

修士学位論文

ATLAS 実験用 TGC 検査設備における
データ解析システムの開発

神戸大学自然科学研究科物理学専攻
美馬 孝行

平成 15 年 2 月

概要

世界最高エネルギーを実現する大型陽子陽子衝突型加速器 (LHC) 計画は、欧州素粒子物理学研究所 (CERN) において 2007 年稼動を予定している。LHC に設置される測定器の一つに、主として Higgs 粒子・SUSY 粒子の探索を目指した ATLAS 測定器がある。ATLAS は汎用の測定器であるが、ミュオンスペクトロメーターはミュオンがほとんどの重要な物理にかかわっていること、およびバックグラウンドの少ない綺麗なイベントを取り出すことができるため、Higgs 発見等に重要な貢献をすると考えられている。我々 ATLAS Japan ミュオングループは、その中の一つである TGC (Thin Gap Chamber) の量産を担当しており、全部で 1056 台 (480 ユニット) 分製作する。

この大規模な量産は茨城県の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われているが、LHC 実験において測定器としての TGC の動作・性能を保証するため、量産された TGC それぞれに対する検査が必要不可欠である。検査は神戸大学で 2 年にわたって行われる。このため、長期運用可能で大規模な検査設備が必要になり、膨大な量の検査結果を解析するシステムを構築しなければならない。そこで TGC 検査設備のための解析システムの設計・開発を行った。

目次

第 1 章	Introduction	3
第 2 章	ATLAS 実験	5
2.1	LHC 計画	5
2.1.1	LHC の物理	5
2.2	ATLAS 測定器	7
2.3	ミューオントリガー検出器	10
2.4	TGC (Thin Gap Chamber)	12
2.4.1	TGC の構造	12
2.4.2	TGC の量産と検査	13
第 3 章	検査設備	18
3.1	TGC 受け入れ	18
3.2	検査	18
3.2.1	ガスリークテスト	20
3.2.2	HV テスト	22
3.2.2.1	ガスシステム	23
3.2.2.2	HV・モニターシステム	23
3.2.3	宇宙線テスト	23
3.2.4	TGC 搬出	23
第 4 章	宇宙線テストセットアップ	26
4.1	全体像	26
4.2	多重散乱による飛跡の曲がり	27
4.3	Scintillation Counter	28
4.4	Drift Tube	28
4.4.1	充填ガス・印加電圧	31
4.4.2	x-t relation	33
4.5	TGC	41
4.6	DAQ system	41
4.6.1	ハードウェア環境	42
4.6.1.1	TMC	42
4.6.1.2	SWINE	44
4.6.1.3	コンピュータ環境	44
4.6.2	データ読み出しプロセス	46
4.6.2.1	VME へのアクセス	46
4.6.2.2	ソケット通信による PC 間の通信	46
4.6.2.3	NFS 経由のデータ転送	48

4.6.2.4	Logging	48
4.6.3	データ解析プロセス	48
第 5 章	宇宙線テスト解析・結果	53
5.1	解析の流れ	53
5.1.1	Raw Data	53
5.1.2	Data Conversion	55
5.1.2.1	Data Format	55
5.1.3	Tracking	56
5.1.3.1	Hit Pattern Selection	56
5.1.3.2	直線の決定	59
5.1.3.3	DataFormat	59
5.1.3.4	Track の評価	61
5.1.4	Analysis	63
5.1.4.1	Track Constraint	64
5.1.4.2	Track の有効範囲	64
5.1.4.3	Data Format	65
5.1.5	Positioning	65
5.1.5.1	tgc.cfg	66
5.1.6	検査期間	67
5.2	解析結果	67
5.2.1	検出効率	67
5.2.1.1	エフィエンシーマップ	67
5.2.1.2	HV curve	70
5.2.2	TimeJitter	70
第 6 章	結論と今後の計画	72
	参考文献	76

第1章 Introduction

自然界の力には強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、重力の4つの種類がある。これらのうち重力以外の力についてまとめた理論として標準模型がある。現代素粒子物理学において標準模型は、これまで実験的に確かめられてきたすべての素粒子相互作用をきわめて良い精度で、破綻無く説明することができる。この標準模型が预言する素粒子の中で唯一の未発見粒子が Higgs 粒子である。素粒子の質量は Higgs 粒子との相互作用の強さとして記述され、質量の起源となっている。Higgs 粒子は、理論的に質量の上限が約 1TeV とされており、実験による発見が待ち望まれている。

欧州素粒子物理学研究所 (CERN) において、2007 年の稼動を目指して建設が進められている大型陽子陽子衝突型加速器 (LHC) は、Higgs 粒子の存在する可能性のある質量領域をくまなく探索できる加速器である。LHC 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 粒子をはじめとする新しい粒子の発見や、各種精密測定を可能とする汎用検出器であるが、単体でも高精度でミュオン運動量測定を行えるミュオンスペクトロメータを持つことが特徴の一つとなっている。ミュオンは重要な物理にかかわっており、透過力が強いことで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、膨大なバックグラウンドの中から興味のある現象のみを選別するトリガーが必要不可欠な技術となっている。そのため ATLAS 測定器ではミュオン専用のトリガー検出器を導入している。

ミュオントリガー検出器の一つに TGC (Thin Gap Chamber) がある。ATLAS Japan ミュオングループでは TGC の量産を担当しており、現在 KEK (高エネルギー加速器研究機構) で量産が進められている。LHC 実験の環境下で正しく安定に動作することが要求されるが、KEK で量産される製品としての各 TGC が、要求通りの動作を得られる物を保障するために、製作された TGC 全数に対して性能を確認することが不可欠となる。

そのため TGC 専用の検査設備を神戸大学に構築しており、量産された TGC は神戸大学での検査に合格したものだけが CERN に輸送される。検査項目はガスリークテスト、HV テスト、宇宙線テストである。ガスリークテストでは TGC のガス漏れをチェックし、HV テストでは高電圧 (HV) を印加するときの安定性をチェックし、宇宙線テストでは検出効率とその一様性・反応時間をチェックする。約 2m^2 の大きさの TGC 全 480 ユニットの 2 年にわたって検査するため、大規模な設備・システムが必要になる。

検査設備におけるもっとも重要な検査項目が宇宙線テストである。約 2m^2 の大面積を全面に渡って検査する必要があり、そのために宇宙線ミュオンを使用する。検査設備を構成する検出器で宇宙線ミュオンを検出し、回路を通して情報を読み出し、ソフトウェアを用いてその飛跡トラックを再構成することで TGC に対する宇宙線ミュオンの通過位置を特定し、その位置での検出効率を導出することで検査を行う。

宇宙線を用いる方法は加速器からのビームや線源を用いる場合と比べて広範囲をくまなく粒子が通過するという利点がある一方、レートが低く粒子のエネルギーにばらつきがあるという欠点を持つ。検査に用いる宇宙線ミュオンのエネルギーが一定ではなく、さらに検査設備が比較的大きな物質質量をもつため、飛跡トラックの再構成においてすぐれた位置分解能を実現する事は難

しい。しかし検査で要求されることは極めて局所的な範囲における検出効率ではなく、ある程度の大きな範囲における平均的な値に対する評価である。また、レートが低いことは検査期間が長くなるということを意味するため、位置分解能を多少犠牲にしても効率的に飛跡トラックを再構成することと、まったく見当違いの再構成を避けることが極めて重要な要請である。

宇宙線テストは決められたサイクルで進められるためデータ収集プロセスと解析プロセスは同じペースで行う必要があるが、解析プロセスとデータ収集プロセスは比較的独立性の高い設計になっている。これにより両プロセスを独立に同時進行を進めることが出来るため、設備全体としての処理能力を高めることを可能にしている。さらに解析プロセスを複数のステップに分け、ステップ同士の結合を疎にすることで、システムに保守性、拡張性を持たせることを可能にしている。

また検査は2年の長期にわたって行われ、TGCの検査にかかわる人すべてが実際の作業者となる。そのため長期運用可能な堅牢さを持ち、柔軟性があり、なおかつ誰にでも簡単に作業をこなせる操作性の良いシステムがのぞまれる。

以上のことから、効率的な宇宙線ミュオン飛跡トラックの再構成を中心とする解析システムを、長期にわたる検査における堅牢さと柔軟性を持ち、なおかつ操作性の良い形で実現しなければならない。本研究ではこのような要請のもと、検査設備における解析システムの設計・開発を行い、その実装を評価した。

本論文の構成は以下の通りである。

2章は「ATLAS 実験」として、LHC 加速器とそこで期待される物理を説明し、ATLAS 測定器の構成要素とその性能について触れ、さらに ATLAS 測定器の一部となる TGC について説明する。

3章は「検査設備」として、神戸大学で行われるすべての検査について、その行程に沿いながら簡単に説明する。

4章は「宇宙線テストセットアップ」として、宇宙線テストのために用意したセットアップの構成要素である各検出器、データ収集 (DAQ) システム、解析システムの設計を説明する。特に宇宙線ミュオン飛跡トラックの再構成のために用いるドリフトチューブの設定のための解析に関して詳しく説明する。

5章は「宇宙線テスト解析・結果」として、4章で述べたセットアップを用いて得られたデータをもとに進める解析の流れをデータのフォーマットや各プロセスとともにくわしく説明し、さらにドリフトチューブで再構成した飛跡の精度を評価する。最後に解析の結果導き出された検査結果について、結果の例を用いて考察する。

6章は「結論と今後の計画」として、本論文全体を総括し、今後の展開を述べる。

第2章 ATLAS 実験

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、大型陽子陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) が、2007 年の稼動を目指し準備が進められている。LHC 加速器は円形加速器であり、大型電子陽電子衝突型加速器 LEP (Large Electron Positron Collider) のトンネル内で現在建設が進められている。LHC の主要パラメータを表 2.1 に示す。LHC 加速器は重心系で 14 TeV の世界最高エネルギーと $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の高ルミノシティにより TeV エネルギー領域での素粒子実験を可能にする。

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	1.1×10^{11}
ルミノシティ	$10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	バンチの長さ	77 mm
入射エネルギー	450 GeV	衝突点でのビーム半径	15.9 μm

表 2.1: LHC 加速器の主要パラメータ [2]

LHC 加速器のような陽子陽子衝突型加速器では、陽子の質量が大きいためシンクロトロン放射によるエネルギー損失が電子の場合と比較して少なく、電子電子衝突型加速器に比べて高いエネルギーを実現しやすい。しかしその反面、陽子は内部構造を持つためバックグラウンドが大きいという特徴ももつ。そのため LHC に設置する測定器は入射粒子が高頻度である環境に耐え、膨大なバックグラウンドの中から希少なイベントを選別しなければならない。LHC の成否は各測定器の性能にかかっている。

2.1.1 LHC の物理

LHC で期待される物理は、標準模型の基本粒子である Higgs 粒子の探索、超対称性粒子の探索、top クォークの物理、B 中間子での CP 非保存の研究などと多岐にわたる。ここではその中で最も重要である Higgs 粒子の探索について述べる。

Higgs 粒子は標準模型における基本粒子であり、電弱相互作用での自発的対称性の破れのメカニズムを説明するためにその存在が必要とされる。図 2.1 に LHC における Higgs 粒子の生成断面積を示す。また Higgs 粒子は t クォークや W ボゾン、Z ボゾンのように質量の大きい粒子と強く結合するので、主な生成モードは図 2.2 のようになる。

さらに図 2.3 のように崩壊過程も Higgs 粒子の質量により変化するので、探索する主な崩壊モードも質量により異なる。

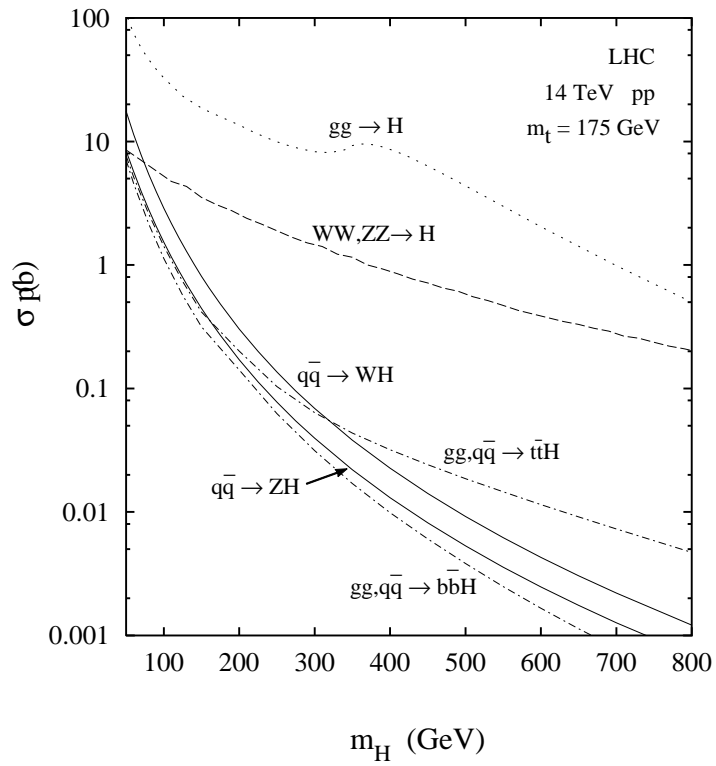


図 2.1: Higgs 粒子の質量と生成断面積

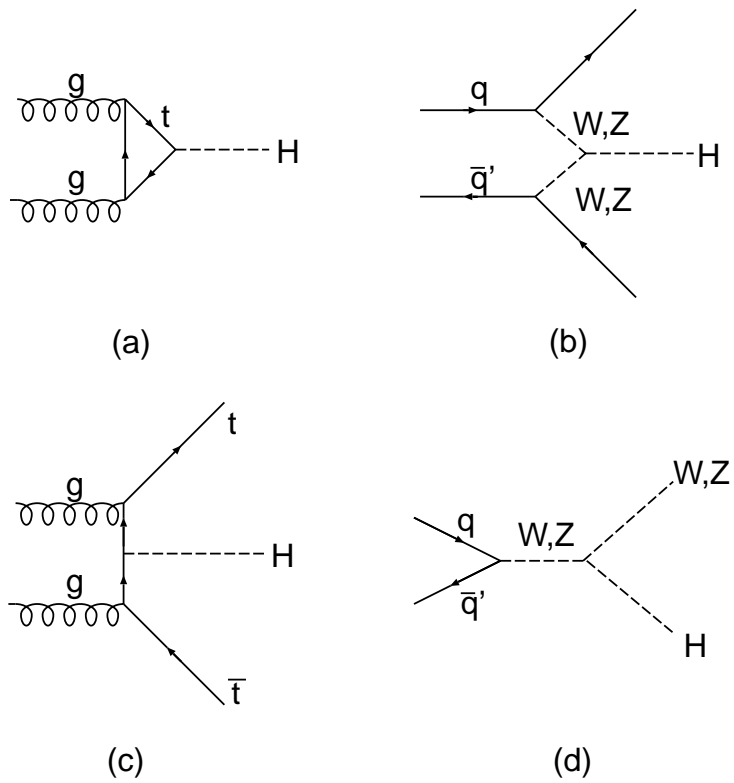


図 2.2: Higgs 生成の Feynman Diagram

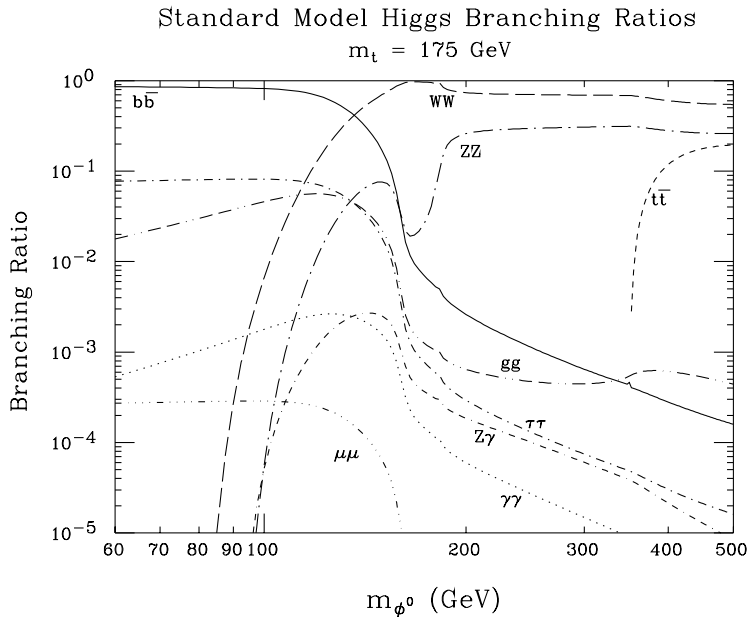


図 2.3: Higgs 粒子の質量と各崩壊過程への分岐比

- $2m_Z < m_H$

この質量領域では、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 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ことが重要となる。それぞれのレプトン対に対して不変質量が m_Z に一致することを要求し、さらに 4 レプトンの不変質量分布を見ることで明確な Higgs の不変質量ピークを探索する。しかし、500 GeV 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、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ や、 $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \nu jj$ を用いてイベント数を稼ぐことが必要となる。

- $120 \text{ GeV} < m_H < 2m_Z$

この質量領域では、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ を調べることが重要となる。 m_Z constraint は使えないが、4 レプトンの不変質量分布から Higgs 不変質量ピークを探索することができる。バックグラウンドとして、 $q\bar{q} \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^* \rightarrow 4l$ があるが、それほど多くはない。

- $80 \text{ GeV} < m_H < 120 \text{ GeV}$

この質量領域での崩壊は $b\bar{b}$ 崩壊が支配的であるが、陽子陽子素過程でも生成されるため大きなバックグラウンドを生じる。そのため有効にトリガーすることができない。したがって、分岐比 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 ($\gamma\gamma$ の質量分布) を調べることが重要となる。

2.2 ATLAS 測定器

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) 測定器 (図 2.4) は LHC 加速器に設置される測定器のひとつである。直径 22m、長さ 44m、総重量 7000 トンに及ぶ ATLAS 測定器は、LHC の持つ高いの重心系エネルギーと高いルミノシティを最大限に利用して、その中から目的の事象を選別でき

るように設計されている。また特定の物理事象に限定しない汎用測定器で、LHC の高ルミノシティにおいても、電子や 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、ミュオンなど多くのシグナルをバランスよく取り出し、精度のよい測定が出来るよう各検出器を配置している。

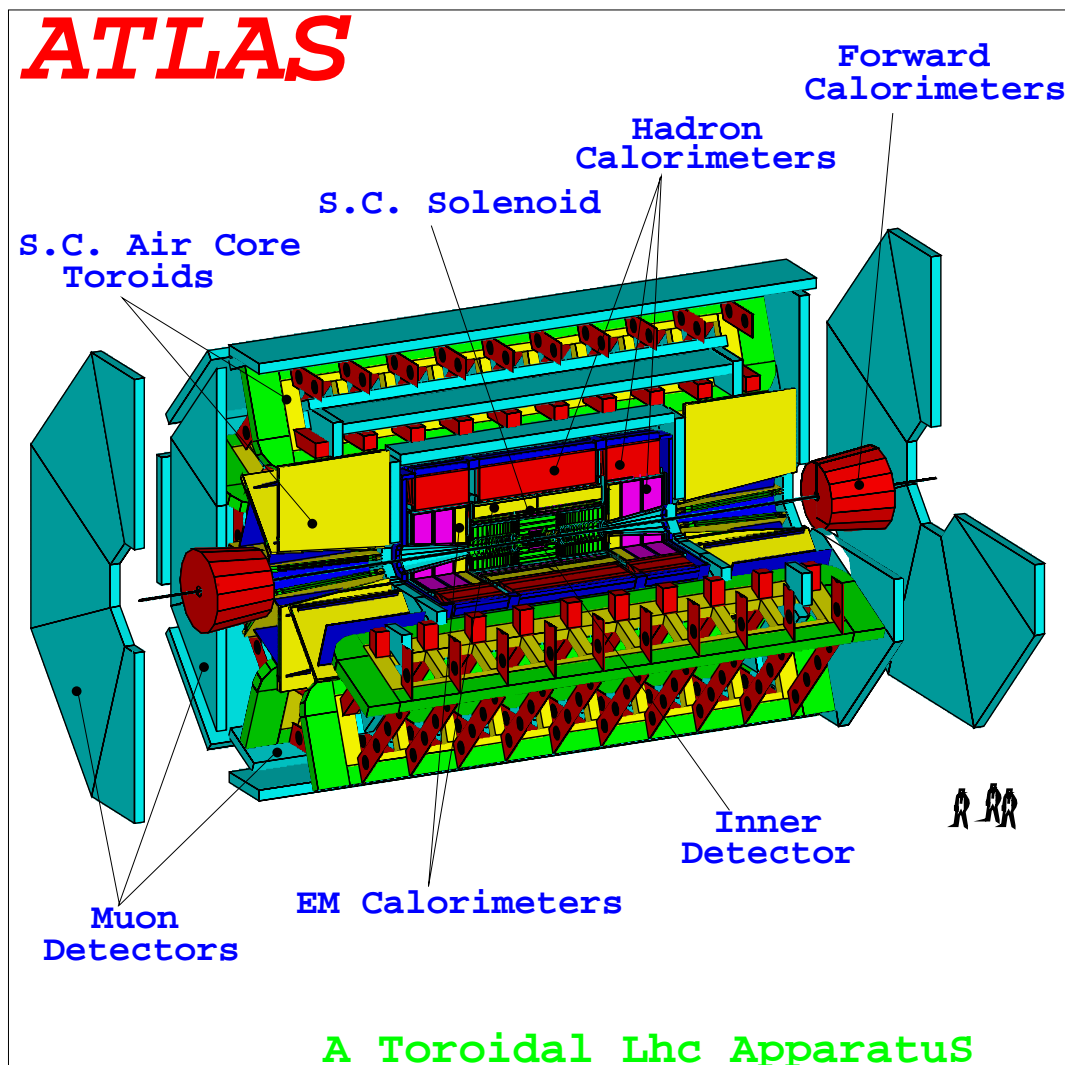


図 2.4: ATLAS 測定器

ATLAS 測定器は大きく分けると次の 3 つのパートから構成されている。

- 内部飛跡検出器
内部飛跡検出器はビームラインに最も近い場所に設置される検出器で、主な機能は、荷電粒子の飛跡認識、運動量測定、反応点測定および電子の識別である。バレル部ではビーム軸周りにピクセル検出器、シリコンストリップ検出器、遷移輻射ストロー検出器が同心円状に設置される。エンドキャップ部ではビーム軸と垂直に円盤上に設置される。
- カロリーメータ
カロリーメータは電子、 γ 線の同定とエネルギー測定、ハドロンのエネルギーおよび消失エネルギーの測定を行なう。内側に電子や γ 線のエネルギーを測定する電磁カロリーメータ

を設置し、外側にハドロンエネルギーを測定するハドロンカロリメータを設置する。電磁カロリメータは液体アルゴンを用いたカロリメータであり、ハドロンカロリメータは領域により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、銅の吸収体をもつ液体アルゴンカロリメータを用いている。

- ミューオン検出器

LHC が目的とする物理事象の多くの崩壊モードが荷電レプトンを含んでいるためミューオン検出が果たす役割は大きい。ミューオンはカロリメータの外まで突き抜けるため、ミューオン検出器は ATLAS 測定器の最も外側に設置される。また、内部飛跡検出器とは独立に広範囲にわたってミューオンの運動量を測定し、トリガーをかけることができるようになっている。ミューオン検出器は、ミューオンの飛跡を精密測定する MDT(Monitored Drift Tube) 及び CSC(Cathode Strip Chamber) と、ミューオンのトリガー信号を出す TGC(Thin Gap Chamber) 及び RPC(Resistive Plate Chamber) からなる。

LHC が高ルミノシティ ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) で約 1 年間稼働するとき、ATLAS 測定器において各崩壊モードで Higgs 粒子が発見されるポテンシャルを図 2.5 に示す。縦軸は予想される 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。縦軸の値が大きいほど Higgs の信号をバックグラウンドと明確に区別できることを表す。この図からもわかるように ATLAS 測定器は $80 \text{ GeV} \sim 1 \text{ TeV}$ 領域までの Higgs 粒子を探索することが可能である。

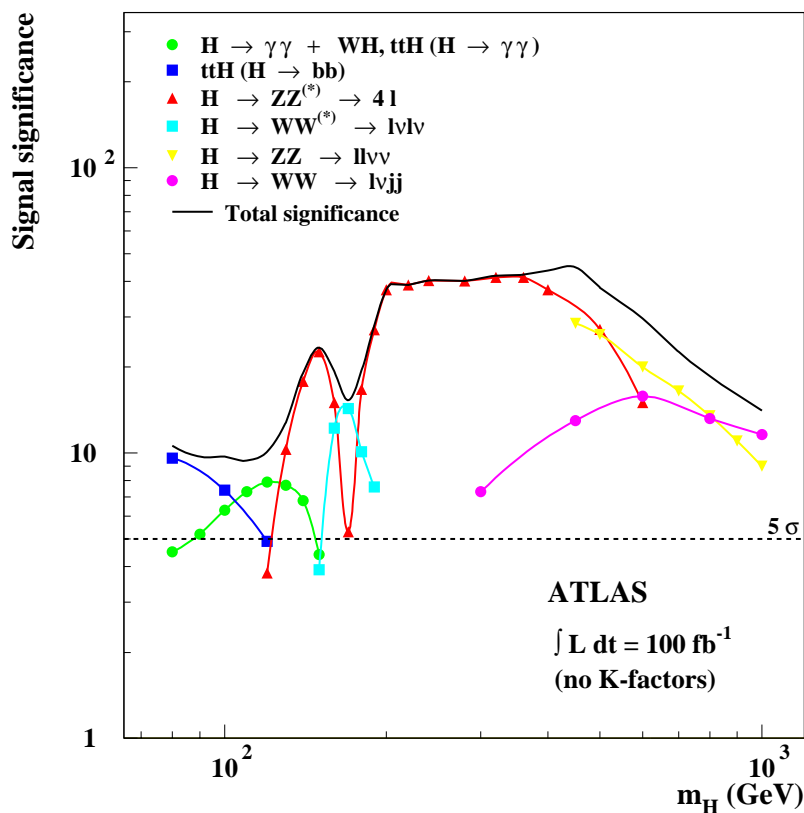


図 2.5: ATLAS 測定器における Higgs 粒子発見ポテンシャル

2.3 ミューオントリガー検出器

LHC 実験では多くのイベントの中から物理的に興味のあるイベントのみを取り出すことが重要である。そのなかでミュオンを用いて反応事象の取捨選択を行うことは、ミュオントリガーの重要性から実験の要となる。ミュオントリガー検出器は ATLAS 測定器の最外部に設置され、バレル部には RPC、エンドキャップ部には TGC を用いる (図 2.6)。ミュオントリガー検出器

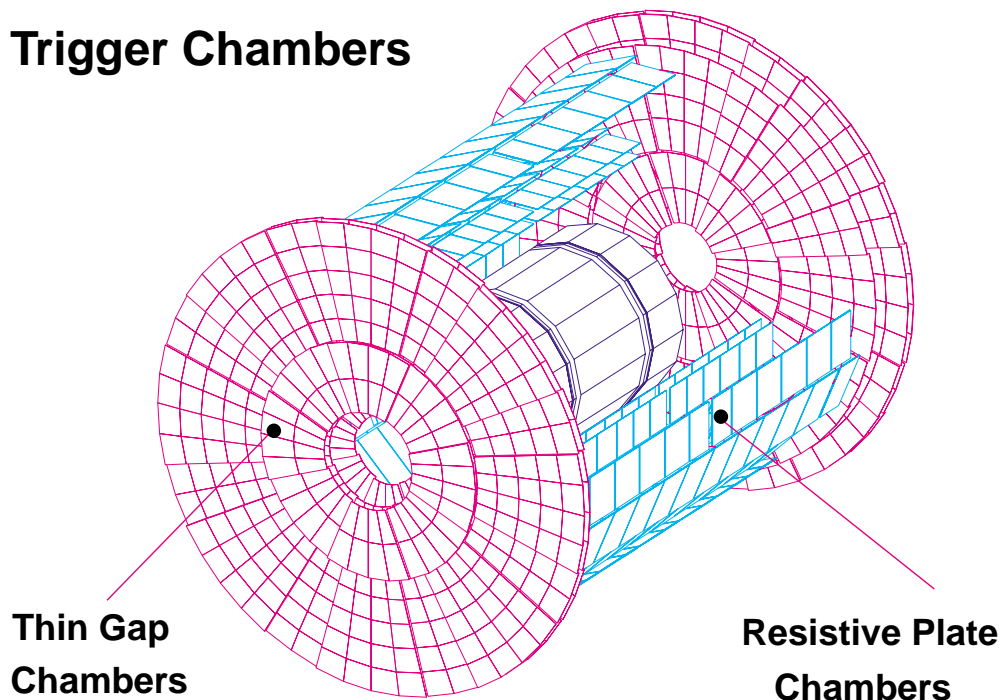


図 2.6: ミューオントリガー検出器

はミュオンの横向き運動量 p_T を測定し、事象の取捨選択を行ない、さらに衝突時間 (バンチ ID) の決定も行う。

トリガーの仕組みを図 2.7 に示す。TGC は、2 重構造のもの (Doublet) が 2 組と 3 重構造のもの (Triplet) が 1 組で構成されており、MDT をはさむ形で設置される。またビームの衝突点に近い側から Triplet(TGC1)、Doublet(TGC2,TGC3) の順で配置される。RPC1,RPC2,RPC3 はそれぞれ 2 重構造からなっている。low- p_T ($> 6\text{GeV}$) のトリガーを出す条件として、バレル部では RPC1 と RPC2、エンドキャップ部では TGC2 と TGC3 の 2 つの Doublet の間でのコインシデンスが取られ、ある幅の window 内に粒子が通過することが要求される。ここでいうある幅の window とは $p_T \sim 6\text{GeV}$ のミュオンを 90% の効率で捕らえられる幅のことをいう。4 層の間のコインシデンス条件として、4 層のうち少なくとも 3 層がヒットすることを要求する。high- p_T ($> 20\text{GeV}$) に対しては low- p_T のトリガー条件に加えて、内側の 3 層の TGC のうち、少なくとも 2 層のヒットがあることを要求する。

