

# 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

神戸大学自然科学研究科物理学専攻

989S114N

塚原 知宏

### 概要

現在、標準模型で予言されている粒子の中で唯一発見されていない粒子が Higgs 粒子である。Higgs 粒子は標準模型において自発的対称性の破れを説明するために必要な粒子である。現在までに LEP-2 において約 100GeV まで Higgs 粒子の探索が進められたが発見されなかった。そこで 100GeV 以上の領域においても Higgs 粒子を探索する必要がある。

欧州原子核研究機構 (CERN) において、世界最大の重心系衝突エネルギー (14TeV) を持つ大型陽子陽子衝突型加速器 LHC が建設されている。LHC の測定器の一つに ATLAS 測定器がある。ATLAS は汎用の測定器であるが、なかでもミューオンの検出に使用されるミューオンスペクトロメータはミューオンがほとんどの重要な物理に関わっていること、及び、バックグラウンドの少ないきれいなイベントがとりだすことができるため、Higgs 発見の大きな手がかりとなる。ミューオンスペクトロメータの一つに神戸大学、東京大学、信州大学、高エネルギー加速器研究機構、ワイツマン研究所 (イスラエル) と共同で研究開発を進めてきた Thin Gap Chamber (TGC) がある。LHC 実験では高頻度のバックグラウンドが予想されているが TGC にはそのような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。

2000 年から TGC の量産が高エネルギー加速器研究機構において始まるが、LHC 実験において TGC の動作・性能を保証するために検査は不可欠なものである。また、約  $2m^2$  の TGC500 台を 2 年間にわたって検査するため、大規模な設備、システムが必要である。特に宇宙線を用いた TGC の検出効率の一様性の測定においては、宇宙線が TGC のどの部分を通じたかを測定することは絶対不可欠である。検査システムの構築、及び、検出効率の一様性を検査するための飛跡検出システムの性能の評価を行い、その結果、必要とされる性能を満たしていることと、現在予定されている検査期間で十分な TGC の検査が行えることがわかった。

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>4</b>
1.1	LHC 計画	4
1.2	LHC の物理	4
1.2.1	Higgs の探索	4
1.3	ATLAS 測定器	6
1.4	ATLAS 測定器におけるミュー粒子と TGC	6
1.5	量産計画	8
1.6	TGC の検査	9
1.7	本論文の構成	9
<b>2</b>	<b>Wire chamber</b>	<b>13</b>
2.1	Wire chamber の動作原理	13
2.2	Drift tube chamber	14
2.2.1	充填ガス	14
2.3	TGC	16
2.3.1	構造と特徴	16
2.4	ASD(Amplifier Shaper Discriminator)	20
<b>3</b>	<b>検査システム</b>	<b>22</b>
3.1	ガスリーク test	22
3.2	$CO_2$ test	22
3.3	n-pentane test	22
3.4	Cosmic ray test	23
3.5	検査システム	24
3.5.1	部屋、スケジュール	24
3.5.2	パレット	25
3.5.3	セットアップ	25
	ガスリーク test	25
	$CO_2$ test	26
	n-pentane test	27
	Cosmic ray test	27
<b>4</b>	<b>宇宙線ミューオンの飛跡の再構成と、飛跡検出システムの性能評価</b>	<b>35</b>
4.1	Efficiency の HV dependence	35
4.2	x-t relation	38
4.3	空間分解能	41
4.4	宇宙線の飛跡の再構成の確率	43

4.5	TGCを使った飛跡検出システムの性能評価 . . . . .	49
4.6	Efficiency の position dependence . . . . .	52
<b>5</b>	<b>結論と今後の予定</b>	<b>56</b>
5.1	結果 . . . . .	56
5.2	今後の予定 . . . . .	56

# 1 序論

## 1.1 LHC 計画

スイスにある欧州原子核研究機構 (CERN) では、2005 年の完成を目指して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 加速器の重心系のエネルギーは 14 TeV であり、TeV エネルギー領域の素粒子物理学の研究が可能となる。LHC 加速器の主要なパラメータを表 1 に示す。[1, 5]

主リング周長	26,658.87m
陽子ビームエネルギー	7.0TeV
ルミノシティ	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
入射エネルギー	450GeV
バンチ間隔	25ns
バンチ当たりの陽子数	$10^{11}$
バンチの長さ	75mm
衝突点でのビーム半径	16mm
ビーム衝突角度	200mrad

表 1: LHC 加速器の主要パラメーター

LHC のような陽子・陽子衝突型加速器では、陽子の質量が電子の質量に比べて非常に大きいのでシンクロトロン放射によるエネルギー損失が少なく電子・電子衝突型加速器に比べエネルギー増強が容易であり未発見粒子の探索に適している。しかし、陽子は内部構造を持つためバックグラウンドが大きく、粒子の質量などの精密測定には適していない。

## 1.2 LHC の物理

LHC 計画の目指す物理には、標準模型 Higgs 粒子 (以下”Higgs” と書く。) の探索、t クォークの物理、超対称性粒子 (SUSY) の探索等があるが、ここではその中で最も重要な Higgs の探索について述べる。[1, 2, 5, 6]

### 1.2.1 Higgs の探索

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ものと強く相互作用するので、主な Higgs 粒子生成の Feynman Diagram は図 1 のようなものである。図 2 は Higgs の生成断面積である。  $m_{Higgs} = 200 \text{GeV}$  としたとき LHC のルミノシティ ( $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) で一年間運転すると生成される Higgs は約 20 万イベントである。Higgs の探索では S/N 比の良いモードを使うことが鍵となる。Higgs の質量によって生成断面積が変わるだけでなく図 4 のように崩壊過程、崩壊

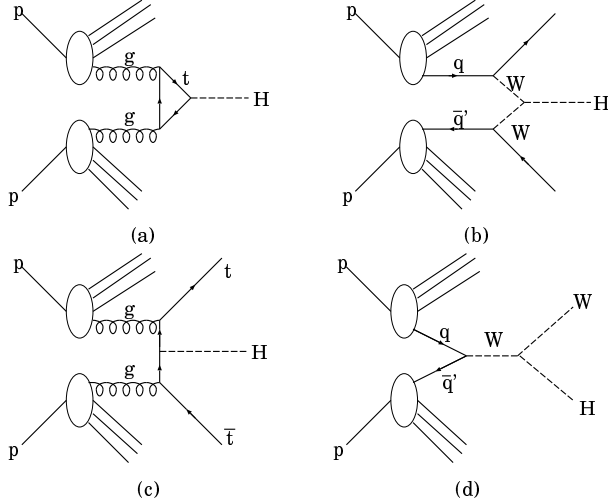


図 1: Higgs 生成の Feynman Diagram (a) グルーオン-グルーオン融合 (b) W-W 融合 (c)  $t\bar{t}$  クォーク随伴生成 (d) W 粒子随伴生成

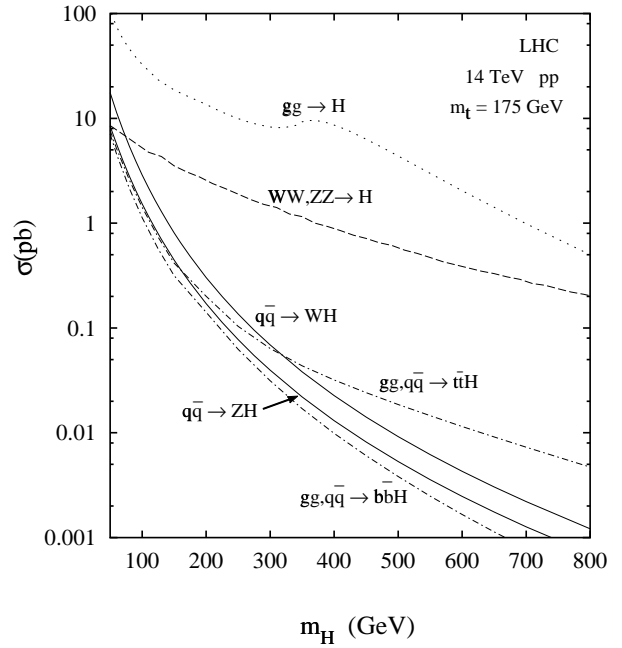


図 2: Higgs の質量と生成断面積

幅が違ってくるので、探索する崩壊モードも異なってくる。

- $2m_Z < m_{Higgs}$

この質量領域では  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l^\pm$  の崩壊モードが最も有効である。それぞれのレプトン対に不変質量が  $m_Z$  に一致することを要求することで Higgs は明確な不変質量ピークを示す。しかし 500 GeV 以上になると  $4l$  の崩壊モードだけではイベント数が少ないので  $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-\nu\bar{\nu}$  も必要になってくる。

- $120\text{GeV} < m_{Higgs} < 2m_Z$

この質量領域になると  $WW^*, ZZ^*$  への崩壊がはじまる。  $WW^*$  への崩壊は  $tt \rightarrow WWbb$  がバックグラウンドになるため測定は難しいので、  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$  を調べるのが重要になる。この過程にもバックグラウンドとして  $q\bar{q} \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^* \rightarrow 4l^\pm$  があるがそれほど多くはない。

- $80\text{GeV} < m_{Higgs} < 120\text{GeV}$

この質量領域では Higgs の主な崩壊過程は、  $b\bar{b}$  である。しかし、これらは陽子陽子素過程でも生成され、Higgs 探索の深刻なバックグラウンドになる。Higgs の質量が 100 GeV のとき  $\gamma\gamma$  への Branching ratio は  $10^{-3}$  程度であるが、Higgs の生成断面積が比較的大きく、バックグラウンドが少ないため、  $\gamma\gamma$  への崩壊を調べる事が重要になる。図 3 は、Higgs の mass に対する Higgs の発見しやすさを示したものである。縦軸は Higgs の発見ポテンシャルと呼ばれ予想される Higgs のイベントの数 (S) をバックグラウンドのイベントの数 (B) の平方根で割ったものである。縦軸の値が高い程、Higgs の信号は明確にバックグラウンドと区別できる。

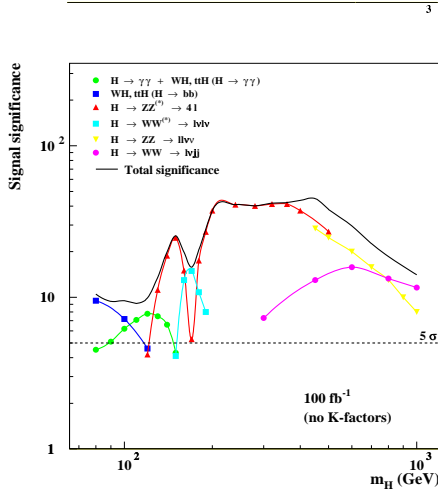


図 3: ATLAS 測定器を低ルミノシティで1年、高ルミノシティで3年運転したときの Higgs<sup>0</sup>発見ポテンシャル [3]

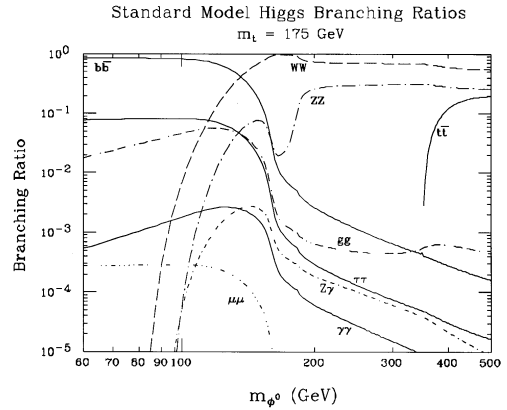


図 4: Higgs の Branching ratio と Higgs の質量

a  
t  
h  
u  
c  
d

### 1.3 ATLAS 測定器

LHCに設置される ATLAS 測定器 (図 5、6) は LHC の  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  というルミノシティにおいても、 $e, \gamma, \mu, \text{jet}, \text{missing } E_T, \text{b-tagging}$  などできるだけ多くのシグナルをバランス良くとりだし精度の良い測定を行うことを目的とした汎用の測定器である。測定器の基本構成は大きく分けて荷電粒子の運動量測定のための内部飛跡検出器、そして  $e, \gamma, \text{hadron}, \text{jet}$  の測定のためのカロリメータ、ミューオンの検出器およびその運動量測定のスペクトロメータの3つの部分からなる。[1]

ATLAS 測定器の大きな特徴の一つとして

- 単体でも高精度でミューオンの運動量測定をおこなえるミューオンスペクトロメータ

があることである。(図 7)

陽子陽子衝突という厳しい実験環境下でもミューオンはきれいな信号が取り出せるため、Higgs 発見のための最も有力なシグナルある。これを精度良く測定するために内部飛跡検出器とは独立にミューオンの検出およびその運動量測定をおこなう。運動量の精密測定をおこなう検出器は MDT(Monitored Drift Tube chamber) と CSC(Cathode Strip Chamber) と、トリガー専用のミューオン検出器からなる。ミューオントリガーに対してはバレル部 ( $|\eta| < 1.05$ ) には RPC(Resistive Plate Chamber)、放射線量の高いエンドギャップ部 ( $1.05 < |\eta| < 2.4$ ) では TGC(Thin Gap Chamber) が置かれる。

### 1.4 ATLAS 測定器におけるミュー粒子と TGC

LHC 実験においてミューオンの果たす役割は大きい。目的とする物理的事象の崩壊モードの多くが荷電レプトンを含んでいる。その中でもミューオンは測定器のなかで止まることなく外まで突き抜ける。したがって、ミューオン検出器は最外部に設置されており、ミューオンを高い S/N

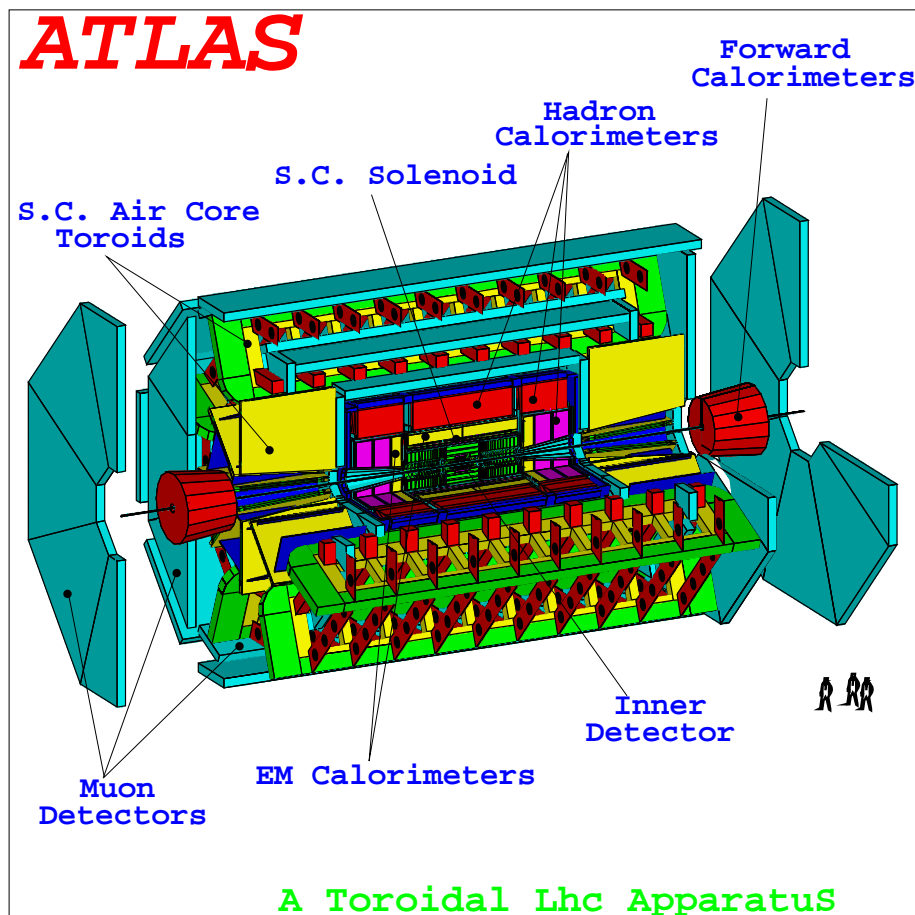


図 5: ATLAS 測定器 [4]

比で検出することができる。しかし、依然としてかなりの高い頻度でバックグラウンドが存在するため、多くの事象の中から物理的に重要な事象だけを選び出すことが必要である。ミュオントリガーチェンバーは、通過するミュオンの横向き運動量  $p_t$  を調べ、事象の取捨選択を行うものである。TGCのおかれるエンドギャップ部分には、陽子陽子衝突による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オン検出器のエンドキャップ部分におけるバックグラウンドレートを表 2 に示す。

以上のことなどにより、エンドキャップミュオントリガーチェンバーには Thin Gap Chamber を使用することが決定された。

Thin Gap Chamber に対して以下のような要請がある。

1. 99%以上の高い検出効率
2. 陽子陽子衝突の時間間隔 25ns より短い信号到達時間分布
3.  $1\text{kHz}/\text{cm}^2$  の高頻度入射粒子に対して性能が劣化しない

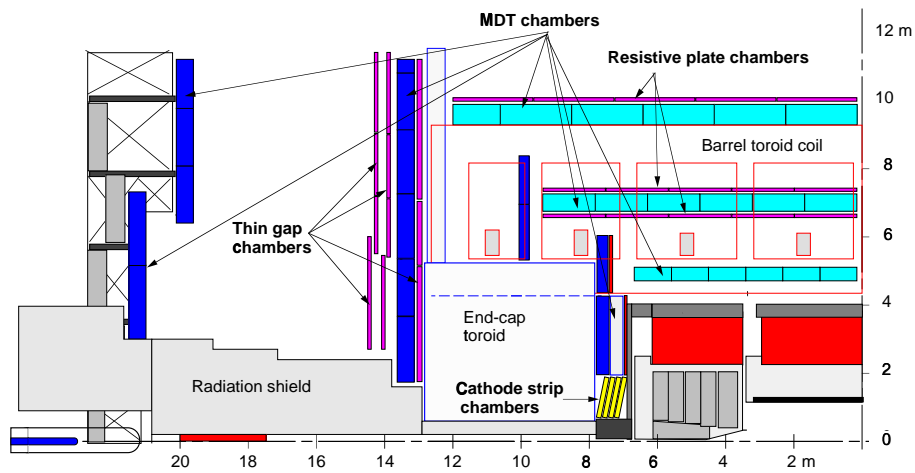


図 6: ATLAS 測定器の r-z 断面図。[4]

	n	$\gamma$	$\mu$	$hadrons^\pm$	$e^\pm$
rate(kHz/cm <sup>2</sup> ±%)	4.1±3	2.7±3	$2.1 \times 10^{-3} \pm 9$	$2.8 \times 10^{-3} \pm 7$	$1.2 \times 10^{-2} \pm 7$

表 2: ミューオン検出器に対するバックグラウンドレート ( $1.44 < |\eta| < 2.3$ )

4. ATLAS 実験の稼働期間 10 年以上かつ  $1\text{kHz}/\text{cm}^2$  の高放射能レベル環境下での安定した動作
5. 第 2 座標読み出しの位置精度 1cm 程度

### 1.5 量産計画

TGC の量産は 2000 年からはじまり 2003 年までに高エネルギー加速器研究機構にて 1056 Chambers がつくられる。1 日あたり 1 doublet が製作される予定であり 4 週間毎に 20 doublets ほど神戸に運ばれ検査される。検査に合格したものは CERN へ輸送される。日本で量産されるタイプと数は以下の通りである。配置は図 8、形状は図 9 に示している。

	T4	T5	T7
Doublet units	96	96	192
Triplet units	0	0	96
units	96	96	288
Chambers	192	192	672



