

修士学位論文
ミュオントリガーチェンバーの動作特性試験

東京大学大学院 理学系研究科
物理学専攻

46152

三宅 正明

1月

要旨

世界最大の重心系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、欧州素粒子物理学研究所 (CERN) において、2004 年の実験開始を目標に計画され、様々な研究がなされている。この実験において重要な役割を果たすミュオントリガー検出器には、高頻度での実験のために様々な極めて厳しい要求が提示されている。Thin Gap Chamber は、ミュオントリガー検出器として LHC 実験で予想される高頻度入射粒子の環境においても、その動作能力をほとんど損なわずに優れた時間分解能特性と高い検出効率を維持し続けると期待されている。これらの項目について実際にテストビームを用いて確かめ、さらに性能が向上する可能性を搜した。

もくじ

1	序論	3
1.1	LHC 計画	3
1.2	ATLAS 検出器	4
1.3	LHC 実験におけるミュオン	4
2	ミュオントリガー検出器 (Thin Gap Chamber)	10
2.1	チェンバーの構造と動作原理	10
2.2	多線式比例計数管	16
2.3	Thin Gap Chamber	18
3	ビームテスト	22
3.1	ビームテスト 94	22
3.1.1	セットアップ	23
3.1.2	データ収集及び解析	24
3.1.3	信号到達時間分布	28
3.1.4	検出効率	30
3.1.5	信号検出チャンネル数	42
3.1.6	粒子入射頻度依存性	45
3.1.7	粒子入射位置依存性	48
3.1.8	信号の伝搬速度	50
3.2	ビームテスト 94 から 95 へ向けて	55
3.3	ビームテスト 95	60
3.3.1	セットアップ	61
3.3.2	データ収集及び解析	61
3.3.3	検出効率	65
3.3.4	時間分解能の向上	69
3.3.5	大型 TGC の信号検出数	76
3.3.6	TGC の信号振幅	79
4	結果のまとめ	82

1 序論

1.1 LHC 計画

スイスの欧州素粒子物理学研究所 (CERN) において現在、大型電子陽電子衝突型加速器 LEP (Large Electron Positron collider) が、当初の目的であった Z^0 粒子の精密測定を終え (LEP-I)、重心系の衝突エネルギーを増加させて稼働中である (LEP-II)。LHC は、この LEP に代わる加速器として 2004 年に稼働する予定の大型陽子陽子衝突型加速器 (Large Hadron Collider) である。その規模は、現在の LEP に使用しているトンネル (全長 27km) をそのまま使用し、重心系エネルギー 14TeV、ビームルミノシティ $10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$ ビーム衝突頻度 25ns に一回というものである。

高エネルギー素粒子実験に用いられる加速器は、大きく分けて二つの種類に分類することが出来る。精密測定に適している電子陽電子衝突型加速器と未発見粒子の探索、新しい物理を追求することに適しているハドロン衝突型加速器である。これら二つは、互いに相補的な面を持っている。

上記 LEP に代表される、 $e^+ e^-$ 衝突型加速器 (collider) は、衝突エネルギーが生成される粒子のエネルギーの総和になるため、特定の粒子の性質 (例えば質量など) を精密測定することに非常に適している。反面、円形加速器の宿命であるシンクロトロン放射によるエネルギー損失のため、エネルギーを増加させることが難しく、現在世界最高エネルギーである LEP の重心系エネルギー 90GeV を越えるものは、LEP 自身のエネルギー強化による LEP-II だけで、そのエネルギーを越えるような新たな円形加速器が建設される予定はない。

しかし、同じ円形加速器でありながら、LHC は LEP の重心系エネルギーを遥かに越えることが可能である。その理由は、シンクロトロン放射によるエネルギー損失は、その加速させる粒子の質量に依存し、重い粒子の方が同じエネルギーでは損失が小さいからである。この利点を生かして、LEP と同じトンネルを使用するにもかかわらず、LHC 実験では未知の TeV エネルギー領域を探索することが可能なのである。LHC のようなハドロン衝突型加速器の代表は、アメリカのシカゴにあるフェルミ国立加速器研究所 (Fermilab) がもつ Tevatron で、現在世界最高エネルギーを加速器としてもち、重心系エネルギーは 1.8TeV である。Tevatron によるトップクォーク粒子の発見は記憶に新しいところである。この例が示すように、現在未発見粒子、ヒッグス粒子・SUSY 粒子等の探索・発見に適している加速器が、ハドロン衝突型加速器である。

しかし、ハドロン衝突型加速器による実験にも問題点がある。それは、衝突させ

る粒子 (LHC の場合は陽子 p) が互いに構造を持つため、実際反応に寄与するエネルギーは、電子陽電子衝突型加速器のように容易に求まらない。加えて、反応に関わらない残りの粒子によるジェットが多数発生するため各反応の解析が非常に難しいことである。

1.2 ATLAS 検出器

LHC 実験に設置される検出器は複数予定され、そのうちの 하나가 ATLAS 検出器である (図 1)。LHC 実験のような高エネルギーでの構造を持つ粒子同士の衝突では、目的としている深部非弾性衝突で生じた粒子による事象に比べ、それ以外の事象 (バックグラウンド) が多数発生する。その両者を識別するために様々な解析方法が計画、試みられている。その結果、多くの目的の物理の場合、生成された粒子が崩壊モードとしてレプトン粒子を含むならば、それを条件に含めた方が効率良く事象を選び出せる。従って、レプトン粒子を高精度で測定することは、その事象がいずれの物理事象から来たものかを特定することと起こっている物理を解明する有力な手段である。ATLAS 検出器の最外部に設置されるミュオン検出器は、かなり高い S/N 比でミュオンを検出でき、多くの物理事象の解析に用いるため非常に重要である (図 2)。この中で、ミュオントリガーに対しては、

- イベントの頻度である 25ns のバンチクロッシング時間より小さい時間分解能
- $1\text{kHz}/\text{cm}^2$ 程度の高レートにおいて十分動作する能力
- P_t (横方向運動量) をトリガー条件に組み込むための 1cm 程度の位置分解能

の三つの要請がある。Thin Gap Chamber (以下 TGC、図 12・14) は、これら全てを満足する検出器として、前後方部のミュオントリガー検出器に採用されたのである。

1.3 LHC 実験におけるミュオン

前節で触れた通り、LHC 実験においてミュオンが果たす役割は大きい。以下に関係する物理を挙げると、

$$\begin{aligned}
 H^0 & Z^0 Z^{(*)} \quad 4l^\pm \\
 H^0 & Z^0 Z^0 \quad l^+ l^- \nu \nu \\
 H^0 & W^\pm W^\pm \quad l\nu \text{ jet jet} \\
 t(\bar{t}) & l\nu \text{ jet (jet tagging)} \\
 B_d^0 & J/\psi \quad ll
 \end{aligned}$$

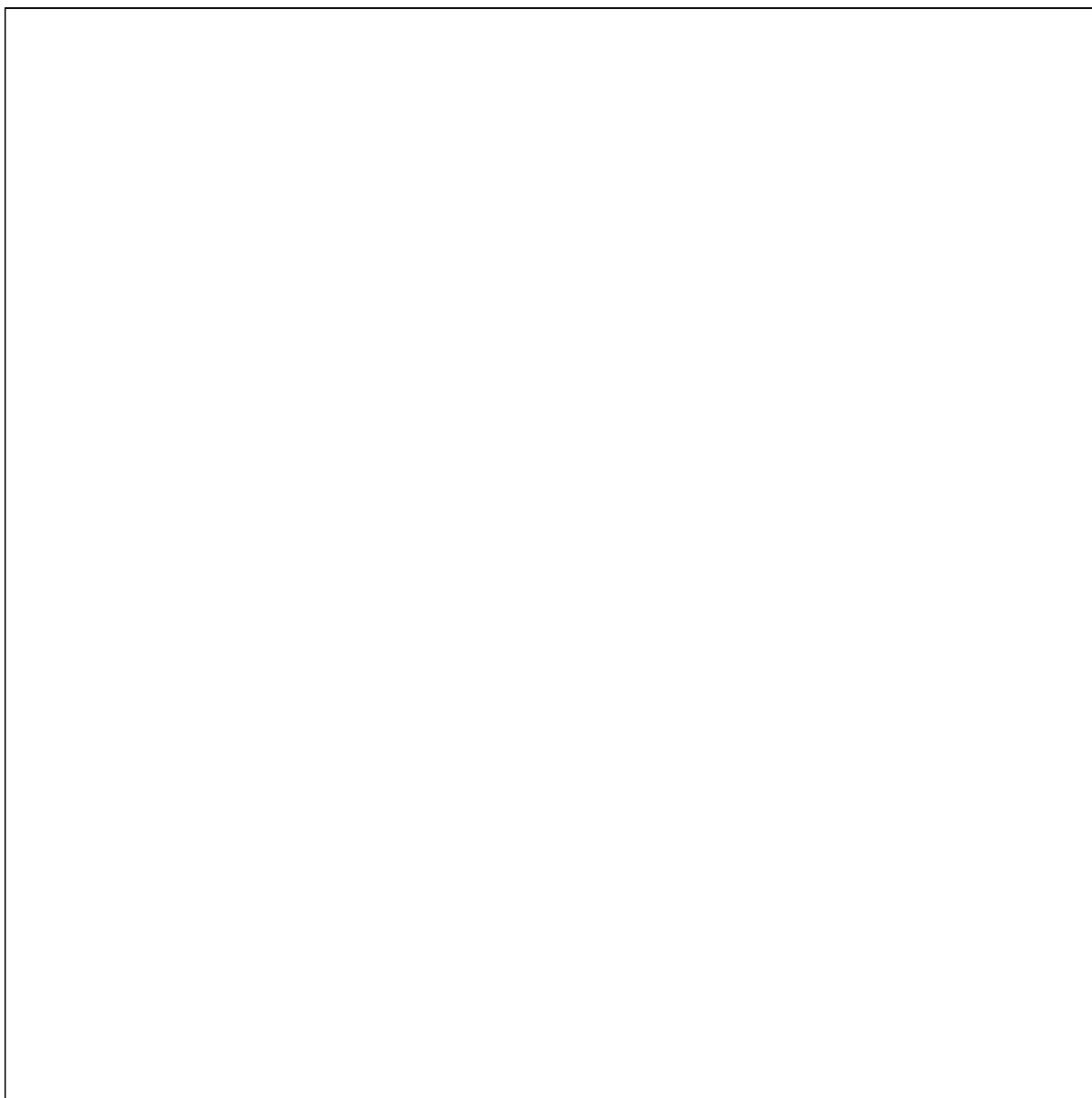


図 1: ATLAS 検出器

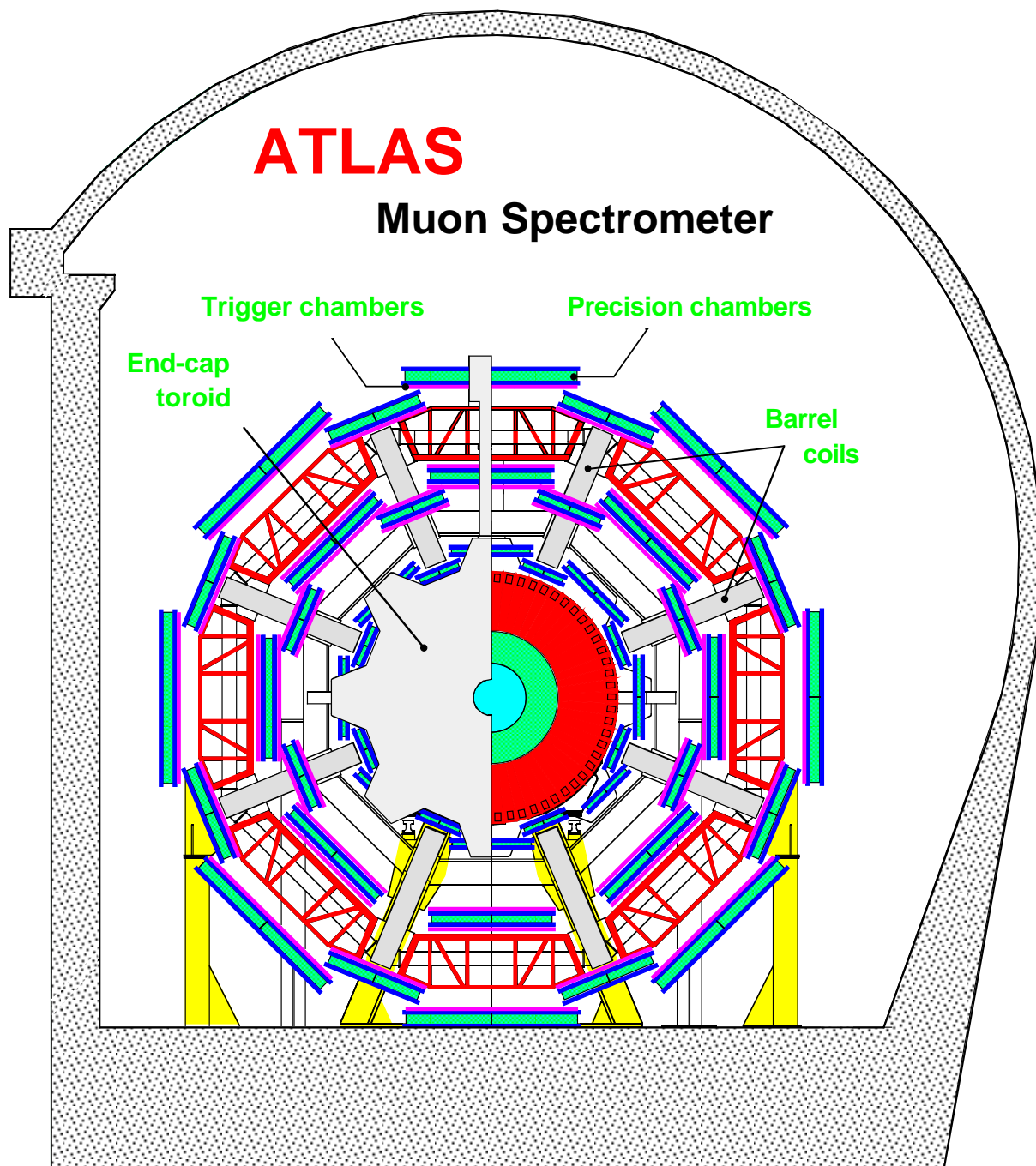


図 2: ミューオン検出器。位置測定器 (Precision chambers) に挟まれてトリガー検出器 (Trigger chambers) がある。

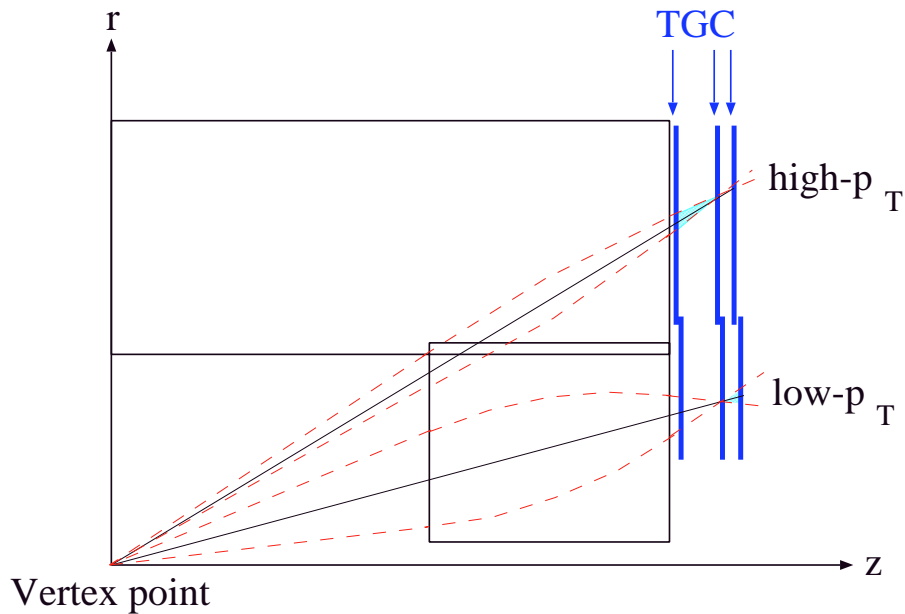


図 3: ミューオントリガーの仕組み。high- P_t 、low- P_t それぞれでトリガー条件に使う TGC の位置が異なる [1]。

のような、荷電レプトンを含むものがある。荷電レプトンのうち、 π^0 等のバックグラウンドを含む電子に比べると、ミュオンは効率よく検出できる。

また、LHC 実験では、発生するイベントの頻度が非常に高く、多くのイベントの中から物理的に重要なイベントの選択をあらかじめすることが必要である。ミュオントリガーは、発生したミュオンの持つ横向き運動量 P_t により、その事象を選択するかどうかを判定する役割を持つ。図 3 がその方法の概要を表したもので、左下がビーム衝突点で、 z 軸を取り巻く方向に磁場が掛けられているため、 r - z 面上で粒子は曲げられる。実線は、粒子の持つ運動量が無限大の時の飛跡で破線が high- P_t (予定 20 GeV)、low- P_t (予定 6 GeV) 粒子の例である。トリガー条件の判定は、high- P_t の場合ビーム衝突点に近い TGC 2 枚で、low- P_t の場合ビーム衝突点に遠い TGC 2 枚で、真中の TGC の位置に対して他の TGC 上にウィンドウを開くことにより行なわれる。ウィンドウとは、条件を満たす運動量を持った粒子が通過すると計算される場所全域を指し、この大きさにより運動量に条件を課すのである。開いたウィンドウ上全てとコインシデンスをとり、成立した場合は条件が満たされたと認識されトリガー信号が出力される。

TGC が採用された前後方部には、ミニマムバイアスイベントやビームとビームパイプとの衝突等で発生する高頻度の粒子入射が予想されている (図 4)。その予想によ

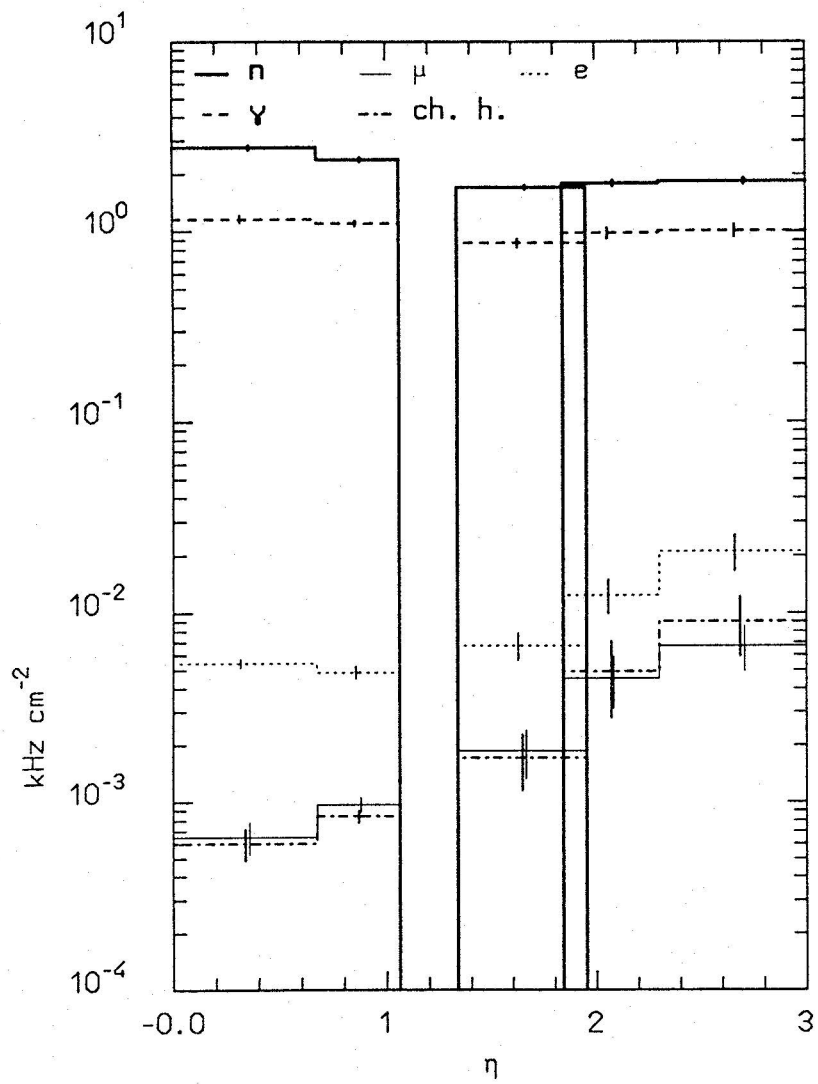


図 4: 予想されるバックグラウンドの割合 [1]。横軸はラピディティーである。

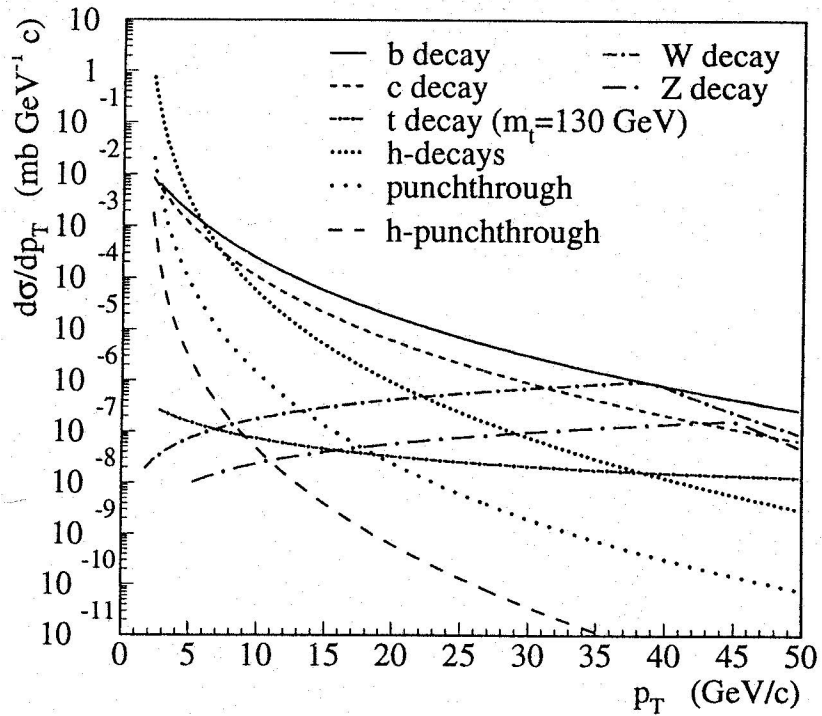


図 5: ミューオンの P_t 分布 [1].

れば、バックグラウンドのレートは $1\text{kHz}/\text{cm}^2$ 程度であるが、シールドが少しでも甘い場合や穴などが空いていると、 $10\text{kHz}/\text{cm}^2$ 程度に簡単に増加してしまうとも予想されている。このような状況に直面した場合でも十分 TGC は対応でき、さらに、 $100\text{kHz}/\text{cm}^2$ 程度までも動作可能な環境と考えている。これに対し、実際のミューオンの P_t 分布は図 5 の様になっている。ここで前述の実験からの要請をみためには、この厳しい環境に耐えられる性能と、信頼できる動作能力、非常に大規模な面積を覆うためのコストパフォーマンスを全て満たすものでなければならない。TGC はこの要請を満たす、すなわち優れた時間分解能を持ち、検出効率も高く、製作費も安くあがり、長期間安定的に動作できる検出器であると期待されている。このことを、今までの TGC を用いて試験し、さらに、LHC 実験用に改良を目指してこの研究試験は行なわれた。

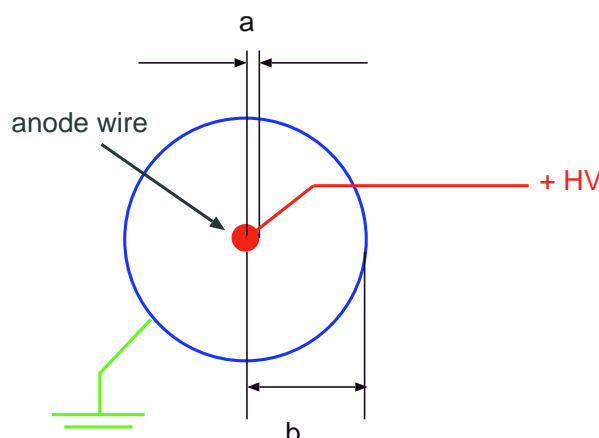


図 6: 円筒型比例計数管の例。a はワイヤーの半径、b はワイヤーグラウンド間の間隔

2 ミューオントリガー検出器 (Thin Gap Chamber)

Thin Gap Chamber(以下 TGC) を含めた各種チェンバーの基本動作原理は、個々には比例計数管と同じであるのでまずそれについて述べ、次に、その応用である TGC 等について述べる (参考文献 [2])。

2.1 チェンバーの構造と動作原理

荷電粒子は、物質中を通過するとその物質と相互作用 (主に電離) し、物質を構成している分子・原子を、励起または、イオン化させる。チェンバーは、その電離によって生じた電子を信号情報源として利用する検出器である。この電子を高電圧とガスによって増幅させて利用するの測定器のうち基本的なものが比例計数管 (Proportional Counter) である。比例計数管の基本構造の例を図 6 に示す。半径 b を持つ円筒の導体の中に、半径 a の金属ワイヤーが張られている。電離により生じた電子 (一次電子) をアノードワイヤーに導く (電子のドリフト) ために、アノードとカソードの間に電位差が作られている。一般的には、図 6 にある通り導体の電位をグラウンドにとり、ワイヤーに正の高電圧が掛けられる。電子の移動速度は、電子ドリフト速度 v_d と呼ばれ、使用するガスに固有である。図 7~ 9 に CF_4 と CO_2 の電子のドリフト速度を示す。この電場 E は、次式に従う。

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0 r} \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} \quad V_0: \text{ワイヤー表面の電位}, C: \text{静電容量} \quad (1)$$

この式が示す様に、アノードワイヤーに近づくにつれて電場は急に強くなる。電子はこの電場により加速されて、自身のエネルギーを増加し、ガス中の分子との衝突

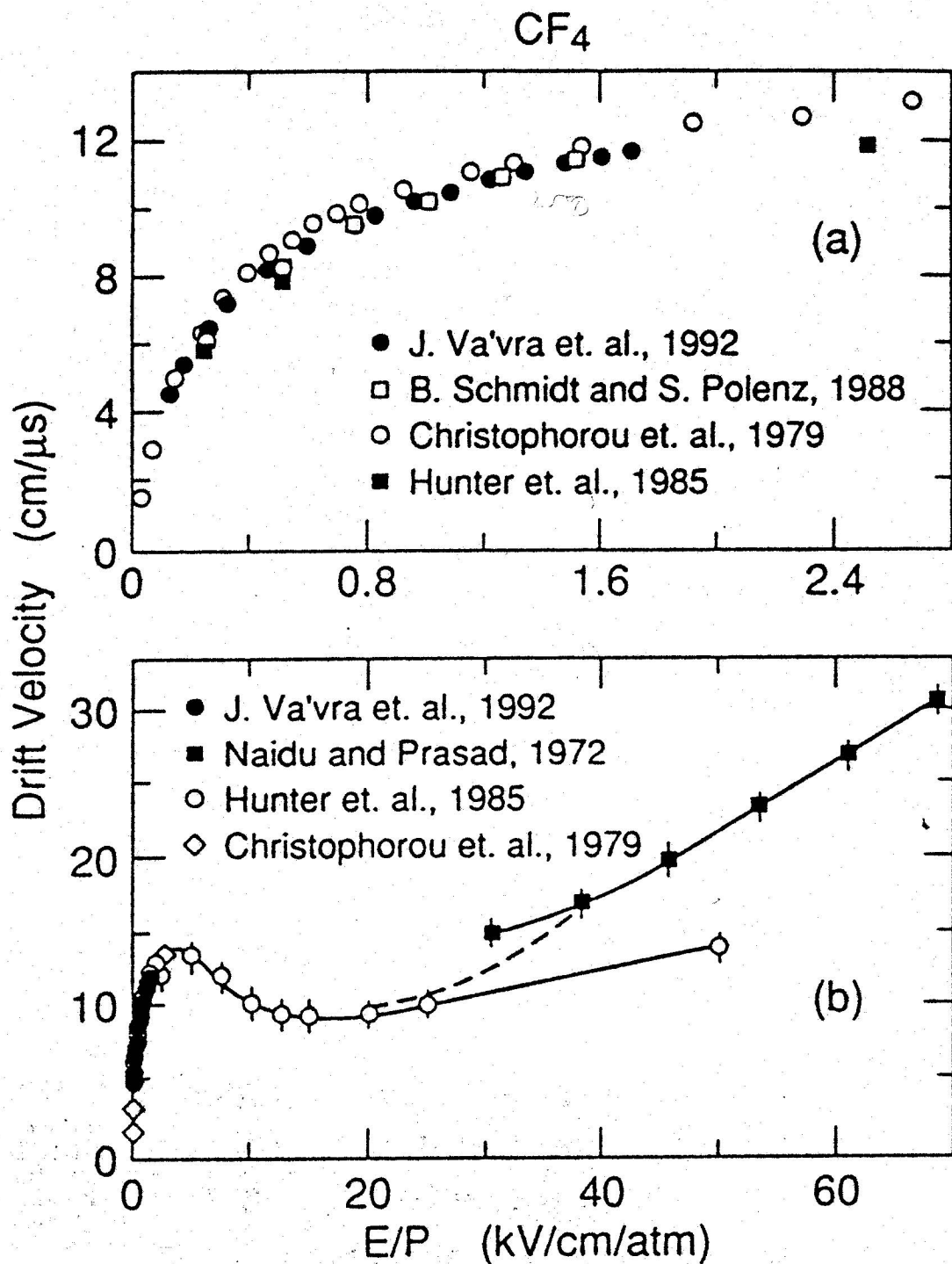


図 7: CF₄ 中の電子のドリフト速度 [3]。 (a) が電場の低い領域で、 (b) が電場の高い領域でのドリフト速度。

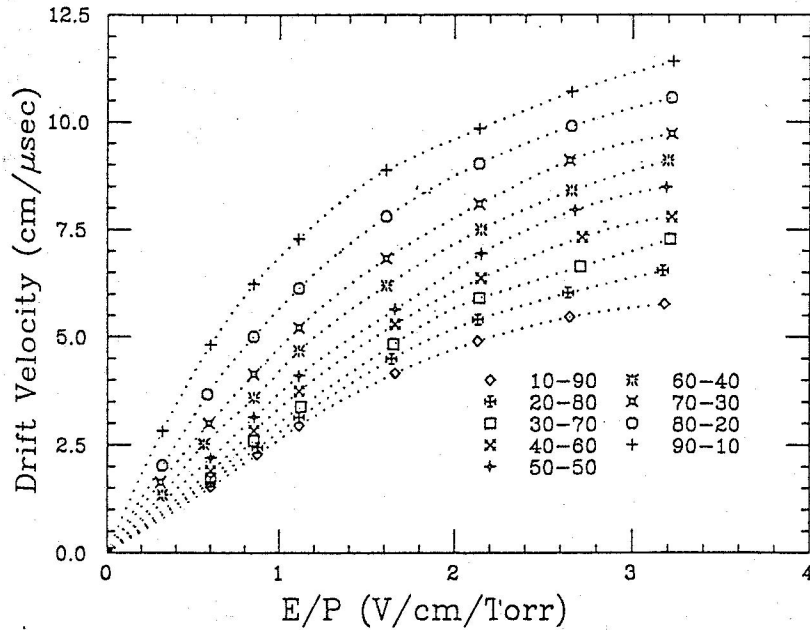


図 8: $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ 中の電子のドリフト速度 [7]。○印が 80:20 の時の速度。

によりそのエネルギーを失う。電場の弱い領域では、この加速と減速が繰り返し行なわれる。ここで、電子が一回の衝突の間に進む距離を平均自由行程という。電子が、アノードワイヤー近傍(半径の数十倍)に到達し、電場の強さが $10^4 \sim 10^5 \text{ V/cm}$ に達すると、一次電子の得るエネルギーは増加し、その衝突によりガス中の分子や原子が得られるエネルギーがそれぞれのイオン化エネルギーを越え二次電離が始まる。この過程は連続的に起こり、電子とイオンの雪崩(タウゼント雪崩)にまで発達する。その結果、生じた電子の数が一次電子の数に比例する電場強度とガス圧が存在し、これを利用した計測器が比例計数管である。つまり、増幅で得られた電荷量から一次電子の数が分かるのである。この領域を比例領域といい、さらに上には、限定的比例領域、もはや一次電子の数によらない領域、ガイガーミュラー領域が存在する。

電子の場合と同じように、ガス増幅で生じた陽イオンも電場によりドリフトする。その速度 w^+ は E/P に比例し、移動度 μ^+ と次のような関係にある。

$$w^+ = \frac{\mu^+ E}{P} \quad P: \text{圧力}/(1\text{atm}), E: \text{電場} \quad (2)$$

