

# 高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けたTGC 検出器による ミュオントリガーアルゴリズムの研究

---

京都大学 三野裕哉

ICEPP シンポジウム 2020年 2月18日

# LHC-ATLAS 実験

- LHC
  - ▶ CERN の陽子陽子衝突型円形加速器
  - ▶ 周長 27 km、衝突頻度 40 MHz、最大エネルギー 14 TeV
- ATLAS 実験
  - ▶ LHC の衝突点の 1 つに設置された大型汎用検出器 (ATLAS 検出器) を用いた実験。
  - ▶ 未知の粒子の探索やヒッグス粒子の精密測定を行うことで標準模型を超えた新たな物理の発見を目指している。

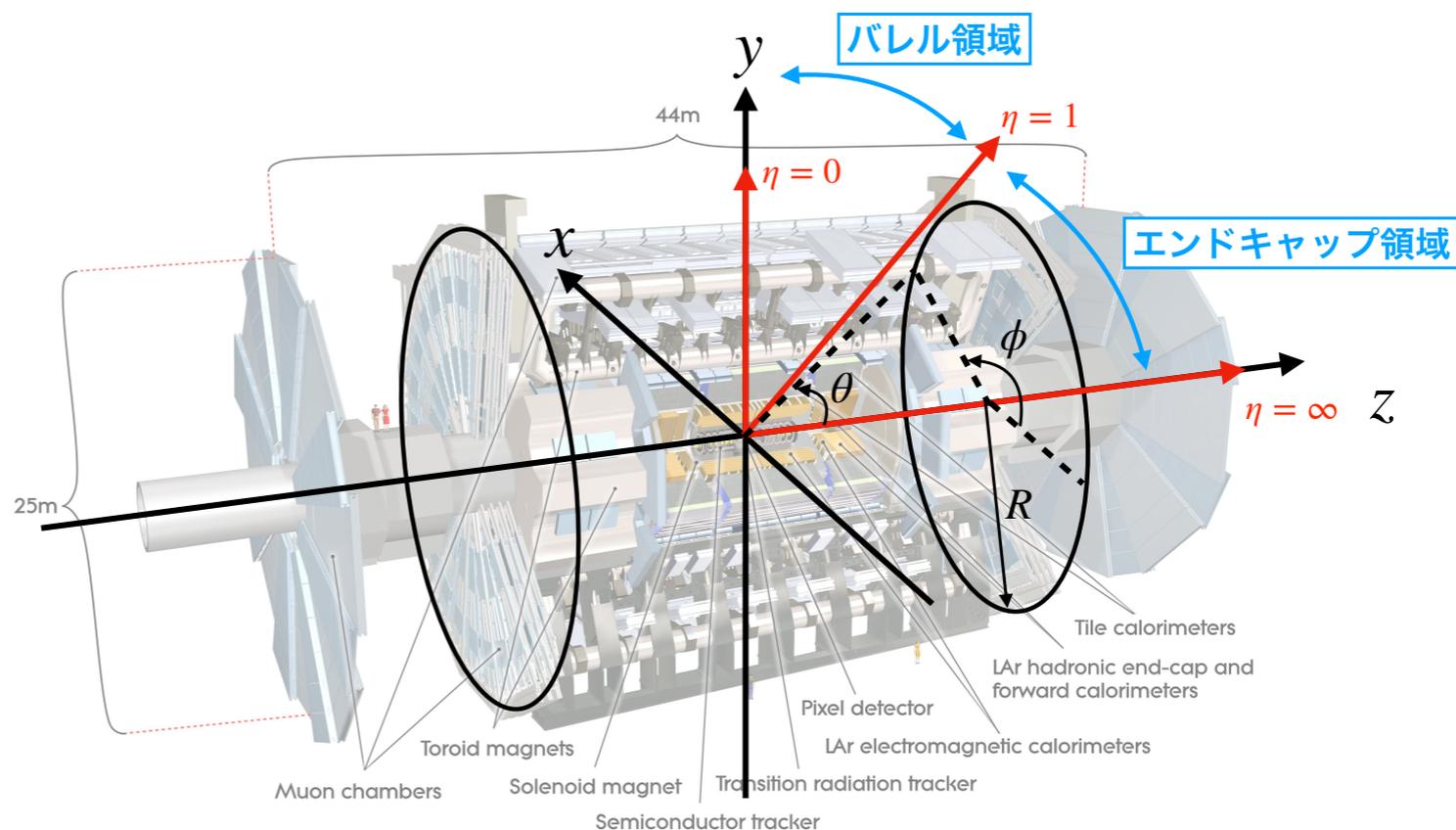
## 擬ラピディティ

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

$|\eta| \leq 1.0$ : バレル領域

$|\eta| > 1.0$ : エンドキャップ領域

## ATLAS 実験で用いる座標系



# トリガーシステムの重要性

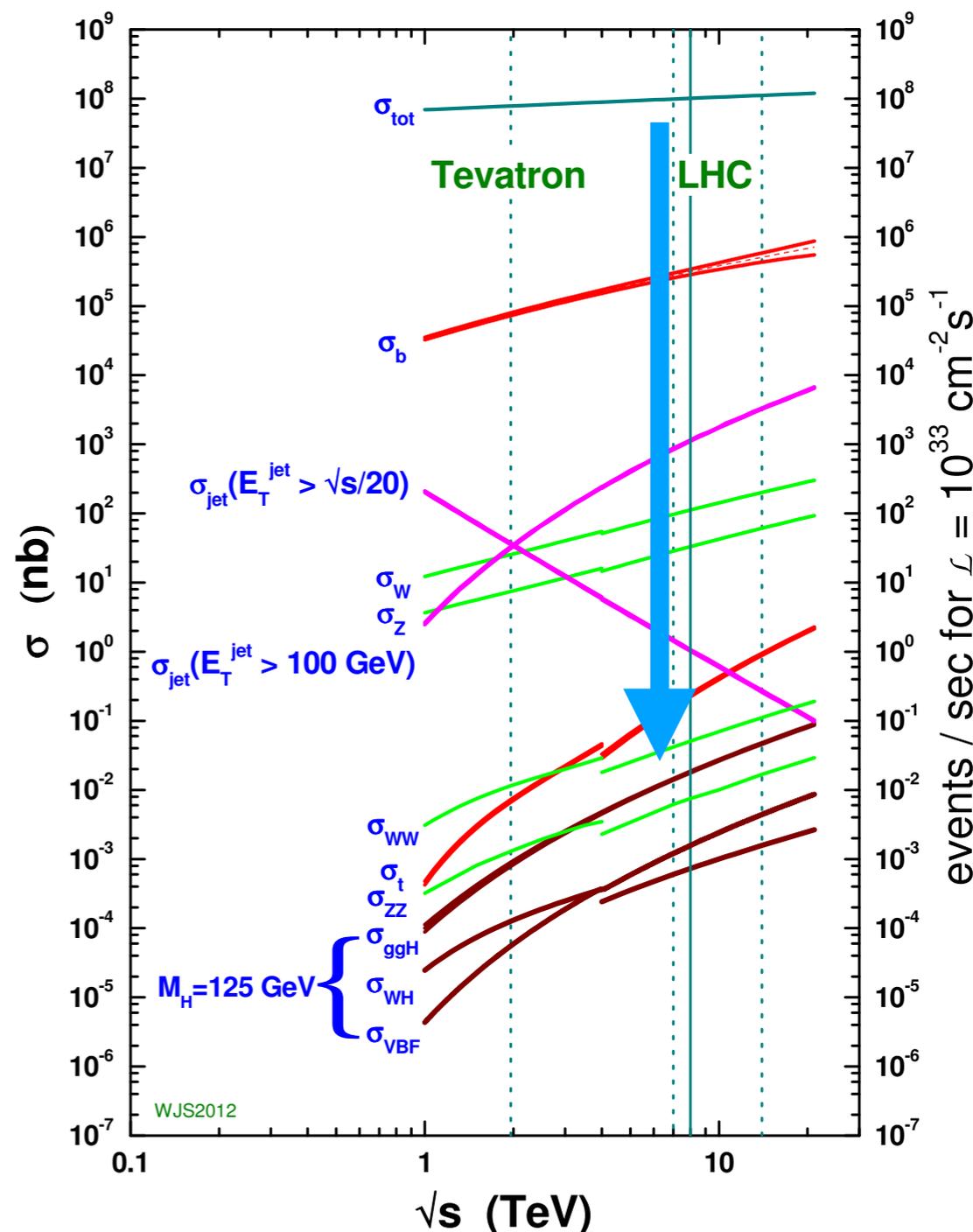
- 陽子陽子衝突における非弾性散乱の全断面積に対して興味のある物理 (ex. ヒッグス粒子生成) の断面積は非常に小さい。

断面積 $\sigma$	
全非弾性散乱	100 mb
ヒッグス粒子生成	30 pb

$\times 10^{-10}$

- 衝突で生じる高レート的事象を全て記録するのはデータ記録速度や容量の点で不可能である。
- エネルギーや横方向運動量( $p_T$ )に閾値を設けて興味のある事象をより正確に選別(トリガー)し、データを取得する必要がある。

proton - (anti)proton cross sections



# 高輝度 LHC

- 高い統計量での標準模型の精密測定や新物理探索を目的として 2027 年から高輝度LHC (HL-LHC) が開始予定。

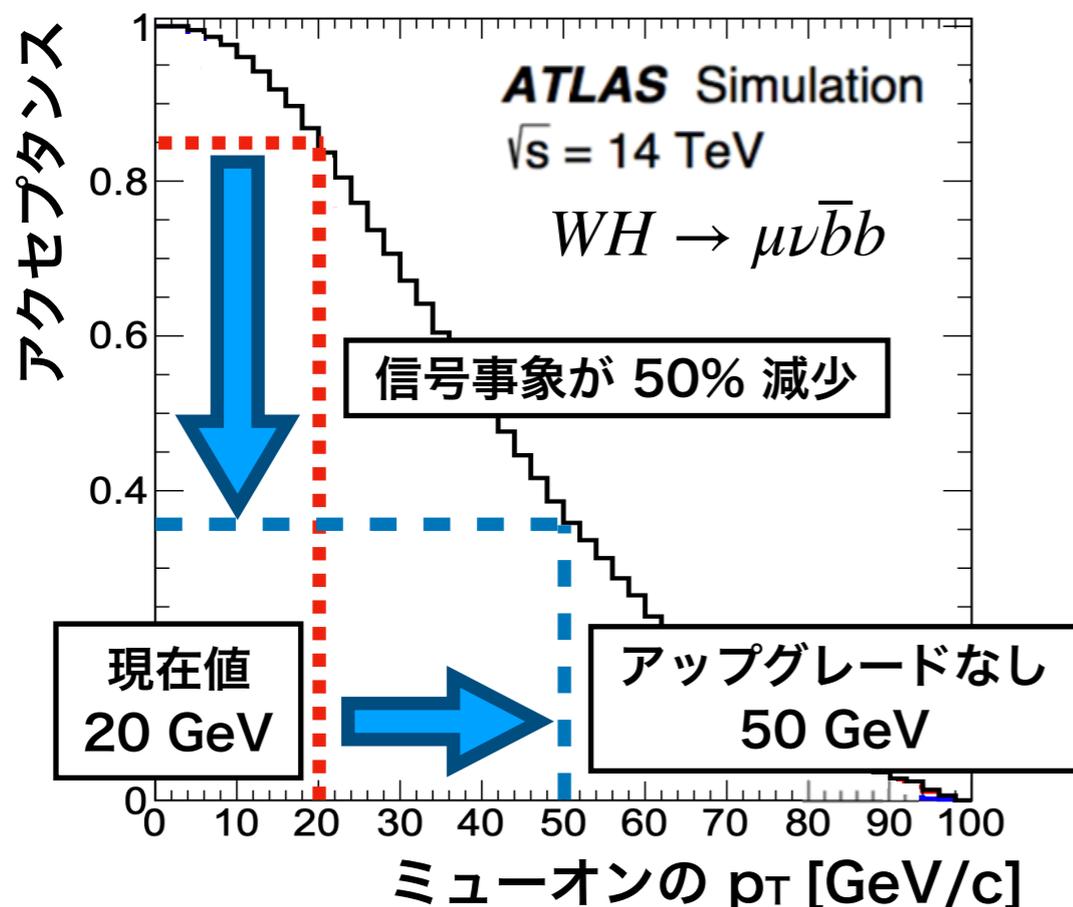
		LHC	HL-LHC
期間		- 2024	2027 - 2036
ルミノシティ	ピーク値 [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	$2 \times 10^{34}$	$5 - 7.5 \times 10^{34}$
	積分値 [ $\text{fb}^{-1}$ ]	350	3000 - 4000

「衝突頻度は 40 MHz のまま」

単位時間あたりの衝突数が約 3 倍

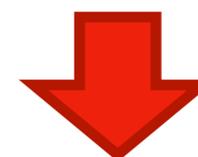
統計が約 10 倍

- 衝突数の増加に伴い、背景事象によるトリガーレートが増加する。



左の図はヒッグス粒子の W ボソン  
 随伴生成でのミュオンの  $p_T$  分布

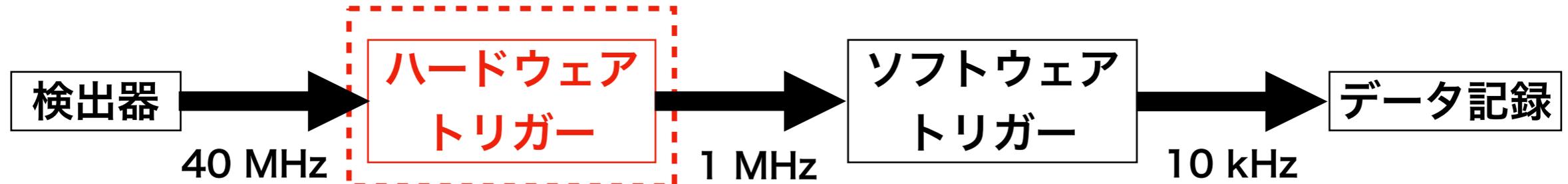
- ▶ トリガーの閾値を上げることでレートを抑制できるが、信号事象が減少する。



- ▶ 物理に対する感度を維持するにはトリガーシステムのアップグレードが必要。

# 高輝度 LHC での ATLAS トリガーシステム

- 初段のハードウェアと後段のソフトウェアで実装されたトリガーの 2 段階構成となっている。



トリガー読み出しシステムを刷新し、  
トリガーレート・判定時間を  
を増強して高輝度 LHC に対応する

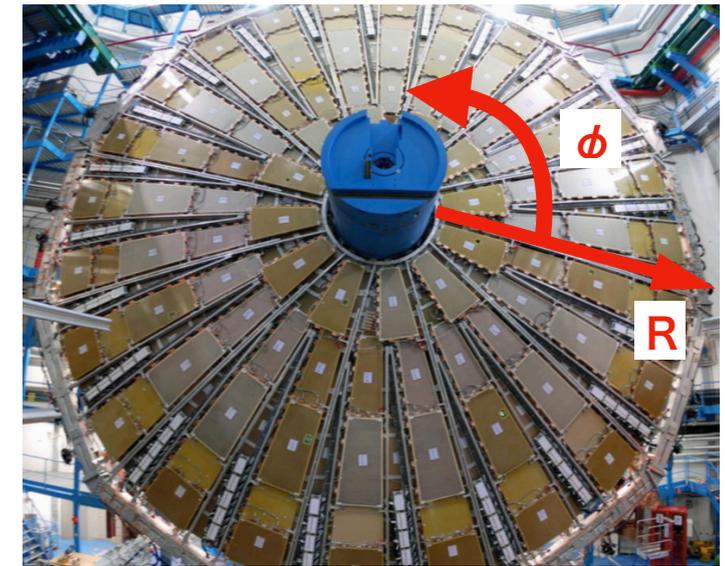
	LHC	HL-LHC
トリガーレート [kHz]	100	1000
判定時間 [ $\mu$ s]	2.5	10

- 判定時間の増強により、現行のトリガーロジックと比較して複雑なアルゴリズムを導入することが可能となる。
- 本研究では、エンドキャップ部ミュオン検出器を用いた初段トリガーアルゴリズムを開発した。

# エンドキャップ部ミュオン検出器

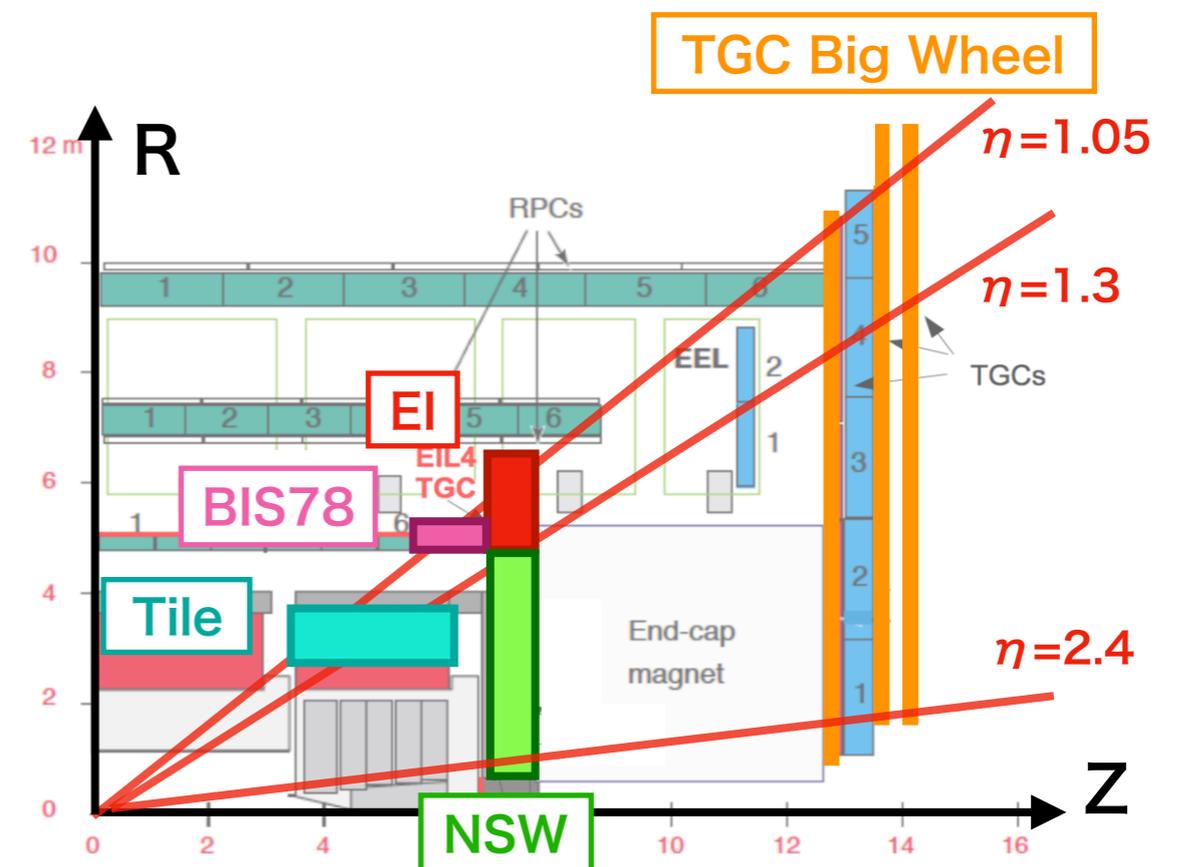
- **Thin Gap Chamber (TGC)**

- ▶ 多線式比例計数管(MWPC) の一種。
- ▶ エンドキャップ部でメインとなるミュオントリガー検出器。
- ▶ Big Wheel (BW) と呼ばれる円盤に 3 つのステーション (全 7 層) で構成されている。
- ▶ ワイヤーストリップによる  $R$ - $\phi$  の2次元読み出しを行う。



