



LHC-ATLAS実験Run-3に向けた ミュオントリガーロジックの 開発と実装

京都大学 岡崎佑太

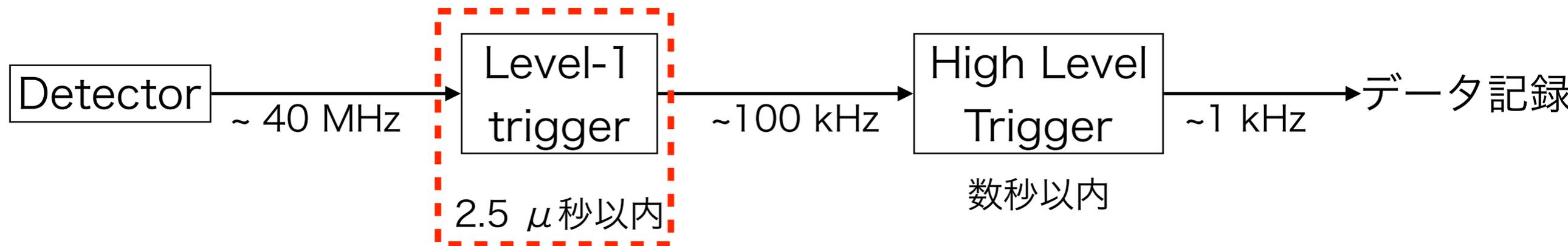
トリガーシステム

トリガーシステムの重要性

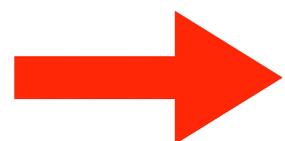
- ・陽子の衝突頻度は40 MHzだが、記録できるイベントは~1 kHz
→興味のある事象を選別して、データ取得を行う

ATLAS実験のトリガーシステム

- ・ハードウェアで実装されたLevel-1 triggerと、ソフトウェアで実装されたHigh Level Triggerの2段階で構成



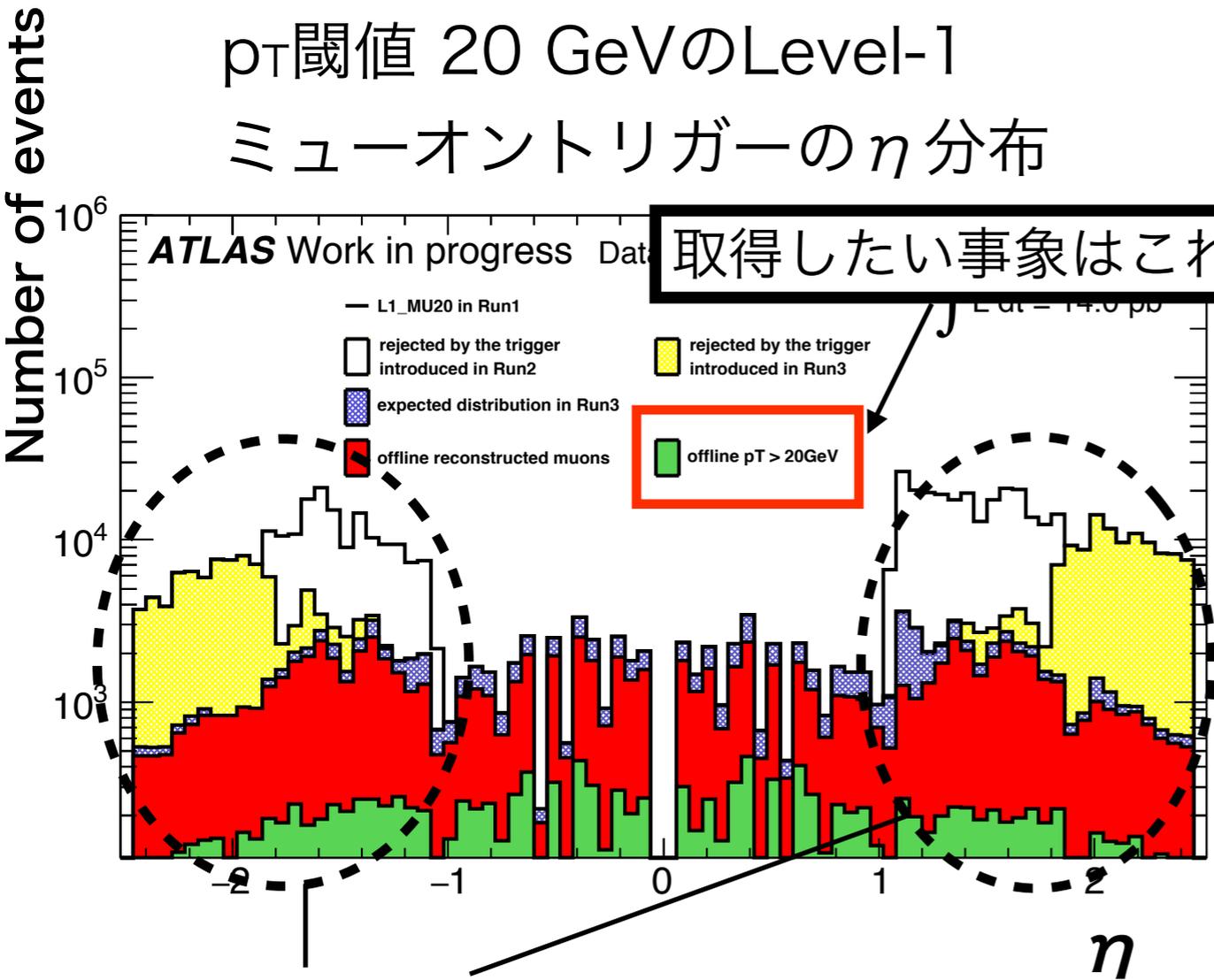
Run-3ではルミノシティの増加によりトリガーレートが増加するが、トリガーレートの許容値は変化しないため、閾値を上げるなどの対策が必要となる
しかし物理感度のため閾値は低く、トリガー効率を高く維持したい



トリガーの改良を行う

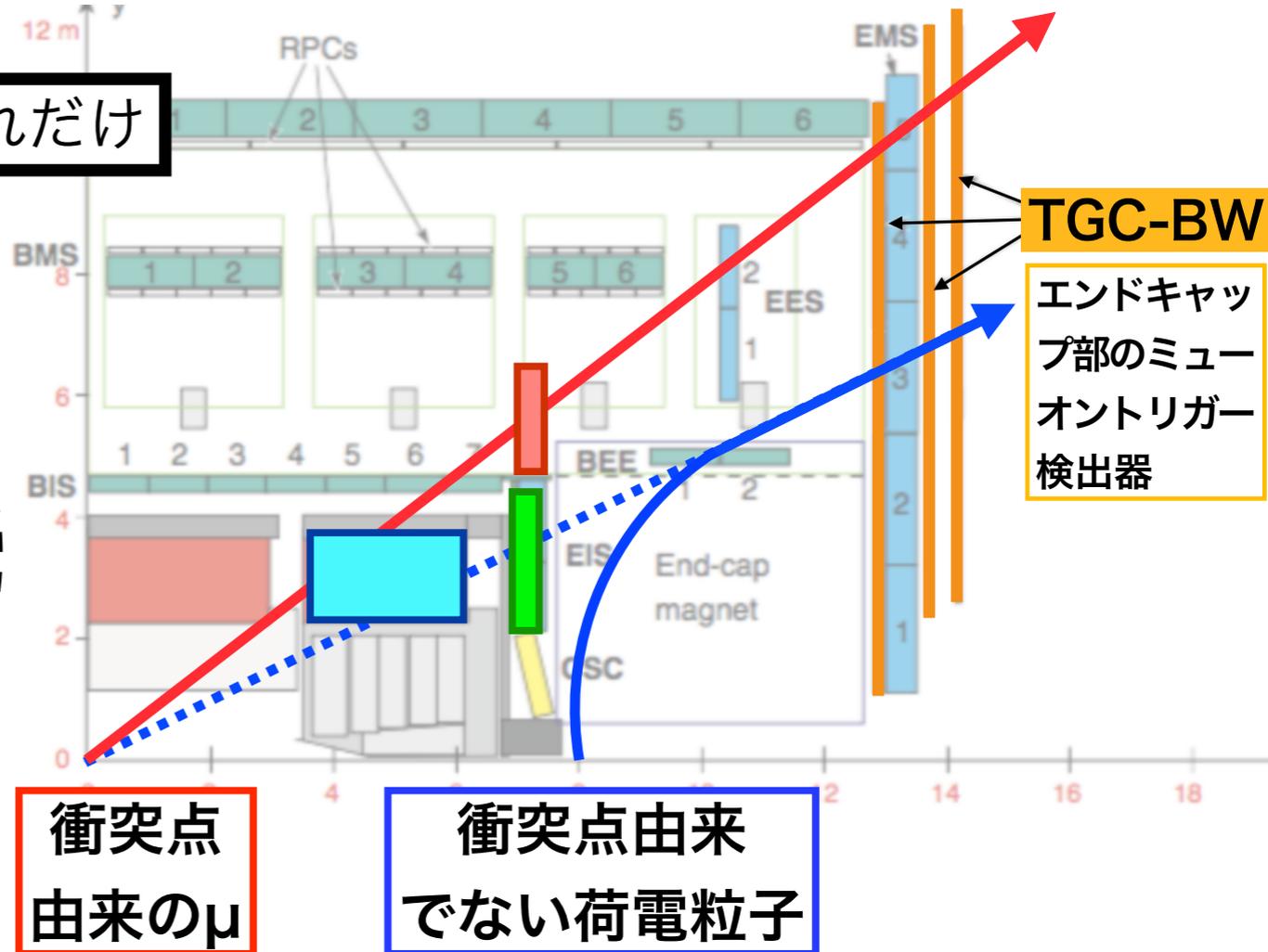
現在のミュオントリガー

p_T 閾値 20 GeV の Level-1
 ミュオントリガーの η 分布



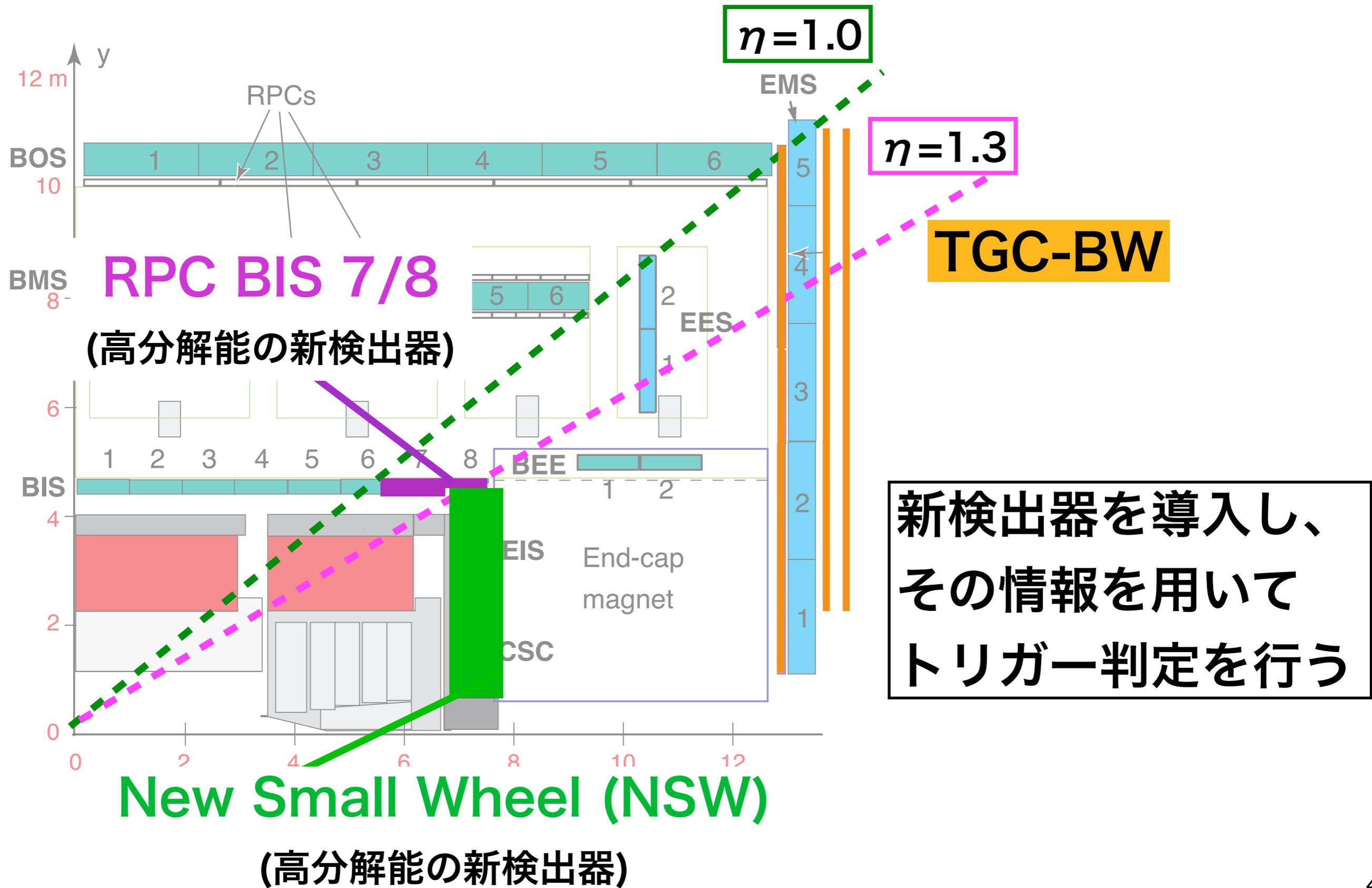
TGCのトリガー発行領域

ATLAS検出器の断面図



- 衝突点由来でない粒子によるフェイクトリガーが多い(約60%を占める)
 → **磁場の内側の検出器の情報を用いる**
- 低い p_T のミュオンによるトリガー発行数が多い

