

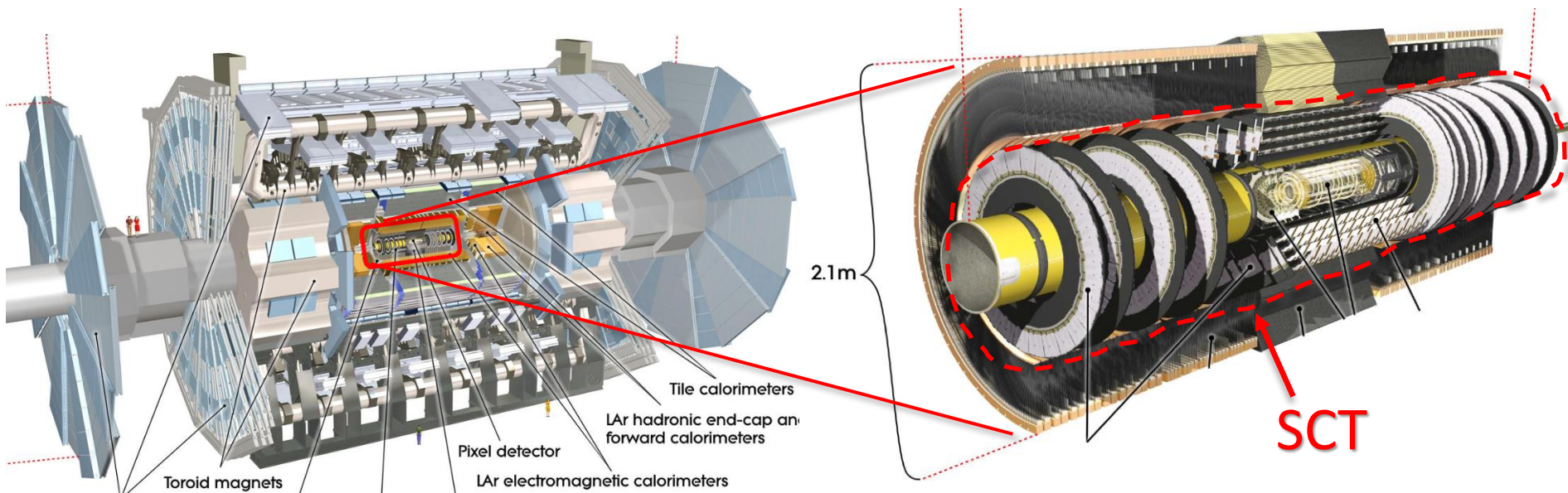
# ATLAS実験シリコンストリップ検出器 Run 2運転までのまとめと Run 3運転の状況

2022/11/17 OpenIt 計測システム研究会2022

廣瀬茂輝(筑波大)

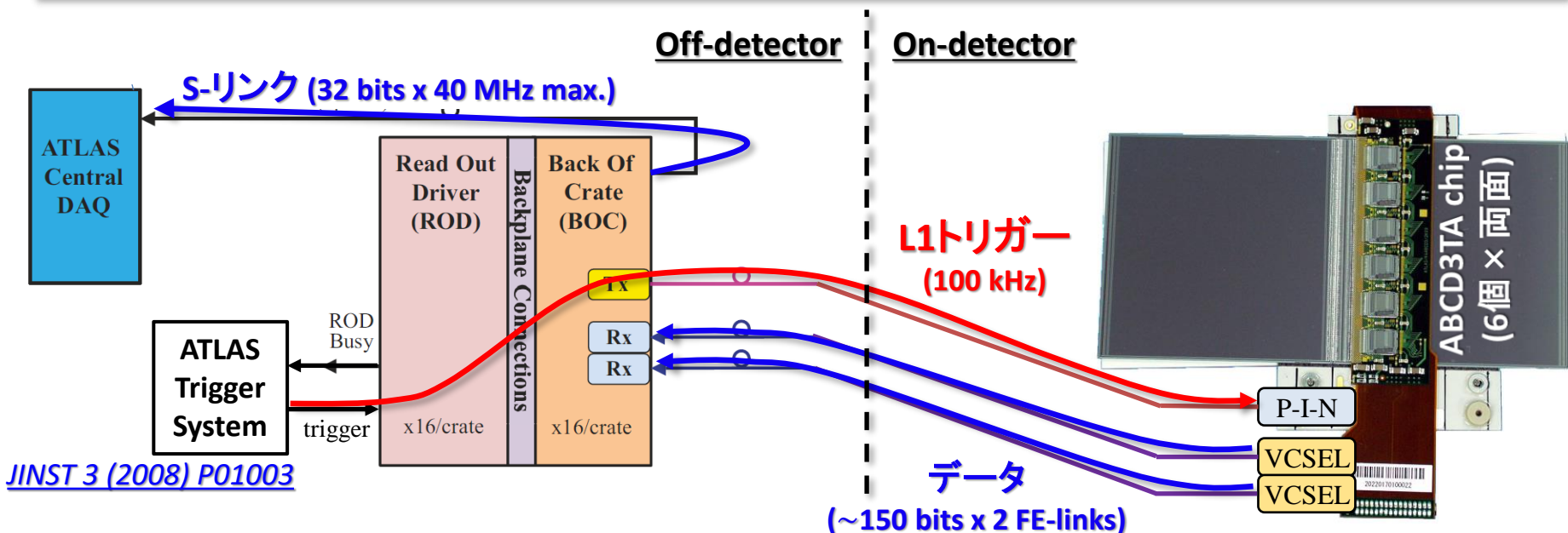
On behalf of ATLAS SCT Group

# ■ ATLAS SemiConductor Tracker (SCT)



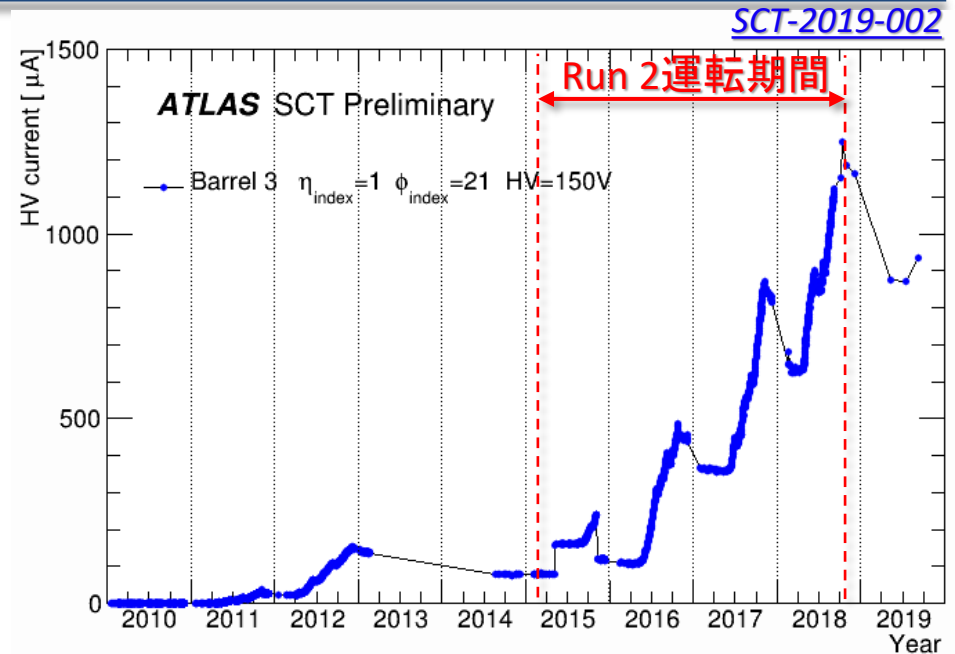
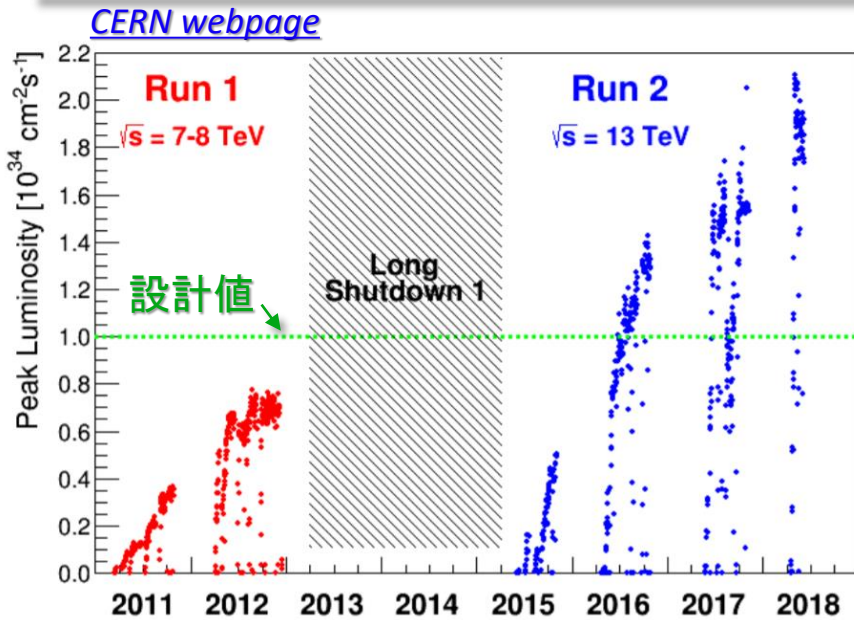
- SCT: ATLAS内部飛跡検出器を構成する検出器の一つ
  - シリコンピクセル検出器の外側に配置
  - 全4088個のシリコンストリップモジュールで構成(合計628万ストリップ)
    - バレル部4層、エンドキャップ部9ディスク×両サイド
- Run 1開始(2010)から運用
  - Run 3(2022-2025)で運用を終了し、ITk (Inner Tracker) に置き換え予定

