

修士論文  
0.5mm MWPC  
の開発とその諸特性

東北大学大学院理学研究科

物理学専攻

西田 淳

平成 10 年

## 目次

1	序章	2
1.1	0.5mm MWPC の意義	2
1.2	この論文の目的	3
2	0.5mm MWPC の設計	4
2.1	MWPC の parameter の決定	4
2.2	0.5mm MWPC の構造と製作	9
3	測定内容と実験方法	14
3.1	測定内容	14
3.2	検出器の配置	15
3.3	読み出し回路系	16
3.4	ガスの混合	20
4	0.5mm MWPC の特性	22
4.1	ガスに対する要求	22
4.2	0.5mm MWPC の基本的特性	24
4.3	Argon+iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> での特性	31
4.4	Freon の及ぼす効果	34
4.5	Freon-13 B1(CBrF <sub>3</sub> ) 混合での特性	34
4.6	Freon-116(C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> ) 混合での特性	37
4.7	Freon を用いた混合ガスのまとめ	40
5	結論	41
A	Appendix	42
A.1	preamplifier について	42

# 1 序章

## 1.1 0.5mm MWPC の意義

加速器ビームを用いる原子核，素粒子実験において，物質量の少ない高位置分解能検出器としてのガス検出器は重要な役割を果たしている．特にビーム運動量を粒子毎に高分解能で決定することが求められる分光実験では，高計数率下でビーム粒子の軌道を精密に測定することが必要不可欠である．そのような実験の1つとして，ストレンジネス量子数  $-1$  である  $\Lambda$  粒子を含む原子核である  $\Lambda$  ハイパー核の分光実験がある．これらの実験は主として2次中間子ビームを用い， $(\pi^+, K^+)$  反応や  $(K^-, \pi^-)$  反応における入射ビームと散乱粒子の運動量を高分解能位置検出器によりイベント毎に測定して，ハイパー核の質量スペクトルを得ている．

最近，KEK(高エネルギー加速器研究機構)では  $(\pi^+, K^+)$  反応による  $\Lambda$  ハイパー核分光実験が，大立体角・高分解能をもつ SKS (超伝導 K 中間子スペクトロメータ) を用いて行われ，大きな成果を上げている． $(\pi^+, K^+)$  反応は，1 GeV/c の  $\pi^+$  をビームとして用いるが， $\Lambda$  粒子は 400 MeV/c 程度の反跳運動量を持ち，フェルミ運動量を越えるため，外殻軌道の中性を深く束縛された  $\Lambda$  粒子に変換することができる．そのため  $\Lambda$  ハイパー核の束縛状態を研究する上で，最も有効な生成反応の一つとなっている．

ここでは  $\pi^+$  ビームの軌道測定のために，a few  $\times 10^6$  particles/sec 計数率下で 200  $\mu\text{m}$ (RMS) の位置分解能を出すことができるセル幅 5 mm のドリフトチェンバーが用いられ，入射  $\pi$  ビームの運動量を粒子毎に精度良く測定している [1]．しかしビームサイズが小さくなるととき，ワイヤー当りの計数率は  $10^6$  particles/sec 近くまで上がり，これ以上のビーム強度で使用することはワイヤーチェンバーの動作原理上困難となっている．

現在計画が進行中である JHF(大型ハドロン計画)において，生成される2次粒子ビームは KEK の現 12 GeV 陽子シンクロトロンに対して飛躍的に強くなり， $\pi^+$  ビームで  $10^8 \sim 10^9$  particles/sec， $K^-$  ビームで  $10^6 \sim 10^7$  particles/sec になる．これまでのビーム計数率の 10 ~ 100 倍になるので，強度の弱い  $K^-$  ビームですらセル幅 5 mm 程度のドリフトチェンバーでは計数率の限界を越えることになる．またビームサイズを小さくする実験も可能になり，ビーム粒子密度がさらに高くなるので，ビーム粒子密度が高くても使用できる高位置分解能検出器の開発が急務となっている．

高計数率に耐え，高位置分解能が得られる検出器としては，シリコンストリップ検出器(SSD)やマイクロストリップガス検出器(MSGC)などが挙げられるが，これらの検出器

は物質量が非常に大きく多重散乱の効果が無視できないため、SKSのような高分解能のスペクトロメータの粒子軌跡検出用としては適していない。Table 1 でこれらの検出器のビームに対する物質量を比較した。この表では、物質量を 0.5mm MWPC, ドリフトチェンバーはそれぞれ 3.4 mm, 4.8 mm の Argon ガスとして, SSD, MSGC は厚さ 300  $\mu\text{m}$  の Silicon, Quartz として求めた。また 0.5mm MWPC の位置分解能は、検出器に対して  $0^\circ$  で入射したとき, 1.ワイヤーは  $\pm \frac{1}{2}s$  の範囲内では一定の検出効率をもつという箱型分布を考えると,  $\sigma = \frac{s}{\sqrt{12}} \simeq 145 \mu\text{m}$  ( $s$ : ワイヤー間隔, RMS) が得られる [2]。

以上のような経緯からビームライン上に置くことができ, 高計数率に耐え, 物質量が非常に小さく, 高位置分解能の得られる検出器として 0.5mm MWPC を開発した。0.5mm MWPC が実用化されると, これまで KEK で用いられていたセル幅 5.0 mm のドリフトチェンバーに比べセル幅が 1/10 となるため, 同等の読み出し回路系を用いても 10 倍の計数率に耐えられる。また 1mm MWPC では不十分であった位置分解能についてもドリフトチェンバー並あるいはそれ以上の性能が得られることになる。

Table 1: 各位置検出器の典型的な物質量の比較

検出器	物質：厚さ	物質量	放射長
0.5mm MWPC	Argon ガス：3.4 mm	$5.6 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$	109.8 m
2.5mm drift chamber	Argon ガス：4.8 mm	$8.0 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$	109.8 m
SSD	Silicon：300 $\mu\text{m}$	$7.0 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$	9.4 cm
MSGC	Quartz：300 $\mu\text{m}$	$6.6 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$	12.3 cm

## 1.2 この論文の目的

本研究では, これまで困難とされていた 0.5mm MWPC の実用化を目指して有効面積  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  のプロトタイプを製作し, その性能を調べることを目的としている。

論文は以下のように進める。第 2 章では実際の設計と製作について, 第 3 章では 0.5mm MWPC の特性を調べるために行った実験の setup と用いた回路系について述べる。第 4 章では Argon + iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$  混合ガスと規制された Freon-13 B1( $\text{CBrF}_3$ ) を混合した magic gas での plateau curve, clustersize について調べる。そして規制 Freon に替わると思われる Freon を混合したガスを用いて同様に調べ, これらから 0.5mm MWPC を高計数率の粒子ビームの位置検出器として動作させるための最適な条件を調べる。



## 2 0.5mm MWPC の設計

Multi Wire Proportional Chamber(以下 MWPC) は、2 枚のカソード面とその間に等間隔で張られたアノードワイヤーで構成され、カソード面がアノード面に対して電位が負になるように高電圧をかける。アノードワイヤーとカソード面との間に形成される電場は、アノードワイヤーの間隔と、アノード面とカソード面の距離である half gap に大きく依存する。現在よく用いられている MWPC のアノードワイヤー間隔は最小でも 1 mm だが、このワイヤー間隔を 0.5 mm とするとき half gap の決定とアノードワイヤー面の平行度を保って製作することがこれまで以上に重要になる。

### 2.1 MWPC の parameter の決定

この節では、アノードワイヤー間隔が 0.5 mm の MWPC を製作するとき以下の設計パラメータを、アノードワイヤー表面で電子なだれを起こすだけの電場が動作電圧 5 kV 以下で得られ、かつ耐久性を考慮して決定する。MWPC の簡単な断面図を示し、これからは Fig.1 の定義を用いる。

- half gap :  $l$
- アノードワイヤーの直径 :  $2a$
- アノードワイヤーの張力 :  $T$
- アノードワイヤーの長さ :  $L$

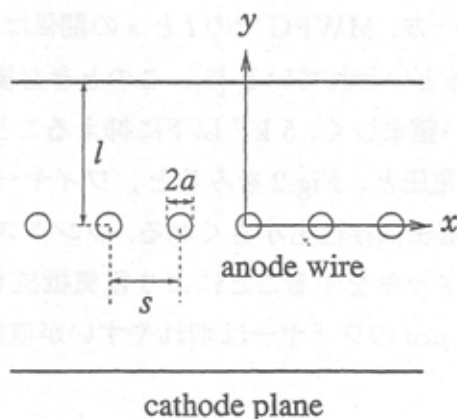


Fig.1: MWPC の断面図

Fig.1のような構造の MWPC で、アノードワイヤー表面とカソード面の電位差を  $V_0$  とすると電場  $E(x, y)$  は

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

と表される。ここで単位長さ当りの静電容量  $C$  は

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

で与えられる。ワイヤー表面での電場は  $x = a, y = 0$  を (1) 式に代入し、 $a \ll s$  として近似すると

$$E_a = E(a, 0) = \frac{CV_0}{2\epsilon_0 s} \cot \frac{\pi a}{s} \approx \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{a} \quad (3)$$

となる。またガス増幅度は次式で表される。

$$M = \exp \left[ 2\sqrt{\frac{kNCV_0 a}{2\pi\epsilon_0}} \left( \sqrt{\frac{V_0}{V_i}} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

ここで  $k$  は first Townsend 係数と呼ばれ、Argon ガスで  $k = 1.8 \times 10^{-21} \text{ m}^2\text{V}^{-1}$  であり、 $N$  は単位体積当りの分子数である。 $V_i$  は電子なだれを起こすしきい電圧である [3]。

(4) 式より 0.5mm MWPC の各ワイヤー直径に対する Argon のガス増幅度の電圧比  $V_0/V_i$  に対する依存性を  $l = 1.7 \text{ mm}$  として計算した結果を Fig.2 に示す。

0.5mm MWPC のアノードワイヤー表面での電場  $E_a$  は、magic gas を用いて安定に動作している 1mm MWPC と 2mm MWPC を参照して (3) 式から計算すると  $\sim 500 \text{ kV/cm}$  程度は必要である (Table 2)。一方、MWPC での  $l$  と  $s$  の関係は、 $l = 3s \sim 4s$  とするのが一般的であり、安定に動作するといわれている [3]。このとき必要な電圧は電圧供給部分などの耐圧性を考えると低い方が望ましく、5 kV 以下に抑えることとする。Table 3 に示す各ワイヤー直径に対する必要電圧と、Fig.2 をみると、ワイヤー直径は小さい方が必要電圧は低くなり、ガス増幅度の電圧依存性も小さくなる。タングステンワイヤーは、かけられる最大の張力が大きく、金メッキをすることにより電気抵抗も小さい [4]。また、1mm MWPC の経験では、直径  $10 \mu\text{m}$  のワイヤーは切れやすいが直径  $12 \mu\text{m}$  のものはほとんど切れたことがない。

こうした使用実績から、直径  $12 \mu\text{m}$  レニウム入り金メッキタングステン W(Au) ワイヤーと決定する。また half gap  $l$  は、Table 3 において必要電圧を 5 kV より十分低くするという条件と加工精度を考慮に入れた限界から 1.7 mm とする。

Table 2: 1mm MWPC, 2mm MWPC[2] のアノードワイヤー表面での電場

	1mm MWPC	2mm MWPC
ワイヤー間隔 $s$	1.0 mm	2.0 mm
ワイヤー直径 $2a$	13 $\mu\text{m}$ W(Au)	20 $\mu\text{m}$ Mo(Au)
half gap $l$	4.0 mm	8.0 mm
動作電圧 $V_0$	5.0 kV	5.5 kV
ワイヤー表面での電場 $E_a$	487.9 kV/cm	343.2 kV/cm

Table 3: ワイヤー表面電場  $E_a \sim 500$  kV/cm となるために必要な電圧

$2a$	$l=1.5$ mm	$l=1.7$ mm	$l=2.0$ mm
10 $\mu\text{m}$	3.05 kV	3.35 kV	3.85 kV
12 $\mu\text{m}$	3.60 kV	4.00 kV	4.55 kV
14 $\mu\text{m}$	4.15 kV	4.60 kV	5.25 kV
16 $\mu\text{m}$	4.70 kV	5.20 kV	5.95 kV

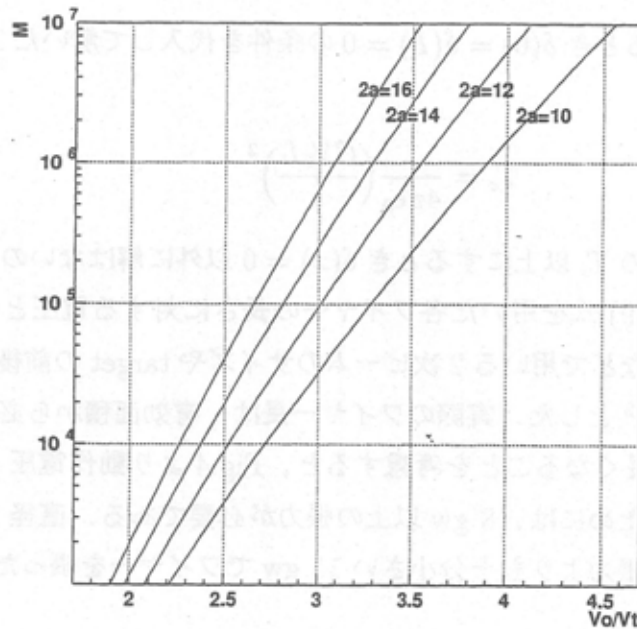


Fig.2: Argon ガスの増幅度の電圧比  $V_0/V_t$  依存性

アノードワイヤーの張力は、静電場による力に対するアノードワイヤー位置の安定性を以下の示すように考慮して決定した。

カソード面に電圧をかけ電場が形成されたとき、Fig.3のようにアノードワイヤーはカソード方向に力を受ける。このカソード方向に引く単位長さ当りの力  $F_{\perp}$  は  $\delta$  をアノード面からのワイヤーのずれとすると近似的に

$$F_{\perp} = 2 \frac{(CV_0)^2}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{s} \frac{2\delta}{s} + \frac{1}{3s} \frac{2\delta}{3s} + \dots \right\} = \frac{(CV_0)^2 \pi \delta}{4\epsilon_0 s^2} \quad (5)$$

