

新しい Magic Gas の開発

田澤 伸也

1999/4/1

目次

第1章	Introduction	4
1.1	目的	4
1.2	MWPCの動作原理	4
1.2.1	基本構造	4
1.2.2	電子なだれ	4
1.2.3	充填 gas	5
1.3	動機	5
第2章	実験装置	8
2.1	MWPC	8
2.2	回路	10
第3章	測定内容	11
第4章	実験の準備	12
4.1	流量計の更正	12
4.2	Delayの調整	19
第5章	実験結果と考察	21
5.1	$Ar + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$	21
5.2	$He + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$	23
5.3	$Ar + CHF_3 + isoC_4H_{10}$	27
5.4	$Ar + CF_4 + isoC_4H_{10}$	29
5.5	$Ar + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$	31
5.6	$He + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$	33
第6章	まとめ	36
第7章	今後の課題	38

付録 A	39
A.1 cluster について	39
A.2 参考文献	40

第1章 Introduction

1.1 目的

1. 多重散乱低減化用の He-base の Magic Gas の最適化
2. 代替フロンの探索

1.2 MWPC の動作原理

ここでは荷電粒子の通過位置を知るための装置である MWPC の動作原理について簡単に触れる。

1.2.1 基本構造

MWPC は通常、平行で等間隔に並べられた anode wire の面と、それを平行に挟む cathode の面で構成される。今回の実験では、典型的な anode 読み出し型の MWPC を用いたので、cathode 面にマイナスの高電圧をかけて、anode wire に来る電流信号を読み出す。この時の MWPC 内での電場は、anode wire 付近では wire からの距離に反比例し、cathode 面付近では平行電場となる。

1.2.2 電子なだれ

荷電粒子が MWPC 内に飛び込んでくると、そのエネルギーで Ar や He 等の充填 gas をイオン化したり励起したりする。イオン化された時に飛び出した電子は、電場にしがたって anode wire に近づく。anode wire 付近では距離に反比例して電場が強くなるので、wire 付近で電子は急激に加速される。そしてそのエネルギーが充填 gas のイオン化エネルギーを越えるとまたそこでイオン化する。wire 付近ではこのイオン化の連鎖が起こり、大量の電子が発生する。これを電子なだれと呼ぶ。この電子なだ

れを利用して wire で電流信号としてとり出すことができる。

1.2.3 充填 gas

充填する gas の主な役割は次の通りである。

1. 主にイオン化されて電子を出すもの
これには主に希ガス元素が用いられるのが一般的である。今回の実験では Ar や He がこれに相当する。
2. 主に光子を捕まえるもの
励起された原子から出てくる光子が cathode 面に当たると光電効果を起こしそこからまた電子が出てくるため、それがノイズ信号となってしまう。それを防ぐために光子を捕まえるような gas が必要になる。これには主に分子量の多い有機化合物が用いられるのが一般的である。今回の実験では $isoC_4H_{10}$ がこれに相当する。
3. 主に drift 中の電子を捕まえるもの
イオン化された時に飛び出してくる電子が最も近くの anode wire にたどり着くとは限らない。なぜなら飛び出してくる電子はすでにその時に運動量を持っているため、平行電場を破って別の wire にたどり着いてしまうこともある。それでは位置分解能が悪くなってしまい、MWPC の運用には不都合である。それを防ぐために電子を捕まえて、電子の平均自由行程を小さくするような gas が必要になる。これには主に電気陰性度の大きい原子を含むような有機化合物が用いられるのが一般的である。今回の実験では $CBrF_3$ 、 CHF_3 、 CF_4 、 C_2F_6 がこれに相当する。

1.3 動機

Ar - $isoC_4H_{10}$ (20%) - Methylal(4%) - $CBrF_3$ (0.3~0.5%) の gas は Magic Gas と呼ばれ、Charpak によって 1970 年に開発された。この gas の特徴は、安定に高い gain を得られることである。

現在の実用上の問題には次のようなものがある。

1. 検出器による多重散乱

クーロン多重散乱の散乱角 θ は

$$\theta \simeq \frac{14(\text{MeV}/c)}{p\beta} \sqrt{\frac{L}{L_R}} \left(1 + \frac{1}{9} \log_{10} \frac{L}{L_R} \right)$$

(p : 運動量 (MeV/c)、 L_R : radiation length、 L : 厚さ)

で表される。よって散乱角を小さくするには $\frac{L}{L_R}$ を小さくする必要がある。今回の実験に用いた MWPC を Ar-based magic gas で使うとすると、

$$\begin{aligned} \text{foil 等} & \cdots \frac{L}{L_R} \simeq 0.8 \times 10^{-4} \\ \text{gas 等} & \cdots \frac{L}{L_R} \simeq 1.8 \times 10^{-4} \\ \text{計} & \cdots \frac{L}{L_R} \simeq 2.6 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

となる。この主な寄与は Ar であり、He に替えることによって

$$\begin{aligned} \text{foil 等} & \cdots \frac{L}{L_R} \simeq 0.8 \times 10^{-4} \\ \text{gas 等} & \cdots \frac{L}{L_R} \simeq 0.5 \times 10^{-4} \\ \text{計} & \cdots \frac{L}{L_R} \simeq 1.3 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

となり、 $\frac{L}{L_R}$ は $\frac{1}{2}$ となる。これは多重散乱に対して 30% 程度の改善となる。

また、Ar を He に代えることによって、重イオンの実験で問題となる delta-ray の数を減らすことができる。

He-base の gas を用いる時に予想される問題として、種の数が少ないことがある。1cm あたりの種数は

Ar-base	He-base
Ar : 96.6 $\times \frac{3}{4}$	He : 7.6 $\times \frac{3}{4}$
<i>isoC</i> ₄ H ₁₀ : 232.8 $\times \frac{1}{4}$	<i>isoC</i> ₄ H ₁₀ : 232.8 $\times \frac{1}{4}$
計 : 130.65	計 : 63.9

となる (ただし、He には Penning 効果があるため、実際にはこれよりは種を出すと考えられる)。そこでこのことが検出効率にどの程度影響するか実際に測定し、比較した。

2. $CBrF_3$ はオゾン層破壊の原因となるために製造が中止されたため、その代わりとなる gas を探す。

$CBrF_3$ は Magic Gas の中で drift 中の電子を捕獲することで cluster size や cluster の数を小さくするために用いられる。目安としては、

電子を捕獲して陰イオンになりやすい、電気陰性度の大きな原子を含む gas を探す必要がある。

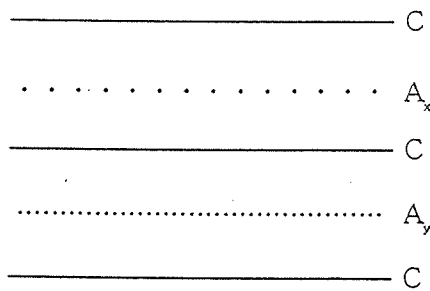
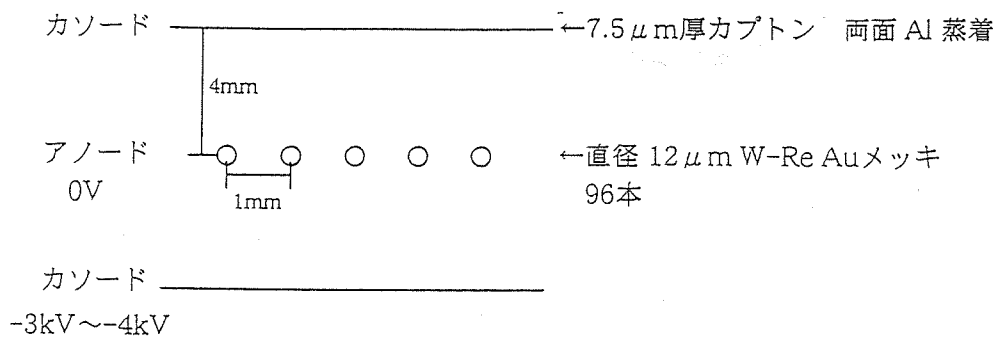
第2章 実験装置

2.1 MWPC

今回の実験に用いた MWPC の概要は次のようなものである。

- 有効領域 96mm × 96mm
- カソード 7.5 μm 厚カプトン 両面 Al 蒸着
- アノード 直径 12 μm W-Re Au メッキ
- アノード間隔 1mm
- アノード-カソード間隔 4mm

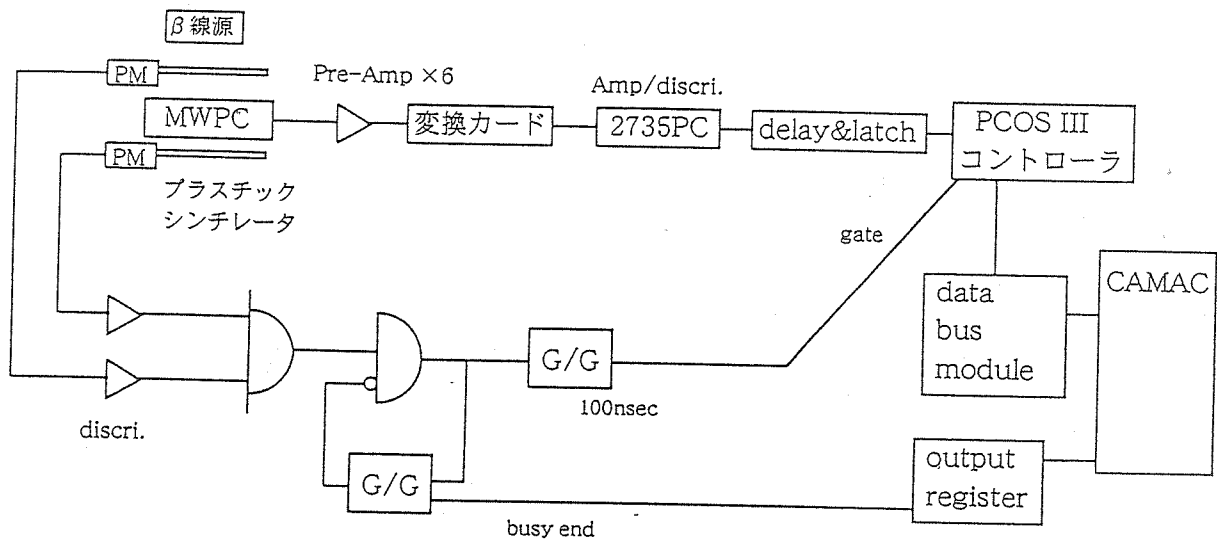
この模式図を次のページに示す。



実際には左のような2層に
なっているが、今回の実験では
片方のアノード (A_x) の信号
のみを測定した。

2.2 回路

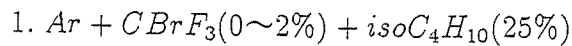
今回の実験の回路は以下のように組んだ。2つのシンチレータでほぼ同時に観測された信号で gate をかけて、その時に MWPC で検出された信号を読み取る。



