

修士学位論文

ATLAS 実験に用いる TGC のための検査設備
の構築及びガスシステムの開発

神戸大学自然科学研究科物理学専攻

奥村 和恵

平成 15 年 2 月

概要

CERN (欧州原子核研究機構)において世界最高エネルギー (14TeV) をもつ LHC (大型陽子 - 陽子衝突型加速器) 実験が 2007 年に開始画予定されており、現在建設が進められている。ATLAS 測定器はその LHC に設置される測定器の 1 つであり、Higgs 粒子の探索を主な目的としている。Thin Gap Chamber (TGC) はミューオントリガーチェンバーとして ATLAS 測定器のエンドキャップ部分に設置される予定である。われわれのグループではこの TGC のうち約 1000 台分の製造を担当している。

この TGC の量産は現在 KEK (高エネルギー加速器研究機構) で行われているが、それに伴い、”製造されたすべての TGC が要請された動作、性能を満たしているか”を評価する必要がある。このような大規模な検査を行うために神戸において検査設備の構築を行い、動作させるに至った。

目次

第 1 章	Introduction	3
第 2 章	ATLAS 実験	5
2.1	LHC 計画	5
2.2	LHC の物理	5
2.3	ATLAS 測定器	7
2.4	ミューオントリガー検出器	10
第 3 章	ガスチェンバーの原理	15
3.1	増幅過程	15
3.2	増幅モード	16
3.2.1	ガスチェンバーのシグナルの生成	18
3.2.2	Drift	18
3.3	充填ガスと quenture	20
3.4	rate 依存性	23
第 4 章	Thin Gap Chamber (TGC)	25
4.1	TGC の構造	25
第 5 章	検査設備	32
5.1	TGC の量産と検査	32
5.2	ガスリークテスト	32
5.2.1	ガスリークテストの検査方法と合格基準	34
5.2.2	ガスリークテストのシステム	34
5.2.3	リークテストの検査状況	35
5.3	HV テスト	36
5.3.1	HV テストの合格基準	36
5.3.2	HV テストのシステム	37
5.3.2.1	HV テストの検査状況	37
5.4	Cosmic Ray Test	38
5.4.1	Cosmic Ray Test の合格基準	38
5.4.2	Cosmic Ray Test のシステム	39
5.4.2.1	Scintillation Counter	39
5.4.2.2	Drift Tube	40
5.4.2.3	TGC	43
5.4.2.4	Cosmic Ray Test の検査状況	43

第 6 章	gas システムの開発	44
6.1	Drift Tube のシステムと評価	44
6.1.1	Drift Tube の構成	44
6.1.2	Drift Tube の動作結果	47
6.2	Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムと評価	48
6.2.1	Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムの構成	48
6.2.2	Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムの動作結果	59
6.3	HV テストにおける TGC 用ガスシステムの構成と評価	63
6.3.1	Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムの構成	63
6.3.2	Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムの動作結果	65
第 7 章	検査結果とまとめ	67
第 8 章	Appendix	68
8.1	space charge effect の計算	68
	参考文献	75

第1章 Introduction

欧州原子核研究機構 (CERN) において、重心系エネルギー 14TeV という世界最高のエネルギーを持つ陽子・陽子衝突型加速器である LHC (Large Hadron Collider) の、2007 年の稼働が予定されており、現在建設が進められている。LHC におけるメインテーマとして Higgs 粒子の探索があげられる。Higgs 粒子の発見は素粒子の質量の起源を担い、電弱対称性の破れのメカニズムを明らかにする上で、非常に重要である。Higgs 粒子は、標準理論が予言する素粒子の中で唯一発見されていない粒子であり、標準理論からその質量は約 1TeV 以下であると期待される。

LHC に設置される 4 つの測定器のうちの 1 つが ATLAS 測定器である。ATLAS 測定器は Higgs 粒子の発見をはじめ、超対称性粒子の発見やトップクォークの精密研究といったさまざまな物理の測定を行うことのできる大型の汎用測定器である。ATLAS 測定器に組み込まれる多くの検出器の中で、ミュオンの測定に使用されるミュオンスペクトロメーターは、ミュオンが物理の重要な事象にかかわっているために、必要性の高い検出器である。よって、ミュオンを含むイベントを選択することもまた重要であり、これを行うミュオントリガトリガーは十分な性能を持っていないとてはならない。ミュオントリガーチェンバーである Thin Gap Chamber (TGC) は ATLAS 測定器のエンドキャップ部分に設置される。Thin Gap Chamber はガスチェンバーであり、ATLAS 測定器に設置されるためには、

- 時間分解能が良い
- エンドキャップという大面積を覆うことができる
- High Rate に対する耐性がある、

という 3 つの要請をクリアしてなくてはならない。

ここでガスチェンバーとは、入射粒子が検出器内のガスをイオン化した際生成された電子をガス増幅し、そのシグナルを測定する検出器である。一般的なガスチェンバーのメリットとしては、物質量が少ないために運動量測定に向いていることと、検出器を構成する材質が少なく、エレキに増幅回路が必要ないことから 1 チャンネル当たりのコストが安くなるという 2 点があげられる。対して、デメリットは、不感時間が長く、High Rate に対して弱いことである。ATLAS 検出器に組み込むためにはこのようなガスチェンバーのデメリットを克服しなくてはならない。そこで、TGC の構造や充填ガスに関して十分な考慮を行った。具体的には、High Rate に耐えることができるようにアノード・カソード間隔を小さくしたり、十分なゲインを得るために、高電圧をかけることが可能な $\text{CO}_2 + n\text{-Pentane}$ を用いたり、十分な時間分解能を得るために、アノード間隔を小さくしたり、といったことである。

現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で TGC の量産が進められており、製作されたすべての TGC は神戸にある検査設備で性能検査を受け、合格したものだけが CERN に輸送される。ガスチェンバーである TGC の動作を検査するためには、何よりガスの制御を行うことが重要である。ガス制御については以下のことに注意が必要である。まず、TGC は圧力変化に弱いため、壊さないように圧力をコントロールしなくてはならない。さらに、増幅率は充填ガス中に空気などが入ることによって下がるので、これを防ぐ工夫が必要である。また、TGC に用いている $\text{CO}_2 + n\text{-Pentane}$ が

スが特殊なガスであるので、ガスの性質に十分注意した上でシステムを組む必要がある。*TGC* のサイズが大きいため、結果的にガスシステムの規模が大きくなりシステム全体を安定な状態に保つのが難しい。これを実現するためには配管に工夫が必要である。以上のような条件を満たすようなガスシステムの構築を行い、検査設備として動作させた。

本論文の構成は、第2章では、*ATLAS* 実験の概要を述べる。*LHC* 計画と *LHC* で期待される物理について述べ、*ATLAS* 測定器を構成する検出器についてふれる。次に、*ATLAS* 検出器の一部であり、我々が検査を行っている *TGC* の概要について述べる。第3章では、ガスチェンバーの動作原理について、とくに本論分の核心である *TGC* や *Drifttube* に深くかかわる部分を中心に説明している。第4章では、第3章のガスチェンバーの性質と *ATLAS* 実験の環境からの要請を踏まえて、*TGC* の構造を説明していく。第5章では、神戸で行われている各検査について、合格基準、検査システム、検査結果にふれる。第6章は、本論分の核心となる *CosmicRayTest* における *Drifttube* および *TGC* のガスシステムについて、要請とそれを踏まえたシステムについて説明し、実際の動作結果についても述べる。第7章では、ガスシステムを中心に検査設備についてまとめ、今後の展望と課題について述べている。

第2章 ATLAS 実験

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

2.1 LHC 計画

スイスのジュネーブにある欧州素粒子物理学研究所 (CERN) において、2007 年の実験開始にむけて LHC (Large Hadron Collider) の建設が進められている。LHC 加速器は周長 27km の陽子・陽子衝突型加速器であり、重心系の衝突エネルギーは 14TeV 、Bunch 間隔は 25ns である。また、この加速器の luminosity は $10^{-34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と非常に高い。表 2.1 に LHC の主要なパラメータを示す。

主リング周長	26,658.87 m	バンチ間隔	24.95 ns
陽子ビームエネルギー	7 TeV	バンチあたりの陽子数	1.1×10^{11}
ルミノシティ	$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	バンチの長さ	77 mm
衝突点でのビーム半径	16 μm		

表 2.1: LHC 加速器の主要パラメータ

LHC は高いエネルギーを実現しやすい加速器である。それは、陽子は電子に比べ質量が大きいため放射損失が少なく、電子より高いエネルギーまで加速することができるからである。一方で、陽子は内部構造を持つため、反応の際に新しい信号に対して (強い力でおきる) 複合粒子同士の散乱といったバックグラウンドのレベルが高くなる。よって LHC に設置される検出器は粒子の入射頻度の高い環境に耐え、目的とする物理事象の選別が可能であることを必要とする。

2.2 LHC の物理

LHC では Higgs 粒子の探索をはじめ、超対称性粒子 (SUSY) の探索、t クォークや b クォークの物理の研究等を目的としている。ここでは、なかでも最も重要な課題であり、ATLAS 実験のメインテーマでもある Higgs 粒子に関して述べることにする。

ATLAS 実験での、Higgs 粒子の主な生成過程は図 2.1 の 4 つである。

Diagram(a) は $gg \rightarrow H_{SM}^0$ のグルオン - グルオン融合 (gluon fusion) である。Diagram(b) は $qq \rightarrow qqH_{SM}^0$ の WW、ZZ 融合 (W/Z fusion process) である。Diagram(c) は $qq/gg \rightarrow ttH_{SM}^0$ の t \bar{t} クォーク随伴生成 (top associate process) である。Diagram(d) は $qq \rightarrow (W/Z)H_{SM}^0$ の W、Z 粒子随伴生成 (W/Z fusion associate process) である。

これらを見るとわかるように、Higgs 粒子は t クォークや、W ボソン、Z ボソンのような質量の重い粒子と強く相互作用する。

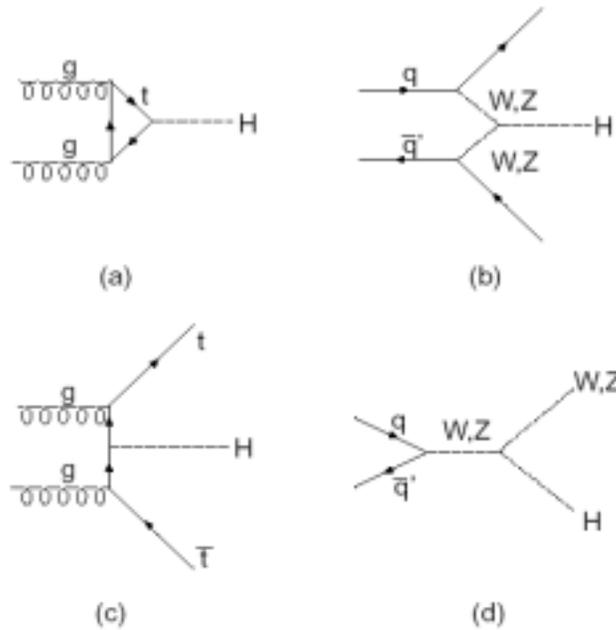


図 2.1: Higgs 生成の Feynman Diagram

Higgs 粒子の探索では、Higgs 粒子の質量によって生成断面積 (図 2.2)、崩壊過程 (図 2.3) が違うので、探索する崩壊モードも異なってくる。

ここで、それぞれの生成過程についての生成断面積を図 2.2 に示す。

$gg \rightarrow H$ が最も大きな生成断面積である。 $qq \rightarrow Hqq$ が WW、ZZ 融合 (W/Z fusion process) である。 $qq \rightarrow HW$ 、 $qq \rightarrow HZ$ が W、Z 粒子随伴生成 (W/Z fusion associate process) を示している。 $gg, qq \rightarrow Hbb$ もしくは $gg, qq \rightarrow Htt$ が湯川カップリングによる Higgs の生成である。

ここで Higgs 粒子の崩壊過程について図 2.3 に示す。

ここで Higgs 粒子の質量 (M_H) に対する崩壊過程について述べる。

- $80 < m_H < 120$
Higgs の主な崩壊過程は $b\bar{b}$ であるが、バックグラウンドが大きく有効ではない。H $\gamma\gamma$ の分岐比は 10^{-3} 程度と小さいが、Higgs の生成断面積が比較的大きく、バックグラウンドが少ないため、 $\gamma\gamma$ への崩壊に注目することになる。
- $120 < m_H < 2m_Z$
ここでは、分岐比の高い H $ZZ^* l^+l^-l^+l^-$ に注目したい。バックグラウンドとして、 $qq \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^* l^+l^-l^+l^-$ があるが、それほど多くない。
- $2m_Z < m_H$
H $ZZ l^+l^-l^+l^-$ が分岐比より最も有効で、バックグラウンドも少ない。よって、このモードを調べることが重要となる。しかし、500GeV 以上になると、崩壊幅は急激に広がり、バックグラウンドとの区別が困難になる。さらに、図 2.2 からわかるように Higgs 粒子の生成断面積も質量が大きくなるにつれて減少するため、分岐比の高い、H $ZZ l^+l^- \nu\bar{\nu}$ や、H $W^+W^- l\nu jj$ を用いてイベント数を稼ぐことが必要となる。

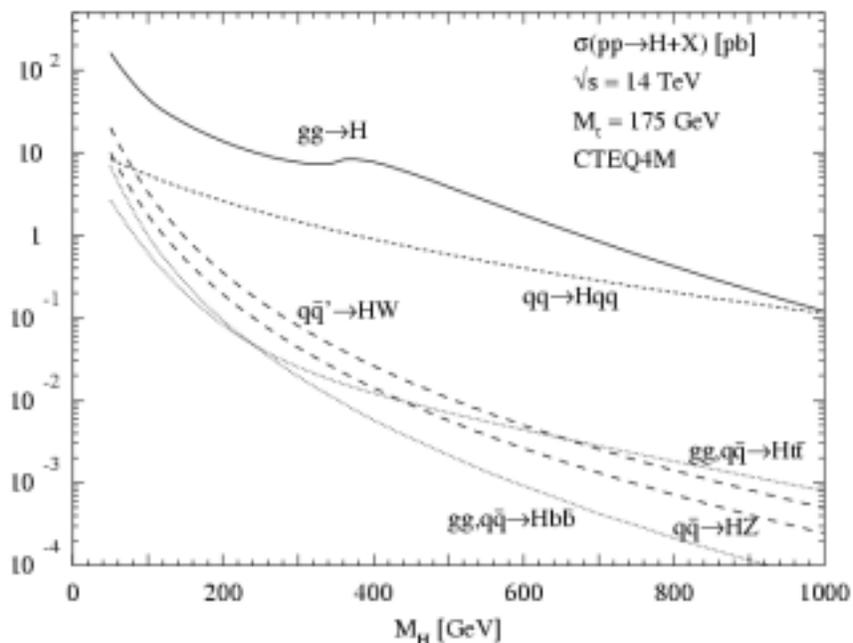


図 2.2: Higgs 粒子の質量と生成断面積

このように Higgs 粒子の崩壊モードは M_H によって異なるが、レプトンを含むモードは $120 < M_h < 500 [\text{GeV}]$ と広いエネルギー領域にわたって有効である

。LHC が高ルミノシティ ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) で約 1 年間稼働したときの ATLAS 実験における H_{SM}^0 の発見能力を図 2.4 に示す。

縦軸は、Higgs を発見する能力を現し、予想される Higgs のイベント数をバックグラウンドのイベント数の平方根で割ったものである。縦軸の値が高い程、Higgs のイベントの確からしさ、をあらわしている。

このグラフより、 130 GeV より軽い領域では top associate production ($H \rightarrow b\bar{b}/\gamma\gamma$) が大きな役割を果たしている。 130 GeV より重い領域では *gluon fusion production* と、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow lll$ 大きな役割を果たす。ここで注目すべきは、ATLAS 実験が標準理論による Higgs 粒子の質量の上限である 1 TeV をカバーしていることである。

2.3 ATLAS 測定器

LHC 加速器に設置される測定器の 1 つが ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS) 測定器である。図 2.5 にその全体像を示す。

ATLAS 測定器は、LHC の高い重心系エネルギーと高ルミノシティのもとで動作し、目的の事象を選別できるように設計された巨大な汎用測定器である。高ルミノシティ下においても、電子、 γ 線等の電磁シャワー、ジェットによるハドロンシャワー、ミューオンなど多くのシグナルを取り出し、精度の良い測定を行うことを目的としている。その大きさは直径が 22 m 、長さ 44 m の円筒形をしており、全重量は約 7000 t に及ぶ。

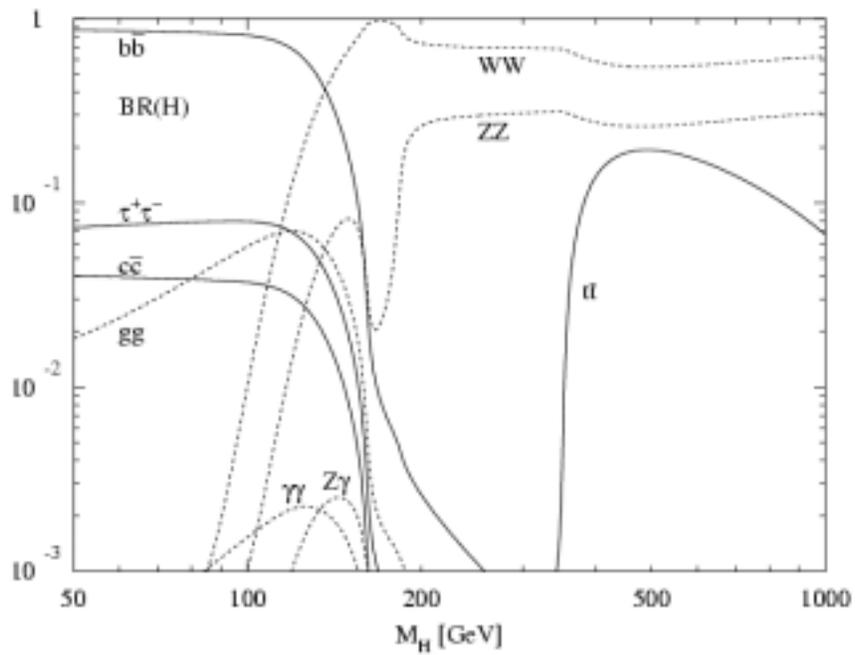


図 2.3: Higgs 粒子の質量と各崩壊過程への分岐比

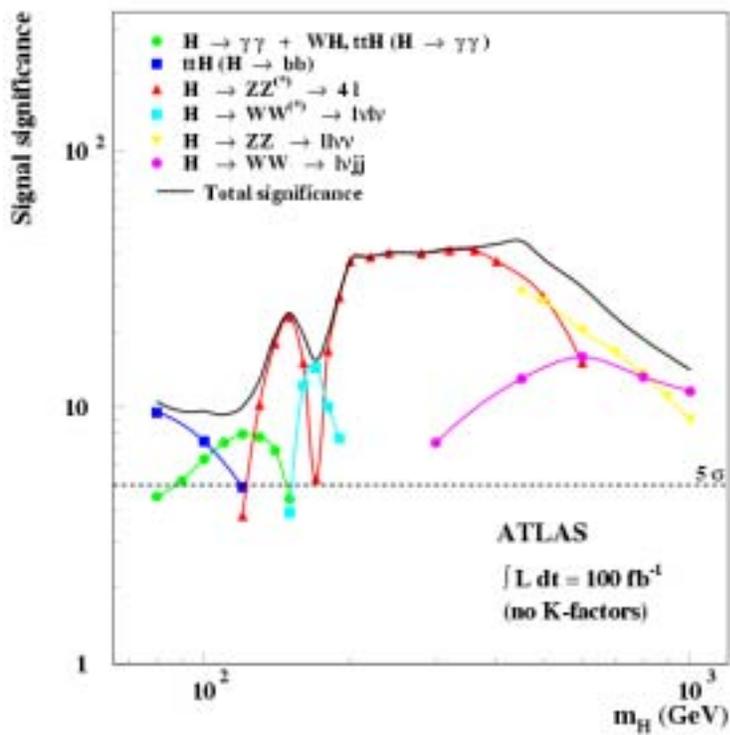


図 2.4: ATLAS 測定器における Higgs 粒子発見ポテンシャル

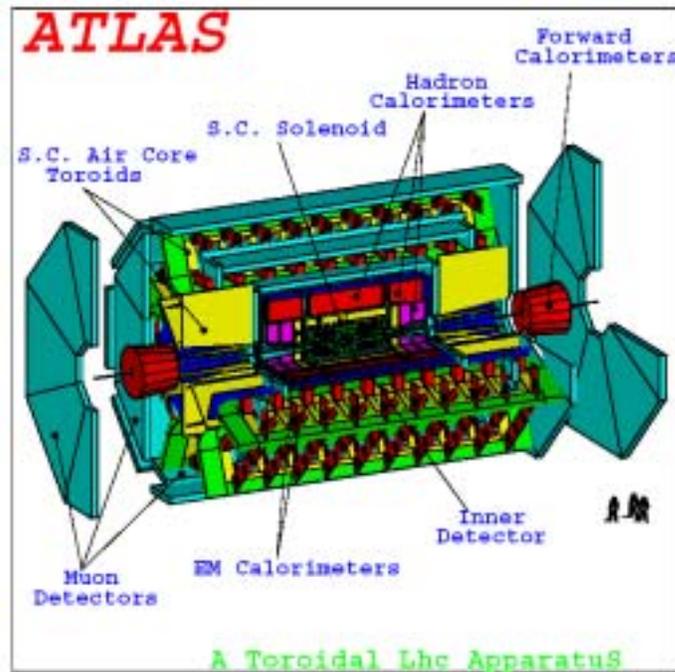


図 2.5: ATLAS 測定器

ATLAS 測定器は大きく分けると以下の 3 つのパートから構成されている。

- 内部飛跡検出器
- カロリメータ
- ミューオン検出器

ここで、図 2.6 に各パートの検出器と粒子とが反応する様子を示す。

以下に検出器の各パートの説明をおこなっていく。

内部検出器は最もビームラインに近い検出器である。これを用いて荷電粒子の飛跡認識、及び運動量の測定、反応点測定、電子と γ 線の識別、を行う。ビーム軸を中心とした同心円状に半導体検出器、遷移輻射ストロー検出器がそう構造をなして設置される。

カロリメータには電磁カロリメータとハドロンカロリメータがある。内側には電磁カロリメータが、外側にはハドロンカロリメータが設置される。電磁カロリメータは、鉛吸収体と液体アルゴンを用いたカロリメータで、電子や γ 線のエネルギーと位置測定を行う。ハドロンカロリメータは領域によって 2 種類に分かれている。鉄の吸収体とタイル状シンチレータ及び波長変換ファイバーからなるタイル型カロリメータと、銅及びタングステンの吸収体を持つ液体アルゴンカロリメータで構成されており、これを用いてハドロンのエネルギー測定を行う。目的とする物理事象の崩壊モードの多くがレプトンを含んでいることから、LHC においてミューオン検出器は重要な役割を果たす。ミューオンは他の粒子と違い測定器の中で反応することなく、カロリメータの外まで突き抜ける。よって、ミューオン検出器は最外部に設置され、内部飛跡検出器とは独立に広範囲にわたってミューオンの運動量を測定するようになっている。ミューオン検出器は、ミューオンの飛跡精密測定する Monitored Drift Tube(MDT)、及び Cathode Strip Chamber(CSC) と、ミューオンのトリガーを信号を出す Thin Gap Chamber(TGC)、及び Resistive Plate Chamber(RPC) からなる。

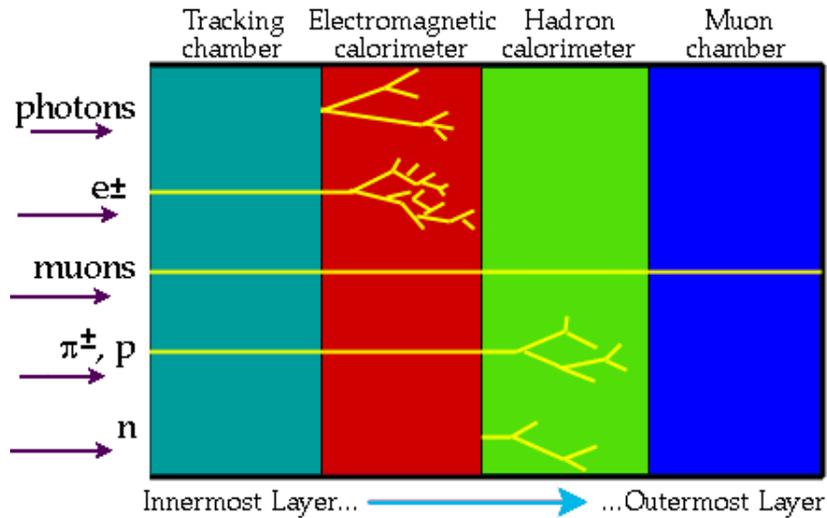


図 2.6: さまざまな粒子と ATLAS 測定器に設置されている検出器との反応

2.4 ミューオントリガー検出器

前節で述べたように、LHC 実験ではミューオンと関係する物理事象の選択のためにトリガーを必要とする。そこで ATLAS 測定器では RPC と TGC というトリガー専用の検出器を設置した。図 2.7 にその様子を示す。

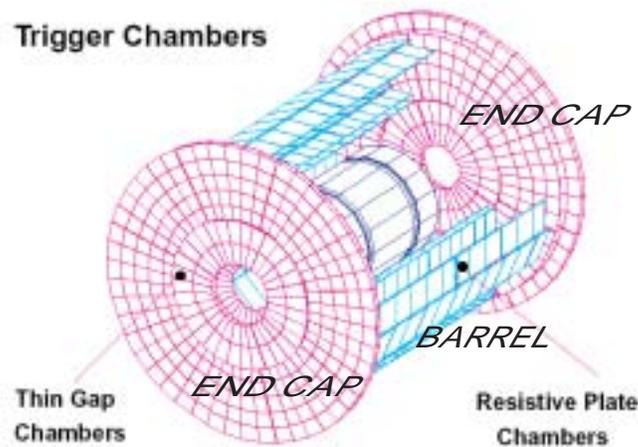


図 2.7: ミューオントリガー検出器

図からわかる通り、barrel 部分に RPC、End cap に TGC が置かれる。ミューオントリガー検出器は、通過するミューオンの運動量成分 p_T とビーム軸に垂直な運動量成分を調べ、膨大なバックグラウンドの中から興味のある物理事象の選択を行い、その事象が起こった衝突の時間 (バンチ ID) を決定する。以下にトリガーの方法を説明する。図 2.8 にミューオントリガーの位置関係を示す。

図??の TGC1 はチェンバー 3 枚を 1 組とした TGC (Triplet) であり、TGC2、TGC3 は 2 枚 1 組とした TGC (Doublet) である。ビーム衝突点から外側に向かって TGC1 (Triplet)、TGC2 (Doublet)、