とかける。一方、ワイヤー張力を  $T$  とし、ワイヤーに沿った方向に  $x$  軸をとると単位長さ当りの復元力  $R$  は

$$R = T \frac{d^2\delta}{dx^2} \quad (6)$$

であり、ワイヤーのずれ  $\delta$  を  $x$  の関数として  $\delta(x)$  とし  $R = -F_{\perp}$  を解くと

$$T \frac{d^2\delta(x)}{dx^2} = -\frac{(CV_0)^2 \pi \delta(x)}{4\epsilon_0 s^2} \quad (7)$$

$$\delta(x) = \delta_0 \cdot \sin\left(\frac{CV_0}{2s} \sqrt{\frac{\pi}{\epsilon_0 T}} x\right) \quad (8)$$

$L$  をワイヤーの長さとするとき  $\delta(0) = \delta(L) = 0$  の条件を代入して解いた  $T$  を臨界張力  $T_c$  とすると

$$T_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{CV_0 L}{s}\right)^2 \quad (9)$$

ワイヤーの張力を上式の  $T_c$  以上にするとき  $\delta(x) = 0$  以外に解はないのでワイヤーの位置は安定する。Fig.4に(9)式を用いた各ワイヤーの長さに対する電圧と臨界張力の関係を示す。ハイパー核実験などで用いる2次ビームのサイズやtargetの前後に置くことを考え、有効面積  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  とした。実際のワイヤー長は、有効面積から必要とされる長さよりも10~20 mmほど長くなることを考慮すると、Fig.4より動作電圧  $V_0$  が5 kVのときワイヤーを安定させるためには、8 gw以上の張力が必要である。直径12  $\mu\text{m}$  のタングステンワイヤーが切れる張力よりも十分小さい15 gwでワイヤーを張った[4]。

図3は、アノードワイヤーと陰極面との間の静電場の力によるアノードワイヤーの曲げを示している。図中、アノードワイヤーは3つの点で示され、それぞれに矢印が描かれている。左側の点には矢印が左向き、中央の点には矢印が下向き、右側の点には矢印が上向きである。これは、静電場の力によってワイヤーが中央に引き寄せられ、同時に左右に引き寄せられるためである。図の下部には「cathode plane」とあり、上部には「anode wire」とある。また、左側のワイヤーと陰極面との距離を  $\delta$  と示している。

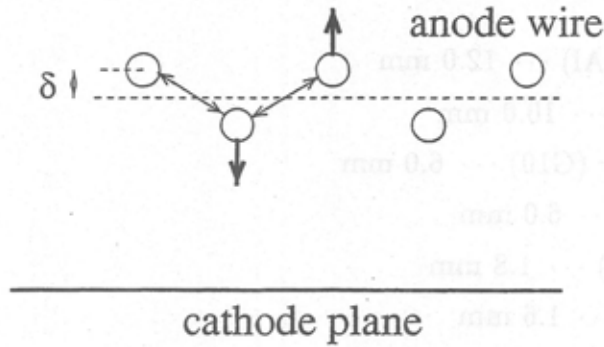


Fig.3: アノードワイヤーに対する静電場の力

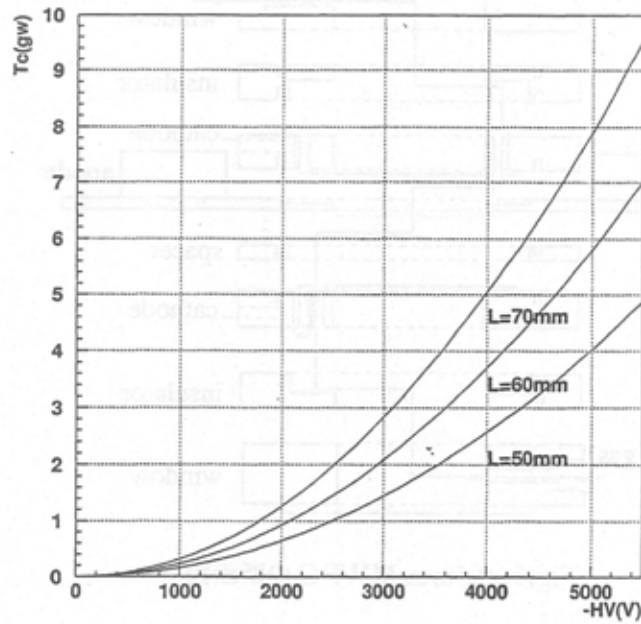


Fig.4: アノードワイヤーの臨界張力の電圧依存性



## 2.2 0.5mm MWPC の構造と製作

今回製作する 0.5mm MWPC は、通常の MWPC で良く行われているように数枚の加工したフレームにそれぞれアノードワイヤーやカソード膜をとりつけ、重ねてネジで固定する構造とした。それぞれの材質と厚さを下に、断面図を Fig.5 に示す。

- ベースプレート (Al) … 12.0 mm
- ウィンドウ (Al) … 10.0 mm
- インシュレーター (G10) … 6.0 mm
- カソード (G10) … 6.0 mm
- スペーサー (G10) … 1.8 mm
- アノード (G10) … 1.6 mm
- カソード (G10) … 6.0 mm
- インシュレーター (G10) … 6.0 mm
- ウィンドウ (Al) … 10.0 mm

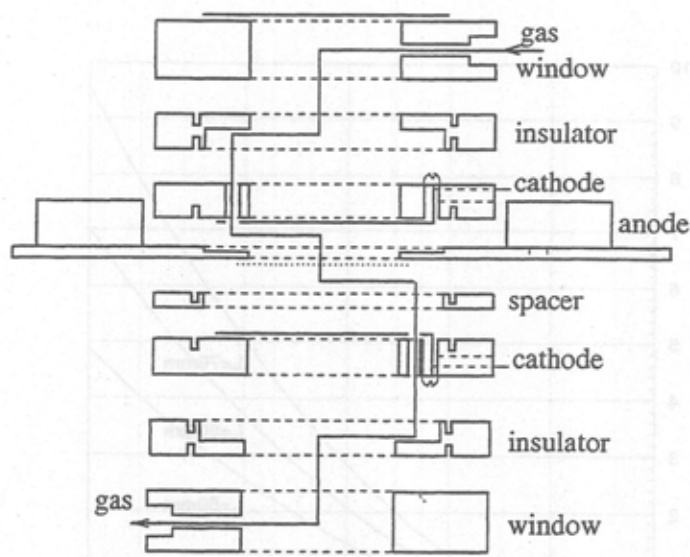


Fig.5: 0.5mm MWPC の断面図

0.5mm MWPC の各フレームの材質は、強度が強く、絶縁性の優れた fiber-glass epoxy (G-10) を使う。これはガラス繊維をエポキシ樹脂で固め、圧縮、加工したものである。G-10 の強度は力をかける方向によって多少異なるが、ヤング率は  $1.9 \times 10^3 \text{ Kgw/mm}^2$  である [5]。

G-10 を加工しフレームを製作するとき、フレームの面の厚みには  $\pm 50 \mu\text{m}$  程度の不均一性がどうしても出てしまう。通常はアノードフレームを half gap の厚さに加工し、アノードワイヤーをフレーム上のプリントパターンに半田付けする。このため G-10 の面の不均一性の分だけアノードワイヤー面はばらつき、half gap もばらついてしまう (Fig.6)。このばらつきによるガス増幅度の変化  $\frac{\Delta M}{M}$  は次のように求められる。

$$\frac{\Delta M}{M} = (\ln M) \frac{\Delta Q}{Q} \quad (10)$$

ここで  $Q = CV_0$  はワイヤーの単位長さ当りの電荷量である。half gap の変化によりもたらされる電荷量の変化は以下のようにかける。

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{Cl}{2\epsilon_0 s l} \Delta l \quad (11)$$

上式から half gap の  $100 \sim 200 \mu\text{m}$  のばらつきによるガス増幅度の変化を  $10^6$  の増幅度下で計算すると、Table 2 に示した 2mm MWPC では  $15 \sim 30 \%$  と変化は少なく、0.5mm MWPC では  $65 \sim 130 \%$  と大きい。0.5mm MWPC では half gap が 1.7 mm と小さいためにガス増幅度の変化は従来の MWPC に比べ大きく、放電を起こしやすい cell と efficiency の低い cell ができ安定に動作しない。このガス増幅度の変化を  $30 \%$  以下に抑えるためには、half gap の変化つまりアノードワイヤー面のばらつきを  $60 \mu\text{m}$  以下に抑えなければならない。

アノードワイヤー面のばらつきを無視できる範囲に抑えるために以下のような方法を採用した。概略図を Fig.6 に示す。アノードフレームは厚さ 1.6 mm で G-10 を加工し、スペーサーフレームは厚さ 1.8 mm で加工する。アノードワイヤーは、後述する高精度の真鍮枠に巻きつけておき、ワイヤー面をアノードフレーム自体の厚さのばらつきとは無関係に両カソード間の中間に位置するようにして、フレームに対して  $100 \mu\text{m}$  浮かせた状態で接着剤で固定した後、半田付けを行った。

この方法を実現するためにも、フレームに固定し、半田付けする前からワイヤーは一樣に張られていなければならない。ワイヤー張りには KEK の田無分室にあるワイヤー巻き機を用いた。概略図を Fig.7 に示す。この巻き機は巻く方向と逆にワイヤーにかかる分の張力で引っ張りながら巻いていく。このとき Fig.7 に示すように真鍮枠に巻いていくので、

ワイヤー間隔，ワイヤー面のばらつきはこの枠の精度によって決まる．この枠の溝の深さは，数  $10 \mu\text{m}$  の精度で作られているので，アノードワイヤーの平行度の精度は数  $10 \mu\text{m}$  となる．

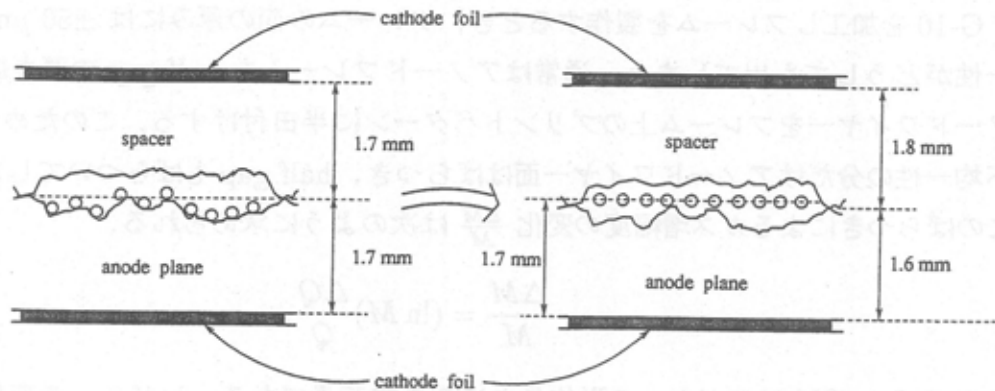


Fig.6: アノードワイヤーの従来の張り方 (左) と平行度を保つ方法 (右)

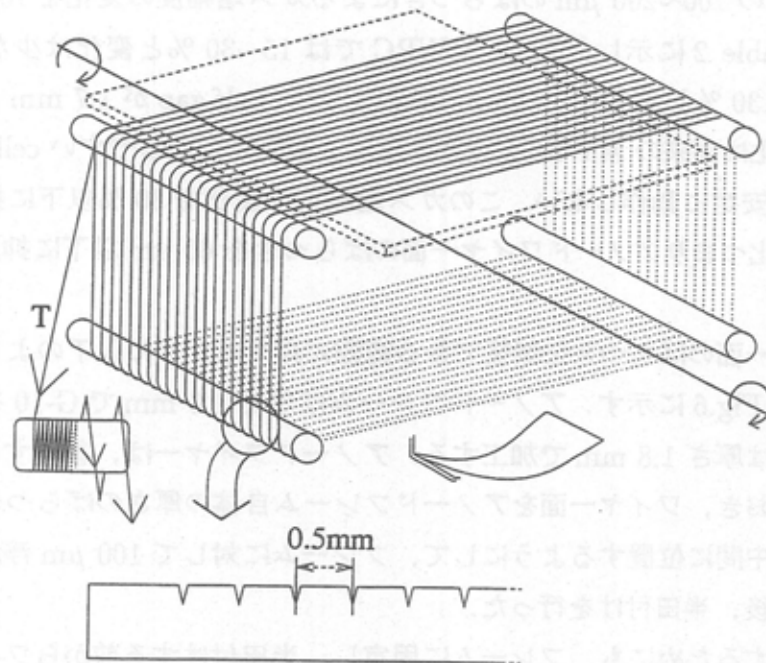


Fig.7: ワイヤー巻き機

ガスが全体に行き渡るよう上下のウィンドウの2箇所に入り口と出口を設けている。各面には溝を彫り、そこに O-ring をはめ込むことによってガス漏れを防いだ。

カソード面は、1000 Åの Cu を蒸着した 12.5 μm 厚の Kapton 膜を用い、G10 のフレームに接着した。これに 100 MΩ の保護抵抗を通して負の電圧が供給できるようにした。