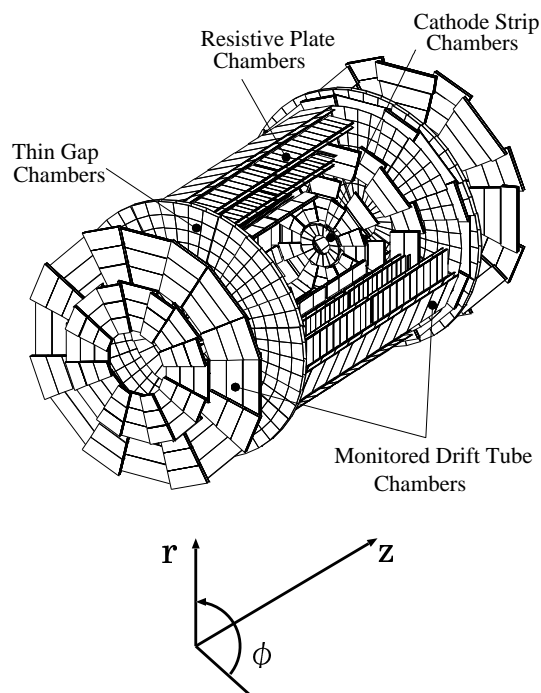


図 7: ミューオンスペクトロメータ

## 1.6 TGC の検査

高エネルギー加速器研究機構において製作された TGC は CERN に送られる前に動作確認を行い異常のあるものを除外する必要がある。そのため製作された TGC は神戸大学へ運ばれ検査を行う。検査項目はガスリーク test、 $CO_2$  test、n-pentane test、cosmic ray test である。 $CO_2$  test、n-pentane test においては高電圧に対する安定性を、ガスリーク test においてはガスリークを、cosmic ray test においては検出効率と那一様性、動作の安定性をそれぞれテストする。

3年にわたって約  $2m^2$  の大きさの TGC を 480modules も検査するため、大規模な設備やシステムが必要となる。

特に宇宙線テストにおいては検出効率、一様性をテストするため Drift tube chamber を使用した宇宙線の飛跡測定技術が鍵となる。

本研究は検査ステーションの設備、システムの構築と、宇宙線テストにおける宇宙線の飛跡測定技術の確立し、その性能評価を行った。

## 1.7 本論文の構成

1章では LHC、ATLAS 及び量産計画について述べた。

2章では一般的な Wire chamber の動作原理について説明するとともに、本研究で用いる Drift

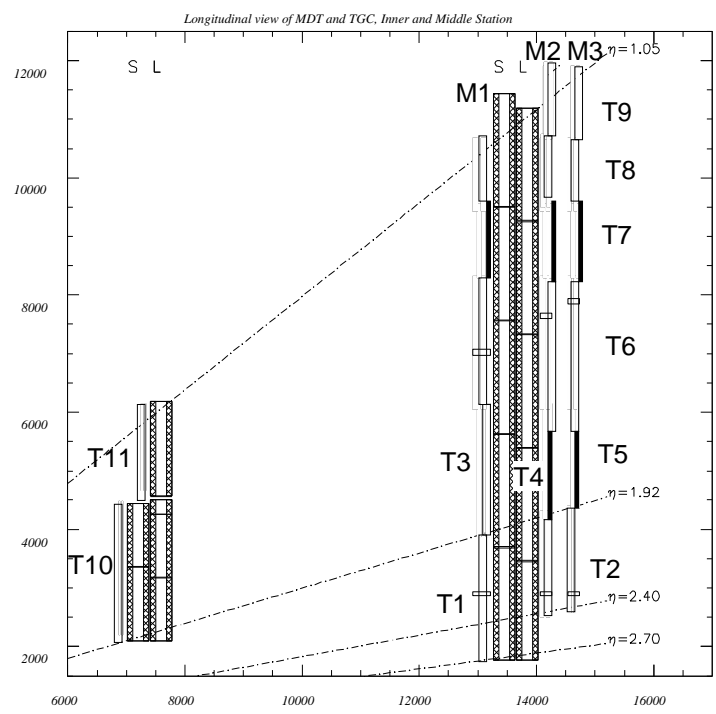


図 8: ATLAS 測定器 1/4 断面図。日本が担当する TGC は黒色の T4,T5,T7。

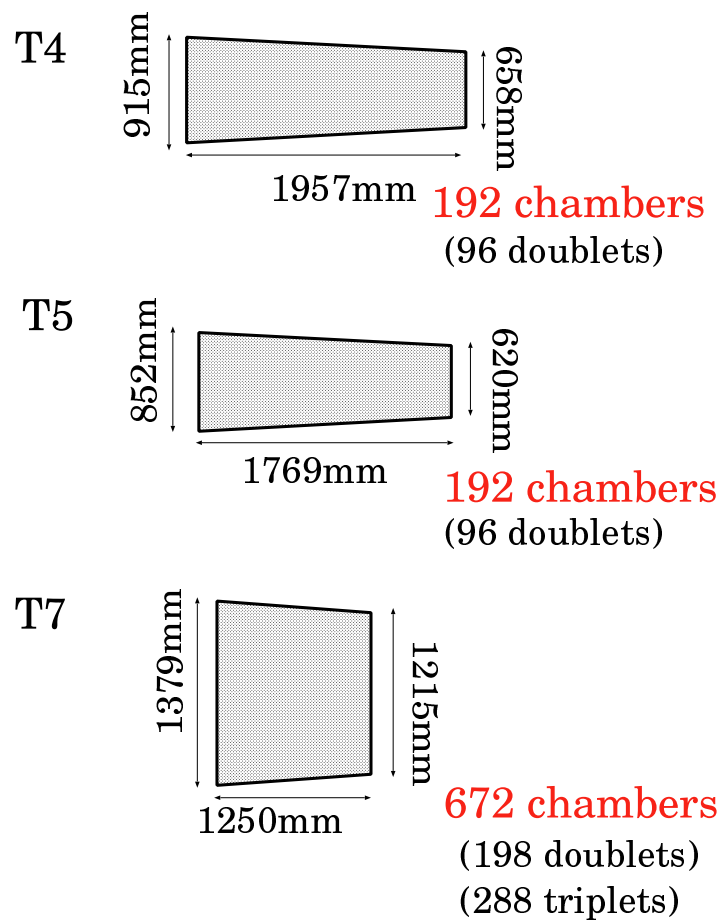


図 9: 日本で量産される TGC の型と数

tube chamber 及び TGC についてその構造を動作を述べる。

3 章では神戸大学で行われる TGC の検査について、その内容と工程について述べる。

4 章では本論文の中心である TGC の検出効率の検査において必要不可欠な Drift tube chamber による宇宙線の飛跡の再構成と、検査のために必要とされる Drift tube chamber を使った、宇宙線飛跡検出システムの性能について調べた。

## 2 Wire chamber

Wire chamber とは、ある密閉された空間の中にいくつかのワイヤーを張り、その空間をガスで充満させ、高電圧を印加したものであり、荷電粒子の検出に使用される。

### 2.1 Wire chamber の動作原理

Wire chamber 内を荷電粒子が通過すると充填されたガスとの相互作用によって電子をガス分子から電離させる。このとき電離された電子を 1 次電子という。1 次電子は電場に沿って移動していき次第に加速され電子のエネルギーが増加していく。そして、移動するときガス分子との衝突がおこり、そのとき 1 次電子のエネルギーがガス分子のイオン化エネルギーに達していれば、ある確率で次の電子を電離する。このように電子は加速されつづけるのではなく、ガス分子との衝突により一定の速度で電子が移動（ドリフト）する。これを Drift velocity と呼び、この速度は、電場の大きさ、ガスの種類、ガスの圧力の関数となる。この過程を繰り返すことで電子の数が増えていく。特にアノードワイヤー近傍では電場が強くなっており電子の数が急増する。一方、電離によって発生した陽イオンは、電子に比べて非常に重いため、電子がアノードワイヤーに到達するまでの時間では、ほとんど動かない。

この残された陽イオンによる影響がほとんどない場合、増幅された電子の数は一次電子の数に比例している。この領域を比例領域という。

さらに電場が強くなった時には陽イオンの濃度が十分高くなり、電場が遮蔽される。その結果、電子のエネルギーが増加しにくくなり、増幅された電子の数は 1 次電子に比例しなくなる。この領域を制限比例領域という。

これよりさらにワイヤー近傍の電場が強くなると、陽イオンによる電場の遮蔽のため電子のエネルギーがほとんど増加しなくなり、増幅された電子の数は 1 次電子の数に無関係になる。この領域をガイガーミュラー領域という。図 10 に Chamber の印加電圧に対する動作領域を示す。

充填ガスとして使用されるものは、効率的に電子を電離させるために希ガス等の構造の単純なガスを使用する。また、大きな電子付着係数を示さない種類のガスであることも重要である。そして、時間分解能が必要な場合は電子の Drift velocity の高いガスを選ぶ必要があり、空間分解能が必要な場合には電子の Drift velocity が飽和していて、かつ、小さいものを選ぶ必要がある。

粒子の通過により電子の電離だけではなく、分子を励起させ紫外線を放出する過程も存在する。この紫外線は他のガス分子をイオン化したり、検出器の壁と相互作用して電子をつくるため、新たな電子雪崩を形成することもある。それが連続的に起こり始めると放電に至ってしまう。そこで、そのような過程を防ぐため充填ガスにはクエンチガスと呼ばれる紫外線吸収断面積の大きいガスが混合されたものが使われる。図 11 にクエンチガスによく使われる多原子分子の紫外線吸収断面積を示す。高分子のガスは紫外線を吸収して基底状態に戻るとき、自身の振動及び回転の励起を起こしてその内部エネルギーを高めることによってイオン化を伴わない非弾性衝突を起こすことが可能である。

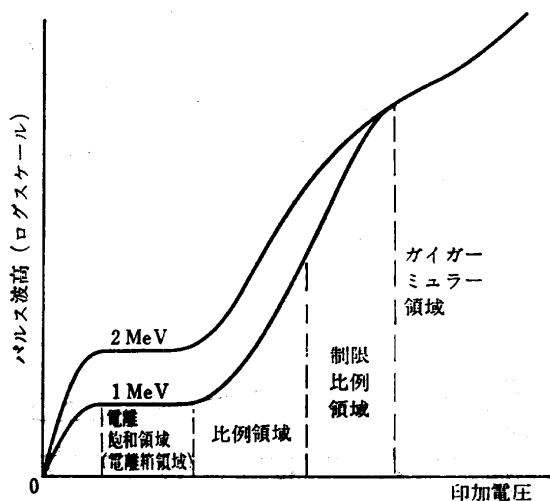


図 10: Chamber の動作領域。ガス中に 2 種のエネルギー量を与えた事象に対するパルス波高の観測値を図示した。[7]

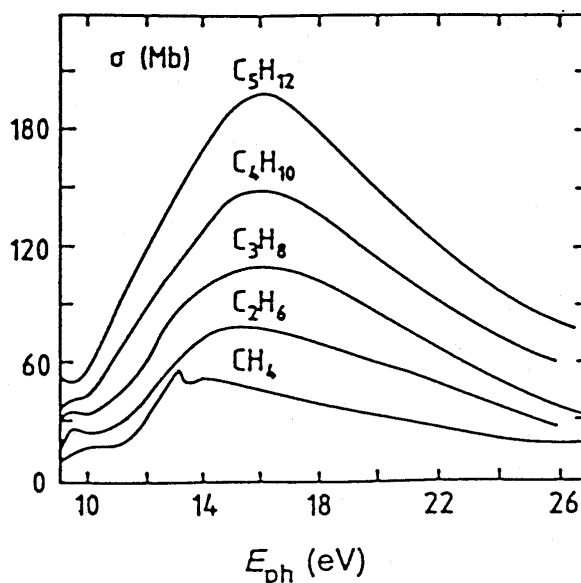


図 11: 紫外線吸収断面積 [10]

## 2.2 Drift tube chamber

ある電場内での電子の移動時間の測定により荷電粒子の通過位置を決定する方法を Drift chamber 方式という。そして形状が tube 型であるものを、Drift tube chamber という。検査ステーションでは宇宙線の飛跡を再構成するために、この Drift tube chamber を用いる。Drift tube chamber は円筒型のアルミで作られており、直径 50mm、アルミの厚さ 2mm、そして両端はエンドキャップで閉ざされている。中心には直径 50 $\mu$ m の金メッキタングステンワイヤーを張っており、これがアノードとなり、アルミのパイプがカソード (ground) となる。内部には Ar+ethane(50:50) のガスを流しておく。アノード・カソード間に高電圧を印加することによって、先に説明した増幅過程を起こし、その信号の到達時間より粒子の通過位置を測定する。図 12 は Drift tube のエンドキャップ部分の構造である。検査ステーションにおいて Drift tube chamber は制限比例領域で動作させる。図 13 はそれぞれ 3.2kV(比例領域) と 3.65kV(制限比例領域) のときの出力波形である。

### 2.2.1 充填ガス

Drift tube chamber は制限比例領域で動作させており、この高い増幅率においては紫外線によるイオン化が無視できない領域となるため 2 次電子の放出を抑えなければならない。そのため、アルゴンとエタンを混合したガスを使用する。

図 14 は充填ガスが Ar+ethane の場合の電場と Drift velocity の関係である。Ar+ethane は図からもわかるように、ある程度 Drift velocity が上がるとそれ以上は電場を強くしても Drift velocity は上がらない。Drift tube chamber の空間分解能を良くするためには、Drift velocity はあまり大

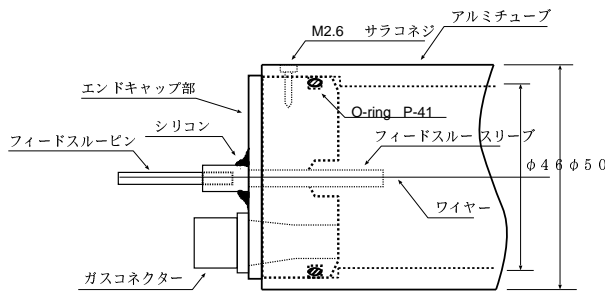


図 12: Drift tube のエンドキャップ部分の構造

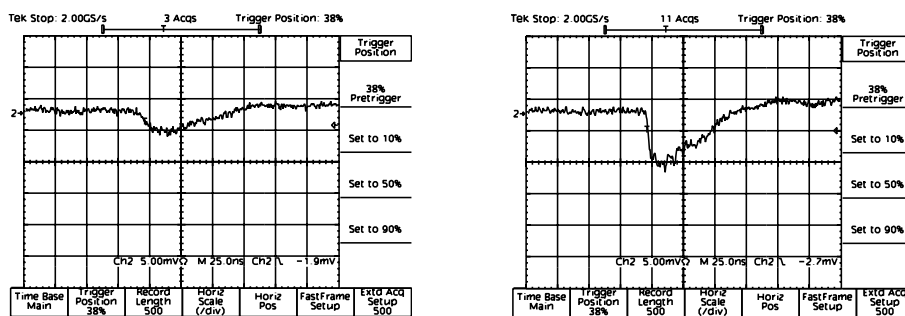


図 13: Drift tube chamber の出力波形。左が 3.2kV で右が 3.65kV。

きくないほうがよく、また広い電場領域にわたって Drift velocity が一定であることが望ましい。Drift tube chamber 内の電場は円筒型電場なので、電場、電位はそれぞれ

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

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

と表される。 $V_0$  はワイヤーへの印加電圧、 $a$  はワイヤー半径、 $b$  はワイヤー・カソード間隔である。Drift tube chamber の場合、 $a = 50\mu\text{m}$  である。検査ステーションでは Drift tube chamber に印加する電圧は 3.65kV である。つまり、 $r = 2.3\text{cm}$  のとき  $V = 3.65\text{kV}$  となることから、 $E(r)$  が計算でき、 $r$  が  $5.0 \times 10^{-3}\text{cm}$  から 2.3cm まで変化するとき、 $E$  は 117~0.26kV/cm まで変化する。 $r=0.5\text{mm}$  のときは  $E=1.17\text{kV/cm}$  なので Drift velocity が比較的安定な領域で動作させることになる。このような理由でガスは Ar+ethane を使用する。

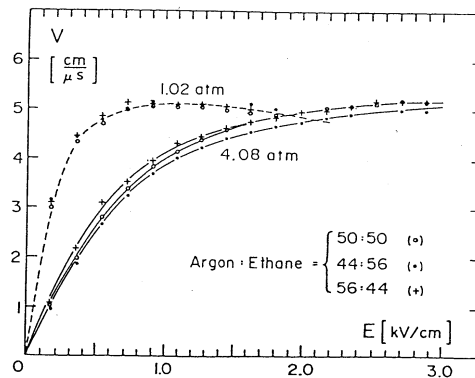


図 14: 電場の強さと Drift velocity の関係 [9]

## 2.3 TGC

### 2.3.1 構造と特徴

TGC の構造上の特徴はアノード・カソード間隔が 1.4mm と非常に狭いことである。1 章でも述べたように TGC には 25ns 以下の時間分解能、高頻度入射粒子においても性能が劣化しないこと、第 2 座標の読み出しの位置精度が要求されている。このような要求をどのようにして満たしたかを述べる。

- アノードワイヤー・カソード間隔

LHC においてはルミノシティが非常に高いため検出器のエンドキャップ部分では約  $1\text{kHz}/\text{cm}^2$  という高頻度で荷電粒子が通過することになる。電子増幅過程で生成された陽イオンは電場を打ち消しガスゲインを減少させ検出効率が低下してしまうことがあるためワイヤー・カソード間隔を減らし、陽子のドリフトの距離を短くしてやることで陽イオンの除去を速やかにする。ワイヤー・カソード間隔 1.4mm は  $1\text{kHz}/\text{cm}^2$  の高頻度入射粒子においても検出効率が低下しない間隔となっている。

- アノードワイヤー・アノードワイヤー間隔

LHC における陽子陽子衝突間隔は 25ns でありどのタイミングで衝突した事象かを同定するには信号を検出する時間分布がそれよりも短くなくてはならない。一般的にアノードワイヤー・カソード間隔を小さくすることで電離された電子のドリフトする距離が短くなり信号到達時間分布が狭くなる。そのため、アノードワイヤー同士の間隔は 1.8mm となった。

- ワイヤー・ストリップ読みだしピッチ



ワイヤー・ストリップ読みだしピッチはエンドキャップの外側に行くほど大きくなっていく。ワイヤー読みだしピッチの変化は interaction point からのビーム軸に対する角度分解能を一定にし、ストリップ読みだしピッチの変化は  $\phi$  方向の角度分解能を一定にしている。

図 15 は TGC の断面図である。

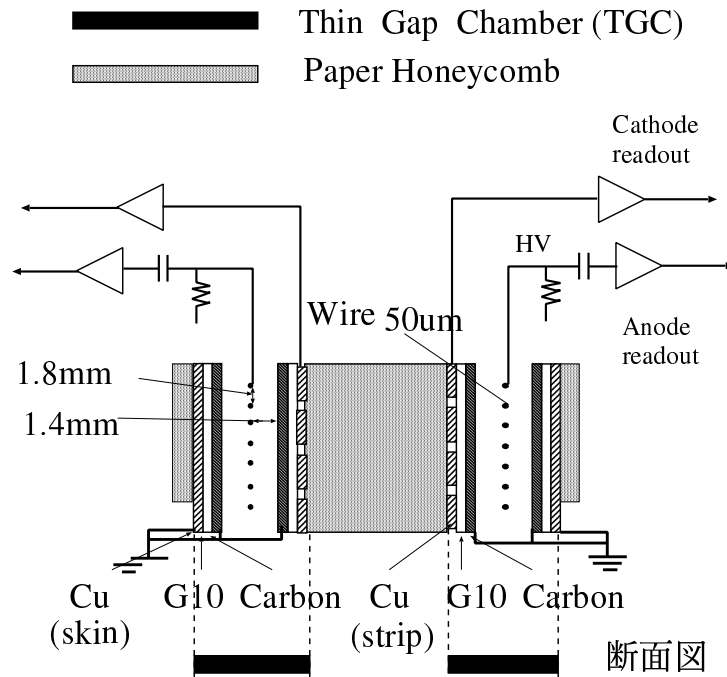


図 15: doublet の断面図。黒色の部分が 1 枚の TGC

アノードワイヤーには高電圧が印加される。図 17 のようにワイヤーの信号は 21 本を 1 グループとして読み出す。カソード面は G10 板 (成分: 60% ガラス ( $SiO_2$ ) + 40% エポキシ樹脂) にカーボンが塗布され抵抗約  $1M\Omega/square$  を有する。もう片面はエッチングにより、あるピッチ幅のパターンの銅ストリップがアノードワイヤー方向に対し垂直に構成されている。(図 17) もう 1 組のペアとして片面が全面銅スキンのものがある。これら 2 枚を重ねて 1 枚の chamber となる。

