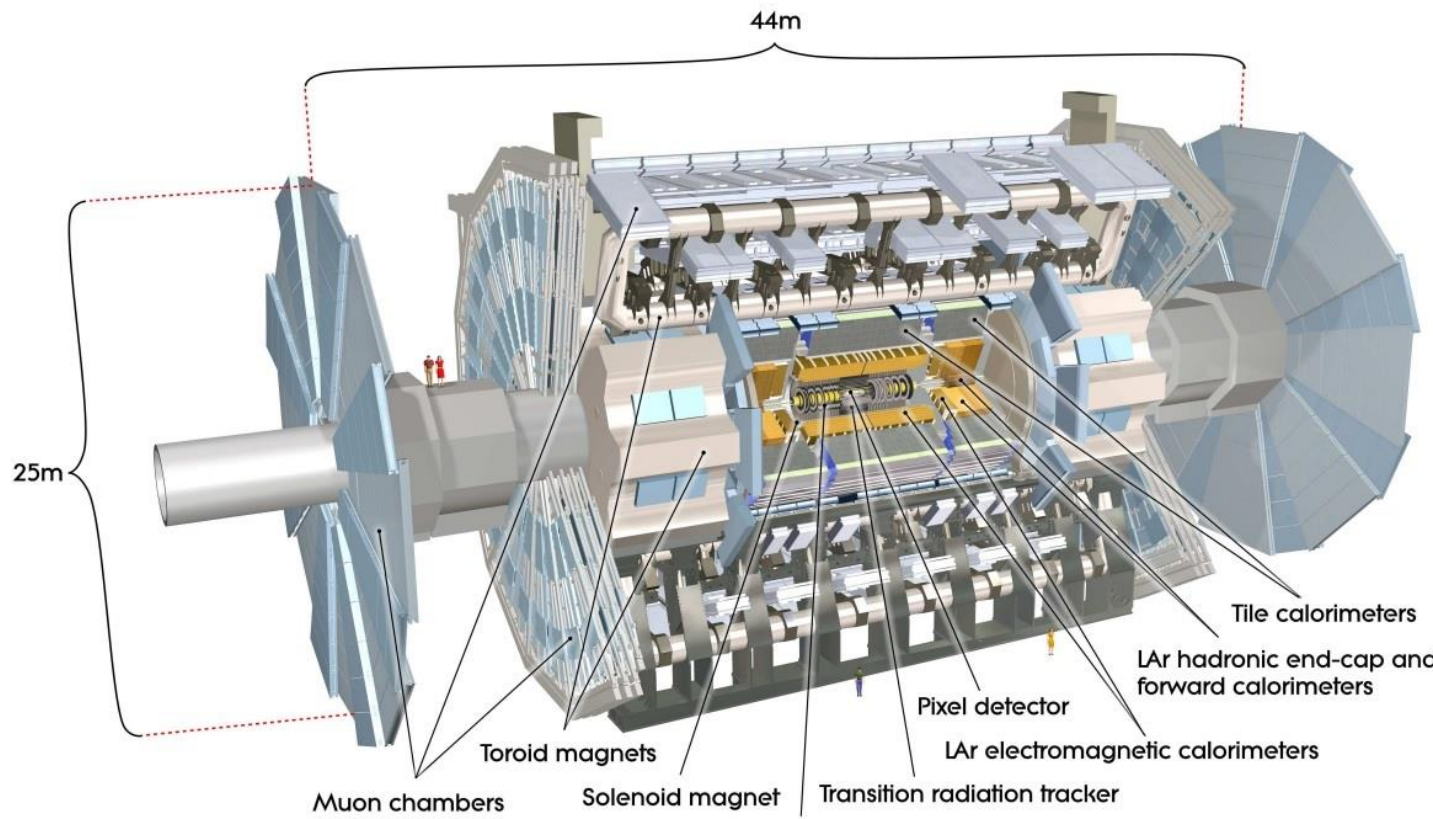




1. LHC-ATLAS実験

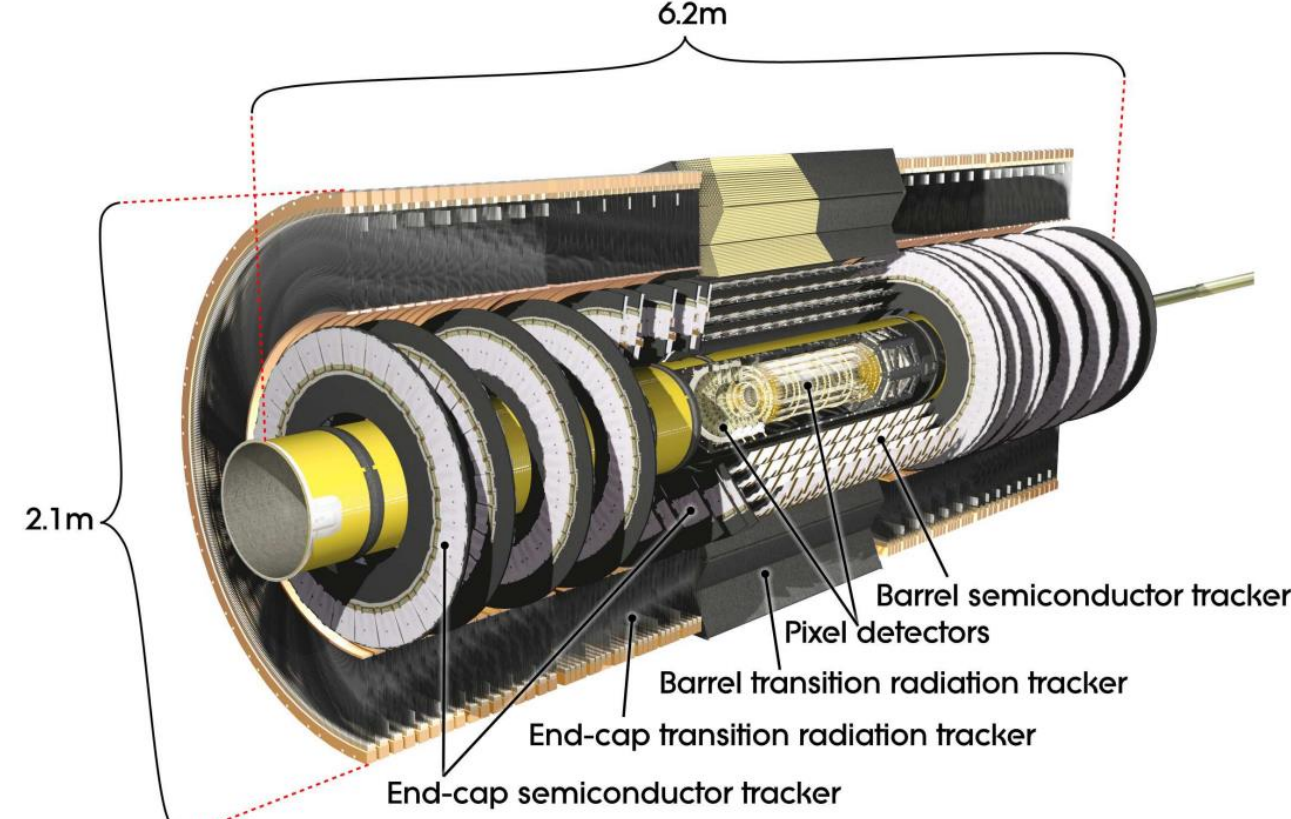
- **LHC**：陽子陽子衝突型円形加速器
 - スイスとフランスの国境をまたいで設置されている加速器
 - 地下約100mに敷設された全長約27kmの加速器
- **ATLAS検出器**：LHC-ATLAS実験での汎用検出器
 - 全長46m 直径25m 重さ7,000トン
 - 陽子同士の衝突によって生成される粒子を測定している
 - 内部飛跡検出器、カロリメータ、ミュオン検出器で構成
 - 内部飛跡検出器はPixel、SCT、TRT検出器で構成