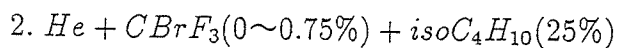
第3章 測定内容

以下の各条件での検出効率とその時の cluster の数とその割合、信号を検出したワイヤーの数とその割合を測定した。また、ガスの混合には Mass flow controller を用いた。

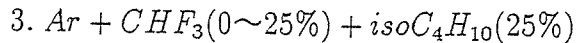
今回の実験では $isoC_4H_{10}$ の割合は全て 25% で固定した。



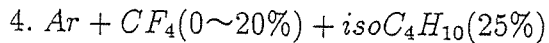
Ar と $Ar + CBrF_3(3\%)$ と $isoC_4H_{10}$ を配管途中で合流させる。



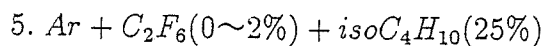
He と $He + CBrF_3(1\%)$ と $isoC_4H_{10}$ を配管途中で合流させる。



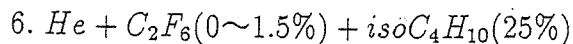
Ar と CHF_3 と $isoC_4H_{10}$ を配管途中で合流させる。



Ar と CF_4 と $isoC_4H_{10}$ を配管途中で合流させる。



Ar と C_2F_6 と $isoC_4H_{10}$ を配管途中で合流させる。



He と C_2F_6 と $isoC_4H_{10}$ を配管途中で合流させる。

第4章 実験の準備

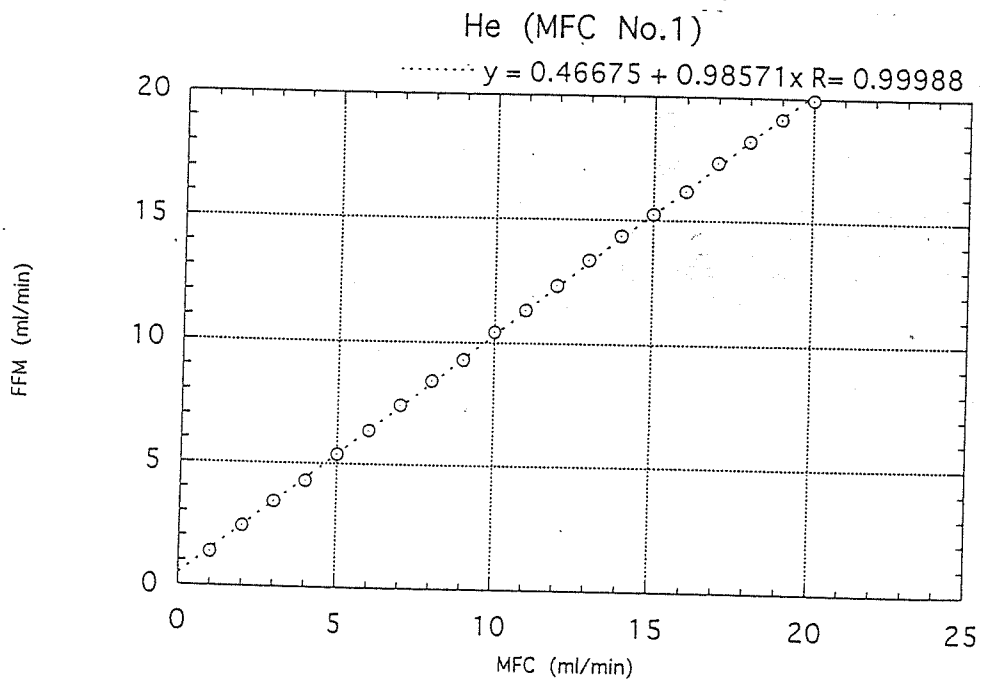
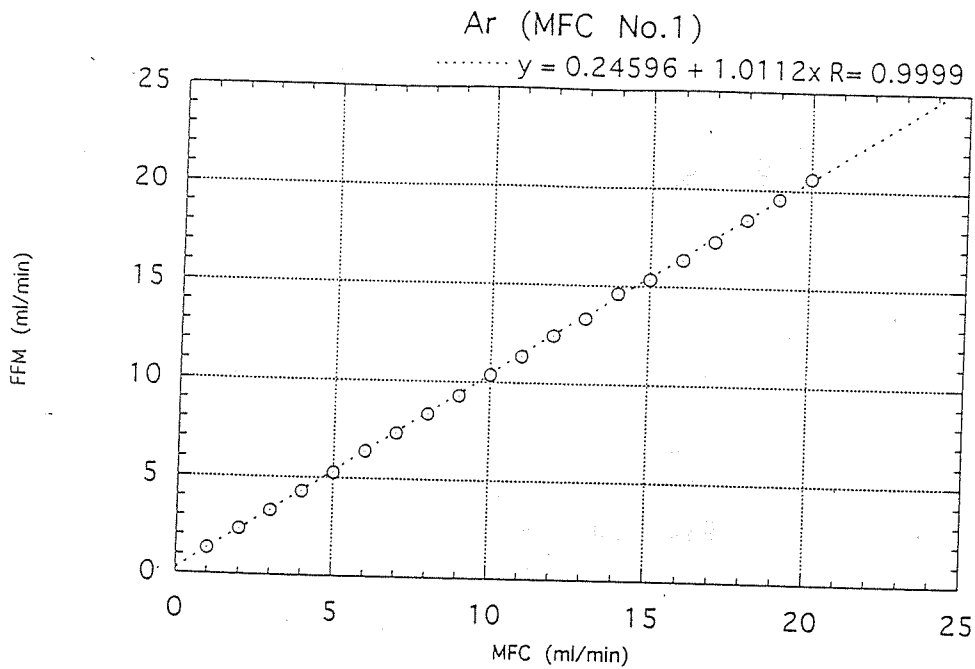
4.1 流量計の更正

まず今回の実験では、始めに gas の混合の際に重要になる流量計の更正を行なった。今回の実験では gas の混合に Mass flow controller (MFC) を用いた。これをより信頼性の高い Film flow meter (FFM) で更正することにした。

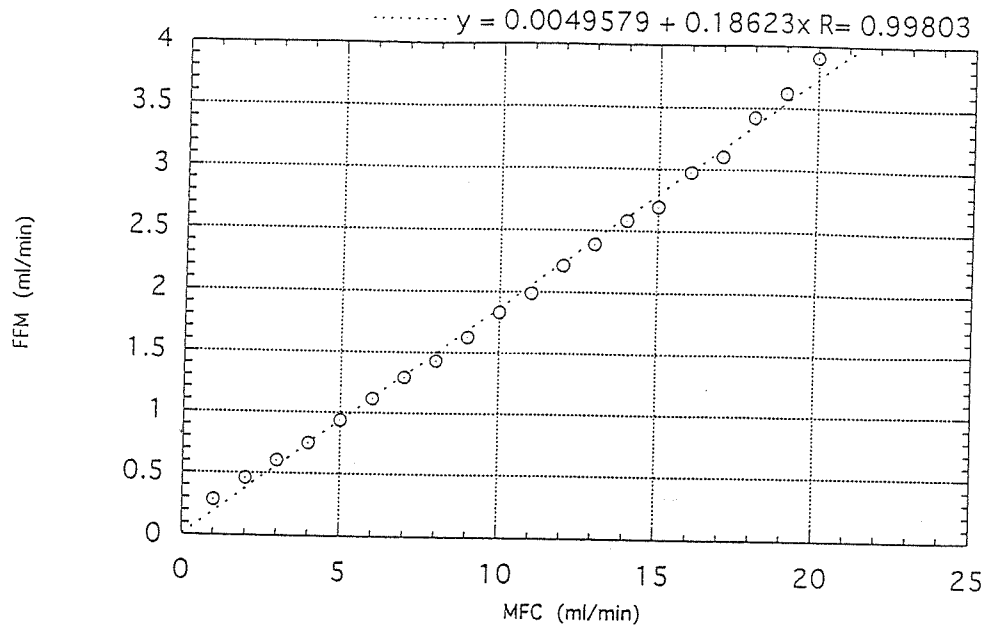
今回用いた MFC の概要は次のようなものである。

No.	更正 gas	最大流量 (CCM)
1	Ar	20
2	Ar	20
3	Ar	20
4	Ar	20
5	Ar	20
6	N ₂	50
7	N ₂	1

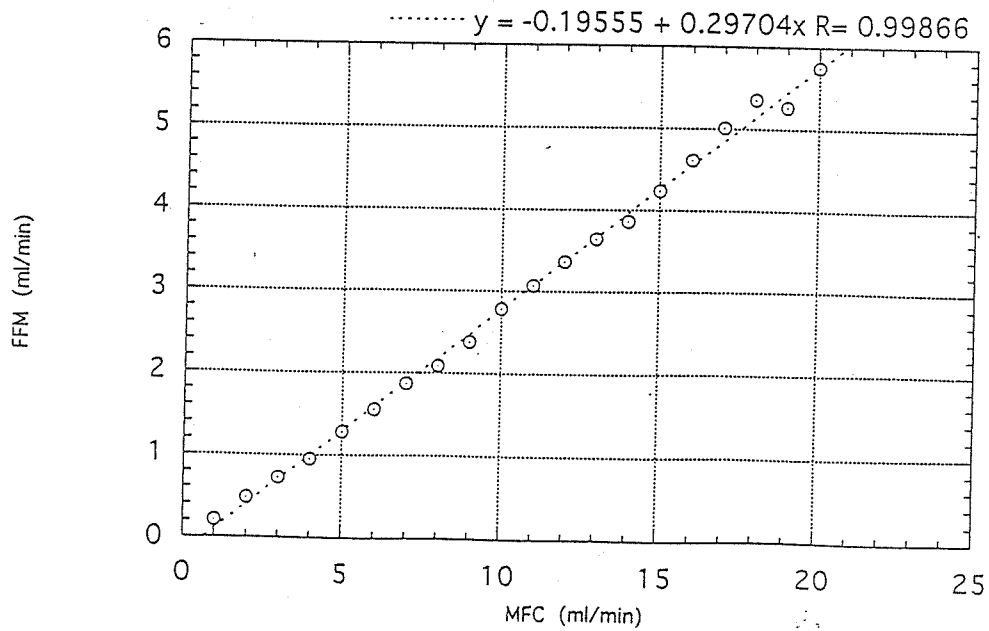
これらの MFC の更正曲線を次のページからグラフで示す。



iso C₄H₁₀ (MFC No.2)