図 16 はワイヤー・カソード間隔を変化させたときの pulse height の変化である。TGC はワイヤー・カソード間隔が非常に狭いため間隔が変化すると、増幅率が大きく変化してしまう。このような理由で TGC には  $100\mu m$  以下の平面性が要求されている。平面性を保つために FR4 のワイヤーサポート、ボタン型サポートが組み込まれ (図 18)、さらに 2 chambers で 1 unit (doublet) (図 15) あるいは 3 chambers で 1 unit (triplet) として使用され、それぞれの chamber の間と外側に強度補強のため紙ハニカムが装着されている。更にワイヤーサポートはアノードワイヤーが重力でたるまなないように、また静電気力が引き起こすワイヤーの不安定性が大きくなるようにという役割もしている。外側のハニカムはガスを流したときの over pressure 時においても平面性を保つ役割をしている。紙ハニカム、G10 は単位体積あたりの物質量が少なく、通過する粒子の多重散

乱の影響をほとんど受けにくく粒子の入射位置の分解能が下がらずにすむ。これはミューオン検出器において運動量測定も行なうため特に重要な点である。

静電シールドのために doublet の各 chamber は信号を読みとるストリップは内側に (Cathode readout)、銅スキンが外側くる。そしてカーボン面、銅スキン面はすべて同一の電位となるように接続し、これを外部回路 (ワイヤー、ストリップのンプ) のグラウンドと共通化することによって完全にシールドされる。(triplet も同様)

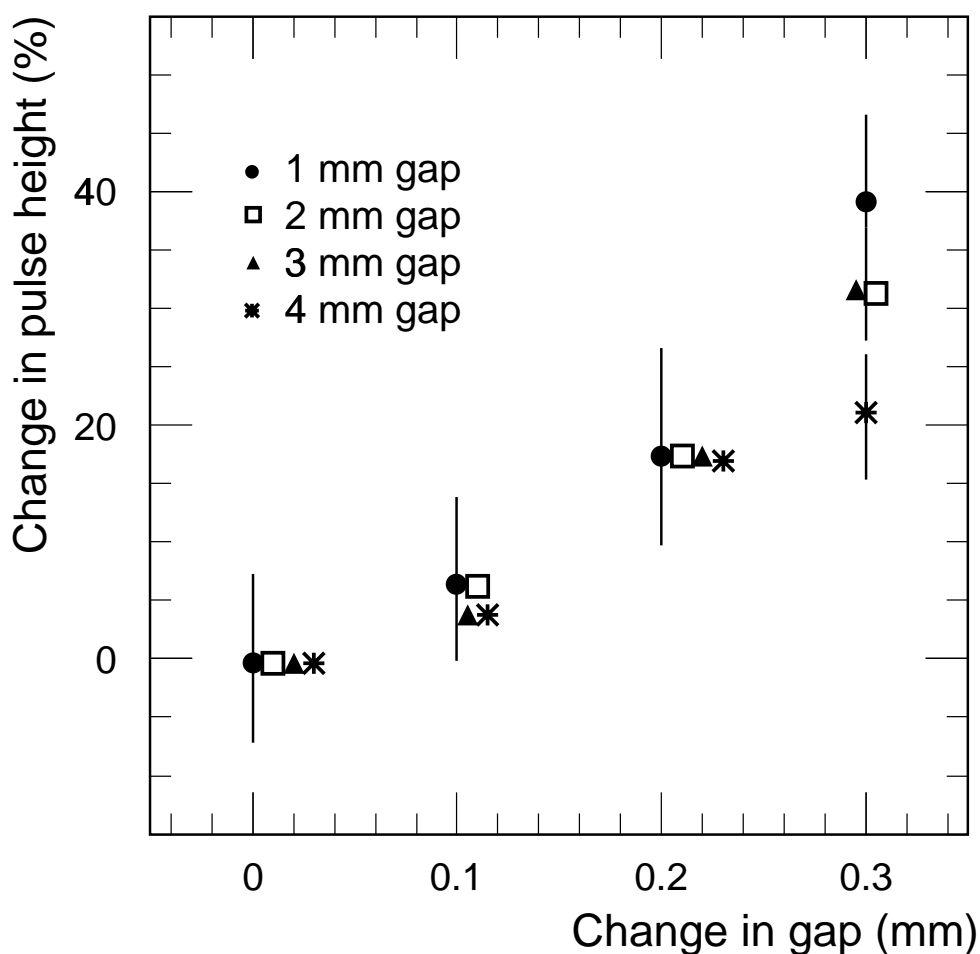


図 16: ワイヤー・カソード間隔を変化させたときの pulse height の変化。[2]

表 3 に TGC の主要パラメータを示し、各項目について説明する。

- ワイヤー径

直径  $50\mu\text{m}$  の金メッキタングステンワイヤーを使用している。一般に細いワイヤー径の方がより高い電場を形成しやすいので、直径  $20\mu\text{m}$  程度の細いワイヤーが使用されるがゲインを大きく

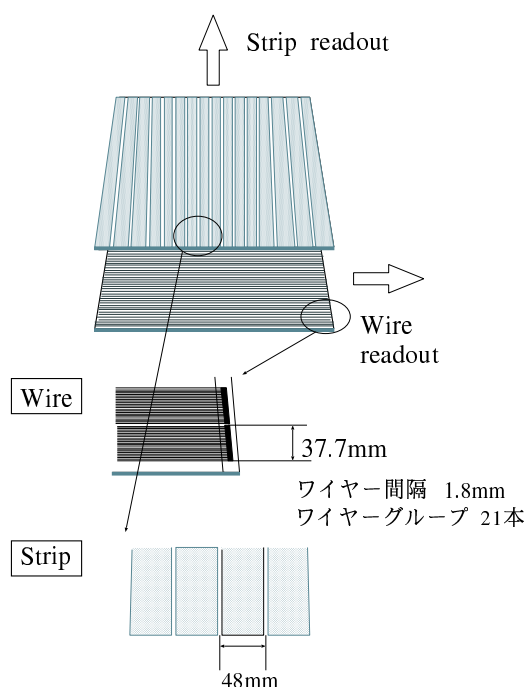


図 17: カソード、アノード読みだしで 2 次元の位置情報を得る。(試作された doublet)

しようとするアノードワイヤーの近傍で生成された電子雪崩がアノードワイヤーを取り囲んでしまい電子雪崩の成長を止めてしまうことになる。TGC で動作させる制限比例領域のような高いゲインで使用するには好ましくない。更に TGC には 1chamber で約 700 本のワイヤーがあり、切れないようにという観点からも細すぎないほうがよい。

- 印加電圧

制限比例領域では比例領域と比べて増幅によって得られる電荷量は 10~100 倍大きく、S/N 比が高く有利になる。また、電場の強さは増幅率に大きな影響を与える。Thin Gap Chamber の様に、アノードカソード間の距離が小さい時は、この間隔が変化することによる電場の変化が及ぼす増幅率変化の影響は大きい。しかし、Thin Gap Chamber では制限比例領域で動作させることによって、この変化を小さくおさえており、大型検出器の量産時の工作精度に、より大きな許容範囲を与える。

- 充填ガス

Drift tube chamber と同様の理由で TGC にも 2 次電子の放出を抑えるため高分子のガスを混入させる。しかし、TGC は Drift tube chamber と比べ非常にアノード・カソード間隔が狭いため、より紫外線吸収断面積の大きいガスを使用する必要がある。そこで n-pentane(55):CO<sub>2</sub>(45) の混合ガスを大気圧で使用する。n-pentane は分圧 0.5 気圧で常温において気体でいられる最も振動、回転の自由度が大きい炭化水素分子である。

表 3: TGC の主要パラメーター

ワイヤー・カソード間隔	1.4mm
ワイヤー・ワイヤー間隔	1.8mm
ワイヤー径	50 $\mu$ m (金メッキタングステン)
ワイヤーポテンシャル	3100V (制限比例領域)
充填ガス	CO <sub>2</sub> +n-pentane(55:45)
ワイヤー読みだしピッチ	7,2-36.0mm
ストリップ読みだしピッチ	14.6-49.1mm

## 2.4 ASD(Amplifier Shaper Discriminator)

ASDとは信号を増幅して (Amplifier)、Tail-cancelation 回路 (Shaper) にかけて信号幅をせまくしたのち、波高分別 (Discriminator) を行い LVDS のデジタル信号を出力するものである。1つの ASD には 16 チャンネルある。プレアンプ、メインアンプのゲインはそれぞれ 0.8V/pc, 8 倍であり、合計 6.4V/pc のゲインである。ASD は TGC と Drift tube chamber の両方の読みだしに使われる。

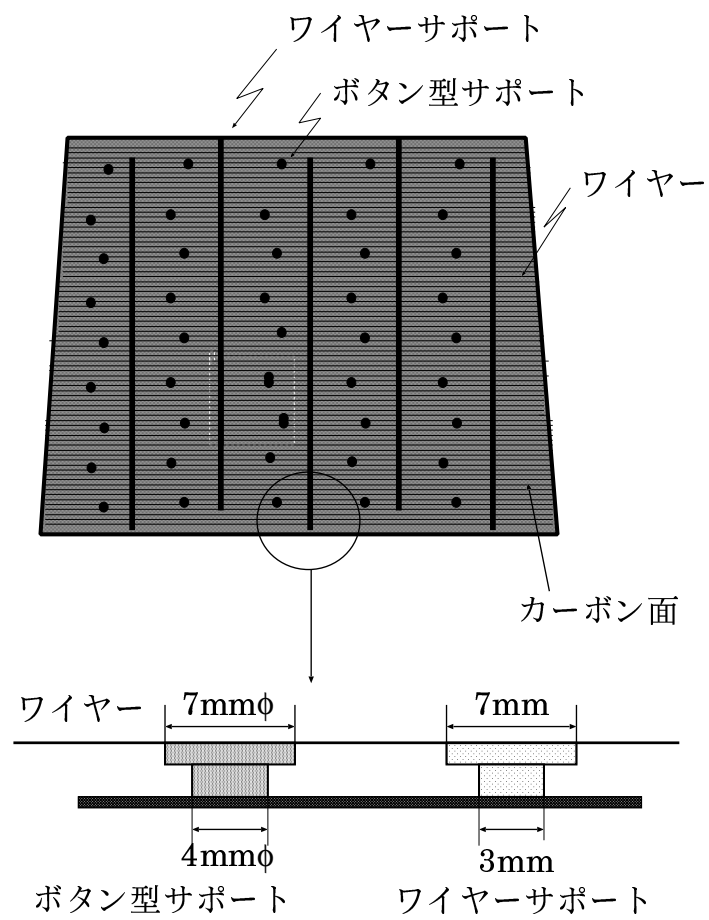


図 18: ワイヤーサポート、ボタン型サポート。(試作された doublet)

### 3 検査システム

KEKで製作されたTGCがLHCにおいて正常に動作するかどうかを検査する。この章では、そのためのシステムについて述べる。検査される内容はガスリーク、高電圧を印加した際のリーク電流、TGCの検出効率、及び不感領域の測定である。それぞれの検査方法について以下に述べる。

#### 3.1 ガスリーク test

ガスリーク testは文字通りTGCのガスリークの有無を調べるものである。。

n-pentaneは有害であり、可燃性であるのでガスリークがあるとLHCにおいて非常に危険である。加えてガスリークがあると充填ガスに空気が混入してしまう。空気の電子付着係数は小さくないので空気の混入によってTGCの検出効率が低下する恐れがある。そのためガスリーク testをする必要がある。

ガスリーク testは大気圧+60mmH<sub>2</sub>Oの圧力をTGCにかけて封じ込め、その圧力の変化をみることでガスリークが無いかチェックするものである。

大気圧+60mmH<sub>2</sub>Oの圧力をTGCにかけて5分間で圧力が10mmH<sub>2</sub>O以上低下しなければ合格である。

#### 3.2 CO<sub>2</sub> test

充填ガスにCO<sub>2</sub>を使用する。まず、2日間CO<sub>2</sub>を流し続けてTGCの中CO<sub>2</sub>で満たす。次にATLASでの動作電圧より少し低い2.9kVを印加する。ワイヤーが運搬等で切れていると高電圧が印加できない。また、正しく印加できたものに対しては、ひきつづき2.9kVの電圧をかけてリーク電流をモニターすることでTGCの動作の安定性をみる。製作時でのカーボン面や、はんだ面での汚れ(主にフラックス)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るとリーク電流が大きく放電もしやすい。電流の変化をモニターすることで、そのようなチェンバーを見つけることができる。また、ワイヤーの刺等を放電させることで潰すとともに、TGCの製作段階において残った塵や埃も焼くこともできる。こうすることで放電の原因を減らすことができるためTGCの安定性が増すというものである。

#### 3.3 n-pentane test

これは充填ガスを本番と同じCO<sub>2</sub>+n-pentaneにして正しく高電圧が印加されるかどうか、安定して動作するかどうかをチェックするものである。ここでTGC内をCO<sub>2</sub>+n-pentaneで満たしておくことで、次のcosmic ray testの時に改めてガスを充填する必要がなくなり、cosmic ray testが少しでも長く出来るようにというねらいもある。ここでも先のCO<sub>2</sub> testと同様に電圧と電流がモニターされる。

### 3.4 Cosmic ray test

これは宇宙線ミュオンを使って TGC の検出効率を測定するものである。Drift tube chamber を使用して宇宙線の飛跡を再構成し、TGC の信号が宇宙線の通過位置に正しく対応しているか、また、ワイヤーサポート、ボタン型サポート以外に不感領域がないかを調べる。また、TGC の信号についてのタイミング測定も行い、到達時間分布が 25ns 以下におさまっていることも確認する。図 19 は cosmic ray test の概念図である。

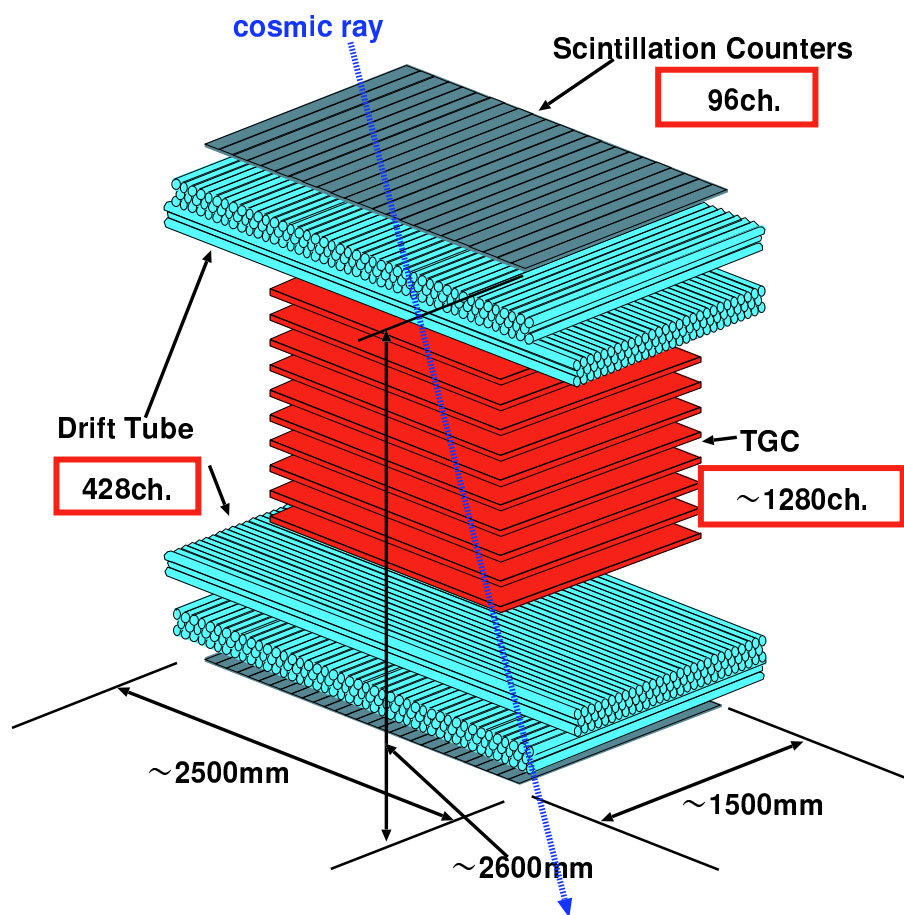


図 19: cosmic ray test の概念図

上下に trigger として使用される scintillation counter が計 48 本、宇宙線の飛跡検出に使用される Drift tube chamber が上下 XY に計 428 本、TGC が 10doublets ある。scintillation counter を上下に置くことで、全ての検出器を通過した宇宙線ミュオンを捉えることができる。Drift tube chamber は上下 XY にそれぞれ 3 層の俵積みにしたものが置かれている。これは原理的には 3 層の Drift tube chamber があれば飛跡が 2 次元で再構成できるためである。すなわち、XY 方向に置くことで 3 次元で飛跡が再構成できる。上の Drift tube chamber を通過して下の Drift tube chamber

を通過するまでに途中で多重散乱を起こしてしまったり、止まってしまったり、崩壊してしまつたトラックは飛跡の再構成が非常に困難である。そのため上下3層づつ置くことでこのようなイベントを除去する。また、ドリフトチューブはその形状から幾何学的な inefficiency が避けられないが、6層設置することでその inefficiency が軌跡再構成の効率に及ぼす影響を無視できるレベルまで軽減できる。scintillation counter と Drift tube chamber は、それぞれ 1650mm × 1940mm、1500mm × 2050mm の領域をカバーしており、ともに KEK で製作されるあらゆる形の TGC の有感領域をカバーしている。TGC の検出効率は 99%以上が要求されているので各ウインドウにおいての統計誤差を 1%以内におさめたい。検出効率の測定値が 99.5%であるとする、統計誤差を 1%以内に納めるために必要なイベント数は二項分布の近似的な誤差より 100 イベントもあれば十分であることがわかる。しかし、各ウインドウ 100 イベントではワイヤーサポートなど見えないので数 mm の位置分解能があったとしても意味がなくなる。位置分解能に意味を持たせるためには各ウインドウ 2000 イベント以上は必要であると思われる。

TGC の検出効率の一様性を調べるために Drift tube chamber には空間分解能が必要とされる。ワイヤー間隔が 1.8mm、ストリップ間隔が約 2.5mm であるため、これらの境界を見分ける必要がある。また、TGC はパレットとともに移動するため検査ステーションにセットアップしたとき数 mm のズレは予想され、このズレをワイヤーサポートの inefficiency を確認することで補正しなければならない。しかし、検査ステーションの物質量は  $50\text{g}/\text{cm}^2$  であるため多重散乱の効果を受けてしまう。そのため、いくら Drift tube chamber の空間分解能がよくとも、飛跡の再構成時の空間分解能は制限されてしまう。以上のような理由から Drift tube chamber は 1mm の空間分解能があれば十分である。

充填ガスを Ar+ethane にし、印加電圧を 3.65kV にしたとき Drift tube chamber の Drift velocity は約  $5\text{cm}/\mu\text{s}$  なので Drift tube chamber の空間分解能を 1mm 以内にするために、Scintillation counter による Trigger の時間分解能は 10ns 以下である必要がある。

