

修士学位論文
ATLAS実験用ミューオントリガーチェンバーの
性能評価

神戸大学自然科学研究科物理学専攻

宇田純郎

034S105N

平成17年3月9日

概要

欧州原子核研究機構 (CERN) で、2007 年稼動予定の大型陽子陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) の建設が進められている。LHC に設置される検出器の 1 つである ATLAS 検出器では、主に Higgs 粒子や SUSY 粒子の探索が行われる。我々 ATLAS Japan ミューオングループは、ATLAS 検出器においてミューオンをトリガーする目的で使用される TGC (Thin Gap Chamber) の製作並びに検査を担当している。

TGC の製作は、日本グループとイスラエルグループ、中国グループの共同で行われており、日本では茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて行われている。製作された TGC は、CERN に送られ ATLAS 検出器に設置される前に、個々の性能が要求された値を満たすかどうかの検査を行い、動作が確認されたもののみ CERN へ輸送される。その検査は神戸大学で行われ、専用の検査設備が 2001 年に建設された。KEK で製作される約 500 台の TGC は、順次神戸大へと輸送される。検査は宇宙線ミューオンを用いた検出効率と信号到達時間の測定、TGC を 600Pa まで加圧しての気密性試験、ATLAS 検出器で使用されるのと同じ混合ガスを用いた高電圧印加試験の 3 種類が行われ、この全てに合格したもののみ CERN へと輸送され ATLAS 検出器に設置される事となる。2002 年から検査が始まり 2004 年までに約 400 台の検査が終了しその性能評価を行なった。

目次

第 1 章 Introduction	1
第 2 章 ATLAS 実験	3
2.1 LHC 計画	3
2.2 ATLAS 実験の目指す物理	4
2.2.1 標準模型における Higgs 粒子	4
2.2.1.1 Higgs 粒子の探索	4
2.2.2 ATLAS 測定器	5
2.2.3 内部飛跡検出器	8
2.2.4 カロリメーター	10
2.2.5 超伝導空芯トロイドマグネット	11
2.2.6 ミューオン検出器	12
2.2.6.1 MDT(Monitored Drift Tube)	13
2.2.6.2 CSC(Cathode Strip Chamber)	14
2.2.6.3 RPC(Resistive Plate Chamber)	15
2.2.6.4 TGC(Thin Gap Chamber)	16
2.3 ミューオントリガーシステム	18
第 3 章 Thin Gap Chamber (TGC)	21
3.1 動作原理	21
3.1.1 ガス増幅と動作モード	21
3.1.2 充填ガス	22
3.2 TGC の構造	24
3.3 TGC の量産	26
3.3.1 製作工程	27
3.3.2 製作スケジュール	31
第 4 章 検査設備	33
4.1 TGC の検査	33
4.1.1 目的	33
4.1.2 検査スケジュール	33
4.2 CosmicRay Test	34
4.2.1 Scintillator	34
4.2.2 Drift Tube	36
4.2.2.1 構造と検出原理	36
4.2.3 Tracking	38
4.2.4 Track Constraint	41
4.2.5 DAQ システム	41
4.2.5.1 エレクトロニクスモジュール	41
4.2.5.2 コンピュータ環境	44

4.2.6	データ解析及びデータの確認	45
4.2.7	Efficiency Map Display	51
4.2.8	T7D から T4D への設備変更	52
4.3	HV Test	57
4.3.1	検査方法	57
4.3.2	HV Test のシステム	58
4.3.2.1	Monitro System	58
4.3.2.2	Log Viewer と自動タイマープログラム	59
4.4	Leak Test	60
4.4.1	システムと検査方法	60
4.4.2	Leak の修復	60
第5章	TGC の評価	62
5.1	CosmicRay Test	62
5.1.1	評価方法	62
5.1.2	検出効率	63
5.1.3	Time Jitter	68
5.1.4	HV Curve	78
5.2	HV Test	80
5.2.1	HV Test の結果	81
5.2.2	HV 印加中の動作不良について	82
5.3	Leak Test	83
5.3.1	検査結果	86
第6章	まとめと今後	87
6.1	まとめ	87
6.2	今後の予定	87

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全ての素粒子相互作用をきわめて良い精度で説明することができる。この標準模型の中で、唯一実験的にその存在が確認されていないのが、Higgs粒子である。Higgs粒子は電弱相互作用での自発的対象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ている。Higgs粒子はこれまで様々な実験で探索が行われたがいずれも見つかっておらず、それらの実験結果より質量の下限値が120GeVと決まり、また理論的にはその上限値は約1TeVであると予想されており、実験による発見が待ち望まれている。

このHiggs粒子を探索するべく、スイスジュネーブにある欧州原子核研究機構(CERN)において、重心系のエネルギーが14TeVと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2007年の稼働を目指して建設されている。LHC加速器に設置される検出器の一つとしてATLAS検出器がある。ATLAS検出器は、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、中でもミューオンの検出、測定に使用されるミューオンスペクトロメータは、ミューオンが重要な物理に関わっており、かつ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、重要性の高い検出器と考えられる。そして、ミューオンを用いた事象の取捨選択は、ATLAS実験でのトリガーとして重要であり、ATLAS検出器のミューオンスペクトロメータにはトリガー専用のミューオン検出器が設置される。そのミュー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いる。2000年9月より、高エネルギー加速器研究機構(KEK)で製作が始められ、2004年12月までに3タイプ計500台のTGCの製作が完了した。

TGCはトリガー検出器であるので、高い検出効率が要求される。さらに、LHCのビーム衝突頻度、すなわちバンチ間隔が25nsecと非常に短く、各イベントを特定するためには、少なくともバンチと同定できる25nsec以下の時間分解能を持つことが要求される。ATLAS検出器に設置される全てのTGCは、これらの要求された性能が得られると保証されたもののみが設置される。それゆえ製作された全てのTGCは、CERNへ送られる前に事前に要求された性能を満たすかどうかを検査する事が必要不可欠となる。

TGCの検査設備は神戸大学に構築され、KEKで量産されたTGCは神戸大学での検査に合格したものだけがCERNへ輸送される。神戸大学での検査は2002年5月から始まり、2004年12月までに約400台の検査を終了した。

検査内容としては、

- (1) TGCの気密性の検査
- (2) ATLAS検出器で用いるのと同じ混合ガスを用いて、高電圧を印加したときの安定性の検査
- (3) 宇宙線ミューオンを用いてTGCの全面にわたる検出効率とその一様性、および信号到達時間の測定

が行われる。

気密性の検査は、KEKより神戸へ運搬された後に最初に行われる検査項目である。TGCの製作は全て部品を接着する事により製作されているので、接着不良が原因で漏れがある場合がある。TGCはガスチェンバーであり、 O_2 など電気陰性度の高い気体が混入すると、ガスゲインが下がってしまう。また、TGCに用いる混合ガスの成分であるn-Pentaneは、人体に有害で、引火性のある物質であるので、漏れがあると非常に危険である。それゆえ検査を行う前にまず漏れないかの検査がなされる。

高電圧を印加したときの安定性検査は、 CO_2+n -Pentaneを用いて高電圧を印加してTGCが安定に動作するかどうかを検査される。TGCに高電圧を印加すると、TGCを構成している部品や用いる接着剤が電氣的な経路

(パス)となり、正常な TGC でも数十～百 nA の電流が定常的に流れる。しかし製作不良などやゴミの混入などにより μA オーダーの電流が流れる場合がある。長期間放電しない程度の高電圧をかけ、パス等を焼き切ることで、TGC を安定にさせる事が出来る。この検査の後に行われる宇宙線を用いた検査では、安定に動作している事がデータ収集時の条件となるので、不安定な TGC はここで安定になるよう処理がなされる。

宇宙線を用いた検査は、検査項目の中で最も重要な検査で、約 2 m^2 の TGC 全面に渡って検査する必要がある。そのため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だし、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決定する。そしてその位置での検出効率を導出することで検査を行う。また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。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おり、これにより両プロセスを独立に同時進行できるため、設備全体としての処理能力を高めることを可能としている。

TGC の検査は 2002 年 5 月から始められ 2004 年 12 月までに約 400 台の検査を終了した。本論文の構成は以下の通りである。第 2 章は「ATLAS 実験」として、LHC 計画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の説明を行う。

第 3 章はミュオントリガーチェンバーである TGC の説明、及び KEK での量産工程について説明する。

第 4 章は「検査設備」として神戸大学で行われる TGC の検査について、各工程に沿って説明を行う。第 5 章では「TGC の評価」として現在までに検査された 419 台の検査結果を示す。第 6 章では「まとめと今後」として 2004 年末までに行われた検査のまとめ、及び CERN への輸送の結果について述べ、今後の展開について述べる。

第2章 ATLAS実験

ここでは LHC 計画、ATLAS 実験の目指す物理、ATLAS 測定器について説明する。

2.1 LHC 計画

スイス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 年に稼働開始を予定している。LHC 加速器は、二つの陽子ビームを各々 7TeV まで加速し、それらを正面衝突させて重心系のエネルギーにして 14TeV の世界最高エネルギーを実現する円形加速器である。2000 年に停止した大型電子陽電子衝突型加速器 LEP (Large Electron Positron Collider) のトンネル内 (周長約 27km) に現在建設が進められている (Fig.2.1)。LHC 加速器の主要なパラメータを Table2.1 に示す。LHC 計画の目的は、標準模型 (Standard Model) の基本粒子である Higgs 粒子の探索や、超対称性粒子の探索、トックオークの物理、B 中間子での CP 非保存の研究等である。LHC 加速器は、最大の特徴である 14TeV の重心エネルギーと $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の高ルミノシティによって、TeV 領域の物理の開拓を可能にしている。陽子陽子衝突型加速器は、電子に比べ陽子の質量が重いいため、円形加速器におけるシンクロトロン放射光の損失が小さく、高エネルギーを得るのに適している。反面、陽子は内部構造を持つため、複合粒子同士の非弾性散乱により生成されるジェット等のバックグラウンドが非常に多く、その中から興味のある事象を選別することは困難を伴う。このため、LHC に設置される検出器は、入射粒子数が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。

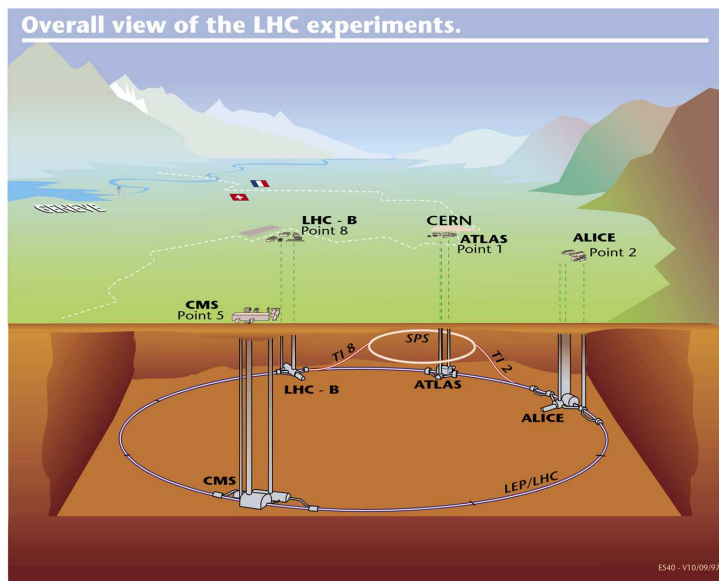


Fig. 2.1: LHC 加速器 [1]

LHC 加速器には 4 つの衝突点があり、それぞれ以下の検出器が設置される。

1. ATLAS (A Troidal LHC ApparatuS)
2. CMS (The Compact Muon Solenoid)
3. LHC-B
4. ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

ATLAS 検出器、CMS 検出器は汎用検出器であり、LHC-B は B 中間子の研究に特化したもの、ALICE は重イオン衝突実験を目的とした検出器である。

主リング周長	26,658.883m	バンチ間隔	24.95nsec
入射エネルギー	450GeV	バンチ内陽子数	1.15×10^{11} 個
陽子エネルギー	7.0TeV	バンチ長さ (陽子)	75.5mm
High Luminosity(7年)	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	衝突点でのビーム半径	16.63 μm
Low Luminosity(3年)	$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	ビーム衝突角度	300 μrad
Luminosity Lifetime	13.9 時間		

Table 2.1: LHC 加速器主要パラメータ [2]

2.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験の目的は、標準模型の基本粒子であり、唯一未発見の粒子である Higgs 粒子の探索及び超対称性 (SUSY) 粒子の探索、top クォークの物理、B 中間子での CP 非保存の研究等と多岐に渡る。LHC が世界最大の高エネルギーを誇る陽子陽子衝突型加速器であることから、中でも特に未発見粒子の探索に大きな期待が寄せられている。

2.2.1 標準模型における Higgs 粒子

電弱相互作用での自発的対称性の破れの機構を説明するためにその存在が必要とされる Higgs 粒子は、質量起源を解明する手がかりと期待されるため、その発見は非常に重要な意味がある。Higgs 粒子自身の質量については、理論的におよそ 1TeV 以下とされている。下限については、これまでに行われた実験により 100GeV 以上となっている。ATLAS 実験では、100GeV 以上 1TeV 以下の全ての質量領域で、標準模型における Higgs 粒子の探索が可能である。

Higgs 粒子は質量の重い粒子と結合するため top クォークや W 粒子、Z 粒子のような質量の非常に重い粒子と強く相互作用し、その生成過程として Fig.2.2 が主となる。Fig.2.3 に Higgs 粒子の生成断面積を示す。これより $m_{Higgs} = 200\text{GeV}$ としたとき、高ルミノシティで 1年間運転すると約 20 万イベント生成されると予想出来る。

2.2.1.1 Higgs 粒子の探索

Higgs 粒子の崩壊モードは、その質量により異なる。Fig.2.4 に各崩壊モードの質量に対する分岐比をプロットしたものを示す。それぞれの崩壊モードでバックグラウンドから分離できる Higgs の質量領域は、次の 4 タイプである。

$$(1) 100 < m_H < 120 \text{ GeV}$$

$$H \rightarrow \gamma\gamma \quad (2.1)$$

この領域での Higgs 粒子の主な崩壊過程は、 $b\bar{b}$ 、 $c\bar{c}$ 、 $\tau^+\tau^-$ であるが、これらについては陽子・陽子素過程による大きなバックグラウンドが大きく測定が難しい。それゆえ、分岐比が 10^{-3} と小さいが、 $\gamma\gamma$ への崩壊過程を用いる。この測定にはエネルギー、角度分解能の優れた電磁カロリメータが要求される。

$$(2) 130 < m_H < 2m_Z$$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^- \quad (2.2)$$

この質量領域に入ると、 W^\pm 、 Z の質量を超えるため、 WW^* 、 ZZ^* の崩壊モードが始まる。この時のバックグラウンドとして、 $pp \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^*$ 、 $Zb\bar{b} \rightarrow 4\text{lepton}$ などがあるが、1組の l^+l^- 対の横運動量 (p_T) に対して制限をつけ、さらにもう1組の l^+l^- 対の不変質量に対し制約を付ける事により、これらのバックグラウンドを除去することが出来る。

$$(3) 2m_Z < m_H < 700 \text{ GeV}$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^- \quad (2.3)$$

この崩壊モードは、分岐比も大きく Z-mass constraint (2組の $lepton$ 対の不変質量 $m_{l\bar{l}} \sim m_Z$) によるイベントの取捨選択が有効であるため、最も信頼性の高いモードであり、比較的きれいな信号が得られる。 $m_H = 200 \text{ GeV}$ としたとき、高ルミノシティで1年間運転して (100 fb^{-1}) 100events 程度が期待されている。

$$(4) 700 \text{ GeV} < m_H < 1 \text{ TeV}$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^- \nu\nu, H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj \quad (2.4)$$

この領域になると、より分岐比の高い (4lepton モードの約 150 倍) これらのモードを用い統計量を稼ぐ事が必要となる。

LHC を高ルミノシティで約1年運転したとき、ATLAS 検出器において Higgs 粒子が各崩壊モードで発見される能力を Fig.2.5 に示す。LHC では様々なバックグラウンドがあるため、Higgs 粒子の探索は Fig.2.5 の中でも S/N 比の良い崩壊モードを狙って探索する必要がある。このグラフの縦軸は Higgs を発見する能力を表し、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 のイベントとバックグラウンドを明確に識別できる事を表す。

2.2.2 ATLAS 測定器

ATLAS 検出器は、全長 44m、高さ 22m、総重量 7000t の世界最大の検出器である。検出器の構成は、衝突点に近い所から内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器とつづく。これらを総合して、様々な陽子陽子衝突反応に対応し、超前方を除いた全立体角を覆い、ほぼ全ての粒子を検出する事が可能となっている。

ATLAS 検出器における座標系は、ビーム軸を z 軸に取り、これに垂直な方向を r 方向、ビーム軸周りを周回する方向に ϕ 方向を取った円筒座標系を採用する。また、衝突点から引いた線とビーム軸のなす角を θ とし、擬ラピディティ (pseudorapidity) η を

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_L}{E - p_L} \right) \simeq -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.5)$$

と定義し、これを用いる。ここで、 p_L は生成粒子のビーム軸に沿った縦方向運動量 ($p_L = p_z$) である [7]。

Fig.2.6 に ATLAS 検出器を示す。衝突点に近い側から各検出器の概要を述べ、TGC が置かれる ATLAS 検出器の要素を説明する。

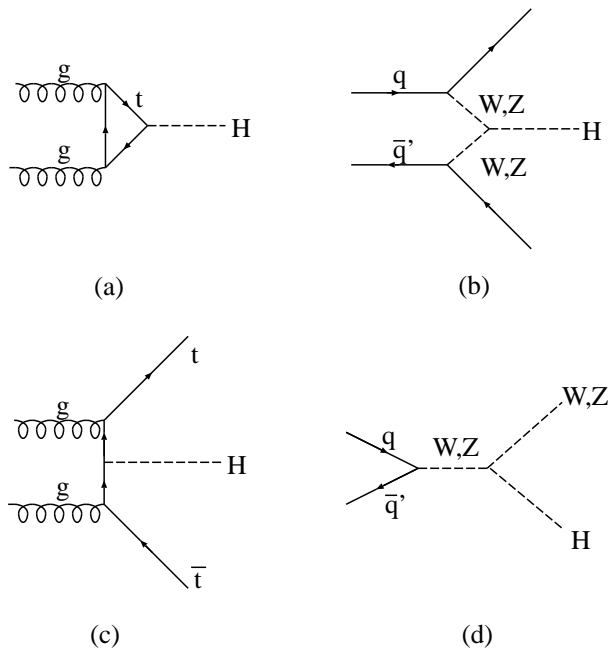


Fig. 2.2: Higgs 生成の代表的な生成過程：(a)gluon-gluon 融合 (gluon fusion)、(b)WW/ZZ 融合 (Vector Boson Fusion)、(c) $t\bar{t}H$ 生成過程 ($t\bar{t}H$ production)、(d)W/Z 粒子随伴生成 (W/Z associate production)

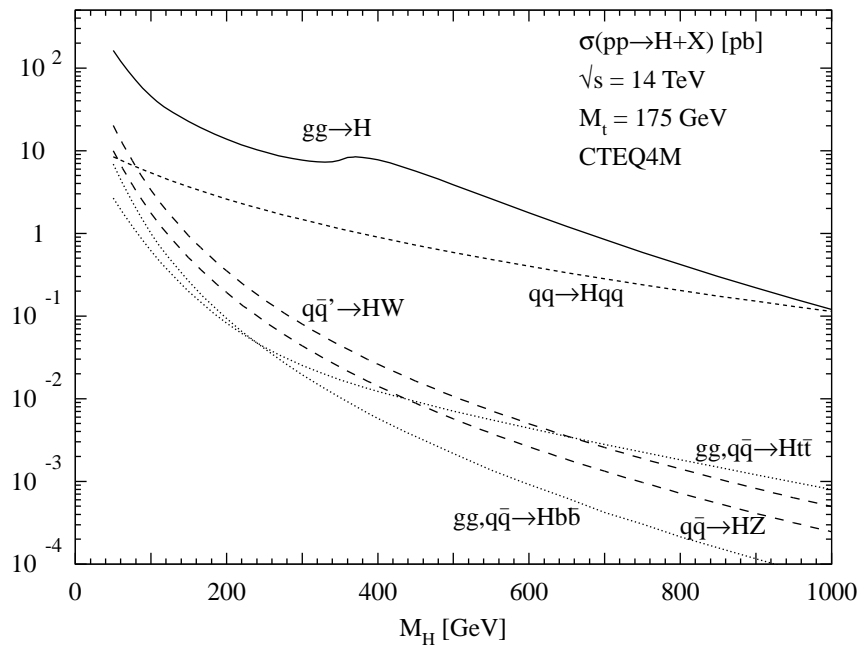


Fig. 2.3: Higgs 粒子の生成断面積 [3]

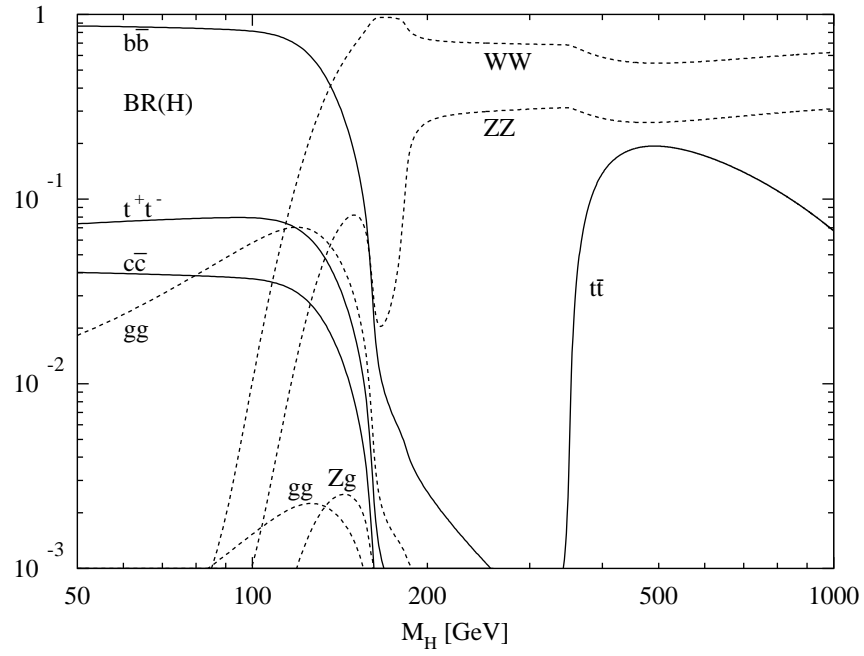


Fig. 2.4: Higgs 粒子の分岐比と質量の関係 [3]

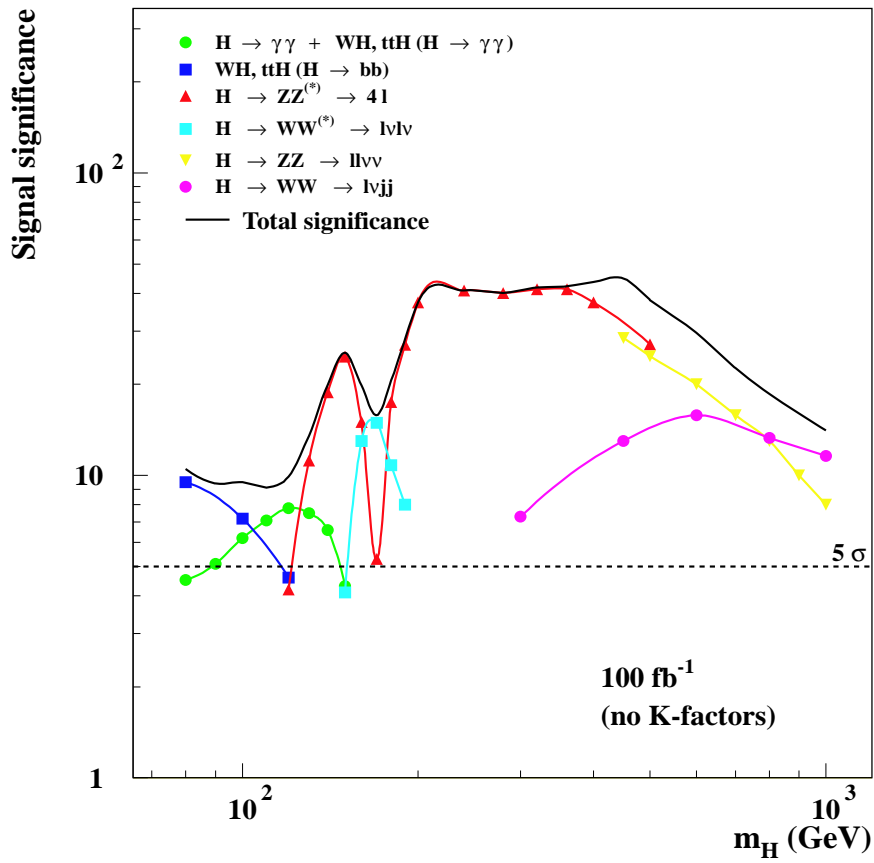


Fig. 2.5: ATLAS の Higgs 発見能力 [3]

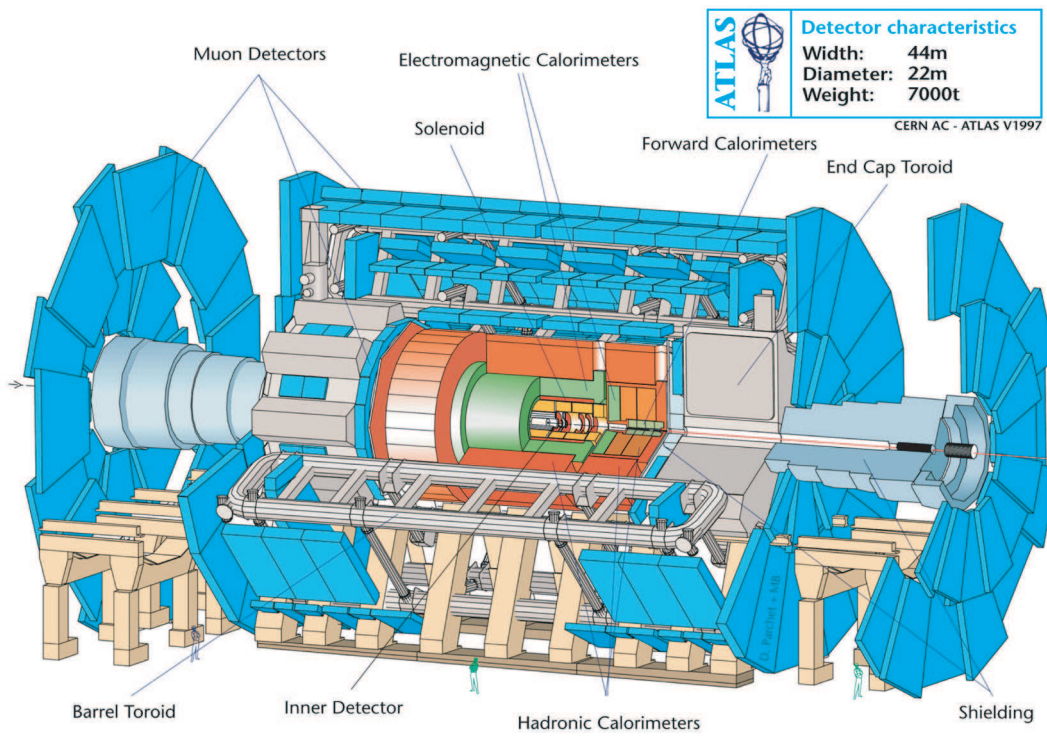


Fig. 2.6: ATLAS Detector [1]

2.2.3 内部飛跡検出器

荷電粒子のトラッキングを行う内部飛跡検出器は衝突点に最も近い位置に設置され、中央ソレノイドの約 2T の磁場によって運動量の測定を行う。中央飛跡検出器は、次の検出器から構成される。

Pixel Detector 最内層にある半導体検出器。1pixel が $50\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ の位置分解能を持つ。

SCT(SemiConductor Tracker) シリコンマイクロストリップと称される、ストリップ間隔が $80\mu\text{m}$ の半導体検出器である。

TRT(Transition Radiation Tracker) 半径 4mm のストローチューブ検出器であり、トラッキングの他に遷移放射を利用した電子識別を行う。最外層に設置される。

これらの検出器により、反応直後の粒子の飛跡測定、短寿命粒子の崩壊点の検出などが行われる。

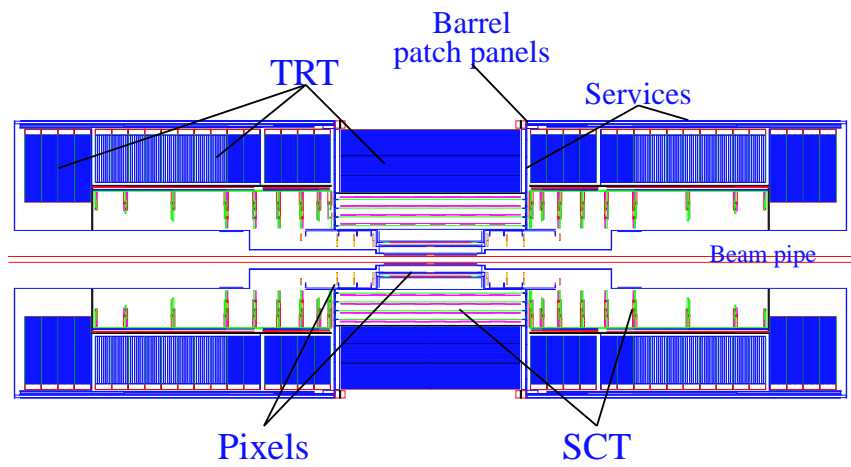


Fig. 2.7: 内部飛跡検出器 [4]

2.2.4 カロリメーター

超伝導ソレノイドの外側に電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータが配置される。電磁カロリメータは鉛と液体アルゴンのサンプリングカロリメータである。ハドロンカロリメータは鉄とシンチレータをタイル状に並べたタイルカロリメータをバレル部に用いる。エンドキャップ部には銅と液体アルゴンによるもの、タングステンと液体アルゴンによるものを用いる。ここで粒子の識別や位置測定、エネルギーの測定が行われる。

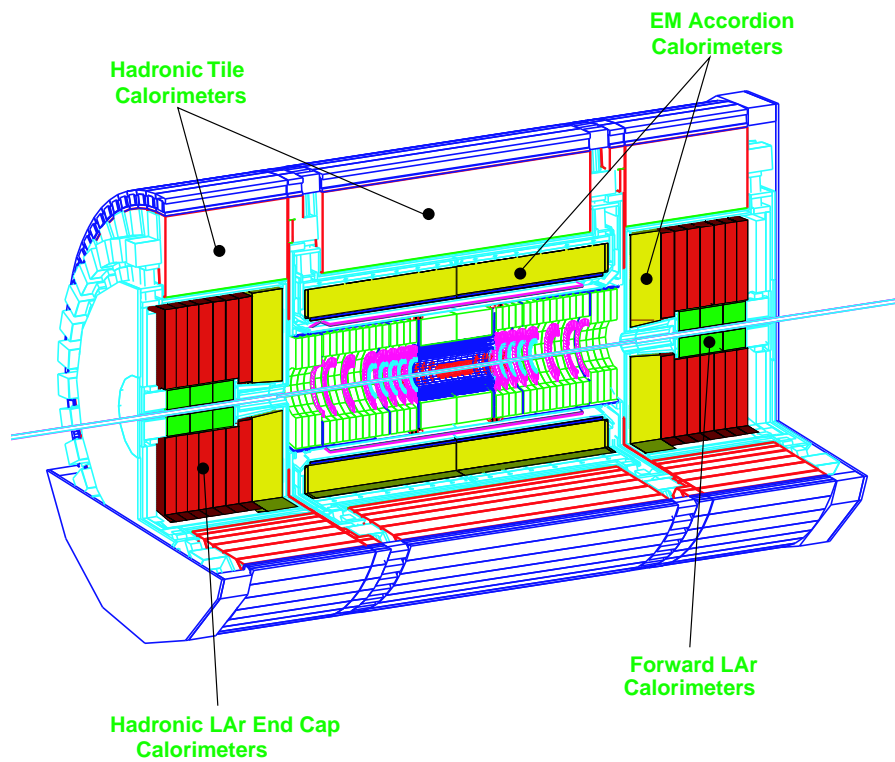


Fig. 2.8: カロリメータ [4]

2.2.5 超伝導空芯トロイドマグネット

Fig.2.9 のように、24 個の超伝導コイルをビーム軸回りに対称に配置し、トロイダル磁場を形成する。この磁場でミューオンの軌道を曲げる事により運動量の測定・選別を行う。多重散乱を抑えるために空芯になっている。Fig.2.10 はビーム軸に垂直な断面での磁力線を表したグラフである。このような磁場により r 方向にミューオンの軌道が曲げられる。トロイダル磁場が完全ではなく、 ϕ 方向成分も持ち、ミューオンは ϕ 方向にも少し曲げられる。磁場による r 方向の曲がり具合でミューオンの運動量を測定するが、精密測定には ϕ 方向の曲がりも考慮する必要がある。

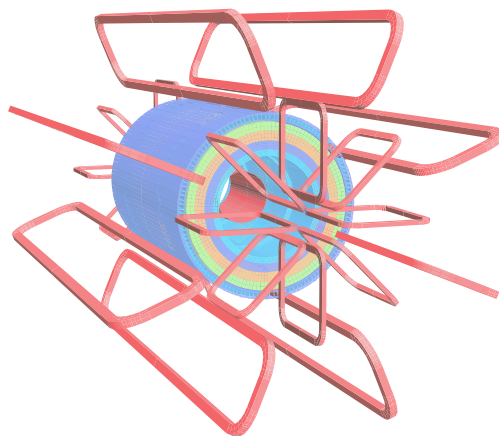


Fig. 2.9: 超伝導空芯トロイドマグネットの配置 [4]

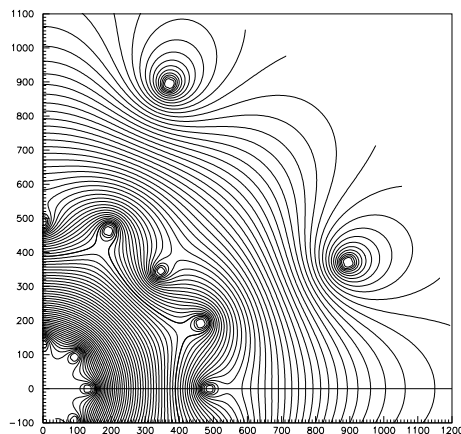


Fig. 2.10: エンドキャップトロイドの中央 ($z=1050\text{cm}$) におけるトロイダル磁場 (磁力線) [4]

2.2.6 ミューオン検出器

衝突点で生成したミュオンは、他の粒子に比べ透過性が高いため (Fig.2.11)、ミュオン検出器は、Fig.2.12 に示すように ATLAS 検出器の最も外側に配置される。ATLAS 検出器に設置されるミュオン検出器には、運動量の精密測定のための MDT、CSC、トリガー信号生成のための RPC、TGC が用いられる。

