修士学位論文

ATLAS 実験ミューオントリガーシステムの構築における統合性能評価及び考察

東京大学大学院 理学系研究科
物理学専攻

36093
羽根八尋

2005 年 1 月

概 要

現在 CERN(欧州原子核研究機構) において建設が進められている、陽子陽子衝突型円形加速器 LHC(Large Hadron Collider) では、14TeV の重心系衝突エネルギーと $10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ の高ルミノシティの実現により、ヒッグス粒子や超対称性理論の探索が期待されている。
LHC の汎用検出器である ATLAS(A Troidal LHC Apparatus) 検出器では、40.08MHz という高レートの陽子バンチ衝突で生じる、ハドロンコライダー特有の多数のバックグラウンドを含んだ膨大なイベントの中から、高速かつ効率的に対象のイベントのみを選別する為のトリガー及びデータ収集システムが必要とされる。本論文では、ATLAS 検出器のエンドキャップミューオントリガー検出器である TGC(Thin Gap Chamber) システムについて、その統合的な性能評価を行うと共に、2005 年 2 月から開始が予定されている、1/12 セクターアセンブリに向けた課題を検証する。

目 次

第 1 章　序論 **1**

第 2 章　LHC 加速器、ATLAS 実験 **2**
2.1 LHC 加速器 . . . 2
2.2 LHC の物理 . . . 2
2.2.1 ヒッグス粒子の探索 . . . 2
2.2.2 超対称性理論の探索 . . . 5
2.2.3 その他の物理 . . . 7
2.3 ATLAS 検出器 . . . 7
2.3.1 内部検出器 . . . 7
2.3.2 カロリーメータ . . . 8
2.3.3 ミューオン検出器 . . . 9
2.3.4 マグネット . . . 10

第 3 章　ATLAS 実験のトリガー及びデータ収集システム **11**
3.1 トリガースキーム . . . 11
3.2 DAQ . . . 12
3.3 レベル 1 トリガーシステム . . . 13
3.3.1 カロリーメータ、ミューオントリガーシステム . . . 13
3.3.2 CTP . . . 13
3.3.3 TTC . . . 14

第 4 章　TGC ミューオントリガーシステム **16**
4.1 TGC の構造と特徴 . . . 16
4.2 TGC におけるトリガー処理 . . . 18
4.3 TGC エレクトロニクス . . . 22
4.3.1 概要 . . . 22
4.3.2 配置 . . . 24
4.3.3 機能 . . . 25

第 5 章　TGC エレクトロニクスの放射線耐性試験 **30**
5.1 ATLAS 実験における放射線の影響 . . . 30
5.2 COTS-IC . . . 33
5.3 γ 線照射試験 . . . 35
5.3.1 γ 線照射 . . . 35
5.3.2 結果、考察 . . . 35
5.4 陽子線照射試験 . . . 37
5.4.1 陽子線照射 . . . 38
5.4.2 結果、考察 . . . 40

5.5 まとめ 46

第 6 章 ビームテストによる TGC システム評価 47
6.1 目的 47
6.2 セットアップ 47
6.2.1 ミューオンビーム 48
6.2.2 トリガー及びクロック 48
6.2.3 チェンバー 48
6.2.4 エレクトロニクス 49
6.3 スタンドアローンによる検証 50
6.3.1 コンフィグレーション 51
6.3.2 ビームプロファイル、検出効率 52
6.4 CTB による検証 57
6.4.1 データ構造 57
6.4.2 CTB データの検証 58
6.5 まとめ 59

第 7 章 1/12 セクターアセンブリに向けた TGC エレクトロニクスの検証 64
7.1 1/12 セクターアセンブリ 64
7.2 セットアップ 64
7.2.1 電源 67
7.2.2 PS-Pack 67
7.2.3 エレクトロニクス 67
7.3 PS-Pack の制御、読み出しの検証 68
7.3.1 検証方法 70
7.3.2 結果 70
7.4 今後の予定 71
7.5 まとめ 72

第 8 章 まとめ 73

付 録 A 略語一覧 74

図 目 次

2.1 LHC 加速器と主な実験 . . . 3
2.2 ヒッグス粒子生成のファインマンダイアグラム . . . 3
2.3 標準理論におけるヒッグス粒子の生成断面積 . . . 4
2.4 ヒッグス粒子の質量と分岐比 . . . 5
2.5 ATLAS 検出器によるヒッグス粒子の発見ポテンシャル . . . 6
2.6 ATLAS 検出器 . . . 7
2.7 内部検出器 . . . 8
2.8 カロリーメータ . . . 8
2.9 ミューオン検出器の R-Z 断面図 . . . 9
2.10 ソレノイドマグネットとトロイダルマグネット . . . 10

3.1 ATLAS 実験におけるトリガーシステムの概要 . . . 11
3.2 レベル 1 トリガーシステムの概要 . . . 13
3.3 TTC システム . . . 15

4.1 ATLAS 検出器における TGC の配置 . . . 16
4.2 TGC モジュール . . . 17
4.3 TGC の構造 (断面) . . . 17
4.4 TGC トリプレット (左) とダブレット (右) . . . 18
4.5 TGC のタイムジッター . . . 19
4.6 TGC システムのレイアウト . . . 19
4.7 TGC ステーション . . . 20
4.8 トリガーセクターとサブセクター . . . 20
4.9 δR、$\delta\phi$ の定義 . . . 21
4.10 TGC トリガーのコインシデンスと p_{T} 判定 . . . 21
4.11 TGC エレクトロニクスのデータの流れ . . . 22
4.12 トリガー部 . . . 23
4.13 読み出し部 . . . 23
4.14 制御部 . . . 23
4.15 TGC エレクトロニクスの配置 . . . 24
4.16 ATLAS 検出器と測定室の位置関係 . . . 25
4.17 ASD ボード . . . 25
4.18 PS-Board . . . 26
4.19 PS-Board のブロック図 . . . 26
4.20 PS-Pack(M1) . . . 27
4.21 High-pT . . . 28
4.22 Sector Logic . . . 28
4.23 Star Switch . . . 28
4.24 ROD . . . 28

4.25 HSC 29
4.26 CCI 29

5.1 TID の R-Z 分布 32
5.2 SEE の R-Z 分布 32
5.3 テスト用基板 33
5.4 ゲート回路 (1) 34
5.5 ゲート回路 (2) 34
5.6 差動アンプ (AD8132) 34
5.7 DC-DC コンバータ (MAX682) 34
5.8 γ 線照射試験セットアップ 36
5.9 ^{60}Co 線源 36
5.10 コンバータの出力電圧 (基板 No.1-4) 37
5.11 差動アンプの出力電流 (基板 No.3) 38
5.12 陽子ビーム照射試験セットアップ 38
5.13 陽子ビーム照射室 39
5.14 X-Y ステージ 39
5.15 Cu フォイルの配置 40
5.16 Ge 検出器のセットアップ 40
5.17 γ 線スペクトル 41
5.18 IP 測定によるビームプロファイル 42
5.19 コンバータの出力電圧 (基板 No.5-6) 43
5.20 差動アンプの出力電流 (基板 No.5) 44
5.21 差動アンプの出力電流 (基板 No.6) 44

6.1 ミューオン検出器の配置 47
6.2 TTC 信号の分配 48
6.3 TGC モジュール 49
6.4 TGC の配置 49
6.5 TGC Triplet 50
6.6 TGC Doublet 50
6.7 TGC エレクトロニクスの構成 (ビームテスト時) 50
6.8 HPT クレート 51
6.9 ROD クレート (左上) 51
6.10 入力信号と遅延時間 52
6.11 遅延時間と検出効率 (M1T3) 52
6.12 ゲート幅と検出効率 (M3D7) 53
6.13 ワイヤー電圧と検出効率 (M1T3) 53
6.14 ビームプロファイル (M1) 54
6.15 ビームプロファイル (M2) 55
6.16 ビームプロファイル (M3) 55
6.17 ヒット分布 (M1) 56
6.18 ヒット分布 (M3) 56
6.19 検出効率、ワイヤー (上) ストリップ (下) 56
6.20 Triplet チェンバーの平面構造 57
6.21 Doublet チェンバーの平面構造 57
6.22 データの階層構造 58

6.23 ヘッダの構造 . . . 59
6.24 RODデータのフォーマット . . . 59
6.25 実際のRODデータ . . . 59
6.26 CTBで読み出されるデータの構造 . . . 60
6.27 実際のCTBデータ . . . 60
6.28 CTBビームプロファイル (M1) . . . 61
6.29 CTBビームプロファイル (M2) . . . 62
6.30 CTBビームプロファイル (M3) . . . 62
6.31 Low-p_{T} コインシデンス検出効率 (TGC+RPC) . . . 63
6.32 Low-p_{T} コインシデンス検出効率 (TGC) . . . 63

7.1 1/12セクター (M1) . . . 65
7.2 TGCとPS-Packの接続 (M1) . . . 66
7.3 電源装置 . . . 67
7.4 PSB収納フレーム (蓋あり) . . . 68
7.5 PSB収納フレーム (蓋なし) . . . 68
7.6 エレクトロニクス検証用セットアップ . . . 68
7.7 エレクトロニクス検証スキーム . . . 69
7.8 リセットの分配スキーム . . . 69
7.9 ゼロサプレスによるデータ圧縮 . . . 71
7.10 テストパルスの読み出し . . . 71
7.11 Star Switch(最終デザイン) . . . 72

表 目 次

2.1 LHC の主要パラメータ 2
2.2 ATLAS 実験で発見可能な超対称性粒子 6
2.3 ミューオン検出器の構成 10

3.1 主な TTC 信号 14

5.1 シミュレーションによる放射線基準値 (SRL) 31
5.2 SRL の安全係数 31
5.3 COTS-IC 一覧 33
5.4 放射線照射試験の目的と内容 35
5.5 γ 線照射試験結果 37
5.6 陽子線照射結果 (基板 No.5) 45
5.7 陽子線照射結果 (基板 No.6) 45

6.1 TGC エレクトロニクスの遅延機能 51
6.2 TGC システムのパラメータ 54

7.1 1/12 セクターエレクトロニクスのコミッショニング 65
7.2 SSW のデータフォーマット 70

第1章　序論

現在、CERN(欧州原子核研究機構) において、陽子陽子衝突型円形加速器 LHC(Large Hadron Collider) が 2007 年の稼働に向けて建設中である。LHC では、ヒッグス粒子、超対称性理論の探索、標準理論の精密検証、等が期待されている。14TeV の重心系衝突エネルギーと、$10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ の高ルミノシティの実現により、1 年間で積分ルミノシティ$100\mathrm{fb}^{-1}$ を蓄積することによって、1TeV までのヒッグス粒子を 5σ 以上の確からしさで発見する能力を備えている。
本論文のテーマは、LHC の汎用検出器の一つである ATLAS 検出器における、ミューオントリガーシステムの構築に向けた、性能評価及び考察である。LHC では 40MHz のバンチ衝突の中から高速、かつ効率よく対象のイベントを選別する為のトリガー及びデータ収集システムが必要となる。ATLAS のトリガーシステムはレベル 1、レベル 2、イベントフィルタの三段階に分かれており、データは各段階で処理され、解析の対象となるイベントのみが次の段階に渡される。イベントレートはレベル 1 で 75kHz、レベル 2 で 1kHz、イベントフィルタでは 200Hz まで大幅に落とされる為、トリガーシステムの役割は極めて重要である。このうち、エンドキャップミューオントリガー検出器 TGC(Thin Gap Chamber) はレベル 1 トリガーシステムの一部を担っている。
TGC は MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) 型の検出器であり、1.4mm の短いワイヤーカソード間隔が特徴である。総チャンネル数は約 40 万チャンネルに及び、TGC 用に開発されたエレクトロニクスは、フロントエンドのボードから、ASIC(Application Specific IC)、モジュールに至るまで多岐に渡る。これらがシステムとして、ATLAS 実験で要求される LVL1 トリガーを形成することを確認し、実験開始に向けた本格的なシステム構築における課題を検討することが本論文の目的である。
先ず、エレクトロニクスの検証として、γ 線、及び陽子線による、放射線耐性の評価を行った。チェンバーに備え付けられるエレクトロニクスは、ATLAS 実験の放射線環境において最低でも 10 年間、その動作が保証されなければならない。そこで、TGC エレクトロニクスに用いられる COTS(Component Off The Shelf)-IC に関して、TID(Total Ionising Dose) 及び SEE(Single Event Effect) に対する評価を行った。
次に、実際のチェンバーの信号を用いたトリガー処理のテストとして、2004 年 10 月に、CERN の SPS(Super Proton Synchrotron) 加速器から供給される、25ns のバンチ間隔を持ったミューオンビームによるビームテストを行った。このビームテストでは、TGC システム単体のトリガー機能の検証に加え、TGC システムとその他の LVL1 トリガーシステムとの統合が行われた。本論文では、ビームテストのデータの解析と、その結果に基づく TGC システムの性能評価について述べる。
最後に、実際の ATLAS 検出器構築に向けて、現在 TGC グループで計画されている 1/12 セクターのアセンブリに関して、エレクトロニクスのセットアップに関する検証と、今後の予定に関してまとめる。

第2章　LHC加速器、ATLAS実験

本章ではLHC計画とATLAS実験について述べる。先ず実験で利用される加速器について述べ、次いで観測が期待されている物理現象、ATLAS検出器の概観を述べる。

2.1　LHC加速器

LHCは、CERN(欧州原子核研究機構)において、2007年の稼働に向けて建設が進められている大型陽子陽子衝突型加速器である。LHCは、LEP(Large Electron Positron Collider)の周長27kmのトンネルを利用し、8.4Tの超伝導電磁石を多数並べることにより、世界最高の重心系衝突エネルギー14TeVを実現する。LEPとは異なり陽子を加速させる為、シンクロトロン放射[1]によるエネルギー損失が極めて少なく、LEP(100GeV)よりはるかに高い衝突エネルギーを達成する。また、1年で積分ルミノシティ100fb^{-1}を蓄積することによって、TeV領域の物理の探索を可能とする。表2.1にLHC加速器の主なパラメータを示す。
図2.1に示すように、LHCでは汎用検出器であるATLAS(A Troidal LHC Apparatus)、CMS(Compact Muon Solenoid)、重イオン衝突実験を目的としたALICE(A Large Ion Collider Experiment)、B物理の測定に用いられるLHC-B、が設置される。

主リング周長	26.66km	衝突エネルギー	7.0TeV
ルミノシティ	$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	*実験初期は $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
衝突頻度	40.08MHz	バンチ間隔	24.95ns
陽子数/バンチ	10^{11}	バンチ長	75mm
バンチ数	2835	イベント/バンチ衝突	19
衝突点のビーム半径	16μm	衝突角度	200μrad

表 2.1: LHCの主要パラメータ

2.2　LHCの物理

2.2.1　ヒッグス粒子の探索

LHCでの物理において最も重要なものは電弱相互作用における自発的対称性の破れの解明である。この為、標準理論において素粒子の質量生成を担うヒッグス粒子の探索はLHCの主要な目的である。ATLAS検出器は、実験的下限である100GeVから、理論的に上限とされる1TeVまで、広範囲の質量エネルギー帯でヒッグス粒子を探索する能力を有する。図2.2に標準理論におけるヒッグス粒子の主な生成過程を、図2.3に生成断面積を示す。

1. gluon fusion
   gluon fusionはトップクォーク、ボトムクォークを介した過程で、生成断面積が最も大きい

[1]半径ρで回る質量m、エネルギーEの粒子が失うエネルギーは、$\Delta\text{E} \propto \gamma^4\rho^{-1}$ $(\gamma = E/mc^2)$であり、質量が大きい程、エネルギー損失は小さくなる。

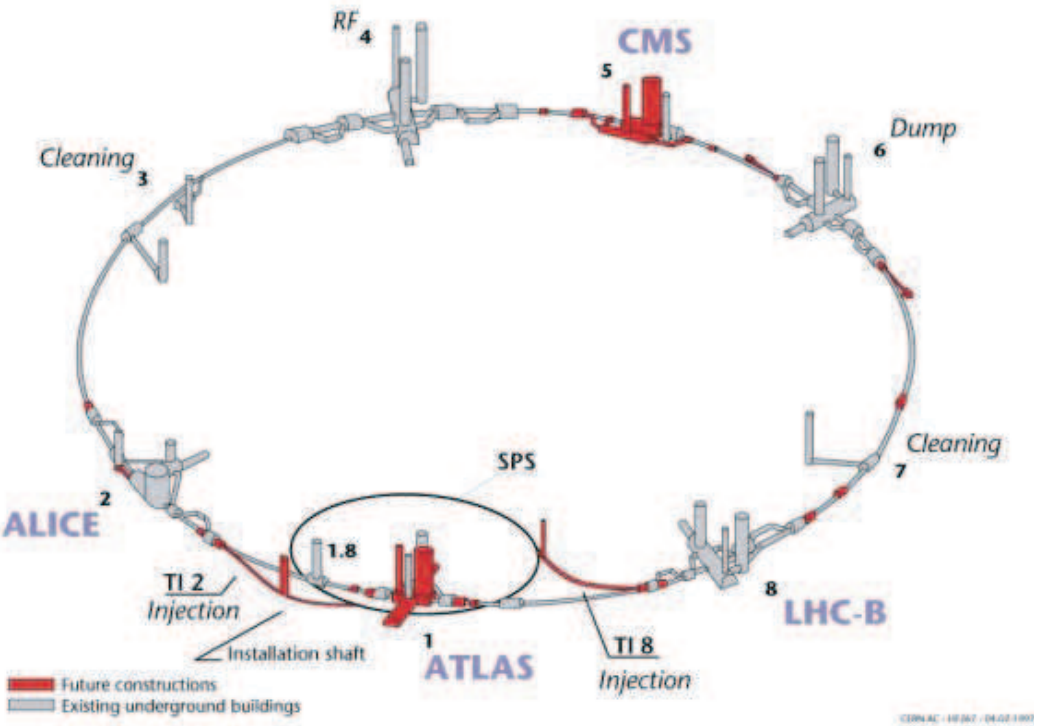


図 2.1: LHC 加速器と主な実験

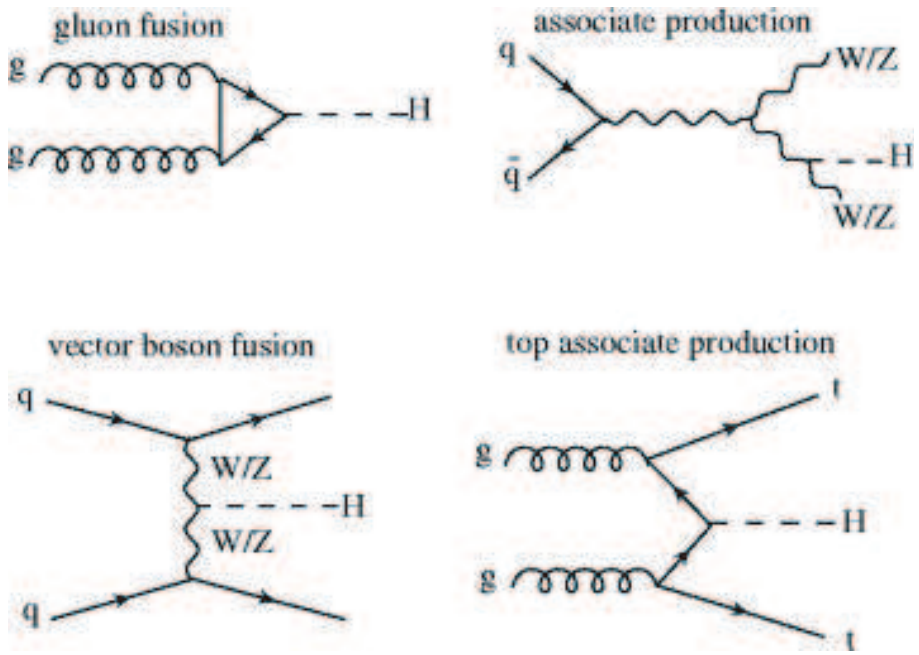


図 2.2: ヒッグス粒子生成のファインマンダイアグラム

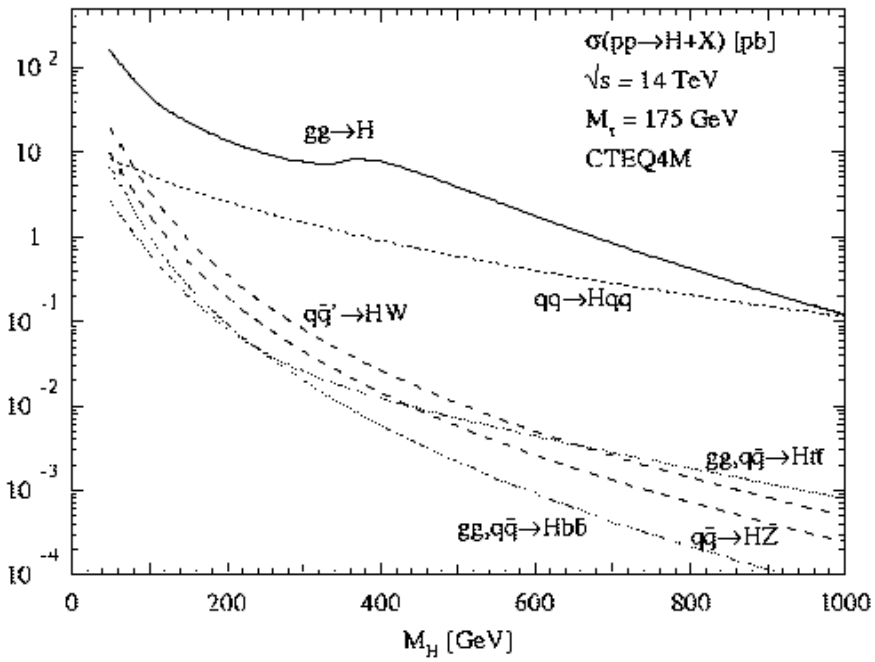


図 2.3: 標準理論におけるヒッグス粒子の生成断面積

過程である。ヒッグス粒子の崩壊から出てきた粒子以外は大きな横運動量を持たないため、シグナルを識別する手段が少なく、バックグラウンドが非常に厳しい。$H \to \gamma\gamma$、ZZ、WW だけが有望な崩壊過程である。

2. vector boson fusion
   二番目に生成断面積が大きく、二つのベクターボソンが融合してヒッグス粒子が生成される過程である。ベクターボソンの質量は重いので、ベクターボソンを放出した二本のジェットは大きな横運動量をもつ。さらにベクターボソンを放出したジェット間で、カラーの交換がないことにより、二本のジェット間の QCD の activity が少なく、イベント選定が行いやすい。従って、この生成過程では様々な崩壊過程でのヒッグス粒子の探索が期待されている。

3. associate production
   クォークペアが対消滅して生成されたゲージボソンから、ヒッグス粒子が放出される過程である。$W^{\pm}$、Z がレプトンに崩壊した場合に、シグナルとバックグラウンドを容易に識別できる。

4. top associate production
   対生成されたトップクォークに伴ってヒッグス粒子が生成される過程である。この過程は生成断面積が小さいが、特徴のあるトップクォークを終状態に二つ含む。それにより、QCD バックグラウンドを大幅に減らすことができる。そしてこのモードでは、トップクォークの湯川結合の情報を含んでいるので、大変重要なモードである。

ヒッグス粒子はその質量によって崩壊過程が大きく異なる。図 2.4 に標準理論におけるヒッグス粒子の質量と分岐比の関係を示し、各質量における特徴的な崩壊過程について述べる。

1. $m_H < 150\mathrm{GeV}$

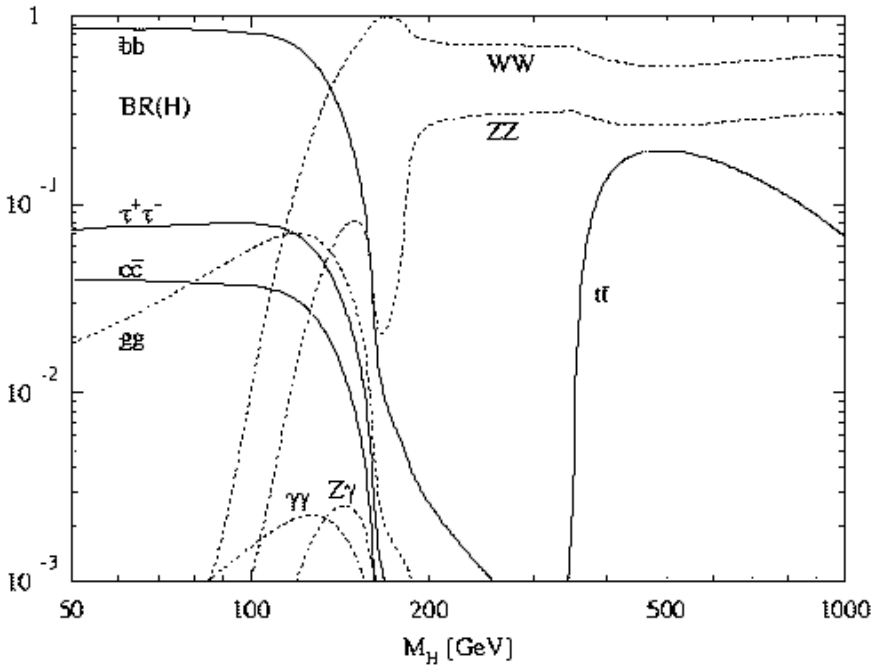


図 2.4: ヒッグス粒子の質量と分岐比

主な崩壊過程 $H \to b\bar{b}$ は、QCD バックグラウンドを落すことが困難である為、稀崩壊である $H \to \gamma\gamma$ や、vector boson fusion によって生成されたヒッグス粒子の崩壊が有効である。

2. $120\mathrm{GeV} < m_H < 180\mathrm{GeV}(=2m_Z)$
   WW^* や ZZ^* への崩壊が始まる。この領域では、$H \to WW^* \to l\nu l\nu$、$H \to ZZ^* \to llll$ のような崩壊が有効である。

3. $180\mathrm{GeV}(=2m_Z) < m_H < 500\mathrm{GeV}$
   $H \to ZZ \to llll$ が有効である。4 つのレプトンを含み、2 つの Z を組むことが出来るので、最も信頼性の高いモードである。

4. $500\mathrm{GeV} < m_H$
   生成断面積が小さい領域であり、崩壊幅も 100GeV を越える。しかし、$H \to ZZ \to llll$、及び $H \to ZZ \to ll\nu\nu$ や、$H \to WW \to l\nu l\nu$ などの崩壊は有効である。

図 2.5 から、ATLAS 検出器は積分ルミノシティ$30\mathrm{fb}^{-1}$ において、115GeV から 200GeV の領域で、5σ 以上の確からしさでヒッグス粒子を発見できることが分かる。また、200GeV より重い場合でも、20σ 以上の有意な検出が可能である。

2.2.2 超対称性理論の探索

超対称性理論は重力まで統一する理論として注目されている。この理論では、全てのフェルミオン、及びボソンに対してスピンが 1/2 だけ異なる超対称性粒子の存在が予言されている。超対称性粒子の質量は、電弱対称性の破れのスケールから TeV 領域にあることが予測され、LHC での発見が期待されている。表 2.2 に積分ルミノシティ$10\mathrm{fb}^{-1}$ において発見が可能な超対称性粒子の質量の上限を示す。

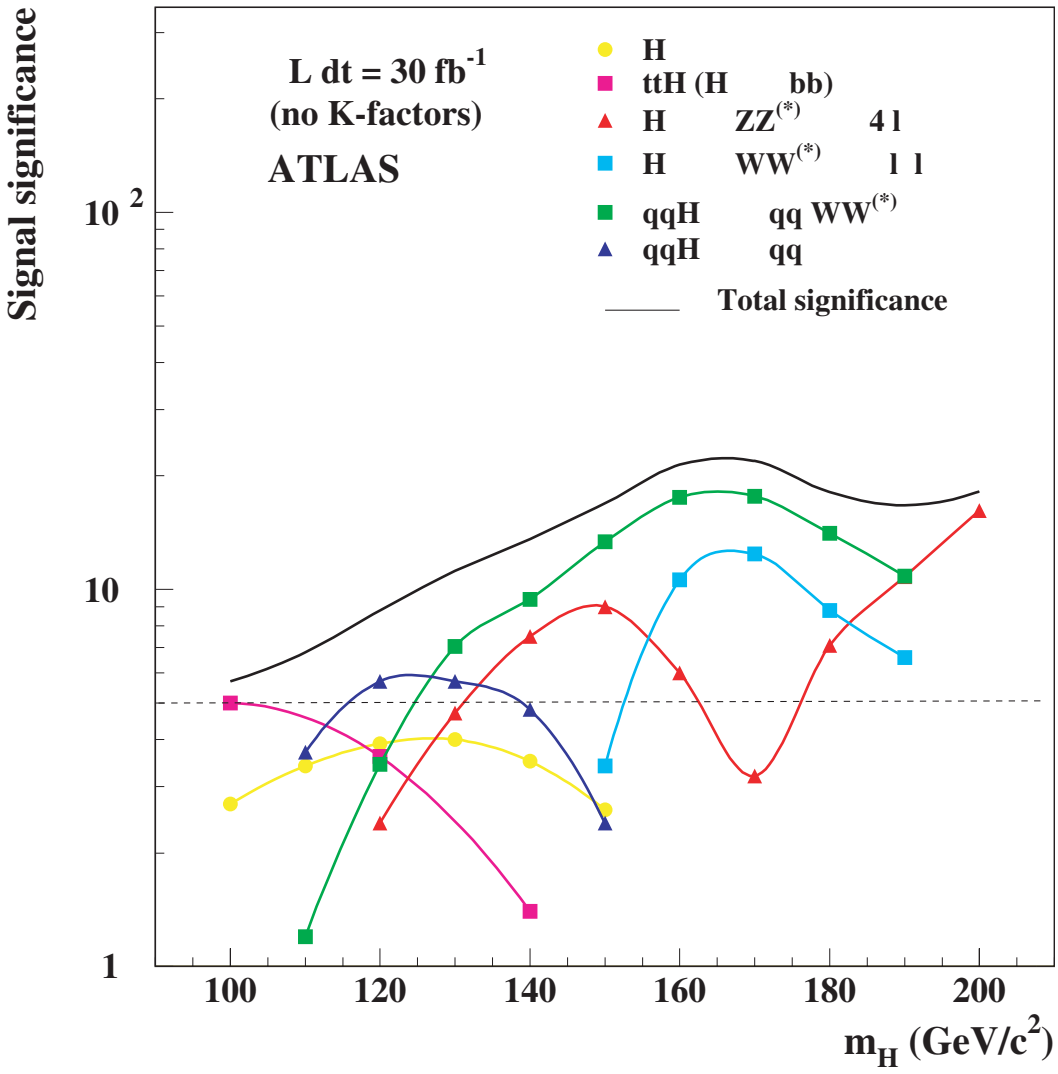


図 2.5: ATLAS 検出器によるヒッグス粒子の発見ポテンシャル

粒子名	発見可能な質量
$\tilde{g}$(グルイーノ)	$\sim$ 2TeV
$\tilde{\chi}^{\pm}$(チャージーノ)	$\sim$ 500GeV
$\tilde{\chi}^{0}$(ニュートラリーノ)	$\sim$ 200GeV
$\tilde{q}$(スクォーク)	$\sim$ 2TeV
$\tilde{l}$(スレプトン)	$\sim$ 500GeV

表 2.2: ATLAS 実験で発見可能な超対称性粒子

2.2.3　その他の物理

LHC の物理としては、ヒッグス粒子、超対称性理論の探索の他に、トップクォーク、ボトムクォークの精密測定、QCD の精密検証などが挙げられる。
トップクォークは、実験開始後数年 ($30\mathrm{fb}^{-1}$) で 2.5×10^{7} の大量の対生成イベントを生じ、その質量を精密に測定することにより、ヒッグス粒子の質量を予言することが可能になる。
また、高い横運動量を持ったジェットイベントの生成断面積の測定を通じて、超微細スケールでのクォークの観測が可能となり、現在「素粒子」と考えられているクォークに内部構造がないか探ることができる。
もし約 1TeV までにヒッグス粒子が見つからなかった場合、通常のヒッグス機構による自発的対称性の破れに代わる新しい機構が必要とされるが、これまでに提唱されている殆どのモデルにおいて、1TeV 領域に共鳴状態の存在が予言されており、LHC ではこのような共鳴状態を比較的容易に捉えることができる。

2.3　ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は直径 22m、長さ 44m の円筒形で、総重量 7000t に及ぶ大型汎用検出器である (図 2.6)。ATLAS 検出器は内側から内部検出器、カロリーメータ、ミューオン検出器で構成され、内部検出器とカロリーメータの間にソレノイドマグネット、カロリーメータの外側にトロイダルマグネットが設置される。LHC では高ルミノシティの為にイベントレートが高く、放射線量も多い。ATLAS 検出器は、このような環境下での高速かつ正確なデータ収集と処理、そして放射線耐性を考慮して設計されている [1, 2]。

