

LHC アップグレードに向けた
ATLAS レベル1 ミューオントリガーの研究

神戸大学大学院 理学研究科物理学専攻 博士前期課程
物理学専攻 粒子物理学研究室
099S115S 徳永 香

平成 23 年 2 月 22 日

概要

その Higgs 粒子の発見を目指し、LHC(Large Hadron Collider) 計画は 1980 年代に始まった。LHC 加速器は、スイスのジュネーブにある CERN 研究所に建設された大型陽子陽子衝突型加速器である。この LHC 加速器では、14TeV の世界最高エネルギー、 $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティによって、Higgs 粒子の探索など TeV エネルギー領域の物理や標準模型の精密測定など様々な研究が行われる。2009 年秋、LHC は本格的に稼働を始め、2010 年春、重心系エネルギー 7TeV での衝突を達成した。

この LHC 加速器では 4 つの実験が行われており、そのうちのひとつに本論文の中心である ATLAS 実験がある。ATLAS 実験で用いられる ATLAS 検出器は様々な検出器によって構成される汎用検出器であり、主に Higgs 粒子の探索、SUSY 粒子の探索が行われる。

しかし、より短時間で多くのデータを得るために、LHC では 2020 年頃にデザインルミノシティを今の 5 倍の $5 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ にするアップグレードが計画されている。

ATLAS 実験で 3 段階に分けられているトリガーうちの 1 段階目の Level1 トリガーは、イベントレートの影響を直接受けるため、LHC のアップグレードに伴ってアップグレードする必要がある。

私はこの ATLAS 実験で、Level1 ミューオントリガーのアップグレードの研究に携わった。特に、現在はトリガーに使われていない Inner station を、アップグレード後の Level1 トリガーに用いることについて研究した。Inner station は、TGC Middle station の内側に設置されているトロイド磁石より、さらに内側に置かれる検出器である。現在の Level1 ミューオントリガーシステムでは、TGC の Middle station を用いミューオンのトロイド磁場中での曲率を測定することで、トリガー判定に必要な p_T の概算を行っている。今回の研究では、Inner station を用いてミューオンが衝突点から来たものかどうかを確認することにより、イベント数をもとの約 8%にまで落とすことができることがわかった。

今回は Inner station をアップグレード後の Level1 トリガーに用いることについて、アップグレードに伴って考えられる Level1 ミューオントリガーの新しいエレクトロニクスの流れについて、Inner station を組み込むことにより複雑になった、Sector Logic というモジュールを設計したことについて述べていく。

目次

第1章	序章	6
第2章	ATLAS 実験	8
2.1	LHC	8
2.1.1	LHC のアップグレード	9
2.2	ATLAS 実験の目指す物理	11
2.2.1	標準模型における Higgs 粒子	12
2.2.2	超対称性粒子 (SUSY:Supersymmetry)	14
第3章	ATLAS 検出器	16
3.1	ATLAS 検出器の概要	16
3.1.1	内部飛跡検出器 (Inner Detector(ID))	17
3.1.2	カロリメータ	18
3.1.3	ミューオンスペクトロメータ	19
3.1.4	マグネット	21
3.2	ATLAS 実験でのトリガー and DAQ システム	23
3.2.1	Level1 トリガー	24
3.2.2	Level2 トリガー	25
3.2.3	Event Filter	25
第4章	TGC ミューオントリガーシステム	26
4.1	Thin Gap Chamber (TGC) の構造	26
4.1.1	基本構造	26
4.1.2	動作原理	28
4.1.3	TGC チェンバー	28
4.2	TGC システムの配置	29
4.3	TGC における p_T 測定の原理	31
4.4	TGC エレクトロニクス	31
4.4.1	TGC エレクトロニクス全体の流れ	33
4.4.2	TGC エレクトロニクスの詳細	35
第5章	新しい TGC トリガーの流れ	44
5.1	SLB 以下をコントロールルームに置くこと	44
5.2	HPT と SL を 1chip に	45
第6章	LHC アップグレードに向けた Level1 TGC トリガー	47
6.1	アップグレードで予想されること	47
6.1.1	TGC のトリガーレート	47

6.1.2	coincidence をとる範囲の変更	48
6.1.3	accidental hit の影響	50
6.2	新しい TGC トリガーシステム	52
6.2.1	Inner station の使用	52
第 7 章	アップグレードに向けた SL の実際の設計	59
7.1	現在の仕様からの変更点	59
7.1.1	HPT coincidence の組み込み	59
7.1.2	R- ϕ coincidence の LUT のサイズの変更	60
7.1.3	Inner station からの情報を用いた coincidence の組み込み	60
7.2	実際の設計	60
7.2.1	decoder	61
7.2.2	High- p_T coincidence	61
7.2.3	R- ϕ coincidence	61
7.2.4	Inner-Middle coincidence	62
7.2.5	Selector	64
7.2.6	decoder	64
7.2.7	見積もり	64
第 8 章	まとめ	65

目次

2.1	LHC 加速器 [11]	9
2.2	CMS 検出器 [11]	9
2.3	LHC-B 検出器 [11]	9
2.4	Alice 検出器 [11]	9
2.5	交差角衝突とクラブ衝突の比較 [5]	10
2.6	ルミノシティ $0.2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のときの衝突の様子 [5]	11
2.7	ルミノシティ $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のときの衝突の様子 [5]	11
2.8	Higgs 粒子の生成過程. (a)gluon fusion, (b)vector boson fusion, (c)top associate production, (d)W/ Z associate production.[12]	12
2.9	Higgs 粒子の生成断面積 [12]	13
2.10	Higgs 粒子の崩壊分岐比 [12]	13
3.1	ATLAS 検出器 [10]	16
3.2	内部飛跡検出器 [12]	18
3.3	カロリメータ [12]	19
3.4	ミュオンスペクトロメータ [12]	20
3.5	ミュオンスペクトロメータ (R-Z 断面図)[11]	20
3.6	マグネットの構造 [12]	21
3.7	トロイド磁場の η と磁場積分強度の関係 [12]	22
3.8	トロイド磁場の X-Y 平面の磁束の構造 ($z=10.5\text{m}$)[12]	22
3.9	Trigger DAQ システム [12]	23
3.10	Level1 トリガー [11]	24
4.1	TGC の配置と構造 [11]	26
4.2	TGC の断面図 [11]	27
4.3	TGC 平面図 [9]	27
4.4	ワイヤサポート [11]	27
4.5	TGC の Triplet(左) と Doublet(右) の構造 [11]	28
4.6	R-Z 平面での TGC のレイアウト [11]	29
4.7	TGC チェンバーの種類 [13]	30
4.8	モジュール番号. octant の範囲	30
4.9	M3 (pivot) での TGC の配置と区分 [9]	30
4.10	Inner Station の配置 [9]	31
4.11	p_T 測定の原理 [11]	32
4.12	TGC トリガーの判定方法 [11]	32
4.13	TGC エレクトロニクス [9]	33
4.14	トリガー系のモジュール構成 [9]	34
4.15	リードアウト系のモジュール構成 [9]	35

4.16	コントロール系のモジュール構成 [9]	35
4.17	ASD Board[11]	36
4.18	PP ASIC のブロック図 [11]	37
4.19	SLB ASIC のブロック図 [9]	38
4.20	デクラスタリング [2]	39
4.21	PS Board の構成図 [9]	40
4.22	PS Board[9]	40
4.23	wire 用 HPT のブロック図 [2]	41
4.24	strip 用 HPT のブロック図 [2]	41
4.25	SL のブロック図 [2]	42
4.26	SL[11]	43
5.1	TGC エレクトロニクスの配置 (R-Z 断面)[11]	45
5.2	新しいフロントエンドエレキ	46
5.3	新しい SL	46
6.1	微分断面積 [12]	48
6.2	Low- p_T coincidence をとった後の δR と $\delta\phi$ の分布. ヒストグラムの左上の番号はモジュール番号に対応する. 中心補正はされていない.	49
6.3	High- p_T coincidence をとった後の δR と $\delta\phi$ の分布. ヒストグラムの左上の番号はモジュール番号に対応する. 中心補正はされていない.	49
6.4	トリガーレートの計算	51
6.5	Inner Station のトリガーアルゴリズム	53
6.6	Inner station における $d\theta$. 上段が $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオン MC シミュレーション、下段が実データの Combined track.	54
6.7	Inner station とバレルトロイドとの位置関係	54
6.8	dL の比較. $Z<0, 1.4<\eta\leq 1.6$ の範囲.	55
6.9	考慮する R 方向の範囲. 縦軸に考慮すべき R 方向の範囲 (mrad)、横軸に RoI の番号として、Endcap と Forward を合わせて外側から内側へ一列分通し番号をつけたものとする. Inner station がないところは省略している.	56
6.10	reduction の効果 (Combined track(CB)).	57
6.11	reduction の効果 (ミュオン検出器で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上でトリガーされたもの (all L1 MU20))	58
7.1	実際の設計	60
7.2	High- p_T coincidence(doublet の SLB3 つ分の範囲)	62
7.3	SSC の構造	63
7.4	Virtex6 FPGA Feature Summary	64

表 目 次

2.1	LHC 加速器の主要パラメータ	8
2.2	Higgs 粒子探索に有効なチャンネル	15
5.1	必要なケーブル数. Aside と Cside の両サイドを合わせた値.	45
6.1	ルミノシティ $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で予想される Level1 エンドキャップミューオントリガー のトリガーレートの内訳	47
6.2	layer ごとの accidental hit レート/octant	50
6.3	accidental hit の関わるトリガーレート	50
6.4	accidental hit がトリガー効率に与える影響	52
6.5	reduction の効果	58
7.1	SLB から受け取る bit 数	61
7.2	SLB から受け取る bit 数 (1hit あたりの内訳)	61
7.3	High- p_T coincidence のあと R- ϕ coincidence に送られる bit 数 (1hit あたりの内訳)	62
7.4	R- ϕ coincidence のあと Inner-Middle coincidence に送られる bit 数 (1hit あたりの内訳)	63
7.5	Inner-Middle coincidence のあと Selector に送られる bit 数 (1hit あたりの内訳)	63

第1章 序章

素粒子物理学における標準模型は、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用についてまとめた理論である。この理論は 1970 年代に構築され、1980 年代以降に様々な加速器実験で実証されてきた。しかし現在、標準模型において素粒子の質量起源と考えられている Higgs 粒子だけが、唯一発見されていない。

その Higgs 粒子の発見を目指し、LHC(Large Hadron Collider) 計画は 1980 年代に始まった。LHC 加速器は、スイスのジュネーブにある CERN 研究所に建設された大型陽子陽子衝突型加速器である。周長 27km のビームトンネル、8.4T の超電導磁石を用いることで、14TeV の世界最高エネルギー、ルミノシティ $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成する。この LHC 加速器では Higgs 粒子の探索など TeV エネルギー領域の物理や、標準模型の精密測定など様々な研究が行われる。2009 年秋、LHC は本格的に稼働を始め、2010 年春、重心系エネルギー 7TeV での衝突を達成した。

この LHC 加速器では 4 つの実験が行われており、そのうちのひとつに本論文の中心である ATLAS 実験がある。ATLAS 実験で用いられる ATLAS 検出器は様々な検出器によって構成される汎用検出器であり、主に Higgs 粒子の探索、SUSY 粒子の探索が行われる。現在、ATLAS 検出器は順調にデータを貯め、現在までに 45pb^{-1} の積分ルミノシティを達成している。

しかし、より短期間で多くのデータを得るために、LHC では 2020 年頃にデザインルミノシティを今の 5 倍の $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ にするアップグレードが計画されている。これにより 10 年ほどで目標としている 3000fb^{-1} を達成できる予定である。

LHC アップグレードでルミノシティが増加すると、25ns ごとに起こる 1 回の衝突あたりのイベントレートが増加する。そのため、多数の衝突の中から欲しい事象を選択するためのトリガーがとて重要になる。ATLAS 実験で探索される Higgs 粒子や超対称性粒子の崩壊過程には、終状態にレプトンを含むモードがある。レプトンは物質との相互作用が単純で信号が複雑にならないためトリガーに適している。その中でも特に、高い物質透過力をもつミュオンは、電離作用によって鮮明な飛跡を残すこと、磁場中の曲率を求めることで、高精度で運動量を測定することが可能である。そのため、ミュオンを終状態に含むモードは解析がしやすく、ミュオンを用いたトリガーは非常に重要な役割を果たす。

ATLAS 実験では、効率よくデータを収集するためにトリガーが 3 段階に分けて設けられている。1 段階目に位置する Level1 トリガーは、25ns ごとに行われる衝突から生じる膨大な量のイベントを高速で処理する。イベントレートの影響を直接受けるため、現在の Level1 トリガーシステムをアップグレード後もそのまま用いるとすると、イベントレートの増加に伴ってトリガーレートも増加し、要請されるトリガーレートを満たすことができなくなる。このため LHC のアップグレードに伴い、ATLAS 実験における Level1 ミュオントリガーシステムをアップグレードする必要がある。

私はこの ATLAS 実験でミュオン検出器の TGC を担当するグループに所属し、Level1 ミュオントリガーのアップグレードの研究に携わった。特に、現在はトリガーに使われていない Inner station を、アップグレード後の Level1 トリガーに用いることについて研究した。Inner station は、TGC Middle station の内側に設置されているトロイド磁石より、さらに内側に置かれる検出器である。現在の Level1 ミュオントリガーシステムでは、TGC の Middle station を用いミュオンの

トロイド磁場中での曲率を測定することで、トリガー判定に必要な p_T の概算を行っている。そこで、この Inner station を用いて、TGC Middle station で検出されたミュオンが Inner station に hit を残しているかどうかを確認する。このことにより、ミュオンが衝突点から来たものかどうかを判断することができ、衝突点以外からやってくるイベントを落とすことができる。今回の研究では、Inner station を Level1 トリガーに組み込むことによって、イベント数をもとの約 8% にまで落とすことができるとがわかった。このように、Inner station をアップグレード後の Level1 トリガーに用いることについて述べる。またアップグレードに伴い、トリガー判定をするのにかかる時間であるレイテンシが延長される可能性もある。その場合に考えられる新しいエレキの流れについても考察したので述べる。さらに、Inner station を組み込むことにより複雑になった、Sector Logic という TGC トリガーの最終段階に位置するモジュールを実際に設計したことについても述べる。

本論文では、

第 2 章 : LHC と ATLAS 実験における物理について

第 3 章 : ATLAS 検出器について

第 4 章 : ATLAS 実験における TGC ミュオントリガーシステムについて

第 5 章 : LHC アップグレードに伴ってレイテンシが延長された場合の、新しい TGC エレクトロニクスの流れについて

第 6 章 : LHC アップグレードに向けた Inner station を用いる TGC ミュオントリガーについて

第 7 章 : LHC アップグレードに向けた Sector Logic の実際の設計について

第 8 章 : 全体のまとめ

の順で述べていく。

第2章 ATLAS 実験

2.1 LHC

LHC(Large Hadron Collider) は、スイスのジュネーブにある欧州素粒子原子核研究機構 (CERN) に建設された大型陽子陽子衝突型加速器である。LHC は重心系 14TeV の世界最高エネルギーを持ち、デザインルミノシティは $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

LHC は 2008 年に完成した。そして、2008 年秋に一度ビーム入射をしたものの機械が故障し、長い間修理が行われていた。その復旧と対策が完了し、2010 年 3 月より重心系 7TeV でビーム衝突が始まった。LHC は現在稼働中であり、着実にデータを貯めている。現在の積分ルミノシティは約 45pb^{-1} である。LHC の主要パラメータを表 2.1 に示す。

主リング周長	26.66km	デザインルミノシティ	$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
入射エネルギー	450GeV	ビームエネルギー	7.0TeV
衝突頻度	40.08MHz	バンチ間隔	14.95nsec
ビーム当たりのバンチ数	2808 個	バンチ間隔	24.95nsec
衝突点のビーム半径	16.7 μm	衝突角度	200 μrad

表 2.1: LHC 加速器の主要パラメータ

陽子の質量は電子の質量の約 2000 倍と大きいので、加速されるときに円軌道の接線方向に放出されるシンクロトロン放射によるエネルギー損失は、電子を加速する場合に比べて少ない。そのため、LHC では到達エネルギーを電子よりはるかに高くすることができ、7TeV まで加速した陽子同士の正面衝突により、重心系エネルギー 14TeV を実現することができる。

しかし、陽子衝突は陽子の構成粒子であるクォークとグルオン同士の散乱によって反応が複雑になることと、高ルミノシティ実現のため 25ns ごとという高頻度で衝突が行われることから、膨大な量の背景事象が現れる。そのため多くの背景事象の中から、見たい物理現象を効率よく収集することが非常に重要になる。

LHC には図 2.1 に示すように、4つの衝突点がある。衝突点ごとにそれぞれ大型汎用検出器が置かれ、4つの異なる実験が行われている。

- ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)
主に Higgs 粒子と超対称性粒子 (SUSY) の探索を目的としている。これから詳しく説明していく。
- CMS (Compact Muon Solenoid) (図 2.2)
ATLAS 実験と同じように、Higgs 粒子の探索を目的としている。
- LHC-B (Large Hadron Collider beauty) (図 2.3)
b クォークを含む B 粒子の CP 非保存などの稀崩壊現象を観測することにより、標準理論を

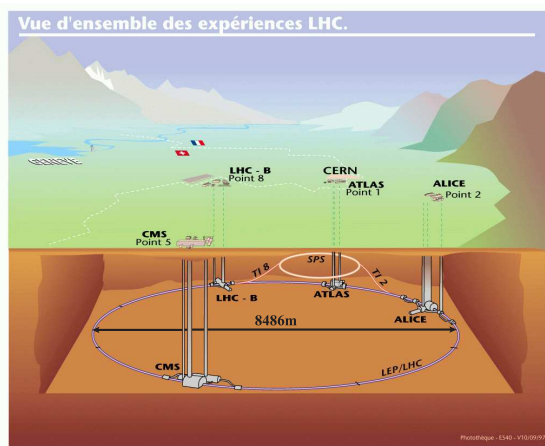


図 2.1: LHC 加速器 [11]

越えた新しい物理の探索を目的としている。

- ALICE (A Large Ion Collider Experiment) (図 2.4)
重イオン衝突実験によるクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 探索を目的としている。

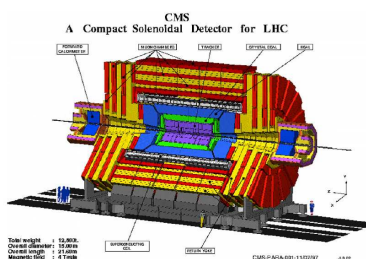


図 2.2: CMS 検出器 [11]

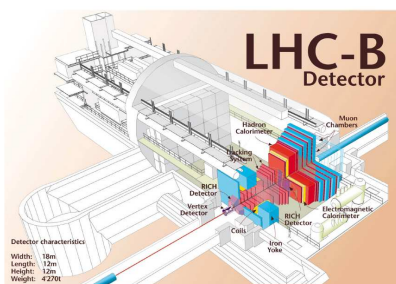


図 2.3: LHC-B 検出器 [11]

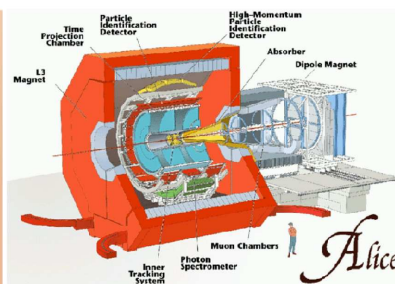


図 2.4: Alice 検出器 [11]

2.1.1 LHC のアップグレード

LHCでは2020年頃に、デザインルミノシティを現在の $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ から、5倍の $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ にアップグレードする計画が立てられている。ルミノシティを $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ に保ち長期間運転することによって、2030年までに 3000fb^{-1} を貯めるのが目標である。アップグレードをすると、10年ほどでこの目標を達成できる予定である。

LHC アップグレードの内容

このアップグレードで、どのように高ルミノシティを達成するかを説明する。ルミノシティは

$$L = \frac{N^2 k_b f}{4\pi \sigma_x \sigma_y} F = \frac{N^2 k_b f \gamma}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F \quad (2.1)$$

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c^2 \sigma_z^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}\right)}} \quad (2.2)$$

と表される。ここで、 N ：各バンチの中の粒子の個数、 k_b ：バンチの数、 f ：秒間に周回する回数、 ϵ_n ：ビームの規格化エミッタンス、 β^* ：衝突点での β 関数、 F ：衝突角度(θ_c)の影響、である。

アップグレードのための技術開発として、衝突角度 θ_c を小さくするためのクラブ空洞への入れ替えと、衝突点での β 関数を小さくするための収束磁石の入れ替えが考えられている。クラブ空洞は、衝突点付近でバンチの向きを変えることで輝度を上げるものである。図 2.5 に交差角衝突とクラブ衝突の比較の様子を載せる。クラブ衝突の方が衝突点での重なりが大きいことがわかる。現在、KEK-B が唯一の実用例であるが、世界中の研究所で設計競争がはじまっている。また収束磁石は、強い勾配と大きな口径をもつ四重極磁石 ($B_{\text{peak}} = 13 \sim 15\text{T}$) の開発が必要である。アップグレード後は現在の LHC の線材を使用するのは不可能なため、米国の LARP(LHC Accelerator Research Program) と KEK-CERN で開発が進められている。高いルミノシティを達成するためには、衝突点でのビームサイズを非常に小さくすることが必要であるが、LHC ではこれらにより達成しようとしている。また現在、よりたくさんのビームを入射するために、線形加速器 Linac4 の建設が開始されている。

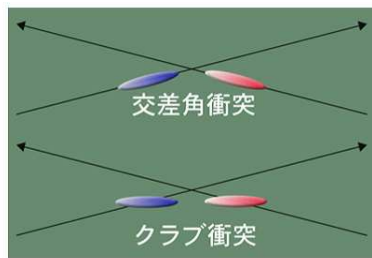


図 2.5: 交差角衝突とクラブ衝突の比較 [5]

LHC アップグレードによる影響

LHC のアップグレードによってルミノシティが増加することにより、25ns ごとに起こる 1 回のバンチ衝突あたりのイベントレートが増加する。図 2.6 はルミノシティが $0.2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の場合、図 2.7 はルミノシティが $10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の場合の衝突の様子をシミュレーションしてみたものである。ルミノシティが $0.2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の場合は 1 バンチの衝突あたり約 5 個の陽子衝突が起こるが、ルミノシティが $10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の場合は 1 バンチの衝突あたり約 400 個もの陽子衝突が起こると予想される。ルミノシティが $10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のように高ルミノシティの状態では、際立った特徴のイベントのみ観測可能となる。

ATLAS 検出器のアップグレード

積分ルミノシティが 500fb^{-1} ほどになると、一部の検出器が放射線損傷による寿命で交換が必要になる。また、LHC のアップグレードによってルミノシティが増加すると、一部の検出器では性能を維持するために交換が必要になる。そのため、LHC のアップグレードに伴って、ATLAS 検出器もアップグレードすることが考えられている。この ATLAS 検出器のアップグレードは、これか

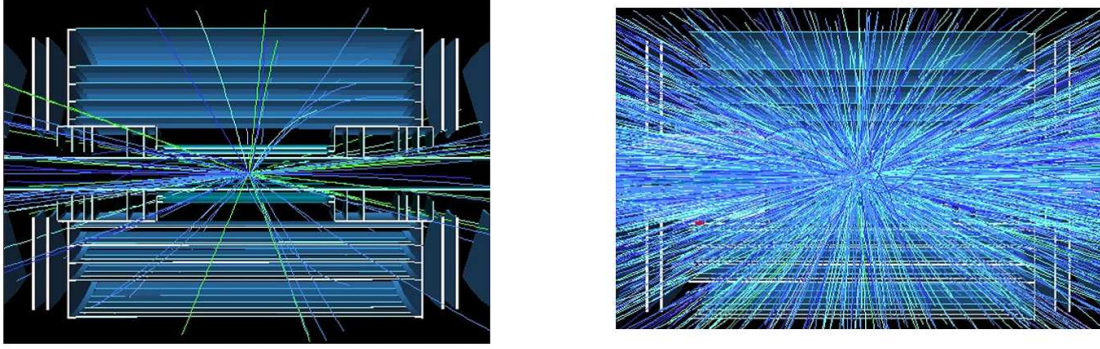


図 2.6: ルミノシティ $0.2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のときの衝突の様子 [5] 図 2.7: ルミノシティ $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のときの衝突の様子 [5]

ら数年にわたり、LHC のシャットダウンに合わせて段階的に行われていく予定である。またここでは、これまでの data taking で分かってきた弱点や不安要素の強化、信頼性の向上なども行うことが考えられている。

