

ATLAS Muon Trigger 全体像

長野 邦浩 (KEK)

「先端加速器LHCが切り拓くテラスケールの素粒子物理学」 研究会

名古屋大学、2013年5月23日

Contents

- Review of 2012 triggers; $\sim 0.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @ 8 TeV
- Improvements for Run 2/Phase 1/2; $(2-5) \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @ 13-14 TeV

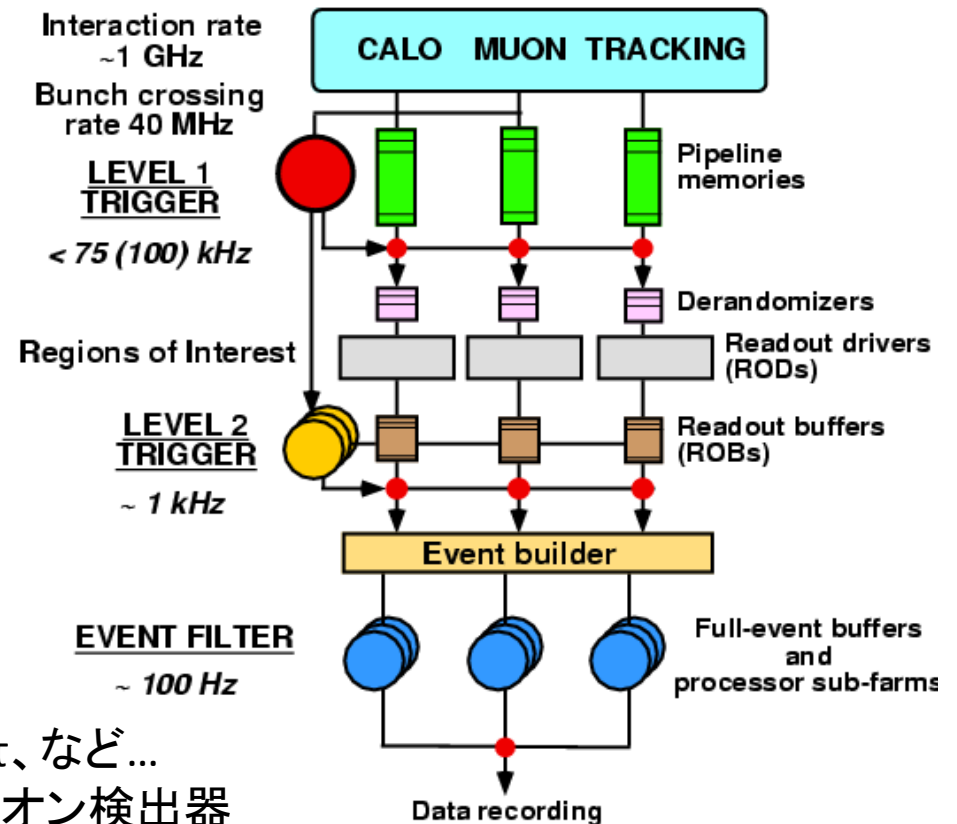
ATLASトリガー概要

- デッドタイム・フリー、マルチレベルトリガー
 - ー トリガー判断の前に(25/50 ns後)
次の衝突 → パイプライン処理
 - ー 低いS/N → マルチレベル

- トリガー出力レート
 - ー 最終的にディスクにデータを書き込める限界 (~200-1000 Hz)
 - * 衝突レート(40/20 MHz)から選別して落とす → 1/5000000

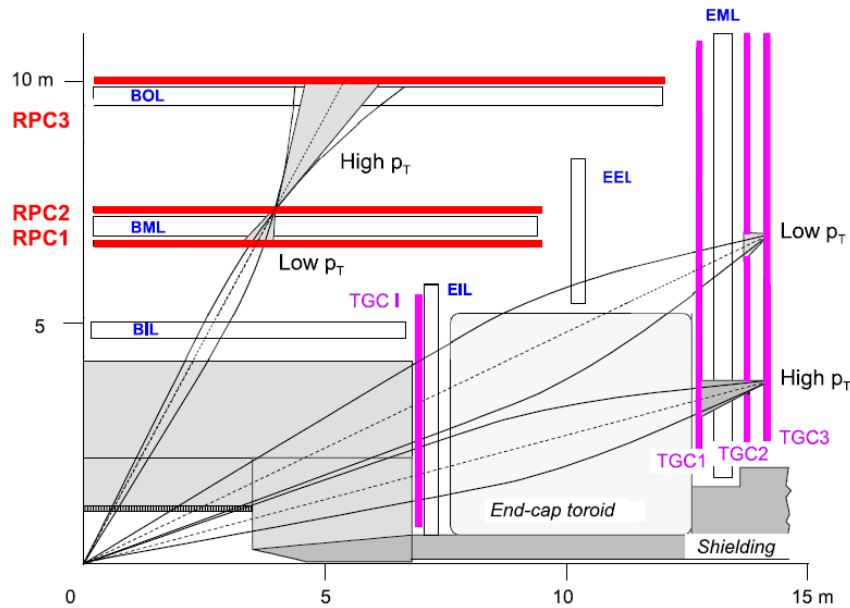
- 検出器に特徴的なシグナルを同定してトリガーする
 - ー 電子、ミューオン、ジェット、b、 τ 、など...
- 第1段トリガー(L1): カロリメータとミューオン検出器
カスタムメイド・エレクトロニクスで計算

- 第2段トリガー(L2): L1でみつけた「トリガーシグナチャー」の周り (Region of Interest)だけ詳細に読みだして、計算精度を上げる
- 第3段トリガー(EF): 検出器の全情報を使える。オフラインにほぼ近い。



Introduction: muon trigger

No sensible
resolution for
higher p_T than
 $p_T > \sim 30\text{--}40\text{ GeV}$



► L1: RPC/TGC

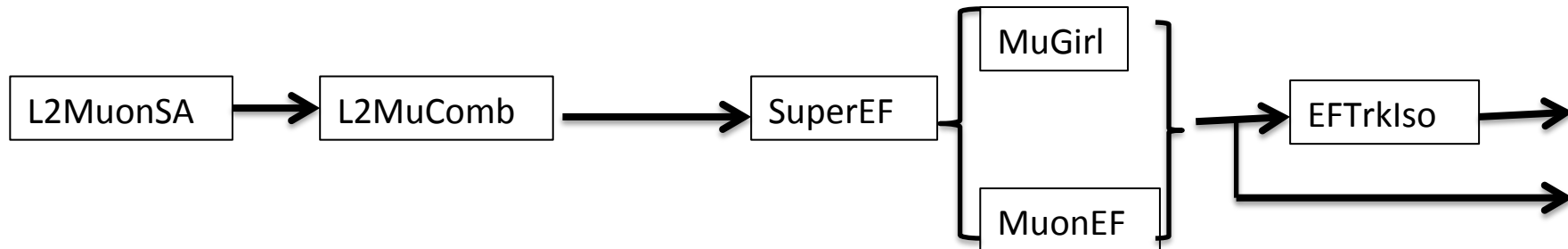
- p_T is calculated into 6 thresholds,
20, 15, 11, 10, 6, 4 GeV

**Expected seed
for Run 2 (see later)**

**Seed for single muon
trigger in 2012**

► HLT: Precision Muon trackers (MDT, CSC), Muon-ID combination, ID-Track/Calo isolation

- L2: trigger-specific reconstruction algorithms including muon geometry
- EF: Conditional OR between MuonEF (outside-in) and MuGirl (inside-out)



**In Run1: Track Isolation was used for single muon trigger (mu24i)
so as to maintain 24 GeV threshold**

2012 Baseline Triggers

- L1/L2 at Peak lumi= 7.0×10^{33}
- EF at Ave. lumi= 5.0×10^{33}

Topology	Trigger item	Trigger Rate (Hz)		
		L1	L2	EF
Single leptons (e) (μ) (τ)	e24vhi_medium1	17000	1030	77.1
	mu24i_tight	8100	330	43.9
	tau115_medium1(_llh)	5000	30	1.3 (2.7)
Two leptons (2e) (2 μ) (2 τ)	2e12Tvh_loose1	5600	70	6.9
	e24vh_medium1_e7_medium1	17000	170	3.0
	2mu13	600	8	5.6
	mu18_tight_mu8_EFFS	8100	540	8.5
	tau29Ti_medium1_tau20Ti_medium1	12100	430	11.1
	2tau38T_medium1(_llh)	5600	30	1.1 (1.7)
Two photons	2g20vh_medium	5600	130	10.3
	g35_loose_g25_loose	8000	60	11.0
	g30_medium_g20_medium	8000	110	7.4

◆ Slide shown in ATLAS Week, Oct 2012
 → Some numbers may be obsolete, just to give a rough view.