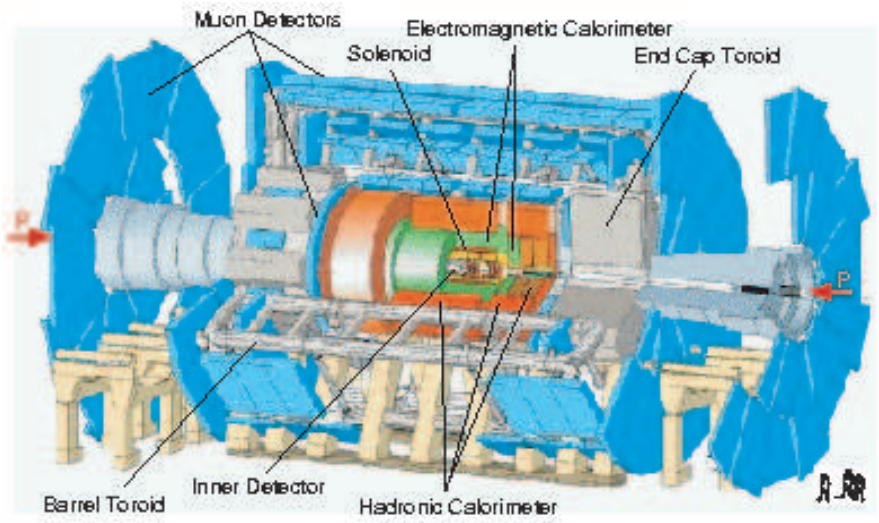


図 2.6: ATLAS 検出器

2.3.1　内部検出器

内部検出器は荷電粒子の飛跡認識と運動量測定を目的とする。運動量測定は、ソレノイド磁場で曲げられた粒子の飛跡の曲率を測定することによって行う。内部検出器は図 2.7 に示すように 3 種類の検出器で構成され、いずれも中心磁場 2T の超伝導ソレノイドの内側に設置される。
Pixel Detector は、衝突点付近で高密度の入射粒子に対して高い位置分解能を実現する為、$50\mu\mathrm{m}$

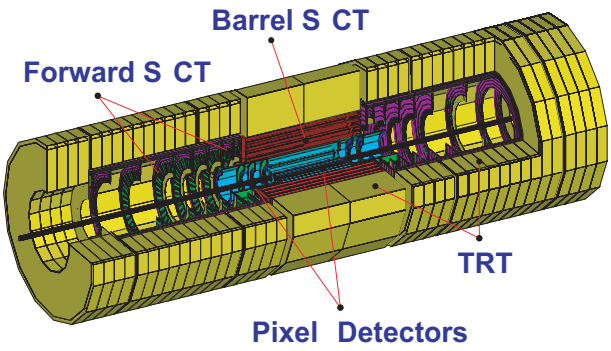


図 2.7: 内部検出器

$\times$ 300μm の要素で構成されたバーテックス検出器である。SCT(Semiconductor Tracker) は 80μm ピッチのストリップ有感領域を持つ半導体検出器であり、TRT(Transition Radiation Tube) とともに、飛跡の検出を行う。内部検出器は $|\eta|$ <2.5 の領域をカバーしている。

2.3.2 カロリーメータ

カロリーメータの主な役割は、電子、光子やジェットについて、高い位置、及びエネルギー分解能に基づいた情報から、粒子のエネルギーを測定することである。ATLAS 実験では図 2.8 に示すように、内側に電磁カロリーメータ、外側にハドロンカロリーメータ設置されている。

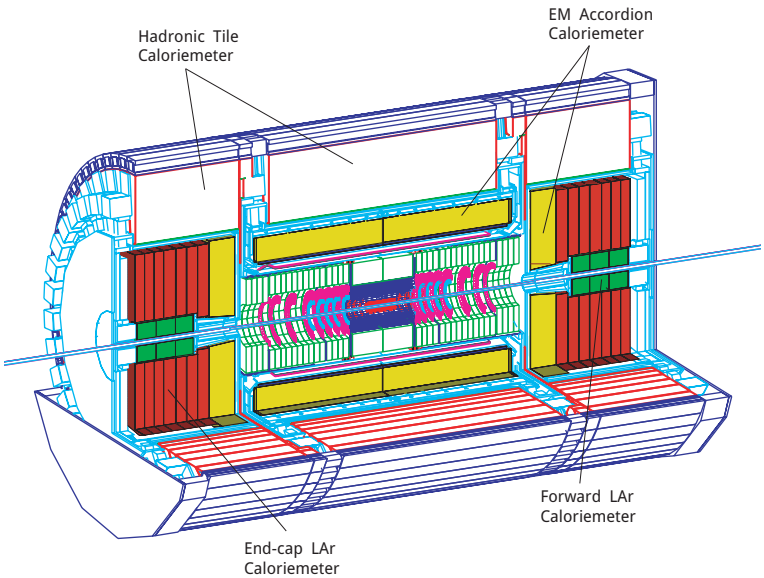


図 2.8: カロリーメータ

電磁カロリーメータは、鉛の吸収体と液体アルゴンで構成され、強い放射線耐性を持つ。また、応答の速いアコーディオン構造が採用されていることも特徴である。電磁カロリーメータはフォ

ワード領域で、$|\eta|<4.9$ の広い範囲をカバーする。
ハドロンカロリーメータは、バレル部では鉄の吸収体とタイル状のシンチレータ、エンドキャップ部では銅の吸収体と液体アルゴンで構成される。さらに、フォワード部では銅とタングステンの吸収体と液体アルゴンが使用される。このカロリーメータにより、ジェットと横方向消失エネルギーの高精度な測定が可能である。

2.3.3 ミューオン検出器

ATLAS のミューオン検出器は、運動量測定用検出器とトリガー用検出器からなり、内部検出器とは独立にミューオンの位置、運動量を測定することができる。ATLAS では空芯のトロイダル磁場を利用することにより、エンドキャップのみならず、フォワード領域でも高精度の運動量測定を実現している。図 2.9 にミューオン検出器の R-Z 断面図を示す。

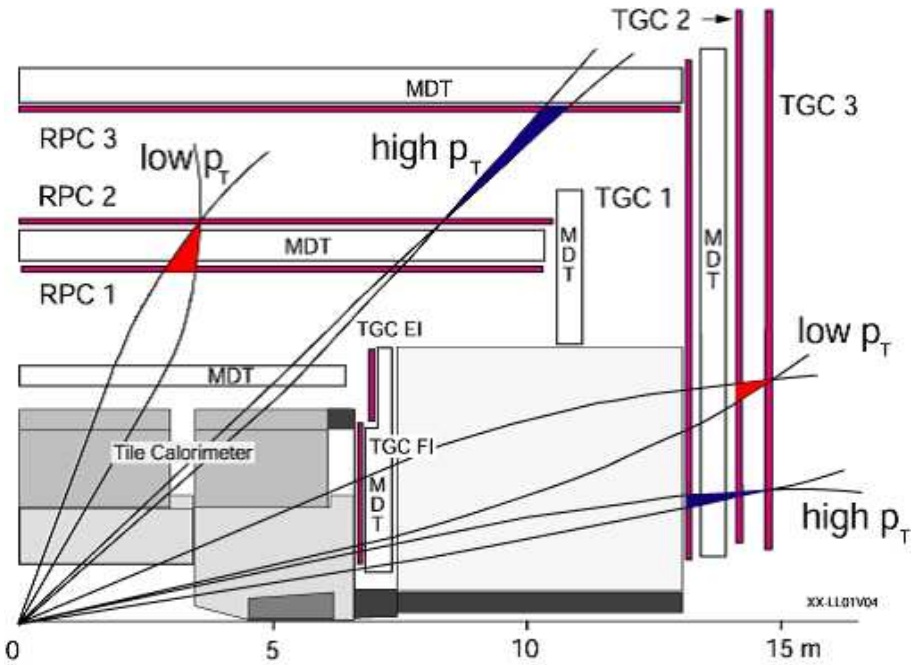


図 2.9: ミューオン検出器の R-Z 断面図

ミューオンはトロイダル磁場によって主に η 方向に曲げられる。この運動量測定には、バレルとエンドキャップで MDT(Monitored Drift Tube)、レートの高いフォワード部の衝突点近傍で CSC(Cathode Strip Chamber) が用いられる。ほぼ全領域を占める MDT は、レーザーによる $\sim 10\mu$m の精度のアラインメントを特徴とし、ミューオンの位置測定を行う。また、ホール磁場測定器により、複雑なトロイダル磁場を測定する。6 層、もしくは 8 層のドリフトチューブでステーションを構成し、バレル、エンドキャップ、ともに 3 ステーションで運動量測定を行う。
一方、トリガー及び ϕ 座標の測定には、バレル部で RPC(Resistive Plate Chamber)、エンドキャップ部で TGC(Thin Gap Chamber) がそれぞれ用いられる。これらは 25ns のバンチ識別能力を有し、後述するトリガーシステムにおいて LVL1 トリガーを生成する。表 2.3 に 4 種類のミューオン検出器の特徴をまとめる。

検出器	用途	$\|\eta\|$ 領域	特徴	チャンネル数
MDT	飛跡測定 (R-Z)	$0 \sim 3.0$	30mmϕ のドリフトチューブ	300,000
	運動量測定		位置分解能 $\sigma_x \approx 60\mu$m	
CSC	飛跡測定 (3D)	$2.0 \sim 3.0$	カソードストリップ読み出し MWPC	100,000
	運動量測定		位置分解能 $\sigma_x \approx 50\mu$m	
RPC	トリガー	$0 \sim 1.05$	平行平板ガス検出器	400,000
	ϕ 座標測定		時間分解能 $\sigma_t \approx 1$ns	
TGC	トリガー	$1.05 \sim 2.4$	薄ギャップワイヤーチェンバー	400,000
	ϕ 座標測定		時間分解能 $\sigma_t \approx 4$ns	

表 2.3: ミューオン検出器の構成

2.3.4 マグネット

ATLAS 検出器のマグネットは 2 種類の超伝導マグネットから構成されている。1 つは内部検出器とカロリーメータの間にあるソレノイドマグネット、もう 1 つはカロリーメータの外側にあるトロイダルマグネットである。図 2.10 にマグネットの構成を示す。
トロイダルマグネットはエンドキャップ、バレル部で異なるマグネットが使用され、積分磁場強度はバレル部で $2 \sim 6$Tm、エンドキャップ部で $4 \sim 8$Tm である。ここで、トロイダル磁場は不均一性によって R 方向の磁場を持ってしまい、ミューオンが通過した際に ϕ 方向にも曲げられる。そのため、ミューオンの運動量測定には ϕ 方向の測定も考慮しなければならない。

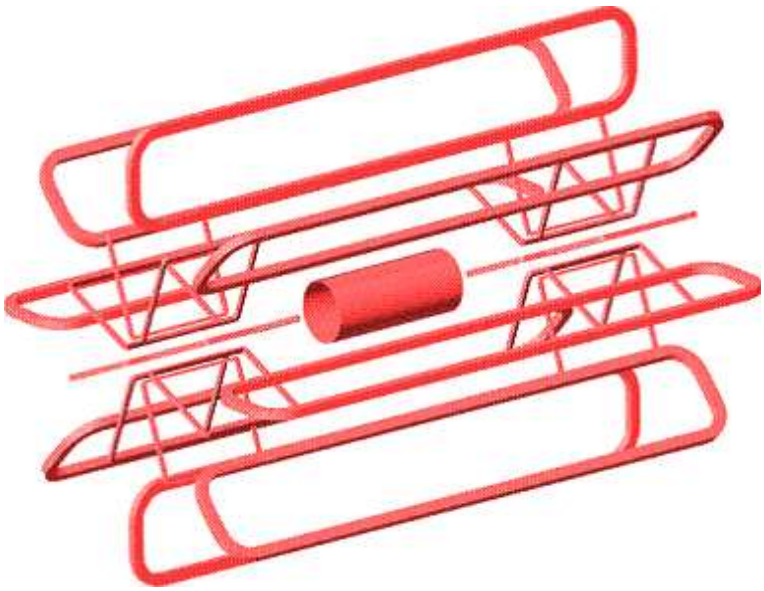


図 2.10: ソレノイドマグネットとトロイダルマグネット

第3章　ATLAS実験のトリガー及びデータ収集システム

ATLAS 実験のトリガー、及びデータ収集システムは、3 段階のオンラインイベント選定から成り立っている。LHC では 40.08MHz の頻度でバンチ衝突が起こり、高ルミノシティ$(10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1})$では陽子反応頻度は $10^9/\mathrm{s}$ に及ぶ。しかし、計算機の処理能力、記録装置の容量の制約からデータのレートは ∼100Hz [1]に抑えなければならない。この為、解析の対象となるイベントのみを効率良く選び出すシステムが必要とされる。

3.1　トリガースキーム

ATLAS 実験のトリガーシステムは、図 3.1 に示すように、レベル 1、レベル 2、イベントフィルタ、の 3 段階で構成されている。各段階でデータが処理され、対象となるイベントのみが次の段階に渡される。

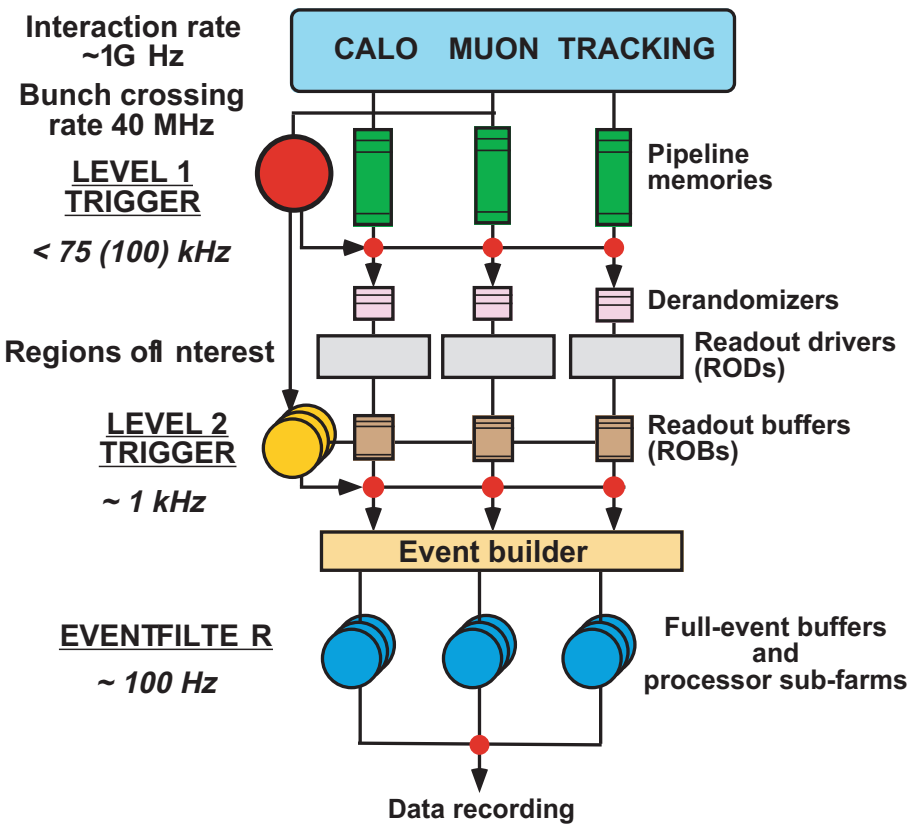


図 3.1: ATLAS 実験におけるトリガーシステムの概要

[1]ヒッグス粒子が生成されるイベントレートは、最も生成断面積の大きい gg→H でも ∼1Hz 以下と見積もられる

レベル 1(LVL1)
カロリーメータと、ミューオン検出器 (TGC、RPC) の情報から、各バンチに対してトリガー判定を行う。カロリーメータからは e/γ、ジェット、横方向エネルギーの情報を、ミューオン検出器からはミューオンの位置と運動量の情報を用いる。これらの情報は CTP(Central Trigger Processer) に集められ、レベル 1 トリガーの判定が行われる。トリガー判定の条件を満たした場合、ここから L1A(LVL1 Accept) と呼ばれる信号が各検出器に送られる。このレベル 1 のトリガー判定のレイテンシー[2]は 2.5μs 以下と規定されており、この間、各検出器はデータをバッファに蓄えておく必要がある。
これらの測定データは、L1A 受信後、各サブシステムの ROD(Read Out Driver) でイベント毎に収集され、ROB(Read Out Buffer) に送られる。レベル 1 では、トリガー信号を送信すると同時に、RoI(Region of Interest) と呼ばれるトリガー領域をレベル 2 に対して送信する。この RoI により、レベル 2 のデータ処理は大幅に削減される。レベル 1 でトリガーレートは 75kHz にまで落される。

レベル 2(LVL2)
カロリーメータ、ミューオンシステム、内部検出器の RoI における完全な位置情報を元にトリガー判定を行う為、判定の精度が上がり、より正確なイベント選定をすることができる。レベル 2 トリガー判定までのレイテンシーは 10ms 以下とされ、イベントレートは 1kHz まで落される。

イベントフィルタ (EF)
LVL2 アクセプトを受けたデータは、イベントビルダーを通じてイベントフィルタに送られる。ここでは、各検出器の完全な位置情報とトリガー条件を元に、通常オフラインで行うアルゴリズムをオンラインで採用し、最終的なトリガー判定が行われる。1 イベントの処理時間は約 1s であり、200Hz までイベントレートが落される。選別されたデータは記録装置に保存される。この時、1 イベントのデータ容量はおよそ 1.6MB である。

3.2 DAQ

各検出器のデータは、図 3.1 に示すように、レベル 1 判定が下されるまでパイプラインメモリに保存される。レベル 1 の処理時間 (=2.5μs) の間、データを保持する為に 100 バンチ分のバッファが必要となる。L1A が与えられると、データはデランダマイザー[3] に送られ、ROD で読み出される。
ROD には、信号がどのバンチに属するかを示す BCID、どの L1A に属するかを示す L1ID、があわせて送られてくるので、これを元に集めたデータの整合性を確認し、最終的なフォーマットに変換する。変換されたデータは ROB に送られ、レベル 2 判定が行われるまで保持される。
レベル 2 では ROB に蓄えられた情報の内、RoI のデータを用いて処理を行う。レベル 2 トリガーが与えられると、ROB データはイベントビルダーを通ってイベントフィルタに送られる。イベントフィルタで処理を行った後、最終的にイベントレートは 200Hz になり、1 イベントのデータ量は平均 1.6MB なので、320MB/s で記録が行われる。

[2]陽子陽子衝突から、トリガー判定がフロントエンドエレクトロニクスに到達するまでの時間
[3]ランダムで起こるイベントを一定間隔で読み出せるようにするもの

3.3 レベル 1 トリガーシステム

図 3.2 に示すように、レベル 1 トリガーシステムはカロリーメータ、ミューオントリガーシステム、CTP、TTC(Timing Trigger Control) から構成される。

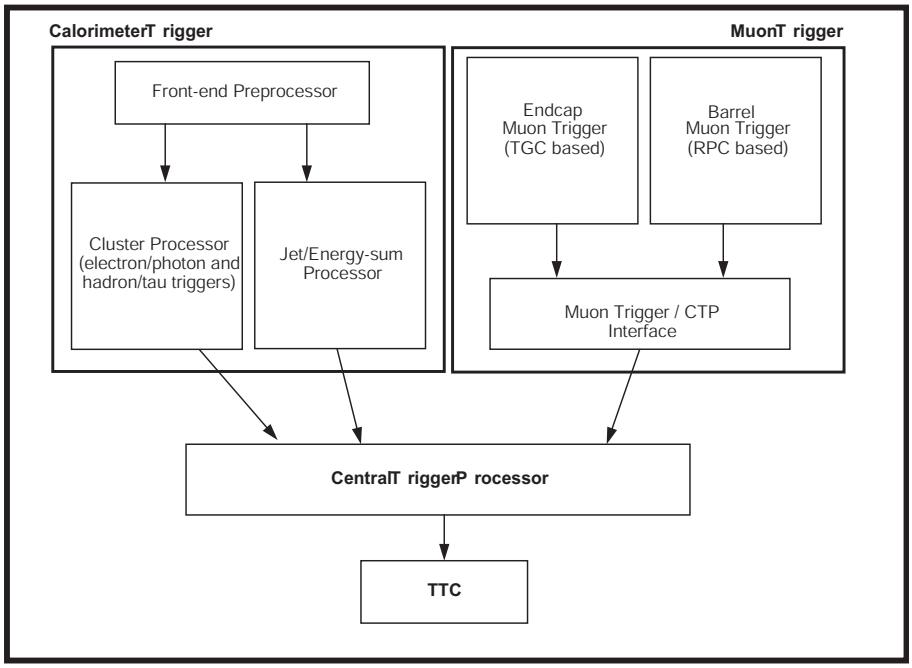


図 3.2: レベル 1 トリガーシステムの概要

3.3.1 カロリーメータ、ミューオントリガーシステム

カロリーメータからは、e/γ、ジェット、横方向消失エネルギーの情報が CTP へ送られる。一方、ミューオントリガーシステムは TGC、RPC で構成され、高い p_{T} [4] を持つミューオンの情報が、CTP とのインターフェースである MUCTPI(Muon Central Trigger Processer Interface) に送られる。MUCTPI は、バレルとエンドキャップの境界処理を行い、CTP へトリガー情報を送信する。CTP はこれらの情報を元にトリガー判定を行い、各検出器に対して L1A の読み出し信号、LVL2 に対してトリガー領域を示す RoI の情報を送信する。

3.3.2 CTP

CTP の役割はカロリーメータ、ミューオントリガーシステムの情報を統合して、最終的なレベル 1 判定を行うことである。CTP では入力情報が同一バンチに揃えられ、予め用意されているトリガー判定条件と比較することにより最終判定が下され、TTC に対して L1A 信号とトリガー情報を表す 8 ビットの情報を送信する。また、L1A はフロントエンドの読み出しを容易にする為、一度 L1A を出力すると、それ以降 4 バンチ (100ns) の間、L1A を出力しないように定められている。トリガー判定条件は最大 96 個まで設定することができる。

[4] 横方向 (Transverse) 運動量

3.3.3 TTC

TTC システムはフロントエンドエレクトロニクスの同期をとる為、各エレクトロニクスに 40.08MHz の LHC クロックを送信する。また、このクロックに同期した制御命令を送ることで、ATLAS 検出器全体を同期させている。これらの制御命令には、L1A、カウンターリセット、キャリブレーション信号が含まれる。非同期命令の送信も可能であり、フロントエンドの TTC レシーバーである TTCrx の設定や、各検出器固有の制御命令が送られる。表 3.1 に TTC が扱う主な信号を挙げる。

信号名	主な機能と特徴
BC Clock	各検出器のエレクトロニクスを BC(40.08MHz) に同期させる為のクロック
L1A	Level1 Accept、CTP から送られてくる
BCR	Bunch Counter Reset、BCID(データがどのバンチに属するかを示す) のリセットに使用、88.924μs の LHC 軌道周期 (ORBIT 信号) に同期する
ECR	Event Counter Reset、L1ID のカウンター (トリガーされたデータがどの L1A に属するかを示す) のリセットに使用
EVID	Event IDentifier、ROD 及び ROB での BC のチェックに使用
BCID	Bunch Crossing IDentifier、ROD 及び ROB での L1ID のチェックに使用

表 3.1: 主な TTC 信号

図 3.3 に TTC システムの概要を示す。TTC は、TTCvi と呼ばれる VME インターフェースで BC クロック、BC リセット信号を受信し、CTP から L1A 信号を受信する。これらの情報は TTC クレートに送信され、受信したデータを加工した後、TTCrx へ分配される。また、TTCvi では A-channel、B-channel の 2 系統の信号を分配し、A-channel では L1A のみを、B-channel では TTCrx に送信される同期命令、及び非同期命令を扱う。

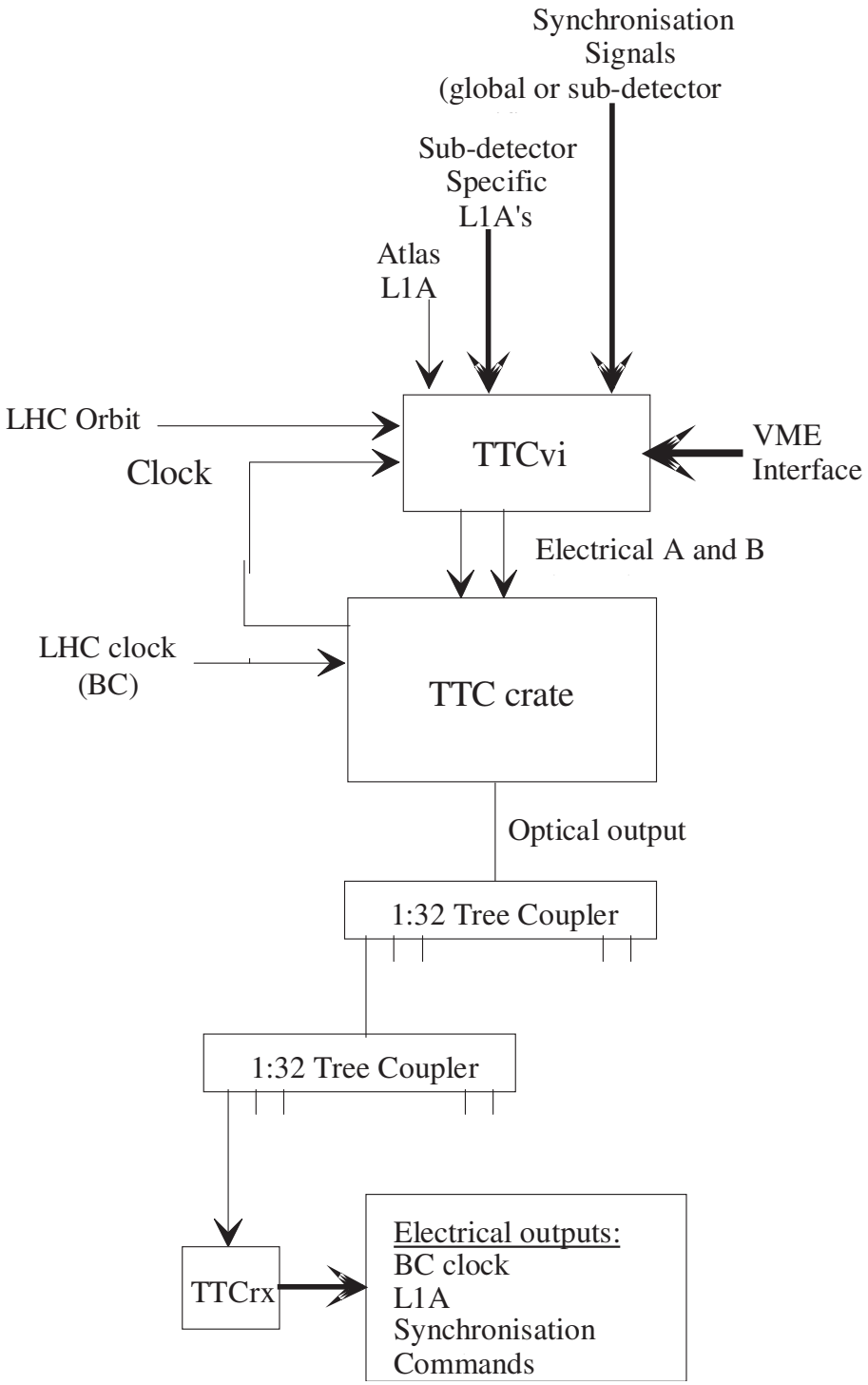

Synchronisation
Signals
(global or sub-detector
Sub-detector
Specific
L1A's
Atlas
L1A
LHC Orbit
Clock
TTCvi
VME
Interface
Electrical A and B
LHC clock
(BC)
TTC crate
Optical output
1:32 Tree Coupler
1:32 Tree Coupler
TTCrx
Electrical outputs:
BC clock
L1A
Synchronisation
Commands

図 3.3: TTC システム

第4章　TGCミューオントリガーシステム

この章では、本論文の主題である TGC ミューオントリガーシステム [3] について、TGC の構造と特徴、トリガー処理、エレクトロニクスについて述べる。

4.1　TGC の構造と特徴

TGC は ATLAS 検出器のエンドキャップミューオントリガー検出器であり、図 4.1 の様に、200~250 台の TGC がエンドキャップ部分全体をカバーするディスク状に配置される。このディスクを支える構造体をビッグホイールと呼び、ATLAS 検出器の片側に 3 ステーションずつ存在する。

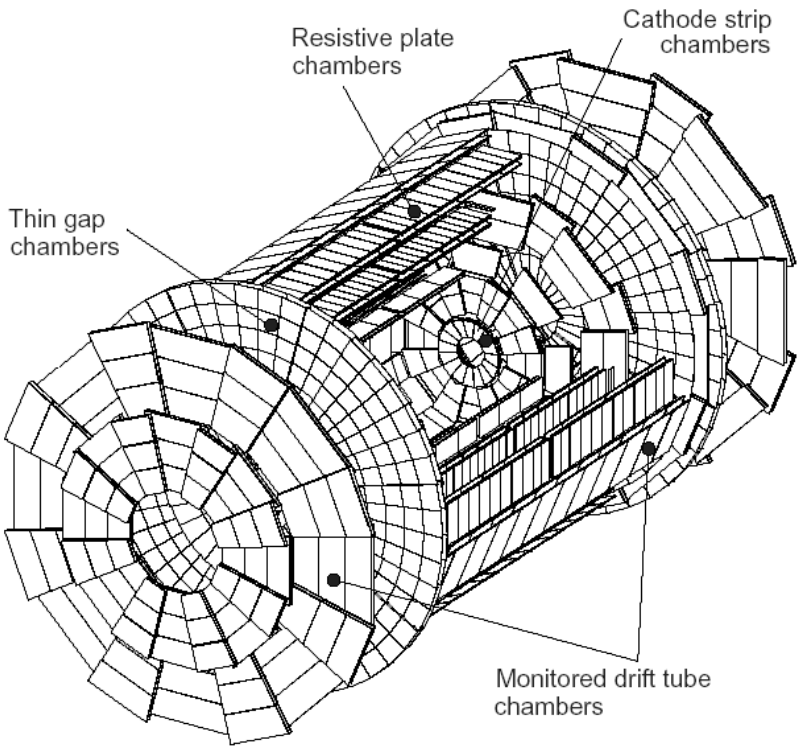


図 4.1: ATLAS 検出器における TGC の配置

TGC(図 4.2) は、ワイヤーで R 方向、ストリップで ϕ 方向の情報を検出することにより、二次元の位置読み出しが可能な MWPC [1] の一種である。TGC は、厚さ 1.6mm の FR4(ガラスエポキシ樹脂) を基板とし、その片面にカーボンを塗布することによってカソード面を形成している。アノードワイヤーは直径 50μm の金メッキタングステンであり、ワイヤー間隔は 1.8mm である。基板の外側にワイヤーと直交する銅ストリップが形成されている。