ミューオントリガーのアップグレード

ATLAS 実験の目的である Higgs 粒子の崩壊過程や超対称性粒子の崩壊過程には、終状態にレプトンが含まれているモードがある。レプトンは物質との相互作用が単純で信号が複雑にならないためトリガーに適している。その中でも特に、高い物質透過力をもつミューオンは、電離作用によって鮮明な飛跡を残すこと、磁場中の曲率を求めることで、高精度で運動量を測定することが可能である。そのため、ミューオンを終状態に含むモードは解析がやすく、高い横運動量 (p_T) をもつミューオンを用いたトリガーは、背景事象を効率的に落とすのに非常に重要な役割を果たす。そのため現在の ATLAS 実験では、High- p_T ミューオンを用いたトリガーが用いられている。

ATLAS 実験では、効率よくデータを収集するために、3 段階のトリガーが設けられている (詳細は第 3 章 3.2 節を参照)。特に 1 段階目に所属する Level1 トリガーは、25ns ごとに行われる衝突に合わせて、膨大な情報の処理を短時間で行う必要があり、ハードウェアで構成されている。LHC のアップグレードによりルミノシティが増加すると、1 回のバンチ衝突あたりのイベントレートが増える。Level1 トリガーは、イベントレートの影響を直接受ける。そのため、現在の Level1 トリガーシステムをアップグレード後にそのまま用いると、イベントレートの増加に伴ってトリガーレートも増加し、要請されるトリガーレートを満たすことができなくなる。このため、LHC のアップグレードに伴い、ATLAS 実験における Level1 ミューオントリガーシステムもアップグレードする必要がある。

2.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験の主な目的は、

- 標準模型において質量の起源である Higgs 粒子の発見
- 超対称性粒子 (Supersymmetry(SUSY) 粒子) の探索

である。以下に、この 2 つについて概要を述べる。

2.2.1 標準模型における Higgs 粒子

標準模型を構成する基本粒子のなかで、唯一未発見であるのが Higgs 粒子である。標準模型ではゲージ対称性が成立し、そのためには 3 つの相互作用の媒介粒子 (ゲージ粒子) の質量がゼロである事が要請される。しかし、弱い相互作用を媒介する W 粒子と Z 粒子は質量を持つということが実験的に確かめられている。そこで、W 粒子と Z 粒子が標準模型で質量を得るために考えられた理論が Higgs 機構である。これらの粒子は、Higgs 場と相互作用することで質量を獲得する。

Higgs 粒子の生成

Higgs 粒子はトップクォークや W 粒子、Z 粒子など質量の大きい粒子と強く相互作用する。このため Higgs 粒子の生成過程は、LHC での生成断面積の大きい順に以下の 4 つが考えられる。

図 2.8 に Higgs 生成のファインマン・ダイアグラム、また図 2.9 に Higgs 粒子の生成断面積を載せる。

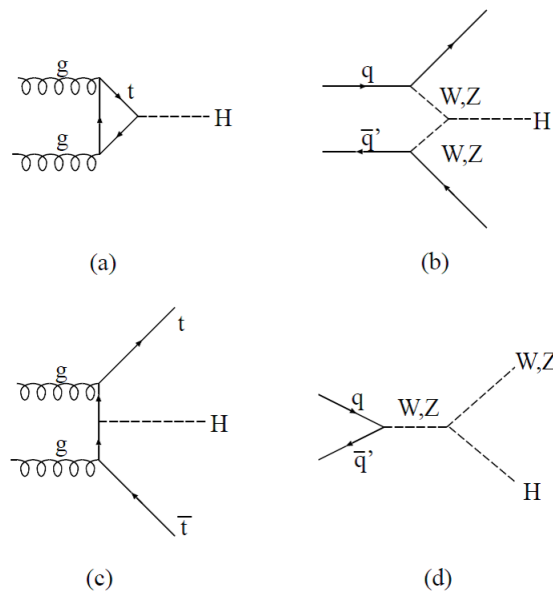


図 2.8: Higgs 粒子の生成過程. (a)gluon fusion, (b)vector boson fusion, (c)top associate production, (d)W/Z associate production.[12]

$gg \rightarrow H$ (gluon fusion)

グルオン同士が反応し、LHC では主にトップクォークのループを介して生成される過程。最も生成断面積が大きい。バックグラウンドとの選別が非常に難しいが、 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $ZZ \rightarrow 4l$, $W^+W^- \rightarrow l\nu l\nu$ と崩壊した場合は解析が可能。

$qq \rightarrow qqH$ (vector boson fusion)

クォークから放出されたゲージボソンから生成される過程。断面積は比較的大きい。2本のジェットが観測される特徴があるため、イベントの選別が比較的行きやすい。

$q\bar{q} \rightarrow W/Z H$ (W/Z associate production)

クォークの対消滅で生成されたゲージボソンから、Higgs 粒子が放射される過程。終状態にゲージボソンが観測される特徴がある。

$g\bar{g} \rightarrow t\bar{t}H$ (top associate production)

対生成されたトップクォークから、Higgs 粒子が放出される過程。断面積は小さいが、特徴のあるトップクォークペアを終状態に含んでいるため、イベントの選別は容易である。

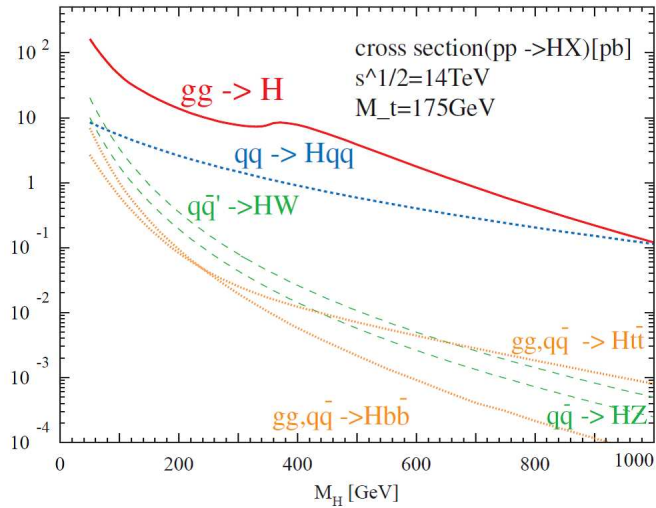


図 2.9: Higgs 粒子の生成断面積 [12]

Higgs 粒子の崩壊過程

生成された Higgs 粒子はすぐに崩壊する。図 2.10 に Higgs 粒子の崩壊分岐比を示す。図 2.10 より、崩壊過程の分岐比は Higgs 粒子の質量に依存することがわかる。

以下に各質量領域において、Higgs 粒子探索に有望な崩壊過程を簡単に説明する。

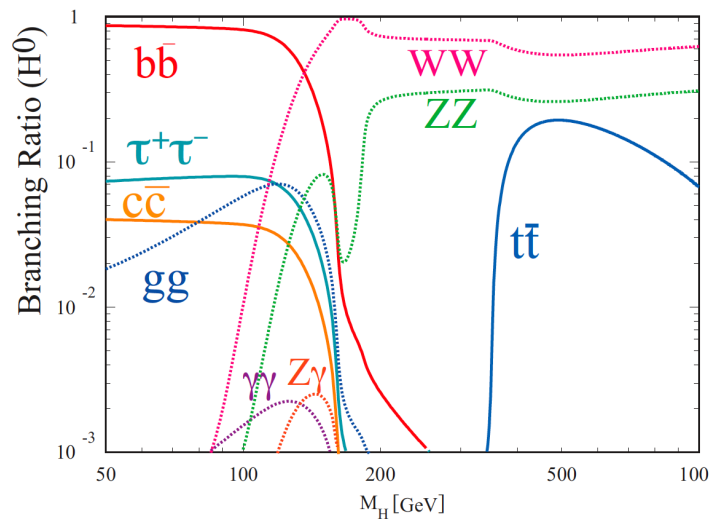


図 2.10: Higgs 粒子の崩壊分岐比 [12]

$H \rightarrow \tau\tau$ ($m_H < 150\text{GeV}$)

Higgs 粒子が軽い場合、 $\gamma\gamma$ よりも崩壊確率が高く、vector boson fusion の生成過程との組み合わせで、発見に有効とされているモード。 τ の崩壊にはニュートリノが含まれるので、消失横方向エネルギー E_T^{miss} の精密な測定が重要になる。

$H \rightarrow \gamma\gamma$ ($m_H < 150\text{GeV}$)

150GeV 以下では bb、cc が支配的であるが、これらは陽子陽子衝突から引き起こされて背景事象となる QCD ジェットと区別することが難しい。この過程は稀崩壊であるが、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ を観測し、不変質量 $M_{\gamma\gamma}$ 分布を求めることで、Higgs 粒子の質量を求めることができる。

$H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ ($150\text{GeV} < m_H < 180\text{GeV}$)

170GeV 近辺では $H \rightarrow ZZ^*$ よりも W への崩壊が支配的になる。2つのレプトンの横運動量 p_T と2つのニュートリノに由来する E_T^{miss} から横方向質量を計算する。

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$ ($120\text{GeV} < m_H < 180\text{GeV}$)

終状態に複数のレプトンを含むためトリガーが容易で、きれいなピークが得られる。1つのレプトン対に対して、不変質量が m_Z に等しいという条件を付けることができる。 Z^* が仮想粒子であるため、もう一方のレプトン対の不変質量には制限がない。

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l^\pm$ ($180\text{GeV} < m_H < 800\text{GeV}$)

4つのレプトンから2つの Z を再構成できるため、背景事象を効率的に落とすことができる。Higgs 粒子が比較的思い場合に有効で、Gold Plated Channel と呼ばれる。4つのレプトンの不変質量を計算すると、Higgs 粒子の位置にきれいなピークが観測される。

$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ ($400\text{GeV} < m_H$)

400GeV 以上では、このモードの分岐比は $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$ の約6倍である。 $\nu\nu$ の不変質量を再構成することはできないが、これに起因する消失横方向エネルギー E_T^{miss} を精密に測定することが必要となる。

$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu jj$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$ ($600\text{GeV} < m_H$)

このモードの分岐比を 600GeV 以上で $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$ と比べると、 $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu jj$ では約150倍、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$ では約20倍である。Higgs 粒子が vector boson fusion で生成した過程と組み合わせて考えられる。

Higgs 粒子探索に有効なチャンネル

生成過程と崩壊過程の組み合わせから、有効なものを表 2.2 にまとめる。

2.2.2 超対称性粒子 (SUSY:Supersymmetry)

超対称性理論は標準模型を超える物理の有力候補である。超対称性とはフェルミオンとボソンの間の対称性である。これに基づく超対称性理論では、すべてのフェルミオンやボソンに対し、スピンが 1/2 だけ異なるスーパーパートナーと呼ばれる超対称性粒子の存在を预言する。例えば、フェルミオンであるクォークやレプトンのスーパーパートナーとして、ボソンのスクォークやスレプトンがあり、ボソンのグルオンのスーパーパートナーとして、フェルミオンのグレイノがある。

超対称性を仮定すると、3つの力が高エネルギーで等しくなり、力が大統一される。また、超対称性は重力も統一する超対称大統一理論を導くものとも考えられている。

生成過程	崩壊過程	有効な領域
Gluon Fusion	$H \rightarrow \gamma\gamma$	$110 < m_H < 140\text{GeV}$
	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	$140 < m_H < 1000\text{GeV}$
Vector Boson Fusion	$H \rightarrow \tau\tau$	$110 < m_H < 140\text{GeV}$
	$H \rightarrow WW$	$130 < m_H < 200\text{GeV}$
	$H \rightarrow \gamma\gamma$	$110 < m_H < 140\text{GeV}$
	$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu jj$	$600\text{GeV} < m_H$
	$H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$	$600\text{GeV} < m_H$

表 2.2: Higgs 粒子探索に有効なチャンネル

超対称性が成立すれば、標準模型の粒子はスーパーパートナーと粒子の質量は等しいはずである。しかし、これらのパートナーはまだ発見されていない。これは実際には我々とは別の世界で超対称性は破れており、その影響が我々の世界の超対称性粒子に伝わり、その質量が 100 から 1000GeV 程度と重くて観測されていないためだと考えられている。もしこの理論が正しければ、LHC では強い相互作用をするスクォークやグルイーノの対が大量に生成され、超対称性粒子が発見できる可能性がある。超対称性粒子の主な崩壊過程の終状態にはレプトンが含まれているモードがあり、これらの精密な測定は超対称性粒子の物理探索において重要な役割を担っている。

以上のように、Higgs の崩壊過程や超対称性粒子の崩壊過程ではレプトンが有効である。その中でも特に、寿命が長く透過性のあるミューオンが、背景事象と区別するために重要な役割を果たす。高い横運動量 p_T をもつミューオンを要求することで、効果的に背景事象を落とすことが可能である。

第3章 ATLAS 検出器

3.1 ATLAS 検出器の概要

ATLAS 検出器は、直径 22m、高さ 44m の円筒形で、総重量は 7000t の汎用検出器である。図 3.1 に検出器全体の様子を載せる。ATLAS 検出器は各粒子の透過性の差異を利用して、内側から、内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオンスペクトロメータを設置する。さらに、検出器の間に超電導磁石を設置する。

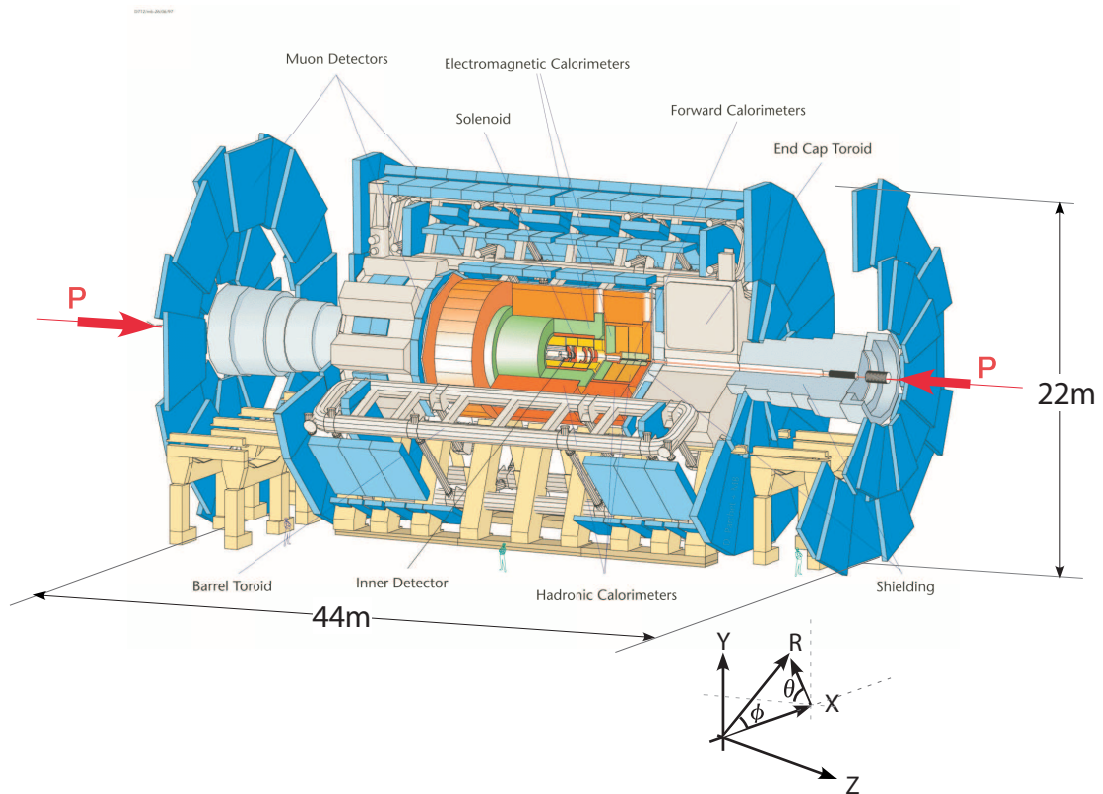


図 3.1: ATLAS 検出器 [10]

まず、座標系について簡単に説明する。ATLAS 検出器の座標系は円筒座標を用いる。x 軸はビーム軸に垂直な水平方向、y 軸は鉛直方向、z 軸はビーム軸方向を表す。また、 η は擬ラピディティ (pseudo rapidity) と呼ばれ、ビーム軸と粒子のなす角を θ とすると

$$\eta = -\log\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (3.1)$$

で定義される。

ATLAS 検出器では、 $|\eta| < 1$ の円筒形の筒の部分をバレル、 $|\eta| > 1$ 両端の円の部分をエンドキャップと呼ぶ。その中でもエンドキャップでは特に、 $|\eta| > 1.9$ の円の中心付近を **Forward**、それより外側の $1 < |\eta| < 1.9$ の領域を **Endcap** と呼ぶ¹。

ATLAS 検出器は、LHC の $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ という高いルミノシティにおいても、光子、電子、ミューオン、ジェット、 E_T^{miss} などの信号を高速かつ正確に処理できるように設計されている。そのため ATLAS 検出器は、以下の要求を満たす。

- 可能な限り広範囲のラピディティ η をカバーし、全方位角 ϕ をカバーすること。
- 内部飛跡検出器により、荷電粒子の運動量測定と Vertex の精密検出ができること。
- 電磁カロリメータにより、電子と光子のエネルギーと位置の高精度な測定ができること。
- ハドロンカロリメータにより、ジェットと消失横方向エネルギー E_T^{miss} の高精度な測定ができること。
- ミューオンスペクトロメータにより、ミューオンの運動量の高精度な測定ができること。
- 高頻度のイベントも逃すことなく処理できるシステムを持つこと。
- 大量のバックグラウンドに対する放射線耐性があること。

3.1.1 内部飛跡検出器 (Inner Detector(ID))

ビームの衝突点に最も近く、2T のソレノイド磁場中に設置される。衝突によって生成された荷電粒子の飛跡の検出や、ソレノイド磁場を用いた横運動量の測定、粒子の衝突点や崩壊点の再構成を行う。ピクセル検出器 (Pixel)、シリコン・トラッカー (Semi-Conductor Tracker (SCT))、遷移輻射トラッカー (Transition Radiation Tracker (TRT)) の3つで構成される。図 3.2 に内部飛跡検出器の構造を示し、以下に各部の簡単な説明を載せる。

ピクセル検出器 (Pixel)

内部飛跡検出器の中でも衝突点から最も近い領域に設置される。1 ピクセルが $50\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}$ のシリコン検出器である。R- ϕ 方向で $10\mu\text{m}$ 、z 方向で $115\mu\text{m}$ という高い位置分解能を持つ。主に、衝突点の測定に使用される。

シリコン・トラッカー (Semi-Conductor Tracker (SCT))

ピクセル検出器の外側に設置される。細長い有感領域を平行に並べた半導体検出器である。位置分解能は、R- ϕ 方向で $17\mu\text{m}$ 、z 方向で $580\mu\text{m}$ である。2層を互いに 40mrad 傾けることで、2次元の位置検出が可能。

¹本論文では、バレルとエンドキャップの区別をするときのエンドキャップをカタカナで、Forward と Endcap の区別をするときの Endcap で英字で書くことにする

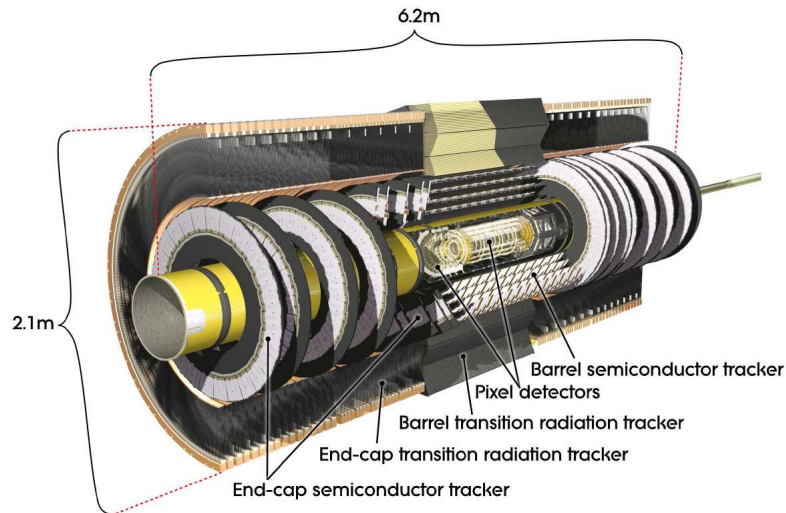


図 3.2: 内部飛跡検出器 [12]

遷移輻射トラッカー (Transition Radiation Tracker (TRT))

シリコン・トラッカーの外側に設置される。半径 4mm のストローチューブ検出器で構成されている。位置分解能はストローチューブは 1 つあたり $130\mu\text{m}$ である。電子の識別や、シリコン検出器と複合して用いることで精密な飛跡測定を行う。

3.1.2 カロリメータ

内部飛跡検出器の外側に設置される。電子や γ 線やジェットなどのエネルギー、位置の測定を行う。電磁カロリメータとハドロンカロリメータがあり、それぞれバレル部分とエンドキャップ部分がある。図 3.3 にカロリメータの構造を示し、以下に電磁カロリメータとハドロンカロリメータの簡単な説明を載せる。

電磁カロリメータ

バレル部分は超電導ソレノイドマグネットの外側、エンドキャップ部分は内部飛跡検出器の外側に設置されている。主に電子や γ 線の同定、精密測定が行われる。吸収層に鉛、サンプリング層に液体アルゴンを用いたサンプリング型カロリメータである。

ハドロンカロリメータ

主にハドロンの同定、ジェットの再構成や消失横方向エネルギー E_T^{miss} の測定を行う。バレル部分は鉄の吸収体とタイル状のシンチレータからなるタイルカロリメータ、エンドキャップ部分は銅の吸収体と液体アルゴンからなる液体アルゴンカロリメータである。エンドキャップは特に放射線耐性が求められる部分なので、放射線耐性のよい液体アルゴンカロリメータを用いている。

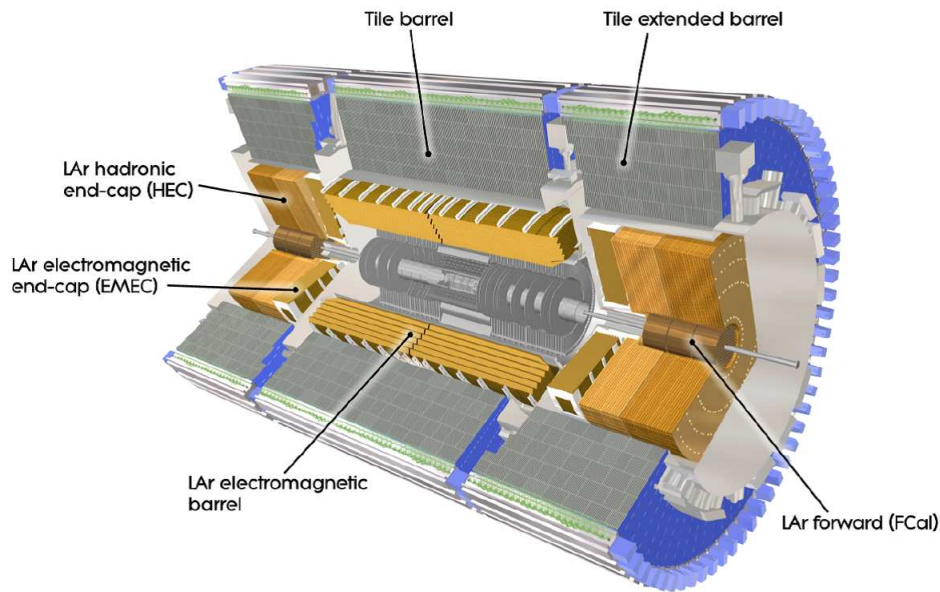


図 3.3: カロリメータ [12]

3.1.3 ミューオンスペクトロメータ

ミューオンは物質の透過力が高く寿命が長いため、ミューオンスペクトロメータはATLAS 検出器の最も外側に設置される。軌跡精密測定用の Monitored Drift Tube (MDT)、Cathode Strip Chamber (CSC)、トリガー用の Resistive Plate Chamber (RPC)、Thin Gap Chamber (TGC) の4つの検出器と、トロイダル磁石からなる。背景事象の多い ATLAS 実験において、ミューオンは比較的きれいな信号を取り出すことが可能という特徴を持つため、ミューオン検出器は非常に重要である。図 3.4 にミューオンスペクトロメータの構造、図 3.5 にミューオンスペクトロメータの R-Z 断面図を示す。また、以下に各検出器の簡単な説明を載せる。

Monitored Drift Tube (MDT)

バレル部分とエンドキャップ部分に、それぞれ3ステーションずつ設置される。ミューオンの運動量の R-Z 方向成分を精密に測定する。直径 30mm のアルミニウム製のチューブを敷き詰めた構造で、ワイヤーには直径 $25\mu\text{m}$ の金メッキのタングステンワイヤーを使用している。ガスは Ar 97%、CO₂ 3% の3気圧の混合ガスを使用している。位置分解能は約 $40\mu\text{m}$ である。

Cathode Strip Chamber (CSC)