TGC の配置図を図 2.8 に示す。TGC の置かれるエンドキャップ部には、陽子陽子素過程によるジェットや、ビームとビームパイプとの間の相互作用等によって生じる高頻度の粒子入射が予想されている。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部でのバックグラウンドレートを表 2.2 に示す。TGC はこのような高頻度のバックグラウンドレートの中でも動作する必要がある。

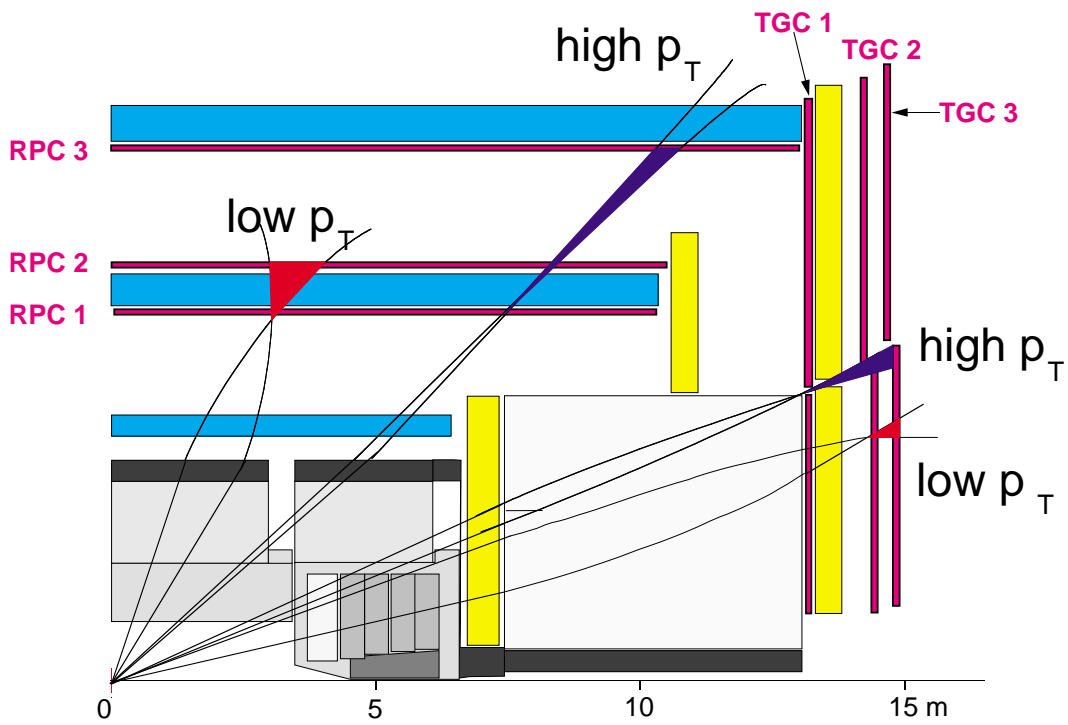


図 2.7: ミューオントリガーの仕組み (Longitudinal view) [3]

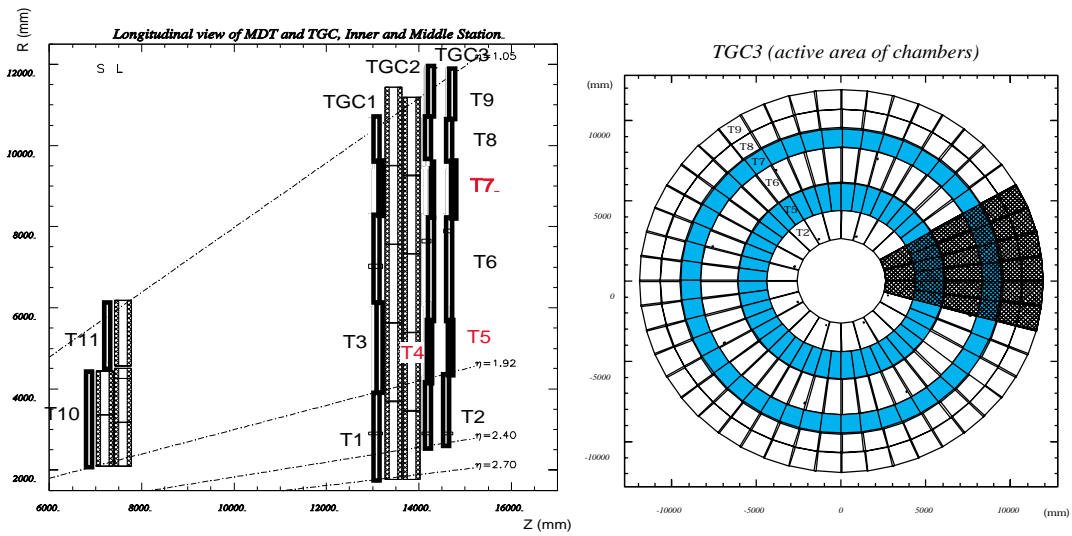


図 2.8: 図左は ATLAS 測定器における TGC の配置図 (R-Z 平面図)。右側が TGC3 についてビーム方向から見た配置図。日本が担当する TGC は図左の黒色で表した T4、T5、T7。 [3]

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 2.2: 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 程度の高い入射粒子頻度でも 10 年間十分安定に動作すること
- バンチ識別を行うために LHC のビームの衝突間隔の 25ns 以下の時間分解能を持つこと
- ミューオンの検出効率が 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の 1~数 cm 程度の位置分解能

2.4 TGC (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る MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) 型の検出器のひとつであるが、アノードワイヤーとカソード面の間隔(ギャップ)が非常に狭い構造であるので Thin Gap Chamber と呼ばれている。この狭いギャップは不感時間を短くするための設計であり、高い入射粒子頻度での動作を可能としている。以下では TGC の構造を説明し、量産・検査について触れる。

2.4.1 TGC の構造

TGC の各種パラメーターについて表 2.3 にまとめる。

ワイヤー直径	50 μ m
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	CO $_2$ + n-Pentane (55:45)
ガスゲイン	$\sim 10^6$

表 2.3: TGC のパラメータ [3]

図 2.9 が TGC のワイヤー方向に垂直な断面図である。

アノードワイヤーには直径 50 μ m の金メッキタングステンワイヤーを用いている。アノードワイヤーの間隔が 1.8mm と狭くなっているが、これは LHC 実験の 40MHz というバンチクロッシングに対応するために電子のドリフト距離を短くするためである。またアノードワイヤーとカソード面の間隔が 1.4mm と非常に狭い。これは高い入射粒子頻度状況下において検出効率が下がらないように空間電荷の原因となる陽イオンのドリフト距離を短くするためである。

1.6mm または 1.8mm の FR4 を基板として、その片面にカーボンを塗布することでカソード面としている。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

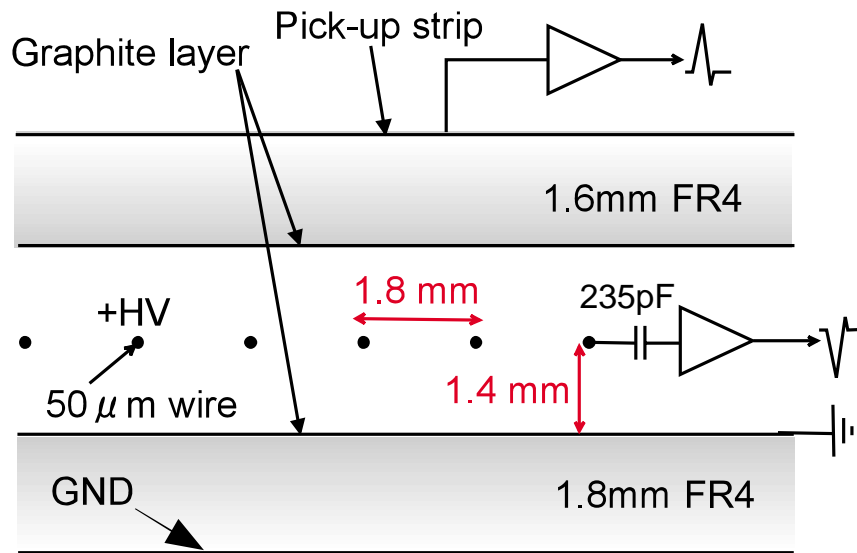


図 2.9: TGC の構造 (断面図) [3]

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 $1M\Omega$ 程度にすることでストリップ読み出しを可能にしている。ワイヤー・ストリップ両方から信号を読み出すことで TGC は 2 次元の位置情報を得ることができる。

TGC は、平面的に非常に大きくガスギャップが狭いという構造のため、ワイヤーのたるみやカソード面の平面性が TGC の性能に大きく影響を及ぼす。このための補強材としてワイヤーサポート・ボタンサポートが入っている。ワイヤーサポートはワイヤーを支えるだけでなく、ガスの流路を一定にする役割も担っており、TGC 全体にガスが行き届くように設計されている。(図 2.10 参照)

TGC は 2 層 (Doublet) または 3 層 (Triplet) のユニットとして製作され、図 2.11 に示すように、TGC に挟まれる空間と外側にはハニカムを接着することで強度を保っている。また、ユニット全体として位置分解能を高めるため、Doublet ではすべての内部構造 (ワイヤーグループとストリップ間隔) が半ピッチずつ、Driplet では $1/3$ ピッチずつずれるように構成されている。さらにユニットとしての不感領域を避けるため、ワイヤーサポート、ボタンサポートは重ならないよう配置される。

各 TGC はタイプによっては異なる場合もあるが、多くはワイヤー・ストリップとも 32ch 読み出しである。ワイヤーに関しては概ね 20 本をまとめて 1ch としている。ストリップは 3cm 程度の幅で刻まれたパターン 1 つを 1ch として読み出す。アンプには ASD (Amplifier Shaper Discriminator) ボードと呼ばれるアンプを用いている。TGC のアナログ出力を増幅した後、閾値電圧 (V_{th}) の値に従ってデジタル出力に変換する。1 つの ASD ボードで 16ch 読み出すことができる (図参照)。さらに ASD ボードは、検査設備においてドリフトチューブの読み出しとしても用いている。

2.4.2 TGC の量産と検査

日本における TGC の量産は 2000 年から KEK (高エネルギー加速器研究機構) で始まっており、Doublet 384 台、Triplet 96 台の合計 480 台 (1056 チェンバー) を製作する。日本で製作する TGC のタイプとその台数を表 2.4 に示し、それぞれの形状を図 2.13 に示す。なお、TGC は日本のほかにイスラエルと中国で量産される。

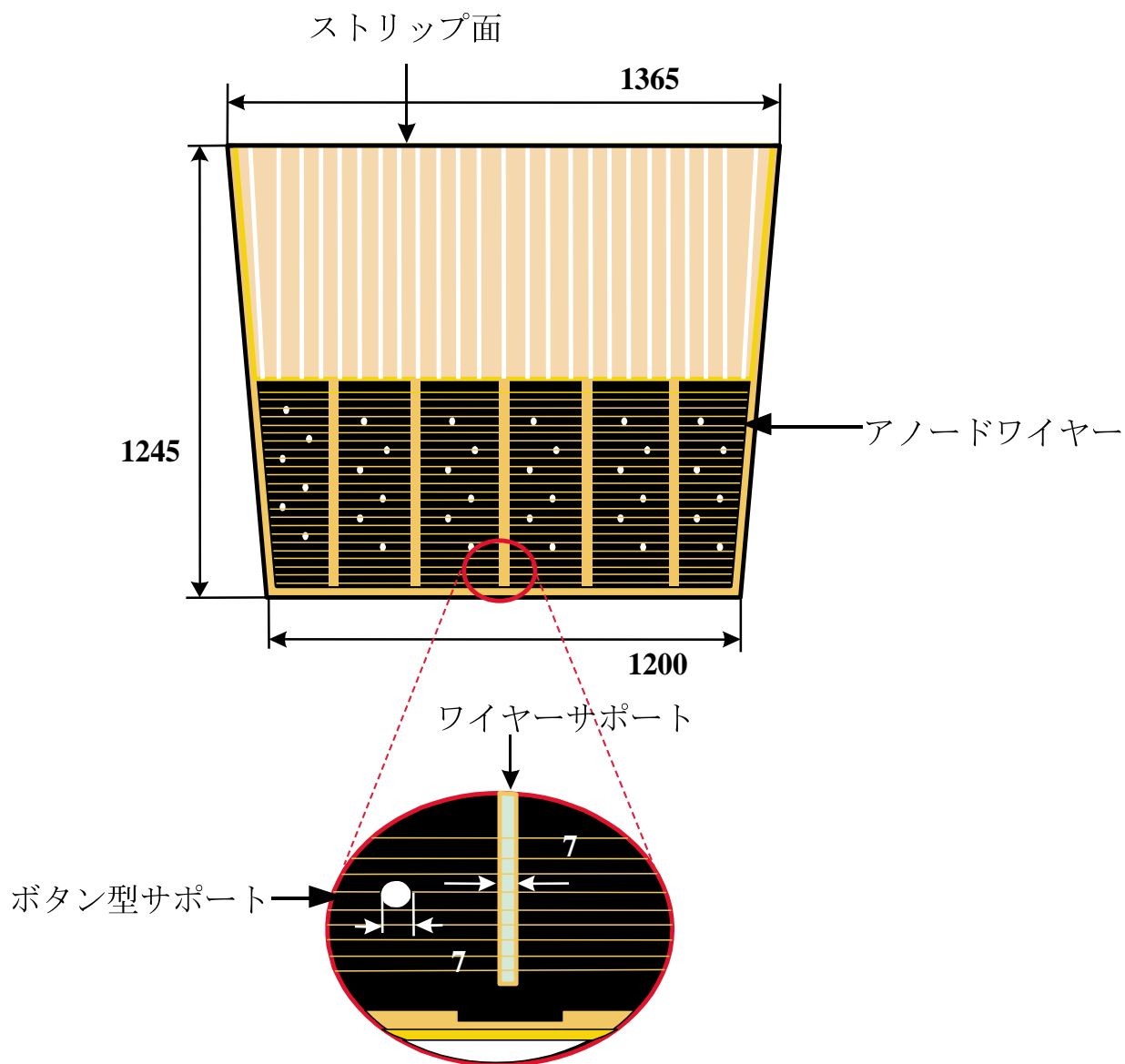


図 2.10: TGC (T7) の構造 (平面図)

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

表 2.4: 日本で製作される TGC のタイプと台数

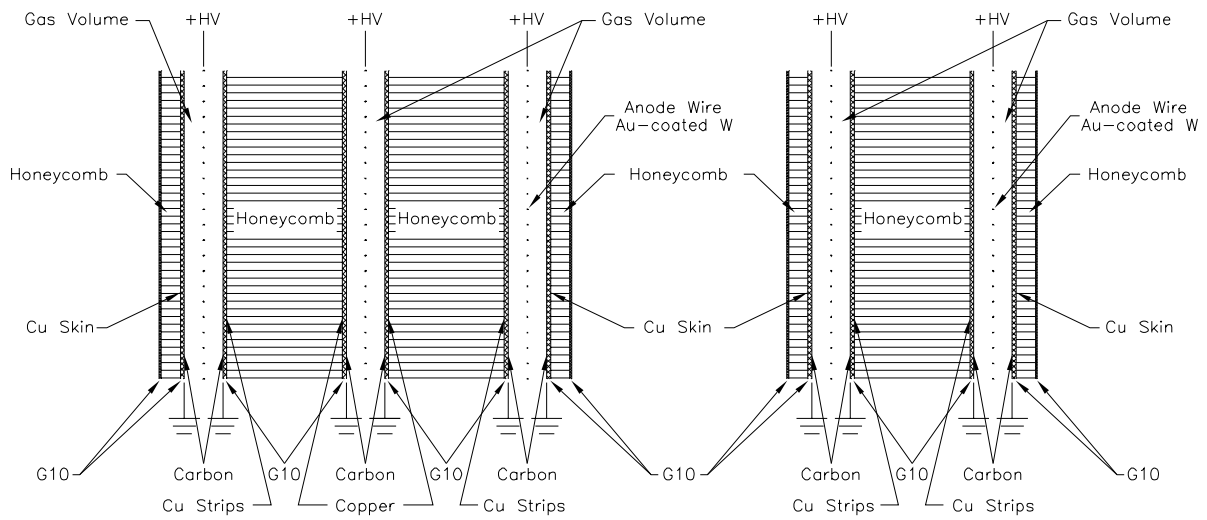


図 2.11: Doublet(右) と Triplet(左) の断面図 [3]

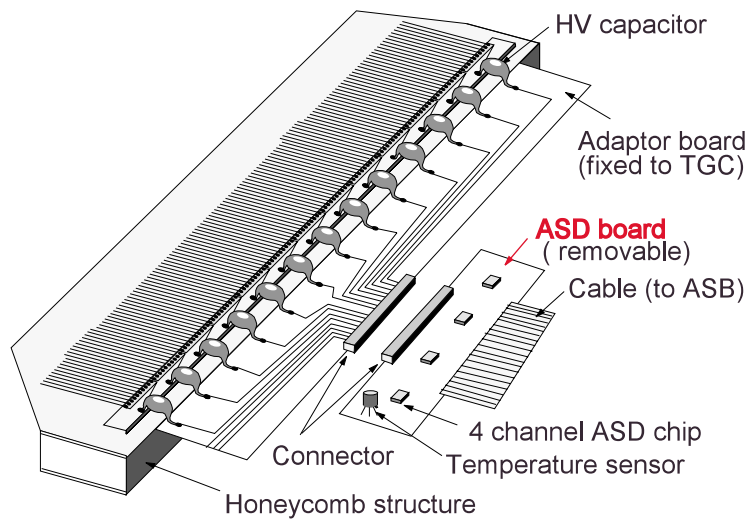


図 2.12: TGC のワイヤー方向の読み出し [3]

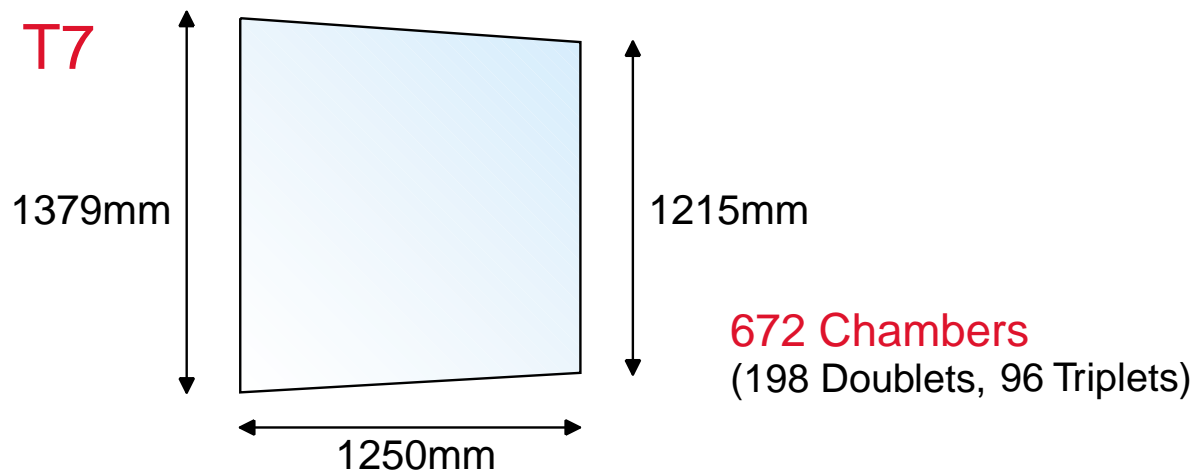
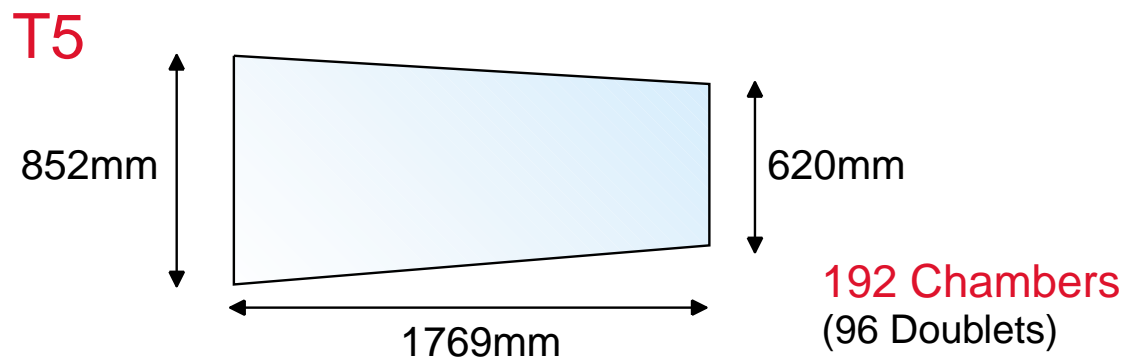
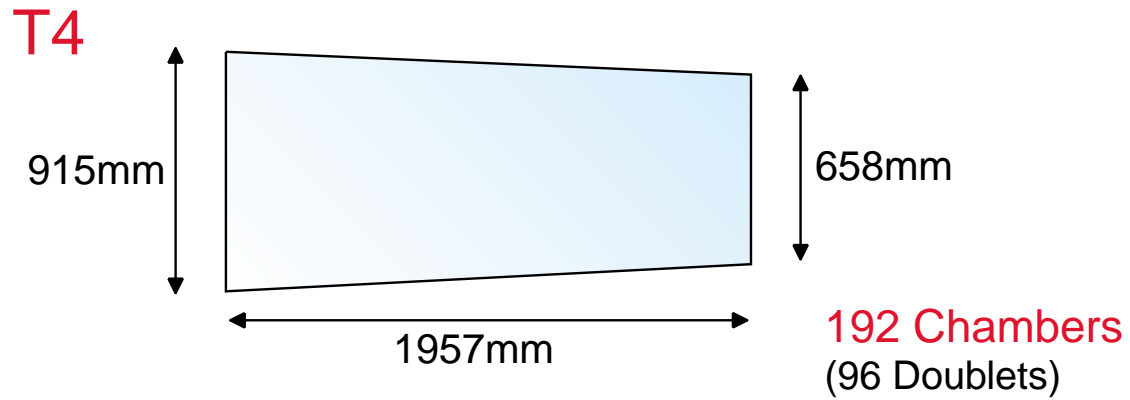


図 2.13: 日本で量産される TGC のタイプと台数 [?]

TGCは一日2チェンバーのペースで量産されており、製作されたTGCは神戸に構築している専用検査設備へ輸送する。検査を終了したTGCはCERNに輸送される。

神戸大学での検査項目は大きく分けて、TGCの検出効率・反応時間を検査する宇宙線テスト、高電圧を安定に印加できることを確かめるHVテスト、ガス漏れのないことを確認するリークテストの3項目である。その中でもとくに宇宙線テストが最重要項目であり、約2年間に渡り480台ものTGCを検査するために、大規模で長期安定稼動するようなシステムが必要である。

第3章 検査設備

この章では検査設備での検査の流れを示し、3つの検査項目について説明する。

3.1 TGC 受け入れ

KEK から神戸への運搬は10台単位で行われる。KEK からの運搬に用いる箱（以下、運搬箱）をトラックから専用台車に移し保管用プレハブに移動する（図 3.1）。



図 3.1: 専用台車に乗せた運搬箱の保管用プレハブへの移動

プレハブに運び込まれた時点で開梱しワイヤー・グラウンド間の導通試験を行う。これは運搬時の衝撃等でワイヤーが切れていないかどうか確認する。ワイヤー・グラウンド間の抵抗値を絶縁抵抗計（横河 2406E）を用いて測定し、測定上限である $2000\text{M}\Omega$ 以上の抵抗値であれば合格としている。運搬の直前と直後にこの検査を行うことで、TGC 損傷の原因所在を明確に調査するようにしている。尚、現在までにおよそ 80 台のユニットを運搬したが運搬によるワイヤー切れは一つも無かった。その後、検査が行われるまで運搬箱に入れたままの状態で保管用プレハブで保管する。

3.2 検査

検査を行う設備の全体像は図 3.2 である。運搬箱を保管用プレハブから検査設備に移し、クレーンを用いて小屋内での取り回し用の運搬台車（図 3.3）に移す。設備内での取り回しは主に運搬台車を用いることで行う。

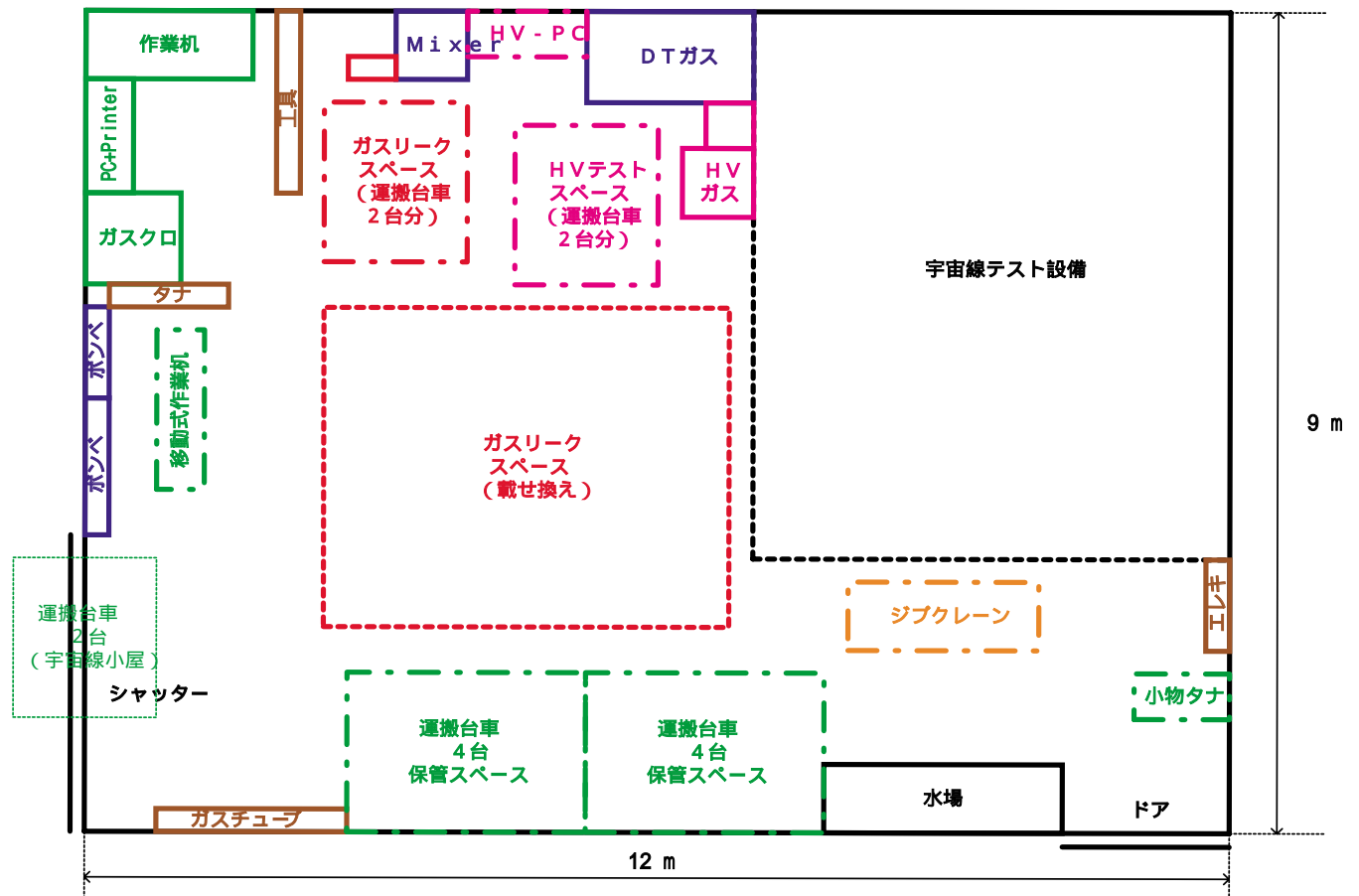


図 3.2: 検査設備全体像

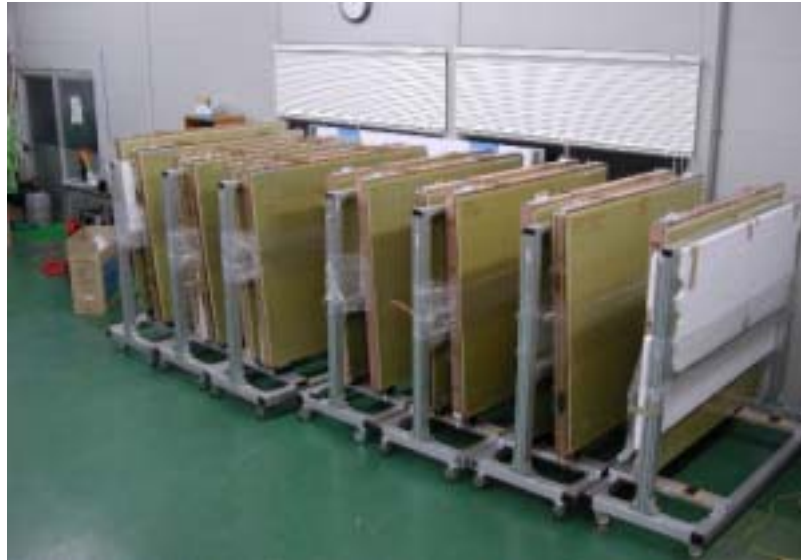


図 3.3: 運搬台車に乗せた TGC

3.2.1 ガスリークテスト

最初に行う検査はガスリークテストである。

TGC のギャップには $\text{CO}_2 + \text{n-pentane}$ を流し、チェンバーの周りを覆った CO_2 チャンネル (図 3.4) には CO_2 を流すことになっている。これらガス領域に漏れがあると、ガスの純度が下がり正しく動作しない可能性がある。また、ペンタンは可燃性ガスであるうえに人体に有害でもあるので、外部に漏れることがあると実際の ATLAS 実験において非常に危険である。