[1] Multi Wire Proportional Chamber。2 枚の陰極板の間に陽極となるワイヤーが等間隔に配置されたチェンバーを指す。

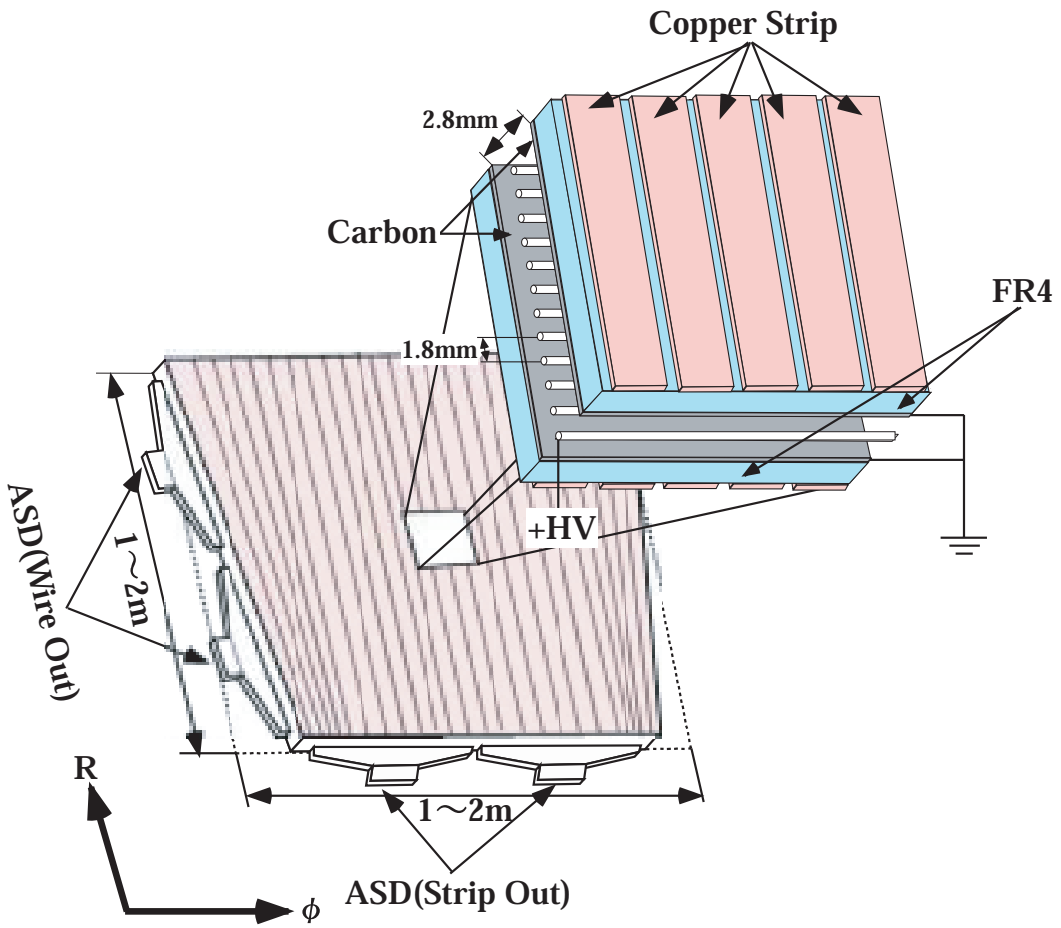


図 4.2: TGC モジュール

図 4.3 に TGC の構造を示す。一般に MWPC では、ワイヤー直径はワイヤー間隔の 1%程度であるが、TGC では内部の高電場領域を広くする為、及び機械的強度を高める為に 50μm としている。ワイヤー間隔 1.8mm は、電子のドリフト距離を短くして 25ns のバンチ間隔に対応する為に最適化されている。また、TGC の特徴はアノードカソード間隔が 1.4mm と短いことである。これによって陽イオンのドリフト距離が短くなり、空間電荷の形成による実効電場の低下を抑制している。

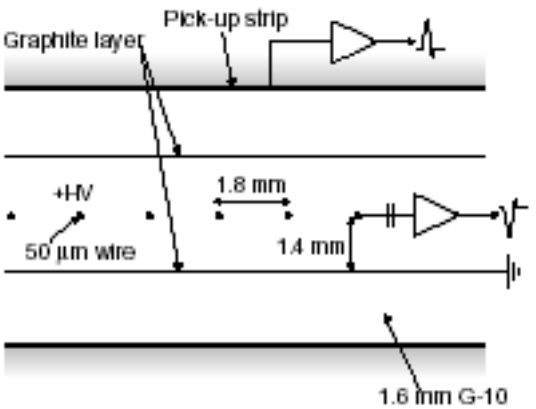


図 4.3: TGC の構造 (断面)

チェンバーの中は、CO_2 と n-pentan が 55:45 の比率の混合ガスで満たされ、2.9kV の高電圧が印加されている。CO_2 に混ぜられた n-pentan により、紫外線を吸収して放電を起こしにくくしている (クエンチ効果)。TGC 内を荷電粒子が通過すると、混合ガス分子がイオン化され、電子がアノード カソード 間の電場によってアノード ワイヤーへ向かう。ワイヤー付近では電場が大きくなっている為、アノードへ向かってきた電子が周辺のガス分子と相互作用し、二次電子が生成される。これによって電子雪崩が発生し、信号として読み出される。また、カソード 面には高抵抗のカーボンが塗布されており、その外側でストリップに誘起された誘導電荷を読み出す構造になっている。

ワイヤーからの信号は、6 本から 20 本を束ねて 1 グループとして読み出される。ストリップは 1 枚の TGC につき 32 本ある。実際の実験に用いられるのは、図 4.4 に示すように、20mm の紙ハニカムを挟んだ 2 層構造の Doublet、及び 3 層構造の Triplet である。Doublet は 2 層のワイヤー、2 層のストリップから、Triplet は 3 層のワイヤー、2 層のストリップから信号を読み出す。各層でチャンネルを 1/2(Doublet)、または 1/3(Triplet) だけずらしているため、チャンネル幅に対して 2 倍もしくは 3 倍の位置分解能を持つ。Doublet、Triplet それぞれについて、設置される位置に応じて複数のデザインが存在し、モジュールのサイズやワイヤーの読み出しチャンネル数が異なっている。

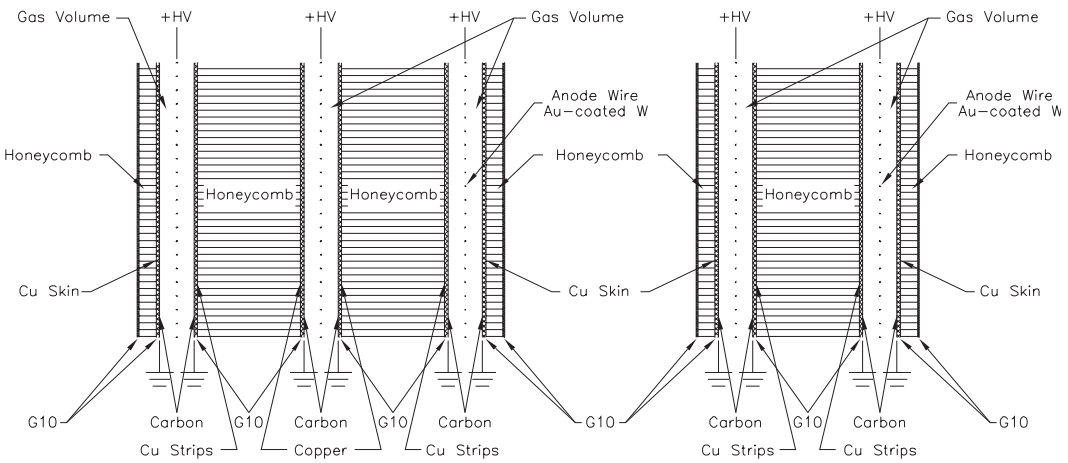


図 4.4: TGC トリプレット (左) とダブレット (右)

図 4.5 に、粒子の入射角度別に見た TGC のタイムジッター[2] を示す。これは 3GeV の π を用いた結果であるが、ATLAS 実験での TGC に対する入射角度は 10 度から 45 度であり、この範囲でタイムジッターは LHC のバンチ間隔である 25ns と同程度かそれ以下である。従ってトリガー検出に不可欠なバンチ識別を行うことが可能と言える。

4.2 TGC におけるトリガー処理

図 4.6 に示すように、TGC システムは M1(Triplet)、M2(Middle Doublet)、M3(Pivot Doublet)、EI/FI(End-cap/Foward Inner) の各ステーションからなる。トリガー判定には M1 の 3 層、及び M2、M3 の各 2 層の計 7 層が使われる。TGC がカバーする範囲は、$1.05 < |\eta| < 2.40$ の領域であり、$|\eta| < 1.92$ をフォワード 領域、$1.92 < |\eta|$ をエンドキャップ領域と呼ぶ。

各ステーションは図 4.7 に示すように、8 つのオクタント (斜線部分) と呼ばれる領域から成り、半径でフォワード 領域とエンドキャップ領域に分けられる。オクタントはさらに 3 つのユニットに分割され、フォワード 領域では、M1 は T1 モジュール 1 台、M2、M3 は T2 モジュール 1 台が

[2]粒子が TGC を通過してから信号を出すまでの時間のばらつき

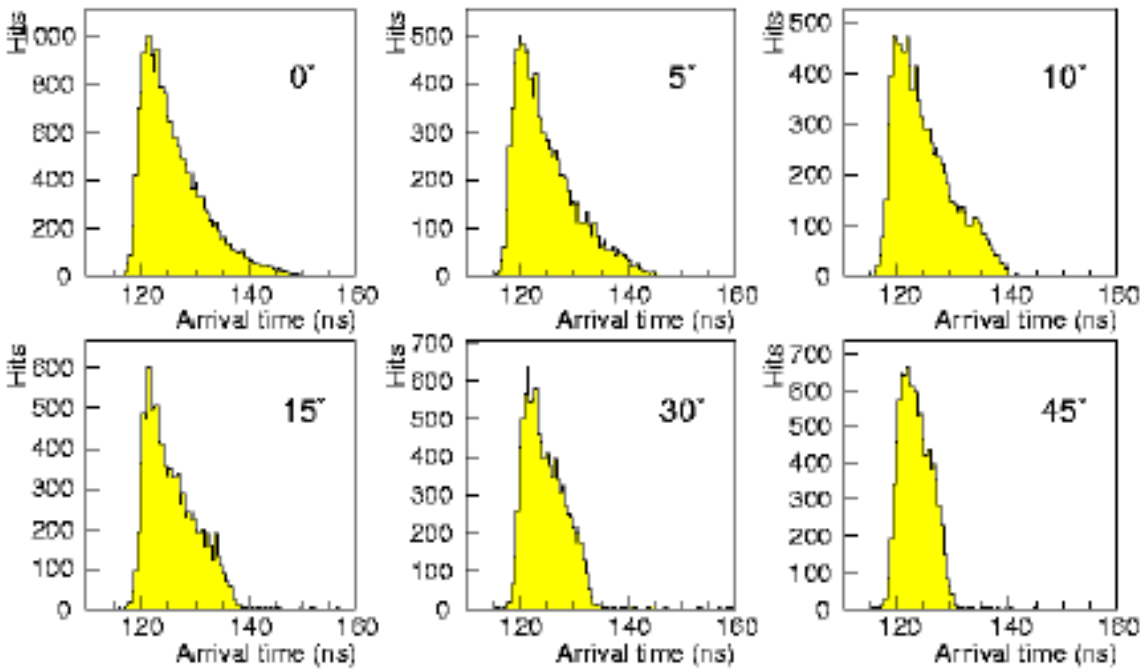


図 4.5: TGC のタイムジッター

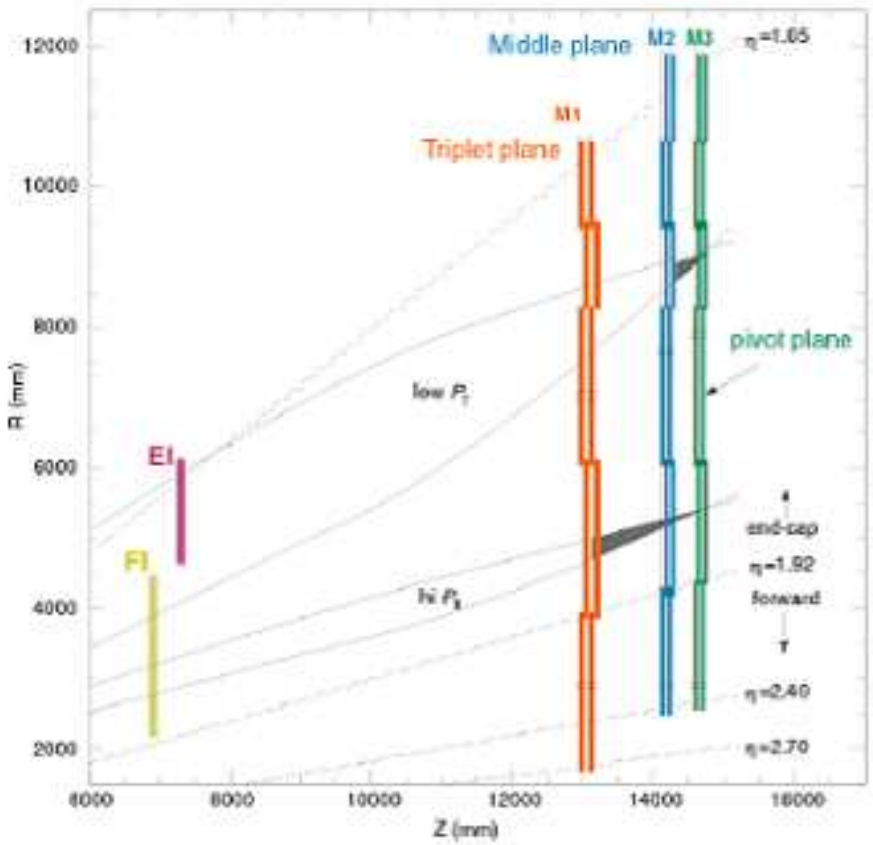


図 4.6: TGC システムのレイアウト

ユニットを構成する。エンドキャップ領域では、M1 は 4 種類の Triplet モジュールが 2 台ずつ計 8 台、M2、M3 は 5 種類の Doublet モジュールが 2 台ずつ計 10 台がユニットを構成する。

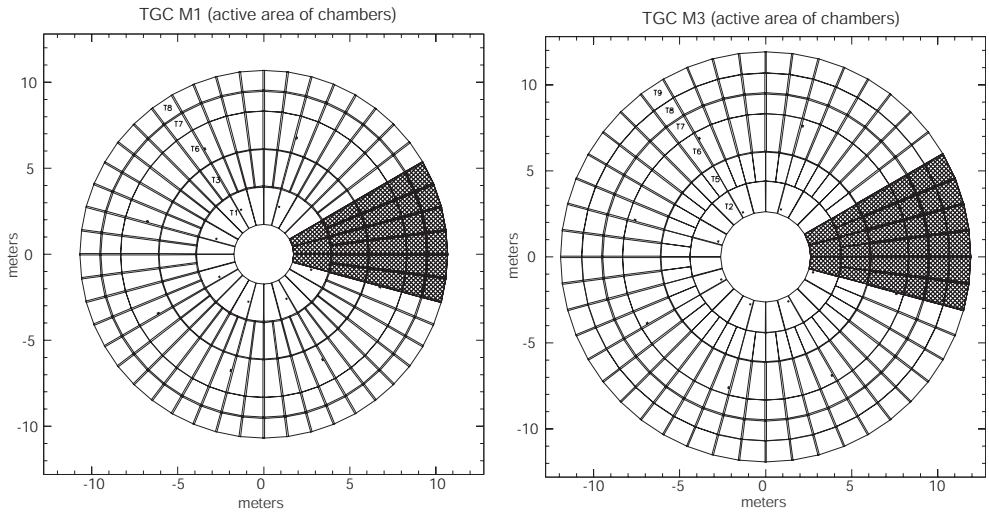


図 4.7: TGC ステーション

各オクタントは図 4.8 に示すように、ϕ 方向について、エンドキャップ領域で 6 等分、フォワード領域で 3 等分したトリガーセクターと呼ばれる領域に分割される。トリガーセクターは、フォワード領域では各ステーション 1 チェンバー、エンドキャップ領域では M1 は 4 チェンバー、M2、M3 は 5 チェンバーで構成される。TGC のトリガー処理は、トリガーセクター単位で行われ、トリガー情報は各セクター毎に MUCTPI へ出力される。このトリガーセクターを、エンドキャップでは η 方向に 49 分割、ϕ 方向に 4 分割、フォワードでは η 方向に 15 分割、ϕ 方向に 4 分割したものをサブセクターと呼ぶ。サブセクターは、トリガー情報の最小単位であり、ワイヤー、ストリップについて各 8 チャンネルで構成され、一つの RoI に対応している。

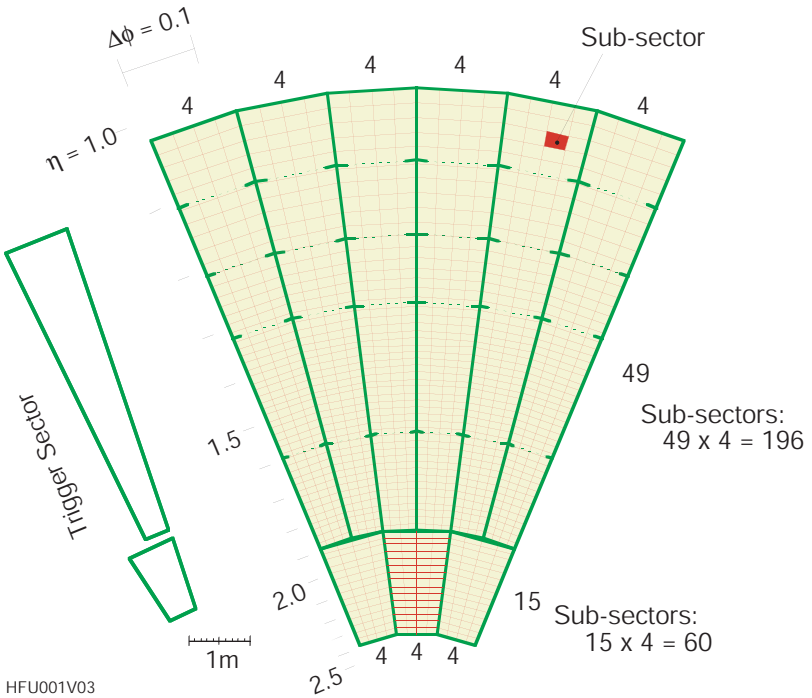


図 4.8: トリガーセクターとサブセクター

TGC では、各層のヒットのコインシデンスをとることにより、バックグラウンドによる偶発的なトリガーを排除している。M2、M3 の Doublet では、ワイヤー、ストリップともに 4 層中 3 層にヒットがあること、M1 の Triplet ではワイヤー 3 層中 2 層、ストリップ 2 層中 1 層にヒットがあること、をコインシデンスの条件として課している。コインシデンスがとられると、p_{T} が判定される。ミューオンの運動量が無限大であった場合、ミューオンは磁場の影響を受けることなく、衝突点から Pivot まで直進する。実際の飛跡は曲率を持っているので、この衝突点と Pivot を結んだ直線からの R 方向、ϕ 方向のずれを δR、$\delta\phi$(図 4.9) として、これを元に p_{T} の判定を行う。

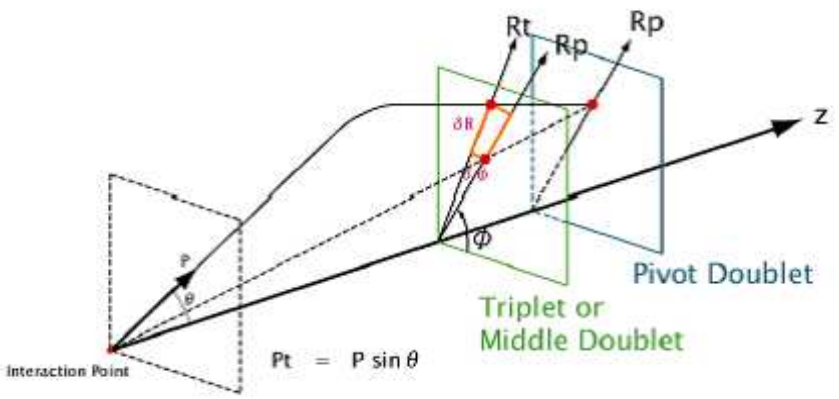


図 4.9: δR、$\delta\phi$ の定義

ミューオントリガーは p_{T} の閾値によって Low-p_{T}(6GeV 以上) で 3 段階、High-p_{T}(20GeV 以上) で 3 段階に分類される。トリガーの判定は、先ず M2、M3 の情報を用いて Low-p_{T} コインシデンスが、これに M1 の情報を加えて High-p_{T} コインシデンスが取られる。ここまではワイヤー、ストリップが独立に処理されるが、R-ϕ コインシデンスの段階で双方の情報が統合され、最終的なトリガー判定が下される。図 4.10 にトリガー判定の過程を示す。

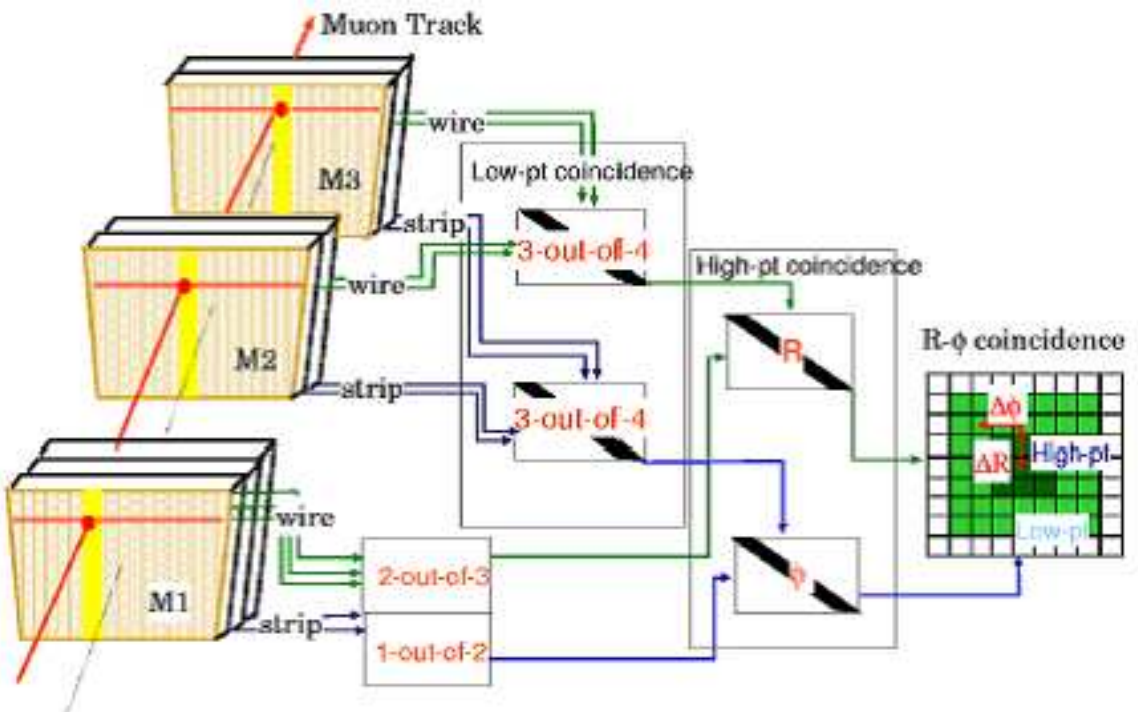


図 4.10: TGC トリガーのコインシデンスと p_{T} 判定

4.3 TGC エレクトロニクス

ここでは TGC エレクトロニクスの概要と、各モジュールの機能及び配置について述べる。

4.3.1 概要

図 4.11 に TGC エレクトロニクスの全体を示す。

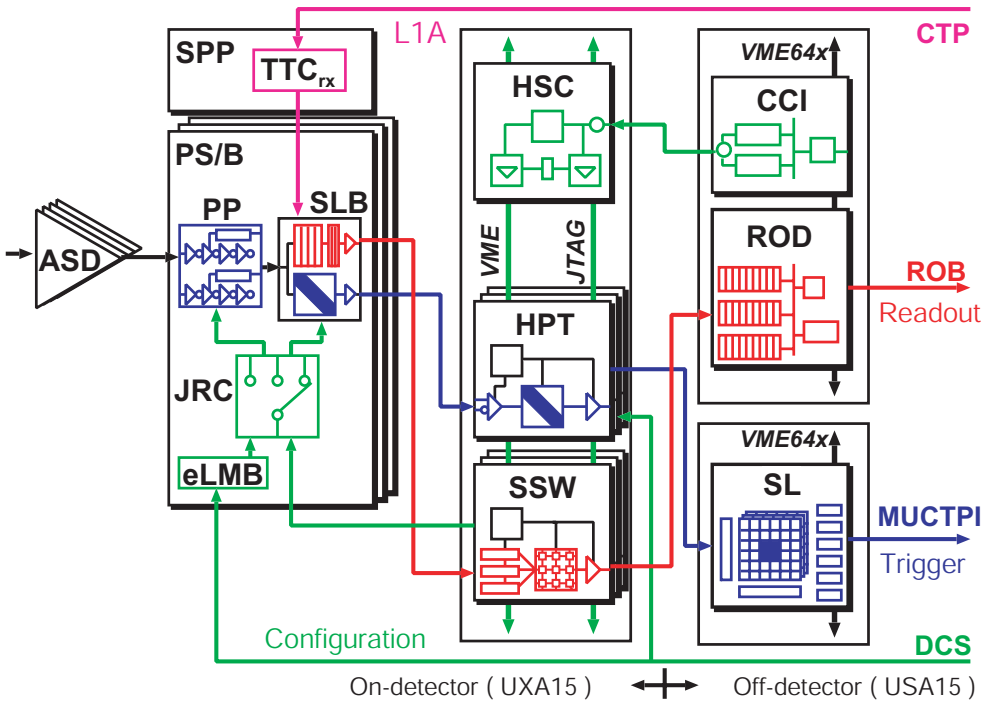


図 4.11: TGC エレクトロニクスのデータの流れ

TGC エレクトロニクスはのデータの流れは、トリガー、読み出し、制御に大別される。以下、各々のデータの流れについて説明する。

トリガー (図 4.12)
TGC の信号は付属の ASD(Amplifier Shaper Discriminator) ボードで増幅、整形された後、チェンバー上に設置される PS-Board に差動信号である LVDS(Low Voltage Differential Signal) で送られる。PS-Board では Patch Panel(PP) によってバンチ識別が行われ、Slave Board(SLB) で Triplet、Doublet、各々独立にコインシデンスが取られる。この結果はビッグホイール外縁に設置されたクレート上の High-pT Board(HPT) に送られ、HPT では Triplet、Doublet 間のコインシデンス判定を行う。判定結果は光ケーブルによって測定室の Sector Logic(SL) に送られ、ここでワイヤー、ストリップ間のコインシデンス処理、δR、$\delta\phi$ による p_{T} 判定を行い、位置情報 (RoI) と p_{T} レベルを MUCTPI に出力する。

読み出し (図 4.13)
CTP が出す LVL1 トリガー信号は、Service Patch Panel(SPP) 上の TTCrx で受信され、SLB へ送られる。SLB は L1A(Level-1 Accept) を受けたバッファ上のデータを、前後あわせて 3 バンチ分、ビッグホイール外縁クレート上の Star Switch(SSW) に送信する。SSW は各 SLB のデータを収集し、光ケーブルで測定室の Read-Out Driver(ROD) に送る。ROD はイベントの整合性をチェックし、PC ベースの Read-Out System(ROS) に出力する。

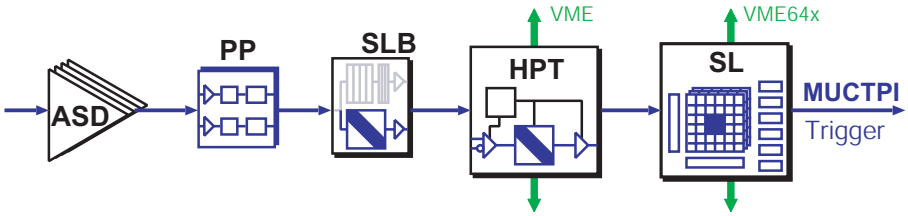


図 4.12: トリガー部

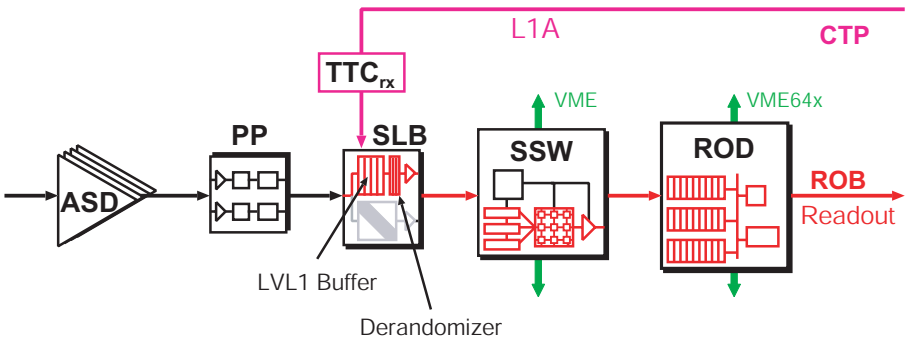


図 4.13: 読み出し部

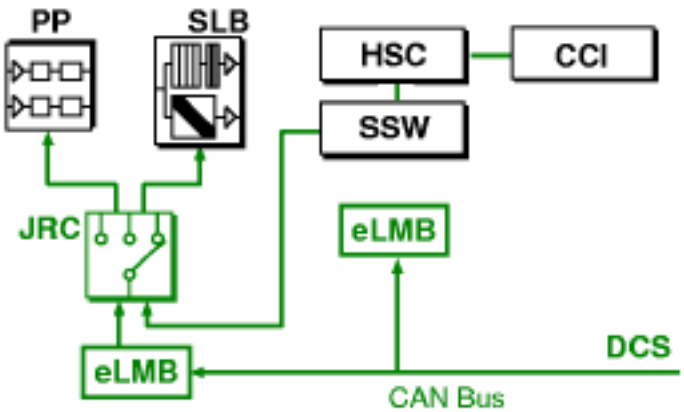


図 4.14: 制御部

制御 (図 4.14)
測定室の VME モジュールは直接 PC で制御される。一方、ビッグホイール外縁の VME クレートには、VME マスターとして HSC(High-pT Star-Switch Controller) が置かれ、測定室の CCI(Crate Control Interface) から光ケーブルを経由して制御する。また、チェンバー上に設置される PS-Board は、SSW から JTAG プロトコルを用いて制御する。この時、PS-Board 上のルーティングには専用の JRC(JTAG Route Controller) が使用される。さらに別系統として DCS(Detector Control System) がビッグホイール外縁の VME クレートと PS-Board に制御系を持ち、TGC の HV(High Voltage supply) や ASD 閾値等の設定、監視が行われる。

4.3.2 配置

前述の TGC エレクトロニクスは大きく分けて三箇所に配置される。図 4.15 に TGC エレクトロニクスの配置を示す。以下に簡単に説明する。

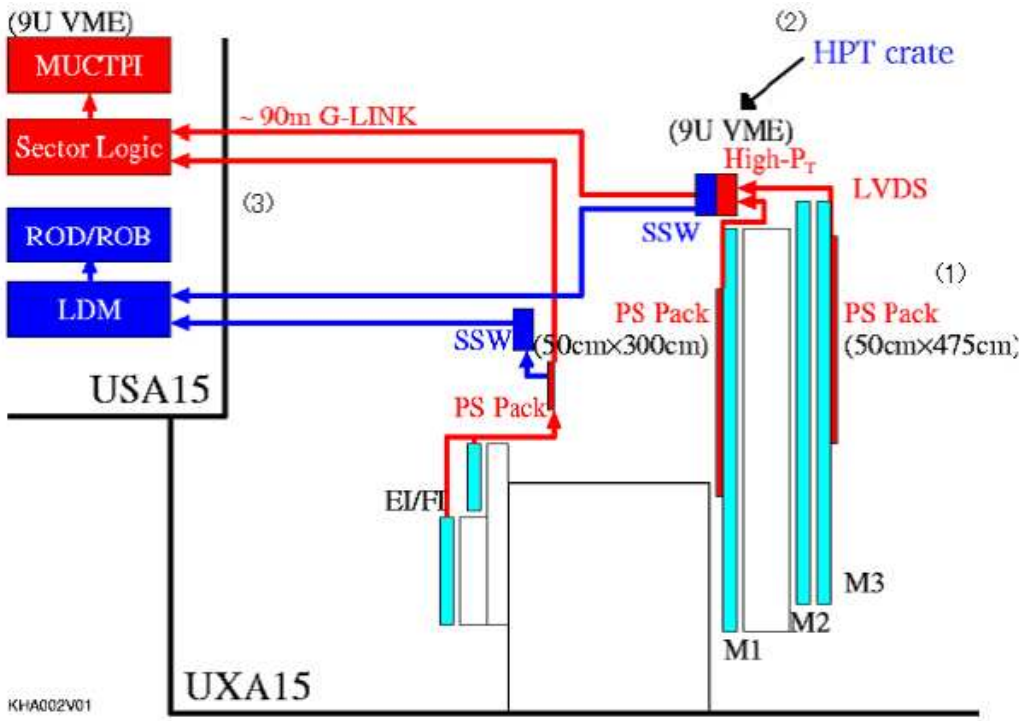


図 4.15: TGC エレクトロニクスの配置

1. PS-Pack (Patch-Panel Slave Board Package)
   M1 の内側と、M3 の外側に設置される。PS-Board と SPP が収められ、チェンバーと直接 LVDS で接続される。TGC エレクトロニクスが設置される場所の中で最も放射線が強く、搭載される IC は ~100Gy の放射線に対する耐性[3] を備えている必要がある。

2. HPT クレート
   ビッグホイール外縁上に設置される VME クレートである。トリガー処理を行う HPT、読み出し処理を行う SSW が設置される。これらは HSC を通じて制御される。PS-Pack と 10m(M1) もしくは 15m(M3) の LVDS で、測定室とは 90m の光ケーブルで接続され、フロントエンドと測定室の中継点として機能する。

[3] 第 5 章で詳しく述べる

3. ROD クレート
測定室 (図 4.16) に設置される VME クレートであり、トリガー処理、読み出し処理をそれぞれ統括する SL、ROD が収容される。また HPT クレートを遠隔制御する CCI が設置される。TGC エレクトロニクスの最下流に位置し、MUCTPI や ROS にデータを受け渡す。

