

修士学位論文
メッシュ付 μ -PIC の Ion Back-Flow 減少と
電子収集率向上に向けた研究

物理学専攻

080s112s

田辺晃

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

平成 22 年 2 月 5 日

概 要

μ -PIC とは高エネルギー実験や宇宙 X 線/ γ 線実験のために開発されているガス放射線検出器であり、優れた位置分解能・時間分解能・入射許容量を備えている。高エネルギー実験での実用には、安定に動作し、MIP 粒子を検出できる 10^4 程度の増幅率が必要となるため、我々研究グループでは、 μ -PIC の基板上方にマイクロメッシュを実装した M^3 -PIC の開発を進め、安定な高増幅率動作を目指している。

本実験では、 M^3 -PIC の動作ガス/メッシュのジオメトリを変更し、増幅率/Ion Back-Flow を実測により評価した。動作ガスでは、放電の原因と考えられる炭化水素系ガスを含まない、 CF_4 ベースの動作ガスを用いてシグナルを確認でき、少量の $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$ (0.3 %) を含ませることで増幅率約 3×10^4 を達成出来た。また $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_6=50:50$ ガスを用いた場合、 M^3 -PIC3 号機 (メッシュ厚 $5[\mu\text{m}]$) と M^3 -PIC4 号機 (メッシュ厚 $20[\mu\text{m}]$) では増幅率に約 37[%] の差分を確認した。また P10($\text{Ar}:\text{CH}_4=90:10$) ガスを用いた場合、 M^3 -PIC4 号機 (メッシュ厚 $20[\mu\text{m}]$) では Ion Back-Flow を 0.5[%] まで低減させることが出来た。

更に、シミュレーションを用いて電子収集率/増幅率/Ion Back-Flow の計算を行い、検出器内での現象を調査した結果、メッシュ厚の増加により増幅率が低下する現象は、メッシュの電子透過率の減少によるものと確認され、メッシュを厚くすることで Ion Back-Flow を減少出きるという実測と同様の結果が得られた。また $\text{Ar}+\text{C}_2\text{H}_6$ ガスでは、Ar の比率を低く抑えることでメッシュへの電子収集率を低減出来ることが確認できた。

目次

第 1 章	Introduction	6
1.1	粒子線の検出	6
1.1.1	荷電粒子の検出	6
1.1.2	X 線、 γ 線の検出	7
1.2	ガス検出器の動作原理	10
1.2.1	ガス増幅	10
1.2.2	充填ガス	12
1.3	ガス検出器の開発過程	12
1.3.1	電離箱 (ion chamber)	12
1.3.2	比例計数管 (proportional chamber)	13
1.3.3	MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)	13
1.3.4	MSGC(Micro Strip Gas Chamber)	15
1.3.5	MicroMegas	15
第 2 章	μ -PIC	17
2.1	μ -PIC の構造	17
2.2	μ -PIC の電極配置	18
2.3	μ -PIC の構造	18
2.4	μ -PIC の動作原理	20
2.5	μ -PIC の特徴	20
第 3 章	メッシュ付 μ -PIC	22
3.1	メッシュ付 μ -PIC の構造	22
3.2	メッシュ付 μ -PIC の動作原理	22
3.3	メッシュ付 μ -PIC の特徴	23
3.4	実験の目的	24
3.4.1	増幅率・電子集収率	24
3.4.2	Ion Back-Flow 率	24
第 4 章	セットアップ	26
4.1	メッシュ付 μ -PIC 本体	26
4.1.1	マイクロメッシュ・スペーサー実装	28
4.2	動作ガス	30
4.2.1	ガスパッケージ	30
4.2.2	ガス混合機	32
4.2.3	n-C ₅ H ₁₂ 用恒温槽	34
4.2.4	ガスクロマトグラフィー	34
4.2.5	ガス配管	37
4.3	増幅率測定	39

4.3.1	増幅率計算	39
4.3.2	測定機器/データ収集フロー/システム/電荷～ADC 校正/増幅率計算	41
4.4	Ion Back-Flow 測定	45
4.4.1	Ion Back-Flow 計算	45
4.4.2	測定回路	46
4.4.3	誤差とキャリブレーション	46
4.4.4	データ収集手順	47
4.4.5	Ion Back-Flow 値の誤差計算	50
4.4.6	データロガーを用いた Ion Back-Flow 測定	50
第 5 章	M^3-PIC の性能評価	52
5.1	増幅率測定	52
5.1.1	異なる厚さのメッシュを用いた増幅率測定	52
5.1.2	異なる動作ガスをを用いた増幅率測定	53
5.2	Ion Back-Flow 測定	56
第 6 章	Maxwell3D と Garfield を用いたシミュレーション	58
6.1	Maxwell3D(三次元電場解析ソフト)	59
6.2	Garfield(ワイヤーチェンバー用シミュレーションプログラム)	59
6.3	シミュレーション計算内容	59
6.3.1	増幅率	60
6.3.2	電子収集率	60
6.3.3	Ion Back-Flow	61
第 7 章	シミュレーションを用いた M^3-PIC の性能評価	62
7.1	メッシュジオメトリの検証	62
7.1.1	電子集収率	63
7.1.2	Ion Back-Flow 率	65
7.1.3	増幅率	66
7.1.4	メッシュジオメトリの最適化	66
7.2	印加電圧の検証	68
7.2.1	電子集収率	68
7.2.2	Ion Back-Flow 率	69
7.3	動作ガス検証	70
7.3.1	Ar+C ₂ H ₆ ガス	70
7.3.2	P10、Ar+CF ₄ 、Ar+CF ₄ +C ₅ H ₁₂ ガス	74
第 8 章	まとめ	77

目 次

1.1	μ^+ の銅に対するエネルギー損失 [2]	7
1.2	光電効果の概念図 [3]	8
1.3	コンプトン効果の概念図 [3]	8
1.4	電子・陽電子対生成の概念図 [3]	9
1.5	ガス中での光電吸収断面積と入射光子の平均自由行程 [6]	9
1.6	鉛中の光子の吸収断面積 [6]	10
1.7	比例計数管の概念図 [5]	11
1.8	ガス増幅過程概念図 [6]	11
1.9	電離箱の概念図 [1]	13
1.10	MWPC の概念図 [7]	14
1.11	MWPC の電場構造 [7]	14
1.12	MSGC の概念図 [10]	15
1.13	MicroMegas 概念図 [9]	16
2.1	μ -PIC の構造図 [11]	17
2.2	正方形 μ -PIC(左) と六方配置型 μ -PIC (右)	18
2.3	六方配置型 μ -PIC 読み出し基板図面	19
2.4	μ -PIC 読み出し基板 (左) と読み出しチャンネル (右)	19
2.5	μ -PIC の動作原理図	20
3.1	メッシュ付 μ -PIC の構造図	22
3.2	μ -PIC の電場構造 (左) とメッシュ付 μ -PIC の電場構造 (右)	23
3.3	Ion BackFlow 概念図	24
3.4	micro-TPC による電子の三次元飛跡 [16]	25
4.1	M^3 -PIC 外観図	27
4.2	マイクロメッシュ拡大写真	27
4.3	M^3 -PIC のスペーサー実装 [17]	28
4.4	メッシュ実装過程図 [17]	29
4.5	マイクロメッシュ実装後の M^3 -PIC の写真 [17]	29
4.6	新しいパッケージの外観図	31
4.7	新しいパッケージ図面	31
4.8	新しいガスパッケージでの酸素濃度の時間変化	32
4.9	ガス混合機の外観図	32
4.10	n-C ₅ H ₁₂ の蒸気圧曲線 [20]	34
4.11	ガスクロマトグラフィー検出概念図	35
4.12	ガスクロマトグラフィー概念図 [21]	36
4.13	P10(Ar : CH ₄ = 90 : 10)、Ar : C ₂ H ₆ = 50 : 50 ガスの配管図	37
4.14	P10(Ar : CH ₄ = 90 : 10)、Ar : C ₂ H ₆ = 50 : 50 ガスの配管図	38

4.15	^{55}Fe から得られる光電子の生成過程	40
4.16	エスケープピーク (左側の山) とメインピーク (右側の山)	40
4.17	5 本足ディバイダの接続による μ -PIC 信号からの出力電荷の分割	42
4.18	M^3 -PIC のデータ収集に使用した機器	42
4.19	データ収集システムのブロック図	43
4.20	オシロスコープでの波形図	43
4.21	キャリブレーション時のブロック図	44
4.22	5 端子ディバイダと 12dB のアテネータを接続した場合の校正曲線	45
4.23	ピコアンペアメータの回路図	46
4.24	同時測定の設定アップ図	47
4.25	^{55}Fe の波形図 (写真の最大波高は $200[\text{mV}]$)	47
4.26	Ion-BackFlow 測定フローチャート	48
4.27	ポリイミド薄膜に長時間電圧をかけたときのリーク電流の時間変化 [22]	49
4.28	データロガーを用いた Ion Back-Flow 測定概念図	51
4.29	データロガーを用いた Ion Back-Flow の電圧データ	51
5.1	M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での増幅率測定	52
5.2	P10 ガスと Ar:C2H6=50:50 ガスでの増幅率測定	53
5.3	P10,Ar+CF4,Ar+CF4+n-C5H12 のクロマトグラム	54
5.4	P10 ガス、Ar+CF4+C5H12、Ar+CF4 ガスでの増幅率測定	55
5.5	M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での Ion Back-Flow 率測定	56
5.6	M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での、Ion Back-Flow 率とドリフト電場の相関関係	57
5.7	M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での、Ion Back-Flow 率とドリフト電場の相関関係	57
6.1	maxwell3D で作製した M^3 -PIC の最小ジオメトリ	58
6.2	ドリフト初期位置	61
7.1	メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での電子集収率	63
7.2	メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、電子のメッシュへの吸収率	63
7.3	メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、電子のカソード又はポリイミドへの堆積率	64
7.4	メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での Ion Back-Flow 率	65
7.5	メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、陽イオンのカソードに吸収される割合	65
7.6	メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、陽イオンのメッシュに吸収される割合	66
7.7	メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での増幅率	66
7.8	増幅率 2×10^5 における、メッシュ厚 $10[\mu\text{m}] \cdot 20[\mu\text{m}]$ での電子集収率と Ion Back-Flow 率	67
7.9	ドリフト電場に対する電子集収率	68
7.10	ドリフト電場に対する、電子のメッシュ吸収率	68
7.11	ドリフト電場に対する Ion Back-Flow 率	69
7.12	Ar の比率を変更したときの拡散係数	70
7.13	Ar の比率を変更したときのメッシュへの電子吸収率	71
7.14	Ar の比率を変更したときの電子集収率	71
7.15	メッシュ電圧を変更したときの、電子のカソード又はポリイミドへの堆積率	72
7.16	メッシュ電圧を変更したときの、電子のカソードへの堆積率	72
7.17	メッシュ電圧を変更したときの電子のドリフト図	73
7.18	P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスの拡散係数	74
7.19	P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスのメッシュへの電子の吸収率	74

7.20 P10、Ar+CF ₄ 、Ar+CF ₄ +C ₅ H ₁₂ ガスの電子集収率	75
7.21 P10、Ar+CF ₄ 、Ar+CF ₄ +C ₅ H ₁₂ ガスのガス増幅率	76
7.22 P10、Ar+CF ₄ 、Ar+CF ₄ +C ₅ H ₁₂ ガスの電子付着係数	76

表 目 次

4.1	各種ガスとコンバージョンファクタ (C_F)	33
7.1	メッシュの高さ 50[μm] における電子集収率と Ion Back-Flow 率	67
7.2	メッシュの高さ 100[μm] における電子集収率と Ion Back-Flow 率	67

第1章 Introduction

1.1 粒子線の検出

ガス検出器では入射粒子線の持つ情報を電子に変換し、増幅することで、入射粒子の飛跡/エネルギー/運動量を観測できる。本章では入射粒子を荷電粒子/光子の場合に分けて、入射粒子から電子への変換過程を述べる。[1]

1.1.1 荷電粒子の検出

入射荷電粒子は検出器内のガス中を通過すると、ガス中原子とクーロン相互作用を連続的に起こし、飛跡にそってガス中分子を電離させエネルギーを失っていく。電離により電子イオン対が生成するが、ここで飛跡にそって生成した電子を「1次電子」という。入射荷電粒子のエネルギーは、制動放射でも失われるが、クーロン相互作用に比べると無視できるほど小さい。入射荷電粒子の物質中でのクーロン相互作用によるエネルギー損失は、Bethe-Bloch の式 1.1 で与えられる。図 1.1 に μ^+ の銅に対するエネルギー損失のグラフを示す。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_0 v^2} N B \quad (1.1)$$

また、

$$B = Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (1.2)$$

である。

c, m_0, e はそれぞれ光速、電子の静止質量、電荷素量、
 E, v, x は入射粒子のエネルギー、速度、移動距離、
 Ze, N, I は媒質の電荷、単位体積当たりの原子個数、実効電離ポテンシャルを表す。

以上の過程を経て電子イオン対が生成するが、電場の無い状態では、電子と陽イオンは再結合し中性原子に戻ってしまう。そのため、ガス検出器では電子と陽イオンを互いに引き離す電場を形成する。

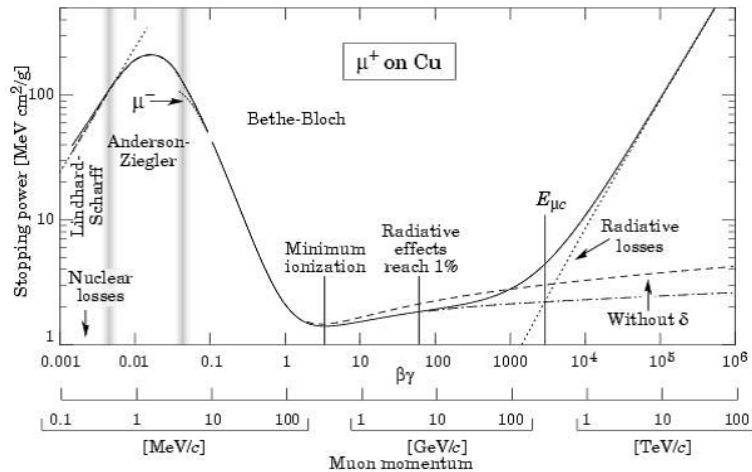


図 1.1: μ^+ の銅に対するエネルギー損失 [2]

$\beta\gamma$ が 1 ～ 10 でエネルギー損失が最小になる。この粒子を MIP 粒子と呼ぶ。

1.1.2 X 線、 γ 線の検出

光子と物質との相互作用は、光子の持つエネルギーによって支配的な反応が異なり、反応の種類は光電効果/コンプトン散乱/電子・陽電子対生成の三種類に分類できる。いずれも荷電粒子が生成されるため、荷電粒子の検出原理に帰結できる。本章では光子の持つエネルギーに分けて、光子と物質との相互作用により荷電粒子が生成される過程を述べる。

光電効果/X 線

100Kev 以下のエネルギーを持つ光子 (X 線) と物質との相互作用は光電効果が支配的である。光電効果とは光子の持つエネルギー $h\nu$ をすべてを軌道電子に与え、電子がある運動エネルギー T で弾き飛ばすという現象である。図 1.2 に光電効果の概念図を示す。生成した電子を光電子といい、光電子の持つエネルギー T は、K 殻電子の束縛エネルギーを I とすると、

$$T = h\nu - I \quad (1.3)$$

と表される。光電効果の起こる確率 (断面積) は、入射 X 線が K 殻の束縛エネルギーよりも大きい場合、原子番号 Z の 5 乗に比例し、入射 X 線のエネルギー $h\nu$ の $\frac{7}{2}$ 乗に反比例する。入射 X 線のエネルギーが、K 殻の束縛エネルギーよりも小さくなると、L 殻の軌道電子と反応する確率が高くなるため、図 1.5 のようなエッジが見られる。また、弾き飛ばされた電子のエネルギー準位は空になっているため、より高いエネルギー準位にある電子が X 線を放出し遷移してくる。このとき放出される X 線は 2 つの準位のエネルギー差に等しく、これを特性 X 線と呼ぶ。または空になったエネルギー準位を埋めるため、内部転換によって同程度のエネルギーの電子が放出されることがあり、放出された電子をオージェ電子と呼ぶ。特性 X 線は引き続き光電効果を起こし、オージェ電子はイオン対を生成する。

コンプトン散乱/ γ 線

数 100Kev 10MeV の領域 (γ 線) では、コンプトン散乱が支配的である。コンプトン散乱とは、光子の持つエネルギー $h\nu$ の一部を外殻電子に与え、外殻電子を弾き飛ばすとともに、入射光子はエネルギーを失い入射方向に対して角度 θ 散乱するという現象である。図 1.3 にコンプトン効果の概念図を示す。散乱した光子のエネルギー

ギ- $(h\nu)'$ と反跳電子のエネルギー T は、エネルギー保存則と運動量保存則から導くことが出来て、散乱した光子のエネルギー $(h\nu)'$ は、

$$(h\nu)' = h\nu \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) h\nu} \quad (1.4)$$

と表され、反跳電子のエネルギー T は、

$$T = h\nu \frac{(1 - \cos \theta) h\nu}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) h\nu} \quad (1.5)$$

となる。 m_e は電子の質量で c は光速度を表す。コンプトン散乱の起きる確率(断面積)は原子番号 Z に比例する。

電子・陽電子対生成/ γ 線

10MeV 以上の領域(γ 線)では、電子・陽電子対生成が支配的である。電子・陽電子対生成とは、電子の静止質量の2倍以上のエネルギーを持つ光子が原子核近傍の電場を通ると、光子が消失し電子と陽電子が生成されるという現象である。図 1.4 に電子・陽電子対生成の概念図を示す。運動量保存則/エネルギー保存則は、生成された電子・陽電子対と原子核とを含めて成立する。原子核の質量は、光子の質量($m_\gamma = 0$)よりも極めて大きいので、原子核は静止しているものとする。と γ 線のエネルギー E_γ と、電子・陽電子のエネルギー E_{e-}, E_{e+} の間には、

$$E_\gamma = E_{e-} + E_{e+} + 2m_e c^2 \quad (1.6)$$

の関係が成り立つ。電子・陽電子対生成の起きる確率(断面積)は原子番号 Z の2乗に比例する。

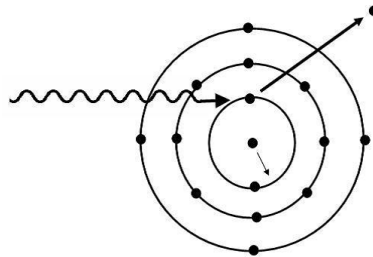


図 1.2: 光電効果の概念図 [3]

入射光子が最内殻電子に衝突し、光電子が飛び出す。

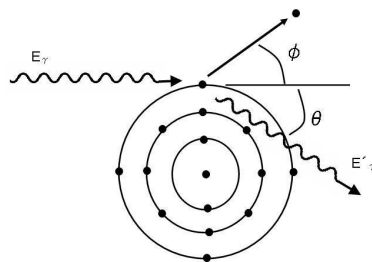


図 1.3: コンプトン効果の概念図 [3]

光子が外殻電子と衝突し、外殻電子をはじき飛ばすとともに、エネルギーの低い光子が出て行く。

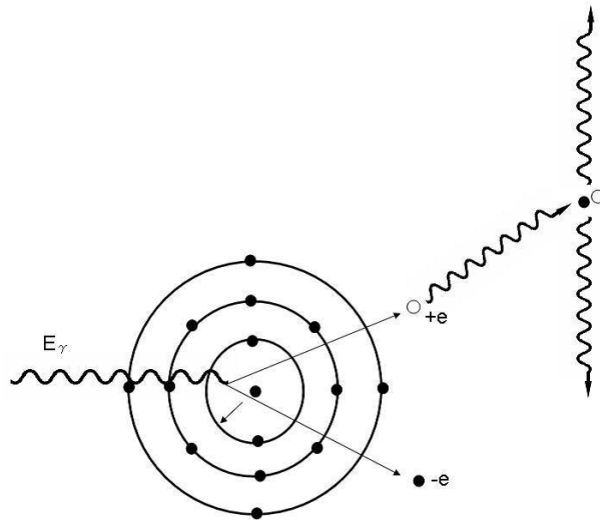


図 1.4: 電子・陽電子対生成の概念図 [3]

γ 線が消失して、電子と陽電子は運動エネルギーを 2 分して飛び出してくる。

図 1.5 にガス中での光電吸収断面積と入射光子の平均自由行程のグラフ、図 1.6 に鉛中の光子の吸収断面積のグラフを示す。

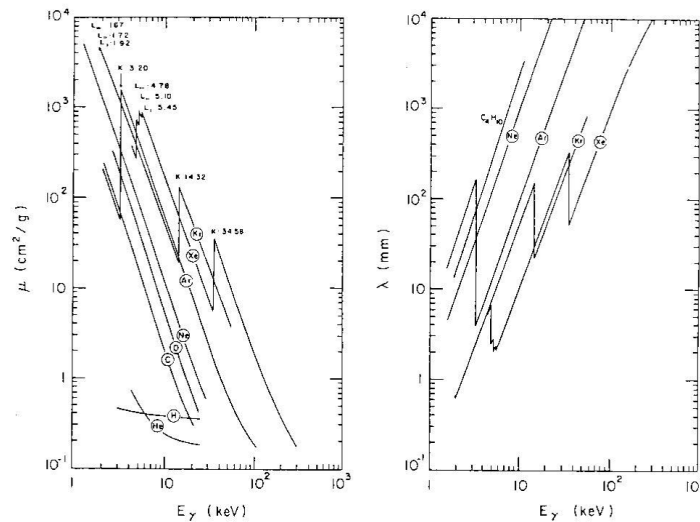


図 1.5: ガス中での光電吸収断面積と入射光子の平均自由行程 [6]

原子番号の大きい気体ほど光電効果が起こり易く、平均自由行程が短くなる。

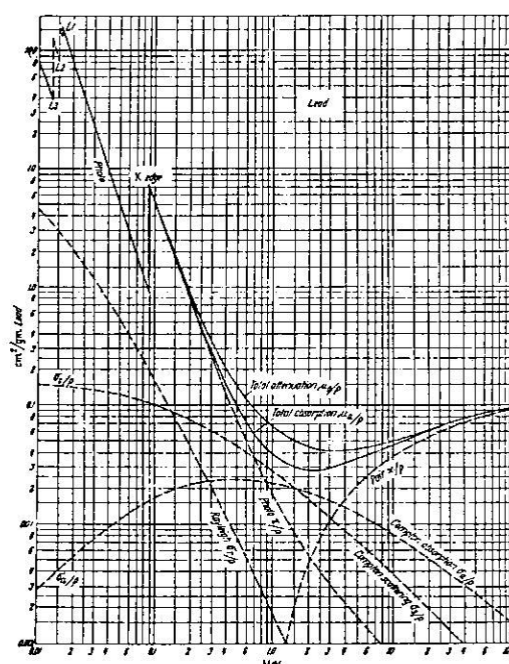


図 1.6: 鉛中の光子の吸収断面積 [6]

入射光子のエネルギーの小さな方から、光電効果、コンプトン効果、電子・陽電子対生成の影響が現れる。

1.2 ガス検出器の動作原理

本章では、一次電子が生成した後の電子の増幅過程、また検出器内の充填ガスの特性について述べる。

1.2.1 ガス増幅

入射した粒子線は、光電効果/コンプトン散乱/電子・陽電子対生成のいずれかの過程を経て、一次電子を生成する。一次電子をガス検出器内の電場によって増幅させる過程をガス増幅という。ここでは比例係数管を例にガス検出器のガス増幅について説明する。図 1.7 に比例係数管の原理図を示す。筒状の陰極（カソードチューブ）の中心に数 10 ～ 数 100 μm 径の陽極ワイヤー（アノードワイヤー）が張られており、計数管の内部は Ar や Ne 等の希ガスが満たされている。アノードワイヤーの半径を r_a 、カソードチューブの半径を R 、陽極と陰極間の電位差を V とすると、アノードワイヤー中心から r の位置の電場は、

$$E(r) = \frac{V}{r} \frac{1}{\ln \frac{R}{r_a}} \quad (1.7)$$

と表される。この式から電場の強さはアノードの中心に近づく程、急激に強くなることが分かる。

まず、粒子線が計数管内に入射すると、粒子線のエネルギーによって希ガス分子を電離する。生成した電子・イオン対は印加電圧によって生じた電場によってそれぞれの電極に引き寄せられる。電子は陽極へ、陽イオンは陰極へ移動する。この電荷は移動する間に希ガスと多数衝突する。イオンは平均自由行程が小さく、衝突間にほとんどエネルギーを得ることが出来ないが、電子は印加電圧によって容易に加速され、衝突時には大きなエネルギーを持ちうる。このエネルギーが希ガスの電離エネルギー（束縛エネルギー）より大きい場合はさらに希ガス分子を電離しイオン対を作る。この時生じた電子を二次電子という。この二次電離過程で作られた電子も電場に

より加速され、電離作用は続いていく。この一連の連鎖反応を電子雪崩と呼ぶ。衝突間の電子の平均エネルギーは電場による加速とともに増大するが、特に陽極ワイヤー付近において電場は急激に強くなるため生成される電子は増加し、電子雪崩を起こす。この反応は電子が陽極に到達するまで続き、最終的に電気信号として測定される。また電子雪崩に伴って発生した陽イオン雲は電子の 1000 分の 1 というゆっくりとした速度で陰極ヘドリフトし、陽極から 1cm 離れた陰極に収集されるまでには数 μs を要する。(ガス圧 1[気圧]、電界強度 $10^4[\text{V/m}]$) 一次電子の陽極ワイヤー付近での雪崩増幅の推移を図 1.8 に示す。

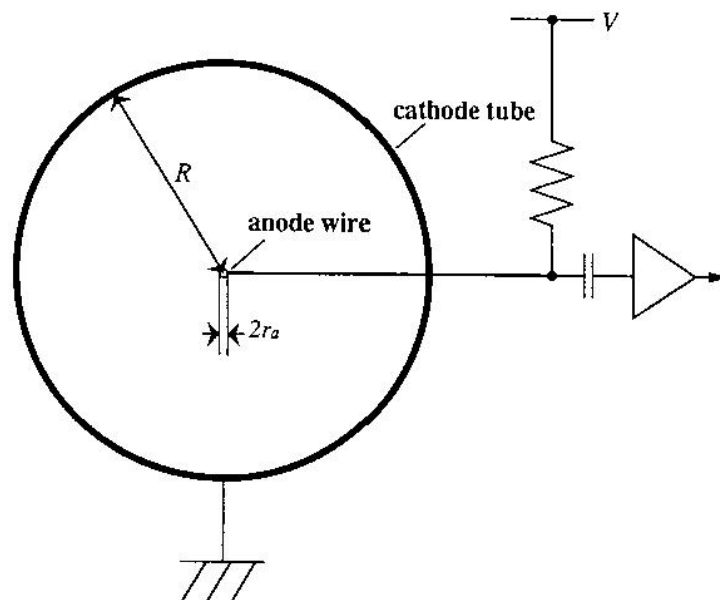


図 1.7: 比例計数管の概念図 [5]

