

平成21年度卒業論文

Mesh付き μ -PICの動作ガスの研究

神戸大学 理学部物理学科 粒子物理研究室
 μ -PIC グループ
宮崎一樹

平成 21 年 3 月 10 日

概要

μ -PICとは近年開発された微細構造を持った粒子検出器であり、X線・ γ 線などの電磁波や μ 粒子・ α 粒子などの荷電粒子の位置や軌跡を測定できる。この μ -PICは従来のガス検出器に比べて、(1)高位置分解能($\sim 90\ \mu\text{m}$)、(2)時間分解能が良い、(3)構造が簡単であり、将来的な大量生産に向く、(4)比較的高頻度の信号に対応できる、などの利点を持つ。

ただ μ -PICの弱点としてアノードとカソードの間の絶縁部分がたまに放電して後に導通してしまうことがあげられる。

μ -PICではこれまで動作ガスとしてArとC₂H₆を混合したものをしていたが、 μ -PICの絶縁部分が導通する理由の一つに、C₂H₆が炭化して底の絶縁体に降り積もり、導通が起こりやすくなることが今までの研究で分かっている[1]。(この研究はオージェ電子分光で絶縁部分の観察、さらに炭化ガスを用いる場合と用いない場合での絶縁部分の堆積物の観察を行った。)

そこで今回C₂H₆の代わりにCF₄をArに混ぜたガスを用いた。CF₄は炭素とフッ素の結合が強いため炭化が起こりにくく、一方でC₂H₆と同様に紫外線に対するクエンチャーとしての役割も持つ。

ガスのコントロールのために、信用性の高いガスクロマトグラフィーを用いてガスの混合比を正確に測りながら μ -PICの動作を確認した。

ただArとCF₄のみではMIP粒子を検出する最低条件の増幅率1万倍に到達しなかったため、ほんの少量のn-C₅H₁₂(0.3%)を入れて増幅率3万倍を得た。(C₂H₆を用いた場合は4万倍)

このガスを用いれば μ -PICの弱点である絶縁部の導通を今までのC₂H₆を用いた場合より抑えながら今まで並の性能で μ -PICを使うことができると考えられる。

目次

第一章 Introduction	1
1-1. 物質と粒子線の相互作用	
1-1-1. 光子の検出	
1-1-2. 荷電粒子の検出	
1-2. 微細加工技術を用いた粒子検出器	
1-2-1. Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)	
1-2-2. Micro Strip Gas Chamber(MSGC)	
1-2-3. Gas Electron Multiplier (GEM)	
1-2-4. Mesh 付き μ -PIC	
1-3. ガスクロマトグラフィー	
第二章 Experimental setup	12
2-1. ガス配管	
2-1-1. Ar と C ₂ H ₆ の混合ガスの場合	
2-1-2. Ar と CF ₄ の混合ガスの場合	
2-1-3. Ar, CF ₄ , C ₅ H ₁₂ の混合ガスの場合	
2-2. μ -PIC 周辺の接続	
第三章 Measurements and Analysis	19
3-1. ADC を用いた波高観測	
3-2. Fe ⁵⁵	
3-3. 波高とその読み取り	
3-4. Gain の求め方	
3-4-1. 生成電荷	
3-4-2. キャリブレーション	
3-4-3. Gain	
3-4-4. サチレーション	
第四章 Results and discussions	23
4-1. それぞれの増幅率	
4-2. Discussion	
第五章 Summary	27
5-1. まとめ	
5-2. 今後の課題	
Acknowledgments	28
Appendix	29
1. ガスクロマトグラフィーのカラムの性能	
References	38

第一章 Introduction

1-1. 物質と粒子線の相互作用

測定しようとする高エネルギー粒子に関する位置・エネルギー・運動量などの情報は検出器の内部の物質と起こる相互作用から得られる物理量をも元にして計算される。ここでは、光子(X線や γ 線など)と荷電粒子がそれぞれ物質との間で行う相互作用について述べる。

1-1-1. 光子の検出

光子は後述の荷電粒子と異なり、電磁波であり物質との相互作用は弱く、したがって物質中を非常によく透過する(もちろんエネルギーに依存する)。光子が物質と相互作用するのは次の(a)光電効果、(b)コンプトン効果、(c)対生成の三つが挙げられる。今回の実験で現れる光電効果に重点を置き説明していく。

(a)光電効果

光子が全エネルギー $h\nu$ を機動電子に与え、光電子に変換される反応である。主として最内殻の電子が、ある運動エネルギー T を持って飛び出す。最内殻の電子と反応する理由には光電効果は原子核とも仮想光子を介して反応するので原子核にもっとも近い最内殻の電子と反応を起こしやすいため。ここでエネルギー T は光子の全エネルギー $h\nu$ から(K電子の)電離エネルギー I を差し引いた値 $T=h\nu - I$ で与えられる。光電効果の起こる確率は原子番号 Z のほぼ5乗に比例するので Z のおおきな物質は、光子のシールド効果が非常に大きい。ただし、光電効果がコンプトン効果や、電子対生成に優先するのは比較的エネルギーの低い領域で、例えばAlでは50 keV以下、Pbでは500 keV以下についてである。本測定では、測定試験のための入射粒子線源として、 ^{55}Fe を用いた。よってここに μ -PIC内で ^{55}Fe から出たX線がAr原子の電子と光電効果を起こす概観図を図1.1に示す。ここでは $h\nu = 5.9\text{keV}$ 、 $I = 3.4\text{keV}$ である。光電効果のあとにさらにオージェ電子が生成されるのでここで簡単に説明する。

^{55}Fe から5.9KeVのX線が μ -PICに入るとAr原子の低い準位の電子と光電効果を起こし、2.7keVの電子が飛び出す。その後さらに、高い準位にある電子が低い準位に落ち込みそのエネルギー差分の特性X線を出す。このX線が15%の確率でそのまま μ -PICの外に出ていく(というのもこのX線はAr分子を電離するほどのエネルギーをもっていないため)。

また85%の確率で自分の電子でこのX線を吸収し、電子を外へ放り出す(オージェ電子)。この時での電子のエネルギーが3.2keVということで全体で85%の確率で5.9keVの電子が出て15%の確率で2.7keVの電子が出る。前者を光電ピーク、後者をエスケープピークと言う。実際に μ -PICでこの二つのピークを見て取れる(3-3節の図参照)。

ちなみに概要で記したオージェ電子分光も名前の通り、このオージェ電子を利用している。

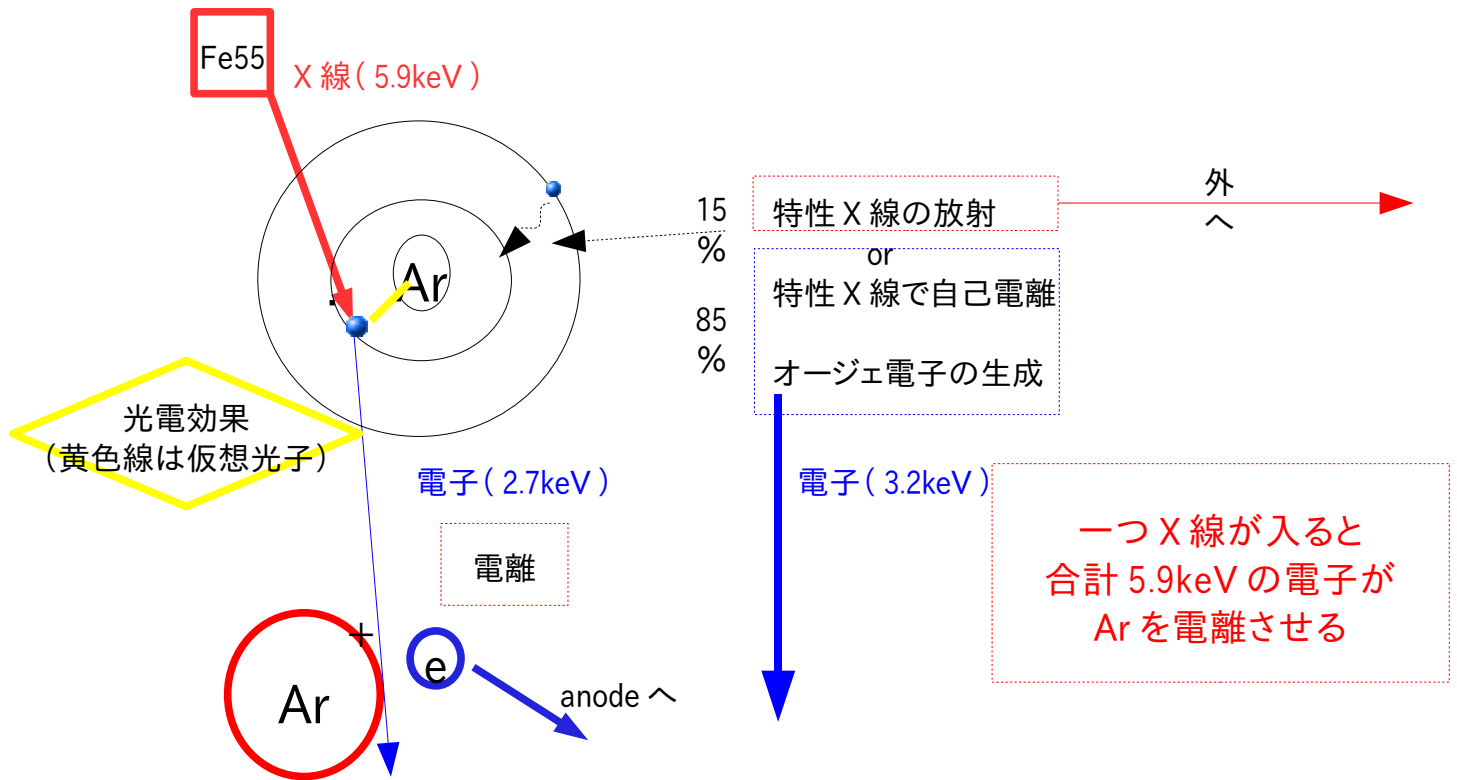


図1.1 X線とAr原子の光電効果

(b)コンプトン効果

光子が物質中の原子の外殻電子と衝突して、外殻電子を弾き飛ばすとともに、エネルギーの低い光子が出て行く現象で、それらのエネルギー運動方向は光子と自由な電子の衝突として、エネルギー保存則、運動量保存則から簡単に導くことができる(図1.2参照)。

簡単な計算から θ 方向に出て行く光子のエネルギー $(h\nu)'$ は、入射エネルギーを $h\nu$ とすると

$$(h\nu)' = h\nu \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos\theta) h\nu} \quad (1-1)$$

と表され、反跳電子のエネルギー T は

$$T = h\nu \frac{(1 - \cos\theta) h\nu}{m_e c^2 + (1 - \cos\theta) h\nu} \quad (1-2)$$

となる。 m_e は電子の質量、 c は光速である。

コンプトン効果の起こる確率(断面積)は原子番号 Z に比例しており、その効果の優先する領域は、Al の場合 $0.05\text{MeV} < h\nu < 15\text{MeV}$ 、Pb では $0.5\text{MeV} < h\nu < 5\text{MeV}$ である。

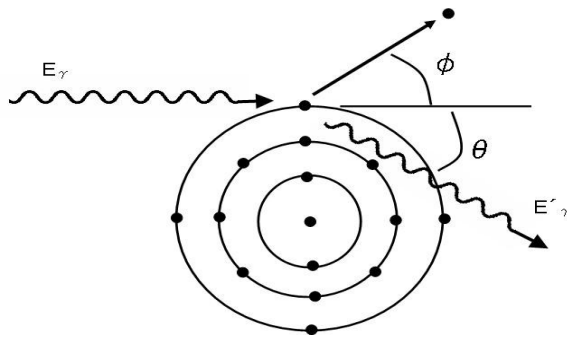


図1. 2:コンプトン効果
光子が外殻電子を弾くとともに、エネルギーの低い光子が出てくる。

(c)対生成

光子のエネルギーが電子の静止エネルギー $m_e c^2$ の二倍以上になると、物質中の電磁場（主として原子核によるクーロン場）との相互作用により γ 線が突然消失して電子と陽電子が運動エネルギー（ $h\nu - 2m_e c^2$ ）を分かち合って飛び出してくることがある（図1. 3）。

電子または陽電子の持つエネルギーは0から $(h\nu - 2m_e c^2)$ にわたっており、エネルギー E を持つ確率はほぼ E に逆比例している。また電子対生成の起こるか確率はだいたい原子番号 Z の2乗に比例している。陽電子は物質中でその運動エネルギーを失い、やがて（ $10^{-10} \sim 10^{-9}$ 秒）物質中の電子と対消滅し、 $(h\nu)' = m_e c^2 = 510\text{keV}$ の2個の光子を出す（3個の光子を出すこともある）。

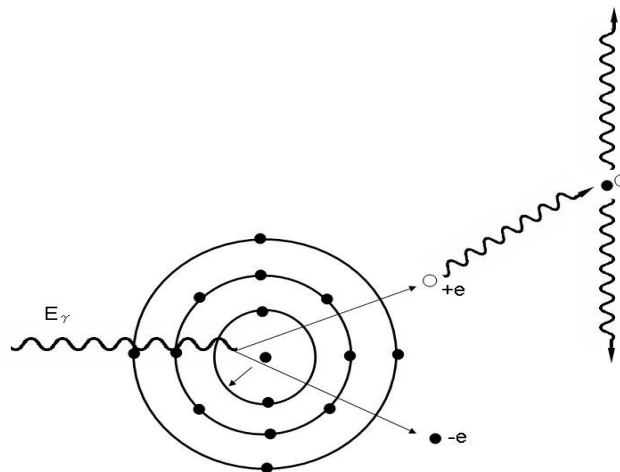


図1. 3:対生成
 γ 線が突然消失して電子と陽電子が運動エネルギーを分かちあって飛び出す

γ 線の強度は物質中では $e^{-\tau x}$ で減少する。これは光電効果、コンプトン効果、対生成が物質中で起こると γ 線が吸収されるからである。 τ は、 $\tau = \tau_{photo} + \tau_{comp} + \tau_{pair}$ となり、Pb ではこれらの吸収係数 τ は図1.4のようになる。

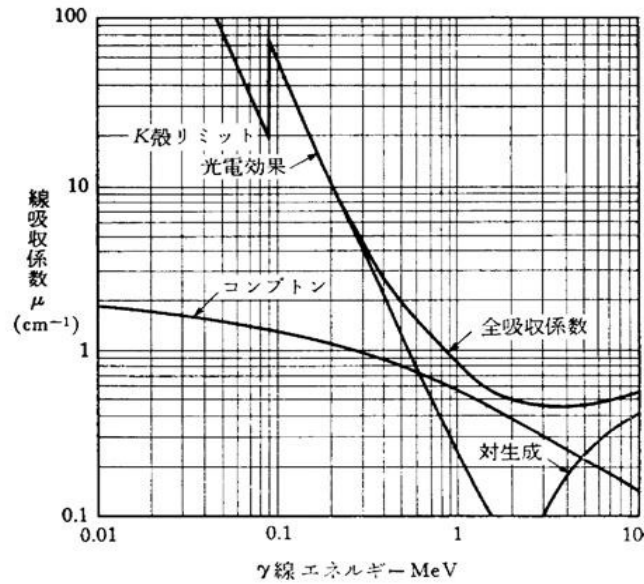


図1.4: Pb に対する光子の吸収係数 [2]
光子のエネルギーによって主たる相互作用は異なる。

1-1-2. 荷電粒子の検出

荷電粒子の場合、電荷が運ばれているので媒質中を通過すると、媒質中の電子とクーロン力によって連続的に相互作用する。荷電粒子が吸収物質に入射すると、電子は荷電粒子のクーロン力によって衝撃を受ける。この衝撃力によって、吸収物質原子内の電子はより高いエネルギー準位に励起または電離する。荷電粒子は衝撃により電子に与えた分だけエネルギーを失う。そのため荷電粒子は速度を落とすことになる。この衝撃により、励起原子またはイオン対が作られる。イオン対は再結合により中性原子に戻ろうとするが、再結合を抑制しイオン対または電子を収集することが検出器の基本である。

吸収物質で入射荷電粒子が単位長さ当りに失うエネルギー(エネルギー損失)は

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_0 v^2} NB \quad (1-3)$$

で表され、ここで

$$B = Z \left(\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (1-4)$$

とし、また v 、 ze 、 N 、 Z 、 m_0 、 e はそれぞれ、一次電子の速度及び電荷、単位体積あたりの物質の原子の個数、物質原子の原子番号、電子の静止質量および電荷である。式2-4は Bethe-Bloch の式と呼ばれ、吸収物質を Cu とし μ^+ を入射粒子とした場合のグラフが図1. 5である。これを見れば、 $\beta\gamma$ が1~1000あたりで単位長さ当りに失うエネルギーが非常に小さくなっていることが分かる。この辺りのエネルギーを持つ粒子を MIP 粒子といい、LHC 又は SLHC で検出したい粒子は GeV オーダーであるためこの MIP 粒子である。この粒子を検出する時は電離して出てくる電子が少なく信号が小さくなるので、この少ない電子を増幅させて大きな信号に変換する必要がある。MIP 粒子検出器として要求される増幅率は 10^4 と言われている。

