

修 士 学 位 論 文

DLC を用いた resistive μ -PIC の X線イメージングについての研究

令和5年2月3日

専攻名 物理学専攻
学籍番号 214S121S
氏名 山下翼

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

目次

第 1 章	序論	2
第 2 章	ガス検出器	3
2.1	粒子と物質の相互作用	3
2.2	ガス検出器の動作原理	6
2.3	様々なガス検出器	10
第 3 章	Micro Pixel Chamber(μ -PIC)	18
3.1	μ -PIC の基本原理	18
3.2	resistive μ -PIC	20
第 4 章	従来の resistive μ -PIC の問題点	25
4.1	絶縁層の電極抵抗率測定	25
4.2	溶剤レジスト	27
4.3	ドライレジストと溶剤レジストの比較	28
第 5 章	光学的読み出しのための X 線イメージング	33
5.1	光学的読み出し	33
5.2	神戸大学での実験	33
5.3	実験結果	34
5.4	CERN GDD Lab での実験	39
5.5	SR μ -PIC の改善点	51
第 6 章	結論と今後の展望	52
	参考文献	55

第 1 章

序論

近年の高エネルギー実験において、高い位置分解能・時間分解能・入射許容量を持つ検出器の開発が要求されている。そこで我々は、Micro Pixel Chamber(μ -PIC)を開発した。 μ -PIC は上記の要求を満たす一方で、その他のマイクロパターンガス検出器 (MPGD) と同様に電極の間隔が狭いため、放電を起こしやすいという問題点を持ち合わせていた。この問題を解決するために、高抵抗素材を陰極として使用した μ -PIC、resistive μ -PIC を新たに開発した。これは放電が起きた時に、高抵抗による電圧降下が生じることで放電を抑制することが出来る構造になっている。

従来使用されてきた resistive μ -PIC において新たな問題点として、陽極と内挿電極間で電流が流れることが頻発することが分かった。原因を調べたところ、絶縁層に使用していたドライレジスト (DR) に問題があることが発覚した。このことから、DR から溶剤レジスト (SR) に変更した新しい resistive μ -PIC を開発した。

本論文では新たに開発された SR 製 resistive μ -PIC の性能評価を行うとともに、SR 製 resistive μ -PIC の挙動を光学的に捉えるため X 線イメージングを行い、SR 製 resistive μ -PIC の考察や問題点、改善案について報告する。

第 2 章

ガス検出器

ガス検出器とは、ガス中に電離放射線を入射させた時に起こる電離を利用して粒子線などの測定を行う検出器である。気体中に電離放射線を入射させるとガス分子が電離し陽イオン-電子対が生成される。この時電場をかけることによって陽イオンと電子の再結合を防ぎ、陽イオンは電場方向へ電子は電場とは逆の方向へと引き寄せられる。そして強電場領域に電子が引き寄せられると電子はさらに加速し、電子のエネルギーが後述のエネルギー閾値 (W 値) を超えると、周りのガス分子を連続的に電離させ、電子が雪崩的に増幅する。雪崩増幅によって生成された電荷が移動することによって誘起される信号を読み出すことによって粒子線を検出する、というのがガス検出器の基本原理である。

本章では粒子と物質がどのような相互作用を起こすかについて述べ、実際に使用されてきた代表的なガス検出器を紹介する。

2.1 粒子と物質の相互作用

2.1.1 荷電粒子線と物質の相互作用

高エネルギーな荷電粒子線と物質の相互作用の一つとして、原子中の電子とのクーロン相互作用が挙げられる。この相互作用によってスピン 0、電荷 q 、速度 v で入射している荷電粒子が失う単位長さ当りの平均エネルギーは、式 2.1 に示す Bethe-Bloch の式に従う [1]。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{Dq^2n_e}{\beta^2} \left\{ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I}\right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right\} \quad (2.1)$$

ここで、 m_e は電子の質量、 n_e は電子の密度、 I は原子の平均イオン化ポテンシャル、 β は高速度に対する速度の比 $\frac{v}{c}$ 、 γ はローレンツファクター $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ である。また、係数 D は式 2.2 で表される。

$$D = \frac{4\pi\alpha^2 h^2}{m_e} = 5.1 \times 10^{-25} [\text{MeVcm}^2] \quad (2.2)$$

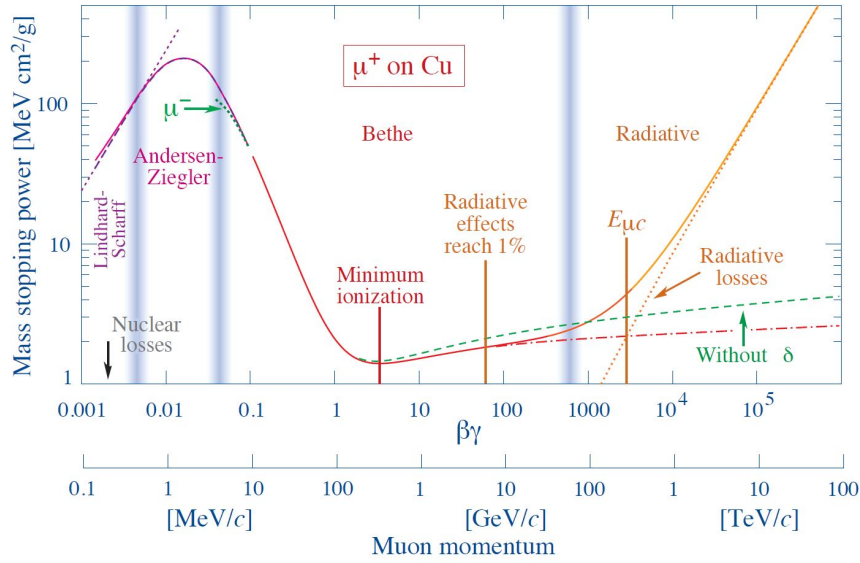


図 2.1 ミューオンのエネルギー損失 [1]

図 2.1 に荷電粒子の一つであるミューオンの運動量とエネルギー損失のグラフを示す。横軸運動量、縦軸エネルギー損失の平均値 (阻止能) である。

図 2.1 からミューオンの運動量 $\beta\gamma$ の領域が、 $0.1 \leq \beta\gamma \leq 1.0$ では、エネルギー損失は β^2 にほぼ反比例し、 $1 \leq \beta\gamma \leq 1000$ では、エネルギー損失は非常に小さくなる。特に $\beta\gamma = 3 \sim 4$ でエネルギー損失は最小になり、この領域は最小イオン化領域と呼ばれている。このこの領域のエネルギーを持つ粒子のことを Minimum Ionizing Particle(MIP) 粒子と呼び、エネルギー損失は式 2.3 で表される。

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{min} = 3.5 \frac{Z}{A} [\text{MeVg/cm}^2] \quad (2.3)$$

ここで、 ρ は物質の密度、 Z は物質の原子番号、 A は物質の原子量を表す。様々な物質に対して式 2.1 を計算したものを図 2.2 に示す。

2.1.2 光子と物質の相互作用

X 線や γ 線と物質の相互作用として、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の 3 種類がある。これらの相互作用の散乱断面積は光子のエネルギー E と物質の原子番号 Z に依存する。K 殻との散乱において、光子のエネルギーは光電効果では $\frac{1}{E^{3.5}}$ に比例し、コンプトン散乱は $\frac{1}{E}$ に比例する。そしてエネルギーが 10 MeV を超えると、エネルギーに関わらず電子対生成が支配的になる。原子番号 Z に関しては、光電効果は Z^5 に比例し、コンプトン散乱は Z に比例し、電子対生成は Z^2 に比例する。Ar/CO₂ = 93/7 の混合ガスを使用した時の光子のエネルギーと質量吸収係数の関係を表すグラフを図 2.3 に示す。

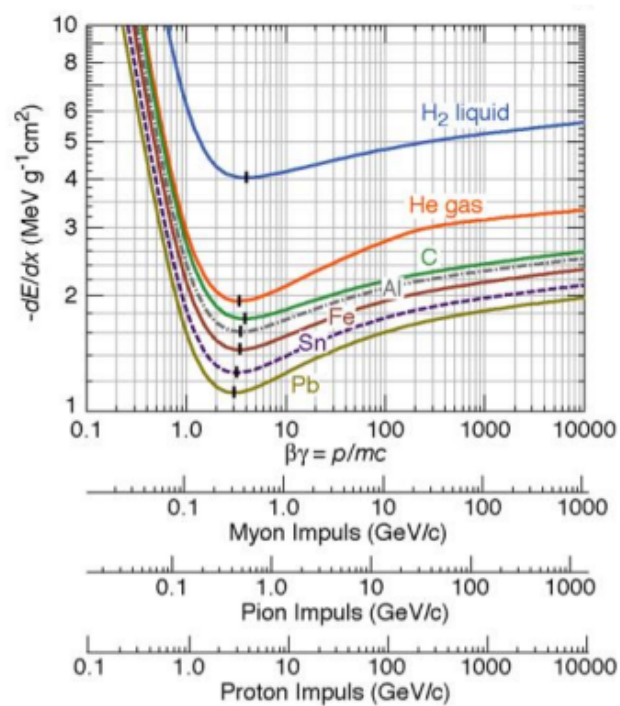


図 2.2 様々な物質に対する粒子のエネルギー損失 [1]

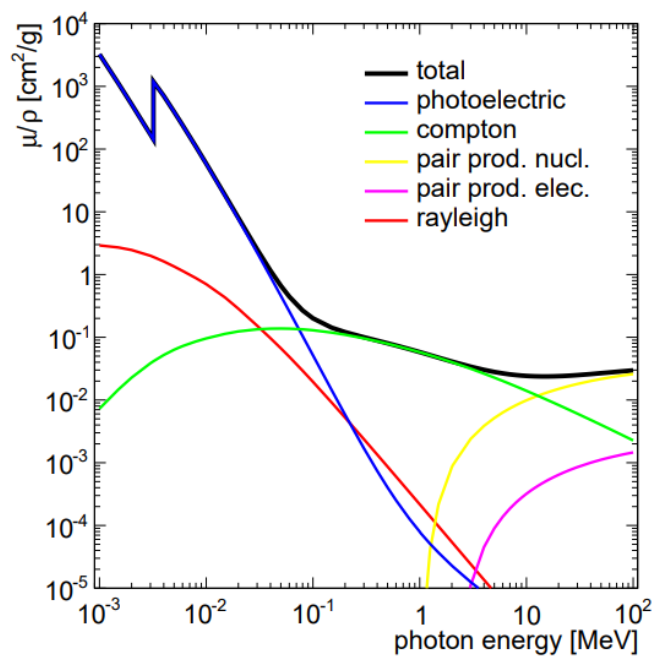


図 2.3 Ar/CO₂ = 93/7 の混合ガスにおける光子エネルギーと質量吸収係数の関係 [2]

光電効果とは、 γ 線が原子核の電場中にある軌道上の電子と相互作用し、そのエネルギーの全てを電子に与え、電子を電離させる反応である。光子のエネルギーが 100 keV 以下までの時に支配的な反応である。電離された電子の運動エネルギー E_e は式 2.4 で表される。

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.4)$$

ここで E_b は軌道電子の束縛エネルギーである。

コンプトン散乱とは、 γ 線と軌道上の電子との弾性散乱である。光子のエネルギーが数百 keV～10 MeV の領域で支配的な反応である。散乱前後の γ 線のエネルギーは散乱角 θ を用いて式 2.5 で表される。

$$\frac{E_{\gamma af}}{E_{\gamma be}} = \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + E_{\gamma be}(1 - \cos \theta)} \quad (2.5)$$

ここで $E_{\gamma be}$ は散乱前のエネルギー、 $E_{\gamma af}$ は散乱後のエネルギーである。

電子対生成とは、 γ 線が電子と陽電子の対になる反応である。光子のエネルギーは陽電子と電子対に全て与えられ、式 2.6 で表される。

$$E_\gamma = E_{e^-} + E_{e^+} + 2m_e c^2 \quad (2.6)$$

従ってエネルギー保存則から、光子のエネルギーが電子の静止質量 (511 keV) の 2 倍である 1022 keV 以上の時にだけ起こる反応であり、10 MeV 以上の領域ではこの反応が支配的になる。

2.2 ガス検出器の動作原理

2.2.1 ガス分子の電離

ガスで充満した検出器内に電離放射線が入射すると、その軌跡にそってガス分子が電離し、陽イオンと電子が生成される。電離放射線によって生成される電子のことを初期電子又は一次電子と呼び、生成される総電子数 N_0 は式 2.7 で見積もられる。

$$N_0 = \frac{\delta E}{W_i} \quad (2.7)$$

ここで、 δE は電離放射線の検出器内のエネルギー損失、 W_i はガス分子が電離するための平均エネルギーで W 値と呼ばれる。

混合ガスを用いた場合、励起電子がより低いイオン化電位を持つ第 2 の気体分子に衝突して電子-陽イオン対を生成するペニング効果と呼ばれる過程が生じる場合もある。励起された希ガス分子は炭化水素などの多原子分子によるクエンチガスと反応して電子を生じさせる。その結果 W 値は大きくなる。表 2.1 に様々なガスの W 値を示す。W 値はガスの種類や放射線の種類、エネル

表 2.1 様々なガスの W 値 [5]

Gas	Density mg cm ⁻³	E_x eV	E_I eV	W_I eV	$dE/dx _{\min}$ keV cm ⁻¹	N_P cm ⁻¹	N_T cm ⁻¹
He	0.179	19.8	24.6	41.3	0.32	3.5	8
Ne	0.839	16.7	21.6	37	1.45	13	40
Ar	1.66	11.6	15.7	26	2.53	25	97
Xe	5.495	8.4	12.1	22	6.87	41	312
CH ₄	0.667	8.8	12.6	30	1.61	28	54
C ₂ H ₆	1.26	8.2	11.5	26	2.91	48	112
iC ₄ H ₁₀	2.49	6.5	10.6	26	5.67	90	220
CO ₂	1.84	7.0	13.8	34	3.35	35	100
CF ₄	3.78	10.0	16.0	54	6.38	63	120

ギーには大きく依存せず、ほとんど一定の値をとることが知られている表 2.1 において、 E_x は第 1 励起エネルギー、 E_I はイオン化エネルギー、 N_P は一回の衝突によって生じる電子-陽イオン対の生成数である。

2.2.2 イオン及び電子の移動

電離放射線によって生成された電子-陽イオン対は、そのままの状態では再結合してしまう可能性がある。また、初期電子は電気陰性度の高い気体に捕獲される可能性もある。電子-陽イオン対の再結合を防ぐためには、検出器内に電場をかける。その結果、陽イオンは電場方向へ、電子は電場とは逆の方向へドリフトし、再結合を抑制することが出来る。この時の電子と陽イオンのドリフト速度は大きく異なる。

陽イオンのドリフト速度

陽イオンは検出器内で、電場 E によって加速され、同質量程度の他の原子や分子との弾性衝突を繰り返しながら移動する。この時の陽イオンの平均ドリフト速度 v_D^+ は式 2.8 で表されるように電場の強さに比例する。

$$v_D^+ = \mu^+ E \frac{p_0}{p} \quad (2.8)$$

この時 μ^+ はイオンの移動度、 p は圧力、 p_0 は標準圧力 (1×10^5 Pa) であり、イオンの移動度はイオンと気体の組み合わせで決められている。表 2.2 に各種気体とイオンの移動度を示す。

電子のドリフト速度

電子も陽イオンと同様に電場によって加速し移動するが、陽イオンに比べ平均自由行程が長いいため、衝突の間に得られるエネルギーは陽イオンに比べ高い。さらに電子に対する原子・分子の散乱断面積は、電子のエネルギーに大きく依存する。図 2.4 に Ar と電子の散乱断面積と電子のエネル

表 2.2 様々なガスとイオンによるイオン移動度 [4]

気体	イオン	移動度 μ^+ (cm^2/Vs)
He	He^+	10.2
Ar	Ar^+	1.7
H_2O	H_2O^+	0.7
Ar	$(\text{OCH}_3)_2\text{CH}_2^+$	1.51
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$	$(\text{OCH}_3)_2\text{CH}_2^+$	0.55
$(\text{OCH}_3)_2\text{CH}_2$	$(\text{OCH}_3)_2\text{CH}_2^+$	0.26
Ar	$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}^+$	1.56
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$	$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}^+$	0.61
Ar	CH_4^+	1.87
CH_4	CH_4^+	2.26
Ar	CO_2^+	1.72
CO_2	CO_2^+	1.09

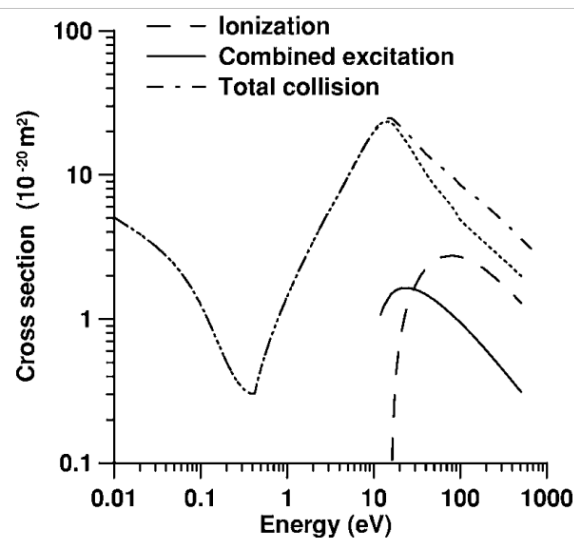


図 2.4 Ar と電子の散乱断面積とエネルギーの関係 [6]

