

修 士 学 位 論 文

セラミック素材を用いた Micro Pixel Chamber(μ -PIC)の開発研究

2020年2月19日

専攻名 物理学専攻
学籍番号 183s112s
氏名 説田暉

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

ATLAS 実験をはじめとする近年の加速器を用いた高エネルギー実験において、位置分解能・時間分解能・入射許容量に優れた粒子線検出器の開発が進められている。我々、神戸大学グループでは上記の条件を満たす測定器であり、微細加工技術を用いたマイクロパターンガス検出器 (MPGD) の一種である Micro Pixel Chamber(μ -PIC) の開発研究を行っている。 μ -PIC 及び MPGD の問題点として、高電圧を印加した陽極と陰極の間で放電が繰り返されることによって陽極陰極間にある誘電体表面に導通路が形成され、検出器として動作しなくなることがある。本研究では放電が起きても導通路が形成されにくい μ -PIC として、絶縁体の素材を従来のポリイミドではなく低温焼結セラミックス (LTCC) を用いた LTCC μ -PIC を開発し、その放電に対する性能について評価した。放電による導通路形成の要因とされる絶縁体の炭素を含まず素材自体が放電に強い LTCC を用いており、電極は金ペーストで作成し、アノードの高さを $100\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ に変更している。本論文では従来の μ -PIC からのデザイン変更点やガス増幅率などの基本的な性能評価の結果、そして神戸大学海事科学部のタンデム静電加速器施設で行った高速中性子を用いた放電レート・放電の大きさについて測定した結果について報告する。

目次

第1章	序論	7
第2章	ガス放射線検出器	8
2.1	放射線の検出原理	8
2.2	ガス検出器の動作原理	11
2.3	様々なガス検出器	13
第3章	μ -PIC と LTCC μ -PIC	19
3.1	μ -PIC の構造と動作	19
3.2	μ -PIC の問題点	20
3.3	LTCC μ -PIC	21
第4章	神戸大学海事科学部タンDEM静電加速器施設での高速中性子試験セットアップ	28
4.1	神戸大学海事科学部タンDEM静電加速器	28
4.2	LTCC μ -PIC の放電測定セットアップ	29
第5章	放電測定試験結果	32
5.1	放電回数・大きさの測定方法と解析手法	32
5.2	放電測定試験の結果	34
第6章	議論	36
第7章	まとめ・今後の展望	41
	謝辞	42

目次

2.1	銅中におけるミューオンの運動量エネルギー損失のグラフ [3]. $\beta\gamma \approx 3$ から 1000 の領域での粒子はエネルギー損失の値がほぼ一定で MIP 粒子と呼ばれる.	9
2.2	様々な物質中での粒子のエネルギー損失のグラフ [3]. 横軸は各粒子の運動量, 縦軸はエネルギー損失を表す.	9
2.3	Ar:CO ₂ =93:7 中での光子のエネルギーと質量吸収係数の関係のグラフ [4].	10
2.4	主な気体の光電効果による光子の吸収係数 (左:横軸 光子のエネルギー, 縦軸 吸収断面積) と平均自由行程 (右:横軸 光子のエネルギー, 縦軸 平均自由行程)[5].	11
2.5	様々なガスでの W 値一覧 [6].	12
2.6	単一電場中における雪崩増幅の形成過程の図 [7].	12
2.7	基本的な比例計数管の構造 [8].	13
2.8	陽極線からの距離に関する電場変化の様子 [8].	13
2.9	比例計数管の動作モード a) 比例モード, b) ガイガーモード [7].	14
2.10	MWPC の構造デザイン図 [7].	14
2.11	MWPC の断面図方向から見た電場構造 [7].	15
2.12	ストリップ状陰極を導入した修正版 MWPC[7]. 陰極からの信号を重心法を用いて解析することで高位置分解能を達成できる.	15
2.13	MSGC の概略図 [10].	16
2.14	MSGC の電極付近の電場構造 [9].	16
2.15	MWPC と MSGC の計数率に対する増幅率の変化 [9].	16
2.16	GEM 電極付近の電子顕微鏡による拡大写真 [12].	17
2.17	GEM 両面の電極間の電場及びドリフト・トランスファー電場の電気力線 (赤線) と等電位線 (緑線) [12].	17
2.18	triple-GEM の構造図 [12]. ドリフト領域で生成された電離電子は GEM1~3 を通りながら増幅され, 底面の読み出し回路で信号読み出しされる.	17
2.19	一段 (緑:SGEM), 二段 (赤:DGEM) そして三段 (青:TGEM) の GEM を使用した際の印加電圧とガス増幅率の関係 (複数段の GEM を用いた際, 各 GEM には等しい電圧をかけている). [12].	17
2.20	Micromegas の動作概略図 [13].	18
2.21	Micromegas の陽極印加電圧によるガス増幅の変化 (大気圧の Ar:CH ₄ = 90:10 で動作) [13].	18
3.1	μ -PIC の基本構造	19
3.2	Micromegas の動作概略図 μ -PIC における電子雪崩増幅の様子. 陽極陰極間の強電場によって電子雪崩が起きる.	20
3.3	μ -PIC の表面付近における電場構造. 陽極:500V, 陰極:GND(0V), ドリフト電極:-500V.	20
3.4	ガス増幅率の印加電圧による変化. 赤三角が Ar:C ₂ H ₆ =90:10, 青丸が Ar:C ₂ H ₆ =80:20 の混合比で測定 [2].	20
3.5	放電が繰り返されて導通路が形成される様子 (Ar:C ₂ H ₆ =1:1 で試験) [15].	21
3.6	LTCC-GEM の実物及び電子顕微鏡像 [17].	22
3.7	LTCC-GEM の製造プロセスとその性質 [17].	23
3.8	耐アーク放電試験の方法 (上) と試験後の PET 試料の様子 [17].	23
3.9	LTCC μ -PIC の構造ポンチ絵. 淡黄色が LTCC, 黄色が電極 (金ペースト).	24
3.10	従来型 μ -PIC(左) と LTCC μ -PIC(右) のデザインの違い.	24

