

修士学位論文

ATLAS 実験用 TGC 検査設備のための
データ収集・解析ソフトウェアの開発

神戸大学自然科学研究科物理学専攻
中畝 佑輔

平成14年2月

概要

欧州原子核研究機構 (CERN) において、世界最大の重心系衝突エネルギー (14 TeV) を持つ大型陽子陽子衝突型加速器 (LHC) が、2006 年の稼働を目指し建設されている。LHC に設置される測定器の一つに、主に Higgs 粒子、SUSY 粒子の探索を目的とした ATLAS 測定器がある。我々 ATLAS Japan ミューオングループは、この中のミューオントリガーのための検出器である Thin Gap Chamber (TGC) の製作を担当しており、量産が進められている。

TGC の量産は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて行われているが、LHC 実験において個々の TGC の動作・性能を保証するために検査は必要不可欠である。その検査は、神戸大学で行われ、約 2 m^2 の TGC を 480 台、3 年にわたって検査するため、専用の大規模な検査設備が必要となり、そこで用いるデータ収集 (DAQ) システムもまた、高い処理能力を持った専用のものを構築しなければならない。そこで、この TGC 検査設備のための DAQ システムの設計・開発、及び解析ソフトウェアの開発を行った。

また、2000 年 12 月にビームテストが行われ、そこでは検査設備での設計を基にして開発した DAQ システムを用いてデータの収集、及び解析を行った。その実装結果について評価し、その動作・性能を保証することができた。この結果を踏まえて、検査設備での DAQ システムの実装を行い、その動作・性能の評価を行った。

目次

第 1 章	Introduction	3
第 2 章	ATLAS 実験	6
2.1	LHC 計画	6
2.2	LHC の物理	6
2.3	ATLAS 測定器	10
2.4	ミュオントリガー検出器	11
2.5	Thin Gap Chamber (TGC)	15
2.5.1	TGC の構造	16
2.5.2	TGC の量産と検査	20
第 3 章	検査設備	22
3.1	ガスリークテスト	22
3.2	n-Pentane テスト	22
3.2.1	TGC ガスシステム	23
3.3	宇宙線テスト	24
3.3.1	Scintillation Counter	24
3.3.2	Drift Tube	24
3.3.3	TGC	27
3.3.4	評価方法	28
第 4 章	DAQ システムの開発	29
4.1	DAQ システムの構成	29
4.1.1	VME モジュール	29
4.1.1.1	TMC	29
4.1.1.2	SWINE	32
4.1.2	コンピュータ環境	33
4.1.2.1	PC-VME bus インターフェイス	33
4.1.2.2	ネットワーク分散システム	34
4.1.2.3	NFS	34
4.2	読み出しプロセス	34
4.2.1	VME へのアクセス	35
4.2.2	Interrupt & I/O Register を用いた通信	37
4.2.3	イベント・フィルタ	37
4.2.4	NFS を利用したデータ転送	38
4.2.5	Raw Data Format	38
4.3	解析プロセス	40

4.3.1	Event Building、及び Data Conversion	40
4.3.2	Data Format	42
4.3.3	Drift Tube による Tracking	43
4.3.4	Event Display	44
4.3.5	Analysis Program	44
4.3.6	Efficiency Map Display	44
第 5 章	ビームテストでの DAQ システムの実装・結果	47
5.1	セットアップ	47
5.1.1	検出器	48
5.1.1.1	Scintillation Counter	48
5.1.1.2	Drift Chamber	48
5.1.1.3	TGC	48
5.1.2	DAQ システム	48
5.1.2.1	モジュール	50
5.1.2.2	コンピュータ環境	52
5.1.3	読み出しプロセス	52
5.1.3.1	ビームテストにおける Raw Data Format	52
5.1.4	解析プロセス	55
5.1.4.1	Data Conversion	55
5.1.4.2	ビームテストにおける Data Format	56
5.1.4.3	Event Display	57
5.1.4.4	Analysis Program	57
5.2	結果	59
5.2.1	解析結果	59
5.2.2	DAQ の実装結果	69
第 6 章	検査設備での DAQ システムの実装・結果	70
6.1	解析結果	70
6.1.1	Drift Tube	70
6.1.2	Tracking	73
6.1.3	TGC	77
6.1.4	Event Display	77
6.2	DAQ の実装結果	82
第 7 章	結論と今後の計画	83
7.1	結論	83
7.2	今後の計画	84
	参考文献	88

第1章 Introduction

現代素粒子物理学において、標準模型は、今までに実験的に調べられてきた様々な素粒子相互作用を破綻なく説明することができる。しかし、標準模型が予言する素粒子の中で、唯一発見されていない粒子が Higgs 粒子である。Higgs 粒子は、電弱相互作用での自発的対称性の破れを説明するために、その存在が必要とされ、質量の起源を解明する手がかりと期待されるため、その発見は極めて重要な意味がある。このような重要な役割を果たす Higgs 粒子は、理論的には質量の上限は約 1 TeV とされており、実験による発見が待ち望まれている。

この Higgs 粒子を発見すべく、欧州原子核研究機構 (CERN) では、重心系エネルギーが 14 TeV という世界最高のエネルギーを持つ大型陽子陽子衝突型加速器 (LHC) が、2006 年の稼働を目指し建設が進められている。LHC 加速器に設置される測定器の一つに ATLAS 測定器がある。ATLAS 測定器は、Higgs 粒子の探索を始めとした新しい粒子の発見や、様々な精密測定を行うことが可能な汎用の測定器である。そのため、多くの高精度な検出器が設置されるが、中でもミュオンの検出、測定に使用されるミュオンスペクトロメータは、ミュオンが重要な物理に関わっており、バックグラウンドの少ないきれいなイベントを取り出すことができるため、その重要性は高い。そして、ミュオンを用いた事象の取捨選択は、トリガーの基本的な技術であり、実験の要となる。

そのため、トリガー専用のミュオン検出器が ATLAS 測定器に設置され、そのミュオントリガー検出器である Thin Gap Chamber (TGC) の開発、及び製作を ATLAS 日本グループは担当しており、現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で量産が進められている。LHC 実験では高頻度のバックグラウンドが予想されており、TGC にはそういった環境下においても、高い検出効率と優れた安定性が要求されている。KEK で量産された TGC は、LHC 実験において、要求通りの性能、及び動作が得られるものであるかを保証するために、検査を行うことは必要不可欠となる。

検査は神戸大学の専用の検査設備で行われ、量産された TGC は検査に合格したもののだけが CERN に輸送される。検査内容は、TGC のガスリークのチェック、高電圧を印加したときのリーク電流のチェック、そして TGC の検出効率、及びその一様性の測定である。特に TGC の検出効率、一様性の測定には、宇宙線ミュオンを用いて、約 2 m^2 の TGC を検査を行うため、大規模な検査設備が必要となり、そこで用いるデータ収集システムもまた、高い処理能力を持った専用のものを構築しなければならない。

本論文で扱うデータ収集 (DAQ : Data Acquisition) システムは、一般にはデータを収集することを目的としたシステムであるが、素粒子実験の分野においては、単にデータを収集するだけではなく、それと同時にデータの保存や、収集したデータの解析などの様々な機能を備えたものでなくてはならない。実験において、データ収集を行うためには、事象 (イベント) の発生を捉え (トリガー)、即座に応答し、次のトリガーが発生するまでの間に、必要な処理をリアルタイムに行う必要がある。近年は、実験に使用する検出器が複雑化する傾向があり、大量のデータを高速に収集することが要求され、DAQ に求められる処理能力は大きくなる。このように DAQ システムは、その性能が実験の精度や信頼性を決定する重要な実験装置の一部と位置付けることがで

きる。

DAQシステムは、大きく分けて、測定回路、コンピュータ、記録装置から構成される。これらの組合せにより開発されるDAQシステムには、リアルタイム処理が要求され、測定器からコンピュータ、コンピュータから記憶装置へのデータの転送速度、トリガー発生から処理開始までの高速応答性、大容量の記憶装置といったものが必要となる。

高エネルギー分野で使用されるデータ収集用のバス規格としては、CAMAC、TKO、VME、PCIなどが挙げられる。しかし、高エネルギー物理学実験では年々、実験装置の規模が増加し、それに伴って、実験中に現れるイベント数も増加している。よって、DAQシステムには高い処理能力が要求され、さらにコンピュータとのデータ転送も高速化が要求される。このような要求から、この分野ではVME規格の採用が増えている。

DAQシステムのコンピュータとしては、ボードコンピュータ、ワークステーション、PCが考えられる。ボードコンピュータは、1980年代から用いられ、リアルタイムOSを搭載して使用される。ボードコンピュータをデータ収集用バス内に組み込むことで、データ転送速度の向上を図り、リアルタイムOSにより高速応答性の向上を図る。ワークステーションは、1980年代後半から1990年代前半にかけて用いられ始め、主にUNIXを搭載して使用される。ワークステーションとUNIXにより、ソフトウェアはより汎用性のあるものとなる。PCは、1990年代後半に入ってから用いられ始め、主にPC用UNIX OSであるLinuxを搭載して使用される。

最近のPCは高い性能と汎用性を兼ね備えていて、価格も考慮するとそのコストパフォーマンスも非常に優れている。また、周辺機器も豊富に存在し、他のシステムとも相性が良い。また、近年のネットワーク技術の発達によって、汎用I/Oとしてネットワークを用いることができ、複数台のPCを繋ぐことも可能となる。

PCに搭載されるLinuxには豊富なソフトウェア群が揃っており、これらをインストールすることで、データ収集から解析まで、すべての環境を揃えることも可能である。そして、特殊な開発環境を必要とせず、通常のアプリケーション開発と同様に行うことができる。

このように、PC + Linux + ネットワークを用いることで、ハードウェア、ソフトウェア共に制限が少なく、スケラビリティのある、非常に拡張性の高いDAQシステムを開発することが可能となる。

記憶装置に関しては、ハードディスクやテープ等が考えられるが、最近では、どちらをとっても、安価であり、簡単に手に入れることができる。また、最近のハードディスクは、100Gbyte近い大容量のものがああり、転送速度も100Mbyte/sと速く、非常にコストパフォーマンスが優れている。

本論文で述べる検査設備でのデータ収集の特徴は、

- データの処理量が大きい。
(トリガー頻度 30Hz で 400byte/event とすると、1年間で約 400Gbyte)
- 3年に渡って検査を行う。
- 決められたサイクルで検査が行われるため、データ収集と解析を同じペースで行う。

などが上げられる。よって、これまでに述べた要求に加えて、検査設備で用いるDAQシステムには、安定性、保守性、拡張性が要求される。そこで、これらの要求をすべて満たす設計のDAQシステムの開発を行わなければならない。よって、検査設備で必要となるTMCモジュール等に関して、VME規格で開発されていることから、検査設備のデータ収集用バスはVMEを採用する。DAQシステムのコンピュータとしてPCを採用し、OSはPC用UNIX OSとして広く普及しているLinuxを採用する。

VME と PC のセットを複数台用意し、複数の PC をネットワークで繋ぎ、並列処理を行うことで、さらに DAQ システムの処理能力を向上させることができる。ネットワークに分散するシステムの利点を更に活用し、データ収集と解析を行う PC を別に配置することが可能である。また、データ収集、イベントビルド、解析は、ファイルを経由して行い、ソフトウェアの各プロセスは疎結合で動作させることで、保守性、拡張性を向上させることを目指す。

本研究は、このような構想をもとにして、検査設備のためのデータ収集システム、及び解析ソフトウェアの開発を行い、その実装を行った。

本論文の構成は、第 2 章では、ATLAS 実験の概要を述べる。LHC 計画と LHC で期待される物理について述べた後、ATLAS 測定器を構成する検出器についてふれ、その一部であり、我々 ATLAS 日本グループが製作を担当している TGC の概要について述べる。

第 3 章では、神戸大学の専用の TGC 検査設備で行われる検査項目と、その評価方法について述べる。

第 4 章では、本論文の核心部であり、宇宙線ミュオンを用いた TGC の検査で用いるデータ収集システムについて述べる。データ収集システムの設計、及び構成の詳細について述べた後、DAQ でのデータを読み出す詳細について手順を追って説明する。その後、読み出したデータを解析する各ソフトウェアについて述べる。

第 5 章では、2000 年 12 月に行われたビームテストでのデータ収集システムの実装、及び解析結果について述べる。第 4 章で述べる設計を基にして開発したデータ収集システムを用いてビームテストを行い、KEK で製作された TGC の動作検証を行った。このときの TGC の動作、性能評価の結果について述べた後、DAQ システムの性能について評価する。

第 6 章では、検査設備において、第 4 章で述べる設計により開発したデータ収集システムを実装し、その結果について述べる。DAQ を行って得られた結果について考察し、DAQ システムの性能評価を行う。

第 7 章では、DAQ システムの実装についてまとめ、実際に検査設備が稼働し始めるまでに、どのような開発過程が必要となるか、見通しと予定を述べる。

第2章 ATLAS実験

ここでは、LHC計画、ATLASの目指す物理、ATLAS測定器、TGCについて解説する。

2.1 LHC計画

スイスのジュネーブにある欧州原子核研究機構 (CERN) において、2006年の稼働を目指し、大型陽子陽子衝突型加速器 (Large Hadron Collider) の建設が進められている。LHC加速器は、重心系のエネルギー 14 TeV という世界最高のエネルギーと、25 ns のバンチ衝突間隔による $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の高ルミノシティにより、TeV エネルギー領域の素粒子物理学の研究が可能となる。LHC 加速器の主要なパラメータを表 2.1 に示す。

主リング周長	26,658.87 m	バンチ間隔	24.95 ns
陽子ビームエネルギー	7 TeV	バンチあたりの陽子数	1×10^{11}
ルミノシティ	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	バンチの長さ	75 mm
入射エネルギー	450 GeV	衝突点でのビーム半径	16 μm

表 2.1: LHC 加速器の主要パラメータ

LHC のような陽子陽子衝突型加速器は、陽子の質量が電子に比べて非常に大きいため、円形加速器におけるシンクロトロン放射によるエネルギー損失が少なく、高エネルギーを得るのに適している。しかし、陽子は内部構造を持ち、電子よりも非弾性散乱断面積が大きいため、衝突によるバックグラウンドが非常に多い。その中から注目する事象を選別することは困難を伴う。このため、LHC に設計される検出器は、入射粒子数の高頻度な環境に耐え、研究目的の物理事象の選別を可能とするものであることが要請される。

2.2 LHCの物理

LHC が目指す物理には、標準模型の基本粒子である Higgs 粒子の探索、超対称性粒子 (SUSY) の探索、top クォークの物理等がある。ここでは、その中でも最も重要な Higgs 粒子の探索について述べる。

主な Higgs 粒子生成の Feynman Diagram を図 2.3 に示す。Higgs 粒子は t クォークや、W ボソン、Z ボソンのような質量の重い粒子と強く相互作用する。Higgs 粒子の探索では、Higgs 粒子の質量によって生成断面積 (図 2.1)、崩壊過程 (図 2.2) が違うので、探索する崩壊モードも異なってくる。Higgs 粒子の質量別による探索する主な崩壊モードについて表 2.2 にまとめる。

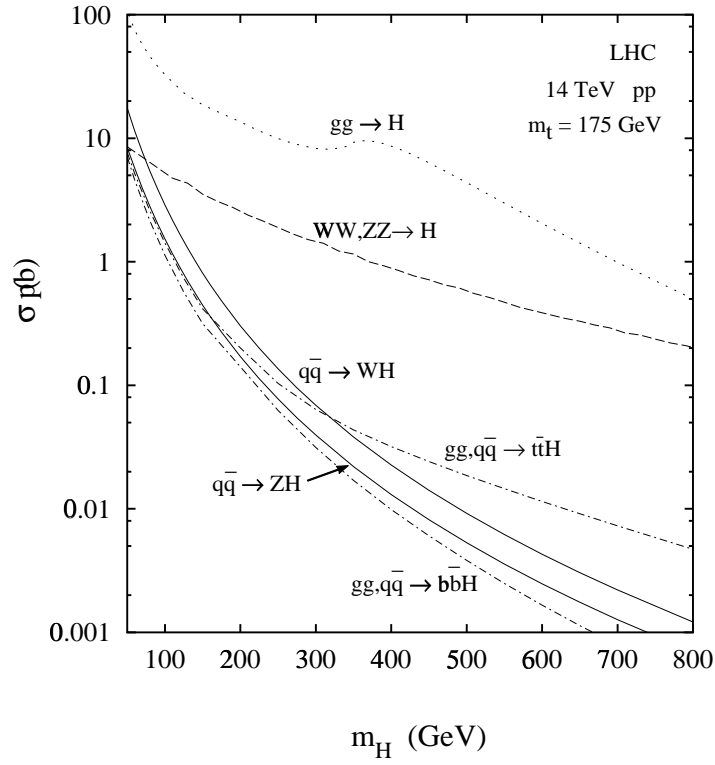


図 2.1: Higgs 粒子の質量と生成断面積

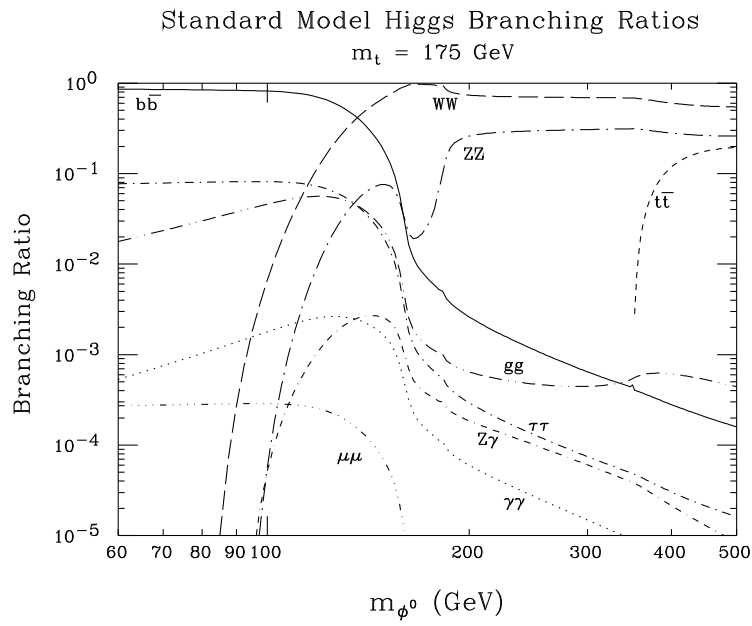


図 2.2: Higgs 粒子の質量と各崩壊過程への分岐比

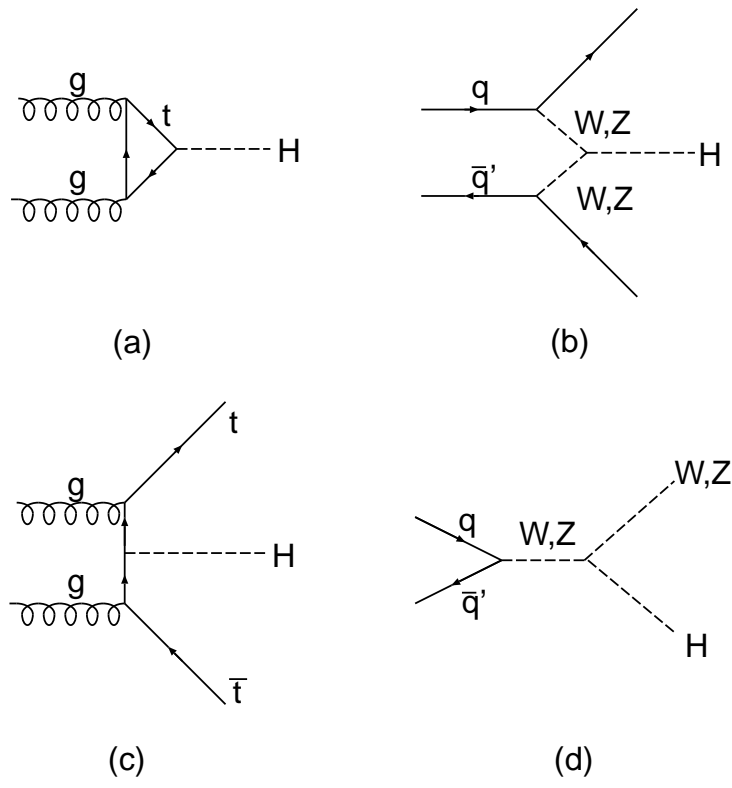


図 2.3: Higgs 生成の Feynman Diagram. (a) グルーオン-グルーオン融合。(b) WW、ZZ 融合。(c) $t\bar{t}$ クォーク随伴生成。(d) W、Z 粒子随伴生成。

Higgs 粒子の質量範囲 (GeV)	探索する主な崩壊モード
$80 < m_H < 120$	$H \rightarrow \gamma\gamma$
$120 < m_H < 2m_Z$	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$
$2m_Z < m_H$	$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^-$

表 2.2: Higgs 粒子を探索する主な崩壊モード

- $80 < m_H < 120$
この領域での Higgs の主な崩壊過程は $b\bar{b}$ であるが、バックグラウンドが大きく有効ではない。従って、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ の分岐比は 10^{-3} 程度と小さいが、Higgs の生成断面積が比較的大きく、バックグラウンドが少ないため、 $\gamma\gamma$ への崩壊を調べるのが重要となる。
- $120 < m_H < 2m_Z$
この領域になると、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$ を調べるのが重要となる。バックグラウンドとして、 $q\bar{q} \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$ があるが、それほど多くはない。
- $2m_Z < m_H$
この領域では、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^-$ が最も有効的で、バックグラウンドも少なく、このモードを調べるのが重要となる。しかし、500GeV 以上になると、崩壊幅は急激に広がり、バックグラウンドとの区別が困難になる。さらに、Higgs 粒子の生成断面積も質量が大きくなるにつれて減少するため、分岐比の高い、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l\nu\bar{\nu}$ や、 $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu jj$ を用いてイベント数を稼ぐことが必要となる。

このように Higgs 粒子の崩壊モードは質量により異なるが、レプトンを含むモードは広いエネルギー領域にわたって有効である。LHC が高ルミノシティ ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) で約 1 年間稼働したとき、ATLAS 測定器において各崩壊モードで Higgs 粒子を発見する能力を図 2.4 に示す。縦軸は、Higgs を発見する能力を現し、予想される Higgs のイベント数をバックグラウンドのイベント数の平方根で割ったものである。縦軸の値が高い程、Higgs のイベントがあったときに、それがバックグラウンドでは説明できないことを示している。

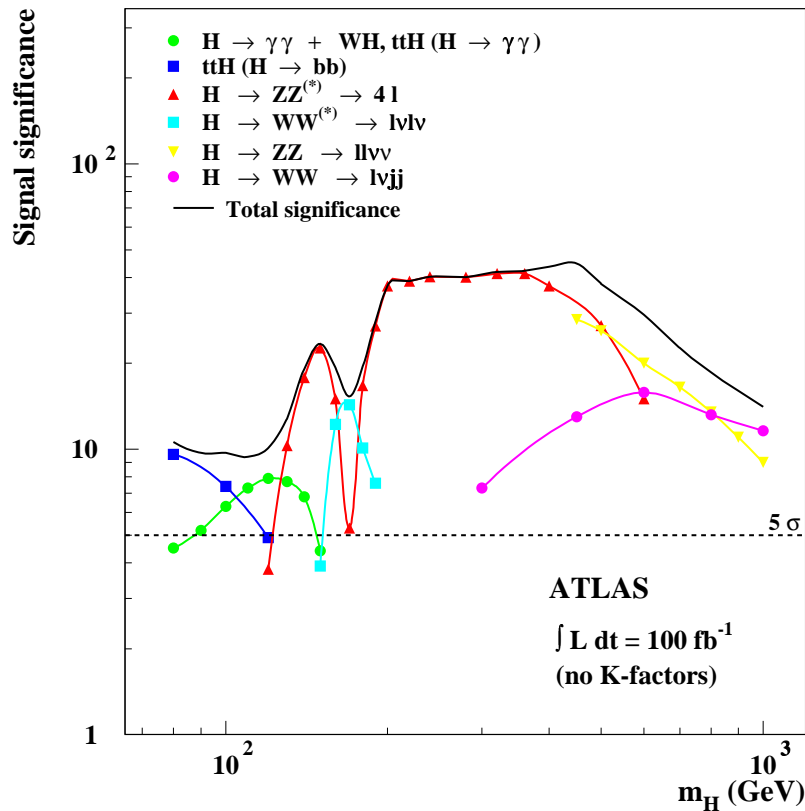


図 2.4: ATLAS 測定器における Higgs 粒子発見ポテンシャル

2.3 ATLAS 測定器

LHC 加速器に設置される測定器に ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS) 測定器 (図 2.5) がある。ATLAS 測定器は、LHC の持つ世界最高の重心系エネルギーと高ルミノシティを最大限に利用し、その中から目的の事象を選別できるように設計された巨大な測定器で、直径が 22m、長さ 44m の円筒形をしており、全重量は約 7000 トンにも及ぶ。また、LHC の高ルミノシティ下においても、電子、 γ 線等の電磁シャワー、ジェットによるハドロンシャワー、ミューオンなど、できるだけ多くのシグナルをバランス良く取り出し、精度の良い測定を行うことを目的とした汎用測定器である。

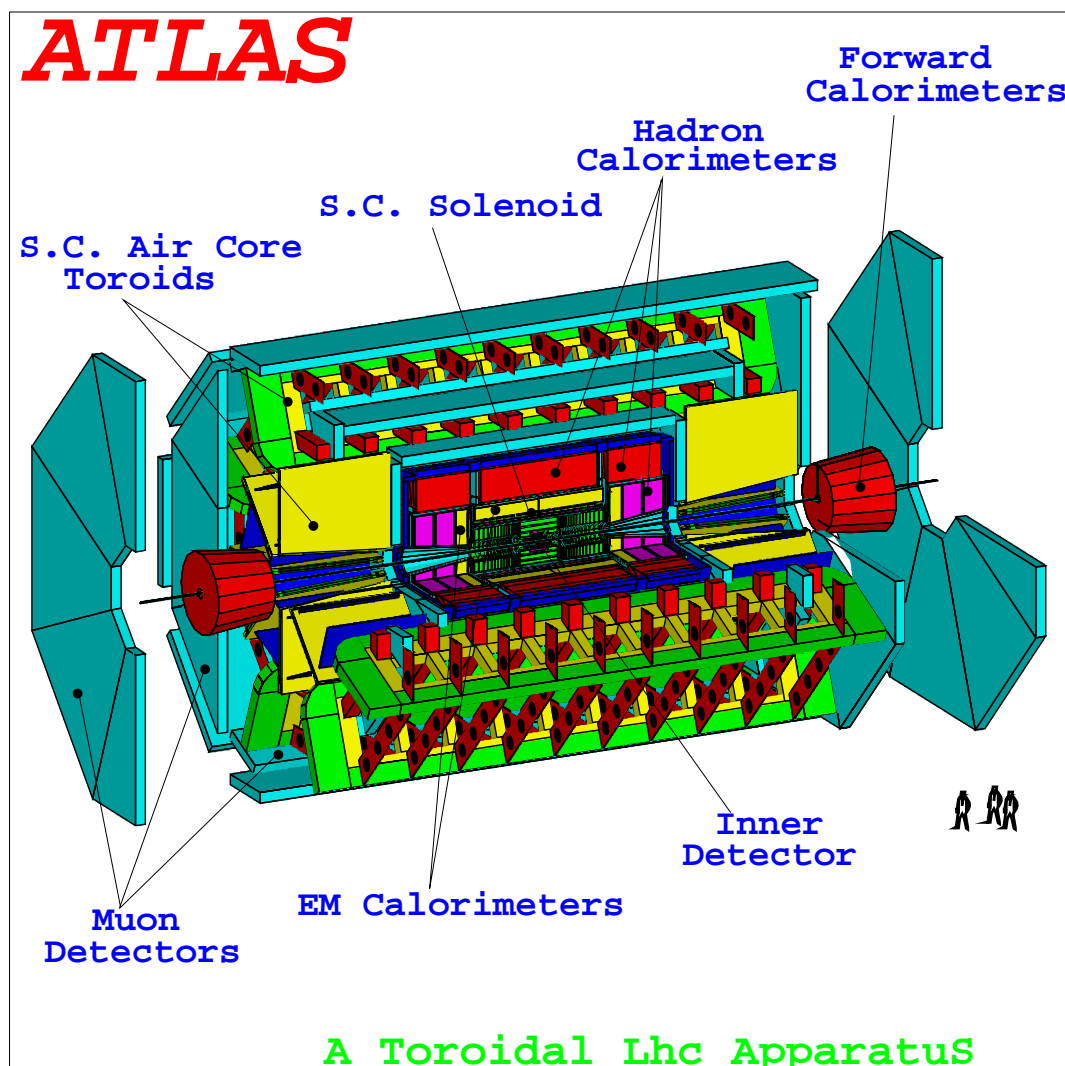


図 2.5: ATLAS 測定器

ATLAS 測定器は大きく分けると以下の 3 つの部分から構成されている。

- 内部飛跡検出器

最もビームライン近くに設置され、荷電粒子の飛跡認識、運動量測定、反応点測定、電子、 γ 線の識別を行う。ビーム軸の周りに同心円状に、ピクセル検出器、シリコン・ストリップ検出器からなる半導体検出器、遷移輻射ストロー検出器が層構造をなして設置される。

- **カロリメータ**

内側には電磁カロリメータ、外側にはハドロンカロリメータがあり、電磁カロリメータで電子や γ 線のエネルギーと位置測定、ハドロンカロリメータでハドロンエネルギー測定を行う。電磁カロリメータは、鉛吸収体と液体アルゴンを用いたカロリメータである。ハドロンカロリメータは領域によって2種類に分かれ、鉄の吸収体とタイル状シンチレータ及び波長変換ファイバーからなるタイル型カロリメータと、銅及びタングステン吸収体を持つ液体アルゴンカロリメータである。

- **ミュオン検出器**

LHC 実験においてミュオン検出が果たす役割は大きい。目的とする物理事象の崩壊モードの多くが荷電レプトンを含んでいる。その中でもミュオンは他の粒子と違い測定器の中で反応することなく、カロリメータの外まで突き抜ける。従って、ミュオン検出器は最外部に設置される。その役割は、内部飛跡検出器とは独立に広範囲にわたってミュオンの運動量を測定し、また、トリガーをかけられるようになっている。ミュオン検出器は、ミュオンの飛跡精密測定する Monitored Drift Tube(MDT)、及び Cathode Strip Chamber(CSC) と、ミュオンのトリガーを信号を出す Thin Gap Chamber(TGC)、及び Resistive Plate Chamber(RPC) からなる。

2.4 ミュオントリガー検出器

前節で述べたように、LHC 実験ではミュオンを用いた事象の取捨選択はトリガーの基本的な技術であり、実験の要となる。そのためトリガー専用の検出器が置かれる。ATLAS 測定器におけるミュオントリガー検出器について図 2.6 に示す。ミュオントリガー検出器としてバレル部に RPC、エンドキャップ部¹に TGC が置かれる。

ミュオントリガー検出器は、通過するミュオンのビーム軸に垂直な運動量成分 p_T を調べ、膨大なバックグラウンドから興味のある事象の取捨選択を行い、さらに衝突時間 (バンチ ID) の決定も行う。図 2.7 にミュオントリガーの仕組みを示す。図 2.7 の TGC1 は 3 層が 1 組となった 3 重層 (Triplet) で、TGC2、TGC3 は 2 層が 1 組となった 2 重層 (Doublet) になっており、ビーム衝突点から外側に向かって TGC1 (Triplet)、TGC2 (Doublet)、TGC3 (Doublet) の順に配置される。RPC1、RPC2、RPC3 は、それぞれ 2 層ずつからなる。

TGC におけるミュオンのトリガー条件として、low p_T (> 6 GeV) に対しては、外側の 4 層の TGC (TGC2、TGC3) の内、少なくとも 3 層の TGC にヒットがあるときで、ヒットの位置からミュオンの運動量を測定する。high p_T (> 20 GeV) に対しては、low p_T のトリガー条件に加え、内側の 3 層の TGC (TGC1) の内、少なくとも 2 層のヒットがあることが要求される。

エンドキャップ部をカバーする TGC は、半径約 10 m の大きなホイールを形成させて配置され (図 2.6 参照)、その配置図を図 2.8、2.9 に示す。図 2.8 は R-Z 平面図²である。図 2.9 は TGC3 を Z 方向から見た全体図で、ホイール全体を R 方向に 6 分割、 ϕ 方向に 48 分割され (最も内側は、24 分割)、図の各セルが 1 台の TGC (Doublet) を示している。

TGC は、その配置する場所により 11 種類の形状 (T1~T11) があり、それぞれの TGC の製作は日本、イスラエル、中国が担当し、全ての形状を合わせて 3649 台製作される。

TGC が置かれるエンドキャップ部には、陽子陽子素過程による高頻度の粒子の入射が予想されており、モンテカルロシミュレーションにより見積もられたミュオン検出器のエンドキャップ

