

計測システム研究会2022 @ J-PARC

ATLAS検出器アップグレードにおける

Outer Barrel

モジュール単体試験からOBの組立に向けた試験環境の整備

2022年11月17日～18日

釣 希夢 (お茶の水女子大学)

On behalf of the ATLAS ITk Pixel group

HL-LHC ATLAS Experiment

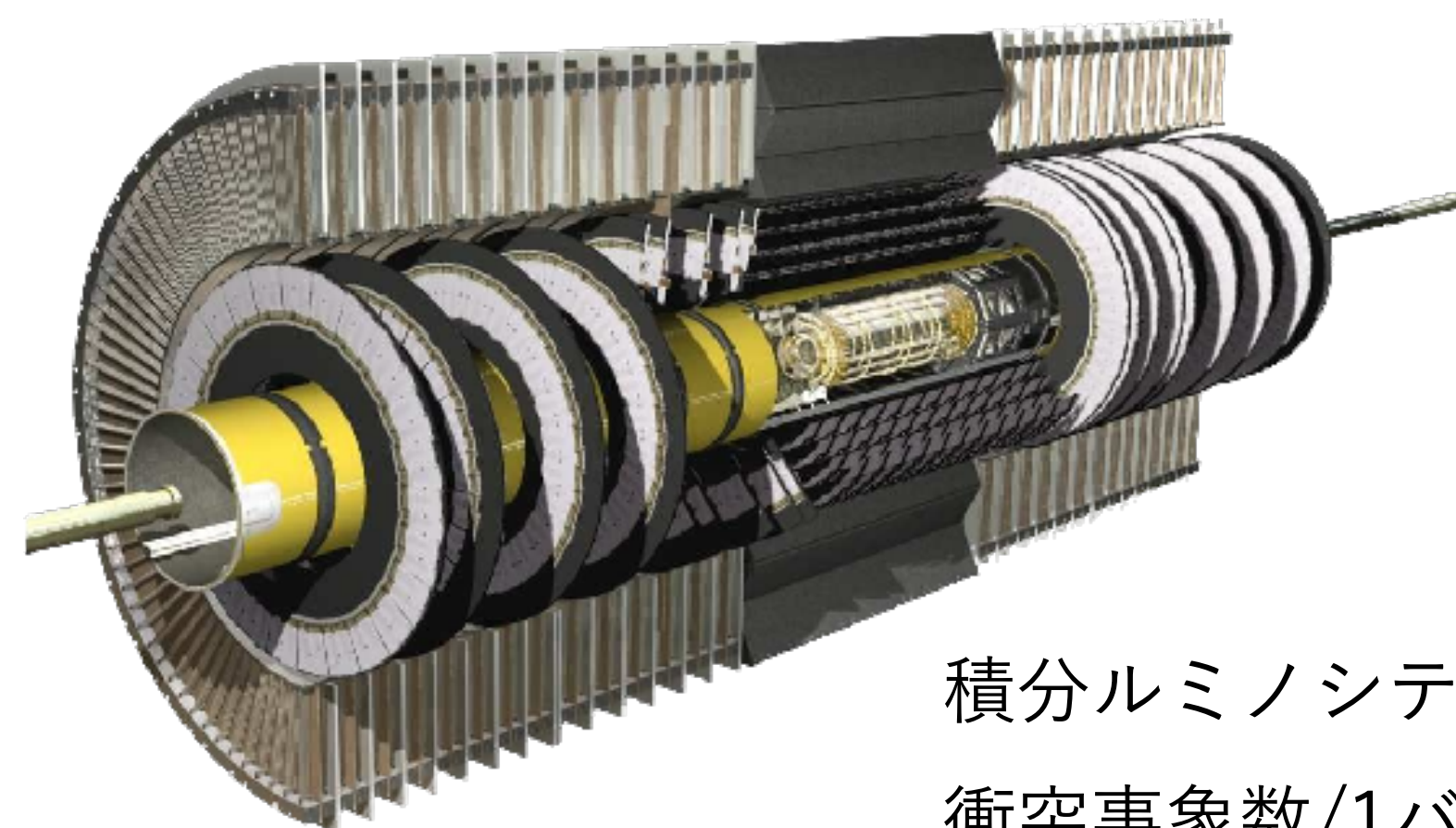
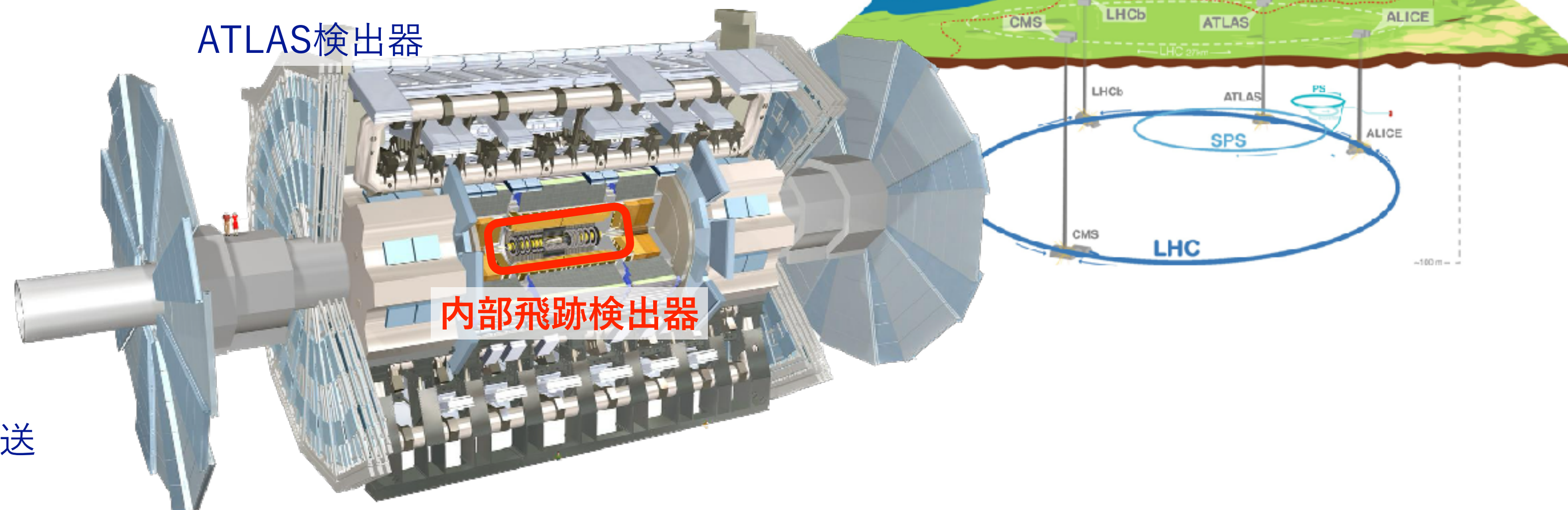
ATLAS実験

- 標準模型の精密測定
- 新粒子探索 など様々な測定

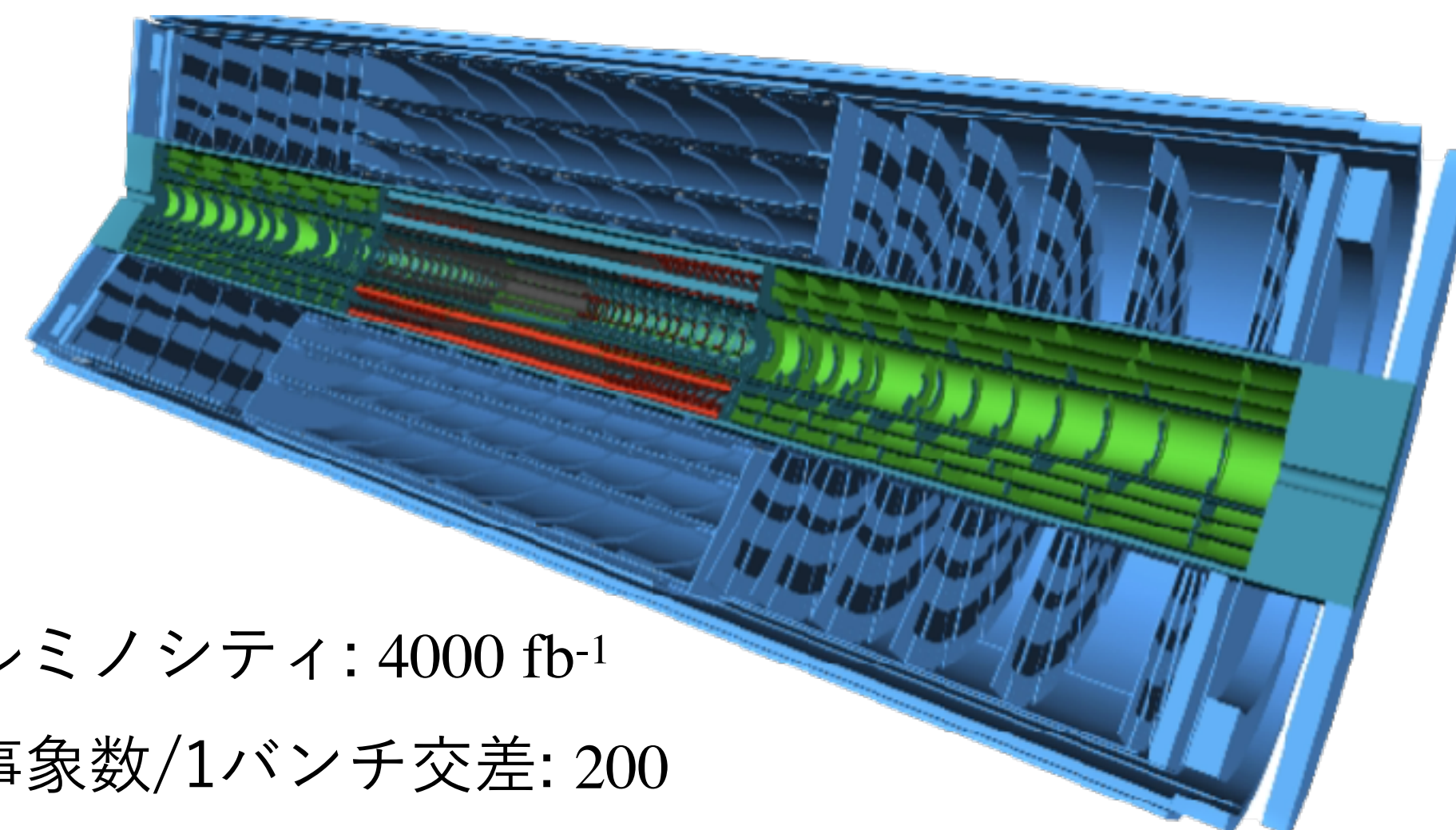
高輝度(High Luminosity) LHC 計画

- 統計量の増加 → 高放射線耐性
- 粒子密度の増加 → 高粒度・高速データ転送

大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)



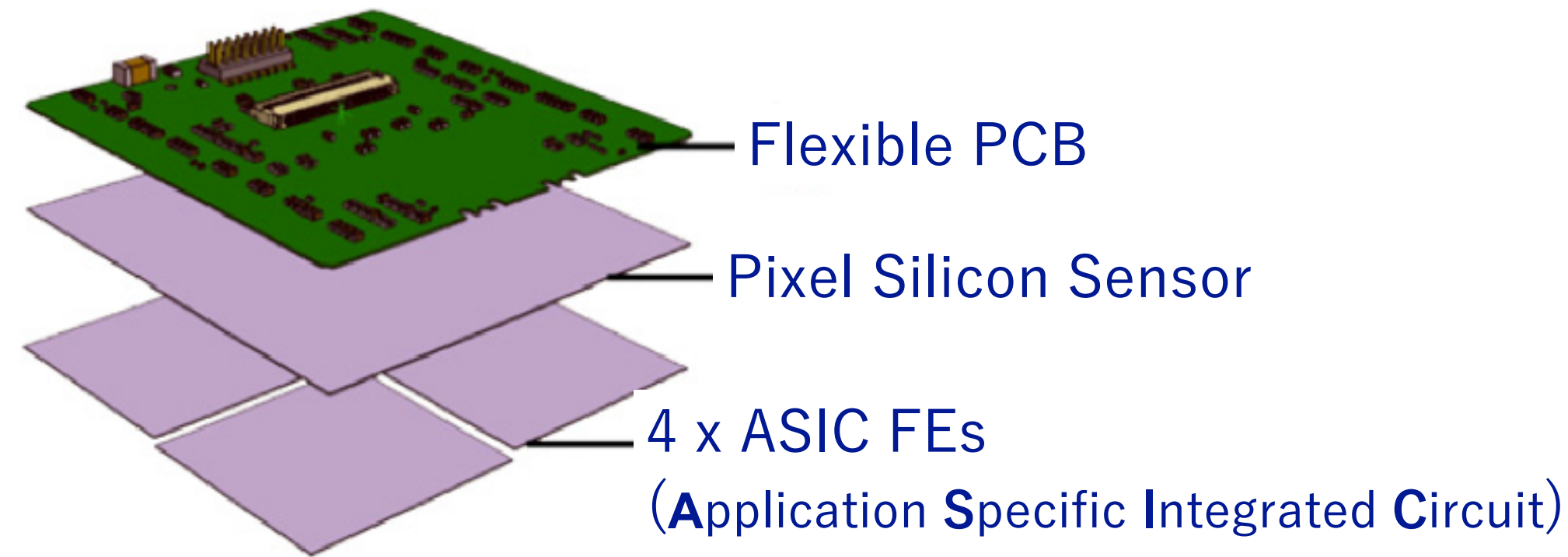
積分ルミノシティ: 300 fb⁻¹
衝突事象数/1バンチ交差: 70



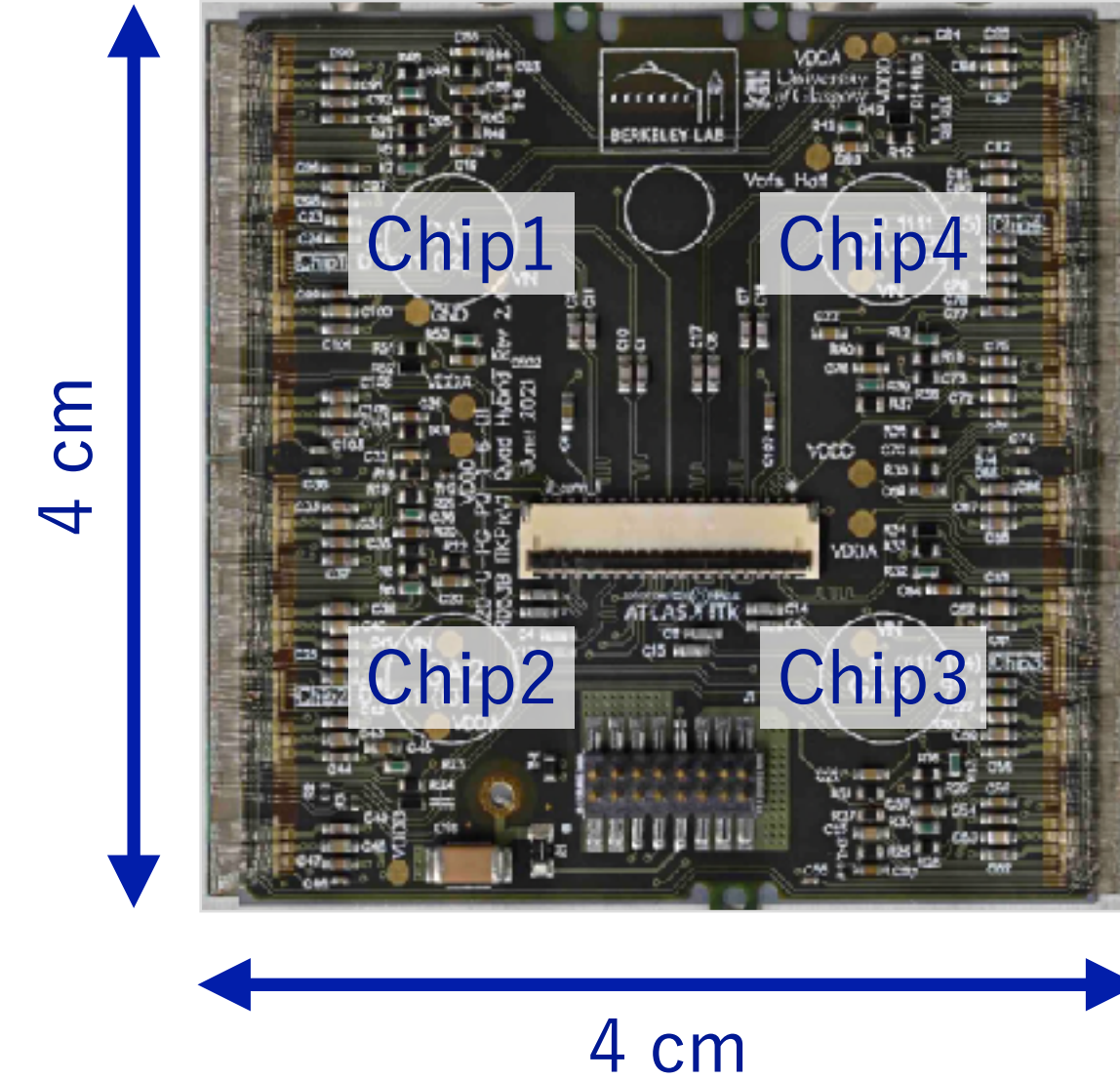
積分ルミノシティ: 4000 fb⁻¹
衝突事象数/1バンチ交差: 200

ATLAS Upgraded Pixel detector

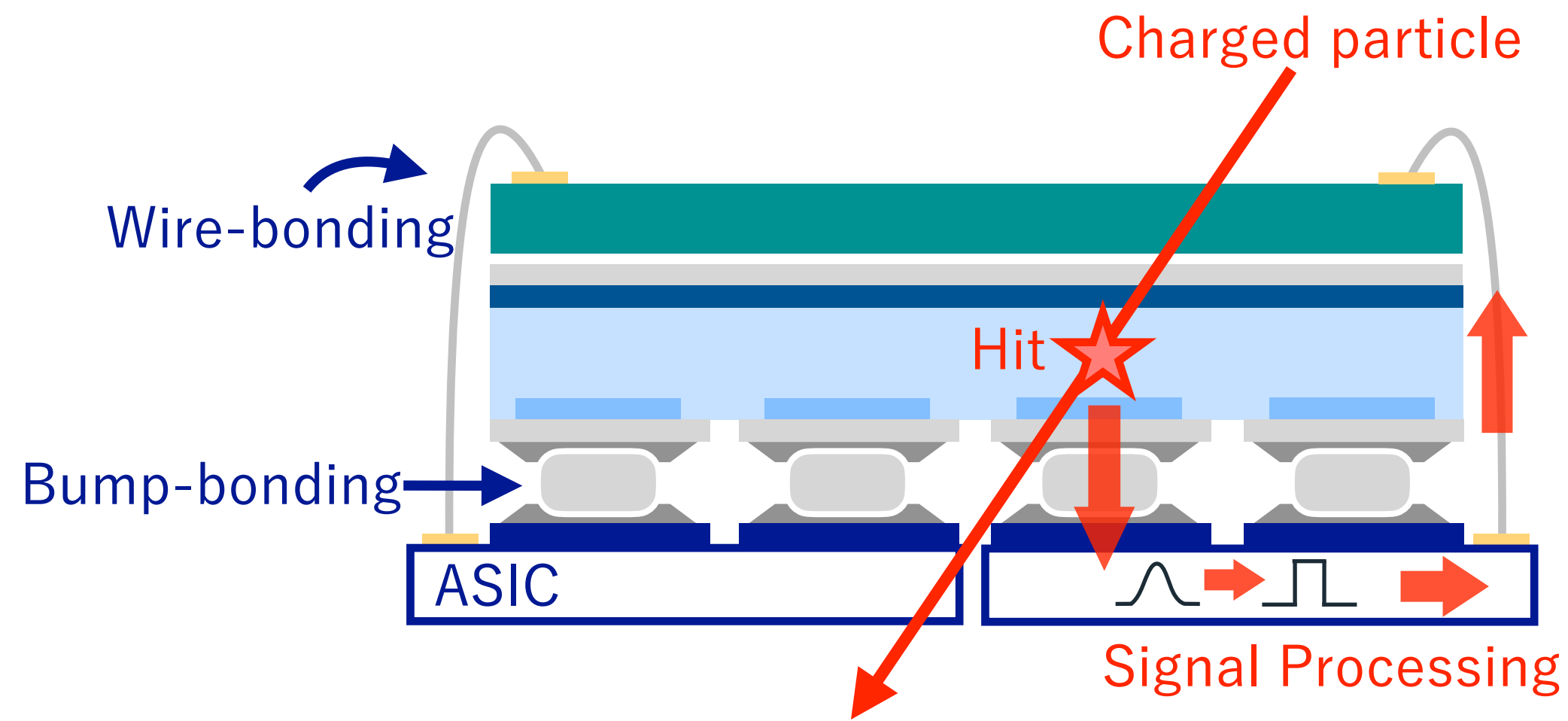
ITk pixel検出器



ITk pixel検出器の分解図 [1]



ITk pixel検出器の上面写真

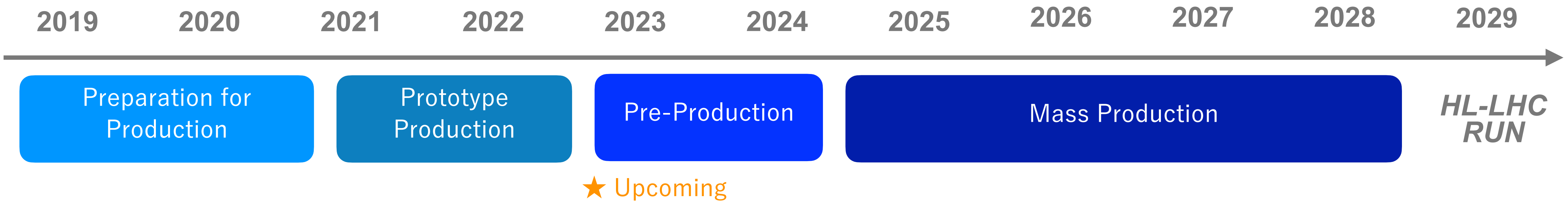


荷電粒子に対する応答の模式図

Feature	現行ピクセル検出器	ITk
Pixel size [μm^2]	50 x 250	50 x 50
Number of pixels/chip	26680	153600
Data rate [Gbs]	0.16	5.12

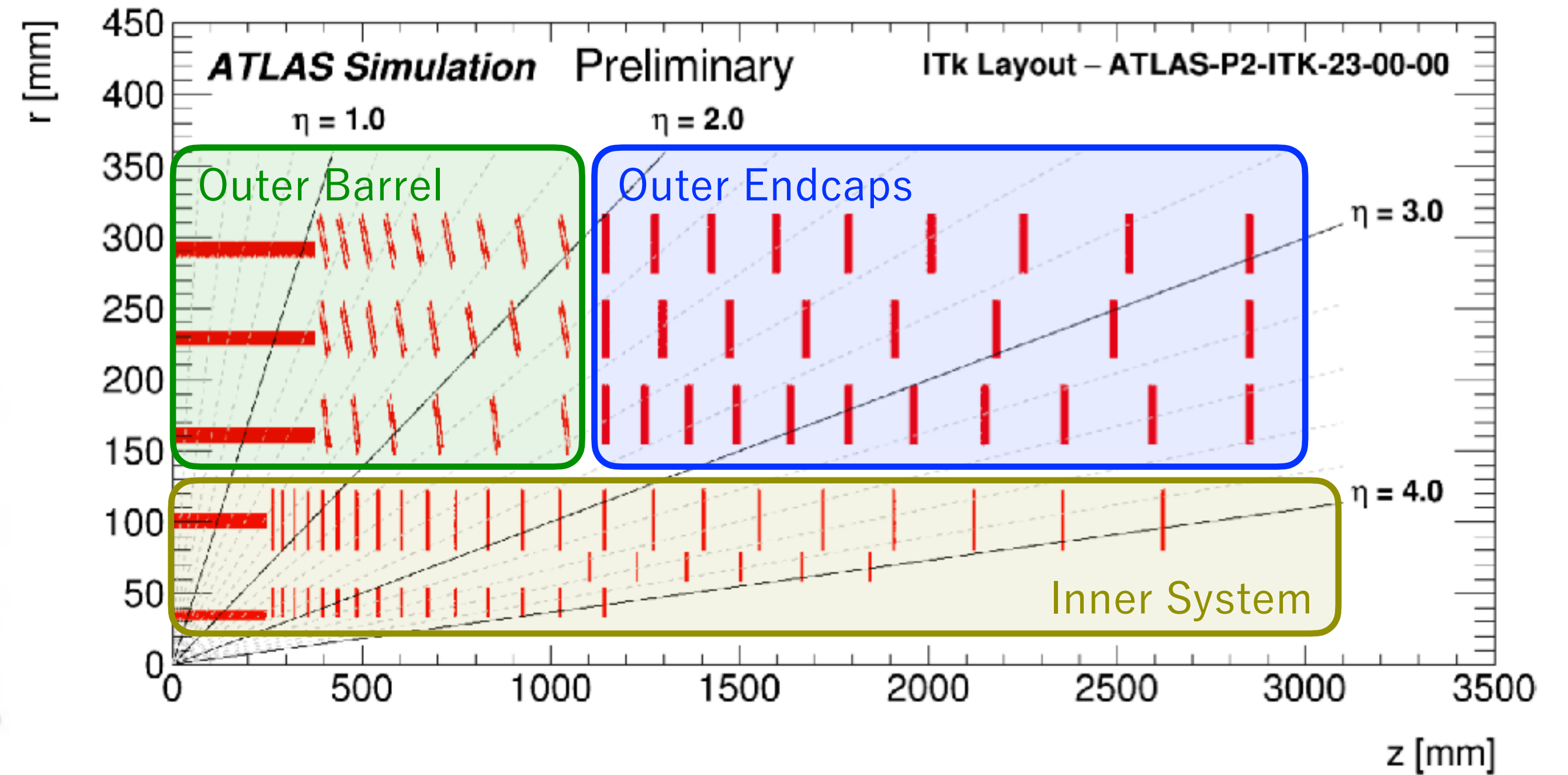
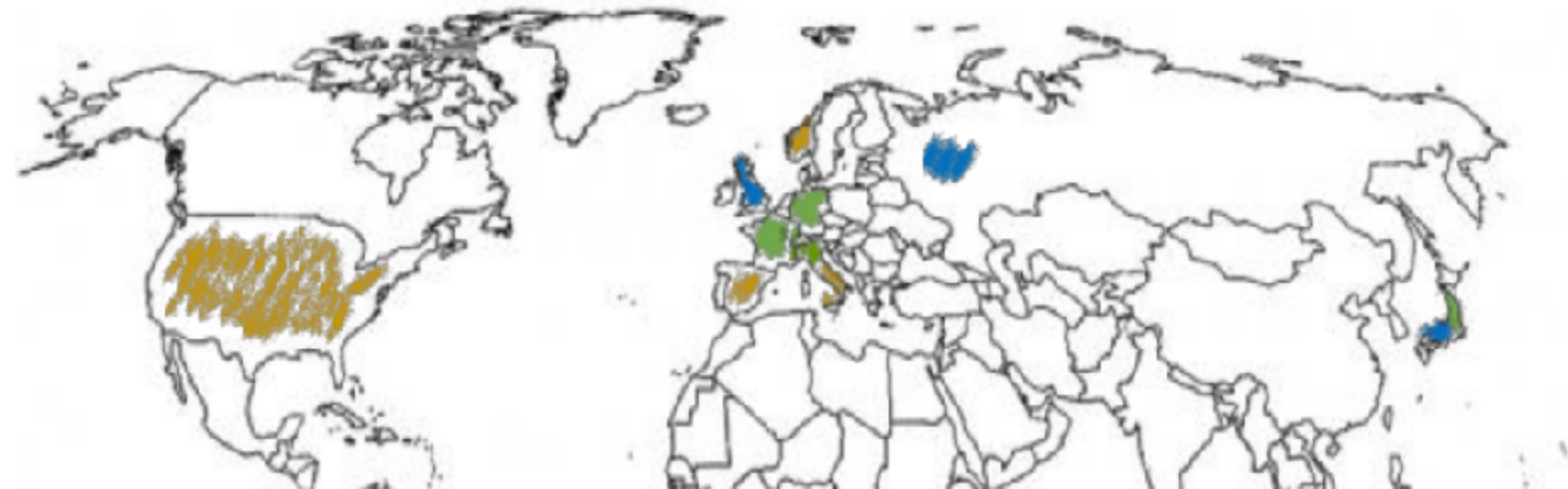
統計量・粒子密度の増加に対応する
高粒度・高速データ転送・高放射線耐性を有する検出器

Production Plan for ITk pixel modules



◎ ITk全体: ~10,000 pixel modules

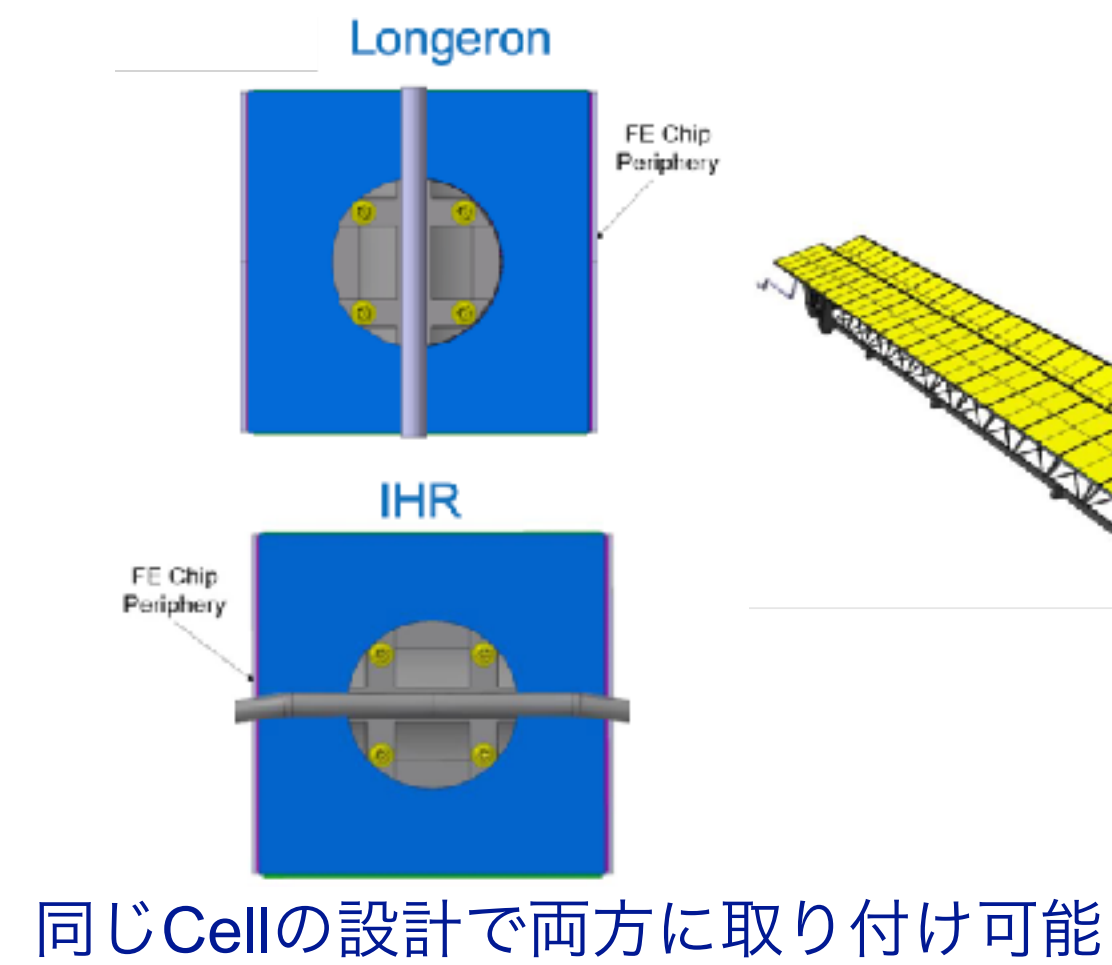
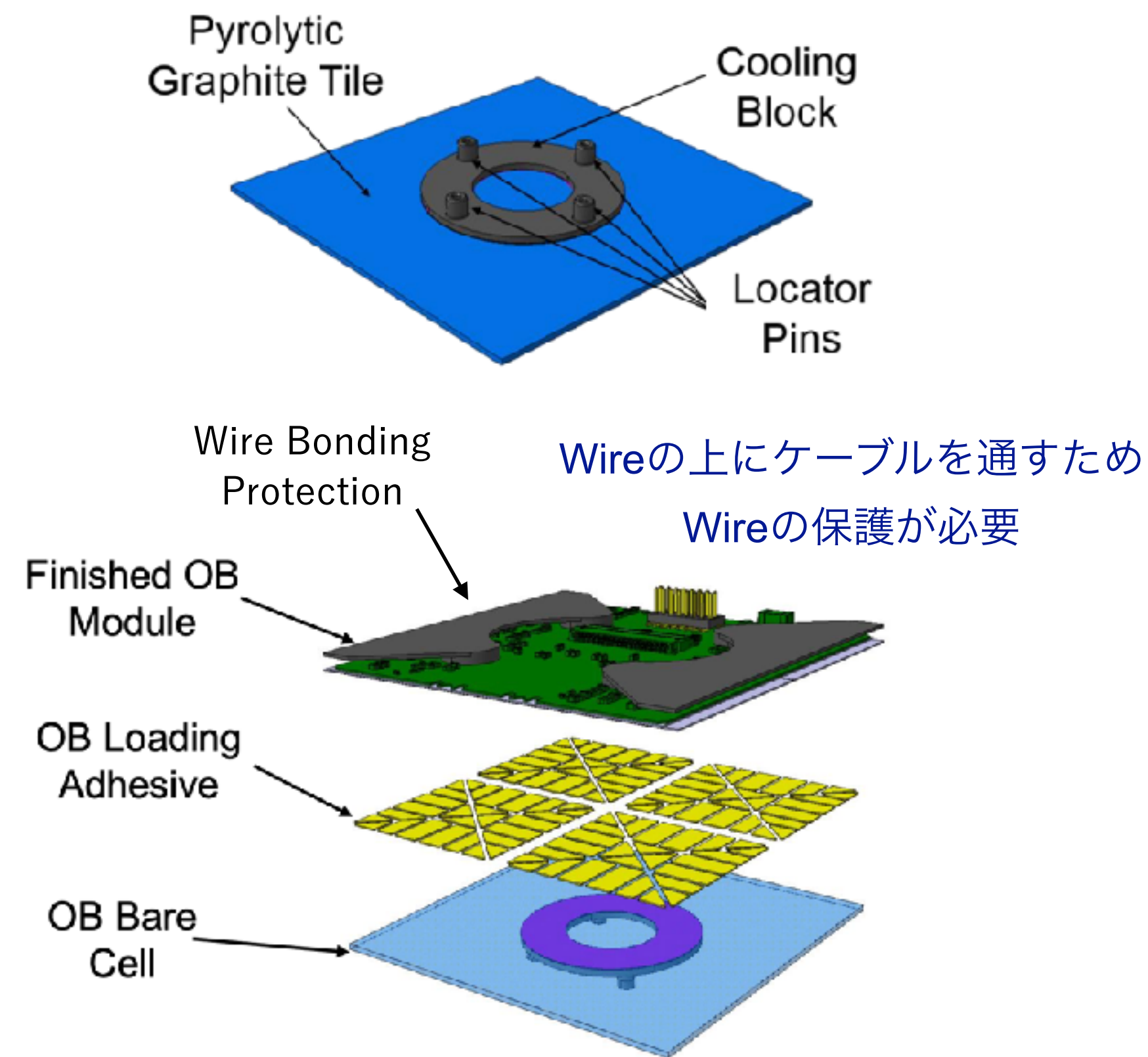
- 日本 : 2,200 pixel modules
- **Outer Barrel (OB) : 1350 pixel modules**
- Outer Endcaps (OE) : 850 pixel modules