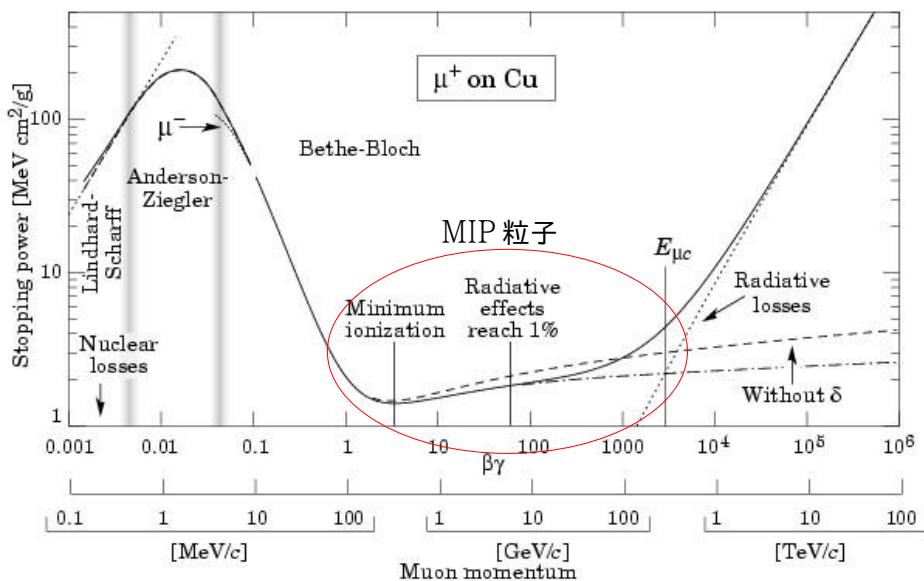


図1. 5: Bethe-Block の式によるエネルギー損失 [3]

1-2. 微細加工技術を用いた粒子検出器

ここでは MWPC と微細加工技術によって製作されているマイクロパターン検出器 MPGD (MSGC, GEM, mesh 付き μ -PIC) を紹介する。

1-2-1. Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)

高エネルギー加速器実験と粒子検出器は切っても切れない関係であり、粒子検出器がなければ、高エネルギー加速器実験も成り立たない。現在、高エネルギー加速実験に使われているガス検出器には Charpak らによって開発されたワイヤーを使った MWPC (Multi Wire Proportional Chamber) [4] などがあるが、近年の高エネルギー加速実験は高輝度化しており、より時間分解能の良いものが求められる。また量産するにしても細いワイヤーを張る作業は非常に困難で、大量生産は難しい。

ここでガスを使った粒子検出器の動作原理をこの MWPC を例に上げて説明する(図1.6参照)。ガスパッケージの中にはガスが充満してそこにワイヤーが何本も平行に張っており、正の電圧がかかっている。ガスパッケージは負の電圧がかけられた電極ではさまれている。ここに荷電粒子が入ると中のガス分子を電離しその電子がさらにワイヤーの高い電場によりエネルギーを増し、さらに他の分子を電離させたくさんの電子がワイヤーに入っていく。これを電子雪崩と呼ぶ。同時に発生した陽イオンがワイヤーから離れることによってワイヤー内の電荷が移動し信号が誘起される。これがガスを使った検出器の主な原理である。また最初に荷電粒子によって生まれた電子(1次電子)と最終的にワイヤーに到着した電子(2次電子)の比が増幅率となる。よって増幅率を上げるには内部の電場を強くして電子の持つエネルギーを高くしてやればよい。

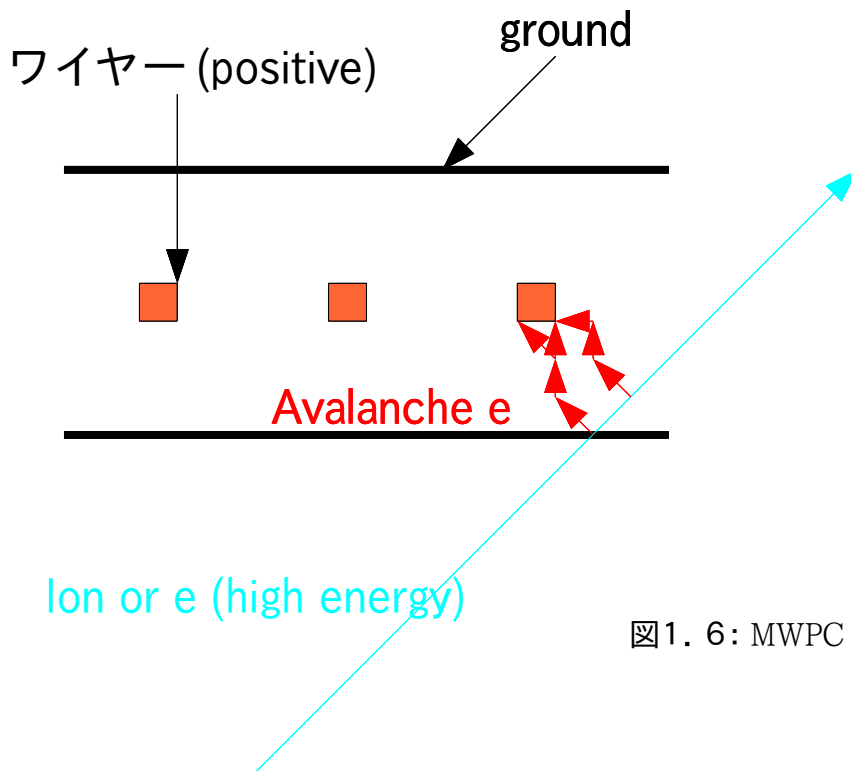


図1.6: MWPC の概観図

1-2-2. Micro Strip Gas Chamber(MSGC)

MWPCでの位置分解能、量産性や高頻度入射粒子に対応できないという問題を克服するためにワイヤーを使わないMSGC(Micro Strip Gas Chamber)が1988年、A.Oedにより開発された。[5]構造を図1.7に示す。LSIの作成などで用いられるリソグラフィ技術を用いて絶縁体(ポリイミド)の基板にストリップを形成した。それらを陽極(Anode Strip)・陰極(Cathode Strip)と交互に接続し電場を与えることでストリップ上に高い電場を作りガス増幅をする。MSGCはAnodeの間にCathodeを配置しており、MWPCでは困難であった間隔以下にストリップを配置でき、高い位置分解能を可能としている。さらにガス増幅時にAnode付近に生じた陽イオンがすぐにCathodeに吸収されるため時間分解能がMWPCと比べても3倍程度早くなっている。

しかしながらガス増幅によって生じたイオンの一部が絶縁層に付着してチャージアンプを起こすことで表面の電場が弱められること、カソード近傍の電場が強くなり金属中の電子が放出し放電をおこすこと、放電に伴ってストリップが溶けて断線したりAnode,Cathode間が導通を起こし電極破壊が起こるといった問題点もある[6]。

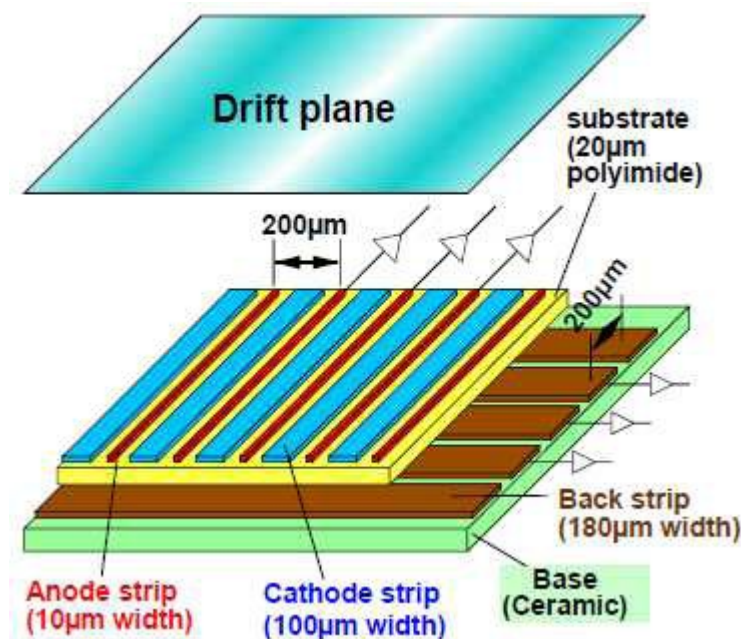


図1.7: MSGCの概観図 [7]

1-2-3. Gas Electron Multiplier (GEM)

GEMは1997年F.Sauliらによって発明された。[8] 現在CERNを中心に使われている標準的なGEMの構造を図1.8に示す。GEMとは、 $50\mu\text{m}$ 程度の厚さのポリイミドまたは液晶ポリマーのフィルムの両面を銅で被膜し、直径 $70\mu\text{m}$ 程度の穴を無数に開けたものであり、銅薄膜を電極として用い、ガス中で300V程度の電圧差を掛け、穴の中にできる強い電場を作りだし、その電場によって電子雪崩を起こし、電離電子数を増やし、信号として捉えるようにするものであり、多段で用いることにより1万倍以上の増幅率が実現できる。

後述する単体の μ -PICではMIP粒子を検出できる 10^4 程度の増幅率を得ることが難しいため、MIP粒子を観測する時はこのGEMを μ -PICの読み出しの上につけ観測を行う。

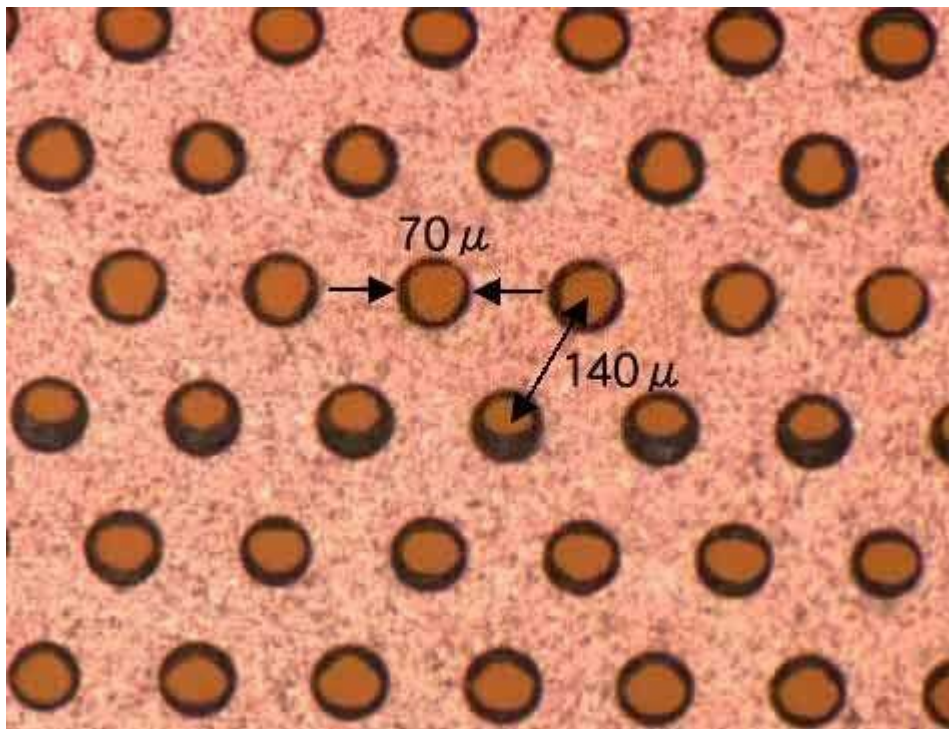


図1.8: GEMの表面

1-2-4. Mesh 付き μ -PIC

μ -PIC とは MicroPixelChamber[9] の略であり、微細構造を持ったガス粒子検出器である。これは MSGC などよりさらに優れた検出効率を持つ検出器として2001年に越智、谷森らにより開発されたものである。その構造は MSGC と同様に Anode と Cathode が存在するが、MSGC と違い μ -PIC では Anode が丸い点状(ピクセル)に配置され、その周りを Cathode が囲む形になっている(図1. 9の基板上)。

この構造により Anode 周りの電場が高くなり MSGC よりも高い増幅率を得られるようになった。また Cathode 周りでは電場が弱くなるため、高い電圧を電極に印加しても放電を起こしにくくなった。さらに、プリント基盤を用いるため将来的に大量生産を行うこととなった場合、電子回路の既存の微細構造技術を流用することで非常に安価に生産できる利点もある。

神戸大学では μ -PIC の Anode と Drift plane 間に金属 mesh を入れることによりさらに増幅率を上げることに成功している。

ここで Mesh 付き μ -PIC が粒子線を検出する原理を説明する。

図1. 9は Mesh 付き μ -PIC にガスが満たされたパッケージ内の概観図で、Drift plane に -600V、金属 mesh に -300V、茶色い点で示された Anode に 200~600V の電圧をかける。ここに高エネルギーの荷電粒子(一次電子)が入ると分子を励起していき、その時できた電子が電場に沿って、Anode へと吸い込まれていく。

Anode 近傍は電場が強くなっているので、引き寄せられた電子が高エネルギーになり周りの分子を電離させていく電子雪崩が起き、大きい信号が得られる。この時、陽イオンも生まれるがこれは Cathode や金属 Mesh へと吸い込まれていく。従来の GEM を使わないでさらに Mesh のない μ -PIC では 1.6×10^4 の増幅率を達成しているものの長時間の安定動作を要請すると 6×10^3 程度である。

だが Mesh 付き μ -PIC では長時間の動作においても 2.0×10^4 の増幅率を得ている[10]。

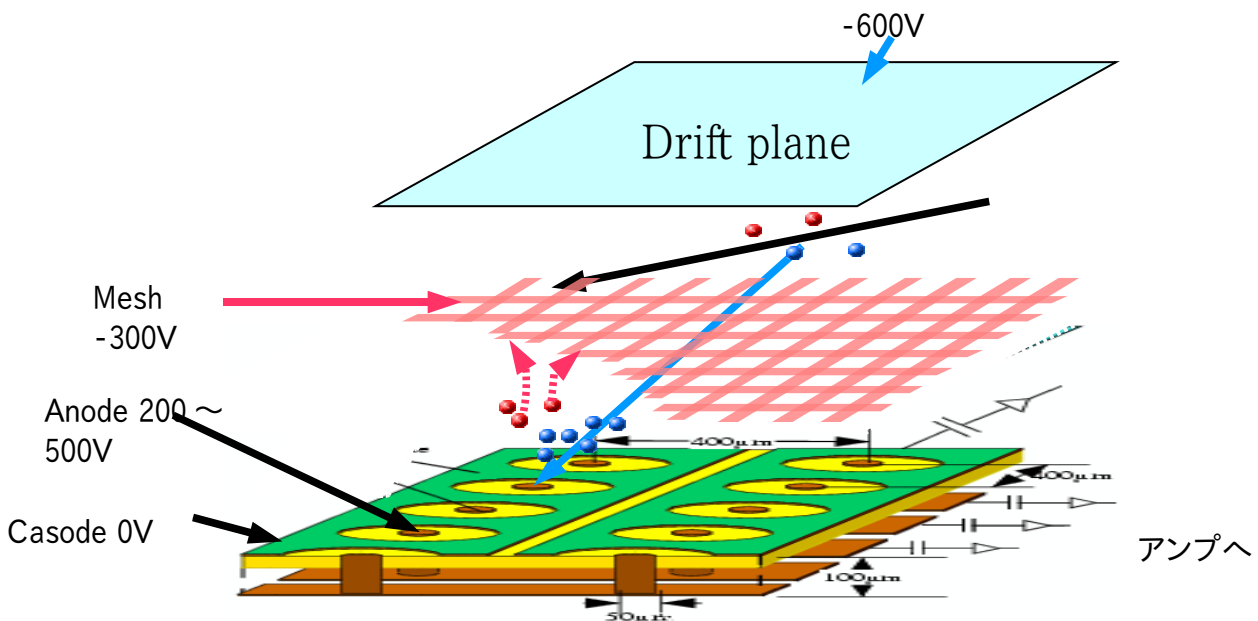


図1. 9: mesh 付き μ -PIC の概観図

1-2. ガスクロマトグラフィー

ここでは今回ガスを混ぜるにあたり成分を計るために用いたガスクロマトグラフィーについて簡単に説明する。



図1. 10:ガスクロマトグラフィー

クロマトグラフィー(Chromatography)[11]とはロシアの科学者ミハエル・ツヴェットが発明した、物質を分離・精製する方法である。物質の大きさ・吸着力・電荷・質量・疎水性などの違いを利用して、物質を成分ごとに分離する。クロマトグラフィーは、**固定相**と呼ばれる物質の表面または内部を、**移動相**と呼ばれる物質が通過する過程で、移動相に混じらせた少量の試料を分離していく。固定相には液体のものと固体のものがあり、移動相には気体と固体のものがあるが今回は固定相に固体(二種類)、移動相に気体(ヘリウム)を用いた。