さらに混合気体の場合、 μ^+ は、

$$\frac{1}{\mu^+} = \sum \frac{f_i}{\mu_i^+} \quad f_i: \text{混合比} \quad (3)$$

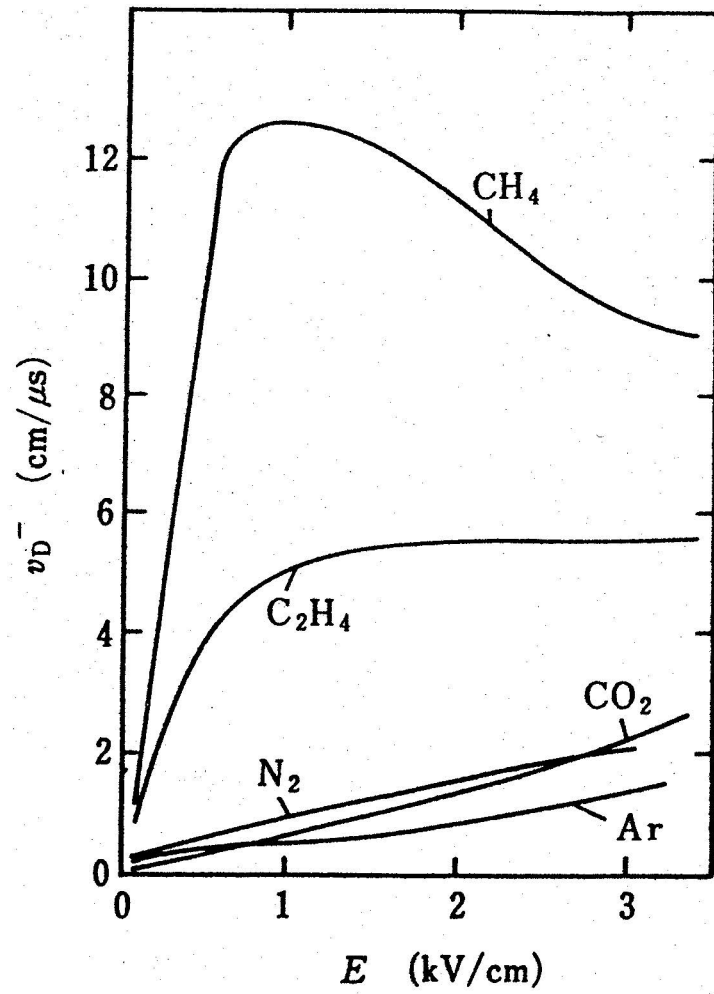


図 9: CO₂ 中の電子のドリフト速度 [2]

となる。TGC で使用するガスを含めた移動度を表 1、図 10 にまとめる。TGC で使用したガス $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80:20)¹ の場合、 $\mu^+ = 0.89 (\text{cm}^2/\text{Vs})$ となる。

粒子の通過によって生じた電子は、多くの場合ガス増幅されるが、中には電子がドリフト中にガス分子に吸着されるものもある。これが、電子吸着性 (electronegative) であり、酸素 (O_2)、水 (H_2O)、さらには四フッ化炭素 (CF_4) にこの効果が見られる。この効果は、ガス増幅を起こす一次電子の数を減少、時には消滅させてしまう。その結果、アノードワイヤーに達する電子の数を不均一し、比例計数管の比例関係を著しく歪めるだけでなく、TGC の場合には、その検出効率を低下させる原因となっている。(3.1.4 節)

¹四フッ化炭素 (CF_4) とイソブタン (C_4H_{10}) とを 80:20 の比で混合したもの

イオン	ガス	移動度 $\mu^+ (\text{cm}^2/\text{Vs})$
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}^+$	CF_4 (四フッ化炭素)	1.00
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}^+$	$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (イソブタン)	0.61
CO_2^+	CO_2	1.09
CH_4^+	Ar	1.87
CH_4^+	CH_4 (メタン)	2.26

表 1: 各ガス中でのイオンの移動度 [6][7]。

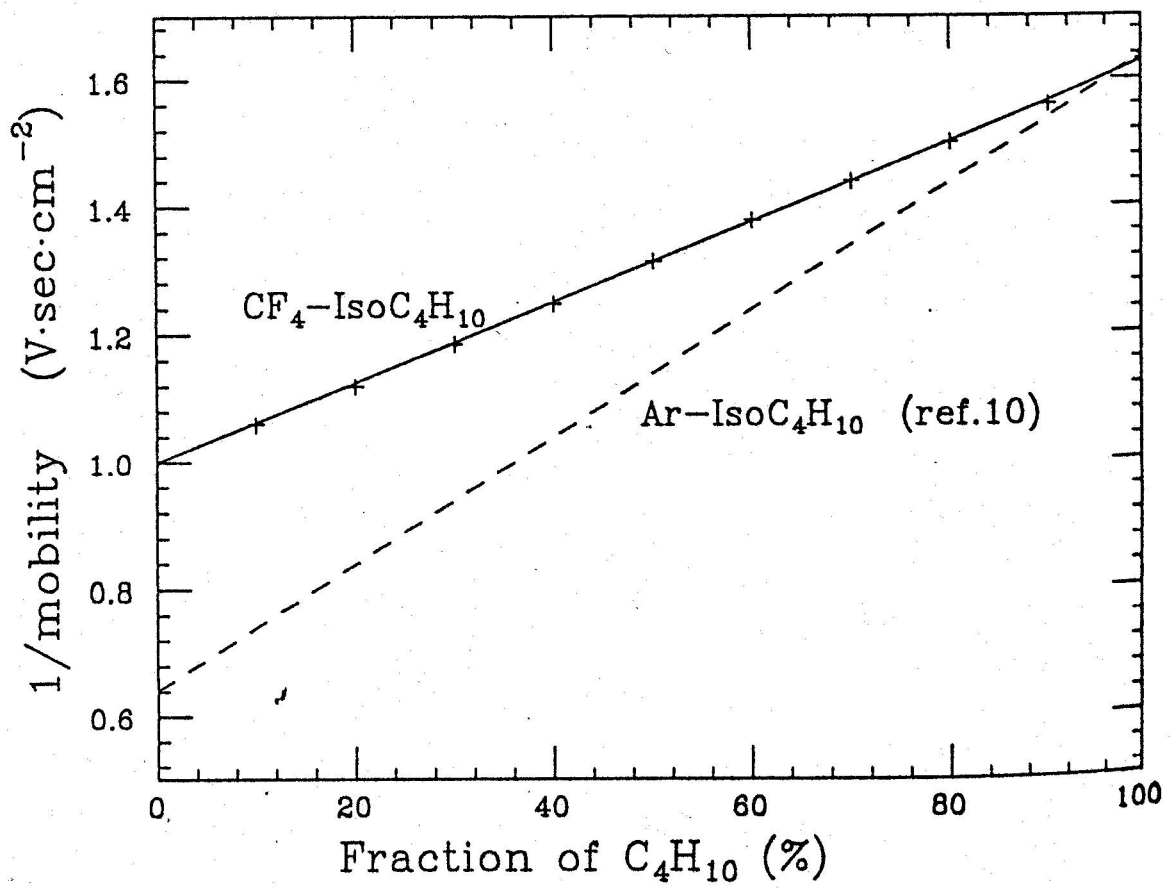


図 10: $\text{CF}_4\text{+iso-C}_4\text{H}_{10}$ 中での C_4H_{10} イオンの移動度 [7]。横軸が C_4H_{10} の含有率で、縦軸が C_4H_{10} イオンの移動度の逆数。

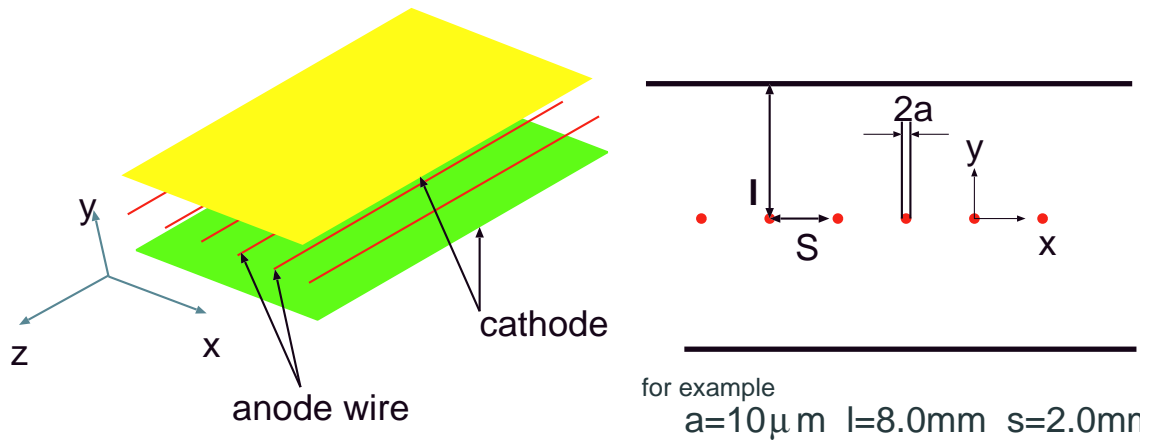


図 11: 多線式比例計数箱

2.2 多線式比例計数管

比例計数管の原理を大面積に応用したものが、多線式比例計数箱 MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) である(図 11)。MWPC の場合、電場を整形するカソード面は平面で形作られている。一般的に、比例計数管と同じようにアノードワイヤーは高電位、カソード面はグラウンドに落されている。

アノードワイヤーの半径 a は、ワイヤー・ワイヤー間隔 s の 1% 程度にすれば、ガス増幅に必要な電場が得られ、アノード・カソード間 l は s の 3 ~ 4 倍に選ばれる。ガス増幅は、比例計数管と同じようにアノードワイヤー近傍でのみ行なわれる。チェンバー内の電位 V と電場 E の式は、ワイヤー表面の電位を V_0 、カソード面をグラウンドとして [2]、

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2\pi l}{s} - \ln \left[4 \left(\sin^2\left(\frac{\pi x}{s}\right) + \sinh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right) \right) \right] \right\} \quad (4)$$

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon_0 s} \left(1 + \tan^2\left(\frac{\pi x}{s}\right) \tanh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right) \right)^{\frac{1}{2}} \left(\tan^2\left(\frac{\pi x}{s}\right) + \tanh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\left(\frac{\pi l}{s}\right) - \ln\left(\frac{2\pi a}{s}\right)} \quad (6)$$

$$V(a) = V_0, \quad V(l) = 0$$

a : ワイヤー半径

l : ワイヤーカソード間の距離

s : ワイヤーワイヤー間の距離

となる。この中で、各ワイヤーはそれぞれ独立した検出器として動作する。その理由は、式 5 がガス増幅をする領域 $y \ll s$ に対して、

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}, \quad r \simeq (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

と近似でき、式 1 と同一であるからである。

さらに発展して、ドリフトチェンバー (Drift Chamber) は、荷電粒子の通過時間と信号の検出時間の時間差が一次電子の発生位置 z と相関関係にあることを利用して、粒子の通過位置を測定するものである。この場合、電子がアノードワイヤーに達する経路に沿って、ドリフト速度 v_d が一定であることが多く、その際は一次式で、

$$z = v_d(t - t_0) \quad (8)$$

t : 電子到達時間

t_0 : 電子到達基準時間

となる。また、ドリフト速度 v_d が一定でない場合は、

$$z = \int_{t_0}^t v_d(t) dt \quad (9)$$

となる。

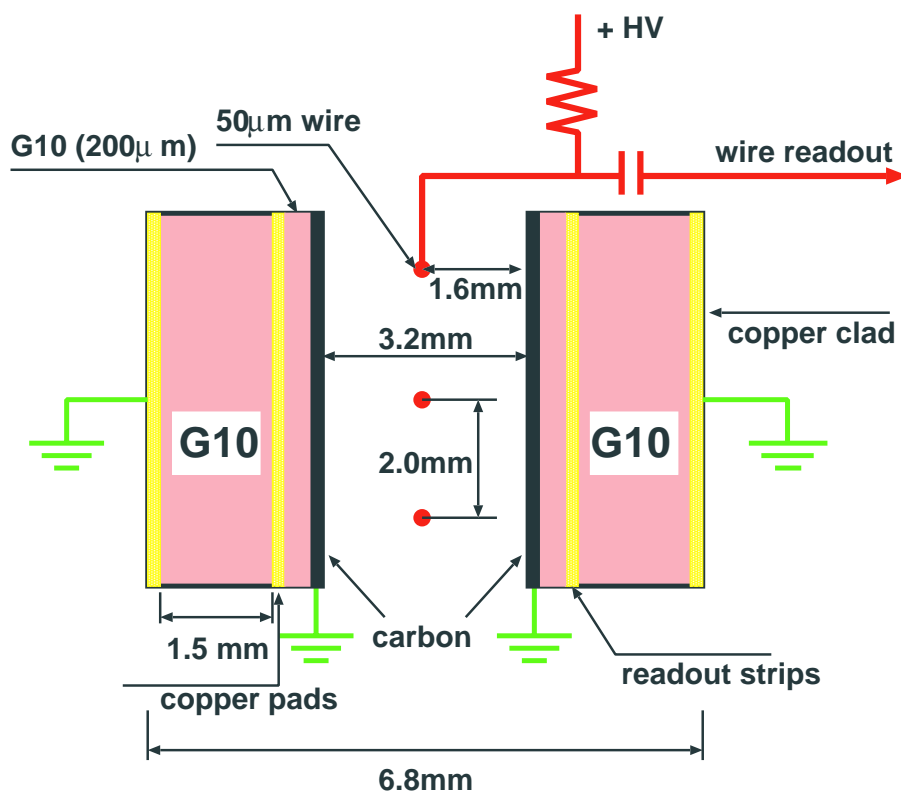


図 12: Thin Gap Chamber の構造

2.3 Thin Gap Chamber

ミュオントリガーチェンバーとして使用する Thin Gap Chamber(以下 TGC)の構造を図 12に示す。TGC の特徴は、アノードワイヤーとカソード面の間隔が、高エネルギー実験で広く使われている MWPC(図 11) に比べて、非常に狭く 1.6mm であることである [9]。TGC のアノードには、直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキされたタングステンワイヤーが用いられている。アノードワイヤーは、2mm 間隔で張力 350g 重が掛けて張られ、さらに大型 TGC(1220mm \times 740mm) の場合は、32cm 毎にアノードワイヤーとカソード面の間隔を一定に保つために、ワイヤーサポート(幅 7mm、図 35) が設けられている。アノードは、5 本のワイヤーを一つにまとめて 10mm 間隔で読み出している。

カソード面は、 $200\mu\text{m}$ の G10²シートに高抵抗 ($\sim 1\text{M}\Omega/\text{cm}^2$) のカーボンが塗布されたものを用い、両面に銅が張られた 1.6mm の G10 基板に接着されている。G10 基板の両面銅のうち接着面側、つまりワイヤー側は、読み出し用のストリップパター

²成分:60% ガラス (SiO_2)+40% エポキシ樹脂

ンが幅 10mm でワイヤーに対し直角に作られており、これに誘起された電荷を信号として読み出す。アノードと同じくこちらも、10mm 間隔で読み出される。外側の銅は、周辺ノイズに対しての静電シールドとしてグラウンドに落とされている。以上の構造が、アノードワイヤーを挟んで両側にある。

TGC において使用するガスは、現在二通り研究されている。一つは CO_2 と n-pentane(ノルマルペンタン、 C_5H_{12}) とを 55:45 の比で混合したもの、もう一つは CF_4 と iso-butane(イソブタン、 C_4H_{10}) とを 80:20 の比で混合したものである。前者は、LEP の実験グループの一つである OPAL(Omuni Purpose Apparatus for Lep) において、ハドロンカロリメーターとして使用され現在稼働中であり、後者は、LHC 実験で予想される粒子入射頻度 ($\sim 1 \text{ kHz/cm}^2$) で 10 年程度の使用に十分耐えられることと、時間分解能がさらに向上するため新たに提案されているものである。その理由として、

- 耐放射線特性が優れている [3][4][5]
- 低い電場領域でもドリフト速度 v_d (図 8) が速い

の二点が挙げられる。どちらのガスにおいても TGC は、LHC 実験に対する要請

- イベントの頻度である 25ns のバンチクロッシング時間より小さい時間分解能
- 1kHz/cm^2 程度の高レートにおいて十分動作する能力
- P_t (横方向運動量) をトリガー条件に組み込むための 1cm 程度の位置分解能

を十分満足すると期待されている。

使用する印加電圧はガス増幅率を適切にするため、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ が 3.1 kV を、 $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ が 3.4 kV を標準電圧としている。この時、ガス増幅のモードとしては、OPAL で用いられているリミテッドストリーマーモード (Limited Streamer Mode) ではなく、それより少し下でプロポーションナルモードより上のモード³になっている。これは、高頻度入射粒子環境でも十分に動作することを保証するためである。OPAL で使用されていない新しいガス $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ を含めたリミテッドストリーマーモードにおける TGC の動作特性については、神戸大学の田中氏により調べられた [10]。リミテッドストリーマーモードにおいては、出力信号が通常の MWPC に比べ大きく (50mV 程度)S/N 比が高いが、不感時間、不感領域が存在し、高頻度入射粒子環境では検出効率を低下させる。従って、それよりも

³限定的に比例関係が残っている領域: 飽和比例領域 (Saturated Proportional Mode)(限定的比例領域 (Limited Proportional Mode))

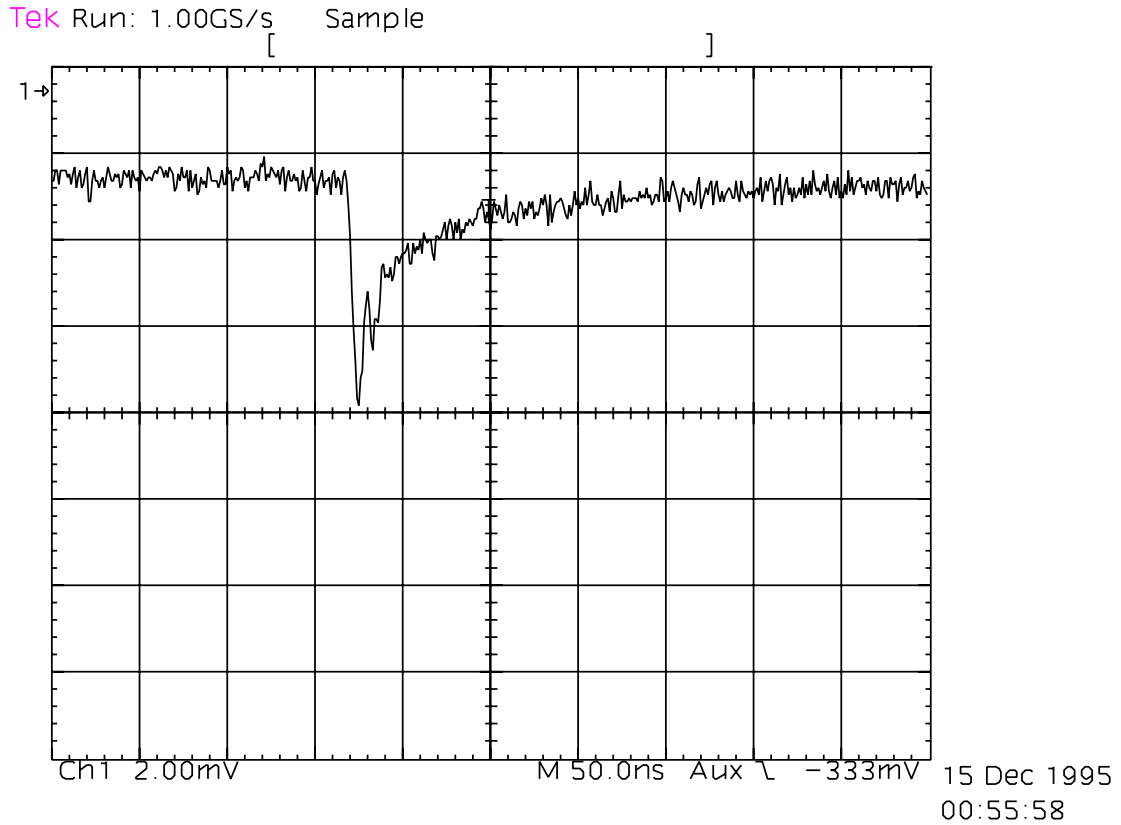


図 13: TGC の実際の信号。横軸は 50ns、縦軸は 2mV である。

少しガス増幅の小さいモード (出力信号 数 mV) にすることにより、これを改善している。

次に、デジタルオシロスコープで記録した、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80:20) ガスで電圧 3.1kV における TGC の生信号を、図 13 に示す。出力信号は、到着時間のバラツキが少なく、非常に高速で、立ち上がり時間は 5ns 以下である。検出される信号の波形は、MWPC と見なすと、ワイヤー近傍で円筒形電場 (図 6) と見なせるため、次のように計算される [2]。

電荷 Q が、距離 dr だけ動いたとき、静電容量 lC (C : 単位長さあたりの静電容量、 l : 長さ) に誘起される信号は、

$$dv = \frac{Q}{lCV_0} \frac{dV}{dr} dr \quad (10)$$

である。これから、ガス増幅による陽イオンが、ワイヤー表面と距離 λ だけ離れた位置から移動した場合、電子とイオンからの信号 v^- と v^+ はそれぞれ、

$$v^- = -\frac{Q}{lCV_0} \int_a^{a+\lambda} \frac{dV}{dr} dr = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_+ l} \ln \frac{a+\lambda}{a} \quad (11)$$

$$v^+ = \frac{Q}{lCV_0} \int_{a+\lambda}^b \frac{dV}{dr} dr = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{b}{a+\lambda} \quad (12)$$

($\frac{dV}{dr}$ は式1より)

となり、その合計 v 及び、その比は、

$$v = v^+ + v^- = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln ba = -\frac{Q}{lC} \quad (13)$$

$$\frac{v^-}{v^+} = \frac{\ln a + \lambda + \ln a}{\ln b - \ln a + \lambda} \quad (14)$$

と計算される。TGC に対しては $\lambda = 1\mu m$ として、 $\frac{v^-}{v^+} = 0.5\%$ である。従って、信号に寄与する割合はほとんどが陽イオンで、信号の波形には陽イオンによるもののみを考えれば良い。

信号の波形 $v(t)$ は、

$$v(t) = -\int_0^t dv = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{r(t)}{a} \quad (15)$$

となり、式 2 を使い $r(t)$ を求めると、

$$\frac{dr}{dt} = \mu^+ \frac{E}{P} = \frac{\mu^+ CV_0}{2\pi\epsilon_0 P} \frac{1}{r} \quad (16)$$

$$\int_a^r r dt = \frac{\mu^+ CV_0}{2\pi\epsilon_0 P} \int_0^t dt, \quad r(t) = \left(a^2 + \frac{\mu^+ CV_0}{2\pi\epsilon_0 P} t \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

結果、

$$v(t) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 l} \ln \left(1 + \frac{\mu^+ CV_0}{\pi\epsilon_0 P a^2 t} \right) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 l} \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \quad (18)$$

$$r(T) = b, \quad T = \frac{\pi\epsilon_0 P (b^2 - a^2)}{\mu^+ CV_0} \quad (19)$$

となる。T は、陽イオンがグラウンド (カソード) にたどり着くまでの時間で、例えば TGC の場合 $CF_4 + iso-C_4H_{10} (80:20)$ ガスで、

$$b = 1.6mm, a = 25\mu m, V_0 = 3.1kV, \mu^+ = 0.89 [cm^2 / V \cdot s] \text{ で}$$

$$T = 23.5\mu s$$

である。

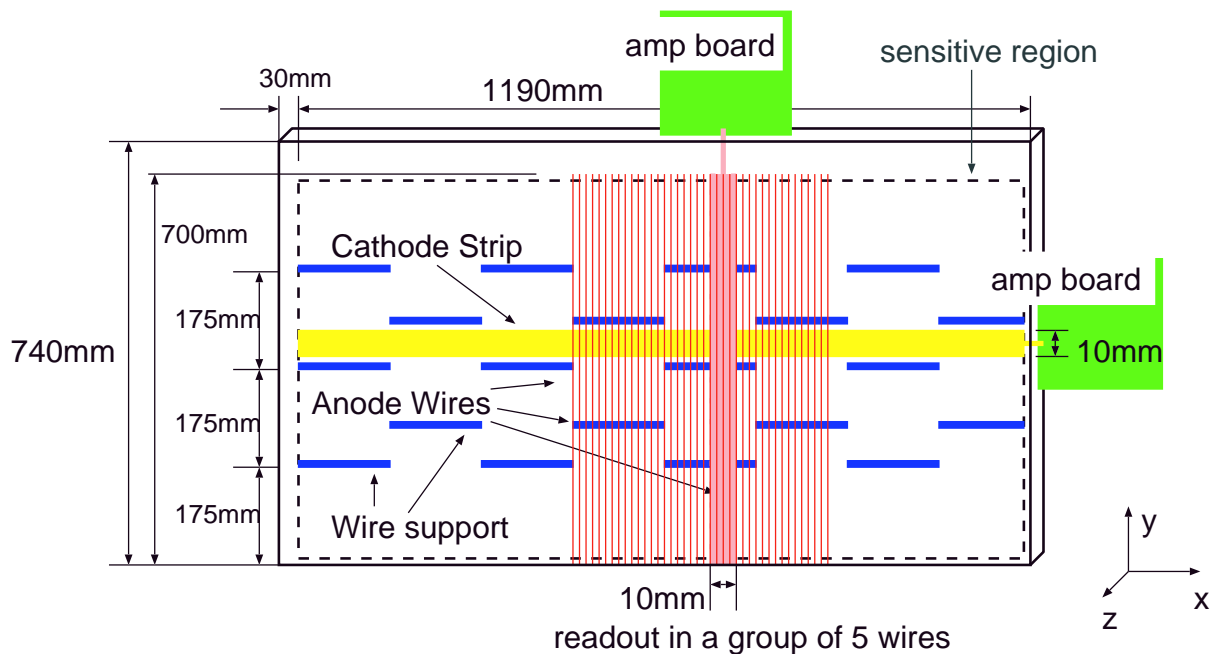


図 14: 大型 TGC の構造。アノードワイヤーに対して直角にワイヤーサポートが設けられている。

3 ビームテスト

94 年暮れ、95 年暮れに茨城県つくば市にある文部省高エネルギー物理学研究所 (KEK) においてプロトンシンクロトロン (PS) 加速器の π^2 ビームライン ($\pi^- 3\text{GeV}/c$) を用いて TGC の各種動作特性試験を行なった。94 年ビームテストは、TGC の現状での性能評価であり、95 年ビームテストは、その解析結果より得られた問題点を改善し、確かめることであった。

3.1 ビームテスト 94

TGC を共同で開発しているイスラエル Weizmann Institute で製作された大型 TGC(図 14) について、その特性を試験した。この大型 TGC の構造は基本的に LEP でハドロンカロリメーター用として使われているものと同じ (図 12) であるが、使用する目的、使用するガスなどが違うため、今実験は基本的な諸特性を調べることを目的とした。測定した主な項目は、

- ガスの違いによる性能差
- 時間分解能の印加電圧 (High Voltage) 依存性

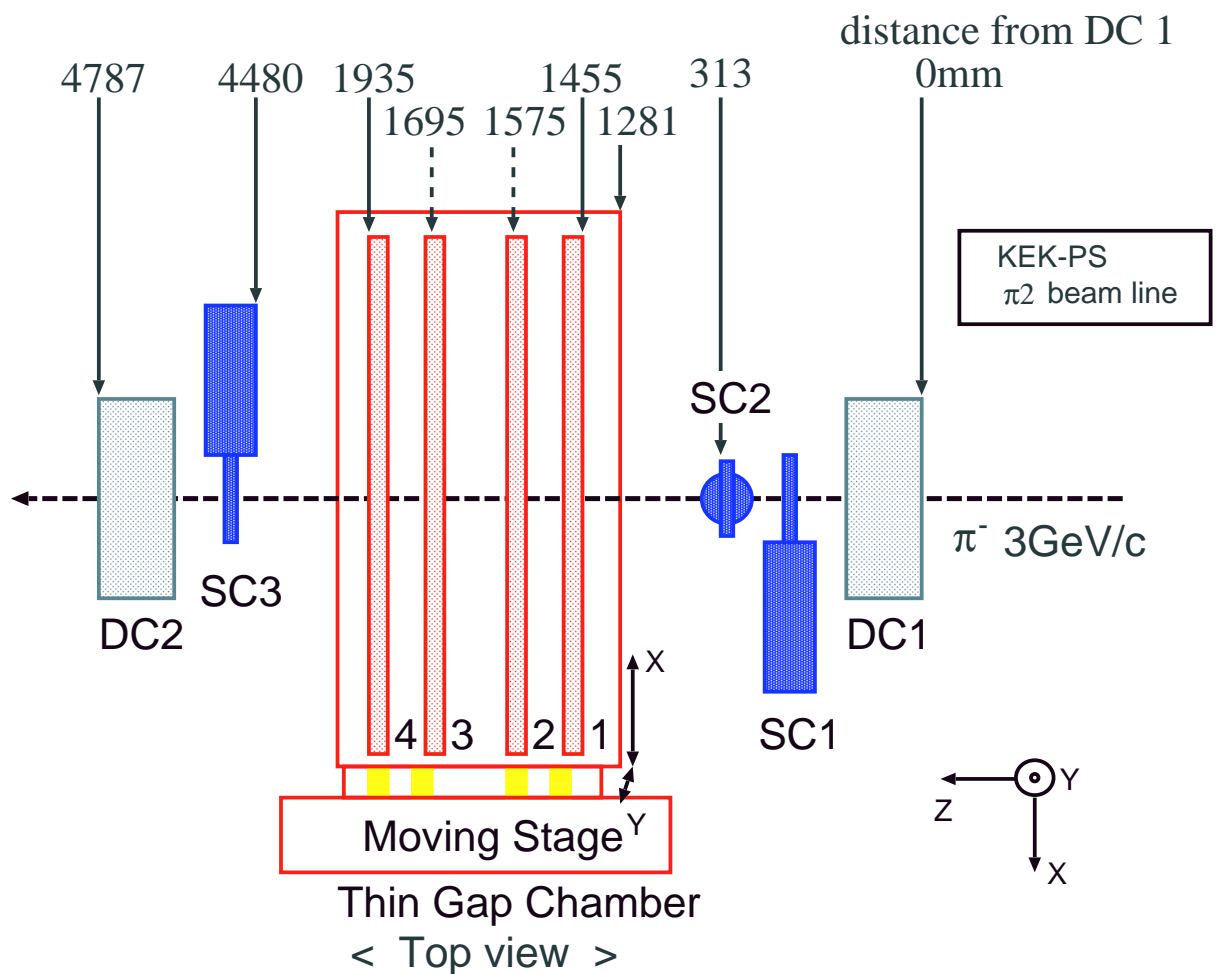


図 15: ビームテストの各種測定器の配置。ドリフトチェンバー間約 5m。

- 検出効率と時間分解能のレート依存性
- 信号の粒子通過位置依存性

である。

3.1.1 セットアップ

実験のセットアップを図 15 に示す。トリガー用シンチレーションカウンターが、ビームに対して上流に二つ (SC1・SC2)、下流に一つ (SC3) 配置され、粒子位置決定用ドリフトチェンバーが TGC を挟んで上流 (DC1)・下流 (DC2) に各一台ずつ設置されている。各ドリフトチェンバーは、ビーム軸を Z 方向として X・Y 方向の位置を決定し、その有効領域は、X・Y 方向ともそれぞれ 160mm である。TGC は X・Y 方向に動くことのできる台の上に四枚設置されており、上流側の二枚 (TGC1・TGC2)

	増幅率	帯域	消費電力	使用 TGC 番号
広帯域アンプ MAR-1	80 倍	400MHz	560mW	1・2
ハイブリッド型チャージアンプ	150mV/pC	65MHz	40mW	3・4

表 2: アンプの仕様 1

はアノードとカソード両方を読み出し、各 10ch(幅 100mm) づつ計 40ch 読み出した。他方、下流側の二枚 (TGC3・TGC4) はカソードのみの読み出しであるが、各 16ch(幅 160mm) づつ計 32ch と幅広く読み出した。

試験したガスは、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80:20) と $\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}$ (55:45) である。n-pentane は、常温で液体であるが恒温水槽によって 17℃ を保たれ、その中に、 CO_2 を通してバブリングさせることで混合比を一定に保ち混合した。従って、その混合比は蒸気圧によってのみ決定されている。それぞれのガス用に TGC は 4 枚ずつ用意され、計 8 枚がこのビームテストに導入された。

使用したアンプは TGC1 と TGC2 が広帯域アンプ MAR-1、TGC3 と TGC4 がハイブリッド型チャージアンプである。その仕様を表 2 に示す。

3.1.2 データ収集及び解析

データ収集は、UNIX ワークステーションから VME クレートを經由して、TKO 規格⁴モジュールを UNIDAQ ソフトウェア⁵を用いて操作し行なった。ビームは約 2 秒間照射され 2 秒間停止するため、ビームスピル中 (ビーム照射中) は VME と TKO 間でのみ通信し、収集されたデータは一旦 VME 上のメモリーに蓄積されビーム停止中に VME と UNIX 間の通信で UNIX に取り込まれた (図 16)。