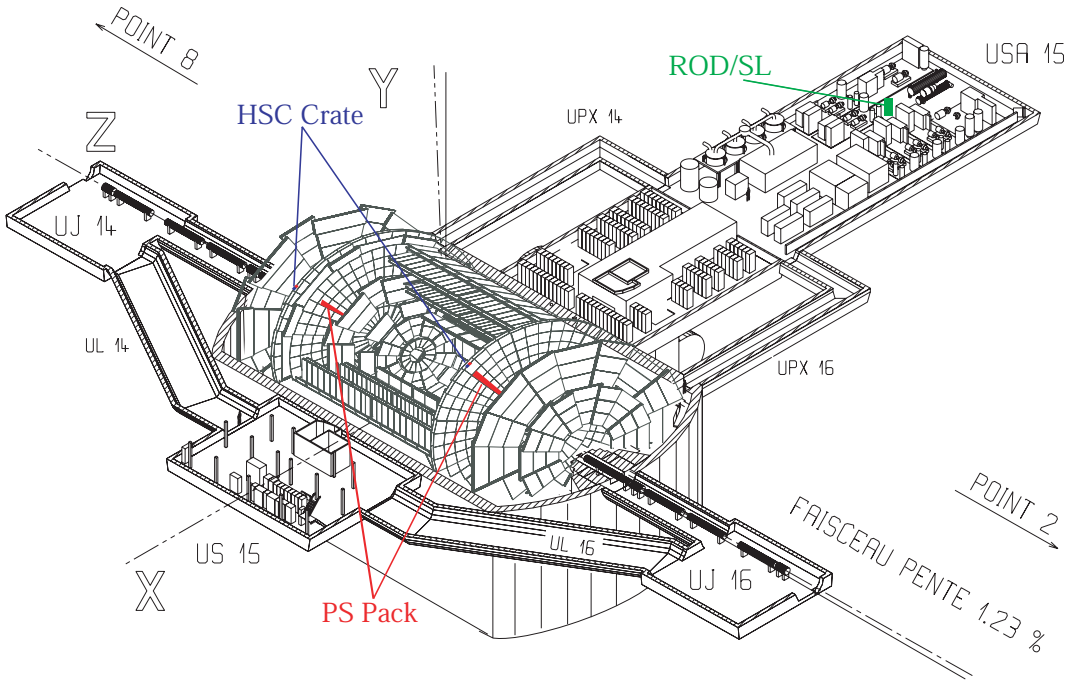


図 4.16: ATLAS 検出器と測定室の位置関係

4.3.3 機能

以下では TGC エレクトロニクスを構成する主なモジュール、ボードの機能について説明する。

ASD
ASD ボード (図 4.17) はチェンバーの外周に取り付けられ、1 ボード当たり 16 チャンネルを処理する。TGC の信号は ASD で 2 段階に増幅され、整形後、閾値電圧と比較される。この出力はノイズに強い差動信号 (LVDS) で PS-Board(PSB) に送られる。ASD の電源電圧と閾値電圧は PSB から供給される。

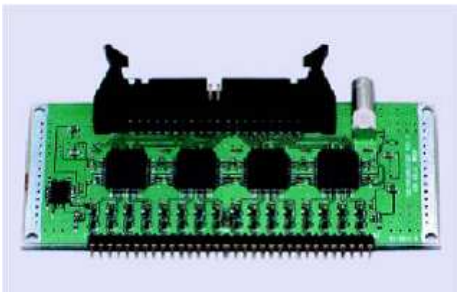


図 4.17: ASD ボード

PS-Board (PSB)
PSB(図 4.18) は、入力信号に応じて数種類のレイアウトが存在するが、典型的には 1 枚の

PSB に PP 8、SLB 2、JRC 1 が載せられる。ボード当たりのチャンネル数は 256~320 である。図 4.19 に PSB のブロック図を示す。PSB は、Service Patch Panel(SPP) からクロック及び L1A 等の TTC 信号を供給される。

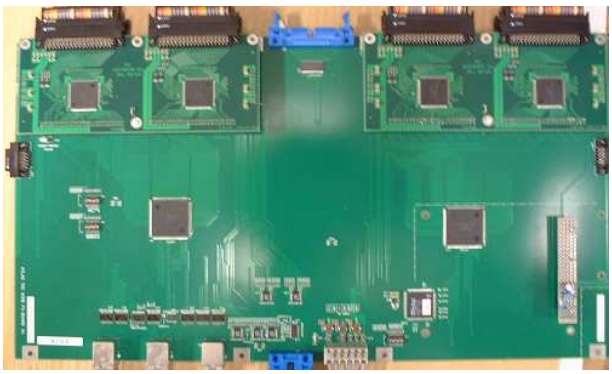


図 4.18: PS-Board

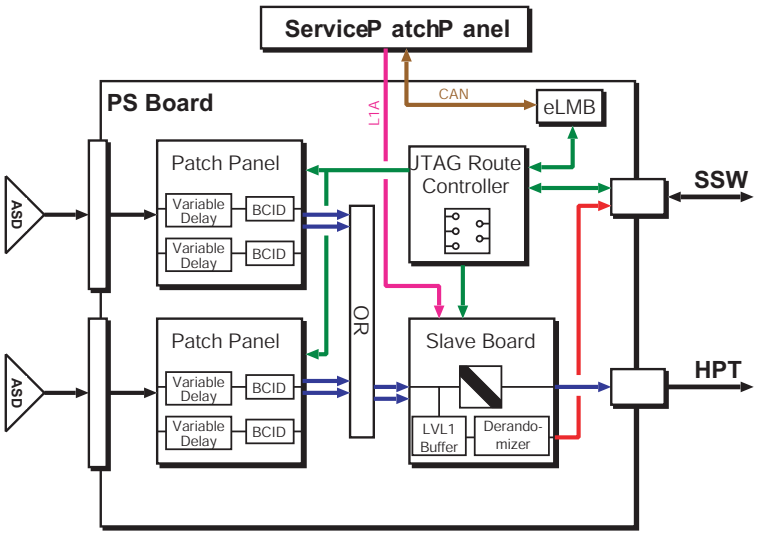


図 4.19: PS-Board のブロック図

- Patch Panel (PP)
  ASD から送られてきた信号は、TOF(Time Of Flight) やケーブル遅延の差により、到達時間が必ずしも一致しない。PP では 1ns 以下の精度で、このタイミング調整を行うことができる。タイミング調整された信号はクロックと同期が取られ、どのバンチで生成されたか決定される。またクロック毎に開けるゲート幅も 25ns から最大 50ns まで拡張することができる。32ch の各入力に対してマスクの設定が可能であり、ASD にテストパルスを出力する機能を持っている。
- Slave Board (SLB)
  SLB では、入力信号のコインシデンス処理、読み出し処理を行う。Triplet/Doublet 各々の Wire/Strip、及び EI/FI の 5 種類のコインシデンスマトリックスを内部で切替えて使用する。典型的には 1 チップで各層 32ch を処理する。Triplet には 2/3(ストリップは 1/2)、Doublet には 3/4 のコインシデンス条件が課されるが、これらはより厳しい条件に設定することも可能である。また、入力部にテストパルスパターンを設定し、テスト

パルスを流す機能を持つ。出力部では、各イベントが L1A のレイテンシーの深さに設定されたパイプラインバッファに貯められ、L1A を受けたイベントは、前後 1 バンチと共に LVDS で SSW に送られる。

PS-Board は、前述のように SPP と共に PS-Pack(図 4.20) に収容される。

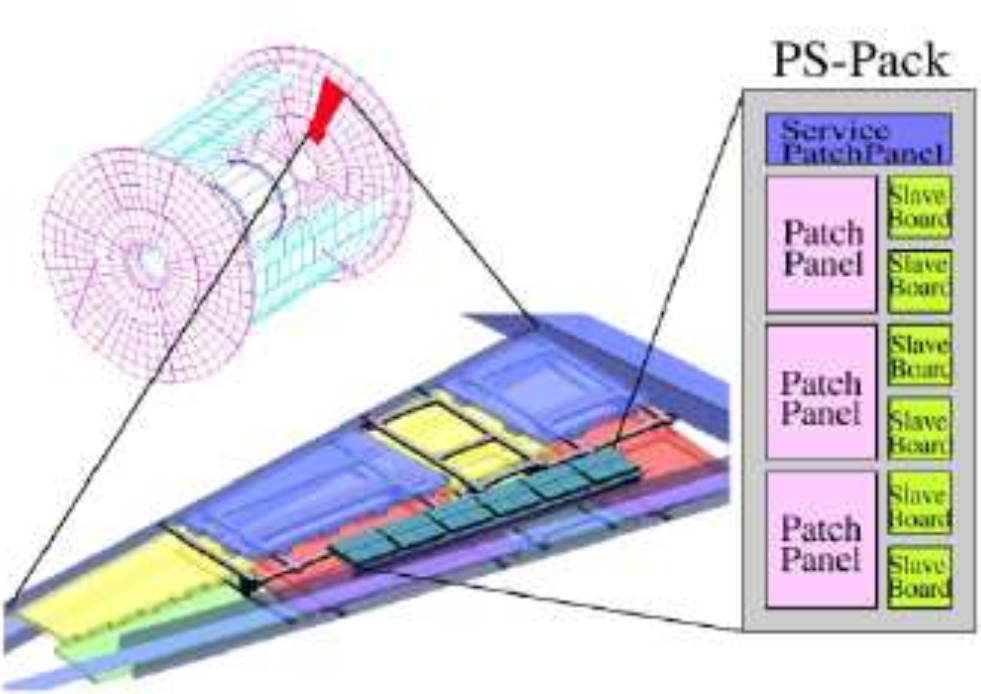


図 4.20: PS-Pack(M1)

High-pT Board (HPT)
HPT(図 4.21) は PSB からの情報を元に Triplet、Doublet 間のコインシデンス処理を行う。High-pT ASIC は 3 つの Doublet SLB から low-p_{T} 信号を受け取り、それに対応した Triplet SLB のヒット信号とコインシデンスを取る。δR、$\delta\phi$ はそれぞれ ± 15 の範囲でエンコードされ、トリガー領域 (RoI) に対応する位置情報と共に、光ケーブルで SL へと送信される。

Sector Logic (SL)
SL(図 4.22) では、ここまで独立に処理されてきた R 方向 (ワイヤー) と ϕ 方向 (ストリップ) のコインシデンス情報から、さらに 6 段階の p_{T} 閾値で分類する。p_{T} の判定には 6 段階の閾値に対応した R-ϕ マップが使用され、このマップは書き換え可能な FPGA(Field Programmable Gate Array) 内に実装されている。
6 段階の p_{T} にはそれぞれプレトラックセレクターが用意され、各段階毎に p_{T} の大きいものから順に最大 2 トラックが選択される。ここで選択された最大 12 トラックがファイナルトラックセレクターに送られ、最終的に 1 トリガーセクターにつき p_{T} の大きい方から最大 2 トラックが選択される。最後に選択されたトラックの p_{T} レベルと位置情報 (RoI) が MUCTPI に出力される。

図 4.21: High-pT

図 4.22: Sector Logic

Star Switch (SSW)
SSW(図 4.23) は SLB から読み出されたデータを収集し、ゼロサプレスによって圧縮後、定められたフォーマットに整形し、後段の ROD へ光ケーブルで送信する。また、データの送受信だけでなく、JTAG [4] プロトコルにより PS-Board の制御、設定を行う機能を持つ。従来の SSW は SRAM 型 FPGA を用いて実装されていたが、素子の論理配位情報が SEU(Single Event Upset) に対して脆弱性を持っていたため、本実験で使用される予定の SSW は、放射線耐性に優れた anti-fuse FPGA を採用している。

Read-Out Driver (ROD)
SSW から転送されたデータを収集し、ID の整合性をチェックした後、イベントデータとして ROS に送信する。ROD(図 4.24) は CPU と SDRAM を搭載し、通常の PC と同じようにロジックをプログラムすることができる。ROD の入出力部には FIFO が備えられているが、入力データ量が処理能力を越えると、CTP にビジー信号を送信する。

図 4.23: Star Switch

図 4.24: ROD

HSC/CCI
HSC(図 4.25)、CCI(図 4.26) はホール内のエレクトロニクスを遠隔制御するためのモジュールである。HSC はビッグホイール外縁上のクレート、CCI は計測室のクレートに置かれ、光ケーブルで接続される。専用のプロトコルでアドレスと値を送受信し、CCI から HSC を経由して SSW、HPT を制御することができる。

[4] IC チップの検査方式の一つであるバウンダリスキャンテストの標準方式

図 4.25: HSC

図 4.26: CCI

第5章　TGCエレクトロニクスの放射線耐性試験

ATLAS 実験では、ハドロン衝突特有の膨大なバックグラウンドが発生するため、TGC エレクトロニクスは γ 線、中性子等、大量の放射線を浴びることが予測される。本章では、放射線が半導体に及ぼす影響と ATLAS 実験の放射線環境、及び TGC エレクトロニクスに用いられる COTS(Component-Off-The-Shelff)-IC の放射線耐性試験の結果について述べる。

5.1　ATLAS 実験における放射線の影響

放射線が半導体に与える影響の内、積算的な吸収線量の効果によるものとして、TID(Total Ionising Dose) と NIEL(Non-Ionising Energy Loss) がある。また、吸収線量に関係なく、単一の放射線粒子の引き起こす効果を SEE(Single Event Effect) と総称する。

- TID(Total Ionising Dose)
  入射粒子の積算的な電離エネルギー損失を評価した量である。TID は主に、電子、陽子などの荷電粒子や、γ 線によって引き起こされる。これらが半導体素子を通過すると、ゲート電極や酸化絶縁膜中で電離が起こり、正電荷捕獲によって常にゲートに正の電圧が印加されている状態になる。その他、TID による影響として、バルク損傷による比抵抗の増加や、界面準位生成によるリーク電流の増加、などが知られている。

- NIEL(Non-Ionising Energy Loss)
  入射粒子の非電離的なエネルギー損失の積算的な評価のことで、一般的に等価フルエンスを用いて評価する。等価フルエンスとは、入射粒子の種類やエネルギーによらず、それらを一つの標準的な粒子のエネルギーに統一するための量である。ここで等価フルエンスは、1MeV の中性子として換算される。
  NIEL に関しては、TGC エレクトロニクスで用いている CMOS デバイスに対するテストを義務付けていないため、行わないものとする。これは、中性子による半導体の劣化は核子の弾性散乱によるバルク中の格子欠陥によるものであり、CMOS デバイスは表面付近のゲート領域のみで動作するため、この影響がバイポーラに比べて少なく、NIEL に対して耐性を持つからである。

- SEE(Single Event Effect)
  単発の高エネルギーのハドロン入射によって起こされる現象であり、ビット反転のような一時的な誤作動 (ソフトエラー) と、半導体デバイスの永久的故障 (ハードエラー) の二種類が存在する。
  典型的なソフトエラーは SEU(Single Event Upset) と呼ばれ、高エネルギーの粒子の通過によって生じる電荷が、カットオフ状態の集積回路をオンしてしまうことによって、メモリセル内のフリップフロップが反転する、などの誤作動を起こす。
  SEL(Single Event Latchup) も、SEU と同じ原理で CMOS 上のサイリスタ構造[1] がオンに

[1] ゲートからカソードへゲート電流を流すことにより、アノードとカソード間を導通させることができる 3 端子の半導体素子、PNPN の 4 重構造をしている

なってしまう現象であるが、サイリスタに大電流が流れ続けると、ジュール熱によって回路が永久的に故障してしまう。SEL はその特性上、メモリセル以外の部分でも発生する。

ATLAS 実験では、RHA(Radiation Hardness Assurance) ワーキンググループが、GEANT [2]をベースにシミュレーションを行い、各サブシステムについて放射線基準値を定め、使用するエレクトロニクスについて耐性をチェックする。TGC エレクトロニクスが設置されるのは、Triplet において (R,Z)=(715-1180cm,1280-1290cm)、Doublet において (R,Z)=(680-1180cm,1470-1480cm) である。RHA のシミュレーションより、TGC エレクトロニクスの放射線基準値 SRL(Simulated Radiation Level) は表 5.1 のようになる [4]。

	SRL_{TID}(Gy/10yr)	SRL_{NIEL}(MeV.n.cm^{-2}/10yr)	SRL_{SEE}(20MeV.h.cm^{-2}/10yr)
Triplet	2.27	2.58E+10	6.54E+09
Doublet	2.49	1.42E+10	4.53E+09

表 5.1: シミュレーションによる放射線基準値 (SRL)

各々の SRL は、SRL_{TID} については 10 年間の積算吸収量[3] 、SRL_{NIEL} については 10 年間の 1MeV 中性子の等価フルエンス、SRL_{SEE} については 10 年間の 20MeV ハドロンの等価フルエンスで評価している。耐放射線基準 RTC(Radiation Tolerance Criteria) の算出に当たっては、SRL のシミュレーションによる不定性等を考慮し、表 5.2 に示す安全係数が定められている [4]。

安全係数	内容	SF_{TID}	SF_{NIEL}	SF_{SEE}
SF_{sim}	シミュレーションの誤差	3.5	5	5
SF_{ldr}	低線量率での長時間照射の効果	5	1	1
SF_{lot}	チップ製造時のロット差による効果	2	2	2

表 5.2: SRL の安全係数

SRL に各安全係数を積算した値が RTC に相当する。従って、TID、NIEL、SEE について、エンドキャップにおける RTC は以下のように見積もられる。

$$\begin{aligned} RTC_{TID} &\sim 1.0 \times 10^{2}[\mathrm{Gy}] \\ RTC_{NIEL} &\sim 3.0 \times 10^{11}[\mathrm{cm}^{-2}] \\ RTC_{SEE} &\sim 7.0 \times 10^{10}[\mathrm{cm}^{-2}] \end{aligned}$$

TGC エレクトロニクスは、上記の RTC の値に相当する照射を行った上で、安定に動作することが要求される。TID については、~100Gy の γ 線を照射することで放射線耐性を評価する。図 5.1 にシミュレーションによる TID の R-Z 分布を示す。
SEE については、ハドロンのフルエンスの基準値に基づき評価すればよいが、SEE の発生率はデバイスの構造と集積度に依存するため、統一的な発生率の基準は与えられておらず、実際の照射試験における SEE の発生率から、システム全体への影響を調べる必要がある。図 5.2 にシミュレーションによる SEE の R-Z 分布を示す。

[2]素粒子、原子核実験における粒子検出器のシミュレーションを行う為に CERN で開発されたライブラリ
[3]物質の単位質量当たりに吸収されるエネルギーで定義される、1Gy = 1J/kg

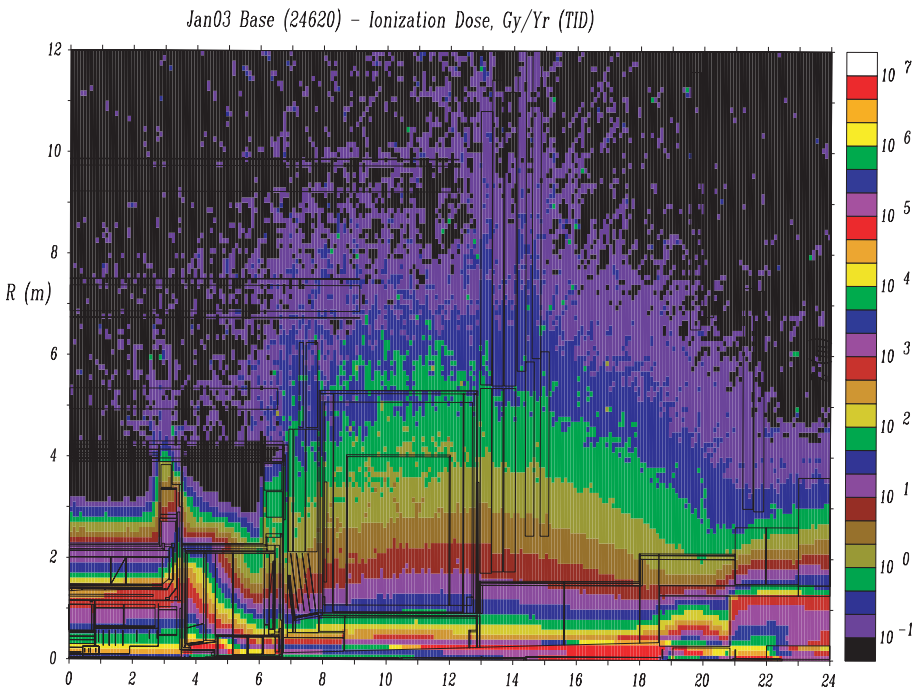


図 5.1: TID の R-Z 分布

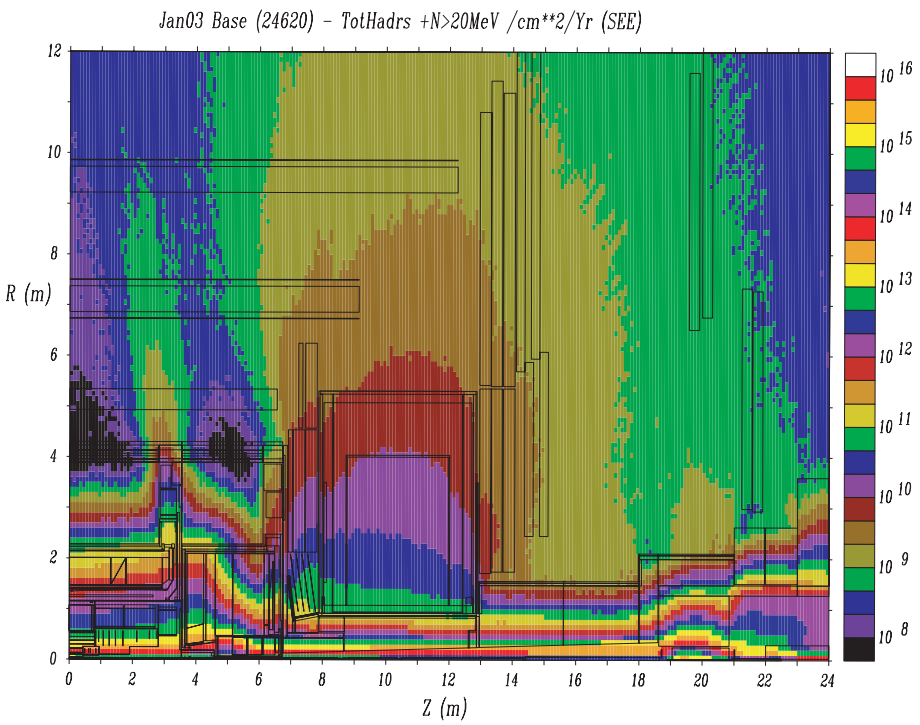


図 5.2: SEE の R-Z 分布

5.2 COTS-IC

TGCシステムでは、各検出器独自のカスタムICと併せ、COTS(Component-Off-The-Shelf)-ICも数多く使用されている。今回の放射線耐性試験の目的は、これらのCOTS-ICが、ATLAS実験の放射線環境下で少なくとも10年間は動作することを保証することである。表5.3に今回試験したICの一覧を示す。

チップ名	ベンダー	機能
SN65LVDS1	TI[1]	HIGH-SPEED DIFFERENTIAL LINE DRIVER
SN65LVDS2	TI	HIGH-SPEED DIFFERENTIAL LINE RECEIVER
SN74LVTH541	TI	OCTAL BUFFERS/DRIVERS WITH 3-STATE OUTPUTS
SN74LVC541	TI	OCTAL BUFFERS/DRIVERS WITH 3-STATE OUTPUTS
SN74ALVC04	TI	HEX INVERTER
TC74AC521F	TOSHIBA	8-BIT EQUALITY COMPARATOR
TC7SA00FU	TOSHIBA	LOW-VOLTAGE 2-INPUT NAND GATE
ADM708SAR	AD[2]	+3V, Voltage Monitoring uP Supervisory Circuits
AD8132	AD	Low-Cost, High-Speed Differential Amplifier
NC7WZ07	FAIRCHILD	UHS Dual Buffer (Open Drain Outputs)
MAX682	MAXIM	3.3V-Input to Regulated 5V-Output Charge Pumps

表 5.3: COTS-IC 一覧

今回の放射線耐性試験では、これらのICをテストするために独自の基板 (図5.3) を作成した。このテスト用基板は、図5.4、及び図5.5に示す2系統のゲート回路と、差動アンプ (図5.6)、DC-DCコンバータ (図5.7) からなる。

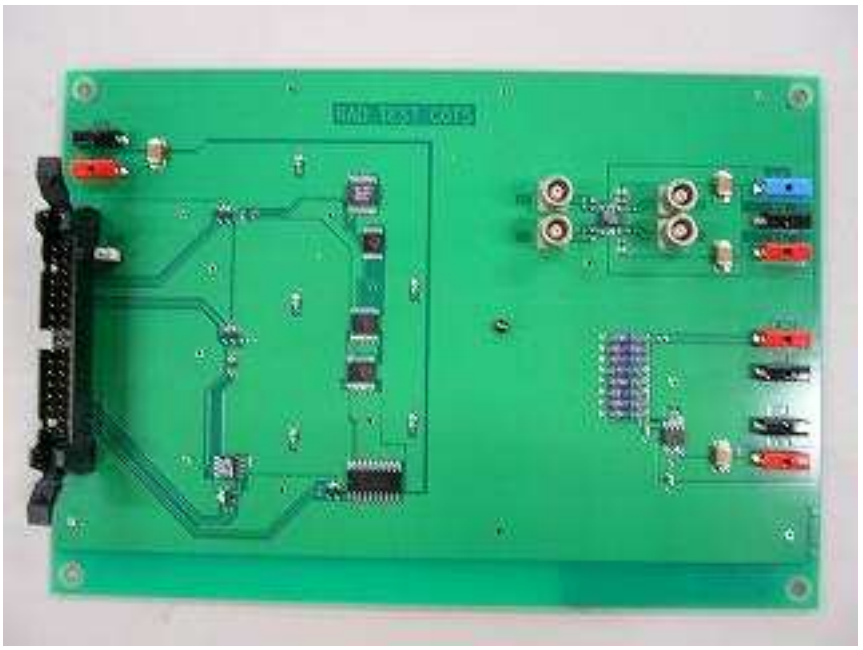


図 5.3: テスト用基板

[1] Texas Instruments Inc.
[2] Analog Devices Inc.

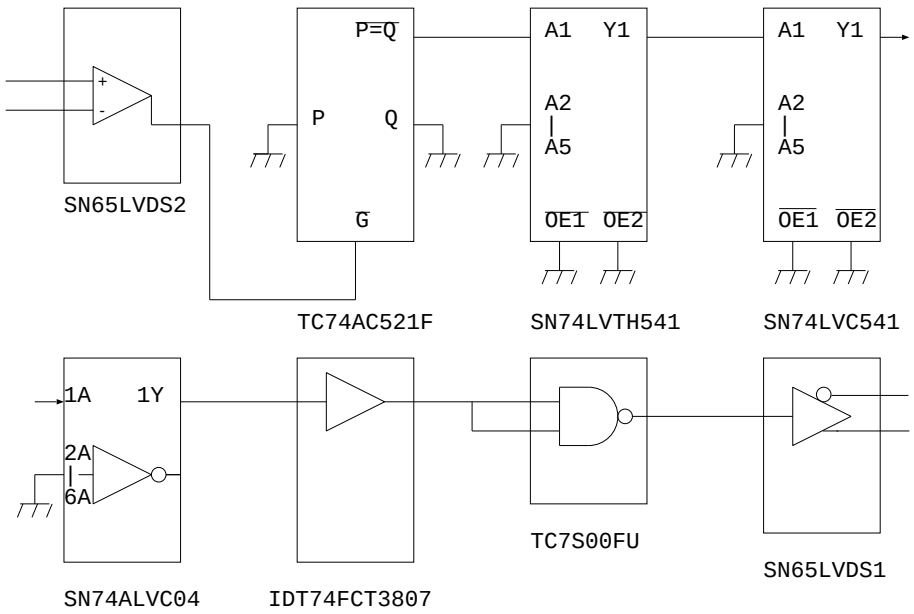


図 5.4: ゲート回路 (1)

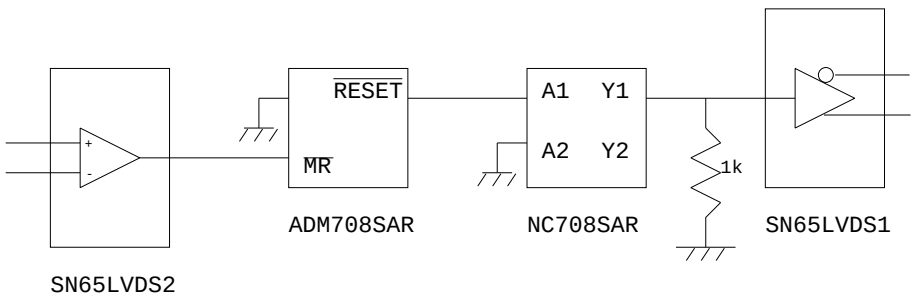


図 5.5: ゲート回路 (2)

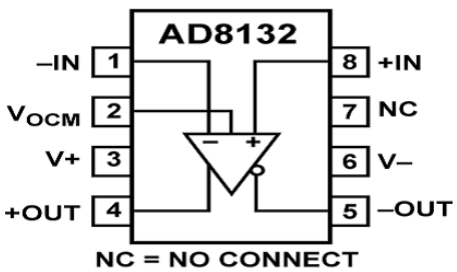


図 5.6: 差動アンプ (AD8132)

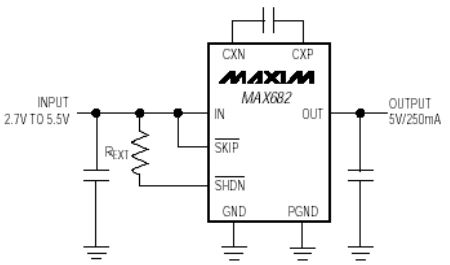


図 5.7: DC-DC コンバータ (MAX682)

各ゲート回路は、30 秒毎に LVDS 入力信号を反転させながら、出力信号の整合性をチェックした。また、差動アンプは入力電流と出力電流を、DC-DC コンバータは入力電圧 (3.3V) と出力電圧 (5.0V) を測定した。その他、基板の電源電圧と各系統の電流を記録した。
今回の照射試験ではこのテスト基板を 6 枚作成し、このうち 4 枚に γ 線照射を、残りの 2 枚に陽子線照射を行った。表 5.4 に各々の目的と内容を示す。

放射線	線源	実験施設	目的
γ 線	^{60}Co	東京大学原子力総合センター	TID に対する評価
陽子線	70MeV 陽子	東北大学サイクロトロン RI センター	SEE に対する評価

表 5.4: 放射線照射試験の目的と内容

5.3 γ 線照射試験

ここでは、東京大学原子力総合センター (RCNST) において、^{60}Co 線源を用いて行われた γ 線照射テストについて述べる。このテストの目的は、γ 線照射による COTS-IC の TID に対する評価である。TGC エレクトロニクスに要求される TID の耐放射線基準値 RTC は、前述のように ~100Gy(10krad) であり、COTS においてもその例外ではない。従って、~100Gy の放射線を照射した状態で、回路が正しく動作することを示す必要がある。
今回の照射テストでは、まずテスト用基板 2 枚について 300Gy を照射した。次いで 1 枚に 1700Gy を照射し、この再現実験として、もう 1 枚に 400Gy を照射した。照射中は、ゲート回路の入出力信号の読み出し、差動アンプ及び DC-DC コンバータの動作確認に加え、各系統の電流を測定した。

5.3.1 γ 線照射

図 5.8 に照射テスト時のセットアップを示す。照射室は二階建てになっており、二階部分に ^{60}Co 線源が収納されていて、照射時のみ一階部分に線源が下りてくる構造になっている。線源は円柱状のものが 58 本、円筒容器に密封されている (図 5.9)。線源の最大強度は 22TBq で、水に対する最大線量率はおよそ 1000Gy/h である。γ 線強度の値は、RCNST のフリッケ測量計[4] によって測定された値である。また、実際の照射率は線源とテスト基板までの距離によって決まるが、水に対する線量率をシリコンに対する線量率に換算する[5] 必要がある。今回のテストでは線源と基板の間の距離は 15cm とした。従って、線量率は 137Gy/h と算出される。ゲート回路の LVDS 信号は、VME クレートから汎用 FPGA モジュール (PT4) を経由して読み出し、オンラインソフトウェアで入出力の整合性をチェックした。また、各系統の電流及び電圧は、デジタルマルチメーター (KEITHLY2000) を用いてリアルタイムに PC に取り込んだ。

5.3.2 結果、考察

表 5.5 に各基板の照射結果をまとめる。基板 No.1 と No.2 では、2 時間余りで ATLAS 実験約 30 年分に相当する ~300Gy を照射したが、COTS の動作に異常は発生しなかった。No.3 には 12 時間半に渡って照射を行った結果、3 時間を経過した時点で、ゲート回路の出力信号が入力信号と一