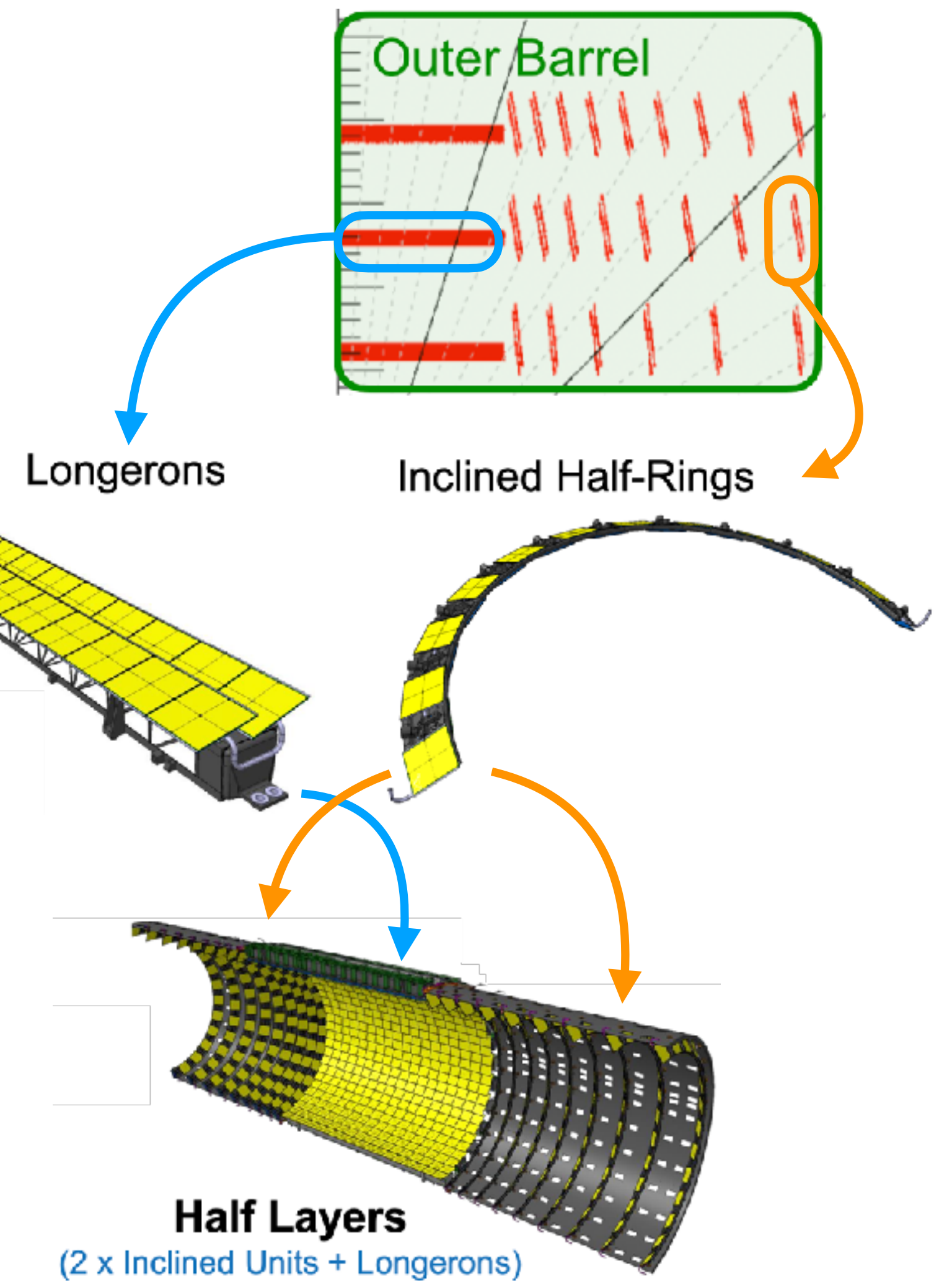
Layout schematic of active elements in the r-z projection of the ITk Pixel detector

Outer Barrel Pixel Module

- ASICで生じた熱を外部へ放出するために、冷却用のCellを取り付ける
 - Cooling Block (ALG1808) + Pyrolytic Graphite Tile (Pyroid® HT or TPG®)

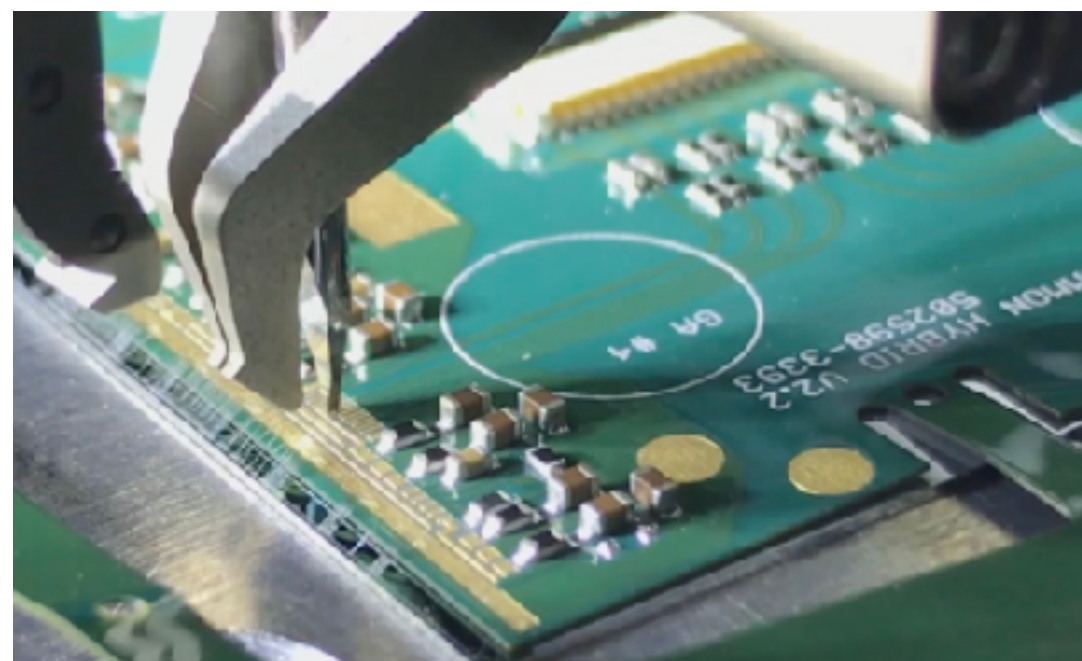
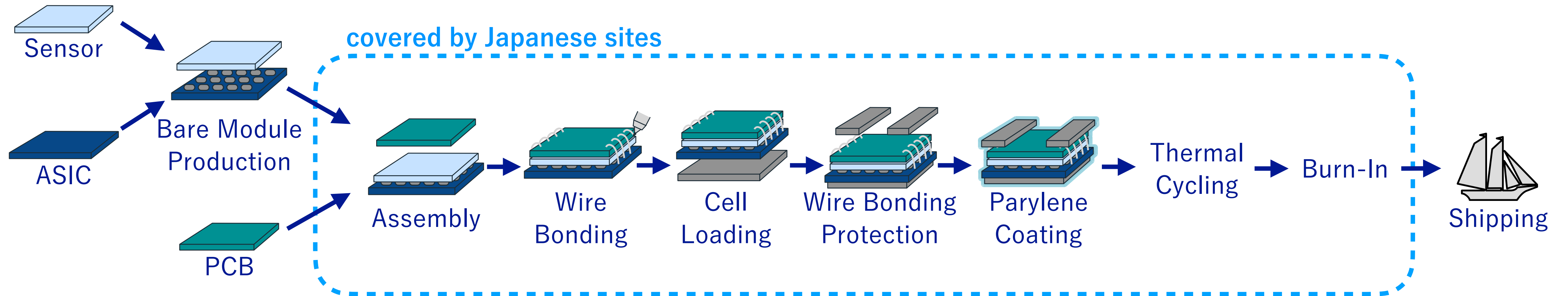


CellのCooling Blockを利用して支柱のパイプへ固定

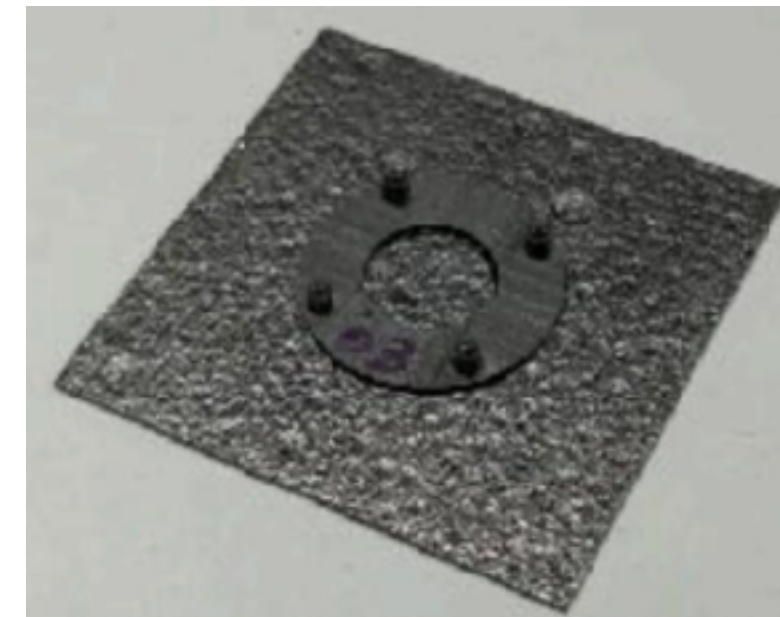


Cooling Blockによって冷却され、Tileでモジュール温度が分散される
→ 正確な温度測定によるモジュール温度の均一性を評価する

Overview of Assembly for Cell Loaded Module



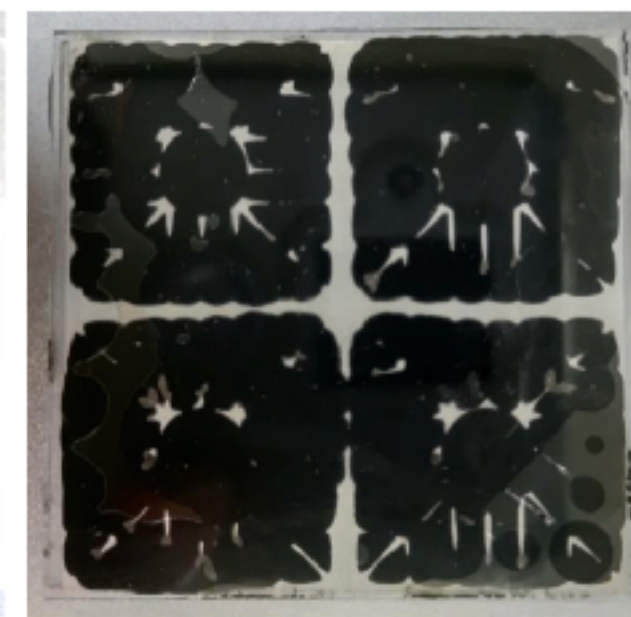
Wire bonding



Cellの写真

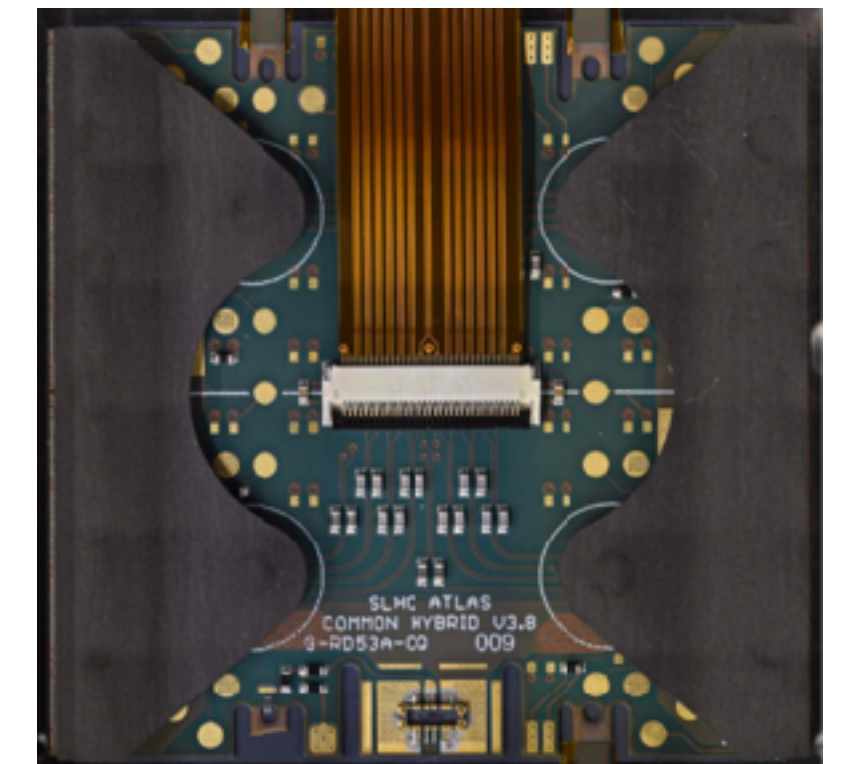


塗布された
Cellの接着剤



Cell貼り付け後の
接着剤の様子
(ガラスを用いて再現)

Wire bonding protection
on the module



Overview of QC test after shipping

● Reception test

- 非電氣的試験: Visual inspection, Metrology, Sensor IV, ASIC VI
- 電氣的試験:
 - 各ピクセルの回路試験: Digital/Analog FE test, Threshold/ToT check → p.10~13
 - Bump接続確認試験 → p.17

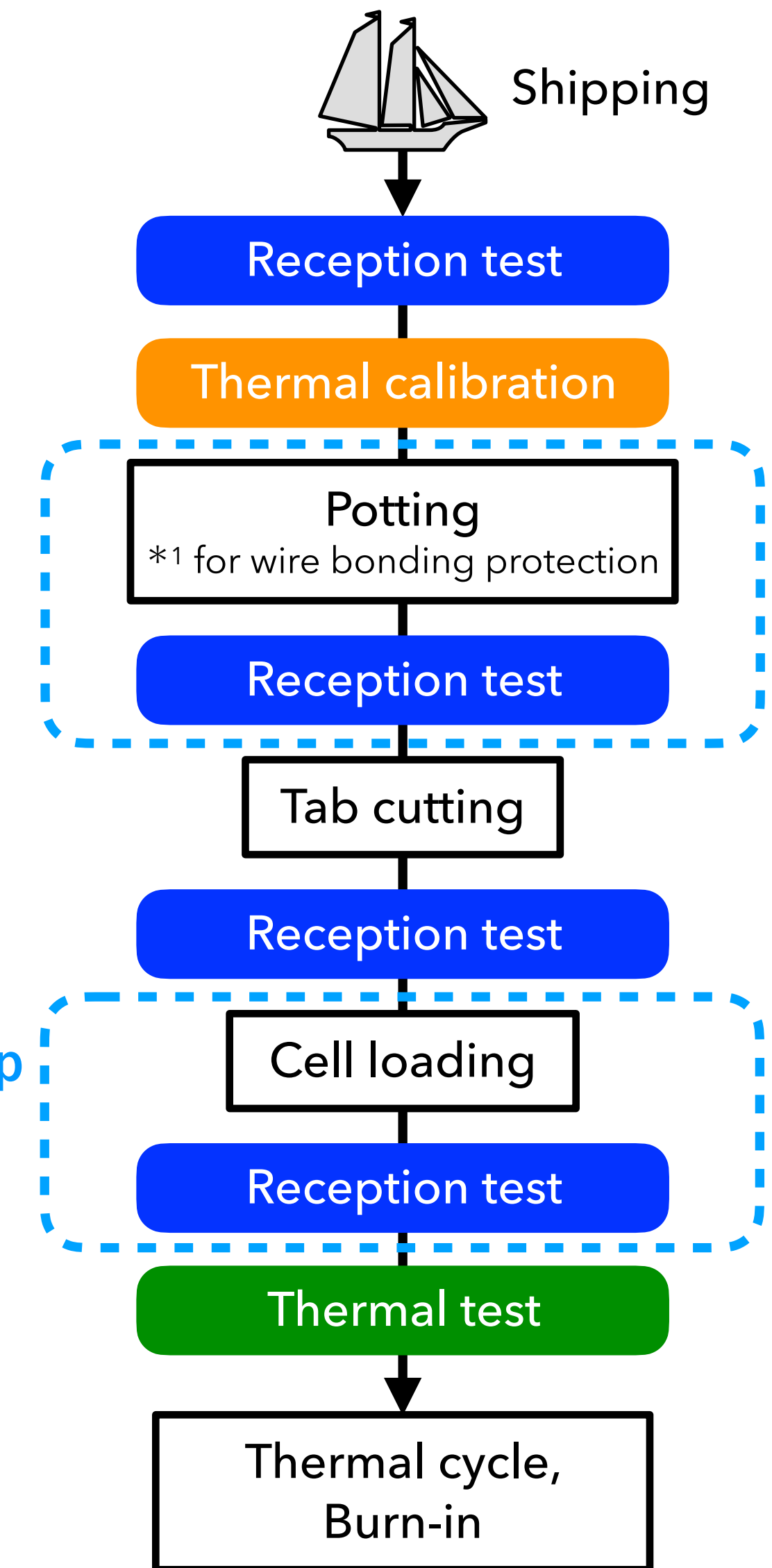
● Thermal Calibration → p.14

- 正確な温度測定のため、
各ASICに搭載された温度センサー(NMOS)のキャリブレーションを行う

● Thermal test → p.15~16

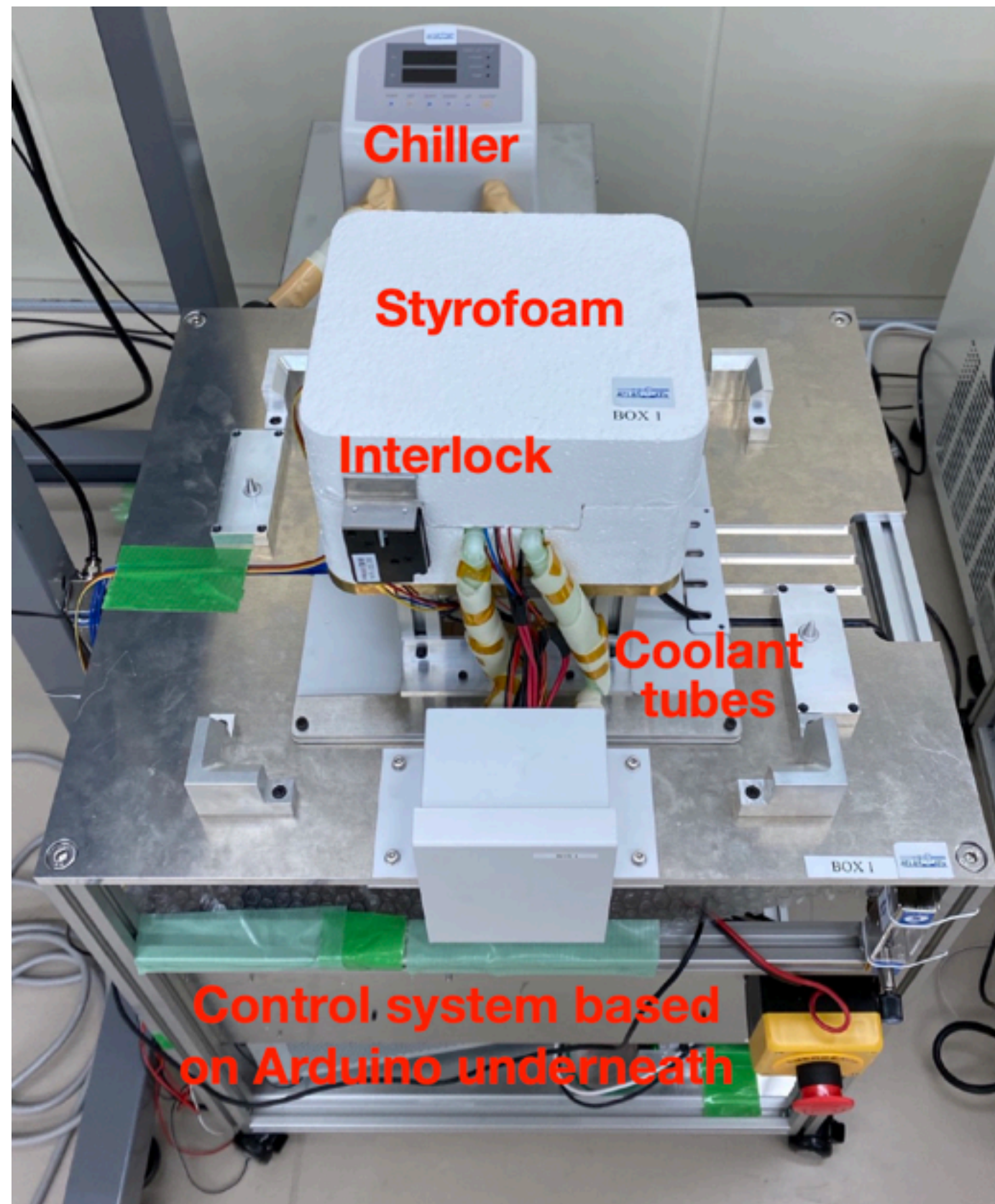
- Cellの貼り付け精度を見るために、モジュール温度が均一に分布していることを確認する
 - **ASIC**内の温度センサー(NMOS)
 - シリコンセンサーのleakage currentから計算される**シリコンセンサー**上の温度
 - **モジュール表面の温度**

Japanese site can skip

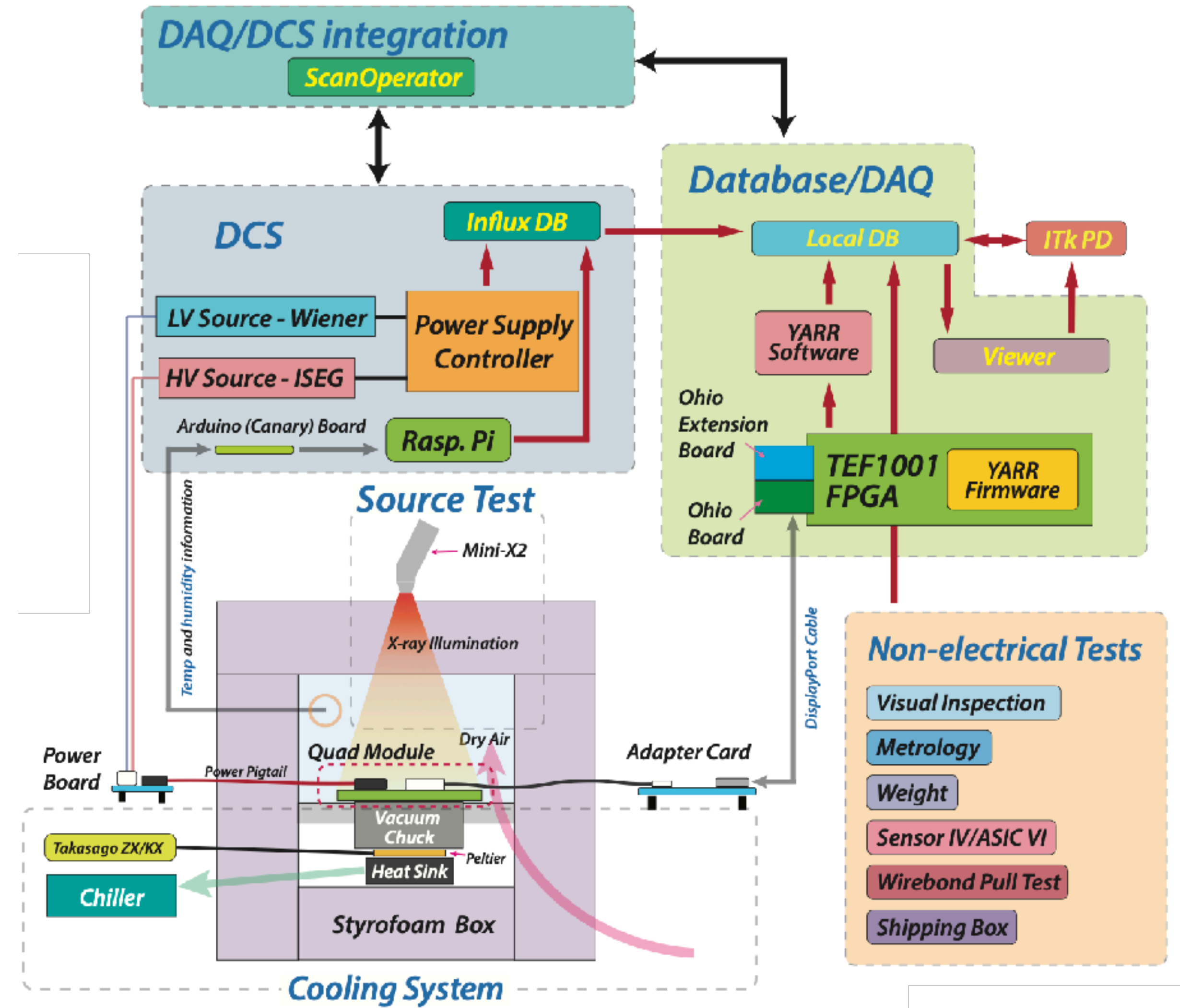
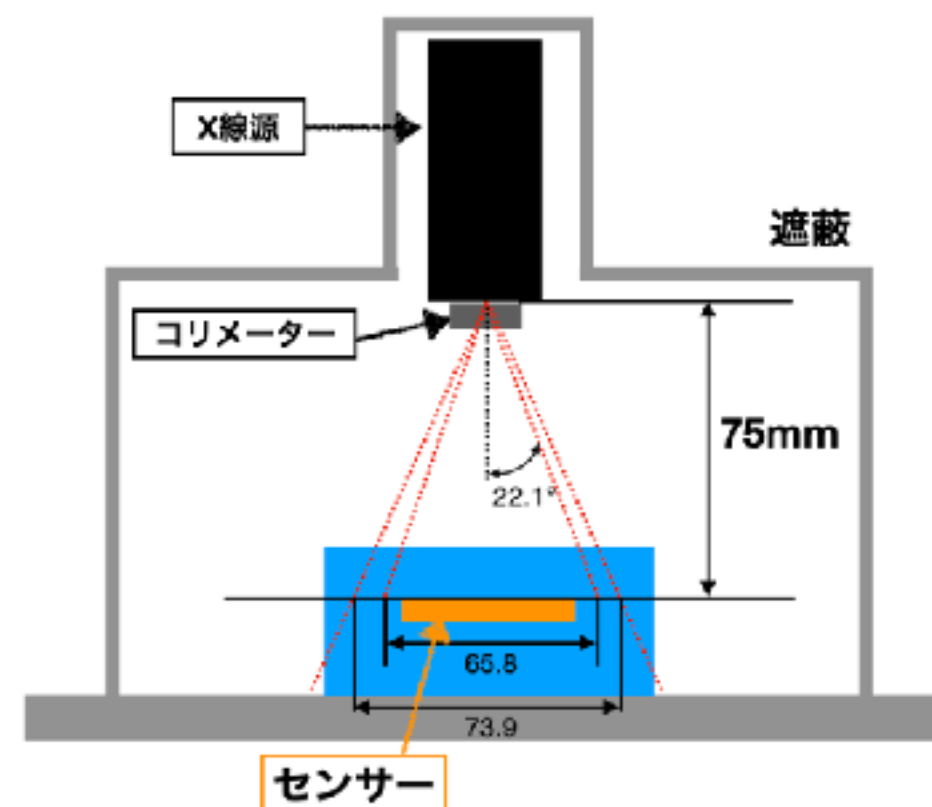
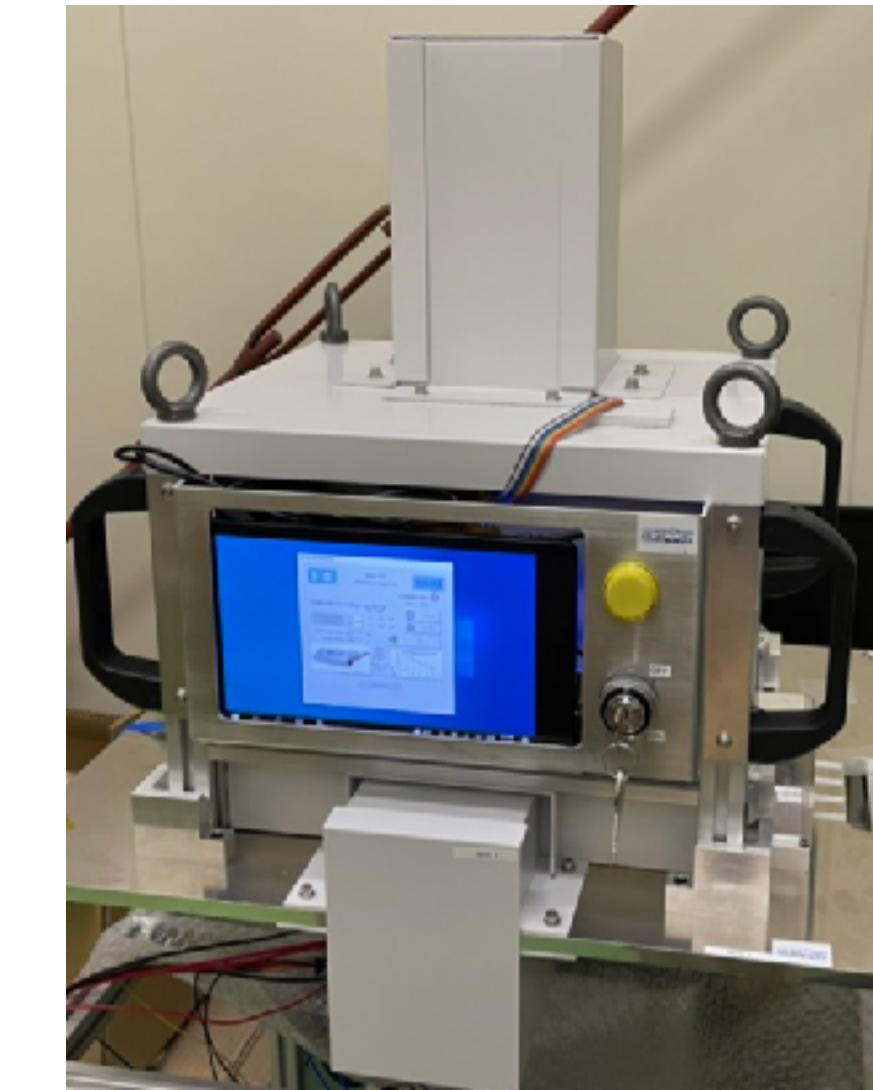