検査には図 3.5 に示す専用ラックを用いる。空気では TGC 耐圧限界の 600Pa まで加圧し、5 分間封じきった時点での圧力降下を見ることで判定する。TGC 本体は 50Pa、 CO_2 チャンネルは 100Pa 以下で合格となる。現在までに TGC 本体が不合格になった例は 1 例のみであり、リークテストで問題になるのは CO_2 チャンネルのリークのみと考えてよい。

不合格となった TGC についてはリーク箇所を見つけて修復する。きわめて微小な漏れなのでその発見が非常に困難である。検査設備では主に 2 種類の方法を用いている。一つ目は、ガス領域を封じきってコンプレッサーで圧縮した空気をリークの生じやすい箇所に吹き付ける方法である。ガス領域と大気との差圧をモニターしており、リークのある場所に圧縮空気が当たると差圧が変化するため検出可能である。二つ目は、同じくガス領域を封じきり掃除機を用いてリークの生じやすい箇所を吸引することで行う方法である。この場合も大気との差圧の変化が生じるので検出可能である。これらの方法を行っている写真を図 3.6 に示す。リーク箇所を発見したらその部分を修復して再びテストを行う。これを合格するまで繰り返す。

テストは 2 台同時に検査可能であるが、リークがあることが多く、現状では 1 台ずつのテストがほとんどとなっている。リーク箇所の特定が難しい TGC があり 1 台当たり 10 日以上費やすことも多くある。しかしガスリークチェックの結果は TGC 製作側にフィードバックされており、製作工程の改善、搬出前チェックがなされるため今後はさらに短い時間で検査を終了することができる見通しとなっている。

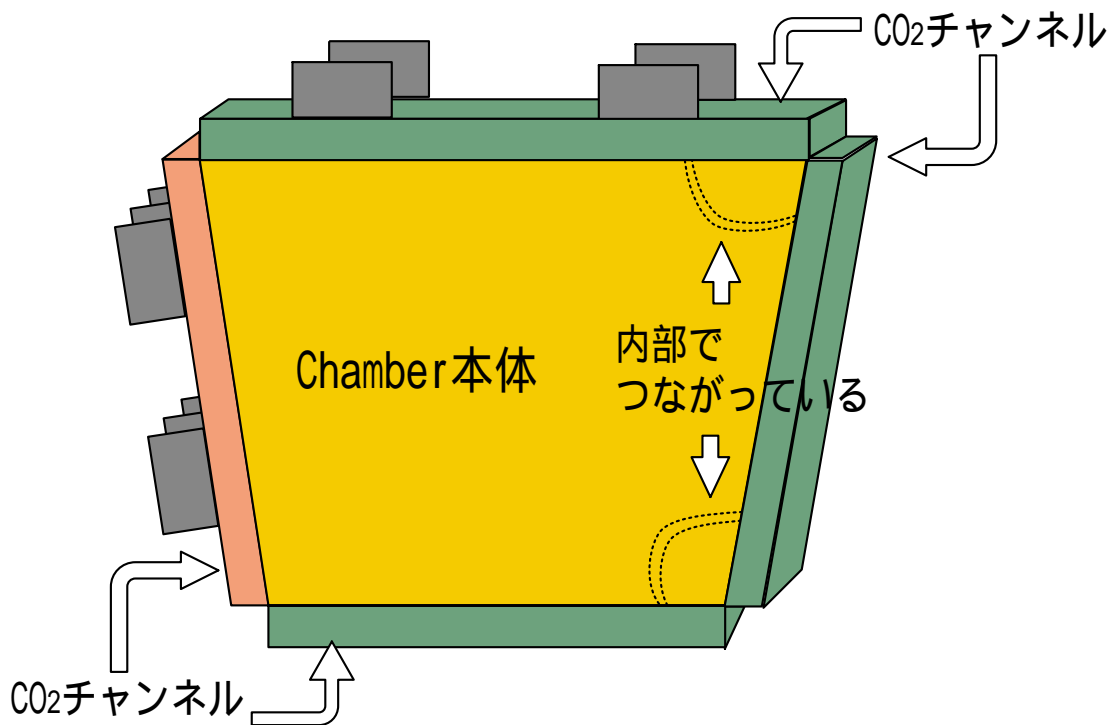


図 3.4: TGC における CO₂ チャンネルの位置

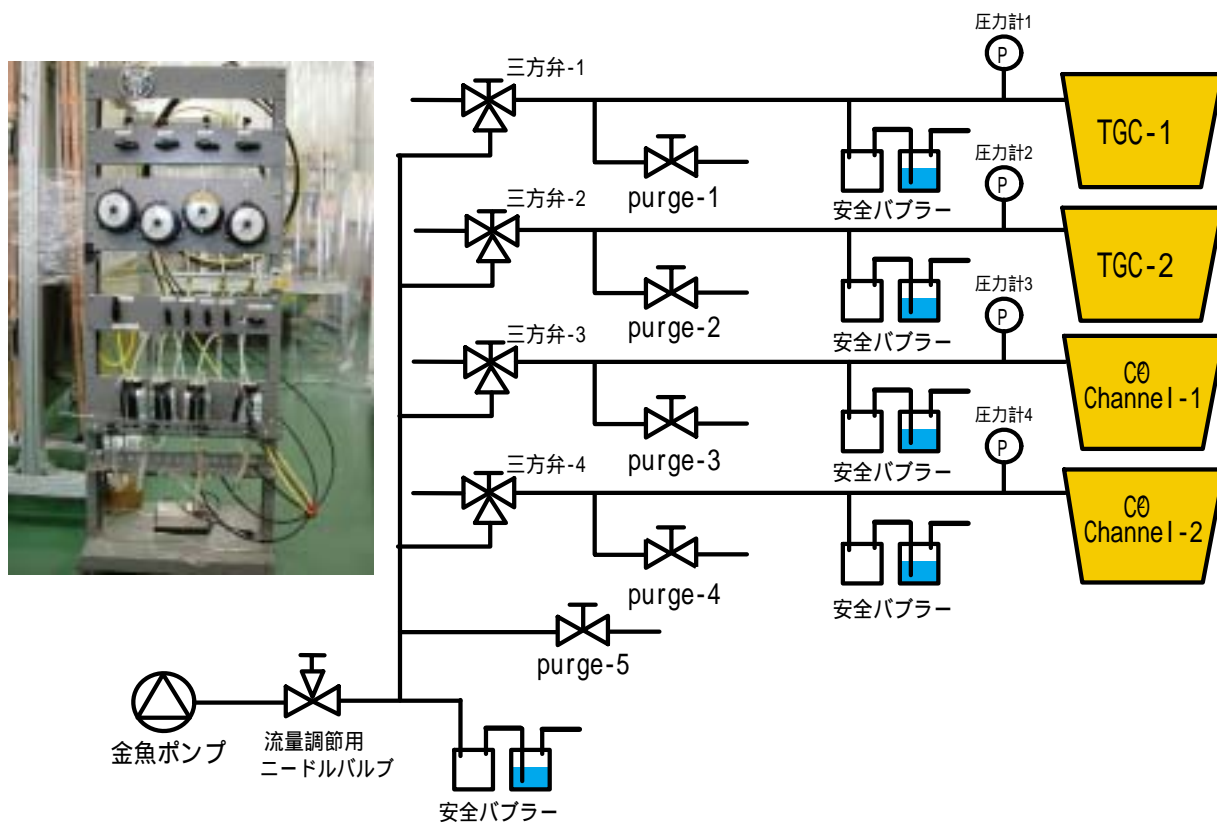


図 3.5: ガスリークテスト検査用ラック



図 3.6: リーク箇所を見つける 2 つの方法。左がコンプレッサを用いる方法で、右が掃除機で吸引する方法。

3.2.2 HV テスト

つづいて HV テスト (高電圧印加テスト) を行う。

本来ワイヤーとグラウンド面の間は絶縁されているため、電流は流れないが、実際はワイヤーサポートやボタン型サポートなどの部品や接着剤のはみ出しなどを介して電流が流れることがある。これをリーク電流という。完成度の低い TGC の中には、このリーク電流が大きく高電圧 (HV) を安定に印加できないものが存在する可能性がある。HV テストは ATLAS 実験における動作環境と同じ $\text{CO}_2 + n\text{-pentane}$ の混合ガスを充填し、HV を安定に印加できるかどうかを確かめる試験である。また、放電させることでコンディショニング効果によりワイヤーの細かなとげを均一化したり、ガス領域内のほこりなどを除去するという目的もある。さらにリーク電流をモニターしており、HV 印加時の電流値の安定性も同時に確認することができるようになっている。なお、過電流に対する安全措置である自動 HV オフをトリップと呼ぶ。

$n\text{-pentane}$ のように分子量の大きい炭化水素ガスを充填している状態でカレントが流れ続けると、アノード・カソード間でガスが炭化し電流のパスができる可能性がある。そのためまず CO_2 を充填し HV を印加してリーク電流の原因を十分焼き出すことから始める。KEK における TGC 製作時に同じく CO_2 を流した条件で HV を印加して記録をとっているので、製作側と検査設備の間でのデータの整合性を確かめることにもつながる。目安として 2.9kV を 3 時間程度安定に印加できる状態を確認して、 CO_2 焼き出しを終了する。ここで、一旦 HV を落として $\text{CO}_2 + n\text{-pentane}$ を流し始める。十分置換されたところで $n\text{-pentane}$ テストを行う。

まず徐々に印加電圧を上げ、3.1kV を印加した時点から 8 時間一度もトリップがないことを確かめる。8 時間の間に一度でもトリップが起きるともう一度測定をやり直し、連続で 8 時間印加できたもののみ次の段階へ進む。3.1kV で 8 時間印加できたものについてはさらに印加電圧を上げ 3.3kV に設定する。3.3kV を印加し 20 分間一度もトリップがないことを満たすことで合格とする。3.3kV の場合でも途中トリップが起きると測定をやり直す。さらに、3.3kV で合計 1 時間以上焼き出すことで検査終了とする。

混合ガスを充填した状態で HV をかけていると、前述のとおりガスが炭化することで電流のパスができて HV が印加できなくなることがある。その場合ふたたび CO_2 を流して HV を印加し、できたパスを焼き切るという作業を行うこともある。

HV テストが終了してから次の宇宙線テストまで時間が空くときは CO_2 でガス置換し、さらにほこり等の混入を防ぐためガス口の保護を行う。

3.2.2.1 ガスシステム

ガス系は図 3.7 のものを使用する。このセットアップで混合ガスと CO₂ 両方流すことが可能である。CO₂ と液体 n-pentane を混合することで混合ガスを作り出す。ガスの混合にはバブリング法を用いている。n-pentane の蒸気圧から CO₂ : n-pentane = 55 : 45 になる 14°C でバブリングを行うことで混合している。

TGC は内部圧と外気圧の差圧に非常に弱い構造になっており、誤って高い圧力をかけると TGC を壊す可能性がある。そのためガスの圧力をモニターし、大気圧との差圧が 300Pa を超えると自動に大気開放するようになっている。また流量もモニターしている。このガスシステムでは混合ガスと CO₂ の系統それぞれ 4 系統ずつ用意しているため、ガス置換や実際の検査を含めて最大 8 台同時の作業が可能な構成となっている。

3.2.2.2 HV・モニターシステム

HV テストに用いている HV 印加・モニターシステムを図 3.8 に示す。HV 印加モジュールから HV の電圧値、リーク電流値に対応する電圧を取り出すことができるので、それらを増幅し PC に取り込むことで常に記録することが可能になっている。なお安定に印加できているときのリーク電流は 200 ~ 300nA 程度である。また、トリップしたときに HV オフの状態を保持することが可能でありその間トリップシグナルを出力している。これをモニターすることで無人運転している間のトリップ時刻を簡単に知ることができる。さらにトリップシグナルを検出するとブザーが鳴るようになっており、作業員、および検査設備内にいる人に対して注意を喚起するようになっている。PC におけるそれぞれの操作をすべて GUI 化することで作業員の負担を小さくし、さらに作業の効率化を図っている。

3.2.3 宇宙線テスト

ガスリークテスト・HV テストに合格した TGC に関して宇宙線テストを行う。TGC の性能としてミュオンに対する検出効率が非常に重要であり、検査設備においてもっとも重要な検査項目である。宇宙線テストはこの検出効率を検査することを主な目的とした検査で、宇宙線ミュオンの飛跡が通過する TGC のチャンネルから正しくシグナルが得られるか、不感領域であるワイヤーサポートやボタンサポート以外に、検出効率の低い部分がないかを確認する。同時にトリガー信号に対する TGC のヒットの時間情報を記録し、TGC の反応時間に問題が無いかどうかもチェックする。また TGC に印加する電圧を変化させ、電圧によって検出効率がどのように変化するかを記録する (HV curve)。

宇宙線テストは本論文の主題であるので次章詳しく述べる。

3.2.4 TGC 搬出

すべての検査を終了した TGC についてはふたたび運搬箱に戻し、保管用プレハブに保管する。神戸から CERN への輸送手段は船を用いた海上輸送であり運搬箱 10 台を一まとめにして搬出する。海上輸送には概ね 1ヶ月を要する。

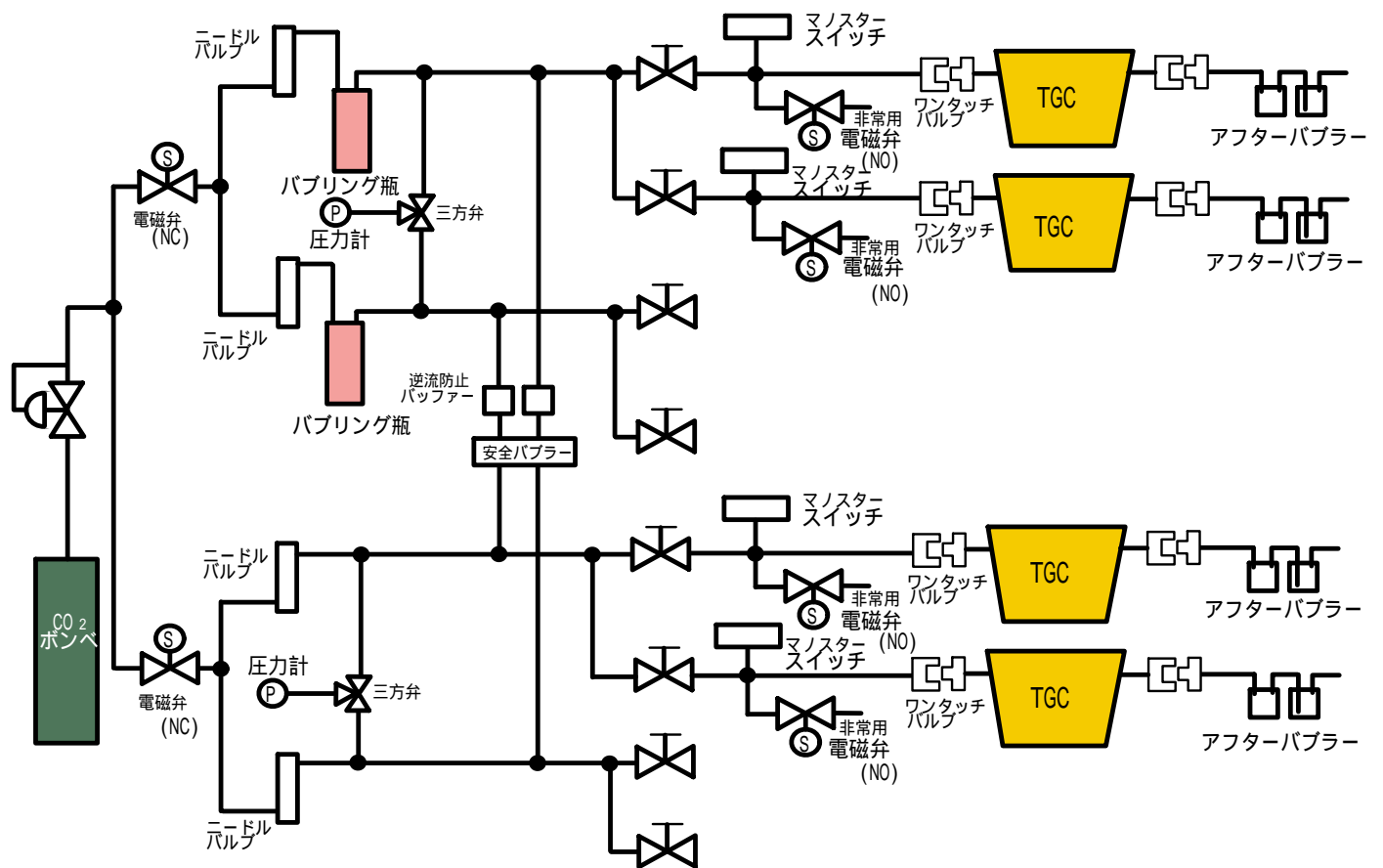
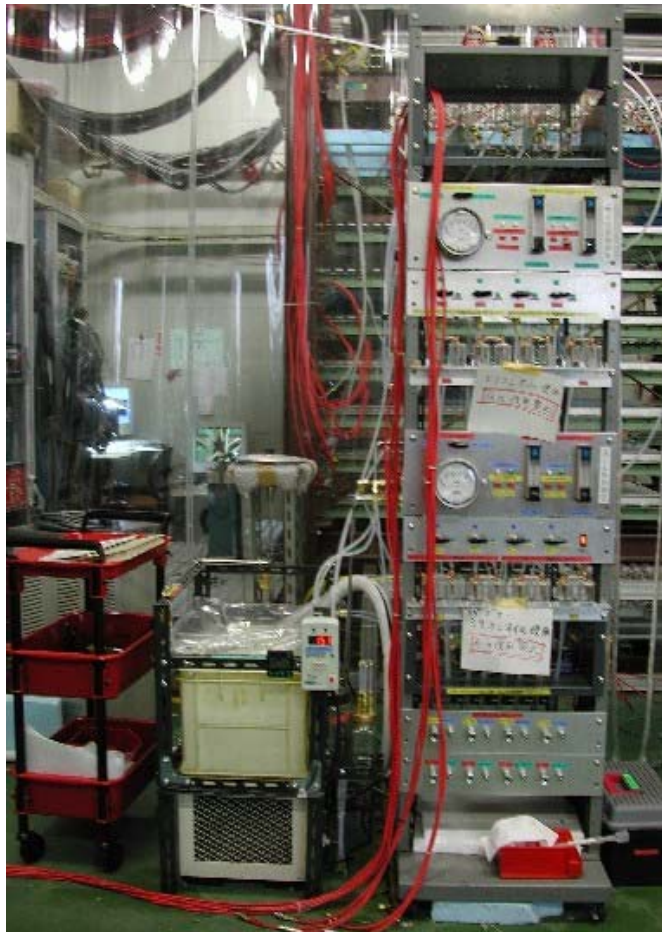


図 3.7: HV テスト用ガスシステム

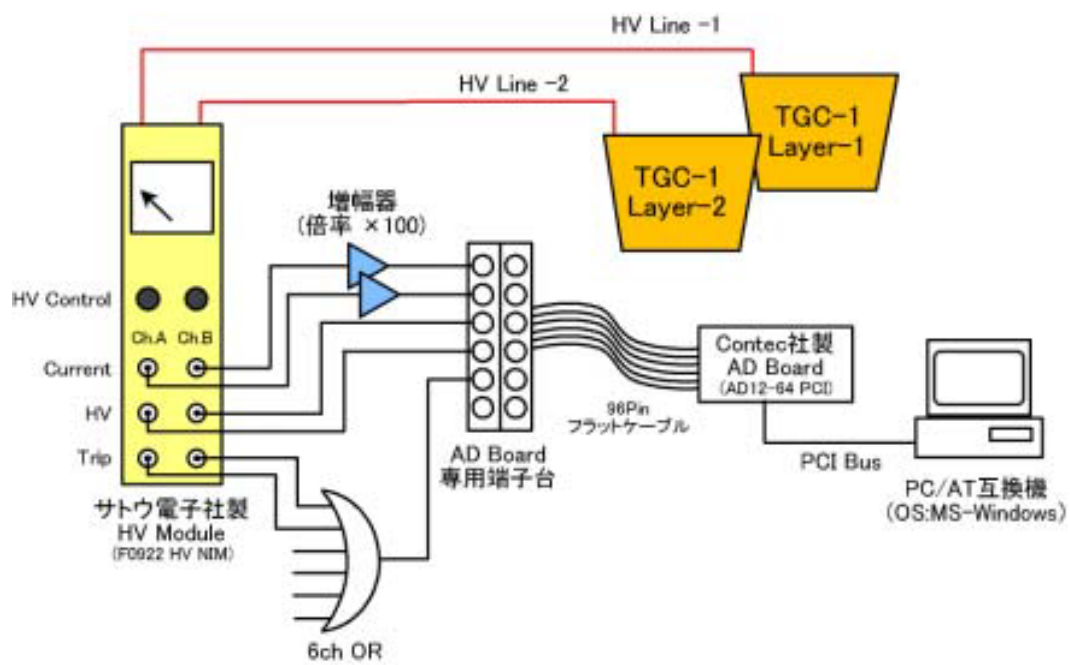


図 3.8: HV・モニターシステム

第4章 宇宙線テストセットアップ

この章では検査設備でもっとも重要な検査であり、また本論文の中心となる宇宙線テストのセットアップを構成する各項目について説明する。

4.1 全体像

TGC に要求される検出効率は 99% 以上であり、有感領域全面に渡って一様に高い検出効率を実現していることを確認しなければならない。そのために宇宙線中のミュオンを利用して検査を行うのが宇宙線テストである。図 4.1 に宇宙線テストのセットアップを示す。

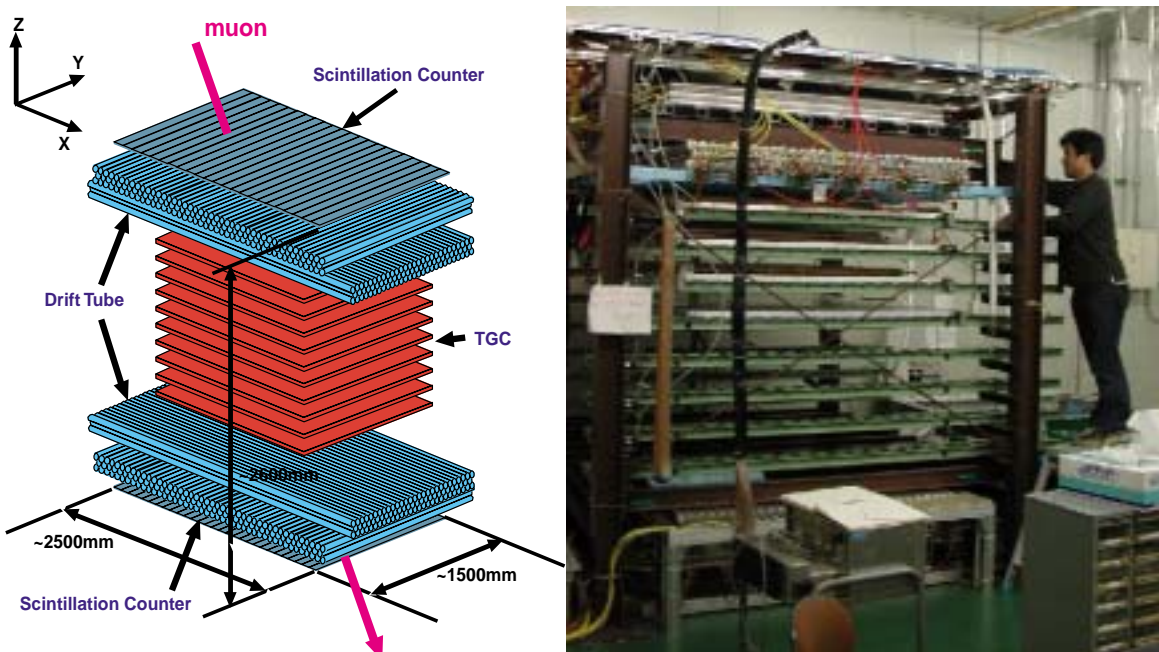


図 4.1: 宇宙線テストでの検査設備の概念図（左）と写真（右）

検査設備を使用して宇宙線ミュオンの飛跡トラックを再構成し、飛跡が通過した点に対して TGC が正しく反応するかどうかを調べる。実際には検出効率の定義は

$$\text{検出効率 (\%)} = \frac{(\text{Track 上に TGC のヒットがあるイベント数})}{(\text{Track が引けたイベント数})} \times 100$$

であり、ワイヤー・ストリップそれぞれにこの値を評価する。宇宙線を用いることで全面に渡ってくまなく検査することができるため、全面に渡る一様性も同時に確認することができる。

LHC のバンチクロッシング間隔が 25ns と短いため、TGC のシグナルの到達時間もまた重要

な検査項目である。まず、TGCの比検出効率を

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

と定義し、この比検出効率が99%に収まる最小の時間間隔をタイムジッター (Time Jitter) と定義する。つまり

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

を調べ、評価する。TGCに要求されるタイムジッターはLHCのバンチクロッシング間隔25ns以内である。

宇宙線のトリガー信号発生のためにシンチレータを用い、宇宙線の飛跡の再構成にはドリフトチューブを用いる。図4.1にあるように上下のシンチレータの方向にY軸を取り、水平平面内でY軸と直行する方向にX軸を取り、鉛直方向にZ軸を取る。シンチレータのすぐ内側に3層依積みのドリフトチューブを上下XY方向に設置する。3層依積みにすることにより2次元的にトラッキングを行うことができる。それをXY方向に設置することで3次元でのトラッキングを可能にし、上下に設置することでその精度を上げている。TGCはその上下のドリフトチューブの間に挿入し検査する。シンチレータ及びドリフトチューブによる測定領域は最大1300mm × 1980mmまで拡張可能である。

ワイヤーサポート・ボタン型サポートの部分は不感領域であり、ワイヤーサポートの幅、ボタン型サポートの直径ともに7mmである。検出効率を求める際それら不感領域を区別できる程度の分解能が飛跡の再構成に要求されている。また、パレットに乗せて検査設備に挿入するTGCの位置情報は、不感領域であるワイヤーサポート・ボタン型サポートの位置をみることで、補正を加えなければならない。しかし検査設備の物質質量50g/cm²を通過する際の多重散乱による宇宙線の飛跡の曲がりなどを考慮に入れると、ドリフトチューブによる位置分解能は1mm程度で十分であると考えられる。

4.2 多重散乱による飛跡の曲がり

荷電粒子である宇宙線ミュオンは物質中で多重散乱の影響を受けその進路を変える。宇宙線テストではミュオンの飛跡を利用して検査を行うので検査設備内での飛跡の曲がりの見積もっておく必要がある。

ドリフトチューブによる飛跡の再構成はX,Yそれぞれに2次元で行なうため、多重散乱によるミュオンの散乱角を入射粒子を含む平面に投射したものを考える。投影した角度の2乗平均は

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{E_s}{p\beta c} \right)^2 \frac{x}{X_0}$$

で計算することができる。E_sは散乱の特性エネルギーと呼ばれる値でE_s = 21MeVである。x[g/cm²]は物質層の厚さ、X₀[g/cm²]は放射長であり、入射電子のエネルギーが放射過程によって、1/eに減少する長さで物質固有の値(表4.1)である。宇宙線テストのセットアップの検査領域では、TGCを乗せるパレットを構成するアルミニウムと、架台を構成する鉄の物質質量が支配的であるので、これら物質について考えることで全体の多重散乱の影響を見積もることとする。

大雑把に上下ドリフトチューブ間の距離1.8mの間の物質質量を、鉄20g/cm²、アルミニウム20g/cm²とし、宇宙線ミュオンの運動量を2GeV/cとすると散乱後の角度は2乗平均で $\langle \theta^2 \rangle = 1.3 \times 10^{-4}$ となる。よって平均的に $\theta = \sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = 1.1 \times 10^{-2}$ 程度散乱することがわかる。

物質の種類	$X_0(\text{g}/\text{cm}^2)$
アルミニウム	24.0
鉄	13.8

表 4.1: 各物質の X_0

宇宙線テストでは飛跡が直線であると仮定して再構成を行なっているが、この角度の散乱が測定領域の最上部で 1 回起きると考えると、最下部では 1cm 程度ずれることがわかる。ここで計算した値は飛跡の再構成における位置分解能の限界に対応する値であり、検査領域においても数 mm 程度分布することが予想される。

4.3 Scintillation Counter

宇宙線のトリガーとして、プラスチックシンチレーターを使用している。設備の最上部と最下部にそれぞれ、70mm × 1300mm × 10mm の大きさのもの、90mm × 1300mm × 2.6mm の大きさのものが各 22 本ずつ、計 44 本設置されている。検査設備の検査可能な範囲はこのシンチレーターで決まっており、上下を大きく覆うことにより、日本で製作されるすべてのタイプの TGC の有感領域をカバーできるように設計されている。

まずシンチレーターの両側に接続された光電子増倍管からのアナログシグナルをディスクリミネーターに送り、デジタル信号に変換する。両側の光電子増倍管からのシグナルのコインシデンスを取ったものをシンチレーターのヒットとして認める。続いて上下それぞれにシンチレーター 22 本分のヒットの論理和を取り、さらにそれぞれの論理和の結果に対して論理積を取ることでトリガー信号を発生させる (図 4.2)。なお、トリガーレートは概ね 20Hz となっており、宇宙線の飛来頻度と立体角の計算と矛盾は無い。

このシンチレーターからのシグナルは、ドリフトチューブにおけるドリフト時間の基準となる時間を決定するために使用する。ドリフトチューブに Ar + ethane を充填し 3.5kV 印加したときのドリフト速度は約 $5\text{cm}/\mu\text{s}$ であるので、ドリフト距離の時間分解能を 1mm 以内にするためにはシンチレーターには 10ns 程度の時間分解能が必要となる。上に設置したシンチレーターと下に設置したシンチレーターの時間差をヒストグラムで表したのが図 4.3 である。この図の分布をみると $\sigma \sim 3.2\text{ns}$ であるので、1 枚のシンチレーターあたりでは $\sigma \sim 2.3\text{ns}$ の程度であり必要な性能は満たしている。

