

LHCアップグレードへ向けた 新ミュオン検出器の開発研究

2012/02/20

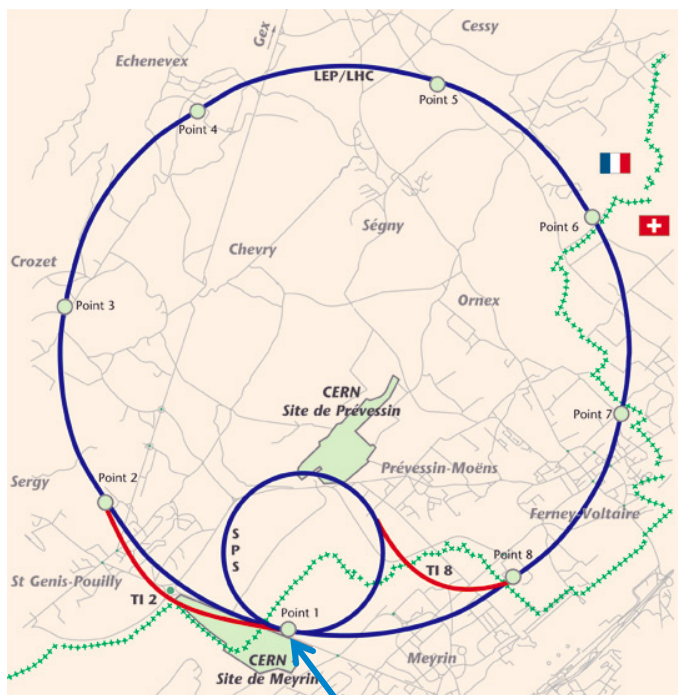
東大素粒子物理国際研究センター

二ノ宮陽一

概要

1. LHCとATLAS検出器について
2. Muon Spectrometer
3. トリガーシステム
4. LHCアップグレードについて
5. Small Wheelのアップグレード
6. New Small Wheelのシミュレーション
7. まとめ

LHC加速器とATLAS検出器



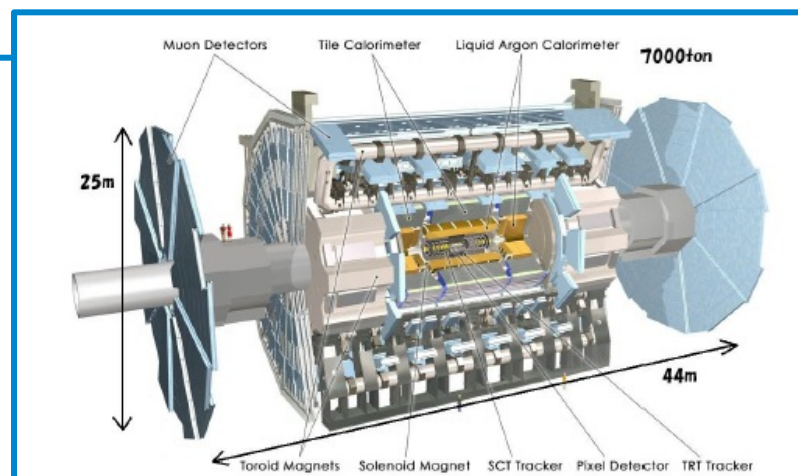
ATLAS検出器

Higgs粒子や、標準模型を超える物理現象の探索を行う汎用検出器

- Tracker
 - MDT
 - CSC
 - TGC
 - RPC
- Calorimeter
- Muon Spectrometer

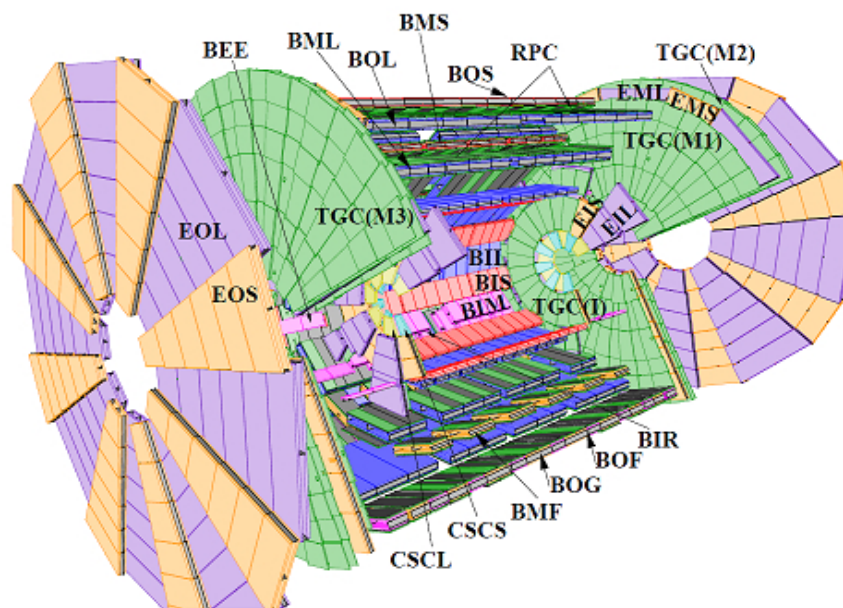
LHC加速器

- メインリング長 26.66km
- ビームエネルギー 7TeV
- デザインミノシティ $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 衝突頻度 40.08MHz
- バンチ数 2808個

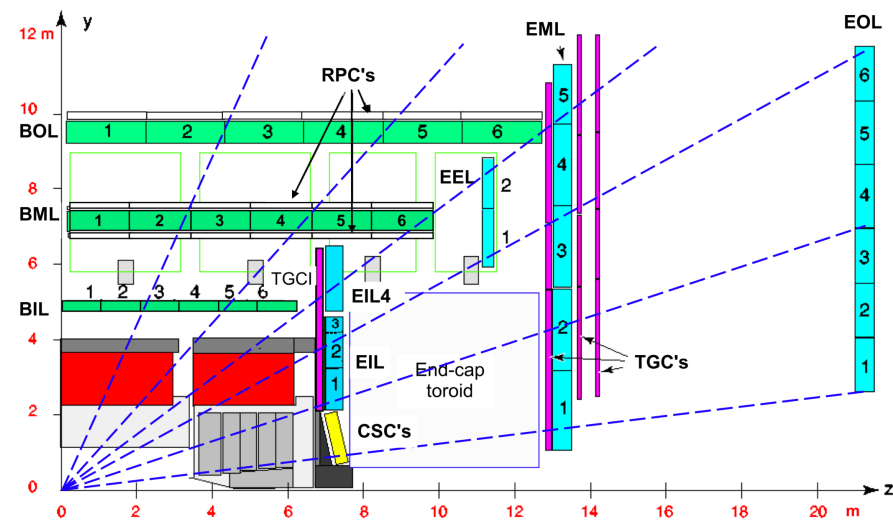


Muon Spectrometer

ATLAS検出器の最外部に配置され、ミュオンの運動量の測定とそれを用いてトリガーの発行を行う。日本グループはトリガー機能を担う、Thin Gap Chamberと呼ばれるMWPCの一種である検出器を担当し、ATLASのトリガーシステムに貢献している。



