

LHC-ATLAS実験Run3における ピクセル検出器のハードウェアエラー解析

早稲田大学 寄田研究室 荒川航輝

30th ICEPP Symposium

2024/02/18

◆ LHC-ATLAS実験

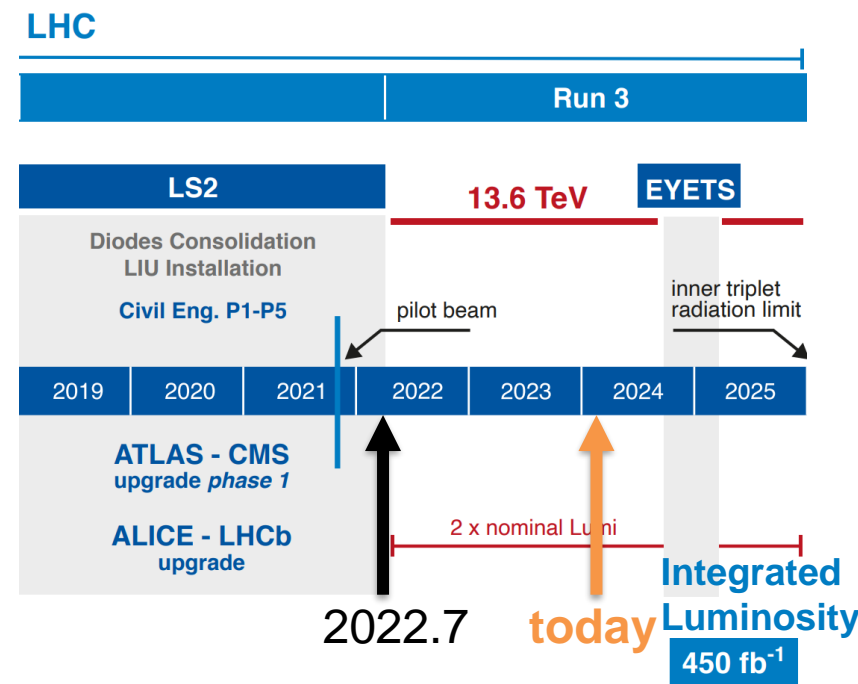
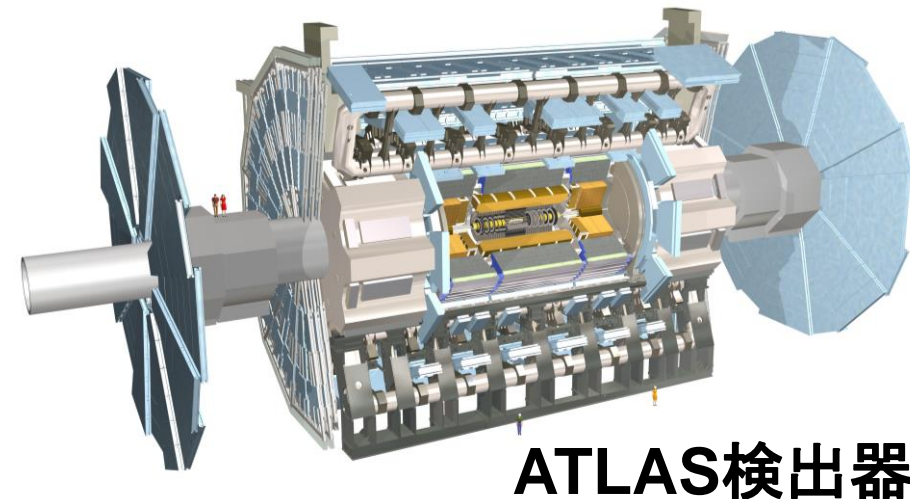
- ✓ LHC(Large Hadron Collider)の衝突点に設置されたATLAS検出器でデータ収集
- ✓ 標準模型の精密測定と新物理の探索

ATLAS検出器の構成

- | | |
|----------|---------------------|
| 内部飛跡検出器 | ● ピクセル検出器(Pixel) |
| カロリメータ | ● シリコンストリップ検出器(SCT) |
| ミューオン検出器 | ● 遷移輻射型検出器(TRT) |

□ 2022年7月よりRun3実験開始

- 2022年、2023年では計 70.4fb^{-1} のデータを記録
 - 最終的に約 260fb^{-1} のデータ収集を予定



ピクセル検出器構成

◆ピクセル検出器

- ✓ ATLAS検出器最内層に設置されたシリコン検出器
- ✓ 荷電粒子の通過位置や**エネルギー損失量(dE/dx)**を測定
- ✓ バレル4層、エンドキャップ前後3層ずつ($|\eta| < 2.5$)

↳ 内層から IBL, B-Layer, **Layer-1**, **Layer-2**

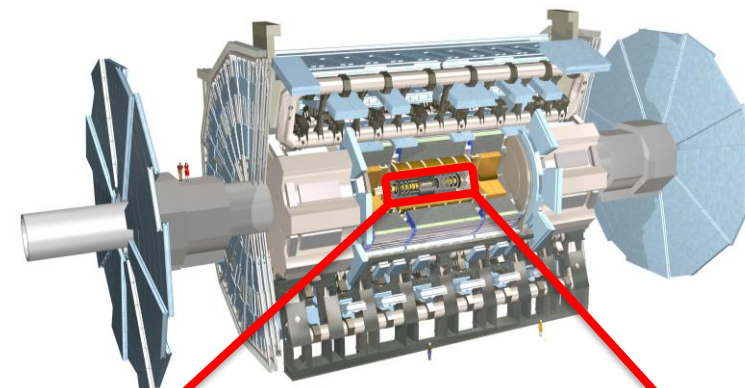
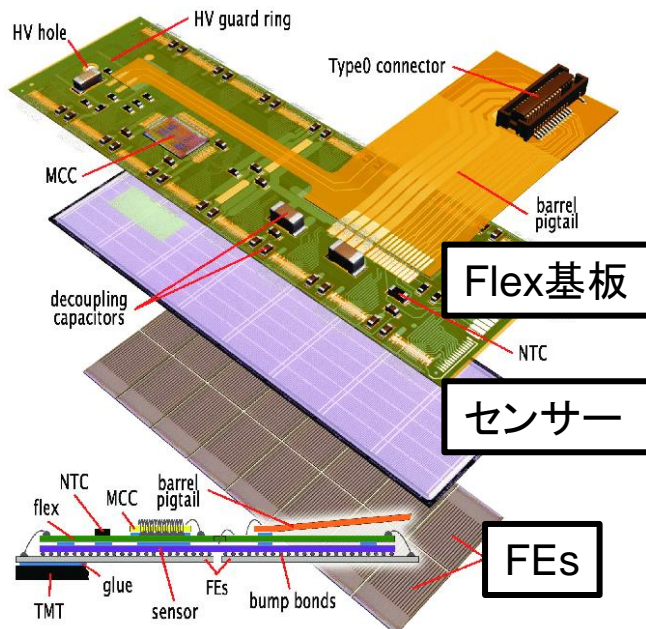
- ✓ 合計1744個+280個(IBL)のモジュールで構成

◆Pixelモジュール(BL,L1,L2,EC)

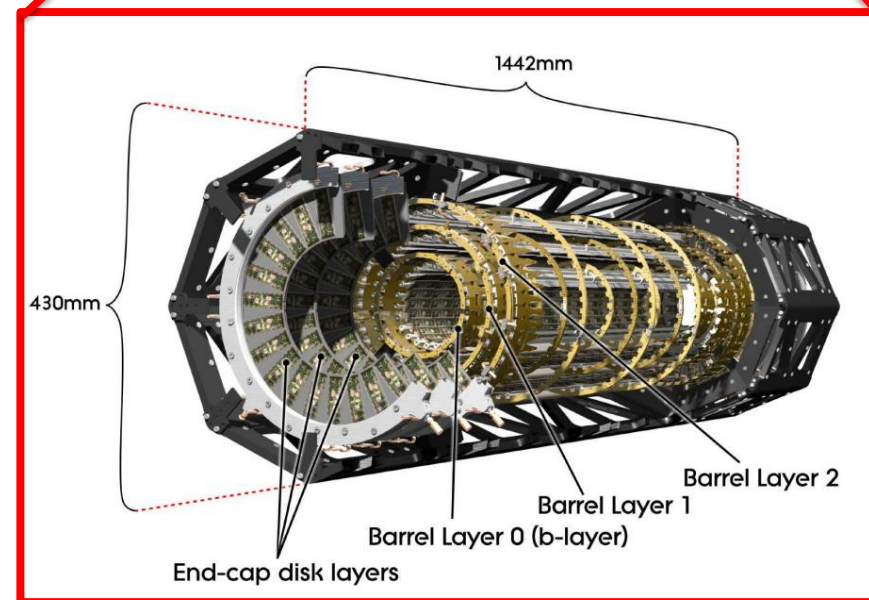
構成要素

- ・Flex基板
- ・シリコンピクセルセンサー
- ・フロントエンドチップ(FE) x16枚

- 1pixel = $50 \times 400 \mu\text{m}^2$

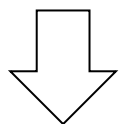


ピクセル検出器



◆半導体検出器

空乏化されたシリコンセンサー内を荷電粒子が通過すると、
落としたエネルギー量に応じて電子正孔対が生成される
(電子正孔対生成に必要な平均エネルギー $W = 3.68\text{eV/pair}$)