¹ATLAS 測定器は円筒形をした測定器であり、円筒の端面をエンドキャップ部、円筒の胴部をバレル部と定義する。

²ATLAS 測定器では円筒座標を用い、ビーム軸を Z、これと直交する半径方向を R、円周方向を ϕ と定義する。

Trigger Chambers

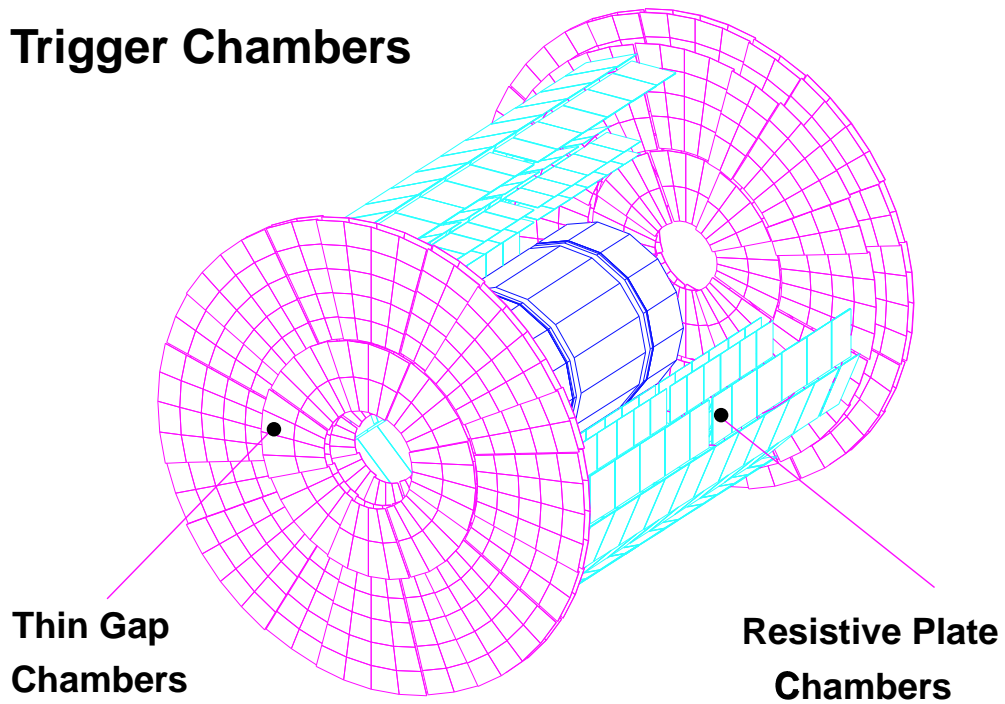


図 2.6: ミューオントリガー検出器

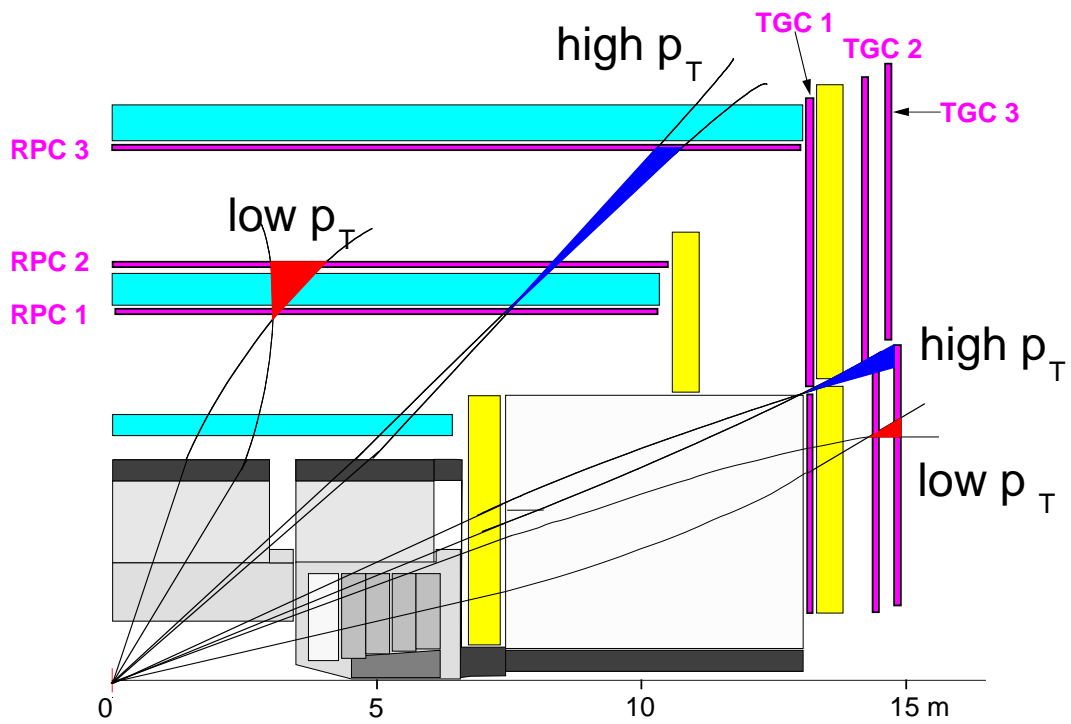


図 2.7: ミューオントリガーの仕組み (Longitudinal view)

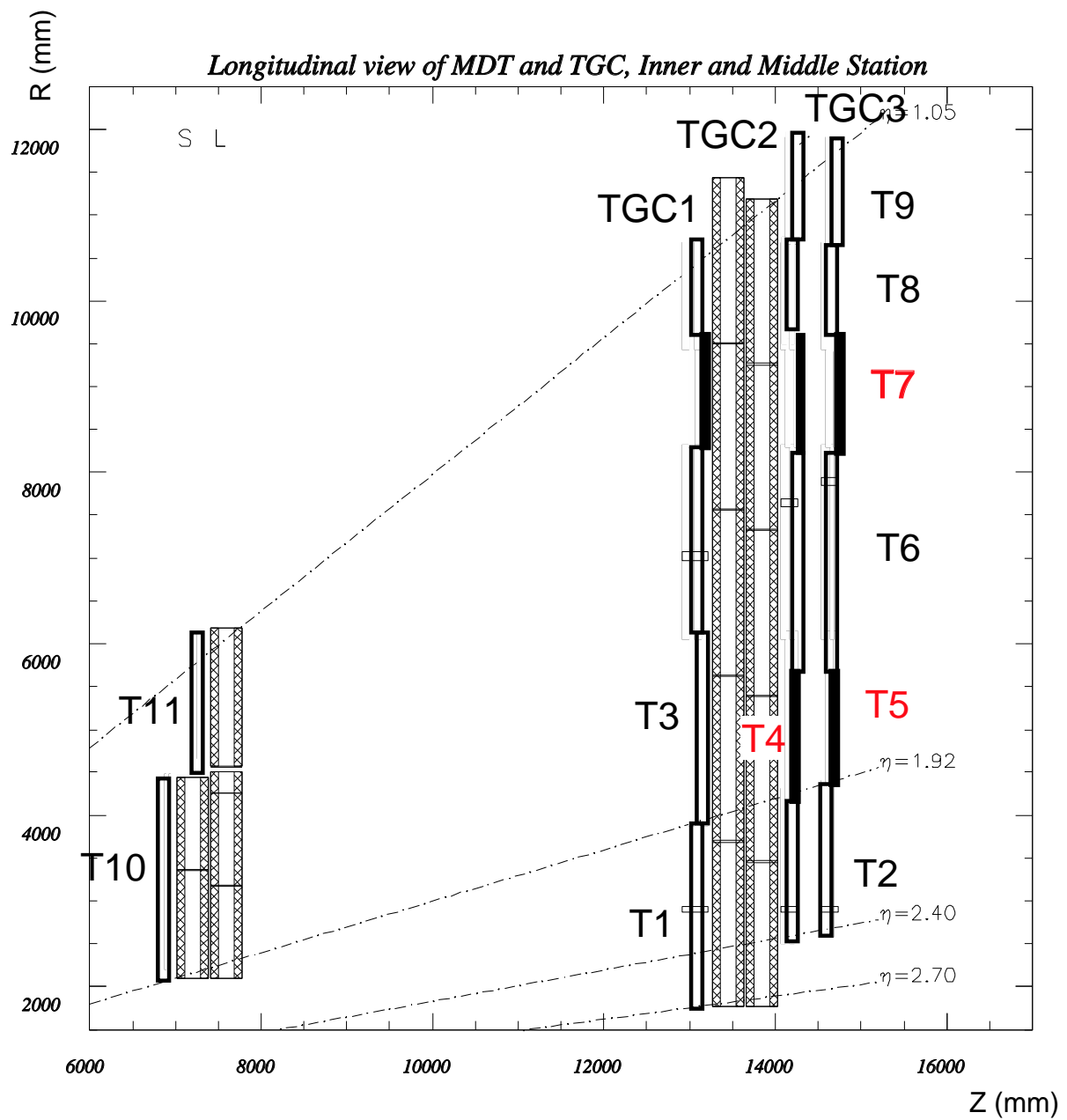


図 2.8: ATLAS 測定器における TGC の配置図 (R-Z 平面図)。日本が担当する TGC は黒色の T4、T5、T7。

TGC3 (active area of chambers)

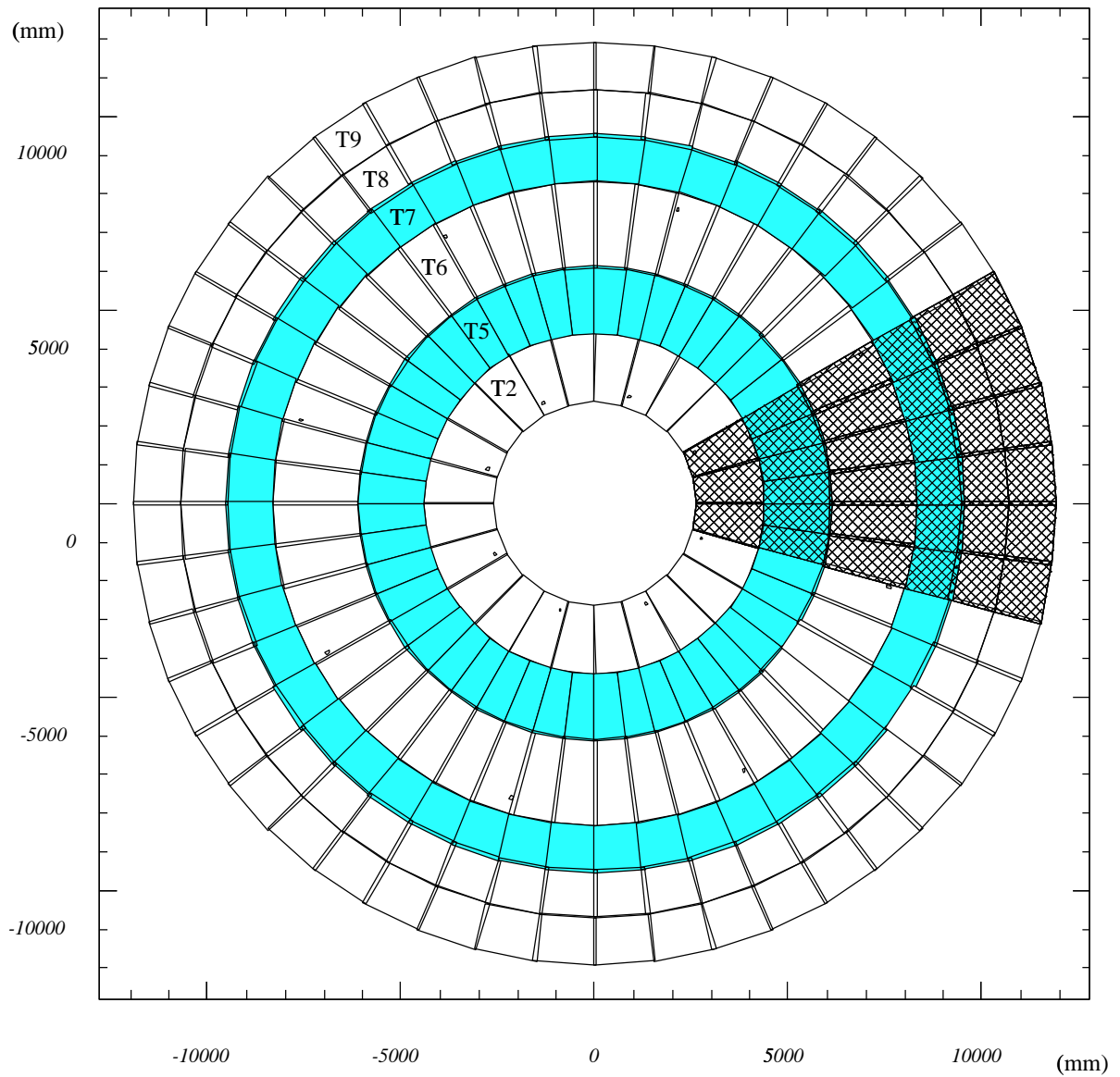


図 2.9: TGC3 の Z 方向から見た配置図。色が塗られた部分は日本が担当する T5、T7。

部におけるバックグラウンドレートを表 2.3 に示す。このように、エンドキャップ部は高頻度入射粒子状況下におかれるため、TGC にはそういった状況下でも動作するように設計されている。

粒子	n	γ	μ	hadron $^{\pm}$	e $^{\pm}$
rate (kHz/cm 2)	4.1	2.7	2.1×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.2×10^{-2}

表 2.3: エンドキャップ部におけるバックグラウンドレート

以上のような役割を担う TGC に要求される条件は以下のようなものである。

- 1 kHz/cm 2 の高頻度入射粒子状況下でも 10 年間安定に動作すること。
- LHC のビームの衝突間隔の 25ns 以下の時間分解能を持ち、バンチの決定ができること。
- ミューオンの検出効率 (Efficiency) が 99% 以上であること。
- p_T (横方向運動量) をトリガー条件に組み込むため、1~数 cm 程度の位置分解能を持つこと。

2.5 Thin Gap Chamber (TGC)

Thin Gap Chamber は、高エネルギー実験においてよく使用されている Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) 型の検出器の一種である。しかし、アノードワイヤーとカソード面との間隔 (Gap) が一般の MWPC と比べて非常に狭いため、Thin Gap Chamber (TGC) と呼ばれている。ATLAS 実験で用いられる TGC は、アノードとカソードのギャップが 1.4mm、ワイヤー間隔が 1.8mm に最適化されている (図 2.10 参照)。以下では、その構造について解説する。

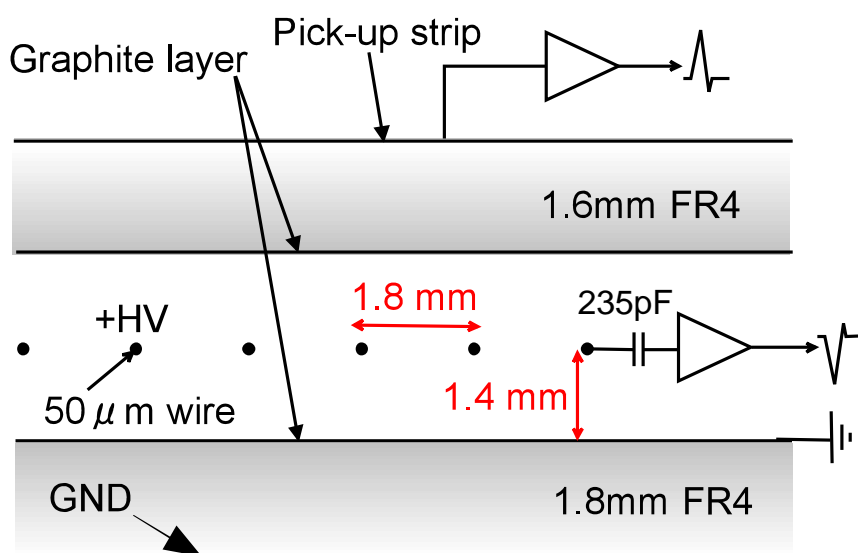


図 2.10: TGC の構造 (断面図)

2.5.1 TGCの構造

図 2.10 は、TGC のワイヤー方向に垂直な断面図である。TGC のパラメータについて表 2.4 にまとめ、それぞれの特徴について述べる。

ワイヤー・ワイヤー間隔	1.8 mm
ワイヤー・カソード間隔	1.4 mm
ワイヤー直径	50 μm
ワイヤー張力	350 g 重
カーボン面抵抗	$\sim 1 \text{ M}\Omega/\text{square}$
印加電圧	3.1 kV
充填ガス	$\text{CO}_2 + \text{n-Pentane (55:45)}$
ガスゲイン	$\sim 10^6$

表 2.4: TGC のパラメータ

アノードワイヤーのそれぞれの間隔は 1.8mm と狭い。これは、LHC 実験での 25ns というビームのバンチクロッシングに対応できるように、電子のドリフト距離を短くするためである。

アノードワイヤーとカソード面との間隔は 1.4mm と非常に狭い。これは、高頻度入射粒子状況下においても検出効率が低下しないように、空間電荷の原因である陽イオンのドリフト距離を短くするためである。

アノードワイヤーは 50 μm の金メッキタングステンを使用している。一般に細い径のワイヤーの方が高い電場を形成しやすいが、TGC は 2m² の大きさであり、機械的な強度を高めるためにも、50 μm の径のワイヤーが採用された。

充填ガスには、 $\text{CO}_2 + \text{n-Pentane (55:45)}$ を用いる。ガス増幅の過程で紫外線を放出する過程が存在し、放電の原因になる。そこで、クエンチガスと呼ばれる紫外線吸収断面積の大きいガスを混合させたものが使用される。また、TGC はアノード・カソード間隔が非常に狭く、より吸収断面積の大きいガスを使用する必要がある。そのため、 $\text{CO}_2 + \text{n-Pentane (55:45)}$ の混合気体を大気圧で使用する。n-Pentane は分圧 0.5 気圧で常温において気体でいられる最も振動、回転の自由度が大きい炭化水素分子である。

カソード面は、1.6mm の FR4(ガラスエポキシ樹脂) を基板とし、その片面にはカーボンを塗装することによって形成している。また、もう片面にはエッチングによりあるピッチ幅のパターンの銅ストリップがアノードワイヤーに対して垂直に構成されている。カソード面であるカーボン面の面抵抗を大きくすることにより、ストリップ読み出しを実現している。カーボンを塗装することにより放電を少なくし、高抵抗にすることでストリップのクロストークを避けるような構造となっている。

図 2.11 はワイヤー・カソード間隔を変化させたときの Pulse Height の変化である。TGC はワイヤー・カソード間隔が狭いため、間隔が変化すると、増幅率が大きく変化してしまう。このため、TGC には全面にわたって 100 μm 以下の平面性が要求される。この要求により、TGC には補強材としてワイヤーサポート、ボタン型サポートが組み込まれている (図 2.12 参照。この図は T8³のものであるが、他の形状の TGC も同じ構造である。)。さらに、TGC は 2 層 (Doublet)、又は 3 層 (Triplet) で 1 単位とされ、TGC と TGC の間、及び外側には強度を保つためにハニカムが接着されている (図 2.13 参照)。このときにチェンバーの位置分解能を高めるために、Doublet

³KEK において試作の段階では T8 が作られた。

では2つのチェンバーの内部構造が全て半ピッチ (ワイヤーグループ、ストリップの間隔) ずつずれるような構造になっている。Triplet では3つのチェンバーが1/3ピッチずつずれるような構造になっている。また、ワイヤーサポート、ボタン型サポートの位置は、チェンバーの不感領域ができるのを防ぐために、ずらして配置される。さらに、TGCは圧力に弱いため、このような補強材によって、ガスを流したときのオーバープレッシャー時においても平面性を保つ役割もしている。

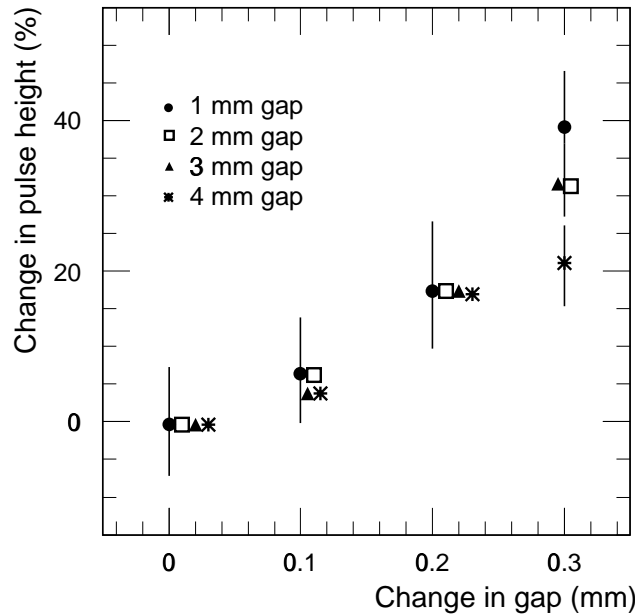


図 2.11: ワイヤー・カソード間隔を変化させたときの Pulse Height の変化

読み出しに関しては、ATLASにおいてTGCは、ワイヤーの情報をR方向(ホイールの半径方向)の情報、ストリップの情報を ϕ 方向(ホイールの円周方向)の情報とするように配置され、ワイヤーとストリップの情報を収集することにより、TGCは2次元の情報を得ることができる。ワイヤー・ストリップ読み出しピッチは、エンドキャップ部の外側に行くほど大きくなる。ワイヤー読み出しピッチの変化は、陽子陽子衝突点からのビーム軸に対する η^4 の分解能を一定にし、ストリップ読み出しピッチの変化は ϕ 方向角度分解能を一定にしている。

読み出すチャンネル数は、チェンバーの種類によって異なるが、例えばT8 Doubletに関しては、ワイヤー、ストリップとも32チャンネル読み出しである。ワイヤー読み出しについては、1.8mm間隔で1枚あたり約700本のワイヤーが張られており、これらを約20本まとめて1チャンネルとして読み出す。ストリップ読み出しについては、約40mm幅のストリップがチャンネル数分割されている。

TGCからの読み出しは、TGCのアダプターボードに接続されるASD (Amplifier Shaper Discriminator) ボードと呼ばれるアンプを通じて行われる。TGCのアナログ出力を増幅し、閾値電圧(V_{th})に従ってデジタル出力に変換する(図2.14参照)。1つのASDボードには16チャンネルある。ASDボードはTGCだけでなく、検査設備で用いるDrift Tubeの読み出しにも用いられる。

⁴ η はシュールドラピディティ(Pseudo Rapidity)と呼ばれ、Z軸からの角度を θ とすると、 $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$ と定義される。

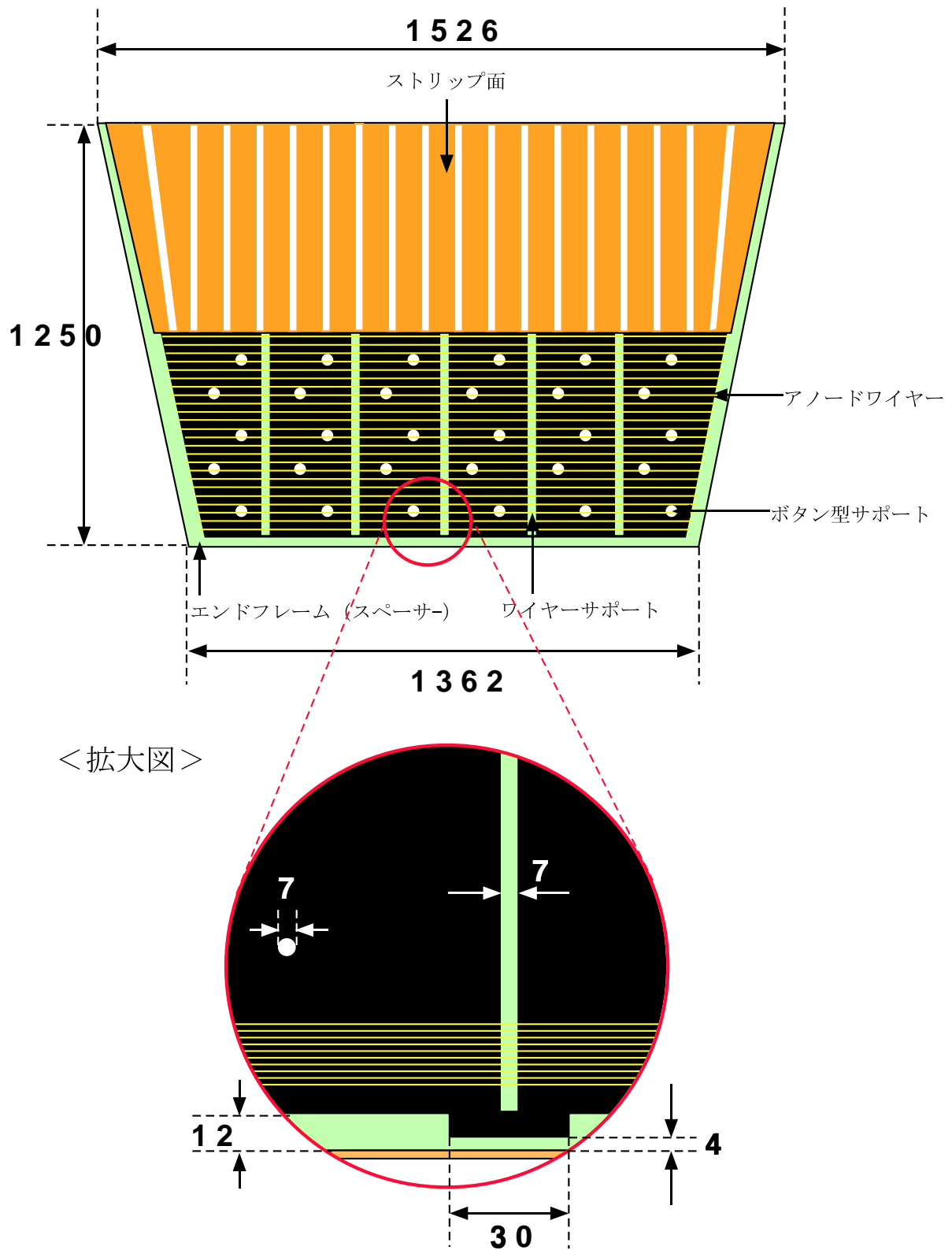


図 2.12: TGC (T8) の構造 (平面図)

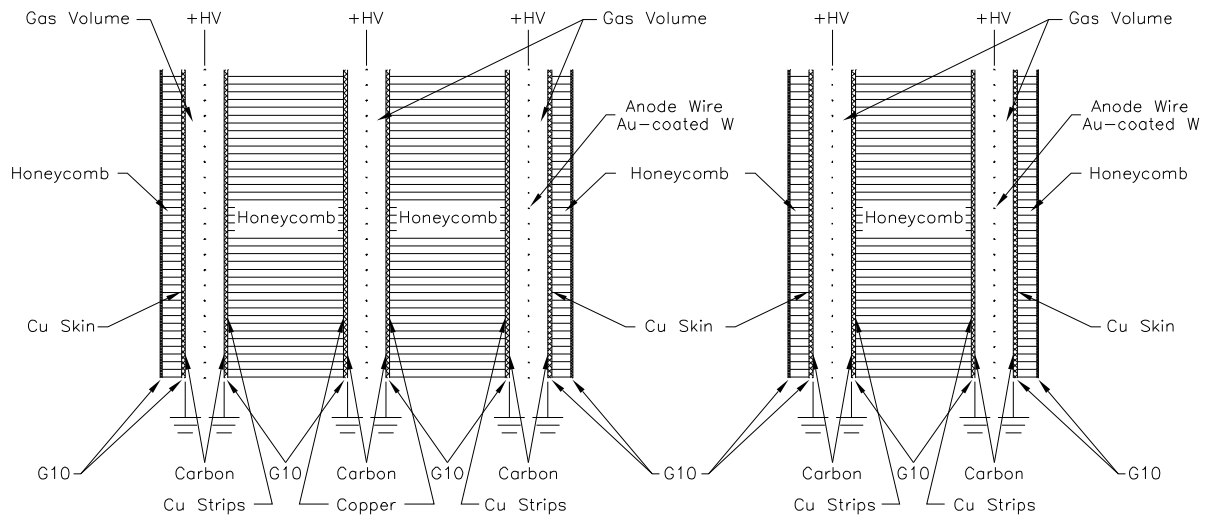


図 2.13: Doublet(右)と Triplet(左)の断面図

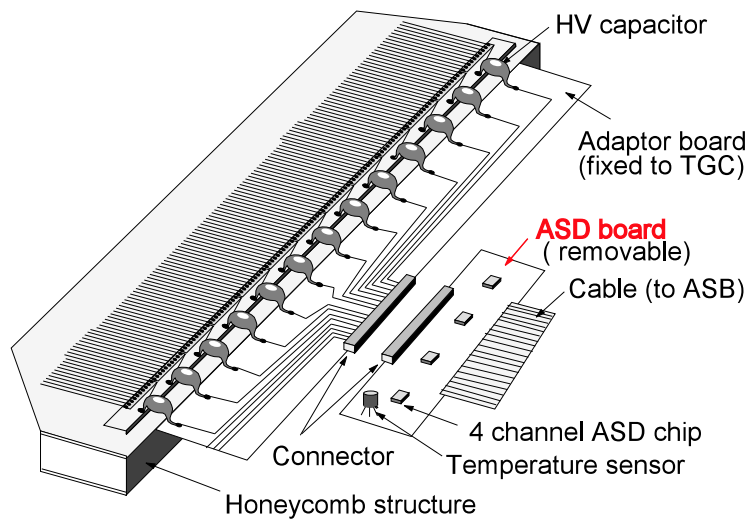


図 2.14: TGC のワイヤー方向の読み出し

2.5.2 TGC の量産と検査

TGC の量産は 2000 年から始まり、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて Doublet 384 台、Triplet 96 台の合計 480 台 (1056 チェンバー) が製作される。表 2.5 に日本で製作される TGC のタイプと台数を示し、図 2.15 にその形状、図 2.8 に各タイプの配置を示す。

Type	Doublet	Triplet	Chamber
T4	96	0	192
T5	96	0	192
T7	192	96	672
計	384	96	1056

表 2.5: 日本で製作される TGC のタイプと台数

TGC は、1 日あたり 2 チェンバーのペースで製作され、製作された TGC は、神戸大学に設置された専用の検査設備へと搬送される。そして、検査に合格した TGC は CERN へと輸送される。

神戸大学で行われる検査は、ガスリークテスト、n-Pentane テスト、宇宙線テストである。約 2m^2 の大きさの TGC を 480 台も検査するためには、大規模な設備とシステムが必要となる。特に、宇宙線長期テストでは、TGC の検出効率、一様性を検査するためには、大規模なデータ収集システムが必要となり、その性能が鍵となってくる。

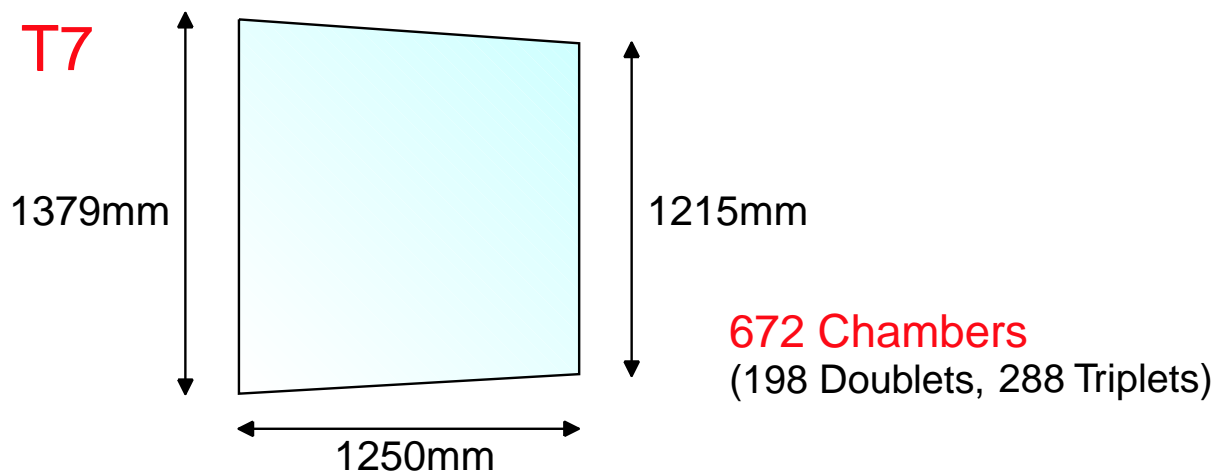
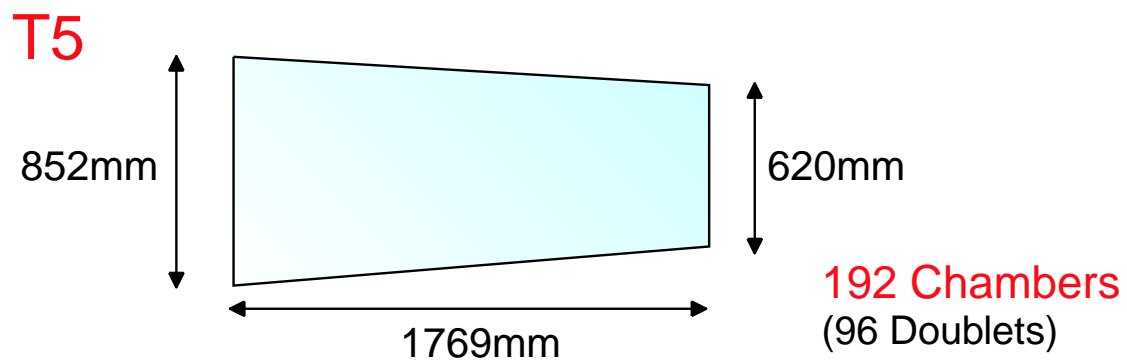
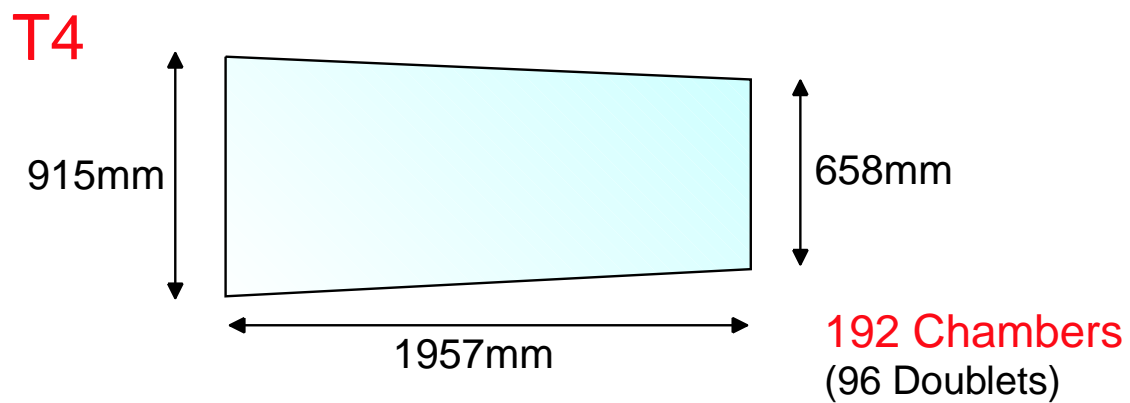


