

# 修士学位論文

## アトラス実験・ミュー粒子トリガー用 Thin Gap Chamber のガス特性の研究

神戸大学自然科学研究科物理学専攻

961S105N

石田哲男

Ver. 1.08

### 概要

欧州素粒子物理学研究所 (CERN) において、世界最大の重心系衝突エネルギーを持つ大型陽子・陽子衝突型加速器 LHC(Large Hadron Collider) が 2005 年の実験開始を目標に計画され、様々な研究が行なわれている。私は ATLAS Japan ミューオングループに所属し、この LHC に設置される ATLAS 測定器のミュー粒子トリガー検出器として Thin Gap Chamber(TGC) の研究開発を行なっている。LHC 実験では、既存の実験では経験したことのない高頻度のバックグラウンドが予想されている。ミュー粒子トリガー検出器にはそのような環境下でも優れた時間分解能特性や高い検出効率など厳しい要求がなされている。高放射線環境下ではワイヤーチェンバーの安定な動作には、水分の添加が不可欠であるといわれている。そこで、水分の影響に対する TGC の動作評価を行ない、その結果水分の量が 250 ppm~17000 ppm の間なら TGC の動作には何の影響も及ぼさないことがわかった。またデジタルオシロスコープを用いて信号波形を取り込むことによって、印加電圧に対する波形の変化を調べ、動作領域に対する研究を行なった。

# 目次

|          |                         |           |
|----------|-------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>序論</b>               | <b>2</b>  |
| 1.1      | LHC 計画                  | 2         |
| 1.2      | LHC の物理                 | 3         |
| 1.2.1    | 標準理論 Higgs 粒子           | 3         |
| 1.3      | ATLAS 測定器               | 6         |
| 1.4      | ATLAS 測定器におけるミュー粒子      | 8         |
| <b>2</b> | <b>Thin Gap Chamber</b> | <b>11</b> |
| 2.1      | 構造                      | 11        |
| 2.2      | 動作原理                    | 12        |
| 2.3      | 充填ガス                    | 13        |
| <b>3</b> | <b>実験装置</b>             | <b>16</b> |
| 3.1      | テスト用チェンバー               | 16        |
| 3.2      | データ収集及び解析               | 17        |
| 3.3      | ガスシステム                  | 19        |
| 3.3.1    | バブリング法                  | 19        |
| 3.3.2    | 液体質量流量コントローラーを用いたガスシステム | 21        |
| 3.3.3    | 空気・水分の混入                | 23        |
| <b>4</b> | <b>TGC のガス特性の測定</b>     | <b>27</b> |
| 4.1      | TGC の印加電圧と動作領域          | 27        |
| 4.1.1    | 印加電圧依存性                 | 27        |
| 4.1.2    | 線源が違う場合の印加電圧依存性         | 31        |
| 4.2      | ガス混合比依存性                | 38        |
| 4.3      | 水の影響                    | 38        |
| 4.3.1    | 水分の添加法                  | 41        |
| 4.3.2    | ガス増幅率、Time Jitter       | 41        |
| 4.3.3    | 高放射線環境下での影響             | 41        |
| <b>5</b> | <b>考察とまとめ</b>           | <b>48</b> |
| 5.1      | 印加電圧と動作領域についての考察とまとめ    | 48        |
| 5.2      | ガス特性についての考察とまとめ         | 48        |
| 5.2.1    | ガス混合比に対する考察とまとめ         | 48        |
| 5.2.2    | 水の影響についての考察とまとめ         | 48        |

# 1 序論

## 1.1 LHC 計画

現在、スイスの欧州素粒子物理学研究所 (CERN) で、次世代の大型加速器の計画として、大型陽子・陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) の建設が 2005 年の稼働を目指して計画されている。LHC は、現在稼働中の大型電子・陽電子衝突型加速器 LEP (Large Electron Positron collider) の全長約 27 km のトンネル内に建設され、重心系衝突エネルギー 14 TeV、ビーム・ルミノシティは低ルミノシティ運転時で  $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、高ルミノシティ運転時で  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  である [1]。また、ルミノシティを稼ぐためにビーム衝突間隔が 25 ns となっている。LHC 加速器の主要パラメータを表 1 に示す [5]。

現在稼働中の衝突型加速器のなかで最大の衝突エネルギーをもつものは、アメリカのシカゴにあるフェルミ国立加速器研究所 (Fermilab) にある Tevatron で、重心系衝突エネルギー 1.8 TeV (1999 年に 2.0 TeV にアップグレードの予定) の陽子・反陽子衝突型加速器である。また電子・陽電子衝突型加速器では CERN の LEP-II が最大でその重心系衝突エネルギーは 183 GeV (2000 年には  $\sim 200 \text{ GeV}$  になる予定 [7]) である。

表 1: LHC 加速器の主要パラメータ

|               |  |
|---------------|--|
| 主リング周長        | 26,658.87 m                            |
| 陽子ビームエネルギー    | 7.0 TeV                                |
| ルミノシティ        | $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ |
| 入射エネルギー       | 450 GeV                                |
| バンチ間隔         | 25 ns                                  |
| バンチ当りの陽子数     | $1 \times 10^{11}$                     |
| バンチ数          | 2,835                                  |
| ビーム/ルミノシティ寿命  | 22/10 時間                               |
| 二口径双極電磁石      | 1,232 台                                |
| 二口径四極電磁石      | 368 台                                  |
| 双極電磁石磁場       | 8.36 Tesla                             |
| バンチ長さ         | 75 mm                                  |
| 衝突点でのビーム半径    | 16 mm                                  |
| ビーム衝突角度       | 200 mrad                               |
| バンチ衝突当りの陽子衝突数 | 19                                     |

LEP-II のような電子・陽電子衝突型加速器では、基本粒子同志の衝突のため、生成粒子のエネルギー総和は重心系衝突エネルギーに等しくなるので、精密測定に適している。反面、電子の質量が軽い場合シンクロトロン放射によるエネルギー損失が大きくエネルギー

ギー増強には限界がある。LEP-II のエネルギーを越えるには、線形加速器の登場を待たねばならない。

LHC や Tevatron のような陽子・陽子 (反陽子) 衝突型加速器では、陽子の質量は電子の質量に比べ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 TeV 領域までエネルギーを上げることが可能である。ゆえに Higgs 粒子や超対称性粒子といった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っており、実際の反応に使われる構成要素のクォークやグルーオンのエネルギーを制御することは不可能であり、反応に使われない残りの粒子によるジェットが多数発生するため精密測定は難しい。

## 1.2 LHC の物理

LHC がめざす物理には Higgs 粒子の探索、超対称性粒子の探索、第 3 世代のクォークである t クォーク、b クォークの物理等がある。ここではその中でも最も重要な Higgs 粒子について述べる [1, 2, 5, 8]。

### 1.2.1 標準理論 Higgs 粒子

Higgs 粒子の生成で最大の断面積を持つ過程は衝突する陽子から放射された 2 つのグルーオンが t クォークのループを通し融合し、Higgs 粒子を作る過程 (図 1(a)) である。次に大きい過程は、衝突する陽子からのクォーク、反クォークがそれぞれ W 粒子を放射し、これらが融合して Higgs 粒子を作る場合 (図 1(b)) である。Higgs 粒子の質量が比較的軽い場合は、2 つのグルーオンが融合し t クォーク対と Higgs 粒子を作る過程 (図 1(c)) と、2 つのクォークが融合し W 粒子と Higgs 粒子 (図 1(d)) を作る過程が重要になってくる。

Higgs 粒子の探索では、Higgs 粒子の質量によって断面積、崩壊過程および崩壊幅が違うので、探索する崩壊モードも異なってくる。質量別にまとめると、

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

Higgs 粒子の崩壊過程は b クォーク対、c クォーク対、 $\tau$  レプトン対が主であるが、これらについては陽子・陽子素過程による大きなバックグラウンドがある。そこで注目する探索モードは光子対への崩壊過程 ( $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ) となる。しかし、このモードのバックグラウンドも少なくはなく、連続したバックグラウンドの上に狭い質量ピークを観測するために、高いエネルギー分解能が要求される。また、t クォーク対や W 粒子をともない Higgs 粒子を生成する過程 (図 1(c)、(d)) では、t クォークや W 粒子が Higgs 粒子観測の補助的な指標となるので、b クォーク対への崩壊も観測可能である。

- $120 < m_H < 2m_Z$

この質量領域での探索モードは  $H^0 \rightarrow Z^0 Z^{0*} \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$  ( $Z^{0*}$  は off-shell) である。バックグラウンドとしては  $q\bar{q} \rightarrow Z^0 Z^{0*} / Z^0 \gamma^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$  があるが、それほど多くない。

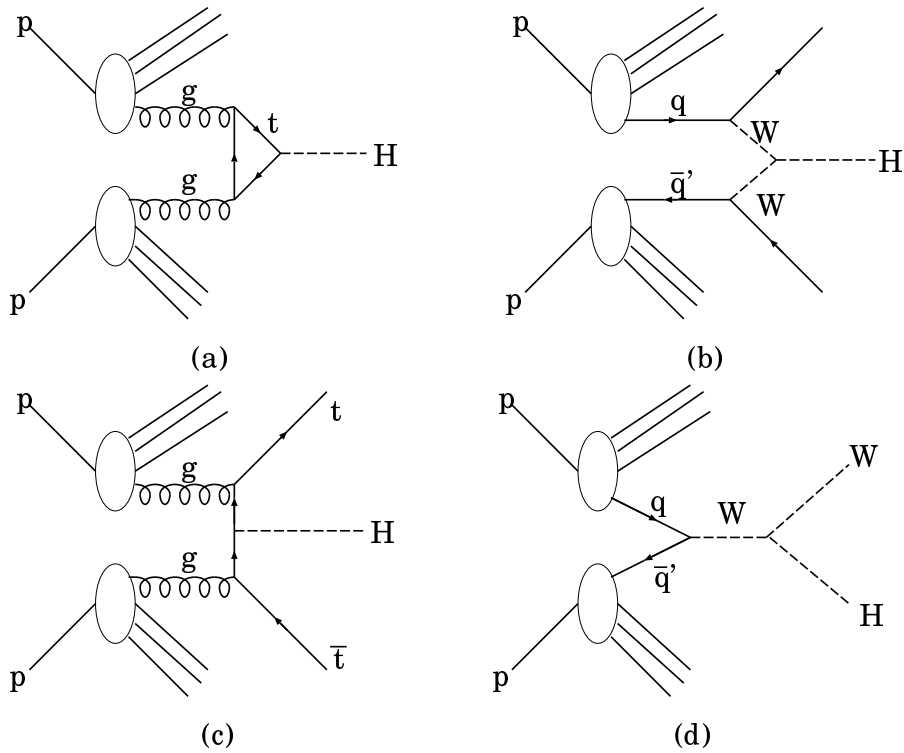


図 1: Higgs 粒子の生成。(a) グルーオン - グルーオン融合、(b) W-W 融合、(c)  $t\bar{t}$  クォーク随伴生成、(d) W 粒子随伴生成。

- $m_H > 2m_Z$

探索モードは  $H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$  である。2組のレプトン対の不変質量がともに Z 粒子に一致することを要求することで、Higgs 粒子は明確な不変質量ピークを示す。500 GeV 以上では  $H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- \nu \bar{\nu}$  の過程も探索に使える。2つの  $\nu$  があるので不変質量分布を測定できないが、先の過程に比べて6倍の頻度がある。 $l^+ l^-$  を含む事象の横エネルギー損失分布を測定すれば、Higgs 粒子は大きい領域にピークを作る。

- $m_H > 800 \text{ GeV}$

Higgs 粒子の質量が大きくなると、その崩壊幅は急激に広がるので、信号とバックグラウンドの区別が難しくなってくる。さらに、Higgs 粒子の生成断面積は、質量が大きくなるにつれて減少していく。したがって、この領域での Higgs 粒子探索には分岐比の高い崩壊過程を探索する必要がある。有力な過程は  $H^0 \rightarrow W^+ W^- \rightarrow l\nu jj$  や  $H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- jj$  である。これらの分岐比は  $H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$  に比べて前者は約150倍、後者は約20倍ある。ただしこれらのレプトンやジェットだけを指標にするだけではバックグラウンドと区別が付きにくい。そこで W 粒子が融合して Higgs 粒子が作られる過程 (図 1(b)) に注目する。この生成過程の特徴は、

散乱角前方にジェットができることである。この前方ジェットを要求することでバックグラウンドを落すことができる。

図2に ATLAS 測定器を低ルミノシティで3年、高ルミノシティで1年(約  $10^5 \text{ pb}^{-1}$ ) 動かした時の標準 Higgs 粒子の発見ポテンシャルを示す。

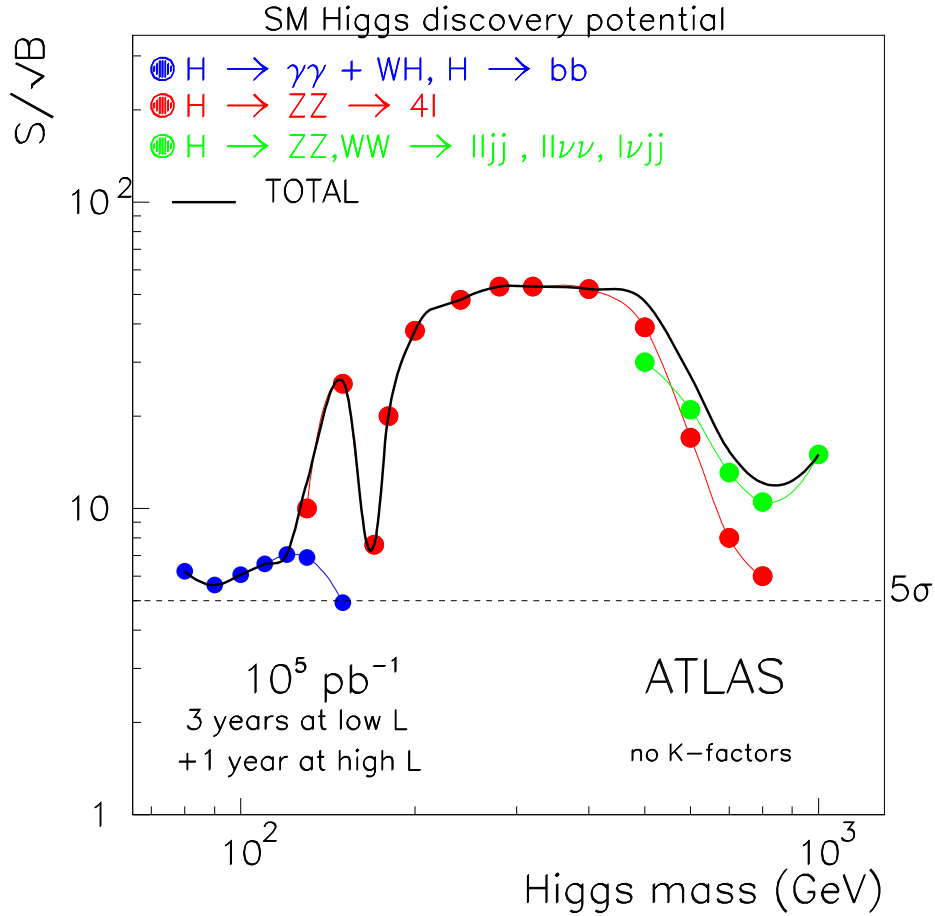


図 2: ATLAS 測定器を低ルミノシティで3年、高ルミノシティで1年動かした時の標準 Higgs 粒子発見ポテンシャル。 [4]

### 1.3 ATLAS 測定器

ATLAS 測定器 (図 3) は LHC の高ルミノシティ ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) においても、 $e$ 、 $\gamma$ 、 $\mu$ 、jet、 $\text{missing}E_T$ 、b-tagging など多くのシグナルをバランス良く取り出し、精度の良い測定を行なうことを目的とした汎用測定器である。その規模は、半径約 12 m、長さ約 44 m の円筒形で、全重量は約 7000 トンにも及ぶ。ATLAS 測定器は主に次のものから構成されている [1]。

#### 1. 内部飛跡検出器

この検出器の主な機能は、荷電粒子の飛跡認識、運動量測定、反応点測定および電子の識別である。内側にはピクセル検出器、シリコン・ストリップ検出器からなる半導体検出器が置かれ、外側には連続飛跡検出器としてストロー検出器が多層に積層されている。電子の識別を行なうため、それぞれのストロー検出器の間には遷移放射を引き起こす物質が挿入されている。これらの飛跡検出器は中心磁場 2 テスラの超伝導ソレノイドの内部に置かれる。運動量分解能は横運動量が 500 GeV の粒子に対して 30% である。

#### 2. カロリーメータ

カロリーメータの役割は、電子や  $\gamma$  線のエネルギーと位置測定、ジェットのエネルギー測定などである。従来の測定器のカロリーメータに比べて非常に高い粒子頻度と放射線量の環境で稼働しなければならない。内側に電磁カロリーメータ、外側にハドロン・カロリーメータがある。電磁カロリーメータは耐放射性に優れ、安定性の良い液体アルゴン・カロリーメータである。ハドロン・カロリーメータは領域によって 2 種のタイプに分かれる。バレル部 ( $|\eta| < 1.6$ ) は鉄の吸収体とタイル状シンチレータおよび波長変換ファイバーからなる。エンドキャップ部 ( $1.5 < |\eta| < 3.2$ ) の領域は放射線量が高いため、銅の吸収体と液体アルゴンを組み合わせたカロリーメータとなっている。

#### 3. ミュー粒子検出器

この検出器の目的は、内部飛跡検出器とは独立にミュー粒子の運動量測定を精度良く行なうことである。そのため、超伝導空芯トロイド磁石が採用されている。このトロイド磁石は、粒子の多重散乱を最小に抑え、ミュー粒子の測定可能な  $\eta$  領域を広く取ることができる。バレル部のトロイド磁石は 8 個の超伝導コイルから成り外径 20 m 長さ 26 m の巨大な構造物である。エンドキャップ部も前後方それぞれ 8 組の超伝導コイルから成っている。これらのトロイド磁石は、偏向力がバレル部で 2.5 ~ 4 Tm、エンドキャップ部では 7 Tm になる。運動量の精密測定を行なう検出器は MDT (Monitored Drift Chamber) と CSC (Cathode Strip Chamber) からなる。また、ミュー粒子を用いた散乱事象の取捨選択はトリガーの基本的な技術であり、実験の要である。そのためトリガー専用のミュー粒子検出器が置かれる。バレル部 ( $|\eta| < 1.05$ ) には RPC (Resistive Plate Chamber)、放射線量の高いエンドキャップ部 ( $1.05 <$

---

<sup>1</sup> $\eta$  はラピディティと呼ばれ、定義は  $\eta = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E+P_L}{E-P_L} \right) \simeq -\ln \left( \tan \frac{\theta}{2} \right)$  である。

$|\eta| < 2.4$  には本論文で述べる TGC (Thin Gap Chamber) が置かれる。図 4 にミュー粒子検出器システムの配置のわかる ATLAS 測定器の R-Z 断面図を示す。