放射線の多い高ラピディティ領域 ($2.0 < |\eta| < 2.7$) に設置される。カソードストリップ読み出し Multi-Wire Proportional Chamber(MWPC) で、4層で構成されている。位置分解能は約 $60\mu\text{m}$ である。

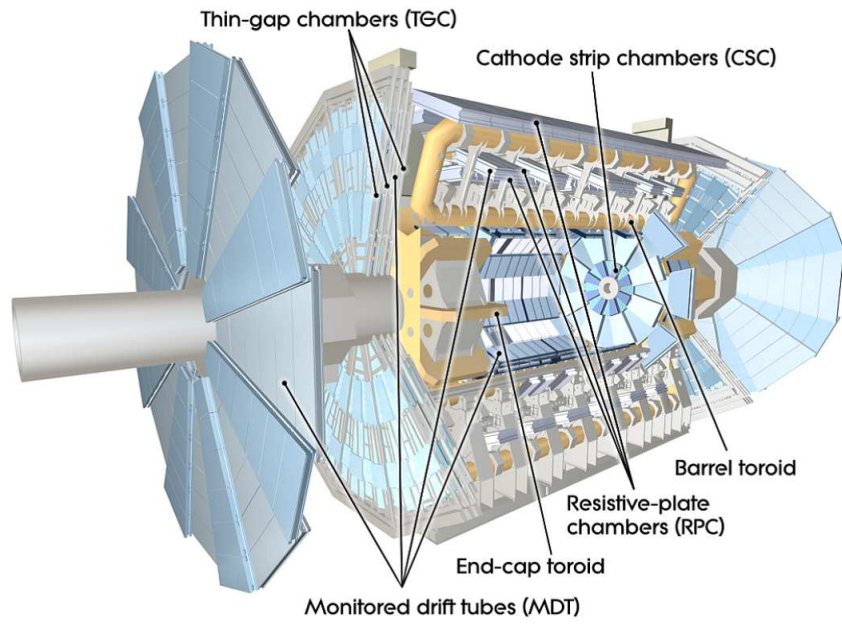


図 3.4: ミューオンスペクトロメータ [12]

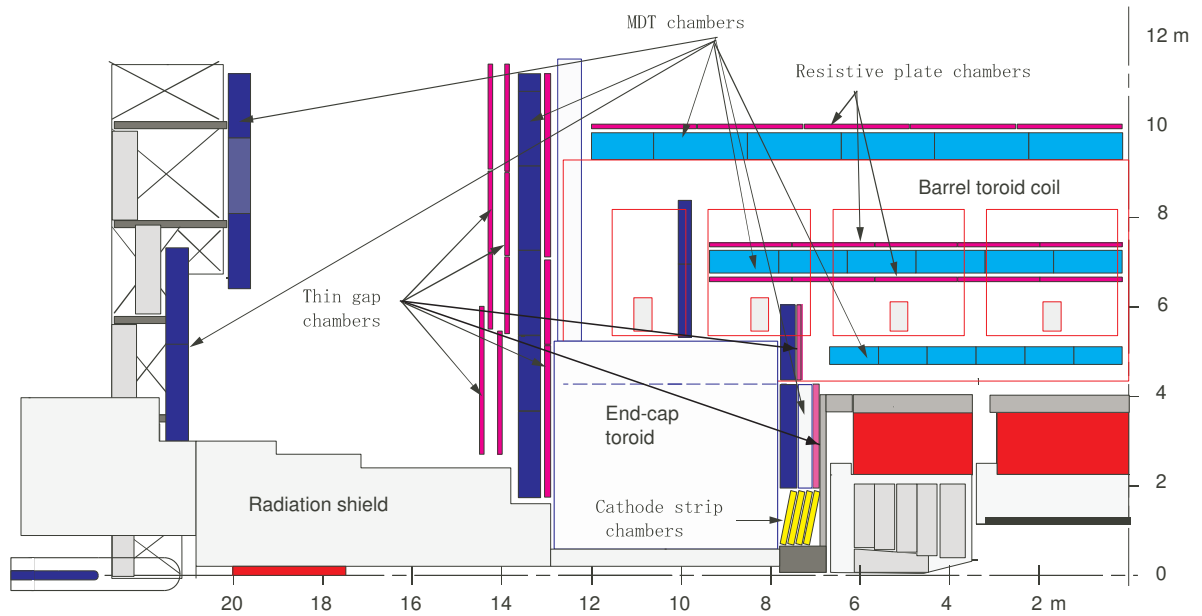


図 3.5: ミューオンスペクトロメータ (R-Z 断面図)[11]

Resistive Plate Chamber (RPC)

バレル部分で R-Z 方向と R- ϕ 方向の位置を測定し、トリガー判定を行う。2 枚の並行板を用いたガス検出器である。位置分解能は 1cm、時間分解能は 2ns である。

Thin Gap Chamber (TGC)

エンドキャップ部分で R- ϕ 方向と R-Z 方向の位置を測定し、トリガー判定を行う。詳細は後に述べる。

3.1.4 マグネット

中央のソレノイド磁石、バレル部、エンドキャップ部のトロイダル磁石の 4 つの超電導磁石からなる。図 3.6 に構造を示し、各マグネットについて簡単に述べる。

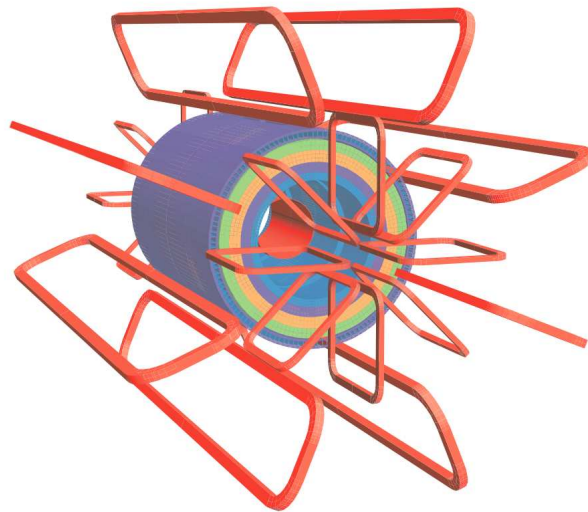


図 3.6: マグネットの構造 [12]

ソレノイド磁石

内部飛跡検出器の外側のバレル部分に設置される。内部飛跡検出器で荷電粒子の曲率を測定し、運動量を決定するために用いられる。磁場の強さは 2T。

トロイダル磁石

バレル部分とエンドキャップ部分で、8 つのコイルがビーム軸に対して 8 回対称になるように配置されている。ミューオンの運動量測定に用いられる。積分磁場強度は、バレル部分で 2 ~ 6Tm、エンドキャップ部分で 4 ~ 8Tm である。トロイド磁場の η と磁場積分強度の関係を図 3.7 に、 $z=10.5\text{m}$ (トロイド磁石の中心付近) についてのトロイド磁場の X-Y 平面の磁束の構造を図 3.8 に示す。

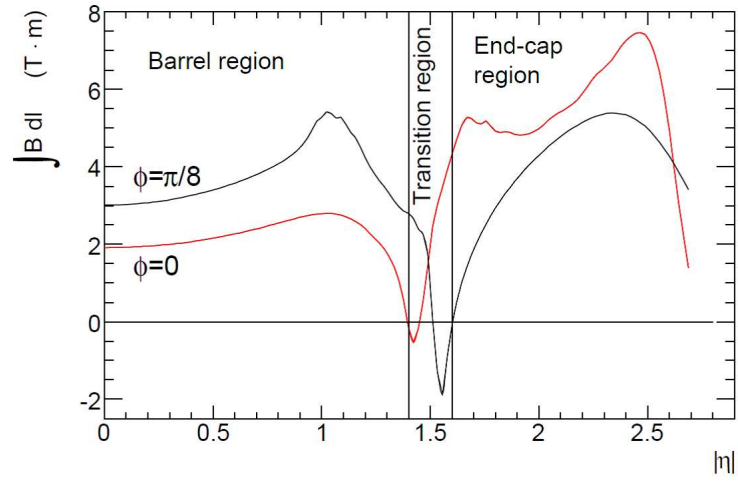


図 3.7: トロイド磁場の η と磁場積分強度の関係 [12]

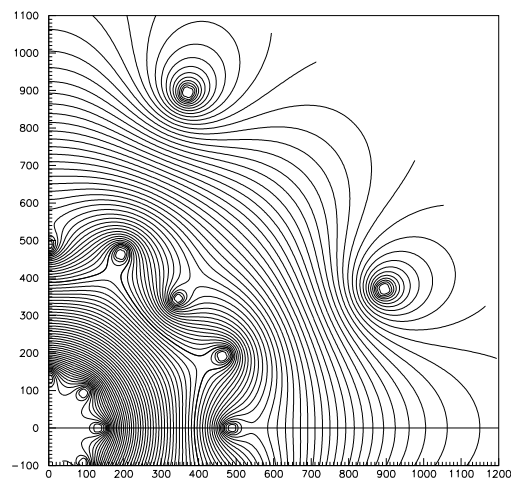


図 3.8: トロイド磁場の X-Y 平面の磁束の構造 ($z=10.5\text{m}$)[12]

3.2 ATLAS 実験でのトリガー and DAQ システム

現在の LHC の最高ルミノシティ時には、40.08MHz でビーム衝突が起こり、1 回のバンチ交差あたり平均 24 個の陽子陽子衝突が予想される。そのため、ATLAS 検出器の衝突点で発生する陽子陽子の反応レートは約 1GHz にもなる。この膨大なイベントの中から興味のある事象のみをデータとして保存するために、ATLAS 実験では Level1(LVL1)、Level2(LVL2)、Event Filter(EF) と呼ばれる 3 段階のトリガーを用いている。Level1 は高速に処理することが求められるのでハードウェアで、Level2、EF はソフトウェアで処理される。トリガーシステムはオンラインで目的とする物理現象を含むイベントのみを収集するための判断を行う。最終的に DAQ システムに送られるイベントレートは、データストレージの容量の制約で 200Hz 程度に抑えられる。このトリガーの流れと DAQ システムを図 3.9 に示す。

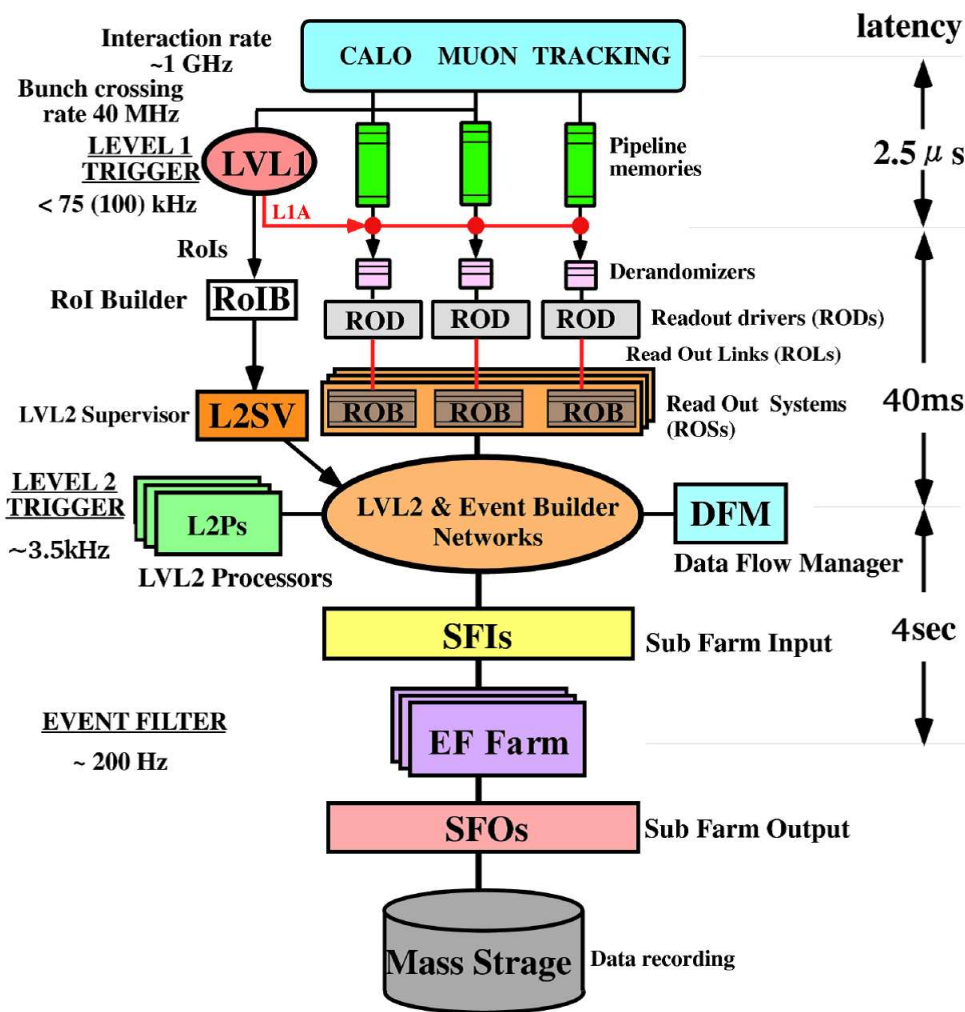


図 3.9: Trigger DAQ システム [12]

3.2.1 Level1 トリガー

40.08MHz のバンチ衝突から発生する膨大な事象を、75kHz に落とすためのトリガーである (基本的には 75kHz だが、100kHz までアップグレードが可能)。図 3.10 に Level1 トリガーの仕組みを示す。図 3.10 のように Level1 トリガーは、カロリメータ、トリガー用ミュオン検出器 (TGC、RPC)、MUCTPI (Muon Trigger to CTP Interface)、CTP (Central Trigger Processor)、TTC (Timing, Trigger and Control distribution system) から構成されている。カロリメータからの、 e/γ 、 E_T^{miss} 、 τ 、ジェットのエネルギーなどの精度を落とした情報と、ミュオン検出器からの、高い p_T の値を持ったミュオンの情報がトリガー判定に用いられる。粒子の衝突からトリガー判定をして、フロントエンドのエレクトロニクスへトリガーを送るまでの処理時間 (レイテンシ) は、 $2.5\mu\text{s}$ と決められている。そのため、情報量が多く、処理に時間のかかる内部飛跡検出器からの情報は利用しない。

カロリメータからの情報とミュオン検出器からの情報を統合して、最終的な Level1 トリガーの判定をするのが CTP である。CTP で出されるトリガー判定の結果を Level1 Accept (L1A) 信号と呼ぶ。この L1A 信号は、TTC システムによって各検出器に配られる。

また、衝突が起きてから L1A 信号が出されるまで、各検出器からの信号は LVL1 バッファと呼ばれるパイプラインメモリに保持される。LVL1 バッファは、L1A 信号が出されるまでの $2.5\mu\text{s}$ 、25ns ごとにやってくる信号をすべて保持するために、最低 100 イベント分を保持できるように設計されている。L1A 信号が発行されたイベントは、LVL1 バッファからデランダムマイザに保持する。デランダムマイザは、L1A 信号によって不規則に送られてくるデータを Read Out Driver(ROD) に読み出されるまで保持する。そして、データはどのバンチ衝突のデータか、どの L1A 信号で読み出されたデータなのかが分かるように、バンチクロッシング ID(BCID)、LVL1ID(L1ID) が付加され、圧縮されて ROD に等間隔で読み出される。ROD で各検出器ごとにまとめられたデータは、Read Out Buffer(ROB) へ送られる。ROB を複数持つひとつのシステムを Read Out System(ROS) と呼ぶ。

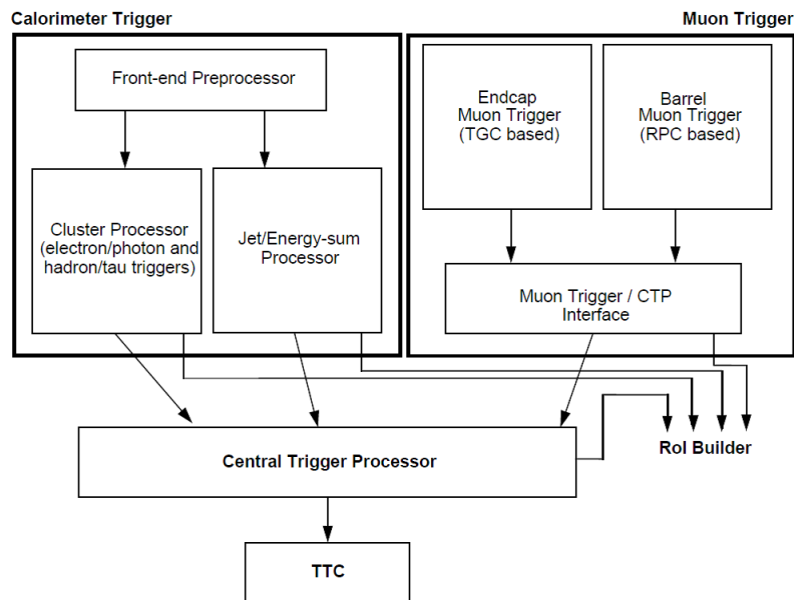


図 3.10: Level1 トリガー [11]

3.2.2 Level2 トリガー

イベントレートを 75kHz から 3.5kHz に落とす。Level2 トリガーでは、カロリメータ、MDT、内部飛跡検出器からの高精度の位置情報を組み合わせて処理する。効率を良くするために、Level1 トリガーによって与えられる RoI(Region of Interest. 第4章を参照) のデータを利用して注目する検出器の領域を絞り込み、その領域のみの情報を用いてトリガー判定が行われる。このことによって、短い演算時間で精度のよい選別を行うことができる。

複数の Level1 の結果が RoI Builder(RoIB) に渡され、そこで RoI が決定される。RoI は他の Level1 の情報とともに Level2 Sper Visor(L2SV) に渡される。L2SV は受け取った RoI と Level1 の情報から Level2 の判定を行う。このとき、L2SV は負荷分散アルゴリズムに従い、いくつかの Level2 Processor (L2P) をそのイベントのトリガー判定に割り当てる。割り当てられた L2P は、LVL2 ネットワークを介して必要なイベント情報を ROS から受け取り、Level2 のトリガー判定を行う。その結果、Level2 Accept 信号は L2SV に戻され、Data Flow Manager(DFM) に渡される。

Level2 は 3.5kHz でトリガーを出し、L2P には最大で 500 台程度の PC が使われ、それらでパラレルに Level2 のトリガー判定の処理を行う。1 イベントにかかる処理時間は 40ms 以下とされている。

LVL2 Accept 信号が DFM に送られると、DFM は負荷分散アルゴリズムに従ってデータを受け取る Sub Farm Input buffer(SFI) を割り当てる。SFI はイベントビルダーネットワークを介して ROS からデータを受け取り、フォーマットに従ってイベント構築を行う。構築されたイベントは EF に送られるために、SFI 内のバッファに保持される。

3.2.3 Event Filter

3.5kHz の事象から最終的に 200Hz を選別する。Level2 トリガーで選別された事象に対して、全ての検出器から送られてきたヒット情報が衝突バンチごとにまとめられる。EF では、この全検出器の情報を使用して全領域に対して解析を行い、最終的なトリガー判定を下す。

EF は全体で 1600 台程度の PC で構成される大規模なプロセッサ・ファームであり、いくつかの独立した EF sub farm から構成されている。EF sub farm は、スイッチング・ネットワークを介して、1 つまたは複数の SFI につながっている。EF sub farm では EF Data flow control program(EFD) というプログラムが走っている。ここで、SFI から完全なイベントデータを受け取り、トリガー判定を行う。EFD は、あるイベントのトリガー判定が終わると、SFI から次のイベントデータをとってきて処理を続ける。EF 全体としてのトリガー・レートは 200Hz であるが、各 EF sub farm で並列に処理が行われるため 1 イベントにかかる処理時間は 4s 以下とされている。

データは、EF トリガー判定のために SFI から EF sub farm に取り込まれる。EFD は EF Accept 信号が出されると、トリガー判定のために生成された情報にイベントの完全な生データを付加し、SFO(Sub Farm Output buffer) ヘデータを送る。そして、SFO から Disk に記録される。1 イベントで発生するデータ量は 1.5MByte 程度と見積もられており、最終的に 300MByte/s のデータが記録されている。

第4章 TGC ミューオントリガーシステム

この章では、エンドキャップのミューオントリガーに用いられる TGC ミューオントリガーシステムについて説明する。TGC の構造・動作原理、トリガー処理の方法について説明し、TGC のエレクトロニクスを説明する。

4.1 Thin Gap Chamber (TGC) の構造

TGC はミューオンスペクトロメータの一部で、エンドキャップのトリガー用の検出器として用いられる。1.0 < $|\eta|$ < 2.7 の領域をカバーする。TGC はエンドキャップ部分を円状にカバーするため、各チェンバーは台形になっている。大きさは配置場所によって異なるが、1 辺が 1 ~ 2m ほどである。図 4.1 に ATLAS 検出器における TGC の位置と、その構造の模式図を表す。

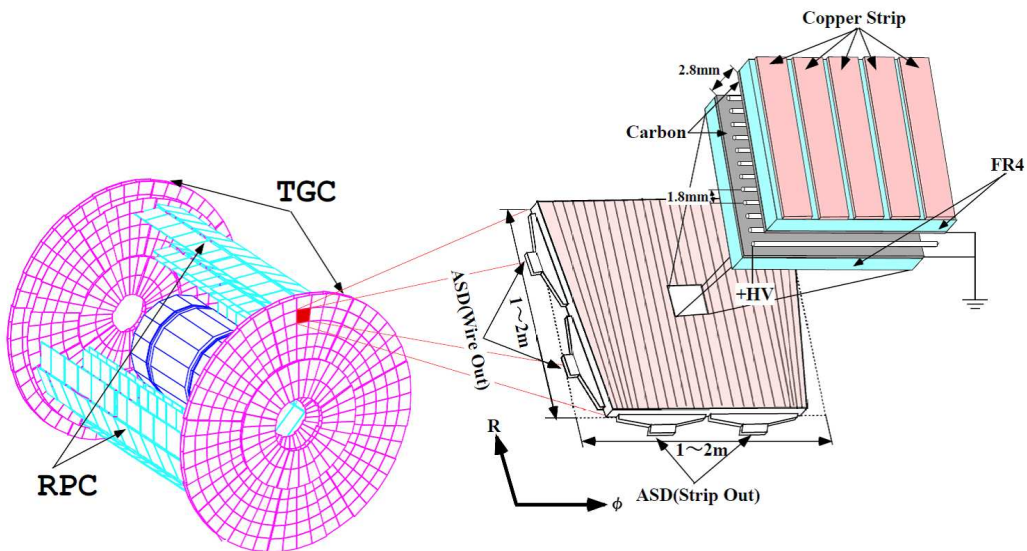


図 4.1: TGC の配置と構造 [11]

4.1.1 基本構造

TGC は MWPC (Multi-wire Proportional Chamber) の一種である。MWPC は 2 枚の平行陰極板に等間隔に並んだ陽極線ワイヤが配置されるつくりである。

TGC では、カソードにガラス・エポキシ板に表面抵抗が約 $1\text{M}\Omega$ のカーボン塗布したものを用い、その反対の面に、1 面を 32 分割した扇形の銅のストリップを並べている。アノードには、直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキしたタングステンワイヤをストリップと直交するように張って用いている。

これにより TGC は 2 次元の読み出しが可能で、ワイヤにより R 方向、ストリップによって ϕ 方向の位置の検出を行う。

ワイヤは 6 ~ 20 本 (幅にして 10.8 ~ 36mm) をまとめてひとつのチャンネルとして読み出す。ストリップは 1 つのチェンバー¹に 32 本あり、それぞれが 1 つのチャンネルとして読み出される。

図 4.2 に TGC の断面図を示す。図 4.2 に示すように、ワイヤとカソードの間隔が 1.4mm で、ワイヤ間隔の 1.8mm よりも狭くなっている。ワイヤの間隔が狭いのは電子のドリフト時間を短くし、バンチクロッシング間隔 (25ns) に対応できるようにするためである。ワイヤとストリップの間隔が狭いのは、陽イオンのドリフト距離を短くし、粒子が高レートで入射してきても検出効率を落とさないようにするためである。

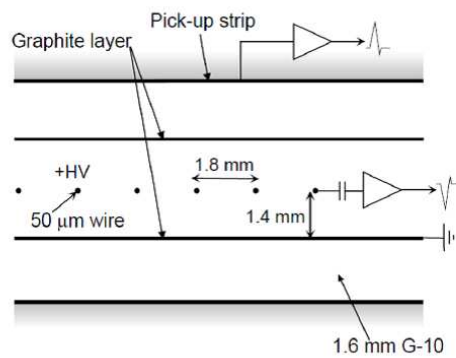


図 4.2: TGC の断面図 [11]

TGC の平面図を図 4.3 に載せる。またチェンバーには図 4.4 に示すように、ワイヤサポートが備えられている。ワイヤサポートはワイヤのたるみや TGC の歪みを防ぎ、ガスの流路を形成する働きもする。ワイヤサポートは不感領域となる。