⁴KEK においてトリスタン実験用に開発され、現在は PS において広く用いられているデータ収集システム

⁵SSC プロジェクトの実験グループによって開発された汎用データ収集システム [11]

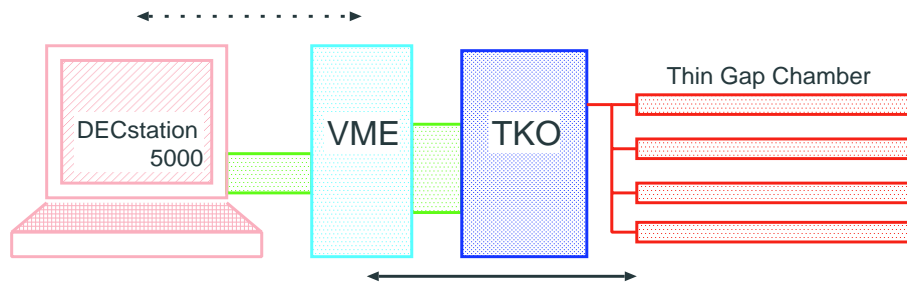


図 16: データ収集の仕組み。ビーム照射中は下の実線で示された VME-TKO 間、ビームが照射されていない時は上の点線で示された VME-DEC 間の通信が行なわれる。

測定器	TDC チャンネル数	ADC チャンネル数
SC(3 本)	3	3
DC(4 層、 X 方向 2・Y 方向 2)	16×4(計 64)	
TGC1 と TGC2	アノード 10・カソード 10(計 40)	
TGC3 と TGC4	カソード 16(計 32)	カソード 16(計 32)

表 3: 94 年収集されたデータ

収集するデータのトリガーは、シンチレーションカウンターの全てに信号が検出されたイベントとした。この時、トリガー頻度は 100Hz 程度である。収集したデータの内容は表 3 の通りである。使用した TKO モジュール以下の通りである。

SC 用 HR TDC⁶ 28ps/count RPT-050(林栄精器製)

TGC 用 TDC 700ps/count RPT-040(林栄精器製)

TGC3・4 用 ADC⁷ 0.3pC/count T004(豊伸電子製)

データ解析の条件は、

1. 全てのシンチレーションカウンター SC に、粒子通過の信号がある。
2. 全てのドリフトチェンバー DC に、粒子通過が一つだけ認められる。

で、1 について補足すると、イベントが取り込まれる段階で粒子通過の条件を満たしているが、その信号のチャージ量も適当なものであることを要求している。この二つを必ず満たしているイベントに対してのみを選んで各種解析を行なった。

また、粒子が通過した TGC 上の相対的な位置情報が必要な場合があるため、ドリフトチェンバーを用い、図 15 に示されている測量した位置を使い内挿して求めた。使用した DC は、電子のドリフト速度が一定でないためシミュレーション (Garfield) により時間と位置の対応関係を付け直して使用した。その結果が図 17 であり、DC は図 18 の様な構造をしているため、理想的には二つの層によって示される距離 (a 、 b) の和 ($a + b$) は一定で 1cm である。対応関係を付け直した結果は、 1cm を中心としてガウス分布をし、どの層の間でも Sigma がおよそ $450\mu\text{m}$ 以下である。

⁶Time to Digital Converter

⁷Analog to Digital Converter

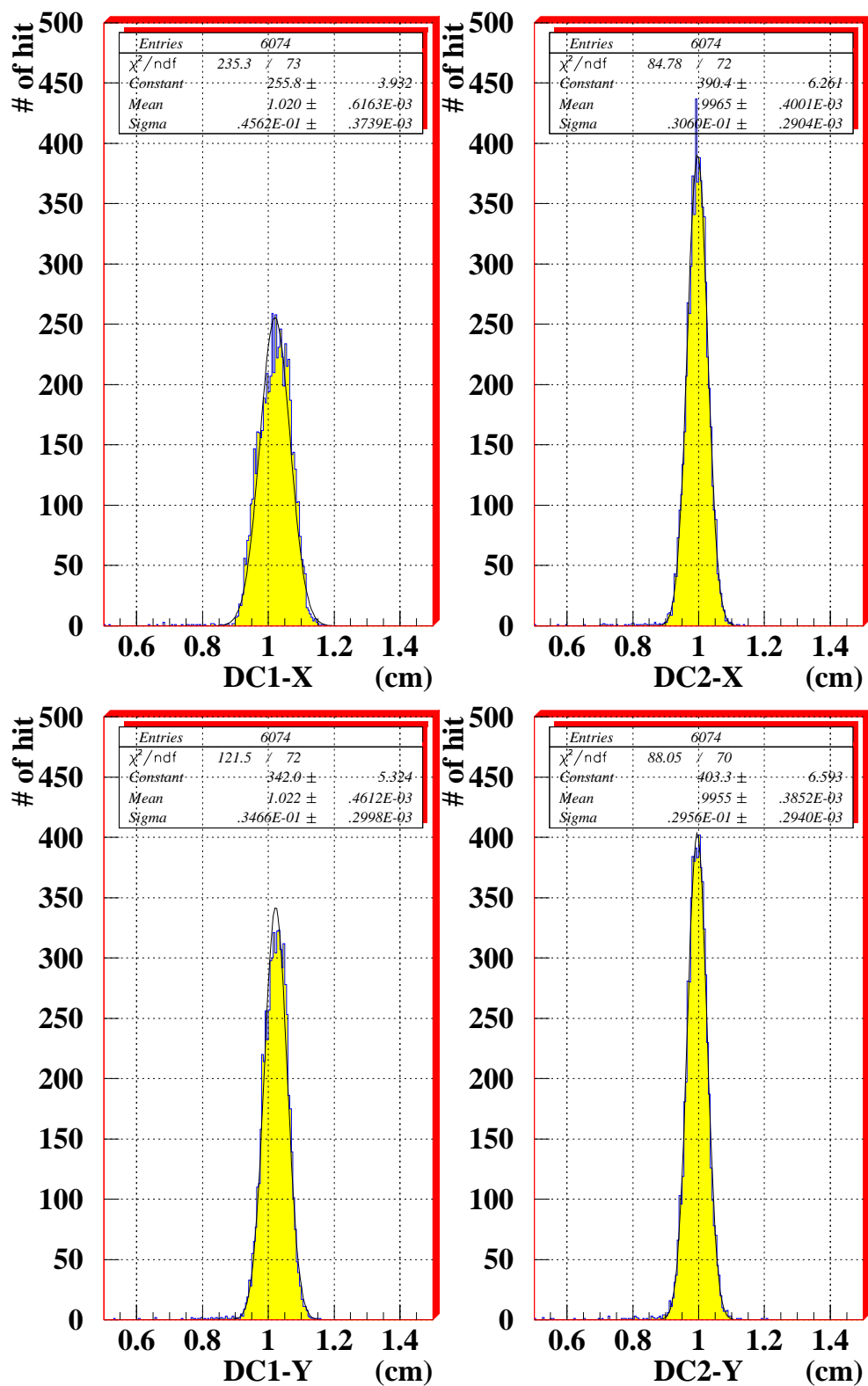


図 17: DC の位置分解能

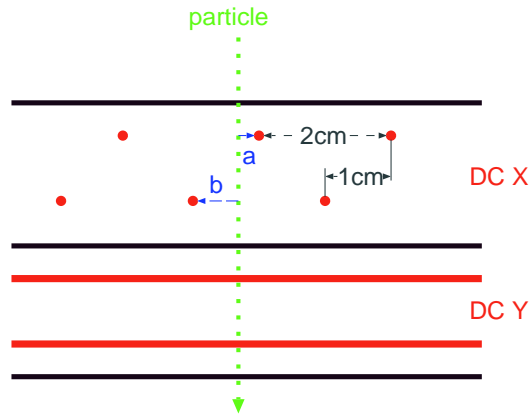


図 18: DC のセンスワイヤー配置図と位置の精度。この構造が上流・下流にそれぞれあり、理想的には $a + b$ が常に 1cm となる。

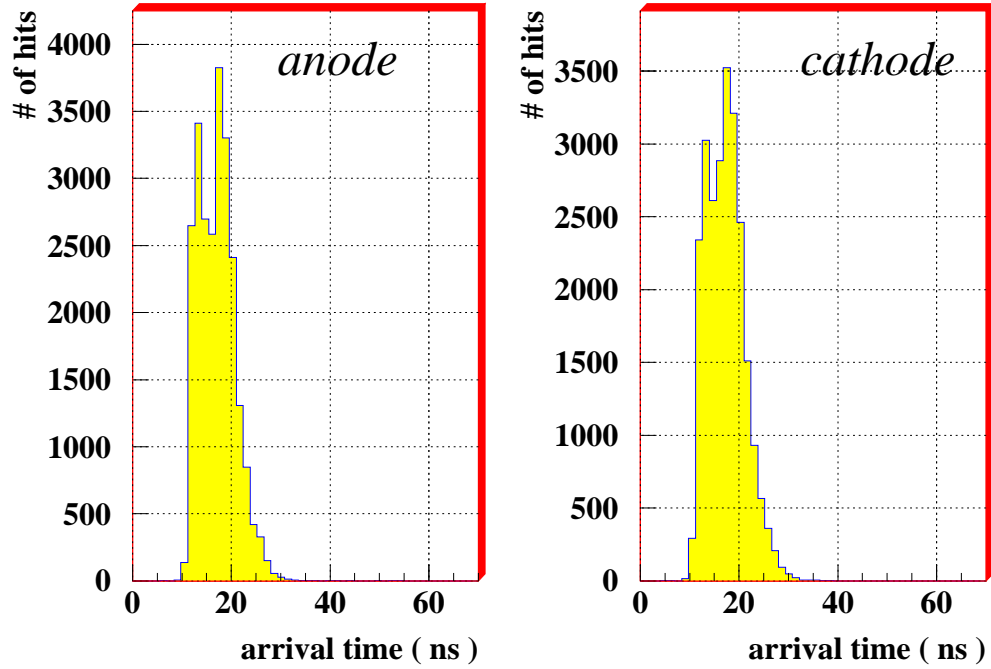
3.1.3 信号到達時間分布

各ガスにおける、信号到達時間分布を図 19に示す。この測定は、以下のように最適化されたディスクリミネーター (波高弁別器) のスレシヨールド (しきい値) と標準 HV の時のものである。

- $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$: HV = 3.1kV
スレシヨールド : アノード 45mV ・ カソード 35mV
- $\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$: HV = 3.4kV
スレシヨールド : アノード 110mV ・ カソード 70mV

図 19を見て明らかなように、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の時間分布は、 $\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ のそれと比べて狭い分布幅を持つ。言い替えれば、 20ns の時間幅を持たせれば、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ は到達する十分な信号を検出できるということである。これに比べて、 $\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ はやや広めの幅、 30ns を必要としている。また、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の分布には特徴的な形、二つのピークが見られる。これは、 CF_4 ガスの持つドリフト速度と密接に関係している。図 7で、電場増加に対して一様に速度が増加していないことが理由である。すなわちこれは、ラムザウワー効果 (Ramsauer effect) により電子のドリフトに対しての衝突断面積が電場の低い領域で一度減少するため、非常にドリフト速度が速くなるのである。二つのピークを作る原因は、この速くなった速度が電場の増加と共に一度遅くなってまた速くなるという性質によるものである。

$CF_4 + iso-butane(80:20)$
 $HV = 3.1kV$



$CO_2 + n-pentane(55:45)$
 $HV = 3.4kV$

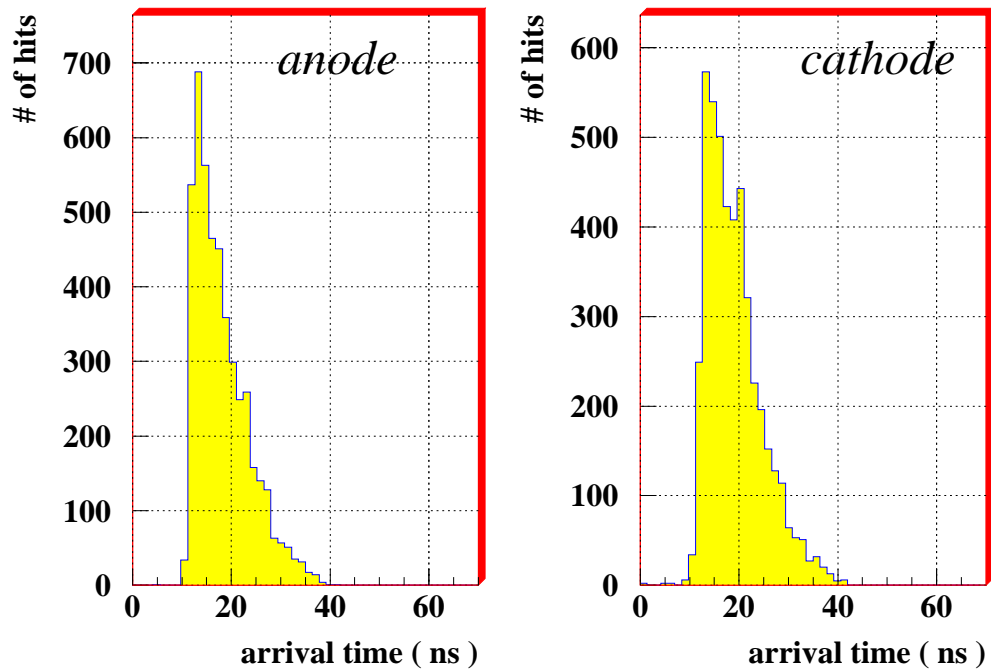


図 19: 信号到達時間分布の比較。 $CO_2 + n-C_5H_{12}(55:45)$ に見られる遅れて到達する信号の分布 (30ns ~ 50ns) が、 $CF_4 + iso-C_4H_{10}(80:20)$ にはほとんど見られない。

3.1.4 検出効率

検出効率の定義は、正しいイベントの条件

1. 全てのシンチレーションカウンター SC に、粒子通過の信号がある。
2. 全てのドリフトチェンバー DC に、粒子通過が一つだけ認められる。

を満たしたイベント数 n_0 に対する、ある決めた時間幅 (通常は、分布を十分カバーする、100ns 程度) に入ったイベント数 n_g の割合とした (式 20)。

$$\text{検出効率}(efficiency) = \frac{n_g}{n_0} \quad (20)$$

ここでは、ワイヤーサポートの影響 (3.1.7節) がない所で調べている。CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20) と CO₂+n-C₅H₁₂(55:45) の検出効率の比較を各 HV について行なったのが、図 20・21である。

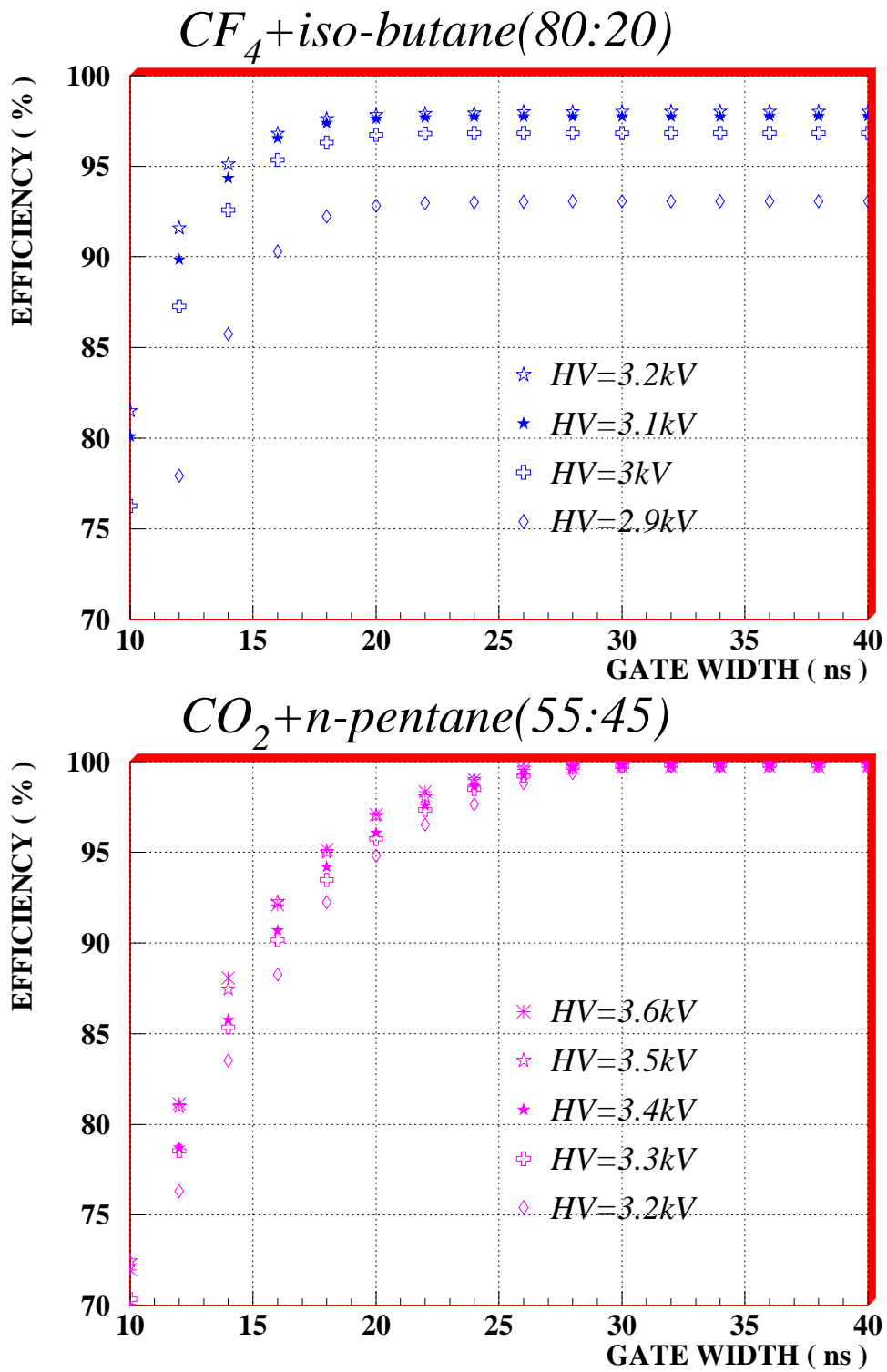


図 20: 各 HV に対するゲート幅対検出効率の変化。

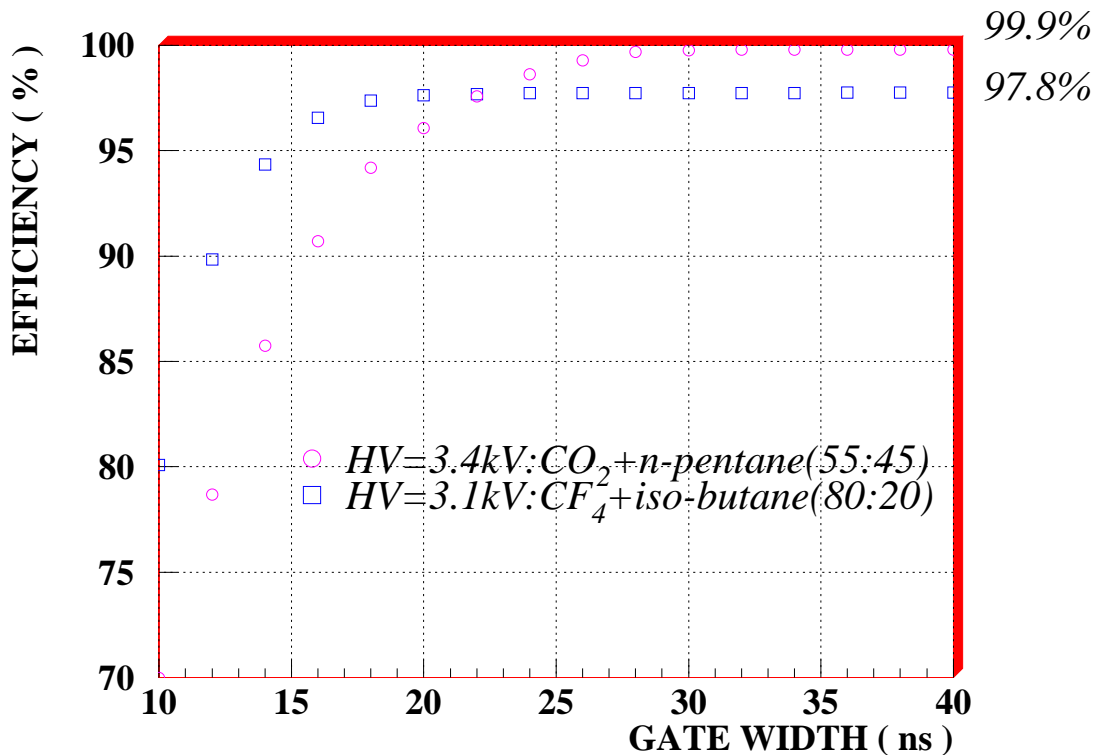


図 21: 二つのガスによる検出効率の比較。CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20)の方がゲート幅が狭いうちに検出効率が飽和している。

横軸に用いられている変数、ゲート幅 (Gate Width) は図 22の方法で位置を決定したものである。ゲート幅という時間幅を固定した時 (ここで固定とは、時間軸上に固定することではなくその幅を一定に固定した意味に注意)、その幅で最大限得ることの出来る検出効率が、そのゲート幅に対する検出効率で、その時のスタート時間が t_0 である。

図 20は、出力信号の分布がアンプとスレショールドの関係で決まることを考慮して HV 依存性を調べたのであるが、この場合標準値が適切であると分かる。図 21から各ガスについての十分なゲート幅を見積もると、表 4のようになる。信号到達時間分布 (図 19) から明らかなように、CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20) は、TGC が検出した信号をほとんどとらえるためのゲート幅が CO₂+n-C₅H₁₂(55:45) に比べ小さくすることが可能である。これは、あるゲート幅を用いた時に、そのゲート幅の中に入ってくるイベント数 n_g が、全検出信号数 n_e のうちの最大でどの程度であるか、逆に言え

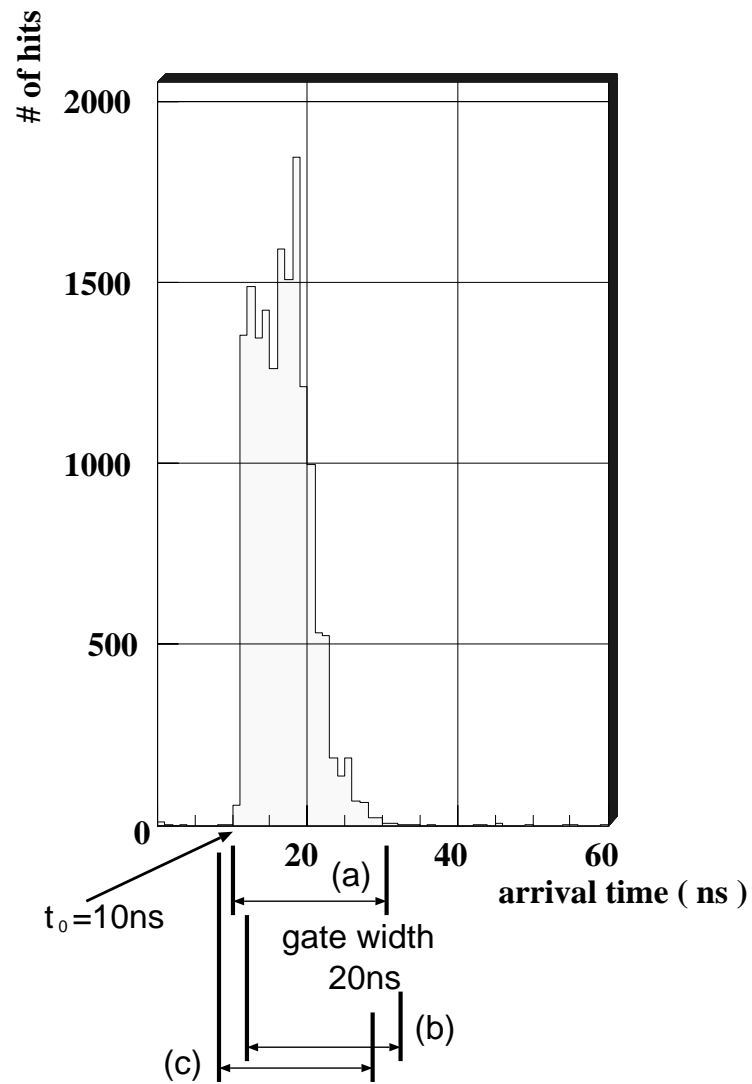


図 22: ゲート幅の位置の決め方。この分布では 20ns のゲート幅をとった時、(b)(c) に比べ一番検出効率が高くなる (a) に決定、つまり t_0 は 10ns に決まる。

ガス	検出効率	ゲート幅
CF ₄ +iso-C ₄ H ₁₀ (80:20)	96.7 %	20ns
CO ₂ +n-C ₅ H ₁₂ (55:45)	99.8 %	30ns

表 4: 各ガスにおける検出効率とその時必要なゲート幅。

ば、全検出信号のうちある割合の信号を得るために必要な最低限のゲート幅を比較することにより示される (比検出効率・式 21)。

$$\text{比検出効率} = \frac{n_g}{n_e} \quad (21)$$

その比較が図 23・24である。さらに、比検出効率を 99% とした時のゲート幅を、ここでは時間分解能 (Time Jitter) と定義する (式 ref 時間分解能の式)。

$$\text{時間分解能}(\text{Time Jitter}) = \text{TGCが検出した信号のうちの} \quad (22) \\ \text{99\%を得られる最小ゲート幅}$$

これは、例えば $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の検出効率が 40% であったとしても、その信号のほとんど全てが 10ns の時間幅に入っているような場合は time jitter は 10ns になる、というように、検出された信号に対する到達時間分布の広がりを定義する量である。それぞれの HV に対しての比較が図 25である。これらの結果を総合すると、現在の TGC は各ガスに対して、もう少し性能向上の余地があることを示している。つまり、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ は、非常に優れた時間分解能を持っているが、検出効率はいかに大きなゲート幅を用いても 97.8% を越えることができない。一方 $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ は、十分なゲート幅を用いれば、検出効率をほぼ 100% にすることができるが、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ より時間分解能が劣ってしまう。

$\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の検出効率低下の原因は電子吸着性にあると考えられている。電子吸着性があると、荷電粒子の通過によって生じた一次電子は、電場によってアノードワイヤーに移動していく間にガス (この場合は CF_4) に吸着されてしまう可能性がある。 CF_4 には、この特性がある。図 26に CF_4 の電子吸着性を示す。電子が吸着されやすい領域は 1atm 下で、 $9\text{kV/cm} \sim 36\text{kV/cm}$ である。TGC において実際に使用されている電場領域は、電場を計算した図 27が示す通りで、多くの部分が 9kV/cm から 36kV/cm に占められている。信号を発するためには、ガス増幅を起こすために最低限一つの電子がアノードワイヤー近傍のガス増幅領域に到達しなければならない。シミュレーション⁸の結果によれば、最低限一つの電子が到達する確率は実験を支持する 97.5% であった。これに対し、 $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ にはこの特性がほとんどないため検出効率はほぼ 100% である。また、このような到達する電子の減少は、出力信号の大きさを減少させる。あるチャンネルに注目したチャージ分布、図 28が示す様に、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の場合、到達する電子の数の減少が、ガス増幅をした結果にも影響を与えている。図 28は、この実験で収集された

⁸神戸大学田中秀治氏製作「たーふいーるど」

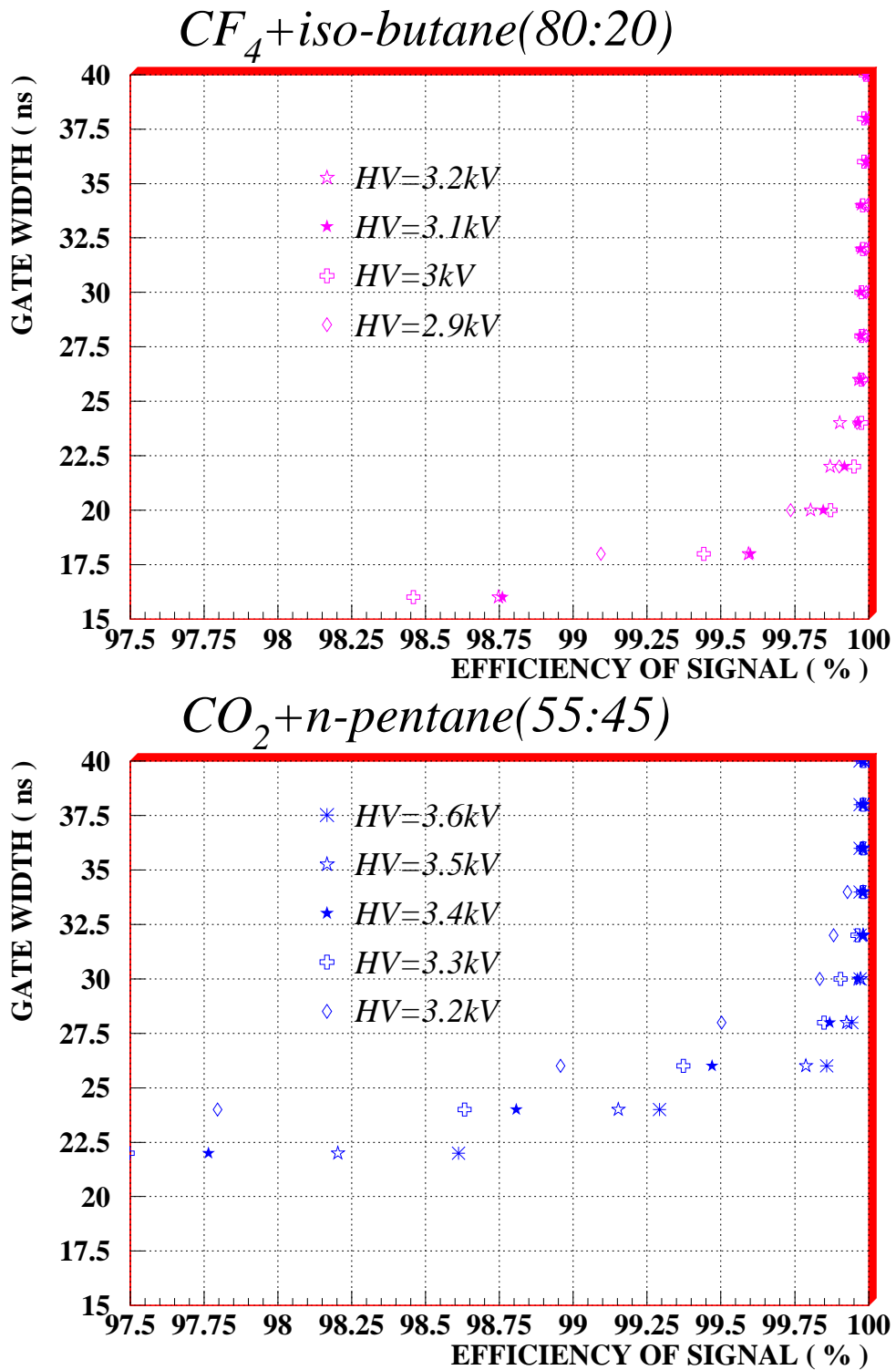


図 23: 各 HV における比検出効率。横軸が検出された全信号に対する信号の割合、縦軸がその際必要な最小ゲート幅。 $CF_4 + iso-C_4H_{10}(80:20)$ の方が必要なゲート幅が小さい。

