

# 低圧 MWPC の開発

東北大学 理学部 物理学科  
素粒子・原子核物理学講座  
原子核物理 大関和貴

# 目次

1. 目的 .....	3
2. 原理 .....	5
2.1. MWPC とは .....	5
2.2. Magic gas とは .....	6
2.3. efficiency とは .....	7
3. 実験装置 .....	8
3.1. 測定回路 .....	8
3.2. MWPC について .....	9
4. 圧力の固定 .....	10
5. 測定 .....	12
5.1. 測定の概要 .....	12
5.2. Pulse height の測定 .....	13
5.3. Delay curve の測定 .....	15
5.4. 1atm .....	16
5.5. 0.5atm .....	17
5.6. 0.25atm .....	18
5.7. i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 100% .....	20
6. まとめ .....	21

## 1. 目的

図1の2次ビームラインにおいて2次ビームの運動量を求めたい。F2とF3の間のTOF(time of flight: 飛空時間)を測定することによって得られる運動量の誤差は $\sigma^P/P \sim 0.5\%$ である。

これに対し、二重極磁場を用いて運動量に応じて2次ビームを分け、その位置をF1で測定することによって得られる運動量の誤差ははるかに小さくなる。このビームラインでは $\sim 25\text{mm}/\%$ という分解能を得られるため、1mmの精度で2次ビームの位置を測定すれば $\sigma^P/P \sim \frac{1}{25}\%$ という高い精度が期待できる。

ここではF1にMWPC(Multi-wire proportional chamber)を置いてビームラインの位置を測定することとした。

1気圧のMWPCを入れると、気圧差に耐えるためにfoilも $\sim 100\mu\text{m}$ と厚くしなければならないので、多重散乱を減らすためにもMWPCを低圧で動かしたい。1気圧のMWPCを入れた際の $L/L_R$ の値を下に示す。

低圧にすると実効ドリフト電界が強くなるためdrift timeが短くなることが予想され、計数率が高くなることも期待できる。

あまり圧力を低くすると、平行平板型なだれ計数管として動作してしまうので、0.2気圧程度の圧力で動かしたい。

そのためにMagic gasの混合比等を新たに最適化する。

1気圧の場合	$L/L_R$
ワイヤ+カソード( $\times 3$ ) + window( $7.5\mu\text{m} \times 2$ )	$1.28 \times 10^{-4}$
Gas(1atm Ar75% C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 25%)	$3.24 \times 10^{-4}$
真空用 window( $125\mu\text{m} \times 2$ )	$5.83 \times 10^{-4}$

真空用 window が最も厚い

HIMAC Secondary Beam Line

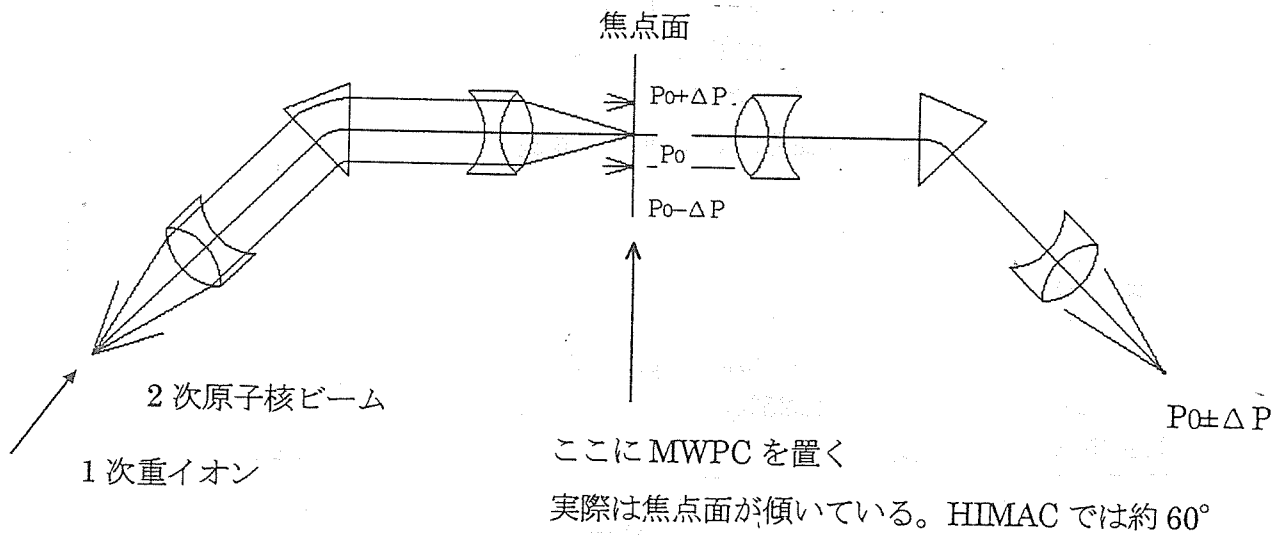
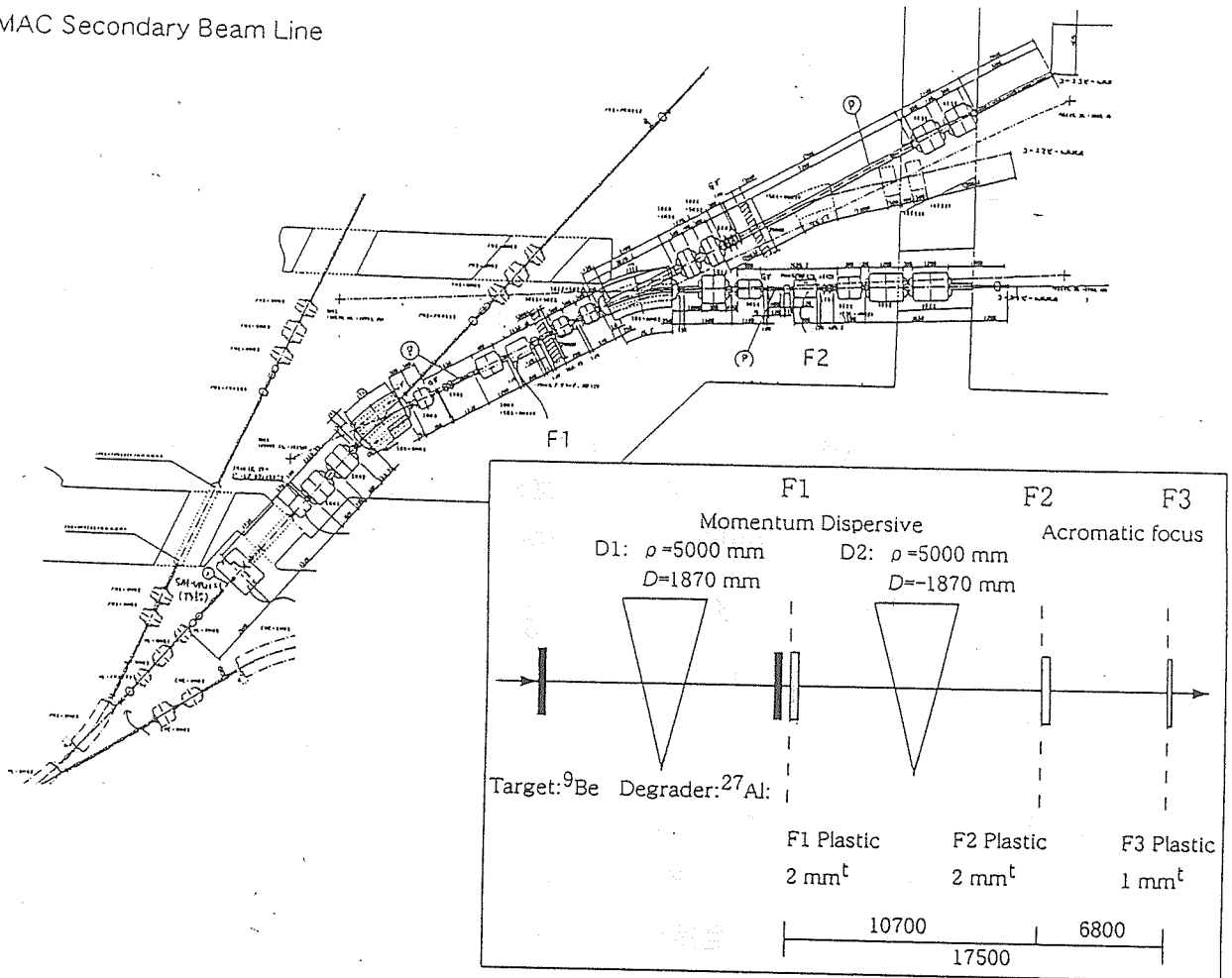