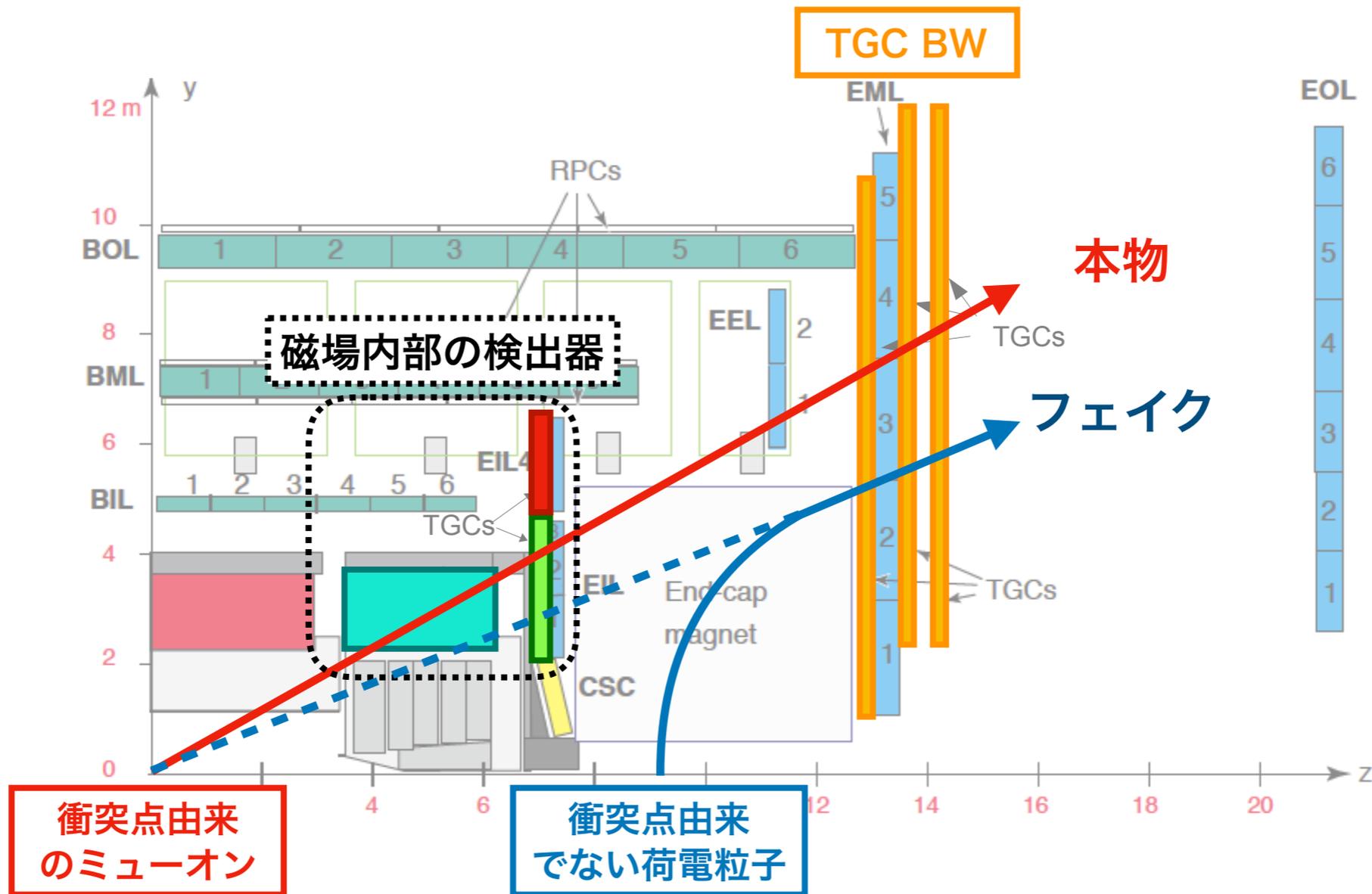
- 磁場内部の検出器

- ▶  $1.05 < |\eta| < 1.3$ 
  - **TGC EI** & **RPC BIS78**  
Resistive plate chamber (RPC) は TGC と同様に  $R$ - $\phi$  の2次元読み出しを行う。
  - **Tile calorimeter** (ハドロンカロリメータ)  
EI or BIS78 でカバーできない領域で用いる。
- ▶  $1.3 < |\eta| < 2.4$ 
  - **New Small Wheel (NSW)**  
飛跡の精密な角度測定が可能な検出器。



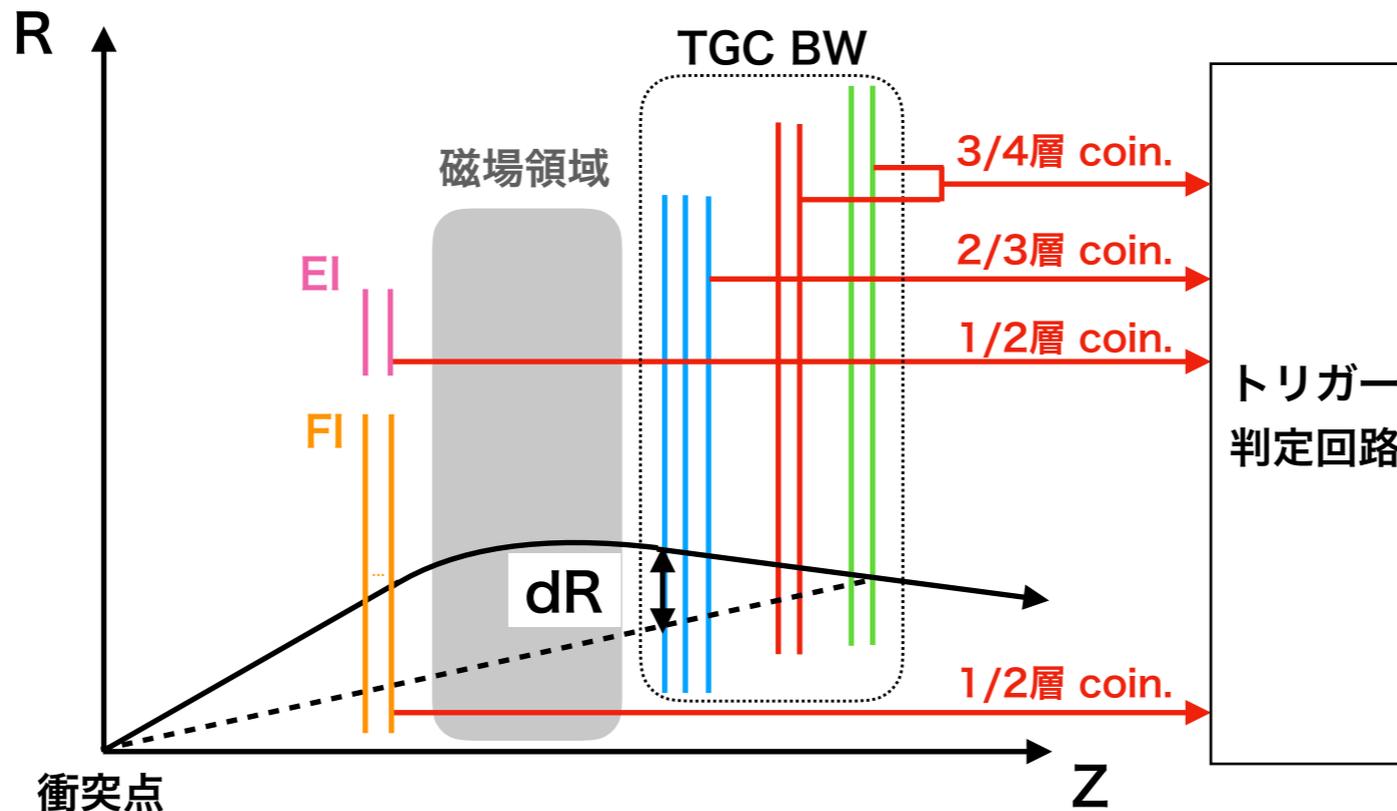
# ミュオントリガーの背景事象

- エンドキャップ部におけるミュオントリガーの背景事象
  - ① 衝突点由来でない荷電粒子によるトリガー。(フェイクトリガー)
    - ➔ 磁場内部の検出器にヒットを要求することで削減する。
  - ② TGC BW の分解能では削減できない低い  $p_T$  のミュオンによるトリガー。



# 現行のミュオントリガーアルゴリズム

- 各ステーションごとにコインシデンスを要求し、通過したものをトリガー判定回路に転送する。

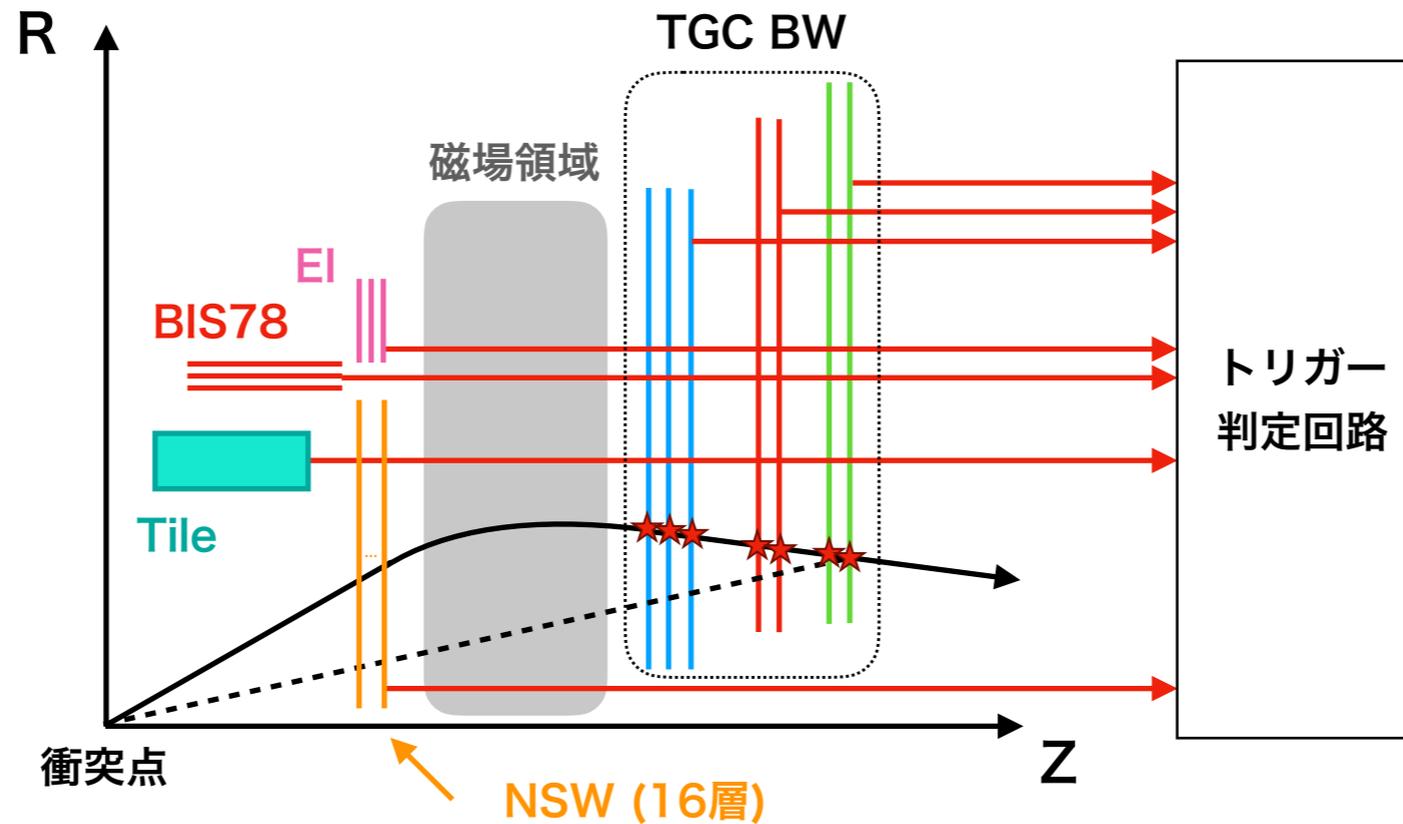


- 現行トリガーアルゴリズム

- TGC の最内層と最外層を用いてヒットの距離 ( $dR$ ,  $d\phi$ ) を計算し、 $p_T$  を判定。
  - ➔ コインシデンス条件により、TGC BW での検出効率は 92% に制限される。
  - ➔ TGC の最内層と最外層のみを用いて  $p_T$  を判定するため、 $p_T$  分解能に限界がある。
- 磁場内部の検出器にもヒットを要求することでフェイクトリガーを削減する。
  - ➔ 位置情報を使用しないため、低い  $p_T$  のミュオンによるトリガーを削減できない。

# 高輝度 LHC でのミュオントリガーアルゴリズム

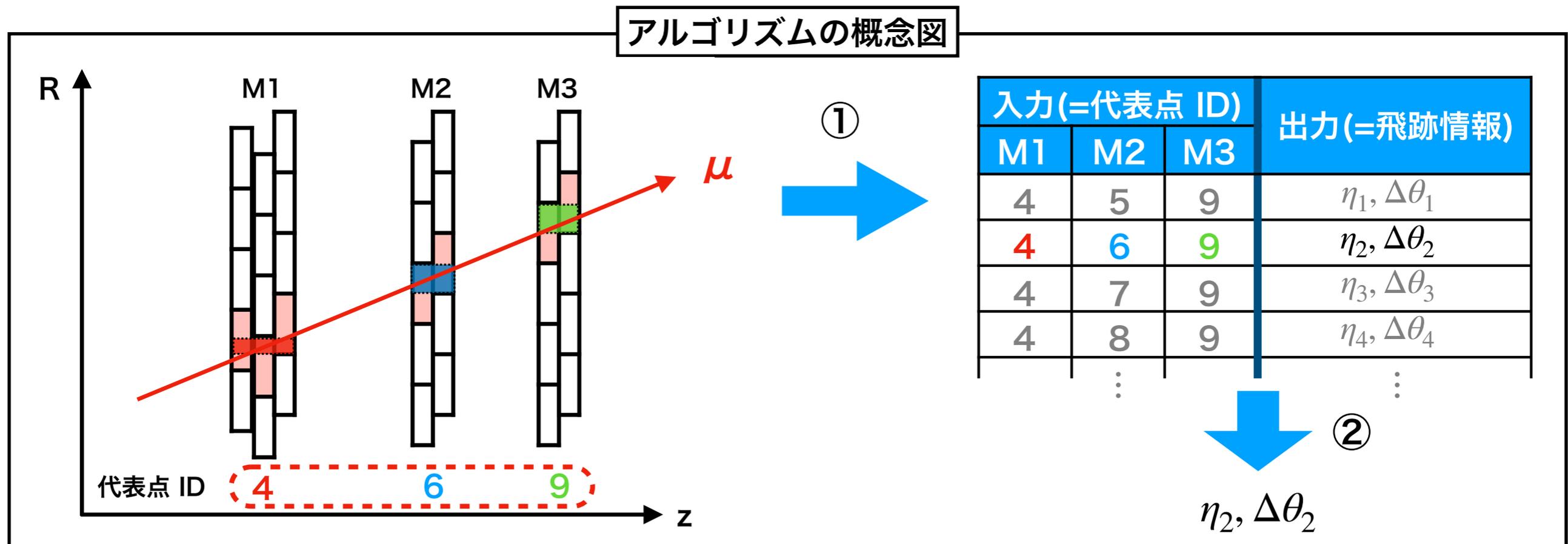
- 高輝度 LHC では TGC のヒット情報を全てトリガー判定回路に転送する。



- 高輝度 LHC でのトリガーアルゴリズム
  - ① TGC BW の全ヒット情報を用いて パターンマッチング(後述) で飛跡を再構成。
    - ➔ TGC BW での検出効率は 96 % (現行のトリガーシステムと比較して +4 %)
    - ➔ 全層の情報を用いることで  $p_T$  分解能が向上する。
  - ② 磁場内部の検出器で測定した位置・角度情報を用いる。
    - ➔ 低い  $p_T$  のミュオンやフェイクトリガーをカット。
- 本研究ではそれぞれのトリガーロジックの開発および性能評価を行った。

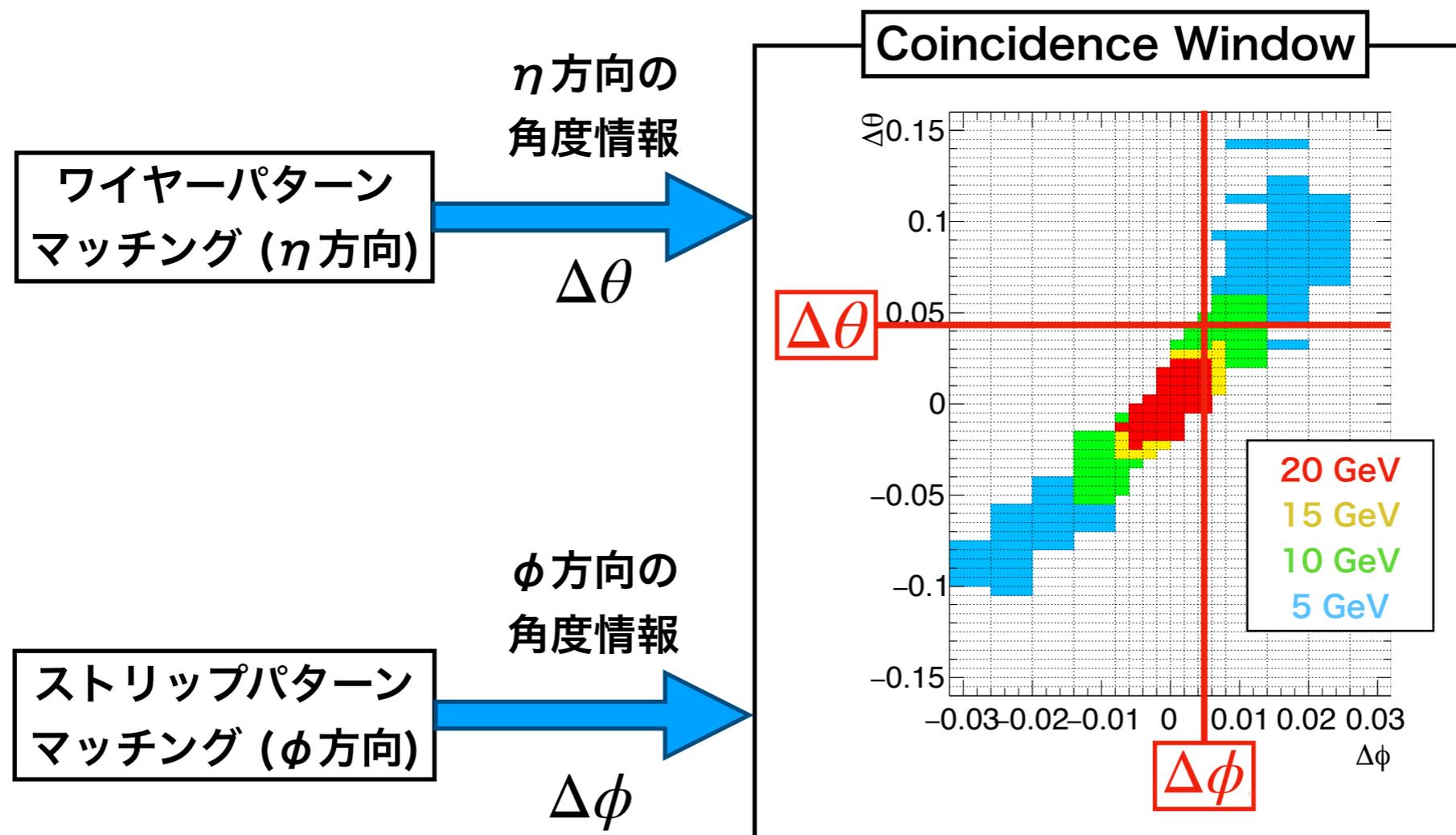
# パターンマッチングアルゴリズム

- ミューオンが各層で残すヒットの組み合わせに対応する飛跡の位置・角度情報をあらかじめ計算し、パターンとしてメモリに保存しておく。
  - ▶ 実際にヒットの組み合わせが得られたら対応するパターンを読み出すことで、複雑な計算を行うことなく飛跡を再構成できる。
- パターン抽出の手順
  - ① 各ステーションで TGC のヒット情報からコインシデンスをとり、代表点を定義。
  - ② パターンリストから代表点の組み合わせに対応する飛跡情報を抽出。