# ■ SCT DAQの概要



- シリコンモジュール(4088個)
  - センサー( $p^+$ -on- $n$ 、768ストリップ) × 両面 (40 mradのステレオ角)
  - 6個 × 両面のABCD3TAチップで信号処理 → 2本のオプティカルケーブルで後段回路(ROD/BOC)にデータを送信
- ROD(128枚)
  - 約32モジュールからのデータをシリアルライズして中央DAQに送る

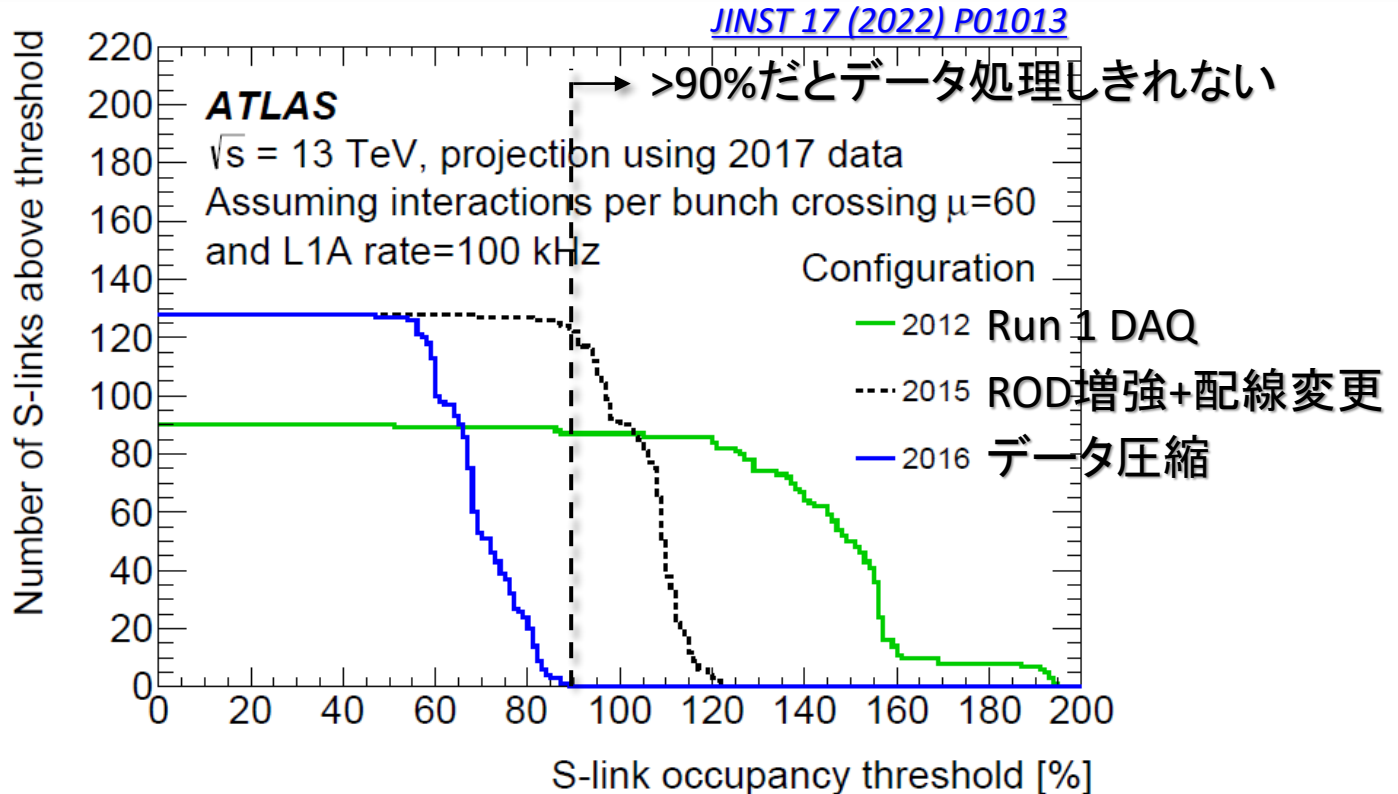
# ■ Run 2運転での挑戦



- LHC Run 2の実験環境はとても大変だった
  - 想定 of 2倍 of ルミノシティ → データをロスなく取るためのDAQ改善
  - 激しい放射線損傷: 漏れ電流はRun 2当初の10倍以上に
    - 状況に応じた運転パラメーターの調整が必要となった
- 同時に、実験環境で放射線損傷を受けた巨大シリコン検出器システムとしても興味深い研究対象

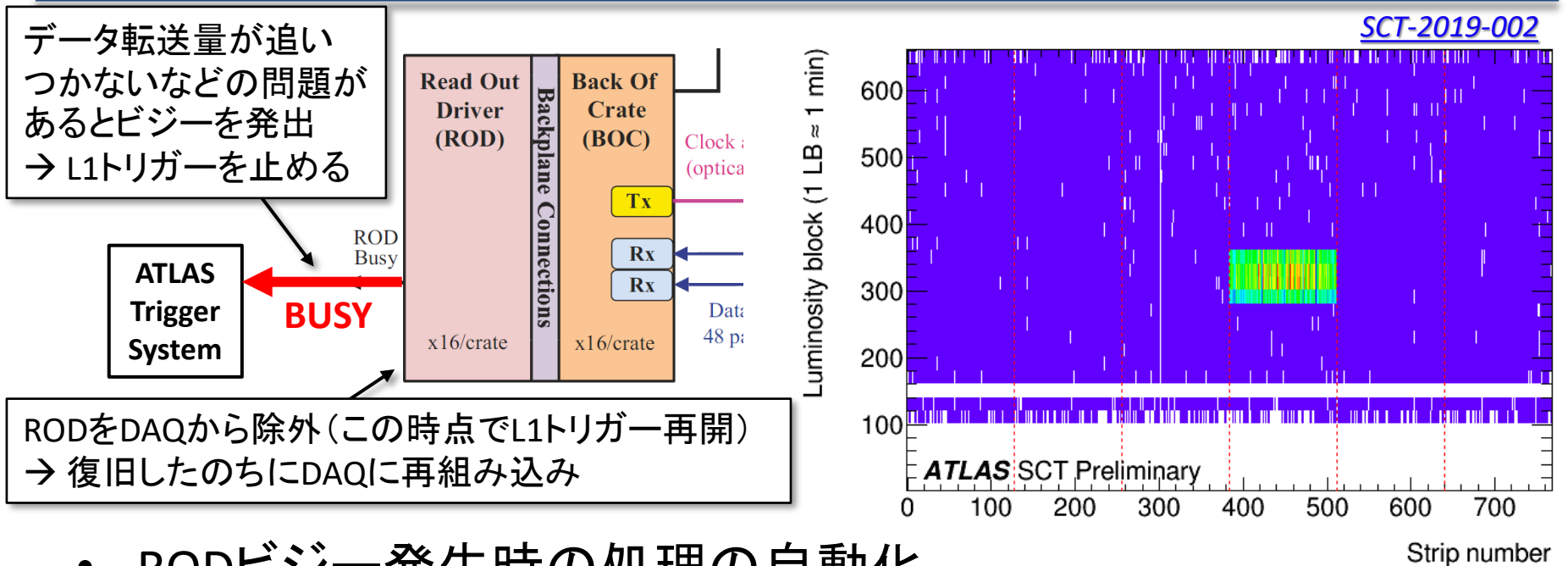
Run 2運転まとめ論文: [JINST 17 \(2022\) P01013](#)

# ■ 高ルミノシティ環境への対応



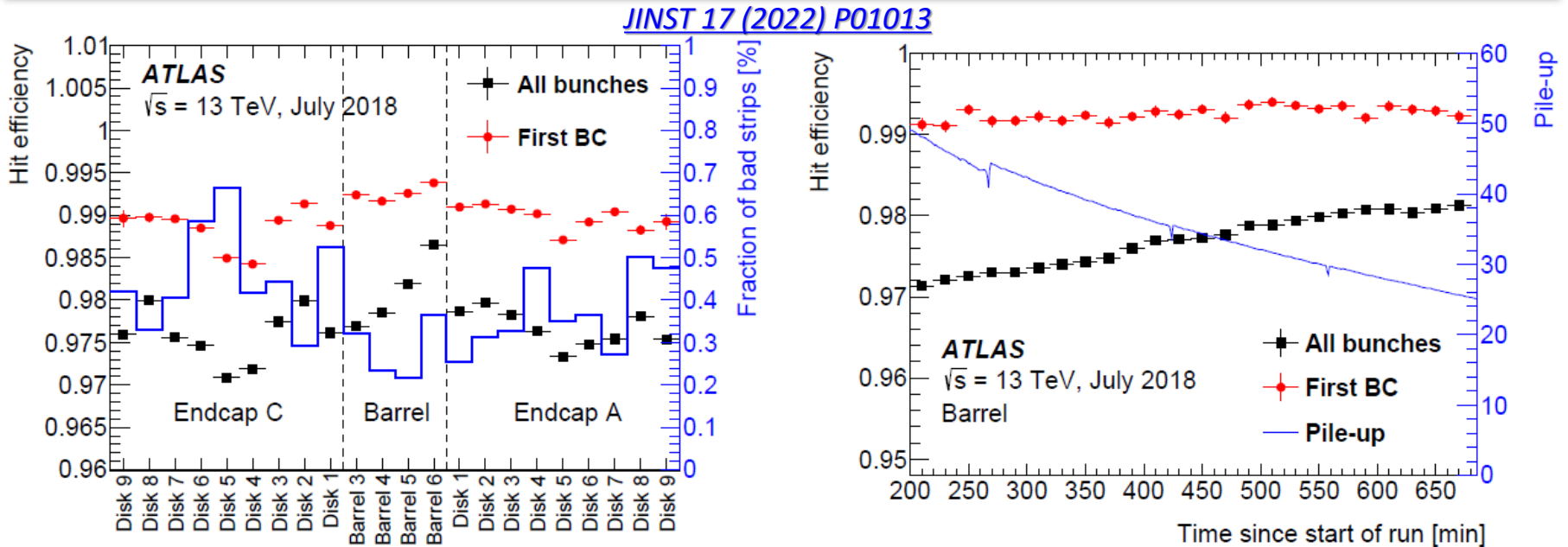
- Run 1 DAQのままでは高ルミノシティ運転に耐えられなかった
    - RODを90 → 128に増強
    - 各RODの負荷が均一になるよう、RODとモジュールの対応を最適化
    - アグレッシブなデータ圧縮
- すべてのS-リンクのデータ占有率を90%以下に抑制した