ATLAS検出器概観図



<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/atlas/public/atlas.html>

内部飛跡検出器概観図

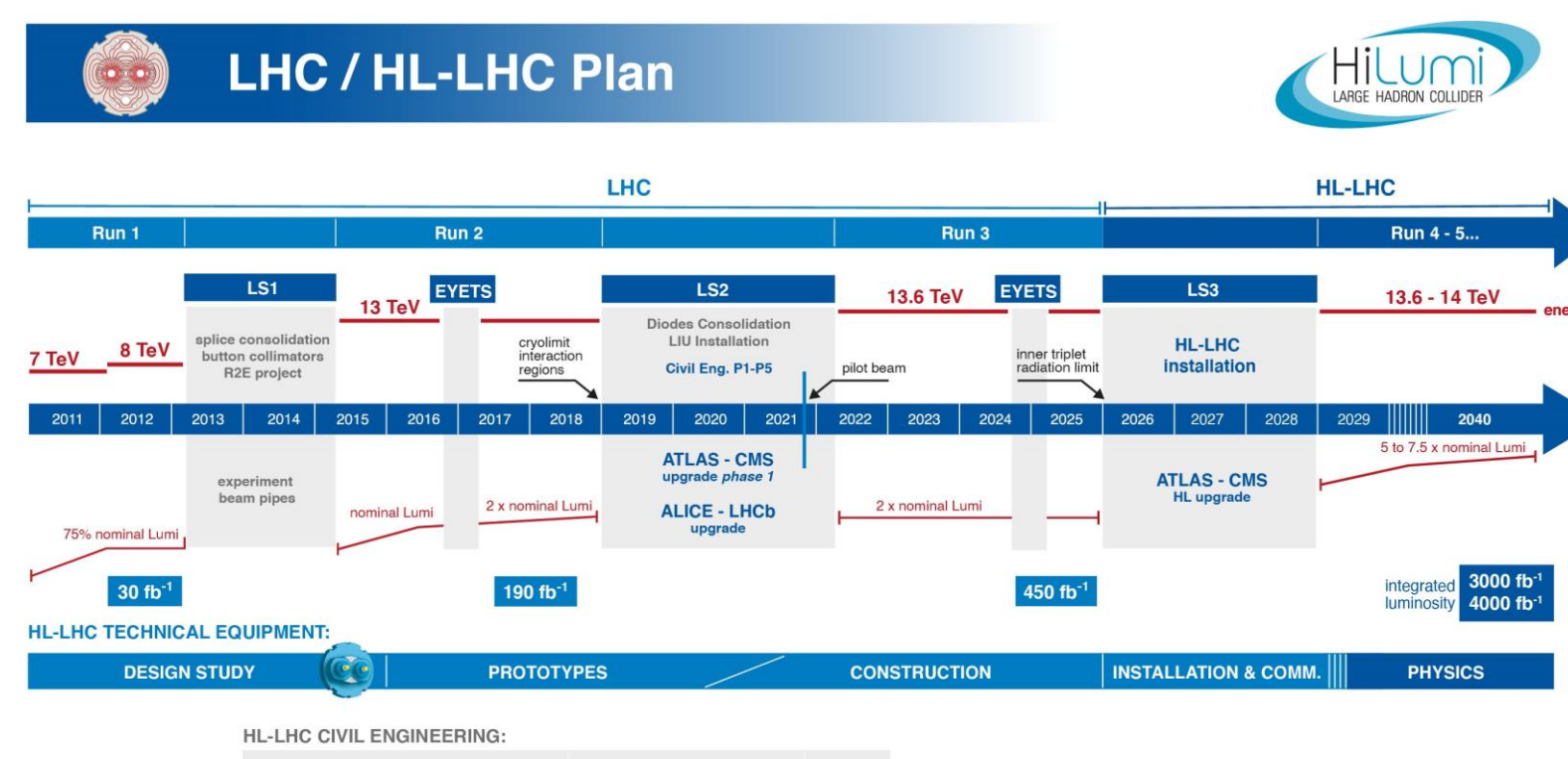


<https://atlas.cern/Discover/Detector/Inner-Detector>

2. HL(High Luminosity)-LHC実験

- LHC-ATLAS実験は、2020年代後半にHL-LHC実験へのアップグレードを計画
- 実験で得られるデータ量の増加が期待される

HL-LHC実験予定



<https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>

- HL-LHCでは、陽子同士の衝突数が増加
- 検出器の放射線損傷の増加などの問題が発生

現行の内部飛跡検出器をITkと交換する