全体図

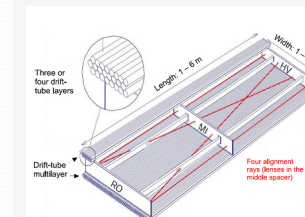
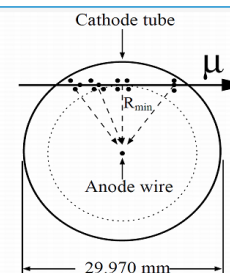
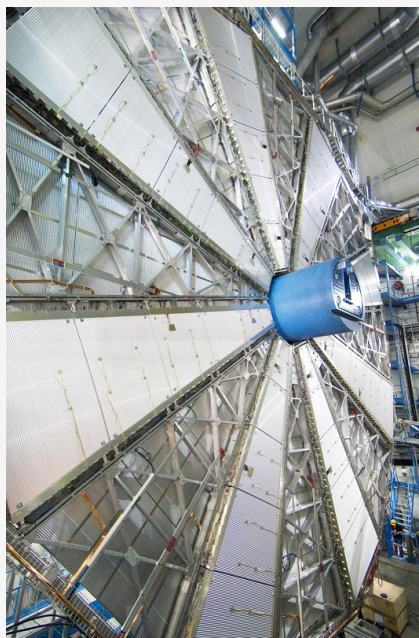


R-Z平面図

Muon Spectrometer

MDT(Monitored Drift Tube)

バレル領域、エンドキャップ領域のミュオンの位置情報を得るための検出器。電粒子の通過と、それによって生じる電子雪崩に起因するパルスの発生の時間差によってチューブ内の粒子の通過位置を測定する。



チューブ素材	Al
チューブの外径	29.970mm
チューブ厚さ	0.4mm
陽極ワイヤー電圧	3080V
ワイヤー素材	金メッキ W/Re 合金 (97/3)
ワイヤー直径	50 μ m
ガス組成	Ar/CO ₂ /H ₂ O (80/20/1000ppm 以下)
ガス圧	3barr
ガスゲイン	2 × 10 ⁴
最大ドリフト時間	~700ns
1 チューブでの平均位置解像度	~80 μ m



TGC(Thin Gap Chamber)

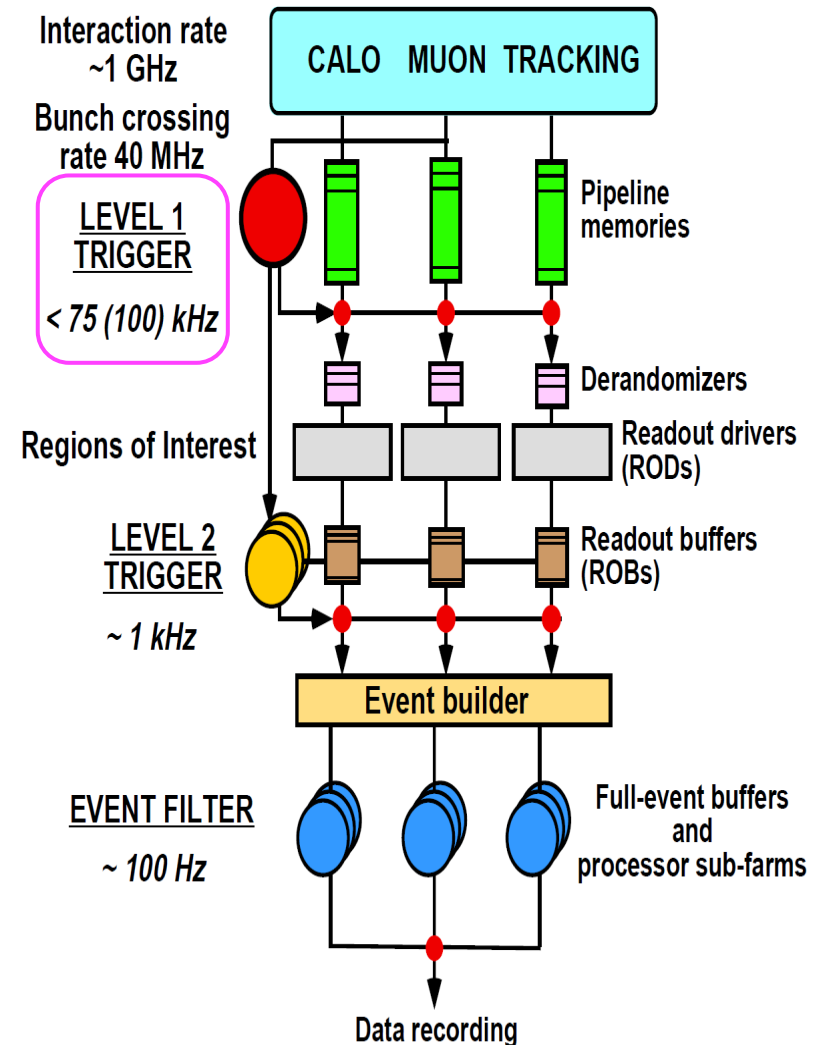
前後方部のトリガーを担う。wire間隔よりもwire-strip間の方が狭くなっている。25ns以下の時間分解能。wireがR方向、stripが ϕ 方向の情報を出力。

Trigger System

高エネルギー、高頻度衝突(40MHz)の実験のため、すべてのデータを保存することは不可能。従って、ATLAS実験では多段階的なトリガーシステムを採用することで、効率良くバックグラウンドを除去し、イベントレートを落としていく。

Level 1 トリガー

ミュオントリガー検出器、カロリメータの情報に基づき2.5 μ s以内での高速なトリガー判定。高速な判定のためにすべてハードウェアで処理を行う。トリガーレート75kHz。



LHC Upgrade

Higgs粒子や超対称性粒子の精密測定、重い新粒子などの新物理の発見のためにLHCのアップグレードを行い、最終的に積分ルミノシティで、 3000fb^{-1} を目指す。

2009	$\sqrt{s}=900\text{GeV}$
2010	
2011	$\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 、ルミノシティ $2\times 10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
2012	
2013	$\sqrt{s}=14\text{TeV}$ 、ルミノシティ $1\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ へ向けてのシャットダウン
2014	
2015	
2016	$\sqrt{s}=14\text{TeV}$ 、ルミノシティ $1\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
2017	
2018?	Phase-1 Upgrade
2019?	
2020?	$\sqrt{s}=14\text{TeV}$ 、ルミノシティ $2\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
2021?	
2022?	Phase-2 Upgrade