QC system at JAPAN

電氣的試験のセットアップ

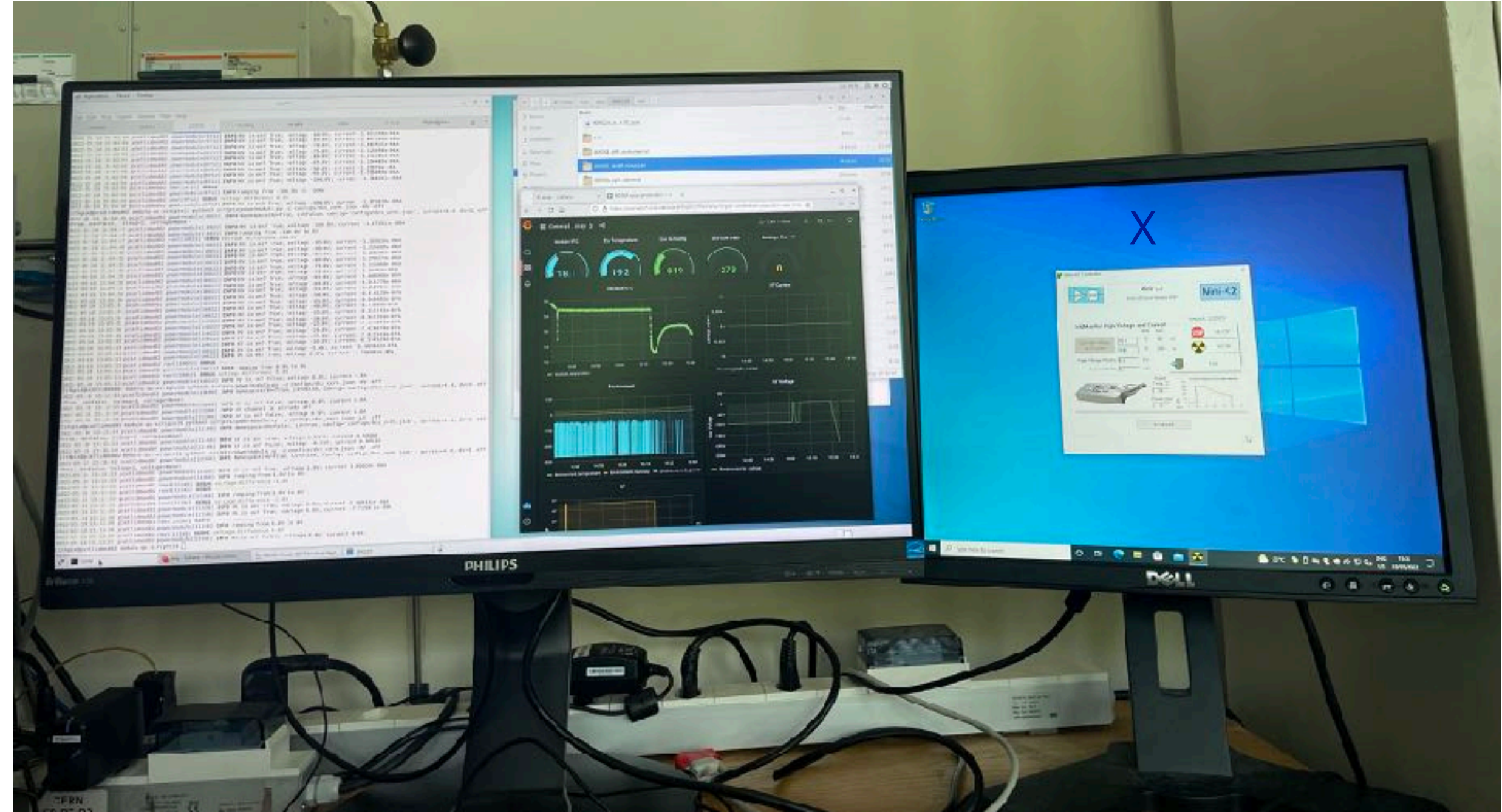
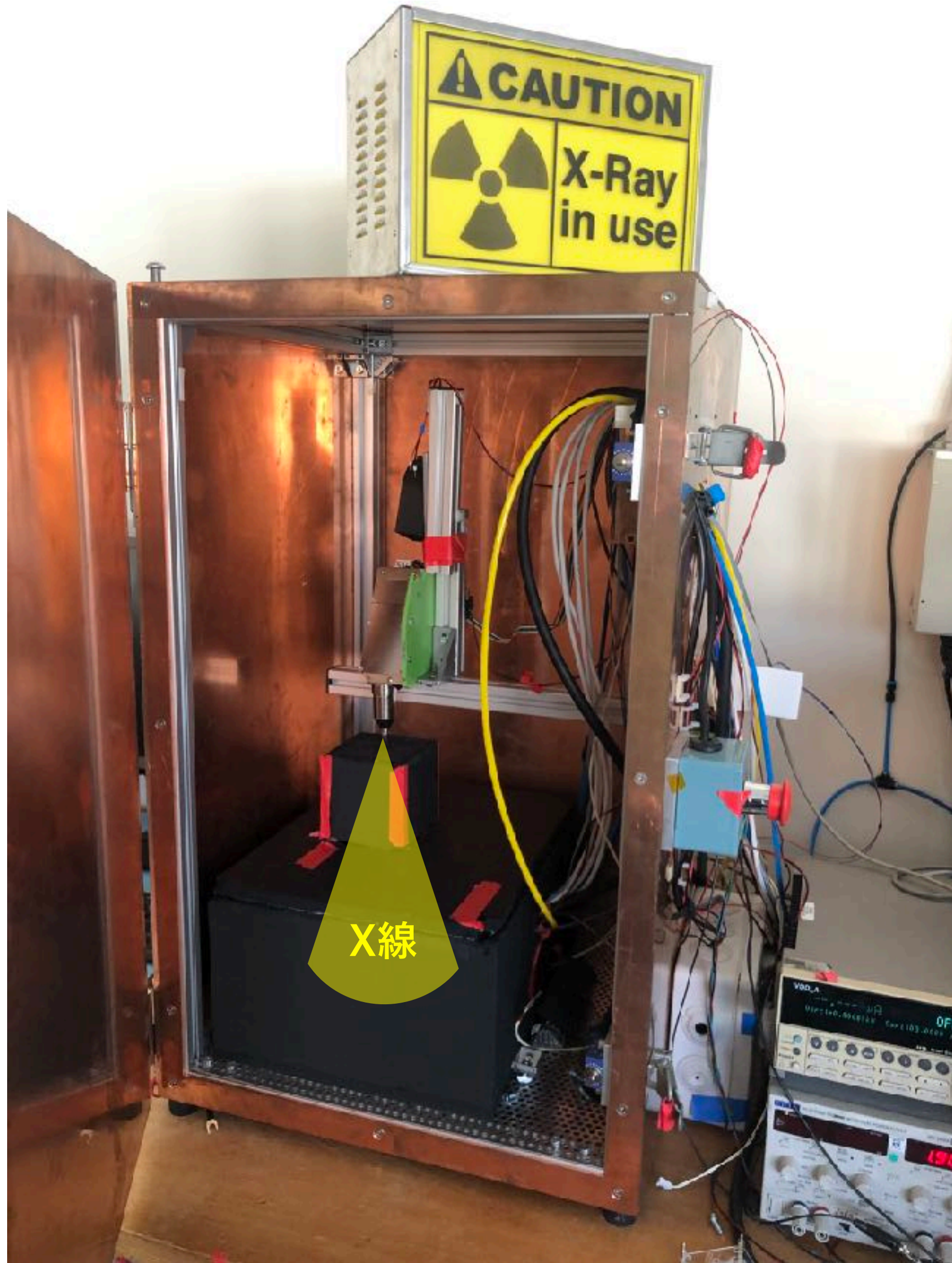


放射線試験のセットアップ



詳細は [計測システム研究会2021](#)

Electrical test / Source test system at CERN



[2410 Keithley Sourcemeter](#)



[PL303QMD-PAIM-TTI](#)

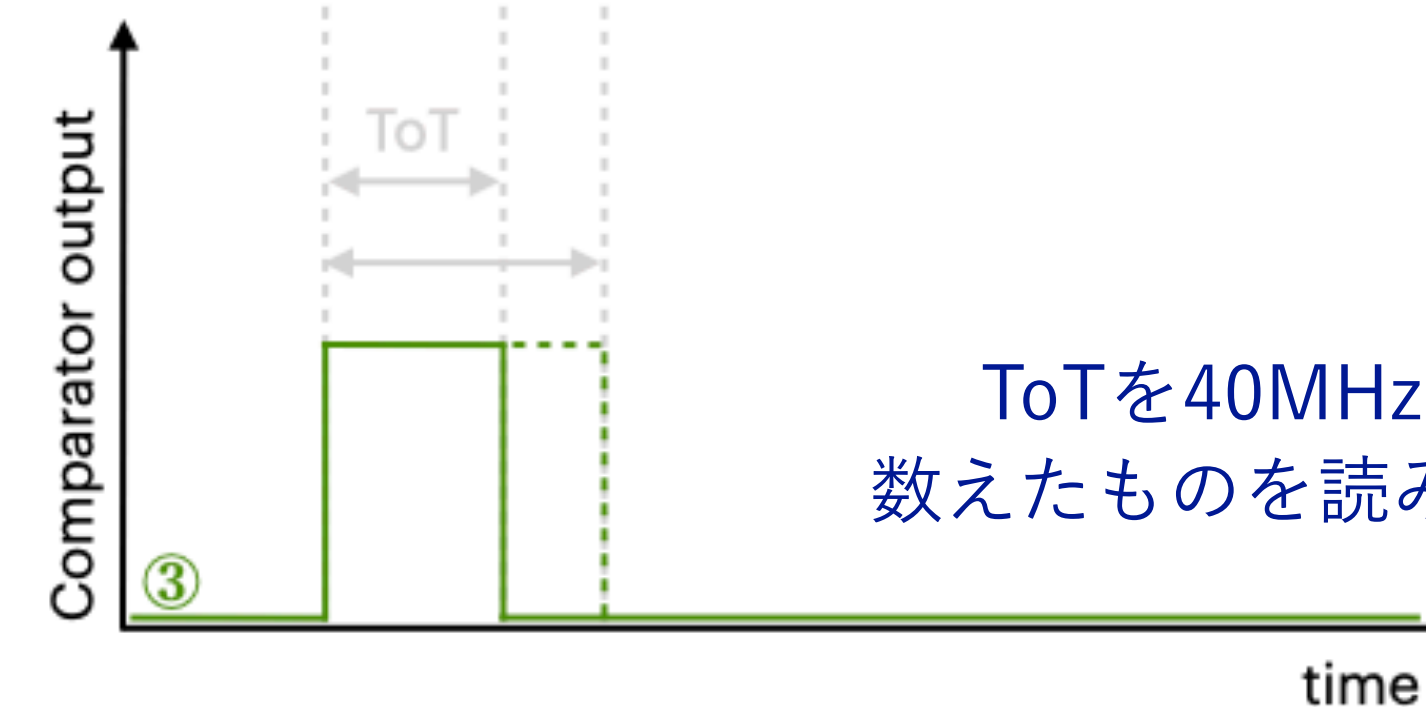
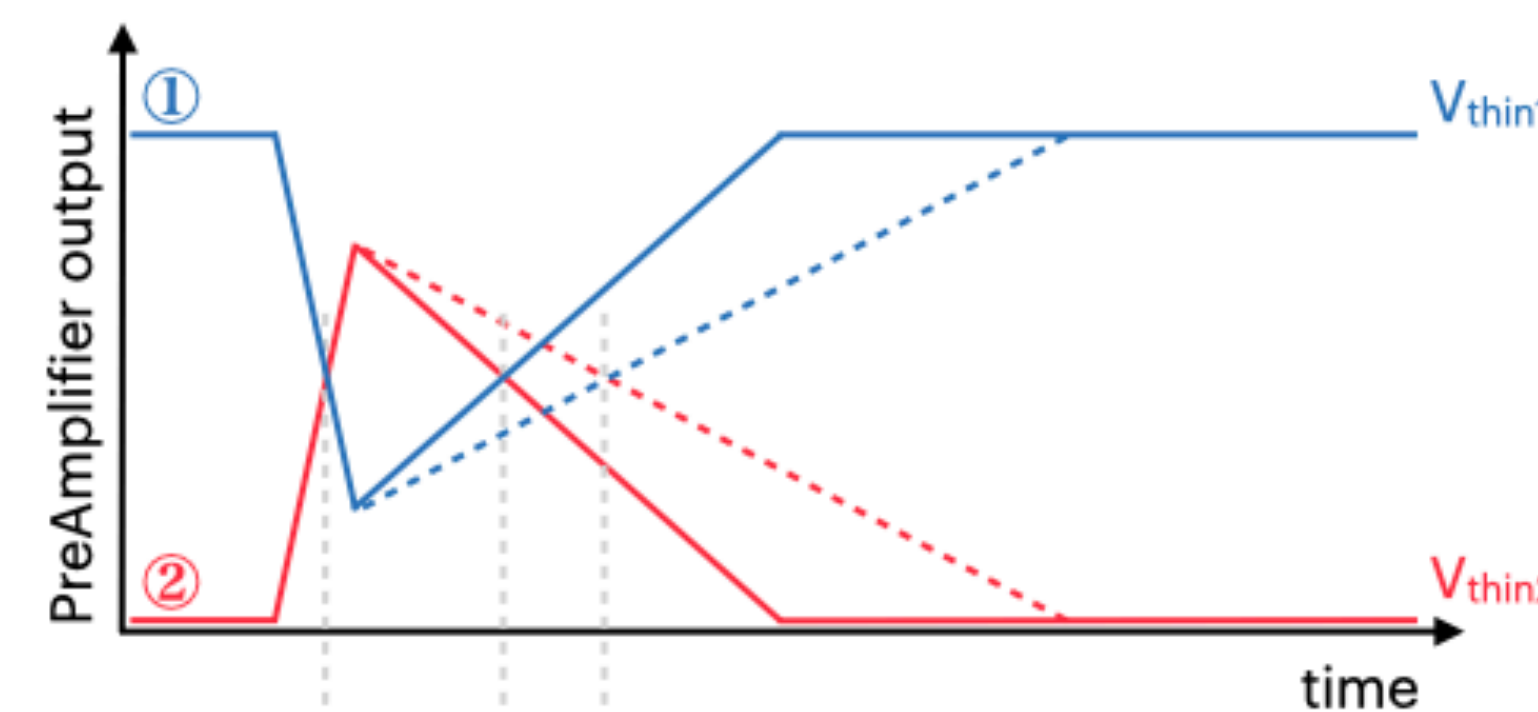
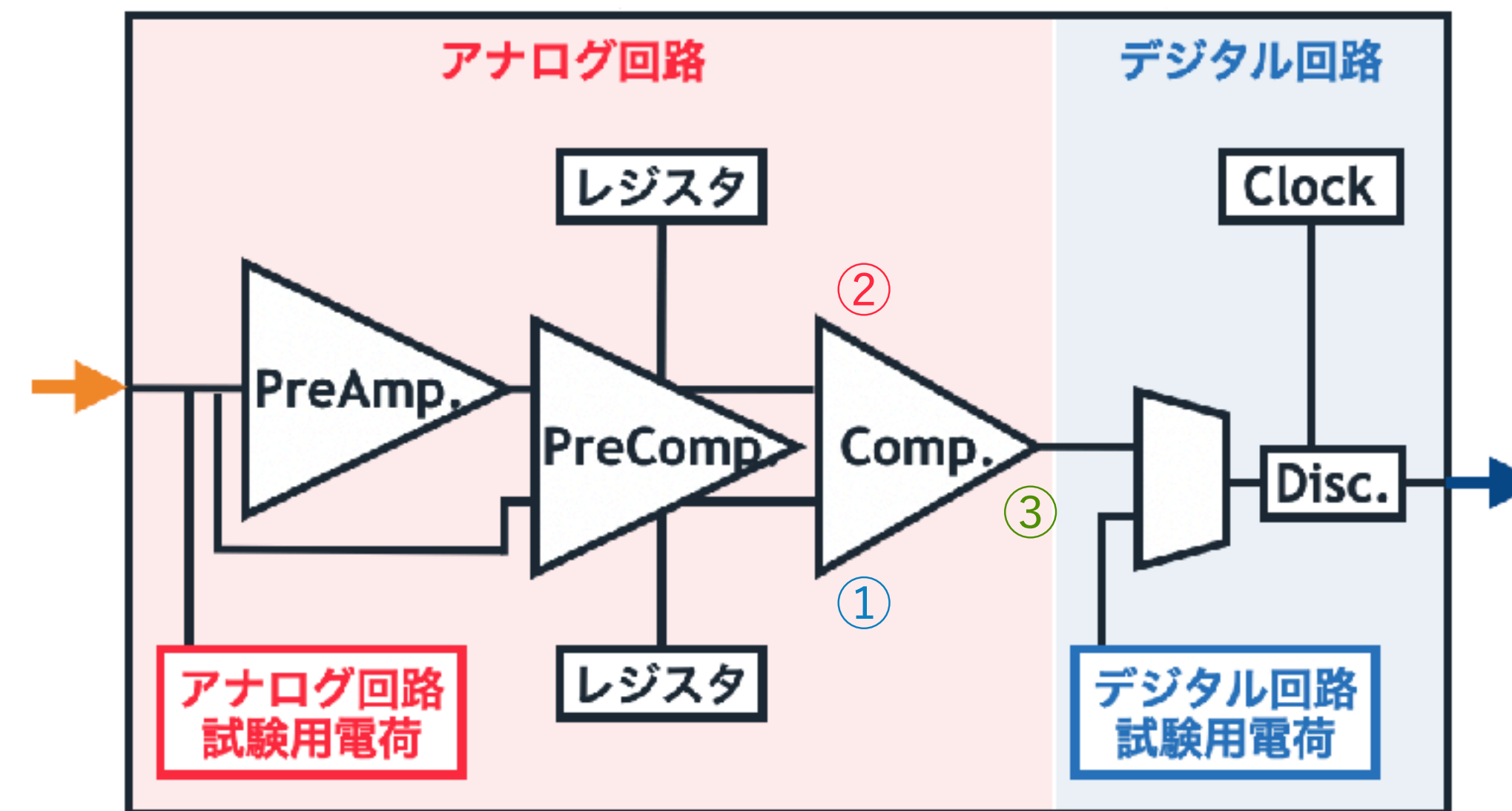
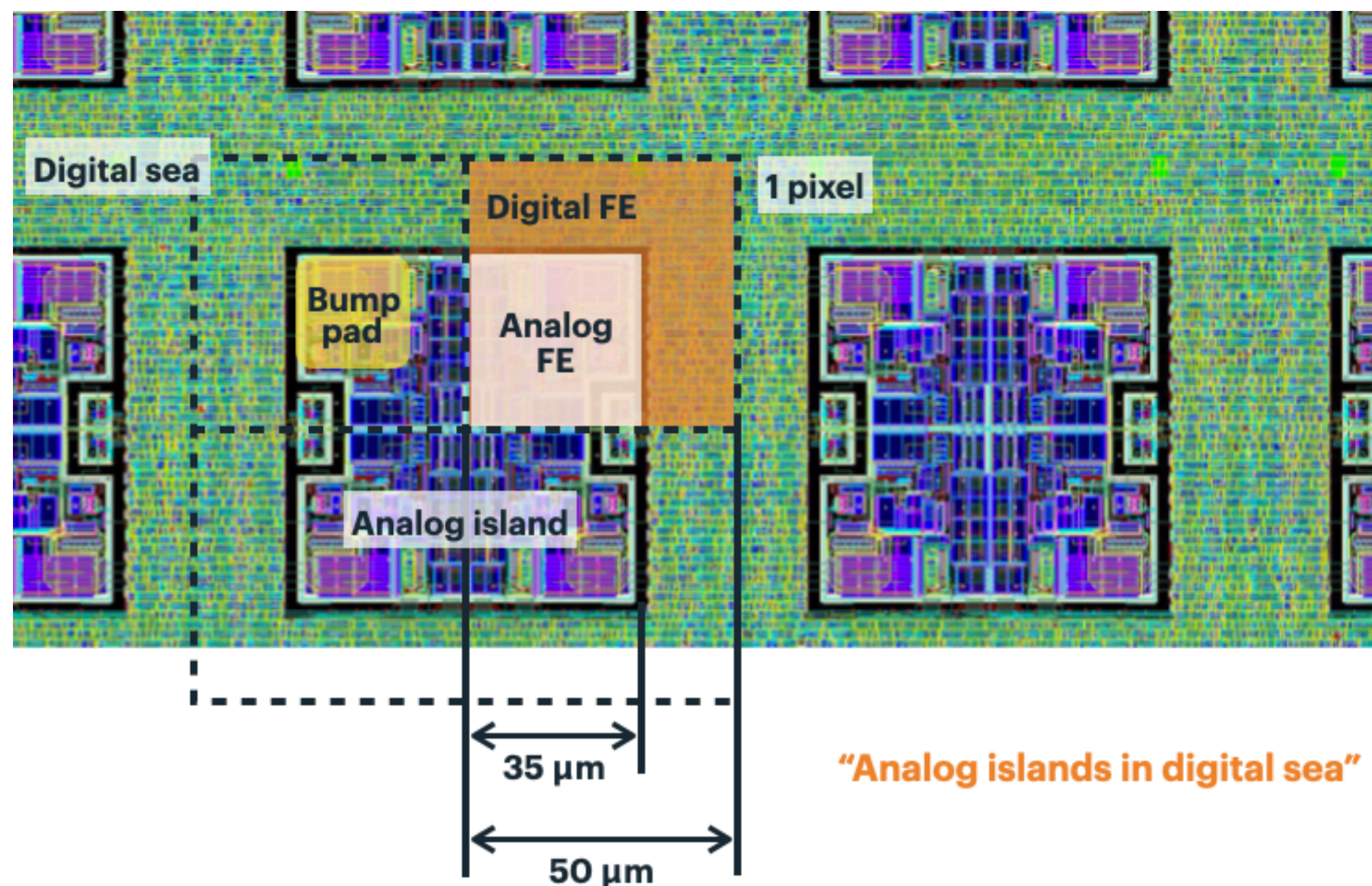
Digital / Analog Front-End Test

◎ デジタル回路試験

- デジタルFEの前に試験用の波形を送り、ASICとの接続確認およびデジタル回路の動作確認を行う。

◎ アナログ回路試験

- アナログFEの前に試験用の波形を送り、アナログ回路が動作確認を行う。



ToTを40MHzのCLKで数えたものを読み出している

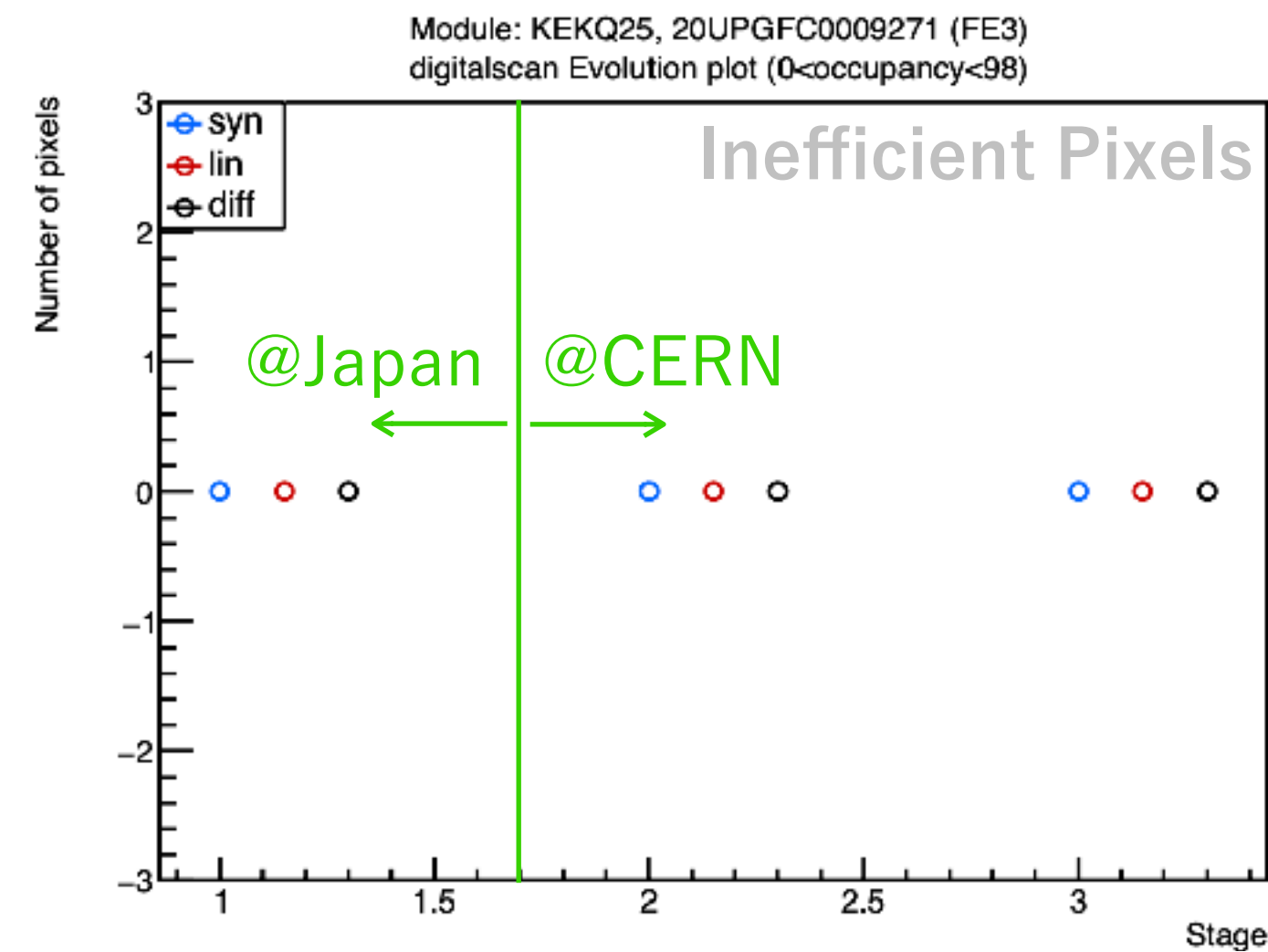
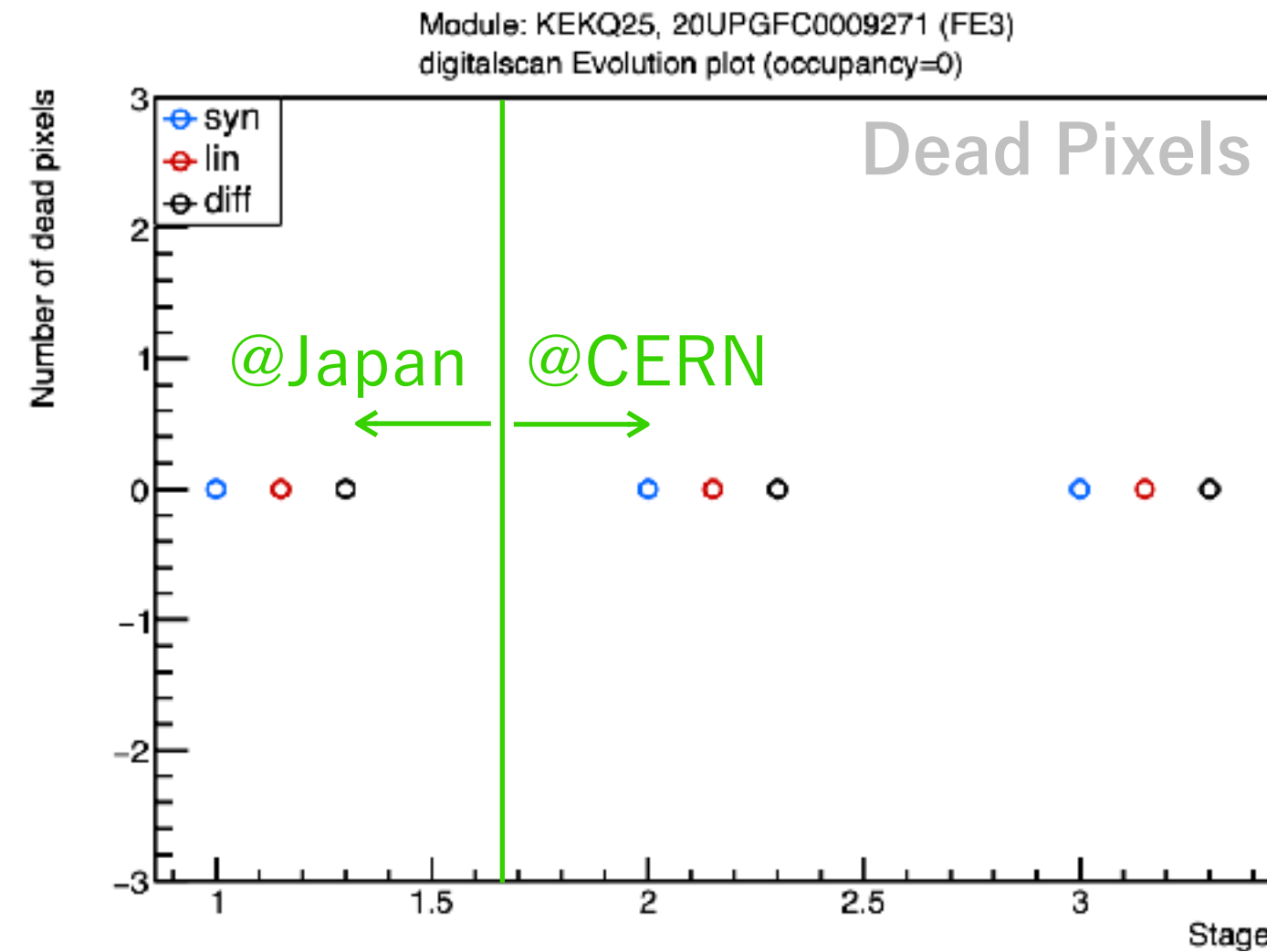
Results: Digital / Analog Front-End Test

Stage1 ... Before Shipping (Japan)
 Stage2 ... First Reception (CERN)
 Stage3 ... After Tab-cutting (CERN)

● 信号が帰ってこないピクセル数(Dead Pixel)

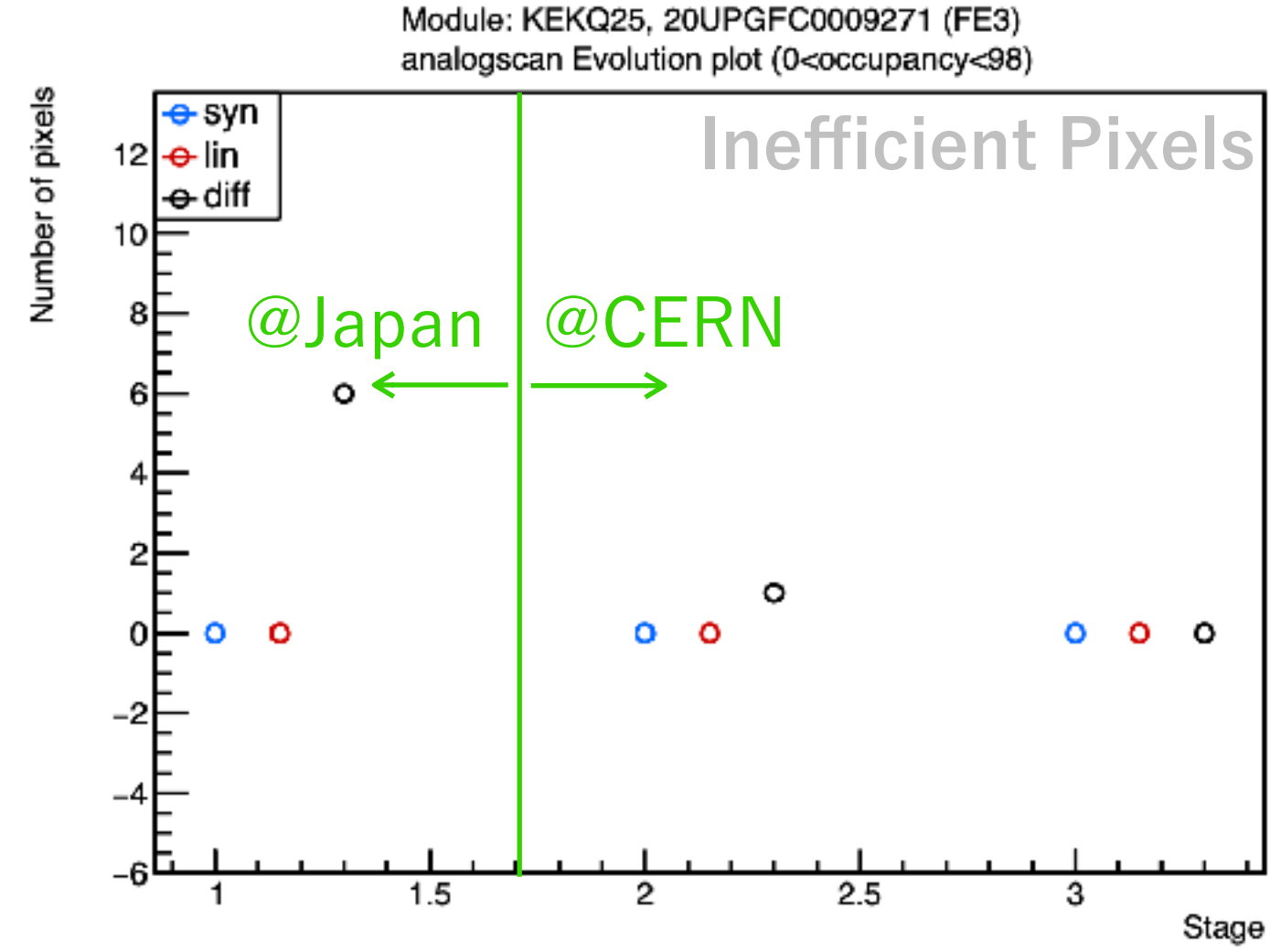
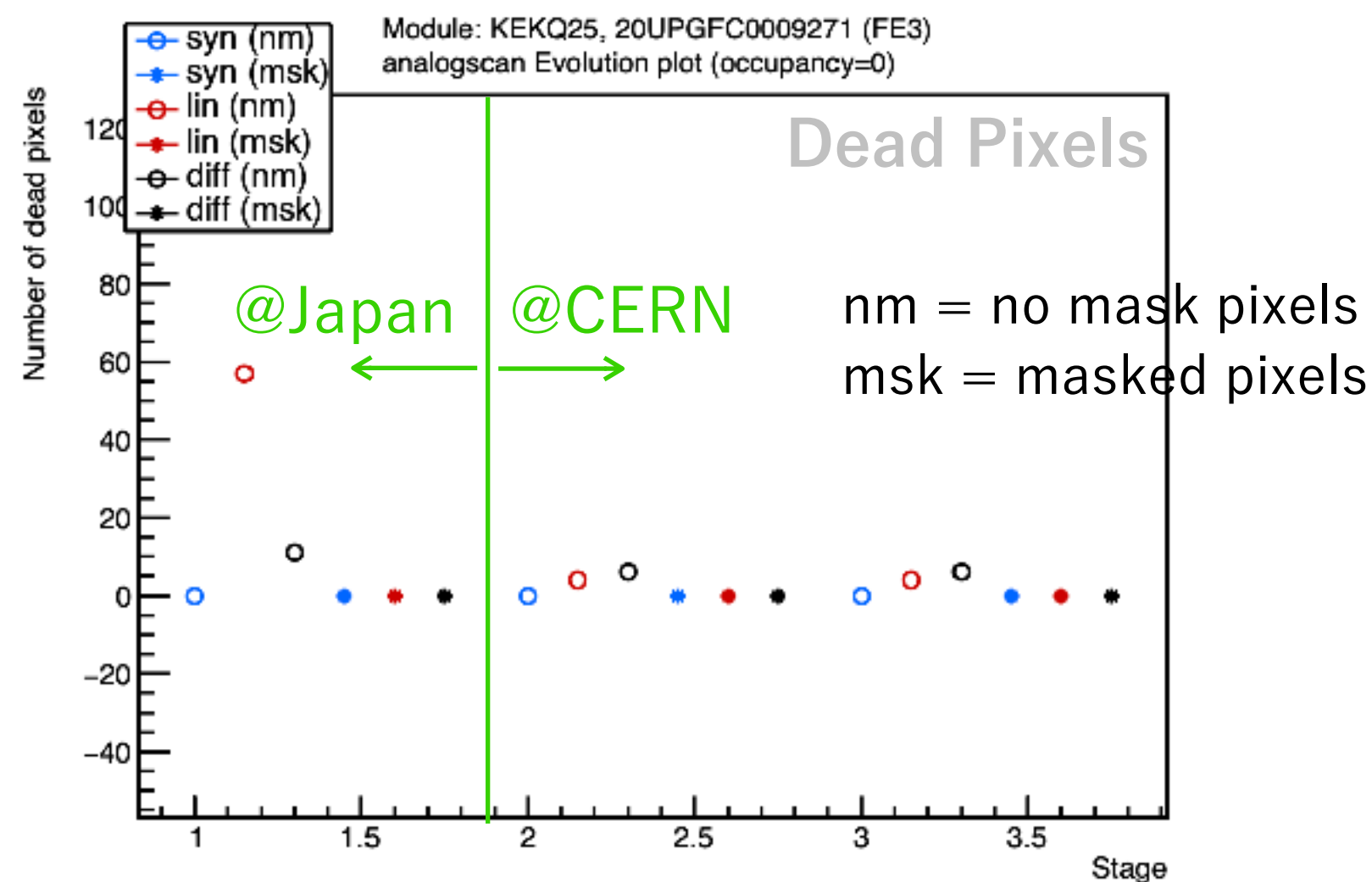
● 信号収集効率が悪いピクセル数(Inefficient Pixel)