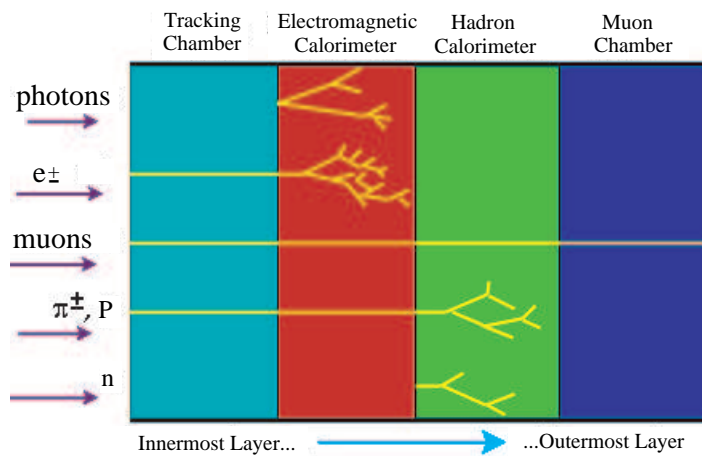


Fig. 2.11: 粒子の透過性の違い

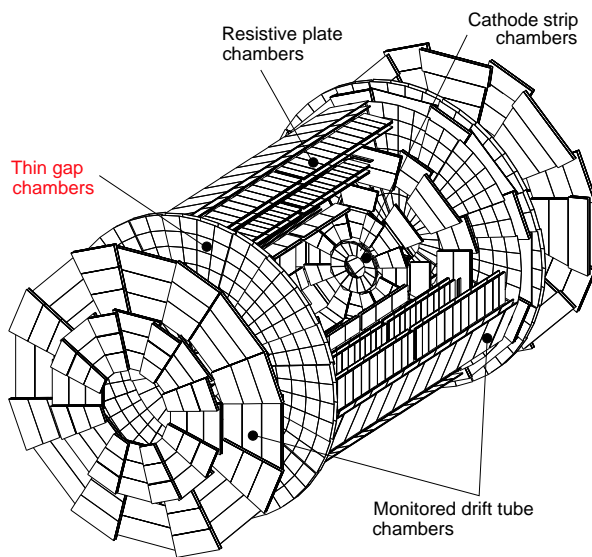


Fig. 2.12: ミューオン検出器 [4]

2.2.6.1 MDT(Monitored Drift Tube)

MDTは Fig.2.13 に示すように、直径 30mm の Drift Tube を俵積みにし、フレームに固定した構造をしている。混合ガスは $Ar : N_2 : CH_4 = 91 : 4 : 5$ で混合されたガスが 3 気圧で用いられ、印加電圧は 3270V で動作する。最大 Drift Time は 500ns、位置分解能は $80\mu m$ である。MDT は $|\eta| < 2$ のバレル・エンドキャップ部分に配置される。

Parameter	Design Value
混合ガス	$Ar : N_2 : CH_4 = 91 : 4 : 5$
ガス圧	3bar(絶対圧)
印加電圧	3270V
位置分解能	$80\mu m$

Table 2.2: MDT の各種パラメータ [4]

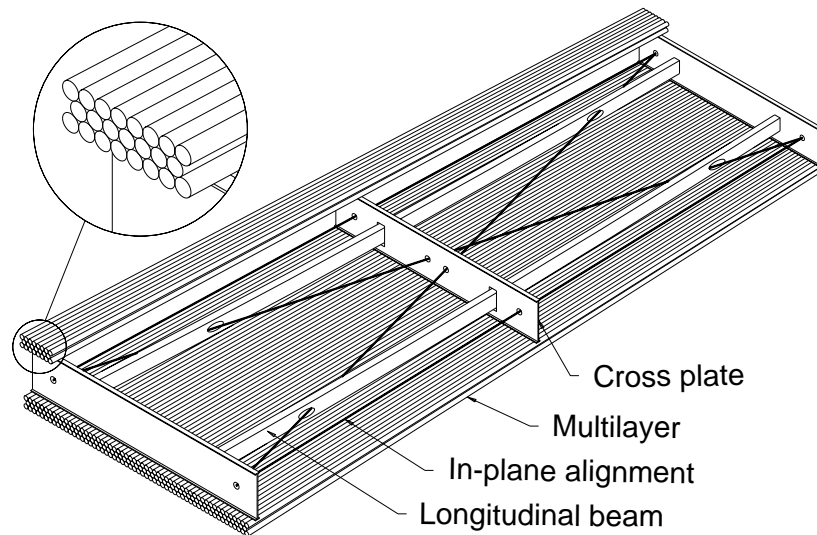


Fig. 2.13: Monitored Drift Tube [4]

2.2.6.2 CSC(Cathode Strip Chamber)

CSCは Fig.2.14 の構造をした、Cathode 読み出しの MWPC である。混合ガスとしては、 $Ar : CO_2 : CF_4 = 30 : 50 : 20$ で混合されたガスが用いられ、印加電圧は 2600V で動作し、位置分解能は $60\mu m$ 、Drift Time は 30ns 以下である。CSC はバックグラウンドとしてミューオン測定 of の妨げになる中性子への感度が 10^{-4} 未満と小さく、 γ 線に対する感度も 1% 程度となっている。そのため、最も放射線強度の高い超前方 ($|\eta| > 2$) に設置される。

Parameter	Value
ワイヤー間隔	2.54mm
Anode-Cathode 間隔	2.54mm
印加電圧	2600V
混合ガス	$Ar : CO_2 : CF_4 = 30 : 50 : 20$
ガスゲイン	4×10^4

Table 2.3: CSC の各種パラメータ [4]

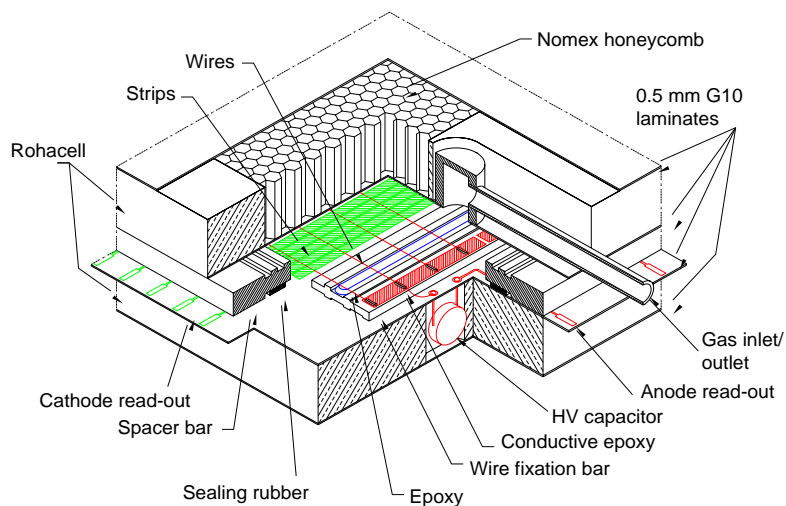


Fig. 2.14: Cathode Strip Chamber [4]

2.2.6.3 RPC(Resistive Plate Chamber)

RPCは $|\eta| < 1$ のBarrel部をカバーするトリガ用検出器である。RPCの特徴は、AnodeにWireを用いないガスチェンバーであることで、2枚の並行するBakelite板の間のガス($C_2H_2F_4$)に数kV/mmの電場を印加し、信号はStripから読み出す。RPCはStripが直交するように重ねられ、2次元読み出しが可能である。

Parameter	Value
ガスギャップ	$2.00 \pm 0.22mm$
印加電圧	$8.90 \pm 0.15kV$
Bakelite Volume Resistivity	$(1 - 5) \times 10^{10}\Omega cm$
カーボン面抵抗	$100 \pm 40k\Omega$
混合ガス	$C_2H_2F_4 : C_4H_{10} = 97 : 3$
ガス圧	$(1.0 \pm 0.5)mb$

Table 2.4: RPCの各種パラメータ [4]

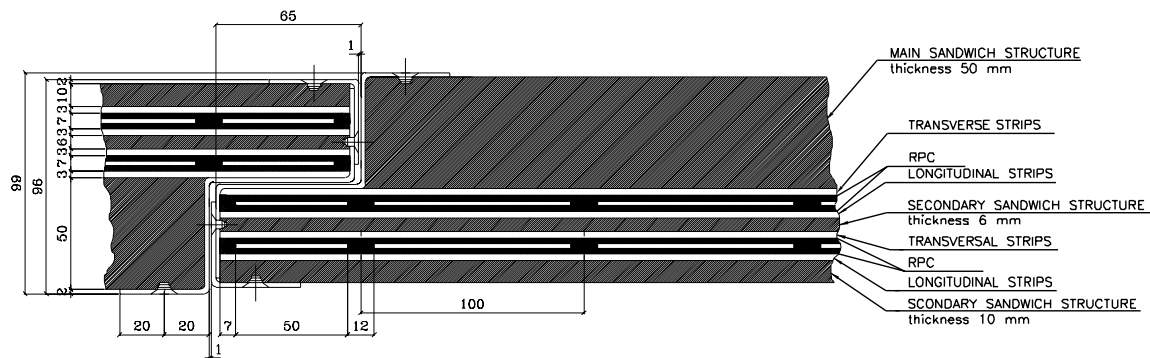


Fig. 2.15: Resistive Plate Chamber [4]

2.2.6.4 TGC(Thin Gap Chamber)

TGC は、 $2.4 < |\eta| < 1.05$ のエンドキャップ部分に設置されるトリガー用検出器である。TGC の構造は MWPC(MultiWire Proportional Chamber) で、Anode Wire と Cathode Strip のシグナルを読み出すことにより、2次元の位置測定が可能である。詳細については3章において述べる。

Parameter	Value
Anode-Cathode 間隔	1.4mm
Wire-Wire 間隔	1.8mm
印加電圧	3000V
混合ガス	$CO_2 : n\text{-Pentane} = 55 : 45$
ガス増幅率	10^6
位置分解能	$\sim 1\text{cm}$
時間分解能	25ns のゲート幅に対して 99%の検出効率

Table 2.5: TGC の各種パラメータ [4]

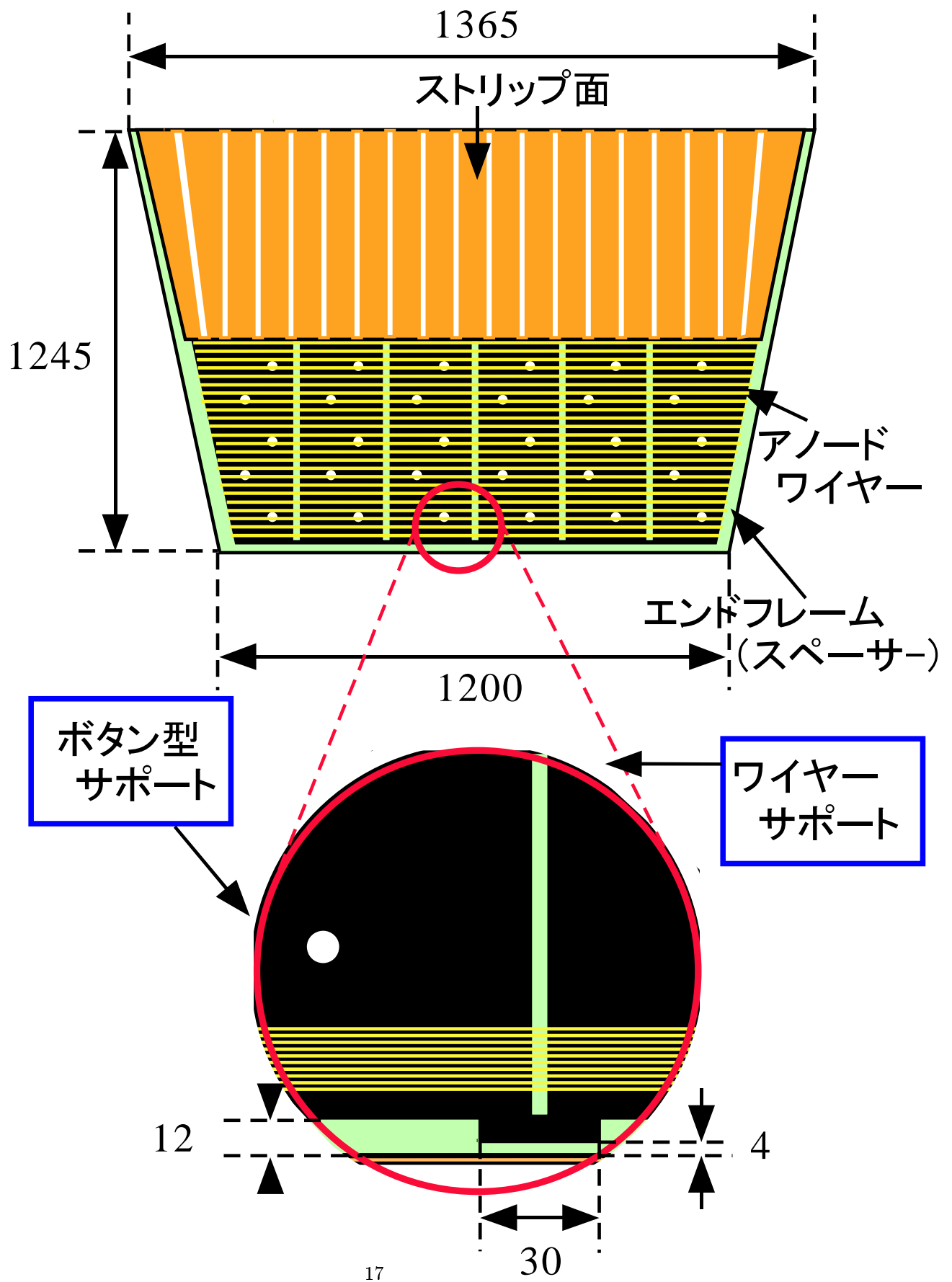


Fig. 2.16: Thin Gap Chamber [4]

2.3 ミューオントリガーシステム

LHC 加速器による 40.08MHz のバンチ交差により、ATLAS 検出器の衝突点で発生する陽子陽子の衝突率は 1GHz にもなる。これらの多量なイベントの中から目的とする物理現象のイベントを同定し、その現象由来のシグナルを探し出す必要がある。トリガーシステムは、これらの膨大なイベントの中からオンラインで、目的とする物理事象を含むイベントのみを収集するための判断を行う。最終的に DAQ システムに送られるイベントレートは、データストレージの容量の関係で 100Hz 程度にする事が要求されている。この目的を達成するために、ATLAS 実験のトリガーシステムは 3 段階のステージに分け順次イベントレートを落としていく設計になっている (Fig.2.17)

初段がレベル 1 トリガーで、カロリメータとミュオンシステムにより行われる。この時、粒子が入射している検出器の領域を Region of Interest として指定する。これが次段のレベル 2 トリガーへ渡される。Region of Interest のデータを用い、さらに精密な選択を行う。最後にイベントフィルタがあり、ここでは検出器の全データを用いてイベントの選択が行われる。

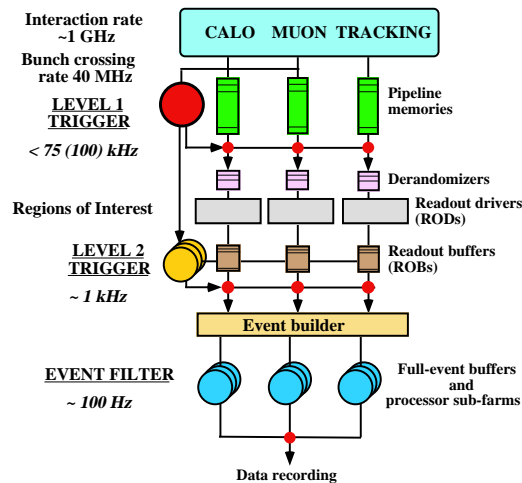


Fig. 2.17: ATLAS 実験のトリガーシステムのスキーム [5]

TGC は上記の各トリガーのうち、End-Cap 部分のミュオンレベル 1 トリガーを担当する。Fig.2.18 に TGC の配置を示す。TGC は 2 層ないし 3 層で 1 Unit となっており (Fig.2.21)、それぞれ Doublet、Triplet と呼ばれる。TGC は衝突点から見て、Troid Magnet の外側に、Triplet (M1)、Doublet (M2)、Doublet (M3) の順で、Big Wheel と呼ばれる円盤上に配置される。中央の Doublet を Middle Doublet、外側の Doublet を Pivot Doublet と呼ぶ。Troid Magnet の内側には、Inner Station と呼ばれる Doublet が置かれる。

ミュオントリガーシステムとしての条件は

- $p_T > 20 GeV$ のミュオンが 1 つ存在
- $p_T > 6 GeV$ のミュオンが 2 つ存在

である。TGC でのミュオントリガーは、トロイド磁場での曲がり具合を、M1、M2、M3 の 3 層での位置測定で判定し、これより横運動量 (p_T) を求める。

トリガーチェンバーである TGC に要求される主な条件は以下の 4 つである。

1. 検出効率が 99% 以上である。
2. LHC のバンチ間隔である 25nsec 以下の時間分解能を持ち、バンチの決定が可能である。
3. p_T をトリガー条件に組み込むため、 $\sim 1cm \times 1cm$ の位置分解能を持つ。
4. ATLAS 実験ホール内での、 $0.1kHz/cm^2 \sim 1kHz/cm^2$ の高頻度入射粒子環境下において、10 年間安定に動作する。

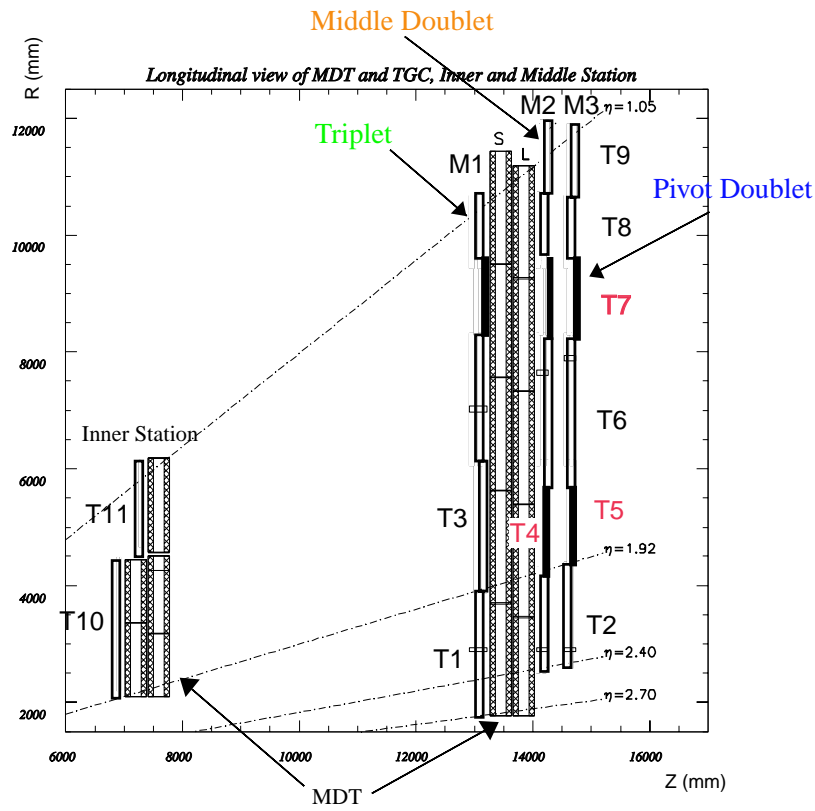


Fig. 2.18: エンドキャップミュオントリガー [4]

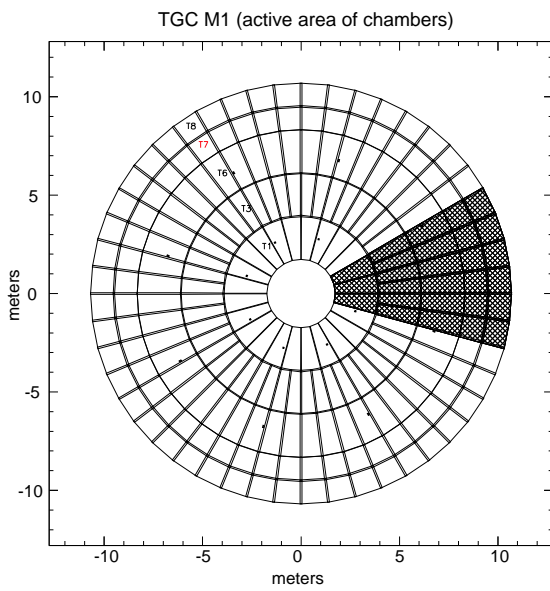


Fig. 2.19: M1 ステーションの TGC の配置 [4]

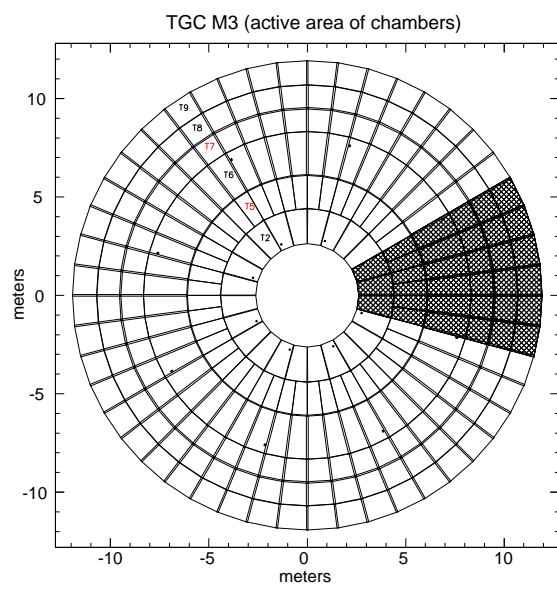


Fig. 2.20: M3 ステーションの TGC の配置 [4]

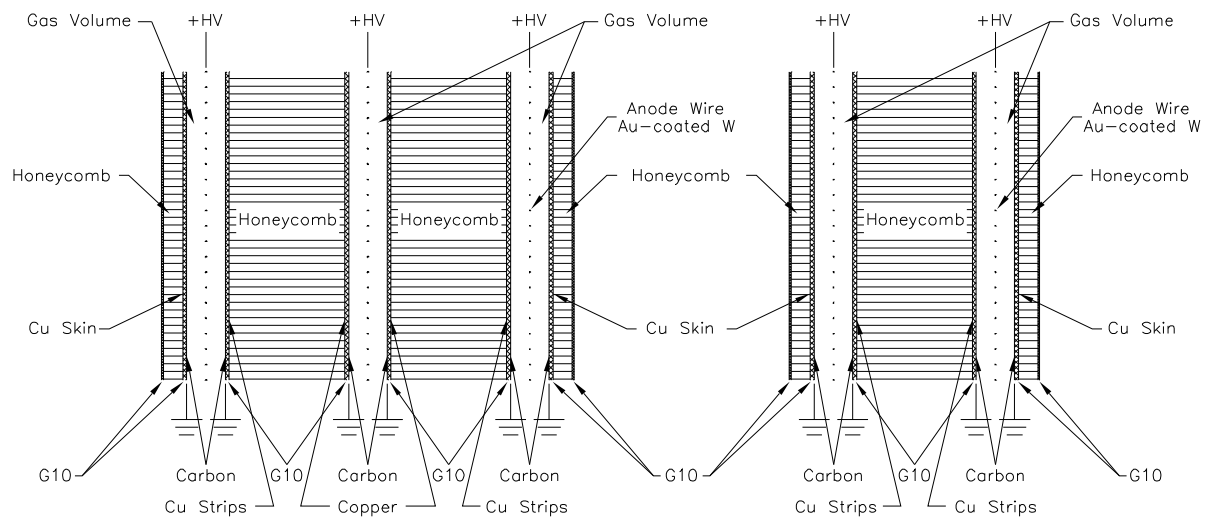


Fig. 2.21: Doublet / Triplet 断面図 [4]

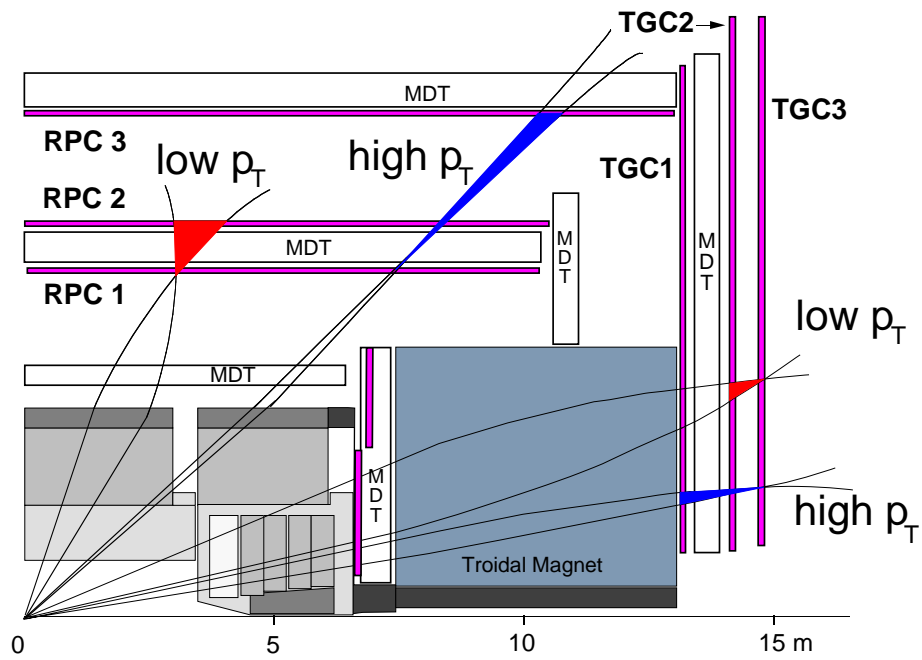


Fig. 2.22: トリガースキーム [5]

第3章 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 Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)型の検出器の一つである。Anode Wire と Cathode Plane の間隔 (Gap) が通常の MWPC に比べ非常に狭いため、Thin Gap Chamber (TGC) と呼ばれる。TGC は、Majewski、Charpak らによって、高頻度入射粒子状況下でも動作できるチェンバーとして提唱された [6]。Anode Wire と Cathode Plane の間隔を狭くする事により、入射粒子によって形成された陽イオンが早く Cathode Plane に到達し、チェンバーの不感時間 (Dead Time) が短くなるよう設計されている。

3.1 動作原理

3.1.1 ガス増幅と動作モード

TGC に入射した荷電粒子は、その飛跡に沿ってガス中の分子と多数衝突し、イオン化させる (Fig.3.1(a))。電離された電子 (1 次電子) は、陽極へ Drift しながら、印加電場によって加速され、運動エネルギーを持つようになる。電子のエネルギーがガス分子の電離エネルギーを超えると、ガス分子をイオン化し、2 次電子を生成する (Fig.3.1(b))。一般に、その電場の閾値は 1 気圧で約 $10^6 V/m$ 程度である。2 次電子も電場によって加速され、それが次々と衝突、電離を繰り返す、タウンゼント型電子なだれと呼ばれるカスケード形の電子なだれを形成する。この過程をガス増幅という。電子とイオン雲はそれぞれ Drift を始めてお互いに離れ (Fig.3.1(c))、電子雲は Anode Wire を取り囲み (Fig.3.1(d))、イオン雲はさらにその周りを取り囲むように Anode Wire 半径方向に拡散していく (Fig.3.1(e))。TGC はこの電子なだれをシグナルとして Anode Wire から読み取り、Anode Wire の位置から、位置情報を得る。

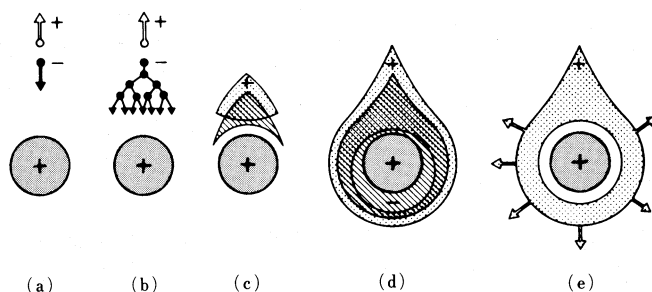


Fig. 3.1: Anode Wire 近傍でのタウンゼント型電子なだれの推移 [8]

ここで、単位長さ dx あたりに電子の数 n が増加する割合は

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (3.1)$$

で、式 (3.1) を **タウンゼントの式 (Townsend Equation)** という。α はタウンゼントの第一電離係数と呼ばれ、電場と圧力、および気体の種類によって変わる係数である。電場が空間的に一定であり、圧力も一定であると仮定すると、α は定数とみなすことが出来、

$$n = n_0 \exp(\alpha x) \quad (3.2)$$

のように、電子の数 n が初期の電子数 n_0 に比例した関係にあることがわかる。

よって、印加電圧とチェンバー内の圧力のある範囲に設定すると、収集電荷を入射放射線によって生成された最初のイオン対数に比例させる事が出来る。この領域を比例モード (Proportional Mode) という。一方、電離によって生じた陽イオンは、移動度が電子に比べて非常に小さいため、電子を収集する間にはほとんど動かない。したがって、チェンバー内には陽イオンの雲が出来、それがゆっくり陰極へ向かって拡散していく。印加電圧をあげていくと、この陽イオン雲の濃度が高くなり、空間電荷を形成してチェンバー内の電場をゆがめ、電子なだれの成長を抑制するようになる。収集電荷が最初のイオン対の増加によって増大するが、直線性を示さない事よりこの領域の動作モードを制限比例モード (Limited Proportional Mode) という。

さらに印加電圧をあげていくと、陽イオンによる空間電荷が完全に支配するようになる。電子なだれと共に生成された陽イオンの濃度が高くなると、ガス増幅を起こす閾値以下に電場が下がってしまい、そこで電子なだれの生成は終了する。この過程は自己制限型で、収集電荷は最初に生成するイオン対の数に関係なく一定である。ここで入射放射線は分子を電離する事以外に励起も起こす。励起した分子は、可視、あるいは紫外線を放射して基底状態へ戻る。これらの紫外線もエネルギーが十分高ければ、電離能力を持ち、別の電子なだれを生成する。印加電圧が高くなると紫外線光子数も増加し、連続的に電子なだれが形成され、やがてチェンバー全体で放電するようになる。この連続放電は、電場がガス増幅の閾値以下になった時に止まる。このときの収集電荷は、最初に生成するイオン対の数に無関係で一定である。これをガイガーミュラー動作モード (Geiger-Müller Mode, GM Mode) という。

このとき、紫外線吸収能力の高い混合ガスを使用すると、最初の電離 (励起) が起こった位置からはなれた場所の電子なだれの生成を抑制する事が出来る。紫外線光子は電子なだれのすぐ近傍で、追加的な電子なだれを形成し、Anode から Cathode の方向に電子なだれが成長すると、先端部の電子なだれから陽極に達し、この部分から急激に電流が流れ、後方の電子なだれへと柱状に伝わりスパーク放電する。これが制限ストリーマーモード (Limited Streamer Mode)、または自己消滅型ストリーマー (Self-Quenched Streamer Mode) である。

1MeV と 2MeV の荷電粒子に対する、印加電圧と各モードにおける出力パルス波高 (すなわち捕獲した電子数) の関係を Fig.3.2 に示す。

3.1.2 充填ガス

TGC はトリガーチェンバーであるため、入射粒子のエネルギーに関係なく入射粒子を全て検出出来なければならない。それには制限比例モードで動作させる事が望ましい。制限比例モードで動作させる事は、比例モードと比べてガス増幅によって得られる電荷量が 10~100 倍と大きく有利である。ガス増幅率が高くなると、紫外線による電離の影響が無視できなくなるので、紫外線吸収能力の高いクエンチガスも必要となる。TGC の充填ガスの候補として、 CF_4 : iso- C_4H_{10} (iso-Butane)=80:20 と、 CO_2 : n- C_5H_{12} (n-Pentane)=55:45 が検証された。時間分解能では CF_4 + iso- C_4H_{10} の方が優れていたが、検出効率の点で CO_2 + n- C_5H_{12} の場合 99%、 CF_4 + iso- C_4H_{10} の場合 97% となり、トリガーチェンバーとしては高い検出効率の方が良く、 CO_2 + n- C_5H_{12} を使用することとなった。

CO_2 は、電子捕獲確率が非常に小さく、1次電子が Anode Wire に Drift して行く途中で、ガス分子に捕獲されにくい。また、n-Pentane は非常に大きな紫外線吸収能力をもち、吸収した紫外線のエネルギーを分子自信の回転エネルギーやラディカル等の低分子への解離エネルギーに使用し、2次電子の放出を抑える働きをする。0.5 気圧、室温で用いることが可能なアルカン系のガスの中で、n-Pentane は、紫外線の吸収断面積が最大である (Fig.3.3)。このことから、 CO_2 + n-Pentane の充填ガスを用いると、高い増幅率と高い検出効率を得る事が出来る。

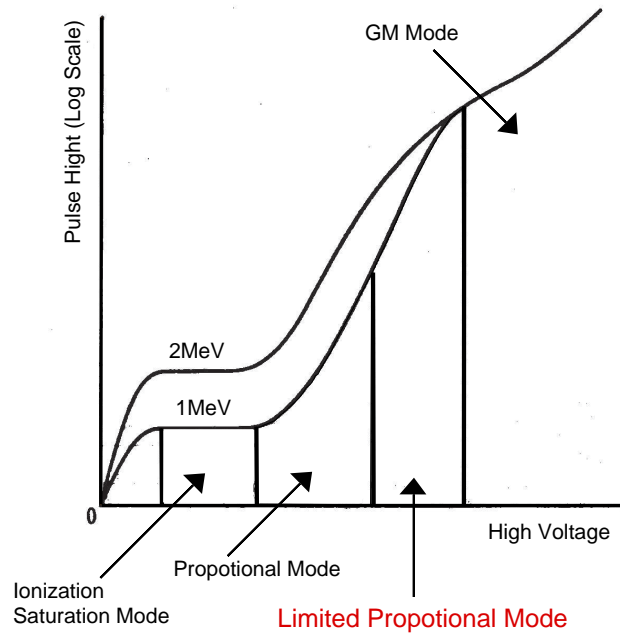


Fig. 3.2: 各動作モードにおける印加電圧と出力パルス波高の関係

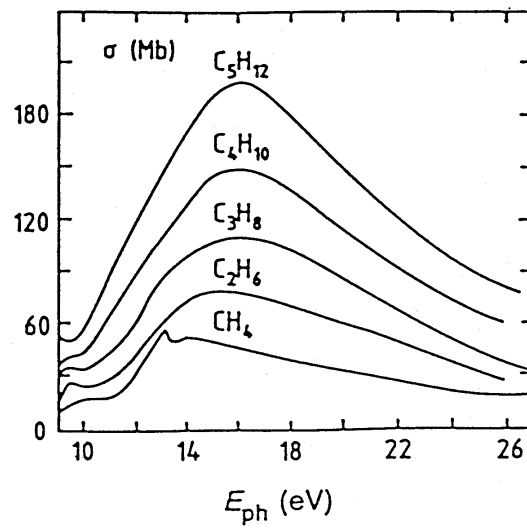


Fig. 3.3: n-Pentane の紫外線吸収断面積

気体	電子捕獲確率
CO_2	6.2×10^{-9}
O_2	2.5×10^{-5}
H_2O	2.5×10^{-5}
Cl	4.8×10^{-4}

Table 3.1: 各種ガスによる電子捕獲確率の違い

3.2 TGCの構造

TGCの断面図をFig.3.4に示す。TGCは、1.6mmのFR4(ガラスエポキシ樹脂)を基板として、その片面にカーボン塗布することで、Cathode面を形成している。Anode Wireは直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤーが用いられ、Wire-Wire間隔は1.8mmである。これにより25nsecの時間分解能を実現している。一方Anode-Cathode間隔は1.4mmと通常のMWPCより狭くなっている。これは陽イオンが早くCathode面に到達でき、不感時間が短く、高頻度入射粒子耐性に対応している。Cathode面であるカーボン面の面抵抗を大きく($0.5\text{M}\Omega\sim 1.5\text{M}\Omega$)する事により、Strip読み出しを可能にしている。陽イオンがCathode面に衝突した際に、電子がチェンバー内に飛び出さないよう仕事関数が大きく、かつ紫外線によって光電効果を起こさないよう原子番号の小さい物質がCathode面には適しており、カーボン面を選択した。カーボン塗布する事で、放電を抑える事が出来、さらに高抵抗にする事により、Strip間のクロストークを抑える事が出来る。しかし、抵抗が高すぎると、局所的な電圧降下の影響を受けたり、チャージアップを起こしたりするので、均一にかつ $0.5\text{M}\Omega\sim 1.5\text{M}\Omega$ の範囲になるよう調整しなければならない。