## 3.5 検査システム

### 3.5.1 部屋、スケジュール

KEK より運ばれて来る TGC の検査を図 20 のような日程で行う。

前から順番に説明すると神戸に運ばれて来た TGC はまずガスリーク test を行ない。それが終わったものからパレットに乗せられる。次に  $\text{CO}_2$  を 2日間流して TGC の中を  $\text{CO}_2$  で満たす。そして  $\text{CO}_2$  test を 1週間行なう。n-pentane test & cosmic ray test room に運ばれ 1日で  $\text{CO}_2$ +n-pentane を充填し、5日間 n-pentane test をする。そして、同じ部屋の中で移動して cosmic ray test を行なう。最後に  $\text{CO}_2$  を 2日間流して TGC 内部に n-pentane が残らないようにする。これは、常温において n-pentane が液化してしまう恐れがあるためである。最後に箱詰めされて CERN へ送り出される。



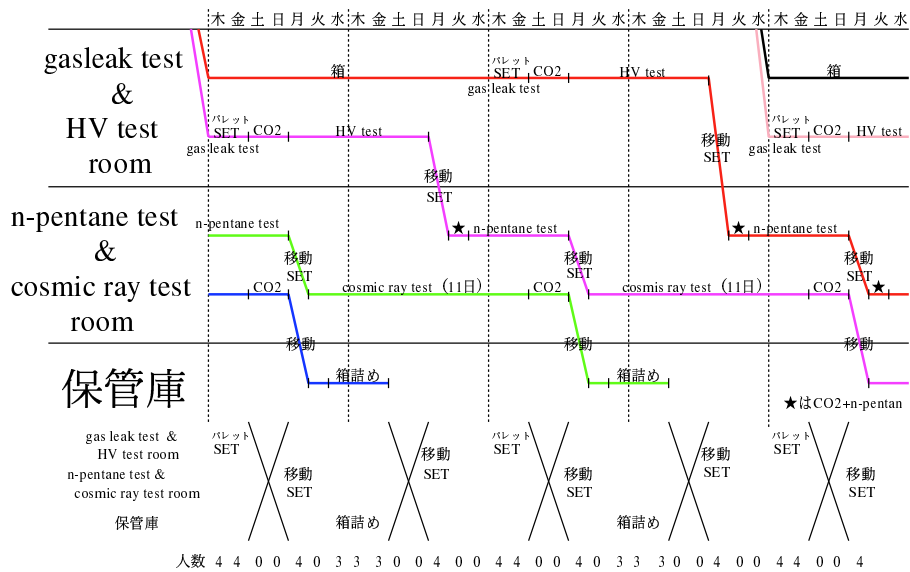


図 20: 検査システムの日程表

### 3.5.2 パレット

TGCの検査は over pressure test 以外は全てある Unit(10doublets or 6triplets) で検査されるので、神戸大学内では、TGCの移動は unit 単位で行う。その unit を乗せるための台として考えられているのがパレットである。2章で述べたように TGCには平面性(100 $\mu\text{m}$ 以下)が要求されているため、パレットの TGC を乗せる部分にも同様の平面性が要求される。over pressure test が終わった時点で TGC はパレットに乗せられる。図 21 はパレットの設計図である。

パレットは二つの構造物が合わさった物である。一つは黒で示された部分で、もう一つは赤で示された部分である。斜線部分は TGC を表している。黒の部分は TGC を積み上げる為の部分で、厚さ約 3cm の木の板の上に TGC を乗せ、それぞれの木の板を木の柱で重ね上げていく。そして最後に構造が崩れないように 4 つ角を鉄のアンクルで支えておく。赤い部分は、クレーンで移動するとき全体をつり上げるための部分である。土台となる一番下の板はパレット全体を支える物なので、厚さ約 10cm の金属製の板にする。上部にクレーンで吊るためのフックが取り付けられる予定である。TGC も合わせた全体の重量は約 1t になる予定である。

### 3.5.3 セットアップ

神戸大学で行なわれる 4 つの test がどのようなセットアップで行なわれるかを述べる。

**ガスリーク test** 図 22 はガスリーク test のガス系のセットアップである。充填ガスには安価な  $\text{CO}_2$  が使用される。regulator は圧力調整、needle valve は流量調整、pressure gauge は TGC 内

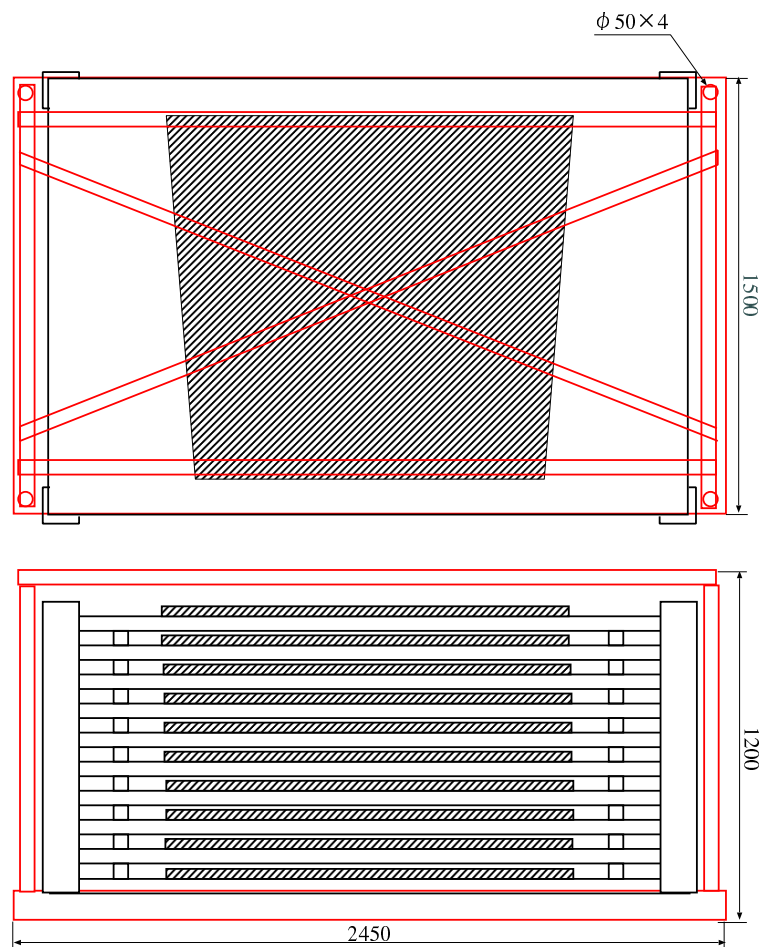


図 21: パレットの設計図

の圧力を見るものである。気体の拡散により水が TGC 内部に行かないように water bubbler と TGC の間のガス経路は長くしておく。

*CO<sub>2</sub> test* 図 23 は *CO<sub>2</sub> test* のガス系のセットアップである。

この図で点線で囲まれている部分はパレットに乗せられる予定の部分であり、残りの検査のガス系で共通の部分である。TGC 内部に過大な圧力がかかると、チェンバーが膨らみ接着剤が剥離してしまうため TGC の内圧を抑制することが第一であるため、このガス系には 2 つの安全システムが備わっている。一つは、パソコンを使用してガスの流量と圧力を常時監視し、異常事態が起こったときに electric valve を閉じる仕組みになっている。もう一つは safety bubbler で、これは bubbler の中にある程度のシリコンを入れておいたもので、ある一定以上の圧力がガス系にかかったとき、ここから気体が排出されるようになっている。purge valve は人の手で簡単にガス系の圧力を大気圧に戻すためのものである。点線内のシステムの入口と出口に valve があるが、これは移

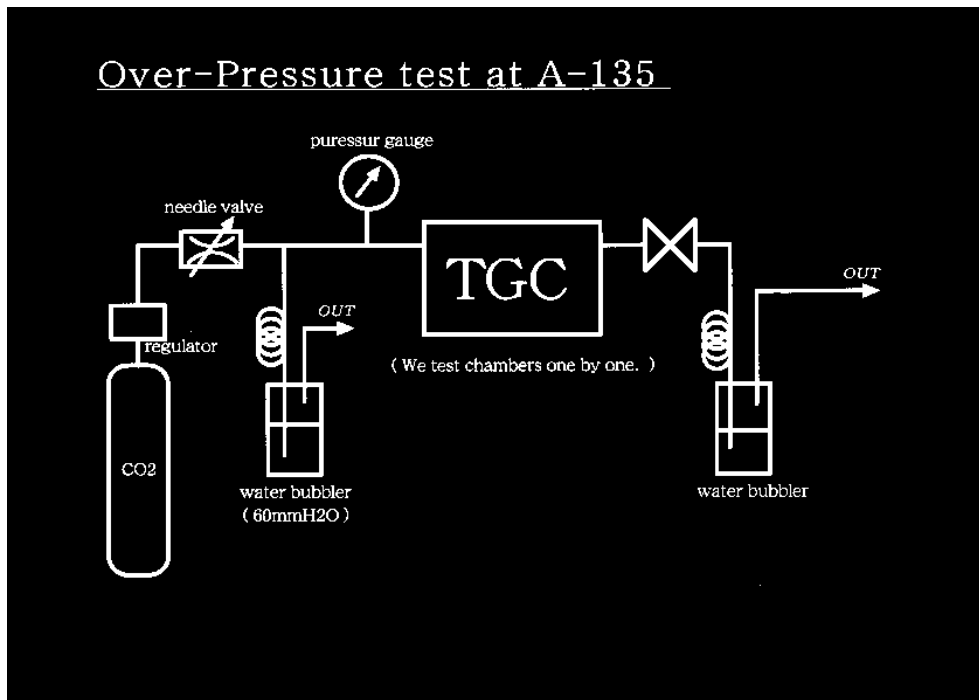


図 22: over pressure test のガス系

動の際に TGC 内に空気が混入するのを防ぐためである。

**n-pentane test** 図 24 は n-pentane test と cosmic ray test のガス系のセットアップである。

ほとんどが  $CO_2$  test と同じだが充填ガスとして  $CO_2$ +n-pentane を使うため  $CO_2$  と n-pentane の mixer があり、そのガスを 2 系統に分けて n-pentane test と cosmic ray test で使用する。

### Cosmic ray test

- TGC のガス系のセットアップ

Cosmic ray test において、TGC のガス系のセットアップは図 24 である。n-pentane test の時と全く同じセットアップである。

- 架台

図 25 は架台の図である。

TGC、パレット、Drift tube chamber、Scintillation counter の総重量は約 1.5t になる。このような重量物を乗せることになるので強固な架台が必要になる。各部分に常時かかる荷重を計算し、その荷重の 5~10 倍の荷重に耐えられるように設計した。特に TGC、パレットを支える部分は移動があるため瞬間的に非常に大きな荷重がかかることが予想されるので他の部分よりさらに強固

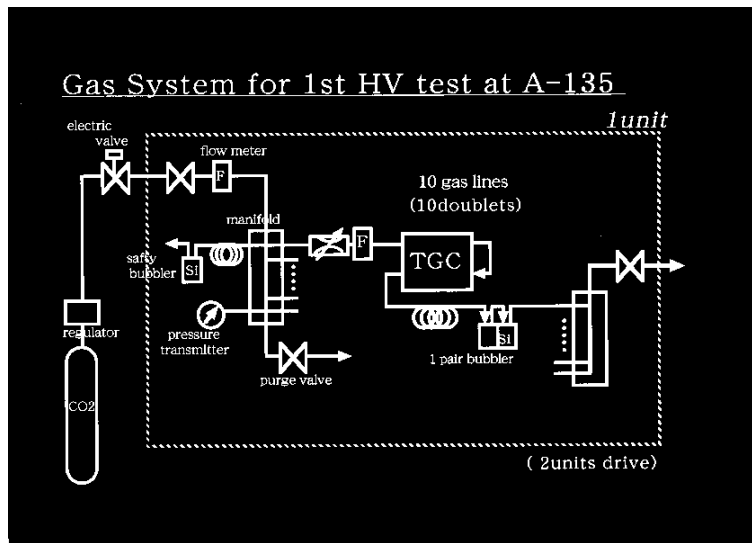


図 23: aging test のガス系のセットアップ

に設計してある。TGC、パレット、Drift tube chamber、Scintillation counter を含む架台の総重量は約 3t になる。

- Drift tube chamber のガス系

図 26 は Drift tube chamber のガス系である。

Drift tube chamber のガス系は単純にガスを分岐して供給している。安全システムとしては 8 系統に分けた後に bubbler を 1 つづつ置いてある。Drift tube chamber は構造が単純な上に耐圧にもすぐれているため複雑なガス系を必要としない。

- Trigger system

宇宙線の通過を知らせ、時間情報の基準となる信号を出す trigger について述べる。

図 27 は trigger 系のロジックである。PMT は scintillation counter から出てくる scintillation 光を電気信号に変換するものであり、discriminator は PMT から送られて来たアナログ信号をデジタル信号に変換するものである。シンチレーターの両端に PMT をとりつけ、両方のタイミング測定を行うことで、シンチレーター内の光の伝搬に要した時間を測定することができ、トリガーカウンターの時間分解能を 10ns 以下に向上することができる。

検査ステーションに置かれた全ての scintillation counter からの信号の理論和を上下で別々にとり次にその理論積を取ることで trigger とする。

- TGC read out

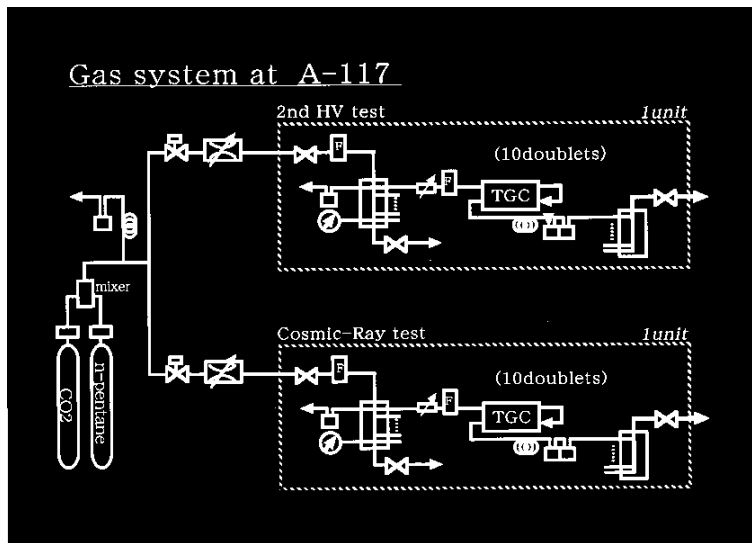


図 24: n-pentane test と cosmic ray test のガス系のセットアップ

Cosmic ray test では検出効率を測定するため各ワイヤグループ、各ストリップごとの read out が必要である。例えば 10doublets の場合、 $(32(\text{ストリップ}) + 32(\text{ワイヤグループ})) \times 10(\text{doublets}) = 640$  個の read out が必要になってくる。そこで cosmic ray test で使用される read out について説明する。図 28 は cosmic ray test での TGC read out である。SWINE は TGC 及び一般の Wire chamber の測定の為に開発された VME のシステムである。HOG と呼ばれるモジュールで測定器の信号が処理される。PORQ はクレート内の HOG をコントロールするモジュールである。

まず ASD でアナログ信号をデジタル信号に変換し HOG を使って hit 情報を得る。TGC では時間情報は必要無く、trigger の信号からある決まった時間の間に TGC からの信号があるかどうかが必要な情報である。

- Drift tube chamber

Cosmic ray test において中心的な役割を果たす Drift tube chamber の read out について述べる。図 29 は Drift tube chamber の read out である。

TGC の read out と同様にもまず ASD (Amplifier Shaper Discriminator) でアナログ信号をデジタル信号に変換する。その信号を TMC を使って時間情報に変換する。TGC と違って Drift tube chamber では時間情報が必要であり、Trigger の信号が TMC に到達してから Drift tube chamber の信号が到達するまでの時間 (drift time) を TMC で読み取る。TMC は Trigger と目的の信号の時間間隔を測定するモジュールである。図 30 は ASD の前後での Drift tube chamber の信号の様子である。図中の上の信号は Drift tube chamber の信号であり、下の信号はデジタル化された信号である。

次章で Drift tube chamber を使い、TMC で読み出された時間情報を元に宇宙線の飛跡を再構成する方法と、Drift tube chamber を用いた飛跡検出システムの性能について述べる。

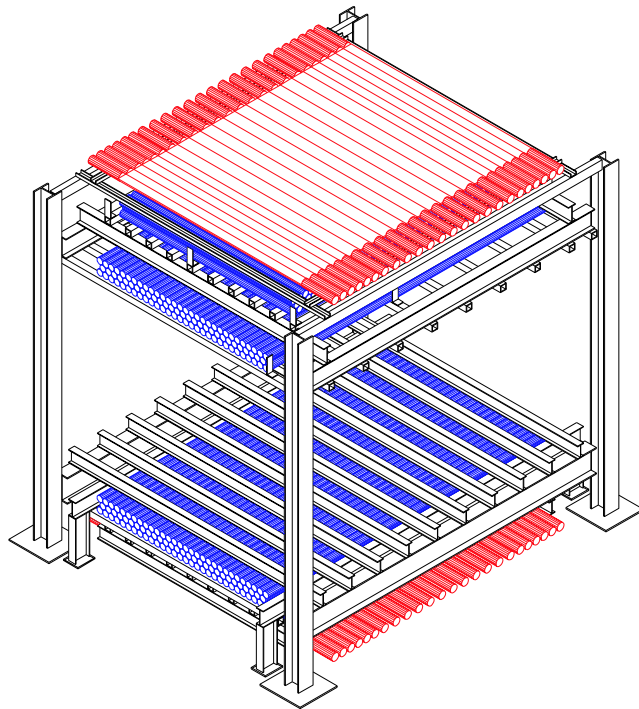


図 25: 架台の図。赤が Scintillation counter。青が Drift tube chamber である。

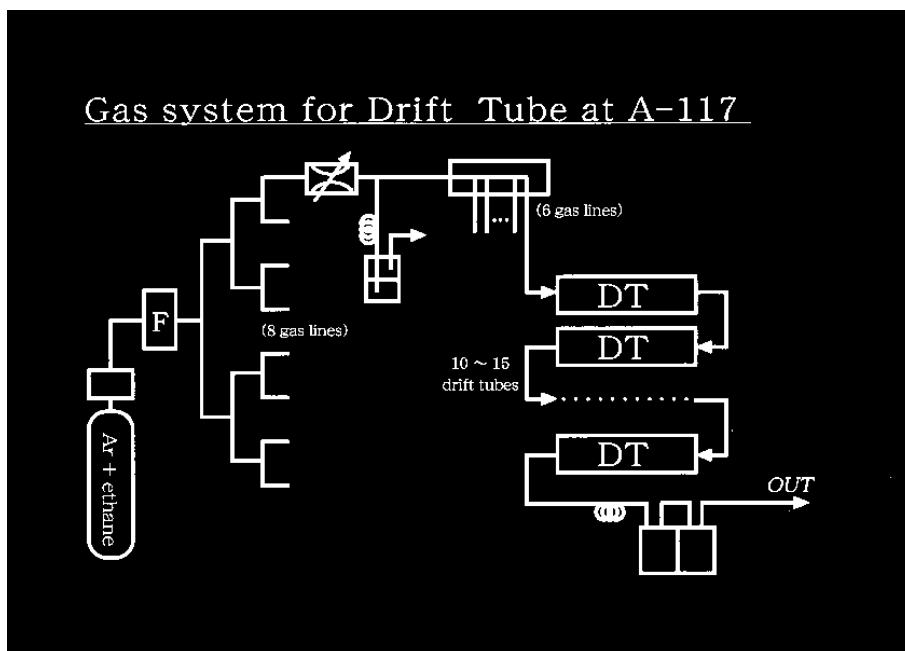
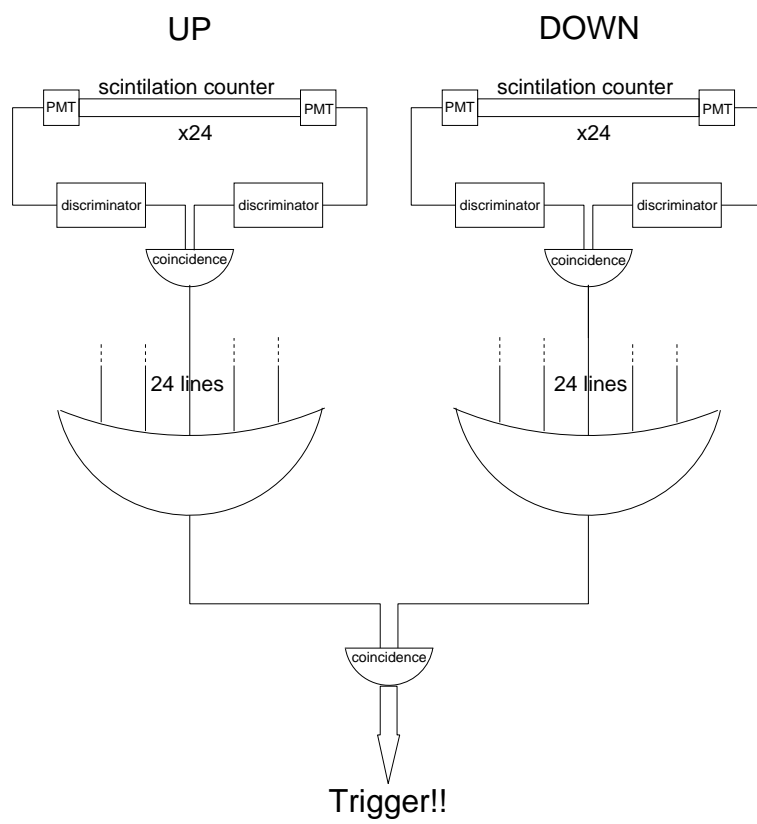