このガスクロマトグラフィーに少量の試料($\text{Ar} + \text{CF}_4 + \text{C}_5\text{H}_{12}$)を流すと、移動相のヘリウムに流されながら固定相の入ったカラムに入っていく。カラムの中には吸着剤が入っているので、この中をガスが通ると吸着力の強い分子ほどゆっくり移動するので、ガスがどんどん分離されていく。図1. 10でも分かるようにカラムはオープンの中に入っており、温度を上げてカラム内での移動速度を上げることができる。

分離されたガスはTCD(熱伝導検出器)という検出部に送られる。

TCDの構造はホイーンストーンブリッジになっていて常に二つのフィラメントにはHeが流れている。Heは非常に熱電導度が高いので、このフィラメントに分離された Ar , CF_4 , C_5H_{12} が流れれば、フィラメントに熱が伝わりにくくなり抵抗値が変わる。この変化を読み取り成分比の測定ができる。ガスクロマトグラフィー(以下ガスクロ)について、図1. 11に概観を示す。

また、今回の測定で用いたカラムには Morecular Sieve と Gaskuropack54 の二種類あり、それぞれ以下の特徴が実験から分かっている(Appendix 参照)。

- ・Morecular Cieve : Ar , CF_4 は分離できるが、 C_5H_{12} を検知できない。
- ・Gaskuropack54 : Ar , CF_4 が分離できない, C_5H_{12} を検知できる。

ただしカラムの温度調整、検出器に流す電流の設定をしっかりとしないとうまく信号を得られない。詳しい設定とカラムの性能を実際の観測例をもとに Appendix.1 にのせる。

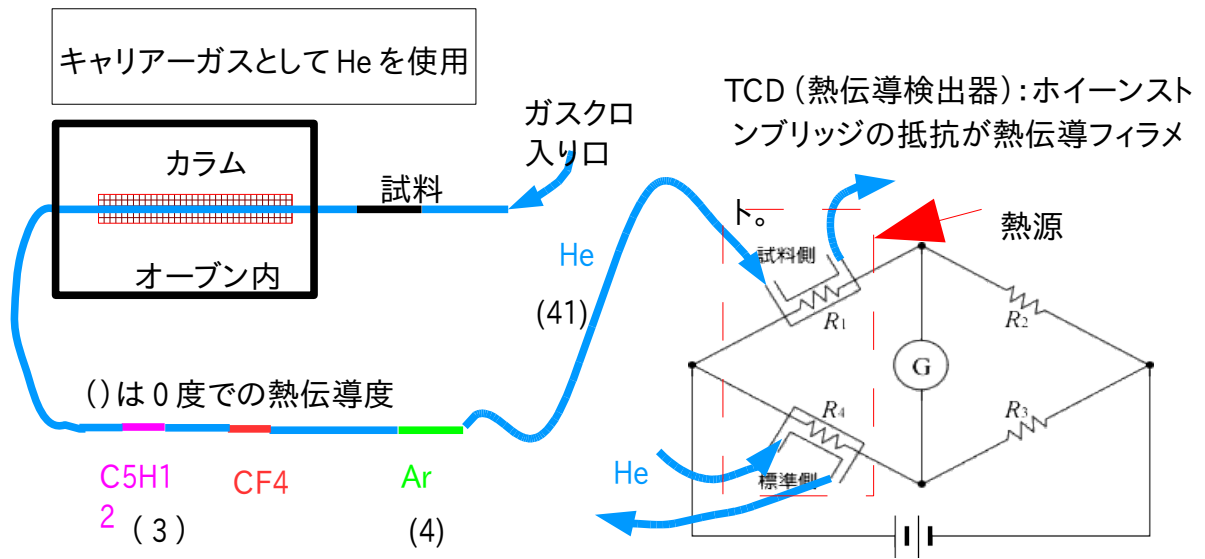


図1. 11:ガス chromatography 概観図

第二章 Experimental setup

2-1. ガス配管

2-1-1. ArとC2H6の混合ガスの場合

このガスはそのまま業者の方が混ぜてくれてガスボンベに入っているののでニードルバルブを介して圧力を下げ、流量を調節し μ -PIC に入れた。図2. 1はガスクロで見た Ar と C2H6 の混合比。

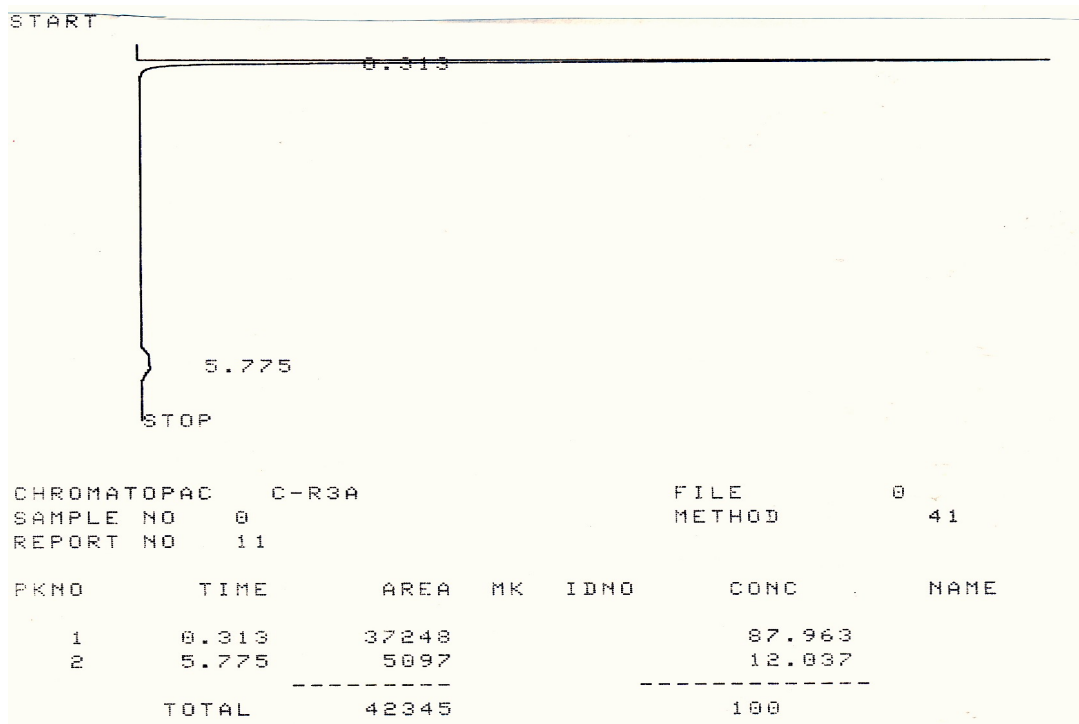


図2. 1: Ar, C2H6 のガス混合比
Ar : C2H6 = 88:12
カラムは Molecular Sieve を使用。

2-1-2. Ar と CF4 の混合ガスの場合

このガスは純粋な Ar と CF4 を電磁弁を用いた三種ガス混合器を用いて行った(図2. 2)。三種の混合ガスはマスフローメーターを用いて流量を調整している。三種のガスのマスフローメーターは Ar, C2H6, n-C4H10 で校正されているが、CF 値(コンバージョンファクター)を用いることで校正ガスではない CF4 の流量も分かる。例えば、C2H6 で校正されたマスフローメータに対して CF4 を流した時の流量は、それぞれのガスの CF 値を使うことによって、以下のように求められる。なおここで用いる CF 値は、N2 を 1.0 とした時の相対値である。

$$(\text{表示値}) \times \left(\frac{0.50}{0.42} \right) = (\text{実際の流量})$$

C2H6 の CF は 0.50,
CF4 の CF は 0.42



図2. 2:ガス三種混合器

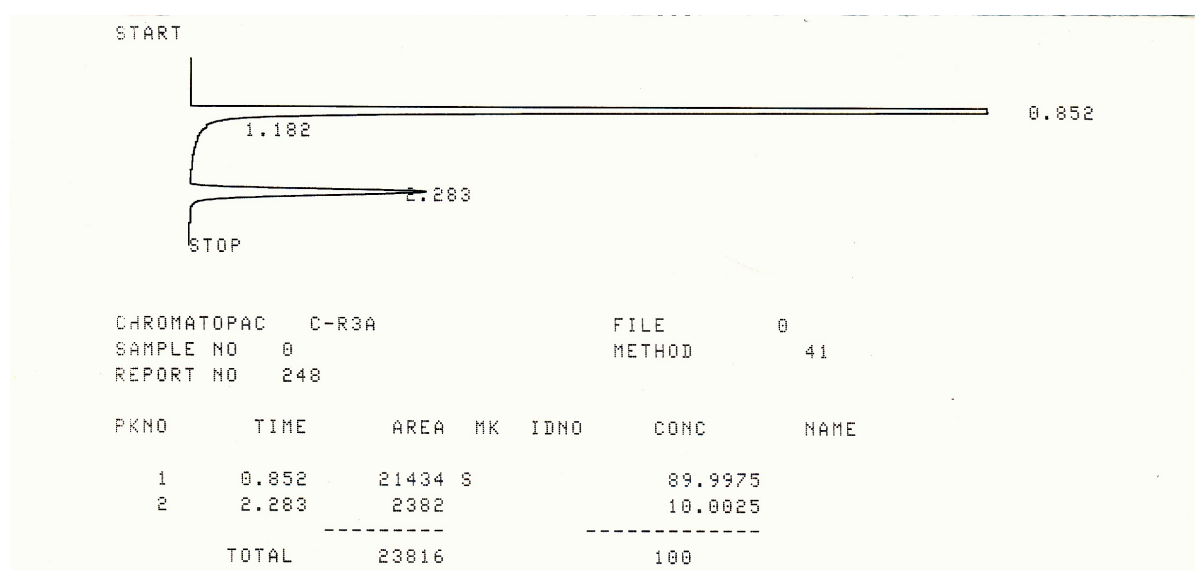


図2. 3:実験で用いた Ar と CF4 の混合比

Ar:CF4=90:10

カラムは Molecular Sieve を使用

2-1-3. Ar,CF4.C5H12 の混合ガスの場合

この混合ガスに用いたガス配管の概観図を図2. 4に示す。おおまかに言えば二種混合器で Ar と CF4 を混ぜる前に CF4 に C5H12 を混ぜて三種混合をする。

Ar と CF4 はガスボンベからニードルバルブで流量を調節し混合器へと入っていく。CF4 は途中で液体の C5H12 (ペンタン) の入った恒温槽へと流す。蒸気圧を調整し CF4:C5H12=1:1 に混ぜるように、恒温槽は常に 15 度になるよう温度管理している(図2. 5)。Ar ではなく、CF4 に C5H12 を混ぜる理由を説明する。今回の実験では高い増幅率を得るため、Ar は全体の90%を占める必要がある。そのため Ar や Ar+CF4 に C5H12 を少量混ぜるためには蒸気圧の関係から恒温槽の温度を氷点下以下にしないといけないので CF4 に C5H12 を混ぜる(恒温槽は水で温度を一定にしているため氷点下以下はコントロールできない)。こうすることによって常温に近い温度での蒸気圧コントロールができ、CF4 に対する C5H12 の混合割合も高くすることができる。

瓶の中は正確に大気圧ではないが、ニードルバルブで流量を微小にしているため蒸気圧に影響を与えるほど圧力は高くない。またこの恒温槽は内部の圧力が高くなるとふたがずれ空気が入り込む。これは瓶とふたに真空グリースを塗ることにより多少圧力が高くてもふたがずれることにはなくなった。実験するとき酸素濃度を500 ppm 以下にしないといけないので瓶内の酸素を手っ取り早く除くため流量を多くする必要があった。(真空グリース付きのふたがはずれないギリギリの流量で1時間ほど流し続け酸素濃度は500 ppm 以下になる。) μ -PIC 内に酸素があると電気陰性度が高いため信号となる電子を吸収するため酸素濃度は低くしておかないといけない。

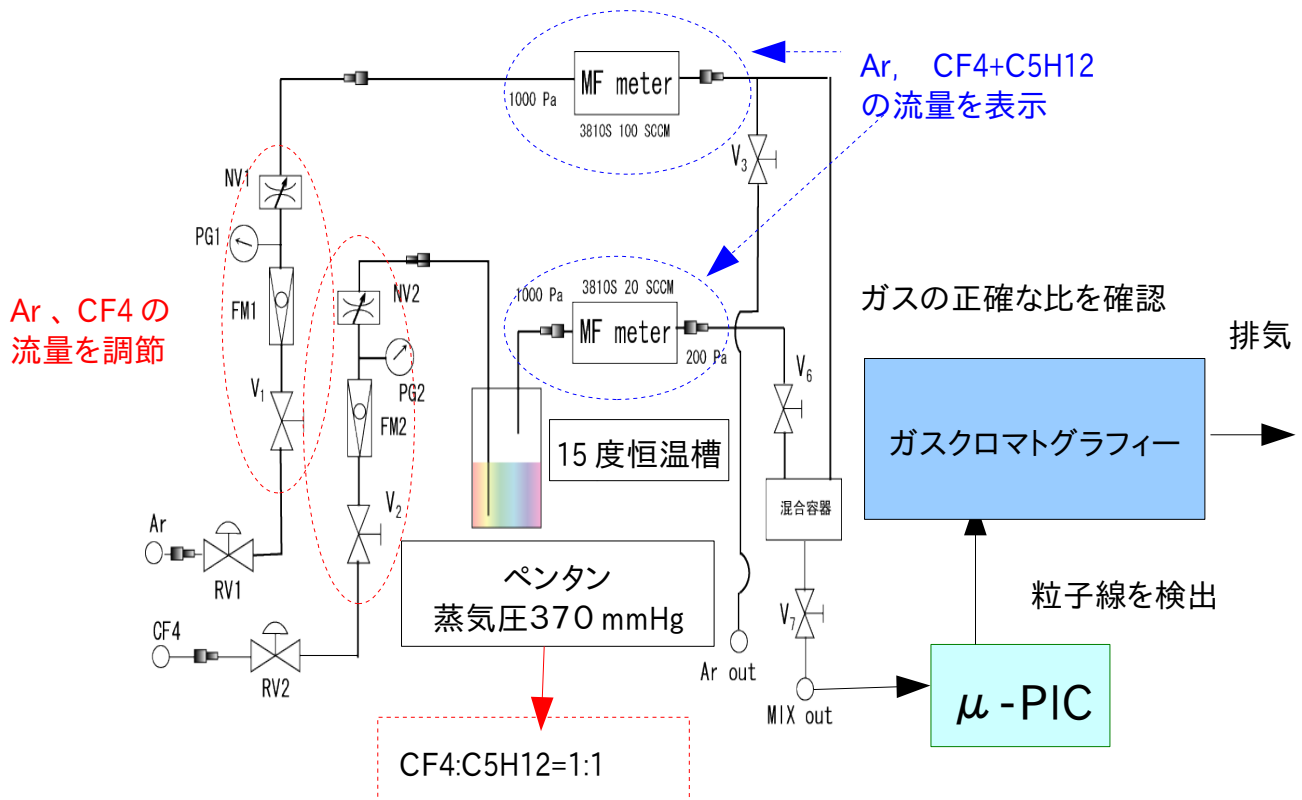


図2. 4:ガス配管図

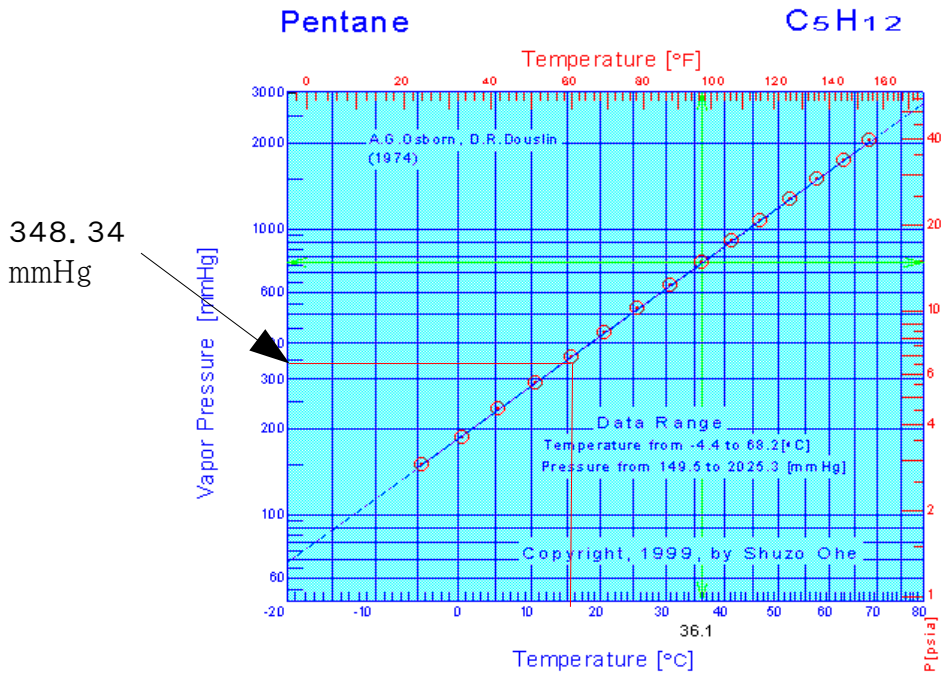
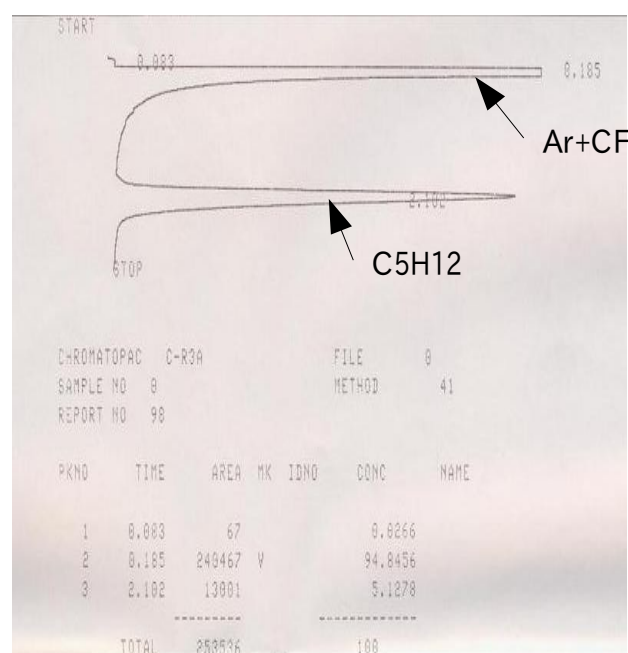