2012 Baseline Triggers

- L1/L2 at Peak lumi= 7.0×10^{33}
- EF at Ave. lumi= 5.0×10^{33}

Topology	Trigger item			
Single leptons (e) (μ) (τ)	e24vhi_medium1 mu24i_tight tau115_medium1(_lh)	● たとえば、single muon trigger: mu24i — $p_T > 25$ GeV offline — EW (W/Z)だけでなく、Higgs, Top, SUSY でも主トリガーとして幅広く使われている ● Di-muon では offline $p_T \sim 15$ GeV をカバー。Asymmetric では 18, 8 GeV ● Electron トリガーとほぼ同じしきい値		
Two leptons (2e) (2μ) (2τ)	2e12Tvh_loose1 e24vh_medium1_e7_medium1 2mu13 mu18_tight_mu8_EFFS tau29Ti_medium1_tau20Ti_medium1 2tau38T_medium1(_lh)			
Two photons	2g20vh_medium g35_loose_g25_loose g30_medium_g20_medium	12100 5600 5600 8000 8000	430 30 130 60 110	11.1 1.1 (1.7) 10.3 11.0 7.4

2012 Baseline Triggers

- L1/L2 at Peak lumi= 7.0×10^{33}
- EF at Ave. lumi= 5.0×10^{33}

Topology	Trigger item
Single leptons (e) (μ) (τ)	e24vhi_medium1 mu24i_tight tau115_medium1(_llh)
Two leptons (2e) (2 μ)	2e12Tvh_loose1 e24vh_medium1_e7_medium1 2mu13 mu18_tight_mu8_EFFS

- 効率 ~90% @ Endcap
(~70 % @ Barrel)

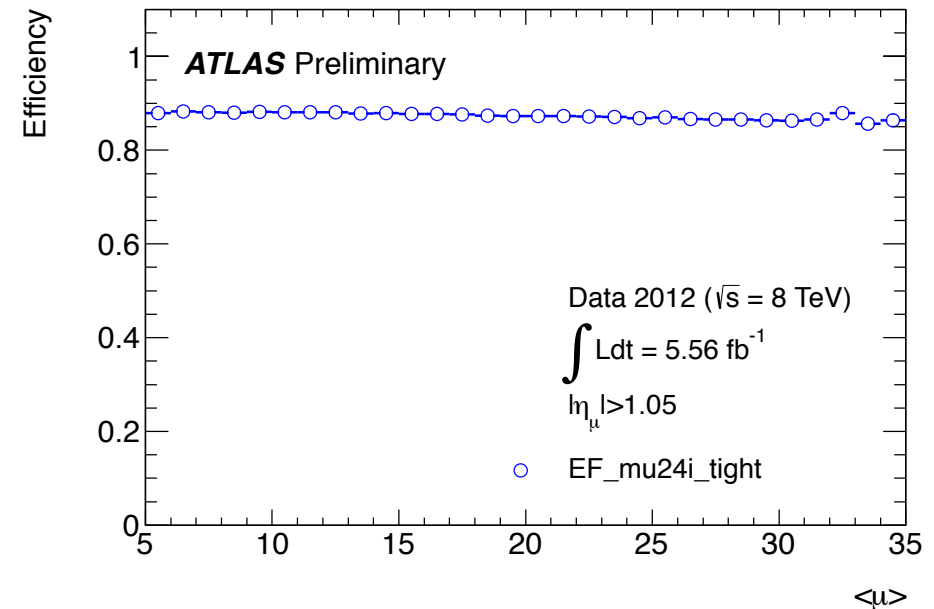
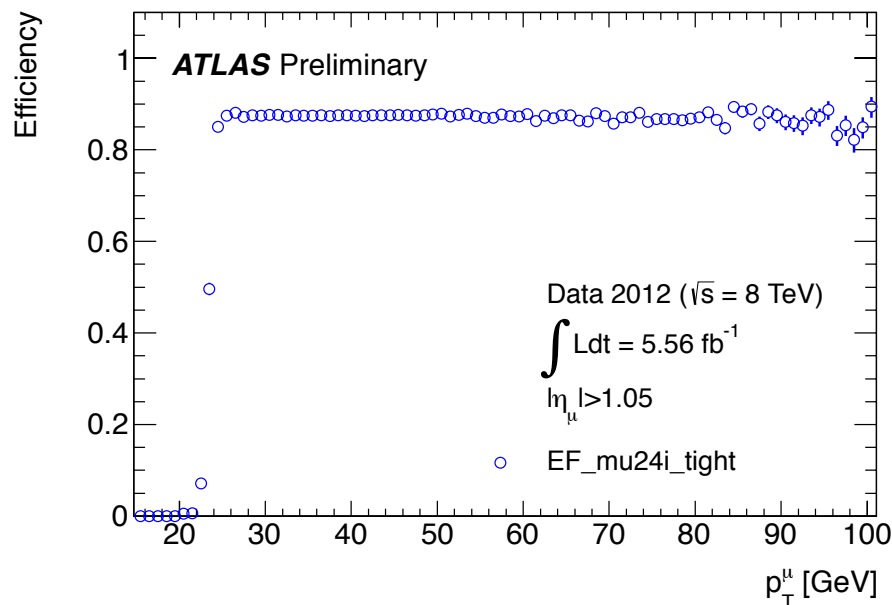
- パイルアップ(1バンチ衝突に重なって起こる陽子・陽子散乱事象数)にもよらず安定して高効率

- アイソレーション要求を、パイルアップ耐性があるように調整している

8100

540

8.5

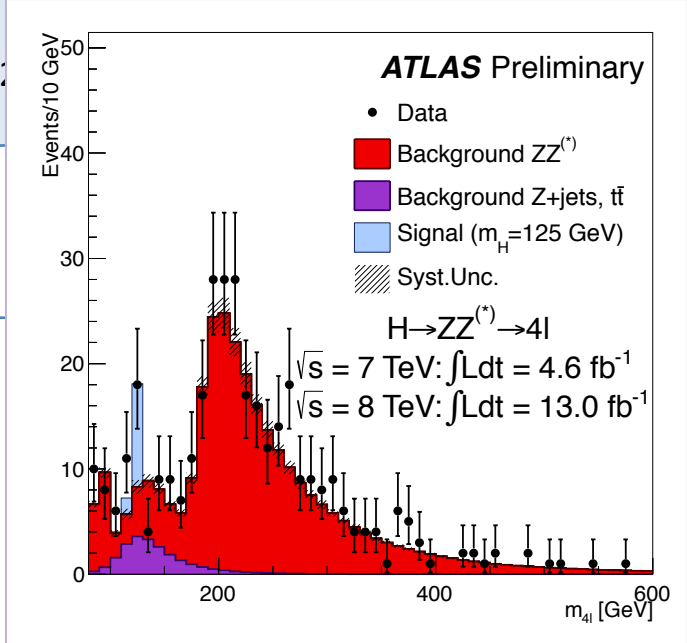


2012 Baseline Triggers

- L1/L2 at Peak lumi= 7.0×10^{33}
- EF at Ave. lumi= 5.0×10^{33}

Topology	Trigger item
Single leptons (e) (μ) (τ)	e24vhi_medium1 mu24i_tight tau115_medium1(_llh)
Two leptons (2e) (2μ)	2e12Tvh_loose1 e24vh_medium1_e7_medium1 2mu13 mu18_tight_mu8_EFFS
Two photons	

- 効率 ~90% @ Endcap
(~70 % @ Barrel)
- パイルアップ(1バンチ衝突に重なって起こる陽子・陽子散乱事象数)にもよらず安定して高効率
 - ー アイソレーション要求を、パイルアップ耐性があるように調整している
- ➔ Higgs 早期発見にもつながった



	5600	30	1.1 (1.7)
	5600	130	10.3
	8000	60	11.0
	8000	110	7.4

Run2 (2015-)以降

- ▶ Higgs 物理のためには、低い p_T しきい値を保ちたい ← $m(H) \sim 125 \text{ GeV}$
 - たとえば $WH (\rightarrow bb, \tau\tau)$ で W を single lepton でトリガーして
バイアスない解析をしたい、など
- ▶ 精密測定＝高統計を得るために高い瞬間輝度が必要
 - (同じトリガー選別なら) 輝度上昇に比例してトリガー頻度が増える
 - パイルアップ数も増え、よりトリガー選別が難しくなる

	2012	2015	
Bunch crossing interval	50ns	50ns	25ns
Max. Inst. Lumi. ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	7.5×10^{33}	1.5×10^{34}	2×10^{34}
Average p.u. at peak lumi, $\langle \mu \rangle$	35	80	55
Event size (MB)	1.5	2.1	1.7