アンプで増幅し、収集電荷量に比例した三角波を出力

◆Time over Threshold(ToT)

出力された三角波がthreshold以上かを25nsごとに判定

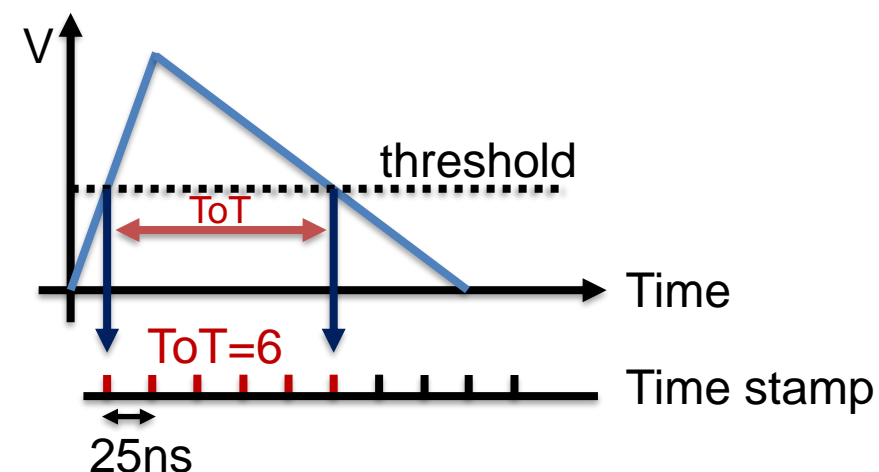
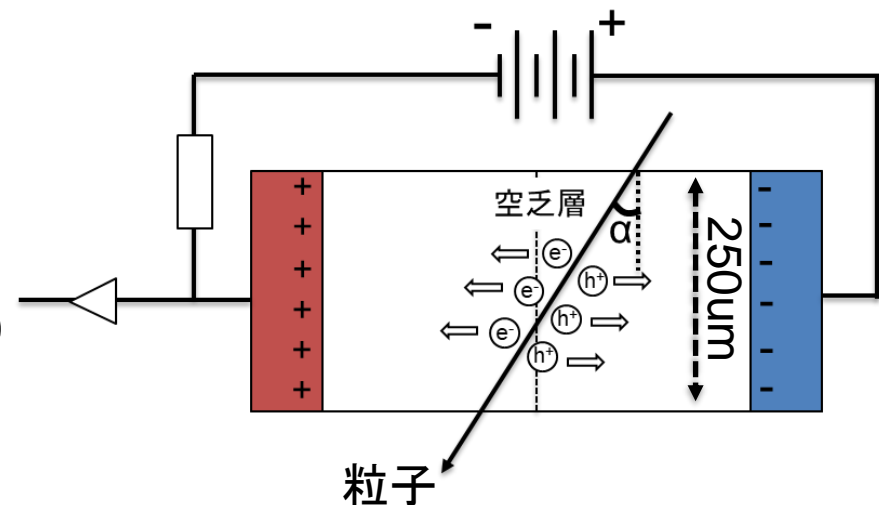
➤ カウント数(ToT)から電荷量 Q を求める

$$\frac{dE}{dx} = \frac{Q}{e} \frac{W \cos \alpha}{\rho d}$$

ρ : シリコン密度

d : センサー厚(250um)

α : センサーへの粒子の入射角

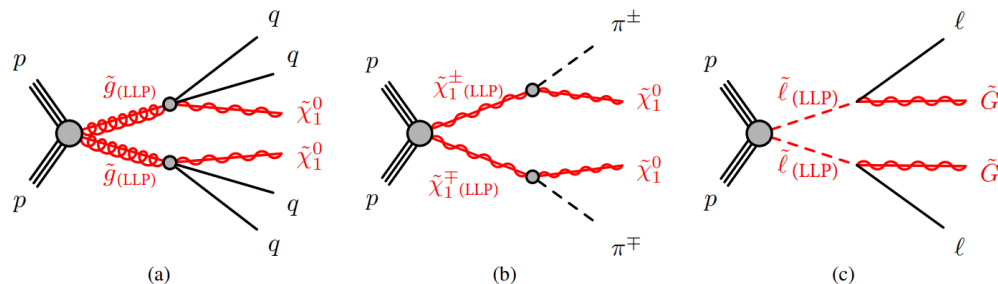


◆ 例：長寿命粒子探索

arXiv:2205.06013v2

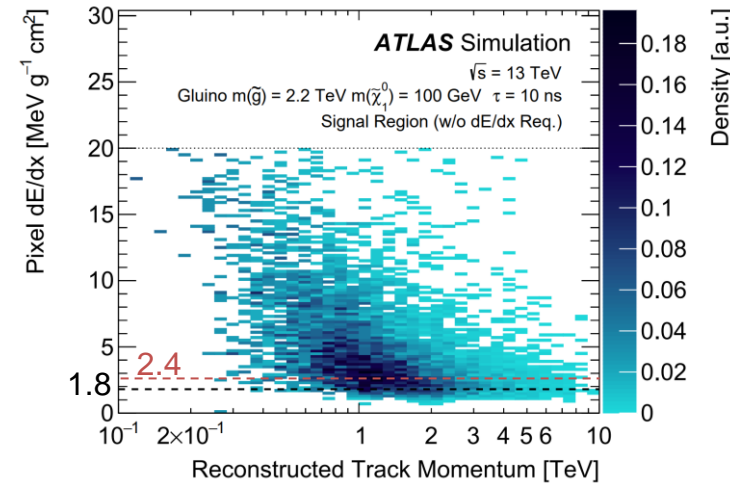
重い長寿命粒子の場合、高い運動量を持っていてもMIPにならず、非常に大きなエネルギーを落とす

➤ dE/dxが強力なBG除去能力を持つ

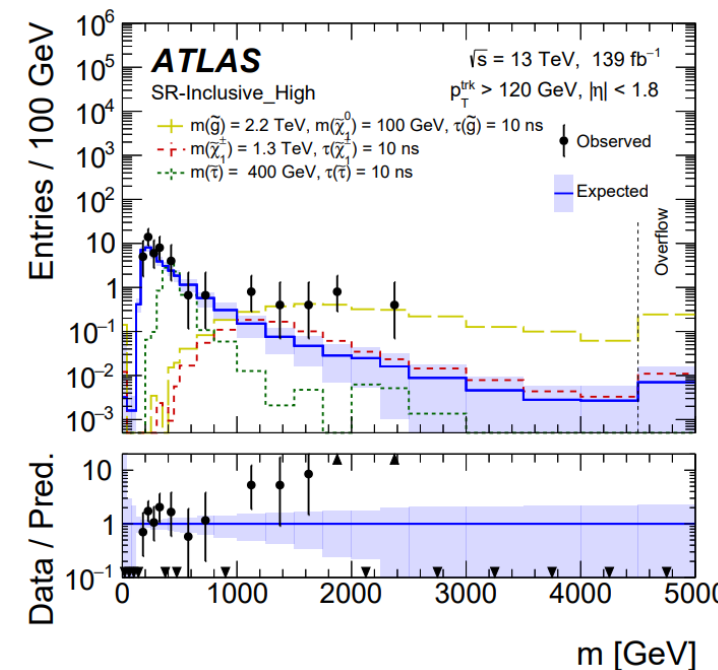


- $dE/dx > 1.8 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ を要求することで背景事象を大きく抑制(全trackの1%のselection)