図 2.15: 日本で量産される TGC のタイプと台数

第3章 検査設備

KEKにおいて製作された個々のTGCがATLAS実験で要求される性能・動作を持つものであるかを検査することは不可欠である。そのため、製作されたTGCはCERNに輸送される前に神戸大学の専用の検査設備に搬送されて検査を行い、検査に合格したTGCはCERNに輸送される。検査される項目は、ガスリークテスト、n-Pentaneテスト、宇宙線テストである。以下では、各項目について説明する。

3.1 ガスリークテスト

ガスリークテストでは、TGCのガスリークの有無を調べるテストである。

TGCにガスリークがあると、ガス圧が変化したり、不純物が混入してしまう。それによって、TGCの検出効率が低下する恐れがある。また、TGCに流すガスの成分であるn-Pentaneは有害であり、可燃性であるため、ガスリークがあるとLHC実験において非常に危険である。そのため、ガスリークテストを行う必要がある。

ガスリークテストは、大気圧+60mmH₂Oの圧力をTGCにかけて封じ込め、その圧力の変化をみることでガスリークが無いかをチェックするものである。大気圧+60mmH₂Oの圧力をTGCにかけて、5分間で圧力が10mmH₂O以上低下しなければ合格となる。

3.2 n-Pentaneテスト

これは、本番と同じ充填ガスCO₂+n-Pentaneを使用し、正しく高電圧が印加されるかどうか、安定して動作するかどうかをチェックするものである。ここで、TGC内にCO₂+n-Pentaneを満たしておくことで、次の宇宙線テスト時に改めてガスを充填する必要がなくなり、宇宙線テストにすぐとりかかれ、宇宙線テストが少しでも長くできるような狙いもある。

n-Pentaneテストでは、TGCにCO₂+n-Pentaneを流して、3.3kVの高電圧が印加できるかをチェックする。ワイヤーが運搬等で切れていると高電圧が印加できないことになる。正しく印加できたものに対しては、引続き3.3kVの高電圧を印加し、リーク電流をモニタすることにより、TGCの安定性をチェックする。TGC製作時に、カーボン面やハンダ面に汚れ(フラックス)が残っていた場合や、パーツ接着部での接着剤のもれがあった場合、リーク電流が大きく、放電も起こりやすい。リーク電流をモニタすることで、そのようなTGCを見つけ出すことができる。また、ワイヤーの刺等を放電させることで潰すと共に、TGC製作段階において残った塵や埃も焼くことができる。こうすることで、放電の原因を減らすことできるため、TGCの安定性が増すことになる。このリーク電流が15 μ A以下¹であれば合格となる。

¹通常、リーク電流は1 μ A以下である。

3.2.1 TGC ガスシステム

ここで、TGC のガスシステムについて述べる。

図 3.1 は、n-Pentane テストと宇宙線テストの TGC のガス系のセットアップである。n-Pentane をヒーターで気化させて、CO₂ との混合比が 55 : 45 になるように Mass Flow Controller で制御している。そして、CO₂ と n-Pentane の Mix ガスを 2 系統に分けて、n-Pentane テストと宇宙線テストで使用する。

このガスシステムにおいて、TGC 内部に過大な圧力がかかると、チェンバーが膨らみ接着剤が剥離して破壊されてしまうため、TGC の内圧を抑制することが第一である。そのために、過圧防止システムが備わっており、TGC にある一定以上の圧力 (30mmH₂O) がかけるとガスが purge される仕組みとなっている (図 3.2 参照)。また、このときの流量もモニタされている。

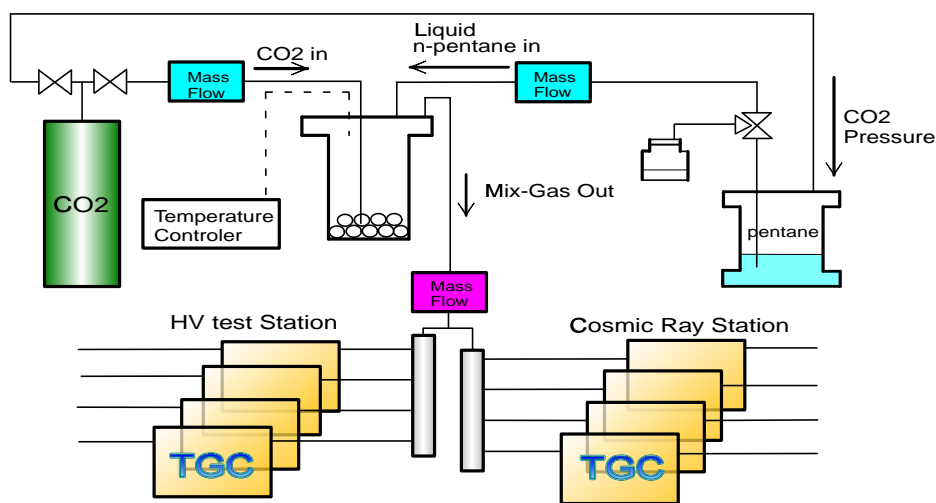


図 3.1: TGC のガスシステム

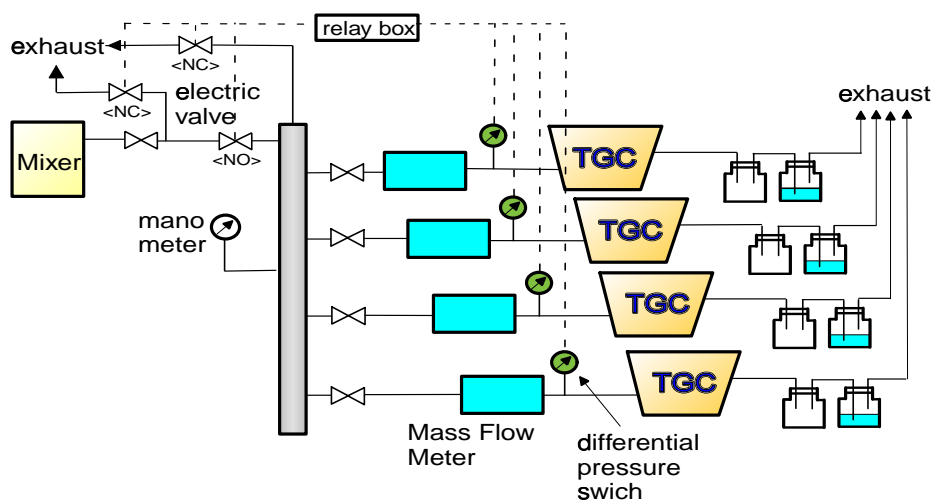


図 3.2: TGC のガス分配、及び過圧防止システム

3.3 宇宙線テスト

宇宙線テストでは、宇宙線ミュオンを用いて TGC の検出効率、及びその一様性を測定する。TGC には高い検出効率が要求されており、この検査は不可欠である。宇宙線ミュオンの通過のトリガー信号発生のための検出器に Scintillation Counter を用い、通過経路の測定のための検出器に Drift Tube を用いる。Drift Tube を用いて宇宙線の飛跡を再構成し、TGC の信号が宇宙線の通過位置に正しく対応しているか、また、ワイヤーサポート、ボタン型サポート以外に不感領域がないかをチェックする。また、TGC の信号についてのタイミングの測定も行い、到達時間分布が 25ns におさまっているかもチェックする。さらに、連続して約 10 日間行うことで、長期安定性も併して検査する。図 3.3 に宇宙線テストでの検査設備の概念図を示す。

図のように Scintillation Counter の向きに Y 軸をとり、右手系に X 軸 (水平方向)、Z 軸 (鉛直方向) をとる。検査設備の最上下面に Scintillation Counter が置かれ、その内側に Drift Tube を 3 層に俵積みにしたものが上下 XY 方向に置かれる。そして、上下の Drift Tube の間に TGC が 8 台置かれる。

Scintillation Counter 及び Drift Tube によりカバーできる測定領域は 1500mm × 1940mm で、日本で製作される全てのタイプの TGC の有感領域をカバーしている (図 2.15 参照)。

3.3.1 Scintillation Counter

検査設備の最上下面にはトリガーとして用いられる Scintillation Counter が、上面には 70mm × 1300mm × 10mm の大きさのもの、下面には 90mm × 1300mm × 2.6mm の大きさのものが各 22 本ずつ並べて配置される。上下に置くことですべての検出器を通過した宇宙線ミュオンを捉えることができる。

図 3.4 にトリガー回路を示す。Counter の両端に接続された Photomultiplier (PMT) からの検出シグナルは Discriminator に送られ、アナログ信号からデジタル信号に変換される。この Counter の両側からのシグナルのコインシデンスを取って、その Counter のシグナルとする。また、検査設備に置かれる全ての Scintillation Counter からの信号の論理和を上下で別々にとり、次にその上下の論理積をとることでトリガー信号を発生する。このトリガー信号の頻度は、約 30Hz と見積もられている。

3.3.2 Drift Tube

Drift Tube は円筒形の比例計数管であり、本設備で使用する目的は宇宙線の飛跡の再構築 (Tracking) を行うことである。その構造は、直径 50mm、厚さ 2mm の円筒形のアルミパイプ (Cathode Tube) の中心に、直径 50 μ m のワイヤー (Anode Wire) が張られている。充填ガスには Ar + ethane(50 : 50) を用い、印加電圧は 3.5kV とする。宇宙線ミュオンの通過によって生成した電子は電場に沿って Anode Wire へとドリフトする。宇宙線通過からシグナル発生までの経過時間 (Drift Time) から、Anode Wire と宇宙線通過経路 (Track) までの距離 (Drift Length) が一意に決まる (図 3.5(a) 参照)。

Drift Tube は上下それぞれに対して、X 軸方向に 2500mm の長さのものを 3 層で 89 本、Y 軸方向に 2000mm の長さのものを 3 層で 125 本、計 428 本設置される。Drift Tube を 3 層に俵積みにすることで 2 次元で Tracking を行うことができ (図 3.5(b) 参照)、XY 方向に置くことで 3 次元で Tracking を行うことができる。

シグナルの読み出しは、TGC と同様に ASD ボードへと接続され、アナログ信号をデジタル信

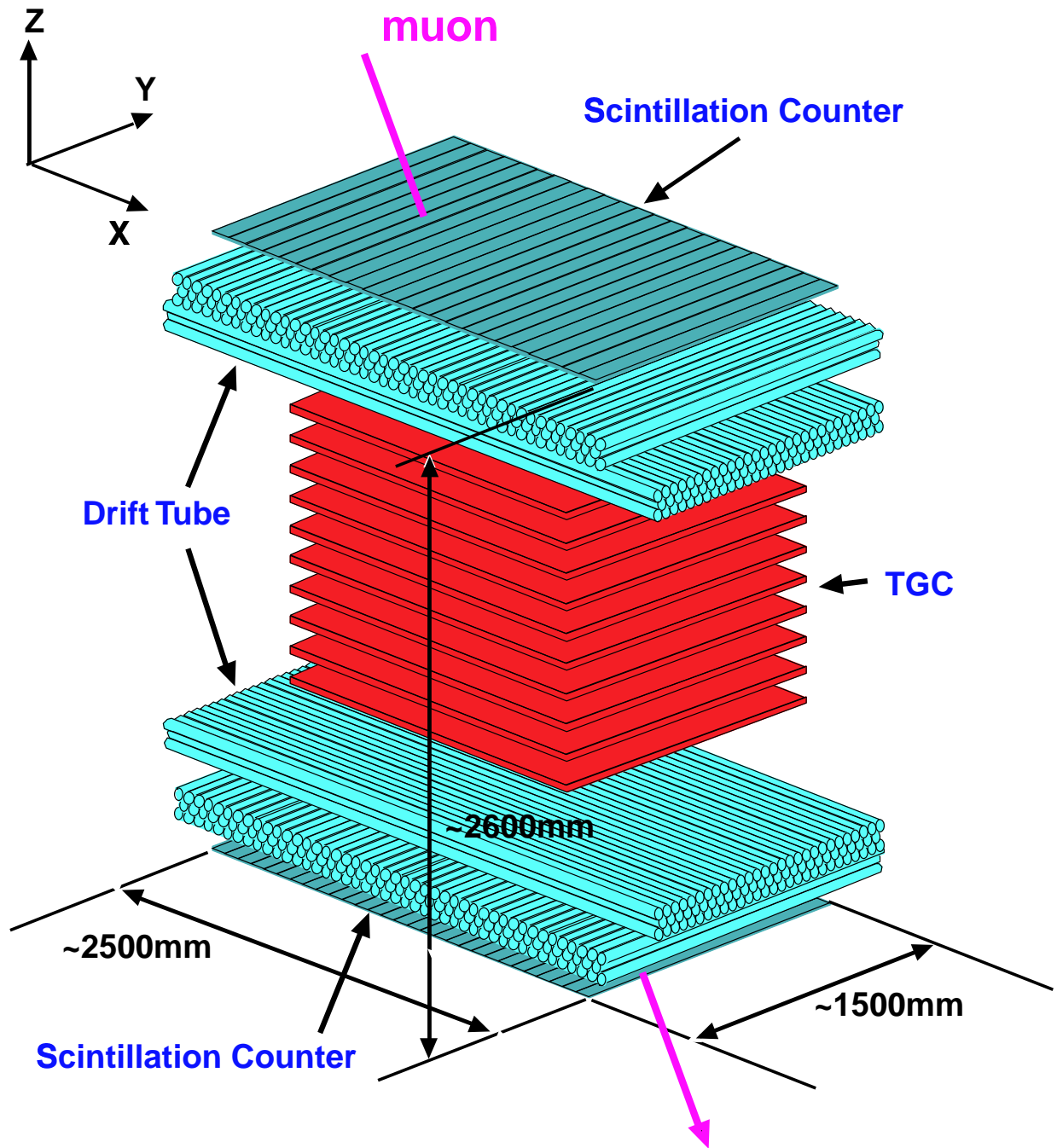


図 3.3: 宇宙線テストでの検査設備の概念図

Trigger system

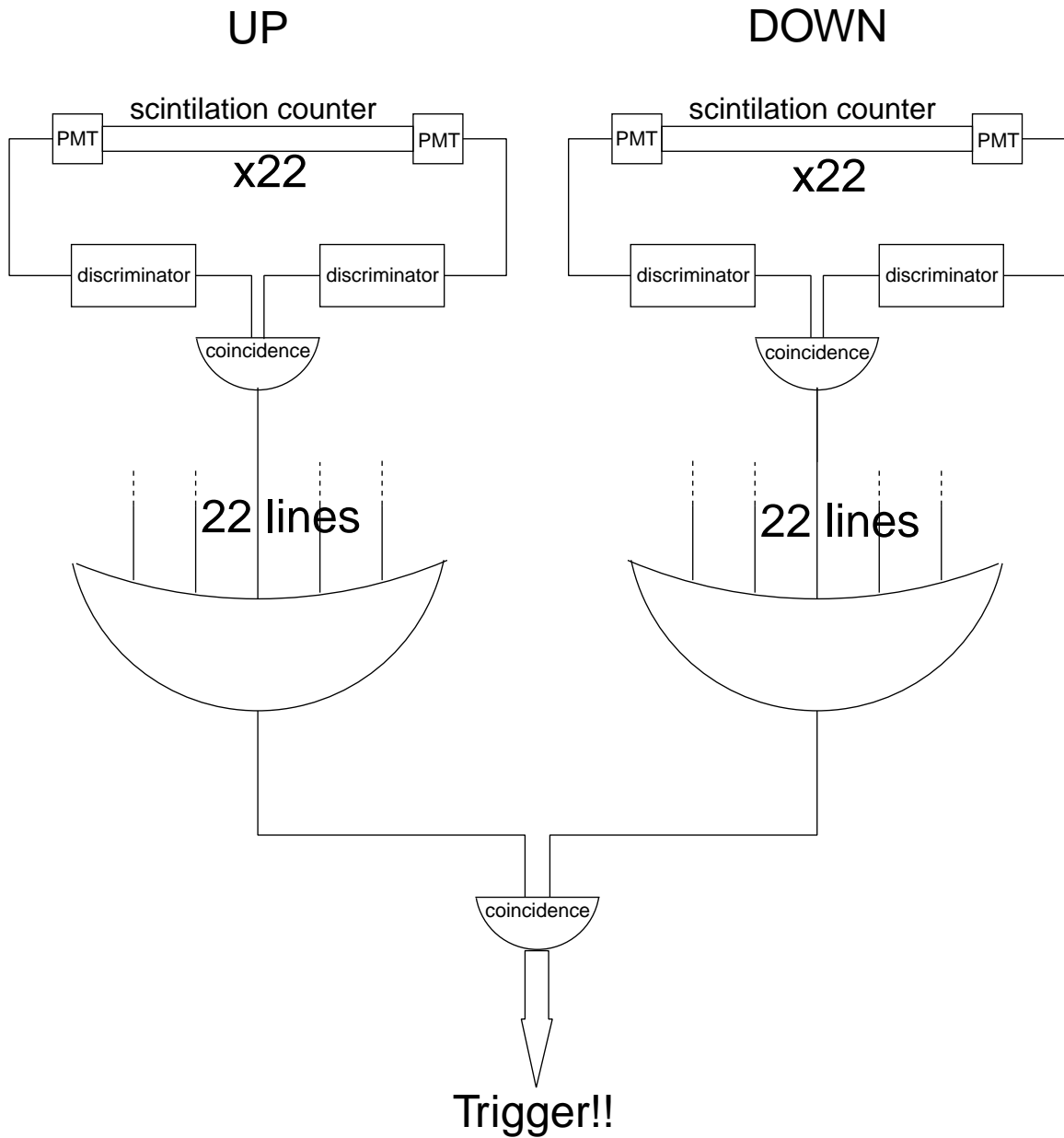


図 3.4: トリガー回路

号に変換される。その信号は、後述する TMC を使って時間情報に変換される。Drift Tube は宇宙線ミューオンの Tracking を行うために時間情報が必要で、TMC はトリガー信号が到達してから Drift Tube の信号が到達するまでの時間、つまり、Drift Time を読み取る。

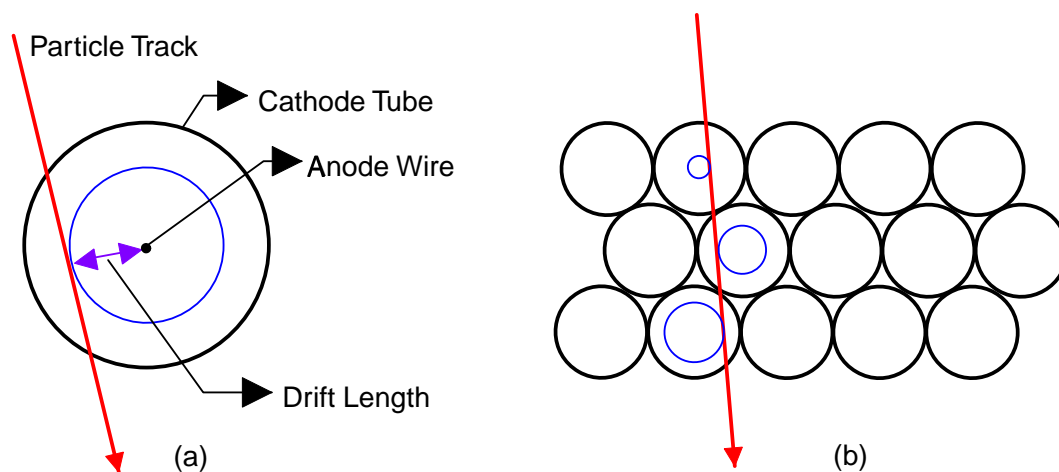


図 3.5: Drift Tube による Tracking

3.3.3 TGC

図 3.6 に検査設備の架台部分を示したものである。これは XZ 平面図で、TGC はパレット上に乗せられ、検査設備の中へと入れられる。

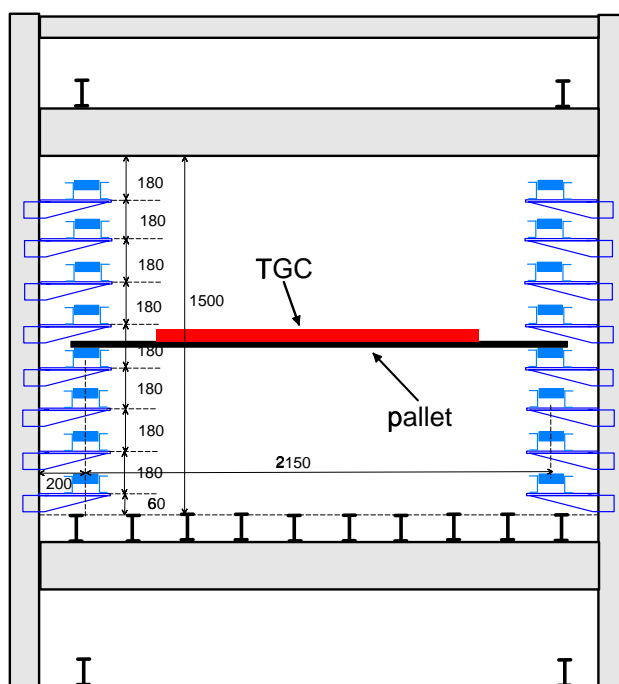


図 3.6: 検査設備の架台部分 (単位は mm)。TGC はパレット上に置かれる。

TGC のガスシステムは n-pentane テストで用いたもの (第 3.2.1 節参照) を使用する。

宇宙線テストでは、TGC に印加する電圧は、3.1kV である。これは、今までのテスト実験や、第 5 章でも述べるように、TGC の検出効率が 99% 以上得られるような印加電圧である。

また、宇宙線テストでは TGC の検出効率を測定するため、TGC の各ワイヤグループ、各ストリップごとに読み出す必要がある。例えば、T7 Triplet を 8 台検査する場合、ワイヤグループが 24 チャンネル×3 層、ストリップが 32 チャンネル×2 層で、計 136 チャンネルあり、8 台で 1088 チャンネルの読み出しを行うことになる。(T7 Triplet は真ん中の層のストリップ読み出しがない。) このような多量のチャンネルを読み出すのに、後述する SWINE を用いる。TGC の各チャンネルからの信号は、ASD ボードでアナログ信号をデジタル信号に変換される。その信号は、SWINE でトリガー信号からある決まった時間幅の中にあれば、そのヒット情報を読み取る。また、TGC の 16 チャンネルの論理和をとり、これを TMC で時間情報に変換し読み取る。これは、TGC の信号の到達時間分布を測定し、25ns の時間分解能を達成しているかを調べるためである。

3.3.4 評価方法

TGC はトリガーチェンバーであることから、その検出効率は 99% を要求されている。そのため、TGC にとって検出効率は重要なパラメータである。製作された TGC の検出効率が要求通り満たされているかどうかを調べることは、検査設備の最も重要な役割である。検査設備における TGC の検出効率の評価方法について述べる。

まず、宇宙線ミュオン通過により、上下 XY に各 3 層積みにされた Drift Tube の時間情報から Drift Length を求め、それらから、3 次元的な一意の Track を決定する (Tracking)。しかし、宇宙線ミュオンが、Drift Tube のアルミパイプとの相互作用により、 δ -ray を放出し、時間情報が狂ったり、多重散乱の効果で飛跡が直線でなかったりする場合があります。このときには、飛跡を正しく再構成することができない。よって、Tracking できた場合についてを評価の対象とし、TGC の検出効率は、その Track と TGC の交点に、TGC のワイヤ、ストリップともにヒットがあるかどうかをみることで評価を行う。つまり、

$$\text{検出効率 (\%)} = \frac{(\text{Track 上に TGC のワイヤ及びストリップにヒットがあるイベント数})}{(\text{Track が引けたイベント数})} \times 100$$

と定義し、評価を行う。

このようにして測定された TGC の検出効率は、TGC のワイヤサポート、ボタン型サポートの不感領域も含めて、95% 以上でなければならない。これを TGC 全体にわたって測定するため、TGC の一様性もまた測定できる。

また、LHC のバンチクロッシング間隔が 25ns と短いことから、TGC の信号の到達時間分布もまた、重要な要素である。まず、TGC の信号到達時間分布において比検出効率を以下のように定義する。

$$\text{比検出効率 (\%)} = \frac{(\text{ある時間幅内に入った数})}{(\text{16CH の総イベント数 (ヒット数)})} \times 100$$

TGC の信号の時間情報は 16 チャンネルの論理和である。この比検出効率が 99% となる最小の時間幅を Time Jitter と定義し、この Time Jitter が 25ns 以内に収まっているかどうかをみて評価を行う。つまり、

$$\text{Time Jitter (ns)} = \text{比検出効率が 99\% となる最小の時間幅} < 25\text{ns}$$

と定義し、評価を行う。

第4章 DAQシステムの開発

DAQシステムは前章までに述べてきた検出器に加えて、フロントエンド・エレクトロニクス、データ収集を行うコンピュータ、それらの上で走らせるソフトウェアからなる。この章では、DAQシステムのそれぞれの構成要素について述べる。

4.1 DAQシステムの構成

DAQシステムは基本的に以下のような設備から構成され、データは1から3へと読み出される。

1. 検出器からの検出シグナルがアナログ信号として発生する。
2. フロントエンドのエレクトロニクスによって、検出器からのアナログ信号からデジタル情報に変換される。
3. コンピュータがデジタル化されたデータを集め、記録や解析を行う。

前章で述べた各検出器からのシグナル読み出しにVMEモジュールであるTMC [2] [3]、SWINE [4]を用い、トリガー用ロジック回路にはNIMモジュール、VME・Interrupt & I/O Registerモジュール [6]を用いる。

Scintillation Counterが宇宙線ミューオンの通過を検知し、NIMモジュールのロジック回路を通じてTMC、SWINEモジュールにイベント発生を通知する。TMC、SWINEはDrift Tube、TGCからのシグナルをASDボードを通じて読み込む。TMCは時間情報へ、SWINEはヒット情報へとデータを変換する。データを変換する間、トリガーシグナルをブロックするVETOには、Interrupt & I/O Registerモジュールを用い、また、VMEクレート間の通信にもInterrupt & I/O Registerモジュールを用いる(図4.1参照)。

以下では、フロントエンド・エレクトロニクス、コンピュータ環境について述べる。

4.1.1 VMEモジュール

本検査設備のデータ収集用バスには、VMEを採用し、Drift Tube及びScintillation Counterからのシグナル読み出し用のVMEモジュールは、TMC-VME TDCモジュールを、TGCからのシグナル読み出し用のVMEモジュールは、SWINE MWPC Readoutシステムを使用する。TMC、SWINE共にデータは16 bit幅であるため、データ量は16 bitを1 wordとする。

4.1.1.1 TMC

TMCはTime Memory Cellの略で、高エネルギー物理学実験用に開発された高精度時間測定回路(TDC: Time to Digital Converter)の一方式である。図4.2にTMCの原理図を示す。TMCは入力信号の状態を記録するフリップフロップが並べられており、書き込み信号が入ると、遅延

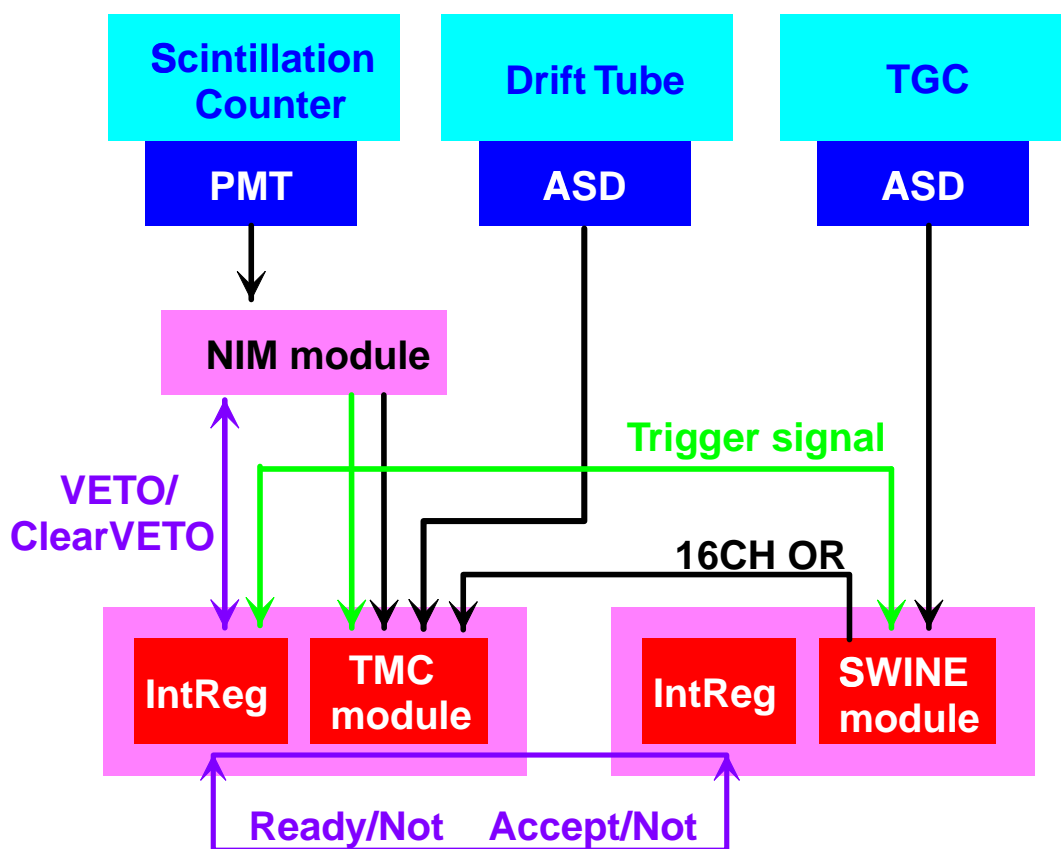


図 4.1: 検出器、エレクトロニクスの構成

ゲートによって、各フリップフロップの書き込みタイミングが1ステップずつ遅れて入力される。従って、入力データは遅延ゲートの遅延時間の間隔でフリップフロップに記録することができる (Multi Hit)。

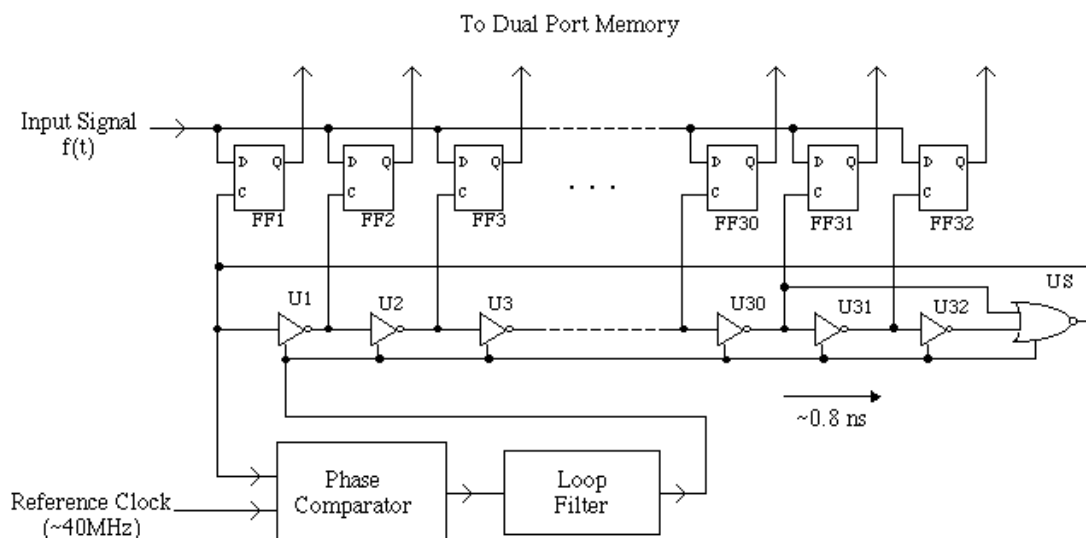


図 4.2: TMC の原理図

共通のスタート信号と 32 チャンネルのストップ信号までの時間差を測るコモンスタート (common start mode)、32 チャンネルのスタート信号と共通のストップ信号までの時間差を測るコモンストップ (common stop mode) の 2 つのモードを搭載している。以下で述べていく DAQ システムでは全て common stop mode で実装される。図 4.3 に common stop mode で実装した場合の TMC におけるシグナルのタイミングを示す。ストップ信号からさかのぼって、time range 内に入った入力信号は全て記録される (Multi Hit)。

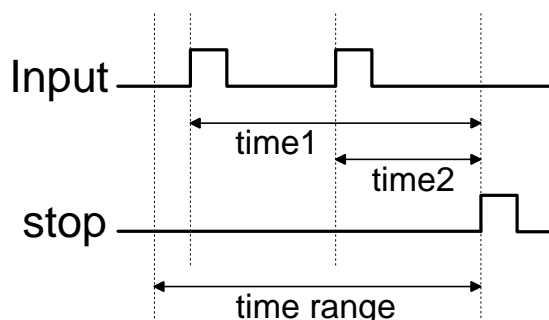


図 4.3: TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode)

TMC LSI から読み出したデータはヒットがなかったものは削除され、コンピュータへの転送用に用意されるため、データは可変長となる。データは 1 つのヒットにつき 2 word からなり、1 word はモジュール ID とチャンネル、もう 1 word は時間情報である。

検査設備では Drift Tube は全部で 428 本、Scintillation Counter は 44 本あり、各 1 本ずつ 1 チャンネルとして読み出すため、32CH の TMC モジュールが 16 台必要となる。さらに、TGC の 16 チャンネル分の論理和をとったものを TMC で読み出すため、T7 Triplet を 8 台検査する場合、

32CH の TMC モジュールが 3 台必要となる。TMC モジュールから読み出すデータ量は、宇宙線ミュオンが上から下へ突き抜けたとして、Scintillation Counter のヒット数は 2 チャンネル、Drift Tube のヒット数は全部で 12 層あるので 12 チャンネルある。TGC のヒット数は 1 Triplet でワイヤー、ストリップ合わせて 5 チャンネルあり、8 台検査するため 40 チャンネルあることになる。従って、合計で 54 チャンネルであると期待できる。データ量は 1 イベント当り 108 word となる。

4.1.1.2 SWINE

SWINE は Super Wire Net Encoder の略で、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発された MWPC 等からの入力のヒット情報を読み出すシステムである。

SWINE は PORQ(Pulse On ReQuest) と HOG(Hold On Go) の 2 種類の VME モジュールと、独自の J2 バックプレーンから構成される。

J2 バックプレーンは、PORQ モジュールと HOG モジュールに電源の供給をすると共に、PORQ モジュールから供給される制御信号を HOG モジュールに分配する働きをする。