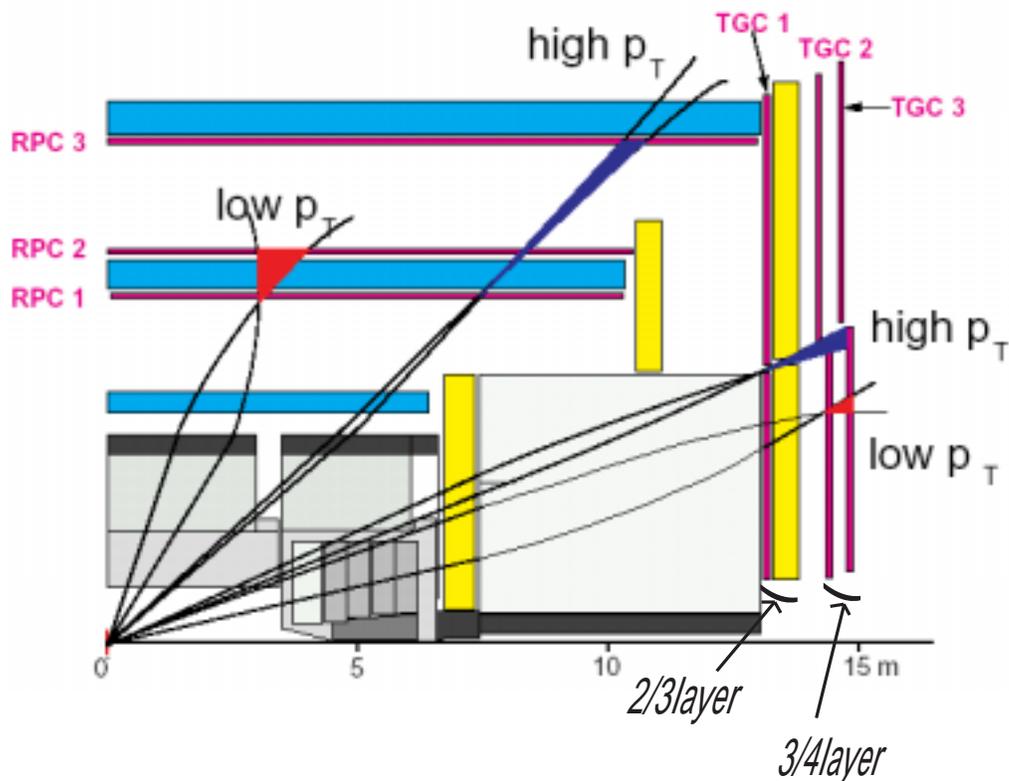


図 2.8: ミューオントリガーの位置関係 (Longitudinal view)

TGC3(Doublet)の順に配置される。RPC1、RPC2、RPC3は、それぞれ2枚1組からなる。

TGCにおけるミューオンのトリガー条件として、 $p_T > 6\text{GeV}$ に対しては、外側の4層のTGC(TGC2、TGC3)の内、少なくとも3層のTGCにヒットがあり、内側の3層のTGC(TGC1)の内、少なくとも2層のヒットがあることが要求される。また、ヒットの位置からミューオンの運動量を測定する。

エンドキャップ部をカバーするTGCは、半径約 10m の大きなホイールを形成して配置される。その様子を図2.9に記す。

これは、TGC3をZ方向から見た配置図で、青色が塗られた部分は日本が担当するTGCのT5、T7である。半径 10m のホイールの全体をR方向に6分割、 ϕ 方向に48分割(最も内側は、24分割)される。図の各セルが1台のTGC(Doublet)を示している。

次にTGCの設置位置をR-Z平面図で示す。ここで、ビーム軸をZ、これと直交する半径方向をRとする。その配置図を図??、に示す。

TGCは、その配置する場所により11種類の形状(T1~T11)があり、それぞれのTGCの製作は日本、イスラエル、中国が担当し、全ての形状を合わせて3649台製作される。図中の黒色は日本が担当するTGCのT4、T5、T7である。

TGCが置かれるエンドキャップ部には、高頻度の粒子の入射が予想されている。モンテカルロシミュレーションにより見積もられたミューオン検出器のエンドキャップ部におけるバックグラウンドレートを表2.2に示す。

また、ATLAS実験ホール内の中性子、 γ 線それぞれに対するフルエンス率(flux density)をシュミレートした図を図2.11に示す。

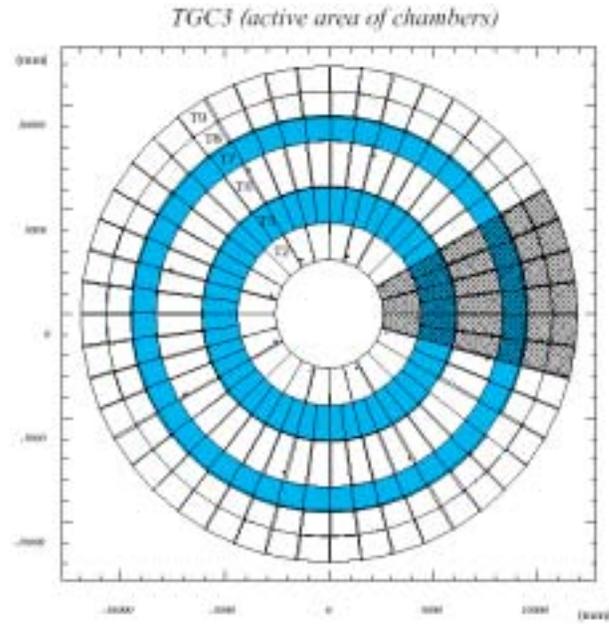


図 2.9: TGC3 を Z 方向から見た配置図

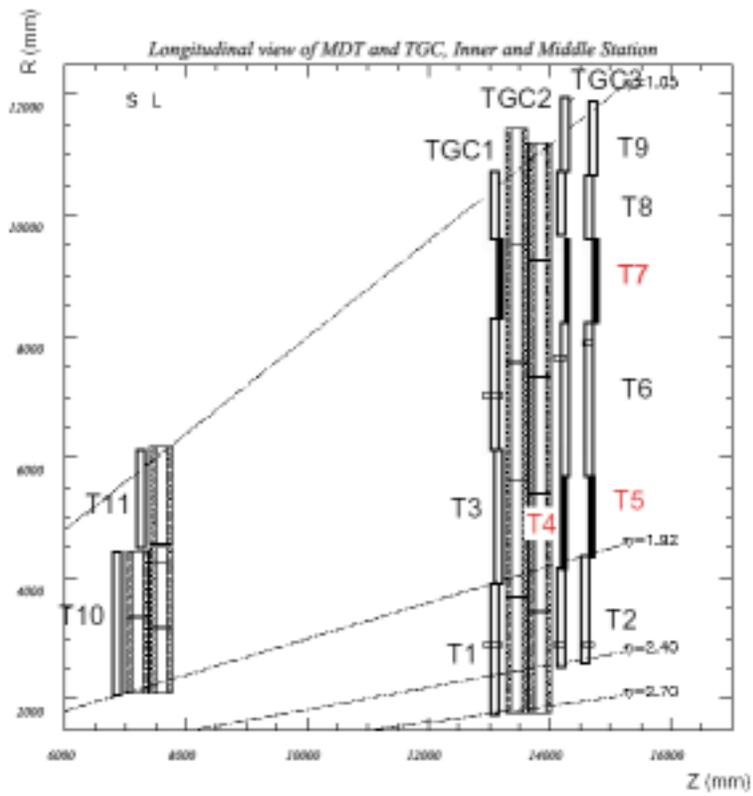
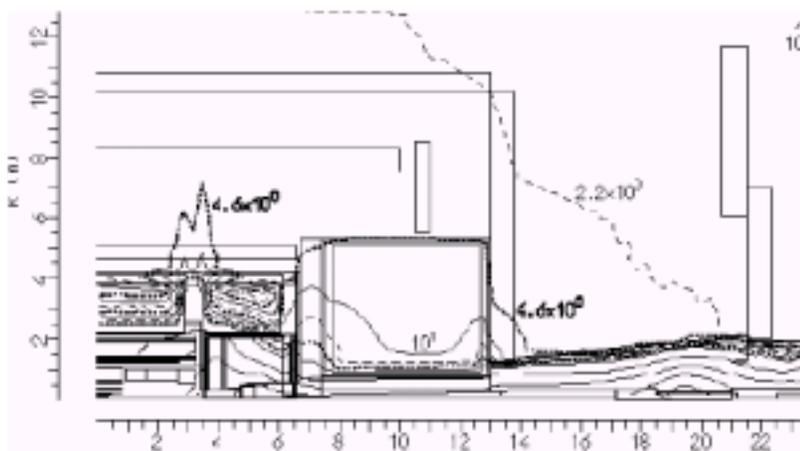


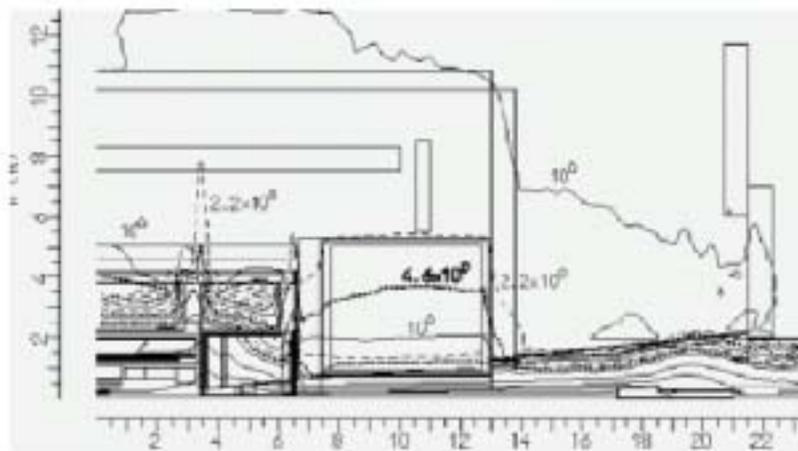
図 2.10: ATLAS 測定器における TGC の配置図 (R-Z 平面図)

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

表 2.2: エンドキャップ部におけるバックグラウンドレート



(a)



(b)

図 2.11: ATLAS 実験ホール内の中性子、 γ 線それぞれに対するフルエンス率 (kHz/cm 2)

ここで (a) は中性子に対するフルエンス率、(b) は γ に対するフルエンス率を表している。TGC に要求される動作条件は以下のようなものである。

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

これらの要請は構造や充填ガスを工夫することで克服できる。詳しくは??章で述べる。

第3章 ガスチェンバーの原理

ガスチェンバーとは検出器内を満たしたガスが荷電粒子や光子のエネルギー損失によってイオン化されることを利用した検出器である。検出器には電場がかけられており、電離した粒子がそれぞれにアノード側、カソード側へ導かれシグナルを出し、粒子が入射したことがわかる。

ミュオントリガーチェンバーである TGC はガスチェンバーである。また、Cosmic Ray Test に用いられている Drift Tube もガスチェンバーである。そこで、この章では TGC およびその検査設備に深い関わりのあるガスチェンバーについてその原理を説明し、TGC や Drift Tube にどのように応用されているのかを述べていくことにする。

3.1 増幅過程

ガスで満たされた検出器内に入射した粒子は、その飛跡に沿ってガス分子（原子）と衝突し、イオン化させる。このとき生じた電子を1次電子という。電子はアノード側へドリフトをはじめ、さらに電場によって加速され、運動エネルギーを持つ。電子の持つ運動エネルギーがガス分子のイオン化エネルギーを超えると、ガス分子はイオン化され、電子を生成する（タウンゼント電離）。このとき生じる電子を2次電子という。2次電子が生じるようになるのは一般的に、1気圧で電場が約 10^4V/m 以上である。2次電子も電場によって加速され、次々と衝突、電離を繰り返し、カスケード型の電子雪崩ができる。これをタウンゼント電子雪崩といい、電子が指数的に増加することをガス増幅という。

次に、タウンゼント電子雪崩によるガス増幅率について考える。電子の平均自由行程を λ とおくと、この逆数である $\alpha = 1/\lambda$ は単位長さあたりに電離する確率をあらわしている。この α をタウンゼントの第1電離係数という。

ここで、 N_e 個の電子が距離 dx すすむ間に増加する電子数は、

$$dN_e = N_e \alpha dx \quad (3.1)$$

である。 α が位置 x に依存しないと考える場合、初期の電子数を N_0 とおくと

$$N_e = N_0 \exp(\alpha x) \quad (3.2)$$

よって距離 x でのガスゲイン G は、

$$G = N_e/N_0 = \exp(\alpha x) \quad (3.3)$$

とあらわせる。

α については、

$$\frac{\alpha}{\rho} = f\left(\frac{E}{\rho}\right) \quad (3.4)$$

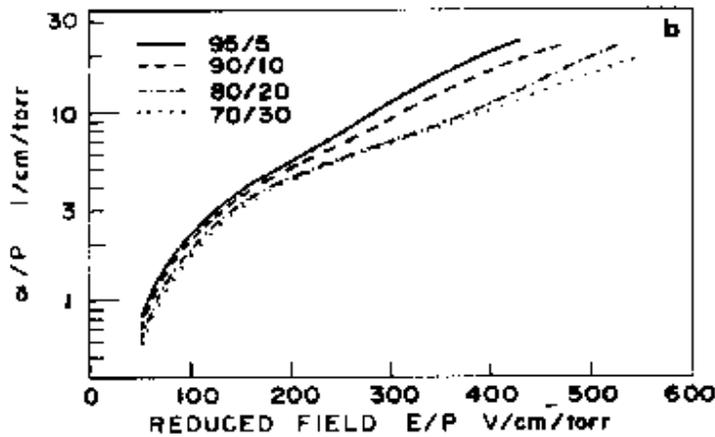


図 3.1: ガスの種類と α の値

という関係式が成り立つ。ここで、 E は電場の強さ、 ρ は気体分子密度をあらわしている。また、 α の値は、ガスの種類によっても異なる。具体的な例を図 3.1 に示す。

これよりガス増幅率は電場の強さ、及び、気体分子密度（つまり、圧力と温度）に依存していることがわかる。

3.2 増幅モード

ここではガス増幅の各 mode について説明していく。タウンゼント電離について、アノードの近くでは電場が強くなっているため、電子の数は急激に増加する。電離によって電子と共に生成された陽イオンはカソード側へ引かれるが、陽イオンは電子に比べて非常に重いので、電子がアノードに到達するまでの間に陽イオンはほとんど動けない。この生成された陽イオンの影響がほとんどなければ、増幅される電子の数は 1 次電子の数に比例する。この領域を Proportional mode(比例領域) という。

Proportional mode より電場が強くなると、電離によって生成される電子の数が増え、それと同時に残される陽イオンの数も増える。陽イオンの濃度が十分高くなると、電場が遮蔽されて電子の運動エネルギーが増加しにくくなり増幅される電子の数は 1 次電子の数に比例しにくくなる。この領域を Limited proportional mode(制限比例領域) という。

これよりさらに電場が強くなると陽イオンによる電場の遮蔽のために電子の運動エネルギーがほとんど増加しなくなり、増幅される電子の数は 1 次電子の数と関係なくなる。この領域を Geiger-Müller mode(ガイガーミュラー領域) という。

図 3.2 は印加電圧と動作領域の関係を表したものである。 β 粒子 (イオンの対生成の数が N_1) と α 粒子 (イオンの対生成の数が N_2) に対する収荷イオン数の変化を示している。グラフよりわかる通り、proportional mode まではエネルギーの違いが収荷イオン数に反映されるが、limited proportional mode になると最初のエネルギーによる収荷イオン数の違いは見られなくなる。

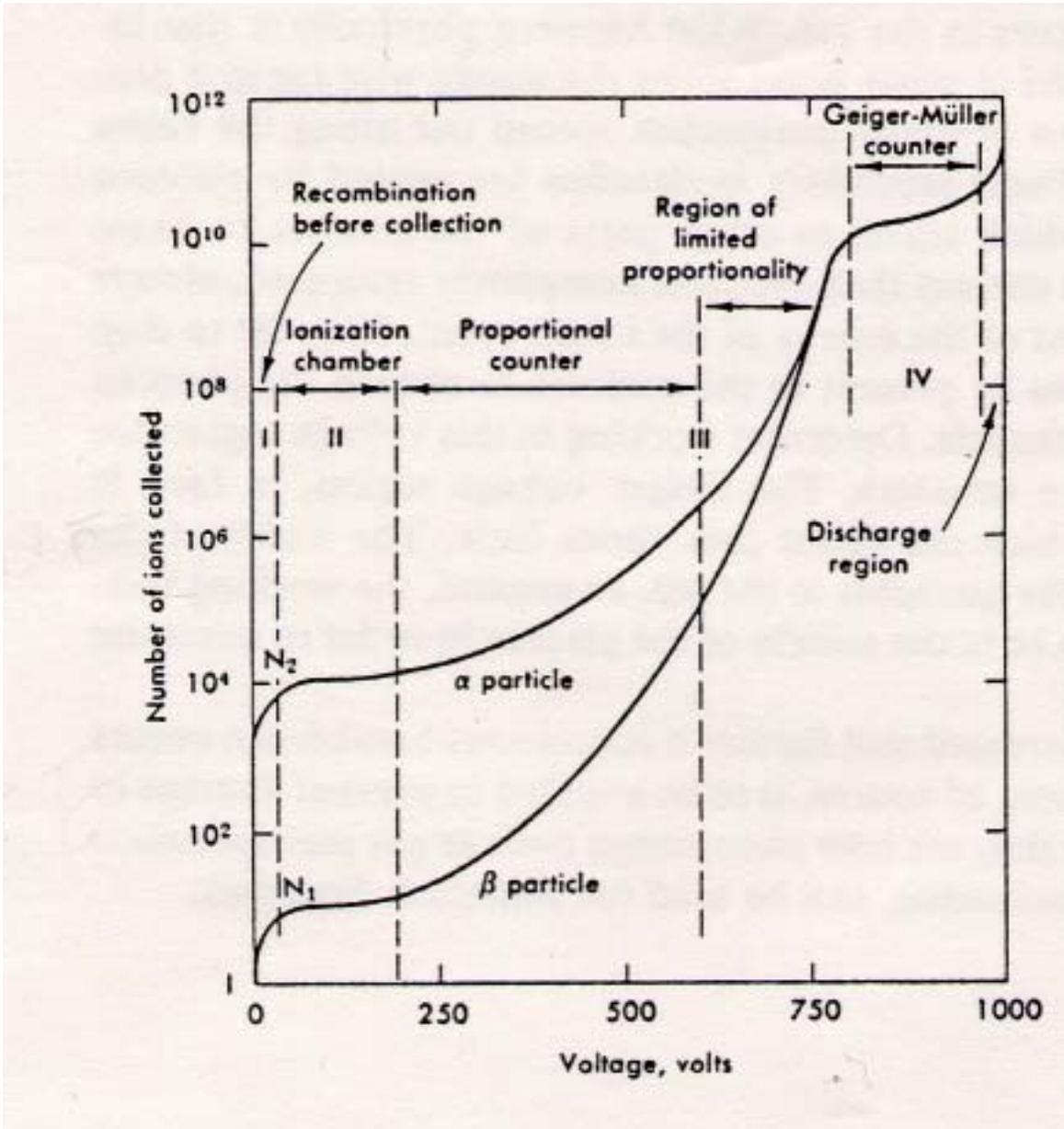


図 3.2: 印加電圧に対する動作領域の変化

3.2.1 ガスチェンバーのシグナルの生成

ここでは、ガスチェンバーにおけるシグナルの生成について説明する。前述の通り電子雪崩によってできた電子と陽イオンはそれぞれワイヤーとカソードに集められるが、その系のエネルギー変化がシグナルとして検出される。ここでは、円筒型比例計数管におけるシグナルの時間発展を考える。このとき、点電荷 Q の時間 t での位置を $r(t)$ とする。ワイヤーの中心からの距離を r 、系の単位長さあたりの容量を C とすると、電場は、

$$E = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r} \quad (3.5)$$

と表せる。

検出器の長さを l 、ワイヤーへの印加電圧を V_0 とすると、誘起されるシグナル電圧 $dv(t)$ は、

$$dv(t) = -\frac{Q}{lCV_0} E(r) dr \quad (3.6)$$

となる。電子雪崩はワイヤーの近くで発達するので、電子の移動距離は小さく、系全体に対する電子の電圧変化の寄与は小さい。

よってイオンがワイヤーから移動度 μ^+ (ここでは定数と考える) で離れることだけを考えればよい。ここで、ワイヤー近傍の電場は、ワイヤーからの距離を r とすると、式 3.5 と表せる。よってワイヤーに誘起される電圧 $V(t)$ は式 3.5 より、 $V(t) = -\int_0^t dv = -\frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r(t)}{a}$ (3.7) と表せる。

一方、点電荷 Q の位置 $r(t)$ は、移動度の定義から、

$$\frac{dr}{dt} = \mu^+ \frac{E}{P} = \frac{\mu^+ CV_0}{2\pi\epsilon P} \frac{1}{r} r(t) \quad (3.8)$$

とかけるので、 $V(t)$ は、

$$V(t) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon l} \ln \left(1 + \frac{\mu^+ CV_0 t}{\pi\epsilon P a^2} \right) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon l} \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \quad (3.9)$$

となる。

円筒型比例計数管は非常に小さい抵抗 R でターミネートして読み出される。よって検出される電流値 $i(t)$ はワイヤー上の電荷 $CV(t)l$ の時間微分として

$$i(t) = Cl \frac{dV(t)}{dt} = -\frac{QC}{4\pi\epsilon} \frac{1}{t_0 + t} \quad (3.10)$$

と表される。この時間変化のテールは $\frac{1}{t}$ テールと呼ばれている。

3.2.2 Drift

1次電子がアノード側に加速される際、電場がそれほど強くない領域では電子がガス分子と衝突しても電離が起こらない。この時、電子は加速し続けるのではなく、電子が何度もガス中の分子と衝突する。その際、分子がエネルギーを奪うため、摩擦力のように作用して粒子の速度がある値に落ち着いてしまう。このような領域をドリフト領域という。ガス中のイオンについても同様に、電場の方向に一定の速度で移動する。このときの移動速度を Drift velocity と呼ぶ。このときの電界方向の定常速度 v は

$$v = \mu E \quad (3.11)$$

と書ける。 μ を移動度 (mobility)、 v を電界による移動速度 (drift velocity) という。粒子が分子と衝突する際、運動量 mv を失うとすると単位時間あたりに衝突する回数を $\nu (= \frac{\bar{c}}{\lambda})$ (\bar{c} は平均熱運動速度、 λ は平均自由行程) とすると、単位時間当たりの運動量の変化量、抵抗力にあたるものは νmv となり、これが粒子に作用する力 eE (E は電界の強さ) とつりあう。よって、

$$\nu mv = eE \quad (3.12)$$

つまり drift velocity は

$$v = \frac{e}{m\nu} E = \frac{e\lambda}{m\bar{c}} E \quad (3.13)$$

よって式 3.11 より、

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{e\lambda}{m\bar{c}} \quad (3.14)$$

となることがわかる。図 3.3 にさまざまな気体のイオンの mobility を示す。

Gas	Ion	Mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)
Ar	Ar ⁺	1.7
Ar	CH ₄ ⁺	2.26
CO ₂	CO ₂ ⁺	1.09
He	He ⁺	13.0

図 3.3: さまざまな気体の mobility

ここで、気体分子の平均自由行程 λ について最も単純なモデルを考えることにする。速さ v で運動する気体分子の平均自由行程を λ 、ある衝突から次の衝突までの時間 (平均自由時間) を τ とすると、

$$\lambda = v\tau \quad (3.15)$$

とあらわせる。気体分子が半径 r の球体と考えた場合、速さ v で運動している分子が他の静止している (とここでは考える) 分子と衝突するのは、動いている気体分子の中心から $2r$ の範囲にある場合であるので、運動している分子の断面積 σ は、

$$\sigma = 4\pi r^2 \quad (3.16)$$

とあらわせる。分子の密度を n とすると

$$n = 1/(\sigma v\tau) \quad (3.17)$$

とあらわせるので、

$$\lambda = 1/(n\sigma) \quad (3.18)$$

ここで、状態方程式 $p = nRT$ から

$$\lambda = RT/(P\sigma) \quad (3.19)$$

という式を得る。ここで失うのは電界による速度分についてであって平均熱速度 \bar{c} は不変とする。(電界による速度は熱運動速度 \bar{c} に比べて小さい。) 式 3.19 より $\lambda \propto P\sigma$ であることと、式 3.13

から drift velocity は電界の強さ E と圧力 P に関係しているとわかる。
電子についても

$$v = \frac{e\lambda}{m\bar{c}}E = \frac{eRT}{m\bar{C}} \left(\frac{E}{P}\right) \frac{1}{\sigma} \quad (3.20)$$

が成り立つ。ここで、電子は軽いので $\bar{c} \sim v$ となる。また、 σ は v に対して大きな変化を示す。
Ar ガスと電子との断面積の変化の様子を図 3.4 に示す。

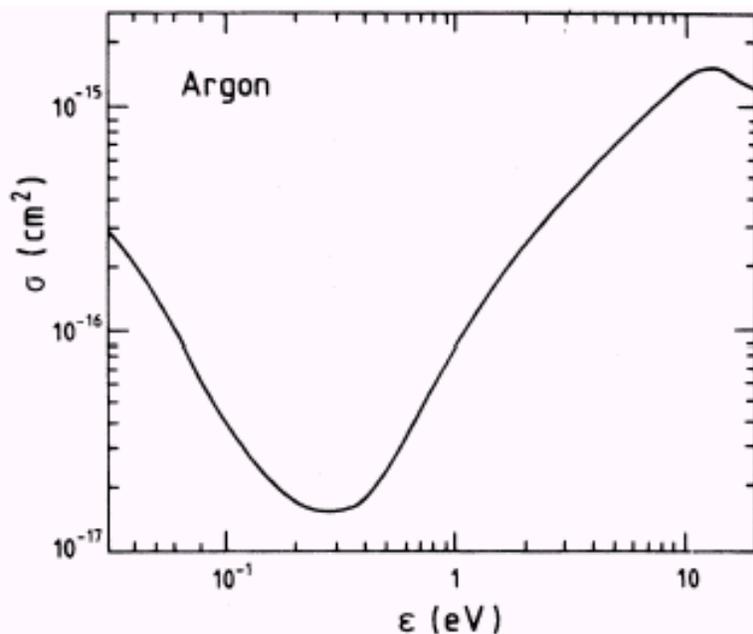


図 3.4: Argon の cross-section

ここで、 $\epsilon = 2 \times 10^{-1} \text{eV}$ 付近で断面積が落ち込んでいることがわかる。よって Drift velocity は $v = 1 \text{cm}/\mu\text{s}$ あたりで飽和する。その様子を図 3.5 で示す。

ここに炭化水素のようなガスが混合されてる場合、炭化水素の断面積は大きく、エネルギーに対する断面積のふるまいも単純ではないので、混合されたガスは複雑な様相を呈する。

参考のために以下にさまざまな気体の Drift velocity をいくつか示す。

3.3 充填ガスと quenture

つぎに、検出器内に充填するガスについて述べる。ガス増幅のために充填されるガスは以下のようなものである。

- 効率的に電離が起こるような希ガス等の構造の単純なガス。(表 3.1 参照)
- ガス分子の電子捕獲率が小さいもの。(表 3.2 参照)