3.11	実物の LTCC μ -PIC の全体図 (左) と陽極ピクセルの顕微鏡写真 (右). 顕微鏡写真のスケール値は設計値である.	25
3.12	実物の LTCC μ -PIC の全体図 (左) と陽極ピクセルの顕微鏡写真.	25
3.13	LTCC μ -PIC で測定した ^{55}Fe のエネルギースペクトル.	26
3.14	MCA リニアリティテストの回路ブロック図.	26
3.15	MCA のリニアリティテストグラフ.	26
3.16	LTCC μ -PIC のガス増幅率の結果.	27
4.1	タンデム静電加速器試験場の概観	28
4.2	加速器本体の概略図 [21]	28
4.3	LTCC μ -PIC 基板を組み込んだ外部回路及びガスパッケージ, ボード	29
4.4	外部回路の回路ブロック図	29
4.5	重陽子ビームのアライメント調整の様子.	30
4.6	検出器セットアップの状況	30
4.7	放電測定におけるセットアップのブロック図	31
5.1	放電測定のデータ収集フロー図	32
5.2	DSO Roll モードでの放電測定画面例	32
5.3	測定された放電の電流値変化の例	32
5.4	電流値モニターのリニアリティテスト回路ブロック図と実際の回路の写真	33
5.5	放電の電流値波形の積分の仕方	33
5.6	リニアリティテストの結果のグラフ. 横軸: 計算値, 縦軸: 測定値	33
5.7	中性子放電試験の際にコンデンサ①②と抵抗 R を変えることで外部回路と放電の大きさの関係を調べた.	34
5.8	中性子を用いた放電の大きさと陽極への印加電圧, 外部回路の関係性のグラフ.	34
5.9	LTCC μ -PIC の放電率とガス増幅率の関係性のグラフ.	35
6.1	電場構造シミュレーションの条件ポンチ絵. 陽極ストリップ方向から見た図で横軸 x は陽極中心からの距離, 高さ z は絶縁層表面を 0 としている.	36
6.2	μ -PIC のデザインと絶縁層物質の違いによる電場シミュレーション結果グラフ. 黒: 従来型 μ -PIC($\epsilon=3.5$), 青: 従来型 μ -PIC($\epsilon=7.0$), 赤: LTCC μ -PIC($\epsilon=7.0$)	36
6.3	new LTCC μ -PIC と他デザイン μ -PIC の電場シミュレーション結果グラフ. 黒: 従来型 μ -PIC($\epsilon=3.5$), 赤: LTCC μ -PIC($\epsilon=7.0$), 青: new LTCC μ -PIC($\epsilon=3.5$)	37
6.4	new LTCC μ -PIC(右) のデザイン変更点.	38
6.5	LTCC 層の穴がずれてしまったサンプルの断面図 (都立産業技術研究センターに撮影依頼).	39
6.6	二次元読み出しの模式図. 読み出した信号から重心法などで粒子線の位置 (赤く塗りつぶしたピクセル) を特定する.	39
6.7	放電後の LTCC μ -PIC 表面の顕微鏡写真. 右側の放電に使用した領域では陽極陰極間に導通路と思しき変色している部分がある.	40
6.8	走査型光電子分光分析装置	40
6.9	SPES で調査した物質探査結果の一例. 現在調査中.	40

第 1 章 序論

近年の高エネルギー実験分野において、高頻度入射レートの実験による新発見の試みが多数なされている。このような実験で広く用いられていたのがワイヤーチェンバーである Multi Wire Proportional Chamber(MWPC) と呼ばれる検出器で位置分解能・時間分解能に優れている [1]。しかし MWPC は 10^4 cps/cm² 程度より高レートの環境下では耐えられず、より高レートの実験に対応できるガス検出器として研究・開発されたのがマイクロパターンガス検出器 (MPGD) である [2]。MPGD は電子回路基板の作成に利用される微細構造技術で作られるガス検出器で Micro Pixel Chamber(μ -PIC) もその一つである。MPGD は位置分解能・時間分解能・入射許容量に優れている一方で、ごく狭い電極間に高電圧をかけることによる電極間放電が生じやすく、電極が破壊されたり不感領域ができたりと問題になっている。放電による問題を解決する手段の一つとして神戸大学では低温焼結セラミックス (LTCC) を素材に使用した μ -PIC(LTCC μ -PIC) の開発を都立産業技術研究センターと平井精密工業株式会社と共同で進めている。

MPGD 及び μ -PIC を動作する中で放電が繰り返されることで形成される導通路の物質的要因として、基盤の絶縁体に含まれる炭素が関わっていると考えられている。LTCC は炭素を含まない無機物質であるため導通路が形成されづらく、放電が繰り返された後でも動作するとして放電耐性が高いガス検出器となることが期待される。また LTCC μ -PIC は製作過程が従来のもより簡略化されており、製作方法の変更に伴いデザインも一部変更している。

本論文では以下の構成でセラミック素材を用いた μ -PIC の主に放電に対する性能評価を中心とした開発研究について述べる。

第 2 章 ガス放射線検出器

第 3 章 μ -PIC と LTCC μ -PIC

第 4 章 神戸大学海事科学部タンデム静電加速器施設での高速中性子試験セットアップ

第 5 章 放電測定試験結果

第 6 章 議論

第 7 章 まとめ・今後の展望

謝辞

第 2 章 ガス放射線検出器

本章では、入射放射線がガスと引き起こす反応を利用したガス放射線検出器について、代表的な測定器の原理などに触れながら説明する。

2.1 放射線の検出原理

ガス検出器は測定しようとする放射線・粒子線を検出器内のガス分子の電離によって測定する。Ar などのガスで満たされた検出器内を粒子線が通過する際に起きる相互作用によって、粒子線の経路に沿って励起された分子と電離された分子（イオン対）の両方が生成される。生成された電子はそのままでは正イオンと再結合して中性粒子になってしまうので、検出器内に電場をかけることで電子は電場と逆方向に、正イオンは同じ方向に動かすことで再結合を防ぐことができる。また、強電場で加速された電子はガスの種類によって異なるエネルギー閾値（W 値）を超えると周りのガス分子を電離し始める。この現象が連続的に起こることで入射粒子線に電離された電子は雪崩式に増幅される。増幅された電子が移動することにより誘起された電気信号を用いて粒子線の検出を行う。