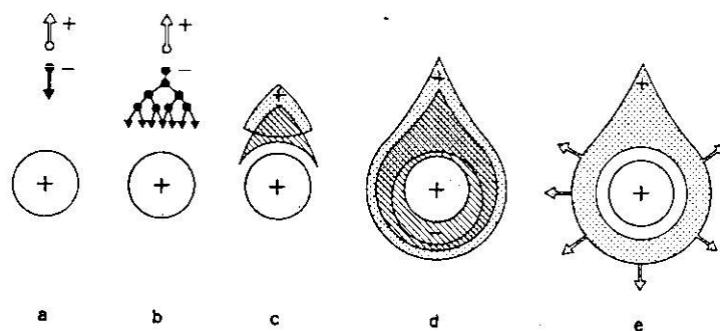


図 1.8: ガス増幅過程概念図 [6]

電離した電子は電子雪崩で増幅しワイヤーに吸収されるが、それに伴い発生した陽イオンはアノードワイヤー周辺に滞留している。電子は短時間で電極に吸収されるが陽イオン雲はゆっくりと陰極ヘドリフトして行く。

1.2.2 充填ガス

本章では、検出器内に充填するガスの特性とその役割について述べる。[4]

ペニング効果

電子雪崩によりガス中に生成された励起状態のアルゴンは、自身よりもイオン化エネルギーの低い有機ガスに、自身が保有するエネルギーを与えて有機ガスを電離させ、自身は基底状態に落ち着く。このことをペニング効果という。ガス検出器では、ペニング効果を利用して電極からの電子の放出を防いでいる。

ガス検出器では、イオン化した陽イオンは陰極に向かってドリフトするが、この陽イオンが陰極付近に到達すると、陰極の金属表面にある電子を引き出して中性化する。この時陽イオンのイオン化エネルギー I から金属の仕事関数 ϕ を差し引いたエネルギーが金属の仕事関数よりも大きい場合、つまり式 (1.8) を満たす場合に陰極表面から電子が放出される。

$$I - \phi \geq \phi \quad (1.8)$$

$$I \geq 2\phi$$

例えば、アルゴンのイオン化エネルギーは 15.8[eV]、電極の仕事関数は 4.65[eV](銅)、5.01[eV](ニッケル) であるので、式 (1.7) の条件が満たされ、陰極からの二次電子放出が起こる。しかし、ペニング効果を利用し、アルゴンよりもイオン化エネルギーの低い有機ガスを混合することで、事前にアルゴンの励起を沈めることが出来る。さらに有機ガスの陽イオンが、陰極で中性化した後のエネルギーは、有機ガス自身の解離エネルギーになり分解される。

クエンチャー

ガス検出器ではガス増幅時に生成した、不活性ガスであるアルゴンイオンが再び電子と再結合し、紫外線を発生する現象が起きる。紫外線は電場に関係なくガス中を透過し、周囲の原子を励起あるいはイオン化し、電極面から二次電子を発生させガス増幅を起こす。このような連鎖反応が続くと、出力信号が一次電子の個数に比例しなくなり放電を引き起こす。紫外線の放射を防ぐため、有機ガスを混合することで、有機ガスに紫外線を吸収させることが出来る。このようなガスはクエンチガスとよばれ、ガス検出器には非常に有効なガスとされている。

1.3 ガス検出器の開発過程

本章ではガス検出器の開発過程とリソグラフィー技術を用いた検出器、Micro Patterner Gas Detector(MPGD)について述べる。

1.3.1 電離箱 (ion chamber)

電離箱は、2枚の導体で挟まれており、内部はガスで満たされている。図 1.9 に電離箱の概念図を示す。粒子線が検出器内部に入射すると、電離を起こし生成した電子・イオン対はおおよそ 100[V/cm] の電場によって各電極へとドリフトし信号として読み出される。電離箱内部の電離物質には様々な種類の物質が利用でき、異なるガスを充填するもの、液体で満たされているもの、空気に開放されているものがある。この検出器は、ある程度の粒子線強度を測定することは出来るが、個々の粒子線を測定することが出来ない。

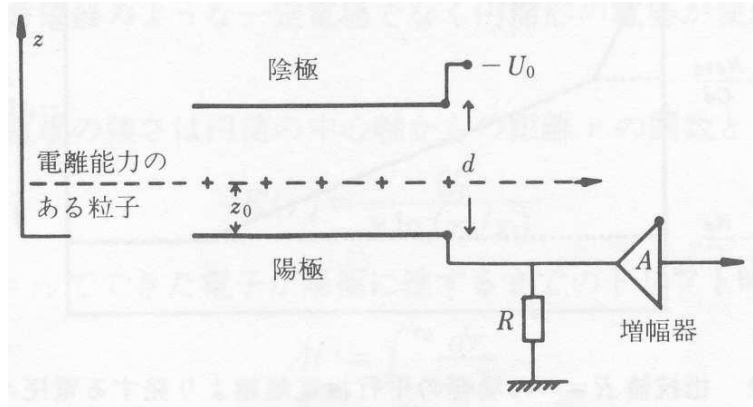


図 1.9: 電離箱の概念図 [1]

1.3.2 比例計数管 (proportional chamber)

比例計数管は、「ガス増幅」のセクションで示したような構造・動作原理を持つ。大きな特徴としては、個々の粒子線のエネルギー損失を測定できる。比例計数管の原理を応用した検出器として、ドリフトチェンバー (DC) や、平行板電極の間に複数のアノードワイヤーを張った Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) がある。

1.3.3 MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)

比例計数管を多数平行に配置すると、粒子が入射したタイミングやその粒子が検出器内で反応したエネルギーの他、粒子が入射した位置も測定できる。Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)はこの原理に基づいて、1967年から1968年にかけて G.Charpak らによって開発された。[7]

MWPCの概念図と電場構造図を図 1.3.3 と図 1.3.3 に示す。MWPCは、2枚の平行板をカソードとし、その間に多数のアノードワイヤーを平行に張った構造になっており、それぞれのアノードは独立した比例計数管として動作するため、粒子の一次元の位置情報を得ることが出来る。位置分解能を向上させるためにはワイヤー間隔を小さくすればよいが、クーロン力による反発のためにワイヤーの配置がずれ電場が歪んでしまう。そのため、通常ではアノードワイヤーの間隔を $500[\mu\text{m}]$ 以下に保つのは困難である。また、ガス増幅の際に生成する陽イオンを速やかに回収することが出来ないため、陽イオンの滞留による空間電荷効果のため検出領域の電場を乱す原因となる。近年の高輝度加速器では $10^4[\text{count}/\text{mm}^2/\text{sec}]$ を超える高頻度入射粒子が入射するため、MWPCでは、 $10^4[\text{count}/\text{mm}^2/\text{sec}]$ を超える高頻度入射粒子への対応は困難であった。

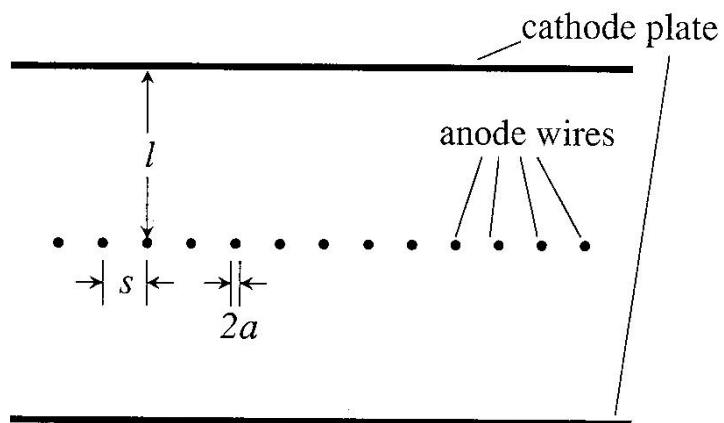


図 1.10: MWPC の概念図 [7]

2 枚の大きな陰極板の間に多数の陽極線を置いて大面積検出器を構成する。

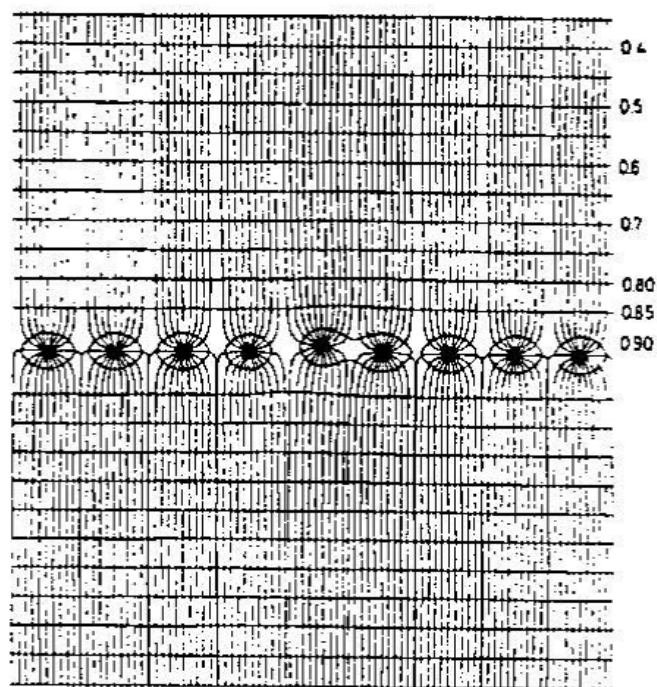


図 1.11: MWPC の電場構造 [7]

陽極線のずれにより電場構造に歪みが生じている。

1.3.4 MSGC(Micro Strip Gas Chamber)

MWPC の位置分解能や高頻度入射の問題を解決するために 1988 年 A.Oed によって、Micro Strip Gas Chamber(MSGC) が提案された。[8]

図 1.12 に MSGC の概念図を示す。MSGC は、LSI 製作等で用いられるリソグラフィー技術を用いて電極が形成されており、アノードワイヤーの代わりにアノード電極とカソード電極を絶縁体上に交互に並べた構造を持つ。高頻度入射粒子に対応させるため、ガス増幅時に生成した陽イオンを、カソードストリップに速やかに回収させることができるという特徴を持っている。さらに、各ストリップに垂直なバックストリップを読み出しに設けることで、2 次元位置情報を得ることが可能である。また、リソグラフィー技術によって MWPC では実現できなかった $500[\mu\text{m}]$ 以下のアノード間隔が可能となり、アノード間隔を $200[\mu\text{m}]$ まで狭めることができた。しかし、ガス増幅時に生成した陽イオンの絶縁体表面への堆積（チャージアップ）による増幅率変化や、カソード近傍の電場が強くなり金属中の電子が放出することによる放電現象、放電に伴ってストリップが溶けアノード・カソードが導通し電極破壊が起きるという問題点があった。

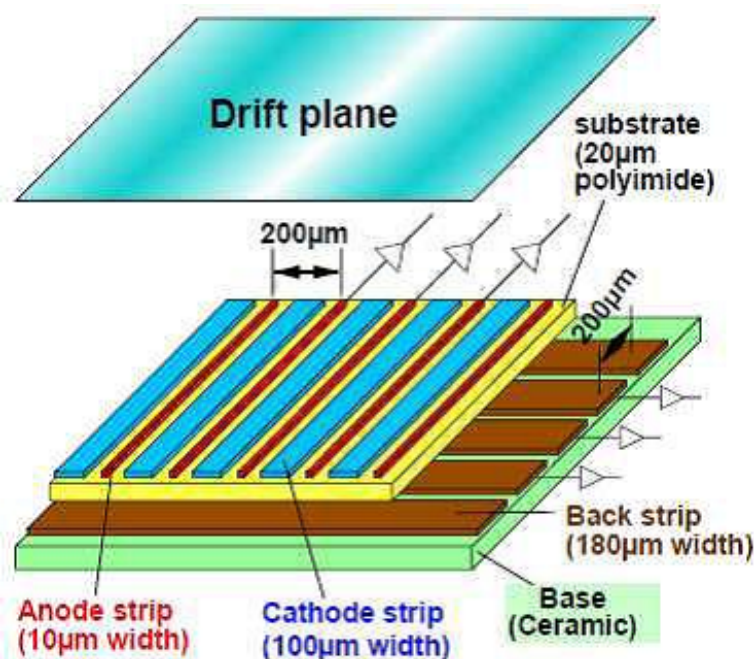


図 1.12: MSGC の概念図 [10]

1.3.5 MicroMegas

MicroMegas は 1996 年、Y.Geomataris らによって開発が進められ、MSGC で問題とされていた放電問題を軽減することができた。この構造はドリフトプレーンとマイクロメッシュをカソードとし、プリント基板はすべてアノードストリップとした MPGD である。ドリフト領域であるドリフトプレーンからマイクロメッシュまで幅 $5[\text{mm}]$ (conversion gap)、増幅領域となるマイクロメッシュからアノード基板まで幅 $50[\mu\text{m}]$ (amplification gap)を持つ。マイクロメッシュはアノード基板からクォーツファイバーの支柱で支えられている。粒子の入射から生成した 1 次電子は、ドリフト領域でかけられた $1[\text{kV}/\text{cm}]$ 程度の電場によってドリフトされマイクロメッシュを通過する。マイクロメッシュからアノード電極にかけては、 $100[\text{kV}/\text{cm}]$ 程度の電場により、多量のガス増幅を起こすことができる。マイクロメッシュを基板上方に配置したことで、安定にガス増幅を高める効果が得られ、ガス

増幅時に生成した陽イオンを、 $100[\mu\text{m}]$ という短いギャップのマイクロメッシュに、速やかに回収できるという効果が得られる。この効果により、マイクロメガスは $10^9[\text{count}/\text{mm}^2/\text{sec}]$ の入射粒子に対応することが出来る。

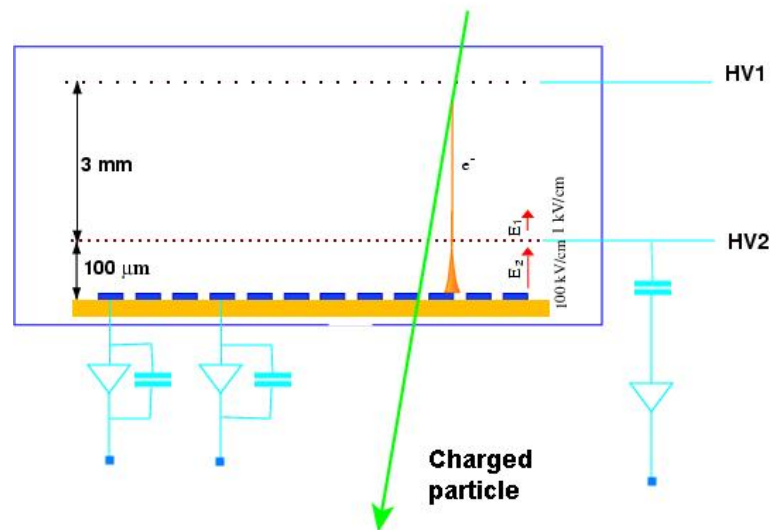


図 1.13: MicroMegas 概念図 [9]

第2章 μ -PIC

本章では、我々研究グループが開発を進めている μ -PIC(Micro Pixel Chamber) の構造と動作原理について述べる。 μ -PIC とは、MSGC の問題点である「放電による電極破壊」と「チャージアップによる動作の不安定性」を改善するために開発された検出器である。図 2.1 に μ -PIC の構造図を示す。

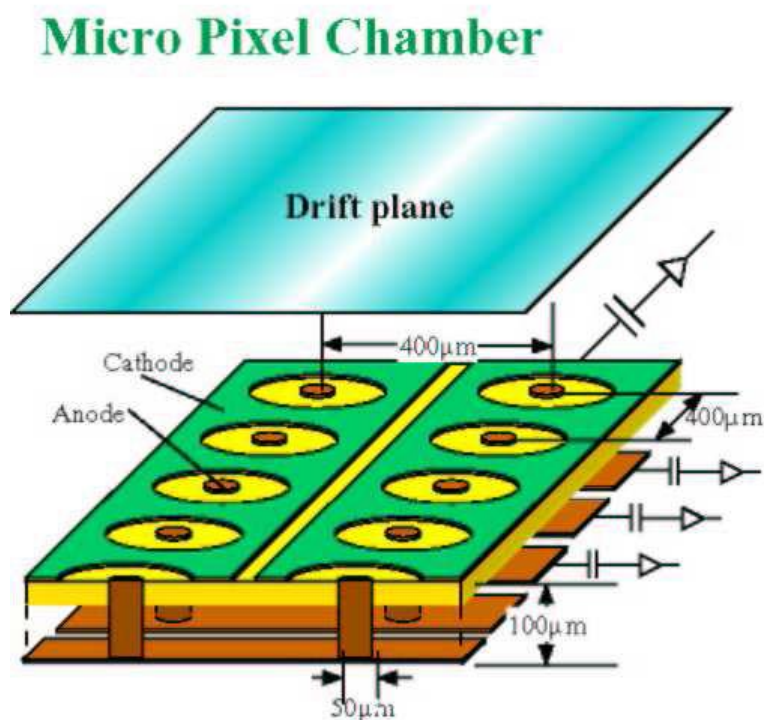


図 2.1: μ -PIC の構造図 [11]

2.1 μ -PIC の構造

μ -PIC は MSGC に変わる検出器として 2000 年に、東京工業大学の越智氏、谷森氏らによって開発された MPGD の一種である。[11] アノード、カソード、ドリフトプレーン、ポリイミド（絶縁層）から構成され、アノードは直径 $50[\mu\text{m}]$ （公称値）でピクセル状に配置されており、カソードはその周りを直径 $200[\mu\text{m}]$ （公称値）で取り囲んでいる。ピクセル間隔は $400[\mu\text{m}]$ である。上部にはドリフトプレーンが配置され、アノードはポリイミドの下でストリップでつながっており、カソードはポリイミドの上でアノードストリップとは垂直にストリップでつながっている。この配置により二次元読み出しが可能となっている。カソードを GND として、アノードにはプラス電圧、ドリフトプレーンにはマイナスの電圧を印加する。

2.2 μ -PICの電極配置

現在我々研究グループが用いている μ -PICは、電極配置が六方配置型の最密構造型 μ -PICである。この電極配置を行うことで、単位面積当たりのアノードの電極の数を増やすことが出来、基板が露出する面積を小さくすることができる。これにより、ドリフト電場を高くした状態でも電子の基板への蓄積を抑えることが出来る。図2.2に正方形 μ -PIC(左)と六方配置型 μ -PIC(右)の電極配置写真を示す。

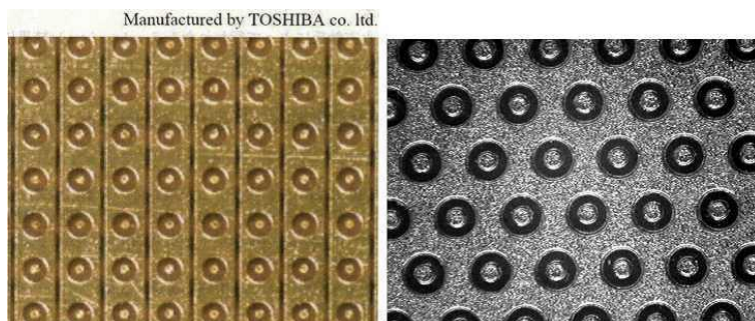


図 2.2: 正方形 μ -PIC(左)と六方配置型 μ -PIC(右)
正方形 μ -PICはカソードはストリップ状に分かれているが、
六方配置型 μ -PICではカソードは全面に繋がっている。

2.3 μ -PICの構造

六方配置型 μ -PICの検出領域は $3[\text{cm}] \times 3[\text{cm}]$ の大きさで、ピクセルが $300[\mu\text{m}]$ 間隔で配置されている。アノードピクセルは絶縁基板の裏側で繋がっており、列単位で信号を読み出すことが出来る。読み出しチャンネル総数は17チャンネルであり、上下外側5チャンネル(1～5ch, 13～17ch)は、11列のアノードピクセルをまとめて1チャンネルとして読み出している。真ん中の7チャンネル(6～12ch)は1列ずつアノードピクセルを読み出している。カソードは読み出しチャンネルが区切られていないため、読み出しチャンネルは1つとなっている。図2.3に六方配置型 μ -PICの読み出し基板図面を示し、図2.3に μ -PIC読み出し基板(左)と読み出しチャンネル(右)示す。

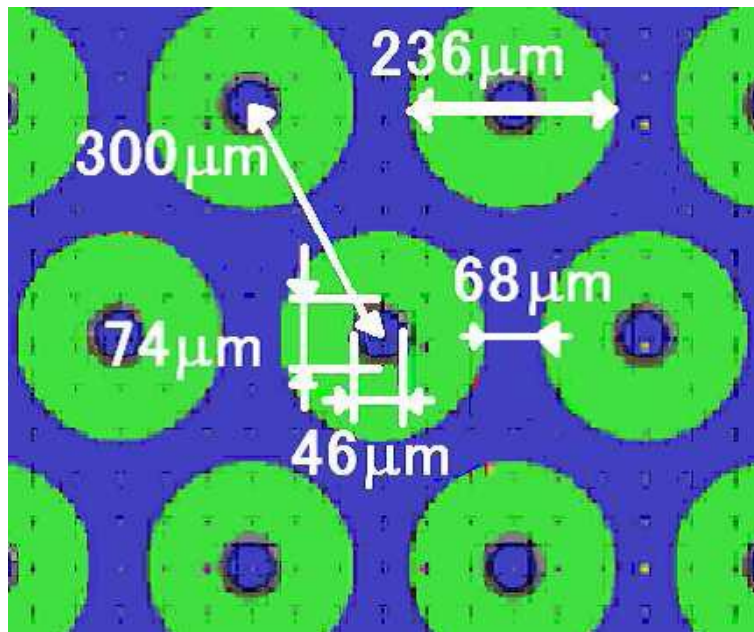


図 2.3: 六方配置型 μ -PIC 読み出し基板図面

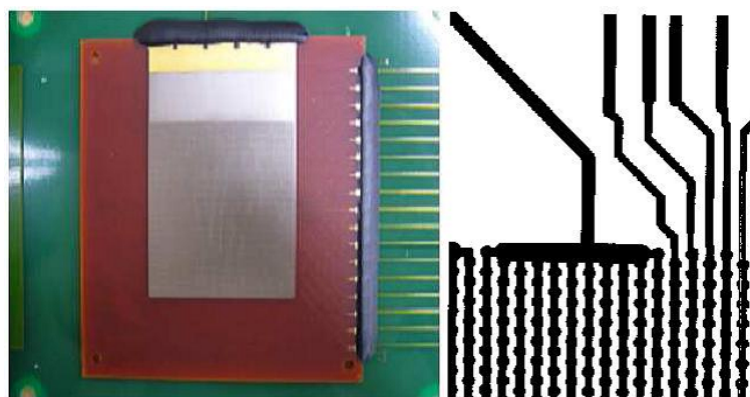


図 2.4: μ -PIC 読み出し基板 (左) と読み出しチャンネル (右)

2.4 μ -PIC の動作原理

図 2.5 に μ -PIC の動作原理図を示す。ドリフトプレーン上部から入射した荷電粒子は電離作用により、電子とイオンの対を生成する。検出器内の電場によってイオンはドリフトプレーンへとドリフトし、電子はピクセル方向へとドリフトする。電子は電極付近に到達すると、アノード近傍の強電場により電子雪崩を起こす。この時生成された電子はアノードに到達し、生成した陽イオンの大部分はカソードに到達し、一部のプラスイオンはドリフト電極にドリフトする。

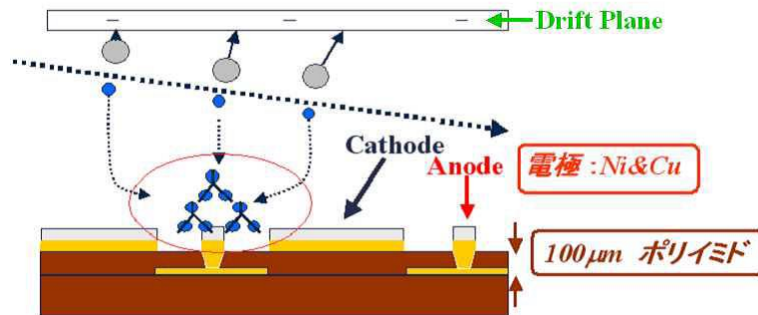


図 2.5: μ -PIC の動作原理図

2.5 μ -PIC の特徴

本章では、我々研究グループが開発している μ -PIC の特徴について述べる。 μ -PIC は従来の MSGC に比べて優れている点が大きく 4 点ある。

安定な高増幅率の達成

μ -PIC では、アノードがピクセル状に配置されその周りをカソードが取り囲む構造を持っている。そのためアノード近傍では電場が強くなり、カソード周りでは電場を弱めることができる構造を備えおり、安定に高ガス増幅率を得ることができる。

放電損傷の低減

MSGC ではストリップ間の放電により、ストリップ 1 つが電極破壊を起こし使用不可能になる。対して、 μ -PIC では 1 ピクセルのみにとどめることができる。

低ノイズの実現

μ -PIC のカソードは GND に繋がっており、更にリング状にアノードを取り囲んでいる。そのため、プリント基板におけるガードリングの役目を果たし、ノイズを低く抑えることができる。

大面積化、及び安価な量産が可能

μ -PIC はプリント基板を製造する際に用いられている PCB 技術を用いて作られている。そのため、リソグラフィ技術を用いて製造されている MSGC に比べて容易に製造でき、大面積化や大量生産が可能である。

以上、4 点が μ -PIC の大きな特徴であるが、 μ -PIC 単独でアノードとカソード間が放電する限界まで電圧を印加させても、得られるガス増幅率は最大で 10^4 程度までである。 μ -PIC を MIP 粒子の読み出しに使用する際は、 10^5 のガス増幅率が必要とされるため、更なる改良が必要となる。

第3章 メッシュ付 μ -PIC

メッシュ付 μ -PIC (Micro-Mesh Micro-Pixel Chamber: M^3 -PIC) は、 μ -PIC 単体の問題点である「放電による高増幅率化の制約」を改善するために開発された検出器である。[12][13][14][15]