ここで、表 3.1 を見てわかるとおり Ar などの希ガス類はイオン化エネルギーが比較的高く、イオン対を作るのに必要なエネルギーは低い。つまり、効率的にイオン化の起こるガスだといえる。

表 3.2 に電子捕獲率を示す。酸素や水は電氣的に陰性になる傾向があるため、捕獲率が高い。これらの要因からガスチェンバーには Ar や CO_2 が用いられることが多い。

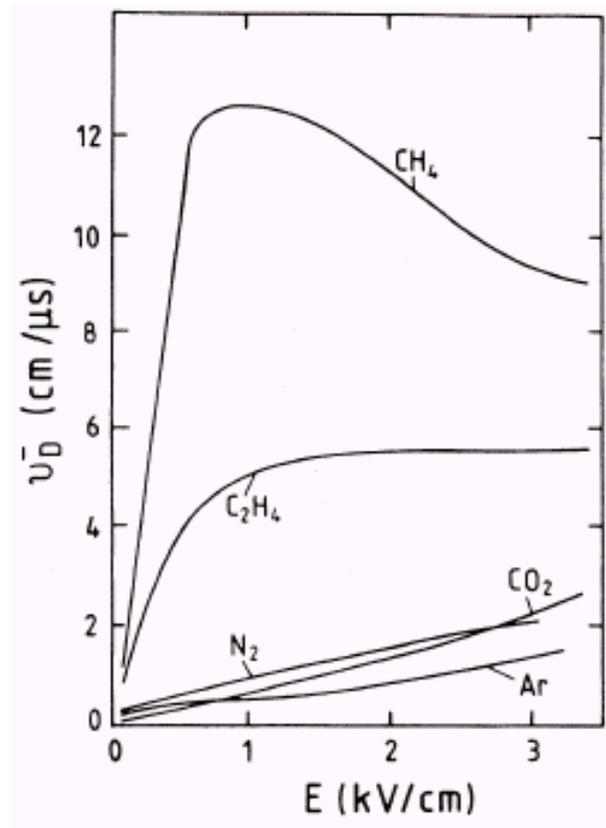


図 3.5: Ar の電場と Drift velocity の関係

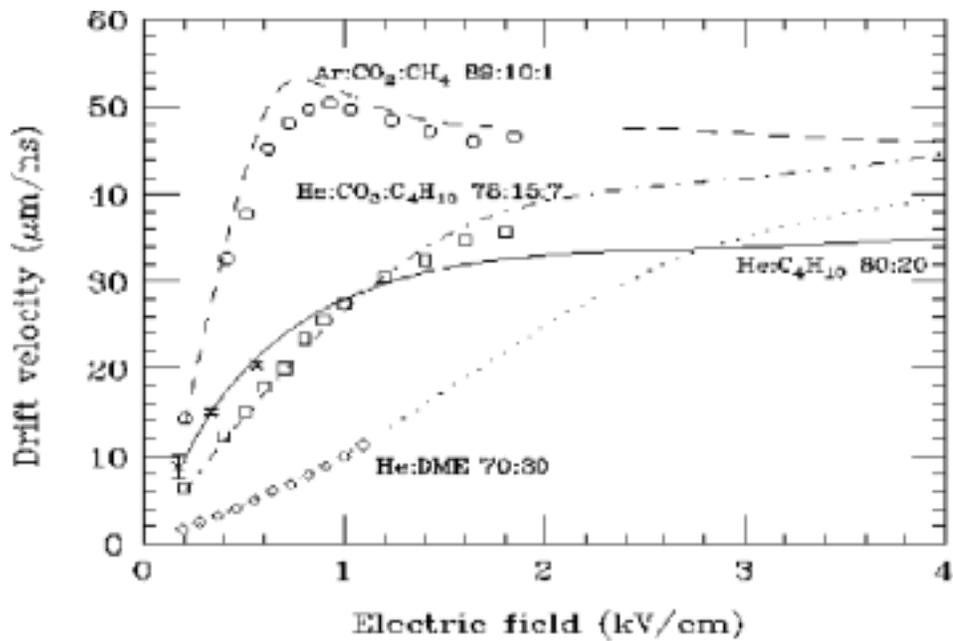


図 3.6: さまざまな気体の drift velocity

	Excitation potential(eV)	Ionization potential(eV)	Mean energy for ion-electron pair creation(eV)
H_2	10.8	15.4	37
H_e	19.8	24.6	41
N_2	8.1	15.5	35
O_2	7.9	12.2	31
N_e	16.6	21.6	36
A_r	11.6	15.8	26
K_r	10.0	14.0	24
X_e	8.4	12.1	22
CO_2	10.0	13.7	33
CH_4		13.1	28
C_4H_{10}		10.8	23

表 3.1: ガスの種類とイオン化エネルギー及び電子対を作る平均エネルギー

入射粒子は電子を電離するだけでなく励起もおこなう。励起した後、紫外線や X 線を放射して基底状態に戻る。これらの光子は他のガス分子をイオン化したり、検出器の壁をたたいて電子をつくる。ゲインが増大し、光子が充分多い場合、励起によって新しく電子雪崩を生成する可能性が高くなる。このような電子雪崩が連続的に起こるとやがては放電してしまう。

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

表 3.2: ガスの種類と電子捕獲率

このような動作を防ぐため、充填ガスにはクエンチャーと呼ばれる紫外線吸収能力の高いガスを加える。クエンチャーは紫外線を吸収してそのエネルギーを自身が振動、回転するエネルギーとして用いたり、イオン化を伴わない非弾性衝突をおこし、2次電子の放出を抑える働きをする。クエンチャーによく用いられるのは多原子分子のガスである。

図 3.7 に多原子分子の紫外線吸収断面積を示す。

増幅ガスとなる希ガスの吸収断面積はおおよそ $10Mb$ であり、炭化水素の断面積のほうが大きいことがわかる。これにより、光子は増幅ガスに当たる前にクエンチャーと衝突することがわかる。光子とクエンチャーとの断面積が大きいと、平均自由行程が小さくなる。ちなみに光子の平均自由行程は数 mm 程度である。

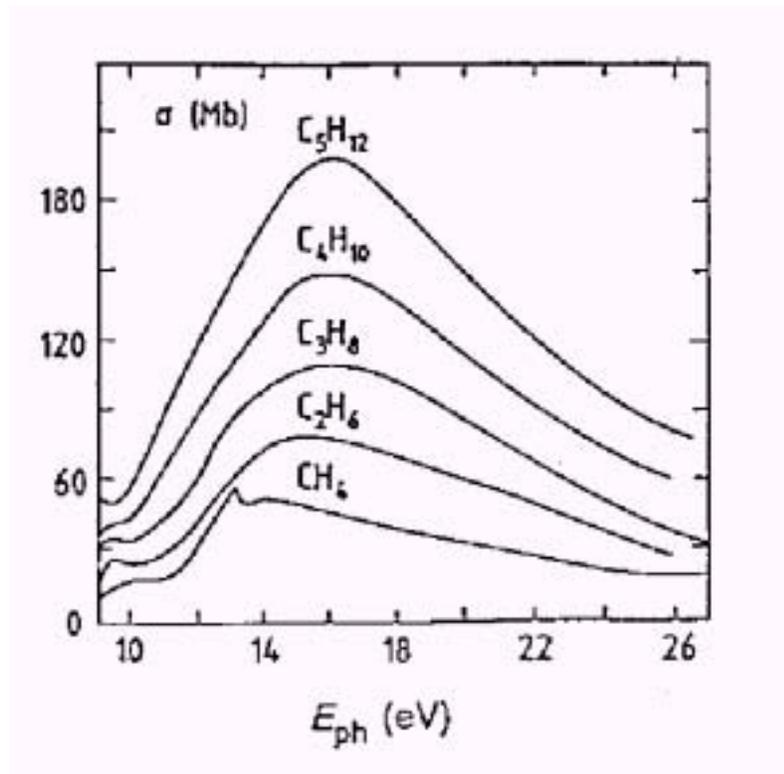


図 3.7: 他原子分子の紫外線吸収断面積

3.4 rate 依存性

rate 依存性とは一定面積に単位時間あたりに通過する粒子の数の変化に伴う出力波高の変化をあらわすものであり、これには陽イオンによる空間電界効果 (space charge effect) が深くかかわっている。これまで述べてきたように、粒子の入射によって生成された電子は電子雪崩を起こすが、入射頻度が高くなると、次々に電子雪崩が起こって陽イオンの濃度が大きくなり、やがて遮蔽が起こる。このような領域を不感領域という。陽イオンがカソード側へ移動すると電界はやがて元の状態に戻る。電界が元に戻るまでの間にできた電子雪崩は通常のものより収集電荷が小さくなる。電界が元に戻るまでの時間を回復時間という。このようにガス検出器には不感時間と回復時間がある。この時間が短ければ単位時間に測定できる粒子の数は増える。

次に空間電界効果について説明する。ここでは簡単のために図 3.8 のような平行なガスチェンバーについて考えていく。

まず、検出器の中で $N_{ions}/cm^3/sec$ という一定のレートで電離していると仮定する。電場の影響で電子と陽イオンはそれぞれアノードとカソードへ引き寄せられる。高頻度に電離が行われている場合、検出器内に空間電荷が溜まり、電場を弱める。ここで、アノード近傍の電場が 0 になった場合、検出器は空間電荷の限界 (space charge limited) を迎えたといえる。Ionization rate が N のもとで、空間電荷が限界を迎えないように検出器のギャップや印加電圧を調整する必要がある。

図 3.8 のモデルに関して空間電荷を実際に計算していくと、単位体積あたり空間電荷の限界のない状態となるためのガスチェンバーに対する動作、構造に対する要請は、

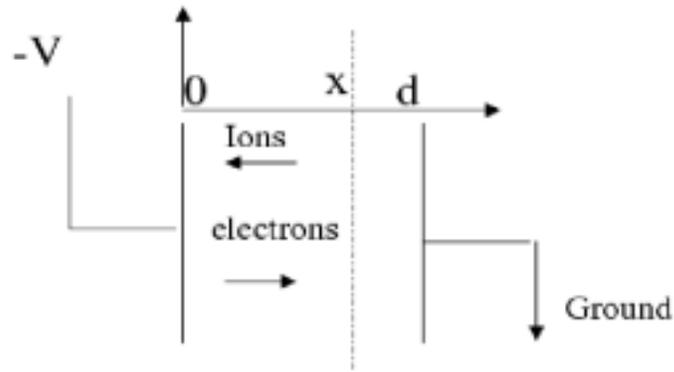


図 3.8: parallel ionization chamber 概略図

$$\frac{V}{d^2} \geq \sqrt{\frac{\pi e N}{\mu}} \quad (3.21)$$

である。ここで μ は陽イオンの移動度である。(求め方は??参照)

もし、ビームのフラックスが $J[\text{tracks}/\text{cm}^2/\text{sec}]$ であり、それぞれのトラックに対して $h[\text{ions}/\text{track}/\text{cm}]$ の寄与があるとすれば、 $N = J \cdot h$ であるといえるので、

$$\frac{V}{d^2} \geq \sqrt{\frac{\pi e J h}{\mu}} \quad (3.22)$$

である。

検出器の構造、印加電圧などを考える際には式等を参考にして空間電荷の限界を迎えないようにする必要がある。

第4章 Thin Gap Chamber (TGC)

Thin Gap Chamber (TGC) は、高エネルギー実験においてよく使用されている Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) 型のガスチェンバーの一種である。前章では、ガスチェンバーの動作原理について説明したが、ここではTGCの構造について説明していく。

4.1 TGCの構造

TGCの構造は図4.1の通りである。

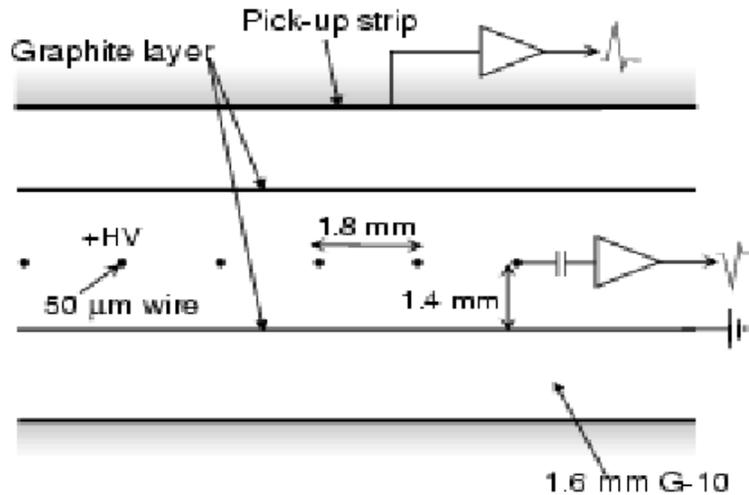


図 4.1: TGC の構造 (断面図)

ここで、TGCのパラメータについて表4.1にまとめて記述する。

図4.1を見てわかるようにTGCはMWPC(Multi Wire Proportional Chamber)の構造を持っている。TGCの電場、電位を求めるためにまず、一般的なMWPCの電場、電位を考えてみる。図4.2にMWPCの一般的な断面の構造を示す。MWPCは2枚の平行なカソード板の間に等間隔に並んだアノードワイヤーが設置されている。図にあるようにaはワイヤー半径、lは陽極・陰極間隔、sはワイヤー間隔である。V(0, a) = V₀、V(0, l) = 0 とすると、このMWPCの電場、電位は

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon} \left[\frac{2\pi l}{s} - \epsilon 4 \sin^2 \left(\frac{\pi x}{s} \right) + \sinh^2 \left(\frac{\pi y}{s} \right) \right] \quad (4.1)$$

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

表 4.1: TGC のパラメータ

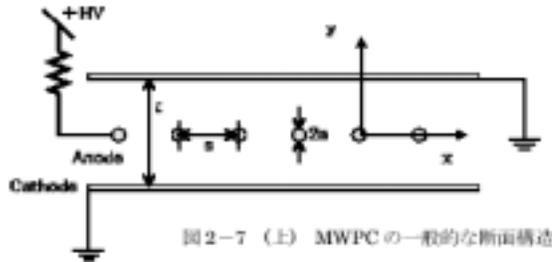


図 4.2: MWPC の一般的な構造 (断面図)

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon_0 s} \left[1 + \tan^2\left(\frac{\pi x}{s}\right) \tanh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \tan^2\left(\frac{\pi x}{s}\right) \tanh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\frac{\pi l}{s} - \ln\left(\frac{2\pi a}{s}\right)} \quad (4.3)$$

となる。TGC の場合 $a = 25\mu\text{m}$ 、 $l = 1.4\text{mm}$ 、 $s = 1.8\text{mm}$ で表される。図 4.3 にワイヤーの作る電場をしめす。

TGC のポイントとなるのは ATLAS の rate の高い環境下でトリガーとして動作させることである。よって構造についてもそのことに重点を置いたつくりになっている。これをふまえた上で表 4.1 に示した各パラメータについて説明していく。

TGC のワイヤー・ワイヤー間隔は 1.8mm と狭い。これは電子の最大ドリフト時間を短くし ($t_{max} \sim \frac{0.9[\text{mm}]}{50[\mu\text{m}/\text{ns}]}$)、LHC の bunch 間隔内に収めるためである。

ワイヤー・カソード間隔は 1.4mm である。これは、電子雪崩によってできた陽イオンがカソード面に到達する時間を短縮し、空間電界効果を防ぐためである。これにより TGC は 1kHz という rate の高い環境でも充分動作することができる。(式 8.20 参照)

TGC の動作領域は *limitedproportionalmode* である。TGC はギャップ間隔が小さいために狭い領域に強い電場がかかることになる。よって、ギャップ間隔の変動により電場が変動したり、レートが高くなることで電場が変化したりした場合でも、*limitedproportionalmode* の性質によりガスゲインが変動しにくいということが TGC を動作する上で有益であるからである。

TGC の充填ガスは *limitedproportionalmode* で動作し、充分なガスゲインが得られるものでなくてはならない。また、ギャップが大変小さいために粒子が入射した際にできる 1 次粒子の数が少

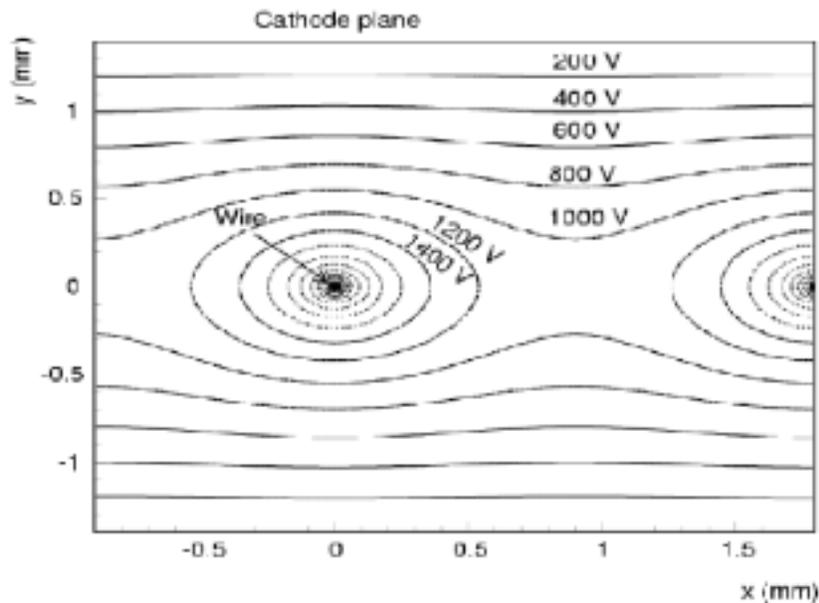


図 4.3: TGC の電場の様子 (断面図)

ないので、ガスゲインの大きいガスを用いなくてはならない。ガスゲインが高いガスはそれだけ紫外線光子を多く発生するので強力なクエンチャーを混入する必要がある。以上の条件を満たすガスとして $\text{CO}_2 + n\text{-Pentane}$ が用いられる。 CO_2 は電子捕獲確率の非常に小さな気体であるのでガス増幅に有利である。(表 3.2 参照) このガスにも、quench が必要であるが、アノード・カソード間隔が非常に小さいため (これに関しては後述する) 紫外線吸収断面積のかなり大きいガスを使用する必要がある。そこで $n\text{-Pentane}$ を quench として用いることとした。 $n\text{-Pentane}$ は分圧 0.5 atm で振動、回転の自由度の最も大きい気体である。以上より $\text{CO}_2 : n\text{-Pentane} = 55 : 45$ で混合したものを大気圧で充填ガスとして用いることとした。このガスで得られるゲインは $10^5 \sim 10^6$ 程度である。

TGC はワイヤー・カソード間隔が狭いため、間隔が変わるとそこにかかる電場も変わり、最終的に増幅率が大きく変化してしまう。このため、TGC には全面にわたって $100 \mu\text{m}$ 以下の平面性が要求される。この要請を満たすために、TGC には補強材としてワイヤーサポート、ボタン型サポートが組み込まれている。(図 4.5 参照) また、これらのサポートを TGC に接着することで、TGC 内部が加圧した際の補強の役割もおこなっている。図 4.4 はワイヤー・カソード間隔を変化させたときの Pulse Height の変化である。

この図は T7 の構造を示しているが、他のタイプの TGC についても基本構造はさほど変わらない。図中に示しているのはチェンバー 1 枚 (1chamber) についての構造である。実際には、TGC はチェンバー 2 枚、もしくは 3 枚を用いて構成されている。チェンバー 2 枚を用いた TGC を Doublet、3 枚を用いた TGC を Triplet と呼ぶ。TGC のチェンバーとチェンバーの間とその外側には強度を保つためにハニカムが接着されている。Doublet と Triplet の構造を図 4.6 に示す。

図中左が Triplet、右が Doublet である。このように TGC を重ねた際に、チェンバーの構造がすべて同じであると、チェンバーのサポート部分が全くの不感領域となってしまう。これを避けるために、TGC を構成するチェンバーのサポートの位置は重ならないようにずらしてある。また、ワイヤーやストリップに関しても、位置分解能を高めるために、Doublet については $1/2$

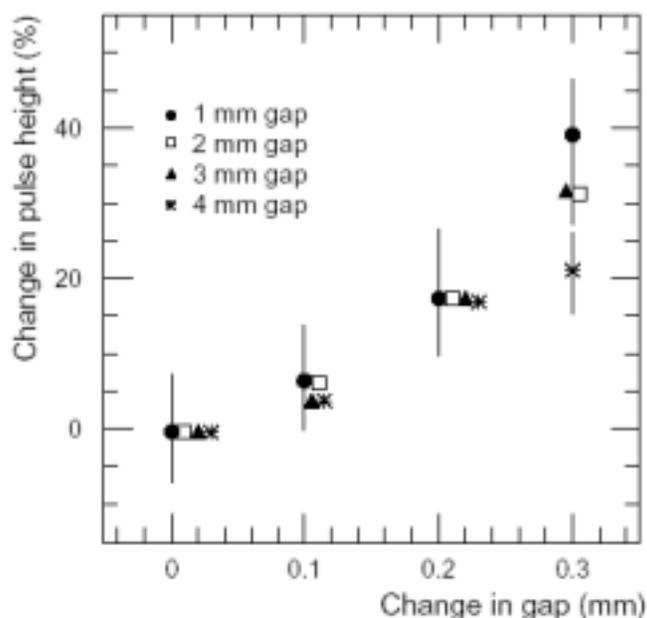


図 4.4: ワイヤー・カソード間隔を変化させたときの Pulse Height の変化

ピッチ、Triplet については $1/3$ ピッチごとにずらしている。

TGC のアノードワイヤーは $50\mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤーを用いている。TGC はアノード・カソード間隔が非常に狭く、強い電場がかけている (カソード付近においても $E \sim 10^4\text{V}/\text{cm}$ の電場が存在する (図 4.3 参照)) ワイヤーがたわんでいると、ワイヤーがカソード側に引き寄せられてしまう。これを避けるために、ワイヤーがたわまないように強いテンションをかけなくてはならないので、これに耐えうる太さのものを選んだ。

カソード面は FR4 (ガラスエポキシ樹脂) の片面にカーボン塗り、もう一方の面にあるピッチ、幅の銅ストリップがワイヤーと垂直になるように接着されている。カーボン面側が検出器の内側、ガスに面する側になる。カーボンは電子雪崩の際に出て来る紫外線光子がカソード面に当たった際に光電効果を起こりにくい物質である。

カソード面では FR4 の下にあるストリップへ伝わった電荷をシグナルとして読み出し、位置情報として用いる。もしカーボンの抵抗値が低く、導通していればストリップ側に電荷の情報は届かない。また、逆にカーボンの抵抗値が高いと、High rate 環境においては、流れた電流による電圧降下が予想される。そこで、カーボンの抵抗値はストリップへ電荷が充分局所的に誘起されるくらい出なくてはならない。測定よりカーボンの抵抗値が $\sim 100\text{k}\Omega/\text{cm}^2$ 以上の抵抗値ではストリップに誘起される電荷は充分局所的であり、入射頻度が $1\text{kHz}/\text{cm}^2$ である時の電圧降下は抵抗値 $10\text{M}\Omega/\text{cm}^2$ で 50V 程度とわかっている。これにより、カーボンの抵抗値を $1\text{M}\Omega/\text{cm}^2$ とした。

次に TGC の読み出しに関して述べる。ATLAS において、ワイヤーの情報が R 方向 (ホイールの半径方向) の情報、ストリップの情報が ϕ 方向 (ホイールの円周方向) の情報となるように配置される。ワイヤーとストリップの情報を収集することにより、TGC は 2 次元の情報を得ることができる。ワイヤー・ストリップ読み出しピッチは、エンドキャップ部の外側に行くほど大きくなる。読み出すチャンネル数はチェンバーの種類によって異なるが、T7 Doublet に関しては、ワ

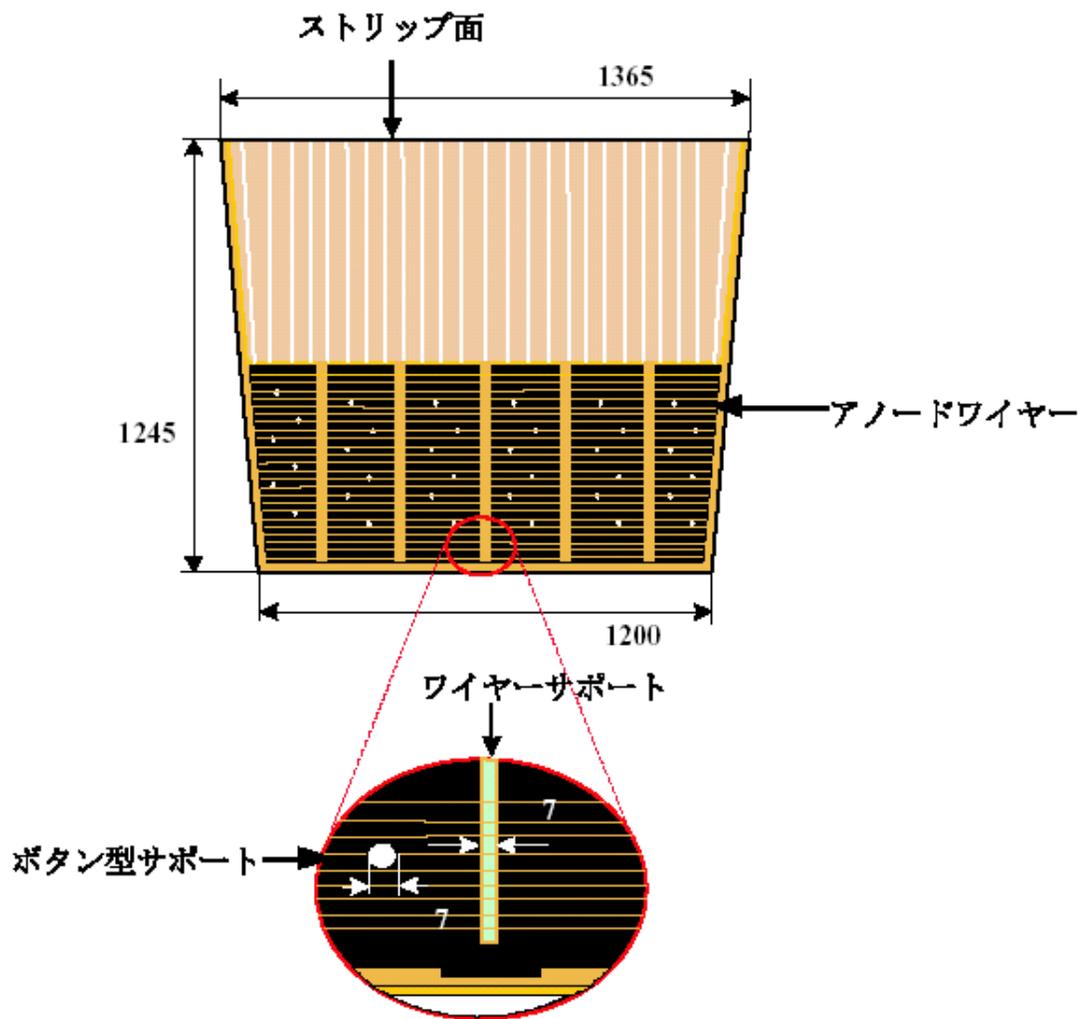


図 4.5: TGC(T7) の構造 (平面図)

