

# ATLAS 実験 Run-3 に向けた複数のミュオン検出器情報を統合するトリガーロジックの開発と性能評価

---

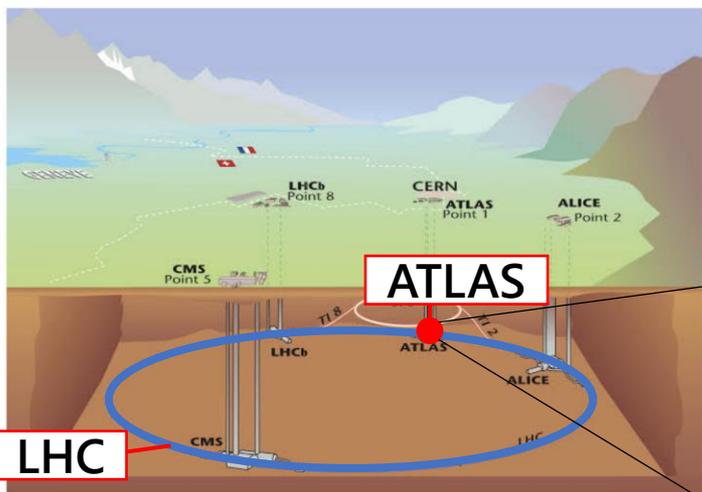
京都大学 吉村宣倅

ICEPP シンポジウム

2021/2/20



# LHC-ATLAS 実験



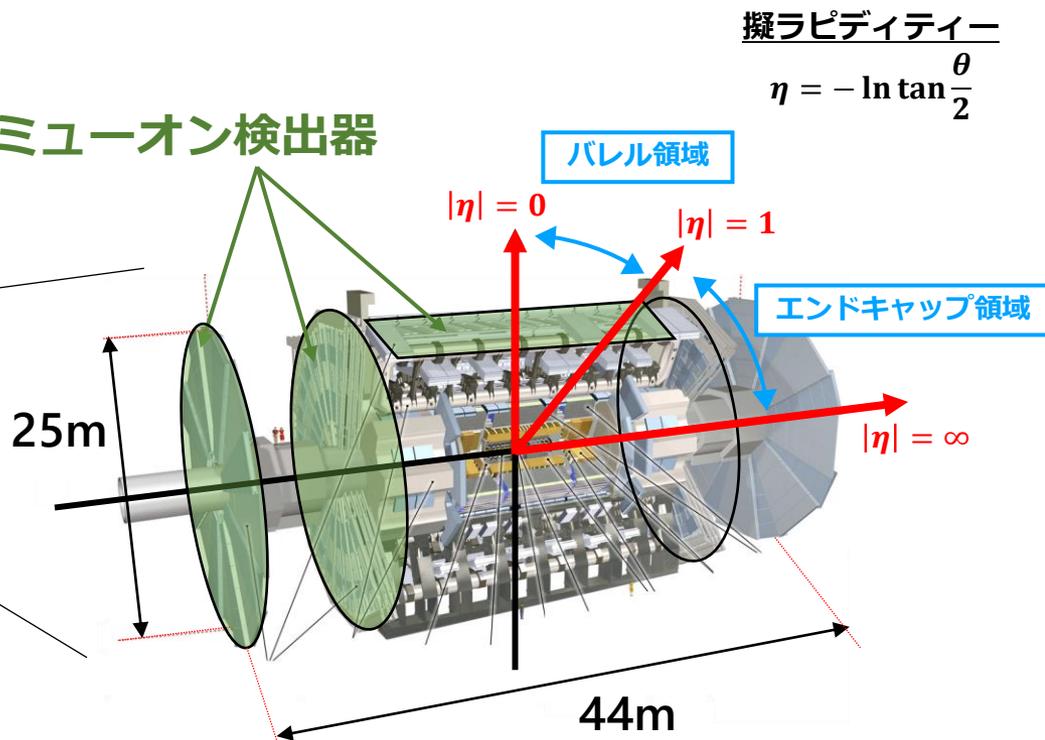
## 陽子陽子衝突型加速器 LHC

- 周長 27 km
- 陽子バンチ交差頻度 40 MHz

## ATLAS 検出器

- 衝突点での物理過程を再構成し、ヒッグス粒子の精密測定や新物理探索を行う。
- 2022年5月から  $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ ,  $L = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  で Run-3 が開始予定

## ミュオン検出器



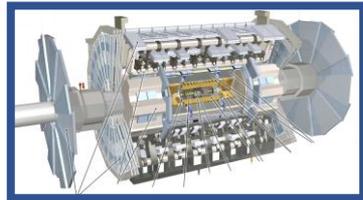
# 初段ミュオントリガー

陽子バンチ交差頻度

40 MHz

100 kHz

(平均 200~300 ms)



## 初段トリガー

- ・ミュオン
- ・カロリメータ

2.5  $\mu$ s 以内

ハードウェアを用いた  
高速なトリガー判定

## 後段トリガー

(数 s 程度)

ソフトウェアを用いた  
より精密なトリガー判定

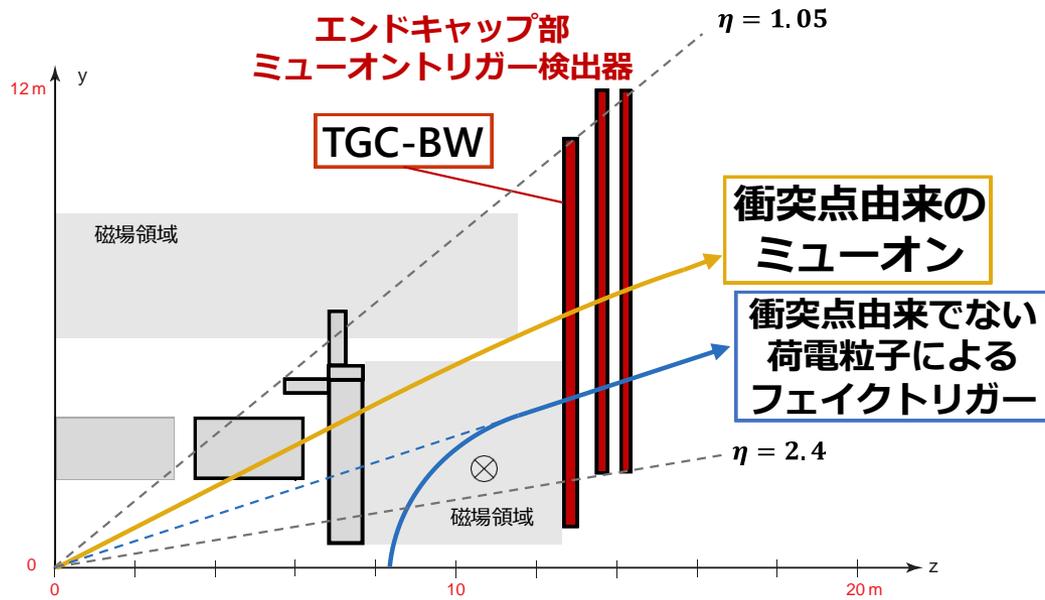
データ記録

- ✓ 衝突事象全ては記録できない
  - ✓ 興味のある事象は低確率でしか生じない
- ⇒ “トリガー” を用いて事象選別する

## ● 初段ミュオントリガー

- ミュオンの横方向運動量( $p_T$ )に閾値を設けることでトリガーする。
- 複数の閾値を用意することで幅広い運動量のミュオンに対応する。
- 初段ミュオントリガーのレート上限は初段全体で 100 kHz のうち約 19 kHz
- 物理感度を上げたり、他のいろいろな物理トリガーを導入するために  
トリガーレートを低くする必要はある。

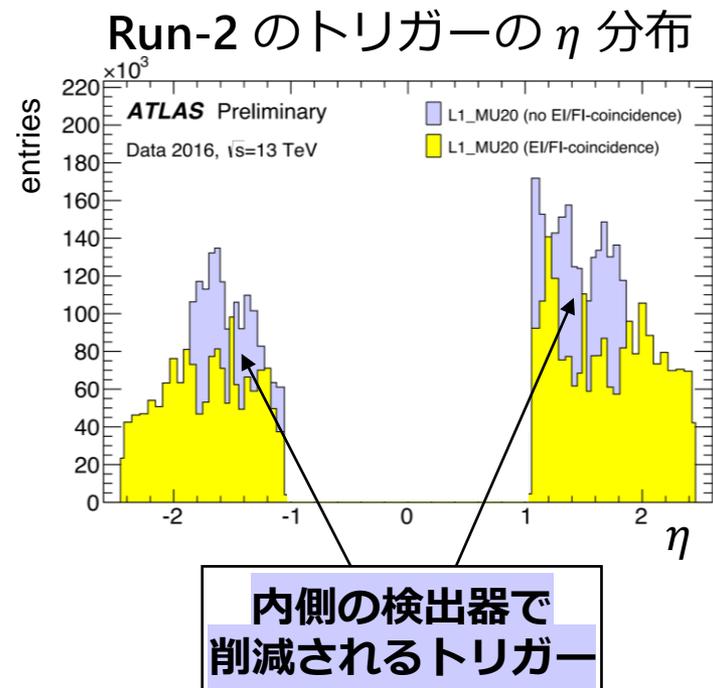
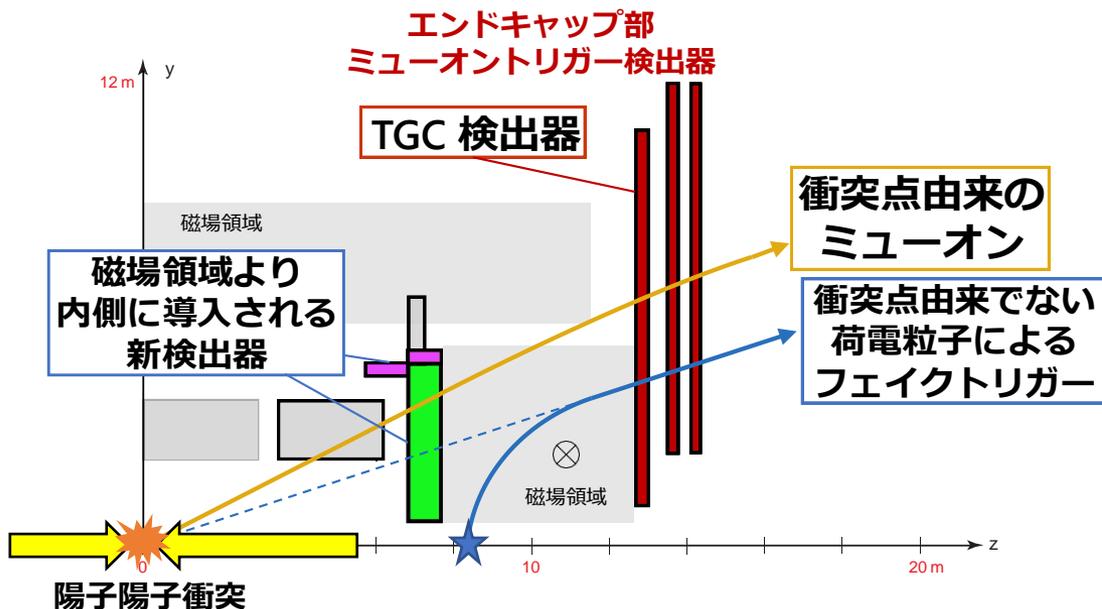
# 初段ミュオントリガーの問題点



## TGC-BW (Big Wheel)

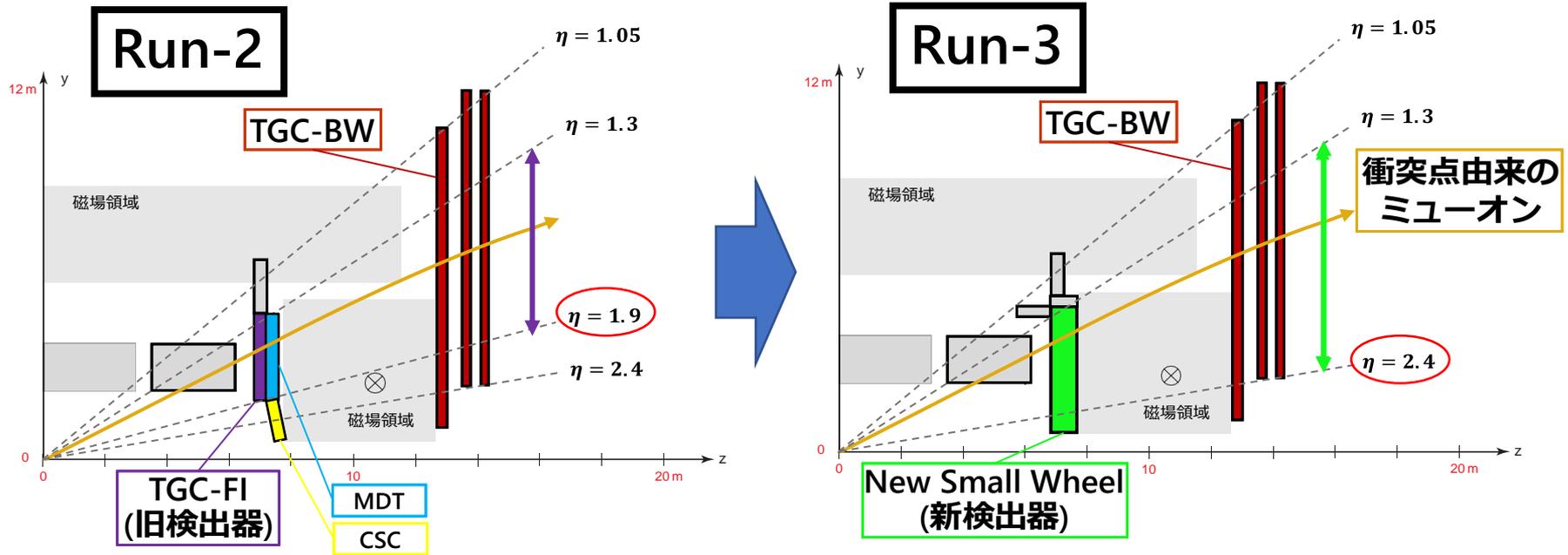
- 全 7 層 Thin Gap Chamber 検出器
  - 層ごとのヒット位置情報( $R, \phi$ )
  - 層間で飛跡再構成を行う。
- 初段エンドキャップ部ミュオントリガーでは、衝突点由来でない荷電粒子によるフェイクトリガーが大きな割合を占め、トリガーレートが上がる要因となる。

# フェイクトリガーの削減



- **TGC 検出器**と**磁場内側の検出器**でコインシデンスを取ることで、ミュオンに対するトリガー効率を維持しながらフェイクトリガーを削減し、トリガーレートを抑える。
- アップグレードにより導入される新検出器を用いたコインシデンスアルゴリズムの開発と性能評価を行った。

# ミュオン検出器のアップグレード



## 旧 TGC-FI

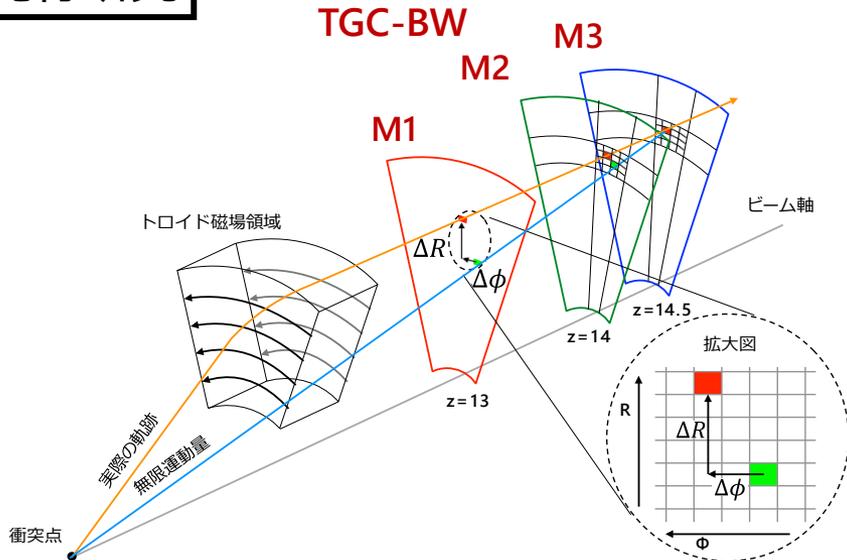
- カバーする領域  $1.3 < \eta < 1.9$
- 全 2 層
- ヒット位置情報( $R, \phi$ )

## 新 NSW (New Small Wheel)

- カバーする領域  $1.3 < \eta < 2.4$
- 全 16 層
- 高分解能のヒット位置情報( $\eta, \phi$ )
- 飛跡再構成による角度情報

# TGC-BW 単体のコインシデンス

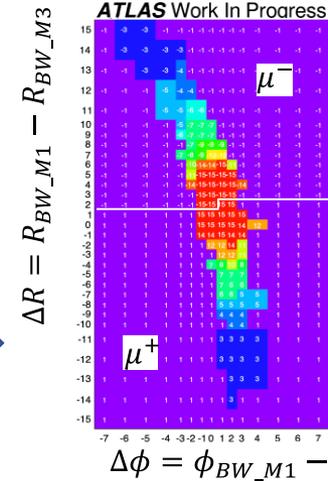
先行研究



磁場の影響で R 方向だけでなく  $\phi$  方向にも曲がる

Coincidence Window(CW)