2.1.1 荷電粒子線による相互反応

入射荷電粒子と物質の相互作用の一つ原子中の電子とのクーロン散乱が挙げられる。この相互作用によって物質内で単位長さあたりに失う平均エネルギー損失は、入射荷電粒子がスピン 0、電荷 q 、質量 M 、速度 v のとき Bethe-Bloch の式に従う（式 2.1）。

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

m_e : 電子の質量, n_e : 電子密度, I : 原子の平均イオン化ポテンシャル

係数 D は式 2.2 で表される。

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

Bethe-Bloch の式で表される荷電粒子のエネルギー損失の例として、銅中での μ^+ の運動量に対するエネルギー損失の関係のグラフを図 2.1 に示す。横軸がミュオン運動量、縦軸はエネルギー損失の平均値である阻止能を表す。

エネルギー損失は $0.1 \leq \beta\gamma \leq 1.0$ の領域では β の二乗にほぼ反比例し、 $1.0 \leq \beta\gamma \leq 1000$ の領域では非常に小さくなっている。また、 $\beta\gamma \approx 3 \sim 4$ にて式 2.3 であらわされる最小値となる。

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

ρ は粒子線が通過する物質の密度、 Z が物質の原子番号、 A は物質の原子量であり、式 2.3 で書ける領域のエネルギーを持つ粒子を Minimum Ionizing Particle (MIP 粒子) と呼ぶ。様々な物質について Bethe-Bloch の式を計算したグラフを図 2.2 に示す。

2.1.2 X 線・ γ 線と物質の相互作用

光子と物質との相互作用は主に、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成がある。これらの相互作用の断面積は光子のエネルギー E と物質の原子番号 Z に依存し、光電効果は $1/E^{3.5}$ 及び Z^5 に比例し、コンプトン散乱は $1/E$ 及び Z に比例する。そして対生成は $E > 10 MeV$ を超えると支配的になり Z^2 に比例する。Ar:CO₂=93:7 の混合気体での光子のエネルギー-質量吸収係数の関係を図 2.3 に示す。

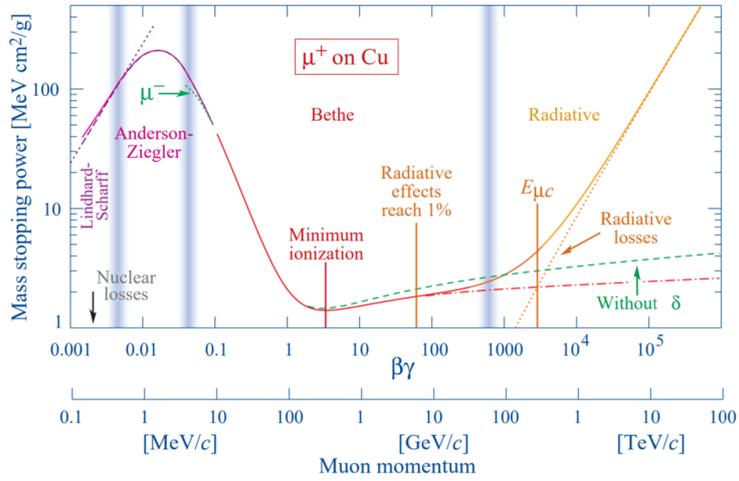


図 2.1 銅中におけるミューオンの運動量エネルギー損失のグラフ [3]. $\beta\gamma \approx 3$ から 1000 の領域での粒子はエネルギー損失の値がほぼ一定で MIP 粒子と呼ばれる.

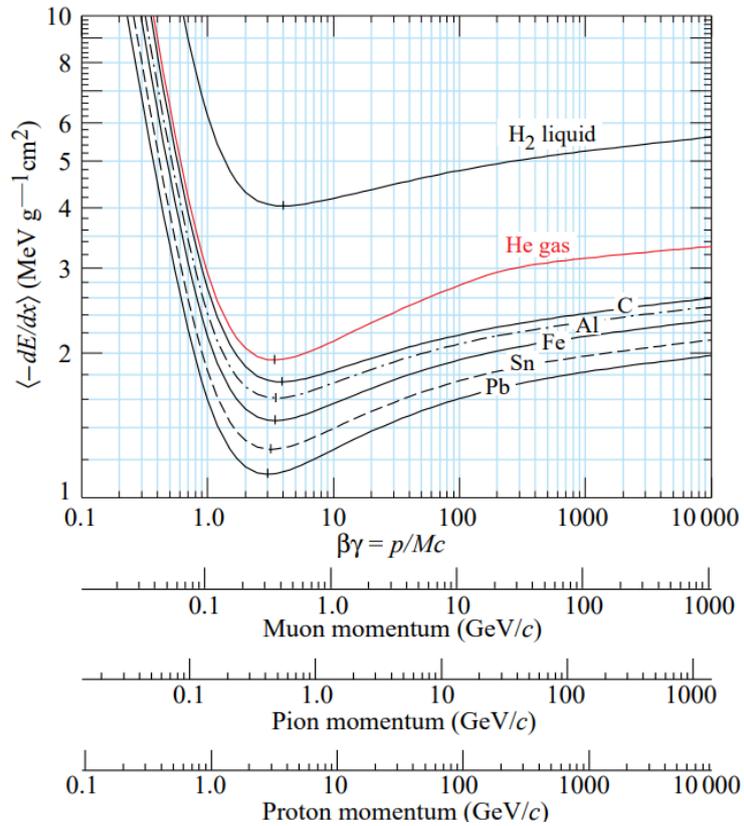


図 2.2 様々な物質中での粒子のエネルギー損失のグラフ [3]. 横軸は各粒子の運動量, 縦軸はエネルギー損失を表す.