アノードフレームには、12 μm のレニウム入り金メッキタングステンワイヤーを 96 本張った。両端は電場が非対称のためワイヤーが切れやすいので、12 μm のワイヤーがフレームの外側に 2 本ずつ張った。ワイヤー間隔が狭いため従来の MWPC のようには読み出せず、1ch ずつ互い違いに反対方向から読み出さなければならない。Fig.8 にアノードワイヤー面の図を示す。アノードフレームには、16ch preamp 用の読み出し用コネクタが 6 個とりつけた。今回アノードフレームの大きさは、このコネクタの大きさによって決定されており、有効面積に比べ非常に大きくなっている。今後、現在開発中の 32ch preamp を用いることでチェンバーのフレームを小さくすることが可能となる。さらに SSD 検出器の読み出し回路等の技術を利用して、集積度の高い読み出し回路系を確立することは 0.5mm MWPC の実用化の点からも必要不可欠である。

今回製作した 0.5mm MWPC の設計パラメータを Table.4 にまとめる。

Table 4: 0.5mm MWPC の諸元

アノードワイヤー間隔	0.5 mm
アノードワイヤー直径	12 μm W(Au)
アノードワイヤー張力	15 gw
half gap	1.7 mm
カソード面	12.5 μm Kapton(Cu) Foil
有効面積	50×50 mm <sup>2</sup>
チャンネル数 (1 面)	96ch

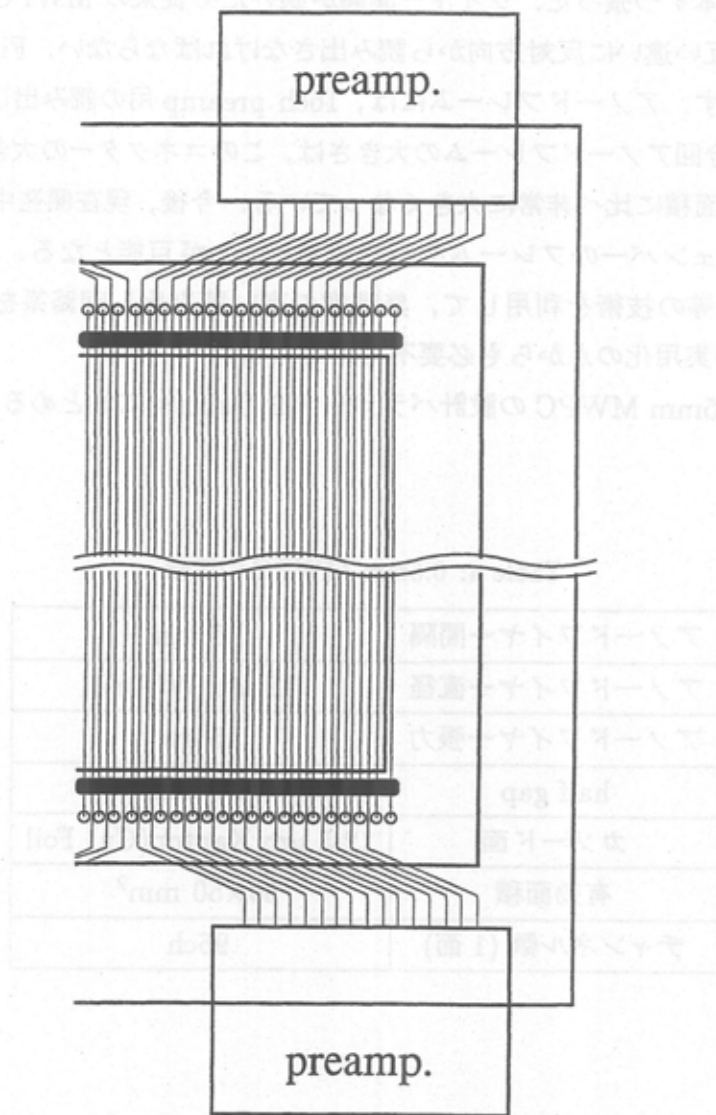


Fig.8: アノードワイヤー面の概略図



### 3 測定内容と実験方法

ビームや散乱粒子の運動量，軌跡測定のためにガス検出器を用いるとき，ほぼ 100 % の検出効率をもつ必要があり，同時にアノードワイヤーの間隔 0.5 mm から期待される位置分解能を達成するためには，clustersize が小さいことも必要となる．この章では，第 4 章で測定する内容，製作した MWPC のテストを行うための setup，読み出し回路について述べる．また 0.5mm MWPC に最適な混合ガスを供給するために製作したガス混合システムについても述べる．

#### 3.1 測定内容

実験で測定する clustersize と efficiency は以下のように定義する．荷電粒子がチェンバーを通過した際にできる電子が電場によってアノードワイヤー方向に加速され，ガス増幅度に従って電子なだれを起こすが，このとき MWPC に信号を与える電子なだれの塊を cluster と定義する．しかし荷電粒子通過時に発生する本物の信号以外にも MWPC が信号を発するものもあり，これも cluster と定義されるものの中に含まれる．またその 1 個の cluster において信号を発生させるアノードワイヤーの本数を clustersize とする．efficiency は以下のように定義する．

$$\text{efficiency} = \frac{\text{hit event}}{\text{trigger}}$$

ここで "trigger" は 2 つの scintillator の coincidence がとれたイベント数で，"hit event" は trigger がかかったときにチェンバーに信号が発生しているイベント数である．

### 3.2 検出器の配置

Fig.9に示すように検出器と線源を配置し, clustersizeが大きくなる状況をつくるため線源の入射角度をつける setup とした. 線源には  $^{90}\text{Sr}$   $\beta$ -source を用いた.

トリガー用シンチレーターをチェンバーと線源の間に置くと多重散乱により入射角度にかなりばらつきが出てしまい, 入射角度依存性をみるには適していない. そこでバックグラウンドを減らすため2つのシンチレーターをチェンバーの下に置き, これらのコインシデンスをとりトリガーとした.

入射角度をつける実験の際には,  $\beta$ 線源とトリガー用のシンチレーターは一体で動かし, Fig.9の距離  $d$  を 20cm として測定を行った.  $\beta$ 線の角度の広がり  $\theta$  は  $\pm 2.8^\circ$  である. 用いたプラスチックシンチレーターの大きさは,  $1\text{ cm}^w \times 2\text{ cm}^h \times 2\text{ mm}^t$  である.

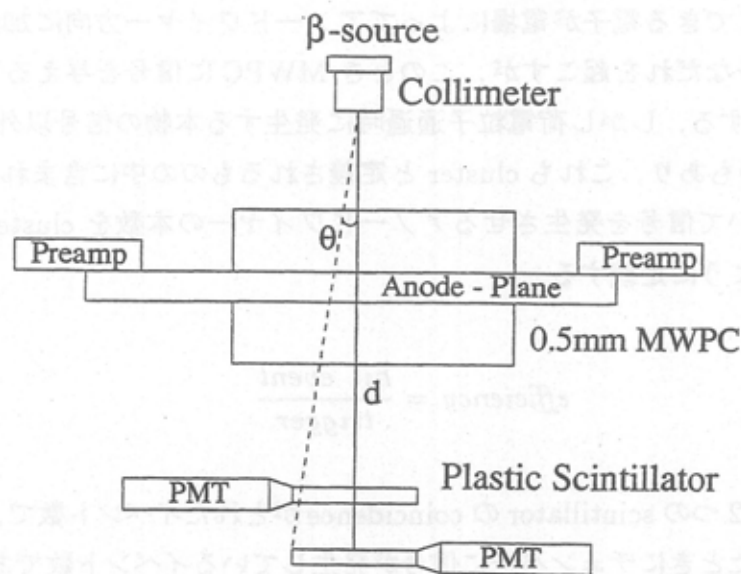


Fig.9: 実験 setup

### 3.3 読み出し回路系

MWPC 用の読み出し回路系は、KEK で開発された Spider システムを用いた。Fig.10 に全体図を示す。Spider システムは、preamp 及び amp, discriminator, delay-latch 回路を 1 つにまとめた Spider Net と、データ収集用の TKO システムから成る。

Spider システムを構成するものは、

- preamplifier カード (Chamber-Mounted)  
→16ch common-base タイプのカレントアンプで増幅度は  $300\text{mV/pC}$  をもつ。1 枚に 16ch 分が入っており、チェンバーに直接とりつける。(林栄精器 RPV-40) 回路図は Appendix に記載する。
- Spider Net  
→16ch amplifier, discriminator, delay-latch 回路。
- Spider Controller  
→トリガーをクレート内の Spider Net に配り、データを順次読み出し TKO SEM に送る。
- TKO SEM (Spider Encoder Memory)  
→Spider Controller に配る Vth の設定・トリガーの入力があり、1 イベント分のヒットデータを蓄える TKO モジュール。
- Spider Crate  
→Crate には変形 VME-Box を使い、1 台の SEM で最大 4 台までの Crate を扱うことができる。
- Spider Termination Card  
→SEM から一番遠い Crate にのみ Spider Bus の反射を防ぐためにつける。

である。

Spider BUS は最大 30m であるので Spider Crate を実験室に置き、TKO SEM を計数室に置くことが可能である。トリガーの作成時間と信号の伝送遅延時間を考慮して Spider Net には 800ns の delay-chip が入っている。計数室内の TKO までは 1 本のケーブル・バスでデータを転送するのでケーブル量が従来のシステムに比べ非常に少なく済む。しかし delay-chip には  $\pm 1\%$  の遅延時間のばらつきがあるため、これを吸収できるくらいのゲート幅  $\sim 20\text{ns}$  が必要になる。また 1 つの Net には 16ch 分の信号が入るが、増幅後コンパレータでデジタルに変換された 8ch 分の信号の OR であるフロントパネルの端子か

ら hit out が出力される。

Spider システムの仕様として, Spider Net 内のコンパレーターに与えられるしきい電圧である  $V_{th}$  は TKO SEM で設定し, トリガーの入力は TKO SEM 又は Spider Termination Card のどちらか一方で行う. このトリガーは Spider Controller に送られ, フロントパネルの trigger out 端子から出力される. その出力を Spider Controller の trigger in 端子に入力すると, トリガー信号は Spider Crate のバックプレーンを通して各 Net に送られトリガーがかかる. このとき Crate 内の各 Net に同じタイミングでトリガーがかかるように各 Net への配線パターンは等しい長さになるように作られている. Spider Controller からの trigger out 端子は 4 つあるが, これは 4 つの Crate を同じタイミングで動かすためである. これにより Spider では最大 1520ch の信号を処理できる. Fig.10 に Spider システムの全体図を示す.

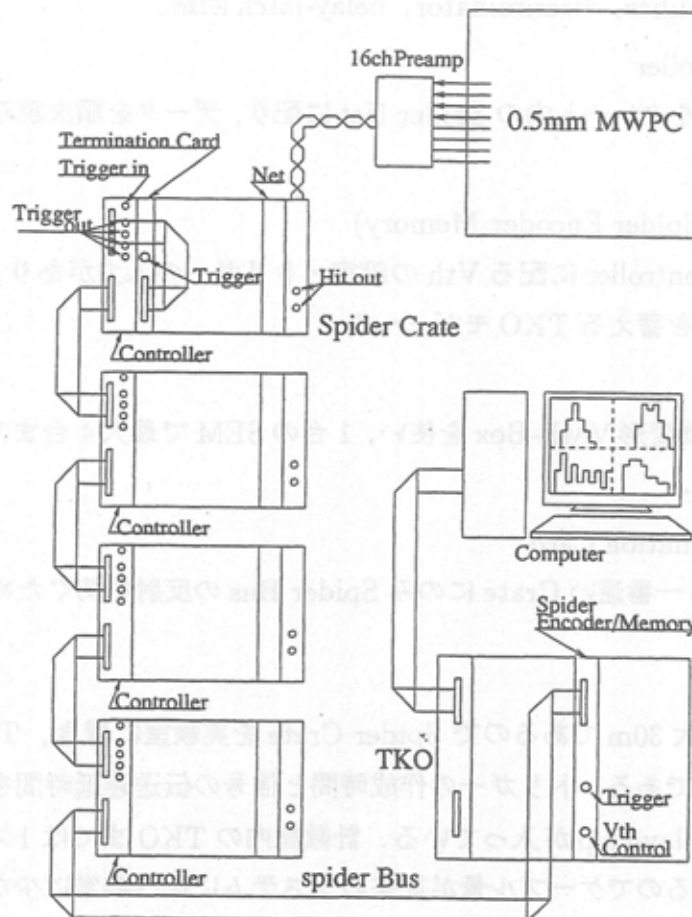


Fig.10: Spider システムの全体図

Spider システムでのデータ収集の流れは、以下のようになっている。

1. TKO SEM 又は Spider Termination Card にトリガーが入る
2. Spider Controller にトリガーが入り、バックプレーンを通して各 Net にトリガー信号が配られる
3. ヒットした Net から Controller へデータが 16bit 信号で送られ、ヒットのない Net はとばされる
4. Controller の全データが TKO SEM に送られ、SEM 内のメモリに蓄えられる
5. TKO SEM がデータのフォーマット変換をする
6. 終了

このデータ収集の 1 サイクルは  $100\mu\text{s}$  以内に終了する。TKO SEM でのデータ・フォーマットは、連続してヒットするチャンネルが多いので 1 つずつのチャンネルを保存するのではなく Fig.11 のようにフォーマットする (clusterizing)。

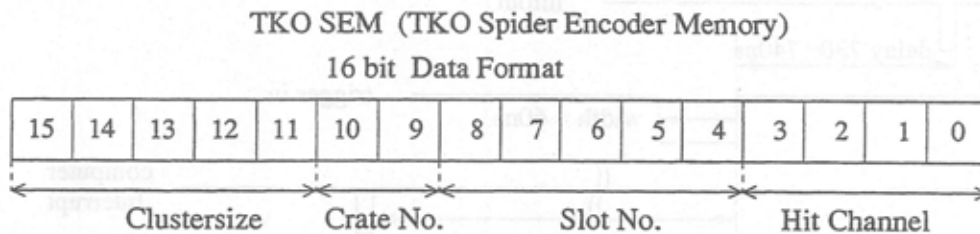


Fig.11: TKO SEM のデータ・フォーマット

- Clustersize : 連続してヒットしたワイヤーのチャンネル数 (1 ~ 31)
- Crate No. : Spider Net のある Crate 番号 (0 ~ 3)
- Slot No. : Spider Net のある Slot 番号 (0 ~ 23)
- Channel : データのある Spider Net 内の一番始めのチャンネル (0 ~ 15)



実験の測定回路図と各信号のタイミングを Fig.12 に示す. delay curve の測定でのタイミングの調整には, Spider Controller からの trigger out 出力と Spider Net からの hit out 出力とをオシロスコープで観察して行った.