[4]硫酸鉄 (II) 水溶液に放射線を照射し、水の放射線分解物との反応で Fe^{2+} イオンが Fe^{3+} イオンに酸化される。この酸化反応の変化量から吸収線量を求める線量計を鉄線量計またはフリッケ線量計という
[5]吸収線量を D、Z を分子を構成する全原子番号の和、A を全ての質量数の和とすると、$D_1 \times A_1/Z_1 = D_2 \times A_2/Z_2$ の関係が成り立つ。ここで 1 と 2 はそれぞれ基準となる分子と変換したい分子を表す。Si の場合は Z/A=0.498 である

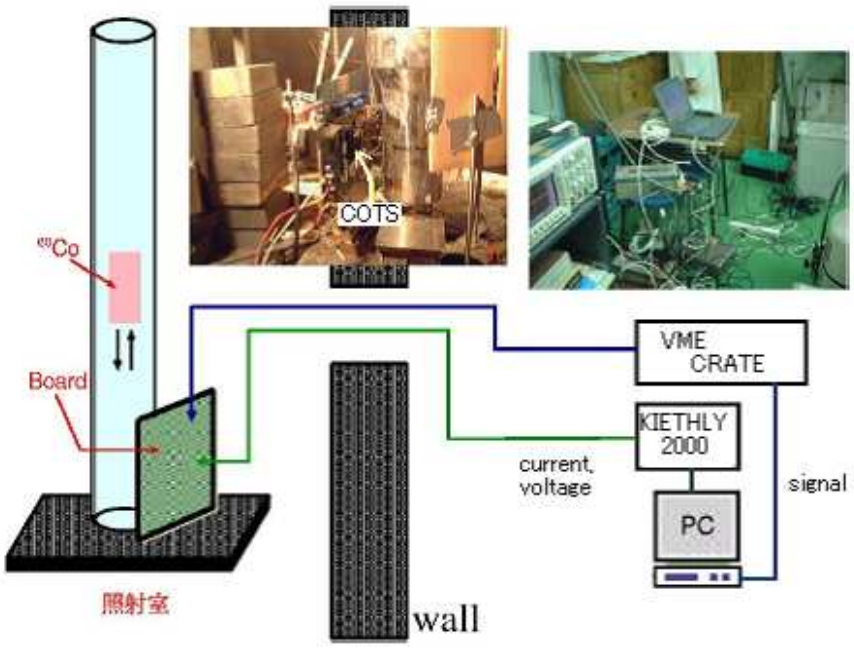


図 5.8: γ 線照射試験セットアップ

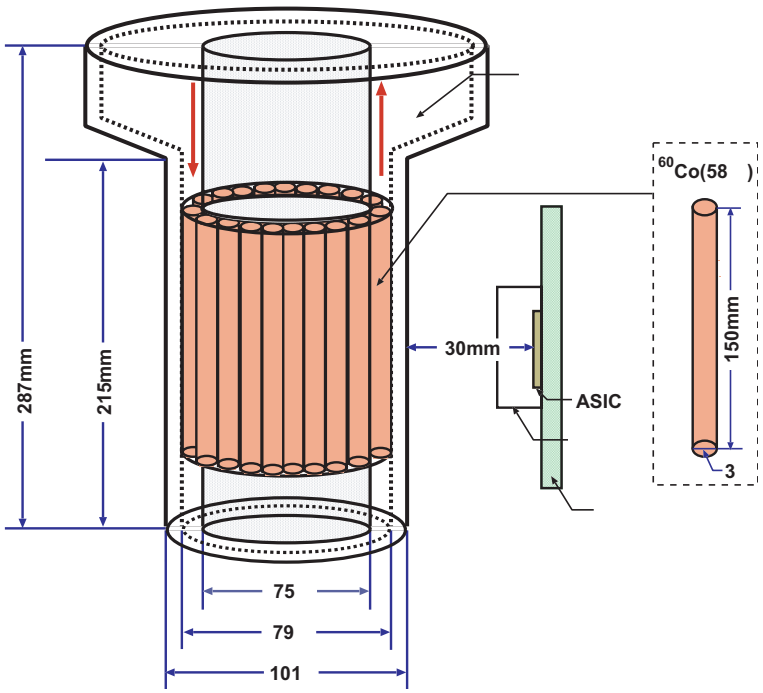


図 5.9: ^{60}Co 線源

致しなくなるエラーが発生した。各 IC の出力をチェックした結果、ADM708SAR でリセットがかからなくなっていることが判明した。エラーの発生記録に基づき、No.4 ではこの再現を試みたところ、照射開始後ほぼ同時間 (≈400Gy) に同じエラーが確認された。従って、このエラーは IC の性能限界によるものであると言える。

基板 ID	放射線量 [Gy]	備考
No.1	300	異常なし
No.2	300	異常なし
No.3	1700	≈400Gy でゲート回路にエラー発生
No.4	400	No.3 のエラーを再現

表 5.5: γ 線照射試験結果

図 5.10 に照射線量と DC-DC コンバータの出力電圧を、図 5.11 に差動アンプの正出力と、負出力を反転させたものをそれぞれ示す。DC-DC コンバータの出力電圧を見ると、照射開始とともに電圧が上昇し、~1000Gy から減少に転じていることが分かる。その後アニーリングにより電圧は再び上昇している。アンプの出力では、照射にともない正電流に顕著な増加が認められる。しかし、いずれも ATLAS 実験 10 年相当の照射量 (~100Gy) では問題なく動作することが確認できる。

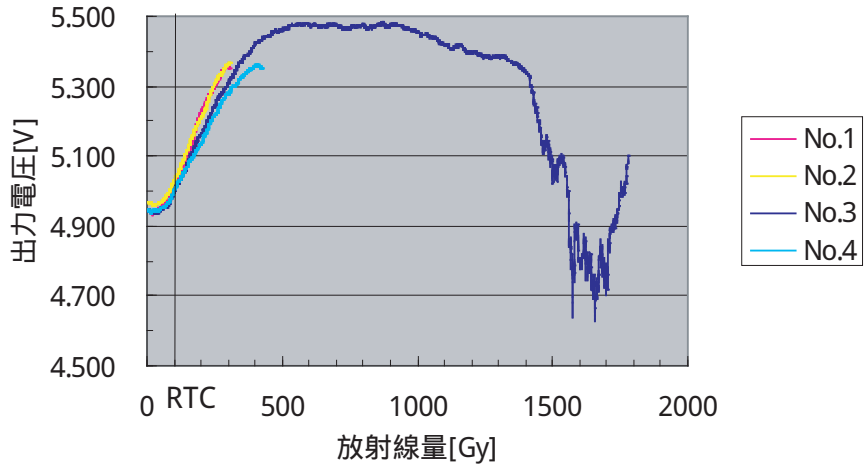


図 5.10: コンバータの出力電圧 (基板 No.1-4)

5.4 陽子線照射試験

ここでは、東北大学サイクロトロン RI センター (CYRIC) で行われた、陽子線による SEE の評価について述べる。SEE は、高エネルギーのハドロン粒子により偶発的に起こされる現象であり、統一的な発生率の評価は存在しない。しかし、放射線による SEE は、主として 20MeV 以上のハドロンビームによって引き起こされ、その断面積は、それ以上のエネルギーではほぼ一定であることが知られている [5]。このため、今回の照射試験では 70MeV の陽子ビームを用いて評価

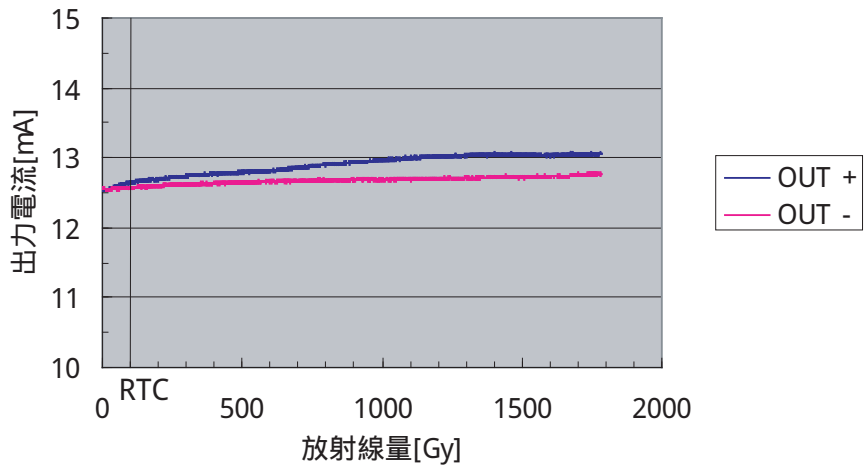


図 5.11: 差動アンプの出力電流 (基板 No.3)

を行った。ここでは、テスト用基板 2 枚に陽子ビームを照射し、γ 線照射時と同様に、ゲート回路の信号、DC-DC コンバータの電圧、アンプの電流等を測定した。

5.4.1 陽子線照射

図 5.12 に全体のセットアップを示す。照射室に設置されたテスト用基板からはデータ読み出し用のフラットケーブル、電源ケーブル、X-Y ステージ[6] のコントロール用のフラットケーブルが伸ばされる。データ読み出し用ケーブルは VME クレート内の PT4 に接続され、Linux-PC によって制御する。一方、X-Y ステージ用のケーブルは専用のコントローラーに接続され、Windows-PC でステージを動作させる。照射室に置かれているこれらの PC は、測定室からネットワークを経由して、VNC または SSH を用いて遠隔操作した。

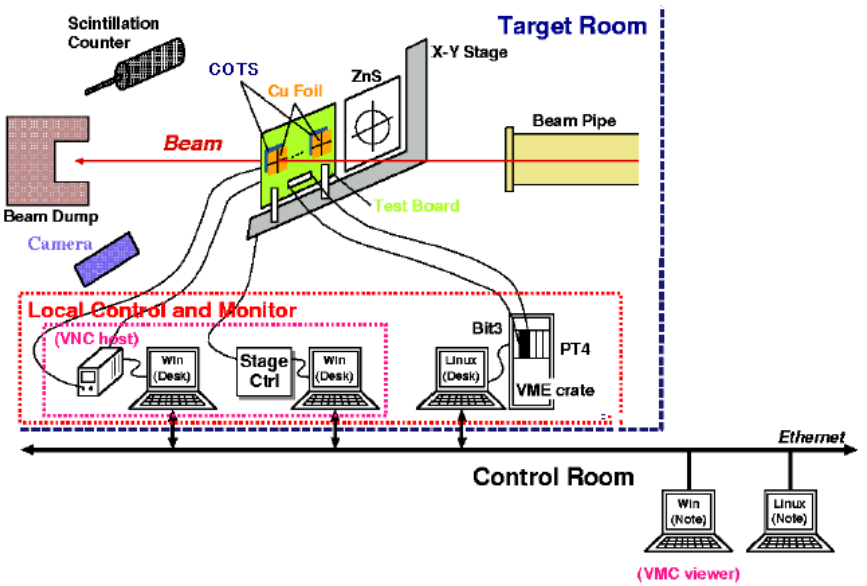


図 5.12: 陽子ビーム照射試験セットアップ

[6] ターゲットやビームモニタの位置の調整を遠隔操作によって行う装置

図 5.13 に実際のビーム照射室を示す。ビームはビームパイプを通過し、テスト基板上の COTS に照射される。基板の後方にはファラデーカップを内蔵したビームダンプが設置されている。ダンプ上にはファイバーシンチレータを置き、ビームのモニターに使用した。

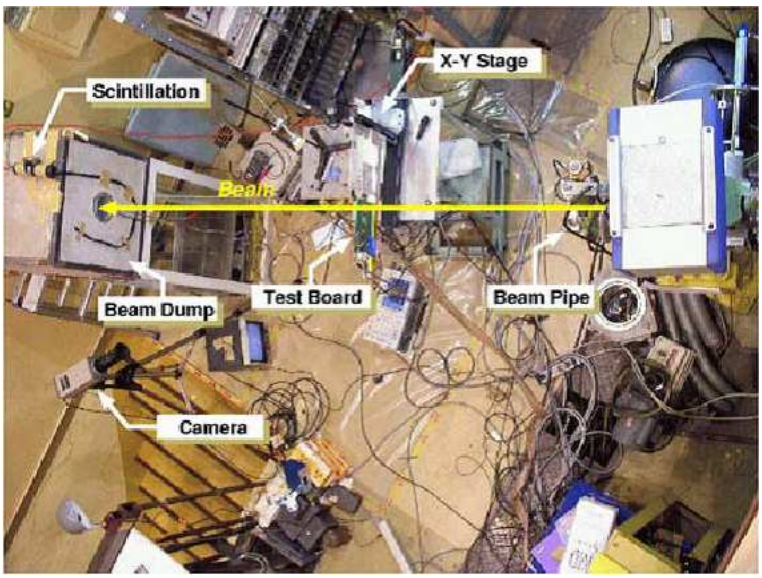


図 5.13: 陽子ビーム照射室

次に、図 5.14 に X-Y ステージのセットアップを示す。X-Y ステージには、基板の位置を調節するために、アルミフォイルに ZnS を塗布した蛍光性のスクリーンを設置した。照射中は、このスクリーンをモニターすることによってビームの照準を合わせ、それからターゲットをビーム位置に動かした。ビームプロファイルと強度の測定は、基板上に Cu フォイルを貼り付け、照射後の Cu から線量測定を行った。ビームラインの最終段のストッパーで測定したビーム電流は 2nA であり、ビームの直径は最大で 25mm まで広げることができる。

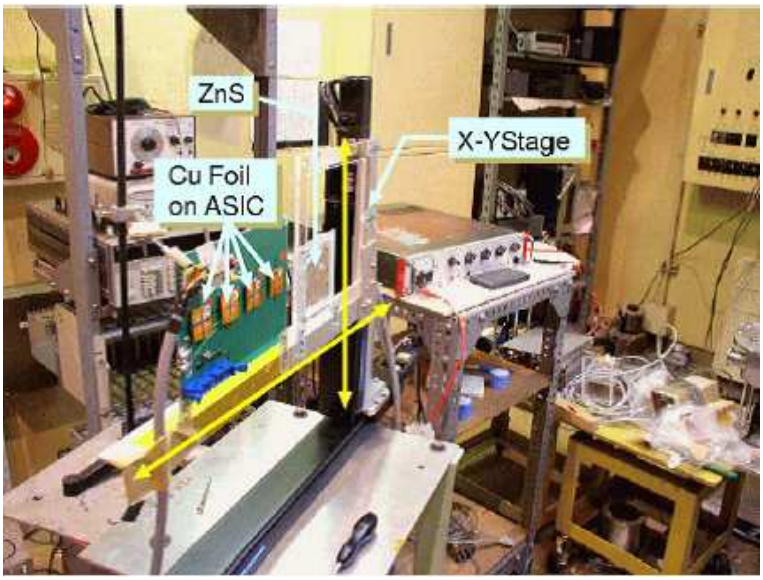


図 5.14: X-Y ステージ

5.4.2　結果、考察

今回の陽子ビーム照射では、照射線量を定量的に評価するため、金属フォイルを使用して線量測定を行った。今回使用したフォイルは 25mm×25mm の Cu(純度 99.99% 以上) であり、これを各基板に全ての COTS を覆うように 8 枚ずつ貼り付けて照射を行った (図 5.15)。図中のアルファベットは、図 5.18 と対応している。

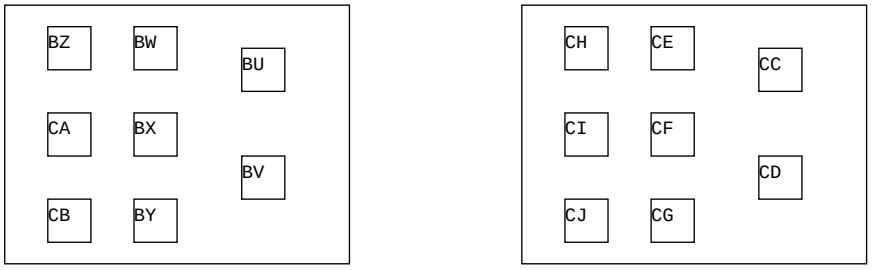


図 5.15: Cu フォイルの配置

照射後はゲルマニウム検出器を用いて Cu フォイルの γ 線スペクトルを測定する。図 5.16 にスペクトル測定のセットアップを示す。アクリル板の中央に Cu フォイルを貼り付け、Cu フォイルとゲルマニウム検出器の距離が 5cm となるように置く。検出器の不感時間を除いて 1000 秒間、γ 線測定を行った。

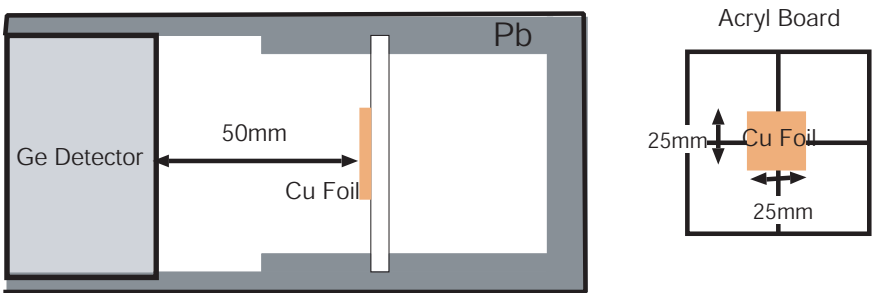


図 5.16: Ge 検出器のセットアップ

図 5.17 に、スペクトル測定結果の一例を示す。線量測定は、図中に示されている各生成核子の、特性 X 線のピークを用いて行う。チップ毎に観測される γ 線の種類に違いはなかった。

また、各 COTS-IC の相対強度の補正を行うため、Cu フォイルに対してイメージングプレートによるビームプロファイルの測定を行った。イメージングプレートとは、輝尽性発光[7] 体が塗布されたフィルム状の画像センサーである。X 線、電子線、中性子などの放射線を高感度で検知し、2 次元の画像情報が得られる。輝尽性発光体に放射線を照射した後、レーザーで励起させることにより、放射線を受けた部分が発光する。この光を光電子増倍管で電流に変換し、画像化する。イメージングプレートの輝尽性発光体の強度は PSL(Photo-Stimulated Luminescence) 値という単位で表され、照射線量に比例した値となる。図 5.18 に各フォイルのビームプロファイルを示す。さらに各フォイルを縦横に 10 分割し、IC を含む 4 セルを平均して相対強度を求めた。

[7] 物質に放射線などの第 1 の刺激を与えた後で、第 2 の刺激を励起光として照射した際に、第 2 の光よりも波長が短く、かつ最初の刺激に対応した第 3 の光を発する発光現象

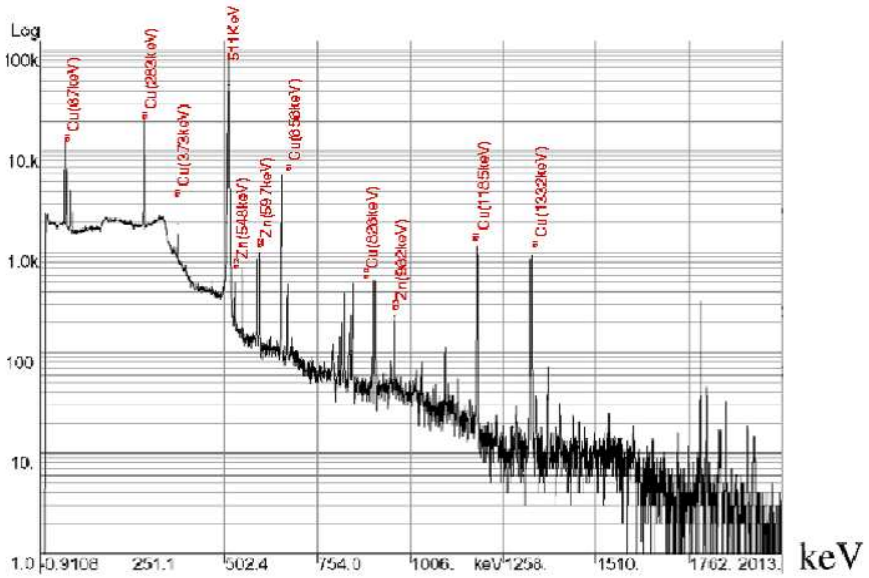


図 5.17: γ 線スペクトル

次に陽子のフラックスの見積もりについて述べる。陽子により Cu フォイルから生成された核の個数を N、陽子のフラックス $\phi[\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}]$、ターゲットである Cu フォイルの原子数 N_t、陽子とターゲットの有効断面積 σ_{eff}、陽子により生成された核の崩壊定数 $\lambda[\mathrm{s}^{-1}]$ とする。陽子によって、Cu フォイルから生成される核の生成速度は

$$\frac{dN}{dt} = \phi \cdot \sigma_{eff} \cdot N_t - \lambda \cdot N \tag{5.1}$$

となる。ここで有効断面積は陽子と直接反応することによって生成される断面積である。式 5.1 を陽子線照射時間 $\mathrm{T}_r[\mathrm{s}]$ で積分すると

$$N = \frac{\phi \times \sigma_{eff} \times N_t}{\lambda} \times (1 - \exp(-\lambda \times T_r)) \tag{5.2}$$

になる。ここで Cu フォイルの原子数 N_t を計算する。Cu フォイルの厚さ $\mathrm{t}(100\mu\mathrm{m})$、面積を $\mathrm{S}(2.5\mathrm{cm}\times 2.5\mathrm{cm})$ 密度を ρ、原子量を A、アボガドロ数を N_A なので、

$$N_t = t \times S \times \rho N_A / A = 5.27 \times 10^{21} \tag{5.3}$$

と求められる。
照射終了時刻を t=0 として、時刻 t にこの Cu フォイルから放出する放射能の強さ B[Bq] は、

$$\mathrm{B}(t) = \lambda \cdot N(t) = \lambda N \cdot \exp(-\lambda t) \quad [\mathrm{Bq}] \tag{5.4}$$

で与えられ、照射後 $\mathrm{T}_m[\mathrm{s}]$ から $\mathrm{T}_c[\mathrm{s}]$ 間にゲルマニウム検出器で得られた γ 線の数を C_γ、生成された核の γ 線への分岐比を R、検出効率を ϵ とすると、

$$\begin{aligned} C_\gamma &= \epsilon R \int_{T_m}^{T_m+T_c} B(t)dt \\ &= \epsilon R N(\exp(\lambda T_m) - \exp[-\lambda(T_m - T_c)]) \end{aligned} \tag{5.5}$$

となり、式 5.2 に代入すると、陽子のフラックス ϕ は

$$\phi = \frac{C_r \lambda}{\epsilon R \sigma_{eff} N_t}(1 - \exp(\lambda T_r))(\exp(\lambda T_m) - \exp[-\lambda(T_m + T_c)]) \tag{5.6}$$

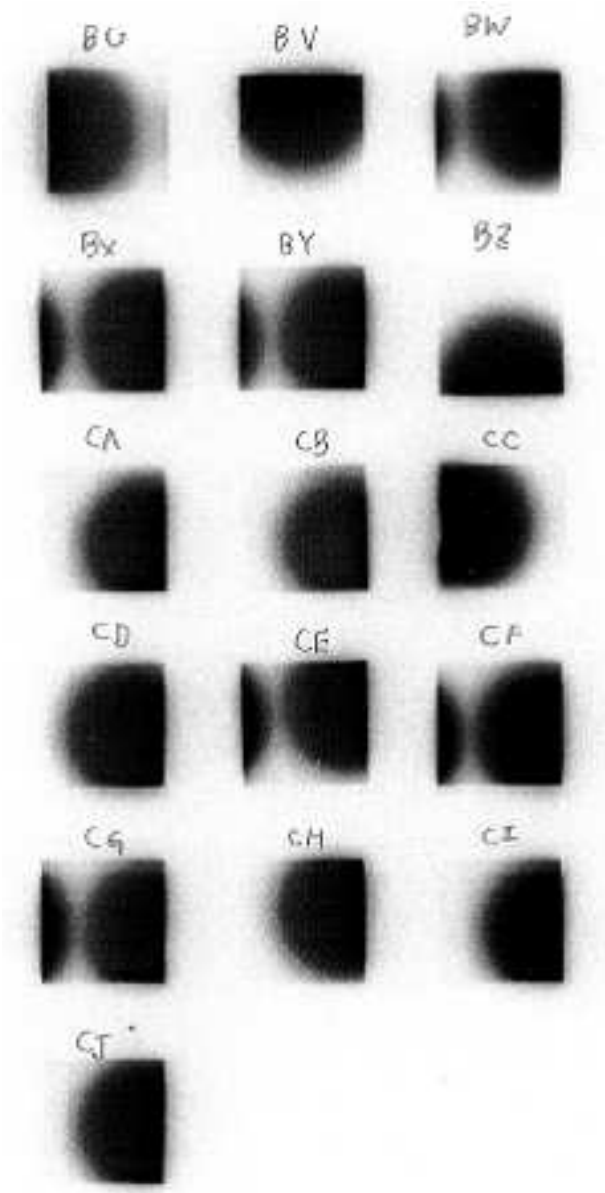


図 5.18: IP 測定によるビームプロファイル

となる。ただし、ここで求めた陽子のフラックスは 25mm 角の Cu フォイルにビームが一様に照射していると仮定しているので、相対強度 ϵ_r を用いることにより各 IC に対する陽子フルエンスを求めることができる。

$$F = \phi \times T_r \times 2.5^2 \times \epsilon_r / 0.5^2 \quad [\mathrm{cm}^{-2}] \tag{5.7}$$

次に各チップが受けた吸収線量 X を求める。70MeV 陽子によるシリコン中のエネルギー損失 dE/dx は

$$\frac{dE}{dx} = 7.6[\mathrm{MeV} \cdot \mathrm{cm}^2/\mathrm{g}] = 1.6 \times 10^{-5} \quad [\mathrm{erg} \cdot \mathrm{cm}^2/\mathrm{g}] \tag{5.8}$$

である。このエネルギー損失と陽子フルエンスから吸収線量は以下のようになる。

$$\begin{aligned} X &= \frac{dE}{dx} \times F \\ &= 1.6 \times 10^{-5} \times F \quad [\mathrm{erg/g}] \\ &= 1.6 \times 10^{-9} \times F \quad [\mathrm{Gy}] \end{aligned} \tag{5.9}$$

以上の方法で陽子線のフルエンスを吸収線量に換算すると、$\mathrm{RTC_{SEE}}$ は ~100Gy に相当する。図 5.19 に吸収線量に換算したフルエンスに対する DC-DC コンバータの出力電圧を、図 5.20、図 5.21 に差動アンプの出力電流を示す。~100Gy の陽子線を照射しても各チップの動作に問題は見られないことが分かる。γ 線の照射結果と比較すると、陽子線を照射した場合の方が、DC-DC コンバータの出力電圧の上昇が早く、上昇幅も大きい。一方、差動アンプの出力電流を比較した場合、両者に大きな差は見られない。
表 5.6、および表 5.7 に照射試験の結果をまとめる。表中では、$\mathrm{RTC_{SEE}}(\sim 7.0 \times 10^{10}[/\mathrm{cm}^2])$ を 10 年として、照射したフルエンスが ATLAS 実験環境下で相当する年数を示している。陽子線照射では、$\mathrm{RTC_{SEE}}$ の照射線量を越えてからも含め、一度も SEE は観測されなかった。また γ 線照射の際に起きたゲート回路のエラー等、COTS の動作異常も発生しなかった。

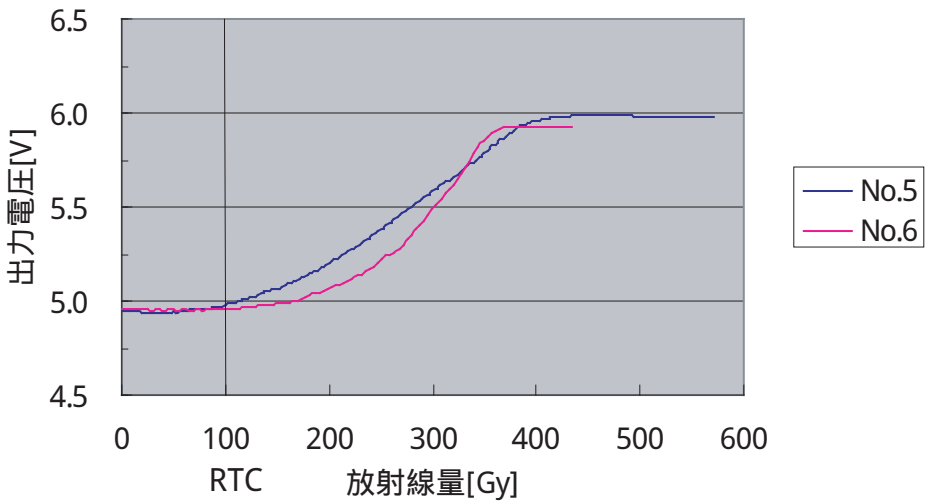


図 5.19: コンバータの出力電圧 (基板 No.5-6)

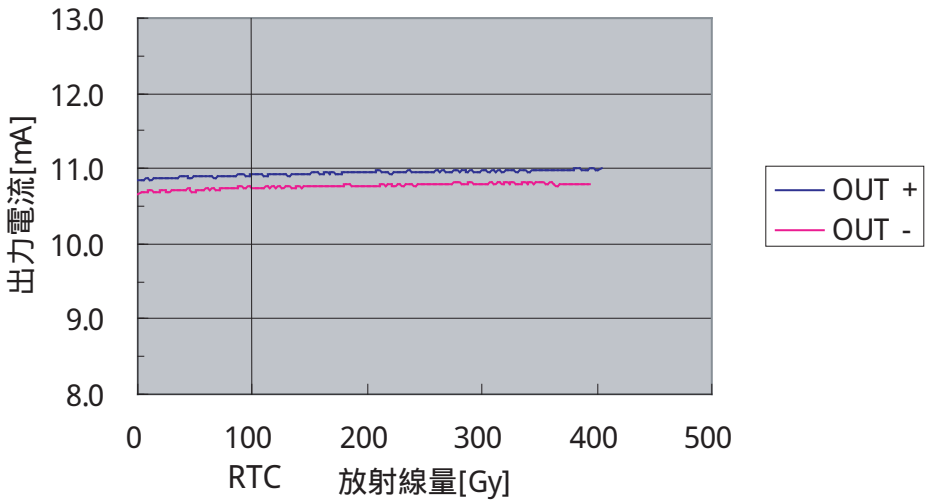


図 5.20: 差動アンプの出力電流 (基板 No.5)

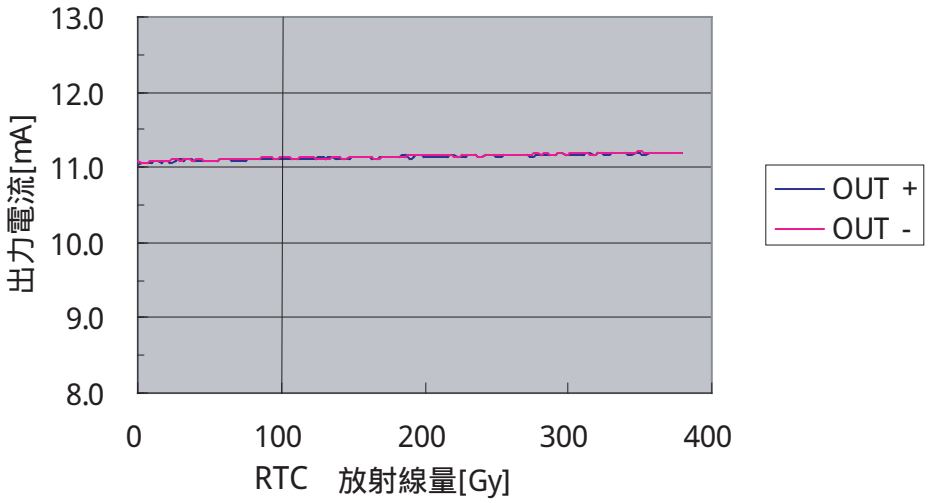


図 5.21: 差動アンプの出力電流 (基板 No.6)

チップ名	ϕ[/s/cm^2]	照射時間 [s]	フルエンス [/cm^2]	ATLAS 実験 [yr]
AD8132	2.40E+08	689	2.52E+11	36.0
MAX682	2.29E+08	1085	3.59E+11	51.3
IDT74FCT3807	2.46E+08	629	2.28E+11	32.6
SN74ALVC04	2.46E+08	629	1.13E+11	16.1
SN74LVC541	2.55E+08	645	1.57E+11	22.4
SN74LVTH541	2.55E+08	645	1.96E+11	28.0
SN65LVDS2	2.26E+08	735	8.67E+10	12.4
TC74AC521F	2.26E+08	735	2.80E+11	40.0
SN65LVDS1	1.77E+08	655	1.33E+11	19.0
TC7SA00FU	1.77E+08	655	1.43E+11	20.4
SN65LVDS1	1.89E+08	635	1.78E+11	25.4
NC7WZ07	1.89E+08	635	2.06E+11	29.4
ADM708SAR	1.86E+08	433	1.09E+11	15.6
SN65LVDS2	1.86E+08	433	1.23E+11	17.6