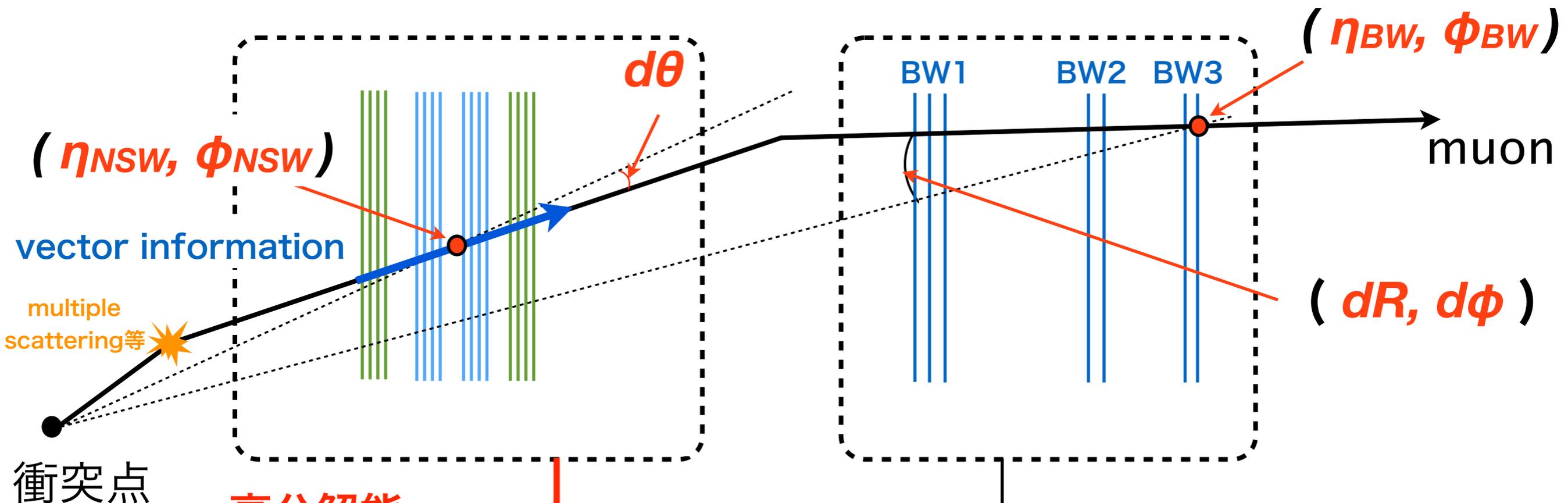
Run-3でのエンドキャップミュオントリガー



Run-3でのエンドキャップミュオントリガー

New Small Wheel

TGC Big Wheel



高分解能

位置情報 + 角度情報

(576-bit / 25 ns)

位置情報 + 曲がり具合の情報

(202-bit / 25 ns)

トリガー判定
回路

トリガー判定結果

高速データ通信

大規模トリガーロジック

トリガー判定回路 New SL

Optical inputs and outputs (GTX)

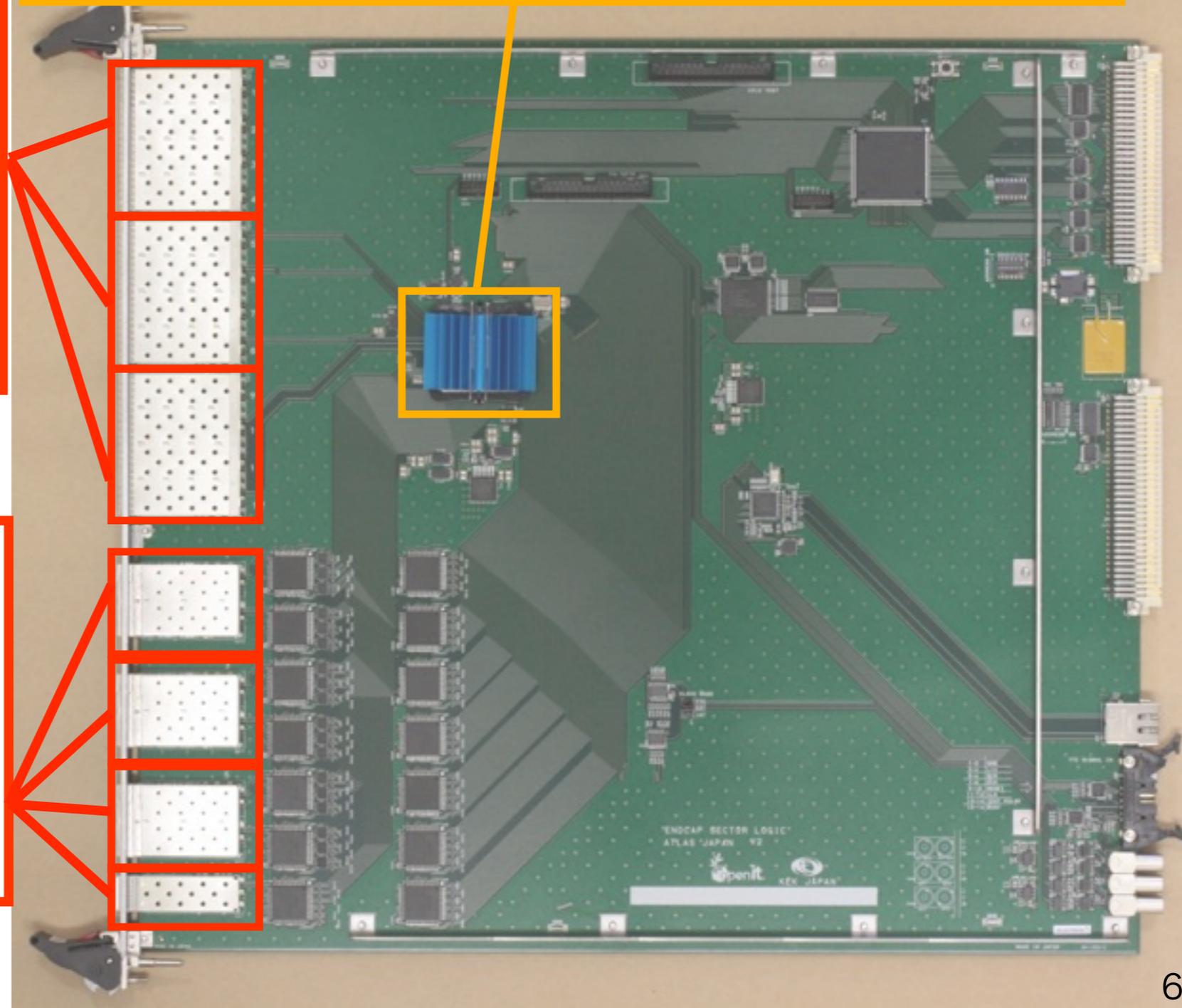
- ・ 光通信用のモジュール
- ・ NSWからのデータ受信
- ・ トリガー判定結果の送信

Optical inputs (G-Link)

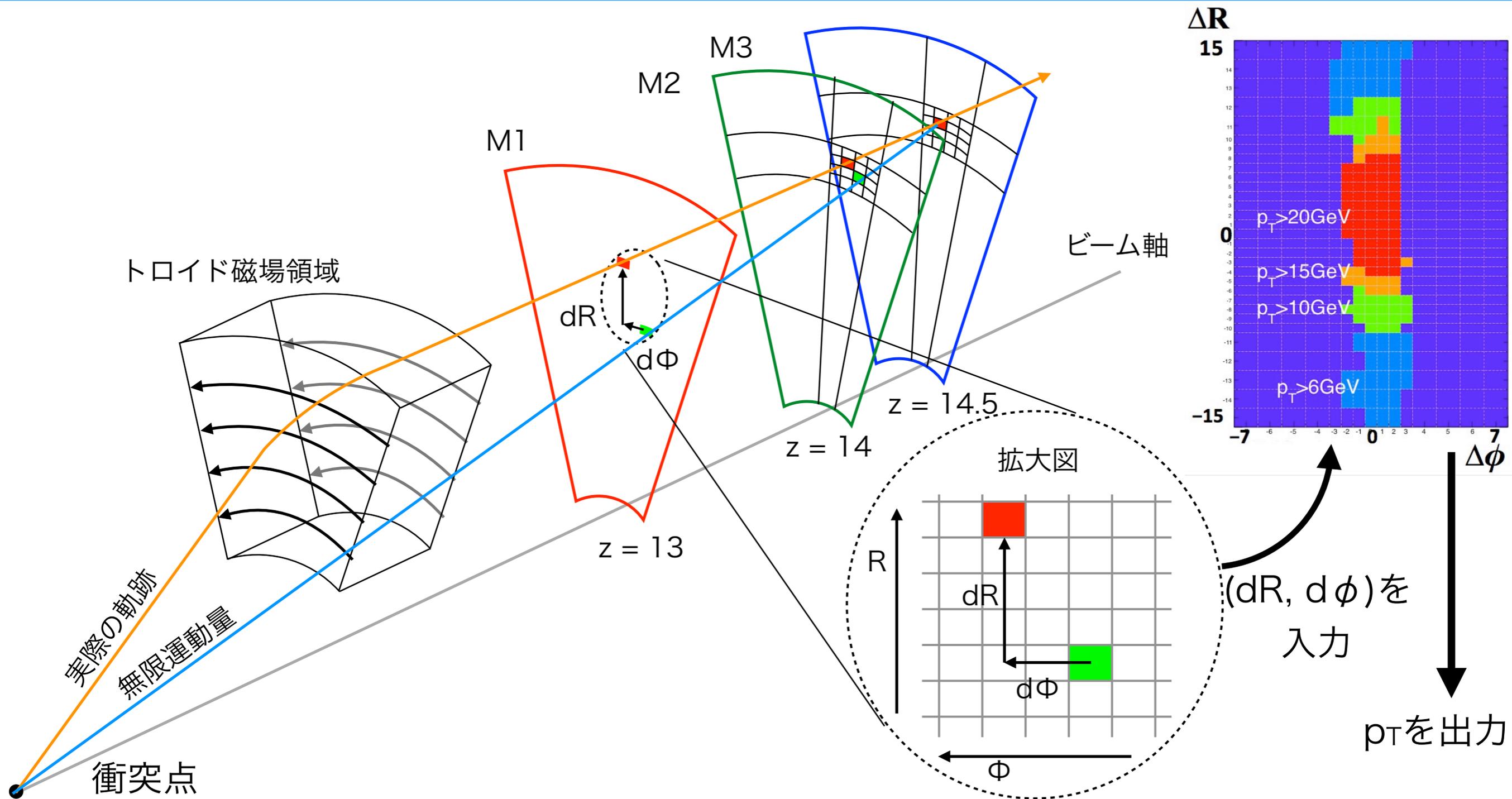
- ・ 光通信用のモジュール
- ・ TGC BWからのデータ受信

FPGA (Xilinx Kintex-7 XCK410T)

Xilinx社のFPGA (書き換え可能な集積回路)を用いて大規模なトリガーロジックを実装できる



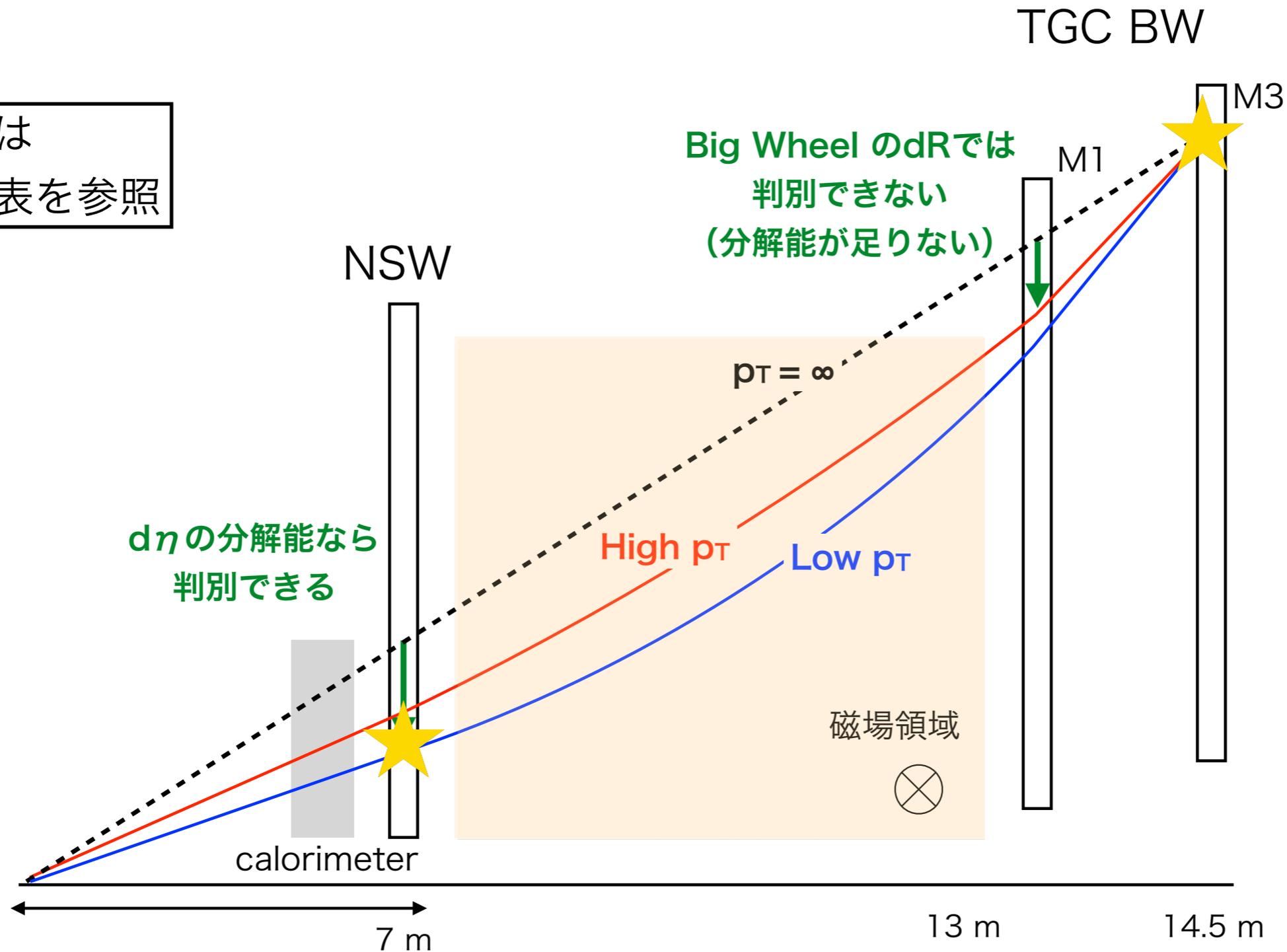
ミュオントリガー判定(TGDCのみ)