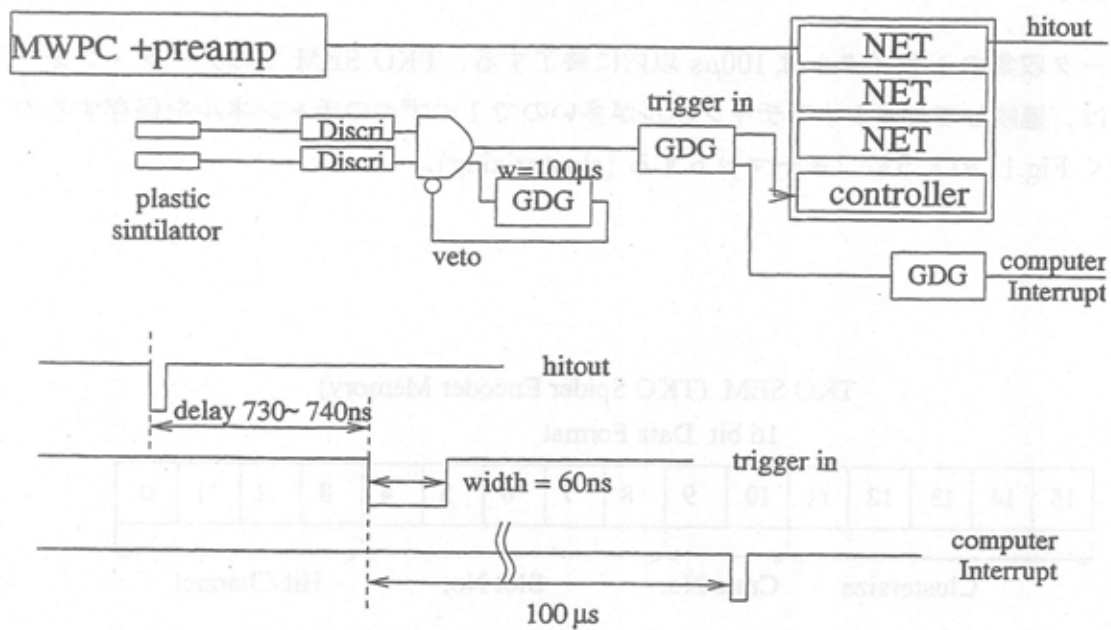


Fig.12: 測定回路と各信号の timing

### 3.4 ガスの混合

magic gas などを用いる場合には Freon の割合を 0.3 ~ 3 % などの非常に微量な値で保持する必要があり, 0.5mm MWPC で使用するガスの流量は 5 ~ 10cc/min と少ないため, 混合時に各構成ガスの流量を正確に知り, 制御しなければならない。

我々が使用したガスの純度・圧力と流量計の一覧を Table 5, 及び 6 にあげる。実験では Omega・Argon 用流量計に純 Argon や 97 % Argon+3 % Freon-13 B1(premixed) を流して使用した。Omega の流量計には全てマイクロニードルバルブが装着されている。STEC・SEC-7320 は微量ガスを制御できるマスフローコントローラーで, これには純 Argon, Freon-116( $C_2F_6$ ) を流した。ガス混合器の簡略図を Fig.13 に示す。

Table 5: ガスの純度・圧力

ガス	純度・混合比	圧力 (Kg · f/cm <sup>2</sup> )
Argon	≥99.9995 %	1
Isobutane	≥99 %	0.8 ~ 0.9
Argon + Freon-13 B1	Argon : 96.99 % Freon-13 B1 : 3.01 %	1

Table 6: ガス流量計の一覧

測定ガス	メーカー・型番	測定流量範囲・精度 (cc/min)
Argon	Omega・SMA-2 型	3~30 · ±0.6
Isobutane	Omega・SMA-2 型	2~20 · ±0.4
Argon	Omega・FD-02 型	2~20 · ±1.0
N <sub>2</sub>	STEC・SEC-7320	1~3 · ±0.03

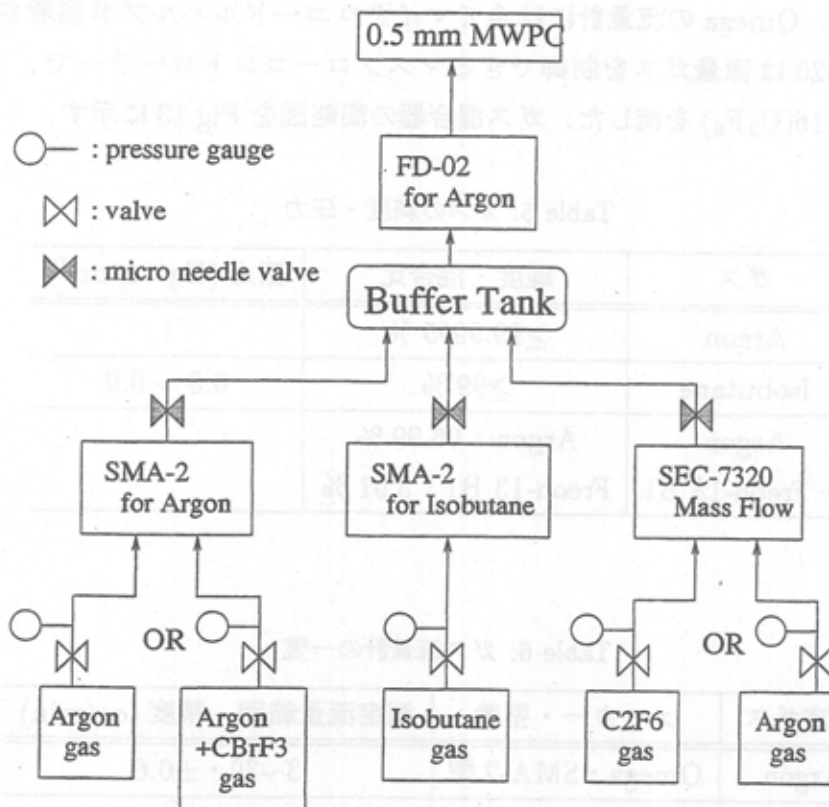


Fig.13: ガス混合

## 4 0.5mm MWPC の特性

この章では 0.5mm MWPC の特性として efficiency と clustersize を Fig.9 の setup を用いて測定した結果について述べる. ガスは, Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> とこれをベースにして Freon-13 B1(CBrF<sub>3</sub>), Freon-116(C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) を混合したガスについて測定した.

### 4.1 ガスに対する要求

0.5mm MWPC を動作させるためのガスに対する要求としては,

1. 構造上許される最大電圧より動作電圧が十分低いこと
2. clustersize が小さいこと
3. 高計数率に耐えうる事
4. 高い増幅度をもつこと
5. 長時間の使用に耐えうる事

などが挙げられる.

まず MWPC に用いるガスとして, よく用いられる Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> をベースに考える. 混合ガスの主成分としては, 回転・振動のエネルギー消費モードをもつ多原子分子よりも, 励起・イオン化のモードしか持たない単原子分子の方が良い. これは電子との衝突の際に得られるエネルギーをイオン化に有効に利用できるからで, 主成分としては希ガスである Argon を用いることが多い. また Argon のみを用いたガス検出器では, 放電領域に入らずして  $10^3 \sim 10^4$  のガス増幅度は得ることはできない. この理由として,

1. なだれ増幅の過程で励起・イオン化された Argon 原子ができ, 励起された Argon 原子が基底状態に戻る際に最小で 11.6 eV の photon を放出する. この photon はカソードである Cu のイオン化ポテンシャル 7.7 eV を越えているので, 光電子がカソードから飛び出し, 本物のなだれ増幅のすぐ後に偽のなだれ増幅を起こす.
2. Argon イオンはカソードに移動し, そこで電気的中性になり, カソードは photon を放出する. この photon がカソードで光電効果を起こし偽のなだれ増幅を起こす.

という二つの過程を起こすことにより適度なガス増幅度に達する前に放電領域に入ってしまう. こうした放電を抑えるために多原子分子ガス (quencher, quenching gas) を混合する.

quencherは広いエネルギー範囲で photon を吸収し、そのエネルギーを他分子との散乱によって散逸したり、他分子を解離するのに使う。また主なガスである Argon などの希ガスよりも低いイオン化ポテンシャルをもつので Argon イオンを中性化してカソードに達するのを防ぐ。一方 quencher のイオンはカソードで電気的中性になる際には解離や重合を形成するので photon を放出しない [3]。Fig.14 に幾つかの quencher gas の photon に対する断面積を示す [6]。

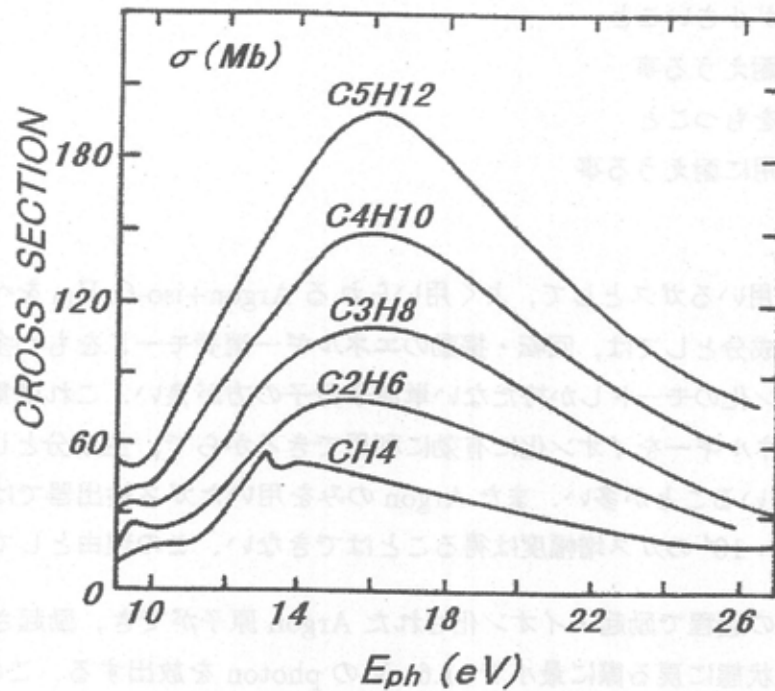


Fig.14: quencher の photon に対する断面積



## 4.2 0.5mm MWPC の基本的特性

混合比 80 : 20 の Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 混合ガスを用いて MWPC の特性をみる実験の前に、基本的特性として 3.2 節で述べたゲート幅、タイミング、V<sub>th</sub> を決める実験を行った。

### 4.2.1 delay, V<sub>th</sub> curve

最初にゲート幅とタイミングを決める為に行った delay curve の測定について述べる。HV = -3100 V をかけ、V<sub>th</sub> は連続ノイズをひっかけない程度の V<sub>th</sub> = -200 mV とし gate 幅を 40 ns, 60 ns, 100 ns の 3 種類に変えて測定した。結果を Fig.15 に示す。

最小ゲート幅は 3.2 で述べたように Spider の回路特性で 20 ns となっていて、その他ドリフト時間の変動やチャンネル間の delay のばらつきを吸収できるだけの幅が必要である。最大ゲート幅は許容できる accidental event rate から決定できる。Fig.15 から full efficiency を実現するためにはゲート幅は 40 ns 以上必要であり、今回の accidental event rate は  $6 \times 10^{-4}$  counts/sec なので広めのゲート幅でも accidental event は無視できると考えられるので 60 ns とし、delay は 730~740 ns とした。

plateau curve を V<sub>th</sub> = -200, -300, -500 mV の 3 種類で測定した結果を Fig.16 に示す。これらの測定結果をみると、plateau の始まる電圧が高電圧側に shift している。今回は V<sub>th</sub> = -200 mV でこれからの測定を行った。