表 5.6: 陽子線照射結果 (基板 No.5)

チップ名	ϕ[/s/cm^2]	照射時間 [s]	フルエンス [/cm^2]	ATLAS 実験 [yr]
AD8132	2.31E+08	580	2.37E+11	36.0
MAX682	2.75E+08	539	2.71E+11	38.7
IDT74FCT3807	2.41E+08	584	1.78E+11	25.4
SN74ALVC04	2.41E+08	584	9.18E+10	13.1
SN74LVC541	2.39E+08	610	1.55E+11	22.1
SN74LVTH541	2.39E+08	610	2.01E+11	28.7
SN65LVDS2	2.29E+08	615	1.21E+11	17.3
TC74AC521F	2.29E+08	615	2.38E+11	34.0
SN65LVDS1	1.82E+08	594	1.17E+11	16.7
TC7SA00FU	1.82E+08	594	2.22E+11	31.7
SN65LVDS1	1.58E+08	595	1.19E+11	17.0
NC7WZ07	1.58E+08	595	1.28E+11	18.3
ADM708SAR	1.94E+08	565	1.63E+11	23.2
SN65LVDS2	1.94E+08	565	1.65E+11	23.6

表 5.7: 陽子線照射結果 (基板 No.6)

5.5 まとめ

今回の放射線照射試験では、γ 線、および陽子線を用いて、TGC エレクトロニクスに採用される予定の COTS-IC の放射線耐性を試験した。その結果、γ 線による TID の試験では、基準値とされる 100Gy の放射線を照射しても、コンバータの出力電圧や、アンプの出力電流は約 1% 増加するに止まり、ゲート回路でもエラーは発生しなかった。また、陽子線による SEE の試験では、$7.0\times10^{10}\mathrm{cm}^{-2}$ のフルエンスにおいて、SEE が発生しないことが実証された。以上から、これらの COTS-IC は、ATLAS 実験の放射線環境下で、少なくとも 10 年間は確実に動作すると言える。この結果、これらの COTS-IC を TGC エレクトロニクスの構成部品として用いることが可能となった。

第6章　ビームテストによるTGCシステム評価

以下では、2004 年 10 月に CERN において行われたビームテストについて述べる。このビームテストでは、25ns バンチ構造を持ったミューオンビームを用いて、TGC トリガーシステム全体の動作を検証するとともに、その他のミューオンシステム (MDT、RPC、MUCTPI) との統合試験が行われた。この章では、ビームテストの概要と、TGC システムから読み出されるデータ解析について、特に CTB(Combined Test Beam) のデータに関する手法と結果を中心にまとめる。

6.1　目的

TGC ミューオントリガーシステムにおいて、チェンバーは既に量産および検査を終了し、これまで ASIC、あるいはモジュール単位で開発が進められてきたエレクトロニクスに関しても、ATLAS 実験で要求されるフルスペックを備えている。今回のビームテストでは、2003 年に行われた同様のビームテストの結果 [9, 10] を受け、一部に変更が加えられた TGC エレクトロニクスに関して、デザインの最終確認を行った。
また、CTB において、レベル 1 ミューオンシステムのトリガーによる DAQ の検証を行った。CTB のデータは、全ての検出器で単一の DAQ によって記録され、このデータの解析手法としては、ATHENA [1] フレームワークが一般的に利用されているが、今回の CTB では、独自のデコーダーによって、スタンドアローンの解析と同様の TGC システムの評価を可能とした。

6.2　セットアップ

図 6.1 にビームテストにおけるミューオン検出器の配置を示す。TGC の前方及び後方と、M1 と M2/M3 の間にエンドキャップ MDT が設置されており、ビーム上流には、バレル MDT 3 ステーションと RPC がそれぞれ設置された。

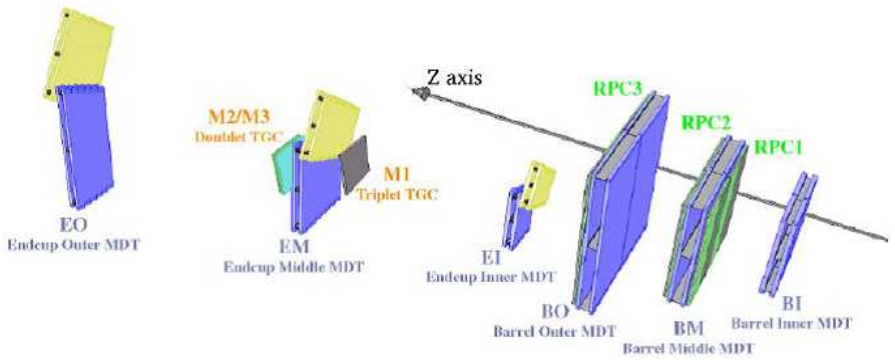


図 6.1: ミューオン検出器の配置

[1] ATLAS 実験の解析ソフトウェア

6.2.1　ミューオンビーム

ビームは、SPS(Super Proton Synchrotron) 加速器の陽子をターゲットで散乱させることにより、生じた π が崩壊してできる 150GeV ミューオンビームを使用した。バンチ間隔は LHC と同じ 25ns であり、バンチ識別の性能評価に利用する。バンチ幅は 4ns であり、1 スピルは 12 秒である。なお、実際の ATLAS 実験では、PS で 26GeV まで加速された陽子を、最終段のプリインジェクターである SPS でさらに 450GeV まで加速した後、LHC に注入することになっている。

6.2.2　トリガー及びクロック

トリガーと、40.08MHz のクロックは、CTP から TTC システムを経由して分配される。図 6.2 に示すように、TGC エレクトロニクス内では、SPP、SL、ROD が TTCrx を通じてトリガーとクロックを受信する。また、43.4kHz の SPS オービットに同期して BCR(Bunch Counter Reset) が配信される。CTP が受け取るトリガー信号のソースは、TGC+RPC もしくはシンチレータである。TGC から 20m 前方に、10cm×10cm のシンチレータが 2 枚設置され、このコインシデンスによりトリガーをかける。

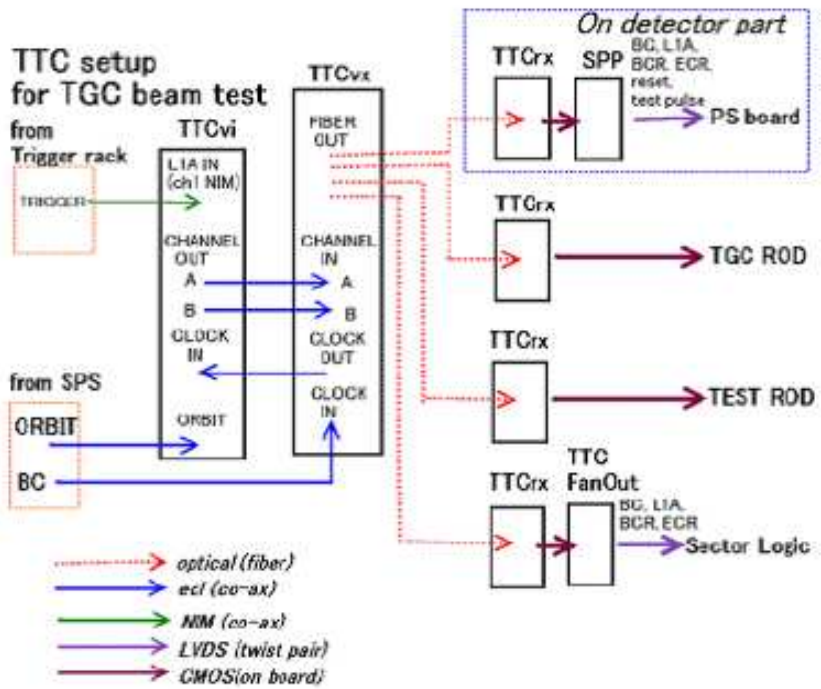


図 6.2: TTC 信号の分配

6.2.3　チェンバー

チェンバーは、図 6.3 に示す T8 と呼ばれるモジュールを、Triplet×1(M1)、Doublet×2(M2、M3) 使用し、ATLAS 実験と同様にワイヤー 7 層、ストリップ 6 層のシステムとした。T8 タイプのチェンバーは、長辺 1528mm、短辺 1364mm、高さ 1250mm であり、エンドキャップ外縁付近で使用される TGC モジュールである。Triplet はワイヤー 24 チャンネル、ストリップ 32 チャンネルの読み出しを持ち、Doublet はワイヤー、ストリップともに 32 チャンネルである。従って、

チャンネル幅は約 4∼5cm である。ATLAS 実験のジオメトリーで ϕ=0 を想定し、ワイヤーを垂直に、ストリップを水平に配置した。図 6.4 に示すように、チェンバーは MDT を挟む形で設置され、ビームに対して 15 度の傾きを持っている。

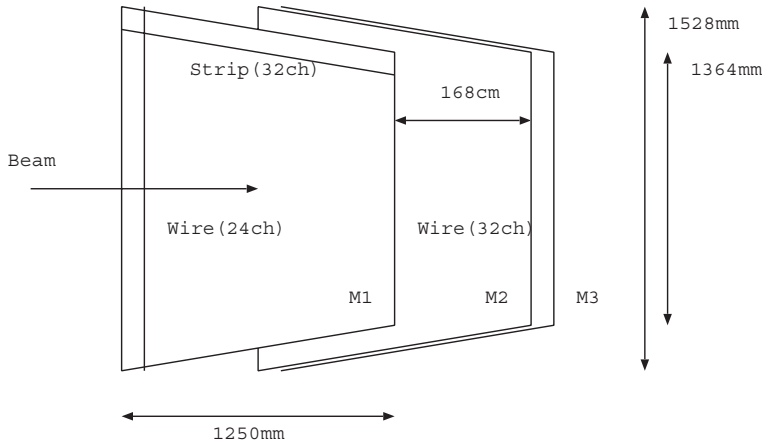


図 6.3: TGC モジュール

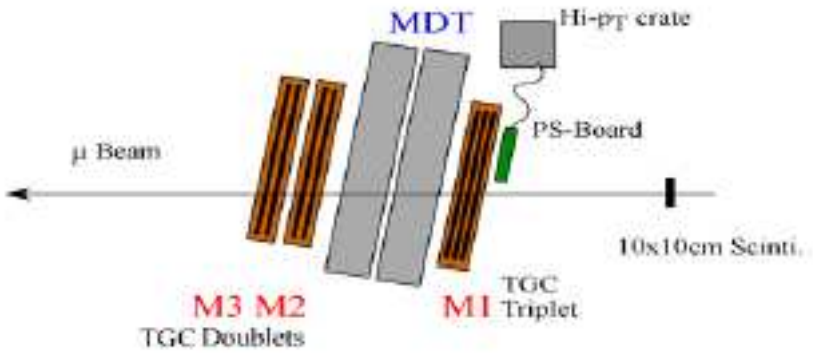


図 6.4: TGC の配置

図 6.5 にビーム上流から見た Triplet を、図 6.6 にビーム下流から見た Doublet を示す。Triplet には PSB 2 枚と SPP が取り付けられており、今回のビームテストのセットアップでは、1 枚の PSB がワイヤー 7 層、もう 1 枚がストリップ 6 層の読み出しを処理する。Triplet が設置されている台に HPT クレートが隣接している。

6.2.4 エレクトロニクス

今回のビームテストにおける TGC エレクトロニクスの構成を図 6.7 に示す。エレクトロニクスはチェンバー上の PS-Pack、それに隣接する HPT クレート (図 6.8)、測定室の ROD クレート (図 6.9) に大別される。このセットアップは基本的に ATLAS 実験と同じものであり、SL 上の SLB から SSW を経由してデータを読み出すことにより、TGC システム単体でトリガー処理の検証を行うことが可能である。

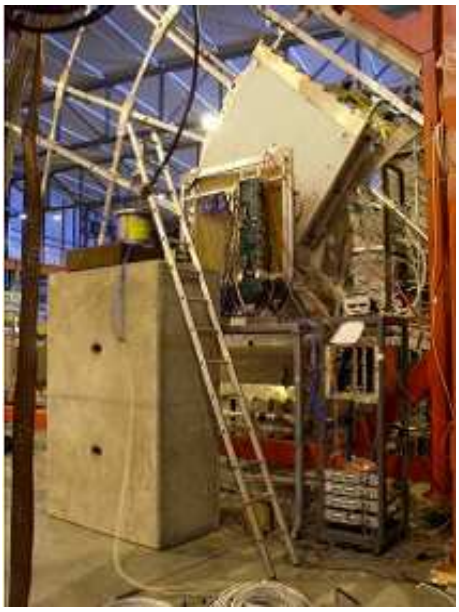


図 6.5: TGC Triplet

図 6.6: TGC Doublet

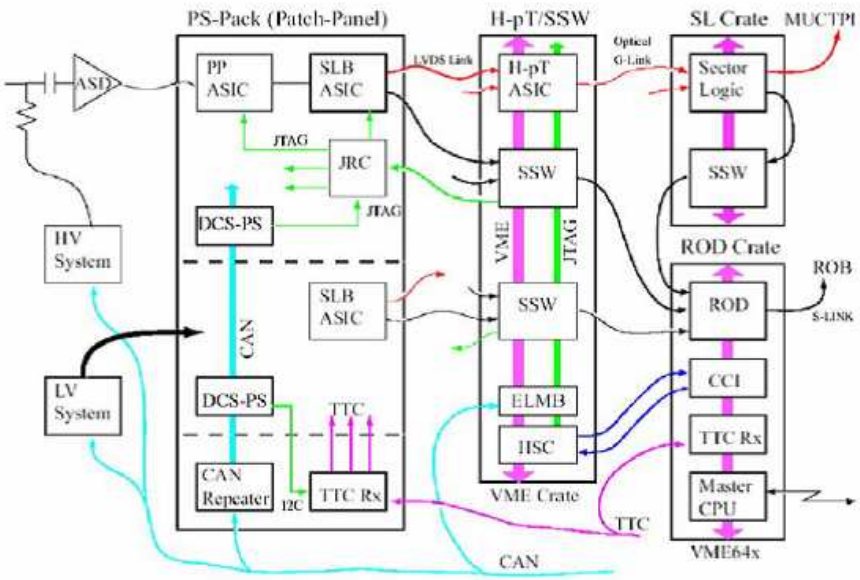


図 6.7: TGC エレクトロニクスの構成 (ビームテスト時)

前回のビームテストからの主なハードウェアの変更点は、PSB の SLB(prototype) 及び JRC(final) チップ、HPT ボード (final)、HSC 及び CCI(final)、SSW(prototype) である。また、PSB-SSW(読み出し)、PSB-HPT(トリガー) の LVDS リンクのデータフォーマットが変更され、リンク状態のモニターと、エラーの自動修復が追加された。

6.3 スタンドアローンによる検証

スタンドアローン形式のテストでは、10cm×10cm シンチレータによってデータの読み出しをトリガーする。スタンドアローンでは、遅延時間やゲート幅のタイミングスキーム、チェンバーのワイヤー電圧 (HV) や、ASD 入力信号の閾値電圧 (Vth)、等の TGC システムにおける各種設定が検証される。

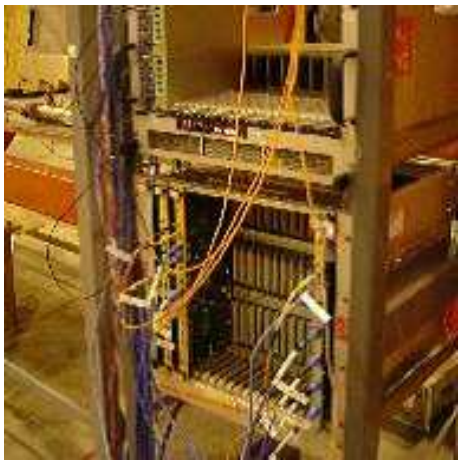


図 6.8: HPT クレート

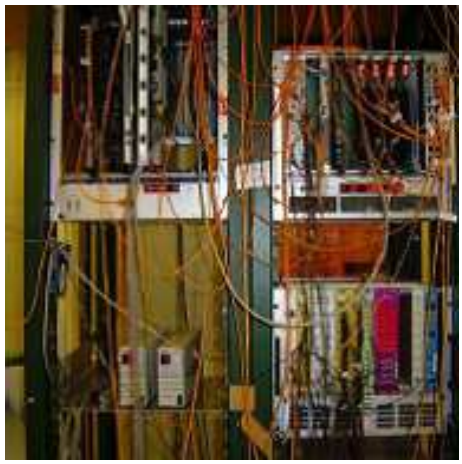


図 6.9: ROD クレート (左上)

6.3.1 コンフィグレーション

TGC エレクトロニクスは、40.08MHz のクロックに同期して 25ns ビームに対して正しくバンチ識別を行うために、各モジュールで遅延時間の調節機能を備えている。これを表 6.1 にまとめる。この遅延の値と、PP のゲート幅を最適に調整することによって正確なバンチ識別が可能となる。

モジュール	遅延機能
Patch Panel	1ns 以下の精度で最大 25ns まで
	TOF やドリフト時間、ケーブル遅延の差を吸収
Slave Board	0.5 クロック単位で最大 1.5 クロックまで
	Doublet 間の位相の差、入力とクロックのタイミングを調節
High-pT Board	0.5 クロック単位で最大 3.5 クロックまで
	Triplet、Doublet 間の位相の差、入力とクロックの調節

表 6.1: TGC エレクトロニクスの遅延機能

遅延時間を決定するため、PP の遅延時間を変えながら、各層の検出効率[2] を求めた。この時、図 6.10 に示すように、トリガーされたバンチ (Current BC) に加え、その前後も合わせて計 3 バンチ分のデータを読み出す。タイムジッターの立上りをゲートの始点とし、図 6.11 において赤の線で示した前バンチ (Previous BC) の検出効率が 0 になる様に遅延を設定する。今回のビームテストでは Triplet の遅延を 20ns、Doublet の遅延を 15ns とした。チェンバーの配置から、遅延時間の違いは主に TOF の差を吸収していると言える。
図 6.12 に、ゲート幅と各バンチの検出効率の関係を示す。ゲート幅を広げるのに伴い、Previous BC の検出効率が上がっている。これは、Previous BC でも Current BC の信号を検出していることを示す。ゲート幅を広くすると、このような異なるバンチの信号間で誤ったトリガー判定がされてしまう為、ゲート幅は可能な限り 25ns に近付けなければならない。図 6.12 より、ゲート幅 26ns で Current BC の検出効率は飽和している。従って、Current BC の信号をゲートの中に収めることができており、これ以上ゲート幅を広くする必要はないと言える。
また、チェンバーのワイヤー電圧と検出効率の関係を図 6.13 に示す。検出効率は 2900V で飽和し、チェンバーの動作は安定していることが分かる。以上により、今回のビームテストの設定で TGC システムが正常に動作することが確認された。

[2] トリガーされたイベントに対して信号を検出した割合

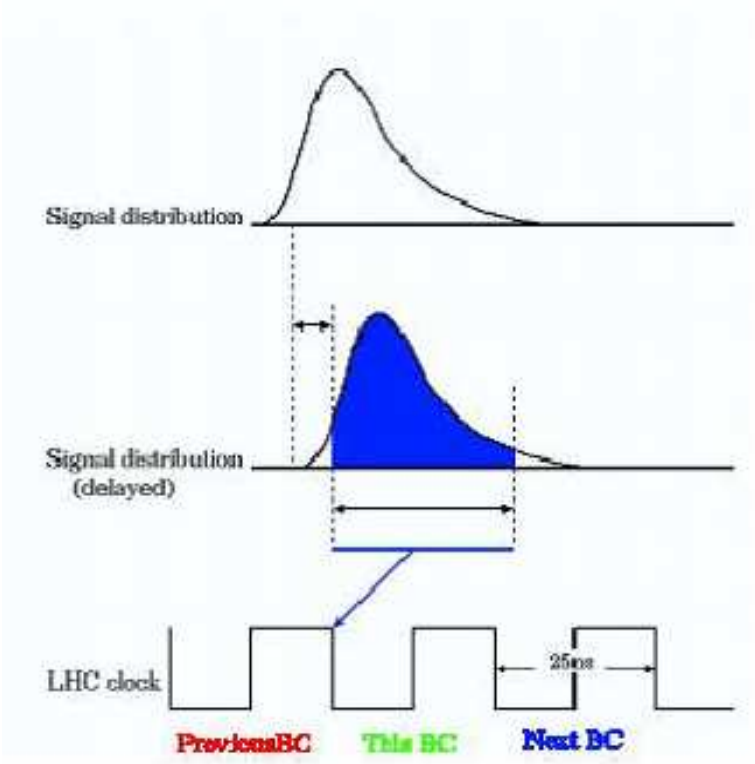


図 6.10: 入力信号と遅延時間

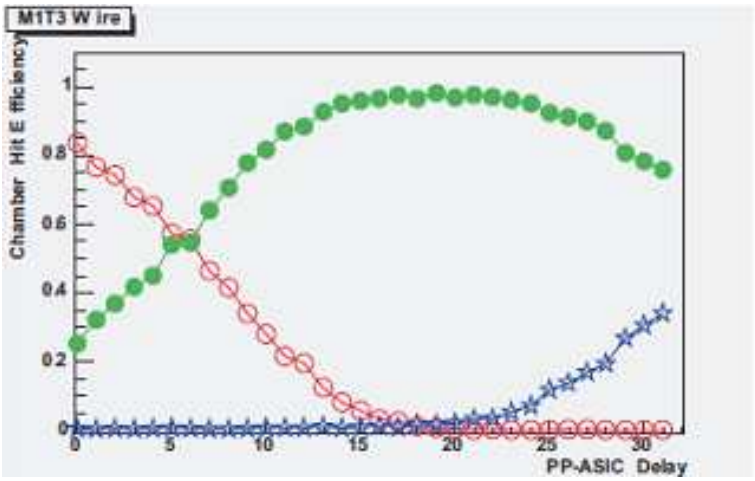


図 6.11: 遅延時間と検出効率 (M1T3)

6.3.2 ビームプロファイル、検出効率

RODのデータを直接PT4で読み出すことにより、ミューオンのビームプロファイルと、チェンバーの検出効率を評価することができる。実際のビームプロファイルを図6.14(M1)、図6.15(M2)、図6.16(M3)に示す。この時のTGCシステムのパラメータを表6.2にまとめる。これらは前述のコンフィグレーションによって決定された値である。

読み出されたビームプロファイルから、ワイヤー、ストリップともに4~5チャンネルにミューオンが集中していることが分かる。マップ中の黒の横線は10cmに相当し、シンチレータのコインシデンスによって絞られたビームは、チェンバーではおよそ20cm×20cmになっている。各プロ

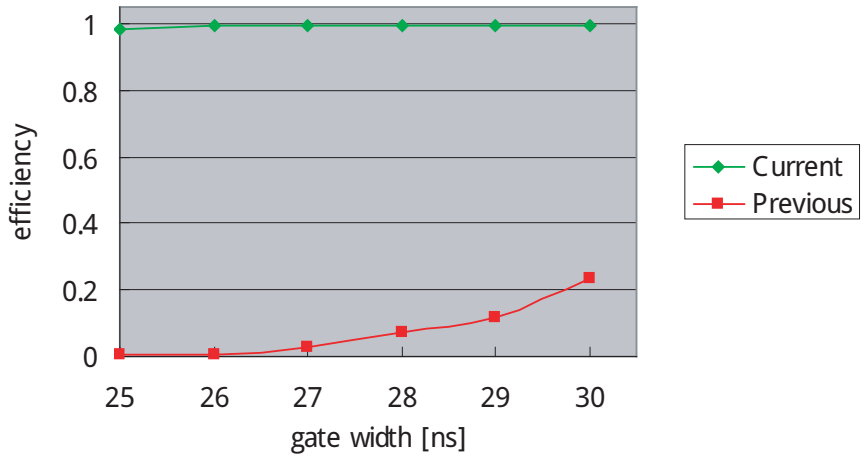


図 6.12: ゲート幅と検出効率 (M3D7)

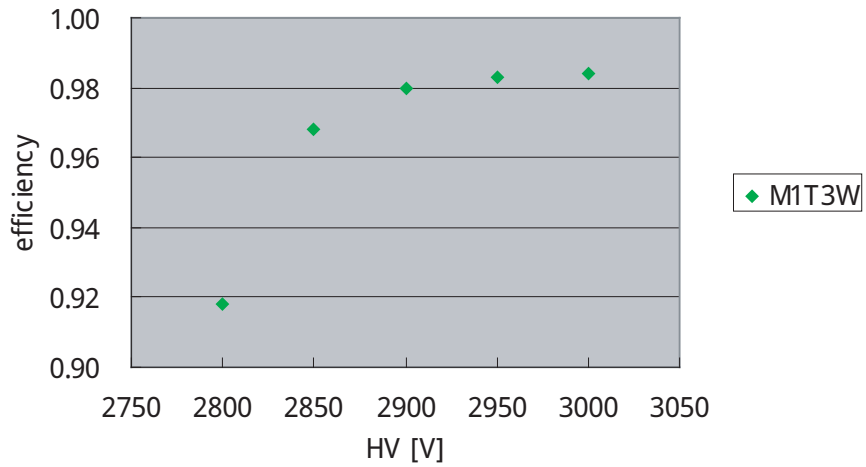


図 6.13: ワイヤー電圧と検出効率 (M1T3)

ファイルに見られる長いテールは、チェンバー全面に広がっていることから、ミューオン 2 トラック以上のイベントであると考えられる。図 6.17、図 6.18 に M1 および M3 におけるヒットの分布を示す。

次に、この時のチェンバーの検出効率を評価する。検出効率は、シンチレータでトリガーされたイベントの内、ワイヤーで 7 層中 6 層以上、ストリップで 6 層中 5 層以上にヒットがあるイベントを母数とし、各層でヒットがあったイベント数を割ったものと定義した。図 6.19 にワイヤー、ストリップ各層の検出効率を示す。

図 6.19 から、Triplet の 1 層、2 層および Doublet の 1 層で検出効率が低くなっていることが分かる。これはチェンバー内部のワイヤーサポートの影響であると考えられる。TGC ではカソード面の平面性を保つ為、幅 7mm のワイヤーサポートが補強材として、各層でストリップと平行方向に挿入されている。図 6.20、および図 6.21 にチェンバー各層の平面構造を示す。ビームによるヒット頻度の高いチャンネルを、ワイヤーはピンク、ストリップはグリーンの領域で表している。これを見ると、検出効率の低い層ではこれらのチャンネルにワイヤーサポート (赤線) が重なっている

パラメータ	設定値
HV	2900V
V_{th}	Wire 50mV、Strip 70mV
ゲート幅	26ns
遅延時間	Triplet 20ns、Doublet 15ns

表 6.2: TGC システムのパラメータ

ことが分かる。
チャンネル中に占めるワイヤーサポートの面積は約 4%であり、ストリップ読み出しチャンネルの検出効率低下の原因となっている。また、ワイヤーサポートによってチェンバー内の実効電場が低下することにより、ワイヤー読み出しでも検出効率が低下する [7]。TGC では、各層でこれらの不感領域の位置をずらすことにより、トリガーの検出効率が下がることがないよう配慮されている。

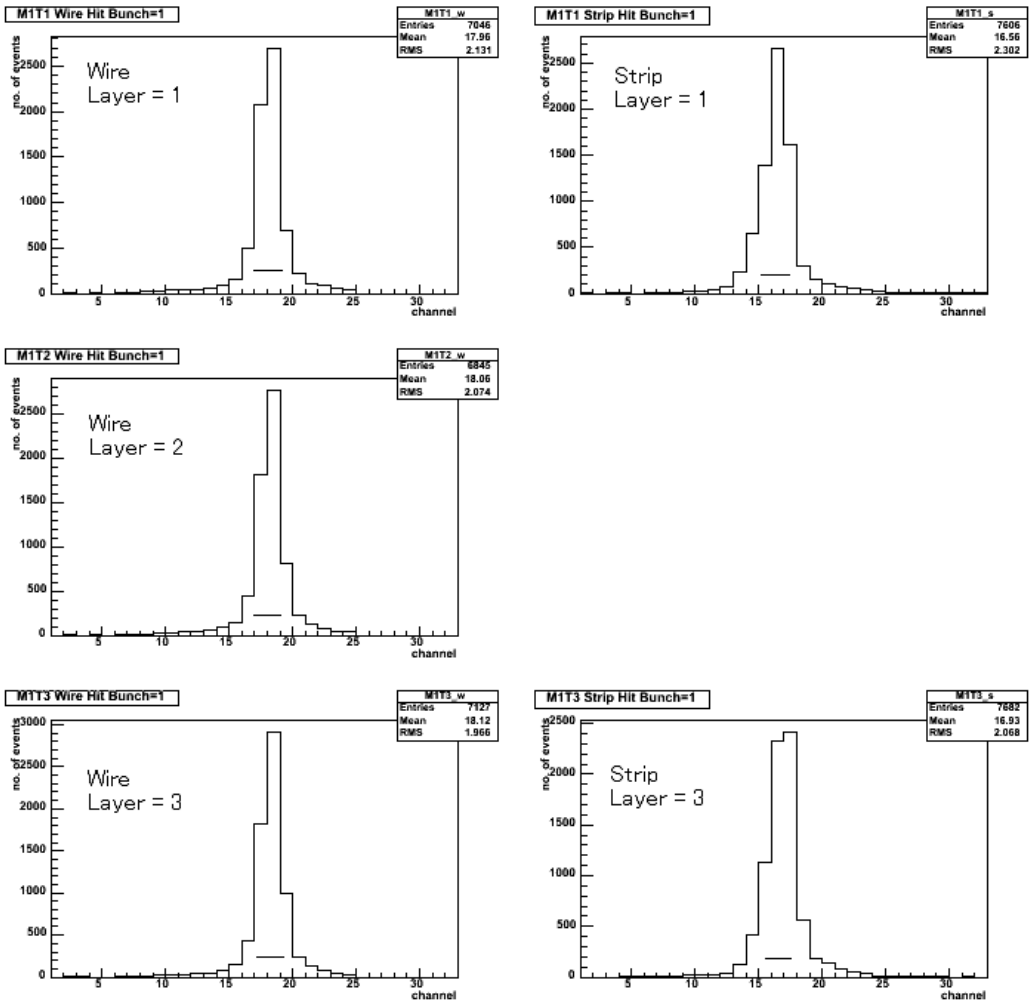


図 6.14: ビームプロファイル (M1)

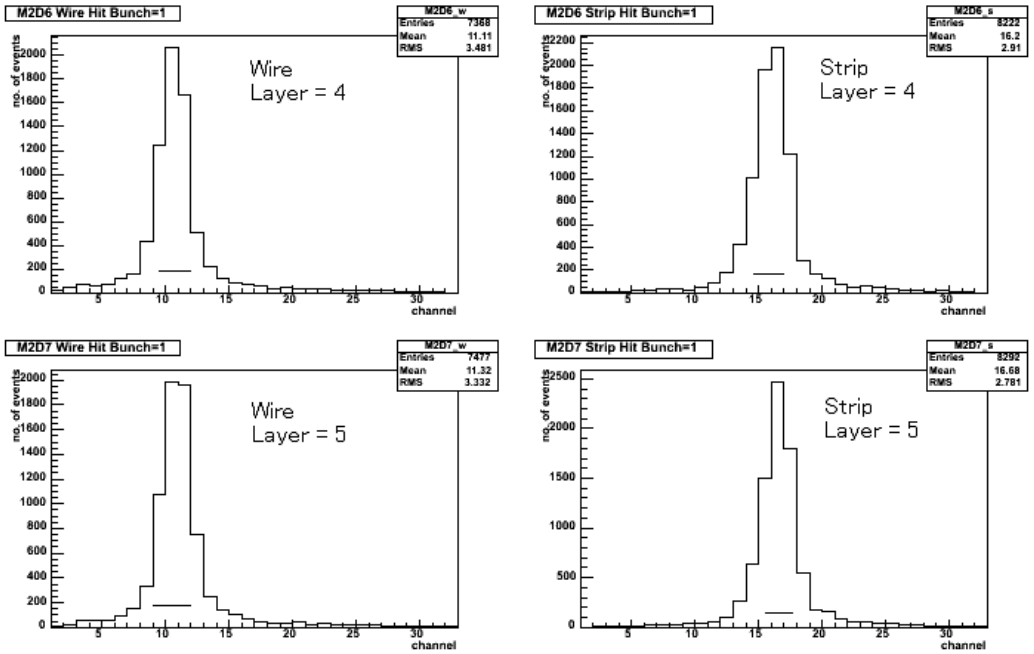


図 6.15: ビームプロファイル (M2)