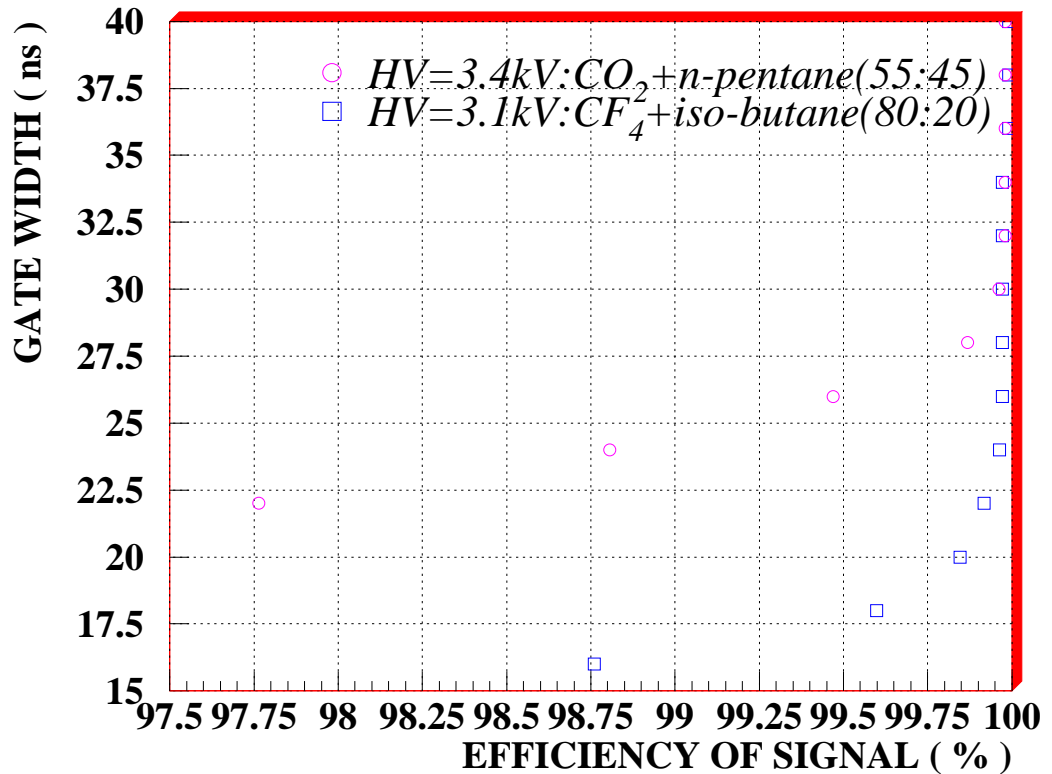


図 24: 二つのガスにおける比検出効率の差。ガスの違いによる信号時間到達分布の広がりが見られる。

カソードについてのチャージ分布で、横軸が得られたチャージ量、縦軸がその頻度で、注目したチャンネルについて以下の条件で分けたものである。

- 上図は、TGCの中で一番最初にそのチャンネルが検出信号を出した時(真の信号)
- 中図は、上図に当てはまらないイベントの内、一番最初ではないが信号を検出した時と、隣のチャンネルが信号を検出した時(この時このチャンネルが一番最初に信号を検出していない)
- 下図は、そのチャンネルとその両隣のチャンネルのいずれも信号を検出しなかった時(ペDESTAL)

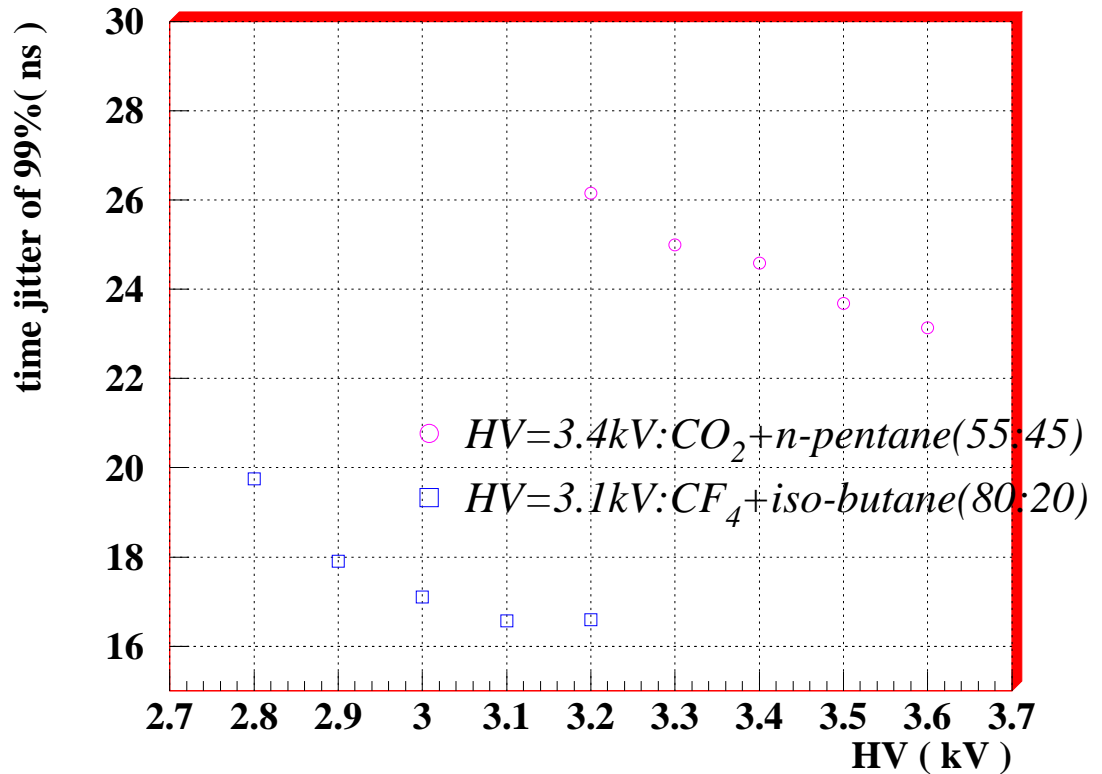


図 25: HV に対する時間分解能の変化。どちらのガスも HV を上げることにより小さくいくが、 $CF_4 + iso-C_4H_{10} (80:20)$ の方が断然小さい。

- 最下図は、上図と下図の比較

最下図を見をみると、二つの分布が重なっていることから、信号を検出した場合のチャージの量でも、検出しなかった場合と同じような大きさを持ったものが多数存在していることが分かる。これはつまり、チャージ量は小さいが信号振幅はスレシヨールドを越えた、非常に信号振幅が小さい場合という事である。これと比較して $CO_2 + n-C_5H_{12} (55:45)$ でのチャージ分布は、図 29 の通りである。これらはチャージ分布であり、スレシヨールドは電圧レベルで掛けるため完全には対応しないが、傾向は同じである。次に行なわれた実験では各ガス信号振幅の違いが完全に示されている (3.3.6 節)。信号振幅は、TGC をトリガーチェンバーとして用いた時に、トリガー信号を発生させるディスクリミネーターのスレシヨールド設定が容易かどうかと密接に関係して

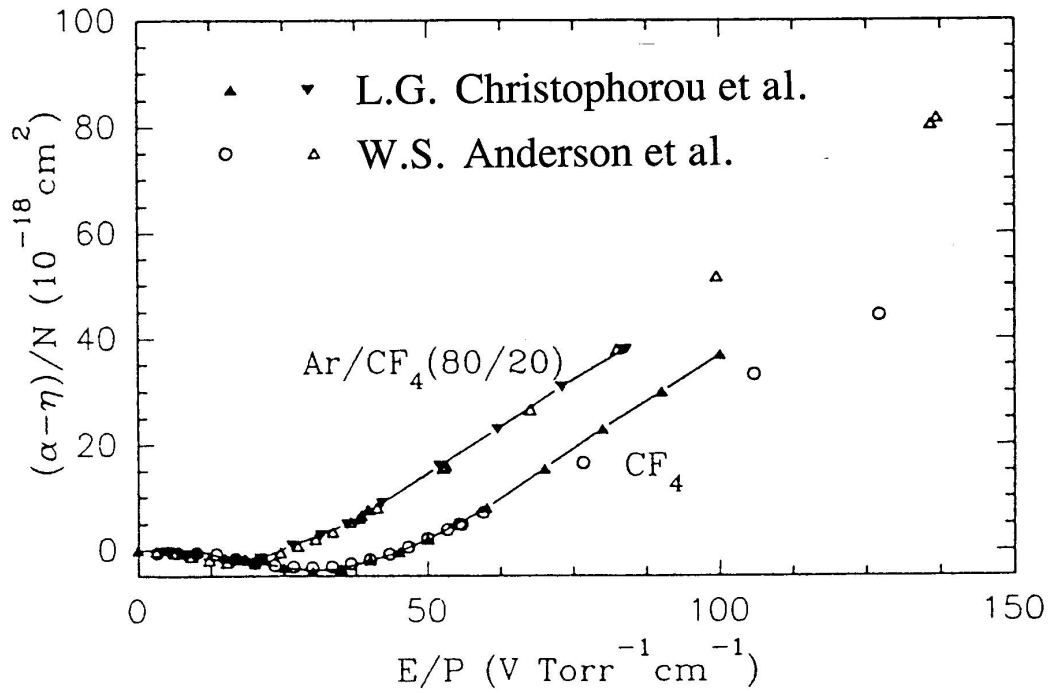


図 26: CF_4 の電子吸着性 [12][13]。縦軸の値は実効イオン化係数。電子吸着はこの係数が負の領域 (CF_4 の場合、 $12 < E/P < 48 (\text{V/cm Torr})$) で起こる。

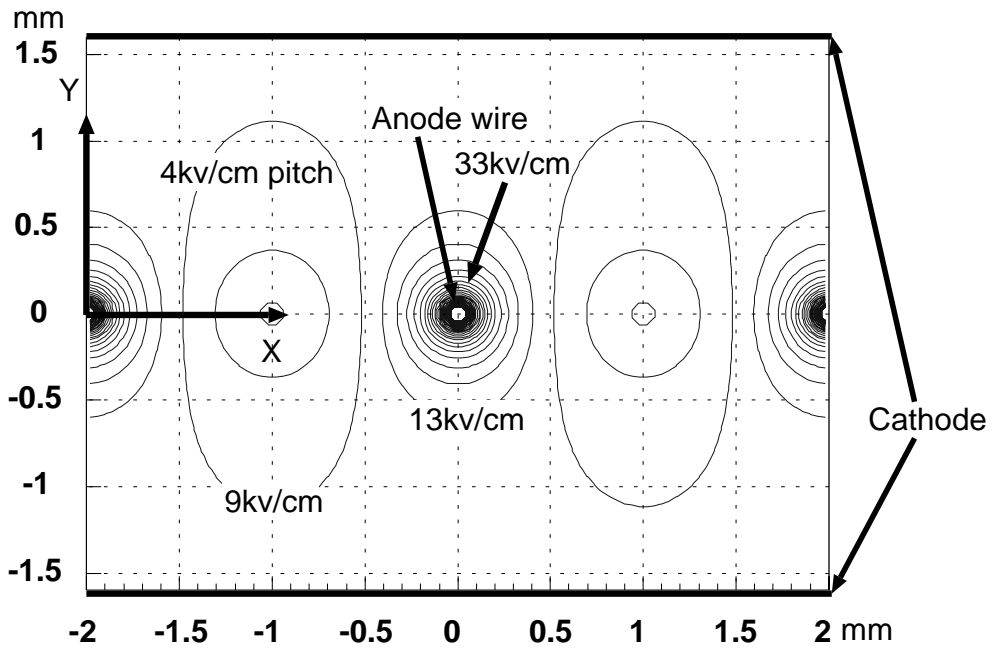


図 27: TGC の電場。多くの部分を 9kV/cm 以上の電場が占めている。

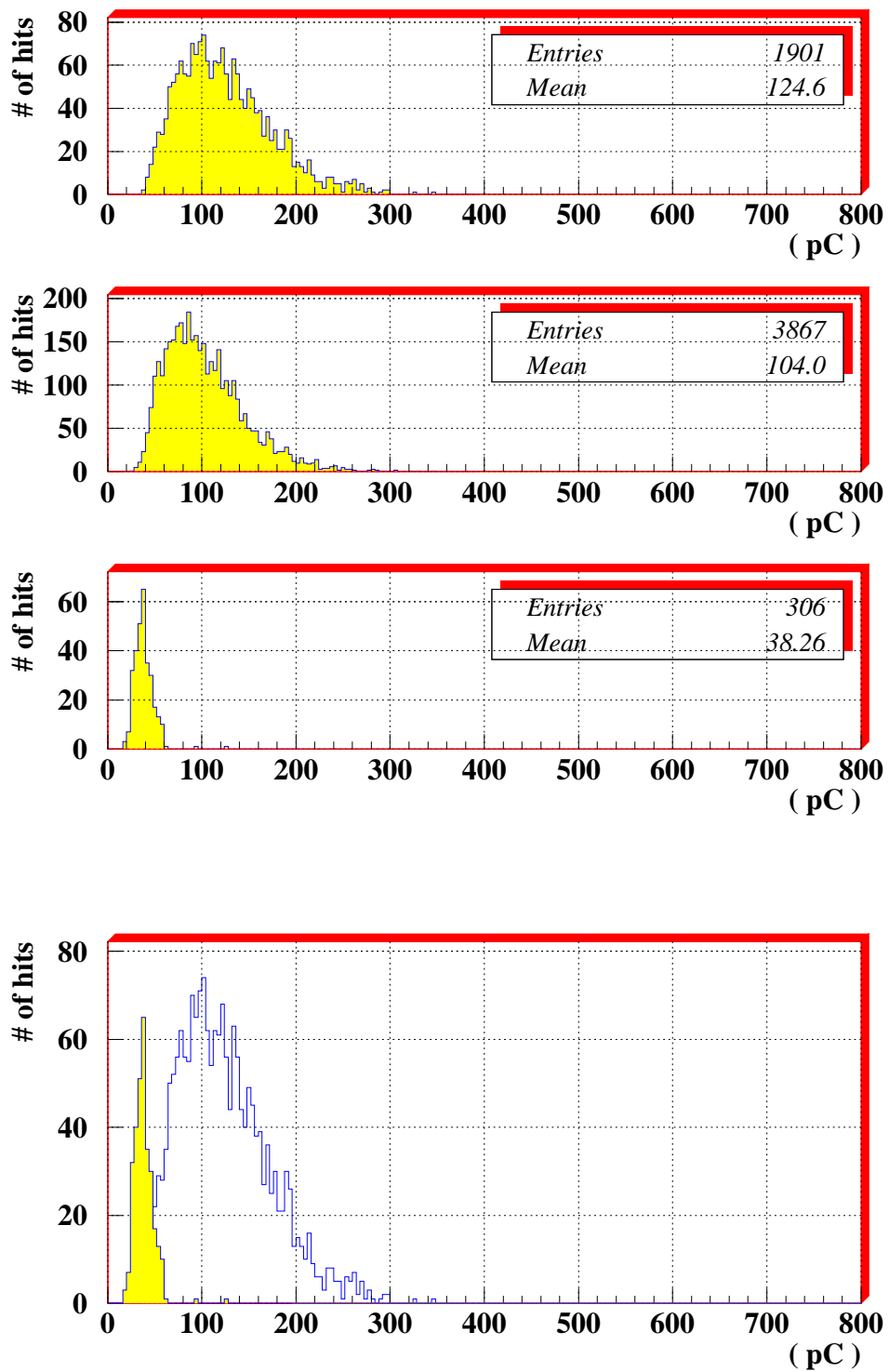


図 28: $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ によるカソードのチャージ分布を各条件で分けたもの。最下図は、真に信号が検出された時と真に信号が検出されなかった時との比較。

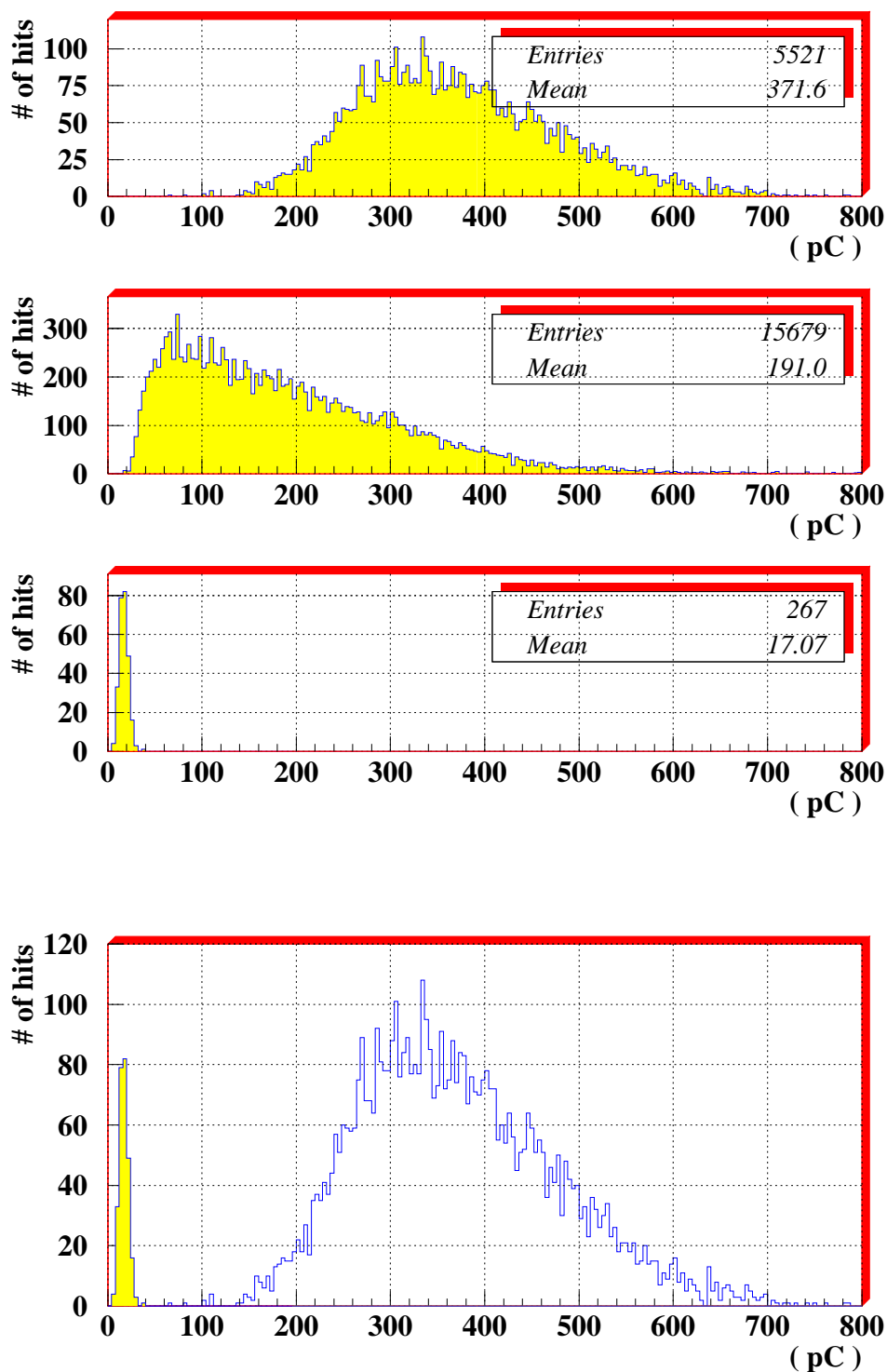


図 29: $\text{CO}_2 + n\text{-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ によるカソードのチャージ分布を各条件で分けたもの。最下図は、真に信号が検出された時と真に信号が検出されなかった時との比較。

いる。CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20)の検出効率の問題を解決することは、トリガーとしての適性を含む重要な事柄と言える。

3.1.5 信号検出チャンネル数

TGC を一つの荷電粒子が突き抜けた時に、信号が観測されるチャンネル数を示したものが、図 30・31 である。期待される結果は、アノードが 1 ヒットに中心があり 2 ヒットまで、カソードが 1 ヒットに中心があり 3 ヒットまでというものである。カソードに 3 ヒットが許されるのは、信号源が誘起電荷であるため、隣のストリップ上にも誘起されるからである。あるストリップ中心の真上のワイヤーに信号が生じた時、もっとも多くのチャンネル (左右、計 3ch) に電荷が誘起される。この時の左右のストリップに誘起される電荷の割合は、計算により中心ストリップの 8% 程度である。結果は、予想に反して複数のヒットが見られ、しかもこれらには印加電圧を増すに従って増加している。このような複数のヒットは、トリガー条件として位置情報を使うミュオントリガー検出器にとって問題である。このように、一度に複数のチャンネルから信号が来た場合、どこが本当に粒子の通過した場所か特定できない。この検出数の増加の原因として考えられるものは、

- 光子の発生による二次的なガス増幅の影響
- 電気的な相互干渉
- ガス増幅及び、信号発生に起因する原因不明ノイズ

などがある。光子の可能性は、参考文献 [14] を見る限りあまり考えられない。TGC 自体の原因か読み出し系の問題かその他か、再度確かめてみる必要が残った。

$CF_4 + iso-butane(80:20)$

anode

cathode

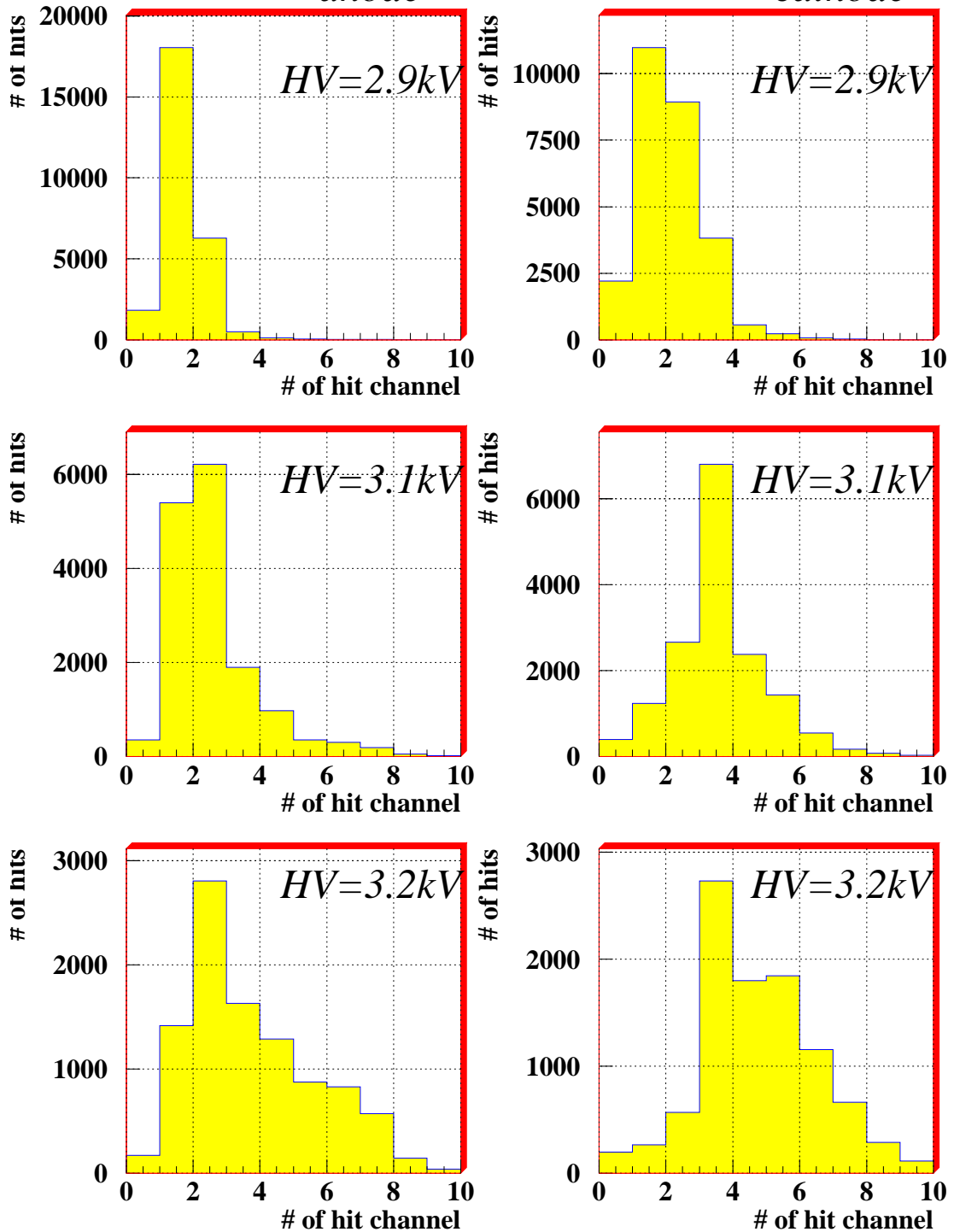


図 30: 縦軸はイベント数、横軸は信号が検出されたチャンネル数。電圧の増加とともにチャンネル数の増加が見られる。

$CO_2+n\text{-pentane}(55:45)$

anode

cathode

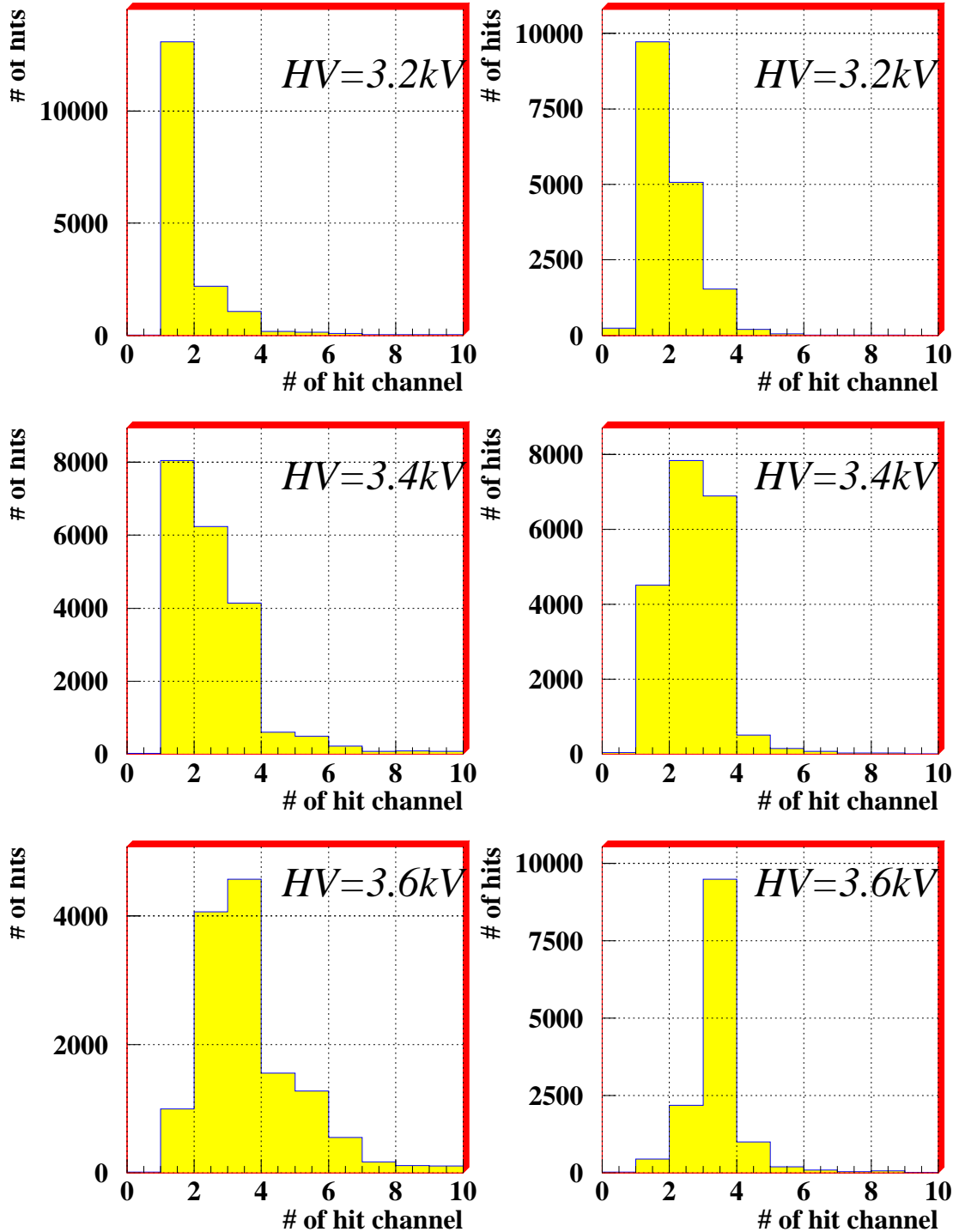


図 31: 縦軸はイベント数、横軸は信号が検出されたチャンネルの数。CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20) ガスと同じような傾向が見られる。

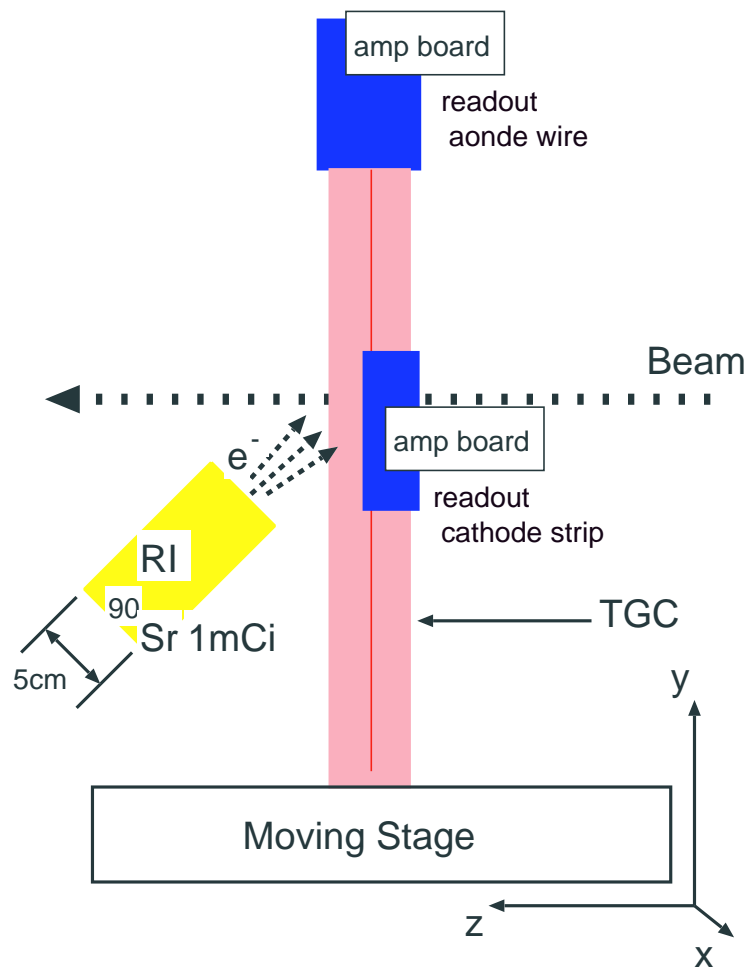


図 32: レート依存性の測定方法。ビームが照射される位置に RI ソースを照射して、高頻度入射環境を作った。

3.1.6 粒子入射頻度依存性

LHC 実験環境では、TGC は極めて高レートの中で動作することになる。その際に、十分な能力が発揮できるかを $100\text{kHz}/\text{cm}^2$ 程度まで確かめた。方法は、 1mCi の ^{90}Sr RI ソース⁹をビームが照射される位置に照射しながらビームを照射する方法を用いた(図 32)。使用したガスは $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80:20) であり、図 33 から分かるように、 $100\text{kHz}/\text{cm}^2$ でさえ、5% 程度の検出効率の低下しか見られない。しかもこの時、時間分解能が劣らないことが図 34 から分かる。以上より TGC は、極めて高いレート ($100\text{kHz}/\text{cm}^2$) でも十分に動作すると言える。

⁹ $^{90}\text{Sr} \rightarrow (\beta^-: E=0.546\text{MeV}) \rightarrow ^{90}\text{Yr} \rightarrow (\beta^-: E= 2.28\text{MeV}) \rightarrow ^{90}\text{Zn}$