PORQ モジュールは 1 クレートに 1 台必要であり、50MHz の内蔵制御クロック、トリガー信号、ゲート幅、遅延長などの制御信号を生成または外部から受信し、J2 バックプレーンを経由して各 HOG モジュールに分配する。

HOG モジュールは 1 クレートに最大 15 台搭載でき、J2 バックプレーン経由で PORQ モジュールから供給される各種制御信号を用いて、ASD ボードからの信号の処理を行う。ASD ボードからの信号を受信し、FIFO を用いたデジタル遅延回路に入力する。遅延された信号が、ゲート内に入っていればヒットとなる。また、HOG モジュールは ASD ボードに電源、閾値電圧 (V_{th}) の供給する。図 4.4 に SWINE におけるシグナルのタイミングを示す。

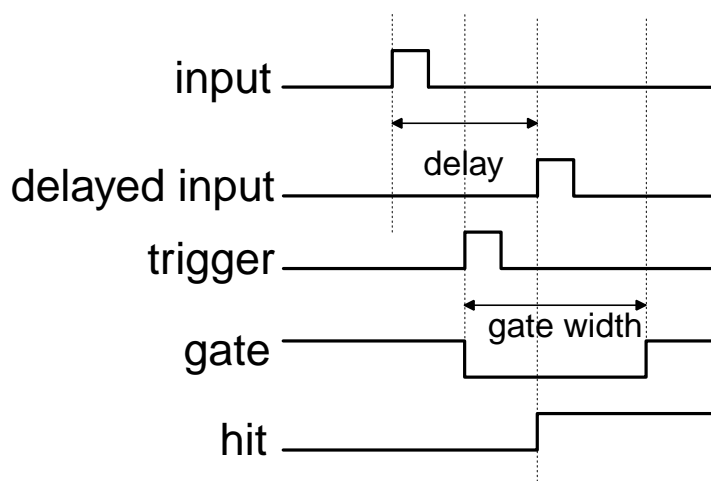


図 4.4: SWINE におけるシグナルのタイミング

HOG モジュールのチャンネル数は 64 で、データは 4word からなる。1ch 当り 1bit に割り当てられ、ヒットがあれば 1、なければ 0 が書き込まれる。1 つの ASD ボードは 16 チャンネルから構成されており、1 台の HOG モジュールで最大 4 つの ASD ボード (合計 64 チャンネル) を読み出すことができる。また、ASD ボードごとの 16 チャンネルの入力が OR された信号が出力される。この信号を前述した TMC で読み出す。

T7 Triplet を 8 台検査する場合、TGC の全ての読み出しは 1088 チャンネルとなる (ASD ボー

ドは 10 枚× 8 台で 80 枚必要となる)。このとき、必要な HOG モジュールは 20 台 (ワイヤークラップに 12 台、ストリップに 8 台) となり、1 イベント当りのデータ量は 80 word となる。

4.1.2 コンピュータ環境

DAQ システムのコンピュータとして PC を採用し、OS は PC 用 UNIX として広く普及している Linux を採用する。

読み出し用モジュールをのせる VME クレートを含めたコンピュータ構成を図 4.5 のように設計した。構成要素は PC、PC-VME インターフェイス、Fast Ethernet(100 BASE-T) によるネットワーク環境である。

ハードウェアから見たデータ収集の流れは、

1. 各 VME モジュールが検出器からの信号をデータに変換する。
2. 各 VME クレイト毎に PC が PCI-VME bus Adaptor を通じて、変換されたデータを読み出す。
3. 読み出されたデータは Fast Ethernet を介して解析用のメイン PC に転送される。

といったものになる。

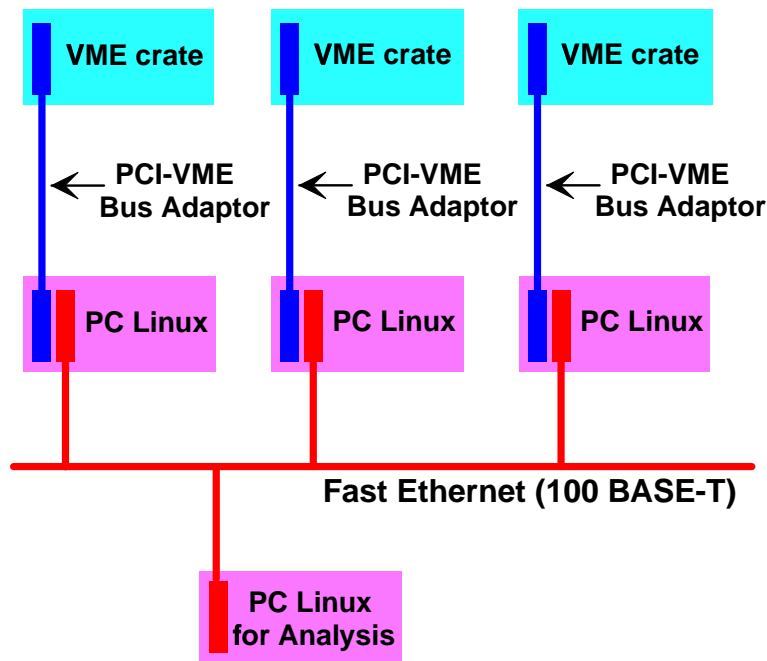


図 4.5: コンピュータ環境

4.1.2.1 PC-VME bus インターフェイス

PC を採用するため、PC と VME bus とのインターフェイスが必要となり、これには、Bit3 社製の model616 PCI-VME bus Adaptor [5] を使用する。これは、PC に接続する PCI カード、VME バスマスターとなる VME 側のモジュール、その間のケーブルから構成される。この機能

は、VMEのメモリ空間をPCI上のメモリのように扱うことができるため、PCでVMEモジュールを直接コントロールすることが可能となる。

PCIカードに対してLinux OS用デバイスドライバが必要となるが、これに関しては vmehb [7] というドライバが開発されており、Web上で公開されているので、これをLinux Kernelへ組み込んだ。また、このドライバを利用したC言語ライブラリ (vmelib [8]) も公開されているので、これを用いて開発を行う。よって、DAQシステムは全てC言語を用いて開発を行うことにする。

4.1.2.2 ネットワーク分散システム

ここで、我々の検査設備では、読み出し可能なチャンネル数を増大させ、同時に、処理性能を上げなければならない。そこで、PC、Bus Adaptor、VMEクレートのセットを複数台用意し、それぞれのPCが分担して読み出しを行う構成を考える。この構成にすると、1つのVMEマスターが担当する読み出しチャンネル数が減るため、データの転送速度は上る。また、処理性能もPCの数が増えるため、同様に向上する。

そして、これらのPCからデータをとりまとめるために、データ収集用のPCはネットワーク上に分散して配置する。通信速度が遅くはネットワークに分散させる意味がなくなるため、ネットワークには、転送速度100 MbpsのFast Ethernet (100 BASE-T)を導入する。

以上のようなネットワーク分散システムの利点を更に活用し、データの解析を行う専用のPCを読み出し用PCとは別に配置し、読み出し処理と解析処理を分担させることで、全体の性能を向上させた。

4.1.2.3 NFS

読み出し処理を行うプロセスが読み出したデータを解析処理を行うプロセスに受け渡すために、ネットワークを通じてデータを転送する必要がある。これには、NFS(Network File System)を利用することができる。NFSとは、ネットワークを介して透過的にファイルアクセスを行うことを可能にする機能で、標準的なUNIX OSで利用できる基本的な機能の一つである。これにより通常のファイルを扱うようにネットワーク上の他のコンピュータのファイルを扱うことができる。

NFSを利用するとデータ収集システムにおいてデータを転送するためのプロセスを開発する必要がなくなるという利点がある。これらの理由から、データ転送にはNFSを利用した。

4.2 読み出しプロセス

VMEに接続している各PCにはデータの読み出しを担当するプロセスが1つ存在する。1つのイベントを読み出すときに、データはそれぞれのプロセスが独立に読み出し、これらのデータが1つのイベントであることを通知するために、データ読み出しプロセスは全て、Interrupt & I/O Register モジュールを用いて通信を行う。ただし、一対一で通信を確立するため、読み出しプロセスは、サーバの役割を担当するマスタープロセスが1つと、そのクライアントとして振舞う幾つかのスレーブプロセスを設定し、それぞれが通信を行うようにする。

TMCを読み出すプロセスは、Drift Tubeのデータを用いてイベント・フィルタを行い、イベントを選別する。この結果をInterrupt & I/O Register モジュールを通じて他のプロセスに通知し、“良い”イベントのデータのみが解析プロセスへと送られる。通知するイベント・フィルタの結果は、全てのプロセスに伝える必要があるため、イベント・フィルタを行うのはマスタープロセスでなければならない。さらに、イベント・フィルタにはDrift Tubeのデータを用いるため、

マスタープロセスが Drift Tube のデータを読み出すことになる。

よって、マスタープロセスは、VME-TMC モジュールにアクセスし、Scintillation Counter と Drift Tube からの時間情報を読みだし、スレーブプロセスが、VME-SWINE モジュールにアクセスし、TGC からのヒット情報を読み出すようにする。

以上のことから、マスタープロセスとスレーブプロセスからなる読み出しシーケンスを図 4.6 に示す。

このシーケンスにより、読み出しプロセスは同期を取りつつ 1 イベントずつ読み出しを行う。図 4.6 の各項目での動作は、

1. VME へアクセスを行う部分
2. Interrupt & I/O Register を用いて通信を行う部分
3. イベント・フィルタを行う部分
4. NFS を利用したデータ転送を行う部分

の 4 種類に分けられる。以下では、それぞれの項目について説明する。

4.2.1 VME へのアクセス

VME へアクセスする手段としては `vmelib` を使用する。`vmelib` のライブラリ関数の内、`model616` で利用できるのは、`vme_mapopen()` と `vme_mapclose()` の 2 つの関数である。`vme_mapopen()` 関数は、VME bus 上の任意のアドレス空間を PC 上の仮想メモリ空間へと割り当てるもので、PC 上のプロセスはメモリを扱うのと同様に VME 上のモジュールとデータのやりとりを行うことができる。`vme_mapclose()` 関数は、この割り当てを閉じる関数である。

図 4.6 の各 VME へのアクセスについて説明する。

Initialize TMC · Initilaize IntReg · Initialize SWNIE

`vme_mapopen()` 関数により、TMC、Interrupt & I/O Register、SWINE の各モジュールのアドレスを PC 上のメモリに割り当てる。また、各モジュールのパラメータの設定を行う。

Ready TMC · Ready SWINE

データの読み出しを完了し、次のデータの読み出しを開始できることを伝える。

Clear VETO

VETO を解除する。Interrupt & I/O Register の状態を読み出して、CLEAR のフラグをたてて、書き込みを行う。

Wait Trigger

トリガー信号がくるまで待つ。TMC では Interrupt & I/O Register、SWINE では PORQ の状態を読み出して TRIGGER のフラグがたつまで待つ。

Read TMC data · Read SWINE data

データの読み出しを行う。

End TMC · End IntReg · End SWINE

`vme_mapclose()` 関数で、アクセスを終了する。

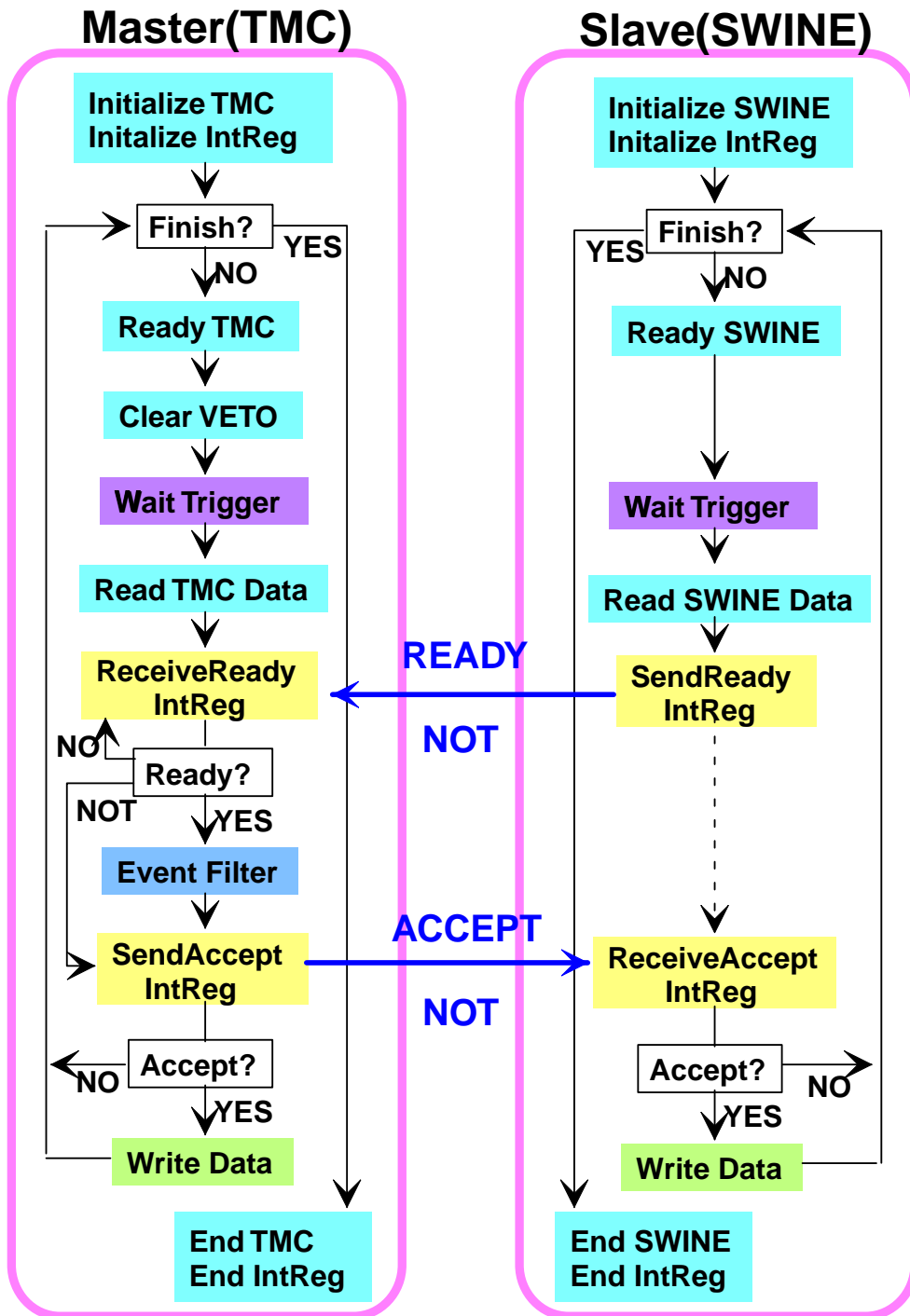


図 4.6: 読み出しシーケンス (IntReg : Interrupt & I/O Register)

4.2.2 Interrupt & I/O Register を用いた通信

第 4.1.2.2 節で説明したネットワーク分散システムを実現するためには、複数の独立した PC 間で同期を取り、それぞれの PC から独立に収集されたデータを 1 つのイベントに再構築しなければならず、複数の独立した PC を制御するシステムが必要となる。これらの同期をとる方法として、Interrupt & I/O Register モジュールを各 VME クレートに搭載し、このモジュール間で通信することで行うことにする。Interrupt & I/O Register モジュールは、TMC 等の VME モジュールと同様に扱うことができる。そのため、C 言語ライブラリ (vmelib) を用いて簡単に開発ができ、通信を行うことができる。

Interrupt & I/O Register モジュールの通信を用いて行う DAQ を実現するためには、Polling によるデータ収集ルーチン (単に Polling と呼ぶ) と、モジュールの Interrupt 機能を利用したデータ収集ルーチン (単に Interrupt と呼ぶ) が考えられる。Polling は、トリガーがかかった瞬間にレジスタにあるフラグが立つようにしておき、ソフトウェア側では、そのフラグを絶えず確認し続け、フラグが立った瞬間にデータの取り込みを行う。また、Interrupt & I/O Register モジュール間の通信も同様に、フラグが立った瞬間にしかるべき処理を行う。一方、Interrupt はトリガーがかかった瞬間にハードウェア的に CPU に割り込みをかけて、現在の処理を中断し、データの取り込みを行う。両者に違いは、CPU の占有率である。Polling は常にプロセスが走りっぱなしの状態であるため、CPU を無駄に消費している時間が長い。Interrupt はソフトウェア的には sleep の状態にあるので、普段はほとんど CPU を使わなくてすむ。逆に、Polling は処理の単純さが魅力である。また、Polling に比べて Interrupt はソフトウェアの開発が難しく、反応速度も多少遅くなる。近年の PC は、高速の CPU を搭載しており、処理時間に関しては問題はないと考えられる。また、データ収集の読み出しプロセスと解析プロセスが独立しており、違う CPU 上で動作していることから、割り込みを考える必要もなく、ソフトウェアの開発、及びデータの取り込み速度を考慮して、Polling でのデータ収集を採用する。

図 4.6 の Interrupt & I/O Register を用いた各通信について説明する。

SendReadyIntReg

スレーブプロセスがデータの読み出しを完了したことを、READY シグナルを送ることでマスタープロセスに伝える。また、エラーが起こった場合、NOT シグナルを送る。

ReceiveReadyIntReg

マスタープロセスが各スレーブプロセスから READY/NOT シグナルが送られてくるまで待ち、そのシグナルを受け取る。

SendAcceptIntReg

マスタープロセスがイベント・フィルタの結果を各スレーブプロセスへ伝える。また、ReceiveReadyIntReg で NOT シグナルを受け取った場合、ここで NOT シグナルを各スレーブプロセスへ送る。

ReceiveAcceptIntReg

各スレーブプロセスは ACCEPT シグナルを受け取るとデータを書き込み、NOT シグナルを受け取るとデータを書き込まずに、次のデータ収集へと進む。

4.2.3 イベント・フィルタ

解析の段階で Drift Tube のデータを用いて宇宙線ミュオン Tracking を行うわけであるが、Tracking が不可能なイベントのデータは不要である。Tracking の可否は、Drift Tube のヒットパ

ターン、つまり信号のあった Drift Tube のチャンネルの配置のみで大まかに判別できるため、解析に入る前の段階でイベントをふるい落とすことが可能である。これにより解析プロセスへデータを転送するデータ量を減らすことができ、ネットワークを通じたデータ転送や、それ以降の処理の負担を減少することができる。

本検査設備 DAQ のイベント・フィルタとして、

1. すべてのデータを受け入れる。
2. 上下 XY のそれぞれの Drift Tube について、2~6 のヒットがあった場合のみ受け入れる。
3. Drift Tube の各層でのヒット数が1ヒットのもののみ受け入れる。

の3つのレベルで選別を行うことにする。

Event Filter

Drift Tube のデータからそのヒットパターンを調べ、設定した各レベルに合わせて、Tracking の不可能なイベントをふるい落とす。

4.2.4 NFS を利用したデータ転送

NFS を用いてデータ転送を行う部分に関しては、通常のファイルを扱うのと何ら変わりがなく、NFS により、ネットワークを介しているファイルを指定するだけでよい。

Write Data

ネットワークを介したファイルにデータを書き込む。

4.2.5 Raw Data Format

データ読み出しプロセスにより同期をとりつつ、独立に読み出された各データは、バイナリ形式でファイルに保存される。そのデータを Raw Data と呼び、Raw Data の Format を以下に示す。

左の表は、マスタープロセスが TMC から読み出し Raw Data の Format で、それぞれのフラグ、データサイズ、ランナンバー、イベントナンバー等は 2 word からなっている。<>で囲まれた部分は、可変長となる部分である。データは、START_FLAG と END_FLAG で囲まれた構造となっている。まず、CFG_FLAG と CFG_END_FLAG で挟まれた部分には、後述する Data Conversion で用いる Configuration ファイルの内容が記されている。そして、RUNbegin_FLAG と RUNbegin_END_FLAG の間に挟まれた部分には、ランナンバー、DAQ 開始時間、Configuration ファイル名が記されている。また、DAQ を開始するときに、コメントを入力することができるようになっており、このコメントもここに記されている。EVT_FLAG から EVT_END_FLAG までが 1 イベントであることを示しており、そのイベントナンバーが記されている。TMC_FLAG から TMC_END_FLAG までは、TMC からのデータであることを示しており、全ての TMC から読み出された 1 イベント分のデータサイズが記され、TMC からの各データが記される。TMC からのデータもまた、2 word から構成され、信号到達時間の早いものから書き込まれて行く。

右の表は、スレーブプロセスが SWINE から読み出した Raw Data の Format で、基本的な構造は、マスタープロセスからのものと同じである。ただ、スレーブプロセスは SWINE の HOG モジュールからデータを読み出すため、SWINE_FLAG と SWINE_END_FLAG で囲まれた部分の構造が異なってくる。1 台の HOG からのデータは 4 word からなり、4 word 毎に 1 台の HOG

START_FLAG	START_FLAG
CFG_FLAG cfg data size < configuration >	CFG_FLAG cfg data size < configuration >
CFG_END_FLAG	CFG_END_FLAG
RUNbegin_FLAG run number DAQ start time configuration file name comment	RUNbegin_FLAG run number DAQ start time configuration file name
RUNbegin_END_FLAG	RUNbegin_END_FLAG
EVT_FLAG event number	EVT_FLAG event number
TMC_FLAG all TMC data size < data >	SWINE_FLAG all SWINE data size < data >
TMC_END_FLAG	SWINE_END_FLAG
EVT_END_FLAG	EVT_END_FLAG
· · · · ·	· · · · ·
RUNend_FLAG run number DAQ end time	RUNend_FLAG run number DAQ end time
RUNend_END_FLAG	RUNend_END_FLAG
END_FLAG	END_FLAG

表 4.1: Raw Data Format(左: マスタープロセスにより読み出された Raw Data。右: スレーブプロセスにより読み出された Raw Data。)

モジュールを示す。HOG からのデータは、1 チャンネル当り 1bit に割り振られ、ヒットがあれば 1、なければ 0 が書き込まれる。

このように読み出しプロセスから読み出された各データは、後述する Event Building において、1 つにまとめられるため、1 イベント毎がフラグで囲まれた構造になっており、イベントナンバー、データサイズを書きしておくことで、Event Building 時のデータエラーの検知、データの復旧を容易にしている。また、このような構造をとることで、モジュールの数の増減にも対応でき、拡張性の高い構造となっている。

4.3 解析プロセス

本検査設備 DAQ システムでは、データ読み出しプロセスと解析プロセスは独立しており、データ読み出しプロセスから解析プロセスへのデータの受渡しは、ファイルを通じて行われる。

解析プロセスで行う主な項目は、

- 複数の VME から読み出されたそれぞれの Raw Data を一つにまとめる Event Building。
さらに、VME のモジュールやチャンネルの番号で構成されたデータを、検出器の種類や位置情報やチャンネルで構成し直す Data Conversion。
- 再構成された Drift Tube のデータを用いた Tracking。
- 再構成されたデータの各イベントの情報を表示する Event Display。
- 再構成されたデータを解析し、様々なヒストグラムを表示する Analysis Program。
- Analysis Program で TGC の検出効率を導出し、それを Display に表示する Efficiency Map Display。

である。また、解析プロセスでのデータフローについて示したものが図 4.7 である。図の赤字は各解析プロセスのプログラムを表す。以下では各項目について説明する。

4.3.1 Event Building、及び Data Conversion

読み出しプロセスからの Raw Data は NFS を通じて解析専用 PC に転送されるのだが、転送されるデータファイルは読み出しプロセスの数だけ存在することになり、これらの複数の Raw Data を一つのデータにまとめる必要がある。これは、第 4.2.5 節で述べたように、各 Raw Data のイベントフラグ、イベントナンバーを確認しながら、1 イベントずつ読み込んでいき、Raw Data に書かれたデータサイズ分を各データから読み込み、さらに、イベントエンドフラグでもう一度確認を行う。このようにして、Event Building は行われていく。

読み出しプロセスからの各 Raw Data は VME のモジュールやチャンネルの番号で構成されたものなので、これを検出器の種類、位置、チャンネルに構成し直す必要もある。これには、Event Building によって読み出された 1 イベントを各 VME のモジュール、チャンネルがどの検出器のどのチャンネルに対応しているかが書かれた Configuration ファイルを用意し、これを読み込むことで VME のモジュールやチャンネルの番号を検出器の種類、位置、チャンネルに再構成し直し、1 つにまとめたデータとして書き出すことで行う。

TMC の時間情報は TMC カウントの値であるため、TMC カウントと時間の変換定数 $0.78\text{ns}/\text{count}$ を掛けて、いわゆる時間情報 (ns) への変換をここで行う。さらに、Drift Tube に関しては、次

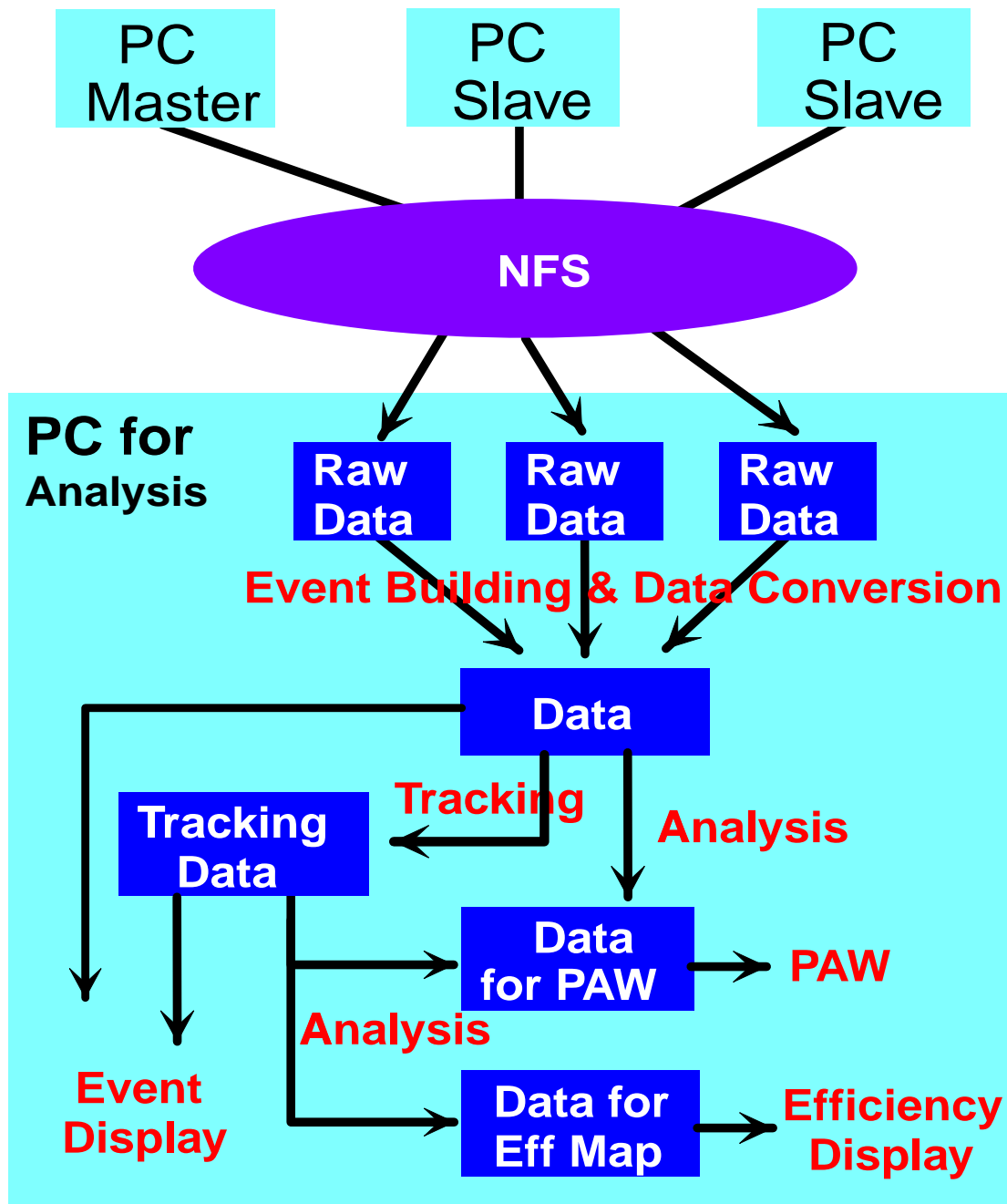


図 4.7: データフローチャート (赤字: プログラム)

に述べる Tracking で Drift Length を用いて解析を行うために、Drift Tube の時間情報から Drift Length を求めることもここで行う。

Drift Tube のデータを用いて宇宙線ミューオンの Tracking を行うわけであるが、Data Conversion 時にも Drift Tube に関するデータについて、いくつかの変換レベルを用意し、効率良く宇宙線ミューオンの Tracking を行えるようにする。これはイベント・フィルタよりも細かいレベル、つまり、Drift Tube の時間情報を用いて判別を行い、データのふるい落としを行う。変換レベルとして用意したものは、

1. すべてのデータを変換する。
2. TMC は Multi Hit に対応しているため、First Hit のみを変換する。
3. First Hit で、あるゲート幅に入っているもののみを変換する。Multi Hit があり、それがゲート幅に入っていれば、ゲート幅に入っている最も早い Hit を採用する。

といったものである。

Event Building、及び Data Conversion を行ってできたデータファイルが、この後に述べる、Tracking、Event Display、Analysis Program へと渡される。これ以降では、データというものの定義として、Event Building、及び Data Conversion を行ってできたデータファイルを表す。

4.3.2 Data Format

Event Building、及び Data Conversion によりできるデータファイルは、アスキー形式でファイルに保存される。このデータファイルの Format を以下に示す。

```
#
# Run Number      : [run number]
# convt level     : [1,2,3]
# Run Start time  : [time,data]
# Config. File    : [configuration file name]
# Comment         : [inputed comment]
#
event            1

tmc_sci          [X]
  [up/down]      [counter#]  [time]  [milti_hit]

tmc_dt           [X]
  [up/down]      [X/Y]      [layer]  [channel]  [drift_length]  [drift_time]  [multi_hit]

wire_tgc         [X]
  [TGC#]         [layer]    [channel]

strip_tgc        [X]
  [TGC#]         [layer]    [channel]
```

```

end          1
.
.
.
#
# Run Number      : [run number]
# Number of Event: [number of event]
# Run End time    : [time,data]
#

```

[] で囲まれた部分は、それぞれに対応する数字、文字列が入る。#の部分は各ランの詳細が書かれ、ランナンバー、変換レベル、DAQ 開始時間及び終了時間、Configuration ファイル名、コメント、イベント数が書かれる。データは、event から end までが 1 イベントを示しており、横に書かれた数字がイベントナンバーである。tmc_sci、tmc_dt、wire_tgc、strip_tgc は各検出器からのデータのフラグであり、横に書かれた X は数字が入り、各検出器からのデータの数を示す。tmc_sci は Scitillation Counter からのデータ、tmc_dt は Drift Tube からのデータ、wire_tgc、strip_tgc は TGC のワイヤー、ストリップからのデータを表している。Scitillation Counter からのデータは、4 つの数字から構成され、始めの 2 つの数字は Counter の位置を示しており、上段下段、Counter ナンバーを示している。そして、TMC からの時間情報と各 Counter の Multi Hit の数を示している。Drift Tube からのデータについては、7 つの数字から構成されている。始めの 4 つの数字は、Drift Tube の位置を示しており、それぞれの数字は、Drift Tube の上段下段、X 方向 Y 方向、(3 層の俵積みの内の) 層、チャンネルを示している。5 つ目と 6 つ目の数字は、Drift Tube の時間情報とドリフト距離を示している。最後の数字は、各 Drift Tube の Multi Hit の数を示している。TGC からのデータは、ワイヤー、ストリップ共に、3 つの数字から構成され、始めの 2 つは TGC の位置を示しており、8 台の内どの TGC であるか、Triplet または Doublet の何層目であるかを示している。最後の数字はチャンネルを示している。このようにデータファイルもまた、Raw Data と同様にイベントごとにフラグで囲むことにより、次の解析でデータエラーを検知し、復旧を容易にしている。このデータファイルもまた、新たな検出器の導入などに簡単に対応でき、拡張性の高い構造となっている。

4.3.3 Drift Tube による Tracking

第 3.3.4 節で述べたように、TGC の検出効率、及び一様性を測定する上で、宇宙線の軌跡を再構成してやること必要不可欠である。

データファイルを読み込み、Drift Tube の位置、Drift Length の情報から 3 次元的な Track が一意に決定され、データファイルと同じデータフォーマットに、Track の検査設備への入射位置と出射位置の座標を追加して、トラッキングデータとして書き出される。つまり、

```

hit_line      1
[X_in] [Y_in] [Z_in] [X_out] [Y_out] [Z_out]

```

が各イベントの最後 (end フラグの前) に追加されて出力される。hit_line は Tracking によるデータのフラグであり、横の数字はデータ数を示している (Track は一本であるので、1 が書かれる)。このデータは 6 つの数字から構成され、始めの 3 つは、宇宙線ミューオンの入射位置の座標 X_{in} 、 Y_{in} 、 Z_{in} を表し、次の 3 つは出射位置の座標 X_{out} 、 Y_{out} 、 Z_{out} を表している。

このように、このトラッキングデータはデータファイルと同じ形式であるので、この後の、Event Display、Analysis Program で読み込むことが可能である。

4.3.4 Event Display

データファイルを視覚的にとらえる Event Display は、ヒットの有無、トラッキングの結果など、個々のイベントの詳細を確認する上で必要となる。

検査設備の側面 2 方向 (XZview、YZview) を表示する Event Display を、gtk+ [9] という C 言語で書かれたオブジェクト指向のライブラリを用いて開発を行った。gtk+とは、Graphical User Interface(GUI) によってアプリケーションを開発するためのライブラリで、Linux のアプリケーション開発に広く用いられていて、Web 上で公開されている。C 言語がベースということで DAQ の一連のシステムとして組み込みやすく、必要とされるファイルを共有することが可能となる。

Event Display に付加した機能としては、

- 拡大・縮小機能
- スクロールバー機能
- ボタン操作による Multi Event に対応
- イベントナンバー指定機能

などである。これらの機能により、全てのイベントについて、詳細まで視覚的に捉えることが可能となる。図 4.8 は、トラッキングデータを表示した Event Display の一例である。