光電効果は光子が全エネルギーを原子の軌道電子に与え、その電子が原子から電離する反応である。主な気体の光電効果による光子の吸収断面積と平均自由行程を図 2.4 に示す。

光子のエネルギーが数百 keV までの領域で支配的な相互作用で、光電子は $E_{e^-} = h\nu - E_b$ (E_b は軌道電子の束縛エネルギー) の運動エネルギーを持つ。多くの場合、電子が飛び出した後空になった準位より高いエネルギー準位の電子が落ちて基底状態に戻る時に、その準位間のエネルギーを持った特性 X 線、または同程度のエネルギーをもったオージェ電子が放出される。

コンプトン散乱が支配的になるエネルギー領域は数 100keV~10MeV 程度であり、コンプトン散乱は光子と電子の弾性散乱である。光子が原子内の電子を弾き飛ばし、光子はその分のエネルギーを失った光子になる現象である。散乱後の光子のエネルギー E'_γ は元のエネルギーを E_γ として

$$E'_\gamma = E_\gamma \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos\theta)E_\gamma} \quad (2.4)$$

c は光速、 θ は光子の散乱角である。また、反跳後の電子のエネルギー T は式 2.5 で表される。

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

対生成は γ 線が陽電子と電子の対になるものでそのエネルギーは電子陽電子対にすべて与えられる。エネルギー保存則より光子のエネルギーが電子の静止質量の 2 倍以上のエネルギーを持つときだけ起きる現象であり、物質の原子核によるクーロン場などの電磁場との電磁相互作用により運動量保存則が満たされている。電子のエネルギー E_{e^-} と陽電子のエネルギー E_{e^+} は

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

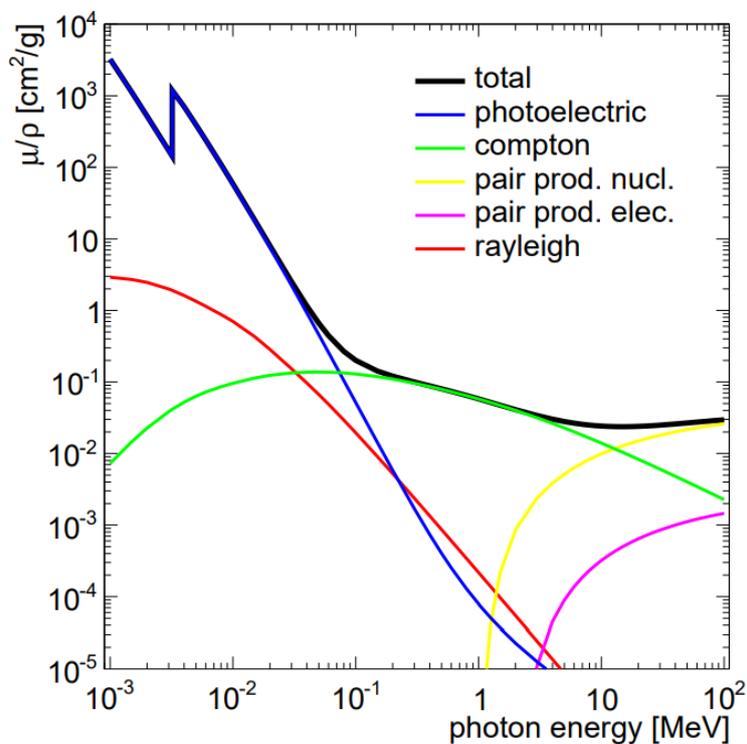


図 2.3 Ar:CO₂=93:7 中での光子のエネルギーと質量吸収係数の関係のグラフ [4]

となる。

2.2 ガス検出器の動作原理

荷電粒子や X 線・ γ 線がガス中を通過する際にガス分子から電離させた電離電子を収集・増幅して検出するのがガス放射線検出器である。本節ではガスを電離した粒子線の信号増幅の仕組みについて触れる。

2.2.1 ガス分子の電離

検出器に満たされたガス中に粒子が入射したとき、その軌跡に沿った位置のガス分子が電離されることで電子が生成される。この最初に電離される電子のことを初期電子と呼び、その数 N_T は粒子が失うエネルギー ΔE とガス分子を電離するときの平均エネルギーである W 値 (W_1) を用いて式 2.7 で表される。

$$N_T = \frac{\Delta E}{W_1} \quad (2.7)$$

ガス原子の電子束縛エネルギーはガス種や混合ガスの比率によって多少異なる。また、混合ガスのを用いた時には励起状態の分子がより低いイオン化電位をもつ第二の気体分子に衝突することで、電子イオン対を生成するペニング効果という過程が存在する。 W 値は励起された希ガス分子が炭化水素などの多原子分子などのクエンチングガスと反応し、電子を生成する過程により混合ガスの場合大きくなる。 W 値の一覧を図 2.5 に示す。この値は放射線の種類やエネルギーに大きくは依存しないことが実験的に分かっている。図 2.5 中の E_x は第一励起エネルギー、 E_I はイオン化エネルギー、一回の衝突で生成される電子とガス分子のイオン対の総数は N_P である。

2.2.2 ガス増幅

電離された一次電子はガス中にかけてられた高い電場によって加速され、大きな運動エネルギーを持つ。加速された電子がガス分子の電子エネルギーより大きいとき更にガス分子を電離 (二次電離) し、また加速されるという過程が連鎖的に続いていく過程をタウンゼント型電子雪崩 (Townsend avalanche) と呼ぶ。この過程は一気圧のガス中に 10^6 [V/m] 以上の領域でおき、雪崩的に電子が増えることを雪崩増幅と呼ぶ。電子が単位長さ dx ドリフトする時の電

