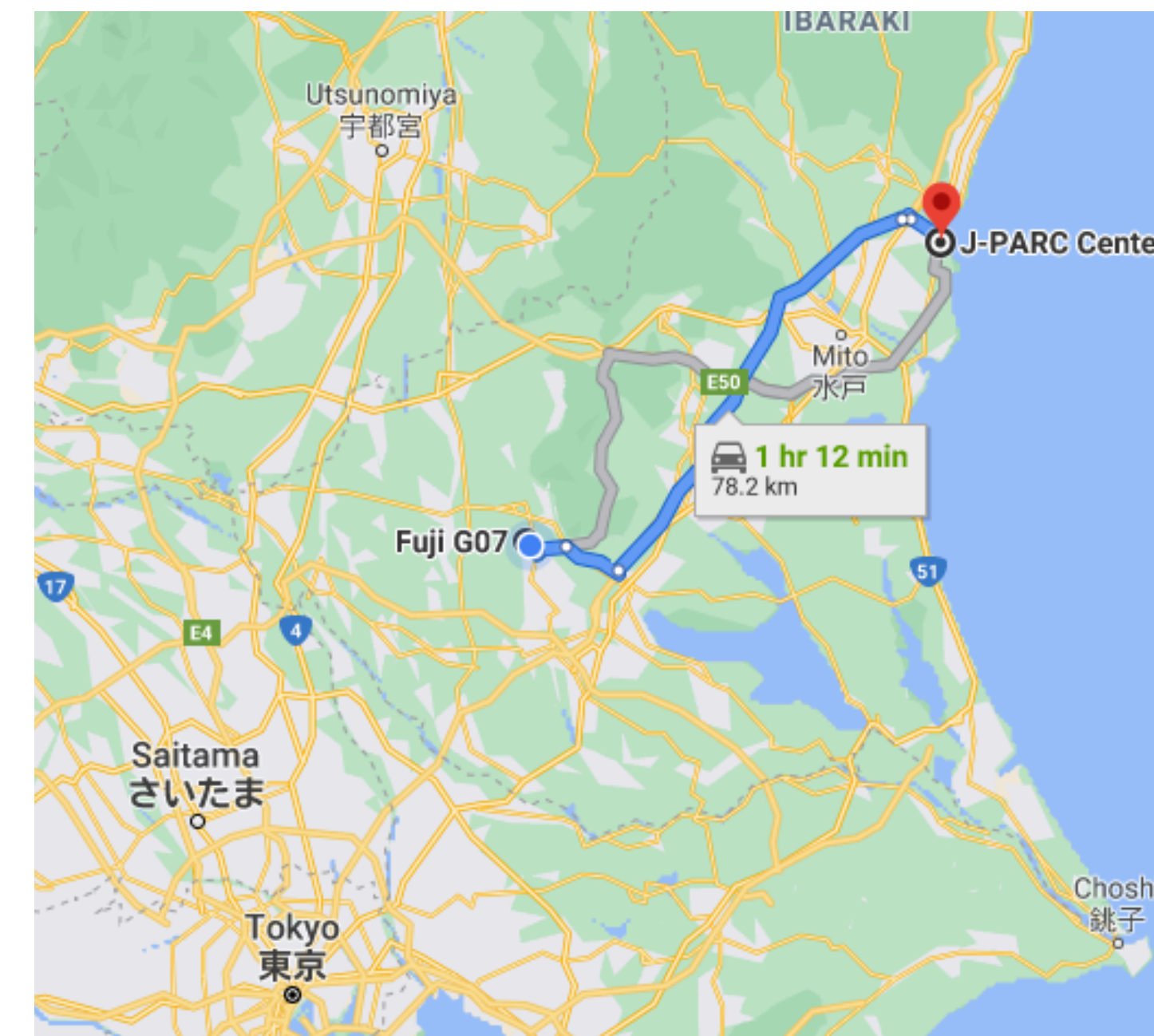
エアサス車 + ユニック車 + 10トントラック 1台 (関連機器の運搬)