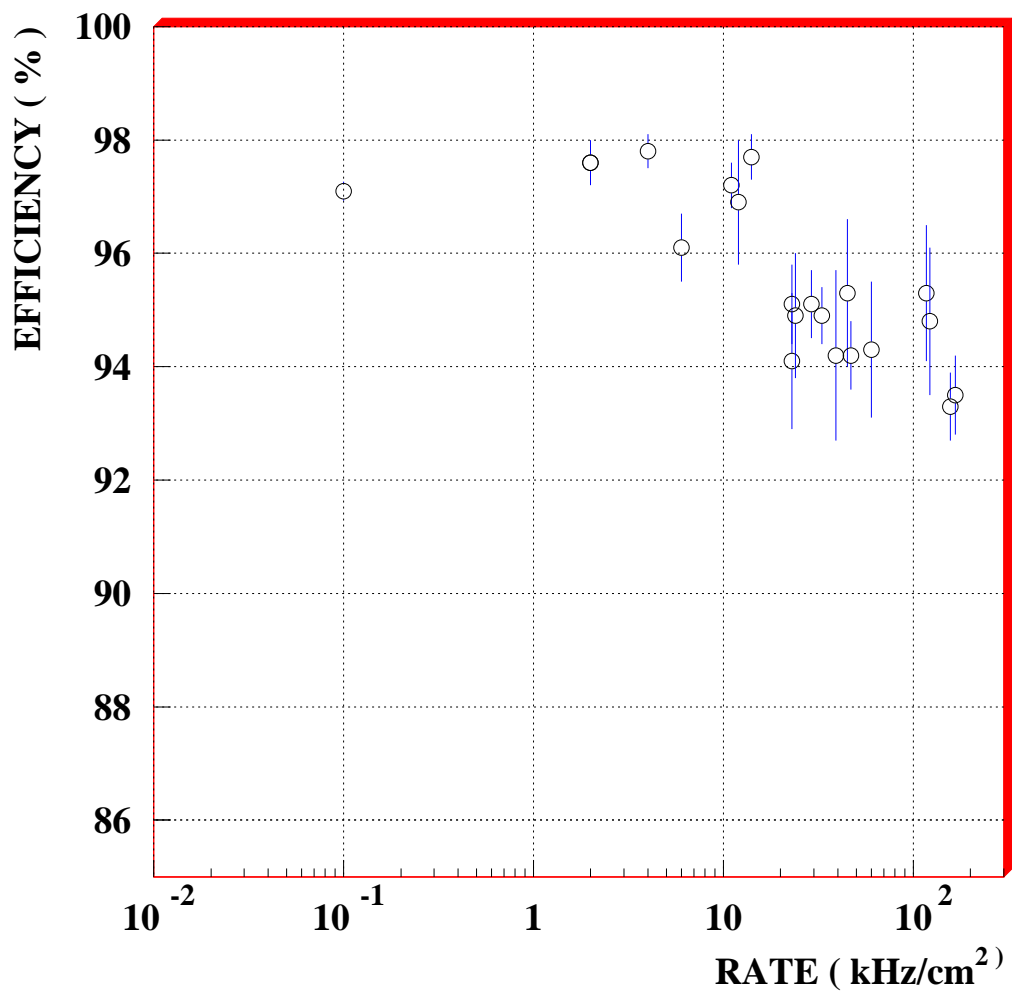


図 33: 横軸は、単位面積あたりの粒子通過数。10kHz/cm² では低下は見られず、10kHz/cm² を越えたあたりで検出効率の低下が見られる

$CF_4 + iso-butane(80:20)$
 $HV = 3.1kV$

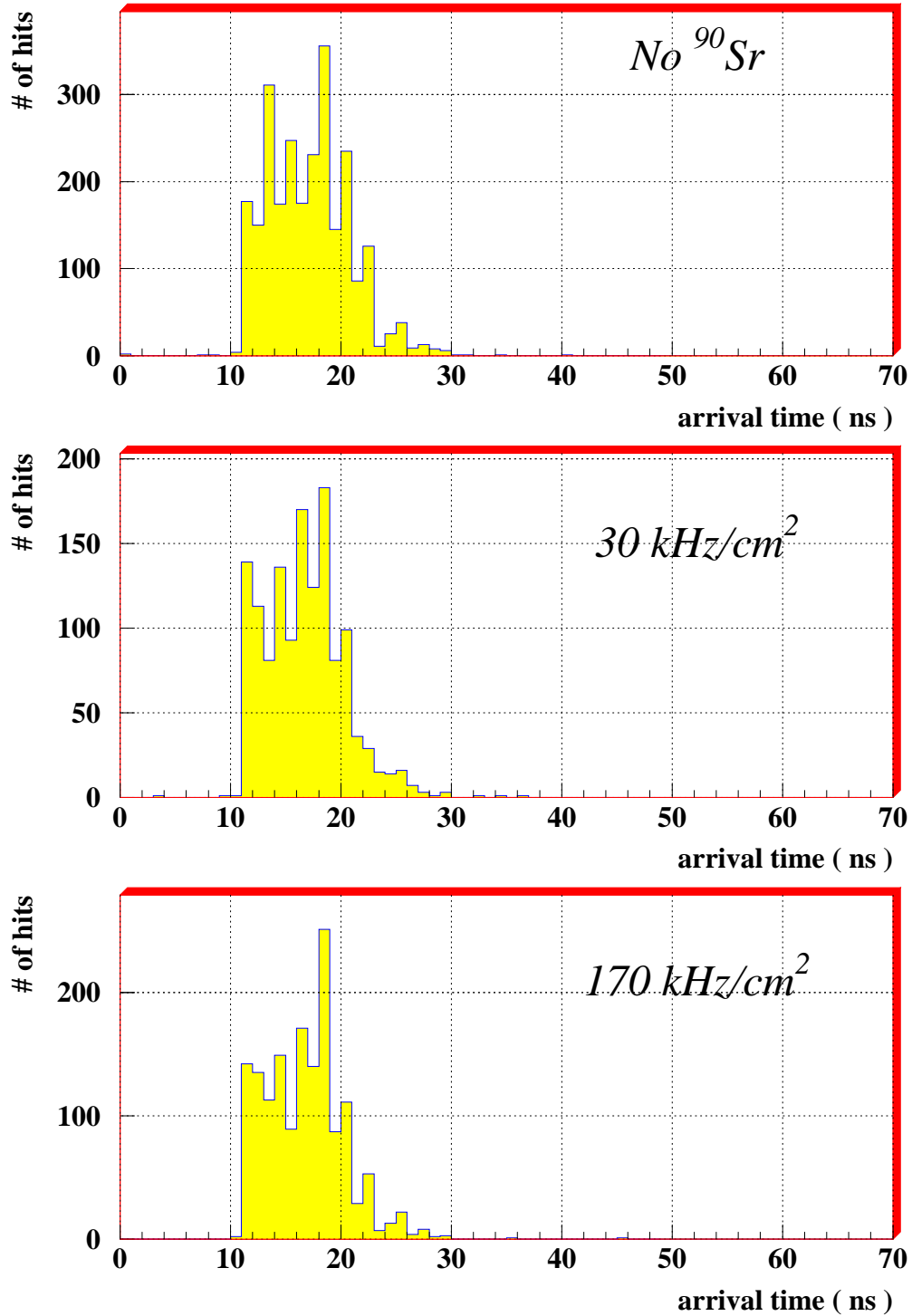


図 34: 高頻度粒子入射時の時間分解能。高頻度入射環境においても時間分解能に変化が見られない。

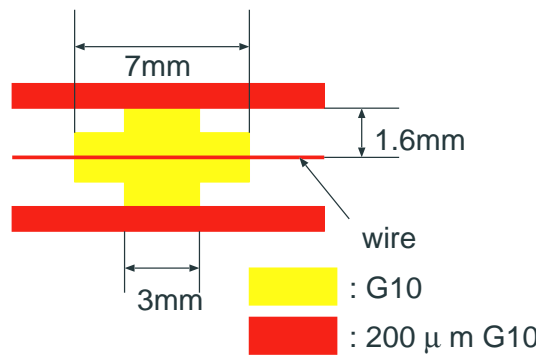


図 35: ワイヤーサポートの形状

3.1.7 粒子入射位置依存性

今回使用した大型 TGC には、ワイヤーサポートが挿入されている (図 14)。その形状は、図 35の通りである。これによって生じたチェンバーの不感領域が、どの程度広がっているか、周辺の検出効率に与える影響がどうかについて調べた。ドリフトチェンバーを使い TGC 上の位置を求め、各位置での検出効率を求めたのが、図 36である。ワイヤーサポートが設けられているため検出効率がほぼ 0 の領域が存在している。ワイヤーサポートの大きさ 7mm に比べ、実際にはさらに広い領域 10mm 程度で検出効率が低くなっている。ワイヤーサポートの影響で、ガス増幅が十分に行なわれない領域はサポートの部分以外にも広がっている。

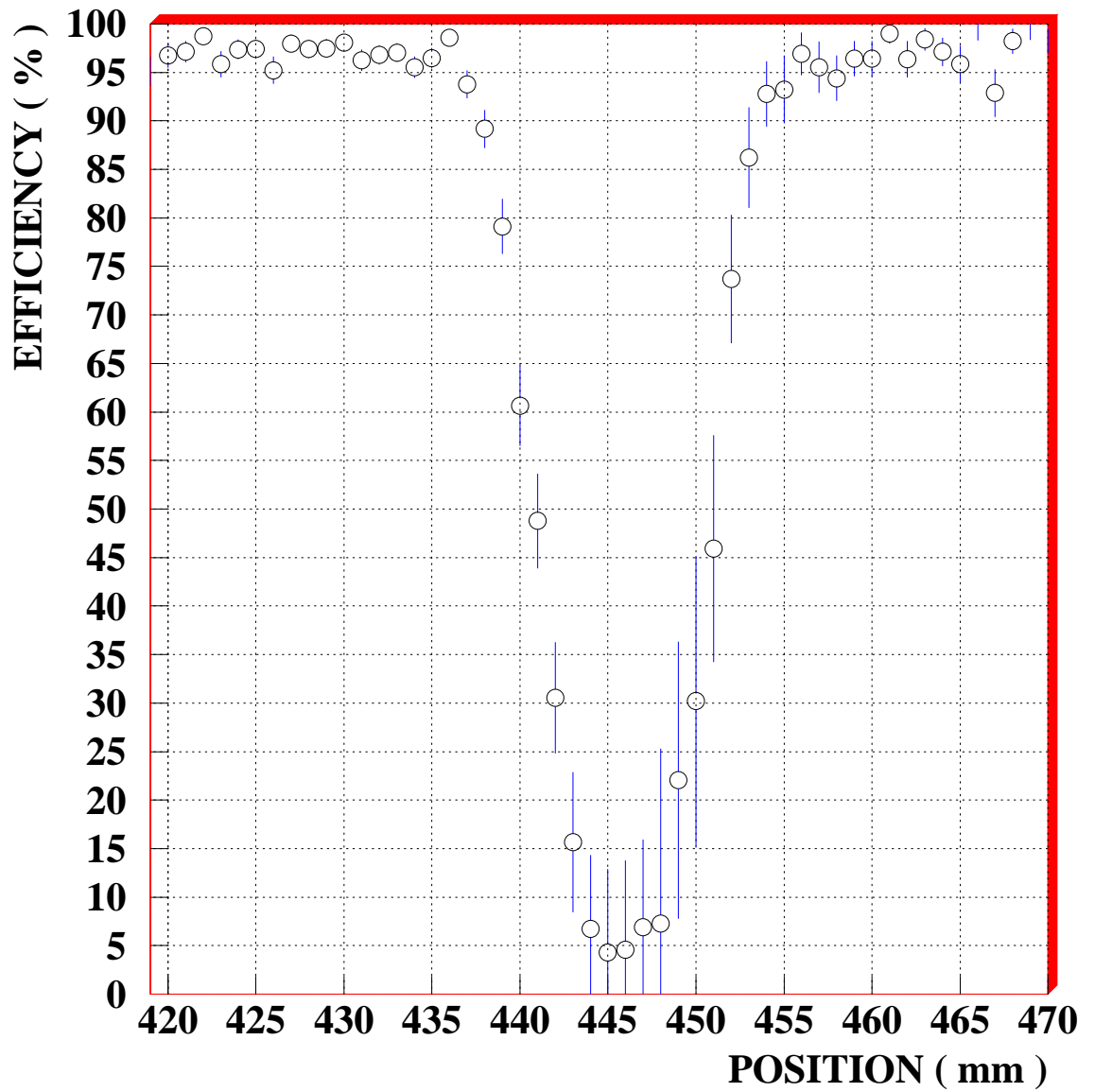


図 36: TGC の入射位置依存性。不感領域が 10mm 程度見られる。

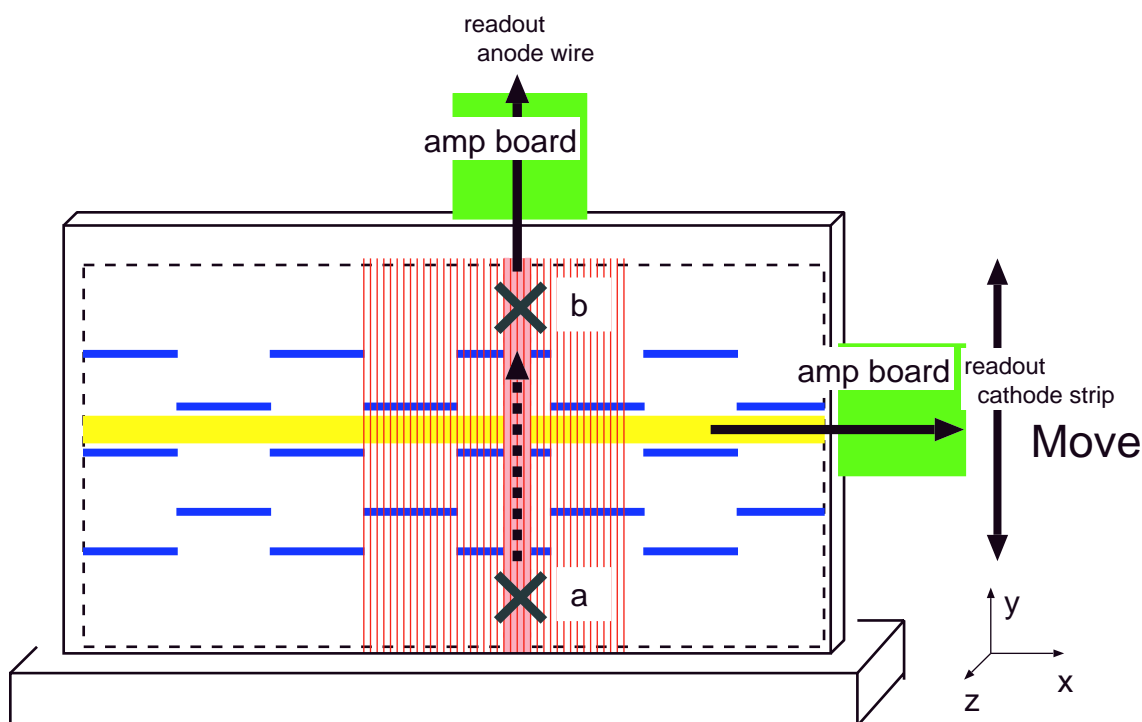


図 37: 信号伝搬速度の測定方法。a ~ b と、ビームを照射する位置を変えて信号到着時間を測定した。

3.1.8 信号の伝搬速度

このビームテストで測定した大型 TGC では、信号発生位置から読み出し側までの伝搬時間は、時間分解能が優れているため (~ 30ns) 無視できるほど小さくない。読み出し側に近い位置に入射した場合と遠い場合を比べてどの程度時間差が生じるかを求めた。今回の実験では、アノード方向 (ワイヤー方向) についての依存性を調べるに留まったが、これ以前に神戸大学石脇氏により同様に、こちらはビームの代わりに線源を用いて調べられたカソード (ストリップ) についてもまとめて述べる。測定方法は、図 37にある通りで、大型 TGC を乗せたまま台を y 方向 (アノードワイヤー方向) に動かして、ビームを照射する位置を変化させて測定した。これにより得られた各信号時間到達分布に対して、ある意味のある共通な値を決めるため、ダブルガウス分布を仮定し関数を当てはめた (図 38)。それにより得られた分布の中心から早い部分にかけて、Sigma 分だけ引いた値をそれぞれの位置で比較した。その結果が図 39である。この変化を単位長さ当たりの伝搬速度 v_g に直すと、図 39を用いて、

$$\frac{1}{v_g} = \text{アノード } 3.6\text{ns/m} \quad \text{カソード } 6.5\text{ns/m}$$
 となる。

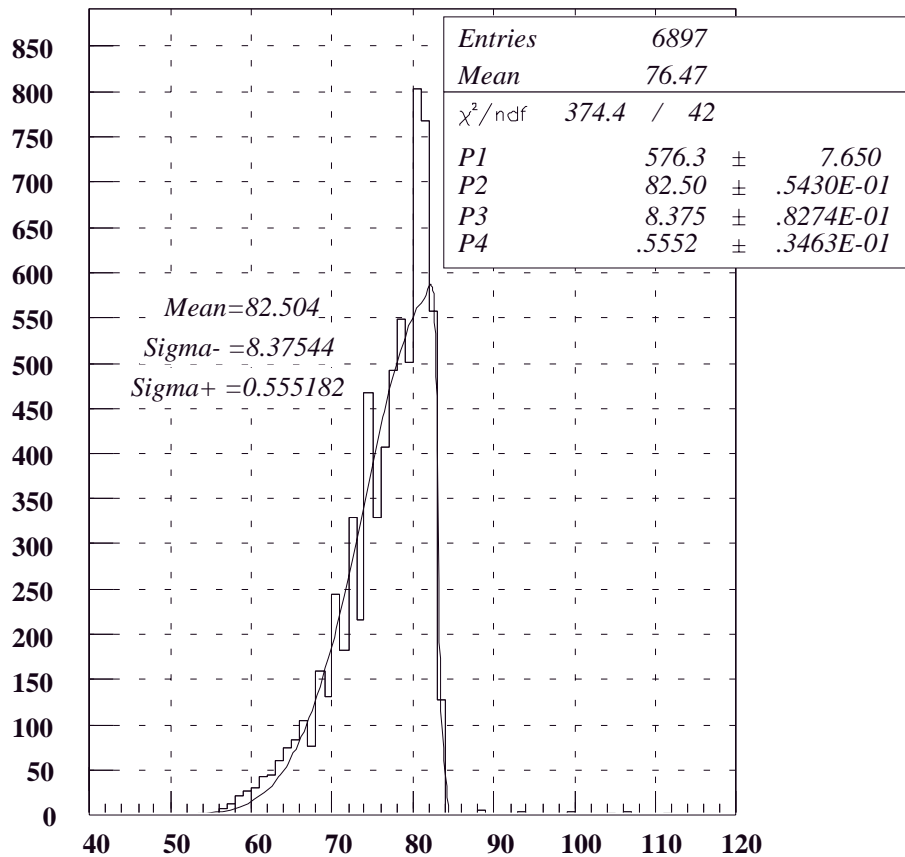


図 38: ダブルガウス分布を当てはめ、その中心より Sigma+ だけ引いた値を比較した。この分布では、83.06ns となる。common stop のモジュールであるため右にいくほど速く到達した信号になっている。

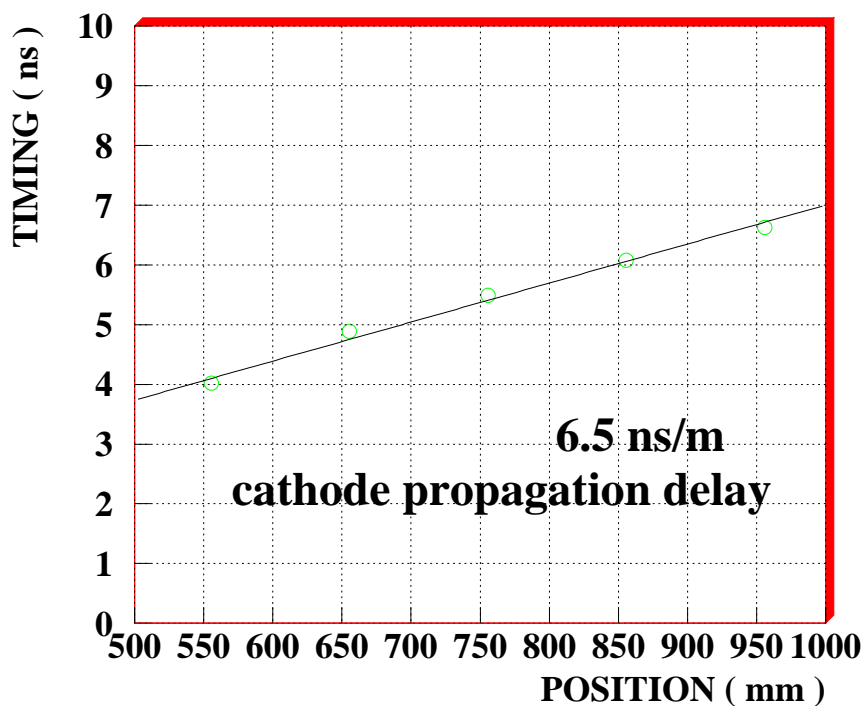
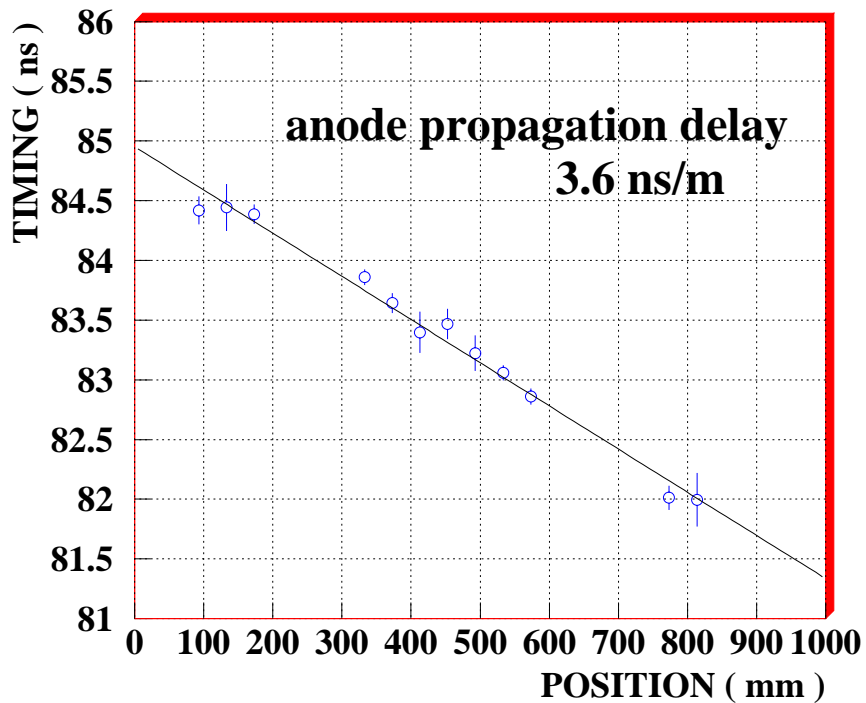


図 39: 各位置からの信号到達時間分布の変化。上図は今実験で求めたもので、誤差は統計的なもの。下図は以前に計られたもの。

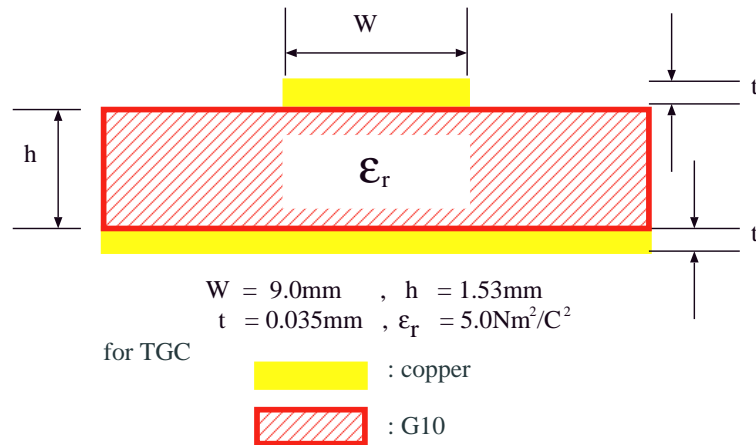


図 40: H.A.Wheeler のマイクロストリップに対する近似式の変数図

理論的には、次のように考えられる。信号は、アノード・カソードともそれぞれが持つ静電容量によって作られる伝送線を通ってくる。その伝搬速度 v_g は、次式で与えられる。

$$v_g = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \text{ [m/s]} \quad \epsilon_{eff} : \text{実効比誘電率} \quad (23)$$

従ってアノードの場合は、 $\epsilon_{eff}=1$ のため伝搬速度 v_g は、光速と同じ $3 \times 10^8 \text{m/s}$ である。これに対しカソードの場合は、マイクロストリップラインと見なして求めることが出来る。しかし、カソードの特性インピーダンス Z_0 は正確には求まらず、H.A.Wheeler らの求めたマイクロストリップラインに対する近似式、式 24 [15][16] を用いて

$$Z_0 = \frac{42.4}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \cdot \ln \left\{ 1 + \left(\frac{4h}{W'} \right) \left(b + \sqrt{b^2 + a\pi^2} \right) \right\} \quad (24)$$

$$W' = W + a \cdot \Delta W$$

$$\Delta W = \frac{t}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{4}{\sqrt{\left(\frac{t}{h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\pi \left(\frac{W}{t} + 1.1 \right)} \right)^2}} \right)$$

$$a = \frac{1 + \frac{1}{\epsilon}}{2}, \quad b = \frac{14 + \frac{8}{\epsilon}}{11} \cdot \frac{4h}{W'}$$

W : ストリップの幅 ϵ_r : 比誘電率 h : G10 の厚さ

$Z_0=21.3\Omega$ と求まる。ここで各数値は、図 40にある通りで、さらにこれを使い、伝搬

時間 t_{pd} 、伝搬速度 v_g は、同じく H.A.Wheeler の式より求まる。

$$\begin{aligned}
 t_{pd} &= \frac{1}{v_g}, \quad v_g = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} [m/s] & \epsilon_{eff} : \text{実効比誘電率} & (25) \\
 \epsilon_{eff} &= \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{effo}}{1 + G \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} & f : \text{使用周波数 [GHz]} & \\
 G &\equiv 0.6 + 0.009 Z_0 \quad (Z_0 : \Omega) & & \\
 f_p &\equiv \frac{Z_0}{0.8\pi h} \quad (h : mm) & \equiv \text{はディメンジョン無視} & \\
 \epsilon_{effo} &= \left(\frac{Z'_0}{Z_0}\right)^2 & & \\
 & Z'_0 \text{ は、図40で誘電体を取り除いた時の特性インピーダンス} & &
 \end{aligned}$$

使用周波数 f を 1MHz とすると、伝搬時間 t_{pd} は 6.75ns/m と求まる。

以上から、アノード・カーソードとも実験値は予想値とほぼ一致し、ワイヤー (アノード) の方が、ストリップ (カソード) より伝搬速度が速いことも確認できた。

3.2 ビームテスト 94 から 95 へ向けて

CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20) の検出効率の低下の原因が、ワイヤーへの電子の到達数、つまり電子吸着性にあると考えられるため、その効果をシミュレーションで調べた。その結果、ワイヤーの間隔 s を広げることで電場を低くし、電子吸着の確率を全体として下げることが可能であるという結論が得られた。電場がワイヤー間隔 s を変えることによりどの様になっているかを示したものが図 41・42 である。それぞれ HV は、ガス増幅率を同じに保つため、アノードワイヤー表面の電場が 3.1kV のものと同じになるように選ばれた値である。大部分を占める領域がどの電場領域であるかが重要になっている。現在の TGC では、平均で 4 個前後の電子しかワイヤーに到達していないとシミュレーションから見積もられ、Poisson 分布を仮定すれば検出効率は 98.2% となる。ワイヤー間隔 s を 2.2mm にした時、多くの部分を 9kV/cm 以下 (3.1.4 節、図 26) の電場、すなわち電子吸着性のない領域に変えることができる。この結果、ワイヤーに到着する電子の数が増え検出効率が上がり、信号の振幅も比例して大きくなると考えられる。シミュレーションの結果は、図 43 の通りである。図では、各 HV に対して同じような検出効率を示しているが、実際は適切なガス増幅率を得る HV が異なるため検出効率が異なるのである。HV を下げることによっても、電子吸着性の領域を減らすことが出来るが、次に挙げるようなことに注意しなければならない。

- ガス増幅率は現状程度を維持しなければならない事
- 電場を低くすることによるドリフト速度の低下する領域が増加する事
- 平均してドリフトする距離が事実上伸びる影響

これらを含めて考えると、ワイヤー間隔 s を広げてガス増幅率を維持しつつ、電子吸着性の領域を減らす方法が最も有力である。その際、幸いにも CF₄ のドリフト速度は低い領域で十分速いため、時間分解能に寄与する影響は小さいと期待され、シミュレーションの結果もそれを支持した。これらの結果を踏まえて、ワイヤー間隔 s を広げた TGC を製作し実験する必要性が生じた。ワイヤー間隔 s を広げることは、TGC を製作する上で様々な利点がある。それは、ワイヤーの数を確実に減らせられるため、製作費の削減、TGC 全体にかかる張力の低下等である。