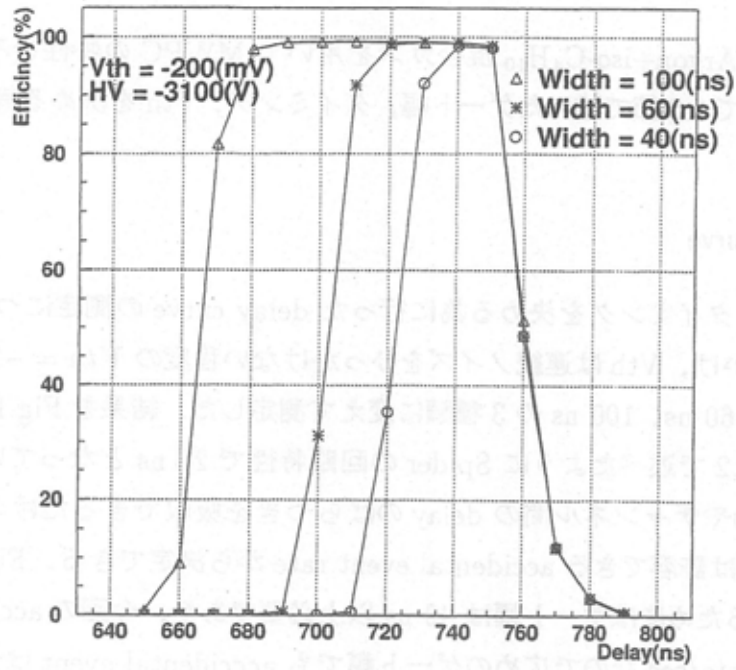


Fig.15: delay curve

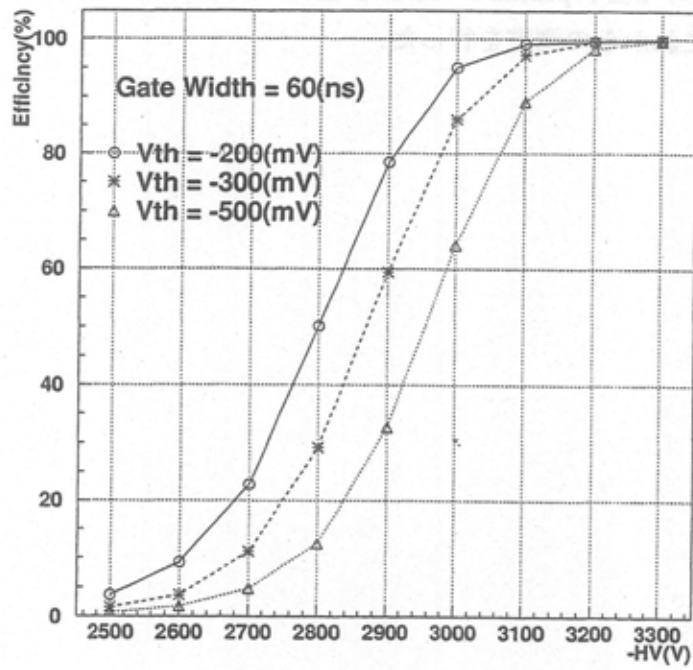


Fig.16: Vth を変えたときの plateau curve

#### 4.2.2 cluster 数, clustersize 分布

前節のタイミング, ゲート幅, Vthとして測定を行うとき, 得られる cluster 数, clustersize 分布の図を下に示す. また信号を与える cluster がワイヤーにどのように分布しているかを示すヒットパターンも示す. このときのガスは, 混合比 70 : 30 の Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 混合ガスである.

cluster 数の分布をみるとほぼ cluster が 1 個というイベントのみであり, 入射角度をつけないとき clustersize は 1 又は 2 というイベントが主である. また, Fig.9 のような setup を用いるとき下に置いたシンチレーターの大きさから考えられるヒットパターンとほぼ一致しているので, 多重散乱の効果はあまりないといえる.

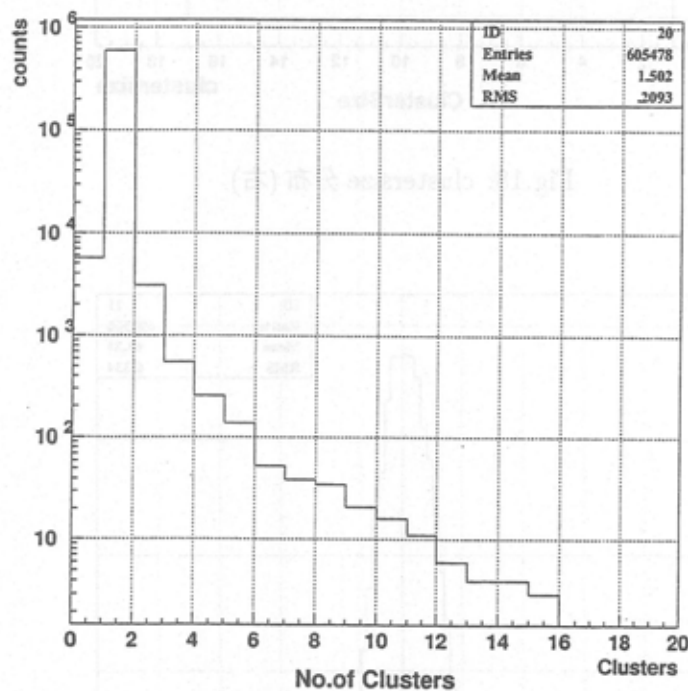


Fig.17: cluster 数の分布

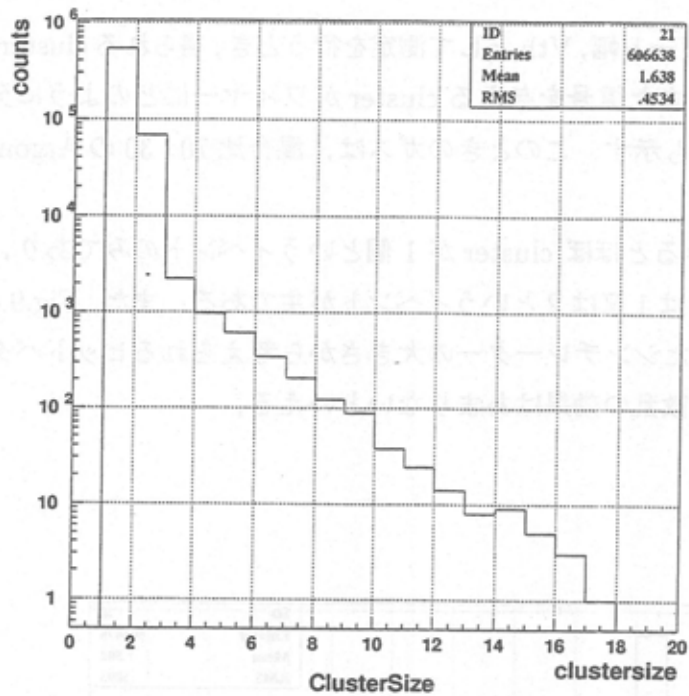


Fig.18: clustersize 分布 (右)

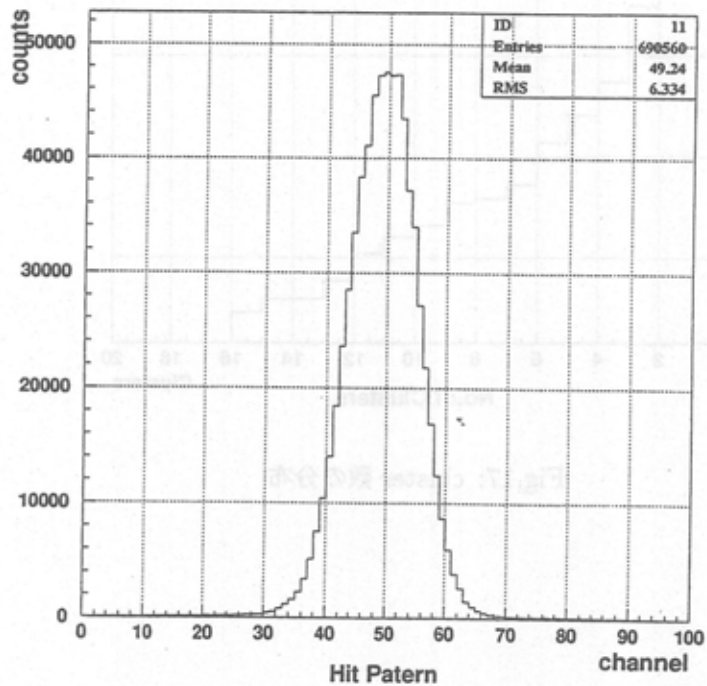


Fig.19: ヒットパターン

#### 4.2.3 入射角度依存性

0.5mm MWPC と Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 80 : 20 の混合ガスの角度に対する応答を調べるために、チェンバーに対する <sup>90</sup>Sr β 線源の入射角度をつけた場合の efficiency, clustersize を入射角度 0°, 5°, 10° の 3 種類について行った. このときの plateau curve を Fig.20 に示す.

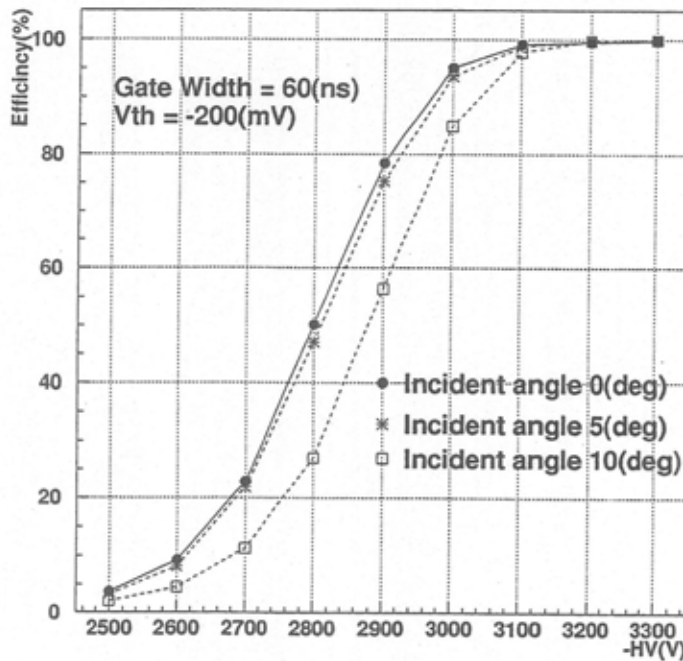


Fig.20: 入射角度を変えたときの plateau curve

Fig.20 と Fig.21 より, 角度が大きくなるにつれてガス増幅の種となる電子が数ワイヤーに分かれてヒットしてワイヤー当りの電荷量が減少し, 信号が小さくなり efficiency を下げていると考えられる.  $HV = -2900$  V などの plateau 領域に入る前では, 角度をつけることにより顕著に efficiency は低下している.  $HV = -3200$  V などの plateau に入ったところでは threshold にかかって efficiency は低下せず, 入射角度が大きくなっても  $V_{th} = -300$  mV までは full efficiency になっている.

角度を変化させたときの clustersize の変化をみるために clustersize=1 の数で clustersize=2, clustersize=3 のイベント数を割ったものの比をそれぞれ clustersize2/1, clustersize3/1 としてプロットしたものを Fig.22 に示す.

$HV = -3300$  Vでは $0^\circ$ ,  $5^\circ$ の場合,  $clustersize=3$ というイベントはほとんどなく, まだ $clustersize=1$ というイベントが最も多いが,  $10^\circ$ では $clustersize=2$ が $clustersize=1$ の1.5~1.6倍にもなる.  $iso-C_4H_{10}$ の混合比を増加させたとき,  $clustersize$ に変化がみられるかと思い, 次節では3種類の混合比で実験を行った.

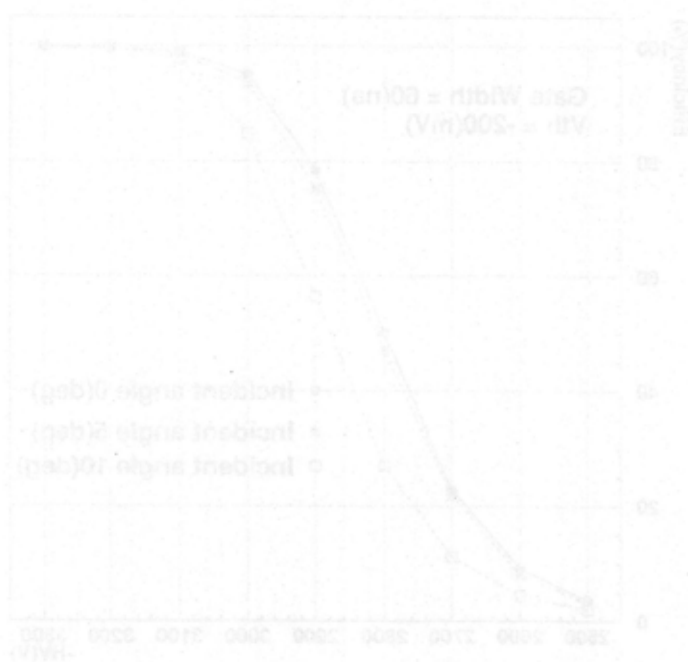


Fig. 20. Plateau curves for different incident angles.