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



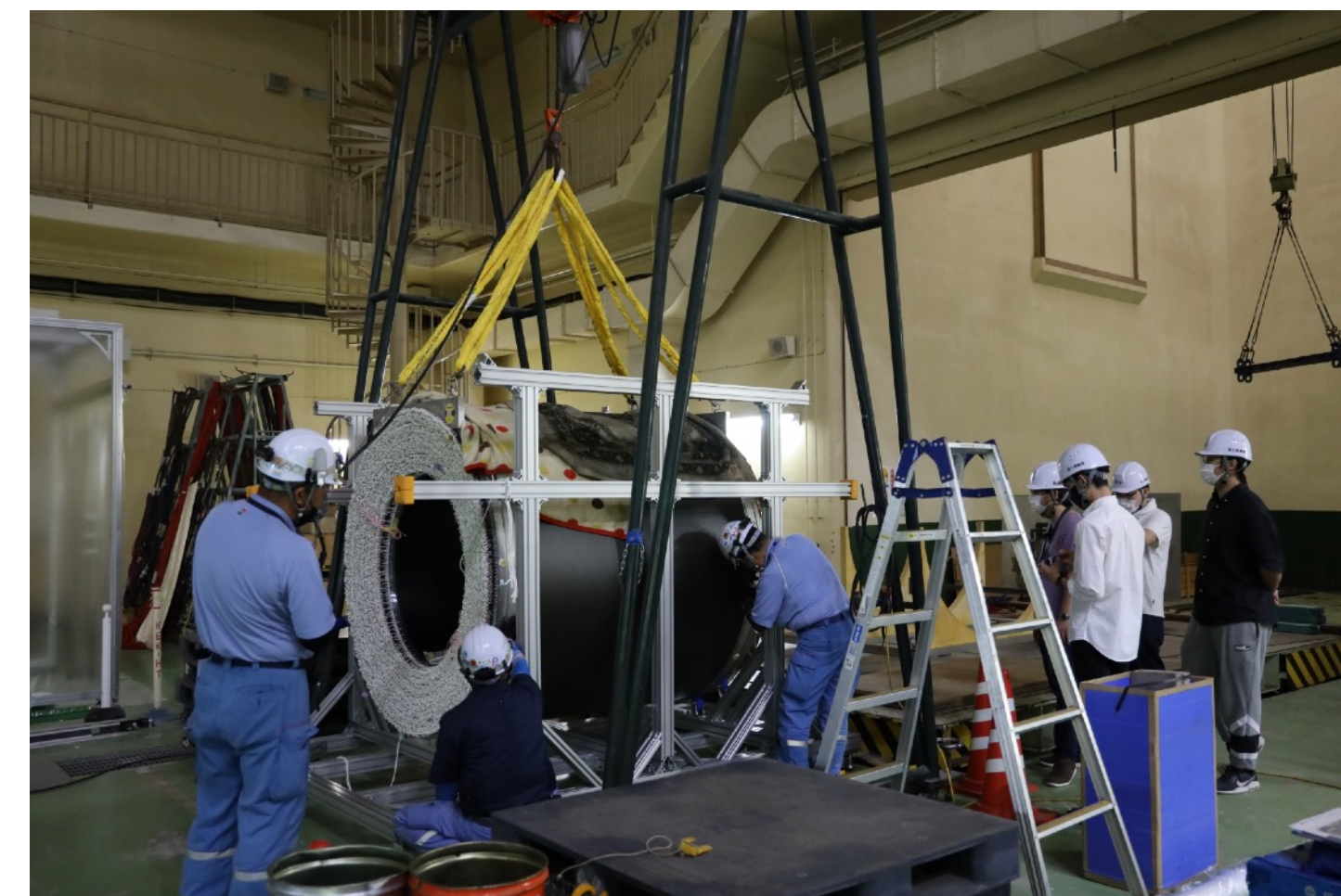
つくばからの搬出



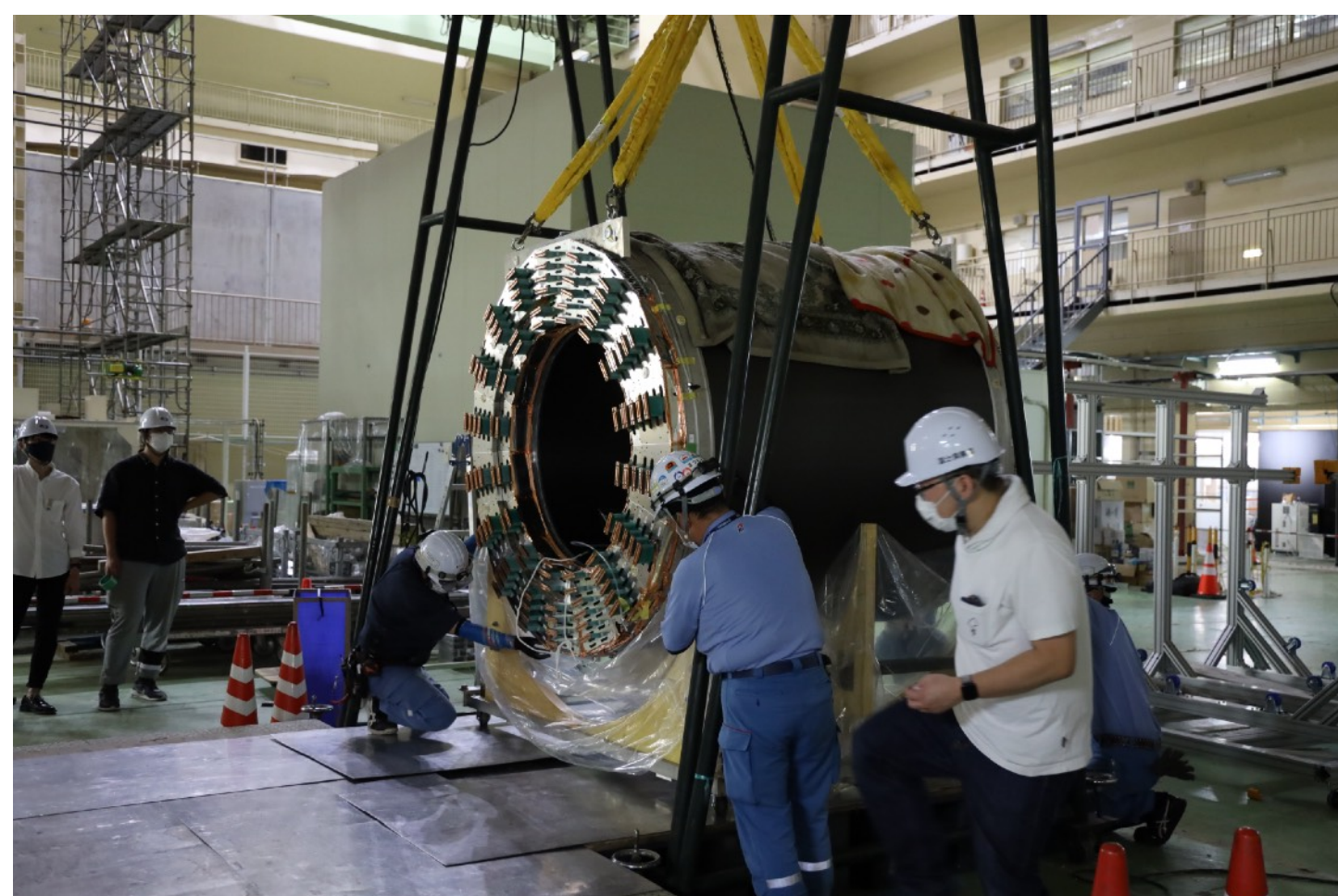
関連物品の梱包



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