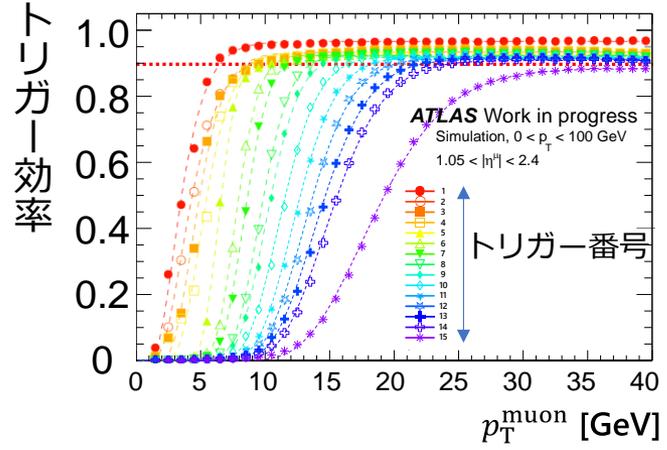
相対位置  
( $\Delta R, \Delta\phi$ )



$p_T$  を判定

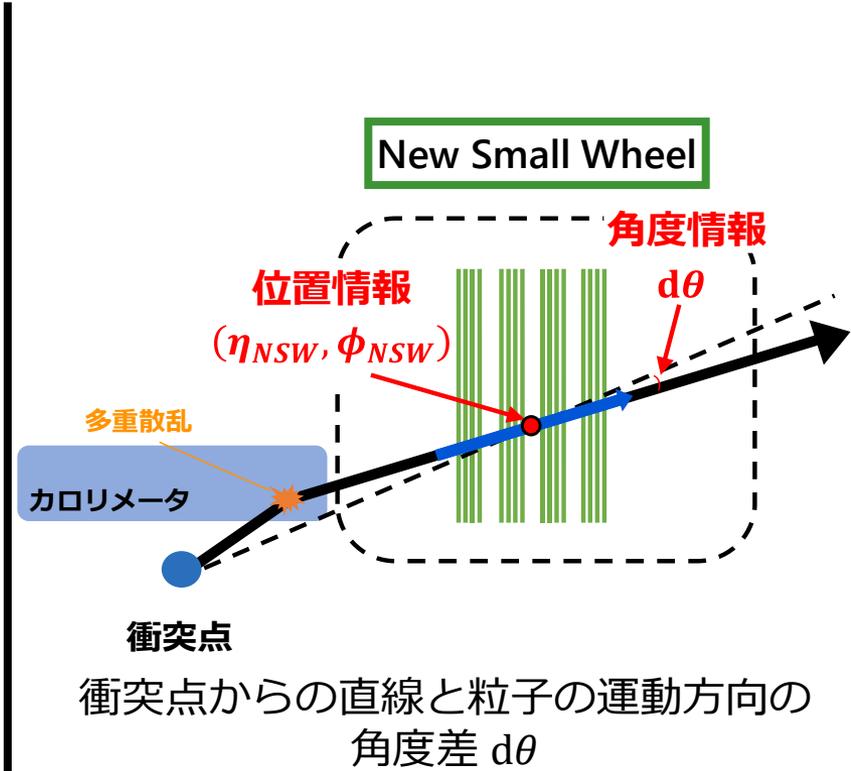
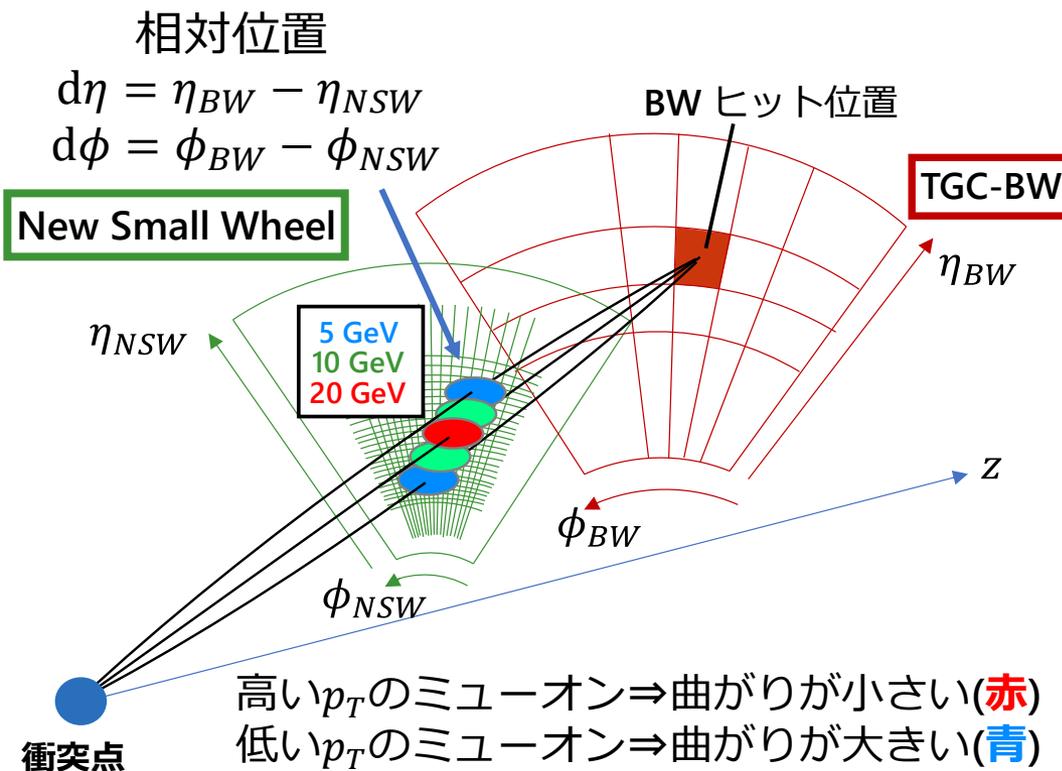
BW コインシデンスのトリガー効率

- ミューオンの  $p_T$  によって曲がり方が異なり、相対位置( $\Delta R, \Delta\phi$ )が変化する。
- TGC-BW のヒットの相対位置( $\Delta R, \Delta\phi$ )から CW を参照して  $p_T$  を 15 段階で判定する。
- トリガー効率はトリガー番号ごとに対応した  $p_T$  の閾値で立ち上がる。



# NSW と TGC-BW のコインシデンス (1)

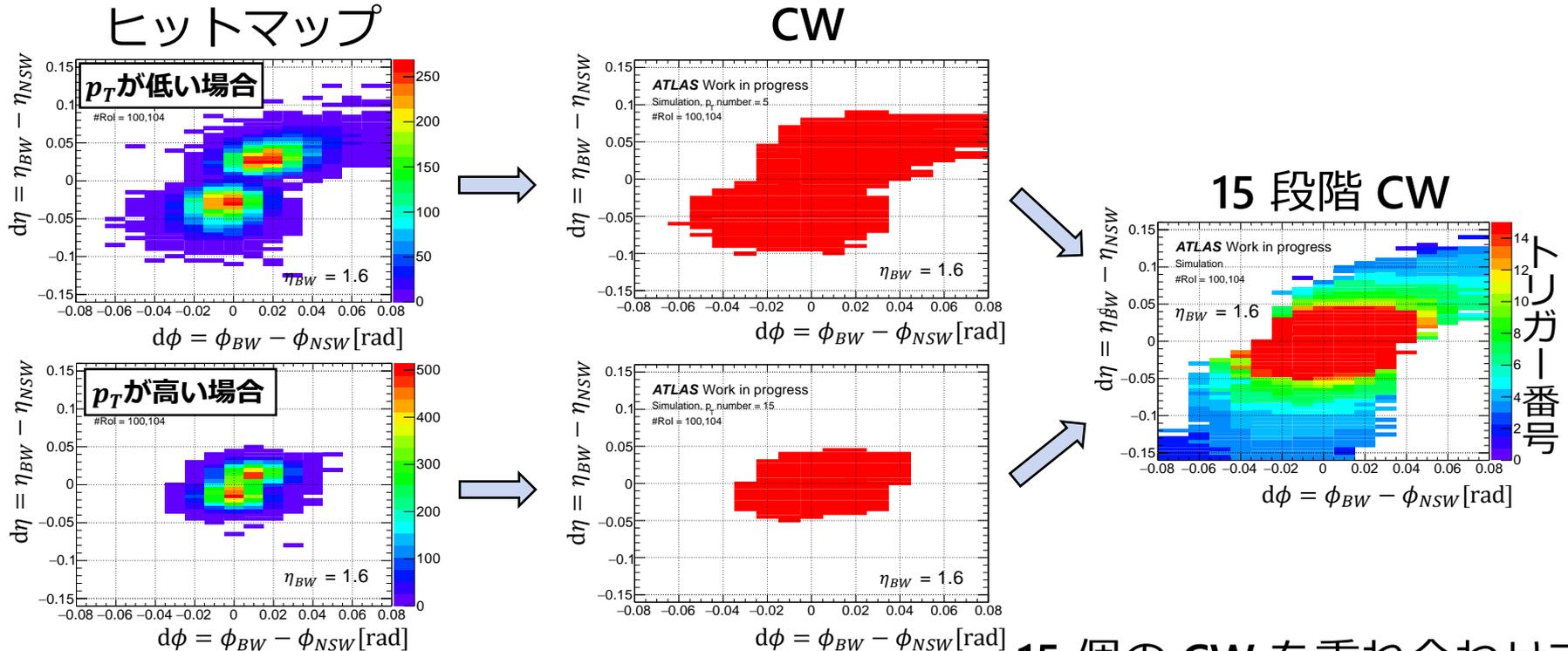
- NSW コインシデンスを用いてフェイクトリガーを削減し、トリガーレートを抑えるアルゴリズムを開発した。
- TGC-BW と NSW 間の相対位置 ( $d\eta$ ,  $d\phi$ ) と NSW の角度情報  $d\theta$  を用いて、位置・角度でのコインシデンスをとり、トリガー判定を行う。



# NSW と TGC-BW のコインシデンス (2)

## “Coincidence Window(CW)” の作成

モンテカルロシミュレーションで作成したシングルミュオンサンプル  
(1 イベントにつき1個のミュオンが発生するサンプル) を用いて  
相対位置( $d\eta$ ,  $d\phi$ )のマップを作成



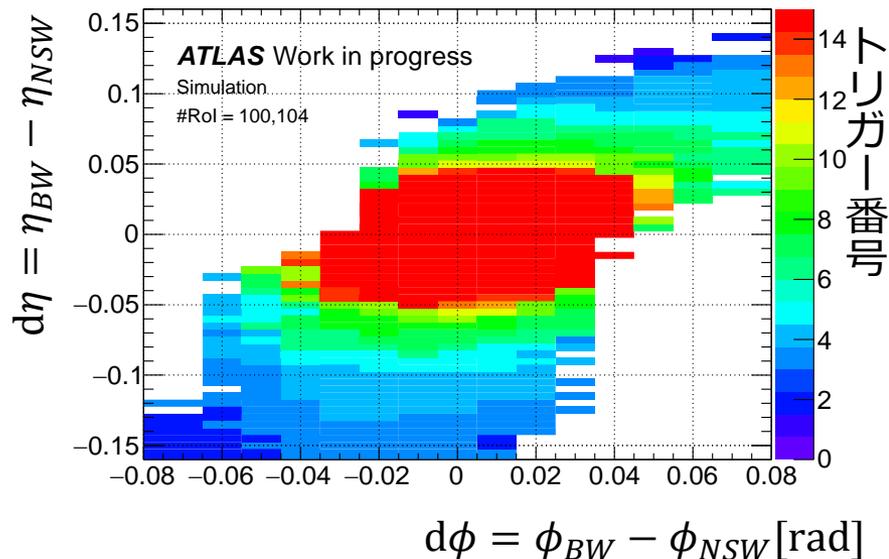
99.9% 含むように CW を定義  
CW の最適化も行う

15 個の CW を重ね合わせて  
15 段階の CW を作成

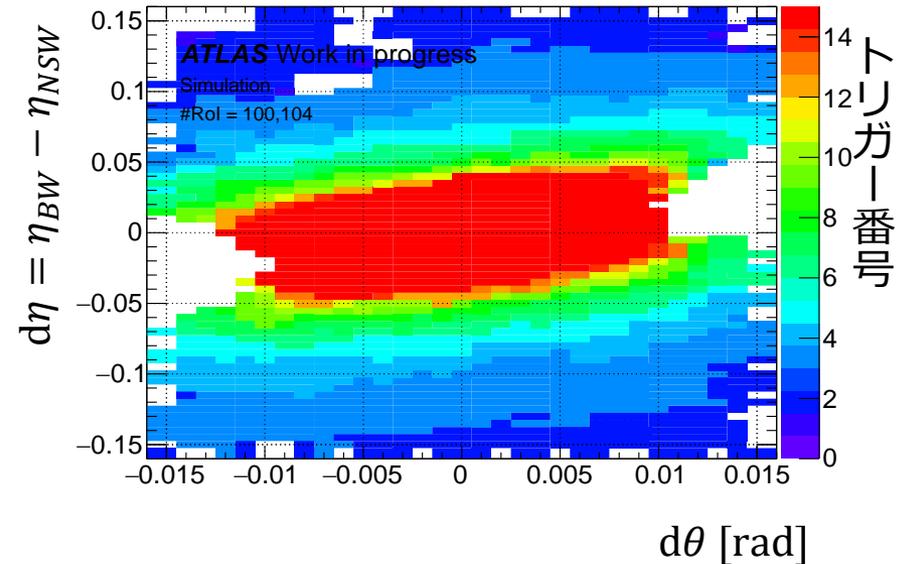
## 15 段階の Coincidence Window(CW)

BW コインシデンスで判定されたトリガー番号に対して NSW コインシデンスで出力されるトリガー番号と対応するミューオンの $p_T$ 分布を変えないように相対位置、角度情報の領域を定義した。

位置 CW



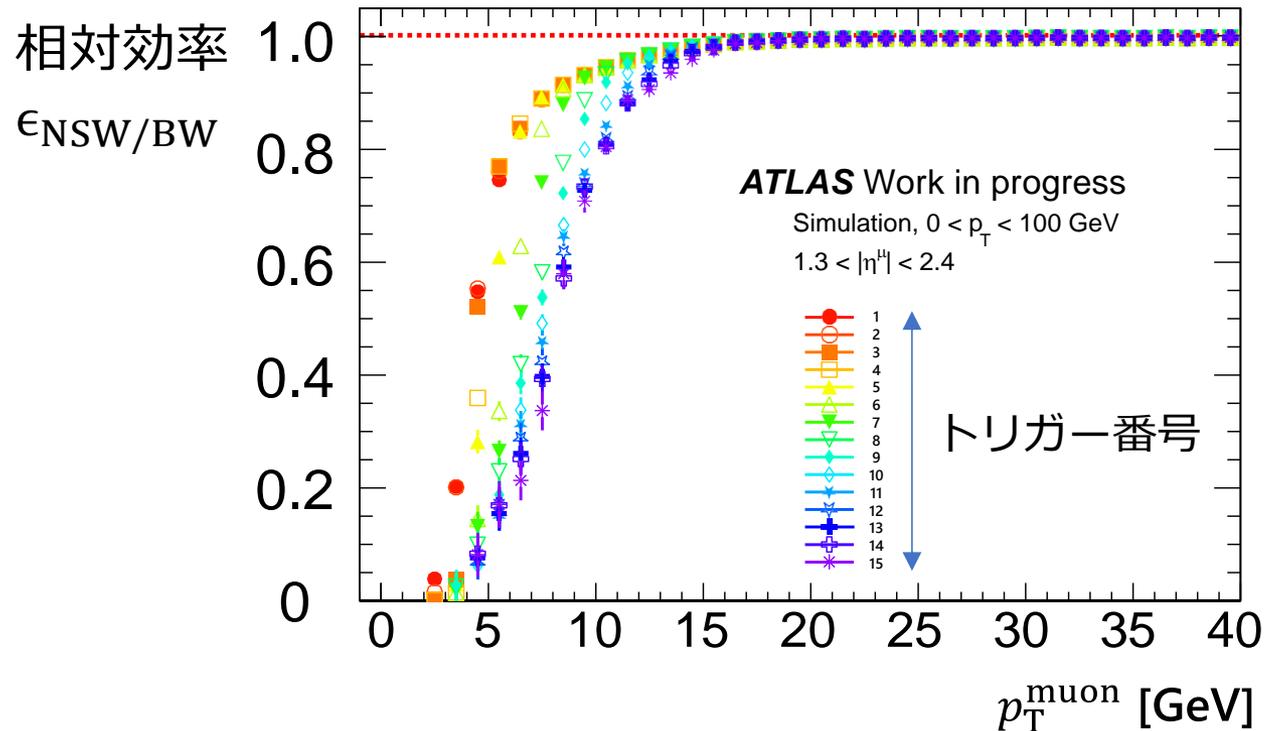
角度 CW



# NSW コインシデンスの性能評価 (1)

## トリガー効率の評価

$$\text{トリガー相対効率 } \epsilon_{\text{NSW/BW}} = \frac{\text{NSW コインシデンスが取れたミュオン数}}{\text{BW コインシデンスが取れたミュオン数}}$$