デジタル回路試験



デジタル回路試験で輸送前後の不具合のあるピクセルの増減は無し

アナログ回路試験



アナログ回路試験では一部のピクセルがCERNに輸送後回復しているピクセルがある
 → 輸送による問題ではないと考えられる

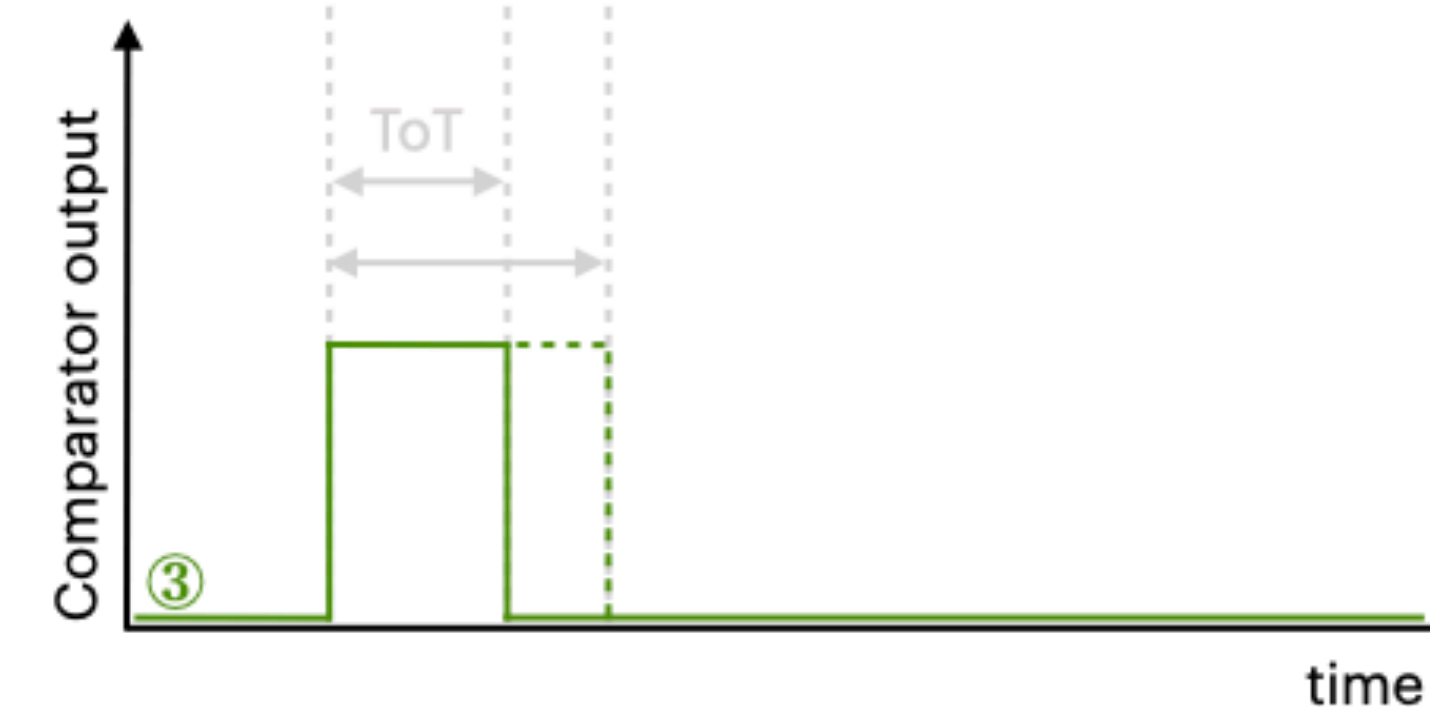
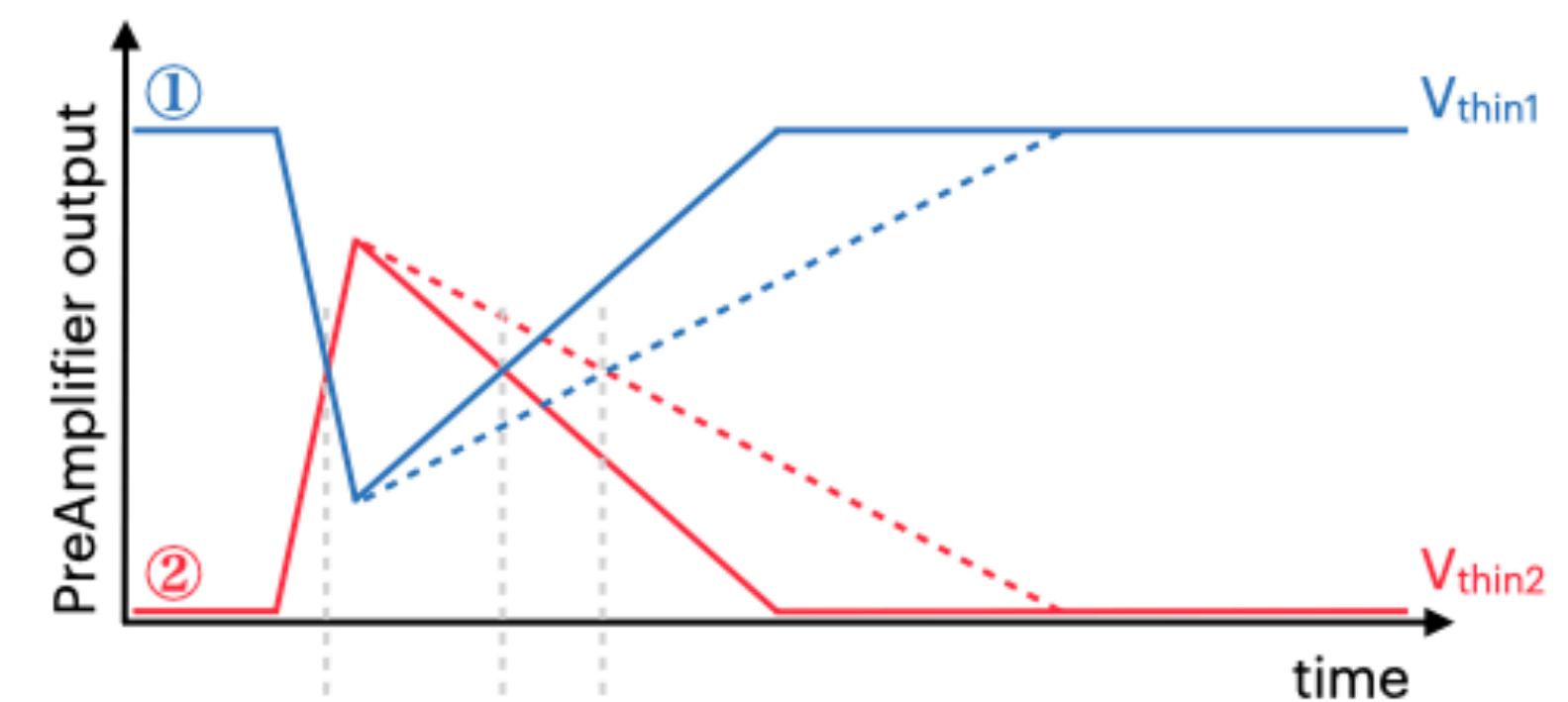
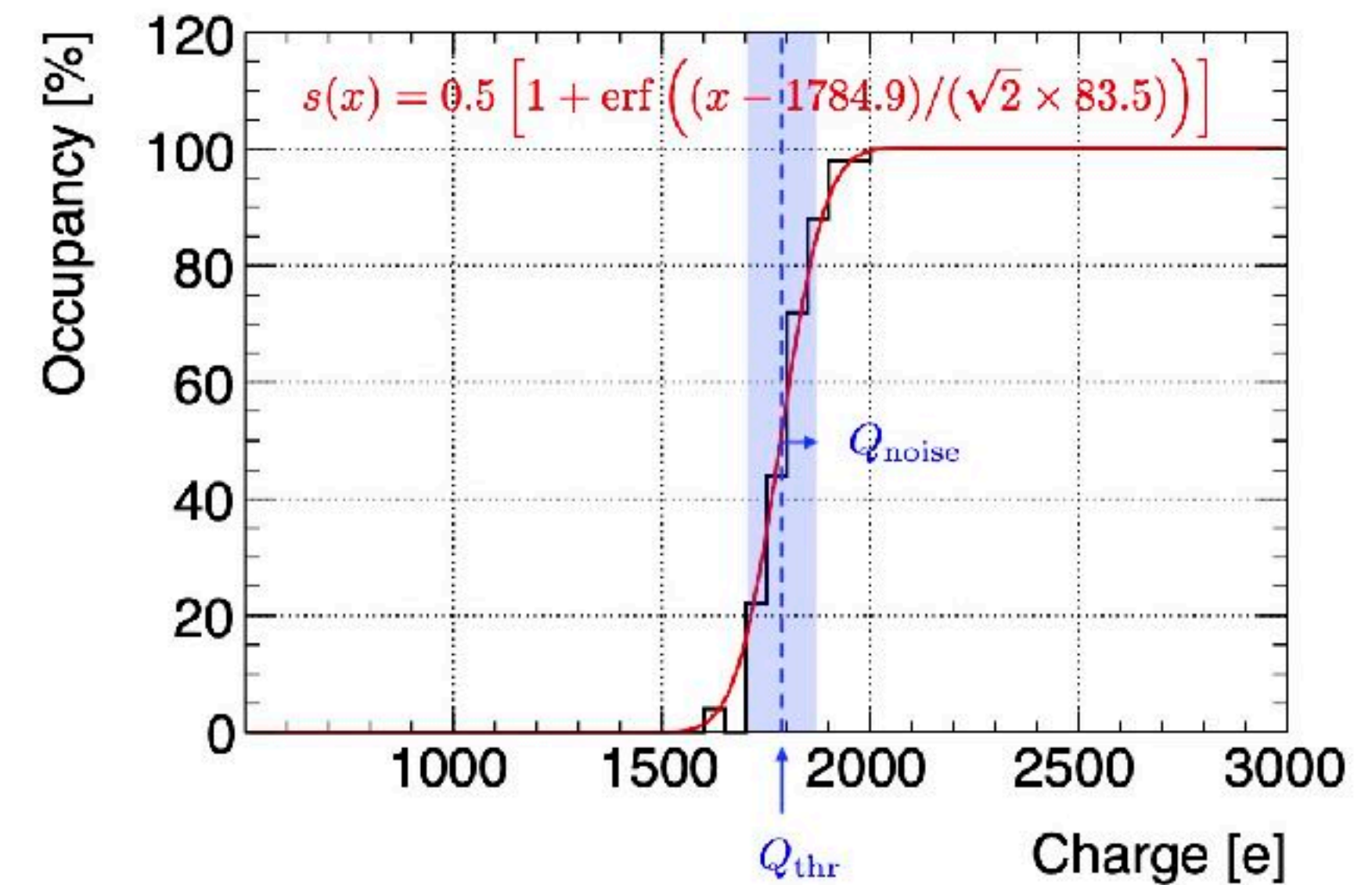
Threshold / Noise / ToT check

◎ 閾値の確認

- アナログFEの前に様々な大きさの試験用波形を送り、異なる大きさの波形に対する応答を確認する
- 波形に対応する電荷量とその時の応答率に対するS字カーブのを $s(x)$ の関数でフィッティングする。その時のS字カーブの中央値は閾値として設定され、幅はピクセルのノイズの大きさに相当する。

◎ ToTの確認

- アナログFEの前に試験用の波形を送り、アナログ信号が閾値を超えている時間 (ToT) の平均値の測定・確認を行う。



Results: Threshold / Noise / ToT check

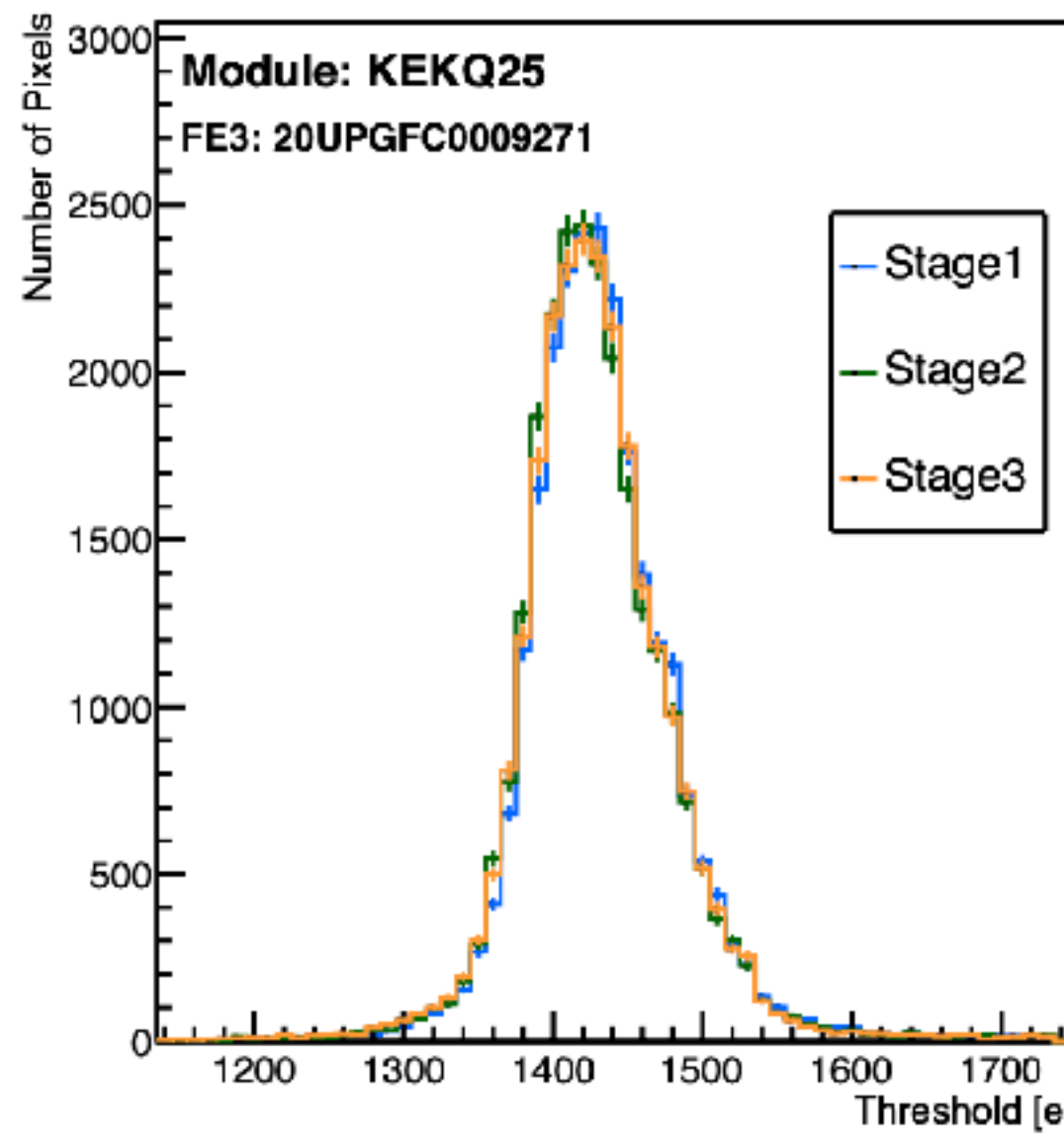
Stage1 ... Before Shipping (Japan)

Stage2 ... First Reception

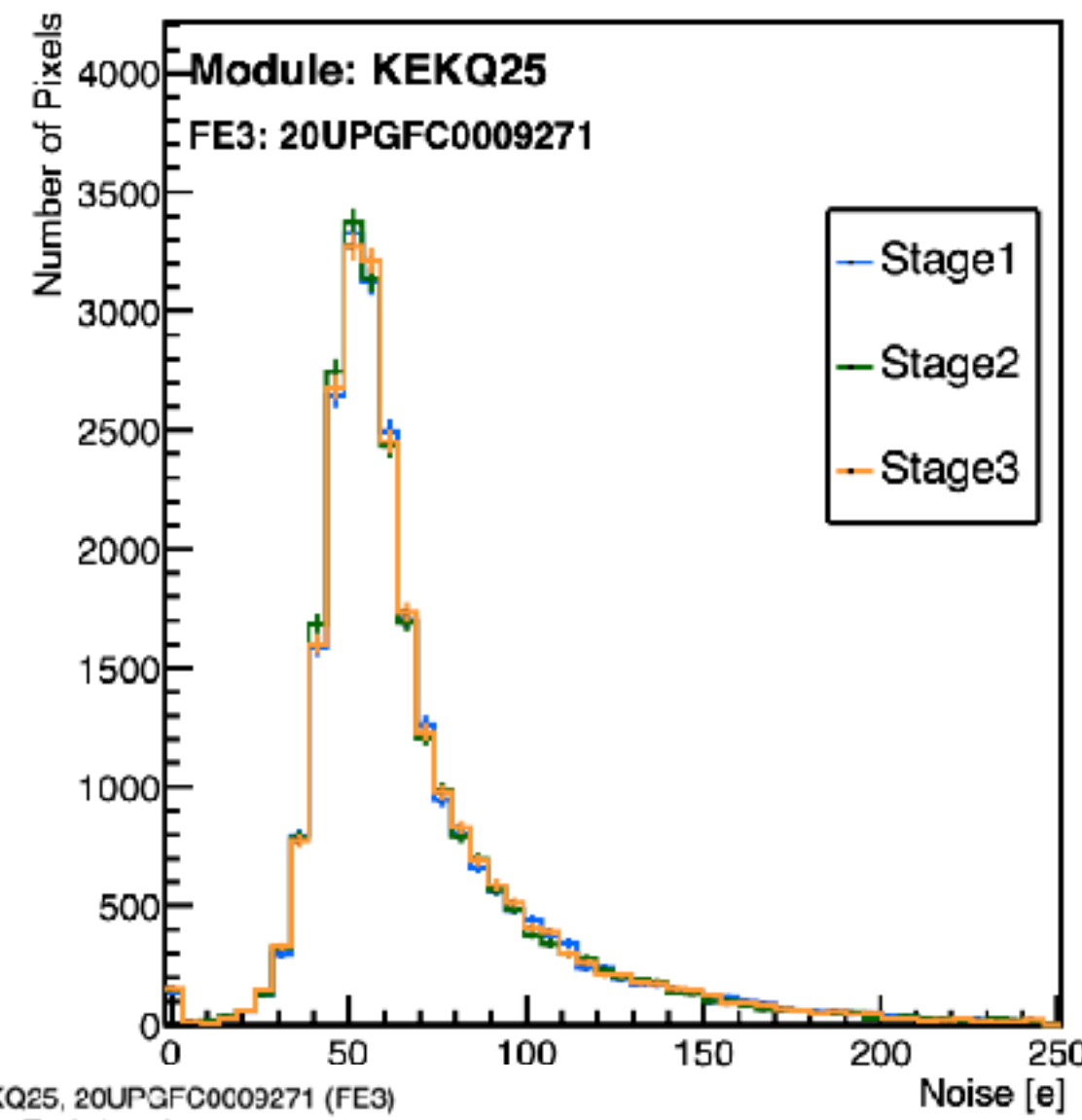
Stage3 ... After Tab-cutting

- Threshold distribution / Noise evolution / Mean ToT distribution

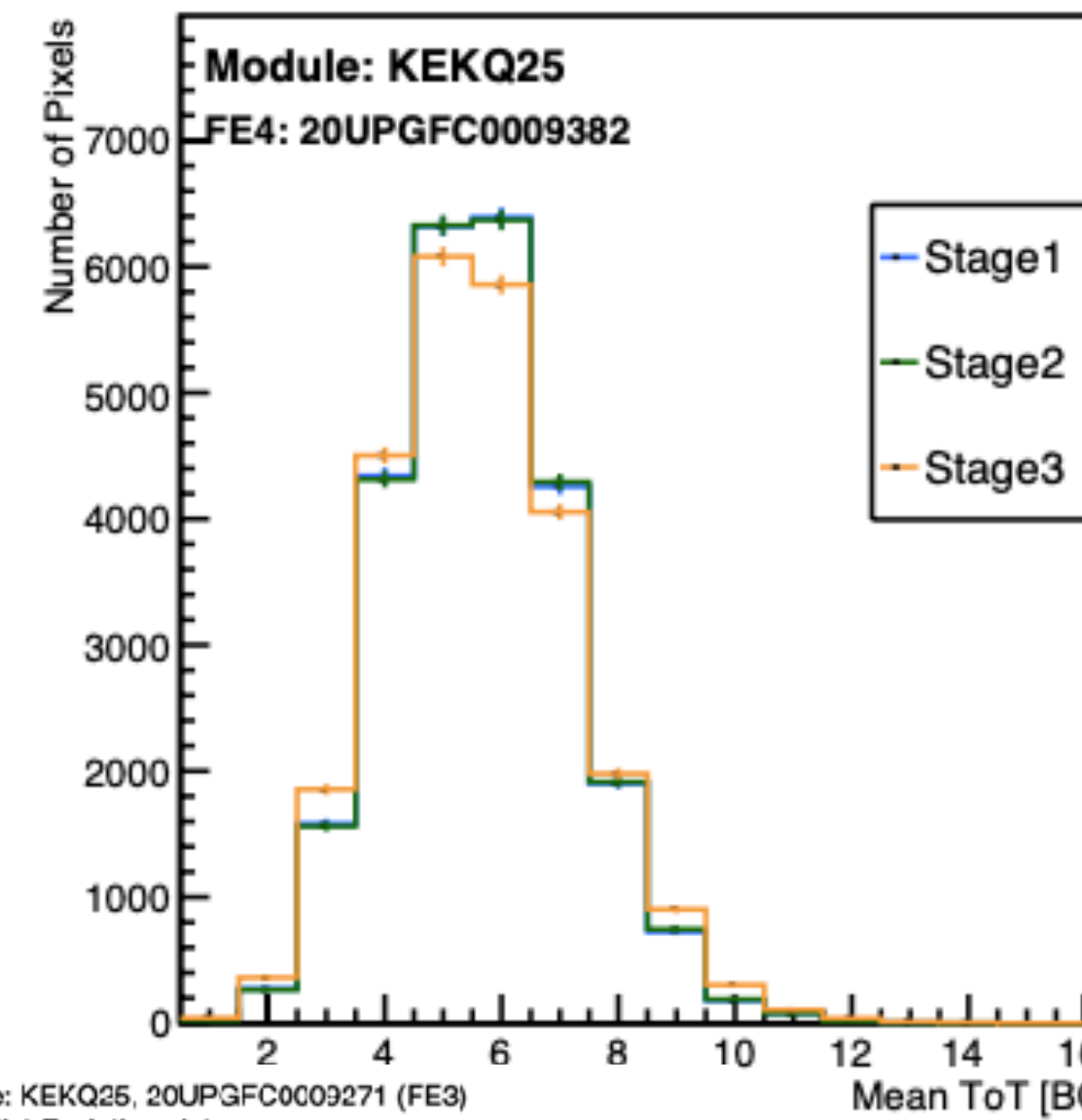
[diff FE] ThresholdDist-0 (Comparison)



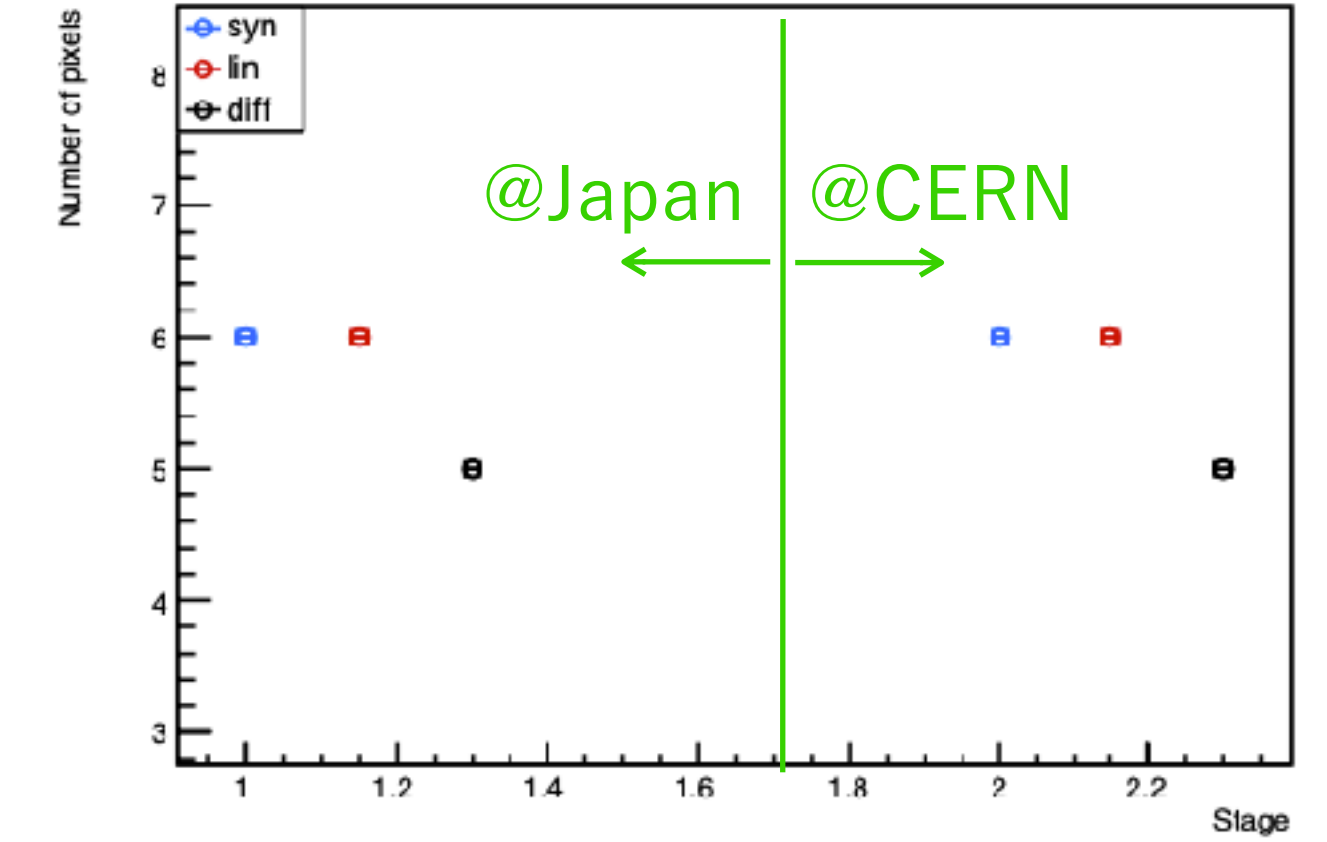
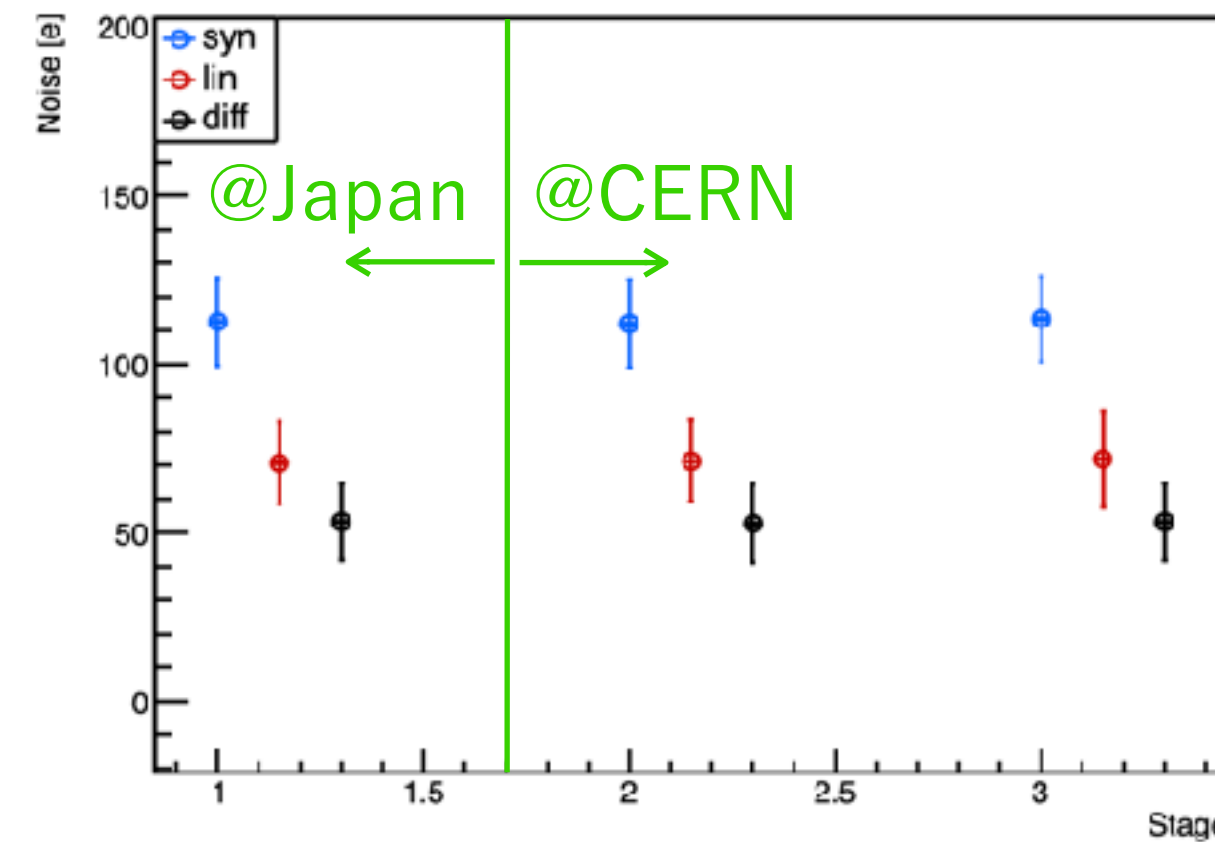
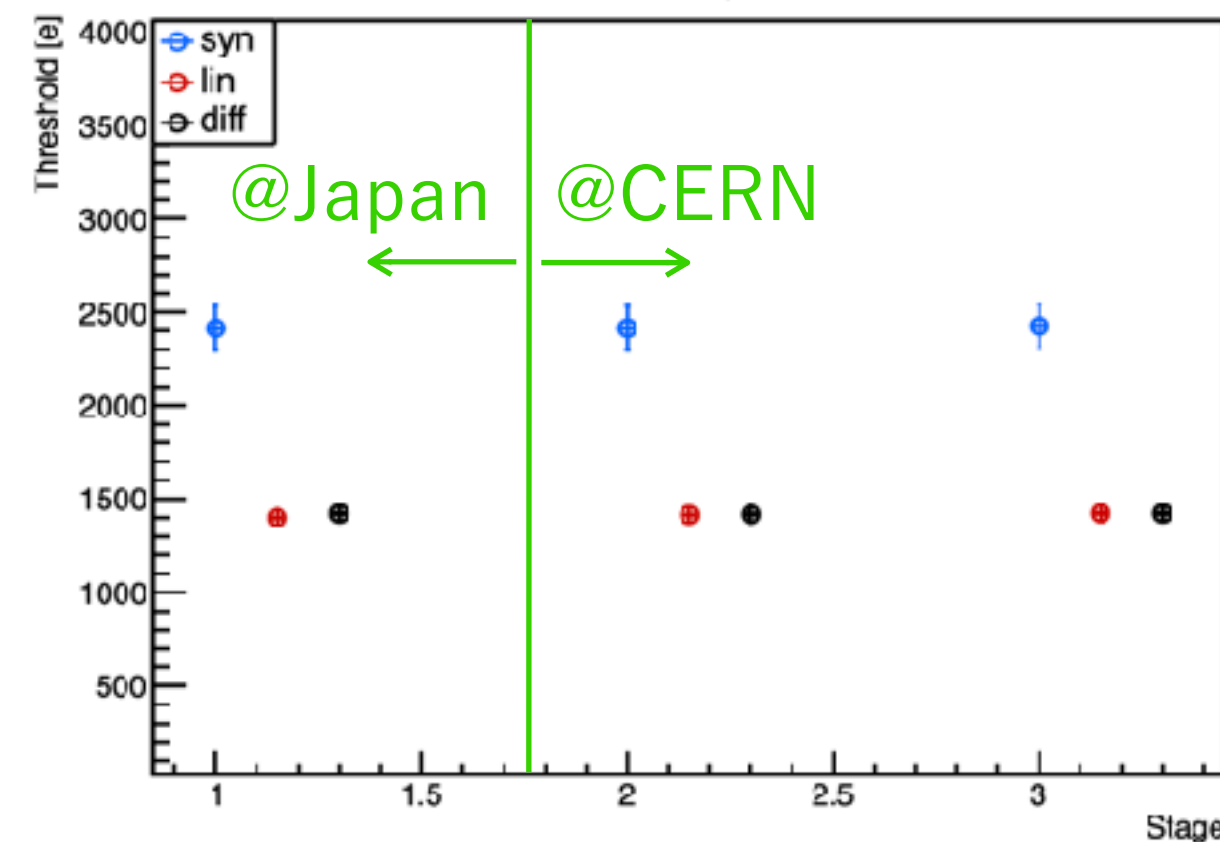
[diff FE] NoiseDist-0 (Comparison)



[diff FE] MeanTotDist-0 (Comparison)



閾値・ノイズ量・ToTは
CERN輸送後も変化なし



Thermal Calibration system at CERN

TA-5000A with Thermal Test Enclosure

- ASiC内のNMOSセンサーをキャリブレーションする
 - 温度の関係式の N_f を較正する

$$T[K] = \frac{k_B \times \ln 15}{N_f} \times V$$

- Leakage currentから計算したシリコンセンサーの温度を使用する

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = \left(\frac{T_{on}}{T_{off}} \right)^2 e^{-\frac{E_g(T_{on})}{2kT_{on}} + \frac{E_g(T_{off})}{2kT_{off}}}$$

T_{off} , $I_{on/off}$ を測定し、 T_{on} を求める

T_{off} は恒温曹と温度が平衡状態になるまで待つので、恒温曹内の空間温度をそのまま使用

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

$$E_g(0) = 1.17 \text{ eV}, \alpha = 4.73 \times 10^{-4} \text{ eV/K}, \beta = 636 \text{ K}$$

$T_{on/off}$: Module temperature with chip power off/on.

$I_{on/off}$: Leakage current with chip power off/on.