Fig. 20とFig. 21より, 角度が大きくなるにつれてガス検出の効率となる電子がマトリクスに分裂してマトリクスに落ちる量が減少し, 検出効率が小さくなり, efficiencyが低下する。HV = -3000 Vまでのplateau領域に入らないうちは, 角度を大きくしてより検出効率に低下している。HV = -3200 Vまでのplateauに入ったところでthresholdにかかっ efficiencyは低下せず, 入射角度が大きくなるとHVは-3000 Vまでfull efficiencyになっている。

角度を変化させたときのclustersizeの分布をみるためにclustersize=1の電子をclustersize=2, clustersize=3の電子を別々のクラスとしてclustersize=1, clustersize=2, clustersize=3としてカウントしたものをFig. 22に示す。



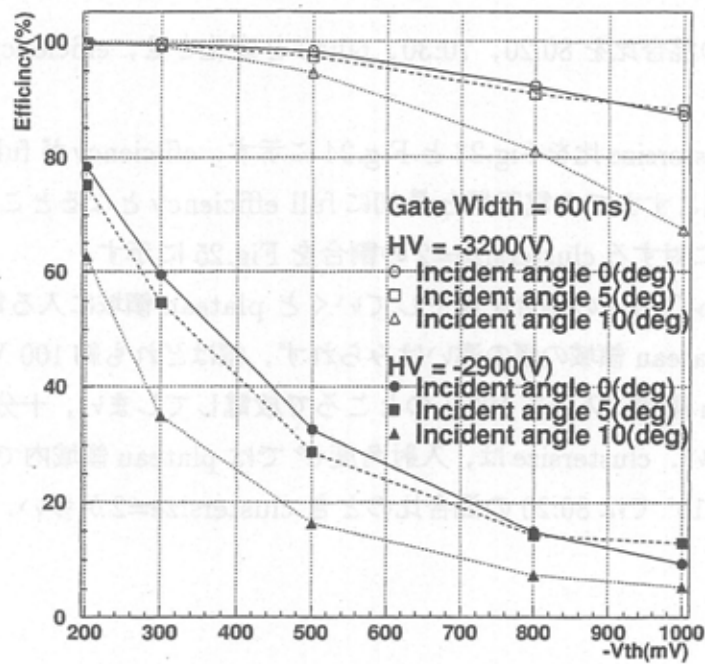


Fig.21: 入射角度を変えたときの Vth curve

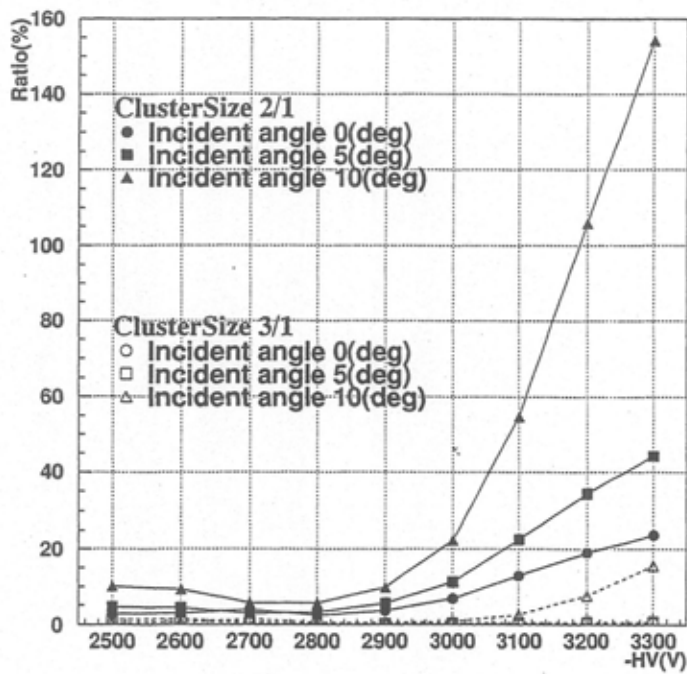


Fig.22: 入射角度を変えたときの clustersize

### 4.3 Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> の特性

Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> の混合比を 80:20, 70:30, 60:40 と変化させ、efficiency, clustersize を調べた。

plateau curve と clustersize 比を Fig.23 と Fig.24 に示す。efficiency が full efficiency となる電圧から放電を起こすまでの電圧幅と最初に full efficiency となるところから 100 V 上での clustersize=1 に対する clustersize=2 の割合を Fig.25 に示す。

入射角 0°, 10° で iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> の割合を増やしていくと plateau 領域に入る電圧が上がる。しかし混合比による plateau 領域の幅の違いはみられず、幅はどれも約 100 V 程度である。このガスでは、plateau 領域に入って 100V のところで放電してしまい、十分な plateau 領域を得ることはできない。clustersize は、入射角度 0° では plateau 領域内でガス混合比による違いはみられず、10° では 80:20 の混合比のとき clustersize=2 が多い。

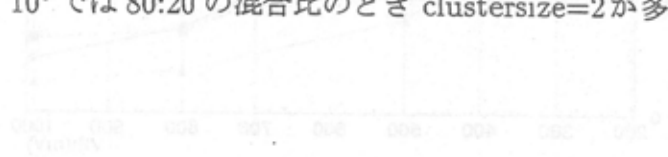


Fig. 23: 入射角 0° のときの plateau 電圧の V 幅

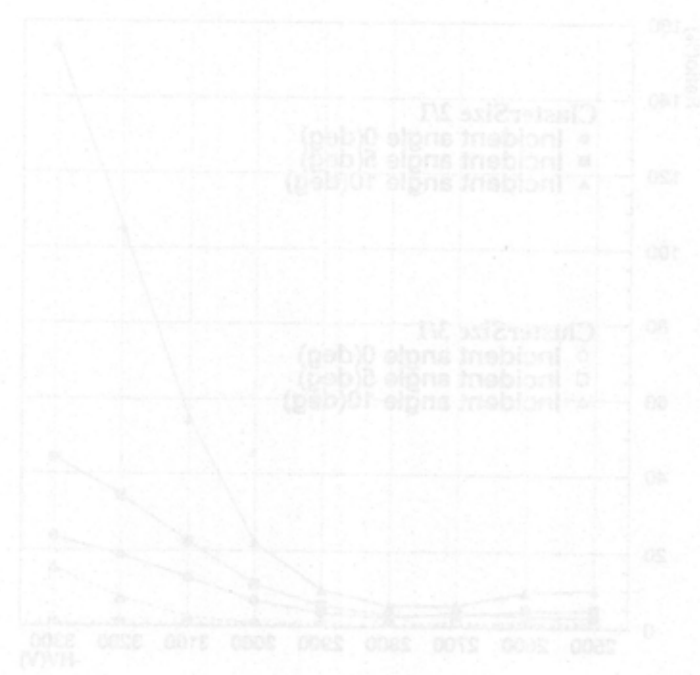


Fig. 24: 入射角 0° のときの clustersize 比

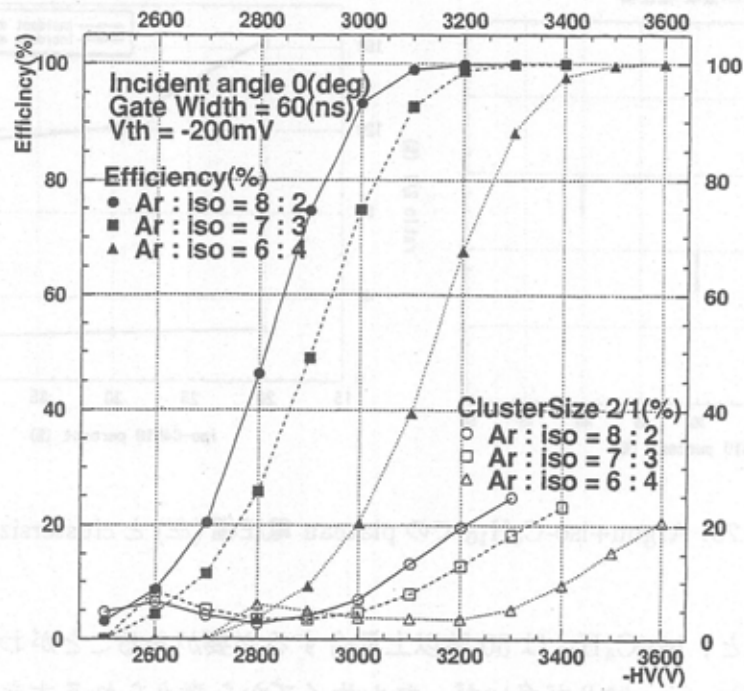


Fig.23: 入射角度 0° での plateau, clustersize curve

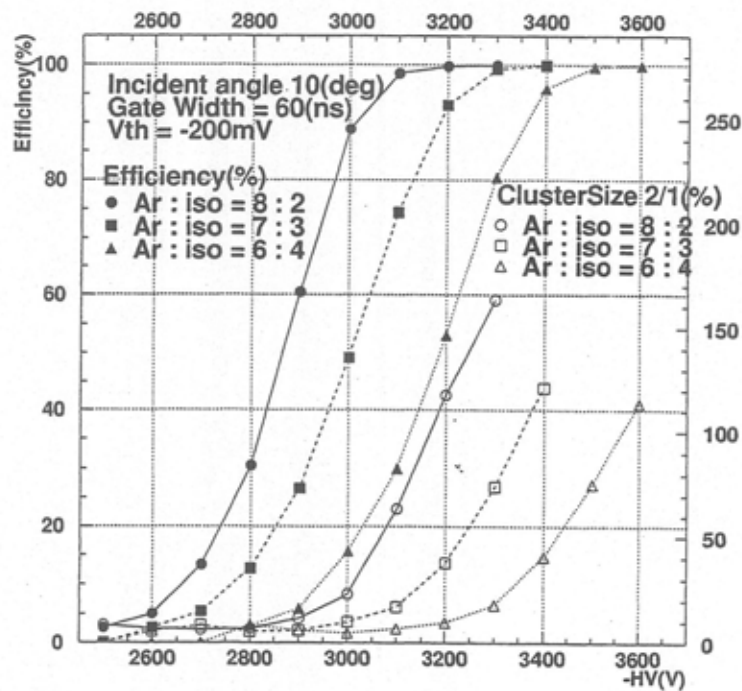


Fig.24: 入射角度 10° での plateau, clustersize curve

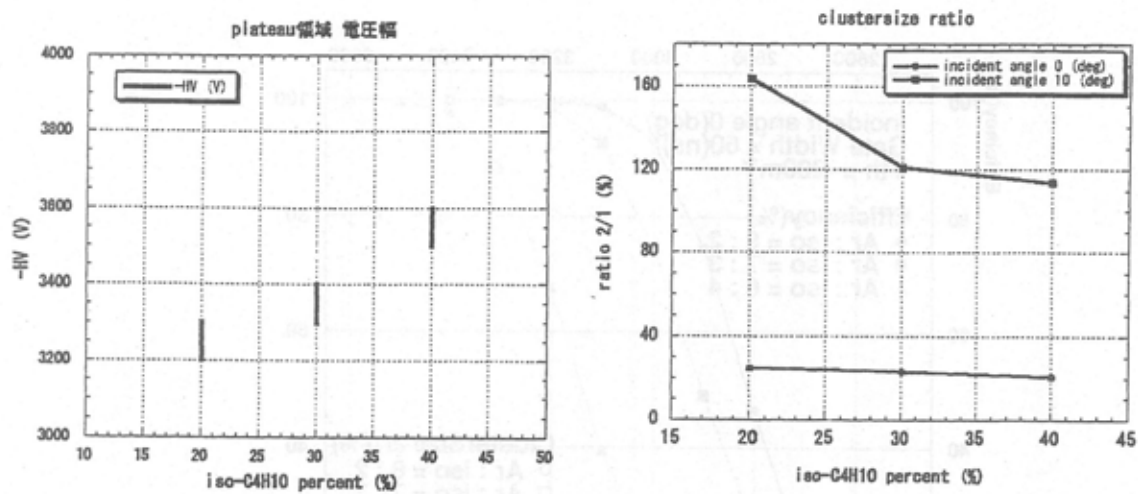


Fig.25: Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> での plateau 電圧幅 (左) と clustersize の比 (右))

clustersize をみると, iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> は 30 % 以上混合する必要があることがわかる. 入射角度が 10° のとき clustersize は 2 が多いが, セルサイズから考えられる大きさに一致している. しかし electronegative なガスを少量混合することにより, チェンバー内の軌跡に最も近いアノードワイヤーのみで電子なだれが起こるようにできるはずである.

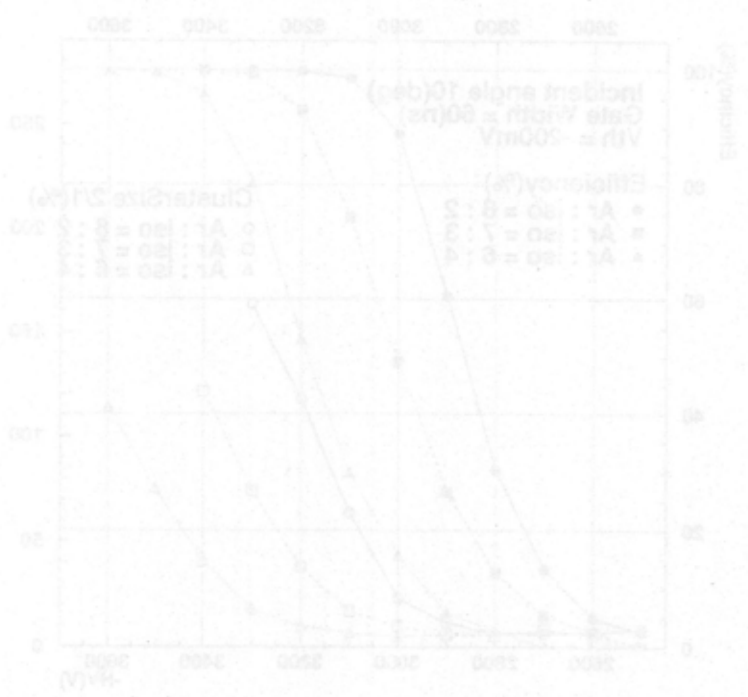


Fig.24: 入射角度 10° の plateau 電圧幅, clustersize curve

#### 4.4 Freon の及ぼす効果

Freon-13 B1(CBrF<sub>3</sub>)<sup>注1</sup> のような electronegative なガスを proportional gas に少量混合することによりガス増幅度が放電前に 10<sup>7</sup> にまで引き上げられ、最初のイオン化の際の電荷量にかかわらず pulse height が飽和するような状態が得られる。electronegative なガスを混合することのもう一つの重要な面としては、過剰な電子を捕獲することにより clustersize を小さくすることであるが、full efficiency を実現するためには混合する量を制限しなければならない [2], [3], [7]。この特有なガスは Charpak 等により開発され、magic gas と呼ばれている。magic gas は我々の要求を満たすガスであるが、このガスではより高い電圧をかけて動作させなければならない。0.5mm MWPC では、half gap のばらつきなどの構造上の問題により高い電圧をかけると放電しやすいため、本当に印加可能な電圧で動作させられるかを確かめる必要がある。また Freon-13 B1 は規制され生産されていないので、Freon-13 B1 に代わる MWPC 用ガスを見出すことが重要な課題となっている。