これに対して、TGC における主な時間分解能の低下の原因は、

- 電子のワイヤーまでのドリフト時間
- 信号のスレシヨールドレベルまでの立ち上がり時間

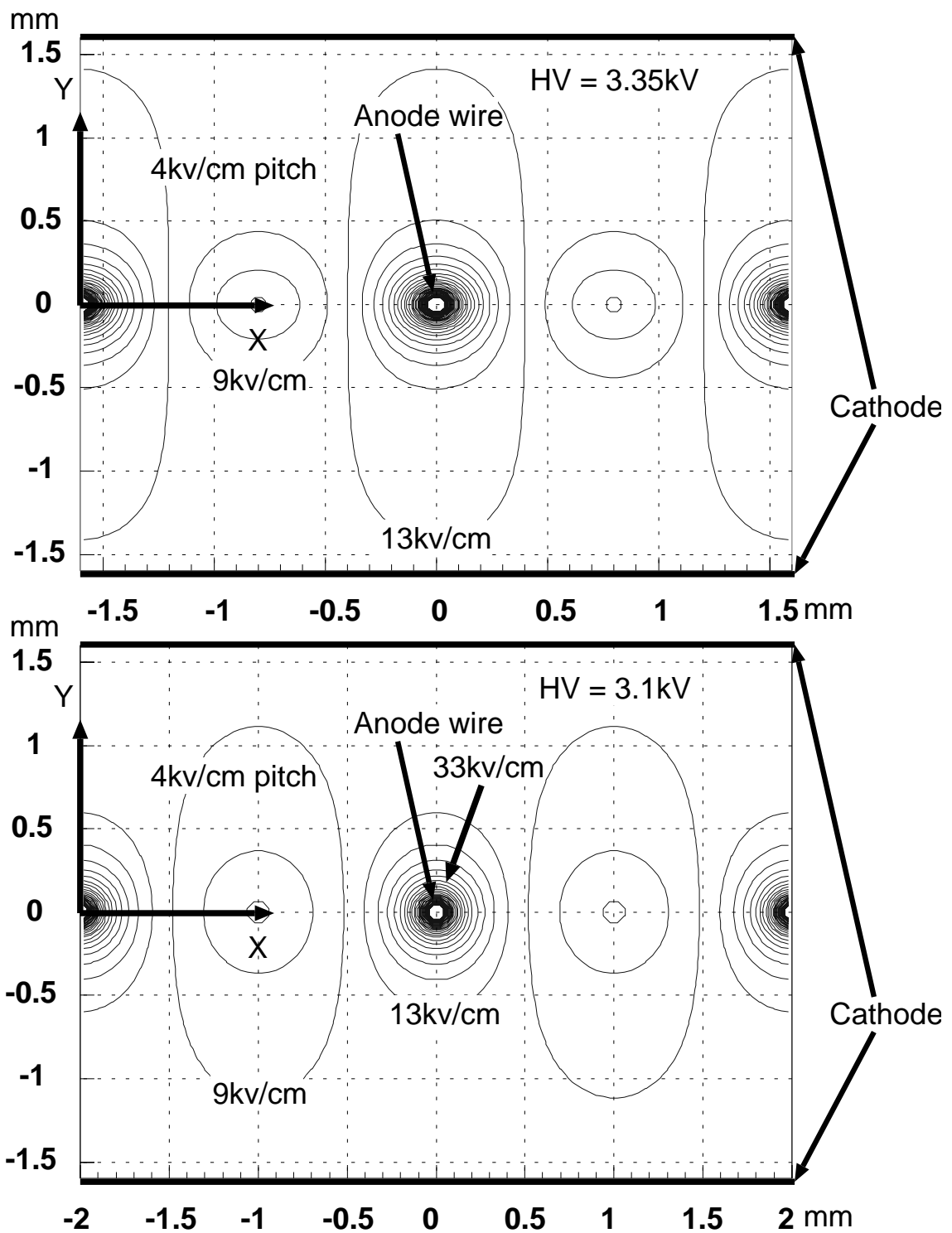


図 41: ワイヤー間隔 1.6mm、 2.0mm 時の電場

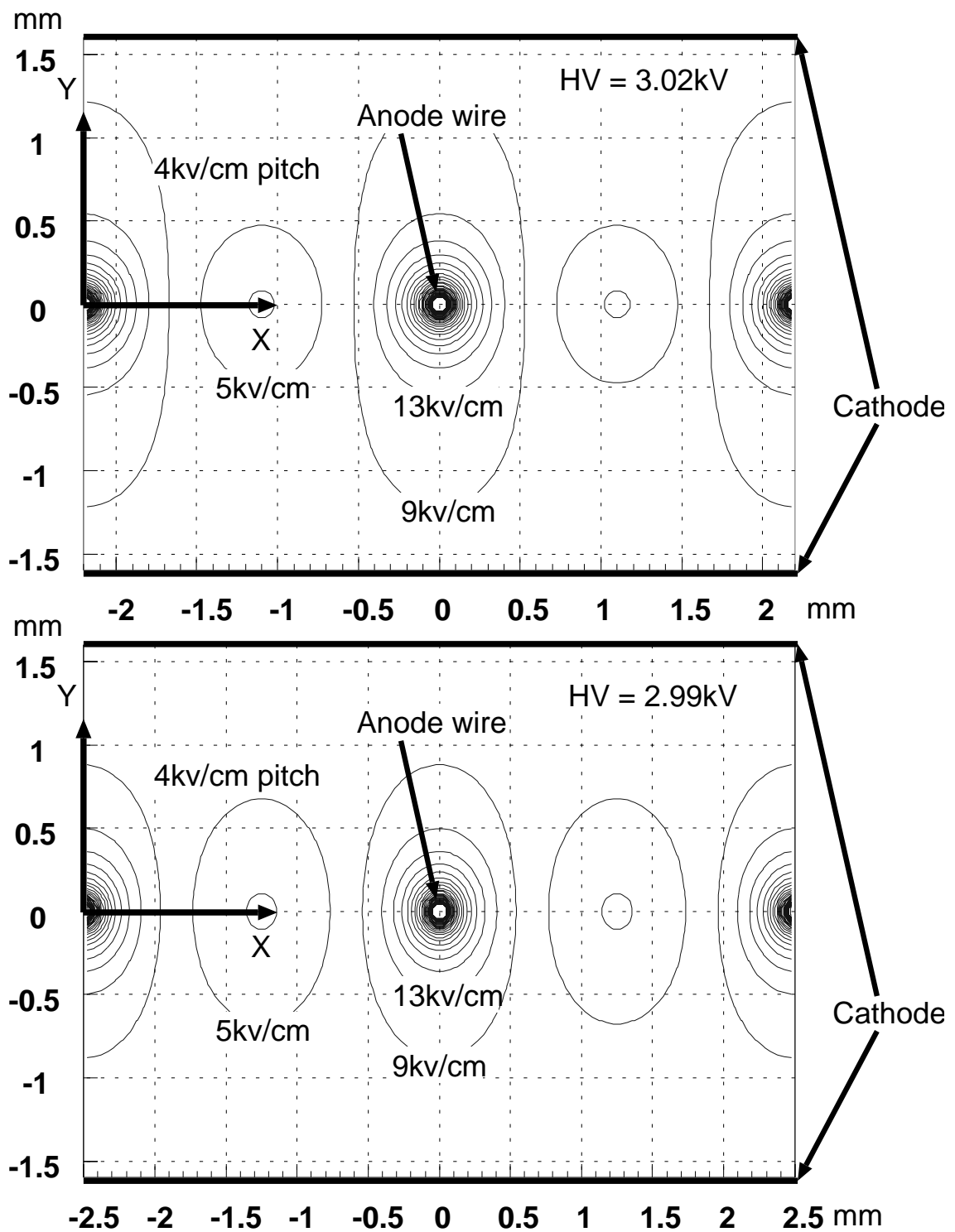


図 42: ワイヤー間隔 2.2mm、2.5mm 時の電場

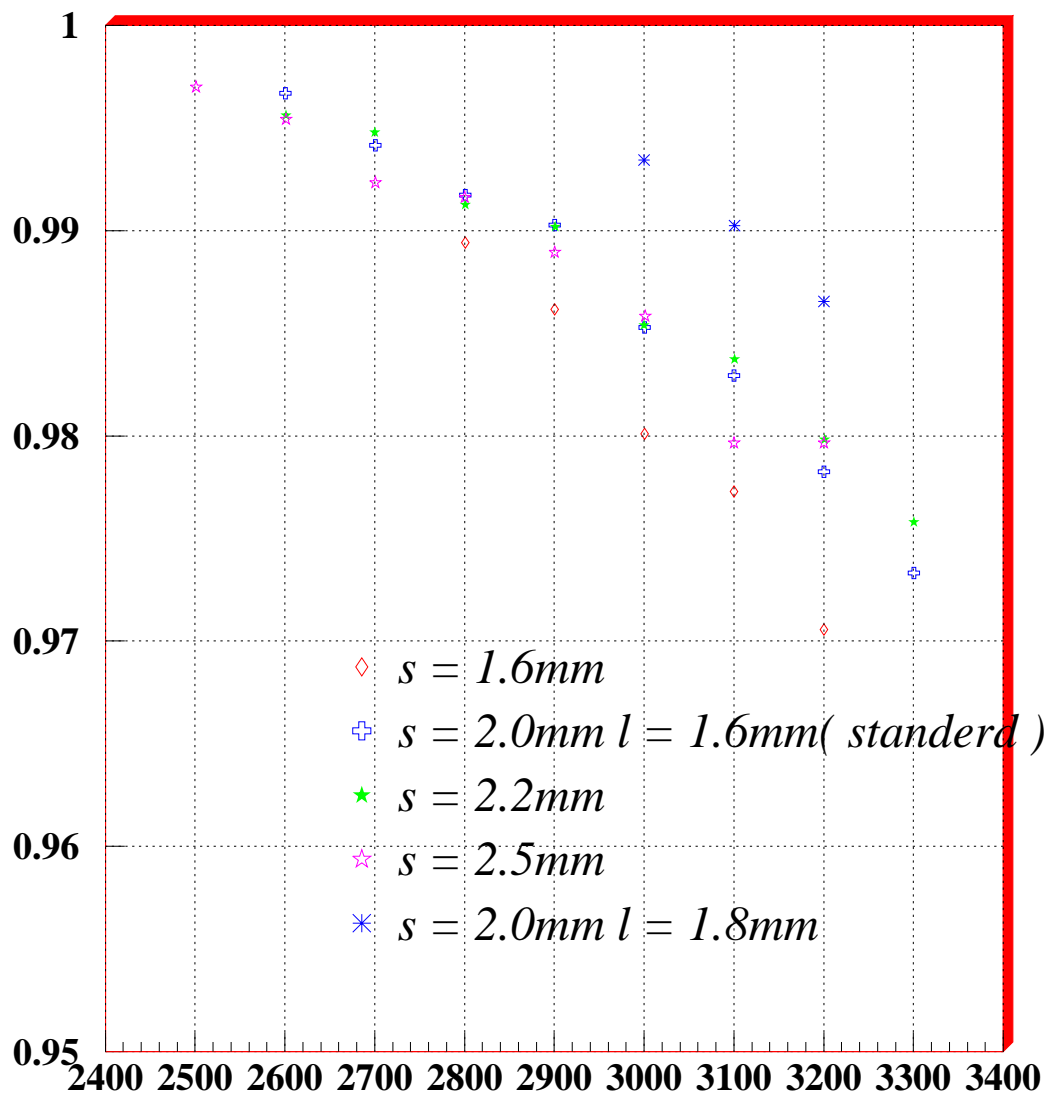


図 43: TGC の構造を変化させた時の検出効率の変化。HV を下げた方が検出効率が上がっている。

- 信号伝搬時間

等のばらつきであるから、 $\text{CO}_2+n\text{-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ に対しては電子のドリフトする距離を短くすることで、時間分解能を向上出来そうである。この時、標準の TGC と相似形することで今までと同じように安定に動作するであろうという観点から、ワイヤー・ワイヤー間とギャップの両方を小さくするという方針で $\text{CO}_2+n\text{-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ に対しては進められた。この事項は、TGC における信号到達時間分布のばらつき、すなわち時間分解能が主に電子のドリフト時間の差にあることを裏付けるために、検証すべき課題である。しかし、 $\text{CO}_2+n\text{-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ で見られる後方分布は、ワイヤー・ワイヤー間の中心に生じる電場の弱い領域から、電子がドリフトしてくる場合に相当するため、この領域はどれほどワイヤー・ワイヤー間の距離を短くしても存在する。従って、このような電場の低い領域でドリフト速度の速い CF_4 の優位性は動かし難いのである。

上記とは別の問題として、信号検出数の問題が残っている。検出効率と時間分解能は、出力信号に掛けるディスクリミネーターのスレシールドと信号の振幅の關係に依る所が大きいため、94 年ビームテスト実験においてはそのぎりぎりの所で使用した。そのため、非常にノイズ及び信号の微小変化に対して、ディスクリミネーターが敏感だったという可能性がまず考えられた。これが原因ならば、さらに増幅率の大きいアンプを用いて十分ノイズと分離することができれば改善できると期待される。そのため、さらに TGC に適したアンプ及び読み出し系の開発を行なわなければならないと言う結論に達した。

以上のような観点から、次のビームテストが計画された。

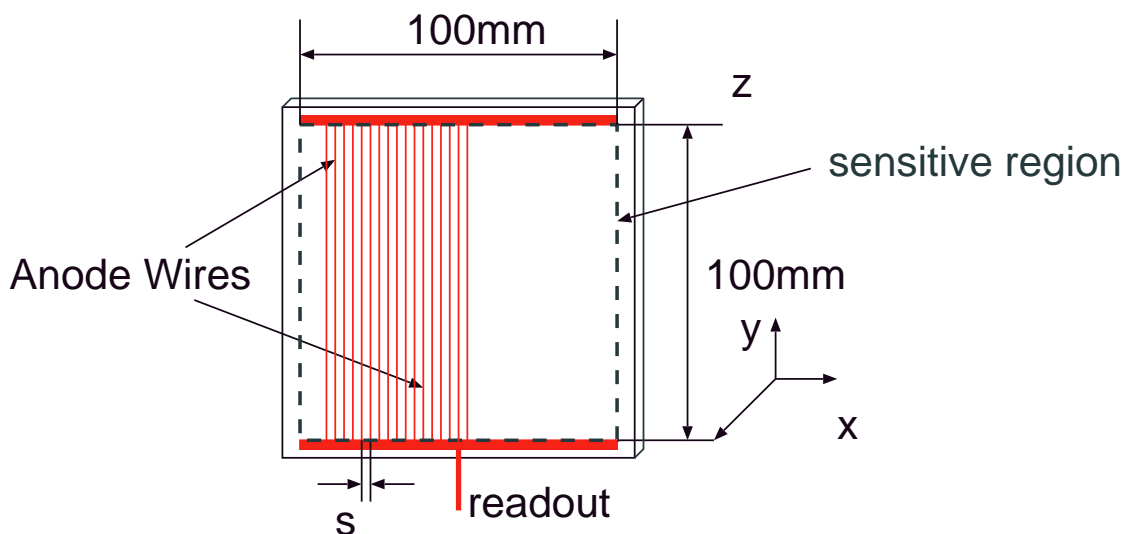


図 44: 小型 TGC の構造。読み出しはアノードのみで、全てのチャンネル (50 本、100mm 幅) がまとめられている。

3.3 ビームテスト 95

前回のビームテストの結果得られた二つの事項を試験することが今実験の主な目的である。

1. TGC の構造改良による $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80:20) ガスでの検出効率の向上及び、 $\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}$ (55:45) ガスでの時間分解能の向上。
2. 印加電圧に依存して増加する信号検出チャンネル数現象の改善確認。

1、2 に対しては、イスラエル Weizmann Institute により新たに制作された小型の TGC (図 44) を用いて試験した。小型 TGC は複数枚あり、それぞれ構造が異なる。表 5 と図 45 にそれをまとめる。図中の HV のうち最適 HV とは、今回の実験に使用したアンプを用いて、時間分解能が十分良く安定的に動作する電圧として、ビームテスト実験中に決定したものである。また、初期 HV とは、今回の実験に使用したアンプを用いて、標準 TGC と出力信号の振幅が同じになるように、つまりガス増幅率が同じになる HV をデジタルオシロスコープを用いて、ビームテスト実験前に実測し、決定したものである。最適化 HV は、概ね初期 HV より数 100V 高めである。

3 に対しては、前回の実験の原因と考えられているアンプ及びディスクリミネーターを、以前とは異なった新たに製作したのを使い、再度大型 TGC を動作させ前回と同じ環境で調べ変化を見た。

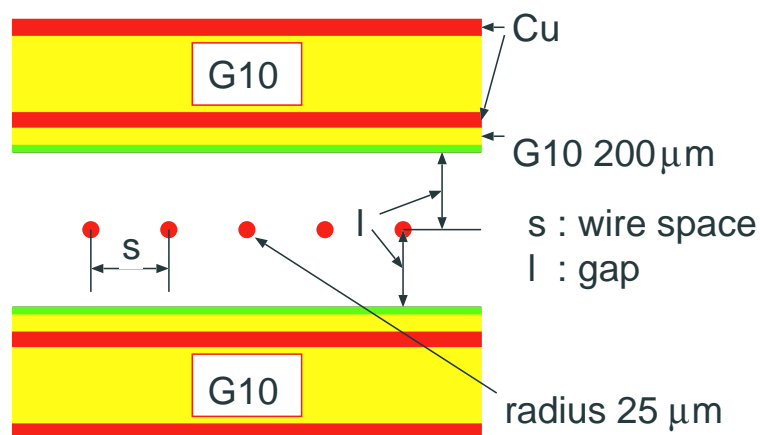


図 45: TGC の各パラメーター。 s がワイヤー間隔で、 l がワイヤー・ストリップ間の間隔。

3.3.1 セットアップ

実験のセットアップを図 46 に示す。この実験も前回の実験と同じように上流・下流にトリガー用シンチレーション カウンターと位置測定用のドリフトチェンバーを設置した。上流に置かれている検出効率を目的とする小型 TGC は、まとめ読み出しになっているため (図 44)、各小型 TGC ごとに読み出しチャンネルは一つである。小型の TGC はそれぞれ構造、目的が異なり、TGC2 ~ 5 は $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80:20) ガスにおいて検出効率が向上することを確かめるのが目的で、残りの TGC6 ~ 8 は $\text{CO}_2 + n\text{-C}_5\text{H}_{12}$ (55:45) ガスにおいて、時間分解能特性が向上するかどうかを目的とした。

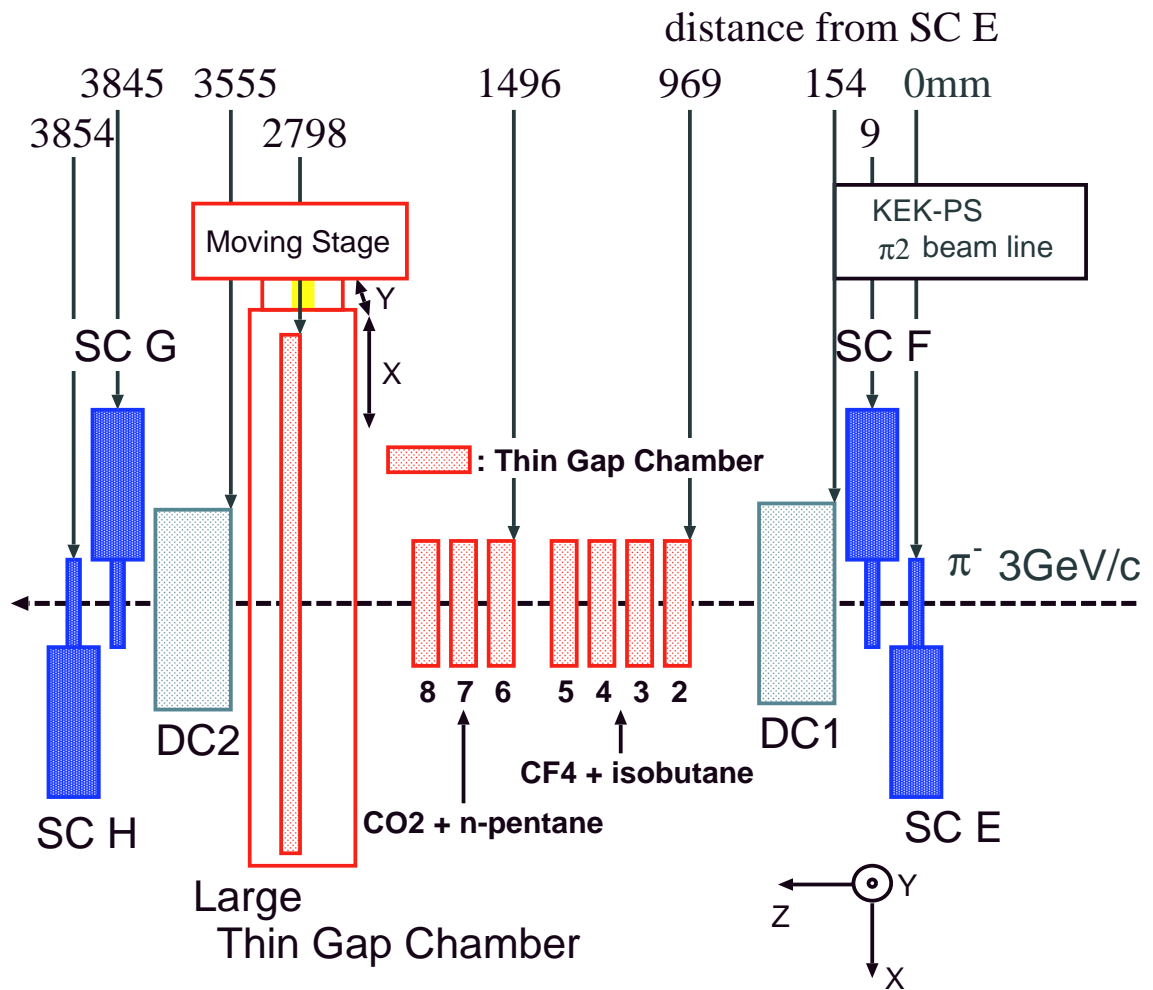
各ガスの使用方法については、前回の実験と同じ方法で行なった (3.1.1 節)。

アンプは、今回新たに、東大吉田 (光) 氏により TGC 用に開発されたものを用いた。アンプの仕様を表 6 にまとめる。

3.3.2 データ収集及び解析

データ収集は、CAMAC と VME の組合せで行った (図 47)。特に今回は、500MHz-FADC¹⁰ を用いてチェンバーの信号波形を可能な限り収集した。使用したモジュール以下の通りである。

¹⁰Flash Analog to Digital Converter



< Top view >

図 46: ビームテストの各種測定器の配置。ドリフトチェンバー間約 4m。

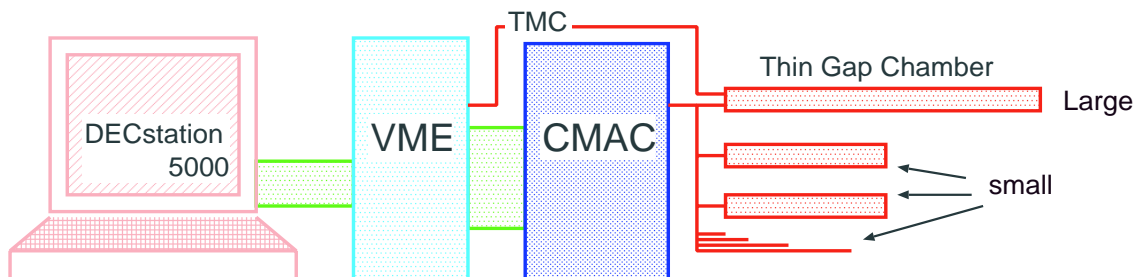


図 47: データ収集の仕組み。

TGC 用 CAMAC:FADC 500MHz RPC-250(林栄精器製)

TGC 用 CAMAC:ADC 0.25pC/count RPC-022(林栄精器製)

小型 TGC 及び SC 用 CAMAC:TDC 25ps/count RPC-061(林栄精器製)

大型 TGC 用 VME:64chTMC 1ns/count (KEK 回路室製)

収集されたデータから解析に用いるイベントの選択方法は、前回と同じである (3.1.2節)。

名称	ワイヤーグラウンド間隔 (ギャップ) l [mm]	ワイヤー間隔 s [mm]	最適 HV [kV]	初期 HV [kV]
TGC2	1.8 (+.2)	2.0	3.3	3.1
TGC3	1.6	2.2 (+.2)	3.0	2.9
TGC4	1.6	2.5 (+.5)	2.7	2.6
TGC5	1.6	1.6 (-.4)	3.3	3.1
TGC6	1.3 (-.3)	1.8 (-.2)	3.2	2.9
TGC7	1.5 (-.1)	1.8 (-.2)	3.4	3.1
TGC8	1.4 (-.2)	1.8 (-.2)	3.3	3.0

表 5: 小型 TGC パラメーター表。() の値は、標準 TGC からの差。

	増幅率	帯域	消費電力
$\mu A733$	100 倍	40MHz	240mW
新型ハイブリッド型アンプ	100 倍	150MHz	未調査

表 6: アンプの仕様 2

3.3.3 検出効率

TGCのパラメーターを変えたことに対する両ガスにおける検出効率の変化を図48から50に示す。まず、図48を見ると、各TGCはHVを上げるにつれ検出効率が上り、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ も $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ も共に99%を越えていることが分かる。図49と50を比べると、アンプと最適になるよう選んだHV(図50)では、初期HVに比べ断然スレシヨールドに対する依存性が小さくなっている。特に $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ では、-100mVまで変わることがない。このことは、 $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ では、信号は十分に大きく-100mV以上の信号が確実に出力されていることを意味している。これに対して $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ では、スレシヨールドを下げれば下げるほど検出効率が上がっている。つまり、TGCは信号を検出しているのであるが、スレシヨールドを越えず検出できないという場合が存在していると思われる。しかし、スレシヨールドを下げ過ぎると、ノイズをディスクリミネーターが捕らえ始める。従って、図49・50のスレシヨールド依存性を見ると-20mVを越えた辺りからノイズによる影響が検出効率の低下に現れている。これは、信号検出の時間よりも速めにノイズによりディスクリミネーターが作動して、適切な時には作動できない状態に陥るからである。この中で、特にTGC5はその傾向が強くノイズレベルが他に比べて高かったため、スレシヨールドの低い所(-20mV前後)で著しく検出効率が落ちている。

また、ワイヤー間隔 s が広い程低いHVで高い検出効率を実現できている。これは、同じ電圧なら、ワイヤー間隔を広げた方がガス増幅率が上がり、スレシヨールドを越えやすくなるためであろう。しかし、前回のビームテストで得られた結果に比べ、全体的に検出効率が高い。これは、TGCの性能が改良されたためと捉えるか、アンプの性能向上により、前回では検出できるまで増幅されなかった信号が、今回は増幅されて検出されたためと捉えるか判断が難しい。どちらの理由にしる、現実には前回の結果を上回る検出効率を達成できたことは事実である。

一方 $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ については、前回同様高い検出効率を、しかも幅広いHVで実現しており、アンプに最も適したHVでは、この領域のスレシヨールドには全く依らない。逆に下げることで、ノイズを捕らえて低下する可能性があるだけである。

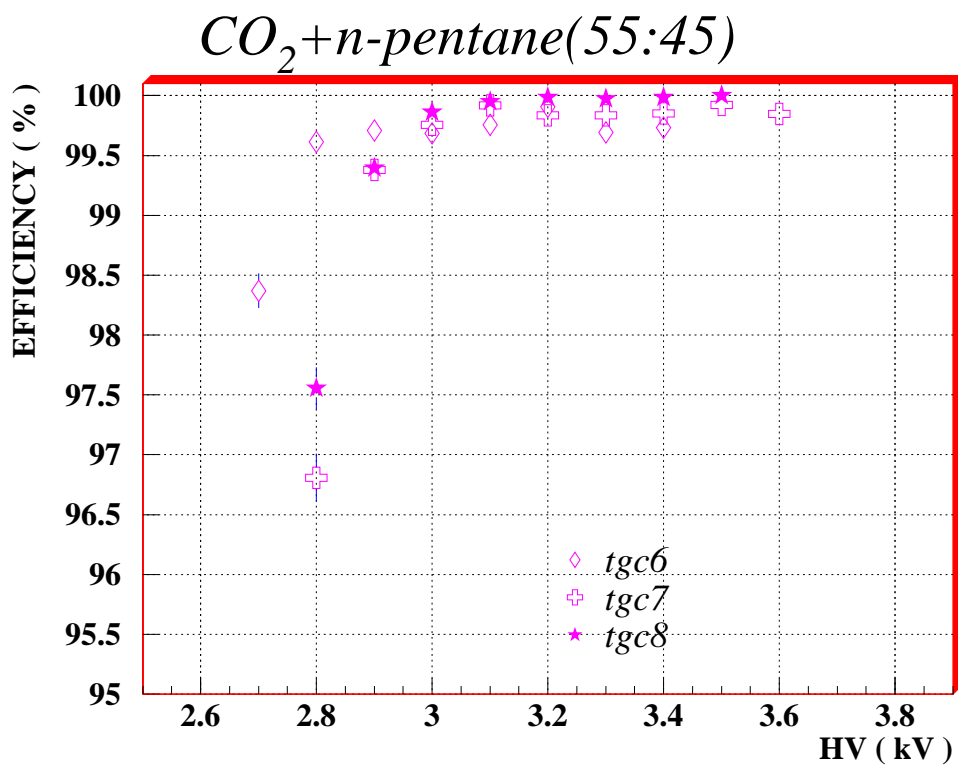
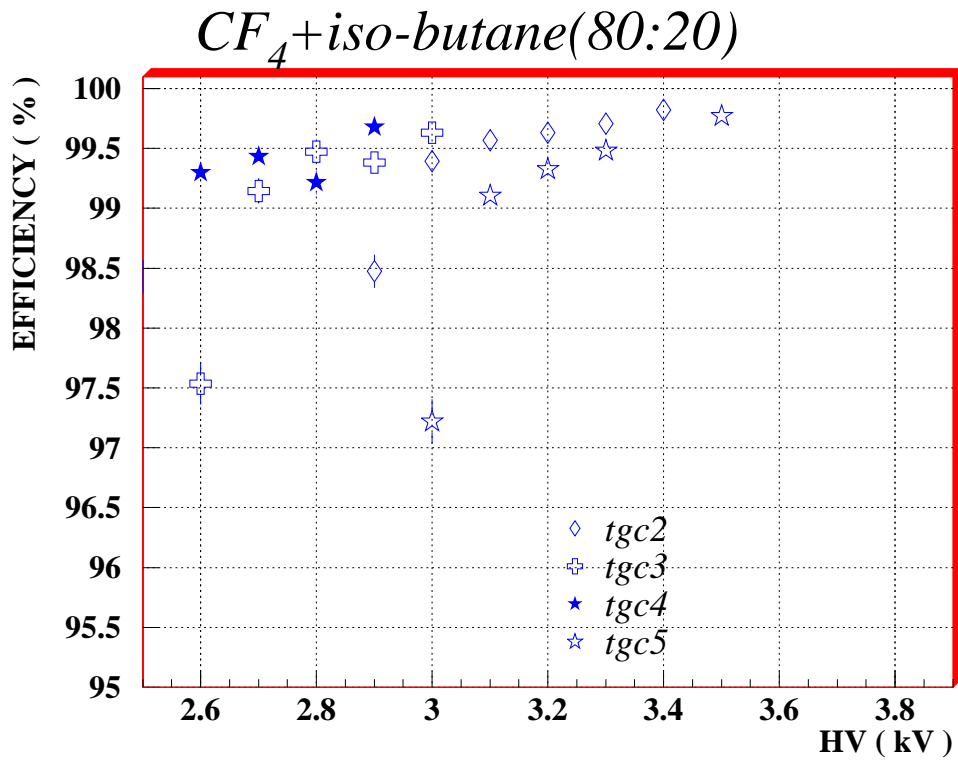


図 48: 検出効率の HV 依存性。この時スレシヨールドは全て -20mV である。

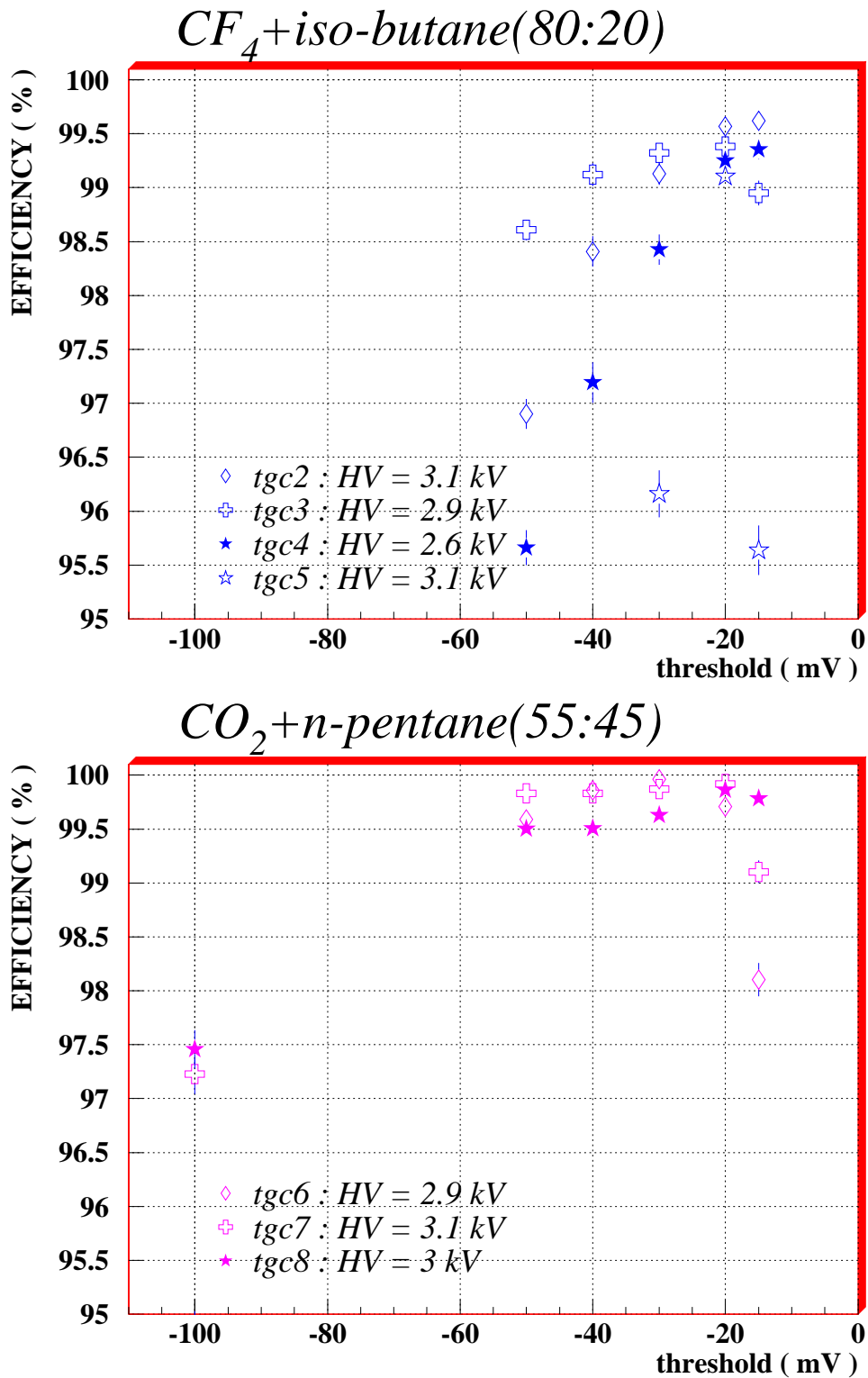


図 49: 初期の HV における検出効率のスレシヨールド依存性。 $CF_4 + iso-C_4H_{10}(80:20)$ はスレシヨールドを下げるにより検出効率を上げられる。 $CO_2 + n-C_5H_{12}(55:45)$ は 50mV からはほぼ一定である。

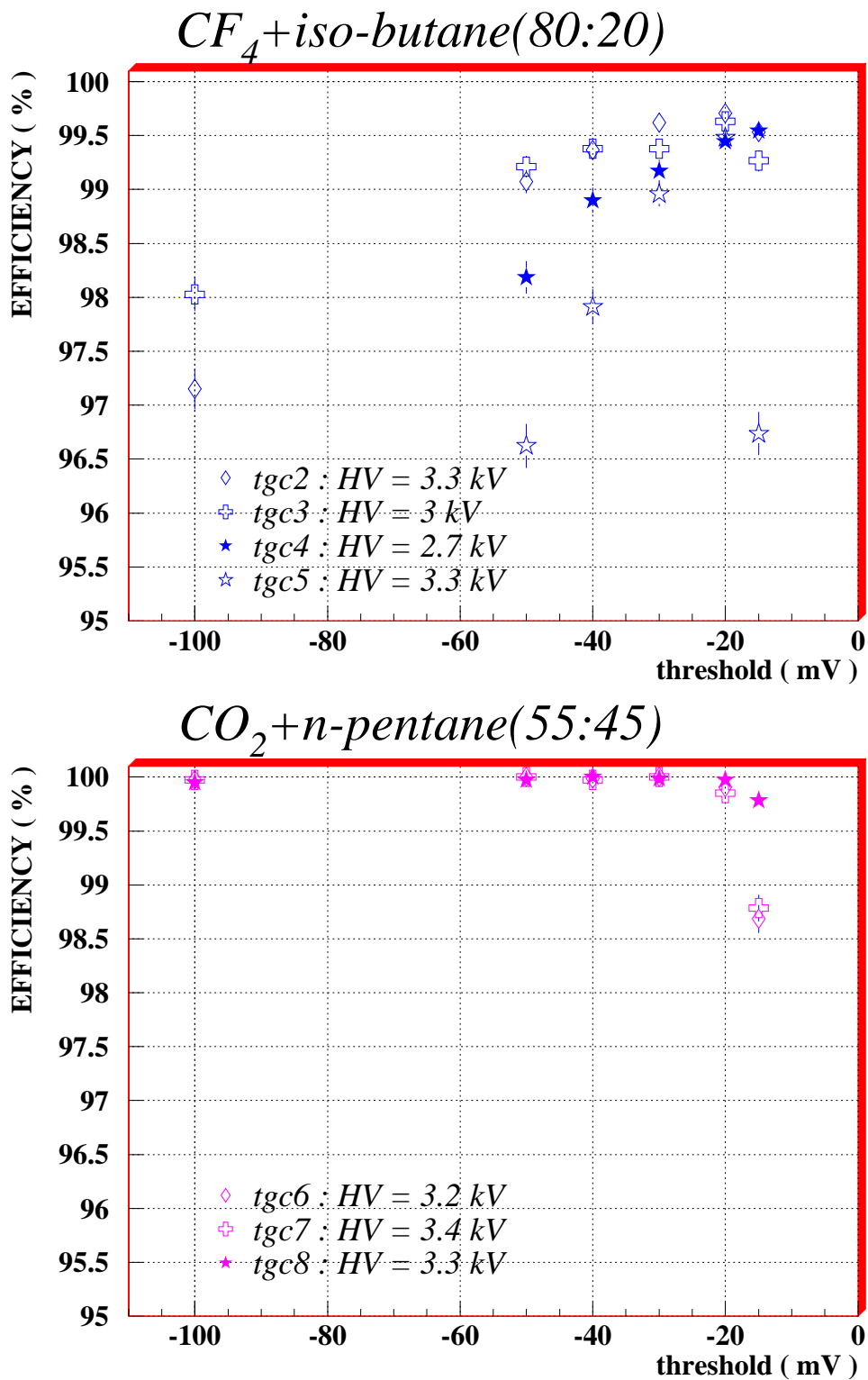


図 50: 最適 HV における検出効率のスレシヨールド依存性。CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20) はスレシヨールドを下げると検出効率が上がる。CO₂+n-C₅H₁₂(55:45) はスレシヨールドに依らず一定である。