- $p_{\text{T}}^{\text{muon}} \geq 20$  GeV において、BW コインシデンスからの効率低下を1%以内で抑える。

# NSW コインシデン스의性能評価 (2)

## $p_T$ residual を用いた運動量分解能の評価

$$p_T \text{ residual} = \frac{p_T^{L1} - p_T^{\text{muon}}}{p_T^{L1}}$$

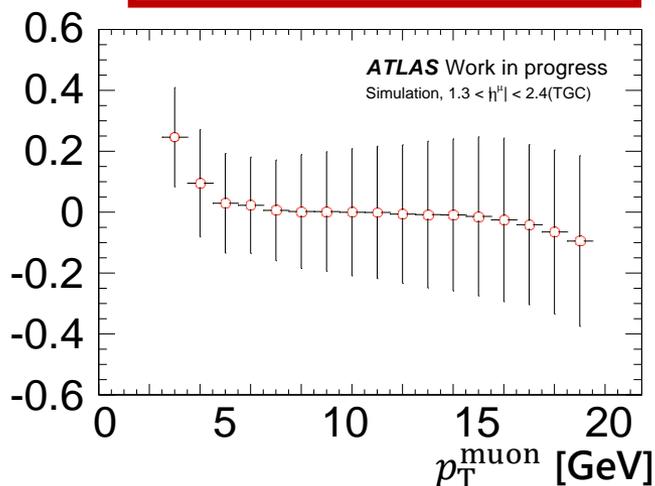
$p_T^{\text{muon}}$  : ミューオンの  $p_T$  [GeV]

$p_T^{L1}$  : 初段トリガー出力の  $p_T$  [GeV]

各  $p_T$  のミューオンにおける  $p_T$  residual 分布  
(平均値と標準偏差)

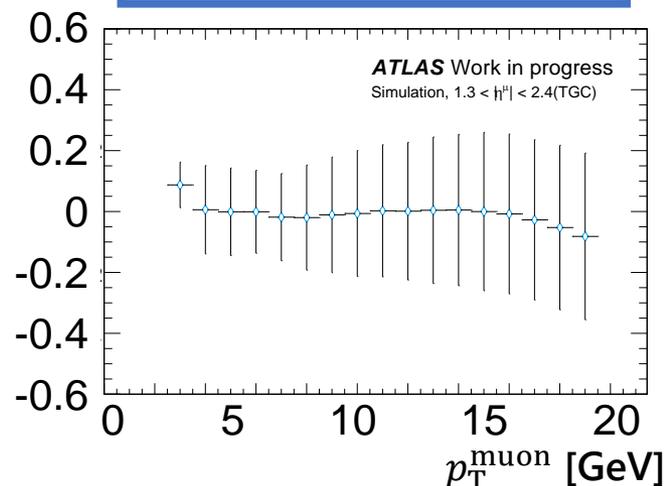
$p_T$  residual

**BW コインシデンス**



$p_T$  residual

**NSW コインシデンス**

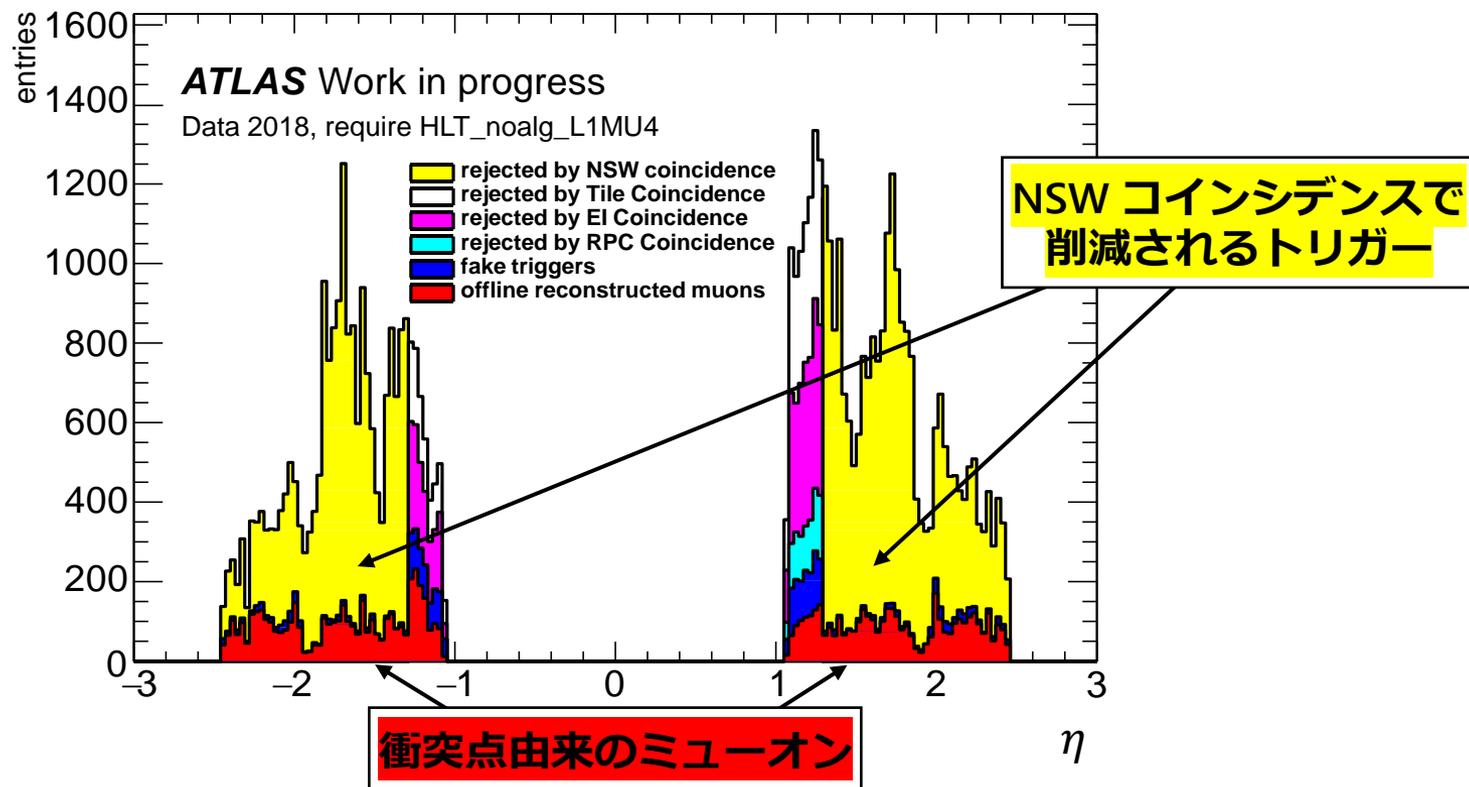


↔  
ほぼ同じ

- ミューオンの  $p_T$  に対応したトリガー判定ができるように **CW** を設定できている。
- **BW** コインシデン스의 **運動量分解能を維持**している。

# データを用いた評価 (1)

## 初段エンドキャップ部ミュオントリガー全体の $\eta$ 分布



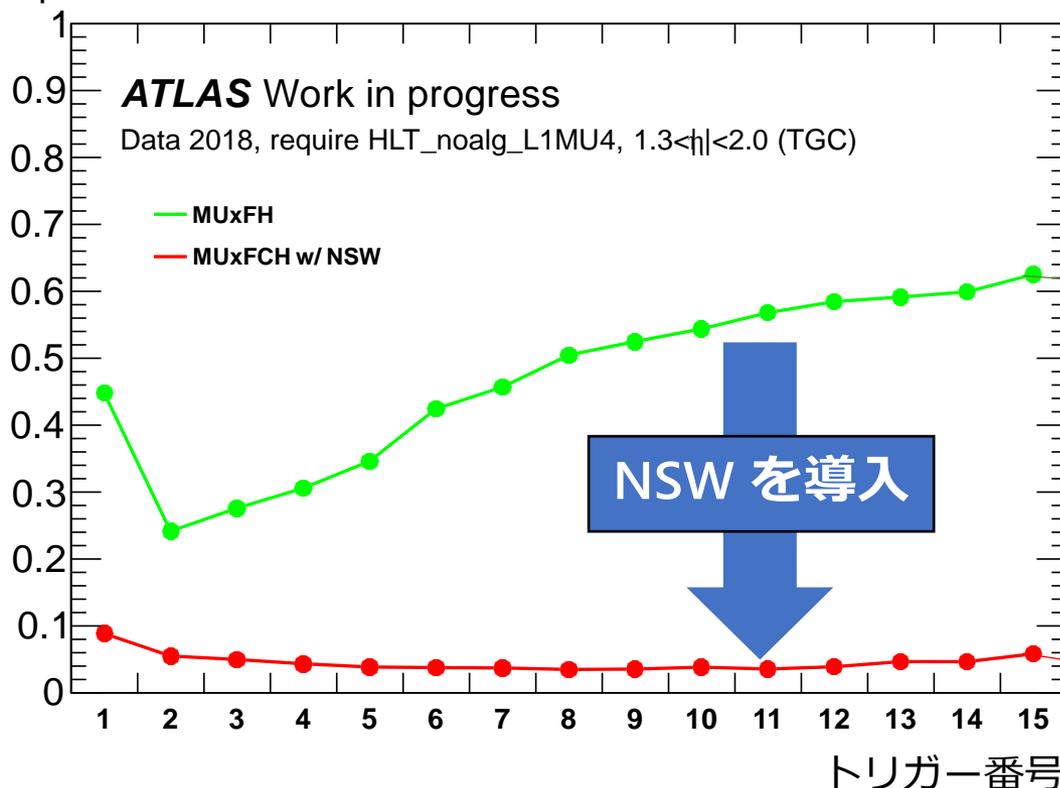
- 2018 年に取得された Run-2 データを用いた評価を行った。
- BW コインシデンスに対して内側の検出器とのコインシデンスを取る。
- 最終的にフェイクトリガー(青)、衝突点由来のミュオン(赤)が残る。

# データを用いた評価 (2)

## フェイクトリガーの削減率の評価

$$\text{フェイクトリガー率} = 1 - \frac{\text{衝突点で再構成されるミュオン数}}{\text{全トリガー数}}$$

フェイクトリガー率



BW コインシデンス

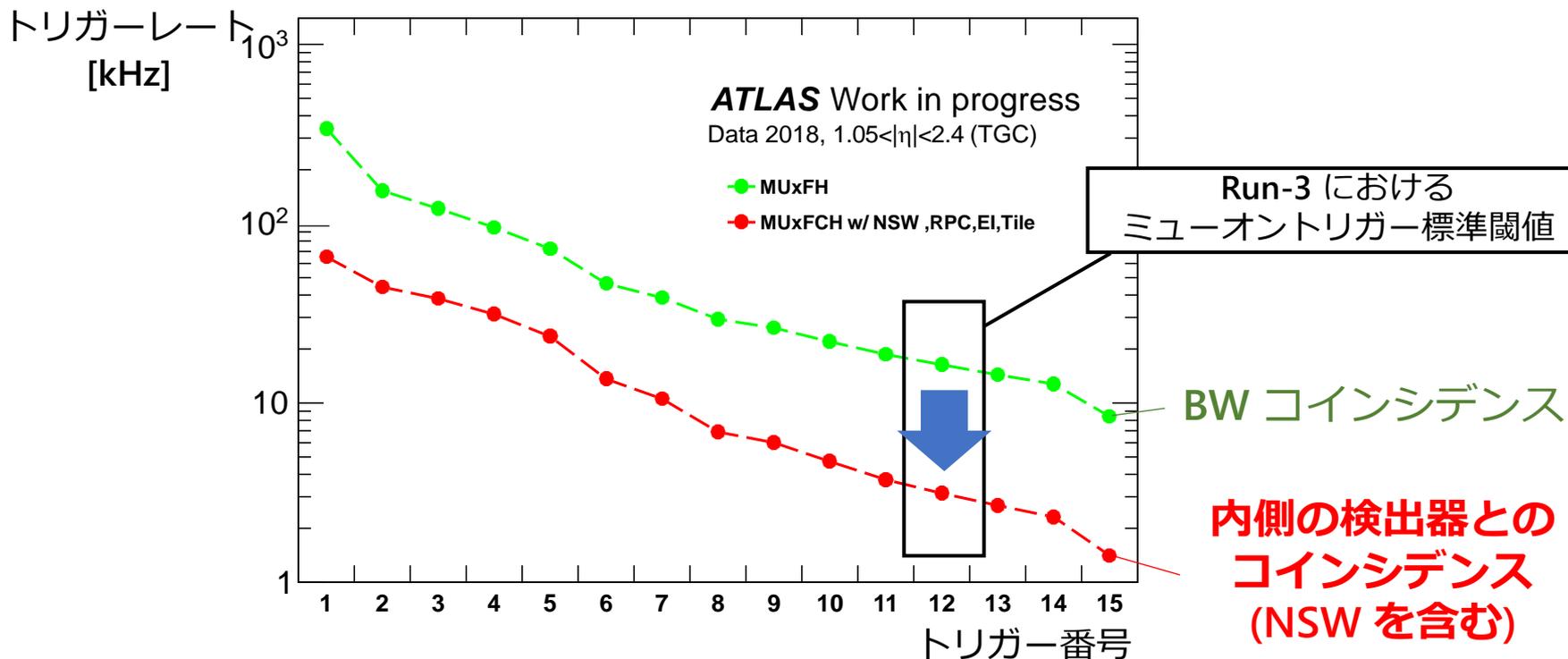
NSW を導入

NSW コインシデンス

- NSW 領域のフェイクトリガー率を 30~60 % ⇒ 5 % 程度に抑制した。

# トリガーレートの評価 (1)

## エンドキャップ部トリガーレートの評価



- 全トリガー番号においてトリガーレートを **70~80%** 程度削減した。

# トリガーレートの評価 (2)

## ミュオントリガー標準閾値のトリガーレート

トリガー名		エンドキャップ部 [kHz]	バレル部 [kHz]	合計 [kHz]
Run-2		14.0	4.1	18.1
Run-3	BW コインシデンス	16.4	4.1	20.5
	内側の検出器との コインシデンス	3.1	4.1	7.2

上限値 16 kHz

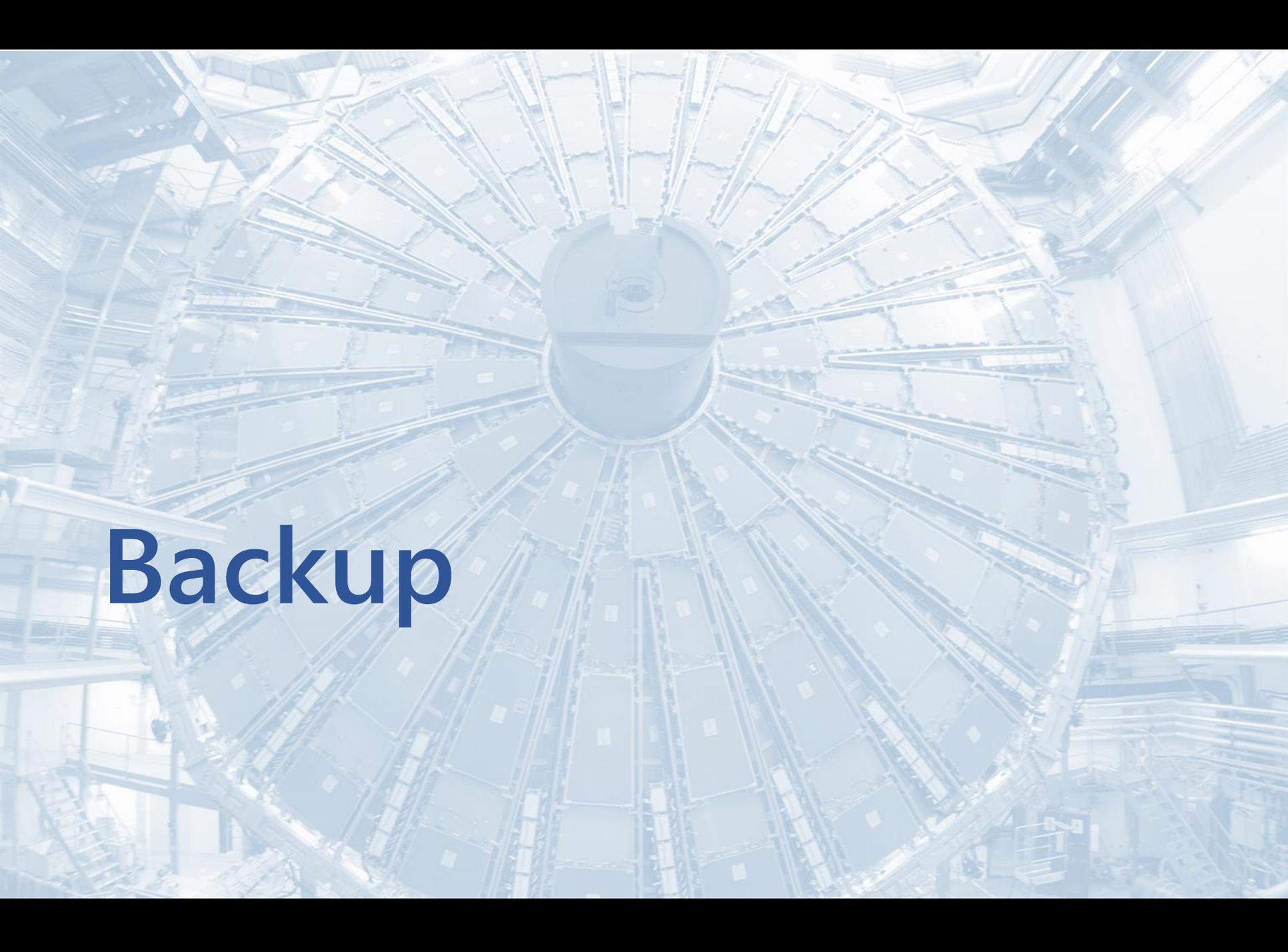
- バレル部のレートは Run-2 のレートをそのまま維持する。
- ミュオントリガーの標準閾値において BW コインシデンスと比較して、NSW を含む内側の検出器とのコインシデンスはレートを 81% 削減した。
- シングルミュオントリガーの上限値 16 kHz を十分満たす。
  - 他のいろいろな物理トリガーを導入できる可能性がある。