新粒子探索も含め、dE/dxは解析における重要なプローブとなる

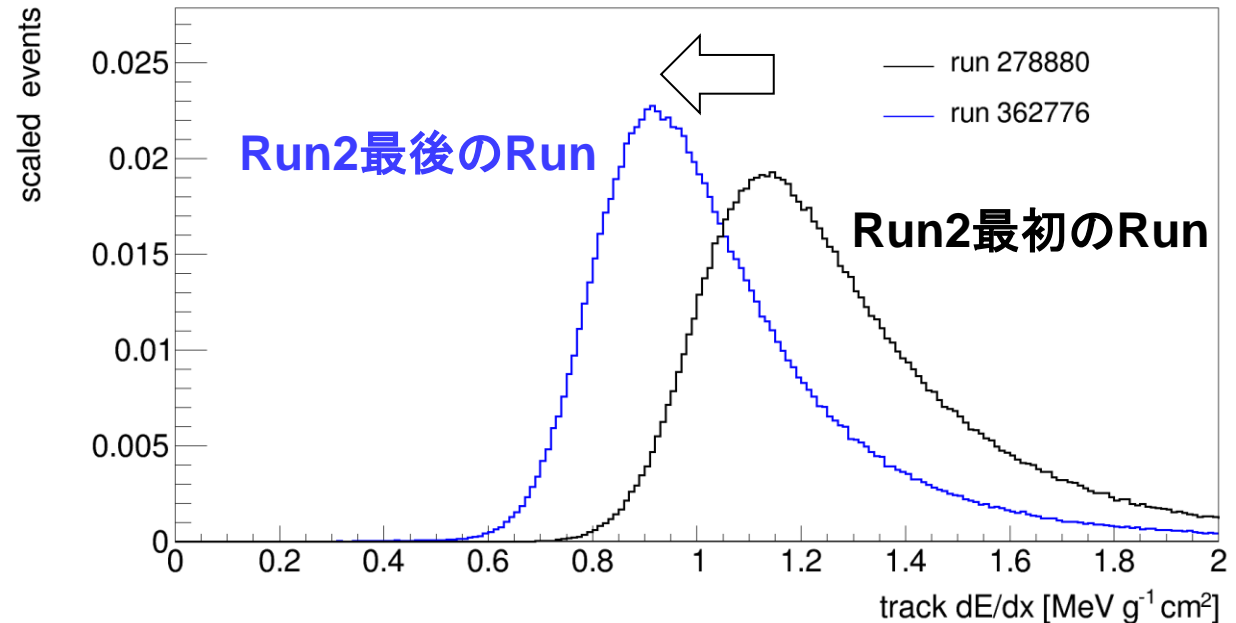
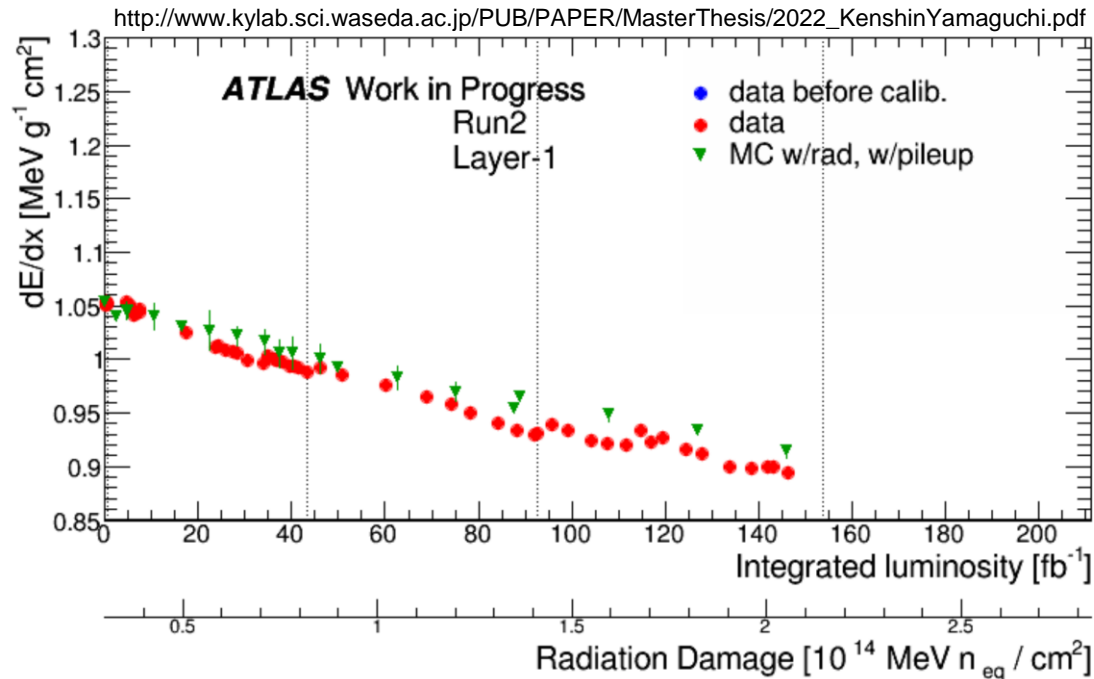


(a) \tilde{g} , $m(\tilde{g}) = 2.2 \text{ TeV}$, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 100 \text{ GeV}$, $\tau(\tilde{g}) = 10 \text{ ns}$



◆ 長期的な放射線損傷の影響で検出器性能が劣化

- 粒子が通過した際に生じた電荷の収集効率が年々低下しており、測定されるdE/dxの値が低く出力されてしまう



解析で使用するため、今一度dE/dxの測定品質について保証する必要がある

- ByteStreamErrorと呼ばれる検出器のハードウェアエラーの活用を検討

Byte Stream Error (BSErr)

◆ Byte Stream Error (BSErr)

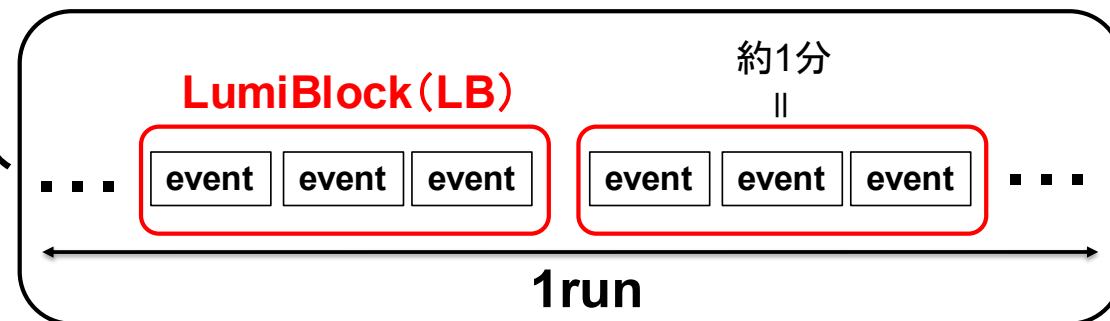
: モジュール/フロントエンドチップ(FE)単位で発行されるハードウェアのエラー(27種)

⇒ 特定のエラーが出力されたFEはそのLBの間、データ収集が行われない(=mask)

LumiBlock(LB)