TGDC(M3)でのミュオンのヒット位置と衝突点を結んだ直線とTGDC(M1)のヒット位置のずれから、磁場中の曲がり具合($dR, d\phi$)を見積もり、 p_T を計算

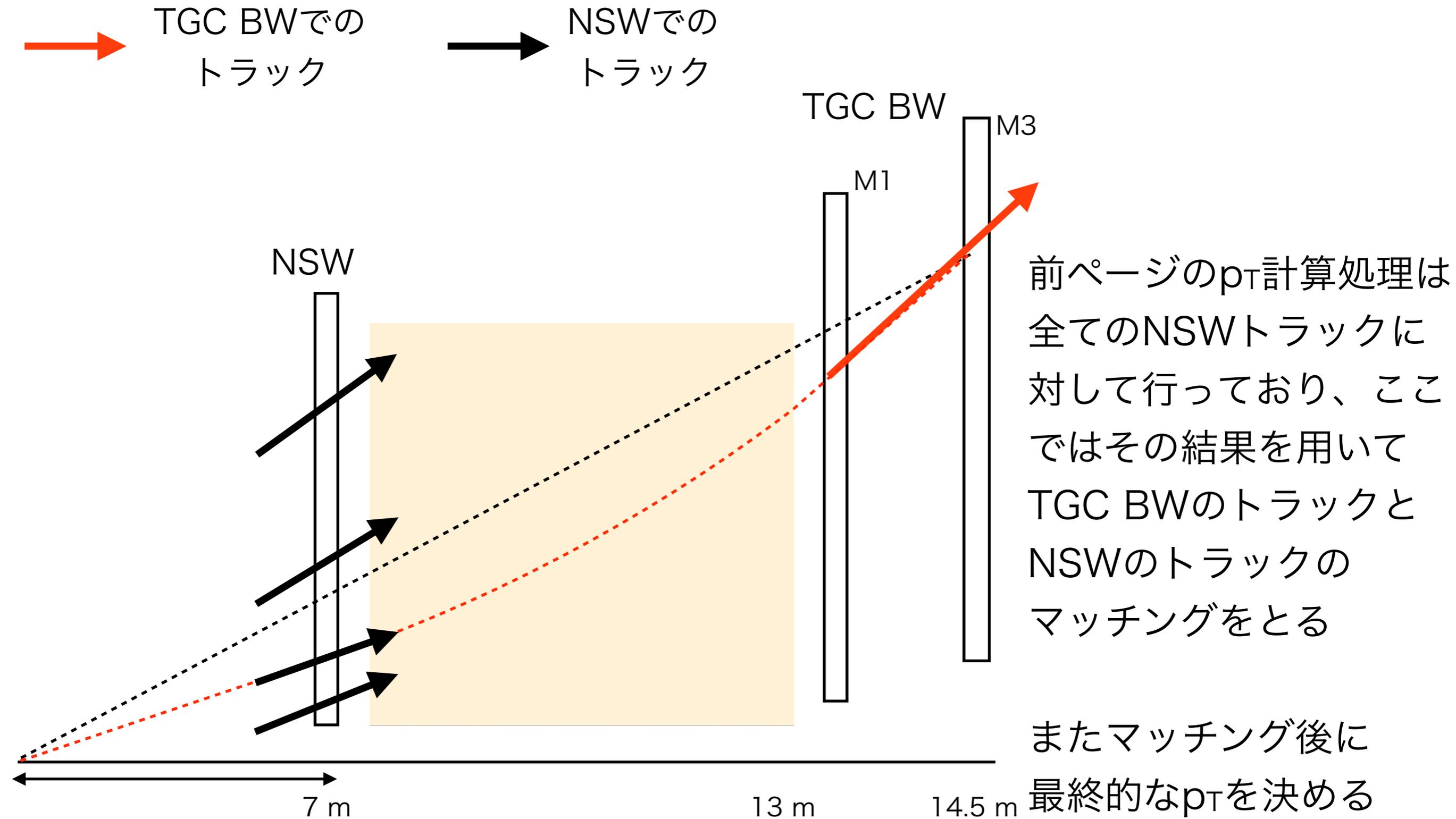
ミュオントリガー判定 (TGC+NSW)

性能評価は
吉田の発表を参照

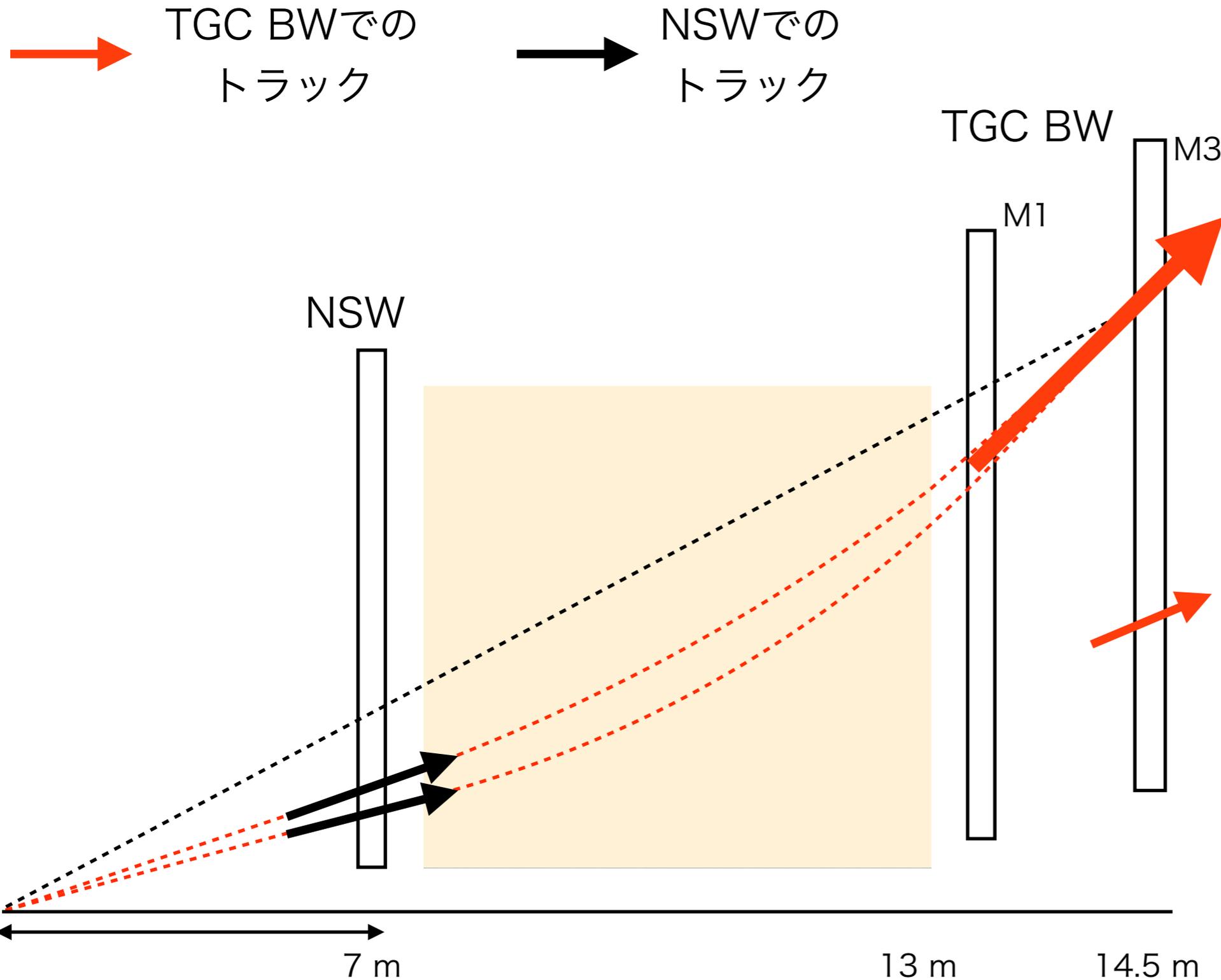


TGC BWのM3の位置とNSWのトラック情報(位置と角度)を用いて p_T を計算
(ここではTGC BWとNSWのトラックの対応が取れておらず、M3の位置を仮定して計算する)

ミュオントリガー判定(マッチング)



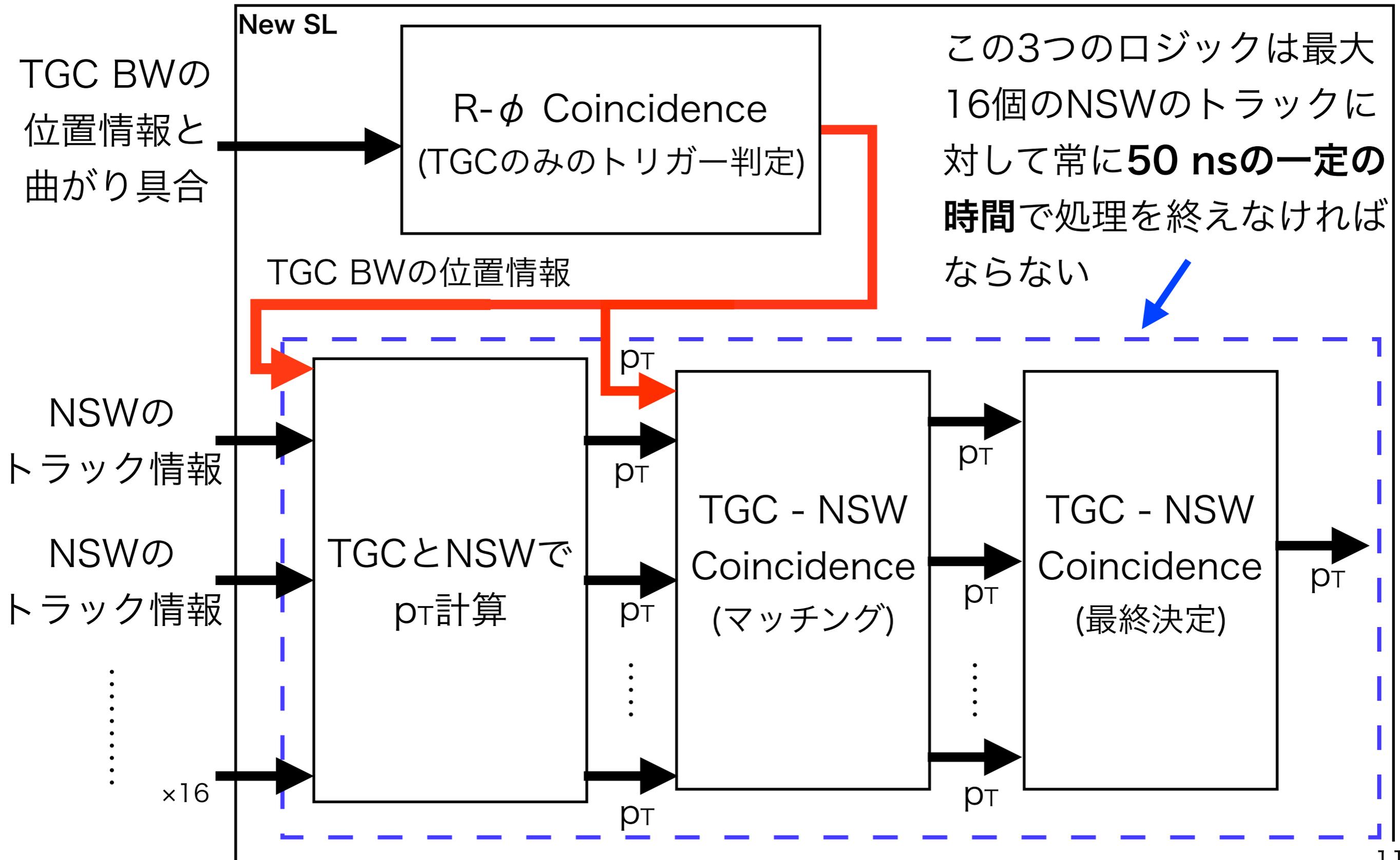
ミューオントリガー判定(最終決定)



