

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

神戸大学自然科学研究科物理学専攻  
杉本 拓也

平成 15 年 2 月 10 日

## abstract

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 480 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。検査は 2 年間にわたり継続的に行われるので、長期間にわたり安定に動作する設備を構築することが求められた。また、実験開始までのスケジュールは既に決まっており、それに併せて検査を終了しなければならないので、効率的に検査を進めるようにしなければならない。2002 年 11 月までに、宇宙線検査用のデータ収集・解析システム、TGC へのガス供給・分配システムが構築され、本格的に検査が始まった。また得られた結果から検査設備の評価を行った。

また、検査の一環として、2002 年 6 月に CERN において、高頻度  $\gamma$  線環境下での動作試験を行った。この動作試験では、日本で製作され、神戸で検査された TGC を使用した。日本製作の ATLAS 実験用実機を用いた初めての  $\gamma$  線照射実験である。我々の TGC はおよそ 1 週間の  $\gamma$  線照射実験を行い、その間安定に動作する事を確認した。

# contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ATLAS 実験</b>	<b>4</b>
2.1	LHC 計画	4
2.2	ATLAS 実験で期待される物理	5
2.2.1	標準模型における Higgs	5
2.2.1.1	Higgs 粒子の生成	5
2.2.1.2	Higgs 粒子の崩壊	6
2.2.1.3	ATLAS の Higgs 粒子発見能力	6
2.3	ATLAS 測定器	9
2.3.1	内部飛跡検出器	10
2.3.2	カロリメーター	11
2.3.3	超伝導空芯トロイドマグネット	12
2.3.4	ミューオン検出器	13
2.3.4.1	MDT(Monitored Drift Tube)	14
2.3.4.2	CSC(Cathode Strip Chamber)	15
2.3.4.3	RPC(Resistive Plate Chamber)	16
2.3.4.4	TGC(Thin Gap Chamber)	17
2.4	ミューオントリガーシステム	18
2.4.1	レベル1 エンドキャップミューオントリガー	18
<b>3</b>	<b>Thin Gap Chamber (TGC)</b>	<b>21</b>
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 の製作	26
3.3.1	製作工程	27
3.3.2	製作スケジュール	32
3.4	TGC の検査	35
3.4.1	目的	35
3.4.2	検査スケジュール	35
<b>4</b>	<b>検査設備の構築</b>	<b>36</b>
4.1	CosmicRay Test	36
4.1.1	Scintillator	36
4.1.2	Drift Tube	39
4.1.2.1	構造と検出原理	39
4.1.2.2	Tracking	40
4.1.3	DAQ システム	43
4.1.3.1	エレクトロニクスモジュール	43

4.1.3.2	コンピュータ環境	46
4.1.4	データ解析	47
4.1.5	Track Constraint	47
4.1.6	データの確認	49
4.1.7	Efficiency Map Display	54
4.1.8	ガス供給・分配システム	55
4.1.8.1	供給系	55
4.1.8.2	分配系	57
4.2	HV Test	61
4.2.1	検査内容	61
4.2.2	ガス供給システム	61
4.2.3	Current Monitor System	62
4.2.3.1	カレント増幅器	63
4.2.3.2	モニタープログラム	66
4.2.3.3	Log Viewer とタイマープログラム	66
4.3	Leak Test	68
4.3.1	システムと検査方法	68
4.3.2	Leak の修復	68
<b>5</b>	<b>検査結果とシステムの評価</b>	<b>72</b>
5.1	CosmicRay Test	73
5.1.1	評価方法	73
5.1.2	検出効率	74
5.1.3	Time Jitter	78
5.1.4	HV Curve	78
5.1.5	検査ペース	81
5.2	HV Test	81
5.2.1	混合ガスを用いた HV 印加中の動作不良について	82
5.2.2	検査ペース	84
5.3	Leak Test	86
5.3.1	出荷前検査	86
5.3.2	CO <sub>2</sub> Channel の Leak	88
<b>6</b>	<b>高頻度 <math>\gamma</math> 線環境下での動作テスト</b>	<b>92</b>
6.1	目的	92
6.2	Setup	93
6.2.1	<i>The Gamma Irradiation Facility</i>	93
6.2.2	実験エリア	94
6.3	実験結果	95
6.3.1	入射頻度依存性	98
6.3.2	長期安定性試験	102
<b>7</b>	<b>まとめと今後</b>	<b>104</b>
7.1	まとめ	104
7.2	今後の予定	104

# 1 Introduction

現代の素粒子物理学における標準模型 (Standard Model) は、これまでその理論を否定するような実験結果は観測されておらず、非常に精度良く実験と一致している。その標準理論の中で、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  $120\text{GeV}$  と決まり、また理論的にはその上限値は約  $1\text{TeV}$  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  $14\text{TeV}$  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、中でもミュオンの検出、測定に使用されるミュオンスペクトロメータは、ミュオンが重要な物理に関わっており、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 検出器のミュオンスペクトロメータにはトリガー専用のミュオン検出器が設置される。

そのため、トリガー専用のミュオン検出器が ATLAS 測定器に設置され、そのミュオントリガー検出器である Thin Gap Chamber (TGC) の開発、及び製作を ATLAS 日本グループは担当しており、現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で製作が進められている。KEK において、3 タイプ計 480 台の TGC が製作される。

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  $25\text{nsec}$  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  $25\text{nsec}$  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。

検査は神戸大学で行われ、このため我々は専用の検査設備を構築した。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が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、 $CO_2+n\text{-Pentane}$  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  $\mu A$  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

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  $2 \text{ m}^2$  の TGC に対して検査を行うためには、大規模な検査設備が必要である。ATLAS 検出器への TGC の設置が 2005 年の 1 月に予定されている事から、検査も 2004 年 11 月には終了しておかなければならず、期間内に検査が終了できるよう、複数の TGC が同時に検査される。また同時に 2 年間にわたる長期間、継続的に検査を行う事から設備には安定性と効率のよさが求められる。

宇宙線検査設備のシステムは、大きく分けて、測定器系、データ収集 (DAQ: Data Acquisition) ・解析系、ガス供給・分配系の 3 種類に分ける事が出来る。測定器系は宇宙線を用いた検査において、いつ宇宙線が来たかを特定する (トリガー) ための Scintillation Counter と、どこをどのように宇宙線が通過したかを特定する (飛跡の再構成) ための Drift Tube と、検査を行う TGC から構成される。3 層積みになった各 Drift Tube のシグナルの時間分布 (Drift Time) から電子の Drift Length を計算する事が出来、それにより宇宙線の飛跡が再構成される。再構成された宇宙線の飛跡を元に検出効率および時間分解能の評価が行われる。

データ収集・解析は、測定回路、コンピュータ、記録装置から構成される。これらのシステムにはリアルタイム処理が要求され、測定回路からコンピュータ、コンピュータから記憶装置へのデータ転送速度、トリガー発生から処理開始までの高速応答性、大容量の記憶装置と行ったものが必要となる。データ収集バスの規格としては、高エネルギー物理学実験において基準となっている VME 規格を用いる。解析環境としては PC に Linux を搭載する方式を採用した。最近の PC はワークステーション並みの高い性能と汎用性を兼ね備えており、価格も安価でコストパフォーマンスに優れている。Linux は、オープンソース OS という性質からソフトウェアが非常に豊富で、これらを利用する事によりデータ収集から解析まで、全ての環境を整える事が可能であることから採用された。記憶装置としては、転送速度と手軽さからハードディスクを用いている。

TGC はガス検出器であるので、ガスを供給し高電圧を印加する事で初めて信号を得る事が出来る。それゆえ、TGC を安定に動作させるためには安定したガス供給システムが必要不可欠である。TGC に用いられるガスは、 $\text{CO}_2$  と n-Pentane を混合したものが用いられる。n-Pentane は、常温で液体 (沸点  $36.05^\circ\text{C}$ ) である炭化水素化合物であるので、 $\text{CO}_2$  と混合する際には一度気化させて混合する必要がある。気化させるという事は逆に再び液化する可能性があることを意味し、n-Pentane が液化してしまうと配管を詰まらせる。さらに、TGC 内での放電や TGC に流れる Current の増加などによる TGC の破損につながる恐れもあるため、液化には特に気を付ける必要があった。液化対策としては、配管が床や壁の付近を通る部分には断熱材を巻き、さらに室温を常に  $20^\circ\text{C}$  以上に保つようにした。また、n-Pentane は脱脂作用を持つ物質であり、プラスチック素材に用いられている可塑剤等を溶かしだしてしまうという性質を持っているため、設備に用いる配管の材質には耐 n-Pentane の材質を使う必要があった。耐性テストの結果、PFA と SUS が耐 n-Pentane である事が確認されたのでそれを用い配管を行った。TGC はその製作方法から内圧の上昇に対し非常に弱い構造をしており、そのためガス供給時には低圧で分配し、さらに圧力上昇に対する安全装置を取り付ける事が要求される。しかし、一般に低圧でガスを分配した際、各配管の抵抗 (コンダクタンス) の差により正しい分配を行う事が難しい。この問題に対し、各配管の排気側にオイルプラーを配置し、そこへ入れたシリコンオイルによって取替えて微小な圧力差を生じさせることによってコンダクタンスの差を無くし、低圧で分配を行うという方法を採用した。

2001 年 5 月より設備の構築を始め、2002 年 11 月より本格的に検査を開始するに至った。本論文では、これらの検査設備のうち、特にガスシステムと高電圧印加試験の設備について詳しく述べ、さらに各検査で得られた結果により設備の評価を行う。

また、LHC 実験では  $\gamma$  線や中性子線などによる高頻度のバックグラウンドが予想されており、TGC には高放射線環境下においても、高い検出効率と優れた安定性が要求されている。そのため、2002 年 6 月に CERN の大型測定器専用の高頻度  $\gamma$  線照射設備を用い、ATLAS 環境の数倍に相当する  $\gamma$  線を照射し、TGC の動作テストが行われた。この動作テストでは、日本で製作され、神戸で検査が行われた TGC が初めて CERN へと輸送され、テストに用いられたと言う意味で非常に重要な実験であった。本論文ではこの結果についても詳しく述べる。

本論文の構成は、第 2 章で ATLAS 実験の概要について述べ、LHC 計画と LHC で期待される物理について述べた後、ATLAS 測定器を構成する検出器とミュオントリガーシステムについて述べる。

第3章ではミューオントリガーシステムの一部である TGC の動作原理と構造について、KEK で行われている TGC の製作工程について述べ、さらに検査の概要について述べる。

第4章では、神戸で行われる検査内容について詳しく述べる。最も重要な検査項目である宇宙線検査を行うための各種検出器について述べ、データ収集・解析システムについて述べる。また、ガスシステムについても詳しく述べる。続いて高電圧印加試験の検査方法と、Leak Current をモニターするためのモニターシステムについて詳しく述べる。最後に気密性試験のシステムについて述べる。

第5章では、第4章で述べたシステムを用い、2002年未現在までに得られたデータよりシステムの評価を行う。

第6章では、2002年6月にCERNにおいて行われた、高頻度 $\gamma$ 線環境下における動作テストについて、詳しく述べる。

第7章では、検査結果についてのまとめを述べ、今後の検査の予定について述べる。

## 2 ATLAS 実験

### 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、重心系のエネルギーにして  $14\text{TeV}$  の世界最高エネルギーを持つ円形加速器である。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  $27\text{km}$ ) 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、トップクォークの物理、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  $14\text{TeV}$  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。

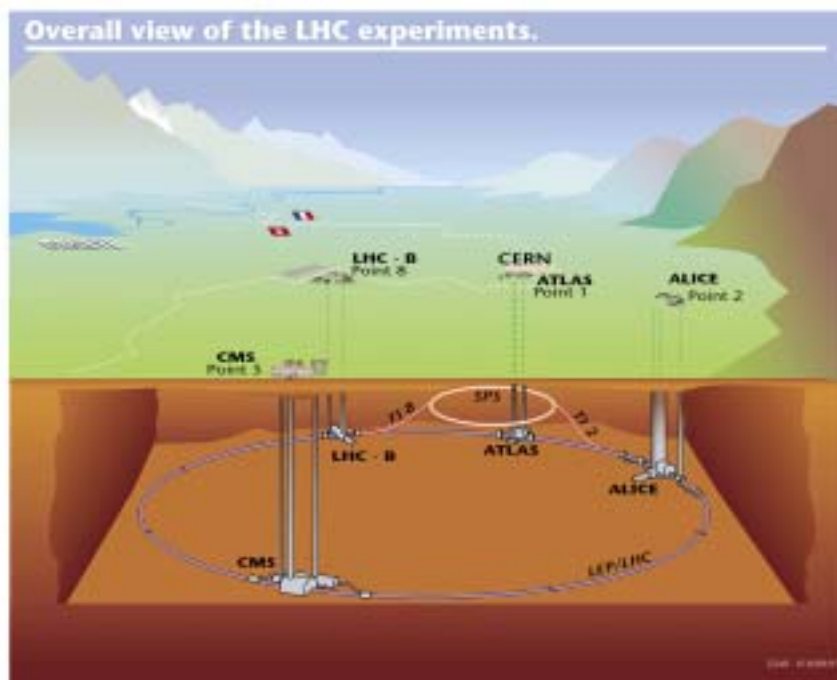


Fig. 2.1: LHC 加速器 [1]



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	26,658.87m	バンチ間隔	24.95nsec
入射エネルギー	450GeV	バンチ内陽子数	$1.1 \times 10^{11}$ 個
陽子エネルギー	7.0TeV	バンチ長さ (陽子)	77mm
High Luminosity(7 年)	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	衝突点でのビーム半径	15.9 $\mu\text{m}$
Low Luminosity(3 年)	$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	ビーム衝突角度	300 $\mu\text{rad}$
Luminosity Lifetime	10 時間		

Table 2.1: LHC 加速器主要パラメータ [2]

## 2.2 ATLAS 実験で期待される物理

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っている。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

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 粒子自信の質量については、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 以上とされている。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。

#### 2.2.1.1 Higgs 粒子の生成

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。

### 2.2.1.2 Higgs 粒子の崩壊

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”Gold Plated Channel”と呼ばれ、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 ( $100 \text{ fb}^{-1}$ ) 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 ( $4\text{lepton}$  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。これらのイベントは、前方にクォークによる 2つのジェットが生じるのが特徴であり、これをタグする事により同定が可能である。

### 2.2.1.3 ATLAS の Higgs 粒子発見能力

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 粒子が発見される能力を Fig.2.5 に示す。このグラフの縦軸は Higgs を発見する能力を現し、予想される Higgs のイベント数をバックグラウンドのイベント数の平方根で割ったものである。縦軸の値が高い程、Higgs のイベントがあったときに、それがバックグラウンドでは説明できないことを示し、 $100 \text{ fb}^{-1}$  あれば ATLAS 実験において Higgs 粒子を  $10\sigma$  以上の確かさで発見できる事を示している。また、横軸の上限が  $1 \text{ TeV}$  である事より、質量の上限値である  $1 \text{ TeV}$  まで Higgs 粒子の探索が出来る、非常に優れた検出器である事を示している。

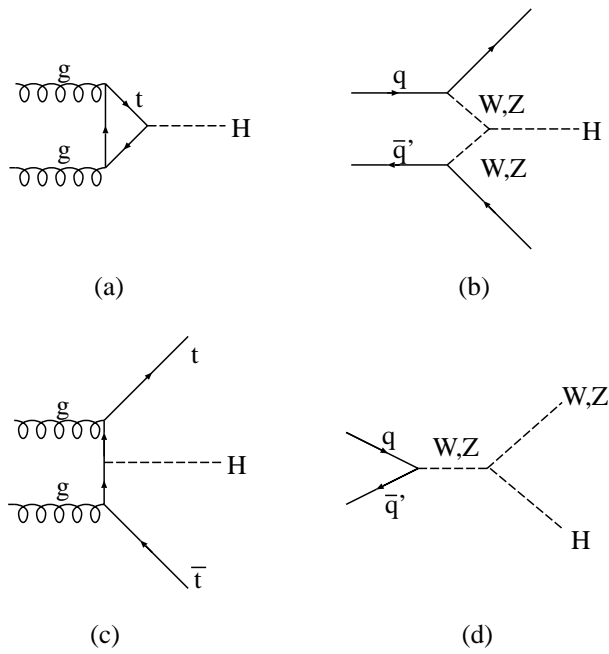


Fig. 2.2: Higgs 生成の代表的な生成過程 : (a)gluon-gluon 融合 (gluon fusion)、(b)WW/ZZ 融合 (Vector Boson Fusion)、(c) $t\bar{t}H$  生成過程 ( $t\bar{t}H$  production)、(d)W/Z 粒子随伴生成 (W/Z associate production)

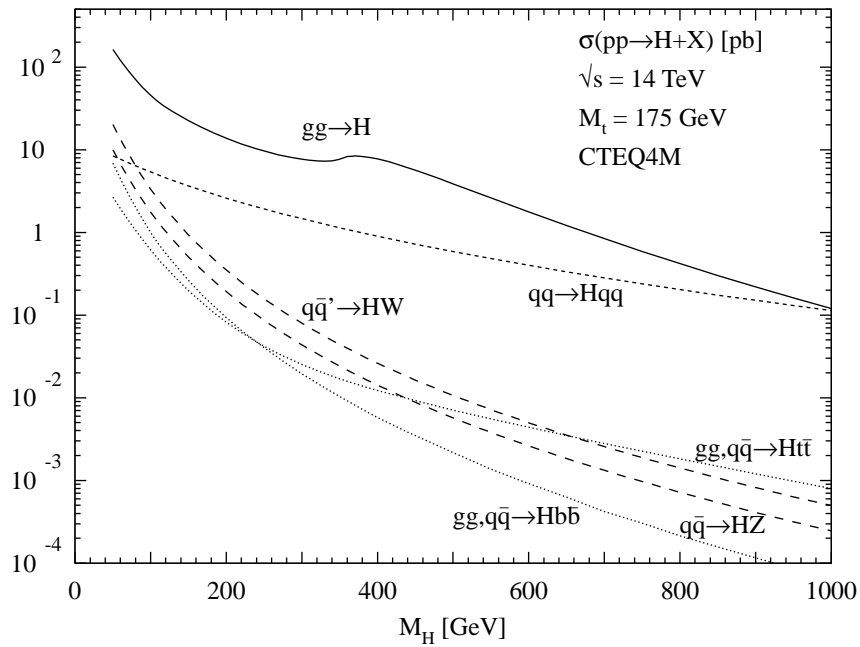


Fig. 2.3: Higgs 粒子の生成断面積

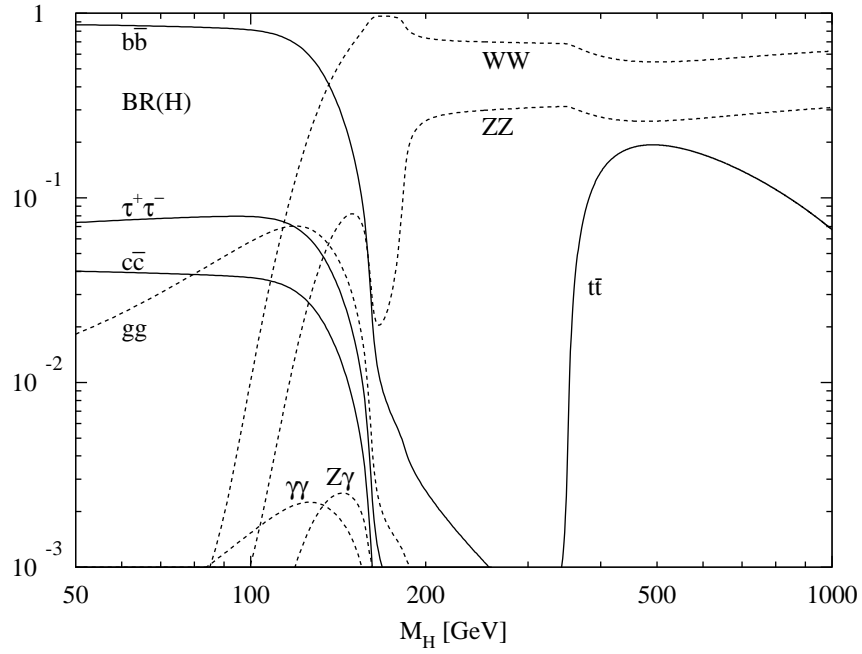


Fig. 2.4: Higgs 粒子の分岐比と質量の関係

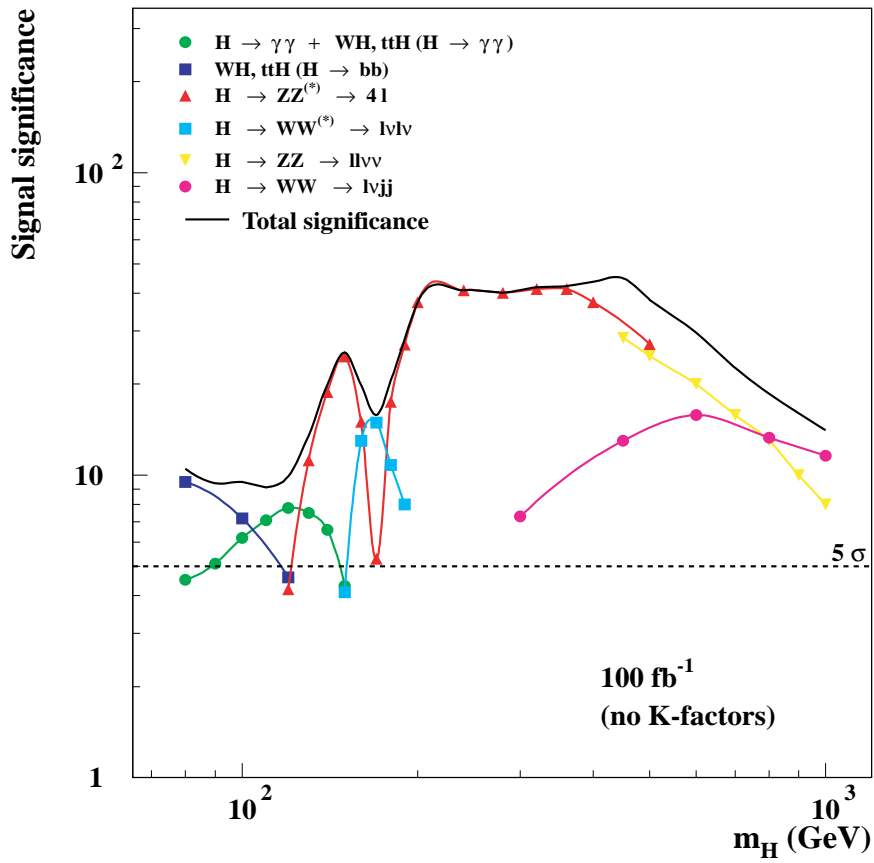


Fig. 2.5: ATLAS の Higgs 発見能力 [3]

## 2.3 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  $\phi$  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  $\theta$  とし、擬ラピディティ (pseudorapidity)  $\eta$  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]。

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。

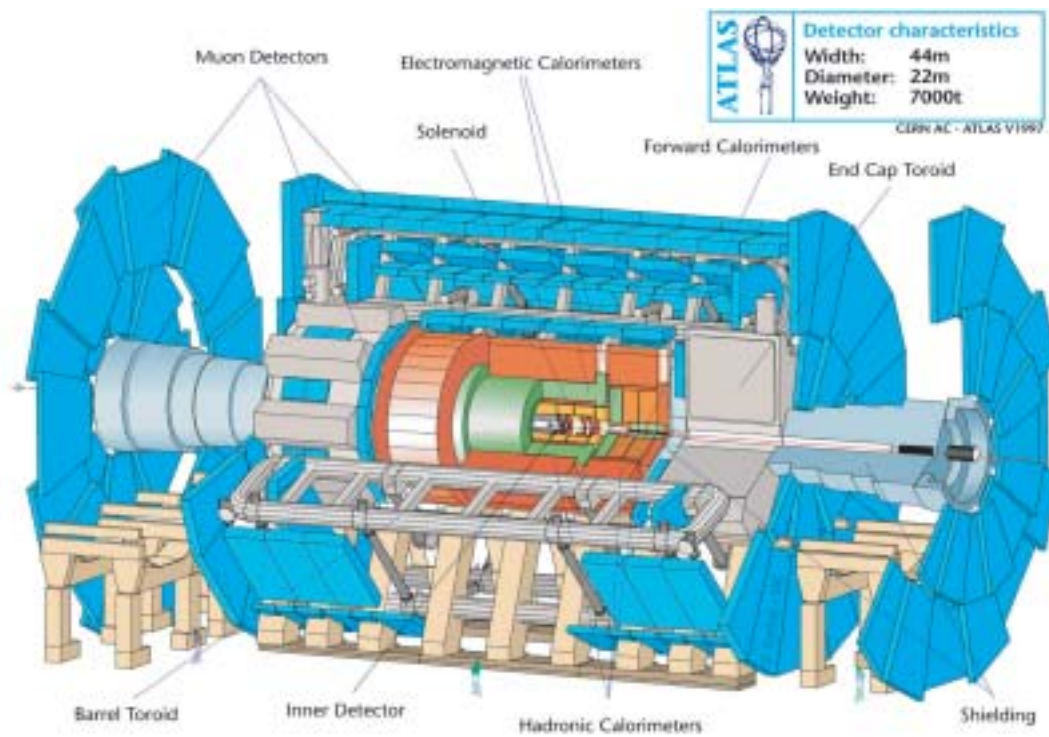


Fig. 2.6: ATLAS Detector [1]

### 2.3.1 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、細長い有感領域を持った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。

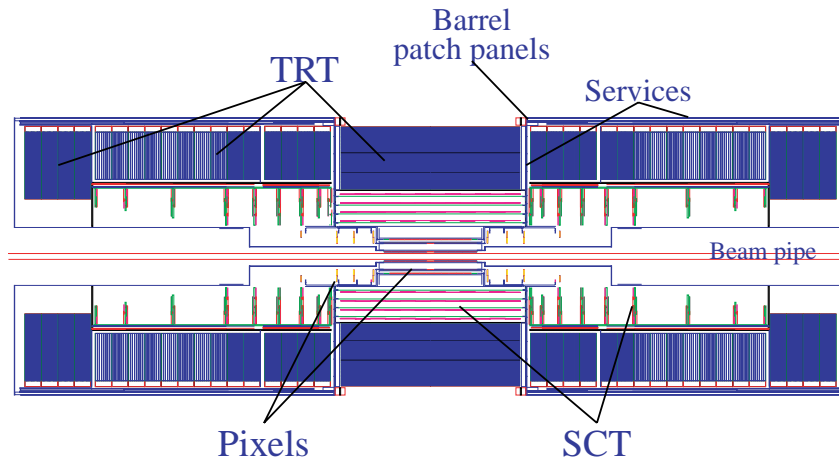


Fig. 2.7: 内部飛跡検出器 [4]

### 2.3.2 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ー、ハドロンカロリメーターが配置される。電磁カロリメーターは鉛と液体アルゴンのサンプリングカロリメーターである。ハドロンカロリメーター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ー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。

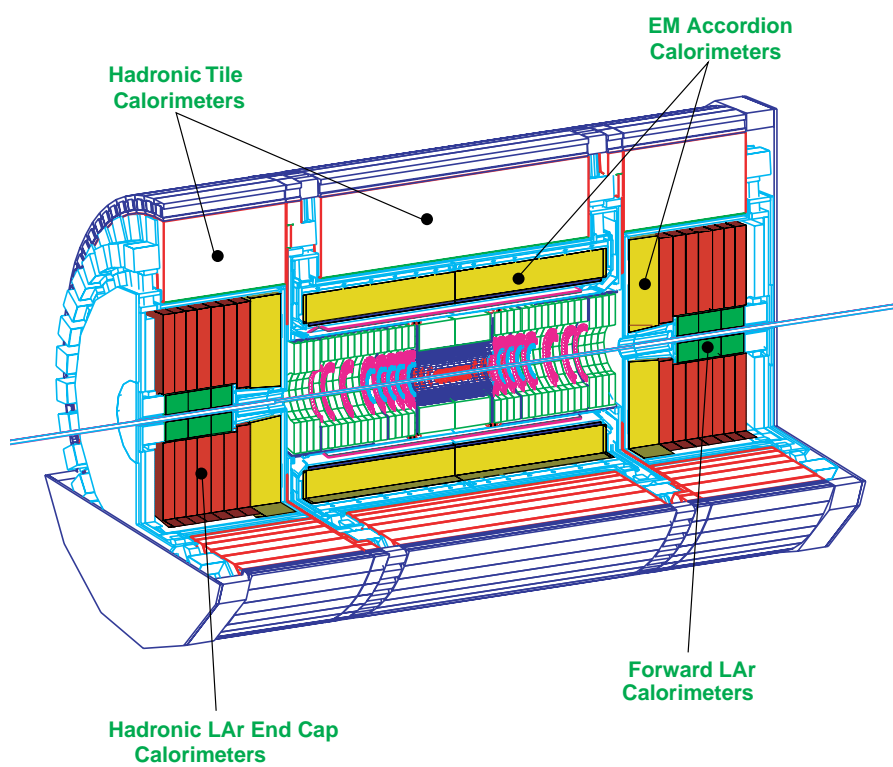


Fig. 2.8: カロリメーター [4]

### 2.3.3 超伝導空芯トロイドマグネット

Fig.2.9のように、8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、 $\phi$ 方向成分も持ち、ミュオンは $\phi$ 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オンの運動量を測定するが、精密測定には $\phi$ 方向の曲がりも考慮する必要がある。

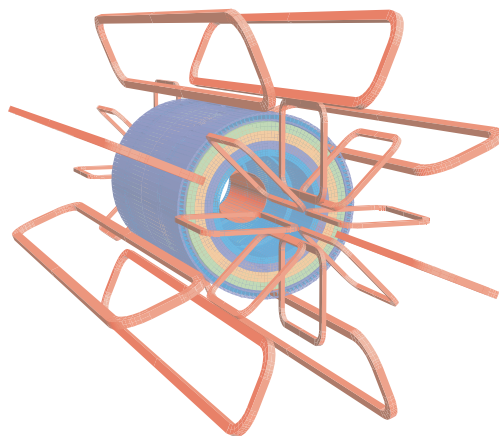


Fig. 2.9: 超伝導空芯トロイドマグネットの配置 [4]

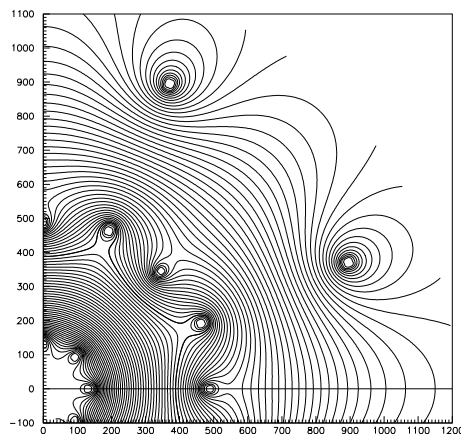


Fig. 2.10: エンドキャップトロイドの中央 ( $z=1050\text{cm}$ ) におけるトロイダル磁場 (磁力線) [4]



### 2.3.4 ミューオン検出器

衝突点で生成したミューオンは、他の粒子に比べ透過性が高いため (Fig.2.11)、ミューオン検出器は、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ーオン検出器には、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。

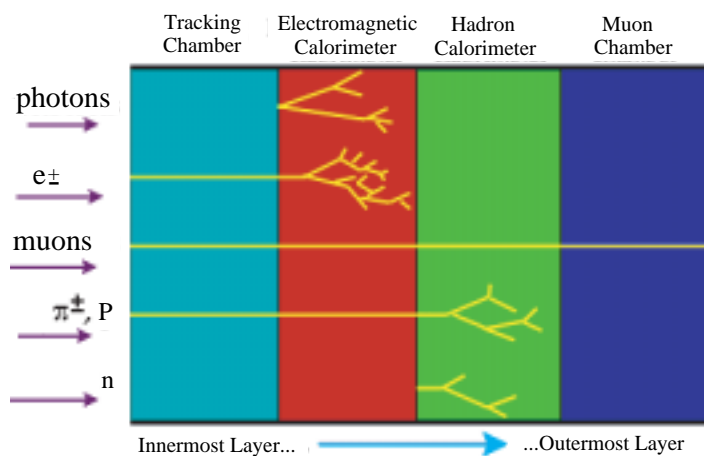


Fig. 2.11: 粒子の透過性の違い

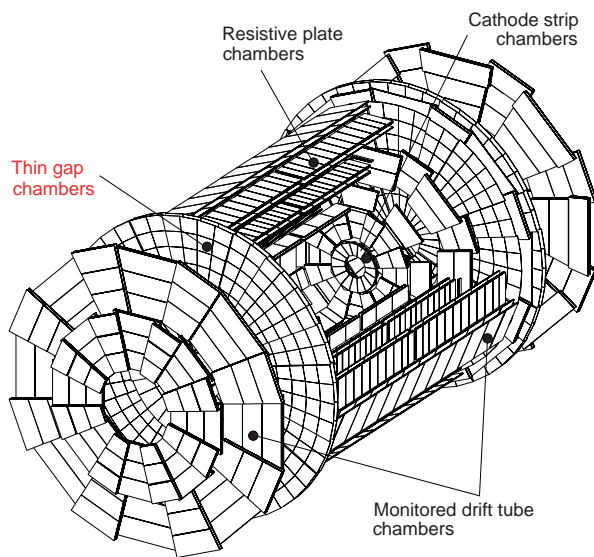


Fig. 2.12: ミューオン検出器 [4]

### 2.3.4.1 MDT(Monitored Drift Tube)

MDTは Fig.2.13 に示すように、直径 30mm の Drift Tube を依積みにし、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]

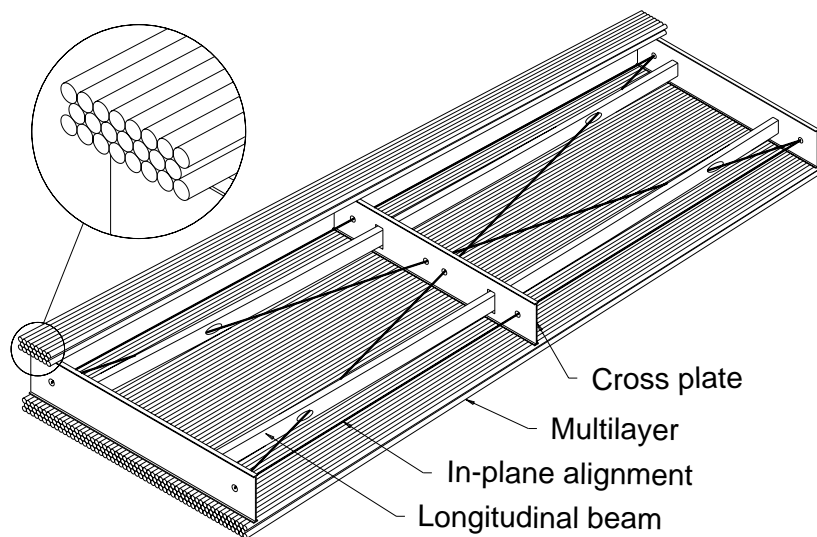


Fig. 2.13: Monitored Drift Tube [4]

### 2.3.4.2 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 妨げになる中性子への感度が  $10^{-4}$  未満と小さく、 $\gamma$  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	$4 \times 10^4$

Table 2.3: CSC の各種パラメータ [4]

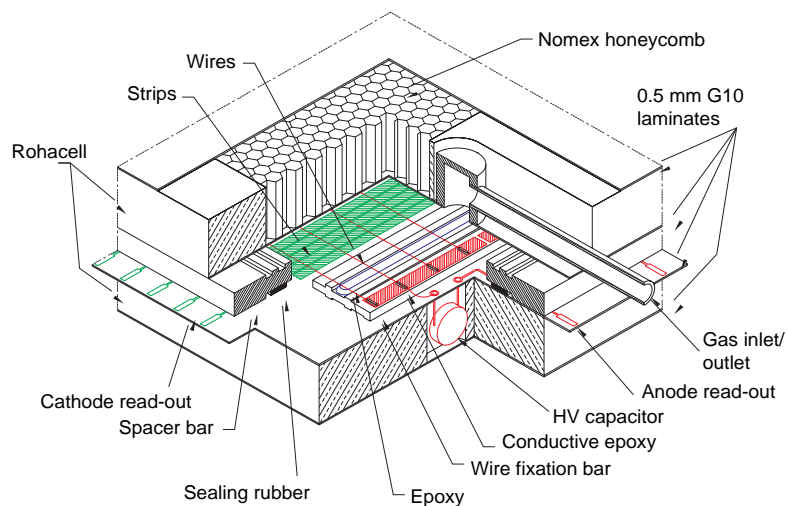


Fig. 2.14: Cathode Strip Chamber [4]

### 2.3.4.3 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	$2.00 \pm 0.22\text{mm}$
印加電圧	$8.90 \pm 0.15\text{kV}$
Bakelite Volume Resistivity	$(1 - 5) \times 10^{10}\Omega\text{cm}$
カーボン面抵抗	$100 \pm 40\text{k}\Omega$
混合ガス	$C_2H_2F_4 : C_4H_{10} = 97 : 3$
ガス圧	$(1.0 \pm 0.5)\text{mb}$

Table 2.4: RPCの各種パラメータ [4]