LHC Upgrade

レベル1ミュオントリガーについて

アップグレードによって膨大なバックグラウンドが予想される。
しかし、これからの実験で主なトリガーとなりうるミュオンの $p_T=20\text{GeV}$ を閾値とするトリガーは、 $\sqrt{s}=14\text{TeV}$ 、ルミノシティ $3\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ では、60kHzまでしか落ちないと予想されている。

レベル1トリガーは、設計の段階で75kHzまでしか耐えることができない。
またレベル1でミュオンに割り当てられているのは20kHz。

閾値の値を上げても、検出器の p_T 分解能の限界から対して下がらない。



アップグレードに向け改善が必要

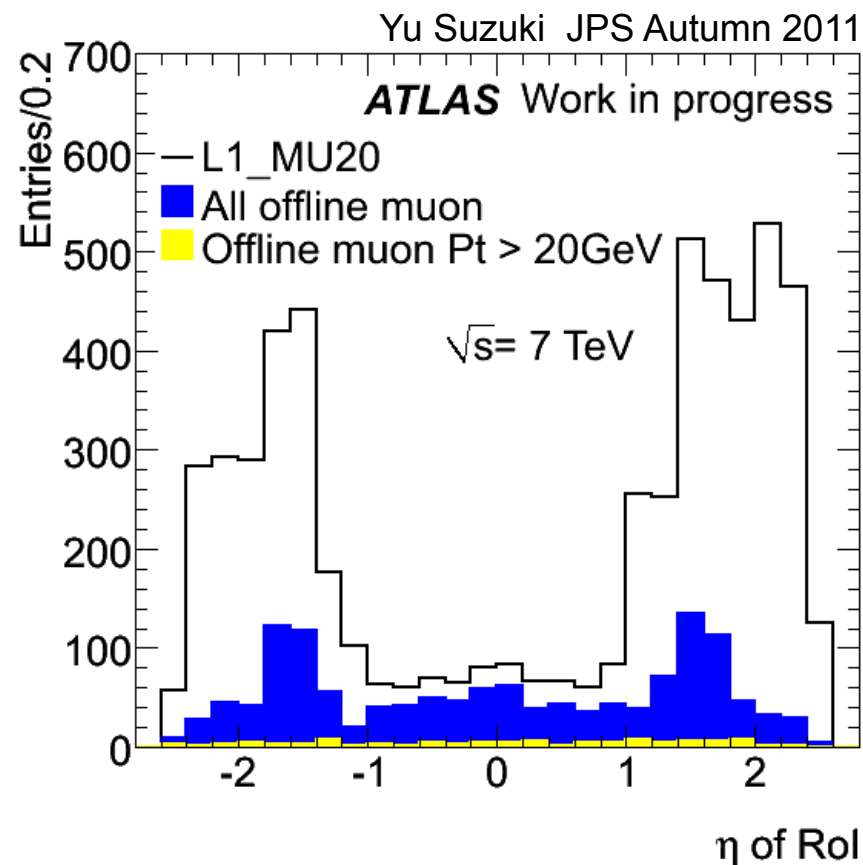
現状のL1_MU20トリガー

L1_MU20 = レベル1のミュオン $p_T=20\text{GeV}$ を閾値とするトリガー。
Offline muon = すべての検出器の情報を用い、Offlineで再構成したもの