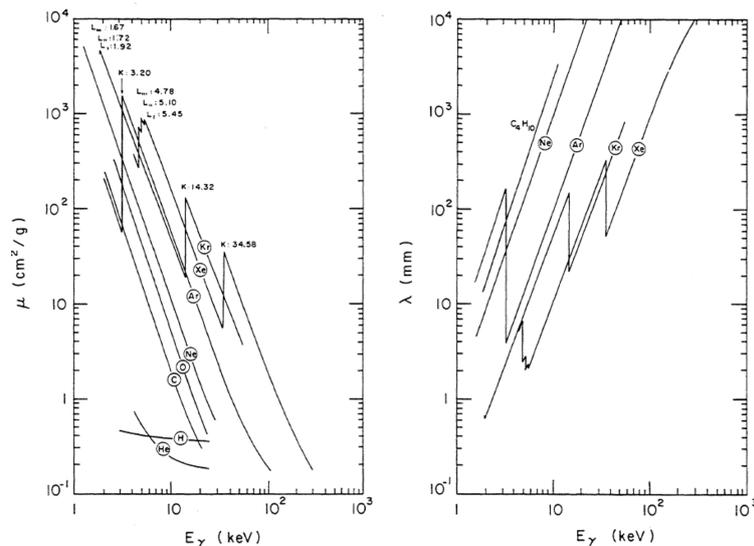


図 2.4 主な気体の光電効果による光子の吸収係数 (左:横軸 光子のエネルギー, 縦軸 吸収断面積) と平均自由行程 (右:横軸 光子のエネルギー, 縦軸 平均自由行程)[5]

子の数が増加される割合は式 2.8 で表せられる.

$$\frac{dn(x)}{n(x)} = \alpha dx \quad (2.8)$$

$n(x)$ は位置 x での電子の数であり, α はガスに対するタウンゼント係数と呼ばれる数で電子の平均自由行程の逆数である. α が x に依存しないとして, 電子が x 進んだ時の増幅率 M は雪崩増幅が起きる初期位置での電子を n_0 とすると式 2.9 で計算できる.

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \quad (2.9)$$

電場が一様でない場合の増幅率は α が位置 x に依存するので, 雪崩増幅が起きる経路に沿って積分した 2.10 の形で書ける. また, α は実験的には電場の大きさやガス圧にも依存する.

$$M = \exp \left[\int \alpha(x) dx \right] \quad (2.10)$$

増幅される過程における電子の分布は図 2.6 のような形をしている.

電子のドリフト速度はイオンに比べてとても大きく, 電子雪崩が形成される間イオンはその場にとどまっているとみなせる. したがって増幅され密集した電子の後ろにイオンが取り残される形となる. 雪崩増幅過程において, 電子雪

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

図 2.5 様々なガスでの W 値一覧 [6]

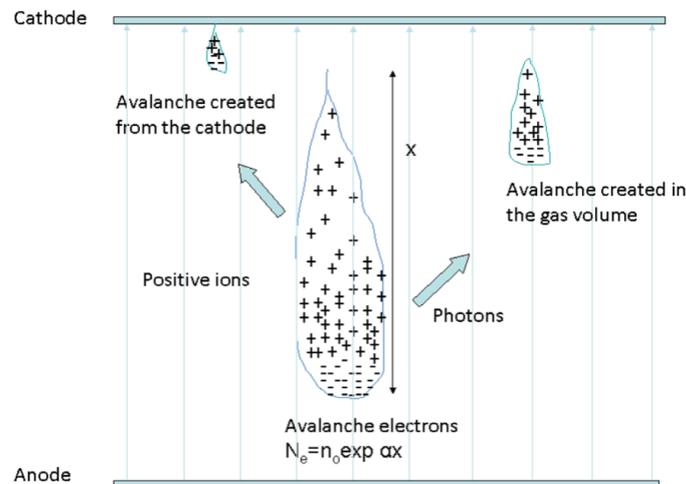


図 2.6 単一電場中における雪崩増幅の形成過程の図 [7]

崩の際に放出される光子がガス電離や陰極との光電効果を起因とした二次的な電子雪崩を生成したり、ガス領域の電場がスペースチャージ効果で乱されることで、増幅が収束せずに放電破壊を引き起こす事がある。電子雪崩が放電に至るときの総電子数の閾値を Raether limit と呼び、増幅率は初期電子数に依存して式 2.11 のように表される。

$$M = 10^8/n_0 \quad (2.11)$$

Raether limit の実効値は増幅領域の大きさなど検出器のジオメトリに依存し、Micro Pixel Gaseous Detector(MPGD) などでは α の値が大きくなるため $10^6 \sim 10^7$ ほどになる。

2.3 様々なガス検出器

現在に至るまで、高エネルギー物理実験において様々な粒子検出器が開発されてきた。ここでは代表的なガス検出器及びそれらの構造をいくつか紹介する。

2.3.1 比例計数管

比例計数管は 1940 年後期に導入された基本的なガス検出器で、図 2.7 のように陰極となる円筒状の金属容器内がその中心にあつ陽極となるワイヤーを囲む構造をしている。ガス増幅のための電場 E は、陽極・陰極間にかかる電場 V と陽極半径 a 、陰極内径 b そしてシリンダーの半径 r に関して

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad (2.12)$$

となる。入射粒子によってガス分子から電離された電子は陽極線方向へドリフトした後陽極のすぐ近くの強い電場によって電子雪崩を引き起こす。増幅された大量の電荷の移動によって陽極に信号が誘起され、電気信号として測定される。この時の陽極からの距離に関する電場の大きさを図 2.8 に示す。