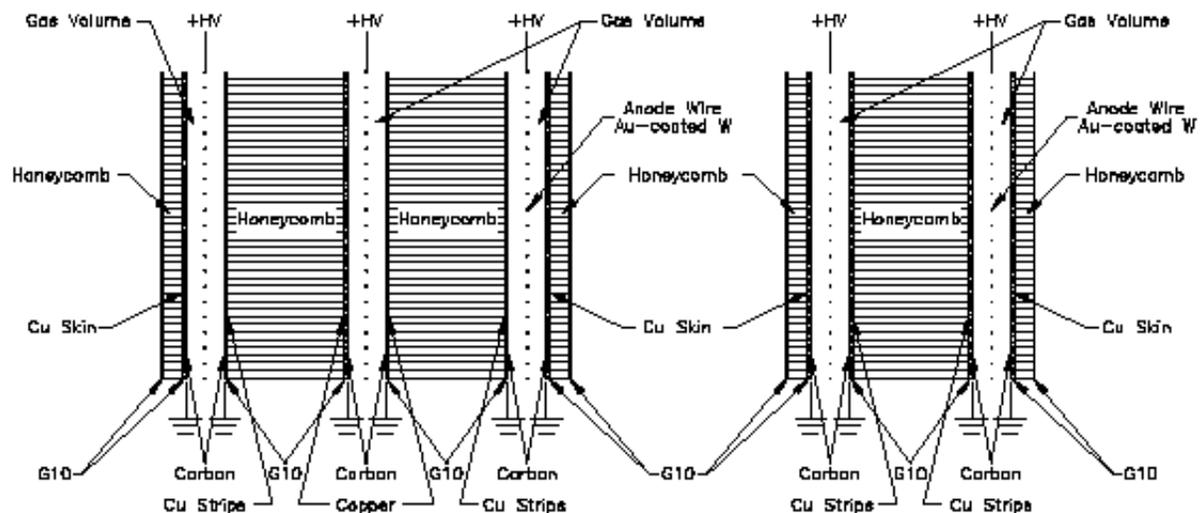


図 4.6: TGC の構造 (断面図)

ワイヤ、ストリップとも 32 チャンネル読み出しである。ワイヤ読み出しについては、1.8mm 間隔で 1 枚あたり約 700 本のワイヤが張られており、これらを約 20 本まとめて 1 チャンネルとして読み出す。ワイヤの読み出しの様子を図 4.7 に示す。

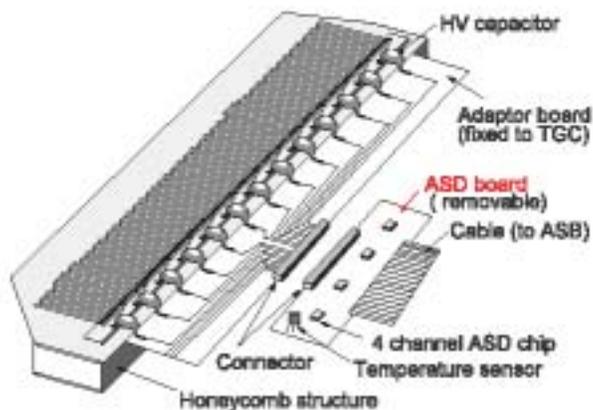


図 4.7: TGC のワイヤ方向の読み出し

TGC からの読み出しは、TGC のアダプターボードと接続している、ASD (Amplifier Shaper Discriminator) というボードを通じて行われる。TGC のアナログ出力を増幅し、threshold を超えたものを整形し、デジタル出力に変換する。1 つの ASD ボードには 16 チャンネルある。ストリップ読み出しについては、約 30mm 幅のストリップが 1 チャンネルにつき 1 枚刻まれている。

ストリップ側の読み出しに関してこの ASD ボードは TGC だけでなく、検査設備で用いる Drift Tube の読み出しにも用いられる。

TGC の周囲には CO_2 チャンネルと呼ばれる空間が存在する。図 4.8 に CO_2 チャンネルの概念図を示す。

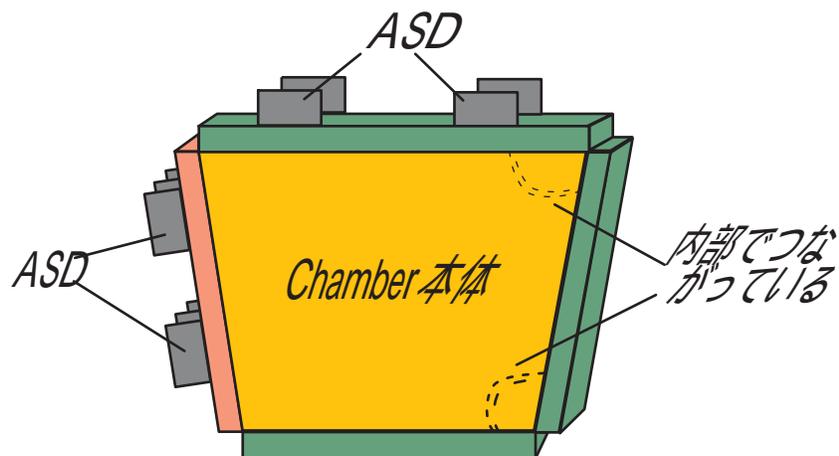


図 4.8: CO_2 チャンネルの概念図

CO_2 チャンネルがあることで、TGC が直接大気と触れないようになっている。これは、TGC に充填する CO_2+n -Pentane が引火性のあるガスであるので、TGC にリークがあって TGC からガスが流れ出しても安全であるためである。

第5章 検査設備

KEK で製造された TGC が LHC において正常に動作するためには、生産された TGC すべてが、要請された性能、動作を満たしているかあらかじめ検査しておく必要がある。そのため CERN へ輸送する前に神戸においてすべての TGC についてその性能を評価している。以下に検査の大まかな内容を示す。

5.1 TGC の量産と検査

TGC の量産は 2002 年から高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われている。製作する TGC は Doublet 384units、Triplet 96units、計 480units (1056chamber) である。日本で製作される TGC のタイプの内訳を表 5.1 に示す。

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

表 5.1: 日本で製作される TGC のタイプと台数

また、図 5.1 に TGC の各タイプの大きさと製作台数を示す。製作に関しては T7、T4、T5 の順で行われる。

現在 TGC は、KEK において 1 日に 2chamber のペースで製作されている。製作された TGC は、KEK から神戸大学での検査を経て CERN へ輸送される。CERN へ輸送されるのは神戸での検査に合格した TGC のみである。

神戸大学で行われる検査は、ガスリークテスト、HV テスト、宇宙線テストである。約 2m^2 の大きさの TGC を 480 台も検査するためには、大規模な設備と長期間動作可能なシステムが必要となる。特に、Cosmic Ray Test ではガスチェンバーである TGC 全面の検出効率を検査するため、長期にわたって十分な性能を持ち、安定した動作を行うガスシステムが必要となる。

5.2 ガスリークテスト

ガスリークテストでは、TGC のチェンバー部分及び CO_2 チャンネルにガスリークがないか検査する。TGC に使用される n-Pentane は可燃性で、且つ有害なガスである。TGC にガスリークがある場合、LHC 施設内に n-Pentane ガスが流出する危険性がある。また、リーク箇所から

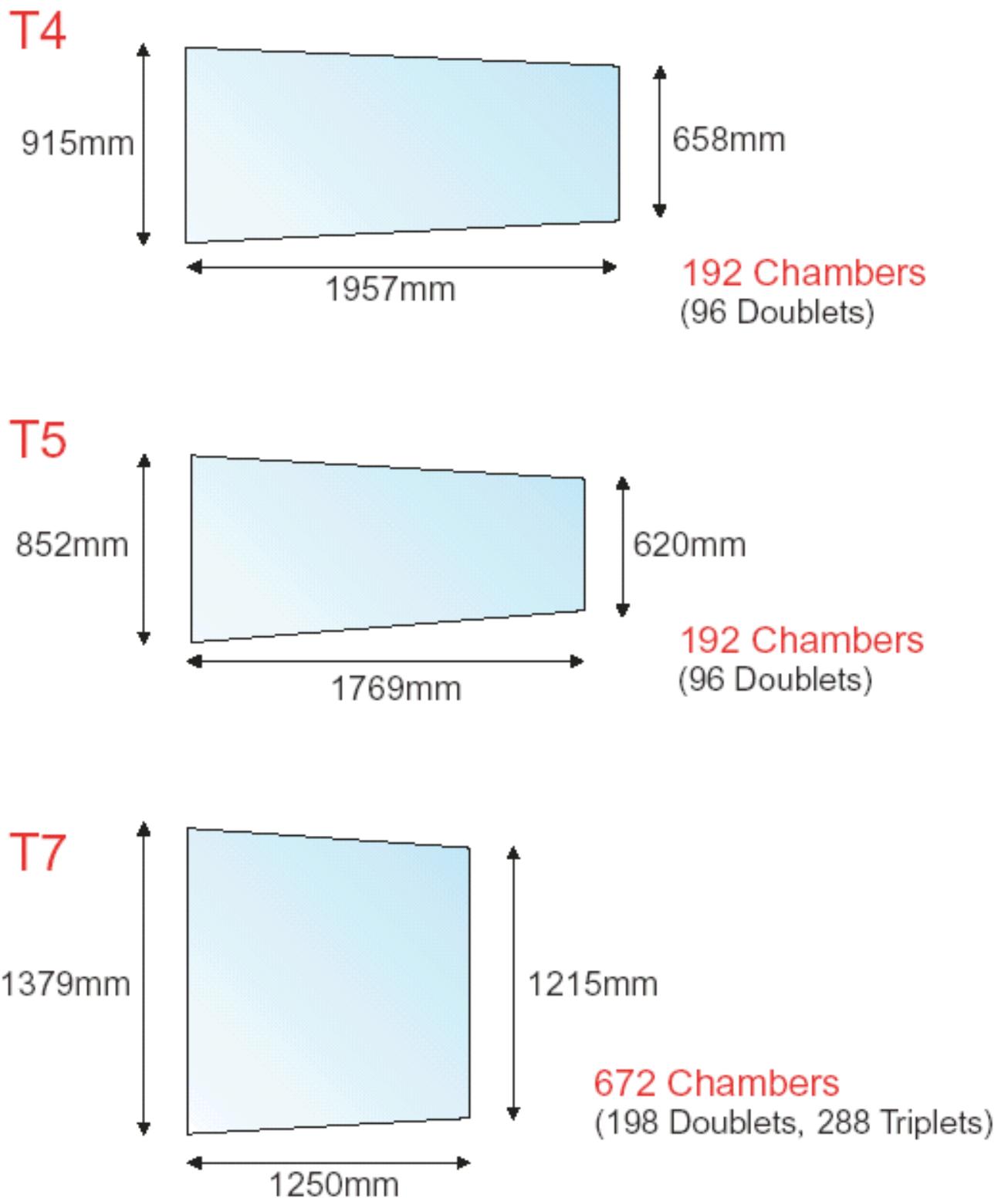


図 5.1: 日本で量産される TGC のタイプと台数

TGC 内部への空気の混入がある場合、TGC の検出効率を低下させる可能性がある。以上の理由によりこの検査が必要となる。

5.2.1 ガスリークテストの検査方法と合格基準

ガスリークテストは、TGC のチェンバー部分およびCO₂ チャンネルにそれぞれ大気圧 + 600Pa の圧力を TGC にかけて密封し、5 分後の圧力変化を見る。圧力低下がチェンバー部分については 50Pa 以内、CO₂ チャンネルについては 100Pa 以内であれば合格とする。

TGC のチェンバー部分の容積を 4l、CO₂ チャンネルの容積を 8l と考えるとそれぞれの合格ラインである 5 分間で 50Pa、100Pa の圧力低下がある場合のリーク箇所から流れるガスの流量は、チェンバー部分では約 1cc/min、CO₂ チャンネルでは約 2cc/min となる。

なお、チェンバー部分、CO₂ チャンネルは個別に検査される。不合格の場合、リーク箇所を発見、修復し、再度リークテストを行う。

5.2.2 ガスリークテストのシステム

次に、ガスリークテストの方法、及び用いるシステムについて説明する。ガスリークテストは大きく分けて 2 つに分けられる。1 つは、低下圧力の測定、もう 1 つはリークテストが不合格になった TGC のリーク箇所の発見、修復である。

圧力低下の測定に用いられるガステムは図 5.2 の通りである。

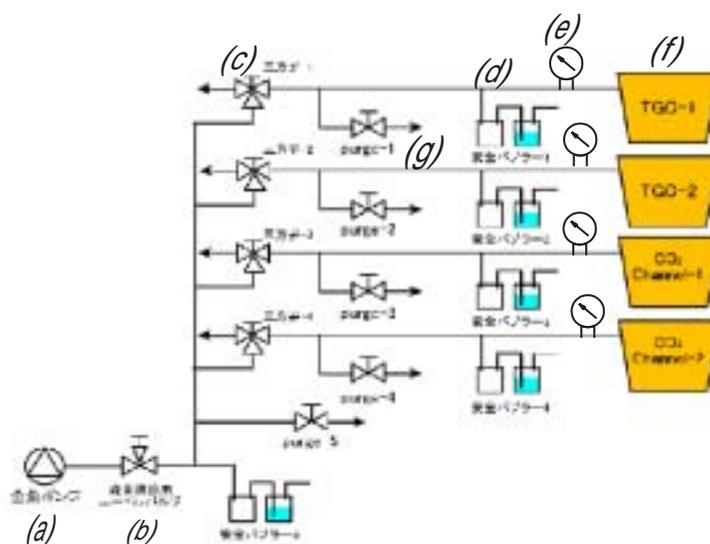


図 5.2: リークテストのガスシステム

ガスシステムを使用する際には、金魚ポンプ (図 5.2 中 (a)) によって空気をガス系へ送り出す。ニードルバルブ (図 5.2 中 (b)) の開き具合によって流量をコントロールした後、4 系統に分岐される。各系統には 3 方弁 (図 5.2 中 (c)) が設置されており、系にガスを流す場合にはバルブを開き、ガスの流入を止める場合にはバルブを閉じる。系を使用しない場合には大気開放にする。この系には安全バブラーが設置されており (図 5.2 中 (d))、これによって系の圧力を一定に保つことができる。TGC のガス口の片方はガスシステムと接続され、各チェンバーへ順に空気が送られる。もう一方のガス口は封じられており、これによって系を封じることができる。(図 5.2 中

(f) リークテストは圧力低下を測定することでリークの有無を確認する方法をとるため、この系には微差圧系が設置されている。(図 5.2 中 (e)) ガスリークテストでガスを流す場合はこの微差圧系を確認しながらつきっきりで行うので、圧力センサーや電磁弁といった圧が上がりにすぎた時に自動でパージを行う機構は必要ない。その代わりに手動のシャットバルブ (図 5.2 中 (g)) がついており、系の圧があがりすぎた場合にはこのバルブを開いて大気開放を行う。当然のことながら、リークを測定している間はこのバルブは閉じられ、3 方弁から TGC の間の系が封じきられる。圧力低下測定用のガスシステムは TGC1unit につきチェンバー部分と CO_2 チャンネルに 1 系統ずつ必要となる。

ガスシステムの実際の写真を図 5.3 に示す。

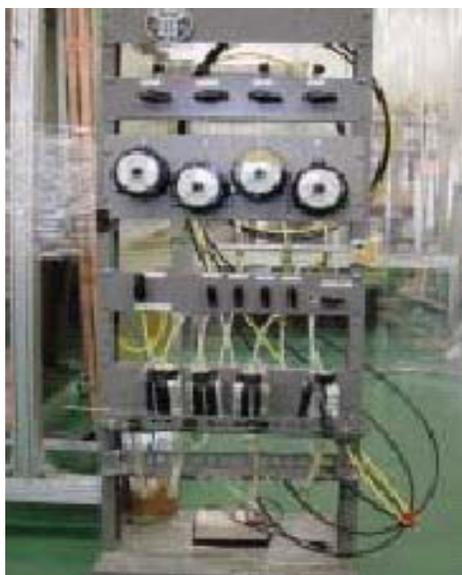


図 5.3: リークテストのガスシステム (写真)

リーク箇所を空気を送り込んだ場合、TGC を封じ切ってあれば、TGC 内の圧は上がるはずである。逆に、リーク箇所から TGC 内の空気を引けば、TGC 内の圧は下がるはずである。このことを利用して、リークの見つかったチェンバー部分や CO_2 チャンネルに対して、その外側を加圧か負圧をかけながらスキャンして行き、圧の変化でリーク箇所を発見するという方法をとっている。加圧の際にはコンプレッサー、負圧の際にはノズル部分を改良した掃除機を用いて行っている。図 5.4 にリーク箇所を探している様子を示す。

5.2.3 リークテストの検査状況

ここでは、現在までに行ったリークテストの検査結果について述べる。リークテストを実施したチェンバーは 52unit である。このうち、リークが発見されたのが 23unit であり、すべて CO_2 チャンネルにあった。修復後再検査を行ったものも含めて、50unit が合格している。リークテストにかかる時間のうち、そのおおくはリーク箇所の発見に費やされる。リーク箇所の発見、修復に手間取って検査のペースが遅れる可能性があるが、今後、KEK にて輸送前の TGC のリークテストを行い、神戸での検査の手順を少なくすることで検査のペースを保つ予定である。



加圧によるチェック



負圧によるチェック

図 5.4: リークチェックの方法

5.3 HV テスト

HV テストでは、TGC へ High Voltage の電圧を印加した際にカレントが安定していることを確認する。この時使用されるガスは本番で用いるのと同じ $\text{CO}_2 + n\text{-Pentane}$ であり、実際にオペレートするより高い電圧が印加される。また、このテストは1チェンバーごとに行われる。

HV テストを行う際にワイヤーのバリ等を放電させることで潰すと共に、TGC 製作段階において残った塵や埃も焼くことができる。このように放電の原因を減らすことで、TGC の安定性が増す。また、TGC 製作時に、カーボン面やハンダ面に汚れ(フラックス)が残っていた場合や、パーツ接着部での接着剤のもれがあった場合、リーク電流が大きく、放電も起こりやすい。リーク電流をモニタすることで、そのような TGC を見つけ出すことができる

5.3.1 HV テストの合格基準

HV テストは2項目ある。それは、

- 3.1kV テスト
- 3.3kV テスト

である。

3.1kV テストは TGC に 3.1kV(8 時間テスト) の電圧を印加し、安定したカレントで 8 時間連続印加できれば合格とする。このときのカレントの上限は $10\mu\text{A}$ である。3.3kV テストは 3.1kV テスト(8 時間テスト) に合格した TGC に対して行われる。

ここで、3.1kV で 8 時間テストを行うのは、実際に ATLAS において TGC を動作させる際の印加する電圧値付近で長時間安定したカレントで動作し続けられるかを見るためである。また、3.3kV テストを行うのは、ATLAS において TGC に ATLAS での印加電圧よりも高い電圧をかけた場合でも充分安定していることを確認するためと、3.1kV で焼ききれなかった塵や埃などの放電の原因となる物質を焼ききるためである。

TGC に 3.3kV 印加し、カレントが連続的に安定している時間を記録する。このときのカレントの上限は $10\mu\text{A}$ である。3.1kV テスト、3.3kV テストともに通過したものを HV テスト合格とみなす。ちなみに、通常 TGC に 3.1kV をかけた時のカレントは数十 $n\text{A}$ である。

5.3.2 HV テストのシステム

HV テストでは 2 段階の手順を踏む。

まず第 1 段階として TGC へ CO₂ ガスを流し 2.9kV まで印加する。(CO₂ でのチェンバー焼きだし作業) このときの電流値を記録する。これは CO₂ + n - Pentane での電圧のかかりをよくすること、KEK で行われた同様のテストのデータとの比較を行って運送時に以上がなかったかをチェックすることを目的としている。

次に、第 2 段階として TGC へ流すガスを CO₂ + n-Pentane (混合比 55:45) に換え、3.1kV まで印加する。その後、前述したように 3.1kV テスト (8 時間テスト) と 3.3kV テストの 2 つの検査を行う。

HV テストで、TGC に電圧を印加するのに用いているのは、佐藤電子の HV モジュールである。このモジュールではカレントの値は針で指し、HV の値は手動で変更する。これは、この HV テストにおいて初めて CO₂ + n-Pentane を充填して高圧を印加する事になるので、慎重に操作を行うためである。このモジュールから得られる電流、電圧といった情報を PC へ送り、時間情報と合わせて画面でモニタし、記録を行っている。

図 5.5、5.6 は PC でのモニタの様子を表している。



図 5.5: HV モニターの PC 上の画像

図 5.6 中の青の線が電圧値を表し、ピンクの線が電流値を表している。図 5.6 中 (a) は、HV をあげる際に一時的にカレントが流れている様子である。この図を見ると、電流値はほとんど $0.02\mu A$ で安定しているが、塵などを焼ききった際には図 5.6 中 (b) のようにカレントが乱れる。また、TGC 内で放電が起こった場合には図 5.6 中 (c) のように大きな電流が流れることがわかる。このテストでは、このようにモニターを行って、高い電圧値をかけても電流が安定していることを確認する。

5.3.2.1 HV テストの検査状況

ここでは、現在までに行った HV テストの検査結果について述べる。HV テストを実施したチェンバーは 43unit である。そのうち現在までに 43unit すべて合格している。他の検査との検査を

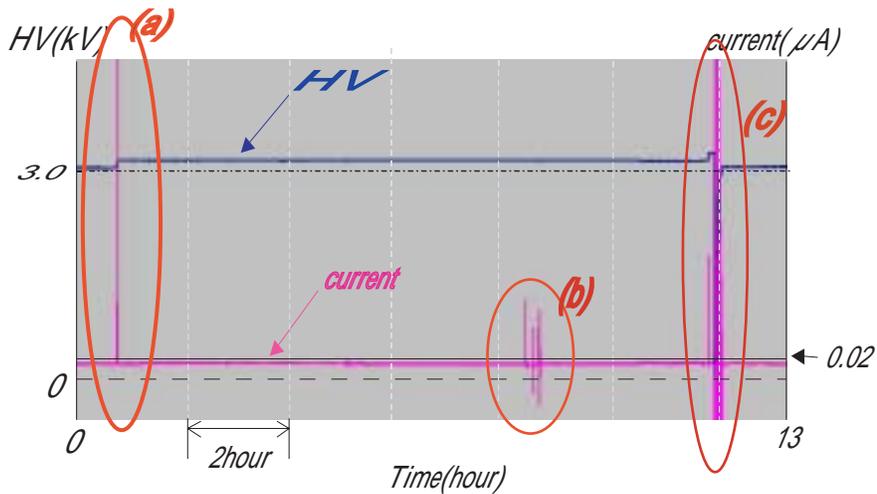


図 5.6: HV モニターの様子

考えるとペースアップが必要であるが、HV テストでは十分な時間をかけて焼ききる作業が必要であるために検査に時間を要する。このため TGC に HV をかける以外の、ガスの充填等の作業で検査全体の時間を短縮することにした。次の章で述べる HV のガスシステムは TGC へのガスの充填を効率的に行えるように考えられて作られている。

5.4 Cosmic Ray Test

TGC はトリガーチェンバーであることから、その検出効率はワイヤーサポートなどの構造上の不感領域を除いて 99% 以上、全体の平均で 95% 以上を要求されている。そのため、製作された TGC の検出効率が要求通り満たされているかどうかを調べることは、神戸における検査のなかで最も重要な項目である。ここでは検査設備における TGC の検出効率の評価方法について述べる。

5.4.1 Cosmic Ray Test の合格基準

検査の間 TGC を設置する架台の上下に、XY 方向に各 3 層俵積みにした Drift tube を設置する。その外側にトリガーとして用いる Scintillation Counter を設置する。宇宙線が通った場合、Drift tube の位時間情報から位置情報を求め、それをもとに宇宙線の track を 3 次元的に求める。(tracking) 求めた track が TGC を通る位置に TGC からのシグナルがあるかどうかで検出効率を求める。つまり、

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

である。このように TGC の検出効率を求めて、全体の平均が 95%、不感領域を除いて 99% 以上あるかどうかを検査する。検査は TGC 全面に渡って行われるので、TGC の検出効率の一様性を調べることになる。ここで、TGC 全面の検出効率の一様性などを視覚的に確認できるツールの利用が望ましい。

5.4.2 Cosmic Ray Test のシステム

宇宙線テストで用いるシステムは大まかに言って以下の3つである。

- トリガー用 Scintillation Counter
- tracking 用 Drift tube
- TGC

これらの位置関係を記した概念図を図 5.7 に、実際のセットアップの写真を図 5.8 に記す。

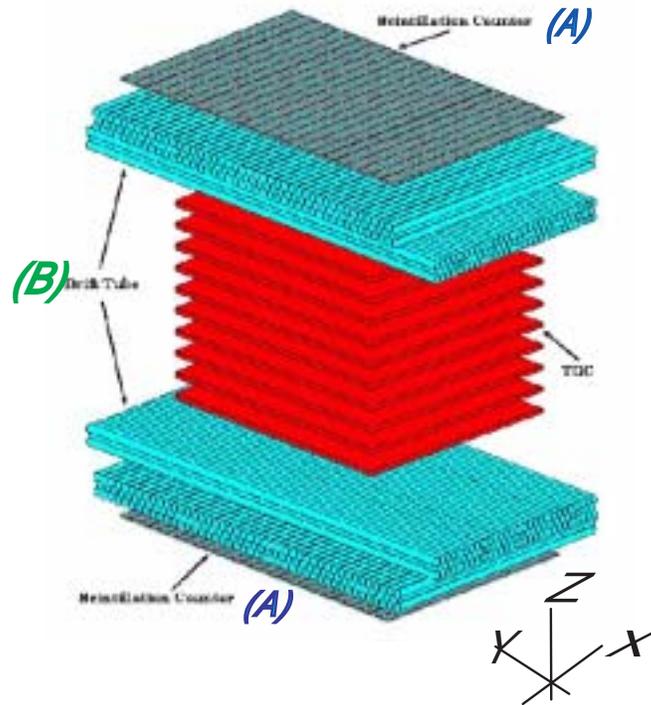


図 5.7: 宇宙線テストの概念図

図 5.7、図 5.8 中の (A) がトリガー用の Scintillation Counter であり、(B) が tracking 用の Drift tube である。Drift tube は 3 層に依積みにしたものが上下それぞれ XY 方向に置かれている。検査の際には上下の Drift Tube の間に TGC が 8 台置かれる。この検査装置の測定領域は 1500mm × 1940mm で、日本で製作される全てのタイプの TGC の有感領域をカバーしている (図??参照)。次にそれぞれのシステムの説明を行う。

5.4.2.1 Scintillation Counter

検査設備の上下両端にはトリガー用 Scintillation Counter が、
上面:70mm × 1300mm × 10mm、22 本 下面:90mm × 1300mm × 2.6mm、22 本
のように配置される。このようにトリガーを上下に置くことですべての検出器を通過した宇宙線を捉えることができる。図 5.9 に Scintillation Counter のトリガー回路を示す。Scintillation Counter は両読み出しである。Scintillation Counter の両端に接続された Photomultiplier(PMT)からのシグナルをそれぞれ Discriminator で、アナログ信号からデジタル信号に変換し、コイン