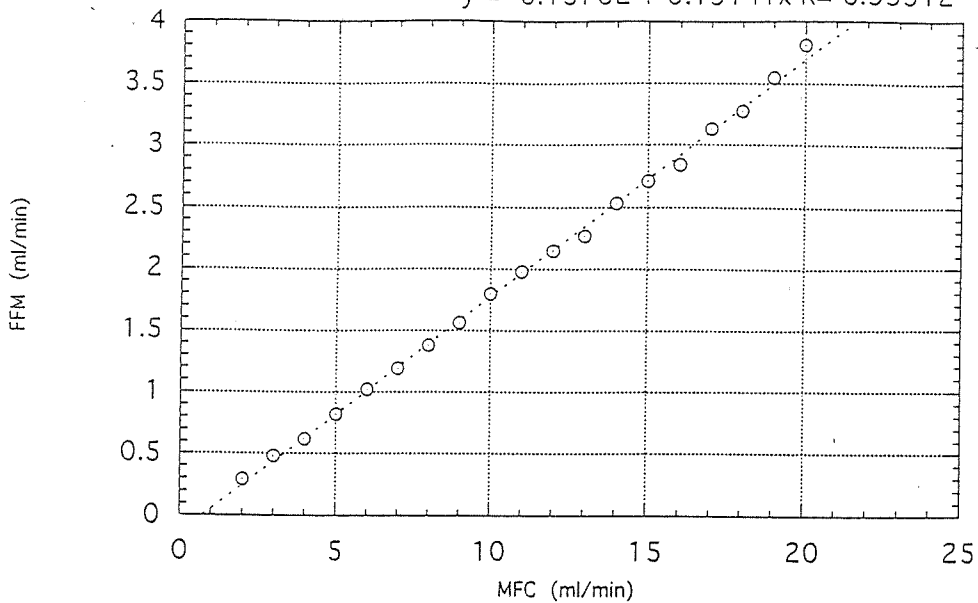


iso C₄H₁₀ (MFC No.4)



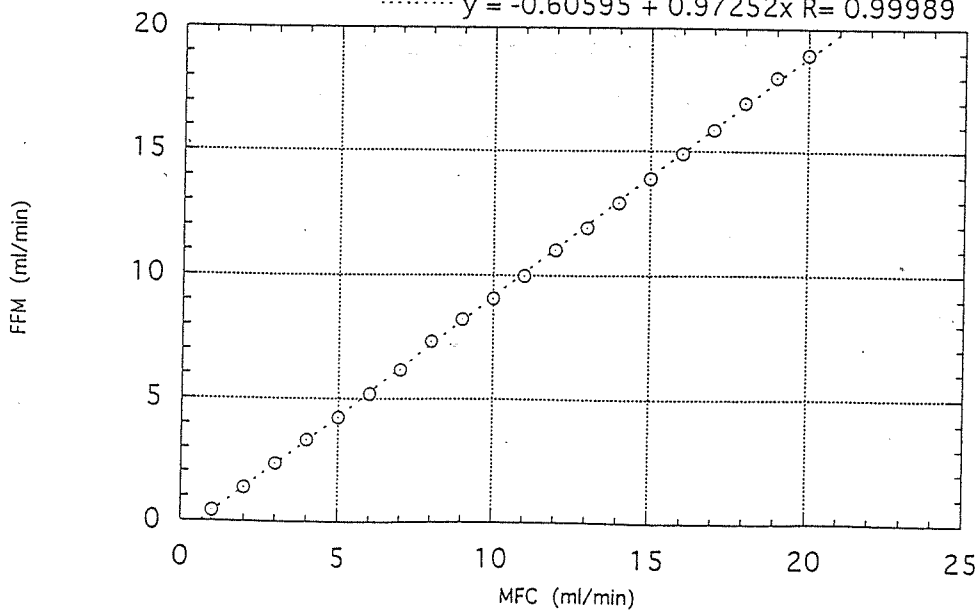
iso C₄H₁₀ (MFC No.5)

..... $y = -0.13782 + 0.19141x$ R= 0.99912

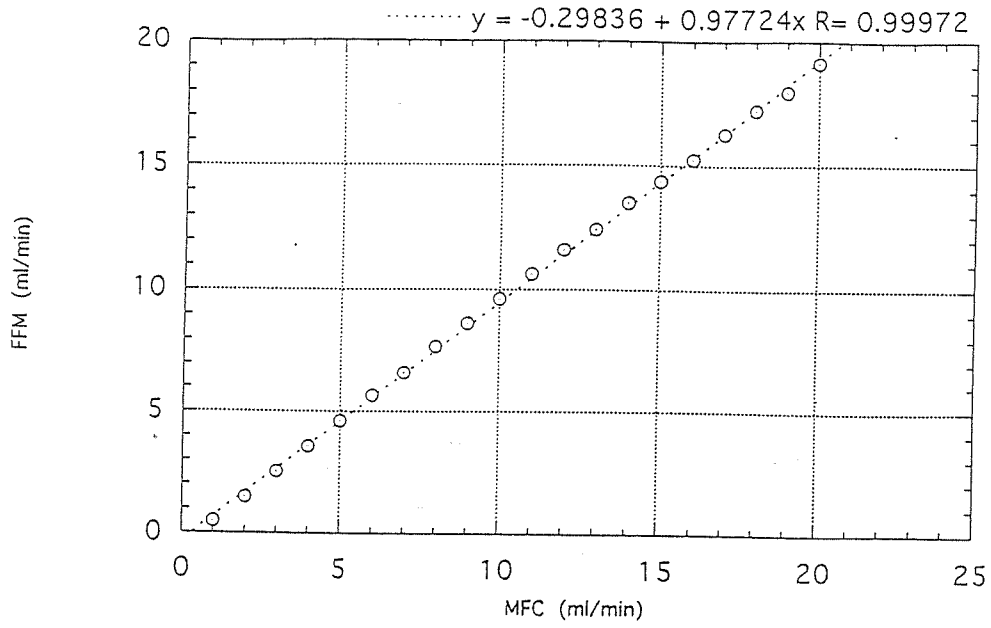


Ar+CBrF₃ (3%) (MFC No.3)

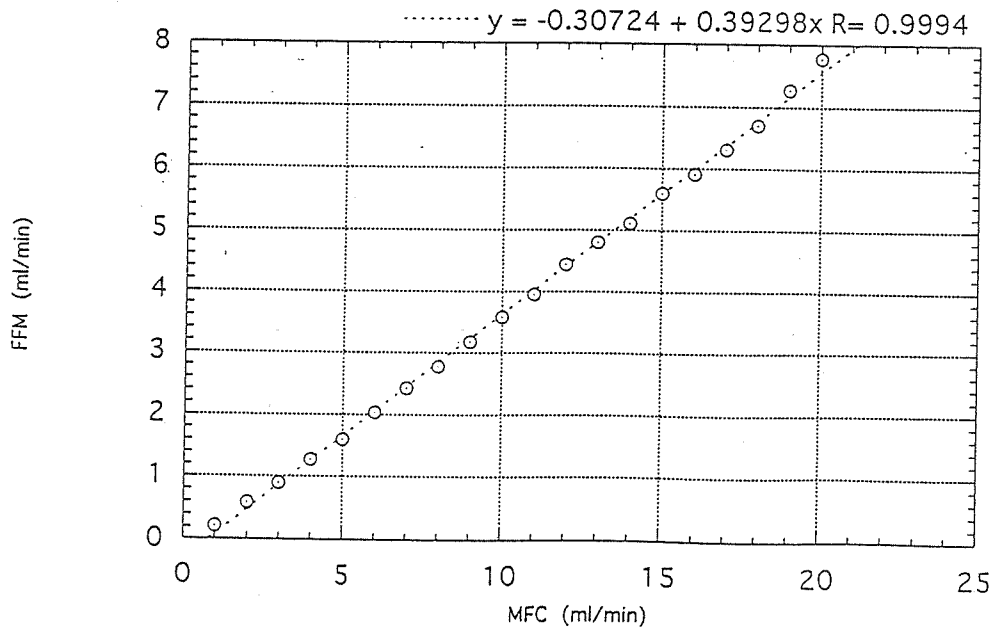
..... $y = -0.60595 + 0.97252x$ R= 0.99989