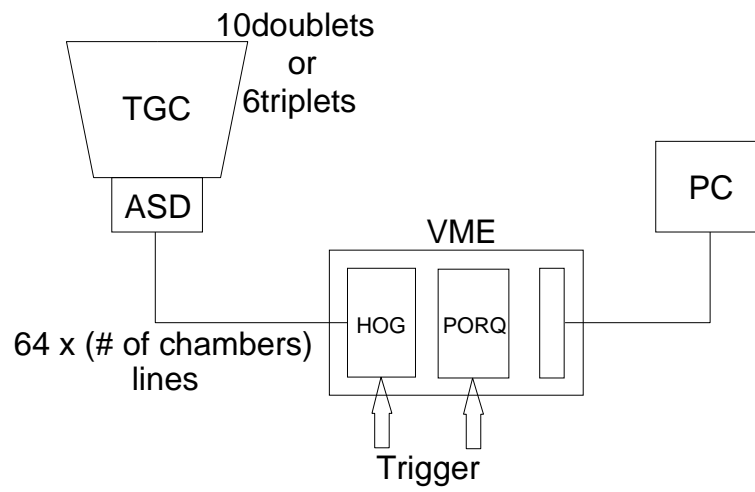
図 26: Drift tube chamber のガス系のセットアップ

## Trigger system



☒ 27: trigger 系のロジック





☒ 28: TGC  $\emptyset$  read out

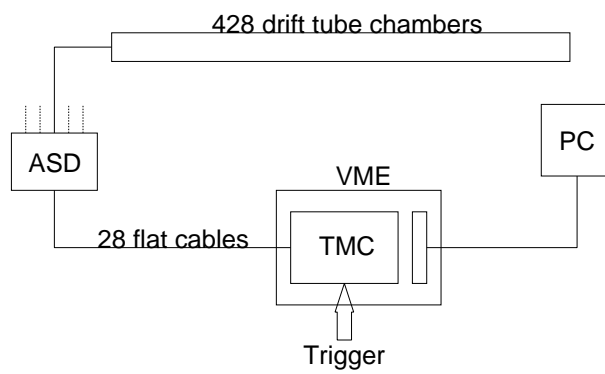


図 29: Drift tube chamber の read out

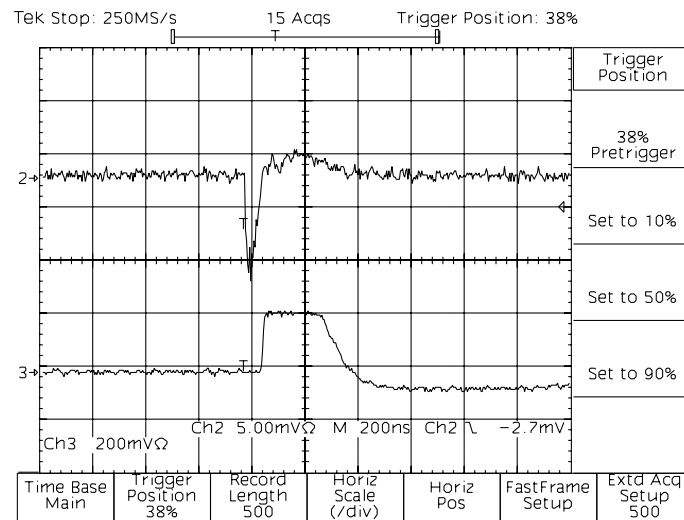


図 30: ASD の前後での Drift tube chamber の信号

## 4 宇宙線ミュオンの飛跡の再構成と、飛跡検出システムの性能評価

TGCの検出効率、及び一様性を測定するために Drift tube chamber による宇宙線ミュオンの飛跡の再構成は必要不可欠である。

3.4 章でも述べたが Drift tube chamber 及び Drift tube chamber を使った飛跡検出システムに対する要求をもう一度挙げておく。

- 空間分解能 1mm 以下 (Drift tube chamber)
- 各ウインドウに 2000 イベント以上 (飛跡検出システム)

以降、この要求を Drift tube chamber 及び Drift tube chamber を使った飛跡検出システムが満たしているかを検証していく。

Drift tube chamber のガスは大気圧で使用している。Drift tube chamber に信号があるか否かを区別する電圧を Threshold といい、この電圧を ASD の後で 1V とした。これは約  $10^8$  個の電子の電荷に相当する。Threshold を決定する時に使用したデータを表 4 に示す。

Threshold(V)	0.1	0.25	0.5	0.7	1.0	1.3
Hit rate(Hz)	11028	4311	3315	3442	3427	3203

表 4: Threshold に対する Drift tube chamber の Hit rate

このデータは 1 つの Drift tube chamber について Threshold に対する Drift tube chamber の Hit rate を記録したものである。全ての Drift tube chamber は形状も印加電圧も同じなので 1 つの Drift tube chamber について調べた。このデータで rate の変化の小さいところに Threshold を定めた。ノイズで Drift tube chamber が Hit したと誤認しないように考慮して少し高め of Threshold を設定した。

### 4.1 Efficiency の HV dependence

印加電圧に対する Drift tube chamber の efficiency 変化を調べた。セットアップは図 31、図 32 である。

Read out については基本的なところは検査ステーションの read out 同じである。上下それぞれ 1 つ以上の scintillation counter から信号が検出されれば trigger を出し、それを基準に Drift time を測定する。

Efficiency は  $3 \times 3$  の構造の Drift tube chamber で測定する。例えば中央列の上段と下段の Drift tube chamber から信号が検出されれば中段の Drift tube chamber の部分を宇宙線は通過したはずである。そこで各列、上段と下段の Drift tube chamber から信号が検出されたときに中段の Drift tube chamber から信号が検出されたかどうかを見ることで efficiency を測定する。

図 33 は測定結果である。印加される電圧が増加すると共に efficiency も増加していくが 3.5kV あたりで頭打ちになっている。しかし、天候の変化による Drift tube chamber 内の圧力の変化に

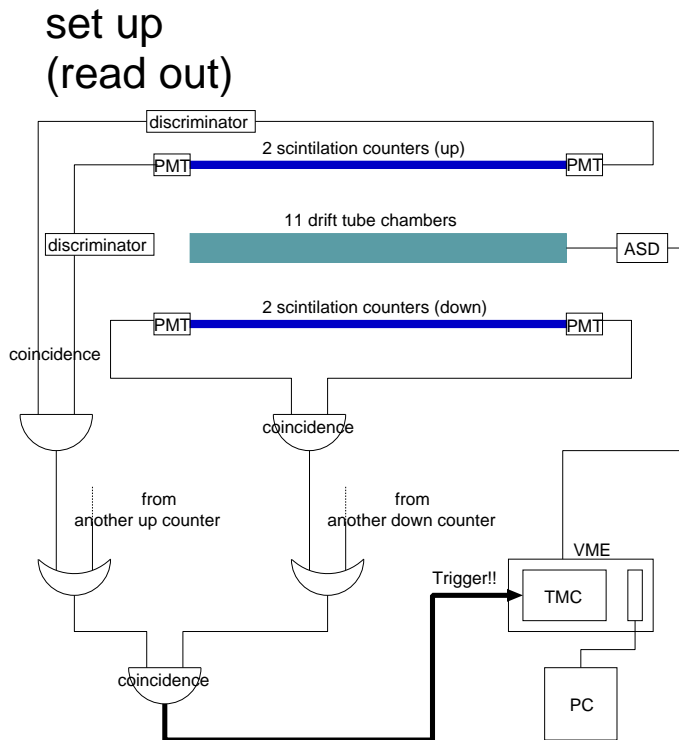


図 31: read out のセットアップ

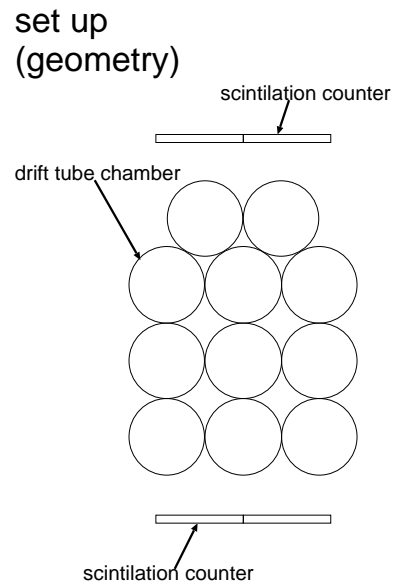


図 32: セットアップの geometry

よって efficiency が多少変化することが考えられるため、ある程度 HV は高く設定しなければならない。しかし、あまり高くしすぎると電流が大きくなりすぎ Drift tube chamber を痛めてしまう。この2つのことを考慮して Drift tube chamber の印加電圧は 3.65kV とした。検出効率は約 98% である。残された 2% は以下のような理由が考えられる。

- Drift tube chamber の端の方を通った宇宙線は Chamber 内の通過距離が短いため電子を電離できなかった

これについては 4.6 章で検証する。

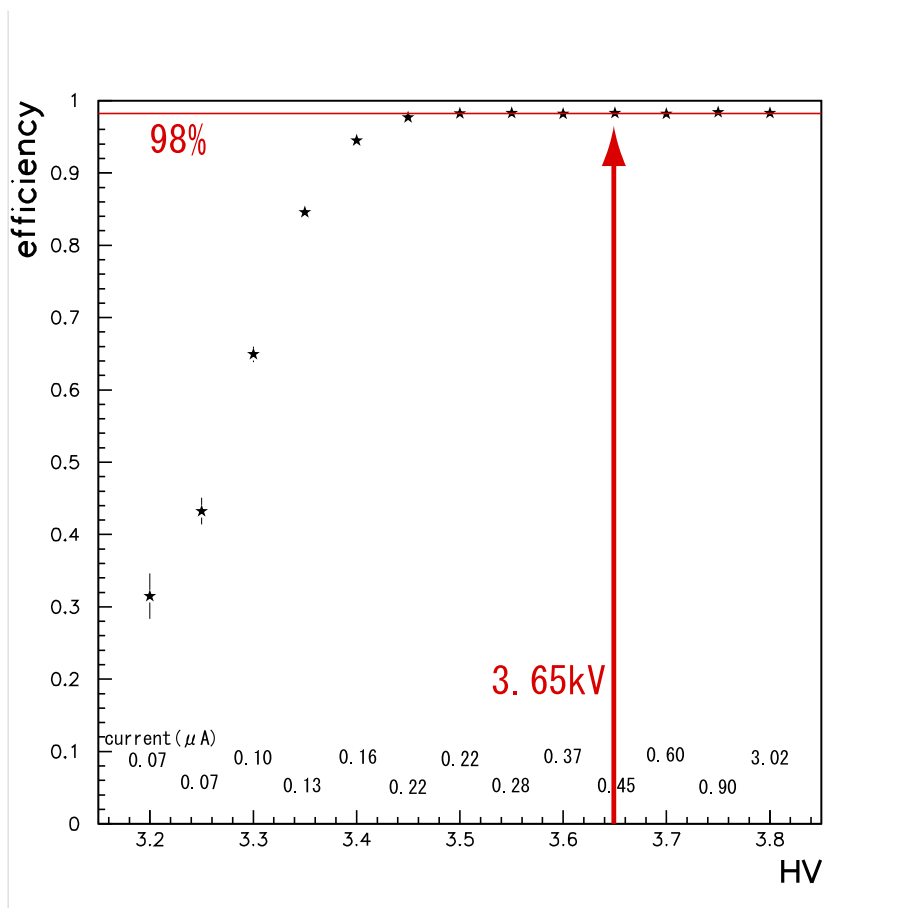
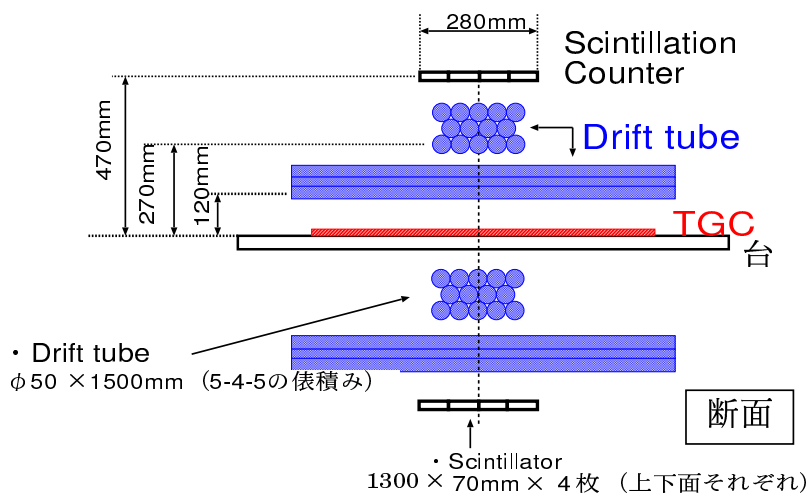


図 33: 印加電圧に対する efficiency

## 4.2 x-t relation

宇宙線ミュオンの飛跡を再構成するためには時間情報を空間情報に置き換えなければならない。そのために x-t relation の測定が必要になる。x-t relation とは Drift time と宇宙線がワイヤーからどれだけ離れた場所を通過したかの関係である。図 34 のようなセットアップで測定した。



70 ×

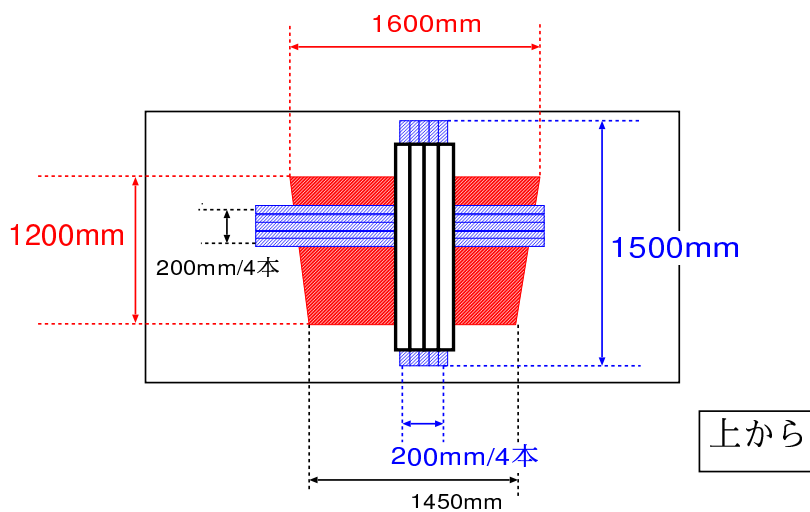


図 34: x-t relation 測定の設定アップ

Read out のセットアップについては 4.1 とほぼ同じで数が増えているだけなので省略する。Drift tube chamber が 2 方向にセットされているのは宇宙線の飛跡を 3 次的にとらえるためである。

今回は解析を簡単にするため Drift tube chamber の各層に 1 本ずつ粒子通過の信号がある event を使用した。まず、x-t relation を表す関数  $X(t)$  を仮定する。t は Drift time である。これで粒子

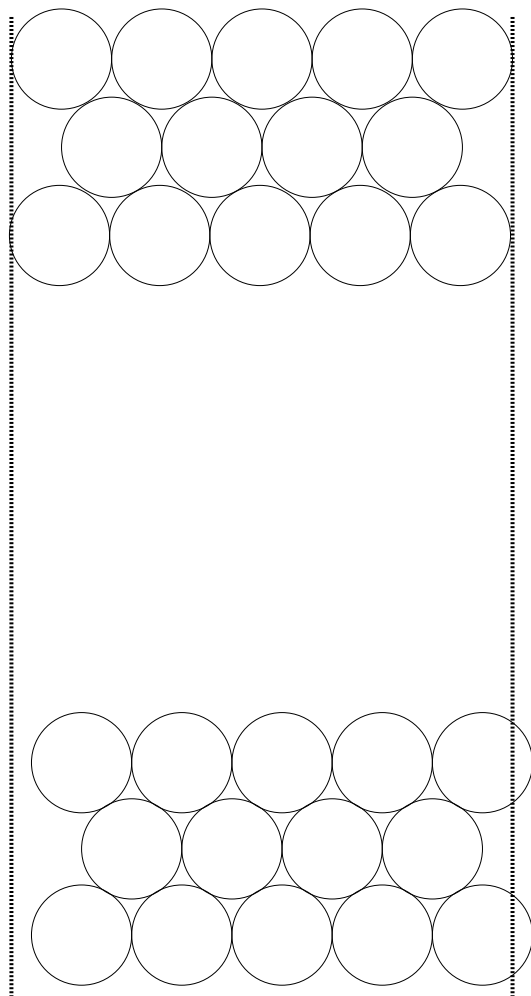


図 35: アライメントのずれ

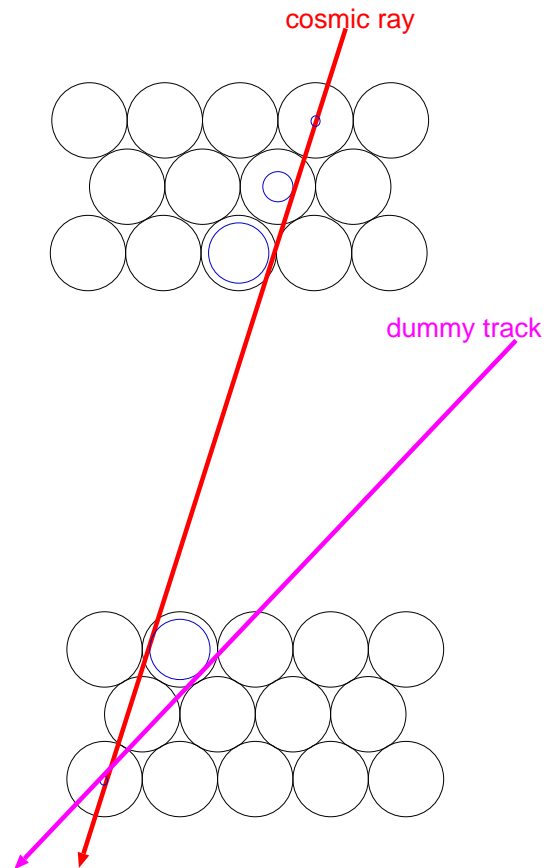


図 36: dummy track

通過の信号があった Drift tube chamber については、その時間情報  $T_1$  を用いてワイヤーを中心とした半径  $X(T_1)$  の円が書ける。