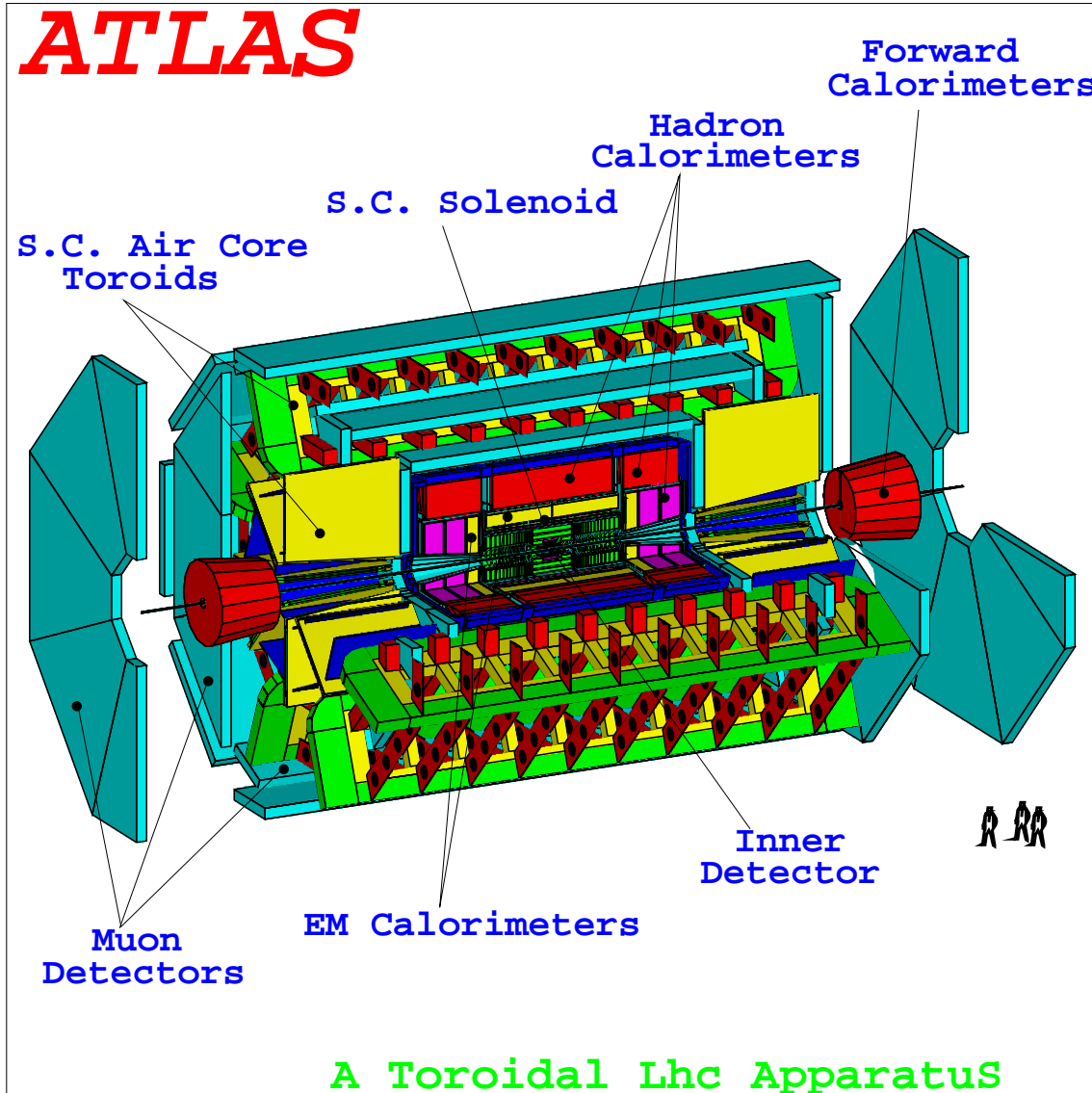


図 3: ATLAS 測定器。 [4]





コインシデンスの条件としては4層のうち少なくとも3層がヒットすることが要求され、この条件が独立にZ、 $\phi$ またはR、 $\phi$ の両方向で満たされる必要がある。

$high-p_t (>20 \text{ GeV})$  のトリガーを出す条件としては、 $low-p_t$  のトリガー条件に更に、エンドキャップ部ではTGC 1の3層のうち少なくとも2層が、バレル部ではRPC 3の2層うち少なくとも1層がヒットすることが満たされなくてはならない。この場合の window の幅は、 $p_t \approx 20 \text{ GeV}$  のミュー粒子が90%の効率で捕らえることの出来る幅である。

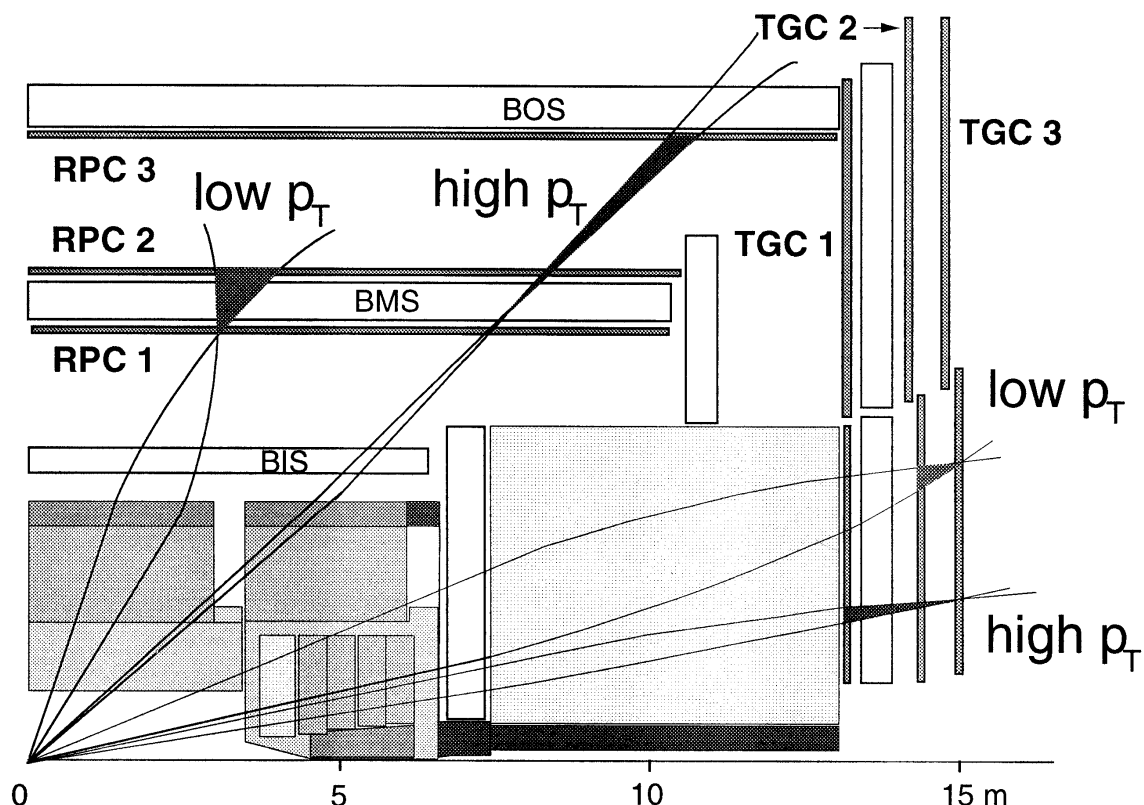


図 5: ミュー粒子トリガーの仕組み。  $low-p_t$  に対するトリガーは2つの2層のトリガーチェンバーのコインシデンスがとられる。  $high-p_t$  に対しては、さらにバレル部では2層、エンドキャップ部では3層のコインシデンスがとられる。影の入った所はカロリメータとアブソーバーである。正負それぞれのミュー粒子に対する飛跡を示している。 [2]

TGC の置かれるエンドキャップ部には、陽子・陽子素過程によるジェットやビームとビームパイプ等との相互作用等によって生じるハドロン衝突型加速器特有の高頻度の粒子入射が予想されている。モンテカルロシミュレーションにより見積もられたミュー粒子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 に示すが、シールドの欠損などによってレートが1桁ほども上昇することも考えられる [9]。

以上のことなどにより、ミュー粒子トリガー検出器には以下のような要請がある。

- 1 kHz/cm<sup>2</sup> 程度の高入射粒子頻度において 10 年程度十分安定に動作すること。
- バンチ識別を行なうため、バンチ間隔である 25 ns よりも小さい Time Jitter。
- 98 % 以上の検出効率。
- $p_t$ (横方向運動量) をトリガー条件に組み込むための、1 cm 程度の位置分解能。

TGC は 1996 年に高エネルギー加速器研究機構 (以下 KEK) の東カウンターホール・ $\pi^2$  エリアで行なわれたビームテスト、K4 エリアで行なわれたエイジングテスト等で以上の要請を満たしていることが確認された [10, 11, 12, 13]。

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

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

## 2 Thin Gap Chamber

### 2.1 構造

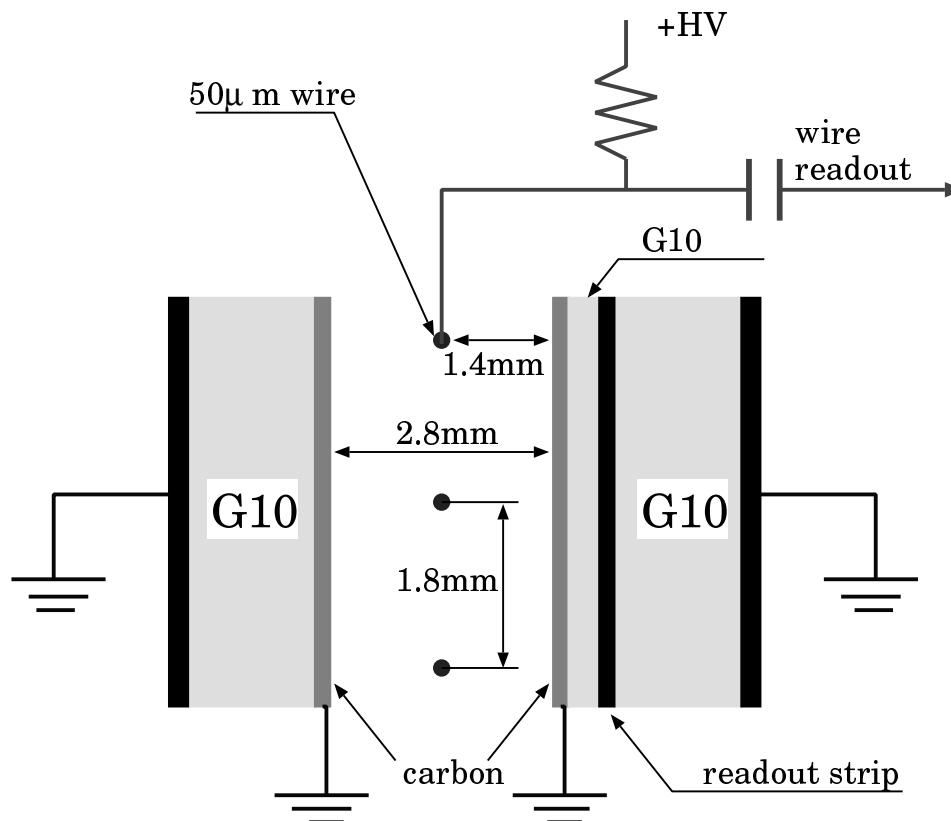


図 6: 基本的な TGC の構造

TGC の構造は図 6にあるように基本的には多線形比例計数箱 (Multi Wire Proportional Chamber:MWPC) と同じである。TGC の特徴はアノードワイヤー間隔 (1.8 mm~2.0 mm) に対して、アノードワイヤーとカソード面との間隔 (1.35 mm~1.6 mm) が通常の MWPC に比べて非常に狭いことである。また、アノードワイヤーも通常よりも太い直径  $50\mu\text{m}$  の金メッキしたタングステンワイヤーを使い、張力 350 g 重で張られている。カソード面には  $\sim 1\text{M}\Omega/\square$  の高抵抗のカーボンが塗布されている。カソード面の外側には銅のストリップがワイヤーと直行して並べられており、第 2 座標の測定が出来るようになっている。G10<sup>2</sup>の板を挟んで外側には静電シールドとして銅メッキがされている。

<sup>2</sup>成分:60% ガラス ( $\text{SiO}_2$ )+40% エポキシ樹脂

## 2.2 動作原理

TGCを荷電粒子が通過するとその飛跡に沿ってTGC内の数十個のガス分子がイオン化する。この過程を1次電離という。TGCのアノードワイヤーには高電圧が印加されており1次電離により生じた電子とイオンは図7に示すような電場に平行なドリフトラインにそって、それぞれアノード、カソードに向かってドリフトしていく。これらがドリフトしていく間にガス分子と多数の衝突を行なう。イオンはその移動度が小さく、衝突間にほとんどエネルギーを得ることが出来ない。それとは逆に、電子は電場によって容易に加速され、大きな運動エネルギーを持ちうる。電子がワイヤー近傍の $10^4 \sim 10^5$  V/cmを越える強い電場の中に入ると、電子が衝突の間に得るエネルギーがガス分子の電離エネルギーより大きくなり、さらにイオン対が生成され2次電離が起こる。この2次電離過程で作られた電子も電場によって加速され、ガス分子と衝突してさらに電離を起こす。このような反応が連鎖的に続き、タウンゼントなだれという形に発展する [14, 15, 16]。このなだれ生成の推移を図8に示す。

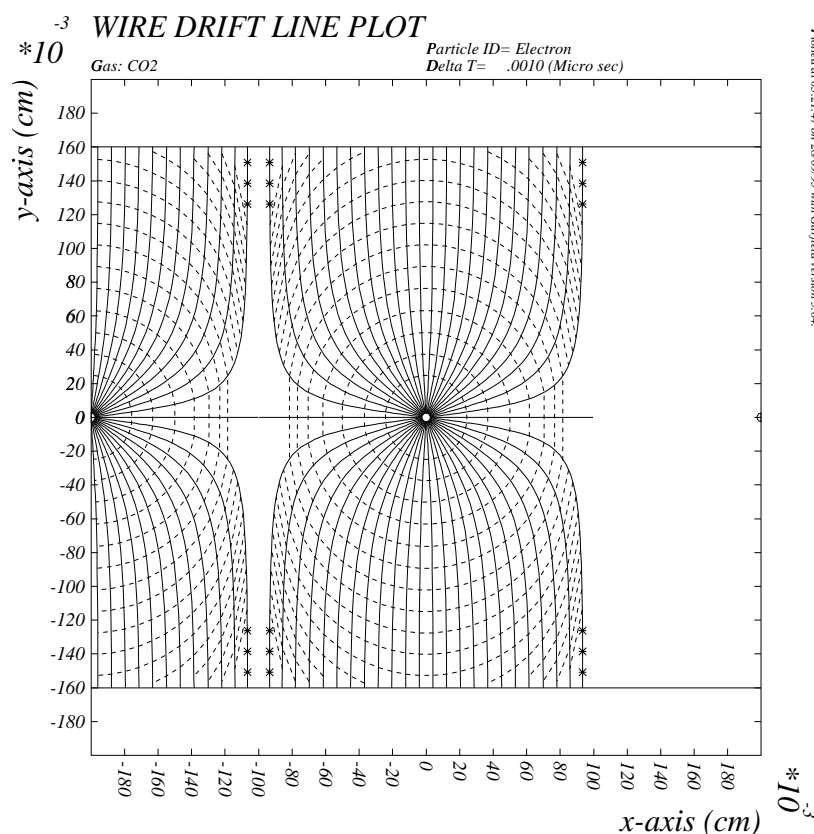


図7: 電子のドリフトライン。実線がドリフトライン。破線は等ドリフト時間を1ns間隔で表示している。

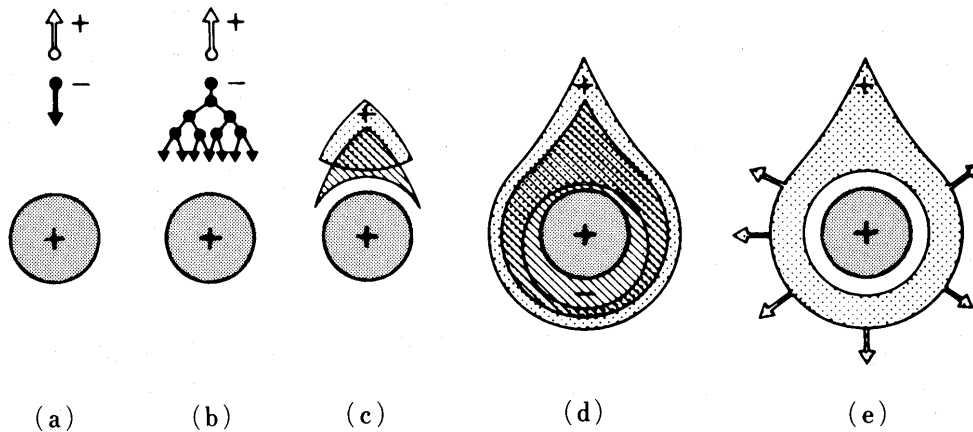


図 8: アノードワイヤー付近でのタウンゼントなだれの推移。(a) 1次電離電子が陽極に向かって移動する。(b) 電場により電子は運動エネルギーを得てさらにガス分子を電離する。ガス増幅が始まる。(c) 電子とイオン雲がお互いに離れる。(d)と(e) 電子雲はアノードワイヤーに向かってドリフトしそれを取り囲む。イオン雲はアノードワイヤーの半径方向に離れていく。[14]

ガス検出器の印加電圧に対する動作領域の違いを図9に示す。極めて低い電圧においては電場は1次電離でできたイオン対の再結合を防止するには不十分であり、収集電荷は最初のイオン対の電荷よりも小さくなる。電圧を上げるに従って再結合は抑制され、電離飽和領域に到達する。この領域は電離箱の動作領域である。さらに電圧を上げるとガス増幅が始まり、比例領域に達する。この領域では収集電荷は1次電離によって作られたイオン対の数に比例する。

さらに印加電圧を増すと非線形効果が起こり始める。この効果は2次電離過程で作られる陽イオンが関係する。電子は素早く吸収されるが、陽イオンの移動速度はずっと小さく、電子が収集する時間内には、ほとんど動かない。この陽イオンの濃度が十分高くなると空間電荷を形成して検出器内の電場を弱める。これ以上のガス増幅はこの空間電荷の大きさに左右されるので非直線性が観測され始める。この効果は制限比例領域の始まりを示し、この領域では収集電荷は1次電離のイオン対の数とともに増加するが、その直線性は、失われる。TGCはこの動作領域で動作していると考えられている。

十分印加電圧が高くなると、陽イオンによって作られた空間電荷が完全に支配的になり、もはや入射粒子の性質を全然反映しなくなり、出力パルスは各々同じ波高を示す。この領域はガイガーミュラー領域と呼ばれる[15]。

### 2.3 充填ガス

比例領域や制限比例領域で動作させるガスチェンバーに使用する充填ガスを選ぶポイントはいくつかある。

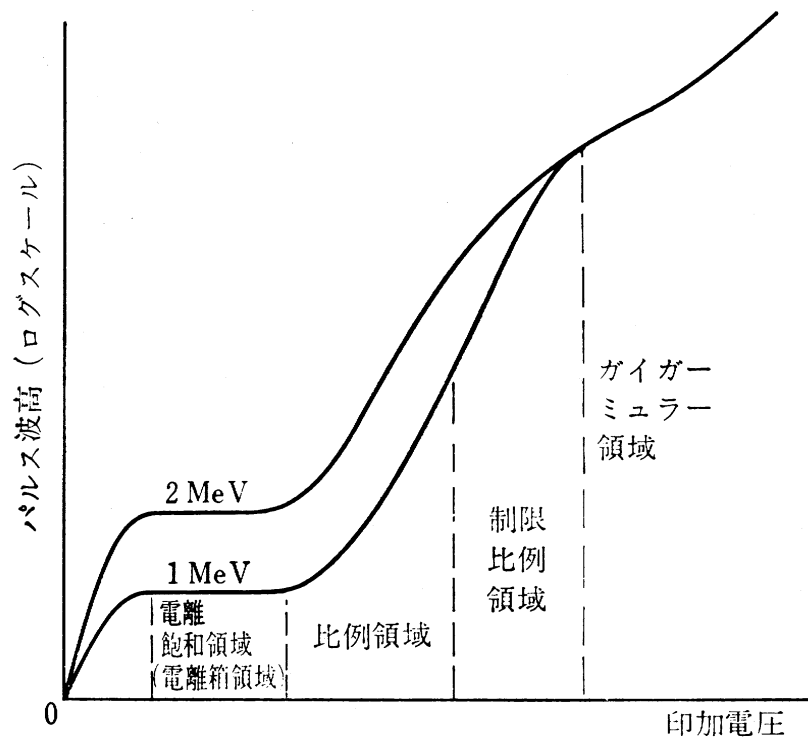


図 9: ガスチェンバーの動作領域。ガス中に 2 種のエネルギー量を与えた事象に対するパルス波高の観測値を図示した。 [15]

まず、高い検出効率を保つためには、電気陰性度の小さいガスを選ばなくてはならない。電気陰性度が大きいガス中では 1 次電離によって生成された電子がアノードへドリフトしていく間にガス分子に捕獲される電子捕獲が起こりガス増幅が起こらず信号が検出されないことがある。酸素や水の電気陰性度は大きいので空気の混入には気をつけなくてはならない。また TGC のようにすぐれた時間分解能が要求されるときには電子のドリフト速度の大きいガスを選ぶ必要がある。

ガス増幅の過程において電子とガス分子との衝突の際にはイオン化の他に単にガス分子を励起するだけで、2 次電子を作らないこともある。この励起分子は紫外線を放出して、基底状態に戻る。この紫外線は他のガス分子をイオン化させることもあるので、ガス増幅過程において重要な役割を果たしている。しかし、この紫外線がタウンゼントなだれの外にまで到達すると、そこで新たな電離を追加してつくり、あるいは検出器の壁と光電相互作用して電子をつくり、新たななだれを形成する。それが連続的に起こり始めると放電にいたってしまう。このような紫外線の効果を抑えるため、通常主要ガスにクエンチガスと呼ばれる紫外線吸収断面積の大きなガスが混合される。図 10 にクエンチガスによく使われる多原子分子の紫外線の吸収断面積を示す。

TGC には  $\text{CF}_4+i\text{-butane}(80:20)$  と  $\text{CO}_2+n\text{-pentane}(50:50)$  が候補として上がっていた。