右図でわかるように現状のミュオン $p_T=20\text{GeV}$ のトリガーで取られたイベントはほとんどがフェイクであることが最近の研究によりわかった。



Endcap領域の改善をすることで、フェイクのレートを下げることができる。

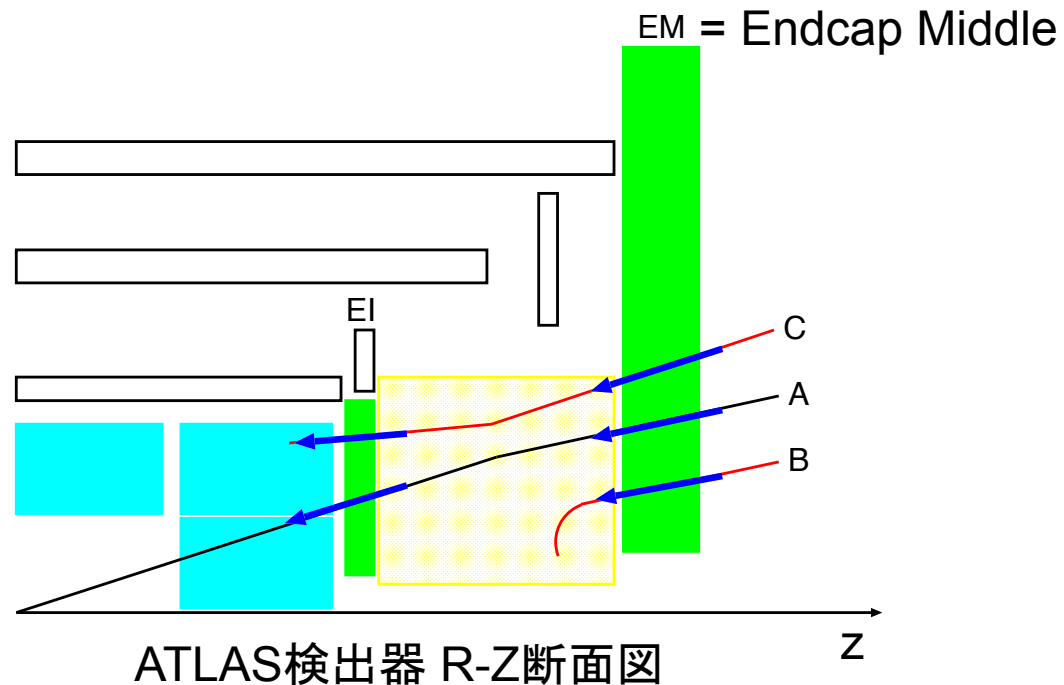


Fakeの起源

現在のシステムはSmall Wheelの情報は使っていない。従って、A, B, Cのすべてのイベントを取ってしまう。



Small Wheelの情報を用いることで除去できる



A. IPからの正しいイベント

B. 高エネルギー中性子がビームパイプを叩いて生成される運動量の小さい陽子

C. ビームハローや多重散乱によるもの

SWの情報を用いたFakeの除去

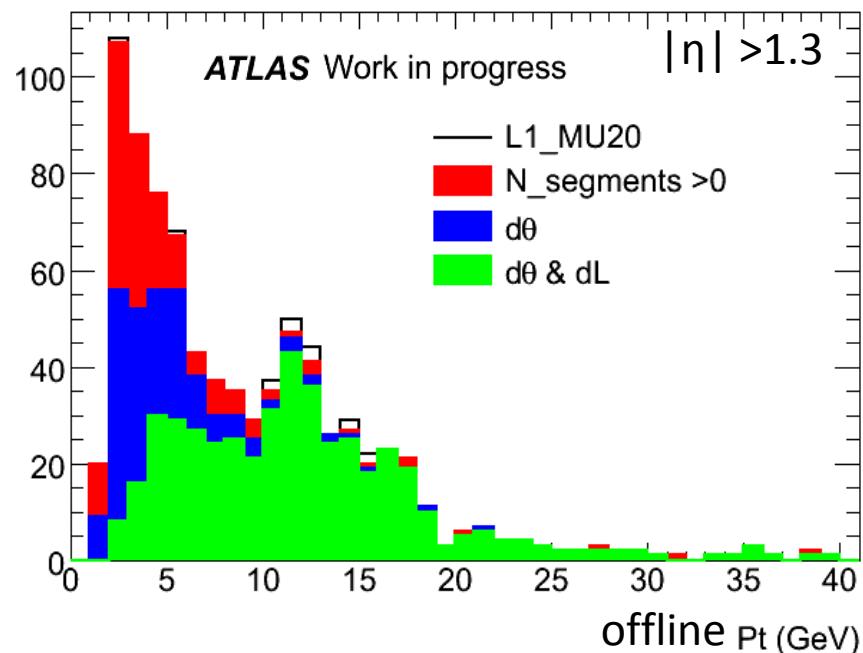
Yu Suzuki JPS Autumn 2011

SWにトラックセグメントを要求するだけで、約63%に落とすことができ、 $d\theta + dL$ のカットを用いると約14%まで落とすことができる。

さらなる向上には p_T の分解能を上げる必要がある。



Small Whellの情報は不可欠であることがわかる



$d\theta$ = IPからの角度とSWのセグメントの角度の差

$dL = \eta_{SW} - \eta_{ROI}, \Phi_{SW} - \Phi_{ROI}$
ROI = L1トリガーが発行されたときのTGCの最外層のヒットの領域

Small WhellのUpgrade

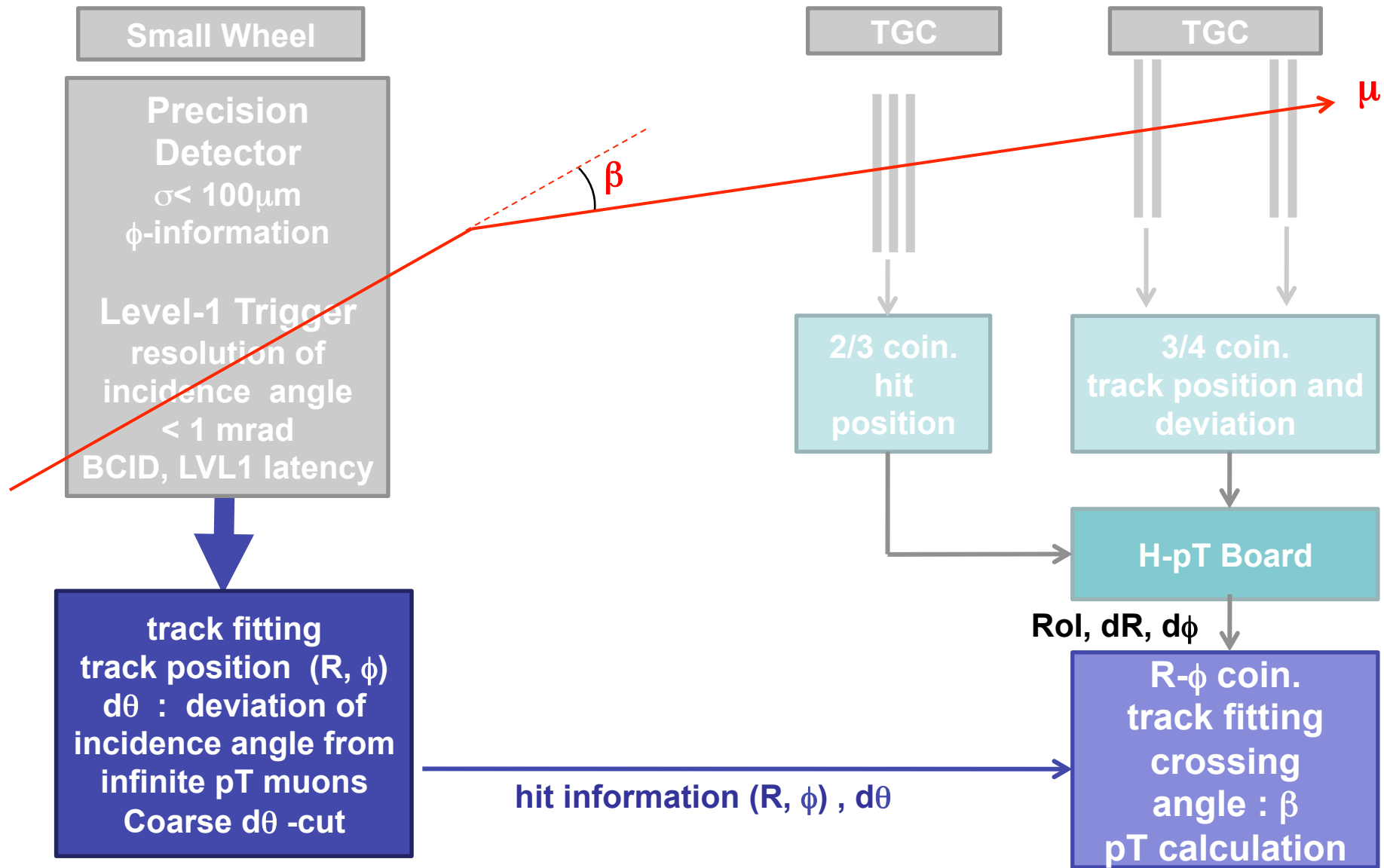
Small Whellのトラックセグメントを正確に得るために、ミュオンの位置情報を得る検出器も高レートバックグラウンドの中で現状と変わらぬ性能が必要である。しかし、MDT(2100mm>R)は $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ での稼働を元にして作られているため、アップグレード後では耐えることができないことがわかっている。そこでPhase-2へのアップグレードも考慮して、Phase-1に新しいSmall Whellを導入することが決まった。

Upgradeへ向けて求められる性能

- ・ Trackingを担当する検出器は粒子の入射角度が1mradの分解能
- ・ Latencyは1.08 μsec 、またはビーム衝突間隔を1clockとしたときの43clock以内。
- ・ Phase-2アップグレードでのルミノシティ $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下でも性能が低下しない。