3.3.4 時間分解能の向上

$\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ における時間分解能の向上と $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ における時間分解能の変化を図 51から図 53に示す。ここで使用している時間分解能 (Time Jitter) は、式 23で定義したのものである。

TGC5 はノイズレベルが他の TGC より高かったため、前節で述べた通り信号到達時間分布が著しく広がってしまい、スレシヨールドを下げた場合に時間分解能の悪化を招いたと言える。

HV の違いにより $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ の TGC は結果が異なる。最適 HV においては、ほとんどスレシヨールドに依らない。これは、前節で述べた通りスレシヨールドよりも非常に大きい信号が発生しているためである。注目すべきは、この時 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ と *timejitter* は同程度である事である。今回の $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ 用に作られた TGC は、期待した通り時間分解能を小さくすることができたと言える。と同時に、時間分解能を左右する一つの要因が実際にドリフトする距離であるということも確かめられた。

それぞれの最適化された HV での実際の信号到達時間分布は、図 54・55の通りである。ここで注意しなければならないのは、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の TGC でワイヤー間隔 s を狭くした場合 (TGC5) では、後方の分布が多くなっていることである (図 54右上)。このことは、ギャップ l を小さくすることで時間分解能が単純に向上することとは対称的である。しかし $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ では、ワイヤー間隔 s を広げてもほとんど時間分解能に影響しないことは十分に確認された。

以上の目的を達成した TGC のうちもっとも有望なものを前回の標準 TGC と比較した時間到達分布が、図 56である。 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ 用 TGC はワイヤー間隔を広げたにも関わらず、分布の形に大きな変化がないことが改めて確かめられる。また、 $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ が時間分解能が小さくなっている事もこの分布を比較すれば、明らかである。

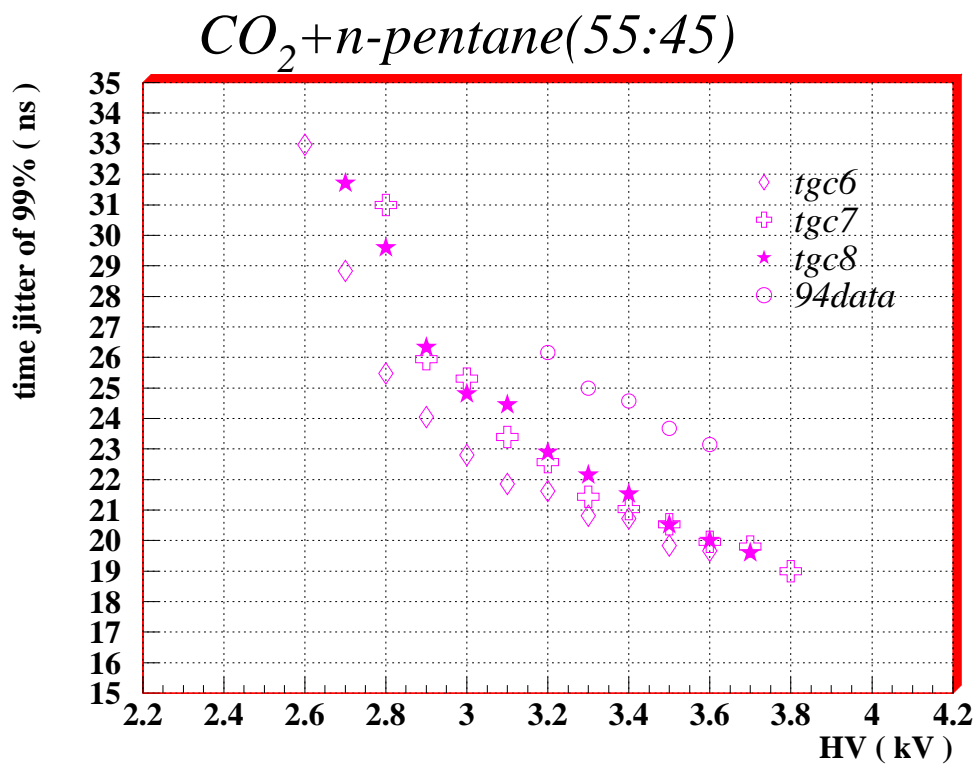
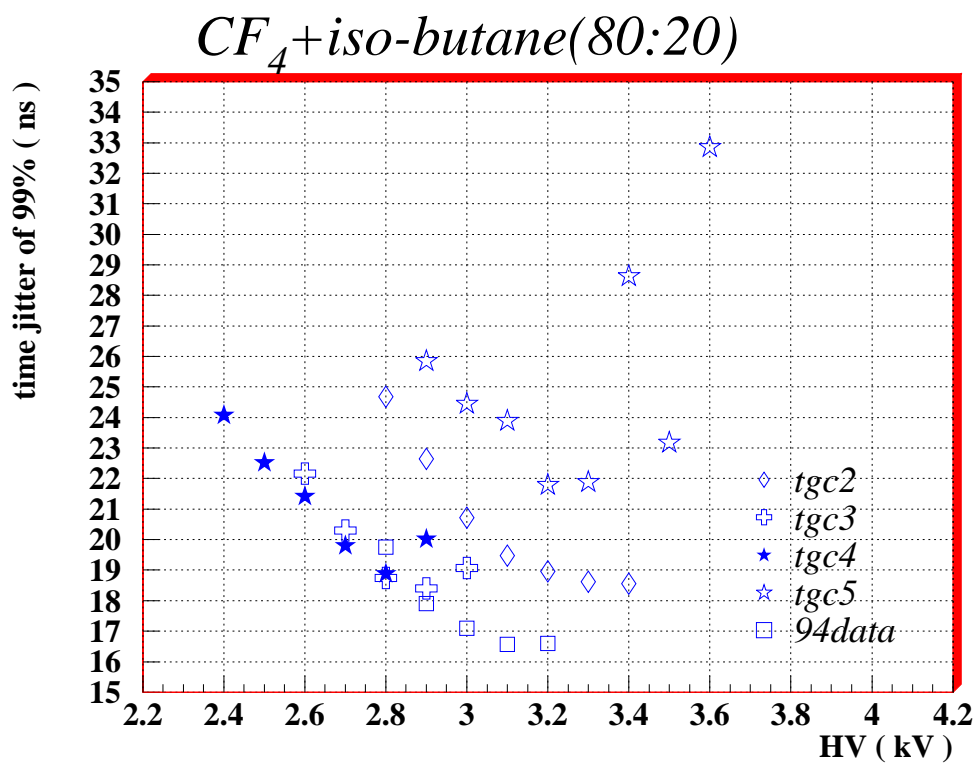


図 51: 小型 TGC の時間分解能の変化。この時スレシヨールドは全て -20mV であり、 $CO_2 + n-C_5H_{12}(55:45)$ で時間分解能の向上が見られる。94data は 94 年実験の結果。

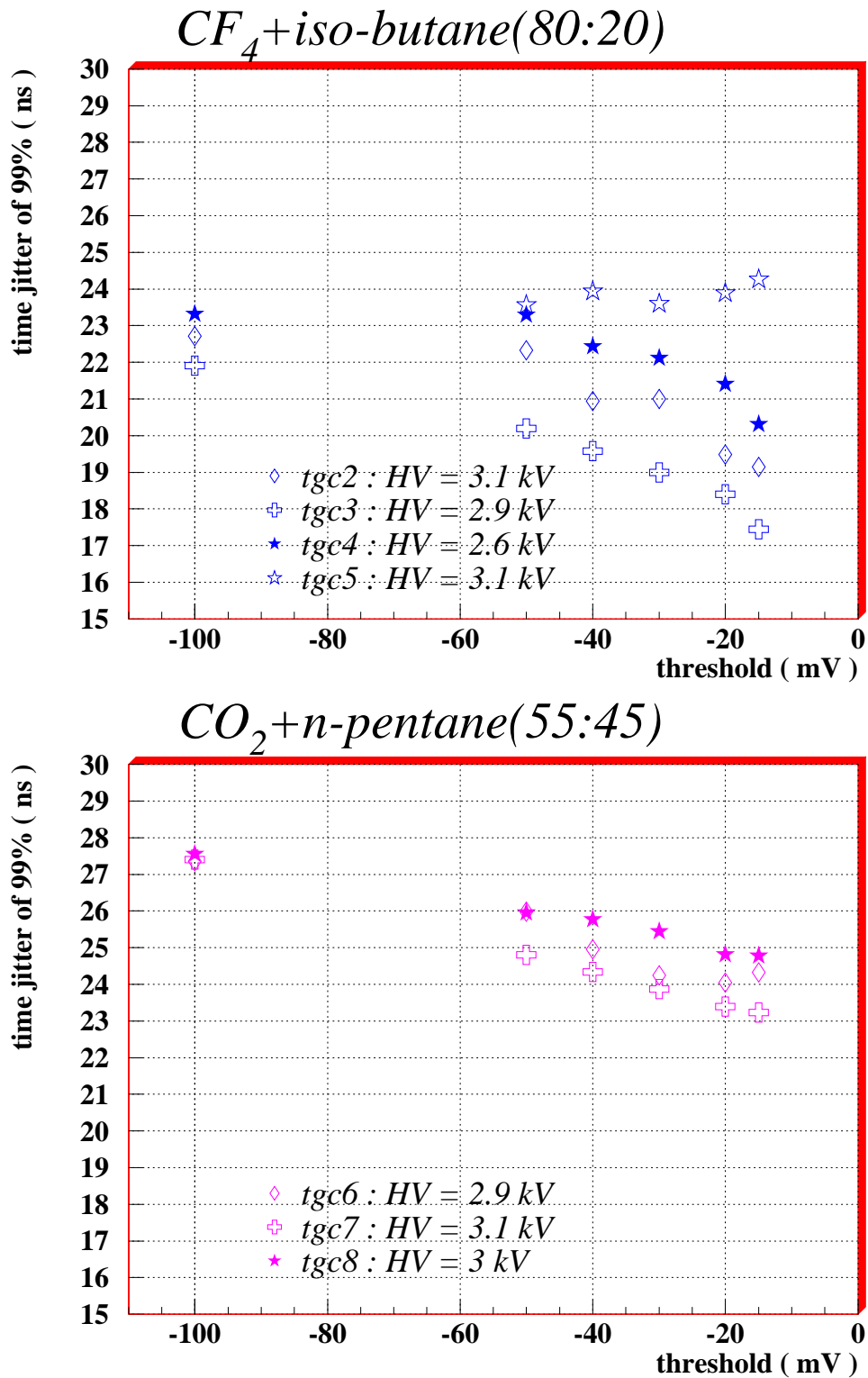


図 52: 初期の HV における時間分解能のスレシヨールド依存性。 $CO_2 + n-C_5H_{12}(55:45)$ と $CF_4 + iso-C_4H_{10}(80:20)$ どちらもスレシヨールドを下げた方が jitter が小さい。

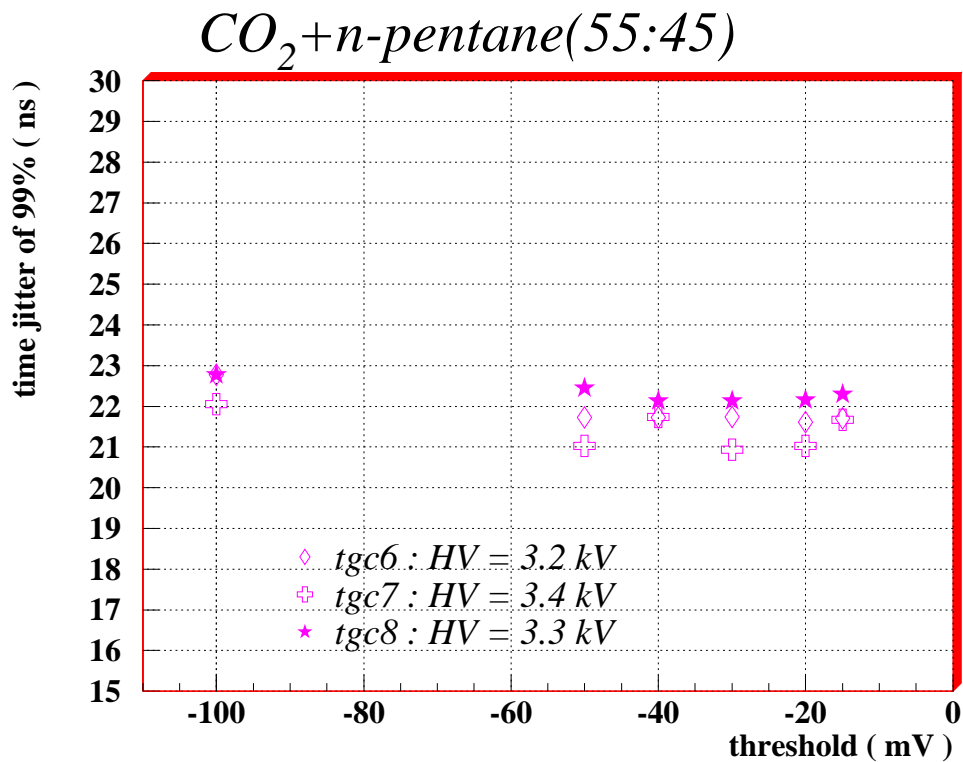
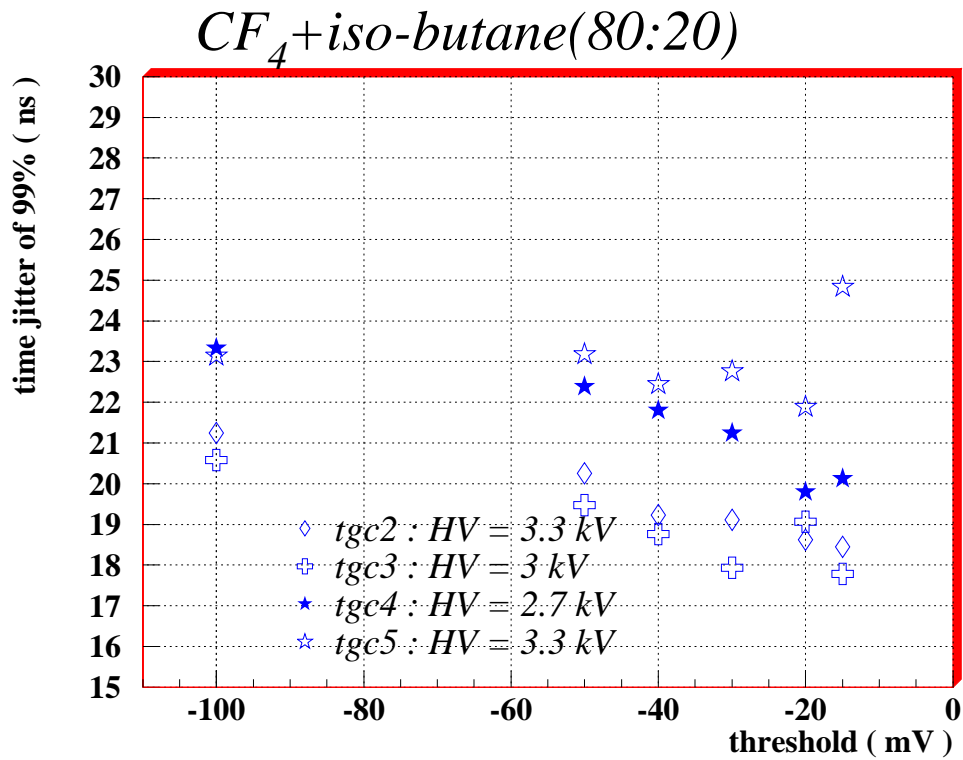
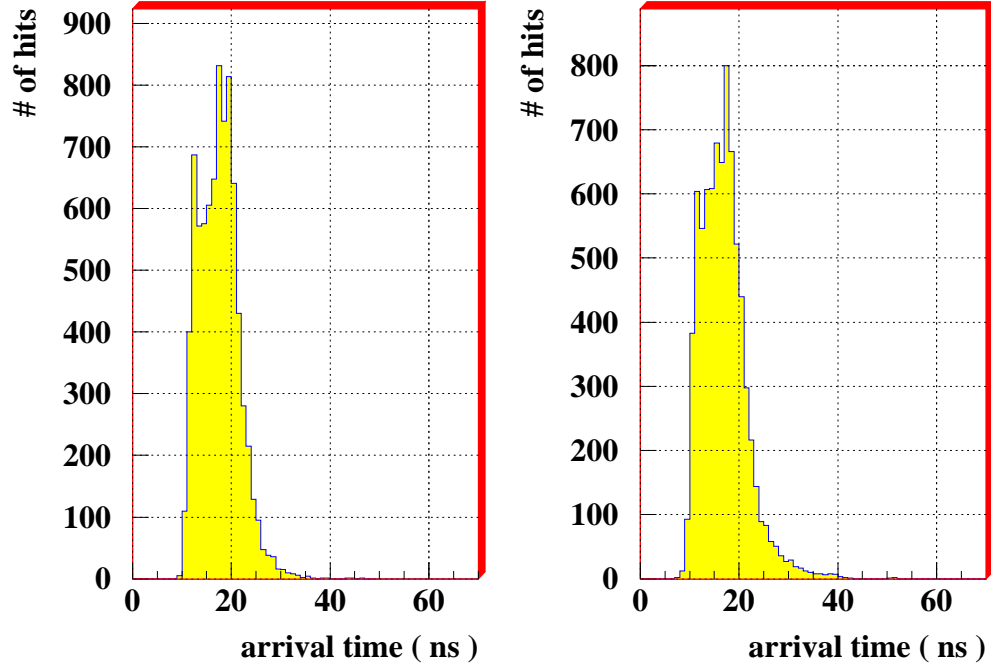


図 53: 最適 HV における時間分解能のスレシヨールド依存性。 $CF_4 + iso-C_4H_{10}(80:20)$ はスレシヨールドを下げた方が jitter が小さくなるが、 $CO_2 + n-C_5H_{12}(55:45)$ はほとんどスレシヨールドに依らず一定である。

$CF_4+iso-butane(80:20)$

tgc 2: HV = 3.3kV : l = 1.8mm tgc 5: HV = 3.3kV : s = 1.6mm



tgc 3: HV = 3.0kV : s = 2.2mm tgc 4: HV = 2.7kV : s = 2.5mm

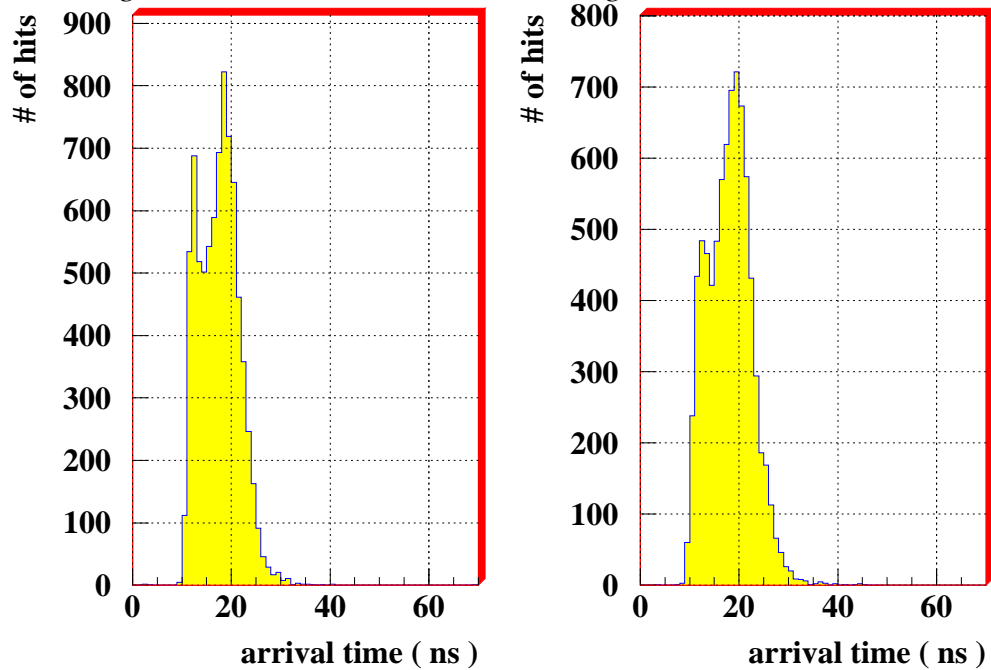
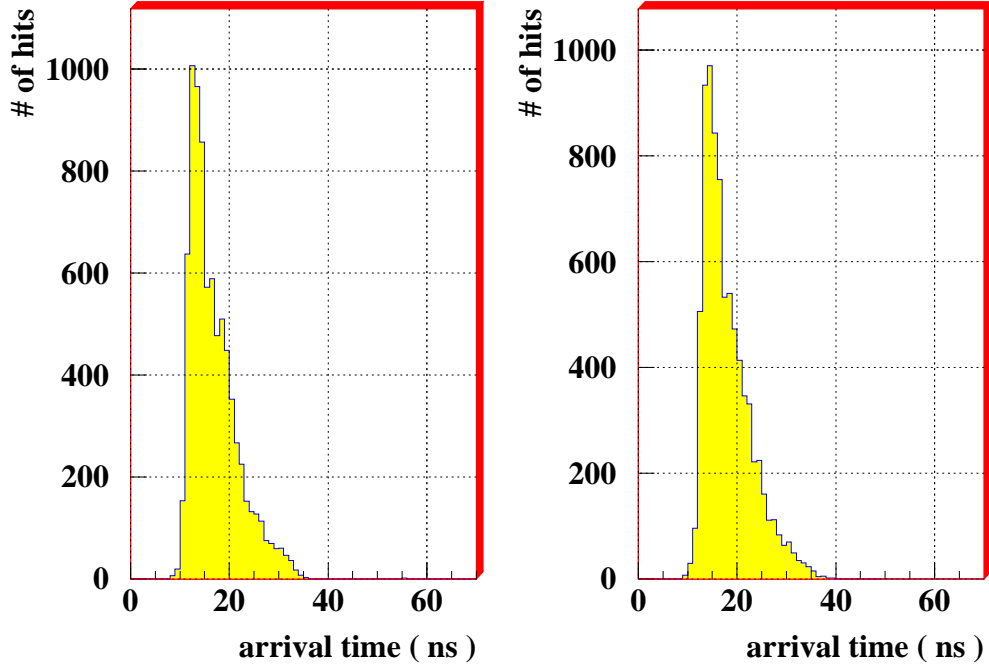


図 54: $CF_4+iso-C_4H_{10}(80:20)$ での信号到達時間分布の変化。それぞれは最適な HV にあり、スレシヨールドは -20mV。

$CO_2+n\text{-pentane}(55:45)$

tgc 6: HV = 3.2kV : l = 1.3mm *tgc 8: HV = 3.3kV : l = 1.4mm*



tgc 7: HV = 3.4kV : l = 1.5mm

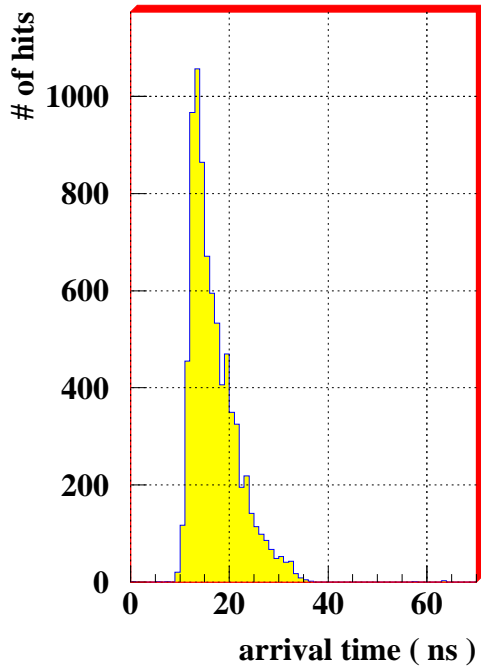


図 55: $CO_2+n\text{-}C_5H_{12}(55:45)$ での信号到達時間分布の変化。それぞれは最適な HV にあり、スレシヨールドは -20mV。左上から順にギャップ l が広がっている。

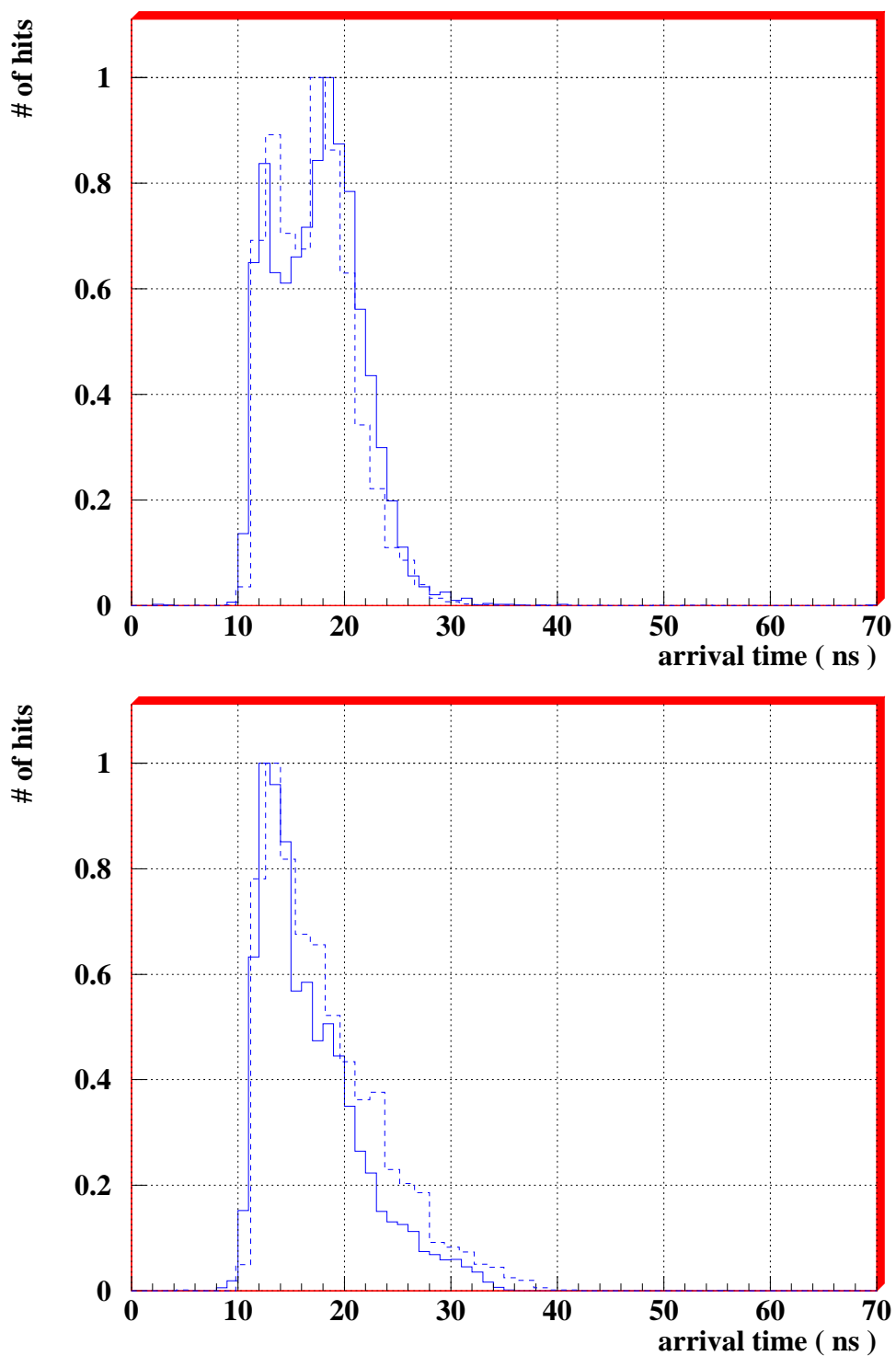


図 56: 実線が改良後、破線が標準 TGC の時間分布。上図が $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ で TGC4 との比較、下図が $\text{CO}_2+\text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ で TGC6 との比較である。

3.3.5 大型 TGC の信号検出数

CF₄+iso-C₄H₁₀(80:20) における大型 TGC の信号検出数の変化を図 57 に示す。この解析においては、実験中に取り除くことのできなかったノイズが原因で、TDC による信号検出の判定は難しいかったため、ペDESTAL 以上の ADC の値を持っていた場合に、信号検出がなされたと判断して信号検出数を数えた。このため、スレシヨールには依存しない結果になっている。

今回は、前回のような信号検出チャンネル数の増加は見られなかった。加えて、小型の TGC と同様に前回よりも検出効率の増加が見られた。アノードに比べてカソードの検出効率が劣った理由は、カソードは誘起電荷であるため信号が小さいからだと思われる。実際、アンプの増幅率はアノード・カソードとも同じであるため、アノードには適していたが、カソードには不適だったということである。しかしこのように、アンプを前回と異なったものを使用した結果、複数の信号を同時に検出するという現象は見られなくなった。従って、前回の原因が読み出し系にあった可能性が強いと言え、TGC 自体の構造、動作に原因のないことが確認された。