ギーの関係を、図 2.5 に様々なガス中での電子のドリフト速度を示す。

2.2.3 ガス増幅

以上から電場がかけられた検出器内では陽イオンと電子はそれぞれ陰極側・陽極側へドリフトする。その際電子は平均自由行程が長いので、衝突間で加速され大きな運動エネルギーを持つ。周りのガス分子を電離させるために十分なエネルギーを持った電子は、ガス分子と衝突し新たな電子を生成する。これを二次電子と呼び、生成された二次電子は初期電子と同様に電場によって加速され、新たに電子を生成する。これが繰り返されることで雪崩的に電子が増幅していくことを雪崩増

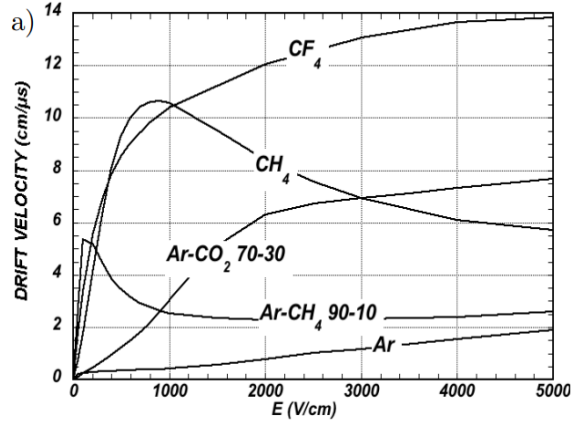


図 2.5 様々なガス中での電子のドリフト速度 [5]

幅と呼ぶ。これは一気圧のガス中において電場の強さが 10^6 V/m 以上の領域で発生する反応である。初期電子数 n_0 の電子がある位置から dx 進んだ時の電子の増加分 dn は式 2.9 で表される。

$$dn = \alpha n_0 dx \quad (2.9)$$

ここで、 α は第一タウンゼント係数と呼ばれ、平均自由行程の逆数である。単位ドリフト距離あたりに生成される電子-陽イオン対の総数を表し、均一電場中では一定である。

一様電場中では、距離 x 進んだ時に生成される電子の総数 N は式 2.10 で表される。

$$N = n_0 \exp(\alpha x) \quad (2.10)$$

式 2.10 から均一電場中のガス増幅率 M は式 2.11 で表され、

$$M = \frac{N}{n_0} = \exp(\alpha x) \quad (2.11)$$

となる。不均一電場中では、第一タウンゼント係数が一定ではないため、式 2.12 で表される。

$$M = \exp\left(\int \alpha(x) dx\right) \quad (2.12)$$

電子のドリフト速度は陽イオンのドリフト速度に比べはるかに速いため、雪崩増幅発生時間(数 μ 秒以下)の間陽イオンは静止していると考えられ、高速で移動する雪崩増幅された電子の後ろには陽イオンの電子雲が形成され水滴のような形をとる(図 2.6)。

ガス増幅率が大きい時、つまり二次電子数が増えすぎると二次的な雪崩増幅が発生し、放電を誘発する可能性がある。これを防ぐためには検出器の放電限界以下の総電子数で検出器を動作させなければならない。この総電子数の限界値を Raether Limit と呼び、式 2.13 で与えられる。通常の Raether Limit は 10^8 程度である。

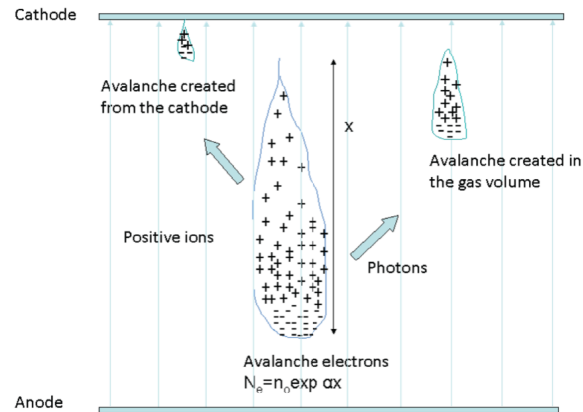


図 2.6 増幅過程中の電子-陽イオン対 [3]

$$Mn_0 = 10^8 \quad (2.13)$$

Raether limit の値は検出器の形状によって異なり、マイクロパターンガス検出器 (MPGD) のような増幅領域が非常に狭い検出器 (数百 μm) などでは、タウンゼント係数 α が小さくなるため、 $Mn_0 = 10^6 \sim 10^7$ 程度になる。よって MPGD では放電対策が検出器開発を行う上で非常に重要なものとなっている。

2.3 様々なガス検出器

前節の原理によってガス検出器は動作している。この節では、これまでに実用されてきた代表的なガス検出器をいくつか紹介する。

2.3.1 比例計数管

比例計数管は直径 0.1~0.5 mm 程度の細いワイヤーを陽極として配置し、直径 2~3cm 程度の金属製のシリンダーを陰極としてワイヤーを覆い、中を混合ガスで満たす構造の検出器である (図 2.7)。中心から距離 r の地点での電場 $E(r)$ は式 2.14 で与えられる。

$$E(r) = \frac{V}{r \ln \frac{b}{a}} \quad (2.14)$$

ここで、 a は陽極の半径、 b は陰極の内径、 V は印加電圧である。

電離放射線による電離の位置に関わらず、増幅過程が同様になることが利点としてあるが、陽極から離れるにつれて電場が弱くなることから、イオンの回収が遅れてしまうという欠点も存在する。

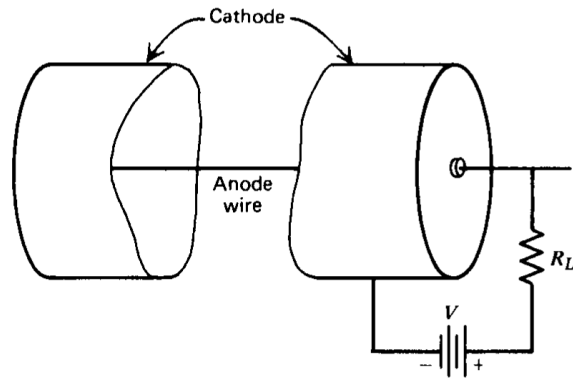


図 2.7 比例計数管 [7]

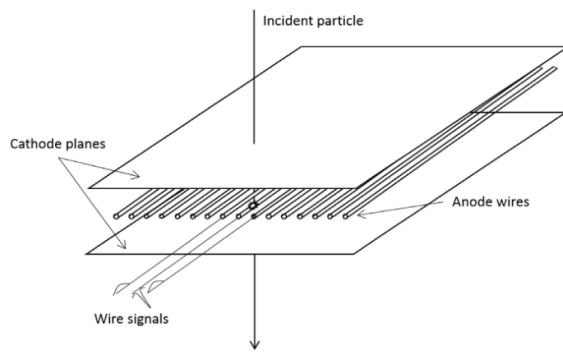


図 2.8 Multi Wire Proportional Chamber[3]

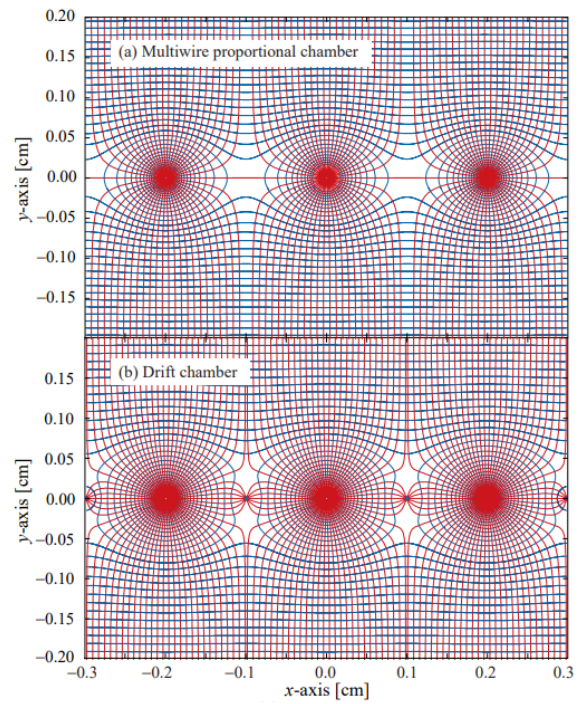


図 2.9 MWPC の電場構造 [5]

2.3.2 Multi Wire Proportional Chamber (MWPC)

Multi Wire Proportional Chamber(MWPC) は 1968 年に *G.Charpak* 氏によって発明された検出器である [3]。図 2.8 に示すように、2 枚の並行金属板を陰極、その間に複数のワイヤーを陽極として使用する、比例計数管を横に並べたような検出器である。図 2.9 に MWPC が作る電場構造を示す。

検出器内に電離放射線が入射して電子を生成させると、陽極線まで電子がドリフトし、陽極線の

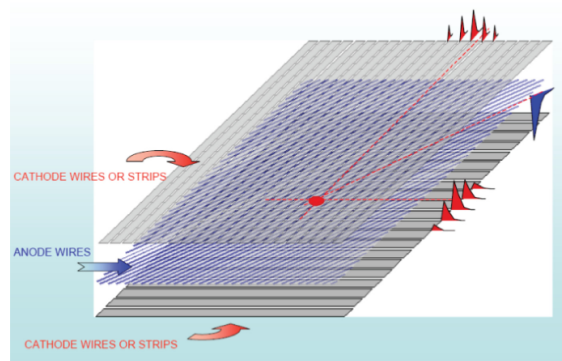


図 2.10 2次元読み出し MWPC[3]

近くで雪崩増幅を起こし、誘起された電荷を信号として検出する。また、陰極面を陽極線と同じくワイヤーを使用して直交に配置させた MWPC も *Charpak* 氏によって開発されており、分割された陰極面に誘起される信号によって、ガス増幅の2次元読み出しが可能になっている (図 2.10)。

2.3.3 Micro Strip Gas Chamber (MSGC)

MWPC は優れた位置分解能を持っているが、陽極に垂直な方向の位置分解能はワイヤーの間隔によって制限されるという欠点を持ち合わせていた。そこでこれを改善するために 1988 年 *A.Oed* 氏によって開発されたのが、Micro Strip Gas Chamber(MSGC) である [8]。図 2.11 に MSGC の概観を、図 2.12 に MSGC の電場構造を示す。この微細な電極は、マイクロエレクトロニクス技術を用いて電極構造のフォトリソグラフィを作成し、絶縁基板上に置く構造になっている。ワイヤーを張る作業が必要なくなったため、特別な技術の知識や熟練した技術者がなくとも製造できるようになったことや、ストリップの間隔が小さい ($200\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ 程度) ため、位置分解能が MWPC に比べ大幅に優れていることが利点である。また陽極-陰極間の距離が短いため、陰極における陽イオンの吸収が速くなったことから、MWPC に比べて計数率が高くなったことも利点に挙げられる。MSGC と MWPC の増幅率と計数率の関係を図 2.13 に示す。しかし MSGC は、放電を起こしやすいことや、経年劣化といった欠点があり、幅広い用途での実用化はなされていない。

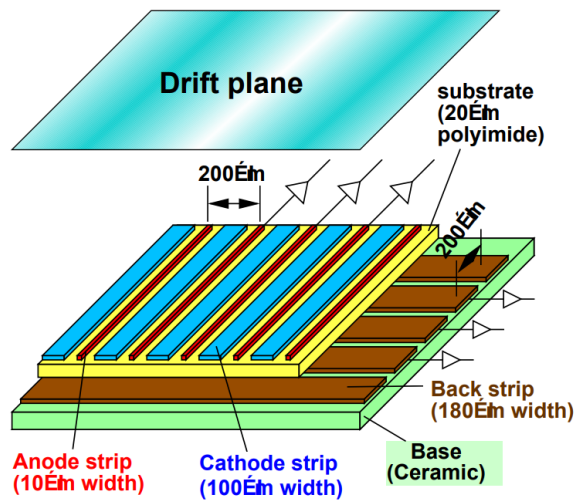


図 2.11 Micro Strip Gas Chamber[8]

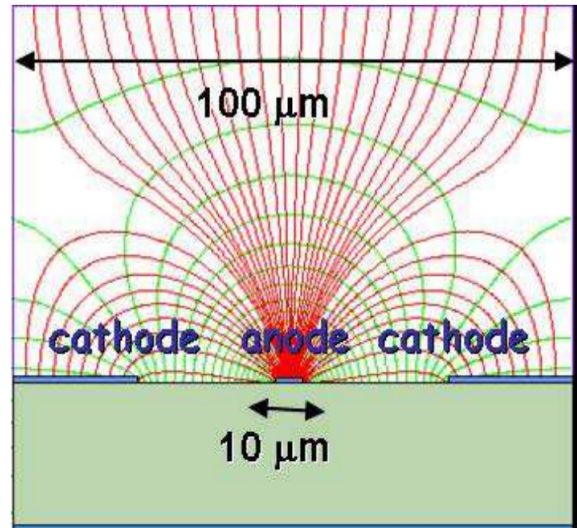


図 2.12 MSGC の電場構造 [5]

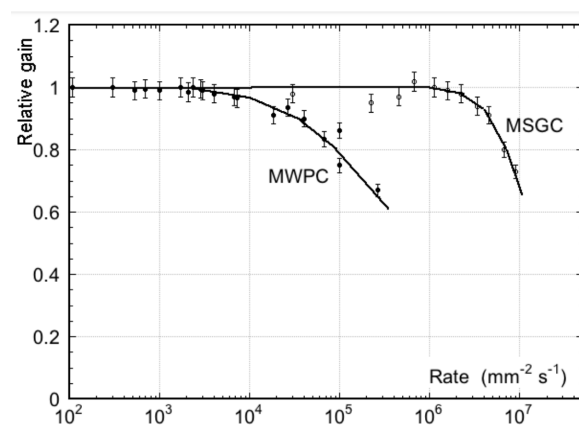


図 2.13 MSGC と MWPC の増幅率と計数率の関係 [5]

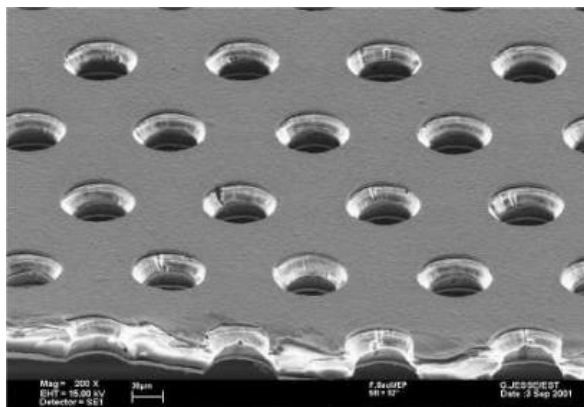


図 2.14 Gas Electron Multiplier[9]

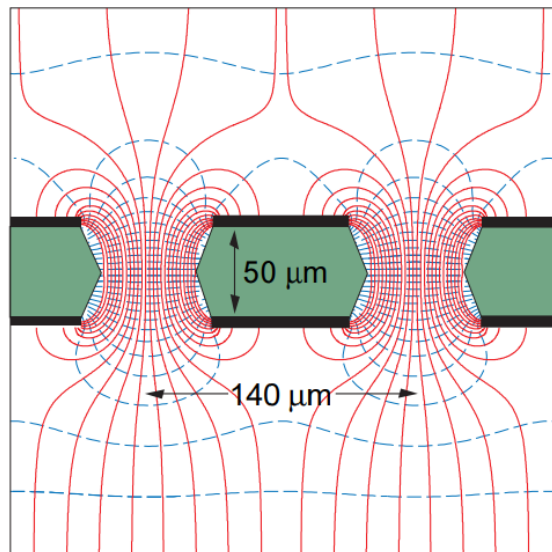


図 2.15 GEM の電場構造 [5]

2.3.4 Gas Electron Multiplier (GEM)

Gas Electron Multiplier(GEM) は 1997 年に *F.Sauli* 氏らによって開発された [5]。両面に金属膜を被覆させた薄い絶縁体に、格子状の穴が空いた構造をしている。図 2.14 は標準的な GEM の電子顕微鏡を用いて撮影された写真である。両面の金属層に電圧を印加することで穴の内部に高電場が生じ、穴に入射した電子は雪崩増幅を起こす。GEM の電場構造を図 2.15 に示す。GEM 本体に読み出し電極は存在せず、別の読み出し基板を用いて使用される。利点として、GEM 本体は軽く柔軟性があり、大面積化が容易であること、複数枚重ねて使用することでガス増幅率を高くすることが出来る、といったことがある。GEM を三枚重ねた Triple-GEM の構造を図 2.16 に示す。図 2.17 に GEM の枚数ごとのガス増幅率の変化のグラフを示す。図 2.17 から GEM の枚数が増えるほどガス増幅率が大きくなっていることが分かり、Triple-GEM はガス増幅率 10^5 を達成している。GEM は Large Hadron Collider(LHC) の CMS 実験や、ALICE 実験など多くの高エネルギー実験で使用されている。