└─→ バックグラウンドのヒットが $14 \text{kHz} \cdot \text{cm}^{-2}$ でも正確に機能すること

Phase-1 Upgradeでのトリガー



Detector

2018年の1年間のLHCシャットダウン時にNew Small Wheelをインストールする予定。2012年現在、未だ検出器は決定されていないが、3種類まで絞られている。そのうち日本グループが推しているのが、MDTを用いたもの。

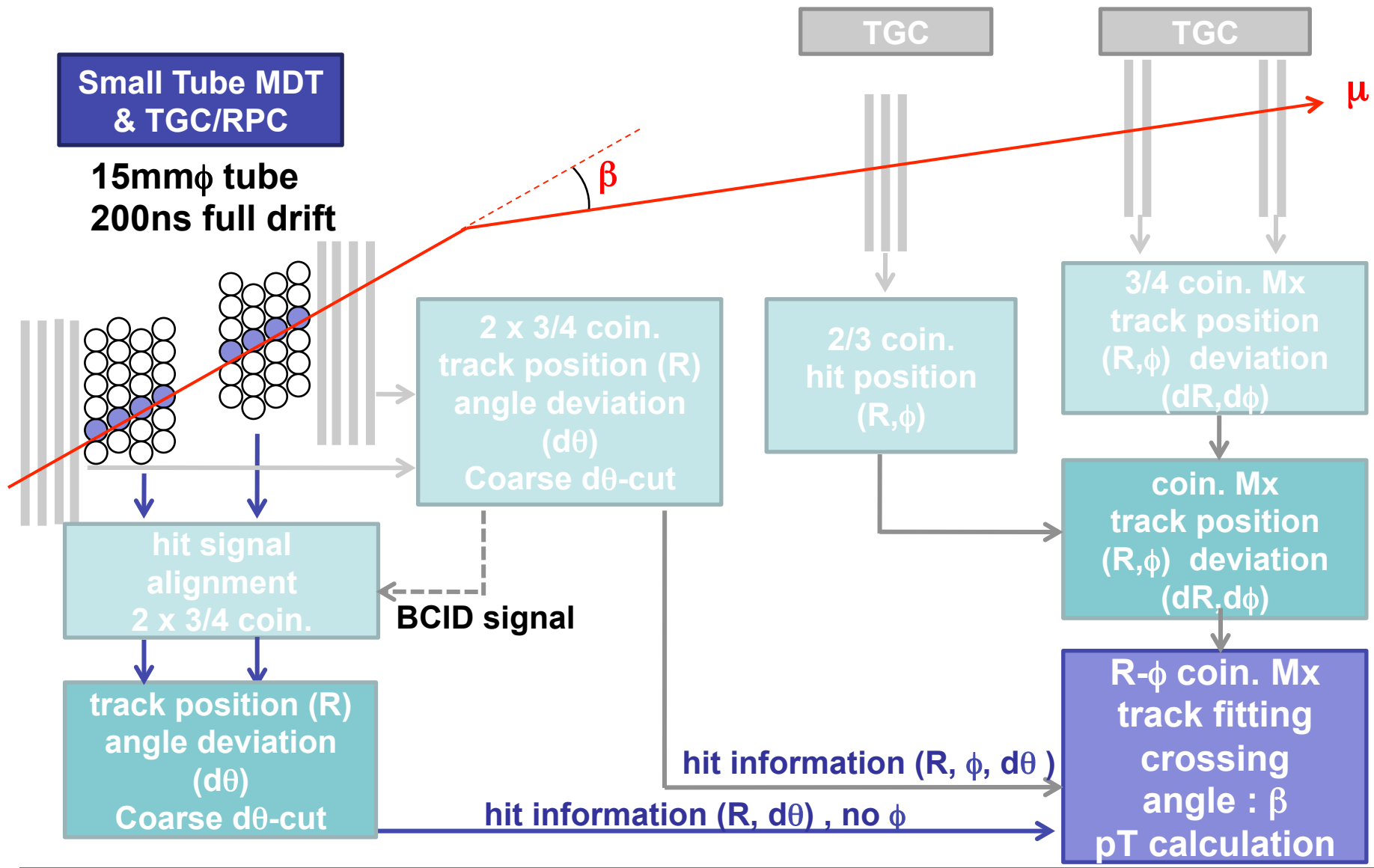
New Small WheelのMDT

高レートに対応するために現在のMDTのチューブサイズ直径30mmから直径15mmのチューブを使用する。

これにより、30mmのときには荷電粒子が通過して、チューブの中心のワイヤーに信号が検出されるまで700nsだったのが、200nsと大幅に減少させることができた。

この位置情報を得るためのMDTとトリガー検出器のTGC、もしくはバレル方向を担当しているトリガー検出器を交互に入れ、BWのTGCと情報を合わせ、L1トリガーを出す。

Small Tube MDT+TGC



日本グループとして

Small Tube MDTを用い、トラックセグメントの情報を使ってトリガーを出せるようにしたいと考えている。

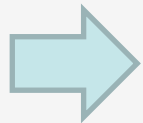
Phase-2ではすべてのMDTを使って、トリガーを発行できるようにしたい。



問題はBCIDの情報を正しく得ることができるか

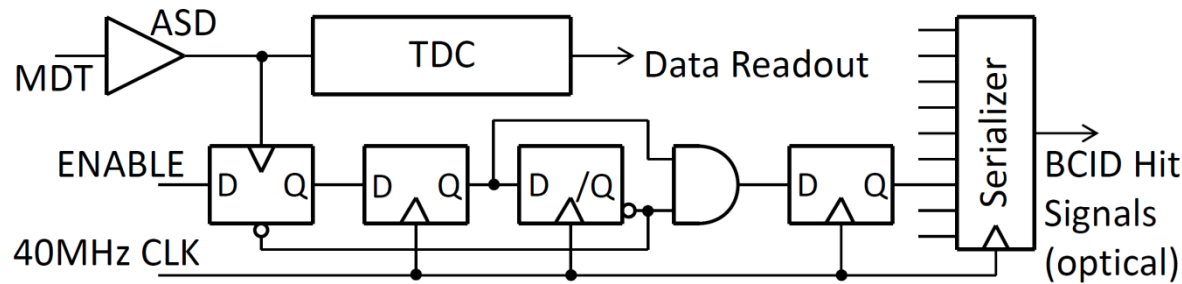
TGCは応答時間が25nsに収まっているので、正確にBCIDの情報を得ることができる。