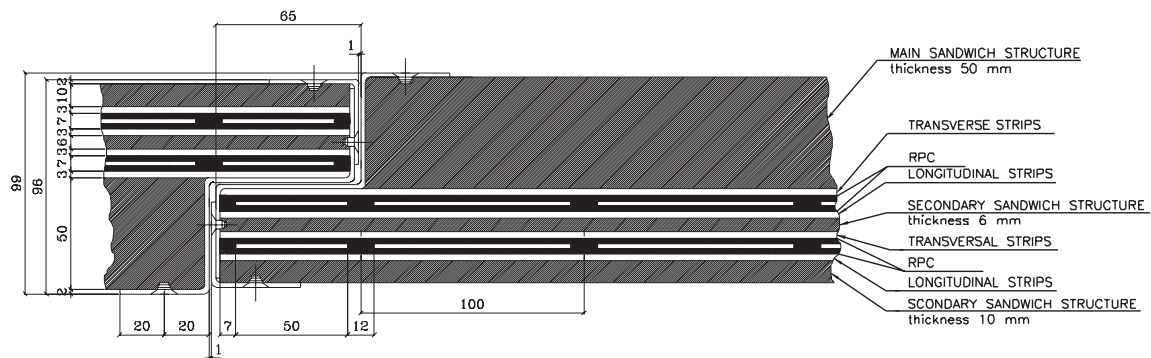


Fig. 2.15: Resistive Plate Chamber [4]

### 2.3.4.4 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]

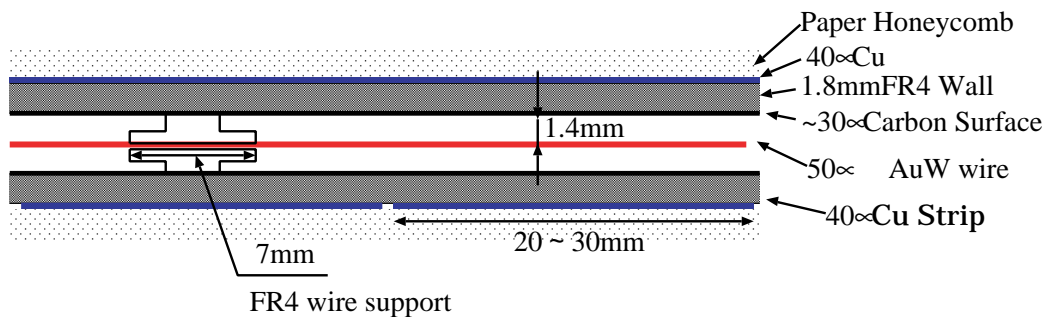


Fig. 2.16: Thin Gap Chamber [4]

## 2.4 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。

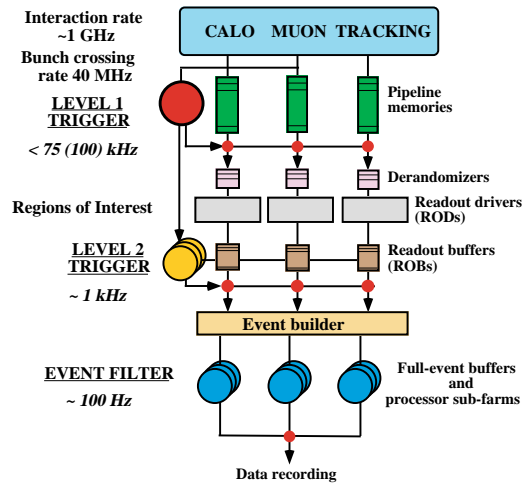


Fig. 2.17: ATLAS 実験のトリガーシステムのスキーム [5]

### 2.4.1 レベル 1 エンドキャップミュオントリガー

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 1Unit 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、Trold 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。Trold 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。 $p_T = 6 GeV$  以上のミュオンの飛跡に対して、M2、M3 の内少なくとも 3 層の検出器の hit を要求し、さらに M1 の 3 層のうち 2 層を要求し、hit の位置からミュオンの運動量を測定する。これらの hit パターンより  $p_T = 20 GeV$  以上のトラックを選別し、Higgs 粒子等の探索に用いられる (Fig.2.22)。

トリガーチェンバーである TGC に要求される条件として、

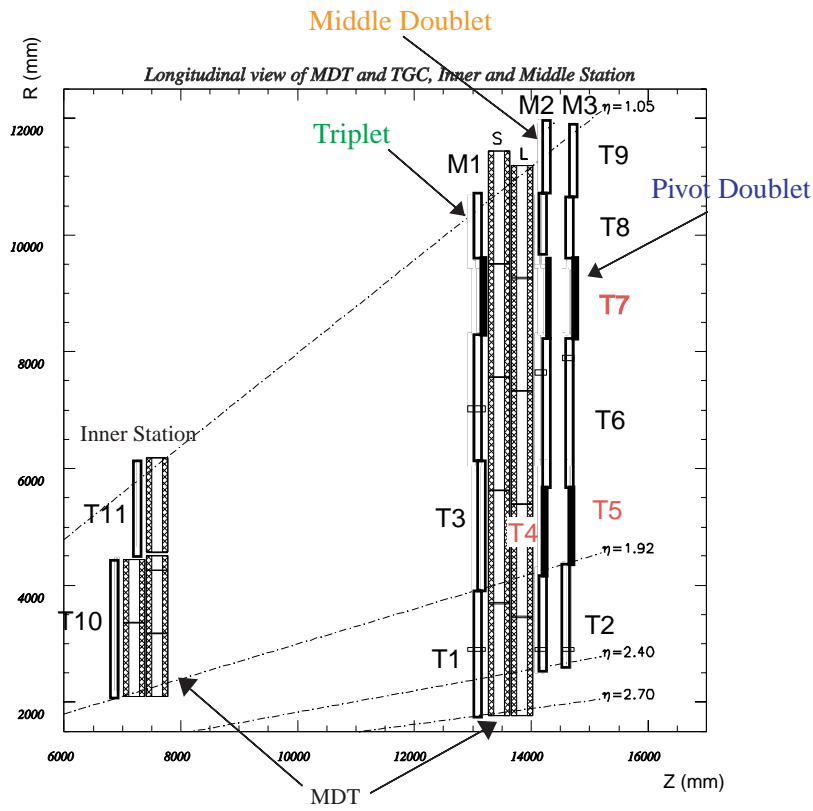


Fig. 2.18: エンドキャップミュオントリガー [4]

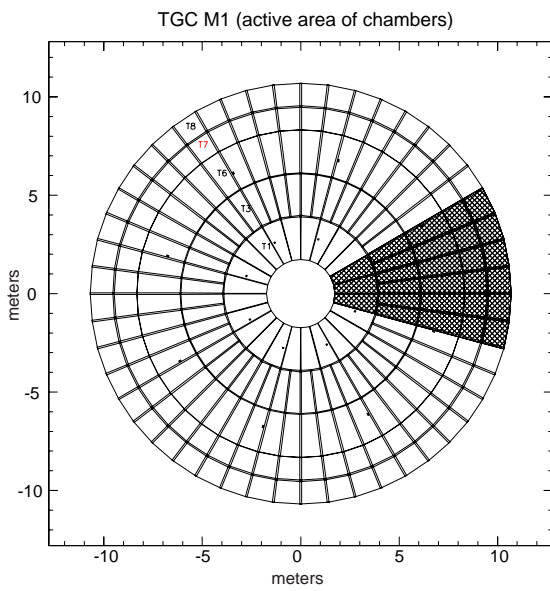


Fig. 2.19: M1 ステーションの TGC の配置 [4]

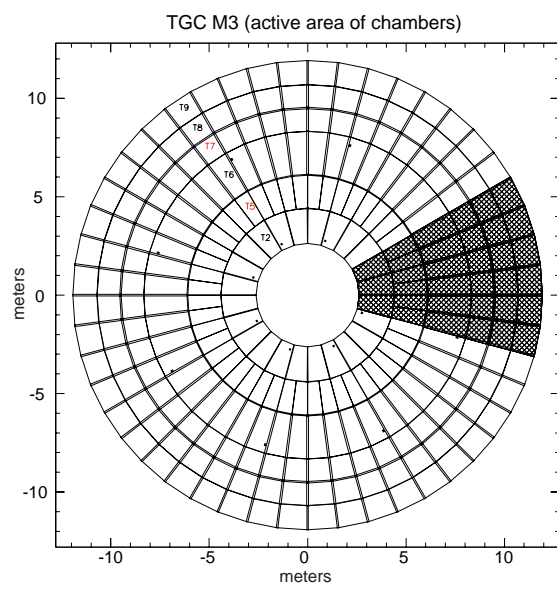


Fig. 2.20: M3 ステーションの TGC の配置 [4]

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、 $\sim 1\text{cm}$  の位置分解能を持つ。
4. ATLAS 実験ホール内での、 $0.1\text{kHz}/\text{cm}^2 \sim 1\text{kHz}/\text{cm}^2$  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。

がある。これらの条件に対する様々な動作研究がこれまでに進行されており [17] [18] [19] [20]、要求された性能を持つことが確認されている。

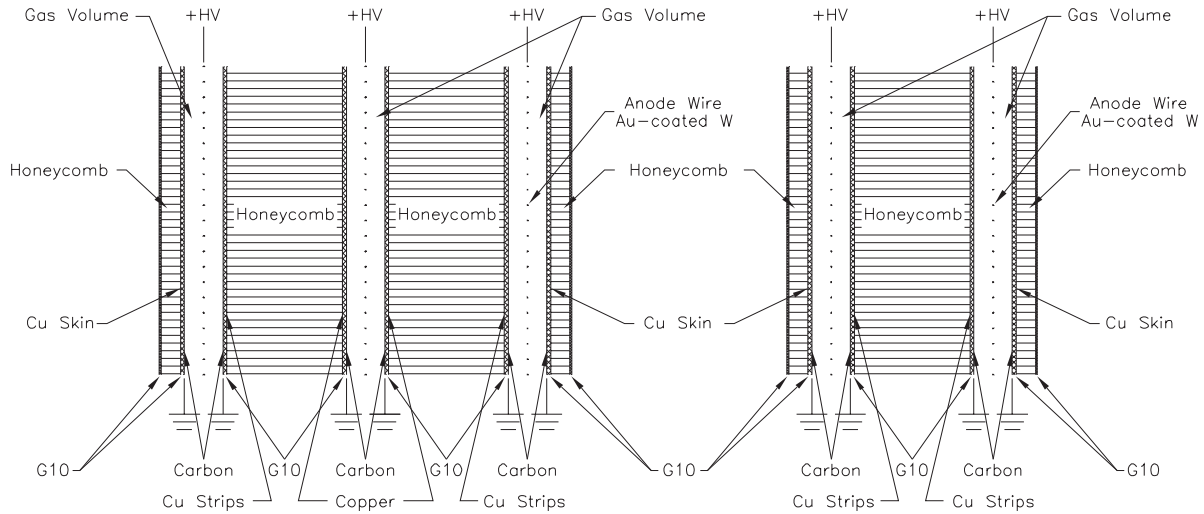


Fig. 2.21: Doublet / Triplet 断面図 [4]

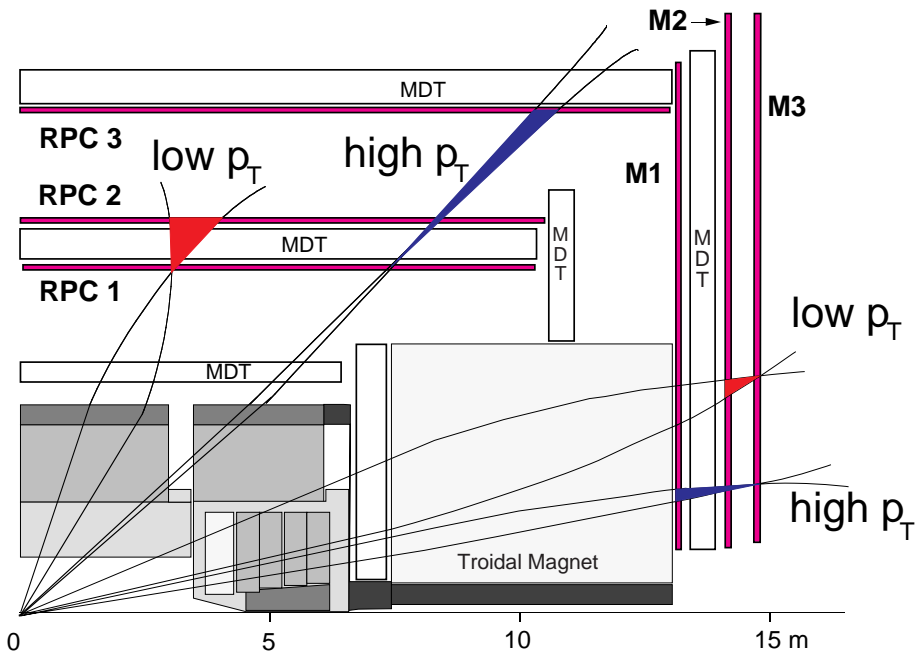


Fig. 2.22: トリガースキーム [5]



# 3 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。

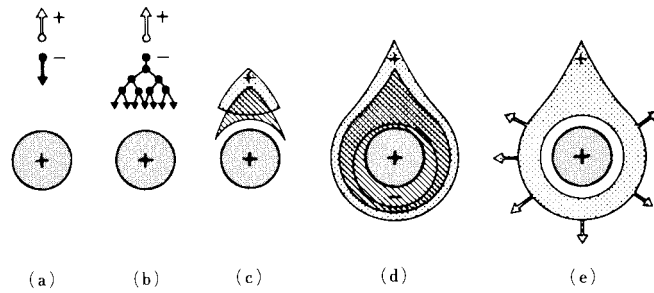


Fig. 3.1: Anode Wire 近傍でのタウンゼント型電子なだれの推移 [8]

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。  $\alpha$  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、  $\alpha$  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。

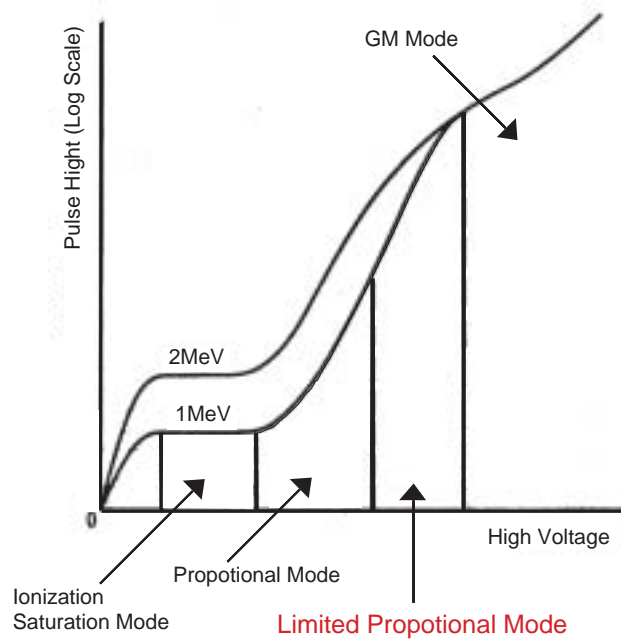


Fig. 3.2: 各動作モードにおける印加電圧と出力パルス波高の関係

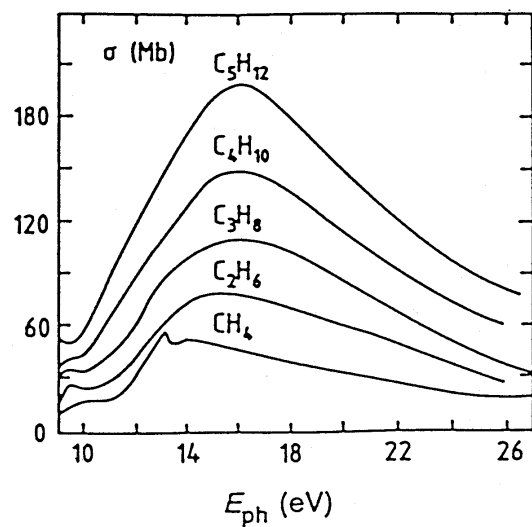


Fig. 3.3: n-Pentane の紫外線吸収断面積

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

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。Anode-Cathode 間隔は 1.4mm と通常の MWPC に比べ狭くなっている。これらにより時間分解能が 25nsec が実現される。Cathode 面であるカーボン面の面抵抗を大きく ( $0.5M\Omega \sim 1.5M\Omega$ ) 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、電子がチャンパ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。カーボンを塗布する事で、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  $0.5M\Omega \sim 1.5M\Omega$  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  $\phi$  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、 $\sim 20\text{ch}$  を 1 グループとして読み出しを行う (Fig.3.6)。Strip に関しては、 $\sim 40\text{mm}$  幅の Strip がチャンネルの数だけ刻まれている。

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  $40\text{kV/cm}$  の電場を持ち、Cathode 面近傍 (Wire から 1mm) の位置でも  $10\text{kV/cm}$  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。

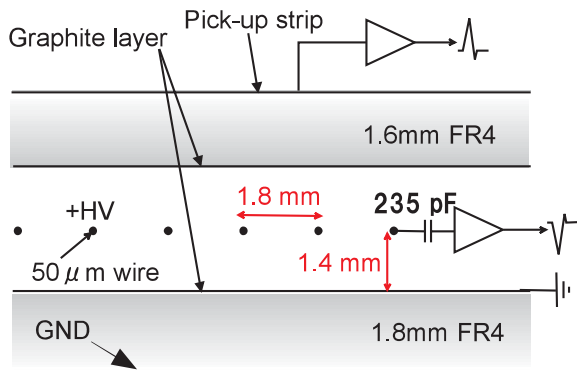


Fig. 3.4: TGC の構造 (断面図) [4]

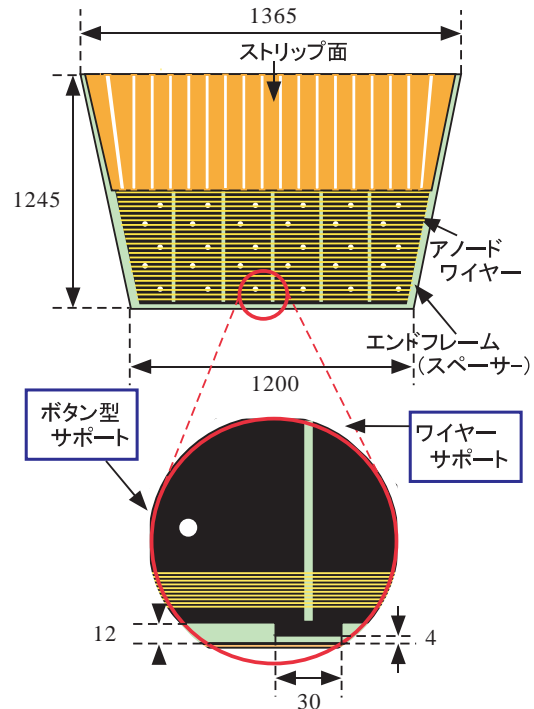


Fig. 3.5: TGC の構造 (平面図)

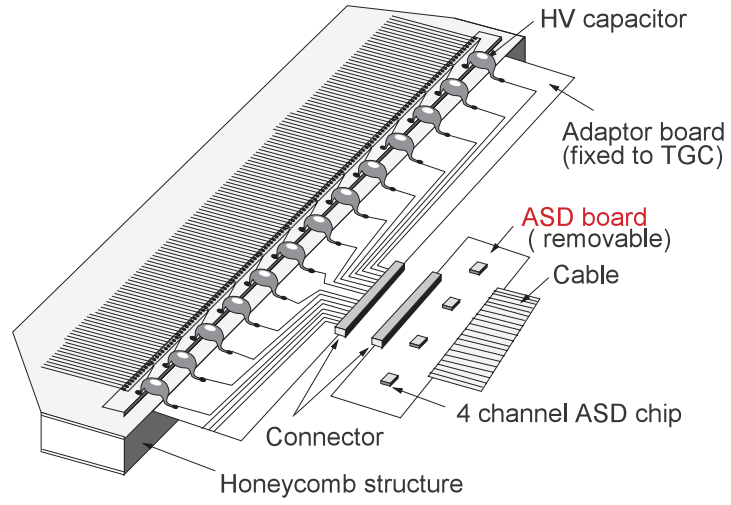


Fig. 3.6: Wire 方向の読み出し部分の構造 [4]

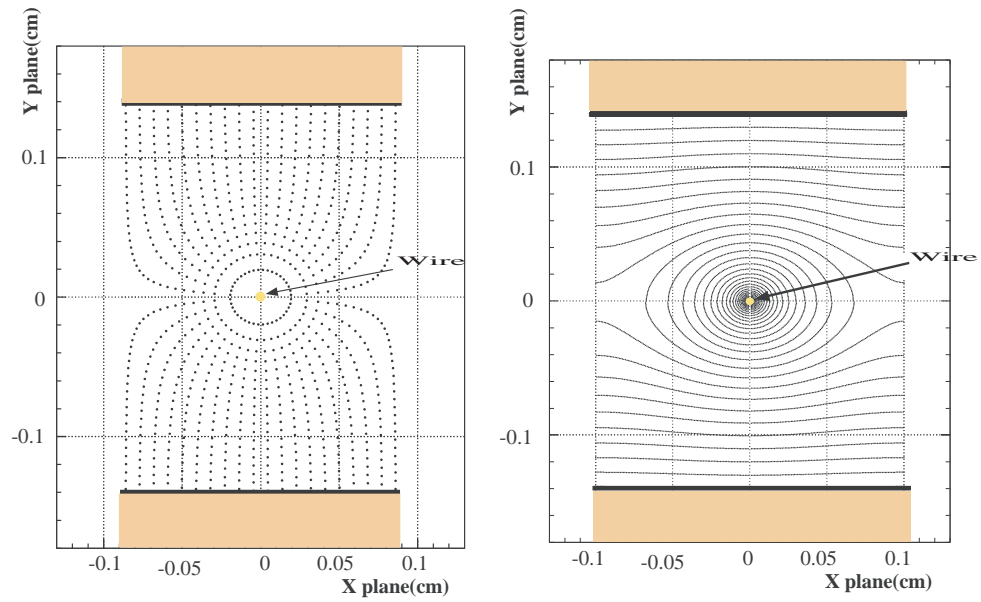


Fig. 3.7: TGC の電場 (左) ・ 電位 (右) 構造のシミュレーション [18]

### 3.3 TGCの製作

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。

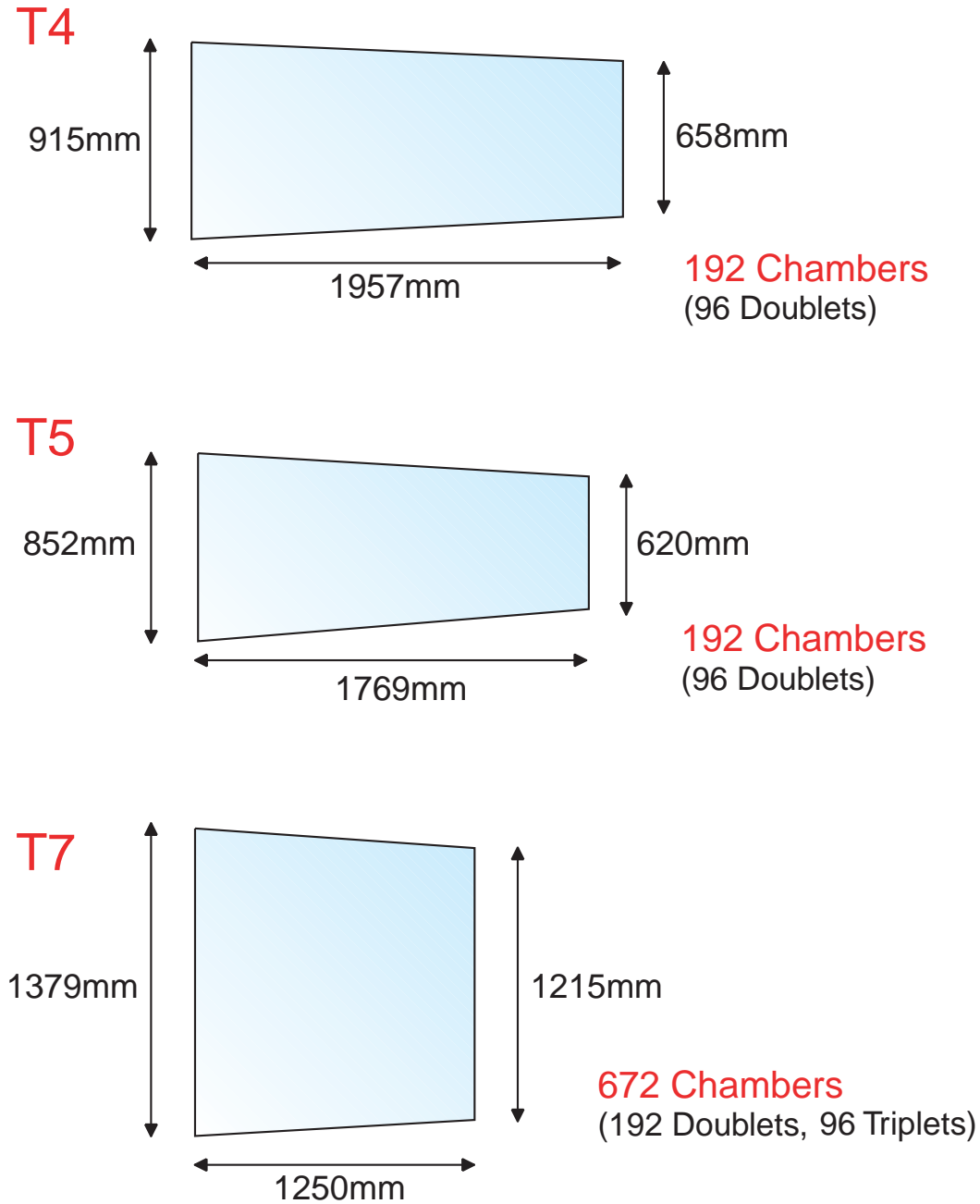


Fig. 3.8: 日本グループが製作する TGC のタイプと大きさ [16]

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。TGC の検査を行う上で、TGC の製作方法を知ることは非常に重要な事であるので、以下 TGC の製作工程について述べる。

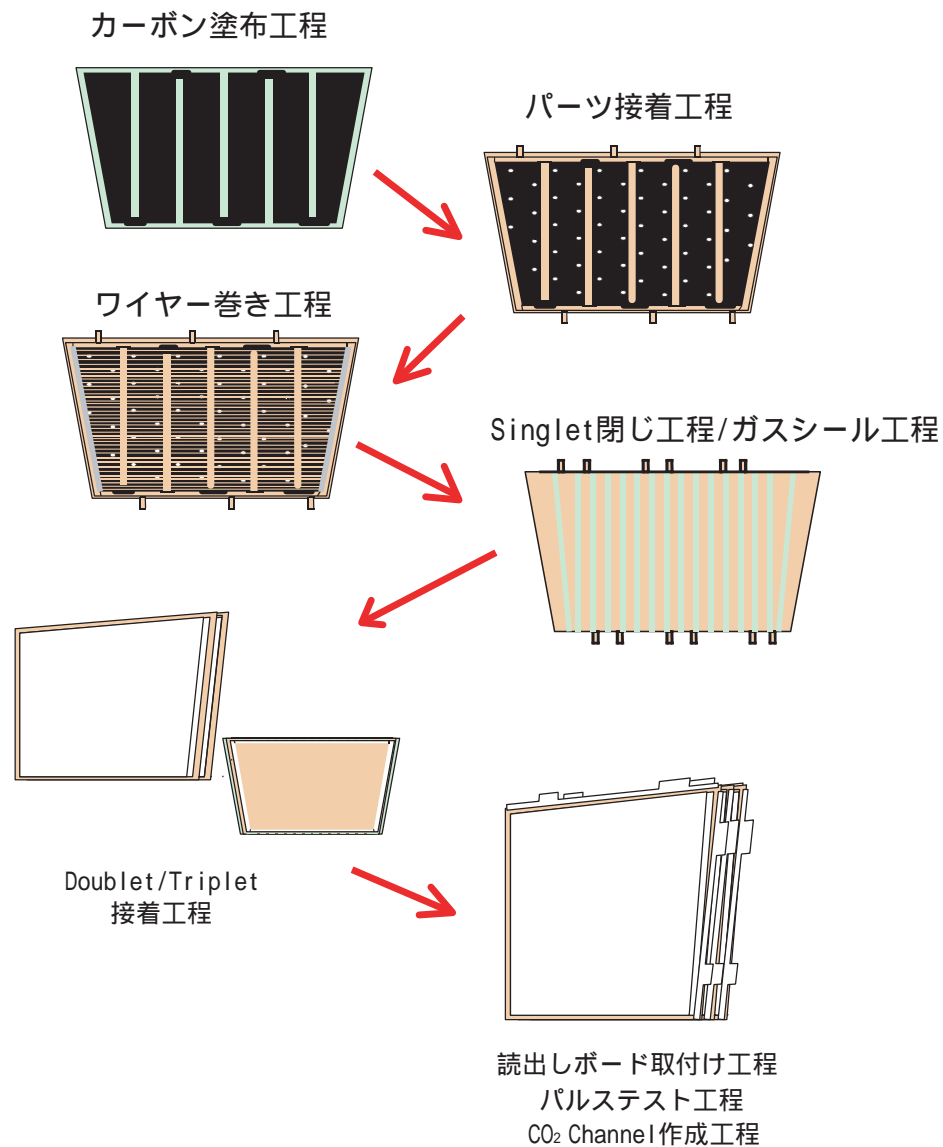


Fig. 3.9: TGC 製作工程 [21]

## 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、アラルダイト<sup>1</sup>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 分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

<sup>1</sup>2 液混合タイプのエポキシ系接着剤。最低硬化時間は 25 分の硬化温度で 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。

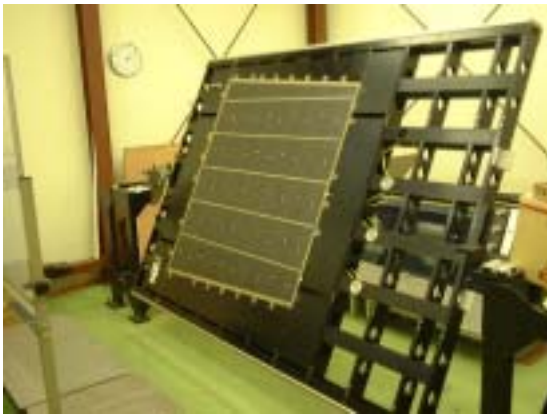


Fig. 3.14: ワイヤー巻き機



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 が印加できなかった場合、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。T7 タイプのみ Triplet が 96Units 製作される。この構造体には後述する  $CO_2$  Channel の Main 部分において  $CO_2$  が通るためのチューブが通される。FRP の角柱は Unit の構造体として用いられ、その部分に支持用アルミブロックを装着し、TGC Unit を支持する。今後、Unit という単位は Doublet または Triplet モジュールに対し用いる。



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 グループとし計 23 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 チャンネルとして計 32 チャンネルの読み出しチャンネルとなる。各ワイヤークラップやストリップと読み出しボードの間には、HV 電源からの高周波成分を取り除くためのコンデンサ (470pF) が取り付けられる。読み出しボードには後述する ASD の取り付け用コネクタが付いており、検査や実際の実験時にはここへ ASD を取り付け読み出す事となる。



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)。



Fig. 3.22: パルステスト



Fig. 3.23: HV 焼き出し

#### 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。TGC の周囲をモールドする際に使用している接着剤 (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 があつた場合、n-Pentane が外部に漏れないよう、2 重に密閉する役割も持つ。 $CO_2$  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。



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。

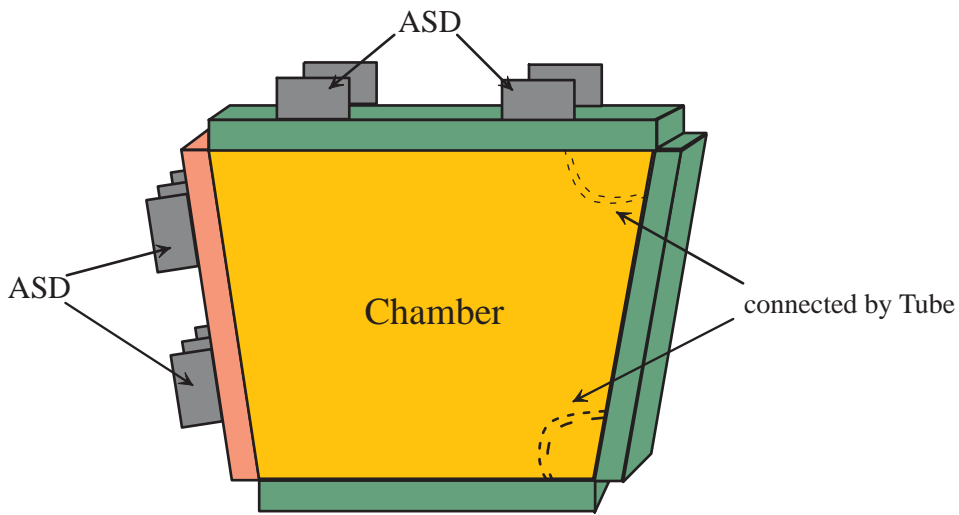


Fig. 3.26: CO<sub>2</sub> Channel 模式図 (緑色を Main、赤色を Side と呼ぶ)

### 3.3.2 製作スケジュール

2007 年の ATLAS 実験の開始に向けて、スケジュールは綿密に立てられており、TGC の製作、検査は全てこれに従わなければならない。Fig.3.27 に TGC の製作から ATLAS 検出器への設置までのスケジュールを示す。日本グループは 2000 年 9 月より T7 Triplet の製作を開始した。カーボン塗布を除く工程に対しては作業員を雇い、現在目標である 10Singlet/1week のペースで生産が行われている。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。2002 年末現在、T7 Triplet の製作は終了しており、T7 Doublet の製作が行われている。T7 Triplet、T7 Doublet の製作進捗を各工程ごとに Fig.3.28、Fig.3.29 に示す。

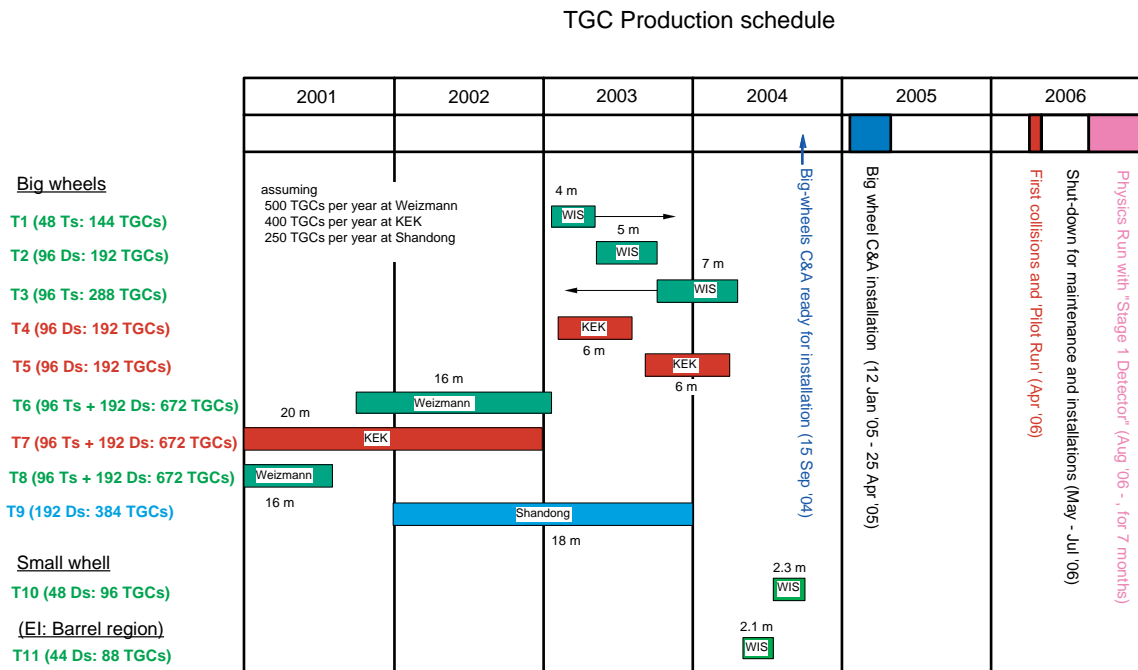


Fig. 3.27: TGC Production Plan



TGC Type	枚数	製作期間
T7 Triplet	96 Units	2000年9月～2002年12月
T7 Doublet	192 Units	2002年4月～2003年4月
T4 Doublet	96 Units	2003年4月～
T5 Doublet	96 Units	～2004年3月

Table 3.4: 量産枚数と期間 (予定含む)