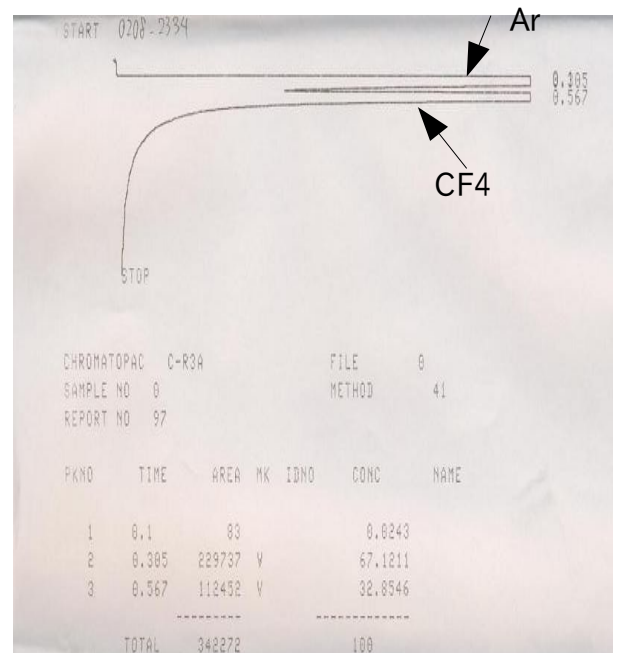
図2. 5:ペンタンの蒸気圧曲線[12]

実際の CF4 に混ざった C5H12 の量

前節で蒸気圧曲線に従って CF4 に C5H12 を混ぜたが実際にはあまり混じらなかった。理由はよく分かっていないが、ここにガスクロにおける CF4 への C5H12 の混ざり具合を図2. 6～8に示す。よって当初 CF4 と C5H12 が 1:1 で混ざり、全体として Ar:CF4:C5H12=90:5:5 の混合比のガスを目指していたが、Ar ガス 90% に CF4 と混ぜられるだけの C5H12 を混ぜたガスを使って μ -PIC での増幅率を見ることにした。実際に用いたガスの比率は図2. 9に示す。

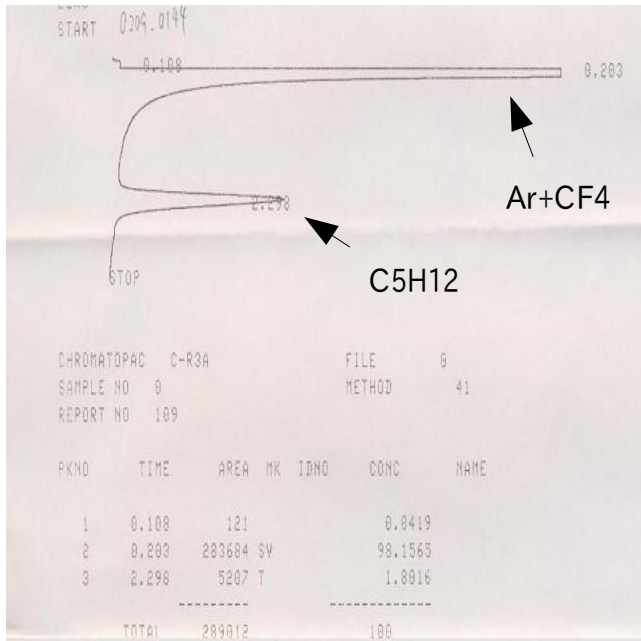


Gaskuropack 54

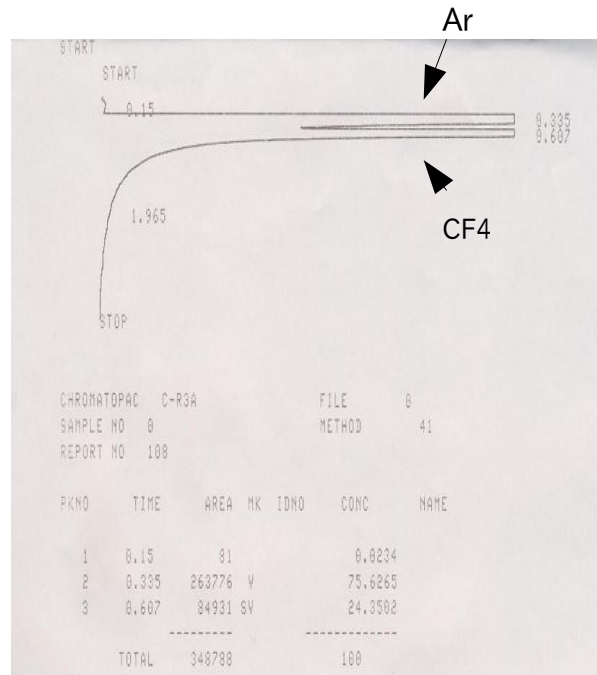


Morecular Sieve

図2. 6: n-C5H12 の混合比その1
Ar:CF4:C5H12 ~ 64:31:5
CF4 : C5H12 = 1 : 1 ではなかった

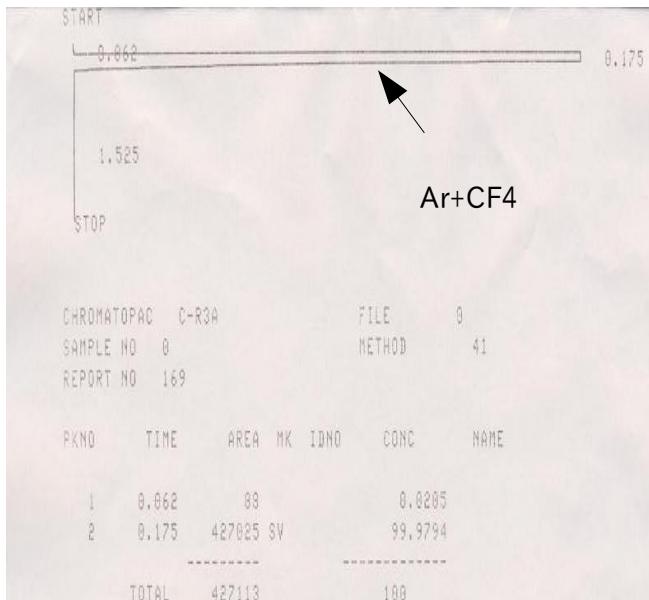


Gaskuropack 54

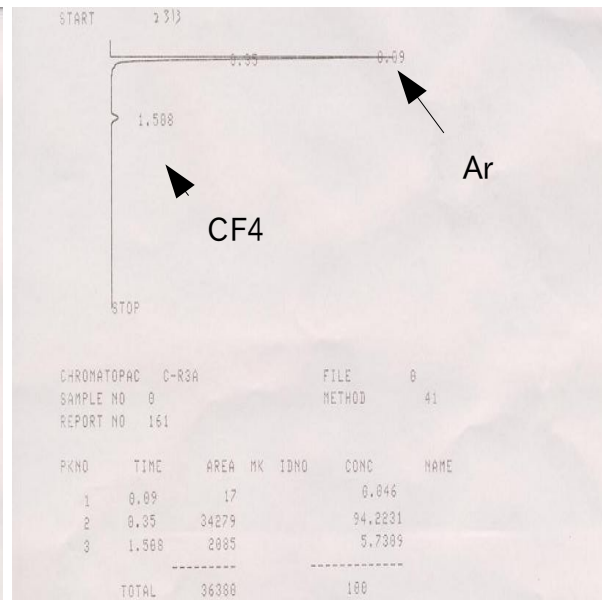


Morecular Sieve

図2. 7: n-C5H12 の混合比その2
Ar:CF4:C5H12 ~ 74:24:2
CF4 をさらに減らすと C5H12 はもっと減るようだ。



Gaskuropack 54

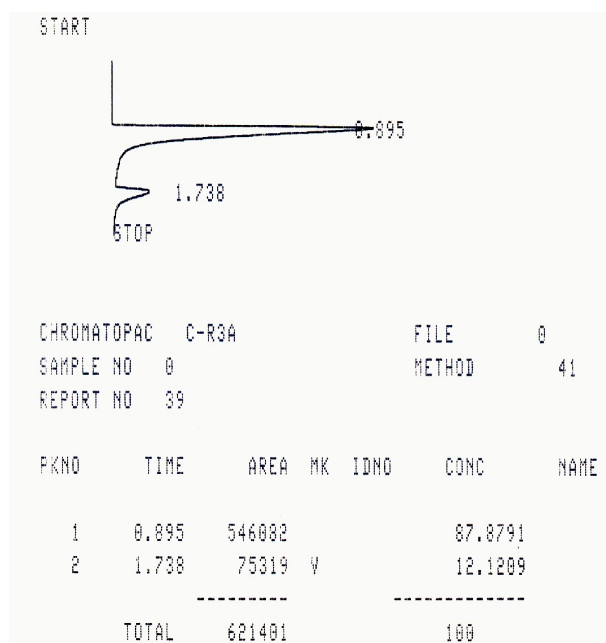
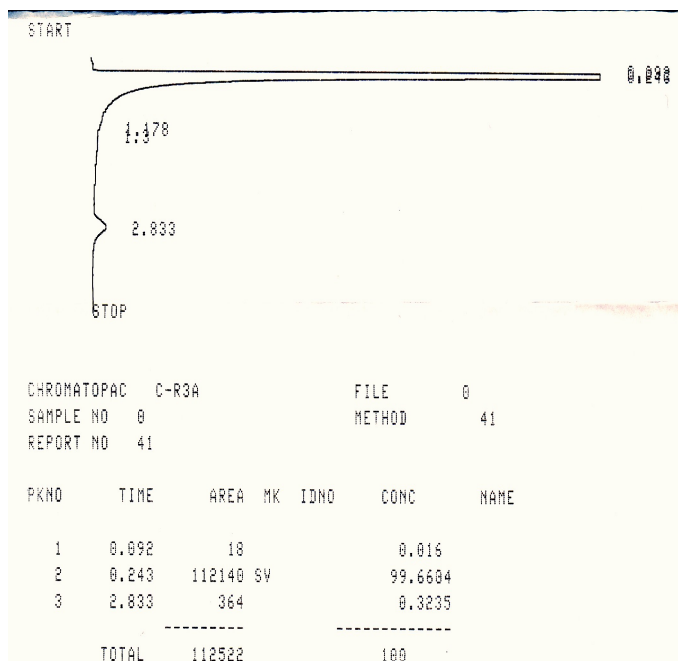


Morecular Sieve

図2. 8: n-C5H12 の混合比その3
Ar:CF4 95:5
もうガスクロで検出されもしない…

実際に μ -PIC に流したガス混合比

このままではガスクロで混合比をデータに残すのが難しいので、念のため室温をエアコンで24度に保ち(n-C₅H₁₂が途中で液化するのを防ぐため)、恒温槽の温度を19度にして以下の安定なガスを得た。これで増幅率を計った。



Gaskuropack 54

Morecular Sieve

Ar:CF₄:C₅H₁₂=87.6:12.1:0.3

図2. 9:実際にデータを取った n-C₅H₁₂の混合比

2-2. μ -PIC 周辺の接続

次に μ -PIC からの信号の読み出しについて説明する。今回用いた実験用の μ -PIC の読み出しはピクセル11列分をまとめて1チャンネルとしている部分と1列を1チャンネルとしている部分がある(図2. 10)。それぞれのチャンネルから配線が伸びていて、コンデンサーを通りアンプで μ -PIC からの信号が増幅されて出力する。

図2. 11と図2. 12に μ -PIC 周辺の接続の概観図を示す。アンプからの信号は3つに分けられ一つは Discriminator, もう一つは10 m のケーブルで遅らせてアテネータをはさみ ADC へと送られる。最後の一つはオシロスコープで信号を観察するために用いる。

ここで Discriminator はある一定の値(しきい値)を超えた信号が来た時だけ一つの矩形波を出力するようになっている。この矩形波は2つに分けられ一つは Scaler で来た信号の数を数えるのに用いる。さらにもう一つは Gate Generator へと送られここで幅と波高を変え ADC に送られ、この Gate が開いた時だけ初めの生の信号が来て読み出すために用いる。このように生の信号が来たときだけ Gate が開き読み取ることでノイズをカットすることができる。

最後に ADC でアナログ信号をデジタル信号に変え PC へと送られる。

図2. 10: μ -PIC 基板の拡大図

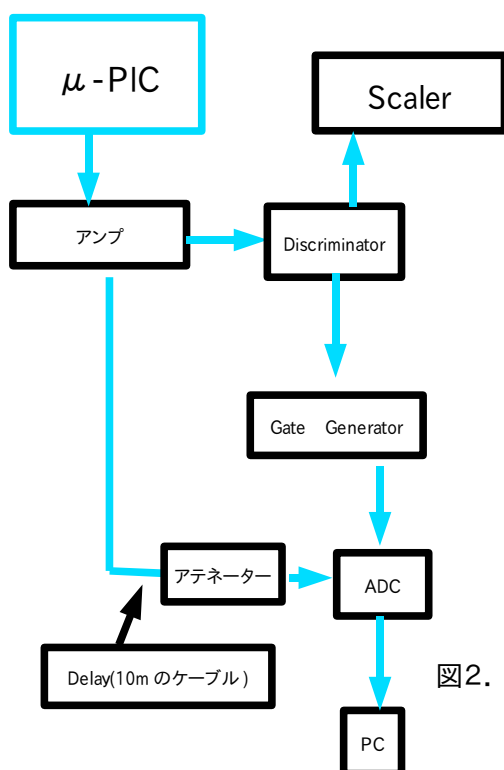
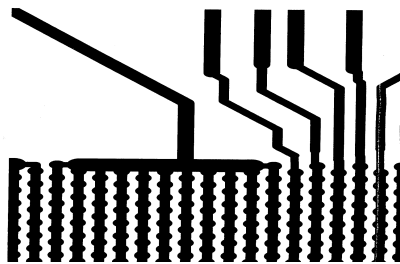