図 3.1 にメッシュ付 μ -PIC の構造図を示す。

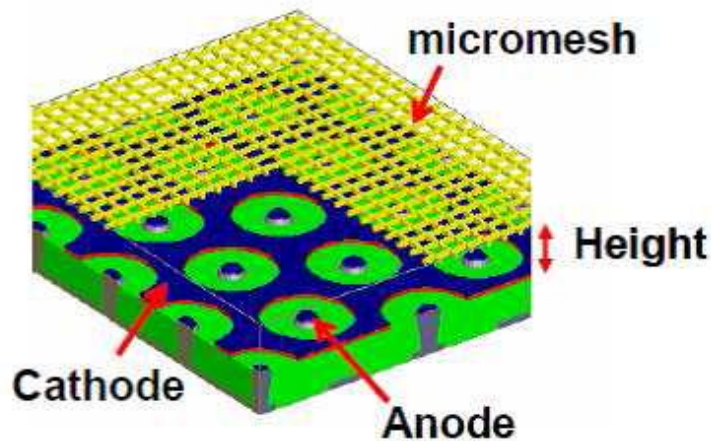


図 3.1: メッシュ付 μ -PIC の構造図

3.1 メッシュ付 μ -PIC の構造

メッシュ付 μ -PIC は、単体の μ -PIC の基板から数百 [μm] 上方にマイクロメッシュを配置した構造を持っており、マイクロメッシュには負の電圧が印加されている。マイクロメガスの増幅原理と μ -PIC の特性を活かした検出器であり、カソードの電場を抑えたまま、高電場領域の拡大によって高ガス増幅率化が可能となる。マイクロメッシュはアノード基板から直径約 200 [μm] のナイロンワイヤーで支えられている。

3.2 メッシュ付 μ -PIC の動作原理

粒子の入射から生成した 1 次電子はマイクロメガスと同様に、ドリフト領域の電場によって基板方向へとドリフトされマイクロメッシュを通過する。通過した電子はアノード近傍のガス増幅を起こしシグナルとして読み出される。

3.3 メッシュ付 μ -PIC の特徴

マイクロメッシュ実装により得られる効果を 2 点にまとめ述べる。

安定な高増幅率の達成

マイクロメッシュをアノード上方に配置し負の電圧を印加することで、アノード近傍の強電場領域が拡大し高増幅率化を実現する。図 3.2 に μ -PIC の電場構造 (左) とメッシュ付 μ -PIC の電場構造 (右) の等電位図を示す

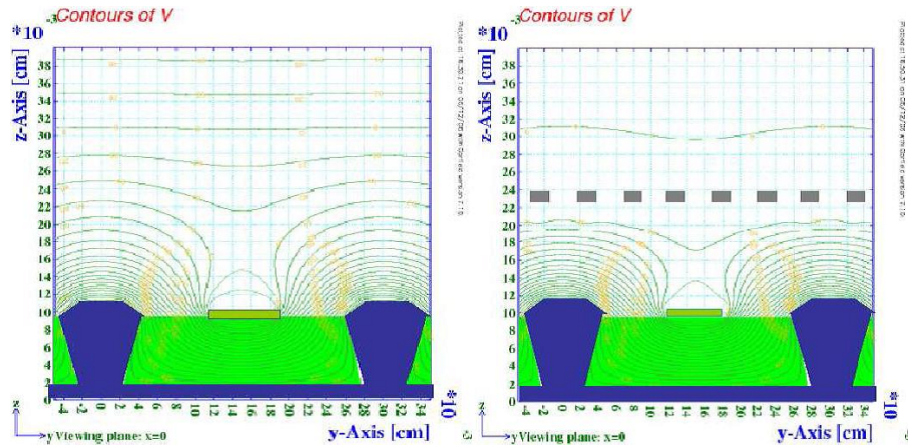


図 3.2: μ -PIC の電場構造 (左) とメッシュ付 μ -PIC の電場構造 (右)

メッシュ無 μ -PIC と比べてメッシュ付 μ -PIC ではアノード近傍の等電位線が密になっているため、強電場領域が拡大されているのが分かる。

Ion BackFlow の低減

μ -PIC 単体では、ガス増幅時に生成した多量の陽イオンの大部分はカソードへと吸収されるが、残りの一部はドリフトプレーン方向へと流れ出たドリフト領域の電場を乱す原因となる。この一部の陽イオンがカソードに吸収されずにドリフト領域へと流れ出る現象を「Ion BackFlow (イオン・バックフロー)」という。Ion BackFlow が生じることでドリフト電場に歪みが生じ、電子の正常なドリフトが阻害されるだけでなく、電子との再結合を起すことで一次電子の持つ情報を失う結果となる。しかしメッシュ付 μ -PIC ではマイクロメッシュを、アノード上方約 200[μ m] の高さに実装することで、ドリフト領域へと流れ出た陽イオンをほぼマイクロメッシュへと吸収することが出来る。更に、陽イオンの速やかな回収により入射粒子許容量の増加が期待できる。図 3.3 に Ion BackFlow の概念図を示す。

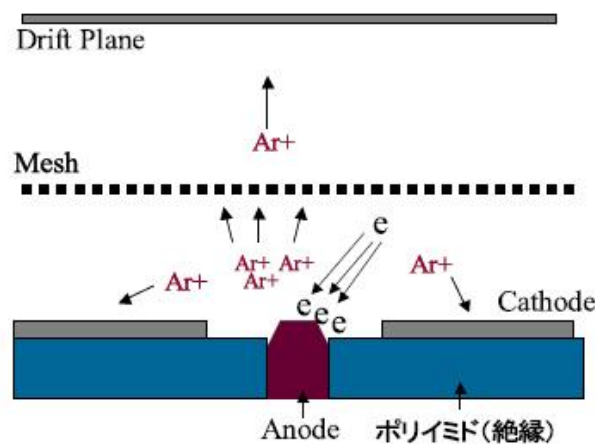


図 3.3: Ion BackFlow 概念図

IBF の値は実験及びシミュレーションから数%程度と確認されている。

3.4 実験の目的

3.4.1 増幅率・電子集収率

メッシュ付 μ -PIC を高エネルギー実験で用いるためには MIP 粒子を検出できる増幅率 10^5 で、安定に動作させなければならない。そのため更なる高増幅率化が必要となる。また高エネルギー実験では粒子の同定を行うため、エネルギー分解能の良い検出器が必要となる。そのため入射粒子の情報を持った一次電子を正確にアノードへと収集する必要がある。つまり高増幅率下で高い電子集収率を実現する検出器が必要となる。本研究では高増幅率化・高い電子集収率を実現する為、検出器内部のメッシュジオメトリ及び動作ガスを変更することで、メッシュ付 μ -PIC の動作検証を行った。

3.4.2 Ion Back-Flow 率

メッシュ付 μ -PIC は TPC (Time Projection Chamber) の読み出しとして使用することができる。[16] TPC とは、粒子の飛跡を再構成することの出来る検出器である。アノード・カソードストリップのコインシデンスから XY 座標の情報を取得し、一次電子を一定の速度でドリフトさせることで Z 方向の情報を得る。図 3.4 に μ -PIC を読み出しに用いた、micro-TPC による電子の三次元飛跡図を示す。Ion Back-Flow が起るとドリフト電場を乱す原因となり正確な一次電子のドリフトを阻害したり、一次電子との再結合を起す。そのため Ion Back-Flow は低く抑える必要がある。

本研究では Ion Back-Flow を低減させるためメッシュジオメトリを変更し、Ion Back-Flow の測定・計算を行った。

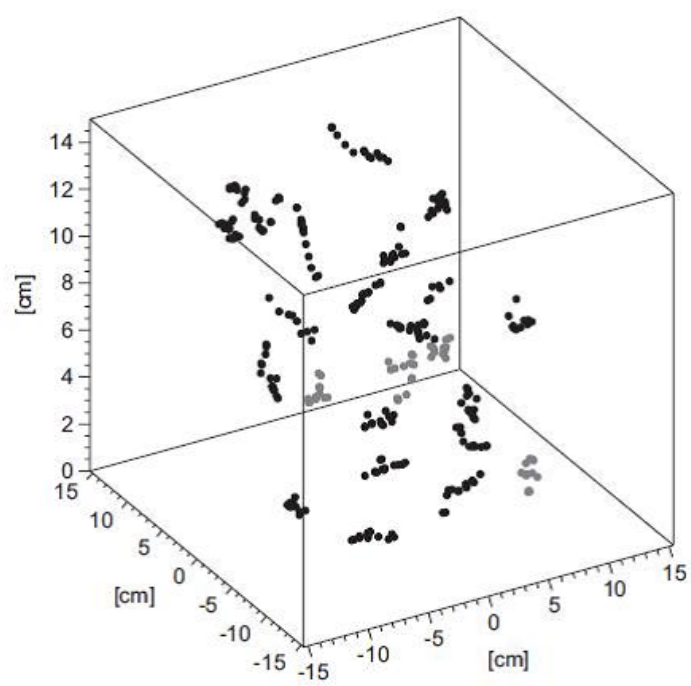


図 3.4: micro-TPC による電子の三次元飛跡 [16]

第4章 セットアップ

本章では、使用したメッシュ付 μ -PIC や、測定機器・周辺機器についてのセットアップについて述べる。

4.1 メッシュ付 μ -PIC 本体

本研究では、使用するメッシュ付 μ -PIC を M^3 -PIC 3号機と M^3 -PIC4号機と名づけた。それぞれの検出器の相違点を述べる。

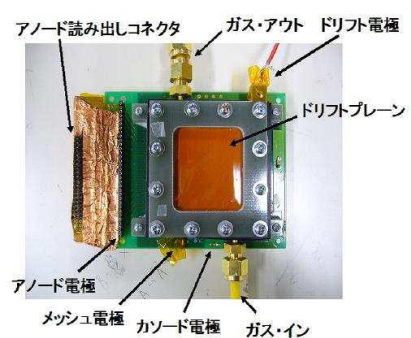
M^3 -PIC3号機

2007年度より使用されている測定器であり、厚さ $5[\mu\text{m}]$ のメッシュが実装されている。マイクロメッシュのスペーサーにはナイロンワイヤーが用いられ、ワイヤー間隔は $1/10\text{inch}$ である。使用しているガスパッケージは上部と下部に分かれており、上部と下部はゴムシートを挟みネジで固定されている。下部と基板は直にネジで固定されており、コニシ製のエポキシ樹脂系接着剤（商品名:MOS7）で隙間を密閉している。

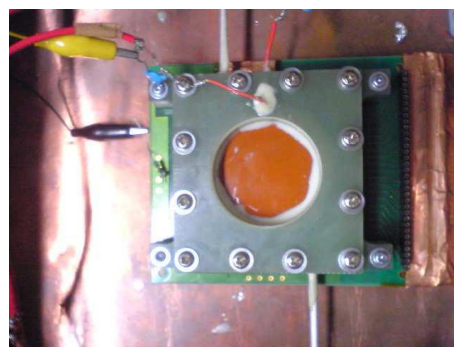
M^3 -PIC4号機

2009年度より使用されている測定器であり、厚さ $20[\mu\text{m}]$ のメッシュが実装されている。マイクロメッシュのスペーサーにはナイロンワイヤーが用いられ、ワイヤー間隔は $2/10\text{inch}$ である。使用しているガスパッケージは上部と下部に分かれており、上部と下部はOリングを挟みネジで固定されている。下部と基板はゴムシートを挟みネジで固定されている。

M^3 -PIC3号機と M^3 -PIC4号機の外観図を図 4.1 に示し、それぞれに実装したマイクロメッシュの拡大写真を図 4.2 に示す。

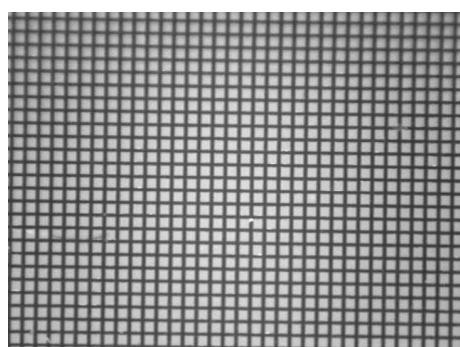


(a) M^3 -PIC3 号機

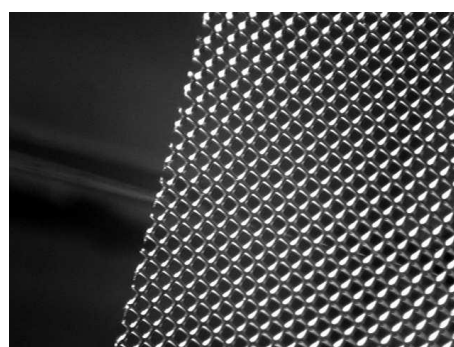


(b) M^3 -PIC4 号機

図 4.1: M^3 -PIC 外観図



(a) 厚さ 5 μm ピッチ 50 μm



(b) 厚さ 20 μm ピッチ 50 μm

図 4.2: マイクロメッシュ拡大写真

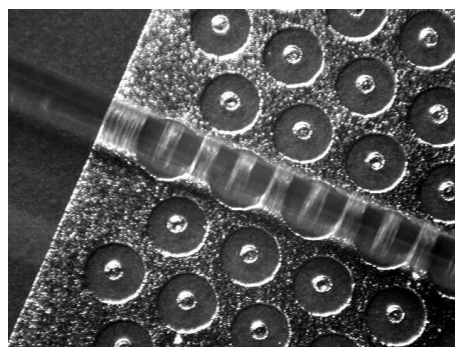
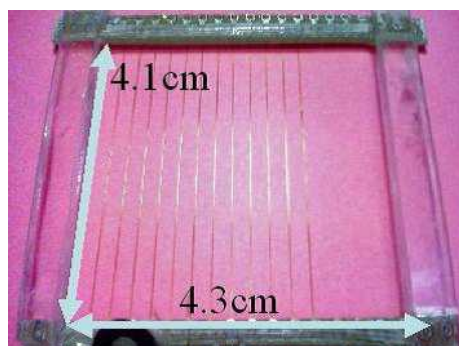
4.1.1 マイクロメッシュ・スペーサー実装

μ -PIC は基板 1 枚で数万ピクセルの信号を一様に読み出している。この特性を活かしたまま、増幅率を一様に増加させるためにはマイクロメッシュを基板と平行に張る必要がある。基板と平行なマイクロメッシュの実装には、ユニバーサル基板とナイロンワイヤーを用いた方法が確立されている。ユニバーサル基板にはあらかじめ 1/10inch のピッチで穴が開けられておりワイヤーを平行に張ることができる。そのため、ピクセル列に沿ってワイヤーを実装することが可能である。また、容易に製作が可能であり素材としても容易に集めることが出来る。[17] 図 4.3 にメッシュ実装に使用した治具と、スペーサ実装後の基板拡大写真を示す。

マイクロメッシュの実装手順を以下にまとめる。

1. 治具を基板に密着させる
2. ナイロンワイヤを基板の μ -PIC 検出領域外側に接着
3. ナイロンワイヤを治具から切り離す
4. ナイロンワイヤの上にマイクロメッシュを張り、カプトンテープで固定

ナイロンワイヤの接着にはワイヤの張りなおし、毛細現象を考慮して 2 液混合型接着剤 (商品名:EP001) を用いる。



(a) M^3 -PIC のスペーサー実装に使用した治具 (b) スペーサー実装後の基板拡大写真

図 4.3: M^3 -PIC のスペーサー実装 [17]

スペーサはピクセル列をまたがぬように、ピクセルに沿って実装された。

図 4.3 にメッシュ実装過程図と、図 4.5 にマイクロメッシュ実装後の M^3 -PIC の写真を示す。

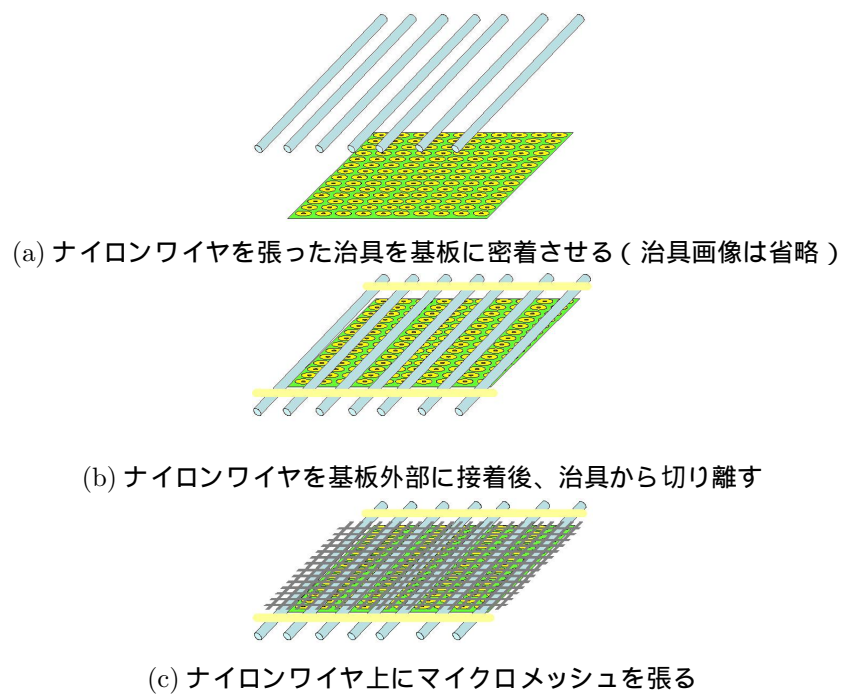
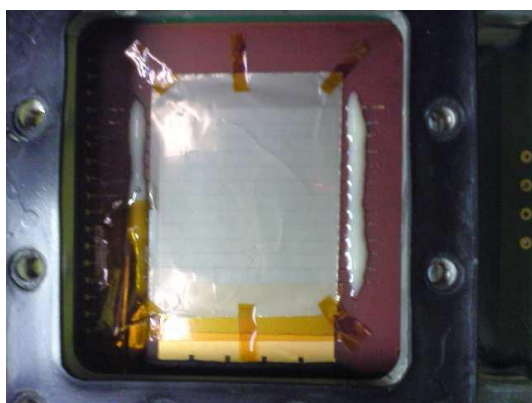
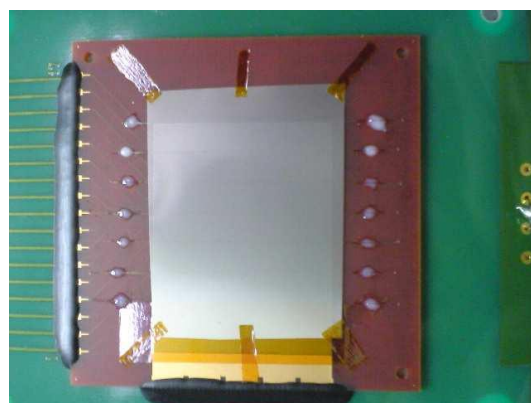


図 4.4: メッシュ実装過程図 [17]



(a) M^3 -PIC3 号機



(b) M^3 -PIC4 号機

図 4.5: マイクロメッシュ実装後の M^3 -PIC の写真 [17]

4.2 動作ガス

ガス検出器では充填ガスは粒子線の検出効率、電子・イオンのドリフトや拡散、放電に至るまで検出器の動作を大きく左右する重要な要素である。そのため本研究では商用の混合ガスに加え、ガス混合器、ガスクロマトグラフィーを用いて大学内にて混合ガスを作製し、メッシュ付 μ -PIC の性能に最適なガスの探索を行った。本節では混合ガスの作製、使用に必要な機器について述べる。[18]

4.2.1 ガスパッケージ

μ -PIC で信号を確認するには、酸素濃度が 500[ppm] 以下の状況が必要となる。500[ppm] 以上では、一次電子が電気陰性度の高い酸素に吸収されるという電子捕獲が起こってしまう。そのためガスパッケージには、非常に高い密閉度が要求される。本研究では従来のガスパッケージに改良を加え、新しいガスパッケージを作製した。図 4.6 に新しいパッケージの図面と、図 4.7 に図面を示す。

従来のガスパッケージからの改良点を次にまとめる。

ドリフト電極

ドリフト電極をパッケージ内に納めることで、外気との接触を遮断した。後述の Ion BackFlow の測定では、ドリフト電極から微弱な電流を測定するため、電解質となる外気の水蒸気の影響を考慮しなければならない。水蒸気とドリフト電極が接触しているとドリフト電極の高電圧により、水蒸気から生成した陽イオンがドリフト電極に流れ込んでしまい、求めたい正確な陽イオンの量が測定出来なくなる。そのためドリフト電極を外気と遮断し、水蒸気による電流の流入を防いだ。

メッシュ電極

従来のパッケージではガスパッケージ下から電極を通しメッシュへと電圧を印加していたため、ガスパッケージと基板間には隙間が生じ、接着剤を用いて隙間を塞いでいた。そのため新しいパッケージではパッケージ・基板間に隙間を作らないよう側面に電極用の穴を通し、メッシュへと電圧を印加する。

ガスパッケージ上部/下部間

密閉度を向上させるため、ゴムシートの代わりに、接触面積の低いシリコン O リングを用いた。パッケージ上部と下部はネジで固定する。

ガスパッケージ下部/基板間

ガスパッケージと基板を容易に脱着させるため、接着剤の代わりにシリコンゴムシートを用いた。当所の予定では、ガスパッケージ下部と基板の間には O リングを用いる予定だったが、O リングが μ -PIC の検出領域近くに被さってしまうためゴムシートで代用した。

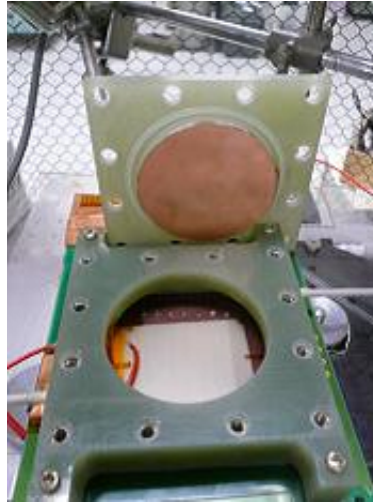
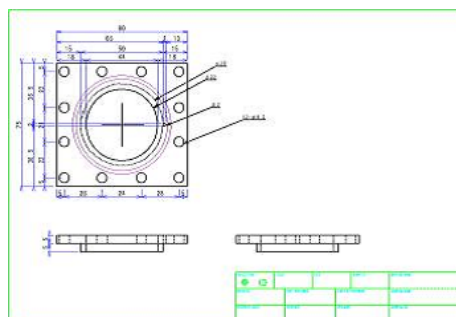
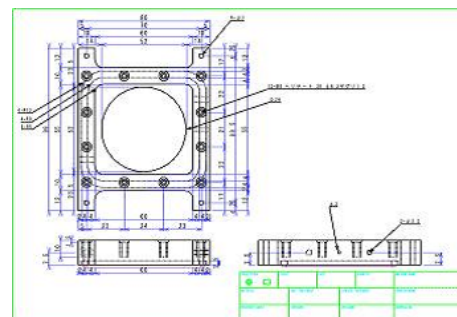


図 4.6: 新しいパッケージの外観図



(a) パッケージ上部



(b) パッケージ下部

図 4.7: 新しいパッケージ図面

新しいパッケージを用いて密閉度試験を行った。ガスパッケージを装着した μ -PIC に、一定流量のガスを流し、どの程度の時間で酸素濃度が 500[ppm] まで下がるかを測定した。図 4.8 に測定結果のグラフを示す。従来型のパッケージでは流量 20[cc/min] 以上で 1~2 時間を要していたのに対し、新しいパッケージでは流量 20・15・10[cc/min] で約 5 分、8[cc/min] で約 10 分まで短縮することが出来た。

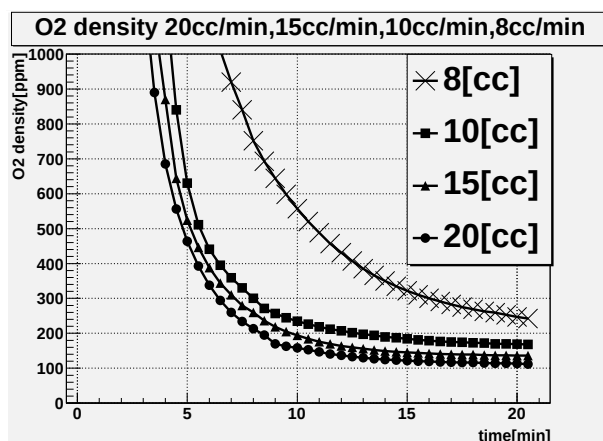


図 4.8: 新しいガスパッケージでの酸素濃度の時間変化

4.2.2 ガス混合機

ガスの混合には三種のガスを混合できるガス混合器を用いた。ガス混合機にはマスフローメーターが組み込まれており、デジタルで流量を制御することが出来る。マスフローメーターは Ar 用、C₂H₆ 用、n-C₅H₁₂ 用の 3 種類があり、いずれも堀場エステック社製の PAC-D2 が使われている。図 4.9 に使用したガス混合機を示す。



図 4.9: ガス混合機の外観図

コンバージョンファクタ (C_F)

それぞれのマスフローメーターのガス流量値は、予め Ar 用、C₂H₆ 用、n-C₅H₁₂ 用に校正されている。それ以外のガスを使用する場合には、 C_F (コンバージョンファクタ) を用いることで校正が可能である。コンバージョ

ンファクタとは、ガスの種類によるマスフローの流量表示の変化を表わした数値で、窒素 N_2 を基準値 1 としている。コンバージョンファクタを用いてガス流量値を校正するには、式 (4.1) を用いる。

$$\text{表示値 [cc/min]} \times \frac{\text{予め設定されているガスの } C_F \text{ 値}}{\text{使用するガスの } C_F \text{ 値}} = \text{実際の流量 [cc/min]} \quad (4.1)$$

例えば、 C_2H_6 (C_F 値=0.50) で校正されたマスフローメータに対して CF_4 (C_F 値=0.42) を流した時の流量は、

$$\text{表示値 [cc/min]} \times \frac{0.50}{0.42} = \text{実際の流量 [cc/min]} \quad (4.2)$$

と求めることが出来る。

ガス名称	記号	C_F
窒素	N_2	1.00
アルゴン	Ar	1.44
メタン	CH_4	0.76
エタン	C_2H_6	0.50
四フッ化メタン	CF_4	0.42
二酸化炭素	CO_2	0.74

表 4.1: 各種ガスとコンバージョンファクタ (C_F)

4.2.3 n-C₅H₁₂ 用恒温槽

Ar+CF₄+少量の n-C₅H₁₂ の 3 種混合ガスを作製するには、n-C₅H₁₂ の蒸気圧を利用して、CF₄ と n-C₅H₁₂ を混合させる。n-C₅H₁₂ の温度は恒温槽で管理し、CF₄ と n-C₅H₁₂ は大気圧下のガラス容器内で混合を行った。図 4.10 に n-C₅H₁₂ の蒸気圧曲線のグラフを示す。