## トリガーアルゴリズムの開発と性能評価

- LHC-ATLAS 実験 Run-3 初段ミュオントリガーでは衝突点由来でない粒子による**フェイクトリガーの削減**が必要。
- TGC-BW と**磁場領域内側の新検出器 NSW** の間でコインシデンスを行う。
- 本研究で開発した Coincidence Window は、TGC-BW が持つ**トリガー効率と運動量分解能を維持しつつ、フェイクトリガー率を 5 % まで抑制し、BW コインシデンスに対してトリガーレートを 81 % 削減した。**

## 今後の展望

- Run-3 開始までに NSW とアルゴリズムを実装するボード間の接続を行う。
- Run-3 開始後に、取得されたデータを用いて相対位置 ( $d\eta$ ,  $d\phi$ ) を修正し、Coincidence Window を最適化することでレートを削減する。



# Backup

# ミューオントリガー (backup)

- 興味のある物理事象の発生頻度は極めて小さい
  - 陽子陽子散乱の全断面積に対して生成断面積が小さい
  - 稀に起こる崩壊過程

終状態にミューオンを含む物理の例

## ● $H \rightarrow \mu\mu$

✓ 高い運動量のミューオン

ミューオンは第三世代粒子に比べて軽くヒッグス粒子との相互作用が弱い。

## ● $B_s \rightarrow \mu\mu$

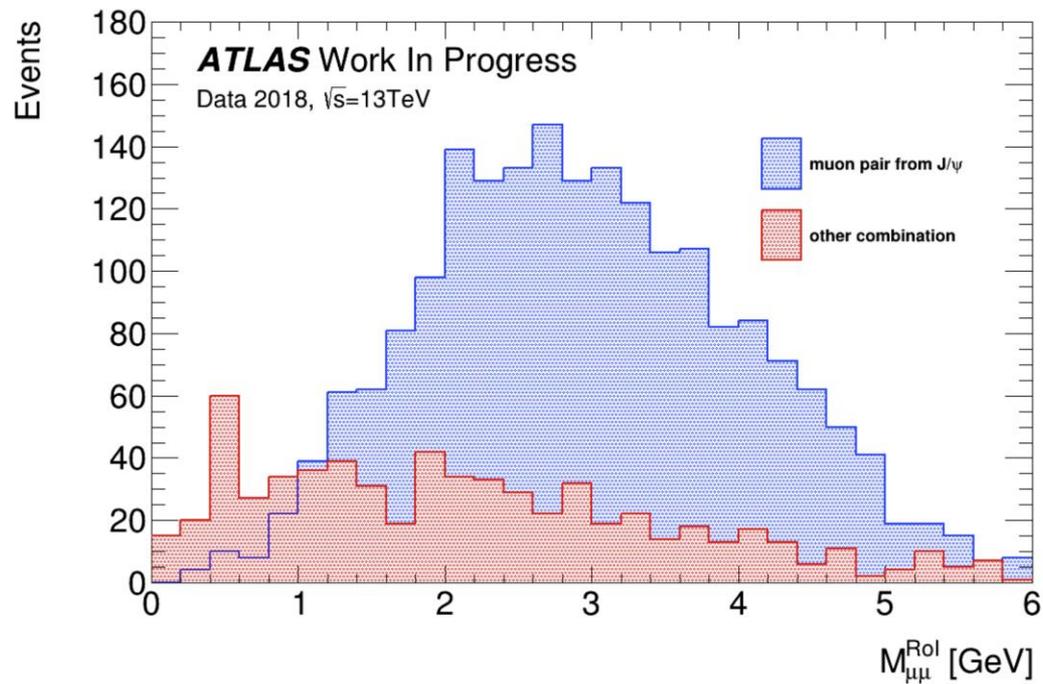
✓ 低い運動量のミューオン

小さい崩壊分岐比  $(3.2 \pm 0.2) \times 10^{-9}$   
超対称性が存在し、 $B_s$  の崩壊に寄与すると崩壊分岐比が標準理論と異なる可能性がある。

- 興味のあるミューオン事象を選別(トリガー)する必要がある。
  - データの取捨選択を行う部分

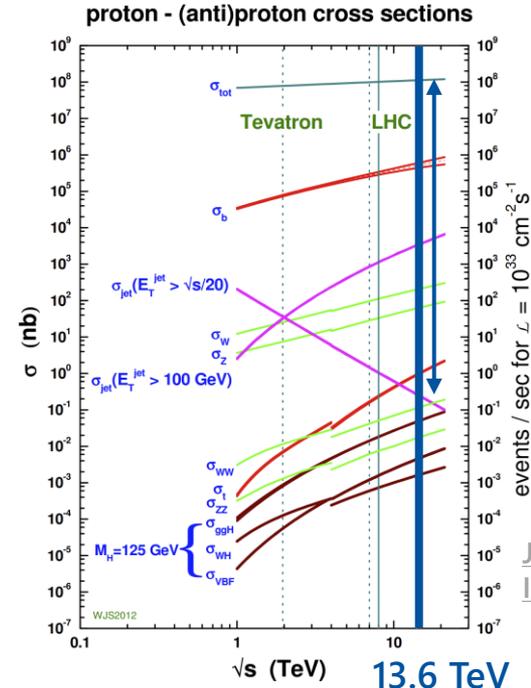
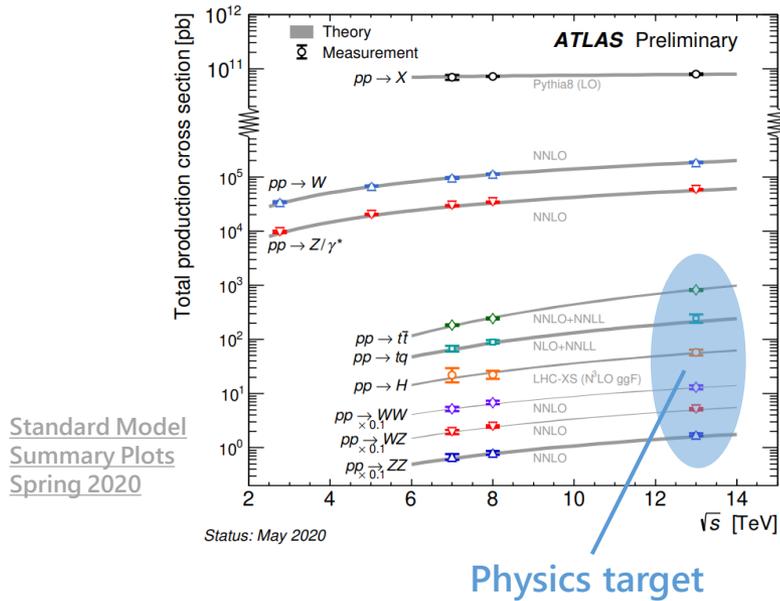
# 先行研究における不変質量の計算 (backup)

$$M_{\mu\mu}^2 = 2p_{T,1}p_{T,2}(\cosh(\eta_1 - \eta_2) - \cos(\phi_1 - \phi_2))$$



# 物理事象の断面積 (backup)

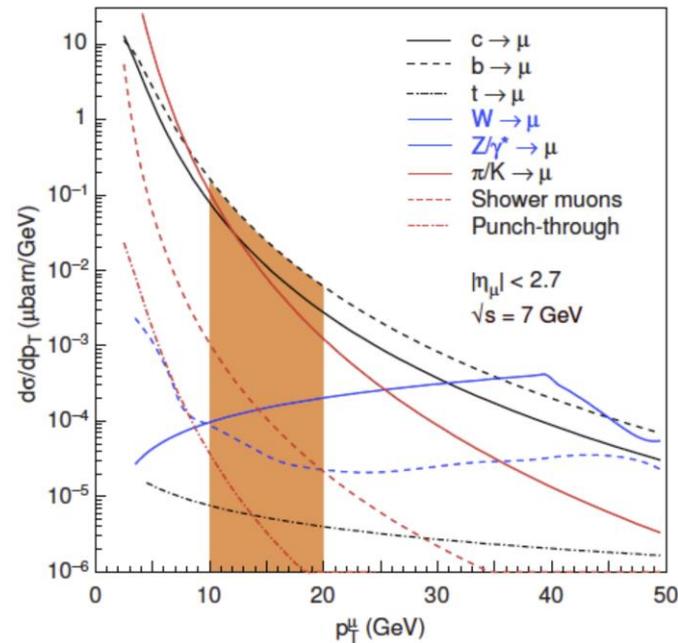
陽子陽子衝突における各物理過程の断面積



James Stirling,  
Imperial College London

陽子陽子散乱の全断面積と比べて、興味のある物理事象の断面積 (ヒッグス粒子、トップクォーク、ベクターボソンW/Z生成) ははるかに小さく ( $10^{-9} \sim 10^{-11}$  程度)、興味のある物理事象を選別するトリガーシステムが重要。

# ミューオンの横運動量と断面積の関係 (backup)



ATLAS Muon Spectrometer TDR

横運動量  $p_T > X$  [GeV]

という要求をすることで、興味のある事象に対する  
アクセプタンスを保持しつつ、興味のない事象を除外できる。

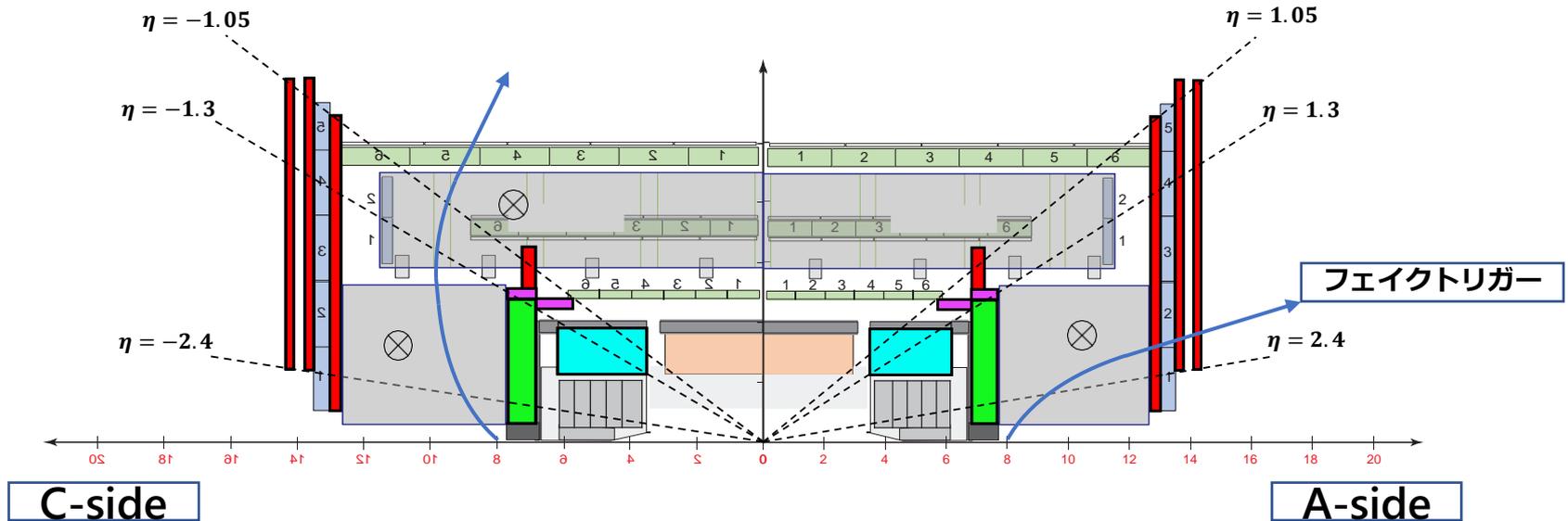
# LHC-ATLAS 実験 Run-3 (backup)

## LHC 加速器の運転とアップグレード計画



2022年5月から LHC-ATLAS 実験 Run-3 が開始予定である。

# フェイクトリガー分布の偏り (backup)



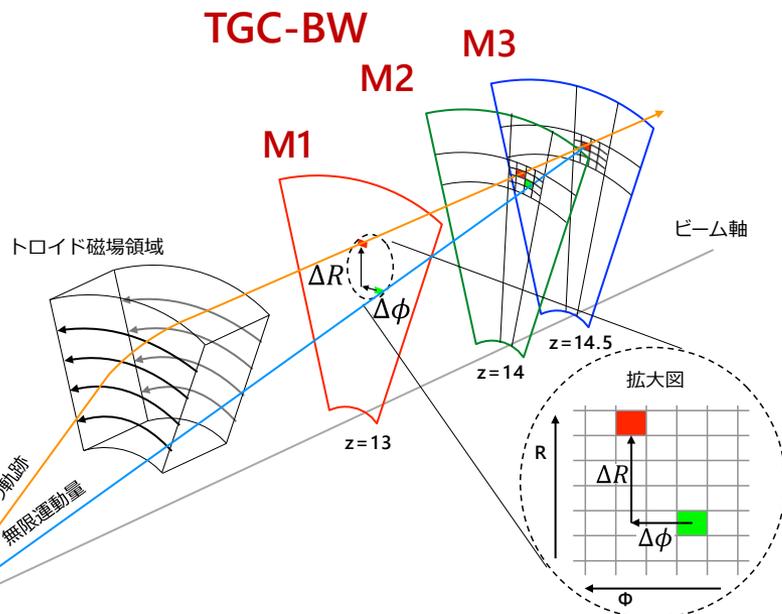
陽子由来のフェイクトリガーは正電荷の割合が多く、  
A-side には入射するが C-side には入射しない場合があるため、  
フェイクトリガーのレートは A-side の方が C-side よりも大きい。



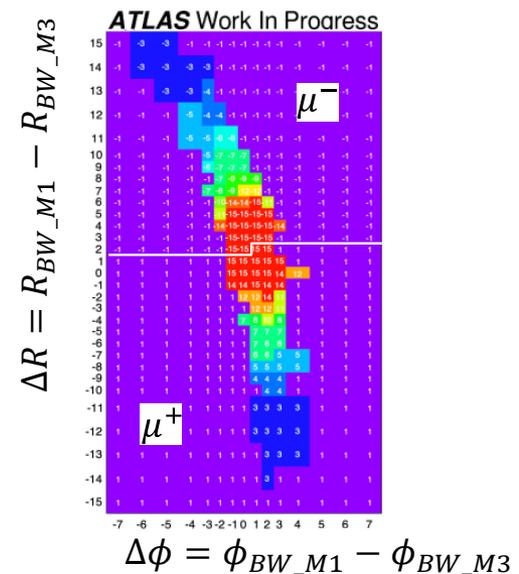
# TGC-BW コインシデンスの概要 (backup)

## 先行研究で開発された TGC-BW Coincidence トリガーアルゴリズム

- ① ミューオンがトロイド磁場を通過したときに生じる粒子飛跡の曲率を事前に計算し、横運動量( $p_T$ )との対応表 (Coincidence Window) を保存しておく。
- ① TGC-BW M3 のヒット位置と TGC-BW M1 のヒット位置の相対位置を飛跡情報( $\Delta R, \Delta\phi$ )として送信する。
- ② CW を参照して ( $\Delta R, \Delta\phi$ ) に対応する  $p_T$  を 15 段階で判定する。  
(本研究では BW Coincidence だけで  $p_T$  判定を行う。)