図2. 11: Data-taking の流れ

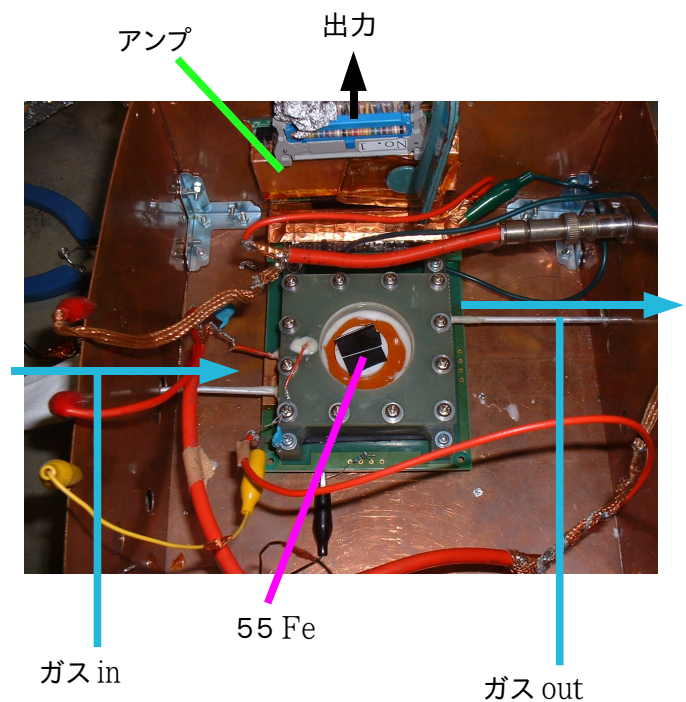


図2. 12: μ -PIC の接続

第三章 Measurements and Analysis

3-1. ADC を用いた波高観測

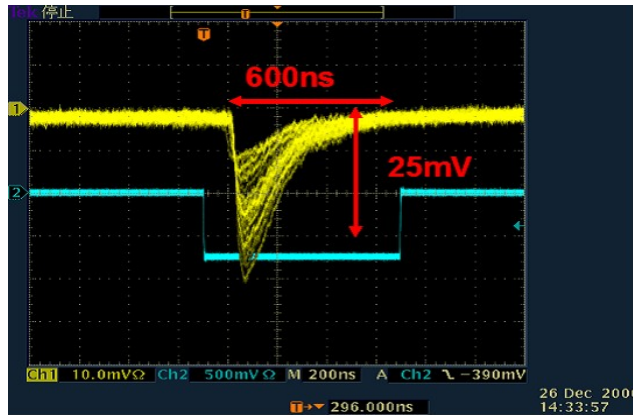


図3. 1:オシロスコープでの信号の様子

ADC 内では波形を Gate で定められた区間で時間積分している。図3.1のオシロスコープの波形を見るように、波形は電圧と時間の関係式として出てくる。

$$V=RI \quad I=\frac{dQ}{dt}$$

より

$$V=R \frac{dQ}{dt}$$

実際に電圧を時間で積分してみると、

$$\int Vdt = RQ$$

よって

$$Q=\frac{1}{R} \int Vdt$$

となり、ADC の測定によって電荷量を与えられる。0.125[pC]を1[count]として出力するようになっている。今回の実験では、各測定点ごとに10000個のパルスによる波高分布を計測し、波高の中心値を測定した。

3-2. 試験に用いた線源

本測定では、測定試験のための入射粒子線源として、 ^{55}Fe を用いた。第一章の光電効果の節で説明したように全体で85%の確率で5.9keVの電子が出て15%の確率で2.7keVの電子が出る。前者を光電ピーク、後者をエスケープピークと言う。一次電子のエネルギーが分かっている

ので μ -PIC でこの電子をどれだけ増幅できるかが、Anode から読み出した電子のエネルギーを求めれば分かる。

また55 Fe を用いる理由には以下の三点が上げられる。

- ・ β 線源だと電子と一緒にニュートリノも出てしまい電子のエネルギーが一定ではないので一次電子のエネルギーが特定できない。よって逆 β 崩壊による特性 X 線はエネルギーが一定なので都合が良い。

- ・ よりエネルギーの強い γ 線を用いるよりも光電効果が支配的な X 線の方がガス中での検出効率が良い。

- ・ さらに数 mm の Ar を通過した時に MIP 粒子が作る電子の数と Fe55 の X 線が作る電子の数が近いので実際に加速器実験などで荷電粒子検出器として使う時の環境と近いことが上げられる。

3-3. 波高とその読み取り

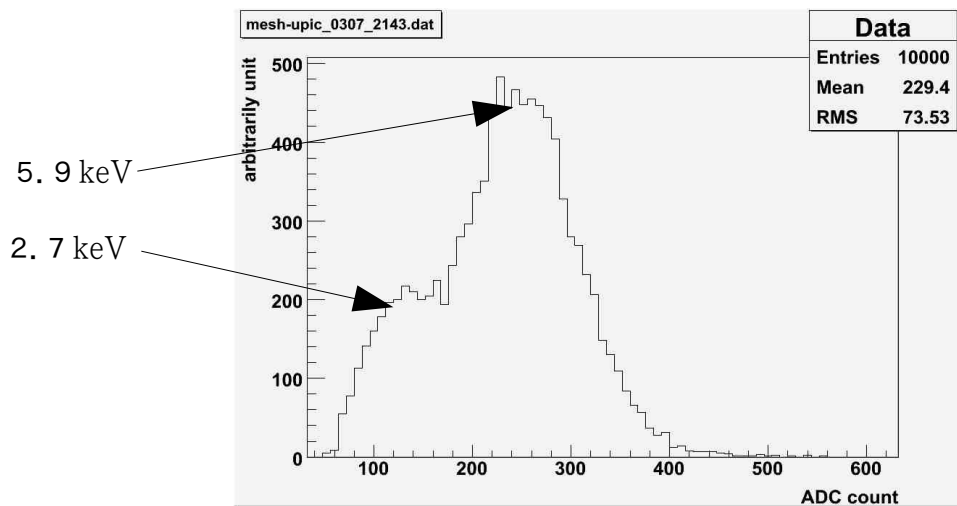


図3. 2: ADC のヒストグラム

ADC から出力された信号の波高分布は PC で図3. 2のようなグラフを描く。横軸は ADC 値で縦軸はイベント数。第一章の光電効果の節で説明したように確かにオージェ電子が出た場合 (5.9keV) と出なかった場合 (2.7keV) の二つのピークが見て取れる。

この 5.9keV に相当するメインのピークをガウスフィットし、中心値からガス増幅率を計算できる。

3-4. ガス増幅率の求め方

3-4-1. 生成電荷

メインピークで考える場合、5.9 keV のエネルギーの電子が出てくると考えられる。Ar の W 値 (仕事関数) は 26[eV/イオン対]より

$$5.9 \times 10^3 \div 26 \sim 227 \text{個} \quad (4-1)$$

の電子が出てくる(一次電子)。よって Fe55 によって生成される電子の総電荷は

$$1.60 \times 10^{-19} \times 227 = 3.63 \times 10^{-5} [\text{pC}] \quad (4-2)$$

となる。

3-4-2. キャリブレーション

ここで ADC でのカウント(ピーク値)がどれほどの電荷に値しているのか、つまり μ -PIC から来た二次電子の信号がどの程度アンプで増幅されているかをキャリブレーション(校正)する。

このために以下の装置を作った。パルスジェネレーターから容量 1[pF] のコンデンサーを通して AMP につなぐ。50 Ω の抵抗があるのは配線に用いているケーブルの特性インピーダンスが 50 Ω d であるため、コンデンサーの基板のインピーダンスも一致させ、信号の反射を抑制するためである。

パルスジェネレーターで 50 mV, 100 mV, ..., 500 mV の振幅の矩形波を送ると、 $\Delta Q = C \Delta V$ とコンデンサーの容量が 1[pF]より、0.05[pC], 0.1[pC], ..., 0.5[pC] に値する ADC 値が得られる。これにより、ADC 値と μ -PIC で得られた二次電子との校正曲線が得られる。

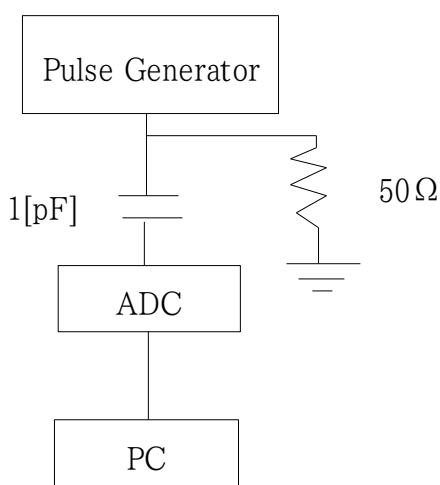


図3. 3: キャリブレーション時の接続
50 Ω の抵抗は内部抵抗を一致させて電子の反射を防ぐため

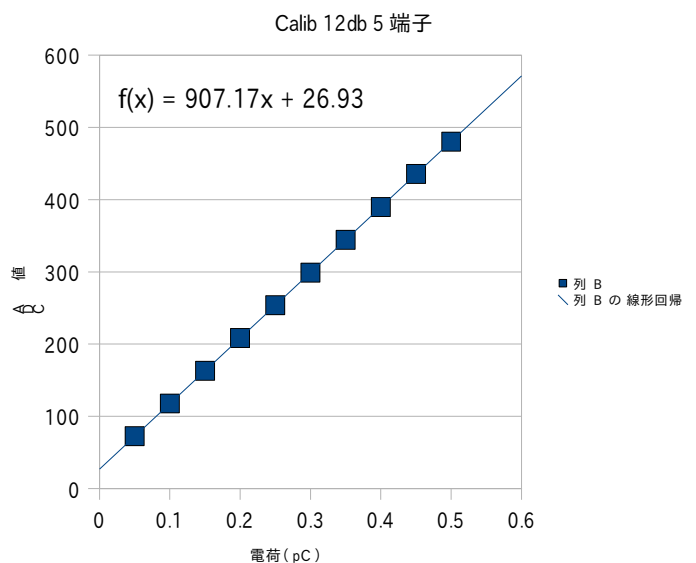


図3. 4: 12dBのアテネータと五端子のディバイダを接続した時の校正曲線(二次電子とADC値の関係)

電荷が 0[pC]の時に 26.93 の ADC の信号がきていることになるが、これはペDESTALといひ機器の offset によりここをゼロ点としたためこのような値がでている。もちろん測定する前は何も信号がこない状態で同様のペDESTALになっているか一応確認する。

$$y=907.17x + 26.9 \quad \rightarrow \quad x=\frac{(y-26.93)}{907.17} \times 10^{-12} [pC] \quad (4-3)$$

となり、この x がアンプで増幅される前の μ -PIC での二次電子にあたる。

3-4-3. Gain

これで Fe55 より一次電子は 3.63×10^{-5} [pC]で、二次電子は前節のキャリブレーションで求まるので、 μ -PIC でどれほど増幅できたのかが分かる。増幅率 G は式(4-2)と式(4-3)から

$$3.63 \times 10^{-5} \times G = \frac{((ADC値) - 26.93)}{907.17}$$

よって、Drift Plane が -600V, Mesh が 300V の時の増幅率は

$$G = \frac{(ADC値) - 26.93}{0.03295}$$

となる。

3-4-4. サチレーション

ADC にもアンプにもそれぞれ出力できる限界がある。これを超えてしまうことをサチレーションという。

ADC のサチレーションに対してはアテネータという信号の大きさを 1/2, 1/4... にしてくれる減衰器を用いて処理した。アンプのサチレーションに対しては μ -PIC からくる電荷を 5 分割するためのディバイダを用いて対応した(図3. 5と図3. 6)。

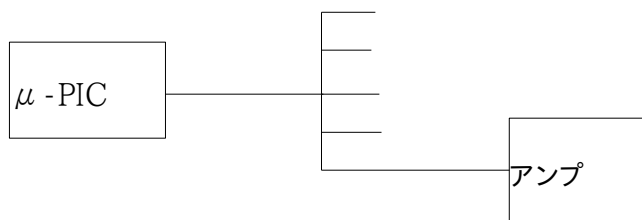


図3. 5:ディバイダを用いて電荷量を 1/5 にする

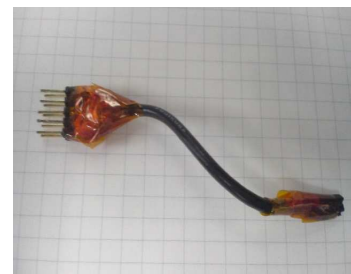


図3. 6:電荷を 5 分割するためのディバイダ

キャリブレーションは使ったアテネータ、端子に応じて行った。

第四章 Results and discussions

4-1. それぞれの増幅率

以下に今回用いた三種のガス Ar:C₂H₆~90:10 と Ar:CF₄~90:10 と Ar:CF₄:C₅H₁₂~87.6:12.1:0.3 の増幅率ならびにその比と結論づけたガスクロマトフィーでの観測の結果を載せる。

増幅率の測定は Anode 電圧を上げていき、信号が現れてから放電が頻繁に起きる手前の電圧までで行った。

Ar:C₂H₆=88:12

Anode 電圧	ADC 値	増幅率
350	612.5	17771.47
355	719.2	21009.71
360	824.2	24196.36
365	966.4	28511.99
370	1159	34357.21
375	1347	40062.82
380	1547	46132.63

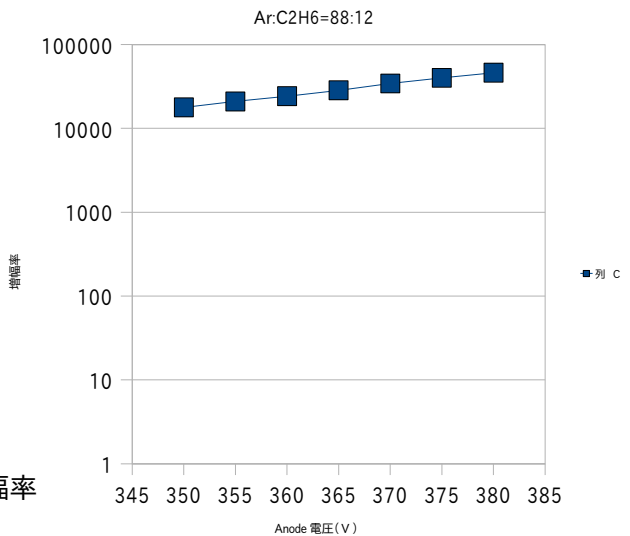


図4. 1:増幅率

図4. 2: Morecular Cieve

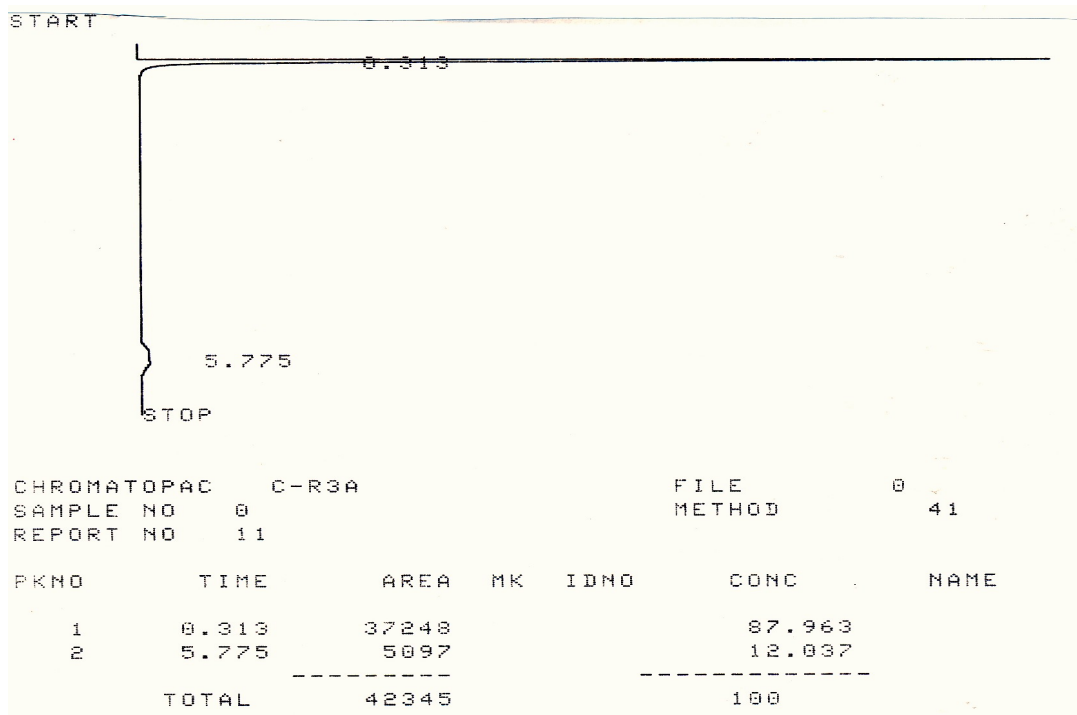


図4. 1 Ar:C₂H₆ =88:12における Anode 電圧を上げた時の増幅率の変化

図4. 2: 混合ガスの比率を決定したガスクロの結果。

カラムは Morecular Cieve を用いた。

Ar:CF4=90:10

Anode 電圧	ADC値	増幅率
430	411.7	2005
440	505	2486
450	675.5	3364
460	1062	5354
470	1558	7908