- 2012 → 2015 : 瞬間輝度が ~ 2 - 3 倍、重心系エネルギーが ~ 1.6 倍、パイルアップ数が ~ 2 倍
→ 単純にトリガー頻度は 3 - 5 倍 ($+\alpha$) になる
- 限られた資源(計算時間など)で、この何倍もの難しい環境で
今と同程度の低い閾値が保てるのか? → 改良が必要

Level-1

- L1 読み出しレート限界を 75 → 100 KHz へ拡張
 - ― CSC 検出器の読み出し装置(ROD)の改良の予定
- L1 最終段(CTP)の直前に新規ハードウェア(L1Topo)を導入
 - ― Topological なカットを入れる事でしきい値を低くできる可能性
($\delta\eta$ cut for $H \rightarrow \tau\tau$, δR cut for $B \rightarrow \mu\mu$, など)

Offline Selection	Offline L1 Item	Threshold (GeV)	Rate [KHz]
Single Electron/Photon	EM28H (EM40H)	33 (45)	28 (7)
	EM50	60	8.6
$e/\gamma + 2\text{-jet}$	(EM20H_3J15)	(25,50(jet))	(4)
$e/\gamma + E_T^{\text{miss}}$	(EM20H_XE35)	(25,130(met))	(7)
Dielectron/Photon	2EM15H	2x20	10.3
Single Muon	MU20	25	25.6
Dimuon	2MU11	2x13	6.6
$e/\gamma + \mu$	EM15H_MU10	20,12	4.9
$2e/\gamma + \mu$	2EM8H_MU10	2x12,12	4
$e/\gamma + 2\mu$	EM8H_2MU6	12,2x8	2.2
Single Tau	TAU60	150	10.2
Ditau	2TAU30_TAU40	100,80	9.4
Ditau+jet	2TAU15I_3J15	2x40,50(jet)	14.3
$\tau + e\text{-jet}$	2TAU15I_EM15H_3J15	40,20,50(jet)	8.3
$\tau + \mu$	TAU15I_MU10	40,15	7.4
$\tau + E_T^{\text{miss}} + 2\text{-jets}$	TAU20I_XE40_3J15	50,90,50(jet)	2.5
Single Jet	J100	250	4.9
Multijet	4J20	4x60	2.9
Jet+ E_T^{miss}	J75_XE40	200,150	5.4
Pure E_T^{miss}	XE60	190	2.7
Others	topo		20

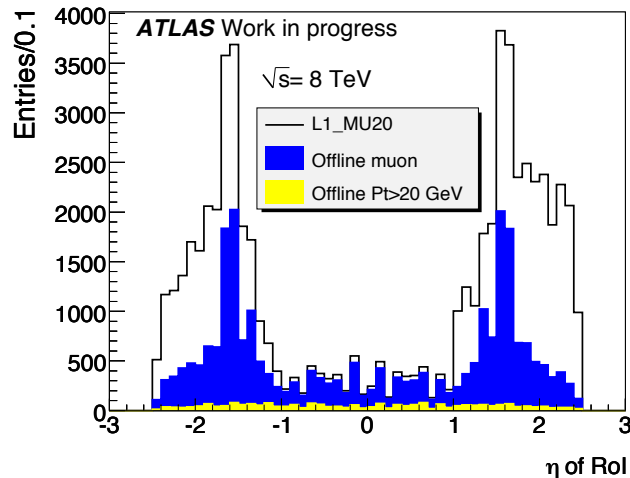
- L1 Caloトリガー($e/\gamma/\text{jet}/\text{tau}/\text{mET}$)は今の読み出し精度では e/jet フェイクも大きくなり、pileup依存も大きく、難しい
 - ― Phase 1 へ向けて改良計画(江成さんのトークを参照)
- L1 Muonトリガーは MU20 閾値のレートを抑える事が必須
 - ― これより上は MU40....
 - ― $p_T > 25$ GeV 物理に必要

2015 Straw-man menus
Plan A (Plan B)

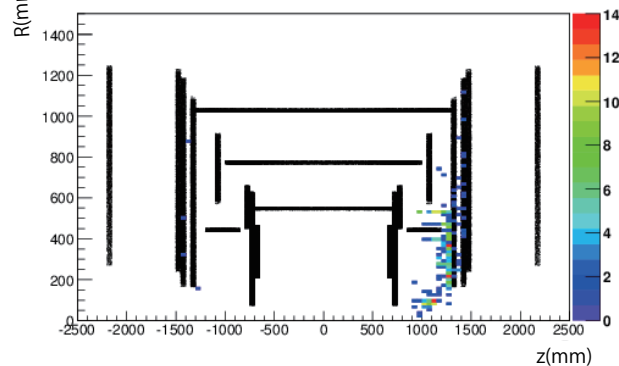
Level-1 Muon

▶ エンドキャップ領域の大半を占める“fake”の排除が必要

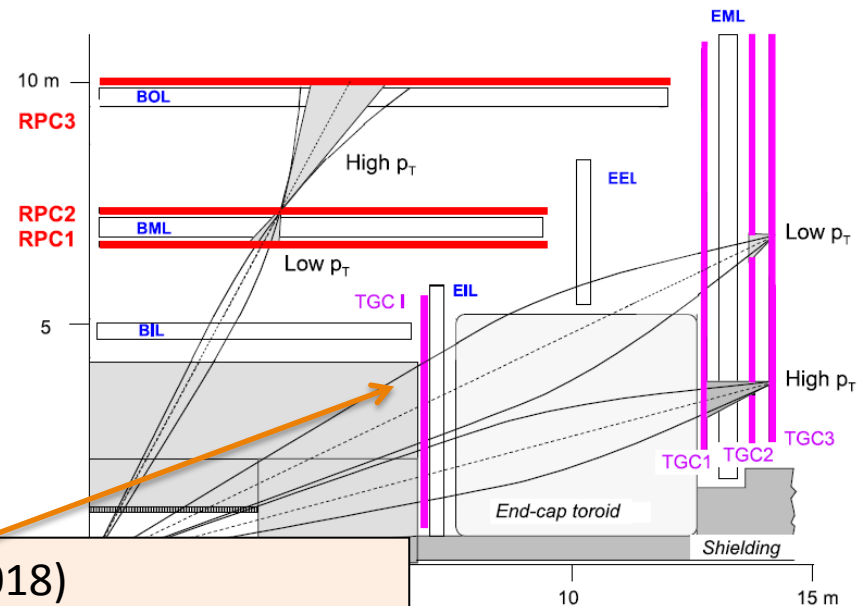
- MU20: 89.5% at TGC, 59% of which do not have offline tracks



- Generated location of protons which causes TGC trigger (by dedicated FLUKA+G4 simulation), showing they are generated at toroid magnets and shields.



- ー トロイド磁石やシールドで生成された二次粒子中の陽子がTGCを通過して“fake”トリガーが発行される
- ー 内層の検出器との位置、角度のコインシデンス要求が有効