6 節では 0.5mm MWPC で Freon-13 B1(CBrF<sub>3</sub>) を混合した場合の efficiency, clustersize について調べる。7 節では、これに替わる Freon の候補として Freon-116(C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) を用いて測定を行い、0.5mm MWPC で使用するガスとしての性能を調べる。

#### 4.5 Freon-13 B1(CBrF<sub>3</sub>) 混合での特性

Charpak 等によって開発されて以来、magic gas は MWPC に多用されているが、0.5mm MWPC に用いた場合に plateau curve, clustersize はどのように変化するかを調べるため 4.3 節と同様に Fig.9 の setup で測定した。今回は Argon : Freon-13 B1(CBrF<sub>3</sub>) = 96.99 : 3.01 の premix gas を用い、4.3 節での結果をもとに iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> が 30 % 程度混合されるように純 Argon と premix gas を調整した。純 Argon の調整にはマスフローコントローラーを用いた。CBrF<sub>3</sub> の混合比として 1.2, 1.5, 1.8 % の 3 種類について調べた。4 節と同じように入射角度 0°, 10° での efficiency が full efficiency となる電圧から放電を起こすまでの電圧幅と最初に full efficiency となるところから 100 V 上での clustersize=1 に対する

<sup>注1</sup> Freon というのはデュボン社の商品名で、炭化水素のクロロフルオロ置換体をいう。不燃性・非爆発性で無毒であり、化学的に安定で金属を腐食しないので、冷媒・消火剤・ウレタンフォーム発泡材に用いられたり、フッ素樹脂の原料になる。

大気中に放出されたクロロフルオロカーボンが分解することなく、次第に成層圏にまで拡散する。ここで太陽の強い紫外線の照射を受けて塩素などの原子を発生し、この原子が触媒となって成層圏にあるオゾン層を分解する。オゾン層保護のため 1985 年に「オゾン層保護のためのウィーン条約」、1987 年には具体的規制措置を定めた「モントリオール議定書」が採択され、1995 年までにはクロロフルオロカーボンは全廃となった。



clustersize=2の割合を Fig.26 に示す. plateau curve と clustersize 比を Fig.27, Fig.28 に示す.

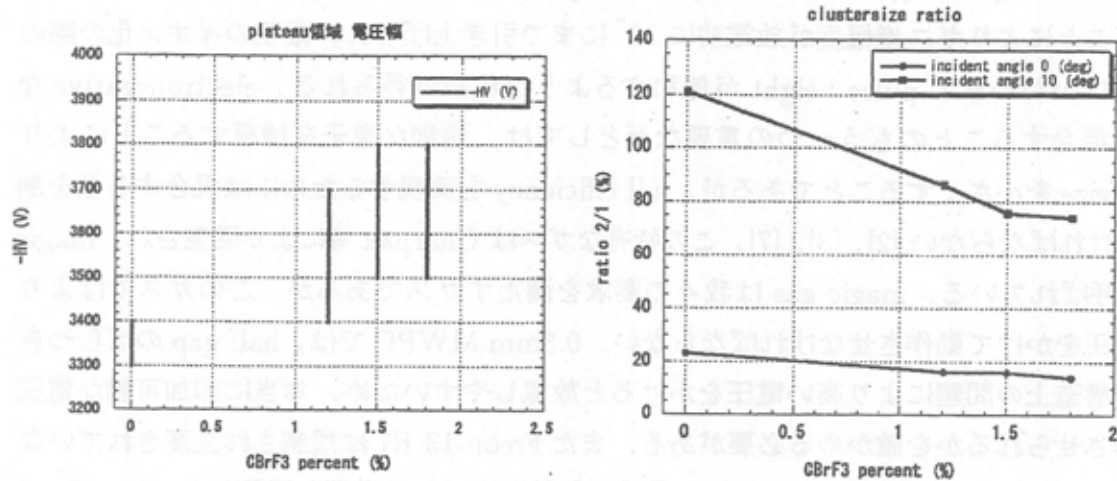


Fig.26: CBrF<sub>3</sub> 混合ガスでの plateau 電圧幅 (左) と clustersize の比 (右)

今回製作された 0.5mm MWPC では, CBrF<sub>3</sub> を混合した magic gas のとき Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> に比べ放電までの plateau 領域が 300V 程度と広く得られた. 入射角度 0°, 10° 共に CBrF<sub>3</sub> の混合比を増やしても clustersize, plateau 領域に入る電圧に大きな違いはみられない. 若干ではあるが, CBrF<sub>3</sub> の混合比が 1.2% と 1.5% のとき plateau curve が 100V 程右に shift しているが, 入射角度 0° では 5%, 10° では 10% ほど clustersize2/1 の比が下がっていることから, CBrF<sub>3</sub> の電子捕獲が効いていることがわかる. 1mm MWPC の混合比は 0.4~0.5% で最適であったから, 0.5mm MWPC では 1.0% 前後で混合するのが良く, 実験結果からも 1.2% において efficiency の低下はなく, clustersize も小さくなっている [8], [9], [10], [11], [12].

magic gas でもさらに HV を上げていくと Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> と同様の放電が起きてしまうが, plateau 領域の幅は 300 V と広く, clustersize も小さく従来の MWPC 同様に安定に動作した. 本研究で製作された 0.5mm MWPC は, このガスでは実用可能な性能を発揮した.



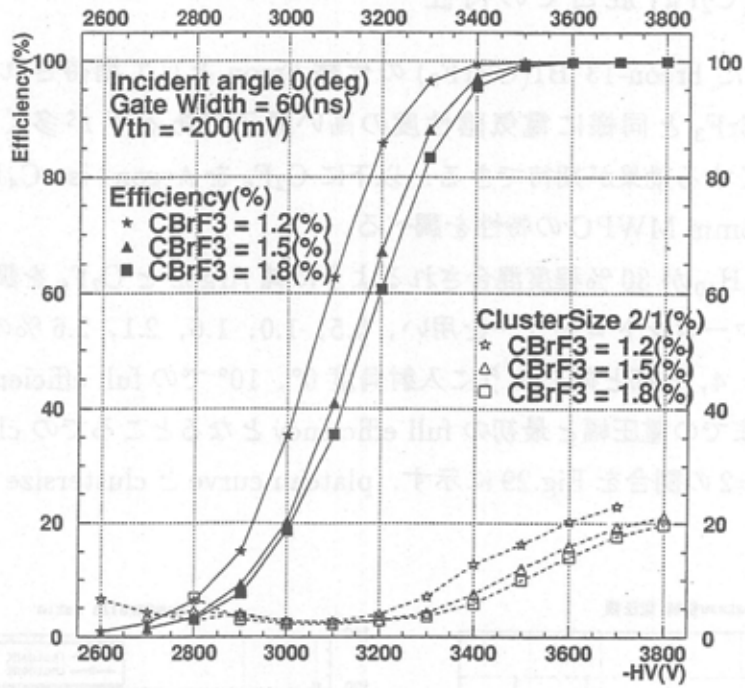


Fig.27: 入射角度 0°, CBrF<sub>3</sub> の様々な混合比での plateau, cluster curve

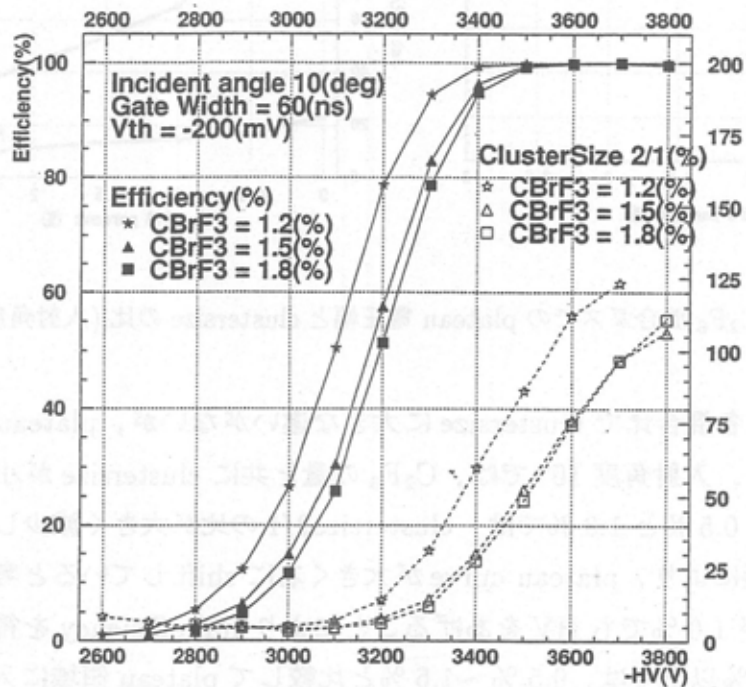


Fig.28: 入射角度 10°, CBrF<sub>3</sub> の様々な混合比での plateau, cluster curve

#### 4.6 Freon-116(C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) 混合での特性

生産中止になった Freon-13 B1(CBrF<sub>3</sub>) の代替 Freon として期待されている Freon-116(C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) は, CBrF<sub>3</sub> と同様に電気陰性度の高い原子である F が多く含まれるので clustersize を小さくする効果が期待できる. 以下に C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> を Argon+iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ガスに混合したガスにより 0.5mm MWPC の特性を調べる.

4.6 節同様 iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> が 30 % 程度混合されるように純 Argon と C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> を調整した. C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> の調整にはマスフローコントローラーを用い, 0.5, 1.0, 1.6, 2.1, 2.6 % の 5 種類の混合比で実験を行った. 4, 6 節と同じように入射角度 0°, 10° での full efficiency となる電圧から放電を起こすまでの電圧幅と最初の full efficiency となるところでの clustersize=1 に対する clustersize=2 の割合を Fig.29 に示す. plateau curve と clustersize の比を Fig.30, Fig.31 に示す.

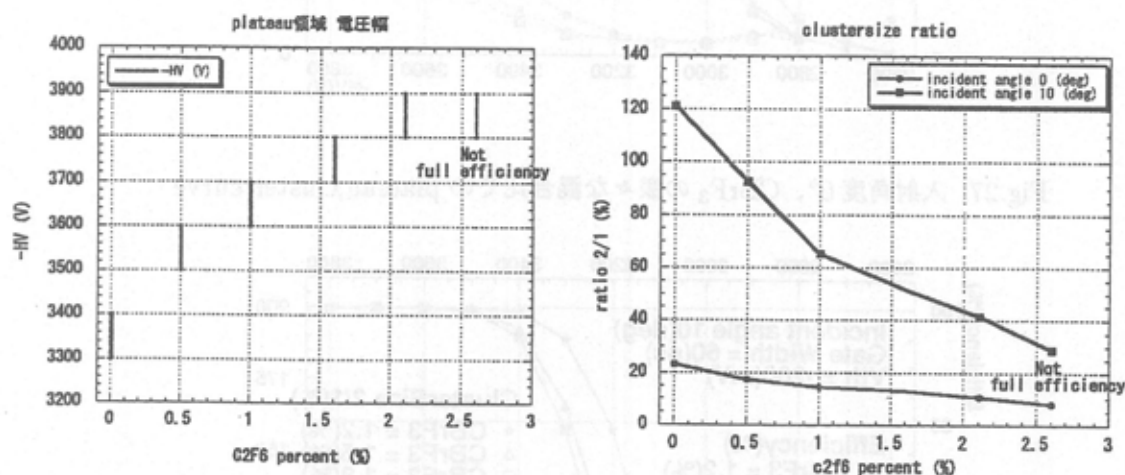


Fig.29: C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 混合ガスでの plateau 電圧幅と clustersize の比 (入射角度 0°(左), 10°(右))

入射角度 0° では各混合比で clustersize に大きな違いがないが, plateau curve は高圧側に shift している. 入射角度 10° では, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> の量と共に clustersize が小さくなっている. C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 混合比が 0.5 % と 1.0 % では, clustersize 2/1 の比が大きく減少していることから C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> の電子捕獲により, plateau curve が大きく右に shift していると考えられる. しかし C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 混合比が 1.0 % でも HV をあげることで full efficiency を得られる. また C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 混合比が 2.1 % 以上では, 0.5 % ~ 1.6 % と比較して plateau 領域に入ったところでも efficiency が低い. C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> が電子を捕獲し過ぎて efficiency を下げており, plateau curve も大きく右に shift している.

これより 0.5mm MWPC では, Fig.29 に示す clustersize と plateau 領域に入る電圧の両方から  $C_2F_6$  の混合比は 1.6% 前後とするのが良いといえる. しかしいずれの混合比でも plateau 領域に入り, 100 V 程度上のところで Argon + iso- $C_4H_{10}$  と同じように放電がおこる.

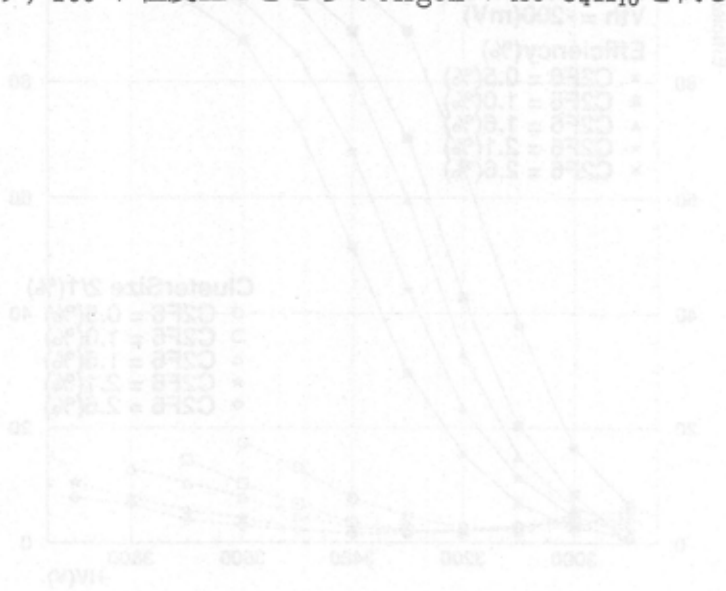


Fig. 29. 入射電圧 0.5mm の場合の効率とクラスタサイズの電圧依存性.