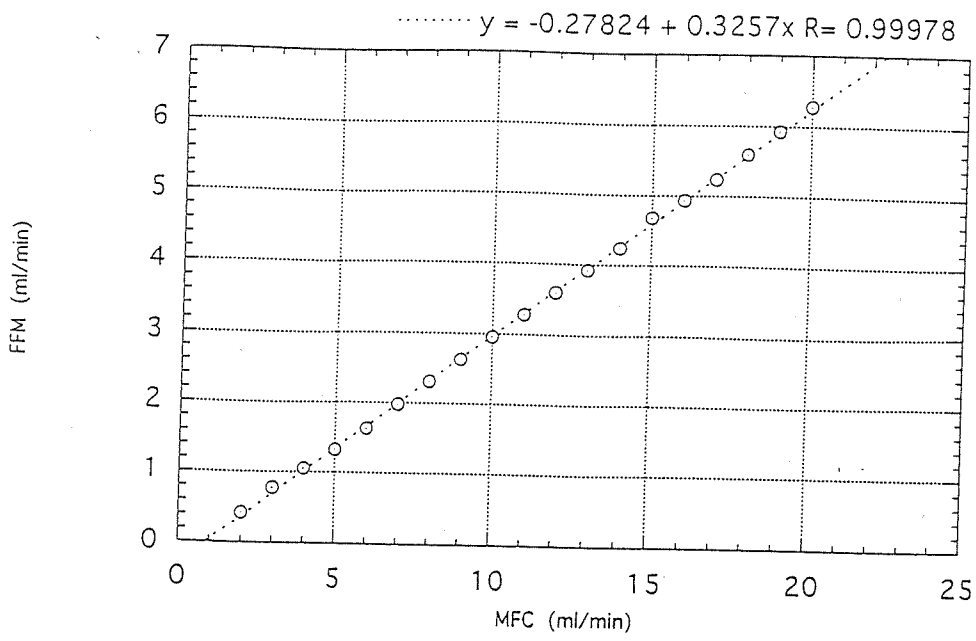
He+CBrF₃ (1%) (MFC No.3)



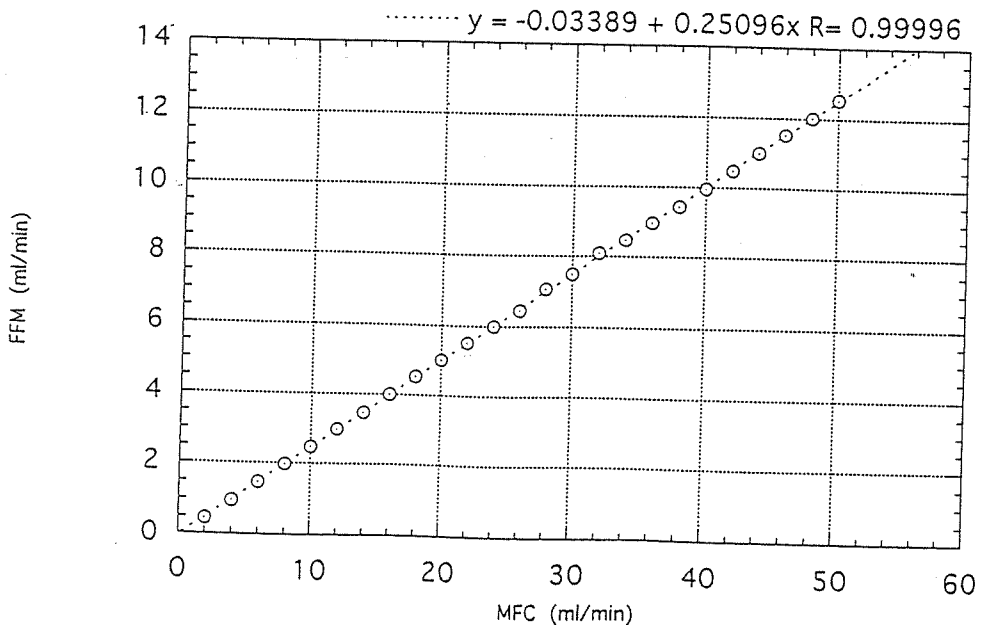
CHF₃ (MFC No.3)



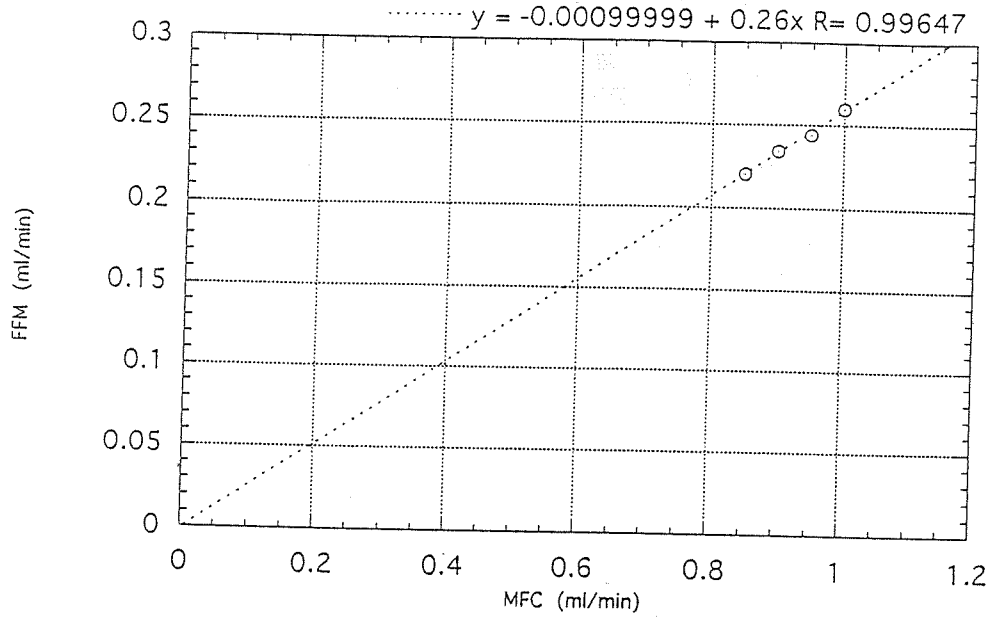
CF₄ (MFC No.3)



isoC₄H₁₀ (MFC No.6)



C₂F₆ (MFC No.7)



MFC を用いた場合の実流量は

$$\text{実流量} = \text{表示流量} \times \frac{\text{実 gas のコンバージョンファクタ}}{\text{更正 gas のコンバージョンファクタ}}$$

になる。主な gas のコンバージョンファクタは次の通り。

gas	コンバージョンファクタ
Ar	1.40
He	1.40
isoC ₄ H ₁₀	0.26
CBrF ₃	0.37
CHF ₃	0.52
CF ₄	0.45
C ₂ F ₆	0.25

この計算による流量と、実際に測定した流量とのずれの大きい No.4 の MFC の使用を止め、他の 6 つの MFC を採用することにした。

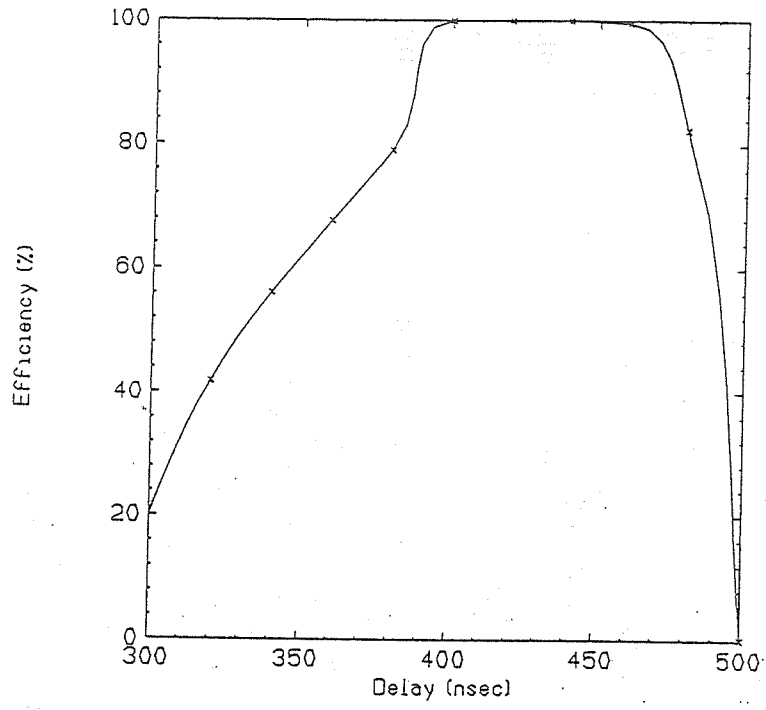
4.2 Delay の調整

今回の実験では、2 つのシンチレータでほぼ同時に信号が検出された時に gate をかけてその時に MWPC で検出した信号を読み取りたい。そこで回路での信号の遅れを調節する必要がある。

HV=4000V、Ar + CBrF₃(0.5%) の時に、delay を変えて検出効率を測定したグラフを次のページに示す。

これにより最適な delay の値は 440 nsec と判断し、以後この値で固定して実験を行った。

Delay 曲線



第5章 実験結果と考察

5.1 $Ar + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$

$Ar + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$ で測定した時の電圧特性と、 $CBrF_3$ の割合と到達効率の関係を示したグラフを次のページに示す。

まず電圧効率のグラフを見ると、 $CBrF_3$ の量が増えるにしたがって plateau 電圧が大きくなることが分かる。また、到達効率のグラフを見ると、 $CBrF_3$ の量が増えるにしたがってトータルの検出効率は落ちるが、cluster size は小さくなる事が分かる。