1つのTGC BWのトラックが複数のNSWのトラックとコインシデンスをとる可能性がある

どちらの結果を採用するか決める必要がある

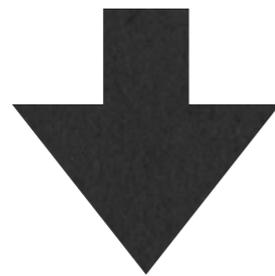
トリガー判定ロジックの概要



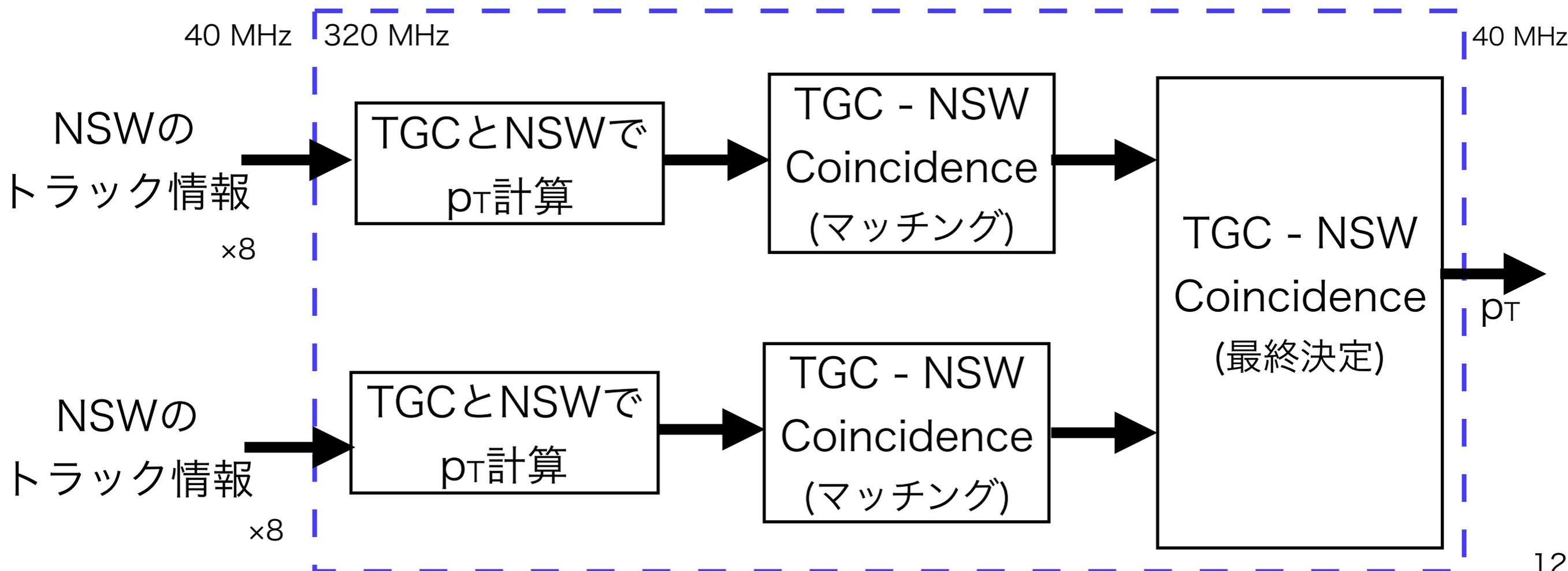
Coincidence Logicのデザイン

p_T の計算及びコインシデンスの実装方法は主に2種類

- 並列で計算 ← 大規模でリソースを大量に使うが、処理時間が短い
- 順番に計算 ← リソース使用量は少ないが、処理にかかる時間が増加する



リソース使用量を減らすため**2つのパスで並列**計算し、**320 MHz**のクロックを用いて処理を行う



まとめ

LHC Run-3ではさらに高エネルギー・高統計での新物理探索を行う

- ・ 高ルミノシティ環境ではトリガー性能の向上が必須
- ・ ミューオントリガーではフェイク事象と低い p_T のイベントの削減が必要となる
→新検出器の導入により、トリガーレートを削減する

トリガー判定用Firmwareのデザイン

- ・ **一定の処理時間内でトリガー判定を行う** ようにFirmwareをデザインした
- ・ 内部で作成したテストデータを用いて動作試験を行い、デザイン通りの動作を確認した

Back up

LHC-ATLAS実験

LHC(陽子陽子衝突型加速器)

- 周長 27 km
- 衝突頻度 40 MHz

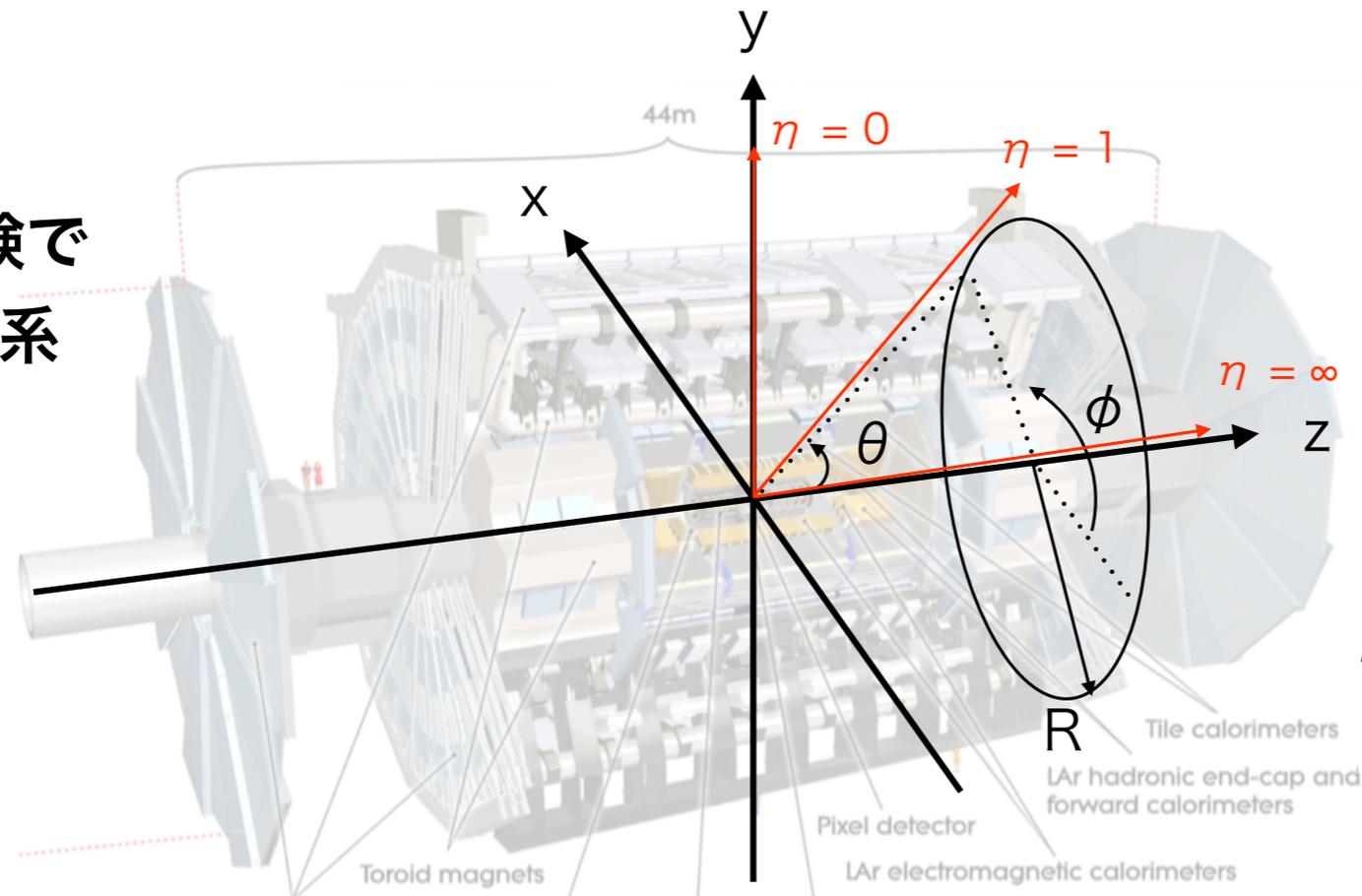
アップグレード後

- $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV} \rightarrow 14 \text{ TeV}$
- $L = 2.06 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \rightarrow 3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

ATLAS 実験

- LHCの衝突点の1つに設置した汎用検出器を用いて、標準模型の精密な検証や標準模型を超えた新粒子の探索をTeVスケールまで行っている

ATLAS 実験で 用いる座標系



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

LHC-ATLAS実験Run-3

LHC Run-3におけるアップグレード

Run-2に比べてエネルギーとルミノシティの改善が予定されている

ルミノシティが増加するが…

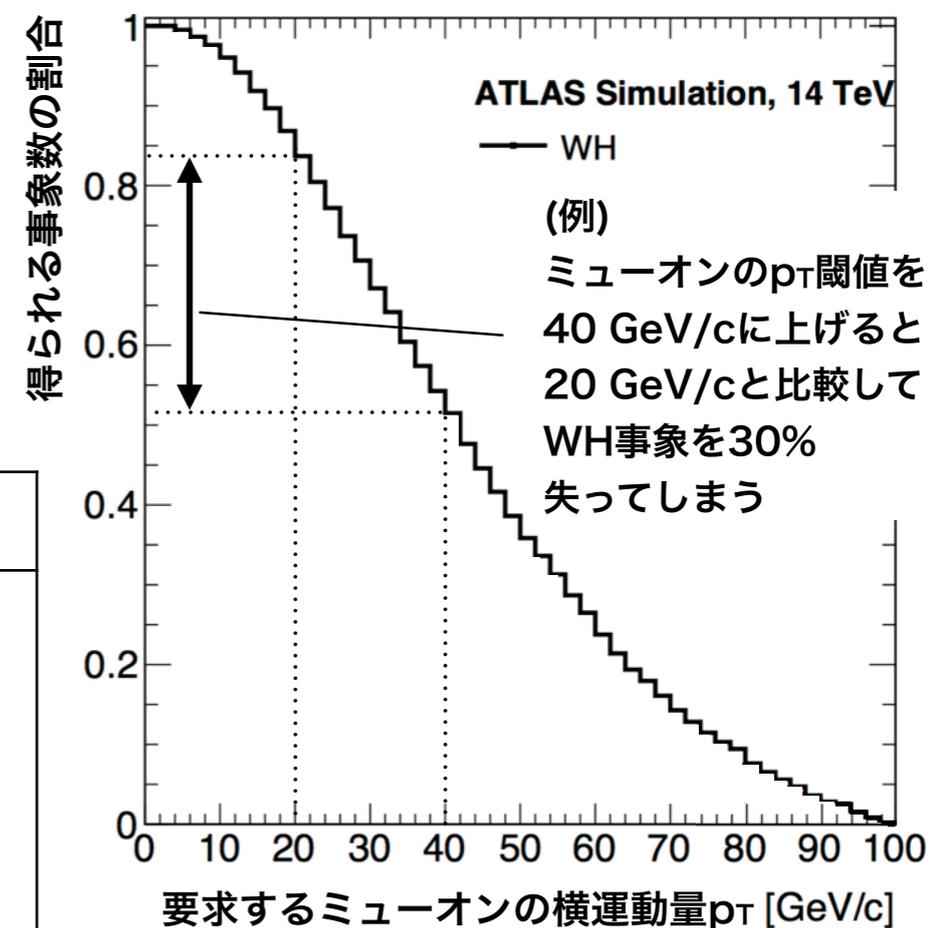
物理感度のため p_T 閾値を低く、トリガー効率が高く維持することが重要となるが、L1トリガーの許容値(100 kHz)はRun-3でも変化しない

トリガーレートを抑えなければならない

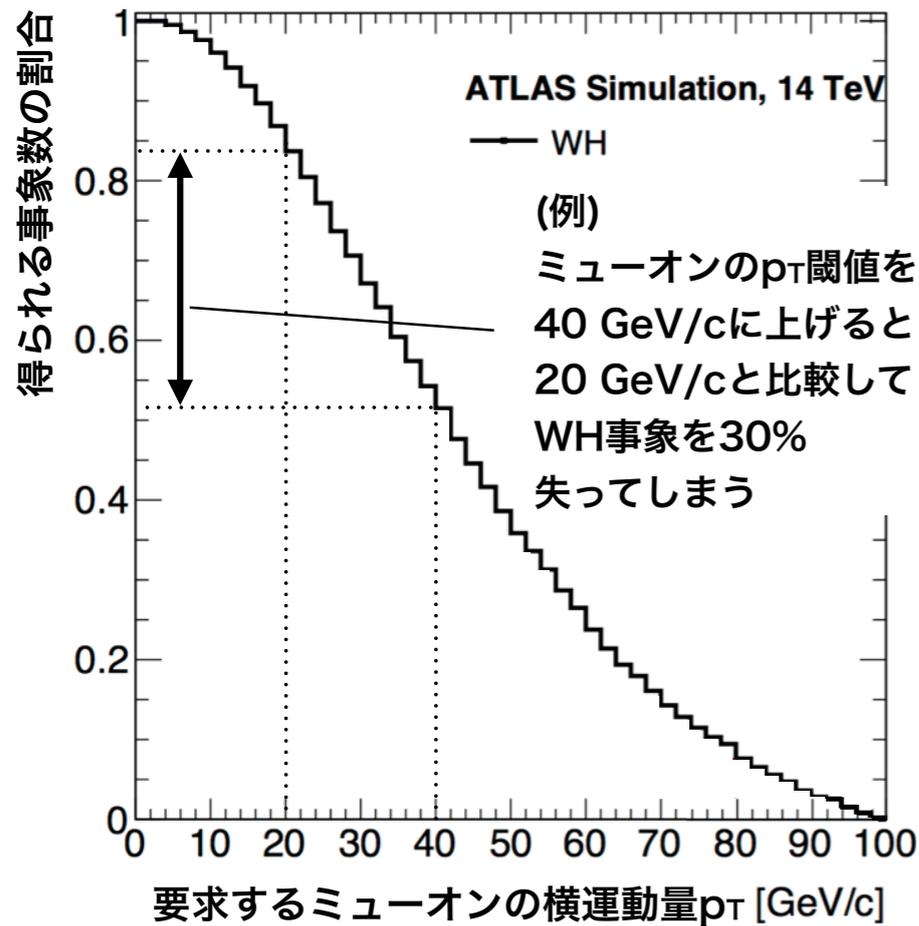
Phase-1 upgrade

Run-2
2015年 ~ 2018年
$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
$L = 2.06 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2017年の最高)

Run-3
2021年 ~ 2023年
$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$
$L = 3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