ミュオンは磁場の影響で R 方向だけでなく  $\phi$  方向にも曲がる



BW Coincidence に用いる CW

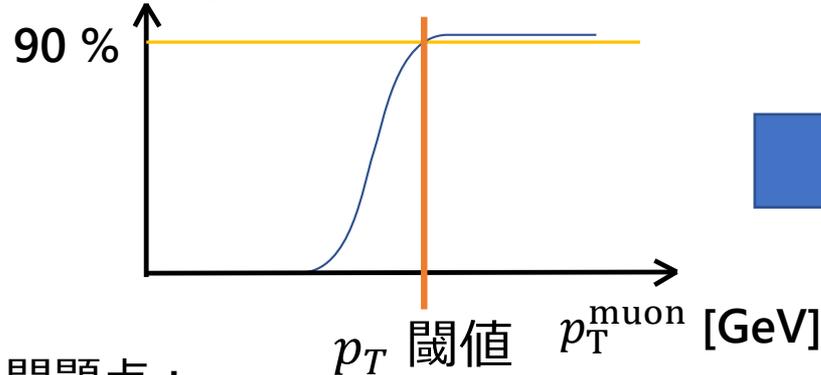
# TGC-BW のトリガーの定義 (backup)

## Run-2 の定義

### $p_T$ 閾値

$p_T$  閾値以上のミュオンが  
**十分な効率でトリガー**できるように  
定義される。

トリガー効率



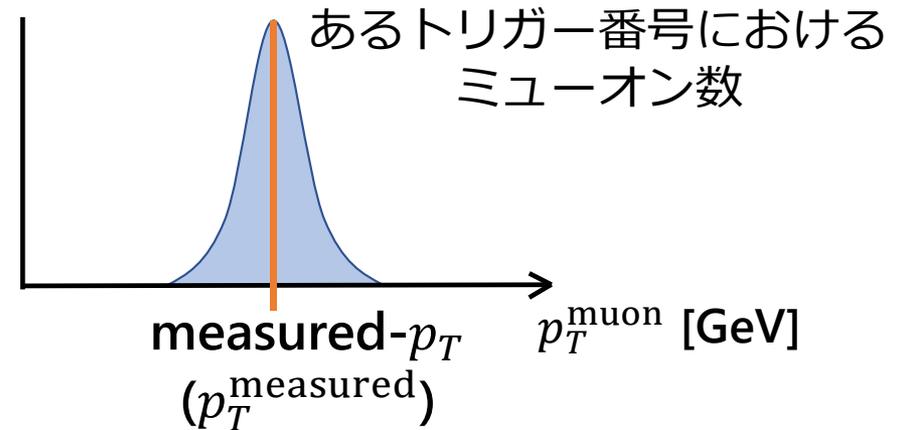
問題点：

出力される  $p_T$  の中心が運動量に対応していないため、後段での不変質量を用いたトリガー判定性能が下がる。

## Run-3 の定義

### measured- $p_T$

後段で不変質量を用いたトリガー判定を行うため、出力される  $p_T$  の中心が measured- $p_T$  となるように定義される。

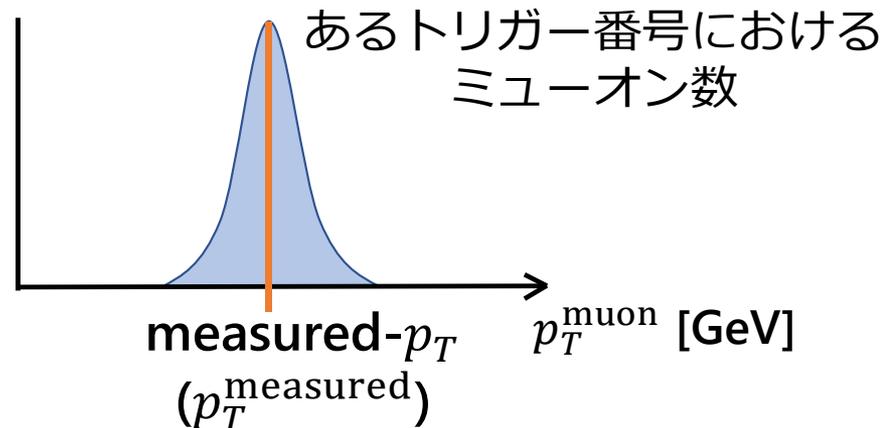
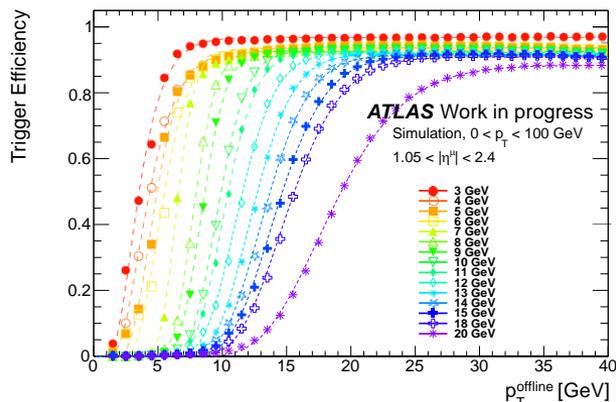


$p_T$  分解能が良いほどトリガーの性能が高い。

- トリガー番号：15 段階のトリガーそれぞれに割り振られた番号
- measured- $p_T$ ：トリガー出力における最も多いミュオンの  $p_T$

# TGC-BW のトリガーの定義 (backup)

## TGC-BW のトリガー効率



トリガー効率  $\epsilon = \frac{\text{トリガーが発行されたミューオン数}}{\text{全ミューオン数}}$

$p_T$  分解能が良いほどトリガーの性能が高い。

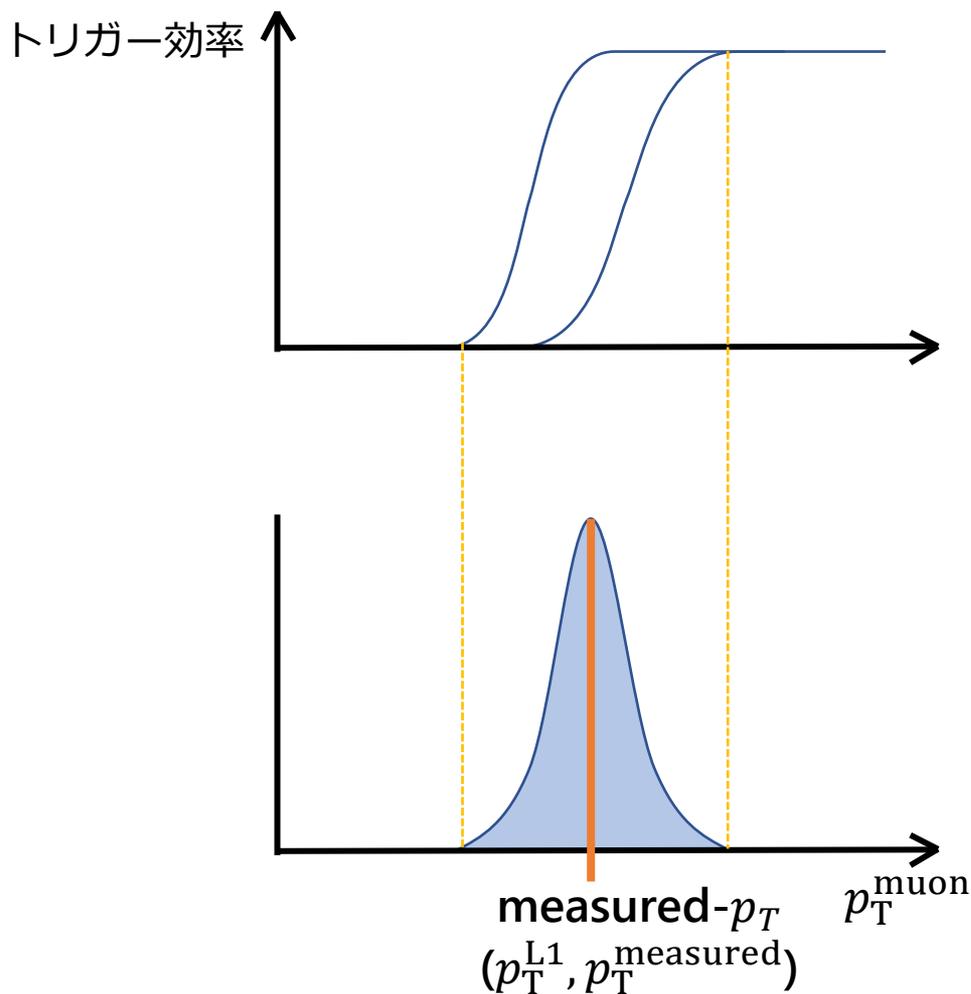
先行研究で作成された BW Coincidence では  
トリガー番号と  $\text{measured-}p_T$  が対応している

## トリガー番号と $\text{measured-}p_T$ の関係

トリガー番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\text{measured-}p_T$ [GeV]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18	20

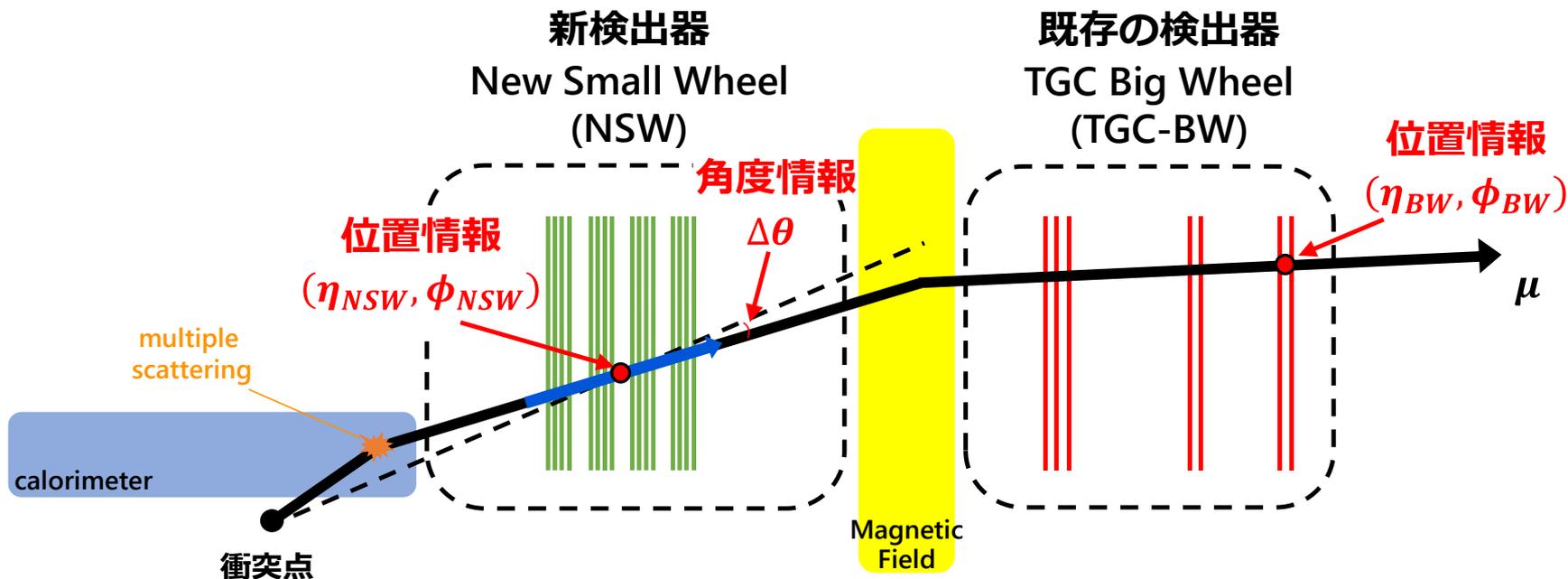
- トリガー番号 : 15 段階のトリガーそれぞれに割り振られた番号
- $\text{measured-}p_T$  : トリガー出力における最も多いミューオンの  $p_T$  (20 GeV を除く)

# トリガー効率と measured- $p_T$ の関係 (backup)



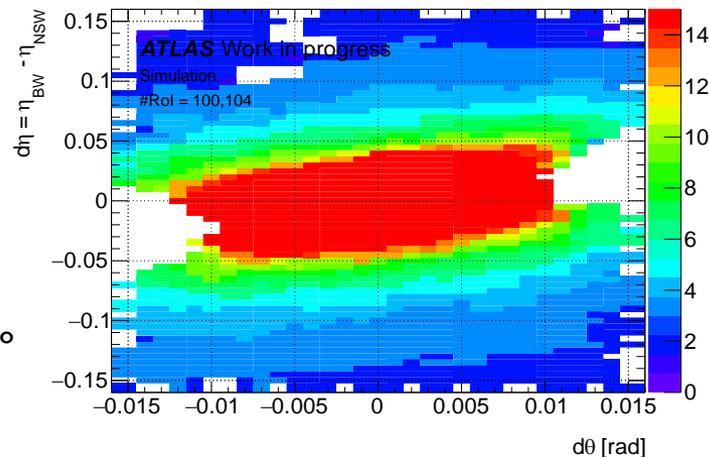
あるトリガー番号におけるトリガー出力

# NSW の角度情報を用いたトリガーアルゴリズム (backup)



## 角度コインシデンスのアルゴリズム

NSW で得られる角度情報  $d\theta$  と  
相対位置  $d\eta = \eta_{BW} - \eta_{NSW}$  を用いて、  
Coincidence Window から  $p_T$  を 15 段階で判定する。

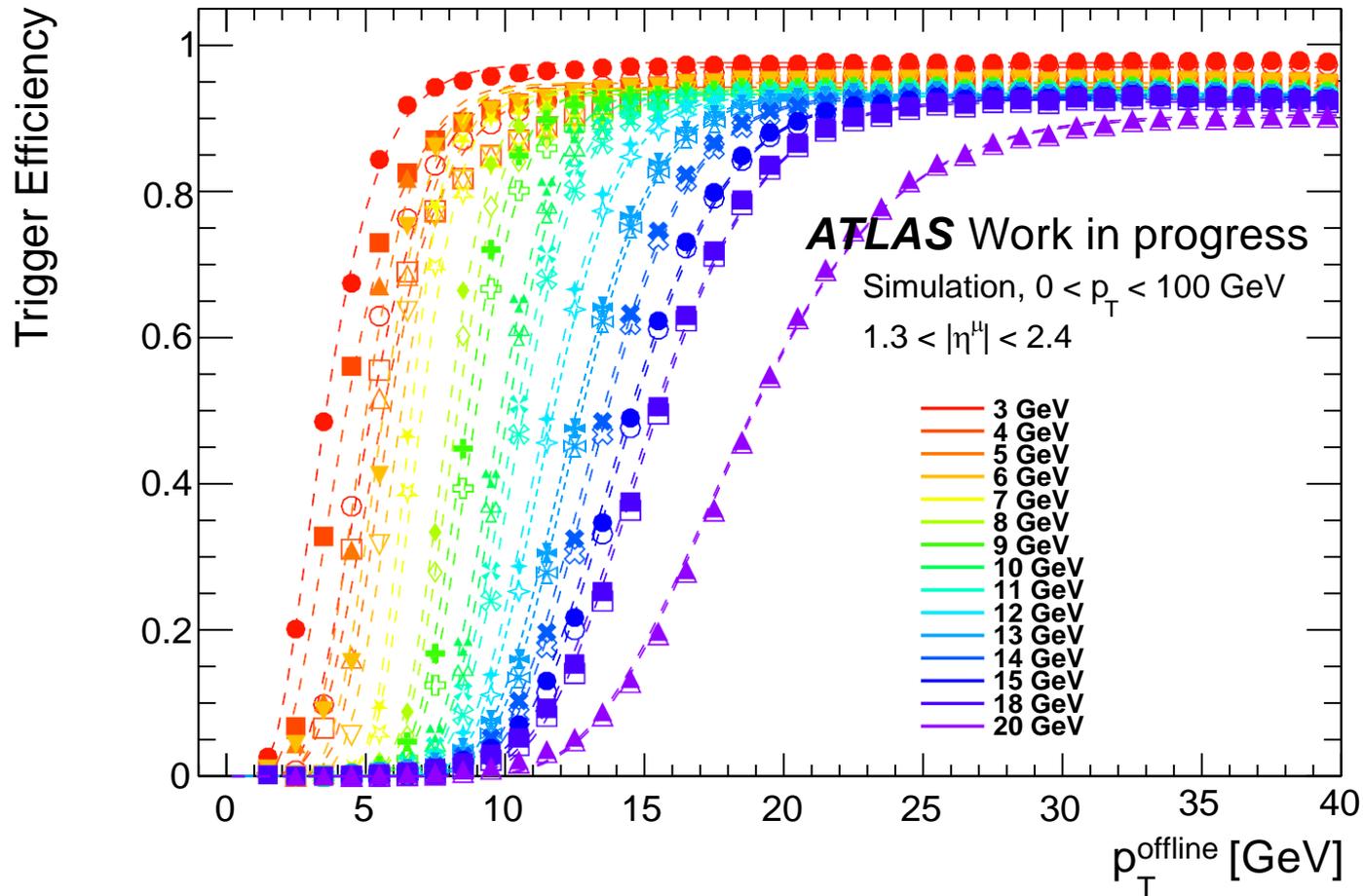


# CW 作成に用いたミューオンの $p_T$ (backup)

トリガー番号	作成に用いるミューオンの $p_T$
1	$0 < p_T < 10 \text{ GeV}$
2	$3 < p_T < 13 \text{ GeV}$
3	$4 < p_T < 14 \text{ GeV}$
4	$5 < p_T < 15 \text{ GeV}$
5	$6 < p_T < 16 \text{ GeV}$
6	$7 < p_T < 17 \text{ GeV}$
7	$8 < p_T < 18 \text{ GeV}$
8	$9 < p_T < 19 \text{ GeV}$
9	$10 < p_T < 20 \text{ GeV}$
10	$11 < p_T < 21 \text{ GeV}$
11	$12 < p_T < 22 \text{ GeV}$
12	$13 < p_T < 23 \text{ GeV}$
13	$14 < p_T < 24 \text{ GeV}$
14	$15 < p_T < 25 \text{ GeV}$
15	$16 < p_T < 26 \text{ GeV}$