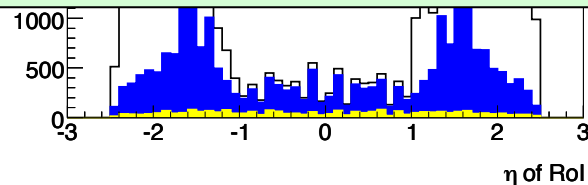


Run2 (2015-2018)
 現行のTGCIとの位置相関を取る

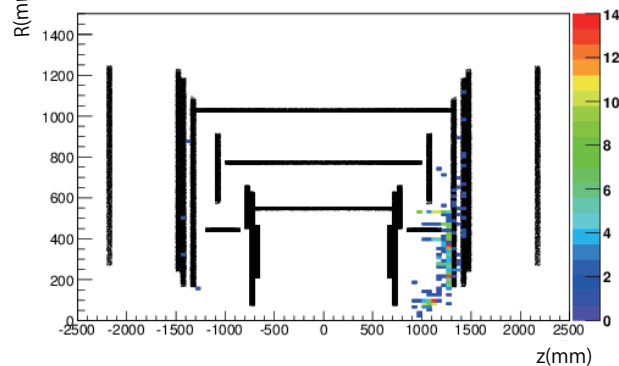
Level-1 Muon

▶ エンドキャップ領域の大半を占める“fake”の排除が必要

- ❑ L1 Muon については、
藏重さんのトークをご参照
ください
- ❑ New Small Wheel については
片岡さんのトークをご参照
ください

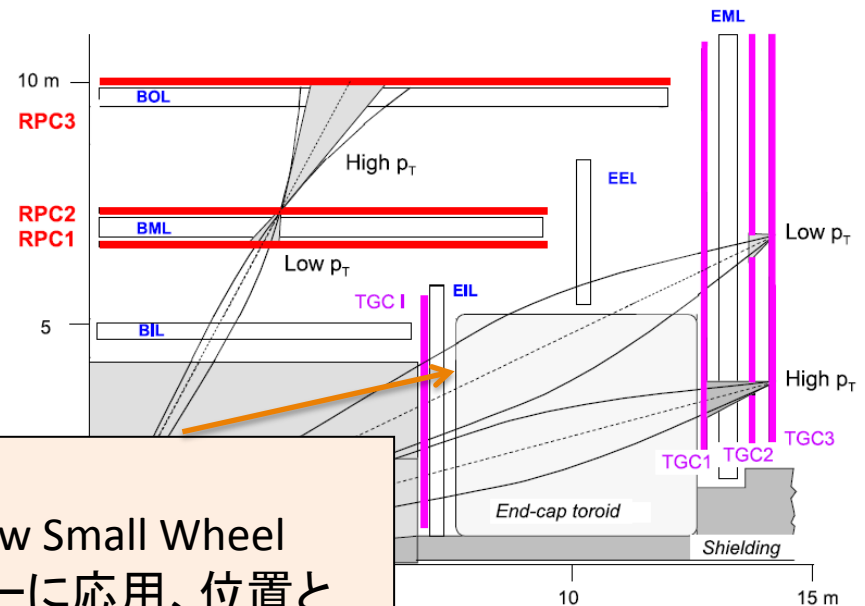


● Generated location of protons which causes TGC trigger (by dedicated FLUKA+G4 simulation), showing they are generated at toroid magnets and shields.



Phase 1
新規導入のNew Small Wheel
(NSW)をトリガーに応用、位置と
角度のコインシデンスを取る

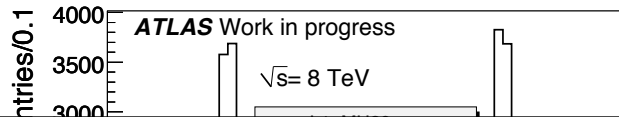
- ー トロイド磁石やシールドで生成された二次粒子中の陽子が TGC を通過して
“fake”トリガーが発行される
- ー 内層の検出器との位置、角度の
コインシデンス要求が有効



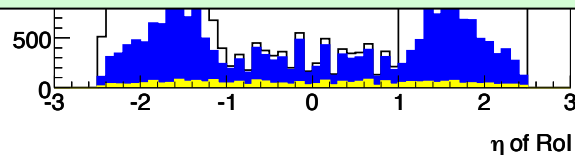
Level-1 Muon

▶ エンドキャップ領域の大半を占める“fake”の排除が必要

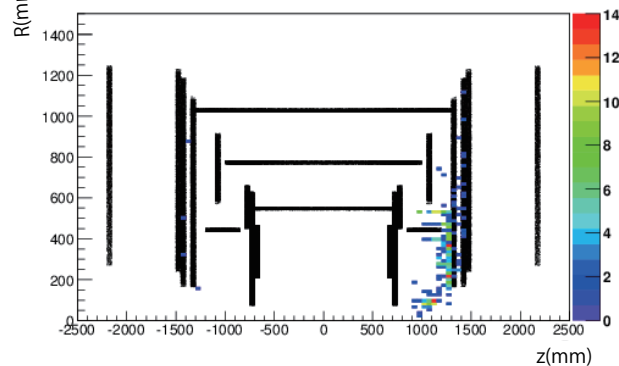
- MU20: 89.5% at TGC, 59% of which do not have offline tracks



❑ L1 Muon については、
藏重さんのトークをご参照
ください

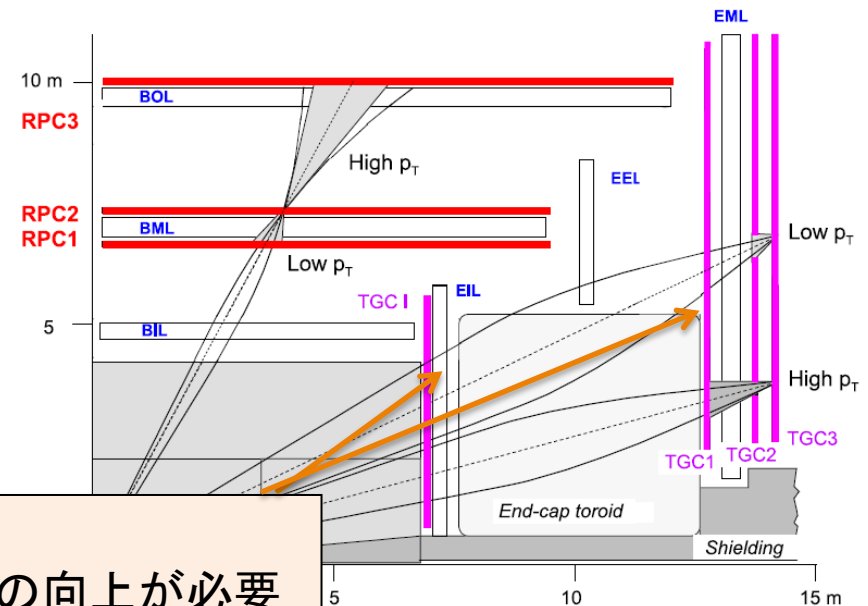


- Generated location of protons which causes TGC trigger (by dedicated FLUKA+G4 simulation), showing they are generated at toroid magnets and shields.



Phase 2
運動量分解能の向上が必要
L1トリガーでMDT使用

- ー トロイド磁石やシールドで生成された二次粒子中の陽子が TGC を通過して “fake”トリガーが発行される
- ー 内層の検出器との位置、角度のコインシデンス要求が有効



HLT Muon

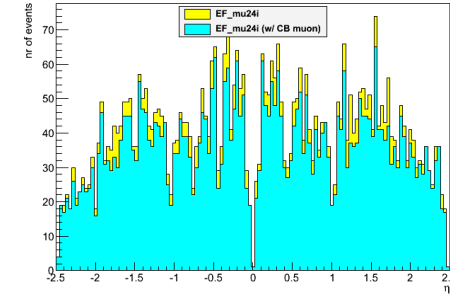
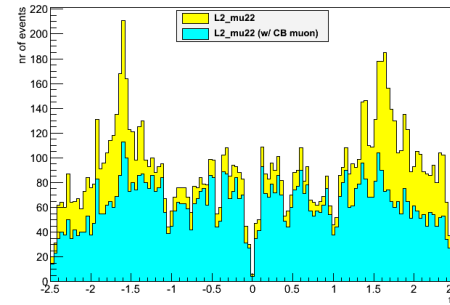
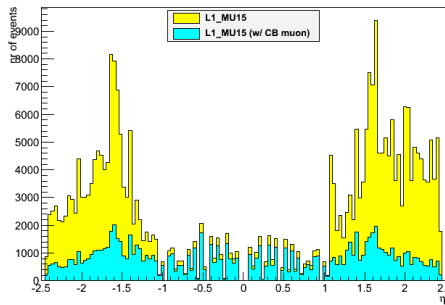
- ▶ 効率 ~ 98-99% (L1に対する)
- ▶ Purity > 90% : ほとんどが実ミュオン

Yellow: triggered,
Cyan: w/ offline CB
muon

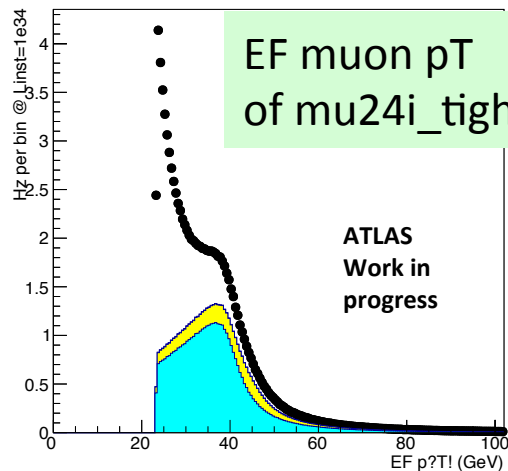
L1_MU15

L2_mu24_tight

EF_mu24i_tight



- ▶ ミューオン起源: Single muon トリガーに緩いアイソレーションを導入後 (2012年)