TGC はガスに、CO₂/n-pentane (55/45) 混合ガスを用いている。このガスは、紫外線を吸収し放電を起こしにくくするクエンチ効果という特性がある。

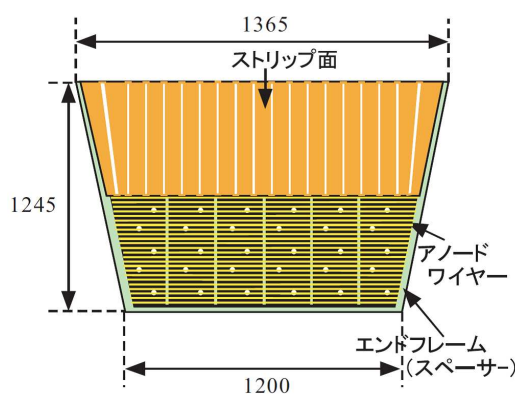


図 4.3: TGC 平面図 [9]

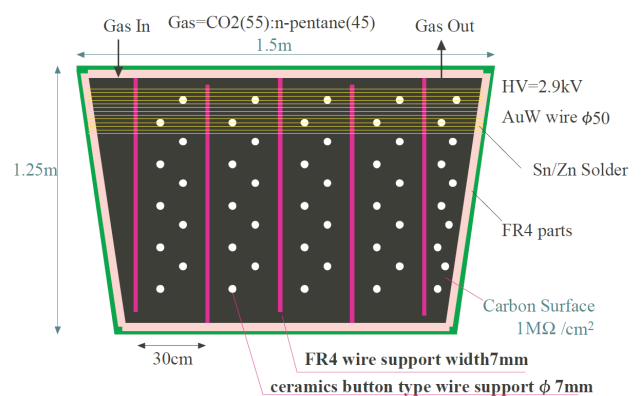


図 4.4: ワイヤサポート [11]

¹TGC1 枚 1 枚のことをチェンバーと呼ぶ

4.1.2 動作原理

TGC のガス中を荷電粒子が通過すると、その経路にあるガス分子から電離作用によって電子と陽イオンが生じる。このときにできた電子は一次電子と呼ばれる。アノード・カソード間の電場によって、一次電子はアノードのワイヤへ、陽イオンはカソードのストリップへ移動する。アノードのワイヤ付近の電場は大きいので、移動してきた一次電子は他のガス分子を電離するだけのエネルギーを得る。そして、一次電子は電離作用によって電子・陽イオンペアを作り、さらにその電子が加速され、また電子・陽イオンペアを作る。このような雪崩の効果によって増幅された電子は、アノードのワイヤに向かってドリフトしワイヤをとり囲む。これにより、信号をワイヤで読み出すことができる。また、同時にカソード面では、塗布された高抵抗のカーボン面に電荷が誘起され、外側のストリップにも電荷が誘起されるため、信号として読み出すことができる。

4.1.3 TGC チェンバー

TGC のチェンバーには、図 4.5 のように、ガスギャップが 2 層のダブルレットチェンバー (Doublet) と、3 層のトリプレットチェンバー (Triplet) がある。Doublet の場合は、2 層のワイヤ面と 2 層のストリップ面から読み出しが行われる。Triplet の場合は、真ん中の層にはストリップがなく、3 層のワイヤ面と 2 層のストリップ面から読み出しが行われる。多層にすることにより、各層のコインシデンスをとってバックグラウンドによるフェイク信号の影響を減らすことができる。また、ワイヤサポートによる不感領域の影響も減らすことができる。

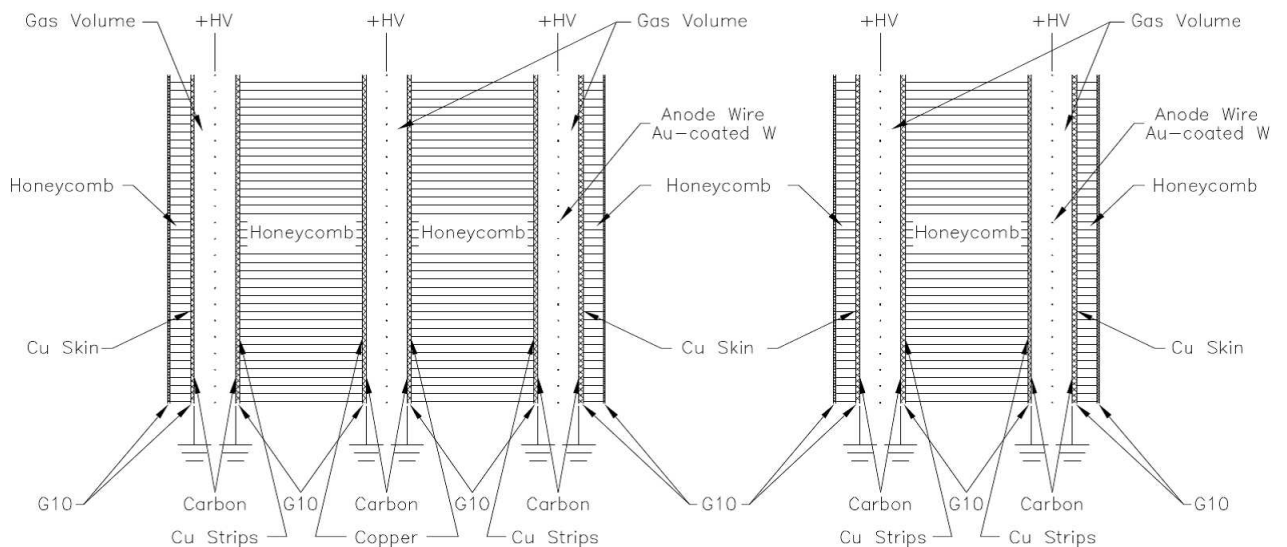


図 4.5: TGC の Triplet(左) と Doublet(右) の構造 [11]

また、ダブルレットチェンバーとトリプレットチェンバーの wire チャンネルは、それぞれ 1/2、1/3 ずつずらして配置されている。これにより不感領域を減らすことができ、実効的な位置分解能を 2 倍、3 倍にすることができる。

4.2 TGC システムの配置

TGCは図4.6に示すように、M1、M2、M3、Endcap Inner (EI)、Forward Inner (FI)の5つから構成されている。M1はTriplet、M2、M3、EI、FIはDoubletである。M3はのちに述べるように、Pt測定の起点となるために、特にpivot planeと呼ばれることもある。M2はmiddle planeと呼ばれることもある。M1、M2、M3の内側から1層ずつT1・T2・T3 (M1)、D4・D5 (M2)、D6・D7 (M3)と呼ばれる。トリガー判定には主にこの計7層が用いられ、EI・FIのInner stationは現在トリガーには用いられていない。

TGCのチェンバーは配置される場所によって形状が異なり、M1には5種類、M2、M3には6種類、EI、FIには2種類が使用されている。M1、M2、M3のチェンバーについて図4.7に示す。

また、図4.9にM3でのTGCの配置と区分を載せる。縦軸、横軸は長さをmで表している。TGCを ϕ 方向に1/12にしたものをセクターと呼ぶ。セクターの ϕ 方向にEndcapは1/4、Forwardは1/2したものをトリガーセクターと呼ぶ(図4.9の水色の部分)。さらにトリガーセクターをEndcapでは η 方向に1/37、 ϕ 方向に1/4、Forwardでは η 方向に1/16、 ϕ 方向に1/4したものをサブセクターと呼ぶ(図4.9の黄色の部分)。サブセクターはpivot planeで8 wireグループと8 stripに対応している。これはトリガー処理の最小単位であり、1つのRegion of Interest(RoI)とも呼ばれる。

また、TGCを ϕ 方向に1/8にしたものをoctantと呼ぶ。octantにはトリガーセクターがEndcapに6つ、Forwardに3つ含まれている。このトリガーセクターをモジュールとも言い、octantごとにモジュール番号がつけられている。このモジュール番号についての説明を図4.8に載せる。

また、図4.10にInner stationの配置を載せる。縦軸、横軸は長さをmmで表している。

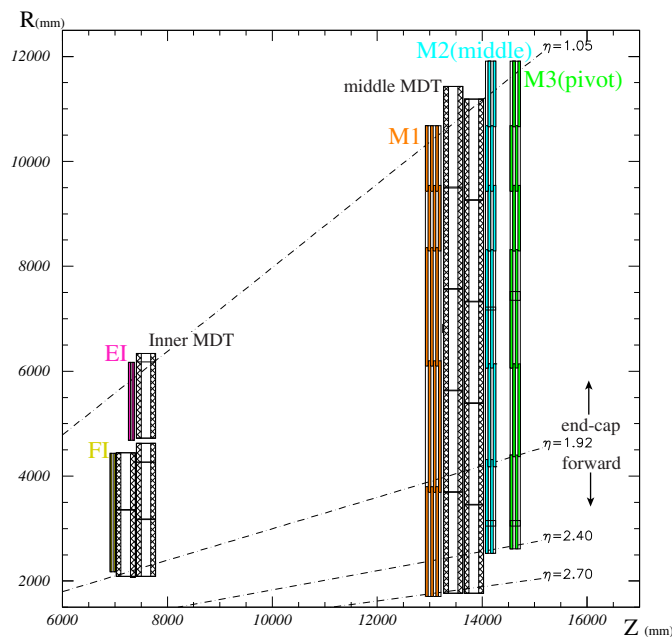


図 4.6: R-Z 平面での TGC のレイアウト [11]

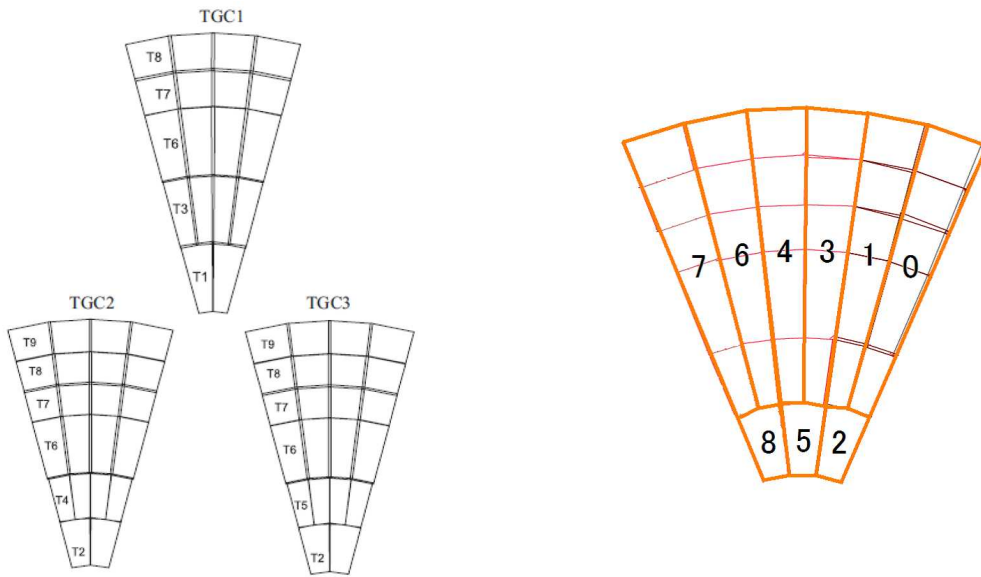


図 4.8: モジュール番号. octant の範囲

図 4.7: TGC チェンバーの種類 [13]

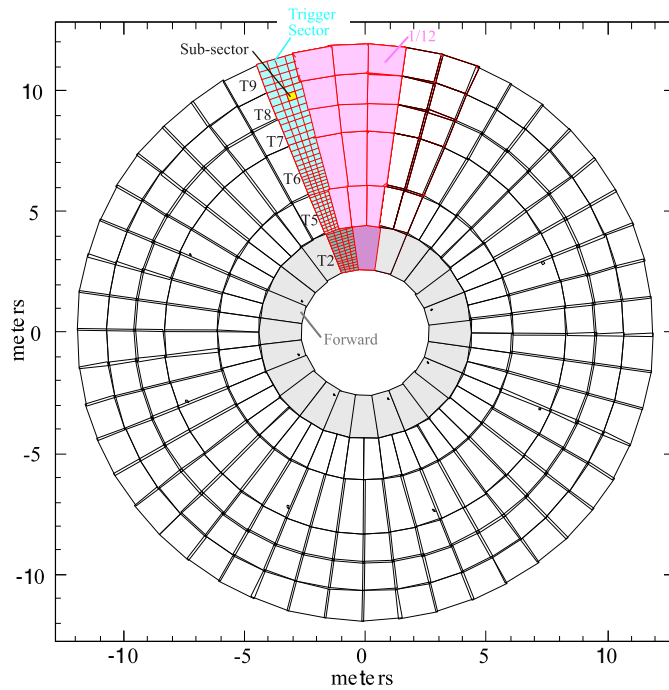


図 4.9: M3 (pivot) での TGC の配置と区分 [9]

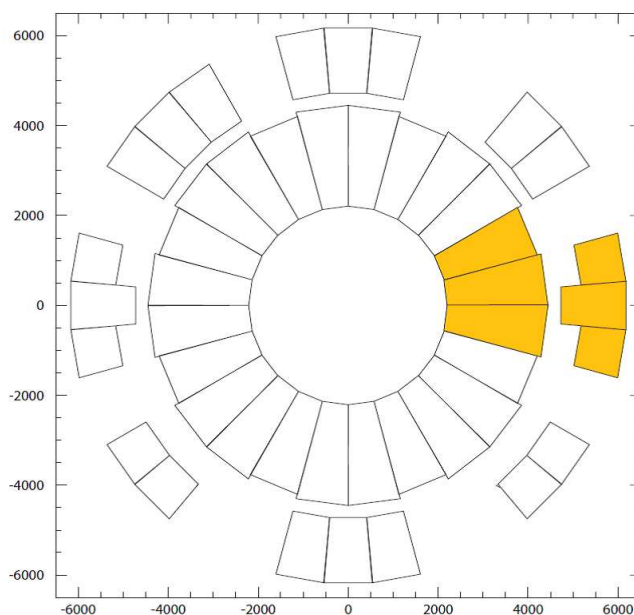


図 4.10: Inner Station の配置 [9]

4.3 TGCにおける p_T 測定の原理

TGC では M1、M2、M3 の 7 層のチェンバーを用いて μ 粒子のトロイド磁場中での曲率を測定することで運動量の概算を行う。Level1 トリガーでは 6 段階の p_T 判定がなされる。この様子を図 4.11 に示す。

まず、pivot plane の通過位置とビームの衝突点を結ぶ直線 (Infinite Momentum Line) を考える。この直線は、無限運動量を持つミュオンが通るトラックである。Middle Doublet と Triplet で、ミュオンが通過した位置と Infinite Momentum Line が通る位置の差を R 、 ϕ 方向それぞれに検出する。そして、この差 δR 、 $\delta\phi$ の大きさによって運動量を概算する。トロイダル磁場が理想的な ϕ 方向成分のみの磁場であれば、 $\delta\phi=0$ となるはずである。しかし、実際には磁場は一様でなく、 R 方向にも存在するので、 ϕ 方向の変位 $\delta\phi$ も測定しなければならない。

TGC トリガーの判定方法を図 4.12 に載せる。TGC トリガーシステムでは、Low- p_T と High- p_T の 2 種類のコインシデンスを用いる。Low- p_T 判定は、pivot と middle の 2 つの Doublet を用いて行われる。wire、strip とともに 4 層のうち 3 層以上で、求める範囲内にヒットがあることを要求する (3 out-of 4)。また High- p_T 判定は、Low- p_T 判定で用いられた情報と Triplet の情報を用いて行われる。ここでは Low- p_T 判定の条件に加えて、Triplet に wire では 3 層中 2 層以上で (2 out-of 3)、strip では 2 層のうち 1 層以上 (1 out-of 2) で、求める範囲内にヒットがあることを要求する。Low- p_T 判定、High- p_T 判定のされたものに関して、最終的に R - ϕ 判定が行われる。ここでは先に少し触れたように、最終的に通過したウィンドウの δR 、 $\delta\phi$ の大きさによって運動量を概算し、6 段階の p_T 判定も行われる。そして p_T の大きいものに対してトリガーが発行される。

4.4 TGC エレクトロニクス

TGC のエレクトロニクスについて説明する。はじめにシステム全体の流れを述べた後、TGC エレクトロニクスでトリガー判定のために使われる各モジュールについて述べる。

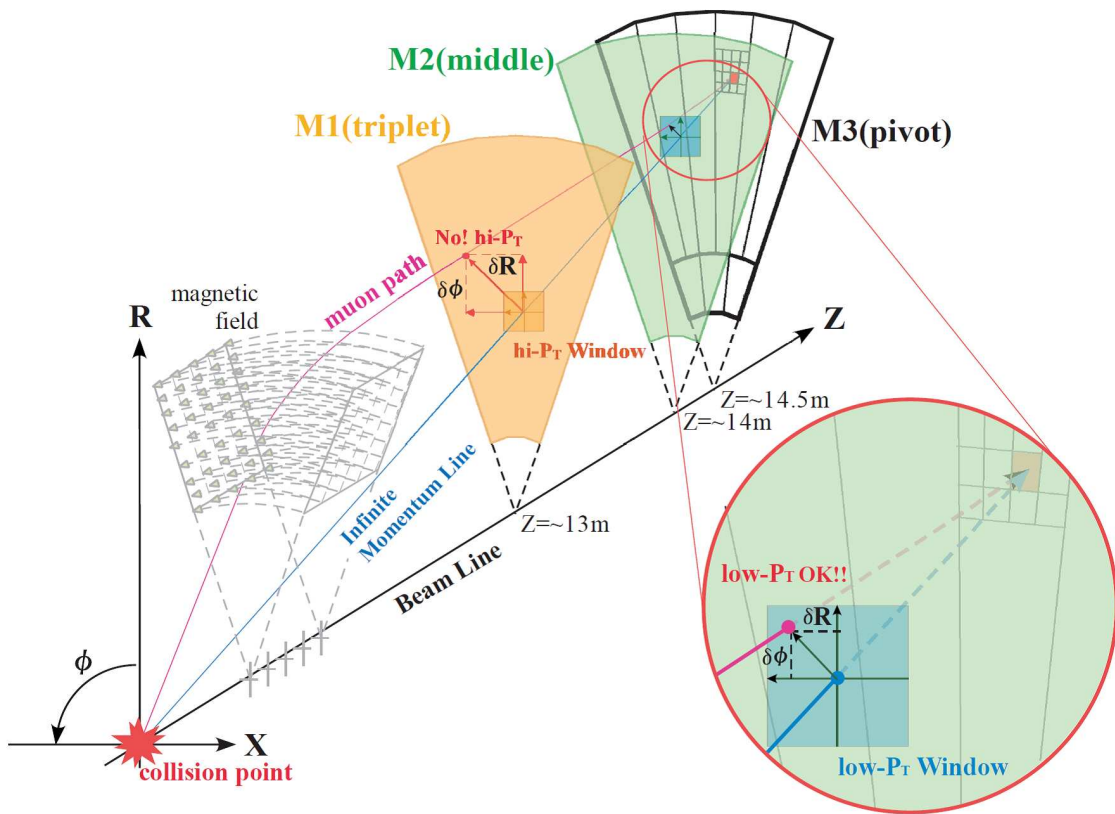


図 4.11: p_T 測定 の原理 [11]

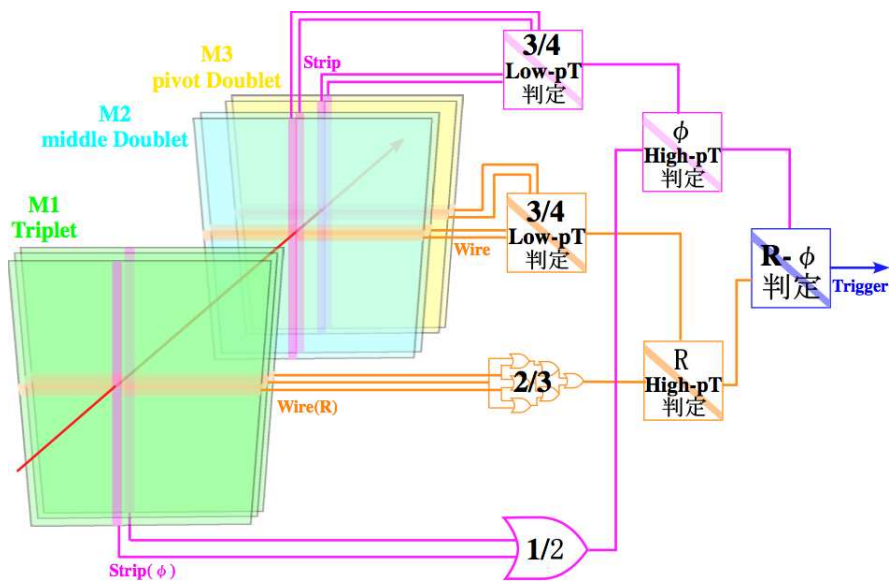


図 4.12: TGC トリガー の判定方法 [11]

4.4.1 TGC エレクトロニクス全体の流れ

TGC の役割は、Level1 ミューオントリガーシステムとしてトリガー判定のための情報を得ること、MDT が測定できない ϕ 方向の情報を得ることの大きく分けて 2 つである。よって、TGC エレクトロニクスのデータの流は大きく以下の 3 つに分けられる。

- トリガー系
25ns ごとのトリガー判定のための情報
- リードアウト系
L1A がくると読み出される TGC 各層でのミューオンのヒットチャンネル情報
- コントロール系
TGC エレクトロニクスの各モジュールをコントロールするための情報

TGC エレクトロニクスの全体像は図 4.13 のようになっている。赤線、青線、緑線はそれぞれトリガー系、リードアウト系、コントロール系を表す。

また設置される場所は、検出器、ビッグウィールのエッジ、コントロールルームの大きく分けて 3 か所である。検出器とビッグウィールのエッジに設置されるエレクトロニクスは放射線耐性が求められる。

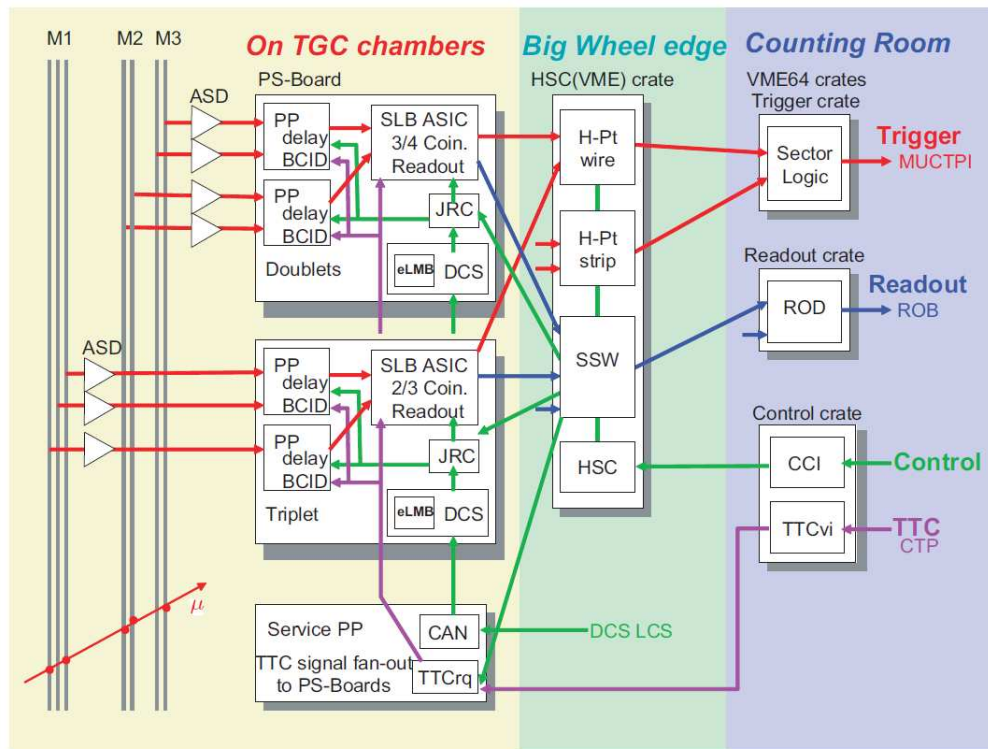


図 4.13: TGC エレクトロニクス [9]

ビッグウィールでミューオンが検出されると、それらの信号は Amplifier Shaper Discriminator (ASD) で増幅・デジタル化され、PS ボード上にある Patch Panel ASIC (PP ASIC) へと送られる。PP ASIC ではケーブルの Delay など調整し、そのデータを Slave Board ASIC (SLB ASIC) へと送る。SLB ASIC では、Low- p_T トリガーがとられ、そのトリガーは High- p_T Board (HPT) へ送られ