: 各runの中で実験条件が同じEventごとの区分

Ex.) 瞬間ルミノシティ

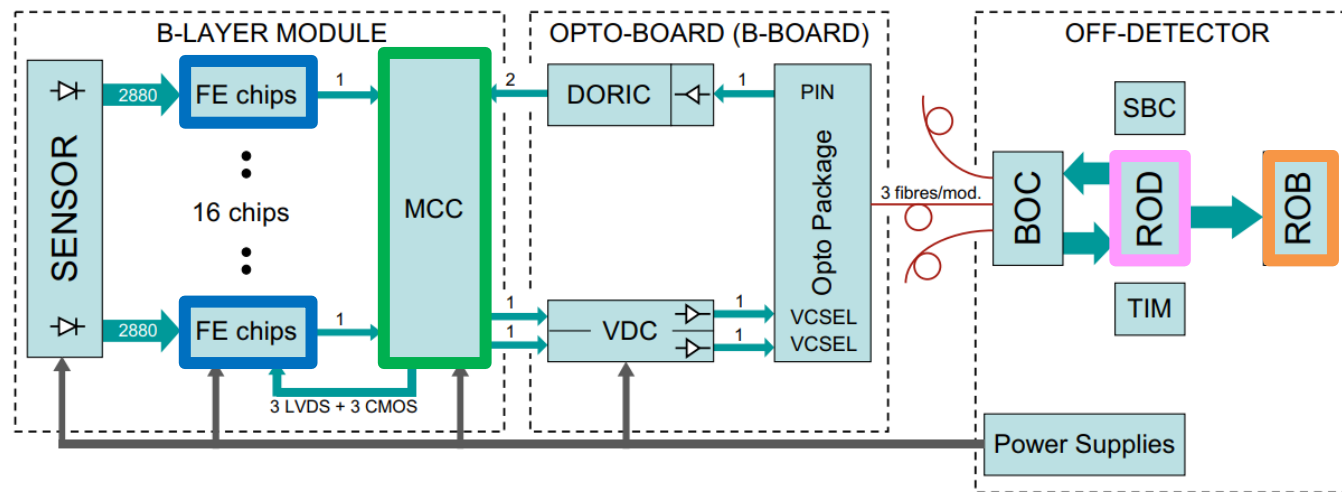


Update! Run2まではLBごとに取得されていたが、Run3からeventごとに取得可能に

ByteStreamErrorを新たなプローブとして、dE/dxのデータ品質を保証する

⇒ まずはRun3データでByteStreamErrorの振る舞いについて詳細な解析

#	BSErrWord	#	BSErrWord
0	Timeout	14	MCCLVL1IDEoECheck
1	BCID	15	MCCBCIDEoECheck
2	LVL1ID	16	MCCLVL1IDCheck
3	Preamble	17	MCCEoEOverflow
4	Trailer	18	MCCHitOverflow
5	Flagged	19	FEWarning
6	BadFE	20	FEHitParity
7	Decoding	21	FERegisterParity
8	Invalid	22	FEHammingCode
9	LinkMaskedByPPC	23	FEEoCOverflow
10	Limit	24	RODTrailerBitError
11	TruncatedROB	25	RODHeaderLimit
12	MaskedROB	26	RODDataOverflow
13	MCCUndefined		



各オブジェクトから送られてきた情報を統合し、最終的にByteStreamErrorの形で記録

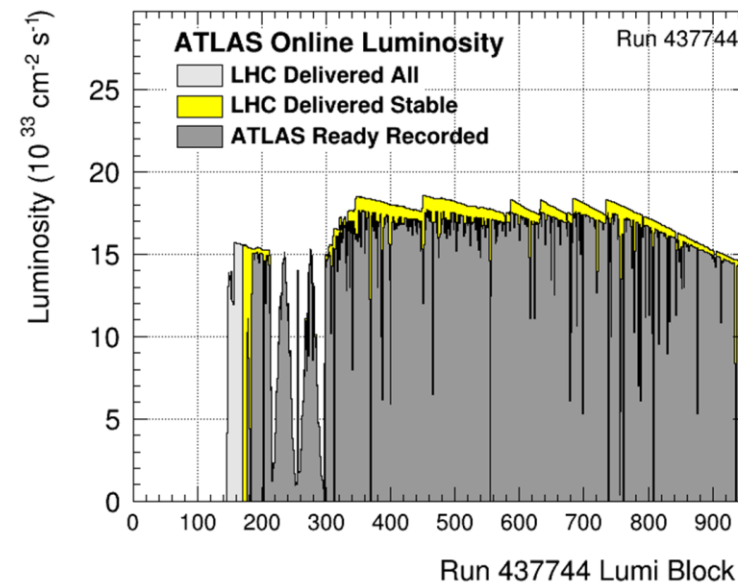
- 特に特定の10種のエラーが出力されると、測定や情報伝搬に問題が生じたとしてmask

例) #2: LVL1ID

トリガー信号が同期していない

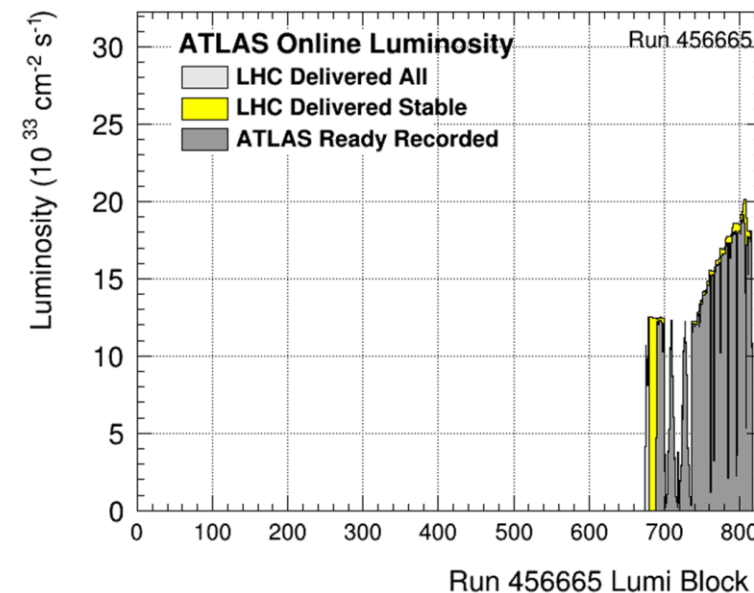
Run 437744

日時	2022/10/23 00:01 - 07:47
記録時間	6時間13分
積分ルミノシティ	377.3pb ⁻¹
最大安定ルミノシティ	1.86x10 ³⁴ cm ⁻² s ⁻¹
平均イベント数/BX	54.0
最大イベント数/BX	49.6

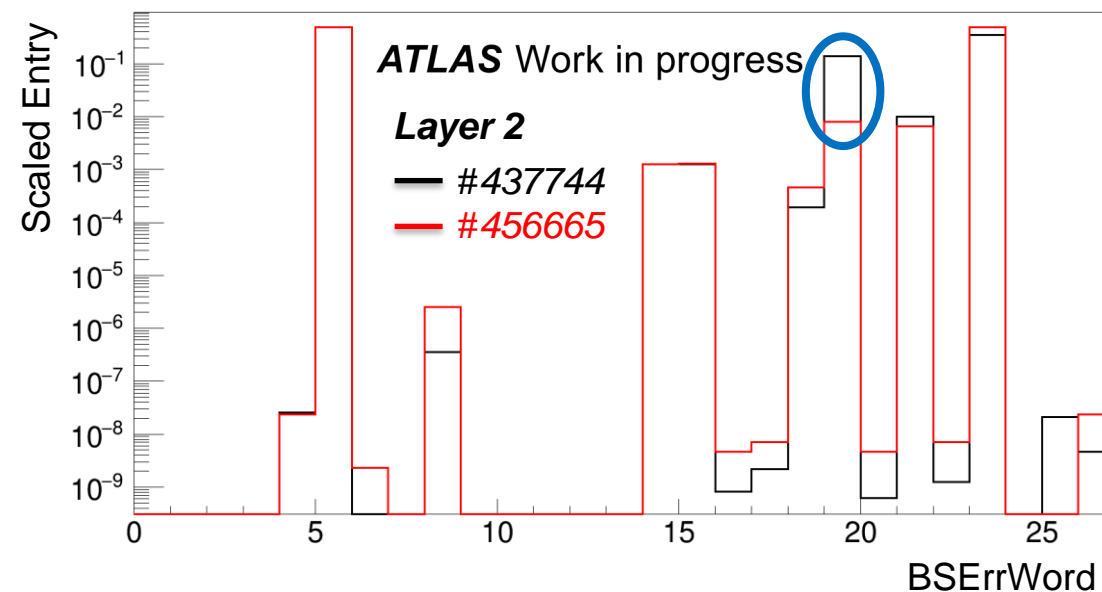
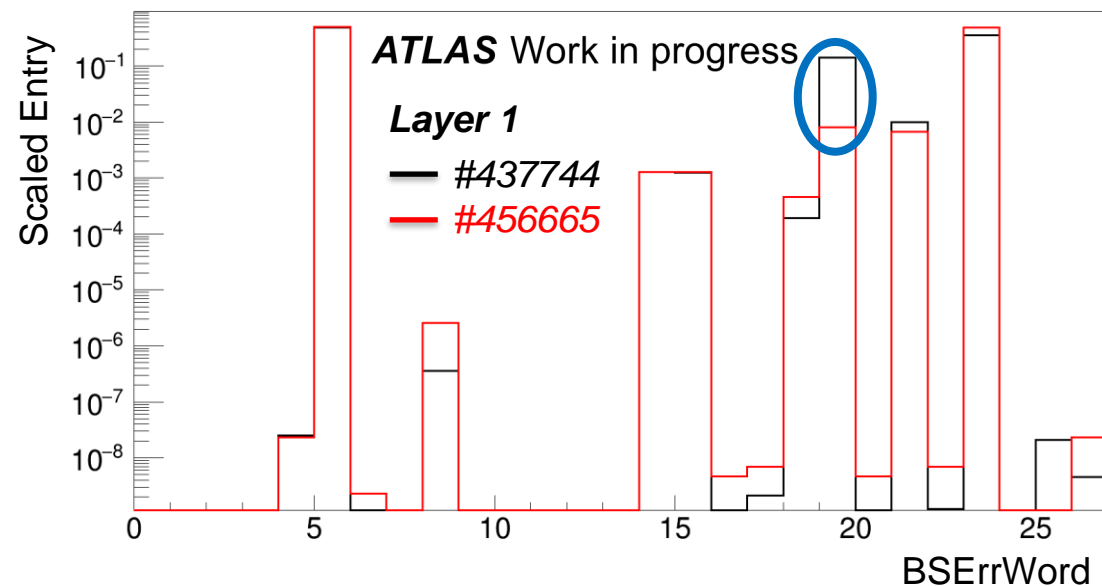