WH → μ ν bb

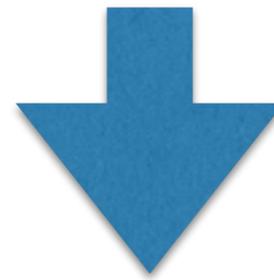


Run-3では300 fb⁻¹のデータを取得予定

WHの生成断面積 1.51 pb

Wのμへの崩壊 10%

Hのbbへの崩壊 58%



$$300 \times 1.51 \times 10^3 \times 0.10 \times 0.58 \rightarrow 2.21 \times 10^4 \text{ (} p_T \text{閾値 } 20 \text{ GeV)}$$
$$= 2.63 \times 10^4 \rightarrow 1.34 \times 10^4 \text{ (} p_T \text{閾値 } 40 \text{ GeV)}$$

トリガーメニュー

Run 1		Run 2		Run 3				
Offline p_T Threshold [GeV]	Rate [kHz]	Offline p_T Threshold [GeV]	Rate [kHz]	Offline p_T Threshold [GeV]	Rate [kHz]			
EM18VH	25	130	EM30VHI	38	14	EM25VHR	32	14
EM30	37	61	EM80	100	2.5	EM80	100	2.5
2EM10	2x17	168	2EM15VHI	2x22	2.9	2EM12VHR	2x19	5.0
EM total		270			18			20
MU15	25	150	MU20	25	28	MU20	25	15
2MU10	2x12	14	2MU11	2x12	4.0	2MU11	2x12	4.0
Muon total		164			32			19
EM10VH_MU6	17,6	22	EM15VH_MU10	22,12	3.0	EM10VHR_MU10	17,12	3.0
			EM10H_2MU6	17,2x6	2.5	EM10HR_2MU6	17,2x6	1.0
TAU40	100	52	TAU80V	180	4.7	TAU80VR	180	3.2
2TAU11I_TAU15	30,40	147	2TAU50V	2x110	3.8	2TAU40VR	2x100	3.9
2TAU11I_EM14VH	30,21	60	2TAU20VI_3J20	2x50,60	5.2	2TAU15VR_3J15	2x40,50	8.1
			2TAU20VI_			2TAU15VR_		
			EM18VHI_3J18	50,25,60	2.8	EM13HR_3J13	40,20,50	3.3
			TAU15VI_MU15	40,20	3.8	TAU11VR_MU11	35,12	6.4
TAU15_XE35	40,80	63	TAU20VI_			TAU15VR_		
			XE40_3J20	50,90,60	4.4	XE40_3J15	40,90,50	5.0
Tau total		238			20			25
J75	200	34	J100	200	7.0	J100	200	7.0
4J15	4x55	87	4J25	4x60	3.3	4J25	4x60	3.3
			J75_XE40	150,150	8.3	J75_XE40	150,150	8.3
XE40	120	157	XE90	250	10	XE70	200	13
Jet/E_T^{miss} total^a		306			25			25
Topological triggers		-			~5			~20
Total		~800			~100			~100

L1 ミューオンで
28 kHz → 15 kHz
に削減



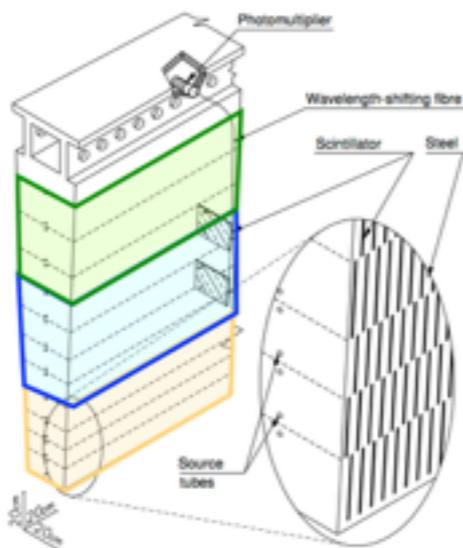
L1 Topoで使える
レートが増加

Run-3でのエンドキャップ部ミュオントリガー

ATLAS検出器は ϕ 方向に大きく分けてLarge SectorとSmall Sectorの2種類のセクターに分けられる

Tile Calorimeter

- ・鉄とシンチレータのサンプルリングカロリメータ
- ・奥行き方向に3層
- ・最外層に到達する粒子は99% μ



TGC-EI

- ・一部の ϕ 領域をカバー (Large Sectorのみ)



(Large Sectors)

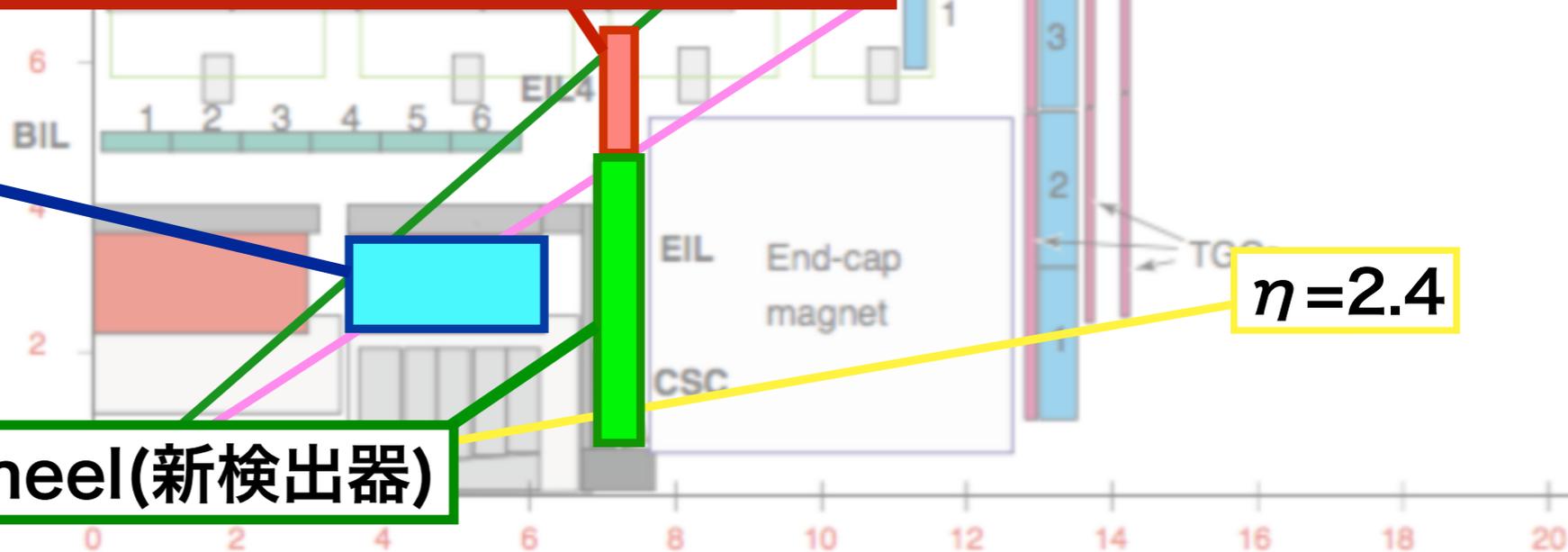
$\eta=1.0$

$\eta=1.3$

TGC-BW

$\eta=2.4$

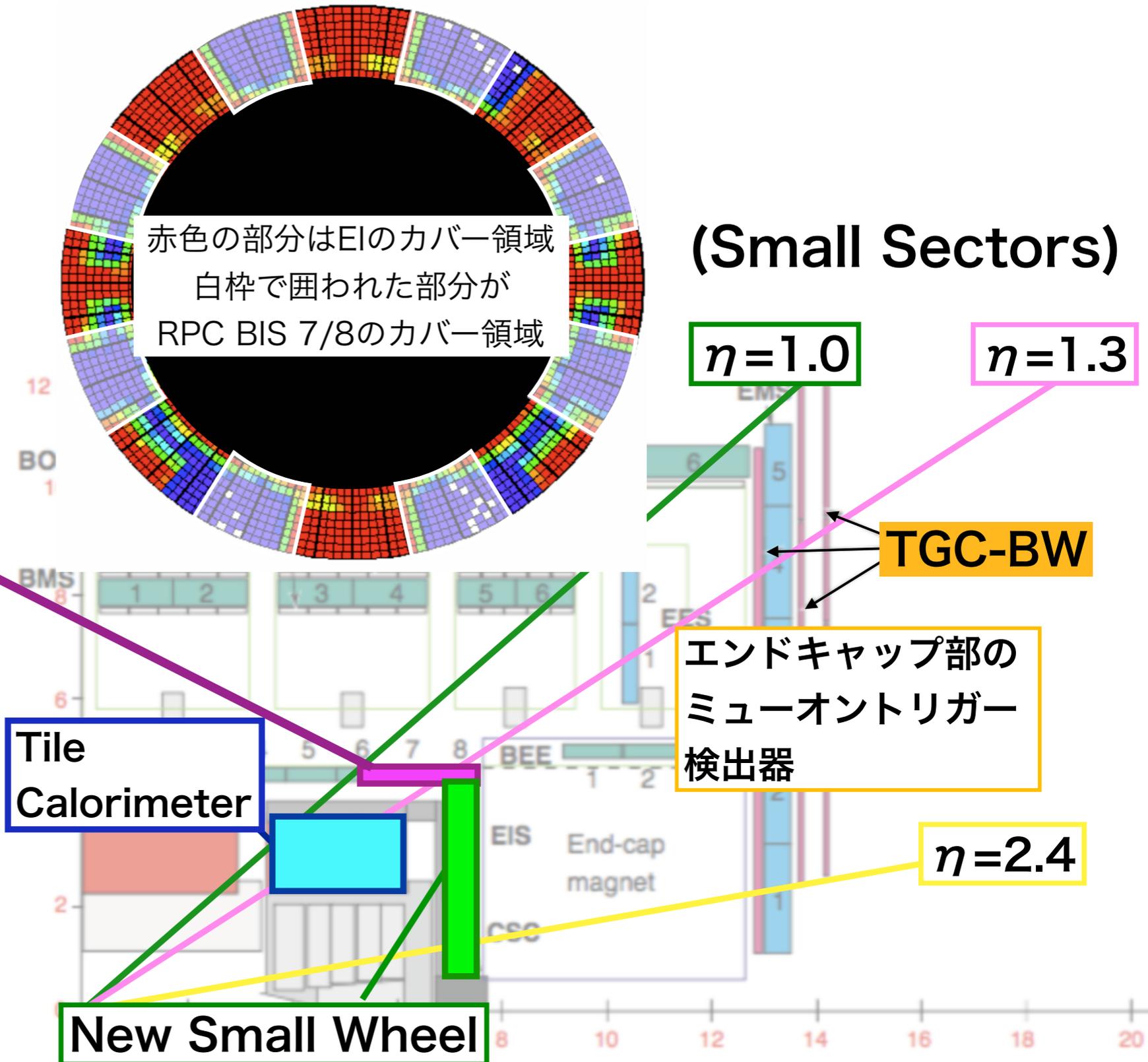
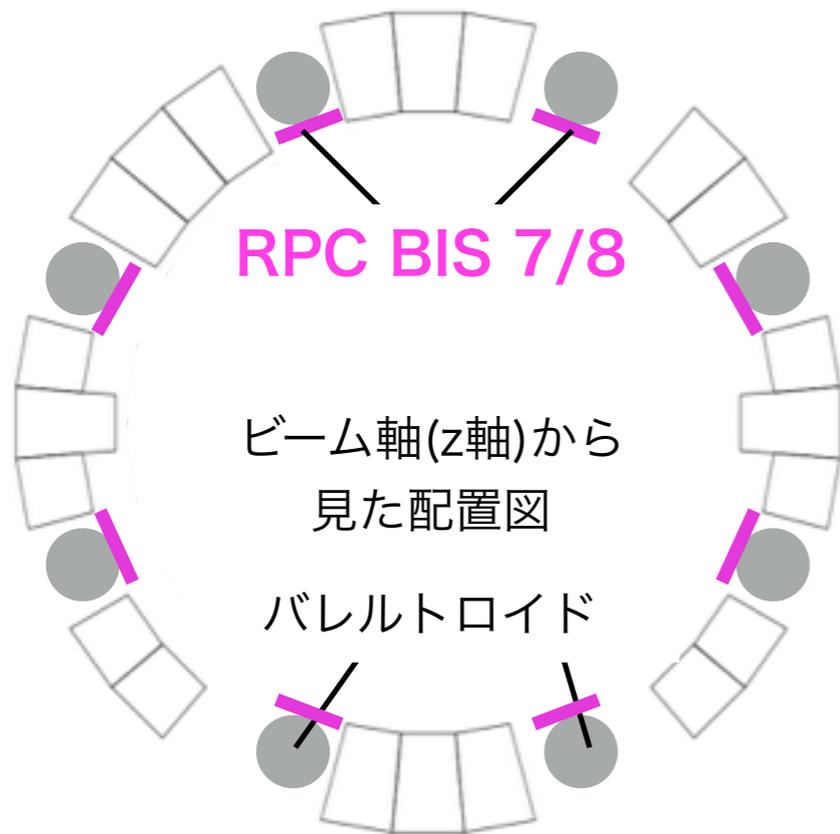
New Small Wheel(新検出器)



Run-3以降で導入される新検出器

RPC BIS 7/8(新検出器)