LHCとHL-LHCの各パラメータ比較

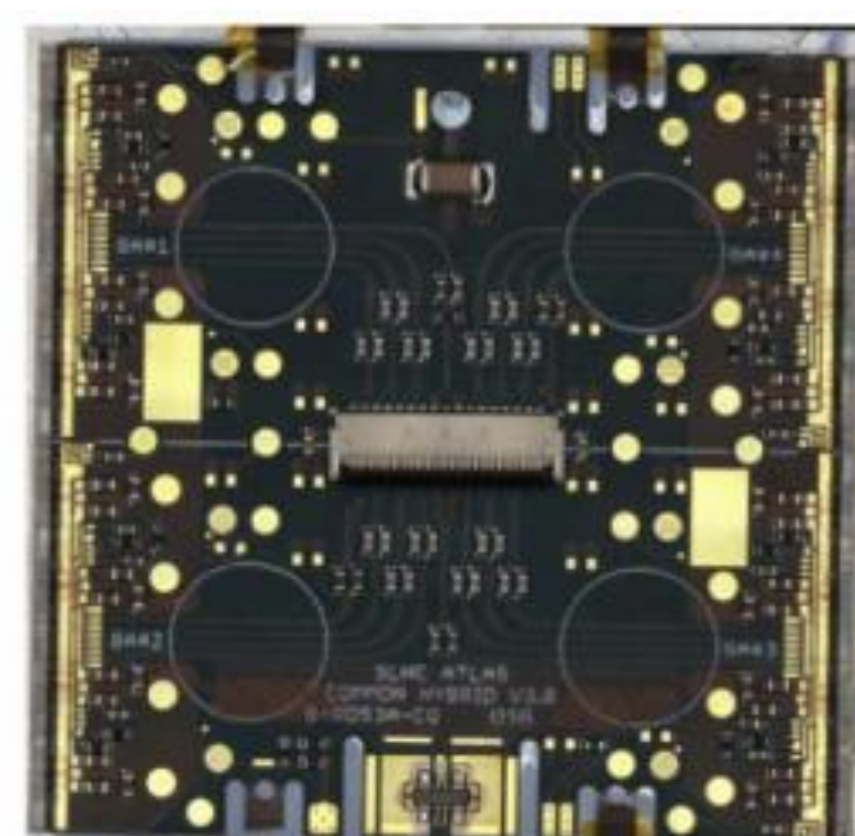
パラメータ	LHC(現在の値)	HL-LHC(目標値)
重心系エネルギー	13.6 TeV	14 TeV
瞬間ルミノシティ	$2.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$5.0 \sim 7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
積分ルミノシティ	350 fb^{-1}	$3000 \sim 4000 \text{ fb}^{-1}$
バンチ衝突頻度	40 MHz	200 MHz

3. ITk(Inner Tracker)の量産

- **ITk(Inner Tracker)**
 - HL-LHC実験で内部飛跡検出器に置き換えられる検出器
 - シリコンをセンサーとした半導体検出器
 - 現在、自分はITkピクセル検出器のQuadモジュール量産に参加