図1. ビームライン

## 2. 原理

### 2.1. MWPC とは

粒子の位置情報を得るのに用いられるのが MWPC である。MWPC は図 2 のような、2 枚のカソード間に等間隔に置かれたワイヤーを挟んだ構造を持つ。

カソード面に負の電圧をかけると、カソード面とアノードの間に図 3 に表されるような電場が生ずる。電場の強さはワイヤ近くの領域ではワイヤからの距離  $r$  に反比例し、それ以外の領域では一定となる。

MWPC に外部から粒子が入射すると MWPC 内の気体が電離される。電子が放出され、電場が一定の領域では電気力線に沿って最も近くのアノードへと流れていく。電場の強い領域までくると、電子は更に加速され、他の気体分子をイオン化できるほどまでエネルギーが増加し、次々と電子が生じていく。この現象が電子雪崩と呼ばれるものである。

こうして電子は増幅されていき、最終的にアノードワイヤに到達する。その信号を見ることで粒子の通過位置を知るものである。

アノード面を垂直に 2 面張ることで 2 次元座標における位置情報が得られる。更にそれを数層重ねることで粒子の飛跡を知ることができるようになる。

図 2. MWPC の基本構造

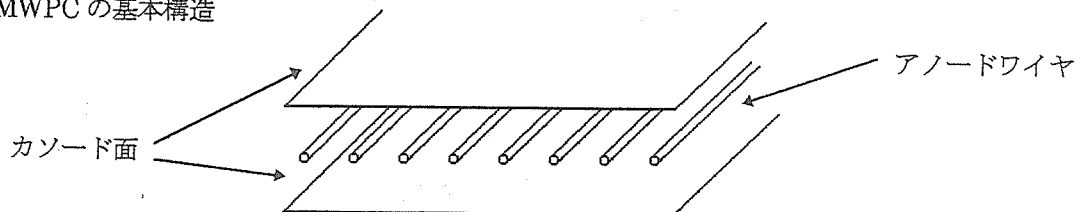
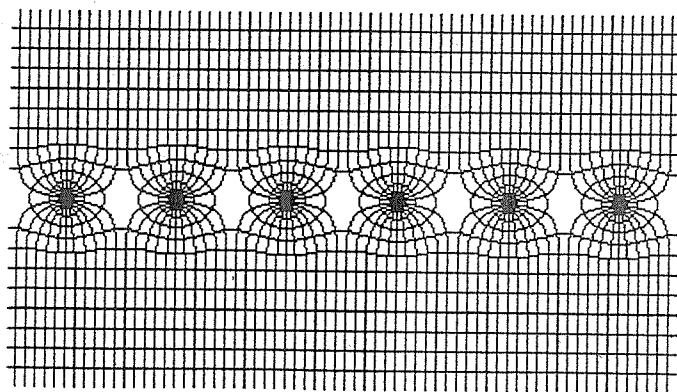


図 3. MWPC 内の  
等電位線と電気力線



## 2.2. Magic gas とは

電子雪崩はあらゆる気体で発生するので、どのような気体を使ってもさしつかえない。もともと、実際には低い電圧で動作すること、高いゲインが得られること等の要求から使用される気体が絞られてくる。

### ① Ar

電子雪崩は、複雑な分子よりも希ガスにおいて低電圧で発生する。これは多原子分子ではイオン化する以外にもエネルギーを吸収してしまうからである。

希ガスの中では値段的な要因から Ar が用いられることが多いのだが、Ar のみでは $10^3 \sim 10^4$ を超えるゲインを得られない。Ar はイオン化と同時に励起され、それが脱励起する際に放射される光子が光電効果によってカソードから電子を叩き出してしまふ。これによって新たな雪崩が際限なく発生するようになってしまふからである。

### ② C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

特に4つ以上の原子を含む多原子分子を混入すると、ゲインを $10^6$ 以上に上げることができる。回転や振動などの放射に関与しない励起状態を多数持ち、非常に幅広いエネルギーの光子を吸収できるからであり、Ar 放出する光子のエネルギーもその範囲に含まれる。最もよく用いられるのは*i*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>である。

### ③ CBrF<sub>3</sub>

フレオンのような電氣的に陰性な気体を加えることにより、ガイガー・ミュラー放電を起こさずにゲインを高くすることができる。フレオンの中ではCBrF<sub>3</sub>が最もよく使われるものである。

電氣的に陰性な気体は光子を吸収するだけでなく、自由電子を捕えて陰イオンになる効果を持つ。電子捕獲の平均自由行程がアノード-カソード間の距離より短くなれば、カソードより放出された電子がアノードに到達する確率は非常に低くなり、ゲインを $10^7$ にまで上げることができる。

### 2.3. efficiency とは

Magic gas の最適な混合比を求める上で、efficiency という概念を導入する。efficiency は、MWPC が粒子の通過を検出した回数をトリガーの数で割った値として表され、粒子が通過した際にそれを検出したアノード面のワイヤの分布に応じ、