4.3.5 Analysis Program

データを解析し、各検出器のヒット分布、TDC 分布等をヒストグラム化することは、極めて重要である。

Analysis Program では、データファイルを読み込み、解析を行う。解析されたデータは、PAW (Physics Analysis Workstation) と呼ばれる CERN で開発された高エネルギー業界で広く使用されているソフトウェアを用いて様々な欲しい情報のヒストグラムを表示させる。

また、ここで、トラッキングデータを読み込むことで、トラッキング情報から第 3.3.4 節の議論により、TGC の検出効率を計算する。ここで計算された TGC の検出効率は、PAW で表示できるだけでなく、次に説明する Efficiency Map Display で読み込むことが可能である。

4.3.6 Efficiency Map Display

検査設備において TGC の検出効率、及び一様性を見ることは、検査の基準となるため、極めて重要となる。

この Efficiency Map Display は、各 TGC を細かなセルに分け、そのセルの検出効率を Analysis Program で導出し、検出効率によりそのセルを色分けして、Display に表示するものである。今現在、このセルの大きさは、TGC のワイヤーとストリップの各チャンネル毎に区切っている。この Efficiency Map Display の表示により、TGC のワイヤーサポート、ボタン型サポートの部分は、検出効率が落ちているのが見えるはずである。図 4.9 に Efficiency Map Display を示す。

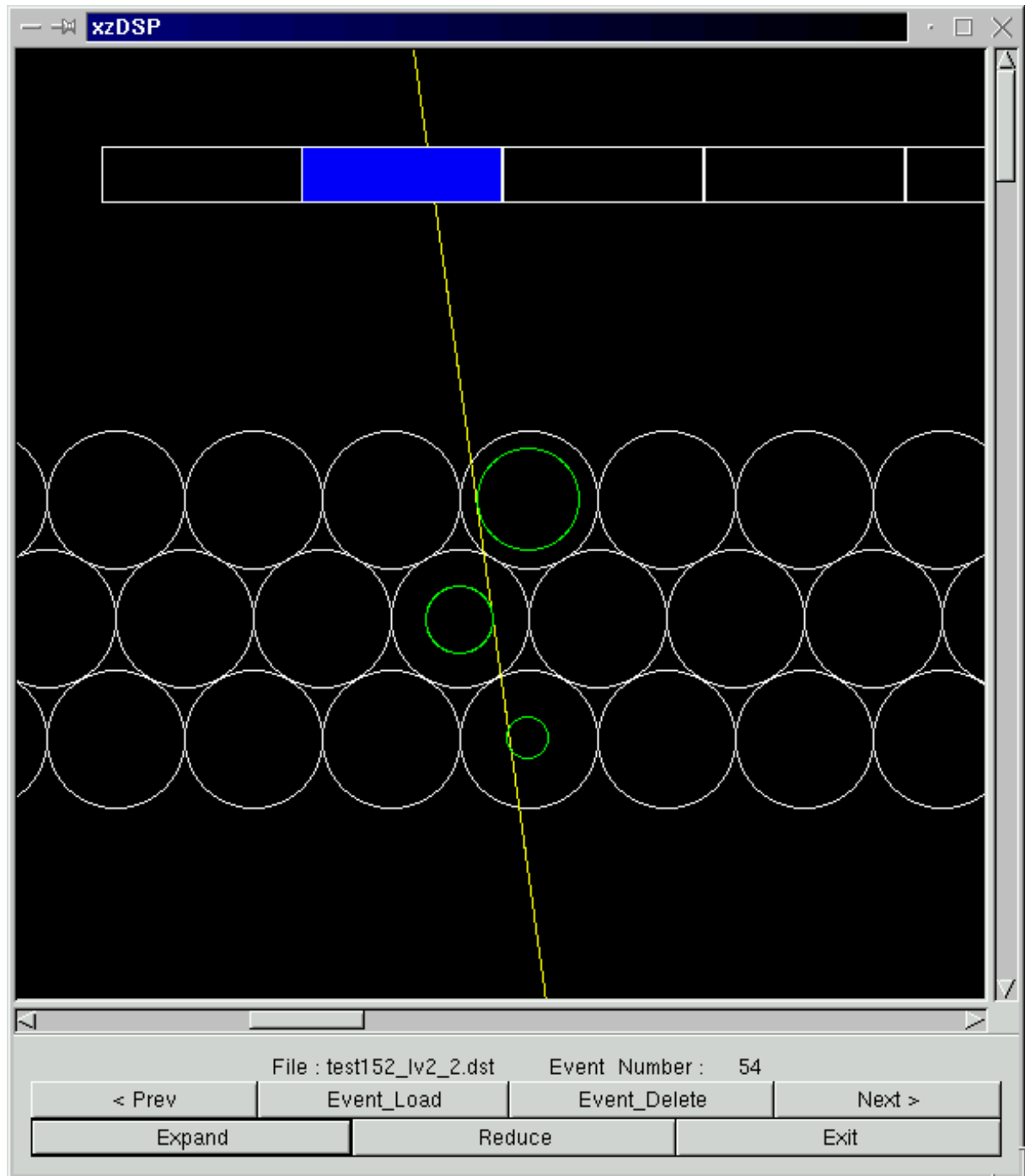
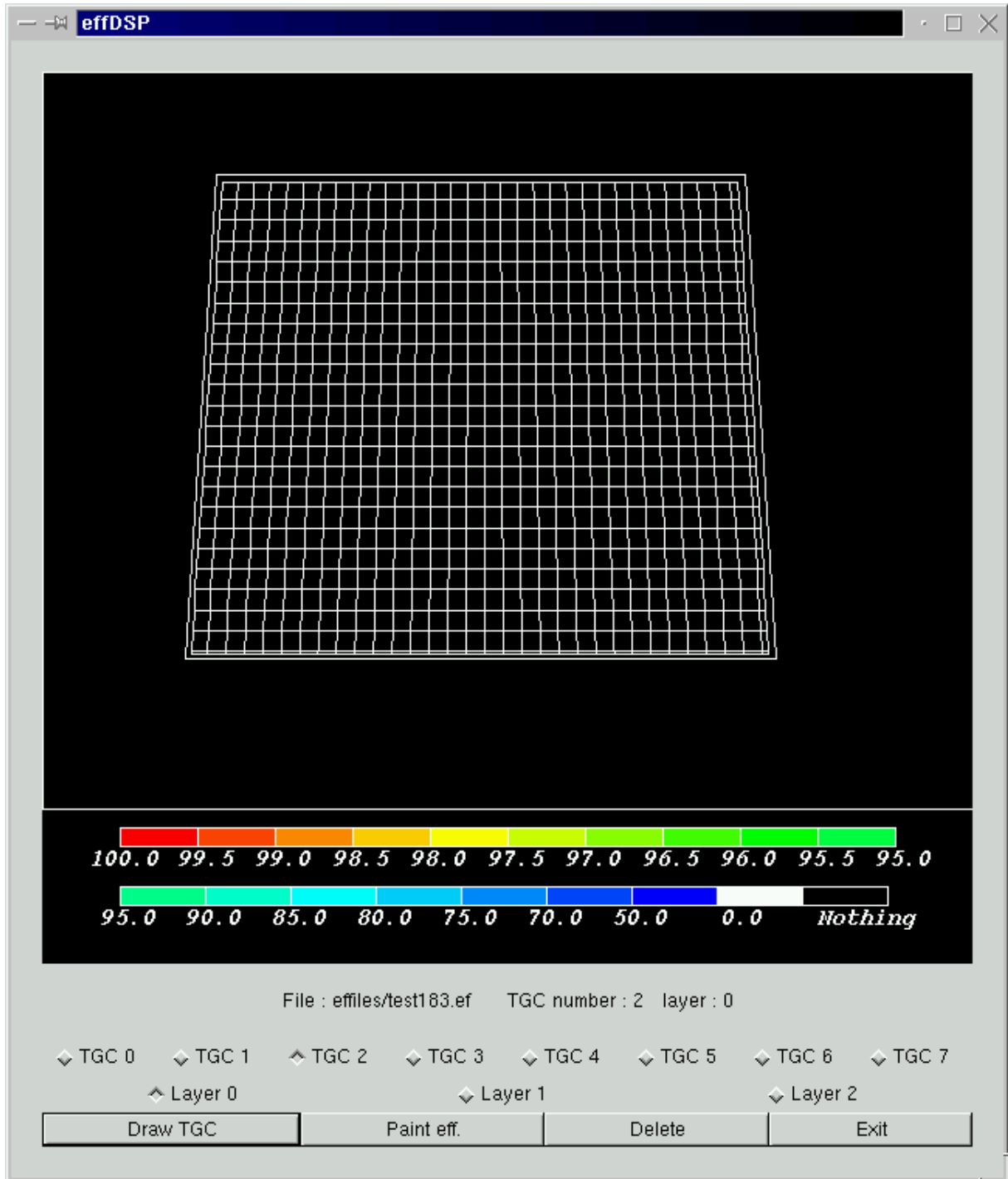


図 4.8: Event Display の一例



☒ 4.9: Efficiency Map Display

第5章 ビームテストでのDAQシステムの実装・結果

第4章で述べた設計を基にして開発したDAQシステムを用いて、2000年11月28日から12月9日まで、KEK PS π^2 ラインで4 GeV/cの π^- のビーム¹を用いてビームテストが行われた。ここでは、そのビームテストでのセットアップとDAQシステムの構成、その結果について述べる。

5.1 セットアップ

ビームライン上に置かれた各検出器の配置を図5.1に示す。ビーム上流からビームラインに沿ってZ軸をとり、右手系にX軸(水平方向)、Y軸(鉛直方向)をとる。TGCはX軸とワイヤーが平行になるように置かれ、TGCにビームが入射する位置を変えられるように、電動ステージ上に置かれ、X軸方向、Y軸方向に動かせるようにした。また、TGCに流すガス成分であるn-Pentaneが液化しないようにTGC全体を覆うようにテントが立てられ、テント内は温度管理された。²

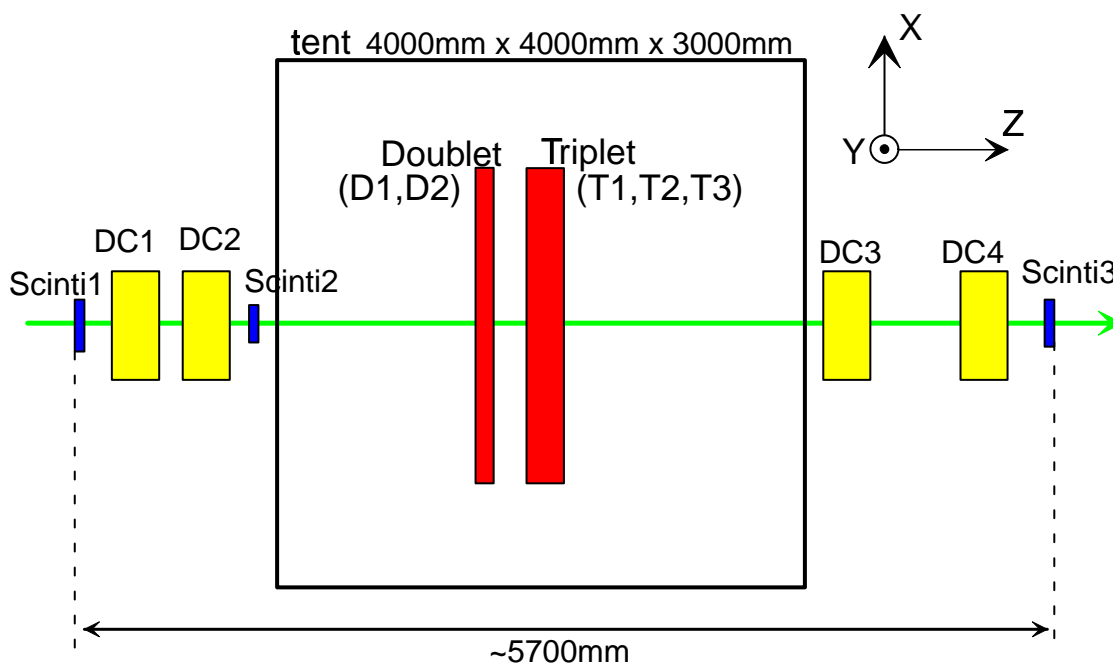


図 5.1: ビームライン上での各検出器の配置 (top view)

¹ビームには電子も含まれているが、特に粒子の分別はしていない。

²n-Pentaneは、その混合比(CO₂: n-Pentane= 55:45)から、17度で液化してしまう。そのため、20度以上に保たれた。

5.1.1 検出器

ビームテストで用いた検出器は、Scintillation Counter 3台、Drift Chamber 4台、TGC 2台であり、検査設備で Tracking に用いる Drift Tube の代わりに、ビームテストでは Drift Chamber を用いている。

5.1.1.1 Scintillation Counter

Scintillation Counter は 3 台置き、ビーム上流から、Scinti 1 (100 mm × 100 mm × 5 mm)、Scinti 2 (40 mm × 40 mm × 5 mm)、Scinti 3 (50 mm × 60 mm × 5 mm) である。また、Scinti 2 は両読みである。これら 4 つのコインシデンスをとり、トリガー信号を出して、データ収集を行う。今回のビームテストでは、コインシデンスの頻度は約 2000/spill³という条件で行った。

5.1.1.2 Drift Chamber

TGC の前後に各 2 台ずつ計 4 台の Drift Chamber (DC) が置かれ、TGC に入射した粒子の飛跡を再構成を行う。ビーム上流から、DC1、DC2、DC3、DC4 とし、全ての DC は同じ外形、構造で、その構造は図 5.2 に示す。直交した 2 つのセルを持ち、各セルにはセンスワイヤーが 1 本張られ、各セルで独立に読み出すことができる。DC 本体にアンプが取り付けられており、その出力信号はデジタルに変換されて出力される。用いるガスは P10 ガス (Ar : C₂H₆ = 90 : 10) で、センスワイヤー、フィールドワイヤーの径はそれぞれ 50 μ m、100 μ m であり、印加電圧 (HV) はそれぞれ 2.2kV、-2.0kV である。

5.1.1.3 TGC

TGC はビーム上流から T8 Doublet (D1、D2)、T8 Triplet (T1、T2、T3) の 2 台、計 5 チェンバーが置かれた。

今回のビームテストでの印加電圧 (HV)、アナログ信号からデジタル信号に変換するための閾値 (V_{th}) は、今までのテスト実験の結果を考慮して、それぞれ 3.1kV、100mV で行った。(後述するように、この値は、TGC の検出効率が 99%以上得られるような HV と V_{th} の値である。) また、TGC には ASD ボードが取り付けられるが、今回のビームテストでは、ガスゲイン等を見積もるため、アナログ出力付きの ASD ボードを用いて、デジタル出力とアナログ出力を読み出した。読み出すチャンネル数は、Doublet はワイヤー 32CH × 2、ストリップ 32CH × 2、Triplet はワイヤー 24CH × 3、ストリップ 32CH × 2 (Triplet の真ん中の層はストリップ読み出しがない。) の計 264CH である。(Triplet のワイヤーのみ 24CH で、他は 32CH である。)

5.1.2 DAQ システム

ビームテストで用いた DAQ システムは、検査設備で用いるものと構成にいくつか違いがある。その違う点は以下のものである。

1. TGC のデジタル出力を TMC モジュール、アナログ出力を ADC モジュールを用いて読み出しを行う。

³ ビームは蓄えと吐き出しを繰り返し行っており、周期性を持つ。この周期を 1 spill とし、約 4 秒である。

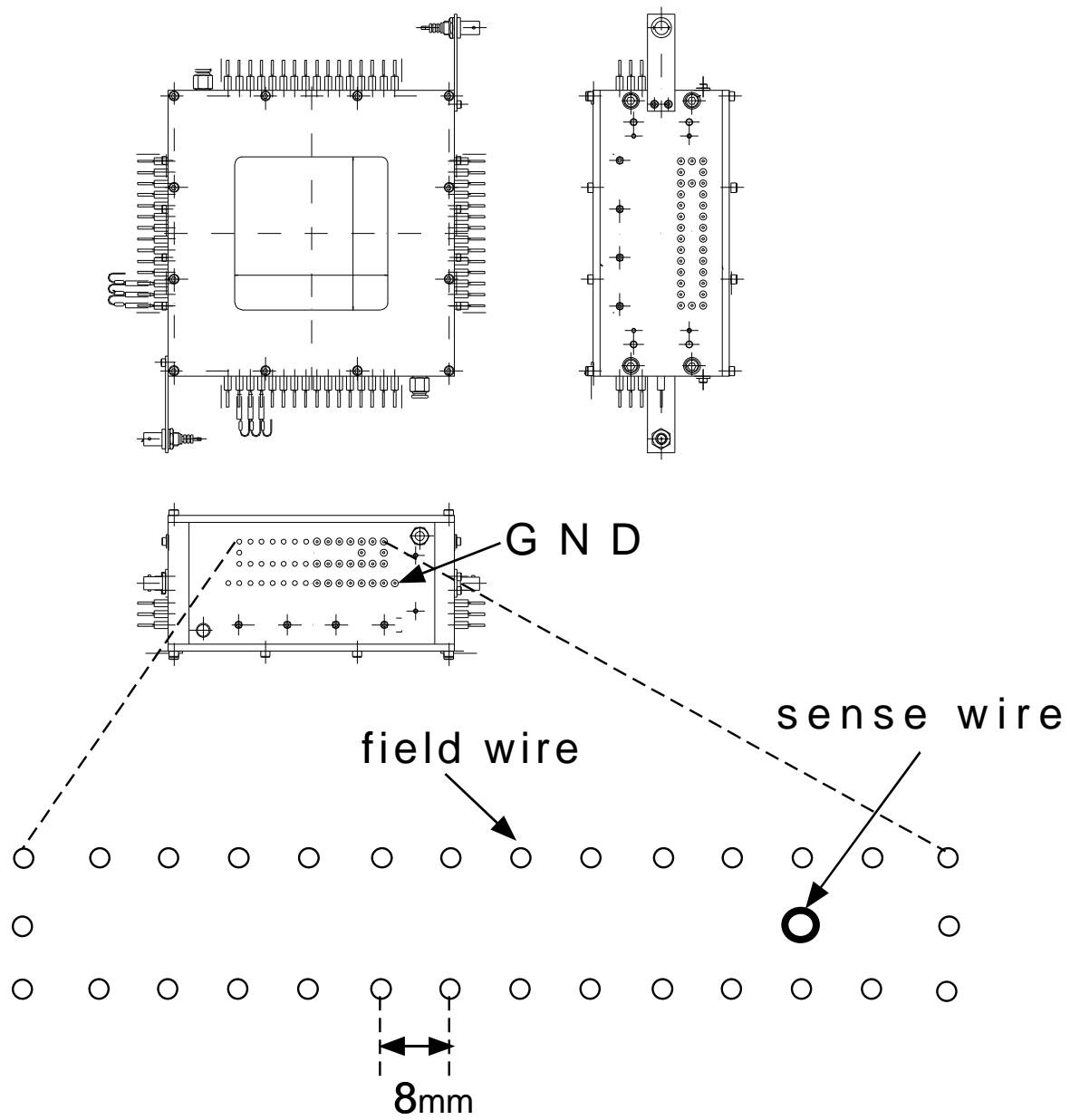


図 5.2: Drift Chamber の構造

2. ネットワークに分散せず、PC1 台で読み出しを行う。(Interrupt & I/O Register を用いた通信を行わない。)
3. イベント・フィルタを用いず、全てのデータを書き込む。
4. NFS を用いず、読み出しを行う PC 上にデータを書き込む。
5. ビームが出ていないとき (Off spill 時) にはデータ読み出しプロセスは sleep するようにする。

1 については、”KEK の量産設備を用いて製作された TGC の詳細な動作検証” というビームテストの目的から、TGC の時間情報、電荷量情報を読み出し、解析を行うためである。そのため、前述のように TGC にはアナログ出力付きの ASD ボードを用いた。2 については、検出器の数が少ないため、読み出すチャンネルも少なくなり、VME クレート 1 台、PC1 台で読み出すことができるためである。そのため、Interrupt & I/O Register を用いた通信部分が必要なくなる。3 については、すべての検出器がビームライン上にあり、加速器ビームを用いるために、ヒット位置が確定されるためであり、さらに、イベントの選別を行わずにすべてのデータを書き込むことにし、解析の段階でイベントの選別を行う方法を取ったためである。4 については、十分な HDD の容量が確保されていることと、1 台の PC 上でデータの読み出しと解析を行っていたので、データ転送の必要がなかったためである。5 については、前述のようにビームは spill 構造を持つため、ビームが蓄えられているとき (Off spill 時) には、データ読み出しプロセスを sleep させることにより CPU の無駄をなくし、解析を行うようにしたためである。この理由から、1 台の PC 上でデータの読み出しと解析を行うことが可能になる。ビームテストで用いた DAQ システムの構成図を図 5.3 に示す。

5.1.2.1 モジュール

TMC

各検出器からのデジタル出力を読み出しを行う。各検出器全てのチャンネルを読み出すため、Scintillation Counter 4CH (1CH × 2 台、2CH × 1 台)、Drift Chamber 8CH (2CH × 4 台) に 32CH の TMC モジュールを 1 台、TGC 264CH (Doublet:128CH、Triplet:136CH) に 32CH の TMC モジュールが 9 台、計 10 台の TMC モジュールを用いた。このビームテストでも common stop mode で実装された。

TMC モジュールから読み出すデータ量は、Scintillation Counter のヒット数は 4CH、Drift Chamber のヒット数は 8CH、TGC のヒット数は 9CH で、多く見積もっても 30CH となり、1 イベント当り 60word となる。

16CH Charge Sensitive ADC

ADC とは Analog to Digital Converter の略で、アナログ入力信号のゲート間の電荷量を積分し、デジタル情報に変換するものである。

用いた 16CH ADC モジュールは 3 台で、アナログ出力を読み出す検出器は、Scintillation Counter は 4CH とも読むものの、TGC は全体で 32CH 分しか読み出さないことにする。その理由は、ADC は 1 サイクルの収集時間が長く、時間短縮のために読み出すチャンネルを絞り込んだためである。そのため、ビームタイム中に効率良く ADC の値が取れるように繋ぎ変えを行った。

データは 1 チャンネルにつき 2word からなり、1word はチャンネル、もう 1word は ADC データである。ADC から読み出すデータ量は $(4CH+32CH) \times 2word$ で、1 イベント当り 72word となる。

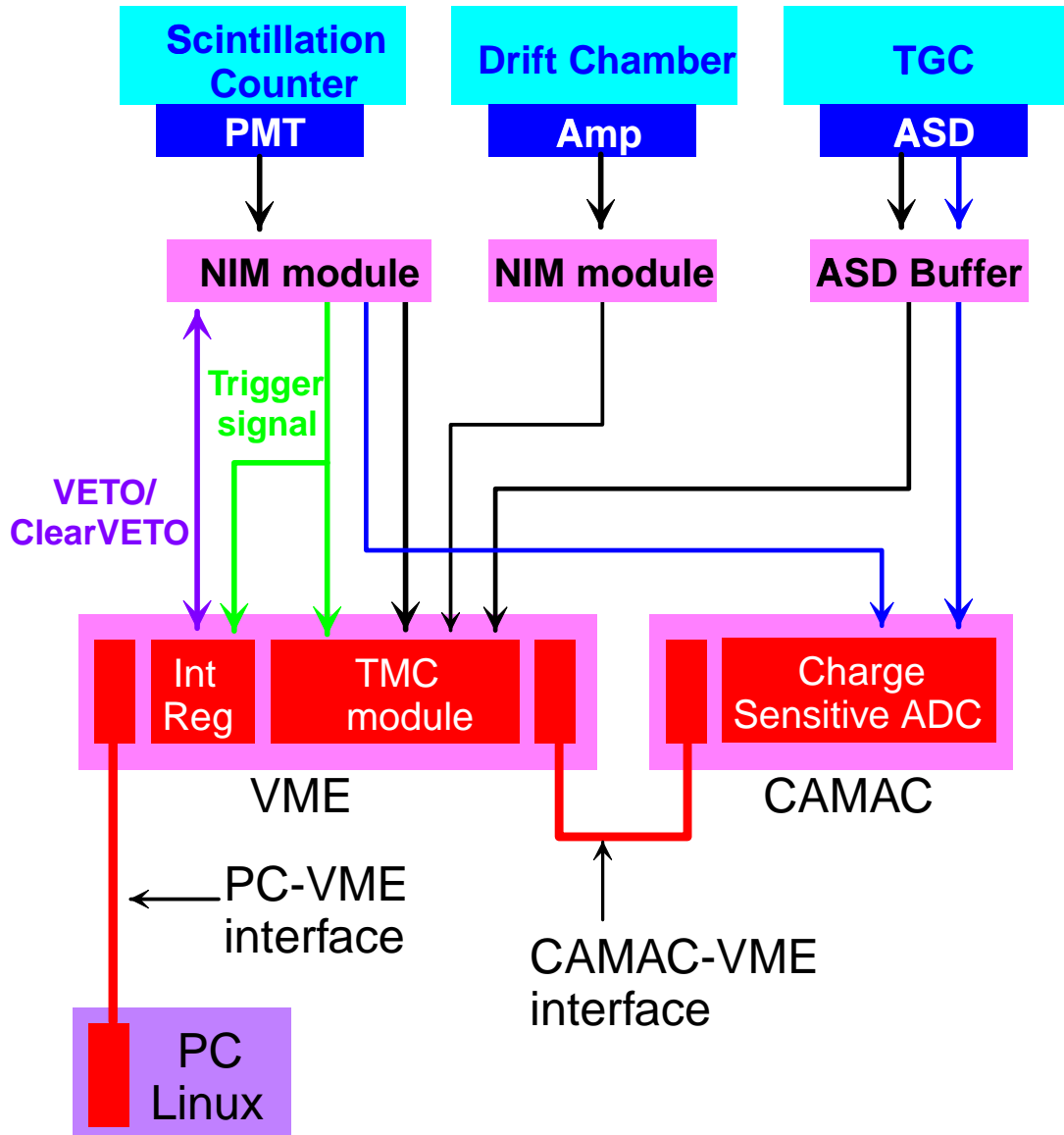


図 5.3: ビームテストでの DAQ システムの構成

CAMAC-VME インターフェイス

CAMAC の各モジュールを VME 経由でコントロールするもので、VME 側のモジュール、CAMAC 側のモジュール、その間のケーブルから構成される。これにより、VME のモジュールを扱うのと同様に CAMAC にアクセスすることができる。また、VME 経由で CAMAC にアクセスする手段として、C 言語ライブラリ `camlib` を使用する。

5.1.2.2 コンピュータ環境

ビームテストでも検査設備と同様に、コンピュータに PC、OS に Linux を採用し、1 台の PC で PC-VME インターフェイスを通じて、データの読み出しを行う (図 5.3 参照)。読み出したデータは同じ PC 上に書き込まれ、解析が行われる。

5.1.3 読み出しプロセス

ビームテストで用いたデータを読み出すプロセスのシーケンスについて図 5.4 に示す。ネットワークに分散していないため、Interrupt & I/O Register を用いた通信は行わず、単一のプロセスで読み出しを行う。また、前述のようにイベント・フィルタを用いずに、TMC、ADC から取れたデータ全てを同じ PC 上に書き込むことにした。

ビームの spill 構造により、ビームの蓄えと吐き出しを約 2 秒間隔で行っている。そのため、ビームが蓄えられている Off spill 時は、データの読み出しプロセスは sleep するように設計されている。こうすることにより、PC の CPU の無駄をなくすと共に、オンライン解析を可能としている。

5.1.3.1 ビームテストにおける Raw Data Format

データ読み出しプロセスにより読み出された Raw Data はバイナリ形式でファイルに保存される。ビームテストでの Raw Data Format を表 5.1 に示す。

基本的な構造は第 4.2.5 節で説明したものと同様である。<> で囲まれた部分は、可変長であることを示す。

データは、START_FLAG と END_FLAG で囲まれた構造となっており、CFG_FLAG と CFG_END_FLAG で挟まれた部分には、Data Conversion で用いる Configuration ファイルの内容が記されている。

そして、RUNbegin_FLAG と RUNbegin_END_FLAG の間に挟まれた部分には、ランナンバー、DAQ 開始時間、Configuration ファイル名、ランコメントが記されている。さらに、ビームテストでは TGC の印加電圧依存性やガス流量依存性などを測定するために、TGC の印加電圧、ガスの流量を変化させたり、ビームの入射位置依存性を測定するために TGC を電動ステージ上に載せて移動させていたため、TGC の各ランの印加電圧、ガス流量、ビームに対する位置情報などの詳細も記されている。

EVT_FLAG から EVT_END_FLAG まだが 1 イベントであることを示しており、そのイベントナンバーが記されている。TMC_FLAG から TMC_END_FLAG までは、TMC からのデータであることを示しており、全ての TMC から読み出された 1 イベント分のデータサイズが記され、TMC からの各データが記される。TMC からのデータもまた、2 word から構成され、信号到達時間の早いものから書き込まれて行く。ビームテストで異なるのは、ADC からのデータが存在することで、ADC_FLAG から ADC_END_FLAG までは、ADC からのデータであることを示しており、全ての ADC から読み出された 1 イベント分のデータサイズが記される。各 ADC の 1

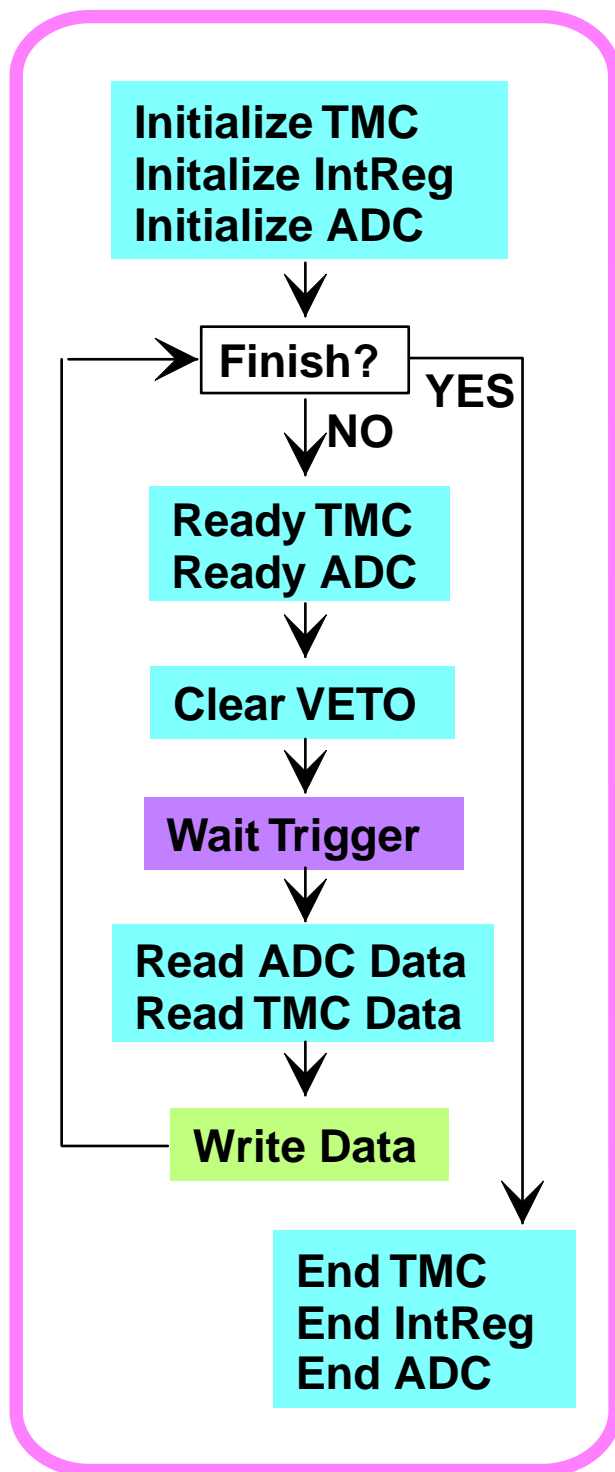


図 5.4: ビームテスト用読み出しプロセスのシーケンス

START_FLAG
CFG_FLAG cfg data size < configuration > CFG_END_FLAG
RUNbegin_FLAG run number DAQ start time configuration file name details of TGC comment RUNbegin_END_FLAG
EVT_FLAG event number TMC_FLAG all TMC data size < data > TMC_END_FLAG ADC_FLAG all ADC data size < data > ADC_END_FLAG EVT_END_FLAG
• • • • •
RUNend_FLAG run number DAQ end time RUNend_END_FLAG
END_FLAG

表 5.1: ビームテストにおける Raw Data Format

チャンネルからのデータは 2 word からなり、1word は ADC のチャンネル、もう 1word は ADC からの電荷量情報である。

5.1.4 解析プロセス

検査設備同様、データ読み出しプロセスから解析プロセスへのデータの受渡しは、ファイルを通じて行われる。解析プロセスで行う主な項目は、

- VME、CAMAC のモジュール、チャンネルの番号で構成された Raw Data を、検出器の種類、チャンネルで構成し直す Data Conversion。
- 再構成されたデータファイルの各イベントの情報を表示する Event Display (XYview、XZview)。
- 再構成されたデータファイルを解析し、PAW を用いて様々なヒストグラムを表示する Analysis Program。ビームテストでは、この部分で Tracking を行い、TGC の検出効率など計算される。