恒温曹

Leakage current測定に使用

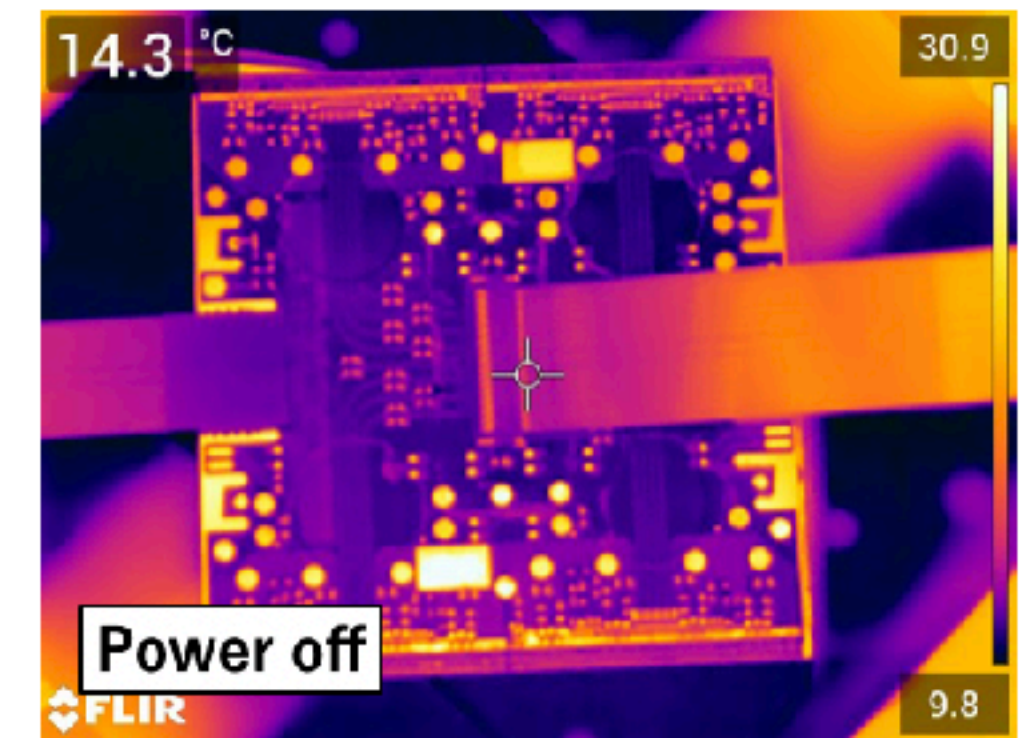
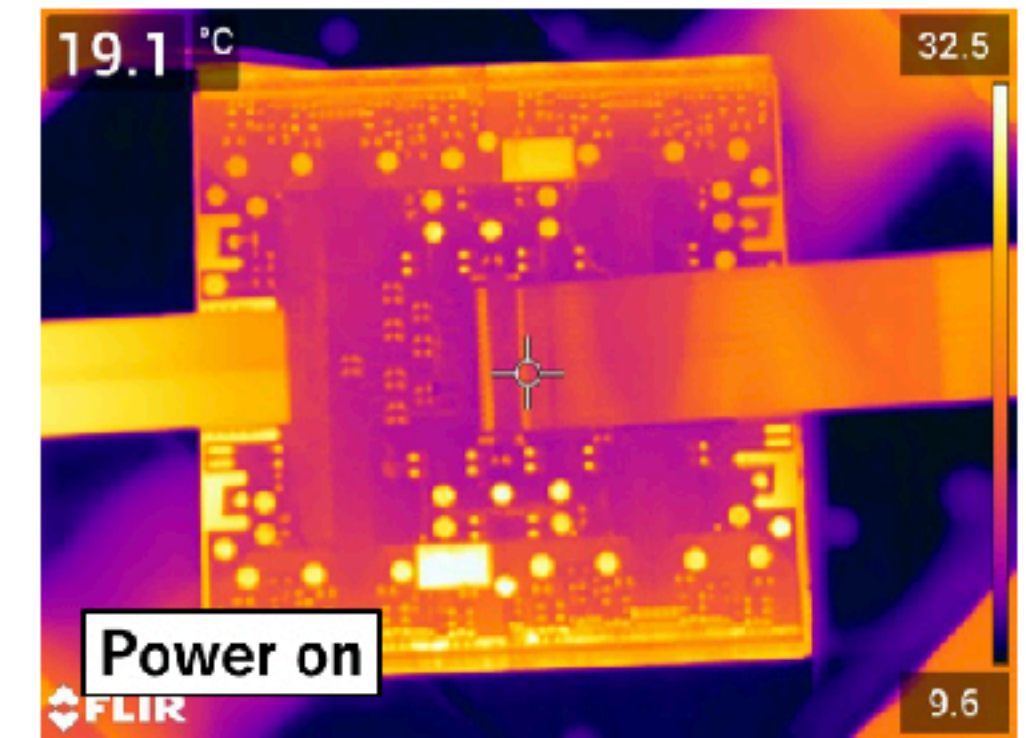


2410 Keithley Sourcemeter

Thermal Test system at CERN

- Cell loadingの貼り付け精度は外観から判断することができないため、モジュールの様々な点における温度測定から判断する必要がある
- モジュール上の測定点:
 - Flex PCBの温度 (PCB上のNTC)
 - シリコンセンサー温度 (Leakage currentから計算)
 - ASICの温度 (NMOSセンサーを使用)
 - モジュール表面の温度 (Thermal Camera)
- 測定温度:
 - モジュールを載せているjigの温度を10C, 20C, -10C に変えて測定

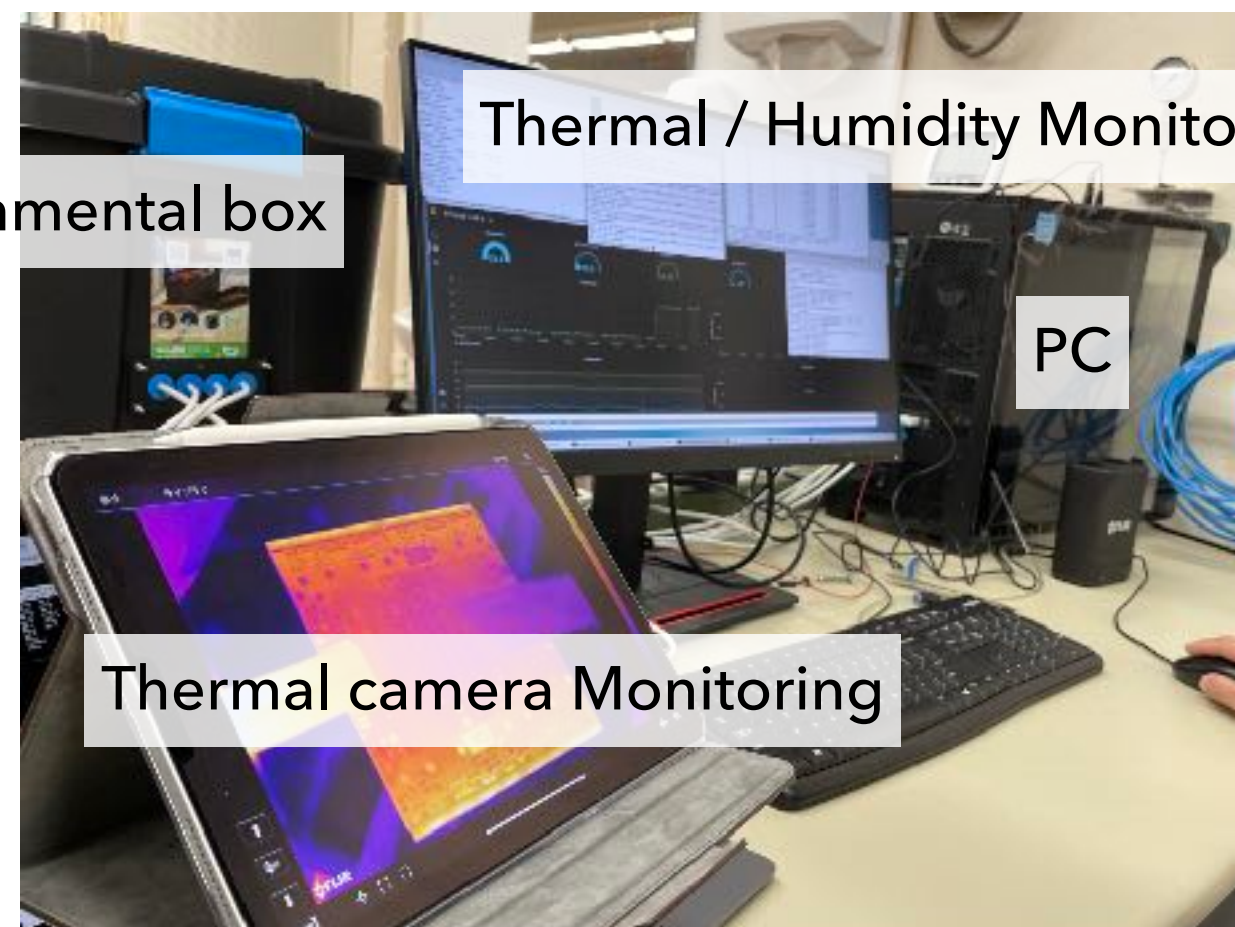
After Cell loading



<https://www.flir.jp/support/products/e75>

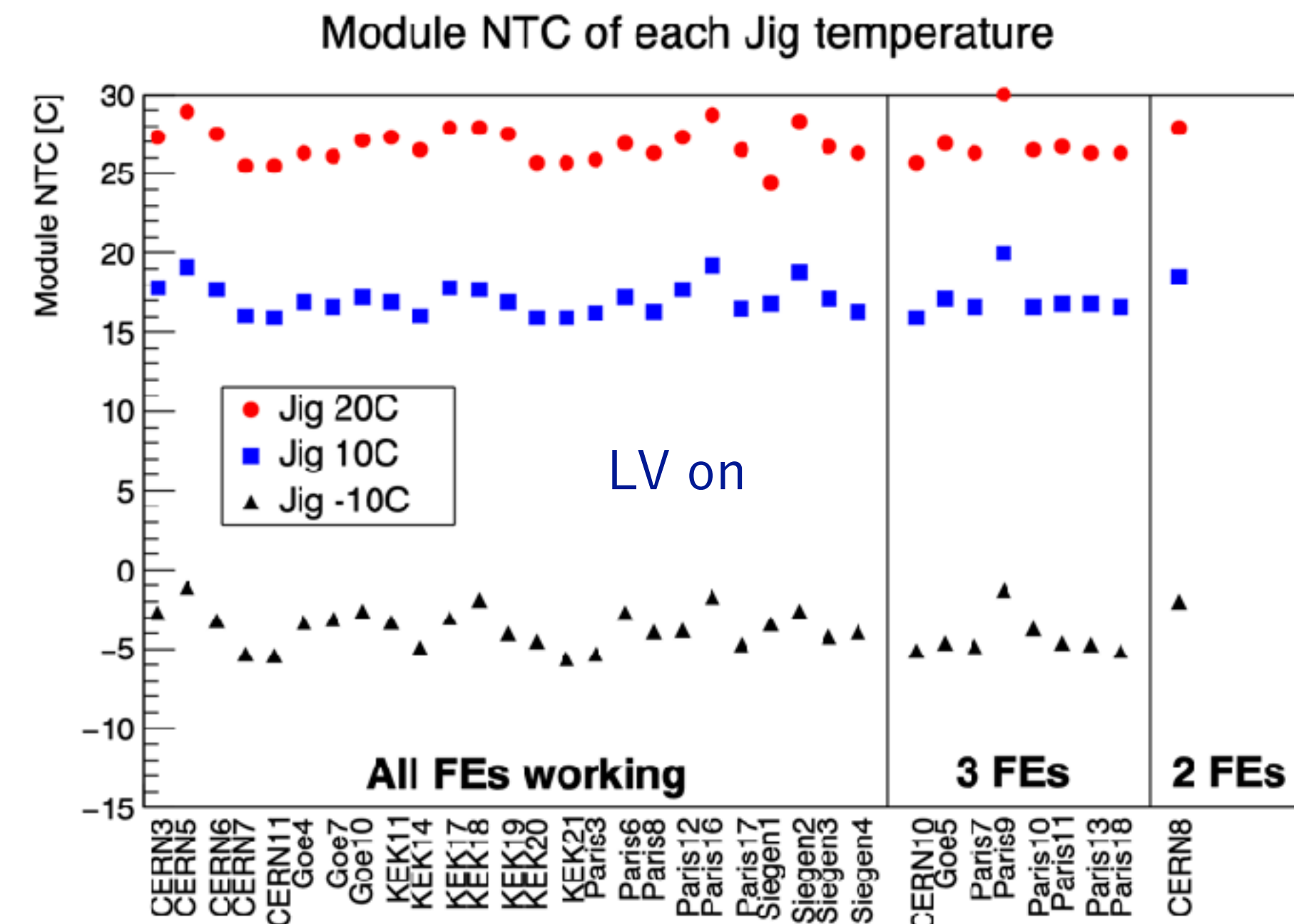
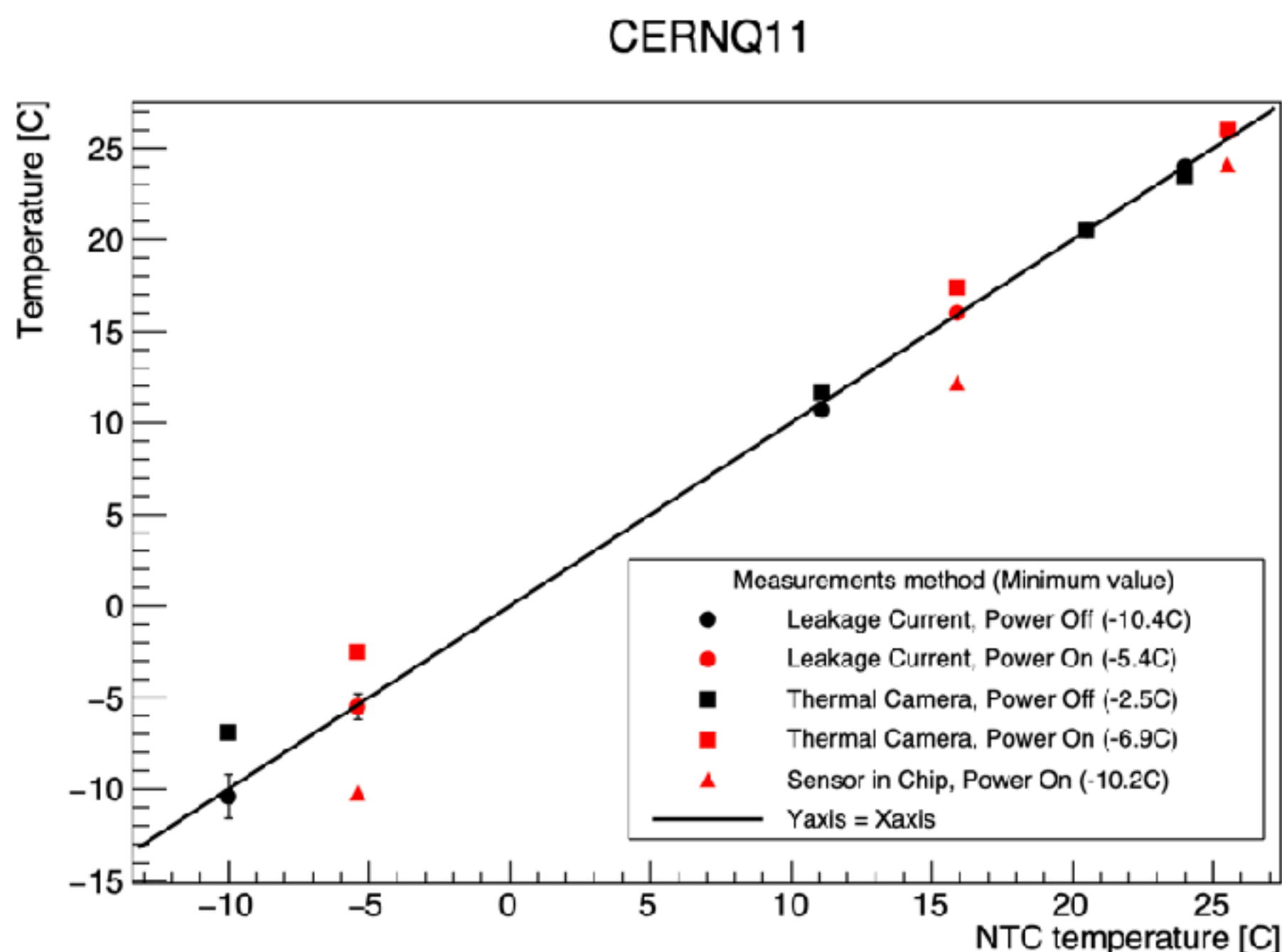


<https://www.digitec.ch/en/s1/product/kis-scuba-80-l-storage-boxes-8989409>



Results: Thermal Test after calibration

- モジュール毎のNTC温度のばらつき
- NTC温度と以下3点の温度の相関性を確認する
 - シリコンセンサー温度 (Leakage currentから計算)
 - ASICの温度 (NMOSセンサーを使用)
 - モジュール表面の温度 (Thermal CameraでNTCがある部分を測定)



NTC温度と3点の相関性が確認でき、異常に温度が高い点は見受けられない
 → Cellは均一に接着できている

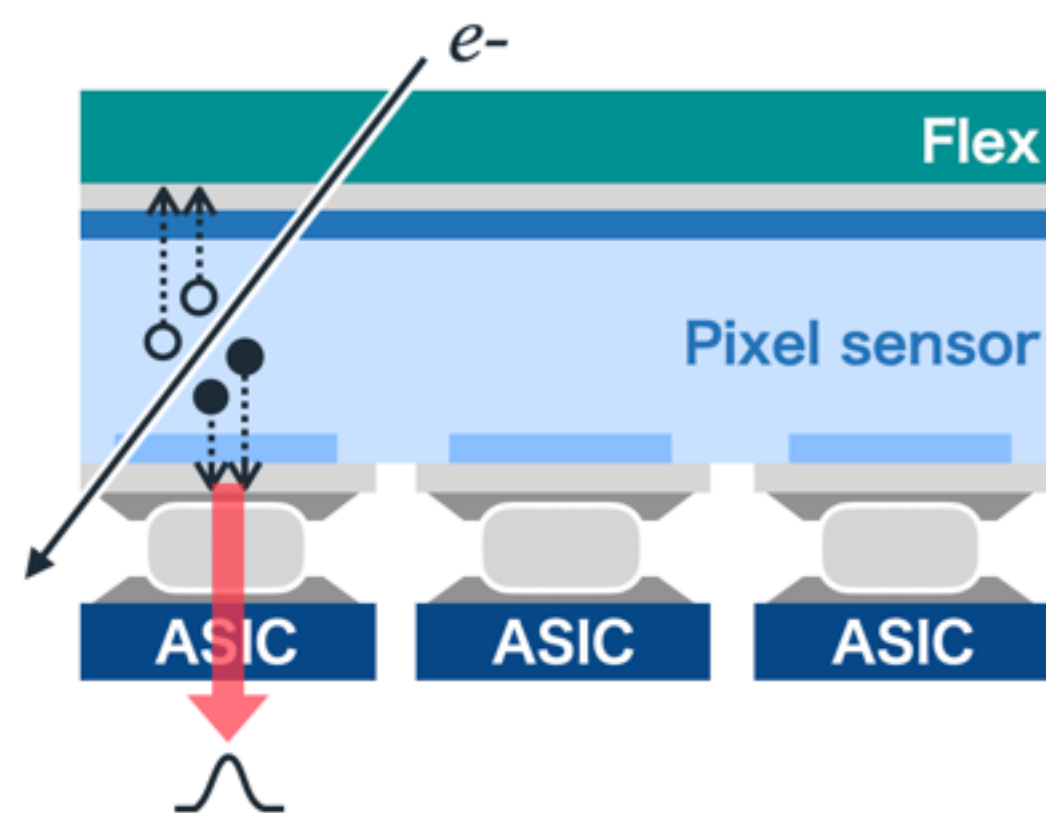
Thermal cameraで測定した点:

物体が放出した赤外線を測定。物質によって放射率が異なるため、素材による補正が必要。現在はモジュール表面を手動で温度を取得しているため、測定点に多少のばらつきがある。今後は、測定を画像識別にし、正確な点を測定。測定された点の物質で補正する予定。

Bump failure test

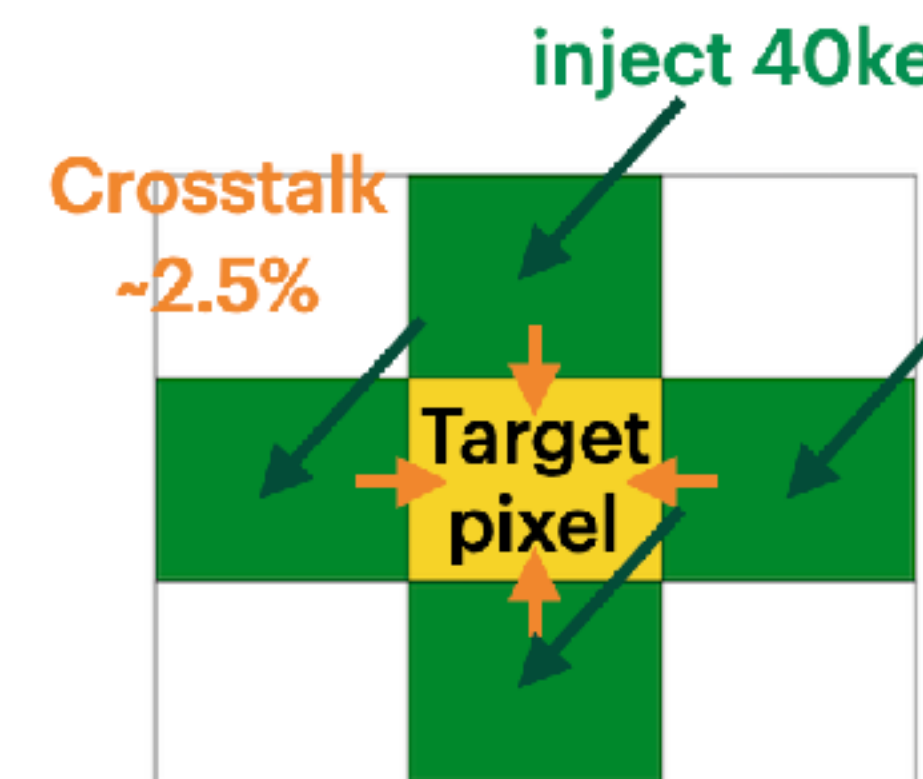
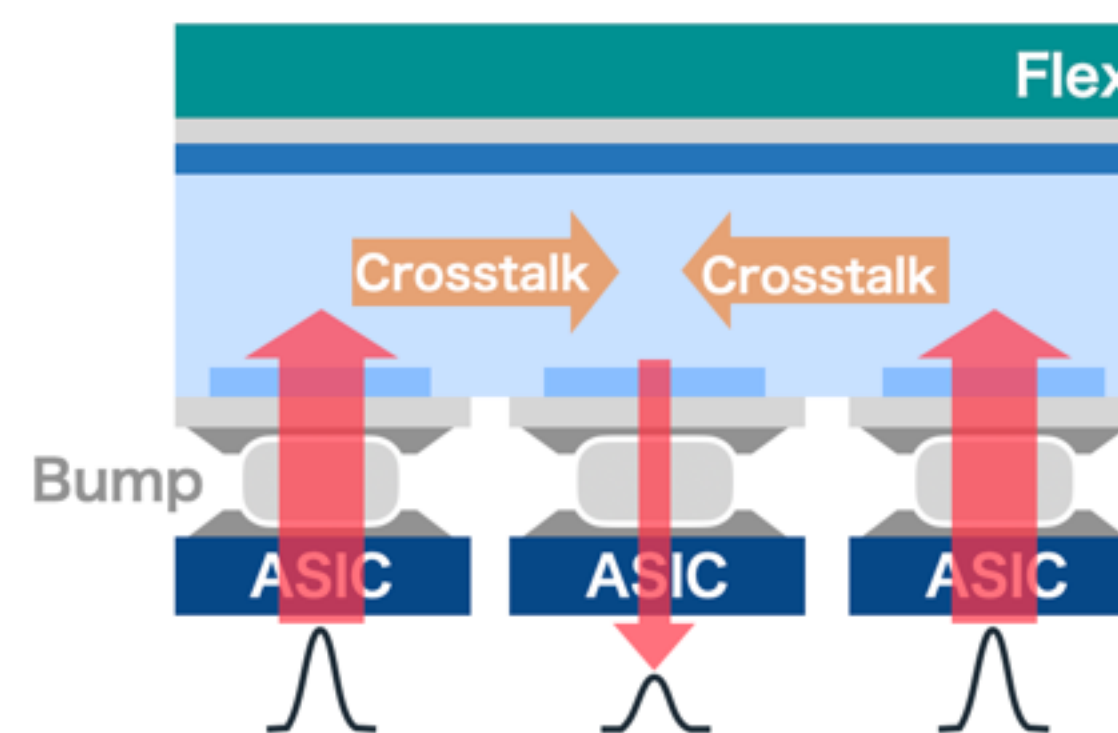
◎ Sourceを用いたバンプ接合確認試験 (Source test)

- 荷電粒子から生成された信号を直接読み出す
- PCB上のSMDや、コネクタの上ではヒットの収集効率が落ちる。
- Sourceを使用できる環境を整える必要がある



◎ センサー内のクロストークを利用したバンプ接合確認試験 (Disconnected bump test)

- センサーのクロストークがないピクセルを特定する
- PCB上の部品に関係なく試験を行える
- アナログ回路試験と同様の最もシンプルな電氣的試験環境で試験が行える
- ただし、隣接する4つのピクセルを使用するため、エッジの部分のEfficiencyが悪くなる



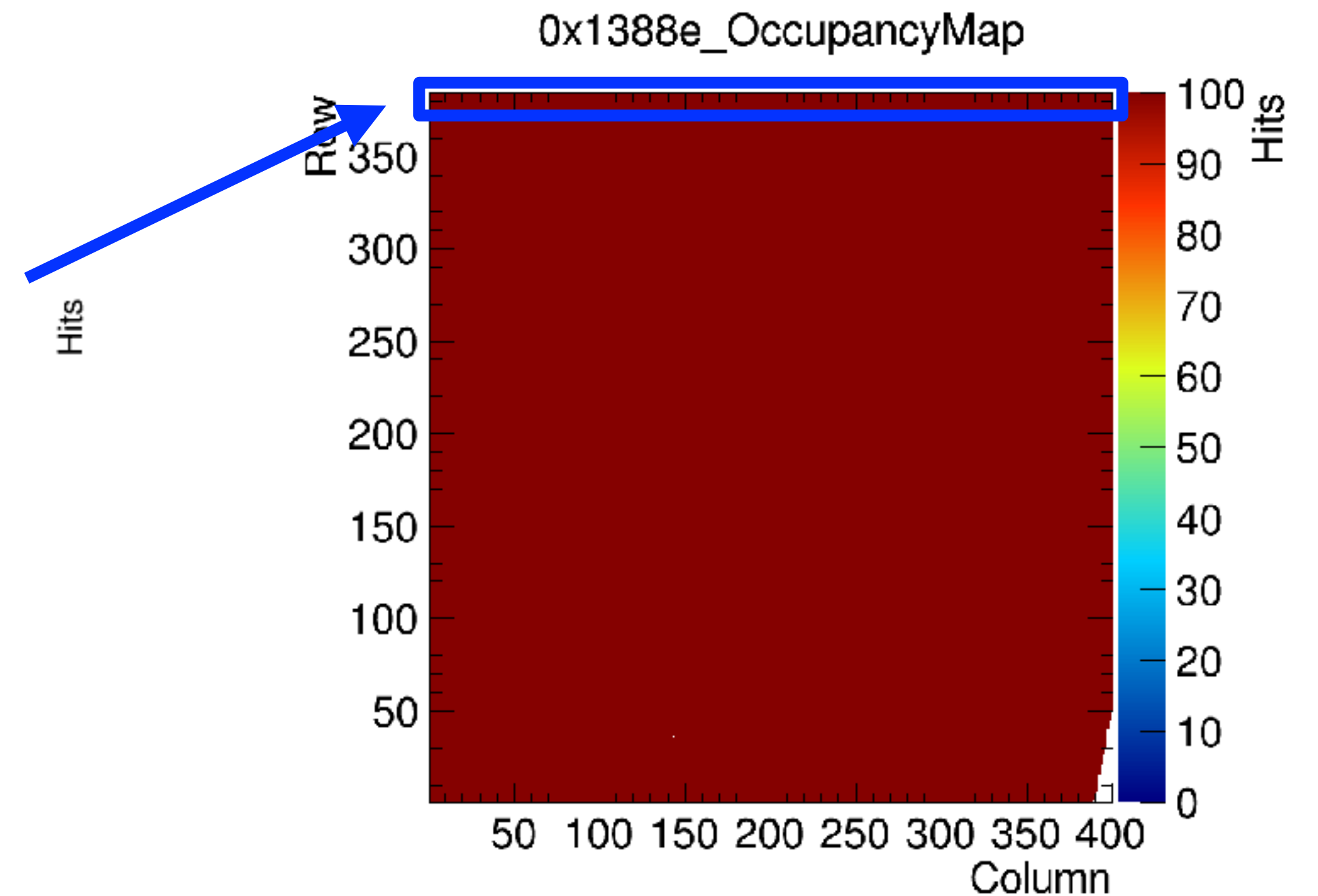
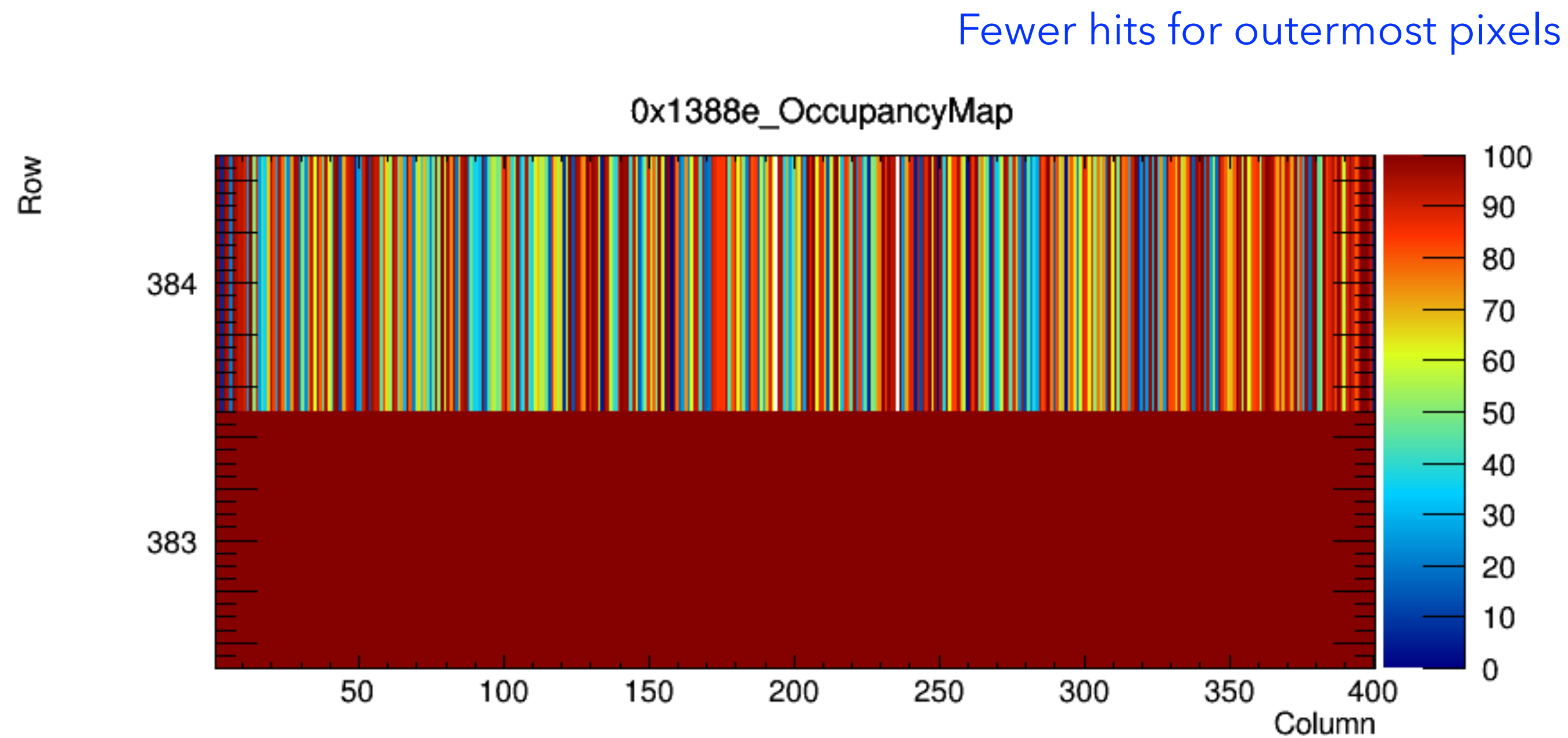
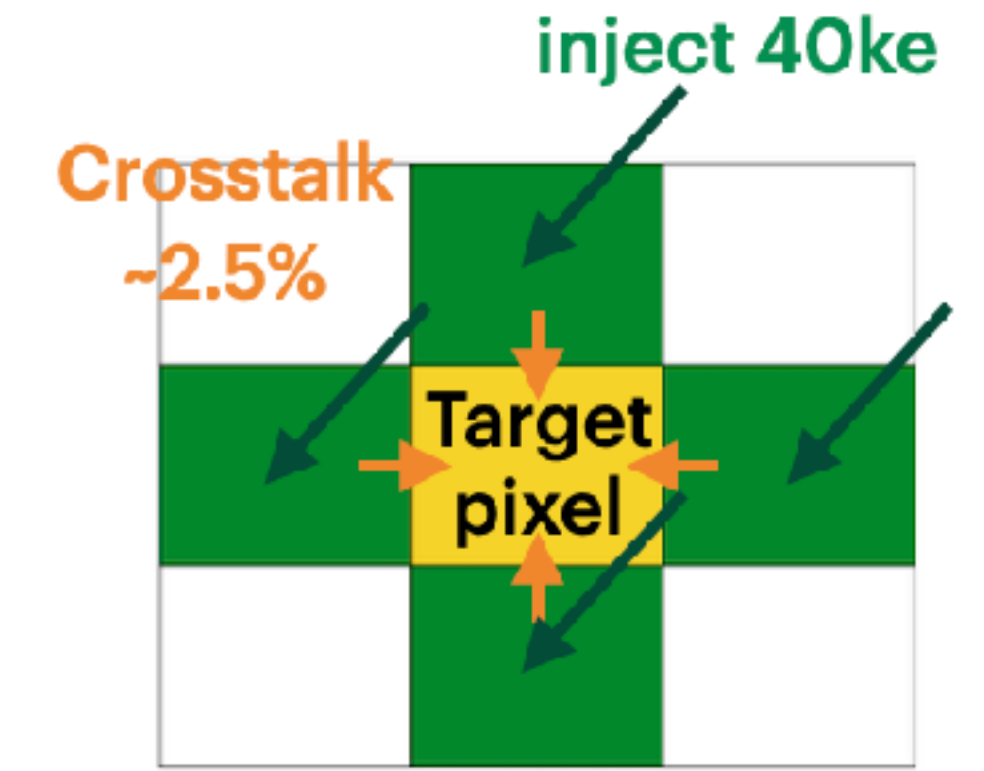
試験用の十分大きいパルスを隣の4ピクセルに送る(100回/pixel)