ワイヤ 1 本の efficiency ----- 粒子の通過をワイヤ 1 本で検出した場合

ワイヤ 2 本の efficiency ----- 粒子の通過をワイヤ 2 本で検出した場合

⋮

及び

クラスタ 1 つの efficiency ----- 粒子の通過をクラスタ 1 つで検出した場合

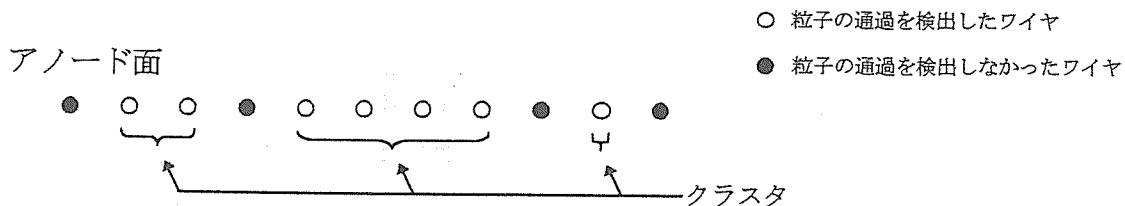
クラスタ 2 つの efficiency ----- 粒子の通過をクラスタ 2 つで検出した場合

⋮

という形に分類される。

クラスタとは、粒子の通過を検出したワイヤの集まりを指し、たとえ何本のワイヤで粒子の通過を検出しようとも、ワイヤ同士が互いに隣り合っていればそれはクラスタ 1 つと数える(下図参照)。

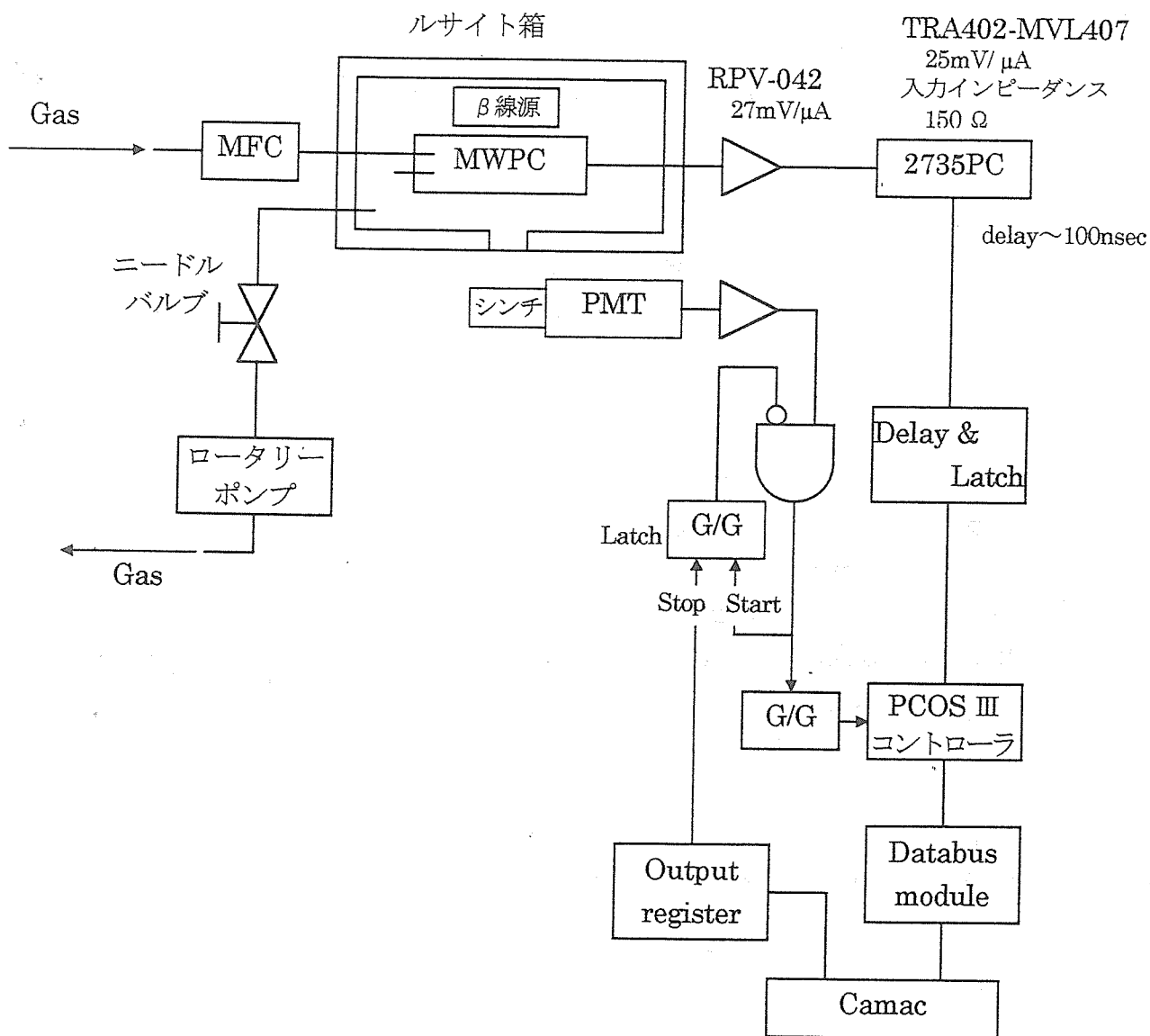
更に、これらの efficiency を全て足し合わせたものが、total の efficiency として表される。MWPC を用いる時は「total の efficiency は落とさずにワイヤ 1 本の efficiency を最大にする」ような Magic gas の混合比、MWPC の動作電圧であることが望まれる。



### 3. 実験装置

#### 3.1. 測定回路

測定回路を以下に示す。





MWPC を密閉したルサイト箱中に入れて低圧にする。混合ガスを引いてきてMFC (Mass flow controller : 流量計)によって流量を調節し、MWPC 内に流入させる。MWPC からはそのままルサイト箱内に流出させ、MWPC 内とルサイト箱内の圧力を等しくしている。ルサイト箱からロータリーポンプで排気をし、その排気量はニードルバルブで調節している。

シンチレータは当初、MWPC といっしょにルサイト箱に入れて低圧化で使う予定だったが、低圧にして電圧をかけると PMT(Photomultiplier tube : 光電子増倍管)の端子間で放電が起きてしまって使えないため、ルサイト箱から出して大気圧中で用いることとした。

### 3.2. MWPC について

MWPC の仕様は以下の通りである。

有効領域 96mm×48mm

アノード 間隔 2mm 直径 20 $\mu$ m Au-W-Re

カソード 12.5 $\mu$ m 厚両面 Cu-Cr 蒸着カプトン

運動量を求めるのが目的なので、1次元での座標がわかればよい。よってアノード面は1面でよいのだが、2次ビームラインで用いる際の効率を上げるためにアノード面を平行に2面取り付けている。今回の測定ではそのうちの1面のみを用いた。

#### 4. 圧力の固定

測定にあたって、まずルサイト箱内を望む圧力に固定する必要がある。以下にそのための理論的方法を述べる。

$N, P, S, V$  をそれぞれ粒子数、圧力、系の排気速度、系の体積とすると、理想的な真空の式は以下で与えられる。

$$\frac{dN}{dt} = -S \frac{N}{V}$$

実際には真空漏れ、さらにロータリーポンプの場合には油の蒸発等の要因が絡んでくる。これらの要因を一括して  $Q$  と置くと、

$$V \frac{dP}{dt} = -SP + Q$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{S}{V}P + \frac{Q}{V} = D(P) \dots\dots\dots ①$$