4.4 Drift Tube

宇宙線の飛跡再構成に使用している検出器がドリフトチューブである。ドリフトチューブは円筒形の比例計数管で、その構造は直径 50mm、厚さ 2mm の円筒形のアルミパイプの中心に、直径 $50\mu\text{m}$ 金メッキタングステンワイヤーを張った形である。アルミパイプをカソード (グラウンド)、ワイヤーをアノードとしている。(図 4.4)

宇宙線がガス領域通過時にその飛跡上でガスをイオン化し、その際生成された電子のクラスターが電場に導かれアノードワイヤーの方向へドリフトする。そして中心付近の強い電場により増幅された電子をアノードワイヤーを通して検出する (図 4.5)。宇宙線通過からシグナル発生までの時間 (ドリフト時間) が飛跡とアノードワイヤーの距離 (ドリフト距離) に対応しているため、ドリフト時間を測定することでドリフト距離を決定することができる。ドリフト距離とドリフト時

Trigger system

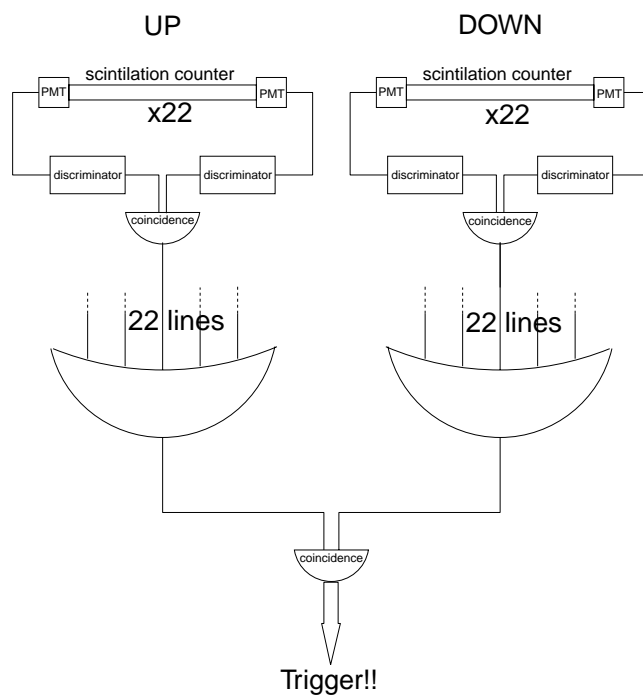


図 4.2: トリガー回路

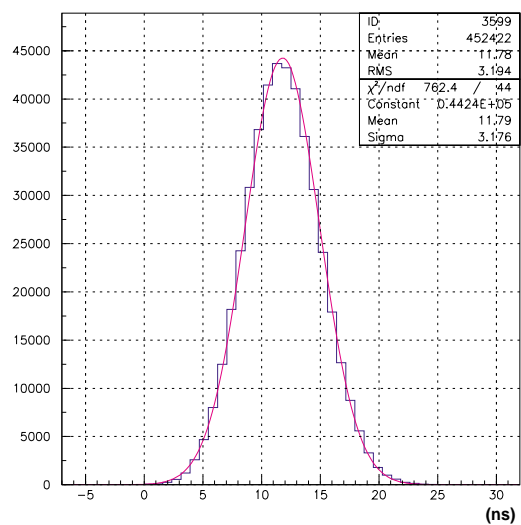


図 4.3: 上下シンチレータ読み出しの時間差

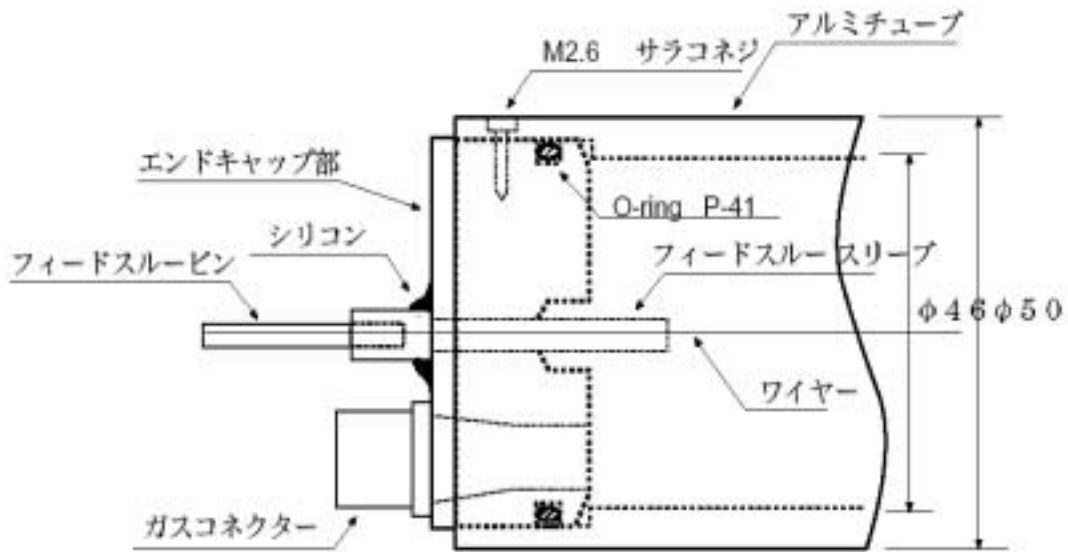
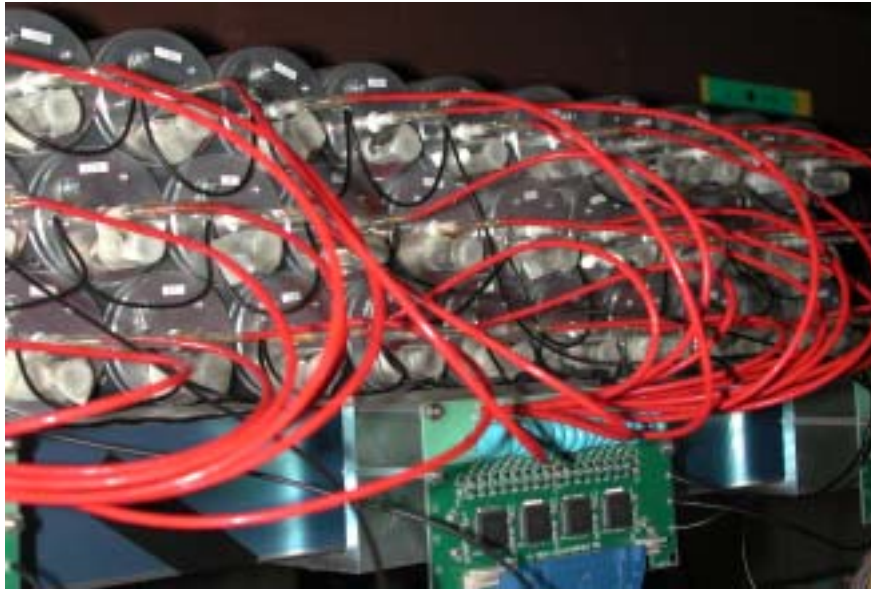


図 4.4: 3 層積みのドリフトチューブ (上) とエンドキャップ部の構造 (下)

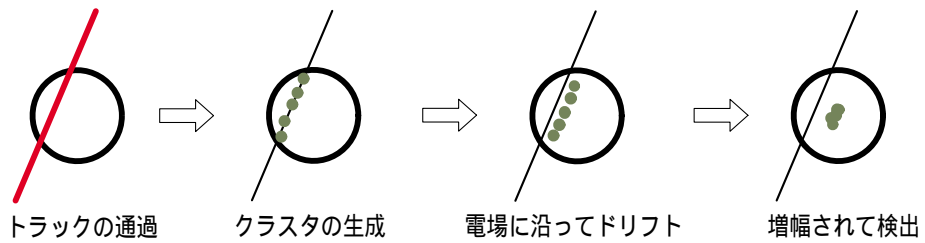


図 4.5: DriftTube の動作原理概念図

間の関係を x-t relation と呼んでいる。

ドリフト距離を半径とするドリフトチューブの同心円を描くと、粒子の飛跡はその同心円の接線になる。よって複数のドリフトチューブを並べることで、2 次的に飛跡を決定することが可能になる。(図 4.6)

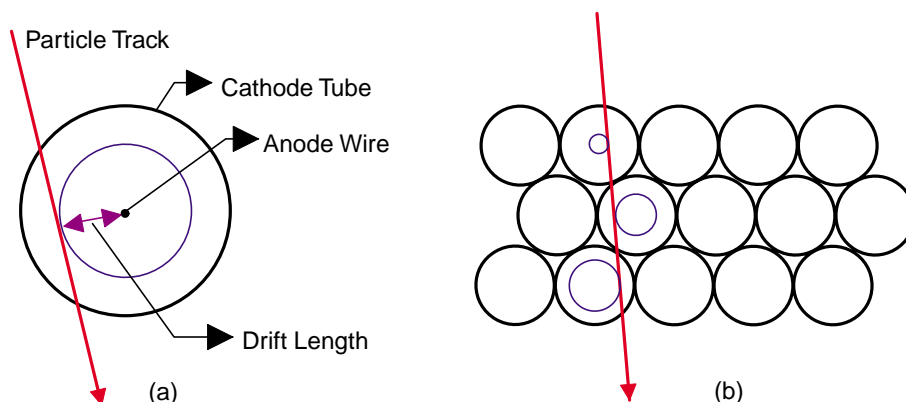


図 4.6: ドリフトチューブによる飛跡の再構成

X 軸方向に 2500mm の長さのものを 3 層積みで 89 本、Y 軸方向に 2000mm の長さのものを 3 層積みで 125 本、それぞれ上下に設置するので、計 428 本設置することになる。3 層積みにするのは、原理的に 3 層のドリフトチューブがあれば 2 次的に飛跡を再構成できるからである。つまり XY 方向に置くことで 3 次元の飛跡を再構成することが出来る。宇宙線ミュオンが設備を通過する間に、多重散乱で大きく曲がる、止まる、崩壊する、などの現象が起こりうるが、これらのトラックは再構成が非常に困難である。上下にドリフトチューブを置き、シングルトラックのみのイベントを使用することでこれらのイベントの除去を行う。

4.4.1 充填ガス・印加電圧

ドリフトチューブの充填ガスには 1 気圧の Ar + ethane(50 : 50) を使い、印加電圧 3.5kV で動作させる。このときの動作領域は制限比例領域で、十分なガスゲインを得ることができる。また、ドリフト時間からドリフト距離を導出することから、ドリフト速度はあまり大きくなく、さらに使用する電場領域に渡って変動が少ないガスを使用している。ドリフトチューブに 3.5kV 印加するとき、その形状からガス領域内の電場は円筒電場になっている。その電場、電位はそれぞれ、

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a}$$

で表される。V₀ は印加電圧、a はワイヤー半径であり、検査設備で使用するドリフトチューブの場合、V₀ = 3.5kV, a = 25μm である。r = 2.3cm のとき V(r) = 3.5kV であることから E(r) を計算することができ、r = 2.5 × 10⁻³cm ~ 2.3cm と変化するとき、E = 220 ~ 0.24V/cm と変化する。またドリフト速度は E/P (E:電場 P:圧力) に依存することが知られている。その変化の様子を図 4.7 に示す。この図を参照すると比較的安定なドリフト速度を実現しているため、用いた充填ガス・印加電圧で問題ないといえる。

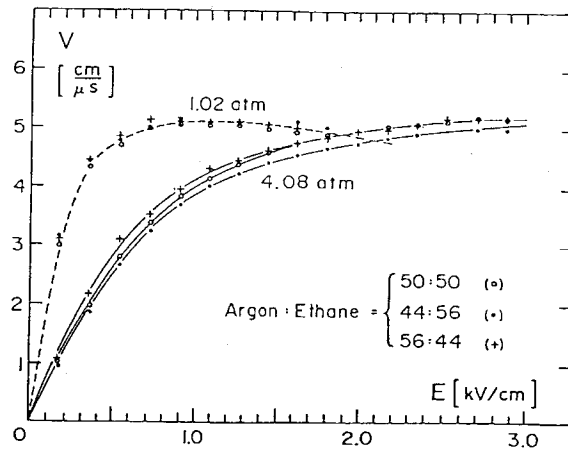


図 4.7: 電場の強さと Drift Velocity の関係

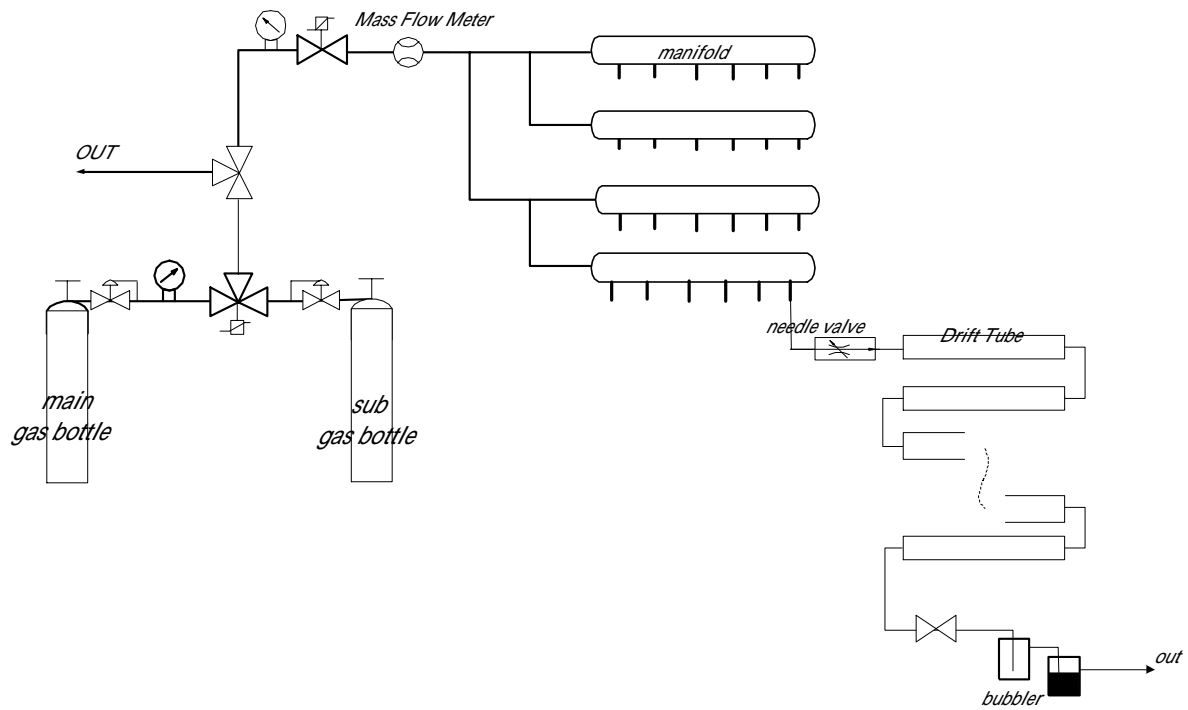


図 4.8: Drift Tube のガス系

ドリフトチューブのガス系の概略図を図 4.8 に示す。プレミックスガスを使用し 24 系統に分岐してそれぞれ直列につないだドリフトチューブに接続する。最下流ではアフターバブラーを通して排出する。ポンベの圧力をモニターしており、圧力が下がると自動的に予備ポンベに切り替わるようになっている。

4.4.2 x-t relation

ドリフトチューブから得られる情報は時間情報 (ドリフト時間) であり、その時間情報をドリフト距離に変換する必要がある。そのときに用いるドリフト距離とドリフト時間の関係が x-t relation である。ここでは x-t relation を決定する方法を説明する。なお、決定には下側に設置し Y 方向に並べたドリフトチューブを用いた。他のレイヤーに対する x-t relation の決定についてはドリフトチューブの形状や充填ガス、印加電圧が同じなので、後述する T_0 の変更だけで対応できるはずである。

ただし、ここでいう x-t relation には電子のドリフト速度だけでなく、シグナルの波高、閾値の設定の影響などすべてを含んだものになる。とくにガスの状態のわずかな差がガスゲインに大きく影響するためシグナルの波高に違いが生じ各ドリフトチューブにより個性が出る可能性がある。

仮定する関数形

使用するドリフトチューブのガス領域におけるドリフト距離は、図 4.7 から解るようにほぼ一定である。よって仮定する x-t relation は 2 次関数で十分であると考えられ、ここでは

$$X(T) = P_2(T_0 - T)^2 + P_1(T_0 - T)$$

の形であるとしている。X はドリフト距離であり、T はドリフト時間に対応する時間情報である。x-t relation を決定するためにはパラメータ P_1, P_2, T_0 を決定する必要がある。以下にこれらパラメータ決定の手順を述べる。

T_0 の決定

読み込んだ時間情報はシンチレータからのトリガーに対する相対的な時間情報であるので、ドリフト距離 = 0 となる時刻 (T_0) を定める必要がある。ドリフトチューブの構造からヒットの時間分布は限られており、もっともドリフト時間の長いイベントはトラックがカソードのすぐそばを通過した場合であり、ドリフト時間の短いイベントはトラックがアノードワイヤーのすぐそばを通過した場合である。よって時間分布を調べることで T_0 を決定することができる。図 4.9 にドリフトチューブから読んだ時間情報の分布を示す。検査設備ではコモンストップで動作させているので、右側のほうが短いドリフト時間に対応している。この図より $T_0 = 1070[\text{ns}]$ と決定した。

P_1, P_2 の決定

P_1, P_2 の値の決定には以下に述べるフィッティングを用いた。

まず状態を正しく把握できるイベントのみを使用するために、イベントを選ぶことから始める。依積みの各層に 1 つずつヒットが存在するイベントの中で、その合計 3 ヒットが図 4.10 の赤点のように縦に「く」の字型に並んでいるイベントを選び出す。さらにドリフトチューブ 1 本ずつの個性がパラメータ決定の障害になる可能性があるため、特定のチューブにのみ注目する。

続いて選んだヒットを用いてフィッティングを行う。その手順は以下のとおりである。なお、選んだヒットのうち一番上のチューブから順に $layer = 0 \sim 2$ とし、得られたドリフト時間とそこから導くドリフト距離を、それぞれ t_{layer}, x_{layer} とする。

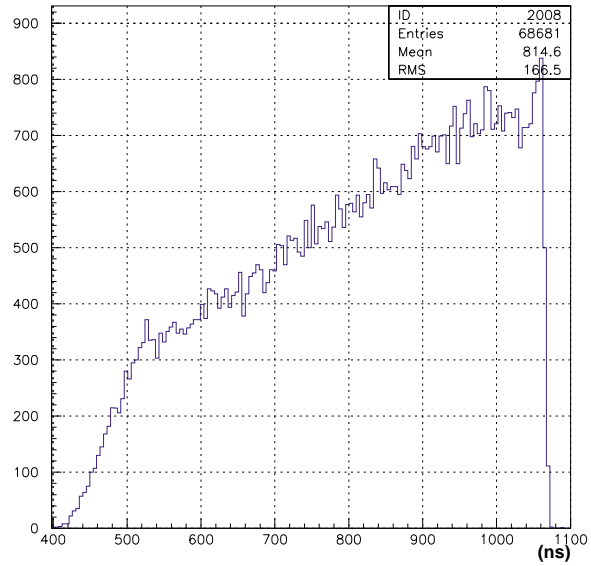


図 4.9: Drift Tube のヒットの時間分布。分布の右端が T_0 に対応する。

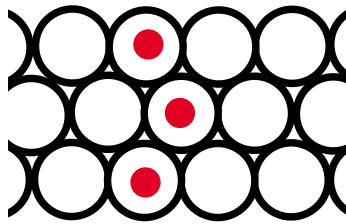


図 4.10: P1・P2 決定のためのイベント選定

まず x - t relation に対して P_1, P_2 を仮定し、ドリフト時間 t_0, t_2 をドリフト距離 x_0, x_2 に変換する。その x_0, x_2 に対応するドリフトチューブの同心円を描き、共通の接線を決定する。この直線を飛跡であると考え、ワイヤーからの距離 d と t_1 との関係を新しい x - t relation とする (図 4.11 参照)。そして新しく求めた P_1, P_2 をさらに仮定として同じ作業を繰り返すことによりパラメー

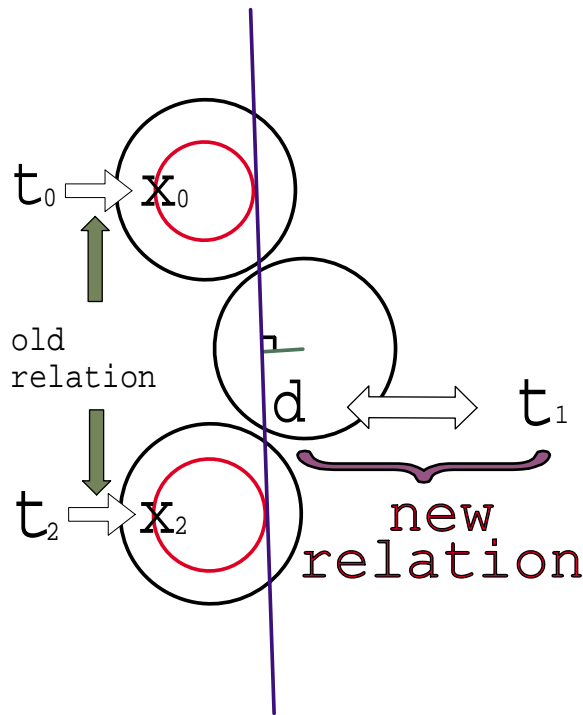


図 4.11: fitting の概念図

タ P_1, P_2 を適切な値に収束させることができる。実際には d と t_1 の関係のプロットを求め、 t_1 をある時間幅でスライスし、プロット密度がもっとも大きい点を x - t relation に対して仮定している関数でフィットする。

図 4.7 を見るとドリフト速度は概ね $5[\text{cm}/\mu\text{s}]$ であるので、実際のフィッティング作業では $P_1 = 5.0 \times 10^{-3}[\text{cm}/\text{ns}]$, $P_2 = 0[\text{cm}/\text{ns}^2]$ を初期値として採用した。そのときのパラメータの変化の様子を図 4.12 に示した。パラメータが正しく収束されていく様子が伺える。これにより $P_1 = 5.56 \times 10^{-3}[\text{cm}/\text{ns}]$, $P_2 = -3.11 \times 10^{-6}[\text{cm}/\text{ns}^2]$ と決定することが出来た。またパラメータが収束した時点での d と t_1 の関係のプロットを、決定した x - t relation でフィットしたものが図 4.13 である。これを見ても正しくフィットできていることがわかる。

空間分解能

ここまで求めてきたパラメータの妥当性を見るためにドリフトチューブの空間分解能を調べる。

図 4.14 に示した概念図のように先ほど決定した x - t relation を使用しドリフト距離を求め、3層積みにしたドリフトチューブの layer0,2 を使用し飛跡を再構成し、layer1 のワイヤーと飛跡の距離を d とするとき、 d と layer1 のドリフト距離 x_1 の差 R を評価するグラフを図 4.15 に示す。

図左はドリフト距離と R の Scatter Plot を示す。 x - t relation が正しく決定できていればすべてのドリフト距離に対して $R = 0$ に分布するはずである。グラフを見ると概ね 0 近辺に分布しており、射影 (図右) をとると $\sigma \sim 355\mu\text{m}$ である。この値には 3 本分のドリフトチューブの誤差を含んでいる。

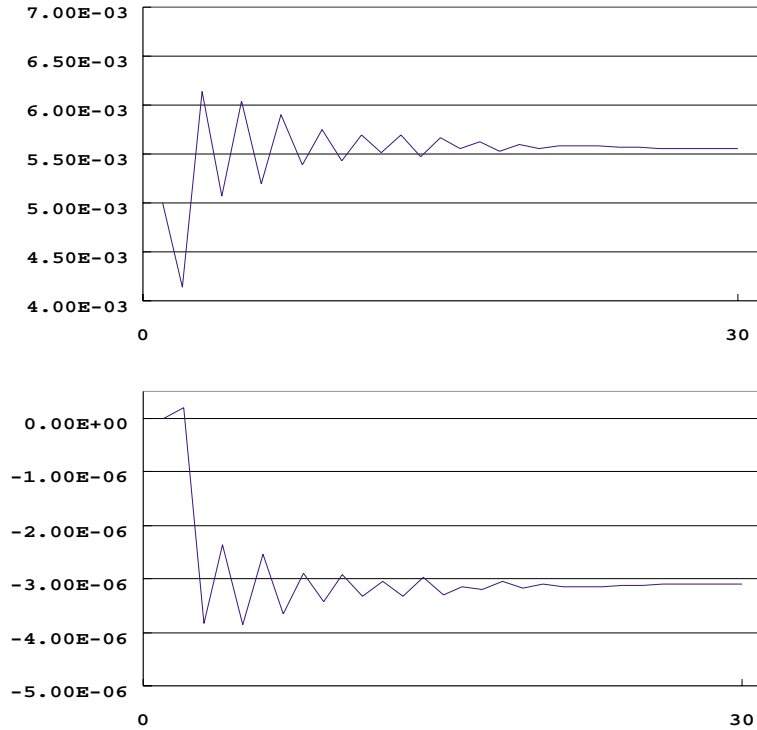


図 4.12: パラメタの変化 (上: P_1 下: P_2)、横軸は fit の回数

図 4.14 の測定では宇宙線の角度はせいぜい 10 度程度であり、図 4.15 にプロットしている R は近似として

$$R = 2.5 - \left(\frac{X_0 + X_2}{2} + X_1 \right)$$

と表すことが出来る (図 4.16)。

この分布の誤差を σ_R 、各ドリフトチューブ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、

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

である。このことからドリフトチューブ 1 本あたりの分解能は $\sigma \sim 290 \mu m$ となる。この値は要求されている性能を十分満たしている。

他の層の T_0 を図 4.17 から上側のドリフトチューブを 1080[ns]、下側を 1070[ns] と決定し、さきに求めた P_1, P_2 とあわせてすべての x - t relation を決定した。図 4.15 右と同様にして表したものを図 4.18 に示す。この図から他の各層についても要求される性能は十分満たしていることがわかる。さらに特定のドリフトチューブだけでなくすべてのドリフトチューブについての結果を重ね合わせたものが図 4.19 である。各ドリフトチューブの個性が出て分布は広がっているが、要求されている性能 ($\sim 1mm$ 程度の分解能) は満たしていることが解った。