Run 456665

日時	2023/7/15 03:36 - 11:02
記録時間	41分
積分ルミノシティ	38.1pb ⁻¹
最大安定ルミノシティ	2.02x10 ³⁴ cm ⁻² s ⁻¹
平均イベント数/BX	58.5
最大イベント数/BX	44.9

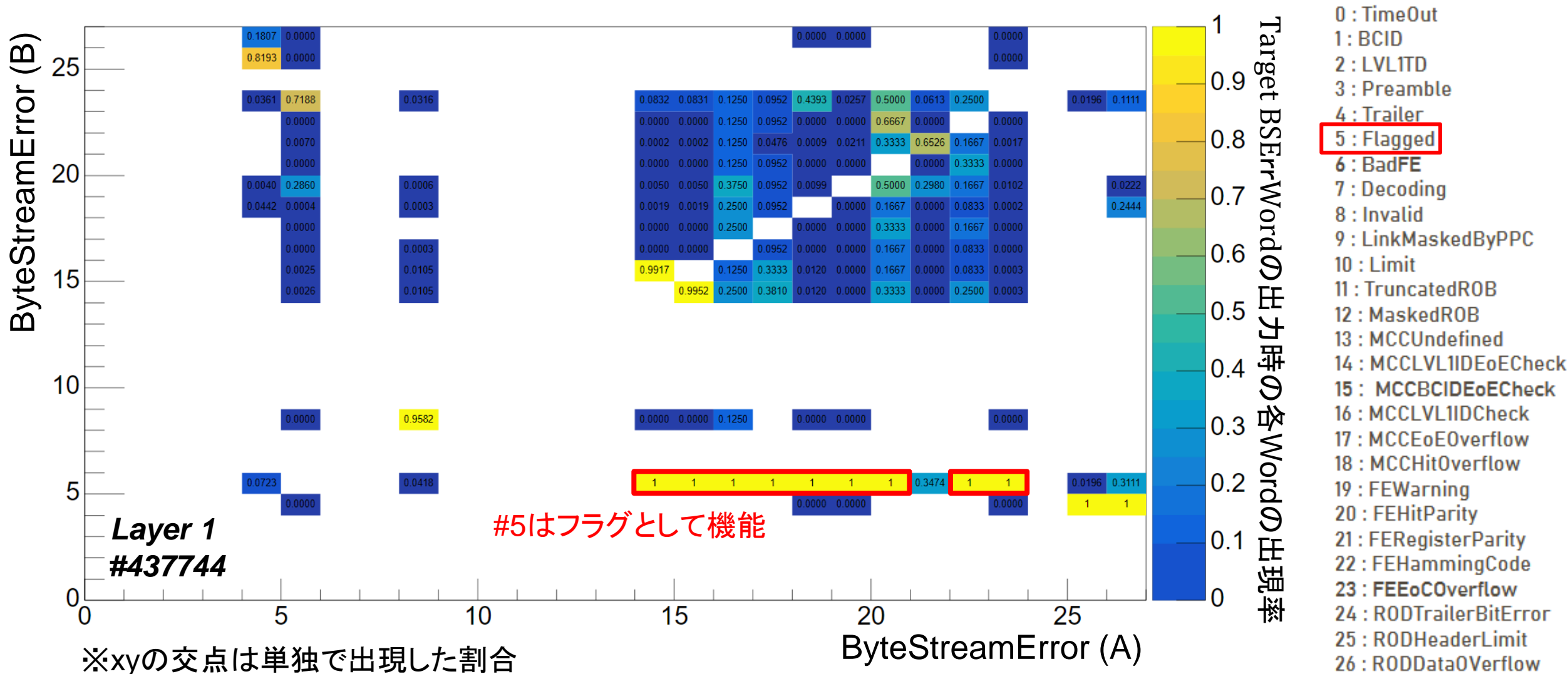


◆27種あるBSErrの出現数を比較

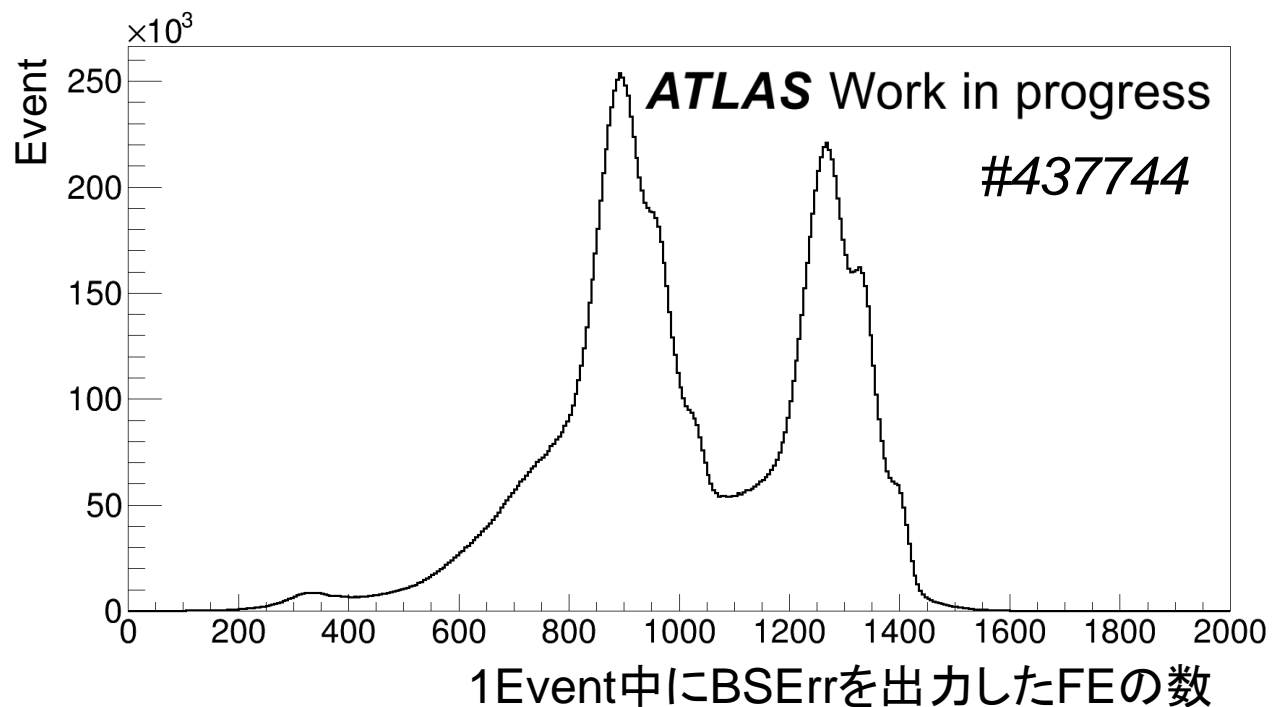
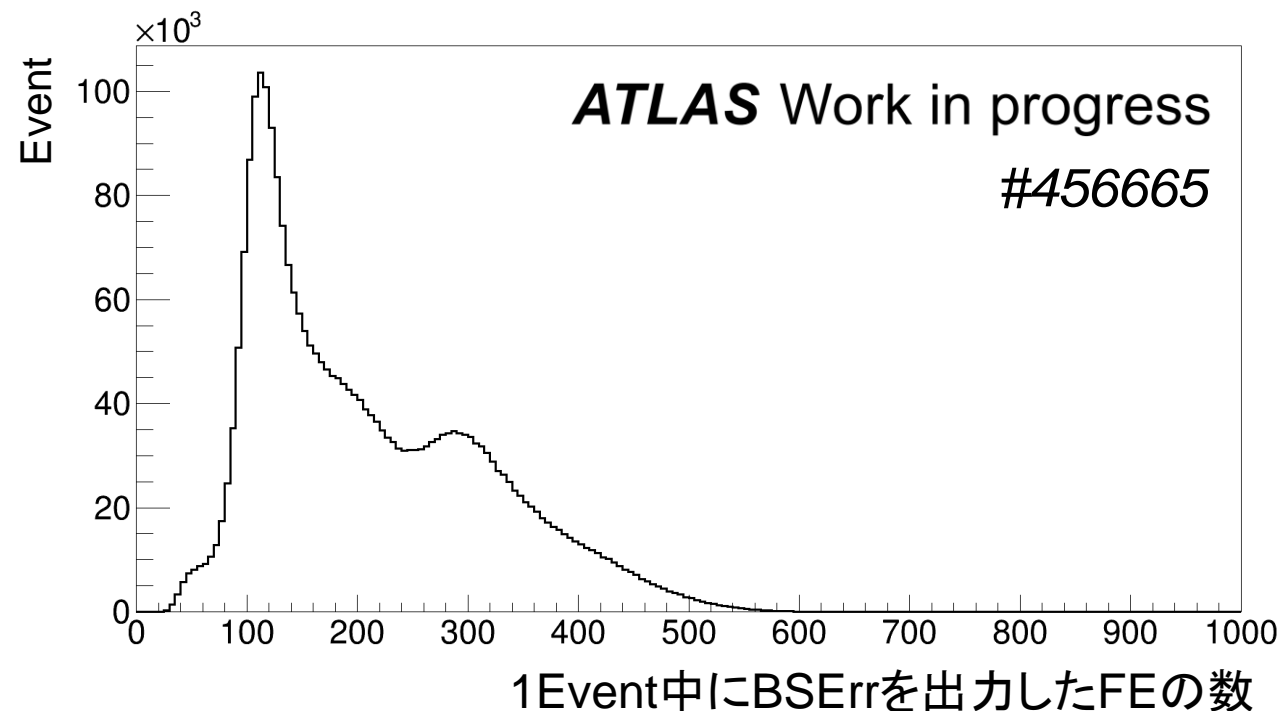