る。トリガーを処理している間、データは SLB ASIC 中のレベル 1 バッファに溜められる。トリガー情報は、HPT において R 方向、 ϕ 方向について、それぞれ High-p_T coincidence がとられ、Sector Logic (SL) へと送られる。SL で R 方向と ϕ 方向の情報が合わさり MUCTPI に送られる。そして、そのトリガー情報が L1A となり、TTC から SLB ASIC に送られると、Level1 buffer に溜めてあったデータは SLB ASIC 内のデランダムマイザを通して Star Switch (SSW) へ送られる。SSW ではデータの圧縮などを行い、そのデータが Readout Driver (ROD) を通り ROB へと送られる。そして、High-p_T SSW Controller (HSC) や Control Configuration Interface Board (CCI) といったモジュールが、このシステムをコントロールする。

次に、トリガー系、リードアウト系、コントロール系の 3 種類のシステムについて説明する。

トリガー系

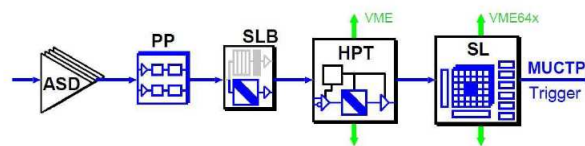


図 4.14: トリガー系のモジュール構成 [9]

トリガー系の流れを図 4.14 に示す。ASD (Amplifier Shaper Discriminator)、PP ASIC (Patch Panel ASIC)、SLB ASIC (Slave Board ASIC)、HPT (High-p_T)、SL (Sector Logic) の順に信号が処理される。TGC から出力されるアナログ信号は、ASD へ送られ信号の増幅・整形・デジタル化が行われる。ASD からは LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 信号で PP ASIC へ送られる。PP ASIC では、各チャンネルに粒子が飛来するまでにかかる時間 (TOF) や、ケーブル遅延などから生じるタイミングのずれを調整し、バンチ識別 (BCID: Bunch Crossing Identification) を行う。SLB ASIC では、Doublet の 4 層を用いて Low-p_T の coincidence 処理が行われ、Low-p_T 判定がなされる。また、Triplet の 3 層を用いて coincidence 処理が行われる。HPT では、SLB ASIC で測定した Doublet 及び Triplet の coincidence 処理の結果をもとに、Low-p_T 判定ができたものに対して High-p_T coincidence 情報が生成される。SL では、High-p_T coincidence がとれたものに対して、それまで独立に扱われていた wire・strip の情報を統合し、coincidence 処理が行われ、TGC のトリガー系の最終的な情報として Pt が大きな 2 つのトラックをセクターごとに選び出す。SL の結果は、MUCTPI (Muon CTP Interface) に送られ、RPC の情報と合わせてミューオンの最終的なトリガー判定が下される。

リードアウト系

リードアウト系の流れを図 4.15 に示す。PP ASIC から送られてきたデータは、SLB 中の Level1 バッファに蓄えられ、128clock の間 L1A 信号がくるのを待つ。L1A 信号を受けたデータのみが、デランダムマイザを通じて次の SSW へと送られる。ここで、SLB は L1A 信号を受けたデータとその後 1BC のデータと、それらのトリガー情報をすべて SSW に送る。SSW はマルチプレクサ²として複数の SLB からのデータをまとめ、データの圧縮を行い、G-Link³を通して ROD にデータを

²二つ以上の入力を一つの信号として出力する機構

³1 ~ 2Gbps を満たすために、ヒューレッドパッケージによって開発されたシリアル-パラレル変換及びシリアル通信の規格

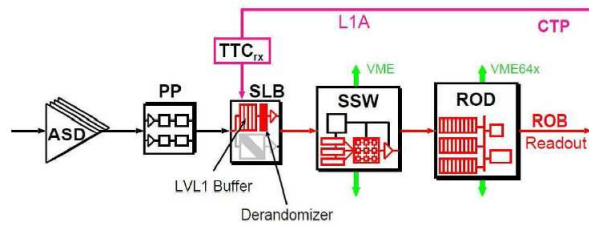


図 4.15: リードアウト系のモジュール構成 [9]

送る。この時、トリガー情報は PS Board に搭載された SLB ASIC から同様に SSW に送られ、データと一緒に ROD に送られる。ROD では複数の SSW からの情報を収集しひとつにまとめ、それらのデータと TTC から送られてくる情報との整合性を確認し、S-Link⁴を用いて ROB に送る。

コントロール系

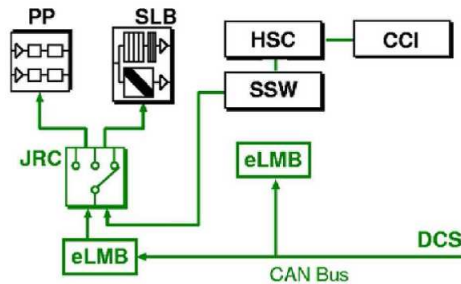


図 4.16: コントロール系のモジュール構成 [9]

コントロール系の流れを図 4.16 に示す。実験が開始すると実験ホール内は放射線環境になってしまうため、遠隔でエレクトロニクスと検出器をコントロールする必要がある。それを行うのがコントロール系である。ATLAS 実験では各検出器の制御と監視を統一的な方法で行うために DCS (Detector Control System) が使用される。DCS にはプロセッサである eLMB (embedded Local Monitor Box) などが搭載され PS Board 上に設置される。HPT/SSW が搭載される VME クレート⁵は実験室外の CCI (Control Configuration Interface Board) から HSC (High-pT Star-switch Controller Board) を介してコントロールされ、PS Board 上の PP ASIC/SLB ASIC の設定は SSW から行う。TGC の DCS は主に温度状態の管理や供給電源の監視を行う。

4.4.2 TGC エレクトロニクスの詳細

Amplifier Shaper Discriminator Board (ASD Board)

ASD Board は TGC チェンバー側面の読みだし口に直接取り付けられている。ASD ASIC 1 つで 4 チャンネル分の処理ができ、1 つのボードには 4 つの ASD ASIC が搭載されるので、1 つの ASD

⁴フロントエンドとリードアウトのエレクトロニクスをつなぐために CERN で開発された光信号のリンクモジュール

⁵Versa Module Europe の略で、IEEE で規格化された産業用の標準バス。96 ピン DIN コネクタを実装した 32 ビット・バスである。高エネルギー物理の分野でも一般的に用いられる。

Board で 16 チャンネル分を処理することができる。

ASD ASIC は TGC チェンバーからのアナログ信号を増幅、整形し、ある閾値電圧を超えた信号だけを LVDS 信号として出力する。また、ASD Board 以降のエレクトロニクス動作チェックやタイミング調整のために、PP からのテストパルスを受け取ることも可能である。図 4.17 に ASD Board の写真を載せる。

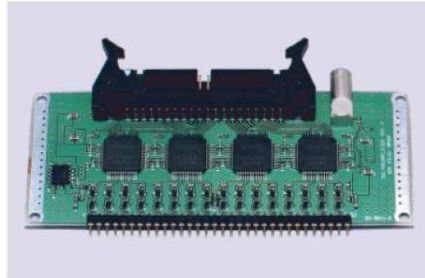


図 4.17: ASD Board[11]

Patch Panel ASIC (PP ASIC)

PP ASIC ではタイミング調整とバンチ識別を行う。ASD から送られてくる信号は、TOF やケーブル遅延などでタイミングがそろわない。そこで、ASD からの LVDS 信号を LVDS レシーバーにより CMOS レベルの信号に変換し、次に 0 ~ 25ns の範囲で各チャンネルにそれぞれ delay をかけることによりタイミングの調整を行う。この delay は 25/28ns 単位で調整が可能になっている。

タイミング調整された信号は BCID (バンチクロッシング ID) 回路で、LHC clock と同期がとられバンチ識別が行われる。また PP ASIC には、ASD Board に向けてテストパルスを発生させるための回路も搭載している。PP ASIC は 1 つで 32 チャンネルの信号を処理できる。

図 4.18 に PP ASIC のブロック図を載せる。

Slave Board (SLB)

SLB ASIC は大きく分けて、トリガー部とリードアウト部からなるので、これらを分けて説明する。図 4.19 に SLB ASIC のブロック図を載せる。

- トリガー系

TGC からの入力信号に対して、coincidence 処理を行う。coincidence の処理の仕方は、Doublet Wire、Doublet Strip、Triplet Wire、Triplet Strip、EIFI の 5 種類があり、これらに合わせて設定を切り替えることができるようになっている。Doublet の SLB では 3 out-of 4 の coincidence をとり、さらに δR 、 $\delta\phi$ を求め、Low- p_T 判定も行う。Triplet wire では 2 out-of 3 の coincidence、Triplet strip では 1 out-of 2 の coincidence がとられる。

また、PP ASIC からの信号に 1/2 clock 単位で delay をかける機能や、各チャンネルをマスクする機能、SLB 以降のエレクトロニクスやタイミング調整のためのテストパルスを出力する機能もある。

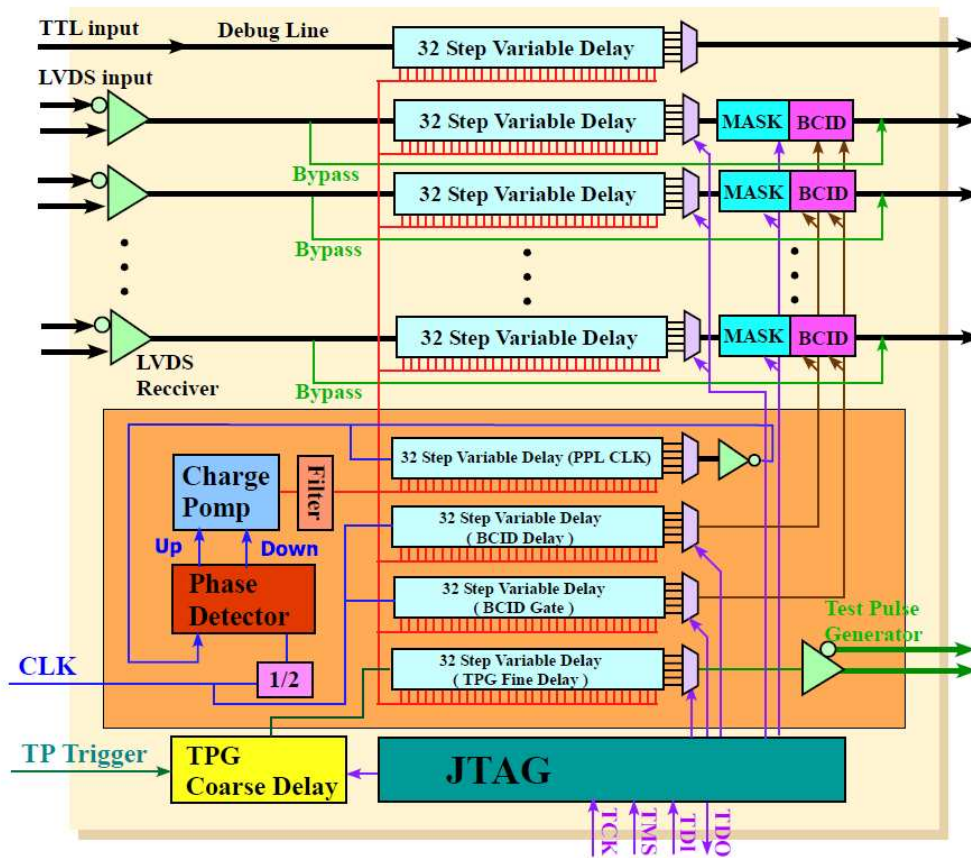


図 4.18: PP ASIC のブロック図 [11]

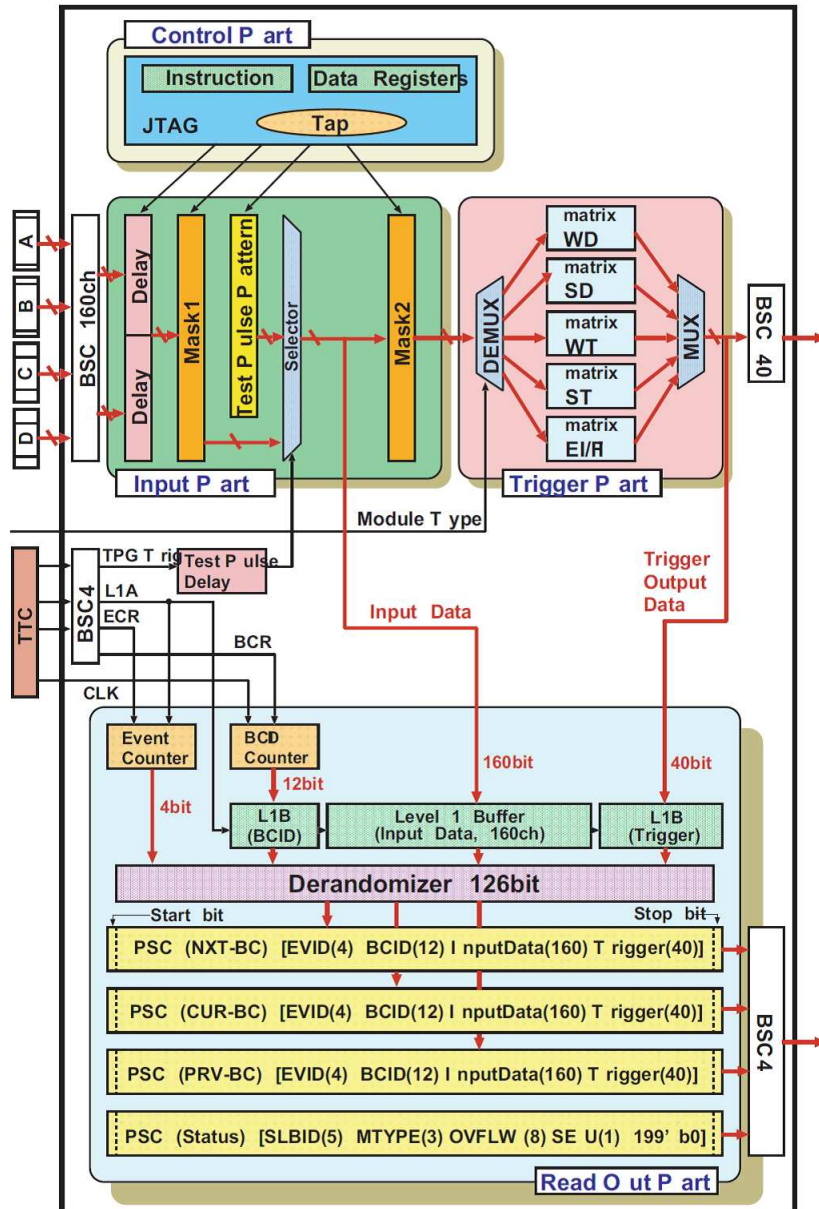


図 4.19: SLB ASIC のブロック図 [9]

連続したチャンネルで coincidence がとられた場合には、その中の 1 つのチャンネルを選択してトリガー判断に用いる。この機能をデクラスタリングと呼ぶ。図 4.20 にデクラスタリングについての説明の図を載せる。

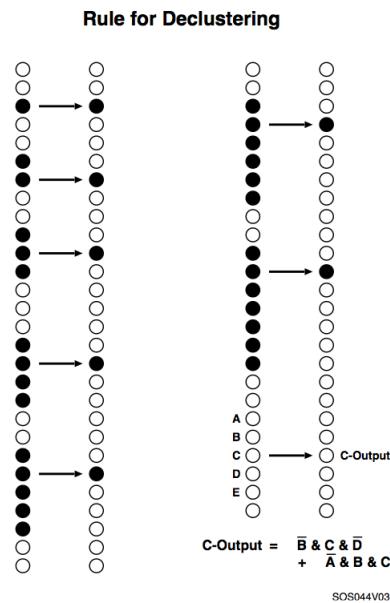


図 4.20: デクラスタリング [2]

- リードアウト系

Level1 トリガーの判定を受けたデータの読み出しを行う。主に LVL1 バッファとデランダムマイザにより構成される。チェンバーからのデータは L1A 信号がくるまで、トリガーデータとともに幅 212-bit、深さ 128 段のシフトレジスタに蓄えられる。212-bit の内訳は、入力データが 160-bit、トリガーパートの出力が 40-bit、バンチ・カウンタ値が 12-bit となっている。このデータは CTP からの L1A が与えられるまでの時間保持され、L1A 信号を受け取ると、該当バンチとその前後 1 バンチ分のデータをデランダムマイザにコピーされる。デランダムマイザは 3 バンチ分のデータを別々にシリアル変換し SSW に送る。

PS Board

PS Board には、PP ASIC、SLB ASIC、JRC⁶、eLMB が搭載される。図 4.21 に PS Board の構成図、図 4.22 に PS Board の写真を載せる。

PS Board では、ASD からの LVDS 信号を PP ASIC で受け、TGC が重なっている領域のダブルカウントを防ぐための OR 論理回路を通して、SLB ASIC へ送られる。SLB ASIC で、トリガー系とリードアウト系にわかれ、トリガー用データは HPT へ、読み出し用データは SSW へ、それぞれシリアルライズされて LVDS 信号で送られる。また、SSW あるいは eLMB から送られてくる PP/SLB を制御するための JTAG 信号は、JRC により PS Board に設置されている各 ASIC に分配される。さらに PS Board は、ASD Board に電源電圧と閾値電圧を供給する役割も果たす。PS Board は Service

⁶JRC (JTAG Routing Controller) : 2 系統の入力ポートと 7 系統の出力ポート、それらをコントロールするための 2 系統の JTAG ポートを持つスイッチングルータ

Patch Panel (SSP)⁷から Timing Trigger Control (TTC)によって供給される LHC clock や、各種 Reset 信号、テストパルスのためのトリガー信号等を受け取る。

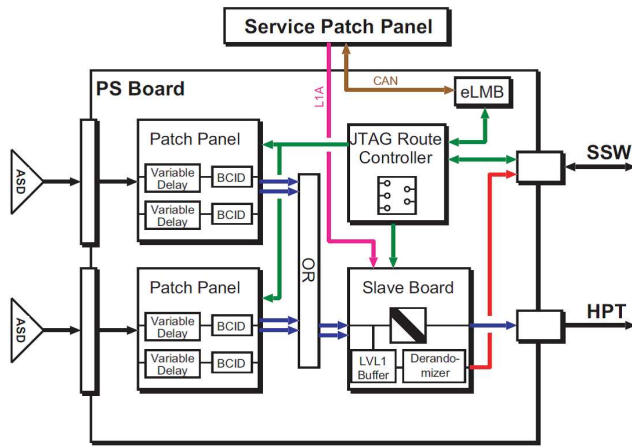


図 4.22: PS Board[9]

図 4.21: PS Board の構成図 [9]

PS Pack

PS Board と SPP は 1 つにまとめられる。これを PS Pack と呼ぶ。Triplet の前面と Doublet の後面に設置される。PS Pack は TGC1/12 ごとに 2 つ設置され、1 つの SPP と複数の PS Board (Triplet は 10 枚、Doublet は 17 枚) から構成される。

High-p_T Board (HPT)

HPT は Doublet と Triplet の情報を用いて High-p_T coincidence 情報を生成する。HPT はまず、PS Board から送られてきたシリアライズされた LVDS 信号のデータをパラレルに変換する。HPT では、SLB ASIC まで独立に処理されてきた Doublet と Triplet のデータを統合する。Triplet は 2 つの Doublet よりも衝突点に近く、Doublet 同士の間隔よりも離れた位置に設置されているため、トロイド磁場であまり曲げられることがなかった大きな p_T を持つミュオンを選別できる。HPT では wire と strip は独立に処理が行われ、 δR 、 $\delta\phi$ を出力する。出力データはシリアライズされ、オプティカル信号に変換され、光ファイバーで 90 ~ 100m 離れた実験室外のコントロールルーム (USA15) にある SL に送信される。

HPT は Endcap 領域用の wire と strip 用、Forward 領域用の計 3 種類作られる。Forward 領域用には 3 つ、Endcap 領域用には 4 つの HPT ASIC が搭載される。図 4.23 に wire 用 HPT のブロック図、図 4.24 に strip 用のブロック図を載せる。

Sector Logic (SL)

SL は TGC エレクトロニクスシステムのトリガーのデータが、最終的に集められるモジュールである。2 トリガーセクター分の信号を処理する。SL は主に R- ϕ coincidence、Pre track Selector、

⁷TTC の信号を受信する機能をもつ TTCr_q が搭載され、TTC から LHC clock、L1A、テストパルス等の信号を受け取り、それを PS Board に分配する役目を果たす。

Final track Selector から構成される。SL は HPT から送られてきたオプティカル信号を受け取り、電気信号に変換したのち平行変換する。そして、HPT Board まで独立に処理されていた R 方向と ϕ 方向の HPT 信号を用いて R- ϕ coincidence を行うことにより、ミュオン軌道の構築を行う。それらの軌道を SSC (Sub-Sector Cluster)⁸ ごとに 6 段階の p_T 閾値によって分類する。探索する物理により、実験中に閾値を自由に変更することが求められる。SL では閾値はシミュレーションから作られた δR 、 $\delta\phi$ の対応表であるコインシデンスマトリクスを変更することで行われ、これは書き換え可能な FPGA の LUT (Look UP Table) によって実装される。Pre track Selector では 6 段階の p_T 判定のそれぞれに用意され、それぞれ R の大きい順に 2 つの軌道を選択して、最大で計 12 軌道が Final track Selector に送られる。Final track Selector では、Pre track Selector から送られた 1 トリガーセクター分の軌道から、 p_T の大きいものを 2 つ選択して、6 段階の p_T 判定と位置情報を MUCTPI に送る。このロジックは FPGA に書き込まれる。SL が処理に使用した HPT からのデータと SL での処理の結果は、SL に搭載された SLB から USA15 に設置された SSW に送られる。図 4.25 にトリガーの流れ、図 4.26 に SL の写真を載せる。

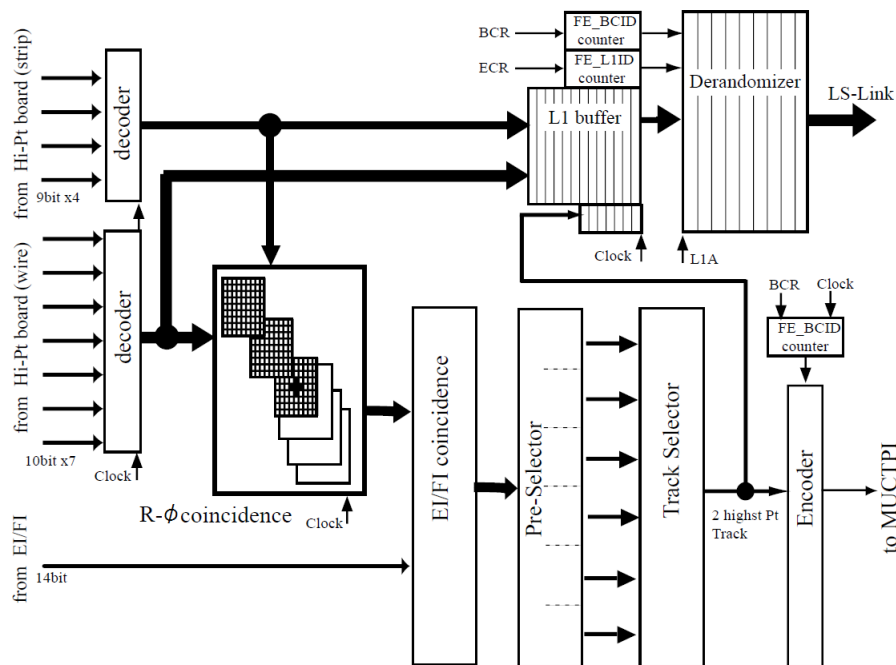


図 4.25: SL のブロック図 [2]

Star Switch (SSW)

SLB のリードアウトから送られてくるデータを圧縮し、ROD にデータを送る前にデータ量を減らして、効率よい読み出しができるようにする。1 つの SSW では最大 23 個の SLB のシリアルライズされたデータを受ける。SSW はまず、それを平行に変換し、データの圧縮を行い、フォーマットする。フォーマットされたデータはシリアルライズ化され、オプティカル信号に変換されて 90 ~ 100m 離れた実験室の外に設置されている ROD に送られる。

⁸R 方向に 2 つ、 ϕ 方向に 4 つのサブセクター (RoI) を集めたもの

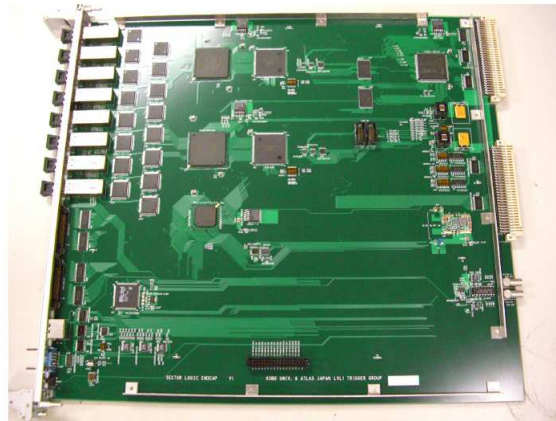


図 4.26: SL[11]