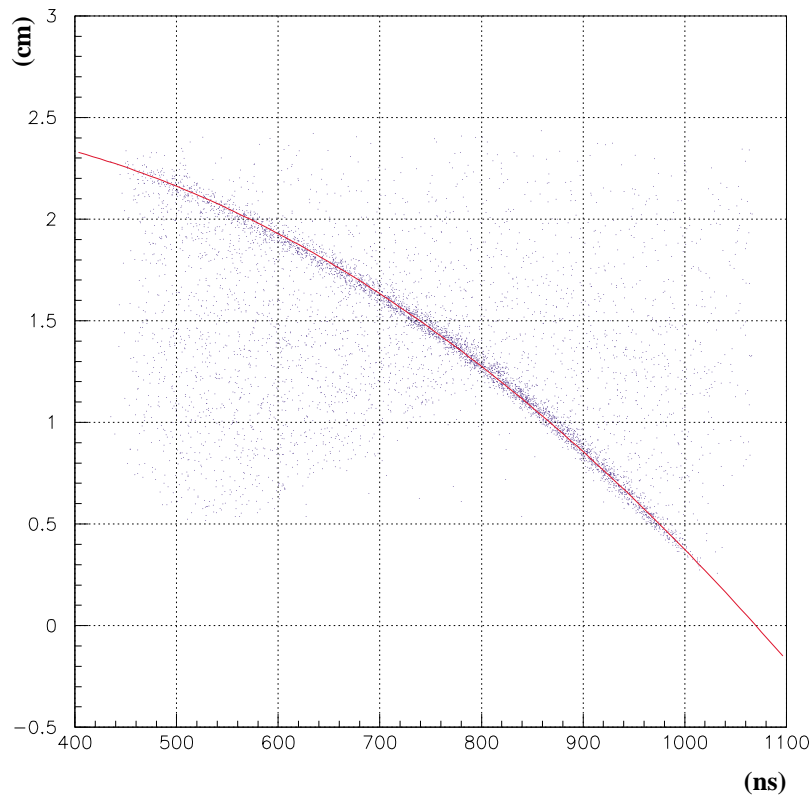


図 4.13: パラメータが収束した時点での d と t_1 との関係、およびそれを決定した x - t relation でフィットしたもの

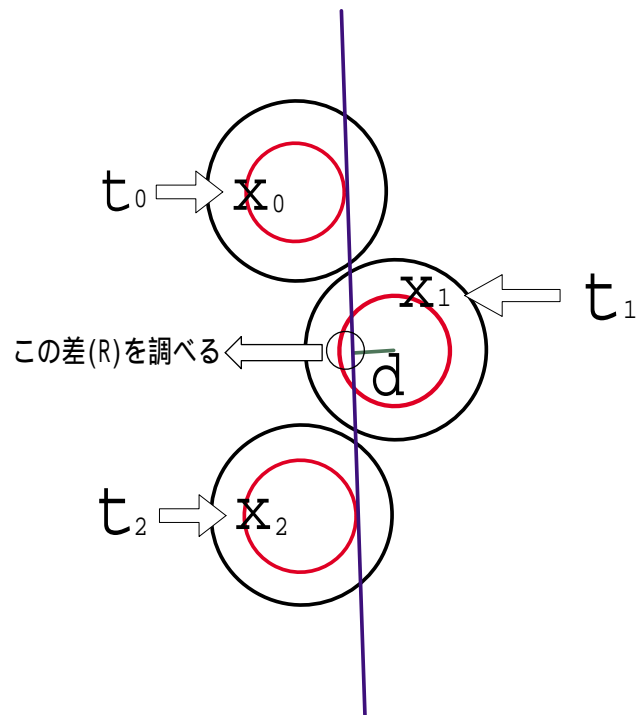


図 4.14: 空間分解能として調べるべき直線とドリフト距離の差

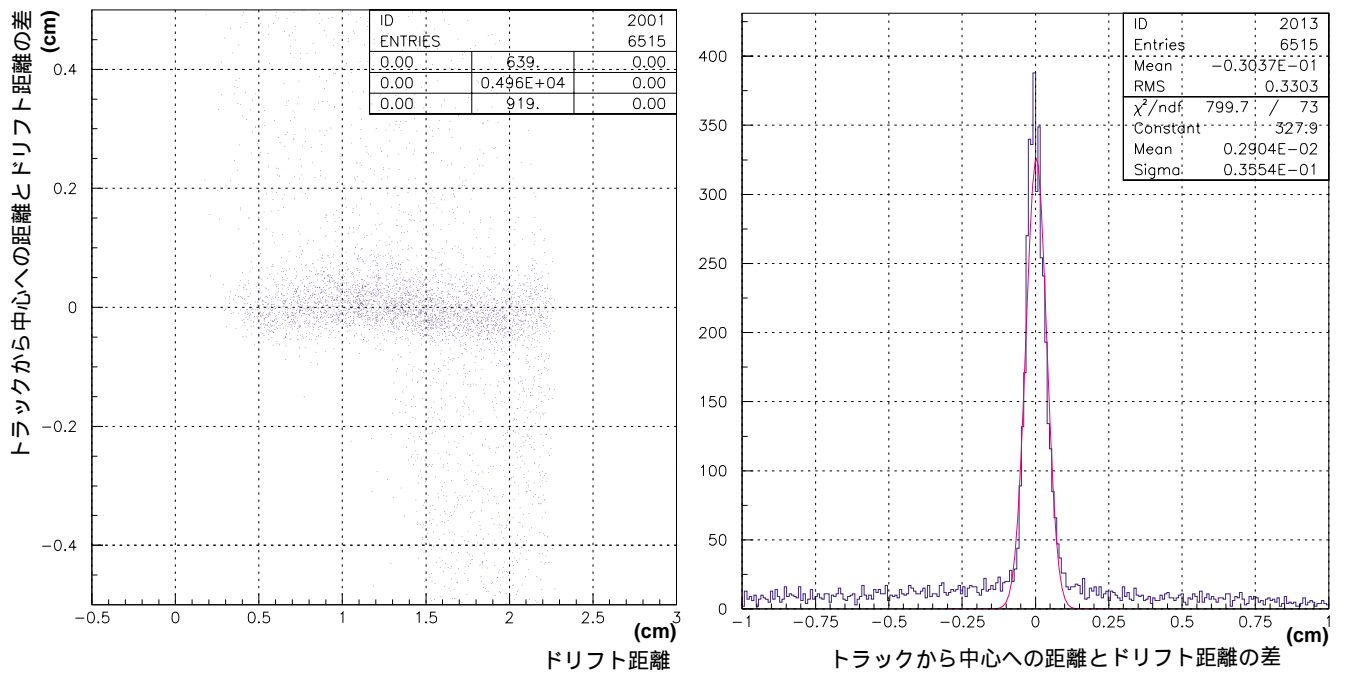


図 4.15: 図 4.14 で示した R の評価。左がガス領域全体にわたる R の値、右がその射影。

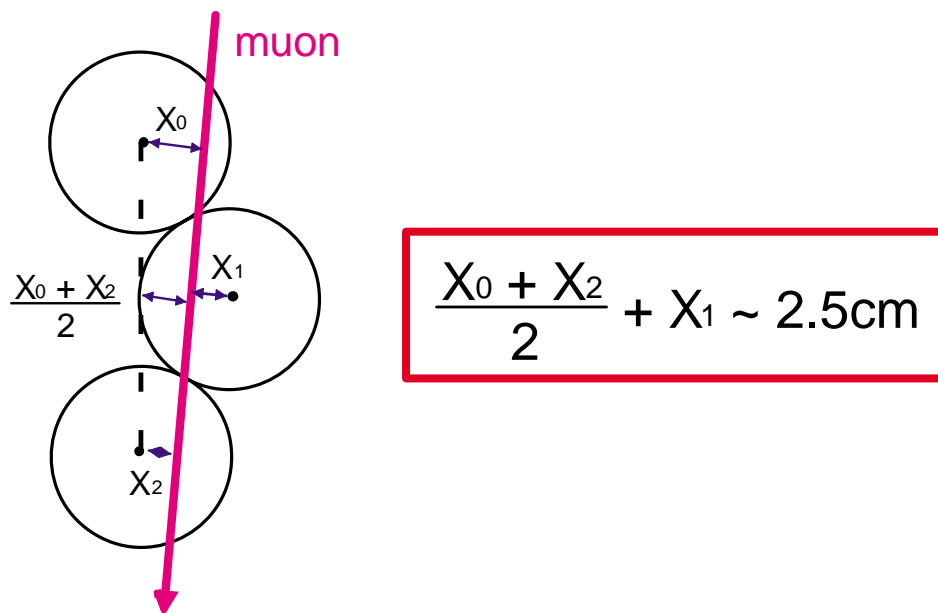


図 4.16: 3層の Drift Length の相関

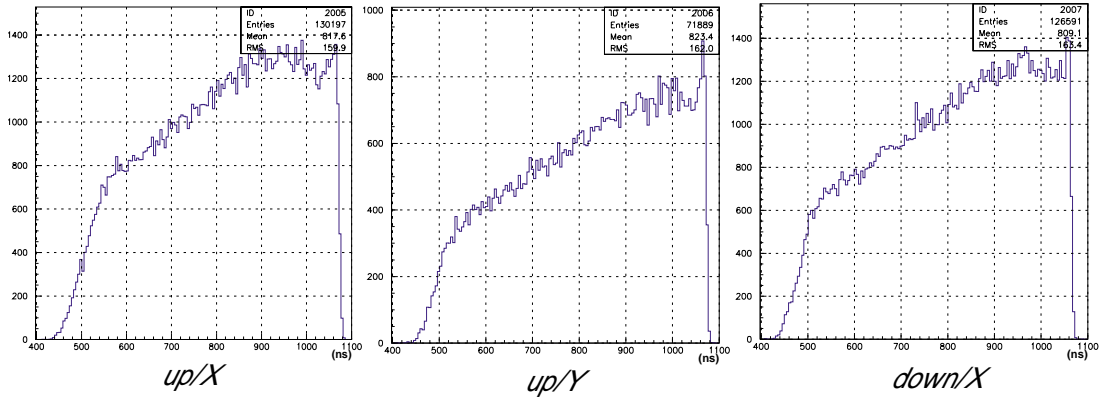


図 4.17: 各層 Drift Tube の時間分布。図 4.9 と同様である。

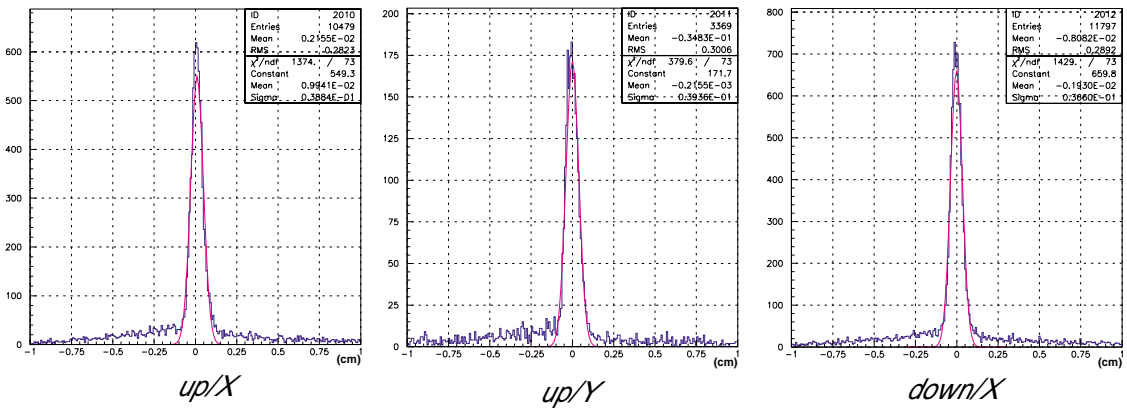


図 4.18: T_0 のみ変更して図 4.15 と同様の図

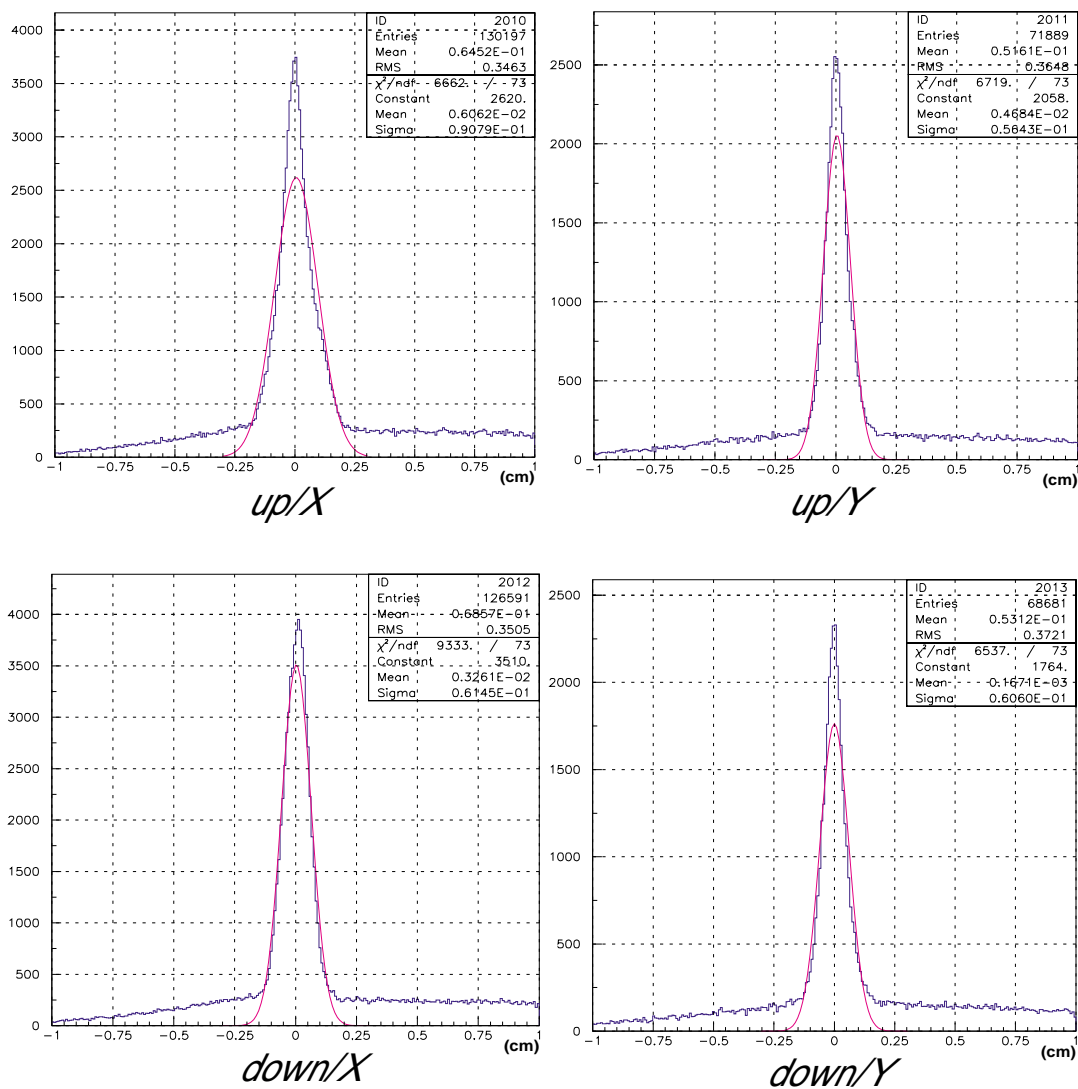


図 4.19: 全ドリフトチューブの分解能の重ねあわせ

4.5 TGC

宇宙線テストでは TGC をパレットに載せた状態で検査設備に挿入し検査する (図 4.20 左)。T7Triplet に対しては 8 台分のスロットを用意しており、最大 8 台同時に検査することが出来る (図 4.20 右)。

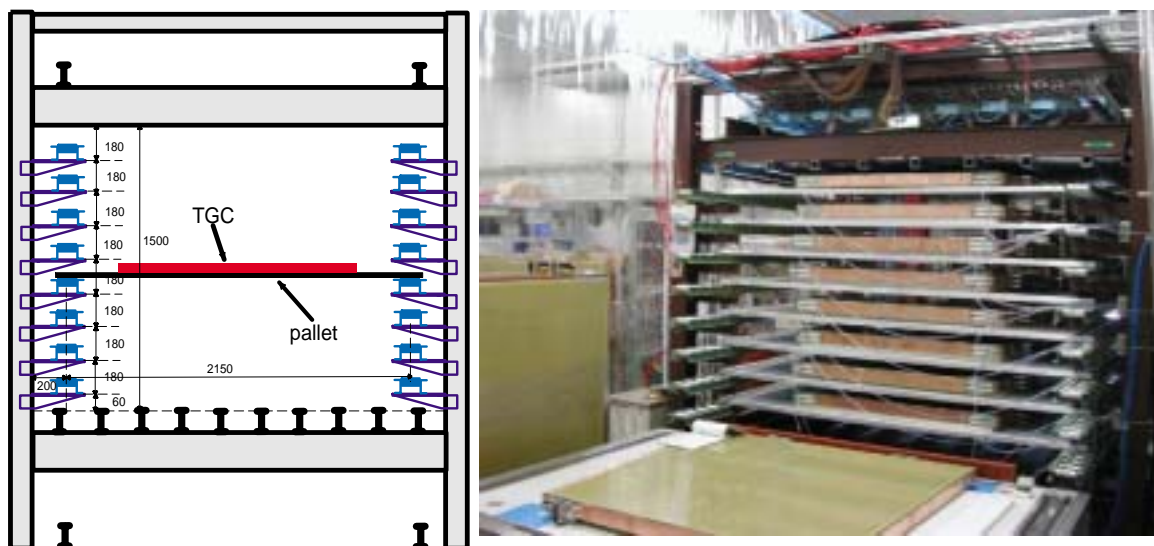


図 4.20: 架台部分 (左、単位 mm) と TGC8 台での検査の様子 (右)

ガスシステムは図 4.21 で表されるものを使用する。液体 n-pentane と CO_2 をミキサーに通し $\text{CO}_2 + \text{n-pentane}(55:45)$ の混合ガスを作り出す。それらを各系統に分岐して TGC に流入する。最下流ではアフタバブラーを通して排出する。TGC は内部圧と外気圧の差圧に非常に弱いのでガスの圧力、流量をモニターして問題が発生すると大気開放するなどの安全対策が施されている。また温度が低下すると n-pentane が液化する恐れがあるため保温対策が施されている。

TGC に対する印加電圧は 3.0kV とする。これは 5.2.1 節の HV curve から解るとおりちょうど検出効率がプラトーに入る値になっている。つまり TGC に問題があるとき発見しやすい印加電圧を設定している。T7 ではワイヤーは 24ch、ストリップは 32ch 存在する。T7Triplet を 8 台同時にテストする場合、ワイヤー : $24\text{ch} \times 3\text{layers} \times 8\text{TGC} = 576\text{ch}$ 、ストリップ : $32\text{ch} \times 2\text{layers} \times 8\text{TGC} = 512\text{ch}$ 、計 1088ch 読み出す必要があり、この大量のシグナルは SWINE によって読み出すことになる。TGC からのシグナルは ASD を用いてデジタル信号に変換される。変換されたシグナルは SWINE への入力となり記録される。SWINE で ASD 16ch 分の論理和を取ったシグナルを作り出し、TMC に入力することでタイミング情報を記録している。TMC・SWINE については次節に述べる。

4.6 DAQ system

これまで述べてきた検出器に加えて、回路系、コンピュータおよびソフトウェアで DAQ システムは構成されている。このセクションでは各構成要素について説明する。

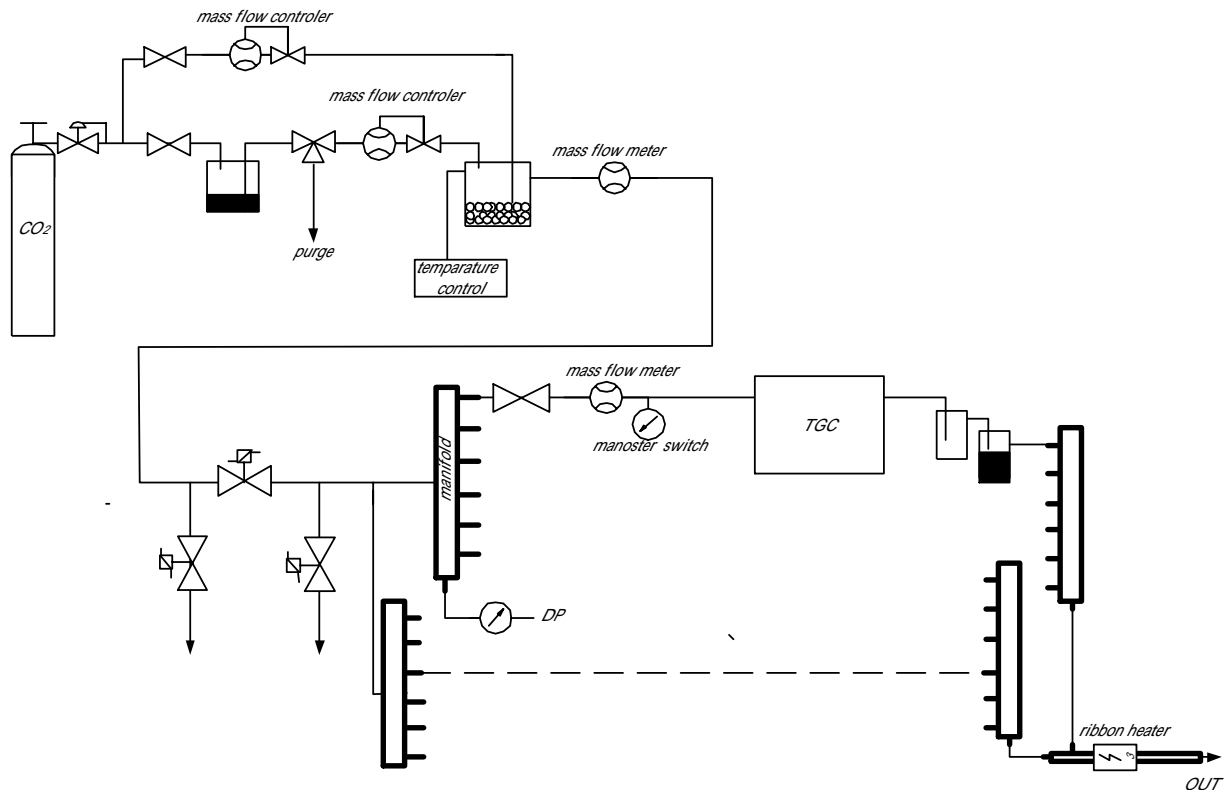


図 4.21: 宇宙線テストにおける TGC ガスシステム

4.6.1 ハードウェア環境

宇宙線テストのデータ収集用バスには VME を採用している。図 4.2 のロジック回路を通して、シンチレーターのヒットからトリガー信号を作り出す。この信号を TMC に入力しイベント発生を通知する。また、インタラプト & I/O レジスタを用いることで VETO 信号を作り出し、データ読み込みの間のトリガーをブロックする。TGC およびドリフトチューブの信号は ASD ボードを通しデジタル信号に変換されてから VME モジュールである TMC, SWINE でそれぞれ読み込まれる。TGC のタイミング情報は SWINE から ASD16 チャンネルの OR シグナルを取り出し、TMC に入力することで収集する。(図 4.22 参照)

4.6.1.1 TMC

TMC は Time Memory Cell の略で、高エネルギー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。TMC は共通のスタートシグナルからそれぞれのストップシグナルまでの時間を計るコモンスタートとそれぞれのスタートシグナルから共通のストップシグナルまでの時間を計るコモンストップの 2 モード搭載しているが、検査設備ではコモンストップで使用している。コモンストップにおけるシグナルのタイミング図を図 4.23 に示す。またマルチヒットに対応しており、ストップシグナルからさかのぼってタイムレンジに入っているシグナルすべてについて記録する。そのため同一チャンネルが複数回ヒットした場合でもすべてのヒットについて記録することが可能である。

TMC は 1 モジュールあたり 32 チャンネルの読み出しが可能である。検査に使用する検出器は

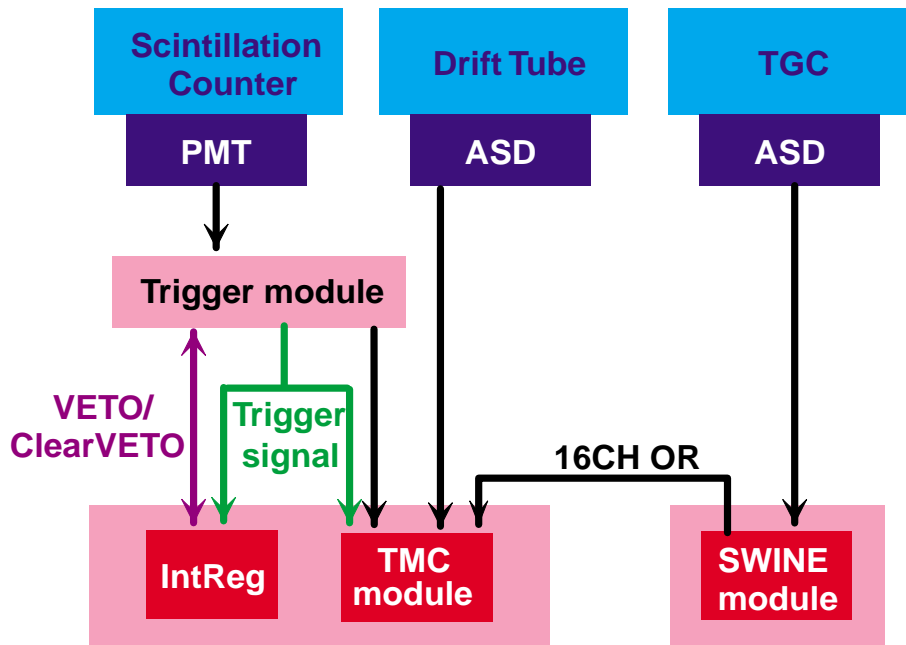


図 4.22: DAQ 構成 - 検出器 ~ エレクトロニクス

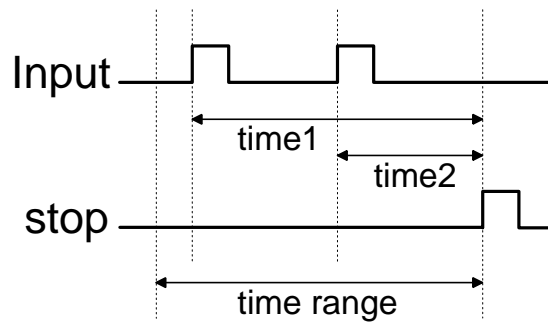


図 4.23: TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode)

ドリフトチューブ 428 本、シンチレータ 44 本、さらに T7Triplet を 8 台検査する場合の TGC の時間情報が ASD の数と同じ 80 チャンネル存在するので全部で 552 チャンネル読み出すことになっている。現在合計で 18 台の TMC を使用している。

4.6.1.2 SWINE

TGC のヒット情報は SWINE を用いて収集する。SWINE は Super Wire Net Encoder の略で高エネルギー加速器研究機構で開発された MWPC 等から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 と HOG に電源を供給するとともに PORQ からの制御信号を HOG に伝える役割を果たす。PORQ は各 VME クレーンに 1 台必要で、50MHz の内蔵制御クロック、トリガー信号、ゲート幅、遅延時間などのコントロール信号を生成もしくは外部から受信し、J2 バックプレーンを経由して HOG に配信する。HOG は各クレーンに最大 15 台搭載可能であり、J2 バックプレーン経由で PORQ から供給される各種コントロール信号を用いて 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収まっていればヒットとなる。図 4.24 にシグナルのタイミングを示す。HOG1 台で 16 チャンネルからなる ASD ボード最大 4 台分を読み出すことができ

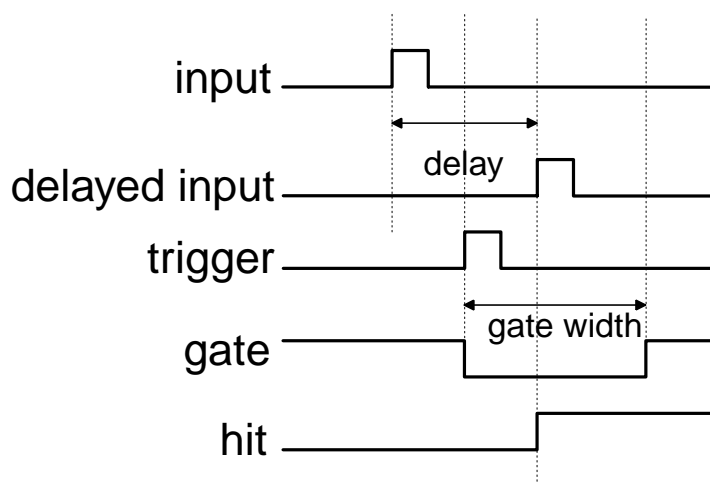


図 4.24: SWINE におけるシグナルのタイミング

る。また ASD ボードに閾値電圧 (V_{th}) と $\pm 3.3V$ の電源とを供給する。さらに ASD ボードごとに 16 チャンネル OR され NIM 信号として出力されるので、これを TMC で読むことで TGC のヒットの時間情報を得ることが出来る。T7Triplet を 8 台検査する場合 TGC の読み出しは合計 1088 チャンネルになる。これをすべて読み出すために HOG モジュールを 20 台用意している。

4.6.1.3 コンピュータ環境

DAQ システムのコンピューターとして PC を採用し、OS は PC 用 UNIX として広く普及している LINUX を採用している。読み出し用モジュールを乗せる VME クレーンを含めたコンピューター環境の設計を図 4.25 に示す。

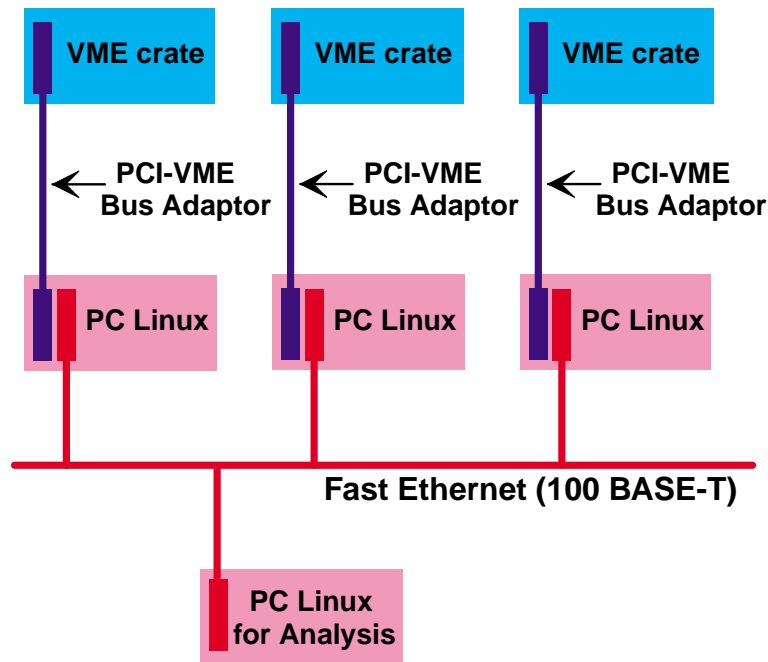


図 4.25: コンピュータ環境

構成要素は PC、VME、PC-VME インターフェース、FastEthernet によるネットワーク環境である。

PC-VME インターフェース PC と VME bus とのインターフェースとして Bit3 社製の model616 PCI-VME bus Adaptor を使用する。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。PCI カードに対してデバイスドライバが必要になるが、LINUX 上で動作する vmehb というドライバが開発されて Web 上で公開されている。また、このドライバを利用した C 言語ライブラリである vmlib も公開されているので検査設備ではこれを用いてソフトウェアを開発している。これらを使うことで VME のメモリ空間を PCI 上のメモリと同様に扱うことができるので、VME モジュールを直接操作することができる。

ネットワーク分散システム 検査設備における DAQ システムは、膨大なチャンネル数の読み出しを持ちながら処理性能を維持しなければならない。このため PC と VME クレーンを複数台用意し、処理を分散させることでその要請に答えている。これらの PC からのデータを取りまとめるためにネットワークを介して分散して配置する。ネットワークには転送速度 100Mbps の Fast Ethernet(100 BASE-T) を用い、高速なデータ転送に対応している。またこれらデータ読みだしのための PC とデータ解析 PC を別に配置することで、ネットワーク分散システムの利点をさらに活用し、全体の性能を向上させている。

NFS ネットワーク上に分散した PC からのデータをまとめ、解析プロセスに受け渡すために、NFS(Network File System) を利用している。NFS とは標準的な UNIX OS で利用できる基本的な機能であり、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ある。これにより各コンピュータは通常のファイルを扱うのとなんら変わりなくネットワーク上のファイルにアクセスできるようになる。

4.6.2 データ読み出しプロセス

VME に接続している各 PC はデータを読み出すプロセスをひとつずつ持つ。シンチレーターからのトリガー信号を TMC 経由で受け取った PC がソケット通信を介して他の PC に通知することで同期を取りながらデータを収集する。ソケット通信では 1 対 1 で通信を確立するため、TMC に接続された PC にサーバーとしてふるまうマスタープロセス、SWINE に接続された PC にそのクライアントとしてふるまうスレーブプロセスを設定しそれぞれ通信を行うこととする。マスタープロセスとスレーブプロセスによる読み出しシーケンスを図 4.26 に示す。

4.6.2.1 VME へのアクセス

vmelib を使用し VME にアクセスするが、利用する関数は VME バス上のアドレス空間を PC 上の仮想メモリ空間に割り当てる `vme_mapopen()` と割り当てを閉じる `vme_mapclose()` の 2 つである。これによって PC の通常のメモリ空間にアクセスするのと変わりなく VME のアドレス空間を直接操作することが可能になる。図 4.26 の各 VME へのアクセスについて説明する。