Fig.3.5に、T7タイプのTGCの平面図を示す。TGCには2種類のスペーサーが入っており、一つはWireのたるみを防ぐためのワイヤーサポートで、もう一つはギャップ間隔を一定に保つためのボタン型サポートである。これらのスペーサーは不感領域となるが、Doublet/Tripletにする際、これらの不感領域が重ならないように、モジュール内のTGC間でワイヤーサポートの位置は半ピッチずつずれるよう製作される。

WireとStripの両読み出しをする事で2次元での位置情報を得る事が出来る。Wireはr方向の情報を、Stripは ϕ 方向の情報を得るよう配置される。T7タイプの場合、Wire-Wire間隔が1.8mmで張られるため、1枚あたり約700本のWireが張られる。このため、約20本のWireを1グループ(1ch)として読み出しを行っている。(Fig.3.6)。Stripに関しては、約40mm幅のStripが1chに対応している。

TGCの電場・電位構造をFig.3.7に示す。電場はWire近傍において $1/r$ で増加し、Wireから0.2mmの位置では約 40kV/cm の電場を持ち、Cathode面近傍(Wireから1mm)の位置でも 10kV/cm を持つ。このようにTGCは全領域にわたり非常に強い電場を持ち、ほぼ全領域でガス増幅が可能な構造を持つ。

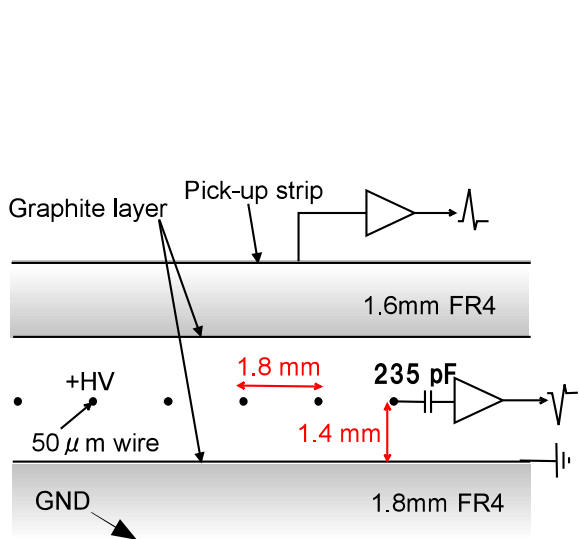


Fig. 3.4: TGCの構造(断面図) [4]

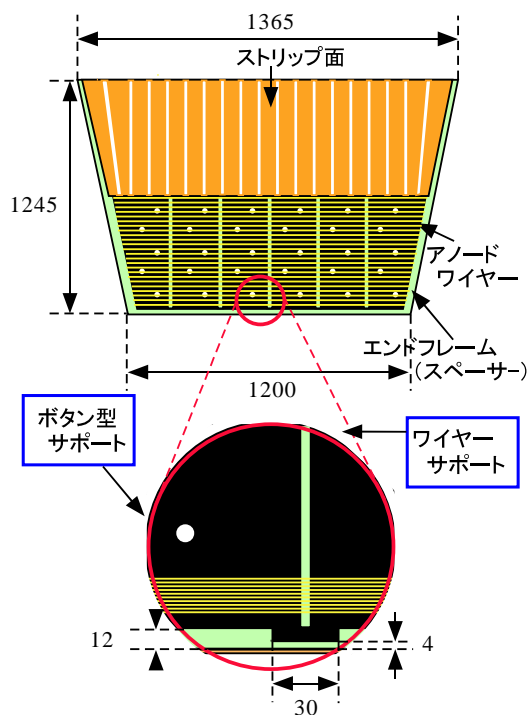


Fig. 3.5: TGCの構造(平面図)

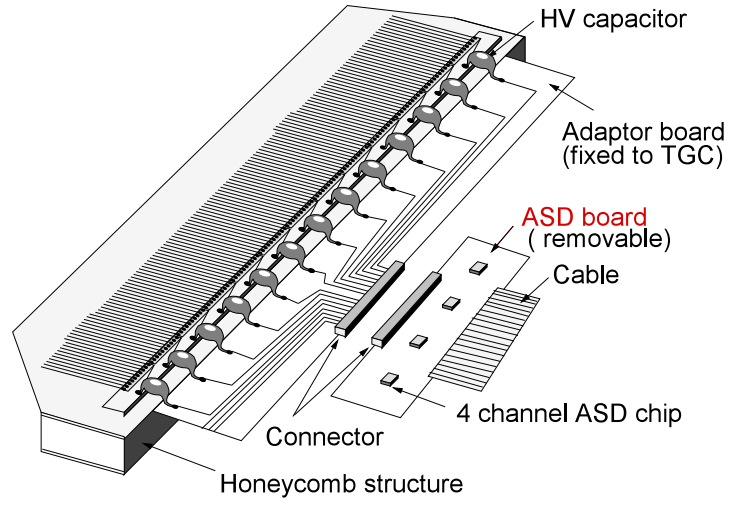


Fig. 3.6: Wire 方向の読み出し部分の構造 [4]

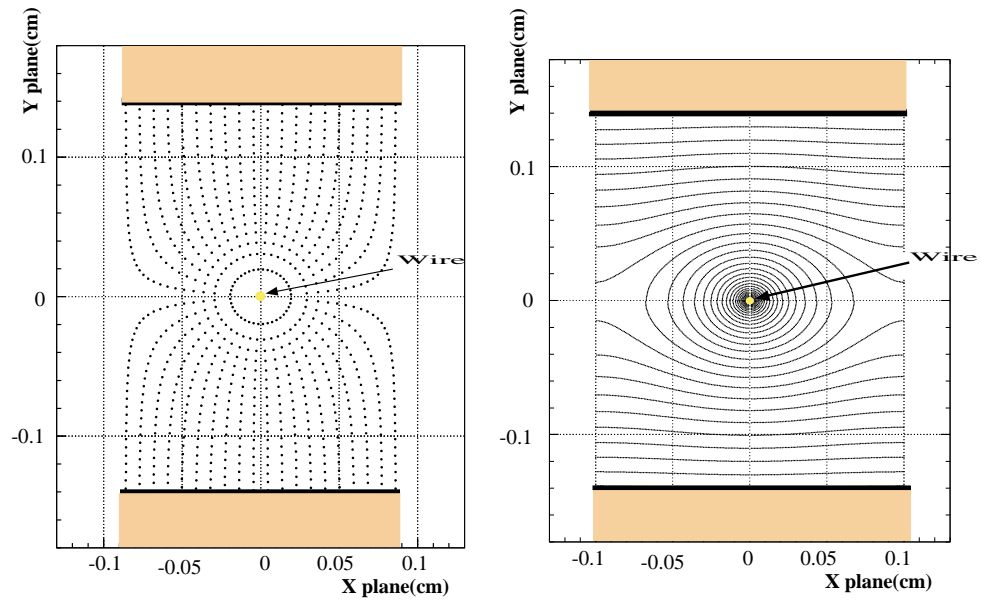


Fig. 3.7: TGC の電場 (左) ・ 電位 (右) 構造のシミュレーション [20]

3.3 TGCの量産

ATLAS 検出器に実装される TGC は、Fig.2.19、Fig.2.20 に示した円形の領域を隙間なくカバーするために様々なタイプの TGC が多数製作される。TGC の製作は日本グループとイスラエルグループ、中国グループの共同で行われており、日本では茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の富士実験室 B4 エリアで行われている。担当国とそれぞれの国が製作する TGC のタイプと Singlet の枚数を Table3.2 にまとめた。日本グループの担当しているのは T4、T5、T7 の 3 タイプで、その大きさを Fig.3.8 に、それぞれの枚数を Table3.3 に示す。

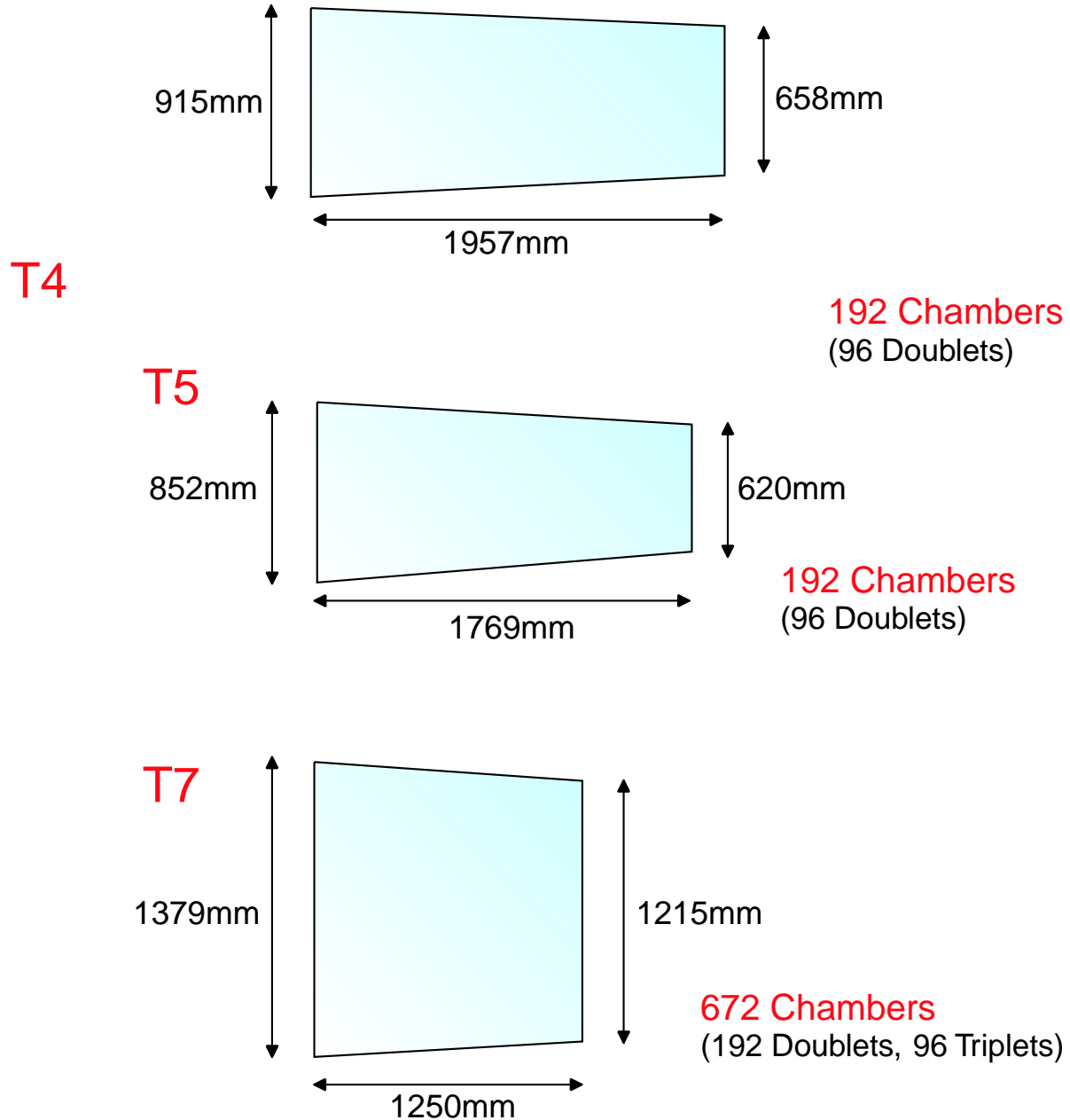


Fig. 3.8: 日本グループが製作する TGC のタイプと大きさ [19]

担当国	タイプ	Singlet 枚数
日本	T4,T5,T7	1056 枚
イスラエル	T1,T2,T3,T6,T8,T10,T11	2152 枚
中国	T9	384 枚
合計		3592 枚

Type	Singlet	Doublet	Triplet
T7	672	192	96
T5	192	96	
T4	192	96	
合計	1056	384	96

Table 3.2: 各国で製作される TGC のタイプと枚数

Table 3.3: 日本グループ担当の TGC タイプと枚数

3.3.1 製作工程

TGC の製作工程を Fig.3.9 に示す。以下 TGC の製作工程について述べる。

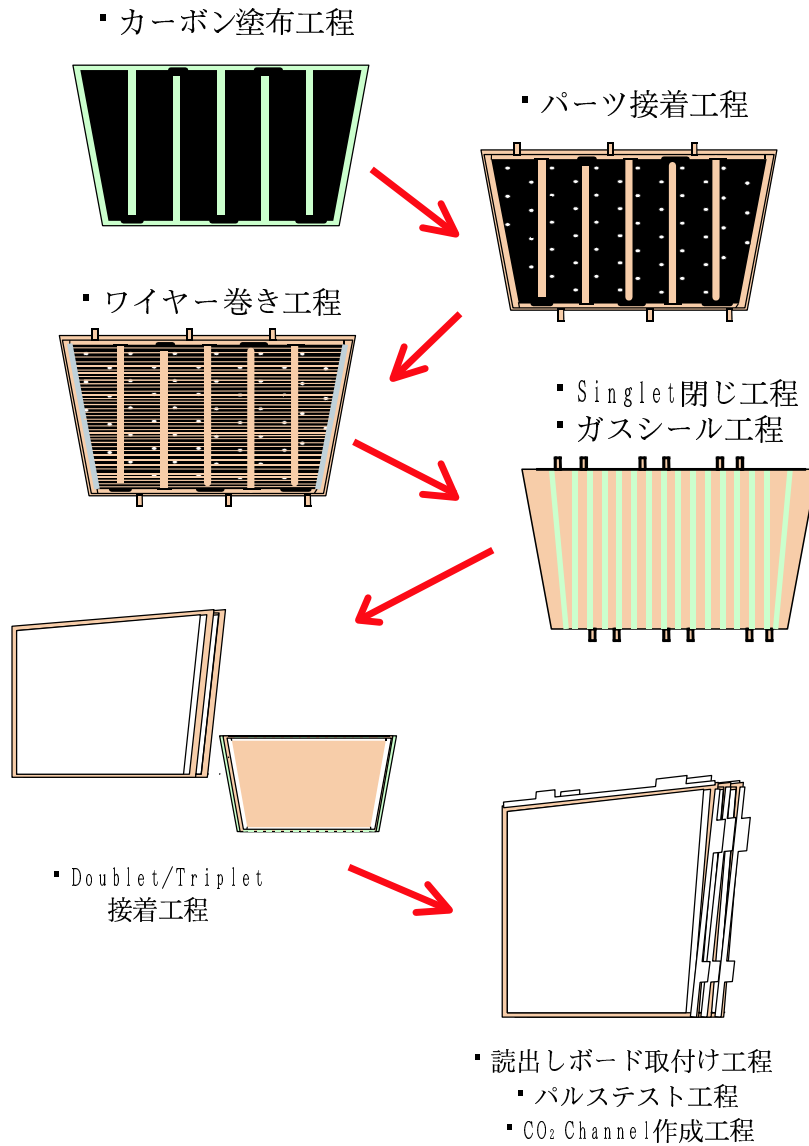


Fig. 3.9: TGC 製作工程 [22]

1. カーボン塗布工程

TGCの製作は、FR4(ガラスエポキシ樹脂)の板材に、高抵抗に調整されたカーボンが塗装される。塗装面がそのままCathode面になるため、その塗装面は均一でなければならない。さらにその面抵抗は、ストリップでのシグナル形成のため $0.5M\Omega/cm^2 \sim 1.5M\Omega/cm^2$ になるよう調整される。この抵抗値が高すぎると、電離したイオンが拡散する速度が遅くなってしまい、チャージアップを起こしてしまう。また低すぎるとシグナルを形成する前に拡散してしまうので、抵抗値のコントロールがカーボン塗布工程において最も重要な課題となる。カーボン塗料は有機系溶剤が使われており、人体に有害であるため、塗装は自動化されている。実際の塗布室の写真を図3.10、図3.11に示す。用いられる塗料は、導電性塗料(Graphit33)と絶縁性塗料(PLASTIK70)を

$$\text{Graphit33} : \text{PLASTIK70} = 13 : 10 (\text{重量比})$$

で混合したものが用いられる。



Fig. 3.10: カーボン塗布装置 1



Fig. 3.11: カーボン塗布装置 2

2. パーツ接着工程

カーボンが塗布されると、次にガス領域を形成するためのサイドフレーム、ワイヤーサポート、ボタン型サポートといったパーツを接着する。ここでは、専用の治具を用い図面どおりに各パーツを配置し、アラライト¹を用い接着される。接着する際、FR4板全面をフィルムで覆い、内部を減圧する事で全面に均一な力をかけ、平面性を保つ事が出来るよう工夫がされている。接着時間は25℃に保たれたパネルハウス内で16時間取られている。



Fig. 3.12: パーツ接着風景 1



Fig. 3.13: パーツ接着風景 2

¹2 液混合タイプのエポキシ系接着剤。最低硬化時間は25℃の硬化温度で12時間である。

3. ワイヤー巻き工程

パーツが接着された板のうち、グランド側に対応する板にはワイヤーが巻かれる。その際に用いられるワイヤー巻き機を Fig.3.14 に示す。この機械では、ワイヤーを巻く FR4 板を吸盤の付いた天板で吸着する事によりその平面性が保たれる。ワイヤーは張力が 350g 重で、間隔が 1.8mm になるよう約 700 本のワイヤーが巻き上げられる。ワイヤーが巻かれた後、数十本を 1 グループとしてはんだ付けされる。用いるはんだは、強度の強い錫-亜鉛の非共晶はんだが用いられる。

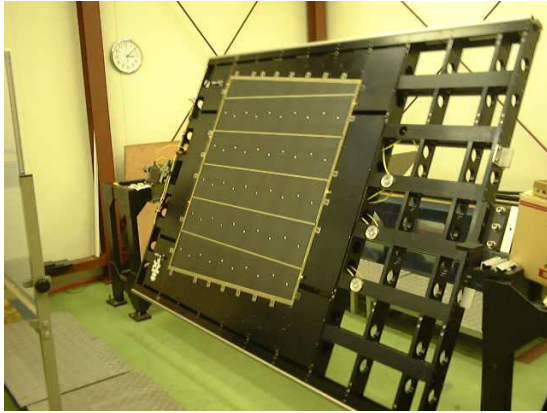


Fig. 3.14: ワイヤー巻き機



Fig. 3.15: ワイヤーの張力でたわんだグランド板

4. Singlet 閉じ工程

次に、ワイヤーの巻かれたグランド板と対になる銅ストリップの切られたストリップ板とを接着剤で貼り合わせる。これが Singlet 閉じ工程である。閉じ工程では、まずワイヤーの巻かれたグランド板を専用の石定盤に固定する。グランド側の板はワイヤーの張力で大きくたわんでいるので、ワイヤーを切らないよう慎重に固定する。その上に対になるストリップ板を置く。この時、各パーツがぴったり合うよう置かなければならないと同時に、ワイヤーを切らないよう注意を払わなければならない。グランド板とストリップ板を重ね合わせた後、接着剤で貼り合わせる前に CO_2 による HV Test を行う。接着前に HV Test をする理由は、何らかの理由で HV が印加できなかつた場合、すぐに開いて原因を探索することが出来るからである。ここで CO_2 で 2.9kV が印加され、同時に Leak Current がモニターされる。Leak Current が 100nA 以下であるもののみ、接着剤を用いてグランド板とストリップ板を貼り合わせる。貼り合わせには、フィルムを用いて減圧し、均一の力を加え接着する。接着後再度 CO_2 で 2.9kV を印加し、Leak Current をチェックする (Fig.3.17)。



Fig. 3.16: Singlet 閉じ室



Fig. 3.17: Singlet の HV Test

5. Doublet/Triplet 接着工程

Doublet や Triplet を製作するために、厚さ 20mm の紙ハニカムを用意し、その 4 辺を同じく 20mm の FRP 製の角柱で囲み、構造体を作る。Singlet 2 枚の間にその構造体を挟んで Singlet を接着する事で Doublet とし、さらにもう一枚との間にも 20mm 紙ハニカムを挟んで接着する事により Triplet とする。

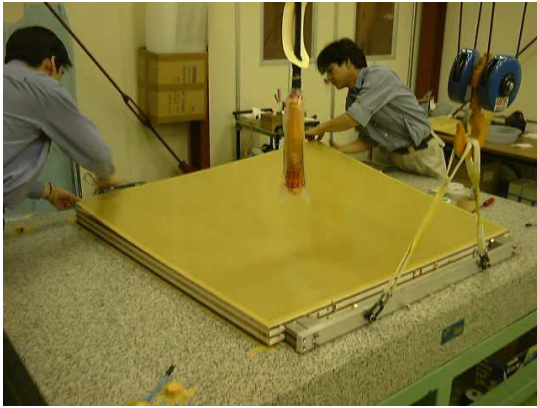


Fig. 3.18: Doublet/Triplet 接着

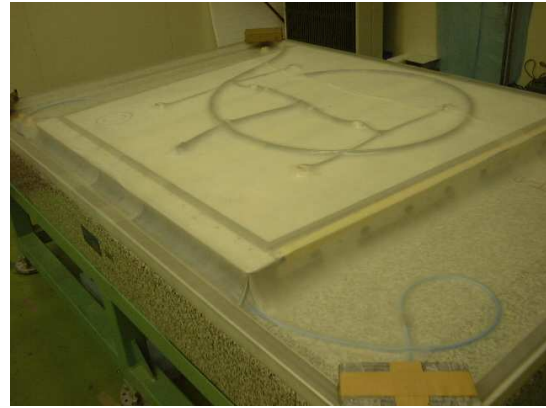


Fig. 3.19: Doublet/Triplet 接着

6. 読み出しボード取り付け工程

Doublet や Triplet の状態になった TGC には、ワイヤー、ストリップそれぞれに対し読み出し用のアダプターボードが取り付けられる。ワイヤーの読み出しは数十本のワイヤーを 1 グループとし、T7、T4、T5 タイプでそれぞれで 23、109、96 チャンネル、ストリップの読み出しはそれぞれのストリップを 1 チャンネルとし、3 タイプとも計 32 チャンネルの読み出しチャンネルとなる。



Fig. 3.20: アダプターボードの取り付け

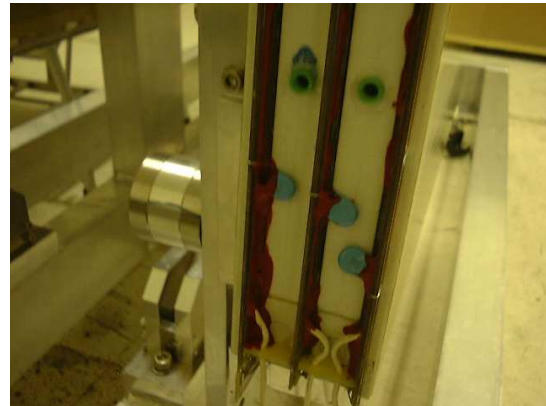


Fig. 3.21: コンデンサ

7. パルステスト工程/HV 焼き出し

読み出しボードが取り付けられ、各チャンネルと対応するアダプターボードの読み出しチャンネルとの結線が行われた後、それが正しく結線されているかどうかを確認するために、HV ラインに高周波の矩形波を入力し、各読み出しチャンネルからの波形を見ることにより、結線テストが行われる。また実際に検出器として動作する場合も、シグナルとして高周波を扱うので、ここでは同時に TGC の高周波に対する応答性も評価出来る。パルステストに合格後は、 CO_2 による HV 焼き出しが行われる (Fig.3.23)。

8. CO_2 Channel 作成工程

TGC の 4 辺は、アダプターボードの固定も含めて 4 辺全てが接着剤 (アラルダイト) でモールドされる。アラルダイトは、吸湿性が高く高湿度環境で使用すると湿気を吸い取り、それが原因で高電圧をかけている配線部分が通電してしまったり気体絶縁破壊を起こしてしまったり、またコンデンサ部分で放電が起こ



Fig. 3.22: パルステスト



Fig. 3.23: HV 焼き出し

ることがある。 CO_2 Channel は、TGC の 4 辺を囲むように取り付けられ、そこへ CO_2 を流す事により接着剤を乾燥状態にし、Chamber 外部での放電を起こさないようにしている。 CO_2 Channel を構成するパーツは、外側全面に銅が均一に貼られておりグラウンドに落とす事で電磁シールドの役目を負っている。また、 CO_2 Channel は、Chamber に Leak があった場合、n-Pentane が外部に漏れないよう、2 重に密閉する役割も持つ。T7 タイプの CO_2 Channel はワイヤー読み出し側の 1 辺を Side、その他の 3 辺を Main と呼んでおり、それぞれ別の系統となっている。T4、T5 タイプではひとつの CO_2 Channel のみである。



Fig. 3.24: CO_2 Channel 製作 1



Fig. 3.25: CO_2 Channel 製作 2

CO_2 Channel の取り付けが終われば製品となる。これまでに述べたように、TGC は製作される際、パーツ等は全て接着剤を用いる事で製作されている。これにより、TGC は外から衝撃や内圧の上昇に対し、非常に弱い構造となっている。後に述べる検査の中の Leak Test では、圧力限界が 600Pa であるとして試験される。また、 CO_2 による HV 印加が閉じ前、閉じ後、Doublet/Triplet 接着後の計 3 回行われる。これにより TGC は CO_2 で安定に HV が印加可能な状態となる。

3.3.2 製作スケジュール

日本グループは 2000 年 9 月より T7 Triplet の製作を開始し、カーボン塗布を除く工程に対しては作業員を雇い生産が行われた。Table3.4 に、日本が担当している各 TGC の製作する Unit 数と制作期間をまとめる。2004 年 12 月には、ほぼ全ての TGC の量産が終了し、現在は予備品の製作が行われている。Fig.3.27 に TGC 量産の結果を示す。

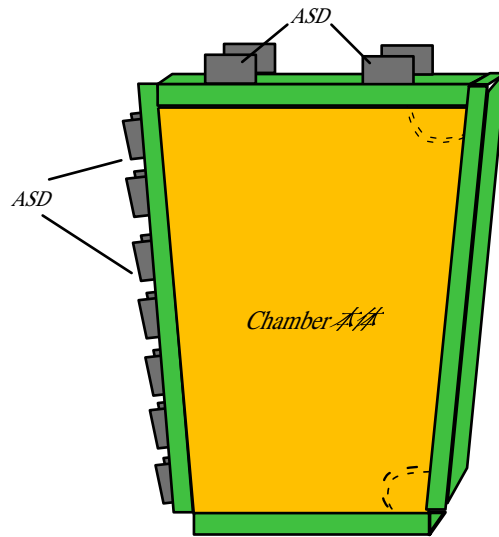


Fig. 3.26: CO₂ Channel 模式図

TGC Type	枚数	Chamber 製作	Readout 取り付け
T7 Triplet	96 Units	2000年9月～2002年3月	2001年9月～2002年12月
T7 Doublet	192 Units	2002年4月～2003年3月	2003年1月～2003年10月
T4 Doublet	96 Units	2003年4月～2003年10月	2003年11月～2004年6月
T5 Doublet	96 Units	2003年11月～2004年4月	2004年7月～2004年11月
予備		2004年5月～2004年8月	2004年12月～2005年1月

Table 3.4: 量産枚数と期間

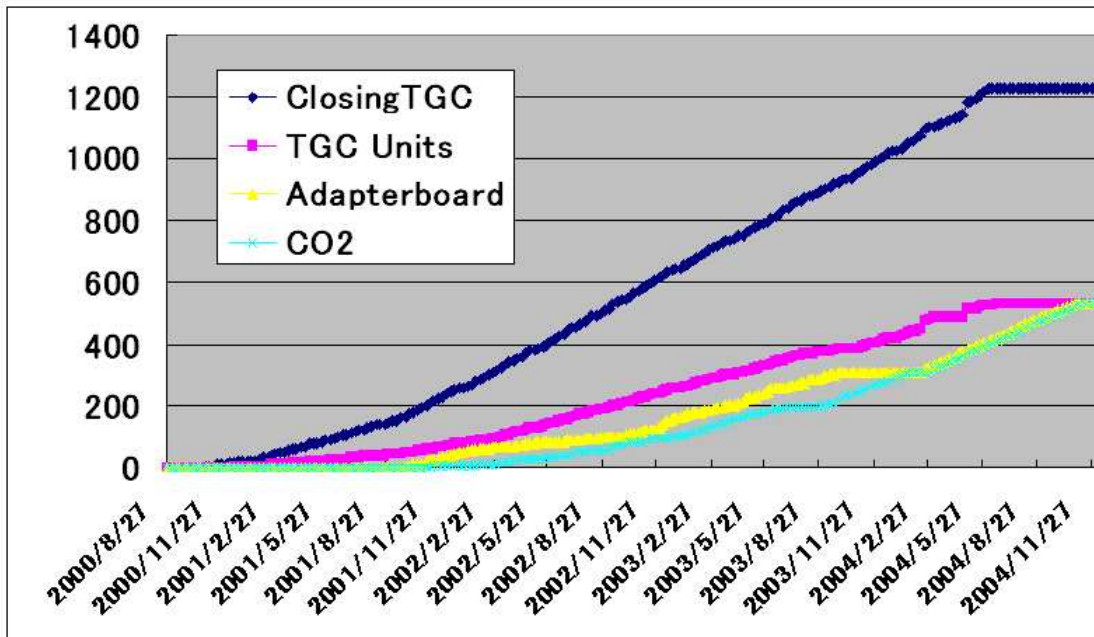


Fig. 3.27: TGC 量産の結果

第4章 検査設備

前章までに、TGC の概要と製作を述べた。本章では TGC の検査の目的とシステムの詳細について説明する。

4.1 TGC の検査

4.1.1 目的

我々日本グループでは KEK 富士実験室にて TGC の製作を行ない、2005 年 1 月までに約 500Units を製作した。これら製作された TGC は CERN へ輸送される前にその動作を確認しておく必要がある。主な動作確認とは

- 不感領域を除いた検出効率が 99%以上であること。
- 信号到達時間が、LHC バンチ間隔である 25nsec 以下であること。

を確認することである。TGC はトリガーチェンバーであるので、衝突点で生成された全てのミュオンを確実に捉えられるよう、実機には不感領域が無いように設置される。それ故に製作された各 TGC では全面に渡り検査を行ない、局所的に検出効率が低下していないかを検査する必要がある。これらの動作を確認するために、宇宙線ミュオンを用いて TGC からのシグナルを読み込み、TGC 全数に対して、全面に渡る検査を行なう。ビームラインから供給される有効面積の小さいミュオンビームとは異なり、宇宙線ニューオンは広範囲に一様に降り注ぐため、TGC の全面に渡る検査には都合がよい。

神戸大学では、宇宙線検査の他に、TGC や CO_2 Channel の気密性を検査する Leak Test と、宇宙線検査前に $CO_2 + n - Pentane$ の混合ガスを用い、3.1kV での漏れ電流 (Leak Current) を測定する高電圧印加試験 (HV Test) も行なう。

4.1.2 検査スケジュール

製作・検査された TGC を ATLAS 検出器へ組み込む日程は既に決まっており、2005 年 5 月末には全ての TGC の検査を終了していなければならない。2004 年 12 月末までに T7 Triplet、T7 Doublet と T4 Doublet までの検査を終了した。Table 4.1 に各 TGC の検査期間をまとめる。検査が終了する 2005 年 6 月までは毎日検査が行なわれる。

TGC タイプ	検査期間
T7 Triplet	2002 年 5 月～2003 年 5 月
T7 Doublet	2003 年 6 月～2004 年 3 月
T4 Doublet	2004 年 4 月～2004 年 12 月
T5 Doublet	2005 年 1 月～2005 年 5 月
予備品	2005 年 6 月～2005 年 7 月

Table 4.1: 検査期間 (予定含む)

4.2 CosmicRay Test

TGC の検査の中で、最も重要なのがこれから述べる宇宙線ミュオンを用いた CosmicRay Test である。CosmicRay Test では検出効率、及び信号到達時間の測定を行う。

Fig.4.1 に、宇宙線検査を行なうための Setup の模式図を示す。上下にトリガー信号を発生させるための Scintillation Counter が設置され、その間に宇宙線の飛跡を再構成するための円筒形の Drift Tube が設置されている。各イベント毎に Drift Tube により再構成された宇宙線ミュオンの Track 上に、TGC からのシグナルがあれば、そのチャンネルはヒットとみなす。つまり検出効率を

$$\text{検出効率 (\%)} = \frac{(\text{Track 上に TGC のワイヤー、及びストリップにヒットがあるイベント数})}{(\text{Track が引けたイベント数})} \times 100 \quad (4.1)$$

と定義し、各 TGC のワイヤー、ストリップそれぞれについて評価を行う。検査する TGC は、専用のアルミパレット上に寝かされ、架台中央部に挿入される。(Fig.4.2)

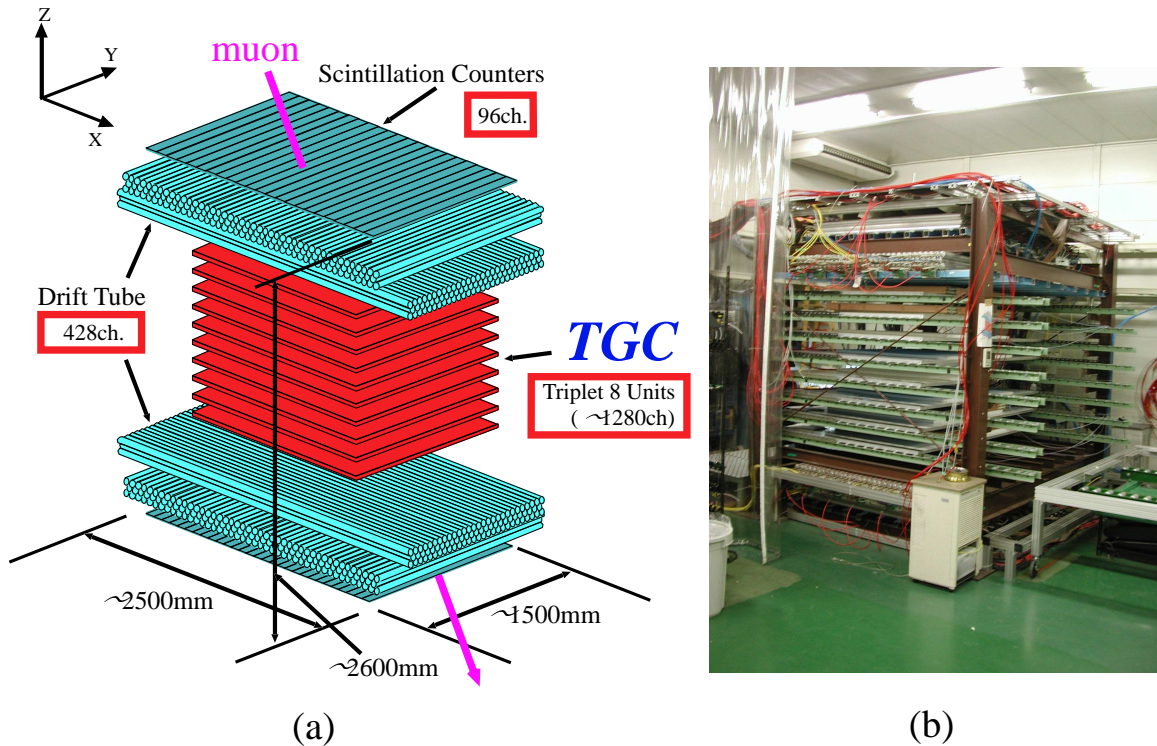


Fig. 4.1: CosmicRay Test 用検査設備の模式図 (Fig.(a)) と実際の検査用架台 (Fig.(b))

4.2.1 Scintillator

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 の大きさのものが 26 本、下面には 90mm × 1300mm × 2.6mm の大きさのものが 22 本の計 48 本並べて配置されている。

Fig.4.3 にトリガースキームを示す。Counter の両端に接続された Photomultiplier(PMT) からの検出シグナルはそれぞれ 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