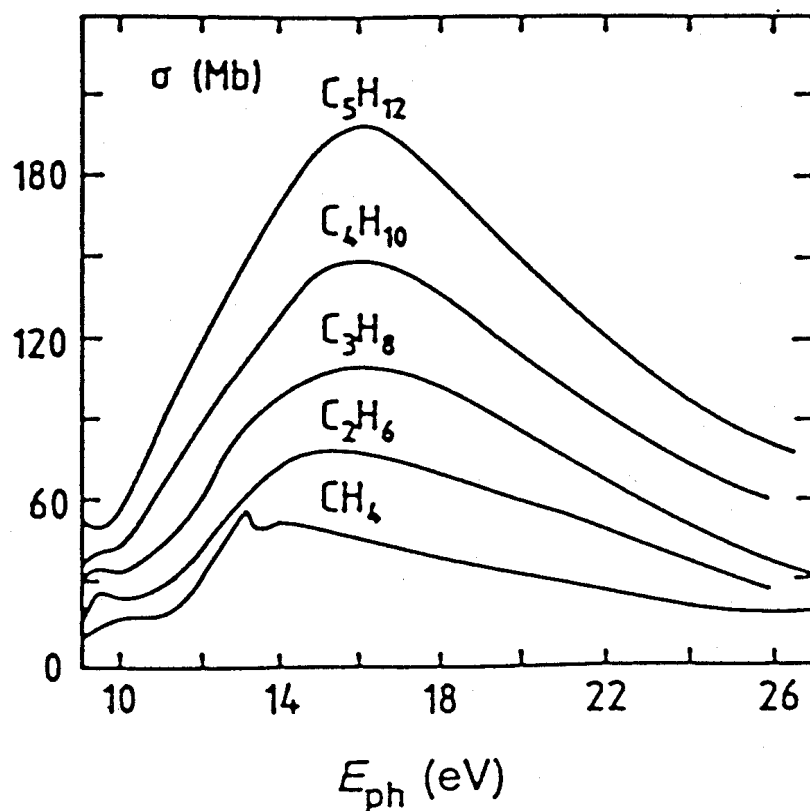


図 10: 紫外線の吸収断面積。 [17]

$CF_4$  のほうが  $CO_2$  より電子のドリフト速度が大きく時間分解能は優れているが、 $CF_4$  は電気陰性度が高く検出効率、シグナルの S/N 比においては  $CO_2+n$ -pentane のほうが優れていることがわかった [10, 18]。よって、現在では  $CO_2+n$ -pentane(50:50) が使われることになっている。

また、高放射線下においては、ガスに含まれる微量成分がチェンバーの寿命に影響を及ぼしていることがわかってきている。チェンバーの内壁、チェンバー製作時の接着剤、ガス供給系(原料ガスのボンベ、ガス配管、パッキン、排気バブラー等々)からの放出ガスなどの微量に含まれる不純物の中に、なんらかの影響を及ぼしているものがある [19, 20]。逆に有用な微量成分には水分や酸素がある。水分が不足すると、放射線照射後しばらくしてから突然電流が増え、電流をコントロールできなくなり、照射を止めても電流が流れ続ける、いわゆるマルター放電が起こる [11, 21]。また、酸素は大量に混入すると有害であるが、1 ppm 以下にまで少なくしてしまうとワイヤーの劣化が起こりガス増幅の低下がみられる。少なくとも 6~7 ppm 程度の酸素が必要なことがわかっている [22]。



### 3 実験装置

#### 3.1 テスト用チェンバー

テスト用チェンバーとしてワイヤーの長さ 8 cm、ワイヤーの本数 16 本の小型のもので、ワイヤー間隔 2.0 mm, アノード・カソード間隔 1.6 mm(以下 2.0 mm × 1.6 mm と略す。)のものとしてワイヤー間隔 1.8 mm, アノード・カソード間隔 1.35 mm(以下 1.8 mm × 1.35 mm と略す。)のものを使用した。図 11 に模式図を示す。読み出しは 16 チャンネル独立に読み出せる物と、端から 2 本、4 本、4 本、2 本ずつをまとめたものを使用した。チャンネルナンバーとして図 11 の下から、1 本ごと独立に読み出せるものは 1~16 ch まとめ読み出しのものは 1~5 ch とする。

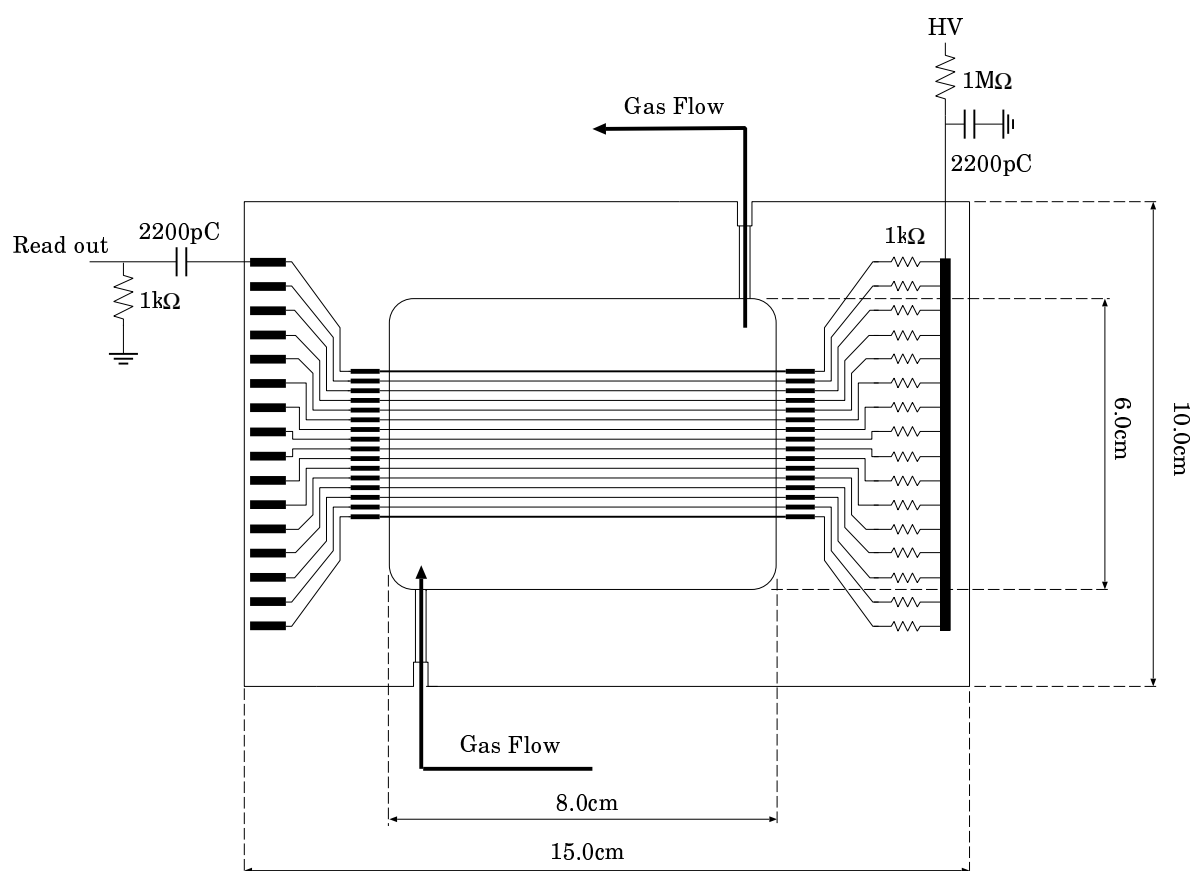


図 11: テスト用チェンバー。

## 3.2 データ収集及び解析

データ収集は 2 Gsampling/sec できるデジタル・オシロスコープ<sup>3</sup>を GPIB を用いてパーソナル・コンピュータで操作して行なった。デジタル・オシロスコープの 4 チャンネルの入力には、TGC の中央の 3 チャンネル (16 本独立読み出しのときは 7、8、9 ch。まとめているものは 2、3、4 ch。) とトリガー信号とを入力した。

デジタル・オシロスコープからは図 12 のような波形のデータが得られる。この波形データから電荷、波高、それらの最頻値、信号到達時間、Time Jitter を次のようにして定義した。

### 電荷 (Charge)

波形を積分してデジタル・オシロスコープのインピーダンスである 50 Ω で割りその符号を変えたもの。

### 波高 (Pulse Height)

図 12 で示しているように電圧の最大値。

### 信号到達時間 (Arrival Time)

図 12 のようにあるしきい値 (印加電圧によって違う。) を越えた時の時間。

### 電荷・波高の最頻値

上で定義した電荷、波高の分布 (図 13) を以下の関数でフィットしたときのピークの値 ( $P2$ ) をそれらの最頻値と定義する。

$$f(x) = P1 \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(x) - \ln(P2)}{P3} \right)^2 \right] \quad (1)$$

### Time Jitter

信号到達時間分布にエントリーされている内の 95% が含まれる最小のゲート幅。

デジタル・オシロスコープに入力した 3 チャンネルの内、真中のチャンネルのみを解析に使用した。その際そのチャンネルのワイヤー近傍に粒子が入射したということを保証するために、3 チャンネルの内、真中のチャンネルの電荷、波高が最大で信号到達時間の最も早い事象のみを選択した。さらに、線源として  $^{55}\text{Fe}$  の  $\gamma$  線を使用したときは、後に述べるように 1 次電離電子の空間的な広がりが小さいので、両端のチャンネルに出力される電荷・波高は真中のチャンネルのもの半以下であるという条件を付けた。

---

<sup>3</sup>ソニー・テクトロニクス TDS 644A

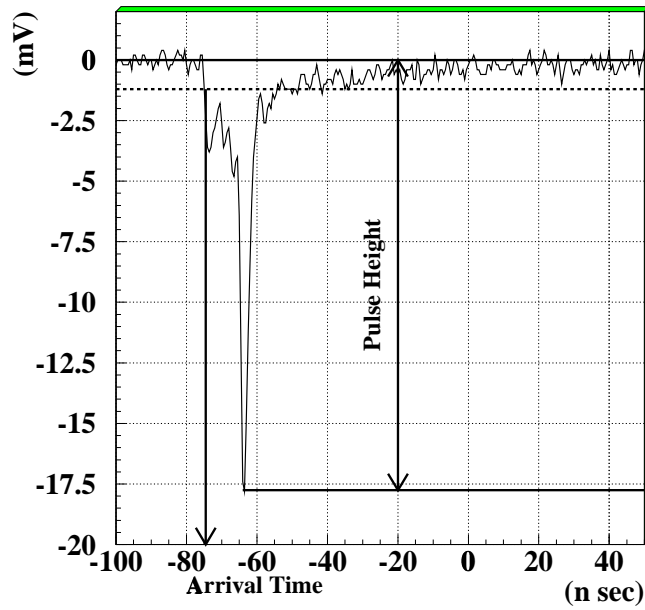


図 12: 波高、信号到達時間の定義。信号の最大の電圧の大きさを波高 (Pulse Height) と定義する。信号到達時間 (Arrival Time) は破線で示したしきい値を越えた時の時間。

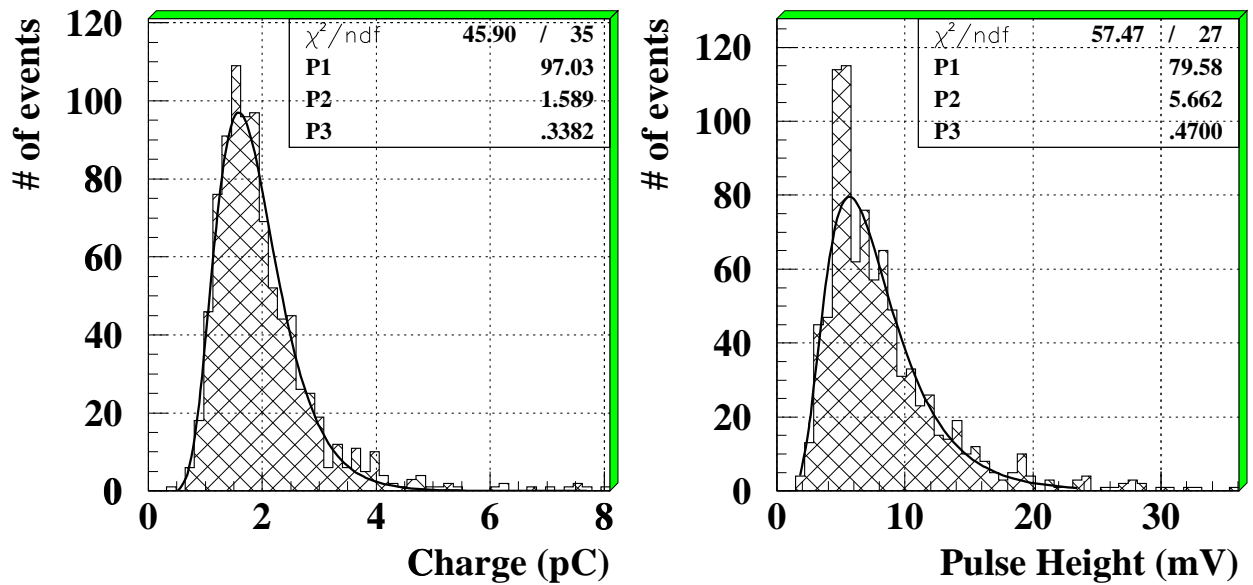


図 13: 電荷、波高の分布の例。(1) 式の関数でフィットしている。ピーク値 P2 をそれぞれの最頻値と定義する。

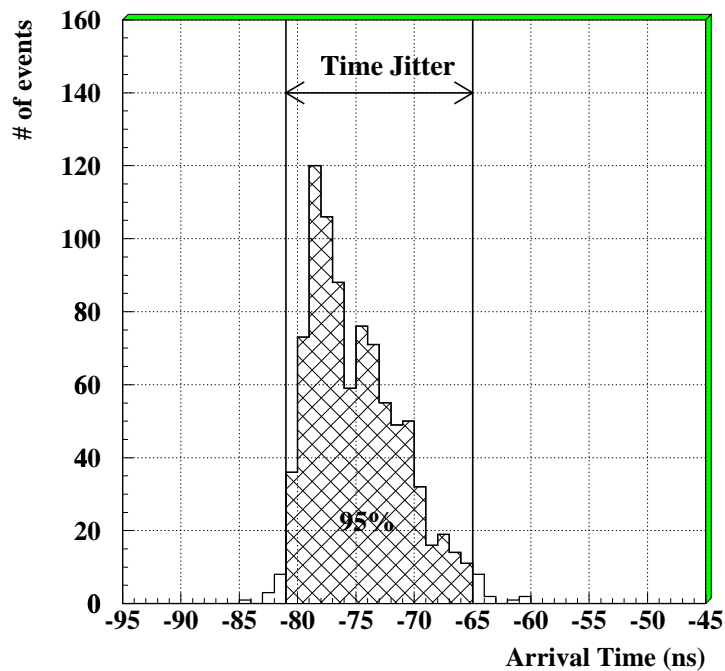


図 14: 信号到達時間の分布の例。Time Jitter のゲート幅に 95 % が含まれている。

### 3.3 ガスシステム

TGC に使用するガスは  $\text{CO}_2+n\text{-pentane}(50:50)$  である。  $n\text{-pentane}$  は沸点が  $36.1^\circ\text{C}$  で常温では液体であるので、混合には工夫が必要である。ここではバブリング法と液体質量流量コントローラーを使用した方法の 2 種類の混合法を組み立ててテストをした。混合比、不純ガスの測定にはガスクロマトグラフ<sup>4</sup>を使用した。

#### 3.3.1 バブリング法

バブリング法とは  $n\text{-pentane}$  の飽和蒸気圧が図 15 のように温度によって一定に決まることを利用した混合法である。図 16 にバブリング法ガスシステムのセットアップを示す。図 15 から  $17^\circ\text{C}$  のときに  $n\text{-pentane}$  の蒸気圧はおよそ  $380\text{mmHg}(0.5 \text{ 気圧})$  になるのがわかる。そこで、 $17^\circ\text{C}$  に保たれた恒温水槽のなかに  $n\text{-pentane}$  が入ったバブラーを置き、そこに流量計で流量を調節した  $\text{CO}_2$  を流しバブリングさせて、希望の混合比 (50:50) に混合する。そのさい、バブラーに入る前にガス管を恒温水槽の中に通し  $\text{CO}_2$  もあらかじめ  $17^\circ\text{C}$  になるようにしている。

図 17 に実際に恒温水槽の温度を変えた時の  $n\text{-pentane}$  の割合を示した。実線はバブラー内の気圧を 1 気圧としたときに図 15 から計算した値である。計算値と実験値とのずれの原因としては、すぐにわかるようにバブラー内の圧力が正確に 1 気圧ではなく環境によ

<sup>4</sup>島津製作所 GC-12A

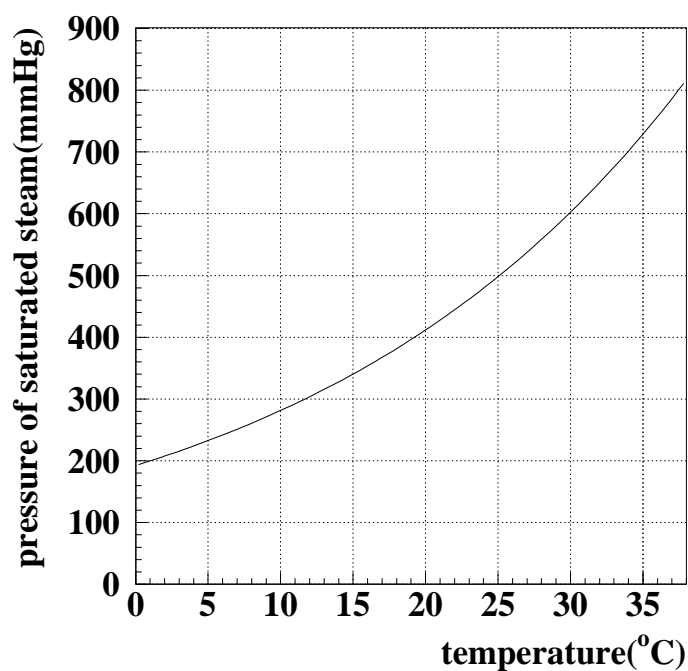


図 15: *n*-pentane の飽和蒸気圧曲線。

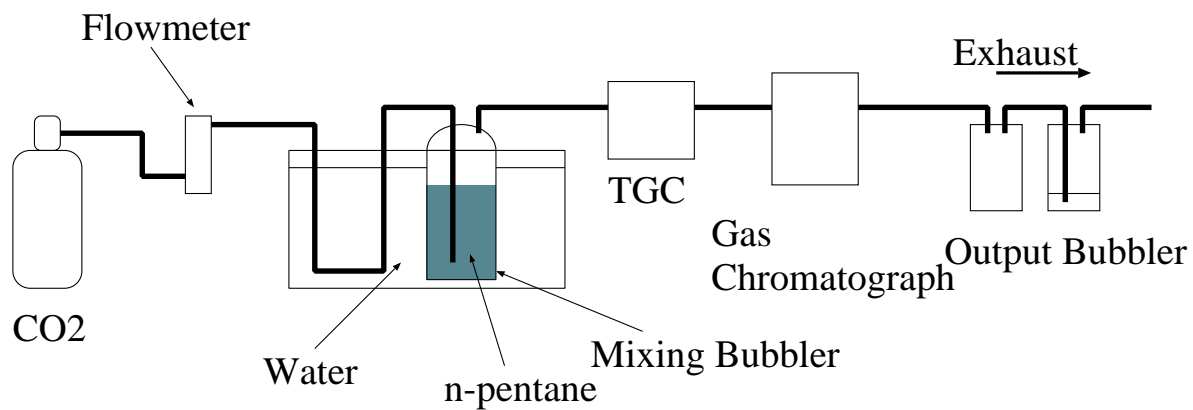


図 16: バブリング法ガスシステム。流量計で流量をコントロールをした  $\text{CO}_2$  を、 $17^\circ\text{C}$  に保った *n*-pentane に通しバブリングすることによりガス混合を行なう。混合比は TGC の下流のガスクロマトグラフでモニターしている。

て変化してしまうことが考えられる。また図 18のように流量依存性もある。これは流量が大きくなると *n*-pentane が飽和状態に達する前にガスが流れていくためだと思われる。ほかに、バブラーの頭が水面から出ており、水面上の温度が混合比に効いていることも確かめられている。このようにバブリング法では混合比に避けられないばらつきが存在してしまう。