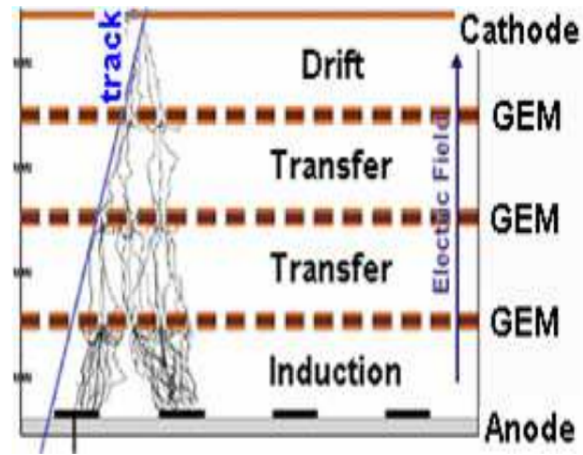


図 2.16 Triple-GEM の構造 [5]

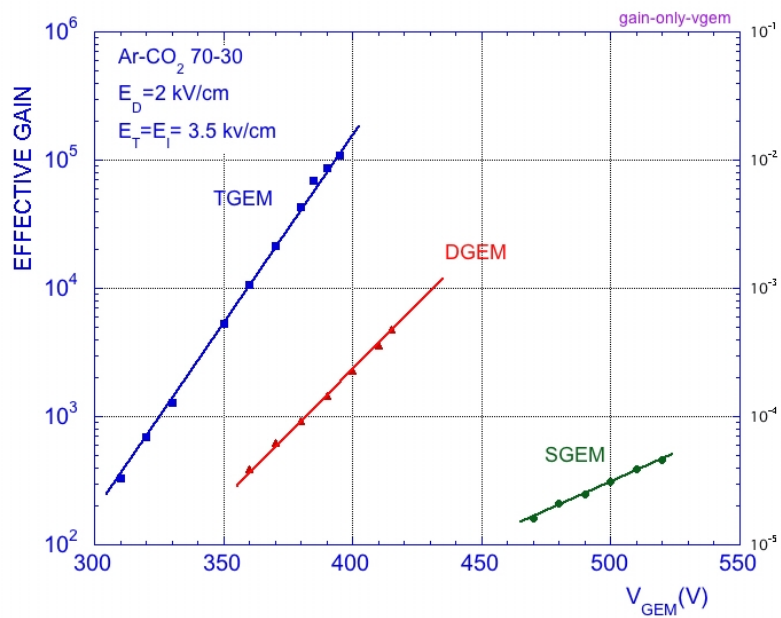


図 2.17 GEM の枚数ごとのガス増幅率の変化 [9]

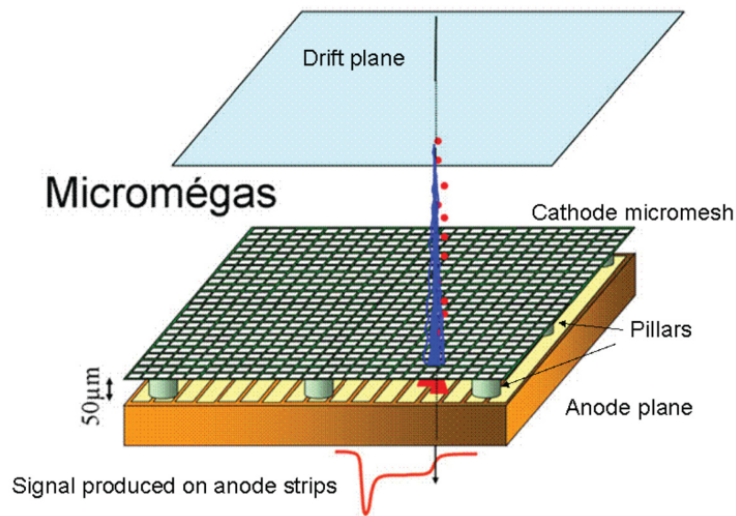


図 2.18 Micro-mesh-gaseous structure[3]

2.3.5 Micro-mesh-gaseous structure (Micromegas)

Micro-mesh-gaseous structure(Micromegas) は、1995 年に *Y.Giomataris* 氏らが開発した平行平板型ガス検出器 (Parallel Plate Avalanche Chamber, PPAC) である。図 2.18 に概観を示すように、陽極は金属製の読み出しストリップをプリント基板 (PCB) 上に配置し、陰極は金属製メッシュを使用した PPAC である。陰極メッシュの数 mm 上に平板のドリフト電極が配置されており、ドリフト電極上方から入射した電離線がガス分子を電離させ、電子が加速されながら陰極メッシュにドリフトし、50～100 μm 間隔の陽極-陰極間で電子が雪崩増幅し、誘起された信号を陽極で読み出すという原理である。図 2.19 に Micromegas の電場構造を、図 2.20 に Micromegas の各印加電圧におけるガス増幅率を示す。Micromegas も他の MPGD と同様に、陽極-陰極間が狭いことから、陽イオンの除去が早い (100 ns 程度)、 10^5 程度の高いガス増幅率を達成している。またマイクロエレクトロニクス技術を用いて作製できることから、検出器の大面积化が容易であることも利点となっている。実際に ATLAS 実験における New Small Wheel(図 2.21) の一部に抵抗性ストリップを使用した Micromegas などが使用されている [10]。

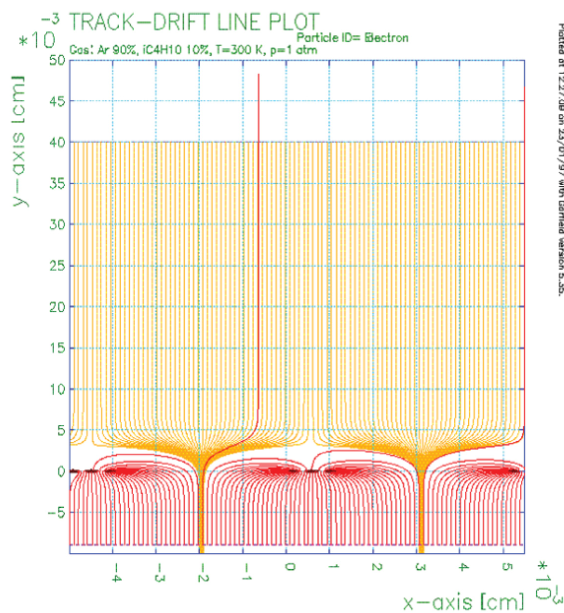


図 2.19 Micromegas の電場構造 [3]

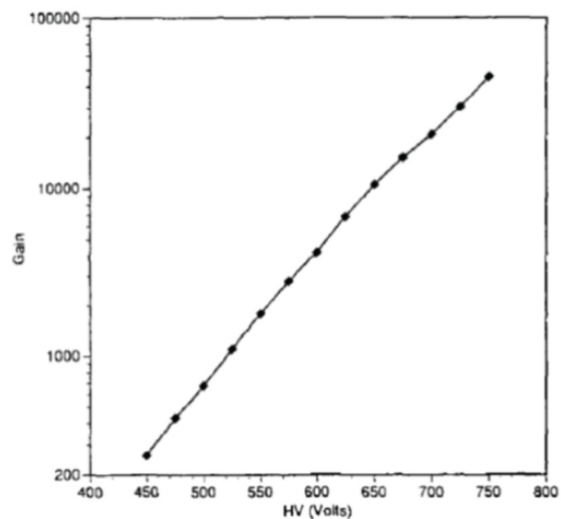


図 2.20 Micromegas の各印加電圧におけるガス増幅率 [3]

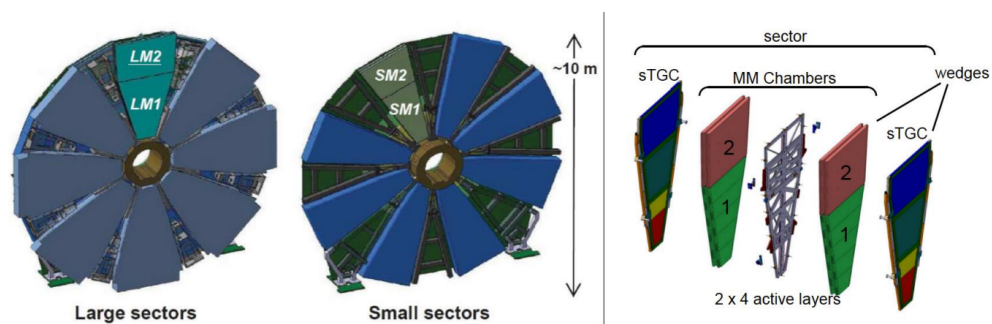


図 2.21 ATLAS New Small Wheel 概観 [10]、NSW は Large Sector Module と Small Sector Module で構成、右図は Large Sector Module の分解図で Micromegas が使用されている

第 3 章

Micro Pixel Chamber(μ -PIC)

前章で解説した MSGC を改良し、電極間の放電という問題を解決するために 2001 年に越智敦彦氏、谷森達氏によって考案されたのが Micro Pixel Chamber(μ -PIC) である [11]。本章では μ -PIC の動作の基本原理や問題点について述べる。また、その問題点を解消するために新たに開発された resistive μ -PIC と抵抗素材として使用している Diamond Like Carbon(DLC) についても紹介する。

3.1 μ -PIC の基本原理

3.1.1 μ -PIC の構造

μ -PIC の構造の概略図を図 3.1 に示す。 μ -PIC はプリント基板技術を用いて作製されており、点状に配置された陽極とその周囲を囲む陰極によって構成された検出器である。陽極は $100\ \mu\text{m}$ のポリイミドを貫くような形になっており、 $400\ \mu\text{m}$ ピッチで配置されている。陽極の直径は $50\ \mu\text{m}$ 、陰極の内径は $200\ \mu\text{m}$ である。陽極の径に関して、製造工程上 $\pm 5\ \mu\text{m}$ のバラつきがあることが分かっている。陽極ピクセルと陰極はそれぞれ 1 列ずつストリップになっており、それらを直交させることで信号の 2 次元読み出しが可能になっている。

3.1.2 μ -PIC の基本動作

μ -PIC の基本動作の概略図を図 3.2 に示す。 μ -PIC 表面から数 mm 上にドリフト電極を μ -PIC と並行に配置し混合ガスで充満させる。ドリフト電極に数百 V の負電位、陽極に 0～数百 V の正電位、陰極には陽極の電位に合わせて 0～数百 V の負電位を印加する。検出器内に荷電粒子線を入射させると、検出器内のガス分子が電離し、ドリフト電場によって陽イオンはドリフト電極へ、一次電子は陽極へ近づく。陽極直上付近まで近づいた一次電子は陽極-陰極間で形成された高電場によって雪崩増幅を起こす。そうして生成された陽イオンと 2 次電子はそれぞれ陰極、陽極に移動し信号が誘起される、というのが μ -PIC の基本動作である。

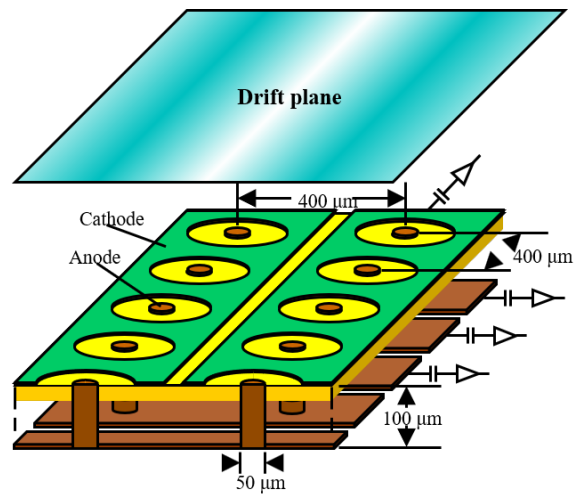


図 3.1 μ-PIC 構造概略図 [11]

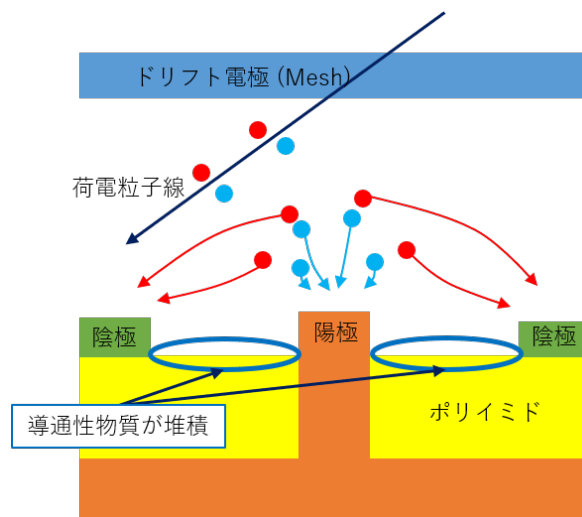


図 3.2 μ-PIC 基本動作、青丸部分で導通性物質が堆積

μ-PIC 内を充満させる混合ガスは主に $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ や Ar/CO_2 であり、荷電粒子線と反応する主ガスは Ar 、クエンチガスは C_2H_6 や CO_2 である。クエンチガスは放電を抑制するガスで、主ガスのみの動作だと、電子が雪崩増幅した際に空間電荷密度が高くなり (Streamer)、放電が多発する。それを防ぐためにクエンチガスが用いられる。

3.1.3 μ-PIC の問題点

μ-PIC の問題点として、その他の MPGD 同様に陽極-陰極間において、放電が頻発するということがある。陽極-陰極間が狭いため、本来の Raether Limit が 10^8 程度なの $10^6 \sim 10^7$ 程度まで低下することによって低い動作ガス増幅率で放電を引き起こすようになる。μ-PIC は陽極-陰極間で絶

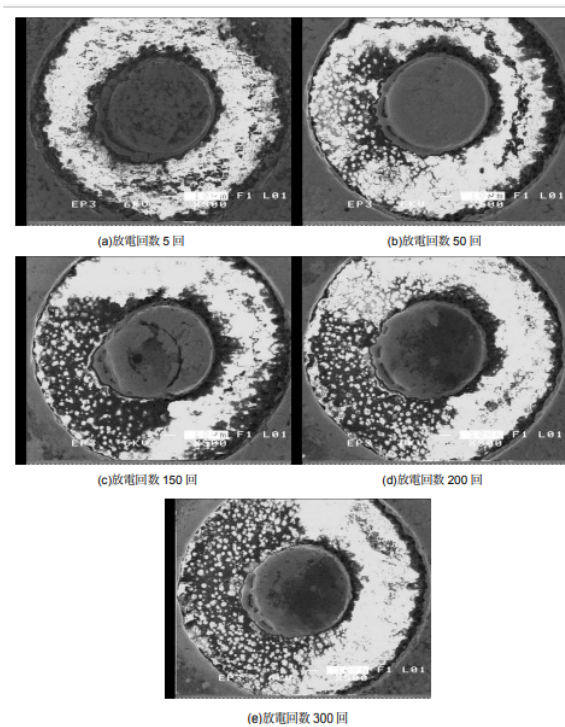


図 3.3 導通路形成の様子 [12]

縁体が存在するため、放電が多発すると導通性物質がポリイミド表面に堆積し (図 3.2 青丸部分)、最終的には導通路を形成し検出器として動作出来なくなる。図 3.3 は実際に μ -PIC の 1 ピクセルに導通路が形成される様子を顕微鏡で撮影した物である [12]。

以上の通り、 μ -PIC で放電が起きるのは生成された二次電子が Raether Limit を超えた時である。すなわち高い増幅率で動作させた場合か、エネルギー損失の大きい粒子がガス中に入射した場合で放電が起きることが考えられる。ガス中で MeV 程度のエネルギーを落とす粒子として陽子や α 線が考えられるが、エネルギー損失が大きいため検出器の蓋などで止まりやすく、検出器内部まで入射することは少ない。しかし、高速中性子が発生するハドロン衝突実験などの環境では、中性子は透過率が高いため検出器内に入射し、ガス分子の原子核と反応し、MeV 程度の反跳原子核を発生させることがある。反跳原子核が放電の原因となるため、このような環境下で μ -PIC を動作させる場合には、放電問題を解決しなければならない。

3.2 resistive μ -PIC

放電問題を解決する方法はいくつか存在する。放電に耐えられる検出器を開発するか、そもそも放電を起こさせない検出器を開発する、という方法である。今回我々は、放電を起こさない検出器を開発するというアプローチで放電問題を解決することになり、考えられたのが、陰極に高抵抗素材を使用した resistive μ -PIC の開発であった [13]。陰極に高抵抗素材を使用する都合上、そのま

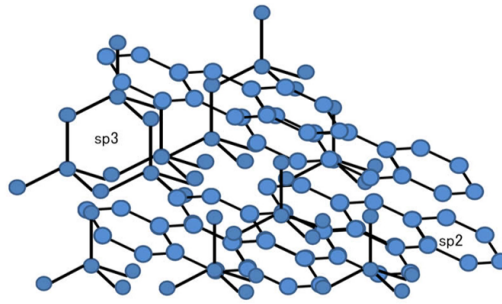


図 3.4 Diamond Like Carbon[14]

まの μ -PIC の構造では陰極で信号読み出しをすることが出来ないため、ポリイミドを挟んだ陰極の真下に内挿電極を設置することで、誘起電荷を測定し信号読み出しを行うことが出来る構造に変更した。陰極に高抵抗素材を使用する理由は放電を自己抑制させることである。陽極-陰極間で放電が発生すると、陰極に電流が流れる。その際に陰極の高抵抗性からオームの法則に従い電圧降下が起こり、陰極周辺の電場が抑えられ、二次電子数が Raether Limit を超えないようなガス増幅率まで低くなることで、それ以上の放電の発達を抑制することが出来る。