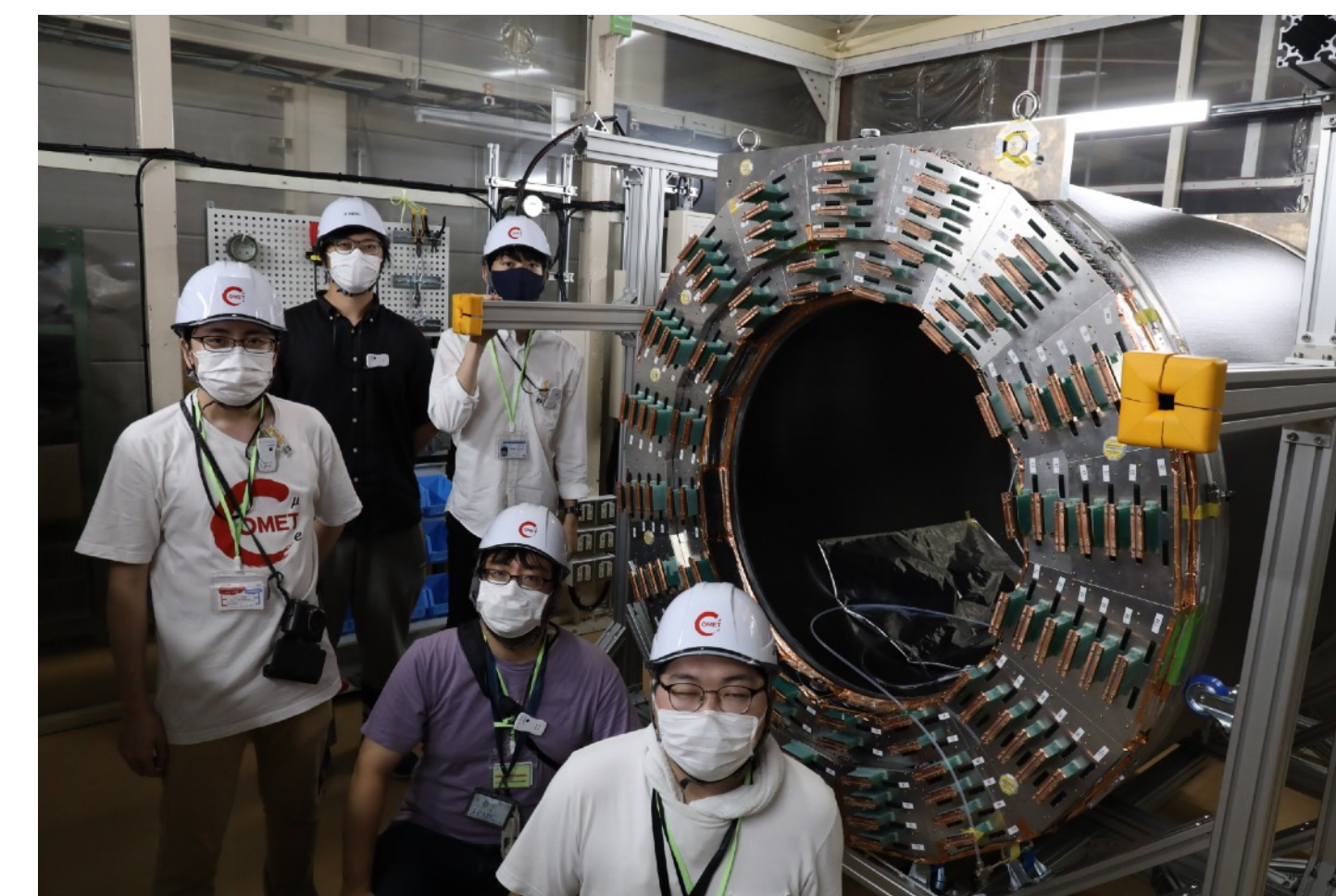
CDC検出器の積み下ろし



再度、回転架台へ載せ替え



テント内へ物品の搬入



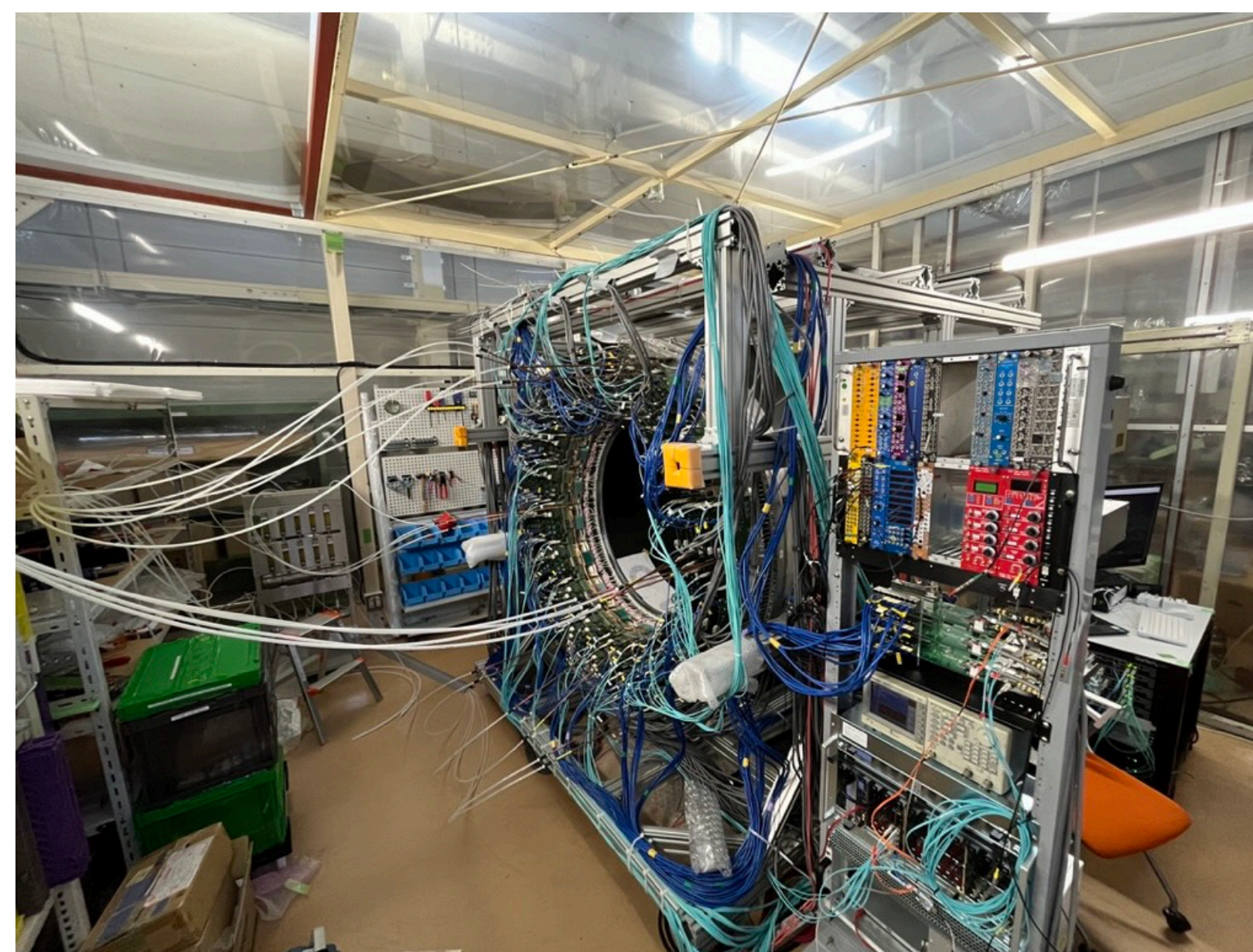
ミッションコンプリート！

J-PARCでのCDC再稼働

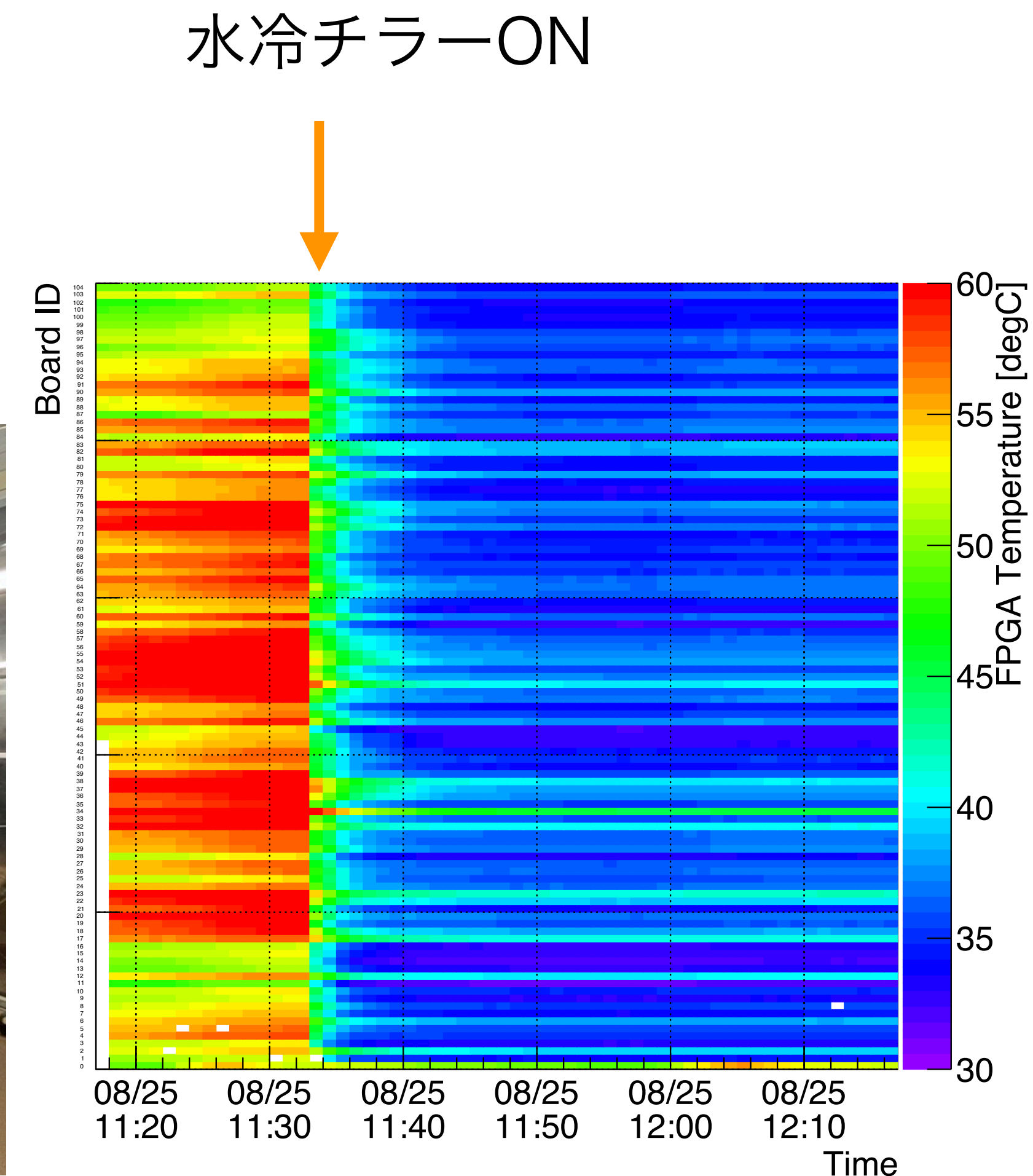
- ・まずはインフラ(電気,ガスなど)整備
- ・ワイヤーのチェック -> 問題なし! 輸送でのダメージは現時点でなし
- ・宇宙線試験用のトリガーカウンターのセットアップ
- ・読み出し電子回路RECBE 104枚の設置、ケーブル配線
- ・実機用水冷チラーを導入し、水冷システムの稼働
- ・現在、DAQの再立ち上げ中。DAQの改良、開発も進行中。