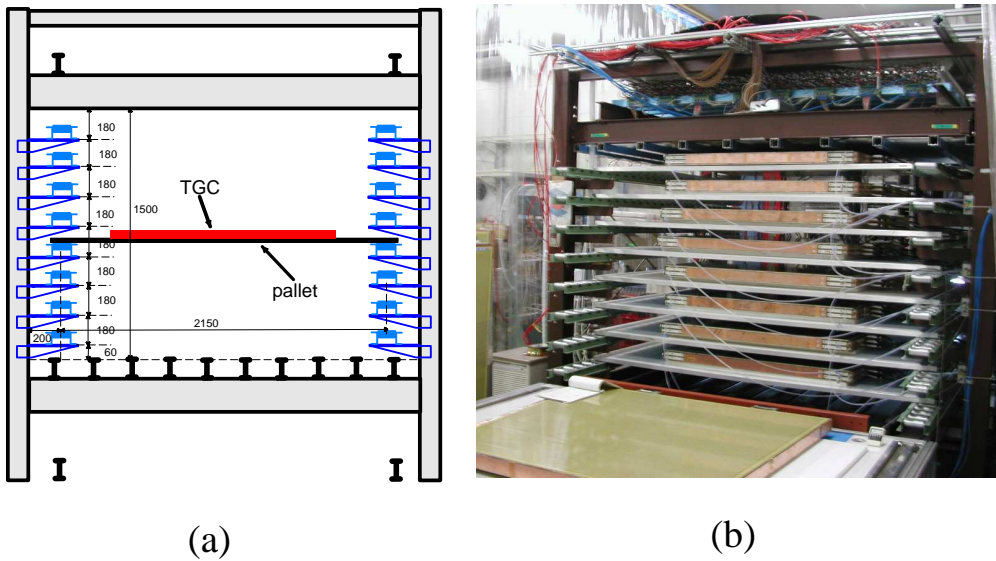


Fig. 4.2: y 方向から見た検査設備の図 (Fig.(a)) と検査を行っている時の写真 (Fig.(b))

シグナルのコインシデンス (論理積) を取ることにより、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。この一連の過程は、専用に開発された Trigger Module によりまとめて行われる。

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 (4.2.2) 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 $3.5kV$ 印加した時のドリフト速度は約 $5cm/\mu s$ 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にしたのが Fig.4.4 である。この図の分布を見ると $\sigma \sim 3.2ns$ であるので、1 枚のシンチレーターあたりでは $\sigma \sim 2.3ns$ の程度であり必要な性能は満たしている。

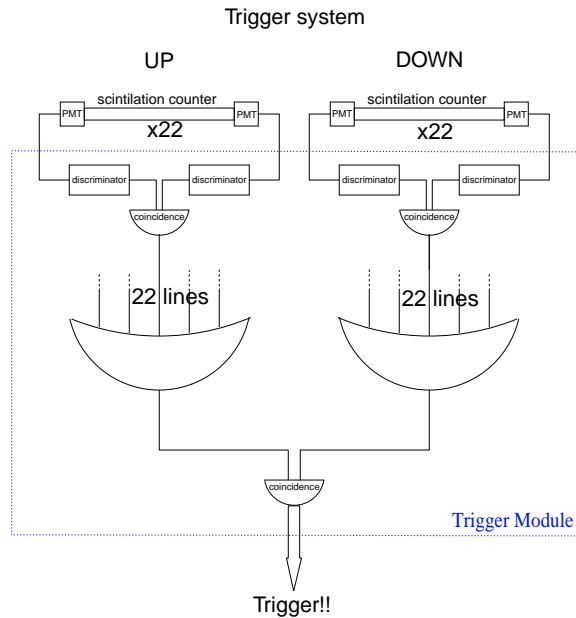


Fig. 4.3: トリガースキーム

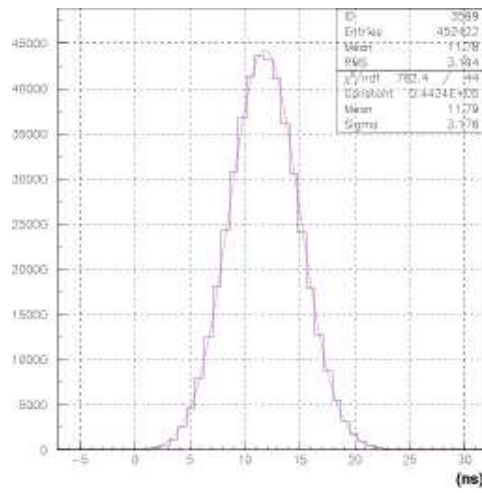


Fig. 4.4: 上下シンチレーター読みだし時間差

4.2.2 Drift Tube

本設備における Drift Tube の役割は、宇宙線の飛跡の再構成 (Tracking) を行う事である。先に述べたように、検査の最大の目的は検出効率の測定であり、track の位置精度はワイヤーサポート、ボタン型サポートの位置を識別するために 1mm 程度が要求される。検出効率は式 (4.1) より再構成された Track を用いて計算されるので、Tracking の効率 (Tracking Efficiency) は、検査期間を短縮するために非常に重要である。ここでは、Drift Tube の構造と検出原理を述べ、検査設備で行われている Tracking の方法について述べる。

4.2.2.1 構造と検出原理

Drift Tube は円筒形の比例計数管であり、シグナルの発生の原理は TGC と同じである。Drift Tube の断面図を (Fig.4.5) に示す。Drift Tube 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 $50\mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤー (Anode wire) が張られている。宇宙線ミュー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。

検査設備で用いる Drift Tube は制限比例領域で動作させる。これは十分なガス増幅率が得られる事から入射ミューオンのエネルギーに依らず全てのミューオンの検出を行うためである。(Fig.4.6) に、3種類の混合比の Ar + ethane に対する Drift Velocity の電場依存性を示す。図から分かるように、Ar + ethane はある強さの電場を越えると Drift Velocity は電場に依らずほぼ一定となる。Drift Tube の空間分解能を良くするためには、Drift Velocity はあまり大きくない事と、使用する電場領域に対して Drift Velocity の変動が少ない事が要求される。Drift Tube は円筒形の構造体であるので、その内部電場、電位はそれぞれ

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \quad (4.2)$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a} \quad (4.3)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} \quad (4.4)$$

となる。ここで V_0 は Anode Wire への印加電圧、 a は Wire 半径、 b は Wire-Cathode 間隔である。検査設備で用いられている Drift Tube においては $a = 25\mu\text{m}$ である。印加電圧 $V_0 = 3.5\text{KV}$ とした時、 $r = 2.3\text{cm}$ において $V(r) = 3.5\text{kV}$ となることから、式 4.2 より $E(r)$ を求める事ができる。 r を $2.5 \times 10^{(-3)}\text{cm} \sim 2.3\text{cm}$ と変化させた時、 $E(r)$ は $205 \sim 0.22\text{kV/cm}$ で変化する。(Fig.4.6) より、この電場範囲における Drift Velocity は比較的安定

な領域にあると考えられる。以上の理由により検査設備で用いる Drift Tube の充填ガスには $Ar + ethane(50 : 50)$ を用い、印加電圧には 3.5kV を用いると決めた。

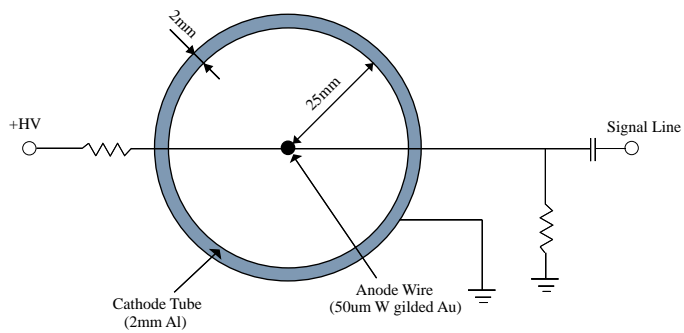


Fig. 4.5: Drift Tube の断面図

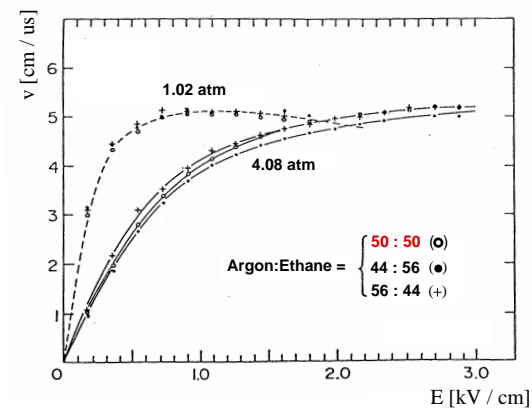


Fig. 4.6: 電場の強さと Drift Velocity の関係

4.2.3 Tracking

検査設備には、Drift Tubeが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本設置されている。Drift Tubeを3層に俵積みすることで2次元でTrackingを行うことができ(Fig.4.7)、XY方向に配置することで3次元でTrackingを行うことができる。

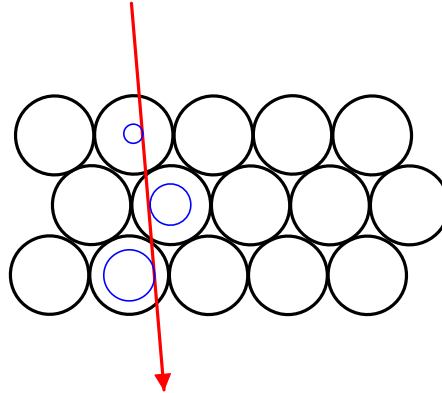


Fig. 4.7: 2次元の Tracking

シグナルの読み出しは、TGCと同じASDを用い、アナログ信号がデジタル信号に変換される。Drift Tubeを用いて宇宙線ミュオンのTrackingを行うためには、Drift Tubeの時間情報(Drift Time)を用いる。

得られたDrift Timeは空間情報(X(t):Drift Length)に変換しなければならない。この変換式(X-T Relation)は

$$X(t) = P_2 t^2 + P_1 t \quad (4.5)$$

$$(4.6)$$

と与えた。フロントエンドエレクトロニクスにより読み出された時間情報が、トリガーシグナルに対する相対的な時間情報であることを考慮し、その時間分布の最も早い時間、すなわちDrift Length = 0となる値を時間軸の原点(T_0)とした。Fig.4.8にDrift Tubeのヒットの時間分布を示す。グラフ右側がAnode Wireに近い部分を示し、 T_0 となる。

ここで、上下XYの各3層のDrift Tubeを用い、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成し、2層目のXを決める(Fig.4.9参照)。このXと2層目の時間情報をプロットすると、新たなX'(t)が得られる。これを用い、同様の計算を式(4.5)が収束するまで繰り返すことによりパラメータ P_1 、 P_2 が決定される。これにより決定されたパラメータは

$$P_1 = 0.556 \times 10^{-2} [cm/ns^2], P_2 = -0.311 \times 10^{-5} [cm/ns] \quad (4.7)$$

と求められた。

(4.7)のパラメータを用い、3層俵積みされたDrift Tubeのうち、最上部と最下部の2本のDrift TubeのDrift TimeからDrift Lengthをそれぞれ求め、Anode Wireを中心としDrift Lengthを半径とする円を描くと、それら2円に対する共通接線が4本引く事が出来る(Fig.4.10)。これら4本の接線のうち、2層目、3層目のDrift Tubeからの情報を用いて1本を2次元的なTrackとして採用する。ここで得られたXY方向それぞれの2次元のTrack情報を組み合わせる事により、3次元的な一意の飛跡を再構成を行う。以上の方法により、全トリガーシグナル数(Event数)に対する飛跡の再構成される効率(Tracking Efficiency)は約70%となった。

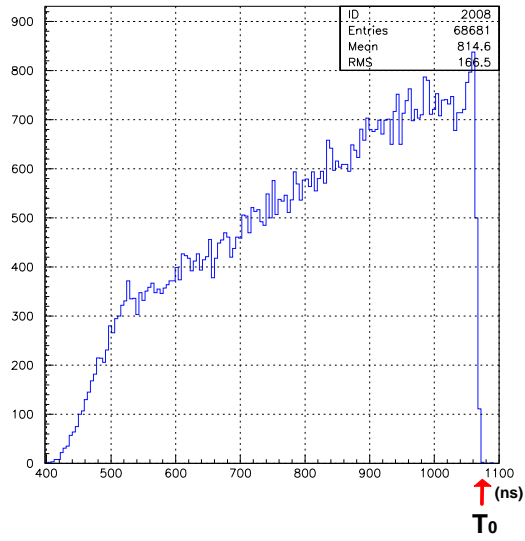


Fig. 4.8: Drift Tube のヒットの時間分布

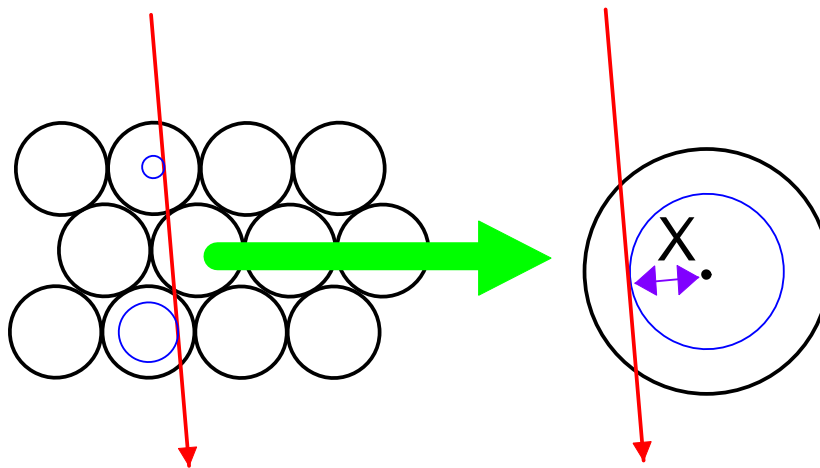


Fig. 4.9: X の決定

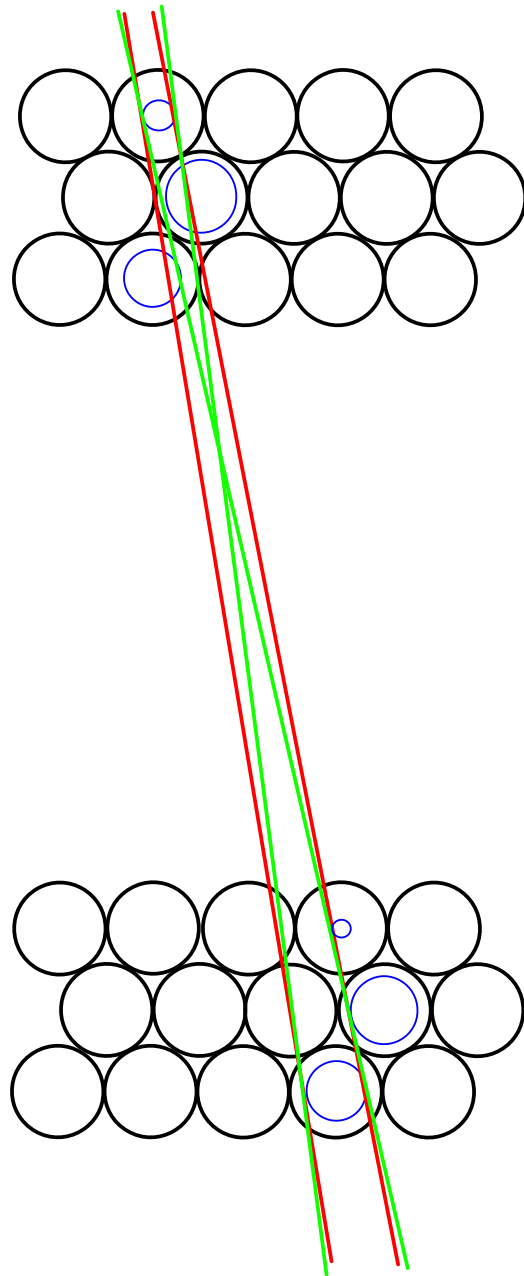


Fig. 4.10: Track の選択

4.2.4 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。フェイクトラックを削除するため、TGCのヒットとの対応を利用して、再構成したトラックのうち明らかにフェイクトラックと思われるものを除外するプロセスが Tracking Constraint である。複数の TGC を検査する場合、それぞれの TGC の検出効率は少なくとも 90% を超える値であり、ミューオンが複数の TGC を通過する際、ひとつもヒットが無い確立はきわめて低い。そこで検査を行う TGC 及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事を条件として課し、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事とする。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。

4.2.5 DAQ システム

TGC の検査を行うためには、これ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 DAQ (*Data Acquisition*) システムが必要である。この節では、DAQ システムのそれぞれの構成要素について述べる。

信号は基本的に以下のように読み出される。

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. エレクトロニクスモジュールによって、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. デジタル信号は、専用の読み出しモジュールに送られる。
4. コンピュータが各モジュールでのデータを集め、記録や解析を行う。

各検出器からの信号の読み出しに VME モジュールである TMC [10] [11]、SWINE [12] を用い、トリガー用ロジック回路には専用 Trigger Module、VME・Interrupt & I/O Register モジュール [13] を用いる。

Scintillation Counter が宇宙線ミューオンの通過を検知し、Trigger Module により生成されたトリガーシグナルを TMC、SWINE モジュールに引き渡す事によりイベントの発生を通知する。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 モジュールを用いる。

4.2.5.1 エレクトロニクスモジュール

各検出器とエレクトロニクスモジュールの関係を Fig.4.11 に示す。

- ASD(Amp Shaper Discriminator)

ASD(Fig.4.12) は、ワイヤー、ストリップそれぞれの読み出し用ボードに用いられる。ASD は TGC からのアナログシグナルを増幅 (Amplifier) し、Tail-cancellation 回路にかけて信号幅を狭く (Shaper) したのち、デジタル信号に変換 (Discriminator) する。デジタル出力は LVDS シグナルである。Shaper 回路はまた $1/t$ テールをキャンセルするための pole-zero cancellation 回路も持っており、高レートでのパイルアップを防いでいる。これらの機能 4ch 分を 1 チップにまとめ、これを 4 個装備する事で 1 枚あたり 16ch の読み出しが可能となっている。プレアンプとして $0.8V/pc$ の電流入力アンプがあり、次に Base-Line Restoration 回路、8 倍のメインアップ、threshold 電圧で弁別を行うコンパレーターと続く。

検査において、ASD は TGC と Drift Tube の読み出しに用いられている。特に TGC では、ATLAS 検出器で用いられる ASD が CosmicRay Test を行う前に取り付けられ、テスト終了後も外される事無くその

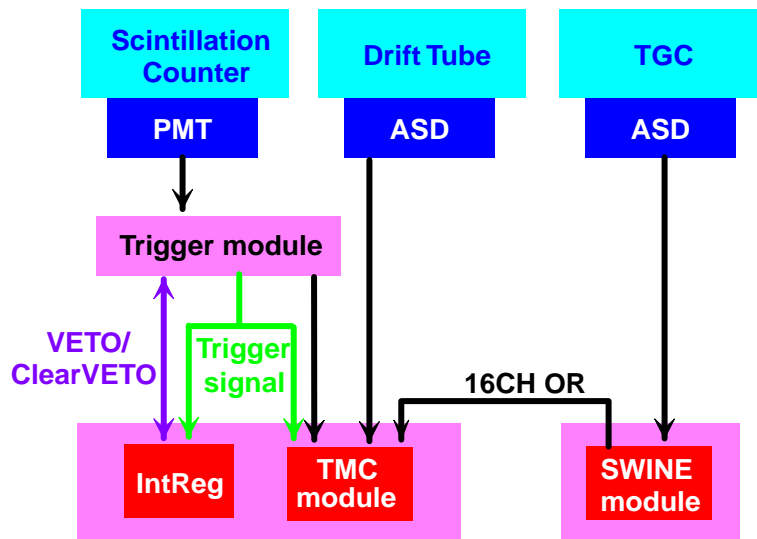


Fig. 4.11: 検出器とエレクトロニクスの構成

まま CERN へ輸送される事になる。ASD は外部のノイズ源から遮蔽するために、専用のシールドが取り付けられる。

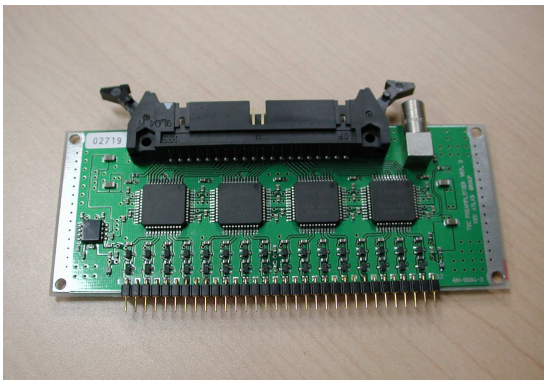


Fig. 4.12: ASD(シールド無し)

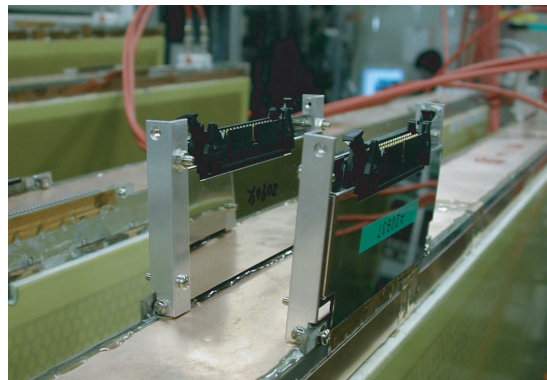


Fig. 4.13: ASD(シールドを付け TGC に実装)

- VME

高エネルギー実験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などが挙げられるが、本検査設備のデータ収集用バスには VME を使用した。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、後述する SWINE MWPC Readout システムを使用する。

- TMC-VME モジュール

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デジタル変換回路 (TDC : Time to Digital Converter) の一方式である。Fig.4.14 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)。本検査設備で使用するのは、TMC LSI を組み込んだ 32 チャンネルの 6U VME バス規格の汎用 TDC モジュールである。

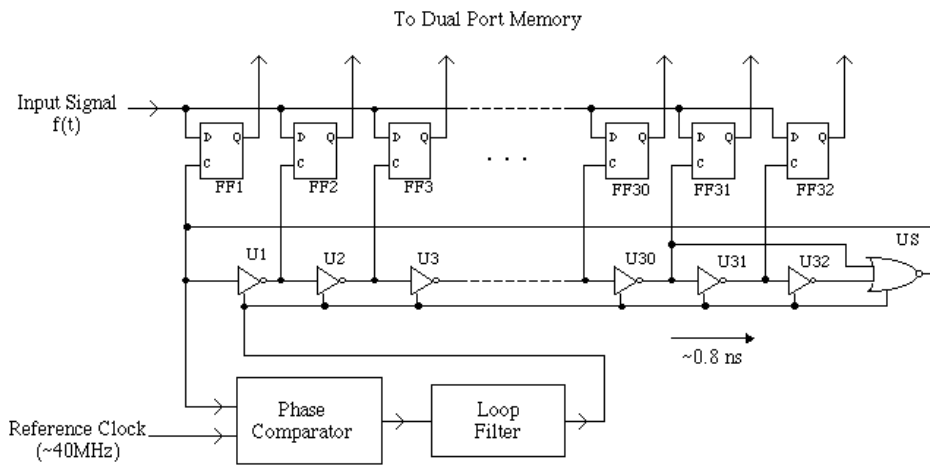


Fig. 4.14: TMC の原理図

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 を使用した。Fig.4.15 に common stop mode で使用した場合の 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。

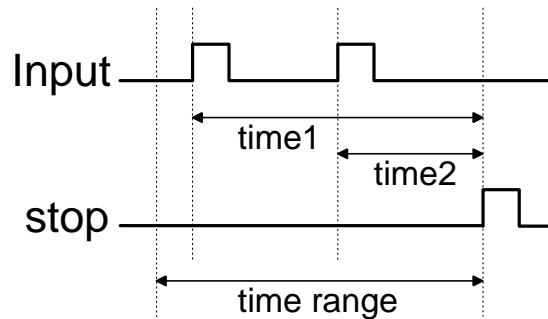


Fig. 4.15: TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode) [19]

検査設備では Drift Tube は全部で 428 本、Scintillation Counter は 48 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 15 台必要となる。さらに、TGC の 16 チャンネル分 (ASD1 枚に相当) の論理和をとったものを TMC で読み出している。T4 Doublet では 1 Layer につき、Wire が 7 ASD、Strip が 2 ASD の計 9 ASD (9 チャンネル) あるため 8 台を検査する場合 144 チャンネル必要となる。しかし TMC モジュールの台数に限があるため Wire が 3 ASD、Strip が 2 ASD の計 80 チャンネル分を 3 台の TMC モジュールで読みだしている。

- SWINE

SWINE(Super WIRE Net Encoder) は、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 (threshold) 電圧 (V_{th}) の供給する。Fig.4.16 に SWINE におけるシグナルのタイミングを示す。

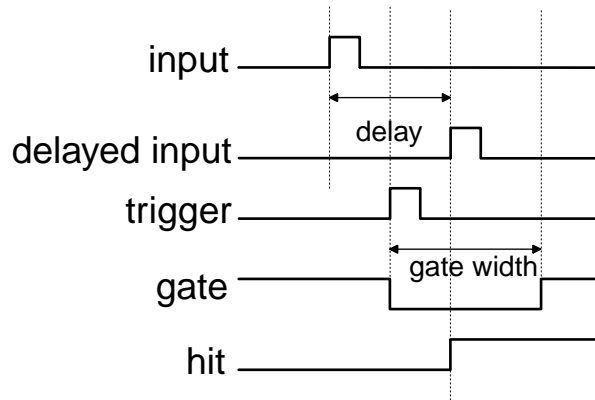


Fig. 4.16: SWINE におけるシグナルのタイミング [19]

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。この信号は NIM レベルで出力されるので、ECL レベルに変換した後に TMC で読み出し、TGC の信号到達時間の測定を行う。

4.2.5.2 コンピュータ環境

前述のエレクトロニクスモジュールにより処理されたデータを記録・解析するために、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 を採用した。Linux を採用した理由は、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事でデータ収集から解析まで、全ての環境をそろえる事が可能であるからである。さらに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の行い事が出来るからである。

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 Fig.4.17 に示す。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数値データに変換する。
2. 各 VME クレート毎に PC が PCI-VME bus Adaptor を通じて、変換された数値データを読み出す。

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。

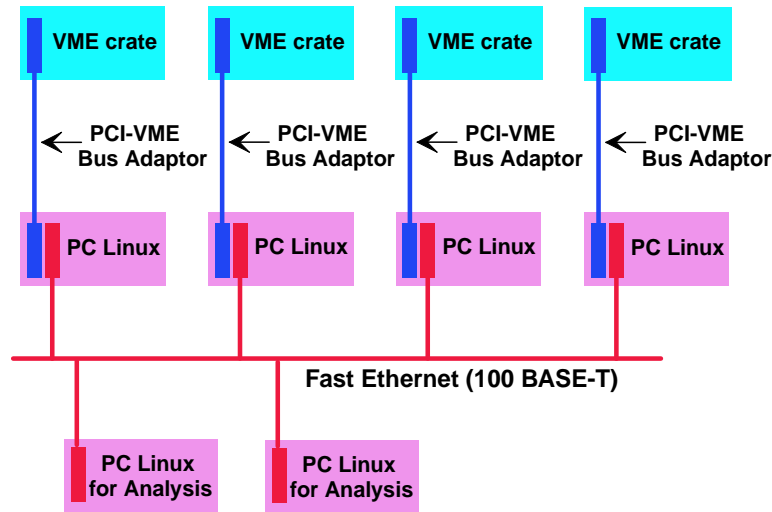


Fig. 4.17: DAQ/解析用 PC 環境

4.2.6 データ解析及びデータの確認

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毎で再構成する **Data Conversion**。
- Drift Tube の情報を用いて飛跡の再構成を行う **Tracking**。
- 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ためのファイルを作成する **Analysis Program1**。
- Tracking 情報と TGC のヒット情報から、各 TGC の検出効率を算出する **Analysis Program2**。
- Analysis Program2 で生成された検出効率のファイルを視覚的に表示する **Efficiency Mapper**。

である。解析プロセスでのデータフローについて Fig.4.18 に示す。図の赤字は各解析プロセスのプログラムを表し、() 内はそこで生成されるファイルを表す。

データを解析し、各検出器のヒット分布、時間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 Program1 において、Event Building 及び Data Conversion が行われてできたデータファイルを読み込み、解析が行われる。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ヒストグラムを表示させる。表示されるヒストグラムは

(1) 上下の Scintillation Counter の profile (Fig.4.19)

(2) 上下 XY 方向 3 層それぞれの Drift Tube の profile と multiplicity¹ 分布 (Fig.4.20、Fig.4.21)²

¹ 1 つのトリガー信号に対し、TMC の Time Window (Time Gate) 内に入って来た信号数の事。同時ヒット数。

² 1 つのトリガー信号に対し、同時に信号を出したチャンネルの数の事。Multi Hit とも呼ぶ。

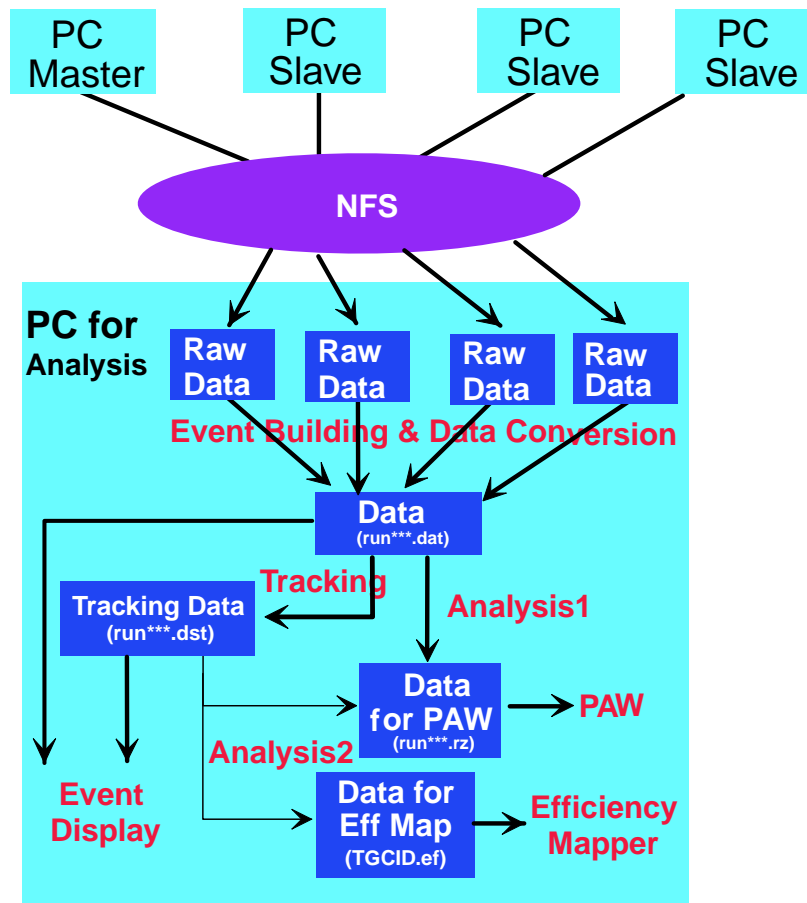


Fig. 4.18: データフローチャート (赤字: プログラム、()内: 生成されたファイル)

(3) TGC の各層の wire、及び strip の profile(Fig.4.22)

の 3 種類が表示される。検査を行う際に、毎回これらのヒストグラムを確認する事でノイズの有無や検出器の状態、ASD、SWINE、TMC 等のエレクトロニクス異常を発見する事が可能となる。