図 5.8: 宇宙線テストの検査設備の写真

シデンスをとる。コインシデンスをとった結果を 1 本の Scintillation Counter のシグナルとみなす。検査設備の上部、下部それぞれについて Scintillation Counter のすべてのシグナルの OR をとり、次に上下の OR の AND をとる。AND をとった結果をトリガー信号とみなす。

5.4.2.2 Drift Tube

まず Drift tube の構造について述べる。

Drift tube は粒子の入射位置を知ることが目的とした、円筒形のガスチェンバーである。方法としては、トリガーがかかってから円筒中心にあるアノードワイヤーに電子が到達するまでのドリフト時間を測定し、それを位置情報に変換している。ちなみに、時間情報を位置情報に変換する関数を $x-t$ relation と呼んでいる。

Drift tube の構造は図 5.10 のようになっている。

Drift tube は直径 50mm, 厚さ 2mm の円筒形のアルミできており、両端はエンドキャップで閉ざされている。このアルミパイプがカソード側 (GND) になる。アルミパイプの長さは X 方向で 2.5m、Y 方向で 2m である。中心にはアノードとなるワイヤーを張っている。

Drift tube は前述したように粒子の入射位置を測定する検出器であるのでワイヤーがたわんでしまうと、誤った位置情報を得ることになるため、このワイヤーはたわまないように張る必要がある。しかし、Drift tube の長さが長いので、ワイヤーをたわまないように張るにはつよいテンションをかけなくてはならない。よって強いテンションで切れない太さの径でなくてはならない。逆にあまりワイヤー径が大きいとワイヤーの作る電場が弱くなってしまふ。以上の理由からアノードワイヤーには直径 50 μ m の金メッキタングステンワイヤーを採用した。

つぎに、Drift tube の動作領域は limited proportional mode を用いることにした。ドリフト時間から位置情報を求めるためには、時間分解能が良くなくてはならない。それにはイベントごとでパルス波高が大きく変わらないことが重要となる。粒子の入射位置の違いによって 1 次電子の数

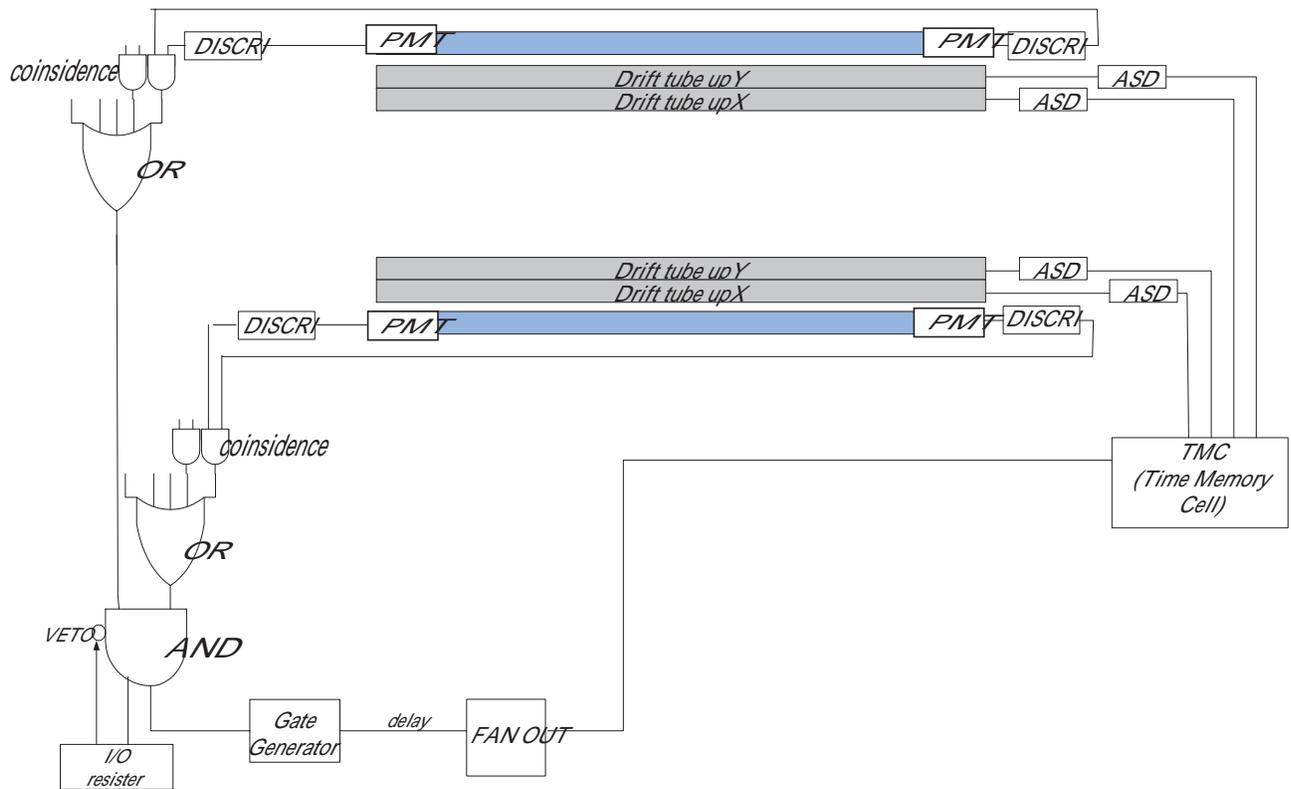


図 5.9: Drift Tube の read out

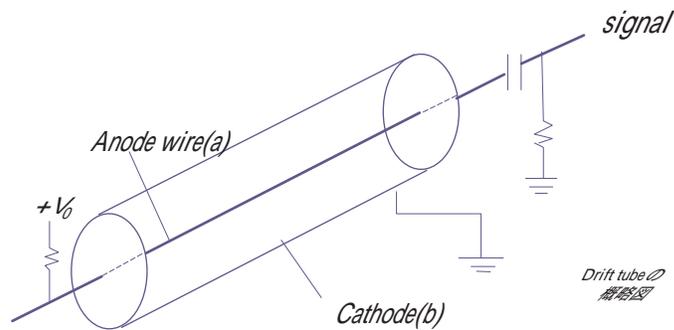
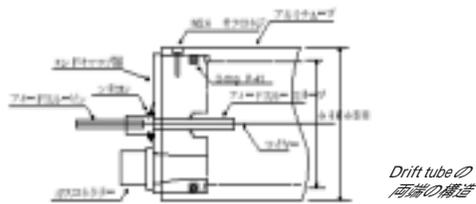


図 5.10: Drift tube の構造

が違って、出てくるパルス波高はさほど変わらないことからこの領域を採用している。
 Drift tube の充填ガスは limited proportional mode で充分なゲインが得られなくてはならない。充填ガスは、Drift velocity が電場に寄らず一定であることが必要である。これは、ドリフト時間を位置情報に変換するのに用いる x-t relation が直線になるため、その補正も簡単になる点と、E/P によらず Drift velocity が一定であれば、圧力モニター（コントロール）が必要ないからである。以上の条件を満たすガスとして Ar+ethane(混合比 50:50) を使用することにした。このガスはクエンチャーの量が多いために $10^5 \sim 10^6$ という高い増幅率で動作することができる上に、Drift velocity が $50\text{cm}/\mu\text{s}$ で安定している。(図 5.11 参照)

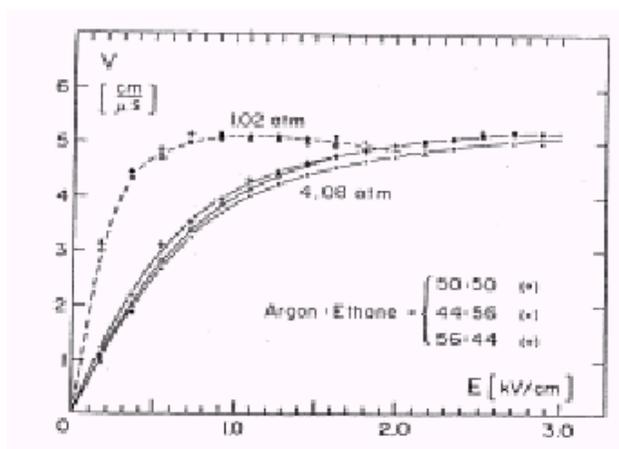


図 5.11: Drift velocity

ここで、Drift tube の電場、電位はそれぞれ

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon r} \quad (5.2)$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{a} \quad (5.3)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad (5.4)$$

とあらわせる。 V_0 はアノードワイヤーに印加した電圧、 a はワイヤー半径、 b はアノードとカソードの距離である。Drift tube では $V_0=3.5\text{kV} \sim 3.65\text{kV}$ 付近で Drift velocity がほぼ一定になっている。(図 5.11 参照) 式 5.2 と図 5.11 を用いて、印加電圧が 3.5kV (実際に検査設備で動作している電圧) であるときの Drift velocity を求めると、カソード近傍である $r = 2.3(\text{cm})$ のときで、 $v_D = 4(\text{cm}/\mu\text{s})$ である。アノードへ近づくにつれて Drift velocity はおおきくなり、 $r = 0.7(\text{cm})$ 付近からワイヤー近傍までは $v_D = 5(\text{cm}/\mu\text{s})$ となる。

Drift tube は上下共に Scintillation Counter の内側に X、Y 方向にそれぞれ 3 層積みになっている。3 層の Drift tube の本数は、
 X 方向:89 本 Y 方向:125 本である。つまり合計で 428 本の Drift tube を用いている。X,Y 方向及び TGC の上下に Drift tube を設置することで、宇宙線 track を 3 次元的に求めることができる。Drift tube のシグナルはワイヤーに接続した ASD ボードへおくられ、そこでアナログ信号から

デジタル信号へ変換される。この信号はTMC(Time Memory Cell) とよばれるモジュールに送られ、トリガー信号がきてから Drift tube のシグナルが来るまでの時間 (Drift time) を記録する。

Drift Tube の読み出しについては図 5.9 に示してある。Scintillation Counter が宇宙線ミューオンの通過を検知し、NIM モジュールのロジック回路を通じて TMC にトリガー信号を伝える。TMC は Drift Tube からのシグナルを ASD ボードを通じて読み込む。TMC はシグナルデータを時間情報へ変換する。

5.4.2.3 TGC

Cosmic Ray Test の間、TGC はパレット上に乗せられ、架台内へと入れられる。その様子を図 5.12 に示す。



図 5.12: 検査設備の架台部分。TGC はパレット上に置かれる。

宇宙線テストでは、TGC に印加する電圧は、3.1kV である。HV カーブ TGC の検出効率が 99%以上の電圧を定めた。

また、宇宙線テストでは TGC の検出効率を測定するため、TGC の各ワイヤグループ、各ストリップごとに読み出す必要がある。例えば、T7 の Triplet を 8 台検査する場合、ワイヤグループが 24 チャンネル× 3 層、ストリップが 32 チャンネル× 2 層で、計 136 チャンネルあり、8 台で 1088 チャンネルの読み出しを行うことになる。このような多量のチャンネルを読み出すのに、SWINE を用いる。TGC の各チャンネルからの信号は、ASD ボードでアナログ信号をデジタル信号に変換される。SWINE でトリガー信号からある決まった時間内に TGC からの信号がくれば、ヒットがあったとみなす。また、TGC の 16 チャンネルの OR をとり、これを TMC で時間情報に変換し読み取る。これによって TGC の信号の到達時間分布を測定し、25ns の時間分解能を達成しているかを調べることができる。

5.4.2.4 Cosmic Ray Test の検査状況

ここでは、現在までに行った Cosmic Ray Test の検査結果について述べる。Cosmic Ray Test は 1 回あたり 2 週間を費やす。Cosmic Ray Test を実施したチェンバーは 32unit である。

第6章 gas システムの開発

ここでは前章の Cosmic Ray Test に用いられる Drift Tube、TGC のガス系について詳しく記述する。Drift Tube 及び TGC は 2 章で述べたガスチェンバーであり、ガスシステムの開発はこれらの検出器の動作に不可欠である。

6.1 Drift Tube のシステムと評価

6.1.1 Drift Tube の構成

3 章に示したように Drift Tube は Cosmic Ray Test の飛跡の再構成に用いられる検出器である。以下に Drift Tube に対する要請を記す。

- 空間分解能 1mm 以下
- 高い efficiency

空間分解能については検査ステーションの物質量が $50g/cm^2$ であり、multiplescattering を考えると、システムとしての飛跡再構成の位置分解能は 1mm 程度であり、Drift tube 単体についてもこれ以上の空間分解能は必要でない。また、1mm 程度の空間分解能があればボタンサポートやワイヤーサポートを区別するのに問題はないと考えられる。efficiency に関しては検査を行うのに十分な値を持つ必要がある。また、Drift tube 内の efficiency に位置依存性があってはならない。これらの要請からガスシステムに関して気をつけるべき点は、

- ガスリーク
- 流量コントロール
- ガス圧に対する safety

である。検出器内に空気 (特に O_2) が入ると、efficiency が低くなってしまふ。Drift Tube は Tracking に用いる検出器であるので、検出器内のガスの成分については特に気をつける必要がある。

図??ではガスを 3 置換行った場合 (B) と、1.5 置換行った場合 (A) の efficiency の差である。ここで 1 置換とは検出器内の体積分ガス置換を行うことである。空気が入って efficiency が下がってしまうのは O_2 のような電子と結びつきやすい分子が検出器内の電子と再結合してしまい、収集電荷が少なくなってしまうためである。さらに、極端に検出器内のガスの成分が変わると電圧がかかりにくくなったり、空間分解能が悪くなるなどの弊害が起こる。これを防ぐためにガスリークを極力減らすことが必要である。しかし Drift tube 全数にガスを流すのに 856 箇所ワンタッチコネクタを接続する必要があり、各コネクタ部分、もしくは各システムのリークによる大気の混入が問題になる可能性がある。この場合リーク箇所を発見し、修復する作業が困難である。

大気が入らないようにするのに次の 2 つの方法が考えられた。

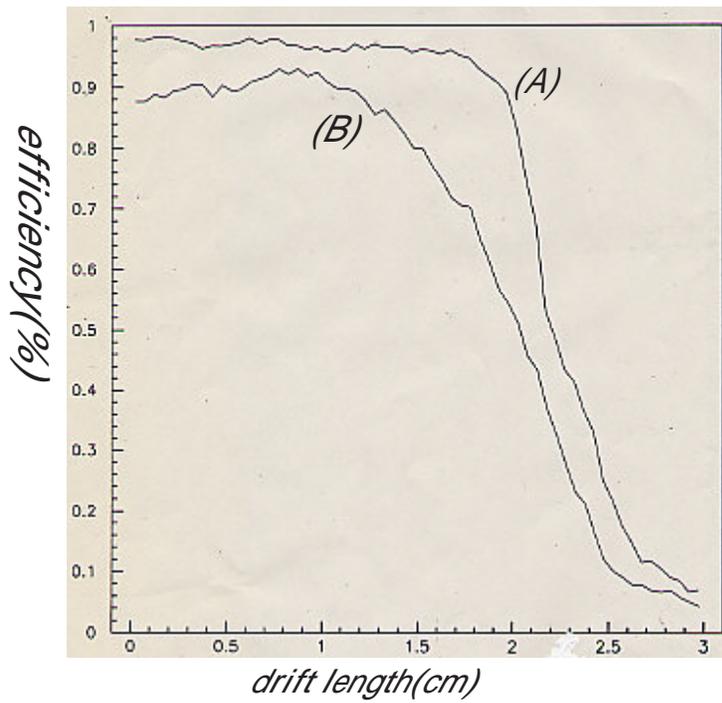


図 6.1: Drift Tube のガス置換量の違いによる efficiency の差 (印加電圧 $3.5kV$)

- Drift tube 内の圧力を大気圧より高くし、大気 (特に酸素) が検出器内に入らないようにする方法
- Drift tube 内にガスを流し続けて、検出器内の大気の濃度が大きくなるようにする方法

ここで、2つめの方法を行うとすると、常に大きな流量でガスを流すことになり、コストがかなり高くなってしまふ。対して1つめの方法では、ガス圧を大気圧よりやや高めにコントロールすれば流す流量は最低限でよいのでコスト的に有利である。また、Drift tube は比較的耐圧に優れているので圧を高めにかけても支障はないと思われる。以上の理由より Drift tube 内の圧を大気圧より高めにかける方法を採用した。併せて各系統のガス流量をニードルバルブによってコントロールし、1系統あたり約 $2cc/min$ と極力流量を抑えることで必要な性能を保ちつつコストを削減することができる。

ガス配管については図 6.2 の通りである。

Drift Tube は構造が単純であり、耐圧に優れているのでシンプルな配管が実現できる。充填ガスは Ar+ethane(50:50) 純度 99% の pre-mix gas である。Ar+ethane のガスボンベには $3.9MPa$ 、 $47l(35)$ で) 充填されており、通常 1 系統あたりに $2cc/min$ 流していることから、25 日程度でガスボンベ 1 本を使用することになる。ガス系の操作を軽減し、長期間の無人での動作を実現するため、メインのガスボンベが空になった場合、自動的に予備のガスボンベからガスを供給できるようになっている。(図 6.2 中の内参照) このガスボンベの切り替え装置は以下のような仕組みになっている。メインのガスボンベの系の 2 次圧を圧力センサー (SUNX 社、PE22-Z) (図 6.2 中 sensor(1)) を用いてモニターし 2 次圧が $0.08MPa$ になった時点でリレー (図 6.2 中 (G)) に信号が伝わり、3 方電磁弁 (図 6.2 中 valve(1)) へ電流が流れる。これにより信号を受けた電磁弁が切り替わり予備のガスボンベの系が開くことになる。圧力センサー (図 6.2 中 sensor(1)) に設定してある 2 次圧 $0.08MPa$ 以下であれば圧力センサーからリレー (図 6.2 中 (G)) へ、さらに

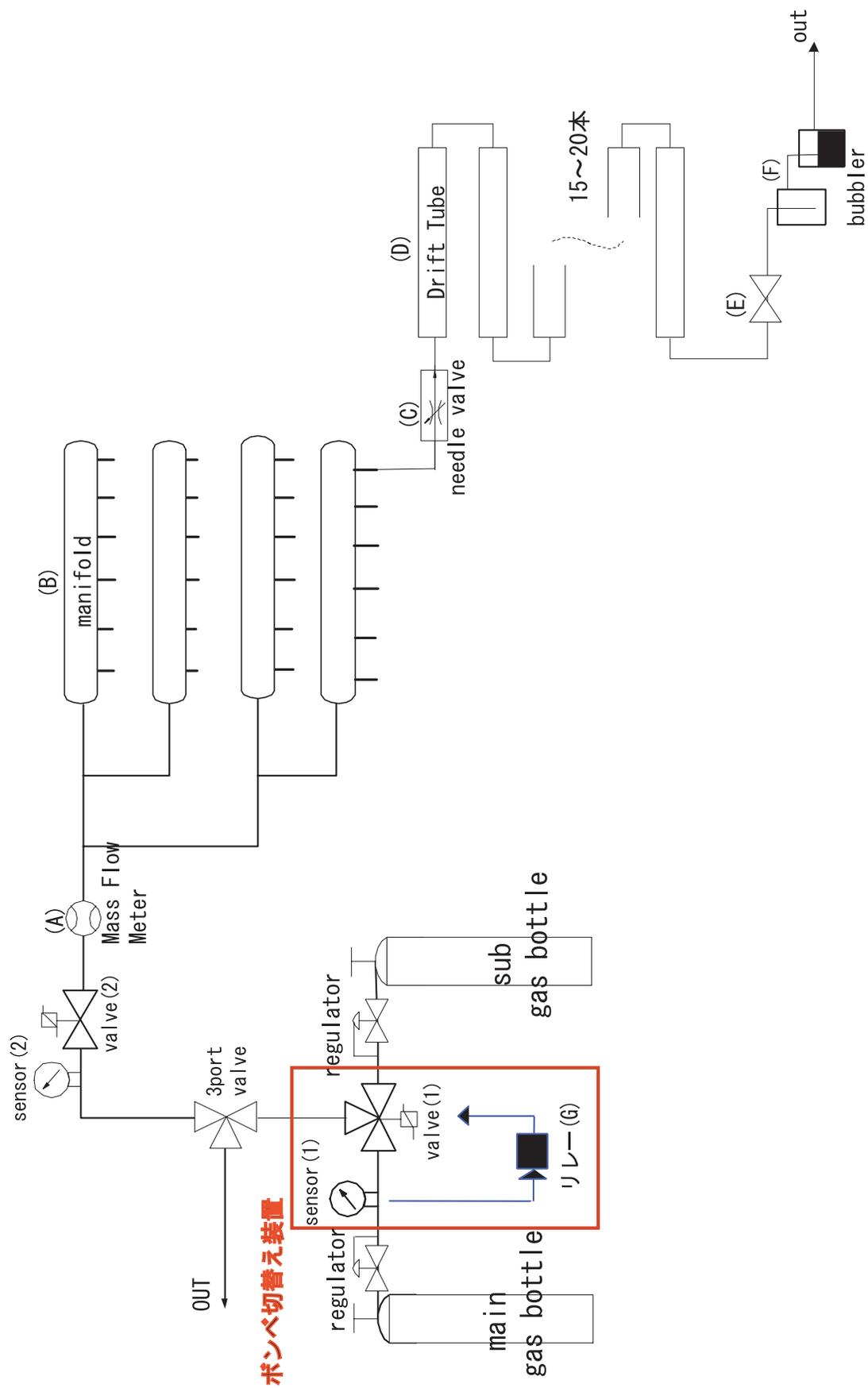


図 6.2: Drift Tube の配管図

電磁弁 (図 6.2 中 valve(1)) へと電流が流れ続ける。

メインポンペが交換され、ガスを流し始めてその系の 2 次圧が 0.08MPa 以上となった場合に圧力センサ - (図 6.2 中 sensor(1)) からの電流が流れなくなることによって電磁弁 (図 6.2 中 valve(1)) が再び切り替わるようになっている。これは予備ポンペの残量に関係なく起こる。このポンペ切替え装置はメインポンペの残量がなくなつてかを交換するまでの期間、予備ポンペを用いることでメインポンペが空になって交換するまでの間、充填の空白期間が起らないように、という目的で作られているからである。この装置により最長で 50 日間ガスポンペを交換しなくてもガスを流し続けることができる。

ガス系は X、Y 方向、上下各 3 層、計 428 本の Drift tube (図 6.2 中 (D)) へ manifold (図 6.2 中 (B)) をもちいて 24 系統に分岐して供給している。分岐前のガス流量は Mass Flow Meter (KOFLOK、3850MS) を用いてモニターしており (図 6.2 中 (A)) 個々から測定された出力電圧を同社の表示機で表示している。ただしこれらは CO_2 で補正されているので、実際の流量は、

$$(\text{実流量}) = (\text{表示値}) \times \frac{(\text{Ar の分子量}) \times 0.5 + (\text{ethane の分子量}) \times 0.5}{\text{CO}_2 \text{ の分子量}}$$

であらわされる。ただし、この表示はガスが安定に流れているかを確認するものであって、厳密な流量は必要ではない。分岐後の 24 系統の各ガス系での流量は KOFLOK 社のニードルバルブを設置し、流量コントロールを行っている。(図 6.2 中 (C)) 排気側にはシリコンバブラーが設置されており、これにより逆流をふせぎ、圧の調整を行うことができる。(図 6.2 中 (F))

ここで、Drift tube 1 本の容量は X 方向用で約 5l 、Y 方向用で約 4l であり、1 系統あたりでは大体 150l 、全体では約 1.8kl である。Drift tube の容積が大きいため、ガスの置換にかなりの時間とガスを必要とする。長期にガスを流さない場合上流のニードルバルブ (図 6.2 中 (C)) と排気側のシャットバルブ (図 6.2 中 (E)) を用いて Drift tube 内を封じきり、tube 内への空気の混入を最小限にすることができる。

配管については、径 $1/4$ インチのシンフレックスナイロンチューブを用いた。Drift tube 間の配管は柔軟性のある N5(02-102-02) を用い、そのほかの部分にはやや硬めの N2(02-104-03) をもちいた。この配管を組み立てた後、前述したように Drift tube 内を大気圧より高めに設定し、リーク箇所から tube 内に空気が入らないようにした。ガス系の圧力のコントロールはガスポンペに装着しているレギュレーターで行っており、24 系統への分岐の直前で約 0.22MPa である。分岐後の Drift tube 内の圧力は 0.0118MPa 程度になる。排気側はバブラーによって程度によってほぼ大気圧になっている。

これらのシステムを利用して *DriftTube* を動作させる。次の節では、これらのシステムを利用した結果をみていく。

6.1.2 Drift Tube の動作結果

前節で述べたシステムを利用して efficiency の HV dependence を調べた。結果は図 6.1 の通りである。

図 6.3: Drift Tube の HV dependence

グラフのプラトーのところでは 98% 程度の efficiency があり、drift tube の壁付近 (2.5cm) で

efficiency が落ちていることがわかる。これより Drift tube の efficiency は tracking を行うのに十分な値であるとわかる。また、このときの印加電圧は $3.5kV$ である。

印加電圧 $3.5kV$ で Drift tube のデータを取ったときの各チャンネルの hit の数 (Drift tube の profile) を図 6.4 にしめす。

図中の profile のなかで、hit のまったくないチャンネルがあるが、これはワイヤー切れによるもので、ガスによる影響ではない。これより、どのチャンネルにも同じように hit が見られることがわかる。ガス系に異常があれば、その部分の profile が他の部分と違うはずであるので、Drift tube は正常に hit を感知し、シグナルを出している、とわかる。

Tracking を行う上で x-t relation は重要な役割をもつ。x-t relation とは、Drift tube の時間情報を位置情報に変換する際に用いられる関数である。この関数の求め方は以下の通りである。まず、x-t relation をあらわす関数を

$$X(t) = p_2(t - t_0)^2 + p_1(t - t_0)$$

と仮定する。ここで、 p_1 、 p_2 はパラメータ値、 t はトリガー信号がきてから Drifttube のシグナルが来るまでの時間、 t_0 は Drifttube に粒子が通過してからシグナルがくるまでの時間であるとする。次に、Drifttube のシグナルのうち tracking に有効なパターンを選び出す。(図 6.5 参照) このヒットパターンから得られる Drifttube のヒットの時間分布より t_0 を決める。次に p_1 、 p_2 を以下の方法で決める。はじめに、Driftvelocity が $50\mu m/ns$ であることから、 $p_1 = 0$ 、 $p_2 = 50 \times 10^{-6}$ と定める。この関数とヒットパターン 3 層の内の上下 2 層の時間情報を用いて真ん中の層の位置情報を求める。次に、この位置情報と真ん中の層の時間情報から新しい $X(t)$ の関数を求める。この一連の操作を収束するまで繰り返し、最終的に得た $X(t)$ を正しい x-t relation とする。

実際にこの操作を行った結果、 p_1 、 p_2 の値は最終的に $p_1 = 0.556 \times 10^{-2}$ 、 $p_2 = -0.311 \times 10^{-5}$ となった。ここで求めた x-t relation を用いて求めたワイヤーからの距離 (= d) と時間 (= t_1) の関係を図 6.6 に示す。