CW のトリガー番号と作成に用いるミューオンの  $p_T$  との対応関係。

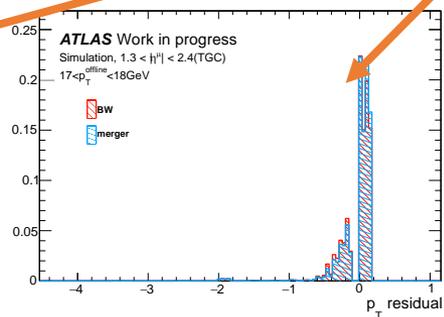
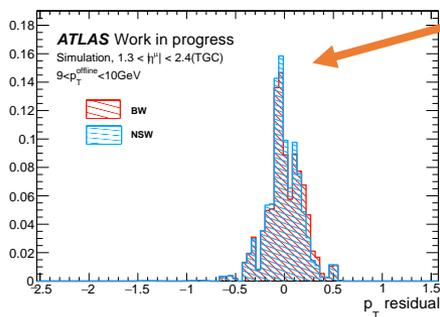
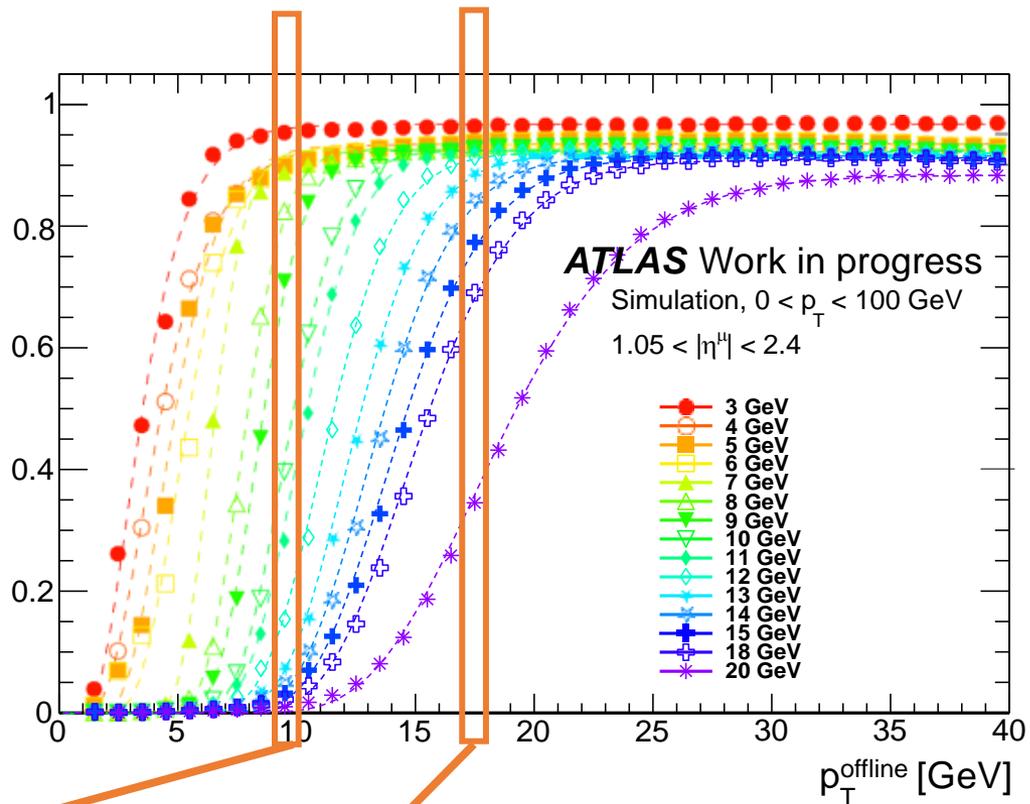
# BW コインシデンスと NSW コインシデンス (backup)



色塗り : BW コインシデンス  
白抜き : NSW コインシデンス

# $p_T$ residual (backup)

Trigger Efficiency



$$p_T \text{ residual} = \frac{p_T^{\text{measured}} - p_T^{\text{muon}}}{p_T^{\text{measured}}}$$

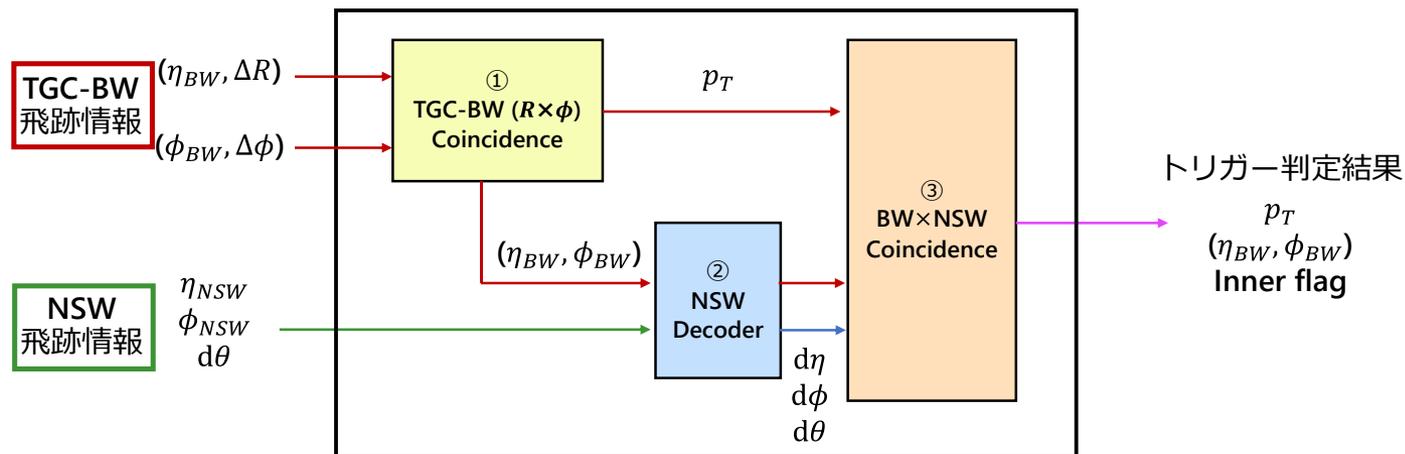
$p_T$  residual 分布はある  $p_T^{\text{muon}}$  [GeV] における  
トリガー出力の分布を反映している。

# トリガー判定ロジックのデザイン (backup)

- ① **TGC-BW ( $R \times \phi$ ) Coincidence** : TGC-BW の飛跡情報を用いて、 $p_T$ , ヒット位置を判定する。
- ② **NSW Decoder** : TGC-BW のヒット位置と NSW のヒット位置を用いて相対位置 ( $d\eta, d\phi$ ) を求める。
- ③ **BW $\times$ NSW Coincidence** : TGC-BW のヒット位置と NSW の相対位置 ( $d\eta, d\phi$ ) と角度情報  $d\theta$  を用いて、 $p_T$  を 15 段階で判定する。

➤ Run-2 では **3-bit** (4 段階) の  $p_T$  閾値の判定しか行えなかったが、Run-3 から通信規格を変更し **4-bit** (15 段階) の判定が行えるようになる。

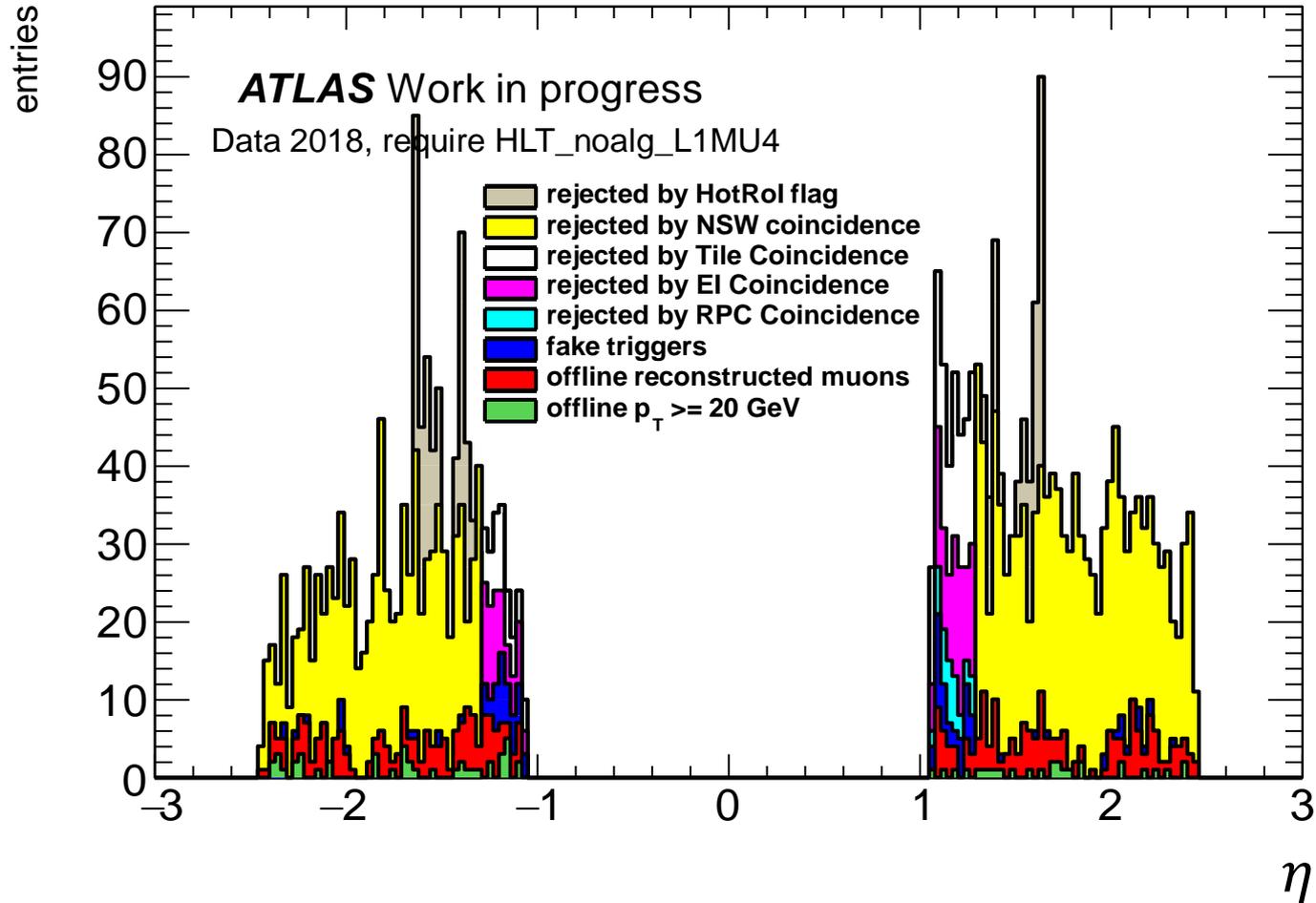
⇒ **BW $\times$ NSW Coincidence の 15 段階  $p_T$  判定に用いる Coincidence Window** の開発と性能評価を行った。



# 使用したデータセットの詳細 (backup)

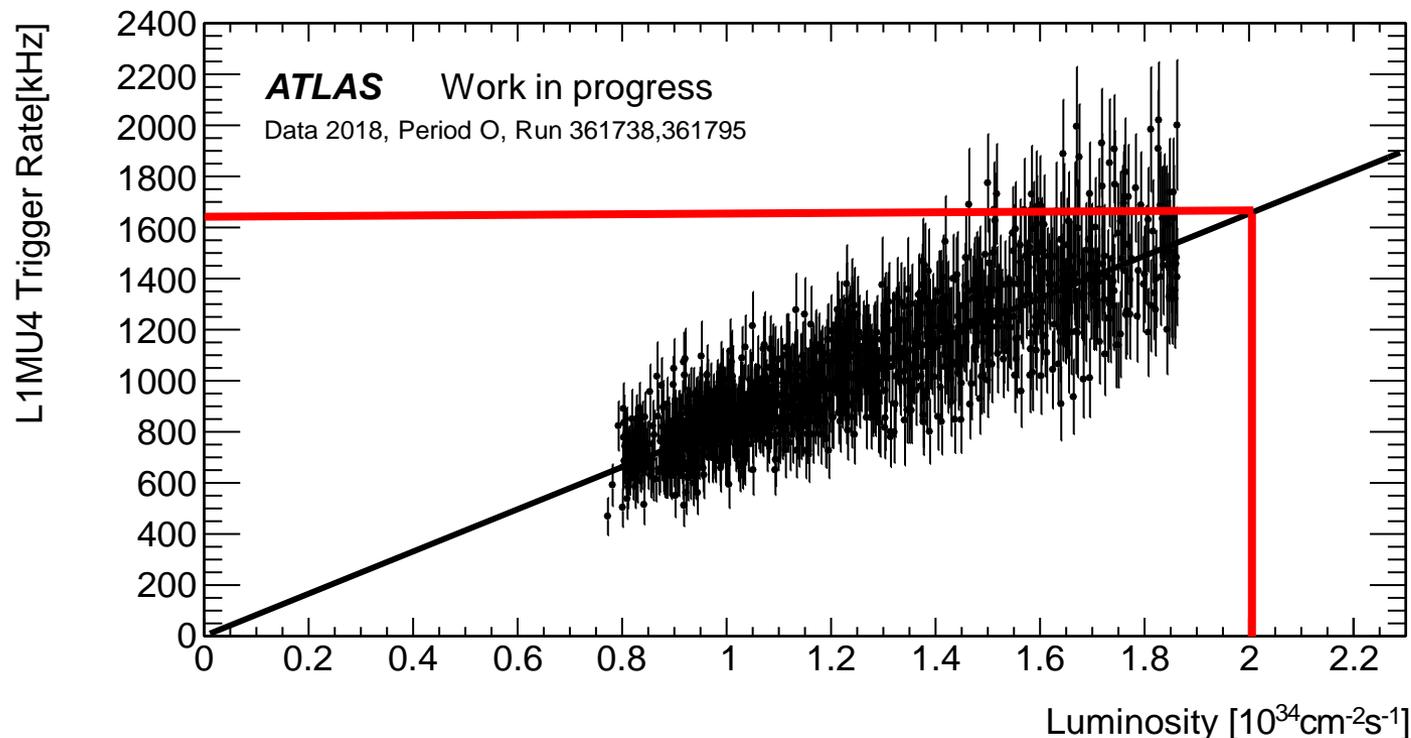
- CW 作成に用いる MC サンプル
  - シングルミュオン  $0 < p_T < 100 \text{ GeV}$  ( $p_T$  flat)
  - BW coincidence を通過したイベント ( $1.05 < |\eta| < 2.4$ )
  - 約 630 万イベント
- トリガー性能の評価に用いる MC サンプル
  - シングルミュオン  $0 < p_T < 100 \text{ GeV}$  ( $p_T$  flat)
  - BW coincidence を通過したイベント ( $1.05 < |\eta| < 2.4$ )
  - 約 100 万イベント
- トリガーレートの評価に用いる実データ
  - 2018 年(Run-2) に取得
  - “L1MU4 かつ HLT パススルー” を通過したイベント ( $|\eta| < 2.4$ )
  - 約 28 万イベント