# ■ さらなる安定運転のための改善



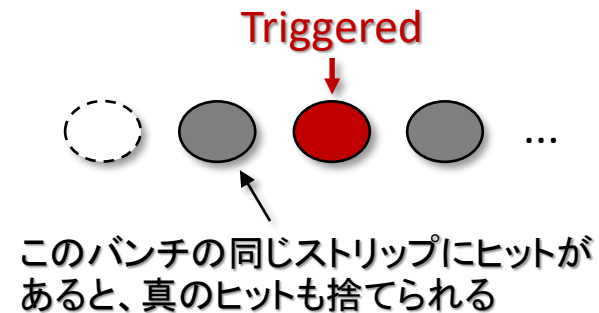
- RODビジー発生時の処理の自動化
    - ビジーを自動検出し、RODをDAQから除外→復旧→再組み込み(約18秒)
    - 復旧直後に再度ビジーを出したら2回目の復旧手順(約70秒)
  - SEUによるエラーチップやノイジーチップの処理
    - 90分ごとにコンフィギュレーションを書き直す(ロス時間は1.2秒/回)
    - 特にノイジーなモジュールを自動検出、再コンフィギュレーション
- 高ルミノシティ下でも安定したDAQを実現した

# ■ 荷電粒子検出効率



- 検出効率はバンチトレインの先頭バンチで測定できる

- “01X” (トリガーされた1個前のバンチにはヒットがない) の要求のため、偶然2バンチ連続できたヒットは捨てられてしまう
  - 先頭バンチではそれが無い

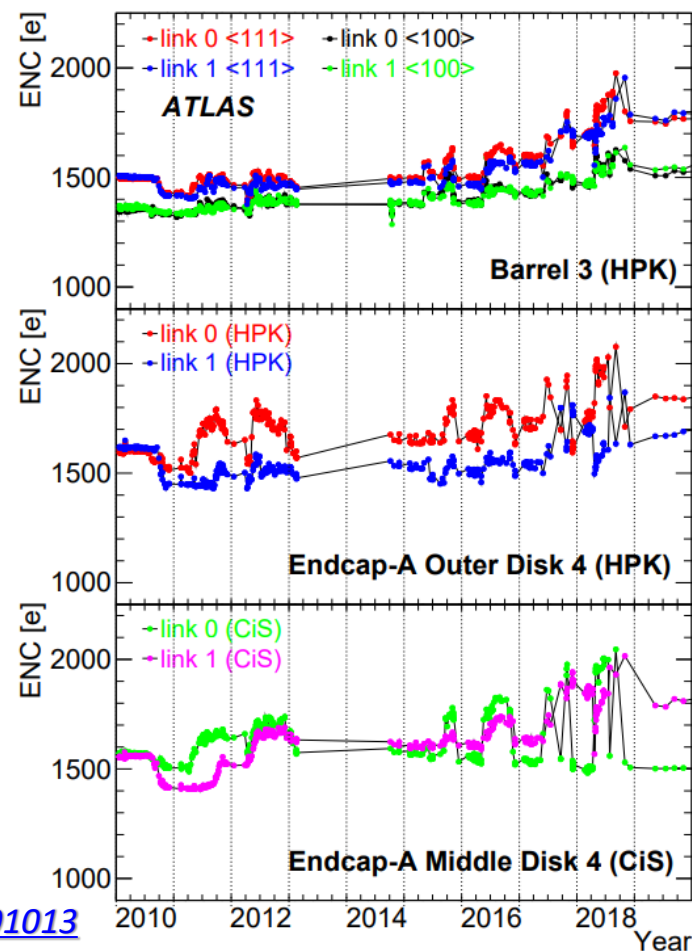
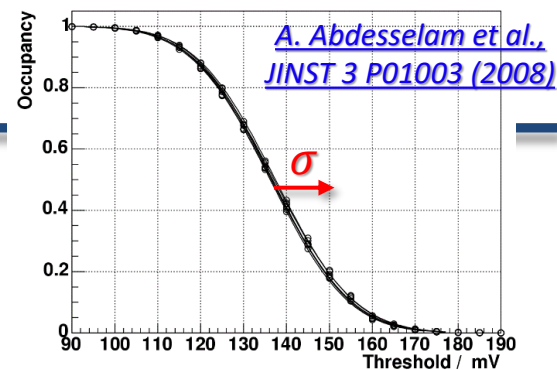


- 先頭バンチで >99%、全バンチで >97% の検出効率

Run 2 最後まで高い検出効率を維持できていた

# ■ ノイズ

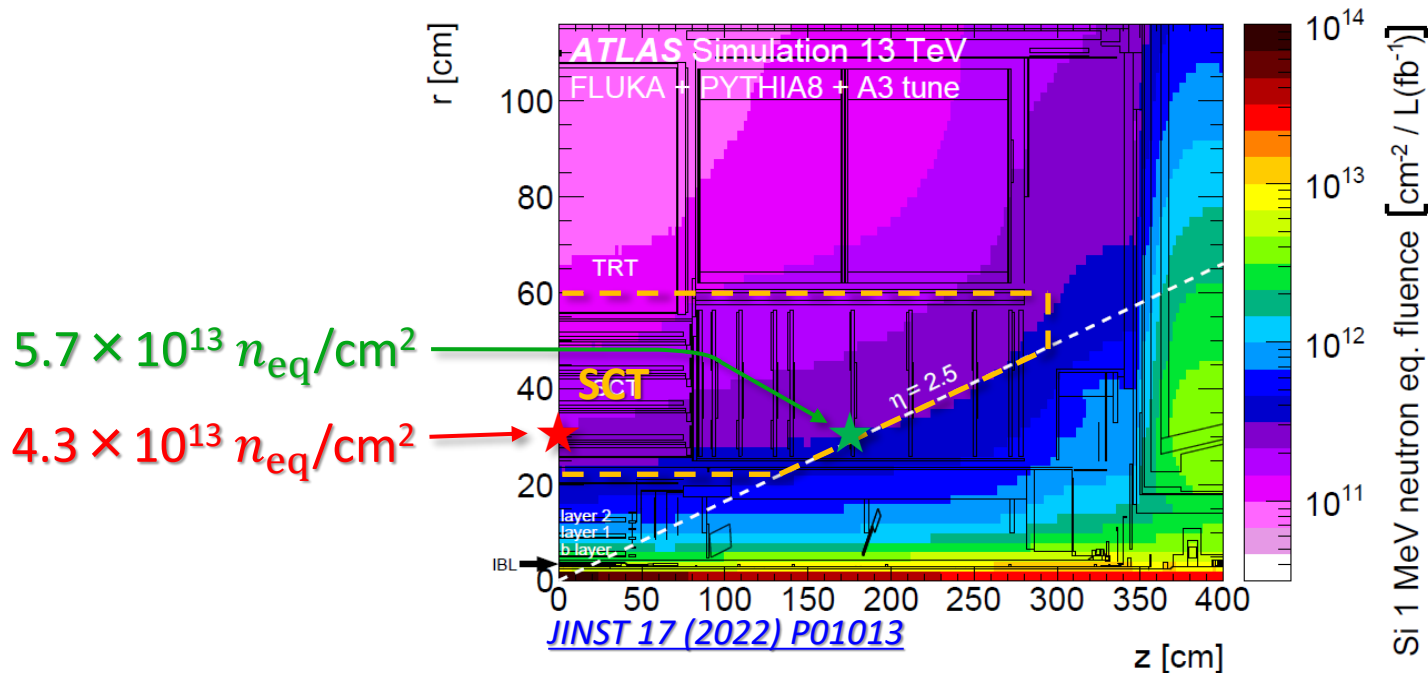
- 定期的なキャリブレーションの中で測定可能
  - 入力電荷2 fCにおける閾値スキャン結果を利用
  - 誤差関数をフィット →  $\sigma$ を得る  
ノイズ =  $\sigma / (G \times e)$   
(e: 素電荷、G: アンプゲイン)
- Run 1運転から定期的にノイズ測定を行ってきた
  - この間、ノイズの増加は10%程度
  - 運用上の閾値は1 fC = 6250 e<sup>-</sup>  
→ まったく問題ない！