我々は高抵抗素材として、Diamond Like Carbon(DLC) を使用した resistive μ -PIC を開発している。本節では DLC 及び DLC を用いた resistive μ -PIC について述べる

3.2.1 Diamond Like Carbon

DLC とはダイヤモンド構造 (sp^3 結合) とグラファイト構造 (sp^2 結合) が不規則に混在するアモルファスカーボンである (図 3.4)[14]。すなわちダイヤモンドとグラファイトの両方の性質を持ち合わせた物になり、成膜時に sp^3 結合 と sp^2 結合 の割合が変わることで、抵抗値が変化する。また膜厚の調整や窒素をドーピングさせながら成膜を行うことで、ある程度任意の抵抗値を設定することが可能になっている (数十～数 $G\Omega$)。

また DLC は、ポリイミドに対する付着力が高いことや、化学的に安定している素材のため、その他の MPGD にも応用可能であるという利点も合わせ持つ。

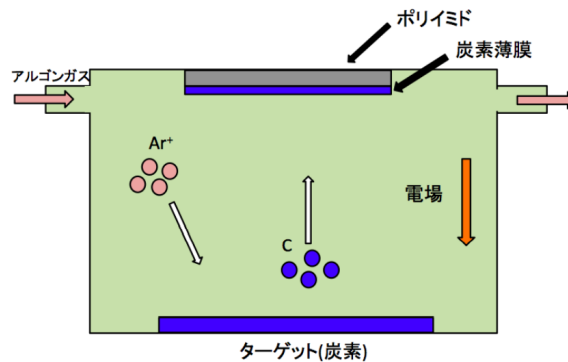


図 3.5 スパッタリング模式図 [16]

3.2.2 炭素スパッタリング

今回ポリイミドに DLC を成膜させるために、炭素スパッタリングを行った。この電極形成のための炭素スパッタリングは、2013 年に神戸大学で開発された [15]。図 3.5 にスパッタリングの模式図を示す。チェンバー内を Ar などの不活性ガスで充満させ、ターゲットである炭素と成膜させたいポリイミドをチェンバー内に設置する。ここで炭素ターゲットに負電位 (1 kV 程度) を印加すると、イオン化された Ar が炭素ターゲットまで加速されながら衝突する。衝突の際に炭素が数十 eV 程度で叩き出され、対面しているポリイミドに付着し薄膜が製膜される。

スパッタリングの利点はいくつかあり、成膜時間と膜厚は比例するため時間を調整することで抵抗値を変更することが出来る、大面積の薄膜の製造が容易である、などといったことである。ただし問題点も存在し、薄膜の製造に時間がかかるといったことや、製造コストが高いといったこともある。

3.2.3 DLC を用いた resistive μ -PIC

Resistive μ -PIC の概略図を図 3.6 に、DLC を用いた resistive μ -PIC の断面の模式図を図 3.7 に示す。 μ -PIC は黄色の Flexible-Print-Circuit(FPC) とオレンジの絶縁層の二層の構造で構成されており、陽極ストリップを形成した基板の上に接着させている。黒い部分が DLC 陰極で、灰色の部分が陽極になっている。FPC を挟んだ陰極の真下に青色の内挿電極があり、ここで誘起電荷を読み出す。陽極の読み出しは黄色のポリイミドの真下に存在し (濃い茶色部分)、陽極の信号読み出しはここで行う。陽極、陰極の読み出し電極は常に接地している。陽極、陰極は共に 256 ストリップずつ存在し、計 512 ストリップの回路を一つの PCB に集約している。図 3.8 は実際の μ -PIC を拡大した写真である。

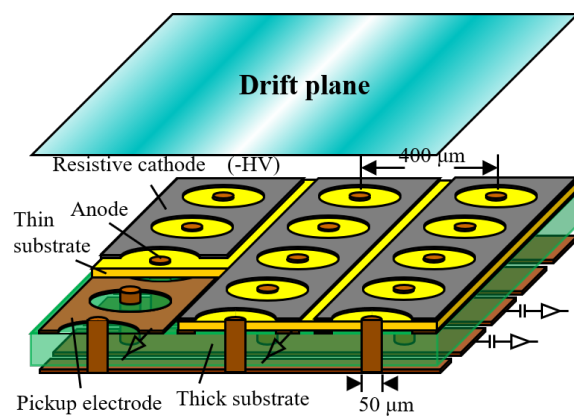


図 3.6 resistive μ -PIC の概略図

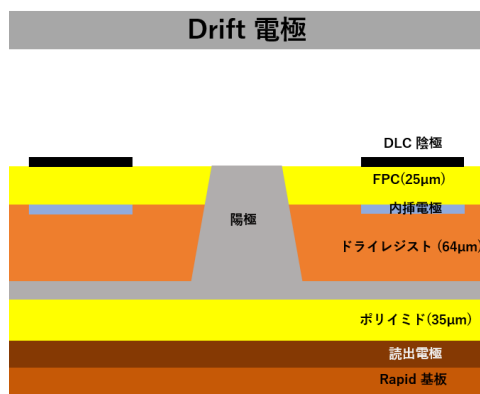


図 3.7 DLC を用いた resistive μ -PIC の構造の模式図

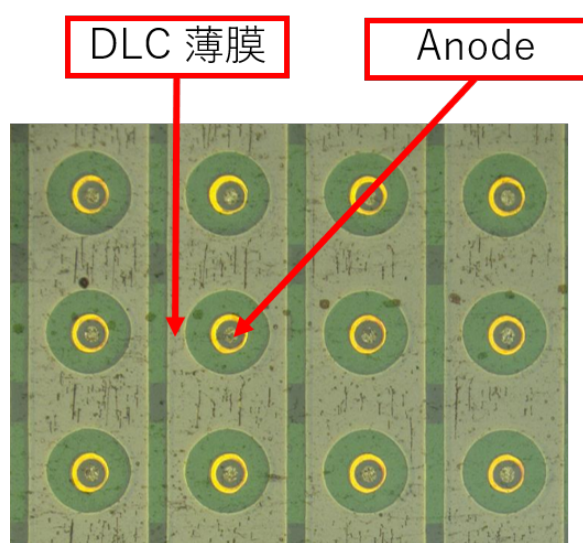


図 3.8 実際の μ -PIC の拡大写真

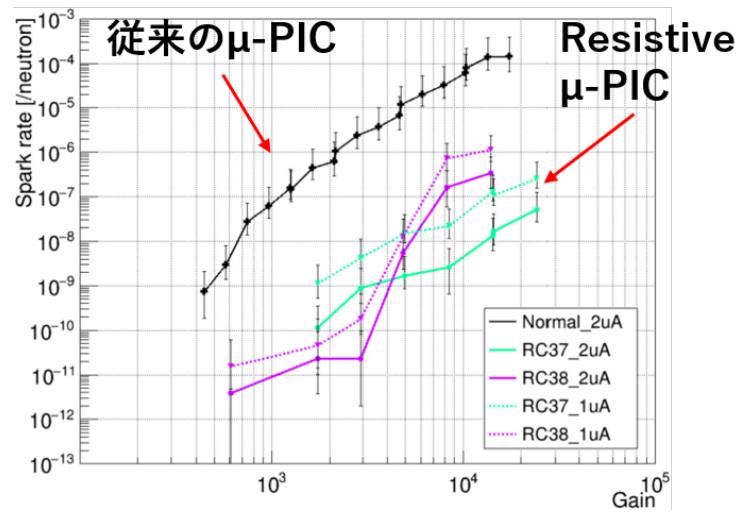


図 3.9 μ -PIC の放電耐性 [17]、resistive μ -PIC は放電の定義を 2 種類用いて測定、RC37 は陽極径 70 μ m、RC38 は 75 μ m

実際に DLC を用いた resistive μ -PIC の放電耐性の試験は過去に行われており [17]、図 3.9 は μ -PIC の放電耐性のグラフである。縦軸放電率、横軸増幅率となっており、resistive μ -PIC は放電の定義に 2 種類の閾値を用いて測定を行っている。また RC37、RC38 の違いは陽極の径であり、それぞれ 70 μ m、75 μ m となっている。従来の μ -PIC に比べ、DLC を用いた resistive μ -PIC の放電率は 3~4 桁程度減少していることが分かる。

第 4 章

従来の resistive μ -PIC の問題点

従来使用していた resistive μ -PIC において、陽極と内挿電極間で電流が流れることが頻発する問題点が発生した。陽極-内挿電極間で電流が流れると、絶縁層に電流が流れ導通を起こしたり、陽極と内挿電極が等電位になり電場構造が変化するといったことが起こり、検出器として動作に支障をきたす恐れがある (図 4.1)。原因として、最初は製造過程での陽極-内挿電極間の金属の解け残りやエッチング液の残渣が残っていることを疑ったが、製造過程を改善しても電流の問題は解決しなかった。次に疑ったのが、使用している絶縁層が経年劣化によって導通性を持つことである。本章では使用している絶縁層の電極抵抗率の測定の結果と、改善案として別の絶縁素材を使用した μ -PIC の抵抗率の結果について報告する。

4.1 絶縁層の電極抵抗率測定

図 4.1 にも示す通り、resistive μ -PIC の FPC 層と陽極下のポリイミドの間の絶縁層には、ドライフィルムレジスト (DR) を使用している。これは MPGD によく使われている絶縁素材の一つで、露光された部分が現像後に残る感光性のフィルムである [18]。

今回は実際の μ -PIC と同じドライレジストを用いたサンプル (図 4.2) を使用して、電極抵抗率を測定した。サンプルはドライレジストに銅箔を貼り合わせた物になっている。この状態ではサンプルの端が銅箔で接触し抵抗率を測定できないため、サンプルの端にエッチングを行った。図 4.3 に実際のドライレジストのサンプルを示す。

測定のセットアップの概略図は図 4.4 に示す通り、銅板の上にサンプルを置き、銅板とサンプルをテスターで繋ぎ抵抗値を測定し、サンプルの面積と厚さから抵抗率を計算した。実験に使用したサンプルについては表 4.1 に記載している。この結果から、ドライレジストの体積抵抗率は $1.02 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ であった。これは μ -PIC に 500 V 印加すると電流が 10 μA 以上流れる計算になり、ドライレジストは絶縁素材として適していないことが分かった。

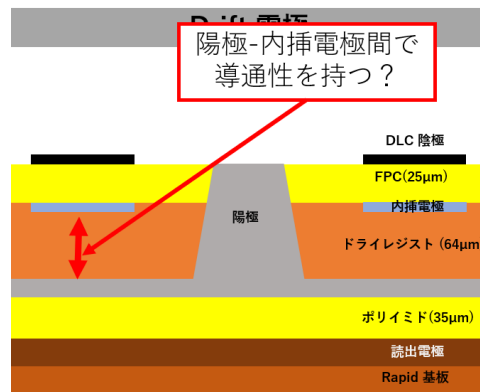


図 4.1 従来の μ -PIC の問題点、絶縁層が導通性を持つことが疑われた

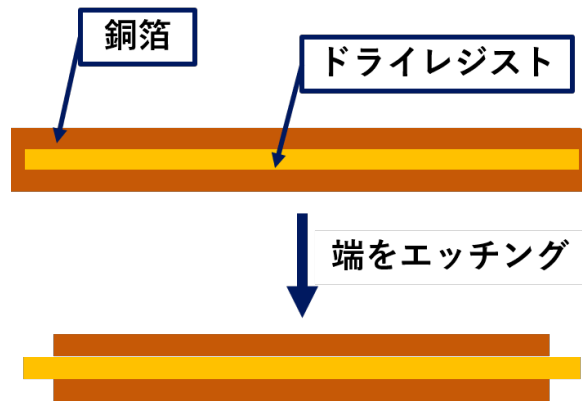


図 4.2 サンプル概略図

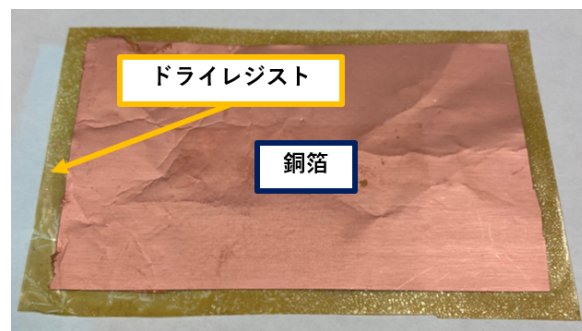


図 4.3 ドライレジストサンプル

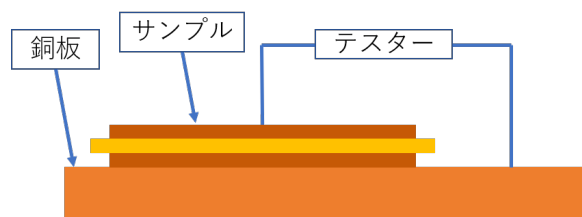


図 4.4 測定セットアップ概略図

表 4.1 サンプルの抵抗値・面積・厚さ

抵抗値	13.2 M Ω
面積	90 × 55 mm ²
厚さ	64.0 μ m

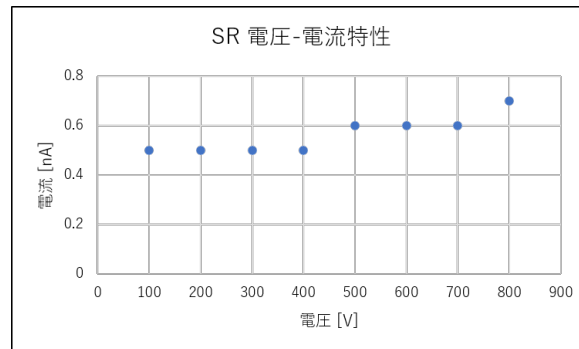


図 4.5 ソルダレジスト電流-電圧特性

4.2 ソルダレジスト

今までは μ -PIC の絶縁素材として、DuPont 社の Pyralux シリーズのドライレジストを使用していた。これは ATLAS 実験の Micromegas 検出器にも採用されており、本来は信頼性の高い素材であったが、5 年ほど前に Dupont 社が製造を中止した。そのため、製造中止以降に作製された μ -PIC には在庫品を使用していたが、現像前のレジストフィルムの使用期限が半年程度ということから、絶縁層が経年劣化し導通性を持ったと考えられる。そこで我々は新たな絶縁素材としてソルダレジスト (SR) の使用を試みた。

ソルダレジストとは、PCB の銅配線部に塗布される絶縁素材であり、一般的には PCB の回路パターンを保護する目的で使用されている [19]。ソルダレジストが μ -PIC の絶縁層として使用できるかどうかを確認するために、ドライレジストと同様にサンプルを用意し抵抗率測定を行った。ソルダレジストの電流-電圧特性は図 4.5 に示す。この結果から 400 V の電圧上昇で、0.1 nA の電流上昇が測定されたことから、体積抵抗率は $2.9 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ と計算された。この結果から、抵抗率としてはドライレジストよりソルダレジストの方が適していることが判明したので、実際にソルダレジストを使用した μ -PIC を開発した。

また、ソルダレジストの特性としてドライレジストに比べ硬く脆いことが分かった。このことから使用の際は、今まで以上に取扱いに注意しなければいけないことが分かった。

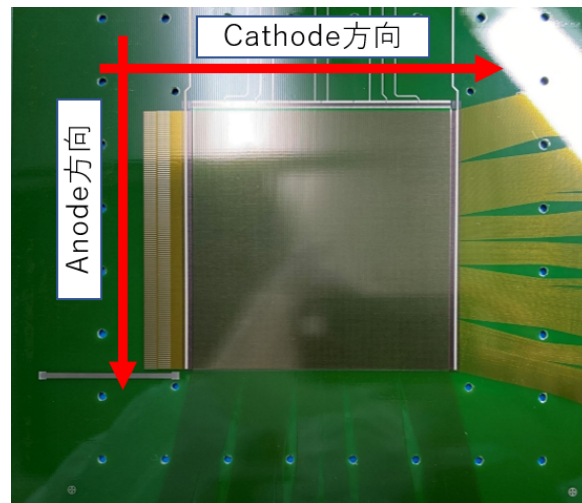


図 4.6 SR 製 μ -PIC

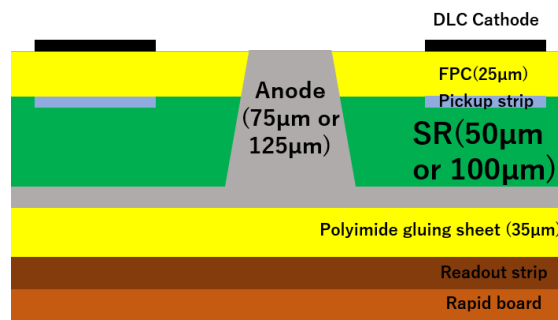


図 4.7 SR μ -PIC 断面模式図

4.3 ドライレジストと溶剤レジストの比較

溶剤レジストが μ -PIC の絶縁素材として十分な絶縁特性を持つことが判明したため、実際に溶剤レジストを絶縁層に使用した μ -PIC を開発した。図 4.6 が実際の SR 製 μ -PIC である。 μ -PIC は陽極の高さが高いほど Gain が大きくなる。陽極の高さは絶縁層の厚さが直接関係し、絶縁層を厚くすることで Gain を大きくすることが出来る。SR 薄膜は 1 枚 $50\ \mu\text{m}$ 厚なので μ -PIC を作る際、表面のポリイミド層 ($25\ \mu\text{m}$) と SR 層の厚さによって陽極の高さが変わる。よって今回は SR 薄膜 1 枚 ($50\ \mu\text{m}$) の μ -PIC と 2 枚 ($100\ \mu\text{m}$) の μ -PIC、つまり陽極の高さが $75\ \mu\text{m}$ と $125\ \mu\text{m}$ の 2 種類を作製した。図 4.7 に SR μ -PIC の断面模式図を示す。