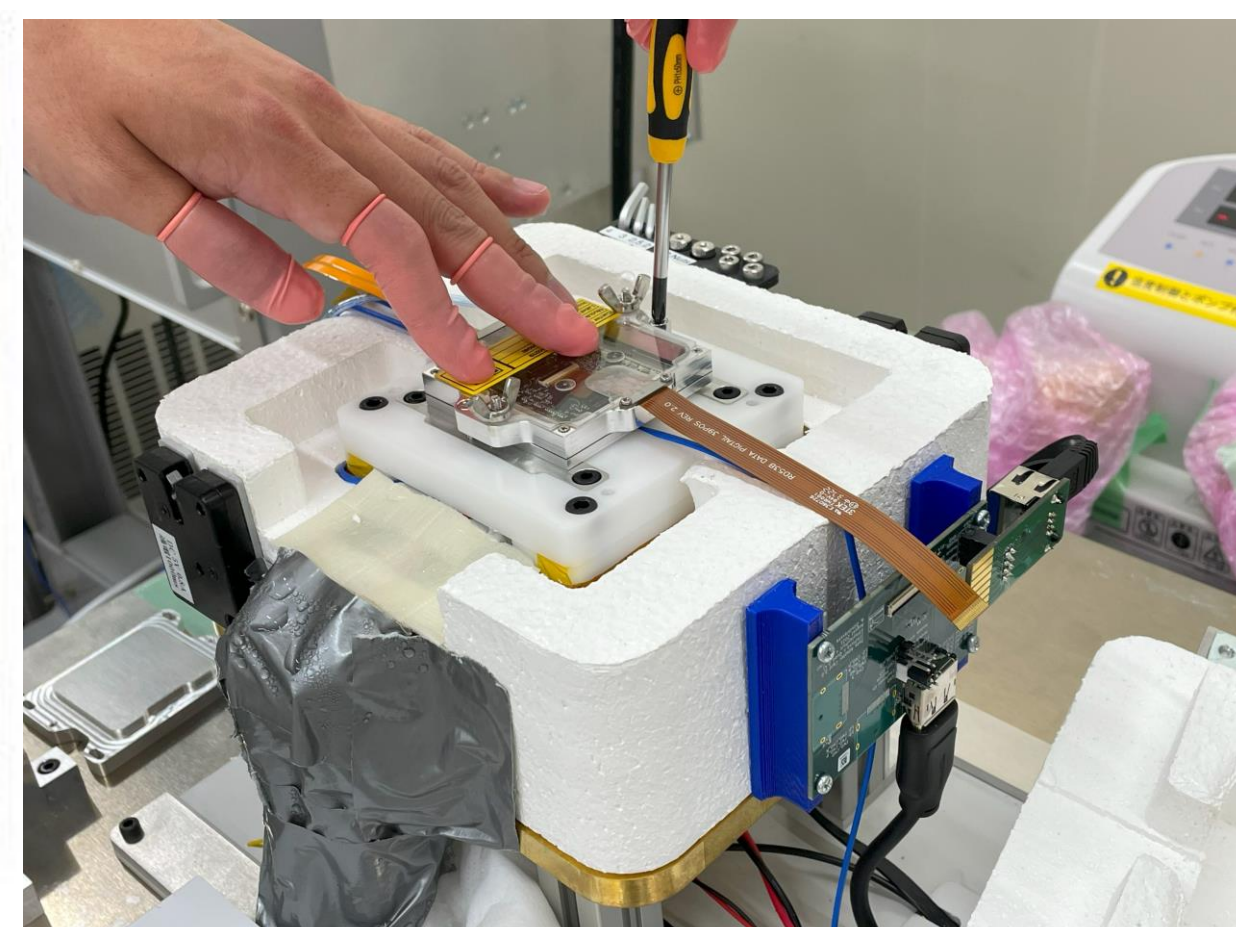
Quadモジュール

- FEチップ4枚
- センサー1枚を搭載



<https://cds.cern.ch/record/2857574/files/ATL-ITK-SLIDE-2023-123.pdf>

電気回路読み出し試験の様子



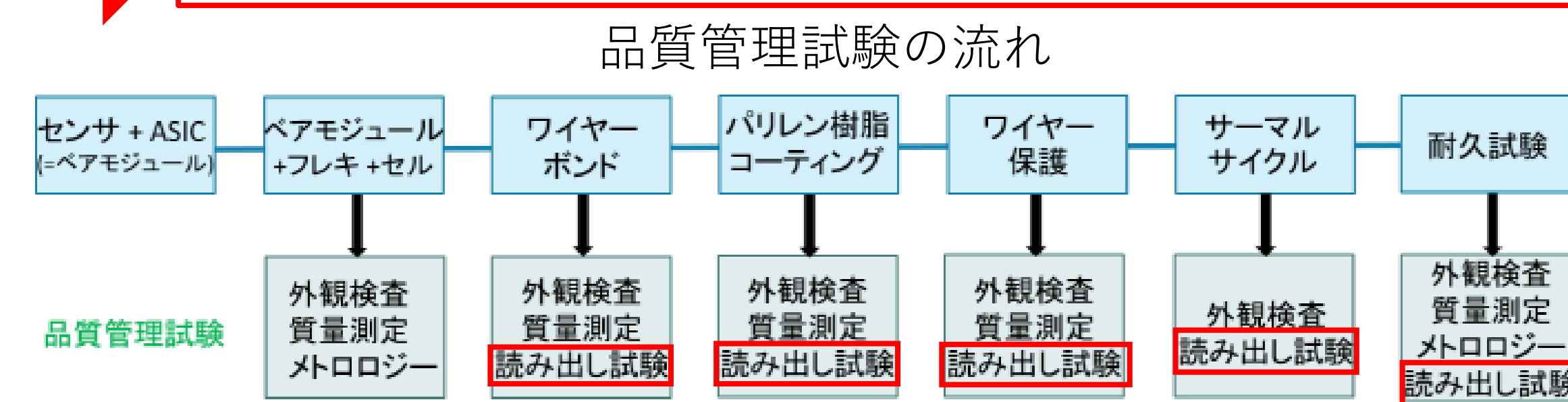
□ ITkの量産

- HL-LHCへのアップグレードに向け、世界中で約10,000個のモジュールが量産される予定
- 日本では、その内の約2,000個のQuadピクセルモジュールの量産を計画
- 現在、130台を量産するPreProductionを実行中

量産サイトの様子



量産に際し、モジュールの組み立てと品質管理試験(QC)を行う



http://www.kyulab.sci.waseda.ac.jp/PUB/PAPER/MasterThesis/2021_TakahitoSuzuki.pdf

□ 品質管理試験

- 複数種類のテストを、ITkグループ内でシフトを取って実行
- 自分は、現在電気回路読み出し試験の解析を行っている

- PreProの際に読み出し試験のいくつかの結果が、現行の基準値から外れていることが分かった

QC結果の解析を通して、本格的な量産における妥当な基準値を見つける

4. 電気回路読み出し試験解析

□ 電気回路読み出し試験

- モジュールの電気回路の状態を確認する試験
- 20°CでのWARMテスト、-15°CでのCOLDテストを行う
- ADC-CALIBRATIONやANALOG-READBACK等のスキャンを実行

- ADC-CALIBRATION：ADC(アナログ信号からデジタル信号への変換機器)に電圧を入力し、出力が電圧に比例するか確認するスキャン
- ANALOG-READBACK：アナログ、デジタル回路への電源供給を確認するスキャン

- 全スキャン合計で、200種ほどのパラメータを解析
- 基準値から外れたチップ(Failedチップ)の数を各スキャンでまとめると、ANALOG READBACKでFailedチップが目立つパラメータが存在
- 特に、モジュールのRing OscillatorとNTCに関するパラメータにおいて、多くのFailedチップを確認