[JINST 17 \(2022\) P01013](#)



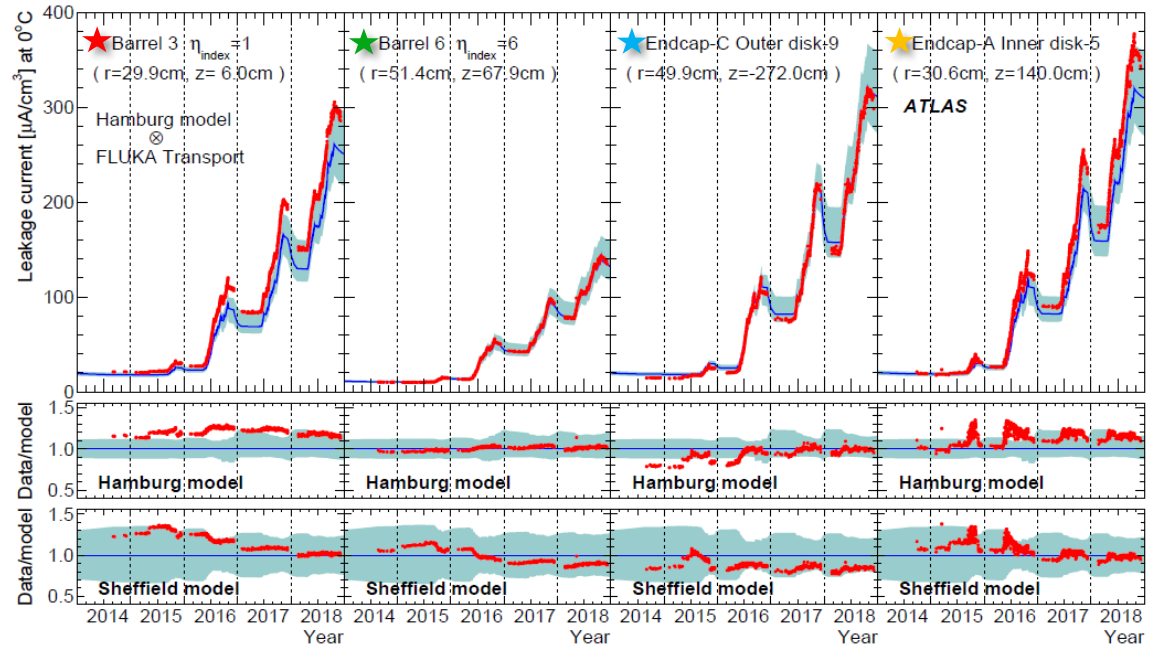
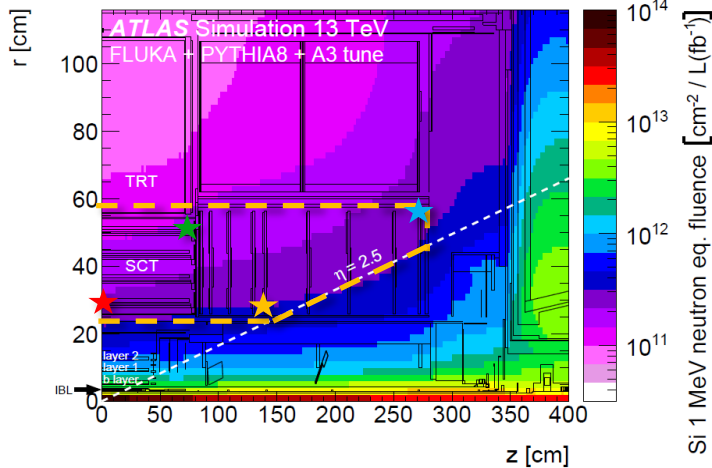
# ■ 放射線損傷



- Run 2運転終了時点での総放射線量は最大 $5.7 \times 10^{13} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 
  - カロリメーターなどで生成された中性子が多い
- 現在のSCTの放射線損傷の理解は、Run 3を走りきる上で重要となる
  - 漏れ電流
  - 完全空乏化電圧 } これらが、SCT運転および性能上の重要パラメータ

# ■ 漏れ電流

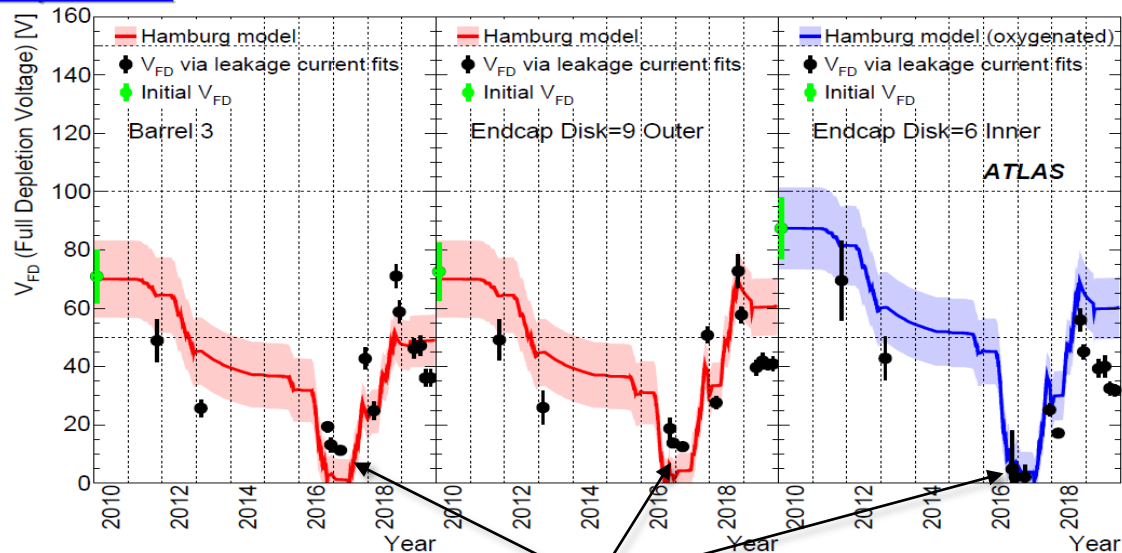
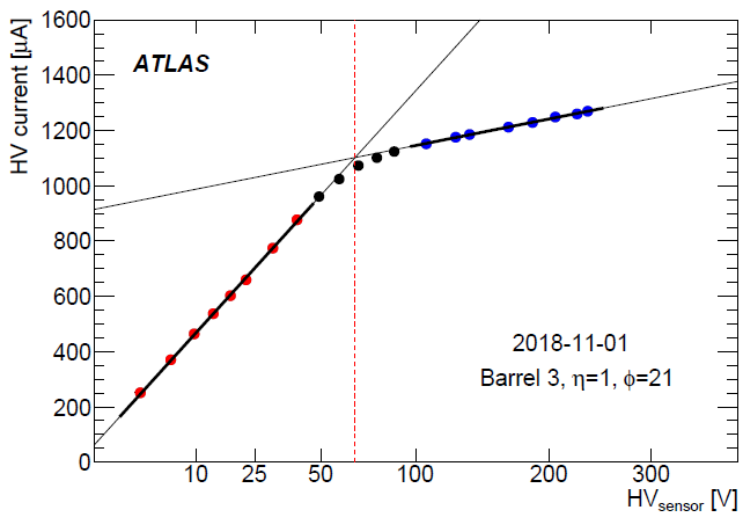
JINST 17 (2022) P01013



- Run 1開始以来、すべてのモジュールの漏れ電流をほぼ常時監視してきた
  - 漏れ電流はRun 2の間に約10倍に増加
- 電流量とその変化は、ハンブルクモデルとよく一致
  - 漏れ電流はよく理解できている

# ■ 完全空乏化電圧 ( $V_{FD}$ )

JINST 17 (2022) P01013



$p^+$ -on- $n$ センサーのため、  
型変換が見えている

- $I$ - $V$ 曲線を使って $V_{FD}$ を見積もる
  - $I_{leak} \propto \sqrt{V_{bias}}$ なので、 $I$ - $\sqrt{V}$ に対して2つの直線をフィット  
→ 2直線の交点を $V_{FD}$ と定義する
  - $I$ - $V$ 測定は、検出器の特性確認のため通常年に数回行う
- $V_{FD}$ 測定値とその変化はハンブルクモデルと~30%程度で一致
  - 完全空乏化電圧もよく理解できている

# ■ Run 2運転のまとめ

- Run 2運転期間を通し、99%以上のデータ収集効率を達成

DAQ効率	99.9%
Data Quality効率	99.85%

DAQ効率: ATLASデータ収集中のSCT稼働率

Data Quality効率: ATLASが収集したデータのうち、SCTのデータ品質が基準を満たした割合

- Run 2終了時点で、検出器全体の98.6%が正常に稼働
  - Run 1終了時点からの減少は1%未満

Component	Barrel		Endcaps		SCT		Fraction [%]	
Modules	12	(11)	30	(19)	42	(30)	1.0	(0.73)
Chips	55	(38)	22	(17)	77	(55)	0.16	(0.11)
Strips	6398	(4111)	9505	(7252)	15903	(11363)	0.25	(0.18)