- 同じRunの中で各Wordの出現傾向はLayer 1とLayer 2で共通している
- 同じLayerについて、異なるRunでも基本的に各Wordの出現傾向は同じ

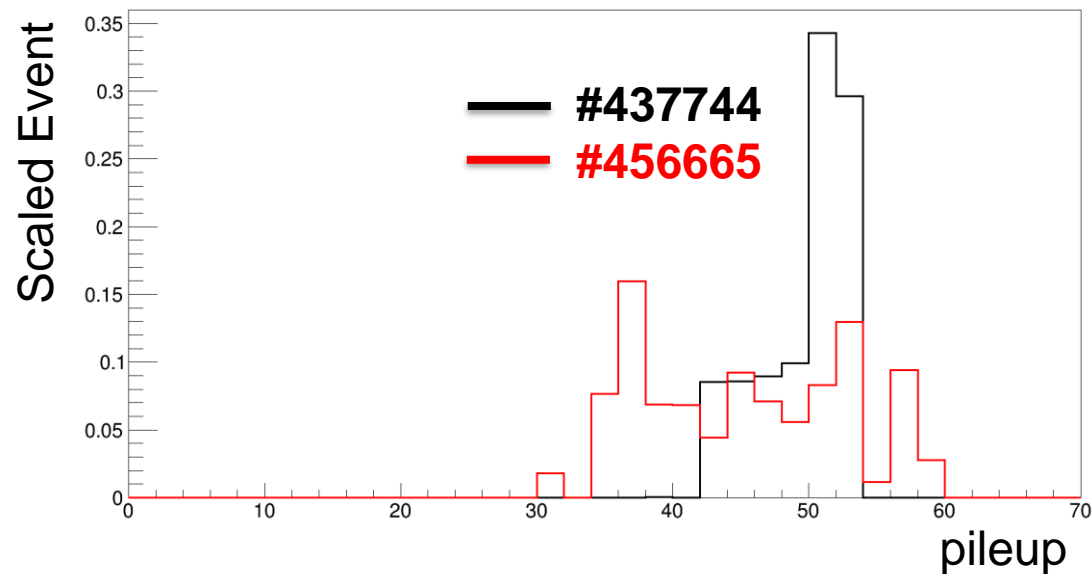
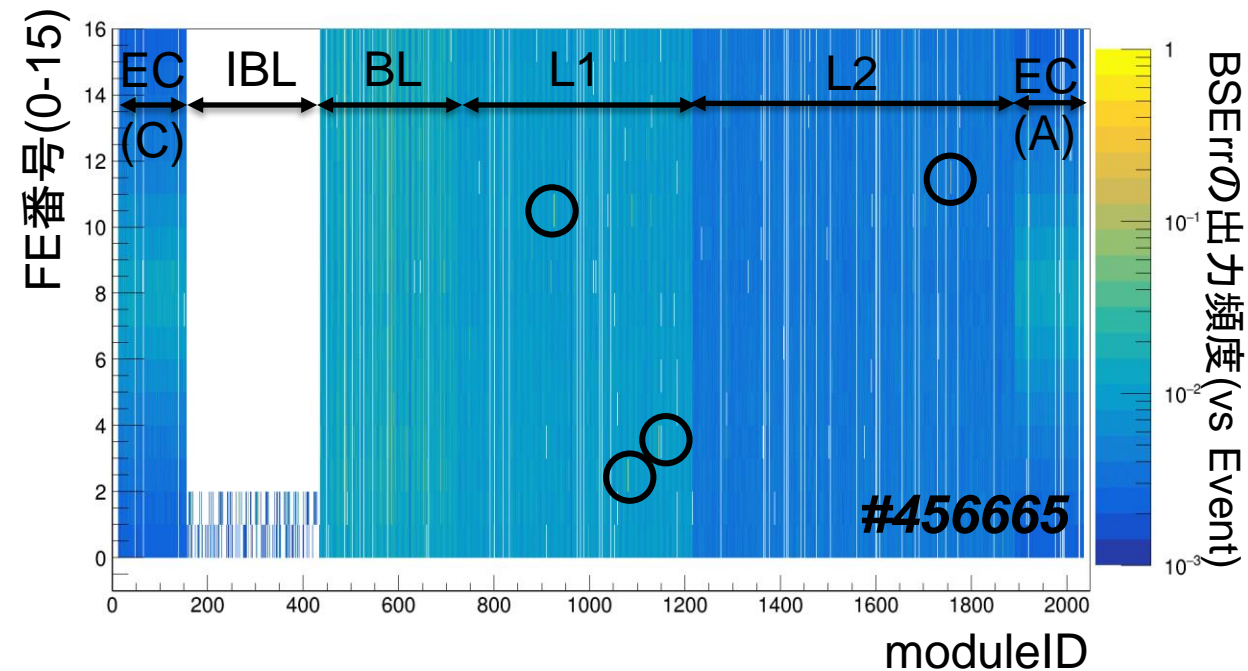
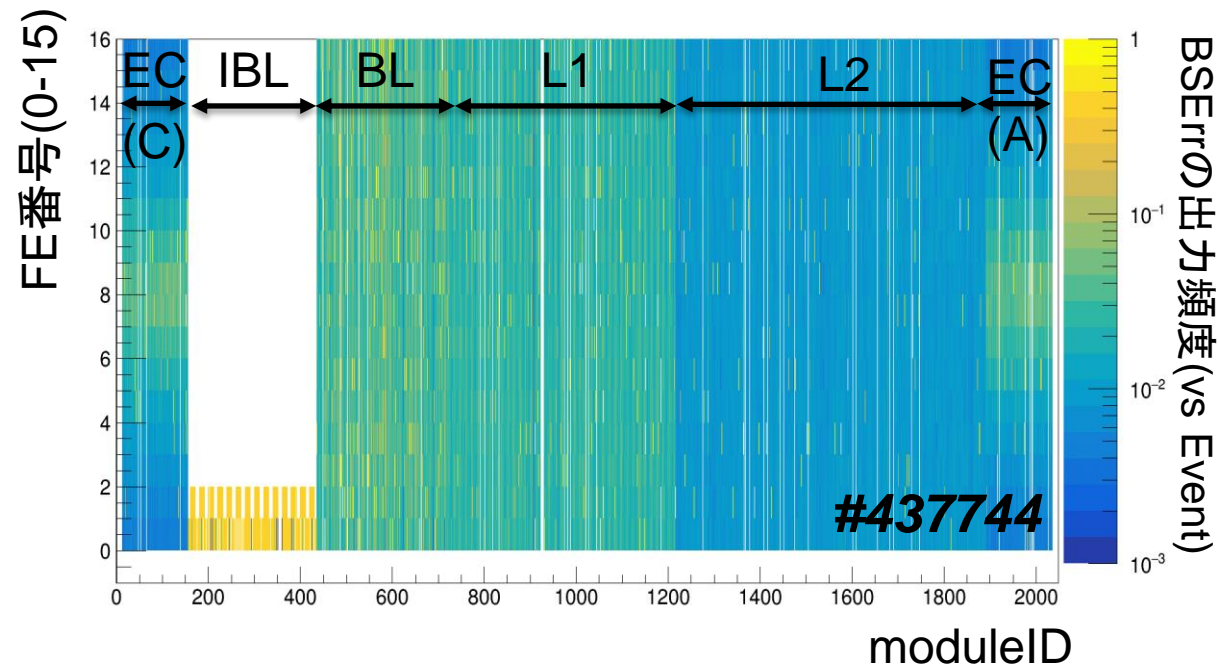
◆エラーAが出現したときにエラーBが出現した割合(=条件確率 $P_A(B)$)を分析