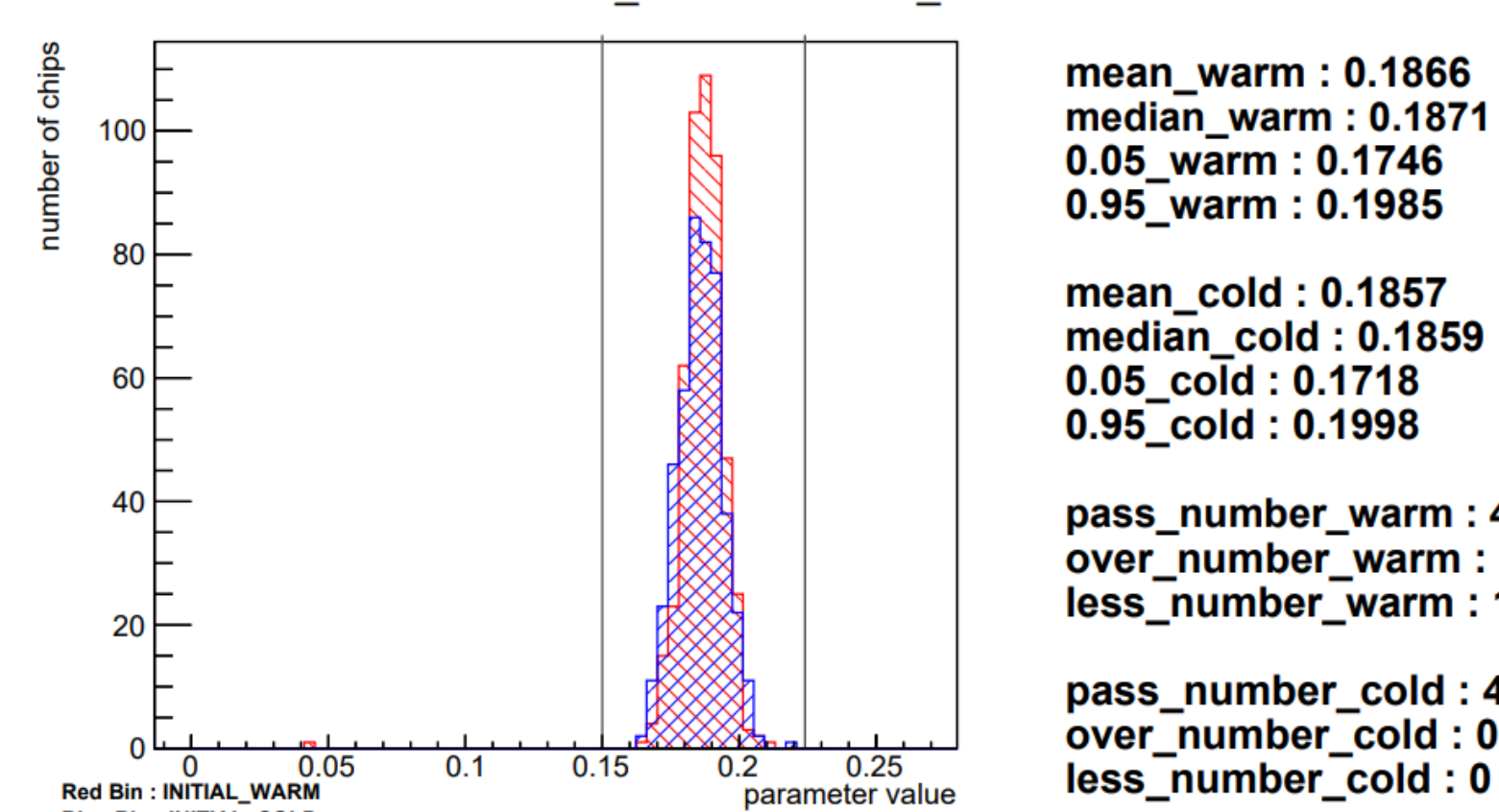
- Ring Oscillator
 - 放射線照射量の蓄積に従い周波数が低下する性質を持つ発振回路
 - 論理回路の寿命を示す間接的な目安として有用

- NTC
 - 温度センサーからの出力電圧

□ 電気回路読み出し試験の基準検証と新しい基準の設定考察

- 例として、モジュール作製直後の読み出し試験の結果から、ADC_CALIBRATION_SLOPEの一次元ヒストグラムを作成、解析する
- 横軸：各FEチップから得られた値、縦軸：その範囲の結果を持つチップ数
- 赤い領域：INITIAL_WARM、青い領域：INITIAL_COLD、グレーの縦線：基準値範囲
- 基準値から外れたチップの数を確認