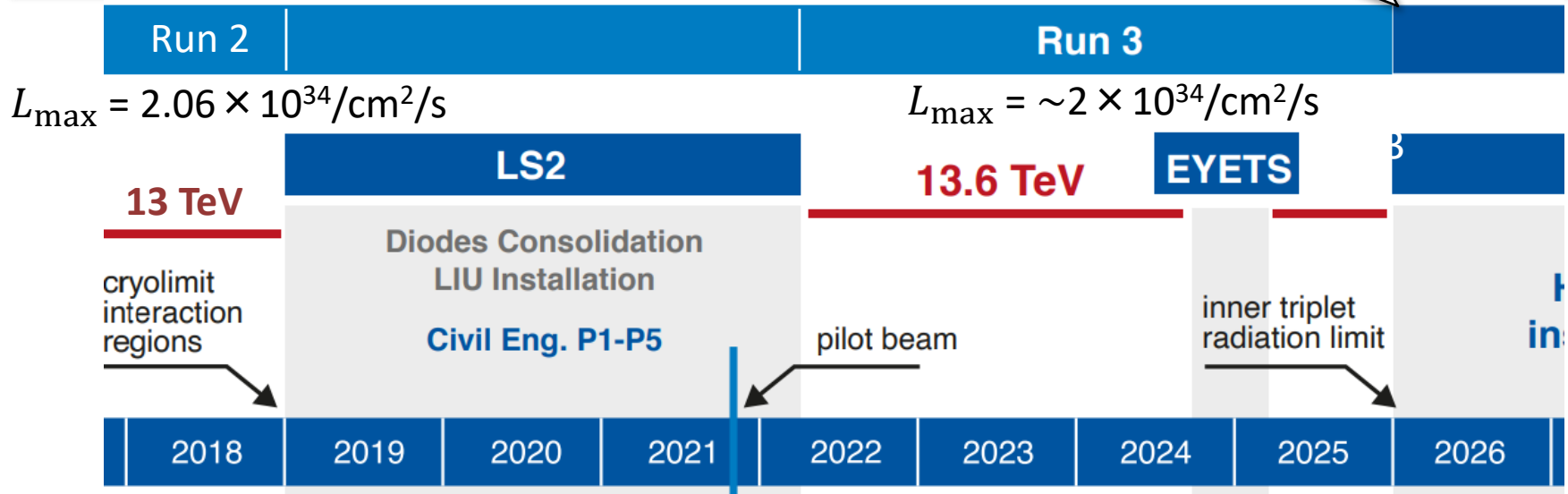
( )内の数値はRun 1終了時点のもの

[JINST 17 \(2022\) P01013](#)

Run 2のシビアな実験環境でも、安定したSCT運転を実現できた

# ■ Run 3運転に向けた準備

SCT運用終了  
(ITkに入れ替え)



- 実験コンディションはRun 2とほぼ同じ
  - SCT DAQに対する大きな変更の必要はない
- シャットダウン期間中に行った準備
  - 放射線損傷がさらに酷くなるの中での運転への準備が重要
    - シャットダウン中の定期的な性能測定による検出器状態の確認
    - より詳細な性能モニタリングツールなどの準備
    - 検出器キャリブレーション用アルゴリズムの信頼性向上  
(実はRun 1の時からまったく変更されていなかった)

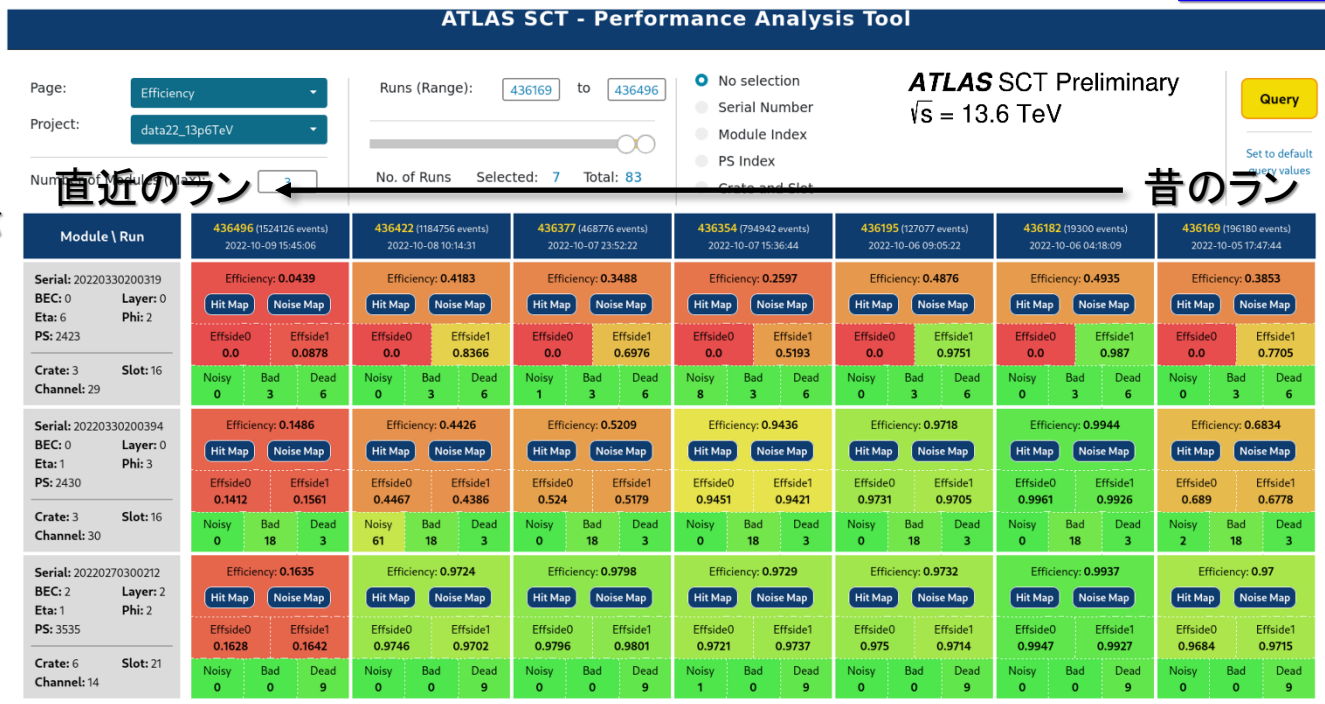
そのために定期的にSCTを動かしていたことがスムーズなRun 3立ち上げにつながった(と思う)

# 性能モニタリングツール

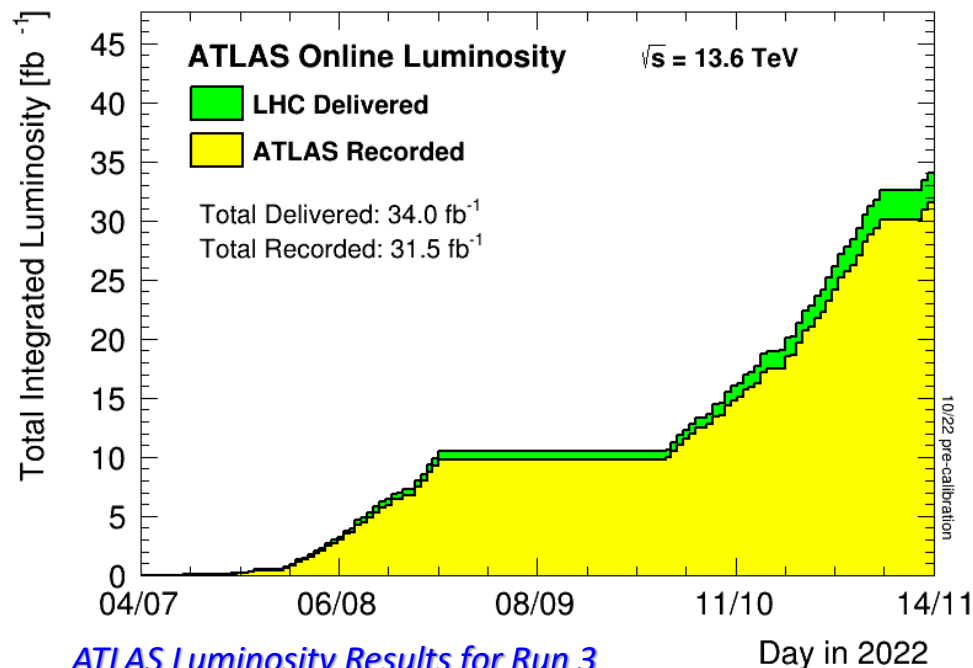
- 放射線損傷や経年劣化によりSCTの性能が徐々に変化する
  - 検出効率が下がったり、ノイズが増加したり...
  - しかし、4088個のモジュールをすべて毎日チェックするのは大変
- 個別のモジュールの性能を一覧できるツールを開発
  - 検出効率など、さまざまなパラメータをモジュール別に表示
  - 性能が悪いモジュールを一目で発見、調整が可能に

[SCT-2022-002](#)