Small Tube MDTは200nsなので現状のままでは無理。

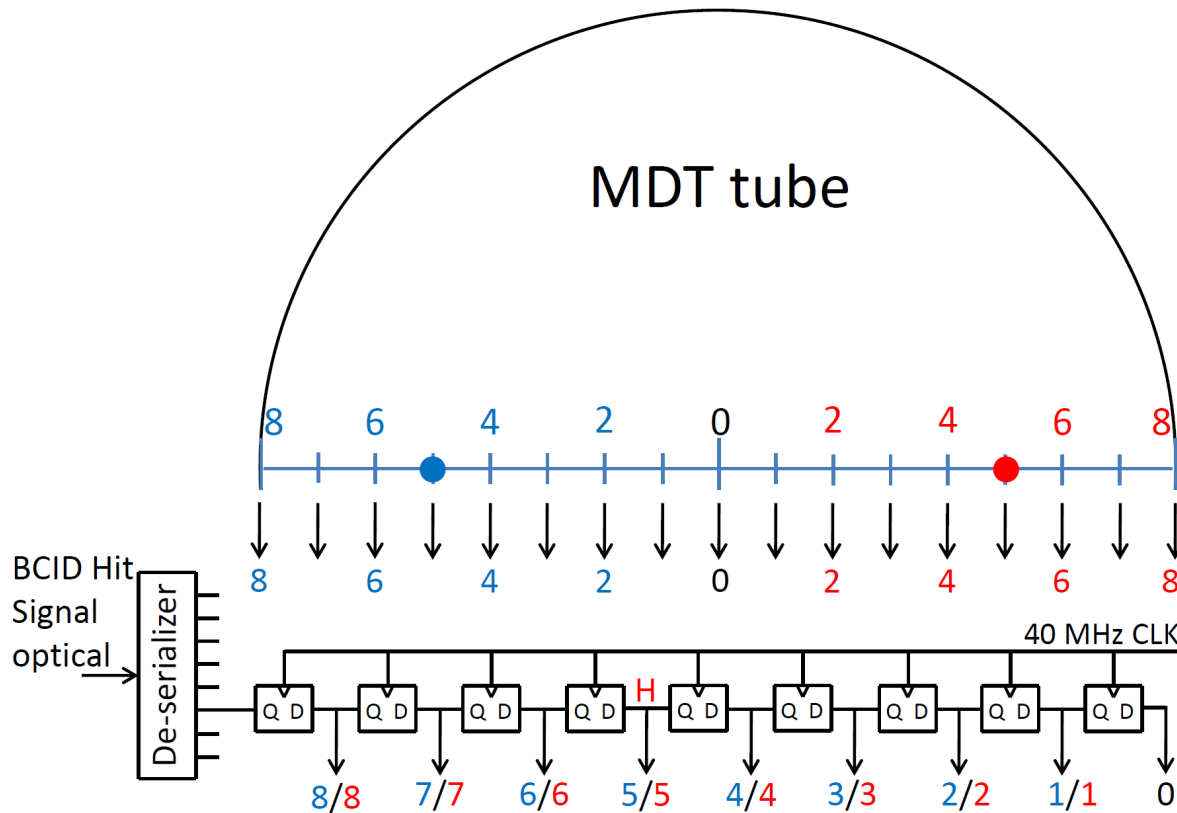


シフトレジスタを用いてBCIDを得る。もしくはTGCから貰う。

BCID and Decoding circuits



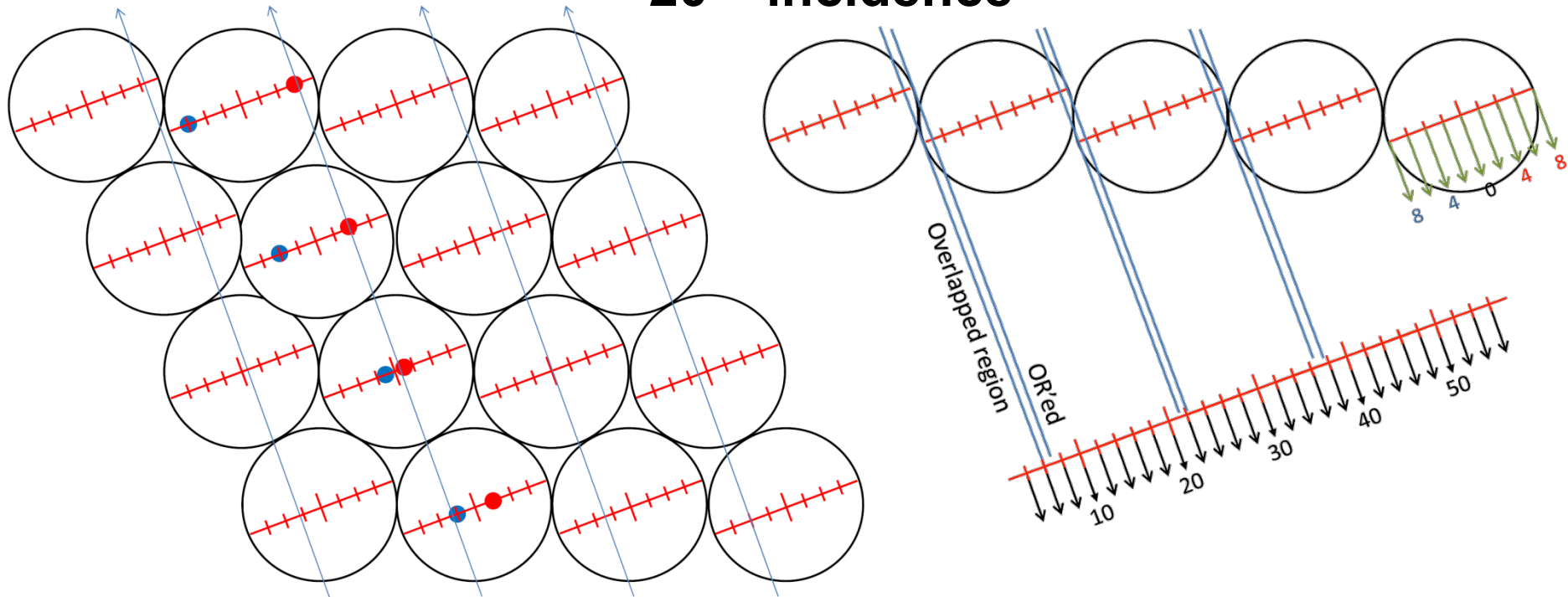
信号がワイヤーに感知されてから、ASDを通してレジスタを1クロックごと移動していく。例えば40MHzで動かした場合、片サイド8チャンネルあれば、8クロック後のレジスタの位置は、粒子が通って描くドリフト半径に一致する。80MHzで動かした場合は、16クロック必要なので、シフトレジスタの数が倍になる。160MHzの場合は、32個。