図中にある実線は d と t_1 を x-t relation でフィットしたものである。これより、x-t relation が実際の測定値を正しくフィットしていることが分かる。

次に Drift Tube の tracking にこの x-t relation を用いた上で得られた空間分解能について述べる。空間分解能は、ヒットパターンの 3 層の内の上下 2 層に上で述べた x-t relation を用い、真ん中の層の x-t relation から求めた予想値と実際の測定値との誤差を求めることで得た。(図?? 参照)

これより空間分解能は約 $350\mu m$ とわかる。よって DriftTube は CosmicRayTest において飛跡の再構成を行うのに十分な性能を持っているといえる。

また、CosmicRayTest を開始して 1 年半以上経過したが、現在のところ経年変化としての efficiency の落ちや、システムの故障等の劣化は見られない。つまりこのシステムは 1 年半以上の連続運転を行っても十分な性能を保っているといえる。

以上のことから Drifttube は要請を満たすシステムを持ち、その測定結果は Tracking に十分な性能を継続して持っていることがわかる。

6.2 Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムと評価

6.2.1 Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムの構成

ここでは Cosmic Ray Test に用いられる TGC のガス系についてのべる。

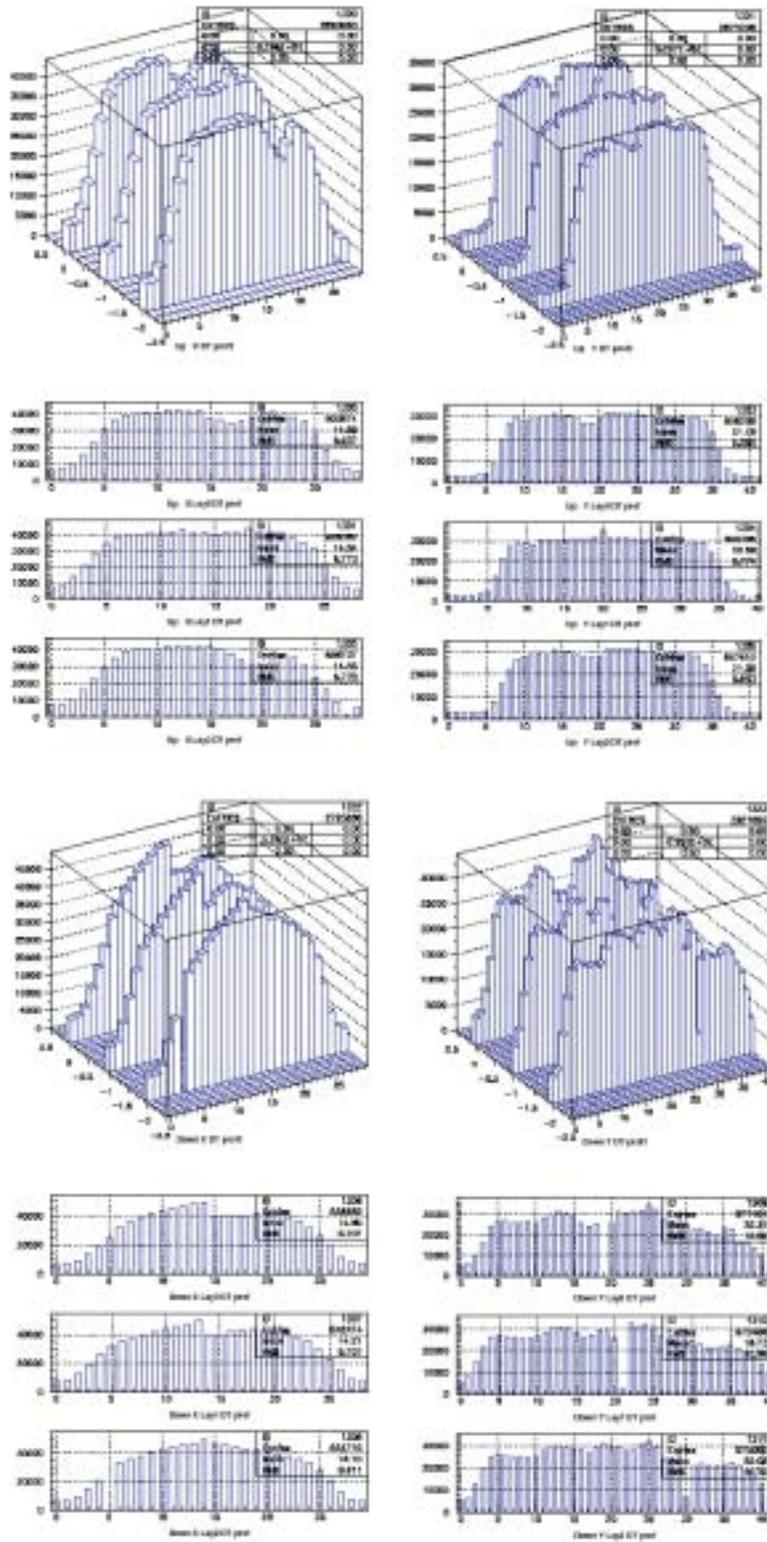


図 6.4: Drift Tube \mathcal{D} profile

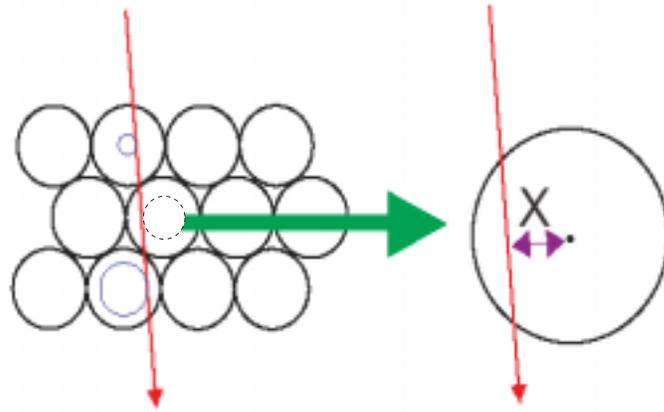


図 6.5: Drift Tube のヒットパターンと tracking

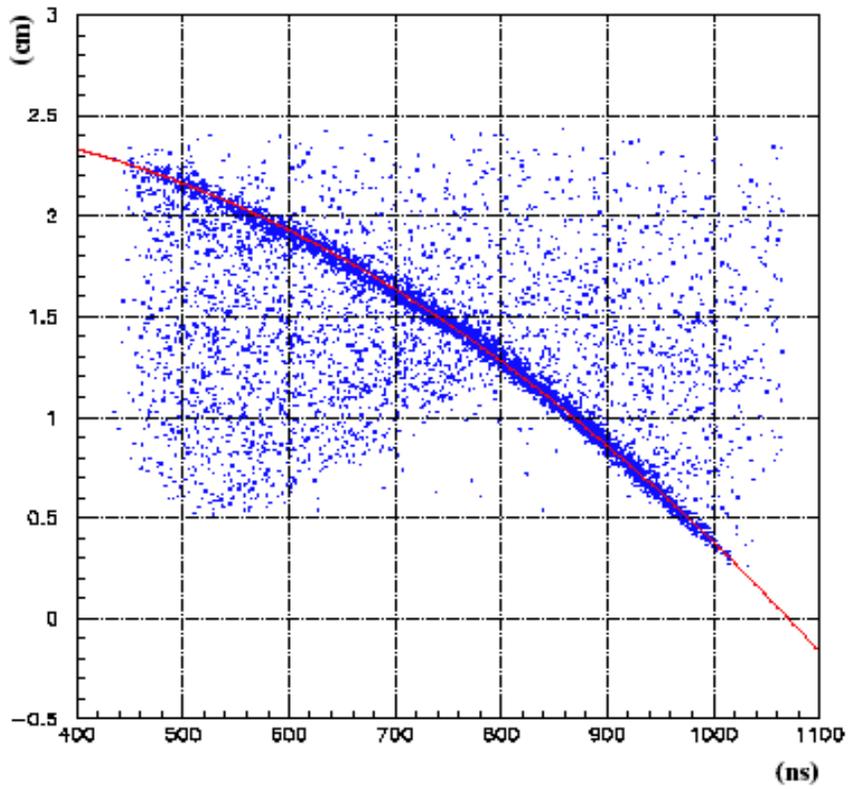


図 6.6: x-t relation で求めた d と t_1 の関係

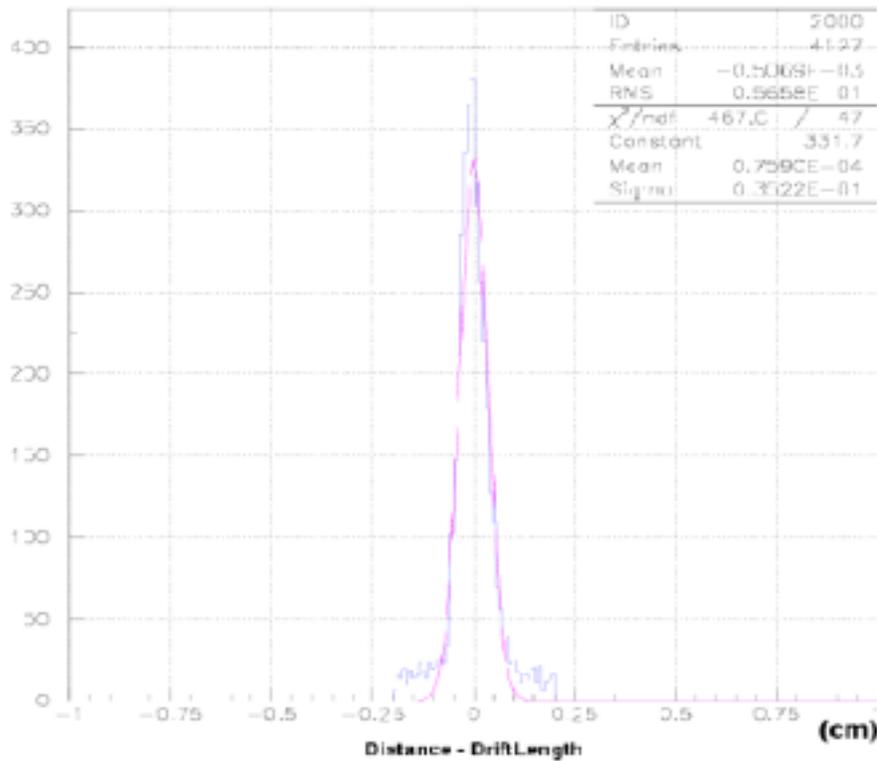


図 6.7: Drift Tube の空間分解能

TGC に対して以下のような要請がある。

- 構造上の不感領域を除く TGC の efficiency が 99% 以上であること。
(TGC 全面での efficiency が 95% であること。)
- time jitter が 25ns 以下であること。

TGC の構造上の不感領域とはボタンサポートやワイヤーサポートのある部分を指している。Cosmic Ray Test ではすべての TGC が上記の性能を満たしているかを検査する。まず、検査の内容から要請される条件としては、

- TGC へのガス供給は 8 系統必要
- 圧力のモニター及び safety
- 流量のモニター
- システムの安定な動作

Cosmic Ray Test は 1 回に 8unit の TGC を検査する。このため TGC へ供給するガスは 8 系統必要である。また、TGC は接着剤を用いて組み立てられているので圧の変化に弱く、 0.6kPa 加圧した時点で接着剤が剥離し、TGC が壊れてしまう。TGC が加圧によって壊れるのを防ぐために圧があがりすぎた際には safety が働くようにしなくてはならない。また、Drift tube の時にも述べたように、ガスの成分の変化は efficiency に影響を及ぼす。TGC の場合は圧力を高めにつ

る方法は使えないので、TGCへガスを流し続ける方法をとっている。そこでガスがきちんと流れていることを確認する必要がある。TGCへ流すガスの流量がどの系統も均一であることをモニターし、必要があれば調節をしなくてはならない。Cosmic Ray Testは1回の検査に2週間という期間を必要とする。この期間に供給するガスに異常があった場合、TGCのefficiencyやTGCの動作自体に変化をきたす可能性がある。よって検査の行われている間、TGCへガスが安定に供給されることが必要である。

n-Pentaneは沸点が高く常温で液体である。(図6.8参照)

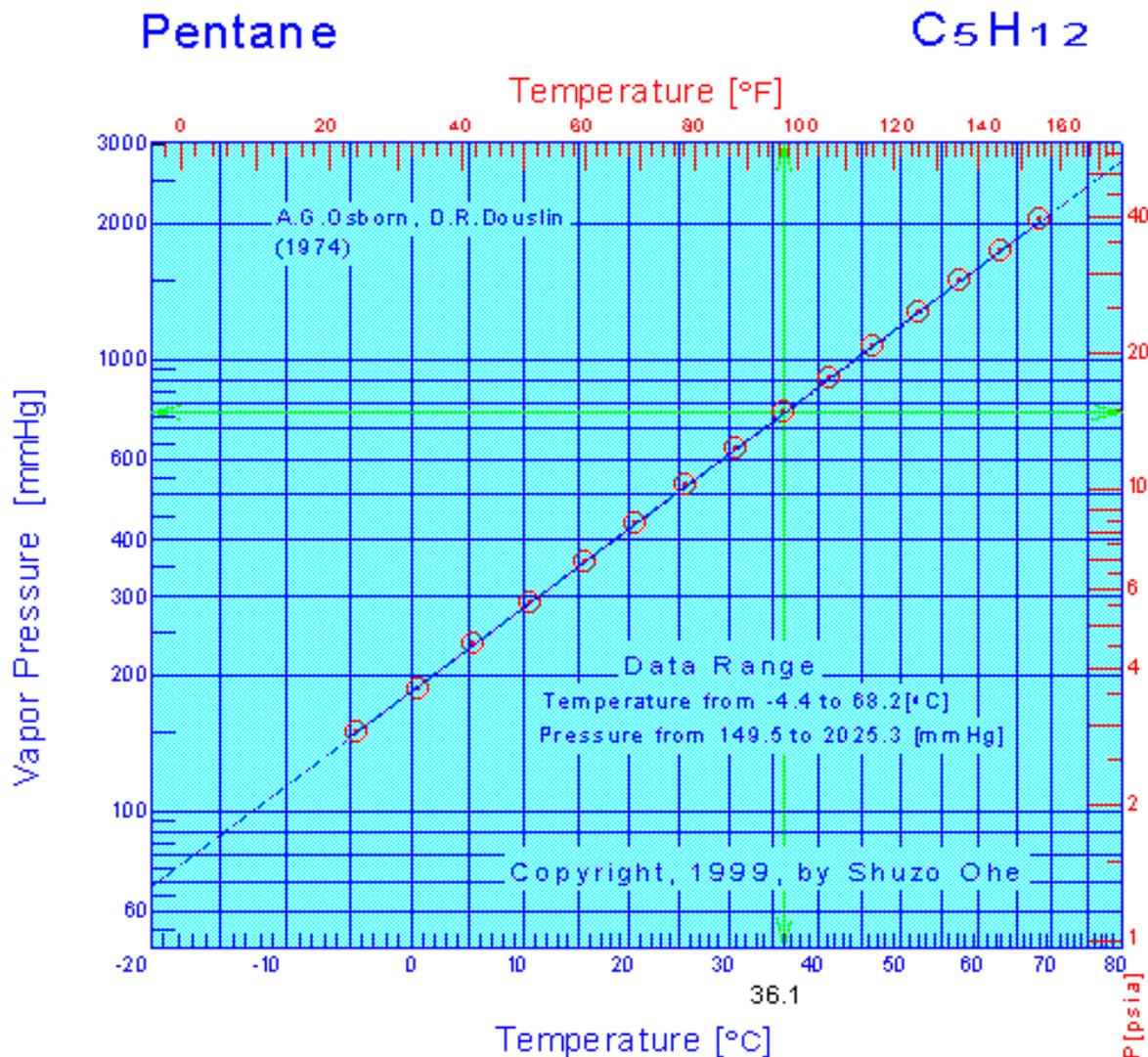


図 6.8: ペンタンの蒸気圧

そこで、TGCに用いるCO₂ + n-Pentaneガスは14で液化する。これより、液化温度より高い温度に保つことが必要となる。また、温度が一定でも圧力があがった場合液化してしまう可能性があるため、圧力があがりすぎないように系のレイアウトや用いるセンサーについても気をつける必要がある。

液化の与える影響は大きく、

- 混合比の変化
- 液化により管が詰まる
- 液化した n-Pentane による TGC への影響 (TGC 付近で液化した場合)

といったことが考えられる。

ここで、n-pentane は有機化合物を溶かしやすいという性質を持っているので、配管に用いる材質には注意する必要がある。とくに TGC の上流側では、n-Pentane が溶かした物質が TGC 内に入り込む等の危険性もあるためそのほとんどを SUS 管で行っている。

以上のことに留意して配管を行った。全体図は図 6.9 の通りである。TGC の配管図中の番号についてはこの節において通して番号がつけられている。

まず Mixer 部分 (A) についてみていく。配管図は図 6.10 に示した。Mixer 内にある恒温槽 (J) の温度は、恒温槽の上部と下部に設置された熱伝対によりモニターし、ヒーターを制御することでコントロールされ、下部が 40 になるように保たれている (K)。この恒温槽内において液体の n-Pentane をあたためて気体にし、CO₂ と混合させる。CO₂ はポンペから流量調節用の Mass Flow Controller (G) を通って恒温槽へ入る。n-Pentane は、入っているタンク (H) 内に CO₂ で圧力をかけて恒温槽へ押し出す。恒温槽へ入る前に Mass Flow Controller (I) で流量を調節される。流量を調節する Mass Flow Controller はどちらも使用する気体 (液体) への補正を行ってある。n-Pentane には液体微量流量コントローラーである ESTEC 社の LV-310 を用い、これを同社のコントロールユニット PAC-D2 を用いて操作する。CO₂ には STEC 社の SEC シリーズを用いた。これらを用いることによって恒温槽へ入れる CO₂、及び n-Pentane の量を調整して、ガスの混合比を CO₂:n-Pentane=55:45 に調整することができる。混合されたガスの流量を確認するために Mixer の下流において STEC 社の Mass Flow Meter (L) でモニターしている。この Mass Flow Meter は N₂ で補正されているので、出力電圧は N₂ での流量を示している。そこで、この電圧値に Conversion Factor と呼ばれる補正係数を掛けて測定された流量を導き出すことができる。つまり

$$\text{実流量} = (\text{出力電圧}) \times (\text{FullScale}) \times (\text{CF 値}) / 5(V) \quad (6.1)$$

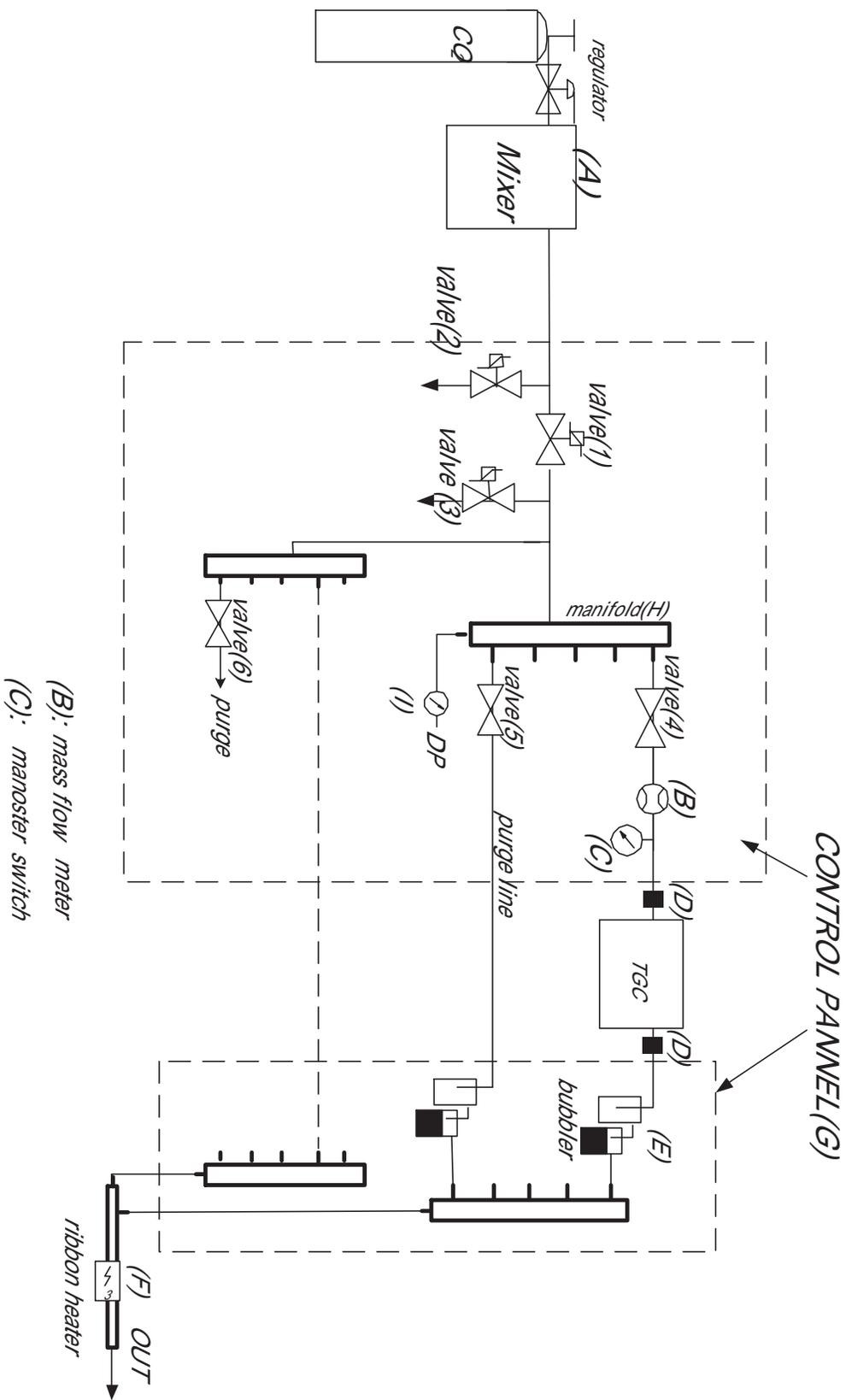
であらわされる。

ここで Conversion Factor (CF 値) を求める式は以下の通りである。

$$\text{CF 値} = (\text{CO}_2 \text{ の混合比}) \times (\text{CO}_2 \text{ の CF 値}) + (\text{n-pentane の混合比}) \times (\text{n-pentane の CF 値}) \quad (6.2)$$

この式中に N₂ キャリブレーションの場合の各成分の CF 値 (CO₂ の CF 値=0.78、n-pentane の CF 値=0.22) を代入すると、CO₂+n-Pentane の実流量がわかる。Mixer で混合された CO₂+n-Pentane は架台近くに設置されたコントロールパネル (G) まで引き回される。Mixer 内部に関しては SUS 管を用いている。Mixer からコントロールパネルまでの配管は 1/4 インチ径の SUS 管を用いた。

では、次にコントロールパネル内の配管について説明していく。(配管図は図 6.9 参照) ここで、コントロールパネルの様子を図 6.11 に示す。コントロールパネル内の配管は 1/4 インチ径の PFA チューブ (ARAM 社、1029-25) で行った。PFA とは、フッ素樹脂の 1 種で耐薬品性、耐熱性、耐食性に優れた素材である。この部分に SUS 管を用いなかったのは、接続箇所が多いことと配管経



(B): mass flow meter
 (C): manostat switch

図 6.9: Cosmic Ray Test における TGC カリブレーション

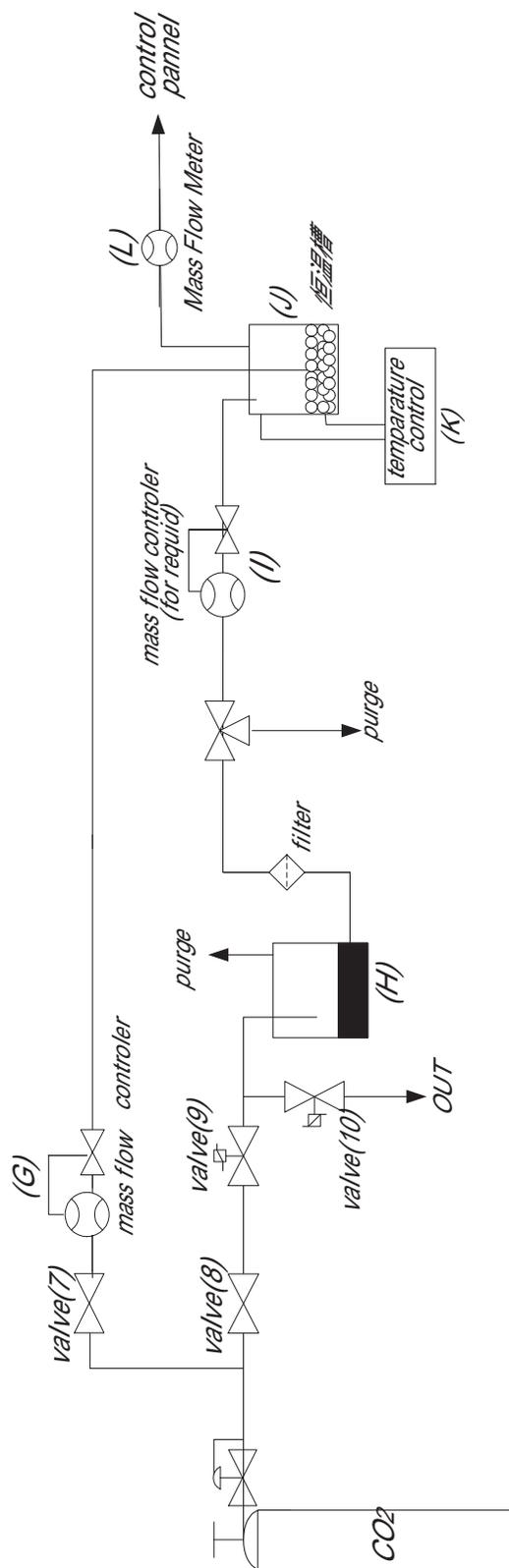


図 6.10: Mixer 付近のガス配管



図 6.11: コントロールパネルの様子

路の確保の難しいところが多いため、リークの起こる可能性が高くなるからである。また、PFAチューブは半透明な樹脂であるので、液化した場合にすぐに目で判別できることも利点である。コントロールパネル部分は排気口付近 (F) に次いで液化の可能性のある部分であるのでセンサー類が多く管を直接暖めることができない分、確認できる形にする必要がある。

まず電磁弁 (valve(1)) を通り、その後 manifold(H) をもちいて 8 系統に分岐される。manifold にはそれぞれにパージを行うための手動シャットバルブ (valve(5)(6)) があり、一時的に圧があがった場合に大気開放できるようになっている。圧のモニターに関しては manifold に長野計器のダイヤフラム微差圧計 (I) を設置している。分岐された 8 系統についてもそれぞれにシャットバルブ (valve(4)) を設置しており、これによって架台で Cosmic Ray Test を行う TGC の台数が変化したり、何らかの理由で特定の系のガスを止める必要ができた場合にも対応できるようになっている。シャットバルブから TGC への差込口 (D) までには、流量計 (B) や圧力センサー (C) が設置され、異常がないかをチェックしている。