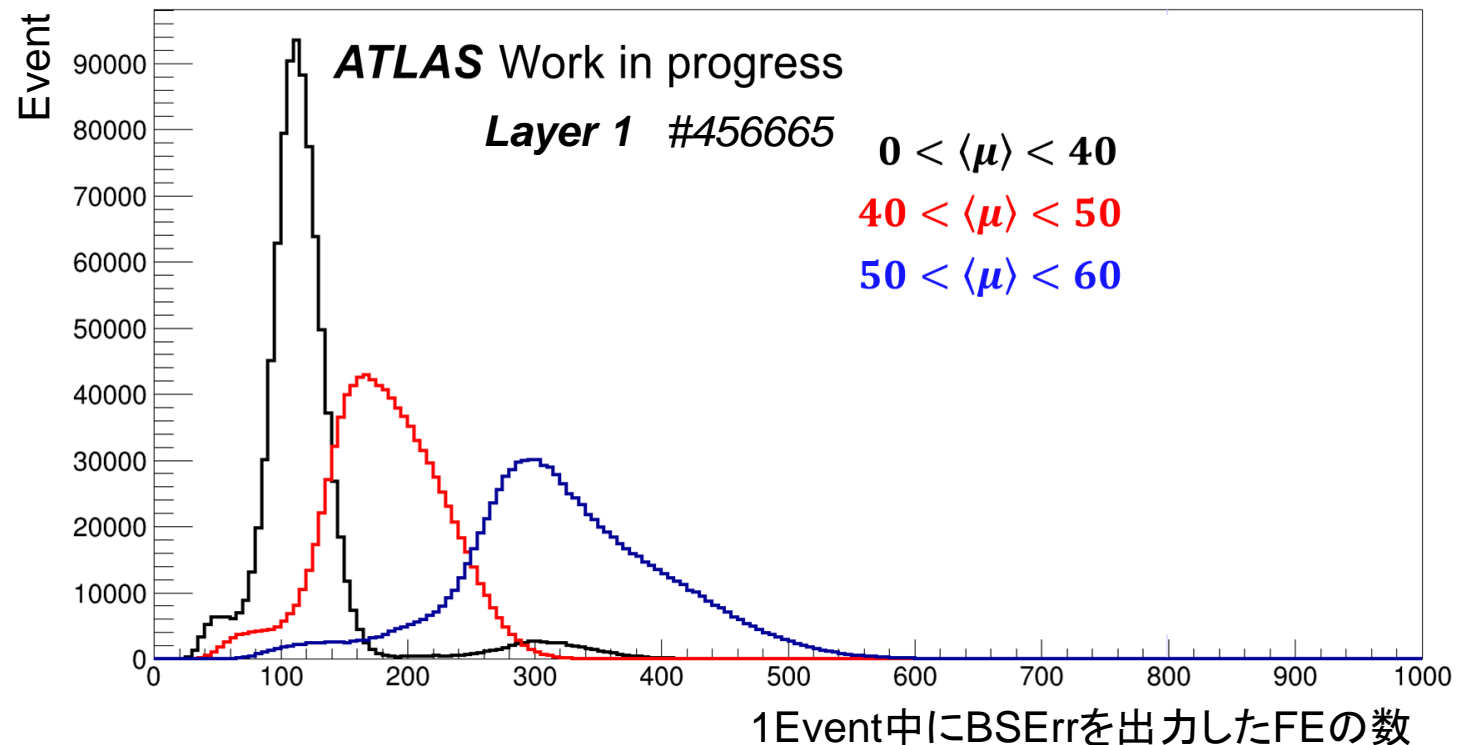
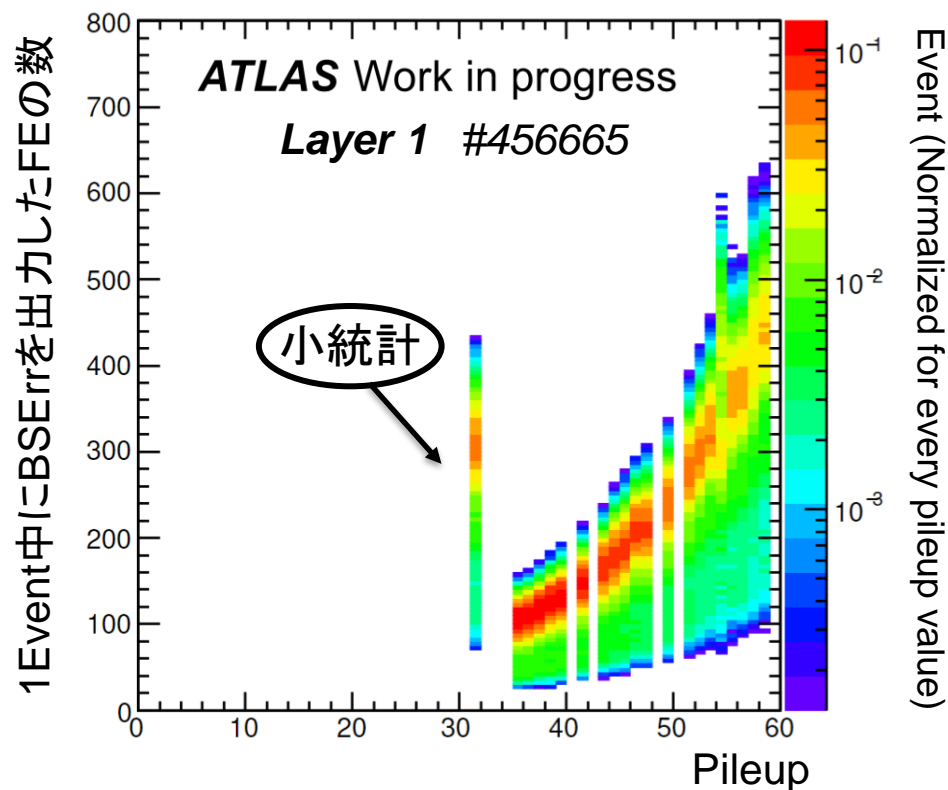
◆ 1Event中にBSErrを出力したFEの数を2つのRunで比較