Initialize TMC · Initilaize IntReg · Initialize SWINE `vme_mapopen()` 関数を使用し、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、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が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、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。Interrupt & I/O Register の状態を読み出し、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()` 関数を使用し、VME へのアクセスを終了する。

4.6.2.2 ソケット通信による PC 間の通信

複数の PC でデータ収集をおこなうため、それぞれの PC が同期を取りながらデータ収集する必要がある。同期を取る手段として PC 間のソケット通信を採用している。図 4.26 のソケット通信による通信について説明する。

SendTriggerMessage · RecieveTriggerMessage TMC 経由でトリガー信号を受け取ったマスタープロセスが、そのトリガー情報をスレーブプロセスに通知する。

SendReadyMessage · ReceiveReadyMessage スレーブプロセスからデータ読み込みの完了を通知する。正常に完了すると READY シグナル、エラーが生じると NOT シグナルを送る。

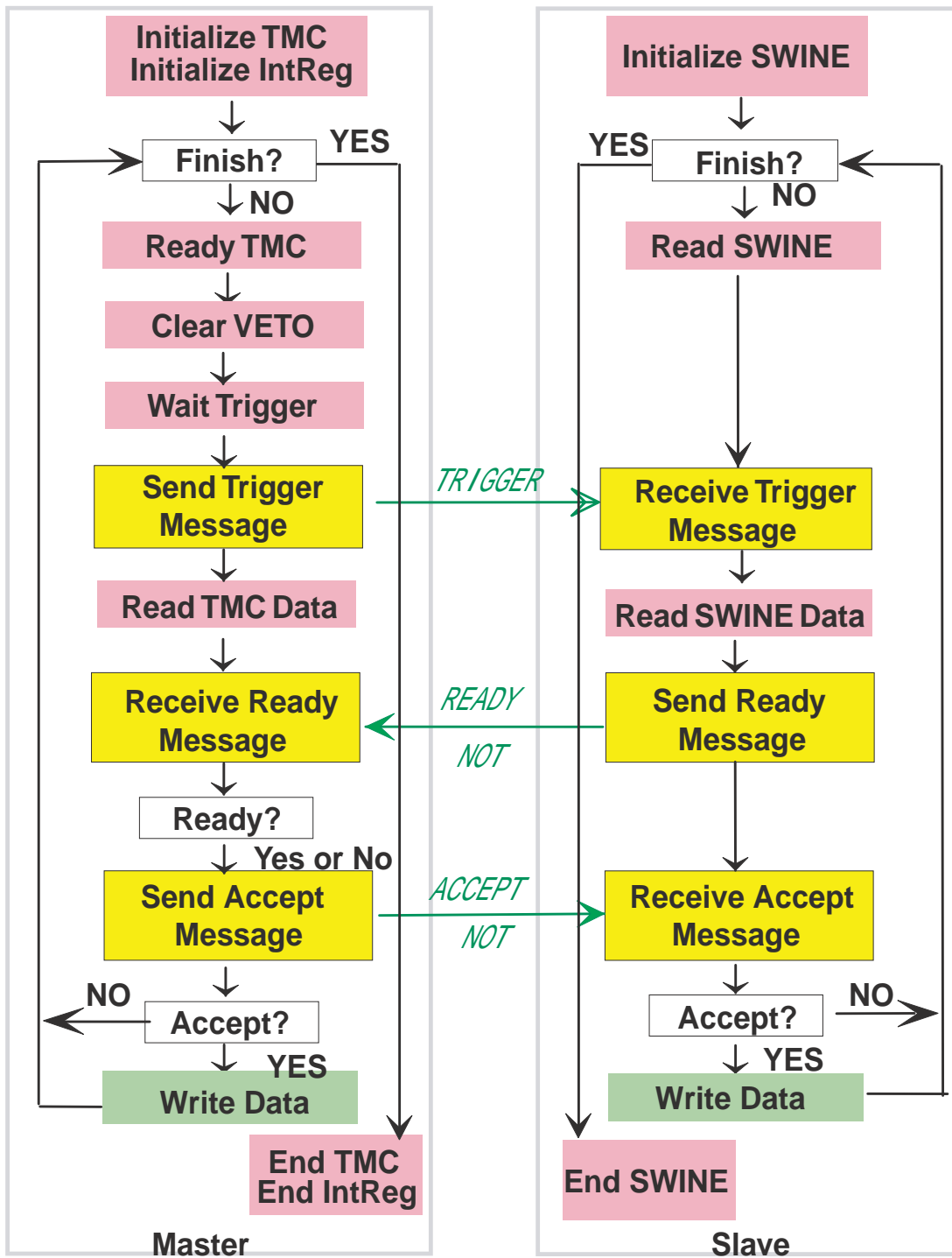


図 4.26: データ読み出しシーケンス

SendAcceptMessage・RecieveAcceptMessage マスタープロセスが各スレーブプロセスに RecieveReadyMessage で受け取ったシグナルを通知する。ひとつでも NOT を受け取ると NOT を通知する。

4.6.2.3 NFS 経由のデータ転送

NFS を利用しているので通常のファイルに書き込むのと同様の手続きでデータの書き込みが可能である。

WriteData ネットワーク上のファイルにデータを書き込む。

4.6.2.4 Logging

TGC に印加している HV がトリップすることがある。そのため TGC の HV の状態をつねにチェックし HV が印加されていないイベントを特定し、除去する必要がある。

これを実現するためにまずデータ読み出しプロセスでは時刻とイベント数の対応を run***.dtm(dtm ファイル) として 10000 イベントごとに記録する。それと並行して、HV の初期状態と、変動があった場合にその変動を時刻とともに run***.hv(hv ファイル) に記録するプロセスを稼働させている。HV チャンネルと TGC との対応を記録しているコンフィグレーションファイルを参照することで、問題のあるイベントを解析の時点でカットすることが可能になる。

4.6.3 データ解析プロセス

検査設備においてデータ収集とデータ解析は独立している。データ収集プロセスで作成されたファイルを通じて情報をデータ解析プロセスに受け渡し、そのファイルをもとに解析を進める。解析プロセスでのデータフローを図 4.27 に示す。以下に解析プロセスでの主な項目について説明する。

Data Conversion

3つのプロセスが独立に読み出したデータはそれぞれバイナリ形式で保存されている。それらを結合して ASCII 形式の run***.dat (***)はランナンバーを表す、以下 dat ファイル) として出力する過程が Data Conversion である。基となる3つのデータは TMC,SWINE のモジュールナンバー、チャンネルであるため、これらを実際の検出器の種類、チャンネルに変換することが必要になる。VME モジュールのチャンネルと検出器のチャンネルの対応を記録しているコンフィグレーションファイルを参照しながら、実際の検出器の番号、位置、チャンネルに再構成し dat ファイルとしてひとつにまとめる。

Tracking

宇宙線テストは宇宙線ミュオン飛跡を用いて検査する。したがって各検出器から得られた情報を基に実際のミュオン飛跡を正確に再構成することがきわめて重要である。この飛跡を再構成する過程をトラッキングと呼んでいる。検査設備ではドリフトチューブの情報を用いてトラッキングを行い、その結果を run***.dst(***)はランナンバー、以下 dst ファイル) として出力する。dst ファイルには飛跡を再構成できたイベントのみ記録されており、このファイルをさらに解析することにより TGC の検出効率を導出する。

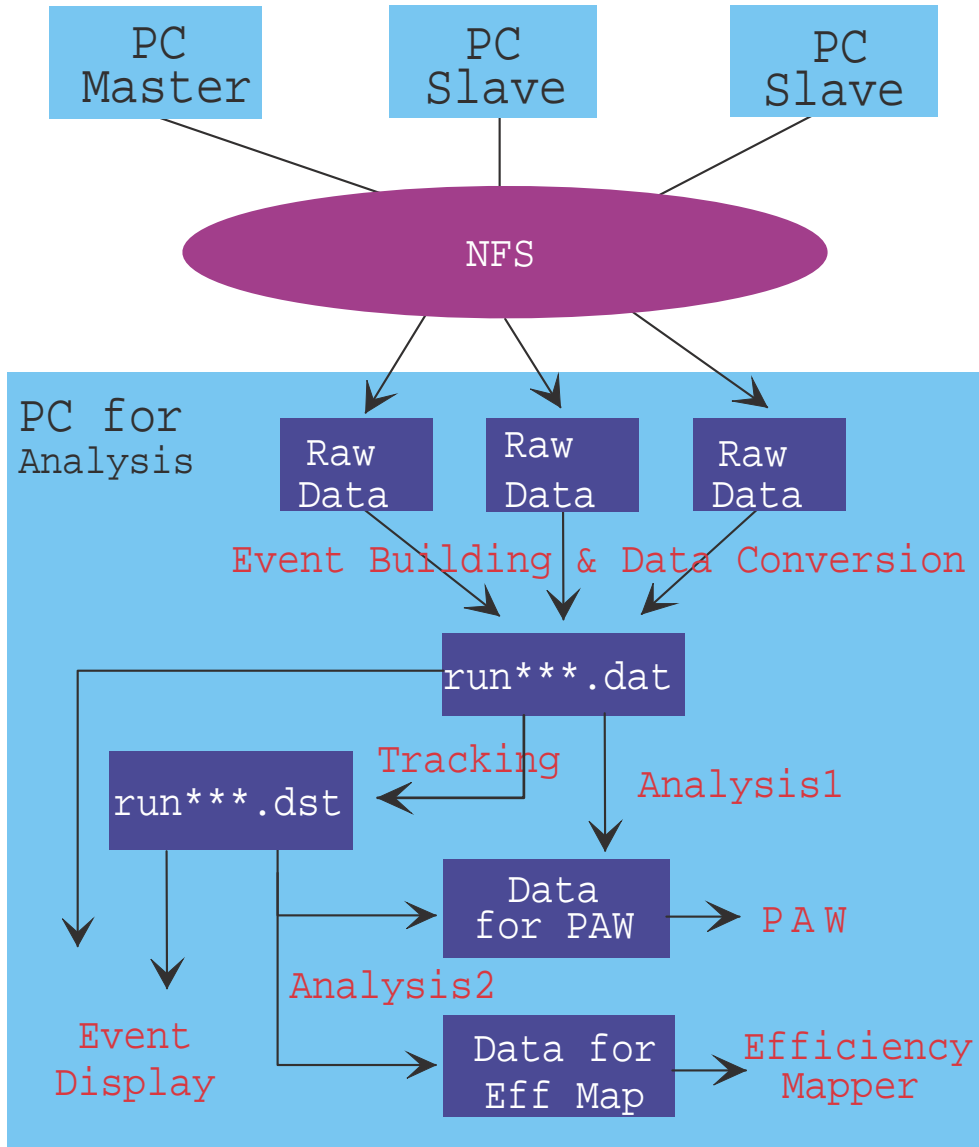


図 4.27: DAQ システムにおけるデータフロー (赤字はプログラムを表す)

Analysis

dat ファイル、dst ファイルを解析するためのプログラムが Analysis1, Analysis2 である。共通の機能として各検出器のヒット数分布などの各種ヒストグラムを生成し、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で表示できる形式で出力する。また dst ファイルを解析する Analysis2 ではトラッキングにより再構成された飛跡の情報と、TGC のヒット情報を基に TGC の検出効率を計算する。ここで計算した検出効率を出力するファイルには拡張子 ef を指定し (以下 ef ファイル)、専用ビューアーである Efficiency Mapper を用いることで視覚的にエフィシエンシーマップとして表示させることが可能である。

Event Display

各検出器のヒット情報が記録されている dat ファイルと、それに加えて宇宙線の飛跡の情報が記録されている dst ファイルは、Event Display を用いることでヒットの有無、トラッキングの結果などを視覚的に表示することが可能になる。これは個々のイベントを詳細に検討するうえで必要となる。図 4.28 に dst ファイルを表示した Event Display の一例を示す。

Event Display に付与されている機能として

- 拡大縮小機能
- スクロールバー機能
- ボタン操作によりマルチイベントに対応
- イベントナンバー指定機能

がある。

Efficiency Mapper

Efficiency Mapper は、TGC の検出効率を記録した ef ファイルを読み込み視覚的に表示する専用ビューアーである。検査設備において TGC の検出効率とその一様性を見ることは検査の基準であるので非常に重要である。

Efficiency Mapper ウィンドウの概観は図 4.29 である。EfficiencyMapper の機能として

- ef ファイルを読み込みエフィシエンシーマップとして表示
- エフィシエンシーマップを JPEG 形式で保存
- TGC 有感領域全面のトータルの検出効率を計算
- TGC の位置決定 (5.1.5 節参照)
- 各検出効率 (%) に対応する色を変化

を用意している。

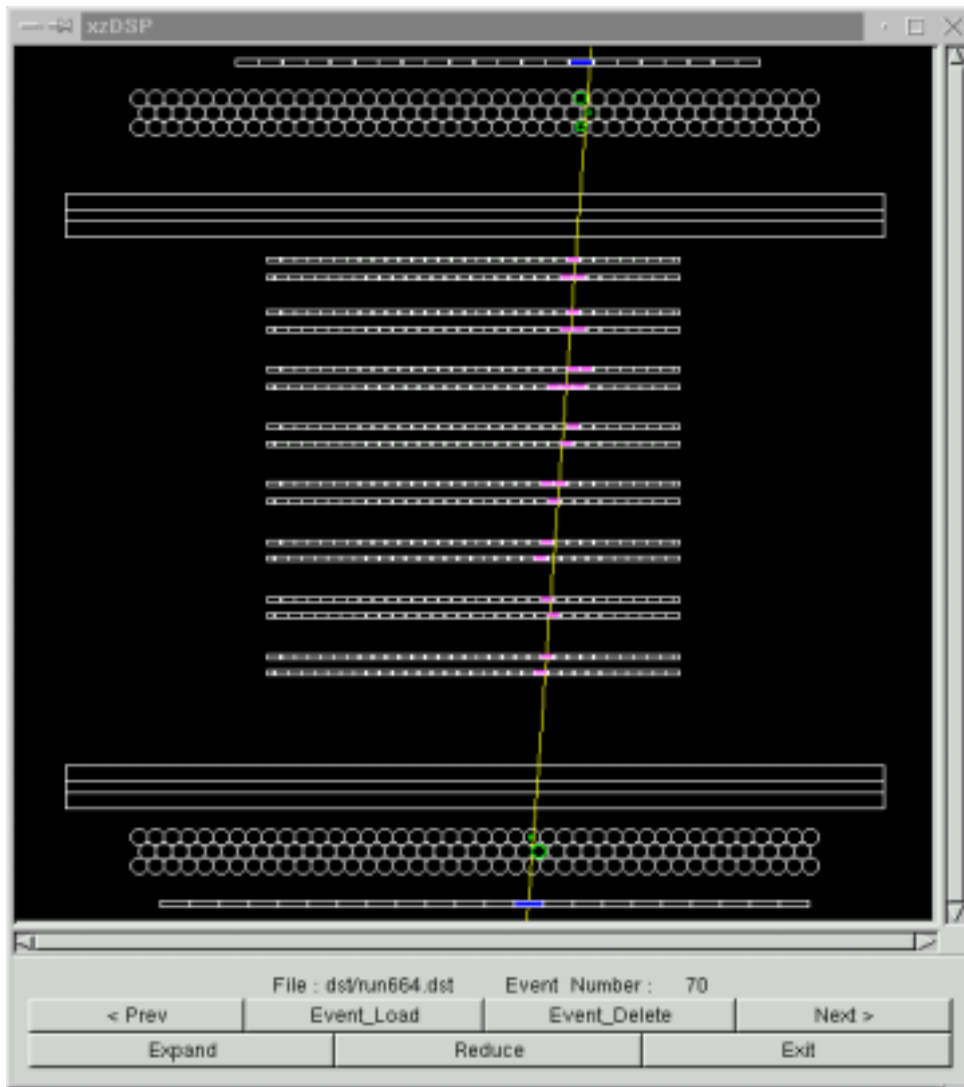
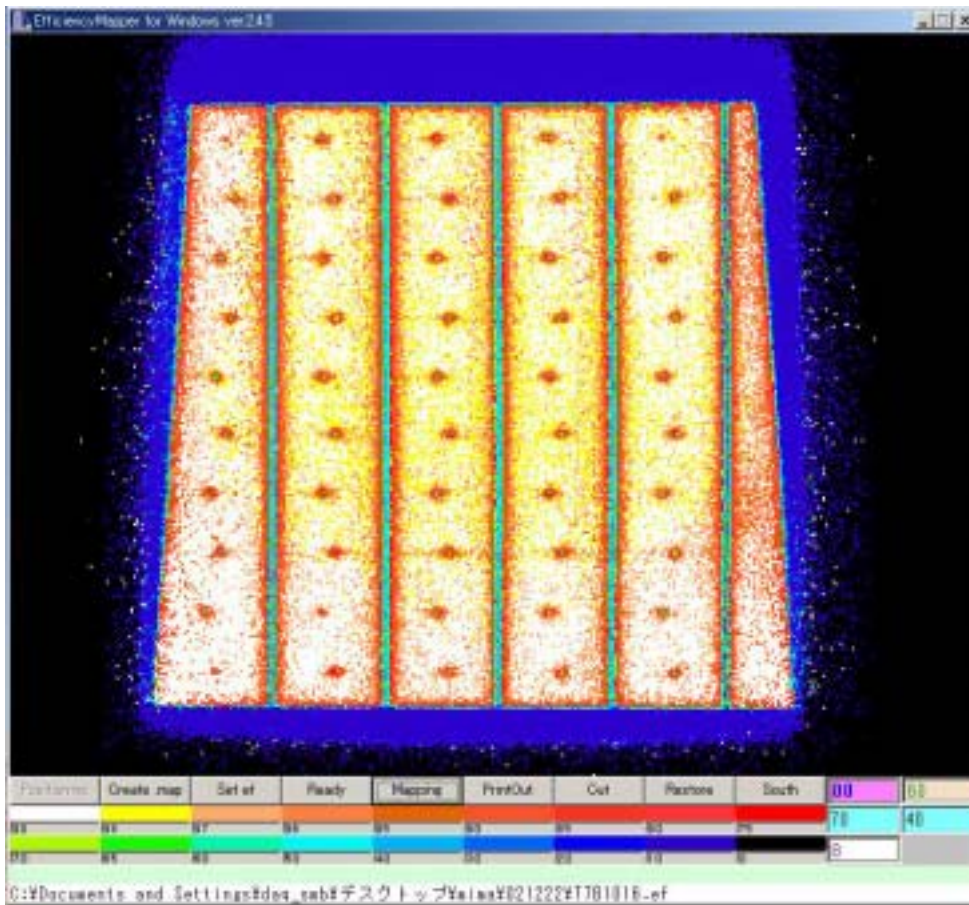


図 4.28: EventDisplay の一例



☒ 4.29: EfficiencyMapper

第5章 宇宙線テスト解析・結果

宇宙線テストにおける検査項目は前述のとおり、TGCの検出効率とその一様性・タイムジッターである。前章で述べたセットアップを用いて収集したデータからこれら検査結果を導き出すことになる。この章では解析プロセスと検査結果について述べる。

5.1 解析の流れ

TGCのワイヤーからのデータとストリップからのデータ、及びTMCからのデータは3台のPCで同期を取りながら収集され、独立にそれぞれバイナリ形式で保存される。このバイナリデータをrawデータと呼んでいる。3つのrawデータを基に解析を進めることになるが、エフィシエンシーマップ、タイムジッターを出力するに至る解析プロセスで行う主な項目は

- 3つのraw dataをひとつにまとめ、VMEのモジュールやチャンネルで構成されたデータを、測定器の種類、チャンネル等に変換するData Conversion
- Drift Tubeのデータを用いたTracking
- Analysis ProgramでTGCの検出効率、TGCヒットのタイミング分布を導出
- 結果をEfficiency Mapとして表示

となっている。以下に解析プロセスの各項目について説明する。

5.1.1 Raw Data

バイナリ形式の各rawデータのフォーマットは表5.1で表される。

左側はマスタープロセスが作成するrawデータのフォーマットであり、TMCからの情報を保持する。これはTGCのヒットの時間情報、ドリフトチューブ・シンチレーターのヒット情報に対応している。全体がSTART_FLAGとEND_FLAGに囲まれた形になっており、データ内の各要素もそれぞれフラグで囲むことで、データの破損などが生じた際に復旧しやすい構成になっている。CFG_FLAGとCFG_END_FLAGには、モジュール番号・チャンネルを検出器の位置に変換する際参照すべきコンフィギュレーションファイルを記録している。RUNbegin_FLAGとRUNbegin_END_FLAGにはランナンバー、データ収集開始時刻、及びコメントを記録している。EVT_FLAGからEVT_END_FLAGの間が1イベントに対応し、これらを積み重ねる形ですべてのイベントについて記録していく。EVT_FLAG内にはまずイベントナンバーが書かれる。つづいてTMC_FLAG,TMC_END_FLAG内にTMCからのデータサイズを書き込み、続いて実際のデータをシグナル到達時刻の早いものから順に書き込む。最後にRUNend_FLAG,RUNend_END_FLAGを設置し、ランナンバーとデータ収集終了時刻を記録する。

右側がスレーブプロセスが作成するrawデータのフォーマットで、TGCのヒット情報に対応するSWINEからの情報を保持する。左側の表との違いはTMC_FLAGがSWINE_FLAGになっている部分で、TGCの各チャンネルに対するヒットの有無だけを記録する。

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 5.1: 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。)

5.1.2 Data Conversion

Data Conversion では前セクションで述べた複数の raw データのイベントナンバーを確認しながら 1 イベント分ずつ読み込み、ひとつのデータとしてまとめる。さらにデータを ASCII 形式に変換して出力する。

raw データの持つ情報は ASCII 形式の dat ファイル (run***.dat) としてまとめる。また、raw データが記録している TMC の時間情報は TDC カウントであるので、TDC カウントに変換定数 0.78ns/count をかけて実時間 (ns) に変換し dat ファイルに出力する。また第 4.4.2 節 (33 ページ) で決定した x-t relation を用いて導出したドリフト距離もあわせて出力する。解析の以降の段階ではこの変換された dat ファイルを使用することになる。

5.1.2.1 Data Format

Data Conversion 後の dat ファイルは ASCII 形式であり、また後述するトラッキングの結果再構成された飛跡の情報も、この dat ファイルに書き加えていくことが基本になる。以下に dat ファイルのフォーマットを示す。

```
#
# [HEADER]
#
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]

tgc_time       [X]
  [TGC#]      [layer]  [wire/strip]  [ASD_number]  [timing]  [multi_hit]

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

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

end            1
.
.
.
#
# [FOOTER]
#
```

[HEADER], [FOOTER] には、それぞれの RUN の開始時間・終了時間、ランナンバー、などが書き込まれるが、解析システムにおいて、データファイル内の#で始まる行はコメントとして読み飛ばすと約束している。event と end フラグで囲まれた部分が 1 イベントに対応している。tmc_sci はシンチレーターの情報、tmc_dt はドリフトチューブの情報、tgc_time は TGC のタイミング情報、wire_tgc は TGC のワイヤーからのヒット情報、strip_tgc は TGC のストリップからのヒット情報をそれぞれ表すフラグである。[X] にはフラグが示すデータの数を表す数字が書かれている。

tmc_sci は 4 つの数字から構成される。最初の 2 つは位置を、3 つ目が時間情報を ns 単位で表している。TMC がマルチヒットに対応しているため、最後の数字としてヒット数を記録している。シンチレーターの位置は、上下を [up/down] = 0, 1 で表現し、端から順に [counter#] = 0 ~ 21 と表現する。

tmc_dt は 7 つの数字から構成される。最初の 4 つは位置を、5 つ目はドリフト距離を cm 単位で、6 つ目は時間情報を ns 単位で、7 つ目はヒット数をそれぞれ表している。ドリフトチューブの位置は、上下を [up/down] = 0, 1、並べている方向を [X/Y] = 0, 1, 3 層積みの中での層を上から [layer] = 0, 1, 2、端から順に [channel] = 0, 1, ... と表現する。

tgc_time は 6 つの数字から構成される。最初の 4 つは ASD の位置を、5 つ目は時間情報を ns 単位で、6 つ目はヒット数をそれぞれ表している。1 行の情報は 1 台の ASD を単位とし、16 チャンネル中でもっとも早いヒットに対応する。T7 Triplet の検査の場合 ASD の位置は TGC の設備内での位置を [TGC#] = 0 ~ 7、TGC のレイヤーを [layer] = 0 ~ 2、ワイヤーとストリップの区別を [wire/strip] = 0 ~ 2、2 つの ASD を [ASD_number] = 0, 1 と表現する。

[wire_tgc] および [strip_tgc] はそれぞれ 3 つの数字で構成される。1 つ目は TGC の設備内での位置を、2 つ目は TGC のレイヤーを、3 つ目はチャンネルをそれぞれ表す。[TGC#] と [layer] は tgc_time と同様で、[channel] は端から順に [channel] = 0, 1, .. と表現する。

5.1.3 Tracking

Data Conversion によって出力された dat ファイルを読み込み、ドリフトチューブの情報から宇宙線の飛跡を再構成するプロセスがトラッキングである。解析プロセスにおいてトラッキングは中心的な役割を担っており非常に重要で不可欠である。検査設備では宇宙線の飛跡を直線であると仮定して再構成している。検査の速度をあげるために高い再構成の効率が要求されている。また、ドリフトチューブのノイズなどにより、実際には飛跡が通過していないにもかかわらず解析上飛跡を再構成してしまう場合がある。この飛跡をフェイクトラックと呼んでいるが、TGC の検出効率を非常に高い値で評価するためには、このフェイクトラックをできるだけ減らす必要がある。一方、多重散乱により宇宙線ミューオンの飛跡が数 mm 程度まがることが予想されるので、位置分解能に対する要求はそれほど厳しいものではない。再構成できたイベントについてのみ飛跡の情報を追加し、dst ファイル (run***.dst) として出力する。

5.1.3.1 Hit Pattern Selection

トラッキングの可能性を up/X, up/Y, down/X, down/Y の各ドリフトチューブでそれぞれ調べ、最終的に 4 つのレイヤーすべてでトラッキング可能であると判定されたイベントについてのみ実際に飛跡の決定をする。トラッキング可能性の判定はドリフトチューブのヒットパターンを解析することで行う。ヒットパターンを選ぶ際には各ドリフトチューブのドリフト距離は考慮に入っていない。ヒットパターンの解析はもっとも確からしいパターンから順に選び出し、順次トラッ

キング可能なものとして採用していく。また実際に直線の決定に用いるために使用するヒットをこの時点で決定する。

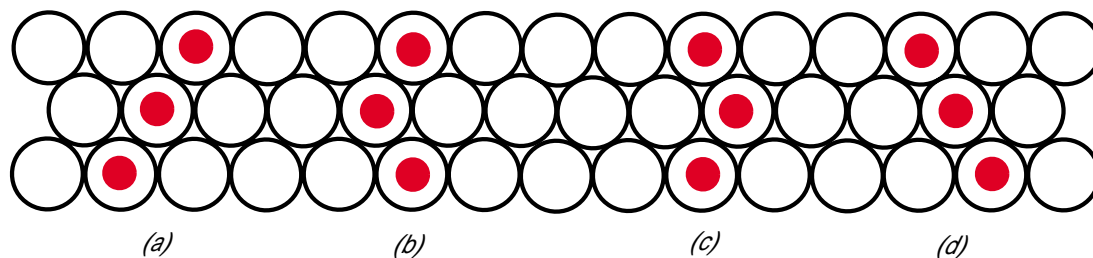


図 5.1: 理想的な 4 つのヒットパターン

3層俵積みのドリフトチューブを宇宙線が通過し、それをドリフトチューブが正しく検出した場合、図 5.1 の (a) ~ (d) のように縦に連続した 4 種類のヒットパターンが生じると考えられる。そこでまず、3層俵積みの中にこれらのヒットパターンが唯一見つかったとき、その層でのトラッキングが可能であると判定し、ヒットとして採用する。考えているヒットパターン以外にヒットが存在していても、理想的なヒットパターンがユニークに選べる場合はヒットとして採用している。図 5.2 の (a) ~ (c) の各 4 ヒットの中で白抜きのヒットはフェイクヒットであると判断できるので赤丸のヒットを採用する。このヒットパターンをパターン 1 とする。

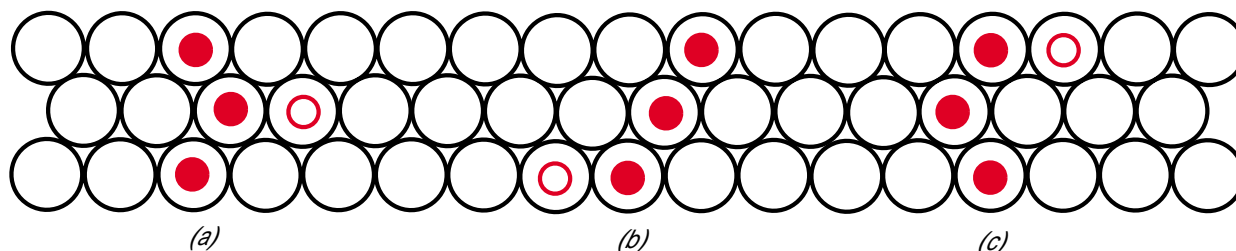


図 5.2: 3 つのヒットを採用できるヒットパターン

続いて図 5.3 のようなヒットパターンを考える。この場合理想的なヒットパターンをユニークに選び出すことができない。しかし (a) のヒットパターンの場合、下層の 2 つのヒットの少なくとも一方はクロストーク等によるフェイクヒットであるが、上層・中層の白抜きのヒットに関しては正しいヒットであると考えられる。よって、図のように明らかに正しいと判定できるヒットが 2 つ選べる場合、その 2 つをヒットとして採用し、トラッキング可能であると判定する。この