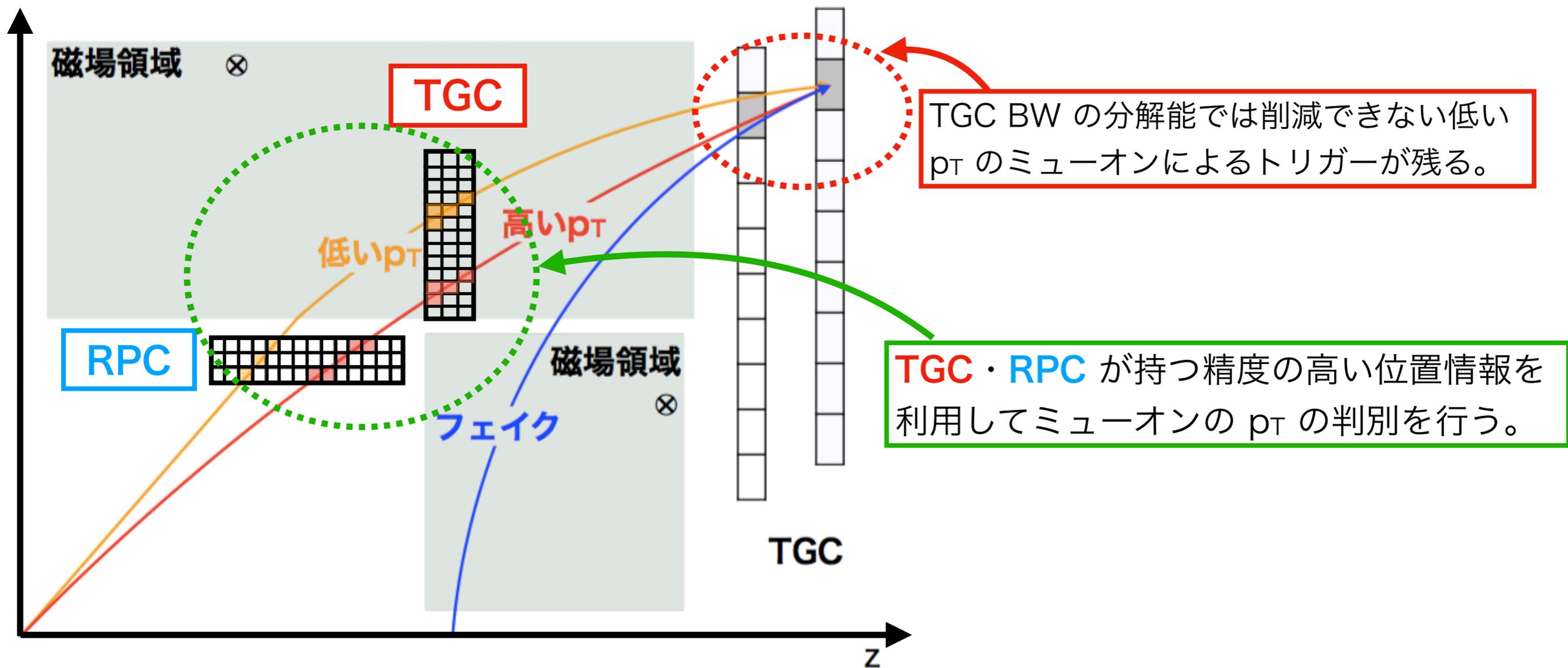


# パターンマッチングアルゴリズム

- ミューオンはトロイド磁場の非一様性により、 $\eta$ と $\phi$ 方向のいずれにも曲がるため、ワイヤーとストリップでそれぞれの方向の飛跡をパターンマッチングによって得る。
- 飛跡の角度と  $p_T$  閾値の対応関係を用いて Coincidence Window (CW) での  $p_T$  測定を行う。



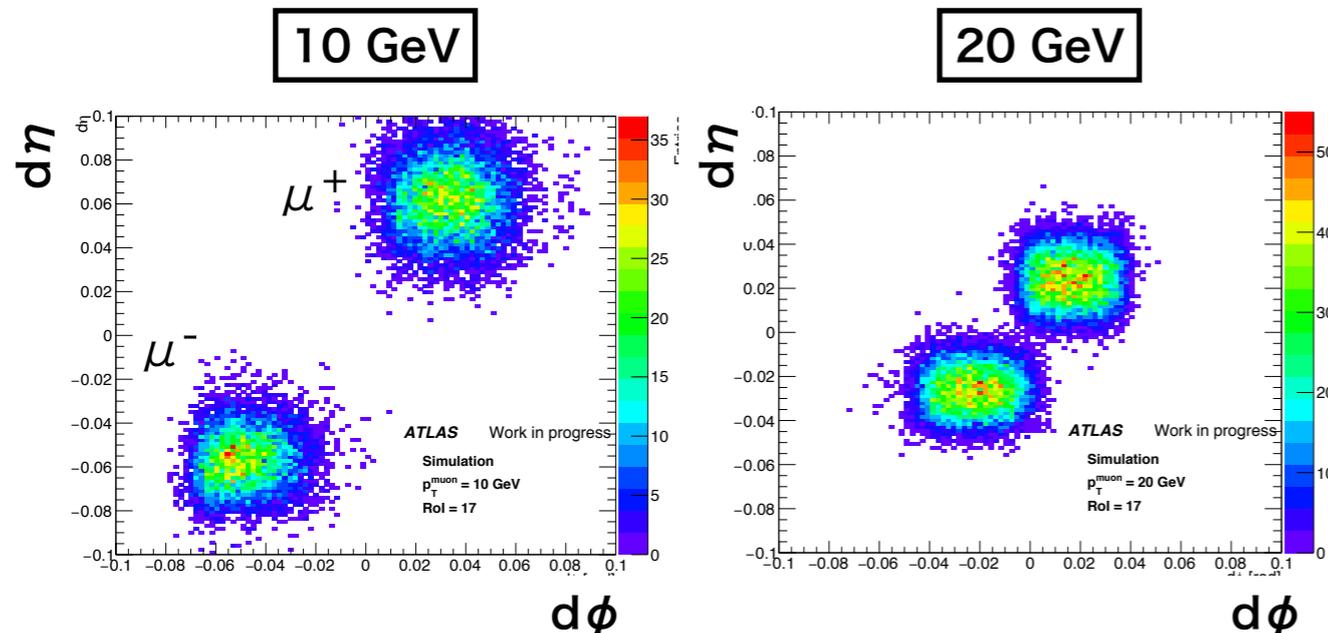
# 磁場内部の TGC・RPC を用いたトリガーロジック



# 磁場内部の TGC・RPC を用いたトリガーロジック

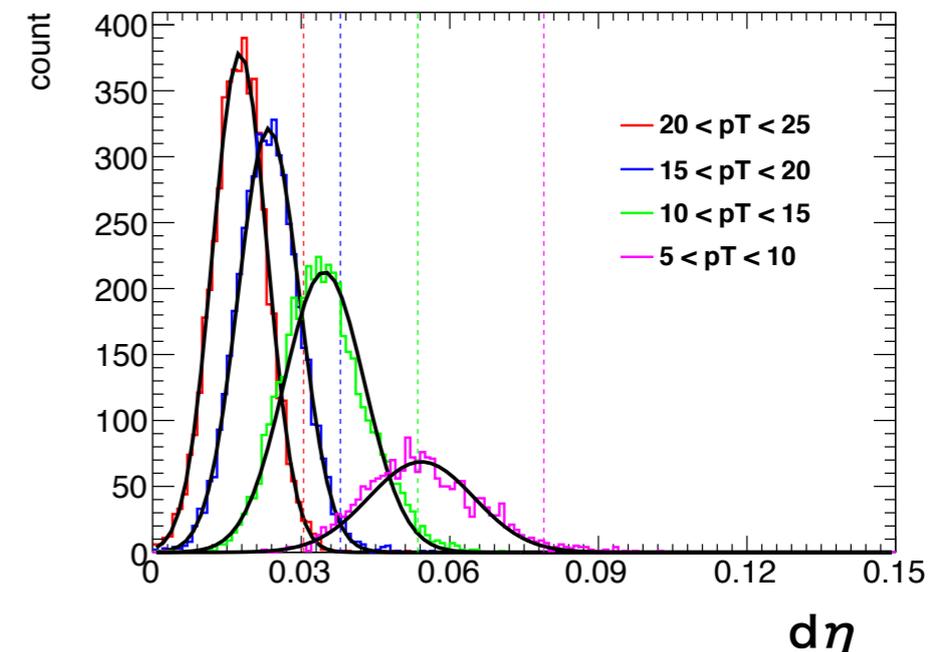
- TGC BW と **TGC**・**RPC** の位置の差に対して閾値を設定する。

RPC



- **RPC** がカバーする領域では磁場の影響によりミュオンは $\phi$ 方向へ曲がる。
  - ▶  $d\eta \cdot d\phi$  と  $p_T$  閾値の対応関係を用いて Coincidence Window (CW) での  $p_T$  測定を行う。

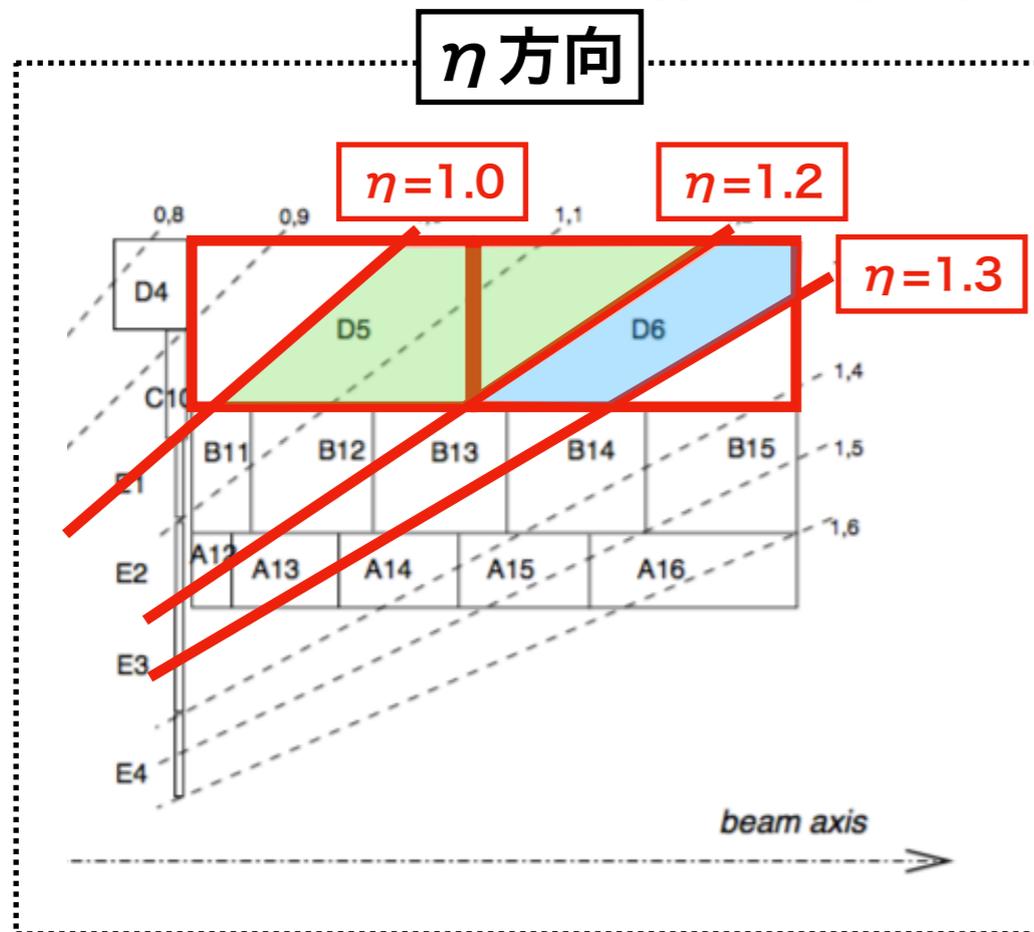
TGC



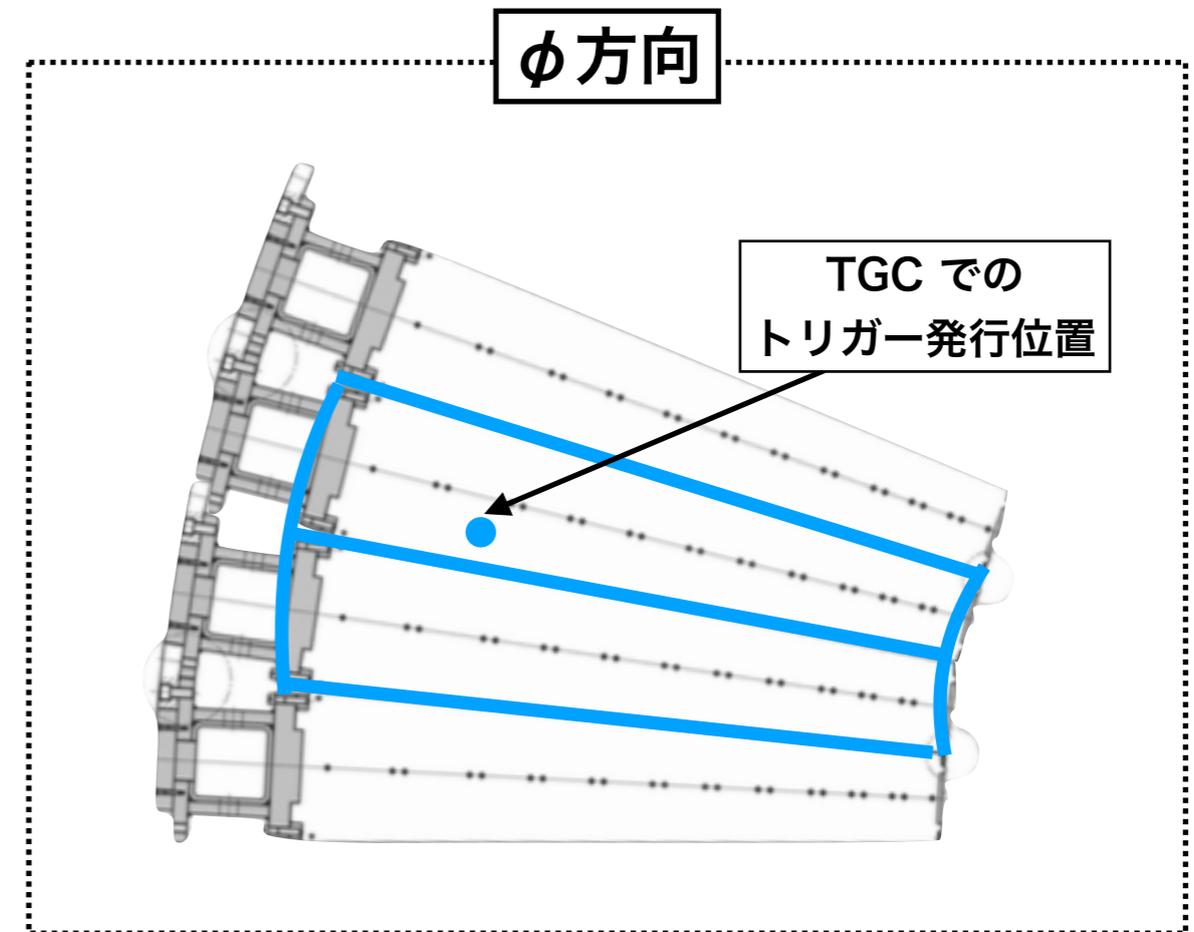
- **TGC** がカバーする領域ではミュオンを $\phi$ 方向に曲げる磁場はほとんどかからない。
  - ▶  $d\eta$  についてのみカットをかける。

# Tile カロリメータを用いたトリガーロジック

- Tile カロリメータで落としたエネルギーに対して閾値を決めることでカットを行う。
- ミューオンの精密な位置情報はないため、通過したかどうかのみ判別。
  - ▶ フェイクトリガーの削減が可能。



1.05 <  $|\eta|$  < 1.2 の場合 D5 + D6  
1.2 <  $|\eta|$  < 1.3 の場合 D6 のみを使用

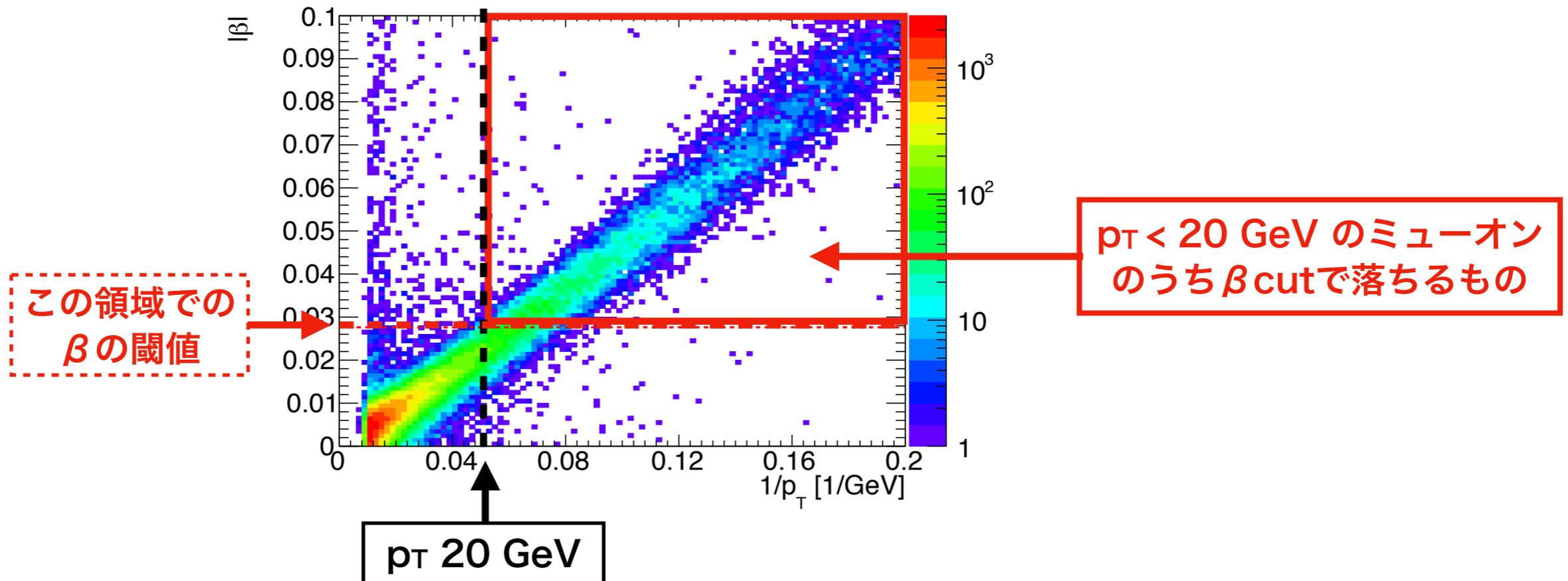
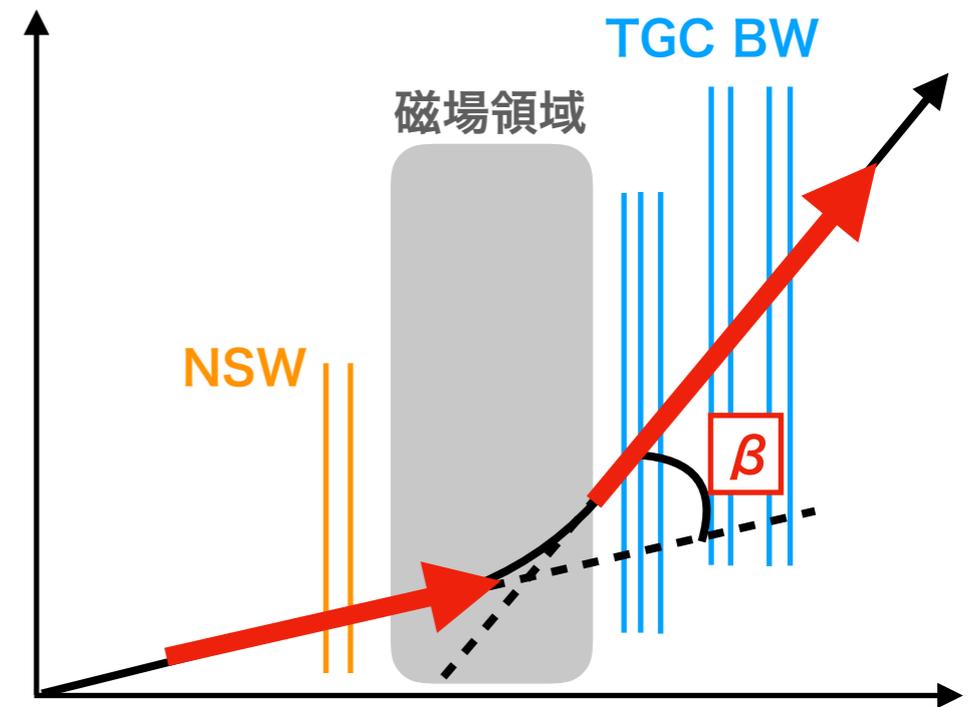