- ・バレル部分のミュオントリガー検出器
- ・位置分解能が良い
- ・EIと相補的な ϕ 領域をカバー

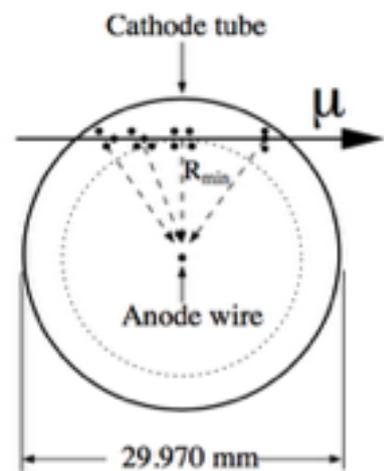
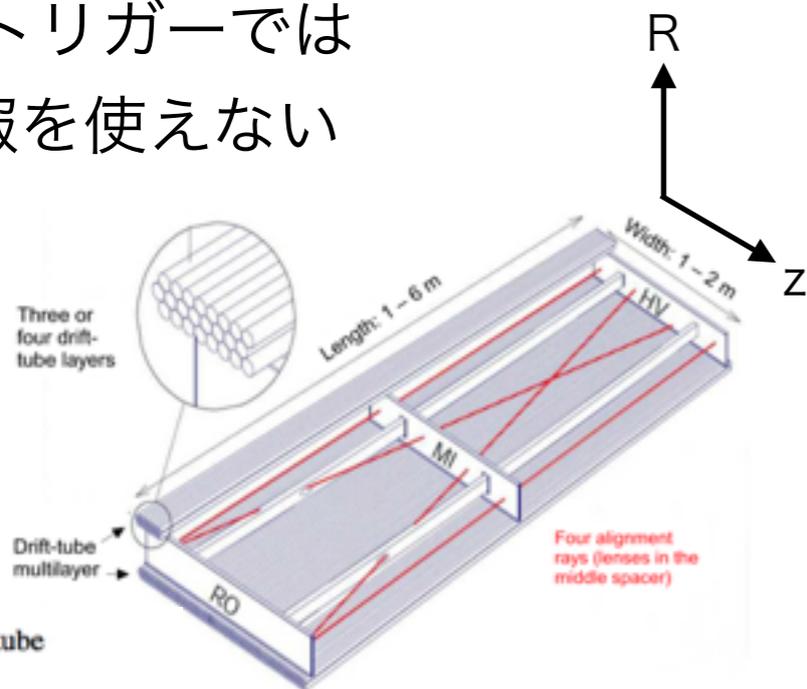


BIS 7/8

現在のBIS 7/8

Monitored drift tube(MDT)

- 多層のdrift tubeで飛跡の位置と方向を測定(半径 ~ 15mm)
- η の分解能 ~ 35 μm
- ϕ の分解能なし
- L1トリガーでは情報を使えない



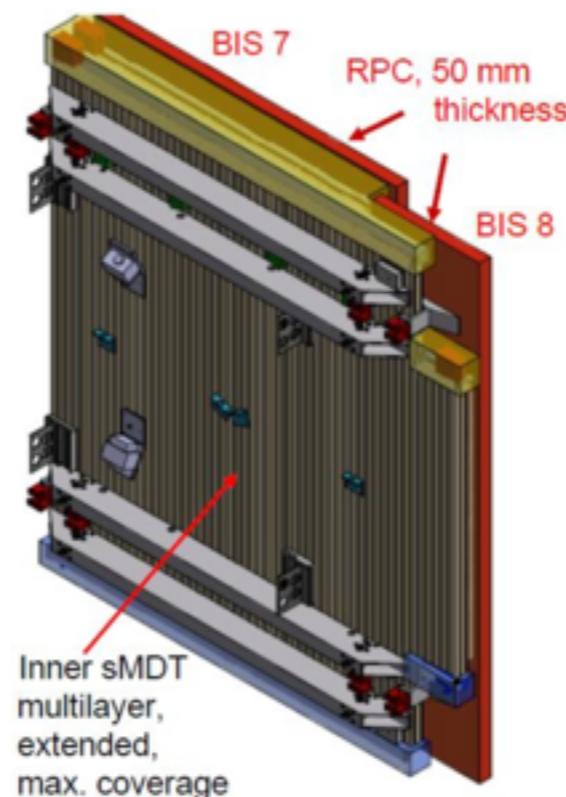
Run-3のBIS 7/8

Resistive plate chamber(RPC)

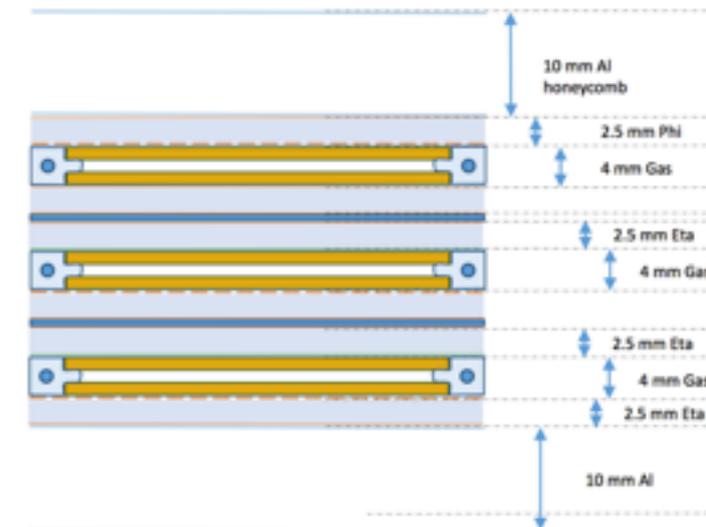
- 3層のtrigger用検出器
- zのチャンネル幅 ~ 25 mm
- ϕ のチャンネル幅 ~ 35 mm

small Monitored drift tube(sMDT)

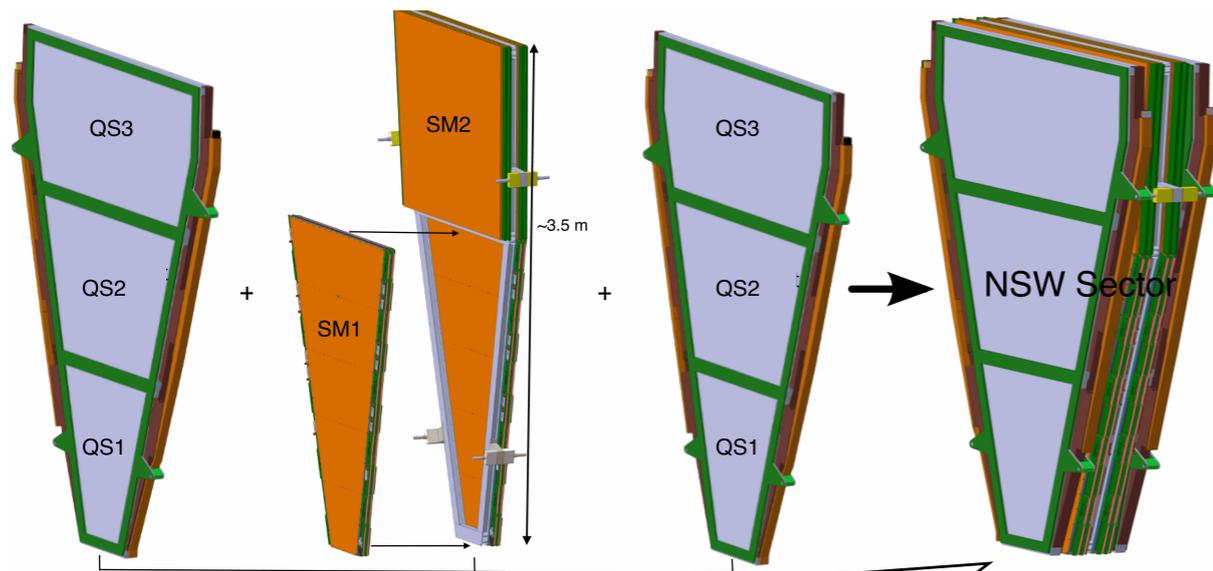
- MDTよりもtubeの半径が小さい(半径 ~ 7.5 mm)



RPC BIS 7/8の構造

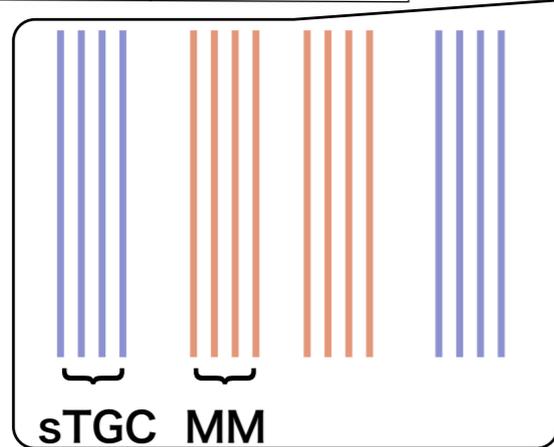


New Small Wheel



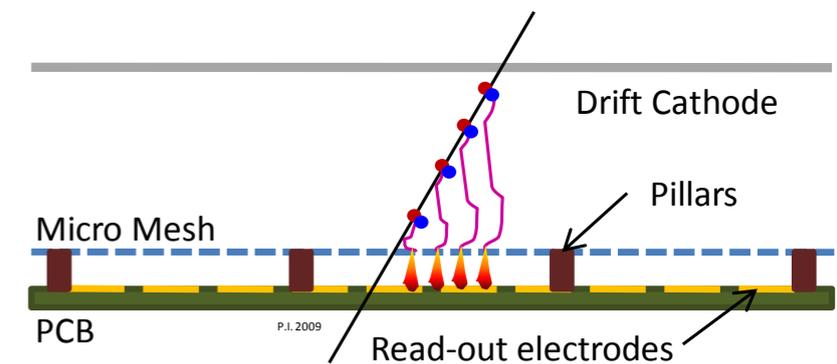
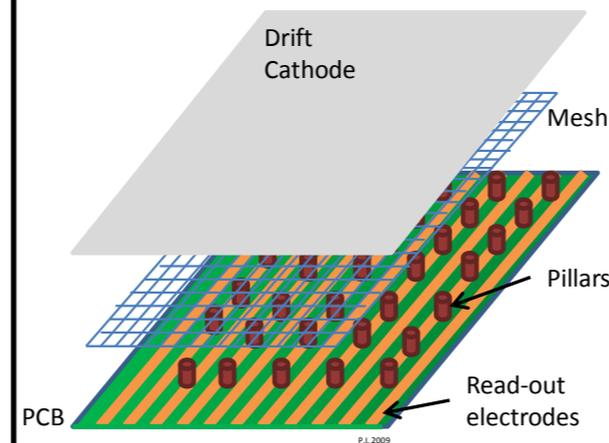
small-strip TGC (sTGC)

MWPCでアノードワイヤー、
カソードストリップ、
パッドから読み出しを行う



Micromegas (MM)