RECBE設置作業中

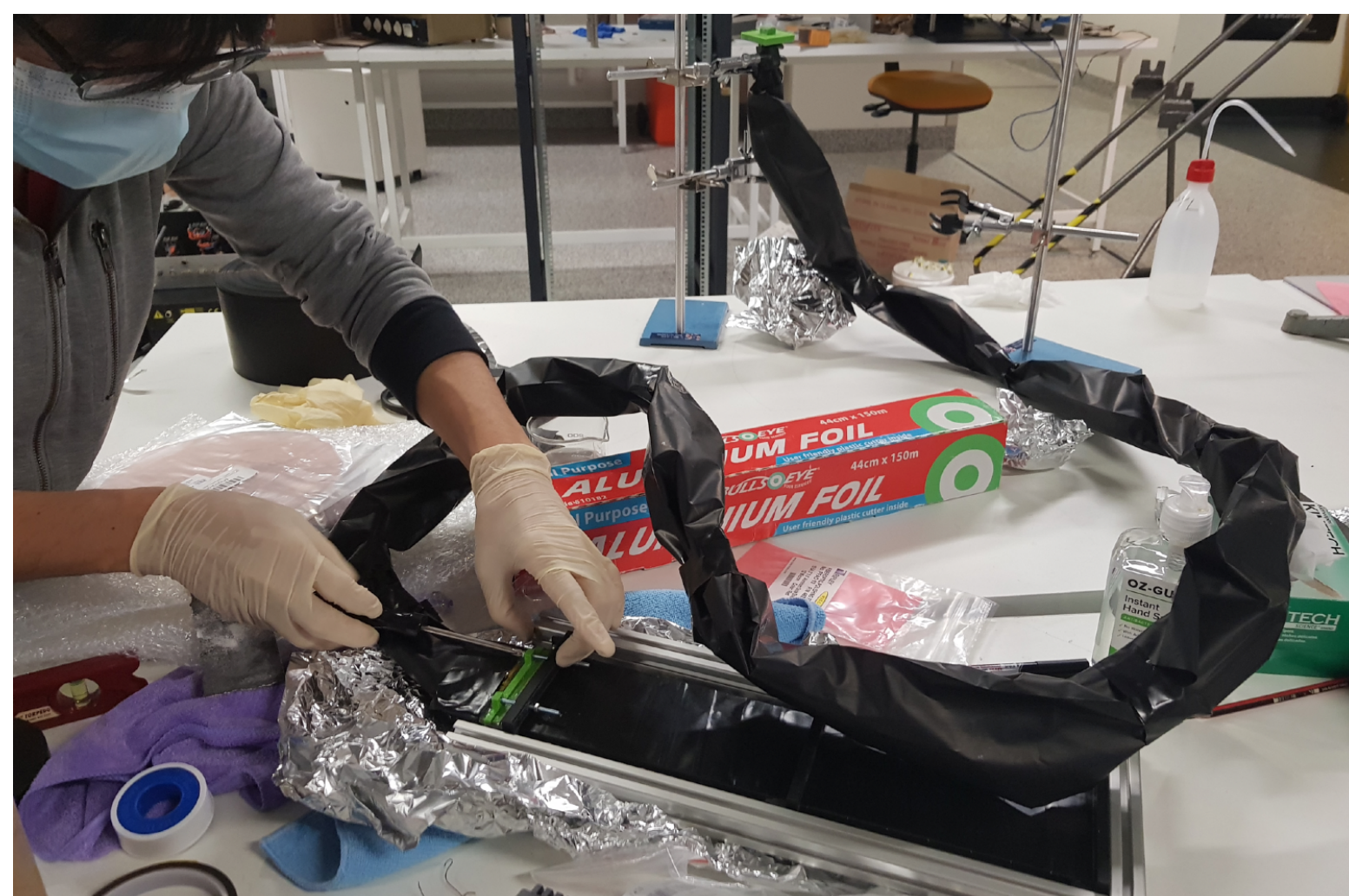


現在の様子

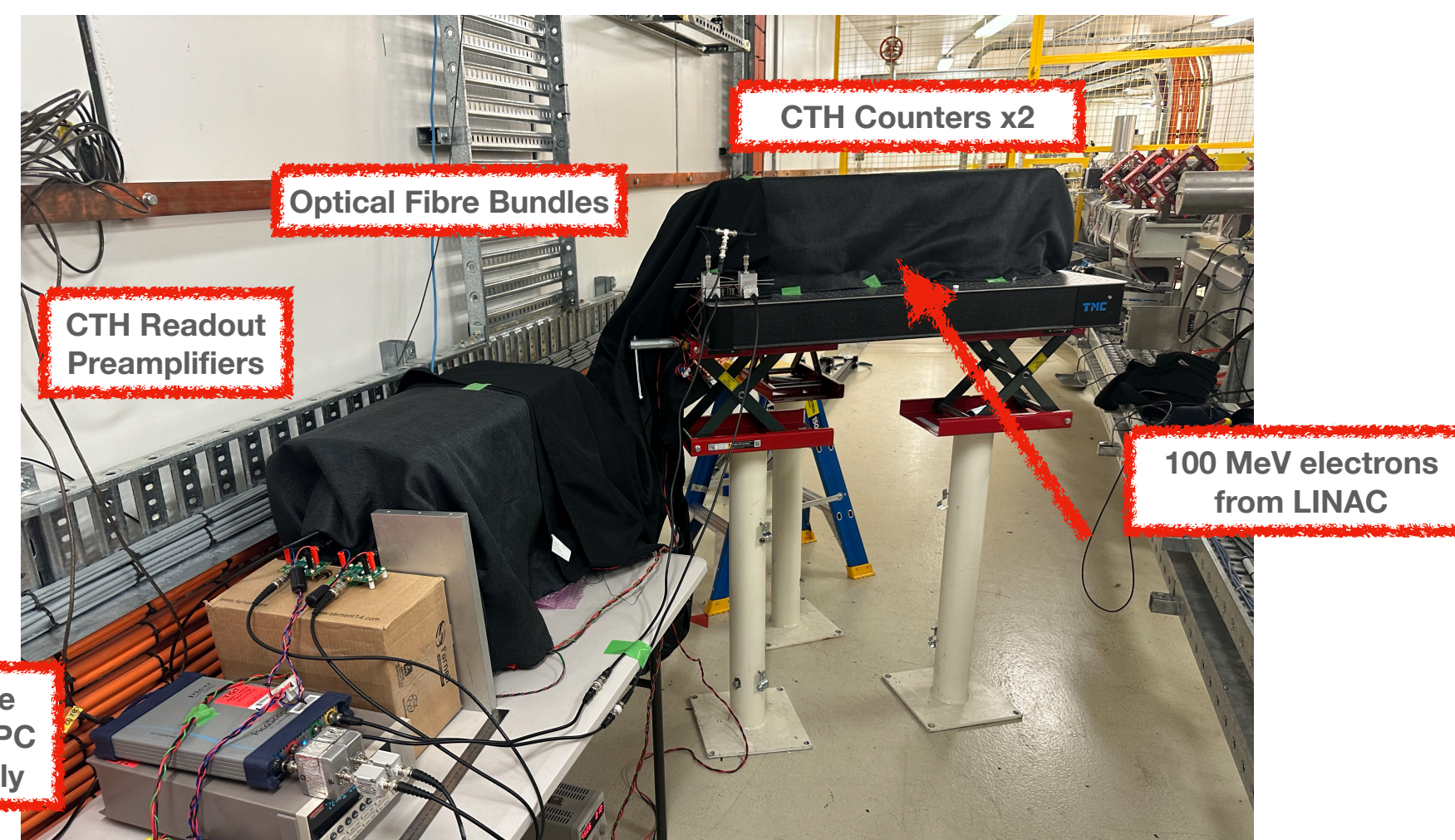


水冷システム稼働時のFPGA温度

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