$CF_4 + iso\text{-butane}(80:20)$

anode

cathode

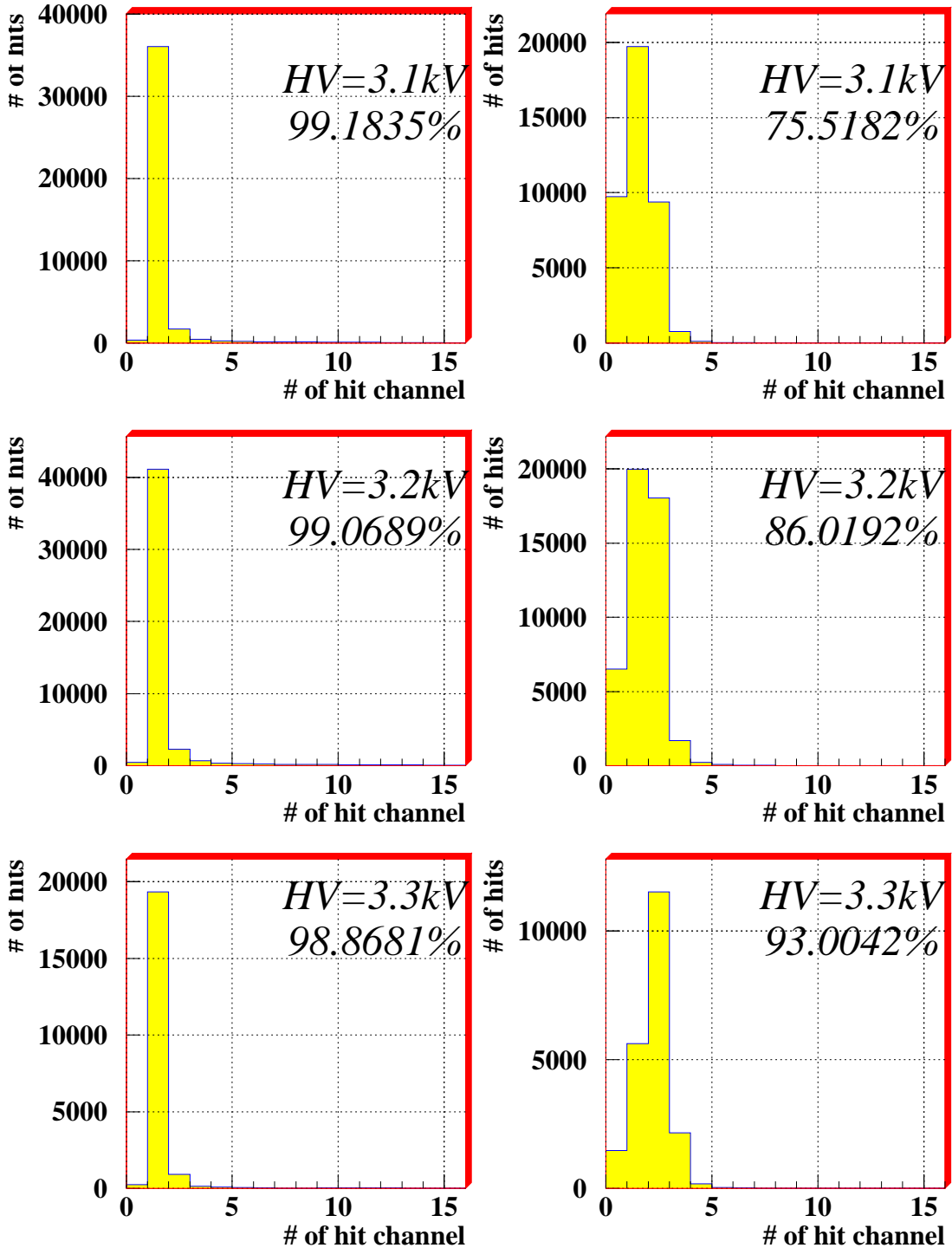


図 57: $CF_4 + iso\text{-}C_4H_{10}(80:20)$ における信号検出チャンネル数。図中には検出効率も示されている。

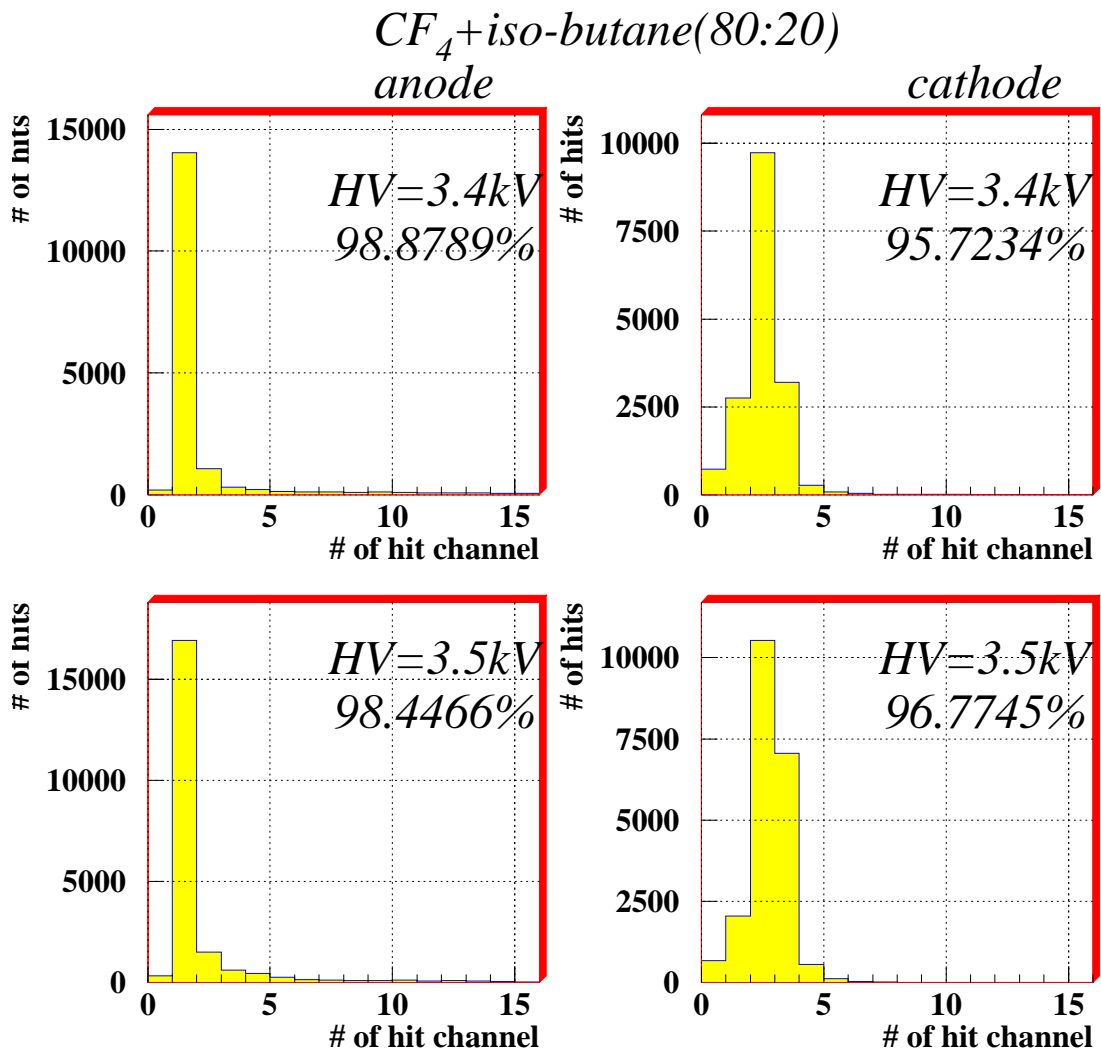


図 58: $CF_4 + iso-C_4H_{10}(80:20)$ における信号検出チャンネル数。図中には検出効率も示されている。

3.3.6 TGC の信号振幅

TGC で使用する各ガスについての信号振幅の大きさを、FADC を用いて各信号波形のピークのボルテージ V の分布を求めた。その結果が、図 59・60 である。この時の HV は、図にある通り今回決定した最適 HV のものである。これから分かることは、 $\text{CO}_2+n\text{-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ の場合 100mV にスレシヨールドを設定しておけば、ノイズを捕らえることなく信号が検出できるが、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の場合そのようなスレシヨールドの設定場所がほとんどないということである。従って、前回のビームテストの結果でも述べた通り、 $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ では、ペDESTAL 及びノイズから信号にかけてそれほど際だった信号電圧レベルの変化がないため、TGC の信号を全て検出するためには、スレシヨールドを出来るだけ下げなければならず、ノイズを捕らえる可能性が極めて高くなるのである。この原因は、まさしくワイヤーに到達する電子の数に依っている。最低限一つの電子がアノードワイヤー近傍のガス増幅領域に到達するだけでなく、さらに多くの電子が毎回平均してワイヤー到達することが要求される。これが、図 59 と 60 の違いである。

このように、 $\text{CO}_2+n\text{-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ と $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ の検出効率と時間分解能の様々な差異は、一つは CF_4 のドリフト速度の速いことで、もう一つがこの到達電子数にあるのである。検出効率を上げるために到達する電子数を上げるだけでなく、トリガー適性も電子の数に依っているのである。このうち TGC4 ($s = 2.2\text{mm}$ 、図 59 左下) の結果は、改良された TGC についてのもの、つまりアノードワイヤーに到達する電子の数が増えている場合で、標準 TGC よりも改善されたものであることに注意する必要がある。つまり、標準 TGC においてはこれよりも $\text{CF}_4+\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ ではさらに信号とそれ以外との分離が難しいと言える。

$CF_4 + iso\text{-butane}(80:20)$

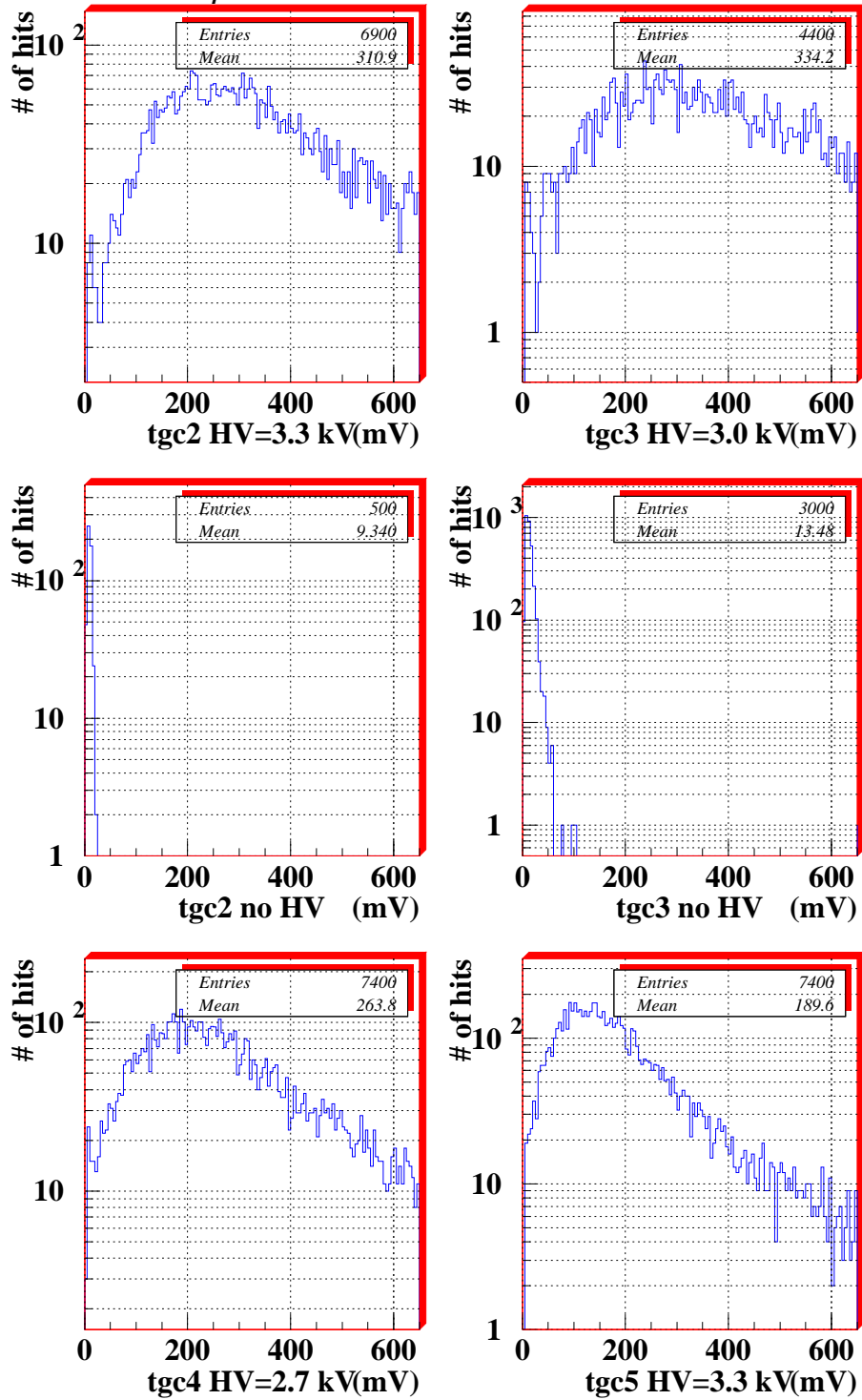


図 59: $CF_4 + iso\text{-}C_4H_{10}(80:20)$ におけるそれぞれの TGC について、増幅された信号のピークボルテージの分布。波高の小さい部分、およそ 40mV までその分布が広がっている。中段の図は上段の TGC に対する HV が掛かっていなかった時の分布。

$CO_2+n\text{-pentane}(55:45)$

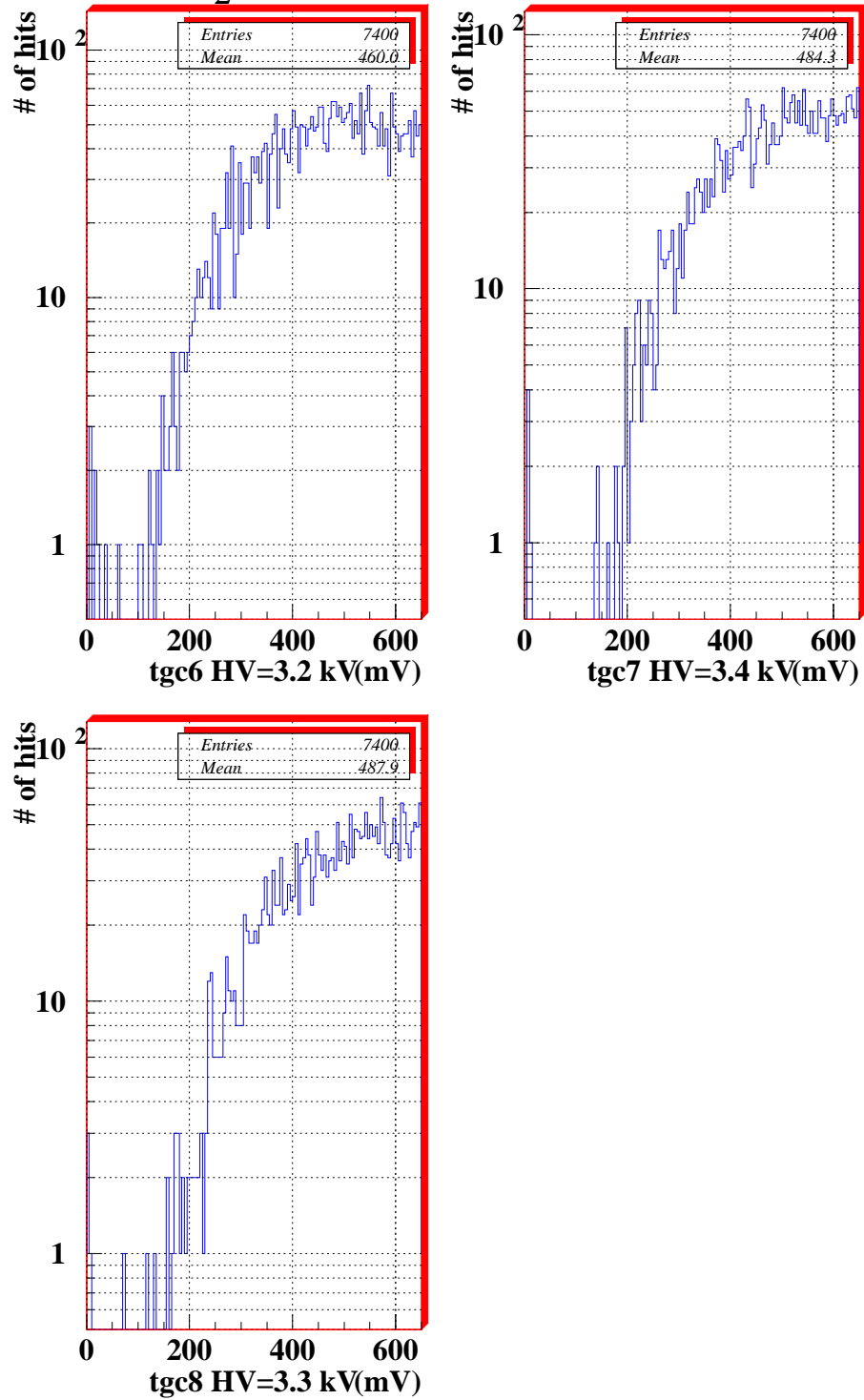


図 60: $CO_2+n\text{-}C_5H_{12}(55:45)$ におけるそれぞれの TGC について、増幅された信号のピークボルテージの分布。図 59 に比べ最低でも 100mV 以上に信号振幅がある。

4 結果のまとめ

これまでのビームテストから得られた結果をまとめると、

1. 時間分解能

現在 TGC で標準とされている構造パラメーター

- ワイヤー間隔 $s = 2.0\text{mm}$
- ワイヤーグラウンド面間 $l = 1.6\text{mm}$

では、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ と $\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ のどちらのガスを使用しても優れていて 30ns 程度である。さらに、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ ガスを用いれば、その値を 20ns にまで減らすことが可能である。

2. 検出効率

標準 TGC では、 $\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ ガスを使用すると 97.8% を越えられない。 $\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ ガスでは検出効率 100% を実現できる。

3. 電子吸着性

CF_4 の特性の一つである電子吸着性をシミュレーションして TGC の動作の理解を進めた。その結果、現在の TGC を改良することによりさらなる性能向上が可能であることが示され、電子吸着性現象に対する定性的な理解が正しいことが確認できた。

4. 構造の改良

$\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ に対しては、ワイヤー間隔を広げる事により、 CF_4 の持つ電子吸着性の効果を下げ、ワイヤーに到達する電子の数を増加させ、検出効率を標準 (97.8%) 以上にすることが可能と確認された。

$\text{CO}_2 + \text{n-C}_5\text{H}_{12}(55:45)$ に対しては、その構造の比率を維持するという観点から、ギャップとワイヤー間隔の両方を狭くする方法を用いた結果、電子がワイヤー迄ドリフトする距離を減少させることが出来、時間分解能の向上が認められた。

5. 粒子入射頻度依存性

$\text{CF}_4 + \text{iso-C}_4\text{H}_{10}(80:20)$ では、非常に高い粒子入射頻度 ($100\text{kHz}/\text{cm}^2$) においても十分に動作し、時間分解能の低下も全く見られない。検出効率も $10\text{kHz}/\text{cm}^2$ まで全く低下が見られない。

6. 入射位置依存性

大型 TGC の場合に設置されるワイヤーサポートが、周りのガス増幅領域に与える影響は、その大きさ $7mm$ より若干大きく $10mm$ であった。また、全体の有効面積に占めるサポートの割合は、 2.5% である。

7. 位置精度

トリガー条件に組み込むための位置精度は、アノードを用いれば $1cm$ を実現でき、カソードにおいても、誘起電荷の広がりや、クロストーク (電氣的な相互干渉) により隣のチャンネルに信号が検出される影響が考えられるが、信号検出数を見る限りは十分可能という結果を得た。

8. 信号伝搬速度

大型 TGC 全体の時間分解能を考えたときに問題となる信号伝搬速度は、理論的な予測をほぼ一致し

$$\frac{1}{v_g} = \begin{array}{l} \text{アノード } 3.6ns/m \\ \text{カソード } 6.5ns/m \end{array}$$

であった。

となる。以上のような理解が TGC について進んだ。

今後の課題としては、さらに性能の向上する TGC の構造があるかどうかを追求する。と同時に、LHC 実験に用いるために試験すべき重要な課題、放射線照射による性能劣化、長期安定について調べる必要がある。これらを、行なうことにより TGC のミュオントリガー検出器としての能力が真に優れていることが示されるであろう。

図一覧

1	ATLAS 検出器	5
2	ミューオン検出器	6
3	ミューオントリガーの仕組み	7
4	予想されるバックグラウンドの割合	8
5	ミューオンの P_t 分布	9
6	比例計数管	10
7	CF_4 中の電子のドリフト速度	11
8	$CF_4+iso-C_4H_{10}(80:20)$ 中の電子のドリフト速度	12
9	CO_2 中の電子のドリフト速度	13
10	$CF_4+iso-C_4H_{10}$ 中での C_4H_{10} イオンの移動度	15
11	多線式比例計数箱	16
12	Thin Gap Chamber の構造	18
13	TGC の実際の信号	20
14	大型 TGC の構造	22
15	94 年測定の配置	23
16	94 年データ収集方法	25
17	DC の位置分解能	27
18	DC の構造	28
19	信号到達時間分布の比較	29
20	ゲート幅対検出効率 1	31
21	ゲート幅対検出効率 2	32
22	ゲート幅の位置決定方法	33
23	比検出効率対ゲート幅 1	35
24	比検出効率対ゲート幅 2	36
25	時間分解能の変化と比較	37
26	CF_4 の電子吸着性	38
27	TGC の電場	38
28	$CF_4+iso-C_4H_{10}(80:20)$ チャージ分布の図	39
29	$CO_2+n-C_5H_{12}(55:45)$ チャージ分布の図	40
30	信号検出チャンネル数 1	43
31	信号検出チャンネル数 2	44
32	レート依存性の測定方法	45

33	レート依存性	46
34	高頻度動作時の時間分解能	47
35	ワイヤーサポートの形状	48
36	入射位置依存性	49
37	信号伝搬速度の測定方法	50
38	ダブルガウス分布と信号到達分布	51
39	伝搬速度	52
40	H.A.Wheeler の近似式の変数図	53
41	ワイヤー間隔 1.6mm、 2.0mm 時の電場	56
42	ワイヤー間隔 2.2mm、 2.5mm 時の電場	57
43	検出効率の変化	58
44	小型 TGC の構造	60
45	TGC パラメーター	61
46	95 年測定 of 配置	62
47	データ収集方法 95	62
48	小型 TGC の検出効率の HV 依存性	66
49	初期の HV における小型 TGC の検出効率のスレシヨールド依存性	67
50	最適 HV における小型 TGC の検出効率のスレシヨールド依存性	68
51	小型 TGC の時間分解能の HV 変化	70
52	初期の HV における小型 TGC の時間分解能のスレシヨールド依存性	71
53	最適 HV における小型 TGC の時間分解能のスレシヨールド依存性	72
54	CF ₄ +iso-C ₄ H ₁₀ (80:20) での信号到達時間分布の変化	73
55	CO ₂ +n-C ₅ H ₁₂ (55:45) での信号到達時間分布の変化	74
56	改良後の TGC の信号時間到達分布の比較	75
57	信号検出チャンネル数 95 年 3.3kV 以下	77
58	信号検出チャンネル数 95 年 3.4kV 以上	78
59	CF ₄ +iso-C ₄ H ₁₀ (80:20) での信号振幅の分布	80
60	CO ₂ +n-C ₅ H ₁₂ (55:45) での信号振幅の分布	81
61	ビームテスト風景 1: ビームライン	89
62	ビームテスト風景 2: 大型 TGC	90
63	ビームテスト風景 3: 小型 TGC	90

表一覧

1	イオンの移動度	14
2	アンプの仕様 1	24
3	94 年収集されたデータ	26
4	検出効率の表	33
5	小型 TGC パラメーター表	64
6	アンプの仕様 2	64

参考文献

- [1] ATLAS Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43
- [2] F.Sauli, *Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber*, CERN Repoert 77-09 (1977)
- [3] J.Va'vra, *Wire chamber gases*, NIM A323(1992) 34-47
- [4] R.Openshaw et al., *Etching of anode wire deposits with CF₄/isobutane(80:20) avalanches* NIM A307(1991) 298-308
- [5] S.Nakamura, *Enhancement of etching ability due to the addition of a trace of oxygen to the CF-₄/iC-₄H-10(80:20)* KEK Report 95-11
- [6] G.Schultz, G.Charpak and F.Sauli, *Mobilities of positive ions in some gas miztures used in proportional and drift chambers*, Rev. Physique Appliquée 12, 67 (1977)
- [7] T.YAMASHITA et al., *MEASUREMENTS OF THE ELECTRON DRIFT VELOCITY AND POSITIVE-ION MOBILITY FOR GASES CONTAINING CF₄*, NIM A283(1989) 709-715
- [8] K. クラインクネヒト 著 / 高橋・吉城 共訳 培風館, 「粒子線検出器」
- [9] G.BELLA et al., *DEVELOPMENT OF CALORIMETERS USING THIN CHAMBERS OPERATING IN A HIGH GAIN MODE*, NIM A252(1986) 503-510
- [10] 神戸大学 田中秀治、修士学位論文「大型陽子・陽子衝突実験に用いるための Thin Gap Chamber の性能評価」
- [11] M.Nomachi et al., *UNIDAQ, Proceedings of the International Conference on Computing in High Energy Physics '94*, LBL-35822(1994), pp.114-116.
- [12] W.S.Anderson et al., *Electron attachment, effective ionization coefficient, and electron drift velocity for CF₄ gas mixtures*, NIM A323(1992) 273-279
- [13] L.G. Christophrou et at., NIM 183(1979) 141

- [14] A.Pansky et al., *The scintillation of CF_4 and its relevance to detection science* NIM A354(1995) 262-269
- [15] H.A.Wheeler, *Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet*, IEEE Trans., Vol. MTT-13, 1965 172-185
- [16] H.A.Wheeler, *Transmission Line Properties of a Strip on a Dielectric Sheet on a Plane*, IEEE Trans., Vol. MTT-25, 1977 631-647

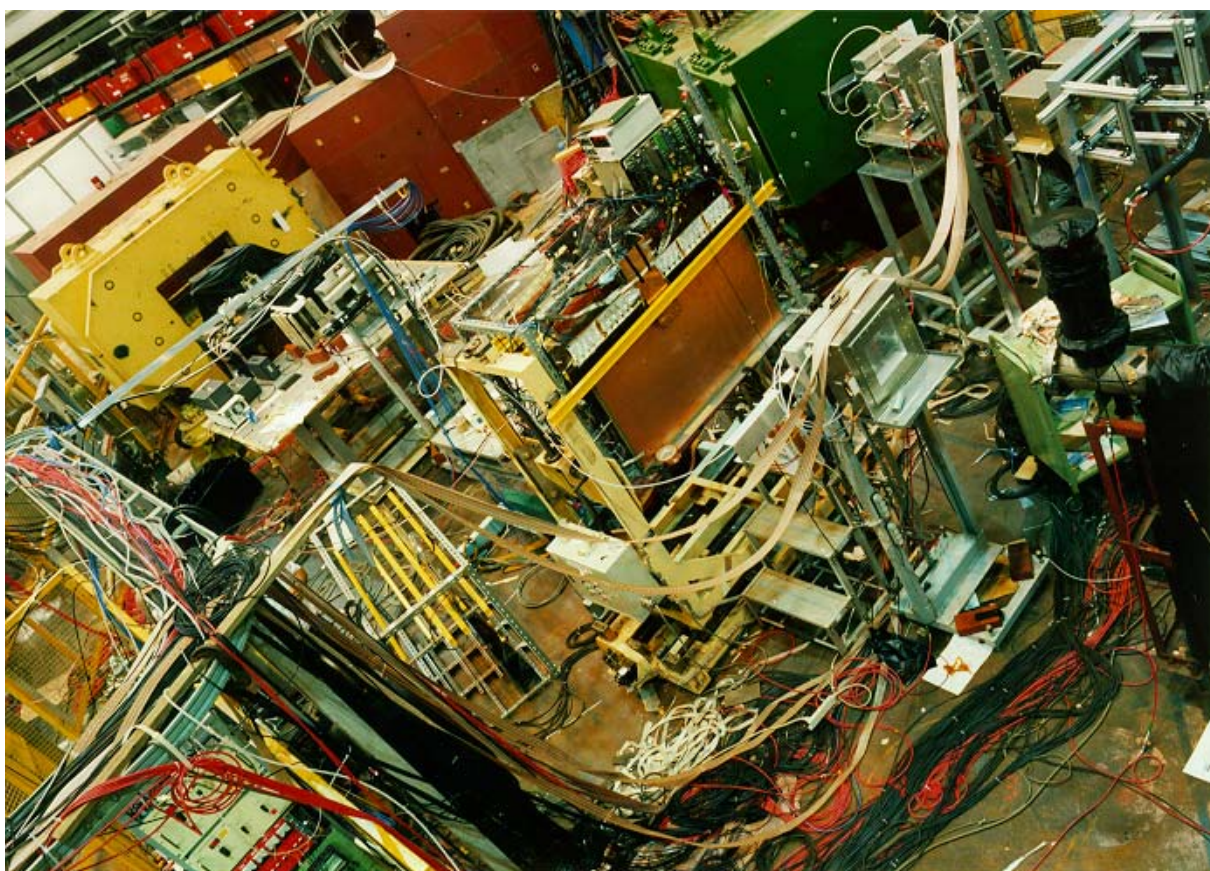


図 61: ビームテスト風景 1: ビームライン

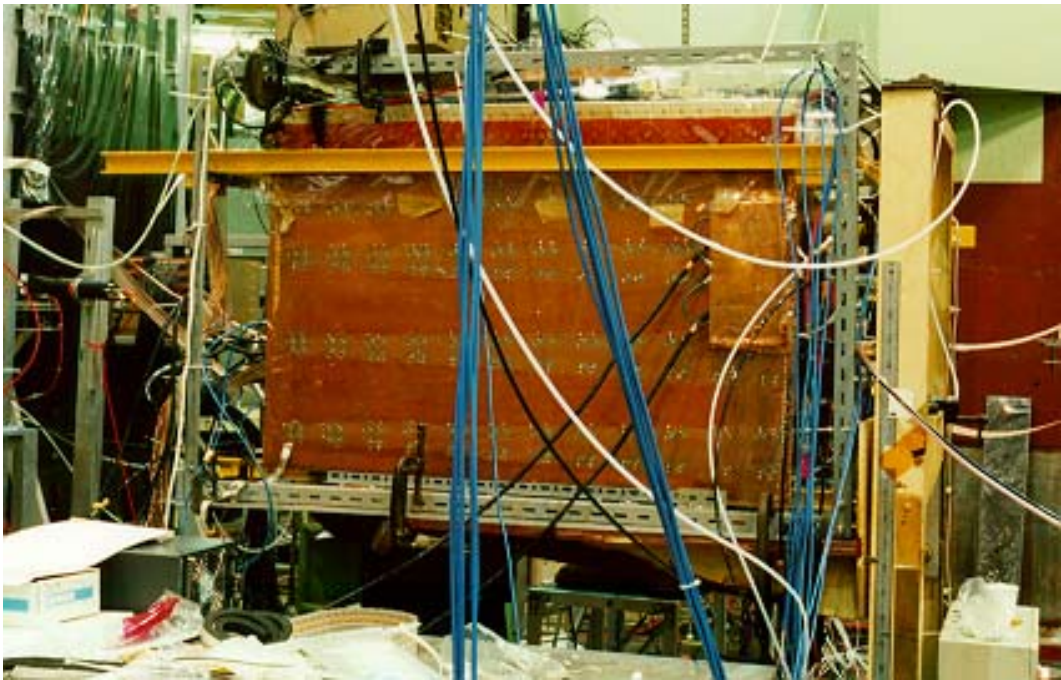


図 62: ビームテスト風景 2: 大型 TGC

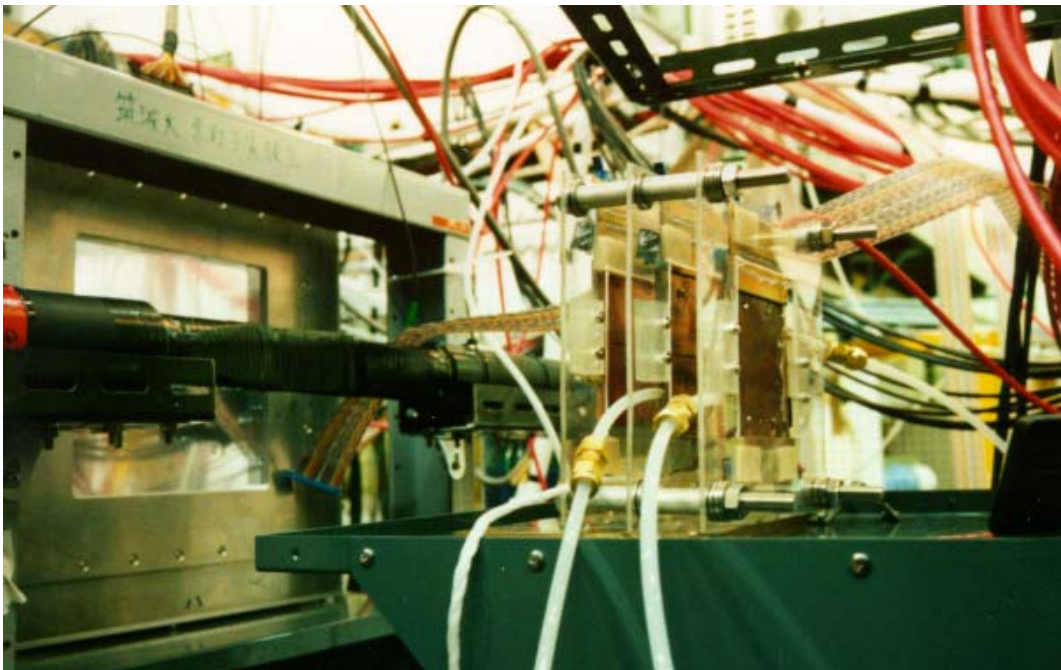


図 63: ビームテスト風景 3: 小型 TGC

謝辞

本研究において、適切なご指導と指針を提示頂いた素粒子物理学国際研究センター所属、指導教官小林富雄教授に、そして、高エネルギー研究所における研究活動に並々ならぬご支援をして下さり、加えて、好意によりこの論文に写真を提供して下さいました KEK 回路室長、大須賀関雄助教授及び回路室の方々に深く感謝し、ここにお礼申し上げます。また、解析を共二して下さいました永井康司氏、Thin Gap Chamber についての各種貴重な意見、情報を下さった田中修二氏をはじめとする神戸大学高エネルギー研究室の方々には大変お世話になりました。深く感謝いたします。さらに、二度のビームテスト実験をするに当たり、アトラスミュオングループの方々特に信州大学竹下徹助教授のご協力に深く感謝するとともに、各種 TGC を制作して頂いたイスラエル Weizmann Institute のの方々、特に G.Mikenberg 教授に深く感謝いたします。最後に、様々な協力をして頂いた長谷川氏、吉田・陣内両氏どうも有り難うございました。