メッシュとstripの間で増幅を行う

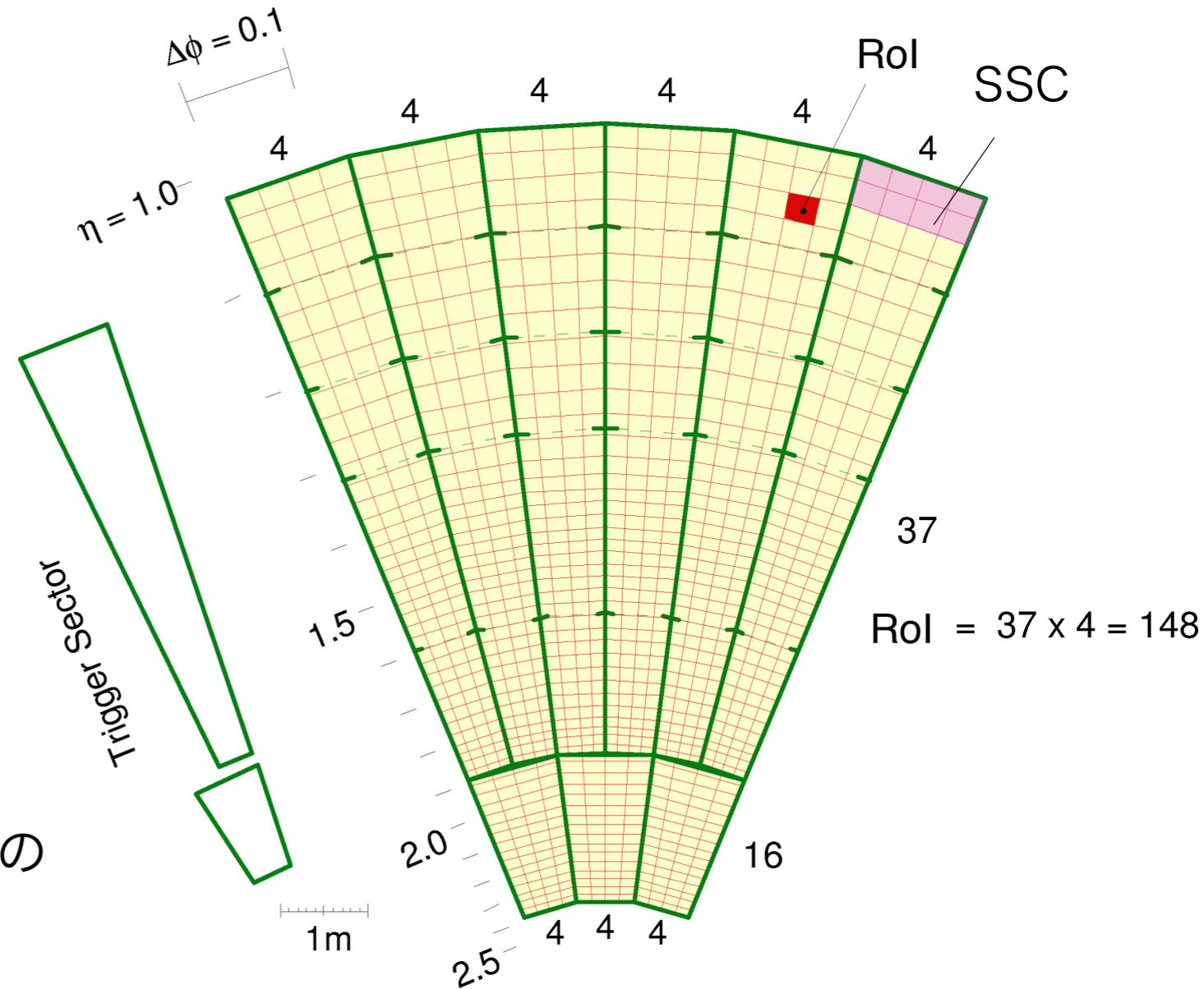


sTGCとMMが8層ずつ

ミュオントリガー判定

ミュオントリガー判定の単位

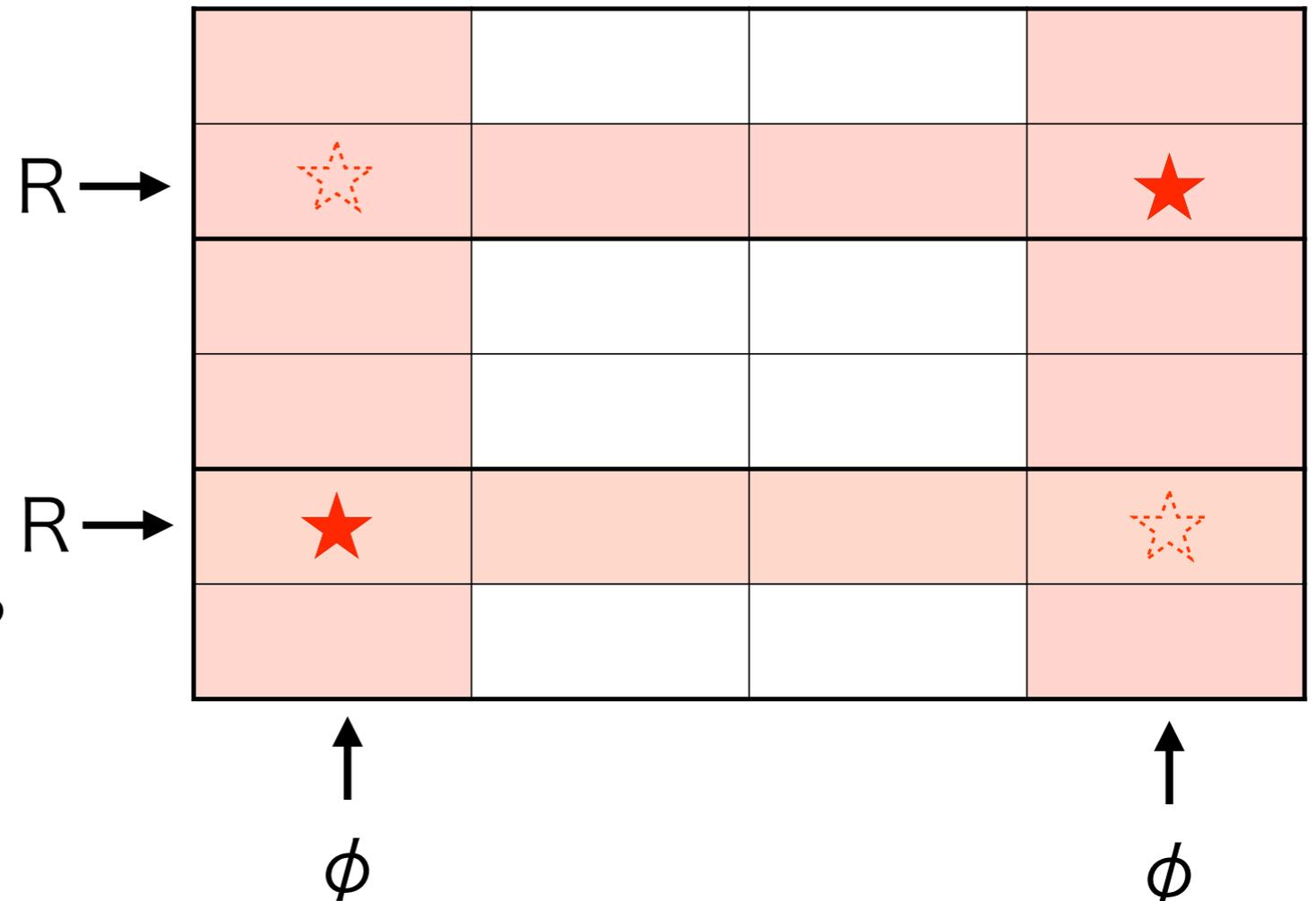
- Trigger Sector
 - 1.0 < $|\eta|$ < 1.9のTGCを
 ϕ 方向に48分割したもの(Endcap)
または
 $|\eta| > 1.9$ のTGCを
 ϕ 方向に24分割したもの(Forward)
- Region of Interest (RoI)
 - EndcapのTrigger Sectorを
R方向に37分割、 ϕ 方向に4分割したもの
または
ForwardのTrigger Sectorを
R方向に16分割、 ϕ 方向に4分割したもの
- Sub Sector Cluster (SSC)
 - R方向に2つ、 ϕ 方向に4つのRoIをまとめたもの



TGC-BW Coincidence

TGC- BW CoincidenceではBWのRと ϕ の情報を用いて
ミュオンの位置(RoI)と p_T を決定する

例えば、2つのミュオンが
赤星の位置にヒットした場合、
R情報は2つ、 ϕ 情報は2つ得られる



ただしコインシデンスをとると、
点線の星の部分も含めて
4つのミュオンがヒットしたように見える
→偽物のトリガーが発行されてしまう
→対策として1 SSCから1つまでにする

RPC BIS 7/8からのデータフォーマット

Data format from RPC BIS7/8 PAD trigger logic board to Endcap Sector Logic

Words (16 bit)	first byte	second byte
Word-0	comma	comma
Word-1	candidate-0	
Word-2		
Word-3	candidate-1	
Word-4	candidate-2	
Word-5		
Word-6	candidate-3	
Word-7	BCID	CRC

8b/10b encoding x 16 bytes = 6.4 Gbps

Format of a candidate information in RPC BIS7/8 PAD trigger logic board (24 bit/candidate)

Field	eta index	phi index	deta	dphi	2/3 flag	reserved
Num. of bits	6	6	3	3	2	4

(BIS7 & BIS8) = 1 station = 1 PAD trigger logic

3-layers (eta) + 3-layers (phi)

2.5 cm/strip for eta, 3.5 cm/strip for phi

Number of channels in BIS7/8 (not defined yet)

	eta	layer	phi	layer
BIS7	48	3	64	3
BIS8	16	3	64	3

2/3 coincidence should be taken in PAD trigger logic board.

Reason of bit assignment per candidate

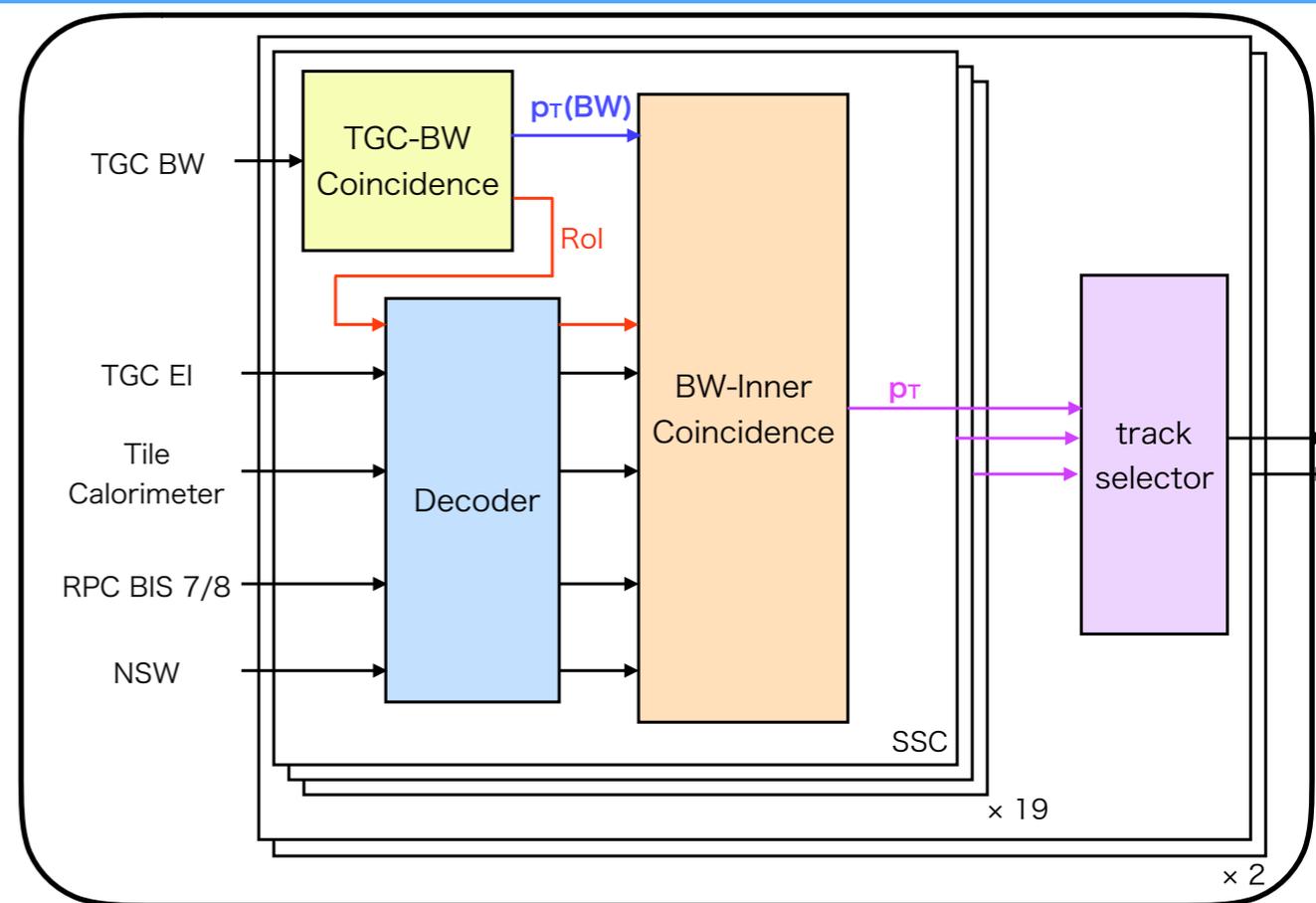
	Bits	from
eta index	6	(48+16) = 64 channels
phi index	6	64 channels
deta	3	eta difference between two farest layers (-3 to 3)
dphi	3	phi difference between two farest layers (-3 to 3)
2/3 flag	2	Layer 1&2=00, Layer1&3=01, Layer2&3=10, Layer1&2&3=11

New SLは
1 BCにつき
最大4トラックの
情報を受け取る

このフォーマットは草案段階のもの
まだ決定していない

Coincidence Logicに対する要求

- p_T 計算するためにRPC BIS 7/8のトラック情報のデコード処理(25 ns必要)
 - TGC BWのミューオンの位置情報を用いた p_T 計算
 - TGC BWで計算された p_T と合わせた最終的な p_T の決定
- の3つの処理を行う



New SLがトリガー判定に使える時間(NSWはデータがNew SLに届く時間が一番遅い)

New Small Wheel			Big Wheel TGC (measured)		
nsec	BCs	Total	nsec	BCs	Total
New Sector Logic					
Receive signal from NSW		41.4	Receive signals from BW		37
Optical Rx + De-serializer	2.5	44	Optical Rx + De-serializer	2	39
Variable Delay	1	45	TGC R-Phi coincidence (LUT)	2	41
Decoding/Alignment of NSW data (LUT)	2	47	Waiting for NSW signals	6	47
			BW - NSW coincidence (LUT)	1	48
			Track selection	1	49
			p_T encoding	1	50
			Serializer (128 bit/clock., 6.4 Gb/s) + Optical Tx	2	52
			Optical fibre to MUCTPI (10 m)	2	54

p_T 計算はRPC BIS 7/8でも使える時間は同じ
計算するために使える合計時間は3 BC(= 75 ns)

New Small Wheelからのデータフォーマット

Data format from New Small Wheel Trigger Processor to Endcap Sector Logic

Words	first byte	second byte
Word-0	comma	comma
Word-1	track-0	
Word-2		
Word-3	track-1	
Word-4	track-2	
Word-5		
Word-6	track-3	
Word-7	ID(4bit)	BCID(12 bit)