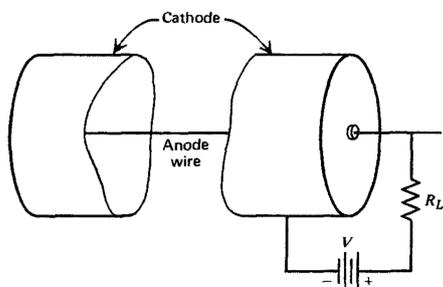


図 2.7 基本的な比例計数管の構造 [8]

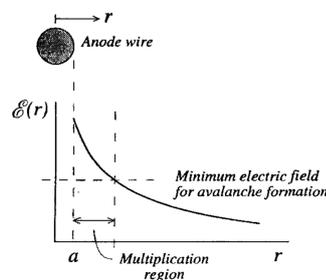


図 2.8 陽極線からの距離に関する電場変化の様子 [8]

比例計数管には主に比例モードとガイガーモードの二つのモードで動作させる (図 2.9)。比例モードは陽極ワイヤーの近くで局所的に雪崩増幅が起き、取得される信号は荷電粒子線によって電離された初期電子の数に比例する。ガイガーモードは陽極に比例モードより大きい電圧を印加することで一次電子雪崩から派生して二次的、もしくは複次的な電子雪崩を引き起こさせる。前節で説明したように複次的な電子雪崩によって放電が起きることで陽極ワイヤー全体に沿って放電が起きることで粒子線の数を知る。この時の放電は検出器の回路に含まれる抵抗の電圧降下やクエンチングガスによって長期的に継続しないように抑えられている。

2.3.2 Multi Wire Proportional Chamber(MWPC)

Multi Wire Proportional Chamber(MWPC) は 1968 年に Georges Charpak によって発明された [1]。比例計数管を並べたような構造で、図 2.10 のように二つの平行極板 (陰極) の中間に陽極線が平行に並んでいる。陰極をグラウ

ンドに接続し陽極線には +HV を印加することで陽極周りに図 2.11 のような強電場を作り出す。MWPC のガス領域内で電離された電子は陽極線方向にドリフトされた後、陽極近くで雪崩増幅され、信号として読みだされる。

また、陰極板を分割した平行ストリップに変更し、上下のストリップが直交するように配置することで増幅された電子の二次元位置を読み出すことを可能としたデザイン (図 2.12) も同じく Charpak らによって開発されている [7]。

2.3.3 Micro Strip Gas Chamber(MSGC)

MWPC は位置感度に優れた検出器で多くの実験などに応用された一方で、陽極ワイヤーに対して垂直方向の位置分解能に限界がある。ワイヤーのピッチが小さすぎるとワイヤー同士が電氣的に反発するため陽極線同士の間隔に限界値が存在し、大型化するのが困難ではあるがガイガーモードで動作させた $\sim 0.3\text{mm}$ ピッチの MWPC が限界である [7]。

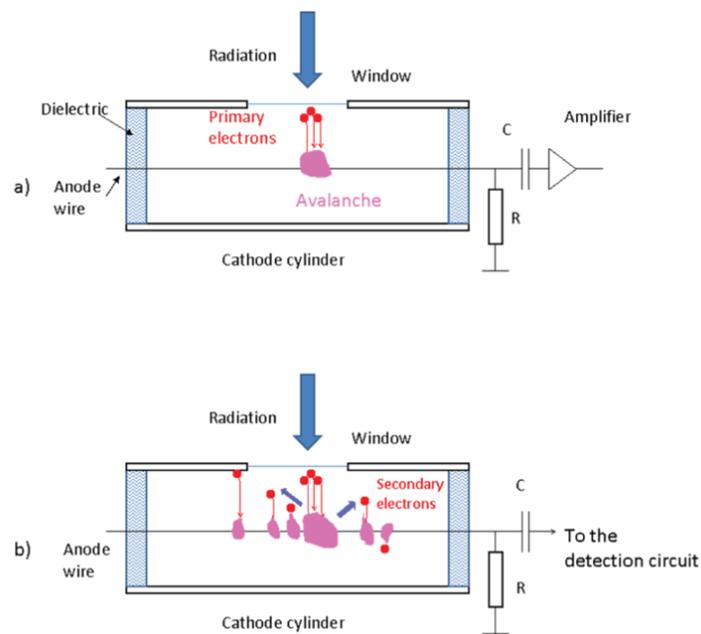


図 2.9 比例計数管の動作モード a) 比例モード, b) ガイガーモード [7]

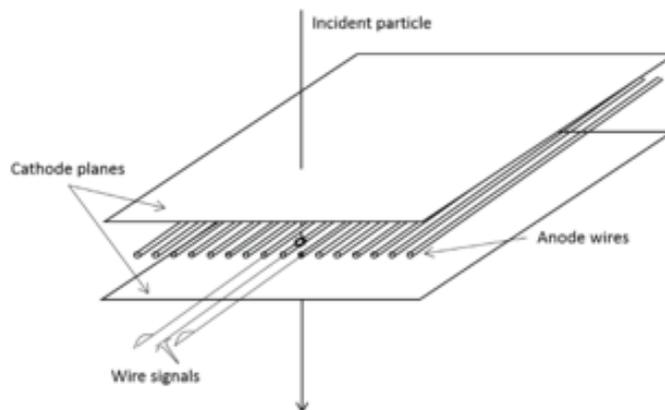


図 2.10 MWPC の構造デザイン図 [7]

この問題を解決するために 1988 年に A. Oed によって発表されたのが MSGC(Micro Strip Gas Chamber) である [9]. MSGC の構造を図 2.13 に示す. 半導体素子などに用いられるフォトリソグラフィック技術を利用することで, 絶縁体層上に極細い金属の陽極ストリップ ($\sim 10\mu\text{m}$) と陰極ストリップを形成することが可能になった. MSGC の陽極に陰極より高い正の電圧をかけることで, 電極間に MWPC と同等の強い電場を作ることができる. 図 2.14 は陽極・陰極間の距離が $250\mu\text{m}$ のときの基板付近の電場構造である. 雪崩増幅で生成された電子は電場によって陽極ストリップへ収集され, 電子と対になって生成される陽イオン雲は陰極までドリフトする距離が短いので直ぐに陰極へ退けられる. 陽イオンの除去が早くなりスペースチャージ効果が抑えられたことで電場の平均値が MWPC より大きくなり, 計数容量も MWPC に比べて高くなる. 図 2.15 は MWPC と MSGC のガス増幅率を計数率の関数として示したものであり, MSGC の増幅率の減少が起きるのは MWPC に比べて 100 倍以上高い計数率になってからであることがわかる.