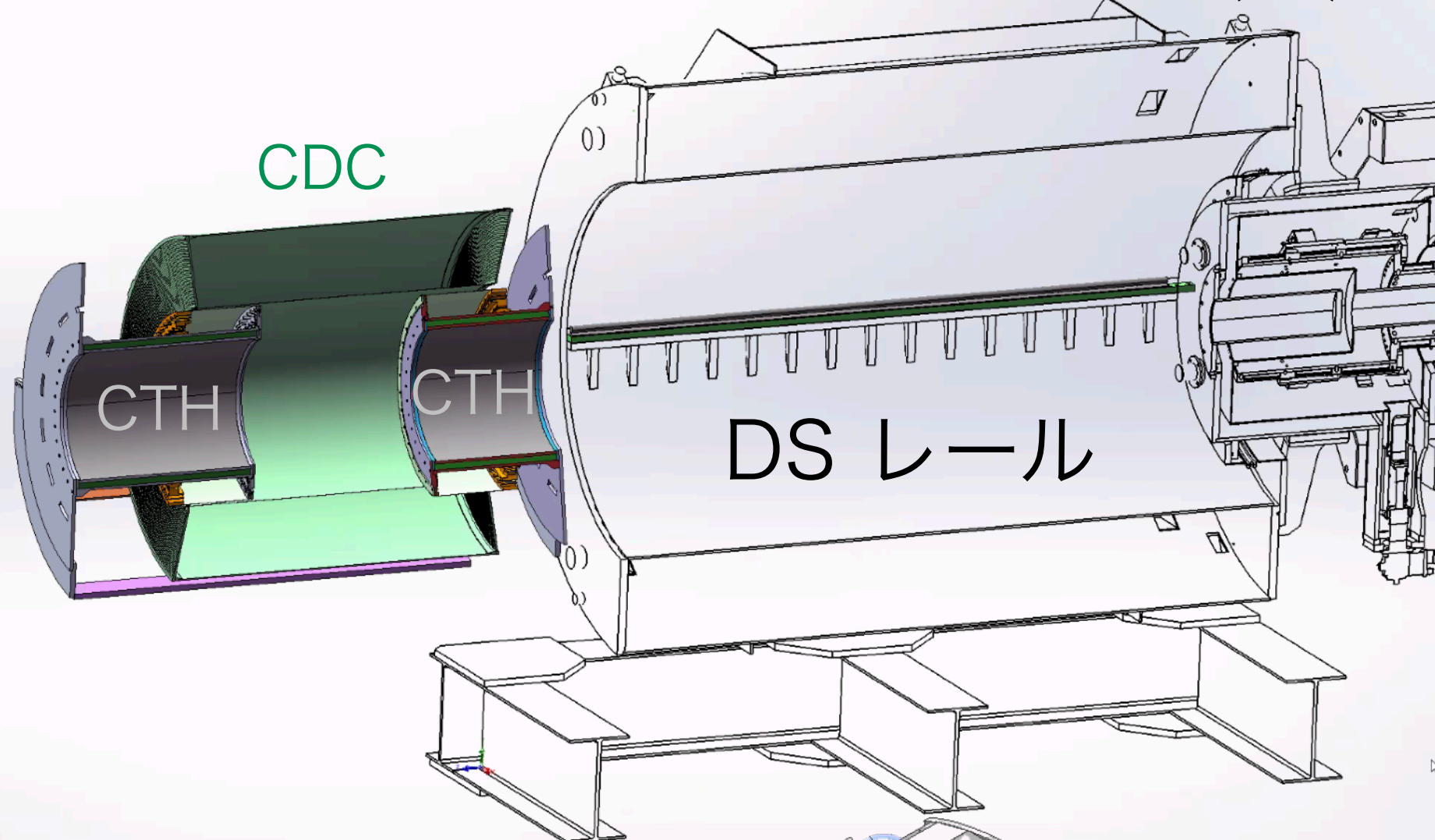


実機用プラスチックシンチレータ

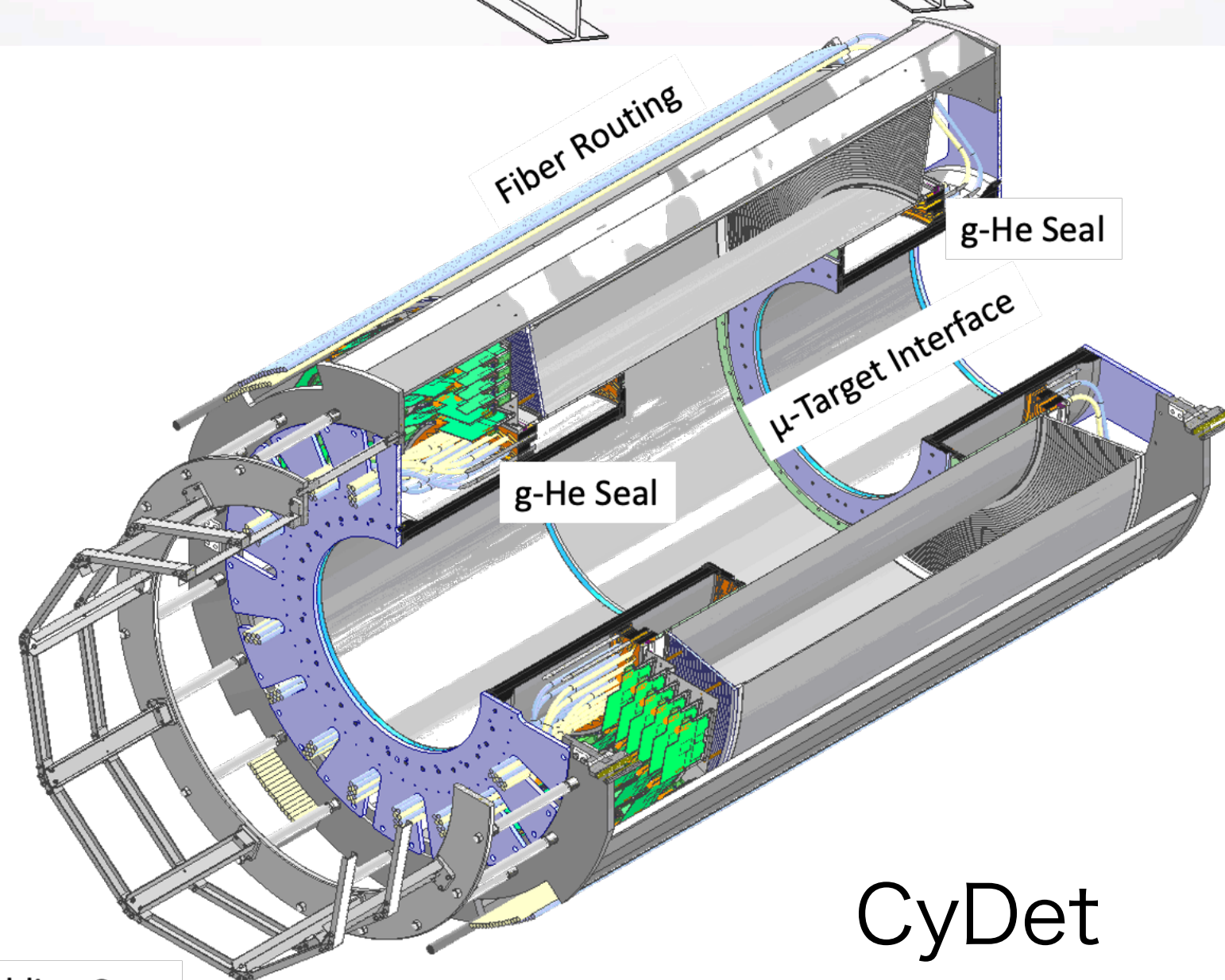
- 検出器デザイン(プラシン+ファイバー+SiPM)はほぼ決定
- ビーム試験を行い、カウンターとアンプの評価試験が完了@Monash
- SiPMの中性子による損傷を軽減するための冷却システムの設計、試作評価試験も継続中 @ 大阪/九州