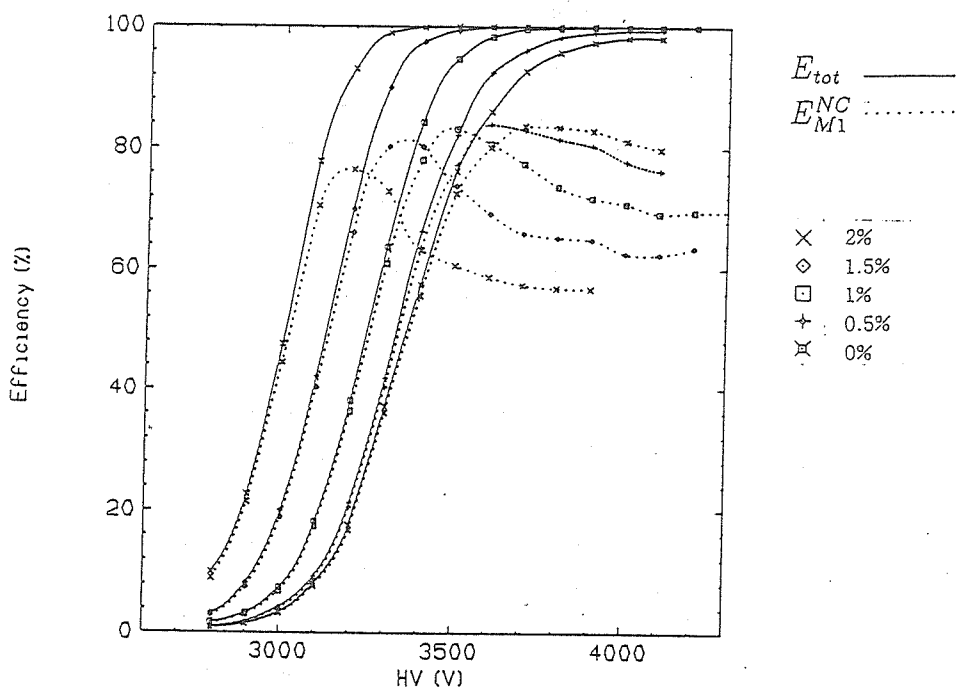
この実験では Ar の割合はほとんど変化していないことから、これらの変化は主に $CBrF_3$ によって drift 中の電子の平均自由行程が短くなったことによるものであると考えられる。

また、1mm MWPC に関しては今まで使っていた $CBrF_3$ 0.5% でほぼ問題ないことも確認できたので、以後他の gas との比較の際にはこれを基準にして考えることにする。

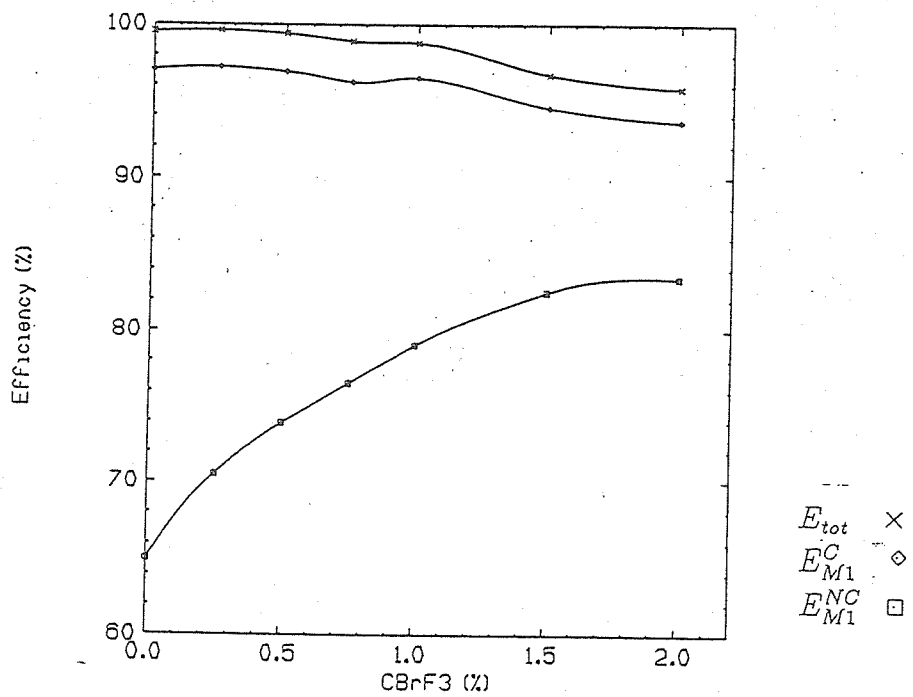
グラフの凡例の見方

E_{tot}	total の検出効率
E_{M1}^{NC}	wire 1 本で信号が検出された割合
E_{M1}^C	cluster 1 つで信号が検出された割合

Ar + CBrF₃ の時の電圧特性



CBrF₃ の割合と到達効率



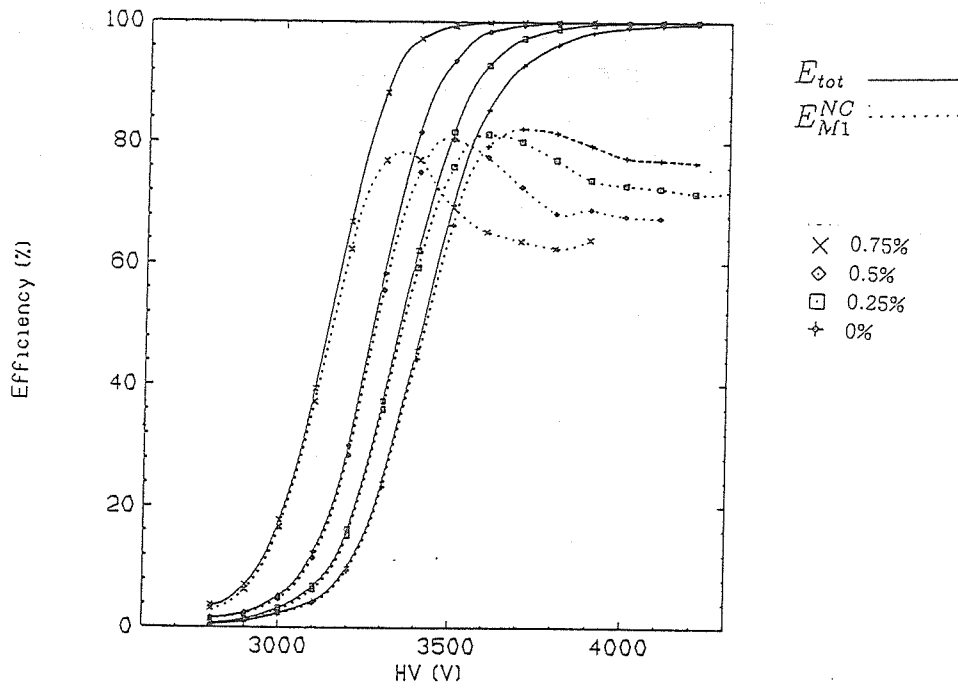
5.2 $He + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$

$He + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$ で測定した時の電圧特性と、 $CBrF_3$ の割合と到達効率の関係を示したグラフを次のページに示す。

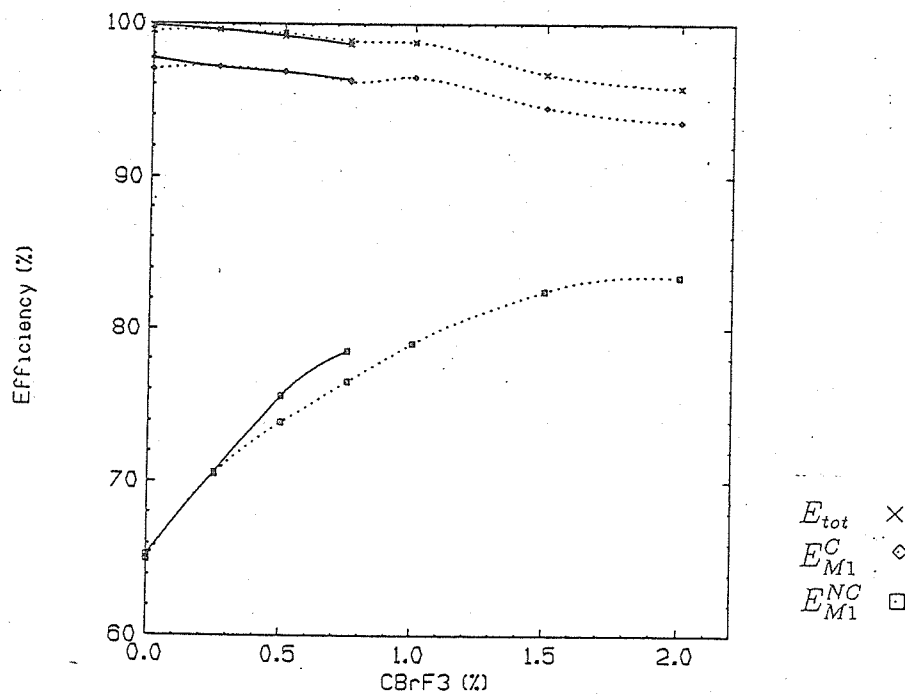
まず電圧効率のグラフを見ると、 $CBrF_3$ の量が増えるにしたがって plateau 電圧が大きくなる事が分かる。また、到達効率のグラフを見ると、 $CBrF_3$ の量が増えるにしたがってトータルの検出効率は落ちるが、cluster size は小さくなる事が分かる。そしてトータルの検出効率も cluster size も Ar-base の時とほとんど変わらない事が分かる。

この結果により、Ar を He に替えても $CBrF_3$ の働きには変化がない事が分かる。

He + CBrF₃ の時の電圧特性



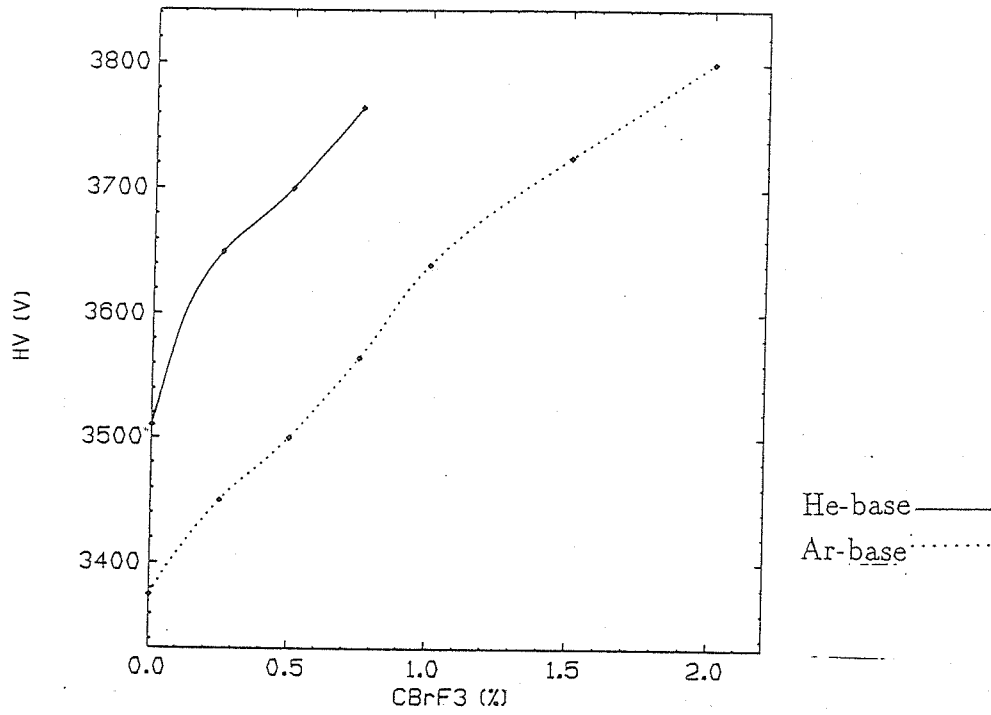
CBrF₃ の割合と到達効率 (比較: Ar + CBrF₃)