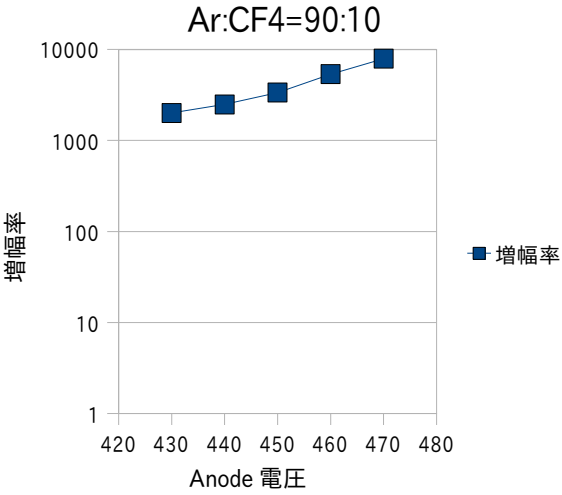


図4. 3:増幅率

図4. 4 : Morecular Cieve

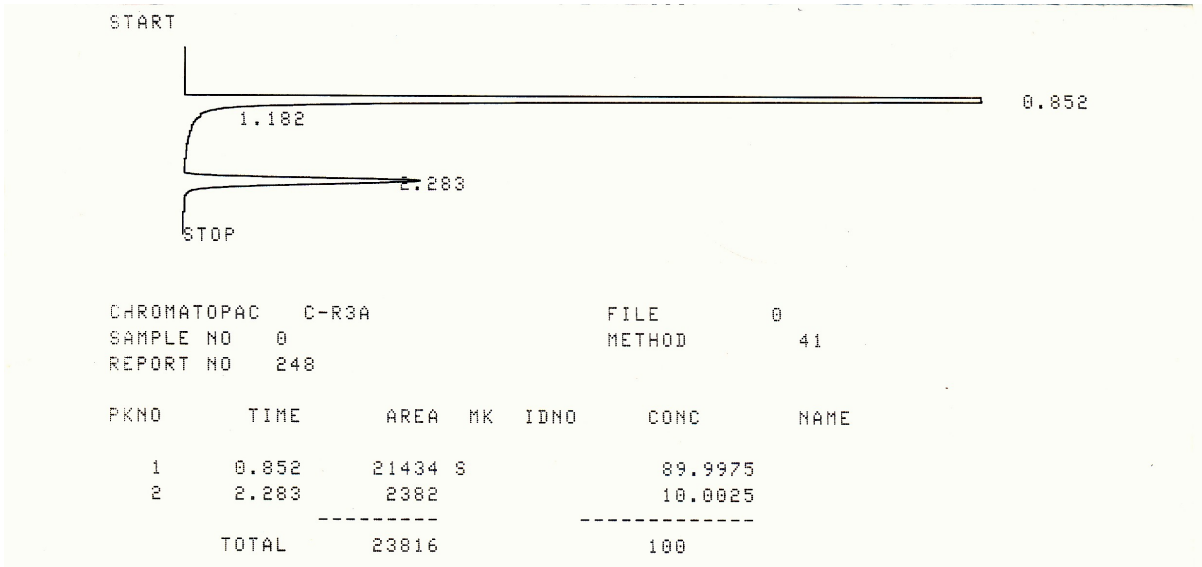


図4. 3 Ar:CF4 = 90:10 における Anode 電圧を上げた時の増幅率の変化
 図4. 4混合ガスの比率を決定したガスクロのデータ
 カラムに Morecular Cieve を使用

Ar:CF4:C5H12=87.6:12.1:0.3

Anode電圧	ADC値	増幅率
390	247.6	6697.12
395	311.7	8642.49
400	416.3	11817
405	684.3	19950.53
410	1026	30320.79

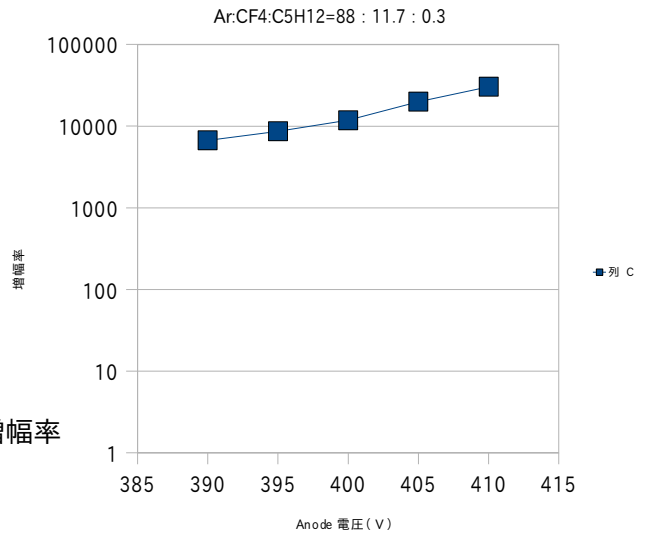


図4. 5:増幅率

図4. 6: Molecular Sieve

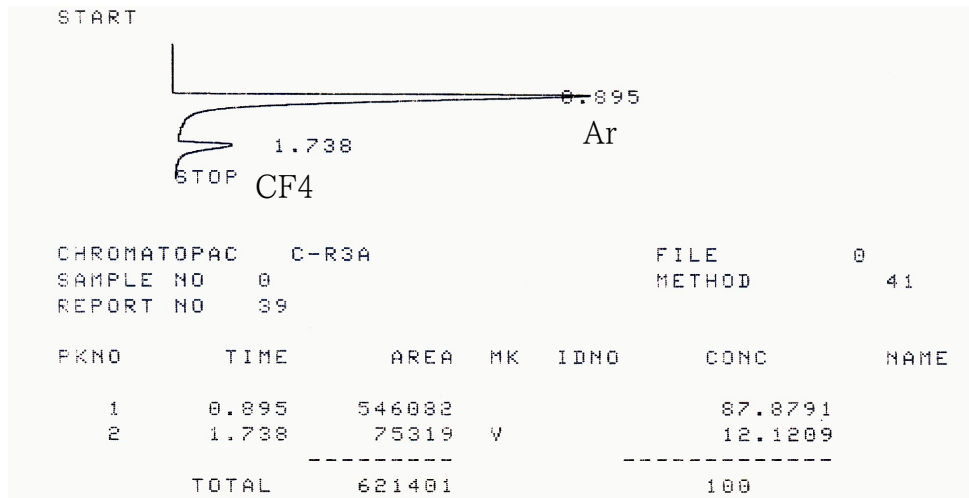


図4. 7: Guskropack54

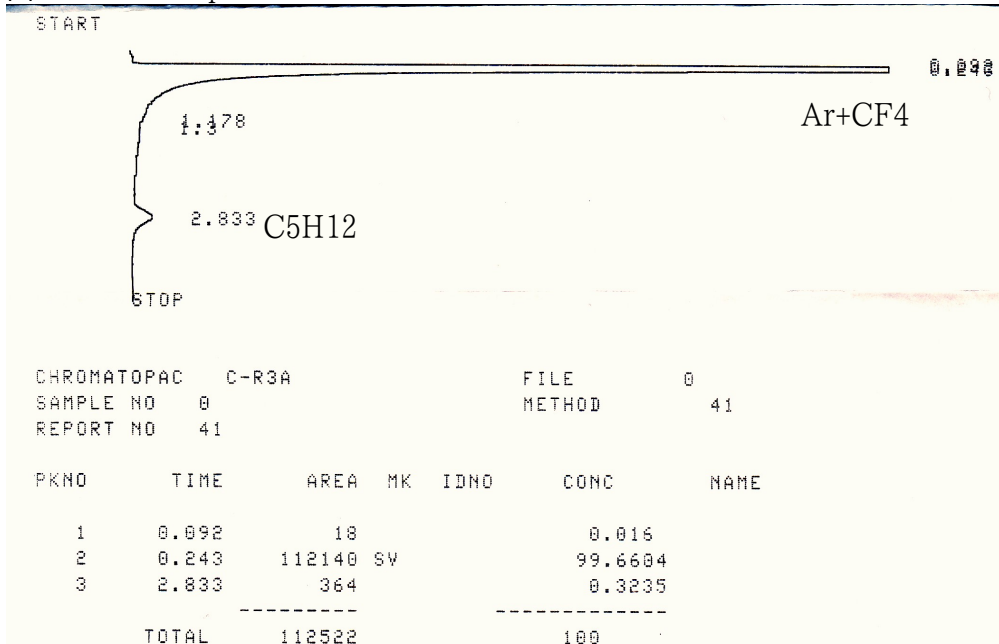


図4. 5 Ar:CF4:C5H12=87.6:12.1:0.3におけるAnode電圧を上げた時の増幅率の変化
 図4. 6、図4. 7:それぞれのカラムで測ったガス混合比

三種のガスの増幅率の比較

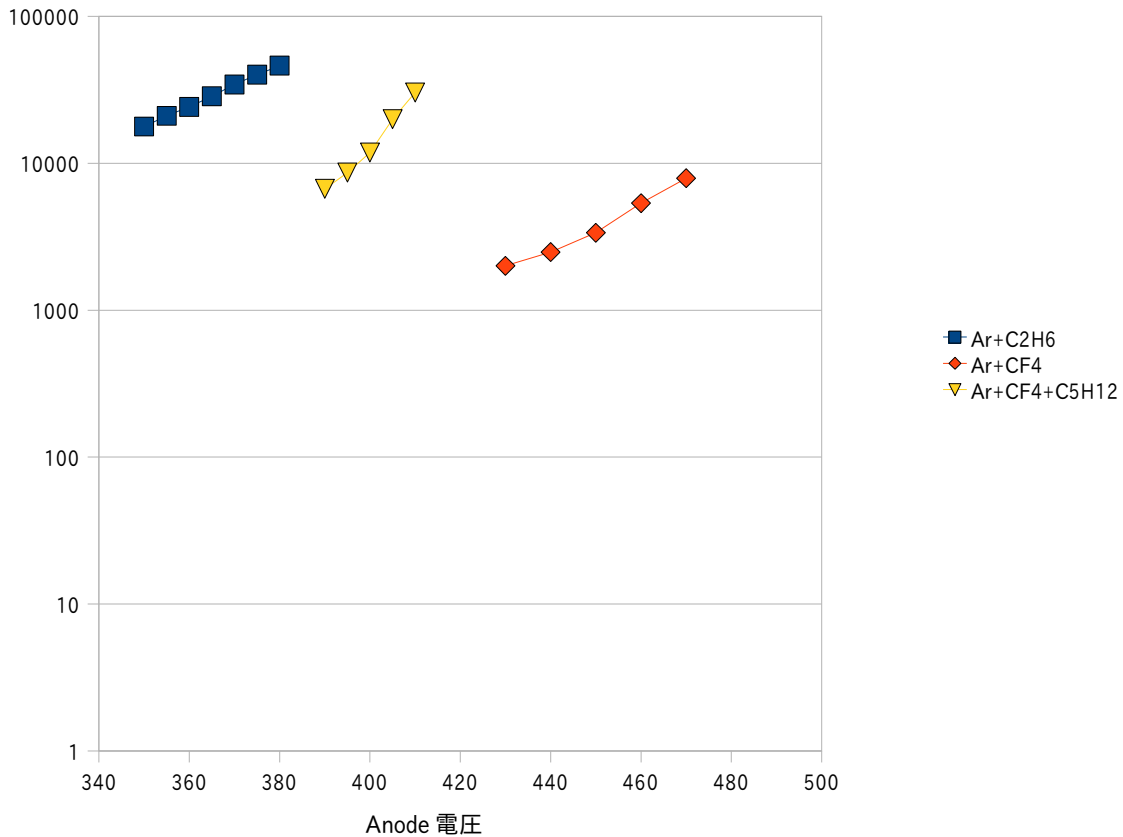


図4. 8: 三種のガスの増幅率の比較

4-2. Discussion

前節で示したデータから議論を始める。Ar, C2H6 のガスは今まで使ってきたガスで今回は CF4 をクエンチャーに用いたときの比較としてデータを載せた。図4. 8より Ar, CF4 のみのデータを見てみると明らかに C2H6 をクエンチャーに用いたときに比べ増幅率が落ち、MIP 粒子を観測するには十分でない増幅率だった。しかしそこに n-C5H12 を0. 3%入れるだけで C2H6 をクエンチャーに用いたときに匹敵するほどの増幅率が得られた。さらに CF4 のみを用いるより Anode 電圧が低くすむ。このガスを用いれば放電しても導通しにくく、また十分実用できるガスだと考えられる。

C5H12 を少量入れただけで増幅率が高くなり Anode 電圧を低く抑えられる理由を考察する。ガス増幅を起こす領域は高い電場がかかっているので二次電離は1次電離の時とは違い Ar だけでなく、CF4 や n-C5H12 も電離しガス増幅に関与する。n-C5H12 のイオン化エネルギーは CF4 より低いいためイオン化しやすいので、n-C6H12 を入れた方が二次電離のときに電子を作りやすいため増幅率が上がり、Anode 電圧が CF4 を入れた時よりも低くすんだと思われる。

第五章 Summary

5-1. まとめ

これまでの研究で μ -PIC の基板の Anode と Cathode 間の絶縁部分に放電の積み重ねが原因で C_2H_6 が降り積もり、絶縁部分が導通しやすくなることが分かった。そこで今回クエンチャーとして C_2H_6 の代わりに結合の強い CF_4 を用いた。しかしこれでは MIP 粒子を検出するのに十分な増幅率が得られなかった。そこで少量の $n-C_5H_{12}$ を混ぜたガスを試すと MIP 粒子を検出するのに十分な $G > 10^4$ を得ることができた。

このガスを用いれば放電しても導通しにくく、また十分実用できるガスだと考えられる。

5-2. 今後の課題

今回用いたガスは MIP 粒子を観測するのに十分な増幅率を得たが、実際にこのガスを用いて故意に放電させて C_2H_6 を用いたときより本当に導通しにくいかわかめる必要は十分にあると思われる。また今回の $n-C_5H_{12}$ の混ぜ方では長時間安定して少量の $n-C_5H_{12}$ を混ぜることはできないので、実際に安定して使う場合には他の混ぜ方か、 $n-C_5H_{12}$ を安定する程度までさらに混ぜて入れることが考えられる。

Acknowledgments

今回研究を行うにあたり、丁寧なご指導、助言を与えてくださった指導教官の越智敦彦先生に深く感謝致します。休みの日にも研究室に来てくださったり、実験以外のことも多々教えていただきありがとうございました。

また同じく本間先生にもミーティングの時間いつも自分の説明不足ながら的確な助言をいただきありがとうございます。小林さんも就活の忙しい中、基本的な質問に時間を割いていただきありがとうございます。

田辺さんには自分の研究があるにも関わらずガスクロマトグラフィーを動かすのに、尽力を尽くしていただいて、田辺さんがいなかったらこの研究はできなかったといっても過言ではありません。

一緒に研究を行った高山君、岡村君、井上君は同学年ということもあり、自分も頑張らなければという刺激を与えられ研究が進んだと思います。一緒に研究ができて非常に楽しかったです。

さらに上の先輩の論文、さらにはガスクロマトグラフィーにおいてご指導の時間をもご了承頂いた大下さん含め、勉強になり非常に感謝しております。

最後になりましたが1年間講義や補習を丁寧に教えてくださった川越先生、武田先生はじめ粒子物理研究室の先生方に深くお礼申し上げます。またTexをいれるのに6時間以上一緒になって手伝ってくださったり、Linuxの設定を手伝ってくださったり、他いろいろ面倒を見てもらった多くの先輩はじめ、同僚の方々にお礼申し上げます。

Appendix

1. ガスクロマトグラフィーのカラムの性能

今回用いたカラムは10年前に用いられていたものをそのままエージングをして使ったものなので多少性能が落ちているのかもしれないが、今回の実験をする上では支障はなかった。ただ、TCDの電流を100 mVに上げると使用範囲にも関わらずベースラインが安定しなかったのでカラムか、TCDが汚れていると考えられる。

ここで実際に使ったカラムの性能を記す。

キャリアーガスはすべてHeを用いた。キャリアーガスの圧力は2~6の間で調節した。炭化水素系のガスは圧力を上げないとなかなか信号がこない。TCD(INJ/DET)の温度はカラム(COL)より20°から50°ほど高くするのが適当。カラムの温度が高いほど分子は早くカラムを通っていく。各設定も記録している限り記載する。基本的なことは説明書にすべて書いている。

グラフでさちってるものがあるが、ペンレコーダーの紙の上でさちってるだけで実際の比率は測れている。同じガスをペンレコーダーのアテネータを変えてさちってる場合とさちらない場合で比べたがほとんど変わらなかった。TCDに流す電流はだいたい70 mAから120 mAで測定した。

1.A Morecular Cieve 13X

モレキュラーシーブは全カラム中、室温で酸素と窒素を分離できる唯一のカラムである[13]。永久ガスの分離に滴しているが、H₂O、CO₂、H₂S、NH₃は吸着されてしまう。ここに実際のガスの測定を行った結果どのような特徴を持っているかここに示す。

図 A. 1 Ar:C₂H₆=9:1の業者さんが混ぜて入れたガスボンベを測る。実際は88:12。
カラム温度50° TCDの温度80度° キャリヤー圧力 2kg/cm²