となる。この式を  $D(P)$  としたのは後の便宜のためである。

これを基に流入がある場合の圧力変化について考える。 $P_0, V_b, V_{in}$  をそれぞれ大気圧、ルサイト箱の容積、流入する気体の体積とすると、状態方程式より

$$P_0 V_{in} = NkT \longrightarrow dN = \frac{P_0}{kT} dV_{in} \dots\dots\dots ②$$

と表される。①を  $N$  の微分方程式に戻し、流入を表すための②の項を加えると

$$\frac{dN}{dt} = \frac{V_b}{kT} D\left(\frac{kT}{V_b} N\right) + \frac{P_0}{kT} \frac{dV_{in}}{dt}$$

という式が得られる。ここで  $\frac{dV_{in}}{dt}$  は単位時間における気体の流入量を表す。こ

の式を再び  $P$  の微分方程式に戻して

$$\frac{dP}{dt} = D(P) + \frac{P_0}{V_b} \frac{dV_{in}}{dt}$$

という、流入がある場合の圧力変化を表す微分方程式を得ることができる。

圧力が一定になるのは

$$\frac{dP}{dt} = 0$$

となる時、すなわち

$$\frac{dV_{in}}{dt} = -\frac{V_b}{P_0} D(P) \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

となる時であるから、望む圧力における  $D(P)$  が分かれば、望む圧力に固定するために必要な流量を決めることができる。

$D(P)$  は流入がない場合の圧力変化であるから、これは測定して求められる。具体例を以下に示す。

圧力を 190torr に設定するものとする。ニードルバルブを適当な	∴
目盛りにあわせ、1分毎に圧力を測定する。その結果として得られたのが右の表である。これより 190torr における圧力変化は	197.7
	194.3
$D(190) = 187.8 - 191.0 = -3.2$ [torr/min]	191.0
となる。後は③の式に代入すれば必要な流量が求まる。	187.8
今回の実験に用いたルサイト箱の容積は約 6882cc だったので、	184.7
大気圧を 760torr として	181.7
	∴

$$\left. \frac{dV_{in}}{dt} \right|_{190} = \frac{6882}{760} \times 3.2 = 28.98 \text{ [cc/min]}$$

という値を得た。

スプライン補間を行って  $\frac{1}{100}$  分毎の圧力変化を求めて流量を計算してみたところ、1分毎の圧力変化から計算した値と大差なかった。1分毎の圧力をそのまま用いて差し支えないといえる。

## 5. 測定

### 5.1. 測定の概要

MWPC 内の圧力を 1atm , 0.5atm , 0.25atm に設定し、各圧力において Magic gas の混合比を変えて efficiency の測定を行った。当初は 0.75atm でも測定を行う予定だったが、圧力を固定するのに十分な流量を MFC が得られなかったため、0.75atm での測定は断念した。

4.により気体の流量は決定できるようになったが、実際には MFC で流量を調整するため、MFC の数値と実際の流量とを対応づける必要がある。つまり、各圧力において

1. 圧力変化の測定
2. 流量の計算
3. 流量の校正

という 3 つの手順が必要になる。

今回の測定ではトリガー数は 10000 回とした。efficiency の誤差は $\pm 1\%$ である。また、信号のしきい値は  $150\mu\text{V}$  とした。

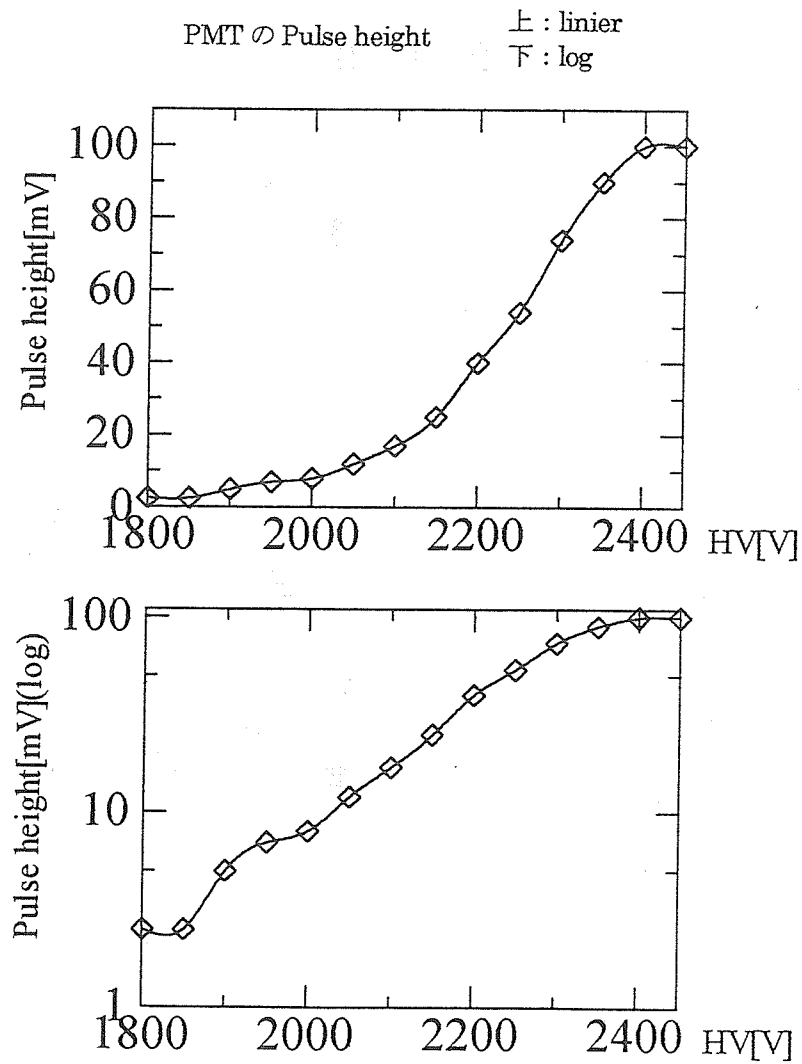
efficiency のグラフで実線で表されるのが total の efficiency、点線で表されるのがクラスタ 1 つ=ワイヤ 1 本(後述)の efficiency である。

なお、圧力を固定するにあたって一旦ルサイト箱内を真空にしてから始めると、測定の際に不純ガスが混入しているという事態を防ぐだけでなく、ルサイト箱内のガスを全て入れ替えるのに必要な時間も削減できる。