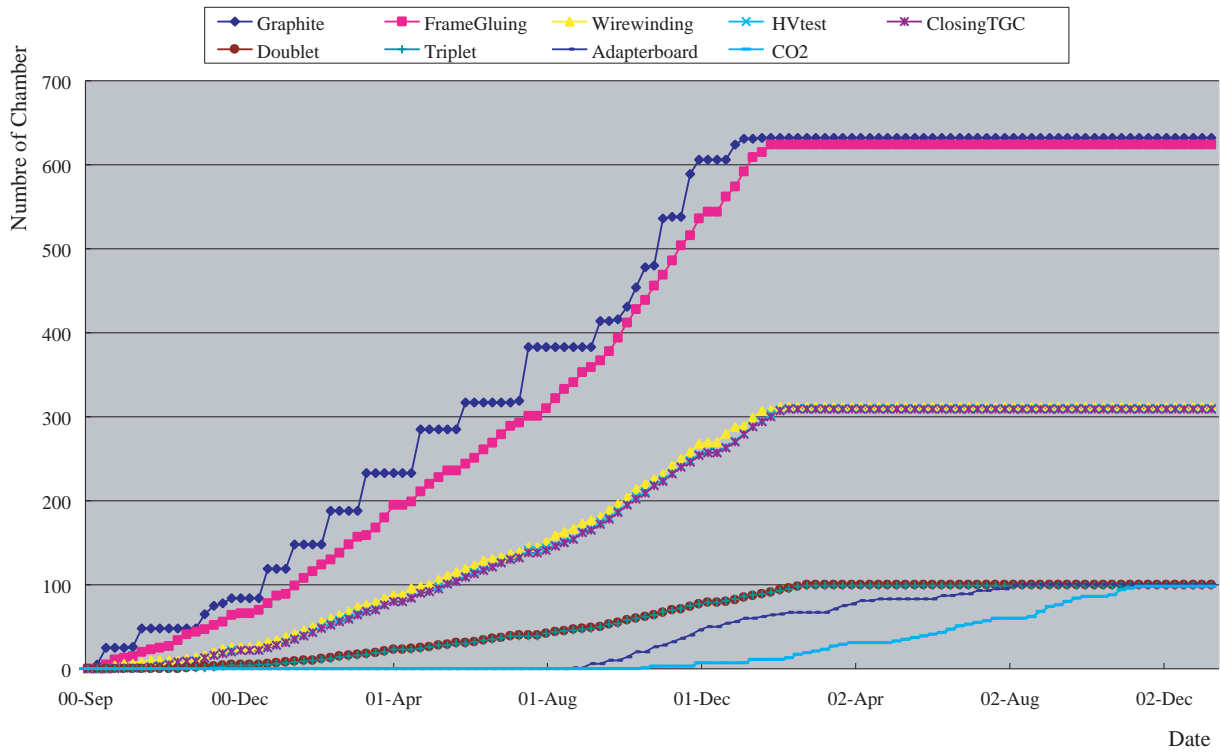


Fig. 3.28: T7 Triplet タイプの製作

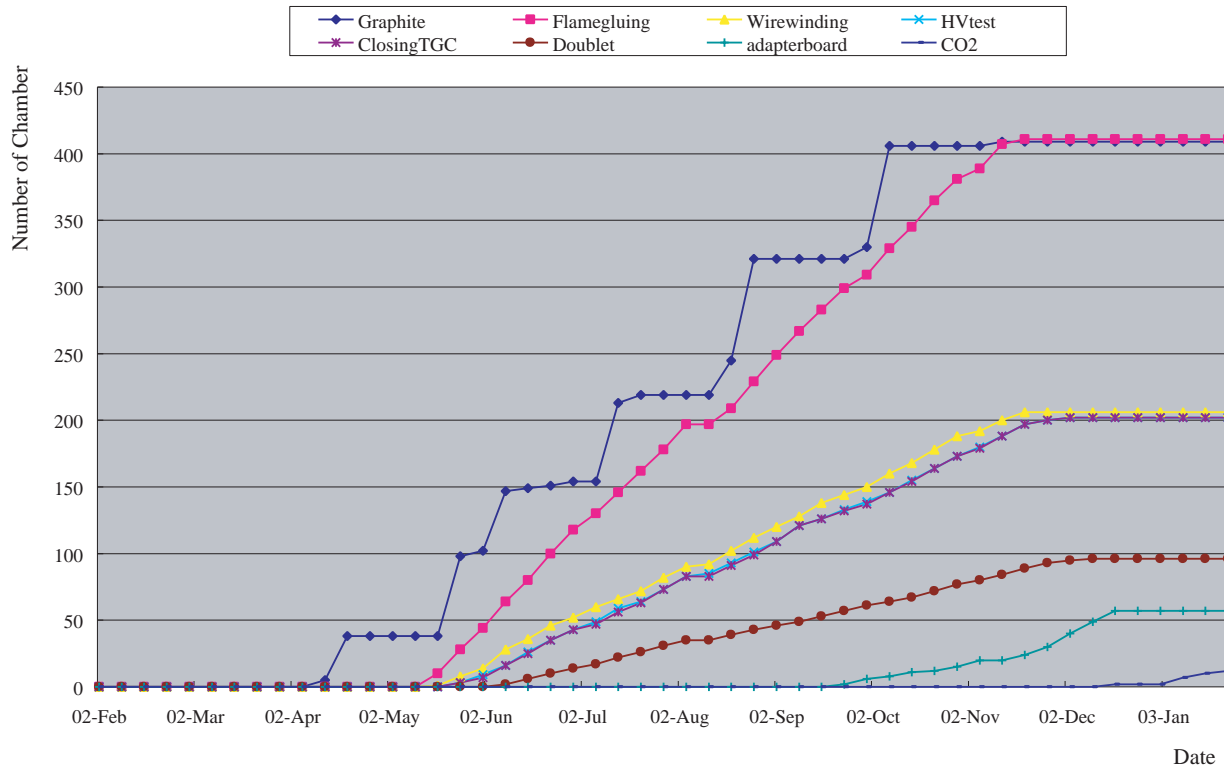


Fig. 3.29: T7 Doublet タイプの製作

## 3.4 TGC の検査

### 3.4.1 目的

前節で述べたように、我々日本グループでは KEK 富士実験室にて TGC の製作を行っており、2004 年 3 月までに 500Units 製作される。それら製作された TGC は CERN へ輸送される前に全てその動作を確認してから輸送しなければならない。ここで言う動作の確認とは、

- 不感領域を除いた検出効率 (Efficiency) 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。

を満たしているかを確認する事である。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設置される。それゆえ製作された各 TGC では全面に渡り検査を行い、局所的に検出効率が低下していないかどうかを全面に渡り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り検査を行う。宇宙線を用いる理由は、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、広い範囲に一樣に振り注ぐミュオンを使う事が出来るからである。Fig.3.8 に示したように、検査される TGC の面積は約  $2m^2$  と大きなものであるので、大規模な専用設備を構築する必要があった。

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  $CO_2 + n\text{-Pentane}$  の混合ガスを用い、3.1kV での漏れ電流 (Leak Current<sup>2</sup>) を測定する高電圧印加試験 (HV Test) も行う。

### 3.4.2 検査スケジュール

3.3.2 で述べたように、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、2004 年 10 月末には全ての TGC の検査を終了しておかなければならない。Table3.5 に各 TGC の検査予定期間をまとめ、この検査期間より要求される、各検査の目標 Unit 数を Table3.6 にまとめる。検査が終了する 2004 年 8 月までの約 2 年間は毎日検査が行われ、検査期間中は安定に動作するシステムの構築が要求される。

TGC タイプ	検査期間
T7 Triplet	2001 年 11 月 ~ 2003 年 4 月
T7 Doublet	2003 年 5 月 ~ 2003 年 12 月
T4/T5 Doublet	2004 年 1 月 ~ 2004 年 8 月

Table 3.5: 検査スケジュール (予定含む)

TGC タイプ	CosmicRay Test	HV Test
T7 Triplet	8Units/2weeks	2Units/3days
T7 Doublet	12Units/2weeks	4Units/3days
T4/T5 Doublet	8Units/1weeks	4Units/3days

Table 3.6: 各検査の目標 Unit 数

<sup>2</sup>4.2 参照

## 4 検査設備の構築

前章までに、TGC の概要と製作から実機取り付けまでの流れを述べ、そこから検査の必要性和検査すべき項目、ならびに目的を述べた。本章では、KEK 富士実験室 B4 エリアで製作された TGC を神戸大学で検査するための設備について述べ、それぞれの工程で検査される項目と合否判定の基準について述べる。

### 4.1 CosmicRay Test

TGC の検査の中で、最も重要な検査が、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

- TGC 全面に渡り検出効率 (Efficiency) が 99%以上であるかどうか
- 信号到達時間が、LHC のバンチ間隔である 25nsec 以下であるかどうか

が検査される。

Fig.4.1 に、宇宙線検査を行うための 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 が配置され、その間に宇宙線の飛跡を再構成する (Tracking) ための円筒形の Drift Tube が配置されている。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)。設備は T7 Triplet タイプで同時に最大 8Units の検査が可能となっている。

#### 4.1.1 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、下面には 90mm × 1300mm × 2.6mm の大きさのものが各 22 本ずつ並べて配置されており、日本国内で製作される全てのタイプの TGC を覆うことが可能となっている。

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 の両側からのシグナルのコインシデンス (論理積) を取る事により、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、専用開発された Trigger Module によりまとめて行われる。

ここで、このトリガースキームでの Trigger Rate を計算により見積もってみる。鉛直方向における 1GeV/c 以上の宇宙線ミュオンの Flux は、地表上においておよそ 70 [ $m^2/sec/sr$ ] であり [9]、上下の Scintillation Counter の距離が 2.6m、およその面積がそれぞれ  $2m^2$ 、 $2.5m^2$  であることを用いると、Trigger Rate は

$$70[m^2/sec/sr] \times \frac{2[m^2]}{(2.6[m])^2} \times 2.5[m^2] = 51.8[Hz] \quad (4.2)$$



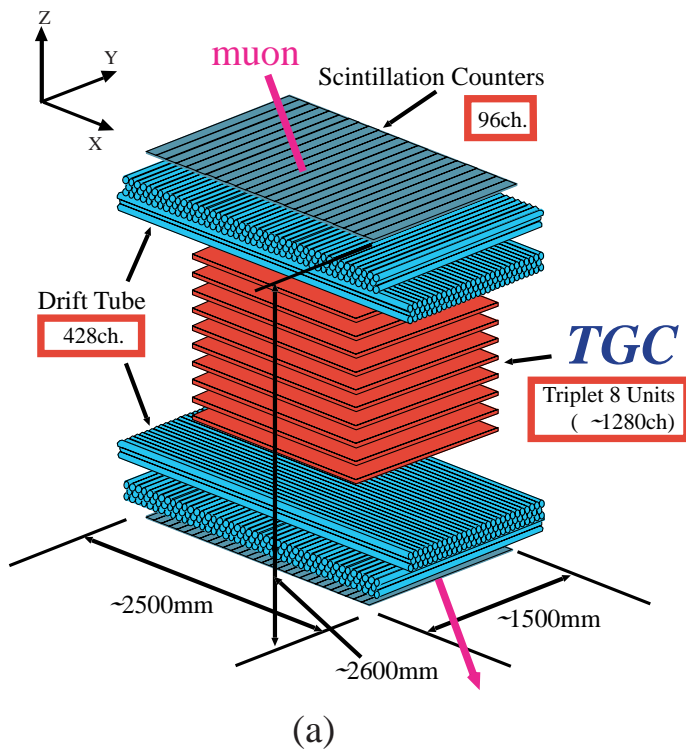


Fig. 4.1: CosmicRay Test 用検査設備の模式図 (Fig.(a)) と実際の検査用架台 (Fig.(b))

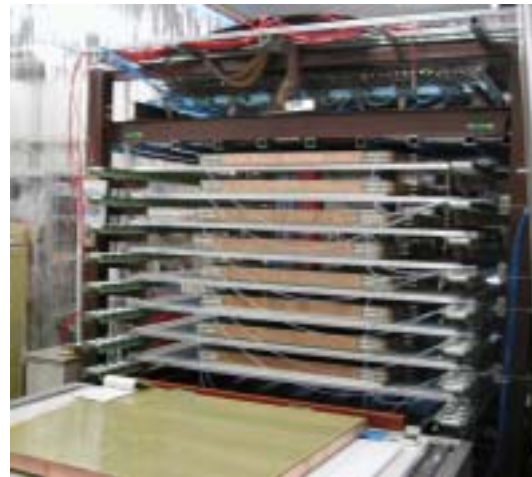
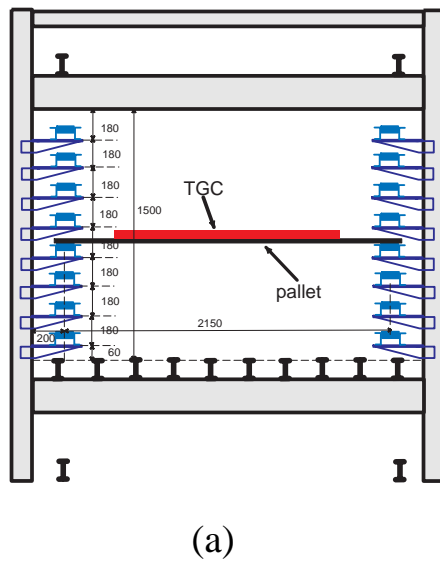


Fig. 4.2: y 方向からみた検査設備の図 (Fig.(a)) と 8Units の検査を行っているところの写真 (Fig.(b))

と見積もられる。実際の Trigger Rate はおよそ  $20[\text{Hz}]$  で、 $1/2$  程度となっておりシステム自体には大きな問題が無いと考えられる。より精密な比較は立体角を数値積分で計算し、さらに宇宙線ミュオンの分布が  $\cos^2 \theta$  などに依存する事を考慮してモンテカルロ法によるシミュレーションを行う必要がある。

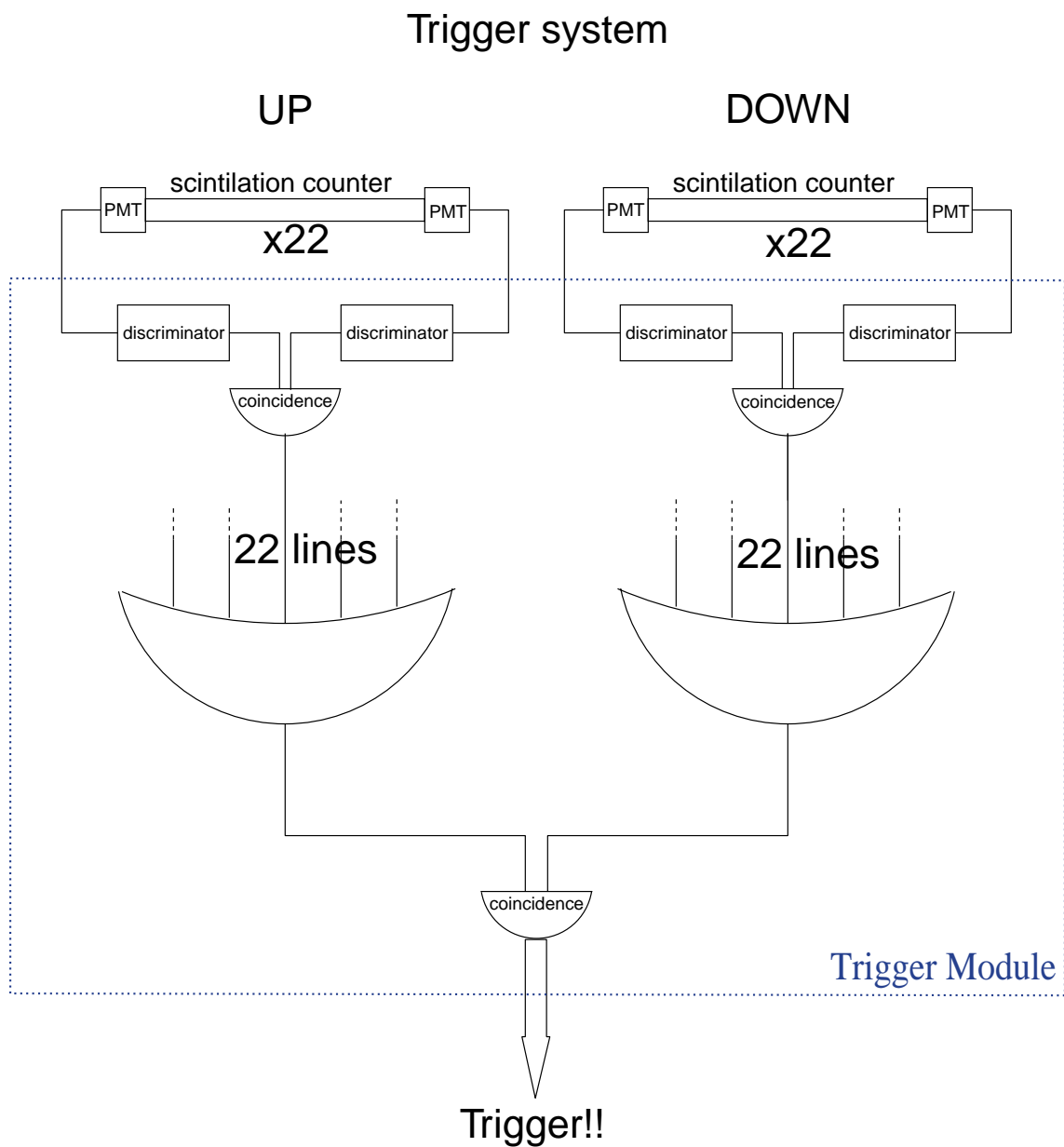


Fig. 4.3: トリガースキーム

## 4.1.2 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) を行うことである。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。

### 4.1.2.1 構造と検出原理

Drift Tube は円筒形の比例計数管であり、シグナル発生の原理は TGC と同じである。Drift Tube の断面図を Fig.4.4 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。宇宙線ミュオン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オンのエネルギーに寄らず全てのミュオンの検出を行うためである。Fig.4.5 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。図からわかるように、Ar + ethane はある強さの電場を超えると Drift Velocity は電場に寄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、その内部の電場、電位はそれぞれ

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \quad (4.3)$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a} \quad (4.4)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} \quad (4.5)$$

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 4.3 より  $E(r)$  を求める事が出来る。 $r$  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.4.5 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、印加電圧は 3.5kV を用いると決めた。

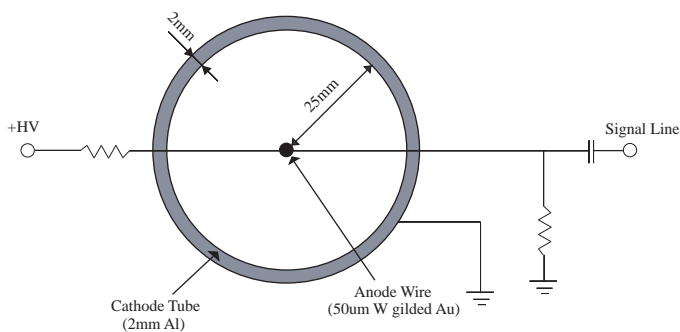


Fig. 4.4: Drift Tube の断面

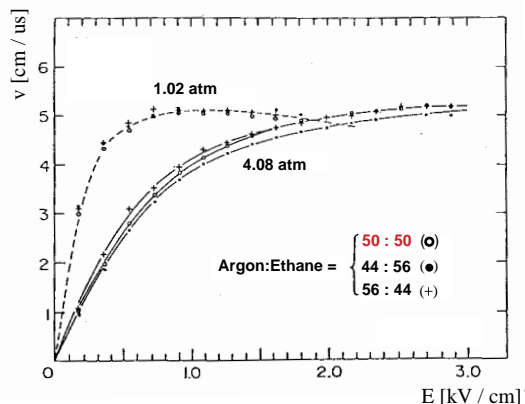


Fig. 4.5: 電場の強さと Drift Velocity の関係

#### 4.1.2.2 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 層に依積みすることで 2 次元で Tracking を行うことができ (Fig.4.6)、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。

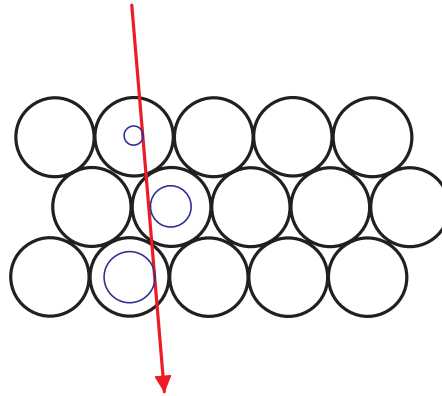


Fig. 4.6: 2次元の Tracking

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

$$X(t) = P_2 t^2 + P_1 t \quad (4.6)$$

$$(4.7)$$

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.4.7 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.4.8 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 (4.6) 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

$$P_1 = 0.556 \times 10^{-2} [cm/ns^2], P_2 = -0.311 \times 10^{-5} [cm/ns] \quad (4.8)$$

と求められた。

(4.8) のパラメータを用い、3 層依積みされた 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.4.9)。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。

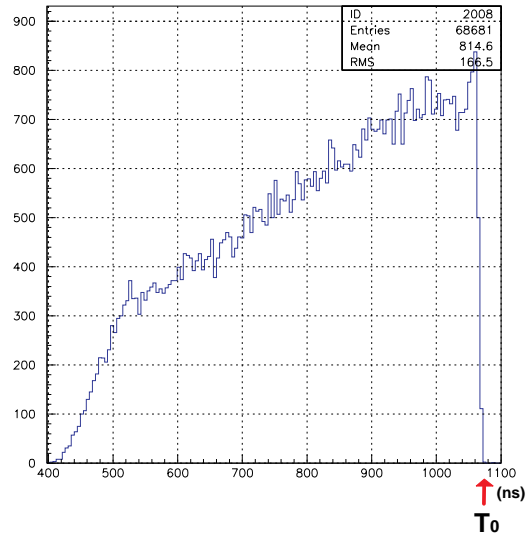


Fig. 4.7: Drift Tube のヒットの時間分布

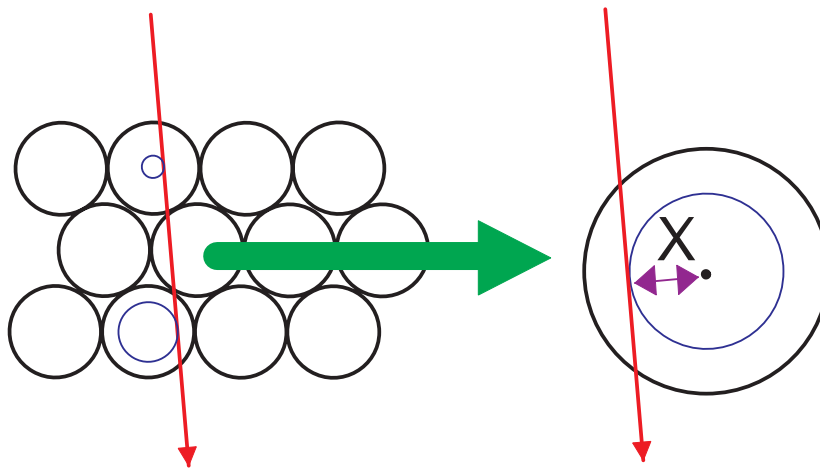


Fig. 4.8: X の決定

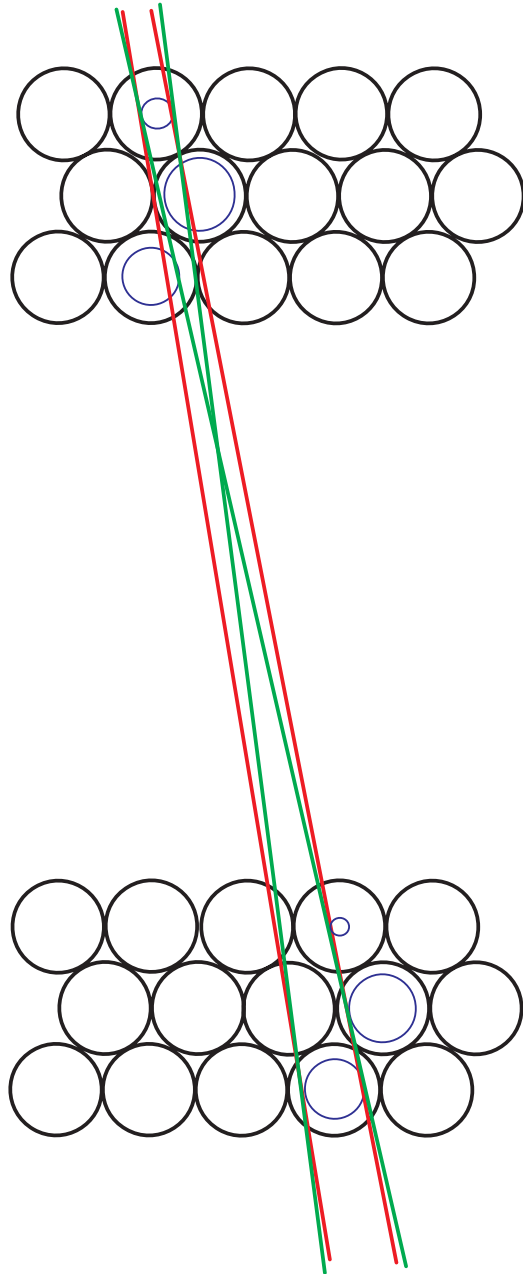


Fig. 4.9: Track の選択

### 4.1.3 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(DataAquisition) 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 が宇宙線ミュオン通過を検知し、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。

#### 4.1.3.1 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.4.10 に示す。

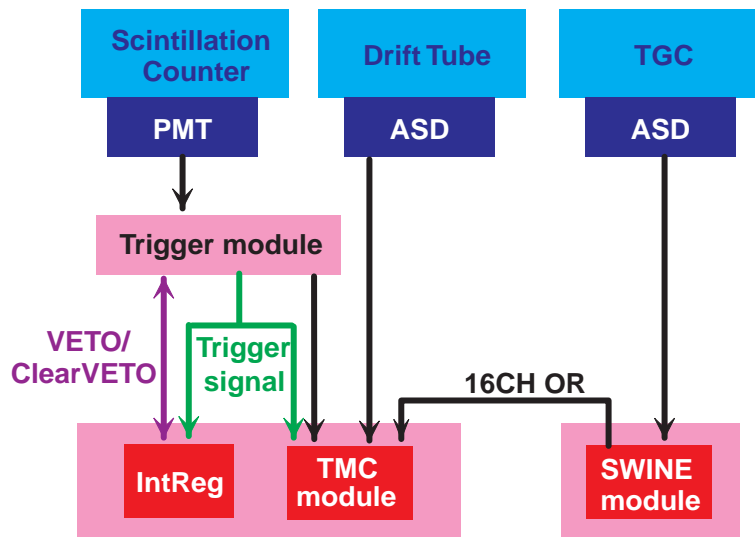


Fig. 4.10: 検出器とエレクトロニクスの構成

- ASD(Amp Shaper Discriminator)

ASD(Fig.4.11) 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。プリアンプとして  $0.8V/pc$  の電流入力アンプがあり、次に Base-Line Restoration 回路、8 倍のメインアンプ、threshold 電圧で弁別を行うコンパレータ - 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. 4.11: ASD(シールド無し)

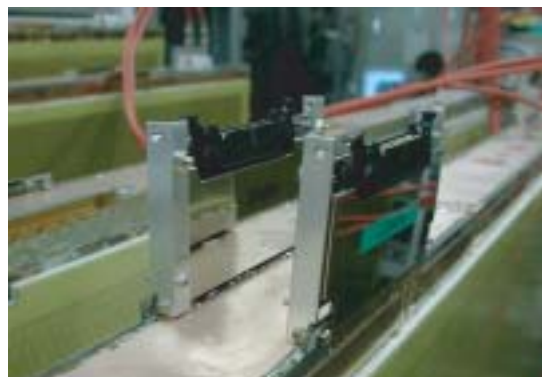


Fig. 4.12: ASD(シールドを付け TGC に実装)

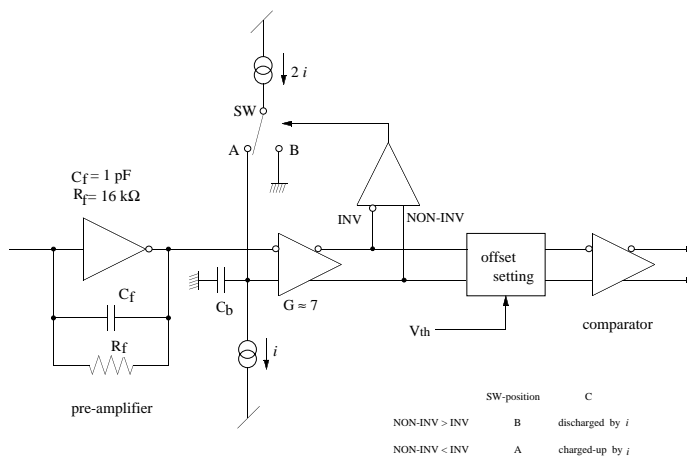


Fig. 4.13: ASD チップのダイアグラム [4]

- 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。

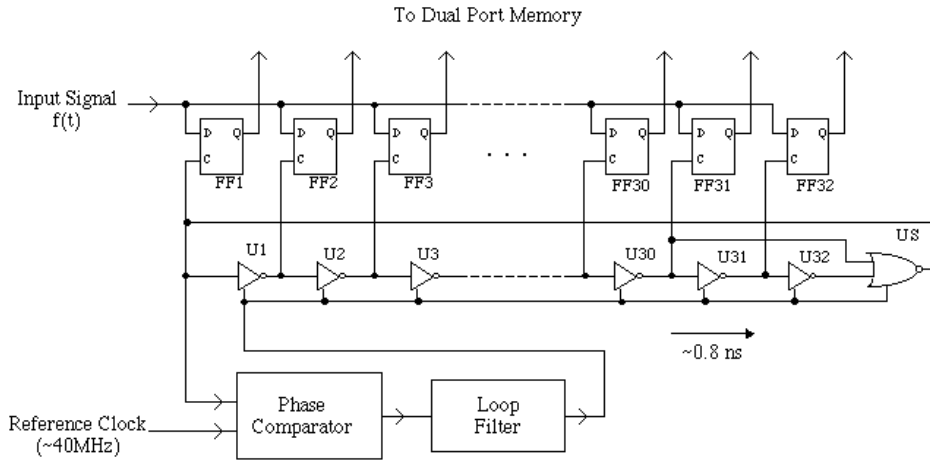


Fig. 4.14: TMC の原理図

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。

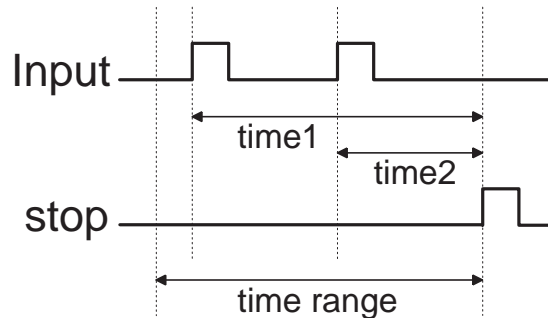


Fig. 4.15: TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode) [16]

検査設備では Drift Tube は全部で 428 本、Scintillation Counter は 44 本あり、各 1 本ずつ 1 チャンネルとして読み出すため、32CH の TMC モジュールが 16 台必要となる。さらに、TGC の 16 チャンネル分 (ASD1 枚に相当) の論理和をとったものを TMC で読み出すため、T7 Triplet を 8 台検査する場合、32CH の TMC モジュールが 3 台必要となる。TMC モジュールから読み出されるデータ量は、宇宙線ミュオンが上から下へ突き抜けたとして、Scintillation Counter のヒット数は 2 チャンネル、Drift Tube のヒット数は全部で 12 層あるので 12 チャンネルある。TGC のヒット数は 1 Triplet でワイヤー、ストリップ合わせて 5 チャンネルあり、8 台検査するため 40 チャンネルとなる。

- 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。

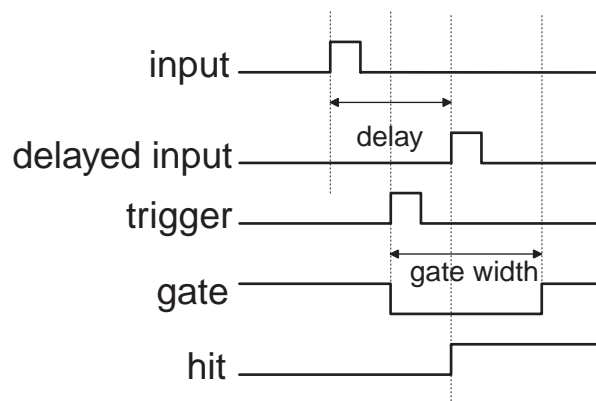


Fig. 4.16: SWINE におけるシグナルのタイミング [16]

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。

T7 Triplet を 8 台検査する場合、TGC の全ての読み出しは 1088 チャンネルとなる (ASD ボードは 10 枚 × 8 台で 80 枚必要となる)。このとき、必要な HOG モジュールは 20 台 (ワイヤーグループに 12 台、ストリップに 8 台) となる。

#### 4.1.3.2 コンピュータ環境

前述の電子学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。

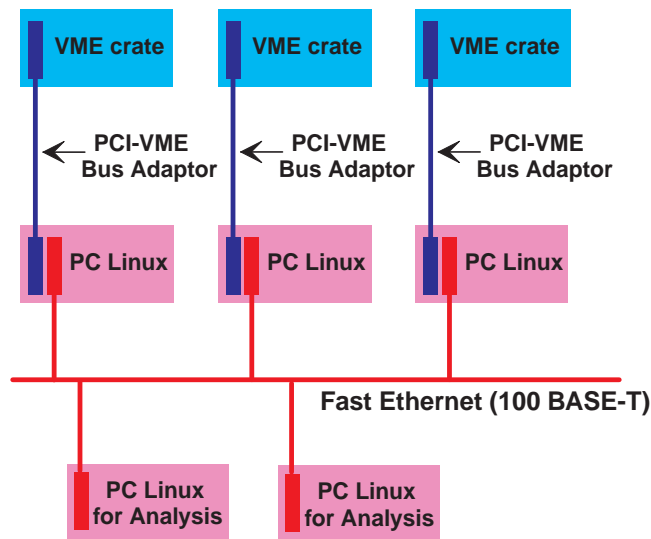


Fig. 4.17: DAQ/解析用 PC 環境

#### 4.1.4 データ解析

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。

#### 4.1.5 Track Constraint

Tracking プログラムにより再構成された宇宙線ミュオンの Track が、正しく TGC を通過しているかどうかを TGC のヒット情報を使って Track のに制約を加える。ここで、位置精度の悪い Track のカットは行わな

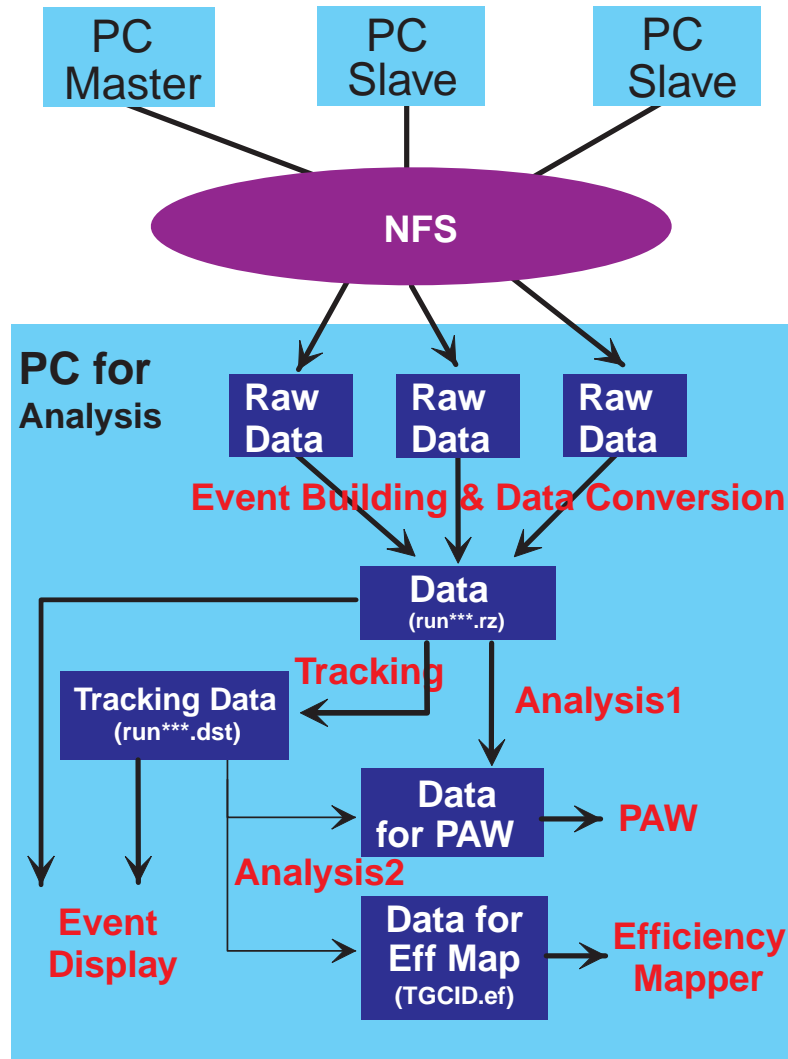


Fig. 4.18: データフローチャート (赤字: プログラム、() 内: 生成されたファイル)

い。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、かつ宇宙線ミュオンが複数の TGC を通過した時に全くヒットが無いという確率は限りなくゼロに等しい。したがって、自分自身以外のワイヤー、ストリップそれぞれに対して必ずいくつかのヒットが存在するという要求を加えればよいと考えられる。Fig.4.19 に、横軸に要求するヒット数、縦軸にその条件で得られた Track 数 (右側) と、その Track を用いて算出した、ある TGC の不感領域を除いた Efficiency (左側) をプロットしたものを示す。この図からわかるように、1 枚と半数には差が見られるが、0 枚と 1 枚に大差は無い。しかし、0 枚の場合、正確に TGC の位置を検出しなければならず、解析プログラムを 2 回以上走らせる必要があり、解析スピード向上のために 1 枚を要求すると決めた。この制約により、再構成された Track のうち、約 40% が Track として検出効率の計算に用いられている (全イベントの約 30% に相当)。