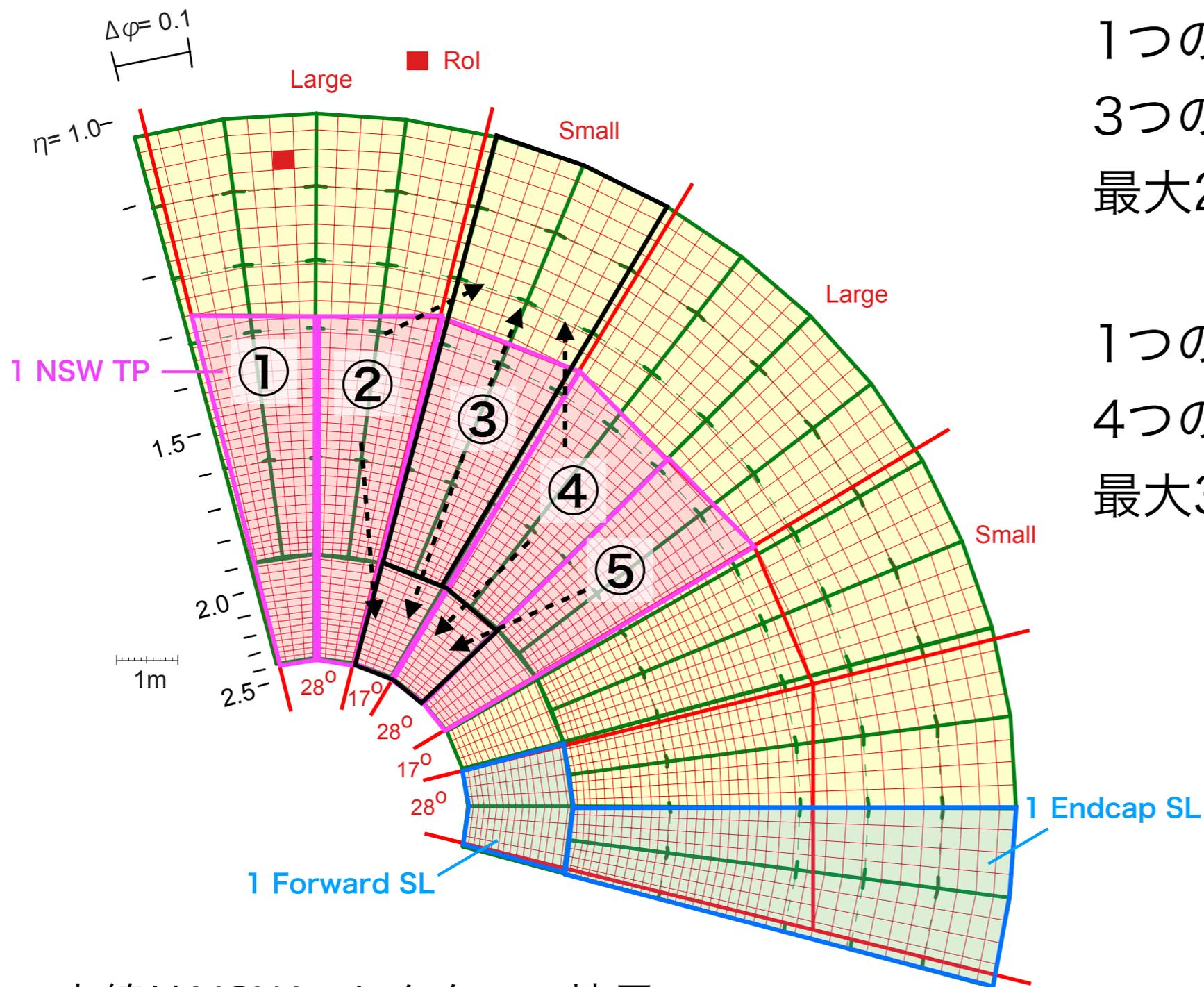
8b/10b encoding × 16 bytes = 6.4 Gbps

New SLは
1 BCにつき
1本のファイバーで
最大4トラックの
情報を受け取る

情報	sTGC type	MM type	$\Delta\theta$	ϕ position	η position	spare
ビット幅	2	2	5	6	8	1

New Small Wheel Trigger Processor(NSW TP)は
2本のファイバーでトラック情報をNew SLに送信する

New Small Wheelのセクター



1つのEndcap用New SLは
3つのNSW TPから
最大24トラックの情報を受け取る

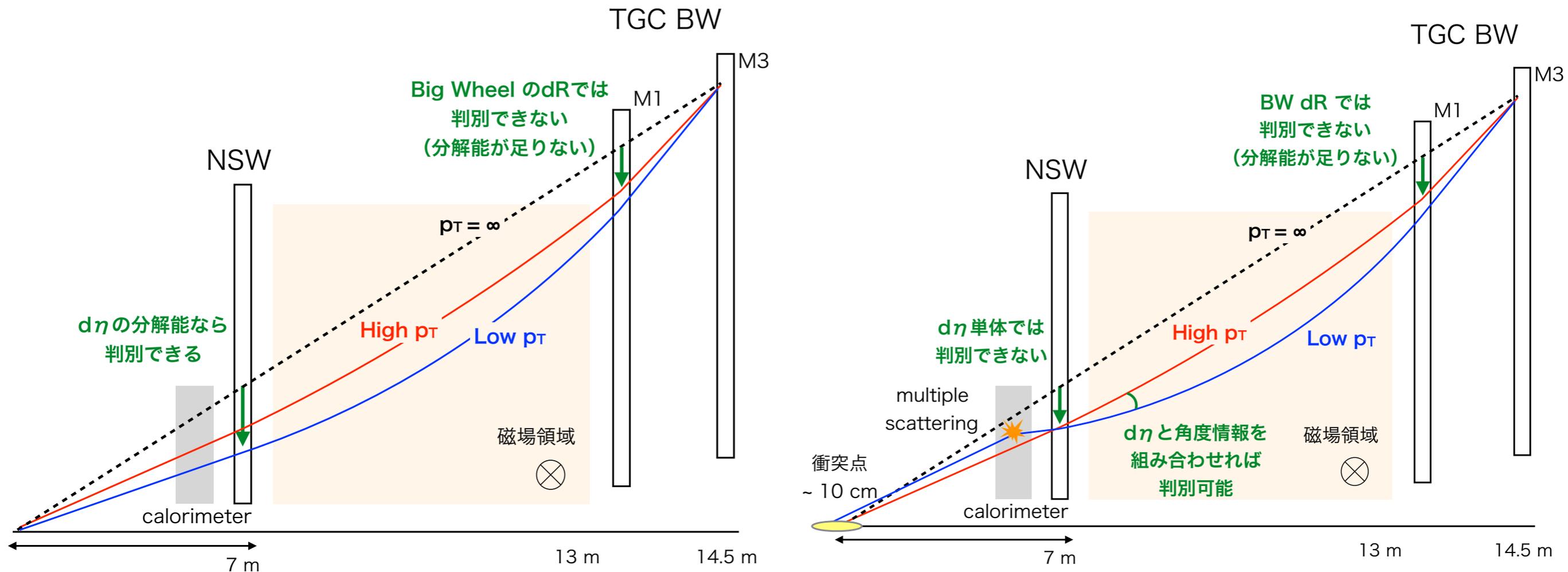
1つのForward用New SLは
4つのNSW TPから
最大32トラックの情報を受け取る

赤線はNSWのセクターの境界
ピンクは1つのNSW TPが担当する領域
青は1つのNew SLが担当する領域

New Small Wheelとのコインシデンス

コンセプトはRPC BIS 7/8と同じ

NSWの分解能 $\eta \sim 0.005$ 、 $\phi \sim 10$ mrad、 $\Theta \sim 1$ mrad

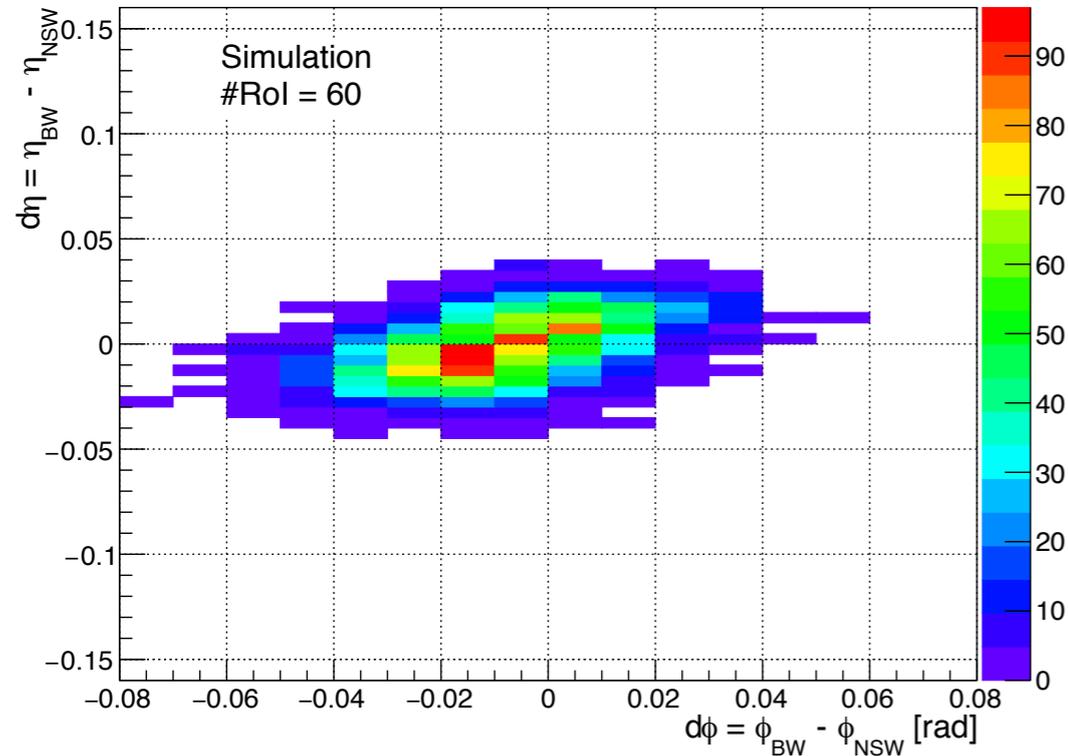


同様にCoincidence Windowを定義して p_T 判定

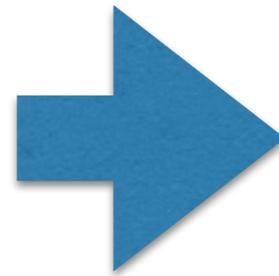
New Small Wheelとのコインシデンス

ヒット分布($d\eta:d\phi$)

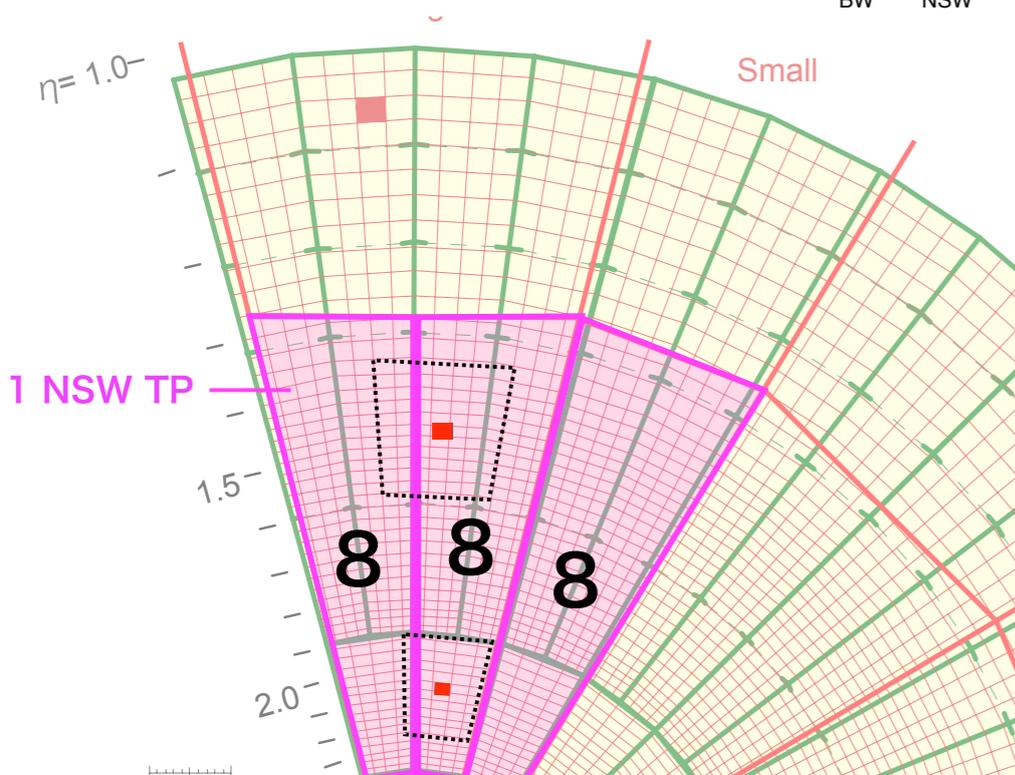
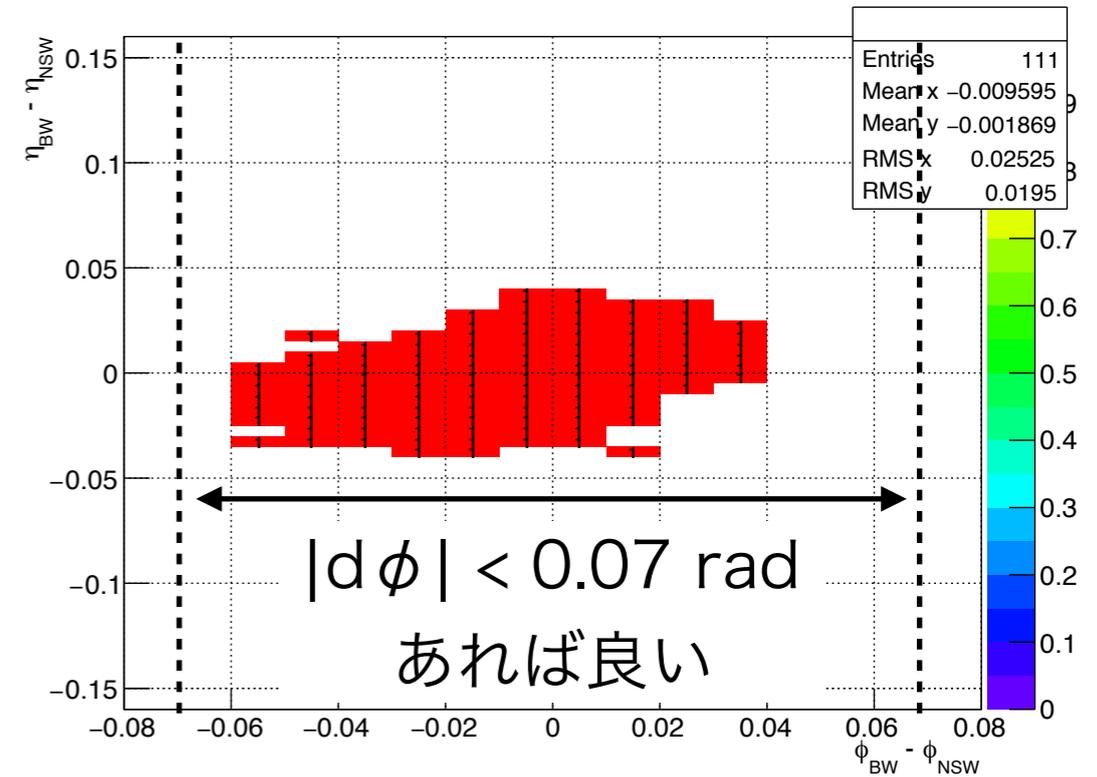
20GeV + 40GeV



99%を
含むように



Coincidence Window



赤の位置にヒットしたミュオンと
コインシデンスをとり得る

NSWでのトラック数の最大は16

→ **16トラックとコインシデンスをとれるようにする**