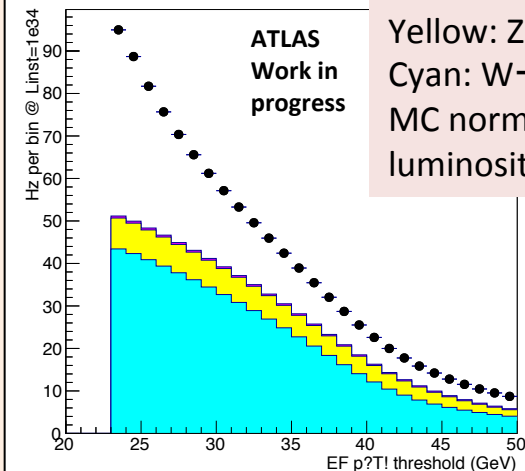


EF muon pT
of mu24i_tight

ATLAS
Work in
progress

8 TeV, $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で
mu24iトリガーの
~100 Hz記録レートのうち
~ 50 HzはW/Zからの μ

→ Phase 1では(Run2も
おそらく)Wを全部記録す
ることは出来ない

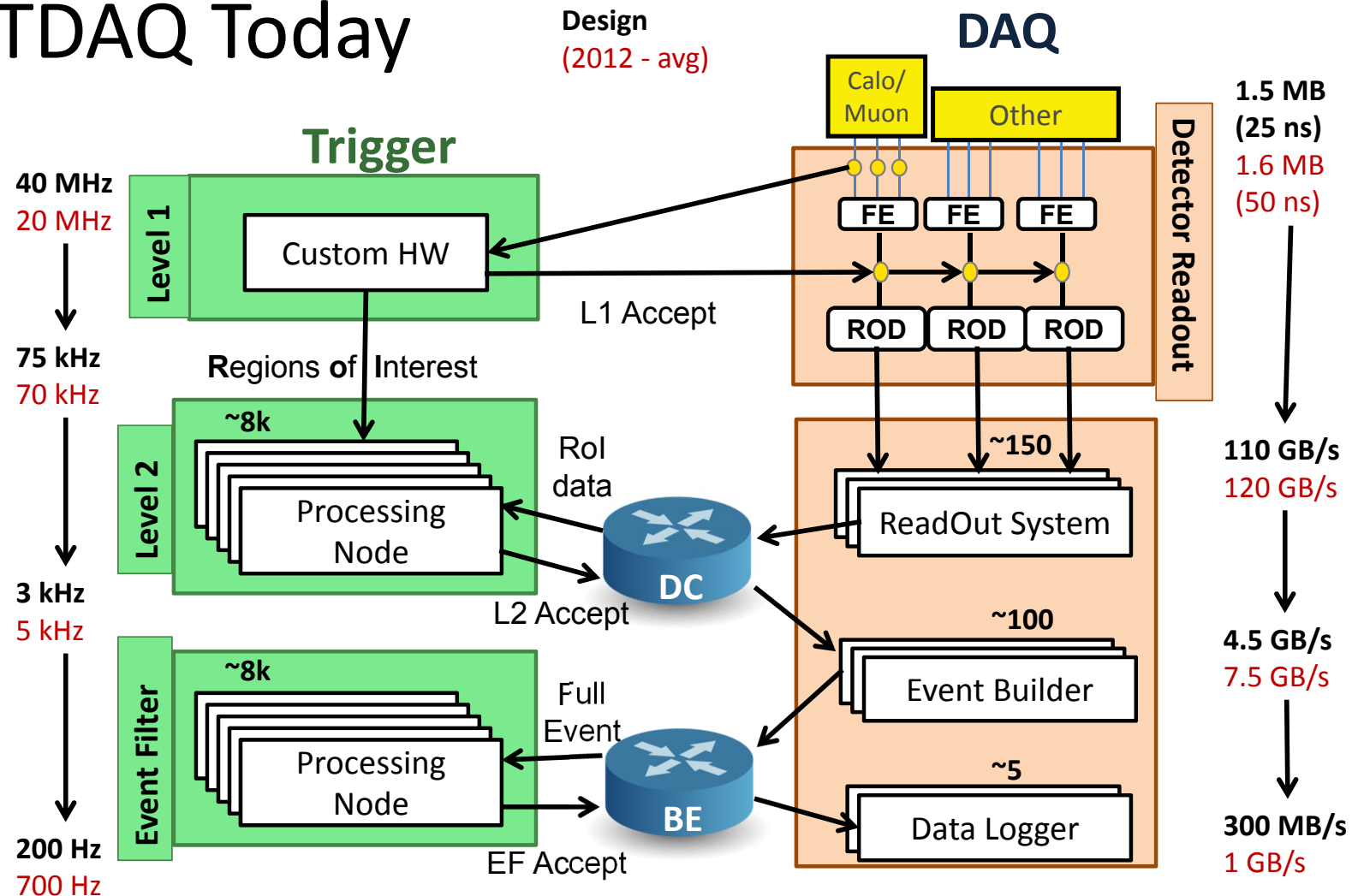


Yellow: $Z \rightarrow \mu\mu$ MC
Cyan: $W \rightarrow \mu\nu$ MC
MC normalized with
luminosity