実際に作製された溶剤レジスト製 μ -PIC を使用して以下の実験を行った。

- 陽極-内挿電極間に電流が流れるか確認

表 4.2 陽極高さ 75 μm $\mu\text{-PIC}$ の電圧ごとの電流値、左表は陽極電圧 0 V・ドリフト電圧 900V、右表は陰極電圧 0 V・ドリフト電圧-300 V

陰極電圧 [V]	陽極電流値 [μA]	陰極電流値 [μA]	陽極電圧 [V]	陽極電流値 [μA]	陰極電流値 [μA]
100	0.001	0.001	100	0.000	0.003
200	0.001	0.002	200	0.000	0.006
300	0.001	0.002	300	0.000	0.006
400	0.002	0.003	400	0.002	0.016
500	0.087	0.096	450	0.028	0.041
550	0.250	0.250	500	0.170	0.200
600	>1 μA	>1 μA	550	>1 μA	>1 μA

表 4.3 陽極高さ 125 μm $\mu\text{-PIC}$ の電圧ごとの電流値、左表は陽極電圧 0 V・ドリフト電圧 900V、右表は陰極電圧 0 V・ドリフト電圧-300 V

陰極電圧 [V]	陽極電流値 [μA]	陰極電流値 [μA]	陽極電圧 [V]	陽極電流値 [μA]	陰極電流値 [μA]
100	0.000	0.000	100	0.001	0.000
200	0.001	0.001	200	0.001	0.001
300	0.002	0.001	300	0.002	0.001
400	0.002	0.001	400	0.002	0.001
450	0.002	0.001	500	0.002	0.001
500	0.002	0.002	550	0.002	0.001
550	0.002	0.003	600	0.003	0.002
600	0.003	0.003			

- ドライレジスト製 $\mu\text{-PIC}$ とソルダーレジスト製 $\mu\text{-PIC}$ の Gain Curve の比較
- 2 種類のソルダーレジスト $\mu\text{-PIC}$ の Gain Curve の比較

順に結果を報告する。また、以下の章からドライレジスト製 $\mu\text{-PIC}$ を DR $\mu\text{-PIC}$ 、ソルダーレジスト製 $\mu\text{-PIC}$ を SR $\mu\text{-PIC}$ と記載する。

4.3.1 陽極-内挿電極間に電流が流れるかの確認

まず、新しく $\mu\text{-PIC}$ を作製する原因となった陽極-内挿電極間に電流が流れるかの確認を行った。 $\mu\text{-PIC}$ に電圧を印加しその時の電流を記録し、電流が 1 μA を超える又は 600 V まで電圧印加を行った。陽極高さ 75 μm $\mu\text{-PIC}$ の結果が表 4.1、陽極高さ 125 μm $\mu\text{-PIC}$ の結果が表 4.3 である。表 4.2、4.3 から 1 μA を超える電流は陽極・陰極共に 500 V 以上程度であることが確認できた。このことから SR $\mu\text{-PIC}$ は陽極-内挿電極間で十分な絶縁性を持つことが確認できた。

4.3.2 DR $\mu\text{-PIC}$ と SR $\mu\text{-PIC}$ の Gain Curve の比較

次に DR $\mu\text{-PIC}$ と SR $\mu\text{-PIC}$ の Gain Curve の比較を行った。本実験のセットアップは図 4.8 に示す。Ar と C_2H_6 で構成された混合ガスを使用し、 $\mu\text{-PIC}$ 内で循環させる。ここに X 線源である ^{55}Fe を $\mu\text{-PIC}$ に照射すると、 $\mu\text{-PIC}$ 内で電子が生成され雪崩増幅を起こし誘起電荷を読み出す。その信号をプリアンプ (ORTEC 142PC)、自作アンプ回路に通して信号を増幅・整形した後、

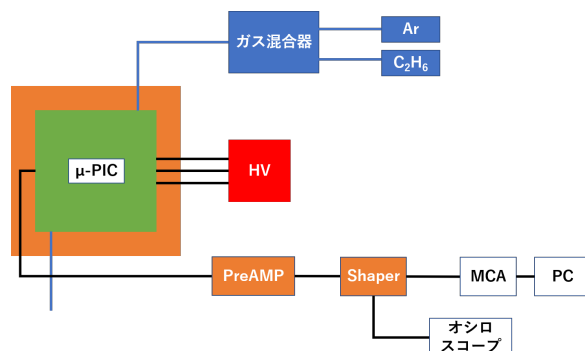


図 4.8 実験セットアップ概略図

MCA(Multi Channel Analyzer/Amptec 8000D) で波形をデジタル変換しキャリブレーションをすることで Gain を算出できる。今回は Ar/C₂H₆ = 90/10 で動作し、線源にコリメートはさせずにデータ取得を行った。また読み出しは内挿電極は使用せず陽極の読み出し電極のみで行った。

増幅率 G (Gain) は以下の式で算出することが出来る。

$$G = \frac{\text{実際に測定された電荷量 [pC]}}{^{55}\text{Fe 由来の電離された初期電子の総電荷量 [pC]}} \quad (4.1)$$

一次電子の総電荷量は計算によって求めることができ、⁵⁵Fe のエネルギースペクトルは既知であるため、今回は X 線源として使用した。⁵⁵Fe の X 線エネルギーのピークは 5.9 keV であり、この値と第 2 章で述べた Ar の W 値 26 eV、素電荷 1.6×10^{-7} pC を用いて

$$1.6 \times 10^{-7} [\text{pC}] \times \frac{5.9 [\text{keV}]}{26 [\text{eV}]} = 3.63 \times 10^{-5} [\text{pC}] \quad (4.2)$$

となる。測定された電荷量は、パルスジェネレータを用いて決められた電荷量を持つ信号を MCA で取得し、電荷量と MCA 値との相関を求めて、実際に取得した信号をキャリブレーションすることで求めることが出来る。キャリブレーションのグラフを図 4.9 に示す。

実際に MCA で取得されたエネルギースペクトルを図 4.10 に示す。図 4.10 には ⁵⁵Fe のメインピーク (5.9 keV) とエスケープピーク (2.9 keV) が表れている。メインピークをガウスフィットし、式 4.1 を用いて得られた Gain を印加電圧ごとにプロットした SR μ-PIC と DR μ-PIC の Gain Curve を図 4.11 に示す。電圧は陰極側に印加し、陽極電圧は 0 V、ドリフト電圧は -900 V で固定して信号を取得している。

青の点が DR μ-PIC で、赤の点が SR μ-PIC である。Gain Curve から SR μ-PIC の方が Gain が低いことが分かった。このような結果が起こった原因について、絶縁層の素材の違いの他に、

- 陽極の高さの違い
- 陽極の形状の差異
- 気温・湿度の影響

が関係しているのではないかと考察した。陽極の高さは DR μ-PIC は 89 μm、SR μ-PIC はそれぞ

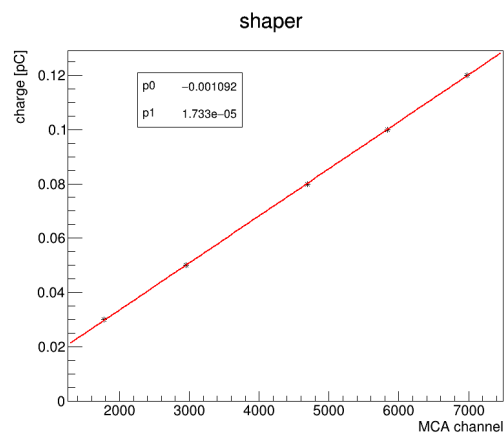


図 4.9 電荷量と MCA 値の相関図

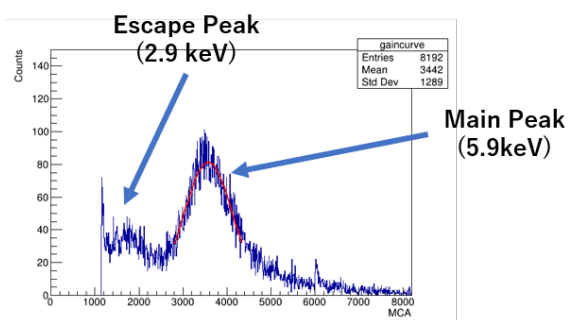


図 4.10 MCA で得られたエネルギースペクトル

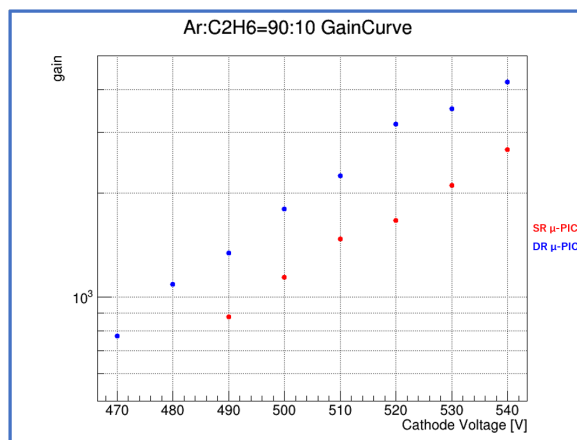


図 4.11 SR μ -PIC と DR μ -PIC の Gain Curve

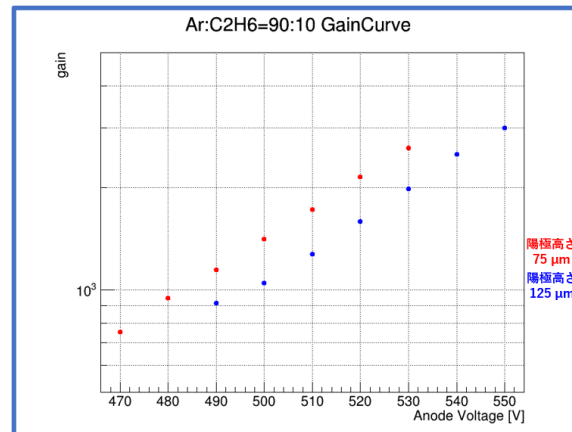


図 4.12 2 種類の SR μ -PIC の Gain Curve

れ 75 μm と 125 μm で異なること、陽極の形状の差異は製造時に起きる、陽極径にバラつきがあることが Gain に影響していると考えている。また、測定時期が異なるため、気温・湿度がそれぞれ違うことから、気温・湿度を加味した Gain を測定する必要があると考えている。

このことから、SR μ -PIC の方が Gain は低い、以上の原因を改善することで、SR μ -PIC の Gain を上昇させることが出来ると考察した。

4.3.3 2 種類の SR μ -PIC の Gain Curve の比較

次に、4.3.2 節と同様の測定を陽極の高さが違う 2 種類の SR μ -PIC について行い、Gain Curve を比較した。図 4.12 に SR μ -PIC の Gain Curve を示す。赤の点が陽極高さ 75 μm 、青の点が陽極高さ 125 μm の Gain Curve である。図 4.9 から陽極高さ 75 μm の Gain は 125 μm に比べ、10 %～15 %の低下が見られたものの信号を読み出すことが可能ということが確認できた。今回は絶縁層厚 100 μm の μ -PIC を作製したが、絶縁層厚 100 μm の μ -PIC は製造が困難であるため、100 μm μ -PIC を今後新しく開発することが難しいことが判明している。今回の結果から信号の読み出し部分を改善することで、陽極高さ 75 μm の μ -PIC でも陽極高さ 125 μm の μ -PIC と同様の結果を得ることが出来ることが考えられる。

第 5 章

光学的読み出しのための X 線イメージング

前章の結果から新しく作製した SR μ -PIC(ソルダーレジストを使用した μ -PIC) は検出器として使用可能ということが分かった。そこで SR μ -PIC を用いて X 線イメージングを試み実際にどのような挙動を示すかを確認することにした。本章では X 線イメージングの基本原理、実際に行った実験の結果、分かった問題点、改善案などを述べる。

5.1 光学的読み出し

従来の μ -PIC の信号読み出しは第 2 章で述べた通り、容器内のガス分子を電離放射線を用いて電離させ、一次電子が雪崩増幅を起こした時の誘起電荷を読み出す仕組みであった。この電氣的読み出しに対し光学的読み出しとは、一次電子が雪崩増幅を起こした時に発生するシンチレーション光を CCD カメラなどを用いて捉える読み出し方法である。図 5.1 に光学的読み出しの模式図を示す。光学読み出しを MPGD で行う実験は GEM[20] や、Micromegas[21] などですでに應用されている。

5.2 神戸大学での実験

光学的読み出しを行うために、混合ガスを従来使用していた $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ から Ar/CF_4 へ変更した。 CF_4 のシンチレーション光の発光バンドが紫外から可視までと広い(図 5.2)、光学読み出しに適しているからである [22]。そのため今回は光学的読み出しを行う前に μ -PIC の Ar/CF_4 での動作確認を行った。また、X 線イメージングを行う際に、 μ -PIC の読み出す位置の整合性が取れているかを確認するため、 $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ を用いて Gain Map を作成した。それらの結果について次節にて記述する。

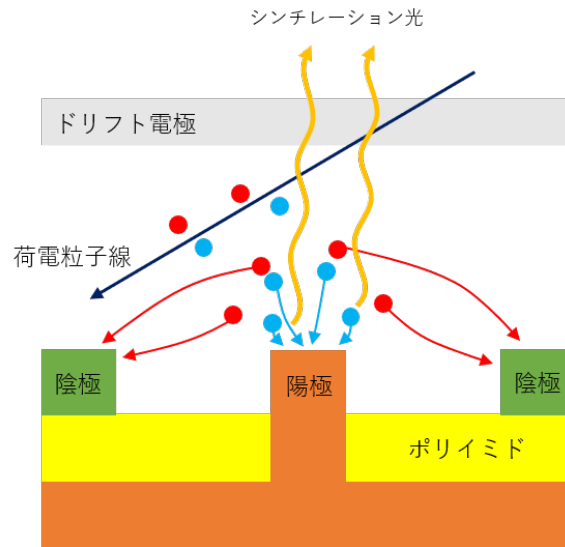


図 5.1 光学的読み出し、模式図

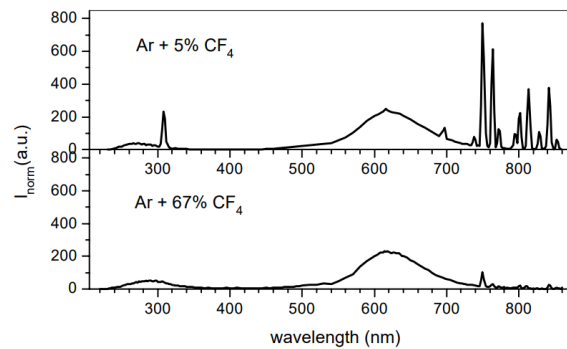


図 5.2 Ar/CF₄ のスペクトル [22]

5.3 実験結果

5.3.1 Ar/CF₄ の動作確認

Ar/CF₄ の動作確認のセットアップは 4.3.2 の実験のセットアップと同じでガス配分のみ Ar/C₂H₆ から Ar/CF₄ へ変更しただけである。概略図を図 5.3 に、実験の様子を図 5.4 に示す。

実際に得られた Gain Curve を図 5.5、5.6 に示す。ここで図 5.5 は陰極、ドリフト電圧を固定し陽極電圧を変化させたもので、図 5.6 は陽極、ドリフト電圧を固定し陰極を変化させたものになっている。どちらの Gain Curve も SR μ -PIC は陽極高さ 125 μ m のものを使用している。

Ar/CF₄ において Gain Curve を描くことができ、陽極電圧変化、陰極電圧変化どちらの場合

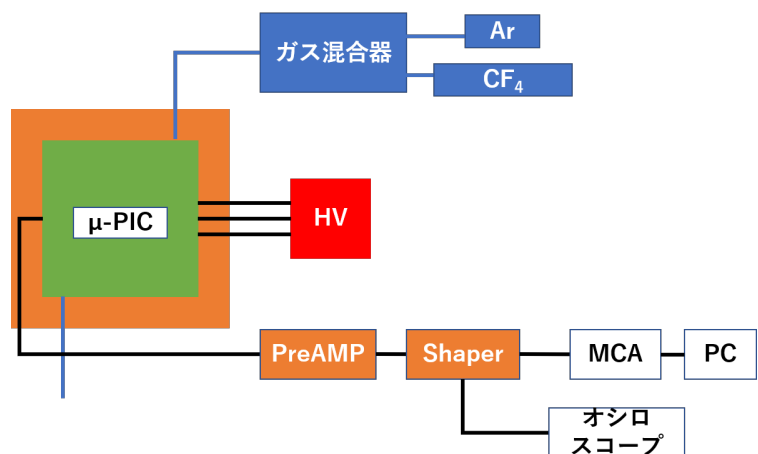


図 5.3 実験セットアップ概略図

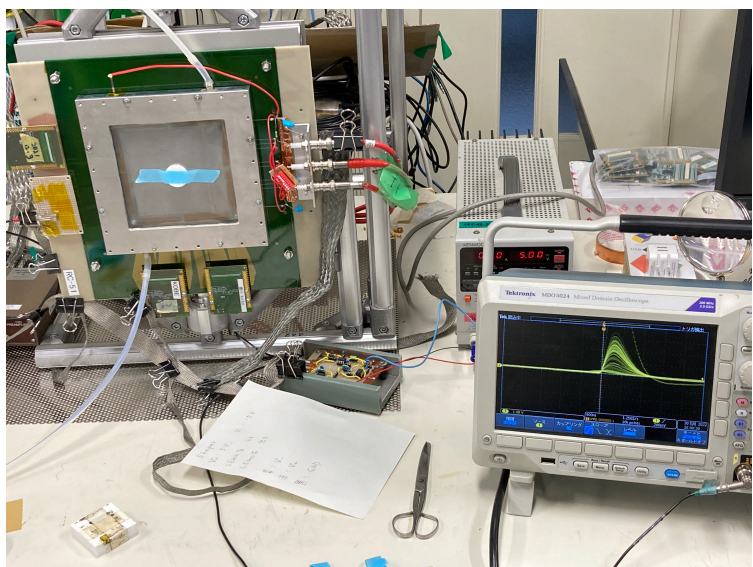


図 5.4 実験の様子

も問題なく動作することが判明した。また、従来使用していた $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ の時に比べ、動作電圧が 100 V 程度大きくなっていることが分かった。この結果から、動作電圧を従来より 100 V 程度高くして動作させることになった。