圧力があがった場合の対策としては、ダイヤフラム式微差圧スイッチ (山本電機製作所、マノスタースイッチ MS61) (C) の設置がある。ここで、仮に圧力が上がった場合の safety 系の動作について説明する。図 6.12 に簡単な概念図を記す。系に 2 次圧 $0.3kPa$ 以上の圧がかかるとマノスタースイッチ (C) がラッチリレー (M) へ電流を流して、各電磁弁 (valve(1)(2)(3)) へ伝える。すると (1) が閉じてガスをそれ以上 TGC 側へ流さないようにし、(2)、(3) が開くことにより系の圧力を下げる。上流の Mixer 付近では、圧で n-Pentane を Mixer (A) まで押すための CO_2 の供給を valve(9) を閉じることによって止め、さらに valve(10) で容器内の圧を逃がし、n-Pentane の Mixer への供給を止める。2 次圧が $0.3kPa$ をこえてから safety が働くまでの時間のずれはほとんどないので、ガス系の圧はすぐに大気圧まで下がり、TGC が壊れることもない。また、ガ

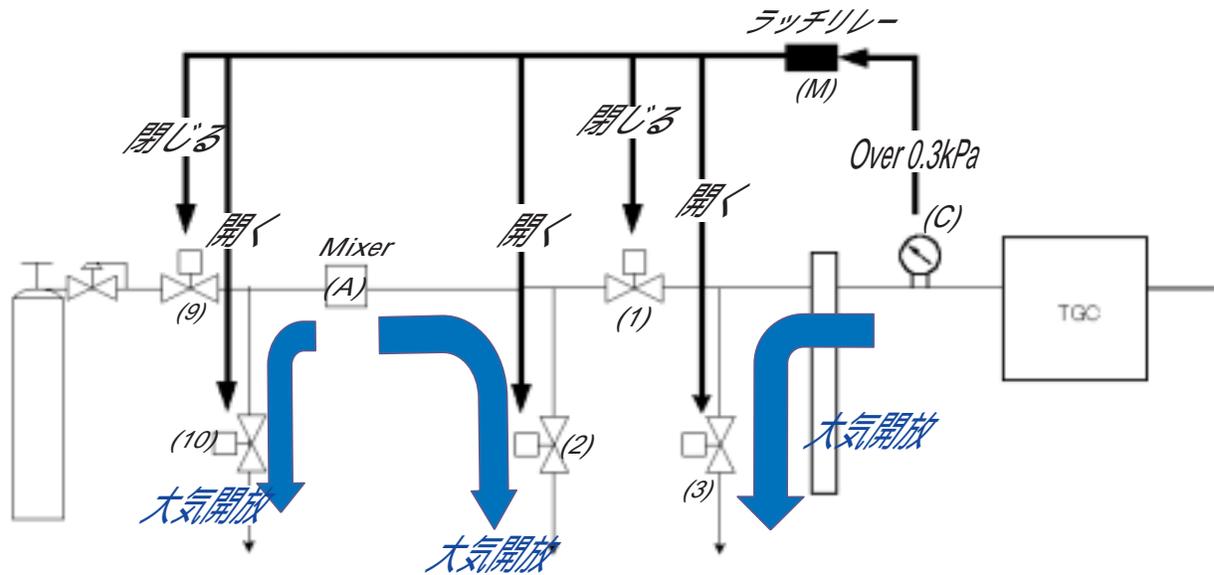


図 6.12: 圧力 safety の概念図

系に n-Pentane が流れ出すというような危険も回避できる。

safety からの復帰は手動で行う。これにより問題の箇所の解決が終わるまで不用意に TGC へガスを流すことはなくなる。復帰に関しては、復帰用のスイッチを押すと safety が入った時と逆に電流が流れて、すべての電磁弁が元に戻るようになっている。また、電気が供給されない時の電磁弁の開閉は、safety に入った時と同じにしている。これによって、無人で停電した場合でも自動的にガス系が大気開放されて、系の圧があがり TGC が壊れてしまう危険がなくなる。また、負圧に関しては TGC の下流にバブラーを設置し、逆流を防いでいる。(E)

流量計は Mass Flow Meter(KOFLOK 社、3850MS、 CO_2 補正)(B) をもちいた。この流量は出力電圧の値で表されるので、この電圧値をボルテージロガーで記録し、安定してガス供給を行っているかを記録、確認している。その様子を図 6.13 に示す。

ここで、通常は Mass Flow Meter の出力電圧から実流量を求めるが、ここでは各系統に均一にガスが流れていることが確認できればよいので、電圧値が安定になっていることが重要である。この図の 1、2ch と 3、4、5ch の出力電圧が違うのは Mass Flow Meter の流量レンジが異なるからである。1、2ch は $500cc/min$ のレンジ、3、4、5ch は $50cc/min$ のレンジの流量計を用いている。グラフより、1(12ch の出力電圧が 3、4、5ch の電圧のほぼ 1/10 であることから、どの系統にも均等にガスが流れていることが分かる。流量の調節は *Dr fttube* のようにニードルバルブを用いるのではなく、*MassFlowMeter* の流量を見ながら TGC の下流にあるバブラーの水位で調整し、どの系にも均等にガスが流れるようにする。ニードルバルブは *input* と *output* の間に圧力差を必要とするため使用しなかった。これは、温度一定で圧力が上がった場合に n-Pentane が液化する可能性があるためである。

このように各センサーを通った後、 CO_2+n -Pentane は架台の TGC へと流される。架台の TGC のパネルの近くにガスの差込口が設置されており (D)、ここまでの配管が固定の配管となる。コントロールパネルからこの差込口までは、比較的長い配管であるので SUS 管を用いて行った。

差込口の模式図を 6.14 に示す。

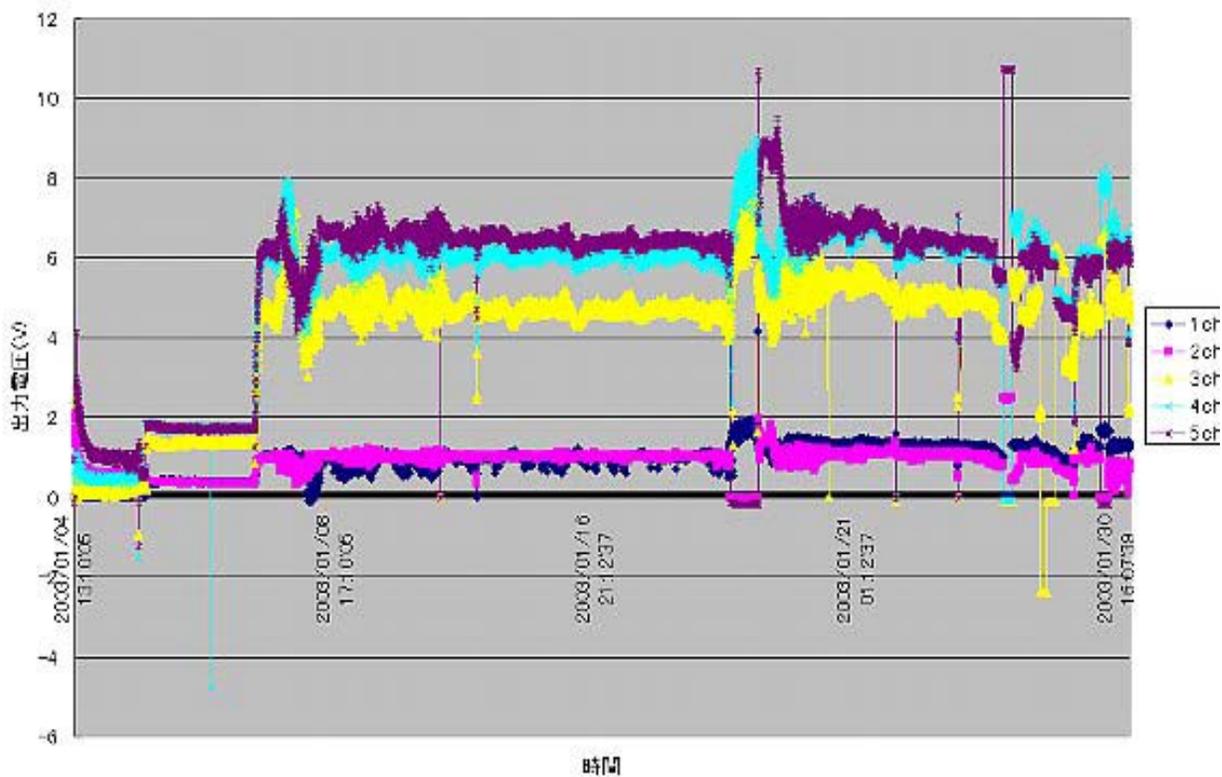


図 6.13: TGC の流量モニターの様子

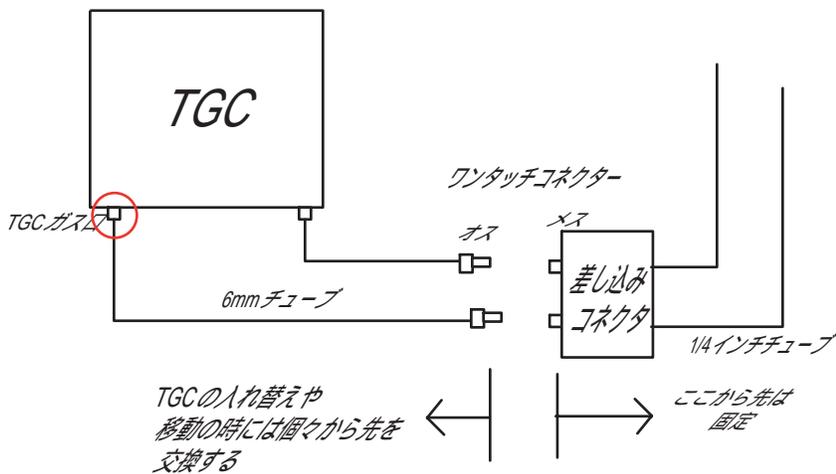


図 6.14: 差込口の様子

差込口の部分でガスの径が 1/4 インチから 6mm にかわっている。これは、配管部品の径と TGC のガス口の径が違うからである。差込口の TGC 側コネクタは PISCO のワンタッチカプラーを使用しており、着脱が簡単に行える。これにより架台付近でガス系から簡単に TGC をはずすことができるので、検査する TGC を移動したり、入れ替える際もコネクタを抜き差しするだけでよく、作業の簡略化ができる。配管の素材については、TGC と差込口の間は 6mm の PFA チューブを用いており、TGC の各 chamber 間は SUS 管を U 字に加工したものをを用いている。TGC に一番近い部分であるので配管材の影響には特に気をつけなくてはならない。

TGC を流れた CO_2+n -Pentane は排気側の差込口 (D) から再びコントロールパネルへ戻り、各系統ともそれぞれバブラー (E) を通って manifold (F) で再び 1 系統にまとめられる。ここまでの配管はすべて 1/4 系の PFA チューブで行われている。その後、液化対策を施した管を通り大気中へ排気される。排気口付近には最も注意が必要である。なぜなら排気口付近では気温の低下が著しく、排気口付近での n-Pentane の液化、凍結の恐れがあるからである。そこで排気口付近を熱伝導の高い銅管で配管し、その周囲にリボンヒーターを巻いて管全体をあたためるようにした (F)。さらに、管の周囲に断熱材を巻き、熱が逃げないようにしている。この管の温度および、排気口付近の外気温はサーモレコーダーで記録している。管の温度は外気にかかわらず 30 ~ 35 程度に安定しており、外気温が 0 を下回った際にも管の温度に変化はなく、排気口にも異常は見られなかった。

その他の液化対策として、暖房により架台周辺の室温を 28 前後に保っている。これにより架台周辺の配管や TGC が冷えて液化することを防いでいる。また、壁面や床面からの放射冷却の影響を防ぐために、発泡ウレタンをコントロールパネルと壁面などとの間に設置している。この発泡ウレタンのコントロールパネル側にアルミのシートをはり、コントロールパネルにも十分に暖房の熱が当たるようにした。また、コントロールパネルの操作性を損なわないようにしながら、なるべく配管に暖かい空気が触れるように床から遠い場所にレイアウトをした。液化によりガスに支障が出ることはないよう、コントロールパネルや排気口付近の温度チェックは適時確認されている。

次節ではここで述べたシステムを用いて得たデータが要請を満たしているかどうかを見ていくことにする。

6.2.2 Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムの動作結果

TGC の efficiency とは

$$efficiency = \frac{track \text{ 上に TGC のシグナルがあった event 数}}{tracking \text{ のできる event 数}} \quad (6.3)$$

である。印加電圧が変わることによる efficiency の変化を表したグラフを HV カーブという。TGC の efficiency の HV カーブを図 6.15 に示す。

efficiency がプラトーになった電圧を印加電圧とする。このグラフより TGC の印加電圧は 3.0kV とする。

3.0kV で TGC のデータを取ったときの各チャンネルの hit の数 (TGC の profile) を図 6.16 にしめす。

これより、どのチャンネルにも同じように hit が見られることがわかる。ガス系に異常があれば、その部分の profile が他の部分と違うはずであるので、TGC は正常に hit を感知し、シグナルを出している、とわかる。

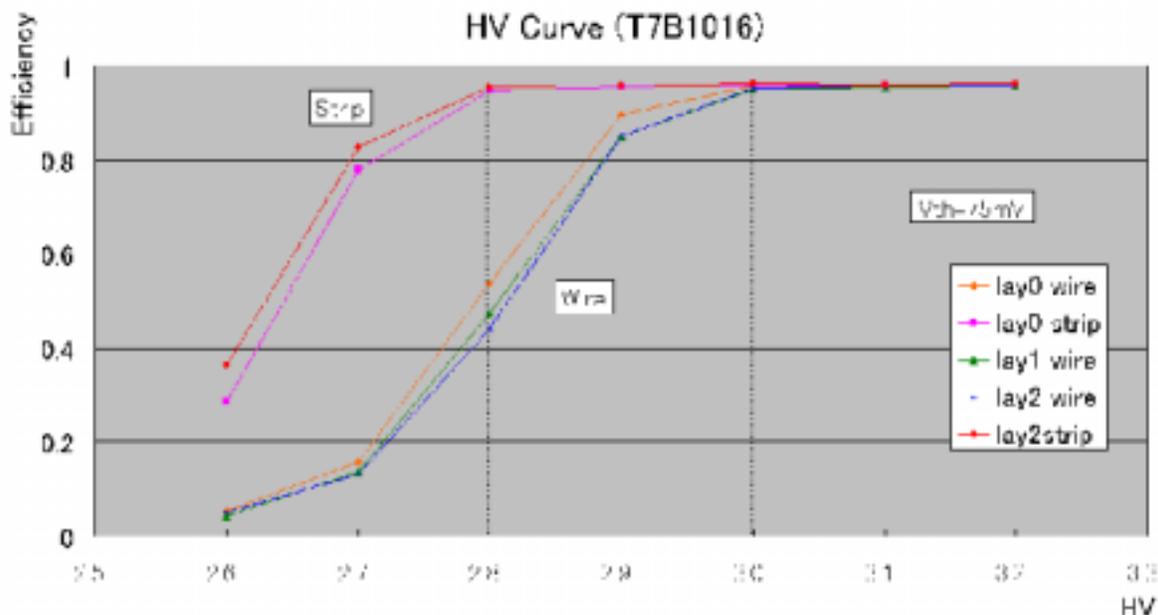


図 6.15: TGC の HV カーブ

Cosmic Ray Test では、TGC 全面の efficiency が不感領域を除いて 99% 以上、全体の平均が 95% 以上という要請が満たされているかを検査するが、efficiency の値の羅列からボタンサポートやワイヤーサポートが判断できるかどうかや、efficiency が落ち込んでいる場所の特定を行うのは難しい。そこで、TGC の efficiency のチェックには efficiency map という TGC 全面の efficiency を視覚的にあらわす絵を用いる。(図 6.17 参照)

これはデータ解析を行った結果得られた efficiency を元に Efficiency Mapper というツールを使って画像として視覚的に表現したものである。TGC の 5mm 四方の単位での efficiency を色で表している。これによってボタンサポートやワイヤーサポートが認識できるか、efficiency が低い部分がある場合はそれがどこなのかといったことが簡単にわかるようになった。図 6.17 と比べると図??のマップに一部分 efficiency の低いところがあることがわかる。

efficiency の低い部分を持つ chamber に関して、製作時の記録と照らし合わせて原因を割り出す作業も行う。図??に関しては、製作の際に efficiency の低くなっているあたりの平面性が悪かったことが原因と思われる。またこのツールには有感領域の efficiency を計算する機能もあり、TGC が要請される efficiency を満たしているかどうかを容易に知ることができる。またこのような efficiency map が得られたことで検査中のガスの安定供給を行えるシステムであることが示せる。

つぎに Time jitter についてみていく。time jitter とは比検出効率が 99% 以上になる最小の時間幅のことである。ここで、比検出効率とは

$$\text{比検出効率} = \frac{\text{timegate へ入った数}}{\text{総エントリー数}} \quad (6.4)$$

のことである。これは LHC の bunch 間隔が 25ns であるからである。エントリー数と時間との関係を図 6.19 に示す。

この図でわかる通り Time Jitter は 25ns 以下に入っていることがわかる。エントリーの時間は

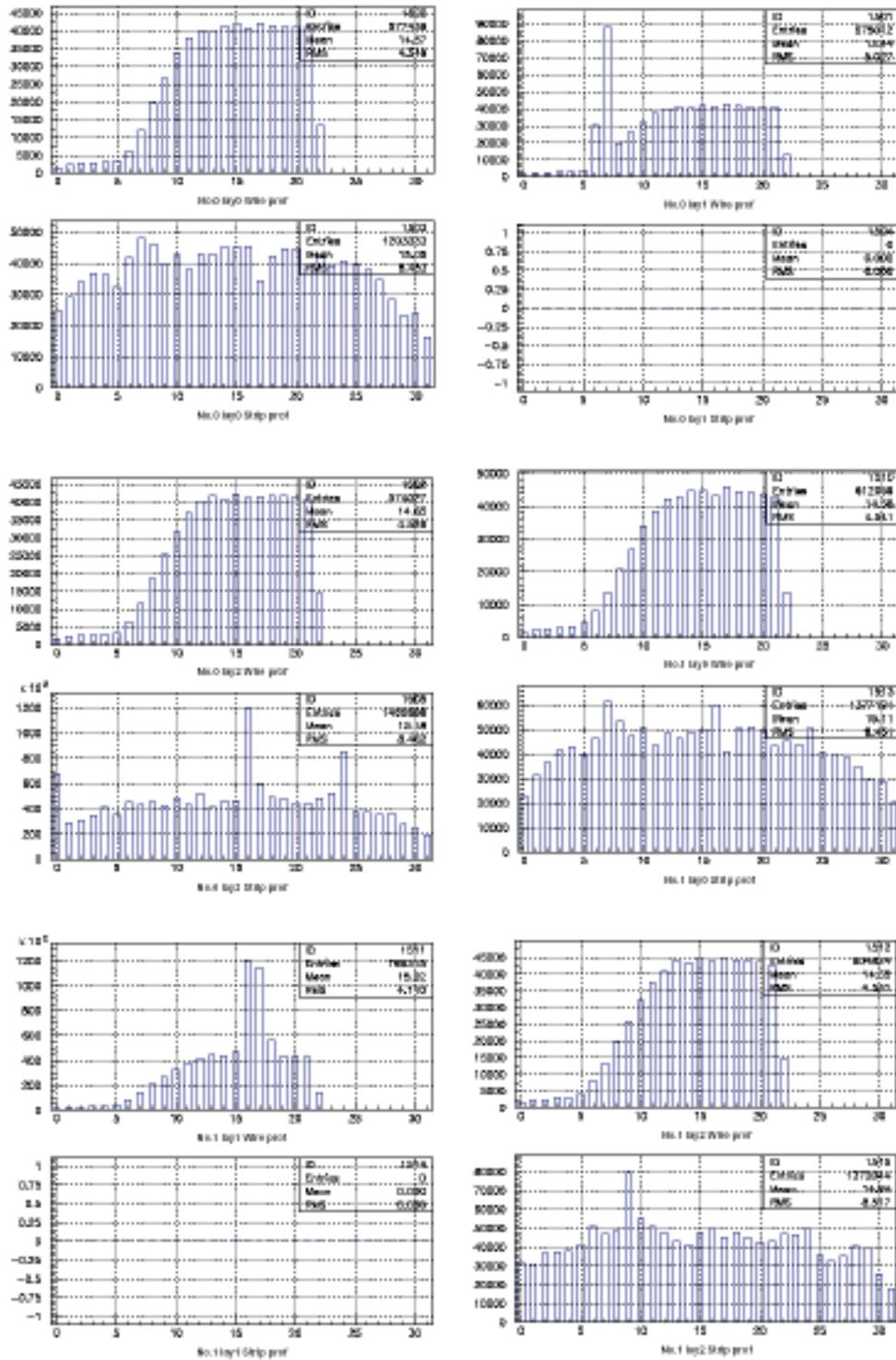
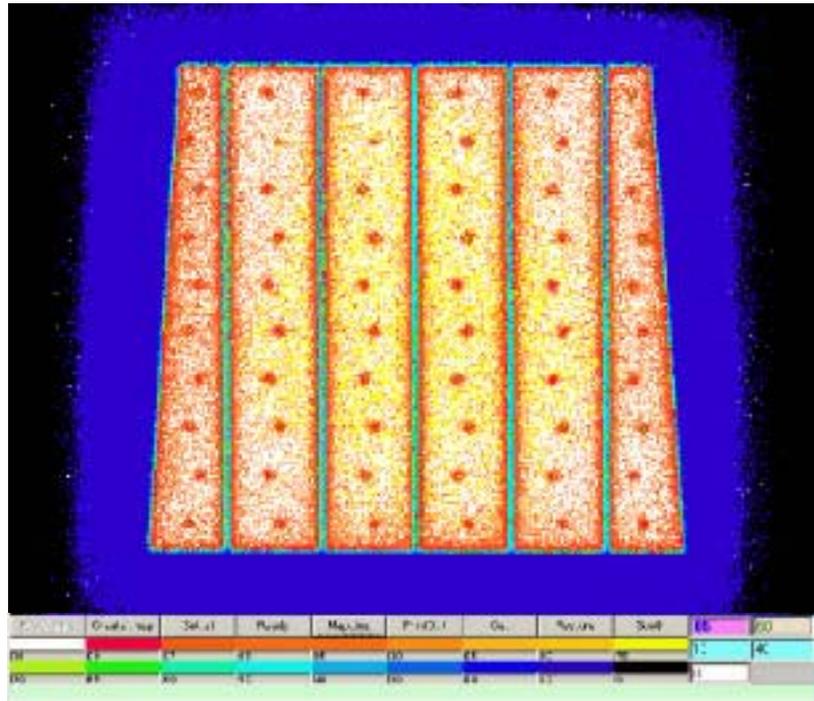
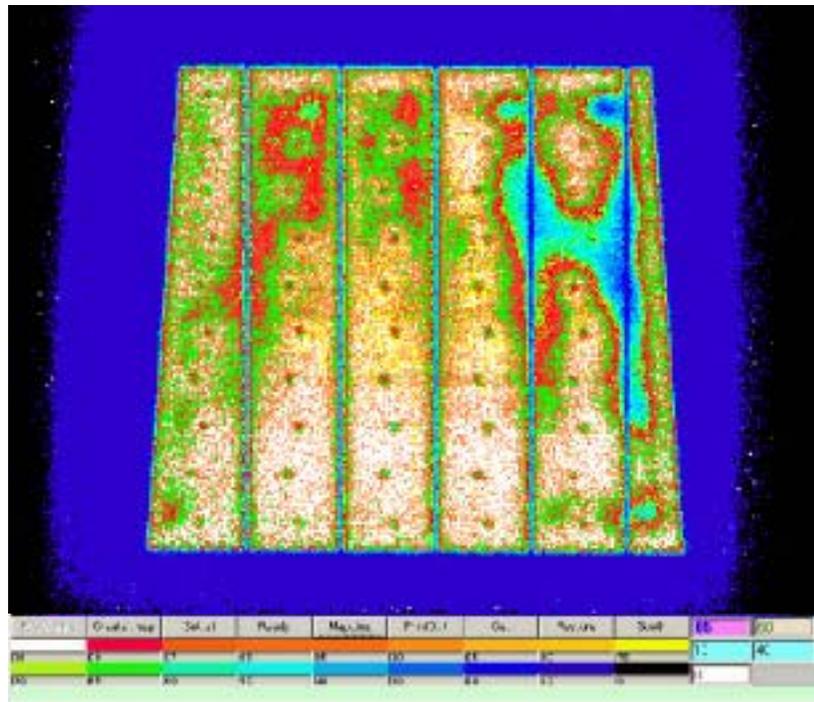


図 6.16: TGC の profile



☒ 6.17: TGC ϕ efficiency map1



☒ 6.18: TGC ϕ efficiency map2

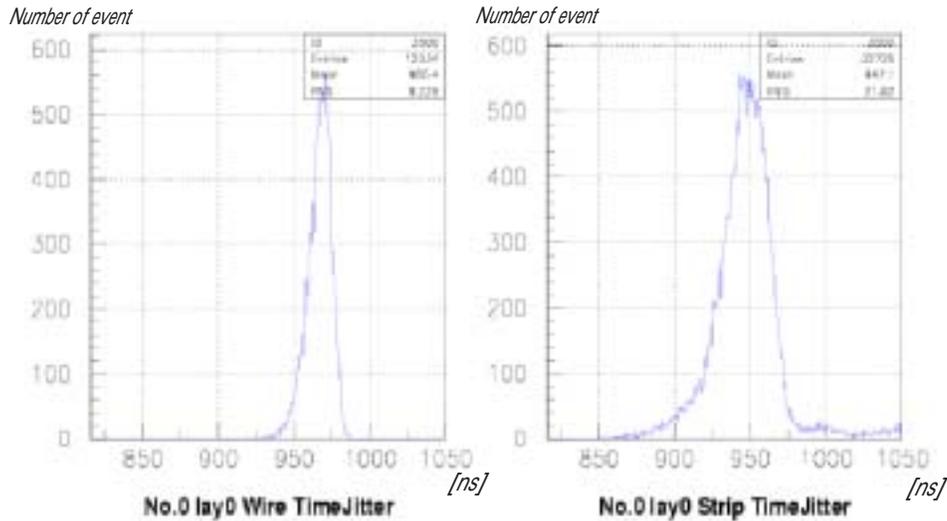


図 6.19: Time jitter

TGC の磁場とガスに依るので Time jitter の要請をみたすことで検出器内のガスの混合比に異常がないことがわかる。

TGC は 1 回に 2 週間の Cosmic Ray Test を行うが、この期間内のガスの状態は安定に保たれている。またこのような検査を 1 年半以上続けているが、ガスシステムの異常は見られない。これらのことから前節で要請された条件を満たす長期間安定に動作するシステムであることが示せた。