- 試作機で $\pi/\mu/e$ ビーム試験 @ PSI 2023年11月
- 実機制作に向けて、シンチレータのQC(@九州大)を開始
- 支持機構やファイバーの取り回しなどの具体的な検討も進行中！

CyDet インストール機構

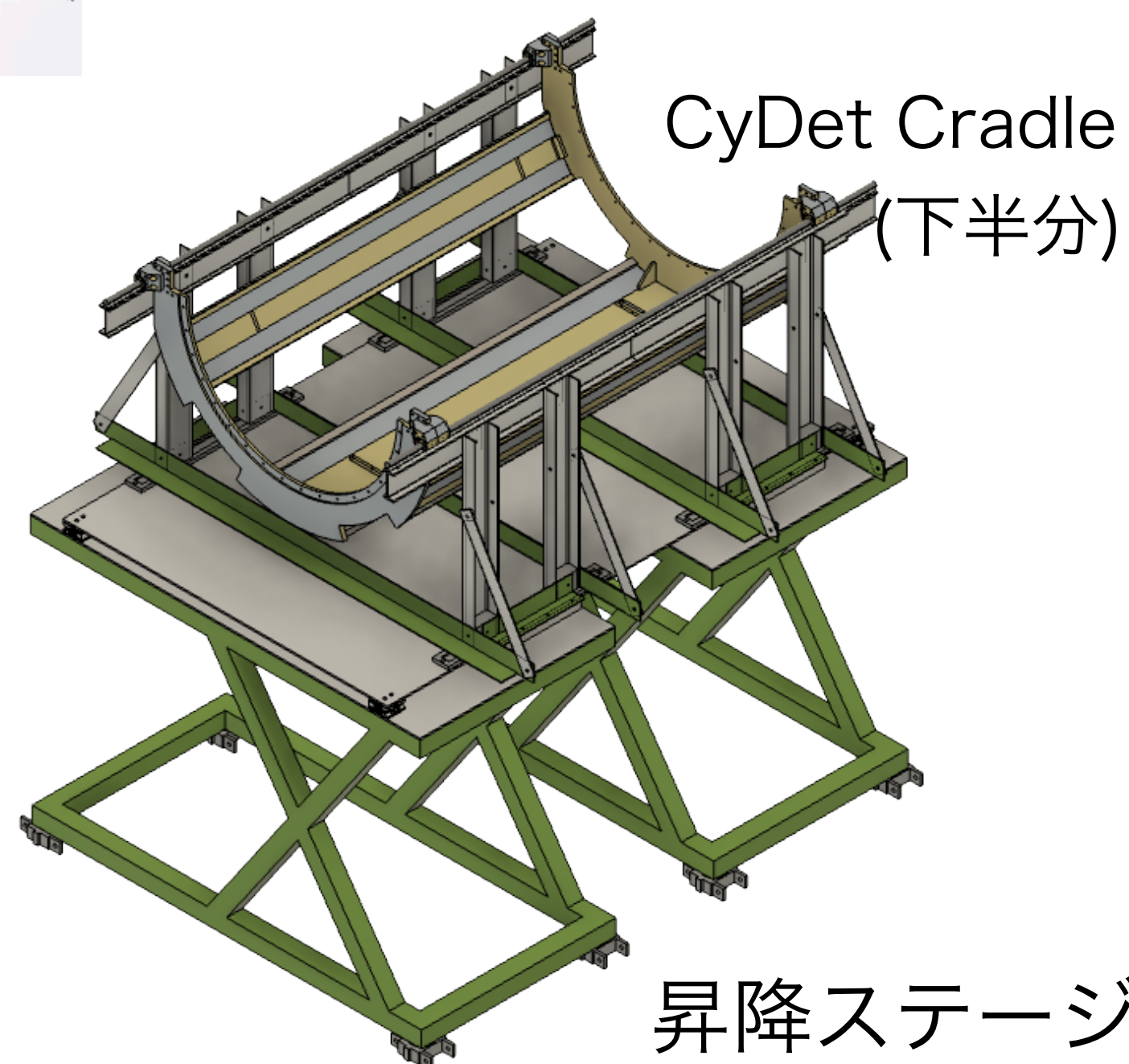
超電導検出器ソレノイド磁石(DS)