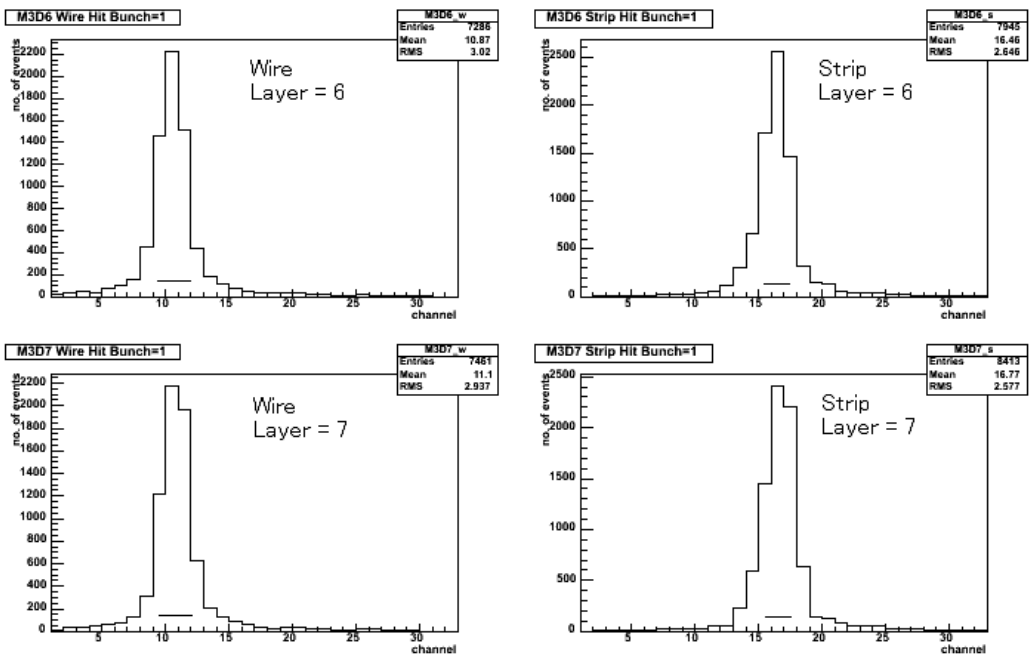
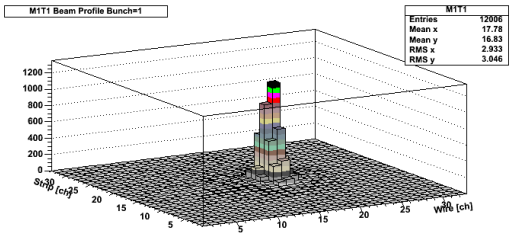


図 6.16: ビームプロファイル (M3)



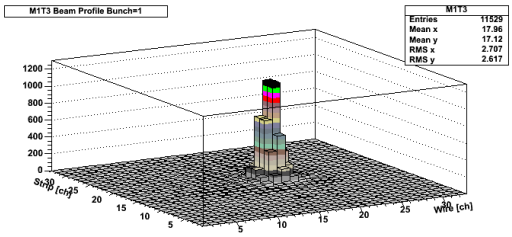
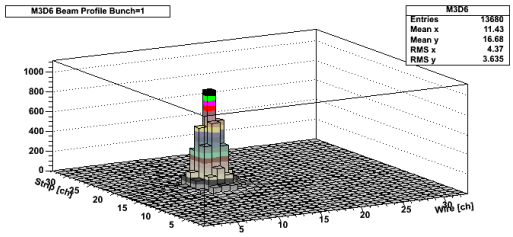


図 6.17: ヒット分布 (M1)



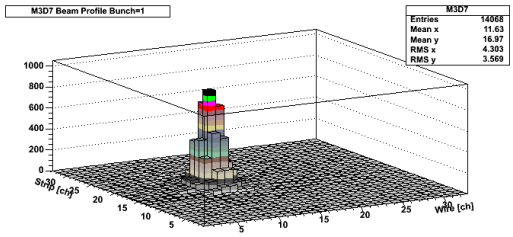


図 6.18: ヒット分布 (M3)

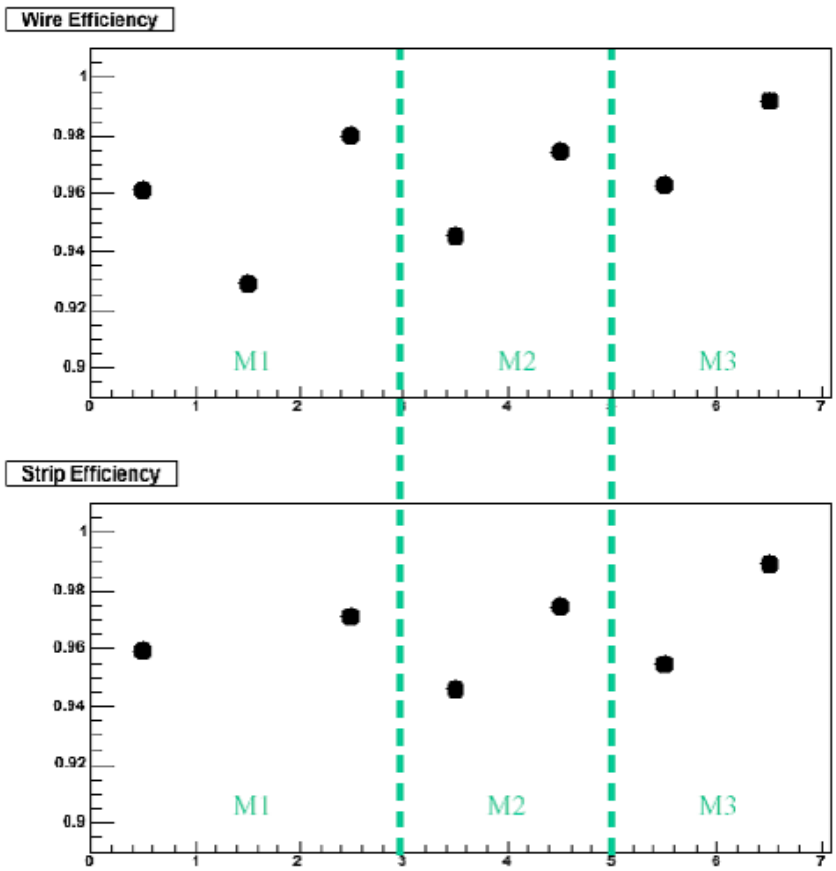


図 6.19: 検出効率、ワイヤー (上) ストリップ (下)

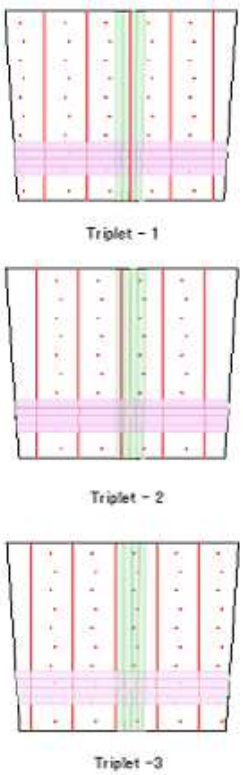


図 6.20: Triplet チェンバーの平面構造

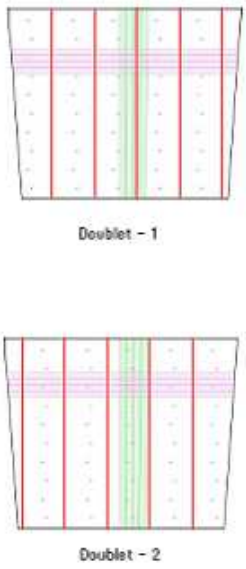


図 6.21: Doublet チェンバーの平面構造

6.4 CTB による検証

CTB(Combined Test Beam) の一環として、レベル 1 ミューオンシステム全体のテストが行われた。CTB では、内部検出器、カロリーメータ、およびミューオン検出器において、各システムの ROD から ROS へ送信されたデータは、SFI(Switch to Farm Interface) を経て収集され、全ての検出器のデータが単一のファイルに保存される。以下では、この単一のデータファイルのデコードによる、TGC システムの動作検証について述べる。

6.4.1 データ構造

図 6.22 にイベントデータの構造を示す。CTB のデータは、ROD データの集合が ROB、ROB データの集合が ROS、というように各検出器毎に階層構造を形成している。各階層のヘッダは、図 6.23 のように定められており、Generic パートは ROD を除いて全ての階層に共通である。一方、Specific パートは検出器固有の情報等、階層毎に異なる構造をとることが許されている [6]。

ROD のデータは、検出器によって必ずしもプログラミング可能ではないハードウェアにフォーマットされること、ヘッダの情報が ROD の製造コストやパフォーマンスに影響を及ぼすこと、等を考慮しなければならない。図 6.24 に ROD のデータ構造を、図 6.25 に実際の ROD データを示す。

CTB で読み出された TGC のデータは図 6.26 に示す構造を持つ。スタンドアローンの解析では、図 6.26 中の ROD に相当する部分だけが読み出されていたことになる。今回の CTB における解析の為に、これらのデータから ROD 部分のみを抽出するデコーダーを独自に開発した。このデコーダーは、各階層のヘッダマーカー (ROS:cc1234cc、ROB:dd1234dd、ROD:ee1234ee) がデータ中に存在すると、自分の一つ下層のヘッダを探す。そして ROD のヘッダマーカーが検出された場合、ROD ヘッダ中の検出器 ID を照合し、TGC の検出器 ID(00006707) と一致すると、データ

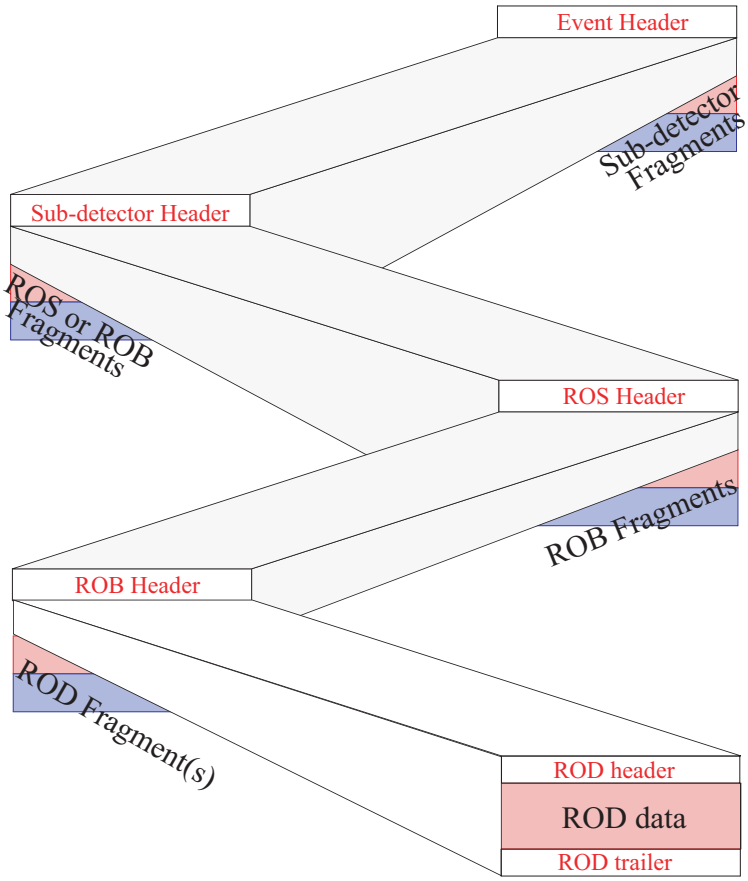


図 6.22: データの階層構造

を ROOT [3] ファイルにエンコードする。これによってスタンドアローンと同様の解析を可能とした。図 6.27 に実際のデータを示す。

6.4.2 CTB データの検証

以下では実際の CTB データを用いた解析結果について述べる。スタンドアローンでは、イベントは 10×10 シンチレータのコインシデンスを用いてトリガーされていたが、CTB では、ATLAS 実験と同様の TGC+RPC トリガーによって読み出されたデータを検証する。図 6.28、図 6.29、および図 6.30 に各ステーションのビームプロファイルを示す。TGC+RPC トリガーでもスタンドアローンとほぼ同様にビームを再現していることが分かる。
図 6.31 に Low-p_{T} コインシデンスの検出効率を示す。これは、TGC+RPC でトリガーされたイベントを母数とし、Triplet で 3 層中 2 層以上 (ストリップは 2 層中 1 層以上)、Doublet で 4 層中 3 層以上のコインシデンスが取られた割合を表している。Triplet のストリップは判定条件が緩い為に検出効率が 99%に近いが、その他では 98%前後である。図 6.32 に TGC+RPC でトリガーされたイベントの内、ワイヤー 6 層以上、ストリップ 5 層以上のヒットを持つイベントを母数とした場合の、Low-p_{T} コインシデンスの検出効率を示す。この場合、ワイヤー、ストリップ共に検出効率は、99.5%以上であった。
この結果から、TGC+RPC でトリガー判定されたイベント全てを母数とした場合、バックグラウンドを誤ってトリガーしてしまったことによる、検出効率の低下があることが分かる。一方、TGC でのヒットにスタンドアローンと同様の条件を課し、TGC にミューオントラックが存在するイベ

[3] CERN で開発されているオブジェクト指向型のデータ解析フレームワーク

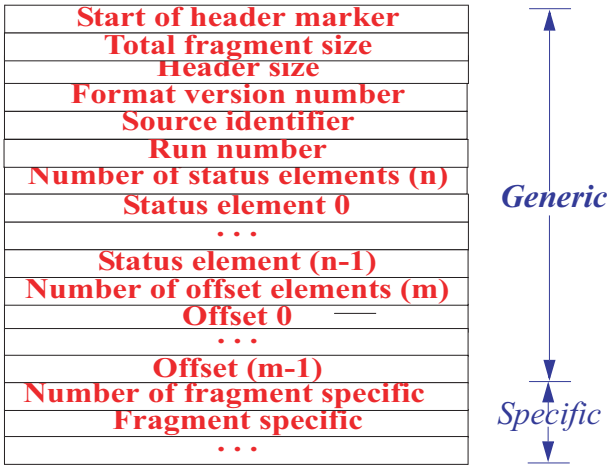


図 6.23: ヘッダの構造

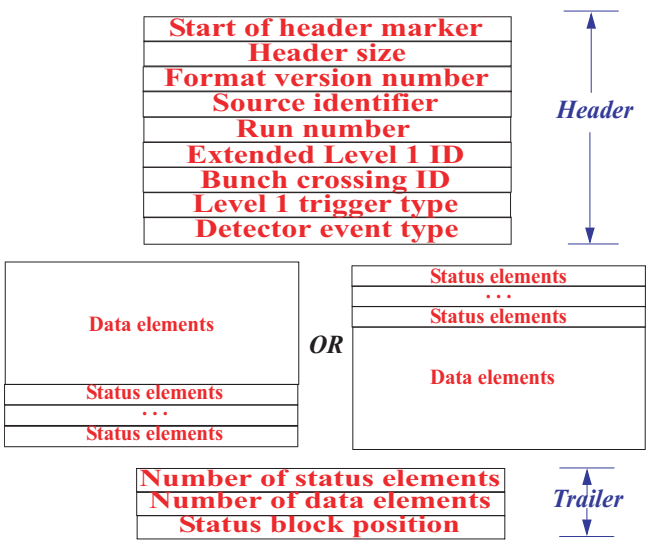


図 6.24: ROD データのフォーマット

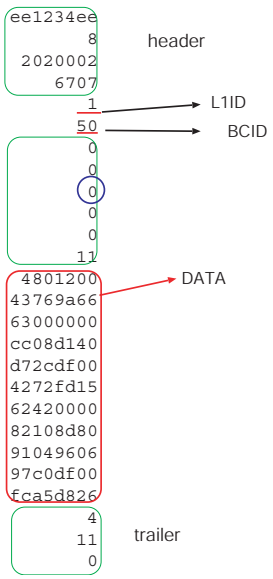


図 6.25: 実際の ROD データ

ントのみを選んだ場合 Low-p_{T}、コインシデンスの検出効率から、SL における最終的なトリガー検出効率は ~99%であると見積もられる。この場合でも、Low-p_{T} コインシデンスの検出効率が 100%にならないのは、ビーム自体が 25ns のバンチ間隔からずれていたイベントがあった為だと考えられる。

6.5 まとめ

今回のビームテストでは、25ns バンチ間隔のミューオンビームを用いて、フルスペックデザインのエレクトロニクスを実装した TGC システムの、レベル 1 ミューオントリガーシステムにおける動作を検証した。

スタンドアローンでは、TGC システムの最適なコンフィグレーションを検証し、トリガー及びデータ読み出しを適切に行うことを確認した。また、CTB では、全検出器のデータから TGC のデータのみをデコードし、この解析結果から、TGC システムのトリガー検出効率を評価した。

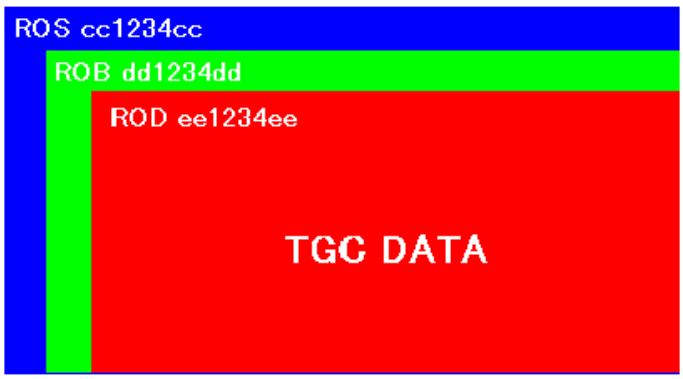


図 6.26: CTB で読み出されるデータの構造

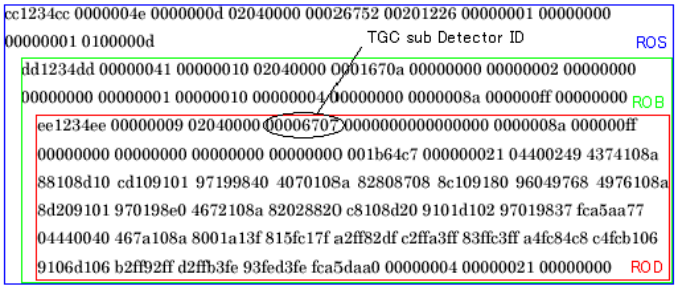


図 6.27: 実際の CTB データ

特に本論文では、TGC システムの読み出し系のデータ解析を行うことによって、Low-p_{T} コインシデンスの段階までを検証した。最終的なレベル 1 トリガーまでを含めたデータ解析に関しては、各検出器に共通のフレームワークとして、ATHENA におけるオンライン解析手法の確立が進められている [12]。

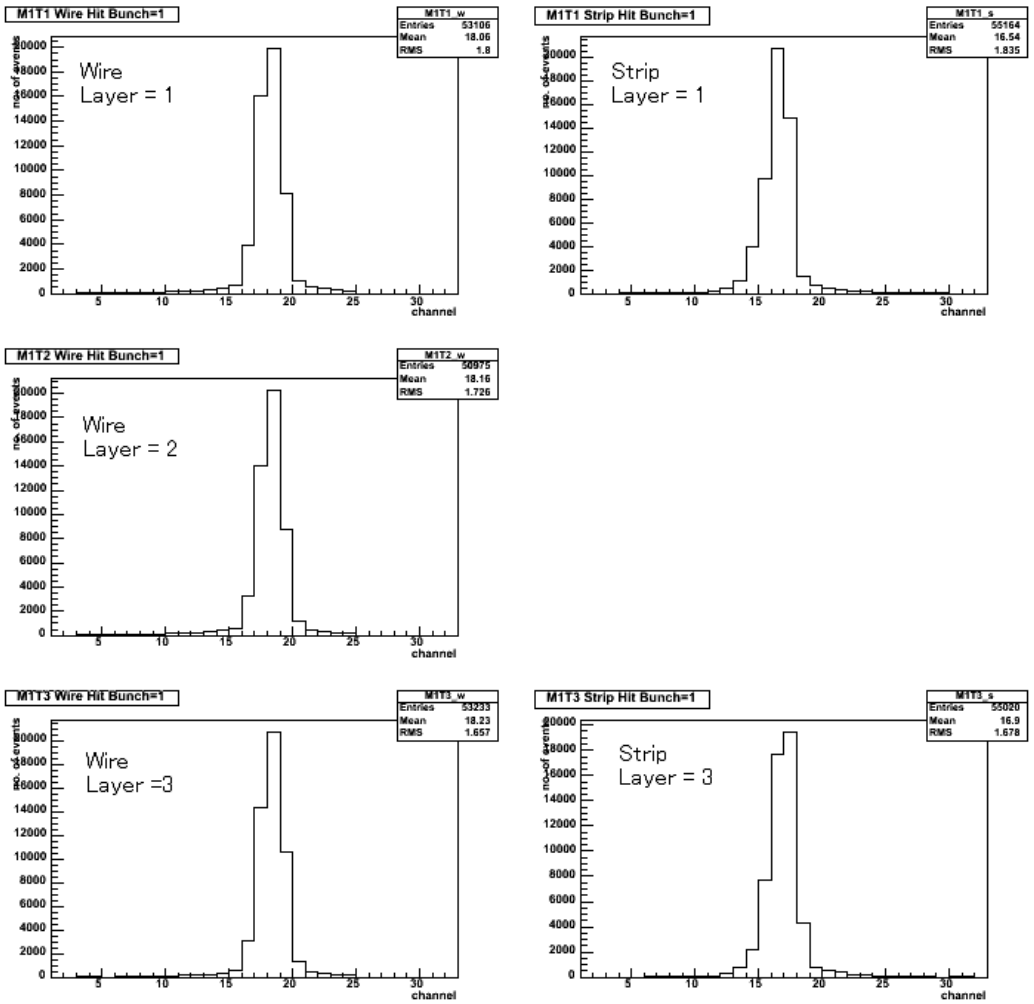


図 6.28: CTB ビームプロファイル (M1)

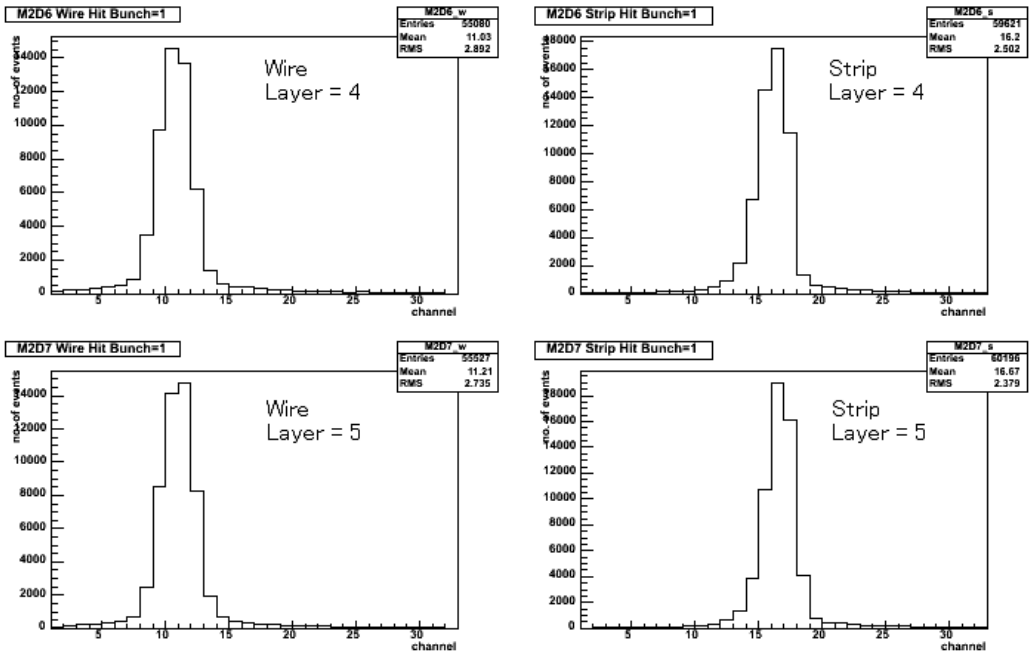


図 6.29: CTB ビームプロファイル (M2)

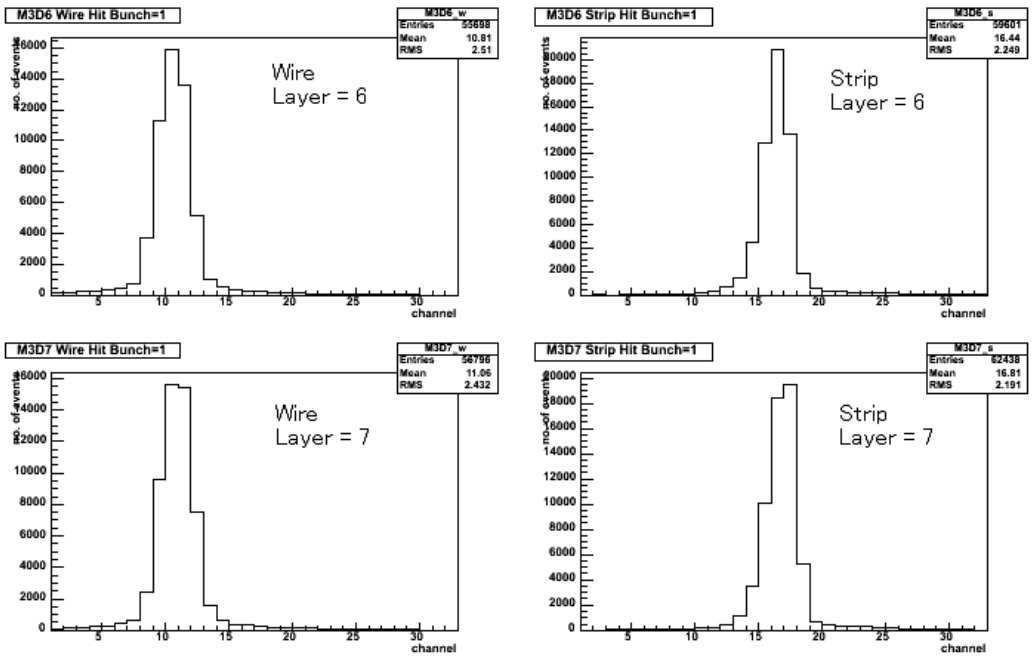


図 6.30: CTB ビームプロファイル (M3)

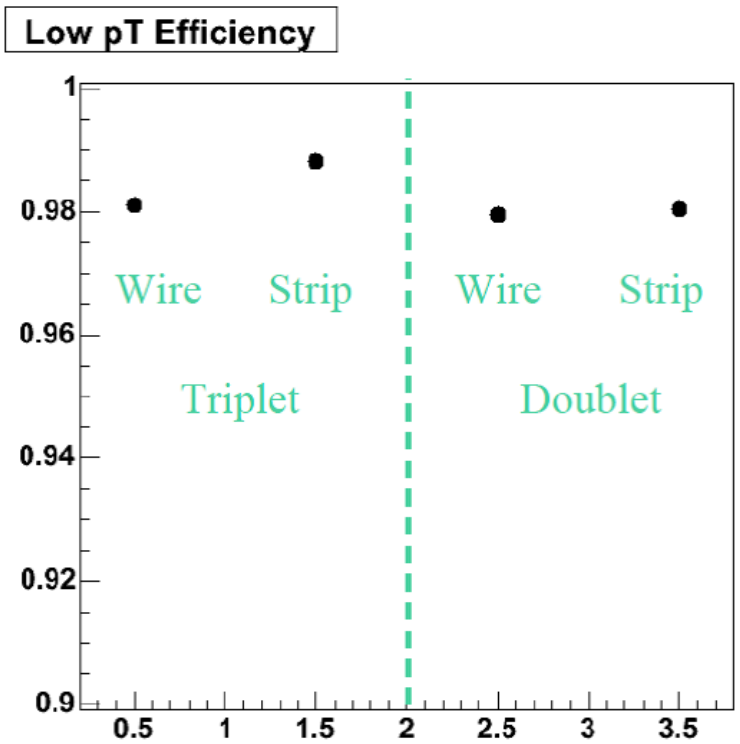


図 6.31: Low-p_{T} コインシデンス検出効率 (TGC+RPC)

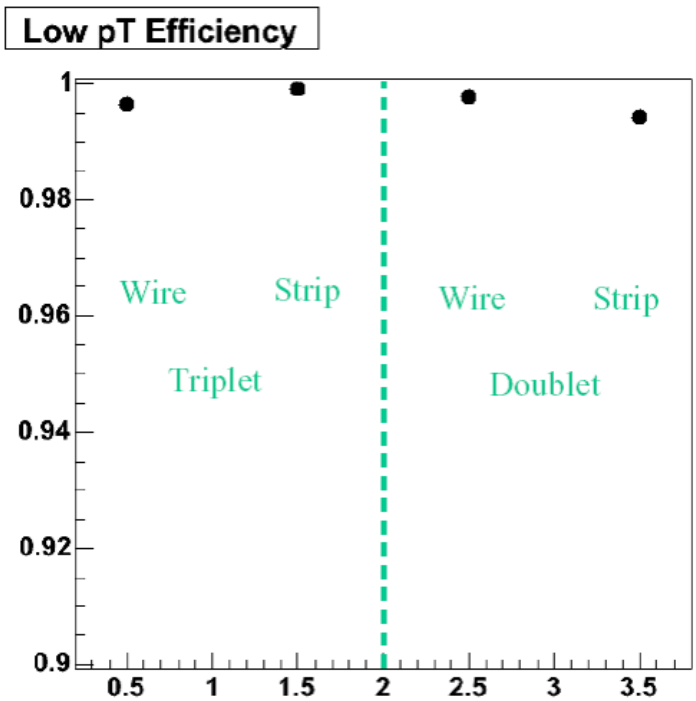


図 6.32: Low-p_{T} コインシデンス検出効率 (TGC)

第7章　1/12セクターアセンブリに向けたTGCエレクトロニクスの検証

TGCの量産の終了と、エレクトロニクスのデザインの確定を受け、2005年2月からCERNにおいて、M1ステーション1/12セクターの構築と、そのテストが開始される。この1/12セクターアセンブリは、エレクトロニクスも含め、本実験で稼働するTGCシステムの一部を実際に構築し、その動作を検証することを目的としている。この章ではアセンブリの概要、1/12セクターにおけるTGCエレクトロニクスの動作を検証する為のセットアップ、及び実際に行った検証内容と、今後の予定について述べる。

7.1　1/12セクターアセンブリ

1/12セクターアセンブリでは、初めてフルスケールのTGCシステムの構築が試みられる。全てのチェンバーは量産後に検査済であり、ビームテストでは、チェンバーからの信号によりエレクトロニクスが正しく動作することが確認されているが、実際の1/12セクター構築に当たっては、セクター本体の組み立てから、ケーブルの配線、電圧やガスの供給、完成後のテスト方法まで、様々な課題の検証が必要である。

図7.1にM1ステーションの平面図を示す。図中の斜線部分が1/12セクターに相当する。1/12セクターは4つのEnd-Capトリガーセクターと、2つのForwardトリガーセクターから構成される[1]。使用されるチェンバーは、T1が2台(Forward)、T3、T6、T7、T8が各4台(End-Cap)である。セクターは、水平状態で先ずケーブル、PS-Packをフレームに配置し、垂直に立てられた段階で、TGCを載せてガスチューブやエレクトロニクスとの接続を行う。この状態でエレクトロニクスのテストが行われる予定である。その後、セクターは垂直状態で実験ホールに設置され、宇宙線やビームハローによる、トリガーおよびデータ読み出し処理のテストを行う。
本論文では、1/12セクターに搭載されるPS-Packの組み立てと接続、およびエレクトロニクス単体で可能な動作検証について述べる。PS-PackはPSB(PS-Board) 10枚とSPP(Service Patch Panel)で構成され、End-Capトリガーセクター 2、Forwardトリガーセクター 1の信号処理を行う。図7.2にチェンバーとPS-Packとの接続を示す。この図は1/24セクターに対応しており、これが2セットで1/12セクターとなる。表7.1に1/12セクターエレクトロニクスのコミッショニングに関する予定をまとめる。

7.2　セットアップ

これまでのエレクトロニクスのテストでは、PSB 2枚を接続し、各々がワイヤー7層、またはストリップ6層の、チェンバー1台分に相当する全チャンネルを処理していた。これは最少のハードウェアでTGCシステム全体のテストを行う為のセットアップであり、本実験では、M1の内側に取り付けられたPS-PackがTripletの3層を、M3の外側に取り付けられたPS-PackがDoubletの2×2層を処理する。