ここで上の 3 層と下の 3 層は、この段階では、まだアライメントされていないので、正確な位置情報を与えることができない。(図 35) そこで、その効果を除くため上下どちらかの 3 層を使い解析する事にした。3 層の塊の中ではそれぞれの drift tube chamber の相対的な位置が比較的正確に決まっているからである。ここでは下の 3 層を使用し、そのうち上段と下段の 2 層で宇宙線の飛跡を再構成し中段の  $X$  を決定した。(図 38)。しかし、2 層の情報だけでは、正しい軌跡だけでなく dummy の軌跡が得られることがある。(図 36) そこで、上の 3 層は下の層で求められた 2 つの飛跡を 1 つにするために使用した。

この  $X$  と中段の時間情報をプロットし  $x-t$  relation をもとめ、新たに出てきた  $X'(T)$  を fit する。この  $X'(T)$  を使い、再び下の 3 層のうち上段と下段の 2 層で宇宙線の飛跡を決定し中段の  $X$

を決定し、x-t relation が収束するまで繰り返す。

ここで、TMCで読み込まれた時間情報は trigger の信号に対する相対的な時間情報であり、drift time そのものではない。そこで TMC の時間情報を drift time に直すために  $t_0$  を決めてやる必要がある。TMC の時間情報を  $T$  とすると  $t = C(t_0 - T)$  である。 $C$  は TMC カウントと時間の変換の定数であり  $0.78\text{count/ns}$  である。そこで x-t relation で仮定する関数は  $X(T) = P_2(C(t_0 - T))^2 + P_1(C(t_0 - T))$  とした。 $t_0$  は、セットアップ (ケーブルの長さ、信号の処理速度等) によって決められるものでセットアップが変わると  $t_0$  の値も変わる。次に  $t_0$  の値を決定するのだが、これは TMC の時間情報の分布を見ることで決定できる。図 37 は、ある Drift tube chamber から読みだされた時間情報の分布である。

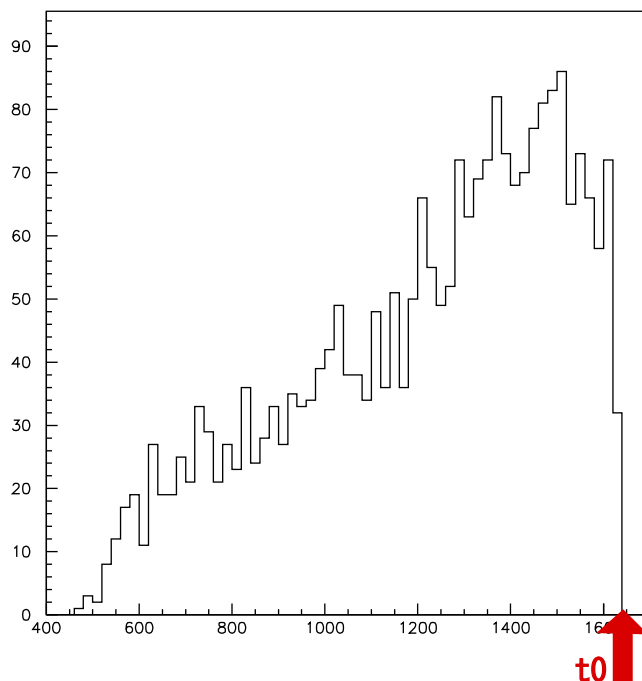


図 37: 時間分布。横軸が TMC count(1count=0.78ns) で縦軸が event 数である。count 数の大きい方が drift time は小さい。 $t_0$  がはっきりとわかる。

上の図より  $t_0=1634$  とした。

2.2.1 で示したように、印加電圧が 3.65kV の場合、Ar+ethane の drift velocity は、ほぼ linear に変化しその値はだいたい  $5\text{cm}/\mu\text{s}$  であるため、ここでは x-t relation は 2 次関数  $X(t) = P_2t^2 + P_1t$  で表されるとした。また、はじめに仮定する関数としては 2 次の係数  $P_2 = 0$ 、1 次の係数  $P_1 = 5 \times 10^{-3}$  とした。図 39 は  $P_1$  と  $P_2$  がある値に収束していく様子である。図 40 は最後の X と T のスキャッタープロットとその fit 関数であり、この結果  $P_1 = 5.1 \times 10^{-3}$ 、 $P_2 = -2.9 \times 10^{-6}$  とした。



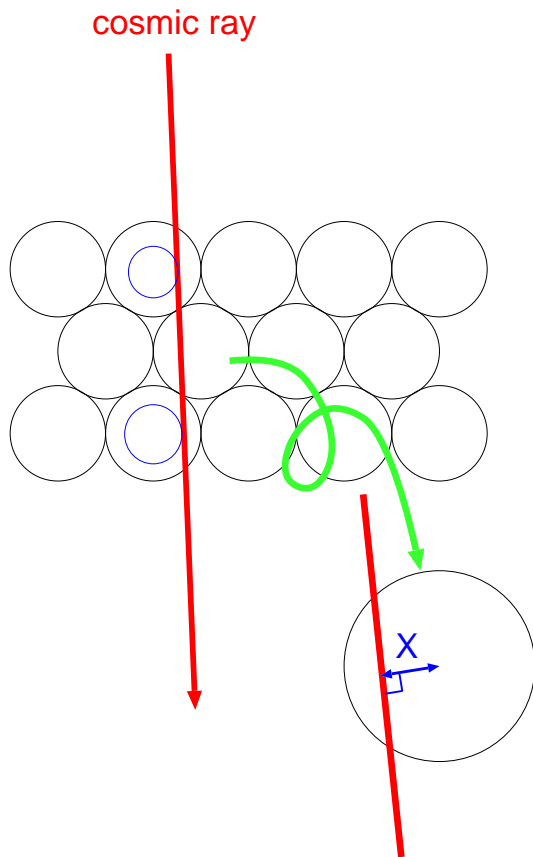


図 38:  $X$  の決定

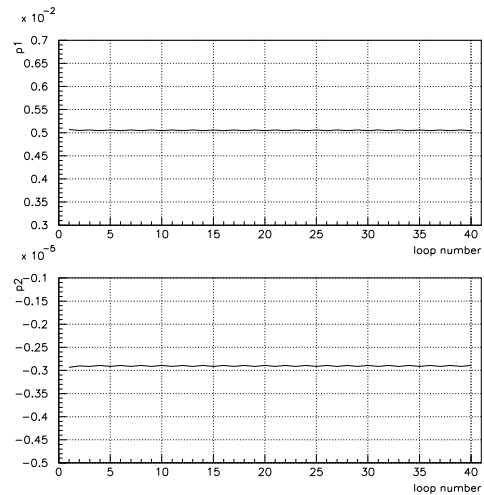


図 39:  $P1$  と  $P2$  の変動。横軸は fit の回数である。

### 4.3 空間分解能

空間分解能とは  $x$ - $t$  relation で求められた  $X(t)$  がどれだけの精度を持っているかというものである。この測定のセットアップは 4.2 と同じである。(図 34)

Drift tube chamber に要求されている空間分解能は 1mm である。図 41 は宇宙線の飛跡より求められた  $X$  と  $x$ - $t$  relation で求められた  $X(t)$  の差をプロットしてのものである。この分布を Gaussian で fit したときに出てくる sigma の値が Drift tube chamber 3 本の空間分解能を含んだ値である。このセットアップ (図 34) において、宇宙線の角度はせいぜい 10 度である。そこで  $X(t_{mid}), X(t_{up}), X(t_{down})$  をそれぞれ中、上、下段の粒子通過位置だとすると図 41 にプロットされているもの ( $R$ ) は近似で

$$R = \pm \frac{X(t_{up})}{2} \pm \frac{X(t_{down})}{2} - X(t_{mid})$$

又は

$$R = 2.5 \pm \frac{X(t_{up})}{2} \pm \frac{X(t_{down})}{2} + X(t_{mid})$$

となる (図 42)。複号はそれぞれ正にも負にもなりうるが両方が負となることはない。R の分布の誤差を  $\sigma_R$ , 各々のチューブの位置精度は一様としてその誤差を  $\sigma$  とすると誤差伝搬の式より

$$\sigma_R^2 = \left( \frac{\partial R}{\partial X(t_{up})} \right)^2 \sigma^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial X(t_{down})} \right)^2 \sigma^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial X(t_{mid})} \right)^2 \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{4} + \frac{\sigma^2}{4} + \sigma^2 = \frac{3}{2}\sigma^2$$

R の誤差は図 41 の sigma なので Drift tube chamber 1 本あたりの空間分解能が計算できて  $540\mu m$  である。これは要求されている空間分解能を満たしている。

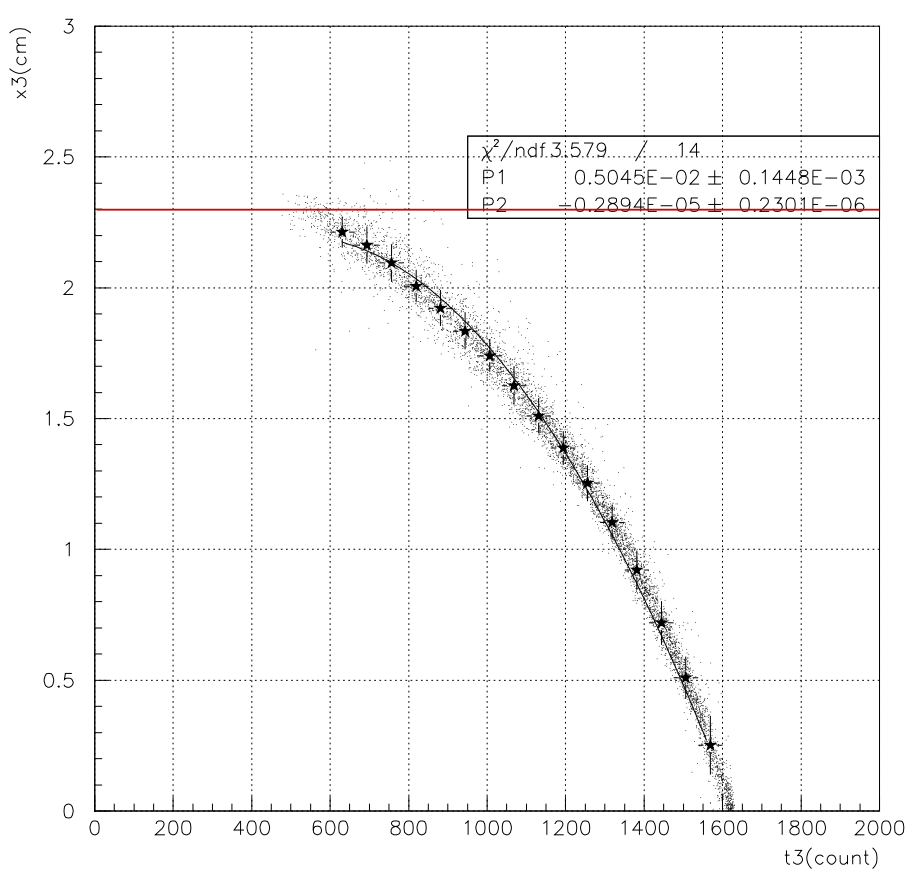


図 40: x-t relation の最終結果。赤い線は Drift tube chamber の内壁の位置 (2.3cm)。

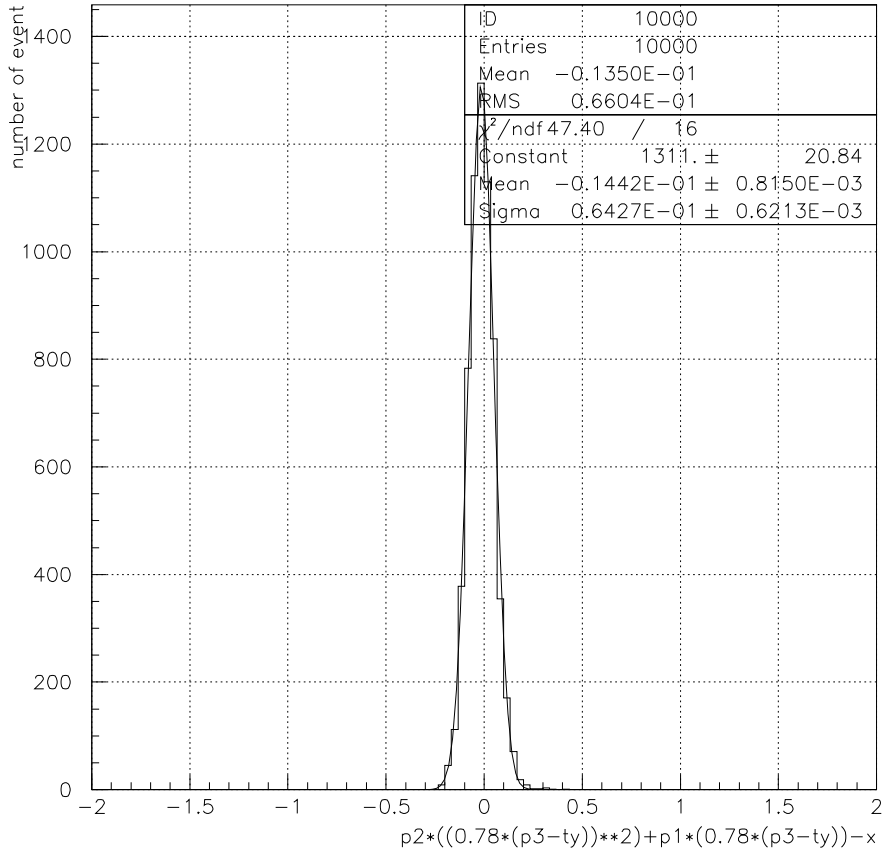


図 41: 宇宙線の飛跡より求められた  $X$  と  $x$ - $t$  relation で求められた  $X(t)$  の差

#### 4.4 宇宙線の飛跡の再構成の確率

Drift tube chamber が上下 3 層中、それぞれ 2 層以上に信号があったとき全ての飛跡が良い精度で再構成できるわけではない。宇宙線ミューオンが Drift tube chamber のアルミパイプとの相互作用により、 $\delta$ -ray を放出し、時間情報が狂ったり、多重散乱の効果で飛跡が直線でなかったりするため正しく飛跡が再構成できない場合がある。ここで、良い精度で飛跡が再構成できているかどうかを判断する指標として、誤差の距離の 2 乗和を空間分解能の 2 乗で割った値を見る。誤差の距離の 2 乗和とは確立された宇宙線の飛跡と、時間情報から得られた空間情報の誤差の 2 乗和である。図 43 は誤差の距離の 2 乗和を空間分解能の 2 乗で割ったものである。

図 43 で 4(誤差約 1mm) まで許してやるとすると約 30% のイベントが正しく飛跡を再構成できていないことになる。この 30% のイベントについて 3 層の誤差を合わせたものと、3 層のうち一

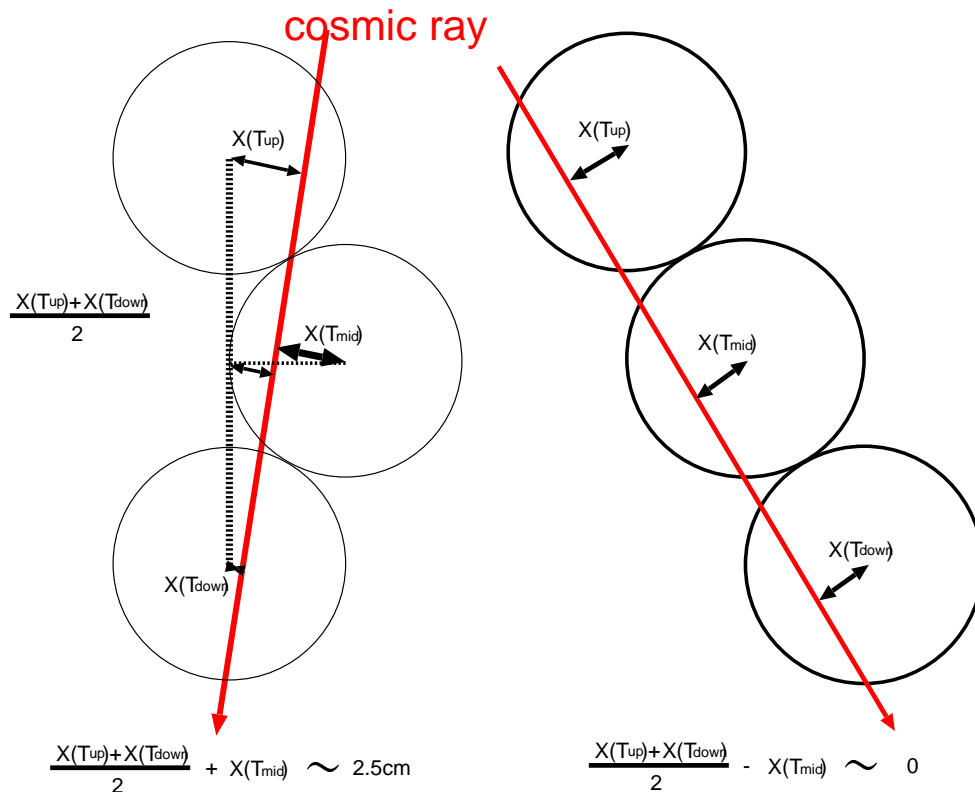


図 42: 関係式の導き方。

一番大きい誤差のプロットすると、図 44 のようになる。もし 1 層だけが本当のトラックとずれていたとすると、図 44 で傾き 3 分の 2 の線に乗るはずである。図 44 をみると、そのラインに完全には乗っていないので 2 層以上がずれているイベントもあると思われる。次に一番大きい誤差を持つ層について、トラッキングの位置と x-t relation での位置をプロットすると図 45 のようになる。トラッキングが正しい場合は傾き 1 の直線上に乗る。この図において縞がみえているのはトラッキングのとき切片を 1mm 間隔で動かしているためである。傾き 1 より小さい部分に出ているイベントは  $\delta$ -ray などのイベントに付随するノイズによるものと思われる。傾きが 1 より大きい部分にあるイベントはトラッキングのミスであると思われる。このイベントは位置が大きいところで起こっている。図 46 のようになっていると考えられる。そのため誤ったトラッキングと正しいトラッキングの誤差が小さいため、上の 3 層を参考にしてもトラッキングのミスが起こると考えられる。

3 層での飛跡の再構成の確率は 70%なので上下 XY 共に再構成出来る確率は 24%となる。

Drift tube chamber は印加電圧 3.65kV において宇宙線が通過したとき、3 層共に信号がある確率は 94%である。合わせて考えると 22.5%の宇宙線の飛跡を確立できることになる。しかし、検査ステーションの物質量は  $50\text{g}/\text{cm}^2$  であるため多重散乱の効果を受けてしまう。検査ステーション