Read Out Driver (ROD)

TGC エレクトロニクスシステムの中で、リードアウトのデータが最終的に集まるモジュールである。ROD は複数の SSW からシリアルライズされた圧縮データをオプティカル信号として受け取り、それを電気信号に変換した後パラレル変換し、FIFO メモリに一時格納する。このデータをトリガー情報をもとに、同じイベントごとにまとめ、S-Link によって ROB に送信される。ROD はイベントの同定や、ヘッダー、トレーラーをつけるために、TTC からのトリガー情報が必要となる。

High-pT Star-switch Controller Board (HSC)

CCI とオプティカルケーブルで結ばれる。CCI からの HSC や SSW に対する命令を受け取り、命令に応じた処理を行い、その後 CCI へ応答を返す。

Control Configuration Interface Board (CCI)

ローカルホストからの命令を受け取り、命令専用レジスタに格納した後 HSC へと送信する。一方 HSC からの応答は、応答専用レジスタに格納されローカルホストが読み出す。

第5章 新しいTGCトリガーの流れ

第2章でも述べたように、LHCはアップグレードを予定している。そして、そのLHCのアップグレードに向けて、TGCトリガーもアップグレードしなければならない。この章からは、このLHCのアップグレードに向けたTGCトリガーのアップグレードについて述べる。

現在のLevel1トリガーのレイテンシは $2.5\mu\text{s}$ である。アップグレードに伴うトリガーの変更により、例えばInner stationやイベントトポロジーをLevel1トリガーに用いることにより、このレイテンシは延長しなければならないと考えられている。どれくらい延長されるかは、内部飛跡検出器やカロリメータなど様々な検出器について考慮する必要があり、まだ決定されていない。

もし、レイテンシが $3.2\mu\text{s}$ 以上になる場合は、現在のTGCフロントエンドエレキを交換する必要がある。現在のTGCでは $3.2\mu\text{s}$ までなら対応できるように作られているが、それ以上は対応できないからである。

この章では、レイテンシが $3.2\mu\text{s}$ 以上になった場合、考えられることについて述べる。

5.1 SLB以下をコントロールルームに置くこと

現在、TGCフロントエンドエレキは、TGC側面に直接取り付けられているASD以外に大きく3つの場所に分けられて設置されている。SLBなどの搭載されるPS BoardはTGCの側面に、HPTなどが搭載されたHSCクレートは、TGCを支えるビッグウィールという構造体の外縁に置かれる。これらは地下の実験ホール内に設置である。また、SLは地下の実験ホールから90~100m離れた場所にあるコントロールルーム(USA15)に設置されている。これらの設置場所を図5.1に示す。

地下の実験ホールにモジュールを設置する場合、強い放射線環境下に置かれるため、放射線耐性が求められる。半導体が放射線により受ける影響は主に、Total Ionizing Doze(TID)と呼ばれる蓄積効果によるものと、Single Event Effect(SEE)と呼ばれる確率的現象によるものの2つがある。TIDは特性の変化やデバイスの永久故障を引き起こし、SEEはメモリやレジスタ値が反転する現象などを引き起こす。この対策として、SLBやHPTでは多数決論理¹などによる放射線対策がとられている。

アップグレードに合わせてTGCフロントエンドエレキを交換しなければならないとすると、ASD、PPの後、光ファイバーを用いて情報をすべてコントロールルームへ送るようにして、SLB以下をコントロールルームにまとめて置くことが考えられる。このようにSLBとHPTをSLと同じようにコントロールルームに置くことによって、SLB、HPTもこのような放射線耐性の必要がなくなり、新しいSLB、HPTの開発がより簡単になる。また、実験が始まってからは地下の実験ホールには入れなくなるが、コントロールルームにSLB以下を設置すると、モジュールの点検・交換などをいつでも行えるというメリットもある。

この場合、SLBやHPTでcoincidenceがとられる前の情報をすべてコントロールルームに送るため、データ転送量が多くなる。そこで、PPからSLBへデータを送るために必要なケーブルの本

¹多数決論理：同時に2つ以上のレジスタ値が反転しない限り正しい値を出す、という仕組み。

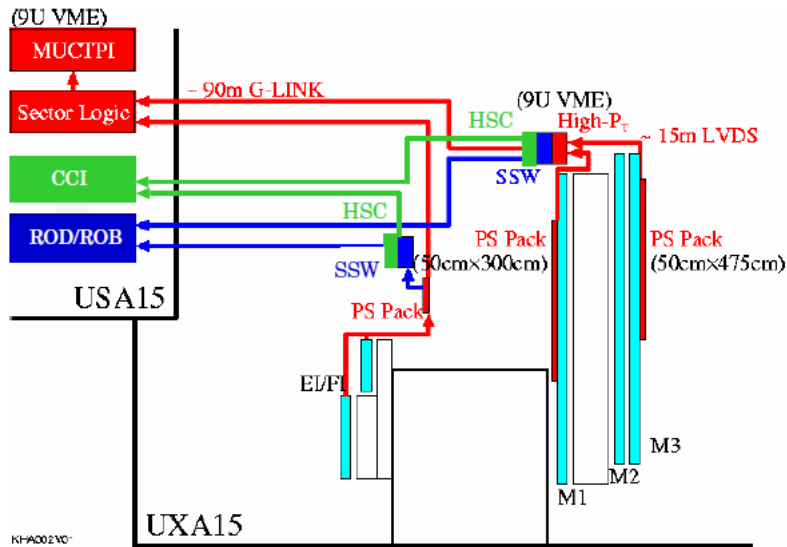


図 5.1: TGC エレクトロニクスの配置 (R-Z 断面)[11]

数がどれくらいかを見積もった。今回は見積もる際に 4Gbps^2 のケーブルを用いて計算した。結果として、両サイド合わせて 3500 本ほどのケーブルがあればよいとわかった (Inner station については考えていない)。計算結果を表 5.1 にまとめる。

	(MHz)	wire	strip
Forward Doublet		288	96
Triplet		192	48
Endcap Doublet		1248	672
Triplet		672	288
Total		3504	

表 5.1: 必要なケーブル数. Aside と Cside の両サイドを合わせた値.

5.2 HPT と SL を 1chip に

SLB 以下をコントロールルームに移すことを考えると、HPT coincidence を行う HPT と $R-\phi$ coincidence を行う SL を分けて考える必要がなくなる。そこで、現在はそれぞれ別々の chip になっているこれらを、1つの chip にまとめることができる。SLB は ReadOut の機能も持ち複雑なため、今回は 1つにまとめることは考えない。

現在の HPT から SL への接続は、データが HPT から出力されるときに 1つにまとめられ、SL に入力された時に該当する箇所に分配される、という流れになっている。HPT と SL を 1つにまとめることにより、HPT の出力を直接 SL の該当する部分へ接続することができる。このようにスムーズに接続することにより、計算に必要な時間を短縮することもできると考えている。

²Gbps:1 秒間に何 Gbit のデータを通信できるか、という単位

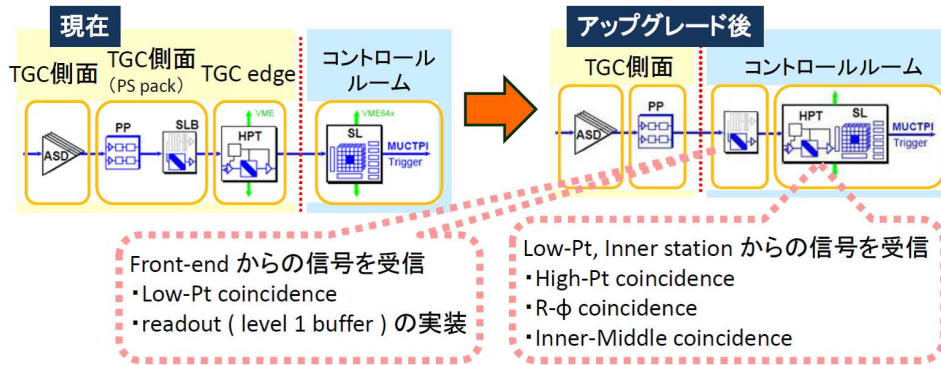


図 5.2: 新しいフロントエンドエレキ

HPT の機能も備えた SL では、wire で Low-Pt coincidence がとれたものに、順次 3 種類の coincidence をとっていく流れとなる。図 5.3 にその流れを載せる。入力大きく分けて、wire、strip それぞれで Low-Pt coincidence がとれたものと、Inner station から送られてくる情報 (R, ϕ) の 3 種類である。coincidence は、Hi-pT coincidence、R- ϕ coincidence、Inner-Middle coincidence(dL カット) の順にとられる。SL で新しく入ってくる情報は、まず distributor を通り該当する RoI に振り分けられる。その後、RoI ごとに Inner-Middle coincidence がとられる。

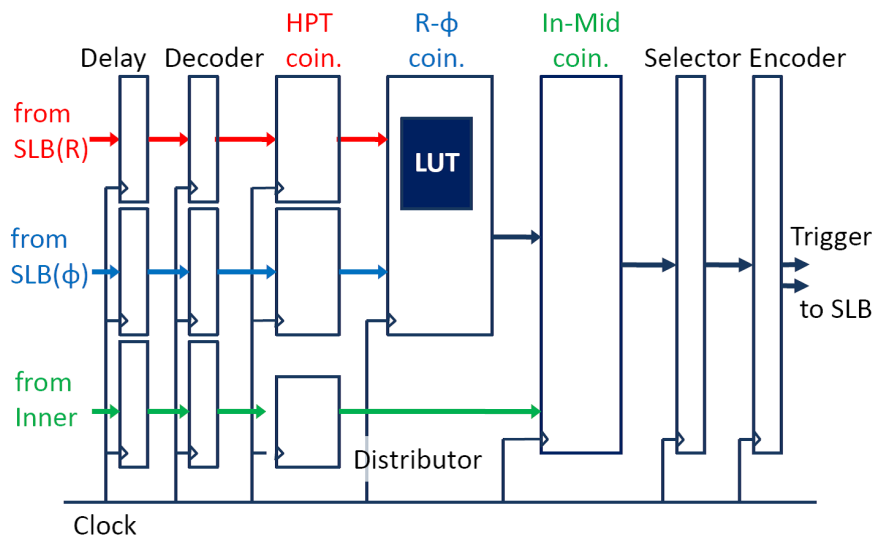


図 5.3: 新しい SL

第6章 LHC アップグレードに向けた Level1 TGC トリガー

この章では、LHC のアップグレードが Level1 TGC トリガーに及ぼす影響¹と、その対策として Inner station を使ったトリガーを用いることについて述べる。

6.1 アップグレードで予想されること

6.1.1 TGCのトリガーレート

現在のデザインルミノシティ $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ でのエンドキャップミュオントリガーのトリガーレートは、 $p_T=20 \text{GeV}/c$ の threshold で 9.5kHz である。これは、現在のエンドキャップトリガーに要請されるレート約 20kHz を満たしている。しかし、このまま LHC がアップグレードしてルミノシティが 10 倍になると、単純に考えてトリガーレートも 10 倍の 95kHz になる。このままでは要請されるレートを大幅に超えてしまうので、トリガーレートを落とすためにエンドキャップミュオントリガーをアップグレードする必要がある。

ルミノシティ $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ において、現在のトリガーで予想されるエンドキャップのトリガーレート (threshold $p_T=20 \text{GeV}/c$) の内訳は、表 6.1 のようになっている。

process	trigger rate(kHz)
total	94.6
π/K decays	28.8
bottom	30.1
charm	35.1
top	0.00488
W	0.393

表 6.1: ルミノシティ $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ で予想される Level1 エンドキャップミュオントリガーのトリガーレートの内訳

また、微分断面積は図 6.1 のようになっている。

図 6.1 より、 $p_T=20 \text{GeV}/c$ では π/K decays から生じるミュオンはそれほど多くない。表 6.1 に示すように、 π/K decays からの寄与がトリガーレートに大きく効いてくるのは、 $p_T=20 \text{GeV}/c$ 以上と誤って判断されるミュオンが多いためと考えられる。そのためレートを落とすためには、まずはこの π/K のミュオンを落とすことが重要となる。しかし、この判断をするためには、現在の TGC を用いるだけでは運動量分解能が足りない。そのため、内部飛跡検出器や MDT など、他の検出器も Level1 トリガーに使用することが考えられている。

¹ここでは、アップグレードされた後のデザインルミノシティの値を $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ として計算に用いている。

また、 b 、 c クォークから生じるミュオンは微分断面積も大きいので、トリガーレートも妥当である。しかし、興味のある事象は t クォークや W や Z 、 $Higgs$ 、 $SUSY$ などにあるので、 b 、 c クォークから生じるミュオンはバックグラウンドとなり、落とす必要がある。特に、例えば $W \rightarrow \mu\nu$ に見られるような *isolated* ミュオンが重要であり、イベントトポロジーを考えることが重要となる。そのため、Level1 トリガーにカロリメータや内部飛跡検出器を使用することも考えられている。

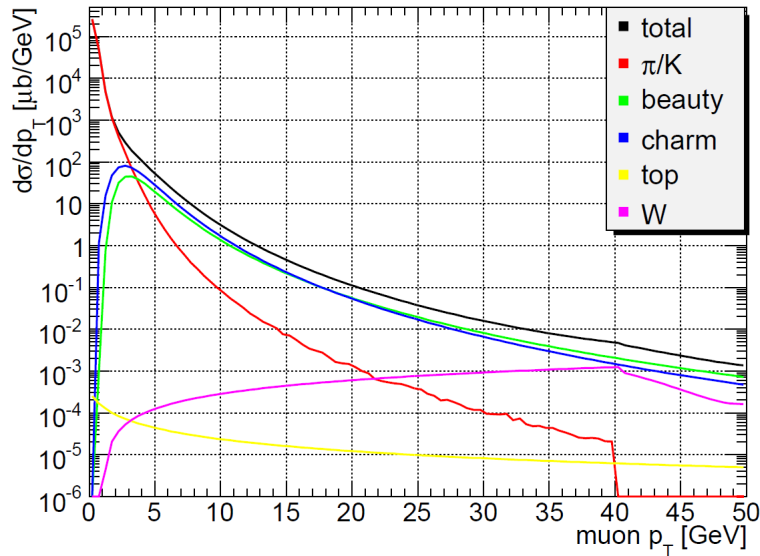


図 6.1: 微分断面積 [12]

6.1.2 coincidence をとる範囲の変更

ここで、アップグレード後に *Low- p_T coincidence*、*High- p_T coincidence* において、 δR 、 $\delta\phi$ を考慮する範囲について考え直す。これは、現在はこれらの *coincidence* は、 p_T の低いものも考えられるように設計されているが、アップグレード後は主に $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上のものが重要になってくるためである。

現在の *Low- p_T coincidence* の範囲は、 R 方向には-7 から+7 まで、 ϕ 方向には-3 から+3 まで、*High- p_T coincidence* の範囲は、 R 方向には-15 から+15 まで、 ϕ 方向には-7 から+7 までとなっている。

実際にこれだけの範囲が必要かどうかを確認するため、*Low- p_T coincidence*、*High- p_T coincidence* をとった後の $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオンの δR 、 $\delta\phi$ の分布をそれぞれモジュールごとに調べた。*Low- p_T coincidence* の結果を図 6.2 に、*High- p_T coincidence* の結果を図 6.3 に載せる。それぞれ、ヒストグラムの上左の番号がモジュール番号に対応している。このモジュール番号の定義については、第 4 章の図 4.8 を参照。

図 6.2、図 6.3 より、 $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上のミュオンでは、現在考慮している δR 、 $\delta\phi$ の範囲すべてを考慮する必要はないことがわかる。図 6.2 では中心補正がされていないので中心の値は 0 ではないが、中心からの広がりには R 方向には δR が-3 から+3 まで、 ϕ 方向には $\delta\phi$ が-1 から+1 まででおさまっている。図 6.3 でも中心補正がされていないので中心の値は 0 ではないが、中心からの広がりには R 方向には δR が-7 から+7 まで、 ϕ 方向には $\delta\phi$ が-3 から+3 まででおさまっている。つまりアップグレード後に考慮しなければならない範囲は、*Low- p_T coincidence* では、 R 方向には δR

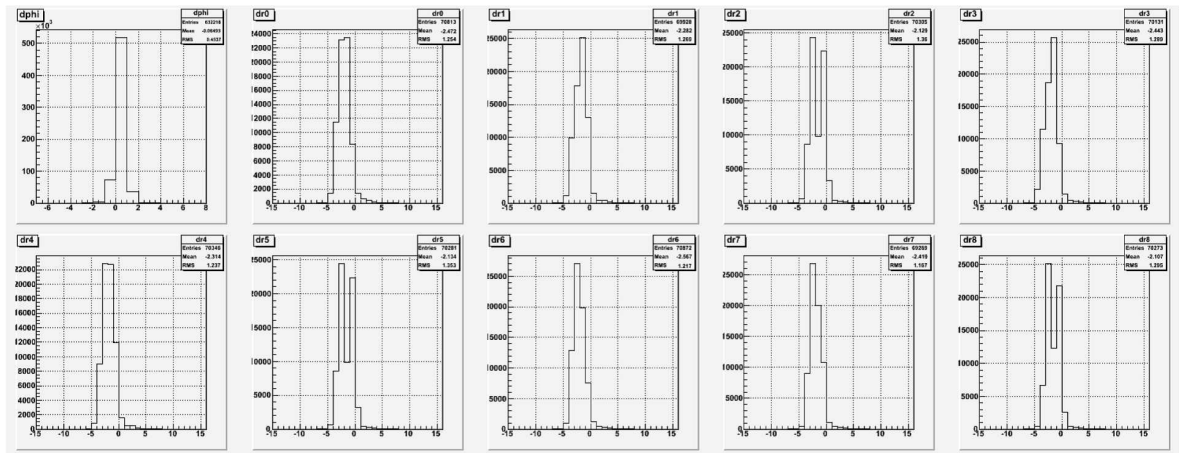


図 6.2: Low- p_T coincidence をとった後の δR と $\delta\phi$ の分布. ヒストグラムの左上の番号はモジュール番号に対応する. 中心補正はされていない.

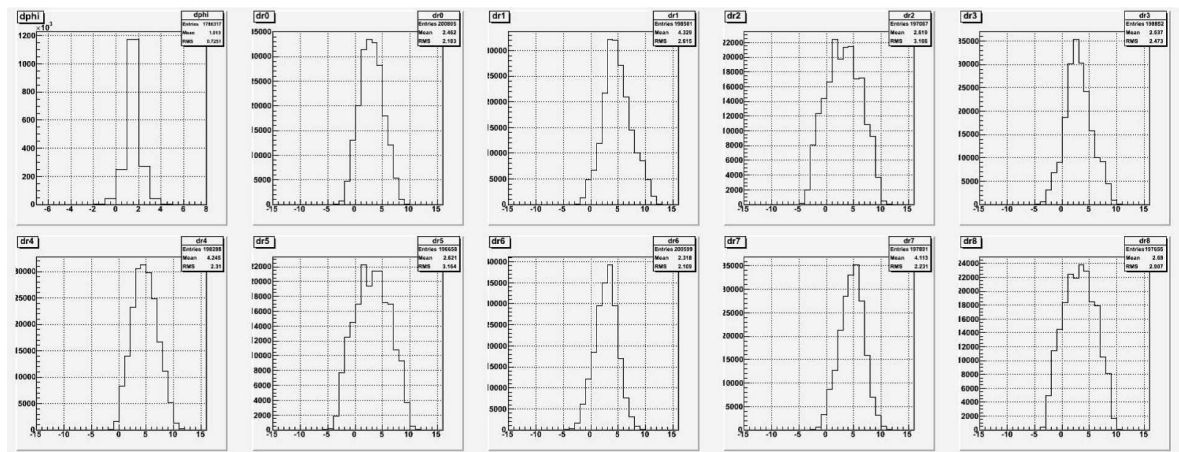


図 6.3: High- p_T coincidence をとった後の δR と $\delta\phi$ の分布. ヒストグラムの左上の番号はモジュール番号に対応する. 中心補正はされていない.

が-3から+3までの7ch、 ϕ 方向には $\delta\phi$ が-1から+1までの3ch、High- p_T coincidenceでは、R方向には δR が-7から+7までの15ch、 ϕ 方向には $\delta\phi$ が-3から+3までの7chに変更できる。

6.1.3 accidental hitの影響

トリガーシステムの性能は、実験場でのバックグラウンドの影響を受ける。実験場には衝突により発生した低エネルギーの中性子やガンマ線が漂っている。また、ビームラインから広がっているビームハローミュオンもある。これらの粒子が検出器と反応して accidental hit となる。

accidental hit には、TGC1層のみで検出される uncorrelated hit と、TGCを2層以上貫きコインシデンスのとれる correlated hit がある。主に中性子やガンマ線は uncorrelated hit、ビームハローミュオンは correlated hit を起こす。これらの hit はそれだけではトリガーされることはない。しかし、低い p_T のミュオンなど他の粒子によるヒットと偶発的なコインシデンスがとれた場合、トリガーレートに影響する。そのためトリガーレートを考える際は、accidental hit の影響も考える必要がある。

表 6.2 にルミノシティ $10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ における、TGC の layer ごとの accidental hit レート/octant を載せる。また、表 6.3 に、表 6.2 の accidental hit レートを利用して計算した、ルミノシティ $10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の場合の accidental hit の関わるトリガーレートを載せる。

(MHz)	M1	M2	M3
uncorrelated	51	40	40
correlated	16	13	13

表 6.2: layer ごとの accidental hit レート/octant

(MHz)	wire	strip
Low-Pt	19	20
High-Pt	0.43	2.3

表 6.3: accidental hit の関わるトリガーレート

以下、表 6.3 の accidental hit の関わるトリガーレートを計算するのに用いた方法について述べる。まず、accidental hit が関わって Low - p_T coincidence がとれるもののレートを、

$$(M3 \text{ の hit レート}) \times (M2 \text{ の hit レート}) \times \frac{\text{coincidence をとるチャンネル数}}{M2 \text{ のチャンネル数}} \times \frac{1}{40\text{MHz}} \quad (6.1)$$

と計算した。hit レートは表 6.2 の correlated hit レート、または accidental hit (correlated hit + uncorrelated hit) レートを用いる。coincidence をとるチャンネル数はアップグレード後について考え、6.1.2 で述べたように、Low - p_T の wire で 7ch、 ϕ 方向で 3ch として計算する。

今回、Low - p_T coincidence がとれるものとして、以下の 3 つの場合を考えた。

- A. M3 に correlated hit、M2 に accidental hit がある場合
- B. M2 に correlated hit、M3 に accidental hit がある場合
- C. M2、M3 両方に correlated hit がある場合

こうして求められた値から、 $A + B - C$ したものを最終的な値 $R_{\text{Low-p}_T}$ とする。

次に、accidental hit が関わって High - p_T coincidence がとれるもののレートを、

$$R_{\text{Low-p}_T} \times (\text{M1 の hit レート}) \times \frac{\text{coincidence をとるチャンネル数}}{\text{M1 のチャンネル数}} \times \frac{1}{40\text{MHz}} \quad (6.2)$$

と計算した。hit レートは Low - p_T と同様に表 6.2 の値で、wire の時は correlated hit レート、strip の時は accidental hit レートを用いる²。coincidence をとるチャンネル数も Low - p_T と同様にアップグレード後について考え、6.1.2 で述べたように、High - p_T の wire で 15ch、strip で 7ch として計算する。

今回、High - p_T coincidence がとれるものとして、以下の 2 つの場合を考えた。

D. accidental hit のために Low - p_T coincidence がとれたときに、M1 の wire に correlated hit、strip に uncorrelated hit がある場合

E. accidental hit を含まない Low - p_T coincidence がとれたときに、M1 の wire に correlated hit、strip に uncorrelated hit がある場合

こうして求められた値から、 $D + E$ したものを最終的な値 $R_{\text{High-p}_T}$ とする。

図 6.4 にトリガーレートの計算に用いた 5 つのパターンを示す。

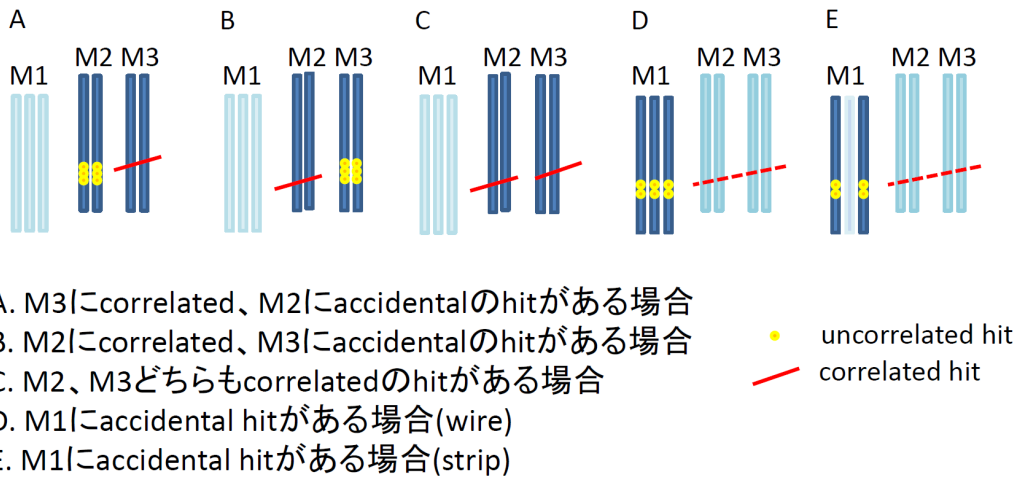


図 6.4: トリガーレートの計算

High- p_T coincidence のとれたものに関しては、最終的に wire と strip の情報を統合する $R-\phi$ coincidence をとる。このとき、

$$(\text{wire の hit レート}) \times \frac{2\text{ch}(\text{coincidence 幅})}{32\text{ch/layer}(1\text{layer あたりのチャンネル数})} \times 2\text{layers} \quad (6.3)$$