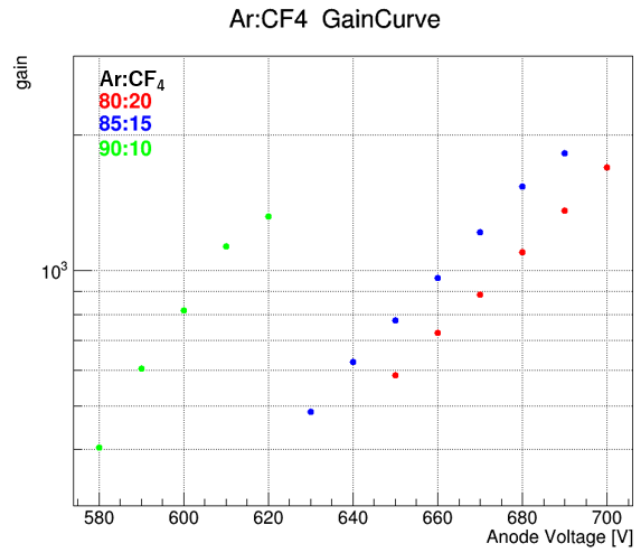


図 5.5 陽極電圧を変化させたの Gain Curve、ガス混合比を変えて測定

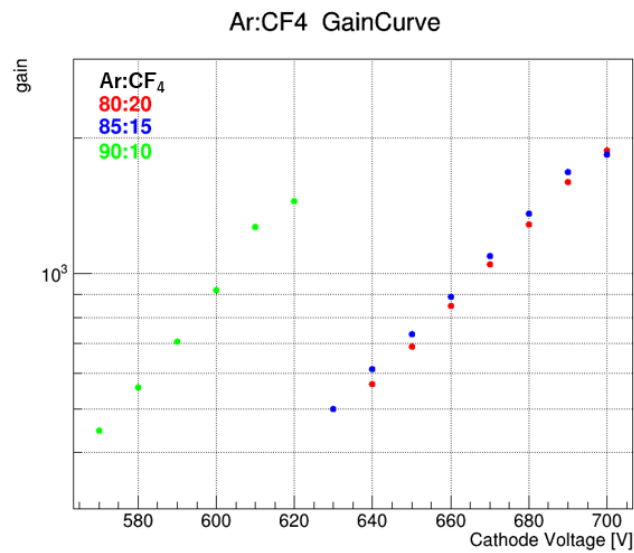


図 5.6 陰極電圧を変化させた Gain Curve、ガス混合比を変えて測定

表 5.1 陽極高さごとの電圧値

陽極高さ	75 μ m	125 μ m
陽極電圧	0V	0V
陰極電圧	-530V	-500V
ドリフト電圧	-850V	-850V

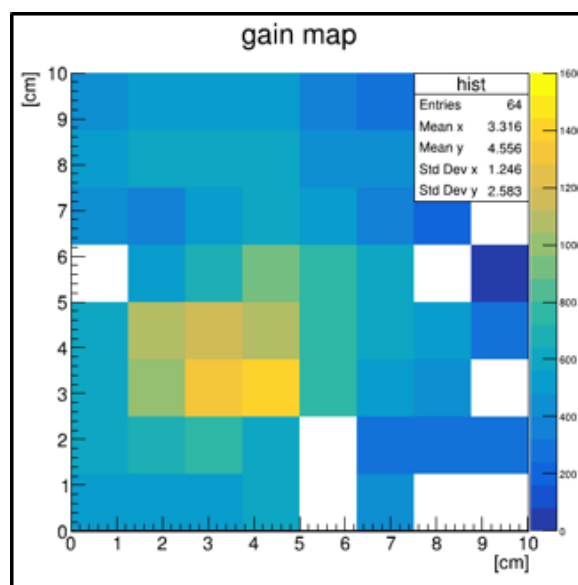


図 5.7 陽極高さ 75 μ m Gain Map、 μ -PIC を 64 分割し測定している

5.3.2 μ -PIC の Gain Map

次に SR μ -PIC の Gain Map を陽極高さ 75 μ m、125 μ m の両方でデータを採取した。実験のセットアップは図 5.3 と同じで、今回は μ -PIC を 8×8 の 64 分割を行い、線源を 1 区画ずつずらしながら MCA を取得し Gain を求めた。表 5.1 に陽極高さごとの電圧値を示し、図 5.7 に陽極高さ 75 μ m、図 5.8 に陽極高さ 125 μ m の Gain Map を示す。

図 5.7 から中心付近の Gain が一番高く 1100 程度であることが分かった。また白くなっている部分はメインピークがノイズに紛れフィッティングが出来ずデータを取ることが出来なかったが、これは自作したアンプ回路が原因であると考えており、高品質なアンプ回路を使用すればデータ採取できると考えている。 μ -PIC 中心から離れるにつれて Gain が小さくなっているように見える。今回 μ -PIC の Gain を一定にするために、 ^{90}Sr を中心に配置しある程度時間をかけて Gain をプラトーにしてから測定を行っている (チャージアップ)。図 5.8 は先行研究の μ -PIC の Gain の時間変化である [23]。チャージアップが不十分だったため、 μ -PIC の位置ごとに Gain にバラつきが出たと考察した。

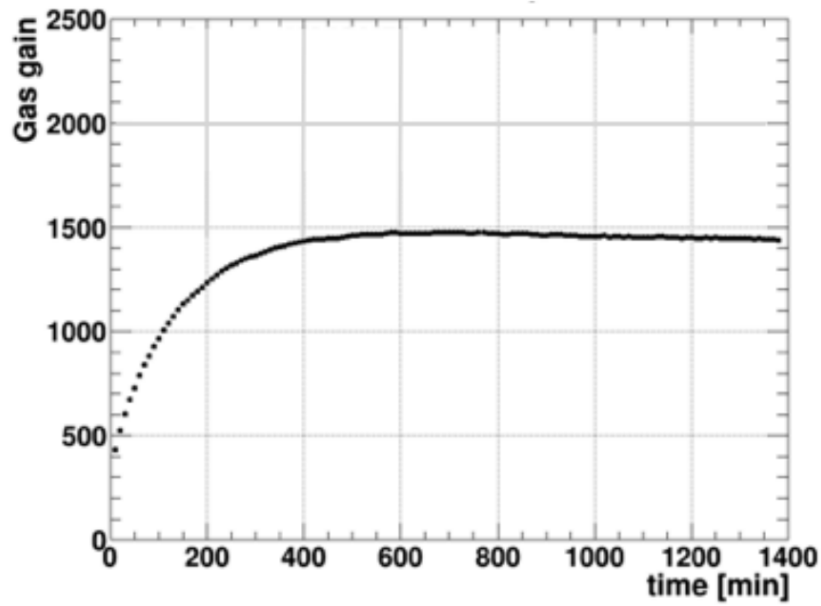


図 5.8 μ -PIC の Gain の時間変化 [23]

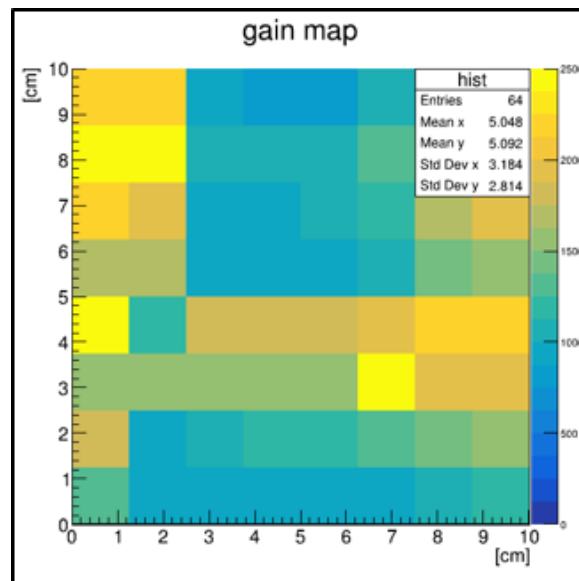


図 5.9 陽極高さ 125 μm Gain Map、 μ -PIC を 64 分割し測定している

図 5.9 からは陽極高さ 75 μm と比べ Gain が大きく、平均 1500 程度であった。動作電圧は 75 μm よりも低いながら Gain が高くなっていることは図 4.12 と整合性が取れていることが分かる。またこの個体の特徴として中心部に比べ両端の方が Gain が大きくなっていることが分かったが、原因は分からず X 線イメージングでも同様の結果を得られるか確認する必要があると考察した。



図 5.10 CERN GDD Lab

5.4 CERN GDD Lab での実験

前述の結果から SR μ -PIC は Ar/CF_4 の環境下でも使用することができ、また個体ごとに特徴があることが分かった。この結果を受けて、実際に μ -PIC がどのような挙動をしているかを確認するために X 線イメージングを行うべく、CERN(欧州原子核研究機構) の Gas Detectors Development(GDD) グループ [24] の実験室で X 線イメージングを行った (図 5.10)。GDD グループは、1969 年に MWPC 考案者の *G.Charpak* 氏によって作られた、素粒子物理学用の高度な検出器の開発と応用を目的としたグループである。本節では CERN GDD Lab で使用した実験装置、実験方法、実験結果について述べる。

5.4.1 GDD Lab での実験

本実験は Cu をターゲットにした X 線管を使用し実験を行った。また現在の μ -PIC はドリフト電極が金属メッシュで出来ているため、そのまま使用すると X 線が入射しない。そこでドリフト電極を透明なフィルムの上に ITO(Indium Tin Oxide) を塗布した電極を使用し X 線が入射できるよう構成した (図 5.11)。実際に行った実験は以下の通りである。

- μ -PIC の前に何も置かずに X 線を照射したイメージング
- デモンストレーション
- 鉛のテストパターンを μ -PIC の前に置いた X 線イメージング
- アルミニウム箔を用いた階段状のパターンを μ -PIC の前に置いた X 線イメージング

5.4.2 から順に結果を報告する。

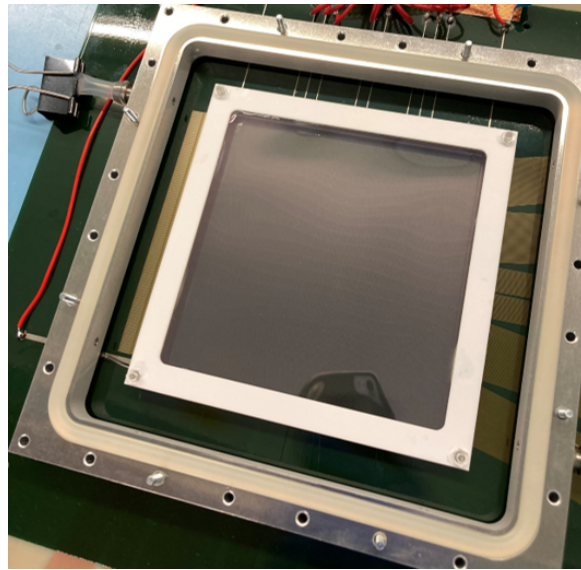


図 5.11 X 線イメージング時に使用した μ -PIC

5.4.2 μ -PIC の前に何も置かずに X 線を照射したイメージング

まず μ -PIC で X 線イメージングが出来るかどうかを確かめるために、図 5.12 のセットアップを用いて撮影を行った。 μ -PIC の裏側 (1.6 mm のガラスエポキシ製基板) から X 線を照射し表側に CCD カメラを設置し X 線イメージングを行う。図 5.13 に実際のセットアップを示す。

今回使用した X 線源は X 線管を使用した。X 線管の原理は、真空容器内に陽極に金属のターゲット、陰極にフィラメントを配置し、フィラメントを加熱する。その時に陽極と陰極に電圧を印加すると両極間の電位差で、フィラメントから熱電子が放出されターゲットに衝突する。衝突されたターゲットから X 線が発生する、という原理である [25]。X 線は使用するターゲット、X 線管に流れる管電流、陽極・陰極の加速電圧によって調整することができ、X 線のエネルギーは管電流に比例、加速電圧の 2 乗に比例する。今回は金属ターゲットに Cu、加速電圧 30 kV、管電流 7 mA で動作させた。図 5.14 に典型的な銅ターゲット X 線管による X 線スペクトルを示す。なお、本実験では X 線強度の絶対値は測定していないため、X 線強度の相対値を管電流のコントロールによって得ている。

カメラは 6MPixel CCD(Qimaging Retiga R6[27]) を使用している (図 5.15)。また高解像度のイメージを撮影するために X 線を照射しない状態で撮影し、取得した X 線イメージから減算するというを行った。

陽極高さ 125 μ m SR μ -PIC のイメージを図 5.16 に、陽極高さ 75 μ m SR μ -PIC のイメージを図 5.17 に示す。図 5.16、5.17 とともに左図に 5.3.2 の Gain Map を比較のために示している。両方とも X 線イメージを撮影することに成功した。

図 5.16 より、右図イメージの検出器左側の部分が明るくなっていることから、左側の部分の

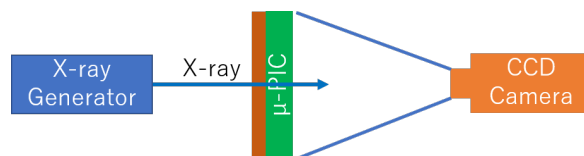


図 5.12 X 線イメージング セットアップ

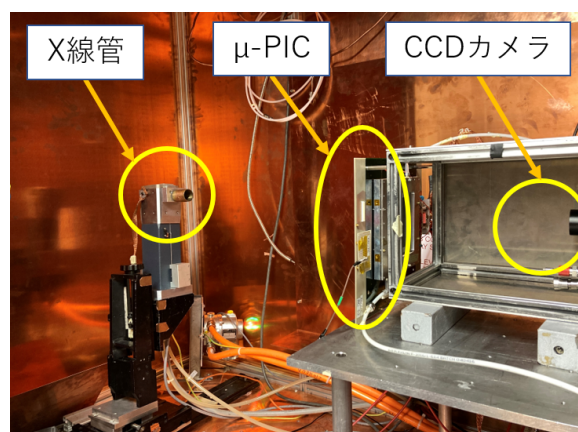


図 5.13 実際のセットアップ

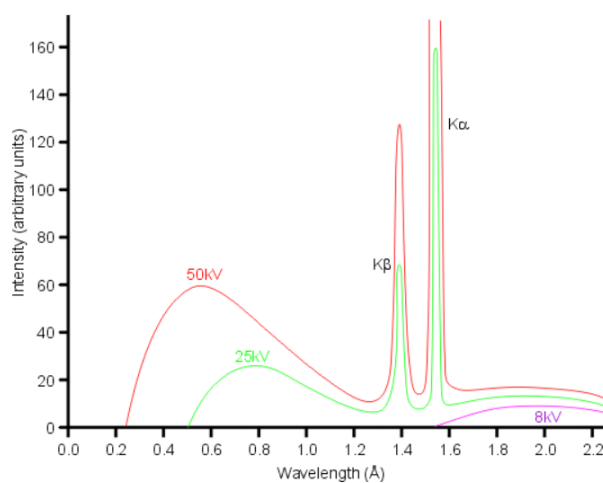


図 5.14 銅の X 線スペクトル [26]、赤が加速電圧 50 kV、緑が加速電圧 25 kV、紫が加速電圧 8 kV

Gain が高くなっていることが分かり、Gain Map と整合性が取れていることが分かる。検出領域の一番端の部分が明るくなっている原因は不明だが、実際に顕微鏡で端の部分を確認した結果、他の部分と違いがないということは分かっているため構造上の違いではないと考えている。

図 5.17 は Gain が低いため比較することが難しいが、右図イメージにおいて、左下の部分が右上の部分に比べ明るくなっているように見えることから、Gain Map と整合性が取れていることが分かる。明るさは右半分と左半分で非一様であることが分かり、この検出器の特徴であると考えてい



図 5.15 CCD カメラ [27]