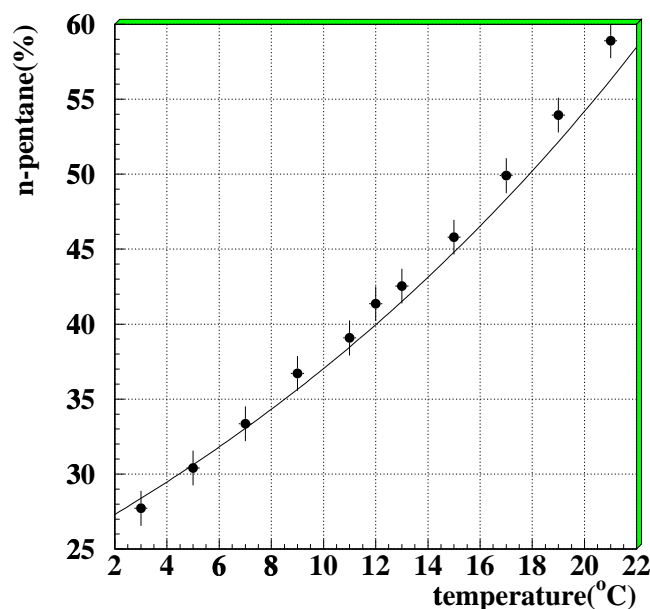


図 17: ガス混合比の温度依存性。点が実測値、実線はバブラー内の気圧を 1 気圧としたときの理論値。

### 3.3.2 液体質量流量コントローラーを用いたガスシステム

*n*-pentane、CO<sub>2</sub> をそれぞれ液体質量流量コントローラーとガス質量流量コントローラーで流量を制御し、約 50°C に保った気化槽で混合させる。混合後の流量はガス質量流量メータでモニターし、混合比はガスクロマトグラフでモニターしている。このガスシステムの模式図を図 19 に示す。この混合法では混合比の精度は環境の変化にとらわれず、流量コントローラーの精度のみで決まる。図 20 は、このガスシステムを使って実験している間に定期的に測定した *n*-pentane の混合比をプロットしたものである。1 度ガスを止め、再び流し始めると正確な混合比になるまでに時間がかかるが、1 度正しく混合されると長期的に安定に混合ガスを供給することができる。そのため長期的にガスを流し続けるときに向いている。

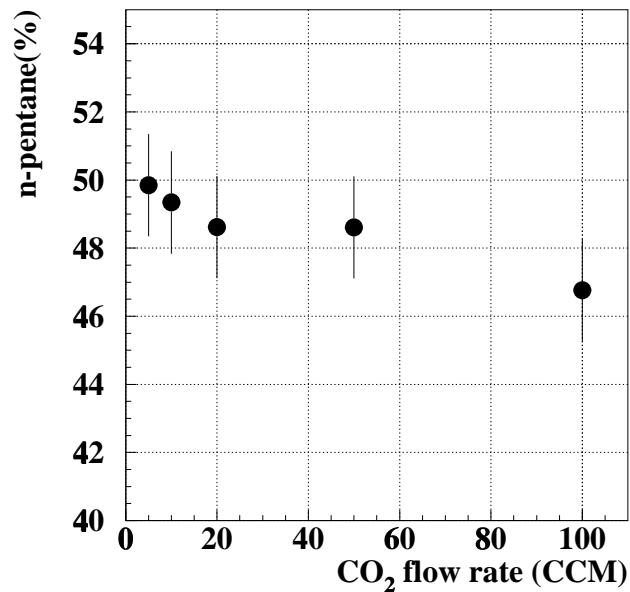


図 18: ガス混合比の流量依存性。流量を増やすとわずかながら、*n*-pentane の混合比が減少している。これは、流量が多くなると *n*-pentane が飽和状態になる前にガスが流れてしまうためだと考えられる。

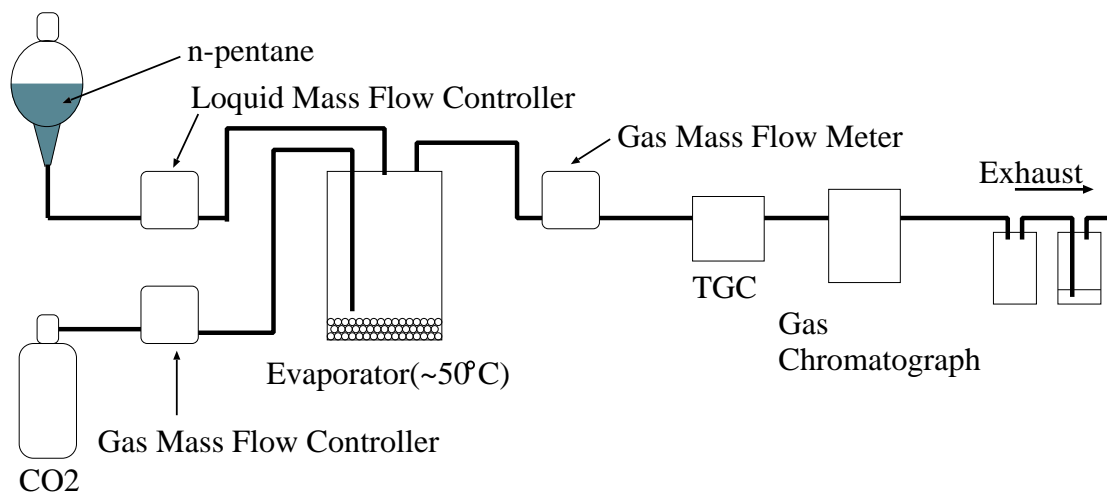


図 19: 液体質量流量コントローラーを用いたガスシステム。*n*-pentane、CO<sub>2</sub> をそれぞれ質量流量コントローラーで流量を制御し約 50 °C に保った気化槽で混合する。

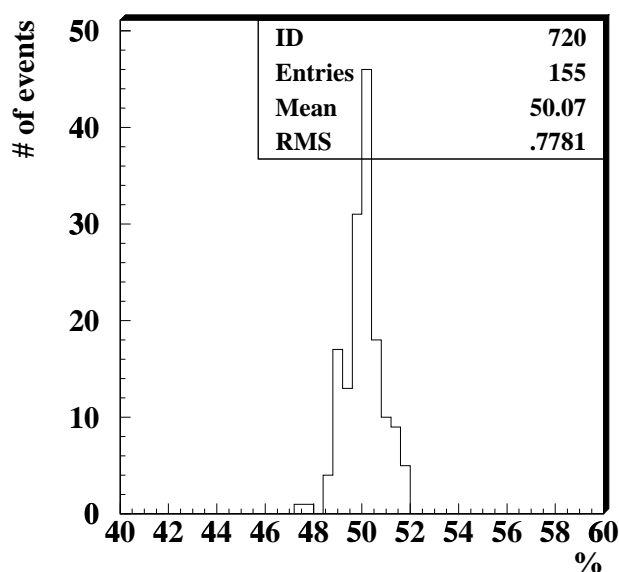


図 20: *n*-pentane の混合比のばらつき。

### 3.3.3 空気・水分の混入

ガスクロマトグラフを用いてガスを調べていると少量ではあるが不定な量の空気<sup>5</sup>と水が入っていることがわかった。これはガス配管に使っているシンフレックス・チューブから空気が混入しているのためだと思われる。どのような環境のときにどの程度空気や水が入ってくるのか調べるために約7mのシンフレックス・チューブを恒温恒湿槽に入れ温度、湿度、ガス流量を変え空気や水の混入率を調べた。

図 21がその結果である。空気、水分の混入量は湿度にはよらず温度に関係していることがわかる。これは、もともとシンフレックスは空気や水を吸い込んでおり、温度を上げることによりそれらが放出されているためだと思われる。ガス流量を大きくすると混入量が少なくなるのはガスがシンフレックス・チューブ中を通る時間が短くなるためだと考えられる。

図 22はタイゴン、シンフレックス、SUSの3種類の材質のチューブそれぞれ3mを17°Cの水の中に入れ、そこに流すCO<sub>2</sub>の流量を変えたときに、入ってくる空気と水分の割合を示したものである。SUSではほとんど混入していないが、タイゴン・チューブからは多量に入ってきているのがわかる。1996年、1997年にKEKで行なわれたビームテスト、エイジングテストでは、バブリング法でガスを混合するさいに、水中につけたタイゴンチューブの中をCO<sub>2</sub>が通っているのだからかなりの量の空気と水分が入っていることがわかる。

このほかにもTGC本体を構成しているG10からのしみだし、排気バブラーからの逆流などから少量ではあるが空気、水分が混入する。また、*n*-pentaneに最初から空気、水が

<sup>5</sup>ここでいう空気とは大気に含まれる窒素、酸素、Ar、COの混合気体である。



溶けていることも考えられる。

これらから、水の影響を調べる際には余計な水分や空気が入ってこないようにガス配管はすべて SUS 製のもので行なった。

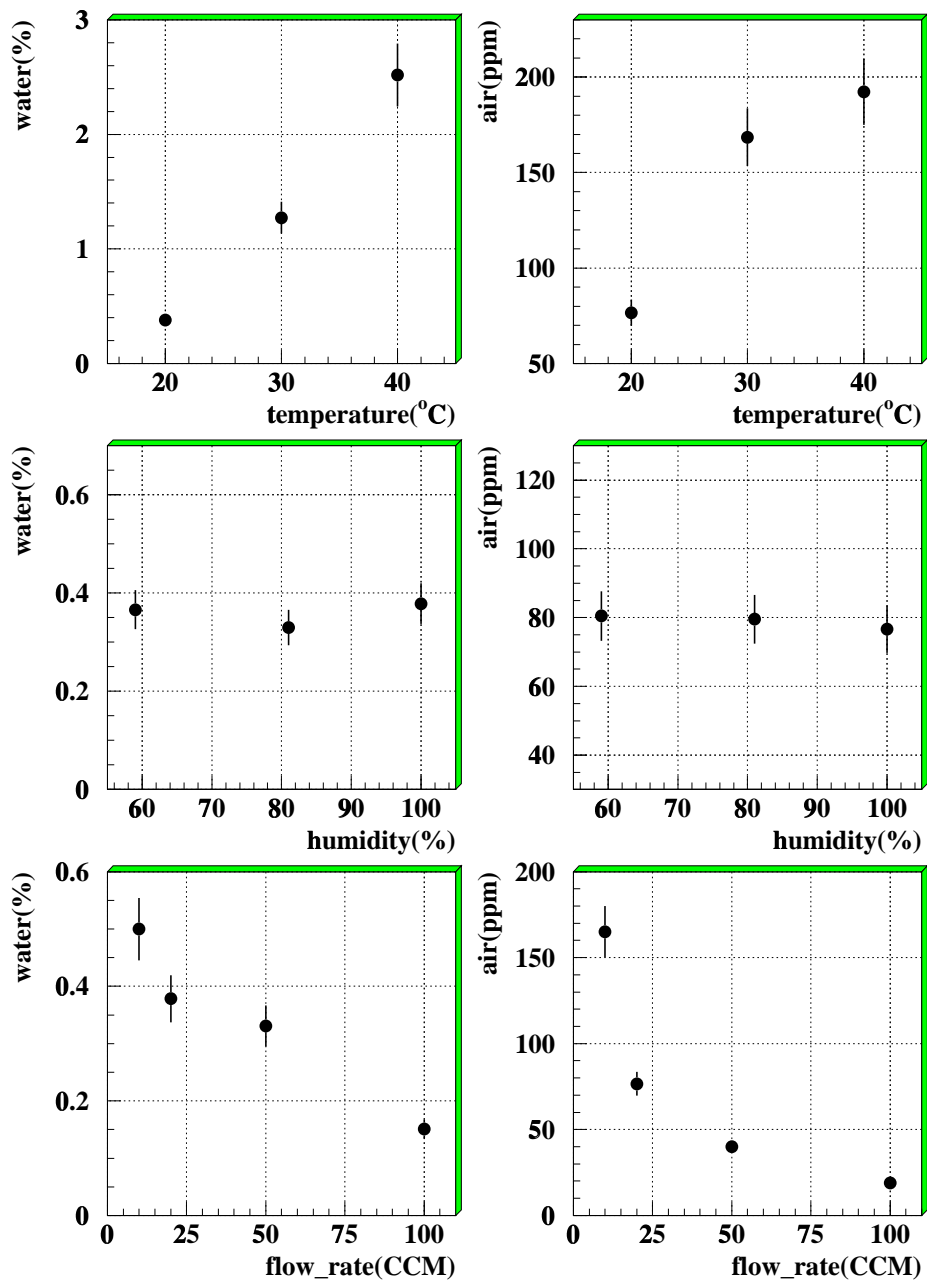


図 21: シンプレックス・チューブから入ってくる空気、水分。温度を変えているときには湿度 100%、ガス流量 20 CCM。湿度を変化させているときは温度 20 °C、ガス流量 20 CCM。ガス流量を変えているときは温度 20 °C、湿度 100 %。混入量は湿度にはよらずに温度によっている。

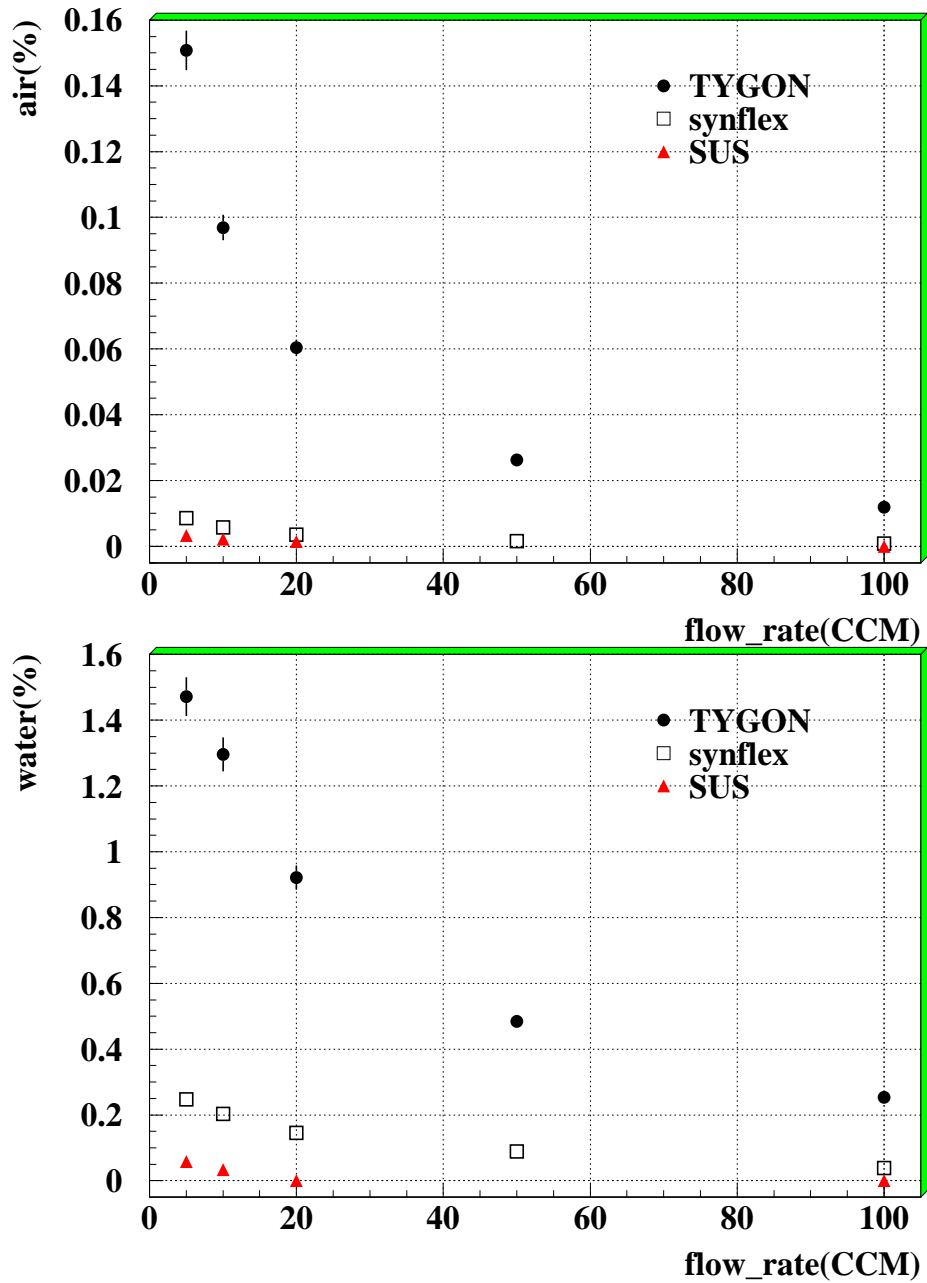


図 22: 3m の長さの 3 種類のチューブを 17°C の水に通したときに入ってくる空気、水分の割合。タイゴン・チューブからはかなりの量の空気と水が入ってくるのがわかる。

## 4 TGC のガス特性の測定

### 4.1 TGC の印加電圧と動作領域

#### 4.1.1 印加電圧依存性

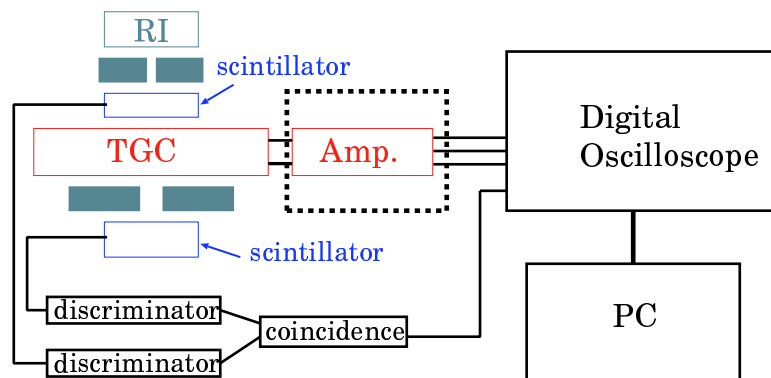


図 23: 印加電圧依存性を調べるさいのセットアップ。TGC の上下をトリガー用のシンチレータとコリメータではさんでいる。印加電圧が低いときにはアンプをしようした。

2.2節で述べたようにガスチェンバーは印加電圧によって動作領域が違ってくる。TGC は制限比例領域で動作していると考えられているが、未だに良く理解されていない。

そこで、まず TGC の印加電圧に対する出力電荷・波高、出力波形、時間分解能の変化を調べた。この時のセットアップを図 23 に示す。TGC の上下をトリガー用のシンチレーションカウンターとコリメータではさみ、そのコインシデンスをトリガー信号にした。線源は  $\beta$  線源の  $^{106}\text{Ru}$  を使用した。TGC は  $1.8\text{ mm} \times 1.35\text{ mm}$ 、4 本まとめ読みだしのものを使った。印加電圧の低いところでは、アンプ<sup>6</sup>を使用し高いところではそのまま入力した。ガスシステムは液体質量流量コントローラを用いたものを使用し、空気、水の侵入をできるだけ防ぐためにガス配管はすべて SUS 製のものをを使用した。

図 24 に印加電圧に対する電荷最頻値、波高最頻値を示す。円がアンプを使って、測定しアンプのゲインで割ったもの。四角がアンプを使わず測定したものである。電荷についても波高についても  $3\text{ kV}$  あたりで傾きが変わっており、このあたりで動作領域が変わっていると思われる。電荷の方が波高よりも傾きの変わり方が大きいので、空間電荷による効果は波高より、電荷に効いていることがわかる。

つぎに信号の波形が印加電圧によってどのように変化しているか示す。図 25、図 26 はアンプ有無でそれぞれの印加電圧について 100 イベントを平均した波形である。アンプを使っていない生の信号の方を見ると、複数の電子なだれによる複数の信号が重ね合っているのがわかる。印加電圧が高いほど 1 番目の信号が目立っており、2 番目以降の信号は小さくなっている。これは 1 番目の電子なだれによってできた陽イオンの雲による空間電荷の効果のためだと考えられる。

<sup>6</sup>ビデオアンプ  $\mu\text{A733}$ + 高速オペアンプ +MAX9687(コンパレータ)[10]