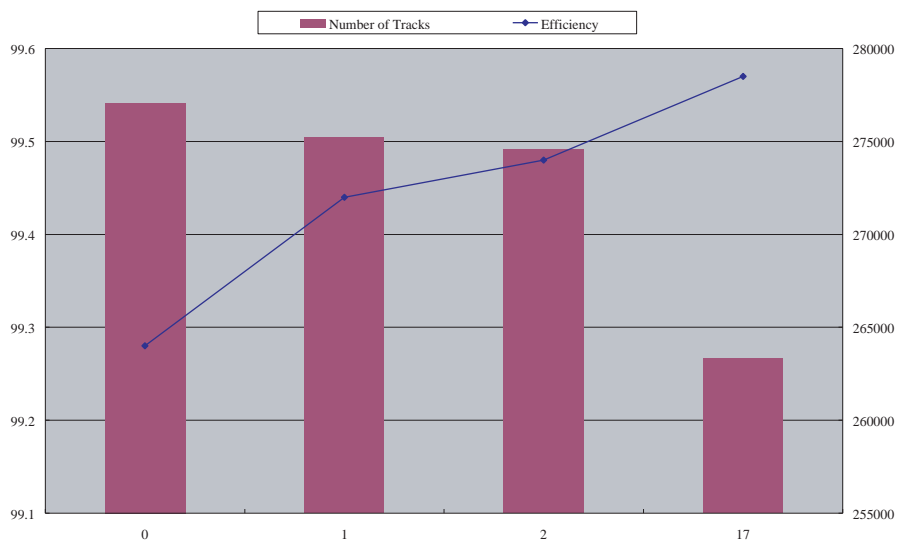


Fig. 4.19: Track Constraint による Efficiency と Track 数の変化

#### 4.1.6 データの確認

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.4.20)
- (2) 上下 XY 方向 3 層それぞれの Drift Tube の profile と multiplicity<sup>1</sup> 分布 (Fig.4.21、 Fig.4.22)
- (3) TGC の各層の wire、及び strip の profile (Fig.4.23)

<sup>1</sup>1 つのトリガーシグナルに対し、TMC の Time Window (Time Gate) 内に入って来たシグナル数の事。同時ヒット数。

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。

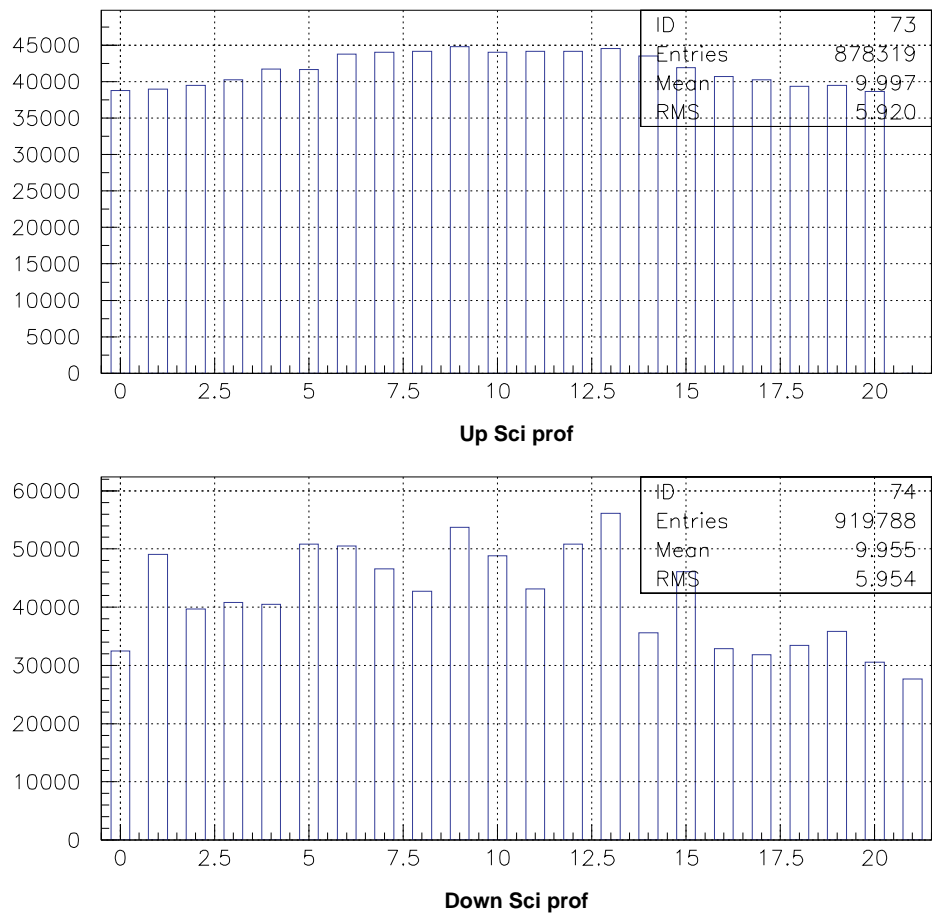


Fig. 4.20: Scintillation Counter の Profile

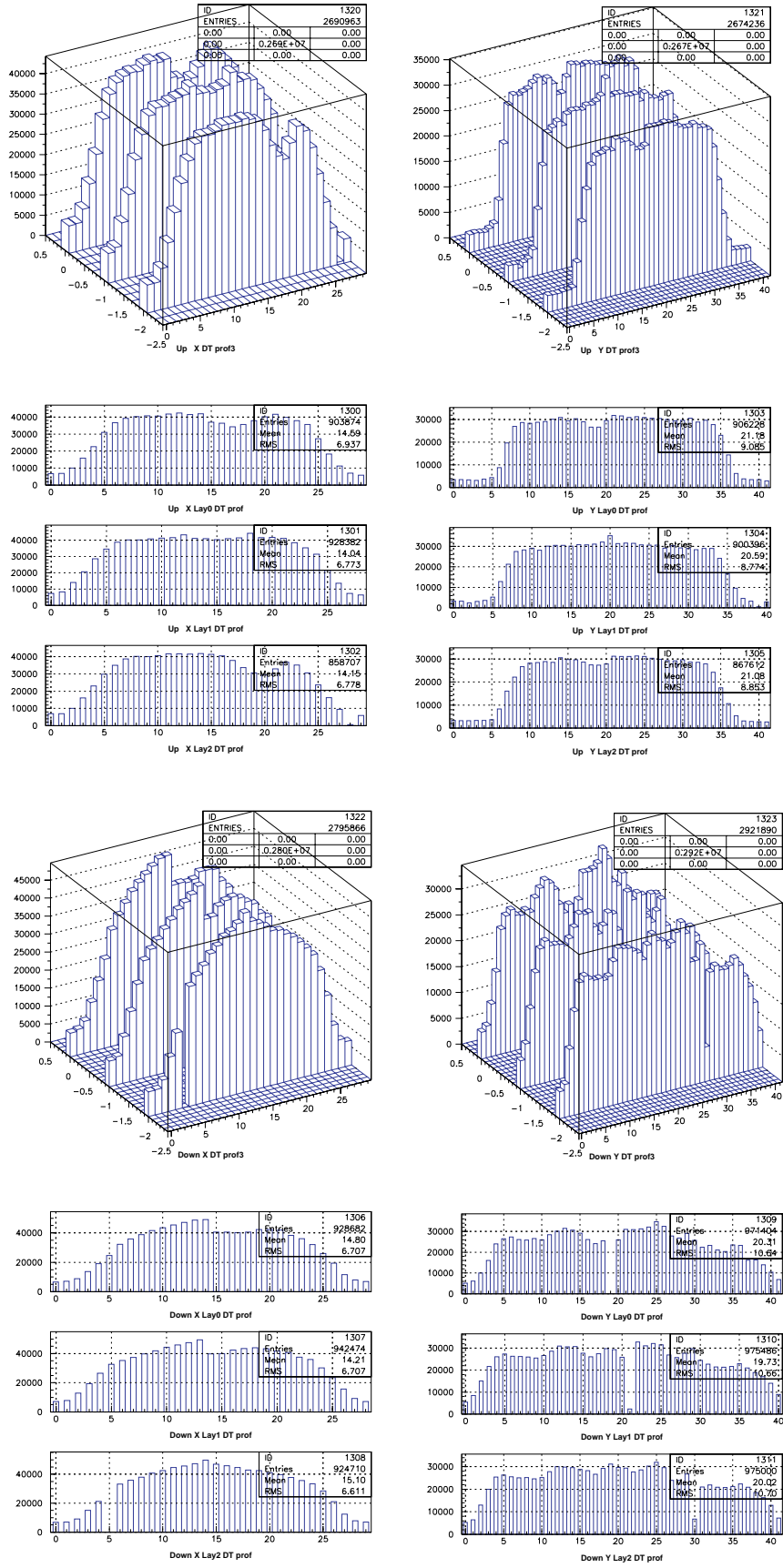


Fig. 4.21: Drift Tube  $\mathcal{O}$  Profile

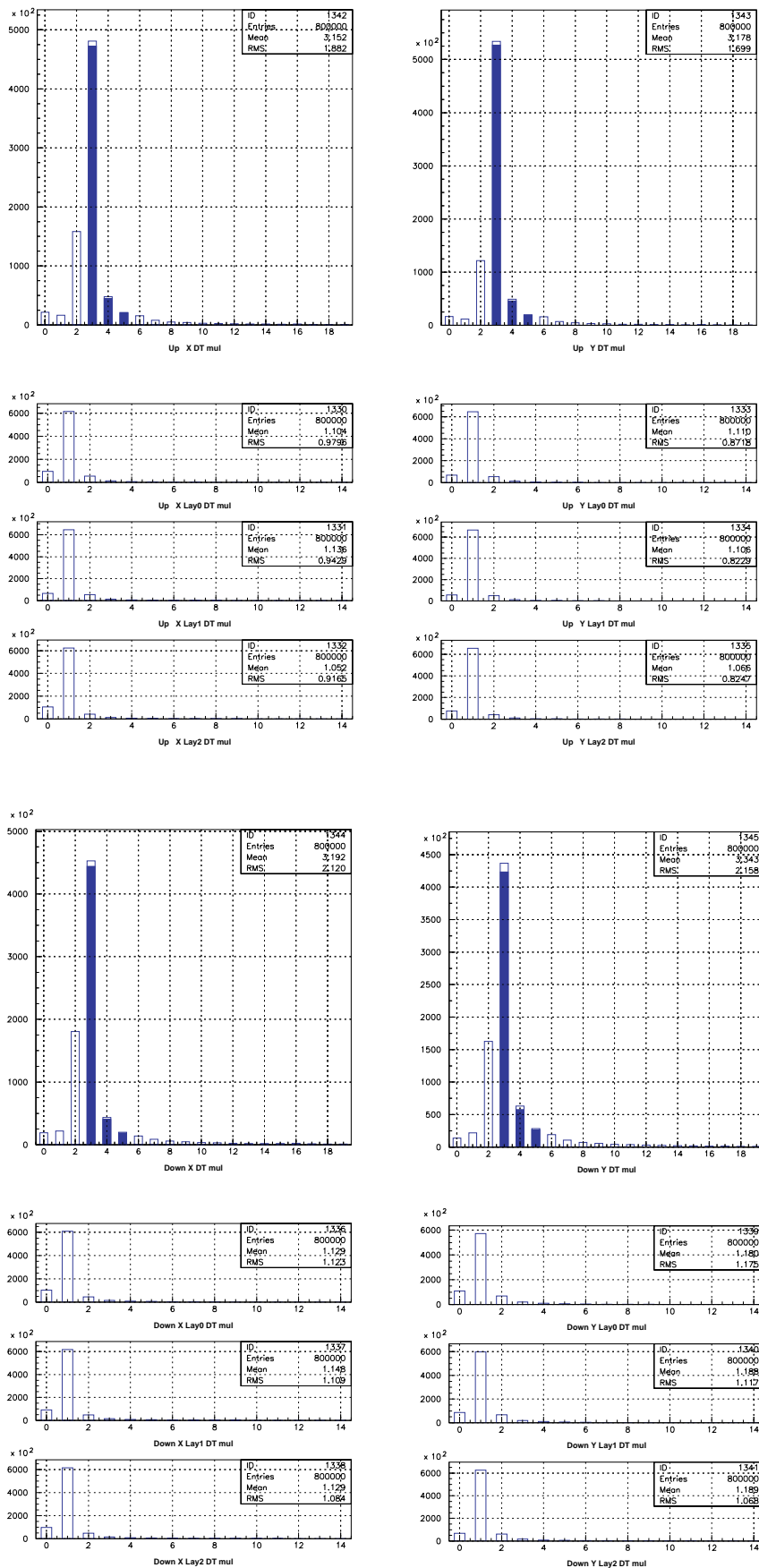


Fig. 4.22: Drift Tube の multiplicity 分布



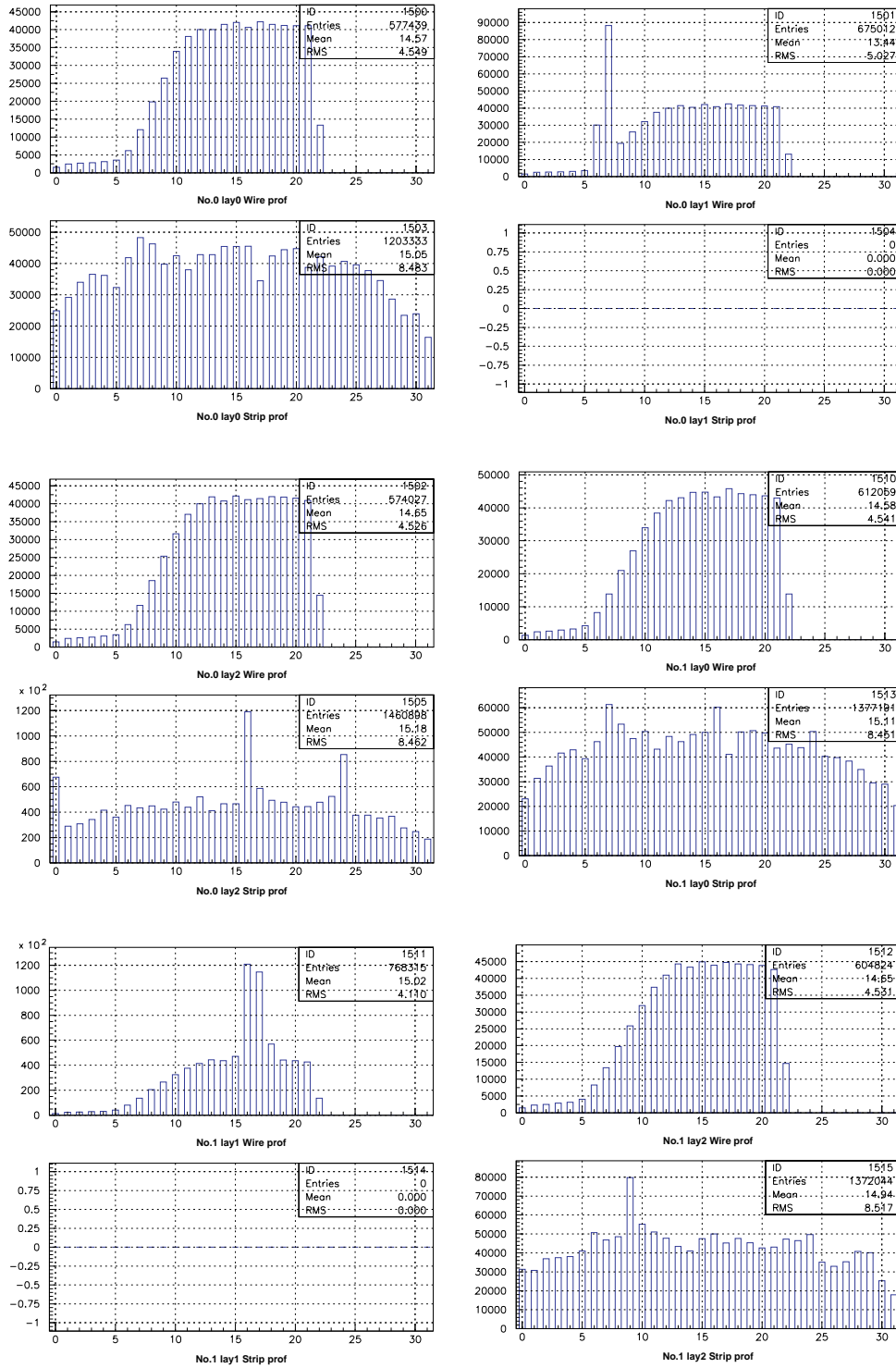


Fig. 4.23: TGC  $\phi$  Profile

### 4.1.7 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<sup>2</sup>、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。Fig.4.24 に Efficiency Map Display の画面とそれを用いて表示した Efficiency Map の一例を示す。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。

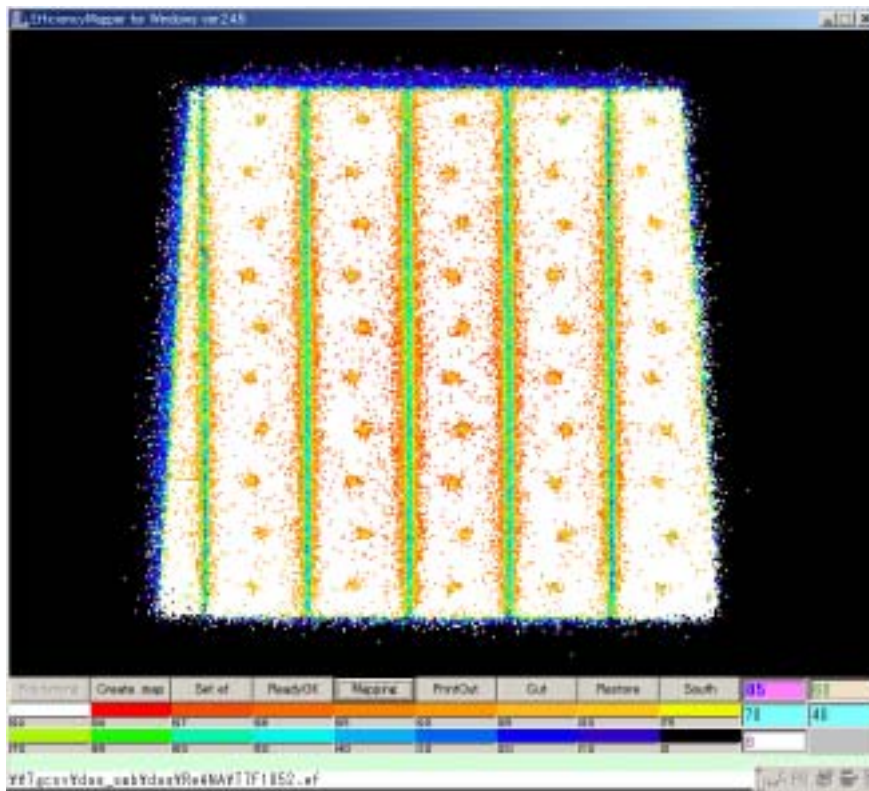


Fig. 4.24: Efficiency Mapper

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。

<sup>2</sup>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

#### 4.1.8 ガス供給・分配システム

これまでに述べた方法で、本検査の目的である Efficiency と Time Jitter を得るためのデータ収集および解析は可能となった。しかし、2週間にわたる検査期間中、TGC を安定に動作させるためには、安定したガスの供給が必要不可欠である。さらに、TGC はその製作方法から内圧の上昇に弱い構造となっている。したがって圧力に対する安全機構も必要である。これらの要請より、CosmicRay Test 専用のガスシステムを構築する必要があった。以下、これについて述べる。

##### 4.1.8.1 供給系

3章で述べたように、TGC には、 $CO_2 + n\text{-Pentane} = 55 : 45$  で混合されたガスが用いられる。CosmicRay Test で採用している混合方法は常温で液体である n-Pentane(沸点  $36.05^\circ\text{C}$ ) を、約  $40^\circ\text{C}$  に保たれた恒温槽に流し、そこへ気体の  $CO_2$  を流し込む。この際、流量は混合比率が  $55:45$  になるよう Mass Flow Controller を用いて調整を行う。配管図を Fig.4.25 に示す。図の中央にあるのが、深さ  $75\text{cm}$  のステンレス製の恒温槽で、右側から液体の n-Pentane を、左側から気体の  $CO_2$  を流入する。恒温槽内部には、直径  $1\text{cm}$  のガラス製ビーズが、底から約  $40\text{cm}$  のところまで詰められている。これは、液体の n-Pentane を気化させる際に出来るだけ表面積を大きくするためであり、熱電対はこのガラス製ビーズの温度を測定し、 $40^\circ\text{C}$  になるようサーモスタットとリボンヒーターにより制御される。n-Pentane は、常時容量  $10\text{L}$  の貯蔵タンクに貯蔵されており、タンクに  $CO_2$  で  $0.1\text{MPa}$  の圧力を加える事で恒温槽へと液体のまま送られ、前述の  $40^\circ\text{C}$  に保たれたガラス製ビーズに触れることにより気化させられる。貯蔵タンクと恒温槽の間には、インラインフィルター (Swagelok<sup>®</sup> 社製) と呼ばれるフィルターがあり、内部には直径  $0.5\mu\text{m}$ (平均値) の細孔の焼結金属製エレメントが入っている。n-Pentane を補充した際に入り込んでしまったわずかなゴミなどはここで除去される。

液体の n-Pentane は恒温槽内部の、液体の n-Pentane を  $1\mu\text{L}$  を気化させると標準状態で約  $0.195\text{cc}$  となるので、流し込む  $CO_2$  の流量を  $100\text{cc}/\text{min}$  に調整した場合、液体 n-Pentane の流量を  $420\mu\text{L}/\text{min}$  に調整することで  $55 : 45$  の混合比を実現することが出来る。

混合ガスの流量は、Mass Flow Meter の出力電圧を記録する事により、常時モニターされている (Fig.4.28 参照)。Mass Flow Meter は、同じ流量でも流される気体の分子量に応じて異なる電圧を出力する。その際に用いられる変換係数を Conversion Factor(以下 CF 値)と呼ぶ。供給系で使用されている Mass Flow Meter は  $N_2$  にて Calibration されており、 $N_2$  をその Mass Flow Meter の Full Scale で流した際、 $5\text{V}$  が出力される。

今、 $CO_2$  の CF 値を  $CF_{CO_2}$ 、n-Pentane の CF 値を  $CF_{np}$  とすると、 $CF_{CO_2} = 0.78$ 、 $CF_{np} = 0.22$  となることで、2種類の混合気体 A( $CF_A$ )、B( $CF_B$ ) の CF 値  $CF_{mix}$  は、

$$CF_{mix} = (A \text{ の比率}) \times CF_A + (B \text{ の比率}) CF_B \quad (4.9)$$

で計算される。 $CO_2 + n\text{-Pentane} = 55 : 45$  で混合された気体の CF 値 ( $CF_{MIX}$ ) は

$$\begin{aligned} CF_{MIX} &= 0.55 \times 0.78 + 0.22 \times 0.45 \\ &= 0.528 \end{aligned} \quad (4.10)$$

となる。また、混合ガスの実流量  $f_{MIX}$  [ $\text{cc}/\text{min}$ ] と出力電圧  $V$  の間には、Full Scale を  $F$  として

$$f_{MIX} [\text{cc}/\text{min}] = \frac{F \cdot CF_{MIX}}{5} V \quad (4.11)$$

という関係が成り立つ。今、 $F = 200 [\text{cc}/\text{min}]$  であるので、変換式は

$$\begin{aligned} f_{MIX} [\text{cc}/\text{min}] &= \frac{200[\text{cc}/\text{min}] \times 0.528}{5} V \\ &= 21.12V \end{aligned} \quad (4.12)$$

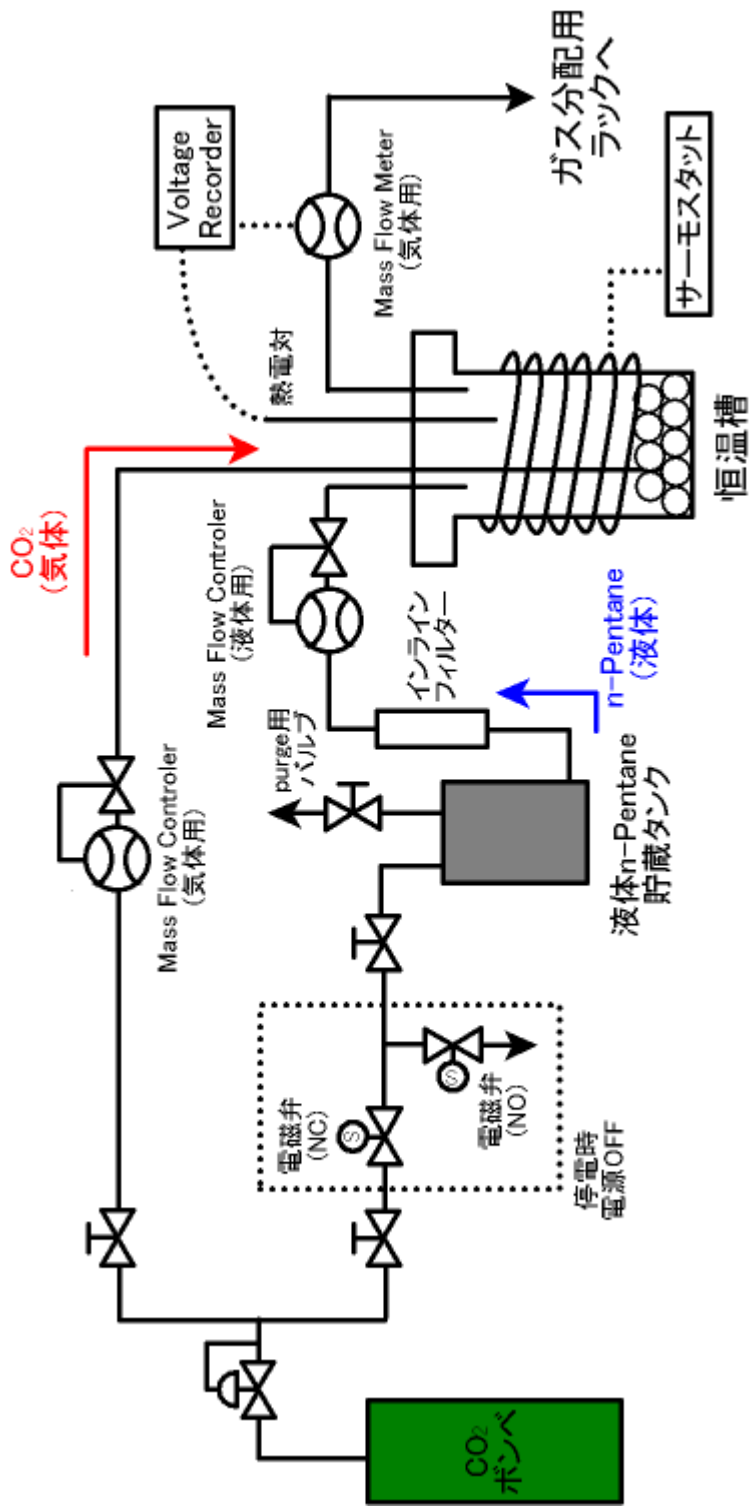


Fig. 4.25: ガス混合システム

となる。式 (4.12) を用いる事により、モニターしている *Mass Flow Meter* の出力電圧から実流量を計算する事が出来る。Fig.4.28 の結果は、上記の計算式を用い流量に変換した後の値をプロットしたものである。このグラフより、このシステムにより安定にガスが供給されている事がわかる。

#### 4.1.8.2 分配系

先に述べたように、量産工程において TGC は全て接着剤を用いて貼り合わせる事により製作されているので、内圧の上昇に対し非常に弱い構造となっており、圧力限界は約  $600Pa$  と見積もられている。そのため、ガスを供給し検査するそれぞれの TGC へガスを分配する際には、 $600Pa$  以下の低圧で分配しなければならない。安全を考え  $300Pa$  以下で行う設計をした。このような低圧でガスを各系統に均等に分配する場合、各系統毎の配管や TGC の抵抗 (コンダクタンス) の影響を大きく受け、分配するのが困難である。この問題の対策として、各 TGC の下流にオイルバブラーを置き、そこへシリコンオイルを数 mm 入れることで系統毎のコンダクタンスの差を無くす方法を採用した。分配後の流量は、KOFLOK 社の *Mass Flow Meter* (3080 シリーズ) を用いモニターされている。Fig.4.29 にその一例を示す。ここで用いられている *Mass Flow Meter* も式 4.12 を導いたのと同じ方法で、電圧-流量変換を行う事が出来るのだが、ここでは各系統の流量の絶対値ではなく、相対値が重要となってくることから、特に変換は行っていない。また、出力電圧の範囲が、各系統で異なるのは、Full Scale の異なる *Mass Flow Meter* を用いているからである。これより、各系統に差はあるものの安定に分配がされていると言える。

混合ガスを供給・分配する際、室温や配管の温度が  $0.5$  気圧の n-Pentane の沸点である  $14$  を下回ると、n-Pentane が再液化してしまい配管を詰まらせたり、またその他の原因で正常にガスを供給・分配出来なくなったりして、内圧が上昇する場合がある。そのような場合に対する過圧防止システムとして、山本電機製作所製のダイアフラム式微差圧スイッチ (マノスタースイッチ MS65H) を  $300Pa$  で動作させ、スイッチが ON になると Fig.4.30 の点線で囲まれた部分の電磁弁が OFF となるよう制御している。マノスタースイッチと電磁弁の間には、一度異常が発生し電磁弁が OFF になった場合、手動で解除しない限り復帰できないようにするために、自己保持型 (ラッチ型) リレーを用いたリレー回路を介している。これにより無人状態で運転中にトラブルが発生しても自動で復帰しないため、誤って TGC を破損する恐れがなくなる。また、停電時にはガスの供給を完全に停止させ、かつ供給ラインの圧力が上昇しないようにするために、供給ラインには通電時閉 (NC:Nomal Close) の電磁弁が、purge ラインには通電時開 (NO:Normal Open) の電磁弁が用いられ、通常運転時は常に通電状態となるよう製作されている。

先に述べたように、配管の温度が n-Pentane の蒸気圧である  $14$  を下回ると n-Pentane が再液化してしまう問題がある。液化に対する対策としては、配管全体を冷やさないよう室温を常に  $20$  以上になるよう空調を設定し、さらに分配用ラック (Fig.4.27) の周りを断熱材で覆うことにより、ラック内での液化を防ぐ対策を取った。

n-Pentane は脱脂作用を持つので、合成樹脂製を用いると可塑剤を溶出してしまい、下流の TGC に悪影響を及ぼす危険性がある。配管に用いる素材は n-Pentane に耐性のある素材を用いる必要があった。数種類の素材に対して耐性テストを行った結果、PFA (PerFluoro-Alkoxyalkane) が n-Pentane に対し耐性があり、かつ比較的安価に入手できる事がわかった。また金属である SUS (Stainress Steel) も、n-Pentane に対し耐性を持つので、供給系と併せて配管の素材は PFA と SUS のみで配管されている。



Fig. 4.26: ガス供給システム



Fig. 4.27: ガス分配用ラック

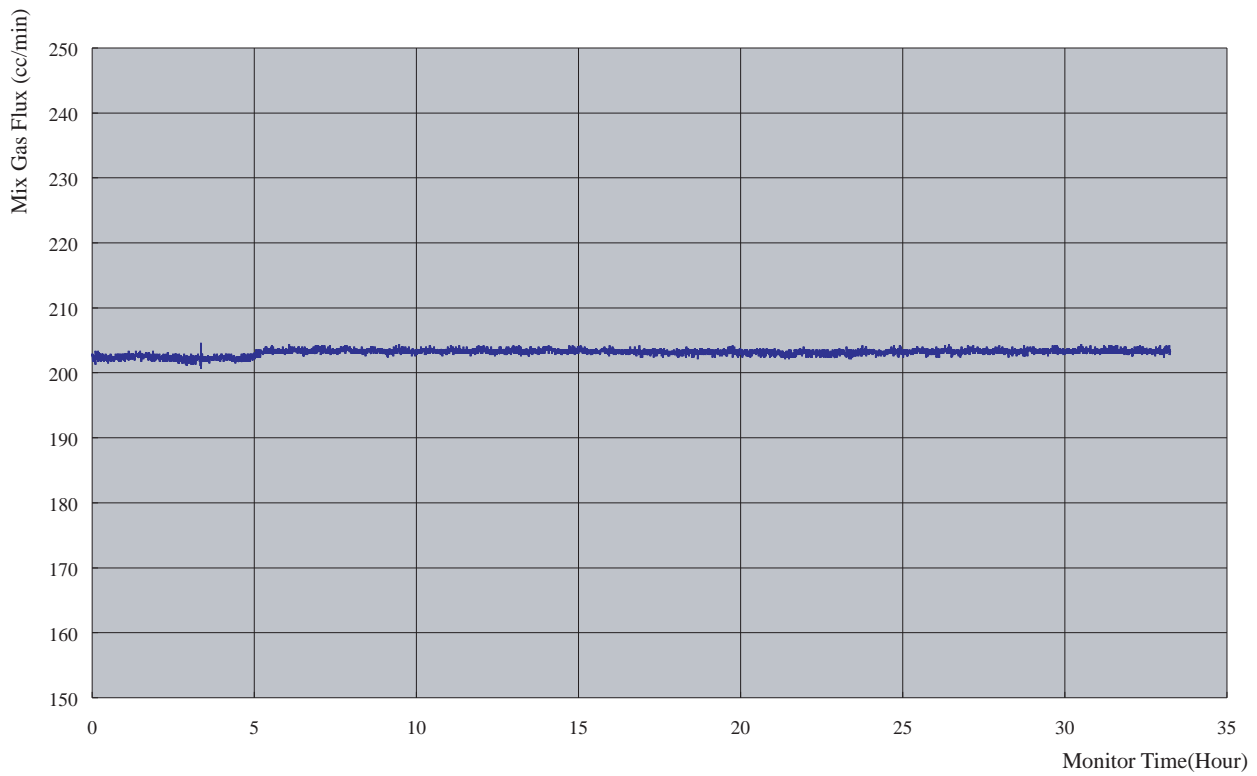


Fig. 4.28: 流量モニター結果 (横軸：時間 [min]、縦軸：流量 [cc/min])

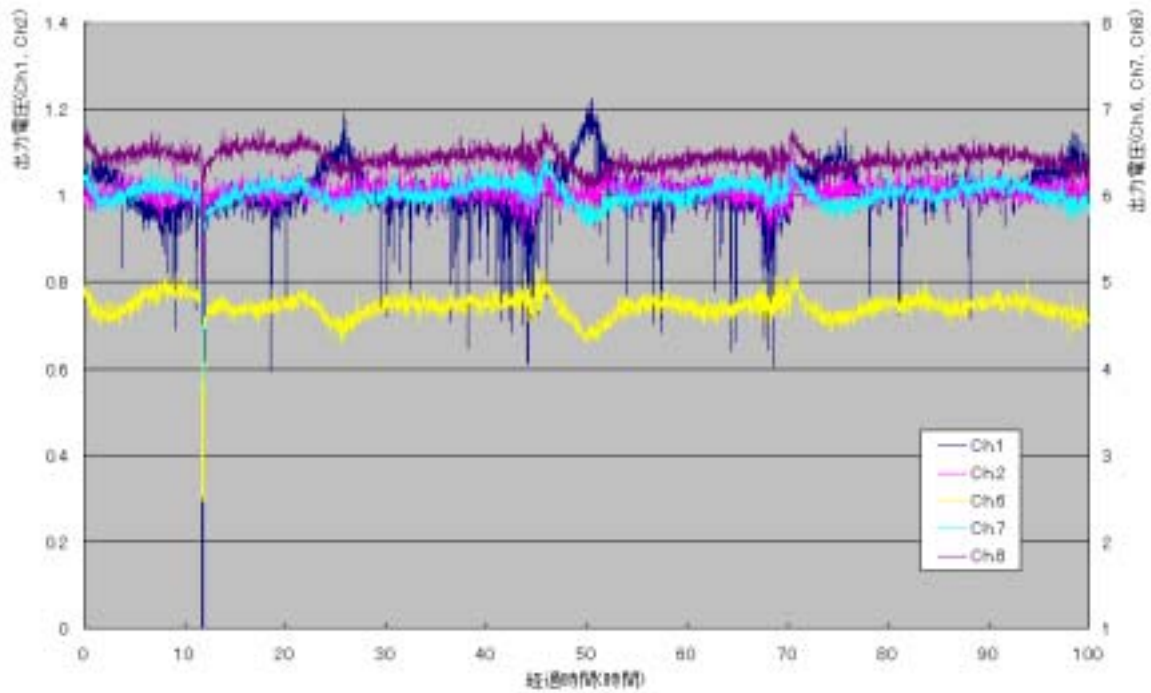


Fig. 4.29: 分配後のモニター結果 (横軸：時間 [min]、縦軸：出力電圧 [V])