HLT

1. 記録レート、 2. CPU(計算時間)、 3. データ読み出しレート の制限

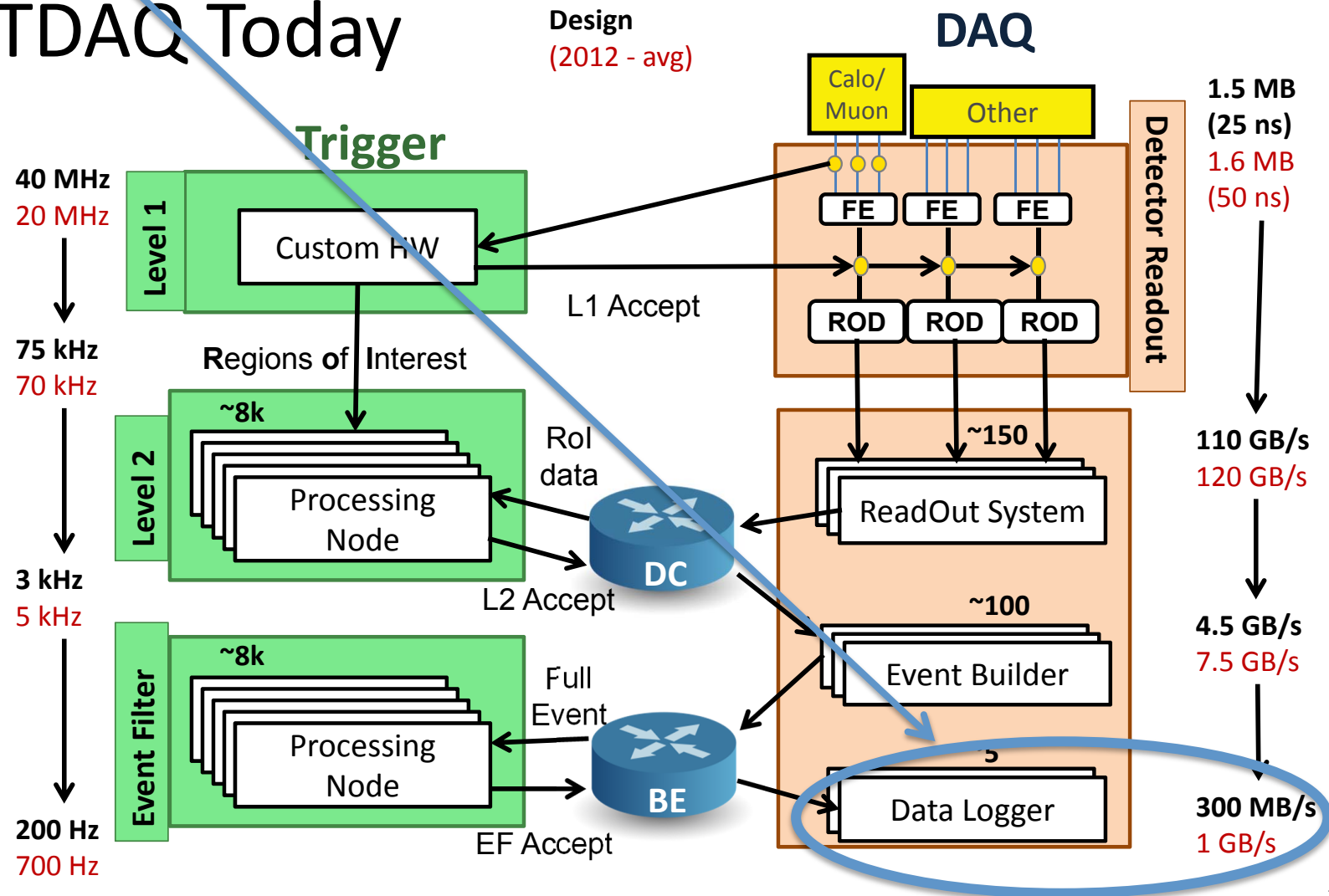
TDAQ Today



HLT

1. 記録レート、2. CPU(計算時間)、3. データ読み出しレート の制限

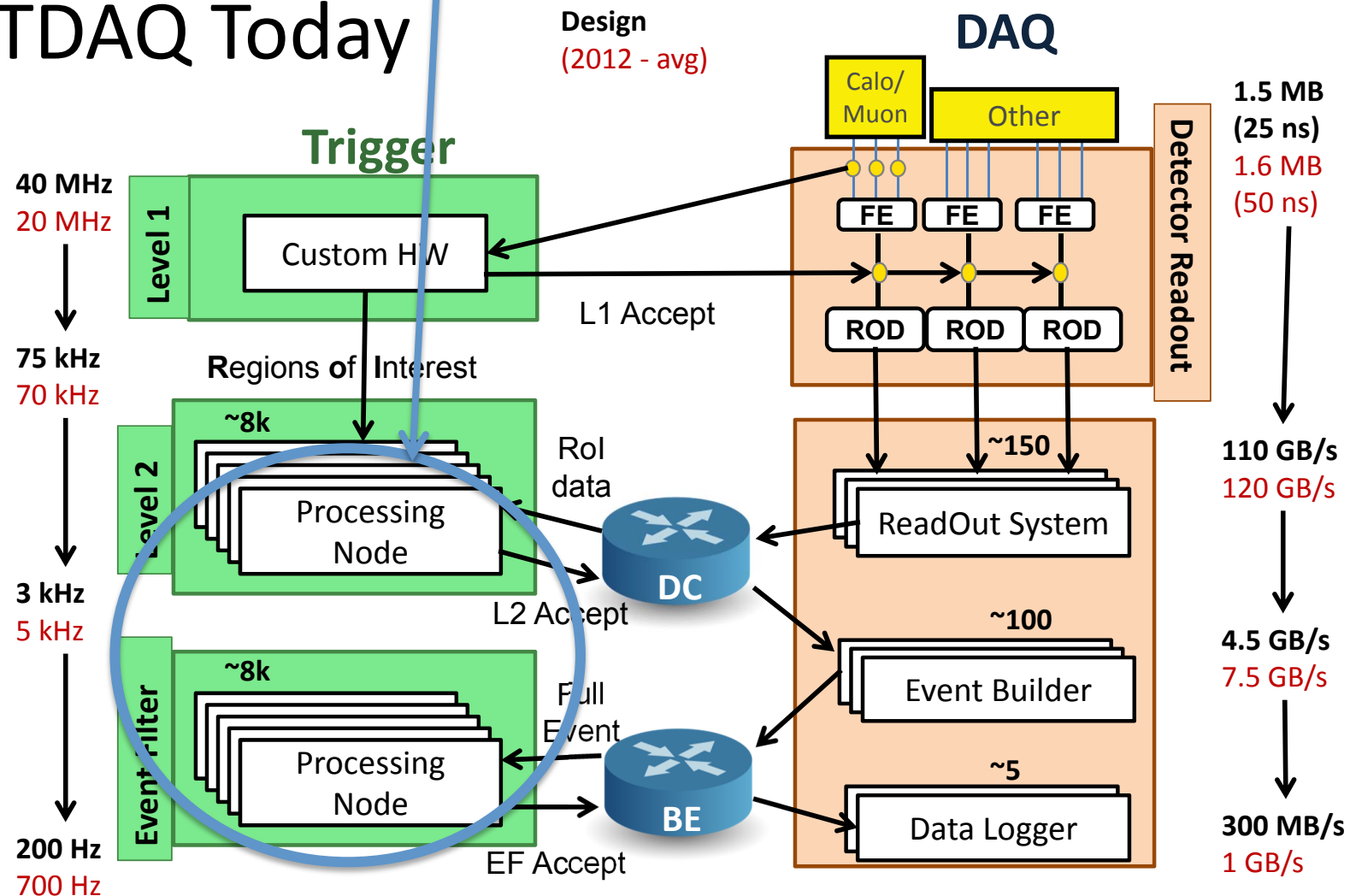
TDAQ Today



HLT

1. 記録レート、 2. CPU(計算時間)、 3. データ読み出しレート の制限

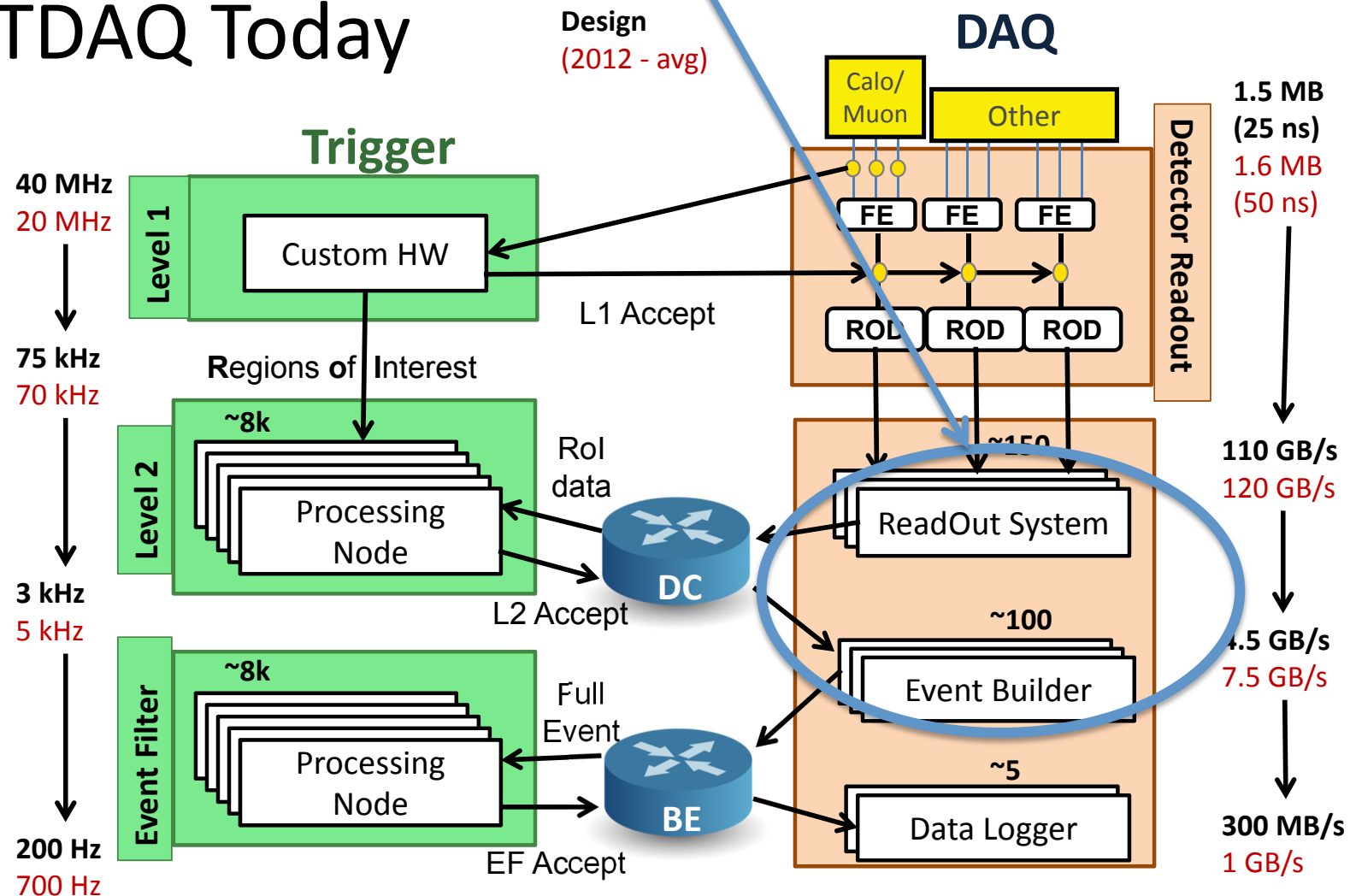
TDAQ Today



HLT

1. 記録レート、 2. CPU(計算時間)、 3. データ読み出しレート の制限

TDAQ Today



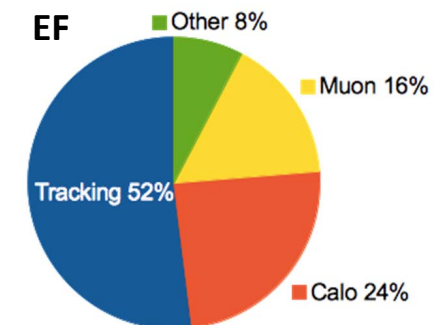
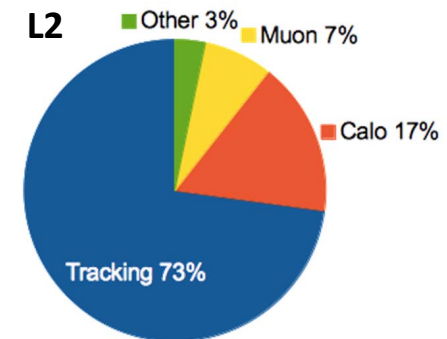
HLT