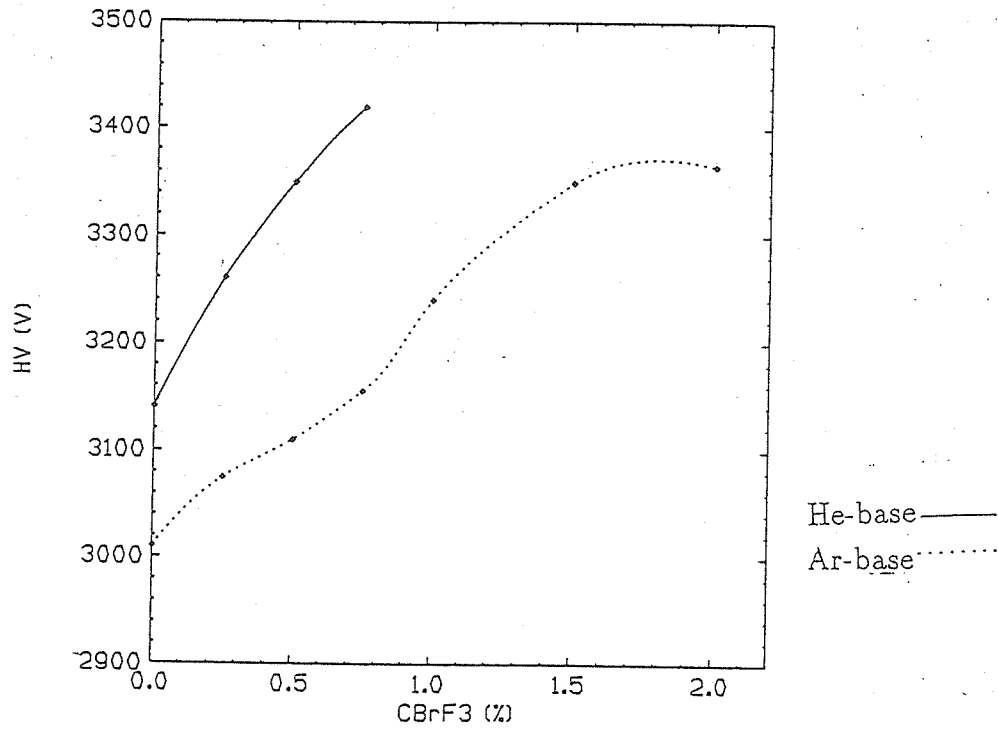
He-base の時と Ar-base の時の plateau 電圧の比較グラフと、検出効率 = 50% の時の電圧の比較のグラフを次のページに示す。

この 2 つのグラフから、He-base にすると Ar-base の時よりも約 200 ~ 250V だけ大きな電圧が必要となることが分かる。これは gain を 2 倍にするために必要な電圧が約 200V であることを考えると、Ar-base から He-base に替えると種の数が $\frac{1}{2}$ となるということでこの変化に対する説明がつく。

He-base の時と Ar-base の時の plateau 電圧の比較



He-base の時と Ar-base の時の検出効率 = 50% の時の電圧の比較



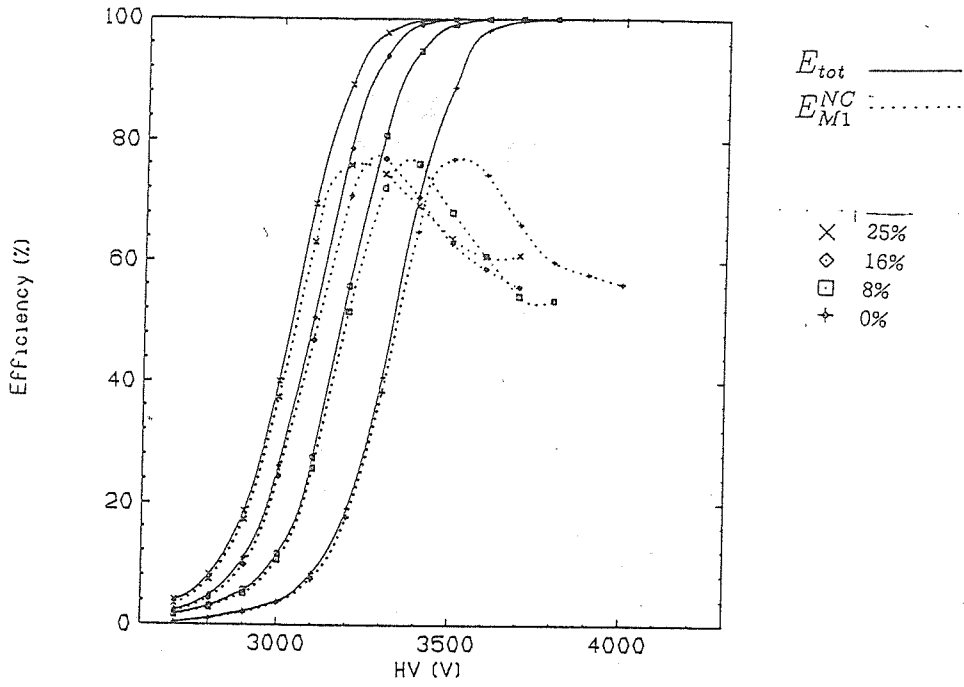
5.3 $Ar + CHF_3 + isoC_4H_{10}$

$Ar + CHF_3 + isoC_4H_{10}$ で測定した時の電圧特性と、 CHF_3 の割合と到達効率の関係を示したグラフを次のページに示す。

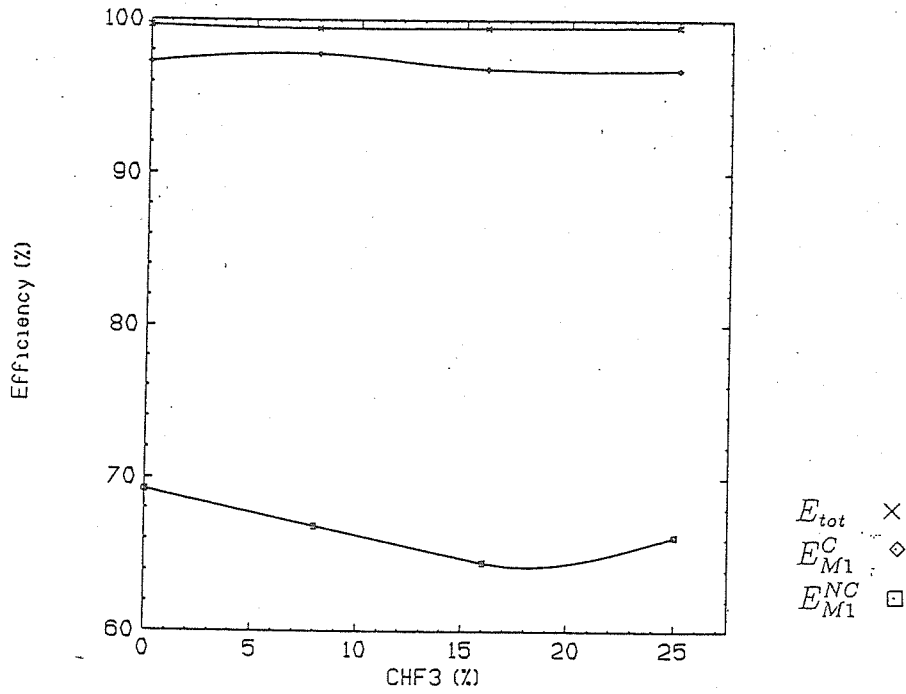
まず電圧効率のグラフを見ると、 CHF_3 の量が増えるにしたがって plateau 電圧が大きくなることが分かる。また、到達効率のグラフを見ると、 CHF_3 の量に関わらずトータルの検出効率は変化せず、cluster size も小さくならない事が分かる。