Disconnected bump scanがSource testの結果を再現するか知る必要がある

Disconnected bump scan

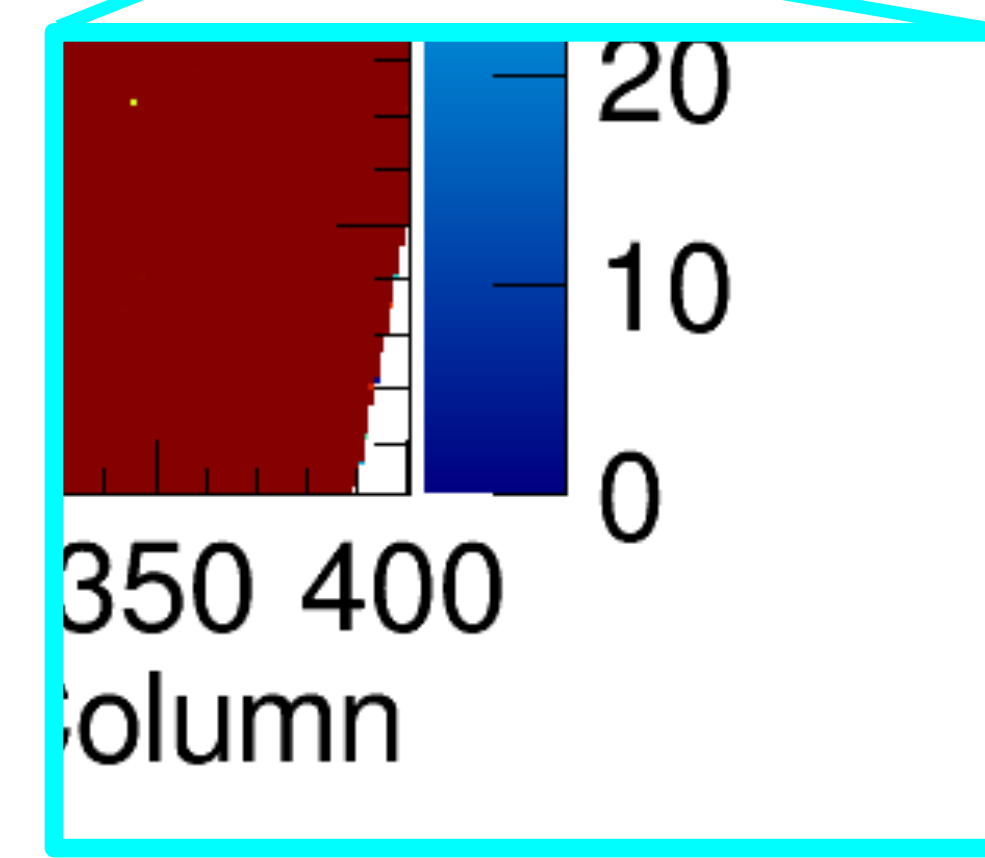
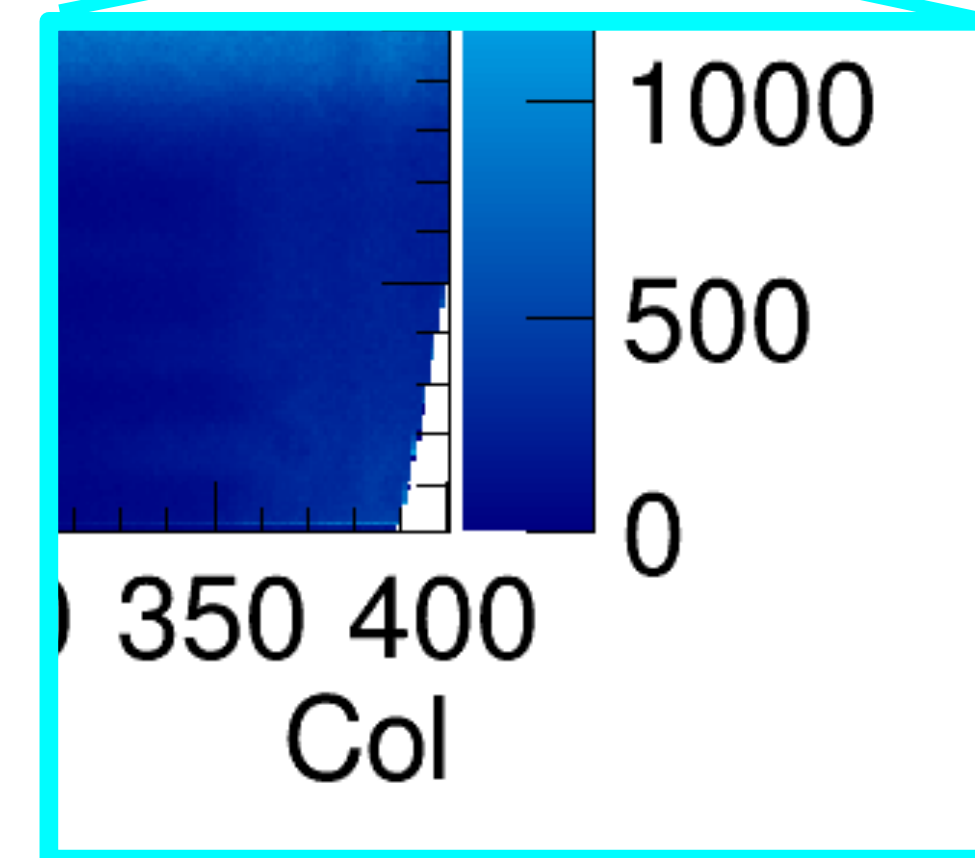
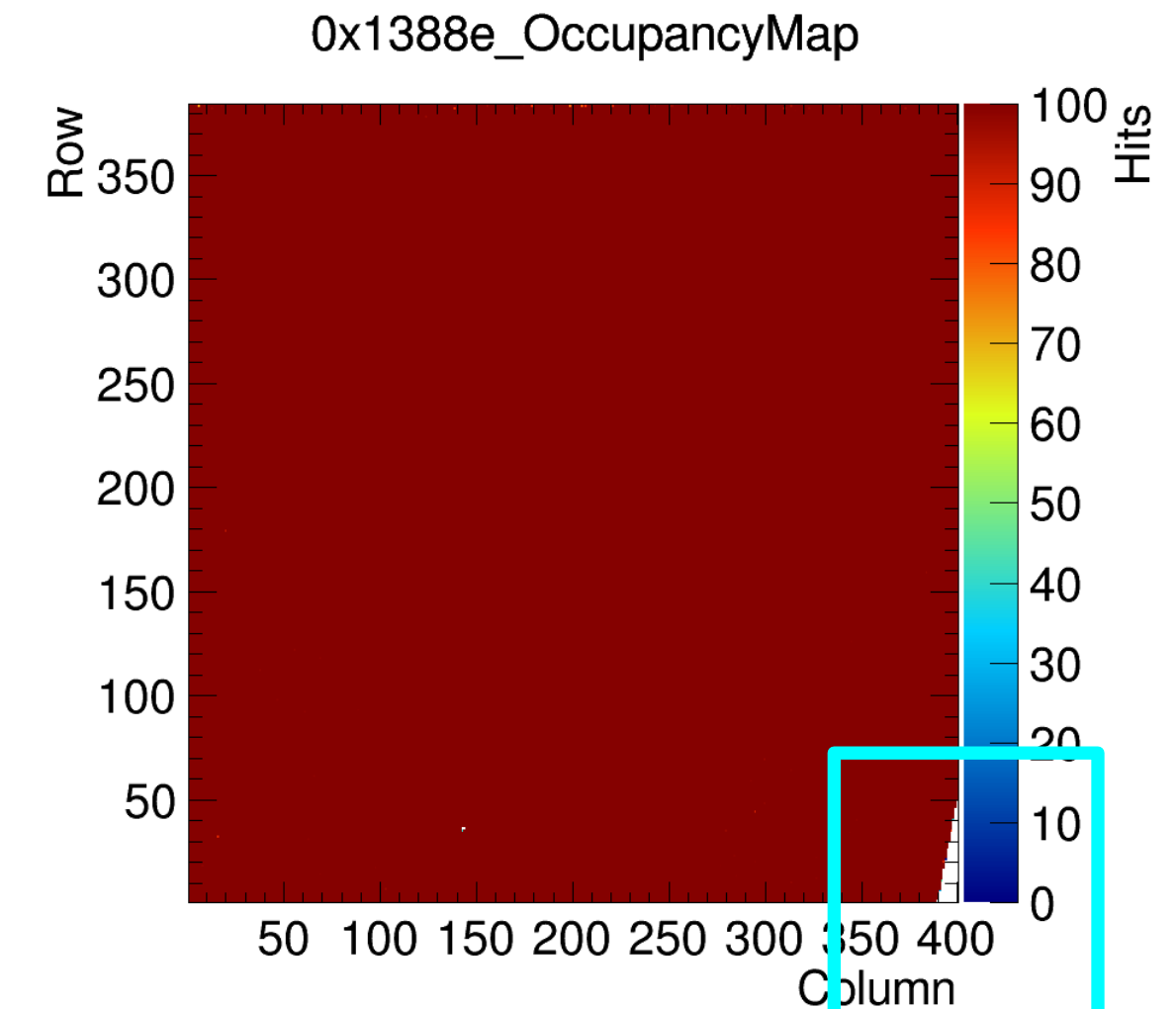
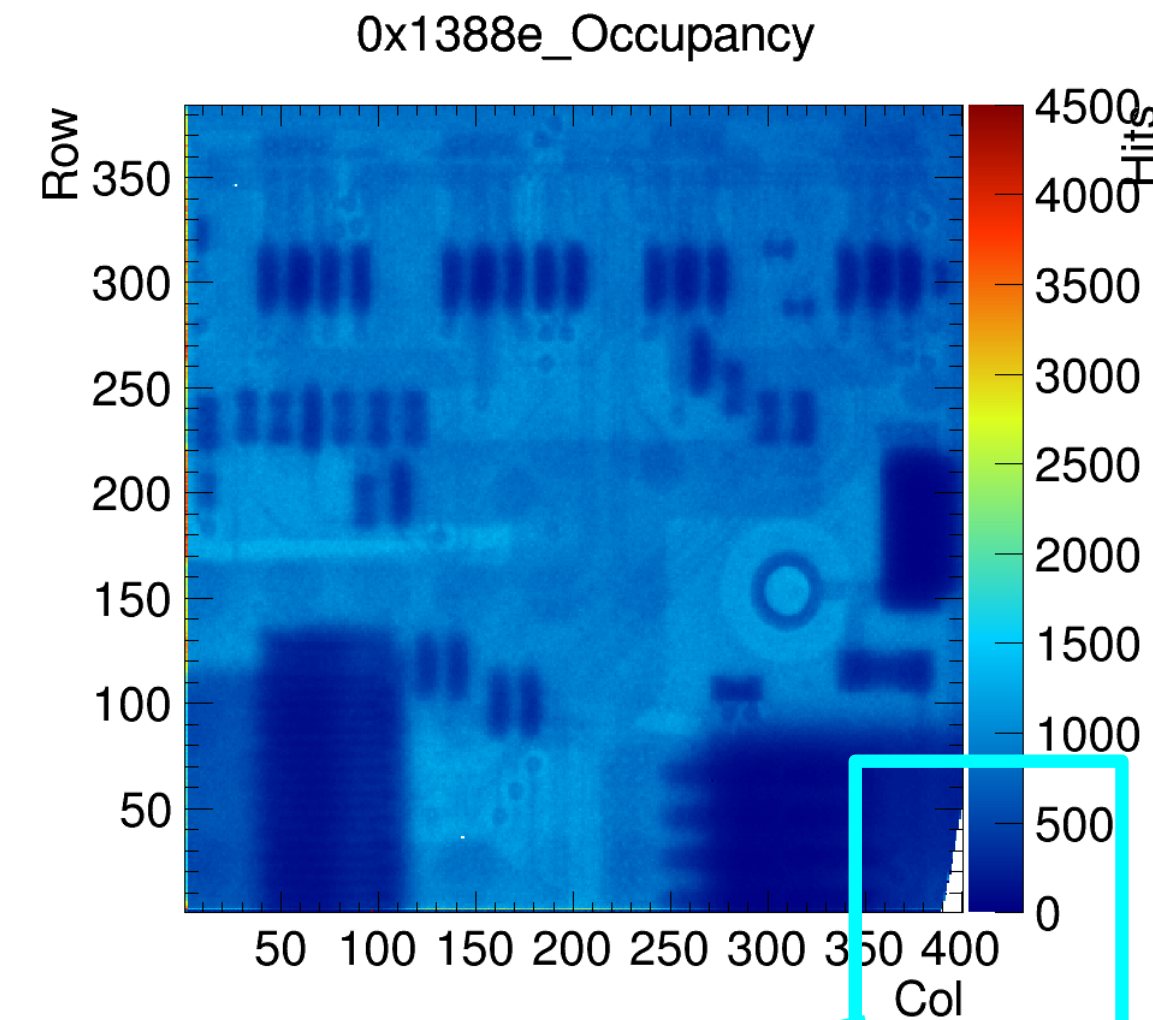
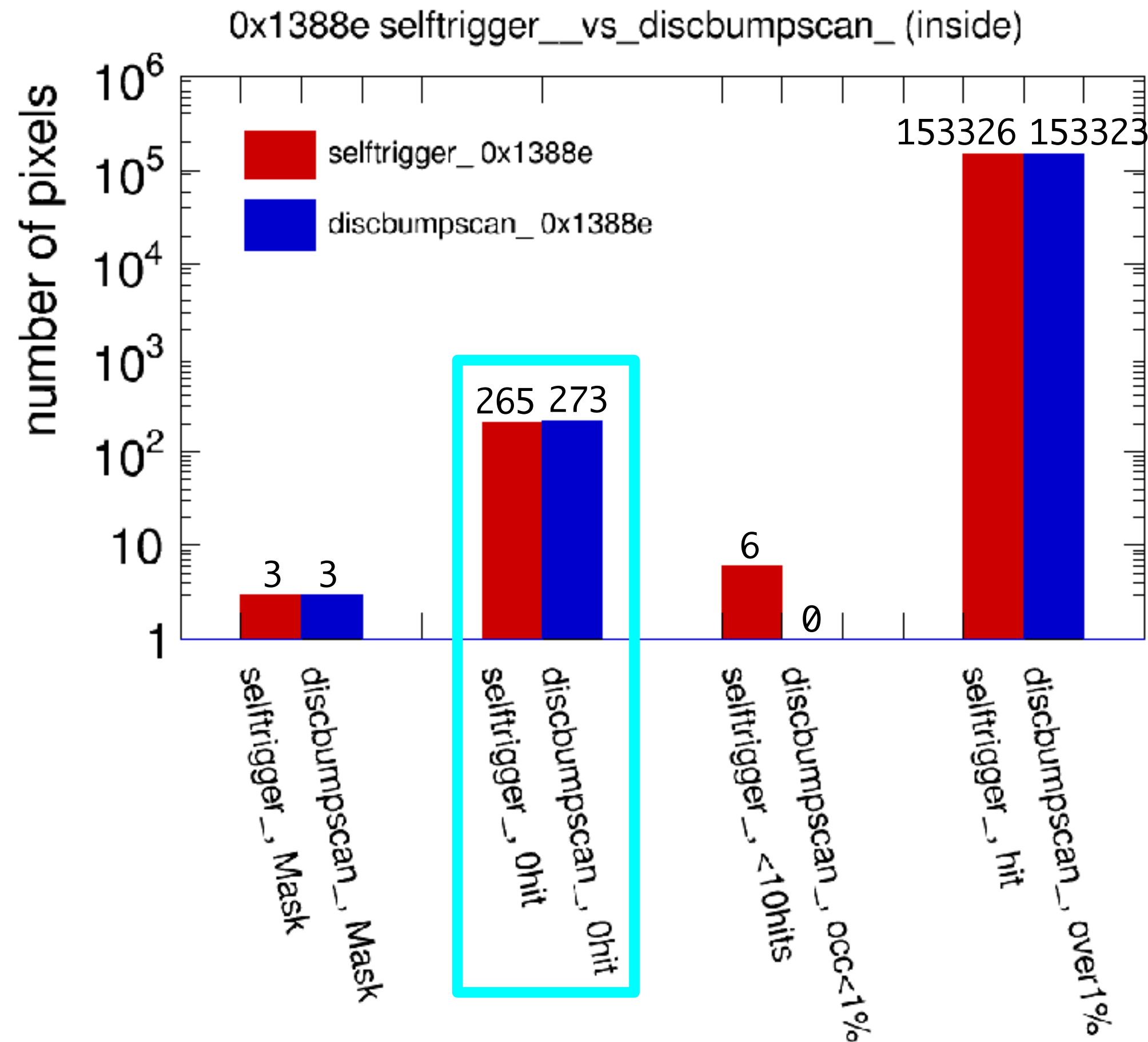
○ Disconnected bump scanを使用する場合

- 試験用パルスを注入するために隣接する4つのピクセルを使用するため
端1ピクセルのEfficiencyが悪くなる
- Source testとの比較には端1ピクセルを除いた内側のピクセルだけを用いる



Compare 2 scans to verify bump failure (bump disconnection chip)

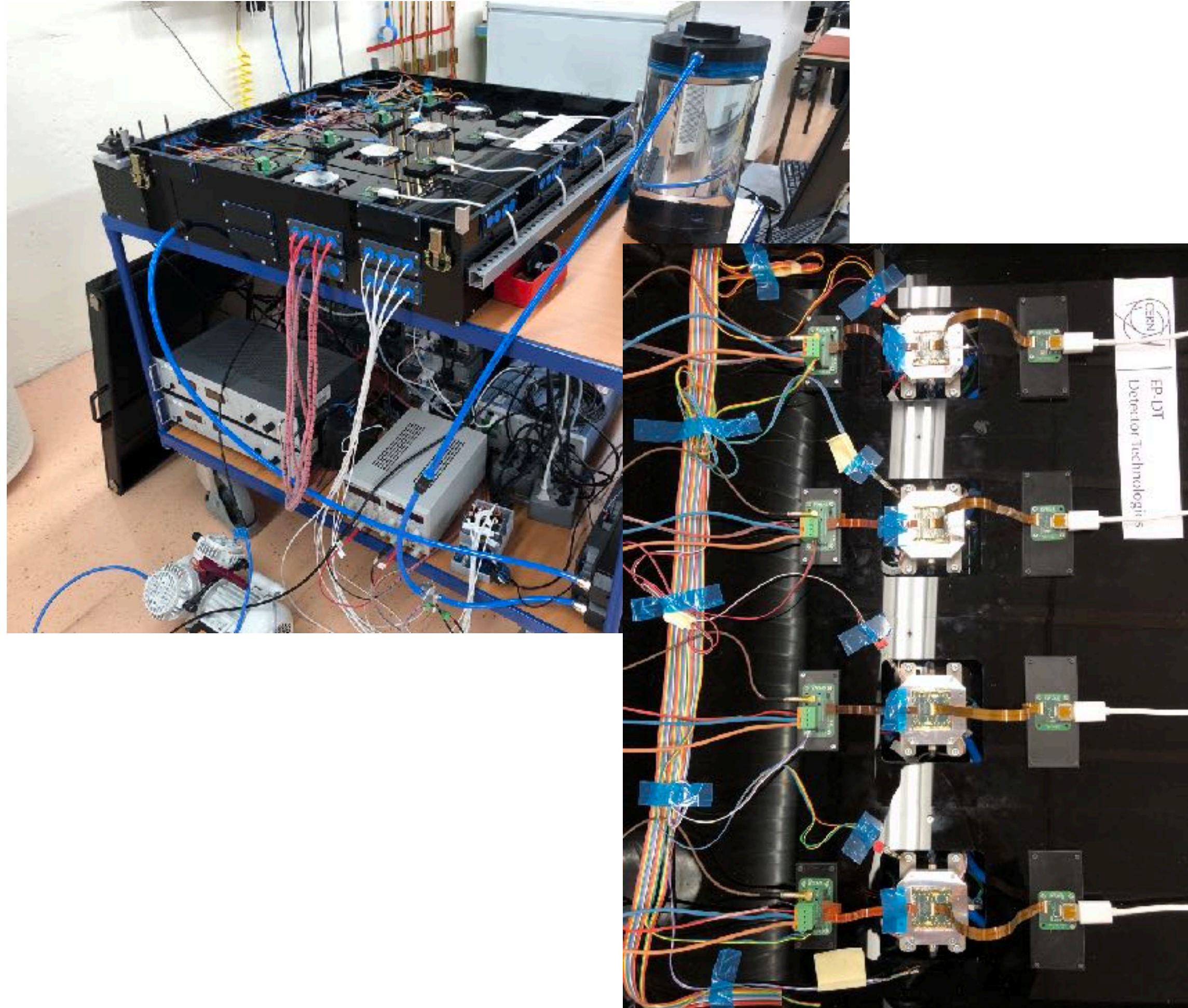
○ Distribution of number of pixels:



Disconnected bump scanは良く Source scanの結果を再現しており、Sourceを用いないバンプ接合確認試験を確立できている

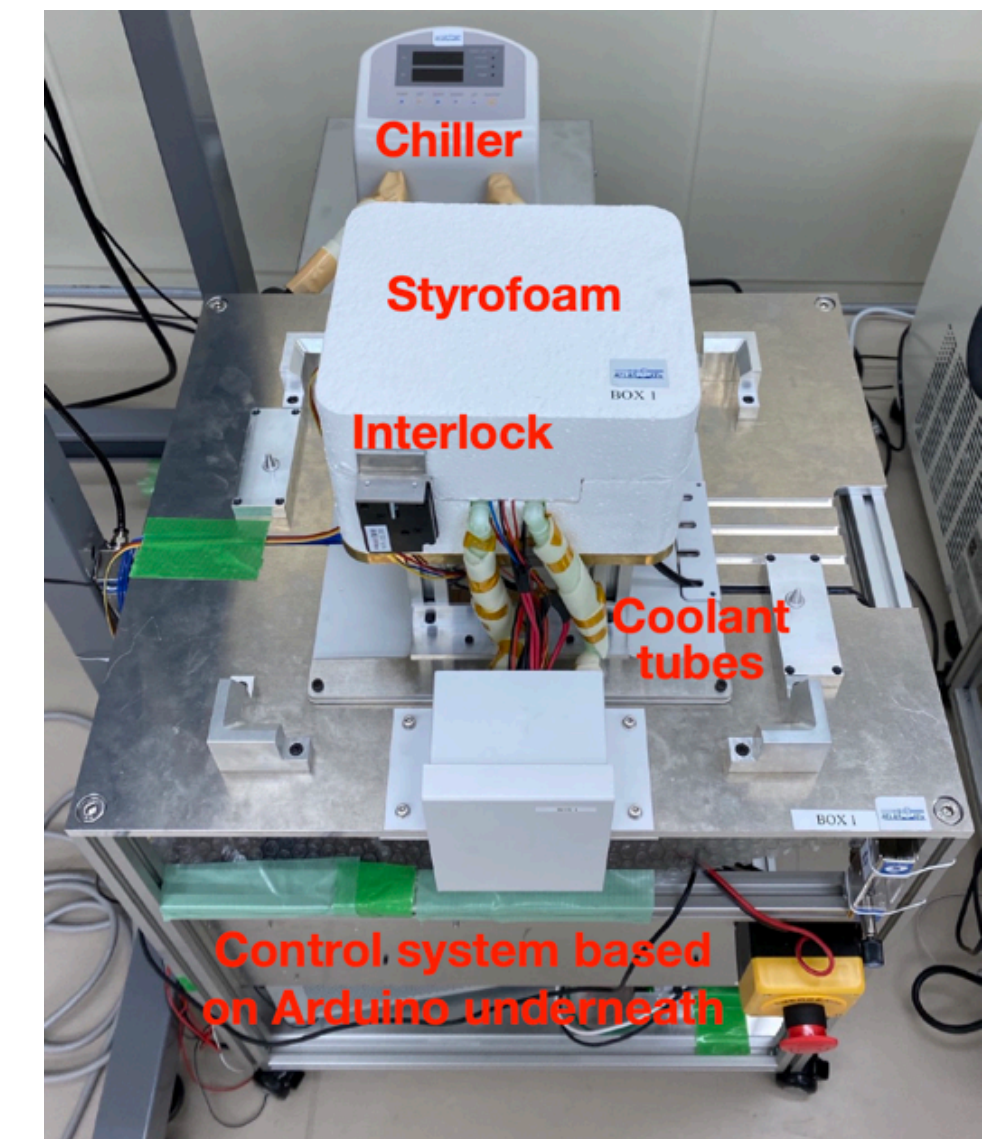
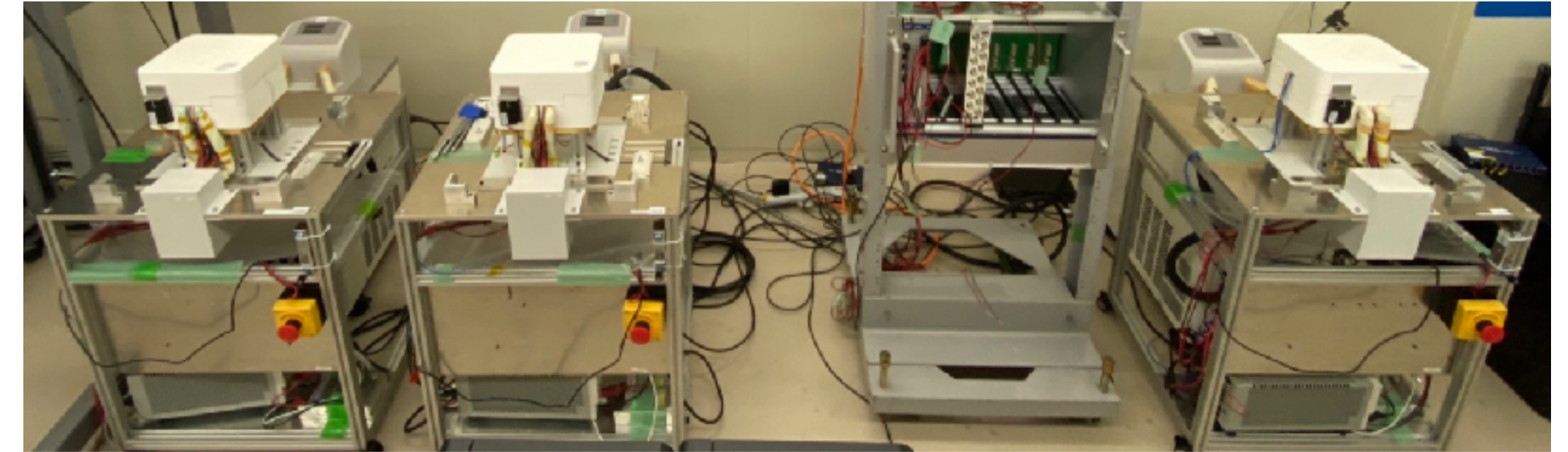
Parallelization of QC test system

◎ CERN



◎ Japan

- Hayashi-REPIC



今後のMass Productionに向けて4モジュール同時に試験できる環境をCERN, Japan両サイトで整備中

Conclusion

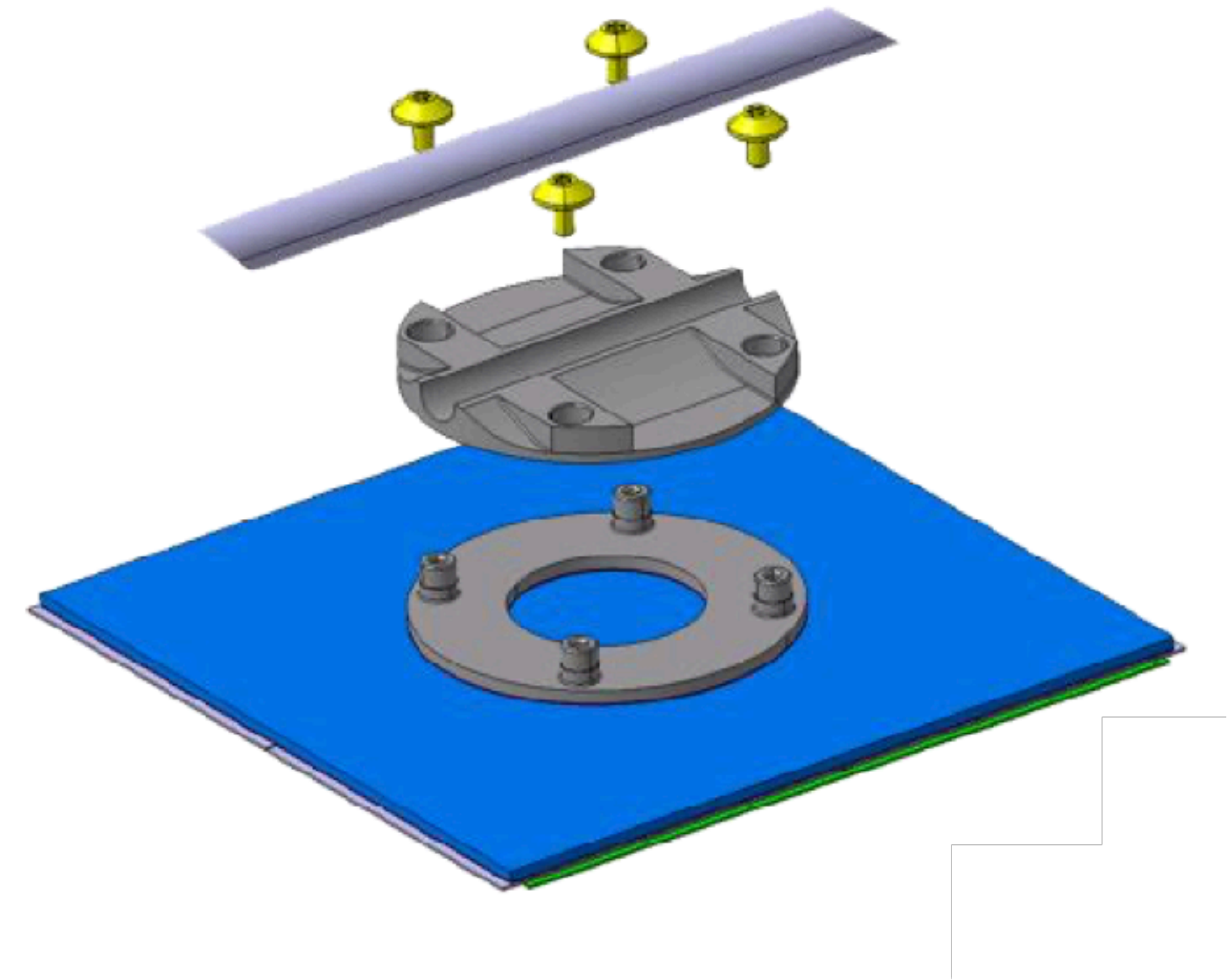
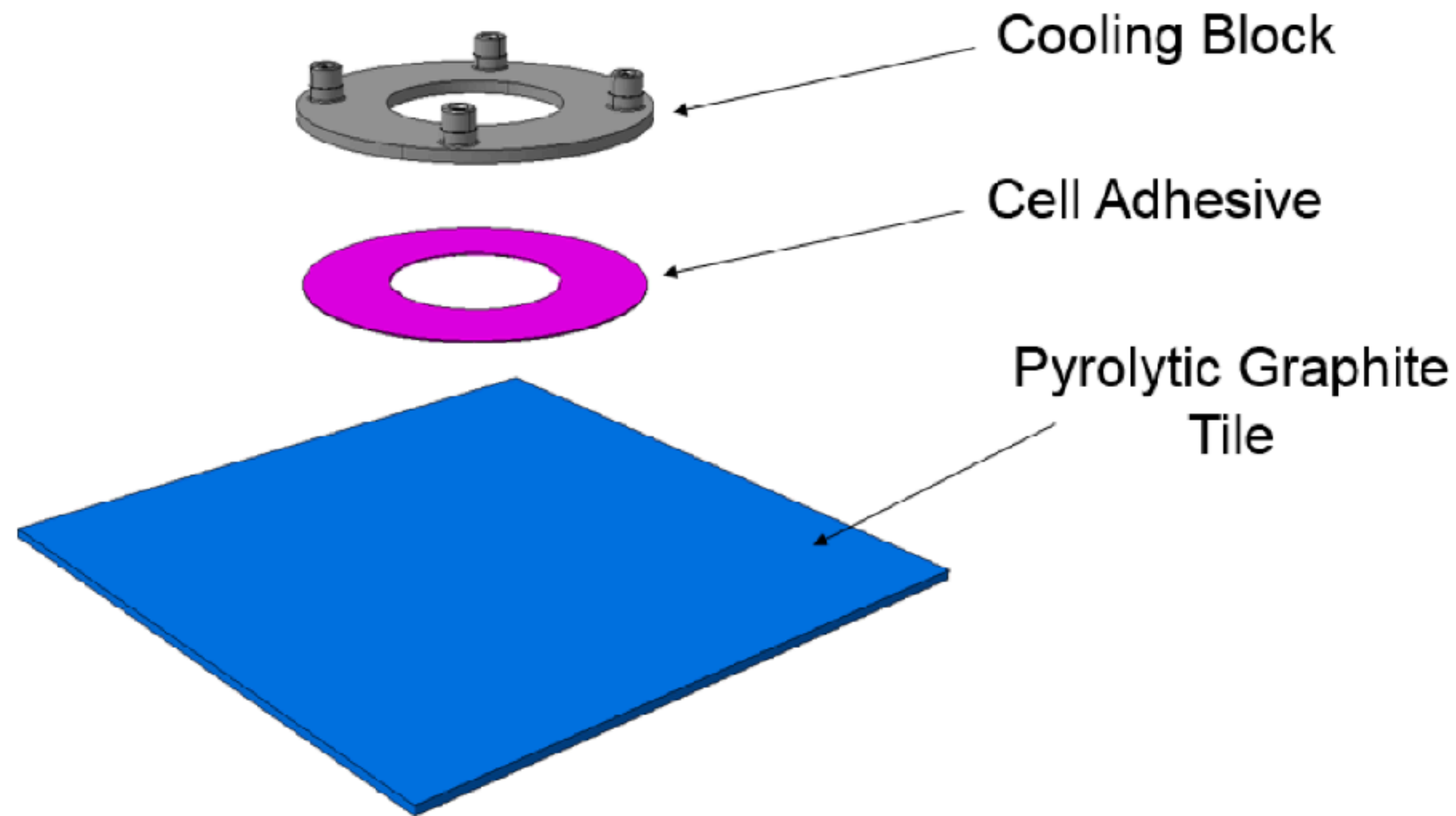
- HL-LHC計画に伴いATLAS検出器の最内層に位置するInner Tracker Systemは新しくITkと呼ばれる検出器にアップグレードされる。
 - このアップグレードのために日本では2,200台のモジュールを量産予定（そのうちOB用は1,350台）
- 組み立てられた検出器はインストールを行うサイトに集められ、QC試験にかけられる
 - 試験用モジュール数十台を各サイトから集められ、CERNで試験を行った（日本からは8台）
 - 組立サイトで行った試験とインストールサイトで行われた試験で一貫性のある結果を取得し、同様の試験環境が整っていることが確認できた。
- 今後のモジュール量産に向けて
 - 4モジュールを同時に試験できる環境を、組立サイト・インストールサイトで整えていく。