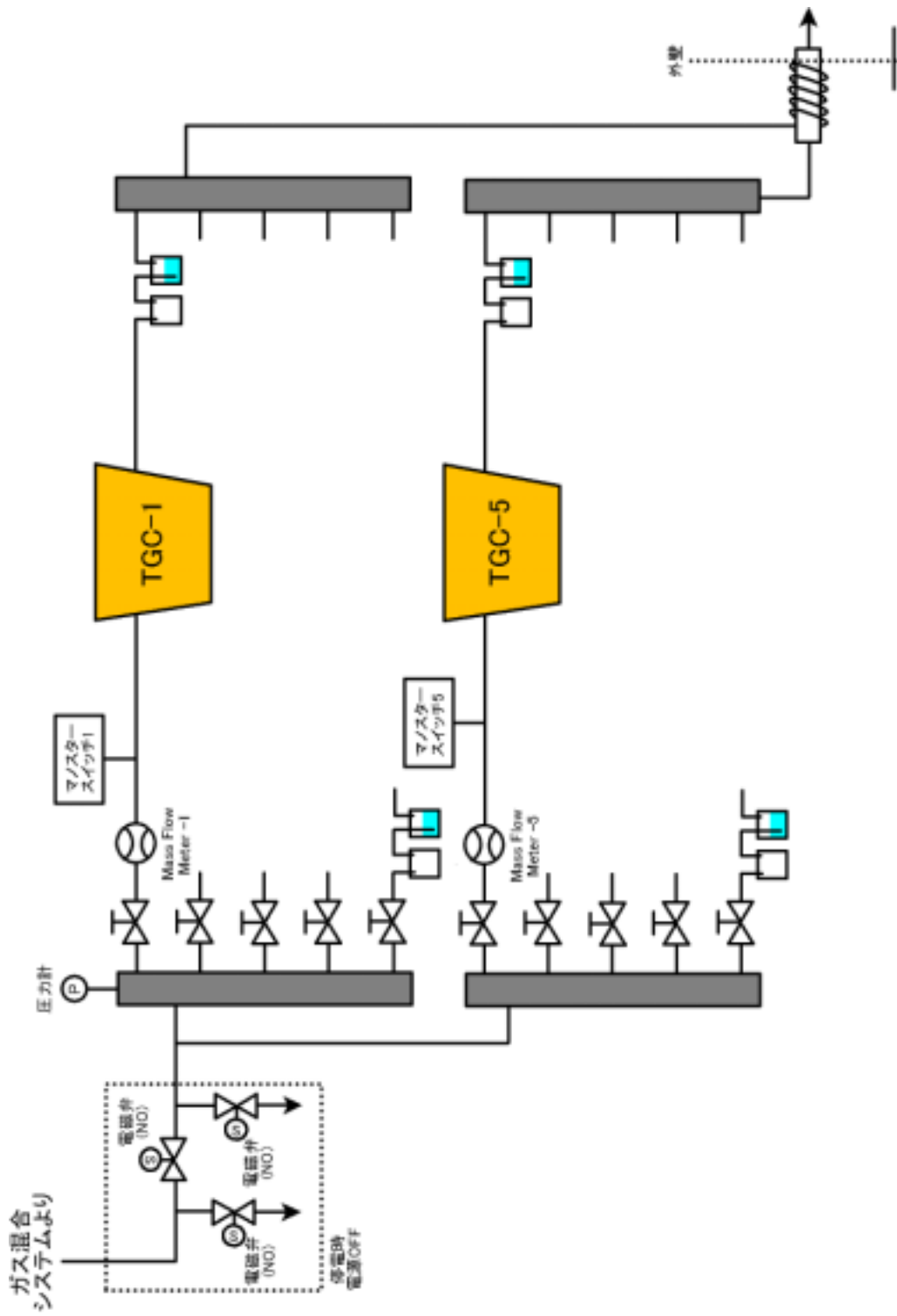


Fig. 4.30: ガス分配システム



## 4.2 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。そのようなチェンバーは Leak Current が大きくなったり、また放電も起こりやすくなってしまい、動作が不安定になる。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非常に重要である。

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。

### 4.2.1 検査内容

#### 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  $2.9kV$  を 3 時間程度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  $2.9kV$  が約 3 時間程度安定に印加でき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。

### 4.2.2 ガス供給システム

HV Test で用いられているガス供給システムの写真を 4.31 に、配管図を図 4.33 に示す。このガス供給システムでは、大きく分けて混合ガスを流す系統と  $CO_2$  のみを流す系統の 2 系統が存在する。これは  $CO_2$  のみによる焼き出し試験と混合ガスを用いた  $3.1kV$ 、 $3.3kV$  印加試験を同時に行う事が出来るようにしたもので、それぞれ 4 系統存在するので、同時に 8Units の TGC へのガス供給が可能となっている。

ガスの混合方法は CosmicRay Test 用ガスシステムとは異なり、バブリング法を用いる。バブリング法とは、14 における n-Pentane の蒸気圧が約  $0.45\text{atm}$  である事を利用し (Fig.4.32 参照)、14 に保たれた液体の n-Pentane 中に流量を制御した  $\text{CO}_2$  を流し混合するという方法である。この方法は、手軽で安価なシステムで混合ガスを得られる方法として過去のビームテストなどで用いられている [18]。混合ガスの流量は流し入れる  $\text{CO}_2$  の流量の約 2 倍になる。流量の制御には、KOFLOK 社製のニードルバルブ付き精密流量計 (RK1250) が用いられる。この流量計は、下部に取り付けられているニードルバルブの開度を調節する事により流量をコントロールする事が可能で、最大  $100\text{cc}/\text{min}$  の  $\text{CO}_2$  供給を行う。

配管の素材には、CosmicRay Test 用と同じく n-Pentane に耐性のある PFA と SUS が用いられている。過圧防止システムも、CosmicRay Test 用と同じ微差圧センサー MS65H を用い、作動圧力も同じ  $300\text{Pa}$  で設定している。



Fig. 4.31: HV Test System

### 4.2.3 Current Monitor System

HV Test で使用する高電圧印加モジュールは、サトウ電子社製の HV モジュールを用いる。このモジュールは

- (1) 各チャンネルの Leak Current の値がアナログの針で確認可能である。
- (2) Trip<sup>3</sup>した場合、その状態が Hold される (Trip Hold)。
- (3) モジュール前面の LEMO 端子から Current 値に比例した電圧出力を得られる。

<sup>3</sup>Trip とは HV Module に付属する機能で、設定した電流上限値の 80 % の状態が 1sec 以上続くと自動的に電圧をカットするというもの

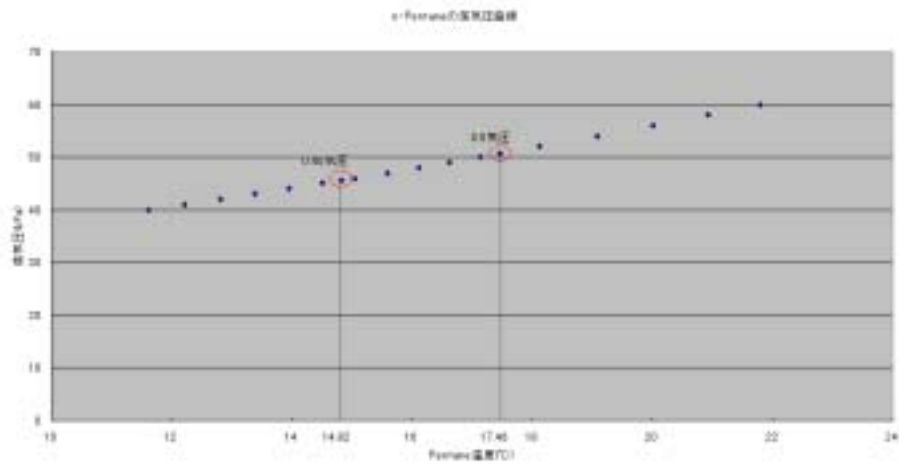


Fig. 4.32: n-Pentane の蒸気圧曲線

が可能である。(3) の機能を利用して、出力電圧を Windows PC に搭載された AD Board(Analog to Digital converter Board) を用いてデジタル変換し、そのデータを取得し、Current 値をモニターするシステムを製作した。

Fig.4.34 に、Monitor System の構成図を示す。HV モジュール前面にある LEMO 端子より得られる Current、HV は各チャンネル毎の値を、Trip は OR 出力を見ている。サトウ電子の HV モジュールの Trip 出力部分は、内部でオープンコレクタ回路になっていて、LEMO 端子より出力される。出力は AD Board で読まれると同時にブザーにつながれており、HV Test 中の Chamber のどれかひとつでも Trip するとブザーが鳴るようになっている。これにより Trip した事に気付かないために生じるデッドタイムが減り、検査を効率よく進める事が可能となった。

	実際の値	LEMO 出力
Current	1 $\mu$ A	10mV
HV	1kV	-1V
Trip		オープンコレクタ出力

Table 4.1: サトウ電子 HV モジュールからの出力

#### 4.2.3.1 カレント増幅器

通常、TGC の Leak Current は 100nA 以下であるので、その時の HV モジュールからの出力電圧は 10mV 以下となる。今回使用した AD Board(CONTEC 社製 AD12-64(PCI)) の分解能は 12Bit、入力レンジは  $\pm 10V$  を使用したので、読み取れる最小電圧は  $20 \div 2^{12} = 5mV$  となり、AD Board で出力電圧を読み取るには増幅器(OP Amp) を用いて増幅する必要があった。その回路図を Fig.4.35 に示す。最大 10 $\mu$ A の電流、すなわち 100mV が 10V になるよう増幅率は 100 倍で、さらに HV モジュールの出力インピーダンスが 10k $\Omega$  であったので、増幅回路の入力インピーダンスを大きくするために非反転増幅回路で設計し、製作した。

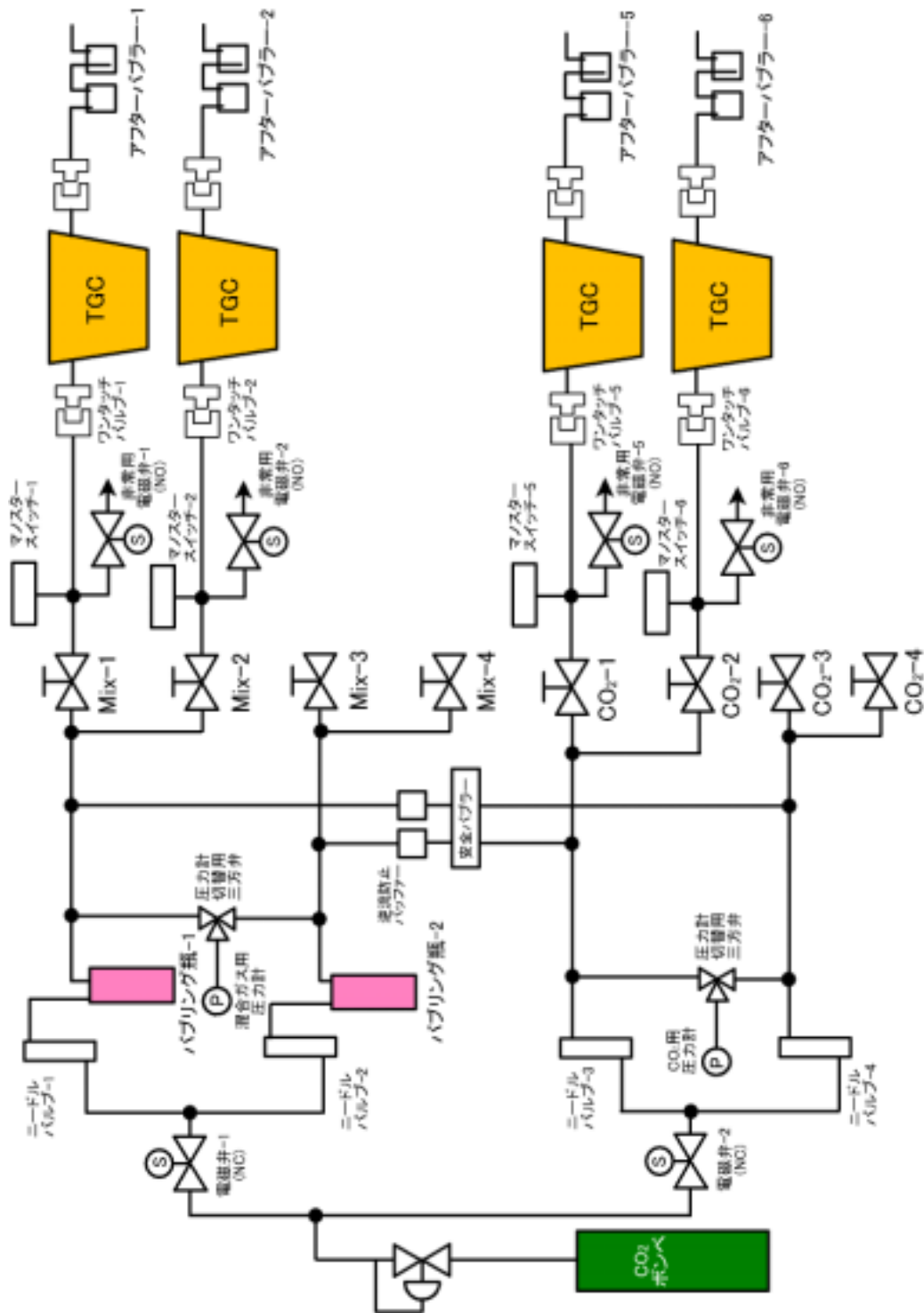


Fig. 4.33: HV Test 配管図

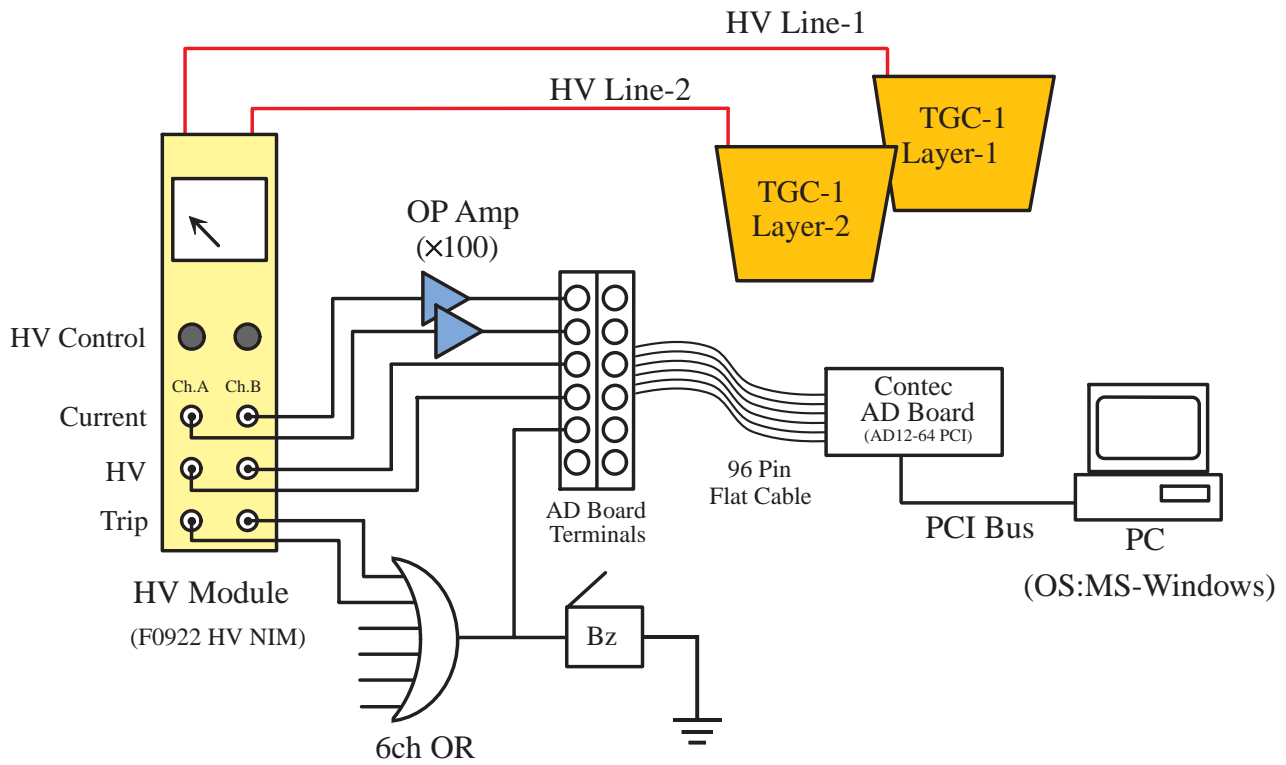


Fig. 4.34: Monitor System 構成図

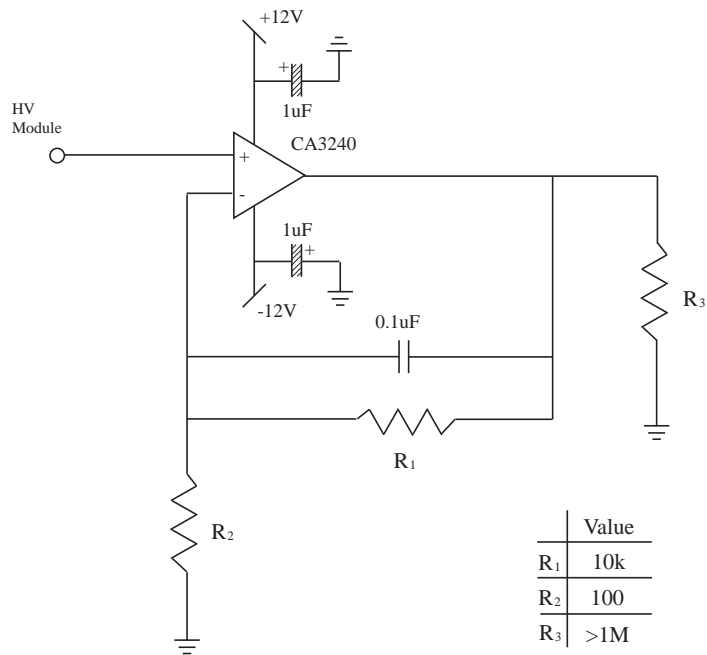


Fig. 4.35: HV Test 用 OP Amp 回路

#### 4.2.3.2 モニタープログラム

先に述べたように、HV Test において得られる Current の値は 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。プログラム言語には *Microsoft*<sup>®</sup> 社製の Visual Basic 6.0(以下 VB) を採用した。VB を採用した理由は、Windows 上で GUI(Graphical User Interface) を用いたプログラムを手軽に短期間で製作する事が出来、操作・表示を視覚的に訴えることが出来るからである。これにより誰にでも検査を出来るようなシステムを構築した。プログラムは大きく分けて次の 5 つの部分からなる。

- (1) AD Board の各チャンネルに入力された電圧の値を取得する。
- (2) 対応する値を変換し、画面に表示する。
- (3) ログファイルに記録する。
- (4) Trip かどうかを判定する。
- (5) メールを送信する。

モニターが開始されると、AD Board に入力された各チャンネルの電圧を一斉に読み込み、1 秒毎の電圧値、Current 値を画面に表示する。それと同時に、それらの値をログファイルに記録して行く。ログファイルはすべてテキストであり、ファイル形式は csv 形式で保存される。ログファイルのデータフォーマットは

```
日付, 時間, -100, 0    モニター開始
日付, 時間, (-1)*HV 値, Current 値
.....
日付, 時間, -200, 0    モニター停止
```

で記録されている。

Trip 判定部では、4.34 の 6ch OR からの出力を見て、Trip したかを見る。OR を取っているのので、HV を印加している TGC のうちのどれか一つでも Trip すれば Trip とみなし、担当者宛てにメールが送信される。

#### 4.2.3.3 Log Viewer とタイマープログラム

4.2.3.2 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。4.2.3.2 で述べたデータ形式で保存されたファイルは、例えば Microsoft Excel(以下、MS-Excel) といった表計算ソフトを用いてグラフにする事は可能である。しかし、例えば 24 時間検査を行った場合、 $1Hz$  の Sampling Rate でデータを記録しているため、ログファイルは 86400 行になり、MS-Excel で読み込める最大である 65536 行を超えてしまう。それゆえ、モニタープログラムと同様に VB を用い専用の Log Viewer を設計、製作した。

Log Viewer のコードは大きく分けて次の 3 つの部分からなる。

- (1) ユーザーが選択したログファイルを開き、カンマ (,) で区切られた値をそれぞれ配列に読み込む部分。
- (2) 読み込んだ値のうち、HV 値と Current 値に相当する値をプロットする部分。
- (3) グラフを画像 (ビットマップ形式) で保存する。

(1) でログファイルを開き、データを配列に読み込む際に、同時に行数をカウントしておき、配列の番号とカウント番号が1対1の対応になるようにする。Sampling Rate は  $1\text{Hz}$  であるので、この行数がすなわち時間 (秒) になる。この行数を横軸、それぞれの配列の値を縦軸にしたグラフを描けば、HV 値、Current 値の時間変化を視覚的に確認する事が可能となる。Fig.4.36 に実際に取得したデータを表示した Log Viewer を示す。

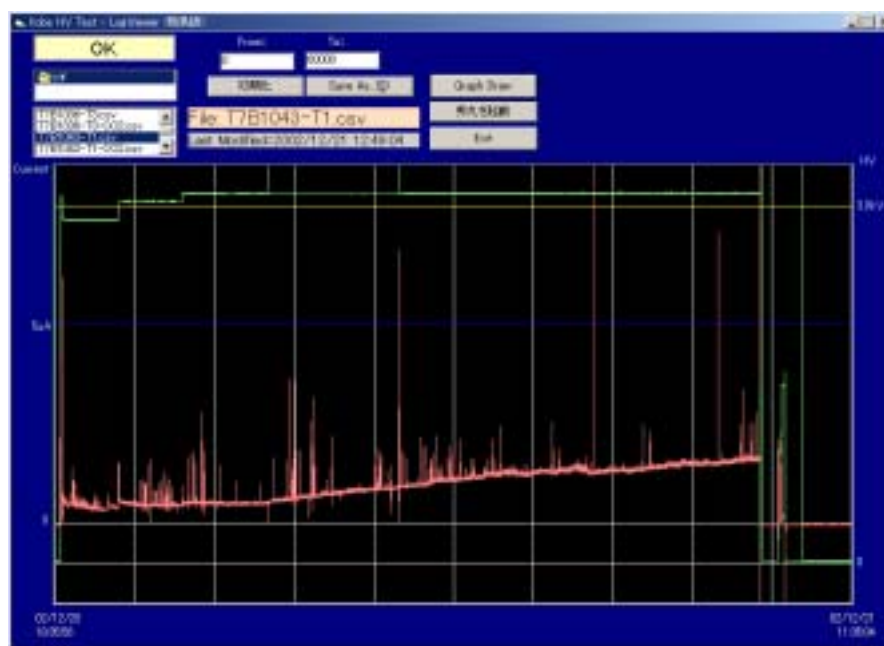


Fig. 4.36: Log Viewer

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ようになり、検査の効率が上昇した。

チャンネル	電圧	モード	経過時間	最大電圧	経過時間	トリップ	停止	出力
T7F1071-T1	3.1 kV	スタート	00:00:00	最高で3kVで2:55:16まで	トリップ	停止	<input type="text"/>	000輸出
T7F1071-T2	3.1 kV	スタート	00:00:00	最高で3kVで2:55:16まで	トリップ	停止	<input type="text"/>	000輸出
T7F1071-T3	3.1 kV	スタート	00:00:00	最高で3kVで2:12:19まで	トリップ	停止	<input type="text"/>	000輸出
T7B1043-T1	3.1 kV	スタート	00:00:00	最高で3.1kVで12:18:36まで	トリップ	停止	<input type="text"/>	000輸出
T7B1043-T2	3.1 kV	スタート	00:00:00	最高で3.1kVで13:10:23まで	トリップ	停止	<input type="text"/>	000輸出
T7B1043-T3	3.1 kV	スタート	00:00:00	最高で3.1kVで8:25:43まで	トリップ	停止	<input type="text"/>	000輸出

Fig. 4.37: タイマープログラム

## 4.3 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 章で述べたように、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。

### 4.3.1 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。そのための試験機を Fig.4.38 に示し、その配管図を Fig.4.40 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  $\Delta P$  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。

### 4.3.2 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。ここで、各検査における合格基準での漏れの量を概算すると、チェンバーの体積  $V$  が約 4000cc であるので、圧力降下  $\Delta P$  が 50Pa であるとすると漏れの量  $\Delta V$  (cc) は 5 分間で

$$\Delta V = 2 \text{ cc} \quad (4.13)$$

となる (ただし気体は全て理想気体であるとし、温度は Test 中一定であると仮定して計算した。)。  $CO_2$  Channel に対しても、Main の体積を 4000cc、Side の体積を 1500cc として同様の計算を行うと、その漏れの量は

$$\Delta V'_{Main} = 2 \text{ cc} \quad (4.14)$$

$$\Delta V'_{Side} = 0.75 \text{ cc} \quad (4.15)$$

となる。Leak 場所の探索方法として、減圧法と加圧法が考案された。その際に使用する治具を Fig.4.39 に示す。減圧法は、Fig.4.39(a) のように整形されたゴムを掃除機の先に取り付け、Fig.4.39(b) の様にして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。加圧法は Fig.4.39(c) のように、エアーコンプレッサーのエアガンにより局所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 (速乾性アラルライト) あるいは半田を用いる。



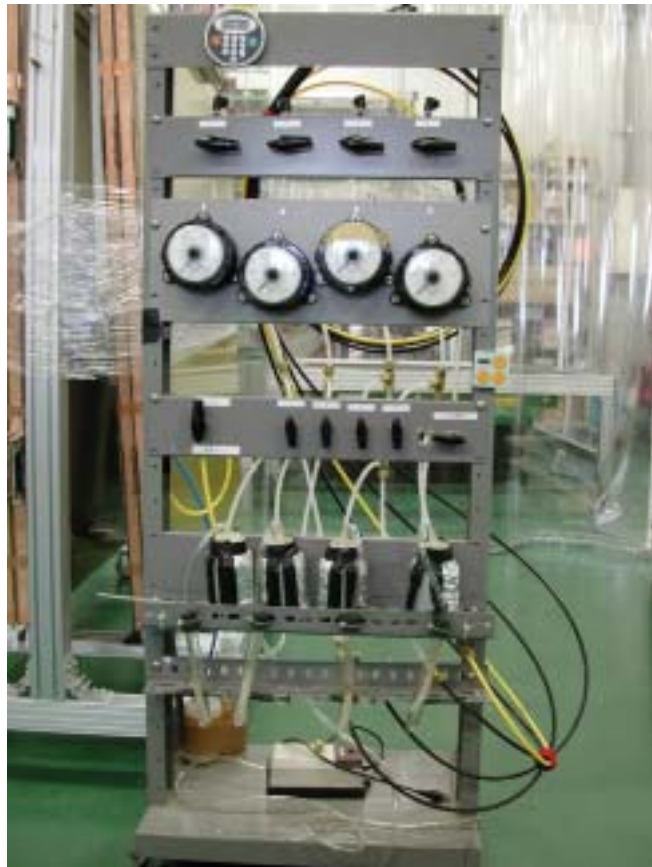


Fig. 4.38: Leak Test 試験機



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.39: Leak 修復用治具

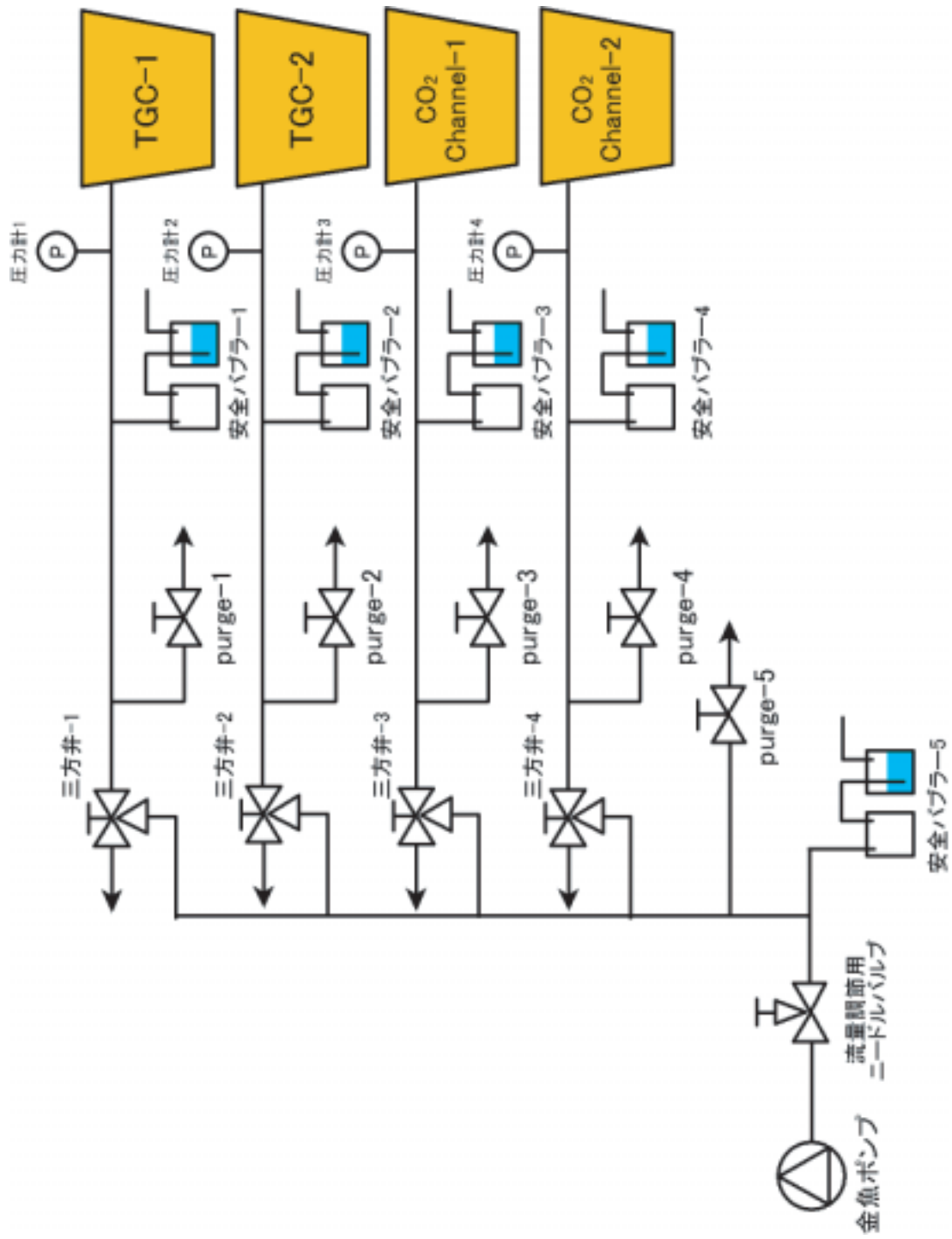


Fig. 4.40: Leak Test 試験機 配管図

## 5 検査結果とシステムの評価

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 600 Pa 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、徐々に設備の整備を進め、2002 年 11 月に本格的に目標であった 8 Triplet / 2week のペースで検査を開始した。本章では各検査において 2002 年末までに得られた結果のを元に設備の評価及び検査結果の考察を行う。

2002 年末現在の時点における各検査が完了した Unit 数を Table 5.1 に示す。KEK で製作された TGC は、計 75 Units 運搬された。しかし、神戸大での取り回し時に発生した落下事故によりワイヤーが切れた 1 Unit と、 $CO_2$  Channel の製作が不十分であった 2 Units は KEK に送り返されているので、実質神戸で検査に使われた TGC は 72 Units である。

工程	Unit 数
KEK ~ 神戸運搬	75 (うち 3 Units は KEK に返送)
Leak Test	50
HV Test	43
CosmicRay Test	32

Table 5.1: 検査完了枚数 (2002 年 12 月末現在)

これまでの検査枚数の推移を Fig. 5.1 に示す。2001 年 11 月までに TGC 以外の設備の構築 (Counter、Drift Tube、ガスシステム) の構築が進められ、2001 年 11 月に KEK から初めて 2 Units の TGC が搬送され、実機を用いながら検査設備の構築が進められた。当初ガスシステムは 4 系統しか整備されていなかったため、CosmicRay Test では同時に最大 4 Units の検査しか行えなかった。また、Leak Test において、 $CO_2$  Channel の漏れが予想以上に多く、それに対する Leak 修復方法が確立していなかったため、1 台あたりの検査日数が最大 100 日かかるなど、検査は予定よりもかなり遅いペースで進められた。しかし、4.3.2 で述べた Leak 修復方法が確立し、後述するように KEK 富士実験室において出荷前検査を行う事により、Leak Test にかかる時間をかなり短縮することに成功した。さらに 2002 年 11 月のガスシステムの 8 系統拡張、HV Test 専用のガスシステムの整備を行い、目標であった 8 Unit/2week の検査が可能となった。2003 年 1 月以降のグラフは、3.4.2 で述べたスケジュール通りに進めた場合のグラフとあわせて表示されている。T7 Triplet の残り 24 Units の検査を 2003 年 4 月に終わらせ、5 月には T7 Triplet を CERN へ輸送する予定となっている。

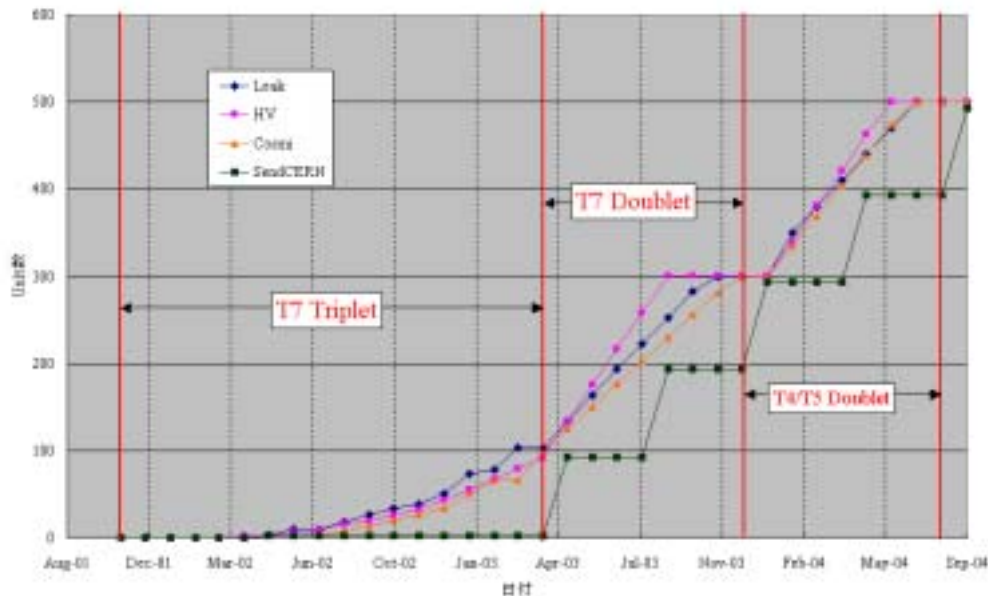


Fig. 5.1: 検査枚数の推移 (2003年1月以降の点は予定を示す)

## 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。

4.1.2.2 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.5.2)。

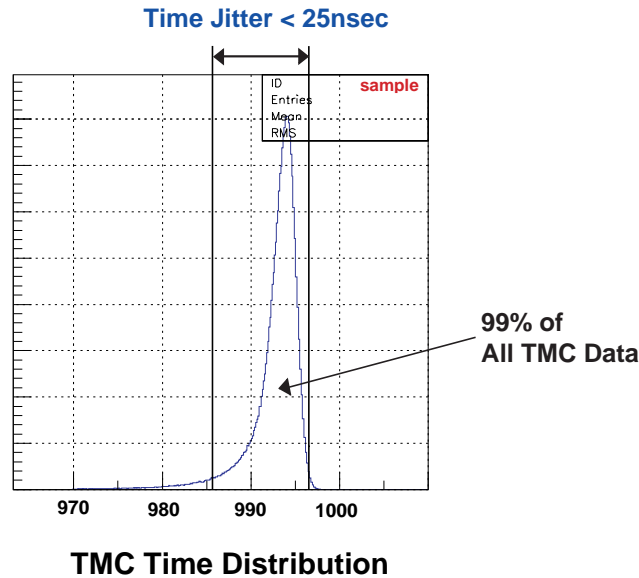


Fig. 5.2: Time Jitter の定義

### 5.1.2 検出効率

Fig.5.3 に、Efficiency Map の一例を示す。これは 2002 年 7 月 14 日～8 月 20 日の 36 日間にわたり検査を行った TGC である。この図を見ると、不感領域であるワイヤーサポート、ボタン型サポートが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 Table5.2 に示す。この Unit は合格基準を満たしていた。

次に、Fig.5.4 に別の Efficiency Map を示す。これ Fig.5.3 とほぼ同じ 2002 年 7 月 12 日～8 月 20 日にわたり検査を行った TGC である。Fig.5.4 の左下の Layer には、ワイヤーサポートの周りに明らかに検出効率の低い部分が存在する。検出効率の低下する原因の一つとして平面性の悪さが考えられる。Fig.5.5～Fig.5.8 に、製作時に測定された平面性のデータを示す。これより、この Unit は製作時のデータより平面性に問題のある TGC であった事が確認された。平面性が悪い場合、Anode - Cathode 間隔が規定の 1.4mm よりも広がってしまい、それにより内部の電場が弱まってしまい十分なガス増幅が行われなくなってしまう。その結果、十分なパルス波高のシグナルが得られなくなり、ASD の閾値電圧  $V_{th}$  を超える事が出来なくなり、そのシグナルはヒットとして認識されなくなってしまう (Fig.5.9)。これにより、平面性の悪い部分の検出効率が低下したと考えられる。この TGC の各層の検出効率を Table5.3 にまとめた。

検出効率を全面にわたり検査により、この様に局所的に検出効率の低下している TGC を未然に発見する事が出来、CERN へ輸送される TGC のクオリティを保つ事が可能となっている。