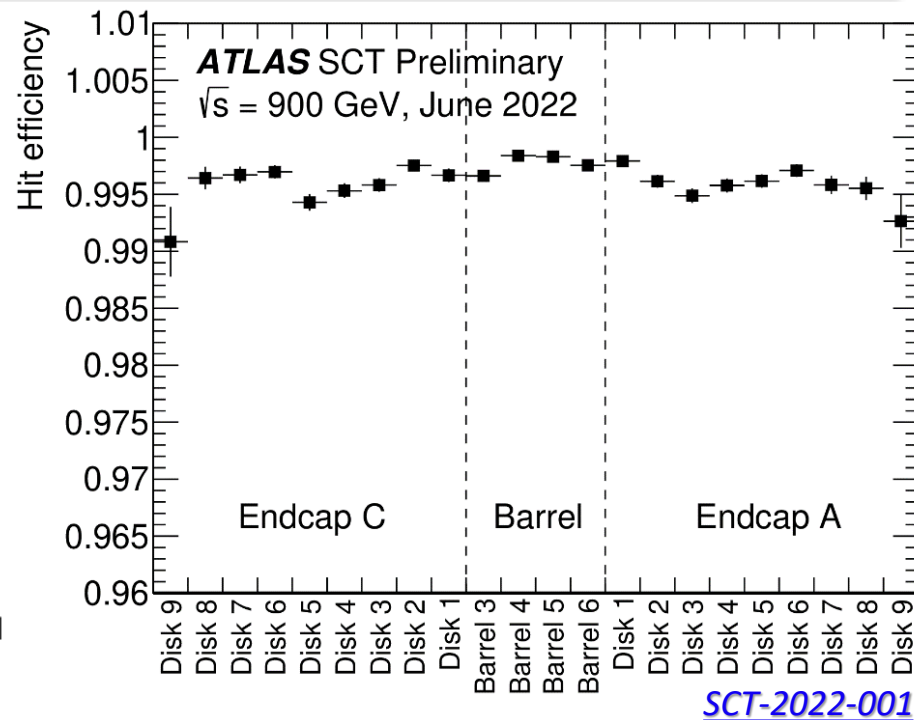
検出効率が  
悪い  
↓  
良い



# Run 3運転の状況 (1)



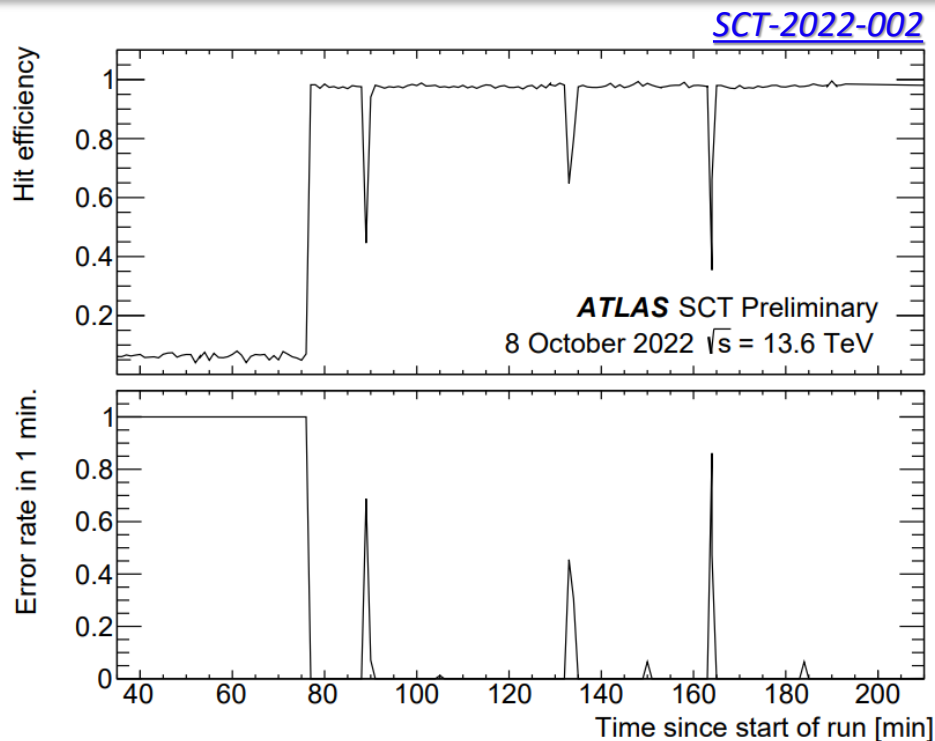
[ATLAS Luminosity Results for Run 3](#)



[SCT-2022-001](#)

- Run 3データ収集を今年7月5日に開始
  - すでに $30 \text{ fb}^{-1}$ 以上のデータを蓄積 → 今年目標に到達した
  - 今月28日で2022年のデータ収集を終了する予定
- SCTも順調に稼働している
  - 開始直後のランから $>99\%$ の検出効率を確認

# ■ Run 3運転の状況 (2)



モニタリングツールのおかげで迅速に  
キャッチされた問題

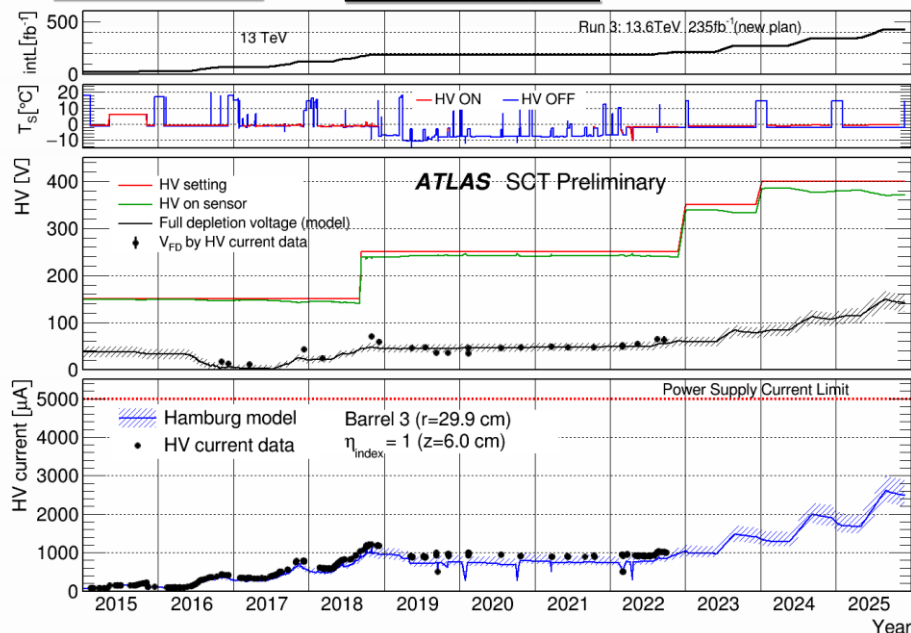
- 特定のランで断続的にエラーを出すモジュールがある
  - Run 2の時には見られなかった現象
  - ある特定のRODにつながったモジュールで起きる
  - 全体の0.3%程度なのでデータ品質には影響ないが、原因を理解しておきたいSCT DAQの問題



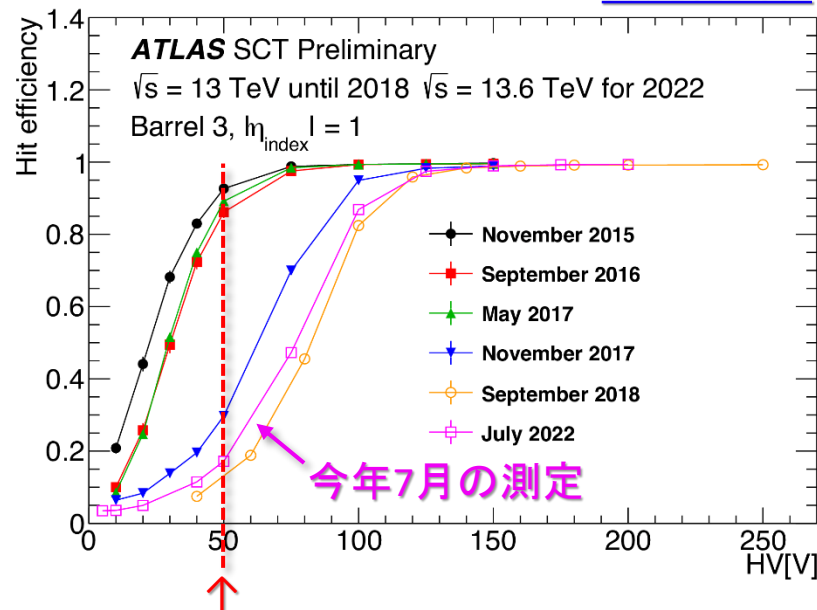
# ■ Run 3運転の最後まで

SCT-2022-001

最内層の場合



SCT-2022-002



I-V曲線から見積もったVFDはこの辺り

- 電源システムは450 V・5 mA/moduleが上限
  - Run 3終了時点での見積もりは、最大で $V_{\text{FD}} \sim 150$  V、 $I_{\text{leak}} \sim 2.5$  mA
- いずれも問題なさそう
- ただし、検出効率 > 99%を維持するための電圧はもっと高い
  - より現実的なシリコンセンサー特性を踏まえた予想を、TCADシミュレーションを用いて検証中