Spatial-aligned hit signals

各々のチューブでレジスタを動かす。すべてのチューブで見た時、粒子が通ったところはレジスタが直線上に並ぶ。これによりトラックセグメントの情報とBCIDを得ることができる。

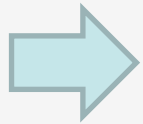
20° incidence



New Small WheelのSimulation

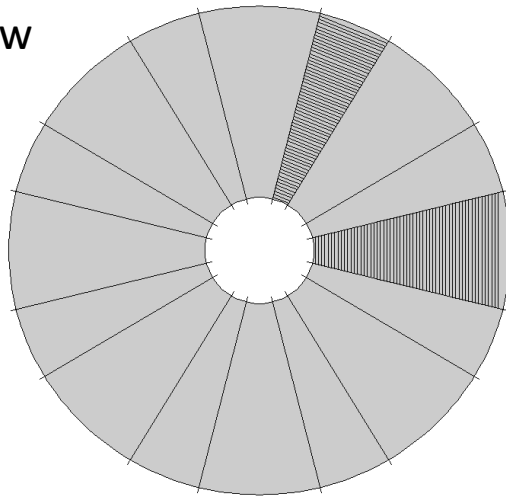
Geant4で現在のSmall Wheelを取り除いて、Small Tube MDTを入れてHit情報を取得。

- ・ チューブを再現するのは大変なので、MDTをAr/CO₂が付加された薄い板とする。
- ・ 100eVの閾値で、Hitがあったとする。



このヒット情報を変換してどのチューブにヒットがあったか、そのヒットのドリフト時間を情報を得る

XY-view

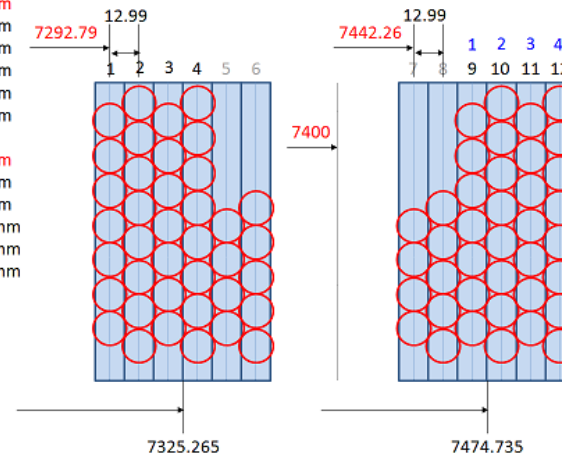


thickness: $15 \text{ mm} \cdot \sqrt{3}/2 = 12.9904 \text{ mm} = 12.99 \text{ mm}$

Z1cnt: 7292.79 mm
Z2cnt: 7305.78 mm
Z3cnt: 7318.77 mm
Z4cnt: 7331.76 mm
Z5cnt: 7344.75 mm
Z6cnt: 7357.74 mm

Z7cnt: 7442.26 mm
Z8cnt: 7455.25 mm
Z9cnt: 7468.24 mm
Z10cnt: 7481.23 mm
Z11cnt: 7494.22 mm
Z12cnt: 7507.21 mm

ZR-view



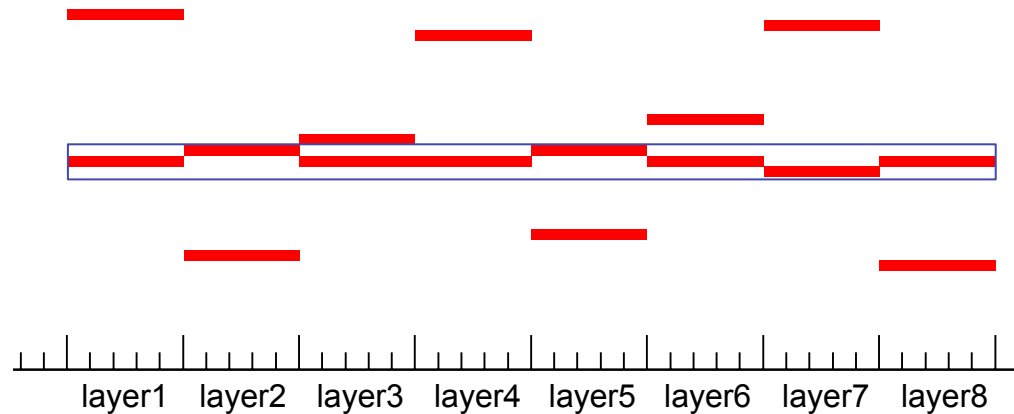
Spacer height is 121.40 mm instead of 120 mm to solve left-right ambiguity.

New Small WheelのSimulation

$p_T=40\text{GeV}$ のSingle Muonのイベント(5000イベント)を用いて、40MHz, 80MHz, 160MHzで動かしてトラックセグメントが引けるか、正しいバンチで取れるかをシミュレーションしてみた。ここでいうEfficiencyは、1イベントで少なくとも1回セグメントが引けることを要求した時の値。

レイヤーは8層使用。内側の4層は使わない。
レイヤーごとにレジスタの値を集め、角度で並び替える。
レイヤー1のヒットを基準として、 $\pm x$ 内に8レイヤー中8レイヤービットが立っていたらセグメントが引けると判断する。