+  
 $p_T$  20, 15 GeV では TGC で測定した  $\phi$  に  
最も近い2つのモジュールのうち  
少なくとも1つのエネルギーが 500 MeV を  
超えた時にコインシデンスをとる。

\*  $p_T$  10, 5 GeV では 3 つのモジュール

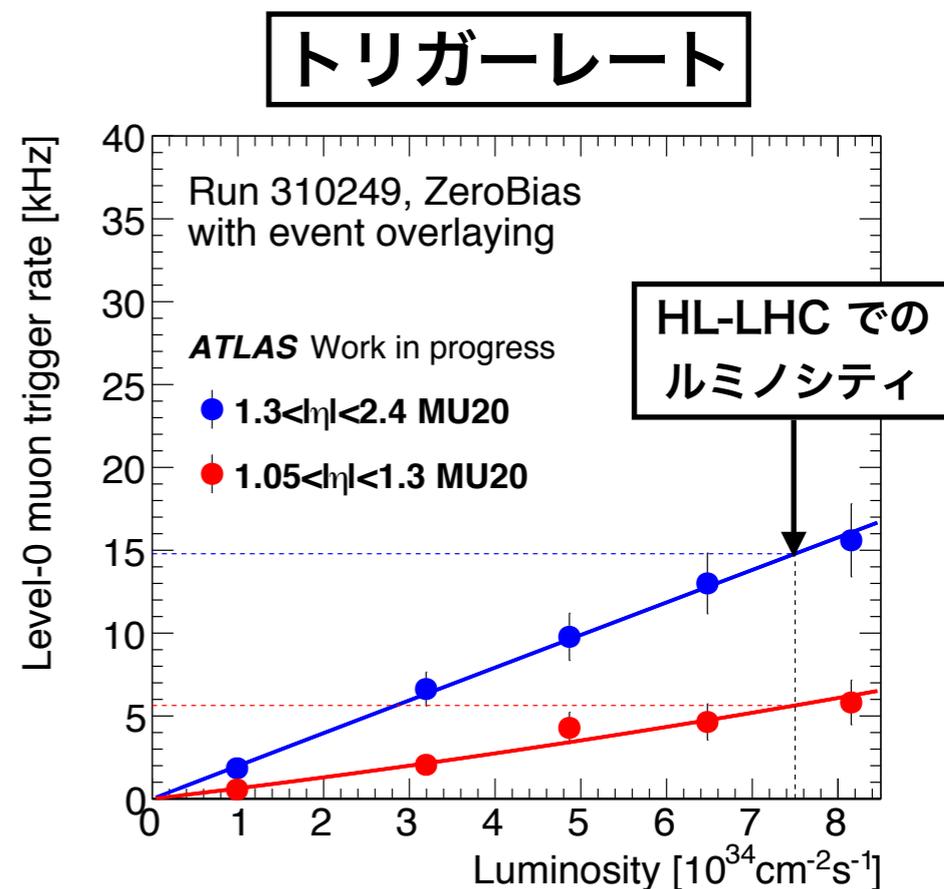
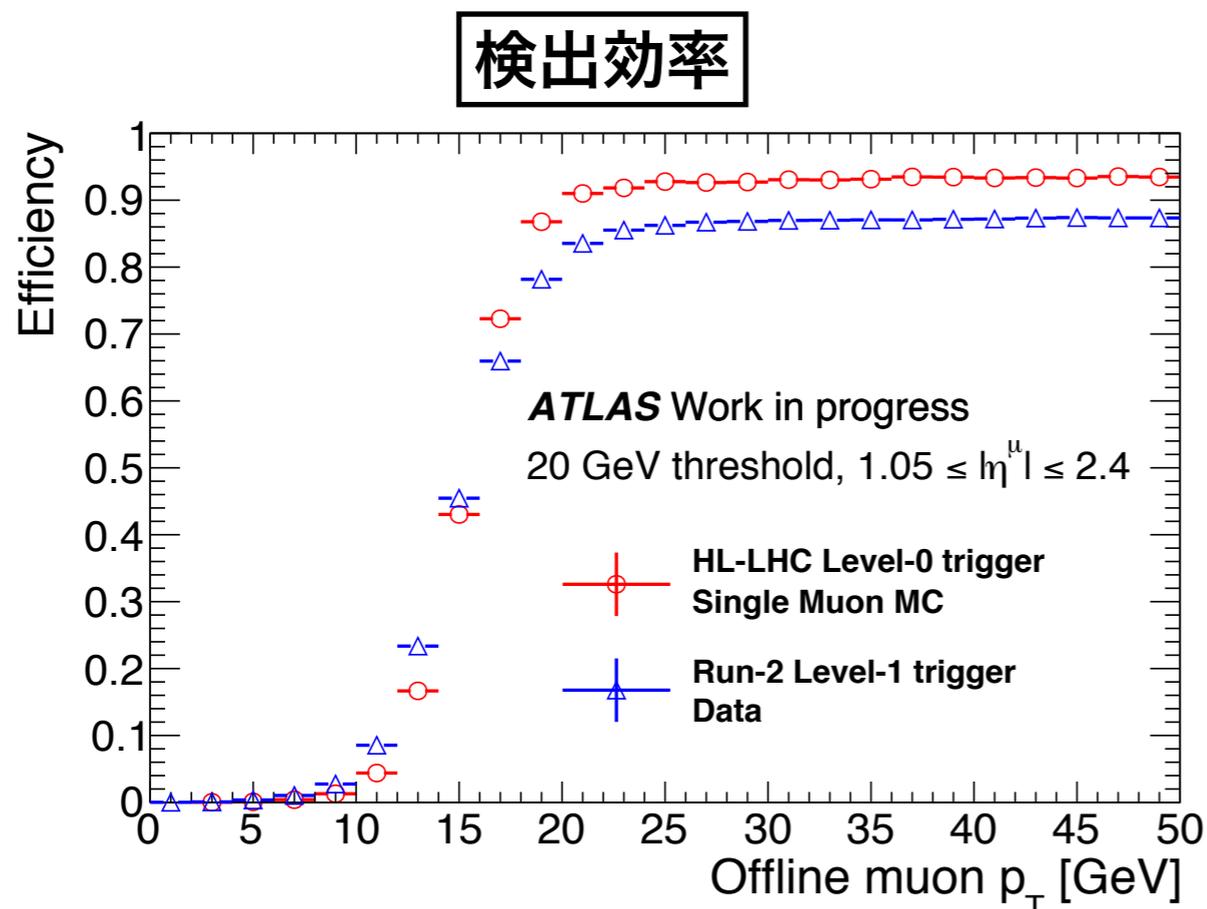
# NSW を用いたトリガーロジック

- TGC BW と NSW で再構成した飛跡の角度差  $\beta$  を用いて、低い  $p_T$  のミュオンによるトリガーを削減する。
  - ▶  $p_T$  が大きいほど  $\beta$  が小さくなる。
- 磁場が一様でないため、領域によって  $\beta$  による  $p_T$  測定の分解能は異なる。
  - ▶ 領域ごとに閾値を最適化した。



# 現行システムとの性能比較

- 検出効率
  - ▶ 閾値以上の  $p_T$  を持つミュオンに対して **94%** (現行システムのままでは 87%) と高い検出効率を持ちつつ、閾値以下の  $p_T$  を持つミュオンを削減した。
- トリガーレート
  - ▶ 閾値以下の  $p_T$  を持つミュオンとフェイクトリガーを大きく削減することで **20 kHz** (現行システムのままでは約 60 kHz) を達成した。



# まとめ

- 高輝度 LHC のための初段ミュオントリガーロジックの開発を行った。
  - ① TGC BW の全ヒット情報を用いて飛跡再構成を行うパターンマッチングアルゴリズム
  - ② ①で得た飛跡情報と磁場内部の検出器の位置・角度情報を用いたトリガーロジックを用いることで、現行のトリガーシステムと比較して性能が向上することを示した。

## 高輝度 LHC でのトリガー性能

	現行のままの場合	アップグレード後
$p_T$ 閾値以上の検出効率	87%	94%
トリガーレート	60 kHz	20 kHz

## 今後

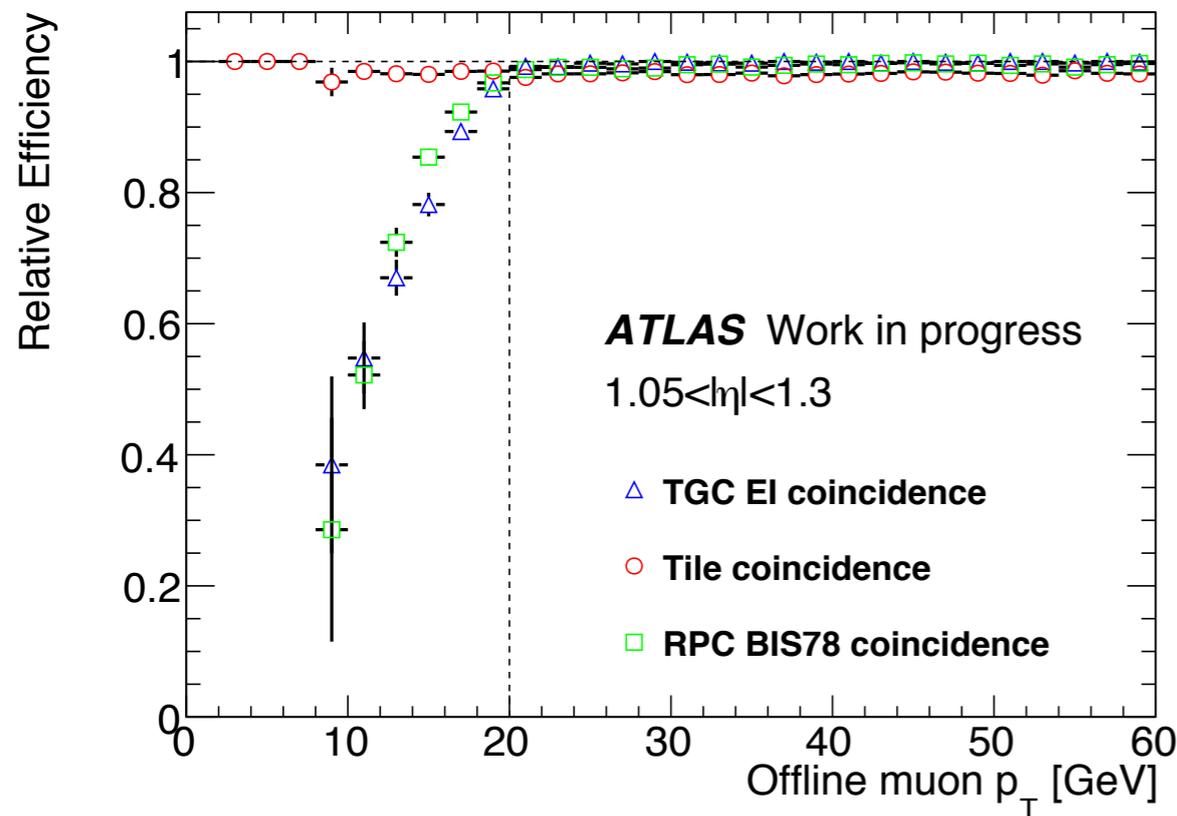
- アライメントのズレによるパターンマッチングアルゴリズムの性能への影響を調べる。

Back up

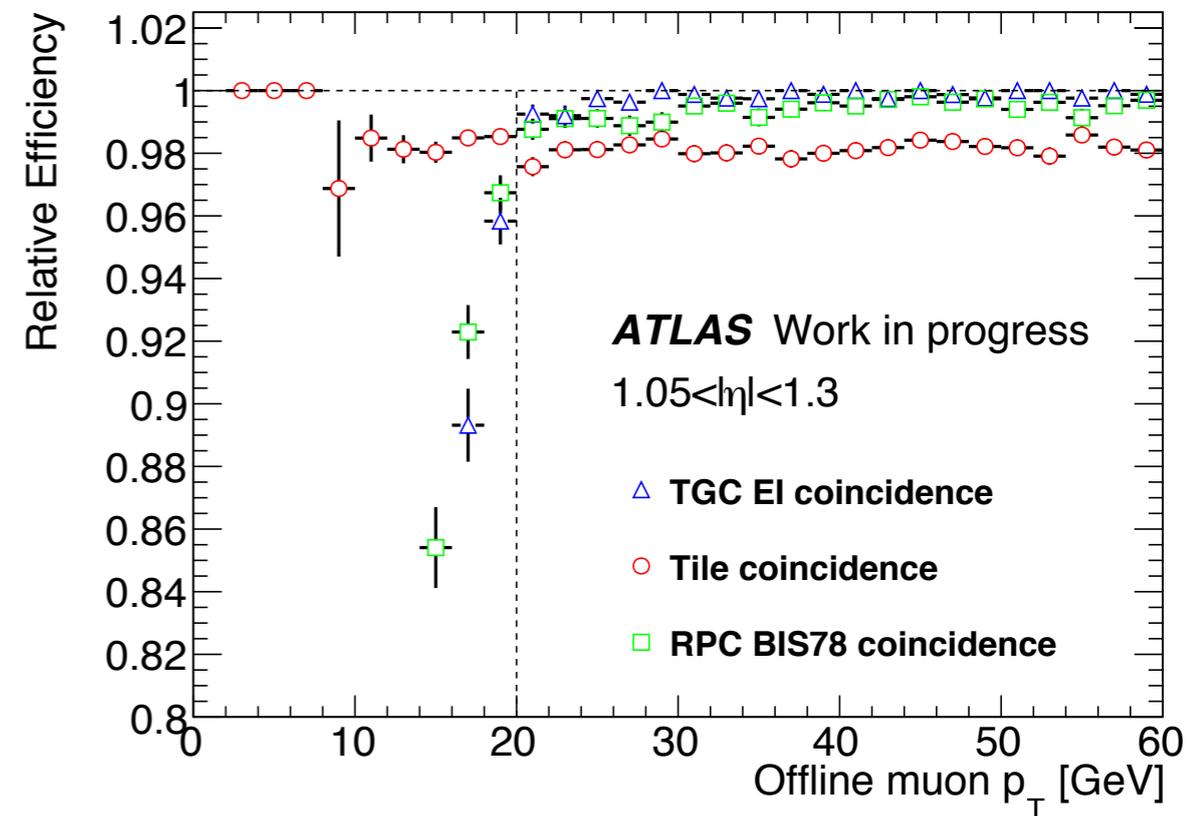
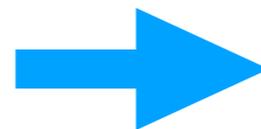
---

# NSW 以外の磁場内部の検出器の利用

- EI・BIS78 は Tile よりも低い  $p_T$  に対する削減率が高く、 $p_T$  閾値以上のミュオンに対する検出効率も高いことを確認。  
→ EI・BIS78 によるカットを優先し、これらでカバーできない領域では Tile カロリメータを用いる。



拡大



# 高輝度 LHC におけるトリガーマニューの一例

- トリガーマニューとは、ハードウェアトリガーとソフトウェアトリガーにあらかじめ配分するレートを決めるためのもの。

Trigger Selection	Run 1	Run 2 (2017)	Planned HL-LHC Offline $p_T$ Threshold [GeV]	L0 Rate [kHz]	After regional tracking cuts [kHz]	Event Filter Rate [kHz]
	Offline $p_T$ Threshold [GeV]	Offline $p_T$ Threshold [GeV]				
isolated single $e$	25	27	22	200	40	1.5
isolated single $\mu$	25	27	20	45	45	1.5
single $\gamma$	120	145	120	5	5	0.3
forward $e$			35	40	8	0.2
di- $\gamma$	25	25	25,25	60	20	0.2
di- $e$	15	18	10,10	10	2	0.2
di- $\mu$	15	15	10,10	45	10	0.2
$e - \mu$	17,6	8,25 / 18,15	10,10	3	3	0.35
single $\tau$	100	170	150	200	40	0.5 <sup>+++</sup>
di- $\tau$	40,30	40,30	40,30	25	25	0.35 <sup>+++</sup>
single $b$ -jet	200	235	180	40	40	0.5
single jet	370	460	400	100	20	0.2
large- $R$ jet	470	500	300	50	10	0.2 <sup>+++</sup>
four-jet (w/ $b$ -tags)		45 <sup>+</sup> (1-tag)	65(2-tags)	60	5	0.4
four-jet	85	125	100	33	5	0.5 <sup>+++</sup>
$H_T$	700	700	375	50	10	0.5
$E_T^{\text{miss}}$	150	200	210	100	40	2
VBF inclusive			2x75 w/ ( $\Delta\eta > 2.5$ & $\Delta\phi < 2.5$ )	50	10	0.5
$B$ -physics <sup>++</sup>				100	40	2
Supporting Trigs				1066	338	10.4
Total						