# トリガー標準閾値(MU14)におけるトリガー出力 (backup)



# トリガーレートの見積り (backup)

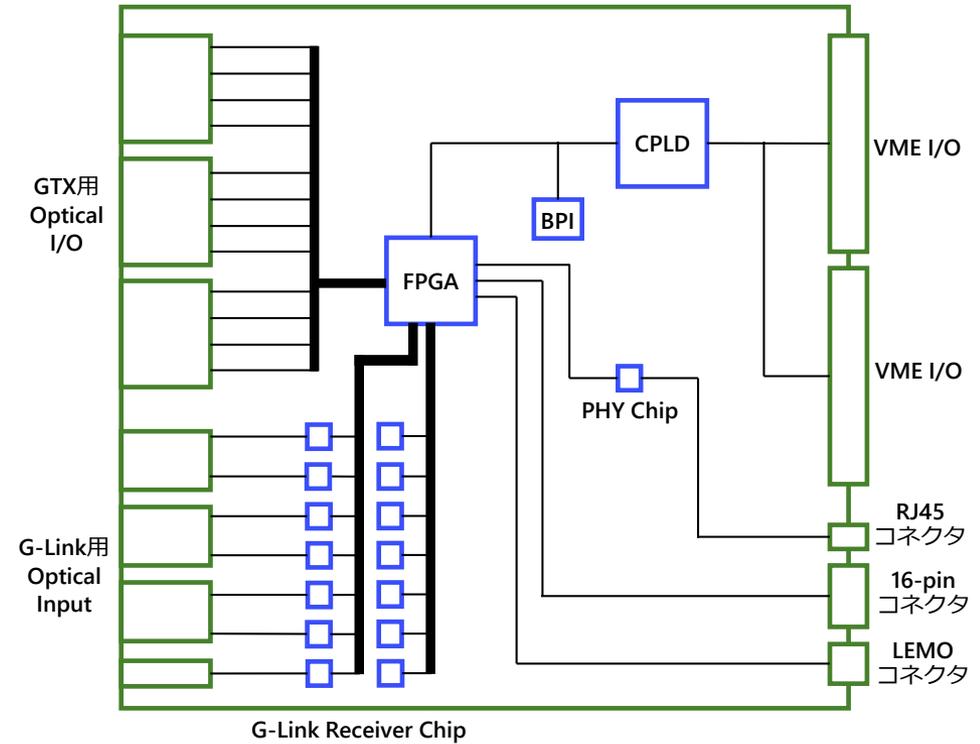
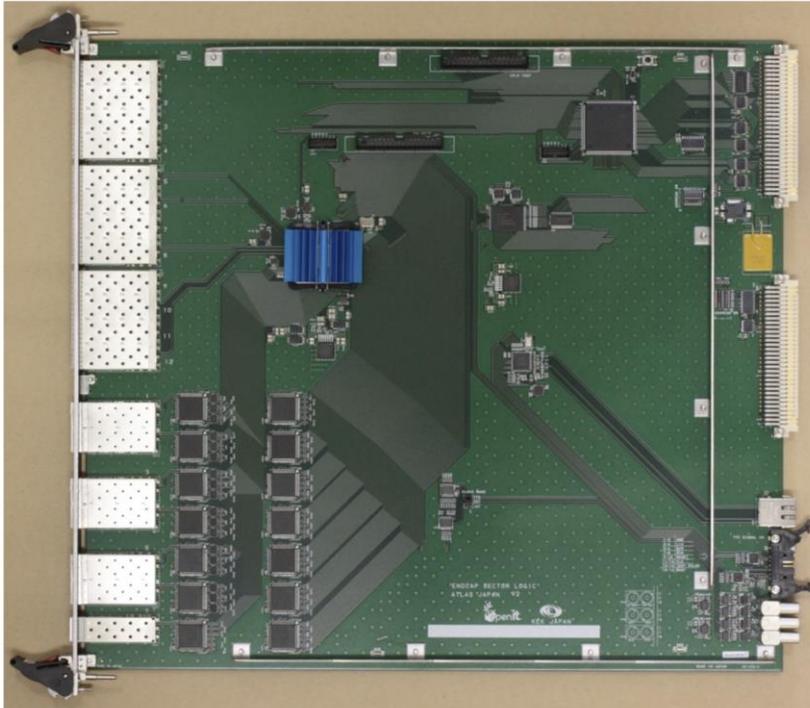
## ルミノシティとトリガーレートの関係



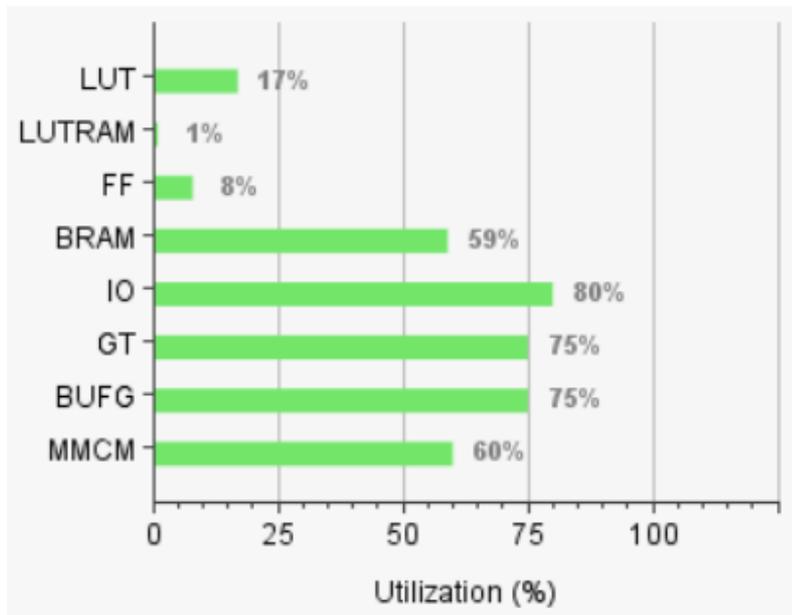
$$\text{L1MU4 のレート [kHz]} = \frac{\text{L1MU4 かつ HLT をパススルーしたイベント数} \times \text{プリスケール値}}{\text{トリガー時間[s]}}$$

ルミノシティ  $2.0 \times 10^{34} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$  のとき  $1653 \pm 7 \text{ kHz}$

# トリガー判定ボード New Sector Logic (backup)



# New Sector Logic のリソース (backup)



Resource	Utilization(%)	Utilization	Available
LUT	16.76	42599	254200
LUTRAM	0.26	236	90600
FF	8.08	41102	508400
BRAM	58.81	467.50	795
IO	80	400	500
GT	75	12	16
BUFG	75	24	32
MMCM	60	6	10

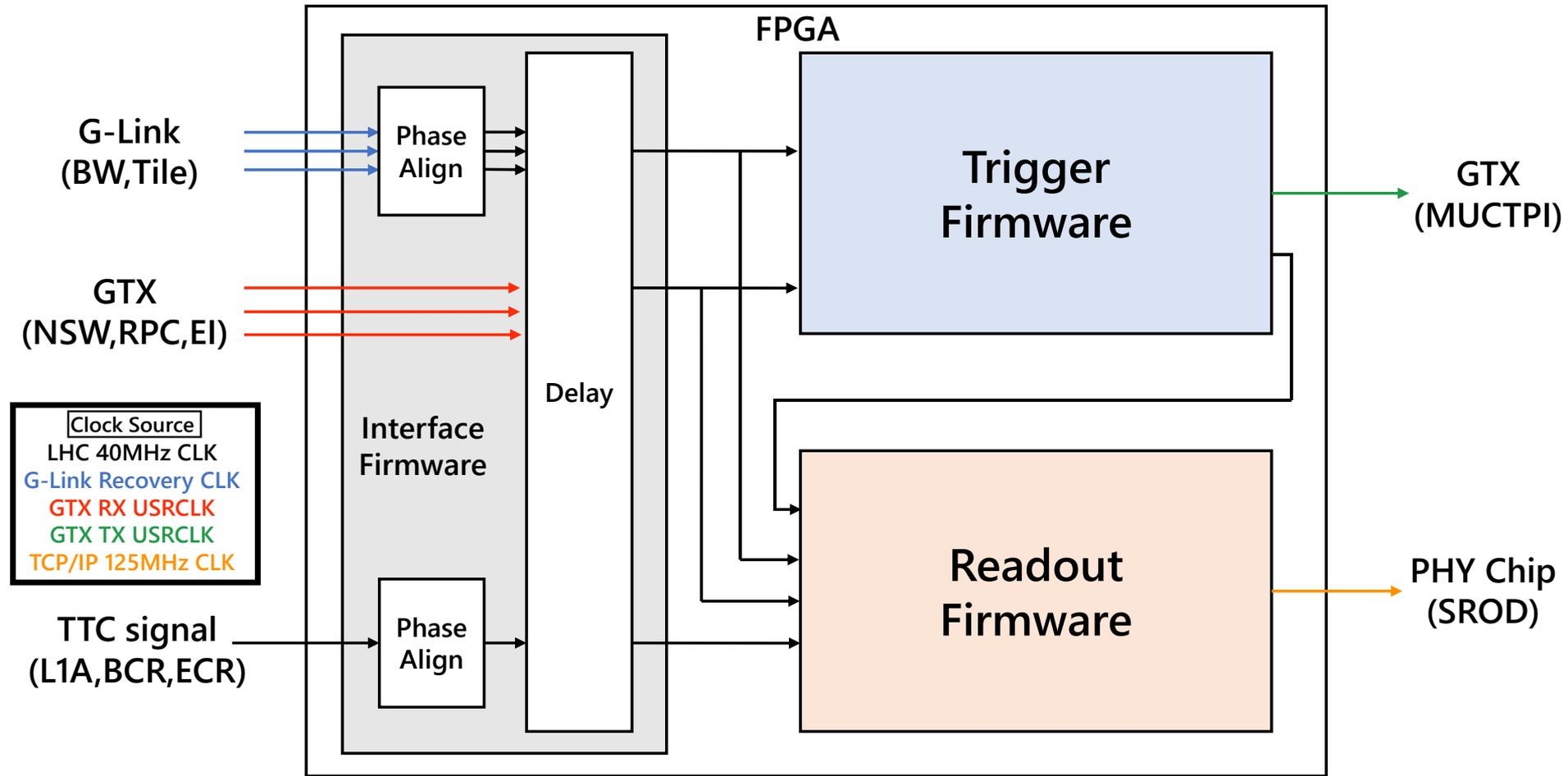
# New Sector Logic の処理時間 (backup)

New Small Wheel			TGC-BW		
	BC	時間		BC	時間
NSW からの信号を受信		41.4	BW からの信号を受信		37
シリアル→パラレルへの変換	2.5	44	シリアル→パラレルへの変換	2	39
Delay	2	45	TGC-BW Coincidence	2	41
NSW Decoder	1	47	NSW 信号を待機	5	43
			BW×NSW Coincidence	2	48
			Track Selector	1	50
			パラレル→シリアルへの変換	2	51
			MUCTPIへの信号の送信	2	53

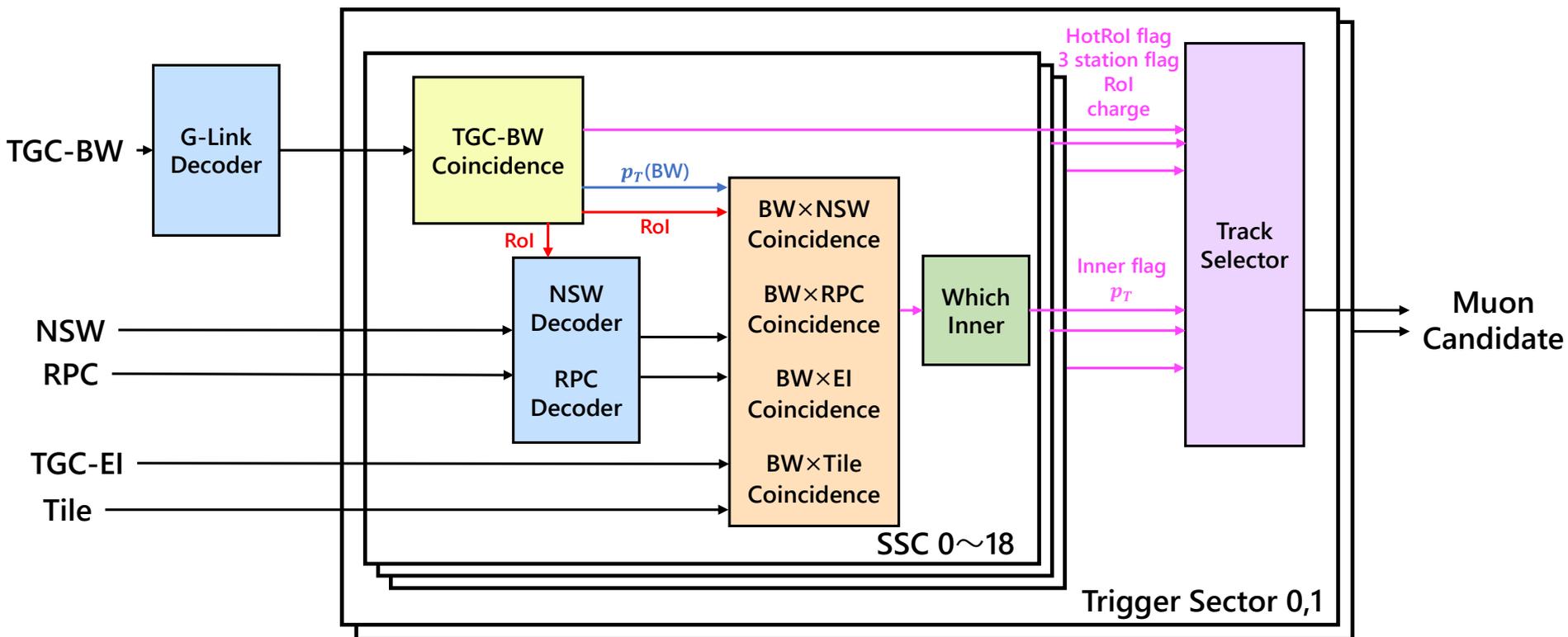
150 ns 以内



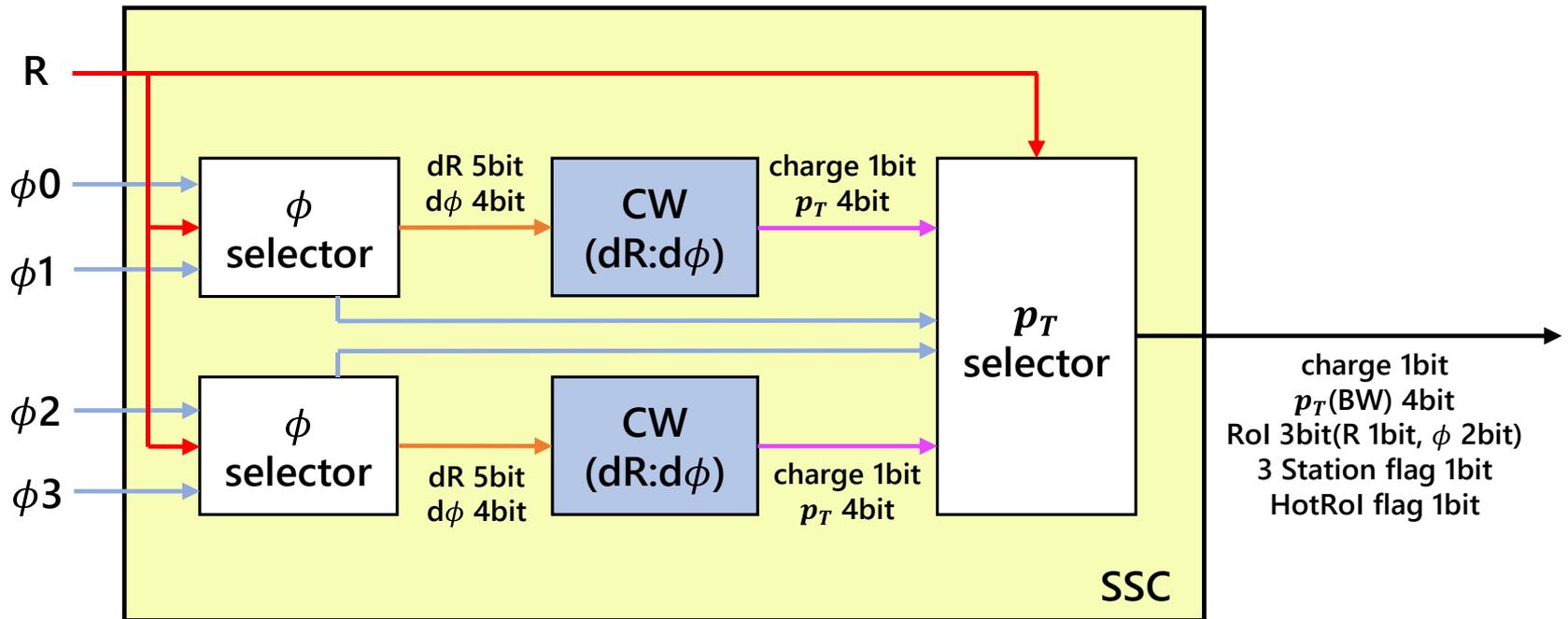
# New Sector Logic ファームウェア (backup)