[1]図4.8参照

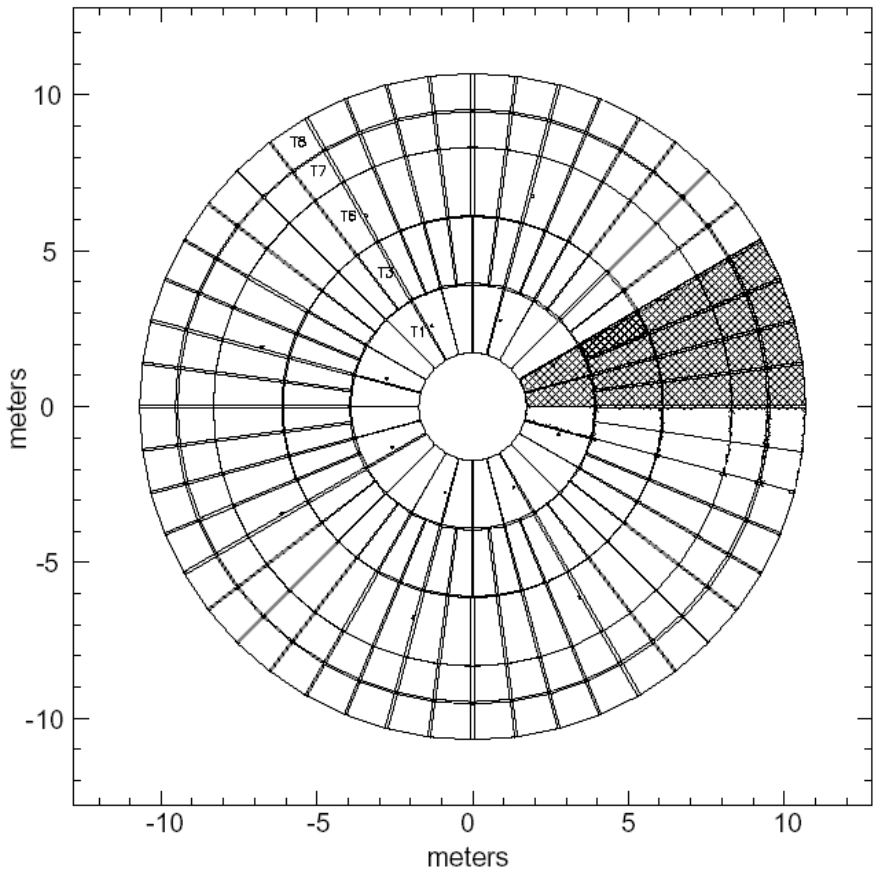


図 7.1: 1/12 セクター (M1)

期間	内容	目的
∼2005 年	ベンチテスト	量産されたエレクトロニクスの検証
2005 年 2 月 ∼	テストパルス、宇宙線	fine delay の検証
2005 年 11 月 ∼(M1) 2006 年 ∼(M2、M3)	テストパルス	実験ホールにインストール、 coarse delay、L1 Buffer depth の検証
2007 年 ∼	ビームハロー	BC クロック、トリガー信号の検証

表 7.1: 1/12 セクターエレクトロニクスのコミッショニング

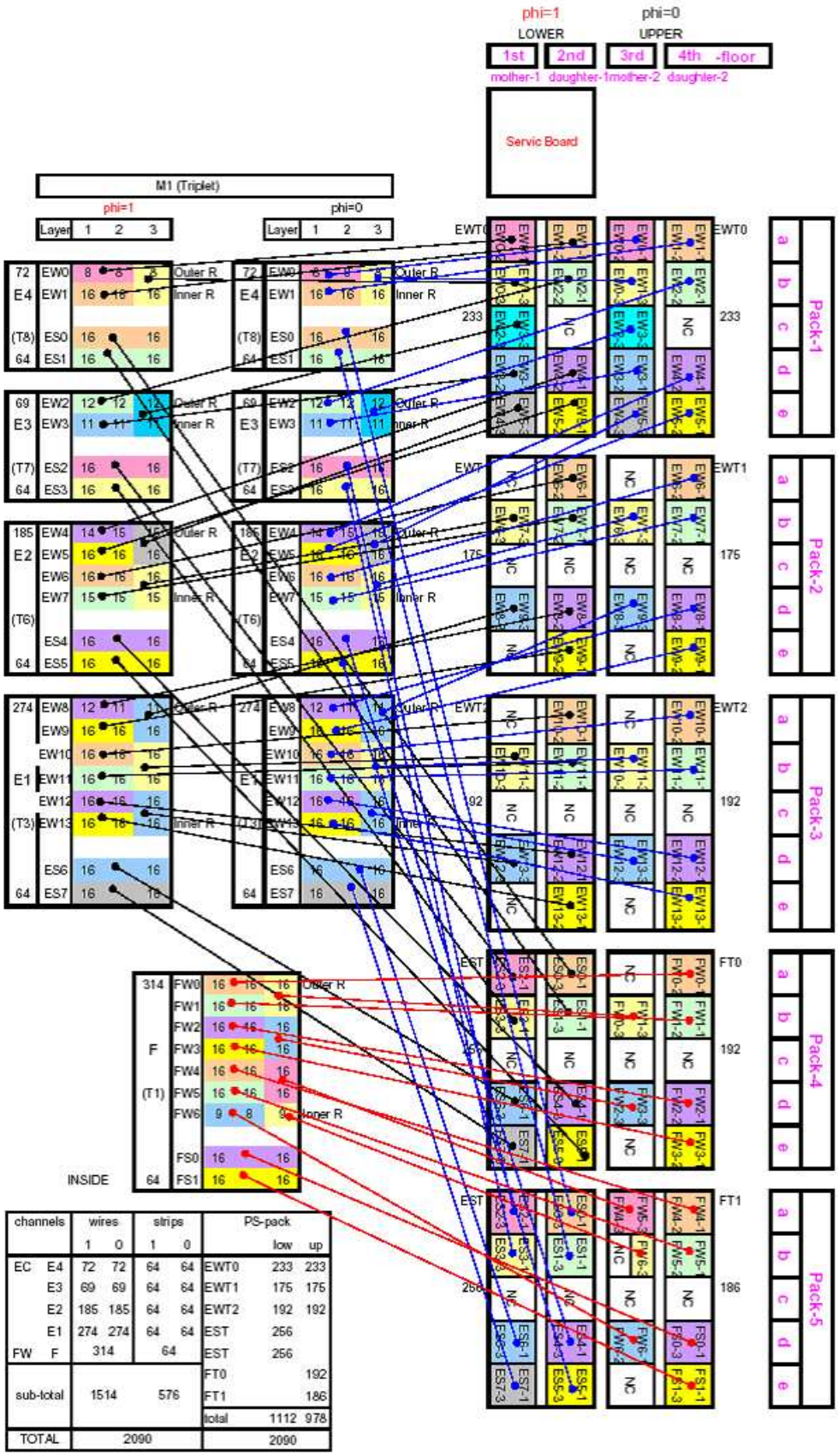


図 7.2: TGC と PS-Pack の接続 (M1)

1/12 セクターアセンブリでは、Triplet 用の PS-Pack を 2 セット作成する。PS-Pack は SPP と PSB 10 枚で構成されるが、多数の PSB を接続した際に、デザイン通りに制御、読み出しが行えるか検証する必要がある。以下では検証の為のエレクトロニクスのセットアップについて述べる。

7.2.1 電源

PSB は 1 枚につき、ボード自身に供給される+3.3V と-3.0V、これとは別に、ASD に供給する為の+3.3V、の計 3 つの電源入力を持つ。スライステスト及びビームテストでは、1 台の電源でこれらを全て供給していたが、1/12 セクターでは、各入力に電源を 1 台、計 3 台を使用する。また、SPP の電源 (+3.3V) もこの電源から供給する。使用される電源装置 (COSEL PBA1500F-3R3) を図 7.3 に示す。

図 7.3: 電源装置

この電源装置は AC85∼264V の入力に対応し、CERN にセットアップを移行する際にも変圧装置を用意する必要がない。また、出力電圧は約 0V まで可変であり、PSB の 3 入力全てに対応することができる。最大出力電力は 990W で、PSB 20 枚を動作させるのに十分な容量を備えているが、現行の圧着端子によるケーブルの接続には限界がある為、専用のディストリビューションボックスを製作する予定である。

7.2.2 PS-Pack

PS-Pack は、PSB 2 枚を 2 階構造で収納するフレームが 5 個と SPP で構成される。図 7.4 及び図 7.5 に PSB を収納するフレームを示す。フレームはボタン状の止め具でラダーに固定され、セクター本体に装着される。本論文で述べるセットアップに関しては、現時点で利用可能な資材の制限により、このフレーム 2 個を用いて PSB 4 枚を接続し、その制御と読み出しの検証を行った (図 7.6)。ただし、接続と検証の方法は PSB の数が増えても原則的に変わることはなく、そのまま適用することができる。

7.2.3 エレクトロニクス

図 7.7 にエレクトロニクスの検証スキームを示す。PS-Pack 上の各 PSB は、データ出力とトリガー出力を持ち、SSW(Star Switch) との間では、データに加え、JTAG の送受信も行っている。トリガー出力は本来 HPT(High-pT) に接続されるが、今回のセットアップでは使用しない。

図 7.4: PSB 収納フレーム (蓋あり)

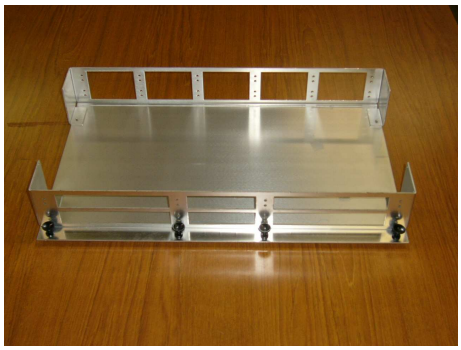


図 7.5: PSB 収納フレーム (蓋なし)

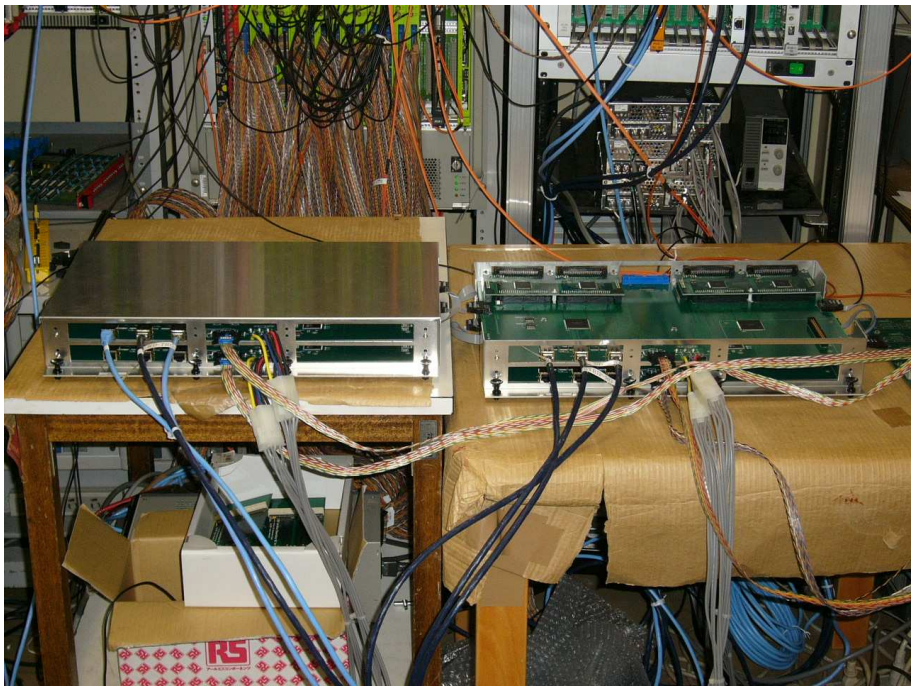


図 7.6: エレクトロニクス検証用セットアップ

各 PSB に対して、クロック (CLK) は SPP から個別に供給される。リセット (RESET) は、SPP の出力が 1 つしかなく、PSB には入力側と出力側が存在し、各々の端子に互換性がない為、図 7.8 に示すように SPP からの信号を分配した。

PSB の接続数を増やす際には、このセットアップに従って、追加されたボードに電源、クロック、リセットを供給することで、ハードウェアとしての準備は整う。

7.3 PS-Pack の制御、読み出しの検証

PS-Pack における場合のような、多数の PSB の同時制御、読み出しはこれまで検証されたことがなく、1/12 セクターアセンブリに向けたエレクトロニクスの準備における課題とされていた。今回の検証では、SSW から各 PSB を制御し、SLB のテストパルス機能を用いて、正しくデータの読み出しが行われていることを確認した。以下では、その方法と結果について述べる。

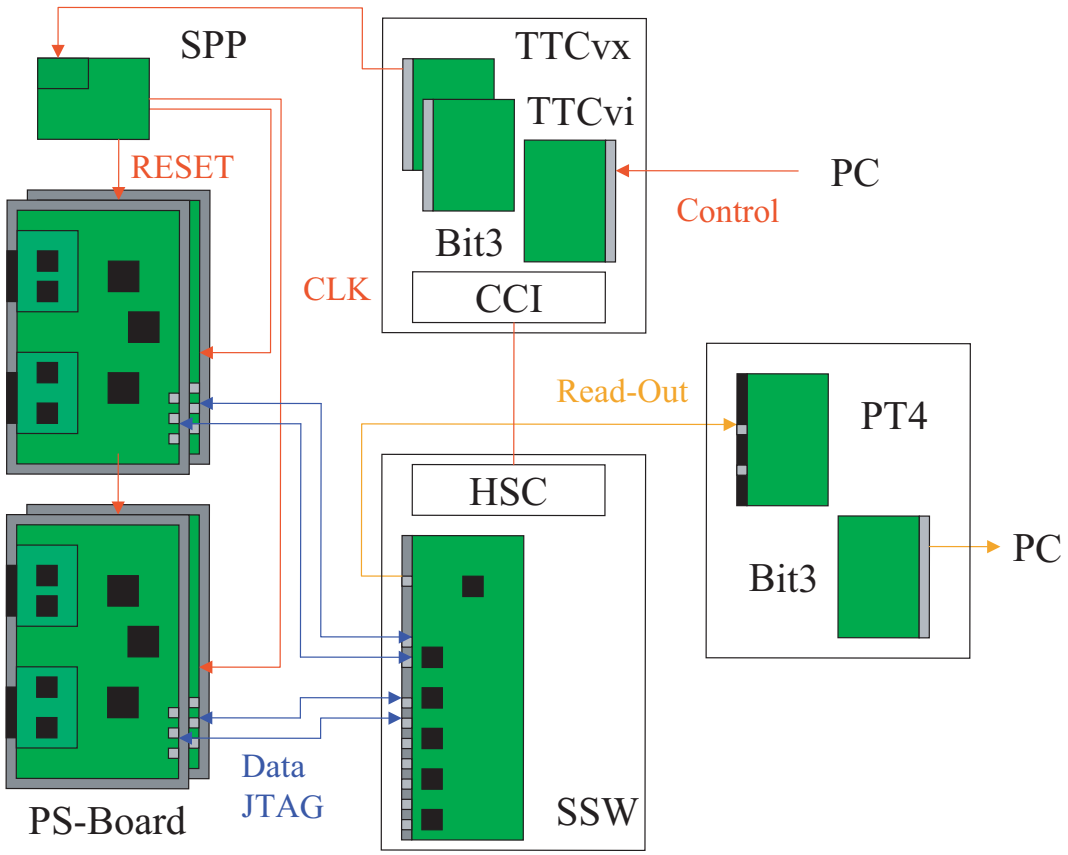


図 7.7: エレクトロニクス検証スキーム

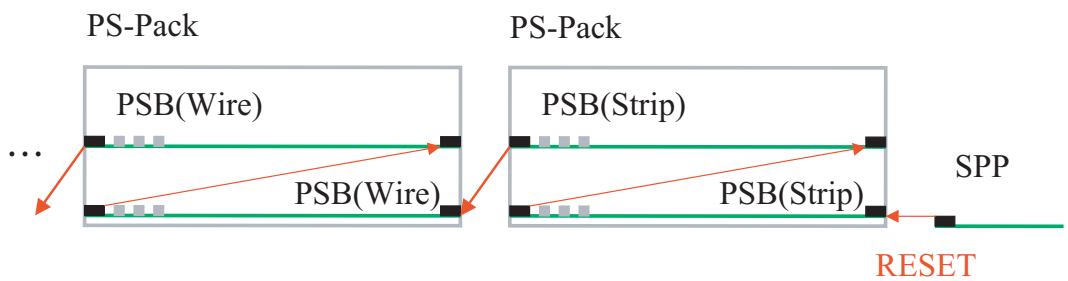


図 7.8: リセットの分配スキーム

7.3.1 検証方法

以下では PS-Pack の制御およびデータの読み出しと、その検証方法について説明する。

- 制御
  各 PSB のクロック、及びリセット信号は全て SPP から供給される。SPP は TTCvx から TTC 信号を受け取るが、この TTC 信号の出力は、VME 経由で TTCvi のレジスタの値を設定することにより、コントロールできる。一方、PSB のコンフィグレーションは SSW から JTAG プロトコルを用いて行う。SSW と各 PSB は、SSW の RX で 1 対 1 に対応しており、SSW 側で RX のアドレスを指定することによって目的とする PSB にアクセスする。これはデータの読み出しに関しても同様である。PSB 上では専用の JRC によってルーティングが行われる。

- 読み出し
  SLB からの出力は CAT6 ケーブルで SSW へ送信される。SSW は受信したデータをゼロサプレスによって圧縮し、規定のフォーマットに整形する。この過程については後で詳しく述べる。SSW の出力は、本実験では光ケーブルで ROD へ送られるが、今回のテストでは PT4 にダンプし、Bit3 経由で直接読み出した。

これまでエレクトロニクスの動作検証を行う際には、PPG(Pulse Pattern Generator) にシミュレーションで生成したテストベクターをダウンロードし、これを ASD の出力信号の代わりとして PP に入力する方式 [11] を取っていたが、入力信号数の増加に伴い、この方式では全数同時のテストが不可能になった。そこで、今回のテストでは、SLB のテストパルス機能を用いて PSB のデータ読み出しの検証を行った。
SLB のテストパルスは、SLB 以降のエレクトロニクスの正常な動作を確認することを目的としており、160 ビットのテストパルスパターンは SSW から JTAG プロトコルで書き込むことができる [8]。この書き込んだパターンが、テストパルストリガー信号が入力された時の SLB の入力となる。今回は 4 種類のテストパルスパターンを用意し、その入力に対するデータの読み出しを検証した。

7.3.2 結果

SSW は、SLB からの出力 200 ビット (テストパルス 160 ビット+トリガー出力 40 ビット) を受け取るとゼロサプレスと呼ばれる圧縮を行う。これにより、200 ビットのデータを 8 ビットずつ 25 のセルに分割し、セルの中に少なくとも 1 つ 1 が存在すれば、データを表 7.2 のフォーマットに整形して FIFO に書き込み、セルの中が全て 0 ならそのデータは無視される。図 7.9 にゼロサプレスの例を示す。

15 14 13	12 11 10 9 8	7 6 5 4 3 2 1 0
100	cell address	cell bitmap
101	cell address	cell bitmap
110	cell address	cell bitmap

表 7.2: SSW のデータフォーマット

FIFO に書き込まれたデータは、先頭の 3 ビットがどの BC に属するかを示し (100 : Current、101 : Previous、110 : Next)、続く 5 ビットがセルのアドレス、最後の 8 ビットがデータである。図 7.10 に実際のテストパルスの例を示す。SLB から入力されたテストパルスが SSW で圧縮され、PT4 で読み出した結果をデコードすると、元のパターンが再現されていることが分かる。各々の

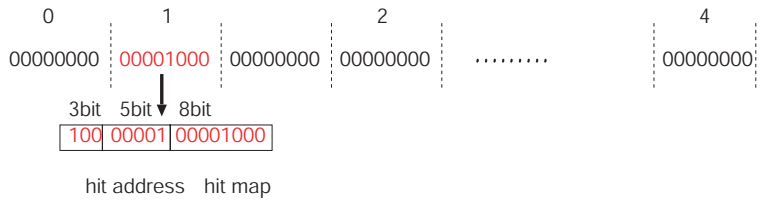


図 7.9: ゼロサプレスによるデータ圧縮

テストパルスパターンについて SLB からの入力と SSW からの出力を照合し、一致することを確認した。
以上の結果から、SSW を経由して任意の PSB にテストパルスパターンを書き込み、これを正しく読み出せることが確認された。今回のセットアップを拡張することで、最終的に 10 枚の PSB から構成される PS-Pack の制御、読み出しも適切に行うことができると考えられる。

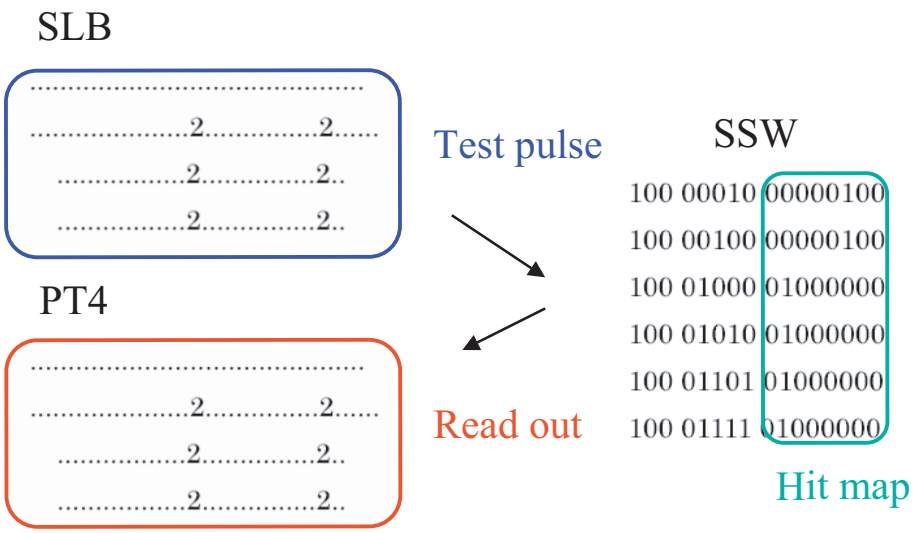


図 7.10: テストパルスの読み出し

7.4 今後の予定

これまで PS-Pack の制御とデータ読み出しについて、SLB のテストパルス機能を用いて検証してきたが、今後、PSB に ASD を接続した際には、PP(Patch Panel) のテストパルス機能による結線のチェックが可能である。この際、TTC からトリガーと L1A を与えてやることによって、ASD の応答を読み出すことができる。これを利用して、ASD の閾値電圧を変更しながら、ノイズの挙動を検証することが必要である。
今回のテストではビームテストと同タイプの SSW を用いたが、今後は anti-fuse FPGA を実装し、1 ボードで PSB 10 枚 (現行デザインでは 5 枚) の制御、読み出しを同時に行う最終デザインの SSW(図 7.11) に移行される予定である [13]。移行後は SSW 1 ボードが 1/24 セクターの制御及び読み出しに対応する。
また、今回は SLB のテストパルスを入力信号として用い、適当なトリガーを入力することで読み出しを行ったが、アセンブリ後に宇宙線等によるテストを行う場合は、Triplet の信号のみからヒットをトリガーしなければならない。HPT は Doublet のヒット情報がなければトリガーをかけ

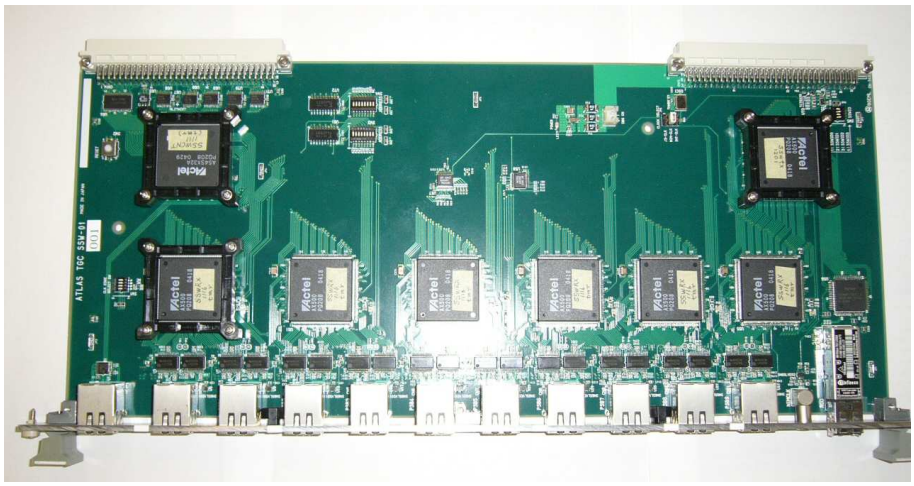


図 7.11: Star Switch(最終デザイン)

ることができない為、HPT に代わるトリガーモジュールの開発が進められている。

7.5 まとめ

2005 年 2 月の 1/12 セクターアセンブリの開始に向けて、PS-Pack の実際の組み立てと、そのエレクトロニクスの動作について検証した。多数の PSB の接続とその制御、データ読み出しのテストは実質的に初めての試みであり、今回のテストの結果、SSW を経由して PS-Pack 内の PSB を正しく制御し、適切にデータの読み出しが行えることが実証された。
PSB の一部 (EWT0) がまだ基板の実装段階にあることや、PS-Pack フレームの数、電源のディストリビューションボックスの製作、等の制限から、実際に接続された PSB は 4 枚に留まるが、接続及び検証方法は PS-Pack(10 枚) と原則として変わらず、今回その手法が確立されたと言える。

第8章　まとめ

ATLAS 実験では、40.08MHz という非常に高いバンチ衝突頻度の下で、高速かつ効率よく対象のイベントを選別する為のトリガー及びデータ収集システムが必要である。ATLAS のトリガーシステムは、レベル 1、レベル 2、イベントフィルタ、の 3 段階から構成され、最終的には 200Hz まで大幅にイベントレートを落とさねばならない。TGC システムはレベル 1 トリガーミューオン検出器であり、本論文のテーマはレベル 1 トリガーシステムとしての性能評価と、実際の検出器構築に向けた課題の検証であった。

TGC システムは強い放射線環境下に置かれることから、そのエレクトロニクスは、ATLAS 実験で少なくとも 10 年間は動作を保証する為に、∼100Gy の放射線に対して耐性を持たなければならない。今回 PS-Board にポリスイッチとして使用される COTS-IC について、γ 線、及び陽子ビームによる放射線耐性試験を行った。その結果、TID(Total Ionising Dose)、SEE(Single Event Effect) に関して、ATLAS 実験で要求されている耐性基準を十分に満たしていることが実証された。

2004 年 10 月に CERN で行われたビームテストでは、本実験と同じ 25ns のバンチ間隔を持つミューオンビームにより、最終デザイン、またはフルスペックを備えたプロトタイプのエレクトロニクスについて、その動作を検証した。TGC システム単体のテストでは、10cm×10cm シンチレータトリガーを用いて、コンフィグレーションを行い、エレクトロニクスが正しく動作することが確認された。CTB(Combined Test Beam) では、他のミューオン検出器及びカロリーメータと連動することにより、レベル 1 トリガーシステムとしての性能評価を行った。特に、CTB における全検出器のデータの中から、TGC のデータのみをデコードし、TGC システムにおけるトリガー検出効率を評価した。

また、2005 年 2 月から開始が予定されている 1/12 セクターアセンブリに向けて、エレクトロニクス、特に PS-Pack の動作検証を行い、正しく制御、データの読み出しが行えることを確認した。様々な制約から、完成状態の PS-Pack を動作させることはできなかったが、構築及び検証に関する手法は確立されたと考えられる。1/12 セクター完成後は宇宙線、ビームハロー等によるコンフィグレーションと動作テストが行われる予定であり、現在その手法が検討されている。

付 録A　略語一覧

ALICE : A Large Ion Collider Experiment
ASD : Amplifier Shaper Discriminator
ATLAS : A Large LHC Apparatus

BCID : Bunch Crossing Identifier
BCR : Bunch Counter Reset

CCI : Crate Control Interface
CMS : Compact Muon Solenoid
COTS : Component Off The Shelf
CSC : Cathode Strip Chamber
CTP : Central Trigger Processor

DCS : Detector Control System

ECR : Event Counter Reset
EF : Event Filter
EI : Endcap Inner

FI : Forward Inner
FPGA : Field Programmable Gate Array

HPT : High-pT Board
HSC : High-pT Star-Switch Controller

JRC : JTAG Route Controller
JTAG : Joint Test Action Group

L1A : Level-1 Accept
L1ID : Lvel-1 Identifier
LEP : Large Electron Positron Collider
LHC : Large Hadron Collider
LVDS : Low Voltage Differential Signal

MDT : Monitor Drift Tube
MUCTPI : Muon Central Trigger Processor Interface
MWPC : Multi Wire Proportinal Chamber

NIEL : Non Ionising Energy Loss

PP : Patch Panel
PPG : Pulse Pattern Generator
PSB : PS-Board
PSL : Photo-Stimulated Luminescence

RHA : Radiation Hardness Assurance
ROB : Read-Out Block
ROD : Read-Out Driver
RoI : Region of Interest
ROS : Read-Out System
RPC : Resistive Plate Chamber
RTC : Radiation Tolerance Criteria

SEE : Single Event Effect
SEL : Single Event Latch-up
SEU : Single Event Upset
SFI : Switch to Farm Interface
SL : Sector Logic
SLB : Slave Board
SPP : Service Patch Panel
SRL : Simulated Radiation Level
SSW : Star Switch

TGC : Thin Gap Chamber
TID : Total Ionising Dose
TTC : Timing Trigger Control

参考文献

[1] ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report Volume 1, CERN/LHCC 99-14, May 1999

[2] ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report Volume 2, CERN/LHCC 99-15, May 1999

[3] ATLAS First-Level Trigger Technical Design Report, CERN/LHCC 98-14, June 1998

[4] AM.Dentan, ATLAS Radiation Tolerance Criteria, CERN/ATC-TE-QA0001, July 2000

[5] M.Huhtinen, F.Faccio, Computational method to estimate Single Event Upset rates in an accelerator environment, NIM A450(2000) 155

[6] C.Bee, D.Francis, L.Mapelli, R.McLaren, G.Mornacchi, J.Peterson, F.Wickens, The raw event format in the ATLAS Trigger & DAQ, CERN/ATL-D-ES-0019, Feb 2004

[7] 長島壮洋, 東京大学 修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガー用 Thin Gap Chamber の量産と動作検証」, 2001 年 1 月

[8] 竹本享史, 東京大学 修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガーシステム用 LSI の開発と総合評価テスト」, 2003 年 1 月

[9] 片岡洋介, 東京大学 修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガーシステムのビームテスト及びシミュレーションによる総合評価」, 2004 年 1 月

[10] 豊島克幸, 東京都立大学 修士学位論文「ATLAS 実験 Level-1 エンドキャップミューオントリガーシステムのビームテスト」, 2004 年 1 月

[11] 渋谷和弘, 東京大学 修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガー検出器に用いる読み出しエレクトロニクスの開発及び統合テスト」, 2004 年 1 月

[12] 藤井祐介, 東京大学 修士学位論文「ATLAS 前後方ミューオントリガーシステムオンライン系の開発と統合ビームテストによる動作検証」, 2005 年 1 月

[13] 野本裕史, 東京大学 修士学位論文「ATLAS 前後方ミューオントリガーシステム読み出し系の開発」, 2005 年 1 月

謝辞

本研究に取り組む機会を与えて頂き、研究を進める上で適切な指導並びに助言を頂いた指導教官である川本辰男助教授 [a] に深く感謝致します。また本研究において多くの助言を頂いた佐々木修氏 [b]、同じく TGC エレクトロニクスグループの坂本宏氏 [a]、蔵重久弥氏 [c]、福永力氏 [d]、池野正弘氏 [b]、長野邦浩氏 [b] にも深く感謝致します。また様々な面で貴重な助言を頂いた小林富雄氏 [a]、近藤敬比古氏 [b]、岩崎博行氏 [b]、田中秀治氏 [b]、石井恒次氏 [c]、浅井祥仁氏 [e]、石野雅也氏 [e]、上田郁夫氏 [e]、前野忠嗣氏 [e] 他 ATLAS 日本グループの方々に深く感謝致します。共に研究を行い議論した、一宮亮氏 [c]、野本裕史氏 [a]、藤井祐介氏 [a]、福地直也氏 [d]、佐々木貴之氏 [a]、山口嘉樹氏 [a] にも深く感謝致します。研究生活を通じて惜しみない協力を頂いた田中純一氏 [a]、南條創氏 [a]、片岡洋介氏 [a]、大下英敏氏 [f]、高田徳之氏 [f] にもこの場を借りて感謝を申し上げたいと思います。

所属:
東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP)[a]、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)[b]
神戸大学 自然科学研究科 [c]、東京都立大学 理学研究科 [d]、欧州原子核研究機構 (CERN)[e]
信州大学 工学系研究科 [f]