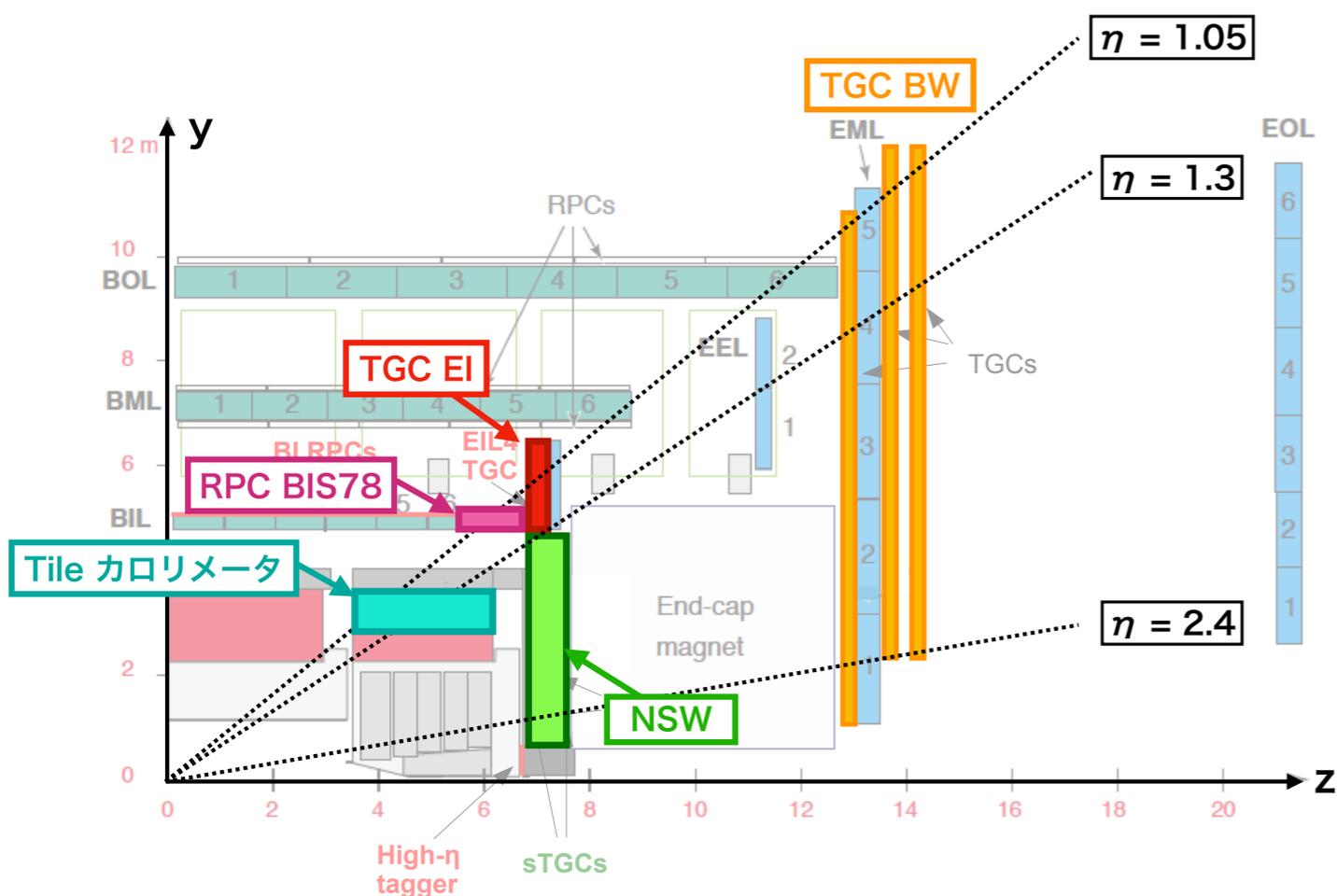
ハードウェア  
トリガー

ソフトウェア  
トリガー

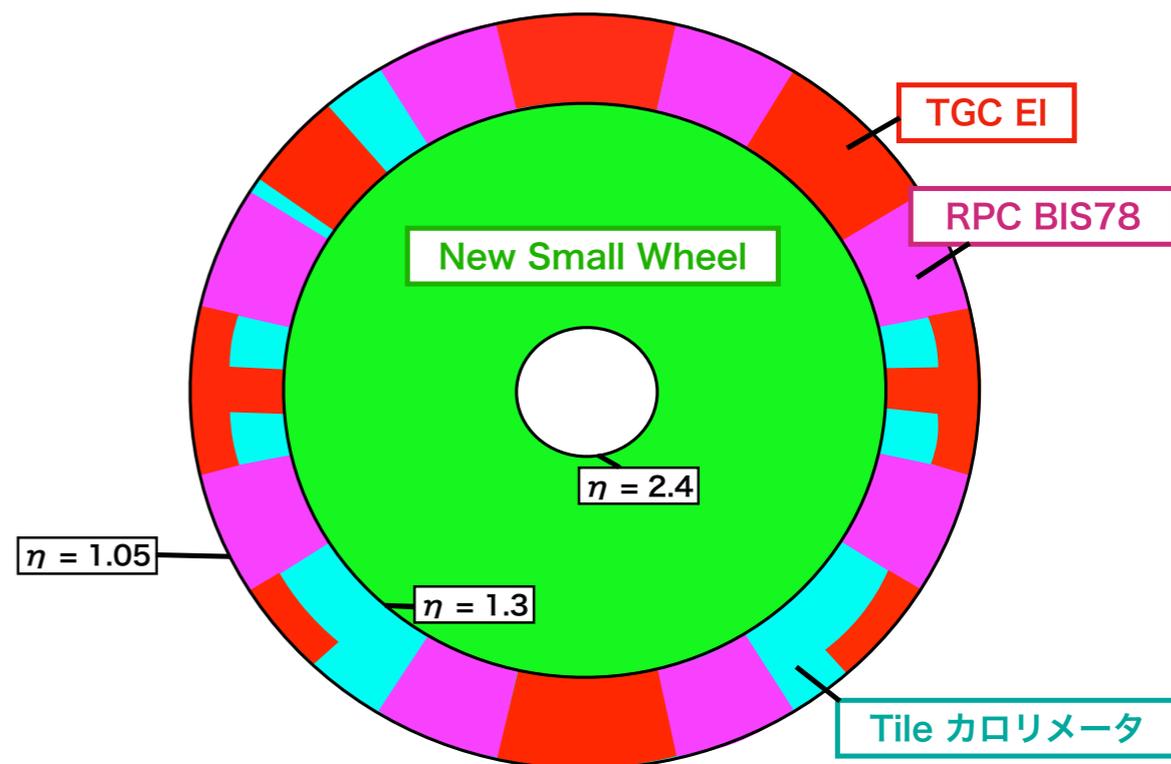
左の例では、 $p_T$  閾値 20 GeV  
におけるハードウェアトリガーの  
レートは 45 kHz

# ミューオン検出器の配置

ミューオン検出器の R-z 図

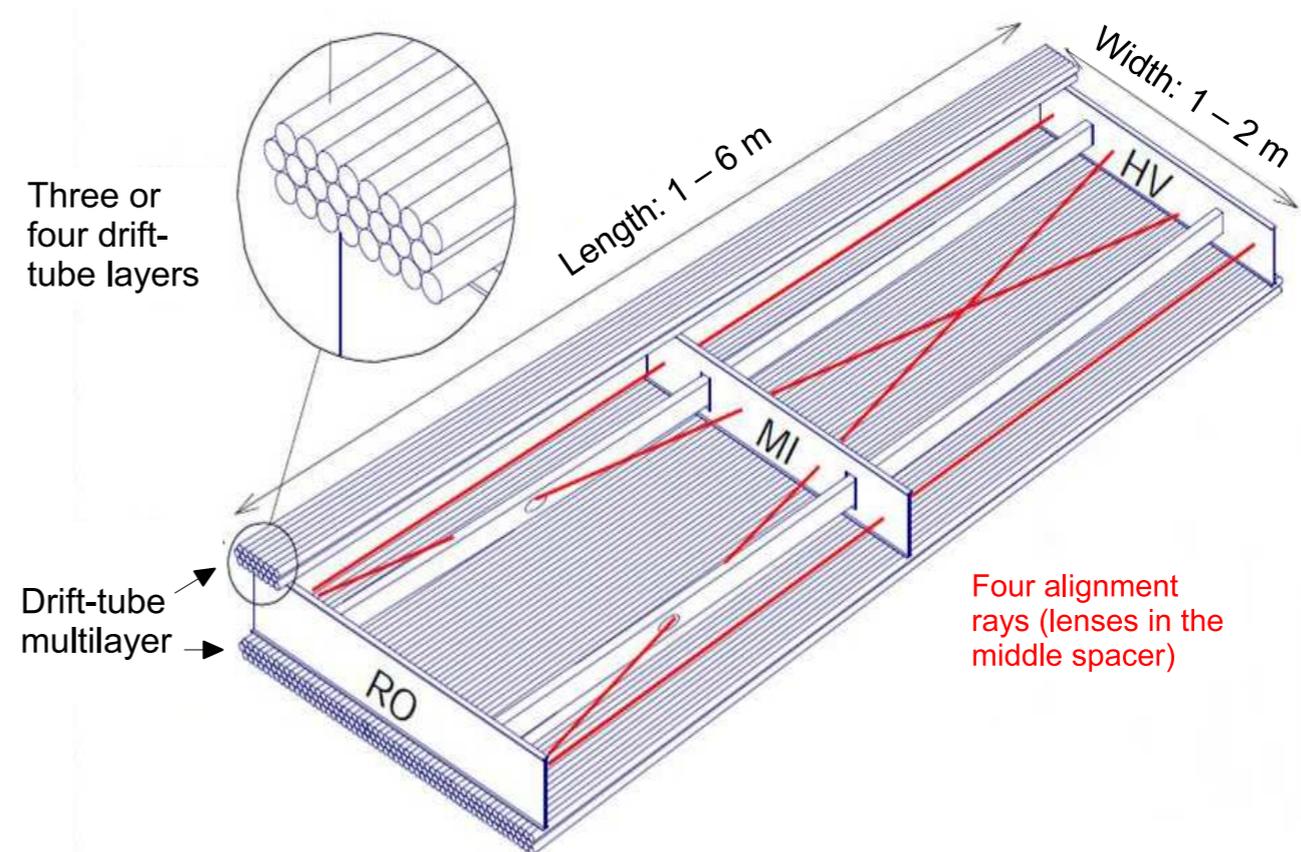
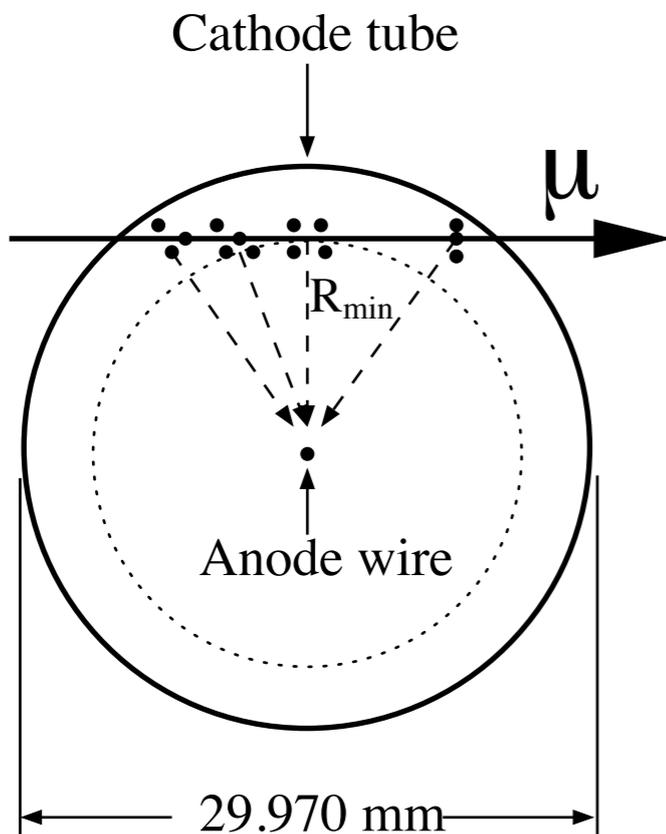


ビーム軸方向から見た検出器の配置



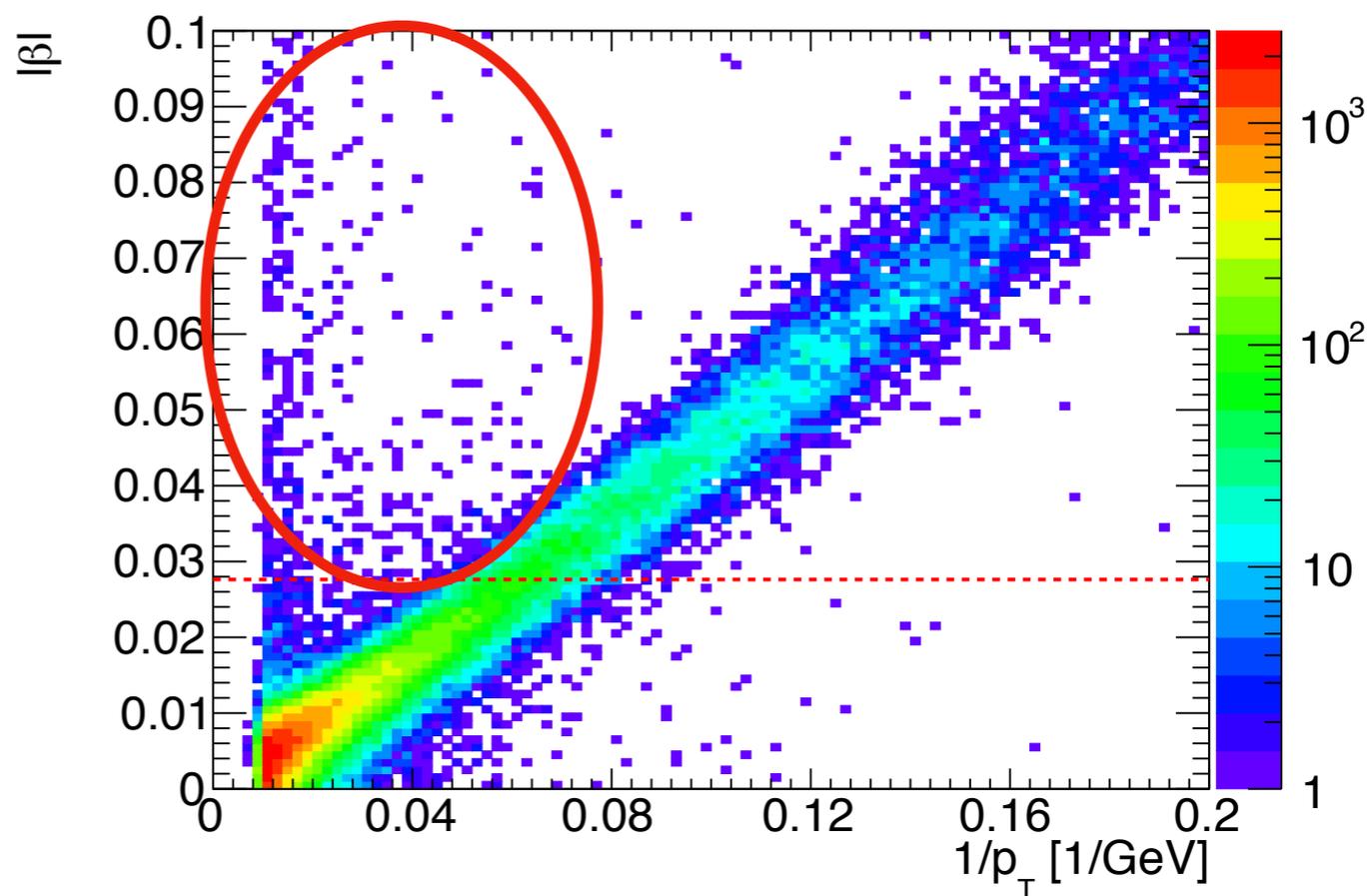
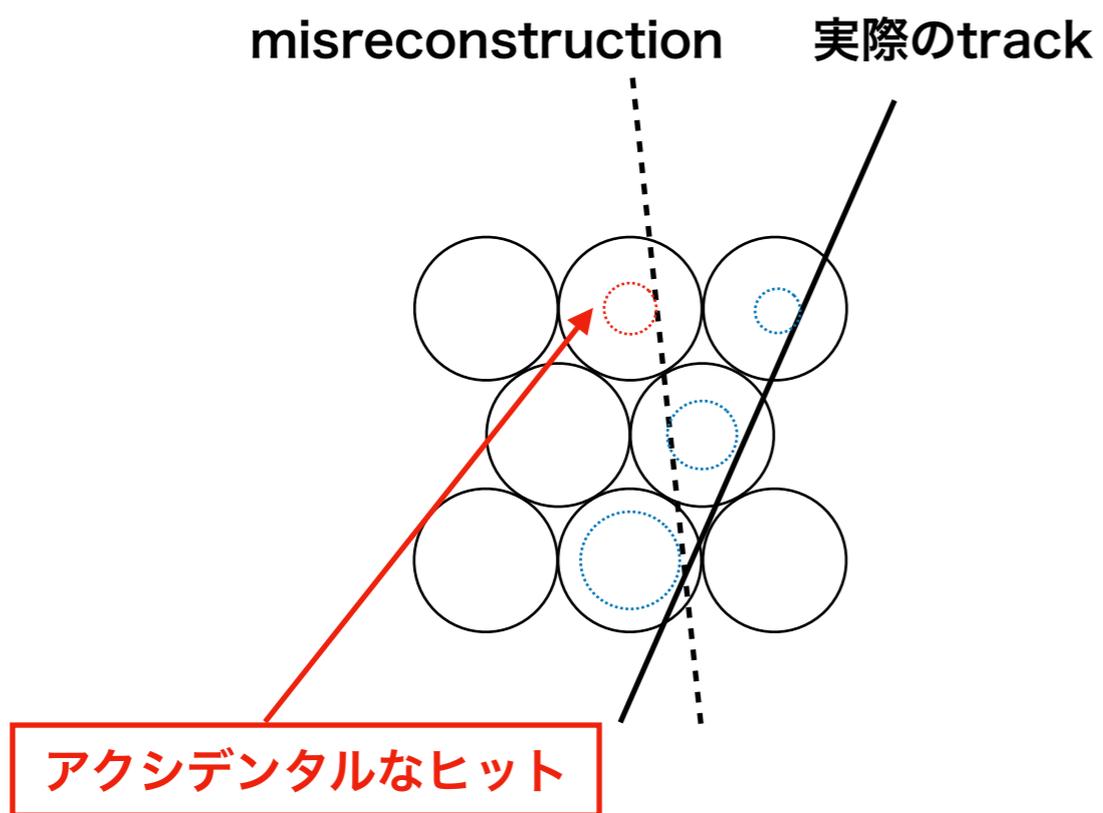
# Monitored Drift Tube (MDT)

- 直径約 30 mm のドリフトチューブを 6 層または 8 層並べた検出器
- MDT は電子のドリフト時間から飛跡の位置を測定する。
  - ▶ 最大ドリフト時間は約 700 ns、位置分解能は 80  $\mu\text{m}$
- 複数のドリフトチューブのヒット情報を組み合わせて飛跡の再構成を行う。



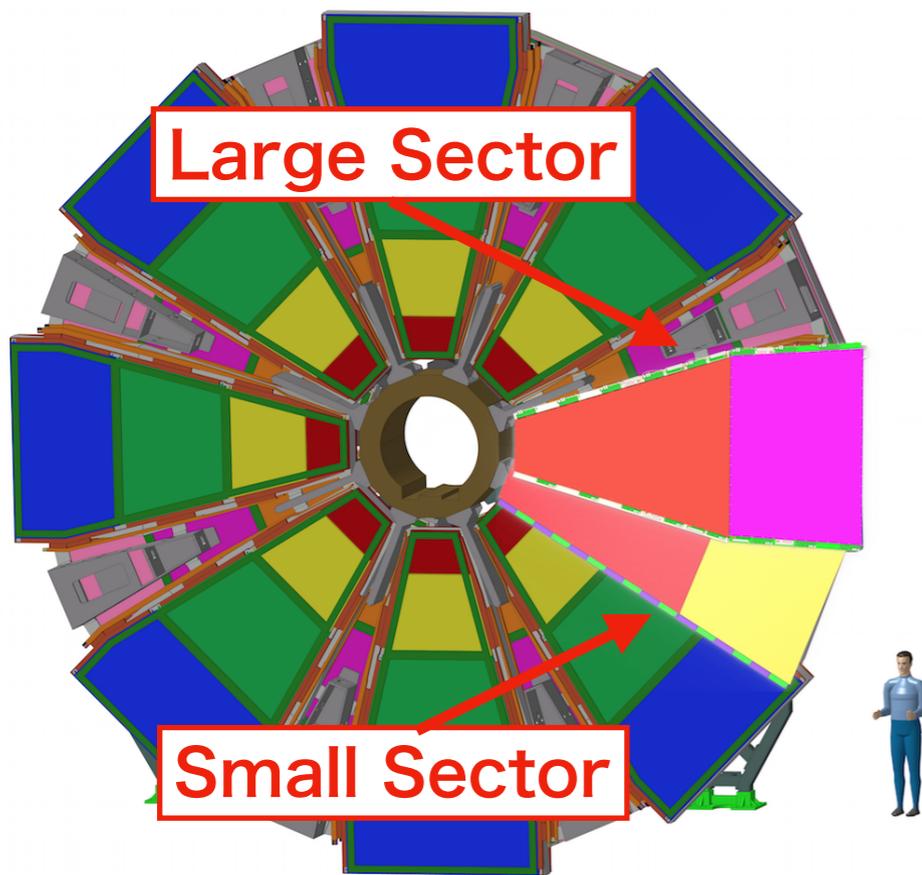
# Monitored Drift Tube (MDT)