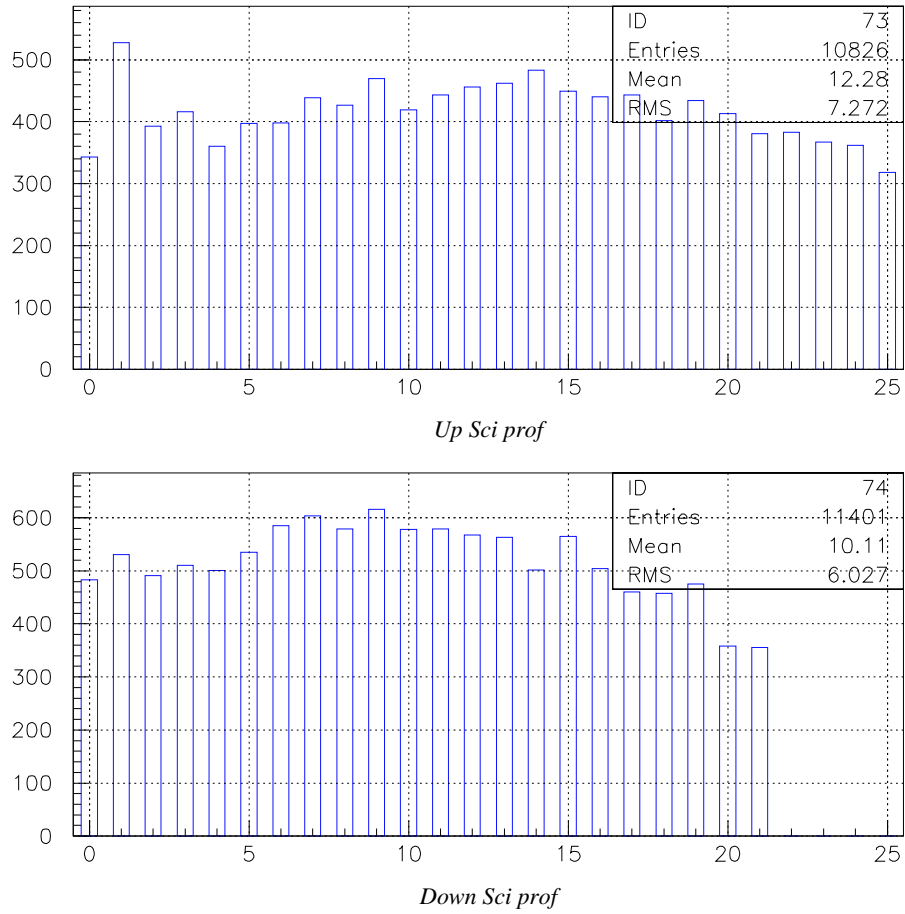


Fig. 4.19: Scintillation Counter の Profile

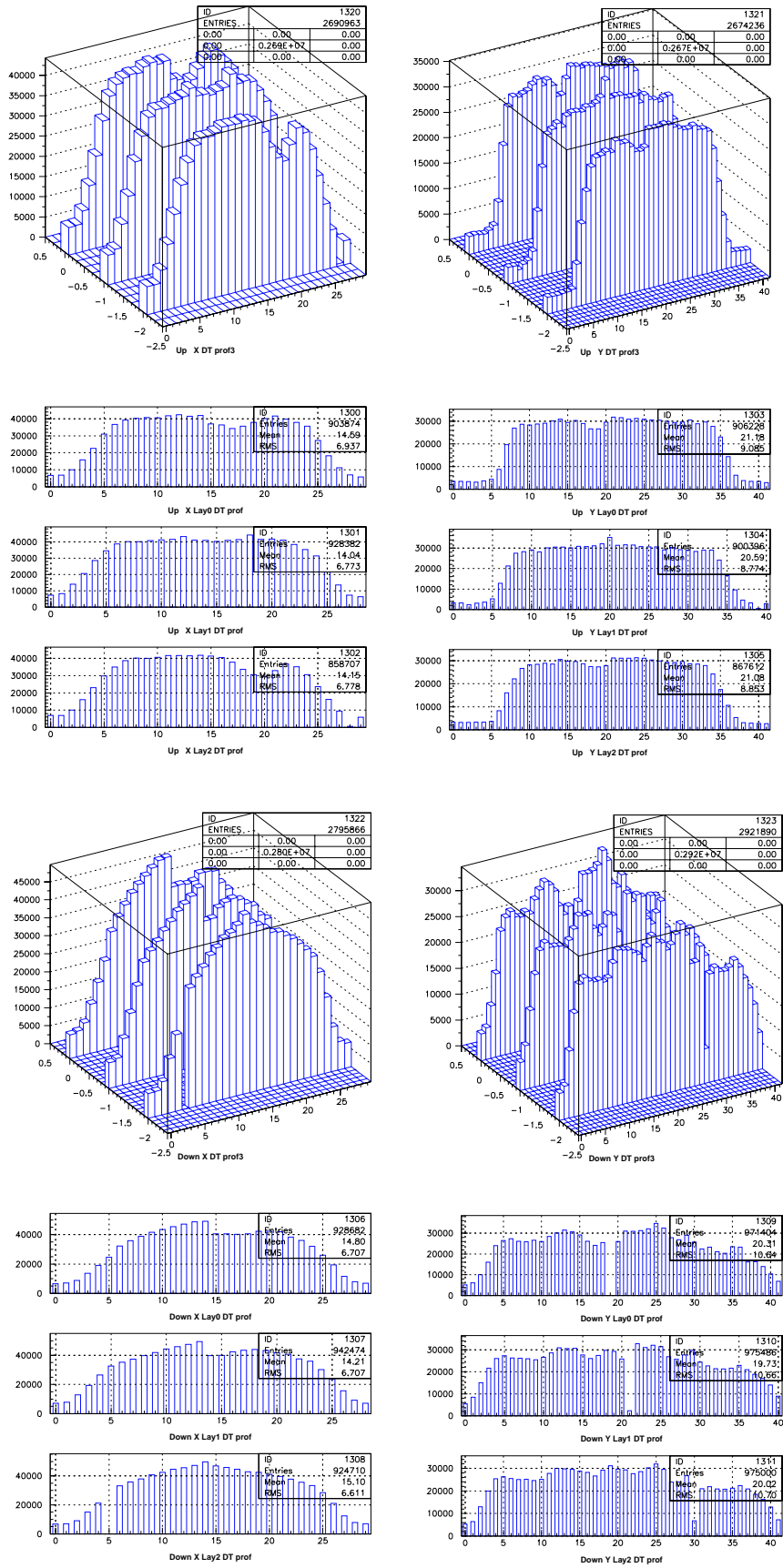


Fig. 4.20: Drift Tube の Profile

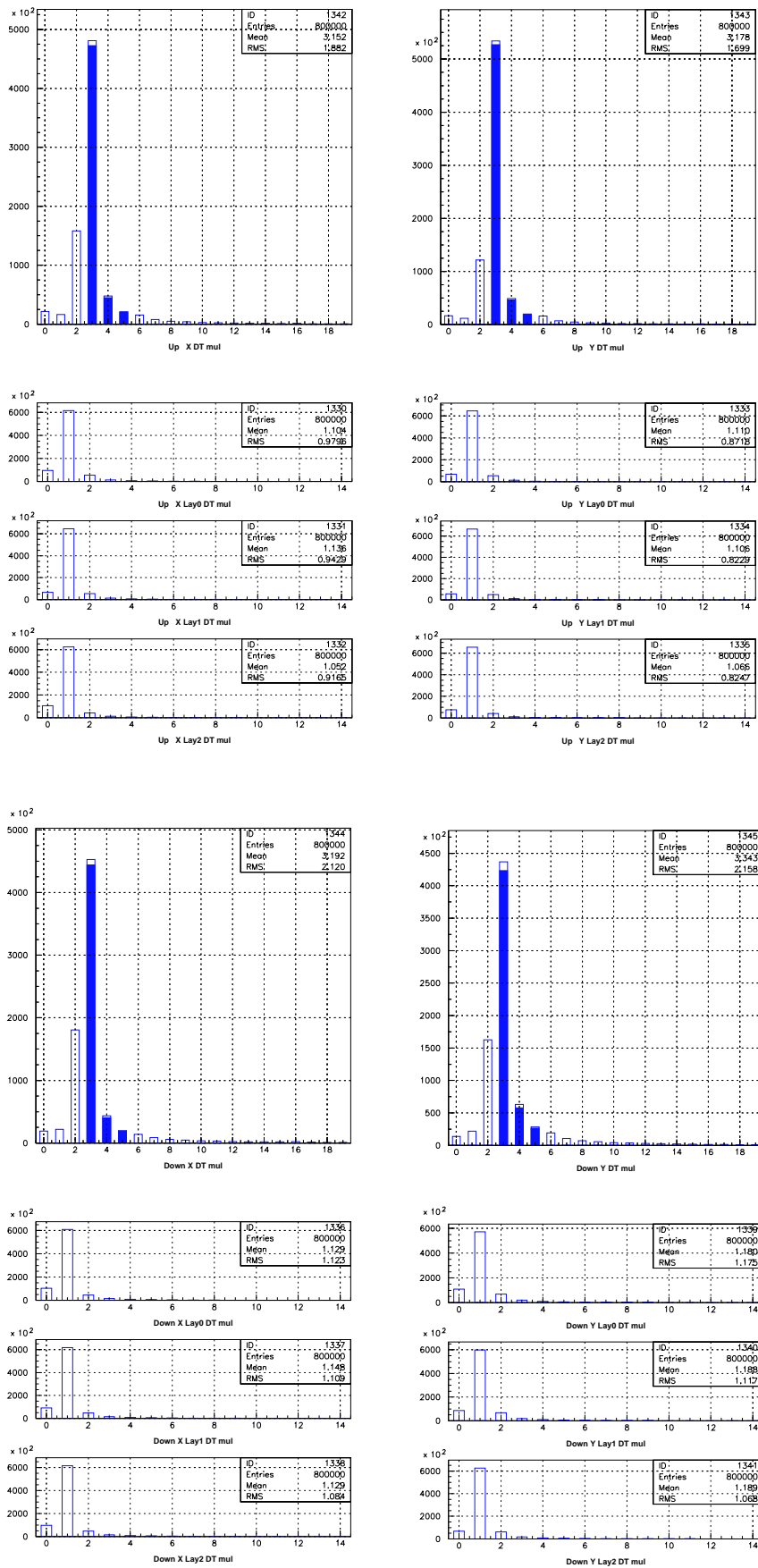


Fig. 4.21: Drift Tube の multiplicity 分布

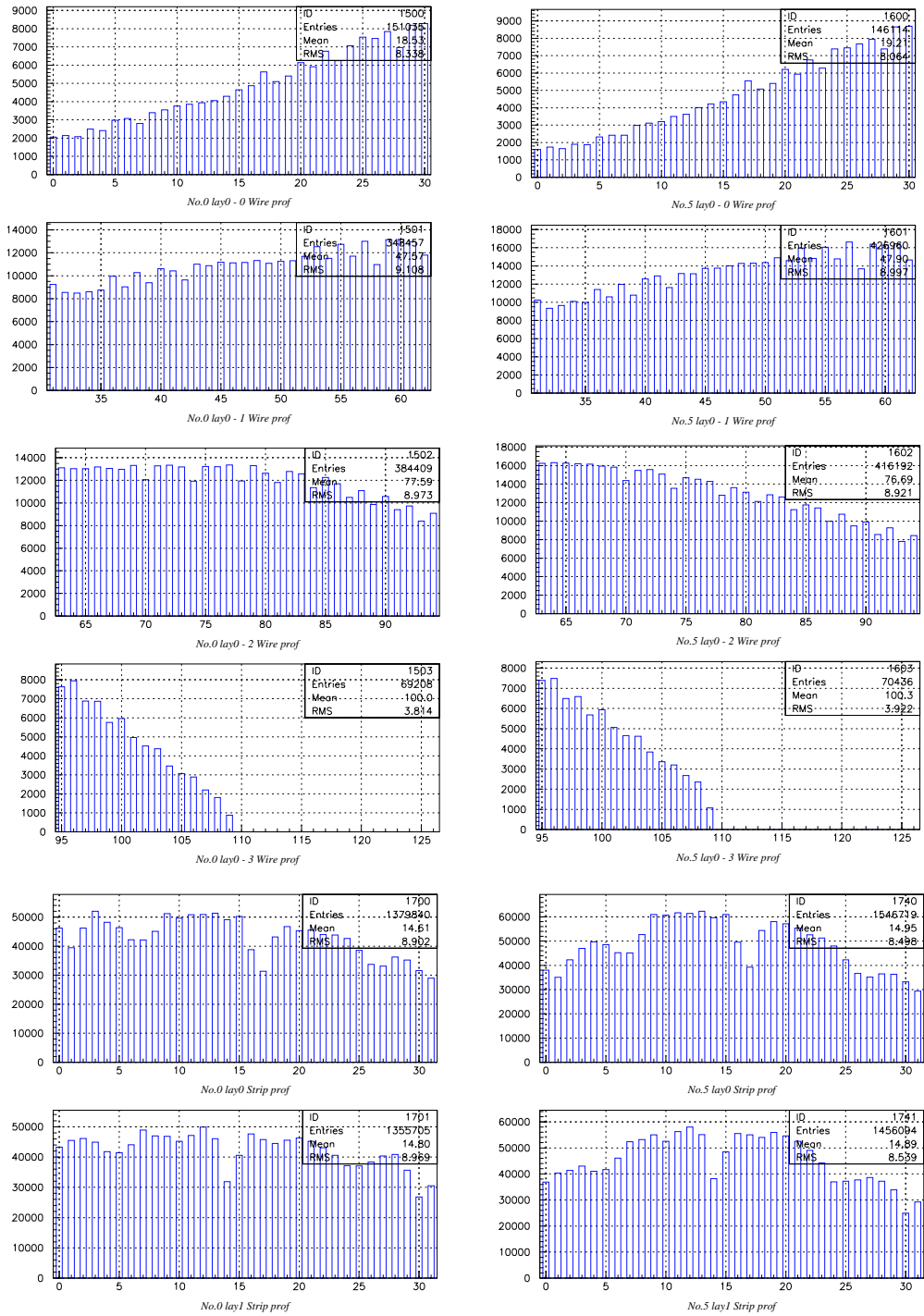


Fig. 4.22: TGC の Profile

4.2.7 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が最終的な目標である。Analysis Program2において生成されたファイルから Efficiency Map を作成するためのソフトが、Efficiency Mapper(以下 Mapper)である。Mapper は、

- 各 TGC を細かなセルに分け³、Analysis Program2 で生成したファイルから各セルの検出効率の値を抜き出す。
- 検出効率によりそのセルを色分けして、Display に表示する。

という事を行うソフトである。検査設備は日本で製作される全ての TGC の有感領域をカバーできるように設計されているが、立体角を考慮すると検査設備可能領域でも外側にいくほどイベントレートが下がる。これに対処するために検査架台内で TGC をずらしてデータ集収することでその差を少なくするという方法を取っている。2つの位置でデータを集収し、1つのマップに合成したひとつの例が、Fig.4.23、Fig.4.24 である。5mm × 5mm の大きさのセルを用いて表示された Efficiency Map では、不感領域であるワイヤーサポート、ボタン型サポートの領域で検出効率が落ちているのが、はっきりと確認できる。

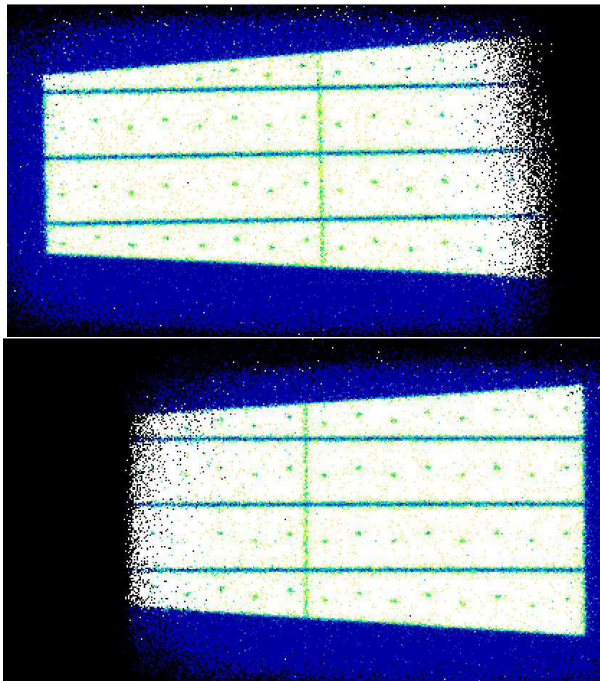


Fig. 4.23: 東と西にずらしてとったデータ

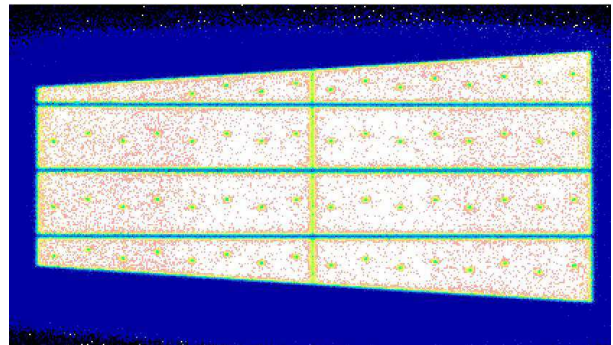


Fig. 4.24: 二つのデータを合成したもの

Efficiency Map Display で Efficiency Map を表示すると、同時に画像ファイル (jpeg 形式) が生成されるので、検査が終了し CERN へ輸送された後でもこれを参照する事で、その Unit の Efficiency Map を確認する事が出来る。

³実際の TGC 上での 5mm × 5mm と 1cm × 1cm に相当する大きさに分ける事が可能

4.2.8 T7DからT4Dへの設備変更

第3章のFig.3.8で示したようにT7タイプとT4タイプでは形が大きく変更されている。それに伴いCosmicRay testに用いる検査架台及びDAQシステムの変更を行った。検査架台は12段から8段へ変更した。これは主にASDへのケーブル付けの効率化を考えてのものである。また上部Scintillation Counterを22本から26本へ増やした。これによりTrigger rateは約20Hzから50Hzとなった。次にDAQシステムの変更である。T7からT4タイプへの移行による大きな違いはチャンネル数である。T7Dでは1TGCにつきASDは8枚であった。一方T4Dでは1TGCにつきASDは18枚である。総チャンネル数では1536chから2304chとなる。まずASDとSwineモジュールを繋ぐケーブル張りを行った。本数は96本から144本へととなる。架台上部、及びSwineモジュールへ接続した図をFig.4.25に示す。Wire側のケーブリングはFig.4.26の様にした。ケーブルの長さでクレートまでの距離を考慮し、両サイドの鉄工に沿う形で張りめぐらし、架台0から3段目までと、4から7段目までの二つに分けた。

Swine(Porc, Hogモジュール)は24台から36台に増やした。これによりクレートを3段構成にし、各段毎に上からWire2、Wire1、Stripとした。(参照Fig.4.25下図)Wire1、2のASDとの対応表をFig.4.27に示す。表示は、架台番号(0~7)-ASD番号(0~6)-layer(Up、Down)となっている。同時にWire2用に新たなPCを設置しデータ集取プログラムの改良を行った。VMEに接続している各PCはデータを読みだすプロセスをひとつずつ持つ。シンチレータ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で通信を確立する必要があるため、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。マスタープロセスとスレーブプロセスによる読みだしシーケンスをFig.4.28に示す。VMEへのアクセスにはvmedrvを使用している。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同じようにVMEのアドレス空間を直接操作することが可能である。また複数のPCでデータ収集を行うため、各PCの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。

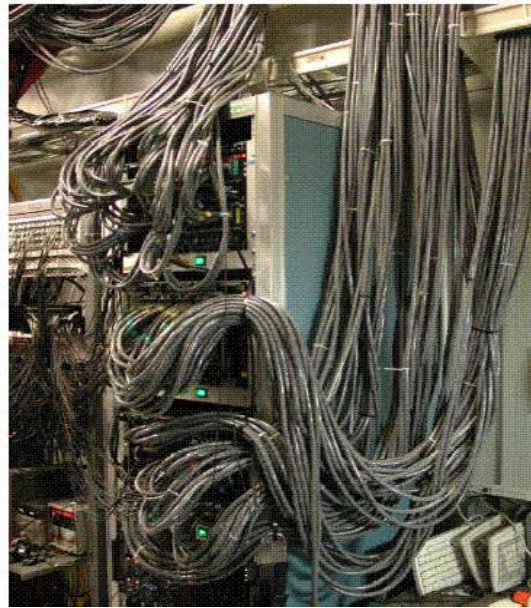


Fig. 4.25: ケ-ブル配置 (上：架台上部 下：クレ-トに接続したもの)

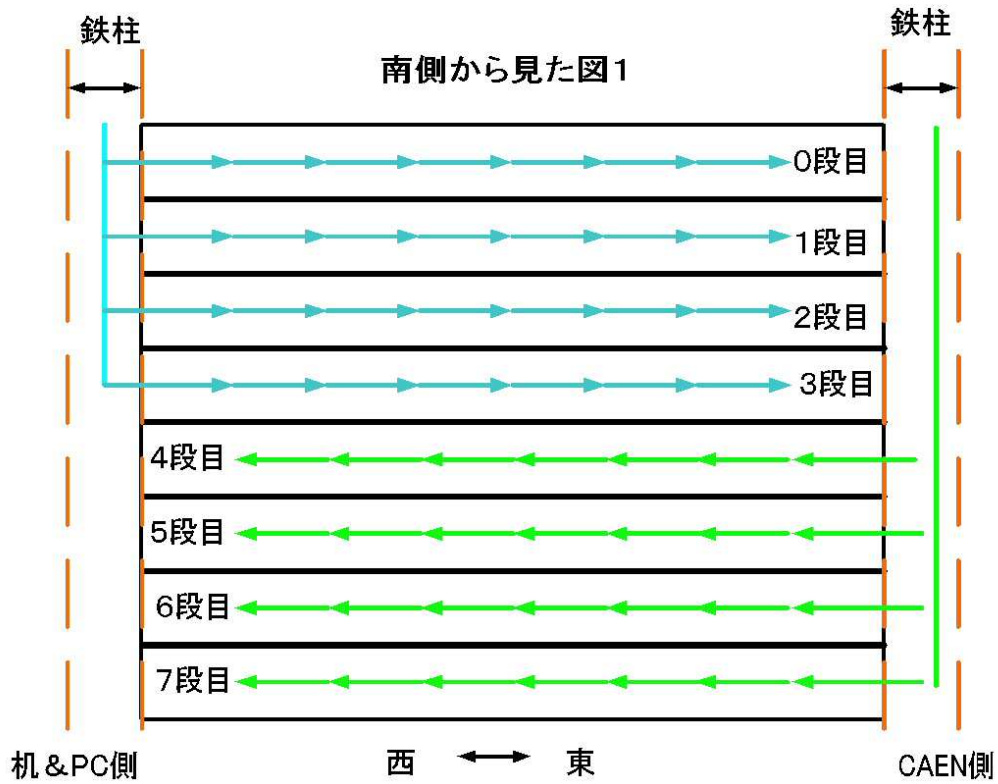


Fig. 4.26: Wire 側のケーブル配線図

14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
0-0-U	0-0-D	0-1-U	0-1-D	0-2-U	0-2-D	0-3-U	0-3-D	0-4-U	0-4-D	0-5-U	0-5-D	0-6-U	0-6-D
2-0-U	2-0-D	2-1-U	2-1-D	2-2-U	2-2-D	2-3-U	2-3-D	2-4-U	2-4-D	2-5-U	2-5-D	2-6-U	2-6-D
1-0-U	1-0-D	1-1-U	1-1-D	1-2-U	1-2-D	1-3-U	1-3-D	1-4-U	1-4-D	1-5-U	1-5-D	1-6-U	1-6-D
3-0-U	3-0-D	3-1-U	3-1-D	3-2-U	3-2-D	3-3-U	3-3-D	3-4-U	3-4-D	3-5-U	3-5-D	3-6-U	3-6-D
4-0-U	4-0-D	4-1-U	4-1-D	4-2-U	4-2-D	4-3-U	4-3-D	4-4-U	4-4-D	4-5-U	4-5-D	4-6-U	4-6-D
6-0-U	6-0-D	6-1-U	6-1-D	6-2-U	6-2-D	6-3-U	6-3-D	6-4-U	6-4-D	6-5-U	6-5-D	6-6-U	6-6-D
7-0-U	7-0-D	7-1-U	7-1-D	7-2-U	7-2-D	7-3-U	7-3-D	7-4-U	7-4-D	7-5-U	7-5-D	7-6-U	7-6-D
5-0-U	5-0-D	5-1-U	5-1-D	5-2-U	5-2-D	5-3-U	5-3-D	5-4-U	5-4-D	5-5-U	5-5-D	5-6-U	5-6-D
6-6-U	6-6-D	7-0-U	7-0-D	7-1-U	7-1-D	7-2-U	7-2-D	7-3-U	7-3-D	7-4-U	7-4-D	7-5-U	7-5-D
7-0-U	7-0-D	7-1-U	7-1-D	7-2-U	7-2-D	7-3-U	7-3-D	7-4-U	7-4-D	7-5-U	7-5-D	7-6-U	7-6-D
28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15
4-0-U	4-0-D	4-1-U	4-1-D	4-2-U	4-2-D	4-3-U	4-3-D	4-4-U	4-4-D	4-5-U	4-5-D	4-6-U	4-6-D
6-0-U	6-0-D	6-1-U	6-1-D	6-2-U	6-2-D	6-3-U	6-3-D	6-4-U	6-4-D	6-5-U	6-5-D	6-6-U	6-6-D
7-0-U	7-0-D	7-1-U	7-1-D	7-2-U	7-2-D	7-3-U	7-3-D	7-4-U	7-4-D	7-5-U	7-5-D	7-6-U	7-6-D
5-0-U	5-0-D	5-1-U	5-1-D	5-2-U	5-2-D	5-3-U	5-3-D	5-4-U	5-4-D	5-5-U	5-5-D	5-6-U	5-6-D
6-6-U	6-6-D	7-0-U	7-0-D	7-1-U	7-1-D	7-2-U	7-2-D	7-3-U	7-3-D	7-4-U	7-4-D	7-5-U	7-5-D
7-0-U	7-0-D	7-1-U	7-1-D	7-2-U	7-2-D	7-3-U	7-3-D	7-4-U	7-4-D	7-5-U	7-5-D	7-6-U	7-6-D

Fig. 4.27: HOG モジュールと TGC の各 ASD とのケーブル対応表

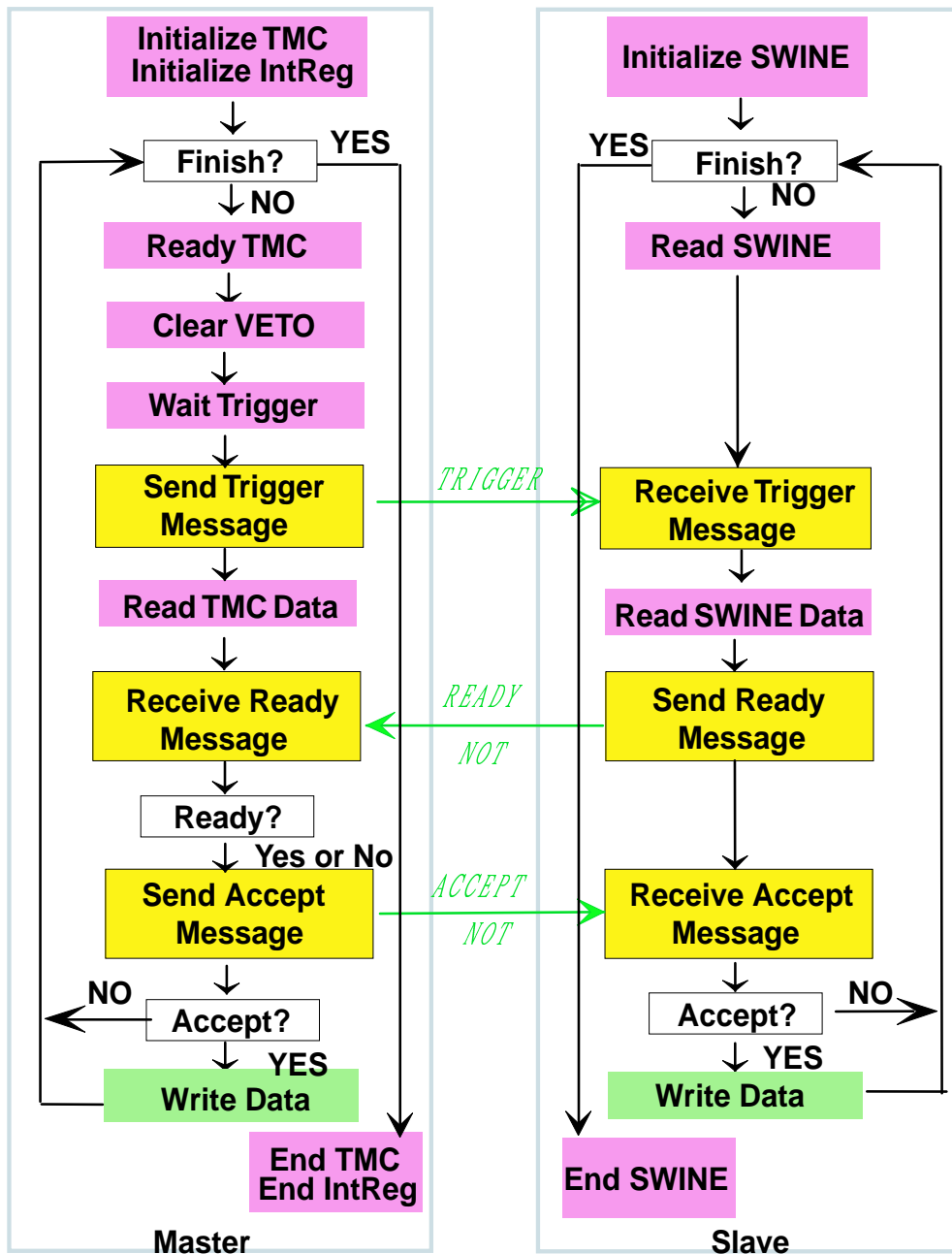


Fig. 4.28: データの読みだしシーケンス [15]

4.3 HV Test

HV Test では、CosmicRay Test に移る前に、予め混合ガス ($CO_2 + n\text{-Pentane} = 55 : 45$) を流した状態で高電圧を印加し、チェンバーの安定性を検査する。本来、Anode と Cathode は電氣的に絶縁されているので電流は流れないのだが、チェンバーを製作する際に使用した接着剤やワイヤーサポート・ボタン型サポート等が電氣的な経路 (パス) となりわずかに電流が流れる。これを Leak Current という。通常の TGC では、Leak Current は 100nA 以下であるが、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、その部分にさらにパスが出来てしまう。この HV Test において長時間高電圧を印加し、Leak Current をモニターすることで、そのような TGC を見つけ出すことが出来、同時に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てしまった塵や埃、カーボンの粉末なども焼き切る事を行う。こうすることで放電の原因を減らし、TGC は安定する。またここでは同時にチェンバー製作時に取った Current 値との整合性を見る事も行われる。これにより運搬による状態の変化をチェックする。

TGC は製作の工程も含め、HV Test で初めて実機で運用されるのと同じ混合ガスを用いて 3.1kV の動作電圧で試験が行われる。すなわち、この時のチェンバーの状態が実機で動作させるのと同じ環境での初期状態に等しいと言う事が出来る。それゆえ、チェンバーの Leak Current をモニターし記録として残し、必要な時に閲覧できるシステムを作る事は重要である。

本節では、実際に行われている HV Test の工程を説明し、そこで用いられているシステムについて述べる。

4.3.1 検査方法

1. CO_2 による焼き出し試験

まず初めに、 CO_2 にて十分に置換 (8 時間) を行った後に 2.9kV を印加し、Monitor System を用い Leak Current をチェックする。これが製作時のデータとの整合性チェックとなる。ここで 2.9kV で 6 時間程度印加、その後 3.0kV で 1 時間印加する事で小さなゴミなどを焼き切る事が出来、次の混合ガスによるテストにおける安定性が増す。

2. 混合ガスによる 3.1kV 印加試験

CO_2 での 3.0kV テストに合格したモジュールは混合ガスへの置換を行う。置換完了後、徐々に電圧を 3.1kV まで上昇させる。印加出来た時点から印加時間の計測を開始し、連続 8 時間の安定動作が合格基準となる

3. 3.3kV 印加試験

3.1kV が 8 時間印加出来れば次に 3.3kV を印加する。3.1.1 で述べたように、TGC は Limited Propotional Mode で動作するよう設計されているが、3.3kV という電圧は、Limited Propotional Mode で動作する限界に近い電圧である。言い換えると、これ以上の高電圧を印加すると、Streamer Mode へと移行してしまい、悪くすると放電が止まらなくなりチェンバーを破壊してしまう恐れがある。それ故 3.3kV を印加する場合は決して無理をせず慎重に印加しなければならない。3.3kV がすぐに印加できなければ例えば 50V 刻みで上げていくなどして徐々に上げていく必要がある。3.3kV 試験での合計印加時間は 1 時間以上とし、連続 20 分以上の安定動作を課している。

Table4.2 に各印加電圧での合格基準を示す。

Gas	印加電圧	合格時間
CO ₂	ガス置換	8(時間)
	2.9kV	6
	3.0kV	1
混合ガス	ガス置換	8
	2.7kV	1
	2.9kV	1
	3.0kV	4
	3.1kV	8
	3.2kV	1
	3.3kV	1

Table 4.2: HV Test の印加電圧と印加時間

4.3.2 HV Test のシステム

4.3.2.1 Monitor System

HV テストに用いる HV 印加・モニターシステムを Fig.4.29 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可能で、それらを増幅し PC に取りこむことで常に記録することが可能になっている。安定に印加できている時のリーク電流値は 100nA 以下である。

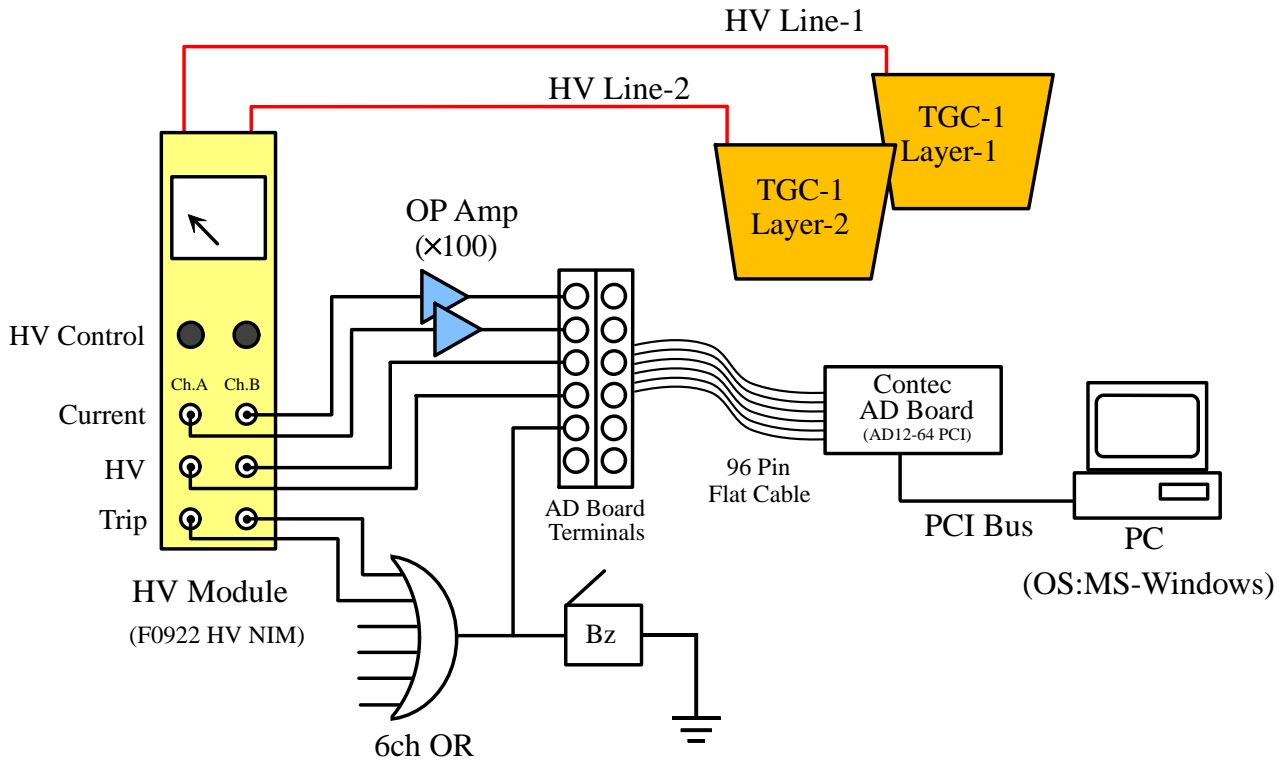


Fig. 4.29: Monitor System 構成図

4.3.2.2 Log Viewer と自動タイマープログラム

4.3.2.1 で述べたプログラムで記録したデータは、 $CO_2 + n\text{-Pentane}$ を用いて HV を印加した際の TGC の HV に対する挙動や安定性を示す重要なデータである。それ故、このデータをグラフ化し、視覚的に確認出来、かつ画像を保存し、常時閲覧可能な状態にする事は非常に重要である。また、夜間や誰もいない間に Trip してしまった場合や、何らかのシステムトラブルがあった時に、即座にログファイルを見てそれらの発生した時間を割り出す事も可能である。4.3.2.1 で述べたデータ形式で保存されたファイルは、VB を用い専用に開発した Log Viewer で表示できる。Fig.4.30 に実際に取得したデータを表示した Log Viewer を示す。

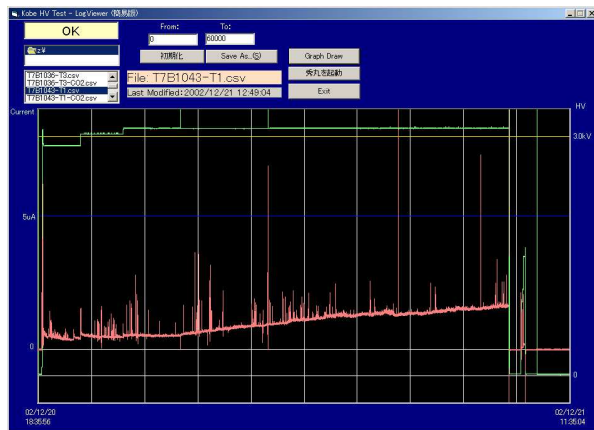


Fig. 4.30: Log Viewer

HV Test における時間を視覚的に管理するために、タイマープログラムが VB により製作された。各チャンネルに対応した開始ボタンが押されると、1 秒毎の経過時間が表示される。3.1kV テストを行う際には 8 時間からのカウントダウンが表示されるので、プログラムの表示を見ることでテスト終了までの時間や Trip までに印加出来た時間などを一目で確認する事が出来る。またこれらの各印加時間をクリアしたら自動的に次の印加電圧まで上昇するよう自動化システムを導入した。これにより作業者が不在のときでも自動で HV テストは行われ、時間のロスを大幅に短縮することができた。Fig.4.31 に自動化モニターを表示する。

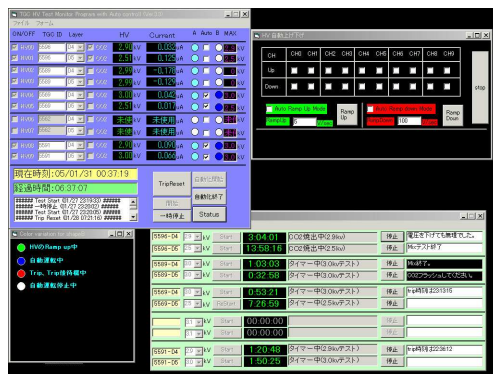


Fig. 4.31: 自動化のモニター

4.4 Leak Test

TGCに用いられる混合ガスの成分である n-Pentane は可燃性のガスであり、さらに人体に有害な物質であるので、TGCに漏れがあると非常に危険である。また、3で述べたように、TGCは内部のガス(この場合 CO_2)が電離する事により生じた電子を、内部の高電場で加速・増幅させる事で信号を検出するガスチェンバーであるので、チェンバー内部に電気陰性度の高い気体(例えば O_2)などが混入する事でガス増幅率が下がり、シグナルが得られなくなってしまう。そのため、チェンバーの気密性を検査する事は非常に重要である。また、 CO_2 Channelへ CO_2 を流す事で、Chamber への O_2 などの混入を防ぐと共に、漏れ出した人体に有害である n-Pentane を CO_2 と共に排気する事が出来る。このため CO_2 Channel が作られているのだが、この CO_2 Channel の気密性も同時に検査する。