BACK UP

Outer Barrel Pixel Module: Cell

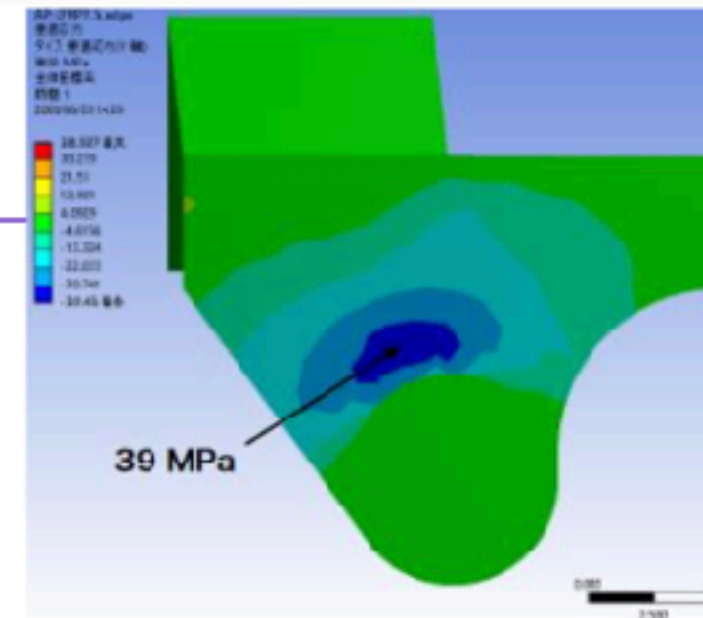
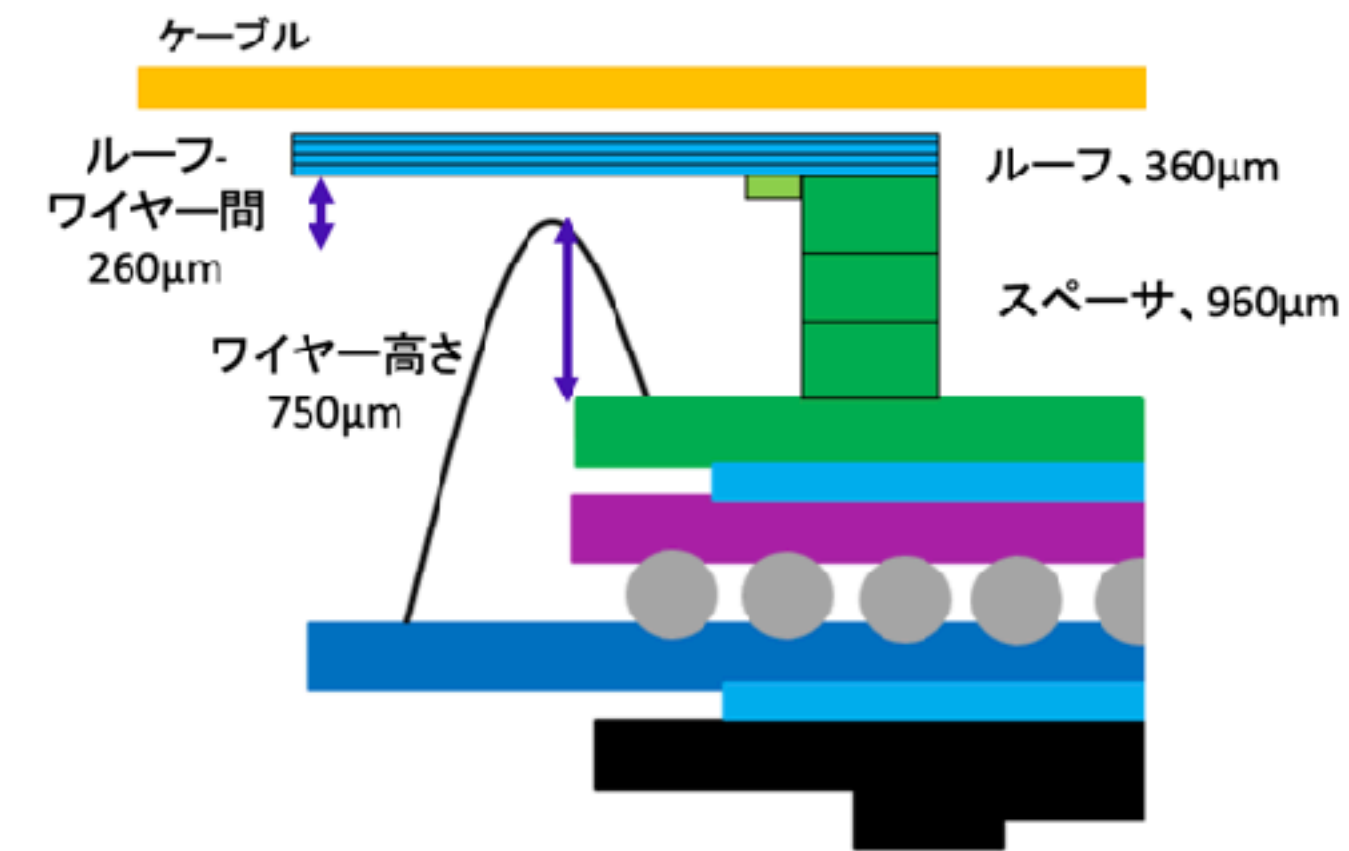
Cellの構造



Outer Barrel Pixel Module: Wire bonding protection

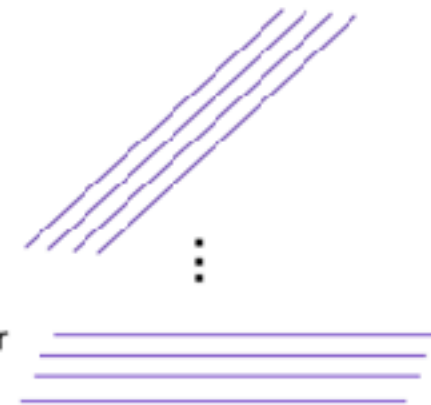
- ModuleのWireの上をケーブルが通るため、Wireを保護する必要がある

CFRP構造体の詳細



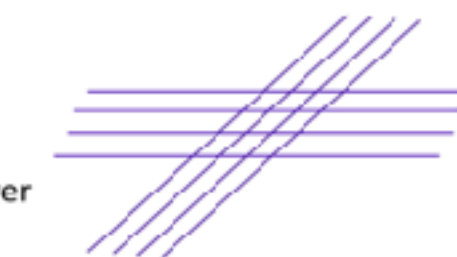
ANSYSによる、荷重変形のシミュレーションの様子

1 direction x 4
0/90/90/0°
80 μ m
thickness/layer

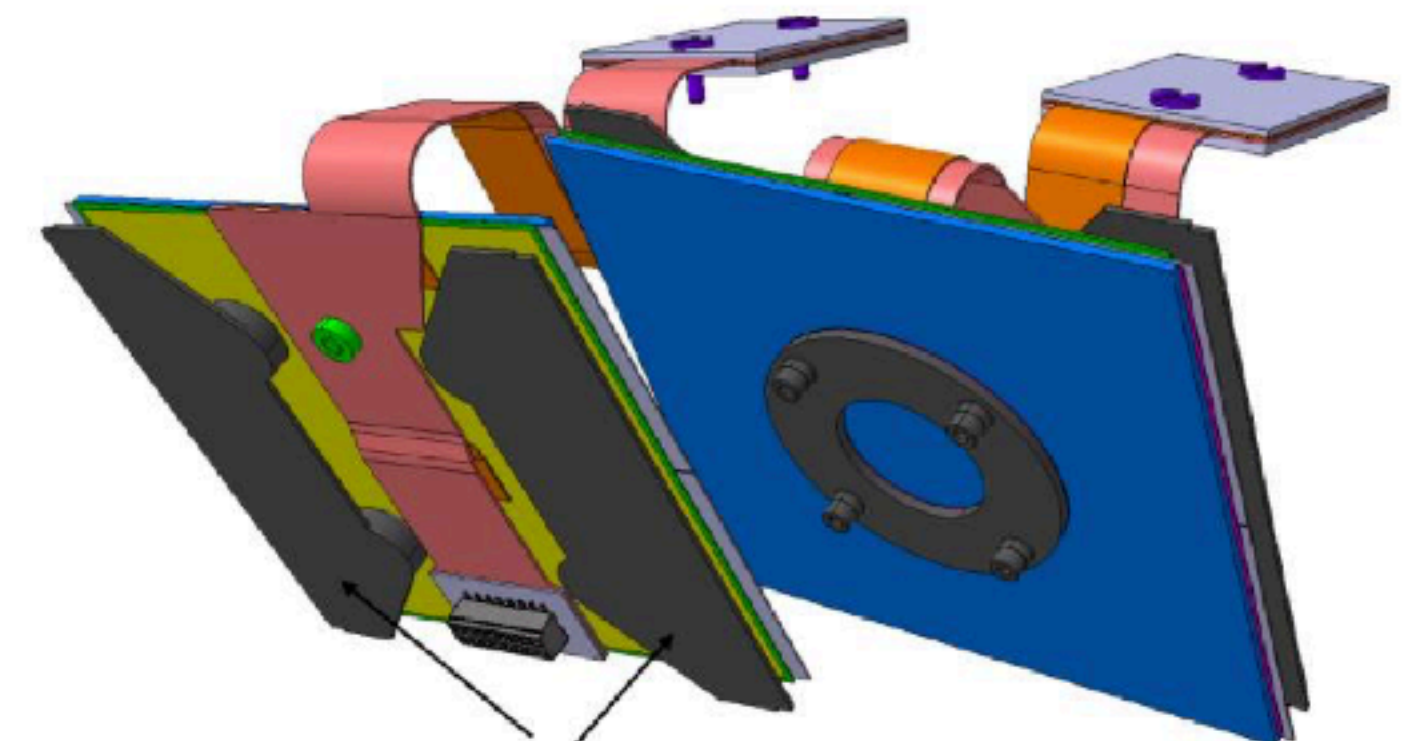
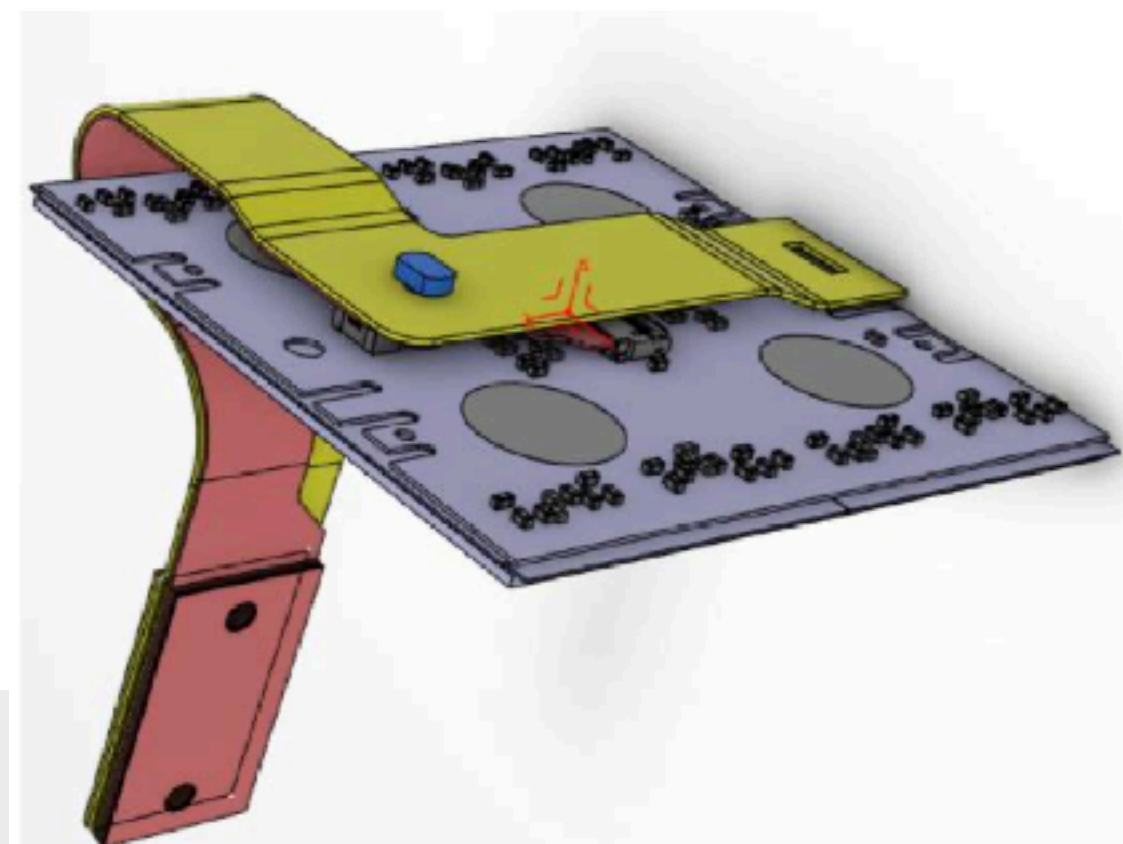


NGT NT91250-525S
Roof
360 μ m thickness
Young's modulus: 220 GPa

Cross x3
0/90/90/0°
240 μ m
thickness/layer



東レ 3K 平織
Spacer
960 μ m thickness
Young's modulus: 60 GPa



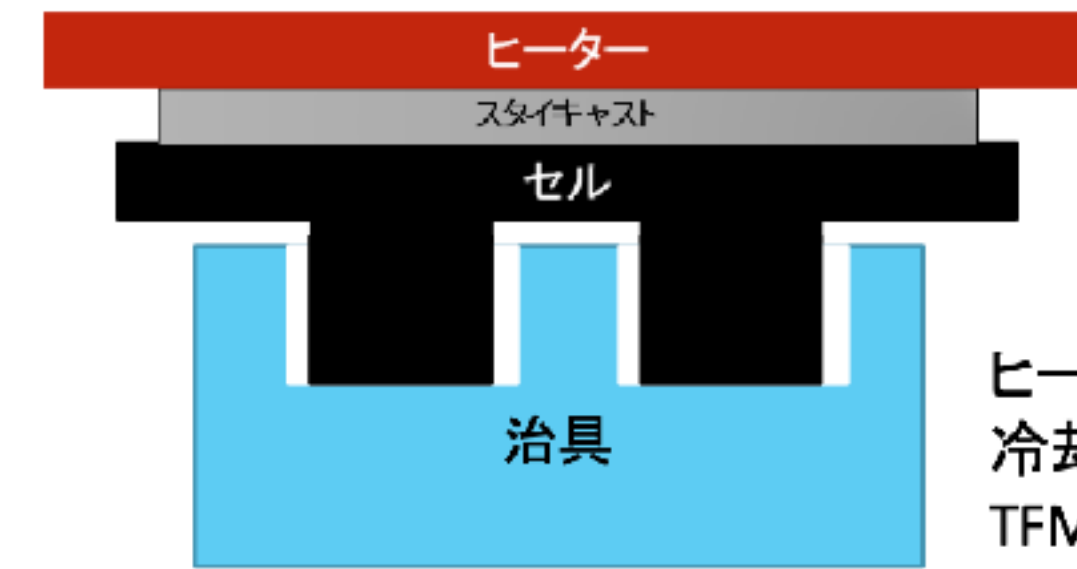
Wire-bond protection

Outer Barrel Pixel Module: Cooling Performance

- 冷却性能評価: TFM手法(Thermal Figure of Merit)

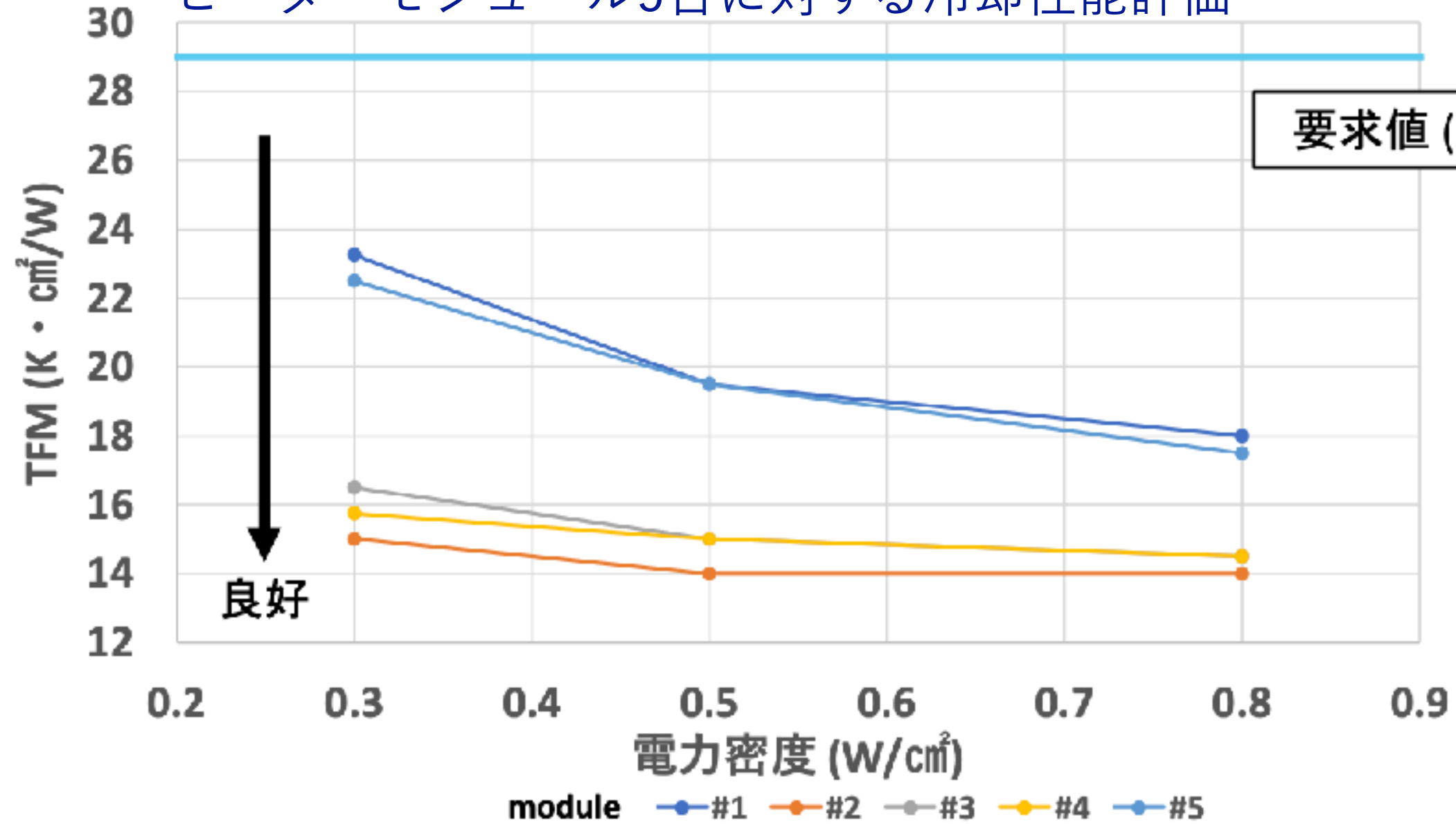
$$(TFM) = \frac{T_{heater} - T_{coolant}}{Q} \quad [K \cdot cm^2 / W]$$

T_{heater} : ヒーター裏面の温度
 $T_{coolant}$: 冷却液の温度
 Q : ヒーターの電力密度 [W/cm^2]



ヒーターの裏面と冷却液の温度差から、TFMを計算する。

ヒーターモジュール5台に対する冷却性能評価



運転時の最大発熱量:
 $0.7 W/cm^2$

発熱量が一定の場合、TFMが小さいほど温度差が小さくなる。

十分な冷却性能を有する

$$T_{detector} = (TFM) \times Q_{detector} + T_{coolant}$$

熱伝達率
 接着剤の厚み
 接着面積等から決まる。

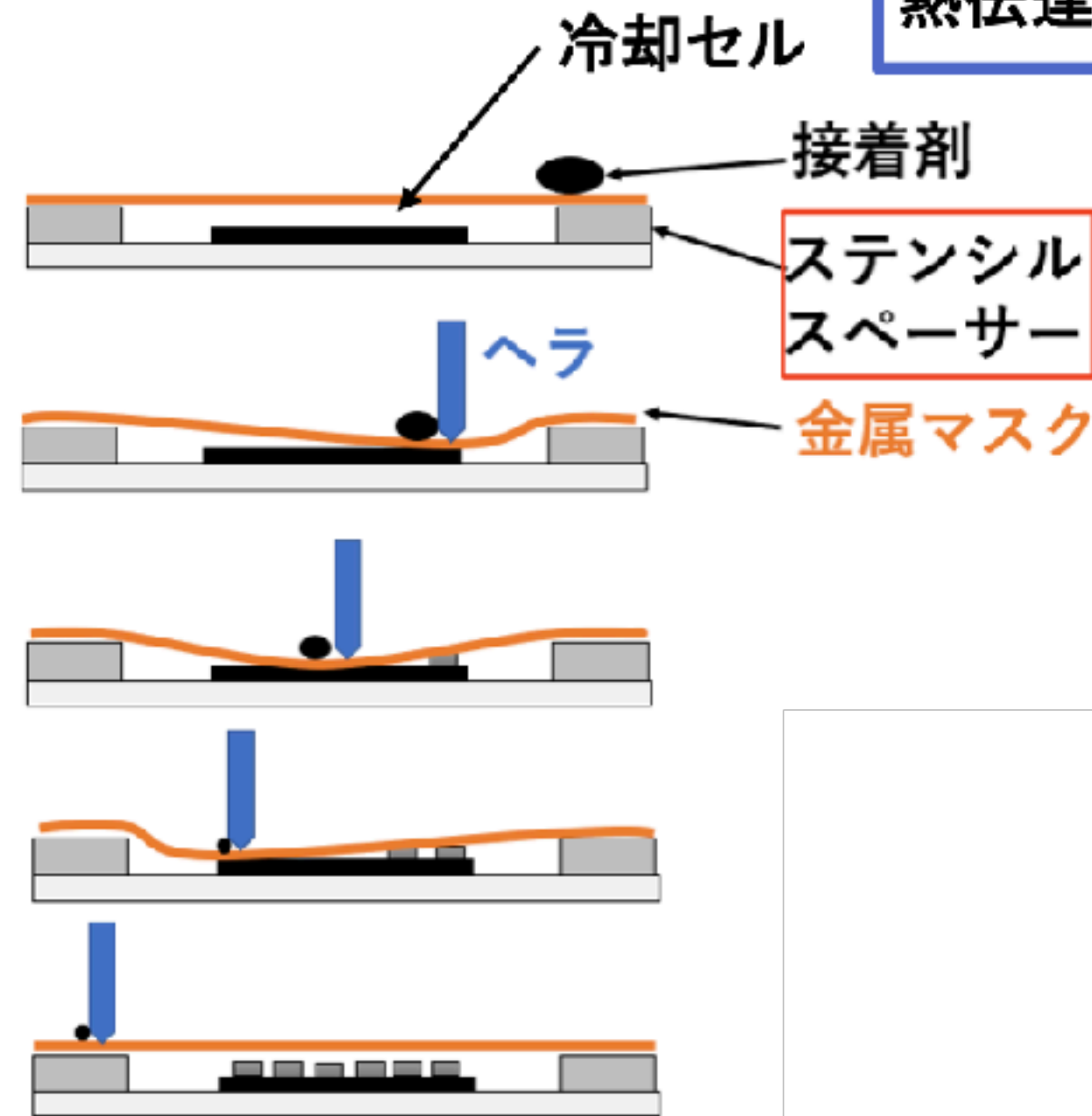
T_{heater} : 検出器の最高温度
 $T_{coolant}$: 冷却液の温度 ($-35^{\circ}C$)
 Q : 検出器の電力密度 [W/cm^2]

Outer Barrel Pixel Module: Assembly of Cell

◎ ステンシル法

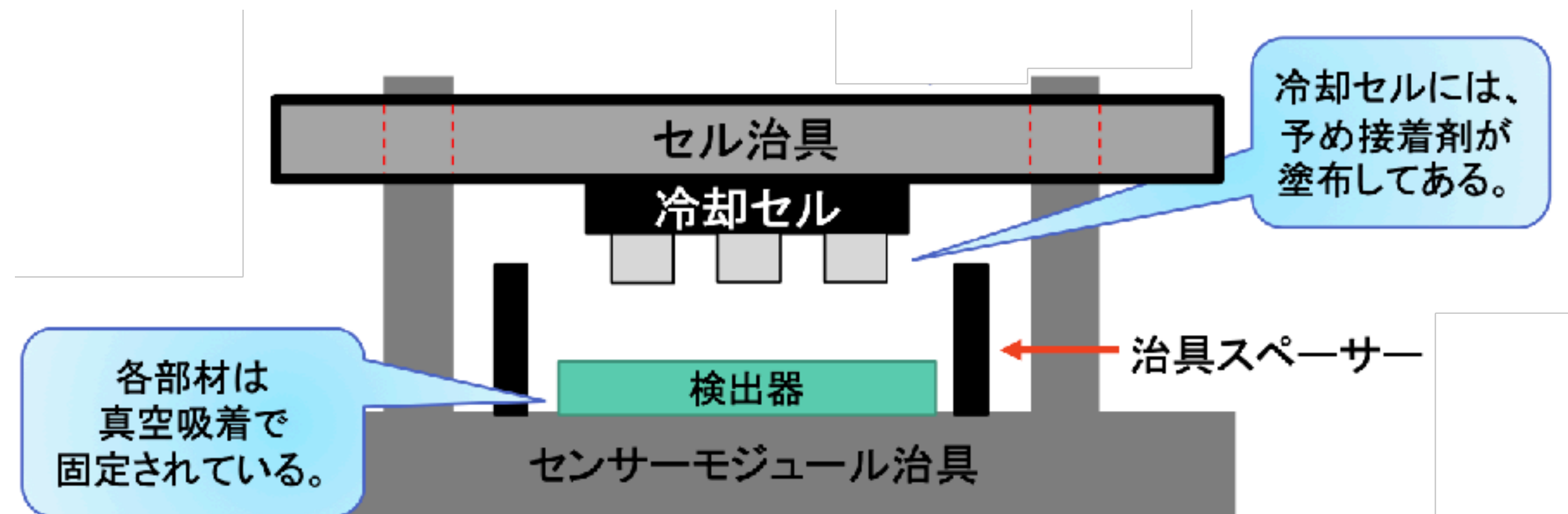
- ステンシルスプレーサーで金属マスクのパターンに接着剤を塗布
- 治具のスペーサーの厚みで、接着剤の厚みを調整可能

ステンシル法

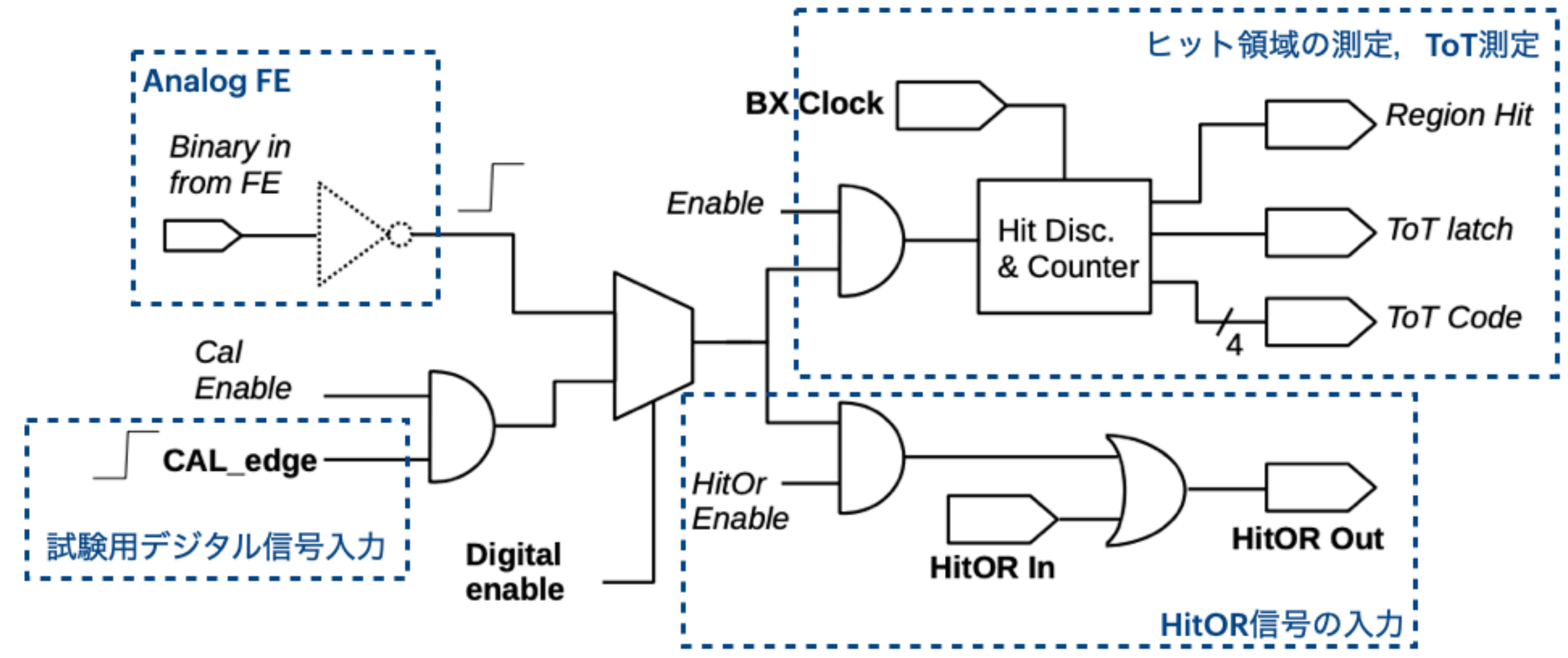
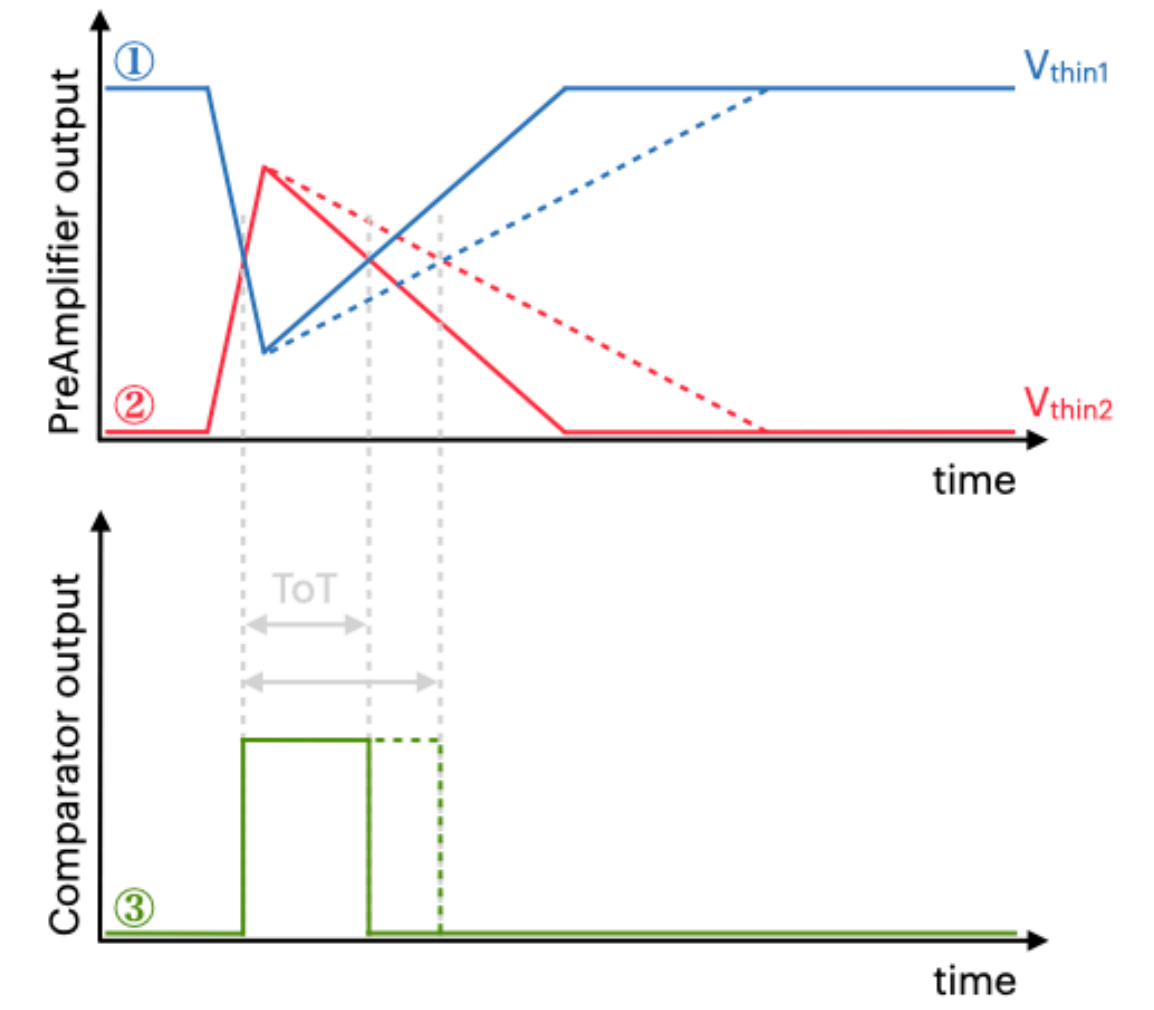
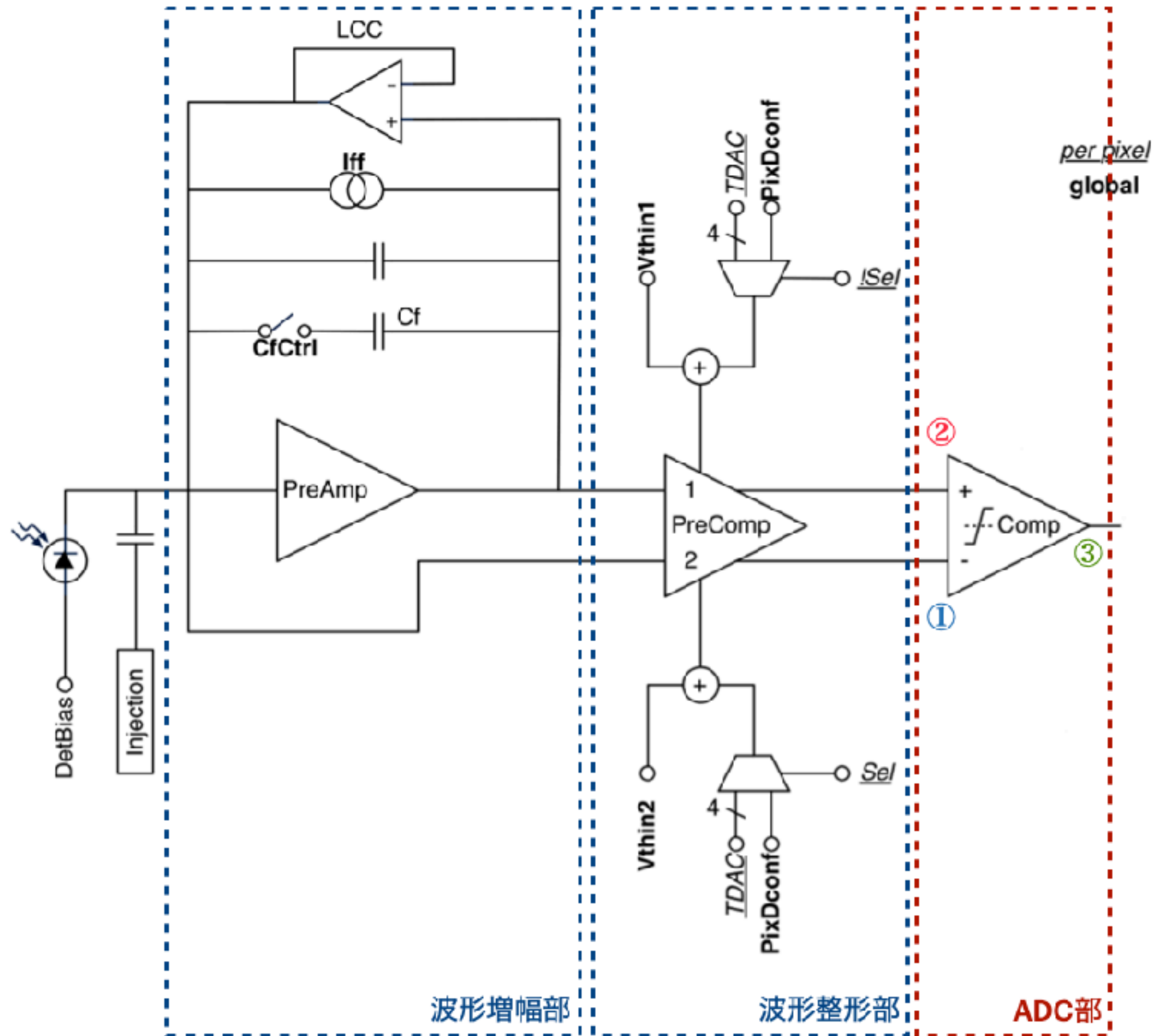