MDTの飛跡再構成は、アクシデンタルなヒットなどで角度を大きく間違えることがある。

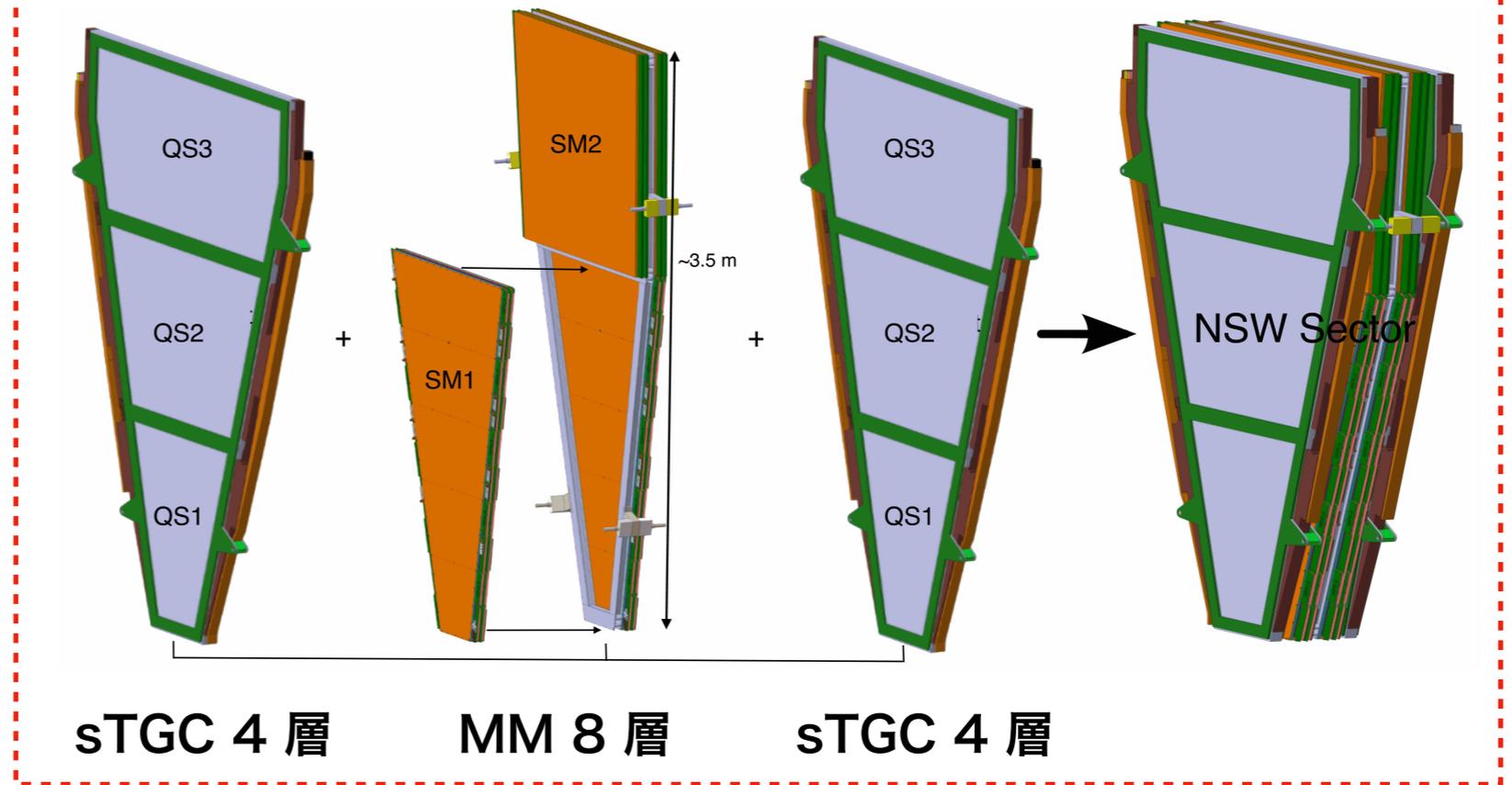


# New Small Wheel (NSW)

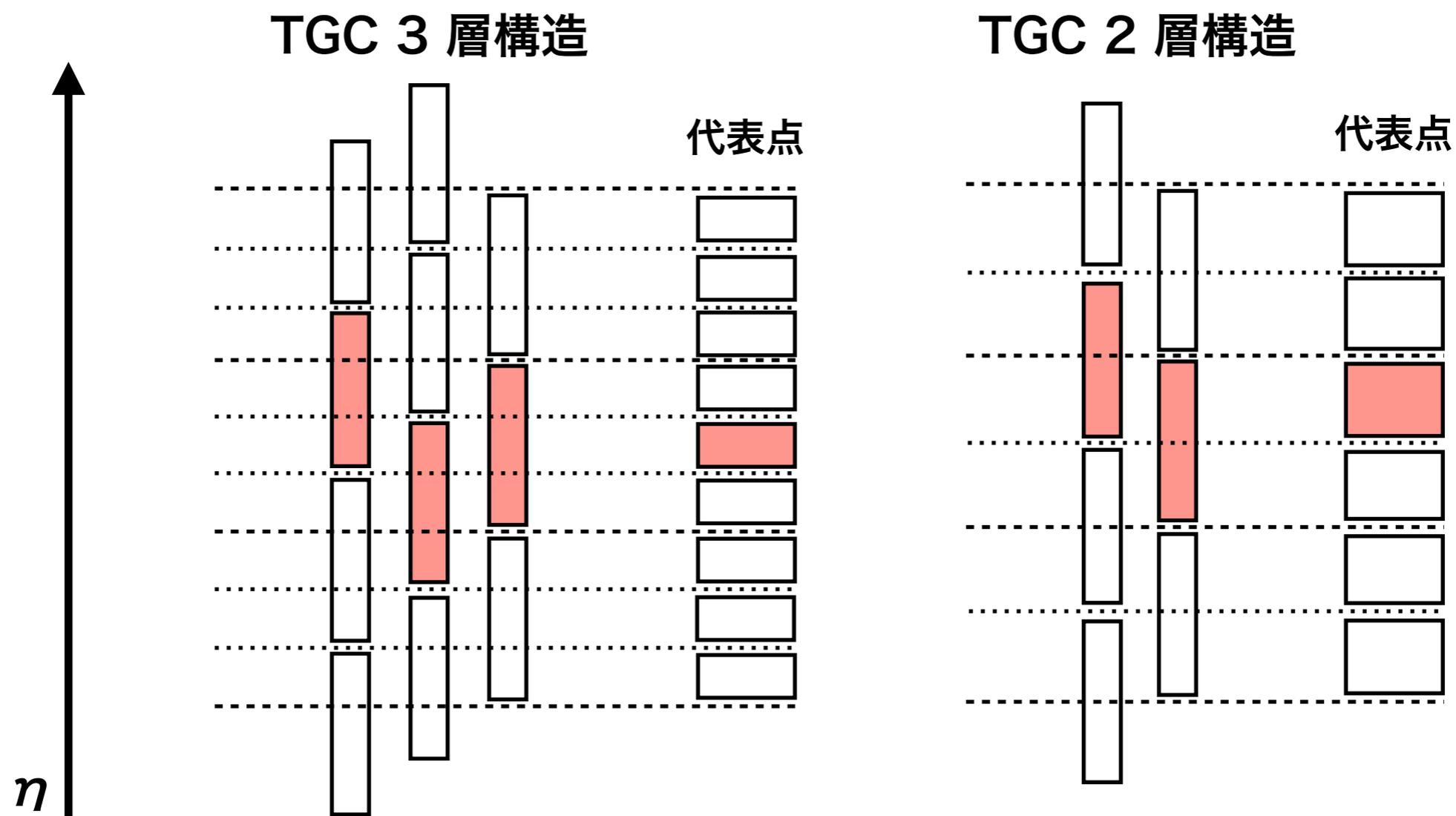
- Run-3 (2021 - 2024) に向けたアップグレードで導入される円盤状の検出器。
  - ▶ Micromegas (MM) 8 層、small strip TGC (sTGC) 8 層で構成されている。
  - ▶ 飛跡の精密な角度測定が可能な検出器。



## Small Sector のチェンバーの構造



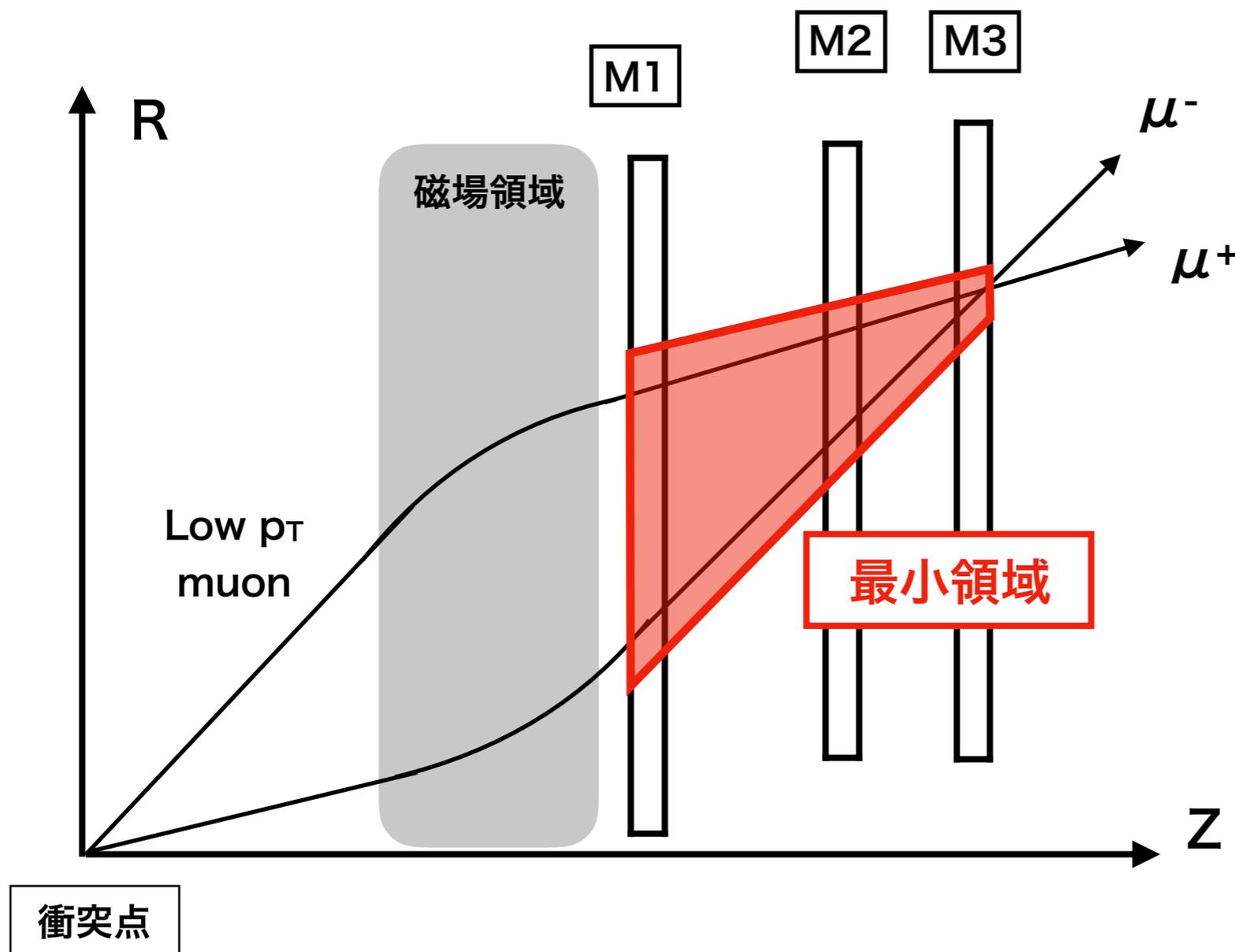
# TGC の代表点



- TGC Triplet (3層構造)と Doublet (2層構造) のワイヤーは $\eta$ 方向に対して位置をずらして配置されている。
  - ▶ 重複している部分を代表点として定義することでデータ量を減らすことができる。

# パターンマッチングを行う最小領域

- ミューオンが通過した時の各ステーションのヒットの組み合わせを探し、M3 のヒット位置に対応した M1・M2 のヒットの組み合わせが含まれるような領域を定義する。



以下の 2 つの条件を満たすように領域を定義する。

- $p_T$  閾値 5 GeV のパターンを含む。
- 1つの領域の全てのパターンが 1つの Ultra RAM block に収まる。

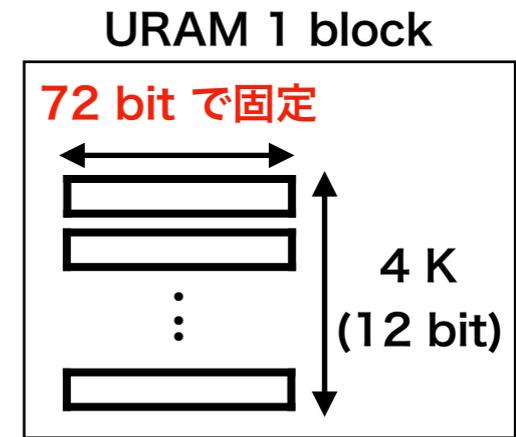
# パターンマッチングに必要なメモリ量の見積もり

- Xilinx 社の FPGA (XCVU9P) には以下の 2 種類のメモリが搭載されている。

- ▶ Block RAM : 36 Kb

- ▶ UltraRAM : 4 K × 72 bit = 295 Kb

XCVU9P のメモリ量は 345.9 Mb

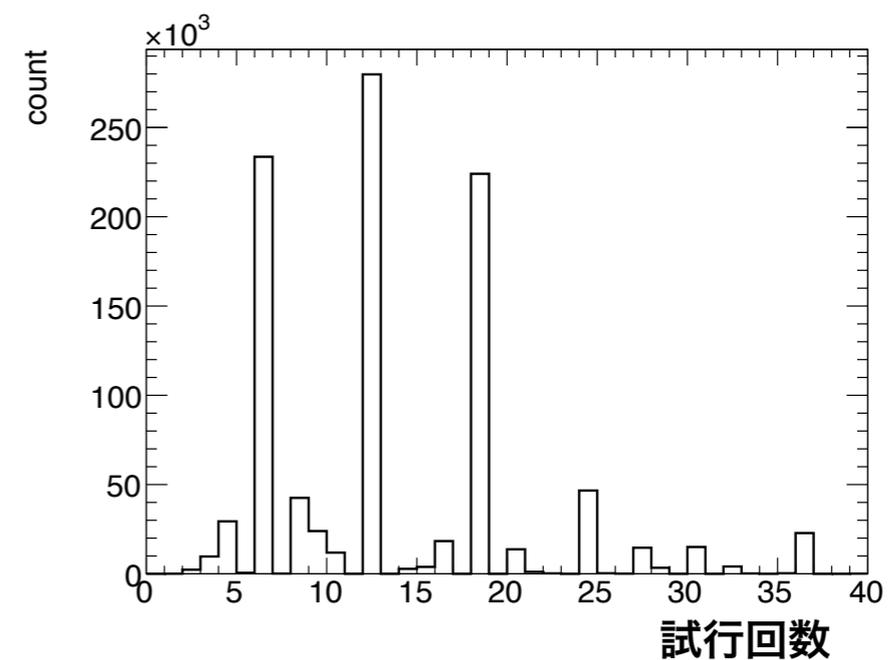
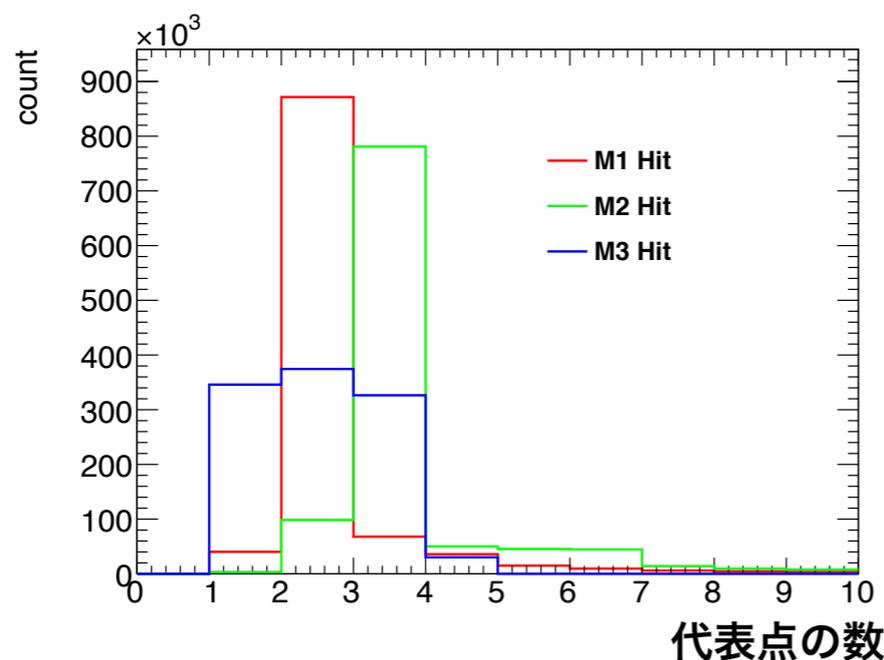
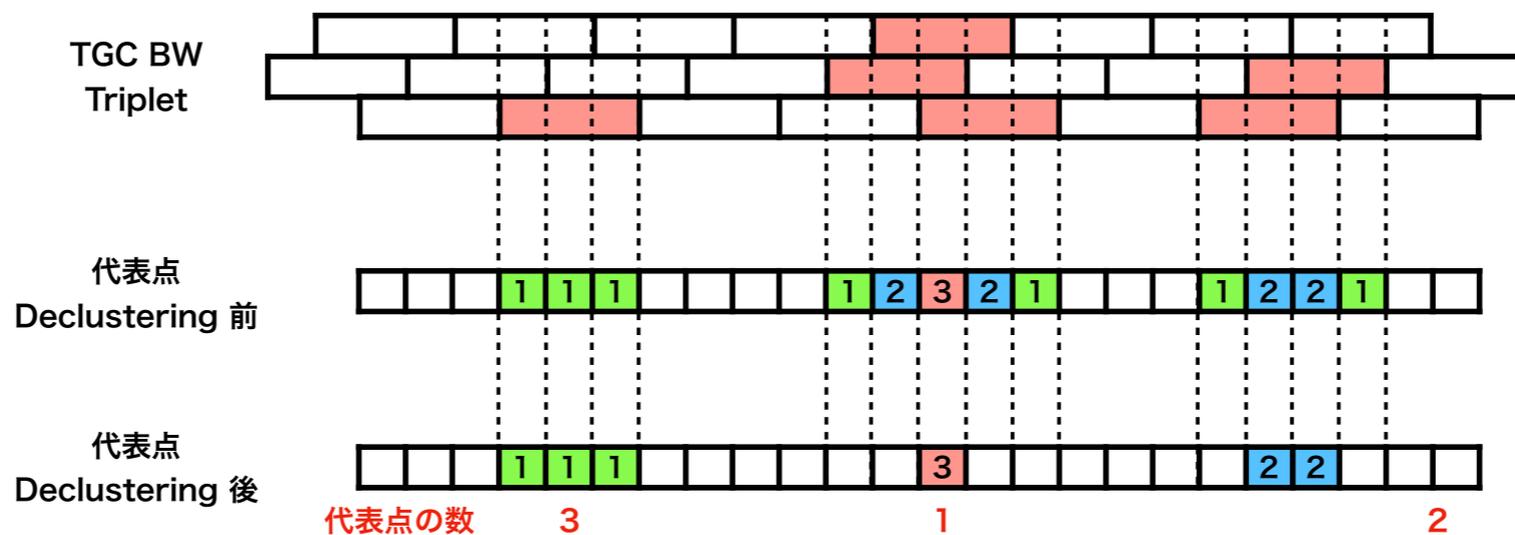


- パターンマッチングに必要なメモリ量は非常に大きいため、大容量メモリである UltraRAM を使用する。
- Coincidence Window には Block RAM を用いる。

	ワイヤー パターンリスト	ストリップ パターンリスト	Coincidence Window	合計
UltraRAM (270 Mb)	105.6 Mb (39%)	13.0 Mb (5%)	-	118.6 Mb (44%)
Block RAM (75.9 Mb)	-	-	12.8 Mb (17%)	12.8 Mb (17%)

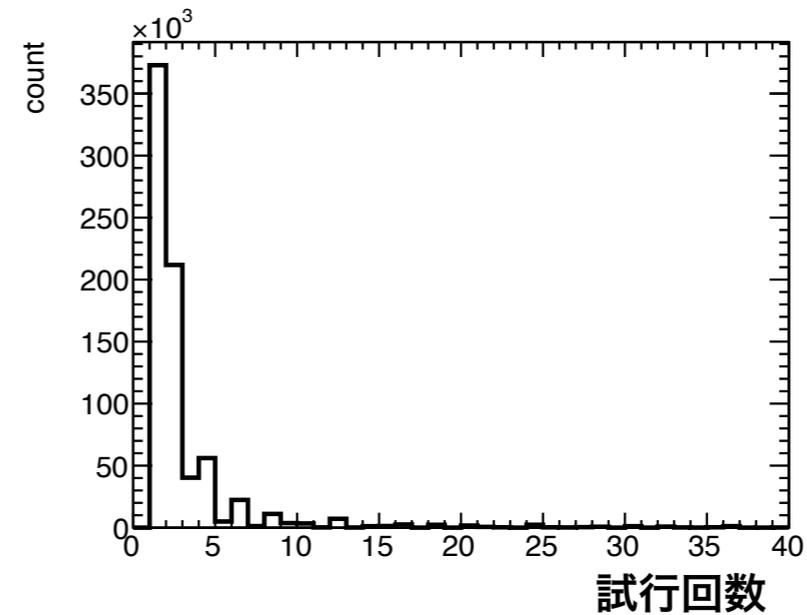
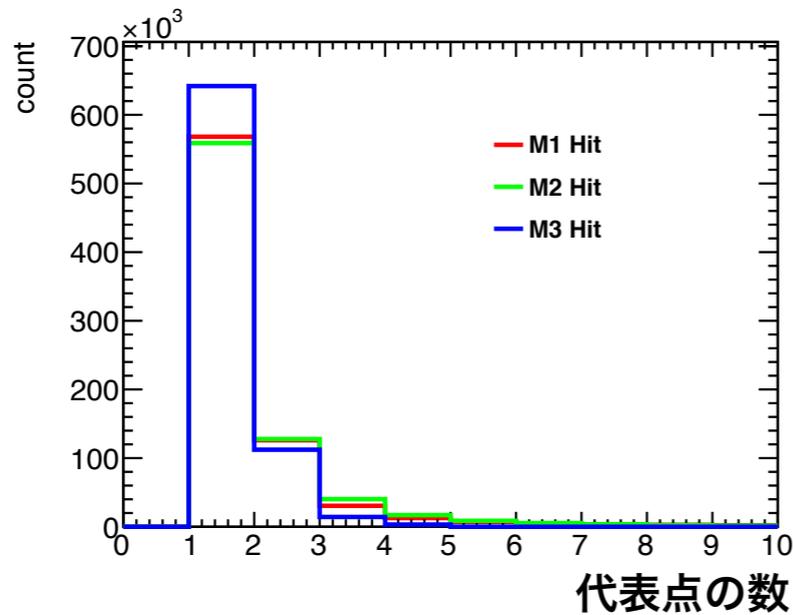
# デクラスタリングアルゴリズム