# ■ まとめ

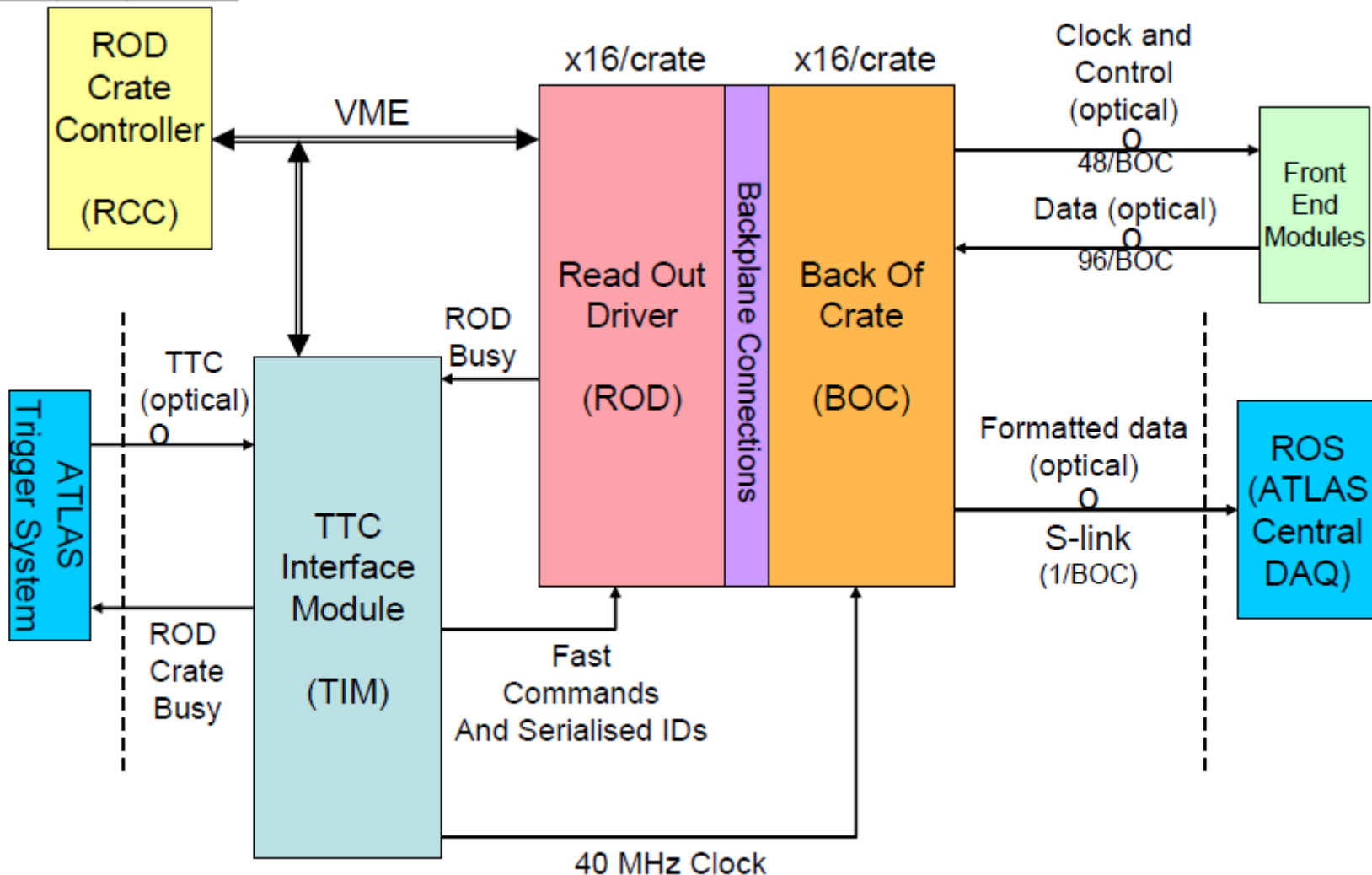
---

- SCTは、2010年のRun 1運転開始から、10年以上にわたって安定して運転されてきた
- Run 2運転では、ルミノシティが想定の2倍に
  - DAQの改善により、Run 2を通じたデッドタイムを0.1%程度に抑えた
  - と同時に、高い検出効率と低いノイズを維持できていた
- 放射線損傷の理解
  - Run 1以降10年近くにわたる漏れ電流や完全空乏化電圧の変化を解析 → Run 3終了まで、安全なSCT運転を期待
- Run 3運転がいよいよ開始！
  - 立ち上げ直後から、SCTは安定して稼働している

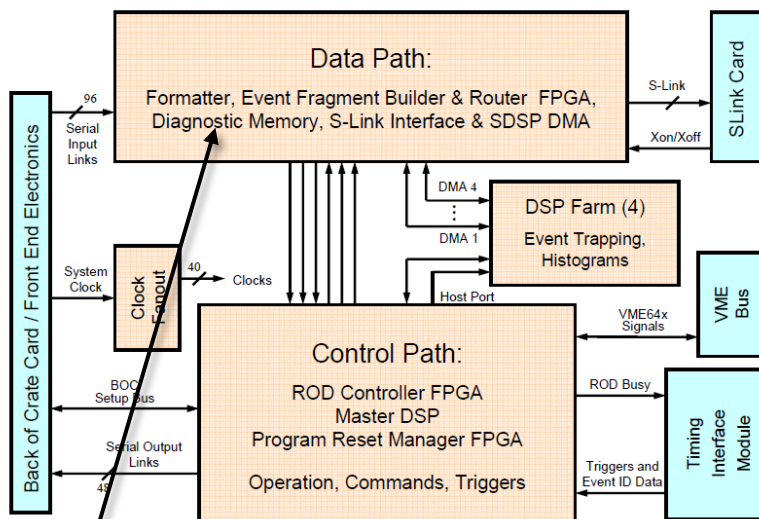
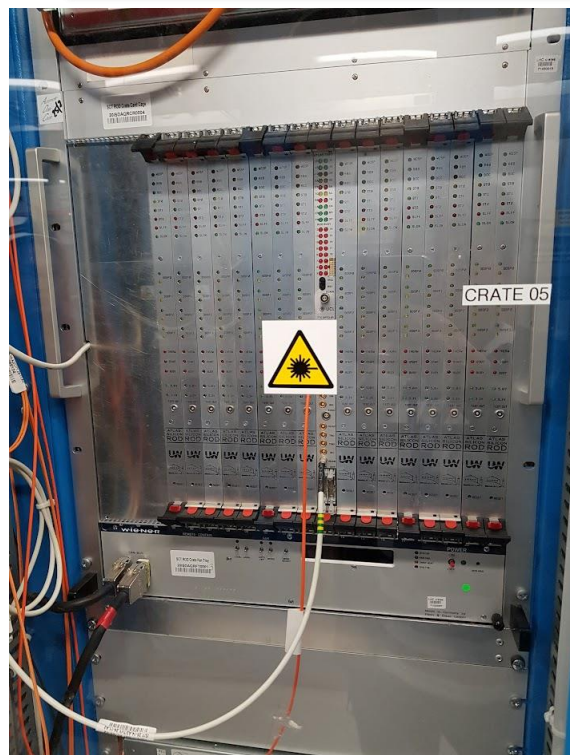


# ■ より正確なDAQダイアグラム

[JINST 3 \(2008\) P01003](#)

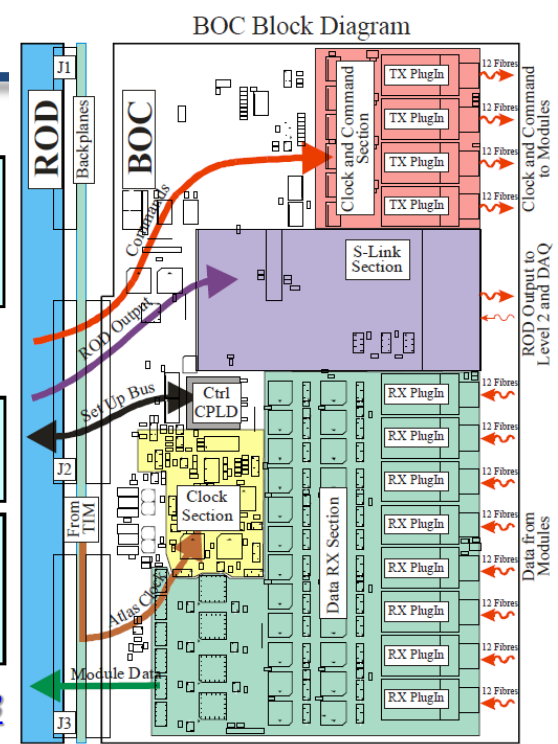


# RODとBOC



JINST 3 (2008) P01003

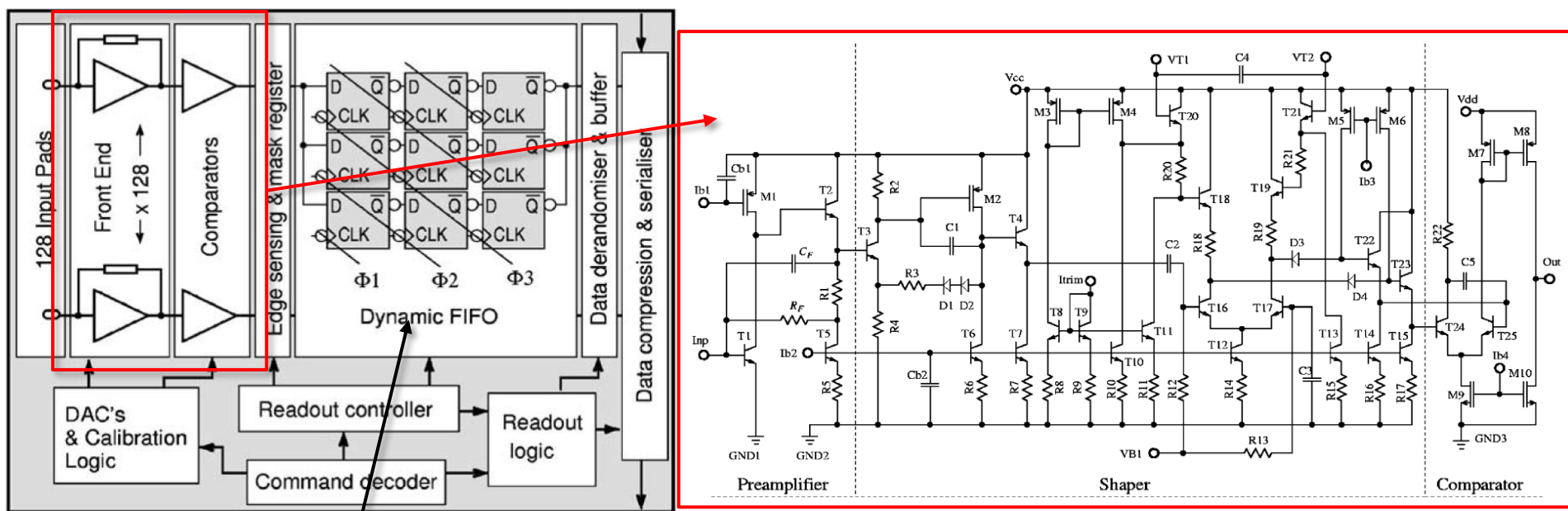
ここでデータをフォーマットする



- RODでデータをフォーマット → Sリンクから中央DAQに送る
- BOC: Back-Of-Crate
  - RODの裏に取り付けられている
  - オプティカルケーブルとRODをインターフェースするボード