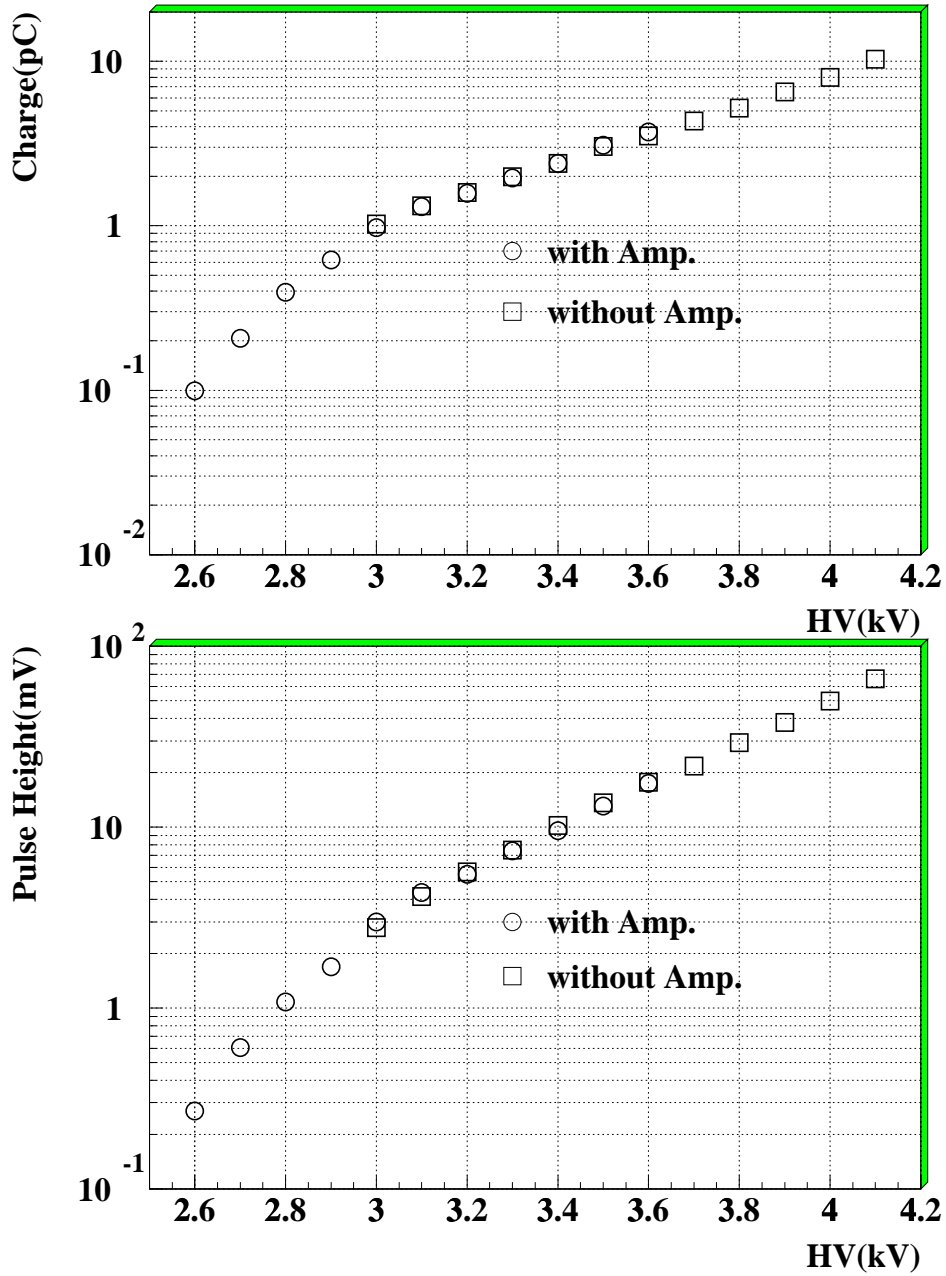


図 24: 電荷最頻値、波高最頻値の印加電圧依存性。上、電荷。下、波高。円はアンプを使って測定し、アンプのゲインでわったもの。四角はアンプを使わず測定したもの。3 kV 付近で傾きが変わっているのがわかる。

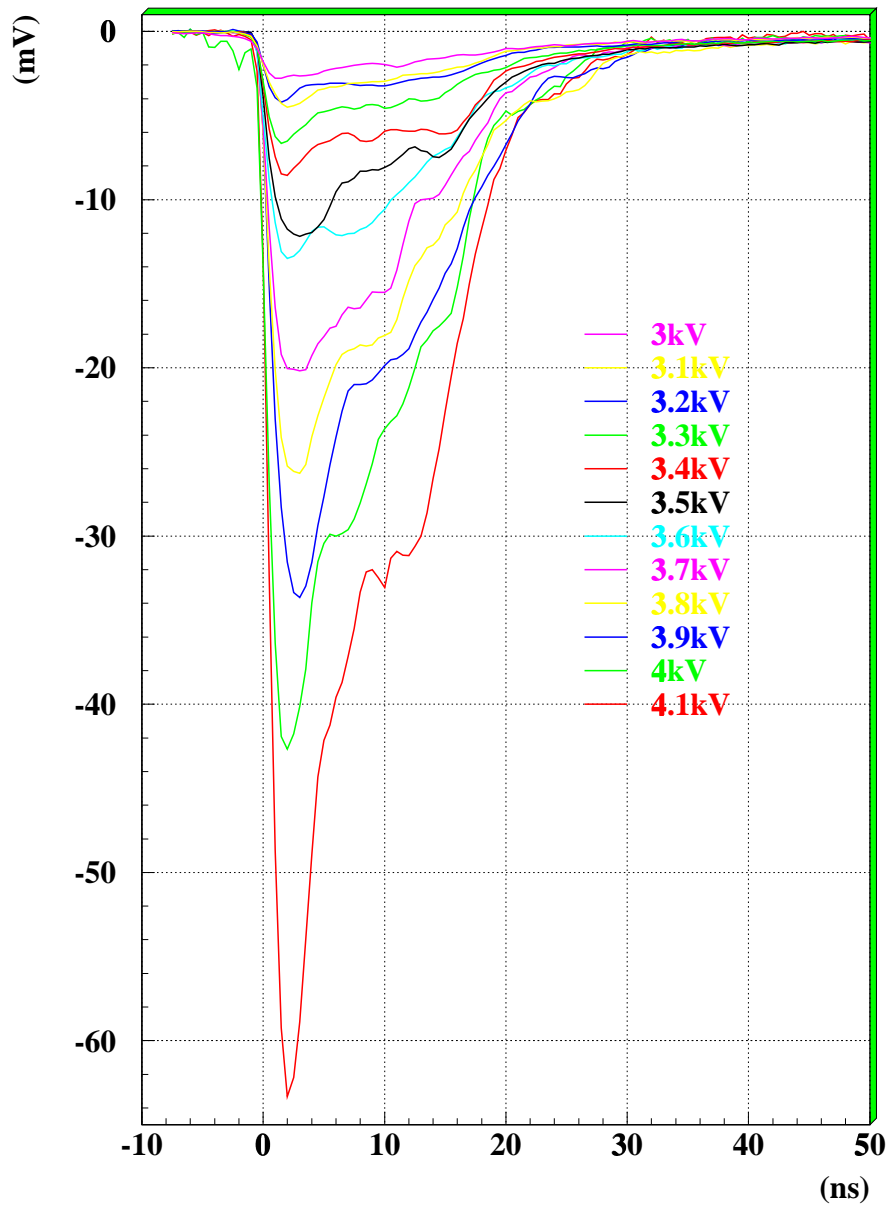


図 25: 100 イベントの平均の波形。アンプなし。いくつかの信号が重ね合っているのがわかる。

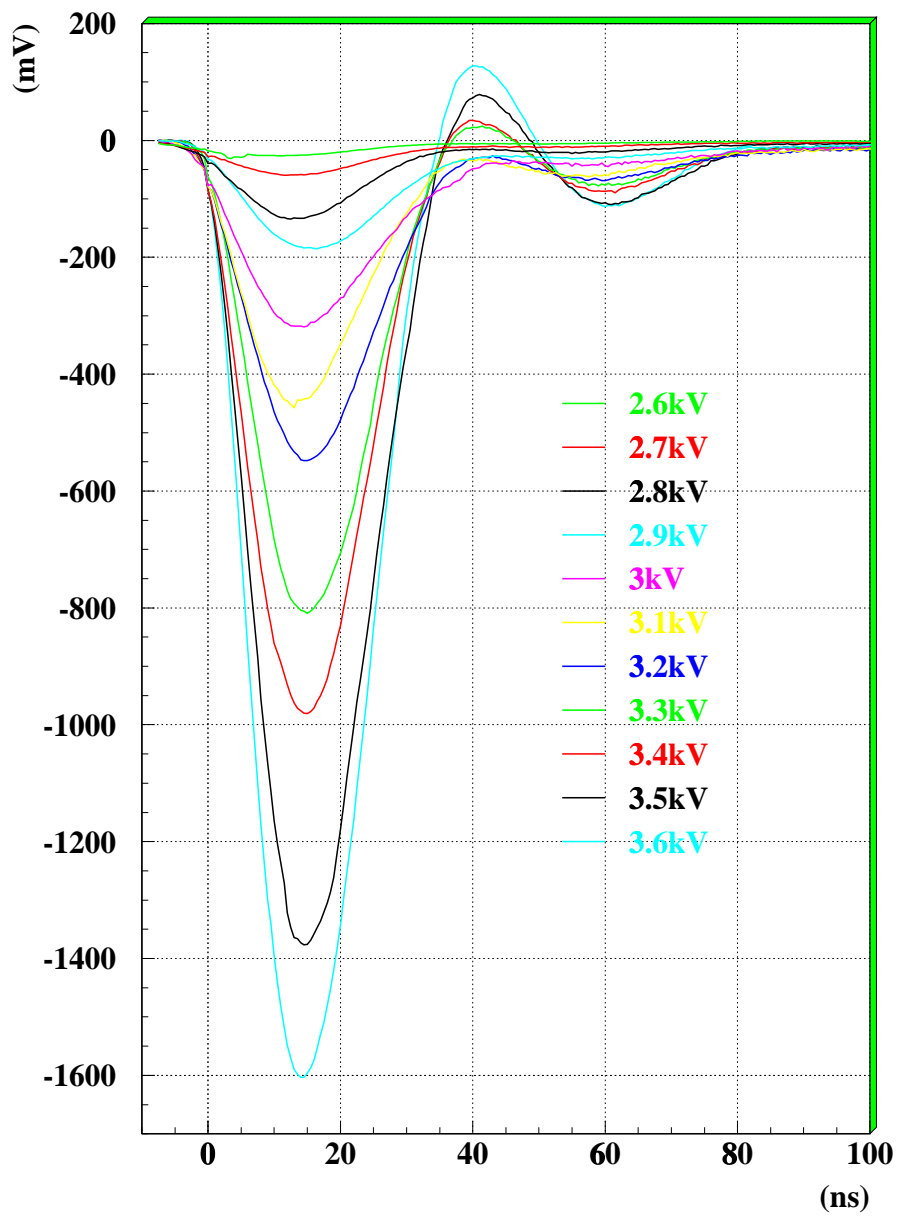


図 26: 100 イベントの平均の波形。アンプあり。アンプにより高周波成分がなまっているので、個々の信号は見えていない。

図 27は横軸に波高、縦軸に電荷をプロットしたものである。アンプを使用していないものはそのまま、アンプを使用しているものはそのゲインで割って重ねてある。動作領域が変わっていると思われる 3kV から傾きの小さな成分、つまり波形のシャープな信号が現れ始め、印加電圧が高くなるにつれて傾きが小さくなっているのがわかる。

図 28は横軸に印加電圧、縦軸に電荷最頻値と波高最頻値の比をプロットしている。これは信号の幅のようなものを表しており、動作領域が変わっていると思われる 3kV までにはほぼ一定だが、3kV からは印加電圧が上がるにしたがって小さくなっている。つまり、波形が鋭くなっていくことを表している。

図 29は横軸に印加電圧、縦軸に Time Jitter をとったものである。電荷最頻値、波高最頻値の時と同じように円がアンプを使ったもの四角がアンプを使っていないもの。3.2kV 以上では、16ns 以内に 95% 入っていることがわかる。

#### 4.1.2 線源が違う場合の印加電圧依存性

$\gamma$  線源の  $^{55}\text{Fe}$  と  $\beta$  線源の  $^{90}\text{Sr}$  を線源として使ったときの波形やガス増幅の違いについて述べる。

$^{55}\text{Fe}$  のときはセルフ・トリガーで、 $^{90}\text{Sr}$  のときは TGC の下にシンチレータを置きその信号をトリガーにした。TGC は  $2.0\text{mm} \times 1.6\text{mm}$  で、1本ずつ独立に読み出せるものを使用した。アンプは使用していない。

$^{55}\text{Fe}$  の  $5.9\text{keV}$  の  $\gamma$  線はチェンバー内のガスと光電効果を起こし、 $5.9\text{keV}-W$  ( $W$  は光電子が最初存在した殻の結合エネルギー。CO<sub>2</sub> では約  $33\text{eV}$ 。) のエネルギーを持った光電子を放出する。 $5.9\text{keV}$  の電子はガス中ですぐに止まり、約 150 個 ( $\sim 5.9\text{keV}/33\text{eV}$ ) の 1 次電離電子が空間的に小さい範囲にできる。それらはほぼ同時に陽極に到達するので、図 30 のように鋭い波形になる。

$\beta$  線の場合は飛跡にそって数十個の 1 次電離電子ができ、それらが時間的にずれて陽極に到達するので、図 31 のように複数の信号の重ね合わせに見える。

$^{90}\text{Sr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$  線源に対する電荷最頻値、波高最頻値の印加電圧依存性を図 32 に示す。 $^{90}\text{Sr}$  線源も  $^{55}\text{Fe}$  線源も  $3\text{kV} \sim 3.2\text{kV}$  のあたりで傾きが変わり始めている。 $^{55}\text{Fe}$  線源と  $^{90}\text{Sr}$  線源の比を見ると一定になっているところがないので少なくとも  $3.1\text{kV}$  より下で動作領域が変わっているものと思われる。印加電圧が  $4\text{kV}$  で  $^{55}\text{Fe}$  線源の電荷最頻値が  $^{90}\text{Sr}$  のそれよりも小さくなっているのは、 $^{55}\text{Fe}$  線源によってできる 1 次電子は空間的にも時間的にも広がりが小さく、空間電荷による影響を受けやすいためだと思われる。

図 33 は横軸に印加電圧、縦軸に  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$  それぞれの線源の電荷最頻値と波高最頻値の比をとったものである。これを見ると  $^{90}\text{Sr}$  線源については、図 28 と同じように印加電圧が上がるにつれて小さくなっているが、 $^{55}\text{Fe}$  線源については印加電圧を上げてほとんど変わっていない。このことから  $\beta$  線源の場合では、1 番目の電子なだれの際に発生した陽イオンの雲による空間電荷の効果によって、それ以降の電子塊のガス増幅が抑えられることがわかる。 $^{55}\text{Fe}$  線源についてはもともと 1 次電離電子は小さい空間内に作られるので電子なだれは 1 つしかできない。



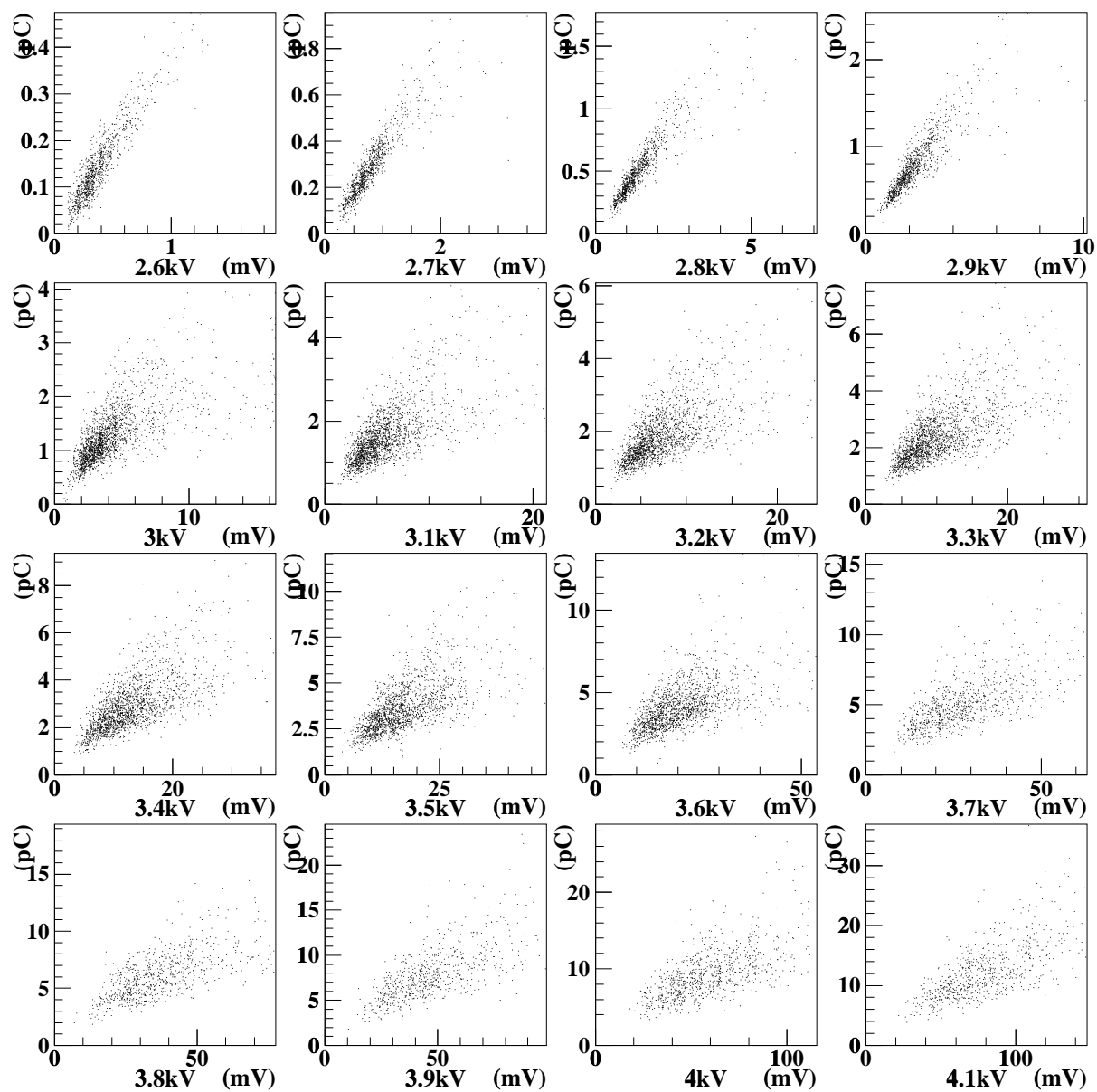


図 27: 電荷と波高の比の印加電圧依存性。印加電圧が高くなるにつれて波形がシャープになっている。

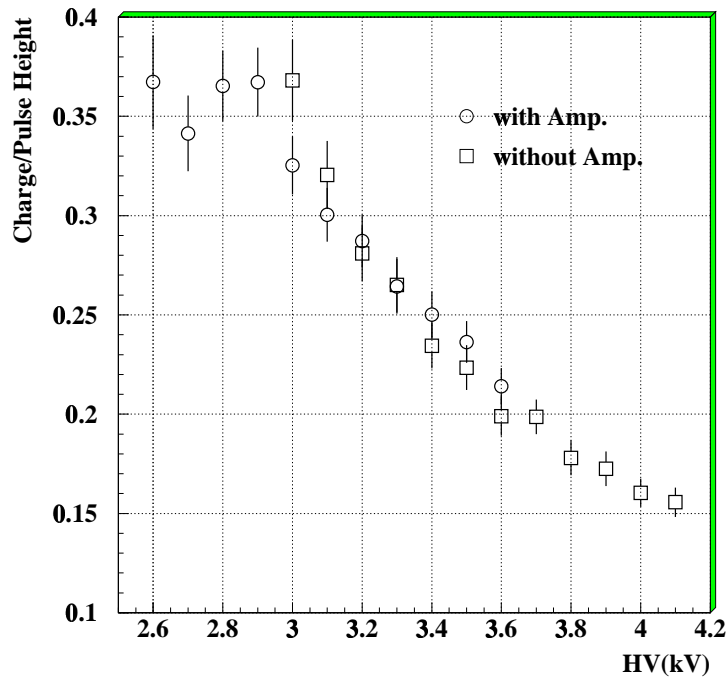


図 28: 電荷最頻値と波高最頻値の比の印加電圧依存性。動作領域の変わっている 3 kV 以上では、印加電圧が高くなるにつれて小さく、つまり信号波形は鋭くなっている。