- パターンマッチングに全ての代表点を用いるとパターンの候補が大幅に増加する。
  - ▶ 各ステーションで複数のヒットが密集しているクラスターが生じている場合には、ヒット数が多い代表点のみをパターンマッチングに使用する。

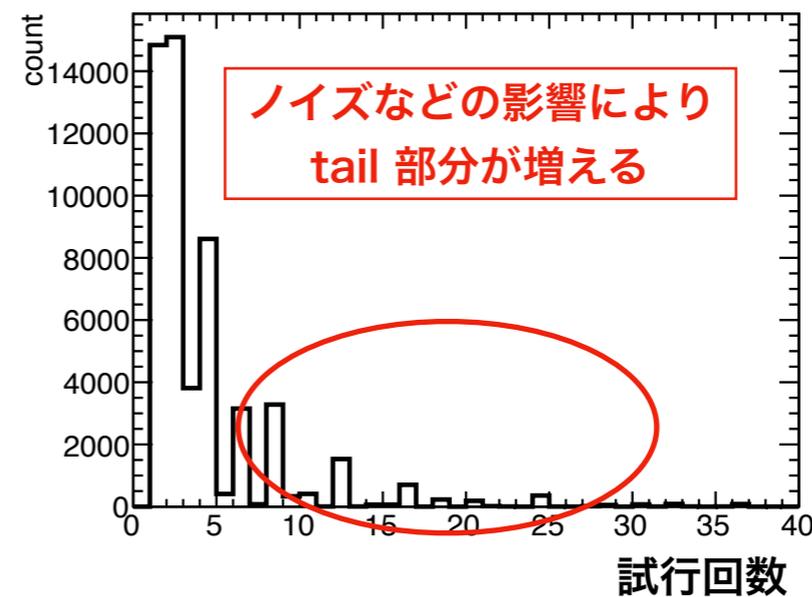
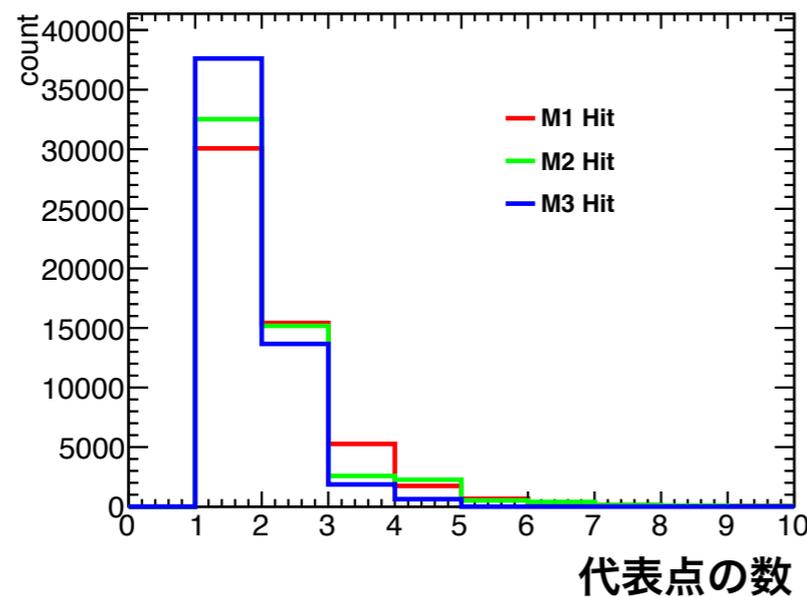


# パターンマッチングの試行回数

- モンテカルロシミュレーションサンプルを用いた場合のパターンマッチングの試行回数

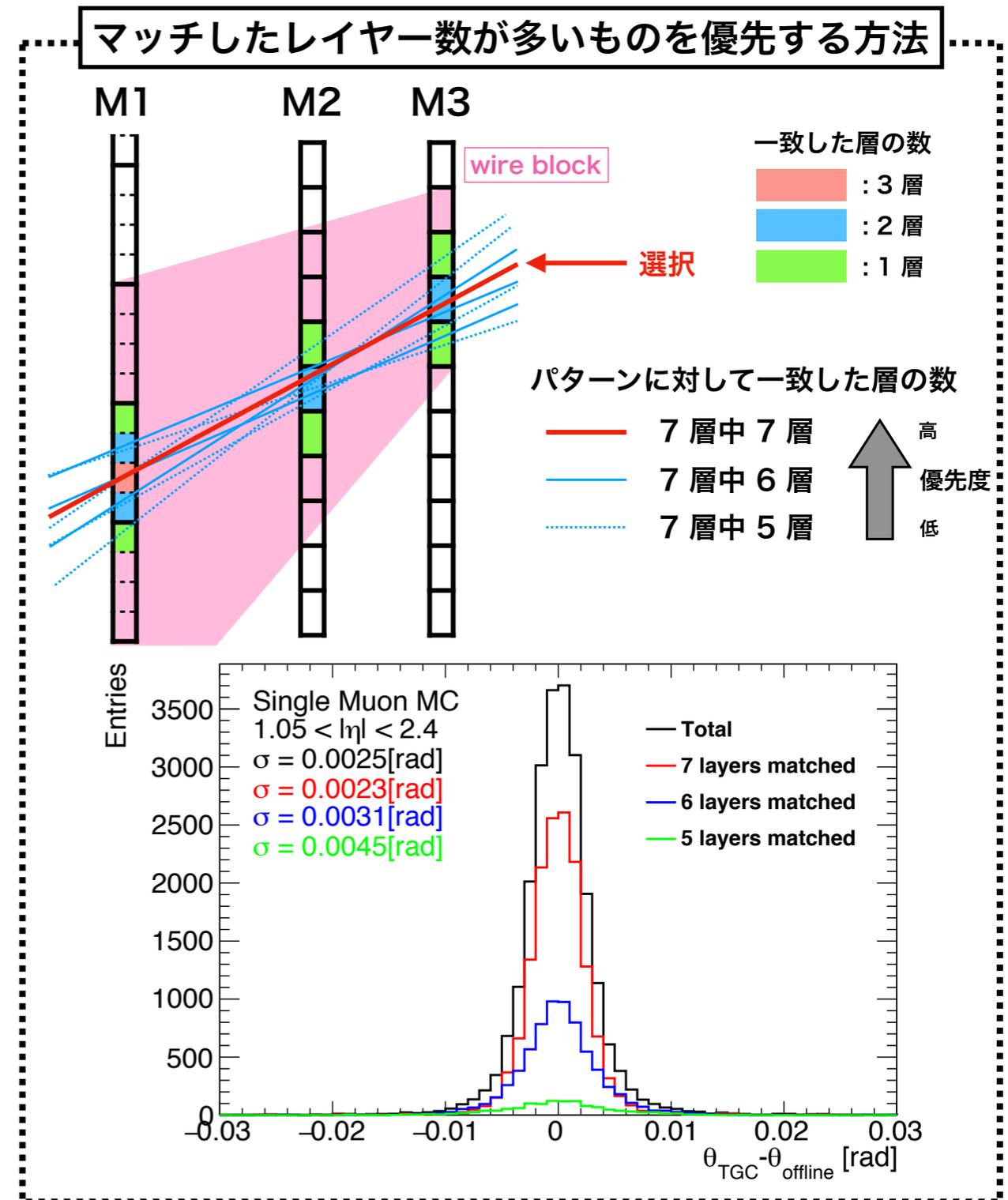
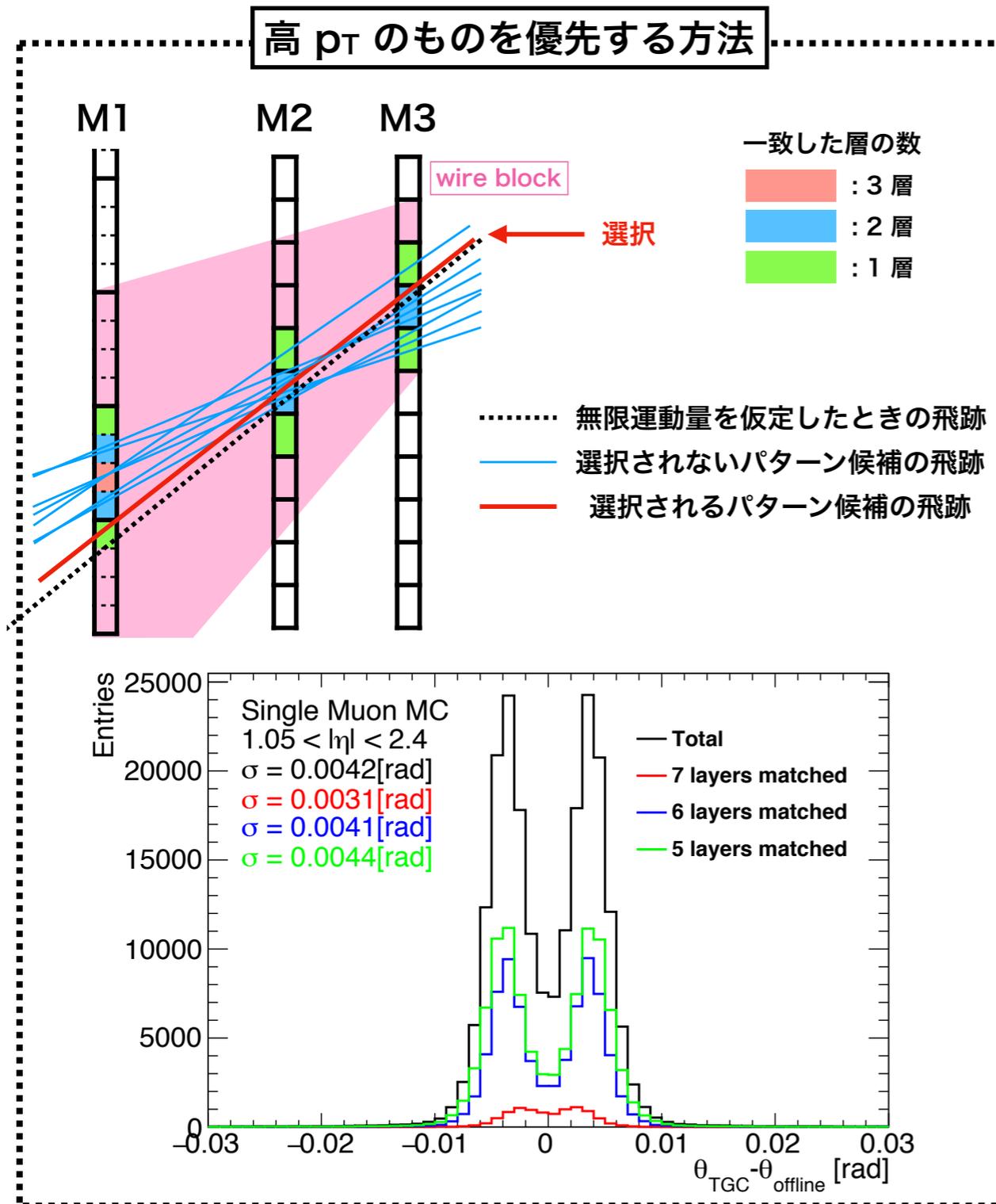


- データサンプルを用いた場合のパターンマッチングの試行回数



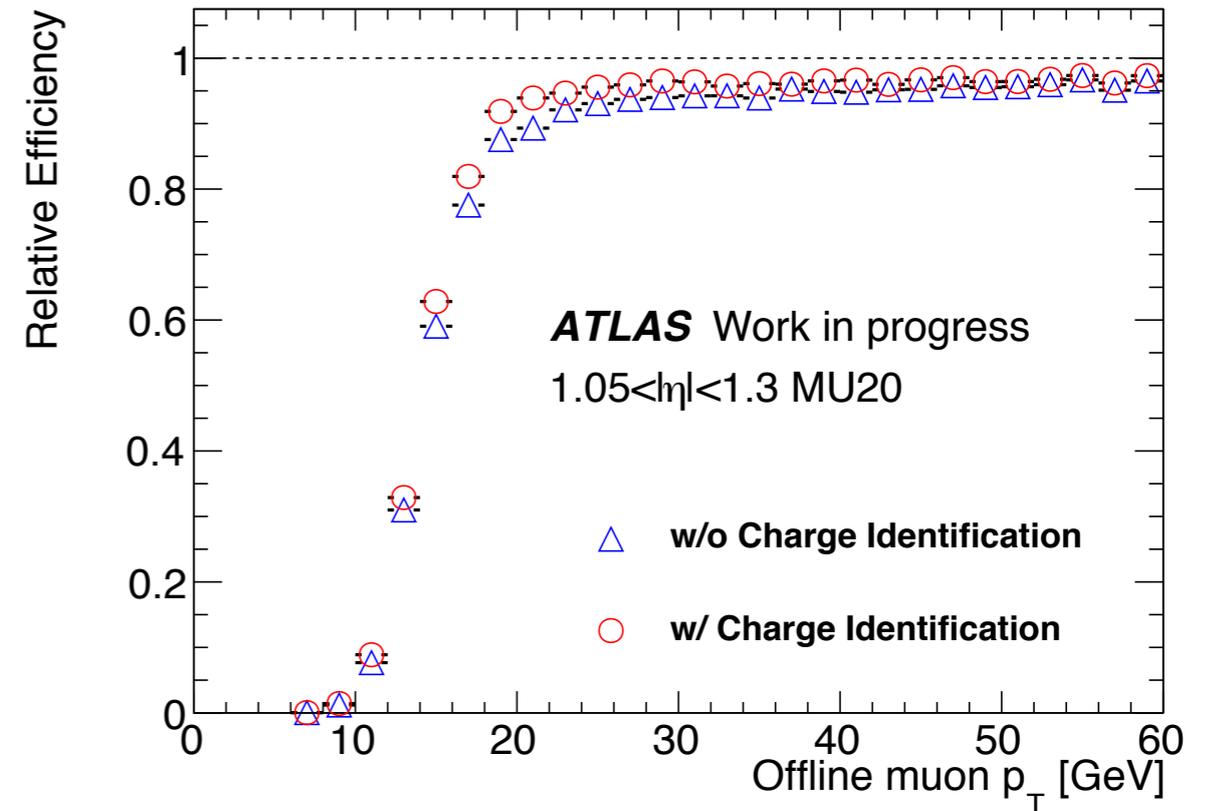
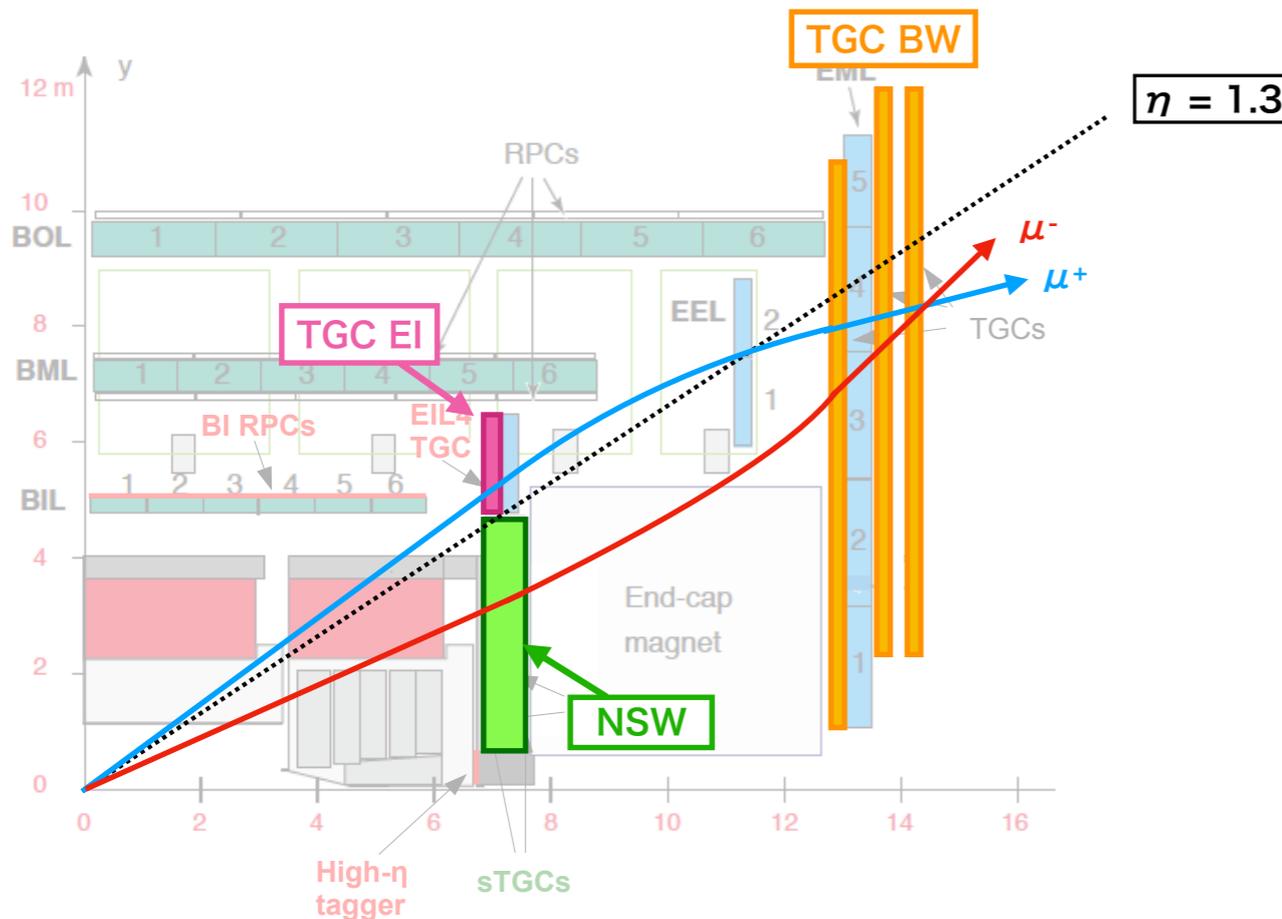
# 複数のパターン候補があるときの処理

- 複数のパターン候補がある場合にはマッチしたレイヤー数が多いものを優先する。



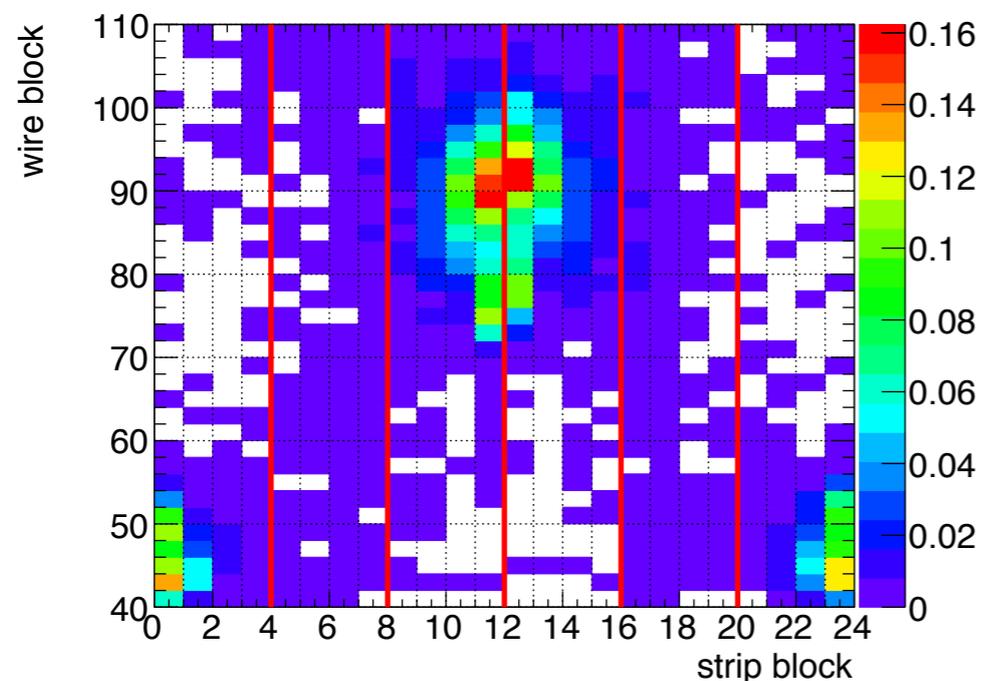
# 電荷情報を用いた内部コインシデンスを適用する領域の決定

- 同じ TGC BW の領域にミューオンが入射する場合でも、電荷や  $p_T$  によりヒット情報を残す内部検出器が異なる。
  - ▶ TGC BW で得た位置、電荷、 $p_T$  閾値の情報を用いてコインシデンスをとる検出器を選択する。