1. 記録レート、 2. CPU(計算時間)、 3. データ読み出しレート の制限

- (しきい値を下げず)記録レートを下げるには、より精度の高い／複雑な計算が必要 $\leftrightarrow$ CPUの制限
- 2015年運転では、パイラアップ増／L1入力増などで、現状のままでもCPU使用量は13.5 kCore $\rightarrow$ 31 (61) kCore @ $\langle\mu\rangle=55$ (80)

- $\rightarrow$ ① アルゴリズム速度の向上 (目標 $\sim$ 3倍速)
- Calo クラスタリング: jet, mET, τ で必要
 - ID Tracking: FTKを種にして速く(後述)
- $\rightarrow$ ② 処理シーケンスの最適化
- 速いリジェクションが大事
 - $\rightarrow$ 遅いが正確な計算をする時間を稼ぐ
- $\rightarrow$ ③ 不要な読み出しは避ける
- 現状 EF の多くは RoI ベース(全データ不要)

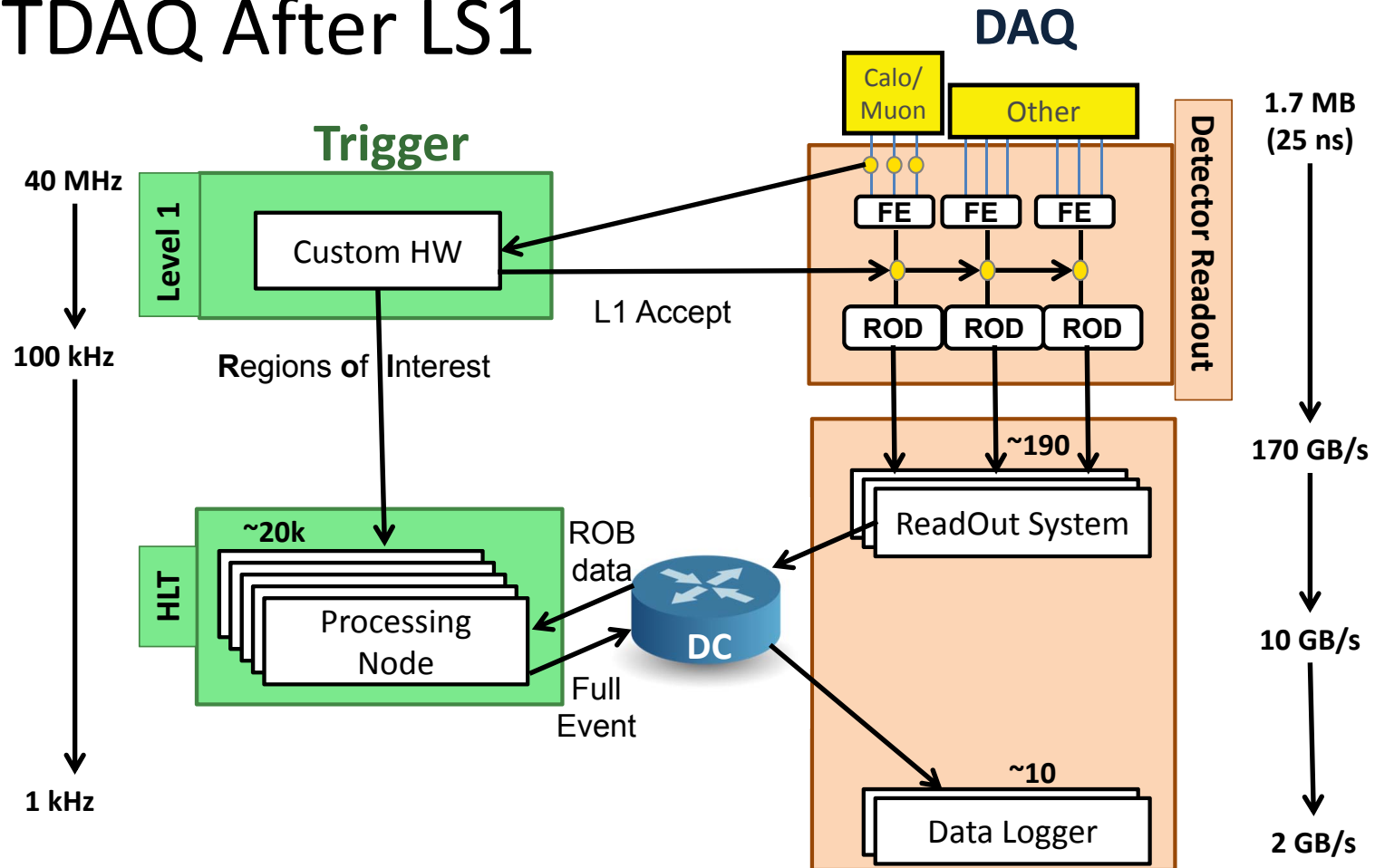
RoI 内で出来る事象選別はL2 $\rightarrow$ EFと
全部やってから、イベントビルドする