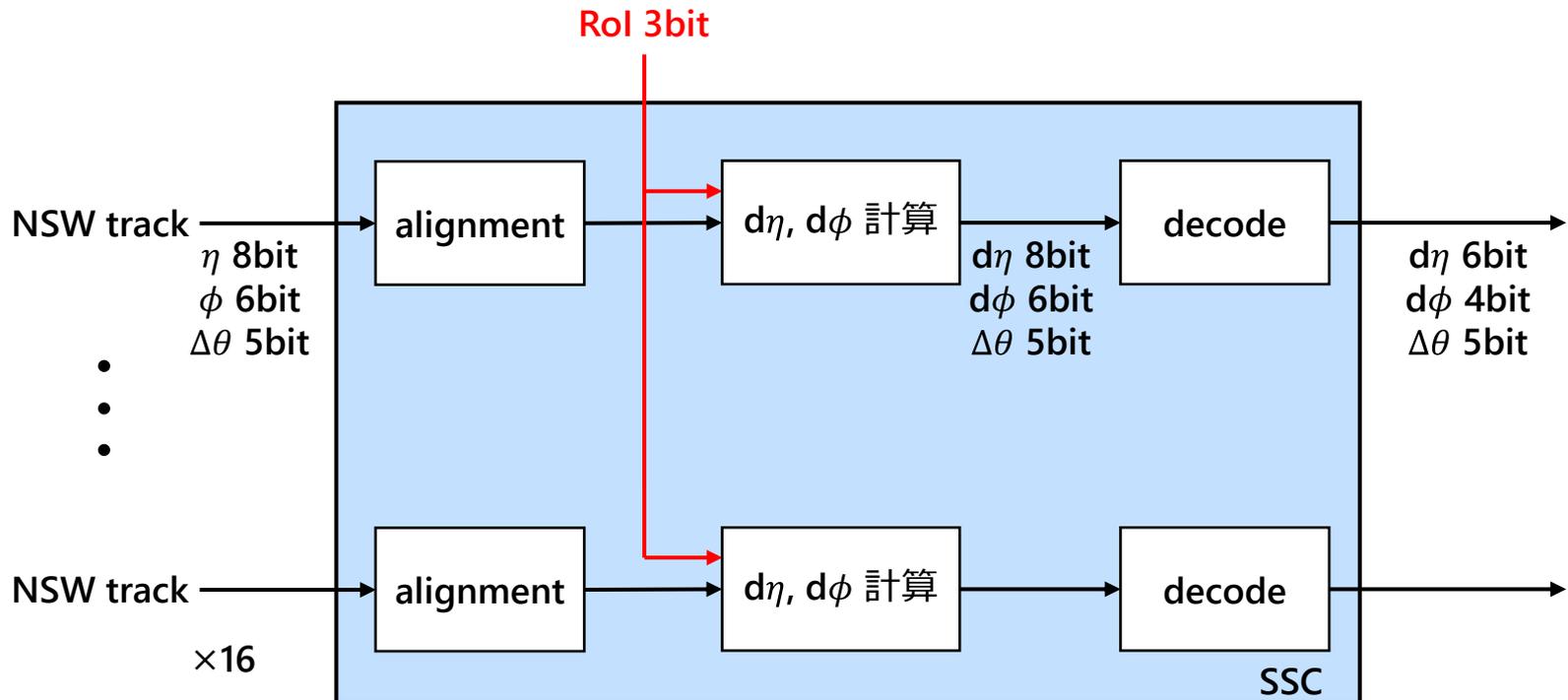
# トリガーファームウェア (backup)



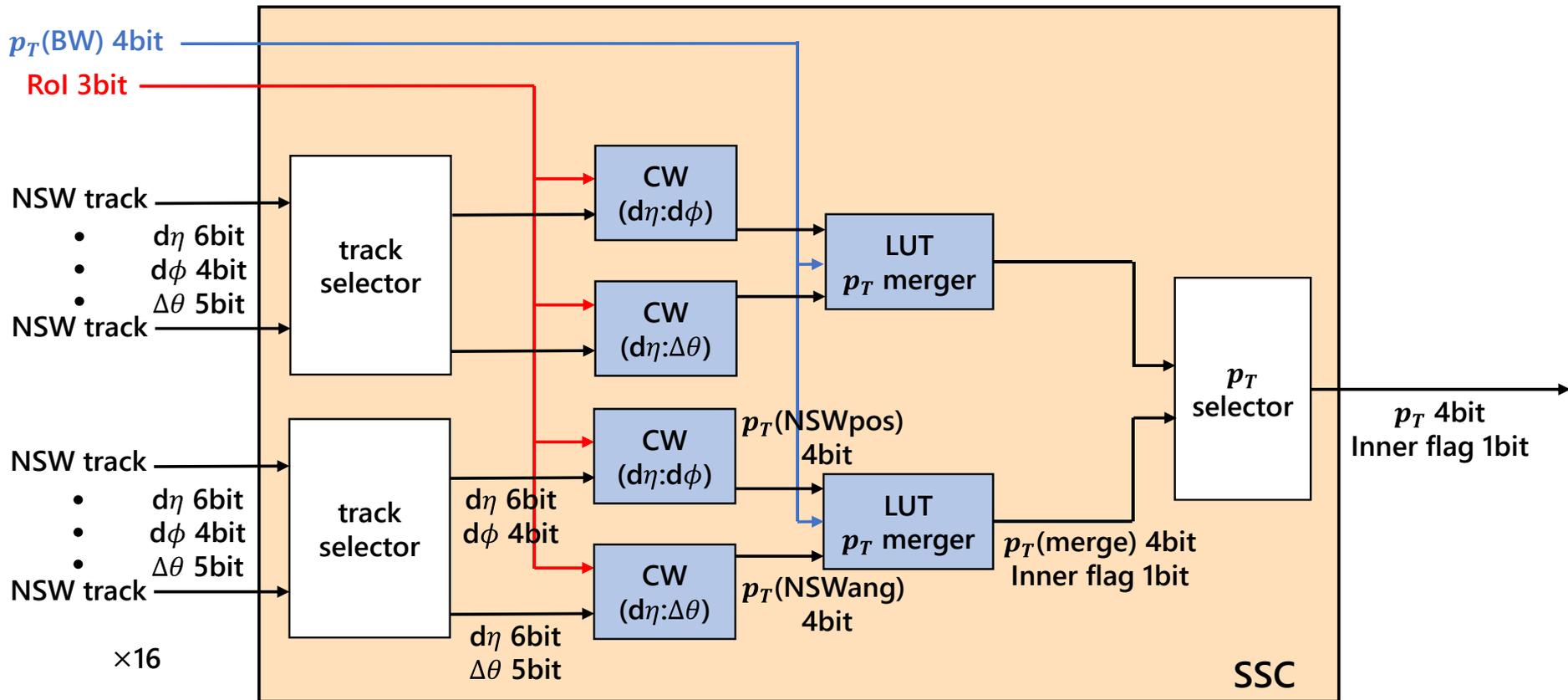
# BW Coincidence (backup)



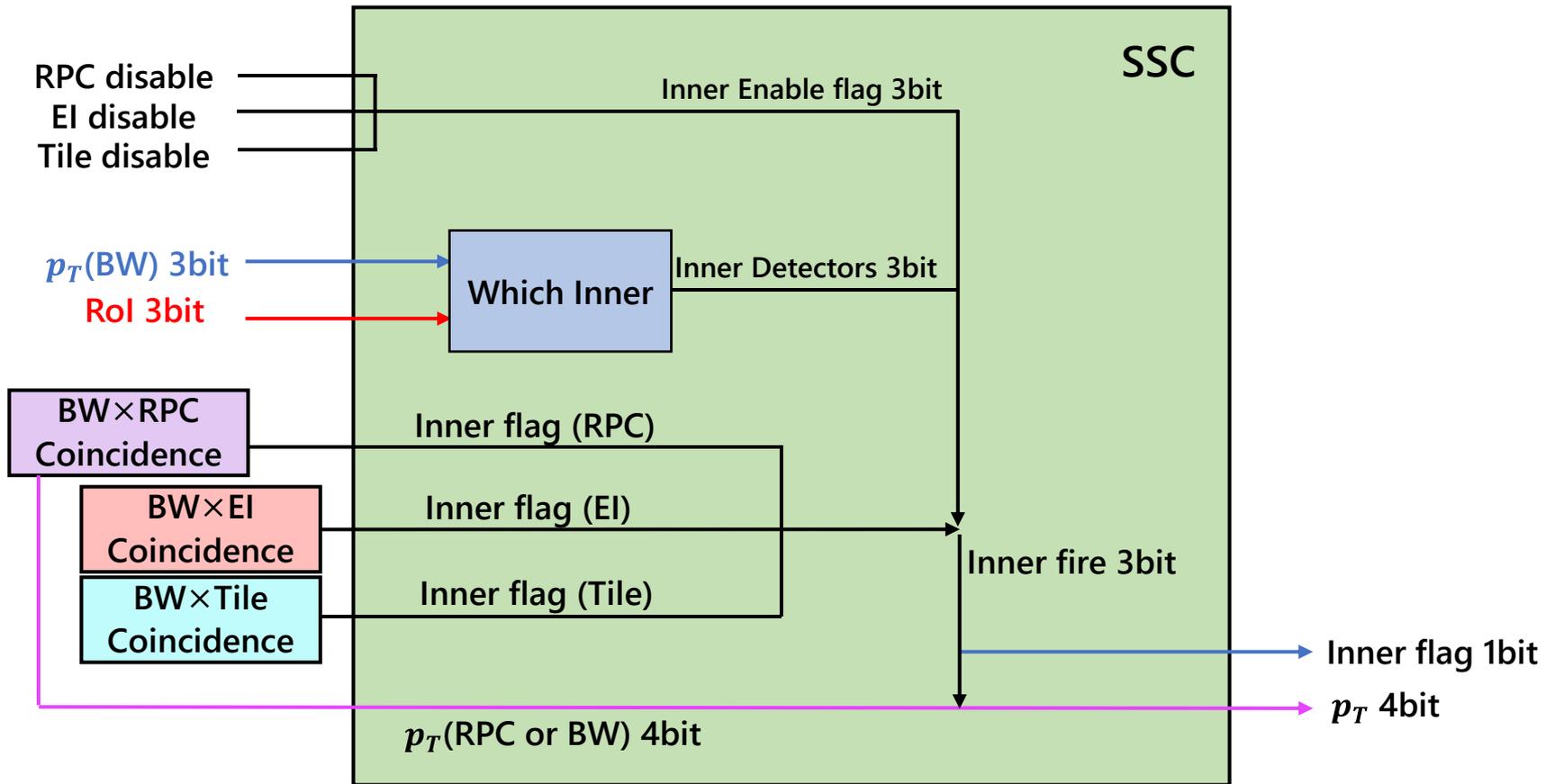
# NSW Decoder (backup)



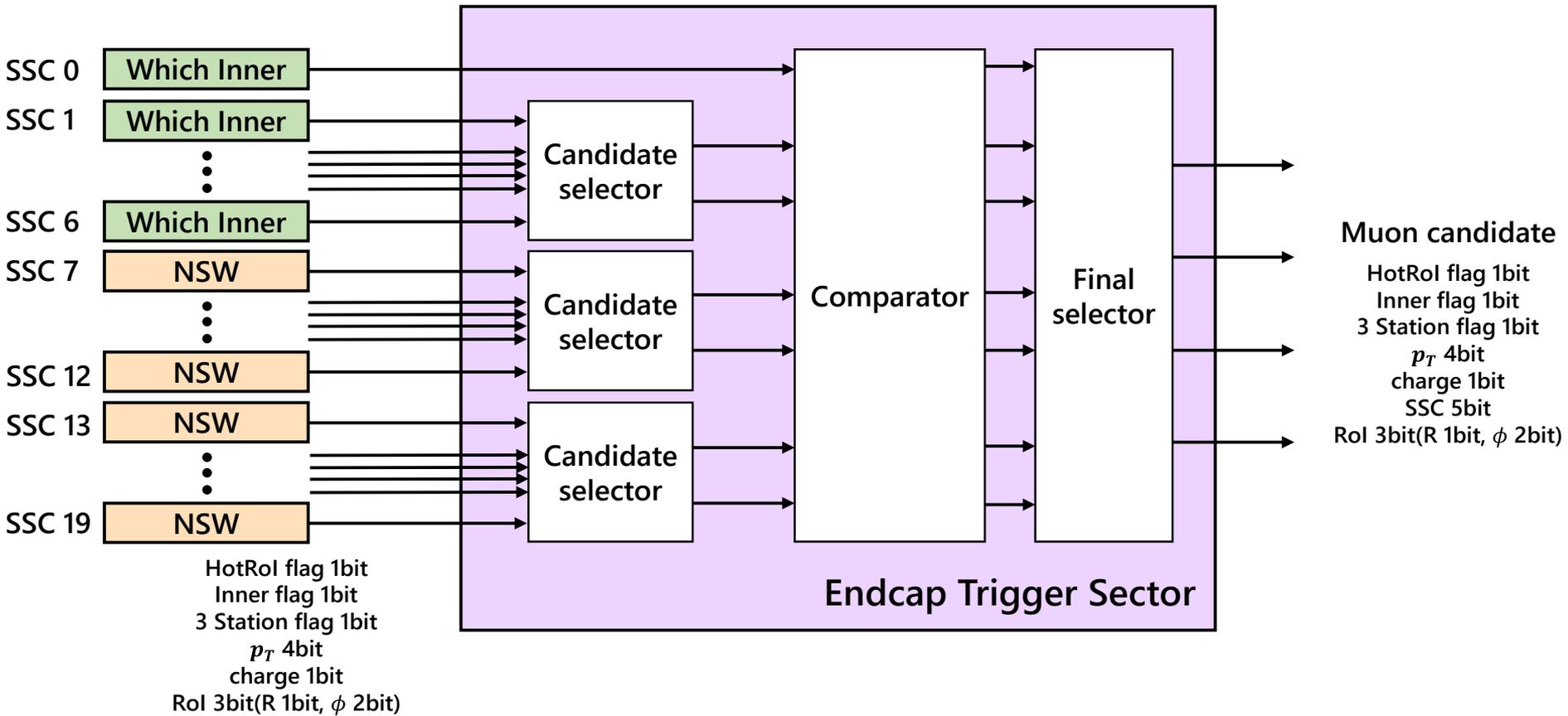
# BW×NSW Coincidence (backup)



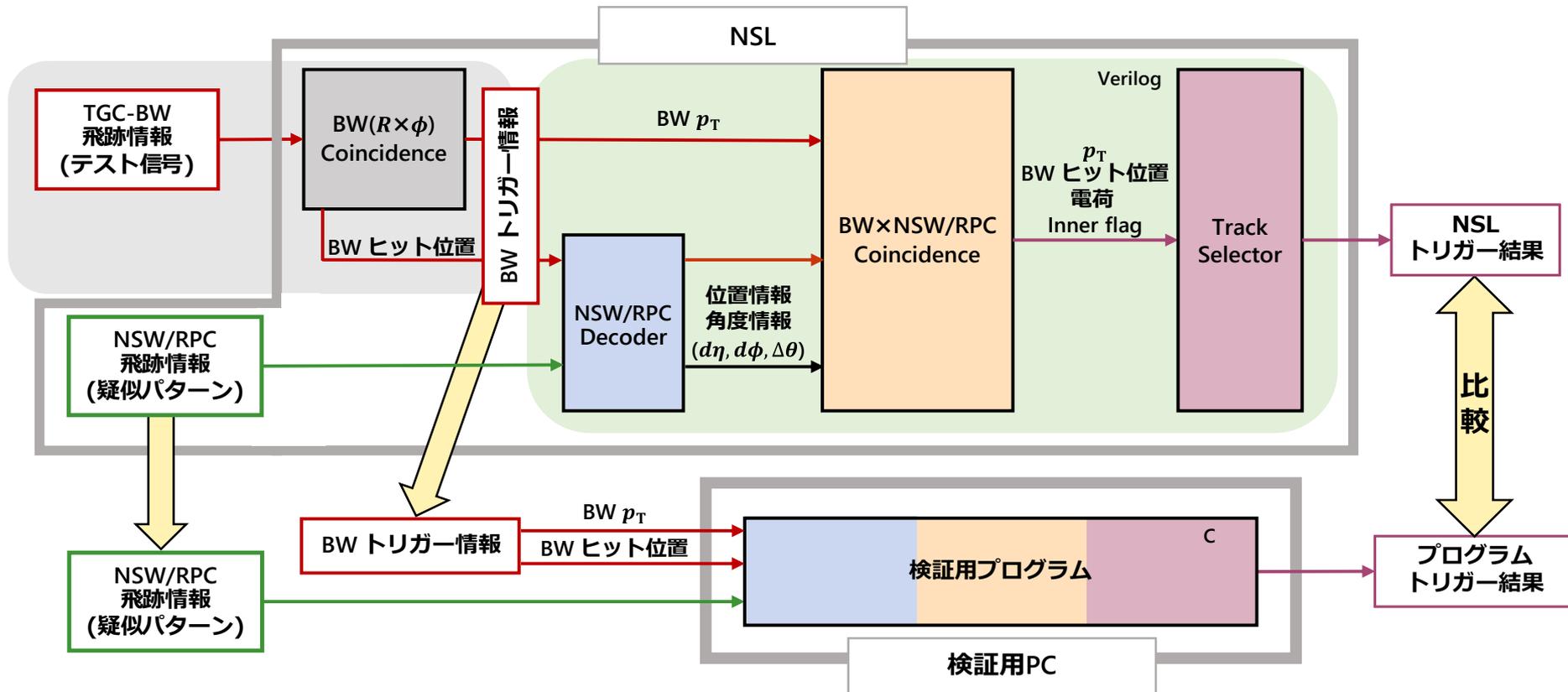
# Which Inner (backup)



# Track Selector (backup)



# トリガーファームウェアの検証試験 (backup)



# トリガーファームウェアの検証結果 (backup)