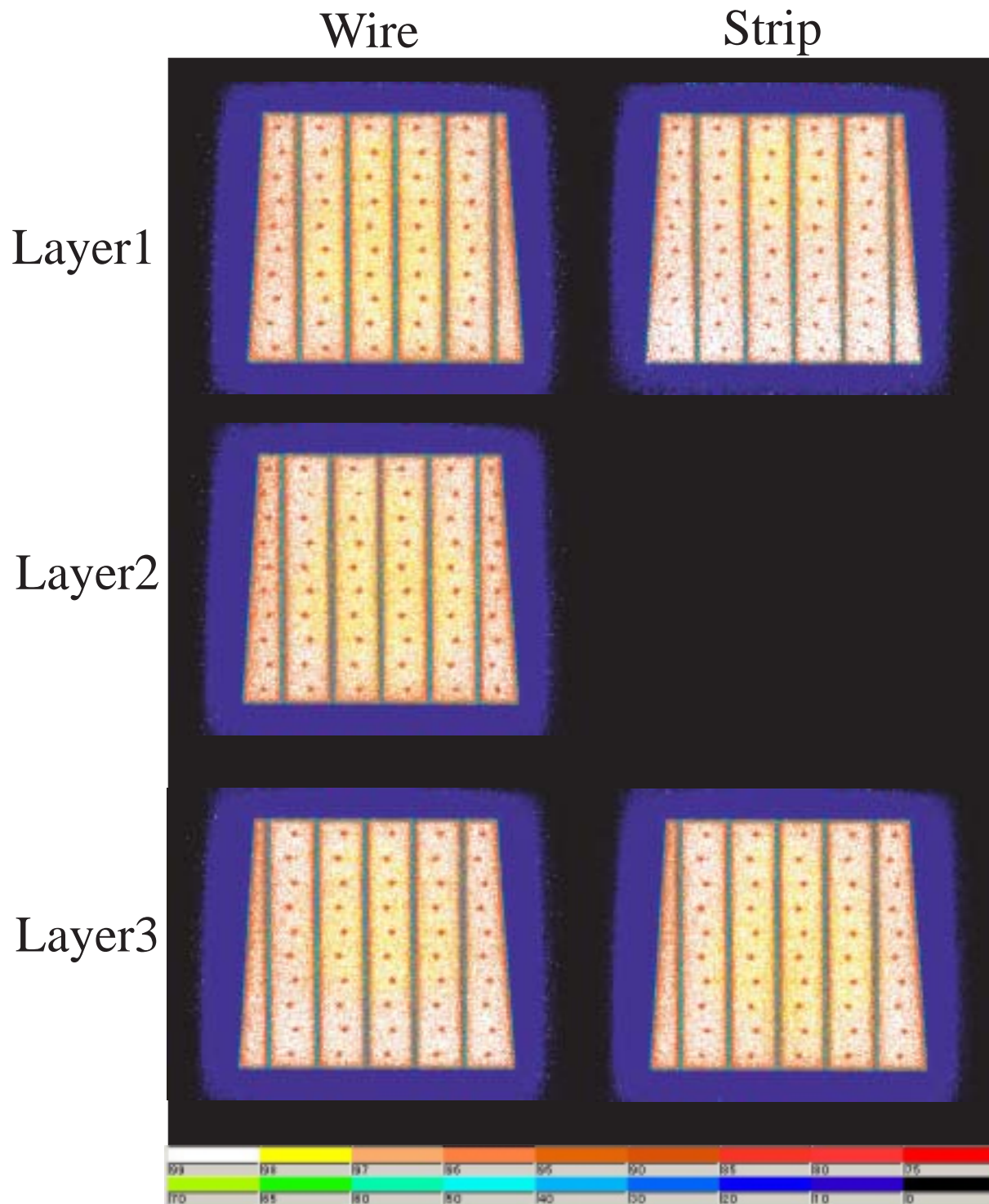


Fig. 5.3: Efficiency Map 例 (T7B1037)



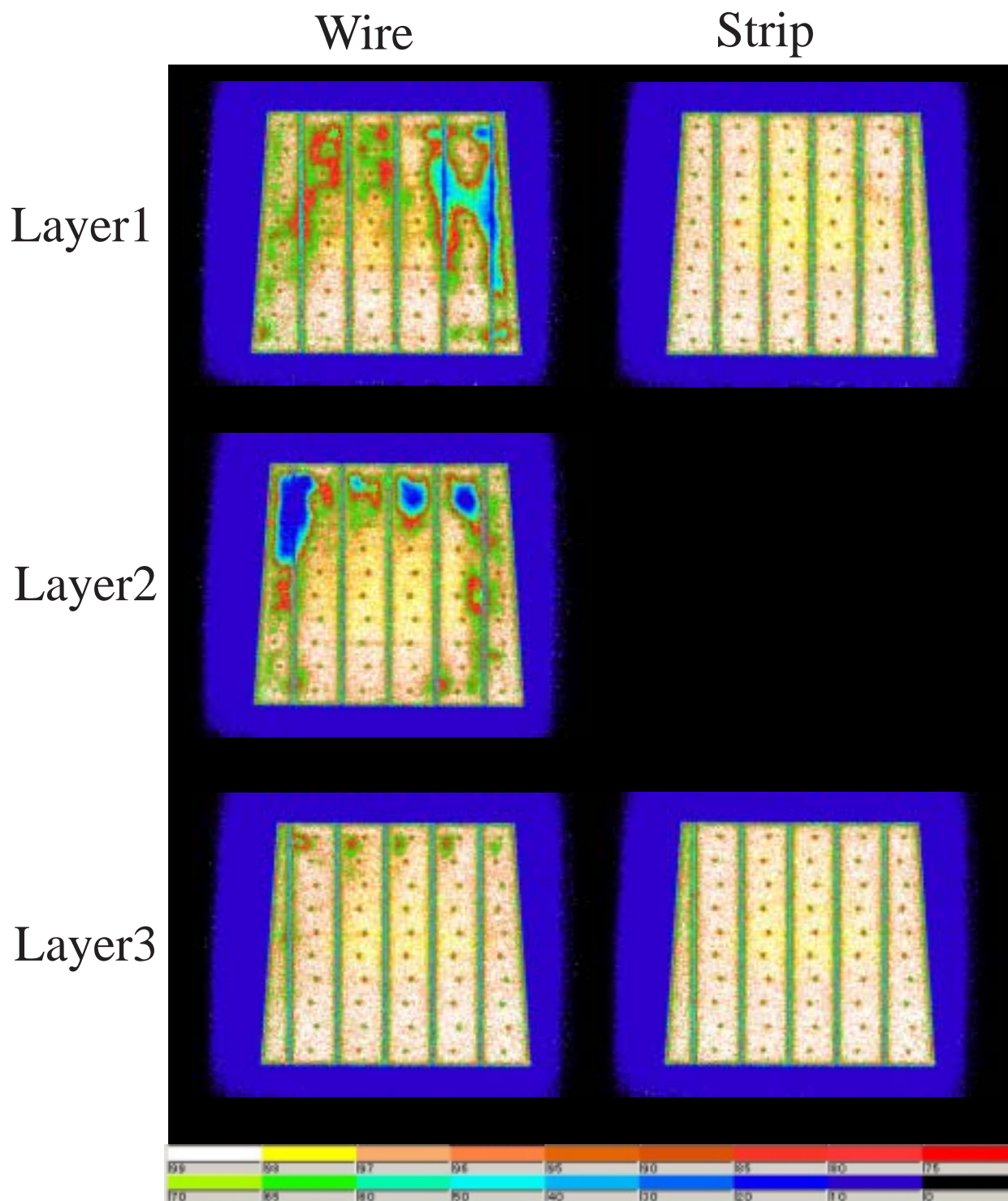


Fig. 5.4: Efficiency Map 例 (T7F1082、平面性が悪い例)



T7B1037	サポート含む	サポート除く
Layer1-W	95.03	99.10
Layer1-S	95.51	99.27
Layer2-W	95.04	99.08
Layer3-W	95.14	99.35
Layer3-S	95.58	99.40

Table 5.2: T7B1037 の検出効率

T7B1082	サポート含む	サポート除く
Layer1-W	88.96	93.14
Layer1-S	95.51	99.24
Layer2-W	88.65	91.79
Layer3-W	94.73	98.89
Layer3-S	95.52	99.43

Table 5.3: T7F1082 の検出効率

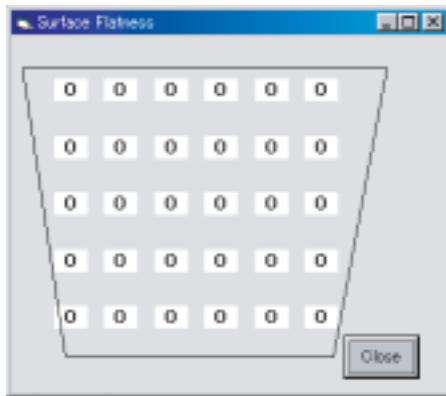


Fig. 5.5: T7B1037 平面性データ (Doublet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)

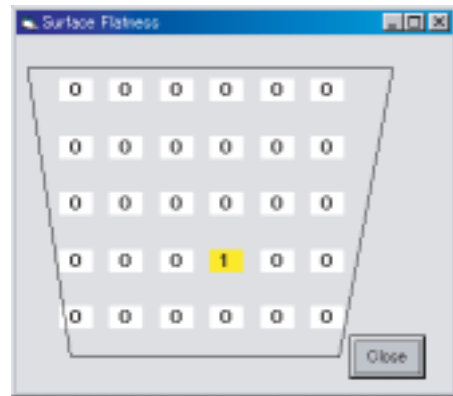


Fig. 5.6: T7B1037 平面性データ (Triplet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)

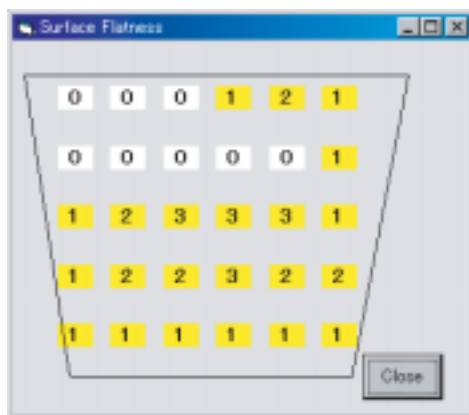


Fig. 5.7: T7F1082 平面性データ (Doublet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)

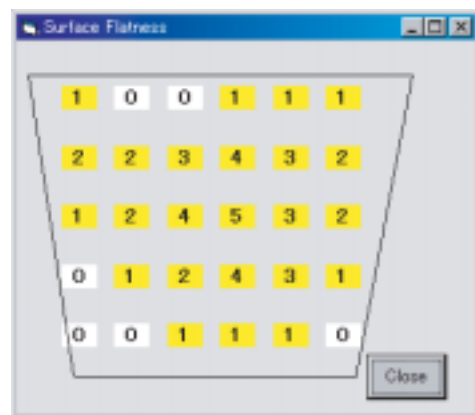


Fig. 5.8: T7F1082 平面性データ (Triplet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)

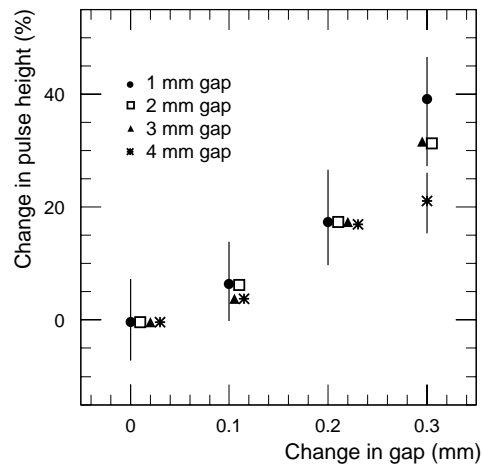


Fig. 5.9: Gap 間隔と Pulse Hight(ゲイン) の相関 [4]

### 5.1.3 Time Jitter

Fig.5.10 に、ある Unit の wire、strip それぞれの TMC 時間分布を示す。これまでに検査を行った全 Unit について同様の結果が得られている。このグラフより、wire、strip とともに Time Jitter が 25nsec 以下になっていない事がわかる。特に strip では 50nsec 以上になっている。

考えられた原因は、宇宙線ミュオンの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 (Fig5.11)、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  $0^\circ$  に対して Wire、Strip とともに 26nsec ~ 27nsec であり、入射角度  $10^\circ$  では 25nsec 以下となる [18]。本検査設備におけるミュオンの入射角度分布は、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、それゆえ Time Jitter が広がったのではないかと考えた。しかし、入射角が検査設備で最大となる約  $10^\circ$  のイベントに対しての TMC 分布を見てみたが、分布は変わらなかった。今回得られた結果のうち、Wire 方向に関しては綺麗な立ち上がりが見られ、分布の形状としては問題ないと思われる。しかし、Strip に関しては明らかにその幅が広がっており、現在その原因を追求中である。

### 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 HV 依存性、いわゆる HV Curve の測定も行われる。Fig.5.12 にその一例を示す。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  $V_{th} = 70mV$  で検査を行っている。これは CosmicRay Test を行う際に発振の少ない最小の電圧であり、Fig.5.12 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。これは、TGC の品質が悪い場合、3.0kV では十分な検出効率を得られず、容易に品質チェックが出来るようにするためである。

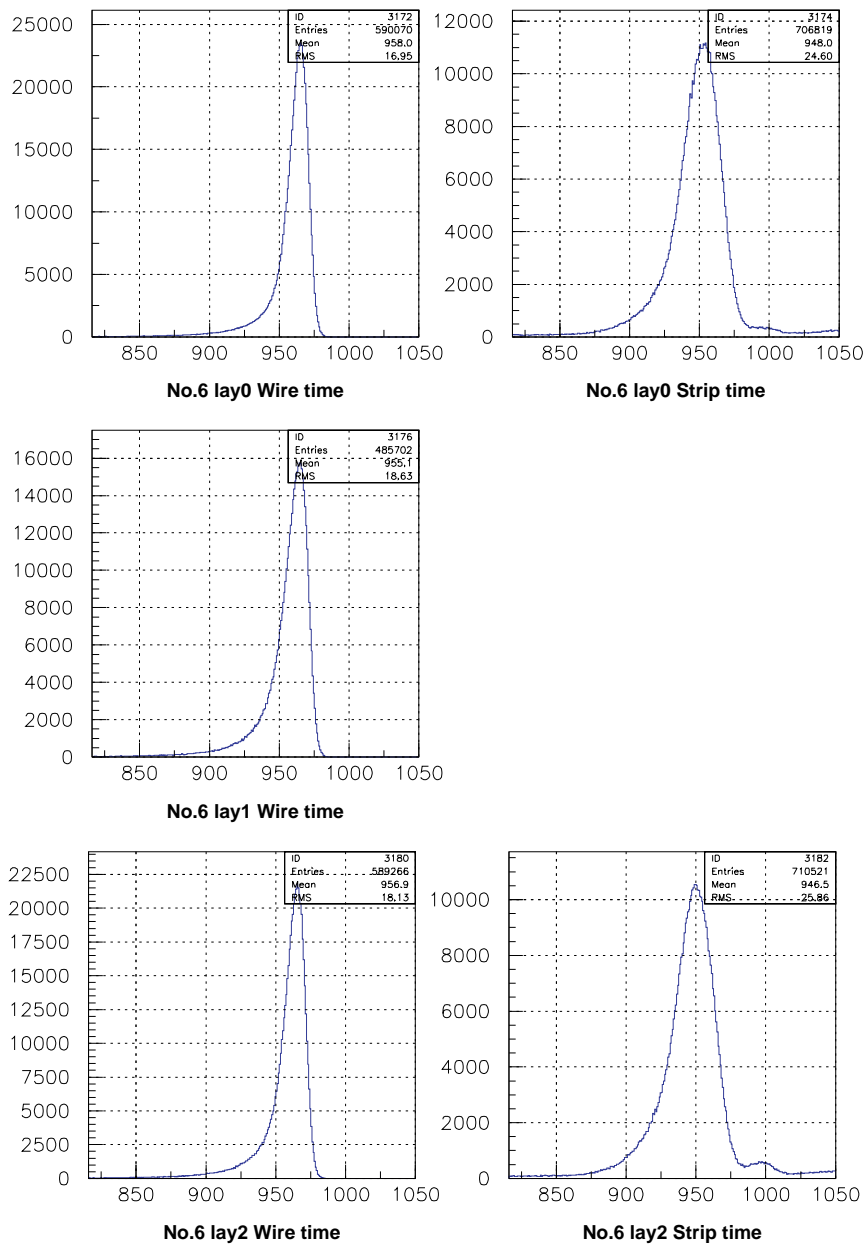


Fig. 5.10: TMC 時間分布の例 (T7F1083)

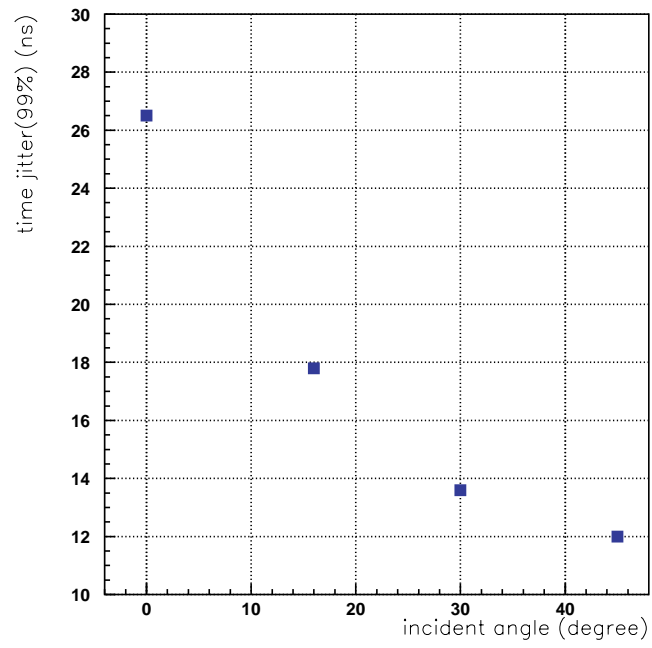


Fig. 5.11: Time Jitter の入射角度依存性 [18]

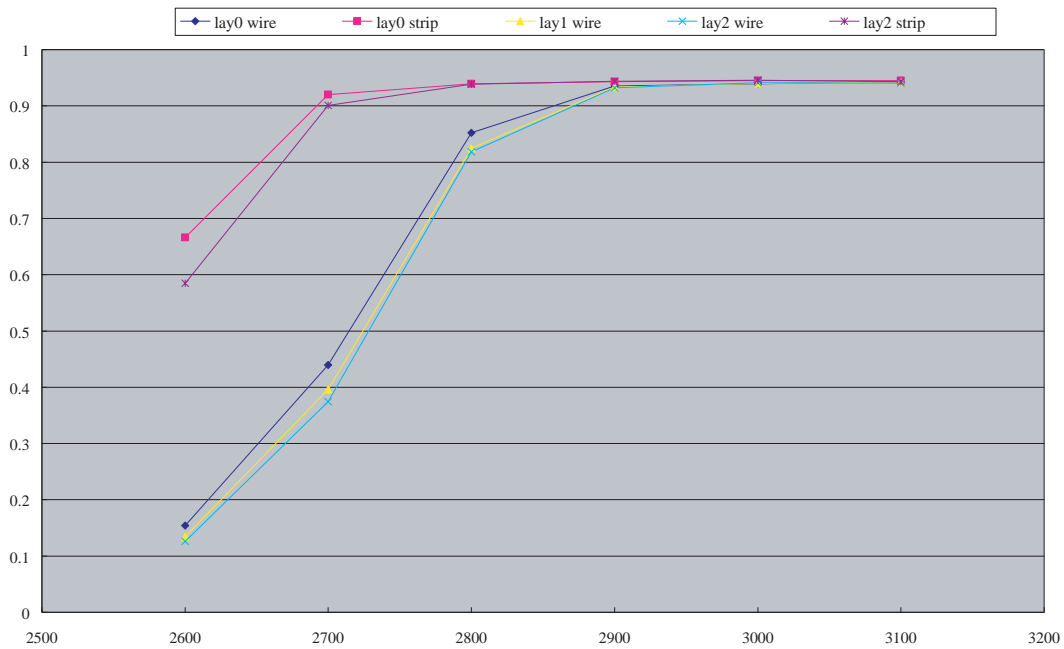


Fig. 5.12: HV Curve の一例 (T7B1037)

### 5.1.5 検査ペース

Fig.5.13 に、2002 年末現在までに行われた 32Units の CosmicRay Test にかかった検査日数のグラフを示す。青線は目標日数である 8Units/2week を表し、赤線より右側は検査設備が整備された 2002 年 11 月以降に検査された Unit を表している。横軸の UnitID は検査が行われた順にソートしている。平均検査日数は 23.5 日である。最初の 3Units(T7B1041、T7B1020、T7F1075) は、2002 年 4 月 25 日より 18 日間かけて検査が行われ、2002 年 6 月末に CERN で行われた高頻度  $\gamma$  線環境下での動作テストに用いるため、CERN へと輸送された。その後、検査を行いながら DAQ システムの調整やガス系の拡張が行われた。T7F1095 と T7F1100 が 44 日間もかかった理由は、共に HV Test の時から動作が不安定で、CosmicRay Test 中にも頻繁に Trip していたからである。また、設備構築初期においては、Tracking Efficiency が低く、検出効率を計算するのに必要な Track 数がなかなか得られなかった事も原因であった。その後、順調に検査ペースが短縮されて行き、赤線以降の Unit からは目標の 8Units/2weeks で行えるよう設備が整備された。整備後、3Units が 20 日を越えてしまっているが、これらは検査中頻繁に Trip した Unit であった。Trip については、5.2.1 において詳しく述べる。

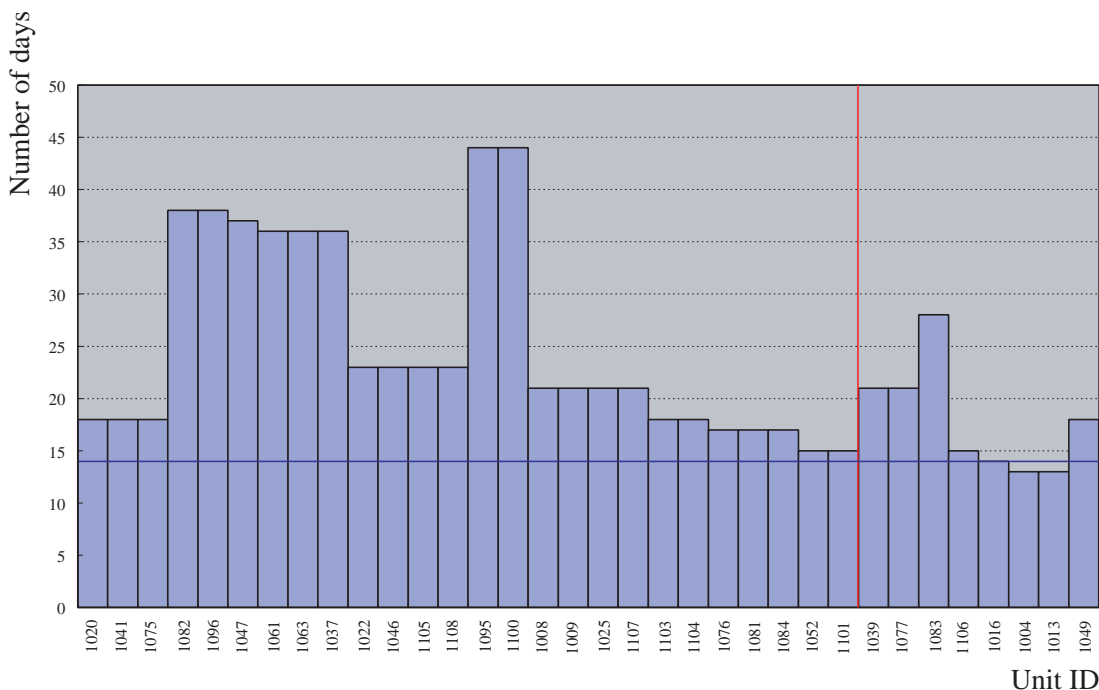


Fig. 5.13: CosmicRay Test の検査日数 (横軸:UnitID 縦軸: 検査日数)

## 5.2 HV Test

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 3.1kV の動作電圧を印加される。この時のチェンバーの状態は ATLAS 実験で動作させるのと同じ状態に等しいと言う事が出来、初期状態と言う点で、Chamber の安定性を示す Leak Current の状態をモニター・記録する事は非常に重要である。Fig.5.15 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。 $CO_2$  によるテスト終了後、混合ガス置換への置換中はモニターを行っていないので省略している。青色のグラフが HV 値の推移を、赤色のグラフが Current 値を表す。 $CO_2$  のみによる 2.9kV 焼き出しにおいて、Layer1 は放電が少ないのに対し、Layer2、Layer3 は放電回数が多い。混合ガスによる 3.1kV テストでは、Layer1 が最も放電回数が多くなっている。しかし、全層 1 度も Trip する事無く 8 時間 3.1kV を印加する事が出来ている。3.3kV テストでは、Layer2 が途中 1 度だけ Trip しているのがわかる。

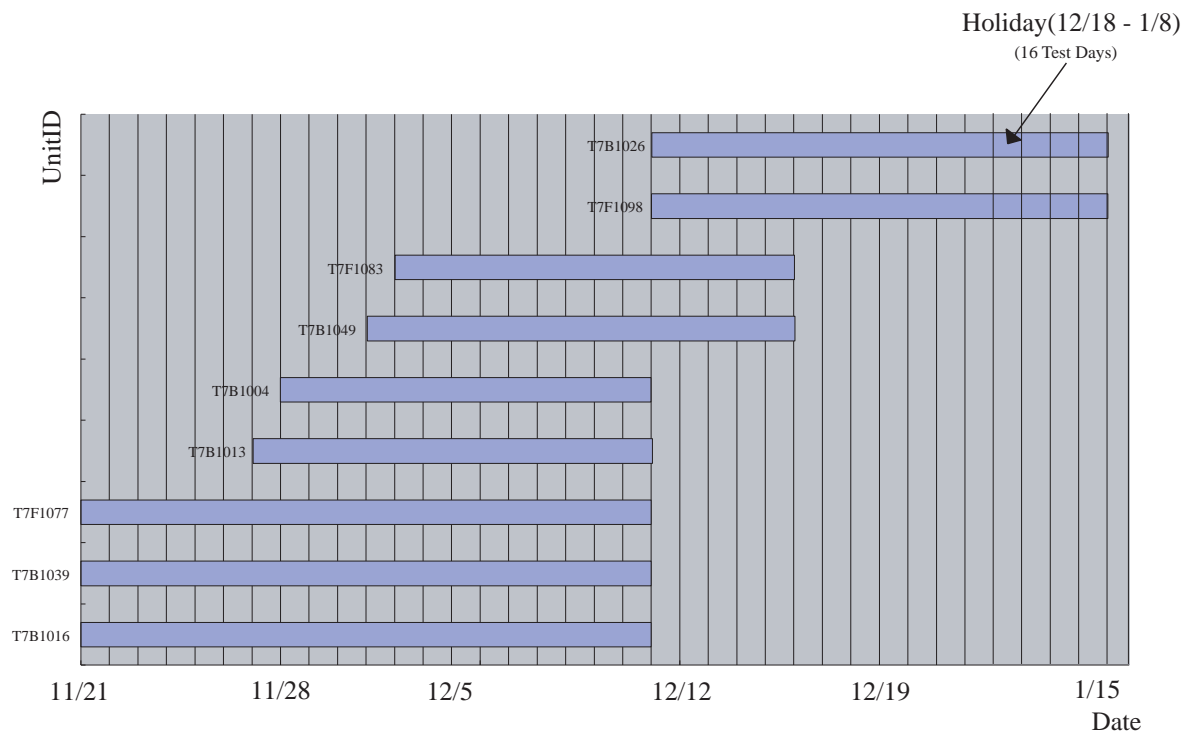


Fig. 5.14: 設備整備後の CosmicRay Test の進捗表

次に、ある Unit についての Leak Current の結果を Fig.5.16 に示す。グラフより、Current が急に増加し、時間をかけて徐々に減少している事がわかる。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事を示していると考えられる。このように放電に加え、ゴミの焼ける事が原因と考えられる電流の増加を確認する事が出来る。HV Test では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、安定性が増すことになる。この場合の Current の最大値は約  $4\mu A$  で、焼き切るのにかった時間は2時間であった。

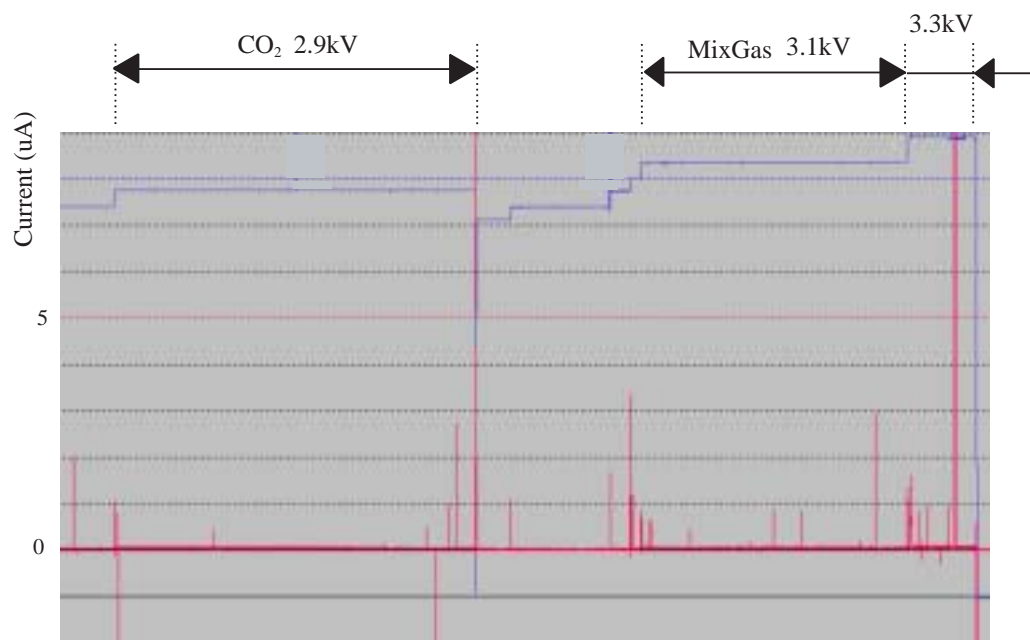
このように、4.2.3 で述べたモニターシステムにより、Chamber の Leak Current をモニター・記録する事が出来るようになり、また Log Viewer を用いる事により、その情報を画像化し、閲覧する事が可能となった。これにより、例えば CosmicRay Test において不安定な Chamber(頻繁に Trip する)があった場合、HV Test の結果を見ることにより、元々不安定であったのかそうではないかを確認する事が可能となっている。

### 5.2.1 混合ガスを用いた HV 印加中の動作不良について

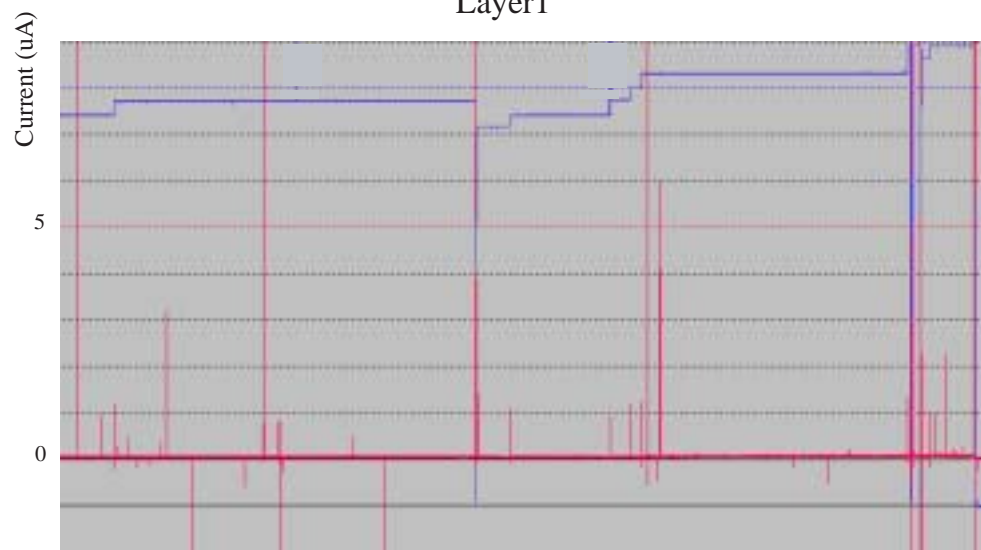
混合ガスを用いた HV Test や CosmicRay Test をしている際に、突然これまでに印加可能であった HV を印加できなくなるという現象がこれまでに数例見られた。これは始めに数  $\mu A$  以上の電流が流れる放電により Trip し、その後再度 HV を印加しようとしても、Leak Current が HV に比例して増加してしまい HV が印加できないという現象で、この時測定した Anode-Cathode 間の抵抗値は数  $M\Omega$  ~ 十数  $M\Omega$  しかなかった。

$CO_2 + n$ -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.5.16 に示したように、ゴミなどが焼き切られる際、数  $\mu A$  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、



Layer1



Layer2



Layer3

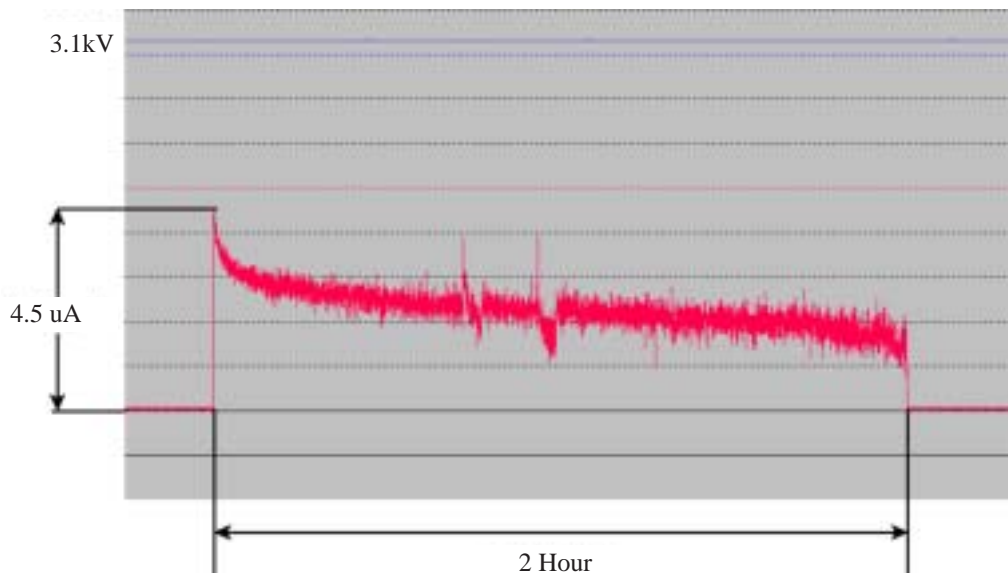


Fig. 5.16: Current Monitor 結果 2 ゴミが原因と思われる Leak Current の増加

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  $CO_2 + n\text{-Pentane}$  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、HV Test 中の場合、 $CO_2$  による置換ならびに  $2.9kV$  での焼き出しを経て  $CO_2 + n\text{-Pentane}$  によるテストに戻らなければならず、また CosmicRay Test 中の場合、その間はデータを取る事が出来ないのもこの現象が生じ、非常に時間のロスが大きい。先に述べた、T7F1095、T7F1100、T7F1083 の検査に時間がかかったのもこの現象が生じ、一度  $CO_2$  のみの状態に戻っていたからである。この現象については、今後さらに詳しく研究する必要がある。

## 5.2.2 検査ペース

既に述べたように、2002 年末現在で 43Units の TGC に対し HV Test を行った。それらの検査日数のヒストグラムを Fig.5.17 に示す。43Units の平均検査日数は 5.3 日である。CosmicRay Test を目標の 8Units/2weeks で進めるためには、HV Test を 2Units/3days で進めなければならない。ヒストグラムからわかるように 43Units のうち 14Units(32.6%) は 3 日で Test に合格しているが、4Units(T7F1081、T7F1082、T7F1083、T7F1095) は 12 日もかかった。これら 4Units が 12 日もかかった理由は、5.2.1 で述べた、混合ガスで検査中に突然 Current が増加し HV が印加出来なくなるという現象が起こったからである。

Fig.5.18 に、2002 年 11 月末以降の HV Test の進捗を示す。横軸は日付、縦軸は UnitID を示す。図からわかるように、2002 年 11 月末に 4.2.2 で述べたシステムの整備を行った事で、ガスを置換する時に生じるデッドタイムを減らす事が出来るようになり、目標の 2Units/3days が達成する事が出来た。しかし、T7F1083 も 5.2.1 で述べた現象が生じた事により合格するまでに 11 日もかかってしまった。HV Test に合格しなければ CosmicRay Test に移行することが出来ないのも、早急に現象の研究を行い、より早く効率的に HV Test を終らせられるようにする事が今後の課題となる。