ADC_CALIBRATION_SLOPEのチップ数分布



mean_warm : 0.1866
median_warm : 0.1871
0.05_warm : 0.1746
0.95_warm : 0.1985

mean_cold : 0.1857
median_cold : 0.1859
0.05_cold : 0.1718
0.95_cold : 0.1998

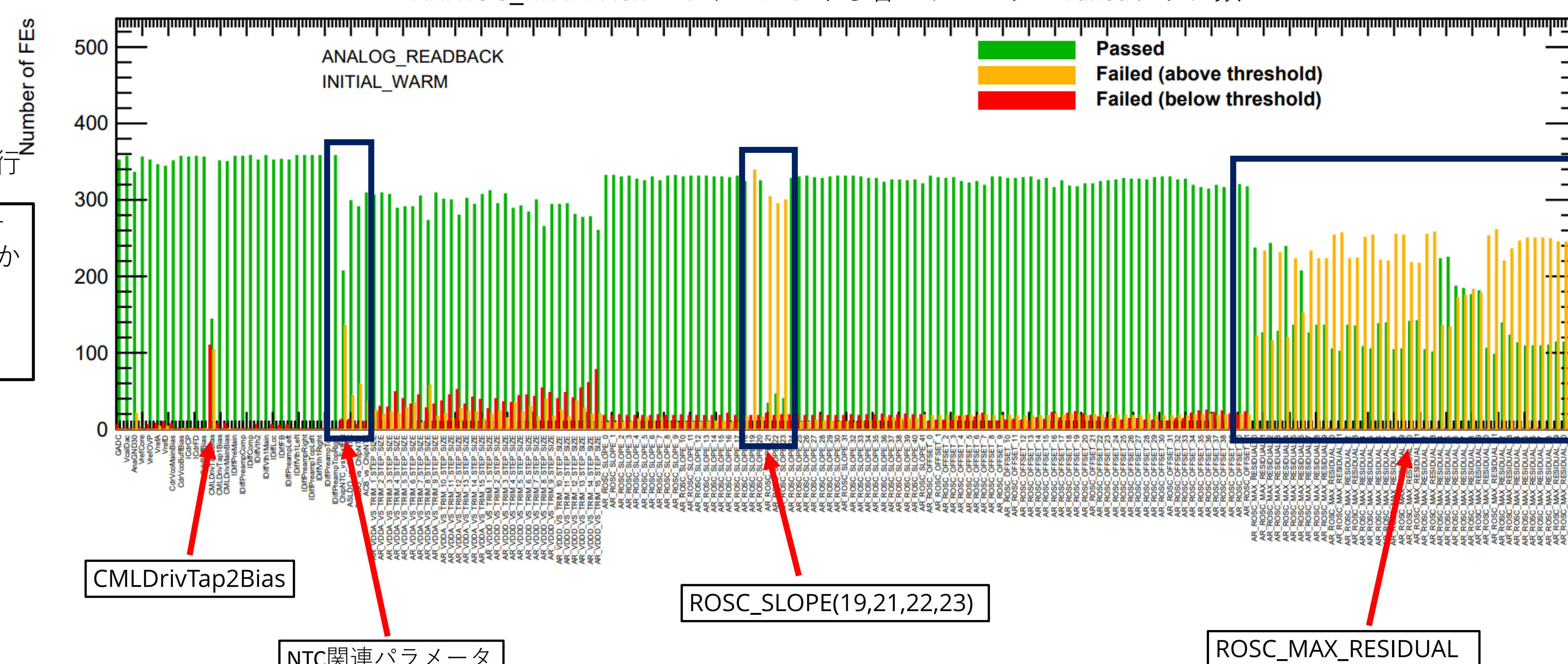
pass_number_warm : 491
over_number_warm : 0
less_number_warm : 1

pass_number_cold : 459
over_number_cold : 0
less_number_cold : 0

- ADC_CALIBRATION_SLOPE : ADCが、入力した電圧に回答した結果得られたデジタル信号の傾き

- mean : ヒストの平均値
- median : ヒストの中央値
- 0.05 : ヒストの5%の値
- 0.95 : ヒストの95%の値
- pass_number : 基準値内の値を持つチップ数
- over_number : 基準値より大きい値を持つチップ数
- less_number : 基準値より小さい値を持つチップ数

ANALOG_READBACKスキャンにおける各パラメータのFailedチップ数



CMLDrivTap2Bias

NTC関連パラメータ

ROSC_SLOPE(19,21,22,23)

ROSC_MAX_RESIDUAL

https://indico.cern.ch/event/1376425/contributions/5784613/attachments/2791472/4868189/QC_test_yield_summary.pdf

5. まとめ

- LHC-ATLAS実験は、HL-LHC実験へのアップグレードを計画
- HL-LHCでは内部飛跡検出器をITkへと交換する
 - 現在、ITkモジュールのPreProductionが進行中
 - 間もなく本格的な量産が開始
- PreProductionでの知見から、現状の基準値が妥当かどうかを調べている

今後の展望

- 現在、解析を進めており、新たな基準値について評価の最中
- ANALOG READBACK以外のスキャンについても解析を進めている
 - 電気回路読み出し試験の全パラメータにおける基準値を設定し、世界的量産へのフィードバックを行う
 - ITkの効率的、高精度な量産に貢献し、HL-LHC実験の成功に寄与する