- 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

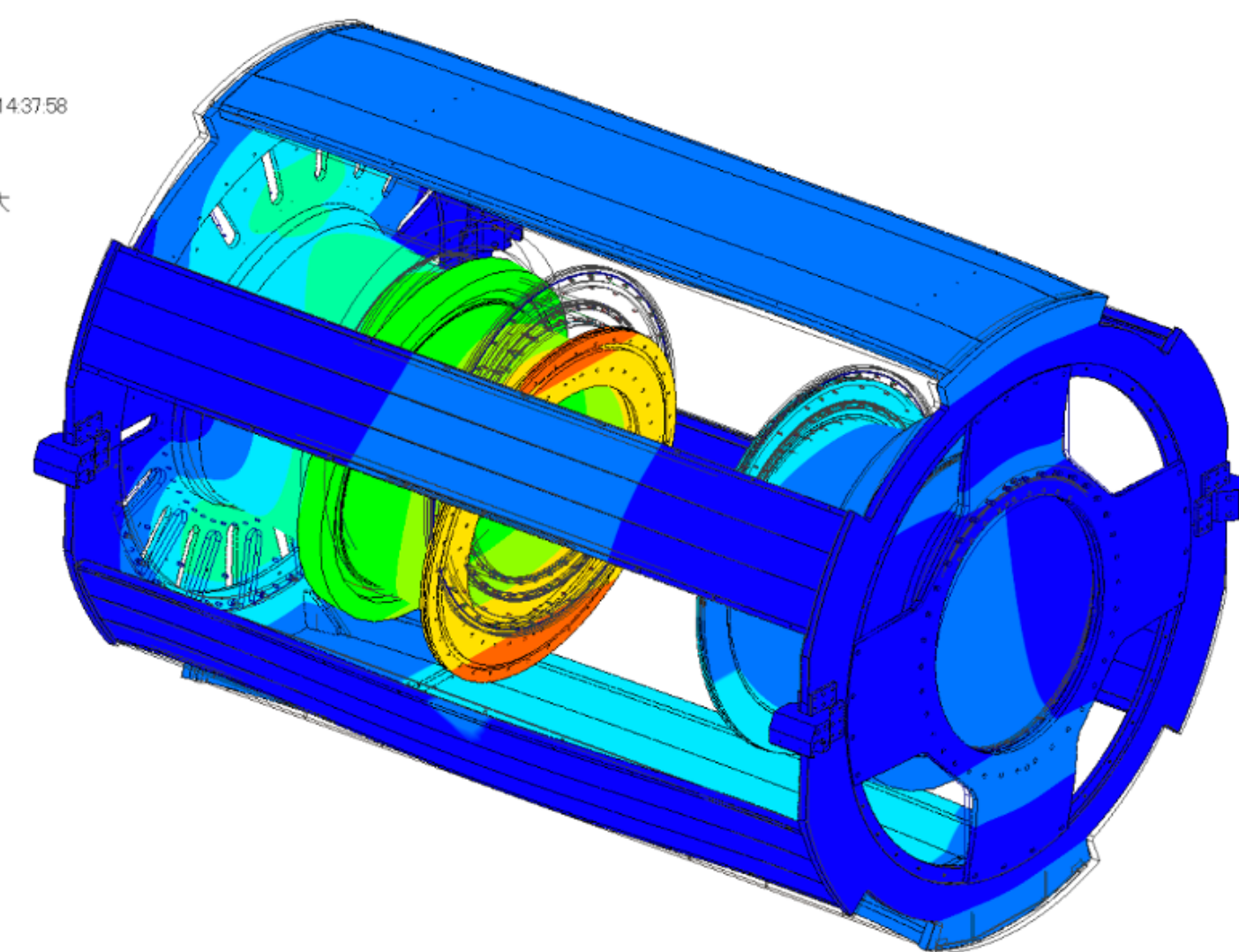
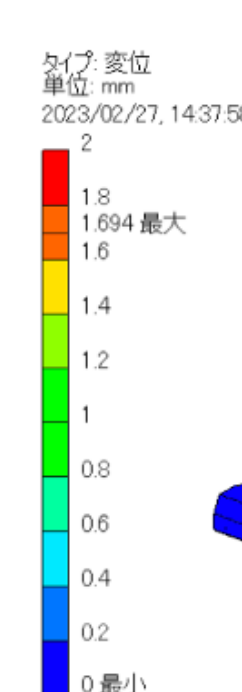


CyDet



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) → 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 → 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/ケーブルリングなど、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