である。解析プロセスでのデータフローについて示したものが図 5.5 である。

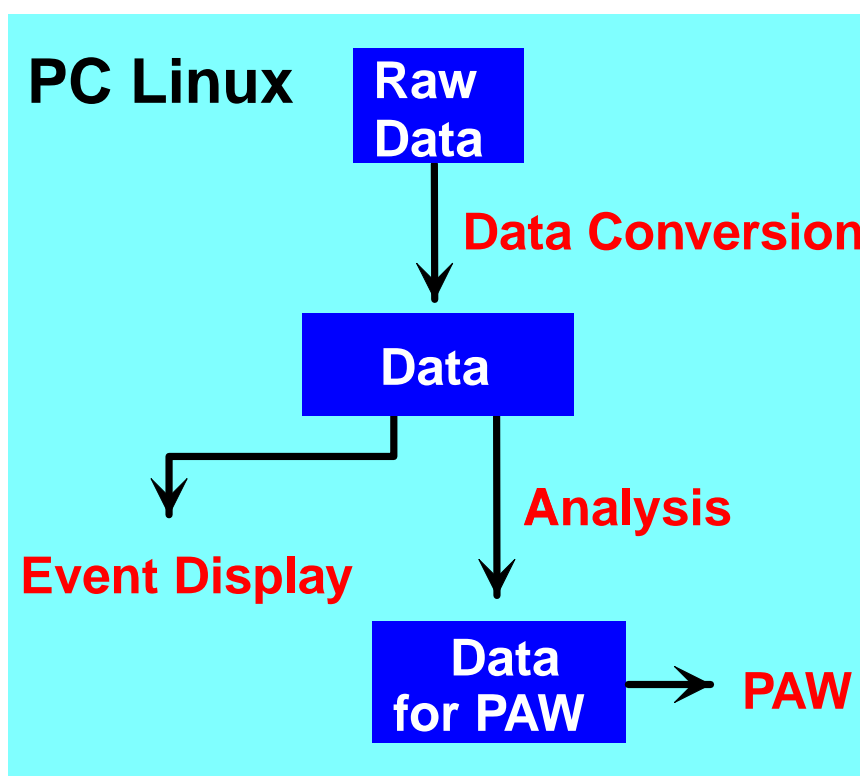


図 5.5: ビームテストでのデータフローチャート

5.1.4.1 Data Conversion

基本的な動作は第 4.3.1 節で説明した検査設備のものと同様であるが、読み出しプロセスからのデータは 1 つであり、この VME、CAMAC のモジュール、チャンネル番号で構成された Raw

Dataを各検出器の種類、位置、チャンネルに再構成したデータファイルに変換するものである。しかし、ADCに関しては、数ラン毎に繋ぎ変えを行ったため、各CAMACのモジュール、チャンネルがどの検出器のどのチャンネルに対応しているかが書かれた Configuration ファイルを繋ぎ変え毎に変更し、いくつもの Configuration ファイルを製作しファイルとして残した。各ランに対してどの Configuration ファイルが対応しているかを Raw Data に書いておくことで、効率良く Data Conversion を行うことができる。

読み出しプロセスがデータを読み出している最中でも、データの読み出しが終わっているイベントまで、Data Conversion を行うことを可能にしている。そうすることで、データ収集中にそのランの詳細を Event Display 等で確認することが可能である。その結果、TGCの発振、ノイズなどが確認でき、発振している場合はデータ収集を止め、発振を止めてから次のデータ収集に進むことで、不要なデータを除くことができるため、データ量を抑えることができる。また、期間の決まったビームテストにおいては、効率良くデータ収集を行えることになる。

この Data Conversion を行ってできたデータファイルを Event Display、Analysis Program へと渡される。

5.1.4.2 ビームテストにおける Data Format

Data Conversion によってできたファイルは、アスキー形式でファイルに保存される。このデータの Format を以下に示す。

```
#
# Run Number      : [run number]
# Run Start time  : [time,data]
# Config. File    : [configuration file name]
# D1 (x y z)      : [X,Y,Z]
# T3 (x y z)      : [X,Y,Z]
# HV (kV)         : [D1,D2,T1,T2,T3]
# Pressure (mmAq): [D1,D2,T1,T2,T3]
# convt level     : [1,2,3]
# Comment         : [inputed comment]
#
event            1

adc_sci_data    [X]
                [counter#] [charge]

tmc_sci_data    [X]
                [counter#] [time] [multi_hit]

tmc_dc_data     [X]
                [DC#] [X/Y] [drift_length] [drift_time] [multi_hit]

adc_tgc_data    [X]
                [layer] [wire/strip] [channel] [charge]
```

```

tmc_tgc_data [X]
  [layer] [wire/strip] [channel] [time] [multi_hit]

end      1
.
.
.
#
# Run End time      : [time,data]
# Number of events : [number of event]
#

```

構造そのものは第4.3.2節で説明したものと同一である。[]で囲まれた部分は、それぞれに対応した数字、文字列が入る。#の部分は各ランの詳細、TGCの詳細が書かれている。データは、eventからendまでが1イベントを表し、横に書かれた数字がイベントナンバーである。adc_sci_dataはScintillation CounterからのADCデータ、tmc_sci_dataはScintillation CounterからのTMCデータ、tmc_dc_dataはDrift ChamberからのTMCデータ、adc_tgc_dataはTGCからのADCデータ、tmc_tgc_dataはTGCからのTMCデータを示すフラグである。フラグの横のXには数字が入り、データの数を示す。

5.1.4.3 Event Display

ビームテスト用にセットアップ全体を上からみたXZview(図5.1参照)と、ビームラインに沿って見たXYviewを表示するEvent Displayを製作した。XZviewでは、ビームライン上に各検出器のヒットの有無を確認できる。XYviewでは、TGC全体を表示するため、ヒットの有無だけでなく、TGCの発振等も確認できる。

ビームタイム中は、データ収集を行いながら、ある一定のイベントまでをData Conversionし、できたデータファイルをXYviewで読み込み、計5枚のTGCのヒット情報を見ることで、各ランの状況を確認した。

5.1.4.4 Analysis Program

ビームテストではオンラインで解析を行い、その内容は、TGCのヒット分布、TDC分布、ADC分布、TGCの検出効率の導出である。その評価基準について説明する。

ヒットチャンネル

TGCのどのチャンネル(CH)にヒットがあるか、ワイヤー、ストリップ両方について示したものが図5.6である。これから、ワイヤー、ストリップとも1CHをピークにほぼ3CH分ヒットしていることが分かる。これは、全てのランで同じことが言えるため、ここでは、3ch分を用いてヒットチャンネルの評価をする。

検出効率

ここでは、検出効率は簡単に

$$\text{検出効率 (\%)} = \frac{(\text{ビーム領域 3ch に TGC のヒットがある イベント数})}{(\text{イベント数})} \times 100$$

と定義し、評価を行う。ここで、イベント数とは Counter のコインシデンスの回数である。Counter のコインシデンスがあれば、TGC にビームが通過したとみなせるので、検出効率の良い TGC であれば、ヒットがあるはずである。

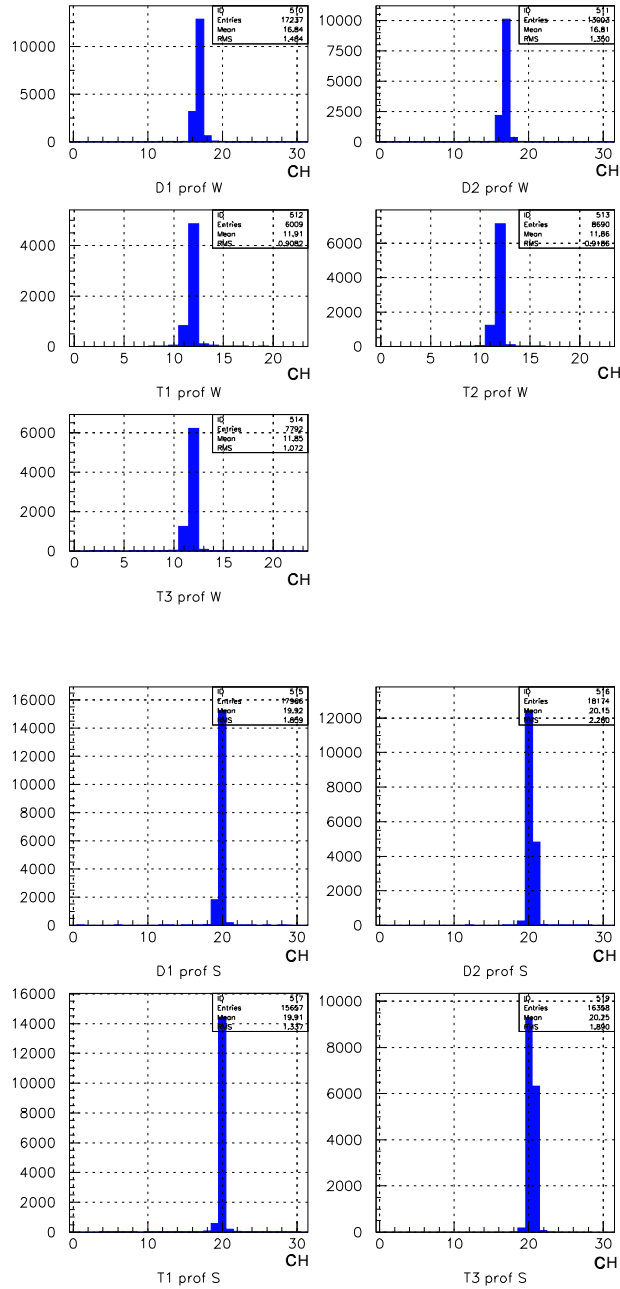


図 5.6: TGC のヒットした CH (上:ワイヤー、下:ストリップ)

5.2 結果

図 5.5 に沿ったオンライン解析が行われ、前述で定義した評価基準に従って行った解析結果と、DAQ の実装結果について説明する。

5.2.1 解析結果

Event Display

データ収集を行いながらそのランの各 TGC のヒット情報を Event Display を用いて表示することで、データ収集の状況を確認できる。その一例を図 5.7、5.8、5.9 に示す。

図 5.7 は、セットアップ全体を上から見た XZview で、ストリップのヒットがあったチャンネルに色が塗られる。Triplet の真ん中の層 (T2) はストリップ読み出しが無いいため、ワイヤーにヒットがあれば、ヒットとみなしている。Drift Chamber に関しては、TMC の時間情報から求めた Drift Length に対応した半径の円をセンスワイヤーを中心に描いている。ディスプレイ上の緑のラインがビームラインを示し、全ての検出器のヒットがビームラインにのっていることがわかる。

図 5.8 と 5.9 は、ビームラインに沿って見た XYview で、図 5.8 が Doublet の D2 のもので、図 5.9 は Triplet の T3 のものである。ワイヤーとストリップのヒットしたチャンネルの交点に色が塗られる。緑のラインの交点がビームが当たっているポイントである。こちらも、ビーム上に TGC のヒットがあり、また、ノイズや発振がないことも確認できる。

信号到達時間分布

TGC のワイヤー、ストリップについての信号到達時間 (TDC) 分布を図 5.10、5.11 に示す。TDC が common stop mode で実装しているため、時間が反転しており、値の大きい方が実際には早く来た信号である。これから分かるように TGC の TDC 分布は、チャンネルによってばらつきが見受けられたものの、およそ 25ns の時間幅の中に入っており、TGC の時間分解能 25ns を達成していることが確認できる。

検出電荷量分布

TGC のワイヤー、ストリップについての検出電荷量 (ADC) 分布を図 5.12、5.13 に示す。ここで、データ収集で Charge Sensitive ADC を用いて読み出しを行うが、Charge Sensitive ADC の電荷量情報は ADC カウントの値であるため、ADC カウントと電荷量の変換定数 0.25 pC/count を掛けた値を検出電荷量と定義する。

検出効率の印加電圧依存性

いままでのテスト結果から、 V_{th} が 100mV のときに HV は 3.1kV に設定すれば、TGC に要求される条件を満たすと考えられているので、今回のテストでも同じ設定で要求される検出効率を得られるか調べる必要がある。

V_{th} を 100mV に設定し、TGC に印加する電圧を変化させたときに、TGC の検出効率がどのように変化するか調べた。ワイヤーとストリップの出力から検出効率を評価した結果を、図 5.14 に示す。これにより、 V_{th} を 100mV にした場合、HV は 3.1kV でワイヤー、ストリップ共に 99%以上の検出効率を得られることがわかる。今回の実験ではこの結果と過去のテスト結果をふまえて、 V_{th} 100mV、HV 3.1kV の設定で行うことにした。

検出電荷量分布の印加電圧依存性

TGC の印加電圧を変化させたときに、ワイヤーの検出電荷量分布がどのように変化するか

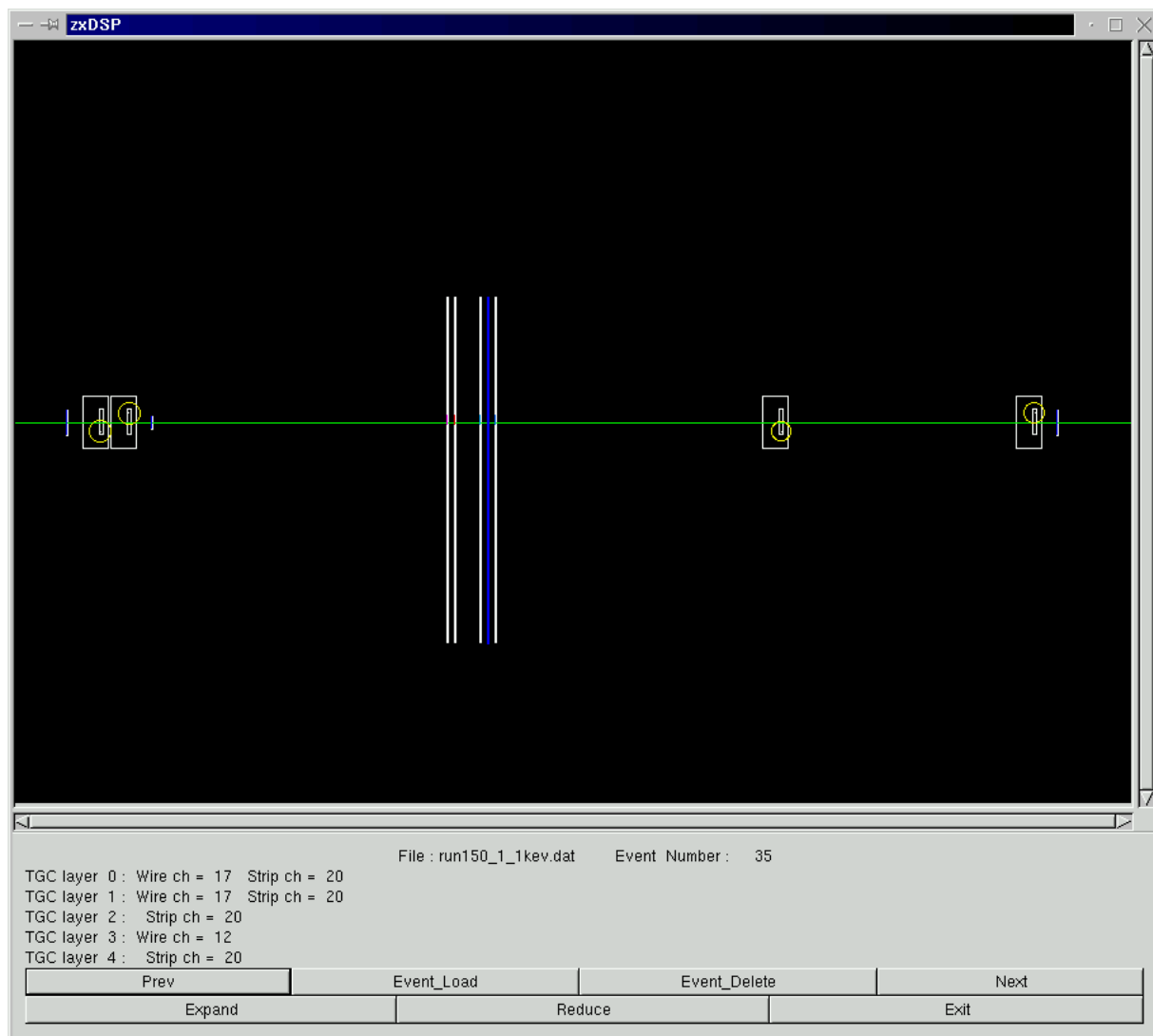


图 5.7: XZview(top view)

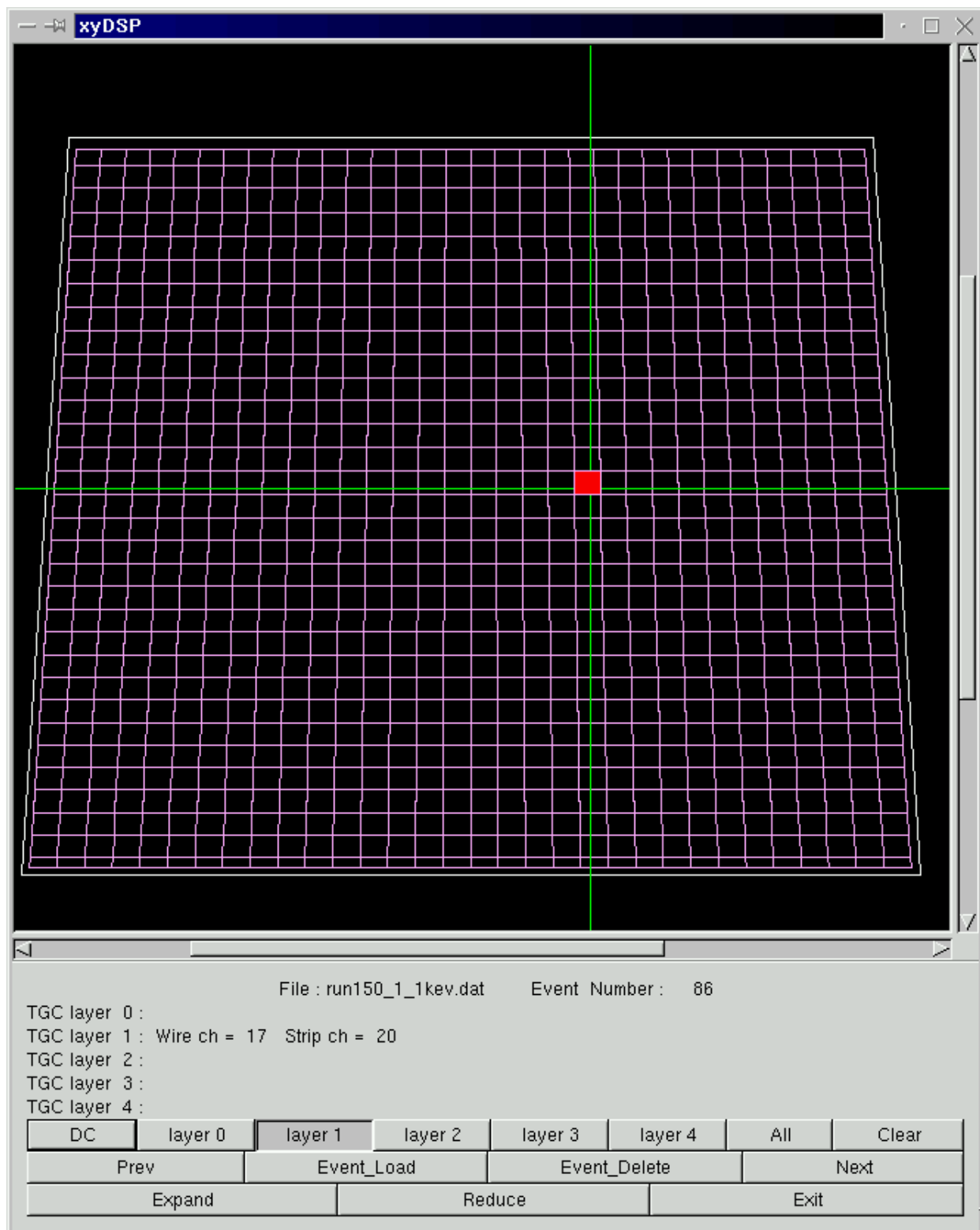


図 5.8: Doublet(D2) の XYview

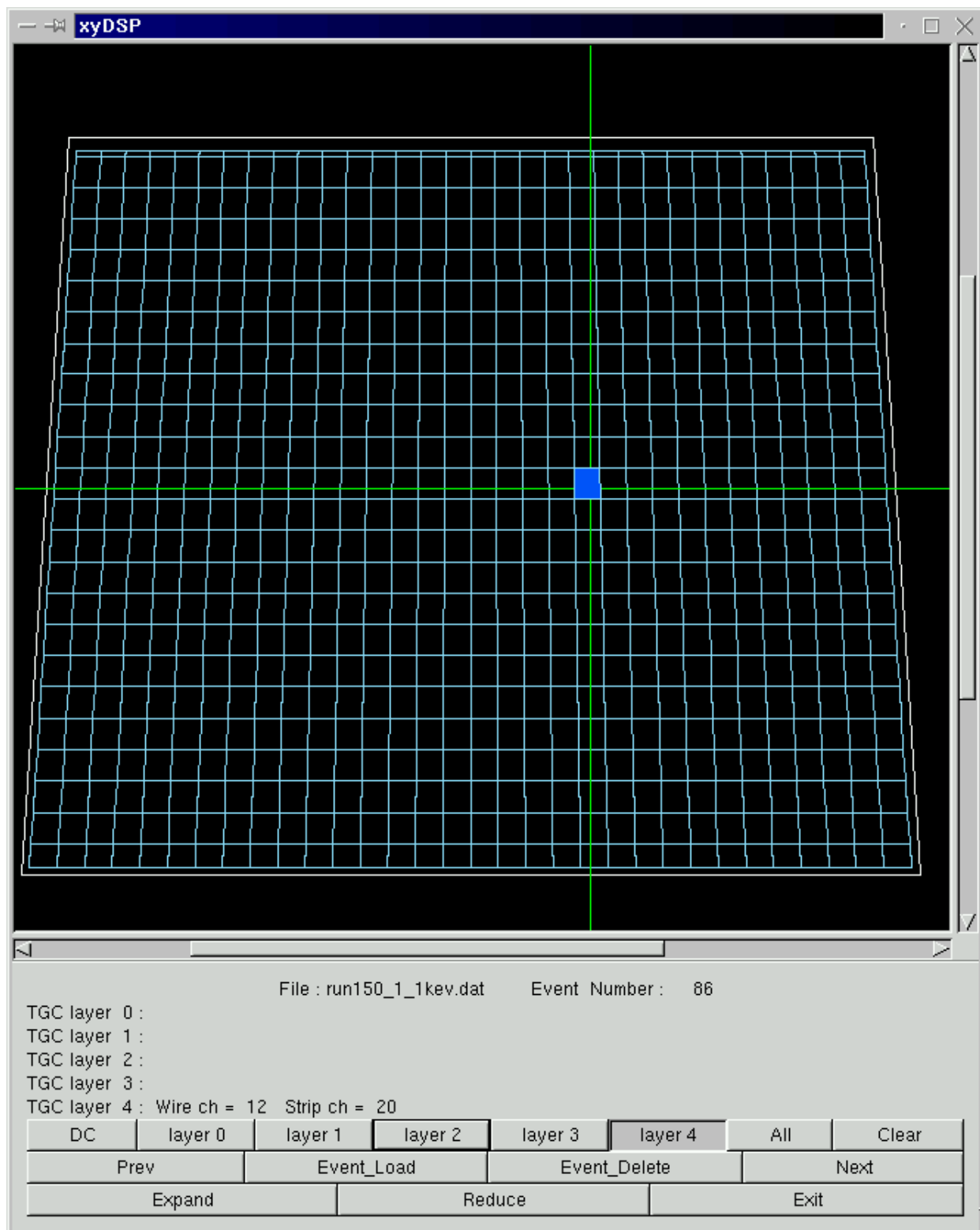


図 5.9: Triplet(T3) の XYview

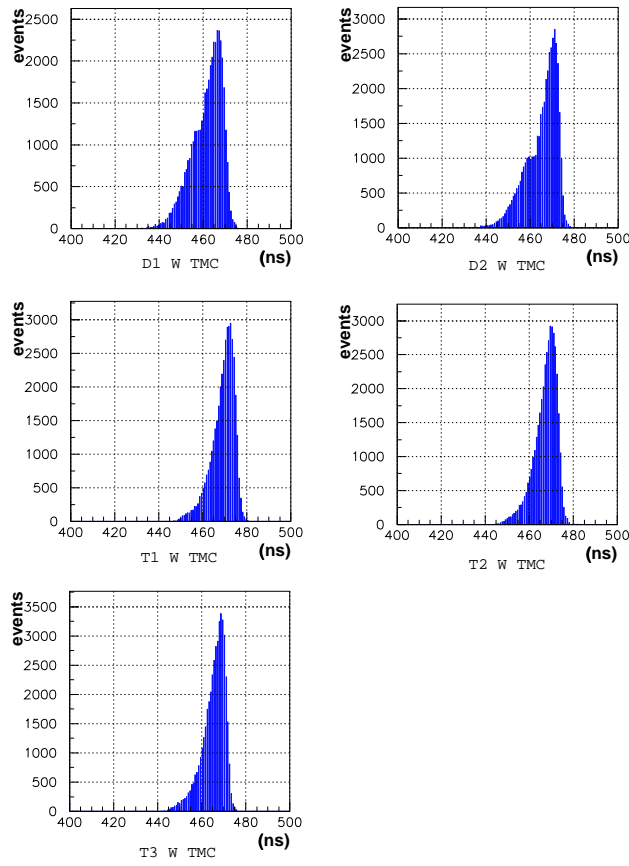


図 5.10: TGC ワイヤの TDC 分布

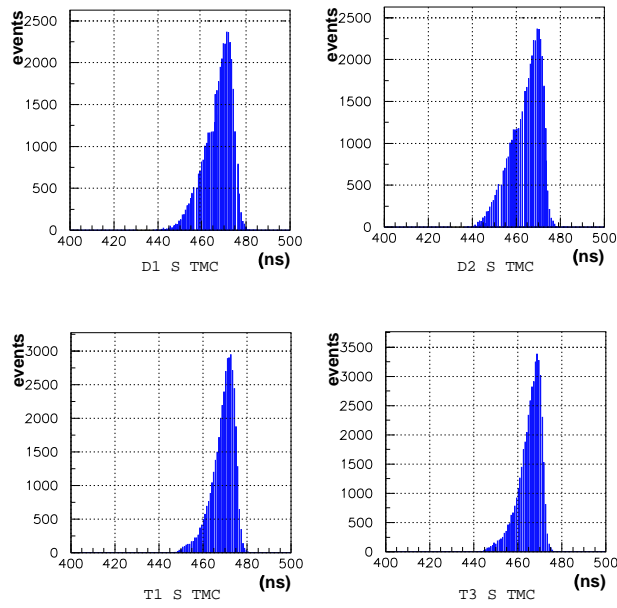


図 5.11: TGC ストリップの TDC 分布

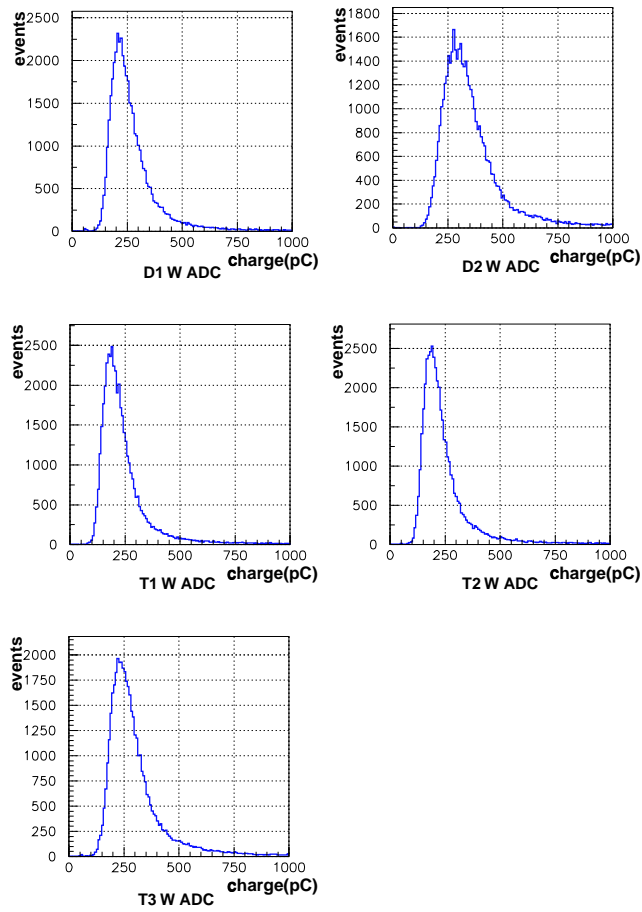


図 5.12: TGC ワイヤの ADC 分布

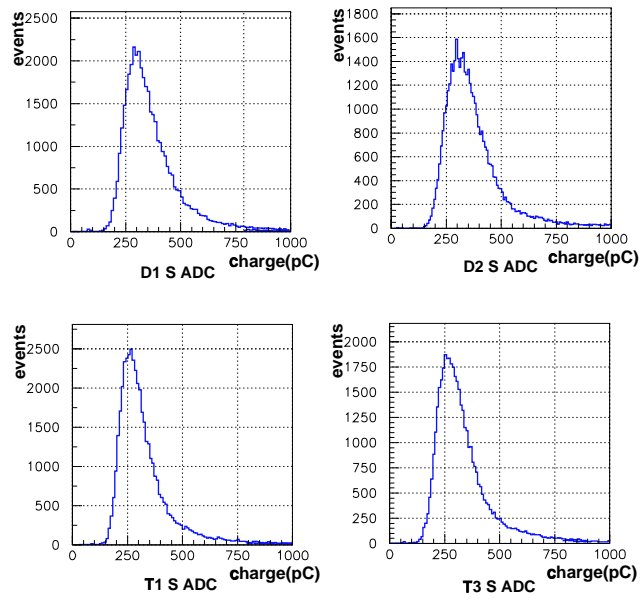


図 5.13: TGC ストリップの ADC 分布

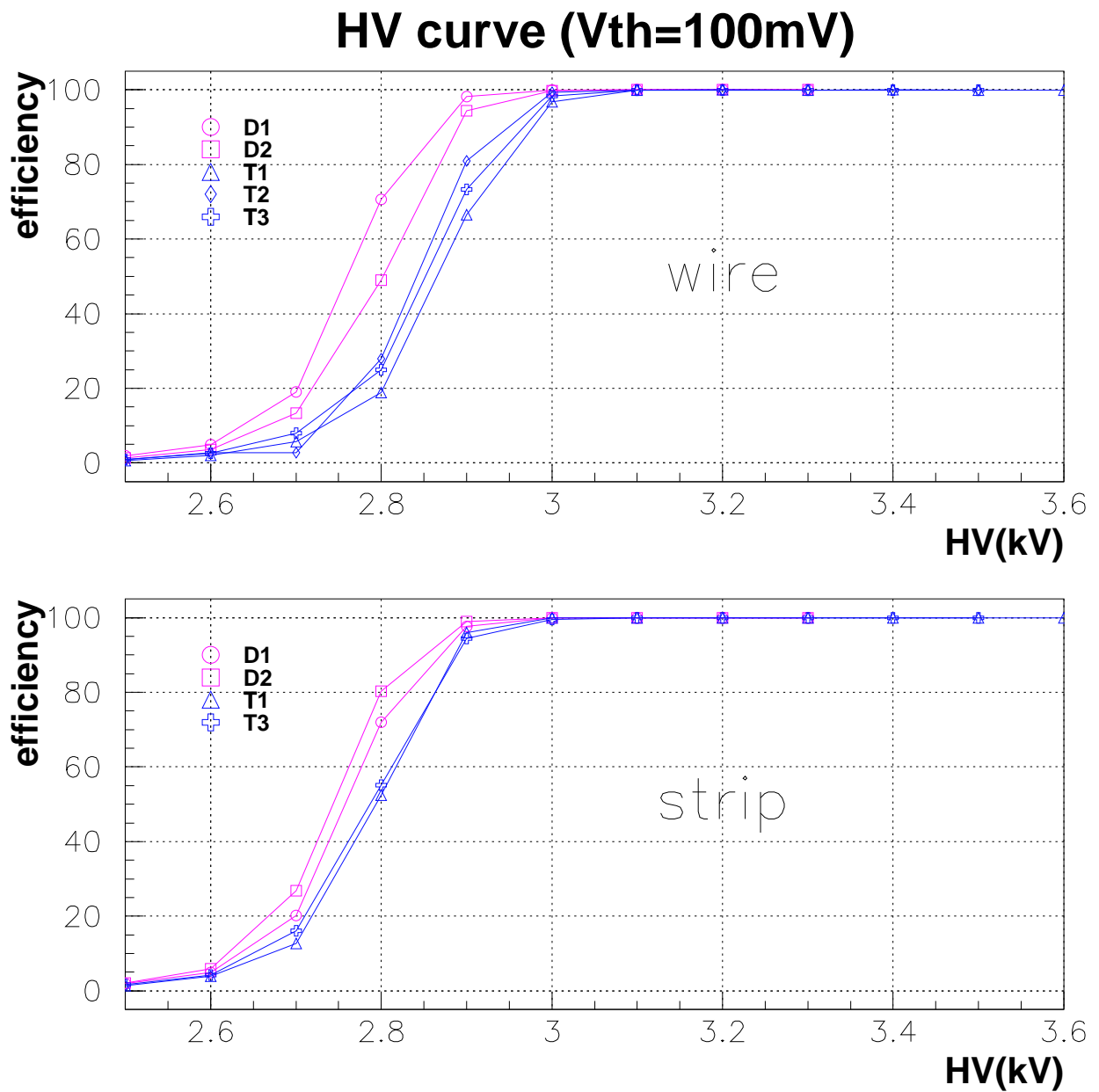


図 5.14: 検出効率の印加電圧依存性

について調べた。それを示したものが図 5.15 である。図 5.15 の縦軸は検出電荷量分布のピーク値をフィットしたものである。

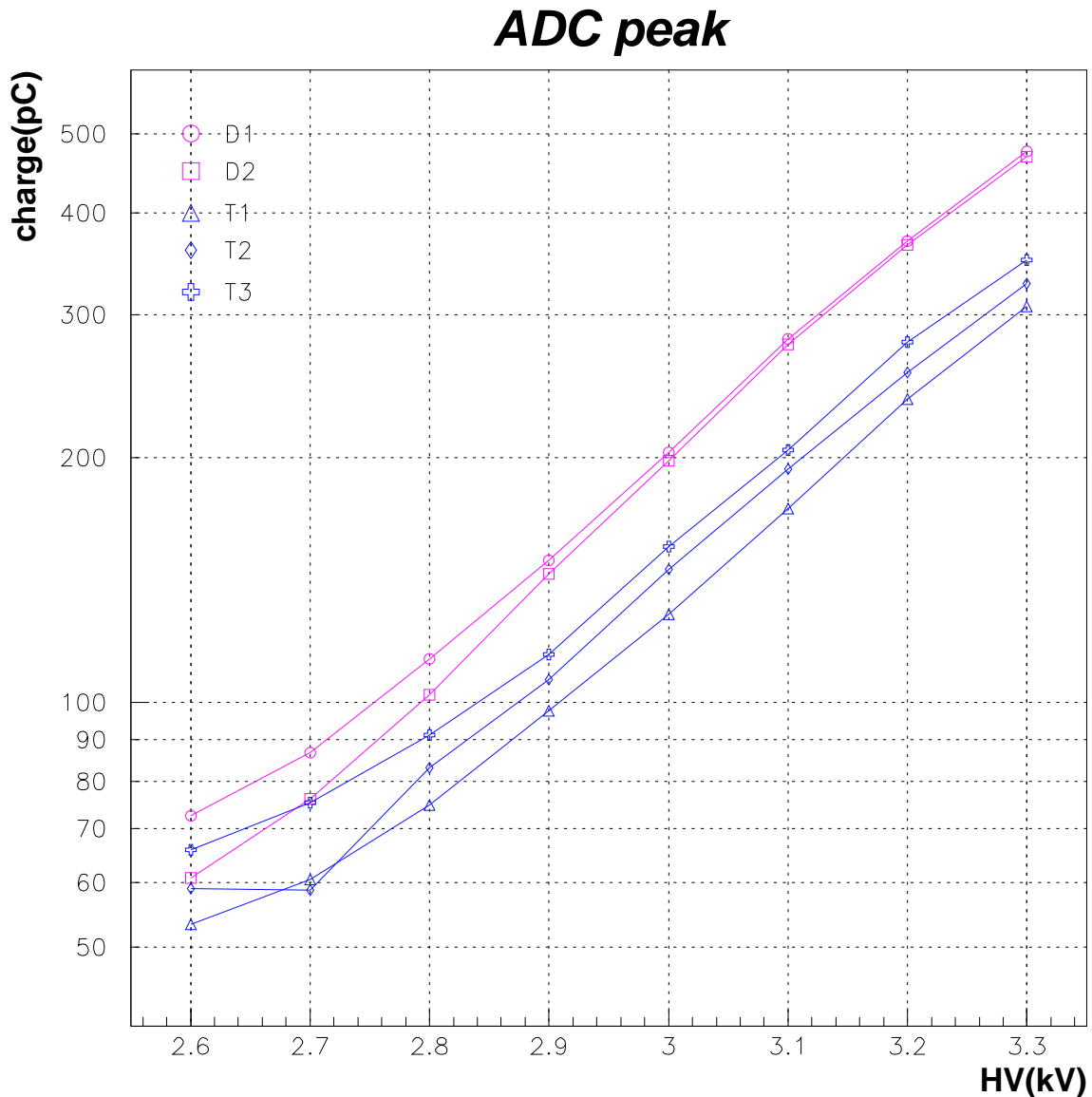


図 5.15: 検出電荷量分布の印加電圧依存性

入射位置依存性

ビームの入射位置を変えたときの TGC の動作の変化について調べた。X 方向にスキャンした場所を図 5.16 に示す。このときの TGC の検出効率の変化を、ワイヤー、ストリップについて図 5.17 に示す。図 5.17 から、ワイヤーサポート部、及びエッジの部分で検出効率が下がっているのが見えるが、それ以外では 99% 以上の高い検出効率を得られていることがわかる。また、前述のようにワイヤーサポートは Doublet、Triplet 共に stagger されているが、その構造も見受けられる。ストリップの T2 の検出効率が 0% なのは、T2 のストリップ読み出しがないためである。