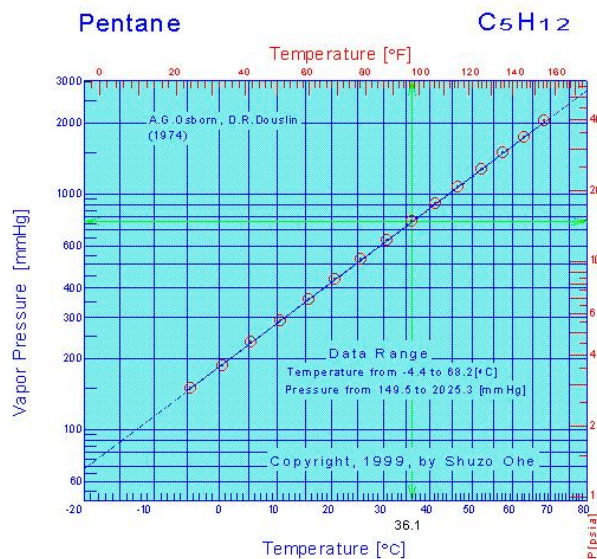


図 4.10: n-C₅H₁₂ の蒸気圧曲線 [20]

CF₄ と n-C₅H₁₂ の混合比はそれぞれの分圧比である。Ar 又は Ar+CF₄ に少量の n-C₅H₁₂ を加えた場合、n-C₅H₁₂ の蒸気圧曲線から、n-C₅H₁₂ の温度を氷点下まで下げる必要がある。しかし、大気圧下で CF₄ とガス比率の同じ n-C₅H₁₂ を混合する場合、n-C₅H₁₂ の温度は 15 で可能である。このため、本実験では CF₄ に n-C₅H₁₂ を混合した。また、ガラス容器の蓋が内部圧力により外れる恐れがあるため、ガラス瓶と蓋の接合部に真空グリースを塗布した。

4.2.4 ガスクロマトグラフィー

ガスクロマトグラフィーを用いることで、ガスの同定や混合ガスの比率を確認することが出来る。クロマトグラフィー (Chromatography) とは物質の大きさ・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できる技術である。クロマトグラフィーでは、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サンプルを分離していく。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。ガスクロマトグラフィー (Gas Chromatography, GC) の大きな特徴として、サンプルと移動相には気体を用いられる。

図 4.12 にガスクロマトグラフィー概念図について示す。

ガスクロマトグラフィーの装置をガスクロマトグラフと呼ぶ。今回使用したキャリアガス・カラム・検出器の特徴について述べる。

キャリアガス

キャリアガス（移動相）には熱電導度が高く分子量の小さいガスを用いる。検出器ではサンプルの混合による熱電導度の低下を感知する。また、試料の分離能はキャリアガスの分子量が小さいほど良くなる。そのため、今回の実験ではキャリアガスには熱電導度が高く分子量の小さい He を用いた。

カラム

カラムとは、ガスクロマトグラフィーの固定相を充填した管である。カラム内には吸着剤が充填されており、試料の吸着性の違いを利用して試料を分離する。試料がカラムに入っていくと、吸着力の強い分子ほどゆっくり移動されてガスが分離されていく。カラムは恒温槽の中に入っており、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。今回の測定で用いたカラムには Molecular Sieve と Gaskuropack54 の二種類あり、それぞれ以下の特徴がある。

カラム	$Ar + CF_4$	C_5H_{12}
モレキュラーシーブ	分離できる	検知できない
ガスクロパック 54	分離できない	検知できる

検出器

検出器はカラム出口に設置され、分離されたガスを検知して電気信号に変換する機能を持つ。今回用いたガスクロマトグラフには TCD（Thermal Conductivity Detector, 熱伝導度型検出器）という検出器が組み込まれている。TCD はホイーンストンブリッジ回路の構造を持っており、物質の熱伝導度の違いを利用してサンプルの検出を行うことができる。ホイーンストンブリッジ回路の上下段のフィラメントにはキャリアガスである He が流れている。He は非常に熱電導度が高いので、抵抗値には変化がない。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、抵抗値が大きくなり熱電導度が減少する。この変化を読み取ることで成分比の測定ができる。図 4.11 にガスクロマトグラフィー検出概念図を示す。

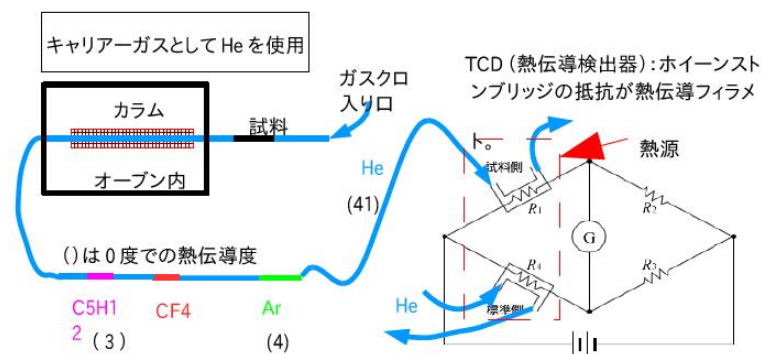
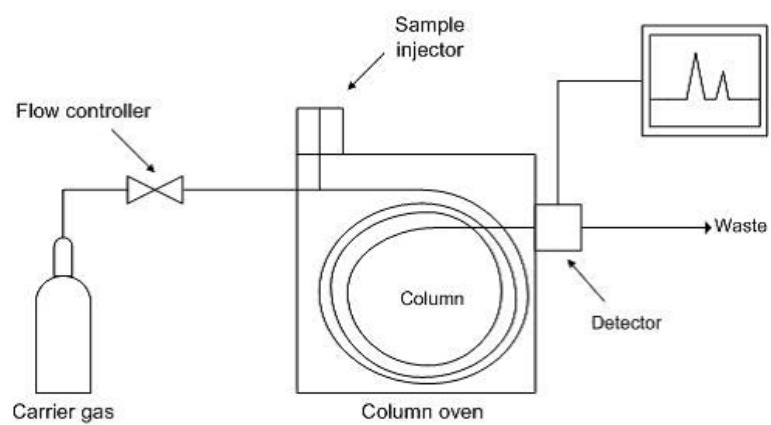
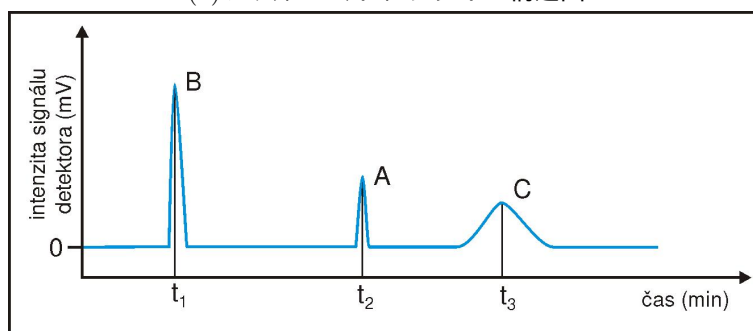


図 4.11: ガスクロマトグラフィー検出概念図



(a) ガスクロマトグラフィー構造図



(b) ガスクロマトグラム の例

図 4.12: ガスクロマトグラフィー概念図 [21]

4.2.5 ガス配管

ガスの流れを制御・確認するには様々な器具を用いる。主要なガス器具について簡単にまとめる。レギュレータ：一次圧でガス残量を確認、二次圧で大まかな流量を調整する。

ボールフローメータ：ガス流量を 20[cc/min] まで細かく調整できる。

バブラー：大きなガス漏れ、パプルの頻度を確認する。

酸素濃度計：ppm オーダーで酸素濃度を確認できる

次に、ガスの配管フローについてまとめる。

$P10(\text{Ar} : \text{CH}_4 = 90 : 10)$ 、 $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 50 : 50$

ガスボンベにレギュレータを繋ぎ、ボールフローメータで流量を制御する。そして μ -PIC へと繋ぎ、バブラー、酸素濃度計、最後にガスを廃棄する流れとなる。図 4.13 に $P10(\text{Ar} : \text{CH}_4 = 90 : 10)$ 、 $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 50 : 50$ ガスの配管図を示す。

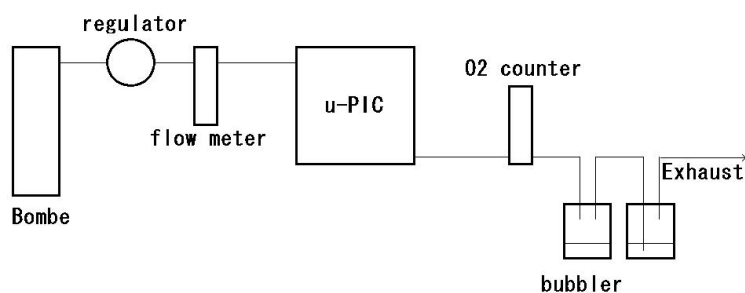


図 4.13: $P10(\text{Ar} : \text{CH}_4 = 90 : 10)$ 、 $\text{Ar} : \text{C}_2\text{H}_6 = 50 : 50$ ガスの配管図

$\text{Ar} + \text{CF}_4$ 混合ガス

Ar と CF_4 は独立にガス混合器へと繋がり、ガス混合機で混合され μ -PIC へと流れる。 μ -PIC からガスクロマトグラフへと繋がりガス混合比を確認する。その後は同様にバブラー、酸素濃度計、ガス廃棄の流れとなる。

$$Ar + CF_4 + n - C_5H_{12}$$

アルゴンは独立にガス混合器へと繋がり、CF₄ は一旦、n-C₅H₁₂ の入った恒温槽を通る。ここで CF₄ と n-C₅H₁₂ が混合され、ガス混合器へと繋がる。ガス混合器では Ar と CF₄+n-C₅H₁₂ の2 系統が混合され μ-PIC へと流れる。その後は同様に、ガスクロマトグラフ、バブラー、酸素濃度計、ガス廃棄の流れとなる。図 4.14 に P10(Ar : CH₄ = 90 : 10)、Ar : C₂H₆ = 50 : 50 ガスの配管図を示す。

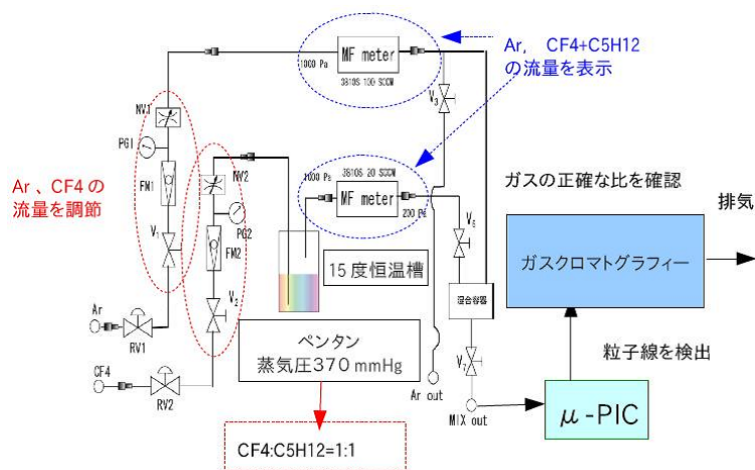


図 4.14: P10(Ar : CH₄ = 90 : 10)、Ar : C₂H₆ = 50 : 50 ガスの配管図

4.3 増幅率測定

ガス検出器では、増幅率は MIP 粒子の検出に関わる重要なパラメータである。本節では増幅率測定に必要な原理、使用機器について述べる。

4.3.1 増幅率計算

本実験では線源として ^{55}Fe を用いた。これは通常鉄 ^{56}Fe より中性子が一つ少ない鉄の放射性同位体で逆 β 崩壊により ^{55}Mn になる。

$$p \rightarrow n + e^+ + \gamma_e$$

このとき主に K 殻から電子が奪われるので、外側の殻から電子が遷移するときに 5.9keV の X 線 (Mn-K 輝線) を放出する。Ar に X 線が光電吸収されると Ar 原子から 2.7keV の電子が放出される。

この時、電子が放出されると内側の準位は空になる。そのため、より高いエネルギー準位にある電子が遷移し 3.2keV の特性 X 線 (Ar-K 輝線) を放出する。この X 線は検出器内で光電吸収される。また、内部転換によって同程度のエネルギーの電子が放出されることがある。この電子をオージェ電子と呼ぶ。しかし、一部の特性 X 線は吸収されることなく検出器の外に逃げ出してしまう。すると結果として生成される一次電子は Ar-K 輝線の分 (3.2keV) 少なくなる。このため、得られる X 線スペクトルには入射エネルギーよりも低いところにピークが作られる。これをエスケープピークと言う。

本実験では、この過程から 5.9KeV 分の電子が生成されたとする。Ar ガスの W 値 (イオン対を一对生成するのに必要なエネルギー) は 26[eV/pair] である。よって、 ^{55}Fe で出来る一次電子数は、

$$5.9 \times 10^3 \div 26 \approx 226[\text{個}]$$

である。電荷量になおすと、

$$1.6 \times 10^{-19} \times \frac{5.9 \times 10^3}{26} = 3.6 \times 10^{-5}[\text{pC}]$$

である。

この一次電子の電荷量 $3.6 \times 10^{-5}[\text{pC}]$ に対して、実測から増幅信号の電荷量を求めることで、ガス増幅率を計算することが出来る。

ガス増幅率を G とすると、

$$G = \frac{\text{増幅信号の電荷量} [\text{C}]}{\text{一次電子の電荷量} [\text{C}]}$$

と定義できる。

図 4.15 に ^{55}Fe から得られる光電子の生成過程と 4.16 に ^{55}Fe のエスケープピークとメインピークのヒストグラムを示す。

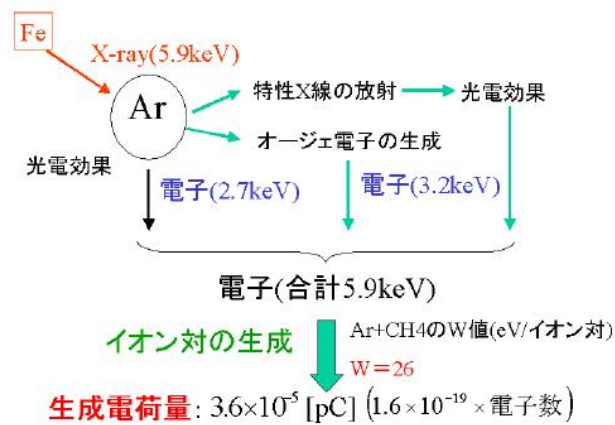


図 4.15: ^{55}Fe から得られる光電子の生成過程

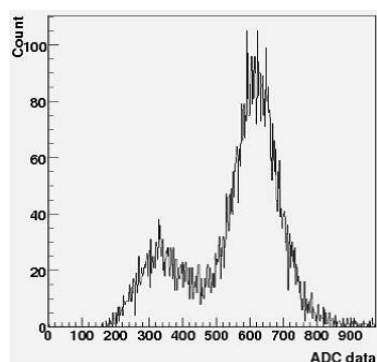


図 4.16: エスケープピーク(左側の山)とメインピーク(右側の山)

4.3.2 測定機器/データ収集フロー/システム/電荷～ADC 校正/増幅率計算

本節では増幅率を求めるための測定機器/データ収集フロー/システム、また増幅率の計算に必要な電荷～ADC 校正/増幅率計算について述べる。

測定機器

本実験では以下の装置を用いた。

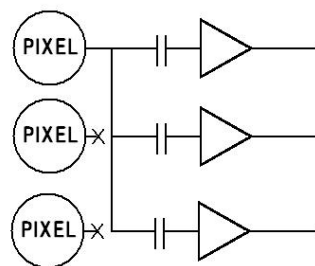
- 電源装置、電荷分割コネクタ
 - Anode-dual voltage power supply positive 使用可能電圧:0～10[kV]
 - Cathode-dual HV power supply 使用可能電圧:-5～0[kV](CH1:drift plane,CH2:mesh)
 - 5 本足ディバイダ (preamp ASD がサチレーションを起こす場合、事前に出力電荷を 5 分割する役割を果たす)
- データ収集機器
 - preamp ASD: μ -PIC のシグナルを電圧に整形する (1V/pC)
 - ASD Buffer:CXA3184 ASD Buffer:プリアンプの信号を増幅させる。
 - Octal Linear fan in out:シグナルをそのまま分配出来る。
 - Discriminator:波高弁別器、閾値を越えた信号はデジタル信号として処理される。スレシヨルド領域は 112[mV]～
 - Gate Generator:Discriminator で弁別されたパルスを由来として、ゲート信号を生成する。
 - Attenuator:シグナルの倍率を調整できる。(1,2,4,8,16dB)
 - 80 MHz Scaler:Discriminator で弁別されたパルスをカウントできる。
 - CAMAC Crate Controller:ゲート内の信号データを収集する。QDC に、放射線検出の電気信号が入力されたかを知らせるパルスを逐一送る形式、すなわちポーリングでなく、CAMLIB という C 言語の関数ライブラリを用いて、LAM(Look at Me)を動作させ、割り込み信号を使ってデータを出力する。
 - PC:Linux:カマッククレートのデータを取りに行く。
- 出力信号観測
 - オシロスコープ:Tektronix 製 TDS3034B
- 電荷～ADC 校正
 - Pulser:Hewlett Packard 製 Pulse/Function Generator 50MHz 8116A

データ収集フロー/システム

アノードより出てきたシグナルはプリアンプで読み出す。アンプはパラレルケーブルで ASD-Buffer と繋がっており、16ch を別々に Lemo ケーブルで取り出せるようになっている。また、アンプの電源もパラレルケーブルを通して供給されている。その後、セルフトリガーによりデータ収集を行うために、LinearFanInOut でシグナルを ADC 入力用と Gate 用シグナル用に分割して ADC (Analog Digital Convertor) を用いて CAMAC によりデータを収集した。Gate シグナルは Discriminator と GateGenerator を用いて作成した。また、約 30m のケー

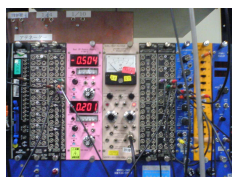


(a)5 本足ディバイダ

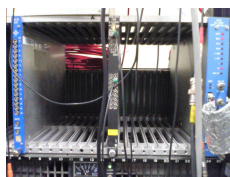


(b) ディバイダ効果 (実際は 5 つに分割)

図 4.17: 5 本足ディバイダの接続による μ -PIC 信号からの出力電荷の分割



(a)NIM 規格モジュール



(b)CAMAC-ADC



(b) データ収集用 PC

図 4.18: M^3 -PIC のデータ収集に使用した機器

ブルを用いて ADC 入力用シグナルを遅らせ、Gate 用シグナルと ADC へのシグナルの入力時間を合わせた。

図 4.17 に 5 本足ディバイダの詳細、図 4.18 に M^3 -PIC のデータ収集に使用した機器、図 4.19 にデータ収集システムのブロック図を示す。

ADC(Analog Digital Convertor)

ADC 内では波形をゲートで定められた区間で時間積分している。図 4.3.2 にオシロスコープでの ^{55}Fe の信号とゲート信号を示す。オシロスコープの波形を見ても分かるように、波形は電圧と時間の関係式として出てくる。

$$V = IR, I = \frac{dQ}{dt} \text{ より } V = R \frac{dQ}{dt}$$

$$\text{両辺を時間で積分して } \int V dt = RQ$$

$$\text{よって } Q = \frac{1}{R} \int V dt$$

となり、ADC の測定によって電荷量を与えられる。そして 0.125[pC] を ADC 値 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 5000~10000 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。

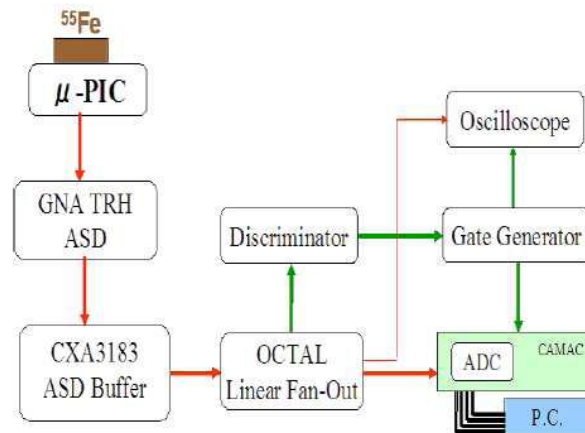


図 4.19: データ収集システムのブロック図

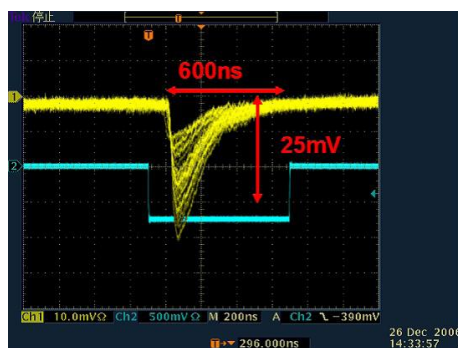


図 4.20: オシロスコープでの波形図
 ^{55}Fe の信号が、ゲート信号の時間幅に収まっているのが分かる。

電荷～ADC 校正 (キャリブレーション)

ADC でのカウント (ピーク値) がどれほどの増幅率に値するのかを測定から割り出すには、測定器固有の誤差、シグナルの伝達に伴う減衰などの様々な原因で、正確な電荷の値を求めることは難しい。しかし、基準となる入力電荷に対する出力を測定することで正確な ADC 値 (出力電荷) を求めることが出来る。このような測定方法を Calibration (キャリブレーション / 校正) という。このために以下のような装置を使用した。パルスジェネレータから容量 1[pF] のコンデンサを通してプリアンプに繋ぐ。パルスジェネレータで 100[mV] 程度の電圧をかけると、

$$Q = CV$$

より、0.1[pC] の電流がプリアンプに流れ込むことになる。この時、ADC でどのようにカウントされるかを測定する。100[mV] だけでなく 200[mV]、300[mV] といくつかの値で測定すると、校正直線が得られる。このグラフで、

$$x = (\text{プリアンプへの入力電荷量})$$

$$y = (\text{ADC 値})$$

である。5 端子ディバイダと 12dB のアテネータを接続した場合の校正曲線は、

$$y = 907.17x + 26.9$$

と得られた。

電荷が 0[pC] の時、校正曲線は 26.93[count] の ADC 値を持つ。これをペDESTAL といい、測定機器の offset に由来する固有の値である。測定では、入射粒子線を遮断して同じ値を得るか確認する必要がある。また、測定器・アテネータの値・ディバイダなどを変更した際には、改めて校正曲線を取り直す必要がある。図 4.21 にキャリブレーション時のブロック図と、図 4.21 に 5 端子ディバイダと 12dB のアテネータを接続した場合の校正曲線を示す。

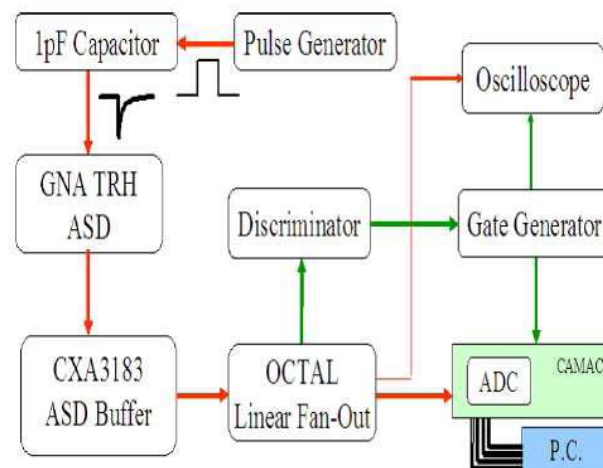


図 4.21: キャリブレーション時のブロック図

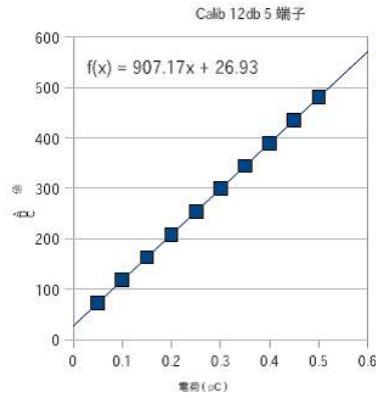


図 4.22: 5 端子ディバイダと 12dB のアテネータを接続した場合の校正曲線

増幅率計算

^{55}Fe より生成した一次電子の電荷量は $3.6 \times 10^{-5} [\text{pC}]$ であり、校正曲線より、プリアンプ前段の増幅信号の電荷量は、

$$y = 907.17x + 26.9 \quad \text{より} \quad x = \frac{y - 26.93}{907.17} \times 10^{-12}$$

である。増幅率 $G = \frac{\text{増幅信号の電荷量 } [C]}{\text{一次電子の電荷量 } [C]}$ より、

$$G = \frac{\frac{y - 26.93}{907.17} \times 10^{-12}}{3.6 \times 10^{-5}} \quad \text{計算して} \quad G = \frac{y - 26.93}{0.03295}$$

となる。

4.4 Ion Back-Flow 測定

Ion Back-Flow はドリフト電場を乱し、1 次電子の正常なドリフトを阻害してしまう。そのため、Ion Back-Flow は低く抑える必要がある。本実験では、ピコアンメータを使用し Ion Back-Flow の具体的な値を実験的に求めた。本節では Ion Back-Flow 測定に必要な原理/計算、使用回路、測定手順について述べる。[19]

4.4.1 Ion Back-Flow 計算

ガス増幅過程では、多量の電子と同数の陽イオンが生成する。この多量の陽イオンの内、一部がドリフト領域へと流れ込みドリフト電極へと到達する。Ion Back-Flow を測定するにはガス増幅で生成した 2 次電子の信号電流と、ドリフト電極へ到達した陽イオンのイオン電流を測定し、その比をとればよい。ドリフト電極には、1 次電子・陽イオン対生成時の陽イオンの寄与が考えられるが、ガス増幅により一次電子の 1 万倍程度の 2 次電子が生成され、Ion Back-Flow が 1[%] 程度であると考えれば、上記の電流寄与は漏洩イオンの 100 分の 1 程度となり無視できる。

よって、

$$\text{IonBackFlow 率} = \frac{\text{ドリフトプレーンに流れる陽イオンの電流}}{\text{アノードに流れる信号電流}} \times 100[\%]$$

と考えることが出来る。

4.4.2 測定回路

Ion Back-Flow の測定には以下の 2 点の大きな問題がある。

1. 各電極には GND に対して数 100~1000[V] のオーダーの高電圧がかかっており、電圧計で測定可能なレンジを越えてしまう。
2. ドリフトプレーン電流は 10~ 数 10[pA] オーダーの微小な電流である。

解決策として、

1. の問題に対しては、GND を H.V. 系統に直接接合することで外界と電氣的に隔離した。そのため GND が高電位状態にあるとみなすことが出来、電圧計の測定可能範囲に納めることが出来る。また、外界と電氣的に隔離しているため、内部回路は 9V 乾電池で動作させている

2. の問題に対しては、オペアンプを用いた増幅回路にフィードバック抵抗 $4[G\Omega]$ という非常に高い抵抗を用いることで、大きな増幅を行い微小な電流値を測定することを可能にした。ただし、使用したフィードバック抵抗は $4[G\Omega]$ という非常に大きな抵抗値を持つため、反転入力端子から電流が流入する恐れがある。そのためオペアンプには $1000[G\Omega]$ 以上という、非常に高い入力インピーダンスを持つ FET (電界効果トランジスタ) オペアンプである「MAXIM 製 ICL7612」が使用されている。