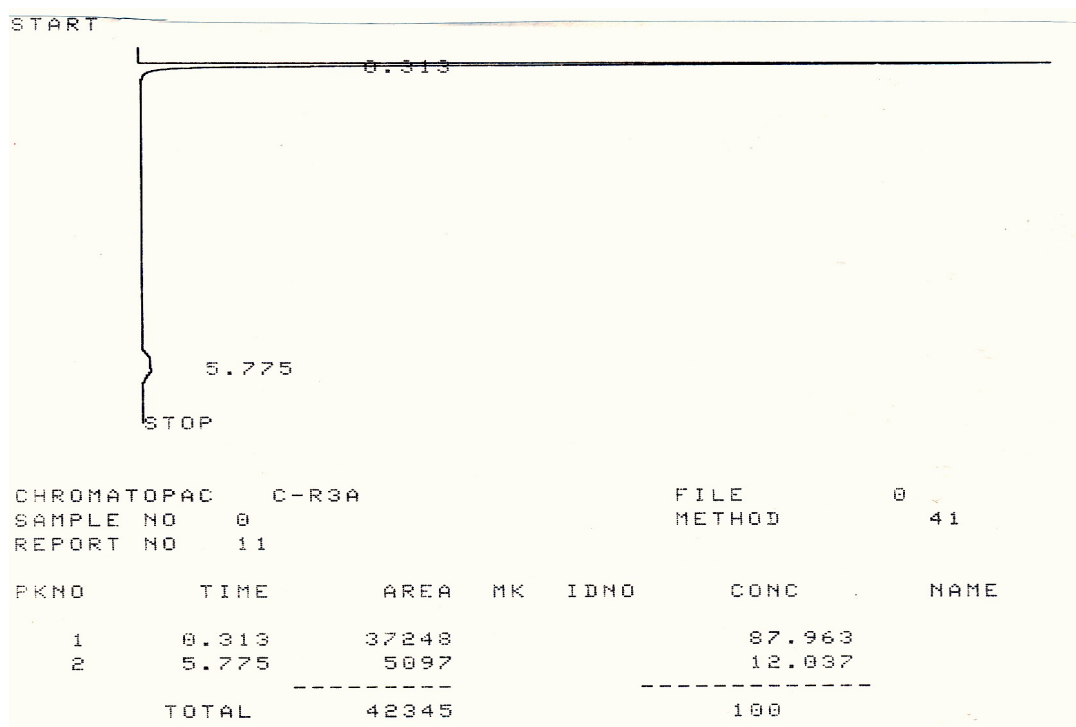


図 A. 2 三種混合器を用いて作った Ar:CF4=88:12。
 ArとCF4 がしっかり分かれてくれる。
 カラム温度50 ° TCD の温度80 ° キャリヤー圧力 2kg/cm²

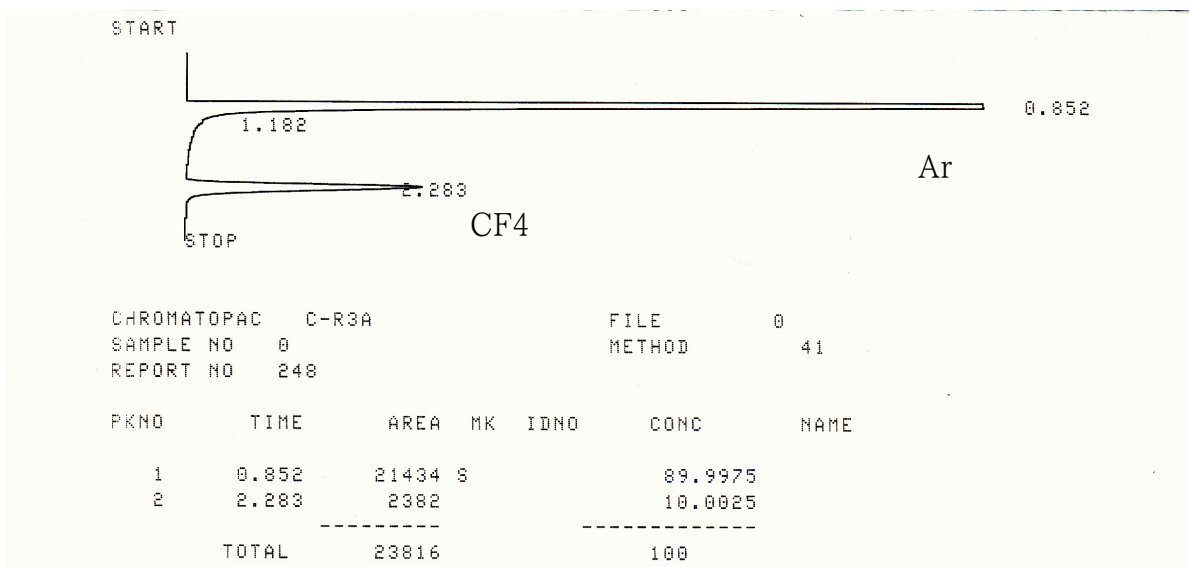


図 A.2

図 A. 3 二種混合器を用いて作った Ar:CF4:C5H12=87.6:12.1:0.3。
 ArとCF4 がしっかり分かれてくれるが C5H12 の信号が出てこない。
 C2H6 の信号がくるのに時間がかかることから
 C5H12 が中でつまっていると思われる。
 カラム温度150 ° TCD の温度180度 ° キャリヤー圧力 2kg/cm²

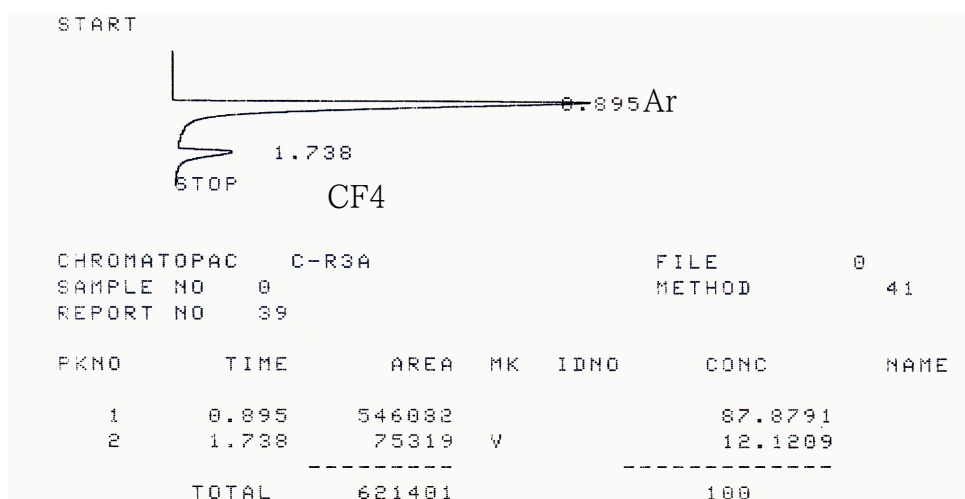


図 A.3

図 A. 4 空気

空気の実際の成分が N2:78.084 O2:20.946 Ar2:0.930 CO2:0.034 より
精度よく検出されていると思われる。CO2 はもう少し待てば見れたのかもしれない。

N2とO2が完璧に分離できてないがもう少しエージングするか、
キャリアーの圧力を高くすればいいと思われる。
カラム温度 50 ° TCD の温度 80 ° キャリヤー圧力 $2\text{kg}/\text{cm}^2$

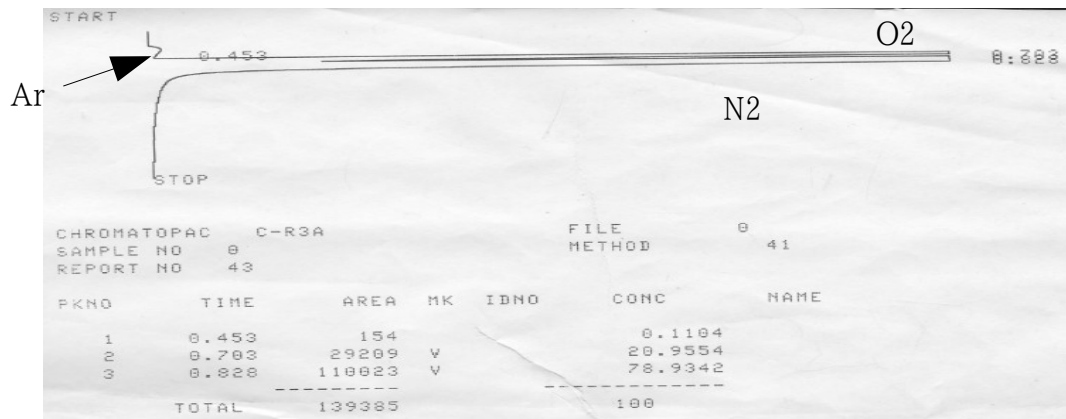


図 A.4

図 A. 5:CF4 + C5H12 を見た。まだ空気が抜けていない段階。
C5H12 は見えなくて CF4 と空気の成分の O2、N2 が見えている。
カラム温度 50 ° TCD の温度 80 ° キャリヤー圧力 $2\text{kg}/\text{cm}^2$

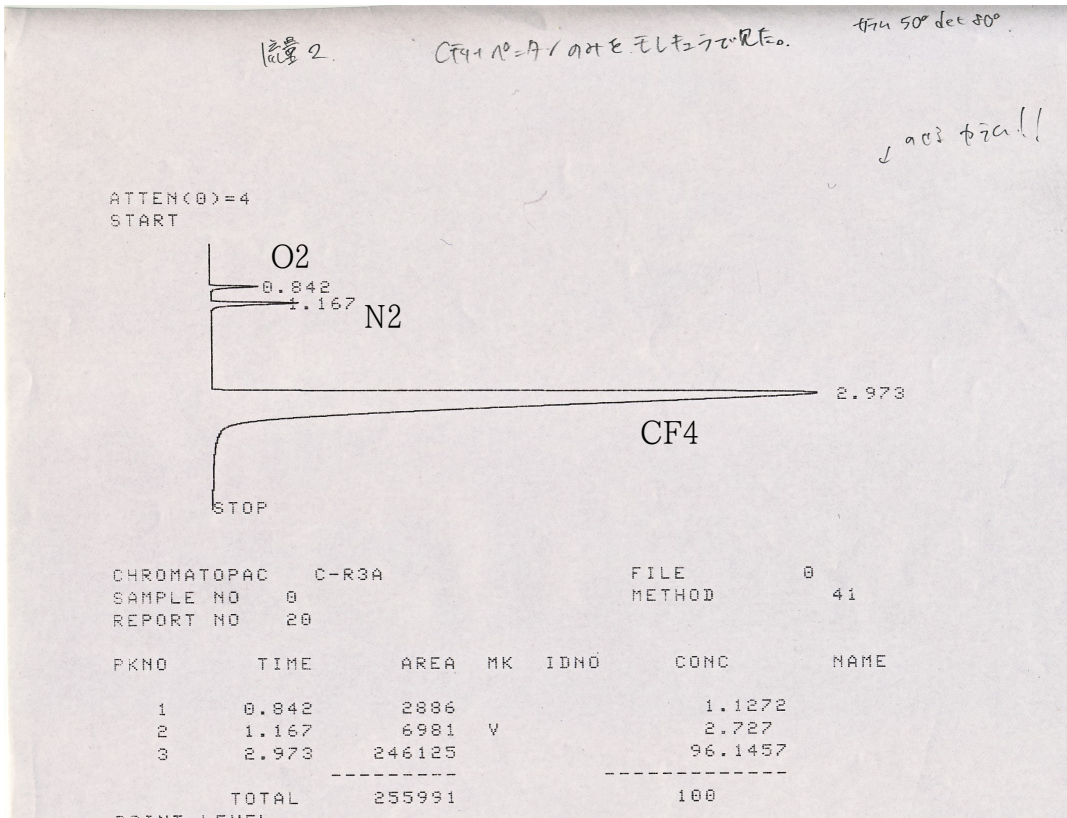


図 A.5

図 A. 6: 図 A.5 からさらに時間がたったガス。空気の成分の O₂、N₂ が減っている。空気の成分は O₂ が N₂ の 1/4 ほどだがあまり一致していない。CF₄ が勢いよくきてるからだと考えられる。
カラム温度 50 ° TCD の温度 80 ° キャリヤー圧力 2kg/cm²

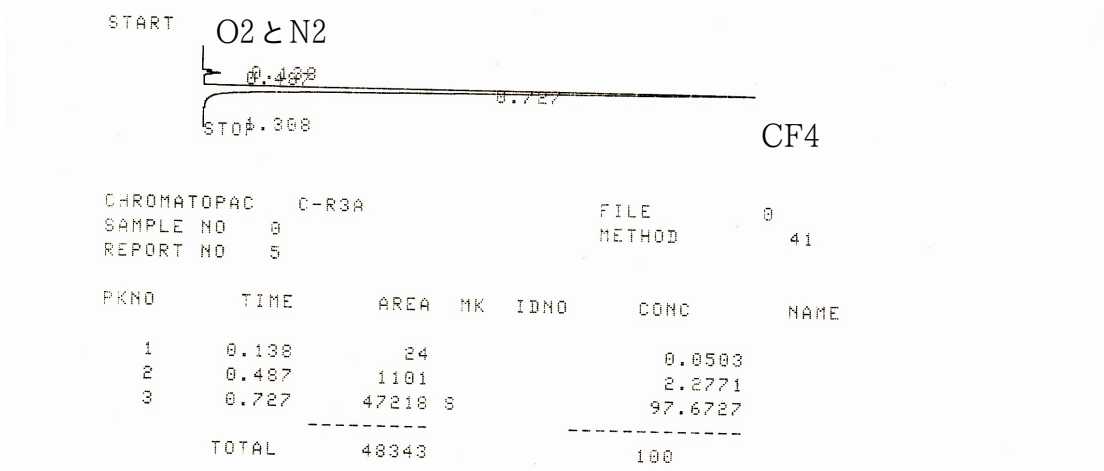
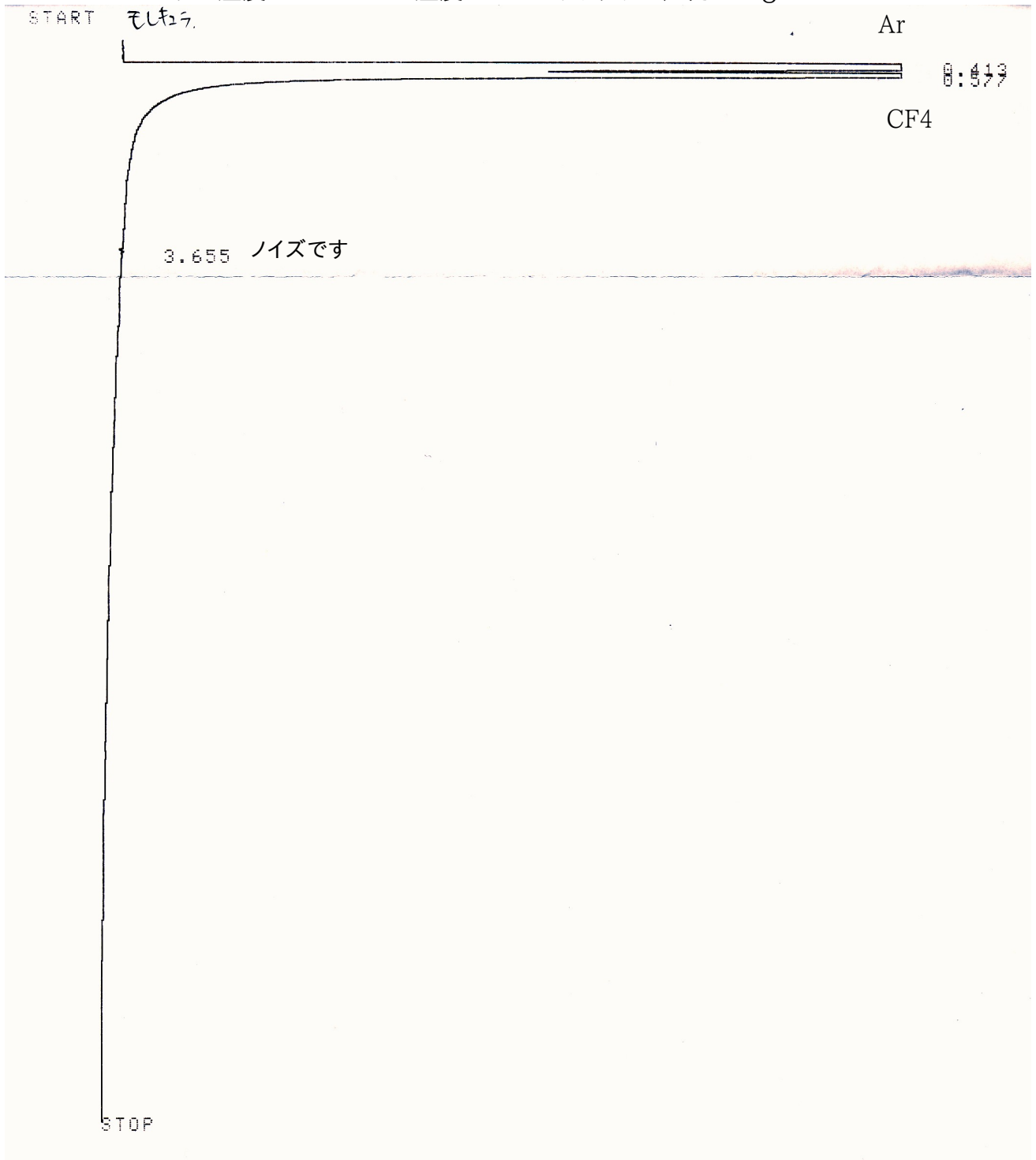