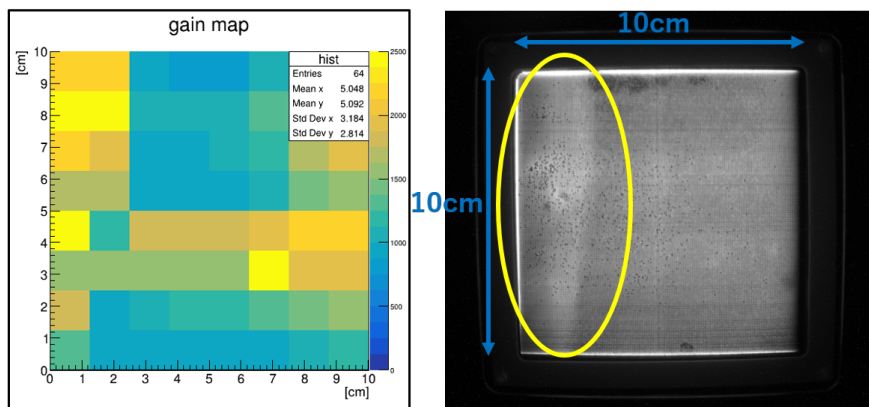


図 5.16 陽極高さ 125 μm X 線イメージ

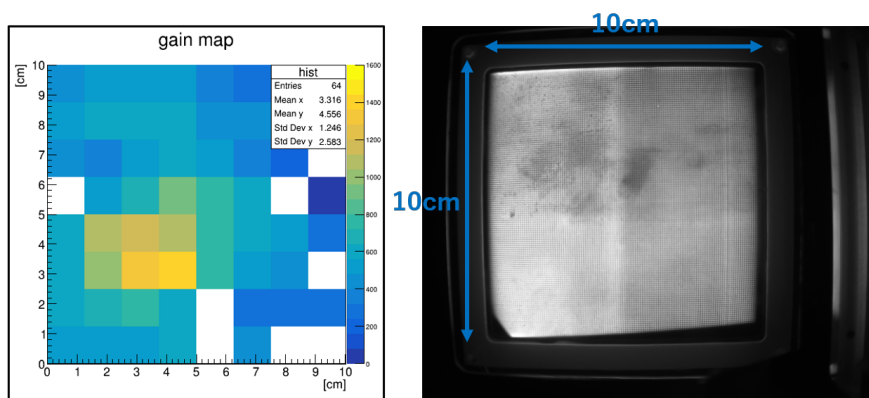


図 5.17 陽極高さ 75 μm X 線イメージ

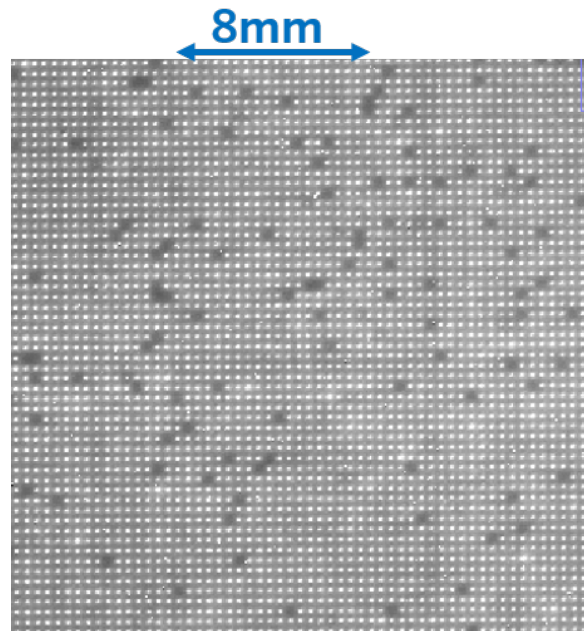


図 5.18 陽極高さ 125 μm SR $\mu\text{-PIC}$ X 線イメージ 拡大図

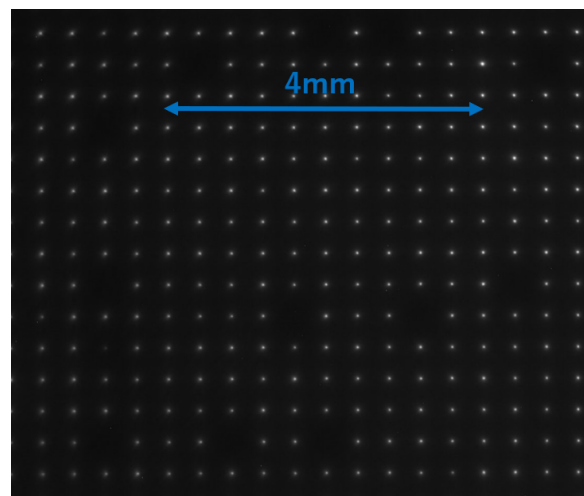


図 5.19 陽極高さ 125 μm SR $\mu\text{-PIC}$ X 線イメージ、拡大レンズに交換

る。中央部分の縦の線に関して、原因は不明だが $\mu\text{-PIC}$ の製造過程が原因だと考えている。

図 5.18 は拡大した陽極高さ 125 μm の X 線イメージである。このセットアップでは $\mu\text{-PIC}$ の 1 ピクセルごとの挙動は光学的に確認出来なかったため、カメラのレンズを交換し像を拡大させてイメージングを撮像した (図 5.19)。その結果高解像度のイメージを撮像できており、信号を出していない陽極も認識できている。またイメージングから陽極の直上でのみ雪崩増幅が起こっていることが、今回の実験で明らかになった。

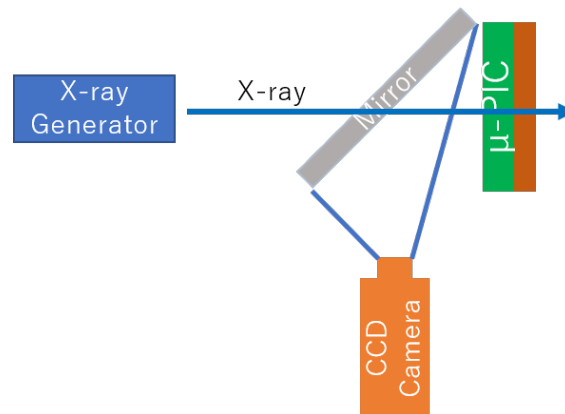


図 5.20 X 線イメージング 鏡を配置したセットアップ

5.4.3 デモンストレーション

次にコウモリの亡骸を使用して X 線イメージングを行った。しかし図 5.12 のセットアップではかなり像がボヤけることが判明した。これは X 線を検出器の裏側から照射しているため、エネルギーの高い X 線しか検出器内に侵入しないためである。実際に計算した結果 8 keV の X 線は検出器のガラスエポキシ製基板に 99.9997 %吸収されることが判明した。検出器基板を透過した X 線はエネルギーが高いため、検出器内でガス分子と反応し生成された光電子はエネルギーが大きいことから飛程が長くなり、結果としてボヤけてしまうと考察した。そこでセットアップを少し変更したものが図 5.20 である。X 線管と μ -PIC の間に鏡を斜めにして配置し μ -PIC の表面から X 線を照射出来るようにし、光は鏡で反射してカメラで捉えるセットアップにした。このセットアップにしたことでエネルギーが比較的小さい X 線も検出器に入射できるようになり、像のボヤけを改善することができた。実際にコウモリをイメージしたものが図 5.21 である。 μ -PIC は陽極高さ $125\ \mu\text{m}$ のものを使用した。高解像度のイメージを撮影することができ、1~2 mm 程度の間隔のコウモリの足の指の骨も分かるイメージになっている。

同じセットアップを用いて μ -PIC を陽極高さ $75\ \mu\text{m}$ に変更し、「 μ -PIC」と描いたものを μ -PIC の前に置いて撮像したものが図 5.22 である。こちらも高解像度のイメージを取ることが出来る。



図 5.21 コウモリのイメージ (陽極高さ 125 μm)



図 5.22 「 μ -PIC」のイメージ (陽極高さ 75 μm)

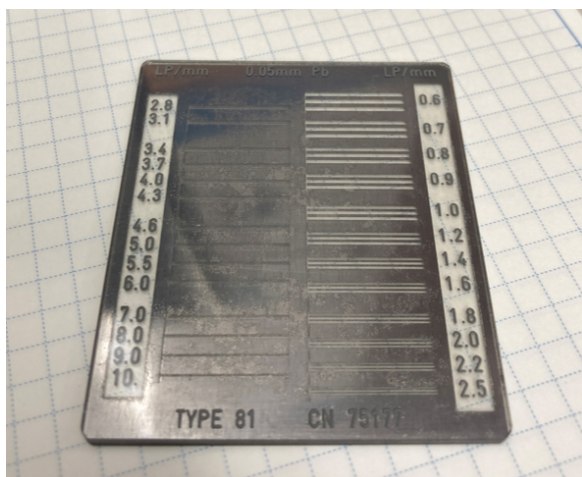


図 5.23 鉛サンプル

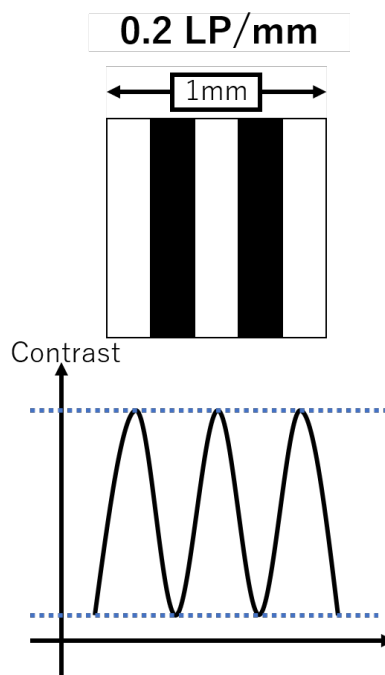


図 5.24 変調伝達関数 (MTF) の定義

5.4.4 鉛のテストパターンを μ -PIC の前に置いた X 線イメージング

比較的簡単なセットアップにより X 線イメージングが実現できたことから、SR μ -PIC の性能の評価をするべく空間分解能を調べた。空間分解能の測定には、変調伝達関数 (MTF) を用いた。MTF はレンズの性能を評価するパラメータで、図 5.23 の鉛ラインペアパターンを使用することで求めることが出来る。サンプルには 1 mm あたりのラインペア [LP/mm] が 0.6~10[LP/mm] まで記されており、図 5.24 のようにその部分のコントラストの最大値と最小値を測定することで MTF が求められる。式 5.1 は MTF の定義である。

$$\text{MTF} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5.1)$$

ここで、 I_{\max} はコントラストの最大値、 I_{\min} はコントラストの最小値である。

測定のセットアップを図 5.25 に示す。X 線管は印加電圧 20 kV、管電流 10 mA で X 線を照射している。 μ -PIC は陽極電圧 0 V、陰極電圧-690 V、ドリフト電圧-900 V で動作させている。鉛サンプルは X 線側の鏡に出来るだけ近づけるように配置している。また MTF を 1 mm あたりのラインペア (lp/mm) の関数として定義し、MTF10 %に相当する lp/mm を空間分解能の定量化に使用した。

図 5.26 に鉛サンプルを置いた X 線イメージを示す。左図が陽極高さ 125 μm の μ -PIC、右図が陽極高さ 75 μm の μ -PIC である。図 5.27 に陽極高さ 125 μm の MTF、図 5.28 に陽極高さ 75 μm の MTF を示す。実験結果から陽極高さ 125 μm の空間分解能は 620 μm 、陽極高さ 75 μm

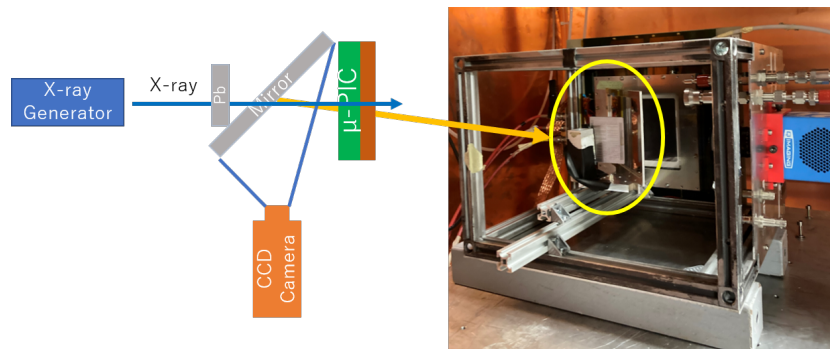


図 5.25 空間分解能測定 セットアップ

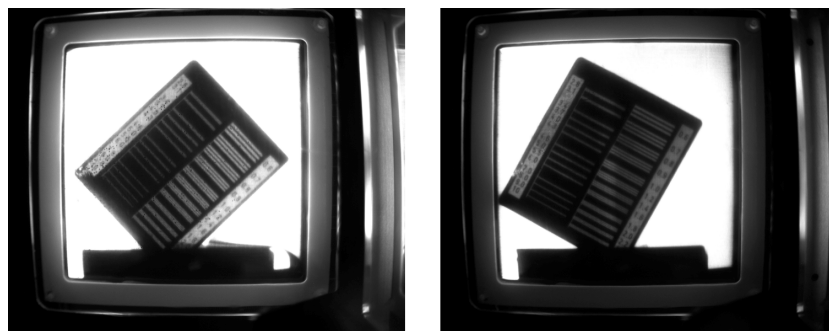


図 5.26 鉛サンプルを置いた X 線イメージ、左：陽極高さ 125 μm 、右：陽極高さ 75 μm

の空間分解能は 710 μm を達成することが出来た。これは空間分解能としては優れているとはいえない。μ-PIC は粒子の飛跡検出など 100 μm 程度の位置分解能を狙って開発した検出器であり、読み出し部も 400 μm ピッチだが、検出器の性能を十分引き出しているとは言えないためである。

空間分解能が悪い原因として次のように考察される。今回の X 線管から照射される X 線のエネルギーは Cu の K_α の 8 keV 程度で、これが検出器内の Ar の K 殻電子と光電効果を起こす。この時の光電子の運動エネルギーは Ar 原子核の K 殻の束縛エネルギー 3.2 keV[28] を引いた値である 4.8 keV 程度だと推測される。計算の結果、この時の光電子の飛程は 1.2 mm 程度であり、これが空間分解能を悪くしているからだと考察される。

空間分解能を良くするには、低エネルギーの X 線を用いる方法や、X 線に対する吸収率の大きい Xe ガスを μ-PIC の動作ガスに用いる方法が考えられる。

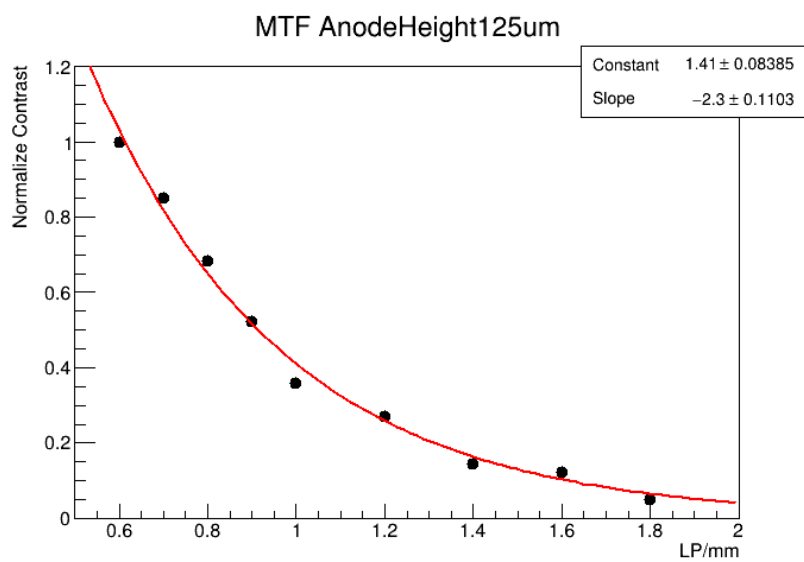


図 5.27 陽極高さ 125 μm の MTF

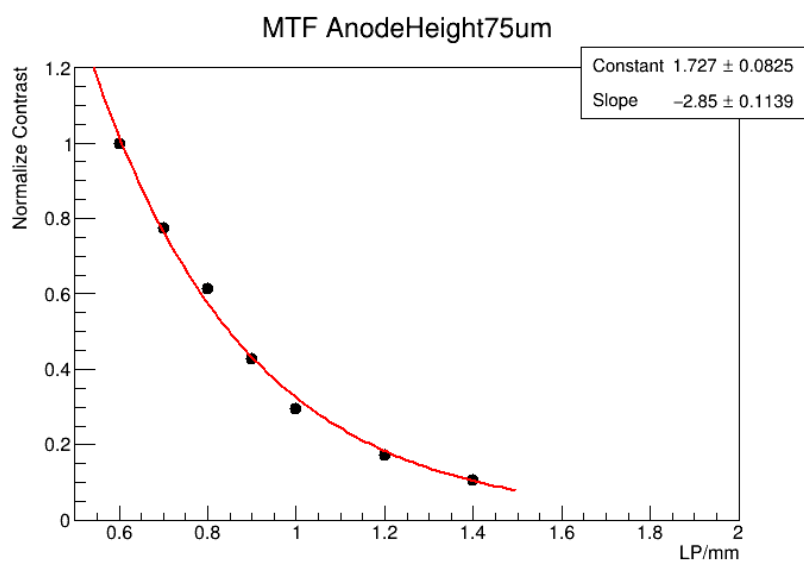


図 5.28 陽極高さ 75 μm の MTF

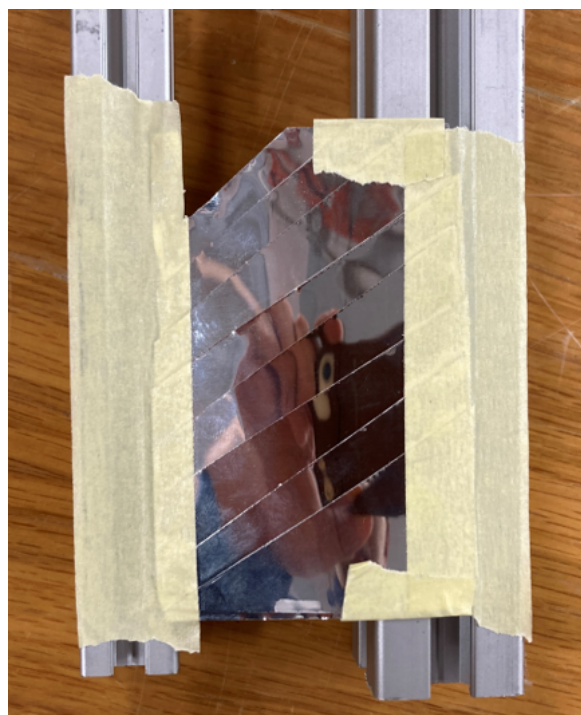


図 5.29 アルミニウム箔パターン

5.4.5 アルミニウム箔を用いた階段状のパターンを μ -PIC の前に置いた X 線イメージング

最後に図 5.29 のようなアルミニウム箔を用いて階段状のパターンを作成し、イメージの入射 X 線依存性の測定を行った。セットアップは 5.4.4 と同じで、図 5.25 の鉛サンプルをアルミニウム箔に変更しただけである。X 線管は印加電圧 20 kV、管電流 10 mA で X 線を照射しており、 μ -PIC は陽極電圧 0 V、陰極電圧-690 V、ドリフト電圧-900 V で動作させている。アルミパターンは 0 枚から 8 枚までの階段を作成した。アルミ箔 1 枚の厚さは $50\ \mu\text{m}$ である。