- 分布内に複数のピークが存在し、Runによってピーク位置や形状が全く異なる
 - 1Event中にBSErrを出力したFE数の分布範囲も一致しない
- ByteStreamErrorの基礎的な特性について分析する必要がある



- FEがBSErrを出力する頻度がrunによって大きく異なる
- 内層側ほどBSErrを多く出力
- ホットスポットの増加



- BSErrを出力するFEの数はPileupに依存して増加
 - Pileupごとに分布を分けるとそれぞれ単一ピークの分布
 - 分布範囲の差も2つのRunのPileup分布の違いが影響

解析で重要なdE/dxについて、ByteStreamErrorの観点から品質の保証を試みる。
スタートアップとしてByteStreamErrorの分析を実施。

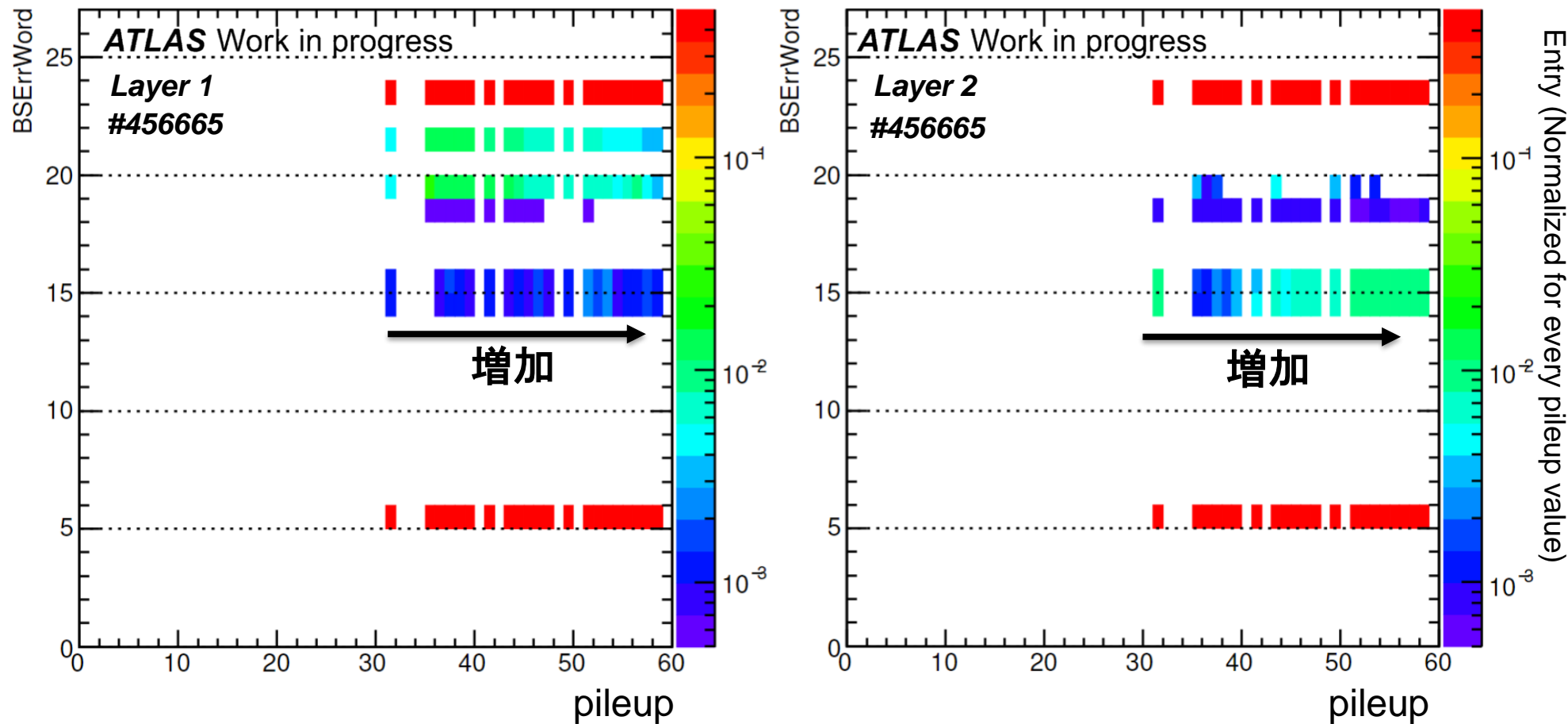
- 27種のErrorWordの出現比率はrunやLayerによらず同程度
- FEのByteStreamError出力頻度はpileupに依存して増加
 - ホットスポットが増加する描像を確認

今後の展望

- 現在maskの設定に使用されていないErrorWordと測定結果の関係を解析
- ByteStreamErrorの効果をエラーとして策定し、物理解析に適用

Backup

◆ Pileupに依存して増加するBSErrWordの存在を確認

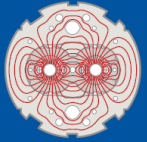


✓ Pileupが増加するごとに#14, #15の割合が増加

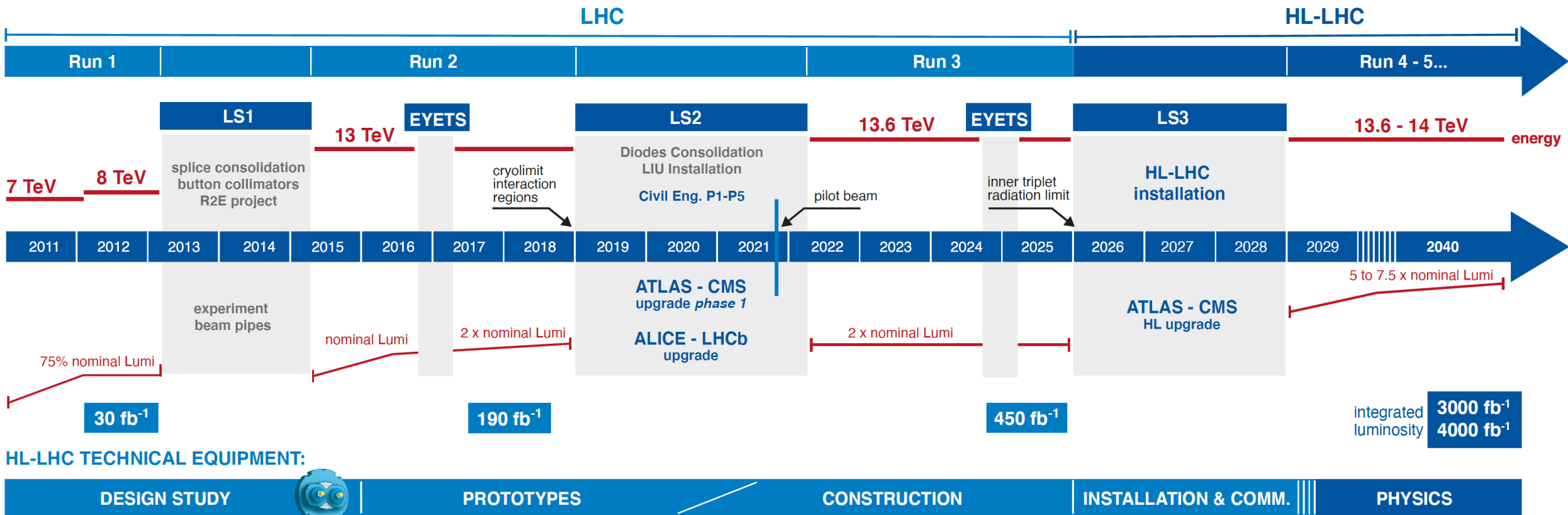
LHC/LHCのタイムスケジュール

2024/02/18

30th ICEPP Symposium



LHC / HL-LHC Plan



HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:

HL-LHC CIVIL ENGINEERING:



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