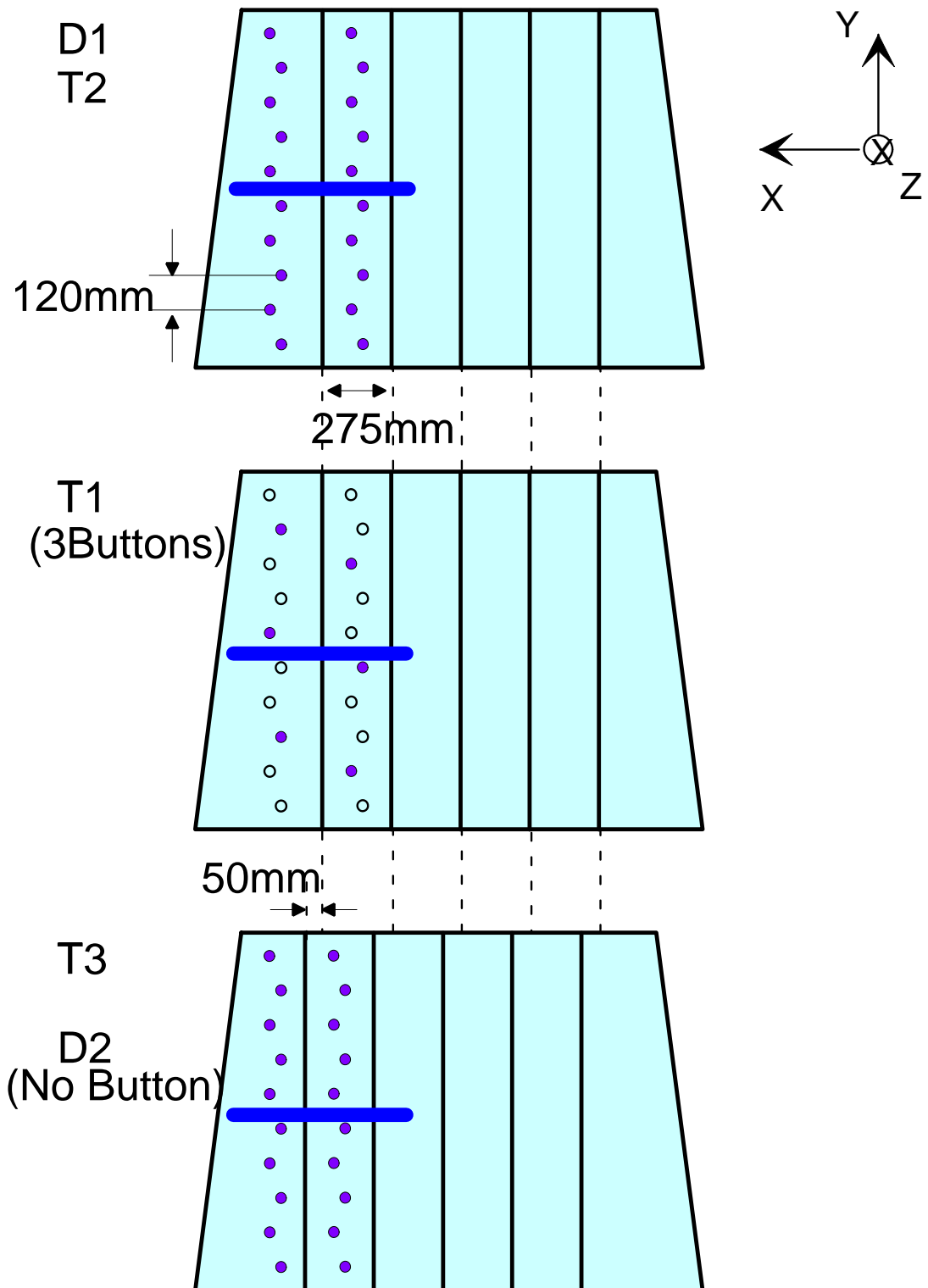


図 5.16: TGC の X 方向のスキャン場所を青線で示す。

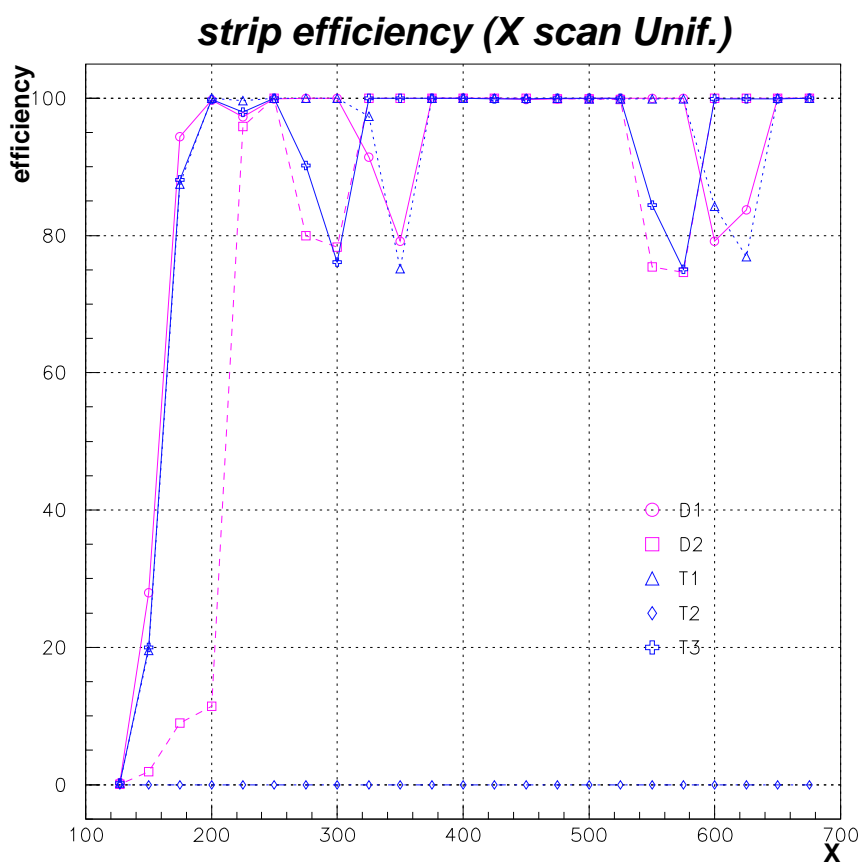
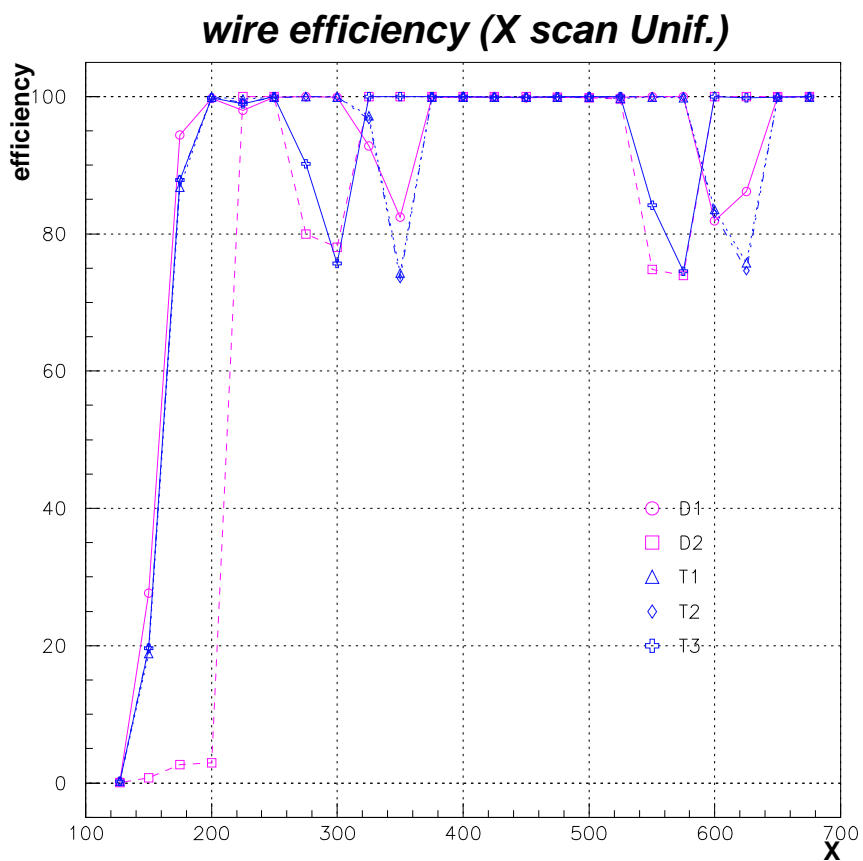


図 5.17: TGC の X 方向入射位置依存性 (上: ワイヤー、下: ストリップ)

5.2.2 DAQの実装結果

今回のビームテストでは、コインシデンスの頻度は約 2000/spill という環境下で行い (検査設備では約 30Hz であると予想される)、約 10 日間で 50000 events/run を約 350 ラン行うことができた。また、最終的には 4000 events/spill まで実現することができた。

前節の結果により、TGC は、ATLAS 実験で求められる条件を満たしていることがわかったと共に、今回のビームテストで DAQ システムは、検査設備で用いるものよりも規模が小さいものとなるが、その性能は保証されたと言える。その内容は、

- ビームを用いた環境下で誤動作なく動作。
- 約 10 日間による長期間のランに対しても安定。
- 高頻度入射粒子状況下 (4000/spill) でも安定に動作。
- 各オンライン解析ソフトウェアの動作。
- DAQ からオンライン解析までの一連の流れ。

といったものである。

ビームテストで用いた DAQ システム、及び解析ソフトウェアの実装により、第 4 章で述べた設計で、動作、性能が確認された点について以下に挙げる。

- コンピュータに PC を採用 (Linux を搭載)
- PCI-VME bus Adaptor により、PC で VME をコントロール
- TMC モジュールからのデータ読み出し
- Data Conversion の動作
- Event Display の動作
- Analysis Program の動作

これらに関しては、検査設備でほぼそのまま用いることができることが保証された。

第6章 検査設備でのDAQシステムの実装・結果

第4章で述べた設計により開発したDAQシステムを用いて、検査設備でデータ収集が行なった。この章では、その結果について述べる。

6.1 解析結果

図4.7に示した流れに沿って行った解析の結果を述べる。

現時点では、本格的なTGCの検査は始まっておらず、試運転の段階である。そのため、Scintillation Counterに関しては、上下各22本の内、各10本ずつを用いて、データ収集を行った。このときのコインシデンスの頻度は約7 Hzである。(全てのScintillation Counterを動かした場合のコインシデンスの頻度は、約30 Hzであると見積もられる。) Drift Tubeに関しては、全数が稼働している。TGCに関しては、ビームテストで用いたTGC(T8 Doublet, Triplet, 各1台)を用いて検査を行った。X方向に平行にTGCのワイヤー、Y方向にストリップがくるようにTGCは設置する。データの読み出しを行ったのは、Doubletの1層目と、Tripletの1層目だけである。

データ収集時のイベント・フィルタは、検査設備が試運転のため、すべてのデータを受け入れるモードで行った。Event Building時の変換レベルは、TMCからの各チャンネルのFirst Hitを採用するというレベルで行った。

6.1.1 Drift Tube

TGCの検出効率、及び一様性を測定するためには、Drift Tubeによる宇宙線ミューオンの飛跡の再構築は必要不可欠である。そのため、Drift Tubeの各層でのヒット分布について調べる必要がある。

図6.1、6.2、6.3、6.4に各層におけるDrift Tubeのヒット分布を示す。図6.1は、検査設備の上段のX方向を向いたDrift Tubeのヒット分布であり、左図は、俵積みにされた3層分のもを示し、右図は、各層のもを示す。図6.2は、検査設備の下段のX方向を向いたDrift Tubeのもの、図6.3は、検査設備の上段のY方向を向いたDrift Tubeのもの、図6.4は、検査設備の下段のY方向を向いたDrift Tubeのものである。(図3.3参照)

上下X方向を向いたDrift Tubeの両端は、Scintillation Counterでカバーできる測定領域からはみ出しているため、ヒットが少なくなる。上下Y方向を向いたDrift Tubeに関しては、前述のようにScintillation Counterを上下各22本の内、各10本ずつを用いているため、Scintillation Counterでカバーしていない右側半分のヒットが減少しているのが見受けられる。また、端についてヒットが少ないのは、X方向同様、Scintillation Counterでカバーできる測定領域からはみ出しているためである。

このように、Scintillation Counterでカバーされている領域では、ヒット分布に大きな差がないことが確認できる。また、Scintillation Counterが全数稼働することを考えると、TGCの有感領域(図2.15参照)に渡ってDrift Tubeのヒット分布が一定であることが分かる。

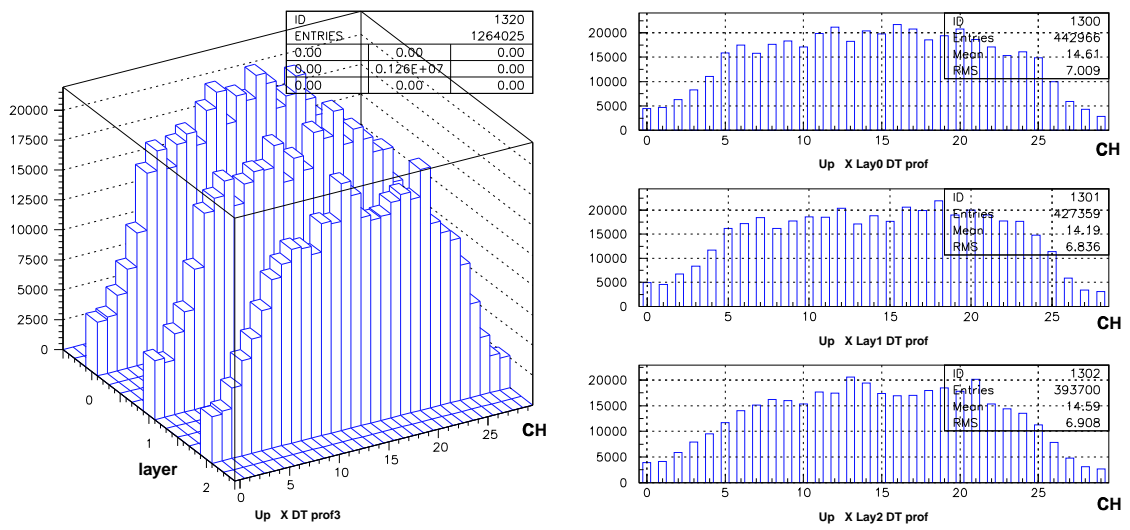


図 6.1: 上段 X 方向の Drift Tube のヒット分布 (左 : 全層、右 : 各層)

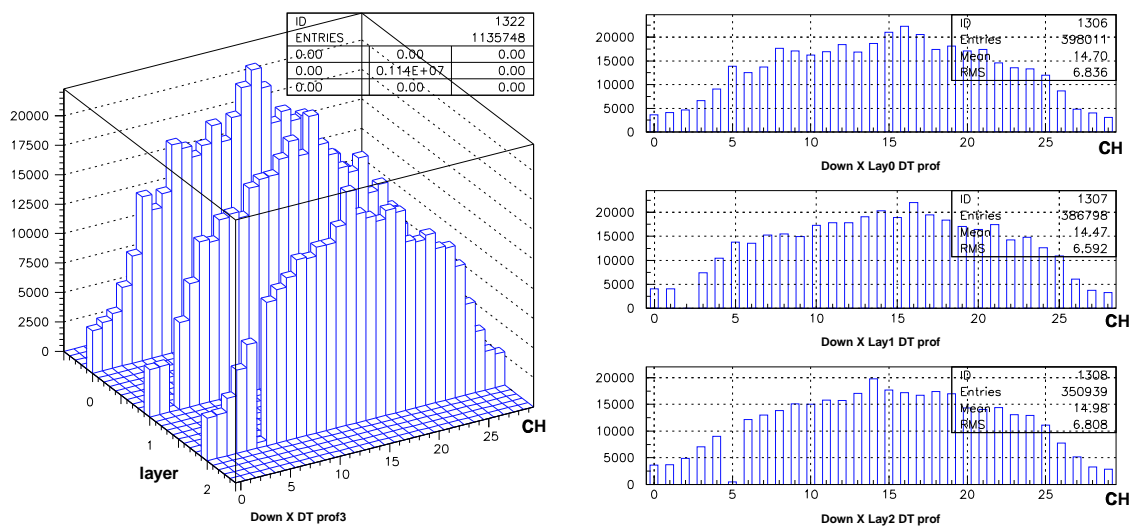


図 6.2: 下段 X 方向の Drift Tube のヒット分布 (左 : 全層、右 : 各層)

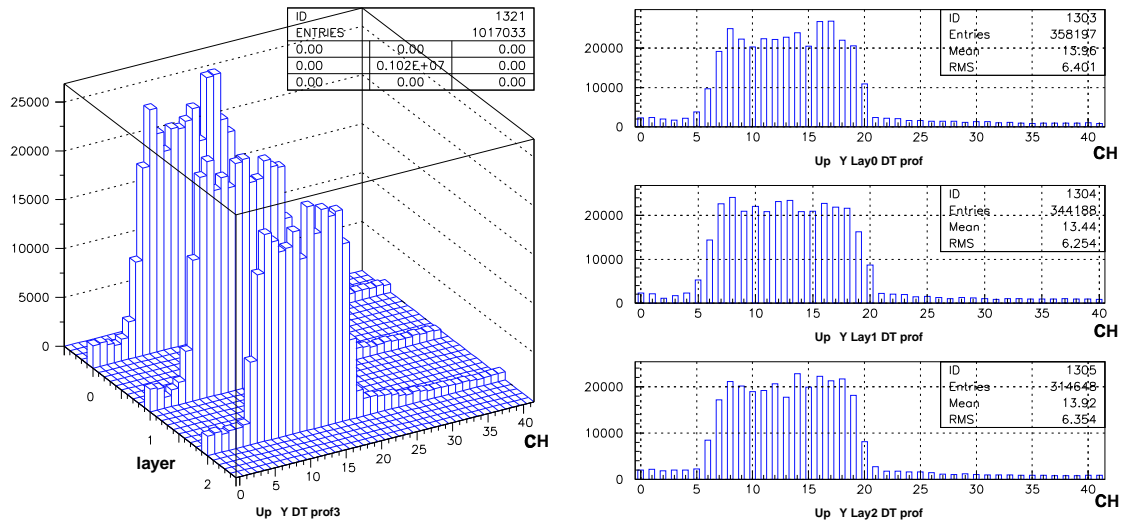


図 6.3: 上段 Y 方向の Drift Tube のヒット分布 (左 : 全層、右 : 各層)

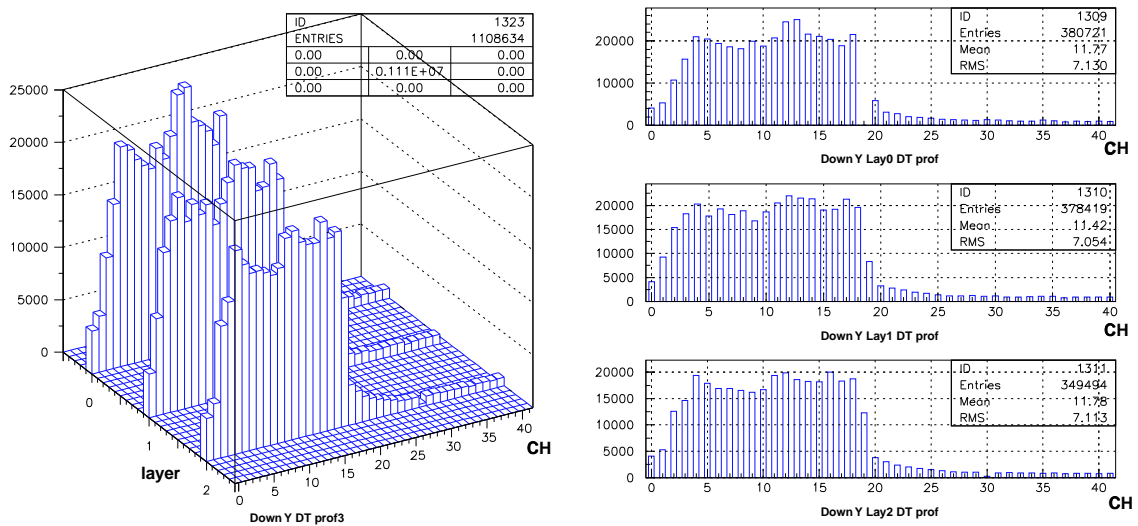


図 6.4: 下段 Y 方向の Drift Tube のヒット分布 (左 : 全層、右 : 各層)

6.1.2 Tracking

前節でも述べたように TGC の検出効率、及び一様性を測定するためには、Drift Tube による宇宙線ミュオンの飛跡の再構築は必要不可欠である。そのために、Drift Tube の時間情報 (T_{TMC} : TMC の時間情報) から空間情報 ($X(t)$: Drift Length) に変換しなければならない。この変換は、Event Building 時に行われ、その変換式 (X-T Relation) は

$$X(t) = P_2 t^2 + P_1 t$$

$$t = C(T_0 - T_{\text{TMC}})$$

と与えられる。ここで、 C は TMC カウントの値と時間の変換定数 0.78 ns/count である。

ここで、上下 XY の各 3 層の Drift Tube を用いて、変換式のパラメータを決定する。1 層目と 3 層目の Drift Tube から宇宙線ミュオンの飛跡を再構築し、2 層目の X を決める (図 6.5 参照)。この X と 2 層目の時間情報をプロットし、X-T Relation を求める。新たに出てきた $X'(t)$ を使って、再び 1 層目と 3 層目の Drift Tube から宇宙線ミュオンの飛跡を再構築し、2 層目の X を決める。これを X-T Relation が収束するまで繰り返す。始めに仮定する関数としては、過去の結果から $P_1 = 5.1 \times 10^{-2} \text{ mm/ns}$ 、 $P_2 = -2.9 \times 10^{-5} \text{ mm/ns}^2$ とした。[12]

また、TMC で読み出された時間情報はトリガー信号に対する相対的な時間情報であるため、TMC の時間情報からドリフト時間に直すために T_0 を求めてやる必要がある。この T_0 は、Drift Tube の TMC からの時間分布を見ることで決定でき、最も早い信号の時間を T_0 とする。

このような議論により決定された上下 XY 各層での各パラメータを表 6.1 にまとめる。

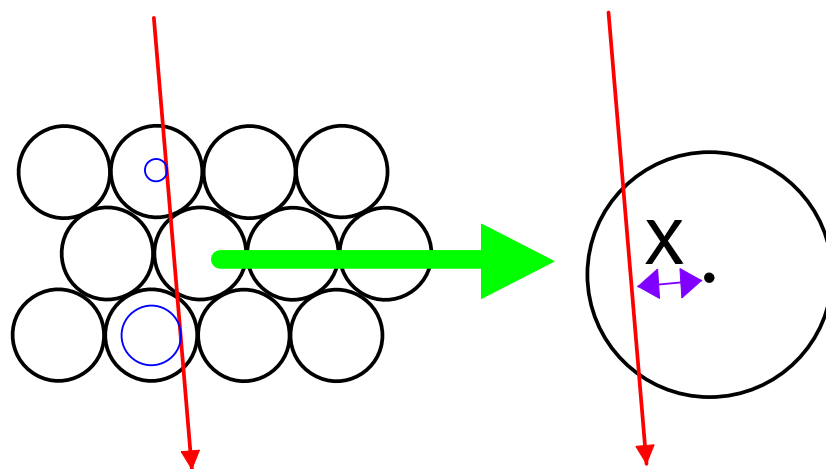


図 6.5: X の決定

	T_0 (count)	P_1 (mm/ns)	P_2 (mm/ns ²)
上段 X	1218	8.2×10^{-2}	-7.3×10^{-5}
下段 X	1218	7.2×10^{-2}	-5.2×10^{-5}
上段 Y	1205	7.9×10^{-2}	-6.6×10^{-5}
下段 Y	1205	7.1×10^{-2}	-5.0×10^{-5}

表 6.1: Drift Tube の各層における X-T Relation のパラメータ

この変換式により求められた Drift Length を用いて、X-T Relation の評価を行った。

上下XY方向の各3層の Drift Tube の Drift Length を上から順に X_0 、 X_1 、 X_2 と定義すると、図 6.6 のような関係式が導かれる。

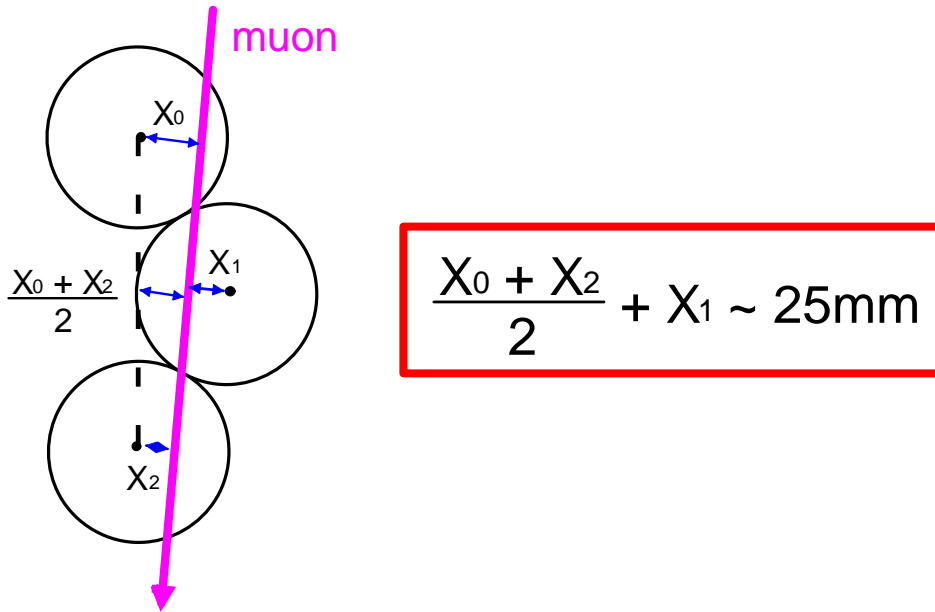


図 6.6: 3層の Drift Length の相関

$\frac{X_0+X_2}{2}$ と X_1 の相関を図 6.7、6.8、6.9、6.10 に示す。これらの図は、図 6.6 のように宇宙線ミュオンが1層目と3層目のワイヤーの右側を通過し、2層目のワイヤーの左側を通過したもの(又は、その反対)についてをプロットしたものである。図 6.7 は、上段 X 方向を向いた Drift Tube をのものであり、左図は、横軸に $\frac{X_0+X_2}{2}$ 、縦軸に X_1 を取ったもの、右図は、横軸に $\frac{X_0+X_2}{2} + X_1$ を取ったもので、左図の射影である。図 6.8 は、下段 X 方向を向いたもの、図 6.9 は、上段 Y 方向を向いたもの、図 6.10 は、下段 Y 方向を向いたものである。

どの層においても $\frac{X_0+X_2}{2} + X_1 = 25$ のラインが明白に見受けられる。このラインに直交するようなラインについては、Drift Tube が同じタイミングでなったものであり、クロストークであると考えられる。

Resolution については、まず、各層の右図においてプロットされたもの (R) は、

$$R = \frac{X_0 + X_2}{2} + X_1$$

である。この R の分布の誤差を σ_R 、各 Drift Tube の位置精度は一様として、その誤差を σ とすると、

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial X_0}\right)^2 \sigma^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2}\right)^2 \sigma^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_1}\right)^2 \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{4} + \frac{\sigma^2}{4} + \sigma^2 = \frac{3}{2} \sigma^2$$

よって、

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_R$$

どの層においても $\sigma_R \sim 1.8\text{mm}$ であるので、Drift Tube 1 本の Resolution は $\sim 1.5\text{mm}$ となる。Drift Tube の位置分解能は 1mm であるため、現時点では、要求されている分解能を達成していない。このため、さらなる X-T Relation の改良が今後の問題となる。

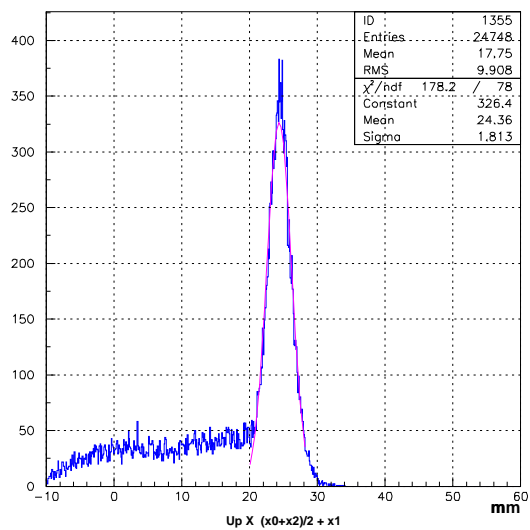
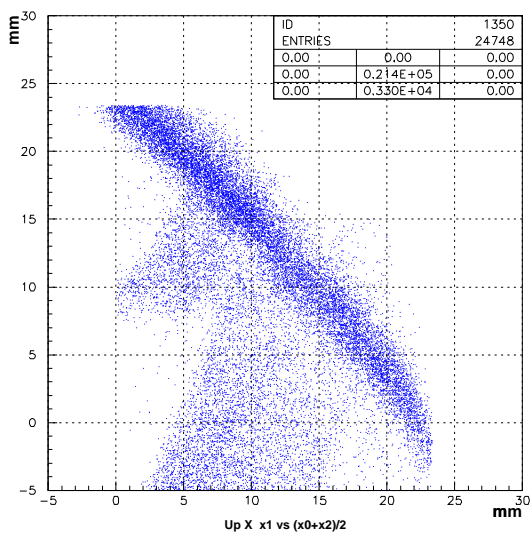


図 6.7: 上段 X 方向の Drift Length の相関 (左 : X_1 vs $\frac{X_0+X_2}{2}$ 、右 : 左図の射影)