より、 $R-\phi$ coincidence がとれるものを約 1/10 と計算すると、accidental hit の関わるフェイクトリガーレートは約 50kHz と見積もられる。ルミノシティが $10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ になったときの、accidental hit を含まない場合のトリガーレートは 6.1.1 より約 95kHz であった。そのため、accidental hit も含んだ全体のトリガーレートは約 145kHz と、要請されるレートである約 20kHz と比べて、とても大きくなってしまふことがわかる。

²M1 の wire では 3 層中 2 層 (2 out-of 3)、strip では 2 層中 1 層 (1 out-of 2) の coincidence が要求されるため

p_T 判定は δR 、 $\delta\phi$ を用いて行われる。accidental hit の影響で、正しい p_T でトリガーされる効率がどれくらい変化するかを調べた。 $p_T=6\text{GeV}/c$ 、 $20\text{GeV}/c$ のミュオンサンプルと、それぞれに accidental hit を混ぜたサンプルを用意し、accidental hit によって $p_T=6\text{GeV}/c$ のミュオンを間違つて $p_T=20\text{GeV}/c$ と判断してしまう、あるいは $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオンを $20\text{GeV}/c$ 以下と判断してしまうものがどれくらいあるか、についてシミュレーションで調べた。この結果を表 6.4 にまとめる。

この結果から、 $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオンにおいて、accidental hit を考慮した場合としない場合の差は、0.845% と小さいことがわかる。また、 $p_T=6\text{GeV}/c$ のミュオンのトリガー効率においての差も、0.0236% ととても小さい。

	トリガー効率 (%)
$p_T=6\text{GeV}/c$ accidental hit あり	0.9796
$p_T=6\text{GeV}/c$ accidental hit なし	0.9560
$p_T=20\text{GeV}/c$ accidental hit あり	88.61
$p_T=20\text{GeV}/c$ accidental hit なし	89.46

表 6.4: accidental hit がトリガー効率に与える影響

6.2 新しいTGCトリガーシステム

6.2.1 Inner station の使用

TGC の Inner station はエンドキャップトロイダル磁石の前に置かれている。しかし現在、TGC の Inner station はトリガーには使われていない。この TGC Inner station と、その内側の η が大きい領域に置かれている CSC は、アップグレード時に Level1 トリガーで用いるために新しい検出器に置き換えられる予定である。その新しい検出器はまだ決定されていないが、候補としては、直径を小さくしてドリフト時間を短縮させた MDT や、MicroMEGAS、 μ -PIC などがある。

Inner station では、位置 (R 、 ϕ) と、ミュオンが Inner station を通過したトラックの角度 (θ_{trk}) を測定する。ここで測定された角度を用いることで、ミュオンの磁場による曲がりを正確に測定することができる。しかし、(1) Middle station の TGC の角度分解能が悪いことから、曲がりを正確に測定するためには MDT も用いなければならないこと、(2) 磁場が複雑で、その計算を Level1 トリガーに組み込むのは困難であること、の二点からミュオンの磁場による曲がりを Level1 トリガーで使用することは不可能である。しかし、TGC Middle station で検出されたミュオンが Inner station に hit を残したかどうかを確認すれば、少なくともそのミュオンが衝突点から来たものかどうかを知ることができる。このような理由から、ここでは TGC Middle station で R - ϕ coincidence がとられたものが衝突点から来たものかどうかを判断するために、ミュオンがトロイダル磁場で曲げられる前の段階の情報を使用することを考える。

本研究では、Inner station の検出器から得られる情報である R 、 ϕ 、 θ_{trk} から $d\theta$ 、 dL を求め、これをアップグレード後の Level1 TGC トリガーに使用することを考える。 $d\theta$ は、Inner station で測られた角度 θ_{trk} と、Inner station でミュオンが検出された位置と IP を結ぶ直線の間の角度 θ_{pos} との差である ($d\theta = \theta_{\text{trk}} - \theta_{\text{pos}}$)。 dL は、ミュオンが hit した RoI の中心と Inner station で検出された場所の 2 点間の距離である ($dL = \sqrt{d\phi^2 + d\eta^2}$ 、 $d\phi$ 、 $d\eta$: RoI の中心 (η_{RoI} 、 ϕ_{RoI}) と Inner station で検出された場所 (η_{in} 、 ϕ_{in}) の (η 、 ϕ) の差)。

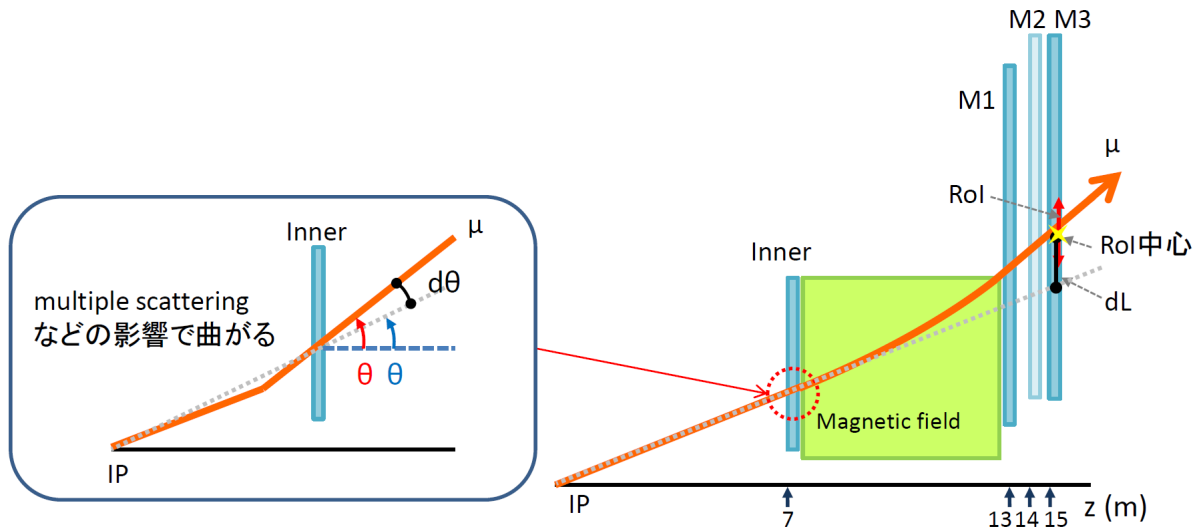


図 6.5: Inner Station のトリガーアルゴリズム

Inner station を用いたトリガーロジックを簡単に説明すると、次のような流れになる。Inner station で検出された位置 (R) に応じて、求められた角度の差 ($d\theta$) が決められた範囲内のものを選別する。ミュオンは Inner station にたどり着く前に、マルチプルスキャタリングの影響を受けたり、漏れ磁場の影響を受けたりして曲げられることがある。ここまですごく大きく曲げられたものに関しては、Inner station の段階で落としてしまう仕組みである。そして、選別されたあとの曲がりの少ないものの情報 (R , ϕ) は SL へ送られ、R- ϕ coincidence の後に RoI 単位で coincidence がとられる。この段階で、R- ϕ coincidence がとれているものでも、衝突点の方向からきていないが coincidence がとれてしまっているものを、Inner station に対応する情報があるかどうかを見て落とすことができる。また、Inner station で対応する箇所にミュオンが検出されたとしても、得られた値 dL がある値よりも大きいものは落とされる。この $d\theta$ と dL のカットを組み込むことにより、より正しい p_T 値を求めるといふ仕組みである。

以下に Inner station での $d\theta$ のカットと、SL での dL のカットについてより詳細に述べる。その後、この Inner station を Level1 トリガーに組み込んだ効果についての考察を述べる。

Inner station でのカット

Inner station では、Inner station で検出されたミュオンの角度 θ_{trk} と、Inner station でミュオンが検出された位置と衝突点を結ぶ直線との角度 θ_{pos} の差 $d\theta$ を用いてカットする ($d\theta = \theta_{\text{trk}} - \theta_{\text{pos}}$)。Inner station で検出した位置の $\eta(R)$ の値によって、 $d\theta$ の幅を変えてカットしたい。

実際のデータを用いた解析と MC シミュレーションを図 6.6 に載せる。上段が $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオンを用いた MC シミュレーション、下段が実データで $p_T=20\text{GeV}/c$ トリガーをかけた Combined Muon³ の解析の結果である。図 6.6 より、 $\eta < 1.4$ のとき $|d\theta| < 20\text{mrad}$ 、 $\eta > 1.4$ のとき $|d\theta| < 10\text{mrad}$ でカットできることがわかる。

Inner station は図 6.7 で示されるように、 $\eta < 1.4$ の範囲がバレルトロイドの設置されている領域にはみ出して設置されている。そのため $\eta < 1.4$ の範囲では、バレルトロイドの磁場の影響を受けて $|d\theta| < 20\text{mrad}$ まで広がってしまう。

³内部飛跡検出器とミュオン検出器でマッチングのとれたミュオンのトラック

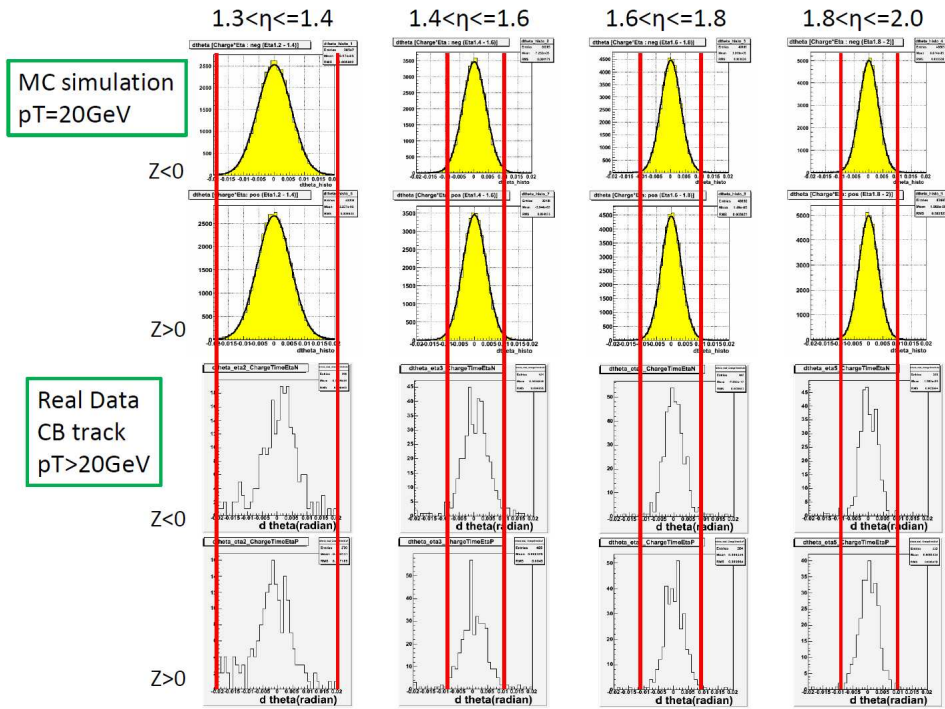


図 6.6: Inner station における $d\theta$. 上段が $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオンの MC シミュレーション、下段が実データの Combined track.

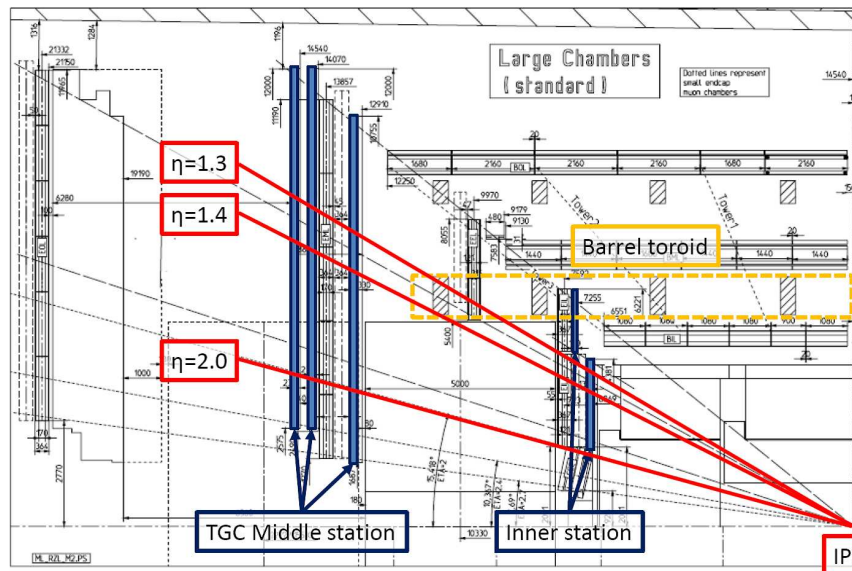


図 6.7: Inner station とバレルトロイドとの位置関係

SLでのカット

SLではR- ϕ coincidence がとれたものに対して、RoI 単位ごとに Inner station との coincidence を考える。ここでは、ミュオンが hit した RoI の中心と Inner station で検出された場所の2点間の距離である dL を用いる ($dL = \sqrt{d\phi^2 + d\eta^2}$)、 $d\phi, d\eta$: RoI の中心 (η_{RoI}, ϕ_{RoI}) と Inner station で検出された場所 (η_{in}, ϕ_{in}) の (η, ϕ) の差)。

実際のデータを用いた解析と $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオンを用いた MC シミュレーションの例を図 6.8 に載せる。左から、MC シミュレーション、Combined track、Level1 トリガーで $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上と判断されたトラックを表している。これらのヒストグラムは、 $Z<0, 1.4<\eta\leq 1.6$ の範囲のものである(これらのヒストグラムでは、Inner station での $d\theta$ のカットは考慮されていない)。MC シミュレーションと Combined track では、ほぼ $dL=0.1$ 以下におさまっているのに対して、Level1 トリガーで $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上と判断されたトラックではかなり広がっていることがわかる。この広がり部分は、衝突点以外からやってくるミュオンを示す。赤い線は今回カットに用いた $dL=0.1$ を表している。 dL でカットすることにより、この衝突点以外からやってくるミュオンを落とすことができる。

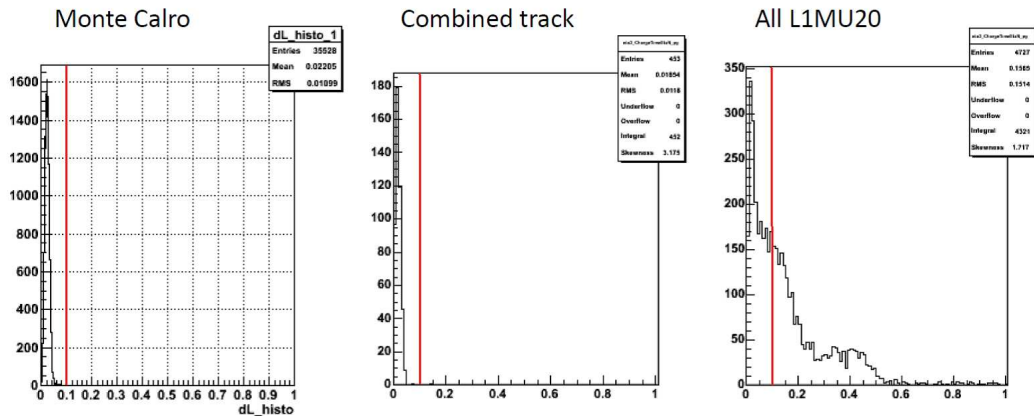


図 6.8: dL の比較. $Z<0, 1.4<\eta\leq 1.6$ の範囲.

この dL のカットを考えると、 dL の efficiency が十分に得られる値でカットを行いたい。この dL のカットを用いるとき、まずは R- ϕ coincidence がとれている RoI に、対応する Inner station からの情報があるかどうかを判断する。Inner station で検出した位置から、Middle station で検出した位置のどの範囲を考慮する必要があるかを以下に述べる。Inner station で検出された位置と Middle station で検出された位置の差を、R 方向と ϕ 方向について、 $p_T=20\text{GeV}/c$ のミュオンを用いてそれぞれ MC シミュレーションで調べた。

図 6.9 に考慮すべき R 方向の範囲を載せる。縦軸に考慮すべき R の範囲 (mrad)、横軸に RoI の番号として、Endcap と Forward を合わせて外側から内側へ一列分通し番号をつけたものとする (Inner station がないところは省略している)。図 6.9 より、R 方向は η によって差があるけれども、Inner station で検出された位置から 30mrad ほどの幅を Middle station で見てやればよさそうであることがわかる。RoI ひとつの大きさは、R 方向に 6 ~ 16mrad ほどである。よって、R 方向には Inner station で測られた位置が差す RoI から 2 つ隣の RoI (合計 5 個の RoI) まで見てやればよい。

ϕ 方向には Inner station で測られた位置から、50mrad ほどの幅を Middle station で見てやればよさそうであることがわかった。RoI ひとつの大きさは、 ϕ 方向には Endcap で約 33mrad、Forward で約 65mrad である。 ϕ 方向には Inner station で測られた位置が差す RoI の両隣の RoI (合計 3 個の

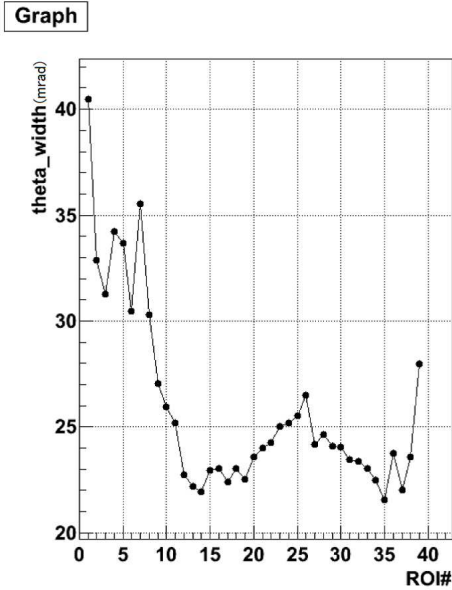


図 6.9: 考慮する R 方向の範囲. 縦軸に考慮すべき R 方向の範囲 (mrad)、横軸に RoI の番号として、Endcap と Forward を合わせて外側から内側へ一列分通し番号をつけたものをとる. Inner station がないところは省略している.

RoI) まで見てやればよい。

Inner station を Level1 トリガーに組み込んだ効果

ここでは、実データを用いて Inner station を Level1 トリガーに組み込んだ効果について述べる。

図 6.10 は、Level1 で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上のトリガーが発行され、内部飛跡検出器とのマッチングがとれたうえで $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上と判断された Combined track についてのヒストグラムである。横軸に η 、縦軸にイベント数をとっている。 η の範囲は 1.3 から 2.0 までで、TGC の Endcap の領域をカバーしている。白が $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上と判定されたイベントすべて、赤が Inner station に segment⁴があることを要求しそれが満たされているもの、青が Inner station に segment⁴があり、かつ Inner station での cut⁵をかけたもの、緑がそれにさらに dL の cut⁶をかけたものを表している。

図 6.10 で考えているのは、内部飛跡検出器も合わせて考えられたトラックであり、これが衝突点からくる signal となるミューオンのトラックに当たる。図 6.10 を見ると、ほとんどのトラックにおいて、対応する Inner station の segment が存在することがわかる (白と赤がほとんど一致していることからわかる)。つまり、Inner station に segment を要求することで、ほしいミューオンを落とすことはない。またこのトラックでは、6.2.1 の MC simulation でも確かめたとおり、 $d\theta$ カットではほとんど落ちないはずである。しかし、 $d\theta$ カット、 dL カットで少し落ちているイベントがある。この理由の一つとしては、磁場の影響が考えられる。 η の範囲が 1.4 から 1.6 あたりの磁場は、Endcap と Forward の遷移領域で打ち消しあって磁場が弱くなっている領域である (第 3 章図 3.7 を参照)。またもう 1 つの理由としては、Muon Inner segment の reconstruct の性能が悪いことも考えられる。ミューオンスペクトロメータのトラッキング効率は $\eta=1.2$ 付近でとても悪くなっている。

⁴MDT の hit の集まりから考えることのできる track

⁵ $\eta < 1.4$ のとき $|d\theta| < 20\text{mrad}$ 、 $d\eta > 1.4$ のとき $|d\theta| < 10\text{mrad}$

⁶ここでは $dL < 0.1$

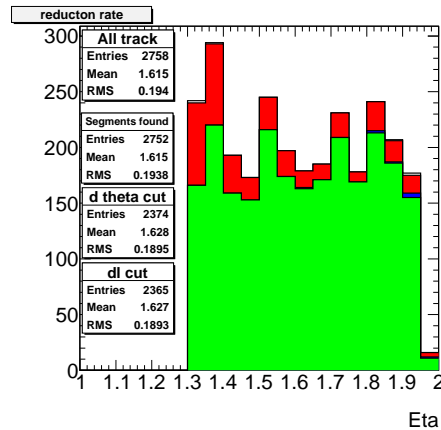


図 6.10: reduction の効果 (Combined track(CB)).