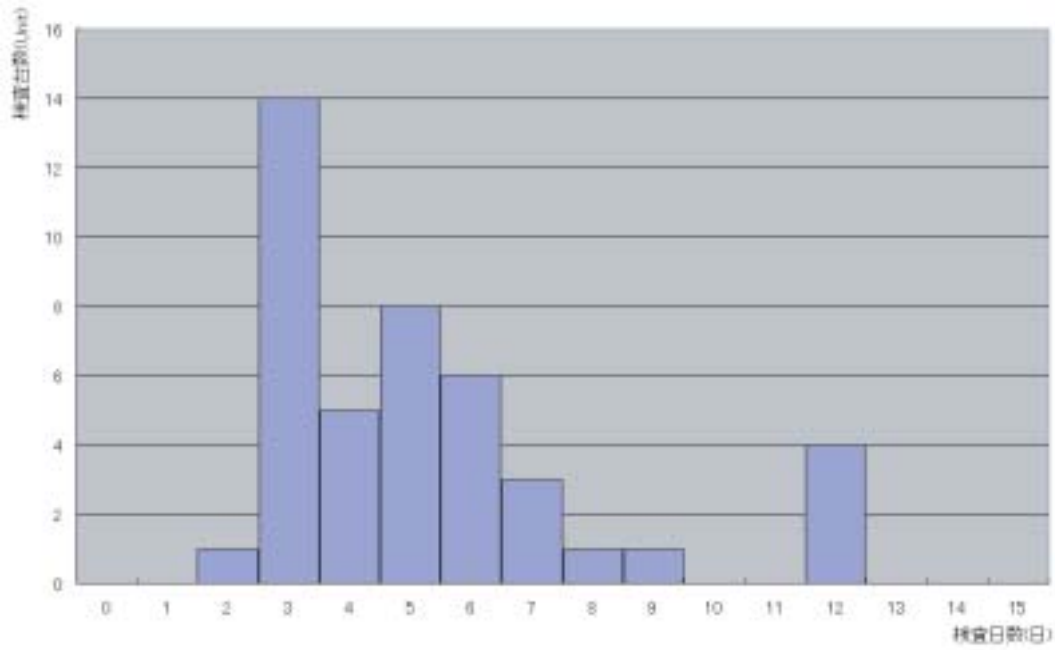


Fig. 5.17: HV Test の検査日数分布 (横軸：検査日数 縦軸：検査台数)

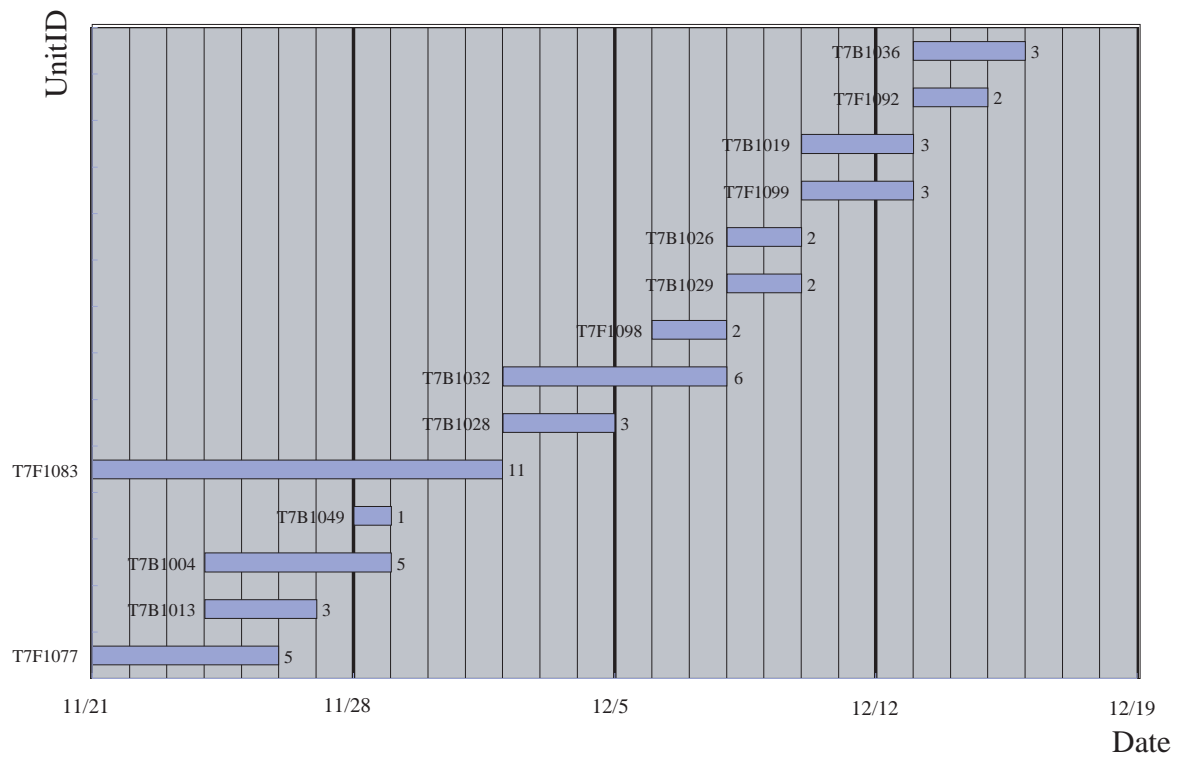


Fig. 5.18: 設備整備後の HV Test の進歩表

## 5.3 Leak Test

Fig.5.19、Fig.5.20、Fig.5.21 にそれぞれ Chamber、 $CO_2$  Channel の Main、Side に対する検査結果のヒストグラムを示す。それぞれ横軸は  $600Pa$  に加圧し、5 分間封じきった後の降下圧力  $\Delta P$  を表し、縦軸は台数を表す。青色は修復前を、赤色は修復後を表す。図中の赤線は、合格基準を示す。この結果からわかるように、Chamber 本体では合格基準を下回る Chamber はほとんど無く、高い水準で製作されている事がわかる。一方  $CO_2$  Channel の Leak は非常に多く、Leak Test に時間がかかっていた原因のほとんどは  $CO_2$  Channel からの Leak の探索であった。 $CO_2$  Channel の Leak については後に詳しく考察を行う。

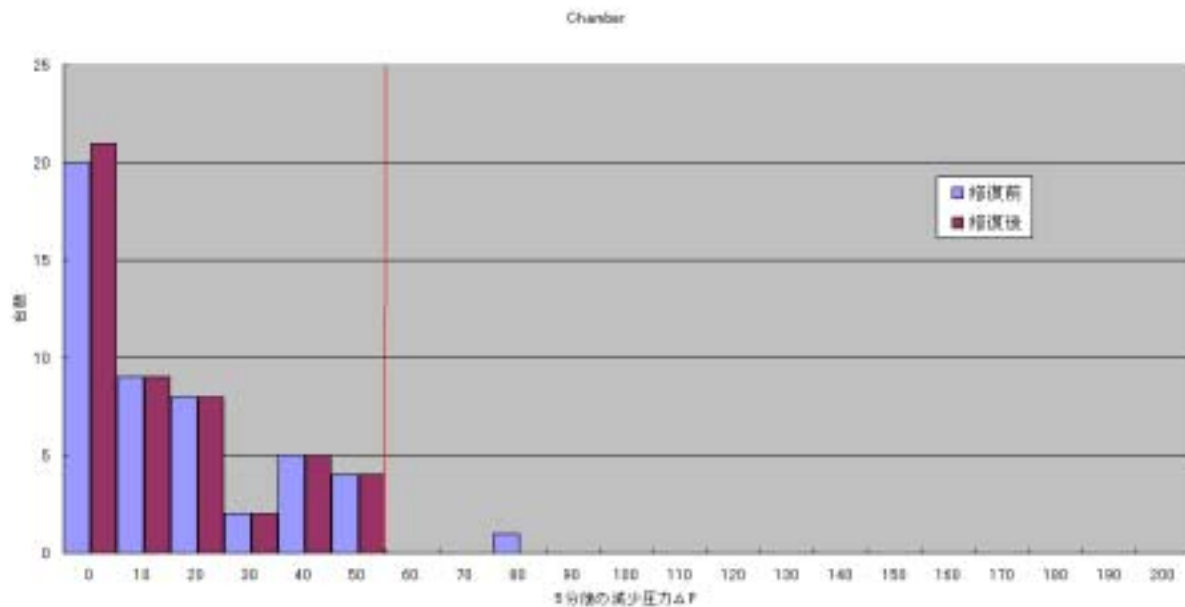


Fig. 5.19: Leak Test における降下圧力  $\Delta P$  の分布 (Chamber)

Fig.5.22 に、横軸にこれまでに行った Leak Test にかかった日数を、縦軸に検査を行った台数をとったヒストグラムを示す。Leak Test にかかった日数とは、最初に Leak 試験機を用いて Test を開始した日から、Leak の修復が行われ合格基準を満たした日までの日数である。このヒストグラムをもとに計算した Leak Test にかかった平均日数は 15.4 日である。しかし実際は、常に Leak Test を行っていたわけではなく、4.3.2 で述べた Leak 場所探索ならびに修復方法が確立するまでは、ほとんど検査を行う事が出来なかった。50 日以上かかっている 4 台は Leak 場所の特定が非常に困難であったが、確立した修復方法を用いる事により、即座に Leak 場所が特定され、合格に至った。また、後述の出荷前検査を行った TGC は神戸ではほぼ全て 1 日で検査を通過する事が出来、修復方法の確立と併せて神戸での検査時間の大幅な短縮となった。

### 5.3.1 出荷前検査

Leak 場所の探索・修復方法が確立されるまで、神戸で行われる検査の中で、最も時間のかかる検査が Leak Test であった。それは既に述べたように、 $CO_2$  Channel の Leak が予想以上に多く、また漏れの場所が  $CO_2$  Channel の大きさに比べて非常に小さく Leak 場所の探索が困難を極めたからであった。それゆえ、2002 年 10 月と 11 月に、既に製作が終了して未だ神戸に出荷されていなかった T7 Triplet52 台の  $CO_2$  Channel の Leak Test を KEK 富士実験室にて行った。出荷前検査の目的は

- (1) 集中作業をする事で、検査における Leak Test 時間の短縮
- (2) Leak の探索および修復方法の確立
- (3) 運搬に対する影響の調査

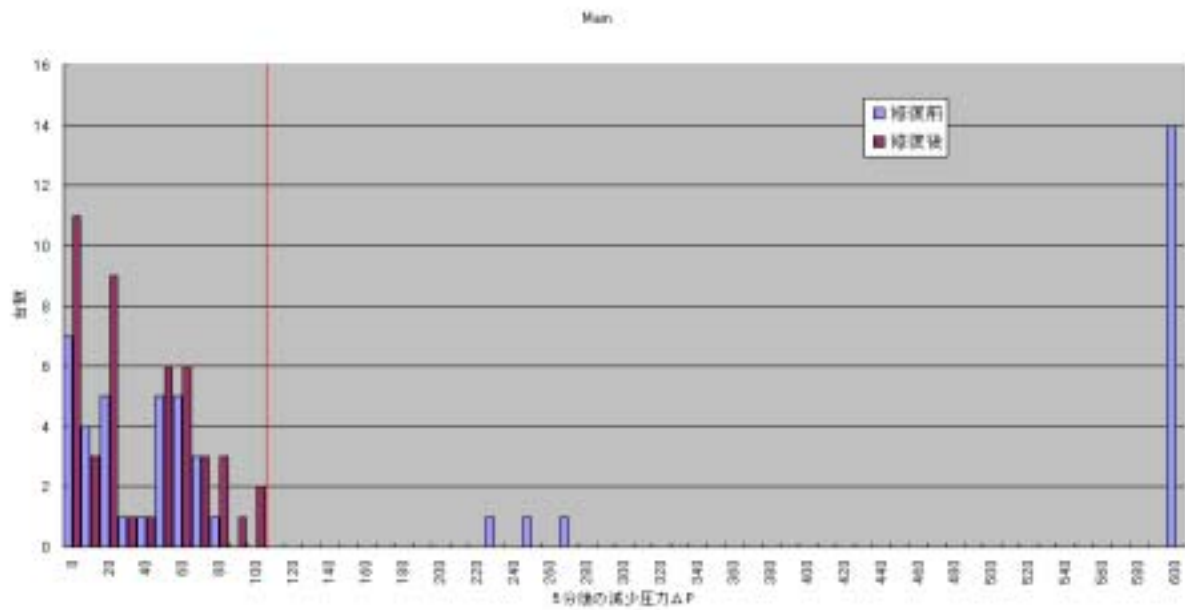


Fig. 5.20: Leak Test における降下圧力  $\Delta P$  の分布 ( $CO_2$  Channel Main 側)

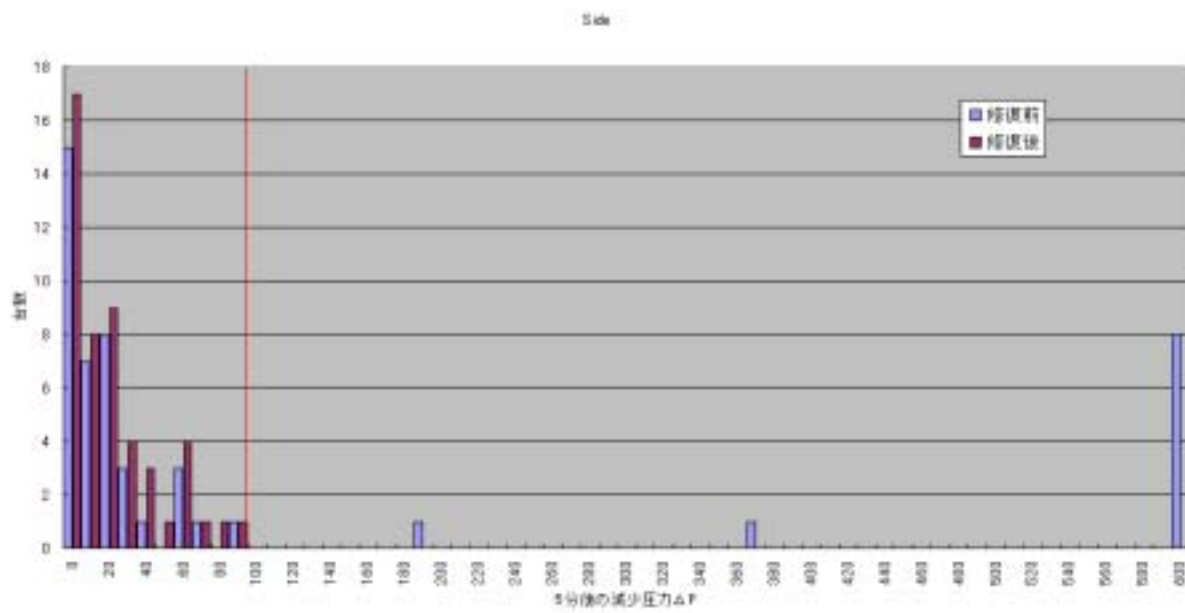


Fig. 5.21: Leak Test における降下圧力  $\Delta P$  の分布 ( $CO_2$  Channel Side 側)

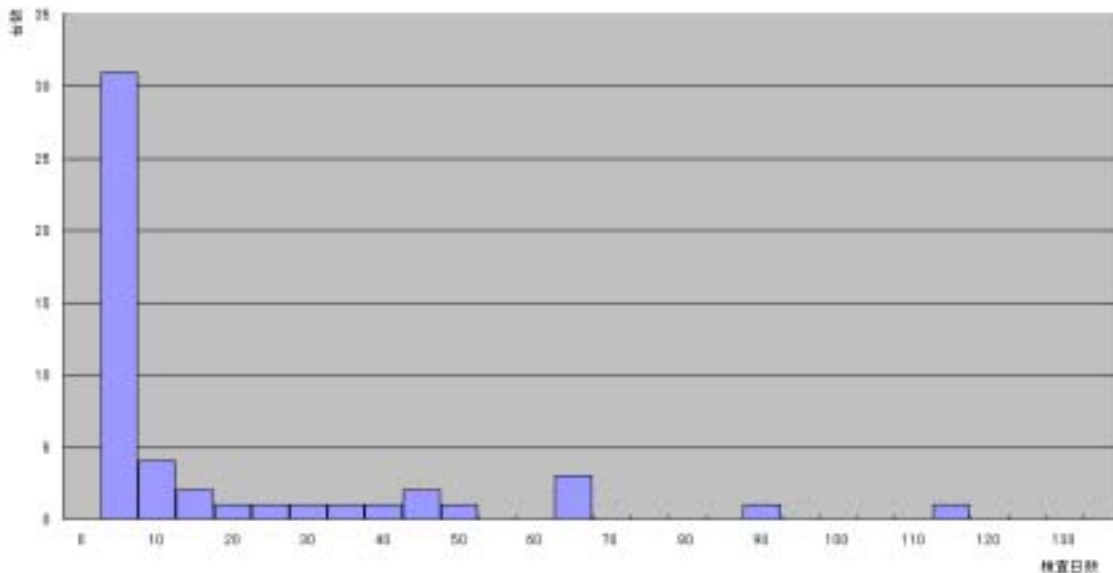


Fig. 5.22: Leak Test の検査日数分布 (横軸：検査日数 縦軸：検査台数)

#### (4) 製作へのフィードバック

である。Leak の探索・修復には、4.3.2 で述べた方法が試され、計 14 日間の集中作業で 52 台全ての検査を終えるという飛躍的なスピードで検査を行える事が実証された。また、これら 52 台の検査を行った事で、Leak 場所についての傾向がわかり、それを製作側にフィードバックすることにより、より Leak の少ない TGC が製作されるようになると期待できる。運搬に対する影響の調査では、10 月に検査され、その直後に運搬された 20Units に対しては影響が見られなかった。これより Leak の原因が運搬時の振動等によるものではなく、製作時の接着不良であると考えられるが、残り 32Units に対しても引き続き調査を続ける必要がある。

Fig.5.23 に出荷前検査を行っていない Unit と行った Unit それぞれの、Leak Test にかかった日数を示す。グラフから明らかなように、出荷前検査を行った事で、神戸での Leak Test にかかる時間が大幅に短縮された。出荷前検査を行う前の TGC では、検査に 1 日で合格したものは 31 台中わずか 6 台であったが、出荷前検査を行った TGC では、19 台中 17 台が 1 日で検査に合格する事が出来た。検査日数のかかってしまった 2 台は、出荷前検査において Leak 場所が探索出来なかった TGC で、神戸においての検査で無事 Leak 場所を特定し合格に至っている。

### 5.3.2 CO<sub>2</sub> Channel の Leak

これまでに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<sub>2</sub> Channel の Leak には種類があることや Leak 場所に傾向があることがわかった。

まず Leak の種類について述べる。CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> Channel に流れ出るため、CO<sub>2</sub> Channel の圧力が少しずつ上昇を始める。内部漏れの無い CO<sub>2</sub> Channel ではこのよう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。





Fig. 5.24: 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)

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。

ここに挙げた以外にも Leak 場所は存在したが、その全てを今回確立された探索方法で特定し、修復を行い合格基準を満たすに至っている。今後の Doublet タイプにもこの方法は適応する事が出来ると考えられており、これにより Leak Test をスムーズに行う事が可能であると見込まれている。

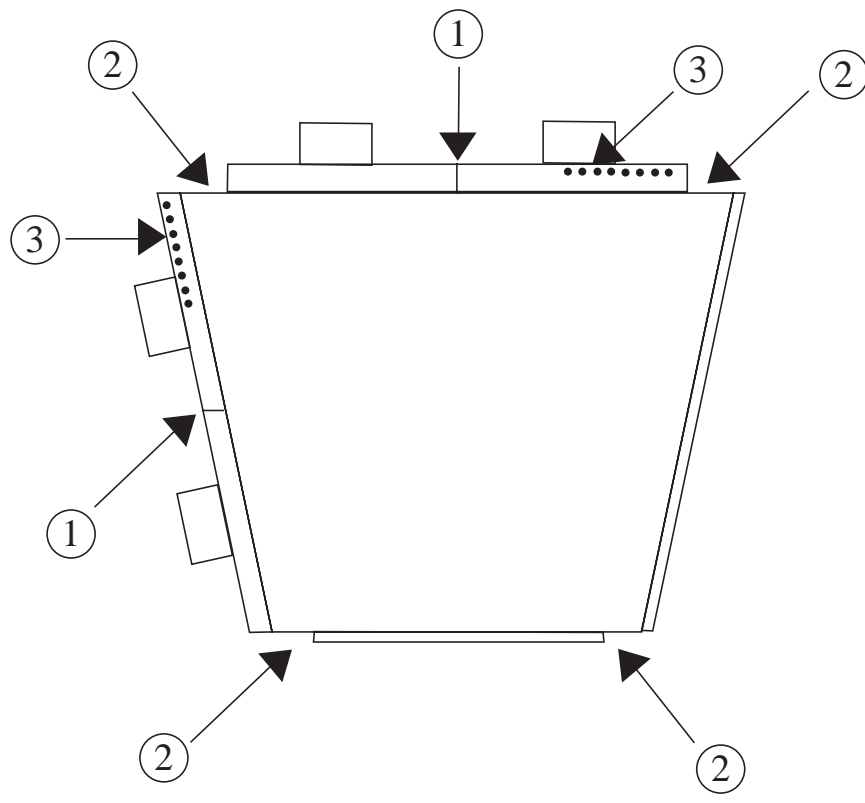


Fig. 5.25: CO<sub>2</sub> Channel の Leak 場所の傾向

## 6 高頻度 $\gamma$ 線環境下での動作テスト

### 6.1 目的

LHC 加速器は陽子陽子衝突型加速器であるため、衝突時や加速している陽子が加速管を構成する物質と相互作用することにより、実験ホール内は  $\gamma$  線や中性子線などが常に発生する環境となる。ATLAS 実験ホールにおける  $\gamma$  線と中性子線のバックグラウンド Flux のシミュレーションを Fig.6.1 に示す。図からわかるように、TGC の置かれるエンドキャップ領域では数  $\text{kHz}/\text{cm}^2$  の高頻度  $\gamma$  線や中性子線のバックグラウンド環境下に置かれる。それゆえ、そのような高頻度  $\gamma$  線環境下で正常に動作するかどうかをテストする事は非常に重要な事である。モンテカルロシミュレーションにより見積もられたバックグラウンドレートを Table6.1 にまとめる。

小型の TGC を用いた  $\gamma$  線に対する基礎研究は過去に既に行われているが [19]、日本で製作した大型の TGC を用いた  $\gamma$  線全面照射実験は行っていなかった。 $\gamma$  線環境下での動作確認は非常に重要な意味を持つので、2002 年 6 月末から 7 月上旬にかけて、CERN X5 ビームライン最下流 (West Area) の *The Gamma Irradiation Facility* (通称 *X5/GIF* エリア) に、日本で製作し、検査した実機を持ち込み、実験を行った。

粒子	n	$\gamma$	$\mu$	$hadron^\pm$	$e^\pm$
rate( $\text{kHz}/\text{cm}^2$ )	4.1	2.7	$2.1 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-2}$

Table 6.1: エンドキャップ部分におけるバックグラウンドレート

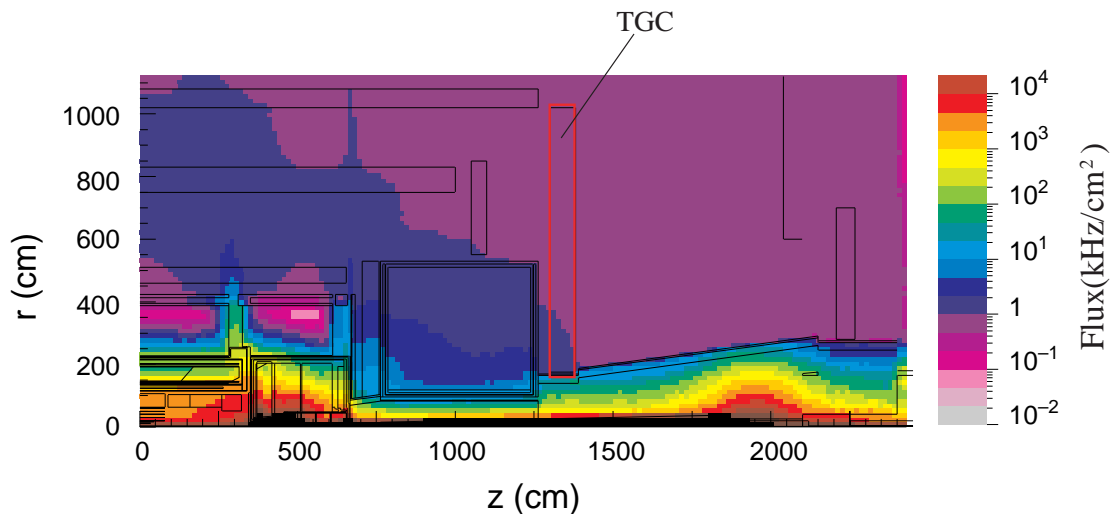


Fig. 6.1: ATLAS 実験ホールの  $\gamma$  線バックグラウンド Flux のシミュレーション (High Luminosity) [4]



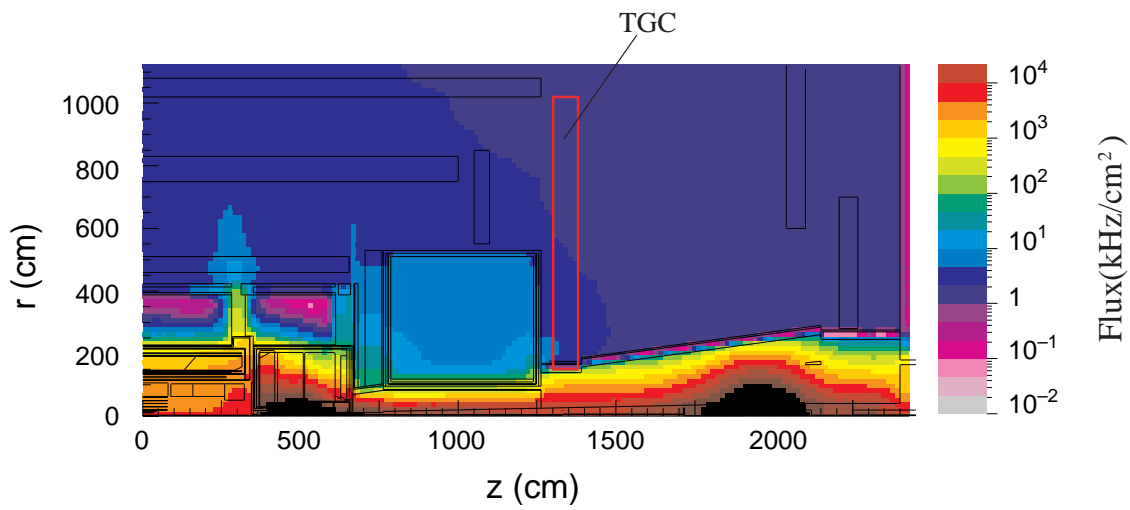


Fig. 6.2: ATLAS 実験ホールの中性子線バックグラウンド Flux のシミュレーション (High Luminosity) [4]

## 6.2 Setup

### 6.2.1 The Gamma Irradiation Facility

CERN X5/GIF エリアは、LHC 実験に使用される大型の検出器全般の高頻度  $\gamma$  線照射実験に用いられる実験エリアである。その全体図を Fig.6.3 に示す。CERN SPS 加速器で  $450\text{GeV}$  に加速された陽子を Be 固定ターゲットに衝突させる事により  $\pi$  粒子を生成し、それが崩壊する事により生成した  $120\text{GeV}/c$  の  $\mu$  粒子が Fig.6.3 の右側より入射する。ビームのパラメータを Table6.2 にまとめる。

エリア内中央には  $620\text{GBq}$  の  $^{137}\text{Cs}$  が置かれており、リモートコントロール可能な 3 重のシャッターの開閉パターンを変えることにより (Fig.6.5、Fig.6.6)  $\gamma$  線照射量を調節する事が可能となる。

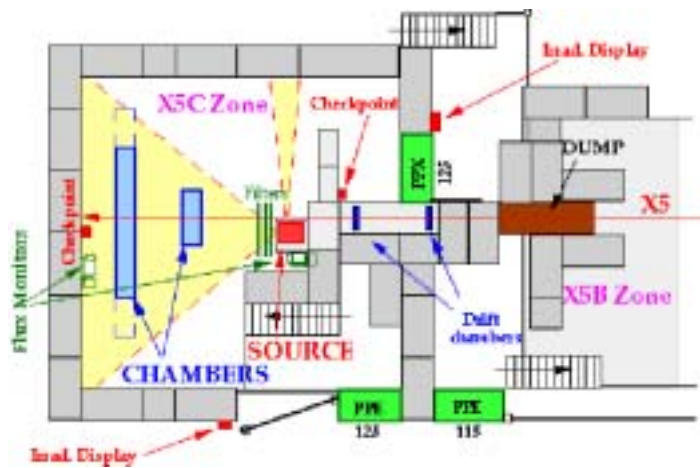


Fig. 6.3: GIF エリア全体図 [22]



Fig. 6.4: GIF エリア外観

ビーム寿命	2.38sec/1cycle
ビーム間隔	14.4sec
$\mu$ 粒子エネルギー	100GeV
ビーム有効断面積	10 × 10 cm <sup>2</sup>
$\mu$ Flux	10 <sup>4</sup> Hz

Table 6.2: SPS 加速器主要パラメータ

核種	<sup>137</sup> Cs
半減期	30year
エネルギー	665keV
最大 Flux	~ 100k Hz/cm <sup>2</sup>
コンテナサイズ	400mm(W) × 900mm(H)

Table 6.3:  $\gamma$  線源パラメータ [22]

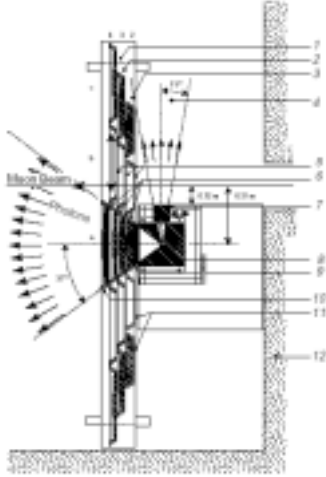


Fig. 6.5:  $\gamma$  線源のシャッター構造 (垂直方向) [22]

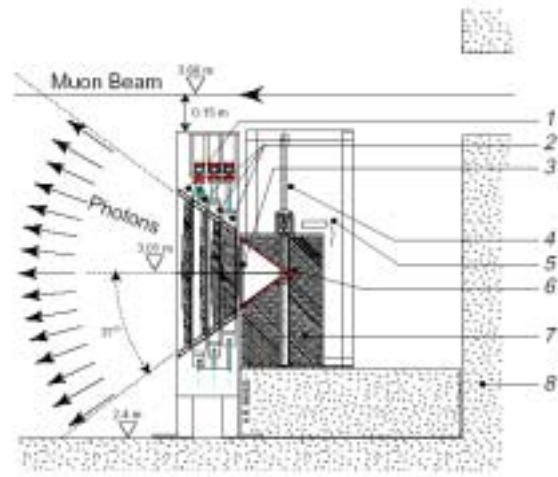


Fig. 6.6:  $\gamma$  線源のシャッター構造 (水平方向) [22]

## 6.2.2 実験エリア

実験エリア内の Setup を図 6.7 に示す。今回用いた TGC は計 5Units(Table6.4) で、T7 Triplet は神戸で検査を行った 3Units(T7B1020、T7B1041、T7F1075) のうち、T7B1020 と T7B1041 が用いられた。TGC はそれぞれ、ビームの入射角が約 20° になるよう配置された。これは、TGC がエンドキャップ部分で  $\mu$  粒子が 15° ~ 40° で入射することを考慮している。ビームの上流には、トリガー用 Scintillation Counter が 2 枚置かれ、それぞれのシグナルのコインシデンスを取る事でトリガーシグナルを生成した。この Setup でのビーム有効面積はおよそ 10cm × 10cm と見積もられた。ビームの高さは床から 120cm であったので、TGC はビームが不感領域であるボタン型サポート、ワイヤーサポートを通らないよう高さを調整して設置された。

TGC からのシグナル読み出しには、ATLAS 検出器において用いられるものと同じ ASD を用いた。TGC の時間情報は、検査で使用している物と同型の TMC モジュールを用い、ASD からの LVDS シグナルを ASD Buffer<sup>1</sup> を用いて ECL シグナルに変換し Time Jitter を測定した。ミュオンビームの有効面積から、ビームシグナルに対しては Wire、Strip それぞれ 1 チャンネルに注目すればよいが、 $\gamma$  線の全面照射を行うことより、全チャンネルの読み出しを行った。

HV モジュールも神戸での検査で使用している物と同型のサトウ電子社製 HV モジュールを用い、Current のモニターシステムは専用の物を製作した。今回のビームテストは、イスラエルグループとの共同で行われ、DAQ プログラムはイスラエルグループが、Current モニターシステムは日本グループが用意した。

ガス混合・供給システムは、OPAL 実験で使用されていた CO<sub>2</sub>+n-Pentane 供給システムを使用した (Fig.6.10) [23]。混合の原理は 4.1.8.1 で述べた方法と同じである。

<sup>1</sup>ASD 読み出し用ポストアンプ

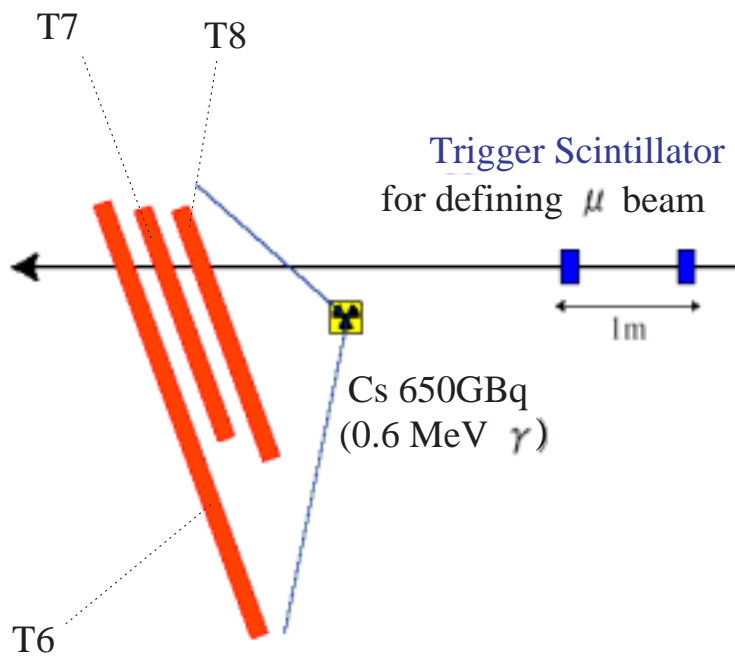


Fig. 6.7: 実験セットアップ

Type	台数	線源からの距離
イスラエル製 T6 Doublet	1 Unit	271cm
イスラエル製 T8 Doublet	2 Units	126cm、141cm
日本製 T7 Triplet	2 Units	197cm、222cm

Table 6.4: 使用した TGC

### 6.3 実験結果

TGC にカーボンの仕事関数を超えるエネルギーの  $\gamma$  線が照射されると電子が生成しシグナルが発生する。 $\gamma$  線の頻度が高くなると、空間電荷の寄与のため Wire 近傍の電場が弱められると考えられる。このため、TGC のガス増幅率が小さくなって検出効率は下がり、信号到達時間も遅れる。つまり Time Jitter は大きくなると考えられる。さらに、Anode Wire に引き寄せられる、単位時間あたりの電子数が増加する事で TGC に流れる Current が増加すると考えられる。それらの効果を調べるために、今回のビームテストでは、以下の測定を行った。

- (1)  $\gamma$  線の入射頻度を变化させた時の、検出効率と Time Jitter の頻度依存性
- (2) 2.5 日間に渡り、ATLAS 環境の 2 倍相当の  $\gamma$  線を照射し続けての、検出効率と TGC に流れる Current 値の時間変化

検出効率の評価方法としては、全トリガーシグナルに対する TGC の Hit 数で評価し、Time Jitter は Fig.5.2 と同様の評価方法を用いて評価を行った。今回のビームテストにおける ASD の閾値  $V_{th}$  は、Wire 側を  $-50mV$ 、Strip 側を  $60mV$  として測定を行った。この値は検査設備で設定しているものと同様にノイズの影響を受けない最も最小の電圧である。TGC への印加電圧は  $2.9kV$  で測定が行われた。