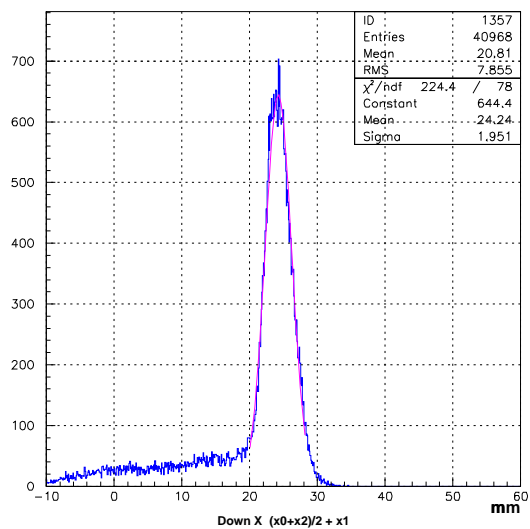
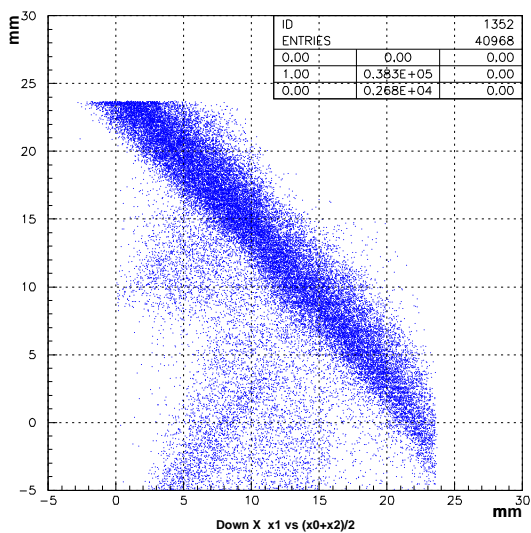


図 6.8: 下段 X 方向の Drift Length の相関 (左 : X_1 vs $\frac{X_0+X_2}{2}$ 、右 : 左図の射影)

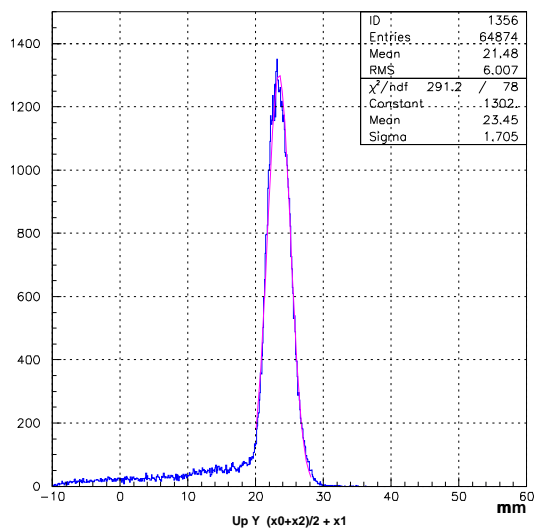
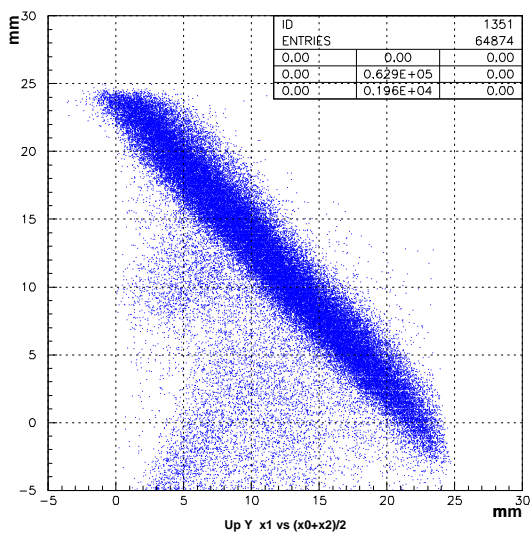


図 6.9: 上段 Y 方向の Drift Length の相関 (左 : X_1 vs $\frac{X_0+X_2}{2}$ 、右 : 左図の射影)

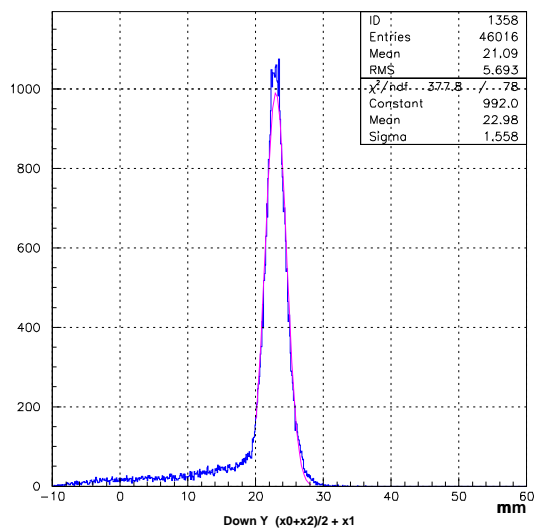
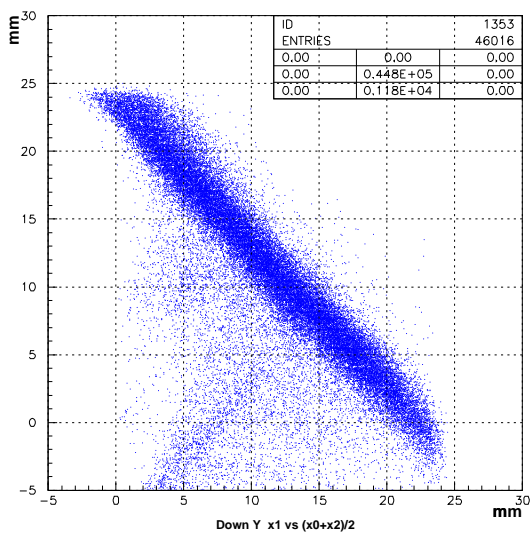


図 6.10: 下段 Y 方向の Drift Length の相関 (左 : X_1 vs $\frac{X_0+X_2}{2}$ 、右 : 左図の射影)

6.1.3 TGC

TGCの検出効率、及びその一様性を測定する前に、TGCのヒット分布を見ることで、大まかな判定が可能である。そのため、SWINEから読み出したTGCの各層のヒット分布について調べる必要がある。

図6.11、6.12にTGCのヒット分布を示す。図6.11はDoubletのもので、図6.12はTripletのものであり、上図はワイヤー方向、下図はストリップ方向のものを示している。

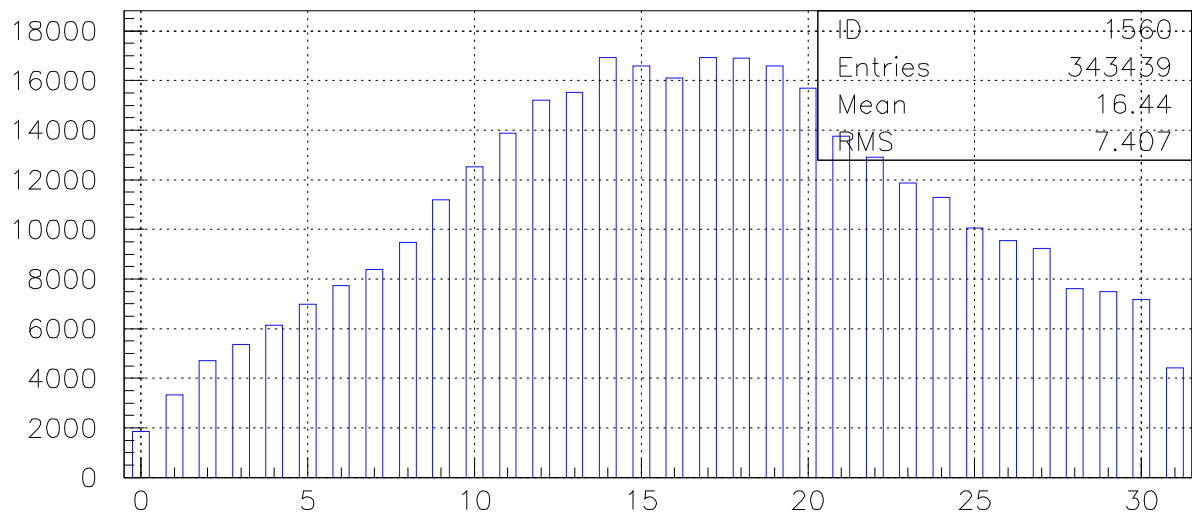
TGCのワイヤー方向、ストリップ方向共に、ノイズが乗っているチャンネルが存在するものの、Drift Tubeのヒット分布から得られた結果と一致していることがわかる。ストリップ方向は、Scintillation Counterに対して水平になるように置かれているため、Scintillation Counterでカバーされていない領域には、ヒットが少ないことが見受けられる。また、Tripletのワイヤー方向のヒット分布に関しては、24チャンネルしかないため、24チャンネル以降にヒットが存在しない。

6.1.4 Event Display

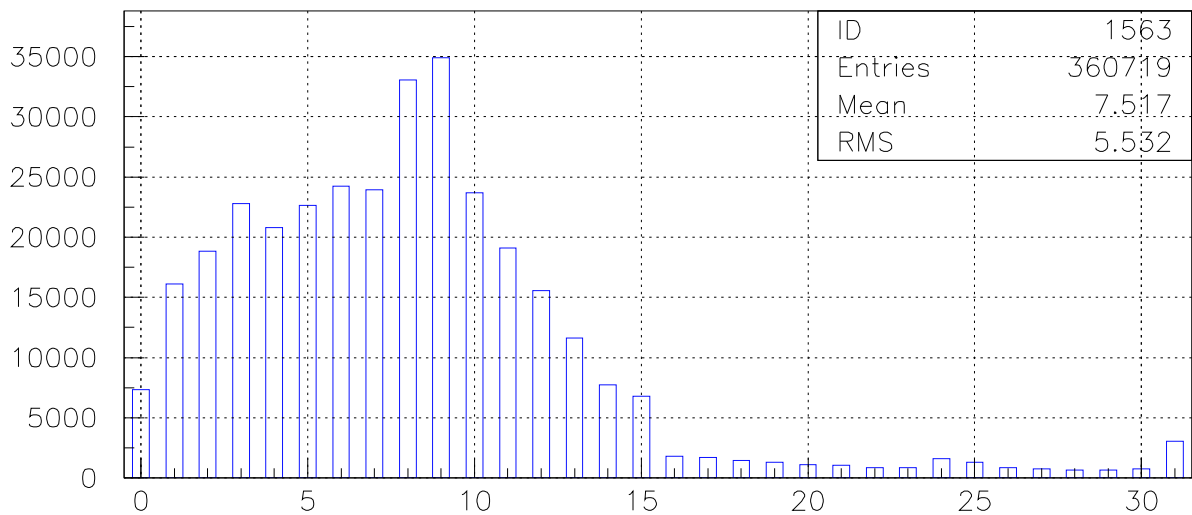
Event Displayでは、各検出器にヒットの有無とTrackingの妥当性を視覚的に確認することができる。

図6.13と6.14にその一例を示す。Scintillation CounterとTGCは、ヒットがあったチャンネルに色が塗られ、Drift Tubeは、Drift Lengthに対応した半径の円がワイヤーを中心に描かれ、それらから導出されたTrackが描かれる。

図6.13 (XZview)は、TGCをストリップ側から見たもので、Trackingにより導出したTrack上に全ての検出器のヒットがあることが確認できる。図6.14 (YZview)は、TGCをワイヤー側から見たもので、こちらも、Trackingにより導出したTrack上に全ての検出器のヒットがあることが確認できる。また、Event Displayは、Multi Eventに対応しているため、Track上のTGCのヒットを見ることで、大まかな検出効率をみることができる。

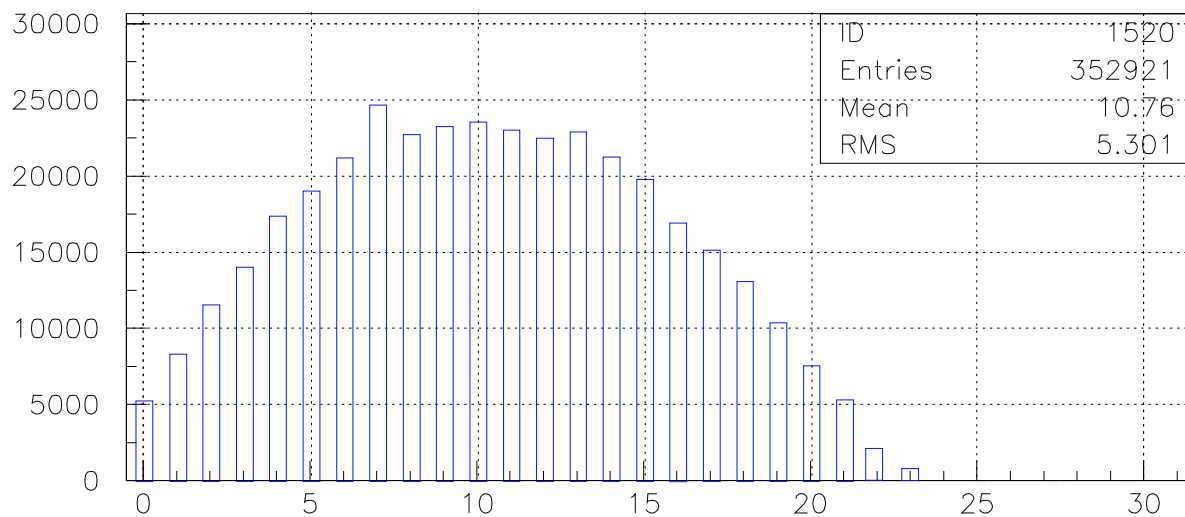


No.6 lay0 Wire prof

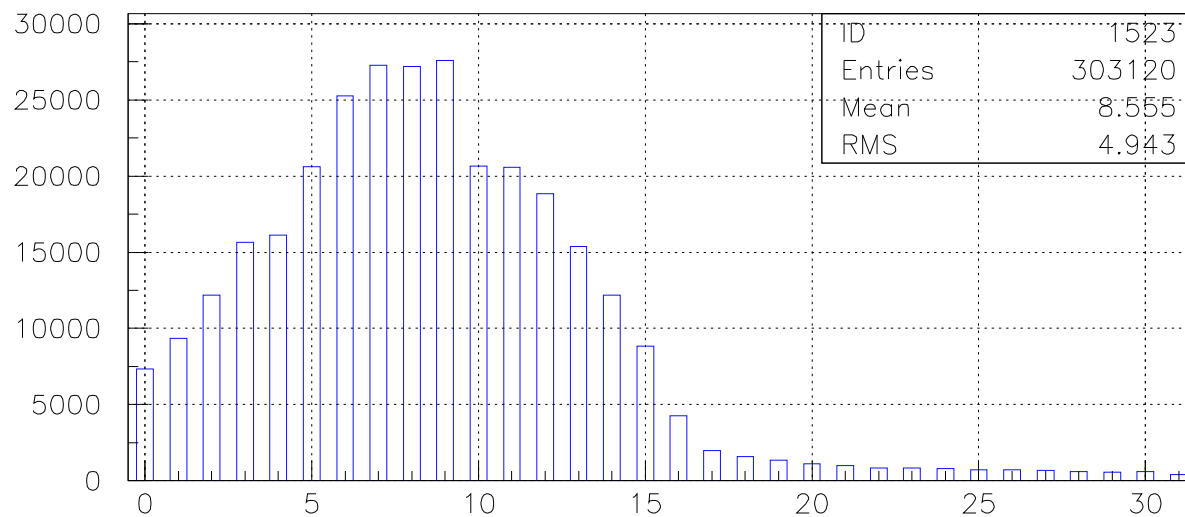


No.6 lay0 Strip prof

図 6.11: TGC Doublet のヒット分布 (上図: ワイヤ方向、下図: ストリップ方向)



No.2 lay0 Wire prof



No.2 lay0 Strip prof

図 6.12: TGC Triplet のヒット分布 (上図: ワイヤ方向、下図: ストリップ方向)

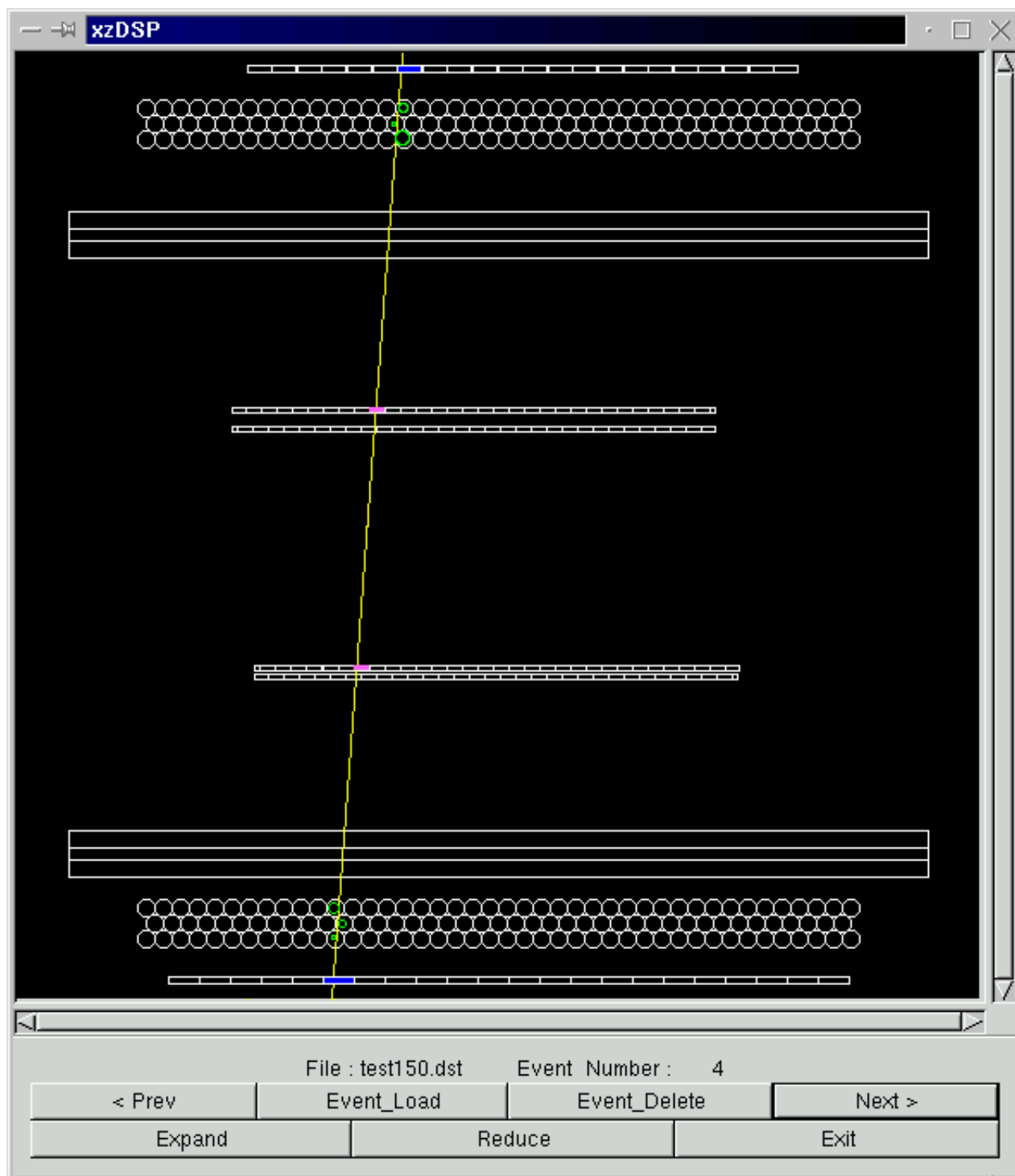


図 6.13: Event Display (XZview : ストリップ方向)

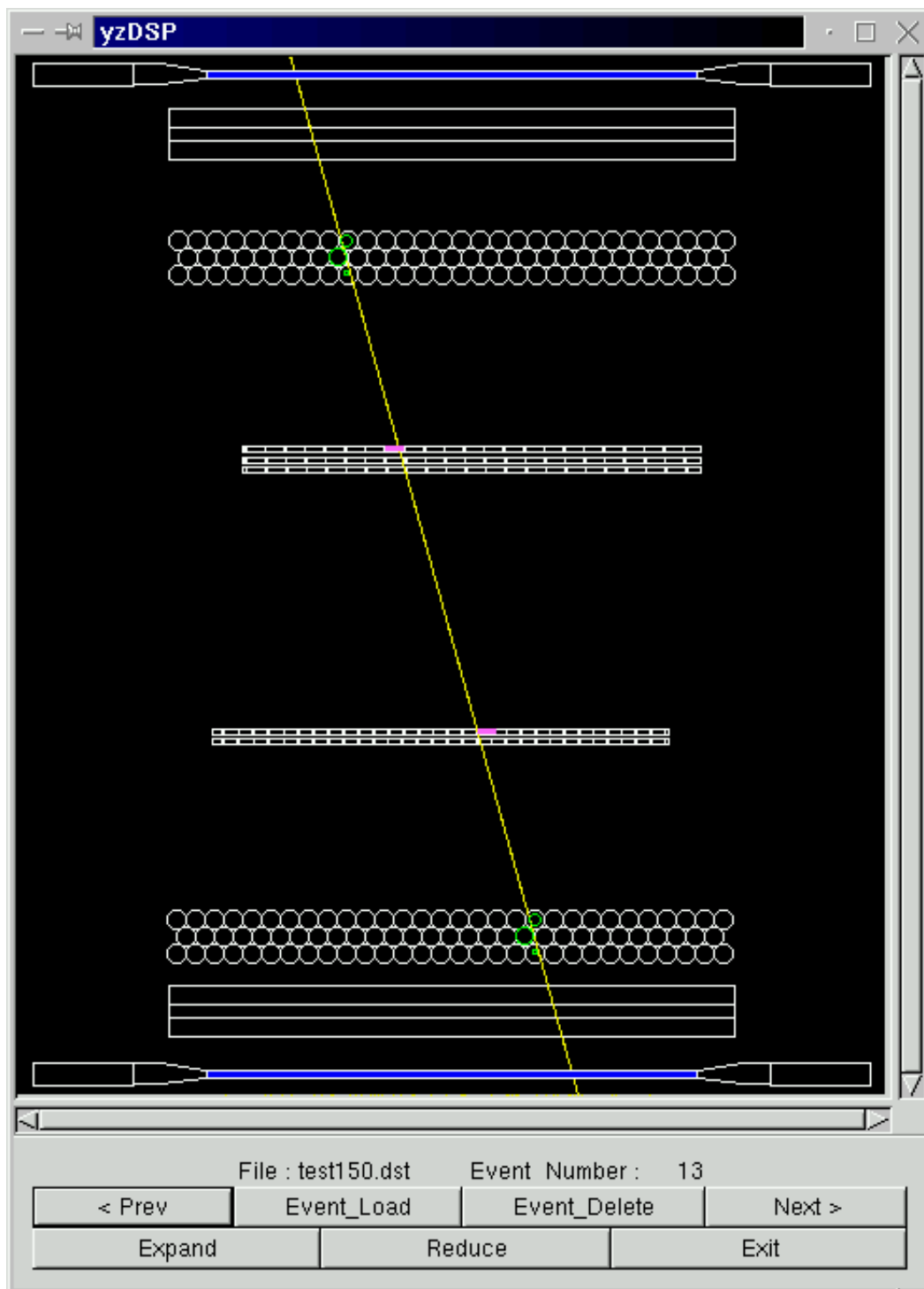


図 6.14: Event Display (YZview : ワイヤー方向)

6.2 DAQの実装結果

今回は、検査設備試運転の段階ではあるが、全節の結果から、第4章で述べた設計により開発したDAQシステムの動作、性能は証明された。長期間に渡るDAQに関しては、コインシデンスの頻度が約7Hzという状況下において、約1日間データ収集を行い(約500k events/日)、安定に誤動作なくデータ収集が行われることも確認することができた。前章のビームテストでのDAQシステム、及び解析ソフトウェアの実装により、動作、性能が確認された点に加えて、検査設備でのDAQシステム、及び解析ソフトウェアの実装により、動作、性能が確認された点についてまとめる。

- ネットワークに分散したシステム
- ネットワーク上に分散した各読み出しプロセスの Interrupt & I/O Register モジュールを用いた通信
- SWINE からのデータ読み出し
- NFS を利用したデータ転送
- 3つの Raw Data を1つにまとめる Event Building の動作
- データ収集から解析までの一連の流れ

これらに加えて、

- イベント・フィルタの動作
- Event Building 時のデータ変換レベルの動作
- コインシデンスの頻度が 150Hz まで、DAQ はイベントの取りこぼしなく動作

についても確認することができている。また、Scintillation Counter 全数稼働で、コインシデンスの頻度は 30Hz と見積もられているため、本格的に検査設備が稼働し始めても、DAQ システムは確実に動作すると考えられる。

第7章 結論と今後の計画

7.1 結論

KEKにて量産されているTGCは、検査にかけられ、検査に合格したものだけがCERNに輸送される。その検査設備に必要なデータ収集(DAQ)システムの設計、開発、及び解析ソフトウェアの開発を行った。それぞれの特徴について以下に述べる。

まず、DAQシステムの開発にあたり、以下の2つの基本的な方針を採用した。

ネットワークに分散したシステム

本DAQシステムは、Fast Ethernetを用いたネットワーク上にデータ収集を行うプロセスを分散して配置し、さらに、解析プロセスも分けたことにより、処理能力を向上させる。加えて、簡単にシステムを拡張することができるスケーラビリティも持つことができる。

コンピュータにPCの採用

PCにLinuxを搭載することで、高性能で、汎用性のあるソフトウェアの開発を行う。また、拡張性の高いシステムを構築することが可能となる。

この2つの方針に基づき、以下のようにDAQシステムを構成した。

VMEモジュールへのアクセス

PCの採用により、PCとVMEをPCI-VME bus Adaptorで繋ぐ構成にした。PCI-VME bus Adaptorで繋ぐことにより、VMEに搭載される各モジュール(TMC、PORQ、HOG、interrupt & I/O Register)をPCでコントロールできる構成にした。

ネットワーク上に分散した各読み出しプロセスの同期

ネットワークに分散した3台のPC上で行うデータ読み出しのプロセスは同期をとる必要があるが、各プロセスがアクセスするVMEクレートにInterrupt & I/O Registerモジュールを搭載し、Interrupt & I/O Registerモジュールを用いて各プロセスは通信を行い、同期をとる構成にした。Interrupt & I/O RegisterモジュールのPollingによるデータ収集を行い、安定性の高いシステムとなる。

NFSを利用したデータ転送

PCにLinuxを搭載し、Fast Ethernetを用いたネットワークで繋ぐことで、UNIX系OSに標準装備されているNFSを利用することができる。これにより、安定で信頼性の高いデータ転送を簡単に行うことができる。データ収集プロセスから解析プロセスへのデータの受渡しは、ファイルを介して行われるため、データ転送のプロセスが不要となる。

解析ソフトウェア

データの読み出しプロセスと解析プロセスは、ファイルを経由して、動作する構成にした。ソフトウェアの各プロセスは疎結合で動作させることで、DAQシステムの保守性を向上させ、また、解析ソフトウェアの拡張性も向上させた。

さらに、高性能な PC を活かし、処理可能な部分をソフトウェアに担当させ、DAQ システムの能力の向上させる設計にした。その設計は以下のようなものである。

イベント・フィルタ

Drift Tube のヒットパターンを判別し、フィルタをかける処理を、データ読み出しプロセスが行うようにした。こうすることで、効率的な読み出しを行うことができ、無駄なデータが減らされ、ネットワークを通じたデータ転送や、それ以降の処理にかかる負担の軽減につながる。

Event Building

Raw Data を FLAG で囲まれたブロックを階層構造にすることで、Event Building 時にデータエラーを検知し、データの復旧を容易にした。

Data Conversion

VME の各モジュールとチャンネルがどの検出器のどのチャンネルに対応しているかが書かれた Configuration ファイルを用意することで、Data Conversion を容易に行えるようにした。

このように、本検査設備で用いるデータ収集システム、及び解析ソフトウェアは、安定性、保守性、拡張性の高いものであることがわかる。また、構想に基づいて設計、開発したシステムが、動作することも確認できた。

7.2 今後の計画

現時点では、検査設備は試運転の段階であるが、今後、定期的に KEK から量産された TGC が搬送されてくるため、そのときまでに、本格的に検査設備を稼働させなければならない。

また、実際に検査が始まると流れ作業となるため、誰にでも行えるような作業手順を確立する必要がある。

目次

2.1	Higgs 粒子の質量と生成断面積	7
2.2	Higgs 粒子の質量と各崩壊過程への分岐比	7
2.3	Higgs 生成の Feynman Diagram	8
2.4	ATLAS 測定器における Higgs 粒子発見ポテンシャル	9
2.5	ATLAS 測定器	10
2.6	ミュオントリガー検出器	12
2.7	ミュオントリガーの仕組み (Longitudinal view)	12
2.8	ATLAS 測定器における TGC の配置図 (R-Z 平面図)	13
2.9	TGC3 の Z 方向から見た配置図	14
2.10	TGC の構造 (断面図)	15
2.11	ワイヤー・カソード間隔を変化させたときの Pulse Height の変化	17
2.12	TGC (T8) の構造 (平面図)	18
2.13	Doublet(右) と Triplet(左) の断面図	19
2.14	TGC のワイヤー方向の読み出し	19
2.15	日本で量産される TGC のタイプと台数	21
3.1	TGC のガスシステム	23
3.2	TGC のガス分配、及び過圧防止システム	23
3.3	宇宙線テストでの検査設備の概念図	25
3.4	トリガー回路	26
3.5	Drift Tube による Tracking	27
3.6	検査設備の架台部分 (単位は mm)。TGC はバレット上に置かれる。	27
4.1	検出器、エレクトロニクスの構成	30
4.2	TMC の原理図	31
4.3	TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode)	31
4.4	SWINE におけるシグナルのタイミング	32
4.5	コンピュータ環境	33
4.6	読み出しシーケンス	36
4.7	データフローチャート	41
4.8	Event Display の一例	45
4.9	Efficiency Map Display	46
5.1	ビームライン上での各検出器の配置 (top view)	47
5.2	Drift Chamber の構造	49
5.3	ビームテストでの DAQ システムの構成	51
5.4	ビームテスト用読み出しプロセスのシーケンス	53

5.5	ビームテストでのデータフローチャート	55
5.6	TGC のヒットした CH	58
5.7	XZview(top view)	60
5.8	Doublet(D2) の XYview	61
5.9	Triplet(T3) の XYview	62
5.10	TGC ワイヤーの TDC 分布	63
5.11	TGC ストリップの TDC 分布	63
5.12	TGC ワイヤーの ADC 分布	64
5.13	TGC ストリップの ADC 分布	64
5.14	検出効率の印加電圧依存性	65
5.15	検出電荷量分布の印加電圧依存性	66
5.16	TGC の X 方向のスキャン場所	67
5.17	TGC の X 方向入射位置依存性	68
6.1	上段 X 方向の Drift Tube のヒット分布	71
6.2	下段 X 方向の Drift Tube のヒット分布	71
6.3	上段 Y 方向の Drift Tube のヒット分布	72
6.4	下段 Y 方向の Drift Tube のヒット分布	72
6.5	X の決定	73
6.6	3 層の Drift Length の相関	74
6.7	上段 X 方向の Drift Length の相関	75
6.8	下段 X 方向の Drift Length の相関	75
6.9	上段 Y 方向の Drift Length の相関	76
6.10	下段 Y 方向の Drift Length の相関	76
6.11	TGC Doublet のヒット分布 (上図：ワイヤー方向、下図：ストリップ方向)	78
6.12	TGC Triplet のヒット分布 (上図：ワイヤー方向、下図：ストリップ方向)	79
6.13	Event Display (XZview：ストリップ方向)	80
6.14	Event Display (YZview：ワイヤー方向)	81

表 目 次

2.1	LHC 加速器の主要パラメータ	6
2.2	Higgs 粒子を探索する主な崩壊モード	8
2.3	エンドキャップ部におけるバックグラウンドレート	15
2.4	TGC のパラメータ	16
2.5	日本で製作される TGC のタイプと台数	20
4.1	Raw Data Format	39
5.1	ビームテストにおける Raw Data Format	54
6.1	Drift Tube の各層における X-T Relation のパラメータ	73

参考文献

- [1] 尼子勝哉、「大型陽子・陽子衝突型加速器 (LHC) 計画とその物理」：日本物理学会誌 Vol.52、No.7 (1997) 508-516
- [2] Y.Arai and M.Ikeno, *32Ch TMC-VME Module User Manual*
- [3] Yasuo Arai, *DAQ6U Program Manual*
- [4] KEK 回路室、「MWPC READOUT SYSTEM」
- [5] Model 616 Adaptor Hardware Manual, Bit 3 Computer Corporation
- [6] 林栄精器株式会社、「VME INTERRUPT & I/O REGISTER MODEL RPV-130 取扱説明書」
- [7] Natalia Kruszynska, *VME Host Bridge for Linux on PC*
<http://www.nikhef.nl/user/natalia/projects/vmehb.html>
- [8] 仲吉一男、安芳次、「PC/Linux による VMEbus ベースのデータ収集システムの構築」
- [9] Eric Harlow 著 SHOEISHA、「GTK+/GDK による Linux アプリケーション開発」
- [10] 神戸大学 鈴木修、修士学位論文「ATLAS ミューオントリガー用大型 TGC 製作と検査システム」
- [11] 神戸大学 林健一、修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガー用大型 Thin Gap Chamber 検査システムの開発」
- [12] 神戸大学 塚原知宏、修士学位論文「ATLAS ミューオントリガー用大型 TGC 検査ステーションの構築と性能評価」
- [13] 東京大学 長島壮洋、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」

謝辞

本研究を進めるにあたり、適切な御指導並びに助言を与えて下さいました武田廣教授、野崎光昭教授、蔵重久弥助教授、川越清以助教授、神戸大学工学部本間康浩助教授、石井恒次助手、越智敦彦助手に深く感謝します。

高エネルギー加速器研究機構での研究活動にあたり、様々な助言、御指導を下さいました近藤敬比古教授、岩崎博行助教授、田中秀治助手に感謝します。また、研究活動全般にわたり適切な御指導をしていただいた東京大学素粒子物理学国際研究センター小林富雄教授、石野雅也助手、信州大学竹下徹助教授に感謝します。

そして、研究室配属当初から適切な御指導をして下さった一宮亮氏に感謝します。

最後に、共に研究活動を進めて行きながら、惜しめない助力と助言を与えてくれ、励ましてくれました東京大学素粒子物理学国際研究センターの長島壮洋氏(現在、理科学研究所)、南條創氏、中村佳央氏、信州大学の山下英敏氏、神戸大学の奥村和恵氏、杉本拓也氏、美馬孝行氏、荒滝陽二氏、藤田豊氏には、感謝の言葉も尽きません。本当にありがとうございました。