また、リーク電流を防ぐため $200[G\Omega]$ の絶縁性の高い支柱端子を用いて、空中配線で組み立てられている。更に、ノイズ遮断の為に回路は金属ケース内に格納されている。図 4.23 にピコアンメータの回路図を示す。

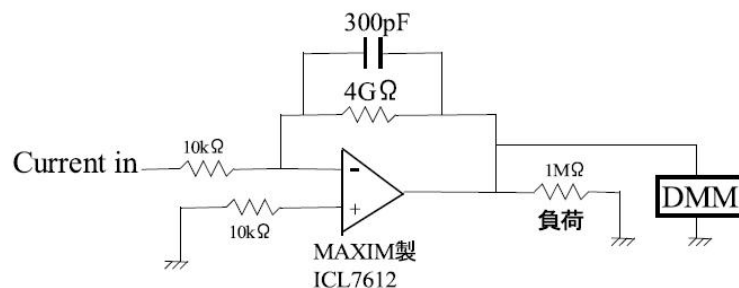


図 4.23: ピコアンペアメータの回路図

4.4.3 誤差とキャリブレーション

同時測定と偶発誤差

Ion Back-Flow の測定では、同一設計の 2 台のピコアンメータによって Anode 電流と DriftPlane 電流を同時に測定している。同時測定を行うことによる利点を 2 つ述べる。

1. 2 台のピコアンメータ間の電流測定差をあらかじめ把握しておき、校正することで、系統誤差を排除して Ion Back-Flow を求めることが出来る。
2. RI ソースの置き方やガス増幅率の変動などによる、測定毎の変化を排除できる。

1. については、2 台のピコアンメータの計測可能範囲がオーバーラップしている領域で、同一の電流源によって電流を生成し、Anode 用・DriftPlane 用それぞれ電流値を測定し校正を行う。その結果、Anode 用ピコアンメータは DriftPlane 用に対しおよそ 3.5[%] ほど、小さい出力を返すことが分かった。この値を校正値として用いる

ことで、系統誤差を排除して Ion Back-Flow の計算を行うことが出来る。

2. については、今回の測定では極板に電圧をかけるだけで、 μ -PIC 基板表面に電流が漏洩することが考えられる。そのためオンソース・オフソース時の差をとることでリーク電流を打ち消している。線源のオン・オフを繰り返す測定では線源の設置位置によって、粒子線の入射量が異なる。その結果、Anode 電流・DriftPlane 電流が測定毎に変化する。しかし、Anode 電流・DriftPlane 電流の変化は同じ比率で変化するため、同時測定を行うことで測定毎の変動要因は排除できる。図 4.24 に同時測定のセットアップ図について示す。

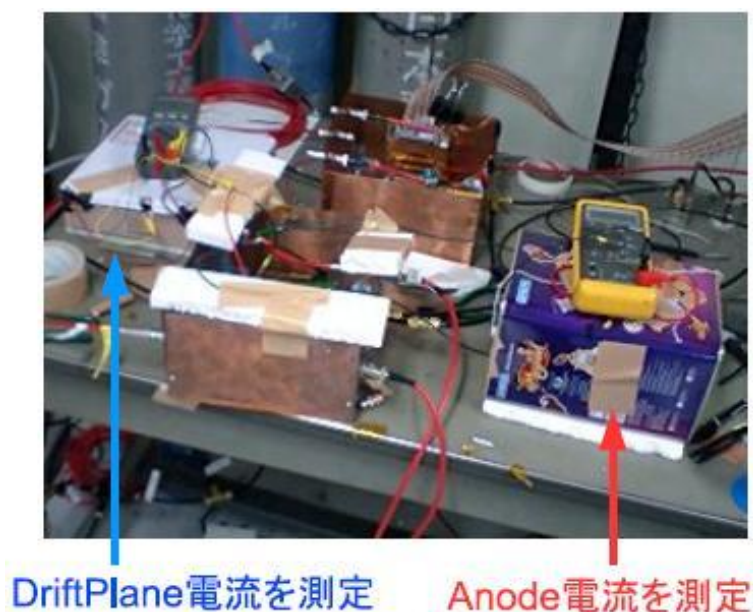


図 4.24: 同時測定のセットアップ図

4.4.4 データ収集手順

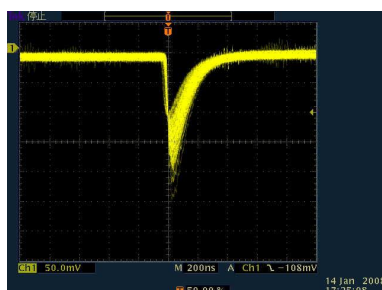


図 4.25: ^{55}Fe の波形図 (写真の最大波高は $200[\text{mV}]$)

今回の Ion Back-Flow 測定では、 μ -PIC の信号をオシロスコープで見て、ガス増幅率を同程度に固定して測定を行った。

イオンフィードバックの測定では、流れ出すアノード電流値が同程度であればガス増幅率は一定である。そのため、今回の測定ではガウスフィットなどの手順を省略した。目安として、図 4.25 に示すように ^{55}Fe を線源に用いた μ -PIC のパルス高最大が、 $200[\text{mV}]$ になるよう設定した。これをガス増幅率に直すと一万倍程度になる。

^{55}Fe を用いて、増幅率を一万程度に固定した後、測定には線源として ^{90}Sr を使用する。 ^{90}Sr は ^{55}Fe に比べて単位時間の放射線の発生数が多いため、 ^{90}Sr を用いることで Anode・DriftPlane 電流は、 ^{55}Fe を使用した場合より格段に大きくなり、測定精度が向上する。

本測定において DriftPlane および Anode への印加電圧は、H.V. と各電極を繋ぐ配線の途中にピコアンメータを挿入した状態で行った。そのため印加する H.V. 電圧を変化させる際、DriftPlane や Anode はピコアンメータを経由して、H.V. から電荷の供給を受け H.V. 電位に追従する。

上記の電圧設定の際、H.V. 電圧値の変更中はピコアンメータの出力は大きく降りきれる。しかし、H.V. 電圧を固定した後、極板の電位が H.V. 電位に追従し、等電位に到達すれば出力は安定するはずである。しかし H.V. 電位を変更後、出力安定までにおよそ 10 分程度の時間がかかった。そのため、H.V. 電圧を変更した後の測定を行うまでの間に、充分長い「安定化時間」を設けることにした。以上の理由により、Ion Back-Flow の測定は以下の手順で行うこととした。

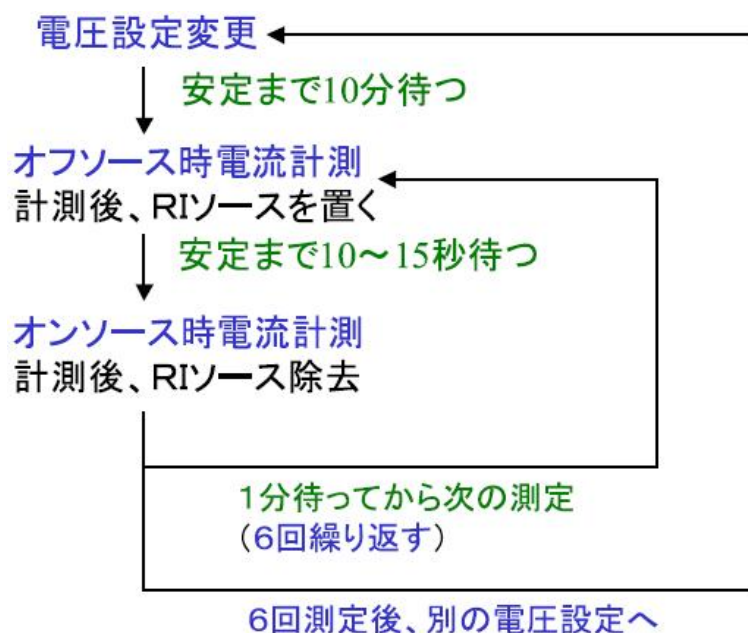


図 4.26: Ion-BackFlow 測定フローチャート

出力安定の遅れの原因として、ポリイミドの電気的特性が考えられる。図 4.27 に、ポリイミド薄膜に長時間電圧をかけたときのリーク電流の時間変化を示す。

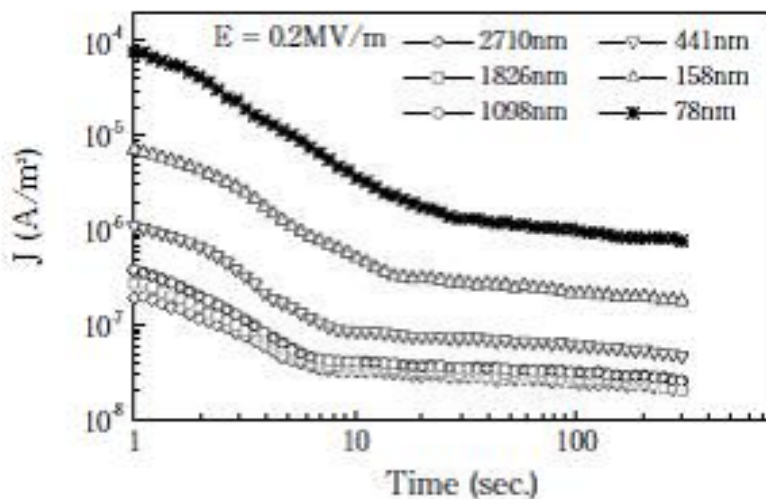


図 4.27: ポリイミド薄膜に長時間電圧をかけたときのリーク電流の時間変化 [22]

図 4.27 において、各ラインは厚さの異なるポリイミド薄膜に関する測定結果である。また、初めの 10 秒間に大きなリーク電流が見られるが、これは測定装置側の時定数が約 10 秒であることの影響であり、ポリイミドとは関係ない。上図を見る限り、ポリイミドに電圧をかけ始めてから 100 秒経過してもまだリーク電流は減少傾向を示しており、電気的特性が安定していないことが分かる。この原因は、ポリイミドが非常に長い時間をかけて誘電分極を起こすためではないかと考えられている。

4.4.5 Ion Back-Flow 値の誤差計算

測定で得られたデータから、Ion Back-Flow 値を求めるまでの過程をまとめる。ピコアンメータでは、高抵抗に流れた電流の電圧値が表示される。高抵抗の抵抗値を R 、高抵抗にかかる電圧を V とすると、オームの法則より流れる微小電流 I は、

$$I = \frac{V}{R}$$

である。

R は高抵抗計で測定されているため、高抵抗計に特有の系統誤差が付く。高抵抗計の系統誤差は一定の方向に表れるため、その割合を x と定義する。電圧に関しては、事前に 2 台のピコアンメータを校正しているため、系統誤差を排除できる。求めた校正值を C とする。測定には、リーク電流を排除するため線源をオン・オフする。線源を置いたときのアノード電圧を V_{aon} 、 V_{aoff} 、線源を除いたときのドリフト電圧を V_{don} 、 V_{doff} と定義する。

$IonBack - Flow = \frac{\text{ドリフトプレーンに流れる陽イオンの電流}}{\text{アノードに流れる信号電流}}$ 、より、

$$IonBackFlow \text{ 率} = \frac{\frac{(V_{don} - V_{doff})C}{R(1+x)}}{\frac{V_{aon} - V_{aoff}}{R(1+x)}} \times 100[\%]$$

となり、まとめると

$$IonBackFlow \text{ 率} = \frac{(V_{don} - V_{doff})C}{V_{aon} - V_{aoff}} \times 100[\%]$$

となり、系統誤差が排除されることが分かる。

複数回測定の統計誤差に関しては、IonBackFlow 値の平均と標準偏差を求める。

4.4.6 データロガーを用いた Ion Back-Flow 測定

電圧計に DMM(Digital Multi Meter) を用いた場合、線源を複数回オン・オフする必要がある。そのためデータロガーを用いたデータ収集システムを構築した。電圧計に、DMM を使用する代わりにデータロガーを用いることで、ワイヤレスでデータを収集することが出来る。データロガーを用いた Ion Back-Flow 測定概念図を図 4.28 に示す。

Ion Back-Flow 値の誤差計算に関しては、オンソース・オフソース時の平均と統計誤差を事前に求めておくことで、上式と同様に計算することが出来る。今回の測定では μ -PIC3 号機を従来のピコアンメータ、 μ -PIC4 号機をデータロガーを用いたピコアンメータで測定を行った。

図 4.29 にデータロガーを用いたときの Ion Back-Flow データの一例を示す。丸印がアノード用ピコアンメータの電圧値、三角印がカソード用ピコアンメータの電圧値を表している。データカウント 40 前がオンソース時でデータカウント 40 後がオフソース時のデータである。

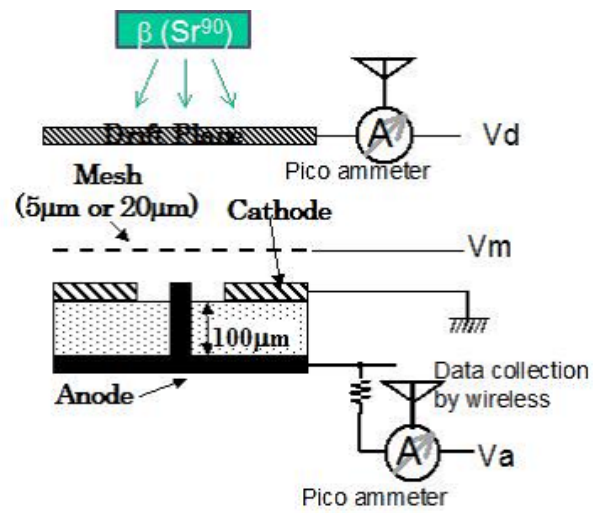


図 4.28: データロガーを用いた Ion Back-Flow 測定概念図

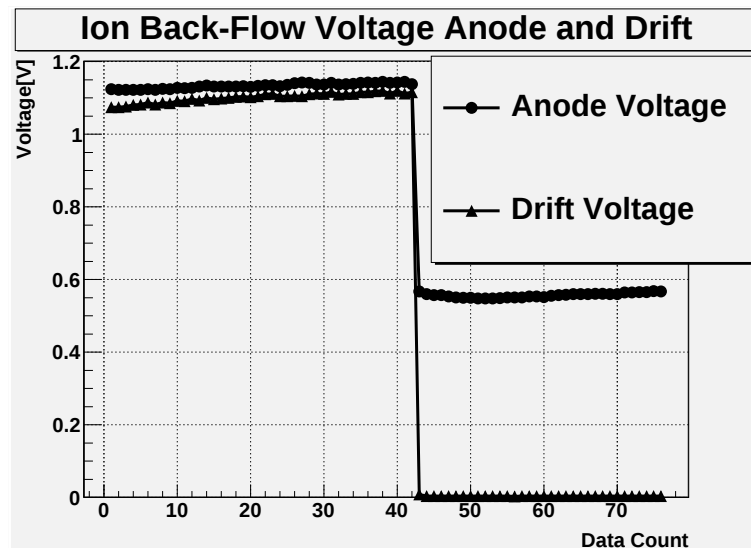


図 4.29: データロガーを用いた Ion Back-Flow の電圧データ

第5章 M^3 -PICの性能評価

本章では、前章のセットアップを元に行った M^3 -PIC の増幅率・Ion Back-Flow の測定をまとめる。増幅率の測定ではメッシュ厚の異なる M^3 -PIC3 号機 (メッシュ厚 $5[\mu\text{m}]$) と M^3 -PIC4 号機 (メッシュ厚 $20[\mu\text{m}]$) の増幅率の比較を行った。また M^3 -PIC4 号機を用いて、動作ガスに P10 (Ar:CH₄=90:10)、Ar:CF₄=90:10、Ar:CF₄:n-C₅H₁₂ の三種を使用して増幅率の比較を行った。また Ion Back-Flow の測定では P10 ガスを用いて M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC3 号機での Ion Back-Flow の比較を行った。

5.1 増幅率測定

5.1.1 異なる厚さのメッシュを用いた増幅率測定

メッシュ厚の異なる M^3 -PIC3 号機 (メッシュ厚 $5[\mu\text{m}]$) と M^3 -PIC4 号機 (メッシュ厚 $20[\mu\text{m}]$) を用いて、増幅率の比較を行った。線源には ^{55}Fe 、動作ガスには混合済みガスである Ar:C₂H₆=50:50 ガスを用いた。メッシュ・ドリフト間は $300[\text{V}]$ に固定し (メッシュ電圧 $=-100[\text{V}]$)、アノードは $600 \sim 700[\text{V}]$ まで $20[\text{V}]$ 刻みで変化させ、ドリフト電場を一定にして、増幅電場を増加させた。またメッシュ電圧の違いによる増幅率の変化を記録するため、同様の測定をメッシュ電圧 $=-200[\text{V}]$ 、 $-300[\text{V}]$ についても行った。測定結果のグラフを図 5.1 に示す。測定の結果、メッシュを厚くすることで増幅率が大きく減少してしまうという結果が得られた。増幅率の減少は、測定点で一様に減少し平均して $37[\%]$ の落ち込みが確認できた。

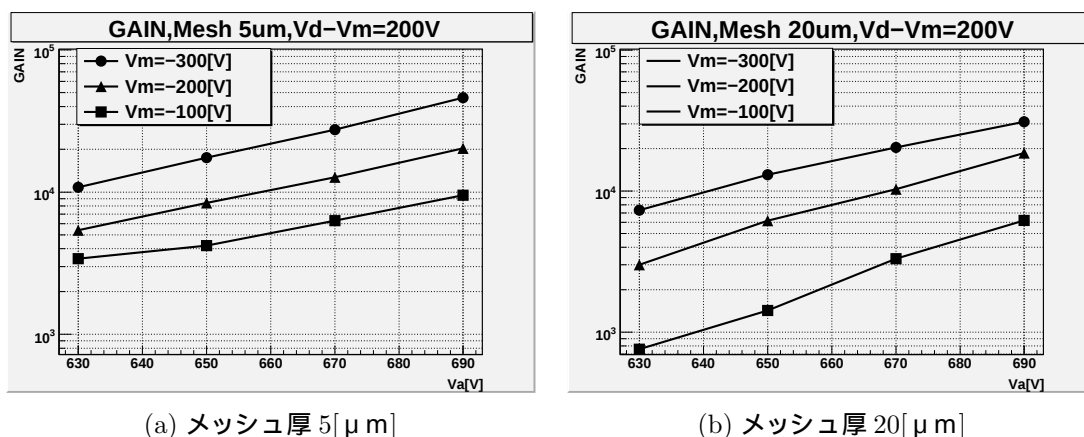


図 5.1: M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での増幅率測定

5.1.2 異なる動作ガスを用いた増幅率測定

P10 と Ar:C2H6=50:50

M^3 -PIC3 号機 (メッシュ厚 $5[\mu\text{m}]$) を用いた、動作ガス P10 と Ar:C2H6=50:50 での増幅率の測定の結果を図 5.2 に示す。

測定の結果、P10 ガスを用いた場合、動作電圧が低い状態から高増幅率が得られることが確認出来た。しかし、放電が起るまでの動作電圧幅は短く、アノード電圧が $500[\text{V}]$ で放電が起った。Ar:C2H6=50:50 ガスを用いた場合、P10 ガスよりも動作電圧が高い状態で高増幅率を得る。しかし、放電が起るまでの動作電圧幅は長く、結果として P10 ガスよりも高い増幅率を得ることが出来た。

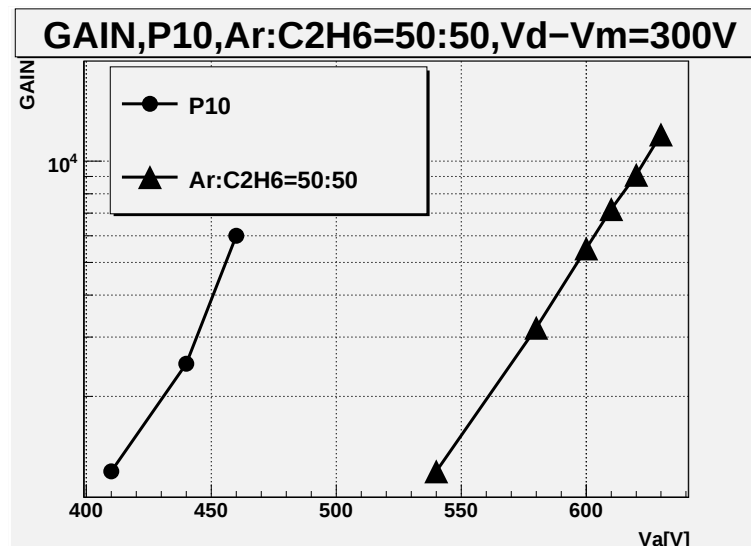
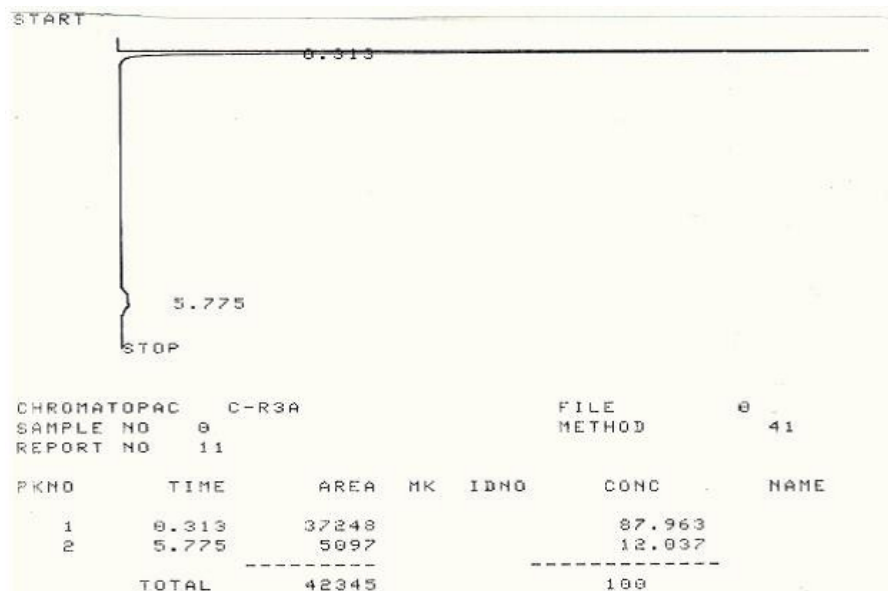


図 5.2: P10 ガスと Ar:C2H6=50:50 ガスでの増幅率測定

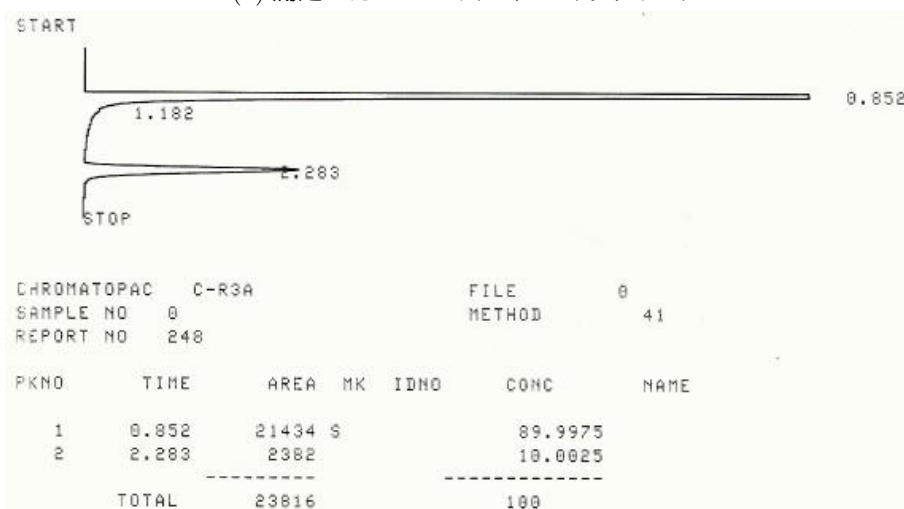
P10 と Ar+CF4 と Ar+CF4+n-C5H12

μ -PIC の高増幅率化を妨げる原因は、アノード・カソード間の放電による導通問題である。これまで動作ガスとして P10 (Ar+CH₄)、Ar+C₂H₆ という Ar+炭化水素系ガスの組み合わせの混合ガスを用いてきた。しかし、 μ -PIC の絶縁部分が導通する原因として、炭化水素系ガスが炭化し絶縁部に堆積することで、導通が起こりやすくなるということが分かってきた。そのため、炭化水素系ガスの代わりに CF₄ を用いて、Ar+CF₄ の混合ガスを作製した。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、炭化水素系ガス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。ただ Ar と CF₄ のみでは十分な増幅率を得ることが出来ないため、少量の n-C₅H₁₂ を含め高増幅率化を計った。

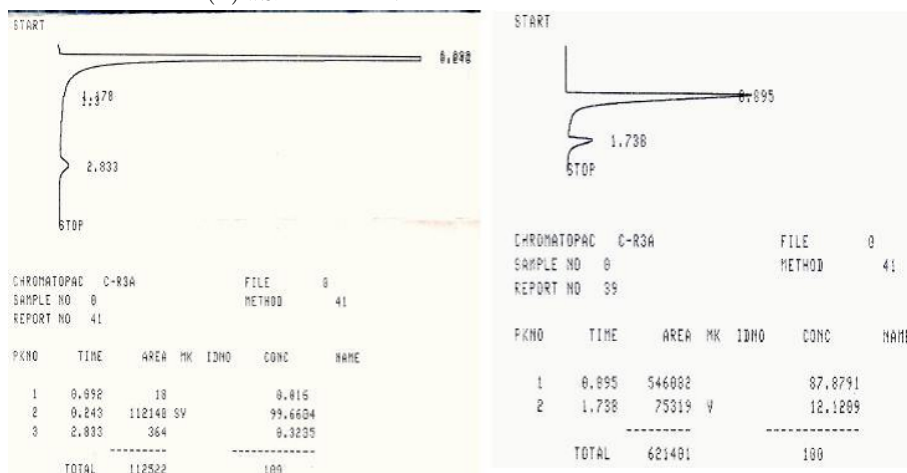
本測定では Ar の比率を 90 % に固定し、クエンチガスを変更したときの増幅率の変化を記録した。図 5.3 に商用の P10 ガスと、作製した Ar+CF₄・Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ の混合ガスをガスクロマトグラフで測定したクロマトグラムを示す。



(a) 測定した P10 ガスのクロマトグラム



(b) 測定した Ar+CF₄ ガスのクロマトグラム



(c) 測定した Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ ガスのクロマトグラム

図 5.3: P10, Ar+CF₄, Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ のクロマトグラム