図 A.6

図 A. 7: ArとCF4とC5H12を混ぜたガスを見た。

30分以上は待ったが結局見えなかった。

カラム温度 220 ° TCD の温度 250 ° キャリヤー圧力 4kg/cm²



CHROMATOPAC C-R3A
 SAMPLE NO 0
 REPORT NO 75

FILE 0
 METHOD 41

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	0.413	65242			74.7064	
2	0.577	22089	V		25.2936	
TOTAL		87331			100	

図 A. 8、図 A. 9: さちってる場合とそうでない場合を安定したガスで比べて
 機械が自動で検出していることを確認した。
 アテネータ4(図 A. 8)とアテネータ128(図 A. 9)で比べたが
 ほとんど変わらなかったのだから確かに機械が自動でさちっている分も検出しているようだ。
 設定は記録し忘れたが、Ar、CF4 を見ているのは確か。

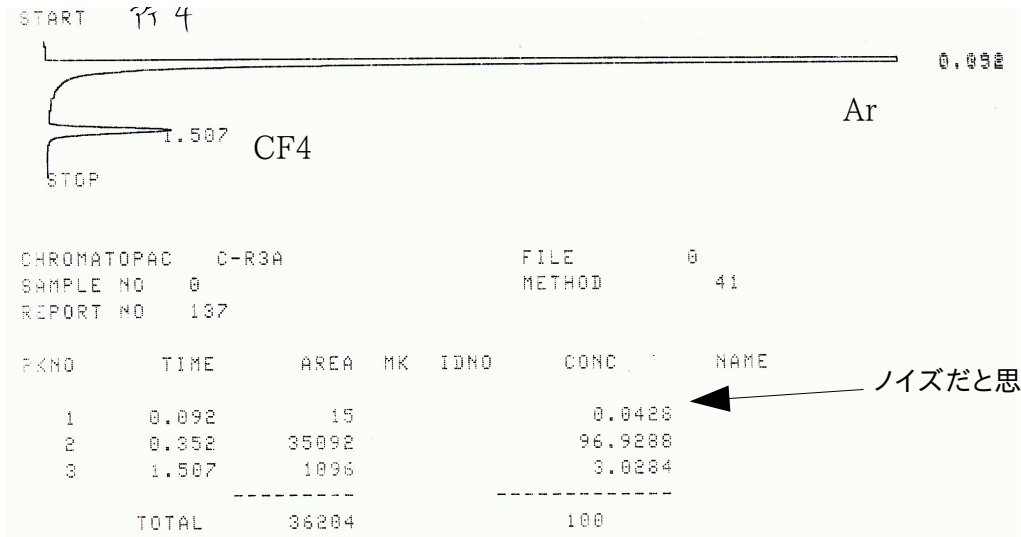


図 A.8 アテネータ4

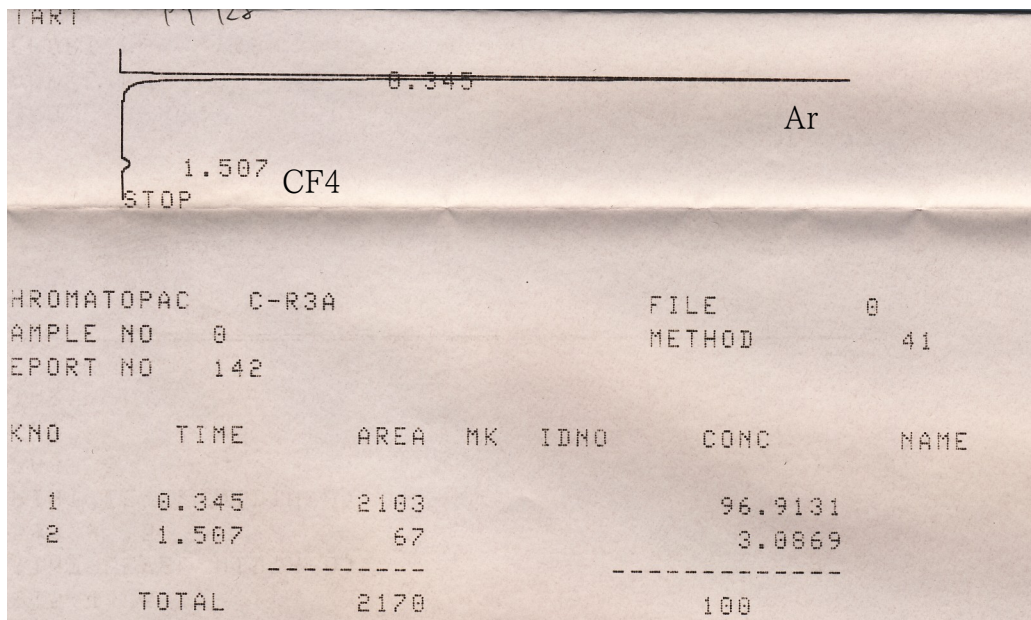


図 A. 9 アテネータ128

1.B Gaskuropack54

Gaskuropack 54 は、架橋度の高いポリスチレン・ジビニルベンゼン共重合体からなるポーラスポリマービーズで、独自の特殊処理により熱安定性の高い、ロット間のバラツキの少ない充填剤となっている。またポーラスポリマーのため、水や空気によるゴーストはほとんどなく作業環境などの分析にも適している。

Gaskuropack 54 による低級炭化水素保持時間表を以下に示す。[13]

分析条件	Gaskuropack 54 80/100 SUS 2m×3mm I.D. He 45mL/min Column Temp. 40°C											
化合物	O2	N2	Ar	CO	CO2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2	C3H8	C3H6	H2O
保持時間 (min)	0.45	0.45	0.45	0.45	1.17	0.62	2.95	1.92	2.12	12.92	9.85	3.67

ここで今回使ったガスと Gaskuropack54 の性能をここに示す。

図 B. 1: Ar:CF4:C5H12=87.6:12.1:0.3 を決定したデータ
 C5H12 を見るにはこの温度まで上げないと見えない。
 何時間もたてば低い温度でも見えるのかもしれない。
 ArとCF4 は分離できない。
 カラム温度 150 ° TCD の温度 180 ° キャリヤー圧力 5kg/cm²

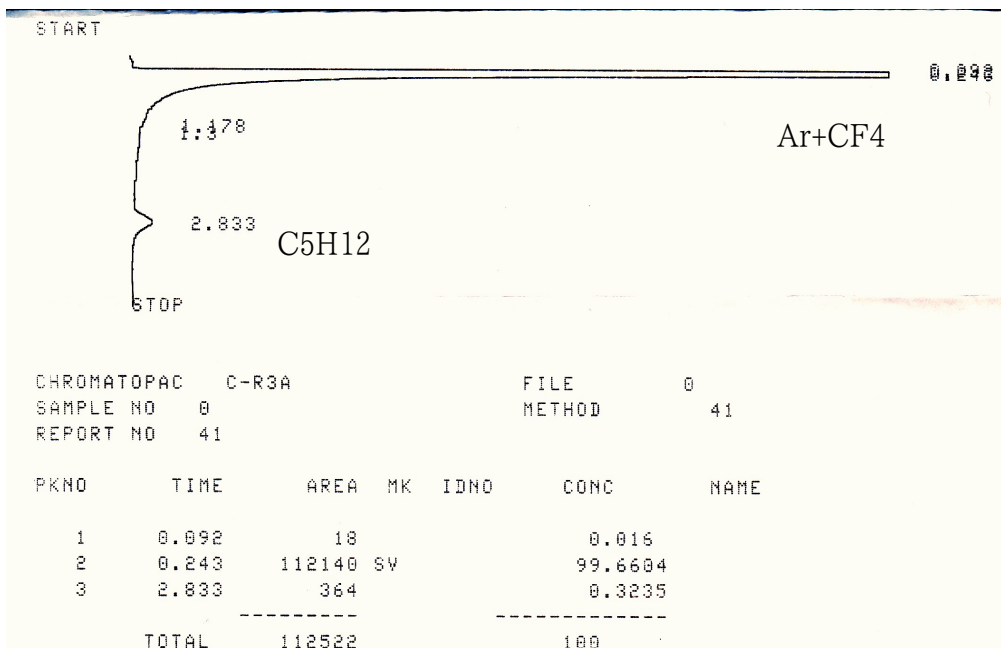


図 B.1

図 B. 2: 空気
 カラム温度 50 ° TCD の温度 80 ° キャリヤー圧力 2kg/cm²

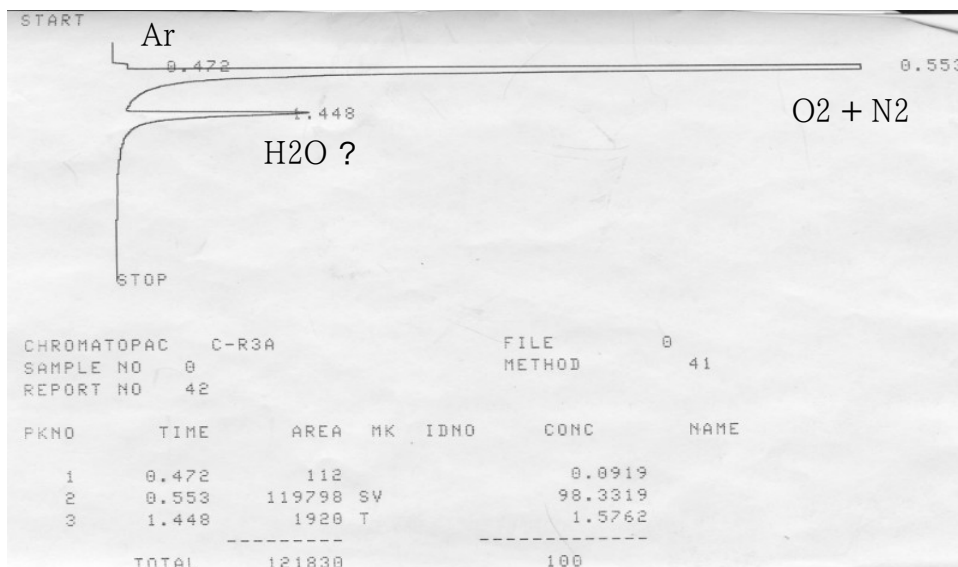


図 B. 2

図 B. 3、図 B. 4: Ar と CF₄ が分離できないと考えているがもしかしたら Ar のみ CF₄ のみ見えているという可能性もあるので Ar のみ CF₄ のみで測定した。

図 B. 3 は Ar のみ、図 B. 4 は CF₄ のみ。
 同じ位置に二つのピークがあるのでやはり分離できてないと考えられる。
 カラム温度 120 ° TCD の温度 150 ° キャリヤー圧力 4kg/cm²

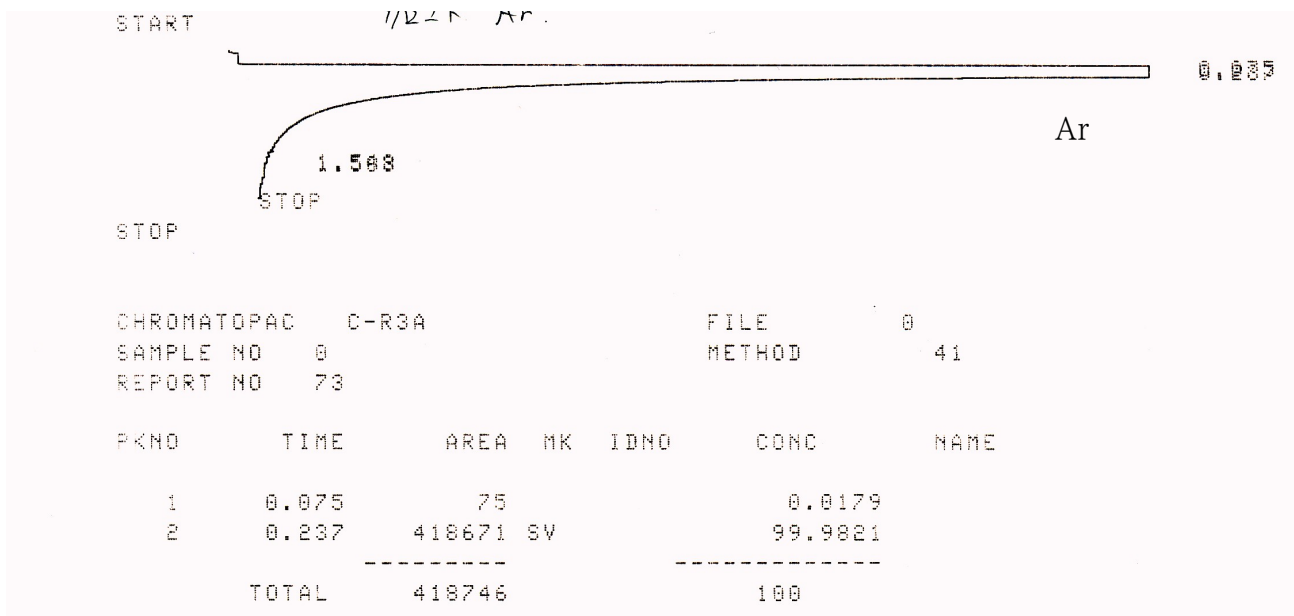
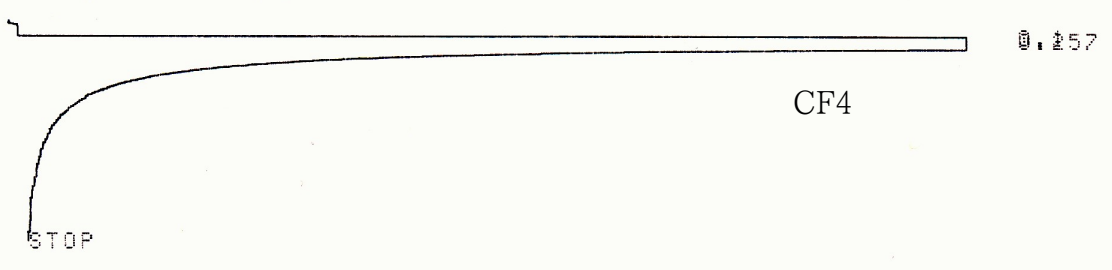


図 B. 3



CHROMATOPAC C-R3A FILE 0
 SAMPLE NO 0 METHOD 41
 REPORT NO 67

PKNO	TIME	AREA	MK	IDNO	CONC	NAME
1	0.1	74			0.0137	
2	0.257	537266	V		99.9863	
TOTAL		537339			100	

☒ B.4

Reference

- [1] 守谷健司.「マイクロピクセル検出器の電極間放電に伴うピクセル上堆積物の研究」Master's thesis, 神戸大学,2007年
- [2] 三浦功、他:「放射線計測学」 裳華房、1960
- [3] PHYSICS LETTER B - REVIEW OF PARTICLE PHYSICS -
- [4] G.Charpak et al. , 「The use of multiwire proportional counters to select and localized charged particles」, Nucl. Instr. And Meth. 62(1968) 235
- [5] A.Oed. 「Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases」. Nucl.Inst.Meth. ,A263,1988
- [6] 小石悟史. 微細加工技術を用いた放射線検出器 μ -PIC の開発.Master's thesis,東京工業大学,2002
- [7] Kentaro Miuchi,Hidetishi Kubo,Thutomu Nagayoshi,Okada Yoko,Orito Reiko, Atusi Takada, Atushi Takeda, Toru Tanimori,Masaru Ueno, Oleg Bouianov, Marina Bouianov, 「Performance and application of a μ TPC」. Nucl.Inst.Meth ,A5535,2004
- [8] F.sauli. 「GEM:A new comcept for electron amplification in gas detectors」.Nucl.Instr.and Meth A386(1997)531
- [9] Atsuhiko Ochi, Tsutomu Nagayoshi, Satoshi Koishi, Toru Tanimori, Tomofumi Nagae, Mirei Nakamura 「A new design of the gaseous imaging detector:Micro Pixel Chamber.」 Nucl.Inst.Meth ,A471,2001
- [10] 小林 正治. 「メッシュ付き μ -PIC の安定動作に向けた研究」 Master's thesis,神戸大学、2009年
- [11] Wikipedia 「<http://ja.wikipedia.org/wiki/クロマトグラフィー>」
- [12] 東京理科大学 大江修造教授の HP 「<http://www.s-ohe.com/i/vpcal/vpcal.html>」
- [13] ジーエルサイエンス社のカラム情報
「<http://www.gls.co.jp/product/catalog-29/10/index.html>」