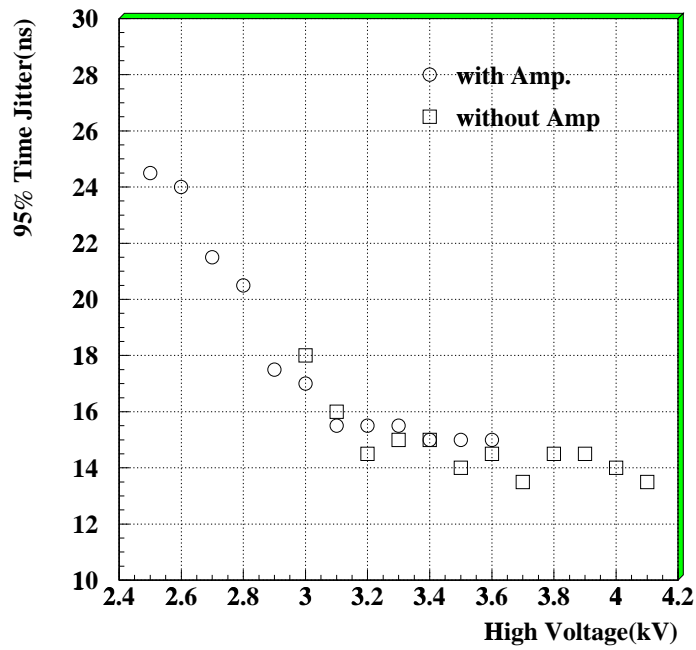


図 29: 95 % Time Jitter の印加電圧依存性。3.2 kV 以上では 16 ns 以内に入っている。

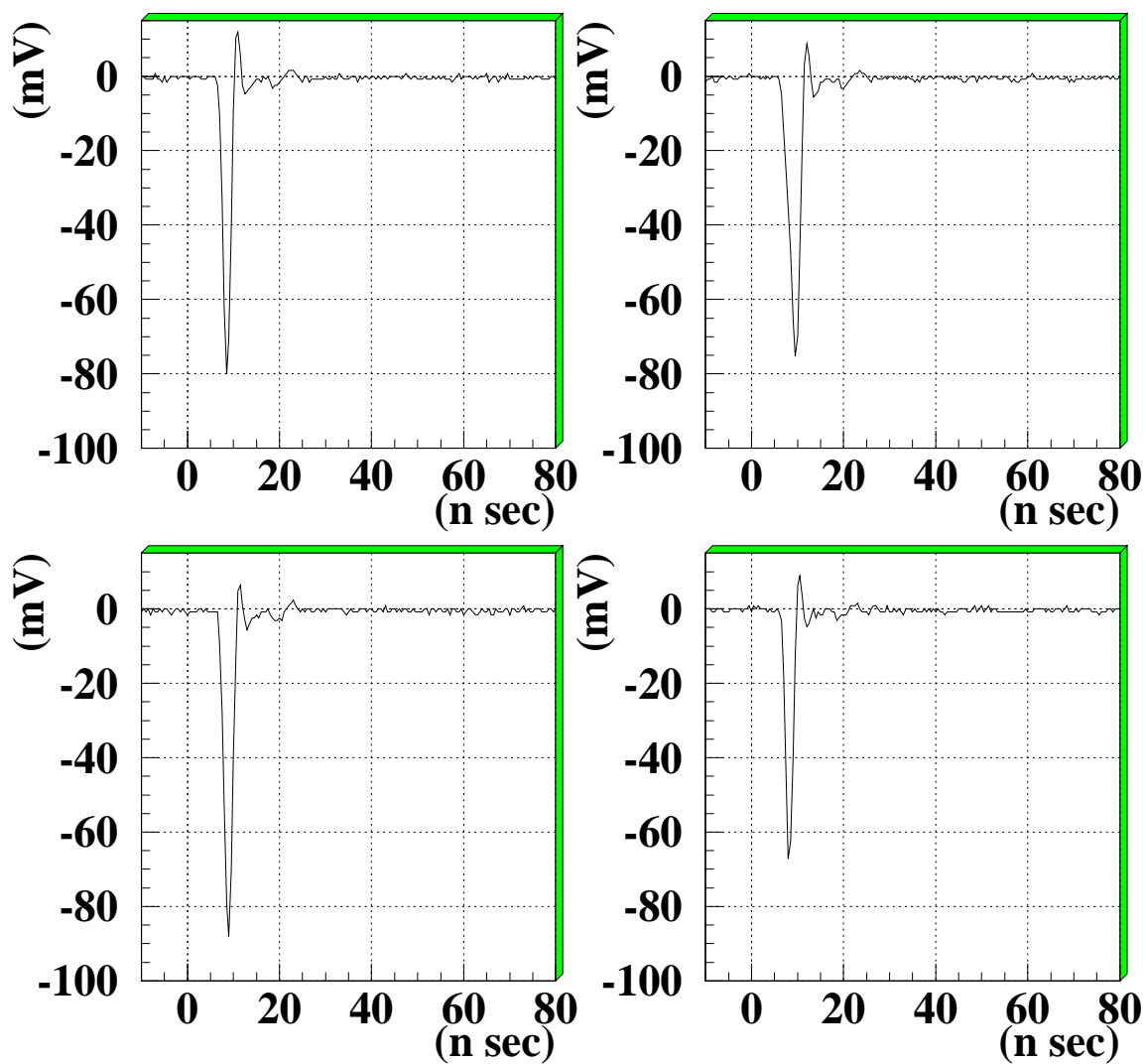


図 30:  $^{55}\text{Fe}$  線源による波形の例。2.0 mm×1.6 mm、3.4 kV。1 次電離電子がまとまって来るので鋭い波形になる。

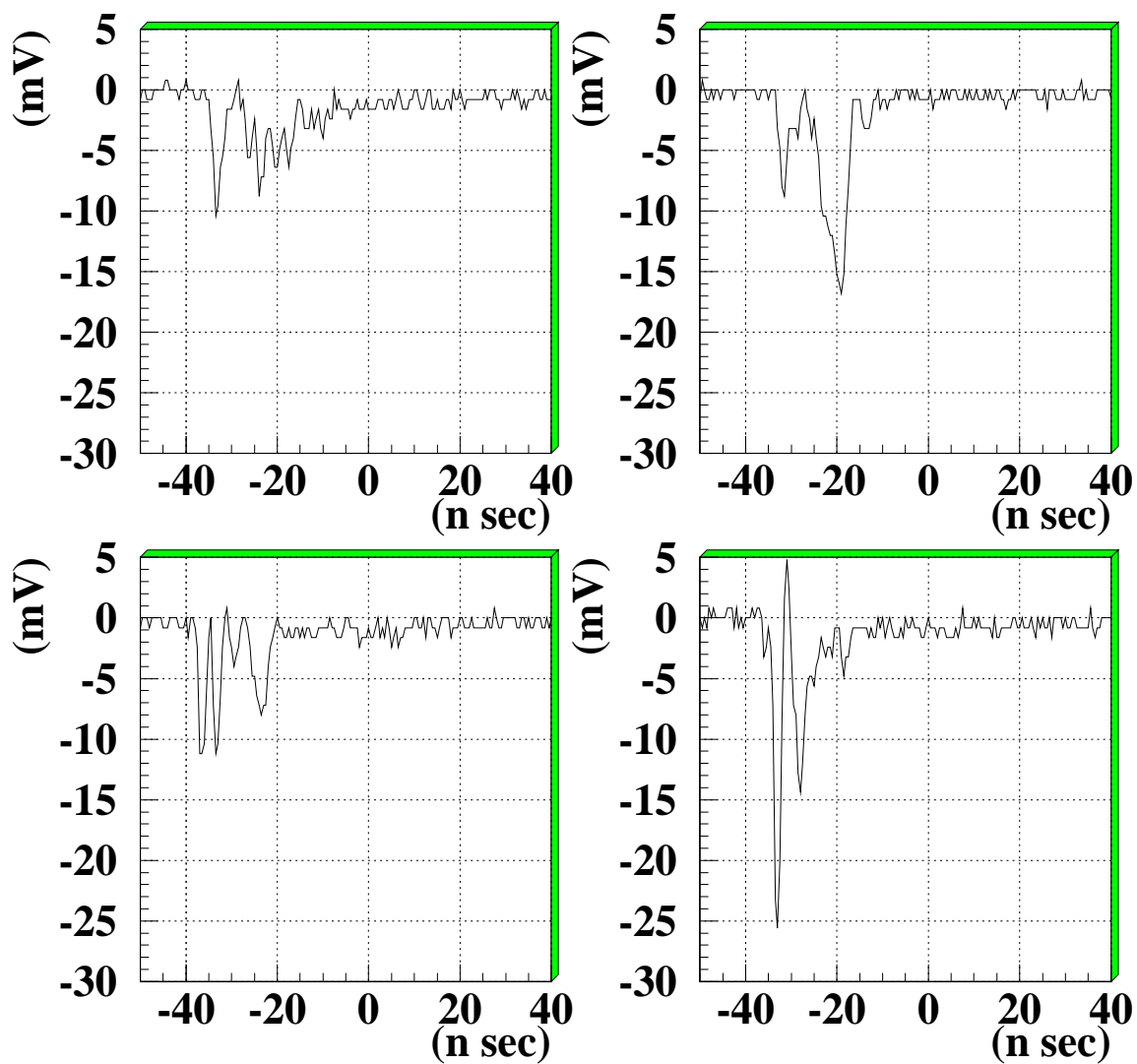


図 31:  $^{90}\text{Sr}$  線源による波形の例。2.0mm×1.6mm、3.4kV。複数の信号が重ね合わさっているのがわかる。

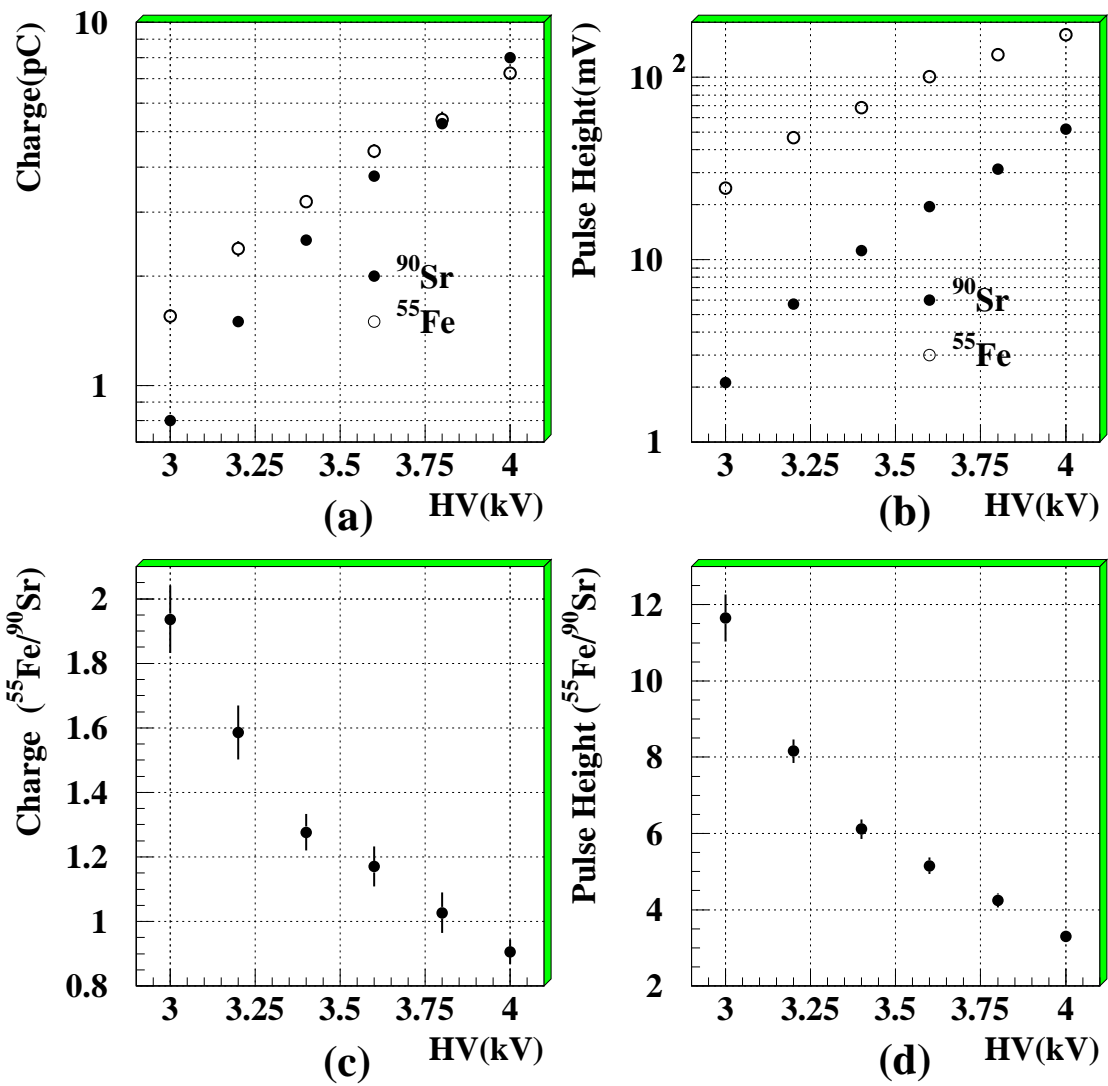


図 32:  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$  線源に対するガス増幅率の印加電圧依存性 (a) 電荷最頻値、(b) 波高最頻値、(c)  $^{55}\text{Fe}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の電荷最頻値の比、(d)  $^{55}\text{Fe}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の波高最頻値の比

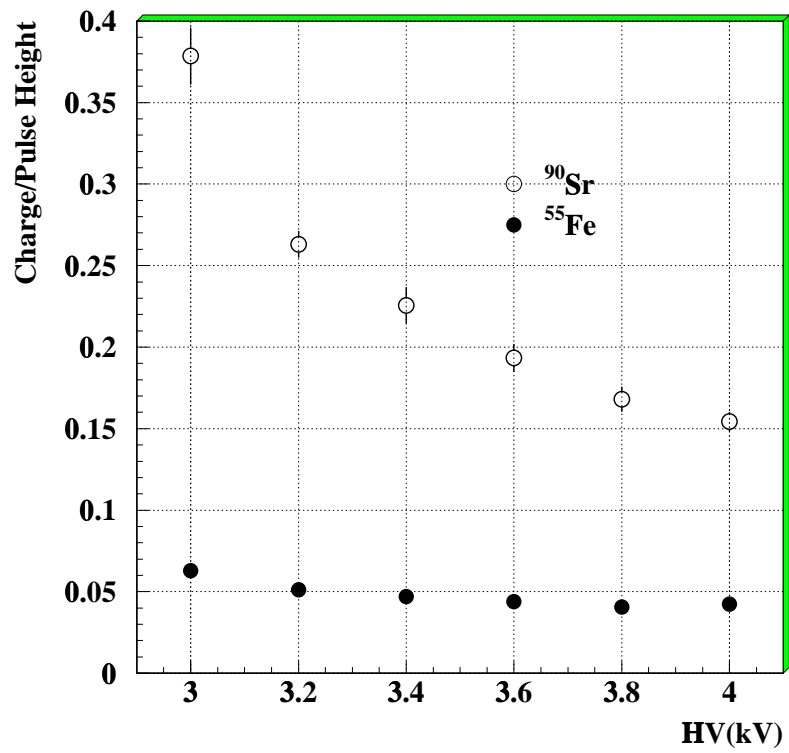


図 33:  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$  線源の電荷最頻値と波高最頻値の比。 $^{90}\text{Sr}$  線源では印加電圧が上がるにつれて、波形が鋭くなっている。 $^{55}\text{Fe}$  線源ではほとんど変化はない。

## 4.2 ガス混合比依存性

この節ではクエンチガスである *n*-pentane の濃度を変化させ、それに対するガス増幅率の変化について述べる。クエンチガスは放電の原因となる紫外線を吸収するので、クエンチガスを増やすとチェンバーの安定性が増す。一方で、紫外線はガス増幅にも寄与するので紫外線の吸収が強まるとガス増幅率が小さくなる。また *n*-pentane は常温で液体であるので、*n*-pentane の濃度が増すと途中で液化する危険性も増す。

図 34 は横軸に *n*-pentane の濃度、縦軸に上図は電荷最頻値、下図は波高最頻値をとったものである。使用した TGC は 2.0 mm × 1.6 mm、1 本ずつ独立に読み出せるものである。アンプは使わずに、線源は <sup>55</sup>Fe、印加電圧は 3.4 kV かけた。ガス混合にはバブリング法を使い、水温を 11°C ~ 21°C まで変化させ *n*-pentane の混合比を調節した。(図 17 参照。)

*n*-pentane の濃度が高くなると信号は小さく、濃度が低くなると信号が大きくなる。*n*-pentane の濃度が 1% 変化したときのガス増幅率の変化率は 2% 程度である。またチェンバーの個性もあるが、*n*-pentane の濃度を低くするほど、放電が起こりやすく高い印加電圧をかけることができない。

図 35 はガス混合比が *n*-pentane:CO<sub>2</sub>=50:50 の場合と 41:59 の場合の電荷最頻値と波高最頻値の印加電圧依存性である。ガスの混合にはバブリング法を使い、水温をそれぞれ 17°C、12°C にして混合比を調節した。(図 17 参照。) TGC は 1.8 mm × 1.35 mm、1 本ずつ独立に読み出せるものを使った。セットアップは図 23 と同じである。41:59 のときには、50:50 のときに比べガス増幅が大きい分、傾きが変わる電圧が小さい方へずれている。

## 4.3 水の影響

2.3 節で述べたように、高放射線環境下では、ワイヤーチェンバーの安定な動作には、少量の水分の添加が不可欠であると言われている。水分が不足するとマルター放電が起こるといわれている。水がマルター放電を抑えるメカニズムは明確にはわかっていないが、次の 2 つの理由が考えられている [21]。

1. マルター放電を引き起こすと考えられているものの 1 つに、カソード表面に付着する絶縁体の不純物がある。相当の放射線にさらされることによりカソード表面に高分子の絶縁体が付着すると、電子なだれにより生じた陽イオンがカソードに到達することができずに絶縁体に溜ってしまう。その結果、カソードと絶縁体の間に非常に強い電場がつくられ、カソードより電子を引っ張り出し放電が始まる。少量の水分を加えると、この絶縁体がわずかな伝導性を持ち陽イオンをカソードに逃がすことによって放電を抑えると考えられている。
2. 他の放電のメカニズムとしては、ガス分子の励起より放出される紫外線がカソードで光電効果を起こし電子を出して放電が始まるというものである。水がこの紫外線を吸収すると考えられるが、10<sup>3</sup> ppm 程度の水分では紫外線の吸収に十分ではない。そこで、水分はカソード表面に集中して存在しており、それにより効果的に紫外線の吸収を行なうことができると考えられている。