ガスクロを用いてそれぞれの混合ガスの比率を確認したところ、商用の P10 ガスでは、Ar:CH₄=88:12 の割合で混合されていることが確認できた。Ar+CF₄ では、設定した Ar:CF₄=90:10 の混合ガスが作製されていることが分かる。Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ では、Ar:CF₄:n-C₅H₁₂=87.6:12.1:0.3 という混合比が得られ、CF₄ に n-C₅H₁₂ を含めることが確認できた。更に n-C₅H₁₂ の比率を増やすには n-C₅H₁₂ の分圧を高める必要がある。しかし今回の混合では、恒温槽を最大値の 19 度にまで上げて n-C₅H₁₂ の蒸気圧を高めている。そのため、今回の測定では Ar:CF₄:n-C₅H₁₂=87.6:12.1:0.3 の混合ガスを用いて測定を行った。

上記の混合比で、M³-PIC4 号機 (メッシュ厚 20[μm]) を用いてガス増幅率の測定を行った。測定結果のグラフを図 5.4 に示す。

測定の結果から、Ar+CF₄ ガスでは P10 ガスと比べ十分な増幅率を得ることが出来なかった。しかし、Ar+CF₄ ガスに少量の n-C₅H₁₂ を加えた Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ では Ar+CF₄ に比べ動作電圧が低く、P10 ガスに匹敵する大きな増幅率を得ることが出来た。

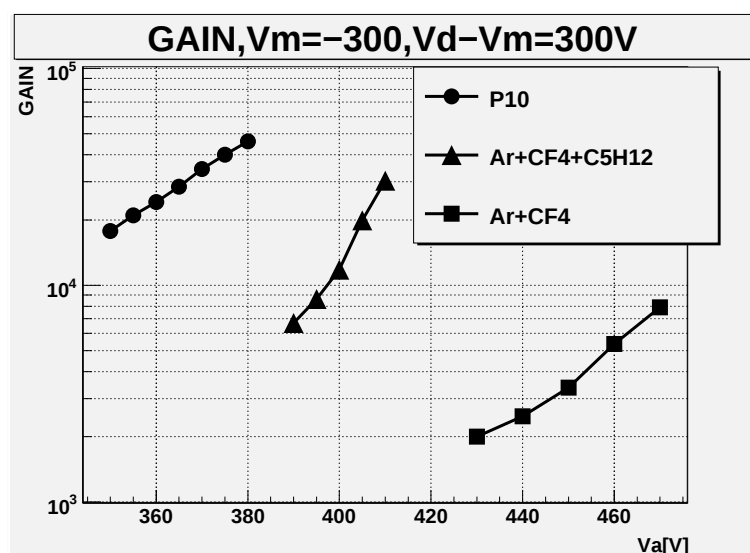


図 5.4: P10 ガス、Ar+CF₄+C₅H₁₂、Ar+CF₄ ガスでの増幅率測定

5.2 Ion Back-Flow 測定

メッシュ厚の異なる M^3 -PIC3 号機 (メッシュ厚 $5[\mu\text{m}]$) と M^3 -PIC4 号機 (メッシュ厚 $20[\mu\text{m}]$) を用いて、Ion Back-Flow 率の比較を行った。 M^3 -PIC3 号機では電圧計に DMM を用いて複数回測定を行い、 M^3 -PIC4 号機ではデータロガーを用いて統計データを集めた。増幅率は線源 ^{55}Fe を用いて二万程度に統一し、Ion Back-Flow の測定には線源 ^{90}Sr を用いた。動作ガスには混合済みガスである P10 ガスを用いた。測定結果のグラフを図 5.5 に示す。

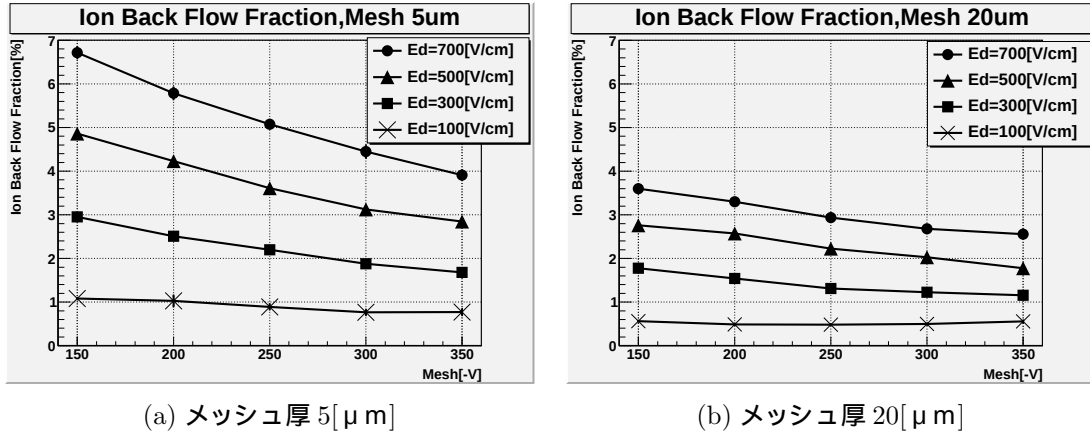


図 5.5: M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での Ion Back-Flow 率測定

測定の結果から、メッシュを厚くすることで Ion Back-Flow 率を減少できるという結果が得られた。メッシュ厚 $5[\mu\text{m}]$ ではメッシュ電圧-350[V]、アノード電圧 320[V]、ドリフト・メッシュ間電圧 100[V] の時、最小値 $0.77 \pm 0.07[\%]$ が得られ、メッシュ厚 $20[\mu\text{m}]$ ではメッシュ電圧-250[V]、アノード電圧 384[V]、ドリフト・メッシュ間電圧 100[V] の時、最小値 $0.52 \pm 0.003[\%]$ が得られた。またドリフト電場が強いほど、メッシュ電圧が高くなるに連れて、Ion Back-Flow 率を抑える効果が大きくなると分かった。

このデータの一部を整理しなおし、ドリフト電場強度と Ion Back-Flow 率の相関関係をみたグラフを図 5.6 に示す。

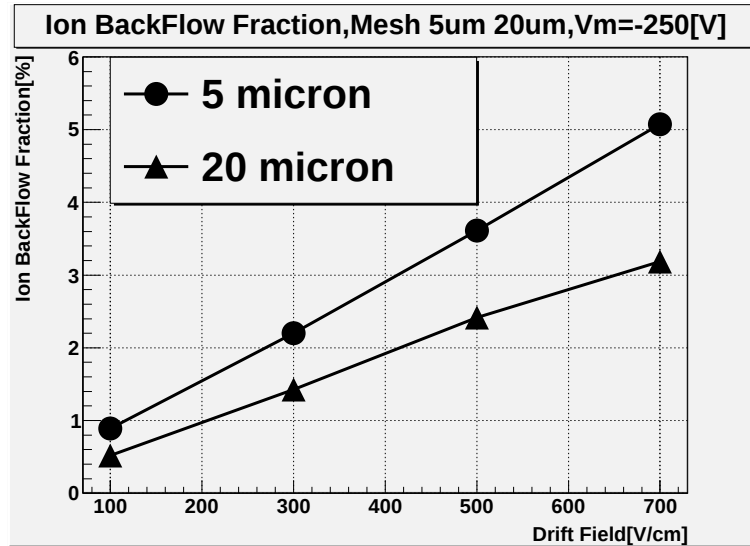


図 5.6: M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での、Ion Back-Flow 率とドリフト電場の相関関係

図 5.6 から、ドリフト電場と Ion Back-Flow には比例関係があることが分かった。これは、強ドリフト電場によって陽イオンが増幅領域から吸い出されることを示している。

また、メッシュ厚 $20[\mu\text{m}]$ について、図 5.5(b) のドリフト・メッシュ間 $100[\text{V}]$ を拡大したグラフを図 5.7 に示す。

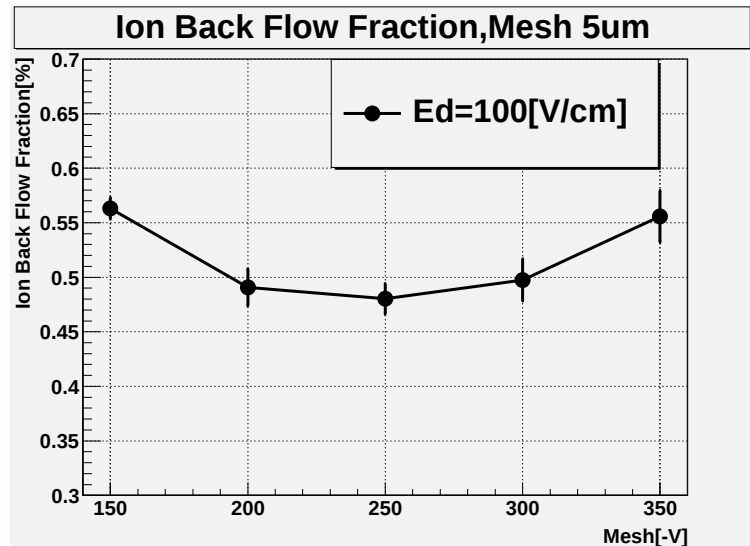


図 5.7: M^3 -PIC3 号機と M^3 -PIC4 号機での、Ion Back-Flow 率とドリフト電場の相関関係

図 5.7 から、増幅率一定下で Ion Back-Flow の最小点が存在することが分かった。つまり同じ増幅率で動作させていても、動作電圧によって Ion BackFlow が異なる値を持つ。そのため Ion BackFlow が最小に抑えられるような適切な動作電圧で動作させる必要があることが分かる。

このように、 M^3 -PIC のメッシュジオメトリ・動作ガス・動作電圧を変更することで M^3 -PIC の動作は大きく異なることが分かる。このような、要因または傾向を調べるためにシミュレーションを用いた検証を行った。シミュレーションの内容については次章にて述べる。

第6章 Maxwell3D と Garfield を用いたシミュレーション

シミュレーションを用いることで、検出器内部の電場構造や電子のドリフトなど、実験では分からない内部の複雑な事象を調べることが出来る。本研究では、3次元電場解析ソフト Maxwell3D とワイヤーチェンバー用シミュレーションプログラム Garfield を用いてシミュレーションを行った。用いたシミュレーションソフトについての概要を述べる。

Maxwell3D

アメリカの Ansoft 社が開発した3次元電場解析ソフトで、組み込まれた CAD を用いて視覚的に3次元のジオメトリを作成することが出来る。そして、物質の素材や印加電圧などを指定し有限要素法を用いて電場を計算する。

Garfield

CERN で開発されたガス検出器に関する2次元・3次元電場計算ソフトである。ワイヤーや無限プレートを用いてジオメトリを作成し、検出器内の電場や電場ベクトル・電気力線・等電位面・ガス増幅率等の計算をすることが出来る。Garfield では3次元のジオメトリを作成することは出来ないが、Maxwell3D で得られた計算結果を読み込むことができ、同様の計算をすることが出来る。

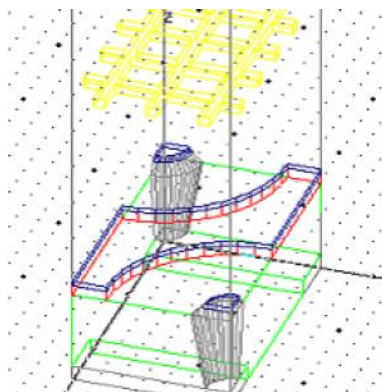


図 6.1: maxwell3D で作製した M^3 -PIC の最小ジオメトリ

6.1 Maxwell3D(三次元電場解析ソフト)

Maxwell3D ではジオメトリを作成し、物質の素材や印加電圧を設定して電場解析を行う。その後、解析データを Garfield へと受け渡す。Maxwell3D では最小ジオメトリを対照に無限に拡張することが出来る。μ-PIC はピクセルが対照に並んでいるため、最小ジオメトリを作り無限に拡張した。作製した最小単位のジオメトリを 6.1 に示す。また電場解析には解析メッシュを作製する必要がある、Maxwell では一つのメッシュが正四面体の構造を持つ。解析メッシュは細かいほど電場解析の精度は良いが、Garfield では解析メッシュを読み込める上限がおよそ 7 万程度という制限がある。そのため、解析メッシュは 7 万を越えないように設定した。また正常な電子のドリフトを行う為には、電場勾配の大きい領域程、解析メッシュを細かく切らなければならないため、メッシュ・アノード近傍にはダミーオブジェクトを配置し、メッシュを重点的に細かく区切れるよう設定した。

6.2 Garfield (ワイヤーチェンバー用シミュレーションプログラム)

Garfield では Maxwell3D で作製された電場データ・ジオメトリを読み込んで、電子・イオンのドリフトを計算する。ドリフトにはルンゲ・クッタ法とモンテカルロ法の 2 種類があり、ルンゲクッタ法では電気力線に沿ってドリフトされる。

モンテカルロ法では以下の情報が必要となる。

- 電子の初期位置と、そこでのドリフト速度ベクトル
- ドリフトされる時間幅 (平均自由行程分のドリフト時間)

このステップを、以下の方法で繰り返しドリフトしていく。

1. ドリフト速度を一定として時間幅分の距離を計算する。
2. 拡散係数を一定として、初期位置からの縦方向・横方向の拡散を計算する。
3. 縦方向・横方向の拡散に加え、衝突による散乱分布を考慮して拡散距離を求める。
4. ドリフト速度から求めた距離と、拡散距離から次の位置に移動する。

上記を繰り返し、以下の状態になるとシミュレーションは終了する。

- 電極に到達、または通り抜ける。ある指定した半径内にはいった時も終了する。
- 電極に到達しなくても、電子がステップ数の最大値を越えれば計算が終了する。このステップ数の最大値は Garfield をコンパイルする時のソースファイル (garfield-7.car) の MXLIST の数を変更すれば大きくすることが出来る。今回のシミュレーションでは、遠くに置いた電子が電極にドリフトされるように、MXLIST の値をデフォルト値 1000 から 10000 に変更した。
- 速度がゼロになったり、粒子が電極から離れた時に計算は終了する。

以上のようなシミュレーション過程を経て電子は電極へとドリフトされる。

6.3 シミュレーション計算内容

本研究で行った計算内容を大きく、増幅率・電子収集率・Ion Back-Flow の 3 つにまとめる。

6.3.1 増幅率

増幅率は MIP 粒子の検出に関わる重要なパラメータである。アノード、カソード、メッシュへの印加電圧をそれぞれ変更し、タウンゼント係数の積分で計算される増幅率を求めた。電子がガス増幅過程において、経路の長さ 1[cm] あたりに作る電子・陽イオン対の数を第 1 タウンゼント係数 α という。

α については、

$$\frac{\alpha}{\rho} = f\left(\frac{E}{\rho}\right)$$

という関係式が成り立つ。ここで E は電場の強さ、 ρ は気体分子密度を表している。また、 α の値はガスの種類によっても異なる。これよりガスの増幅率は電場の強さ、気体分子密度（圧力、温度）、ガスの種類に依存していることが分かる。

計算には次の方法を用いた。基板より十分離れたところ（メッシュ位置より 300[μm] 上方）に電子を並べる。斜線部は各ピクセルの最近接のピクセルで作られる三角形の重心を結んで作られた範囲であり、中心のピクセルがカバーする領域に相当する。理想的には、斜線部にある電子はドリフト後、中央のピクセルに到達する。配置した電子をモンテカルロ法を用いてドリフトさせる。

増幅度 A は第一タウンゼント係数 $\alpha(x)$ を用いて、

$$A = \frac{n(x)}{n_0} = \exp\left(\int \alpha(x) dx\right)$$

となる。

混合ガスのタウンゼント係数は Garfield 内にある Magboltz プログラムによって計算される。しかし、ドリフトした電子はアノードだけではなく、メッシュ、カソード、ポリイミドにも到達する。そこで、新たにアノードへの電子の集収率 R_a を考慮した増幅度 A' を

$$A' = R_a \times A$$

と定義する。

今回は、アノードに到達した電子のみについてそれぞれ計算した増幅率の平均を A' とし、アノードへの電子集収率 R_a を用いて増幅率 A' を求めた。

Garfield では空間電荷効果や再結合といった増幅率を低下させてしまう現象の効果は含まれていない。特に高い増幅率を得られる条件においてはイオン対が多量に生成するため、シミュレーションで得られた結果は実際の測定値よりも大きな値を示す。そのため、得られた増幅率の増減の傾向を調べるものとする。

6.3.2 電子収集率

ガス中で生成した電子の内、アノードに到達した電子の割合を電子集収率 R_a とする。電子はドリフト電場とアノード近傍の強い電場によりアノードピクセルに集められるが、その一部はポリイミドに蓄積したり、メッシュに吸収されてしまう。アノードピクセルに到達する電子が減少することにより、増幅率・エネルギー分解能が低下してしまうと考えられる。あるエネルギーの粒子線がガス中に入射した際、生成されるイオン対の数は入射粒子のエネルギーに寄与する。そのため、生成した電子を十分にアノード電極に集めることができれば、生成した電子数を特定することが難しくなり、エネルギー分解能が悪くなる。また、ポリイミドに電荷が蓄積し帯電すると沿面放電の原因になると言われており、できる限り蓄積を少なくする方が望ましい。

計算には以下の方法を用いた。増幅率を計算した前節と同様に、電子を並べモンテカルロ法を用いてドリフトさせる。最初に並べた電子の数を N_0 、アノードに到達した電子の数を N_- とすると、電子集収率は、

$$R_a = \frac{N_-}{N_0}$$

となる。

ただし、この計算ではガス増幅によって生成した電子は考慮していない。ポリミドへの電子の蓄積の割合やメッシュで吸収された電子の割合についても同様の計算式を用いて導いている。

6.3.3 Ion Back-Flow

ガス増幅時に生成した陽イオンの内、ドリフト領域に流れ込む陽イオンの割合を Ion Back-Flow 率 R_d とする。ガス増幅により電子が生成すると、同時に陽イオンも生成する。陽イオンは電子とは逆の方向にドリフトし、メッシュ付 μ -PIC の場合カソードやメッシュ、ドリフトプレーンに到達する。陽イオンがドリフトプレーン領域へ流れ込むと後段で作られる一次電子と再結合を起こしたり、ドリフト電場を歪ませる原因となる。そのため陽イオンのドリフト領域への漏洩はできる限り抑えなければならない。

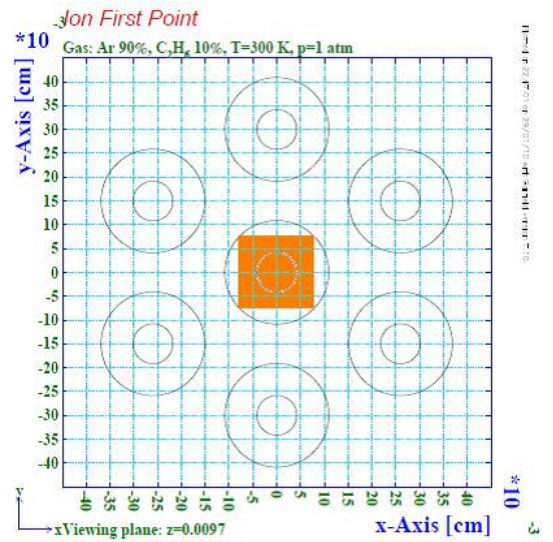
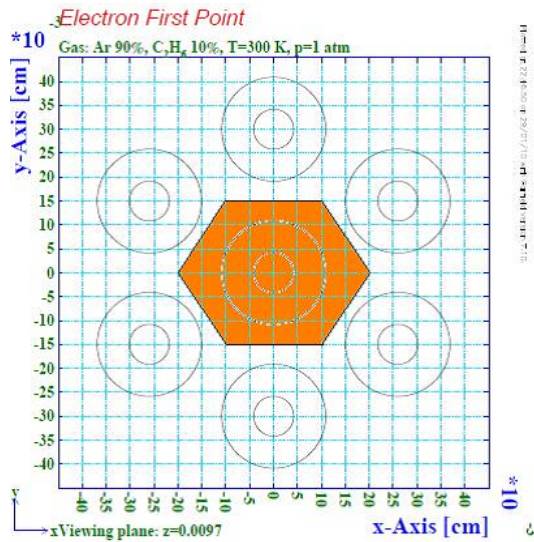
計算には以下の方法を用いた。基本的には電子集収率の計算方法と同様である。陽イオンはガス増幅時にアノード近傍で多量に生成されるため、アノード直上に陽イオンをならべドリフトさせる。最初に並べた陽イオンの数を N_0 、ドリフト領域へと流れ込む陽イオンの数を N_+ とすると、Ion Back-Flow 率は、

$$R_d = \frac{N_+}{N_0}$$

となる。

ただし、この計算ではガス増幅によって生成した陽イオンは考慮していない。カソードやメッシュで吸収された陽イオンの割合についても同様の計算式を用いて導いている。

図 6.2(a) に電子のドリフト初期位置と (b) に電子のドリフト初期位置を示す。



(a) ガス増幅率・電子集収率を計算する際の初期電子の位置 (b) Ion Back-Flow 率を計算する際の初期陽イオンの位置

図 6.2: ドリフト初期位置

第7章 シミュレーションを用いた M^3 -PIC の性能評価

M^3 -PIC の性能は、印加電圧・実装マイクロメッシュ・充填ガスに大きく依存する。そのため印加電圧・実装マイクロメッシュ・充填ガスの最適化を図ることで、 M^3 -PIC の性能を十分に活かすことができる。本節では、実装マイクロメッシュ・印加電圧・充填ガスの最適化を行うため、シミュレーションを用いて検証を行った。

7.1 メッシュジオメトリの検証

マイクロメッシュの M^3 -PIC 動作における大きな効果として、高増幅率化と低 Ion Back-Flow 化が挙げられる。ガス増幅・Ion Back-Flow はマイクロメッシュによる電場構造に大きく依存する。マイクロメッシュの生成する電場構造はマイクロメッシュのジオメトリと印加電圧により変化する。そのためメッシュジオメトリと印加電圧の最適化が必要となる。

メッシュ付 μ -PIC の動作にはアノード電圧、ドリフト電圧、メッシュ電圧の3つの電圧パラメータを用いる。ドリフト電場はドリフト電圧とメッシュ電圧、増幅電場はメッシュ電圧とアノード電圧に大きく依存する。

今回のシミュレーションにおいては、メッシュ電圧に対する電子集収率・Ion Back-Flow 率の変化を調べるため、増幅電場に最も影響を与えるアノード電圧を固定した。アノード電圧設定値は、実測で放電を起さずに安定に動作する 450[V] を用いた。また、実測ではドリフト・メッシュ間の電位差を小さく抑えた方が高い増幅率を得られるため、今回はドリフト・メッシュ間を 100[V] に固定した。また動作ガスについては実験で使用されている P10 ガスを用いた。以上の設定を行うことでメッシュに対する増幅率・電子集収率・Ion Back-Flow 率の変化を調べることができる。

次にマイクロメッシュのジオメトリ、メッシュへ印加した電圧についてまとめる。

マイクロメッシュの基板からの高さ

メッシュの高さを 50[μm]・100[μm]・200[μm]・500[μm] の4通りについて計算を行い比較した。

マイクロメッシュの厚み

メッシュの厚みを、それぞれの高さにおいて 10[μm]・20[μm] の2通りの計算を行い比較した。

マイクロメッシュへの印加電圧

それぞれのメッシュジオメトリについて、メッシュ電圧を 0~400[-V] まで変化させ比較した。

以上の設定に基づき計算を行った。計算して求めた値は、ガス増幅率・電子集収率・Ion Back-Flow 率の三種類である。電子集収率については電子のメッシュへの吸収率、Ion Back-Flow 率については陽イオンのカソードへの吸収率を用いて考察を行った。結果を以下に示す。

7.1.1 電子集収率

図 7.1 にメッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での電子集収率を示す。図を比べると、メッシュを厚くすることで電子集収率が大きく減少することが分かる。また、メッシュの高さ $50[\mu\text{m}]$ においては、 $100 \cdot 200 \cdot 500[\mu\text{m}]$ に比べ電子集収率に増加が確認できる。この大きな原因として電子のメッシュへの吸収が考えられる。図 7.2 にメッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、電子のメッシュへの吸収率を示す。この図より、メッシュを厚くすることで電子のメッシュへの吸収率が增加することが分かる。また、メッシュの高さが低くなるにつれて電子のメッシュへの吸収が減少することが分かる。以上からメッシュの高さ $50[\mu\text{m}]$ での電子集収率に増加は、電子のメッシュ透過率の増加に起因することが確認できる。

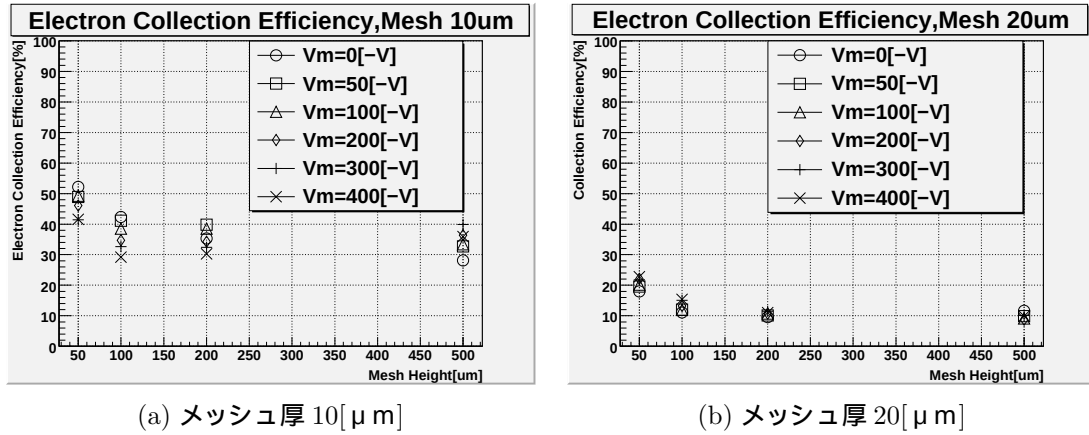


図 7.1: メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での電子集収率

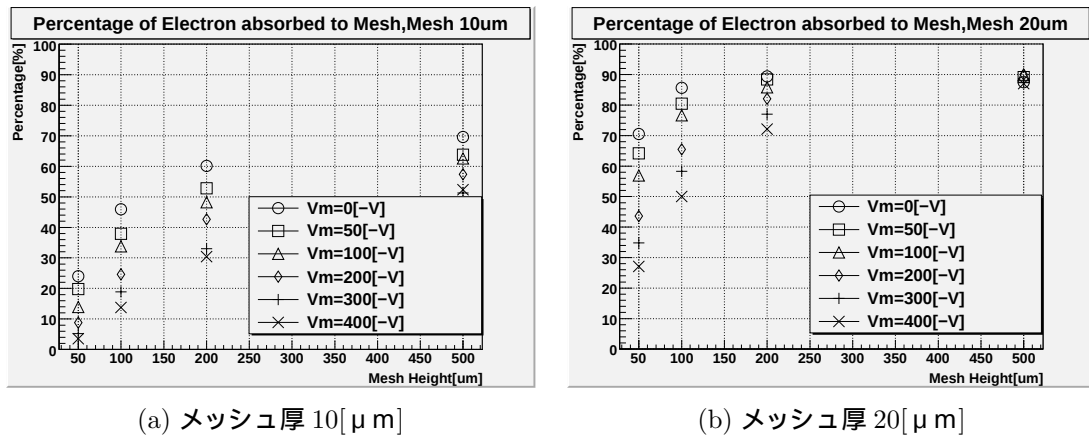


図 7.2: メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、電子のメッシュへの吸収率

またメッシュの高さ $100 \cdot 200 \cdot 500 [\mu\text{m}]$ では、メッシュの高さが低くなるほどメッシュ吸収率は減少するが、電子集収率には大きな違いがみられなかった。この原因として、メッシュを通過した電子のポリイミド又はカソードへの堆積が考えられる。図 7.3 にメッシュ厚 $10 [\mu\text{m}]$ と $20 [\mu\text{m}]$ での、電子のカソード又はポリイミドへの堆積率を示す。この図より、メッシュの高さが低くなるにつれて、ポリイミド又はカソードへの堆積率が増加することが分かる。このことから電子は、メッシュを透過できた後においてもポリイミド又はカソードへの堆積により、電子集収率が低下してしまうということが分かった。メッシュの高さ $50 [\mu\text{m}]$ においても、ポリイミド又はカソードへの堆積率増加は確認できるが、メッシュ吸収率の大幅な低減によって、電子集収率の増加を可能にしていることが分かる。