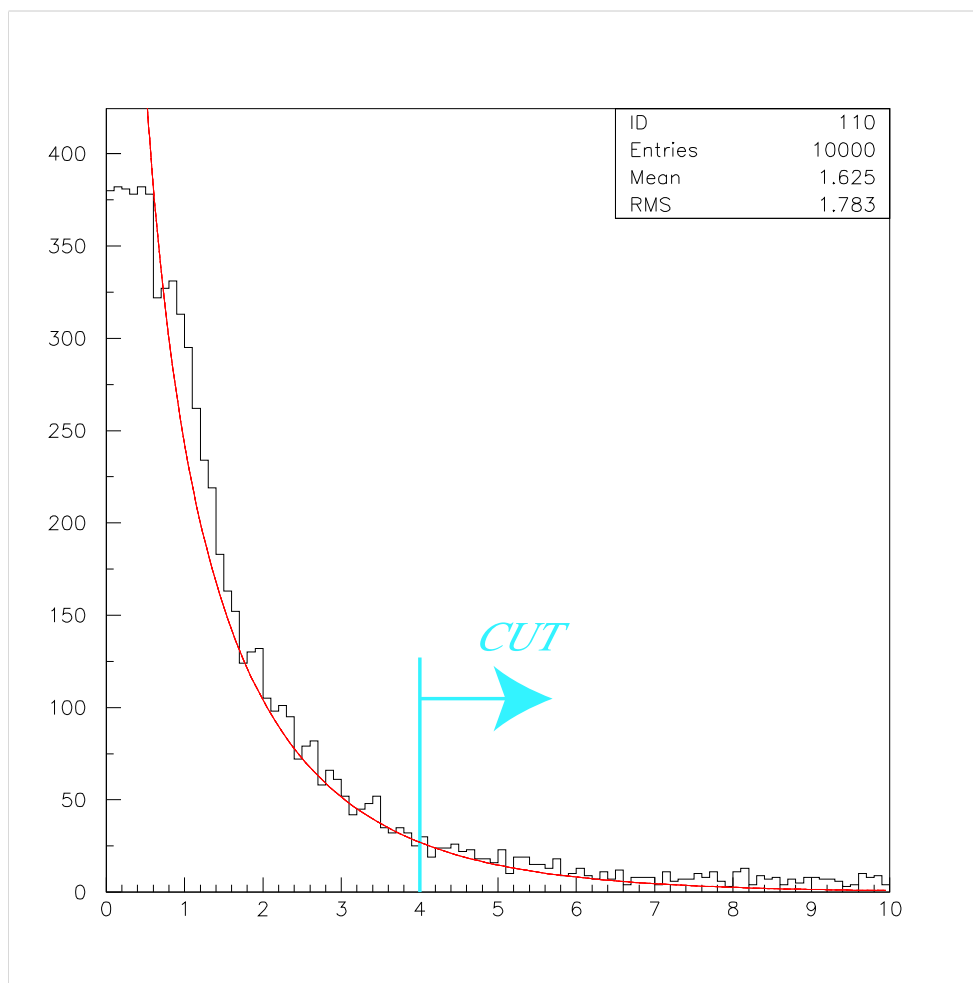


図 43: 誤差の距離の 2 乗利を空間分解能の 2 乗で割ったもの。赤い線は自由度 1 の  $\chi^2$  分布

において上下の Drift tube chamber で再構成された飛跡が 1mm の範囲で一致する宇宙線は全体の約 10% である。したがって全宇宙線の 2.25% の飛跡が再構成できることになる。cosmic ray test は 11 日間ある。scintillation counter による宇宙線ミュオン の Trigger rate は約 100Hz と予想されるので通過する宇宙線ミュオンの数は約 1 億個と見積もられる。一つの TGC には  $32 \times 32 = 1024$  個のウインドウがあるので各ウインドウを通過する宇宙線は約 10 万イベントである。ここに飛跡の再構成の確率である 2.25% をかけると各ウインドウには約 2250 のイベントが観測されることになる。これは要求を満たしている。今回はシングルトラックに限定したうえで、上下 XY 全ての 3 層中 3 層に信号があることを要求したが、本来は上下 XY 全ての 3 層中 2 層の信号で飛跡は再構成できる。さらに、マルチトラックのイベントの飛跡も再構成をすることで、飛跡の再構成が可能なイベント数の増加が予想される。これにより、検査期間の短縮も可能である。このような飛跡の再構成技術の改良は今後の課題である。

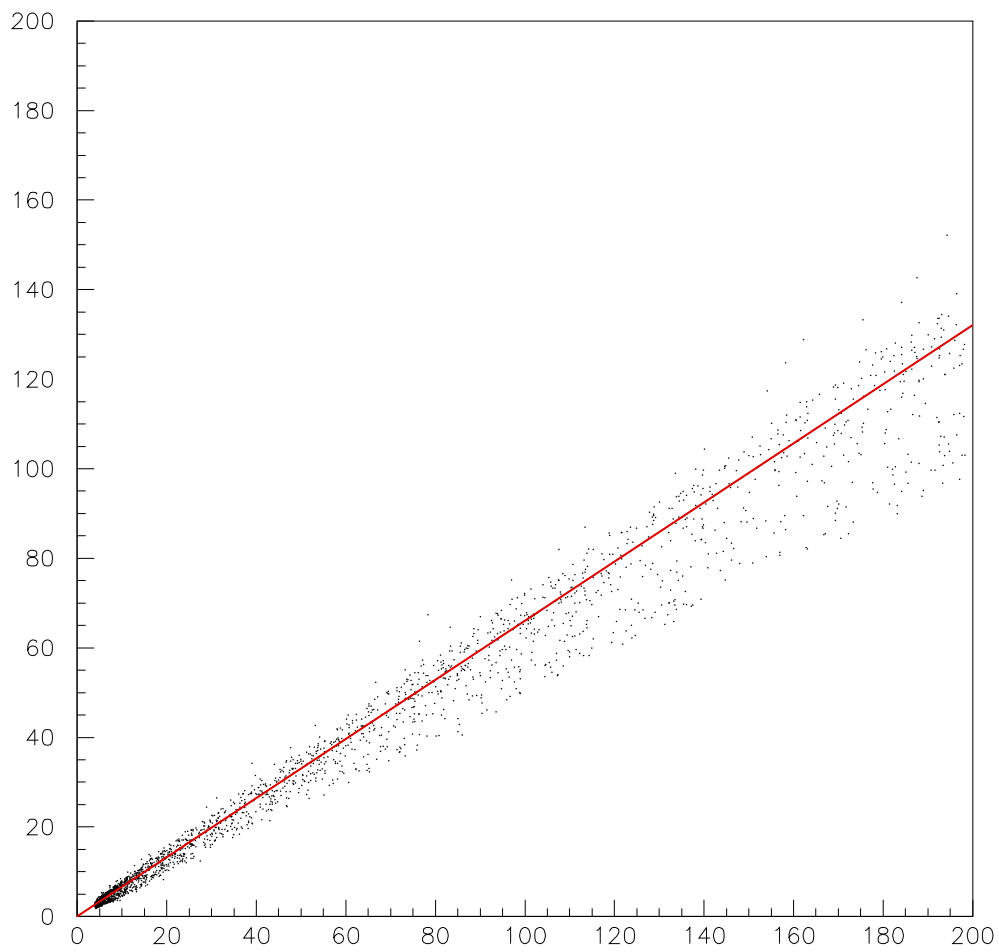


図 44: 3 層の誤差を合わせたものと、3 層のうち一番大きい誤差を空間分解能で割ったもののプロット。横軸が 3 層の誤差を合わせたもの。赤の直線は傾き  $\frac{2}{3}$  の直線

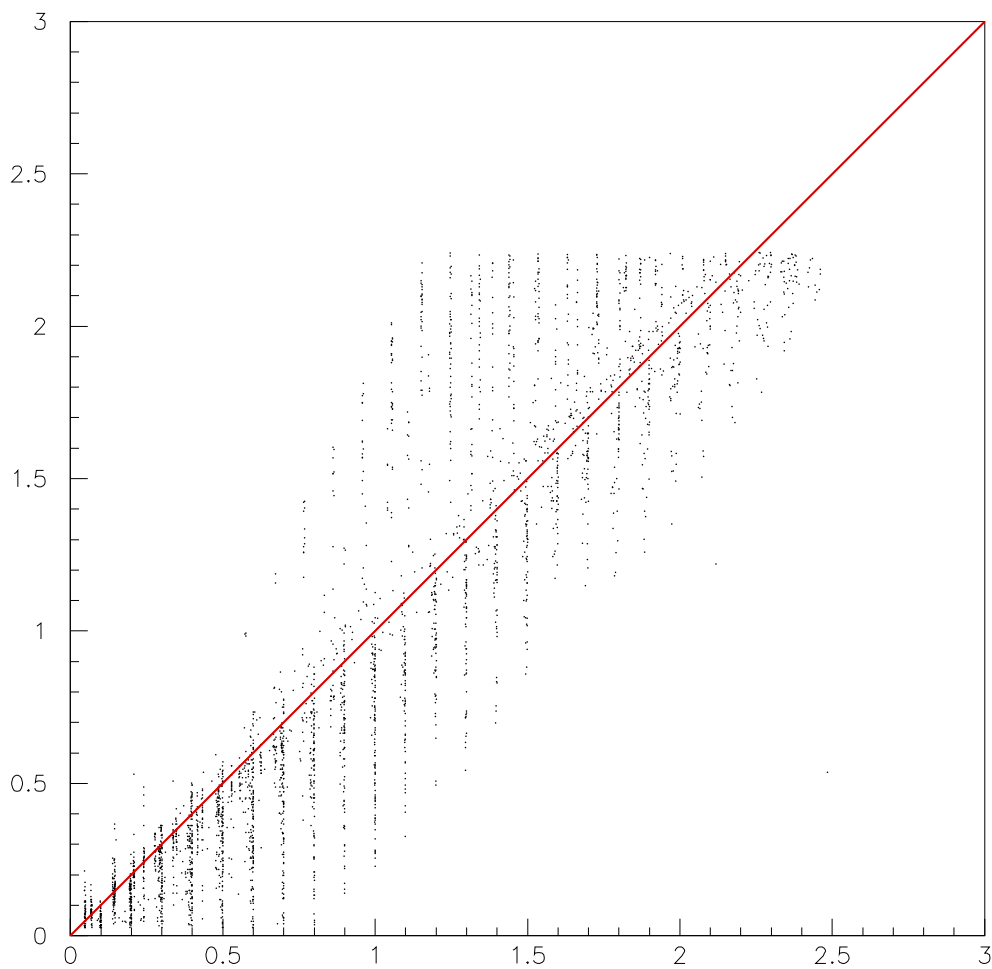


図 45: 3層のうち誤差の一番大きい層のトラッキングで求められた位置と x-t relation の差。横軸がトラッキングで求められた位置。単位は cm

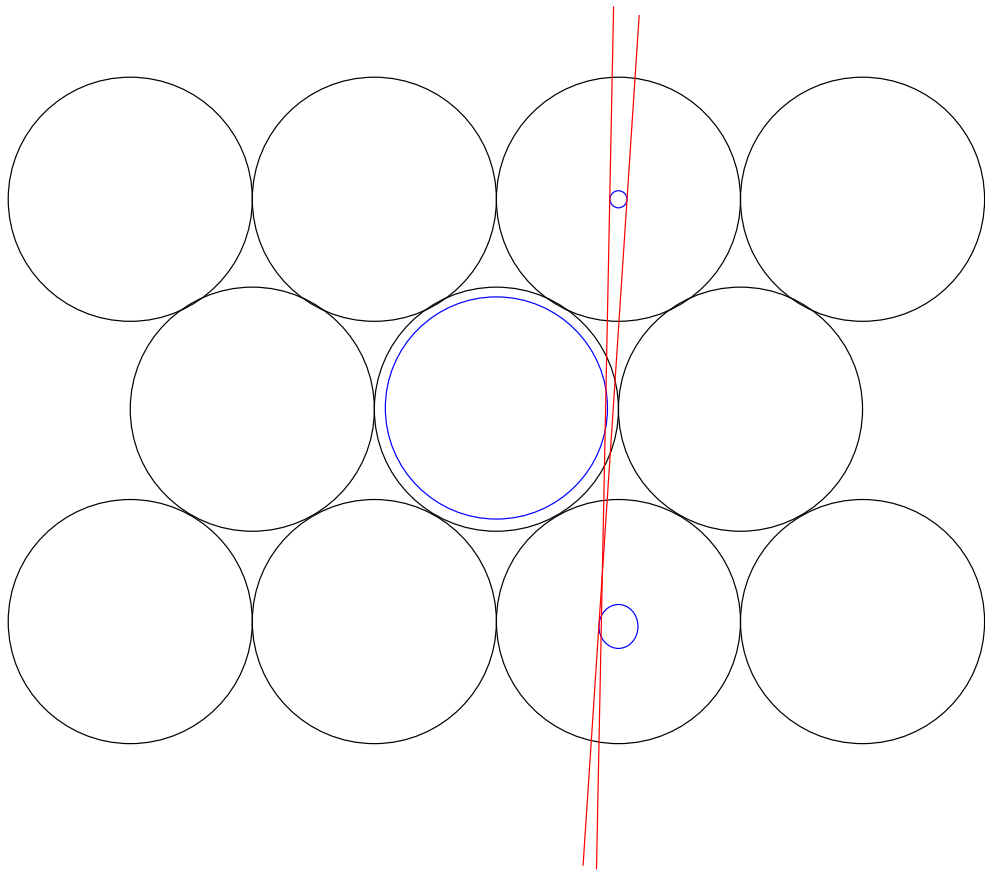


図 46: ミストラッキングの理由。トラックの差が小さい。



#### 4.5 TGC を使った飛跡検出システムの性能評価

Drift tube chamber の空間分解能の要求は 1mm 以下という要求であり、それを満たしていることが証明された。では実際にワイヤーサポート・ボタン型サポートを使って TGC を架台にセットアップしたときのズレを補正できる程度にワイヤーサポート・ボタン型サポートが見えるかどうかを測定した。セットアップは 4.2 と同じである。(図 34)

4.2 で求めた  $x-t$  relation を用いて X 方向、Y 方向の Drift tube chamber でそれぞれ tracking(図 47) をおこない TGC 上での宇宙線の通過位置  $(x,y)$  を求め、そのときその位置  $(x,y)$  が属するワイヤーグループとストリップから正しく信号が出ている event の  $(x,y)$  をプロットする。

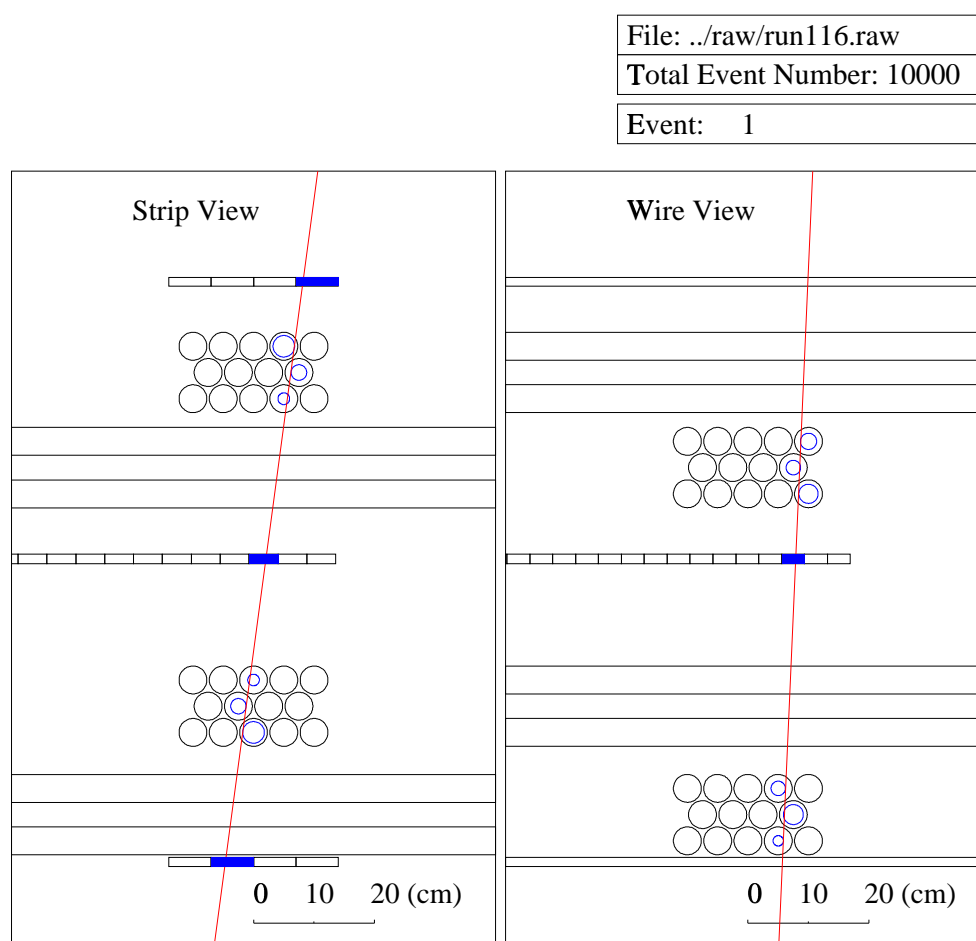


図 47: Event display. Drift tube chamber の tracking による宇宙線の飛跡が見える。

TGC のワイヤーサポート、ボタン型サポートの位置にはガスがないため TGC の不感領域となる。つまり Drift tube chamber の tracking が正しく行われているならば、上記の  $(x,y)$  のプロットでワイヤーサポート、ボタン型サポートが浮き上がって見えるはずである。

今回は図 48 に示されている範囲を見た。

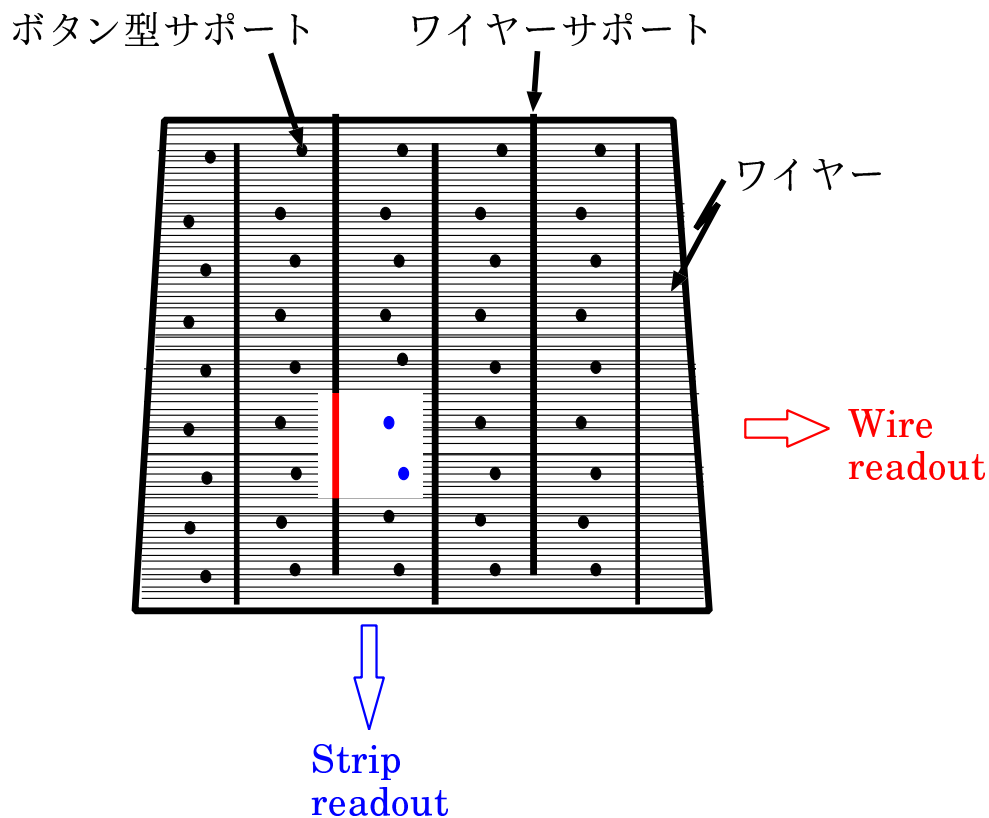


図 48: 今回見た範囲。20cm × 20cm である。

もし、正しく tracking 出きていれば上図のような形が見えるはずである。

結果は図 49 であった。

図を見ると確かに赤で囲んだ部分にワイヤーサポート、ボタン型サポートが見えている。20cm × 20cm の領域をカバーしているが端のほうでは event 数が少ないため、右下のボタン型サポートは、はっきりとは見えていない。