次に、Inner station に segment を要求すること、Inner station に $d\theta$ の cut をかけること、によってどれほどイベントを減らせるかについて調べた。図 6.11 は、ミュオン検出器で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上のトリガーが発行されたトラック⁷、についてのヒストグラムである。図 6.10 と同様に、横軸に Eta、縦軸にイベント数をとっており、 η の範囲は 1.3 から 2.0 までで、TGC の Endcap の領域をカバーしている。また、白が $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上と判定されたイベントすべて、赤が Inner station に segment があることを要求しそれが満たされているもの、青が Inner station に segment があり、かつ Inner station で $d\theta$ の cut をかけたもの、緑がそれにさらに dL の cut をかけたものを表している ($d\theta$ のカット、 dL のカットの条件は図 6.10 と同じ)。

図 6.11 では、内部とのマッチングをとる前のトラックを見ているので、衝突点以外からくるミュオンのトラックも混じっている。図 6.11 を見ると、Inner station に segment を要求することで、衝突点以外からやってくるミュオンを大幅に落とすことができていることがわかる。また、Inner station での cut をかけることで、segment を要求するだけよりもさらにイベントを落とすことができる。さらに dL のカットをかけることによって、Inner station のカットだけでは落とすことのできなかつたものを落とすことができる。ことがわかる。

表 6.5 に図 6.10、図 6.11 の内容を数値化してまとめたものを載せる。Inner station に segment があることを要求するだけでも、Level1 で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上でトリガーされたもののうちの約 30% まで落とせ、さらに $d\theta$ のカットをかけることでもとの約 10%、 dL のカットをかけることでもとの約 8% にまで落とすことができるという結果が出された。ただし、ここで all L1 MU20 は、実際には Level1 で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上でトリガーされたものすべてをとっているわけではなく、HLT で選別された後の値を使っている。本来落とせる数はもっと多いはずである。つまり最悪でも、Level1 で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上でトリガーされたもののうちの約 30% まで落とせ、さらに $d\theta$ のカットをかけることでもとの約 10%、 dL のカットをかけることでもとの約 8% にまで落とすことができる。

⁷用いたトリガーチェーンは EF_mu20_MOnly。これは Level1 で $p_T=10\text{GeV}/c$ 以上、Level2 のミュオン検出器のみで $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上、EF のミュオン検出器のみで $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上のトリガー判定がなされるものである。本来は Level1 で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上のトリガーが発行されたトラックすべてを選択したいが、今回は簡単のためにこのトリガーチェーンを用いている。そのため、ここで用いるトラックの数は、Level1 で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上のトリガーが発行された本来の数よりも少ない数になっている。

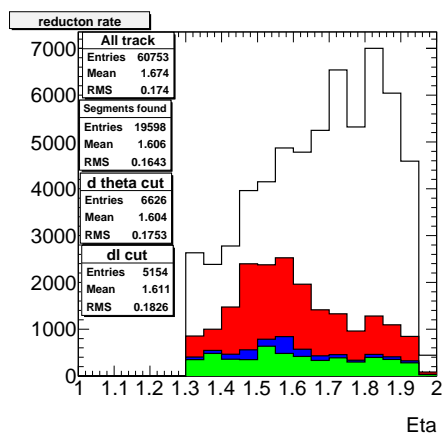


図 6.11: reduction の効果(ミュオン検出器で $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上でトリガーされたもの(all L1 MU20))

	all	segment	$d\theta$	dL
all L1 MU20	60753	19598(32.2%)	6626(10.9%)	5154(8.5%)
CB	2758	2752(99.8%)	2374(86.1%)	2365(85.7%)

表 6.5: reduction の効果

第7章 アップグレードに向けたSLの実際的设计

7.1 現在の仕様からの変更点

SLをアップグレードに向けて新しく設計する際、現在のものから仕様を変更した方がよい点が、大きく分けて以下の3つある。

1つ目は、HPT coincidenceの組み込みである。これは第5章で述べたように、レイテンシが $3.2\mu\text{s}$ 以上になった場合に考えられる。またその場合、stripのtripletのSLBはデクラスタリングをなくすことが考えられているので、これも考慮に入れなければならない。

2つ目は、 $R-\phi$ coincidenceのLUTのサイズの変更である。これも第5章で述べたように、アップグレード後は p_T が $p_T=20\text{GeV}$ 以上のHigh- p_T ミューオンに注目するため、Low- p_T ミューオンも考えることのできるように設計してある現在のSLのLUTを考え直すことができる。

3つ目は、Inner stationからの情報を用いたcoincidenceの組み込みである。これは第6章で述べたように、Inner stationとMiddle Stationの位置情報を用いたdLのカットである。

以下では、これらについてひとつずつ述べていく。

7.1.1 HPT coincidenceの組み込み

第5章で述べたように、レイテンシが $3.2\mu\text{s}$ 以上になった場合、TGCフロントエンドエレキの交換の際にHPTをSLに組み込むことが考えられる。HPTをSLと同じchipにまとめることにより、HPT-SL間のデータのやり取りがスムーズになり、所要時間も短縮されるというメリットがある。

またこの場合、SLBから信号を受け取ることになるので、SLBの出力の方法の影響を受ける。SLBの出力に合わせた設計が必要である。現在、クロストーク対策としてstripのtripletのSLBについてデクラスタリングをなくそうという考えがあるので、以下はそれについて述べる。

SLB strip triplet デクラスタリング

現在、それぞれのSLBではデクラスタリングを設けている。デクラスタリングとは4.4.2でも述べたように、連続したチャンネルでcoincidenceがとれた場合、その中のひとつのチャンネルを選択してトリガー判定に用いる機能のことである。

現在、stripのクロストーク¹が問題になっている。クロストークによる影響で、本来はcoincidenceがとれていないはずの隣り合ったチャンネルでcoincidenceがとれたと判断された場合、デクラスタリングによって本来coincidenceのとれていないチャンネルをトリガー判定に用いてしまう可能性がある。これはトリガー効率が落ちる原因のひとつになる。そこでクロストーク対策として、特にstripのtripletではSLBでのデクラスタリングをなくし、チャンネル単位でHPTへ情報を送ることが考えられる。

¹クロストーク：本来信号を出すべきでないwireもしくはstripが信号を出してしまうというもの

7.1.2 R- ϕ coincidence の LUT のサイズの変更

High- p_T coincidence で考慮する範囲は、現在の R 方向は-15 から+15 まで、 ϕ 方向は-7 から+7 までとなっている。しかし、6.1.2 で述べたように、アップグレード後は R 方向は-7 から+7 まで、 ϕ 方向は-3 から+3 までの範囲に変更することができる。このことにより、R- ϕ の LUT の大きさは R 方向に 4-bit、 ϕ 方向に 3-bit と、現在のものの 4 分の 1 のサイズに縮小できる。

7.1.3 Inner station からの情報を用いた coincidence の組み込み

これは第 6 章で述べたように、Inner station からの位置情報 (R_{in}, ϕ_{in}) と、Middle station で hit した RoI の中心の位置情報 (R_{RoI}, ϕ_{RoI}) を用いた dL のカットである。この coincidence は R- ϕ coincidence のあとにとられる。

7.2 実際の設計

現在の SL は、探索する物理により実験中に閾値を自由に変更することが求められるため、回路の書き換えが可能な FPGA で実装されている。

今回、SL で coincidence をとる最小単位の範囲、基本的な内容を FPGA に設計をした。使用したデバイスは Xilinx 社の FPGA である Spartan3-XC3S400-FG320PIN である。この設計には Xilinx の ISE ソフトウェアを用いた。使用した言語は verilog HDL² である。

ここで、サブトリガーセクターを R 方向に 2 つ、 ϕ 方向に 4 つ集めたものを SubSectorCluster(SSC) と呼ぶ。今回、設計した範囲は wire、strip それぞれの doublet の SLB1 つ分と triplet の SLB2 つ分から情報を受け取る領域であり、SSC2 つ分に対応する。

図 7.1 に実際に設計した SL の全体の流れを載せる。以下では、decoder、High- p_T coincidence、R- ϕ coincidence、Inner-Middle coincidence、Selector、encoder について順にひとつずつ説明していく。

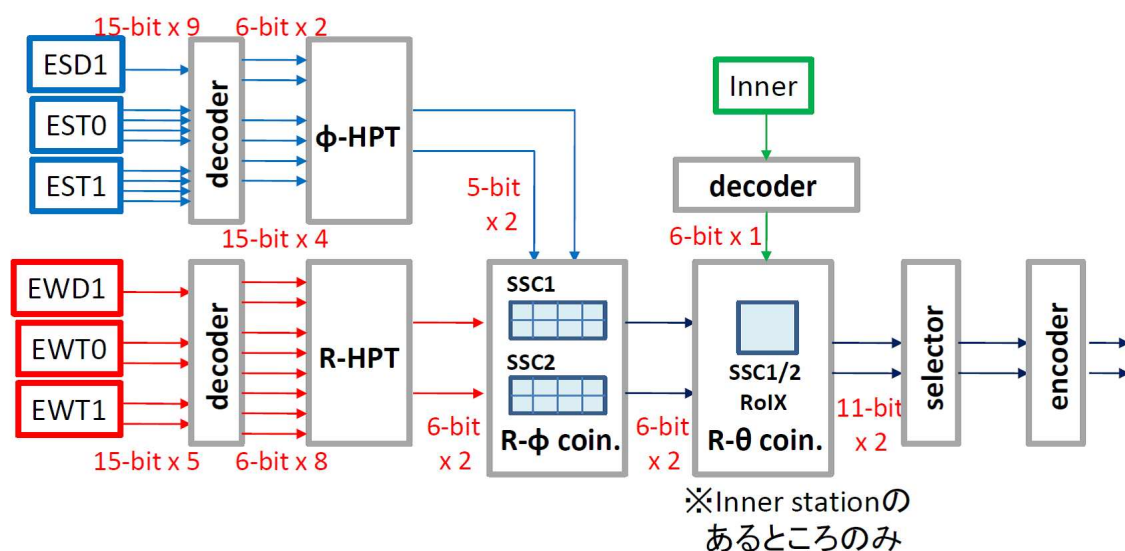


図 7.1: 実際の設計

²verilog HDL : ハードウェア記述言語 (HDL) のひとつ。

7.2.1 decoder

wire、stripそれぞれのdoubletのSLB2つ分とtripletのSLB1つ分から送られてくる情報を受け取り、hit情報ごとに分け、High- p_T coincidenceをとるものごとに振り分けていく。

この情報には、hitの位置情報(R, ϕ)および、hitがあるかないかのフラグが含まれる。doubletのSLBからは、それぞれ2hit分が送られる。SLBで32chから1hitが選ばれるので、1hitの位置情報は5-bitで表される。これに1-bitのhitフラグが加えられ、1hit全体で6-bitで表される。またtripletのwireのSLBからは、3hit分が送られる。これも1hitの位置情報は5-bitで表される。これに1-bitのhitフラグが加えられ、1hit全体で6-bitで表される。また、tripletのstripのSLBは7.1.1で述べたデクラスタリングを廃止する部分なので、hit情報は1チャンネルずつ送られて、全部で64-bitで表される。

SLBから受け取るbit数を表7.1に、SLBから受け取るbit数の1hitあたりの内訳を表7.2に示す。

	wire	strip
Doublet	6-bit×2	6-bit×2
Triplet	6-bit×3	1-bit×64

表 7.1: SLB から受け取る bit 数

	wire		strip	
	Doublet	position	5	position
	hit flag	1	hit flag	1
Triplet	position	5	-	1
	hit flag	1		

表 7.2: SLB から受け取る bit 数 (1hit あたりの内訳)

7.2.2 High- p_T coincidence

現在のSLには組み込まれていない部分である。今回は第5章で述べた場合を想定して、High- p_T coincidenceも組み込んで設計している。

High- p_T coincidenceはwire、stripそれぞれ別々にとる。現在のHPTでは、SLBから6つのhit情報が送られてきて、High- p_T coincidenceをとることによって、その中から2つのhit情報をSLに送っている。アップグレード後のHigh- p_T coincidenceでは、この6つから2つに絞り込むことをやめ、6つ全ての情報をSLに送る設計にする。これは、情報量の少ないHigh- p_T coincidenceの段階でトラック候補を落とすたくないからである。図7.2にdoublet SLBが3つ分の範囲のHigh- p_T coincidenceのブロック図を載せる。

ここでは7.1.2で見たように、 R 方向には δR が-7から+7まで、 ϕ 方向には $\delta\phi$ が-3から+3までの範囲で値を出す。表7.3にHPTから R - ϕ coincidenceへの送信bit数の内訳を示す。

7.2.3 R - ϕ coincidence

各サブセクターごとに割り当てられた δR 、 $\delta\phi$ の値から p_T の値をコインシデンスマトリクスを用いて求める。このコインシデンスマトリクスは、シミュレーションから作成され、各サブセク

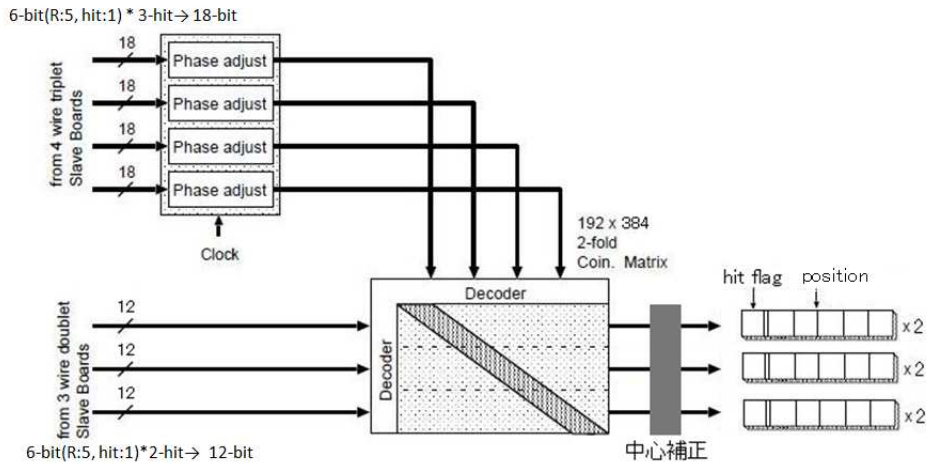


図 7.2: High- p_T coincidence(doublet の SLB3 つ分の範囲)

wire		strip	
dR	4	$d\phi$	3
hit flag	1	hit flag	1

表 7.3: High- p_T coincidence のあと R- ϕ coincidence に送られる bit 数 (1hit あたりの内訳)

ターごとに用意される。

doublet の SLB では、16ch ごとに 1 つのトラック候補が出力される設計になっている (1 つの SLB から 2 つのトラック候補を出力する)。その次の段階の High- p_T coincidence は、doublet SLB の出力を基本にとられる。つまり、High- p_T coincidence がとられたあと、R 方向、 ϕ 方向ともに隣接する 2 つのサブセクターから 1 つの hit に絞られて出力される。そのため、隣接する 2 つのサブセクターをまとめて扱い、その中から 1 つのミューオンのトラックの運動量測定を行うことができる。これらのことから、サブセクターを R 方向に 2 つ、 ϕ 方向に 4 つの小さなブロックにまとめ、この単位で運動量測定を行う。このブロックを SSC(SubSectorCluster) と呼ぶ。SSC は R 方向の HPT からは 1hit、 ϕ 方向の HPT からは 2hit 分の入力を持つ。そのため、 ϕ 方向の HPT からの 2hit の入力と同時に存在した場合が問題になる。しかし、これが実際に 2 つのミューオンが入射したことによるケースは稀であり fake hit がほとんどである。そのため、1 つの SSC からは 1 個のトラック候補しか出力しない。SSC 内でのトラック選出の優先順位は、1. p_T 値の大きいもの、2. ϕ の小さいもの、である。

表 7.4 に R- ϕ coincidence がとられ、Inner-Middle coincidence に送られる bit 数の内訳を表す。position は R 方向、 ϕ 方向それぞれ 4-bit ずつなので合計 8-bit が必要である。 p_T 値は、必要なものは $p_T=20\text{GeV}/c$ 以上なので、20-40GeV/c、40GeV/c 以上の 2 段階を設定する。しかし、20GeV/c 以下のものもデバッグ用に残しておきたい。そのため、これらをすべて合わせた、20GeV/c 以下、20-40GeV/c、40GeV/c 以上の 3 段階を設定し、2-bit が必要となる。

7.2.4 Inner-Middle coincidence

第 6 章で述べた、dL のカットである。Inner station から送られてくる (R_{in} , ϕ_{in}) の情報と、Middle station で R- ϕ coincidence がとれたものが通るサブセクターの中心の位置情報 (R_{RoI} , ϕ_{RoI}) を用いて

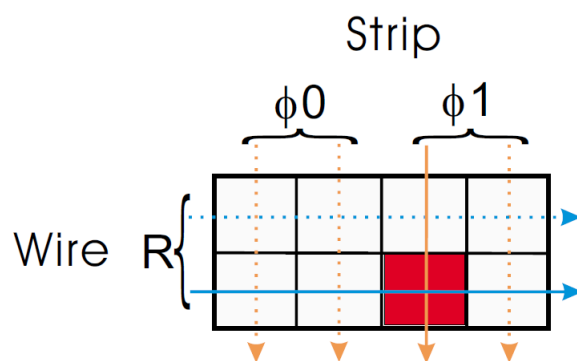


図 7.3: SSC の構造

SSC	
dR	4
p _T	2

表 7.4: R- ϕ coincidence のあと Inner-Middle coincidence に送られる bit 数 (1hit あたりの内訳)

dL の計算を行い、カットをかける。カットを通ったものにはフラグが立てられ、位置情報、p_T 情報とともに Selector へ送られる。

表 7.5 に Inner-Middle coincidence がとられた後、Selector に送られる bit 数の内訳を表す。

Inner	
position	8
p _T	2
inner flg	1

表 7.5: Inner-Middle coincidence のあと Selector に送られる bit 数 (1hit あたりの内訳)

また、Inner station の配置の問題について少し説明する (Inner station の配置は図 4.10 を参照)。図 4.10 を見ると、FI は 360° すべてをカバーすることができているが、EI はところどころ抜けている箇所がある。これはバレルトロイドの設置のため、Inner station を置くスペースがないことによる。EI は η が 1.0 から 1.2 の範囲を担当しており、これは Middle station では Endcap の一番外側の部分に相当する。そのためこの領域の一部では、Inner station を用いての判定を行うことができず、はじめから Inner station との coincidence を行わない。つまり、ここでは Inner station との coincidence をとれたかどうかを示すフラグは立たないままである。

ここで、のちの Selector での判定を簡単に行うために、Inner station との coincidence がとれたミューオンの情報だけを Selector に送ることを考える。このことにより、Selector で判断する材料を減らす。また、デバッグ用にすべての情報を Selector に送るといった設定もできるように設計する。

7.2.5 Selector

最終的に p_T 値の大きいものから最大で2つのトラックを選び出す(今回は、ちょうどトラックが2つしか選べない範囲でしか設計していないが、SSC1個につき1つのトラック候補があるので、実際は全部で Endcap では19個、Forward では8個のトラック候補がある)。ここに送られてくるトラック候補は、Inner station との coincidence がとれているものである。 p_T 値が同じときは、Rの値の大きいものを優先させる。

現在の SL の Selector は、PreSelector と FinalSelector の二段階に分かれている。PreSelector では、6段階の p_T 値の中でそれぞれ最大2つのトラックを選び出す。FinalSelector では、各 p_T ごとに振り分けられたトラックから、最終的に p_T 値の大きい順に最大2つのトラックを選び出す。

今回は SSC2 個分の範囲しか設計していないので、Selector は二段階には分かれていない。しかし、実際に SSC19 個分や8個分を設計するときには、判断が複雑になるため、Selector を二段階に分ける方がよい。

7.2.6 decoder

Selector で選ばれた2つのトラックを、MUCTPIへ送信するためにまとめる。

7.2.7 見積もり

今回作成した小さな単位で使用した IO ピンの数は119本であった。これより、Endcap1/48、Forward1/24の範囲のSLを作成するのに必要なIOピン数を見積もると、Endcapでは592本、Forwardでは256本である。またこの範囲に必要なメモリは、Endcapでは約420kb、Forwardでは約150kbほどである。これより、これから使用しようとするFPGAであるVirtex6-XC6VLX240Tでは、Endcap1/48、Forward 1/12の範囲を1chipに収めることができる。

Device	Logic Cells	Configurable Logic Blocks (CLBs)		DSP48E1 Slices	Block RAM Blocks			MMCMs	Interface Blocks for PCI Express	Ethernet MACs	Maximum Transceivers		Total I/O Banks	Max User I/O
		Slices	Max Distributed RAM (Kb)		18 Kb	36 Kb	Max (Kb)				GTX	GTH		
XC6VLX240T	241,152	37,680	3,650	768	832	416	14,976	12	2	4	24	0	18	720

図 7.4: Virtex6 FPGA Feature Summary

第8章 まとめ

本研究では、LHCのアップグレードに向けたATLAS実験のレベル1トリガーの研究として、Inner station をレベル1トリガーに組み込むための研究、レイテンシが延長される場合のTGCフロントエンドエレキの構想、TGCトリガーシステムの最終段階に位置するSector Logicの一部の実際の設計を行った。

現在のデザインルミノシティ $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ でのエンドキャップミュオントリガーのトリガーレートは、 $p_T=20\text{GeV}/c$ のthresholdで9.5kHzである。ルミノシティが10倍の $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ になるとすると、単純に考えてトリガーレートも10倍の約95kHzになると考えられる。またルミノシティ $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のときにaccidental hitの関わるフェイクトリガーレートを概算すると約50kHzとなった。つまりアップグレード後のトリガーレートは、フェイクトリガーレートも考慮に入れると合計で約145kHzとなり、要請されるレートである20kHzを大幅に超える。このため、Inner station をレベル1トリガーに組み込むことによって、衝突点から来ていないミュオンを落とすことでレートを下げること考えた。ここでは、Inner stationでのカットとSLでのカットの2段階で行われる。この2段階のカットをかけることにより、ミュオンのイベントは少なくとももとの約8%に落とすことができ、アップグレード後のエンドキャップミュオントリガーのトリガーレートは要請を満たすことができると考えられる。これについては今後、カットするための最適値など細かい点を調査していく必要がある。

レイテンシが $3.2\mu\text{s}$ 以上に延長される場合、TGCフロントエンドエレキではSLB以下をすべてコントロールルームに設置することが考えられた。またHPTをSLに組み込むことで、よりスムーズにデータを送信することができる。これはレイテンシが $3.2\mu\text{s}$ 以上にならなければ実現することはないが、ひとつの可能性として挙げられる。

また、アップグレードに向けたSLの一部を実際に設計した。これは現在考えられる変更点の内容をすべて盛り込んで設計した。特に、SLにHPT coincidenceの機能も組み込むこと、 $R-\phi$ coincidenceのLUTの大きさを変更すること、Inner stationを用いたcoincidenceとしてdLのカットを組み込むことなどである。これから実際に設計を行う際、Endcapでは1sideの1/48、Forwardでは1sideの1/12の範囲をひとつのchipに設計することができるとわかった。実際に1chipに収めようとしている範囲すべてを記述し、今回は作成しなかったdelayやmaskの機能なども追加する必要がある。また、Inner stationに関する部分は未定の部分が多いので、この点をしっかり設計していくことが今後必要である。

参考文献

- [1] Krisztian Peters, "Higgs Searches" arXiv:0911.1469 (hep-ex), November 2010.
- [2] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 S08003 (2008)
- [3] ATLAS Collaboration, ATLAS/TGC Master Database (2010)
- [4] 徳宿克夫, 2010 年日本物理学会秋季大会口頭発表「LHC upgrade 計画概要」, 2010 年
- [5] 川本辰夫, 2010 年日本物理学会秋季大会口頭発表「LHC 測定器のアップグレード計画」, 2010 年
- [6] 石野雅也, "L1_TGC trig. rate study with $n \times 10^{34}$ sample", June 2010.
- [7] 一宮亮著, 神戸大学修士学位論文「ATLAS 実験前後方ミューオントリガ用 Sector Logic の開発」, 2001 年
- [8] 岡田勝吾著, 神戸大学修士学位論文「ATLAS 実験における質量が縮退した超対称性粒子の発見可能性に関する研究」, 2008 年
- [9] 門坂拓哉著, 神戸大学修士学位論文「ATLAS 前後方ミューオントリガーシステム SectorLogic 及びオンラインソフトウェアの開発」, 2008 年
- [10] 奥村恭之著, 名古屋大学修士学位論文「LHC 実験開始に向けたミュー粒子トリガーシステム統合試運転」, 2008 年
- [11] 早川俊著, 神戸大学修士学位論文「LHC シングルビームを用いた ATLAS 実験前後方ミューオントリガーシステムの性能評価」, 2009 年
- [12] 堀卓也著, 神戸大学修士学位論文「アトラス実験レベル1 ミューオントリガーのシミュレーションによる性能評価」, 2009 年
- [13] 伊藤悠貴著, 名古屋大学修士学位論文「検出効率解析に基づく μ 粒子検出器の高電圧・閾値電圧の最適化」, 2010 年

謝辞

本研究はたくさんの方々に支えられて進めることができました。皆さんに本当に感謝しています。ありがとうございました。

はじめに、本研究を行う機会を与えてくださった指導教官の藏重久弥^a教授に深く感謝いたします。この二年間、研究に関して様々な指導と助言を与えてくださりました。

そして、本研究においては佐々木修教授^b、坂本宏教授^cに多くの指導と助言をいただきました。また池野正弘技師^bには技術的な面でお世話になりました。神戸の研究室では、川越清以教授^a、山崎祐司准教授^a、越智敦彦助教^a、松下崇助教^d、石川明正氏^aに適切な助言をいただきました。また福永力教授^e、川本辰男准教授^c、石野雅也准教授^b、戸本誠准教授^f、花垣和則准教授^g、杉本拓也助教^fにはアップグレードの研究や各種ミーティングで多くの助言をいただきました。

道前武氏^hと鈴木友氏^bには本研究のきっかけをいただくと同時に、本研究に関する様々な助言をいただきました。神戸大学のエレクトロニクス担当である早川俊氏^aには、エレクトロニクスについて本当にたくさんの助言をいただきました。谷和俊氏^a、吹田航一氏^aには研究に関していつも適切な助言をいただきました。そして岡田勝吾氏^a、西山知徳氏^a、**Matthew King**氏^aもその時々に応じて適切な助言を与えてくださりました。

また共に研究に励んだTGCエレクトロニクスグループの奥村恭幸氏^f、高橋悠太氏^f、長谷川慧氏^f、伊藤悠貴氏^f、**Lily Morvaj**氏^f、志知秀治氏^f、若林潤氏^f、結束晃平氏^c、越前谷陽佑氏^c、神谷隆之氏^c、二ノ宮陽一氏^c、**Katarina Bendtz**氏^cにもたくさんの協力、助言をいただきました。そして、神戸ATLASグループの秋山邦裕氏^a、宮崎一樹氏^a、岸本巴氏^a、鈴木雄太氏^a、小西拓也氏^a、駒井英俊氏^a、大阪大の岡村航氏^g、皆さんのおかげで楽しく研究生活を送ることができました。

それから、秘書の横山有美様^a、井上奈保氏^aには出張手配や事務手続き等で大変お世話になりました。

そして、私の研究生活を支え応援してくださった家族、むっちゃんをはじめ、たくさんの方々に感謝しています。どうもありがとうございました。

所属:

神戸大学 理学研究科^a

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)^b

東京大学 素粒子物理国際研究センター (ICEPP)^c

神戸大学 自然科学研究科^d

首都大学東京 理工学研究科 数理情報科学専攻^e

名古屋大学 理学研究科^f

大阪大学 理学研究科^g

東京大学 理学系研究科^h