HLT

1. 記録レート、 2. CPU(計算時間)、 3. データ読み出しレート の制限

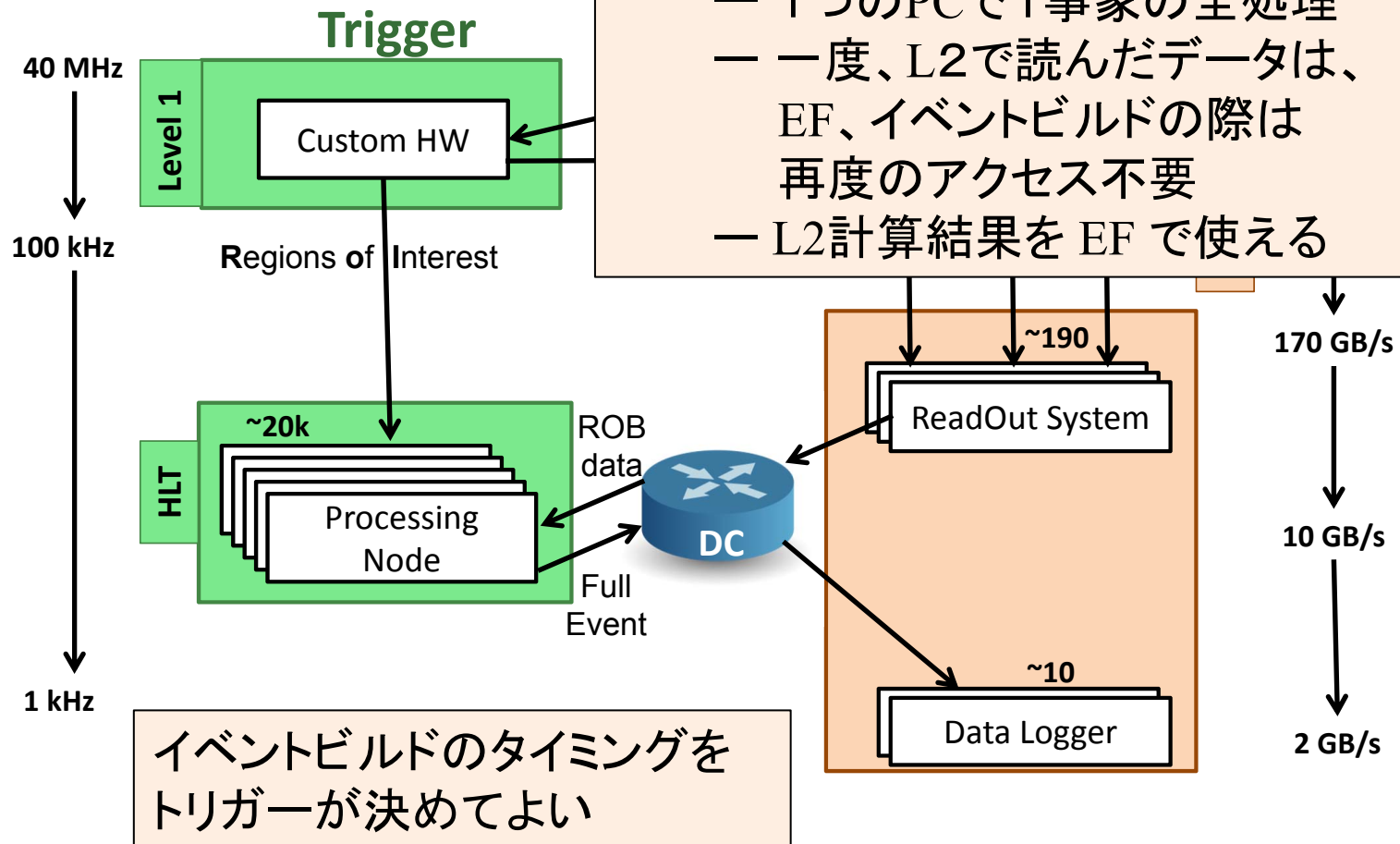
TDAQ After LS1



HLT

1. 記録レート、 2. CPU(計算時間)、 3. データ読み出しレート の制限

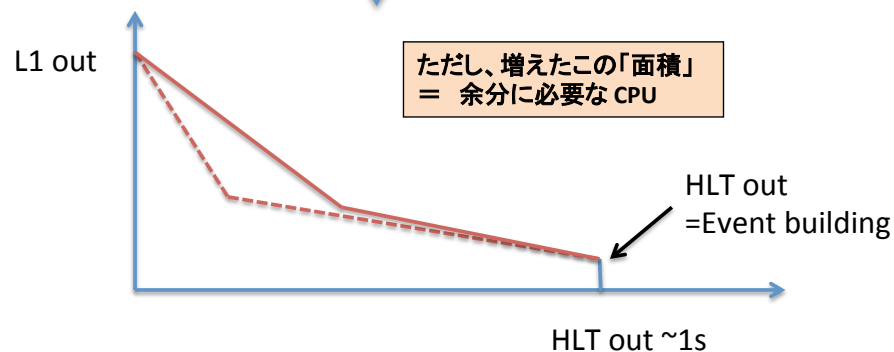
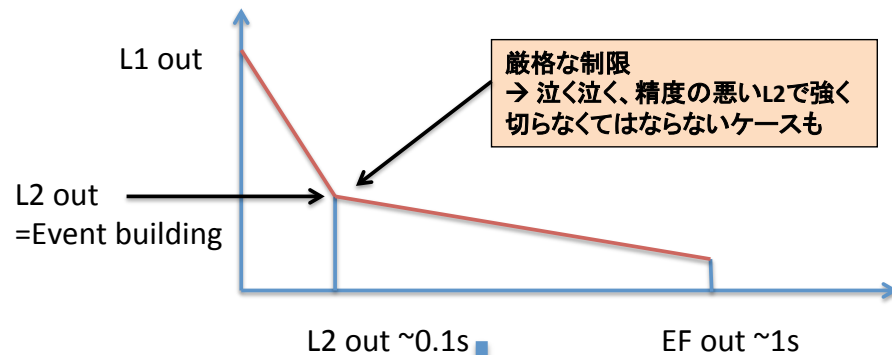
TDAQ After LS1



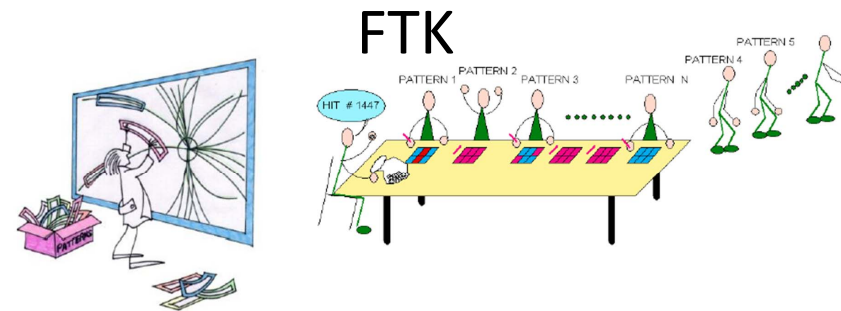
Fast Tracker (FTK)

- ▶ 速く、こつこつ、トリガーレートを削って行き、時間のかかる複雑な計算をする時間を稼ぐ事が重要

L2-EF mergingでL2の仕切りを自由に決められるからと言って、いきなり最初から時間のかかる計算を投入は出来ない



- FTK : “L1.5 Tracking”
 - ハードウェア(FPGA)でトラッキング
 - HLT処理の最初の段階で全トラックを供給
 - 2015年から導入予定



- 速い Track Isolation
- MVA-tau, B-tagging, track MET
- # of vertex for pileup 補正

□ FTK については、明日の木村さんのトークをご参照ください

HLT Muon

▶ 速いアルゴリズムの事象排除率の増強

— L2 ミューオン検出器単体アルゴリズム

- * ~ 1 ms の計算速度だが、運動量再構成にテールが出るため、強い事象選別は行っていない
(主な用途はIDとのマッチング)

➔ パターン認識アルゴリズムの改良、
特殊チェンバーの積極利用など

▶ FTKを用いた改良

— FTKバーテックス数によるパイルアップ補正

- * Isolation カットのパイルアップ耐性の強化

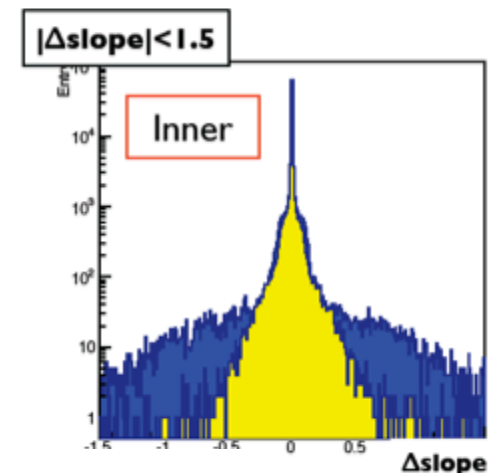
— FTKトラックをシードとした、ミューオン再構成

- * FTKからミューオン検出器へ外挿。

L1 ミューオントリガー検出器の
アクセプタンスを回復

— FTKトラックを用いた速い事象選別

- * FTKトラックを用いた Isolation 要求
- * FTKトラックを用いた MS-ID コンビネーション

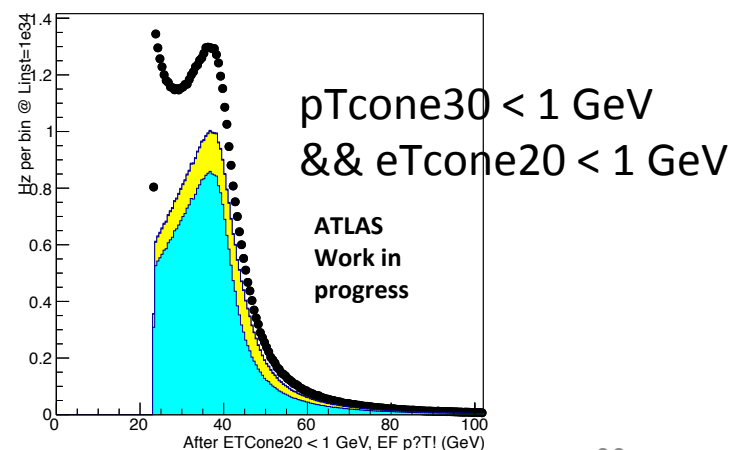


▶ Single muon $p_T > 25$ GeV

— 非常に強いIsolation

を使ってもレートが厳しい

➔ Wを全部取る事は出来ない



Muon HLT については、石塚さんの
トークをご参照ください

まとめ

- 2012年運転でsingle muonトリガーは、Isolation 要求を入れるなどして、L1 しきい値 15 GeV, HLT しきい値 24 GeVでデータ取得できた。
- Higgs質量が低い事もあり、2015年以降も $p_T = 20\text{-}25$ GeV ミューオンをトリガーする事は重要であるが、しかし、トリガー頻度を抑えるためには大きな改良が必要
- L1ミューオンでは、フェイクトリガーを抑えるために 2015 年に向けて現在の TGC EI チェンバーとの位置相関を取るアルゴリズムを導入する改良を行う。Phase 1では、新しく入れ替えられる Small Wheel チェンバーをトリガーにも使用し、角度と位置の相関を取る事でフェイクトリガーをほぼ削減する改良を行う。Phase 2では、運動量分解能を向上させるために MDT をL1トリガーで使用するR&Dを進めている。
- HLTでは 2015 年に向けて L2 と EF を統合させる改良を行う。これにより、イベントビルドのタイミングを各トリガーで最適化して無駄なデータ読み出しを抑える。
- また、2015年から HLT 処理の最初の段階でのハードウェアによるフルトラッキングを行うFTKを導入する改良を行う。全トラックであることやバーテックス情報を生かした改良や、速い事象除去を行う。