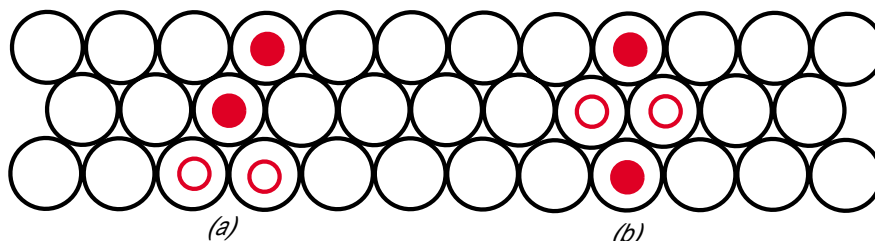


図 5.3: 2 つのヒットを採用できるヒットパターン

ヒットパターンをパターン 2 とする。

以上のヒットパターンがひとつも見つからなかった場合、図5.4のような理想的なヒットパターンから1ヒット少ないヒットパターンを探す。2ヒットのパターンが唯一見つかった場合それをヒットとして採用する。このヒットパターンをパターン3とする。

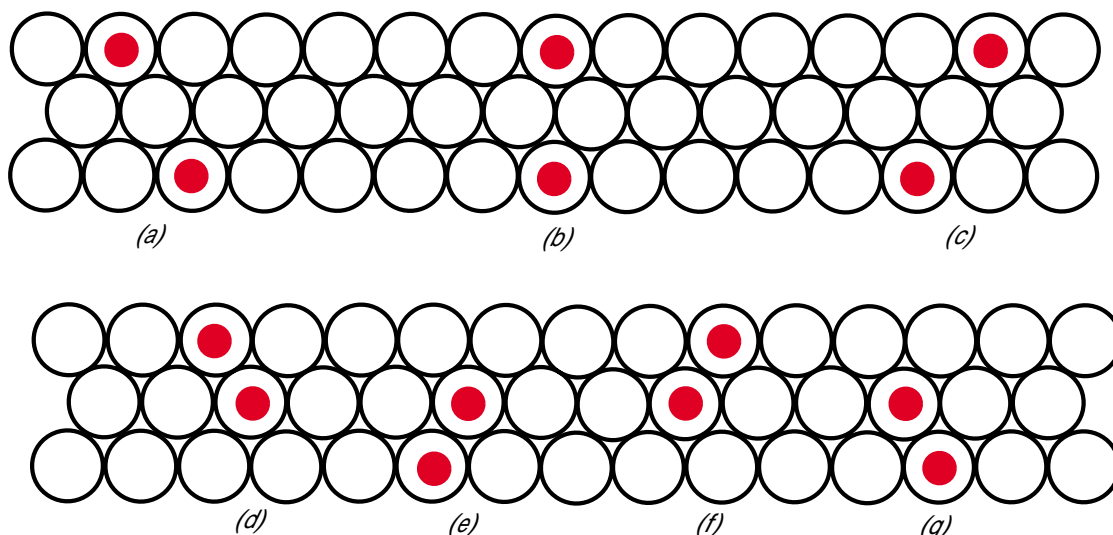


図 5.4: 2 ヒットで採用するパターン

それぞれの段階で選び出される割合を図5.5に示す。各層でのトラッキング可能なイベントの割合はおよそ90%程度であるが、各層のヒット可能性に相関があるので上下XY4層全体では72~73%程度になる。Hit Pattern Selectionでトラッキング可能であると判定されたイベントに関してのみ、宇宙線の飛跡に相当する直線を決定するプロセスに移る。

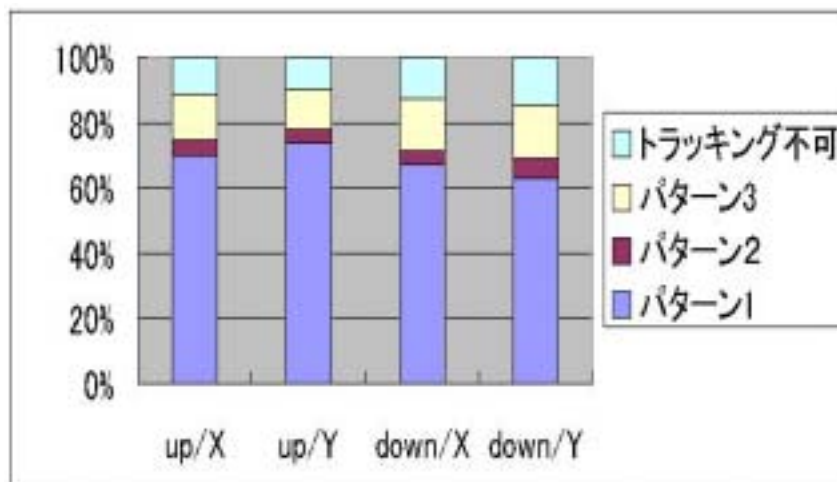


図 5.5: 採用されるヒットパターンの割合

5.1.3.2 直線の決定

宇宙線の飛跡に相当する直線を決定するために、Hit Pattern Selection で選び出したドリフトチューブのヒットのみを使用し、他のヒットに関しては無視することとする。この直線を決定するプロセスに必要な情報は使用するドリフトチューブのドリフト距離と位置情報である。飛跡の再構成は X/Y の各方向について独立に行い 2 次元的に再構成する。最終的には 2 つの 2 次元の飛跡を合成することで 3 次元の飛跡に再構成する。

各方向で使用できるドリフトチューブのヒットの数はそれぞれ Hit Pattern Selection で選び出した 4~6 である。まず図 5.6 のように一番上のヒットと一番下のヒットのドリフト距離に対応する円を考え、その 2 円の共通の接線を飛跡の候補として決定する。幾何的に 4 本の共通の接線が存在するが、残りの 2~4 本の DT の情報を用いて、一番もっともらしい直線を選び出す。直線からあるドリフトチューブの中心までの距離を d 、そのドリフトチューブのドリフト距離を x とするとき $\sum (d-x)^2$ を評価し、この値がもっとも小さくなる直線を選び、これを 1 方向から見た飛跡であると認める。ヒットのうち一番上と下のドリフトチューブに対する依存がやや大きい決定方法ではあるが、多重散乱による宇宙線のトラックの分布が数 mm 程度であること、また実用上解析のスピードを維持するという観点からも、現段階でこれ以上のトラッキング方法の改善は必要ないと考えられる。

トラッキングにドリフトチューブ 6 本を使用した場合に、最終的に決定した直線に対する $\sum (d-x)^2$ の値をプロットしたものが図 5.7 である。両方向とも概ね 0 近傍にピークがあるので多くのイベントを正しく再構成できていると考えてよい。また、この値が大きいとフェイクトラックの可能性が高くなるので適当なところでカットすることも可能であるが、すべての $(d-x)$ の値が 0.5cm となる 1cm² でカットした場合、各方向で 20% ずつカットされてしまう。これは効率的な再構成という要請にそぐわないので行わず、フェイクトラックのカットは次節の Analysis で行う。

5.1.3.3 DataFormat

トラッキングにおいて宇宙線の飛跡の決定は 2 点を通る直線という形でおこなっている。この情報を dat ファイルに付け加え、dst ファイルとして出力する。付け加えられる情報のフォーマットは

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

であり、この情報を end フラグの直前に書き込む。hit_line は飛跡情報に対するフラグであり、つづく 1 は飛跡の本数を表すが、唯一の飛跡を考えているので常に 1 である。次の一行は直線の通る 2 点を cm 単位であらわしたものであり、最初の 3 つはセットアップの最上部、残りの 3 つは最下部の通過位置に対応している。また dst ファイルは再構成できたイベントのみを記録し、番号を付け直しているため、どのイベントが実際の検査の何イベント目に対応しているのかわからなくなっている。しかし HV のトリップなどによりカットをかけるべきイベントを区別するためには実際の検査でのイベントナンバーが必要になる。これに対処するため dat ファイルでの 10000 イベントごとに

```
$dat_event_num [X]
```

のフラグを挿入する。[X] は dat ファイルでのイベントナンバーを表しており、dtm ファイル、hv ファイル (4.6.2.4) を参照することで 10000 イベントごとにカットをかけることが可能となっている。

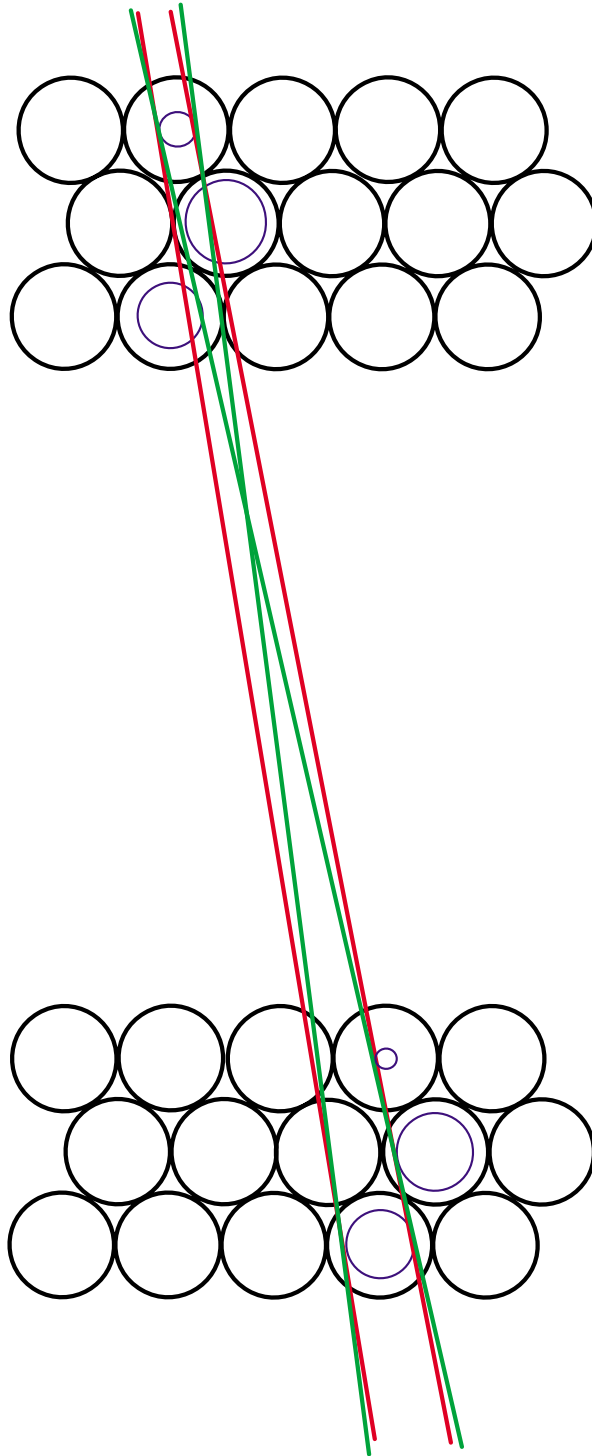


図 5.6: 4本の飛跡候補。まず一番上と下のドリフトチューブで4本の候補を割り出し、残りのドリフトチューブで1本に決定する。

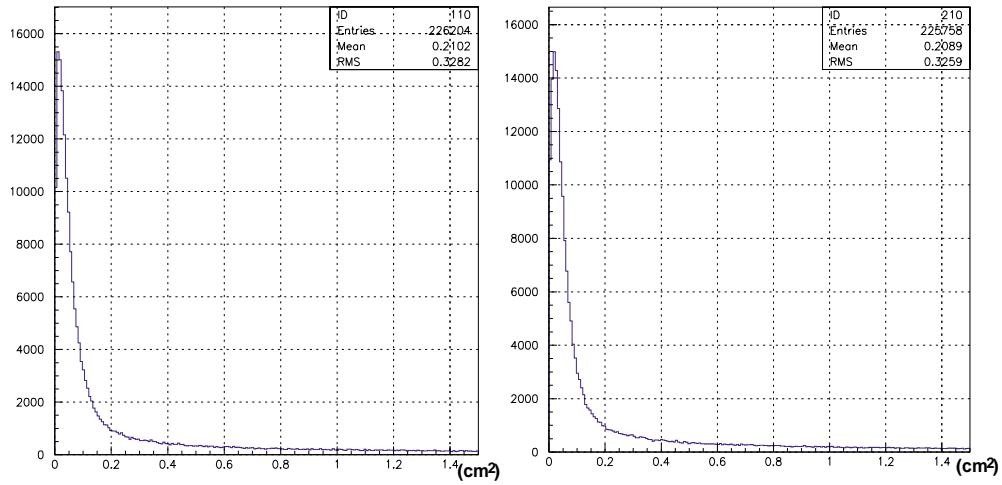


図 5.7: $\sum(d-x)^2$ のプロット (左: x 方向 / 右: y 方向)

5.1.3.4 Track の評価

これまで述べてきたように決定したトラックを TGC のヒットを用いたナイフエッジ法で評価する。

ナイフエッジ法

必ず決まった 1 点を通過する理想的な線源を考える。有限の分解能を持った 2 次元飛跡検出器を用いてこの通過点を測定すると、その通過点は正規分布

$$G(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})\sigma} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

の形で分布して観測される (図 5.8)。このとき真の飛跡の分布を $F(x) = \delta(x-x_0)$ と考えることができる。

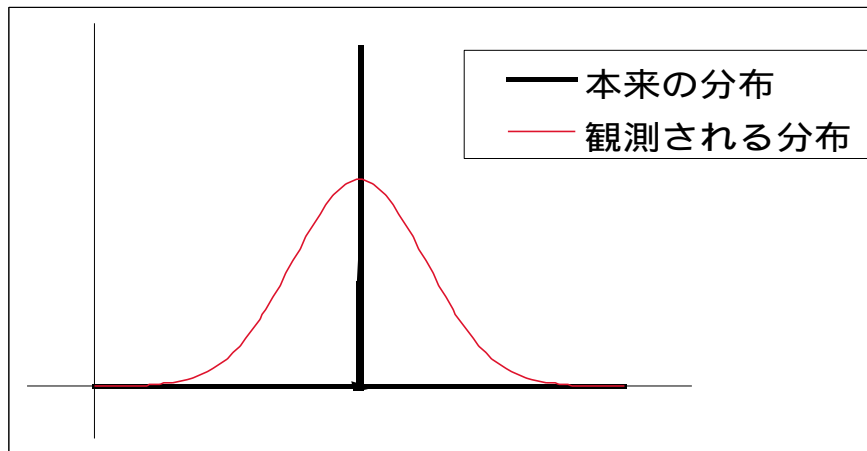


図 5.8: 理想的な線源の分布とその観測結果のイメージ

一方、ステップ関数状に通過する理想的な線源を考えると、同じ検出器を用いて測定すると図 5.9 のようにエッジがなまって観測される。ここで図 5.10 のようなステップ関数を細くスライ

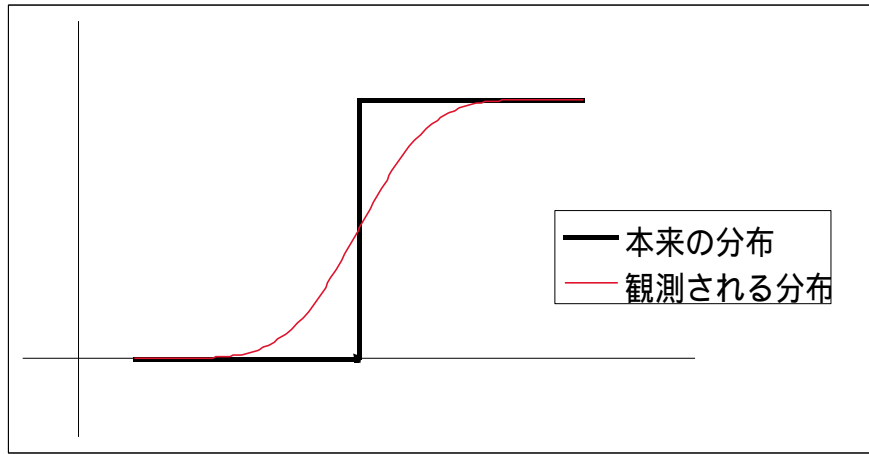


図 5.9: 理想的なステップ関数状の分布とその観測結果のイメージ

スした領域を考える。 Δx を小さくすると、その領域を通過するトラックは最初に述べた理想的

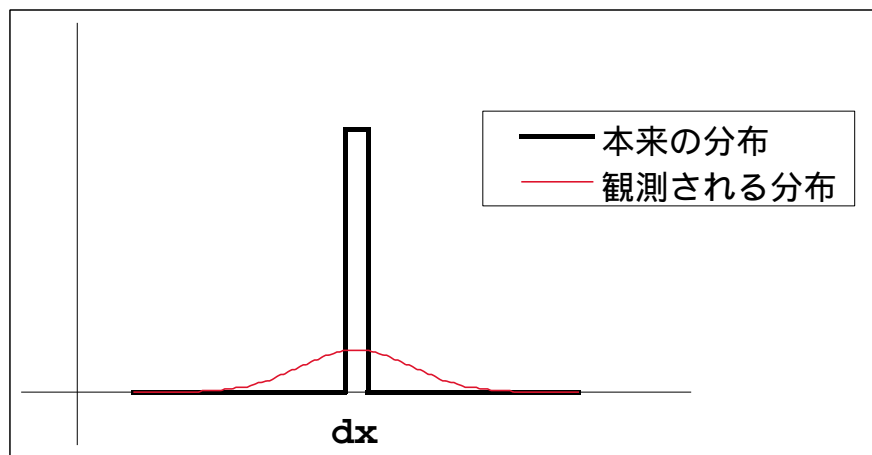


図 5.10: 図 5.9 を細くスライスした領域の線源の分布と観測結果の分布のイメージ

な線源と同様に考えることができ、その領域を通過する粒子は正規分布して観測されることになる。ひとつの bin に入射するトラック数は $\Delta x \cdot \delta(x - x')$ であり、その bin に入射したトラックは $\Delta x \cdot G(x)$ と分布して観測される。よってステップ関数状の分布は

$$\int_{-\infty}^x dx' \cdot F(x')$$

と表現できて、それを観測すると

$$\int_{-\infty}^x dx' \cdot G(x')$$

という分布になる。このことから本来ステップ関数状に分布する線源を観測して図 5.9 のように、なまった分布が得られたとき、その分布を微分することデルタ関数状の線源に対する正規分布が得られ、その幅をみることで測定器の分解能を調べることができる。これがナイフエッジ法である。

評価

TGC のワイヤグループに注目すると X 方向にならべたドリフトチューブとほぼ平行になっている。よってワイヤグループのチャンネルに制限を与えることで、ナイフエッジ法によるトラックの評価を与えることができる。ドリフトチューブで再構成した飛跡に対してワイヤグループのヒットがあったものについて分布を取る。このとき 0 ~ 17 チャンネルにひとつでもヒットのあるイベントを除外することで、18 ~ 23 チャンネルの位置のみに飛跡が分布するステップ関数状の線源の観測と同じ状態になる。ドリフトチューブによる飛跡の分解能が有限であるため実際に観測される分布は、なまったものになる。これを微分すると正規分布に近い分布になり、この幅が飛跡の分解能を表すことになる。

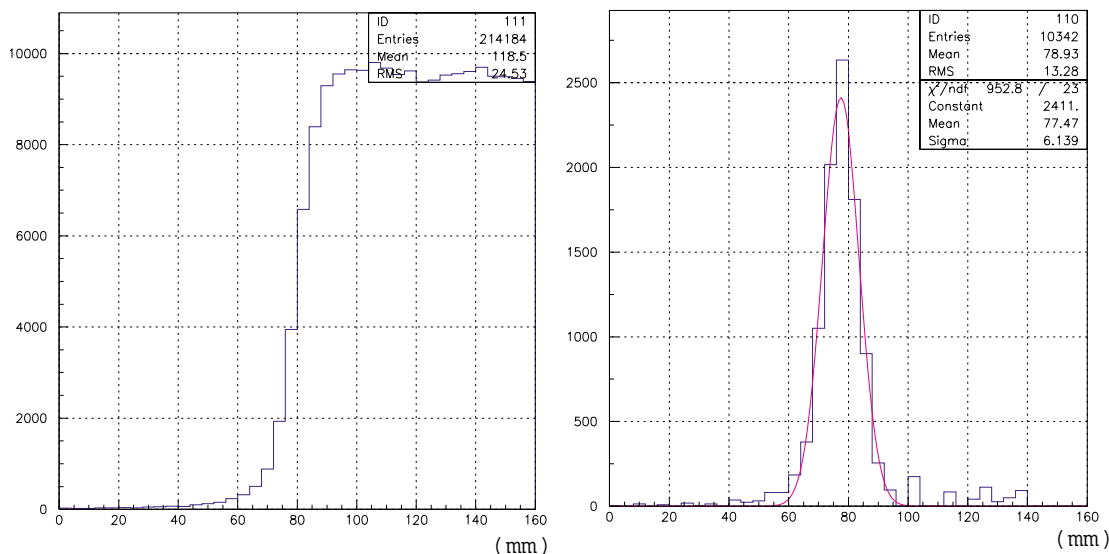


図 5.11: ヒット数分布 (左) と微分 (右)

図 5.11 左が実際に測定された分布であり、その隣の bin との差を取ることで微分したものが図右である。ただし差が負になるものについては除外している。図を見ると確かに正規分布に近い形になり、その分解能は $\sigma \sim 6\text{mm}$ であることがわかった。これは多重散乱による飛跡の曲がりとはほぼ対応している。

5.1.4 Analysis

宇宙線の飛跡の情報に加えた dst ファイルに記録している飛跡の情報と TGC の位置から飛跡が TGC を通過する点を求めることができる。この点に対して正しく TGC のヒットが存在するかどうかの割合を検出効率として導き ef ファイルとして出力するのが、この Analysis である。この際、ストリップとワイヤの検出効率は独立に判定している。実際に用いている検出効率の定義は前述のとおり

$$\text{検出効率 (\%)} = \frac{(\text{Track 上に TGC のヒットがあるイベント数})}{(\text{Track が引けたイベント数})} \times 100$$

である。

ef ファイルを作成する段階ではこの値を $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 毎に計算する。TGC 全面で 4×10^6 トラック通過するとき、この 1 マスに平均 50 トラック通過することになる。よって各点における

99%以上の検出効率を確認するためには4マス組み合わせた1cm×1cm程度の範囲で計算すればよい。

5.1.4.1 Track Constraint

トラッキングで再構成した飛跡トラックにはフェイクトラックが含まれている可能性がある。そのためTGCのヒットとの対応を利用して、再構成した飛跡のうち明らかにフェイクトラックであるものを除外するプロセスがTrack Constraintである。適当な条件で動作させた場合TGCの検出効率は少なくとも90%は超える値であり、ミュオンが複数のTGCを通過する際ひとつもヒットがない確率はきわめて低い。そこで、検査を行うTGCおよびレイヤー以外でストリップ、ワイヤー両方に関して少なくとも1ヒットずつ存在することを条件として課し、条件を満たしたトラックのみに関する検出効率を求めることとする。これによりトラッキングで再構成されたトラックのうちおよそ0.2%程度がフェイクトラックとしてカットされる。

5.1.4.2 Trackの有効範囲

宇宙線の飛跡に対するヒットの判定を行う際、全チャンネルのORとの対応を見ても通過したチャンネルとの対応のみを見ても、本来は同じ検出効率という結果が得られるはずである。しかし実際は全チャンネルとの対応を考えるとノイズが乗りやすいチャンネルの存在により検出効率が高めに出去しまうことになり、通過したチャンネルとの対応のみ考えると解析上認識しているTGCの位置と実際の位置のずれや飛跡再構成の精度により、とくにチャンネルの境目付近の検出効率を低めに導出してしまうことになる。

そのため図5.12のように、飛跡の通過位置の周囲に有効範囲を設定し、その範囲にTGCの

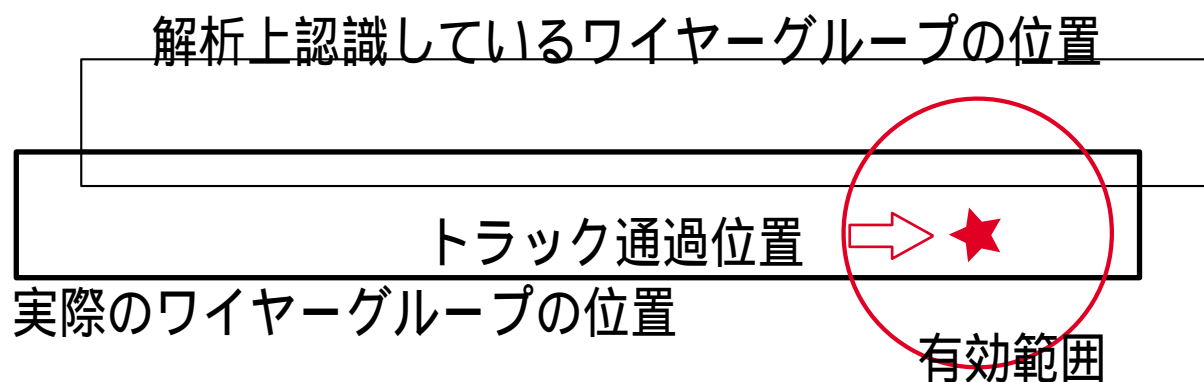


図 5.12: Track の有効範囲

ヒットがある場合のみヒットであると判定する。この際、検出効率が判定される位置はトラックの通過点である。また検査の目的として、設備内での絶対位置の検出効率を求める必要はなく1台のTGCに対して位置情報が一樣でありさえすればよいので、有効範囲を十分大きく10cmとしている。この値を十分大きくすることで精密なTGCの位置を考慮に入れなくても解析を行うことができるという利点がある。

5.1.4.3 Data Format

エフィシエンシーマップを記録するデータには拡張子 ef を指定している。ef データは TGC の 1 ユニット毎にひとつのファイルにまとめている。そのデータフォーマットは

```
[layer] [x] [y] [hit] [track]
      :
```

であり、5mm × 5mm を単位として情報を順番に書き連ねる形になっている。[layer] はワイヤー・ストリップの区別を含めたレイヤーを記録しており、0 は lay0,wire、1 は lay0,strip...、を表している。T7Triplet に関しては lay1,strip が存在しないため 3 が欠番となっている。

[x] および [y] には座標に相当する数字が記入され、5mm × 5mm マスを [x] と [y] の組み合わせで表現する。情報を保持する範囲は $0 \leq [x] \leq 399$, $0 \leq [y] \leq 299$ であり、これは 200cm × 150cm に相当する範囲である。[hit] はその 1 マスに入射したトラックのうち TGC がヒットした数、[track] はその 1 マスに入射したトラックの数を表す。この 2 つの数字から検出効率を計算する。このデータから各点における検出効率、全面にわたる検出効率を導くことができる。また専用ビューアである Efficiency Mapper を用いることにより、視覚的にマップを表示することができる。

5.1.5 Positioning

検査設備は日本で製作されるすべての TGC の有感領域をカバーするように設計されているが、立体角を考慮に入れると検査可能領域内でも外側に近づくほどイベントレートが下がる。検査可能領域は長方形になっており、T7 は正方形に近い形をしているため、場所によるイベントレートの差が生じる。ヒット数分布を図 5.13 に示す。

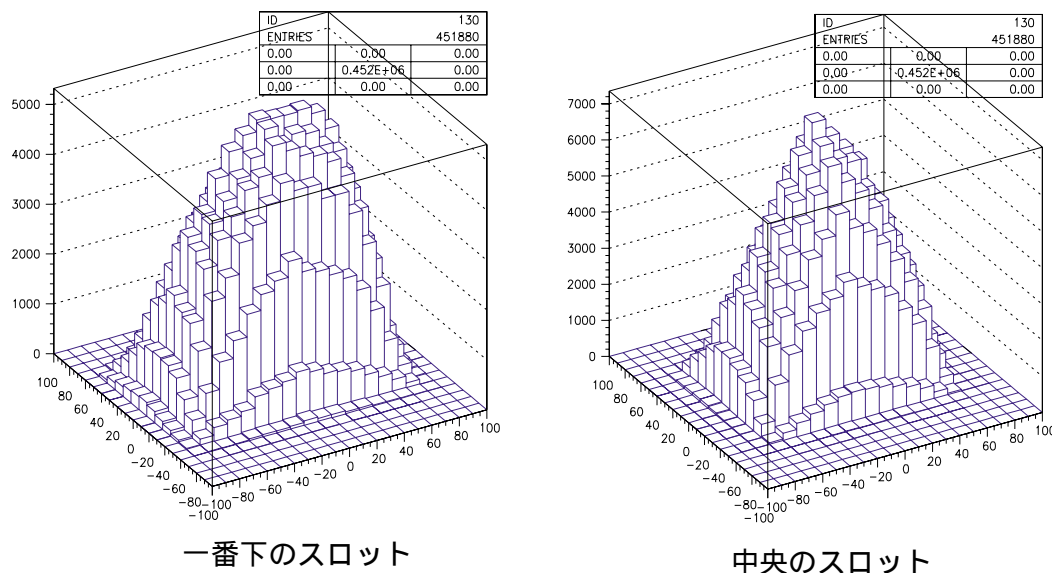


図 5.13: 各スロット位置でのヒット数分布。左が第 7 スロット (一番下)、右が第 3 スロット (真中) に対応している。

これに対処するため検査可能領域の狭い方向に TGC をずらしてデータ収集することで、その

差を少なくするという方法を採用している。2つ以上の位置でデータ収集した1台のTGCに対するエフィエンシーマップを作成するとき、その位置のずれを考慮に入れて合成しなければならない(図5.14参照)。そこで必要になってくるプロセスがTGCの位置決定である。