この実験では CHF_3 を混ぜる割合が大きいため、これらの変化は主に Ar の量が減ったことにより種の数が増ったことによるものと考えられる。

Ar + CHF₃ の時の電圧特性



CHF₃ の割合と到達効率



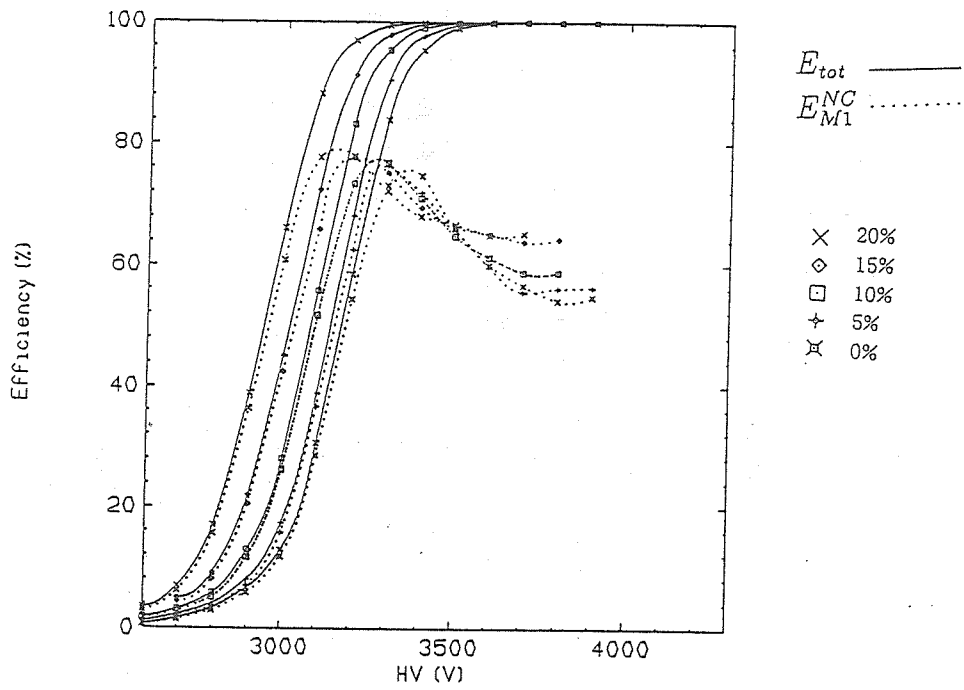
5.4 $Ar + CF_4 + isoC_4H_{10}$

$Ar + CF_4 + isoC_4H_{10}$ で測定した時の電圧特性と、 CF_4 の割合と到達効率の関係を示したグラフを次のページに示す。

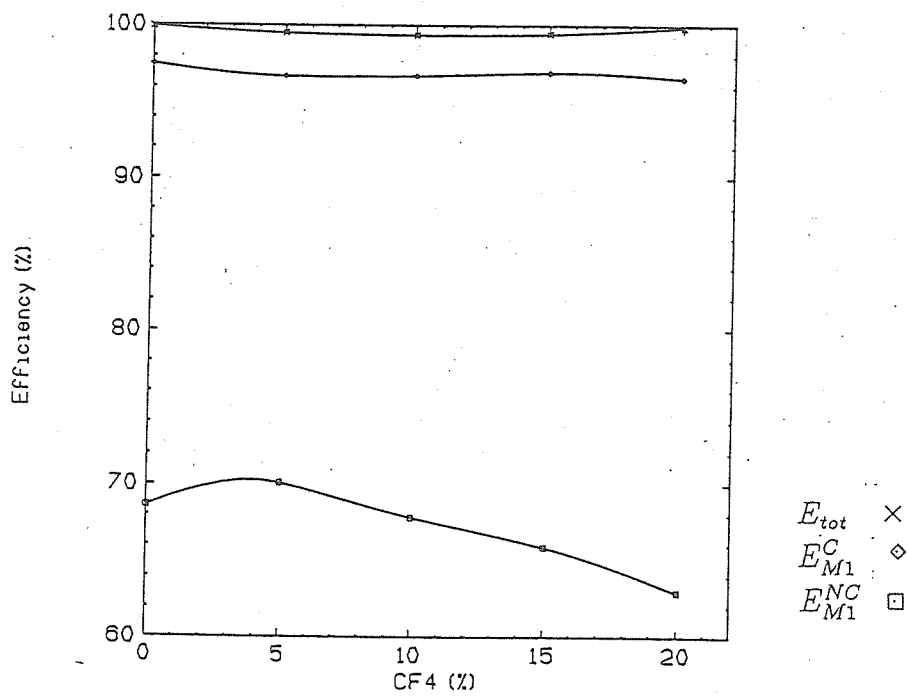
まず電圧効率のグラフを見ると、 CF_4 の量が増えるにしたがって plateau 電圧が大きくなることが分かる。また、到達効率のグラフを見ると、 CF_4 の量に関わらずトータルの検出効率は変化せず、cluster size も小さくならない事が分かる。

この実験では CF_4 を混ぜる割合が大きいため、これらの変化は主に Ar の量が減ったことにより種の数が増えたことによるものと考えられる。

Ar + CF₄ の時の電圧特性



CF₄ の割合と到達効率



5.5 $Ar + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$

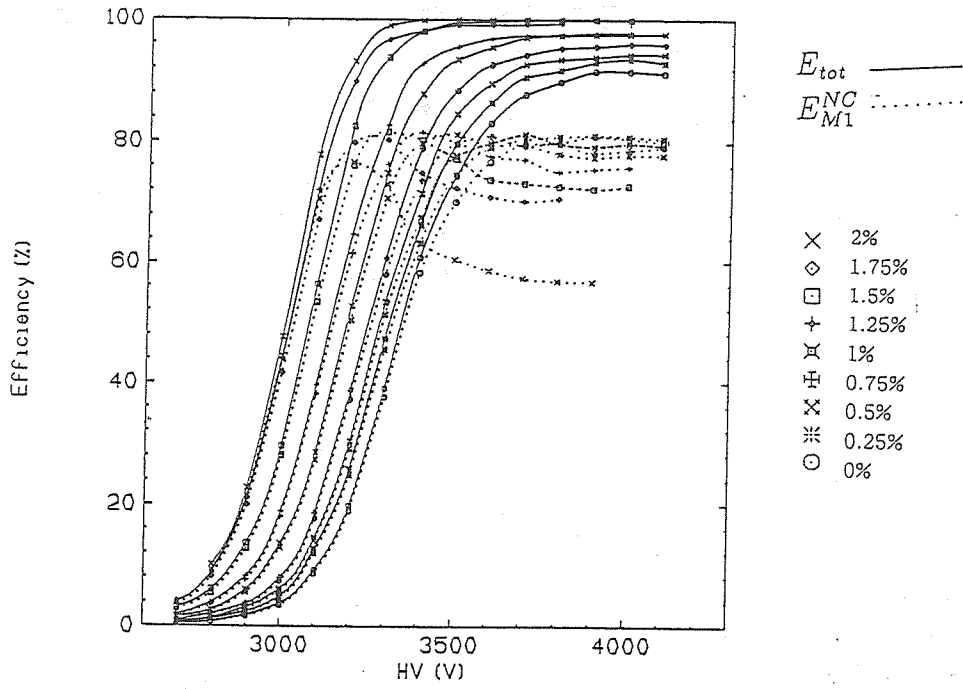
$Ar + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$ で測定した時の電圧特性と、 C_2F_6 の割合と到達効率の関係を示したグラフを次のページに示す。

まず電圧効率のグラフを見ると、 C_2F_6 の量が増えるにしたがって plateau 電圧が大きくなることが分かる。また、到達効率のグラフを見ると、 C_2F_6 の量が増えるにしたがってトータルを検出効率は落ちるが、cluster size は小さくなる事が分かる。

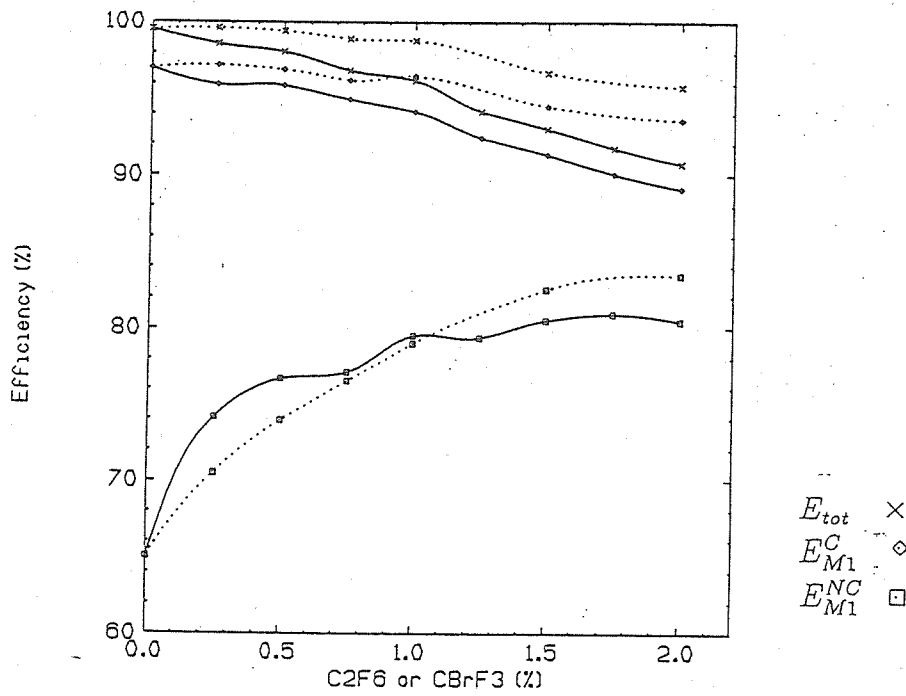
この実験では Ar の割合はほとんど変化していないことから、これらの変化は主に C_2F_6 によって drift 中の電子の平均自由行程が短くなったことによるものであると考えられる。

さらにその検出効率の落ち込みは $CBrF_3$ の時に比べて大きくなっていることが分かる。これより平均自由行程は $CBrF_3$ の時に比べてさらに短くなっていると考えられる。そしてこの gas を $CBrF_3$ 0.5% の時と同じ条件で使用するためには、 C_2F_6 を約 0.2% で用いるのが適当であることがこの実験から分かる。

Ar + C₂F₆ の時の電圧特性



C₂F₆ の割合と到達効率 (比較: Ar + CBrF₃)