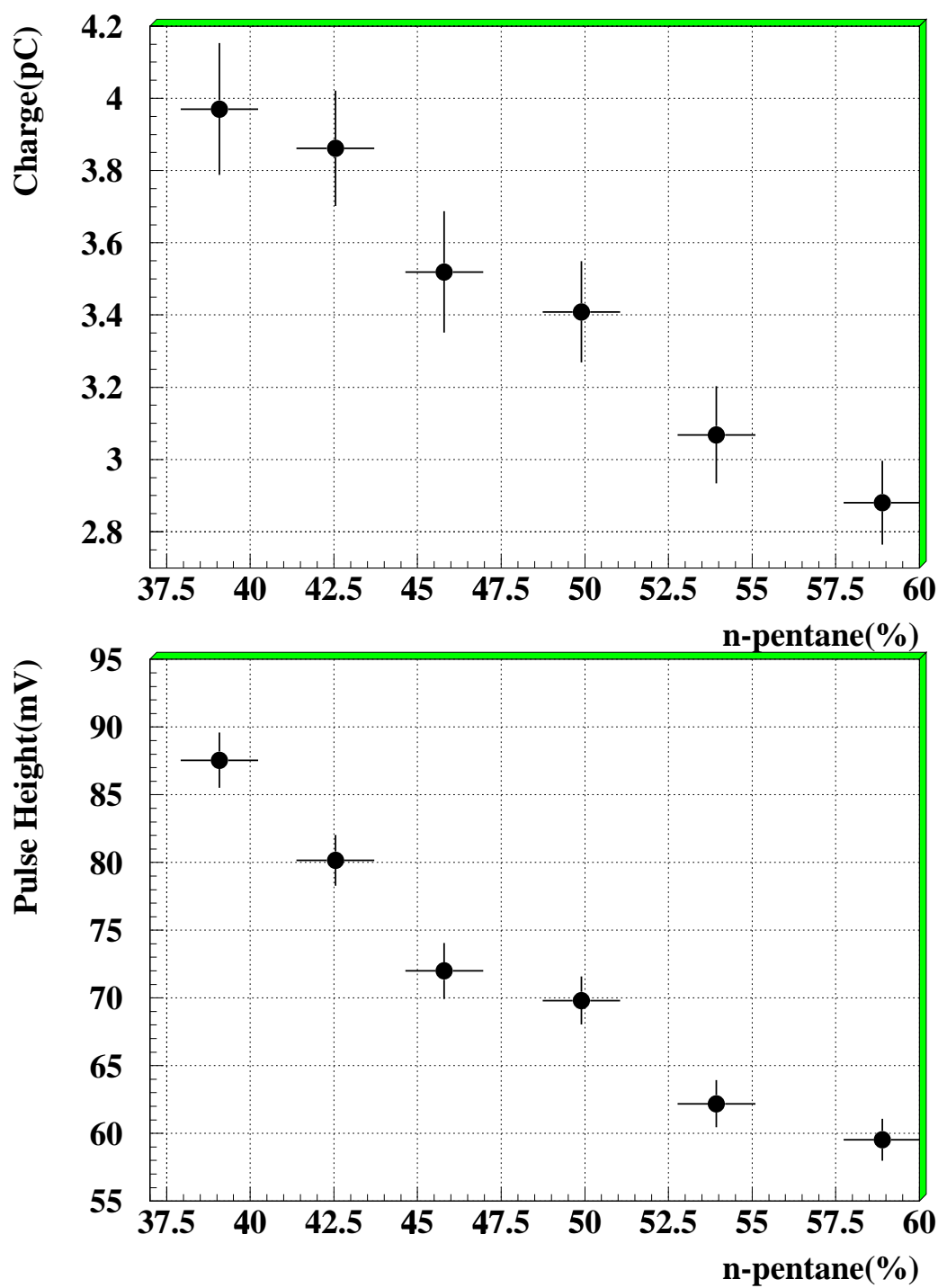


図 34: ガス混合比依存性。2.0 mm× 1.6 mm。3.4 kV。線源  $^{55}\text{Fe}$ 。



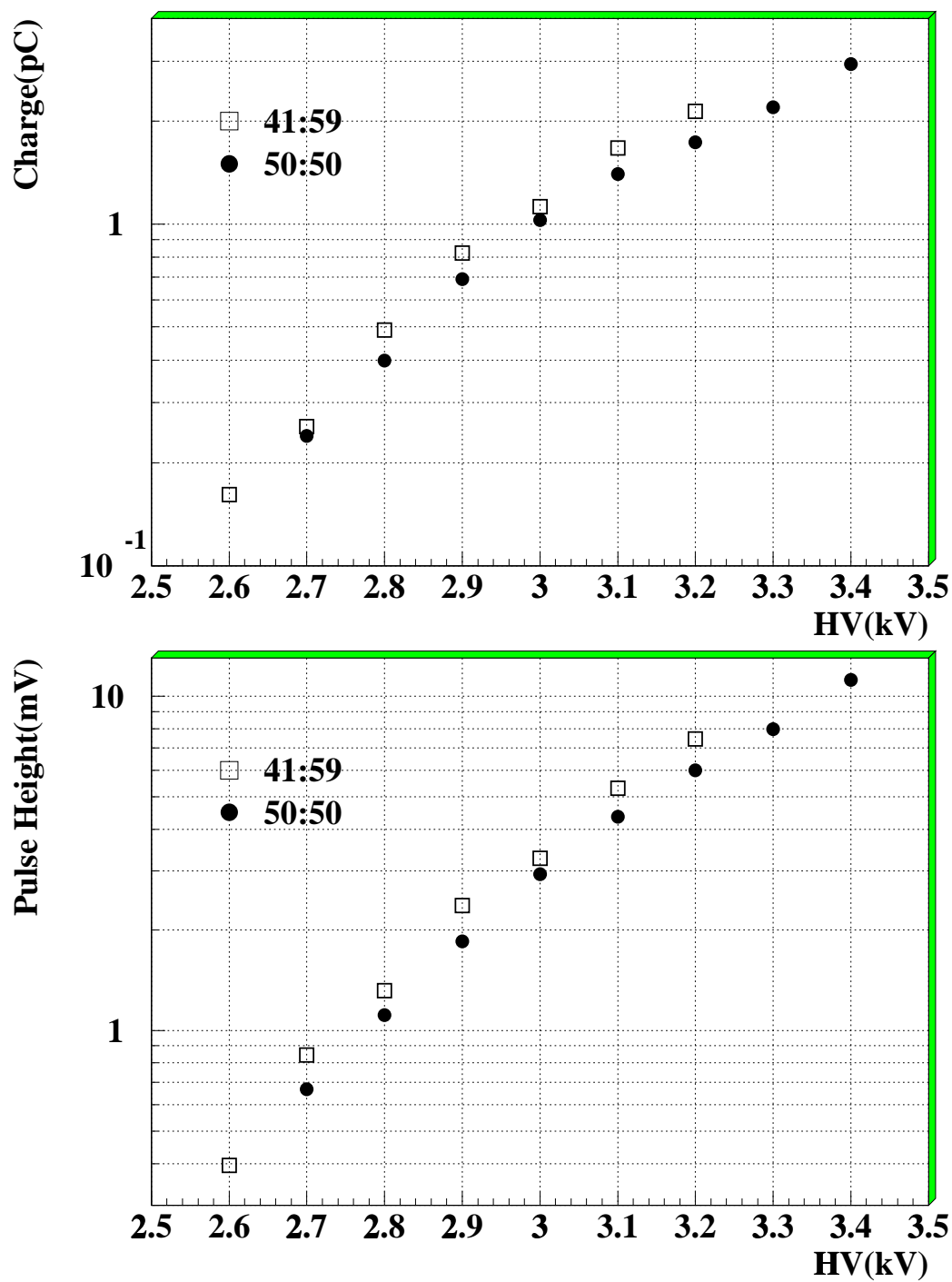


図 35: 2 種類の混合比ガス ( $n$ -pentane:CO<sub>2</sub>=50:50,41:50) における電荷、波高の印加電圧依存性。1.8 mm× 1.35 mm の TGC を使用し、線源は  $\beta$  線源の <sup>106</sup>Ru を使った。

以下では、水分を加えることによって、ガス増幅率や Time Jitter にどのような影響が出るか調べた。また、TGC は 5000 ppm 程度の水分を加えると高放射線環境下においても、安定した動作をしていることがわかっている [2, 11]。そこで高放射線環境下で水分をできるだけ少なくした時にはどうなるか調べた。

#### 4.3.1 水分の添加法

ガスシステムは 4.1.1 節と同様に液体質量流量コントローラを用いたものを使用し、配管は SUS 製のものを使った。ガス混合した後の配管の途中に 1m のタイゴン・チューブをつなぎ、そのタイゴン・チューブを 25°C の水の中につけることによって水分の添加をした。

図 36(a)、(b) はこの実験の間に定期的にガスクロマトグラフで調べた水分と空気の割合の分布である。これから水分が約 17000 ppm、空気が約 3000 ppm 入っていることがわかる。17000 ppm という水分の量は気温を 25°C としたときの相対湿度でいうと約 54% にもなる。図 36(c)、(d) はタイゴン・チューブをつないでいない状態のとき (4.1.1 節) に入ってくる水分と空気の割合である。このときには水分約 500 ppm、空気約 350 ppm 入っている。これらは 3.3.3 節でも述べたように TGC 本体や *n*-pentane から入ってきていると思われる。

#### 4.3.2 ガス増幅率、Time Jitter

4.1.1 節とまったく同じ TGC、セットアップを使い、同様に印加電圧依存性を調べた。

図 37、図 38 は水分を約 17000 ppm 加えた時の電荷最頻値、波高最頻値、Time Jitter の印加電圧依存性を図 24、図 29 (水分約 500 ppm) の上に重ねてプロットしたものである。

これから水分を 17000 ppm というかなりの量を加えても、ガス増幅率や時間分解能にほとんど低下は見られないことがわかる。安定性の面においても、水分を加えないときと同じ印加電圧までかけることができ、TGC に流れる電流の増加も見られず、内部でのカレント・リークは確認されなかった。

#### 4.3.3 高放射線環境下での影響

1996 年、1997 年に KEK、K4 エリアで行なわれたエイジングテストでは 80 kHz/wire/cm という高放射線環境において約 400 時間、積分電荷にして、1 C/wire/cm まで、安定に動作することがわかった [11, 12, 13]。このときには約 5000 ppm の水分を加えている。この水分の量は考えられたものではなくバブリング法でガス混合を行なう際にタイゴンチューブを使っているのだからそこから入ってきたものである。

そこで、この安定性が水分の効果によるものなのか、水分が影響しているとするときの程度の水分が必要なのか調べるために、まずは水分をできるだけ少なくした状態で放射線耐久テストを行なった。

ガスシステムは液体質量流量コントローラを用いたものを使用して、ガス配管はすべて SUS 製のもので行なった。このときに侵入してくる水分と空気の量を図 39 に示す。このときの水分が図 36(c) よりも少ないのは、実験室の湿度が低くなっていたために TGC を

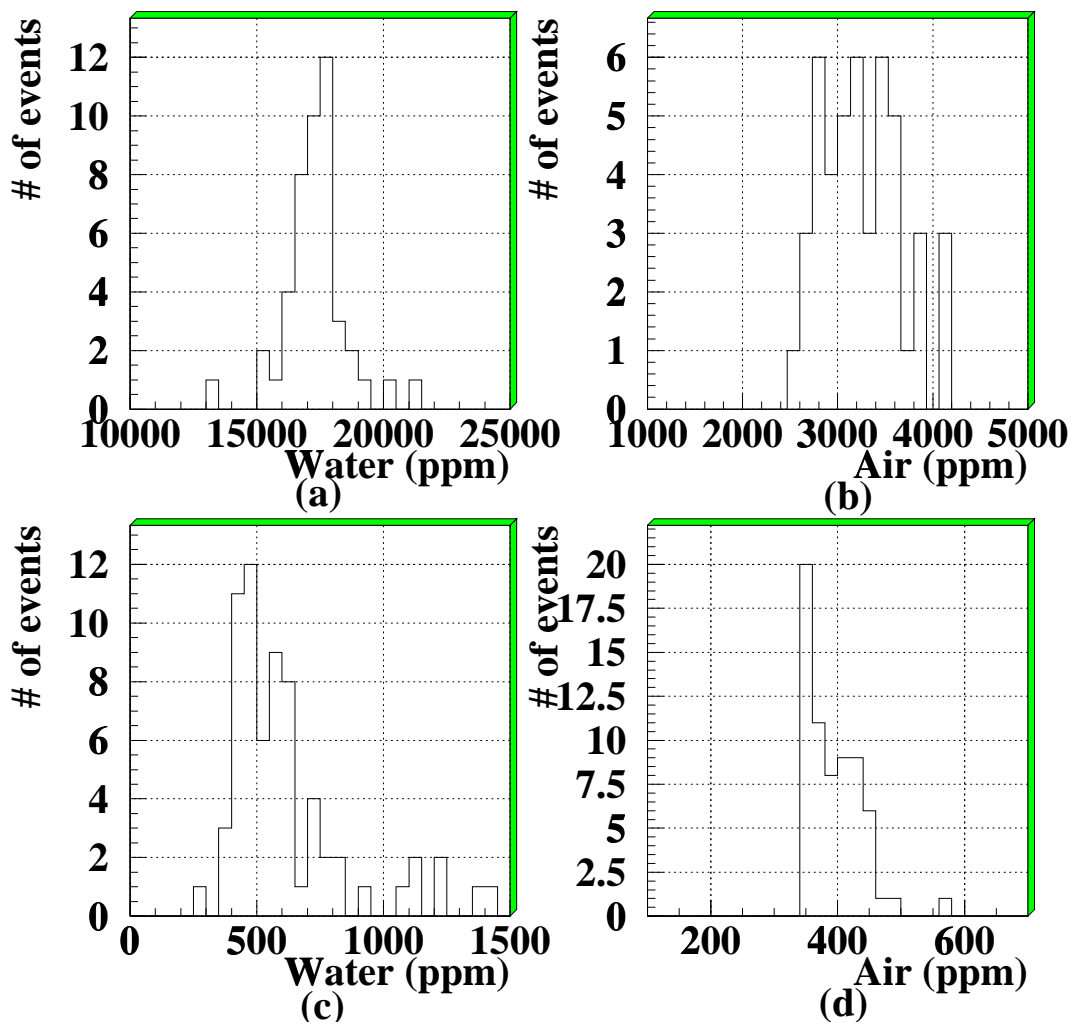


図 36: 混入する水分、空気の割合。(a)、(b)タイゴン・チューブをつないだとき。(c)、(d)タイゴン・チューブをつながないとき。

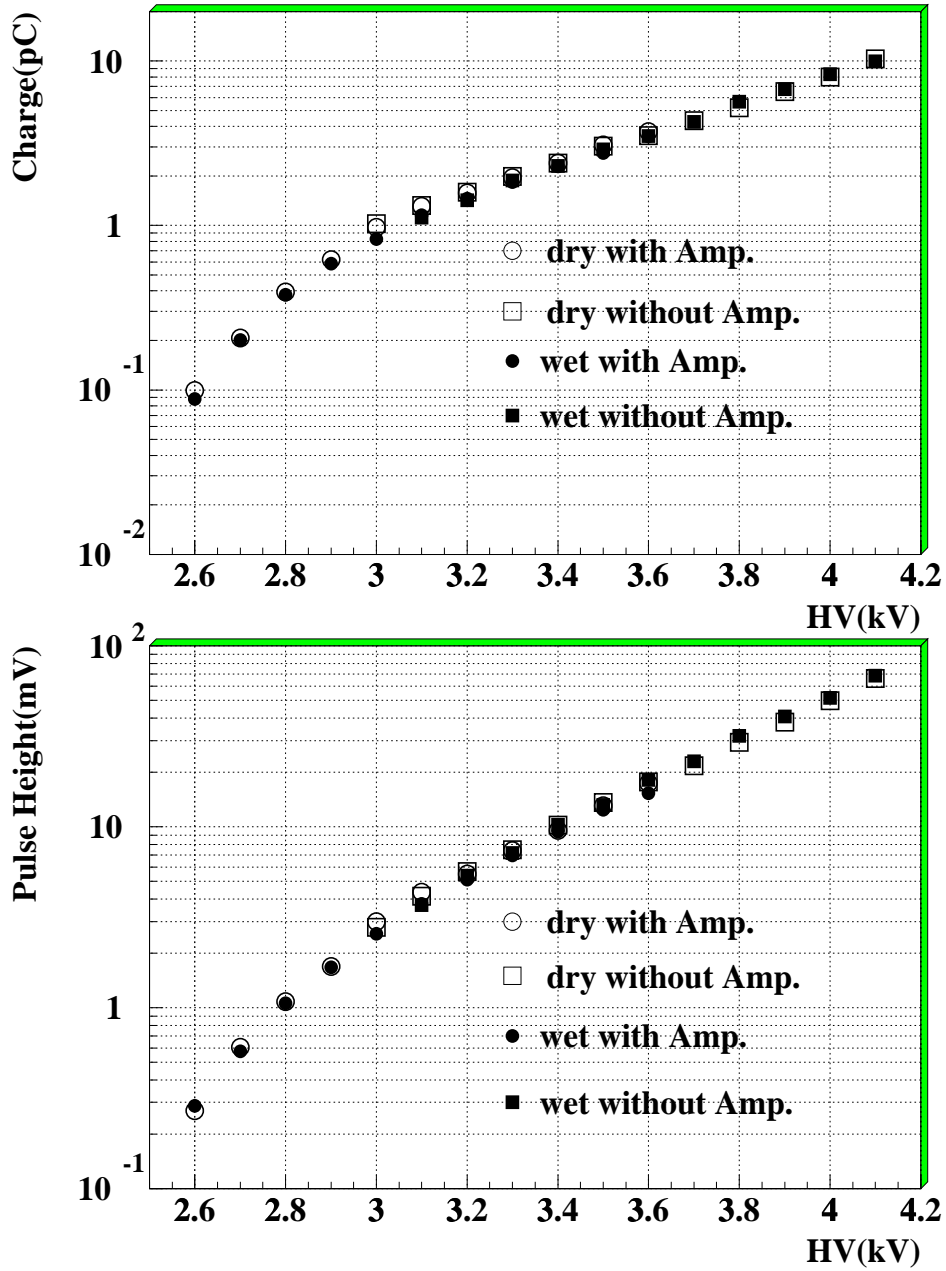


図 37: 水を加えた時のガスゲインの印加電圧依存性。上、電荷。下、波高。図 24に重ねてある。黒塗りの丸、四角が水分を約 1.7% 加え、それぞれアンプ有り、無しで測定したもの。水分を加えていないとき (白抜き丸と四角) と大きな違いはみられない。

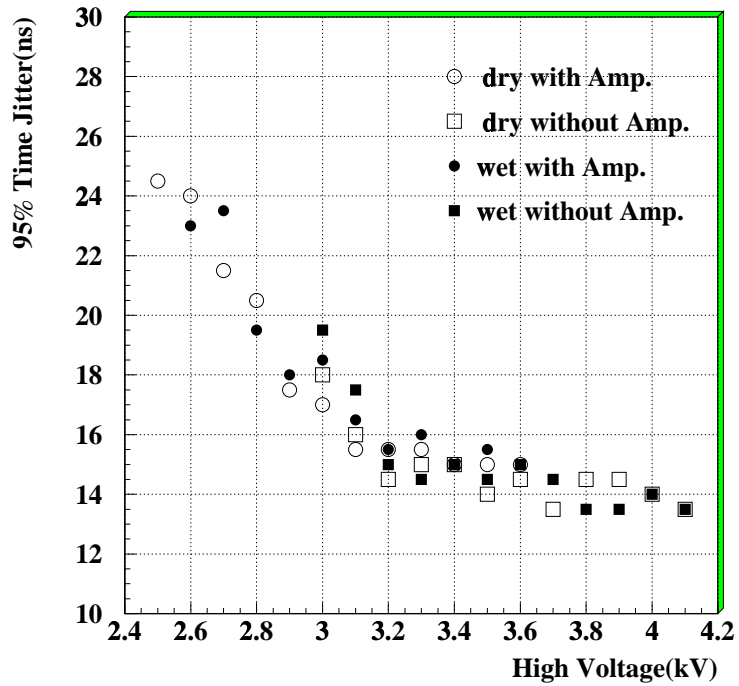


図 38: 水を加えた時の 95 % Time Jitter の印加電圧依存性。図 29に重ねてある。黒塗りの四角、丸が水分を約 1.7% 加え、それぞれアンプ有り、無しで測定したもの。水を加えていないとき (白抜きの円と四角) と大きな違いはみられない。

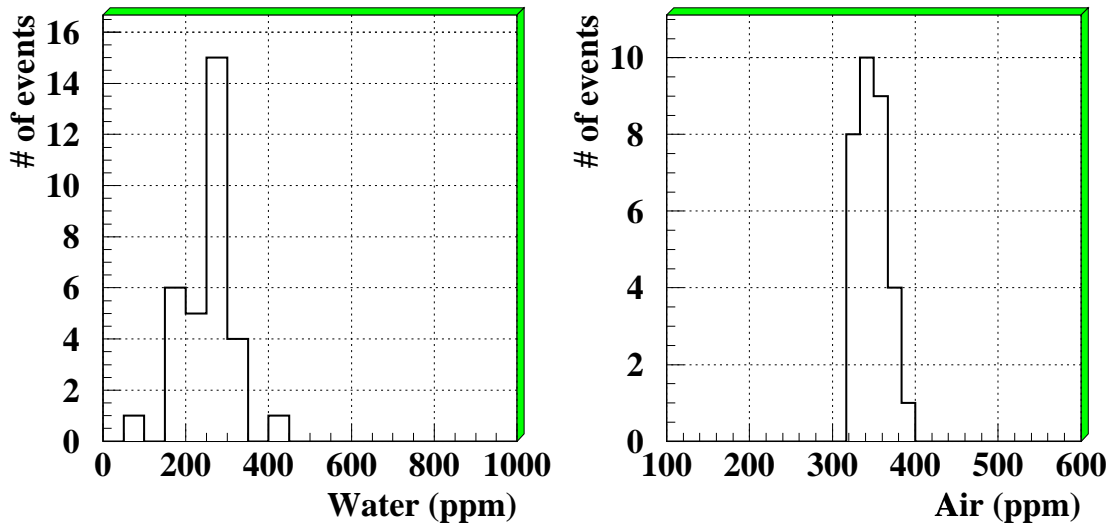


図 39: 混入する水分、空気。水分約 250 ppm、空気約 350 ppm 入っている。

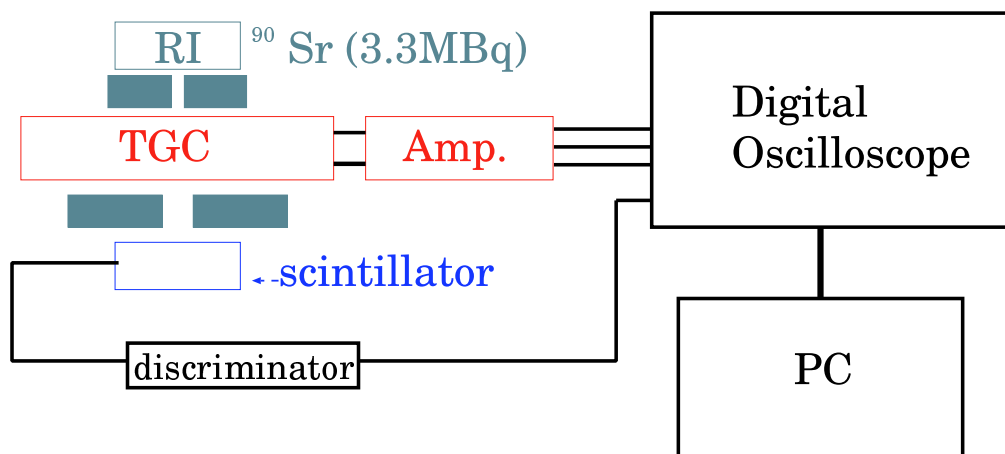


図 40: 高放射線テストのためのセットアップ。TGC の上下にコリメータを置き、その下にトリガー用シンチレータを置いた。線源は 3.3 MBq の  $^{90}\text{Sr}$  を使った。