この図は全部で 30000 イベントであり、この領域には 20 個のウインドウがある。したがって、各ウインドウ 1500 イベントである。

以上のことより各ウインドウ 1500 イベントあればワイヤーサポート、ボタン型サポートが見えることがわかった。

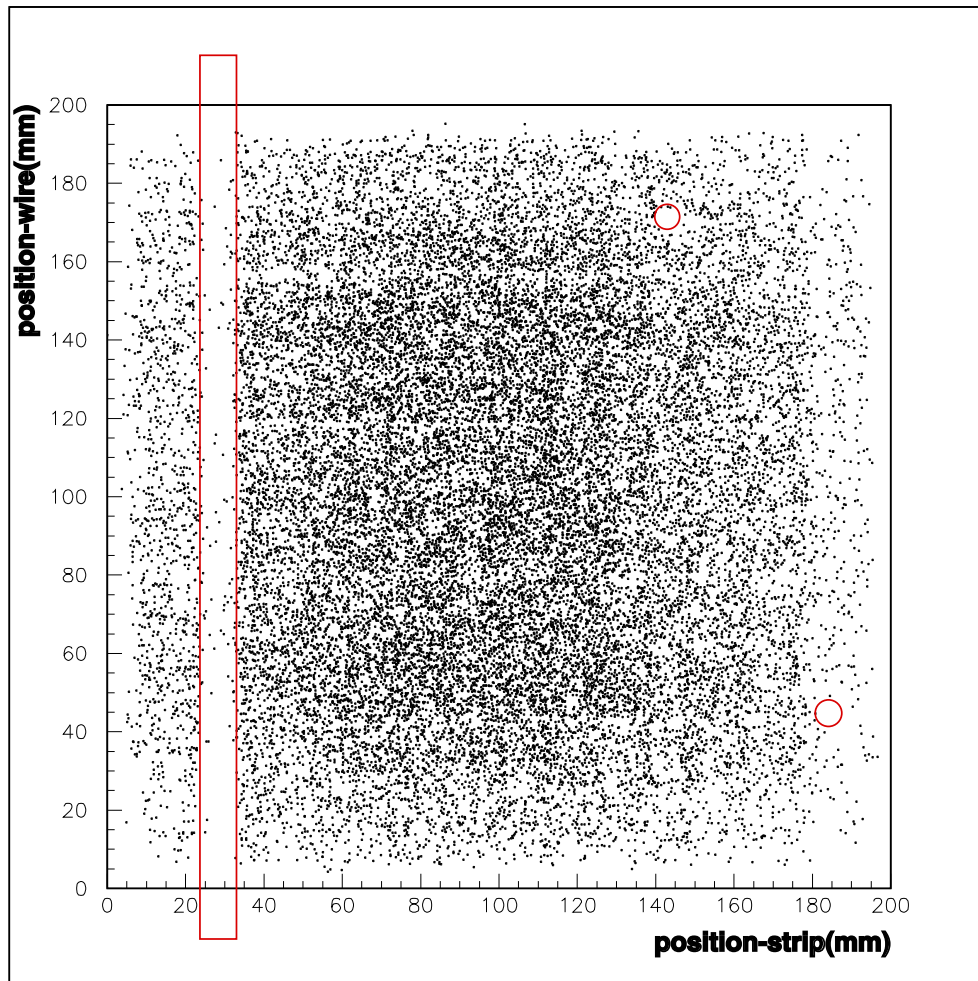


図 49: 粒子が TGC 上を通過した位置に対応するワイヤグループとストリップから信号が検出された場合をプロットしている。イベント数は 30000

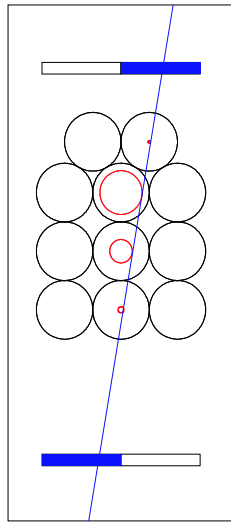


図 50: event display

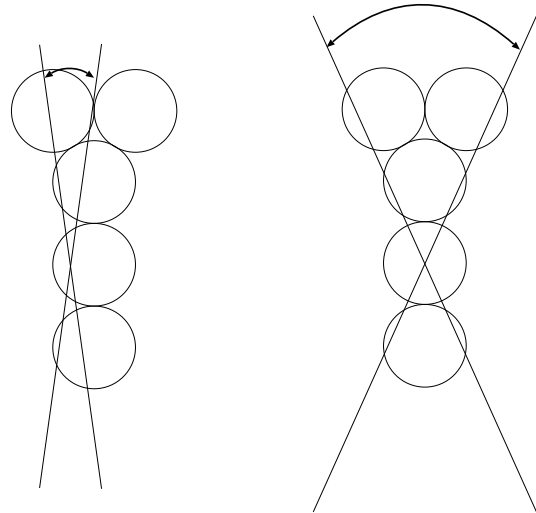


図 51: 中央列の 2 段目を選んだ場合。ワイヤーから遠い位置を通る宇宙線の数が少ない。

#### 4.6 Efficiency の position dependence

宇宙線の飛跡が再構成できるようになったのでこれを利用し Drift tube chamber の efficiency の position dependence を調べる。一般的にワイヤーから遠いところを宇宙線が通過すると Drift tube chamber の管内を通過する距離が短くなるのでガス分子と反応する機会が少なくなるため efficiency は低くなると思われる。

この測定の設定アップは efficiency の HV dependence とおなじである。(図 31、図 32)

図 50 は、このセットアップでの event display である。

この図では、全て層の Drift tube chamber を使用しているが efficiency の position dependence を測定する際は、1 つの Drift tube chamber に注目して、その Drift tube chamber が属していない残りの 3 層を使用して飛跡の再構成を行い、注目している Drift tube chamber の位置と efficiency の関係を調べる。今回注目する Drift tube chamber は中央列の 2 段目を選んだ。そして中央列 Drift tube chamber と 1 段目の Drift tube chamber の計 4 本で飛跡の確立を行った。4.1 でも述べたように efficiency の測定である以上は、中央列の 3 段目を使うのが妥当であるが、これに注目して解析を行うとワイヤーから遠い位置を通過する粒子の数が極端に少なくなる(図 51)。そこで中央列の 2 段目を選んだ。この Drift tube chamber の場合は今度はワイヤー付近を通過する宇宙線の数が減少するが、ワイヤー付近では efficiency は最高であると考えられることに加え、ワイヤーから距離が遠い位置を宇宙線を通過した時の efficiency のほうが重要であるため、こちらに注目する。図 52,53 は測定結果である。

理想的には position が 2.3cm のところまで efficiency が 1 で、それ以降は 0 になるのだが Drift tube chamber の空間分解能のため少しなまってみえている。しかし、position が 2cm のところまでの平均が 99%、2.3cm のところまでだと 95%であるため Drift tube chamber の空間分解能の影

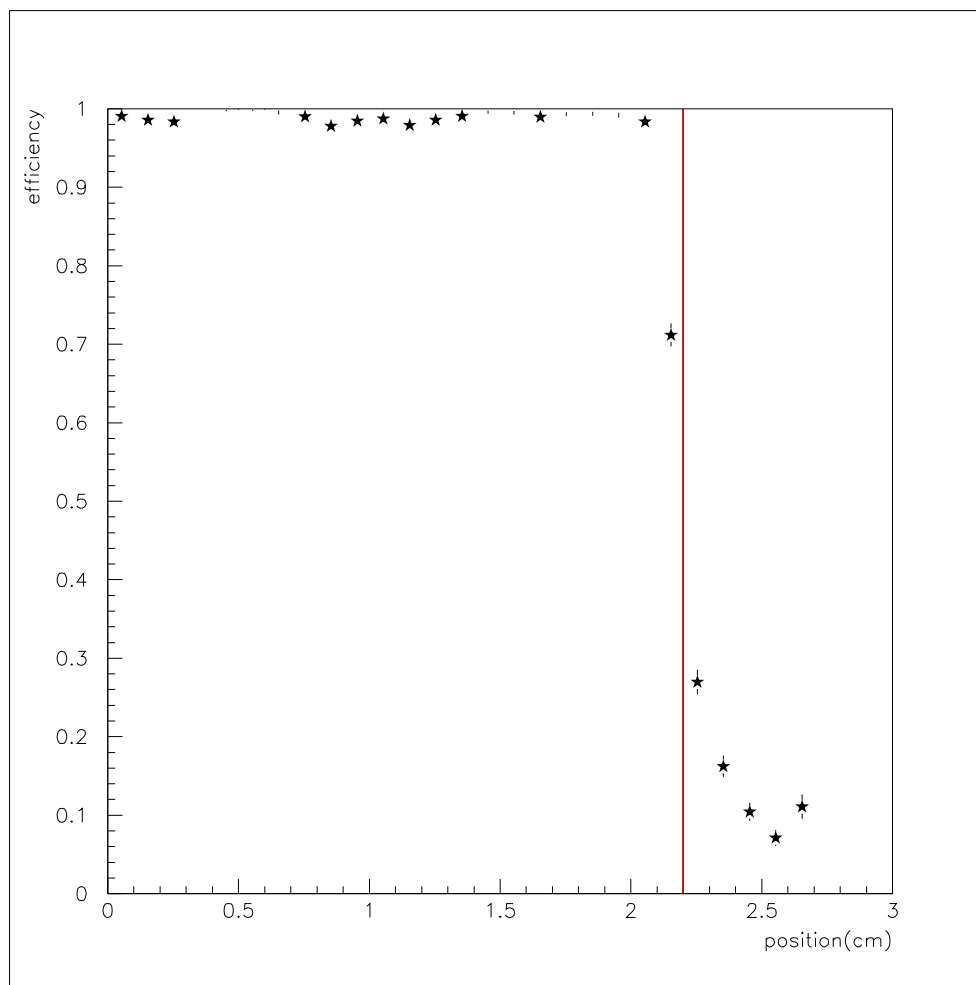


図 52: efficiency の position dependence. 赤い線は Drift tube chamber の内壁の位置 (2.3cm)。

響も含まれているが Drift tube chamber の端の方で検出効率が下がっていると思われる。さらに、図 53 には構造があるように見えるが、それは、図 54 のようなトラッキングのミスであると考えられる。そのため位置によっては検出効率が低下しているように見える。図 54 は位置が 0.8~1.2 の場合だが、構造が見えている他の部分についても同様のことが言える。したがって、本来の検出効率をもっと高くなる。しかし、現在のセットアップではこのミストラッキングを除くことは難しい。

残りの 1%は

- 散乱が起こり偶然その Drift tube chamber だけ信号がなかった
- マルチトラックのため偶然 inefficiency に見えた

のような理由が考えられる。

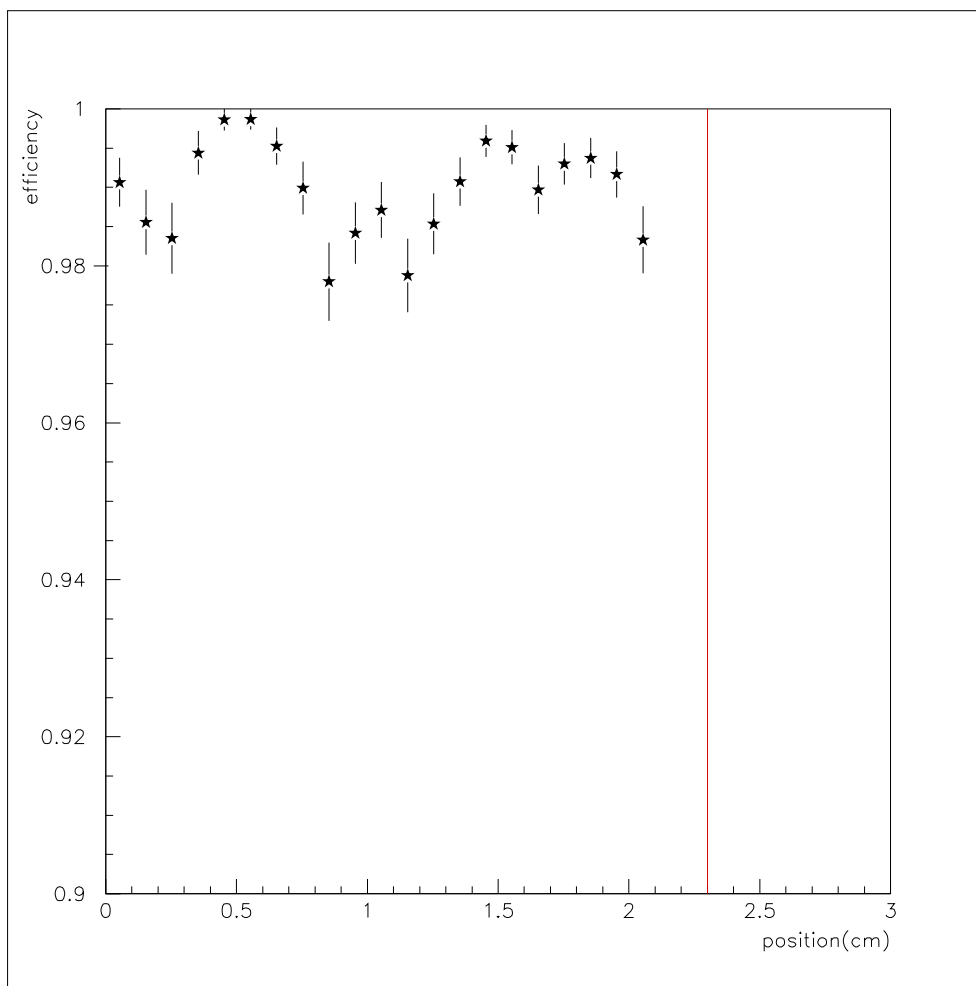


図 53: efficiency の position dependence. efficiency が 1 付近の拡大図。赤い線は Drift tube chamber の内壁の位置 (2.3cm)。

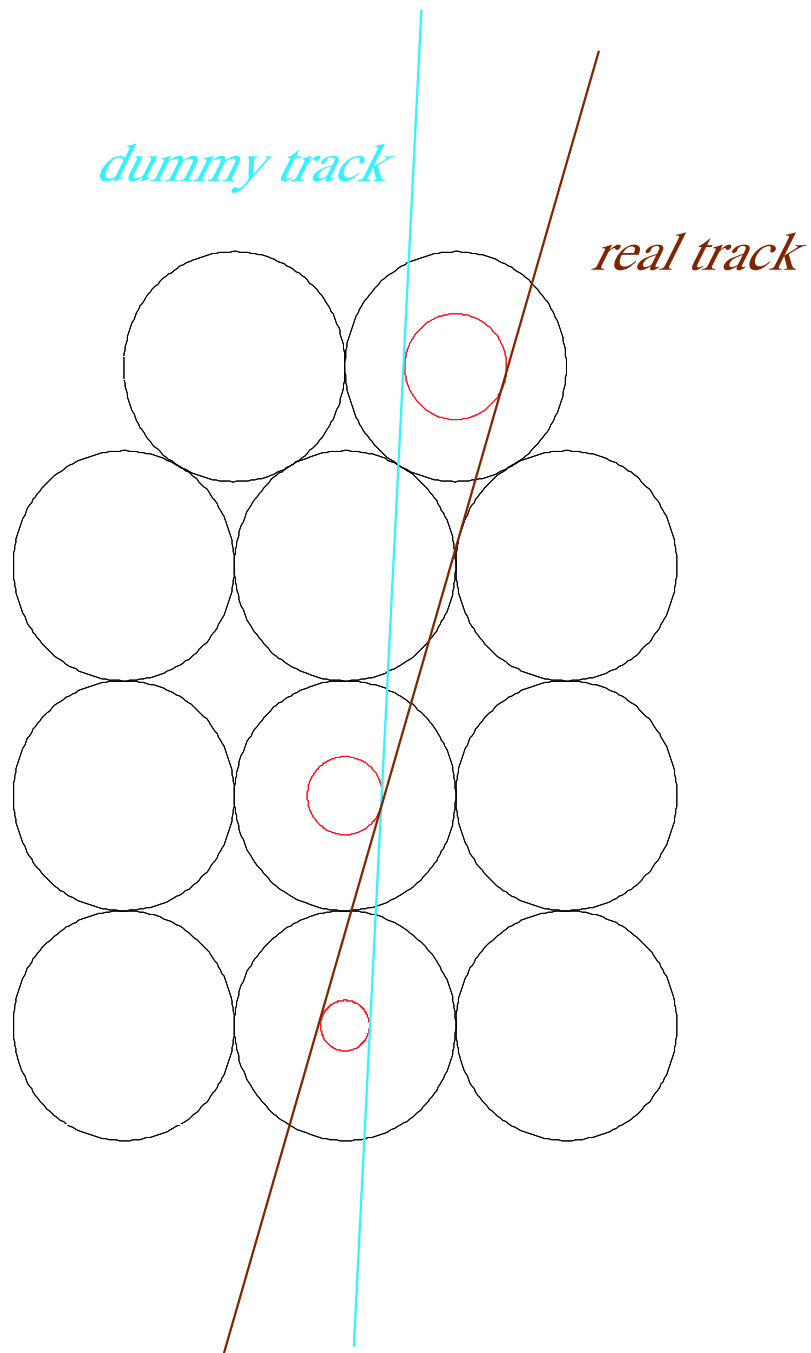


図 54: ミストラッキングの例。実際は信号の出ないアルミの部分を通過している。

## 5 結論と今後の予定

### 5.1 結果

2000年から KEK において量産される TGC は検査にかけられ初期不良のものを除いて CERN に送られる。その検査のためのシステムを構築し、その要となる Drift tube chamber による宇宙線の飛跡の再構成、及び、検査のために Drift tube chamber 要求される性能について評価した。

その結果、空間分解能 540mm と要求された性能を満たしていることがわかった。

飛跡検出システムは各ウインドウに必要なイベント数 2000 イベントを検査期間で検出できることがわかった。

TGC を用いた宇宙線の飛跡検出システムの性能評価においては、ワイヤーサポート・ボタン型サポートの不感領域を見ることで宇宙線の飛跡の確立が正しく行われていることがわかった。また、これを用いて TGC を架台にセットアップしたときのズレが補正できることがわかった。

Drift tube chamber には多少の位置依存性があることがわかった。

### 5.2 今後の予定

検査システムは今後も準備を進めていき KEK において量産が始まるまでに準備が整うと思われる。

検査期間の短縮のため飛跡の再構成技術の改良をおこなう。



## 参考文献

- [1] ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43(1994)
- [2] ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN/LHCC/97-22 (1997)
- [3] ATLAS Detector And Physics Performance Technical Design Report Volume2(1999)702
- [4] ATLAS homepage, <http://atlasinfo.cern.ch/Atlas/Welcome.html>
- [5] 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
- [6] 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 山内一夫「標準 Higgs 粒子の探索」ATLAS-Japan workshop NARUTO(1997)
- [7] Glenn F.Knoll 著 日刊工業新聞社 「放射線計測ハンドブック」
- [8] 西村 純 編 共立出版株式会社 「宇宙放射線」
- [9] F.Sauli, *DRIFT AND DIFFUSION OF ELECTRONS IN GASES: A COMPILATION*
- [10] R.I.Schoen, *Absorption, ionization and ion-fragmentation cross-section of hydrocarbon vapors under vacuum-ultraviolet radiation*, J.Chem.Phys. 17 2032(1962)
- [11] 神戸大学 鈴木修 修士学位論文 「ATLAS ミューオントリガー用大型 TGC 製作と検査システム」

## 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、神戸大学工学部本間康浩助教授、石井恒次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、佐々木修助手、田中秀治助手に感謝します。

研究を行なうに当たりいろいろとお世話していただいた福井秀人氏、山内一夫氏に感謝します。

研究室配属当初から御面倒を見ていただき適切な御指導をして下さった鈴木修氏に感謝します。

そして、研究生生活を共にし様々な支援をしてくれました一宮亮氏、西村将人氏、中村佳央氏、久保田達也氏、仲畝祐輔氏に感謝します。