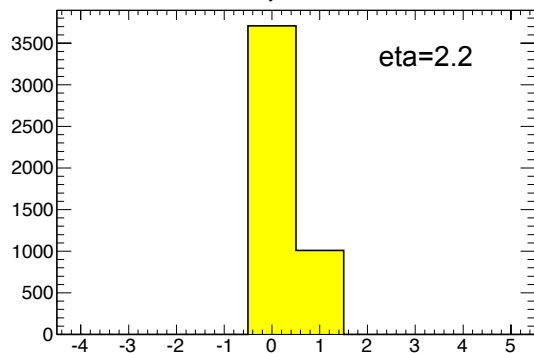
右図は ± 1 のときを表したもの



New Small WheelのSimulation

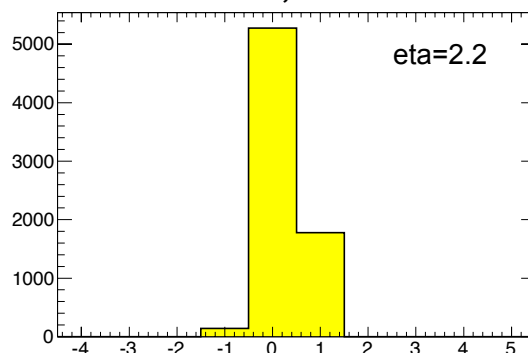
各周波数でもっとも割合が高かったxのものを表示。

40MHz, x=2



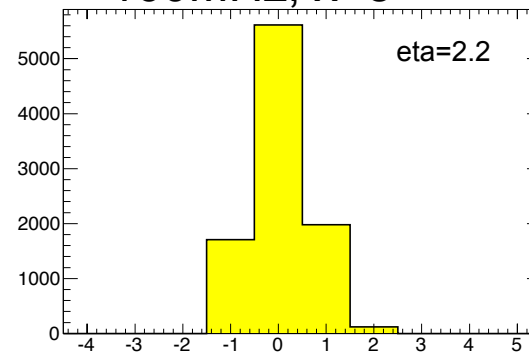
Efficiency=99.46%, Current=73.35%

80MHz, x=3

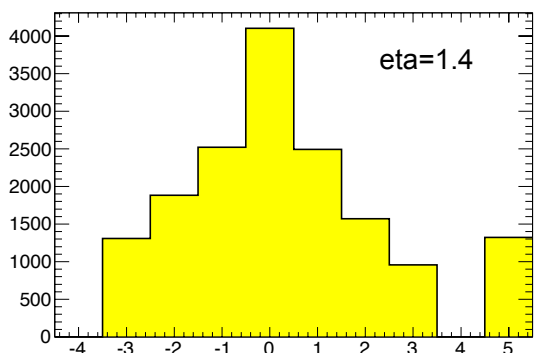


Efficiency=99.82%, Current=68.71%

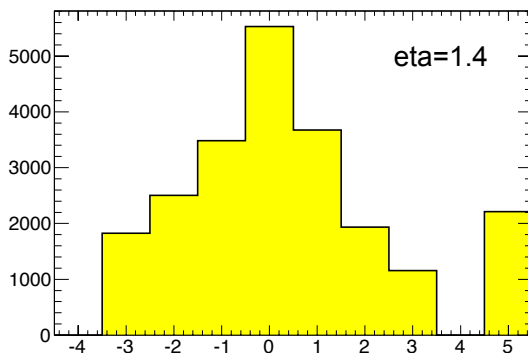
160MHz, x=8



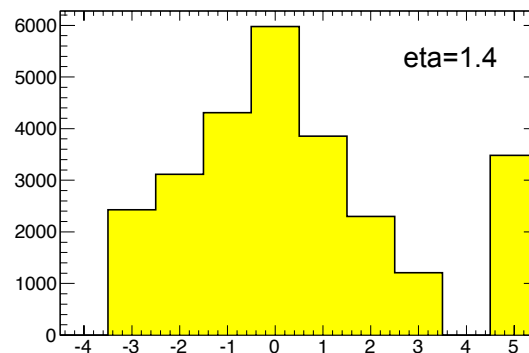
Efficiency=100.0%, Current=58.13%



Efficiency=99.24%, Current=24.77%



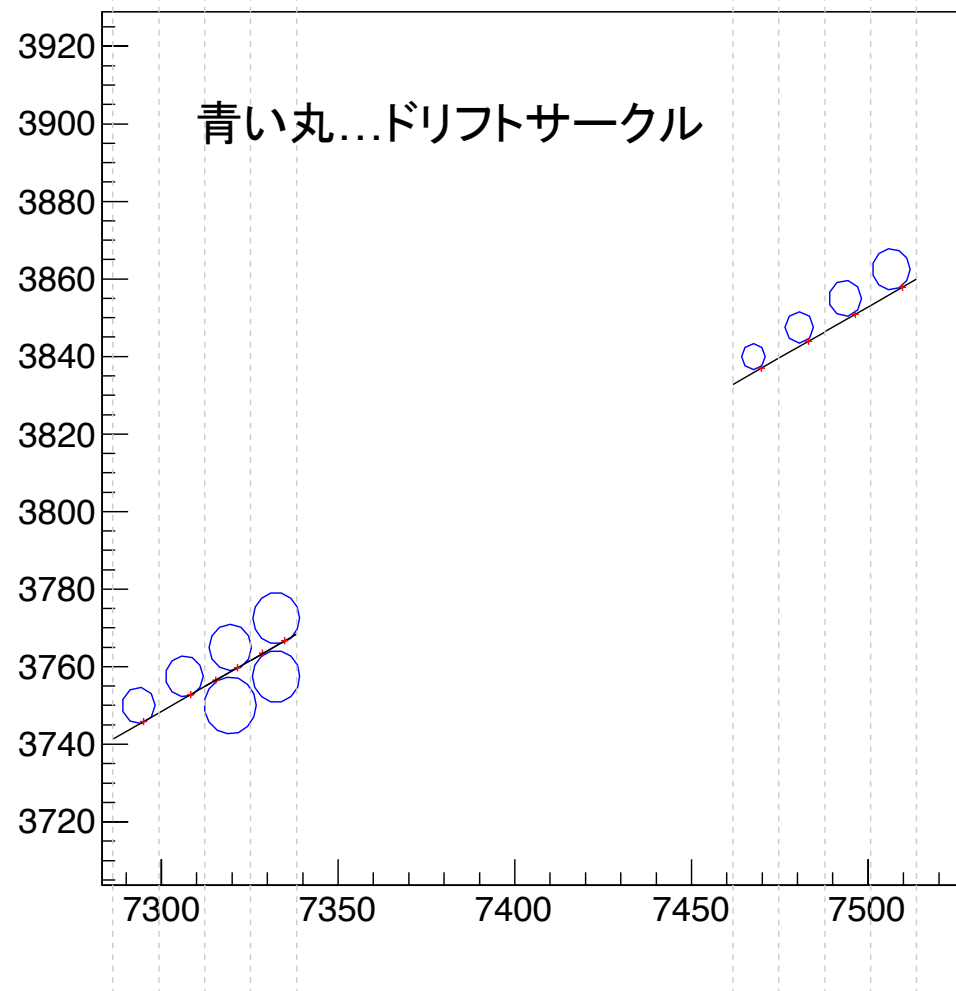
Efficiency=96.14%, Current=25.17%



Efficiency=99.00%, Current=24.27%

New Small WheelのSimulation

etaが小さいところでは、時間が経過しても同じ傾きの接線が引けてしまう領域があり、これによりBCIDを特定できない。この領域にはなにかしらの工夫が必要である。



まとめ

LHCのアップグレードに向け、MuonSpectrometerのSmall Wheelを新しく作る必要がある。日本グループはMDTを使うことでトリガーの性能を上げようとしている。現在はシミュレーションを行い、MDTの性能を計っている段階。

シミュレーションでは、

- ・ Single Muonのイベントでは正しくトラックセグメントが引けることを確認。
- ・ 正しいバンチでセグメントを引くにはまだ調整が必要。

高レートバックグラウンド下でのシミュレーション、BWとの情報を合わせたときの性能評価をこれから行なっていく予定。