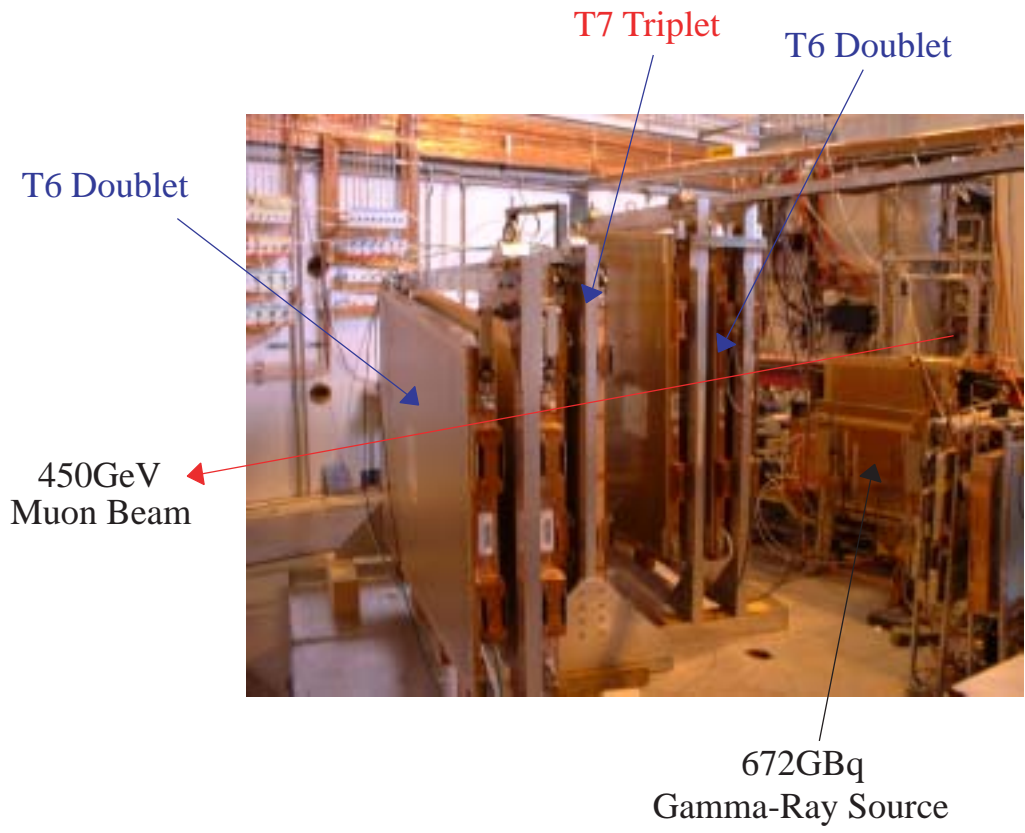


Fig. 6.8: Setup 風景 1

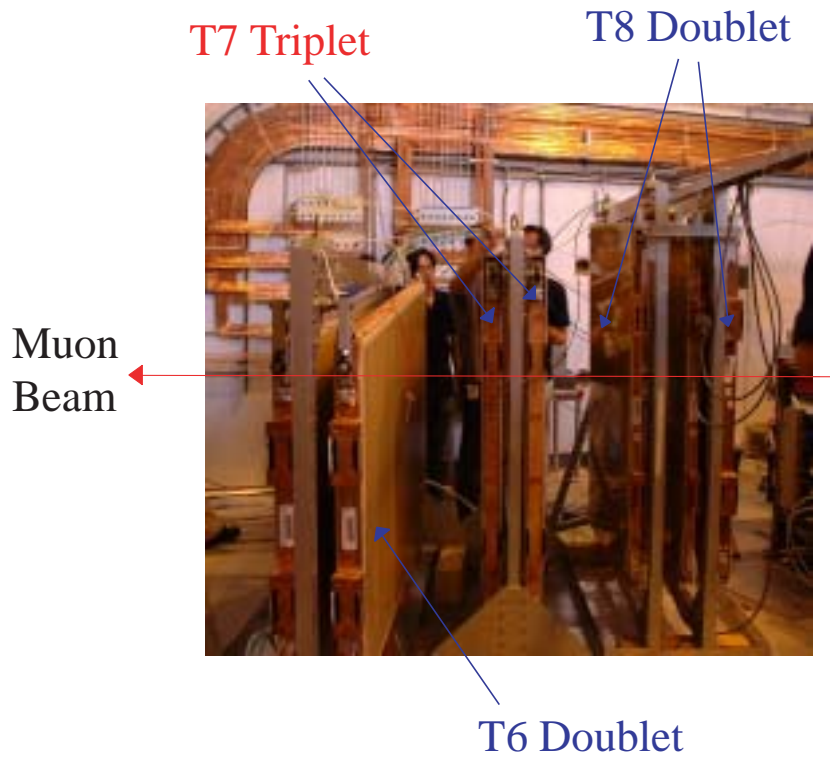


Fig. 6.9: Setup 風景 2



### 6.3.1 入射頻度依存性

#### (1) 検出効率

Fig.6.11 に、T7 タイプの検出効率の Rate 依存性を示す。グラフ横軸は ATLAS 環境とほぼ同じ Rate である  $1kHz/cm^2$  を単位としている。 $\gamma$  線の Rate を上げると検出効率が低下して行くが、ATLAS 検出器で予想される程度の  $\gamma$  線環境下でも 99%を超える検出効率を持つことがわかった。

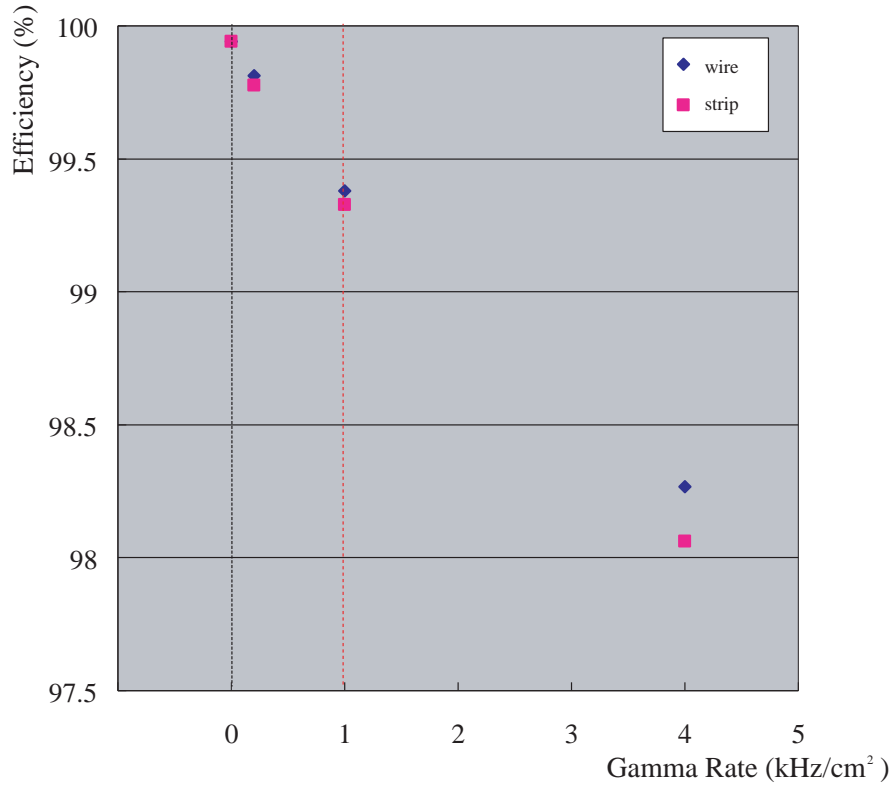


Fig. 6.11: T7 タイプの検出効率の Rate 依存性

次に、全タイプの検出効率の Rate 依存性を Fig.6.12 に示す。大きさの異なる TGC に対しても同様の結果が得られ、問題が無い事がわかった。

#### (2) Time Jitter

Fig.6.13 に T7 タイプの Time Jitter の Rate 依存性を、Fig.6.14 に全タイプの Time Jitter の Rate 依存性を示す。このグラフより、 $\gamma$  線の Rate を上げて Time Jitter に差がないことがわかる。また、2.7kV 以上の印加電圧において 25nsec 以下になることが確認出来る。これにより TGC が ATLAS 検出器で予想される  $\gamma$  線環境下においても要求された 25nsec 以下の Time Jitter を持ち、LHC のバンチを特定する事が可能である事が確認された。

次に、異なる大きさの TGC における Time Jitter を Fig.6.14 に示す。解析に用いた TGC のタイプの、その設置位置と面積から求めた  $\gamma$  線 Rate は Table6.5 である (ただし、1ATLAS= $2.7kHz/cm^2$  とする。)。Fig.6.14 から、ATLAS 環境以上の入射粒子頻度において、大きさが異なっても 2.7kV 以上の印加電圧に対して Time Jitter が 25nsec 以下になることが確認された。

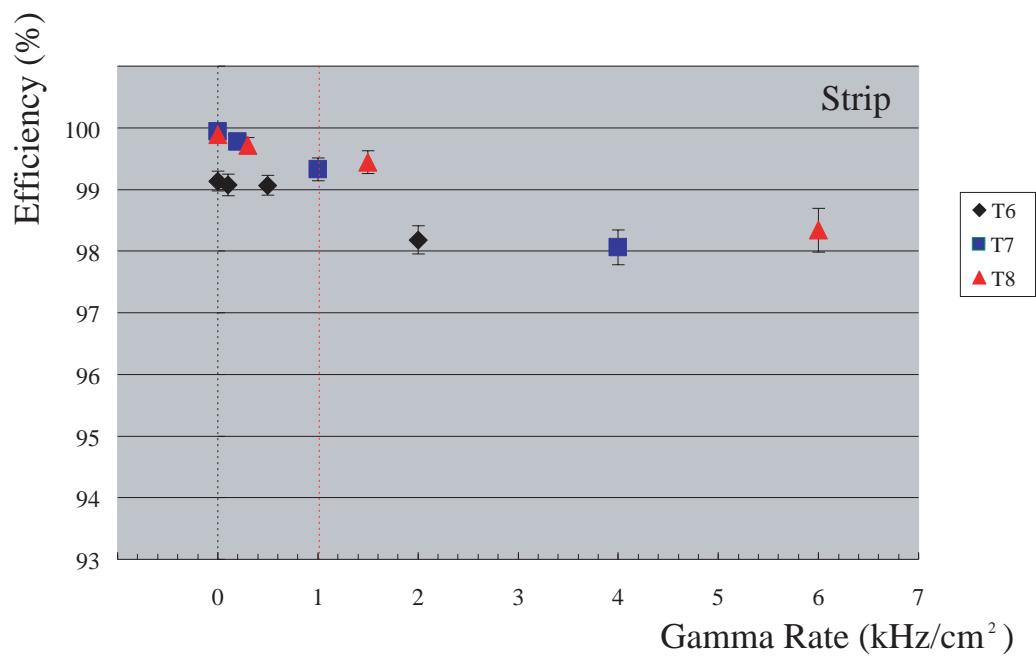
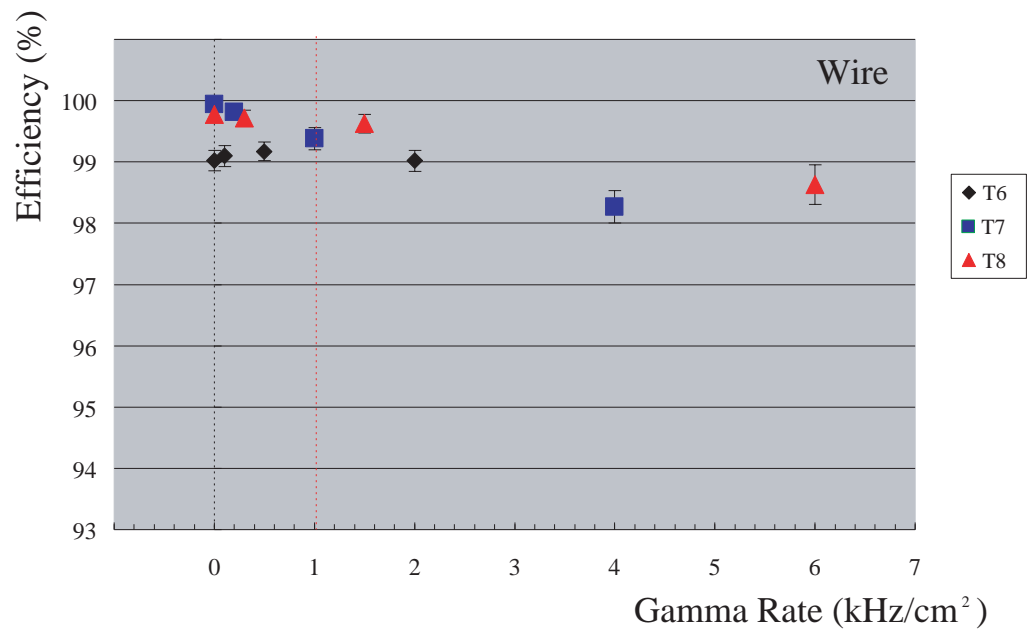


Fig. 6.12: 各タイプの検出効率の Rate 依存性

TGC Type	Rate
T8	1.5ATLAS
T7	1ATLAS
T6	2ATLAS

Table 6.5: 各 TGC の入射  $\gamma$  線の Rate

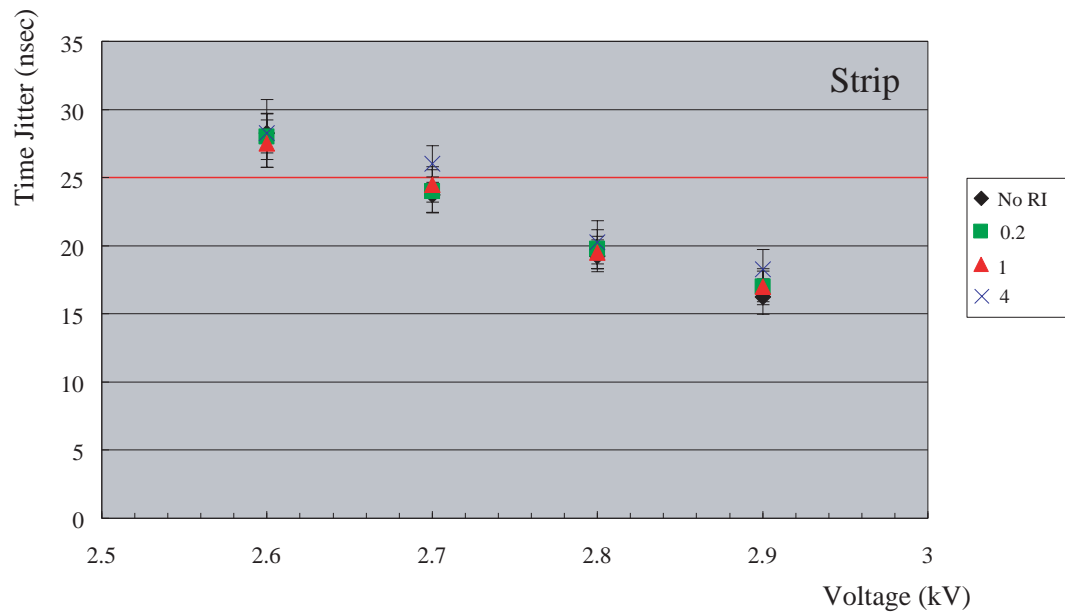
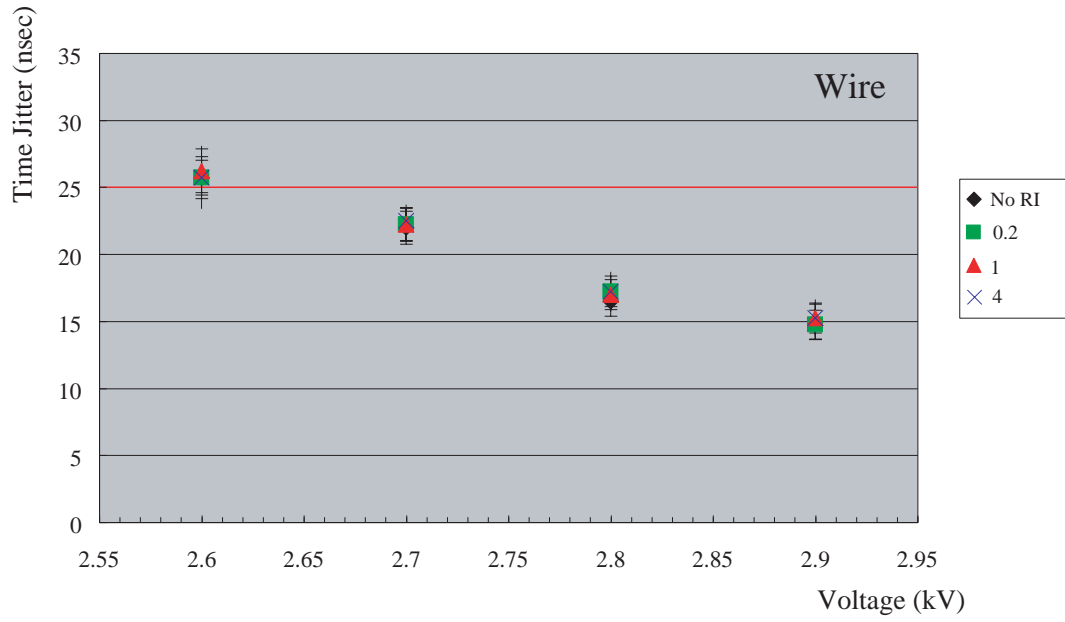


Fig. 6.13: T7 タイプの Time Jitter の Rate 依存性



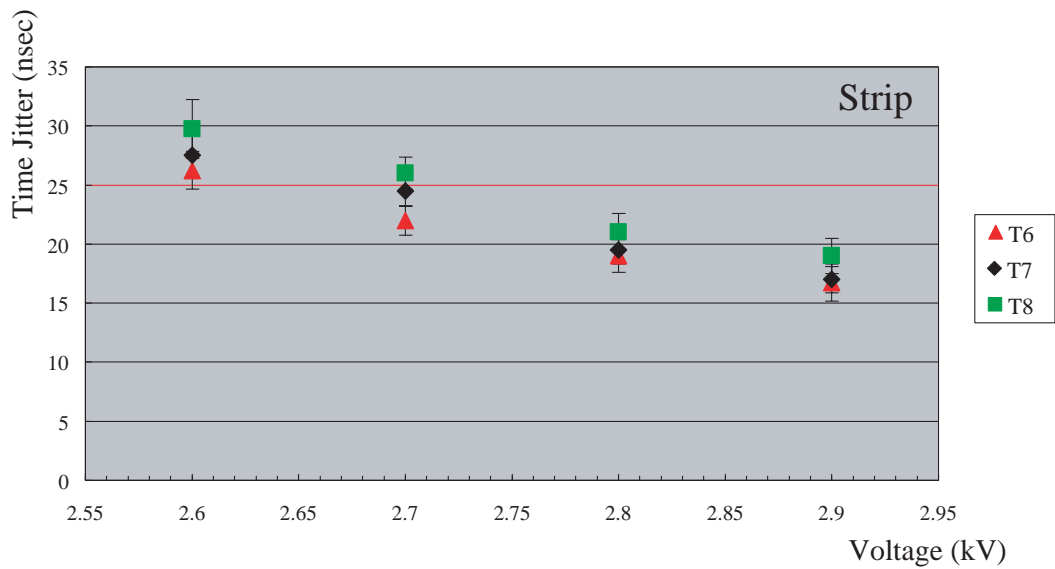
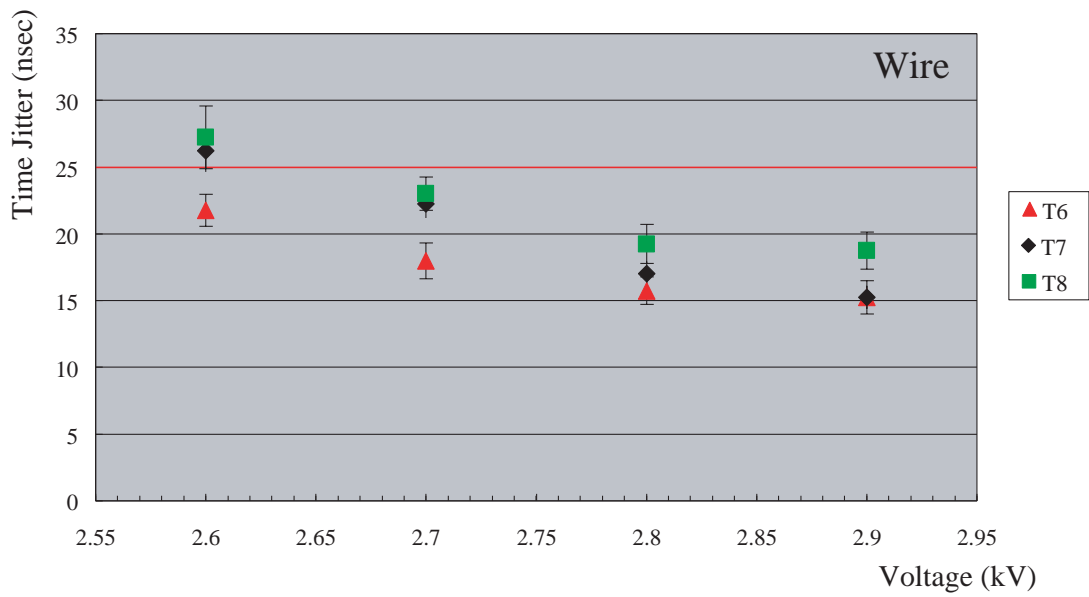


Fig. 6.14: 全てのタイプの Time Jitter の Rate 依存性

### 6.3.2 長期安定性試験

長期間、高頻度の  $\gamma$  線環境下に置かれた TGC の安定性をテストするために、約 2.3 日間にわたり今回用いた 12 層の TGC 全てに ATLAS 環境の数倍以上の  $\gamma$  線を照射し続け、4 時間ごとに測定した検出効率を行った。Fig.6.15 にその推移の一例を示す。グラフ中の TGC1 ~ TGC4 は、T7 タイプの TGC の各 1 層目と 3 層目を表す。測定期間中、検出効率は変動しているが、極端に検出効率が下がったり、照射時間に対する依存性も見られない。この小さな変動は、測定中に気圧が変化したり、ガス増幅率が変わったか、もしくはガス配管の温度変化によりガスの混合比が変わった事が原因で生じたのではないかと考えられている。

また、Fig.6.16 にその期間中、継続的に取得したある Unit の Current のモニター結果を示す。Current 値が一定間隔で変動しているのは、その間隔で HV を変えてデータを取ったためである。ATLAS 環境の数倍に相当する  $\gamma$  線を照射した事で、 $50\mu A$  程度の Current が定常的に流れている。しかし、2.3 日にわたる期間中、この Unit を含めた全 12 層は 1 度も Trip しておらず、安定に動作していた事がこのグラフよりわかる。Current が周期的に変動しているのも、検出効率と同様に気圧変化かガス混合比の変動による影響ではないかと考えられている。

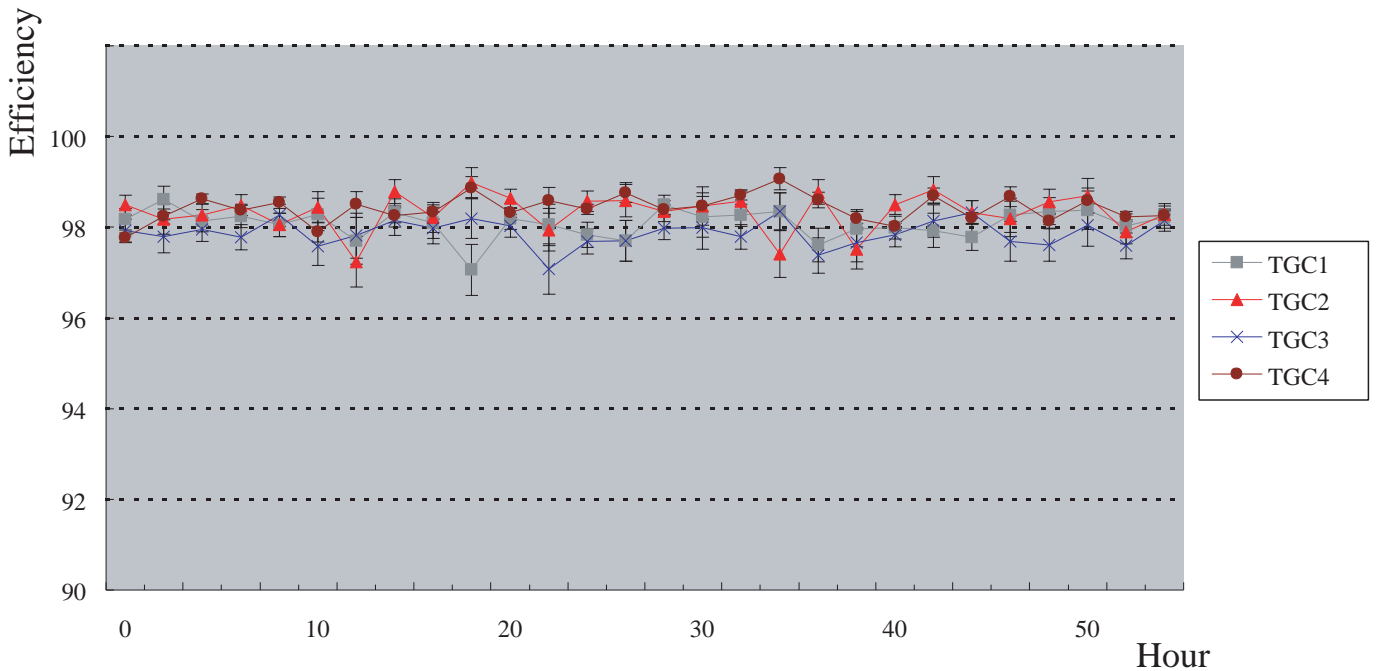


Fig. 6.15: 検出効率の長期安定性

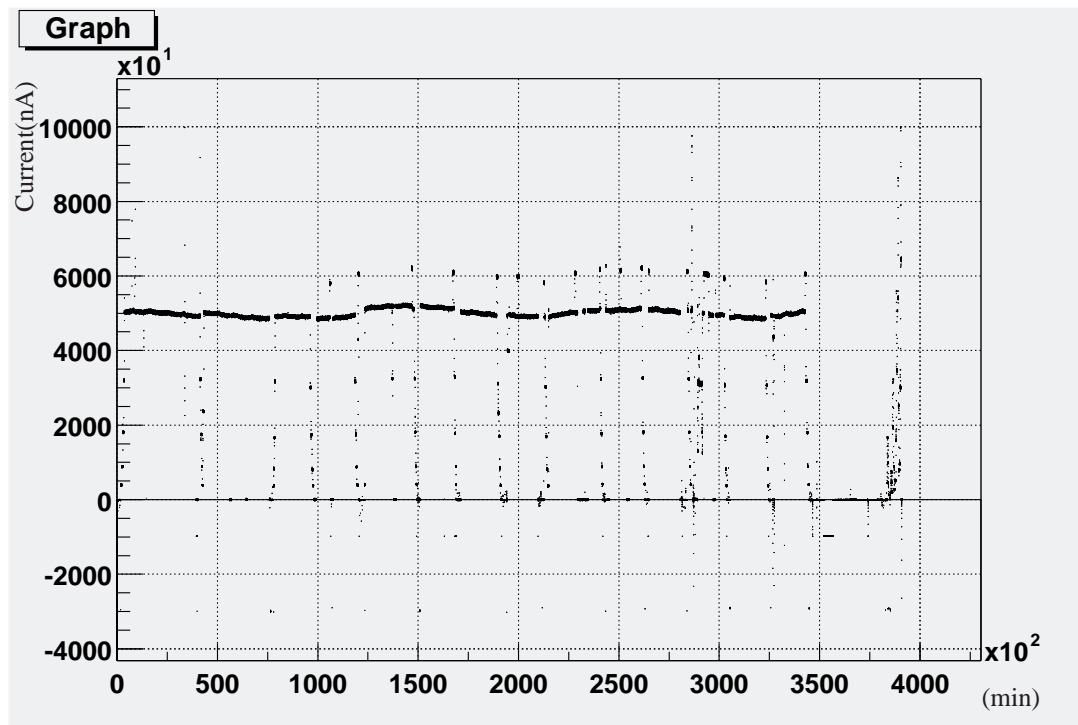


Fig. 6.16: Leak Current の長期モニター

# 7 まとめと今後

## 7.1 まとめ

KEK で製作された TGC は全て神戸大学においてその動作検査が行われる。検査項目としては

(1) CosmicRay Test

TGC はトリガーチェンバーであるので、不感領域を除き 99%以上という高い検出効率が求められる。また、LHC のバンチ間隔が 25nsec と非常に短いため、バンチを特定するために 25nsec 以下の時間分解能が要求される。神戸大学における動作検査では宇宙線ミュオンを用いて、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 (Time Jitter) の測定が行われる。

(2) HV Test

ATLAS 検出器で用いられるのと同じ混合ガス ( $CO_2:n\text{-Pentane} = 55 : 45$ ) を用い、動作電圧よりも高い 3.1kV および 3.3kV を印加し、その際に流れる Leak Current がチェックされる。

(3) Leak Test

n-Pentane は人体に有害であり、引火性物質であるので、TGC には一定の気密性が求められる。TGC および  $CO_2$  Channel を 600Pa まで加圧し、その降下圧力値で漏れ量の評価を行う。

の 3 種類が行われる。

神戸大における検査設備の構築は 2001 年より開始された。神戸で行われる検査のうち、最も重要な検査が CosmicRay Test である。検査を安定にかつ効率よく進めるためには、安定したガスの供給が必要不可欠であり、そのためのガスシステムの構築を行った。また、HV Test において、Leak Current をモニターする事は TGC の安定性を知る上で非常に重要な要素であり、そのためのモニターシステムの構築を行った。

これらの構築を行ない、検査の効率化を図ったことで 2002 年 11 月に CosmicRay Test を 8Units/2weeks で、HV Test を 2Units/3days で行える体制が整った。2002 年末現在の時点で、KEK において製作された TGC のうち T7 Triplet タイプ 72Units が神戸に運搬され、そのうち 32Units の CosmicRay Test を終了した。

また、神戸で検査が行われた TGC のうち 3Units を CERN に送り、高頻度  $\gamma$  線環境下において大型の TGC を用いた初の動作テストが行われた。この動作テストにより、KEK で製作された TGC が ATLAS 環境の数倍の高頻度  $\gamma$  線入射に対して要求された性能を満たし、安定に動作する事が確認された。

## 7.2 今後の予定

実験開始までのスケジュールは既に決まっている事から、検査予定はそれに従わなければならない。2003 年 5 月までに T7 Triplet 全 Unit の検査を終了し、引き続き T7 Doublet 192Units、T4/T5 Doublet 192Units の検査を行い、全ての検査を 2004 年 9 月に終了する予定である。

# 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、信州大学竹下徹教授に感謝します。

そして、慣れない外国でのテストにあたり、現地での様々な世話や助言、御指導を下さいました東京大学素粒子物理学国際研究センター石野雅也助手、南條創氏に深く感謝します。

また、大学院入学後から同じ研究室で多くの時間を共に過ごし、研究活動を行ってきた神戸大学の美馬孝行氏、奥村和恵氏に感謝します。さらに、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坂東隆哲氏、竹本享史氏、松本悠氏、信州大学の宮崎由之氏、大下英敏氏、中川義徳氏、京都大学の溝内健太郎氏、辻伸介氏、そして神戸大学の中畝佑輔氏、荒滝陽二氏、藤田豊氏、一宮亮氏、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。

最後に、大学院進学に対しあらゆる面での援助、支援をしてくれた両親と、神戸大学への進学に際して数々の助言を与えて下さいました京都大学笹尾登教授、東京大学素粒子物理学国際研究センター坂本宏教授に感謝します。

# Figure List

2.1	LHC 加速器 [1]	4
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)	7
2.3	Higgs 粒子の生成断面積	7
2.4	Higgs 粒子の分岐比と質量の関係	8
2.5	ATLAS の Higgs 発見能力 [3]	8
2.6	ATLAS Detector [1]	9
2.7	内部飛跡検出器 [4]	10
2.8	カロリメータ [4]	11
2.9	超伝導空芯トロイドマグネットの配置 [4]	12
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]	12
2.11	粒子の透過性の違い	13
2.12	ミュオン検出器 [4]	13
2.13	Monitored Drift Tube [4]	14
2.14	Cathode Strip Chamber [4]	15
2.15	Resistive Plate Chamber [4]	16
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 [18]	25
3.8	日本グループが製作する TGC のタイプと大きさ [16]	26
3.9	TGC 製作工程 [21]	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 <sub>2</sub> Channel 製作 1	31
3.25 CO <sub>2</sub> Channel 製作 2	31
3.26 CO <sub>2</sub> Channel	32
3.27 TGC Production Plan	32
3.28 T7 Triplet タイプの製作	33
3.29 T7 Doublet タイプの製作	34
4.1 CosmicRay Test 用検査設備	37
4.2 y 方向から見た検査設備の模式図 (a) と写真 (b)	37
4.3 トリガースキーム	38
4.4 Drift Tube の断面	39
4.5 電場の強さと Drift Velocity の関係	39
4.6 2次元の Tracking	40
4.7 Drift Tube のヒットの時間分布	41
4.8 X の決定	41
4.9 Track の選択	42
4.10 検出器とエレクトロニクスの構成	43
4.11 ASD(シールド無し)	44
4.12 ASD(シールドを付け TGC に実装)	44
4.13 ASD チップのダイアグラム [4]	44
4.14 TMC の原理図	45
4.15 TMC におけるシグナルのタイミング (common stop mode) [16]	45
4.16 SWINE におけるシグナルのタイミング [16]	46
4.17 DAQ/解析用 PC 環境	47
4.18 データフローチャート	48
4.19 Track Constraint による Efficiency と Track 数の変化	49
4.20 Scintillation Counter の Profile	50
4.21 Drift Tube の Profile	51
4.22 Drift Tube の multiplicity 分布	52
4.23 TGC の Profile	53
4.24 Efficiency Mapper	54
4.25 ガス混合システム	56
4.26 ガス供給システム	58
4.27 ガス分配用ラック	58
4.28 流量モニター結果	59
4.29 分配後のモニター結果 (横軸: 時間 [min]、縦軸: 出力電圧 [V])	59
4.30 ガス分配システム	60
4.31 HV Test System	62
4.32 n-Pentane の蒸気圧曲線	63
4.33 HV Test 配管図	64

4.34	Monitor System 構成図	65
4.35	HV Test 用 OP Amp 回路	65
4.36	Log Viewer	67
4.37	タイマープログラム	67
4.38	Leak Test 試験機	69
4.39	Leak 修復用治具	70
4.40	Leak Test 試験機 配管図	71
5.1	検査枚数の推移	73
5.2	Time Jitter の定義	74
5.3	Efficiency Map 例 (T7B1037)	75
5.4	Efficiency Map 例 (T7F1082、平面性が悪い例)	76
5.5	T7B1037 平面性データ (Doublet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)	77
5.6	T7B1037 平面性データ (Triplet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)	77
5.7	T7F1082 平面性データ (Doublet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)	77
5.8	T7F1082 平面性データ (Triplet 接着時測定、単位:100 $\mu$ m)	77
5.9	Gap 間隔と Pulse Hight(ゲイン) の相関 [4]	78
5.10	TMC 時間分布の例 (T7F1083)	79
5.11	Time Jitter の入射角度依存性 [18]	80
5.12	HV Curve の一例 (T7B1037)	80
5.13	CosmicRay Test の検査日数 (横軸:UnitID 縦軸:検査日数)	81
5.14	設備整備後の CosmicRay Test の進歩表	82
5.15	HV Test Current Monitor 結果	83
5.16	Current Monitor 結果 2	84
5.17	HV Test の検査日数分布 (横軸:検査日数 縦軸:検査台数)	85
5.18	設備整備後の HV Test の進歩表	85
5.19	Leak Test における降下圧力 $\Delta P$ の分布 (Chamber)	86
5.20	Leak Test における降下圧力 $\Delta P$ の分布 ( $CO_2$ Channel Main 側)	87
5.21	Leak Test における降下圧力 $\Delta P$ の分布 ( $CO_2$ Channel Side 側)	87
5.22	Leak Test の検査日数分布	88
5.23	出荷前検査前後の検査日数	89
5.24	20mm FRP フレームと Chamber の隙間	90
5.25	$CO_2$ Channel の Leak 場所の傾向	91
6.1	$\gamma$ 線バックグラウンド Flux のシミュレーション	92
6.2	中性子線バックグラウンド Flux のシミュレーション	93
6.3	GIF エリア全体図 [22]	93
6.4	GIF エリア外観	93
6.5	$\gamma$ 線源のシャッター構造 (垂直方向) [22]	94
6.6	$\gamma$ 線源のシャッター構造 (水平方向) [22]	94
6.7	実験セットアップ	95
6.8	Setup 風景 1	96
6.9	Setup 風景 2	96
6.10	ガス混合・供給システム [23]	97
6.11	T7 タイプの検出効率の Rate 依存性	98
6.12	各タイプの検出効率の Rate 依存性	99
6.13	T7 タイプの Time Jitter の Rate 依存性	100



6.14 全てのタイプの Time Jitter の Rate 依存性 . . . . .	101
6.15 検出効率の長期安定性 . . . . .	102
6.16 Leak Current の長期モニター . . . . .	103

# Table List

2.1	LHC 加速器主要パラメータ [2]	5
2.2	MDT の各種パラメータ [4]	14
2.3	CSC の各種パラメータ [4]	15
2.4	RPC の各種パラメータ [4]	16
2.5	TGC の各種パラメータ [4]	17
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 (予定含む)	33
3.5	検査スケジュール (予定含む)	35
3.6	各検査の目標 Unit 数	35
4.1	サトウ電子 HV モジュールからの出力	63
5.1	検査完了枚数 (2002 年 12 月末現在)	72
5.2	T7B1037 の検出効率	77
5.3	T7F1082 の検出効率	77
6.1	エンドキャップ部分におけるバックグラウンドレート	92
6.2	SPS 加速器主要パラメータ	94
6.3	$\gamma$ 線源パラメータ [22]	94
6.4	使用した TGC	95
6.5	各 TGC の入射 $\gamma$ 線の Rate	99

# 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 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
- [15] 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」,2000年2月
- [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」,2002年2月
- [17] 東京大学 深津吉聡、修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガー用 Thin Gap Chamber の動作原理の研究」,1998年3月
- [18] 東京大学 長嶋壮洋、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」,2000年2月
- [19] 東京大学 津野総司、修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガー検出器のバックグラウンド放射線に対する動作研究」,1999年1月
- [20] 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
- [21] 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

- [22] S. Agosteo et al., A facility for the test of large area muon chambers at high rates, CERN-EP-2000-031 (February 16 2000)
- [23] ATLAS Muon Spectrometer, Thin Gap Chamber Gas System Safety Report, TGC-002-98 ATLAS TGC Collabolation (1 Jan 1999)