図 5.30 にアルミニウム箔を置いた X 線イメージを示す。このイメージから左上から右下にかけてだんだん暗くなっていることが分かる。図 5.31、図 5.32 はそれぞれの μ -PIC において、縦軸アルミの厚さごとの明るさの強度、横軸アルミ箔の厚さのグラフになっている。 μ -PIC は陽極の直上でのみ増幅し、陽極のすぐ周りは増幅が起きていないことが確認できる (図 5.19、43 ページ) ので、図 5.31、図 5.32 では陽極直上 (青い点) と、陽極周り (赤い点) をプロットした。

図 5.31、図 5.32 とともにコントラストの強度はアルミ箔厚さ $200\ \mu\text{m}$ までは線形に減衰し、それ以降は緩やかに減衰していることが確認できる。これから μ -PIC が観測できる下限値は $200\ \mu\text{m}$ だと考察した。エネルギーの大きい X 線が透過していることや、光の乱反射などが下限値以降も緩やかに減衰している原因であると考察している。この結果から、アルミ厚さ $0\sim 200\ \mu\text{m}$ の範囲で指数関数でフィッティングを行った結果、陽極高さ $125\ \mu\text{m}$ の時の減衰係数は $8.5 \pm 0.8[\text{mm}^{-1}]$ 、



図 5.30 アルミニウム箔 X 線イメージ、左：陽極高さ 125 μm 、右：陽極高さ 75 μm

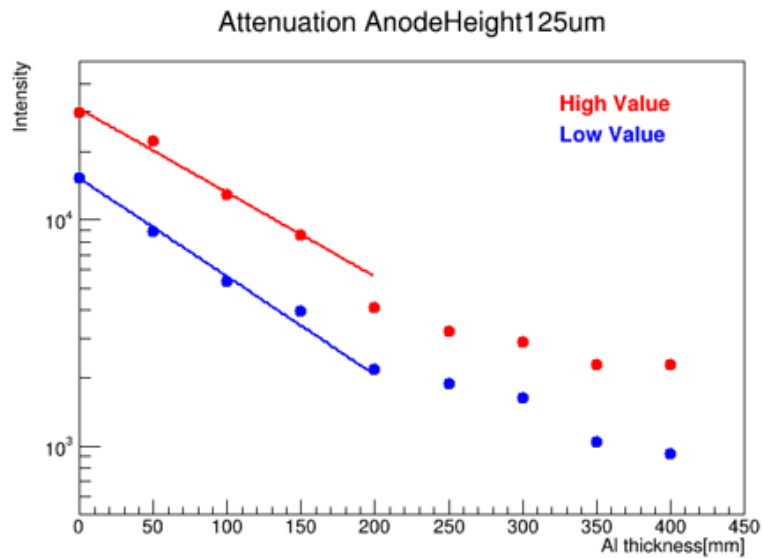


図 5.31 コントラスト強度、陽極高さ 125 μm

陽極高さ 75 μm の時の減衰係数は $19.9 \pm 1.0 [\text{mm}^{-1}]$ であることが確認できた。これは 8.0 keV の電子の場合のアルミニウムの質量減衰係数 [29] と密度 [30] から計算した減衰係数 $13.6 [\text{mm}^{-1}]$ に比べ大きく異なることが分かった。またカメラのダイナミックレンジを算出することを試みたが、カメラが認識出来る下限はある程度確認できたものの、上限に関しては確認することができなかった。光強度が大きくなると飽和し上限を観測できると考えているため、SR $\mu\text{-PIC}$ を改善し Gain を向上させることによってダイナミックレンジを算出出来ると考察した。

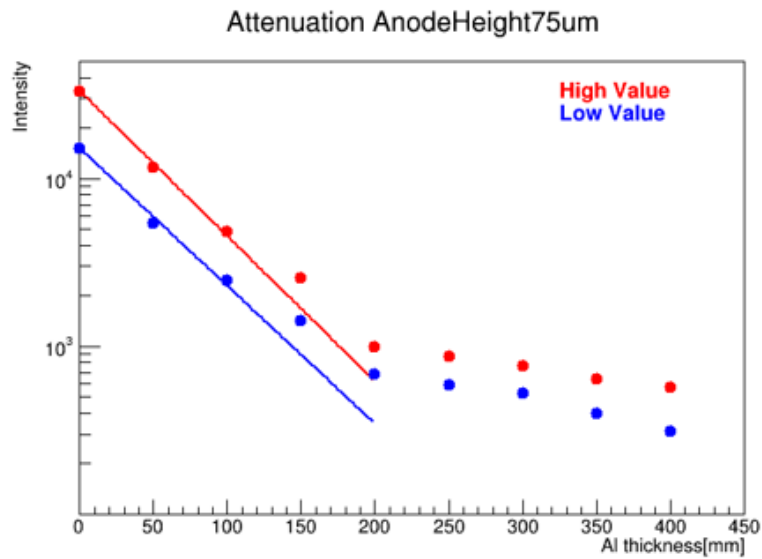


図 5.32 コントラスト強度、陽極高さ 75 μm

5.5 SR μ -PIC の改善点

今回 X 線イメージングによって、SR μ -PIC に動作していないピクセルが複数あることが確認された。ピクセルが動作しない原因として考えられるのは、ピクセルごとの陽極の径が均一ではなく、 $\pm 5 \mu\text{m}$ 程度のバラつきがあることである。この径のバラつきによって電場構造に若干の変化が生じ、電子が集まりやすいピクセルと集まりにくいピクセルがあると考えている。よって次回製造時は陽極の径のバラつきを今より抑える必要があることが判明した。また陽極の高さが高い方が Gain も大きくなり、X 線イメージングも高解像度で撮影できたことから、陽極高さも今以上に高くすることが出来れば、より高性能な μ -PIC になると考えている。しかし、製造の都合から、絶縁層を厚くするとポリイミドとレジスト素材の収縮率の違いから、レジスト素材が丸まってしまい、製造が困難になるといった事情がある。従って、今後の μ -PIC の作製は陽極の径や高さに注意していく必要があると考えている。

第 6 章

結論と今後の展望

今回、今まで使用していた DR μ -PIC において、絶縁層が導通性を持っていたことが判明した。それを改善するためにソルダーレジストを絶縁素材に使用した SR μ -PIC を開発した。この SR μ -PIC の挙動を調べるために X 線イメージングを行い光学的に動作確認を行った結果、動作していない陽極が多数存在することが判明した。これは陽極の径が位置によってバラつきがあるため、径が大きい陽極の方へ電子が移動し、径が小さい陽極では信号が読み出されないのではないかと考察した。陽極径のバラつきは製造工程上で起こるため、出来るだけ径のバラつきをなくせるような製造が今後必要であると考えている。また、X 線イメージングを用いて μ -PIC の空間分解能を測定した結果、陽極高さ 75 μm では 710 μm 、陽極高さ 125 μm では 620 μm の空間分解能を得ることが出来た。これは μ -PIC 本来の性能を引き出せているとは言えないが、比較的大きなエネルギーの X 線を照射させたことが原因であると考えているため、低エネルギーの X 線を照射してイメージングを行うことで空間分解能を改善できると考えている。

絶縁層を厚くすると、ポリイミドとレジスト素材の収縮率の違いからレジスト素材が丸まってしまうことや、ソルダーレジストの硬くて脆い性質から、 μ -PIC の作製が困難であるといった事情がある。そのため今後の展望として、製造工程を見直して μ -PIC を作製するか、別の絶縁素材を検討すべきではないかと考えている。

また、今回 μ -PIC を使用して初の光学的な読み出しは比較的簡単なセットアップにより実現できたため、X 線イメージングによる光学的な動作確認は今後も活用していくことが望ましいと考えており、光学的な読み出しによる測定は非常に有用であると考えている。

謝辞

本研究を行う上でたくさんのご指導、ご協力頂きました全ての方々に感謝を申し上げます。

指導教員の越智敦彦先生には μ -PIC について基本的なことから応用的なことまで、ガス検出器について理解の浅かった僕に丁寧に説明してくださいました。人生初の海外渡航の際も、研究はもちろん海外での生活などあらゆる場面で力を貸していただきました。英語に不慣れだった私にとってとても心強い存在でした。研究以外の話もさせていただき、その時開催していたサッカー W 杯の話は今でも鮮明に覚えております。越智先生のおかげで充実した海外出張を送ることが出来たと考えております私の人生にとって非常にいい経験になりました。越智先生のもとで研究できて良かったです。ありがとうございました。

研究室のスタッフの方々にも大変お世話になりました。藏重久弥先生にはアナログ回路セミナーでシェイパーを自作するときにお力を貸して頂きました。初めてアナログ回路を組むにあたって一から教えて頂いたおかげで自作シェイパーを作製することができ、実際に研究に使用することが出来ました。ありがとうございました。竹内康雄先生には TA でお世話になったことを覚えております。TA を行ったおかげで人前でプレゼンをすることに抵抗がなくなったと考えております。山崎祐司先生からは、コロキウムの際の丁寧な質問内容などは見習うべきだと心に刻みました。身内賢太朗先生は、MPGD 研究会などで的確な質問をされた時に、自分の研究を深く見直すきっかけになったと考えております。前田順平先生は、学生との距離がかなり近く、時々聞こえてくる ATLAS グループでの会話から自分にも当てはまることが多いなと密かに思っておりました。鈴木州先生は、研究経過報告での SK などのお話はとても興味深かったです。秘書の吉田和美さんには出張関連でお世話になりました。いつも出張関連の提出物が遅れ、ご迷惑をおかけしたことをお詫びします。研究室のスタッフの皆様、本当にありがとうございました。

CERN の GDD Lab の皆様にもお世話になりました。特に Florian Brunbauer 氏とは X 線イメージングの知識も浅く英語にも不慣れな僕に、つたない英語での質問に対して丁寧に対応していただいたことが私の CERN による実験が上手くいったと考えております。ありがとうございました。

先輩方にもお世話になりました。谷口さんとは、 μ -PIC の基本的な構造や検出原理など色んな事を教えて頂きました。コロキウムや研究会での発表の際も資料の作り方などを丁寧に教えて頂き、研究に必要なことを色々教えて頂きました。長崎さんとも、 μ -PIC について色々教えて頂きました。印象に残っているのは六甲での研究でも研究海事科でのビームテストの時でも自転車で通学し

ていたことで、この力強さが研究活動に活きているのだと感じ、参考にさせていただきました。1年間だけでしたが、多くのことを教えて頂きありがとうございました。

同級生では、特に同じ μ -PIC グループの高橋君にはお世話になりました。同じ外部進学で神戸大学に来ましたが、彼の研究に対する知識には遠く及ばず、力を貸してもらえばなしで何もお返しすることが出来なかったことが申し訳なく思います。本当にありがとうございました。博士としてこれからも研究に力を注いで頑張ってください。丸本くんには M1 の時席が隣で、研究の進捗について話したことを覚えております。金崎君とは時々 2 階研究室で実験を行っているのをみて自分も頑張らなければと思ったことが幾度とありました。中山さんとはいつも 2 階研究室で研究しているイメージがあり、M1 の頃から出張によく行って研究のモチベーションの高さには驚かされました。中村君は、いつもパソコンと格闘している姿を見てただただすごいと思いました。最後になりますが、本研究に関わった全ての方々、そして学生生活を支えてくれた家族に感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Particle Data Group, " Review of Particle Physics" , 2021
- [2] J.Bortfeldt , " The Floating Strip Micromegas Detector" , 2014
- [3] Tom.Francke, Vlandimir Peskov, " Innovative Applications and Developments of Micro-pattern gaseous Detctors"
- [4] Edward A. Mason Earl W. McDaniel. " The Mobility and Diffusion of Ions in Gases." Wiley, 1973
- [5] Maxim Titov, Gaseous Detectors: recent development and applications, arXiv: 1008.3736
- [6] Ivan Kolev, Annemie Bogaerts, and Renaat Gijbels, " Influence of electron recapture by the cathode upon the discharge characteristics in dc planar magnetrons" , PHYSICAL REVIEW E 72, 056402 (2005)
- [7] Glenn F.Knoll , " Radiation Detection and Measurement" , WILEY, 2010
- [8] T.Tanimori,Y.Nishi et al., " Imaging Gaseous Detector based on Micro Processing Technology" , NIM A 436 (1999) 185-195
- [9] CERN Gas Detectors Development, Gaseous Electron Multiplier, <https://gdd.web.cern.ch/gem>, (参照 2023-01-10)
- [10] I.Manthos, I.Maniatis et al., "The Micromegas Project for the ATLAS New Small Wheel", arXiv:1901.03160
- [11] Atsuhiko Ochi, et al., " A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber" , NIM A 471 (2001) 264
- [12] 神戸大学修士論文駒井英俊. μ -pic の放電抑制に関する研究, 2013
- [13] 神戸大学修士論文石飛由介. 150GeV/c ミューオンビームを用いた DLC μ -PIC の性能評価, 2019
- [14] 株式会社 東研サーモテック, DLC(Diamond Like Carbon), <https://tohkenthermo.co.jp/technology/dlc/>, (参照 2023-01-10)
- [15] Atsuhiko Ochi, et al., " Carbon Sputtering Technology for MPGD detectors" , PoS (TIPP2014) 351
- [16] 神戸大学修士論文山内悟, 炭素スパッタを用いた Resistive GEM の開発, 2016
- [17] Fumiya Yamane, et al, NIM, A 951 (2020) 162938

- [18] ADTEC ENGINEERING, プリント基板の作り方, https://www.adtec.com/world/vol03_01.html, (参照 2023-01-10)
- [19] 太陽ホールディングス, ソルダーレジストとは, <https://www.taiyo-hd.co.jp/jp/business/electronics/solderresist/>, (参照 2023-01-10)
- [20] F.M. Brunbauer, et al., Radiation imaging with optically read out GEM-based detectors, 2018 JINST 13 T02006
- [21] F.M. Brunbauer, et al., Radiation imaging with glass Micromegas , NIM A 955 (2020) 163320
- [22] M.M.F.R. Fraga, et al., The GEM scintillation in He-CF₄, Ar-CF₄, Ar-TEA and Xe-TEA mixtures, NIM A 504 (2003) 88-92
- [23] 神戸大学修士論文谷口大悟. DLC を用いた resistive μ -PIC のガス増幅率向上のための研究, 2021
- [24] CERN, Gas Detectors Developmet Group, <https://gdd.web.cern.ch/>, (参照 2023-01-10)
- [25] 正橋直哉, X線の基礎, http://www.trc-center.imr.tohoku.ac.jp/mono59_2.pdf, (参照 2023-01-10)
- [26] Jeremy Karl Cockcroft, Generation of X-rays, <http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/inst1/xrays.htm>, (参照 2023-01-10)
- [27] CAIRN RESEARCH, QImaging Retiga R6, <https://www.cairn-research.co.uk/product/qimaging-retiga-r6/>, (参照 2023-01-10)
- [28] A.Thompson, I.Lindau, et.al, X-RAY DATA BOOKLET, October 2009
- [29] NIST, X-Ray Mass Attenuation Coefficients, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z13.html>, (参照 2023-01-10)
- [30] 「砥石」と「研削・研磨」の総合情報サイト。 , アルミニウムの比重、密度の一覧, https://www.toishi.info/sozai/al/al_density.html, (参照 2023-01-10)