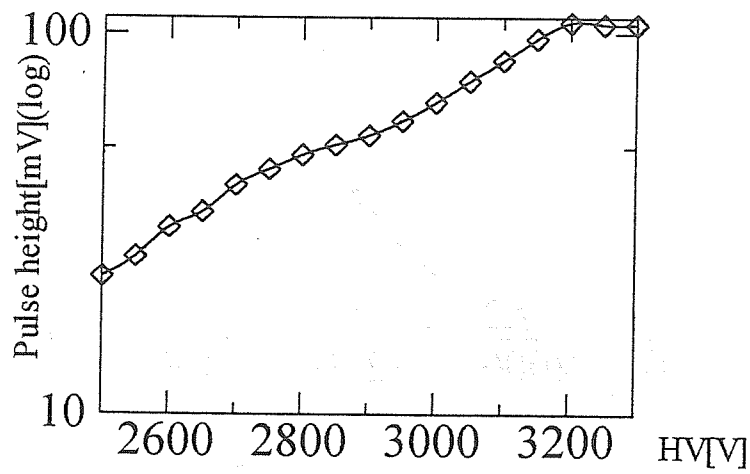
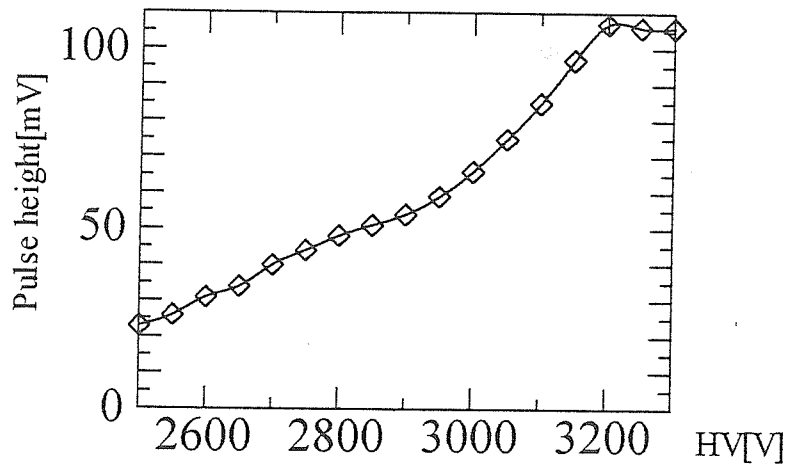
## 5.2.Pulse height の測定

実験に先立ち、今回使用する PMT と MWPC の Pulse height を測定した。  
X 線源として  $^{55}\text{Fe}$  を用い、各電圧毎の Pulse height を測定したのだが、波形がめまぐるしく変わるためどう読み取っていいかわからなかった。

試行錯誤の挙げ句、MWPC の測定では「トリガーの電圧を徐々に上げていき、トリガーのかかっている時間が全時間のうちほぼ半分になったと思われる電圧を記録する」という、果たしてこんな方法でいいのだろうかというような読み取り方をしたので、本来読み取られるであろう値よりも高くなっているものと思われる。



MWPC の Pulse height 上 : linier  
下 : log

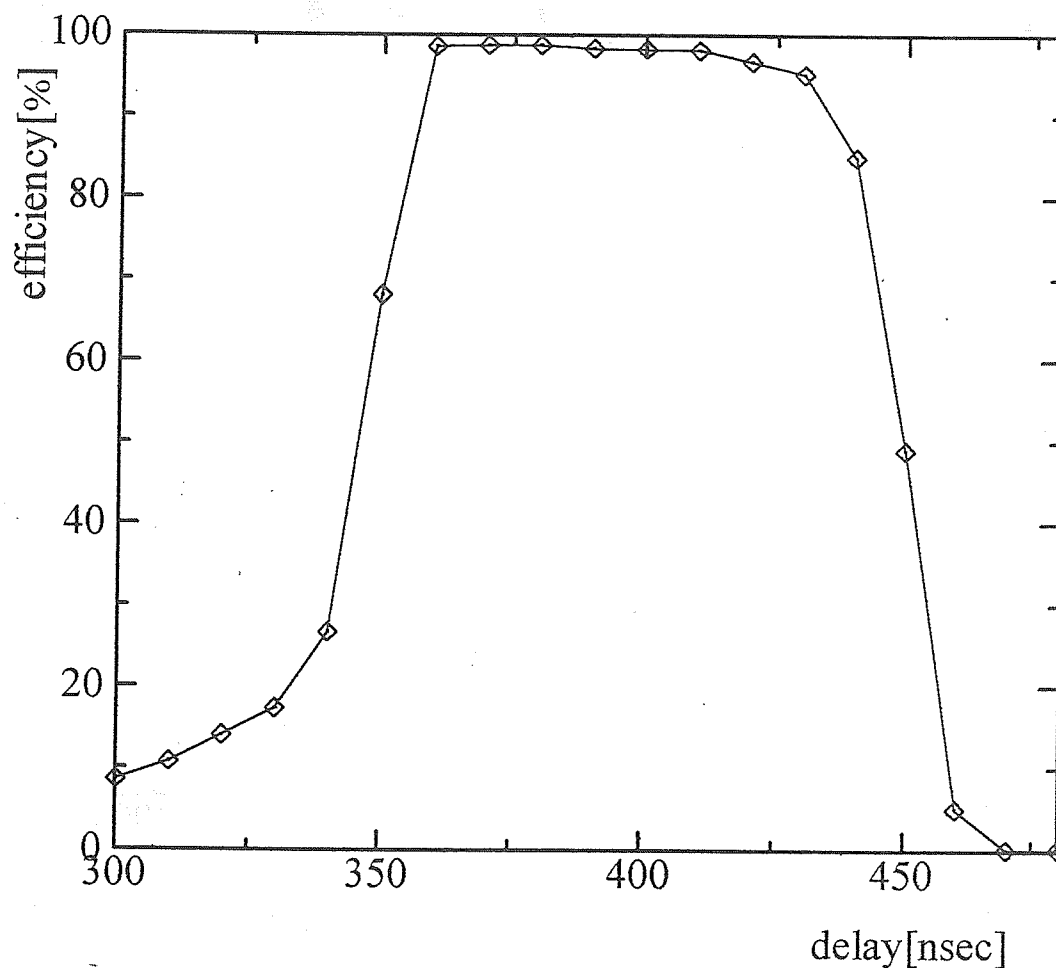


低電圧での Pulse height が読み取りづらかった。log をとった時に直線に乗ることが期待されるのだが、今回の測定では低電圧での直線からのずれが大きかった。

### 5.3. Delay curve の測定

efficiency の測定の際には、efficiency が最大になるように delay を設定する必要がある。そのために Delay curve の測定を行った。1atm において適当な電圧をかけ、delay を変えて efficiency を測定したのが下のグラフである。