6.3 HV テストにおける TGC 用ガスシステムの構成と評価

6.3.1 Cosmic Ray Test における TGC 用ガスシステムの構成

HV テストではその検査手順から、 CO_2 ガスと CO_2+n -Pentane ガスの 2 種類のガスを用いる。 CO_2 から CO_2+n -Pentane へ充填ガスを変える方法は容易であることが望ましい。また、電圧印加は同時に 3units 可能であるので、最低でも 3units へ供給するガス系が必要となる。前章でも述べたように、検査のペースアップを図る必要から、HV テストをしている TGC とは別に、他の TGC へあらかじめガスを充填しておくことにしたため、実際に検査を行う台数以上のガス系が必要である。

また、Cosmic Ray Test のガス系と同様に TGC に対する圧力に気をつける必要がある。HV テストのガス系の配置は壁面や排気口から充分離れているため、液化対策についてはさほど考える必要はない。

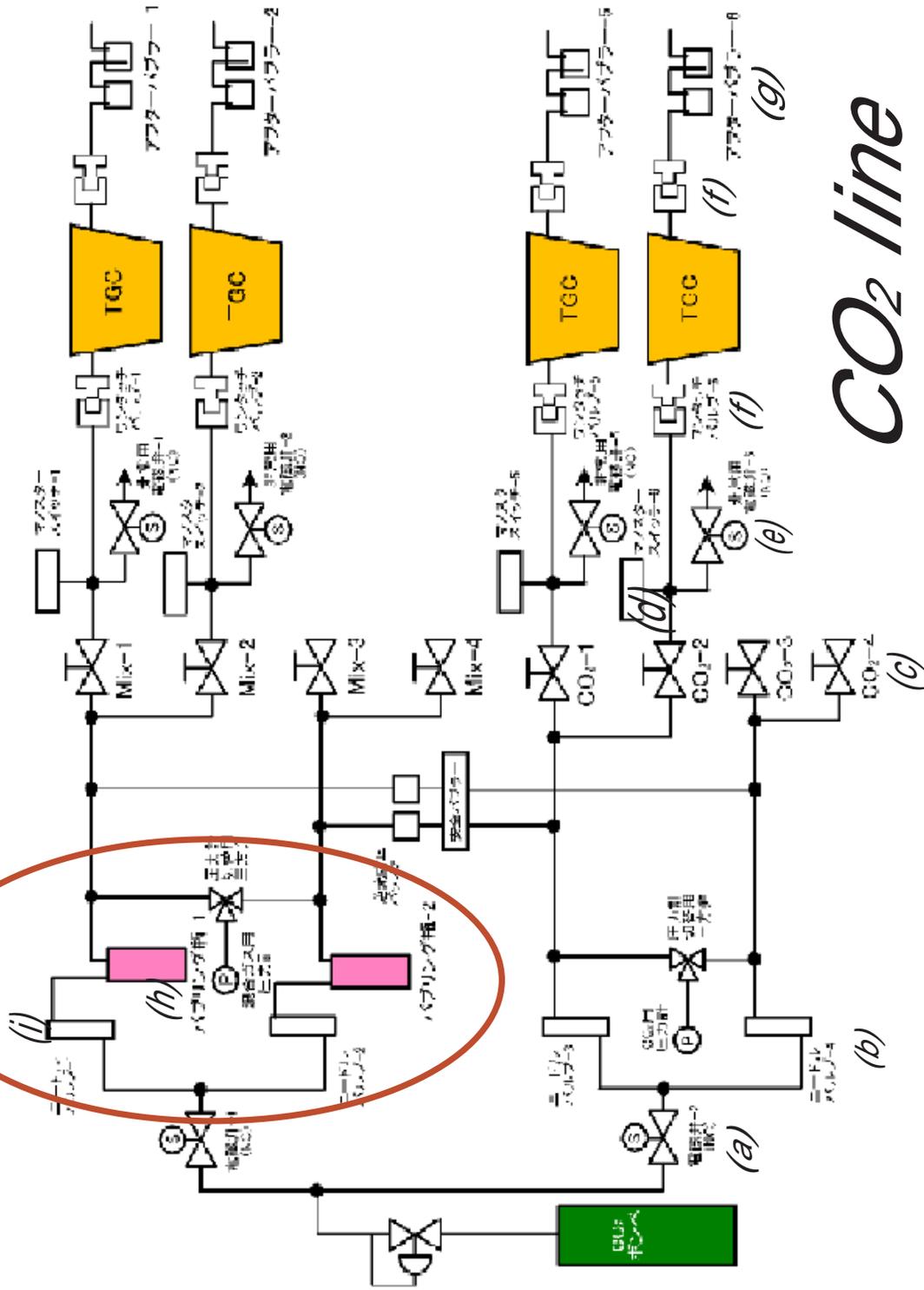
これらのことを考慮してガス系を図 6.20 のように組んだ。

この図を見てわかるように、 CO_2 line と CO_2+n -Pentane line の 2 つの系が存在する。どちらの系とも 4 系統ずつあり、HV テストを行う TGC のほかにもガスを供給することができるようになっている。

まずは、 CO_2 line から説明していく。 CO_2 line を使用する際は、まずシャットバルブ (図 6.20 中 (a)) を開き、使用する系のニードルバルブ (図 6.20 中 (b)) を開ける。このニードルバルブのさきはそれぞれ 2 系統に分岐している。使用する系統数を確認してニードルバルブの流量を決めなく

パクリンガ機

n-Pentane line



*CO*₂ line

図 6.20: HV テストにおける配管図

てはならない。ガスを置換する際には1系統につき $40\text{cc}/\text{min}$ 程度のガスを流す。これは、ガスの置換を早く行うためと、輸送やリークテストを経てTGC内にごみが入っている可能性があるためそれをチェンバーの外に出すためである。4系統になった CO_2 line にはそれぞれにシャットバルブ(図6.20中(c))が設置されており、必要な系統にのみガスを流すことができるようになっている。各系にはCosmic Ray Testのときと同様マノスタースイッチ(図6.20中(d))が設置されており、系の2次圧が 0.3kPa 以上になるとラッチリレーを通して電磁弁(図6.20中(e))に信号が伝わり、電磁弁が開くことにより系が大気開放される。これらのガス系と、TGCをつなぐのにはswadgelokのワンタッチコネクタ(図6.20中(f))を用いた。これによりTGCの充填ガスの交換や、検査の開始、終了時の着脱が簡単に行える。TGCの下流にはバブラー(図6.20中(g))があり、これによってガスの逆流を防ぎ、ガス系の圧を一定に保つことができる。

つぎに、 $\text{CO}_2+\text{n-Pentane}$ line について説明していく。こちらのガス系についても図6.20中の○で囲んだ部分以外は同じシステムを用いている。よってその部分については説明を割愛する。このlineで特筆すべきは、 $\text{CO}_2+\text{n-Pentane}$ の混合の仕方が前節で示したCosmic Ray Testのガス系と違うことである。ここで用いているのはバブリング法と呼ばれる方法である。この方法は、n-Pentaneの蒸気圧が17で 0.05MPa であることを利用したものである。(図6.8参照) n-Pentaneを容器にいれ、容器が充分つかるくらいまで水を入れた水槽の中へつけておく。(図6.20中(h))水槽の水を17に保った状態で CO_2 を流し込み、バブリングさせる。このとき流し込む CO_2 は、ニードルバルブ(図6.20中(i))により流量をコントロールされている。蒸気圧よりバブリングにより混合された $\text{CO}_2+\text{n-Pentane}$ の流量は流し込んだ CO_2 の2倍になる。つまり、ニードルバルブの流量は、流したい流量の $\frac{1}{2}$ にしなくてはならない。この方法によりガス系へ容易に $\text{CO}_2+\text{n-Pentane}$ ガスを生成、供給することができる。

このガス系の配管素材は CO_2 line については、神経質に考える必要はないので、1/4インチのシンフレックスチューブ N_2 を用いている。 $\text{CO}_2+\text{n-Pentane}$ line では、ワンタッチコネクタからTGCまでをPFAチューブで配管している。これは、TGCへ充填するガスが頻繁に変わるためであり、操作性を考えた上で選択した。それ以外の部分についてはSUS配管をおこなった。ガスの流量が多めに流されているので、SUS配管にリークがあった場合でも、ガスの置換が充分行われるため支障はないと思われる。

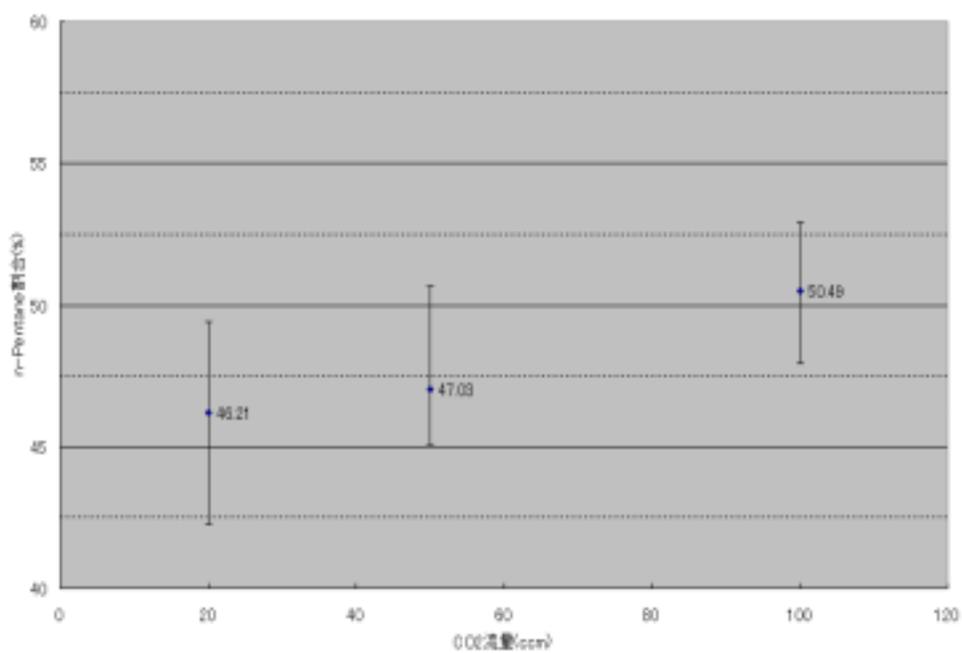
このガス系を用いて動作した結果を次節に示す。

6.3.2 Cosmic Ray TestにおけるTGC用ガスシステムの動作結果

このガス系の動作で重要なのは、系の圧があがった時にちゃんとsafetyが働くかということと、バブリング法で生成された $\text{CO}_2+\text{n-Pentane}$ の混合比が $\text{CO}_2:\text{n-Pentane}=55:45$ になっているかということである。圧があがった時にsafetyがきちんと働くかということに関してはTGCに接続する前にテスト済みである。圧が 0.3kPa をこれるとすぐに、電磁弁が開いた。電磁弁が開くまでのタイムラグはほとんどないといっている。少なくともTGCを破壊する可能性の圧力は 0.6kPa であるので、圧の変化に依るTGCの破壊は防げるといえる。つぎに、 $\text{CO}_2+\text{n-Pentane}$ の混合比について述べていく。ここで、図6.21に CO_2 の流量に対するn-Pentaneの混合比を表したものである。

これを見ると流量によって混合比に若干の変化が見られるものの、 $\text{CO}_2:\text{n-Pentane}=55:45$ 付近になっていることがわかる。混合比の変化は水槽の温度コントロールが難しいことが原因と考えられる。しかし、HVテストでは、電圧を印加することが目的であるので、この程度の混合比の違いはHVテストの結果に影響しないと考えられる。よって、このシステムはHVテストを行うのに十分な性能を持っているといえる。

混合比0cc流量依存性 (電子ノック流量計使用)



第7章 検査結果とまとめ

KEKにおいて量産されたTGCは神戸で検査を行い、合格したものだけがCERNに送られる。その検査設備について、特に、Cosmic Ray Testにおいて用いられるDrift tubeとTGCのガス系について構築を行った。安定に動作するガスシステムの構築により、長期運転が可能となった。2002年4月から現在(2002年12月)までに検査設備で検査されたTGCの台数は、それぞれのテストに関して

- リークテスト:50unit
- HVテスト:43unit
- Cosmic Ray Test:34unit

が完了しており、現在? unitが合格している。2002年4月から2002年12月までの検査ペースについて図7.1に示す。

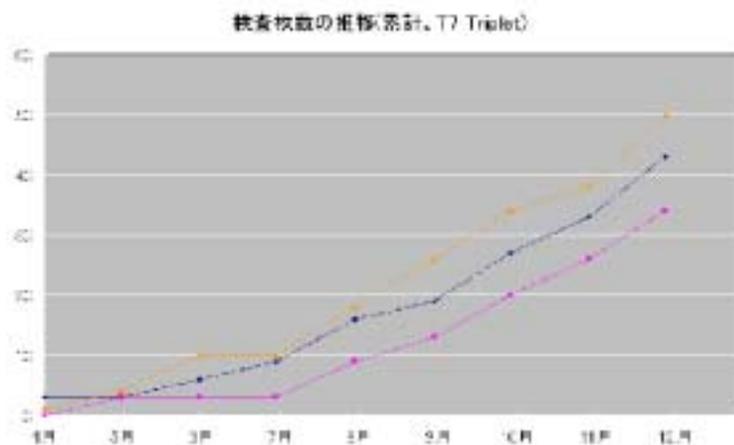


図 7.1: 2002年4月から2002年12月までの検査ペース

これより分かるとおり、検査開始当初は検査手順や、自動化を含めたシステムの構築が充分でなかったため、検査ペースはずいぶん遅かった。しかし検査手順や、検査システムの構築、改良が進みかなりのペースアップをはかれた。また、この検査の期間中、Cosmic Ray Testのガスシステムの性能は変わらず、安定した運転を続けている。

検査ペースとシステムの安定性を考慮すると、検査の最終目的となるTGC全台(残り446unit、内384unitはDoublet)の検査は予定されている2004年4月までに完了すると思われる。またTGC全台を検査する期間異常のない、安定したガスシステムの構築が行われた。

第8章 Appendix

8.1 space charge effect の計算

図3.8のような平行なガスチェンバーについて考えていくとする。検出器の内で $N \text{ ions/cm}^3/\text{sec}$ という一定のレートで電離していると仮定する。電場の影響で電子と陽イオンはそれぞれアノードとカソードへ引き寄せられる。高頻度に電離が行われている場合、検出器内に空間電荷が溜まり、電場を弱める。アノード近傍の電場が0になった場合、検出器は空間電荷の限界 (space charge limited) を迎えたといえる。時間 t で x から d の間にある陽イオンの数は、

$$A \int_x^d p(x', t) dx' \quad (8.1)$$

ここで A は並行電極の面積、 $p(x, t)$ は時間 t 、位置 x の時のイオン密度である。時間 $t + dt$ のときは、

$$A \int_x^d p(x', t + dt) dx' = A \int_x^d p(x', t) dx' + AN(d - x)dt - Ap(x, t)V_p(x, t)dt \quad (8.2)$$

この式の2項目は、電離レート $N \text{ (ions/cm}^3/\text{sec)}$ の時、時間 t での体積 $A(d - x)$ 中にある陽イオンの数である。3項目は位置 x においてこの体積中から電磁場に引かれて出て行ったイオンの数である。以上のことから式を再構成すると、以下ようになる。

$$\int_x^d \frac{\partial p(x', t)}{\partial t} dx' = N(d - x) - p(x, y)V_p(x, y) \quad (8.3)$$

ここで、 $x = d$ のとき $p(d, t) = 0$ が得られるのは、アノードに集まっている陽イオンが常に0であることを表している。次に電子密度 $n(x, y)$ に関して、検出器の範囲が0から x の間の場合について調べる。

時間 t のときの電子の数は

$$A \int_x^d n(x', t) dx' \quad (8.4)$$

時間 $t + dt$ の時は、

$$A \int_x^d n(x', t + dt) dx' = A \int_x^d n(x', t) dx' + ANxdt - An(x, t)V_n(x, t)dt \quad (8.5)$$

これらから再構成した式は、

$$\int_x^d \frac{\partial n(x', t)}{\partial t} dx' = Nx - n(x, t)V_n(x, t) \quad (8.6)$$

となる。

ここで、 $x = 0$ の時、 $n(0, t) = 0$ が得られるのは、電子密度がカソードでは常に 0 であることを示している。

安定状態であれば時間 dt に電離するイオンの電荷はすべてカソードに集められる。よって、電子密度 $n(x)$ 及びイオン密度 $p(x)$ は、時間に寄らず位置 x に依る。よって、

$$p(x) = \frac{N(d-x)}{V_p(x)} \quad (8.7)$$

$$n(x) = \frac{N_x}{V_n(x)} \quad (8.8)$$

と表せる。イオン及び電子の Drift Velocity は電場と、それぞれの持つ移動度に依る。よって、

$$p(x) = \frac{N(d-x)}{\mu_p \left| \frac{d\phi}{dx} \right|} \quad (8.9)$$

$$n(x) = \frac{N_x}{\mu_n \left| \frac{d\phi}{dx} \right|} \quad (8.10)$$

ここで、電場は

$$E(x) = -\frac{d\phi}{dx} \quad (8.11)$$

である。ここで、安定な状態における、位置 x での電荷の合計は

$$\rho(x) = ep(x) - en(x) = \frac{eN}{\left| \frac{d\phi}{dx} \right|} \left(\frac{d-x}{\mu_p} - \frac{x}{\mu_n} \right) \approx$$

と表せる。ここで、電子の移動度はイオンの移動度の 1000 倍以上であるので、電子の移動度を無視した。Laplace equation を解いて、検出器内の電場を位置 x の関数としてあらわすと、

$$\frac{dE(x)}{dx} = 4\pi\rho(x) \approx \frac{4\pi eN(d-x)}{\mu_p \left| \frac{d\phi}{dx} \right|} \quad (8.13)$$

かもしくは、

$$E(x) \frac{dE}{dx} \approx \frac{4\pi eN(d-x)}{\mu_p} \quad (8.14)$$

となる。これを計算して、

$$|E(x)| = \sqrt{\{E(d)\}^2 + \frac{4\pi eN}{\mu} (d-x)^2} \quad (8.15)$$

が得られる。 μ はイオンの移動度のことである。ここで、 $E(d)$ は $E(x) = -\frac{d\phi}{dx}$ と、 $\phi(0) = -V$ 、 $\phi(d) = 0$ を用いて解ける。これらの細かい計算をまとめると、以下の関係式が導かれる。

$$\frac{V}{d} \sqrt{\frac{\mu}{\pi N e}} = \sqrt{1+z^2} + z^2 \ln \left(\frac{1+\sqrt{1+z^2}}{z} \right) = F(z), \text{ with } z = \sqrt{\frac{\mu\{E(d)\}^2}{4\pi eN d^2}} \quad (8.16)$$

上式を解いて、ギャップ間隔と印加電圧の関数として検出器内の電場が得られる。 z の関数である $F(z)$ の振る舞いは図 8.1 で表される。

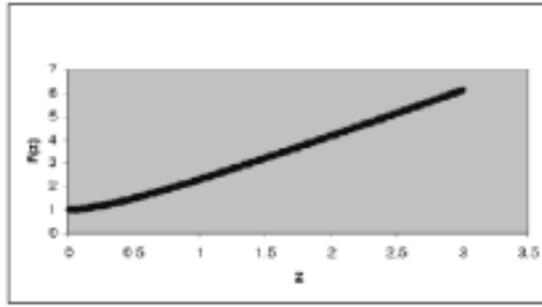


図 8.1: 関数 $F(z)$ の値

この図より、 $z \rightarrow 0$ (電離レートがより高く、アノード近くの電場はより低い) となると $F(z)$ が 1 に近づく。 $E(d)$ を得るには $\frac{V}{d} \sqrt{\frac{\mu}{\pi e N}} \geq 1$ でなくてはならない。この公式から、構造上、動作上の特徴 (印加電圧、ギャップ、充填ガス) から検出器に対する粒子の最大フラックスを調べられる。 $E(d) = 0$ に対する限界値を次に求める。 z の値が小さい場合、 $F(z)$ の表現を拡張して、最初のオーダーのわかる z の項だけを考えると、 $E(d) = V/d$ が得られる。これより電離のレートが低い時、仮定した電荷は検出器内の電場をほとんど変わらない。

$E(x)$ の式より安定した空間電荷の元では電場はアノード近傍 ($x = d$) で最小値となるとわかる。この近くで電場が充分小さくなると、電子の Drift velocity も充分小さくなり、電子の収集も大きく抑制される。ガスチェンバーが正しく動作するためには、以下の状態が保たれていなくてはならない。

$$E(d) \geq 0 \Rightarrow |E(x)| = \frac{d\phi}{dx} \geq (d-x) \sqrt{\frac{4\pi e N}{\mu}} \quad (8.17)$$

これを解くと、

$$\int_0^d d\phi = \phi(d) - \phi(0) = V \geq \sqrt{\frac{4\pi e N}{\mu}} \int_0^d (d-x) dx = d^2 \sqrt{\frac{\pi e N}{\mu}} \quad (8.18)$$

つまり、単位体積あたり一定の電離レート N のもとで、空間電荷の限界のない状態となるためのガスチェンバーに対する動作、構造に対する要請は、最終的に、

$$\frac{V}{d^2} \geq \sqrt{\frac{\pi e N}{\mu}} \quad (8.19)$$

である。もし、ビームのフラックスが J [tracks/cm²/sec] であり、それぞれのトラックに対して h [ions/track/cm] の寄与があるとすれば、 $N = J \cdot h$ であるといえるので、

$$\frac{V}{d^2} \geq \sqrt{\frac{\pi e J h}{\mu}} \quad (8.20)$$

とかける。ちなみに、検出器内のカレントはイオンと電子個々の寄与の和であらわされる。つまり、

$$I = eA(p(x)V_p(x) + n(x)V_n(x)) \Rightarrow I = NdAe = JhAed \quad (8.21)$$

である。

目 次

2.1	Higgs 生成の Feynman Diagram	6
2.2	Higgs 粒子の質量と生成断面積	7
2.3	Higgs 粒子の質量と各崩壊過程への分岐比	8
2.4	ATLAS 測定器における Higgs 粒子発見ポテンシャル	8
2.5	ATLAS 測定器	9
2.6	さまざまな粒子と ATLAS 測定器に設置されている検出器との反応	10
2.7	ミュオントリガー検出器	10
2.8	ミュオントリガーの位置関係 (Longitudinal view)	11
2.9	TGC3 を Z 方向から見た配置図	12
2.10	ATLAS 測定器における TGC の配置図 (R-Z 平面図)	12
2.11	ATLAS 実験ホール内の中性子、 γ 線それぞれに対するフルエンス率 (kHz/cm^2)	13
3.1	ガスの種類と α の値	16
3.2	印加電圧に対する動作領域の変化	17
3.3	さまざまな気体の mobility	19
3.4	Argon の cross-section	20
3.5	Ar の電場と Drift velocity の関係	21
3.6	さまざまな気体の drift velocity	21
3.7	他原子分子の紫外線吸収断面積	23
3.8	parallel ionization chamber 概略図	24
4.1	TGC の構造 (断面図)	25
4.2	MWPC の一般的な構造 (断面図)	26
4.3	TGC の電場の様子 (断面図)	27
4.4	ワイヤー・カソード間隔を変化させたときの Pulse Height の変化	28
4.5	TGC(T7) の構造 (平面図)	29
4.6	TGC の構造 (断面図)	30
4.7	TGC のワイヤー方向の読み出し	30
4.8	CO_2 チャンネルの概念図	31
5.1	日本で量産される TGC のタイプと台数	33
5.2	リークテストのガスシステム	34
5.3	リークテストのガスシステム (写真)	35
5.4	リークチェックの方法	36
5.5	HV モニターの PC 上の画像	37
5.6	HV モニターの様子	38
5.7	宇宙線テストの概念図	39
5.8	宇宙線テストの検査設備の写真	40

5.9	Drift Tube の read out	41
5.10	Drift tube の構造	41
5.11	Drift velocity	42
5.12	検査設備の架台部分。TGC はパレット上に置かれる。	43
6.1	Drift Tube のガス置換量の違いによる efficiency の差 (印加電圧 $3.5kV$)	45
6.2	Drift Tube の配管図	46
6.3	Drift Tube の HV dependance	47
6.4	Drift Tube の profile	49
6.5	Drift Tube のヒットパターンと tracking	50
6.6	x-t relation で求めた d と t_1 の関係	50
6.7	Drift Tube の空間分解能	51
6.8	ペンタンの蒸気圧	52
6.9	Cosmic Ray Test における TGC ガス配管	54
6.10	Mixer 付近のガス配管	55
6.11	コントロールパネルの様子	56
6.12	圧力 safety の概念図	57
6.13	TGC の流量モニターの様子	58
6.14	差込口の様子	58
6.15	TGC の HV カーブ	60
6.16	TGC の profile	61
6.17	TGC の efficiency map1	62
6.18	TGC の efficiency map2	62
6.19	Time jitter	63
6.20	HV テストにおける配管図	64
6.21	バブリング法による $CO_2 + n - Pentane$ ガスの混合比	66
7.1	2002 年 4 月から 2002 年 12 月までの検査ペース	67
8.1	関数 $F(z)$ の値	70

表 目 次

2.1	LHC 加速器の主要パラメータ	5
2.2	エンドキャップ部におけるバックグラウンドレート	13
3.1	ガスの種類とイオン化エネルギー及び電子対を作る平均エネルギー	22
3.2	ガスの種類と電子捕獲率	22
4.1	TGC のパラメータ	26
5.1	日本で製作される TGC のタイプと台数	32

参考文献

- [1] 尼子勝哉、「大型陽子・陽子衝突型加速器 (LHC) 計画とその物理」: 日本物理学会誌 Vol.52、No.7 (1997) 508-516
- [2] William R. Leo 「Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach 」
- [3] Glen F. Knoll 著、井村逸郎、坂井英次訳「放射線計測ハンドブック」
- [4] 三浦功、菅浩一、俣野恒夫共著「放射線計測学」
- [5] 本田侃士著「気体放電現象」
- [6] Claus Grupen 「Particle Detectors 」
- [7] Helmuth Spieler 「Introduction to Radiation Detectors and Electronics 」: Lecture Note
- [8] G.Auday, Ph. Guillot, J.Gely, and H.Brunet 「Experimental study of effective secondary emission coefficient for rare gasses and copper electrodes 」
- [9] 「ATLAS Technical Design Report 」
- [10] ATLAS Seneral site
- [11] 浅井祥仁「ATLAS 実験での物理/総論」: ホームページ
- [12] 田中秀治「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」
- [13] 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」
- [14] 神戸大学 塚原知宏、修士学位論文「ATLAS ミューオントリガー用大型 TGC 検査ステーションの構築と性能評価」
- [15] 東京大学 長島壮洋、修士学位論文「ATLAS 実験ミューオントリガー用 Thin Gap Chamber の量産と動作検証」

謝辞

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

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

最後に、共に研究活動を進めて行きながら、惜しみない助力と助言を与えてくれ、励ましてくれました信州大学の宮崎由之氏、大下英敏氏、中川義徳氏、東京大学の南条創氏、坂東隆哲氏、神戸大学の一宮亮氏、杉本拓也氏、美馬孝行氏、荒滝陽二氏、神谷氏竜一氏、鈴木氏良太氏には、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。