4.4.1 システムと検査方法

この工程ではチェンバー本体と CO_2 Channel に圧力を加えることにより気密性が検査される。そのための試験機、及びその配管図を Fig.4.32 に示す。Chamber の耐圧は 600Pa と見積もられており、それ以上の加圧は Chamber を破壊する可能性がある。それに対し、 CO_2 Channel は 1kPa 以上の耐圧を持つ。本検査では、Chamber 本体ならびに CO_2 Channel を 600Pa まで圧力をかけた状態で封じ切り、

- Chamber 本体は 5 分後の圧力降下 ΔP が 50Pa 以内
- CO_2 Channel は 5 分間での圧力降下 $\Delta P'$ が 100Pa 以下

である事を要求する。

4.4.2 Leak の修復

検査後、漏れがあった物に関しては神戸で漏れ箇所の探索ならびに修理を行う。Leak 場所の探索方法として、減圧法と加圧法が考案された。その際にこの方法を行っている写真を Fig.4.33 に示す。減圧法 (Fig.4.33 の右) は、整形されたゴムを掃除機の先に取り付け、吸引した際圧力計の針が下がる事により漏れの場所を探索する。 CO_2 Channel の 1 辺の長さ約 1m に比べ Leak 箇所は数 mm と非常に小さいので、減圧法は Leak 箇所をある程度の範囲に絞る際に有効な手段である。加圧法 (Fig.4.33 の左) のように、エアーコンプレッサーのエアガンにより局部的に加圧すると圧力計の針が減圧法とは逆に上昇する事により特定を行う。この方法は、減圧法により絞られた範囲からより正確な Leak 箇所を特定する際に有効な手段である。これらの方法により漏れ場所が特定されれば修復を行う。修復には製作工程で使用しているのと同じ接着剤 (速乾性アラルダイト) あるいは半田を用いる。

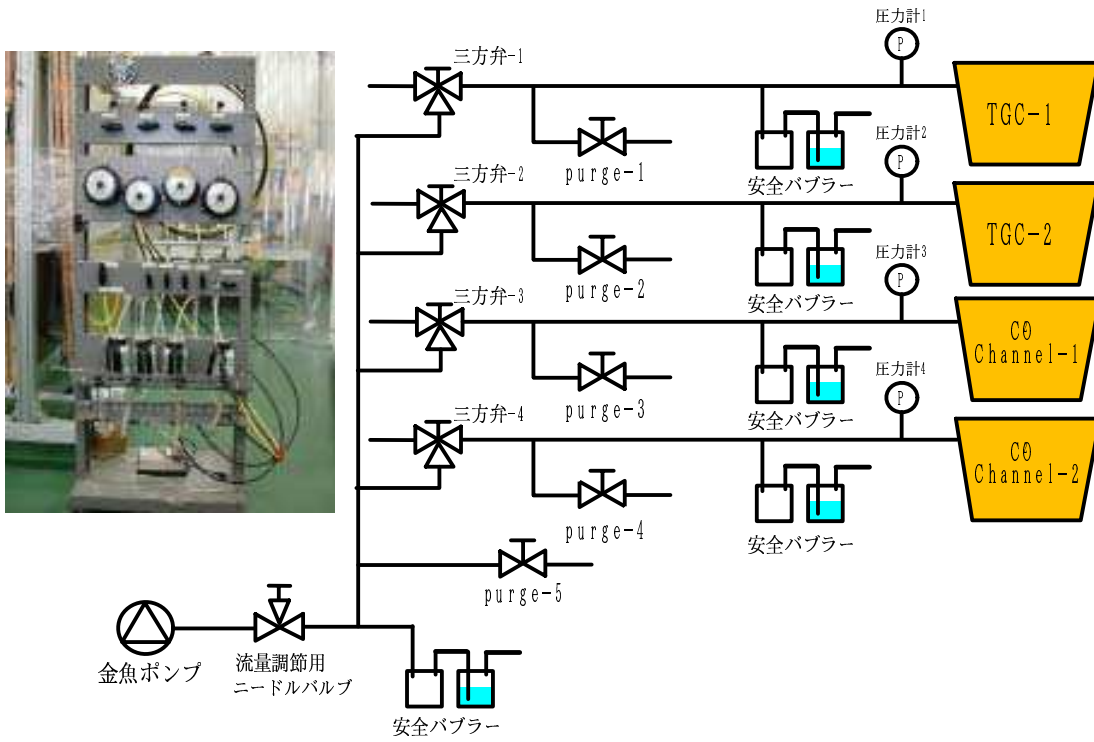


Fig. 4.32: Leak Test 試験機



Fig. 4.33: リーク箇所を見つける2つの方法 (左が加圧法、右が減圧法)

第5章 TGCの評価

前章までに述べてきたように、神戸大学で行われる TGC 動作検査は

- 宇宙線ミュオンを用いた検出効率の全面検査および Time Jitter の測定 (CosmicRay Test)
- $CO_2 + n\text{-Pentane}$ (55 : 45) を用いた高電圧印加試験 (HV Test)
- TGC の耐圧 600Pa まで圧力をかけての漏れ検査 (Leak Test)

の3種類が行われる。4章で述べた設備は、2001年によりその建設および構築が始まり、2002年4月よりテストを開始した。2004年4月には T7 タイプから T4/T5 タイプへ移行し、Scintillator、及び Swine Module の造設など設備の変更も行われた。本章では 2002年5月から 2004年12月末までに検査を終了した全 TGC の検査結果の考察を行う。

5.1 CosmicRay Test

CosmicRay Test において検査される項目は、製作した全ての TGC が

- 不感領域を除いた TGC の全面にわたる検出効率が 99%以上である。
- 信号到達時間が、LHC のバンチ間隔である 25nsec 以下である。

という性能を満たしているかどうかである。さらに、検出効率の HV 依存性 (HV Curve) についての検査も行われる。以下に、得られた Efficiency Map と Time Jitter、HV Curve に対する結果のまとめとそれらに対する考察を述べる。

5.1.1 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% が要求されている。製作された TGC の検出効率が要求された値を満たし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。

4.2.3 で述べた方法により、宇宙線の飛跡が 3 次元的に一意に決定される。TGC の検出効率はその Track と TGC の交点に TGC のワイヤー、ストリップそれぞれに対するヒットがあるかどうかをみることで評価を行う。つまり、

$$\text{検出効率 (\%)} = \frac{(\text{Track 上に TGC のワイヤー及びストリップにヒットがあるイベント数})}{(\text{Track が引けたイベント数})} \times 100 \quad (5.1)$$

と定義し、評価を行う。

このようにして測定された TGC の検出効率を元に合否判定を行う。合格基準は

- TGC のワイヤーサポート、ボタン型サポートの不感領域も **含めて**、95%以上
- TGC のワイヤーサポート、ボタン型サポートの不感領域も **除いて**、99%以上

である。検出効率は TGC 全体にわたって測定するため、検出効率の一様性もまた測定できる。

LHC のバンチ間隔が 25ns と短いことから、TGC の時間分解能もまた重要なパラメータである。この分解能が長ければ、バンチを決定する事が出来なくなる。そこで、Time Jitter と呼ばれる量を

$$Time\ Jitter = \text{シグナルの 99\%が入る最小のゲート幅} \quad (5.2)$$

と定義し、Time Jitter が 25nsec 以下であるかどうかの検査を行う (Fig.5.1)。

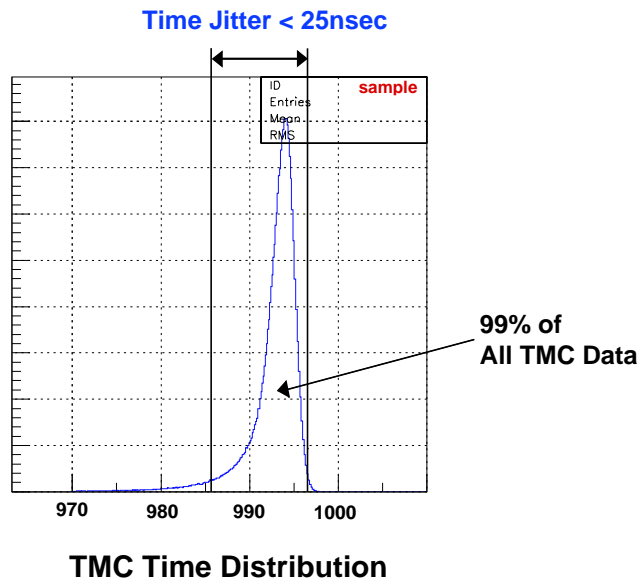


Fig. 5.1: Time Jitter の定義

5.1.2 検出効率

Fig.5.2、Fig.5.3 に、T4 タイプの Efficiency Map の一例を示す。この図を見ると、不感領域であるワイヤーサポート、ボタン型サポートを正しく確認する事が出来る。また、Efficient な領域では検出効率の一様性が確認でき、局所的に著しく検出効率の低い部分の無い事が確認できる。この TGC の検出効率を Table5.1 に示す。この Unit は合格基準を満たしていた。Fig.5.6 に各タイプごとの検出効率分布を示す。横軸が TGC の ID (モジュール台数) で縦軸が検出効率である。T7 Triplet では 102 モジュールで、1 モジュールあたり 5 つの Layer がある。T7 Doublet は 209 モジュール、各 4Layer、同様に T4 Doublet は 107 モジュール、各 4Layer である。上段が T7 Triplet、中段が T7 Doublet、下段が T4 Doublet である。Fig.5.6 上段を見て分かるように T7 Triplet では検出効率が 98% 以下のものが 17Layer あった。これは初期に製作された TGC であり、その原因は平面性が悪かったというものであった。Fig.5.4 にその Layer のマップを示す。第 3 章で述べたように、TGC は非常に薄型の MWPC であり、平面性が悪い場合 Fig.3.7 で示した電場構造が歪み電子の増幅が十分にできず検出効率が下がったと思われる。Fig.5.5 にその Layer の平面性データを示す。100 μ m 単位で各点における歪みが示されており、大きい所では 300 μ m のずれがある。Fig.5.7 に検出効率 98% 以上のヒストグラムを示す。全 1700Layer 中 1672 枚が 98% 以上であり、98% 未満のものは 28 枚であった。Fig.5.8 には Cosmic test の進捗状況を示す。ヒストグラムの平坦な部分は TGC のタイプ移行の時期であり、検査システムの変更などにより検査が中断した時である。各タイプごとの週間ペースは T7T は 4.7 台/week、T7D は 19.1 台/week、T4D は 5.1 台/week であった。

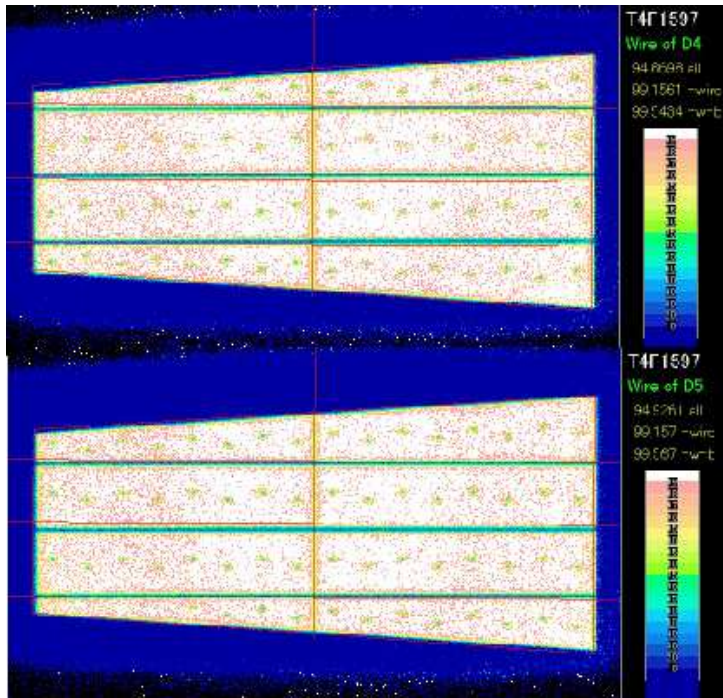


Fig. 5.2: Efficiency Map 例 (T4F1597-wire)[上 : layer0 下 : layer1]

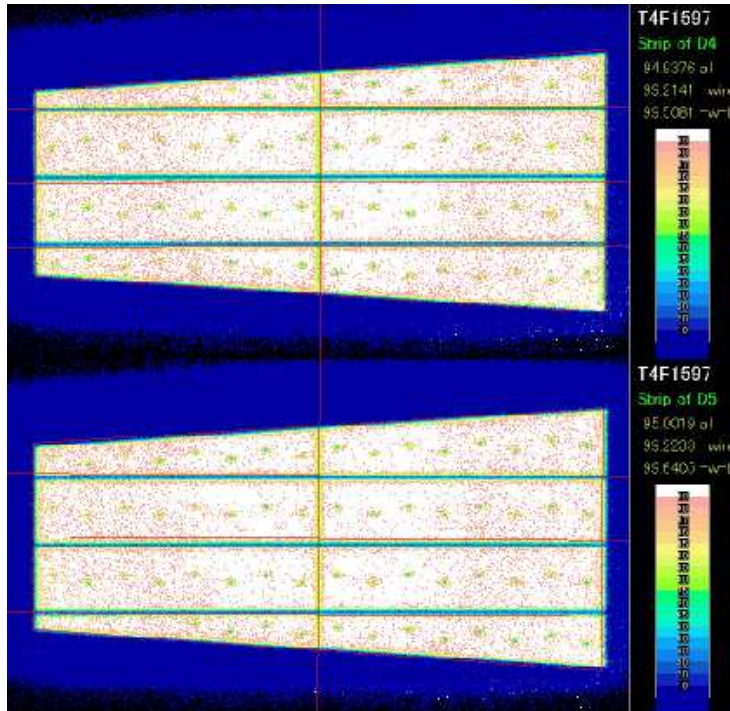


Fig. 5.3: Efficiency Map 例 (T4F1597-strip)[上 : layer0 下 : layer1]

T4F1597	サポート含む	サポート除く
D4-W	94.889	99.543
D5-W	94.920	99.567
D4-S	94.937	99.508
D5-S	95.002	99.641

Table 5.1: T4F1597 の検出効率

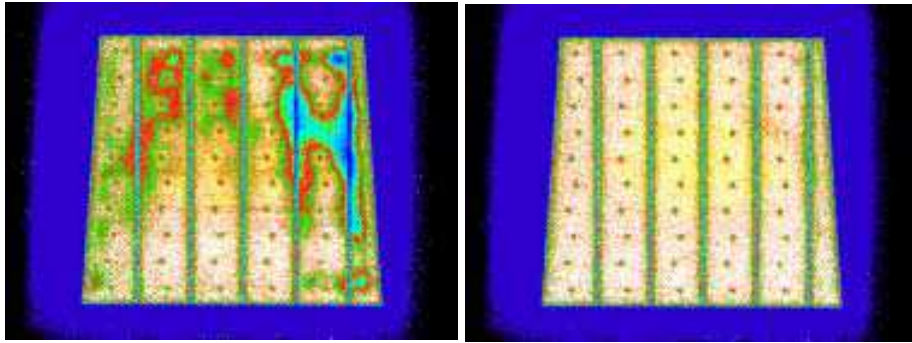


Fig. 5.4: 検出効率の悪いマップ (左が悪い例、右が良い例)

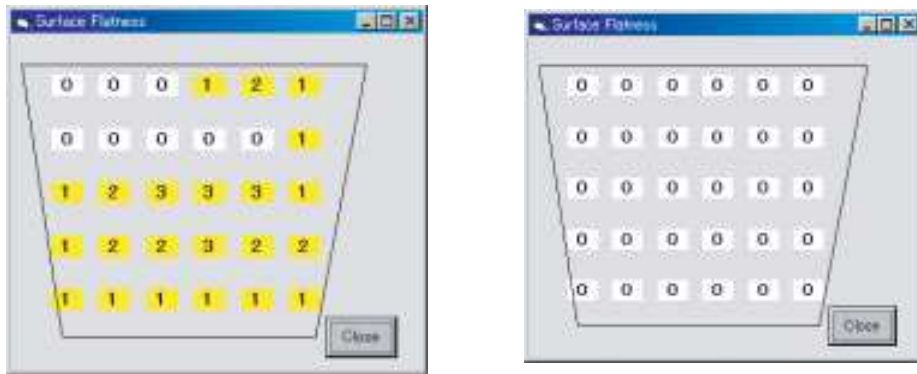


Fig. 5.5: 平面性のデータ [単位 $100:\mu m$](左が悪い例、右が良い例)

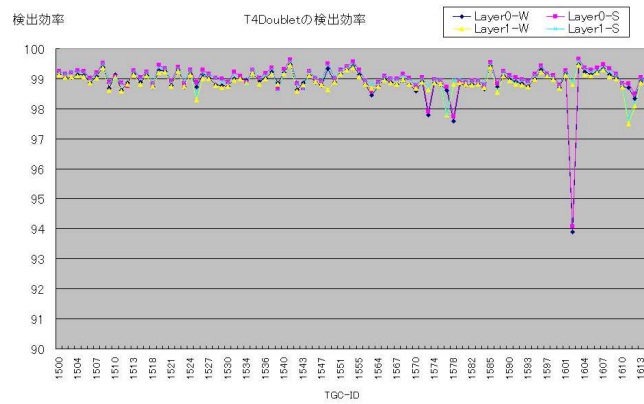
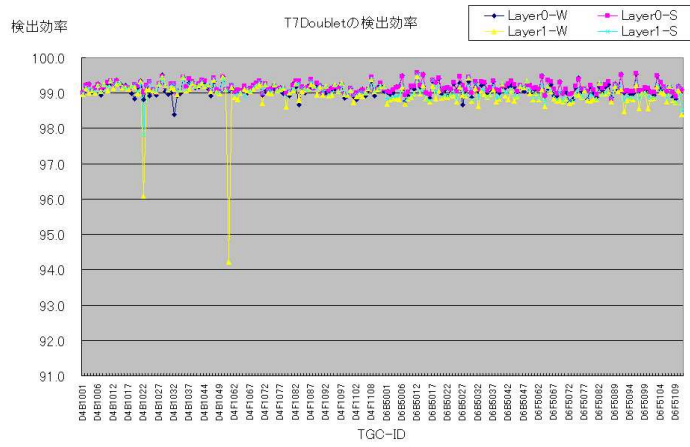
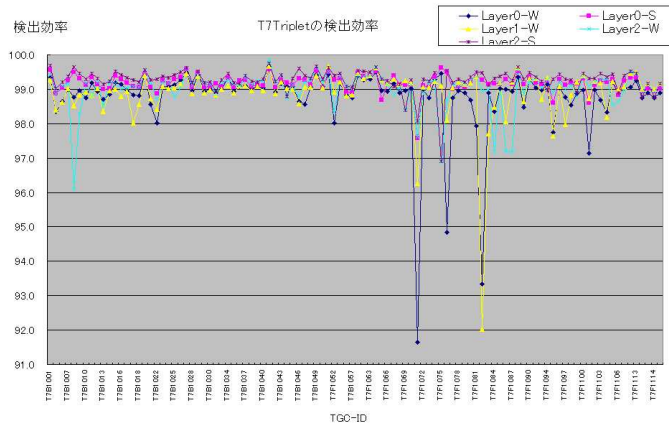


Fig. 5.6: 各タイプごとの検出効率 (上段が T7T、中段が T7D、下段が T4D である)

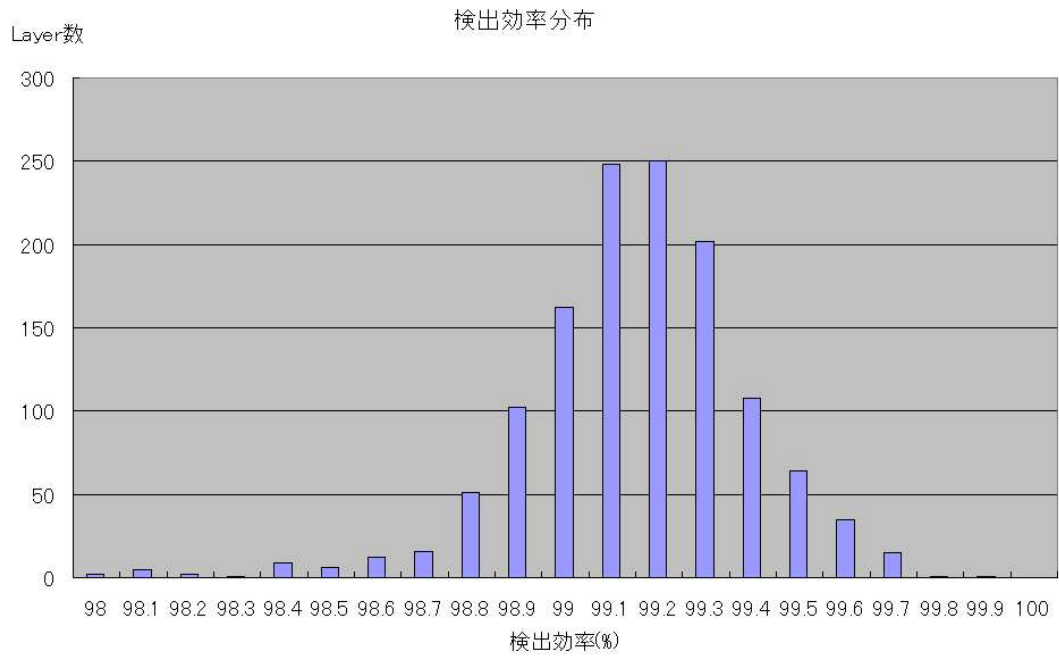


Fig. 5.7: 検出効率分布

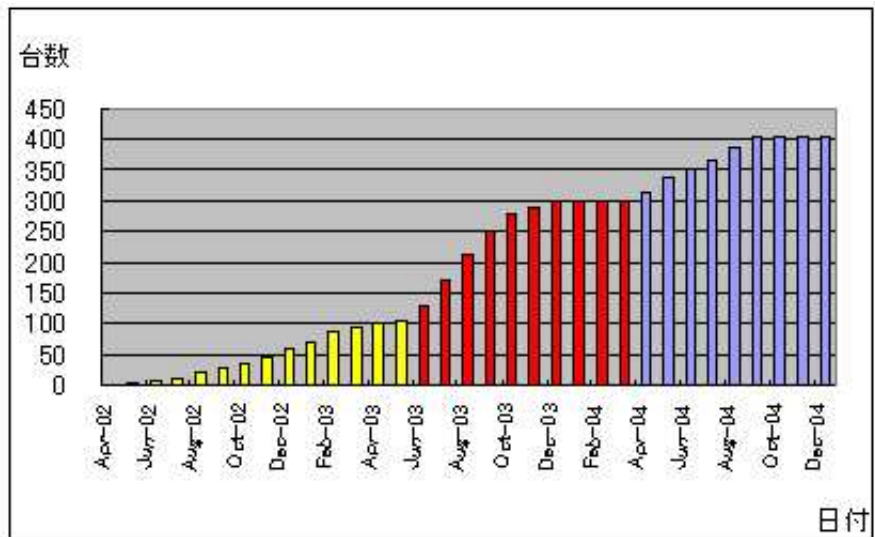


Fig. 5.8: Cosmic Test の進捗状況 (黄色: T7T、赤: T7D、青: T4D)

5.1.3 Time Jitter

Fig.5.9に、ある Unit の wire、strip それぞれの TMC 時間分布を示す。(注：common stop モードでデータを集取しているため反転されており、値の大きい方が実際には早く来た信号である) 式 (5.2) で定義したように、シグナルの 99%が入る最小のゲート幅を Time Jitter とする。ここでは Time Jitter の評価方法としては、最大値の bin を基準とし、両側にある一定の bin 幅づつ拡げてエントリー数を加えていく。その値が総エントリー数の 99%になった所での bin の間隔を計算し Time Jitter と決定した。Fig.5.9 を見てわかるように、Stripの方が Wire に較べてやや幅が広がっている。Fig.5.10に T4Doublet、200Layerの結果を示す。Wire、Strip 共に 25nsec を満たしていない事が分かった。また Wire でいくつか 30nsec を超えているものがある。これは TMC の分布 (5.13) を見てノイズによるものであることがわかった。Fig.5.11にヒストグラムを示す。青が Wire、赤が Strip である。

Time Jitter の広がりの原因のひとつは TGC の大きさによる伝達時間のばらつきと考えられた。3.8に TGC のタイプごとの大きさを示したとおり、T4Doublet では Strip 側が約 2m の長さを持つ。このために Strip の Time Jitter が Wire より遅くなる原因だと思われる。もうひとつの考えられる原因は、宇宙線ミュオン入射角度の問題である。TGC は、既に述べたように、ATLAS 検出器の $2.4 < |\eta| < 1.05$ に配置される。そのため、衝突点で生成した粒子は入射角度が約 $15^\circ \sim 40^\circ$ を持つ。入射角度依存性は、2000年のビームテストでも測定されており (Fig.5.12)、明らかに角度依存性を持つことがわかっている。ビームテストの結果では、入射角度 0° に対して Wire、Strip ともに 26nsec \sim 27nsec であり、入射角度 10° では 25nsec 以下となる [20]。本検査設備におけるミュオン入射角度分布は、地表での宇宙線の分布が $\cos^2\theta$ に依存している事や各検出器の立体角を考慮すると、天頂角方向からの入射が多いと考えられ、それゆえ Time Jitter が広がったのではないかと考えられる。

次に Time Jitter の印加電圧依存性を調べた。印加電圧は 2.6kV から 100V ずつ 3.0kV まで変化させた。Fig.5.14 に Wire、Fig.5.15 に Strip の図を示す。Fig.5.16 に各値をプロットした図を、Table5.2 に各値を示す。Wire、Strip 共に印加電圧 2.6kV では分布の形が崩れており、十分なガス増幅が行われていないことが分る。またどちらも印加電圧に比例し Time Jitter が早くなっていることが分る。

また 2004 年の 11 月に T4 タイプの TGC2 台に CF₄ ガスを流して CO₂ との比較を行った。これまでに述べたように TGC は ATLAS 検出器のミュオントリガーに使用され、膨大な γ 、中性子バックグラウンドに曝される。これらのバックグラウンドはフェイクトリガーを生成するだけでなく、TGC の安定動作や長期的な劣化現象に深刻な影響を与えると思われる。特に中性子が入射して生成する反跳陽子は TGC 内で大きなエネルギー損失をすると共に、放電等の異常動作の原因となる。そこでクエンチャーとして性能の優れている CF₄ ガスを実際の TGC に流し性能を評価した。Fig.5.17 に印加電圧を変化させた時の TMC 時間分布の例を示す。印加電圧は 2.6kV から 100V ずつ 3.1kV まで変化させた。に各印加電圧での TMC 時間分布の例を示す。Fig.5.18 に各 jitter をプロットしたグラフを、Table5.3 にデータを示す。Fig.5.17 から、CO₂ の時と同様に Strip の方が Wire より幅がやや広がっている。また Fig.5.18 より、Wire は印加電圧に比例して jitter が早くなっているが、一方で Strip は 2.9kV 以上では大きな変化が見られない。次に Fig.5.19 に CO₂ との比較を示す。共に印加電圧は 3.0kV、n-Pentane との混合比は 55:45 である。Wire、Strip 共に 3.5 \sim 4.0 nsec の差がありこのことより Time Jitter に

関しては CF4 ガスの方が優れている事が分った。

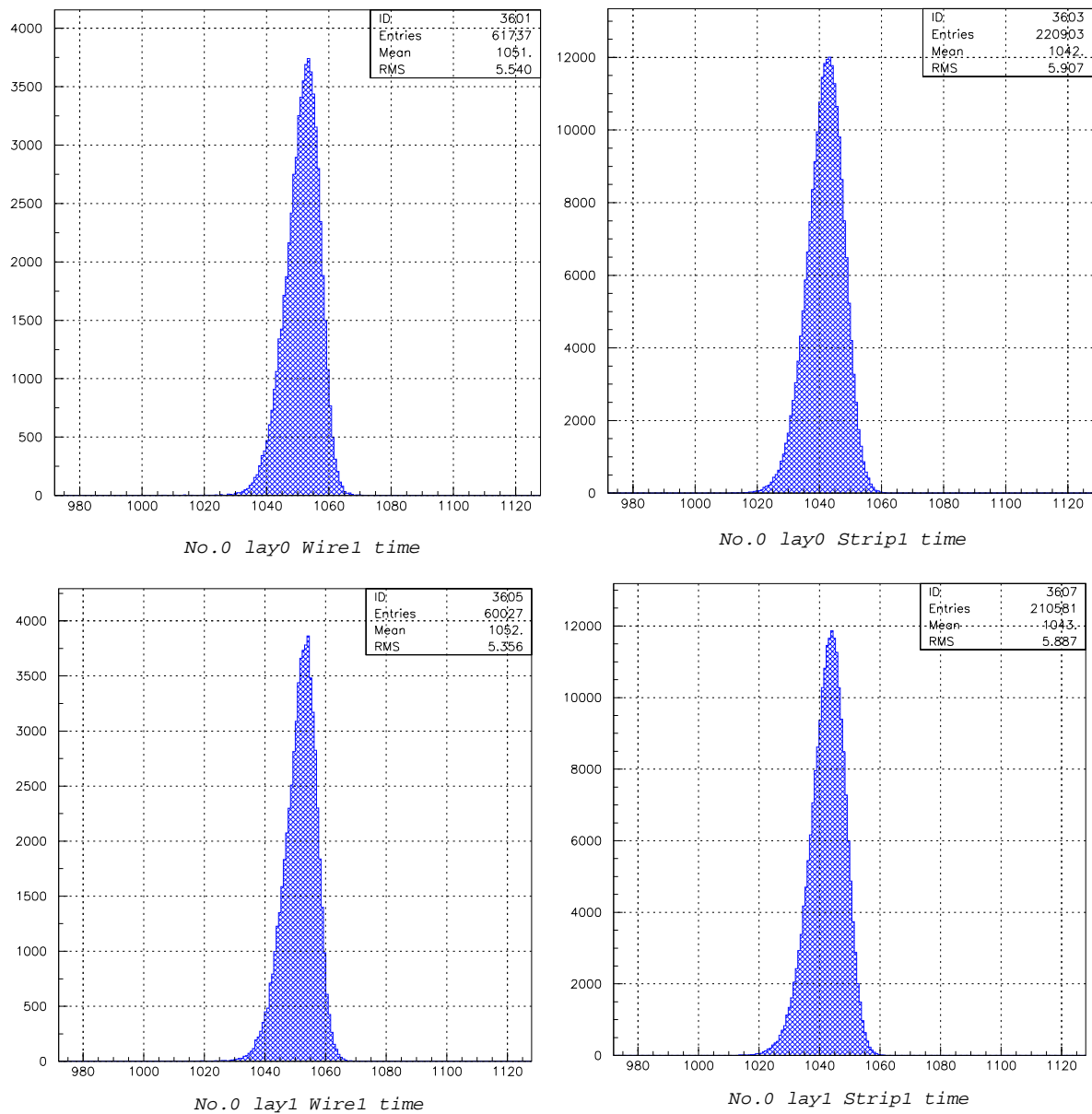


Fig. 5.9: Time Jitter の一例 (左が Wire、右が Strip)

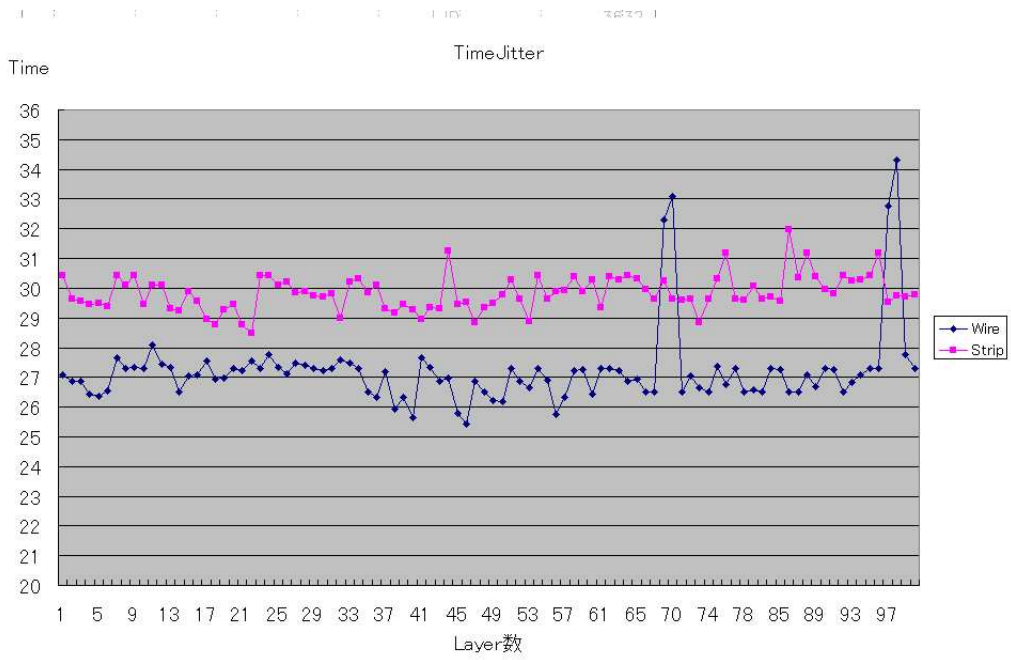


Fig. 5.10: T4 Doublet の Time Jitter 分布

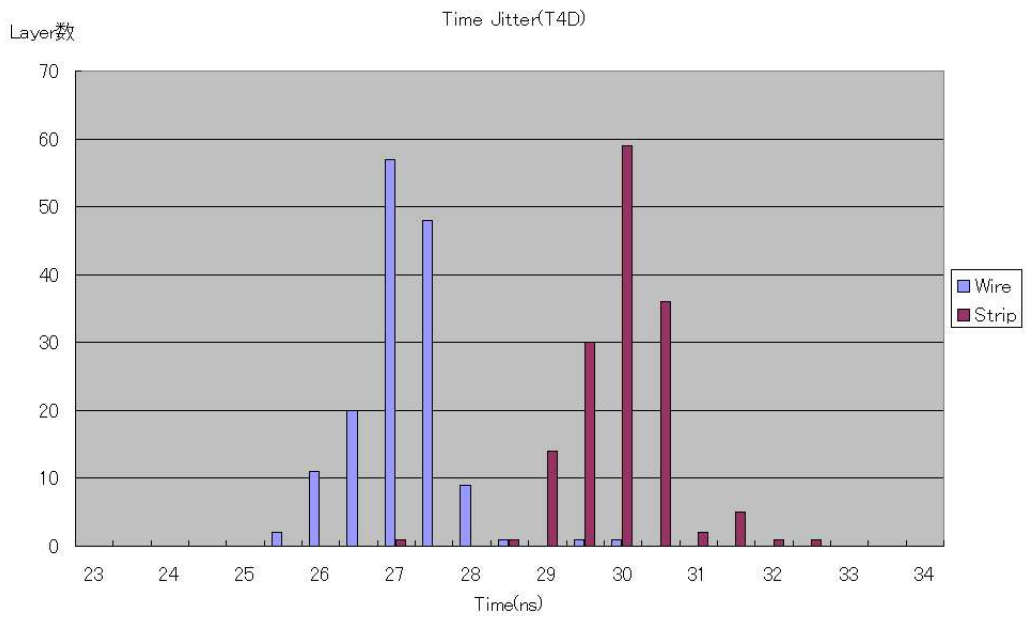


Fig. 5.11: Time jitter のヒストグラム

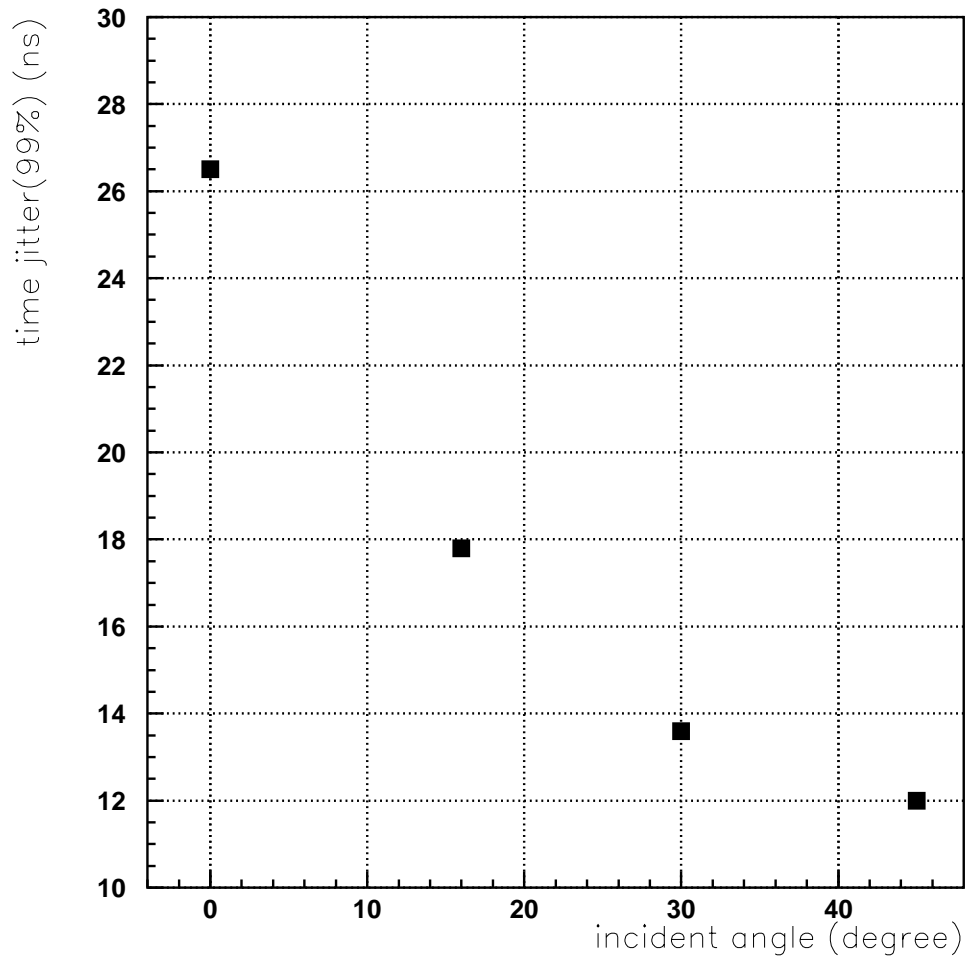


Fig. 5.12: Time Jitter の入射角度依存性 [20]