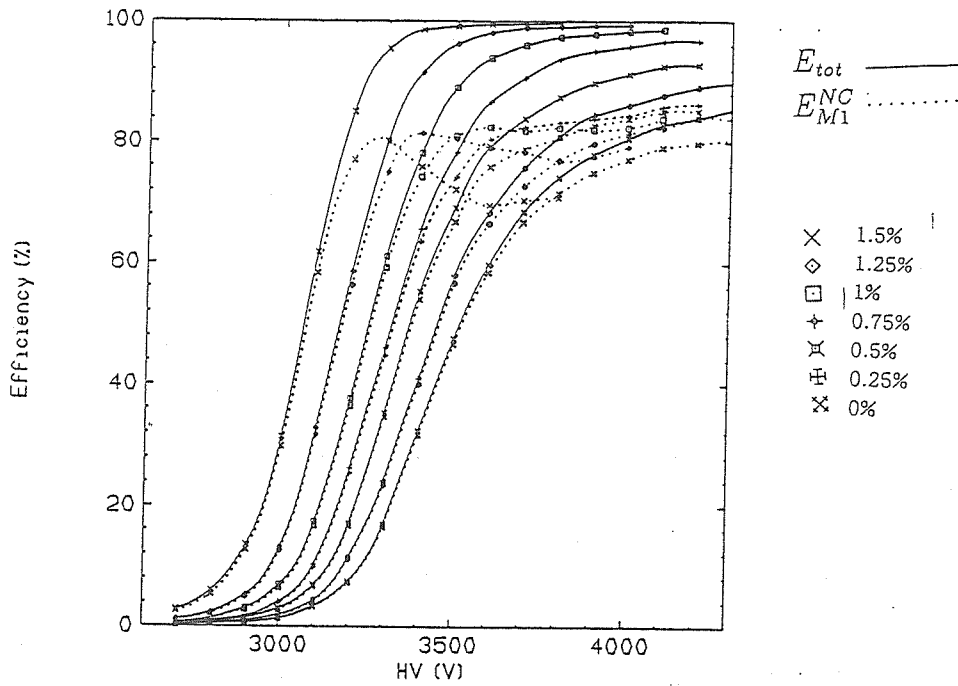
5.6 $He + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$

$He + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$ で測定した時の電圧特性と、 C_2F_6 の割合と到達効率の関係を示したグラフを次のページに示す。

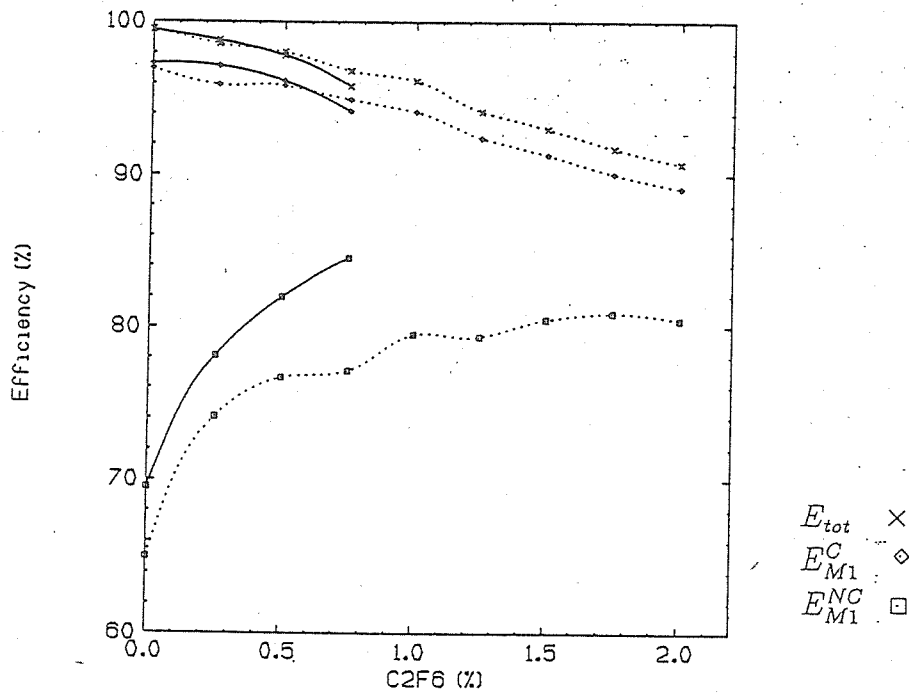
まず電圧効率のグラフを見ると、 C_2F_6 の量が増えるにしたがって plateau 電圧が大きくなることが分かる。また、到達効率のグラフを見ると、 C_2F_6 の量が増えるにしたがってトータルの検出効率は落ちるが、cluster size は小さくなる事が分かる。そして cluster size は $Ar + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$ の時よりも少し小さくなるが、トータルの検出効率は $Ar + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$ の時とほとんど変わらない事が分かる。

この結果により、 Ar を He に替えても C_2F_6 の働きには大きな変化がないことが分かる。

He + C₂F₆ の時の電圧特性



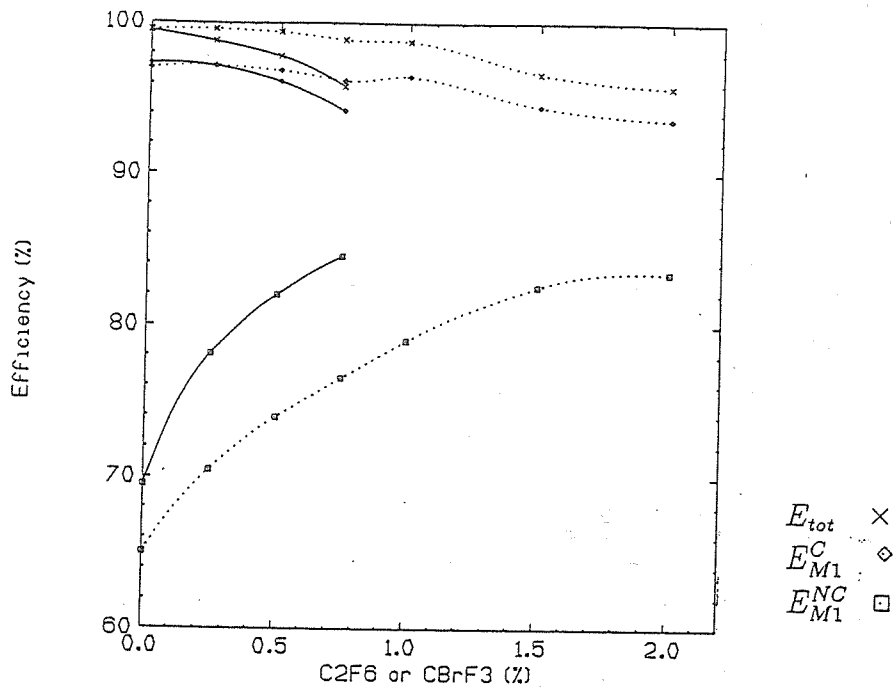
C₂F₆ の割合と到達効率 (比較: Ar + C₂F₆)



次に $Ar + CBrF_3$ の時と比較した到達効率のグラフを下に示す。

この gas を $Ar + CBrF_3 0.5\%$ の時と同じ条件で使用するためには、 $Ar + C_2F_6$ の時と同様に、 C_2F_6 を約 0.2% で用いるのが適当であることがこの実験から分かる。

C_2F_6 の割合と到達効率 (比較: $Ar + CBrF_3$)



第6章 まとめ

今回の実験で分かったことは以下の通りである。

1. $Ar + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$ について
 $CBrF_3$ の量が増えるにしたがって plateau 電圧は大きくなり、トータルの検出効率は落ちるが、cluster size は小さくなる。また、1mm MWPC に関しては、今まで使っていた $CBrF_3$ 0.5% でほぼ問題ない。
2. He-base と Ar-base の比較について
トータルの検出効率も cluster size もほとんど変わらない。
plateau 電圧は約 250V(0.5%混ぜた時) 大きくなる。これは、種の数の比が約 $\frac{1}{2}$ であることと、gain を 2 倍にするための電圧が約 200V であることからほぼ説明がつく。
3. $Ar + CHF_3 + isoC_4H_{10}$ について
 CHF_3 を増やすと plateau 電圧は大きくなるが、検出効率には影響を与えない。また、cluster size も小さくならない。
4. $Ar + CF_4 + isoC_4H_{10}$ について
 CF_4 を増やすと plateau 電圧は大きくなるが、検出効率には影響を与えない。また、cluster size も小さくならない。
5. $Ar + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$ について
 C_2F_6 を増やすと $CBrF_3$ の時に比べて検出効率の落ち込みが大きくなる。しかし cluster size は小さくなり、約 0.2% の C_2F_6 を用いると今までの Magic gas $Ar + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$ とほぼ同じ条件で使える。

6. $He + C_2F_6 + isoC_4H_{10}$ について

Ar-base の時と同様に C_2F_6 を増やすと $CBrF_3$ の時に比べて検出効率の落ち込みが大きくなり、約0.2%の C_2F_6 を用いると今までの Magic gas $Ar + CBrF_3 + isoC_4H_{10}$ とほぼ同じ条件で使える。

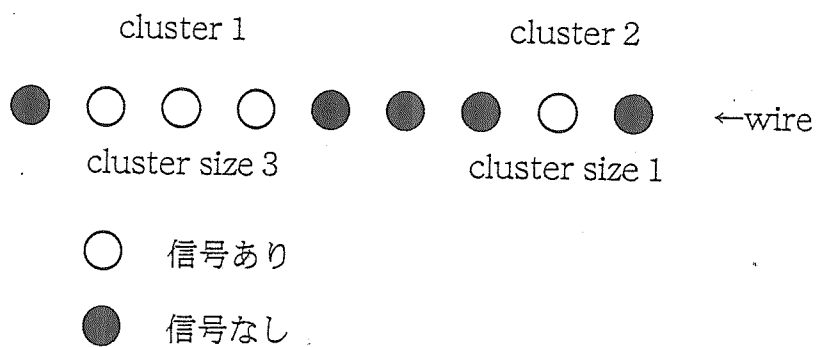
第7章 今後の課題

今回の実験で用いた MWPC では He-base で C_2F_6 を用いて実験を行なうメドがたったと思うが、 $CBrF_3$ や C_2F_6 を用いた時の電子の平均自由行程を見積もることまではできなかった。また、 CHF_3 や CF_4 ではどうしていけなかったのかもよく分からないままとなってしまった。この2点が今後の大きな課題である。

付録A

A.1 cluster について

cluster とは、隣合う連続した wire で信号が検出された時に、その一続きのかたまりのことを指す。図に示すと以下のようなになる。また、cluster size とは、この cluster の大きさのことである。



この図の場合、信号を検出した wire は 4 本、cluster は 2 個となる。

A.2 参考文献

1. W.R.Leo Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
2. Sitar et al. Ionization Measurements in High Energy Physics