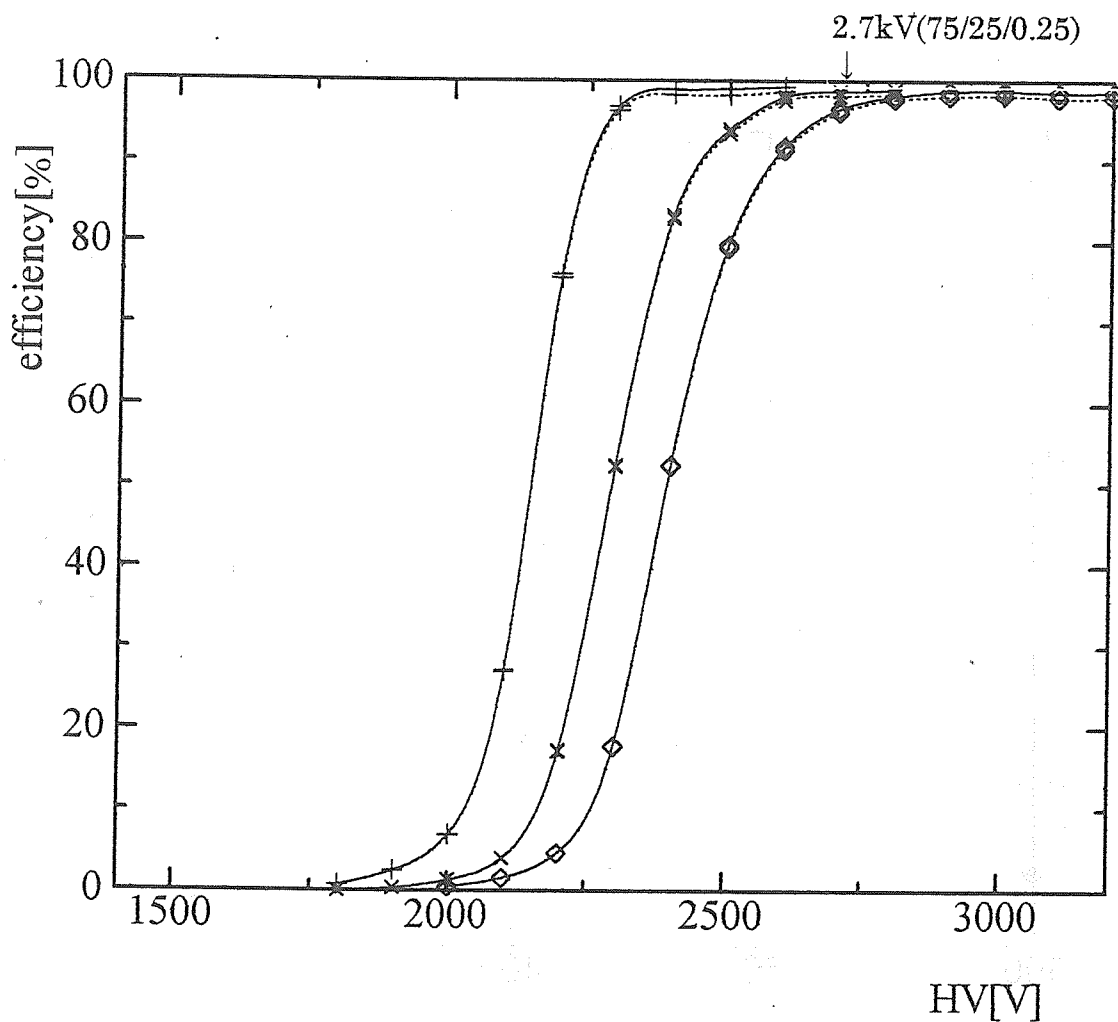
このグラフより、以降の測定では delay を 390nsec に設定することとした。



#### 5.4. 1atm

2mm の MWPC を 1atm で用いる際は通常 Ar 75% ,  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  25% ,  $\text{CBrF}_3$  0.25% という Magic gas を使っている。よってここでも Ar と  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  の割合をそれぞれ 75% , 25% とし、 $\text{CBrF}_3$  の割合が 0%(+) , 0.25%( $\times$ ) , 0.5%( $\diamond$ ) の各場合について efficiency を測定した。

1atm , Ar 75% ,  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  25% での種の数 は 130.650/cm である。

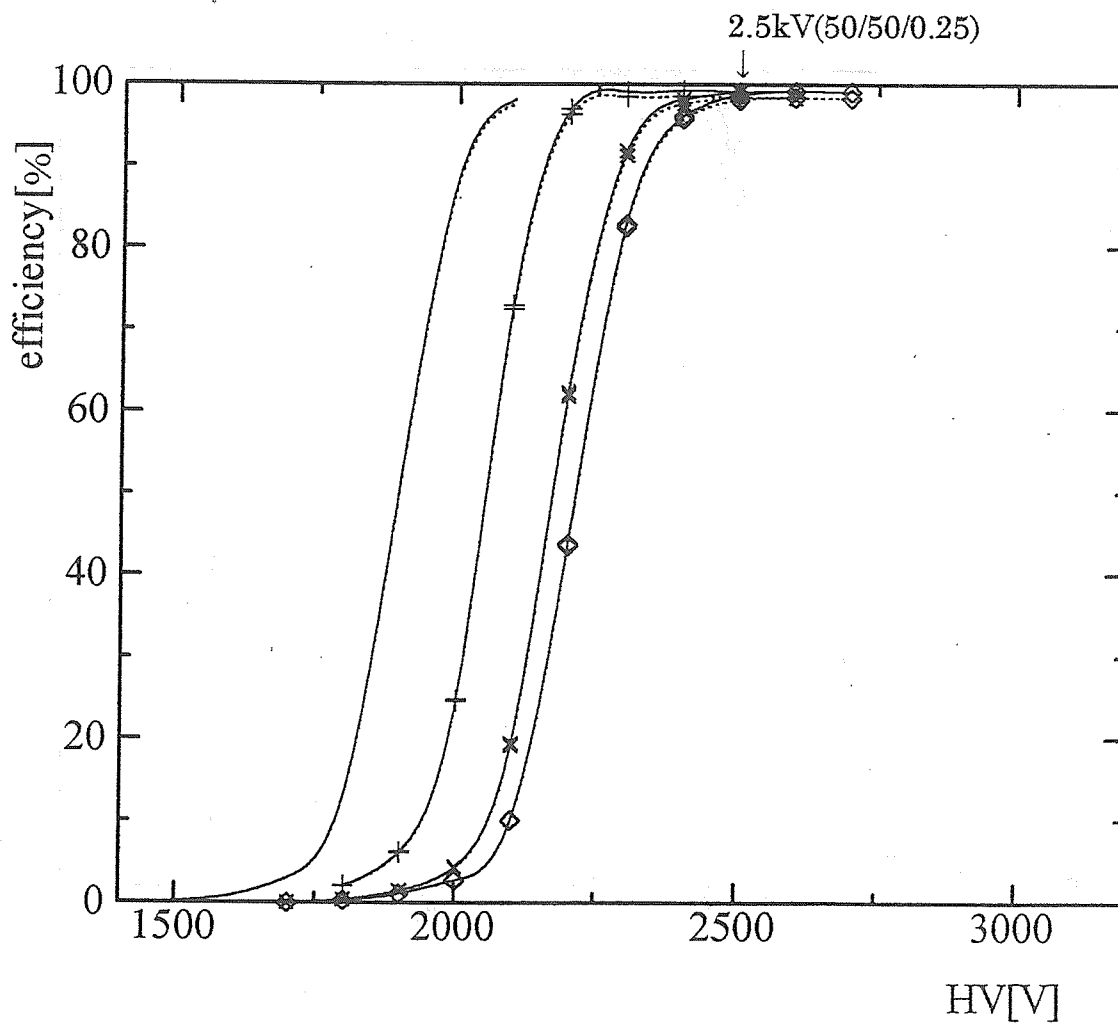




### 5.5. 0.5atm

まず 1atm と同様に Ar 75%(CBrF<sub>3</sub> 0.5%) , i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 25%で測定した (NULL) 。この混合比では efficiency がプラトーに入る前に電流が Current limit を超えてしまったので、次に Ar 50% , i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 50%に比率を変え、CBrF<sub>3</sub> が 0%(+) , 0.25%(×) , 0.5%(◇)の各場合について efficiency を測定した。