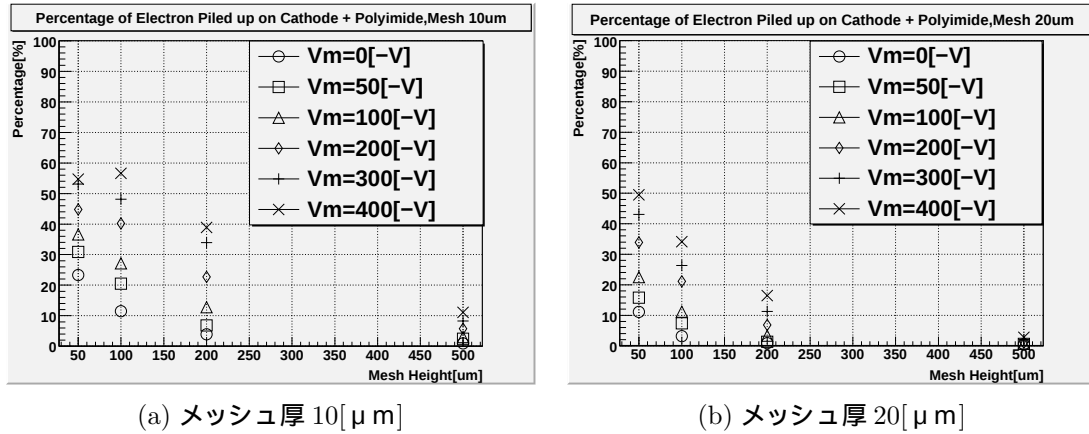


図 7.3: メッシュ厚 $10 [\mu\text{m}]$ と $20 [\mu\text{m}]$ での、電子のカソード又はポリイミドへの堆積率

7.1.2 Ion Back-Flow 率

図 7.4 にメッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での Ion Back-Flow 率を示す。図を比べると、メッシュを厚くすることで Ion Back-Flow 率を減少出来ることが分かる。これはメッシュを厚くすることで、陽イオンのメッシュへの吸収を増加させることが出来たと考えられる。

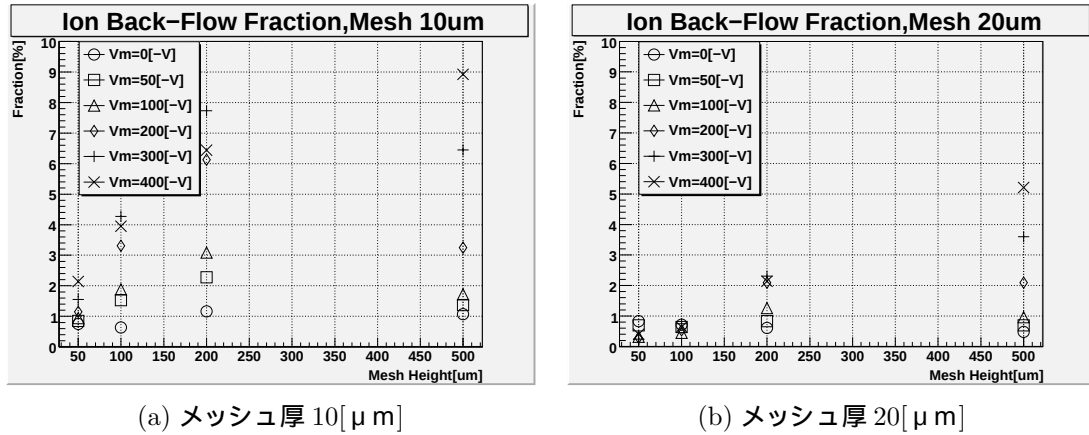


図 7.4: メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での Ion Back-Flow 率

まず図 7.5 にメッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、陽イオンのカソードへの吸収率を示す。この図からはメッシュ厚に関わらず、陽イオンのカソードへの吸収率は変わらないことが分かる。つまり同量の陽イオンがドリフトプレーン方向にドリフトしていく。次に、図 7.6 にメッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、陽イオンのメッシュへの吸収率を示す。この図から、メッシュを厚くすることで陽イオンのメッシュへの吸収を増加させることが出来たと考えられる。以上から、メッシュを厚くすることで陽イオンのカソード信号を減らすことなく、Ion Back-Flow を抑制できることが確認できた。

また、図 7.4 からメッシュ電圧を高くすると Ion Back-Flow 率が上昇することが分かる。図 7.5 をみるとメッシュ電圧を高くすると、カソードへの陽イオンの吸収率が減少することが分かる。つまり、メッシュ電圧を上げることによってドリフトプレーン方向へ向かう電気力線が増加することが分かる。このため、メッシュ電圧を上げると Ion Back-Flow 率が増加すると考えられる。メッシュ高が高くなると Ion Back-Flow が増加する傾向は、図 7.5 の陽イオンのメッシュ吸収が減少した結果と考えられる。

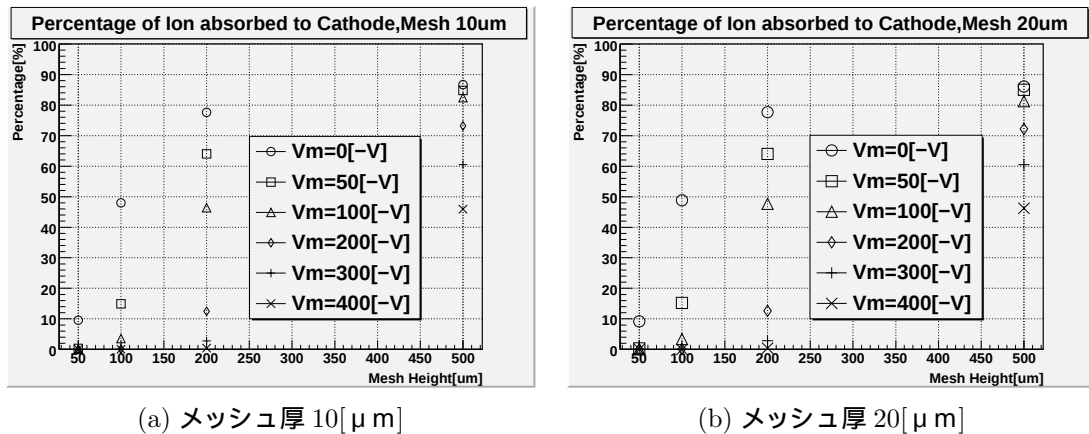
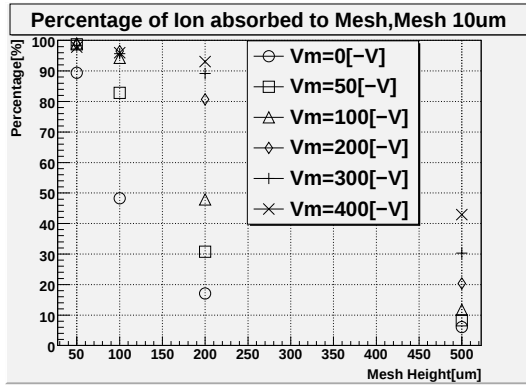
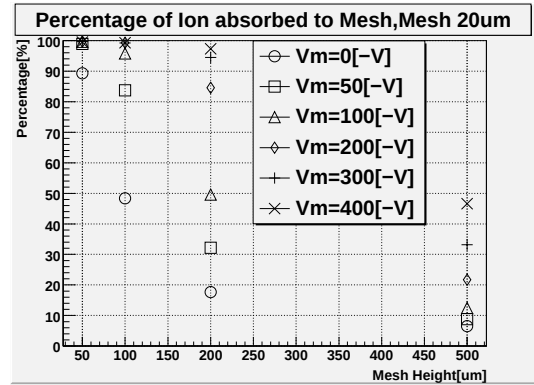


図 7.5: メッシュ厚 $10[\mu\text{m}]$ と $20[\mu\text{m}]$ での、陽イオンのカソードに吸収される割合



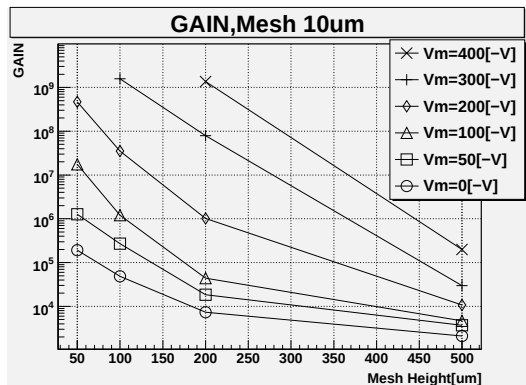
(a) メッシュ厚 10[μm]



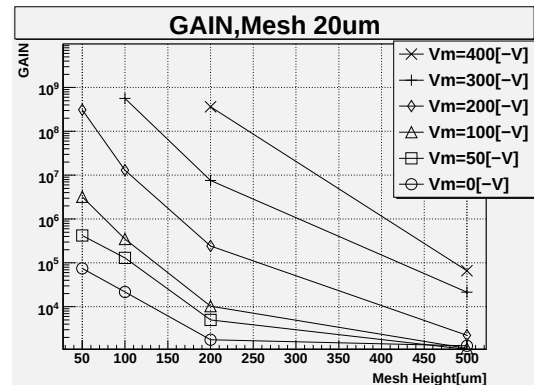
(b) メッシュ厚 20[μm]

図 7.6: メッシュ厚 10[μm] と 20[μm] での、陽イオンのメッシュに吸収される割合

7.1.3 増幅率



(a) メッシュ厚 10[μm]



(b) メッシュ厚 20[μm]

図 7.7: メッシュ厚 10[μm] と 20[μm] での増幅率

図 7.7 にメッシュ厚 10[μm] とメッシュ厚 20[μm] での増幅率を示す。この図から、メッシュを厚くすることで増幅率が大きく減少することが分かる。これは前節の、電子のメッシュ吸収による電子集収率低下に起因する。また、メッシュ電圧の増加と低いメッシュ高での高増幅率は、増幅電場が強まったためだと確認できる。

7.1.4 メッシュジオメトリの最適化

以上の結果を用いて、メッシュジオメトリの最適化を行った。同程度の増幅率 (2×10^5) における、メッシュジオメトリに対する電子集収率と Ion Back-Flow 率を調べた。求めたグラフを図 7.8 に示す。

図 7.8 より、高さの最適条件としては、傾向として Ion Back-Flow 率が小さく、アノードへの電子集収率の大きい 50[μm] であるという結果が得られた。しかし、厚さに関しては 20[μm] では 10[μm] よりも Ion Back-Flow を減少することができるが、アノードへの電子集収率が大きく減少してしまうという結果となった。

増幅率 2×10^5 でのメッシュ高 50[μm] における電子集収率と Ion Back-Flow 率を、表 7.1 に示す。高さ 50[μm] ではメッシュ厚 10[μm] と 20[μm] に Ion Back-Flow 率の違いはみられないが、高さ 100[μm] ではメッシュ

厚 20[μm] は 10[μm] よりも小さな Ion Back-Flow 率の値を持つ。高さ 100[μm] の電子集収率と Ion Back-Flow 率については、表 7.2 に示す。

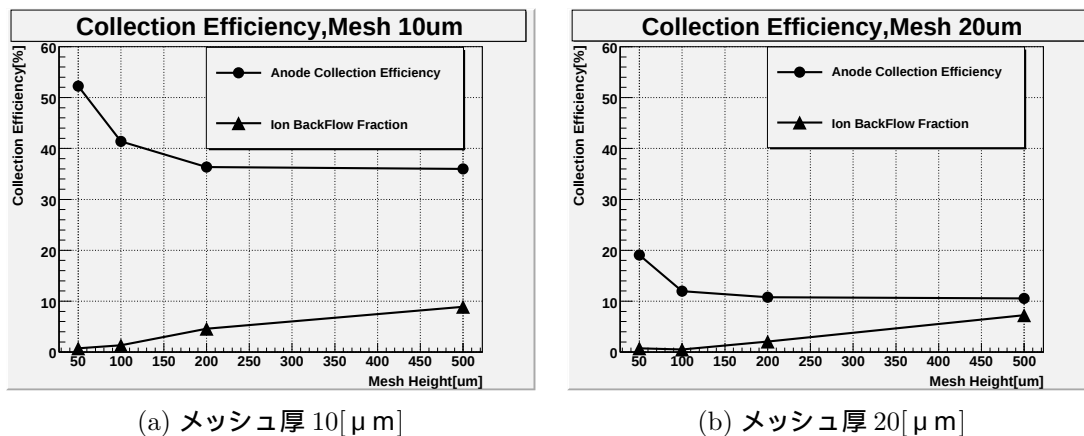


図 7.8: 増幅率 2×10^5 における、メッシュ厚 10[μm]・20[μm]での電子集収率と Ion Back-Flow 率

高さ 50[μm]	厚さ 10[μm]	厚さ 20[μm]
電子集収率	52	19
Ion Back-Flow 率	0.75	0.75

表 7.1: メッシュの高さ 50[μm]における電子集収率と Ion Back-Flow 率

高さ 100[μm]	厚さ 10[μm]	厚さ 20[μm]
電子集収率	41	12
Ion Back-Flow 率	1.4	0.53

表 7.2: メッシュの高さ 100[μm]における電子集収率と Ion Back-Flow 率

7.2 印加電圧の検証

前節ではメッシュ電圧を低く抑えること、メッシュの位置を低く設置することで電子収集率の向上と Ion Back-Flow の低減を確認した。本節ではメッシュ電圧を固定した状態でドリフト電圧を変更し、ドリフト電場に対する電子収集率と Ion Back-Flow について調べた。

前節と同様にアノードは 450[V] に固定し、ドリフト電圧に対するドリフト電場の影響を調べるため、メッシュ電圧は 200[-V] に固定した。ドリフト電圧は 300 ~ 2000[-V] まで変更させ比較を行った。

7.2.1 電子集収率

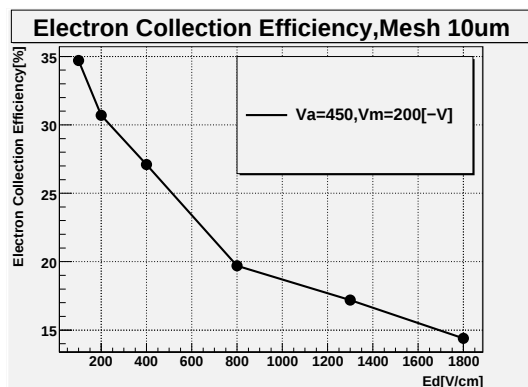


図 7.9: ドリフト電場に対する電子集収率

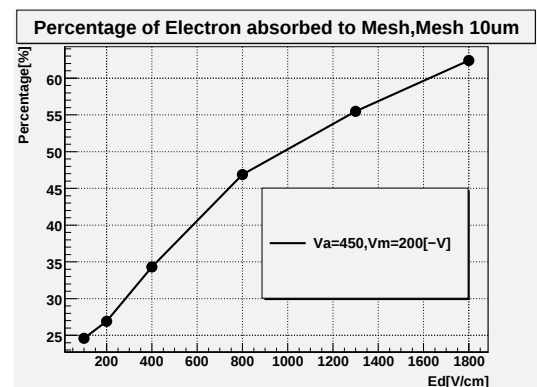


図 7.10: ドリフト電場に対する、電子のメッシュ吸収率

図 7.9 にドリフト電場に対する電子集収率を示す。この図からドリフト電場を増加させることで、電子集収率が減少することが分かる。これはドリフト電場を増加させることで、電子のドリフト速度が増加しマイクロメッシュの上部に電子が衝突する為だと考えられる。図 7.10 にドリフト電場に対するメッシュへの電子の吸収率を示す。この図からドリフト電場を増加させることで、電子のメッシュへの吸収が増加することが分かる。そのため、電子集収率を向上させるためにはドリフト電場は出来るだけ低く抑えなければならない。しかし実験では、ドリフト電場を低く抑えすぎると、一次電子と陽イオンの再結合が生じるためドリフト電場の抑制には限界がある。

7.2.2 Ion Back-Flow 率

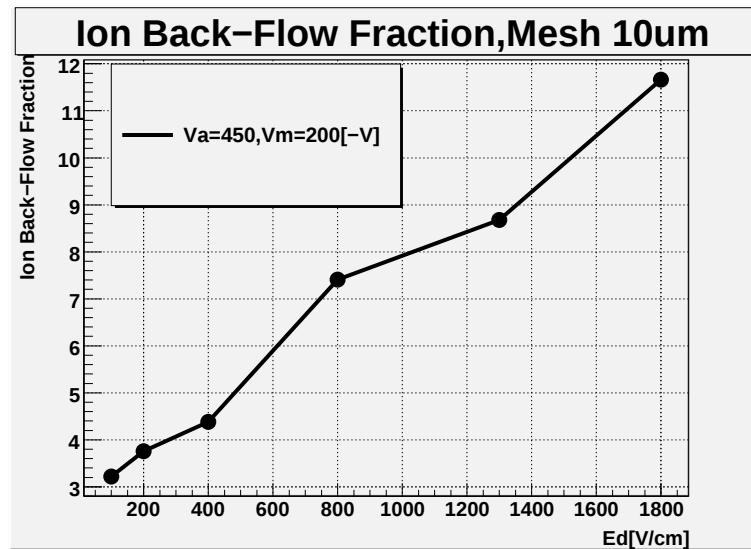


図 7.11: ドリフト電場に対する Ion Back-Flow 率

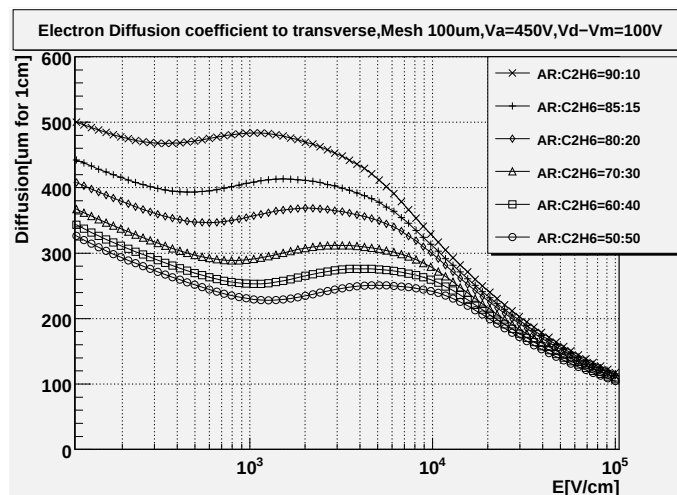
図 7.11 にドリフト電場に対する Ion Back-Flow 率を示す。この図から、ドリフト電場を低く抑えることで Ion Back-Flow 率を抑制出来ることが分かる。メッシュ電圧を固定し、ドリフト電場を増加させるとアノードからメッシュへ向かう電気力線がドリフトプレーンへと移ってしまうと考えられる。そのため、ドリフト電場の増加に伴い Ion Back-Flow 率が増加したと考えられる。

以上の結果から、ドリフト電場を低く抑えることで電子集収率の向上と Ion Back-Flow の抑制を可能にする。

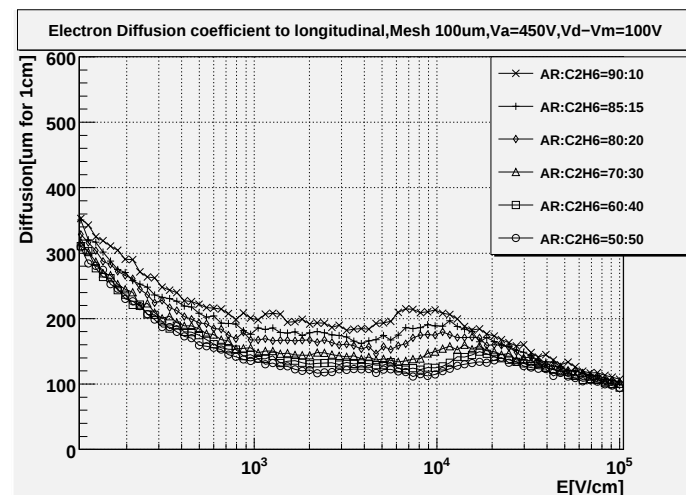
7.3 動作ガス検証

M^3 -PIC の動作はマイクロメッシュ・印加電圧に加えて充填ガスにも大きく依存する。特に電子集収率においては、マイクロメッシュ近傍の電子の拡散が、電子のメッシュ吸収率に影響を与えていると考えられる。そのため、電子集収率を向上させるためには電子の拡散の影響の少ないガスを選定する必要がある。本節では Ar+CH₆ ガスを用いて Ar の比率を変更したときの、電子のアノードへの集収率とメッシュへの集収率を調べた。また、実験で使用した P10、Ar:CF₄=90:10、Ar:CF₄:C₅H₁₂=90:9:1 ガスのクエンチガスの特性をシミュレーションにより評価を行った。 M^3 -PIC はメッシュ厚 10[μ m]、メッシュ高 100[μ m]、メッシュ電圧 0 ~ 400[-V]、ドリフト-メッシュ電位差は 100[V] に設定してシミュレーションを行った。電子の拡散係数は、Garfield 内のプログラム Magboltz を用いて計算を行った。

7.3.1 AR+C₂H₆ ガス



(a) 横方向への拡散係数



(b) 縦方向への拡散係数

図 7.12: Ar の比率を変更したときの拡散係数

図 7.12 に、Ar+C₂H₆ ガスにおいて Ar の比率を変更したときの電子の拡散係数を示す。図 (a) が電子のドリフト方向に垂直な成分の電子の拡散を表しており、図 (b) が電子のドリフト方向に平行な成分の電子の拡散を表している。電子のメッシュへの吸収は、メッシュ通過時の横方向の電子の拡散が大きく影響を与えていると考えられる。そのため、図 (a) の垂直方向の電子の拡散について注目する。図 (a) から、Ar の比率を抑えるほど電子の拡散が抑えられていることが分かる。この結果を用いて、Ar の比率を変更したときの電子のメッシュ吸収率を調べた。

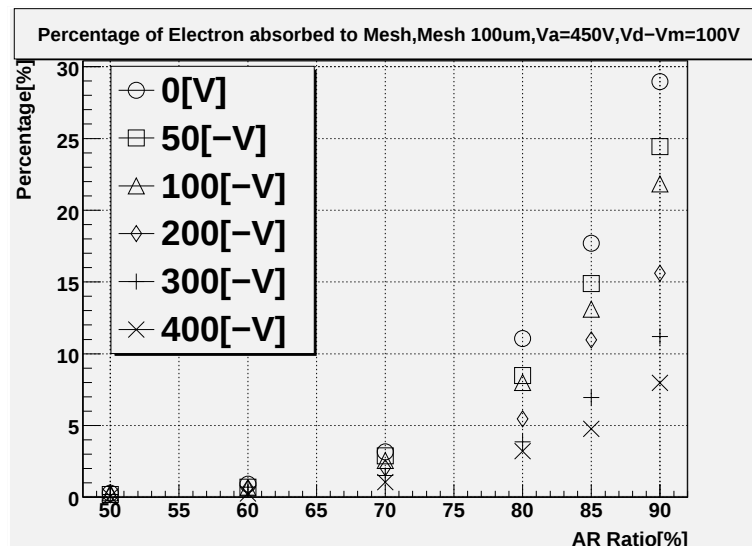


図 7.13: Ar の比率を変更したときのメッシュへの電子吸収率

図 7.13 に、Ar+C₂H₆ ガスにおいて Ar の比率を変更したときのメッシュへの電子吸収率を示す。この図から、Ar の比率を抑えることで電子のメッシュへの吸収を低減できることが分かる。この結果から図 7.12 の拡散の抑制の影響が反映されていることが分かる。

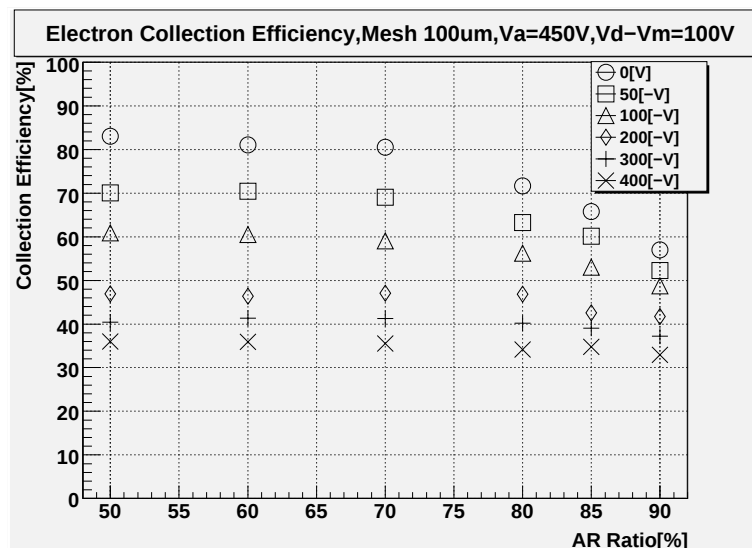


図 7.14: Ar の比率を変更したときの電子集収率

図 7.14 に、Ar+C₂H₆ ガスにおいて Ar の比率を変更したときの電子集収率を示す。図から Ar の比率を抑えることで、電子集収率が向上できることが分かる。これは図 7.13 の Ar の比率を抑えることで、電子のメッシュの透過率が増加することに起因すると考えられる。