要求

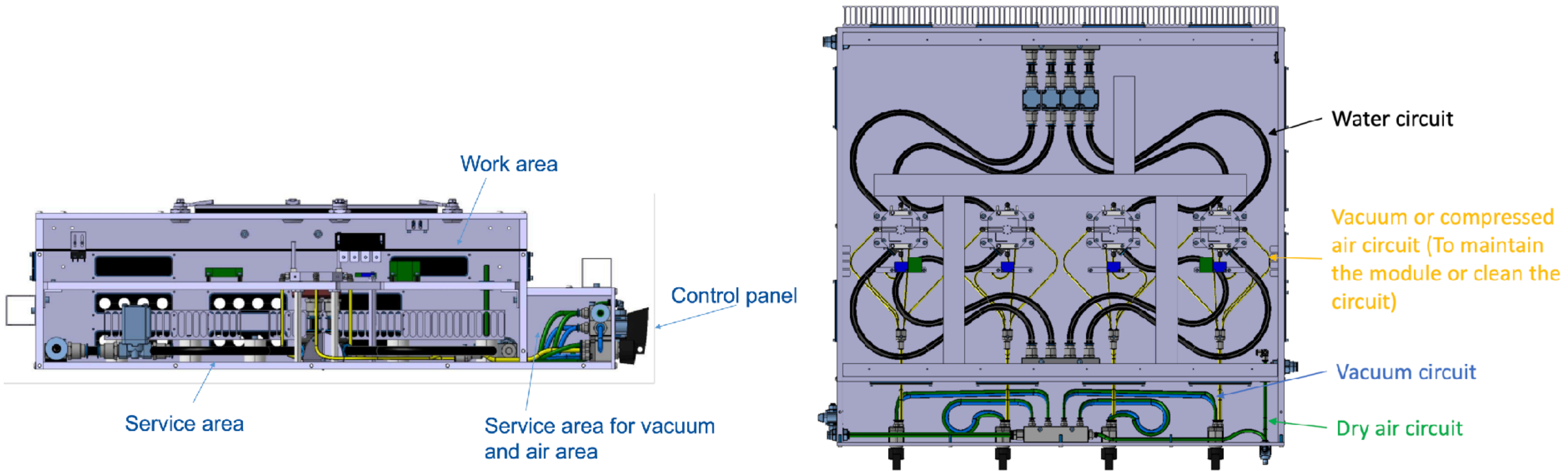
接着剤の厚さ: 75-100 μm (下限: フィラーの大きさ、上限: 熱伝達効率が悪化する。)
熱伝達効率: TFMで29 $\text{K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ (検出器が、熱暴走を起こさないよう設計。)



Digital / Analog Front-End Test



Parallelization of QC test system at CERN



Environmental Monitoring



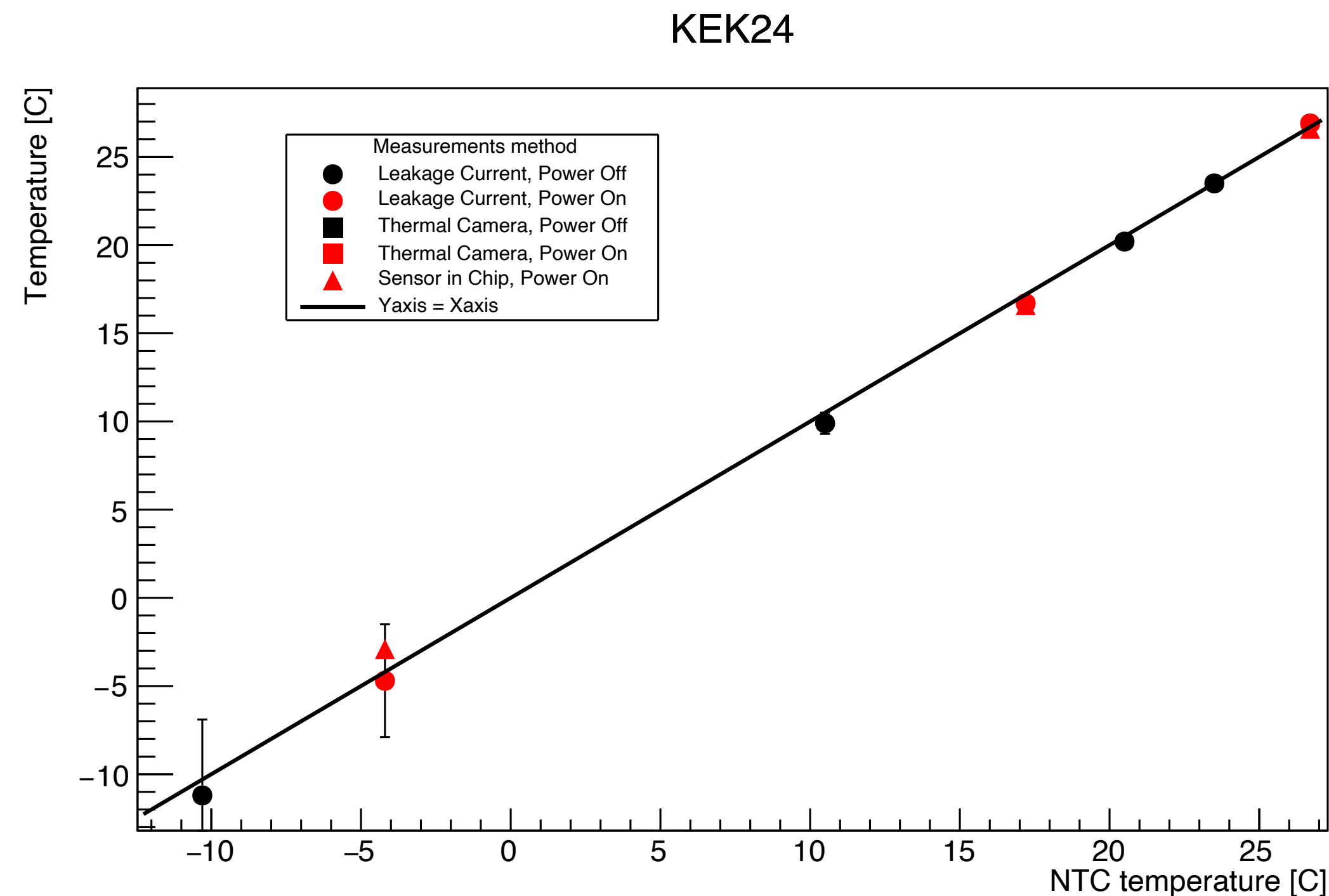
- モジュール上の温度 (NTC)
- 環境の温度・湿度・露点
- HV / LV モニタリング
- Leakage Current



Results: Thermal Test after calibration

◎ NTC温度と以下3点の温度の相関性を確認する

- シリコンセンサー温度 (Leakage currentから計算)
- ASICの温度 (NMOSセンサーを使用)
- ~~モジュール表面の温度 (Thermal CameraでNTCがある部分を測定)~~ ← Wire bonding protectionがあるため測定不可

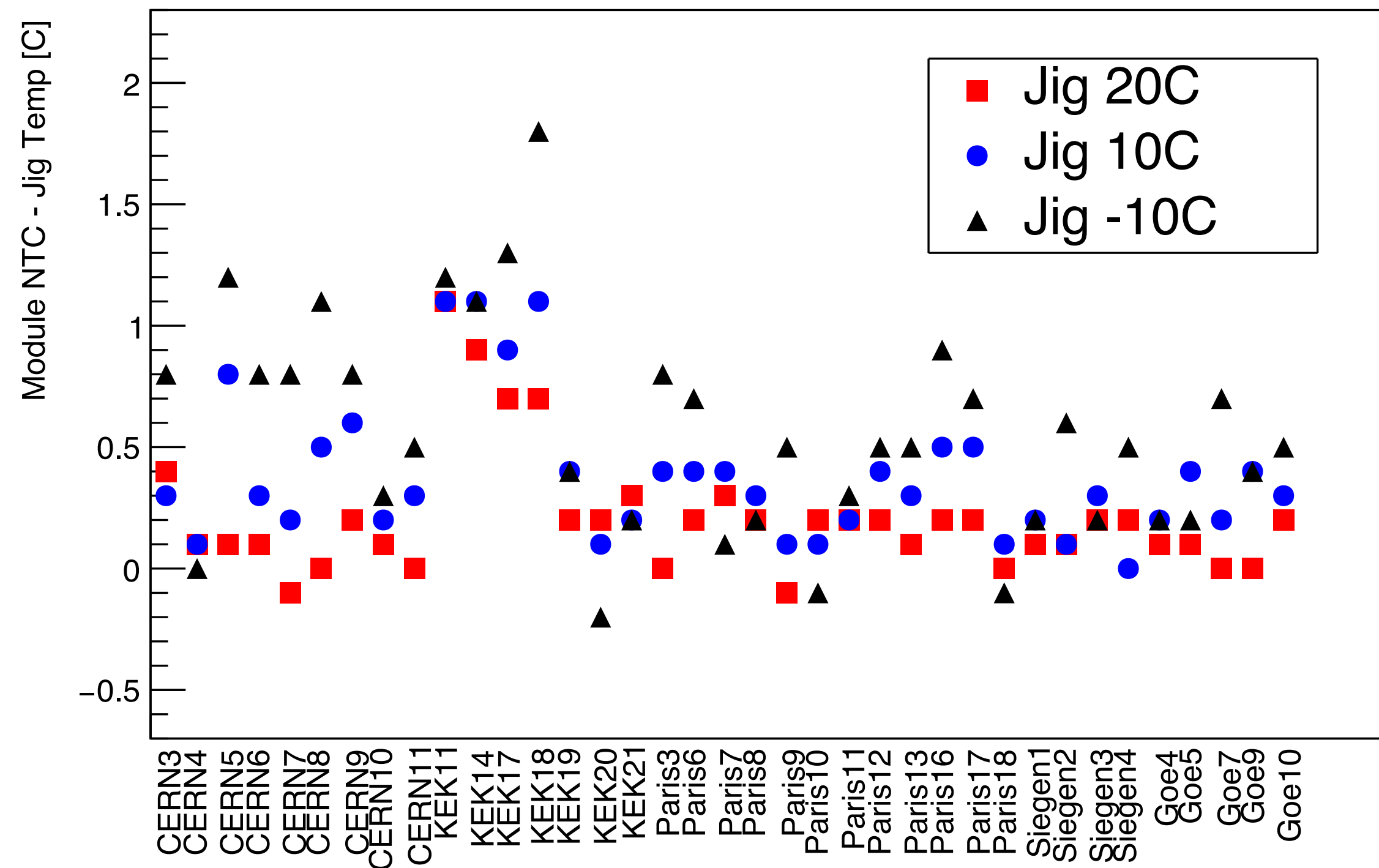


ASICの中のセンサー温度とシリコンセンサー温度はよく一致している
Thermal CalibrationはCell loading後に行う方が良い

NTC temperature of variety module

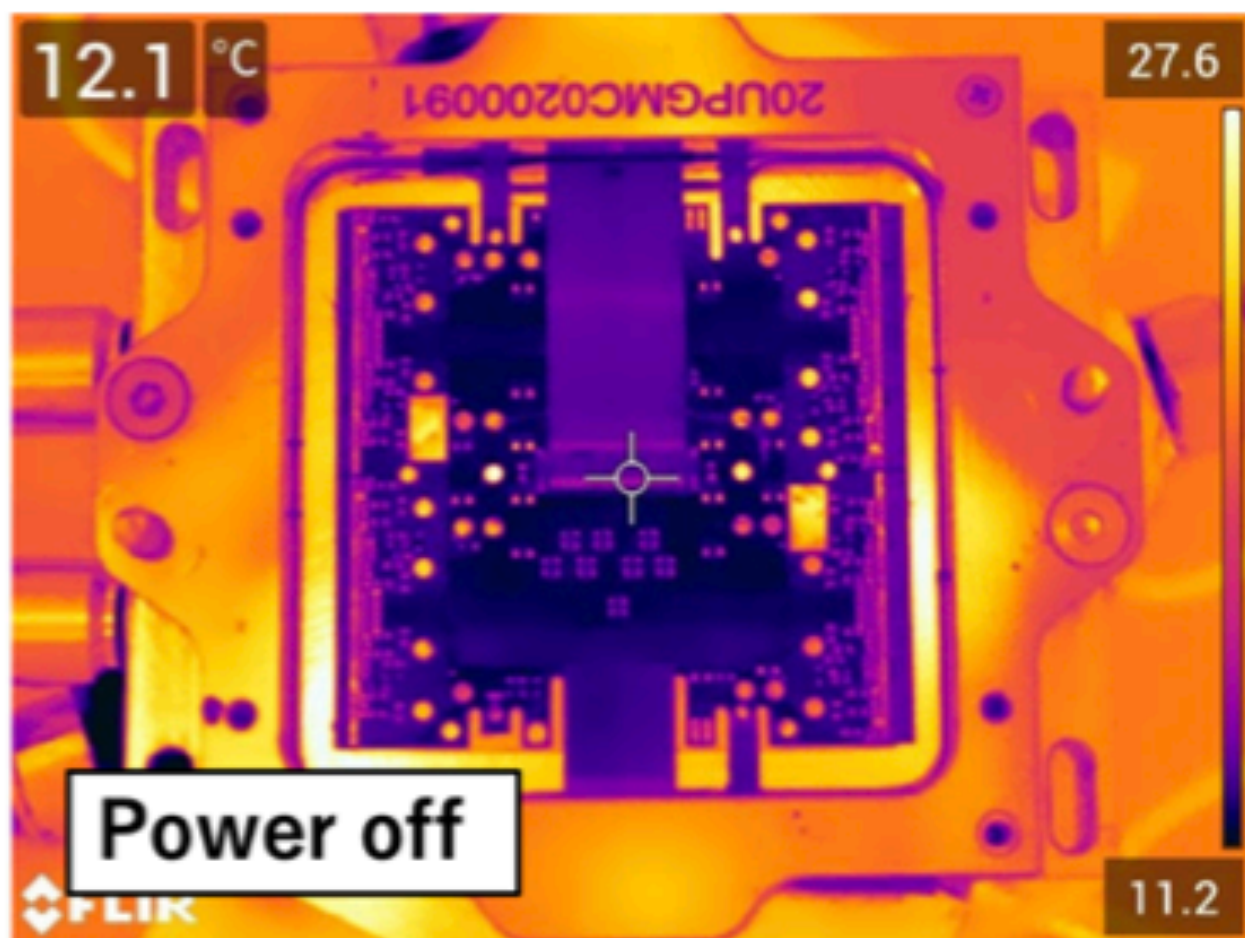
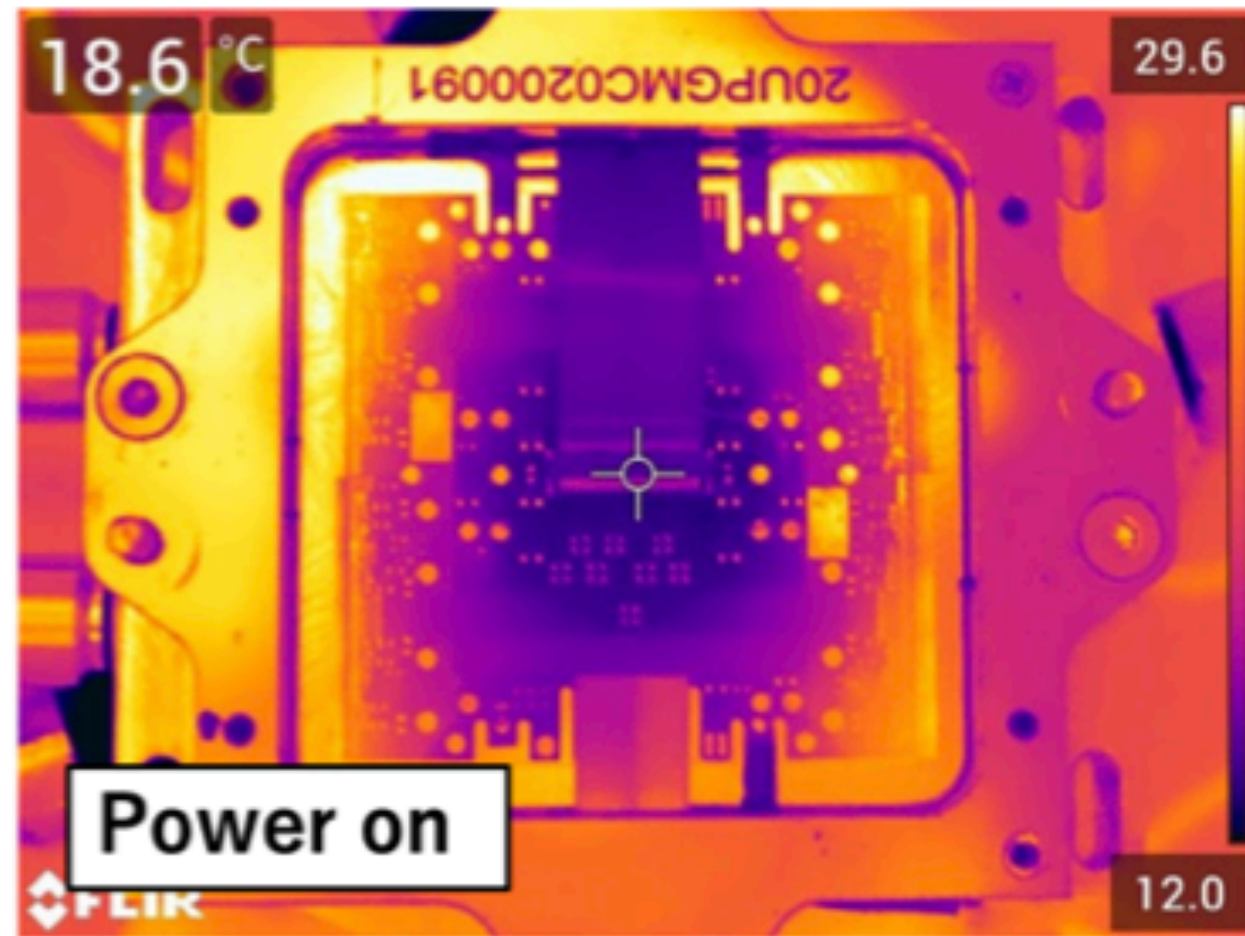
○ LV off

Module NTC of each Jig temperature

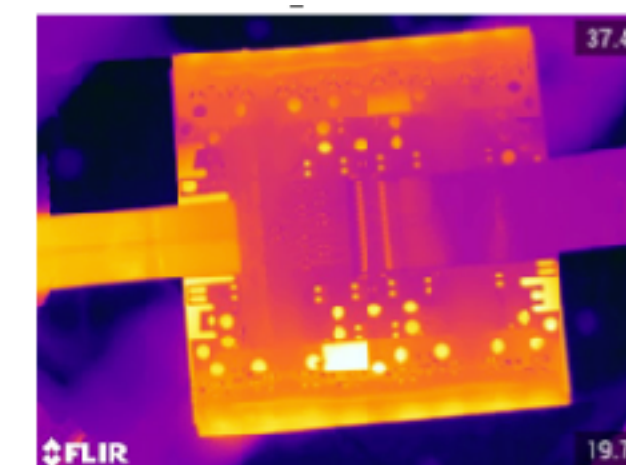
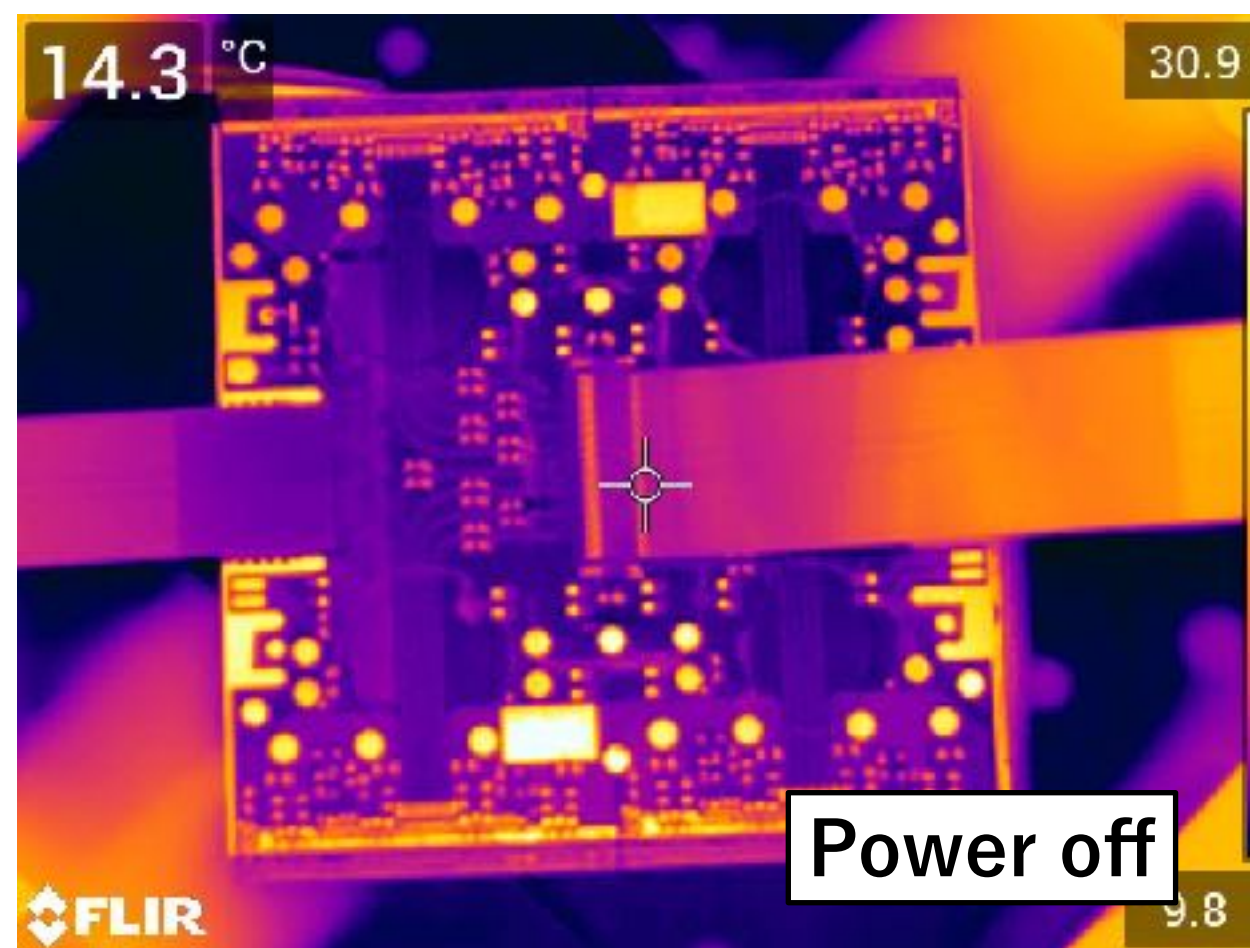
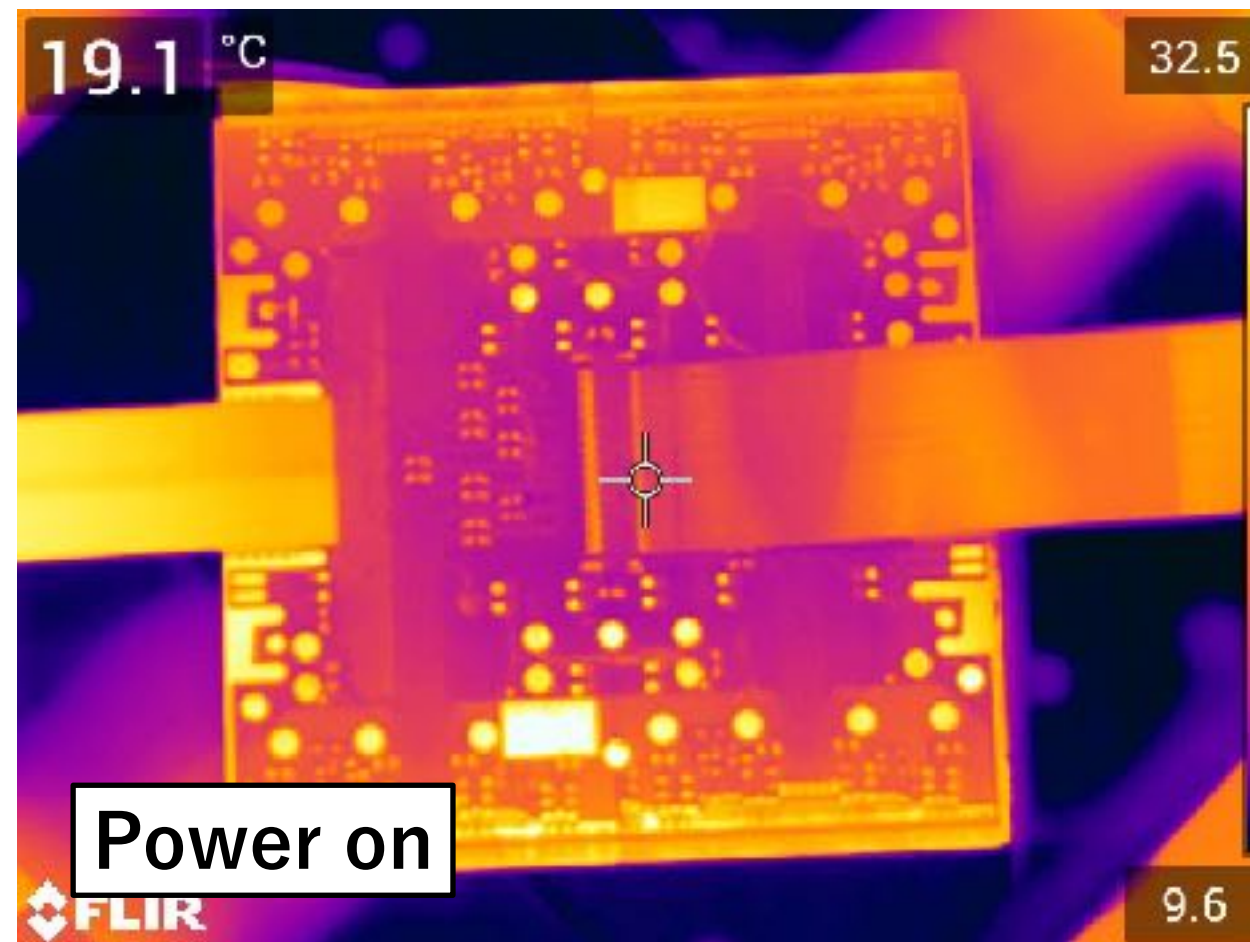


Thermal Camera

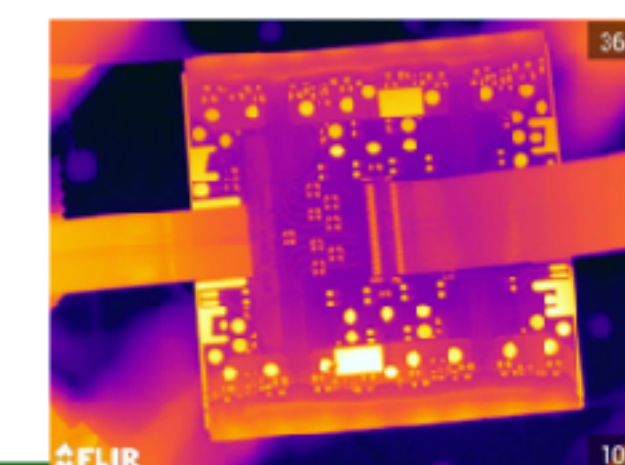
Before Cell loading



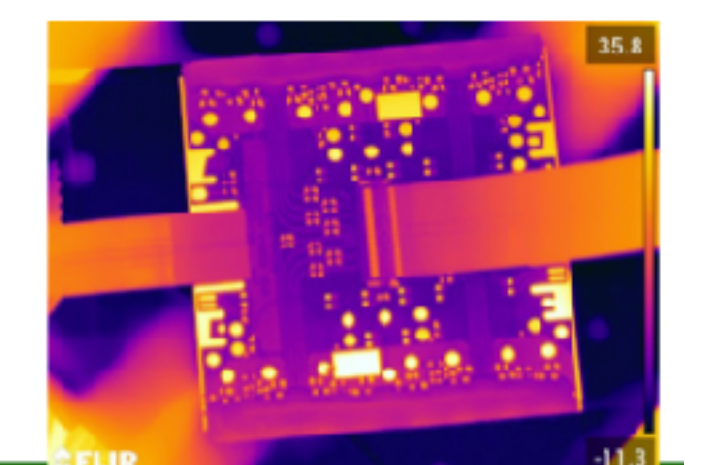
After Cell loading



Jig 20.5°C, NTC 25.5°C



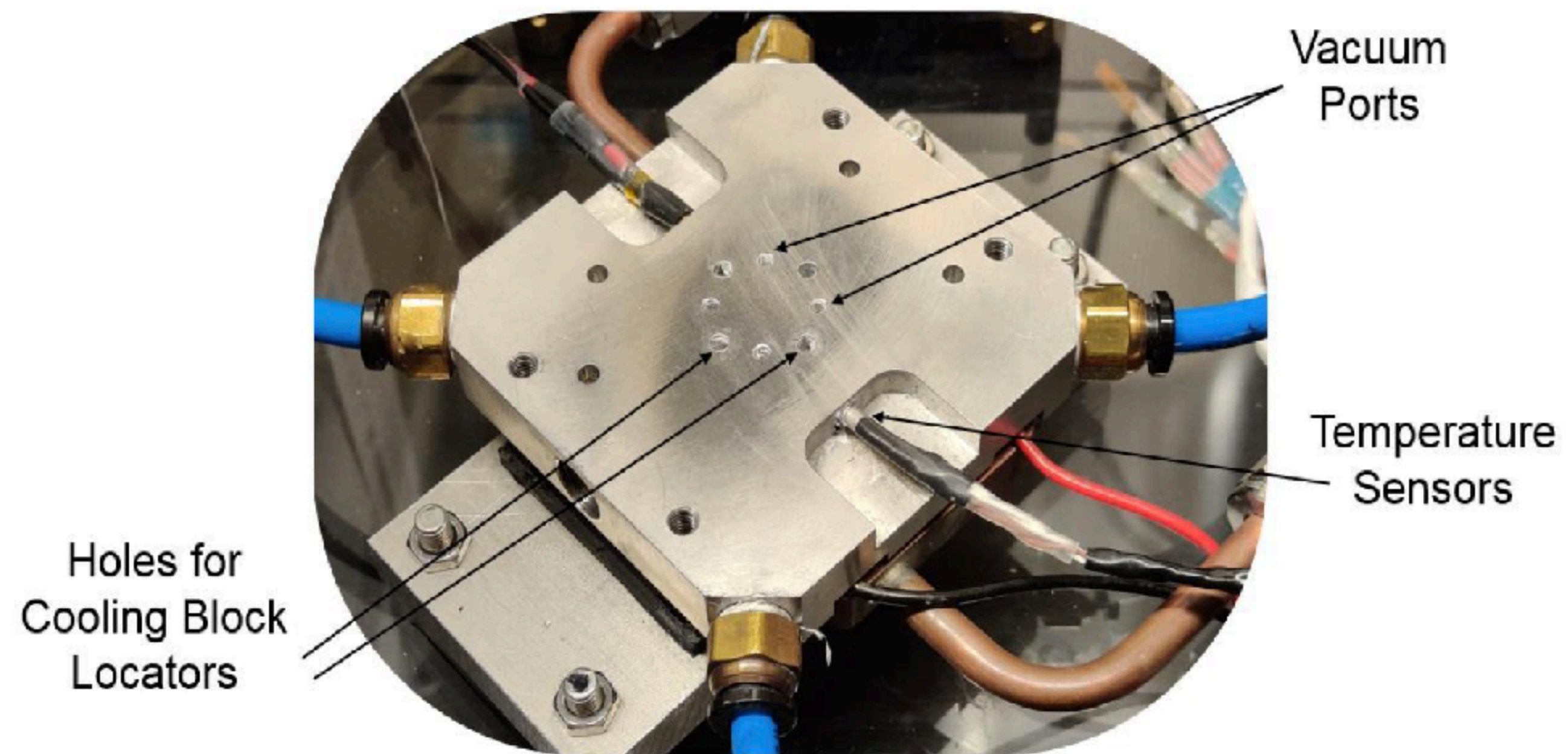
Jig 10.8°C, NTC 15.9°C



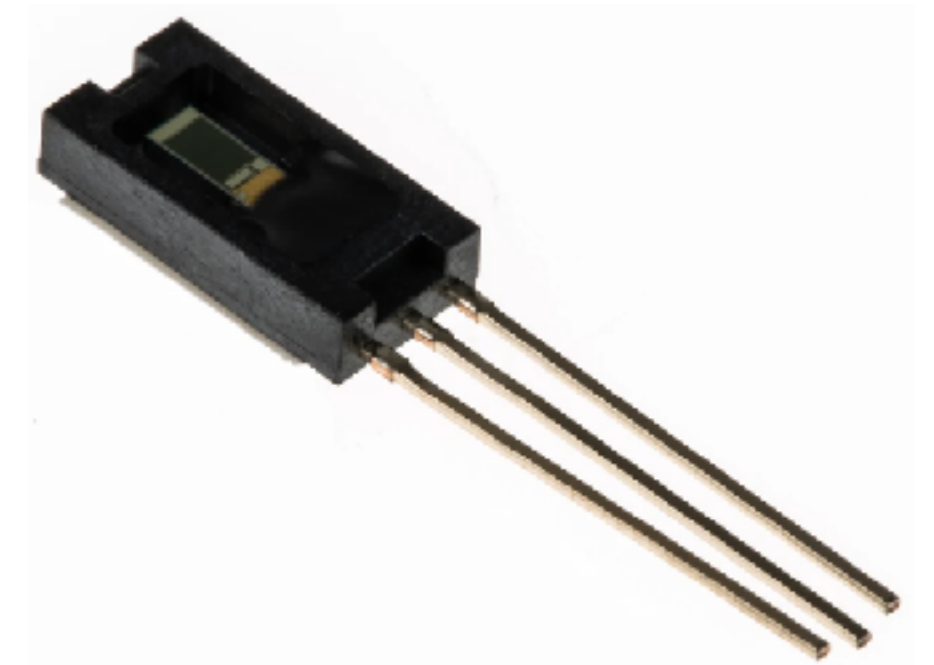
Jig -10.8°C, NTC -5.4°C

Setup for Thermal test and Calibration

Cell用のJig



湿度計



[HIH4000](#)