構成している G10 からのしみだし、*n*-pentane に溶ける水の量が少なくなかったためだと思われる。

このときの実験セットアップを図 40 にしめす。TGC は 1.8 mm × 1.35 mm、4 本まとめ読みだしのものを使った。線源は 3.3 MBq の  $^{90}\text{Sr}$  を使用した。印加電圧は 3.2 kV かけた。

1 番よく放射線の当たっている真中の 4 ワイヤーには約 49 kHz の計数率がある。これは全体の 55% にあたる。これからおおざっぱに計算すると約 52 kHz/cm<sup>2</sup> の入射粒子頻度になる。

この状態で約 226 時間放射線を当て続け、約 600 mC/cm<sup>2</sup> の積分電荷量を得た。この間に電流の大きな変化はなく、考えられていたマルター放電は起こらなかった。図 41 は放射線照射前と照射後の電荷、波高、信号到達時間の分布である。このようにガス増幅率、時間分解能にも大きな変化はなかった。

図 42 は同じセットアップ、同じ TGC で放射線強度の違う線源を使った入射粒子頻度依存性である。電荷、波高については入射粒子頻度が高くなるとわずかに小さくなっている。Time Jitter については変化はない。ATLAS で予想されているバックグラウンドレートは 1 kHz/cm<sup>2</sup> 程度で、多くとも 10 kHz/cm<sup>2</sup> であると考えられているので問題ないと思われる。

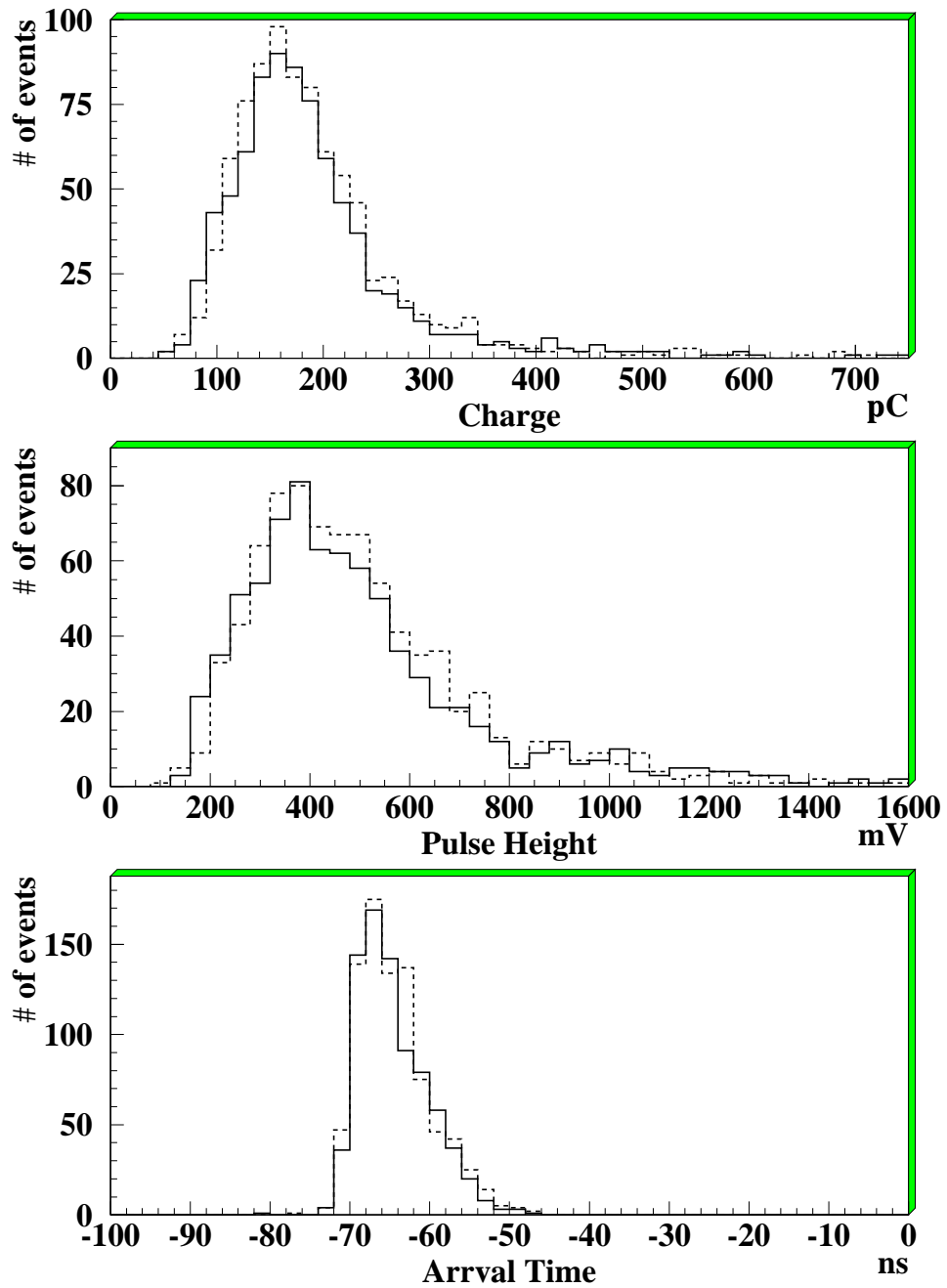


図 41: 放射線照射前 (実線)、照射後 (破線) の電荷、波高、信号到達時間の分布。照射前と照射後に大きな変化はない。

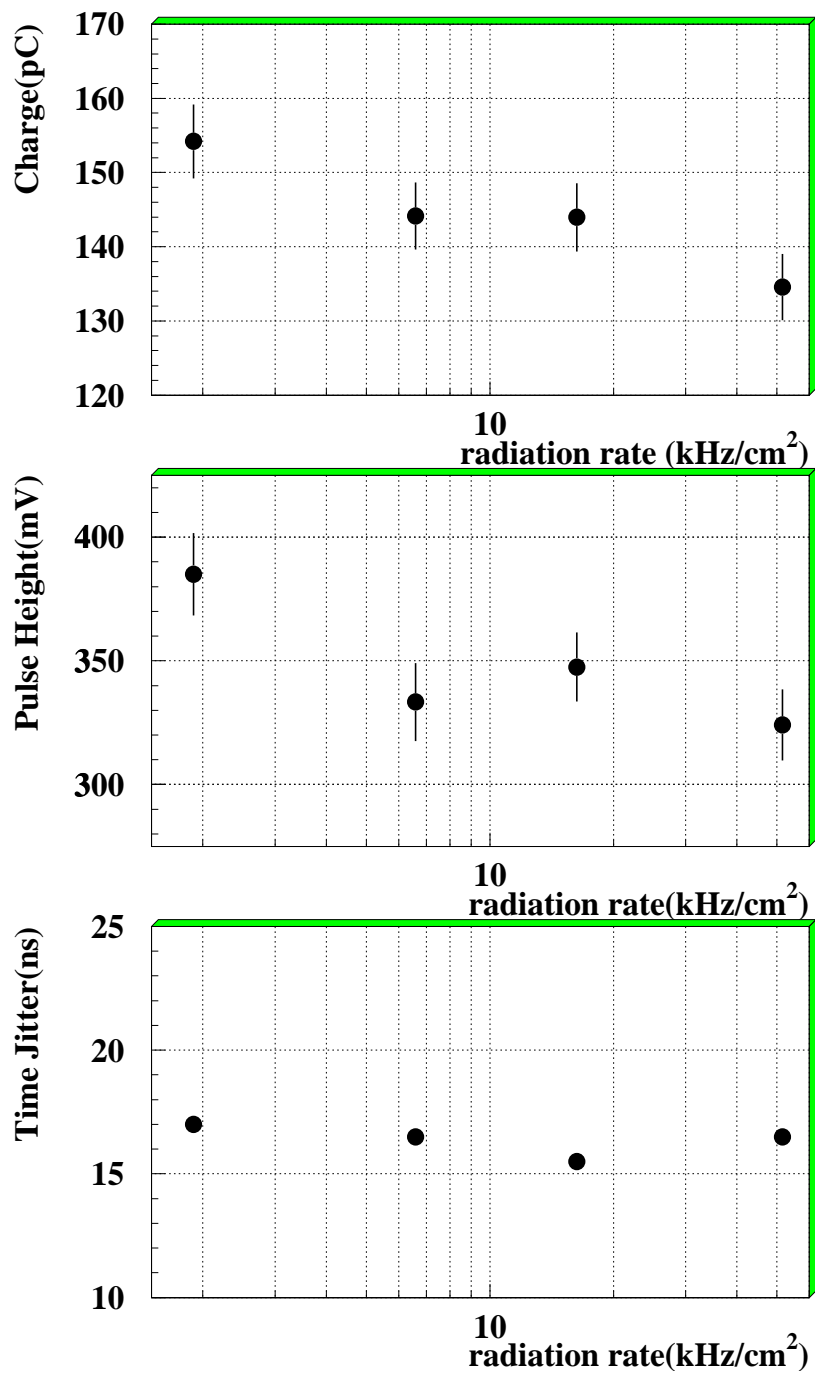


図 42: 入射粒子頻度依存性。高頻度では電荷、波高は若干小さくなっているが、Time Jitter には変化はない。



## 5 考察とまとめ

### 5.1 印加電圧と動作領域についての考察とまとめ

印加電圧、放射線源を変えることにより、動作領域についての研究を行なった。データ収集にデジタル・オシロスコープを用いることで、信号波形の変化を調べることができた。

その結果、 $1.8\text{ mm}\times 1.35\text{ mm}$  の TGC では約  $3\text{ kV}$ 、 $2.0\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$  の TGC では約  $3.1\text{ kV}$  で動作領域が制限比例領域に入っていることがわかった。 $\beta$  線源では比例領域での信号波形に比べ、制限比例領域のそれのほうが形が鋭くなっていることがわかった。これは電子なだれの生成さいに生じた陽イオンの雲よる空間電荷の効果によって電場が弱められ、2 番目以降にワイヤーに到着する電子塊のガス増幅が抑えられるためだと考えられる。

ATLAS 測定器のミュー粒子トリガー検出器として使う TGC は  $1.8\text{ mm}\times 1.35\text{ mm}$  のもので印加電圧を  $3.2\text{ kV}$  にすると考えている。この印加電圧での動作領域は制限比例領域に入ったところである。この領域での鋭い信号波形は、チェンバーの寿命に関係する電荷を低く抑えながら、高放射線頻度下においても高い検出効率、時間分解能を持つのに都合がよい。

### 5.2 ガス特性についての考察とまとめ

#### 5.2.1 ガス混合比に対する考察とまとめ

$\text{CO}_2$  と *n*-pentane の混合比に対するガス増幅率の変化を研究した。

*n*-pentane の混合比を減少させると電荷・波高とも大きくなった。これはガス増幅に関係する紫外線を *n*-pentane が吸収しているためだと考えられる。しかし、*n*-pentane の混合比を下げると放電を起こしやすくなり、安定性に問題が生じることがわかった。

#### 5.2.2 水の影響についての考察とまとめ

充填ガスへの水分の添加によるチェンバーへの影響を研究するために以下の実験を行なった。17000 ppm、相対湿度にして 54% の水分を充填ガスに添加したときの印加電圧に対するガス増幅率、Time Jitter について調べた。また、水分を 250 ppm まで少なくしたときに高放射線環境下においてどのような影響が出るか調べた。

結果は、水分を添加してもガス増幅率、Time Jitter に大きな変化はなかった。また、250 ppm 程度の水分でも入射粒子頻度約  $52\text{ kHz/cm}^2$ 、積分電荷量約  $600\text{ mC/cm}^2$  までは何も影響がなかった。つまり水分が 250 ppm~17000 ppm の間ならば TGC の動作には何も影響がないことがわかった。

250 ppm という水分の量は今のガスシステムでは自然に入ってきてしまう量だが、実際の ATLAS 実験の間にこれよりも少なくなってしまうことも考えられる。今後の課題として水分を強制的に排除した状態で、高放射線テストを行ない ATLAS 実験において水分の添加が必要であるかどうか調べる必要がある。

## 図目次

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | 主な Higgs 粒子の生成過程。 . . . . .                                      | 4  |
| 2  | 標準 Higgs 粒子発見ポテンシャル . . . . .                                    | 5  |
| 3  | ATLAS 測定器。 . . . . .   | 7  |
| 4  | ATLAS 測定器の R-Z 断面図。 . . . . .                                    | 8  |
| 5  | ミュー粒子トリガーの仕組み。 . . . . .   | 9  |
| 6  | 基本的な TGC の構造 . . . . .   | 11 |
| 7  | 電子のドリフトライン。 . . . . .  | 12 |
| 8  | アノードワイヤー付近でのタウンゼントなだれの推移。 . . . . .                              | 13 |
| 9  | ガスチェンバーの動作領域。 . . . . .  | 14 |
| 10 | 紫外線の吸収断面積。 . . . . .   | 15 |
| 11 | テスト用チェンバー。 . . . . .   | 16 |
| 12 | 波高、信号到達時間の定義。 . . . . .  | 18 |
| 13 | 電荷、波高の分布の例。 . . . . .  | 18 |
| 14 | 信号到達時間の分布の例。 . . . . .   | 19 |
| 15 | <i>n</i> -pentane の飽和蒸気圧曲線。 . . . . .                            | 20 |
| 16 | バブリング法ガスシステム。 . . . . .  | 20 |
| 17 | ガス混合比の温度依存性 . . . . .  | 21 |
| 18 | ガス混合比の流量依存性。 . . . . .   | 22 |
| 19 | 液体質量流量コントローラーを用いたガスシステム。 . . . . .                               | 22 |
| 20 | <i>n</i> -pentane の混合比のばらつき。 . . . . .                           | 23 |
| 21 | シンフレックス・チューブから入ってくる空気、水分の量 . . . . .                             | 25 |
| 22 | 3 種類のチューブから入ってくる空気、水の割合。 . . . . .                               | 26 |
| 23 | 印加電圧依存性を調べるさいのセットアップ . . . . .                                   | 27 |
| 24 | 電荷最頻値、波高最頻値の印加電圧依存性 . . . . .                                    | 28 |
| 25 | 100 イベントの平均の波形。アンプなし。 . . . . .                                  | 29 |
| 26 | 100 イベントの平均の波形。アンプあり。 . . . . .                                  | 30 |
| 27 | 電荷と波高の比の印加電圧依存性 . . . . .  | 32 |
| 28 | 電荷最頻値と波高最頻値の比の印加電圧依存性。 . . . . .                                 | 33 |
| 29 | Time Jitter の印加電圧依存性 . . . . .                                   | 33 |
| 30 | <sup>55</sup> Fe 線源による波形の例。 . . . . .                            | 34 |
| 31 | <sup>90</sup> Sr 線源による波形の例 . . . . .                             | 35 |
| 32 | <sup>90</sup> Sr、 <sup>55</sup> Fe 線源に対するガス増幅率の印加電圧依存性 . . . . . | 36 |
| 33 | <sup>90</sup> Sr、 <sup>55</sup> Fe 線源の電荷最頻値と波高最頻値の比。 . . . . .   | 37 |
| 34 | ガス混合比依存性。 2.0 mm× 1.6 mm。 3.4 kV。線源 <sup>55</sup> Fe。 . . . . .  | 39 |
| 35 | 2 種類の混合比ガスにおける電荷、波高の印加電圧依存性。 . . . . .                           | 40 |
| 36 | 混入する水分、空気の割合。 . . . . .  | 42 |
| 37 | 水を加えた時のガスゲインの印加電圧依存性 . . . . .                                   | 43 |
| 38 | 水を加えた時の Time Jitter の印加電圧依存性 . . . . .                           | 44 |

|    |                                       |    |
|----|---------------------------------------|----|
| 39 | 混入する水分、空気。 . . . . .                  | 44 |
| 40 | 高放射線テストのためのセットアップ。 . . . . .          | 45 |
| 41 | 放射線照射前、照射後の電荷、波高、信号到達時間の分布。 . . . . . | 46 |
| 42 | 入射粒子頻度依存性。 . . . . .                  | 47 |

## 表目次

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | LHC 加速器の主要パラメータ . . . . .                              | 2  |
| 2 | ミュー粒子検出器に対するバックグラウンドレート ( $1.44 <  \eta  < 2.3$ ). . . | 10 |

## 参考文献

- [1] ATLAS Technical Proposal,CERN/LHCC/94-43(1994)
- [2] ATLAS Muon Spectrometer Tecnical Design Report,CERN/LHCC/97-22 (1997)
- [3] ATLAS Letter of Intent,CERN/LHCC/92-4(1992)
- [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] 小林富雄 「質量の起源を求めて」：パリティ Vol.11,No.03(1996)58-61
- [7] 神戸大学 中村勇氏 との Private Communication より。
- [8] 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)
- [9] A.Ferrari and P.R.Sala,*Background rates in the muon system:recent results and the effect of the tungsten plug*,ATLAS Internal Note Muon-No-90(1995)
- [10] 東京大学 吉田光宏、修士学位論文 「ミューオントリガーチェンバーの信号特性の研究とフロントエンドモノリシック IC の開発」
- [11] 信州大学 細田隆志、修士学位論文 「アトラス・ミュー粒子検出器用トリガーチェンバーの研究」
- [12] H.Fukui et al.,*Results of An Ageing Test of Thin Gap Chamber for ATLAS Endcap Muon Trigger*,(1997) submitted to ATLAS Muon Note
- [13] H.Fukui et al.,*Studies on ageing effect and rate dependence of Thin Gap Chamber*,(1998)
- [14] K. クラインクネヒト 著 培風館、「粒子線検出器－放射線計測の基礎と応用－」
- [15] Glenn F.Knoll 著 日刊工業新聞者、「放射線計測ハンドブック」
- [16] F.Sauli,*PRINCIPLES OF OPERATION OF MULTIWIRED PROPORIONAL AND DRIFT CHAMBERS*,CERN Report 77-09(1997)
- [17] R.I.Schoen,*Absorption,ionization and ion-fragmentaton cross-section of hydrocarbon vapors under vacuum-ultraviolet radiation*, J.Chem.Phys. 17 2032(1962)
- [18] 東京大学 三宅正明、修士学位論文 「ミューオントリガーチェンバーの動作特性試験」
- [19] J.A.Kadyk,*Wire chamber aging*,Nucl.Inctr.and Meth. A300 (1991)436-479

- [20] R.Bouclier et al., *Effects of outgassing from some materials on gas chamber ageing*, Nucl.Instr.and Meth.A350(1994)464-469
- [21] J.A.Kadyk et al., *Use of straw tubes in high-radiation environments*, Nucl.Instr.and Meth. A300(1991)511-517
- [22] S.Nakamura, *Enhancement of Etching Ability due to the Addition of a Trace of Oxygen to the  $CF_4/i-C_4H_{10}$  (80:20)*, KEK Report 95-11.

## 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、川越清以助教授に深く感謝します。

また、研究を行なうにあたり適切な助言と惜しめない御協力をして下さいました神戸大学工学部本間康浩助教授に深く感謝します。また、実験装置の製作等技術的指導並びに助言を与えて下さいました横山千秋先生に感謝します。

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、大須賀関雄助教授、岩崎博行助教授、佐々木修助手に感謝します。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素粒子物理学国際研究センター小林富雄教授、信州大学竹下徹助教授に感謝します。

研究活動のみならず研究生活全体においても惜しめない御支援、御協力をしていただいた福井秀人氏に心から感謝します。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下された永井康一氏、田中秀治氏に感謝します。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長谷川庸司氏、山内一夫氏、本間謙輔氏に感謝します。この論文を書くに当たり適切な助言をしていただいた中村勇氏、石井恒次氏に心から感謝します。そして、研究生活を共にし様々な支援をしてくれました陣内修氏、吉田光宏氏、深津吉聡氏、宮崎由之氏、加賀志穂佳氏、津野総司氏、鈴木修氏、林健一氏、そして東京大学、信州大学、KEK、イスラエル Weizman Institute、神戸大学の方々に心から感謝します。

最後に直接研究とは関係ありませんが、私のわがままを聞いて下さった母と私をはげましてくださったたくさんの友人に心から感謝します。