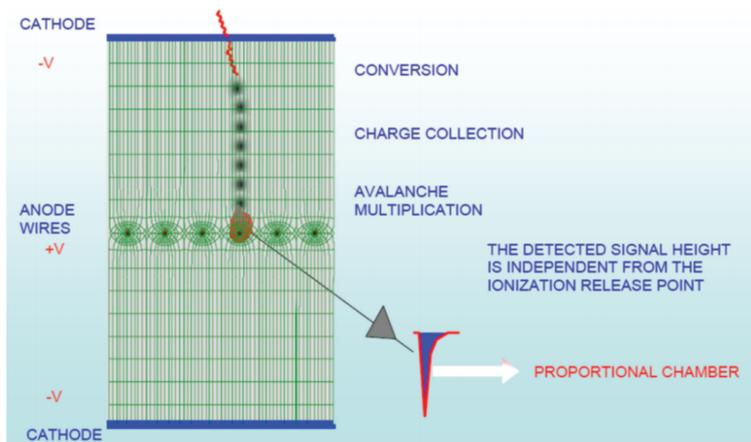


図 2.11 MWPC の断面図方向から見た電場構造 [7]

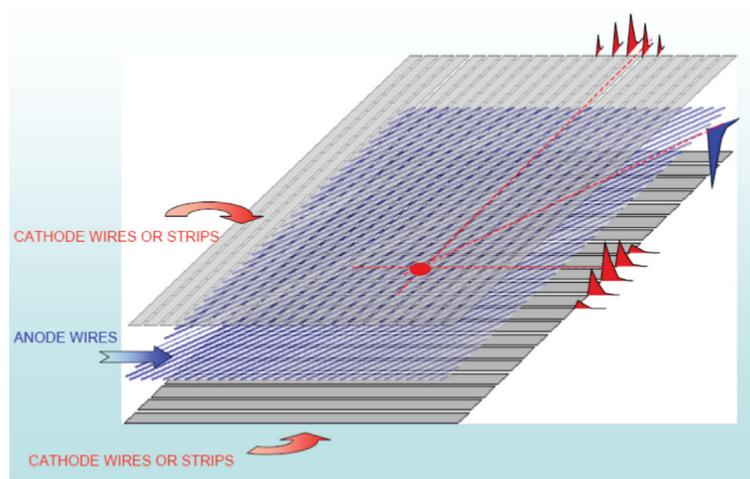


図 2.12 ストリップ状陰極を導入した修正版 MWPC[7]. 陰極からの信号を重心法を用いて解析することで高位置分解能を達成できる.

2.3.4 GEM(Gas Electron Multiplier)

GEM(Gas Electron Multiplier)とは両面に金属(主に銅)層が被覆された薄い絶縁体に格子状の高密度の穴をフォトリソグラフィック技術によってエッチングしたものであり、1997年にF. Sauliらによって開発された[11]。図2.16は金属被覆された厚さ $50\mu\text{m}$ のポリイミドをエッチングしたGEMの電極付近の写真である。直径 $70\mu\text{m}$ の穴が $140\mu\text{m}$ ごとにあけられた構造となっている。両面の電極にそれぞれ正負の異なる電圧をかけることで図2.17のような穴を貫く形態の高電場を形成している。電離電子はドリフト(トップ)電極による電場によってGEMの穴方向にドリフトされ、穴内の高電場によって増幅、トランスファー(ボトム)電極による電場によって穴の外方向へ移動させられる。GEMは単体で検出器として用いること、もしくは前段増幅機構として他の検出器(MSGCなど)と組み合わせ動作させることも可能である。図2.18はtriple-GEMと呼ばれるGEMを三段重ねて動作させる時のセットアップ図であり、このように複数段のGEMを組み合わせることで高いガス増幅率を実現することが可能である。GEMの使用枚数を変えたときのとガス増幅率の変化を表したのが図2.19であり、triple-GEMのとき1万以上の増幅率を達成していることがわかる。また、GEMを複数段用いる際に、実効的な増幅率に対してGEMの印加する電圧を小さくできるので放電を抑えることも可能である。

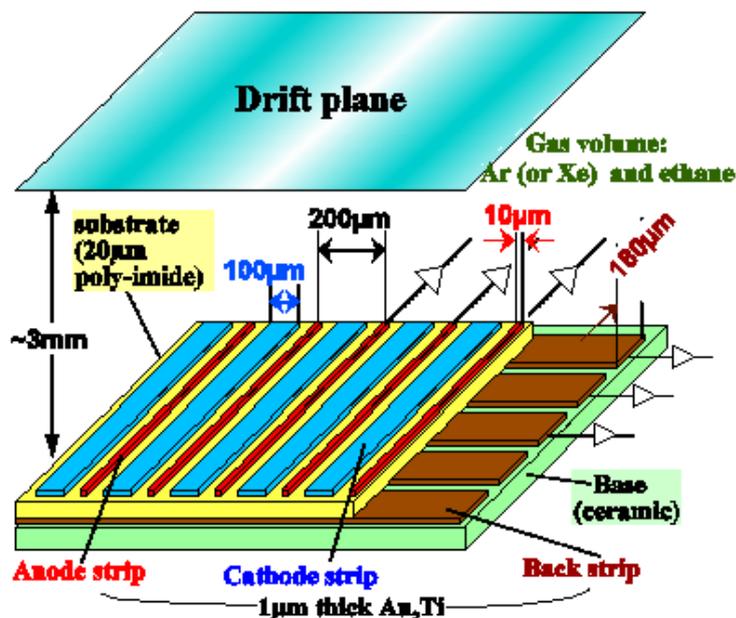


図 2.13 MSGC の概略図 [10]