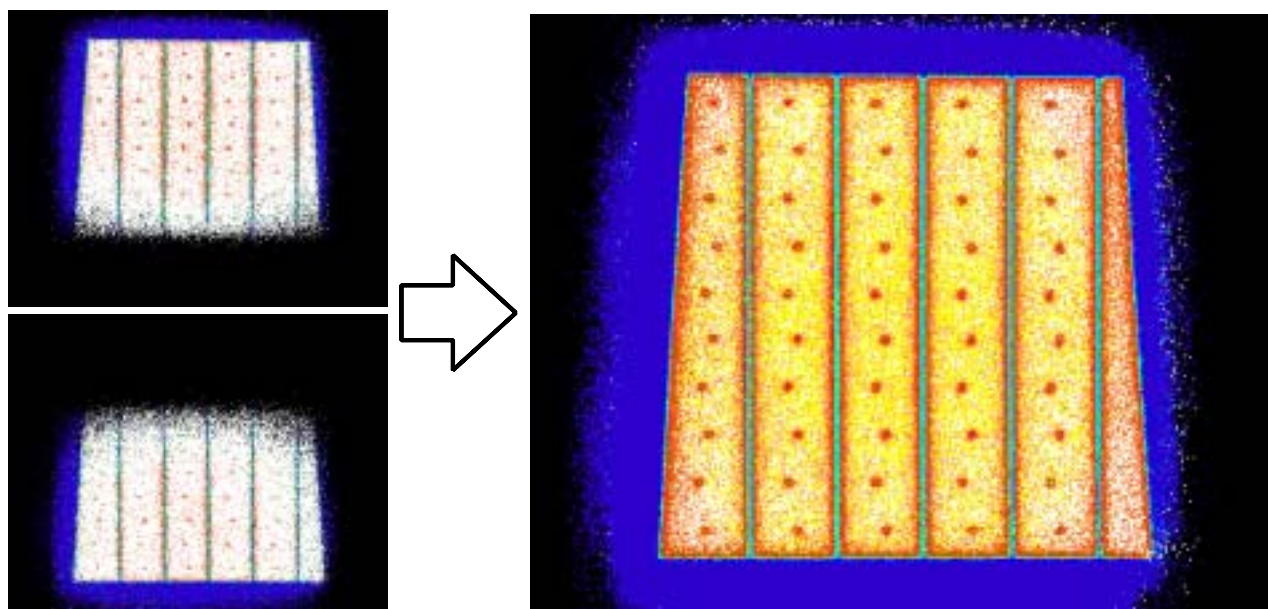


図 5.14: 2つの位置で収集したデータの合成

位置決定は `dst` ファイルを解析することで行う。同じ位置でデータ収集した `RUN` の中から適当にサンプリングし、エフィエンシーマップを求める。TGCの標準的な位置を定めており、そこに正しくTGCが存在するという仮定のもとに解析をする。このようにして導出したエフィエンシーマップからワイヤーサポートとボタンサポートの位置を確認し、標準の位置からのずれを検出する。ずれはX方向、Y方向、XY平面内の回転の、3つのパラメーターで決定する。解析ではこのずれの情報を含めたTGCの位置情報を用いて解析する。

5.1.5.1 tgc.cfg

TGCの位置情報を保持するファイルとして `tgc.cfg` を用意している。フォーマットは

```
[TGC#] [Type] [side] [X] [Y] [angle]
.
.
```

である。各行は6つの数字から構成され、1行の情報は1台のTGCについて記述する。1つ目はTGCの設備内での位置を `[TGC#] = 0, 1, ..` で、2つ目はダブルレットとトリプレットの区別を `[Type] = 2, 3` で、3つ目はTGCの置き方(表裏)を `[side] = 0, 1` で、4つ目は架台の中心からのTGCのX方向のずれを `cm` 単位で、5つ目は架台の中心からのTGCのY方向のずれを `cm` 単位で、6つ目は回転角をそれぞれ表している。すでに述べた標準的な位置は `[x] = 0, [y] = ±30, [angle] = 0` である。位置決めの際には標準の `tgc.cfg` を使用し、本番の解析では位置決めで確認したずれを反映した `tgc.cfg` を生成して使用することになる。

5.1.6 検査期間

シンチレーターでのトリガーレートが 20Hz である。Track Constraint でのカットはトリガーレートに対して無視できる程度であり、5.1.3.1 節で述べたトラッキング可能なイベントの割合が 72~73% であるので、実際に検査に使用できるイベントのレートは 15Hz 程度である。しかし前節で述べたように、TGC の端の部分の効率を正しく判定するために TGC の中心位置を宇宙線ミュオン分布の中心からずらして検査しているので、TGC を通過しないミュオンの割合が大きくなってしまい、実際に検査に使用しているイベントはトリガーレートの 30% 程度である約 6Hz となっている。

飛跡の分解能が ~6mm であることを考えると、局所的な検出効率を求める場合でも 1cm^2 より小さな範囲で計算することに意味が無いことがわかる。TGC 全面に対して 2×10^6 トラック通過するとき ef データの単位である $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ マスに平均的に 20~30 トラック通過する。このとき $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ の範囲では約 400 トラック通過することになるので、この範囲では 99% の検出効率を確認することが可能である。このことから有効トラック数 2×10^6 を目安に検査を終了しており、これを達成するためには約 4 日間必要である。検査前後のガス置換やテストランを含めて最短 1 週間周期で 1 台の TGC の検査を完了させることが可能である。

5.2 解析結果

5.2.1 検出効率

5.2.1.1 エフィシエンシーマップ

以上のようにして導き出した検出効率は EfficiencyMapper を用いることで視覚的にエフィシエンシーマップとして表示することが可能である。図 5.15 にその一例を示す。検査を行う TGC の多くはこれに近いマップとなり、ワイヤーサポート・ボタン型サポートの不感領域以外では一様に高い検出効率を実現していることを確認することができる。図に示した TGC について、不感領域であるワイヤーサポート・ボタン型サポート付近を除いた検出効率の平均は、すべての層において 99.5% 程度となっている。

つづいて、検出効率に問題のある TGC のエフィシエンシーマップを図 5.16 に示す。一面に渡って検出効率にむらがあり、要求された性能を満たしていないことが一目瞭然に理解できる。また、量産におけるデータベースを参照することで、検出効率に問題を生じさせる原因をさぐることも可能となっている。3 台のシングレットを接着してトリプレットにする際、その平面性を測定しているが、図に表したものはその平面性にばらつきのあるユニットであった。また、ワイヤーサポートの付近でとくに検出効率が大きく落ちていることが見て取れるので、製作過程、もしくは運搬途中で接着剤が剥離している可能性も考えられる。検査を通じて、検出効率の問題はユニット単位で生じる傾向があり、ここで述べた平面性をもっとも重要な要素になっていると考えられる。

問題のある TGC を修復することは現実的には非常に難しい。よって予備の TGC をあらかじめ作ることで、必要な性能を満たさない TGC を使用しないで済むように対処する。予備の数は検査をさらに進めて結果を製作側にフィードバックすることで決定する。

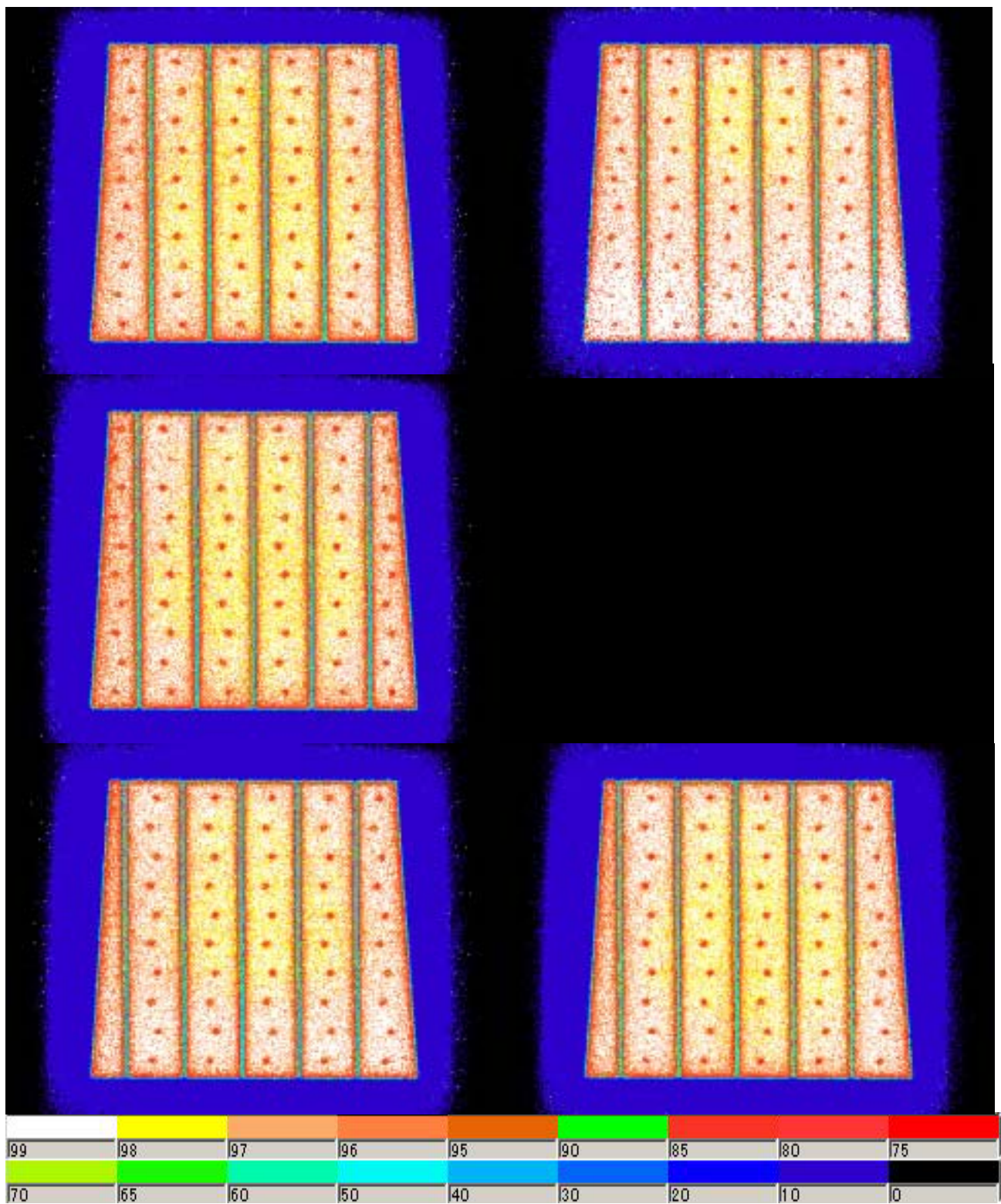


図 5.15: 正しく検出効率が99%を超えている TGC のエフィシエンシーマップの例 (T7B1037)。上から T1,T2,T3 で左側がワイヤー、右がストリップに対応している。

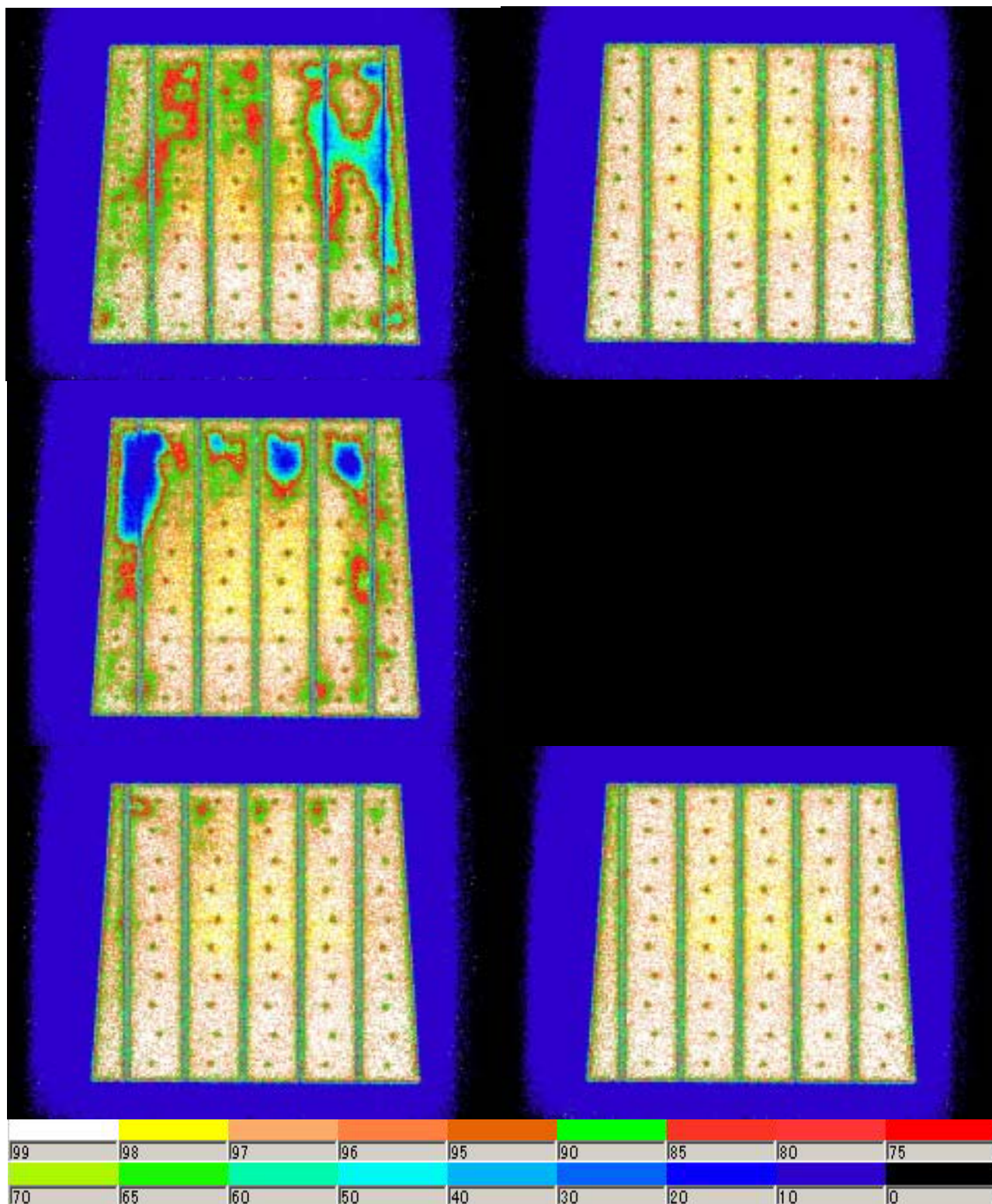


図 5.16: 検出効率に問題のある TGC のエフィシエンシーマップの例 (T7F1082)。上から T1,T2,T3 で左側がワイヤー、右がストリップに対応している。

5.2.1.2 HV curve

TGC に印加する電圧を変化させることで TGC の検出効率がどのように変化するかを調べたものが HV カーブである。これを見ることで TGC を正しい印加電圧で動作できていることを確認することができる。また、TGC の完成度が低いと印加電圧を下げることによる検出効率の低下が早く生じやすい。よって HV カーブを調べることで、TGC の精度を見積もることも可能である。

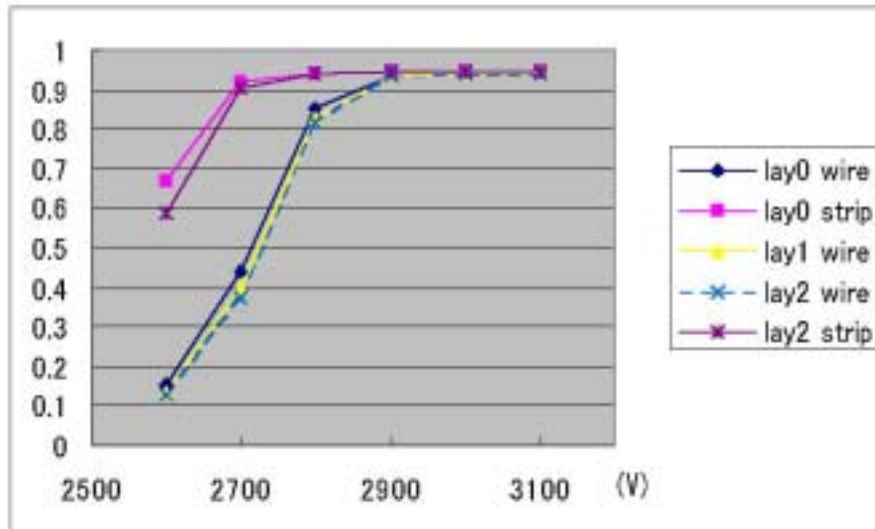


図 5.17: 典型的な HV カーブ (T7B1037)

図 5.17 に検査設備における典型的な HV カーブを示す。ワイヤーとストリップで HV カーブの曲線が 200V 程度ずれている。これは検査しているすべての TGC に対して現れる現象であり、今まで行われたビームテスト等では現れなかったため、検査設備が原因で生じている現象であると考えられる。この点に関しては今後検討の余地があるが、各 HV の値に対する検出効率を CSV 形式で出力することで図のように簡単に HV カーブを確認することができるようになっている。

ここで生じているワイヤー・ストリップ間の差の原因は未確認であるが、読み出し回路系が問題になっている可能性がある。検査設備での読み出しは SWINE を用いている。しかし過去に行われたビームテスト等での読み出しは TMC によって行われてきた。TMC における最小の読み出し時間幅は 1ns 程度であり、SWINE の最小読み出し幅は ~20ns である。ワイヤーからは電子の電荷量を読み出ししており、ストリップからは陽イオンの電荷量を読み出しているため、ストリップからの信号と比較してワイヤーからの信号は、パルス幅が狭くなる傾向がある。そのため波高が低くなるにつれワイヤー読み出しのパルス幅のほうが先に読み出せる最小の時間幅を下回ることになり、結果として HV カーブに差が生じるということである。これを確かめるためには TGC の読み出しに TMC を用いて試験する方法が考えられる。これは今後の課題である。

5.2.2 TimeJitter

検査設備における典型的な TGC の反応時間分布を 5.18 に示す。これをみても解るとおり、タイムジッターは要求されている 25ns 以内に収まっていない。さらに、ワイヤー・ストリップの分布に差があり、ストリップの分布の方がより広がっている。これらの原因は不明であるが、過

去に行われたビームテストではタイムジッター 25ns を達成しており、ワイヤストリップ間にこのような差は見られないので、TGC ではなく検査設備側に問題があることはあきらかである。分布が 25ns に収まらないというワイヤ・ストリップ共通の問題点とワイヤと比較して分布が広くなるという、ストリップに固有の問題が存在していると考えられる。これらの原因解明は今後の課題となる。なお、ストリップ読み出しの大きなピークより早いタイミングで小さな分布が見られるが、これはSWINE モジュールが作り出したトリガー信号由来のノイズである。

これら問題点は多いが、ワイヤ読み出しとしての一様性、ストリップ読み出しとしての一様性については検査を通じて確認することができるようになっている。

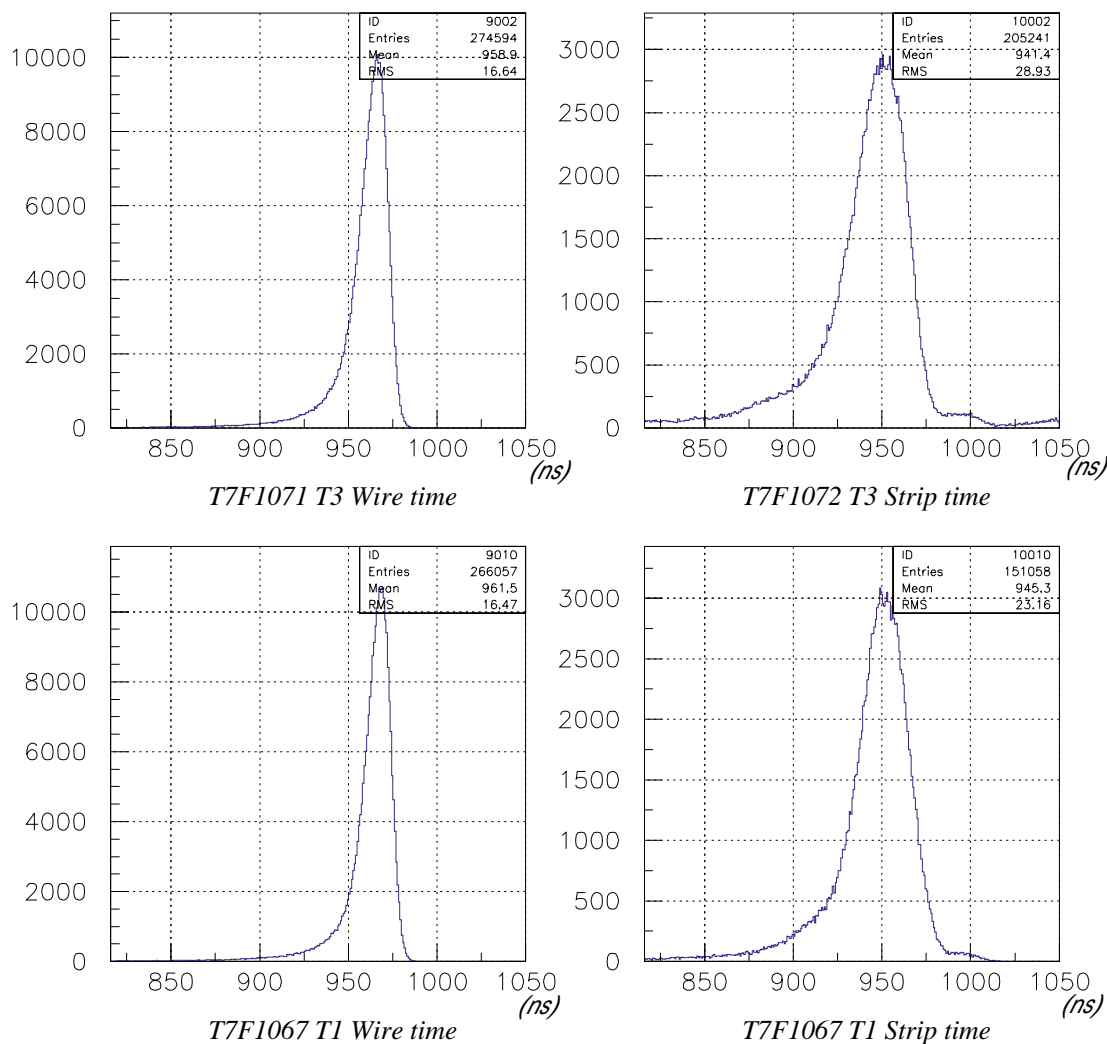


図 5.18: 典型的なタイムジッターの例

第6章 結論と今後の計画

ATLAS 実験用 TGC 専用検査設備を神戸大学に構築した。そのなかで最も重要な検査項目である宇宙線テストにおける解析システムの設計・開発を行い、評価を行った。

まず、解析プロセスにおいて中心的な役割を担う宇宙線ミュオン飛跡トラックの再構成のための準備として、ドリフトチューブの x - t relation を必要十分な空間分解能を持つように決定した。解析プロセスの流れを確立し、実際に運用可能なシステムを開発した。検査結果を導出するための主要な解析プロセスとしては

- データ読み出しによって得られた複数のデータを結合し、VME のモジュールやチャンネルを測定器の種類、チャンネル等に変換する Data Conversion
- Drift Tube のデータを用いた Tracking
- Analysis Program で TGC の検出効率、TGC ヒットのタイミング分布を導出
- 結果を Efficiency Map として表示

が必要であり、それぞれについてデータフォーマットの確定、ソフトウェアの開発を行い、柔軟性のあるシステムを構築することができた。とくにドリフトチューブによる宇宙線ミュオンの飛跡トラック再構成のスキームを確立し、設備内での飛跡の実際の曲がりと同程度まで再構成の分解能をあげることが可能となった。

検出効率についてはエフィシエンシーマップという形で全面にわたる検出効率を視覚的に判断できるようにした。これにより問題のある TGC について、完成度の高い TGC と明らかに区別できることがわかった。また、HV カーブ、シグナルの時間分布を参照することで、製品としての TGC の一様性を確認することが可能になった。以上のことにより TGC を必要な精度で検査できることが確かめられた。

構築した解析システムをもとに、今後長期にわたって検査を行っていくことになる。そのため作業自体を流れ作業として実現できるよう、また誰にとっても使いやすいシステムとして改良していく必要がある。また今後 T7Doublet・T4Doublet・T5Doublet と違うタイプの TGC を検査することになるので、それぞれに対して最適化するよう微調整が必要である。さらに HV カーブ・タイムジッターにおけるワイヤーとストリップ読み出しの差が、現在わかっている問題として存在している。これらについてさらに研究を進め、原因を突き止める必要がある。

目 次

2.1	Higgs 粒子の質量と生成断面積	6
2.2	Higgs 生成の Feynman Diagram	6
2.3	Higgs 粒子の質量と各崩壊過程への分岐比	7
2.4	ATLAS 測定器	8
2.5	ATLAS 測定器における Higgs 粒子発見ポテンシャル	9
2.6	ミュオントリガー検出器	10
2.7	ミュオントリガーの仕組み (Longitudinal view) [3]	11
2.8	ATLAS 測定器における TGC の配置図 (R-Z 平面図)	11
2.9	TGC の構造 (断面図) [3]	13
2.10	TGC (T7) の構造 (平面図)	14
2.11	Doublet(右) と Triplet(左) の断面図 [3]	15
2.12	TGC のワイヤー方向の読み出し [3]	15
2.13	日本で量産される TGC のタイプと台数 [?]	16
3.1	専用台車に乗せた運搬箱の保管用プレハブへの移動	18
3.2	検査設備全体像	19
3.3	運搬台車に乗せた TGC	20
3.4	TGC における CO ₂ チャンネルの位置	21
3.5	ガスリークテスト検査用ラック	21
3.6	リーク箇所を見つける 2 つの方法。左がコンプレッサを用いる方法で、右が掃除機で吸引する方法。	22
3.7	HV テスト用ガスシステム	24
3.8	HV・モニターシステム	25
4.1	宇宙線テストでの検査設備の概念図 (左) と写真 (右)	26
4.2	トリガー回路	29
4.3	上下シンチレータ読み出しの時間差	29
4.4	3 層依積みのドリフトチューブ (上) とエンドキャップ部の構造 (下)	30
4.5	Drift Tube の動作原理概念図	30
4.6	ドリフトチューブによる飛跡の再構成	31
4.7	電場の強さと Drift Velocity の関係	32
4.8	Drift Tube のガス系	32
4.9	Drift Tube のヒットの時間分布。分布の右端が T_0 に対応する。	34
4.10	P1・P2 決定のためのイベント選定	34
4.11	fitting の概念図	35
4.12	パラメタの変化 (上: P_1 下: P_2)、横軸は fit の回数	36
4.13	パラメタが収束した時点での d と t_1 との関係、およびそれを決定した x-t relation でフィットしたもの	37

4.14	空間分解能として調べるべき直線とドリフト距離の差	37
4.15	図 4.14 で示した R の評価。左がガス領域全体にわたる R の値、右がその射影。	38
4.16	3 層の Drift Length の相関	38
4.17	各層 Drift Tube の時間分布。図 4.9 と同様である。	39
4.18	T_0 のみ変更して図 4.15 と同様の図	39
4.19	全ドリフトチューブの分解能の重ねあわせ	40
4.20	架台部分 (左、単位 mm) と TGC8 台での検査の様子 (右)	41
4.21	宇宙線テストにおける TGC ガスシステム	42
4.22	DAQ 構成 - 検出器 ~ エレクトロニクス	43
4.23	TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode)	43
4.24	SWINE におけるシグナルのタイミング	44
4.25	コンピュータ環境	45
4.26	データ読み出しシーケンス	47
4.27	DAQ システムにおけるデータフロー (赤字はプログラムを表す)	49
4.28	EventDisplay の一例	51
4.29	EfficiencyMapper	52
5.1	理想的な 4 つのヒットパターン	57
5.2	3 つのヒットを採用できるヒットパターン	57
5.3	2 つのヒットを採用できるヒットパターン	57
5.4	2 ヒットで採用するパターン	58
5.5	採用されるヒットパターンの割合	58
5.6	4 本の飛跡候補。まず一番上と下のドリフトチューブで 4 本の候補を割り出し、残りのドリフトチューブで 1 本に決定する。	60
5.7	$\sum(d-x)^2$ のプロット (左: x 方向 / 右: y 方向)	61
5.8	理想的な線源の分布とその観測結果のイメージ	61
5.9	理想的なステップ関数状の分布とその観測結果のイメージ	62
5.10	図 5.9 を細くスライスした領域の線源の分布と観測結果の分布のイメージ	62
5.11	ヒット数分布 (左) と微分 (右)	63
5.12	Track の有効範囲	64
5.13	各スロット位置でのヒット数分布。左が第 7 スロット (一番下)、右が第 3 スロット (真中) に対応している。	65
5.14	2 つの位置で収集したデータの合成	66
5.15	正しく検出効率が 99% を超えている TGC のエフィシエンシーマップの例 (T7B1037)。上から T1, T2, T3 で左側がワイヤー、右がストリップに対応している。	68
5.16	検出効率に問題のある TGC のエフィシエンシーマップの例 (T7F1082)。上から T1, T2, T3 で左側がワイヤー、右がストリップに対応している。	69
5.17	典型的な HV カーブ (T7B1037)	70
5.18	典型的なタイムジッターの例	71

表 目 次

2.1	LHC 加速器の主要パラメータ [2]	5
2.2	エンドキャップ部におけるバックグラウンドレート	12
2.3	TGC のパラメータ [3]	12
2.4	日本で製作される TGC のタイプと台数	14
4.1	各物質の X_0	28
5.1	Raw Data Format	54

参考文献

- [1] CERN Public home, <http://public.web.cern.ch/public/>
- [2] LHC Large Hadron Collider Home Page, <http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/>
- [3] ATLAS Muon Spectrometer, TECHNICAL REPORT, CERN/LHCC/97-22 ATLAS TDR (27 May 1997)
- [4] 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
- [5] Y.Arai and M.Ikeno, *32Ch TMC-VME Module User Manual*
- [6] Yasuo Arai, *DAQ6U Program Manual*
- [7] KEK 回路室、「MWPC READOUT SYSTEM」
- [8] Model 616 Adaptor Hardware Manual, Bit 3 Computer Corporation
- [9] 林栄精器株式会社、「VME INTERRUPT & I/O REGISTER MODEL RPV-130 取扱説明書」
- [10] 福井崇時、粒子物理計測学入門
- [11] Neil Matthew, Richard Stones, *Linux プログラミング*
- [12] 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」
- [13] 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」
- [14] 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」
- [15] 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」
- [16] 神戸大学、中畝 佑輔、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

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、葺重久弥助教授、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、信州大学竹下徹授、宮崎由之氏に感謝します。

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南條創氏、坂東隆哲氏、信州大学の大下英敏氏、中川義徳氏、神戸大学の中畝 佑輔氏、奥村和恵氏、杉本拓也氏、荒滝陽二氏、神谷竜一氏、鈴木良太氏には、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。