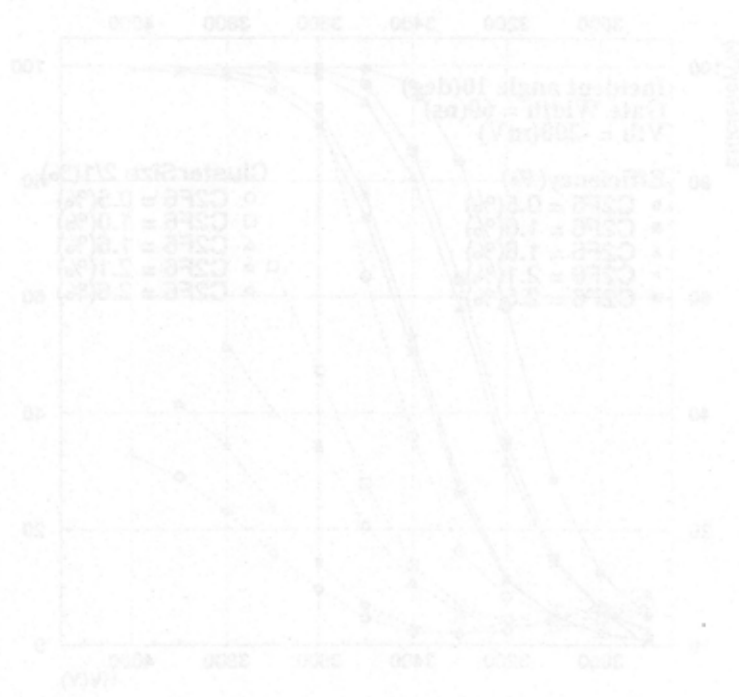


Fig. 30. 入射電圧 0.5mm の場合の効率とクラスタサイズの電圧依存性.

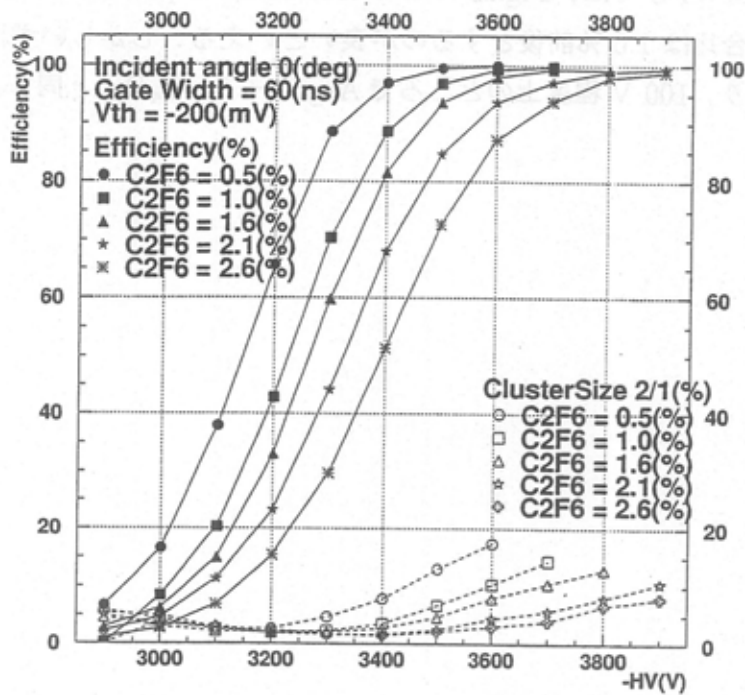


Fig.30: 入射角度 0°, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> の様々な混合比での plateau, cluster curve

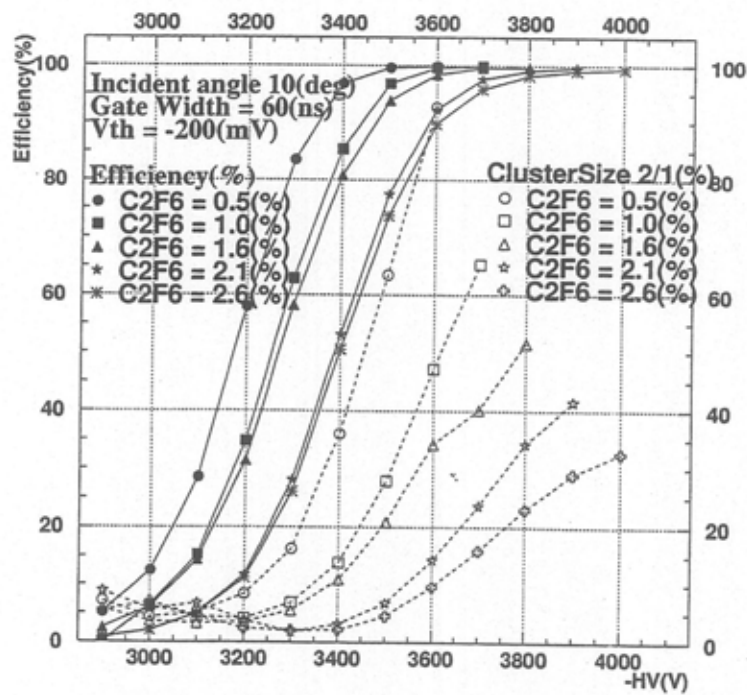


Fig.31: 入射角度 10°, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> の様々な混合比での plateau, cluster curve

#### 4.7 Freon を用いた混合ガスのまとめ

$C_2F_6$  と  $CBrF_3$  とを比較すると、 $C_2F_6$  は  $CBrF_3$  の約  $1/3$  の量で同程度にまで clustersize を小さくすることができ、この点では非常に優れている。しかし  $CBrF_3$  では plateau 領域幅を 300V 得られるのに対し、 $C_2F_6$  では Argon+iso- $C_4H_{10}$  と同様に放電が起き、plateau に入る電圧から 100V までしか得られない。plateau 領域の幅については、clustersize の測定より  $C_2F_6$  は電子捕獲を  $CBrF_3$  より強く行っていることがわかる。そのために full efficiency となる HV が高圧側に shift し、0.5mm MWPC では幅が狭くみえている様である。混合比を増やしたときの plateau 領域への入り方をみると  $CBrF_3$  ではガス増幅度が飽和しているのに対し、 $C_2F_6$  では飽和していない可能性がある。これは  $C_2F_6$  は比例領域だけをもつガスなのか、または飽和状態がさらに高圧側にあり 0.5mm MWPC ではみれないのかと考えられる。

以上のように 3 種類のガスを混合比を変えて実験を行ったが、今回製作された 0.5mm MWPC を現時点で Spider システムを用いて安定に動作させるときガスとしては、 $CBrF_3$  による magic gas が優れていることがわかった。

## 5 結論

高計数率下でビーム粒子の軌道を高位置分解能に得られる 0.5mm MWPC の実用化は、今後の原子核、素粒子実験においてますます重要となるが、今回プロトタイプとして有効面積  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  の 0.5mm MWPC の設計パラメータを決定し、製作した。そして 3 種類の混合ガスを用い動作確認を行ったが、どのガスについても full efficiency が得られた。なかでも  $\text{CBrF}_3$  を混合した magic gas では plateau 領域が 300 V 程度得られ、従来の MWPC と同様に実用できることがわかった。また  $\text{C}_2\text{F}_6$  混合ガスについては、magic gas よりも clustersize を小さくすることができるが、plateau 領域については今回の 0.5mm MWPC では十分な結果が得られなかった。今回の MWPC は設計上の印加限界電圧より低いところで放電しているので、放電の原因によっては構造、製作上の改良が必要かもしれない。これらと共に代替 Freon の探索は今後の重要な課題である。



## A Appendix

### A.1 preamplifier について

0.5mm MWPCでは、林業精器のRPV-40をpreampに使った。このRPV-40では、プリアンプ部分に低ノイズのベース接地型カレントアンプを使用しており、高計数率での使用に耐えうるようになっている。プリアンプカードは、ハイブリッド I.C の低ノイズプリアンプを 16ch 分とテスト信号入力回路で構成される。その回路図を下に示す。

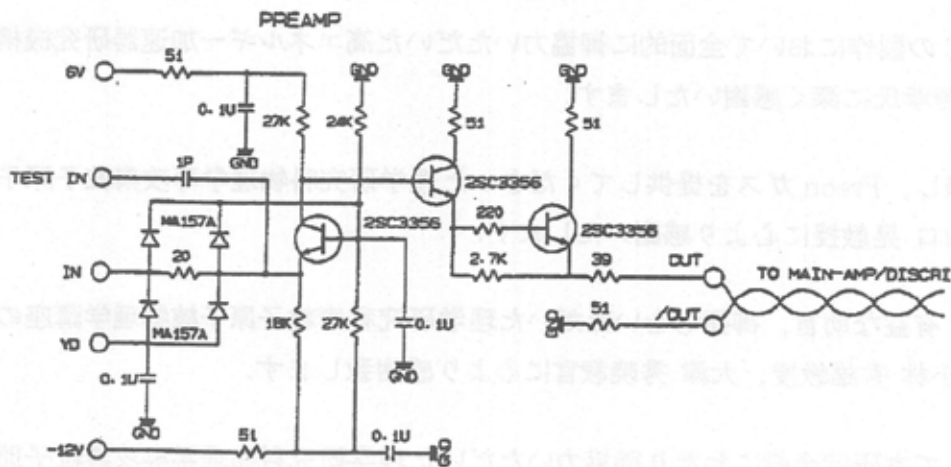


Fig.32: preamp RPV-40 の回路図

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，御指導いただいた理学研究科物理学専攻素粒子原子核物理学講座の橋本 治教授に心より感謝いたします。

本研究に対し，貴重な助言，御指導をいただきました理学研究科素粒子原子核物理学講座の田村 裕和助教授，田中 英二助教授に深く感謝いたします。

理学研究科素粒子原子核物理学講座の高橋 俊行教官，藤井 優教官には，実験の準備及び遂行に際し，有益な助言，御協力をいただき深く感謝いたします。

0.5mm MWPC の製作において全面的に御協力いただいた高エネルギー加速器研究機構田無分室の松山 芳孝氏に深く感謝いたします。

実験の遂行に際し，Freon ガスを提供してくださった理学研究科物理学専攻素粒子原子核物理学講座の山口 晃教授に心より感謝いたします。

本研究に渡り，有益な助言，御指導をいただいた理学研究科素粒子原子核物理学講座の中川 武美教授，小林 秀雄教授，大津 秀暁教官に心より感謝致します。

共同研究者として本研究全般にわたり御協力いただいた理学研究科物理学専攻素粒子原子核物理学講座の遠藤 卓哉氏，里 嘉典氏，葛巻 剛氏，佐藤 創氏，三好 敏喜氏，阿部 大輔氏，荒木 公太氏，小沢 健一郎氏，佐々尾 淳一氏に心より感謝致します。

山崎 明義氏，熊谷 和明氏，平井 正人氏ら理学研究科素粒子原子核物理学講座の院生の方々には，研究面のみならず生活面に於いても多くの助言，励ましをいただきました。深く感謝いたします。

日頃から暖かい励まし，助言をいただいた理学部原子核物理学講座の加藤 守夫氏、理学部物理事務の川村 直子氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] T.Fukuda et al. Nucl.Inst.and Meth. A361,485. 1995.
- [2] R.Bouclier et al. Nucl.Inst.and Meth. 88,149. 1970.
- [3] F.Sauli Principles of Operation of MultiWire Proportional Chamber. 1975.
- [4] K.Fujita et al. Nucl.Inst.and Meth. A308,514. 1991.
- [5] I.Veress Nucl.Inst.and Meth. 156,73. 1978.
- [6] W.Blum L.Rolandi Particle Detection with Drift Chambers. 1993.
- [7] C.Grunberg Nucl.Inst.and Meth. 78,102. 1970.
- [8] R.J.Gray Nucl.Inst.and Meth. 176,133. 1980.
- [9] D.D.Christian Nucl.Inst.and Meth. A345,62. 1994.
- [10] G.Charpak Nucl.Inst.and Meth. 148,471. 1978.
- [11] G.Charpak, F.Sauli Ann.Rev.Nucl.Sci. 34,285. 1984

参考文献

- [1] T. Fukuda et al. *Nucl. Instrum. Meth.* A381, 482 (1997).
- [2] R. Fomenko et al. *Nucl. Instrum. Meth.* A381, 448 (1997).
- [3] F. Sauter, *Principles of Operation of MultiWire Proportional Chambers*, 1973.
- [4] F. Sauter et al. *Nucl. Instrum. Meth.* A308, 514 (1991).
- [5] T. Vaisa, *Nucl. Instrum. Meth.* 156, 71 (1978).
- [6] W. Blum, L. Rolandi, *Particle Detection with Thin Chambers*, 1993.
- [7] C. Gumpfer, *Nucl. Instrum. Meth.* 131, 102 (1976).
- [8] R. L. Gray, *Nucl. Instrum. Meth.* 176, 133 (1980).
- [9] D. D. Christison, *Nucl. Instrum. Meth.* A442, 62 (1994).
- [10] O. Charvat, *Nucl. Instrum. Meth.* 148, 471 (1978).
- [11] O. Charvat, *Průběh a Rev. Nucl. Instrum. Meth.* 34, 282 (1964).