# ABCD3TA

- SCT用の読み出しチップ
  - 128チャンネルのamp, shaper, discriminator
  - バイナリ読み出し

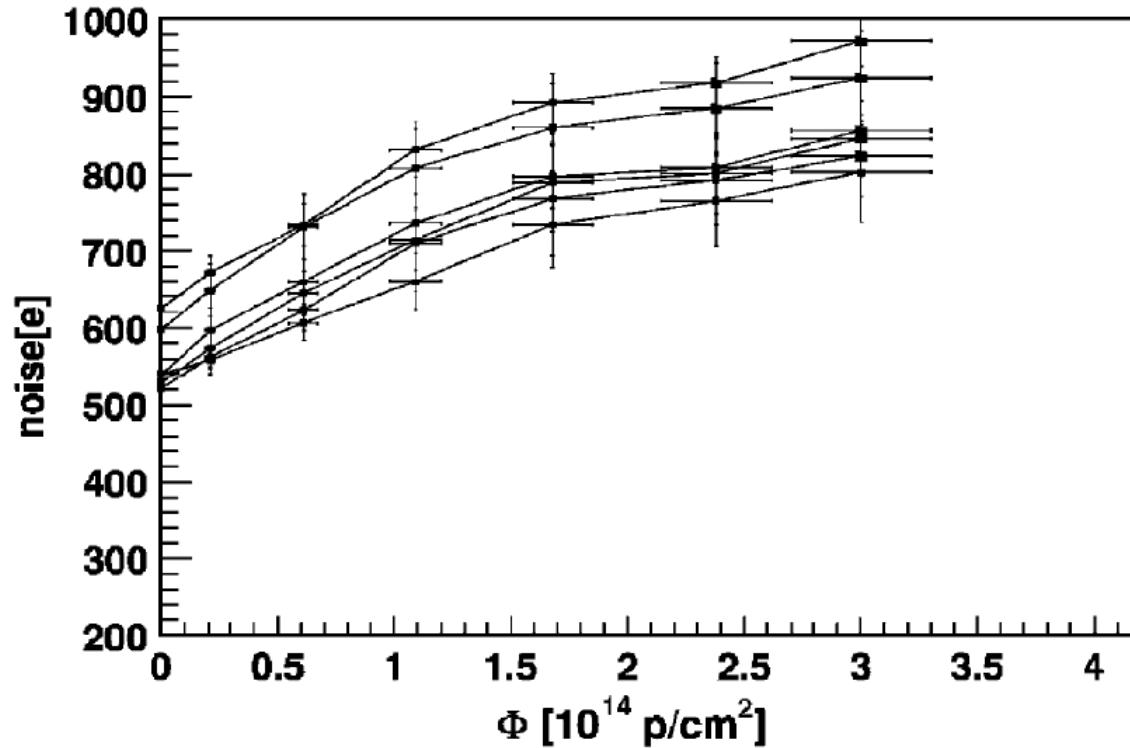


12 × 12 memory cell (実際に使えるのは12 × 11 = 132セル)  
→ 132 × 25 = 3300 nsのレーテンシーを確保

# ■ ABCD3TA

*F. Campabadal et al., NIM A 552 (2005) 292*

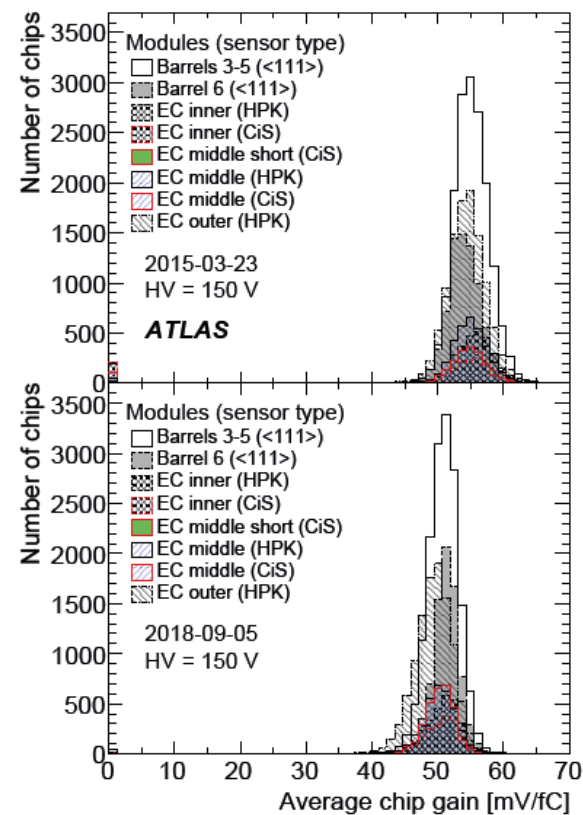
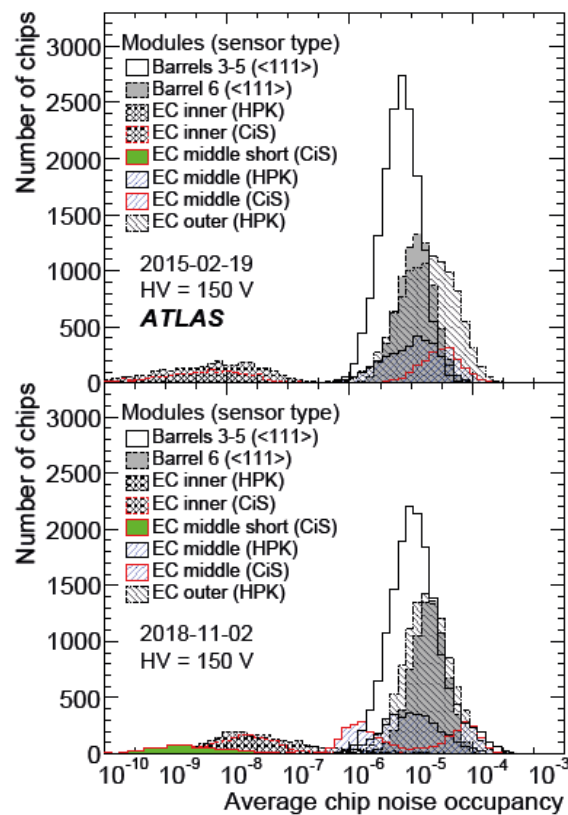
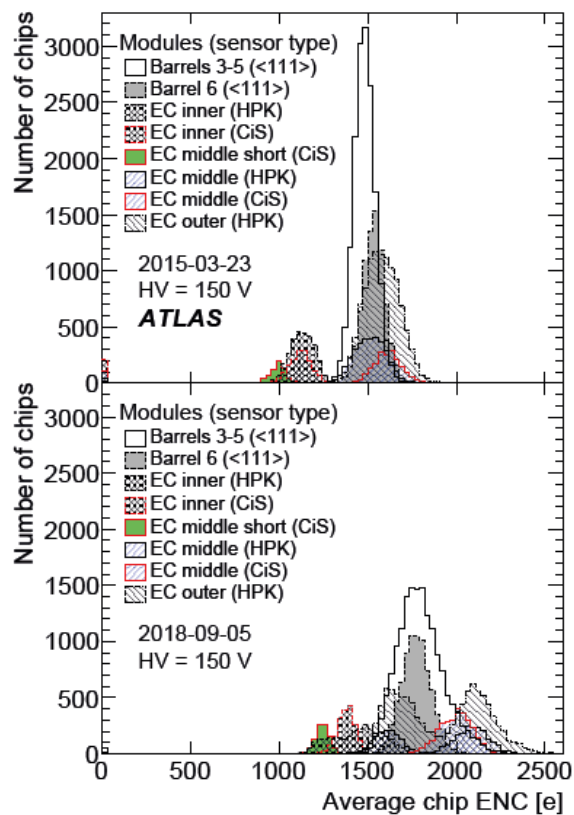
- ノイズ



# ■ ノイズ

- Average chip ENC: Sカーブ測定から見積もったノイズ
- Average chip noise occupancy: ノイズ占有率測定から見積もったノイズ

– 閾値1 fCでのランダムトリガー測定





# ■ IV測定

(本来のIV測定の目的からは必要ないが) なんとか  
350 Vまで上げた