# 磁場が弱い領域での処理

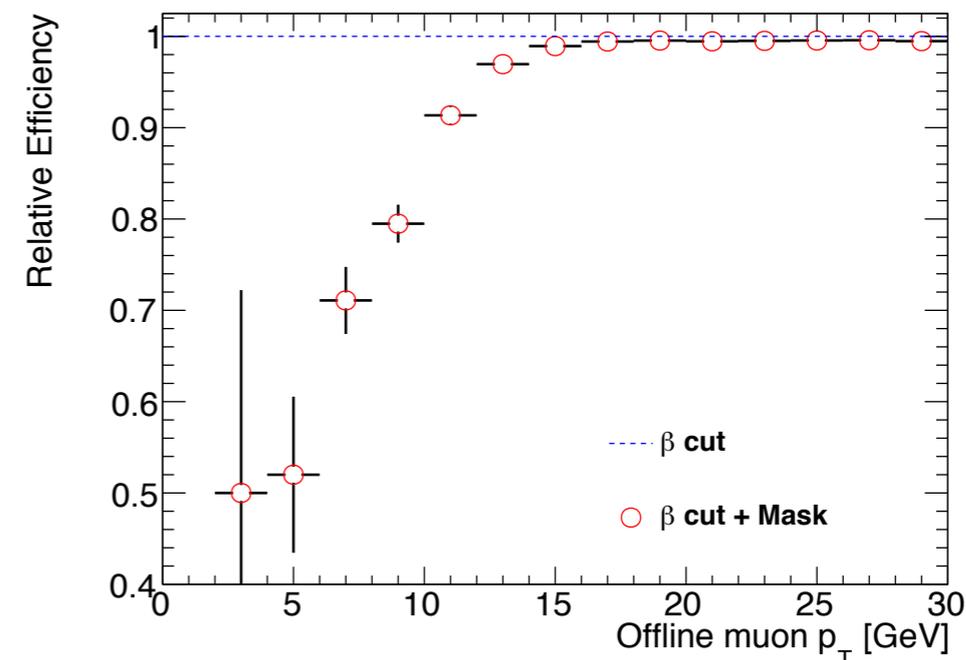
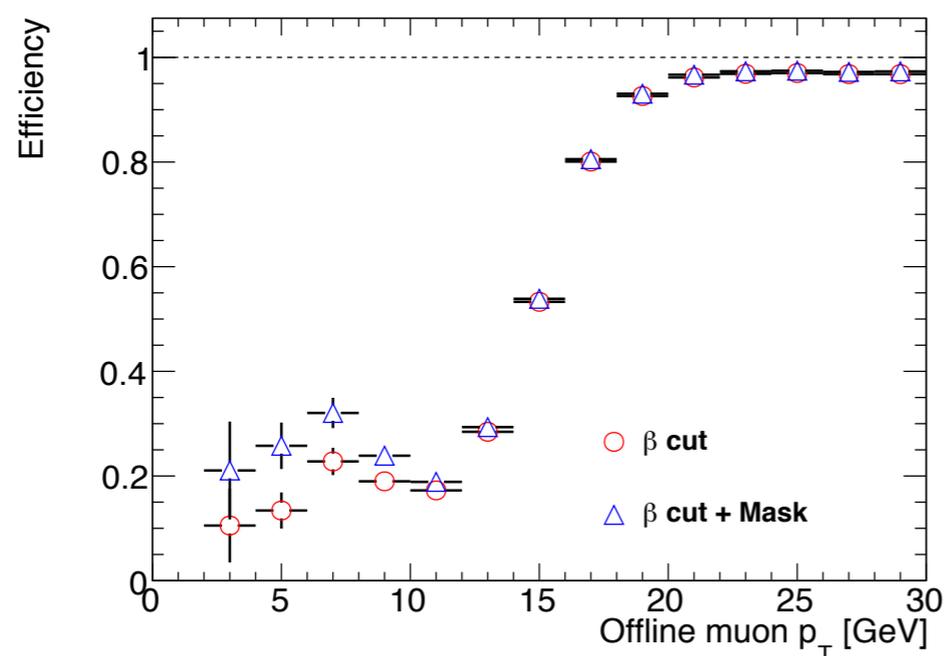
- $1.4 < |\eta| < 1.6$  の領域には磁場が弱い領域が存在し、ミュオンを十分に曲げることができず  $p_T$  分解能が低い領域が存在する。



低い  $p_T$  を持つミュオンが通過したにも関わらず、高い  $p_T$  を持つミュオンとして誤ってトリガーを発行してしまう領域。

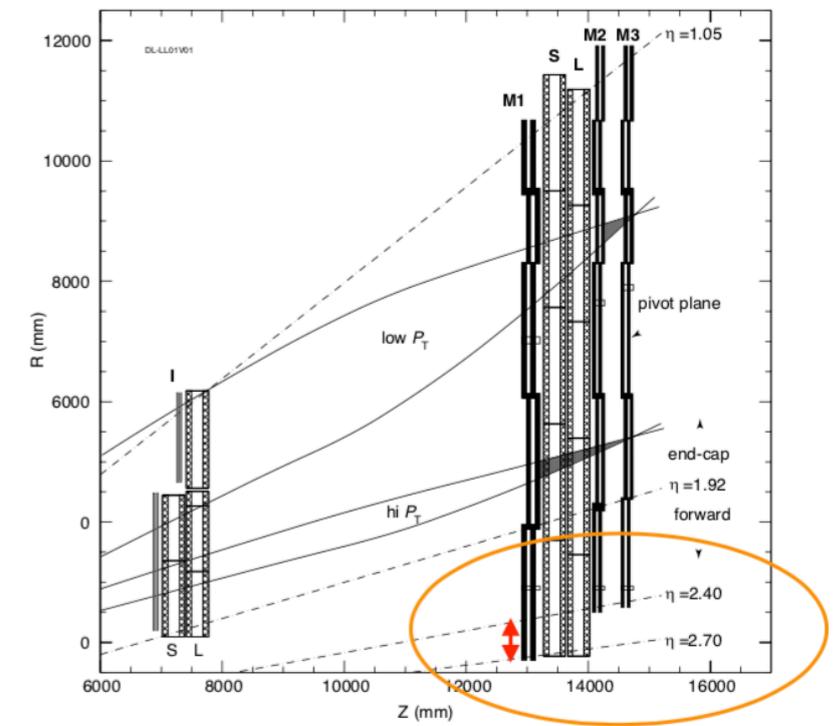


この領域をマスクすることで低い  $p_T$  のミュオンによるトリガーを削減する。

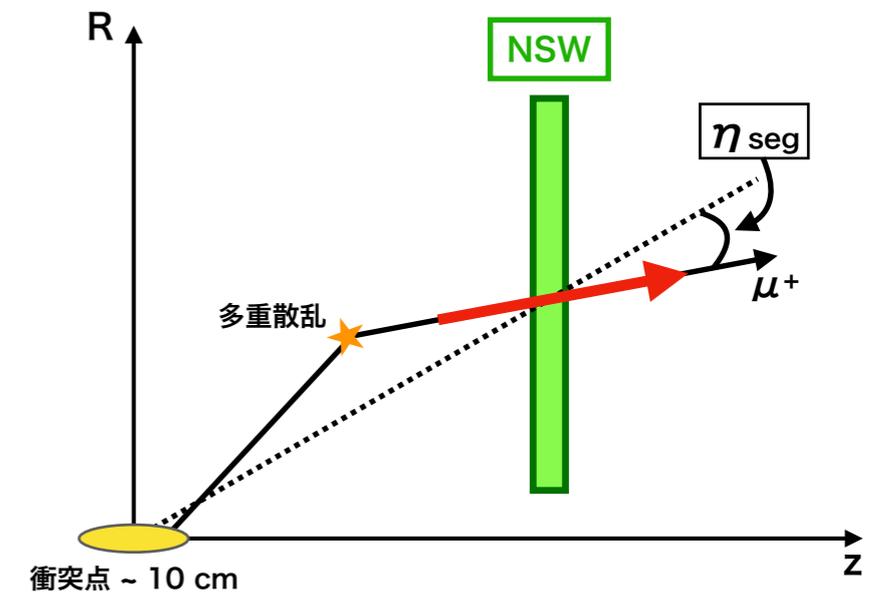


# 最前方領域でのトリガーロジック

- TGC の M2・M3 は  $|\eta| > 2.4$  の領域をカバーしていないため、パターンマッチングは行えない。
  - ▶ NSW と M1 (ワイヤー 3 層、ストリップ 2 層) のみでミュオンの  $p_T$  を測定する。
  - ▶ 高輝度 LHC では MDT によるトリガーも追加されるため、M1 のみでは削減できない背景事象によるトリガーを削減できる。
- トリガー領域を最前方まで広げることで物理感度を改善できる可能性がある。



- トリガー条件
  - ① TGC のヒットパターン
    - ヒットのあった層の合計が 4 層以上
    - ワイヤーとストリップで同じ層にヒット
  - ② TGC と NSW の位置の差 ( $p_T$  判定が可能)
  - ③ NSW で測定した位置と方向の差 (衝突点由来のものを選ぶ)



# 最前方でのトリガーロジック

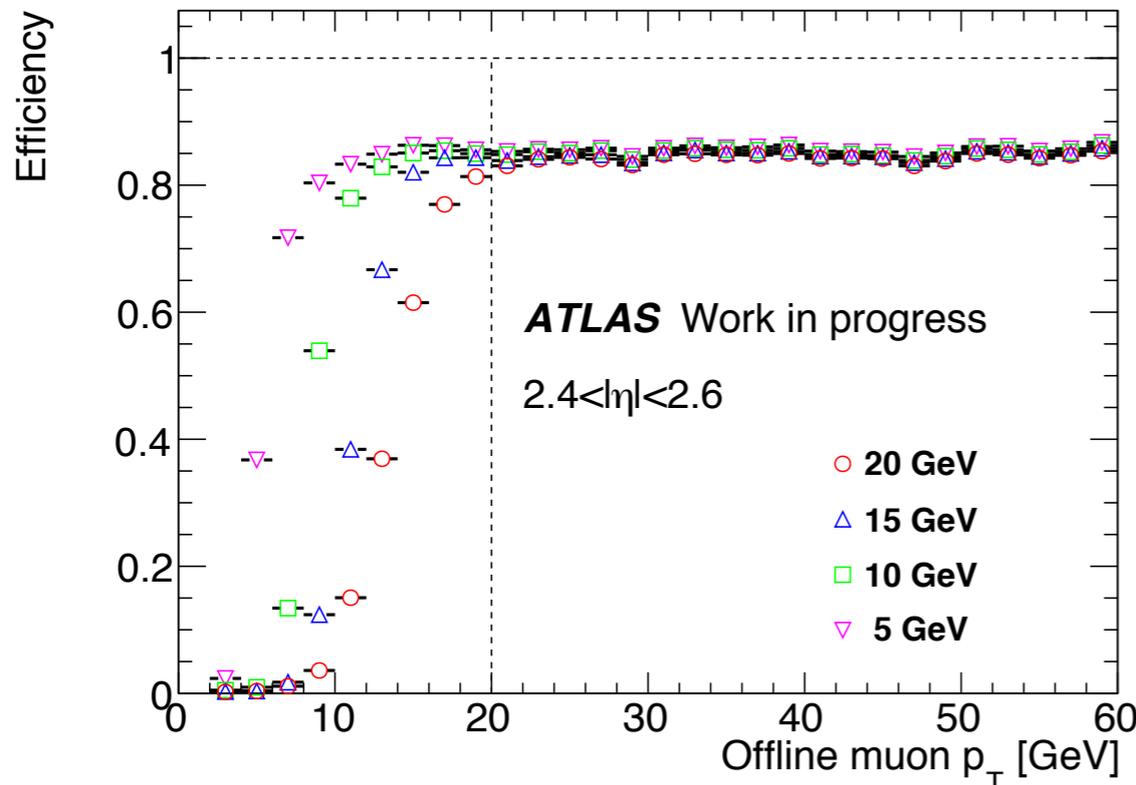
- 検出効率

- ▶  $p_T$  閾値以上の検出効率が低いのは、ノイズによるレートの増加を防ぐために、TGC BW の M1 に対してコインシデンス条件を厳しくしているためである。

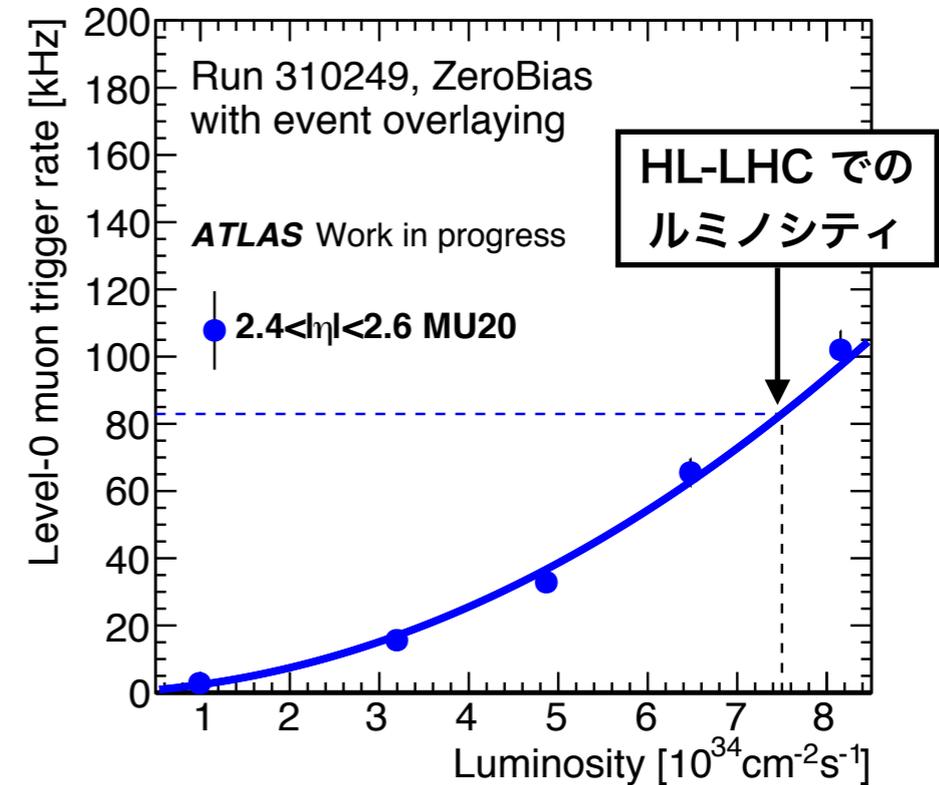
- トリガーレート

- ▶ TGC BW の M1 と NSW のみを用いてトリガーの判定を行うため、ノイズやアクシデンタルなヒットによりトリガーレートはルミノシティに対して非線形性を示している。
- ▶ MDT を用いることで最前方領域におけるトリガーレートをどの程度削減できるかを評価することが今後の研究課題である。

検出効率

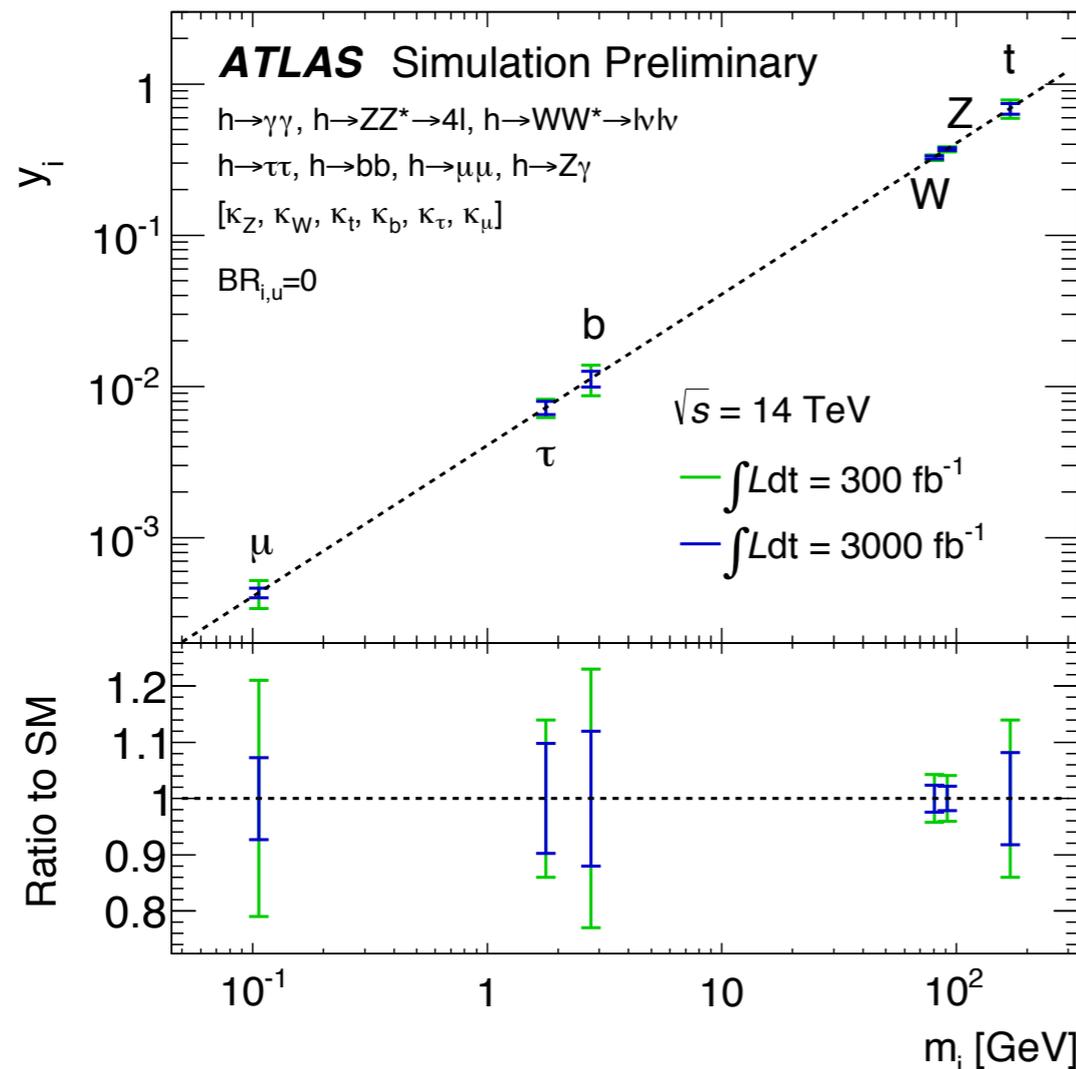


トリガーレート



# 高輝度 LHC におけるヒッグス精密測定

- ヒッグス粒子とフェルミオンの結合定数はフェルミオンの質量に対して比例関係にある。
  - ▶ 新物理による寄与によって、この比例関係にズレが生じる可能性がある。
- 高輝度 LHC で取得した  $3000 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いることで、結合定数のより精密な測定が可能となる。



Run-3 までと比較して  
誤差が大幅に改善される。

# 高輝度 LHC における SUSY 探索

- 標準模型には、いまだヒッグス粒子の階層性問題や暗黒物質の候補などの問題がある。
  - ▶ 超対称性理論 (Super Symmetry) が有効な理論として注目されている。
- 高輝度 LHC で取得した  $3000 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いることで質量の探索領域を広げることができる。
  - ▶ チャージノーとニュートラリーノの対生成プロセスの場合