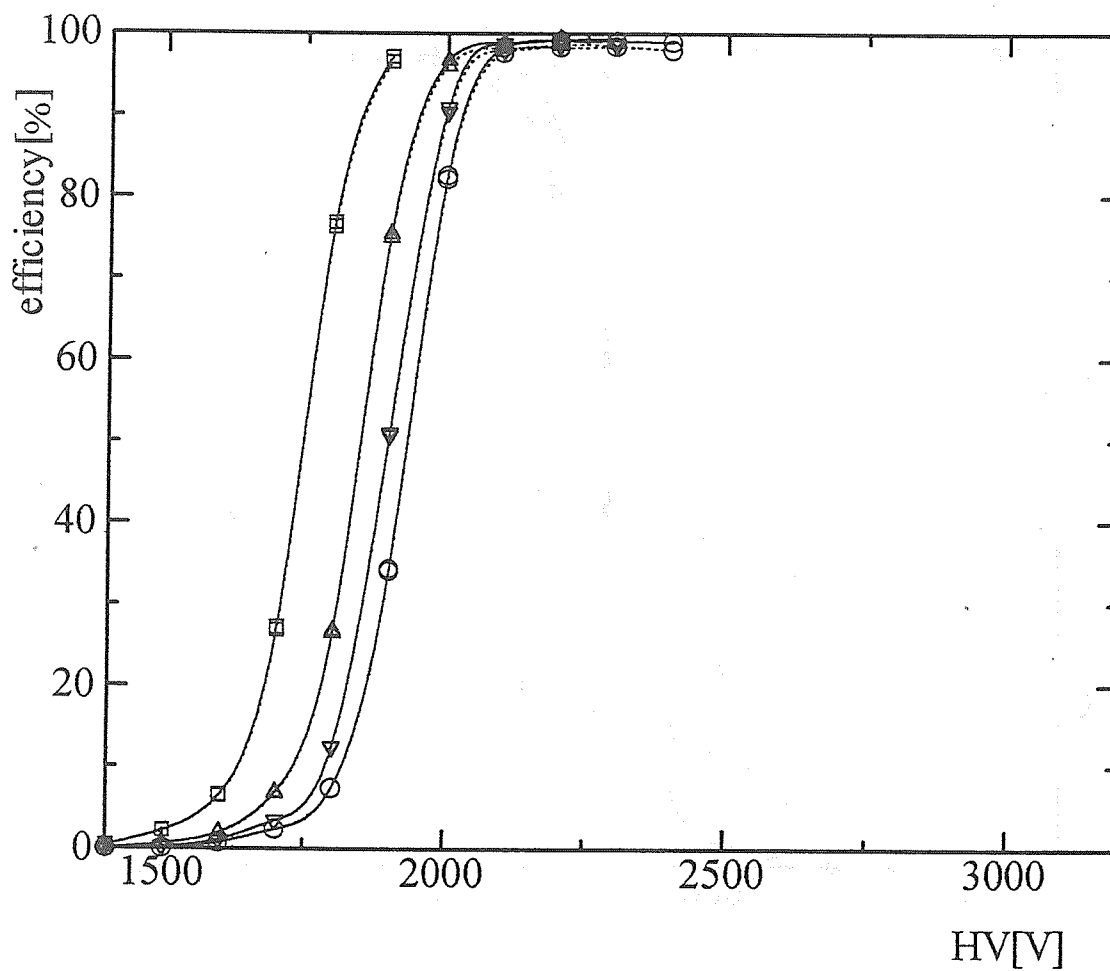
0.5atm , Ar 50% , i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 50%での種の数 は 82.350/cm である。



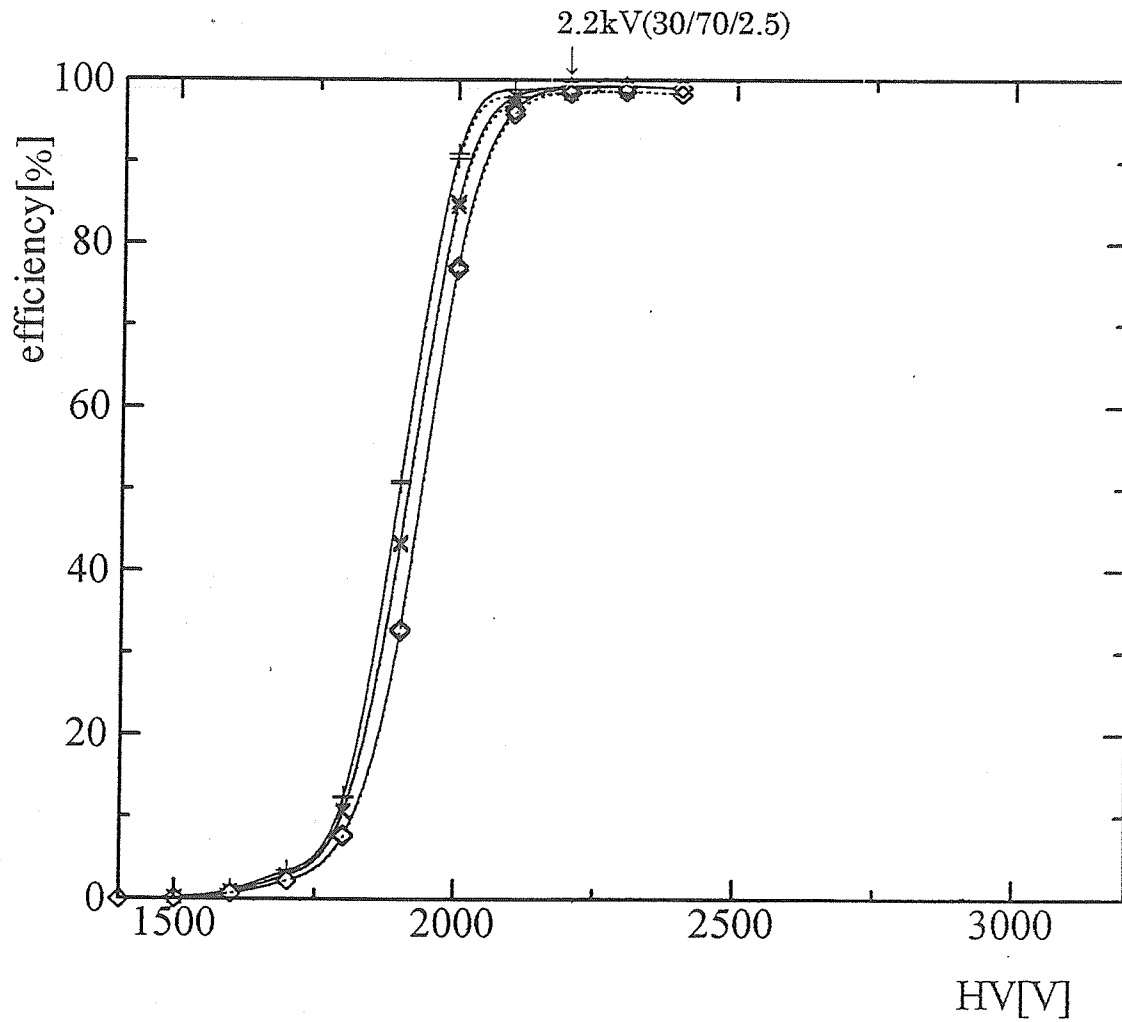
## 5.6. 0.25atm

CBrF<sub>3</sub> の混合比を全て 0%とし、Ar と i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> の混合比が 50%-50%(◇) , 40%-60%(△) , 30%-70%(▽) , 25%-75%(○)の各場合について efficiency を測定した。Ar 30% , i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 70%の混合気体からプラトーが見えるようになったと判断される。