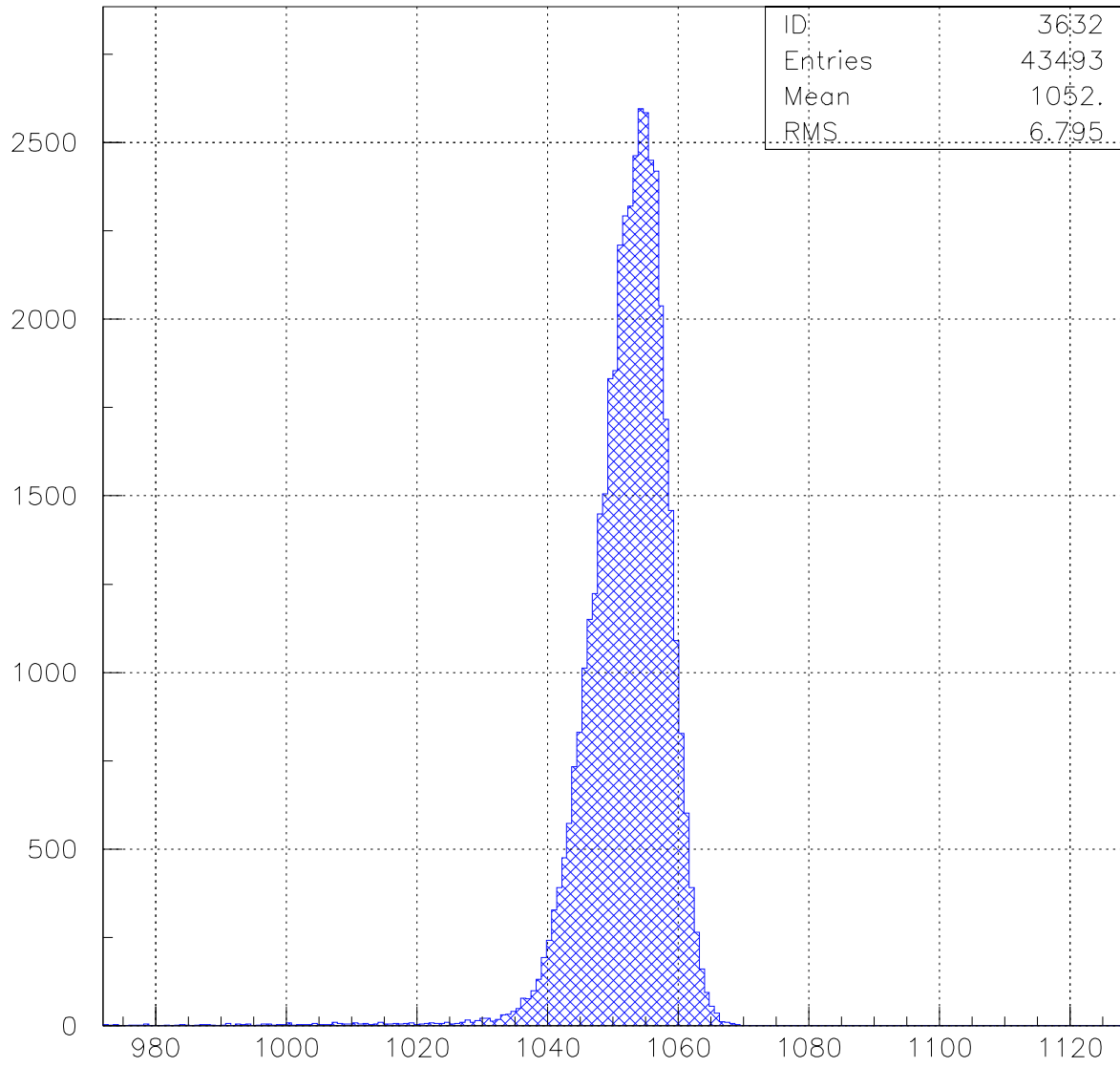


Fig. 5.13: ノイズのある TMC 分布

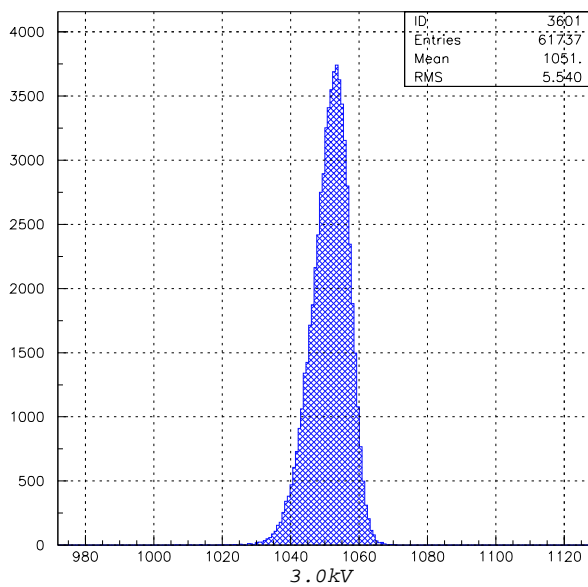
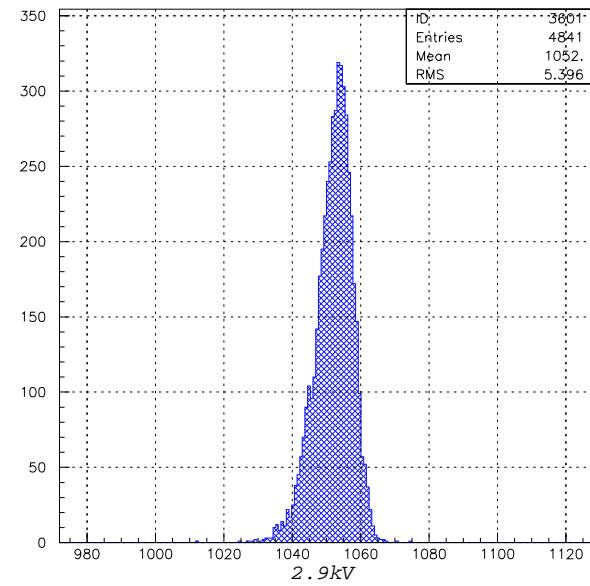
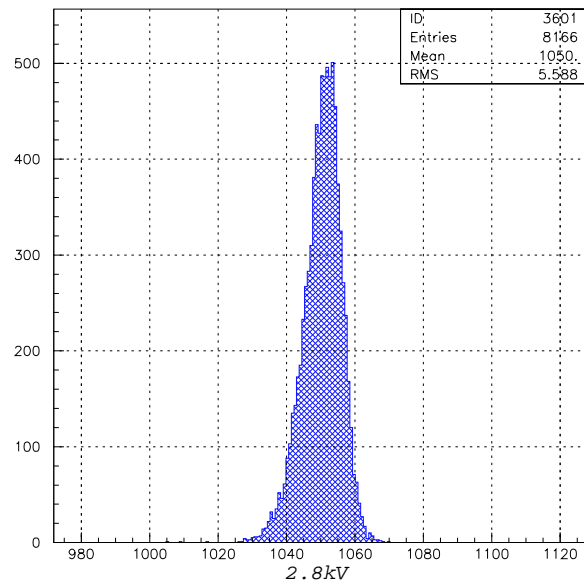
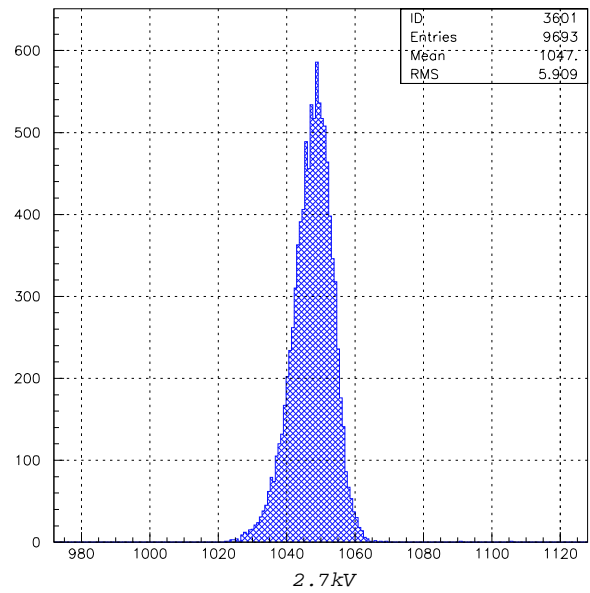
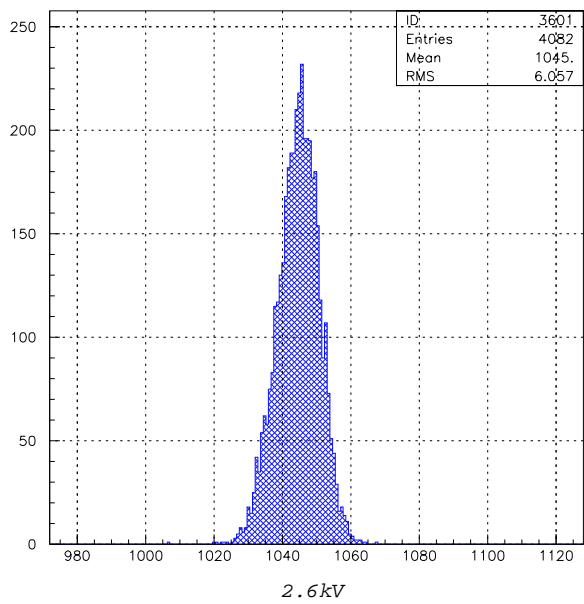


Fig. 5.14: Time Jitter の印加電圧依存性 (Wire)

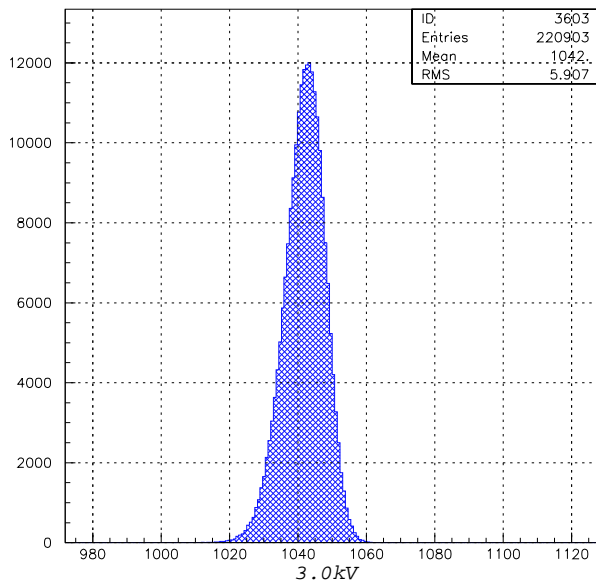
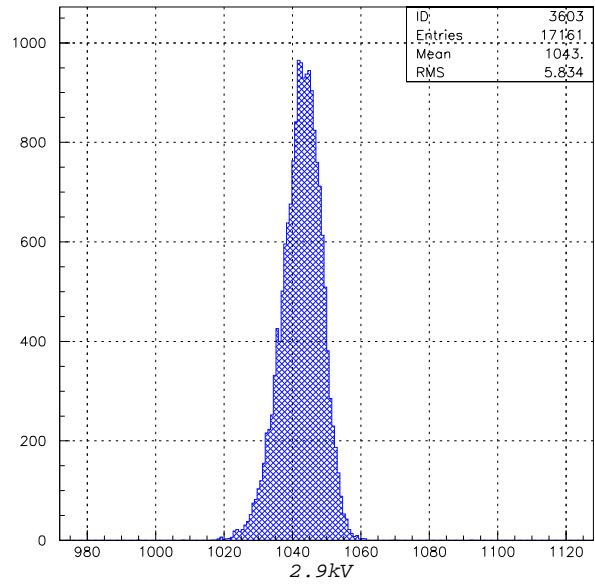
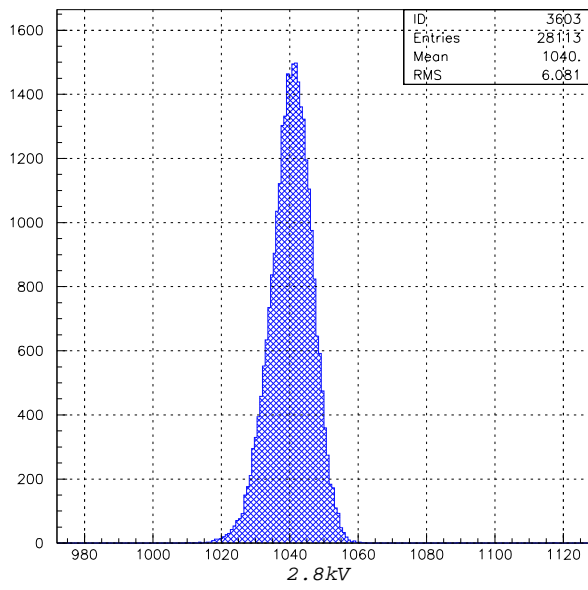
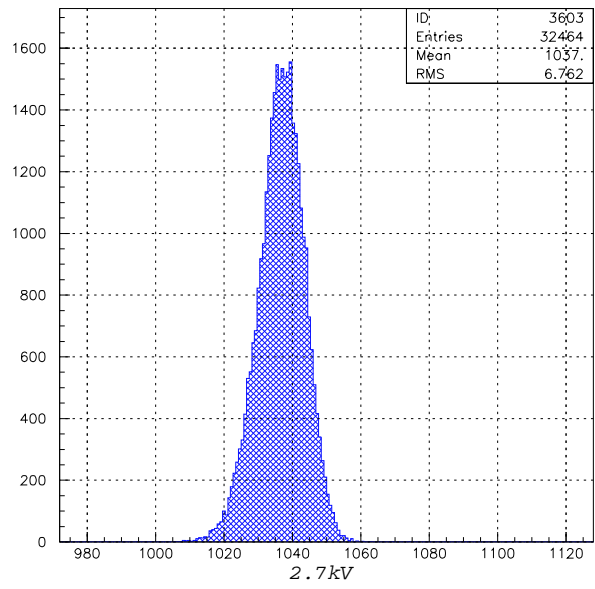
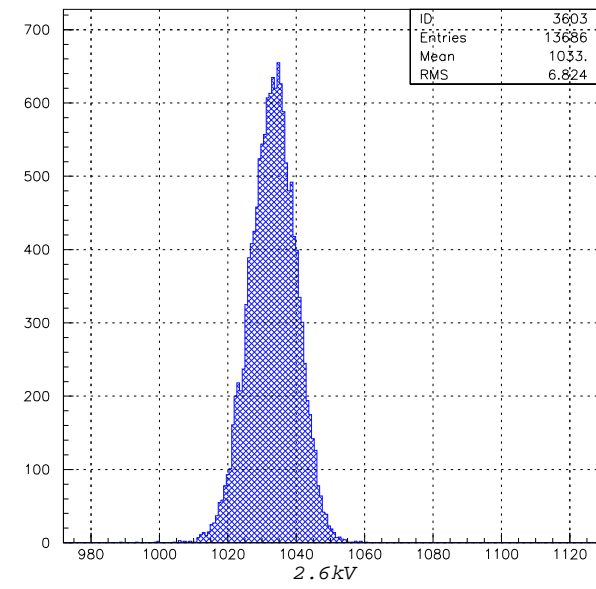


Fig. 5.15: Time Jitterの印加電圧依存性 (Strip)

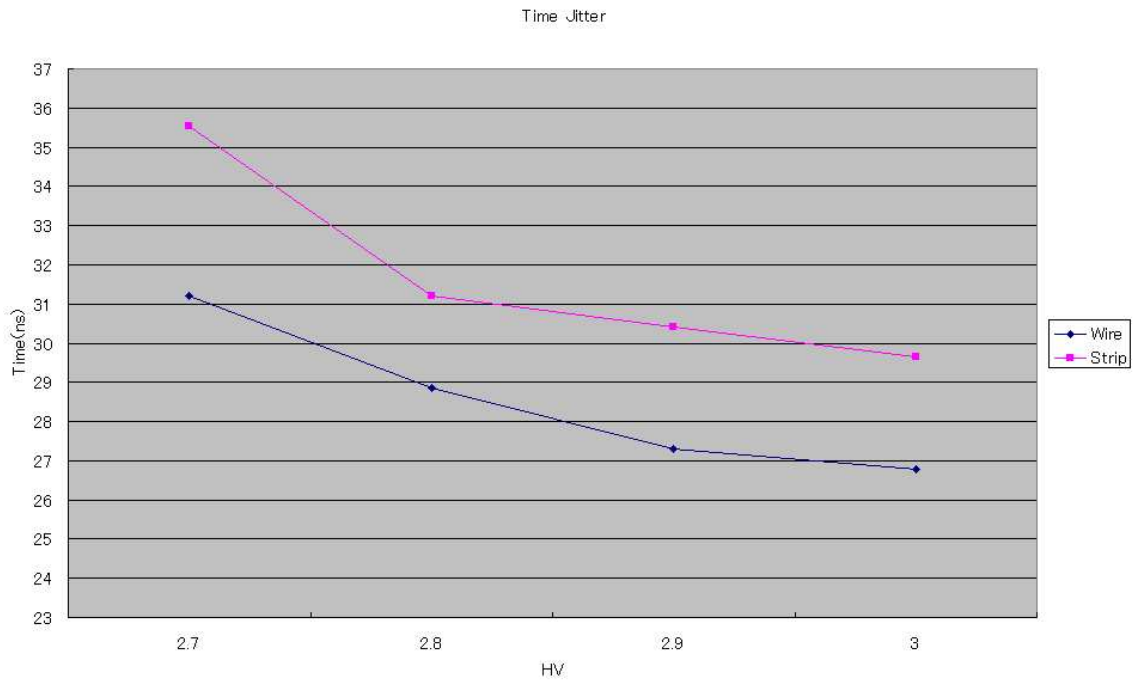


Fig. 5.16: Time Jitter の印加電圧依存性

印加電圧	Wire(ns)	Strip(ns)
2.7kV	31.2	35.55
2.8kV	28.86	31.22
2.9kV	27.3	30.42
3.0kV	26.77	29.64

Table 5.2: Time Jitter の印加電圧による変化

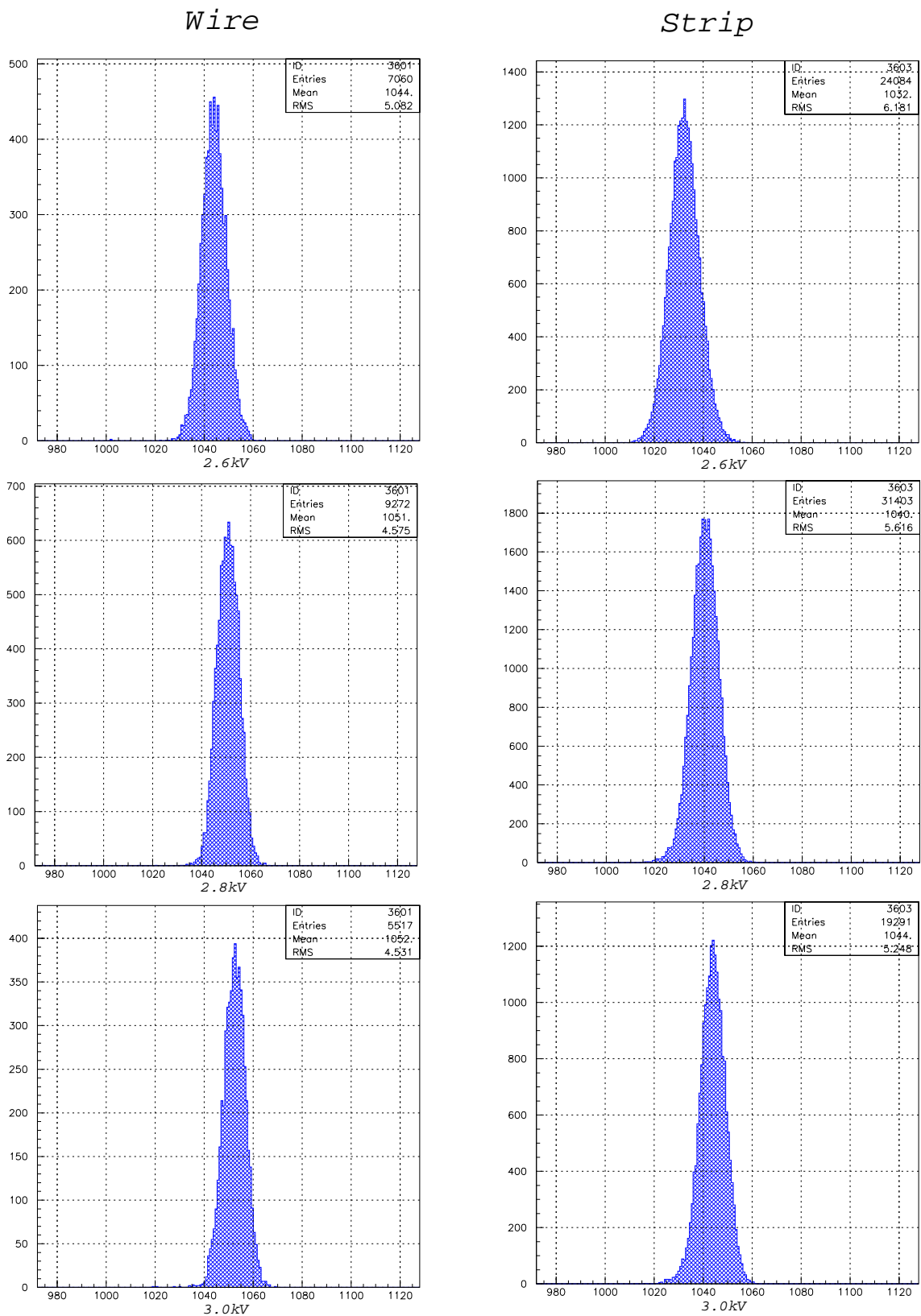


Fig. 5.17: Time jitter の印加電圧依存性 (CF4 ガス)

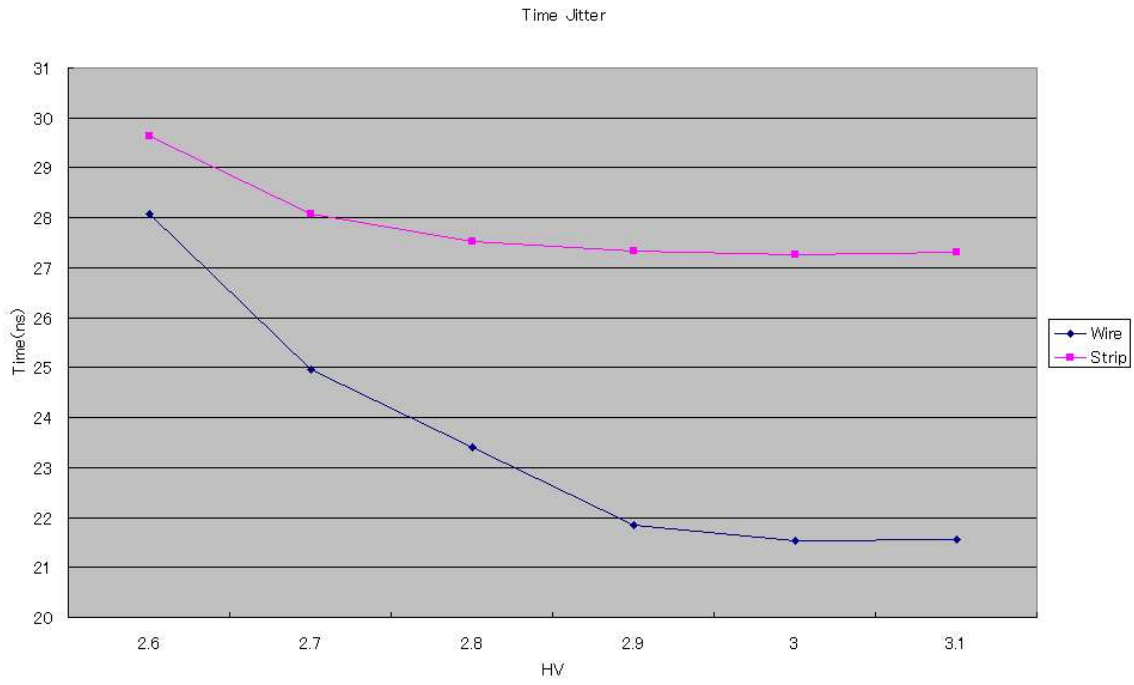


Fig. 5.18: HV 値の変化による CF4 での Time Jitter の変化

印加電圧	Wire	Strip
2.6kV	28.08	29.64
2.7kV	24.96	28.08
2.8kV	23.4	27.52
2.9kV	21.84	27.33
3.0kV	21.54	27.25
3.1kV	21.55	27.3

Table 5.3: HV 値を変化させた時の Time Jitter(CF4 ガス)

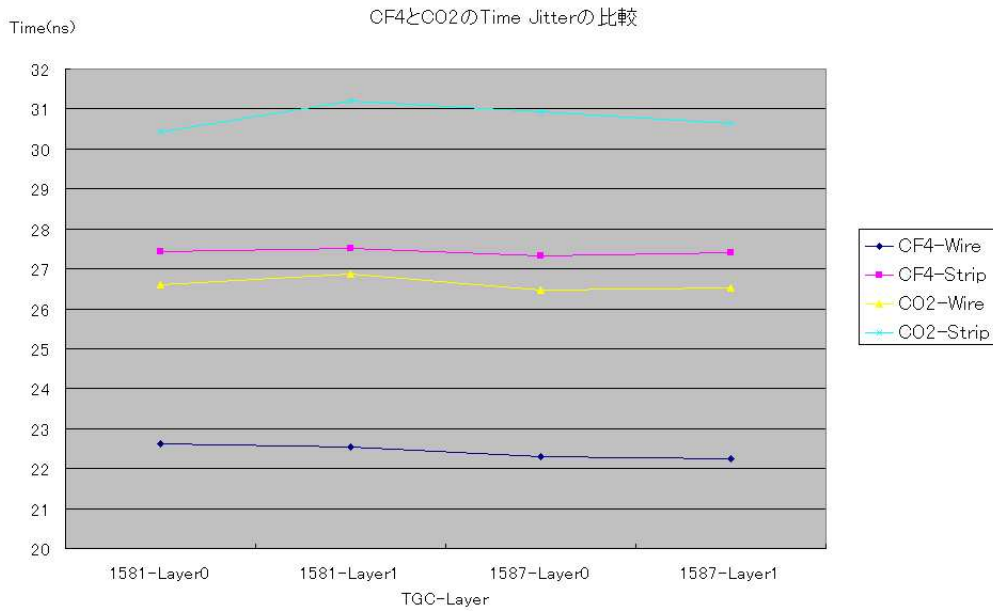


Fig. 5.19: CF4 ガスと CO2 との Time jitter の比較 (混合比 55:45)

5.1.4 HV Curve

CosmicRay Test では、各 TGC の検出効率の一様性を全面に渡り検査するのと平行して、検出効率の印加電圧依存性、いわゆる HV Curve の測定も行われる。Fig.5.20 に T4D の一例を示す。横軸が印加電圧、縦軸が対応する印加電圧に対する検出効率である。イベント数はそれぞれ 100k イベントで検出効率を計算している。それぞれの HV における検出効率を測定する事で、検出効率が平坦な領域 (プラトー領域) に達する電圧を調べ、その電圧に Unit 毎の個性が無いかが調べられる。プラトーに達する電圧は、用いる ASD の閾値電圧 V_{th} に依存し検査設備では、ワイヤー、ストリップ共に $V_{th} = 100mV$ で検査を行っている。Fig.5.20 はこの値でとられたものである。CosmicRay Test における印加電圧は 3.0kV を採用している。また CF4 ガスを用いた時の HV Curve の測定を行った。Fig.5.21 にその結果を示す。CO₂ の時と比較しても大きな差は見られなかった。5.1.3 の結果を考慮すると CF4 ガスの方を用いた方が優れている事がわかった。

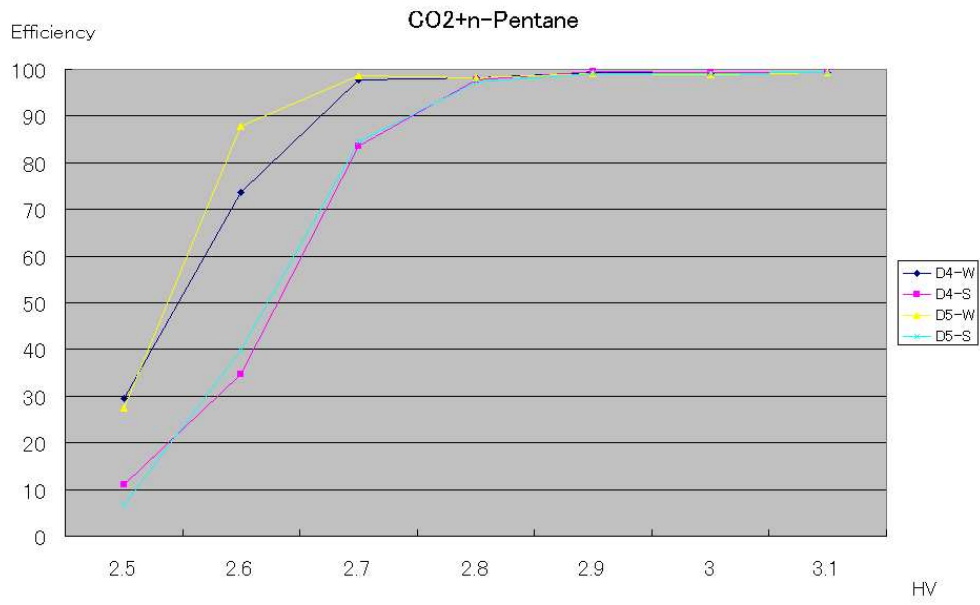


Fig. 5.20: HV 値の変化による検出効率の変化 (CO₂ ガス)

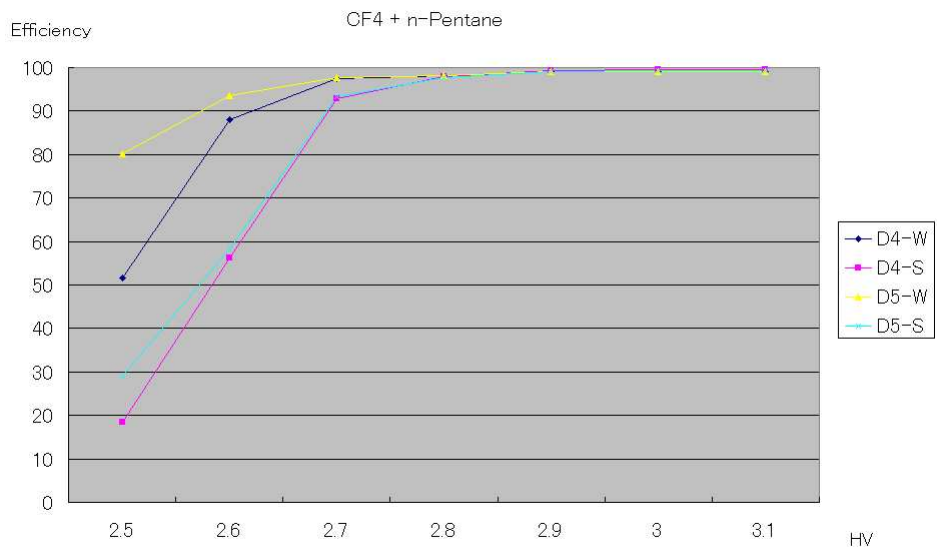


Fig. 5.21: HV 値の変化による検出効率の変化 (CF₄ ガス)

5.2 HV Test

4.3で述べたように神戸でのHV Testにおいて、TGCは製作されて以来初めて、本実験で用いる混合ガス($CO_2 + n\text{-Pentane} = 55 : 45$)を用いて試験を行う。ATLAS実験で動作させる時とほぼ同じ状態であり、初期状態と言う点でチェンバーの安定性を示すLeak Currentの状態をモニター・記録する事は重要である。Fig.5.22に、あるUnitのHV Testのモニター結果を示す。横軸は時間である。青色のグラフがHV値の推移を、赤色のグラフがCurrent値を示す。次にFig.5.23に、あるUnitのleak Currentの結果を示す。図より、ある時にLeak Currentが急に増加し、徐々に減少しているのが分かる。これはTGC内部に残っていたゴミか埃がAnode-Cathode間にパスを作り、それにより電流が流れゴミが焼かれていると考えられる。HV TestではTGCの内部に残っていたゴミを高電圧をかけて徐々に焼く事が可能で、それによりCosmicRay Testに移行した際に安定性が増す。実際に焼き出しの効果調べてみた。混合ガスで3.3kVテスト終了後にもう一度3.1kVへ戻し1時間の焼き出しを行い、最初の3.1kVテスト1時間のデータと比較してみた。(参照table4.2)Fig.5.24に示す。横軸がCurrent値を示し、縦軸はカウント値を示す。最初に3.1kVテストに移行した際はCurrentが所どころ流れている事が分かる。一方3.3kVテストまで終了したものはほとんどが0であり、Currentが流れなくなっている事が分かる。これによりHVテストによる焼き出しの効果があった。

また、4.3.2.1で述べたようにCurrentをモニター・記録することができ、Log Viewerを用いてその情報を画像化し閲覧する事が可能である。そのため例えばCosmicRay Testにおいて不安定なチェンバーがあった場合、HV Test時の状態を調べ元々不安定であったのかどうか確認する事が出来る。