以上の結果から、Ar の比率を低下させクエンチガスの割合を増加させることで、メッシュへの電子吸収を抑制し電子集収率の向上に繋がることが分かった。

メッシュ電圧については、メッシュ電圧を増加させることで電子のメッシュ吸収率を抑制出来ることが分かる。しかし、メッシュ電圧を増加させると電子集収率が減少するという矛盾が生じる。この原因として、メッシュを通過した電子がカソード又はポリイミドへ堆積したと考えられる。図 7.15 にメッシュ電圧を変更したときの、電子のカソード又はポリイミドへの堆積率を示す。Ar の比率にはカソード又はポリイミドへの堆積率は大きな変化はみられないが、メッシュへの印加電圧を大きくしていくことで、カソード又はポリイミドへの堆積率が増大していくことが分かる。また、図 7.16 にメッシュ電圧を変更したときの電子のカソードへの堆積率を示す。このグラフから、メッシュへの印加電圧を大きくしていくことでカソードへの電子堆積率が増加していくことが分かる。このことから、メッシュへの印加電圧を大きくしていくことで、電気力戦がアノードからカソード側へと移行していったと考えられる。

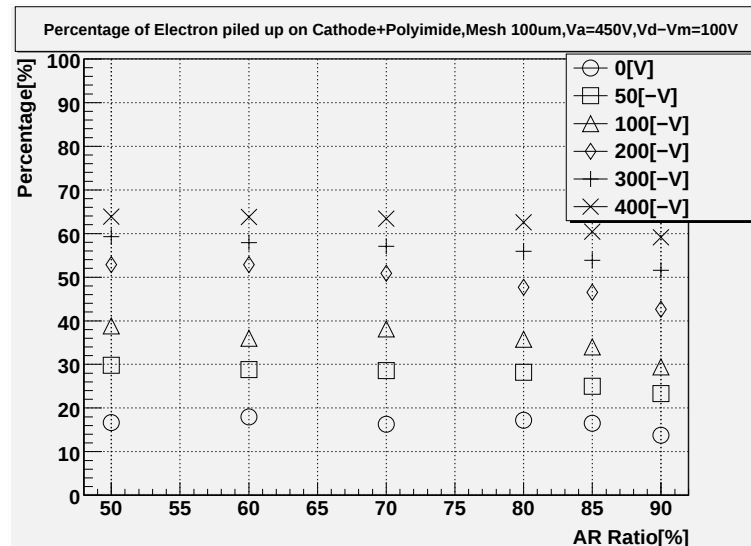


図 7.15: メッシュ電圧を変更したときの、電子のカソード又はポリイミドへの堆積率

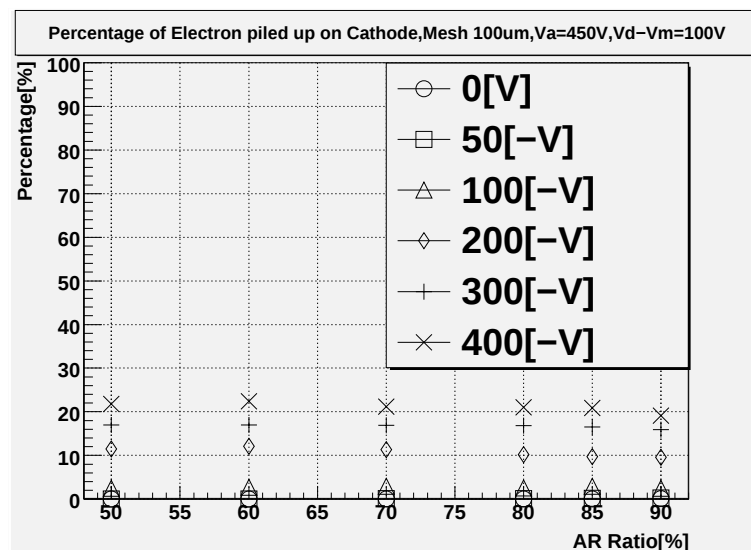
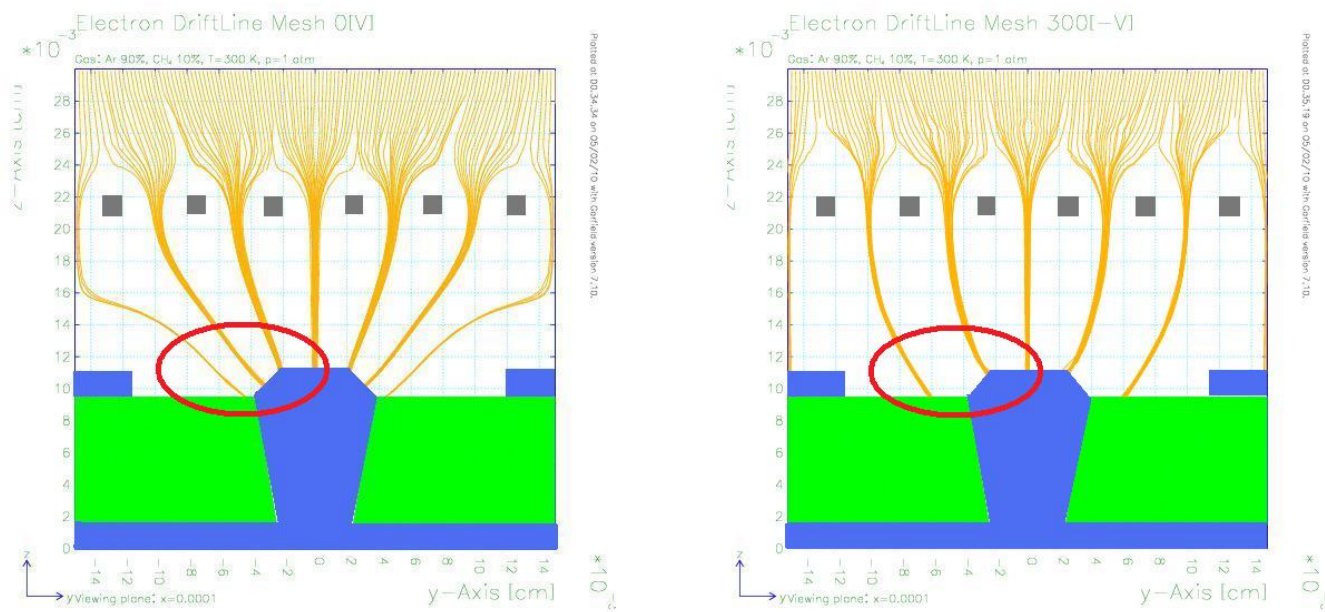


図 7.16: メッシュ電圧を変更したときの、電子のカソードへの堆積率

例として、図 7.17 にメッシュ電圧 0[V] の電子のドリフトとメッシュ電圧 300[-V] の電子のドリフト図を示す。



(a) メッシュ電圧 0[V]

(b) メッシュ電圧 300[-V]

図 7.17: メッシュ電圧を変更したときの電子のドリフト図
メッシュへの印加電圧を大きくしていくことで、
電気力戦がアノードからカソード方向へと移行していくのが分かる。

7.3.2 P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガス

本節では、実験で用いた P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスについての拡散の影響について検証する。今回は Ar の比率を固定することで、クエンチガスの特性について調べた。それぞれのガス比率は Ar:CH4=90:10、Ar:CF4=90:10、Ar:CF4:C5H12=90:9:1 に設定して計算を行った。

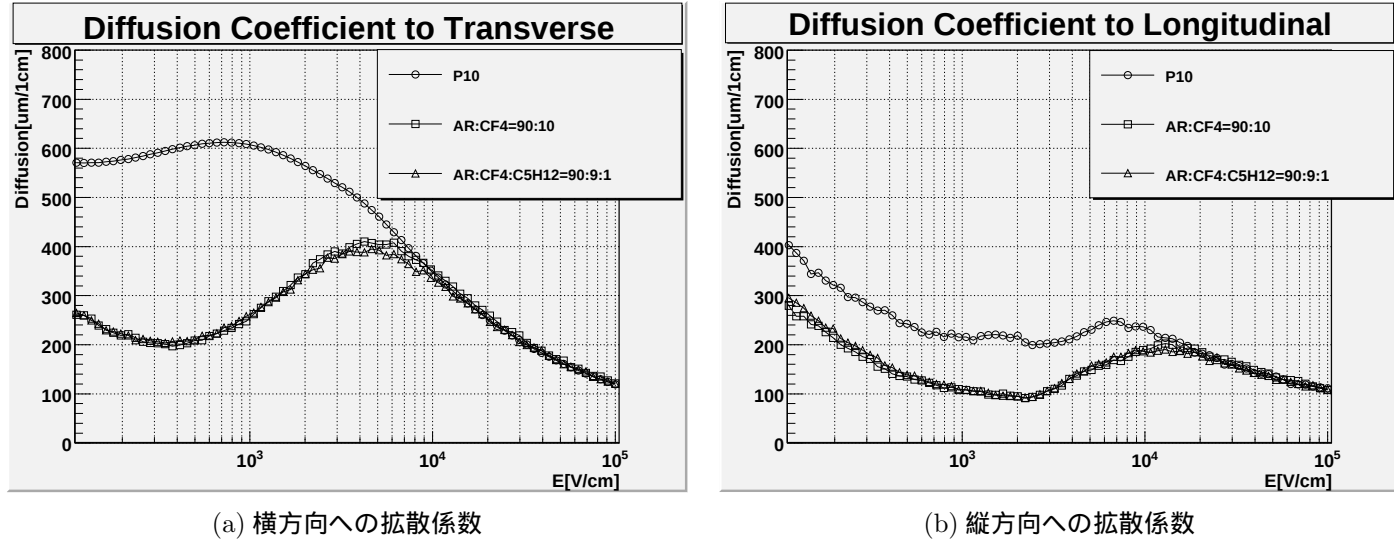


図 7.18: P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスの拡散係数

図 7.18 に P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスの拡散係数を示す。この図から CF4 ベースのガスは、C2H6 ベースのガスに比べて拡散係数を低く抑えることが出来ると分かった。この結果を用いて、P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスの電子のメッシュ吸収率を求めた。

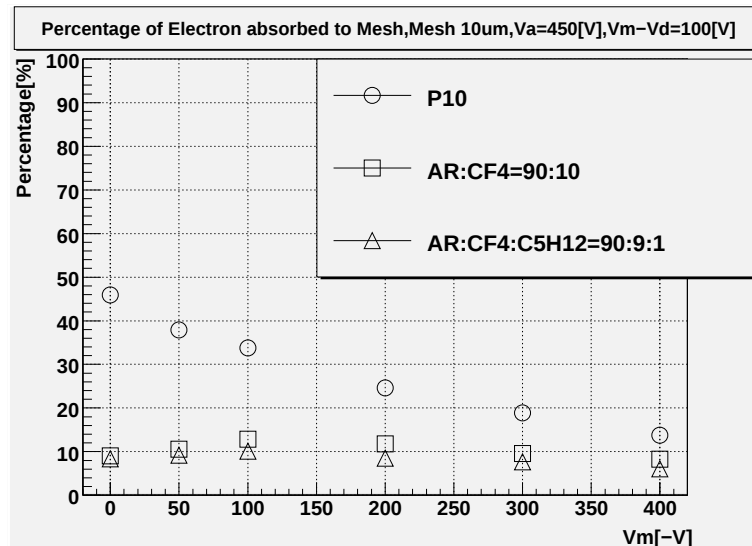


図 7.19: P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスのメッシュへの電子の吸収率

図 7.19 に P10、Ar+CF4、Ar+CF4+C5H12 ガスのメッシュへの電子の吸収率を示す。この図から、CF4 ベースのガスは、C2H6 ベースのガスに比べて電子のメッシュへの吸収が小さいことが分かる。これは図 7.18 の拡散の抑制の影響が反映されていることが分かる。

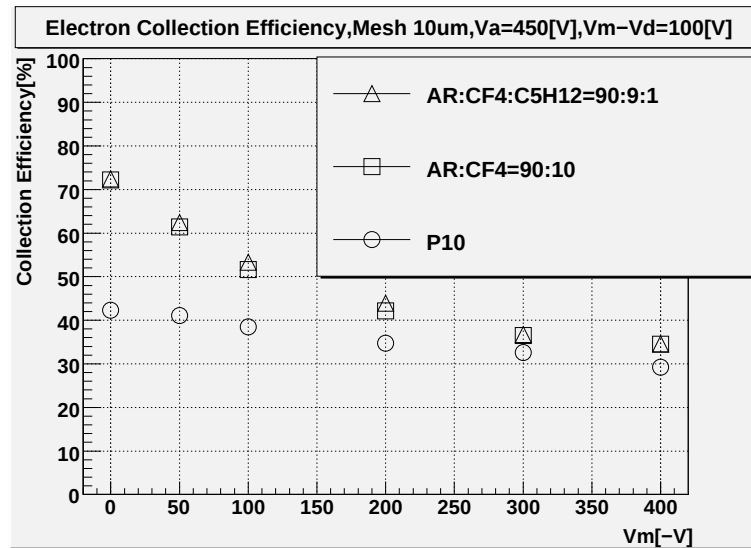


図 7.20: P10、Ar+CF₄、Ar+CF₄+C₅H₁₂ ガスの電子集収率

図 7.20 に、P10、Ar+CF₄、Ar+CF₄+C₅H₁₂ ガスの電子集収率を示す。図から、CF₄ ベースのガスを用いることで、C₂H₆ ベースのガスに比べて電子集収率が向上できることが分かる。これは CF₄ ベースのガスは、C₂H₆ ベースのガスに比べて電子のメッシュ透過率が向上していることに起因すると考えられる。

以上から C₂H₆ ベースガスの代わりに CF₄ ベースのガスを用いることで、電子の拡散を抑制し、メッシュの透過率向上が電子集収率の向上に繋がることが分かった。

最後に、P10、Ar+CF₄、Ar+CF₄+C₅H₁₂ガスの増幅率の比較を行った。図 7.21 に、P10、Ar+CF₄、Ar+CF₄+C₅H₁₂ のガス増幅率を示す。

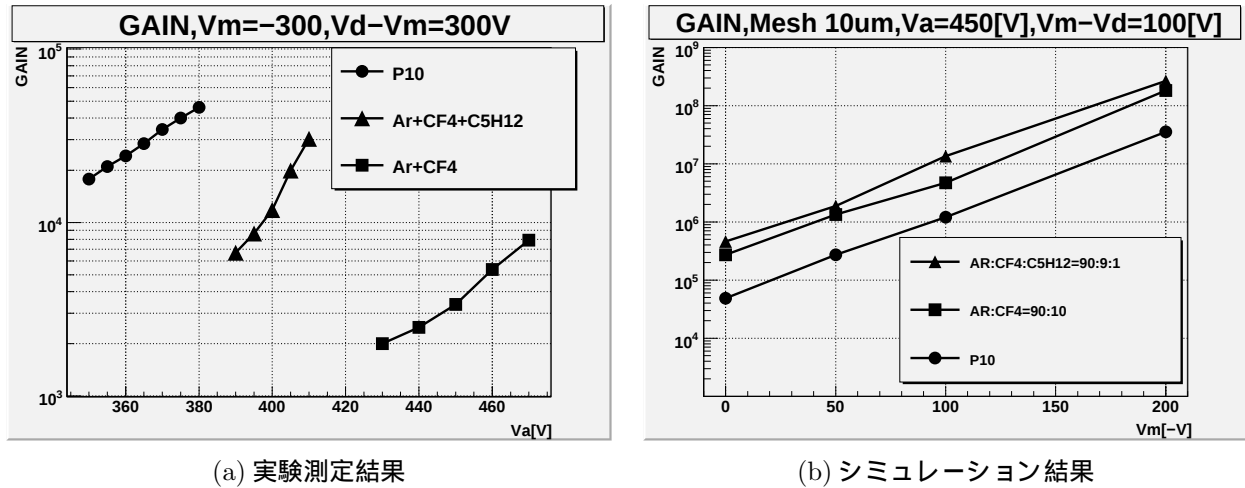


図 7.21: P10、Ar+CF₄、Ar+CF₄+C₅H₁₂ ガスのガス増幅率

図 (a) が実験測定結果、図 (b) がシミュレーション結果を表している。実験ではメッシュ電圧とドリフト電圧を固定してアノード電圧を変化させているのに対し、シミュレーションではアノード電圧を固定して、メッシュ電圧とドリフト電圧を変化させている。しかしどちらもドリフト電場を固定して、増幅電場を増加させている。図 7.21 から実験結果では、P10 ガスは CF₄ ベースガスよりも低い増幅電場で高増幅率を達成しているのに対し、シミュレーションでは CF₄ ベースガスは P10 ガスよりも低い増幅電場で高増幅率を達成している。これは Garfield では電子捕獲のプロセスを考慮されていないためだと考えられる。CF₄ ガスは電気陰性度が強く、高電場においては電子を捕獲しやすいという性質を持つ。そのため実験では CF₄ による電子捕獲が起こり、CF₄ ベースガスでは P10 ガスよりも増幅率が低下してしまうという結果となった。

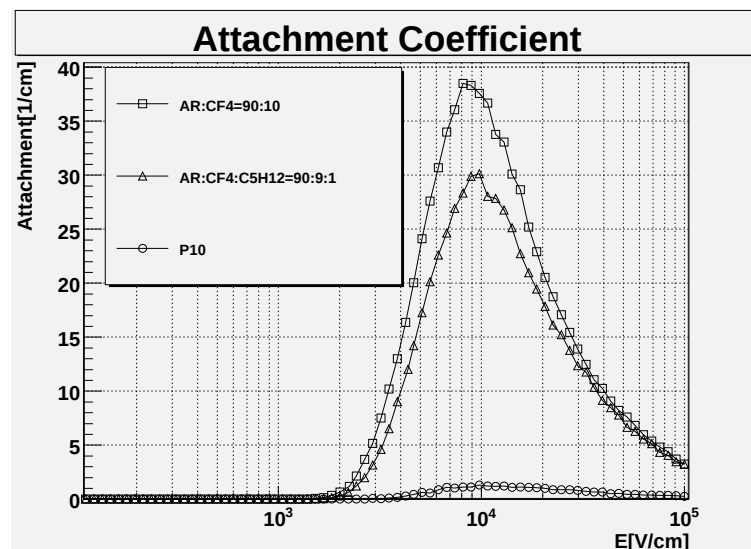


図 7.22: P10、Ar+CF₄、Ar+CF₄+C₅H₁₂ ガスの電子付着係数

図 7.22 に P10、Ar+CF₄、Ar+CF₄+C₅H₁₂ ガスでの電子付着係数を示す。この図から、CF₄ の割合を減らすことで電子の付着を減少できることが分かる。

第8章 まとめ

本研究では、 M^3 -PIC の性能向上に向けて実験とシミュレーションから性能評価を行った。得られた結果をまとめ、更なる開発への課題点を述べる。

マイクロメッシュの与える影響

今回の実験では、マイクロメッシュの作る電場における電子・陽イオンの挙動を検証した。メッシュ電場の効果として、高増幅率化と低イオンバックフロー化は増幅率測定・微小電流計を用いた Ion Back-Flow 測定から実証された。今回得られた最大増幅率は 5×10^4 、Ion Back-Flow 値は 0.5[%] である。しかしシミュレーションから、アノード電圧を固定した場合にはメッシュ電場の増大とともに電子集収率の落ち込みと Ion Back-Flow の増加が確認された。電子集収率に関しては、メッシュ近傍の電場が増加するほどメッシュ透過率は増加するが、カソード又はポリイミドへの堆積が増加するという結果が得られ、Ion Back-Flow に関してはメッシュ近傍の電場が増加するほど、カソードへの吸収が減少し、メッシュへの吸収率が増加するという結果が得られた。具体的な値としてメッシュの高さ 100[μm]、厚さ 10[μm] では、メッシュ印加電圧を 0[V] から 400[V] に増加させることで電子集収率は 15[%] の減少、Ion Back-Flow は 4[%] の増加が確認された。 M^3 -PIC の高増幅率化にはメッシュの効果は不可欠であるが、メッシュ電場によって μ -PIC 自身の作る電気力線を歪めるという影響が考えられる。そのためメッシュ電場による電気力線の歪みは最小限に抑える必要があり、 M^3 -PIC の最適動作としては、メッシュ印加電圧は可能な限り低く抑えた状態で、アノード電圧を変化させた方が良いと考えられる。

ドリフト電場の影響

シミュレーションからドリフト電場を低く抑えることで電子集収率かつ Ion Back-Flow 率の向上を示すことが出来た。また増幅率一定下では、Ion Back-Flow 率とドリフト電場に比例関係が見られ、現在の測定値では Ion Back-Flow の最小値はメッシュ厚 20[μm]、ドリフト電場 200[V/cm] の時に 0.5[%] であるという結果が得られた。

Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ ガス

今回新たに CF₄ ベースのガスを導入し M^3 -PIC での信号を確認した。Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ ガスでは、最高増幅率で 3×10^4 を達成することが出来た。Ar+CF₄+n-C₅H₁₂ ガスの特徴として、低電場領域で炭化水素系ガスよりも拡散を抑える事が出来るという結果がシミュレーションより示された。導通を起こさず炭化水素系ガスに匹敵する増幅率が得られるため、 M^3 -PIC 動作ガスとして有効に使用できることが示された。

電子の拡散の影響

シミュレーションから Ar の比率を抑えることで、拡散の影響を低く抑えることが可能であると分かった。このため Ar の比率を低く抑えると、電子のメッシュ吸収率を抑制でき電子集収率の向上に繋がる事が分かった。具体的な値として Ar+C₂H₆ ガスでは、Ar50[%] では Ar90[%] に比べてメッシュ透過率は 30[%] 向上し、電子集収率は 25[%] の向上が確認できた。

μ -PIC の用途として、TPC(Time Projection Chamber) の読み出しに使用することが挙げられる。TPC 読み出しとして使用するには、十分な増幅率下 (1×10^4 程度) での低 Ion Back-Flow、拡散の低減が必要となる。今回の研究から、増幅率 2×10^4 で Ion Back-Flow は 0.5[%] まで低減できることが確認でき、Ar の比率を低く抑えることで拡散の影響を低減できる事が分かった。以上から現在開発している M^3 -PIC は TPC 読み出しとして有用な検出器であるということを示すことが出来た。

謝辞

本研究の進行、また本論文の作成に当たり、指導して頂いた越智敦彦助手に深く感謝致します。海外への出張や国際会議への参加でご多忙の中、研究への助言や発表スライドの確認をしていただいたりと大変お世話になりました。また研究への適切な助言を頂き、研究を進めれたことに感謝しております。同じく μ -PIC グループの工学部本間康浩准教授に指導して頂いたことに深く感謝致します。本間先生のご指摘により、実験の進行・考察を段階的に進めることができました、ありがとうございます。また工学研究科、松田慎司氏、片山翔平には MPGD 研究会、ミーティングなどで大変お世話になりました。

同研究室先輩である小林正治氏には μ -PIC グループ配属時から大変お世話になりました。研究で必要な機器の取扱いなど、一から教えていただきとても感謝しております。研究を堅実に進める姿勢から、研究の進め方を学ぶことが出来ました。宮崎一樹氏にはガスクロの動作で大変お世話になりました。就職活動中に、井上将尋氏と共に研究を助けてくれたこと、とても感謝しております。阪大大学院に在学する加納英朗氏には、神大卒業後も研究の助言を頂けたこと、非常に感謝しております。

最後に 2 年間に渡る大学院での研究生活において、御助言を賜った川越清以教授、蔵重久弥教授、山崎祐司准教授、原俊雄准教授、ならびに粒子物理研究室の先輩、後輩および同級生の皆様に深く御礼申し上げます。

関連図書

- [1] K. クラインクネヒト 著/高橋嘉右・吉城肇 共訳 「放射線検出器-放射線計測の基礎と応用-」 培風館 1987
- [2] PHYSICS LETTER B - REVIEW OF PARTICLE PHYSICS -
- [3] 岡村淳一 卒業論文「SLHC に向けた高頻度粒子線検出器 MicroMEGAS の試作」 神戸大学 2007
- [4] 守谷健司 修士論文「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」 神戸大学 2007
- [5] 吉田圭一 修士論文「マイクロパターン型放射線検出器用基板材料の紫外線照射 PL 特性による機能評価」 神戸大学 2007
- [6] F.Sauli. "Principle of operation multiwire proportional and drift chambers. " CERN(1977)1975.
- [7] G.Charpak et al.,The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles,Nucl.Instr.and Meth.62(1968)235.
- [8] A.Oed.「Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases」.Nucl.Inst.Meth.,A263,1988
- [9] URL: <http://ipnweb.in2p3.fr/rdd/projects/mpgd/images/micromegas2.gif>
- [10] A.Ochi.Ph.D thesis,Tokyo Institute of technology,1998.
- [11] Atsuhiko Ochi, Tsutomu Nagayoshi, Satoshi Koishi, Toru Tanimori, Tomohumi Nagae, Mirei Nakamura, A new design of the gaseous imaging detector:Micro Pixel Chamber. Nucl.Inst.Meth,A471,2001
- [12] Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Takeshi Dohmae, Hideaki Kanoh, Tomohiro Keika, Seiji Kobayashi, Yota Kojima, Shinji Matsuda, Kenji Moriya, Akira Tanabe, Keiichi Yoshida“ A New MPGD design:Micro-Mesh Micro-Pixel Chamber ” Nucl.Inst.Meth.,accepted for publication,2009
- [13] Y.Homma,A.Ochi,K.Moriya,S.Matsuda,K.Yoshida,S.Kobayashi “ Study of deposit associated with discharge in micro-pixel gas chamber ”Nucl.Inst.Meth.,A47,2009
- [14] 桂華智裕 修士学位論文「Micro Pixel Chamber(μ -PIC) の安定性向上と高増幅率化に向けた研究」 神戸大学 2006
- [15] 道前武 卒業論文「メッシュ付き μ -PIC の動作検証」 神戸大学 2006
- [16] K.Hattoria,S.Kabukia,H.Kuboa,S.Kurosawaa,K.Miuchia,T.Nagayoshib,H.Nishimuraa,Y.Okadaa,R.Oritoc,H.Sekiya,A. ray imaging with a large micro-TPC and a scintillation camera.Nucl.Inst.Meth. ,A581,2007
- [17] 小林正治 修士論文「メッシュ付き μ -PIC の安定動作に向けた研究」 神戸大学 2008
- [18] 宮崎一樹 卒業論文「Mesh 付き μ -PIC の動作ガスの研究」 神戸大学 2008
- [19] 加納英朗 卒業論文「メッシュ付き μ -PIC による陽イオンフィードバックの測定」 神戸大学 2007

- [20] URL:<http://www.s-ohe.com/i/vpcal/vpcal.html>
- [21] Wikipedia 「<http://ja.wikipedia.org/wiki/クロマトグラフィー>」
- [22] 梁 涛, 槇田 穰, 木村 慎一. ポリイミド薄膜の電気特性の膜厚依存性, JSR TECHNICAL REVIEW No.109, 2002