0.25atm , Ar 30% , i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 70%での種の数 は 47.985/cm である。



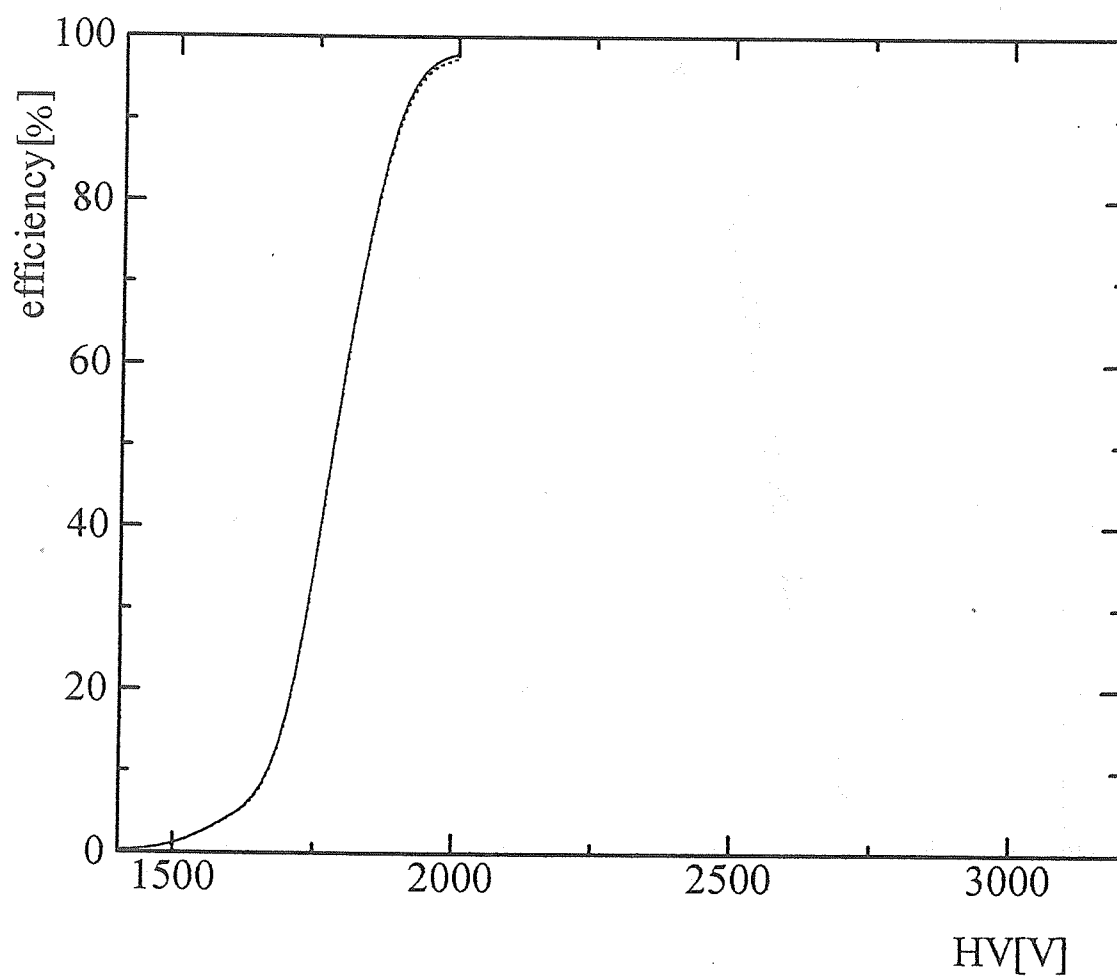
Ar 30%, i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 70%の混合気体なら使用に耐えうると判断されたので、今度は Ar 30%, i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 70%において、CBrF<sub>3</sub>が 0%(+), 0.25%(×), 0.5%(◇)の各場合について efficiency を測定した。



### 5.7. i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 100%

最後に i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 100% で、圧力を 100torr まで下げて efficiency を測定した。下のグラフでは一応電圧を 2000V まで上げることができたのだが、その後同じ測定を試みた際には 1500V や 1600V でも電流が Current limit を超えてしまい、全く再現性がなかった。HV の接続部での放電によるものかと思われる。

100torr, i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 100% での種のは数は 30.632/cm である。



## 6. まとめ

- ◆ 低圧において MWPC が動作するのに必要な Ar と  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  の混合比を確認できた。ただし、今回はワイヤー1本、クラスタ1つの efficiency の差がフレオンの混合比によらず常に0だったため、フレオンの最適な混合比を調べるには至らなかった。

efficiency の差が0だったのは、シンチレータが小さいため入射角度が浅い  $\beta$  線は計数していなかったことによると思われる ( $\pm 8^\circ$  程度)。もっとも、焦点面での  $\theta$  分布は  $\pm 5^\circ$  程度なので、入射角度によるクラスタサイズの増加は考慮に入れなくてよいかもしれない。

- ◆ 実際に2次ビームラインで使うのは、エネルギーが約 250MeV/核子の2次重イオンビームである。250MeV/核子では約2倍の  $\frac{dE}{dx}$  があり、かつ  $\frac{dE}{dx}$  は粒子の電荷(Z)の2乗に比例する。よって Ne だと  $\beta$  ソースの  $2 \times 10^2 = 200$  倍の  $\frac{dE}{dx}$  があるので、100torr 以下の圧力でも充分動作するはずである。

- ◆ 圧力を固定する際、排気量を多く設定できる時は狙った通りの圧力を実現できるのだが、実際の測定でイソブタンの混合比が増えると Gas を流せる最大量が少なくなり、それに応じて排気量も少なく設定しないとなくなる。そのため、狙う圧力付近で単位時間当たりの圧力変化量が重複してしまい、結果としてあまり狙い通りの圧力にはならなかった。

4.で流量決定の例として求めた値も、実際はこれだけの流量を MFC で得ることができず、排気量を小さくして流量を求め直さなければならなかった。結果として1分おきの圧力変化量が重複してしまい、やはり狙い通りの圧力にはなかなかならなかったのである。

MFC をもっと容量の大きなものにするか、ニードルバルブをもっと絞れるものに変える必要があると思われる。MFC には GAUGE FACTOR と呼ばれるつまみが付いていて、今回はこれを固定して使ったのだが、このつまみを調節すればもっと多くの流量を得られるようになるかもしれない。