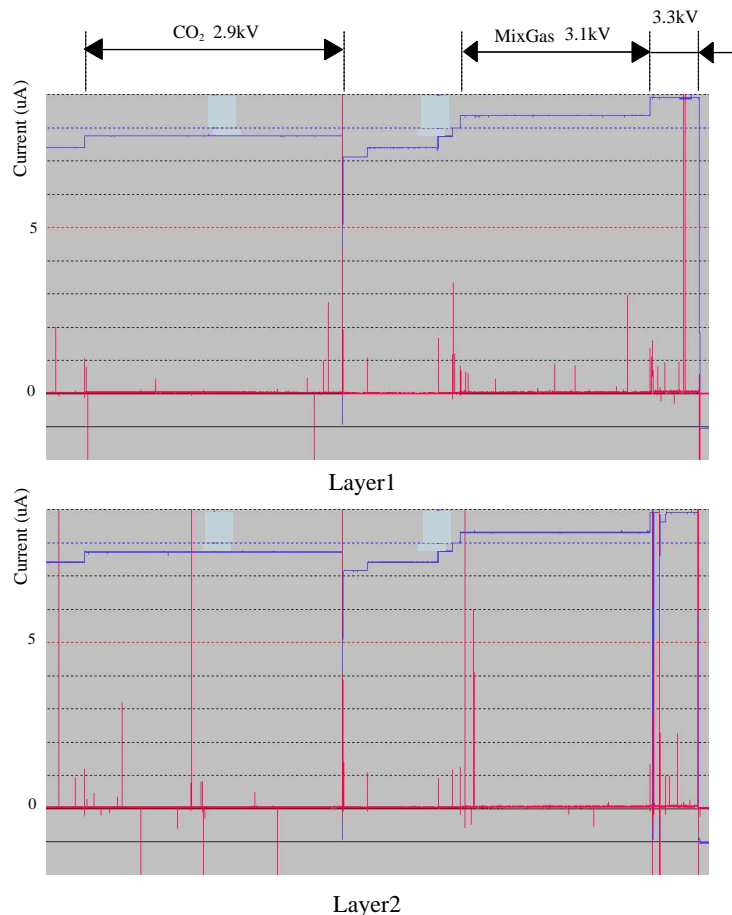


Fig. 5.22: HV Test Current Monitor 結果

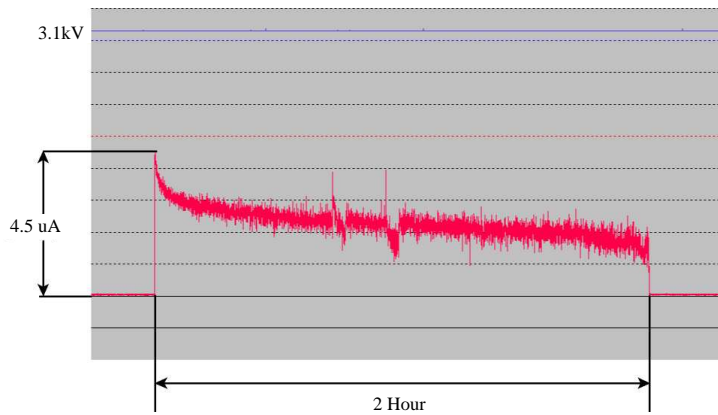


Fig. 5.23: Current Monitor 結果 2 ゴミが原因と思われる Leak Current の増加

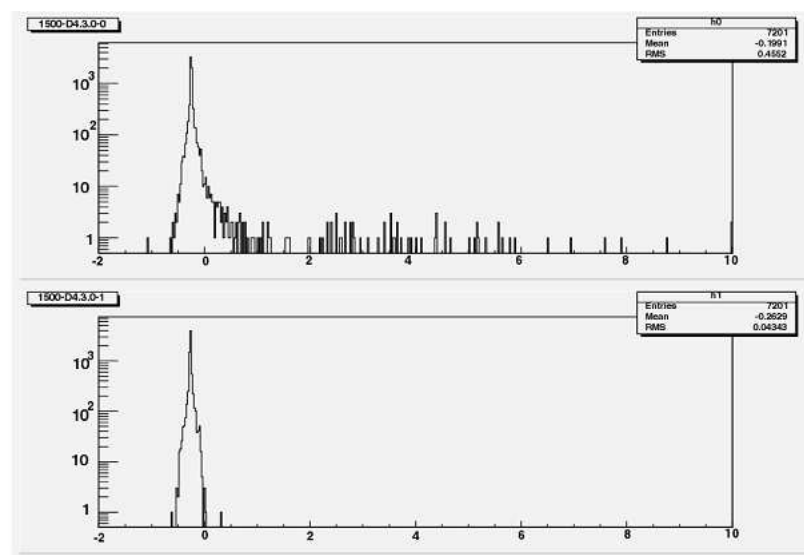


Fig. 5.24: HV 焼きだし効果

5.2.1 HV Test の結果

2004 年末までに T7 Triplet 101 台、T7 Doublet 207 台、T4 Doublet 107 台の計 415 台の検査を終了した。Fig.5.25 に HV Test 検査日数のグラフを示す。

青色が T4 Doublet、赤色が T7 Doublet、黄色が T7 Triple である。4 日以内に終了した個数は T4 Doublet は 85 台 (79%)、T7 Doublet は 136 台 (65%)、T7 Triple は 53 台 (52%) であった。各タイプの一週間の検査ペースは T7 Triplet が 2.1 枚/week、T7 Doublet が 5.3 枚/week、T4 Doublet が 3.6 枚/week となった。HV テストの自動化は 2003 年 12 月頃であり、T7 Doublet から HV テストの検査ペースを上げることができた。現在までに HV テストを合格していないものは、T7T が 1 台、T7D が 2 台、T4D が 1 台となっている。これらの TGC は次節 5.2.2 で述べるように、HV Test 中に HV を印加できなくなるという現象があらわれたものであり現在修理を行っている。

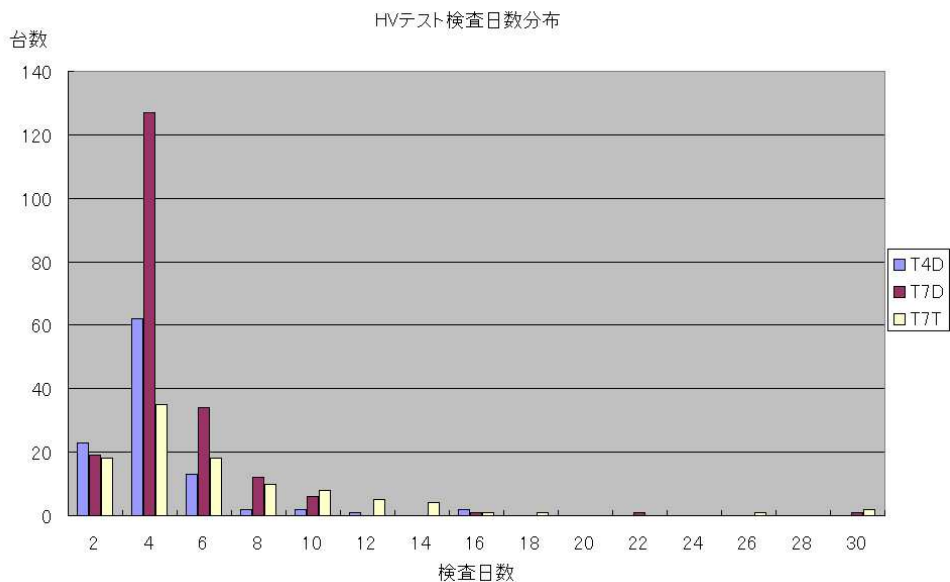


Fig. 5.25: HV テストの検査日数分布

5.2.2 HV 印加中の動作不良について

Fig.5.25 では 30 日以内に終了した TGC の台数を示しているが、いくつかの TGC は検査終了まで 30 日以上かかった。T4D では 3 台、T7D では 1 台、T7T では 2 台あった。これらの TGC は混合ガスを用いた HV Test を行っている際に、突然これまでに印加可能であった HV を印加出来なくなるという現象がみられたものである。これは始めに数 μA 以上の電流が流れる放電により Trip し、この後再度 HV を印加しようとしても、Leak Current が HV に比例して増加してしまい HV が印加できないという現象で、この時測定した Anode-Cathode 間の抵抗値は数 $M\Omega$ ~ 十数 $M\Omega$ しかなかった。

$CO_2 + n$ -Pentane を用いて HV を印加している際に放電が起こると、Anode - Cathode 間にパスが出来てそれ以降 $CO_2 + n$ -Pentane を用いての HV 印加が不可能となる。パスの出来る原因としてはまだはっきりとはわかっていないが、 CO_2 のみでのテストでは見られない現象であるので、Chamber 内部に残っていた埃やカーボンの粉と n-Pentane が何らかの反応をしたのではないかと考えられている。Fig.5.23 に示したように、ゴミなどが焼き切られる際、数 μA の電流が流れる。n-Pentane 雰囲気中で放電が発生した場合、ゴミが焼ききられずに逆に柱上の炭化物に成長するのでは無いかと考えられる。

この現象が生じ、HV を印加できなくなってしまった Chamber は、再度乾燥した CO_2 で十分に置換を行い、徐々に 2.9kV を印加してやることによりパスを安全に焼き切ることが出来、再び $CO_2 + n$ -Pentane によるテストに戻る事が可能となる。しかし、一度この現象が生じると、 CO_2 による置換ならびに 2.9kV での焼き出しを経て $CO_2 + n$ -Pentane によるテストに戻らなければならない。このため検査に多くの時間を要したのである。

5.3 Leak Test

4.4.1 で述べたように、Leak Test では Chamber と CO₂ Channel を 600Pa まで圧をかけて封じ、その後の圧力低下を見て検査する。Fig.4.32 の試験機に PC を接続し圧力低下のデータを取得している。Fig.5.26 に例を示す。縦軸が圧力 (Pa)、横軸が時間 (秒) である。5 分後の圧力低下が 50Pa であり合格している。一方 Fig.5.27 は 400Pa まで低下しており漏れがある。この場合は 4.4.2 で述べた方法を用いて漏れている場所を特定し修理を行う事になる。

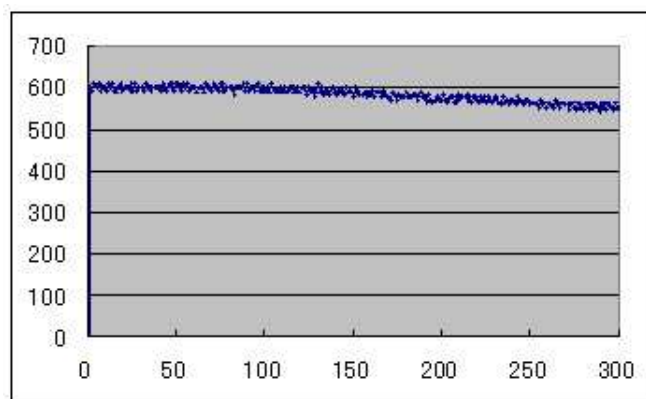


Fig. 5.26: Leak Test における降下圧力 (良い例)

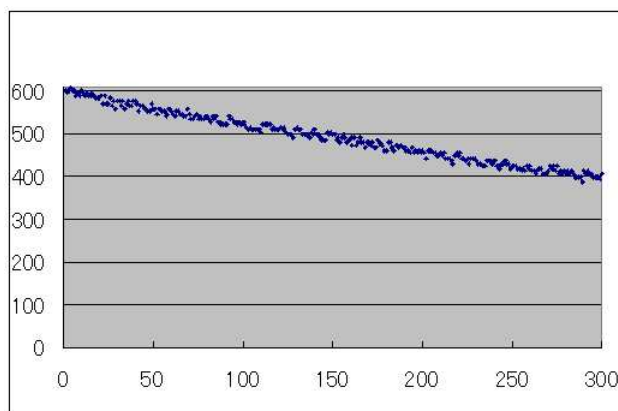


Fig. 5.27: Leak Test における降下圧力 (悪い例)

現在までの検査により漏れがおこる主な場所が分かった。Fig.5.29 にその場所を示し、以下に説明をする。

1. アダプタボードの継ぎ目

wire、strip 読み出し用のアダプタボードはそれぞれ 2 枚を接着剤で継ぎ合わせる事により製作されている。この部分に隙間が開く事が多く、中には 600Pa まで加圧できないくらい隙間が開いている Unit もあった。この場合の修復方法は、アダプタボードの周りには静電遮蔽のための銅テープが半田で固定されているので、まず銅テープを外し、それから継ぎ目を接着剤で埋める事で修復を行う。

2. 構造体と Chamber の境目、ならびにネジ穴

TGC の 4 角には、TGC を ATLAS 検出器に取り付ける際の金具を固定するために、構造体のフレームが外に剥き出しになっており、さらにネジ穴が切られている。フレームと Chamber の間やネジ穴から漏れる傾向があった (Fig.5.28)。これらの場合、それは内部漏れであることを意味する。本来、CO₂ Channel とフ

レームとは空間的に隔離されており、これらの部分を加圧・減圧しても CO_2 Channel の圧力は変化しない。しかし、内部漏れにより経路が来ると、加圧・減圧する事により圧力変化が生じる。フレーム-Chamber 間の漏れの場合は、その部分を接着剤で埋める事によりほとんどの場合が対処できる。ネジ穴に対しては、接着剤を流し込め無い事から、現在のところパテを埋め込む事により修復を行っている。両者の Leak 場所は、先に述べた減圧法・加圧法が確立するまでほとんど見つける事は不可能であったが、方法が確立したことにより現在ではほぼ 100% 発見する事が出来ている。

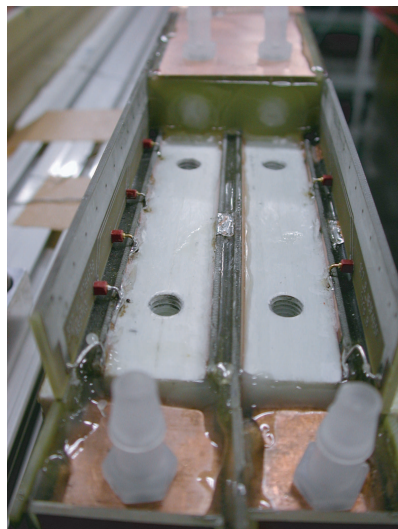


Fig. 5.28: 20mm FRP フレームと Chamber の隙間と 4つのネジ穴 (前後にあるのは CO_2 Channel 用ガス口)

3. アダプタボードのスルーホール

アダプタボードには、等間隔にスルーホールが開けられており、そこはアダプタボード取り付け前に接着剤ないしは半田で埋める処理がなされている。しかし、この処理が不十分であるとそこが Leak の原因となる。このタイプの漏れも減圧法によりある程度範囲を絞り、加圧法により穴を特定し、接着剤で埋める事により修復を行う。

上記の場所以外にも漏れはおこるが主な原因は制作時の接着不良であると考えられ、製作側にフィードバックし、出荷前検査を行っている。また神戸大学で行われた Leak Test や KEK での出荷前検査において、 CO_2 Channel の Leak には種類がある事がわかった。

まず Leak の種類について述べる。 CO_2 Channel の Leak には、「外部漏れ」と呼ばれる普通の漏れと、「内部漏れ」と呼ばれる特殊な漏れの 2種類が存在する事がわかった。内部漏れとは、Doublet/Triplet 製作工程において、接着剤で 20mm の紙ハニカムと FRP フレームの構造体を接着する際に、そこに隙間が出来てしまい、 CO_2 Channel の Leak の原因となってしまう。漏れの方向が Chamber から見て内部に漏れている事から内部漏れと呼んでいる。

内部漏れの兆候として、 CO_2 Channel に一度 600Pa の圧力をかけた後、すぐにその圧力を抜く。圧力が 0Pa になった後に CO_2 Channel を封じ切ると、まだ構造体内部に残っている気体が徐々にではあるが CO_2 Channel に流れ出るため、 CO_2 Channel の圧力が少しずつ上昇を始める。内部漏れの無い CO_2 Channel ではこの様な現象は起こらないので、これにより内部漏れであると判断する。

間に挟まれている厚さ 20mm の構造体の体積は、 CO_2 Channel の体積に比べ非常に大きなもの (約 40l) であるので、構造体内部も含めて 600Pa に加圧するためには、長時間 (少なくとも 2 時間以上) 加圧しつづけ、構造体内部まで十分に気体を流し込み圧力を上げてから封じ切りテストを行わなければならない、非常に時間のかかる作業である。

内部漏れにもさらに 2つのタイプが存在すると考えられている。一つは構造体の別の隙間からさらに外部に漏れるタイプ。もう一つは構造体内部で完全に閉じているタイプである。構造体内部で完全に閉じているタイプは、

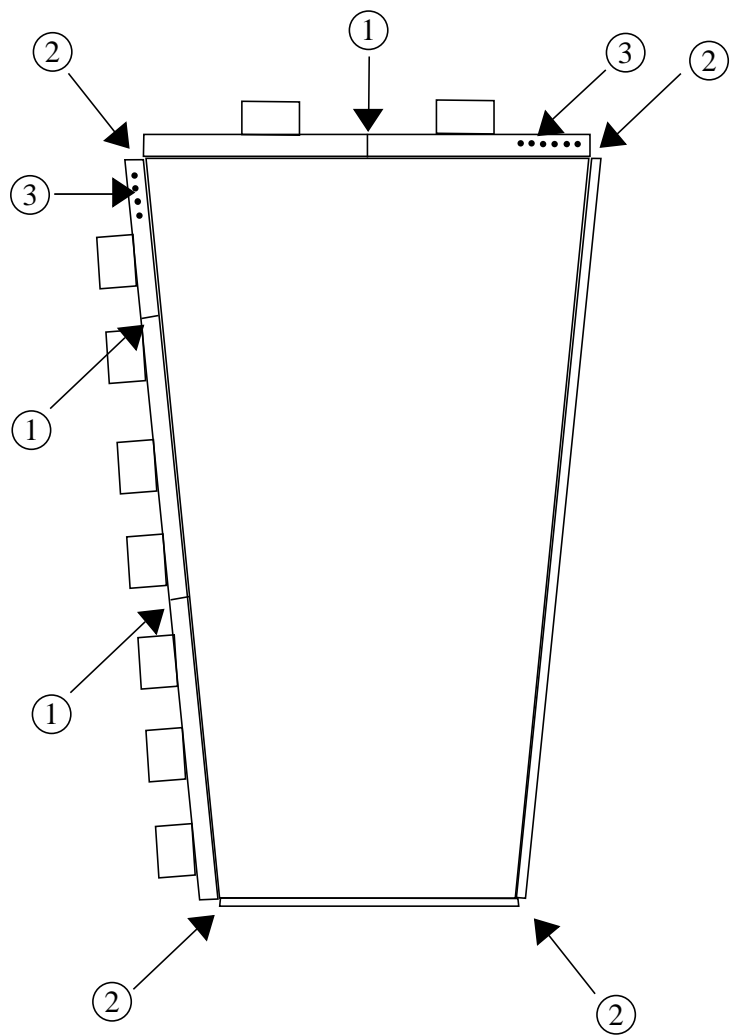


Fig. 5.29: CO_2 Channel の Leak 場所の傾向

程度にもよるがだいたい8時間程度の加圧を行う事により圧力の減少がほぼ無くなり、合格基準を満たす事が分かっている。Fig.5.30に内部漏れのグラフを示す。900Paで長時間加圧していた例である。一度圧力を抜いたあと、再度CO2 Channelを封じ切り測定を行った。約7分かけて内部バッファからの戻りがありほぼ900Paまで戻っている。その後は圧力低下がCO2の合格基準である100Paを下まわる事は無いのでこのTGCは合格とした。

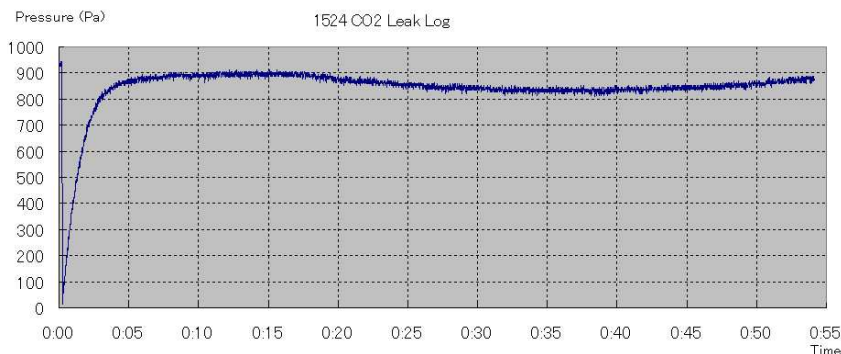


Fig. 5.30: 内部漏れの例

5.3.1 検査結果

Fig.5.31にLeak Testの結果を示す。横軸は検査日数、縦軸が検査台数を示している。青色がT4D、赤色がT7D、黄色がT7Tである。前節で説明したように、製作側へのフィードバックと、Leak傾向が分かったためほとんどのTGCが4日以内に検査を終了している。しかし30日を越えたTGCはそれぞれT4Dは12台、T7Dは34台、T7Tは13台であった。TGCタイプが変わると形や面積が変わり、接着量などがタイプ毎に異なるため、漏れはFig.5.29で示した場所以外にもあった。しかし4.4.2の探索方法を用いて修理を行い419台全て合格している。

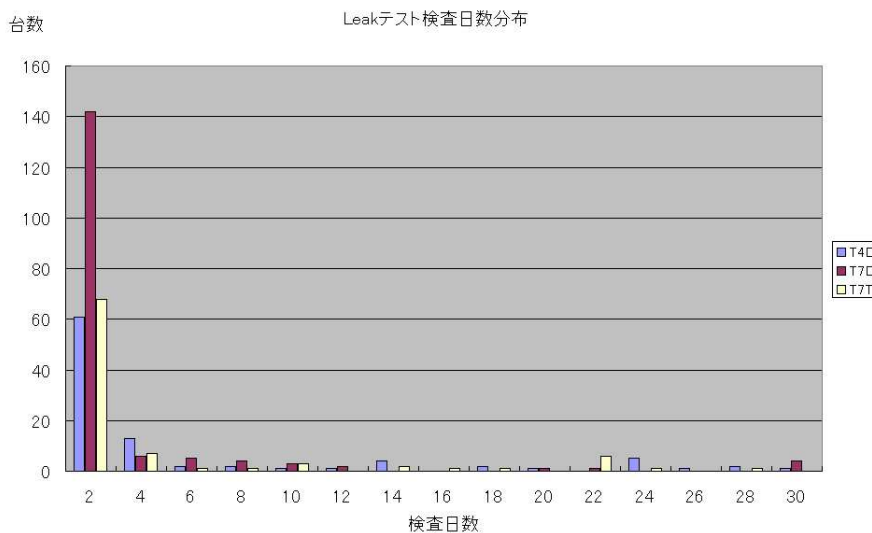


Fig. 5.31: Leak Test の検査日数分布

第6章 まとめと今後

6.1 まとめ

2000年9月より KEK にて TGC の製作が始まり 2004年12月にはほぼ全ての製作が完了し、神戸大学では 2002年5月より TGC の検査を始めた。主な検査項目は 3つ、CosmicRay Test、HV Test、Leak Test である。CosmicRay Test では検出効率のと信号到達時間の測定が行われた。初期の T7 Triplet タイプでは検出効率が 98%を下まわるものが 17Layer 存在した。しかしその原因が TGC の平面性によるものと確認し、量産側へのフィードバックによりその後の TGC においては、ほとんどの TGC が高い検出効率を持つことが確認された。また T7 Doublet ではテスト架台を 8 段から 12 段への変更も行い、タイプ変更に柔軟に対応し検査ペースを向上させた。一方 T4 Doublet の信号到達時間を検査した結果、Wire、Strip とともに 25nsec 以上であった。また Wire と Strip の間に差があることも分った。その原因としては、ひとつに T4 タイプの形状による伝達時間のばらつき、もうひとつには、入射角度によるものではないかと考えられた。テスト架台に降り注ぐミューオンは垂直入射のものが多いと考えられ、またかつてのビームテストの結果では入射角度 0° では 26~27nsec となっている。二つの原因を考慮すれば信号到達時間も十分な性能をもつと思われる。しかしこの Time Jitter に関しては更に研究を進める必要がある。またクエンチャーガスとして優れている CF₄ ガスを実際の TGC に流し、Time Jitter、及び検出効率の印加電圧依存性を調べた。その結果 Time Jitter に関しては CO₂ よりも CF₄ ガスの方が優れている事がわかった。一方検出効率の印加電圧依存性は CO₂ と CF₄ の間では大きな違いが無いこともわかった。

HV Test では本実験で使われる混合ガスを流し動作確認が行われ、Leak Current のチェックを行った。Leak Current のモニターシステムにより長時間印加することで TGC 製作時に付着したゴミや埃が焼きだされることが確認できた。また HV Test の最初と最後のデータを比較し、焼きだしにより Leak Current が抑えられていることを確認した。更に自動化システムを導入し HV Test の検査ペースが向上した。

TGC に流される混合ガスに用いる n-Pentane は人体に有害であり、引火性物質であるため漏れがあっては危険である。TGC の気密性をチェックするため Leak Test が行われた。CosmicRay Test と同様に初期の TGC には多くの漏れがあり、その場所の特定に多大な時間がかかり検査ペースを下げる原因であった。製作側との連系により主なリーク場所が理解されると共に、リーク場所を特定する検査方法が確立されその後のリーク検査の時間短縮につながった。

20002年の検査開始より、適宜各システムの最適化を行い安定した検査を行って来た。そして 2004年末までに T7Triplet 102 台、T7Doublet 209 台、T4Doublet 108 台の合計 419 台の検査を終了した。また 2004年末までに CERN への TGC の輸送を 3 回行い、無事に受け取りを済ませた。

6.2 今後の予定

現在 KEK にて予備品の製作が行われている。神戸大学では残された T5Doublet 約 100 台の検査と予備品の検査を 2005年7月まで行う事になる。その後、最後の CERN への輸送を行う予定である。一方神戸で検査された全 TGC の検査結果をまとめ、今後の CERN における TGC のセットアップ作業につなげる必要がある。

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助言、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、信州大学竹下徹教授、大下英敏氏に感謝します。

そして、共に研究活動を進めながら、様々な助力と助言を与え、励ましてくれました神戸大学の杉本拓也氏、荒滝陽二氏、一宮亮氏、鈴木良太氏、喜家村裕宣氏、緒方岳氏、大町千尋氏には、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。

Fig List

2.1	LHC 加速器 [1]	3
2.2	Higgs 生成の代表的な生成過程:(a)gluon-gluon 融合 (gluon fusion)、(b)WW/ZZ 融合 (Vector Boson Fusion)、(c) $t\bar{t}H$ 生成過程 ($t\bar{t}H$ production)、(d)W/Z 粒子随伴生成 (W/Z associate production)	6
2.3	Higgs 粒子の生成断面積 [3]	6
2.4	Higgs 粒子の分岐比と質量の関係 [3]	7
2.5	ATLAS の Higgs 発見能力 [3]	7
2.6	ATLAS Detector [1]	8
2.7	内部飛跡検出器 [4]	9
2.8	カロリメータ [4]	10
2.9	超伝導空芯トロイドマグネットの配置 [4]	11
2.10	エンドキャップトロイドの中央 ($z=1050\text{cm}$) におけるトロイダル磁場 (磁力線) [4]	11
2.11	粒子の透過性の違い	12
2.12	ミュオン検出器 [4]	12
2.13	Monitored Drift Tube [4]	13
2.14	Cathode Strip Chamber [4]	14
2.15	Resistive Plate Chamber [4]	15
2.16	Thin Gap Chamber [4]	17
2.17	ATLAS 実験のトリガーシステムのスキーム [5]	18
2.18	エンドキャップミュオントリガー [4]	19
2.19	M1 ステーションの TGC の配置 [4]	19
2.20	M3 ステーションの TGC の配置 [4]	19
2.21	Doublet / Triplet 断面図 [4]	20
2.22	トリガースキーム [5]	20
3.1	タウンゼント型電子なだれ	21
3.2	各動作モードにおける印加電圧と出力パルス波高の関係	23
3.3	n-Pentane の紫外線吸収断面積	23
3.4	TGC の構造 (断面図) [4]	24
3.5	TGC の構造 (平面図)	24
3.6	Wire 方向の読み出し部分の構造 [4]	25
3.7	TGC の電場 (左)・電位 (右) 構造のシミュレーション [20]	25
3.8	日本グループが製作する TGC のタイプと大きさ [19]	26
3.9	TGC 製作工程 [22]	27
3.10	カーボン塗布装置 1	28
3.11	カーボン塗布装置 2	28
3.12	パーツ接着風景 1	28
3.13	パーツ接着風景 2	28
3.14	ワイヤー巻き機	29
3.15	ワイヤーの張力でたわんだグラウンド板	29

3.16 Singlet 閉じ室	29
3.17 Singlet の HV Test	29
3.18 Doublet/Triplet 接着	30
3.19 Doublet/Triplet 接着	30
3.20 アダプタボードの取り付け	30
3.21 コンデンサ	30
3.22 パルステスト	31
3.23 HV 焼き出し	31
3.24 CO ₂ Channel 製作 1	31
3.25 CO ₂ Channel 製作 2	31
3.26 CO ₂ Channel	32
3.27 TGC 量産の結果	32
4.1 CosmicRay Test 用検査設備	34
4.2 y 方向から見た検査設備の模式 x 図 (a) と写真 (b)	35
4.3 トリガースキーム	35
4.4 上下シンチレータ読みだし時間差	36
4.5 Drift Tube の断面図	37
4.6 電場の強さと Drift Velocity の関係	37
4.7 2次元の Tracking	38
4.8 Drift Tube のヒットの時間分布	39
4.9 X の決定	39
4.10 Track の選択	40
4.11 検出器とエレクトロニクスの構成	42
4.12 ASD(シールド無し)	42
4.13 ASD(シールドを付け TGC に実装)	42
4.14 TMC の原理図	43
4.15 TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode) [19]	43
4.16 SWINE におけるシグナルのタイミング [19]	44
4.17 DAQ/解析用 PC 環境	45
4.18 データフローチャート	46
4.19 Scintillation Counter の Profile	47
4.20 Drift Tube の Profile	48
4.21 Drift Tube の multiplicity 分布	49
4.22 TGC の Profile	50
4.23 東と西にずらしてとったデータ	51
4.24 二つのデータを合成したもの	51
4.25 ケーブル配置 (上: 架台上部 下: クレ-トに接続したもの)	53
4.26 Wire 側のケーブル配線図	54
4.27 HOG モジュールと TGC の各 ASD とのケーブル対応表	55
4.28 データの読みだしシーケンス [15]	56
4.29 Monitor System 構成図	58
4.30 Log Viewer	59
4.31 自動化のモニター	59
4.32 Leak Test 試験機	61
4.33 リーク箇所を見つける 2 つの方法 (左が加圧法、右が減圧法)	61

5.1	Time Jitter の定義	63
5.2	Efficiency Map 例 (T4F1597-wire)[上: layer0 下: layer1]	64
5.3	Efficiency Map 例 (T4F1597-strip)[上: layer0 下: layer1]	64
5.4	検出効率の悪いマップ (左が悪い例、右が良い例)	65
5.5	平面性のデータ [単位 100: μm](左が悪い例、右が良い例)	65
5.6	各タイプごとの検出効率 (上段が T7T、中段が T7D、下段が T4D である)	66
5.7	検出効率分布	67
5.8	Cosmic Test の進捗状況 (黄色: T7T、赤: T7D、青: T4D)	67
5.9	Time Jitter の一例 (左が Wire、右が Strip)	69
5.10	T4 Doublet の Time Jitter 分布	70
5.11	Time jitter のヒストグラム	70
5.12	Time Jitter の入射角度依存性 [20]	71
5.13	ノイズのある TMC 分布	72
5.14	Time Jitter の印加電圧依存性 (Wire)	73
5.15	Time Jitter の印加電圧依存性 (Strip)	74
5.16	Time Jitter の印加電圧依存性	75
5.17	Time jitter の印加電圧依存性 (CF ₄ ガス)	76
5.18	HV 値の変化による CF ₄ での Time Jitter の変化	77
5.19	CF ₄ ガスと CO ₂ との Time jitter の比較 (混合比 55:45)	78
5.20	HV 値の変化による検出効率の変化 (CO ₂ ガス)	79
5.21	HV 値の変化による検出効率の変化 (CF ₄ ガス)	79
5.22	HV Test Current Monitor 結果	80
5.23	Current Monitor 結果 2	81
5.24	HV 焼きだし効果	81
5.25	HV テストの検査日数分布	82
5.26	Leak Test における降下圧力 (良い例)	83
5.27	Leak Test における降下圧力 (悪い例)	83
5.28	20mm FRP フレームと Chamber の隙間	84
5.29	CO ₂ Channel の Leak 場所の傾向	85
5.30	内部漏れの例	86
5.31	Leak Test の検査日数分布	86

Table List

2.1	LHC 加速器主要パラメータ [2]	4
2.2	MDT の各種パラメータ [4]	13
2.3	CSC の各種パラメータ [4]	14
2.4	RPC の各種パラメータ [4]	15
2.5	TGC の各種パラメータ [4]	16
3.1	各種ガスによる電子捕獲確率の違い	23
3.2	各国で製作される TGC のタイプと枚数	27
3.3	日本グループ担当の TGC タイプと枚数	27
3.4	量産枚数と期間	32
4.1	検査期間 (予定含む)	33
4.2	HV Test の印加電圧と印加時間	58
5.1	T4F1597 の検出効率	65
5.2	Time Jitter の印加電圧による変化	75
5.3	HV 値を変化させた時の Time Jitter(CF4 ガス)	77

Reference

- [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 DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE Technical Design Report Volume II, CERN/LHCC/99-15 ATLAS TDR (25 May 1999)
- [4] ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN/LHCC/97-22 ATLAS TDR (27 May 1997)
- [5] ATLAS Level1 Trigger Technical Design Report, ATLAS TDR-12 (20 Aug 1998)
- [6] S.Majewski,G.Charpak,A.Breskin,and G.Mikenberg, A THIN MULTIWIRED CHAMBER OPERATING IN THE HIGH MULTIPLICATION MODE, Nucl. Instr. and Meth. ,217(1983)265-271
- [7] 高エネルギー物理学実験、パリティ物理学コース、真木晶弘、丸善 (30 Sep 1997)
- [8] 粒子線検出器 - 放射線計測の基礎と応用 -, K. クラインクネヒト, 培風館 (15 Dec 1987)
- [9] Review of Particle Physics, *TheEuropeanPhysicalJournal*, Volume 15, Number 1-4, Springer, 2000
- [10] Y.Arai and M.Ikeno, *32Ch TMC-VME Module User Manual*
- [11] Yasuo Arai, *DAQ6U Program Manual*
- [12] KEK 回路室、「MWPC READOUT SYSTEM」
- [13] 林栄精器株式会社、「VME INTERRUPT & I/O REGISTER MODEL RPV-130 取扱説明書」
- [14] 神戸大学 杉本拓也、修士学位論文「ATLAS 実験用大型ミュオントリガーチェンバー検査設備の構築と評価」、2003年3月
- [15] 神戸大学 美馬孝行、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」、2003年3月
- [16] 神戸大学 奥村和恵、修士学位論文「ATLAS 実験に用いる TGC のための検査設備の構築及びガスシステムの開発」
- [17] 神戸大学 田中秀治、修士学位論文「大型陽子・陽子衝突実験に用いるための Thin Gap Chamber の性能評価」,1994年3月
- [18] 神戸大学 塚原知宏、修士学位論文「ATLAS ミュ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」,2000年2月
- [19] 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」,2002年2月
- [20] 東京大学 長嶋壮洋、修士学位論文「ATLAS 実験ミュオントリガー用 Thin Gap Chamber の量産と動作検証」,2000年2月

- [21] 東京大学 南條創、修士学位論文「アトラス実験ミューオントリガー用検出器の中性子バックグラウンドに対する動作研究」,2001年1月
- [22] 信州大学 大下秀敏、修士学位論文「TGC量産における検査システムとその評価」,2002年2月