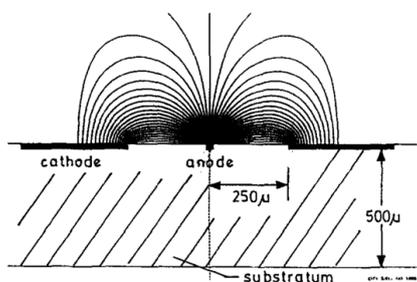


図 2.14 MSGC の電極付近の電場構造 [9]

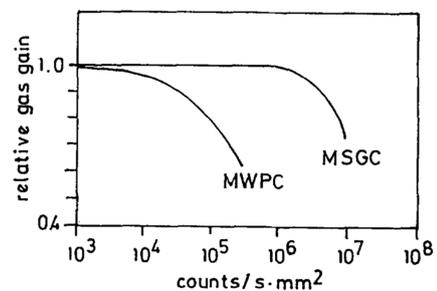


図 2.15 MWPC と MSGC の計数率に対する増幅率の変化 [9]

2.3.5 Micromegas(Micro-mesh-gaseous structure)

MWPC は雪崩増幅の際に生成される陽イオンのドリフト速度が数 $10\mu\text{s}$ と遅いためスペースチャージ効果によって計数容量に限界がある。この制限を打破するために開発されたのが MSGC であるが、絶縁体表面上の breakdown が原因で増幅率が 10^4 を超えることができない。増幅率が増えてくると陽イオンの除去が間に合わずに絶縁層表面に陽イオンが堆積し、局所的に増幅率を下げるような電場を形成する。この問題の解決を目指して Y. Gionataris らによって考案されたのが Micromegas(Micro-mesh-gaseous structure) chamber である [13]。

図 2.20 は Micromegas の動作原理の概略図である。金属メッシュ電極が絶縁層の約 $100\mu\text{m}$ 上に絶縁体ピラーを使って設置され、絶縁層表面には信号読み出し用の陽極ストリップがある構造になっている。電離電子はメッシュ陰極と 3mm ほど上方にあるドリフト陰極間(ドリフト領域)に形成される 1kV/cm ほどの電場によって読み出し電極方向へドリフトさせられ、メッシュ陰極と読み出し電極間(増幅領域)の 100kV/cm 程の高電場によってガス増幅される。狭い増幅領域に高電場を形成することで陽イオンは読み出し電極付近から 100ns 程で素早く除去されるようになり、 10^5 近くの高増幅率を達成できる(図 2.21)。

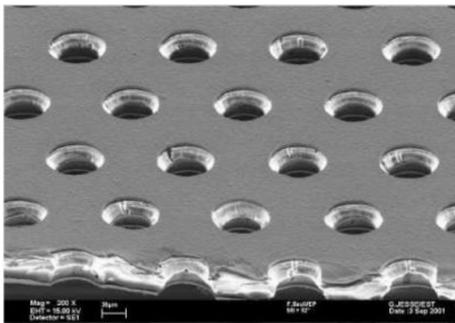


図 2.16 GEM 電極付近の電子顕微鏡による拡大写真 [12]

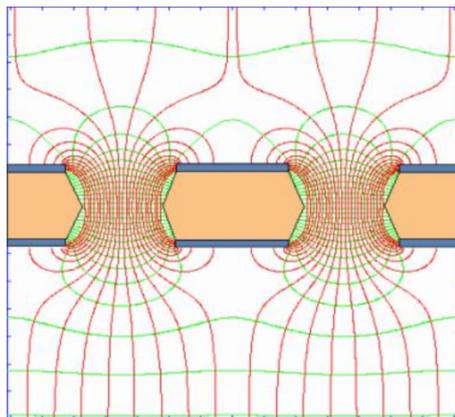


図 2.17 GEM 両面の電極間の電場及びドリフト・トランスファー電場の電気力線(赤線)と等電位線(緑線) [12]

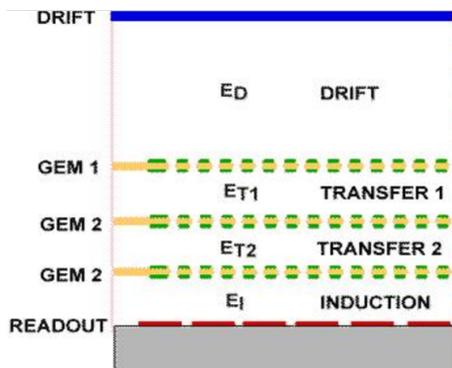


図 2.18 triple-GEM の構造図 [12]。ドリフト領域で生成された電離電子は GEM1~3 を通りながら増幅され、底面の読み出し回路で信号読み出しされる。

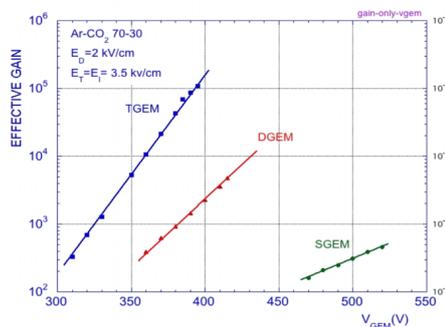


図 2.19 一段(緑:SGEM)、二段(赤:DGEM)そして三段(青:TGEM)の GEM を使用した際の印加電圧とガス増幅率の関係(複数段の GEM を用いた際、各 GEM には等しい電圧をかけている)。 [12]

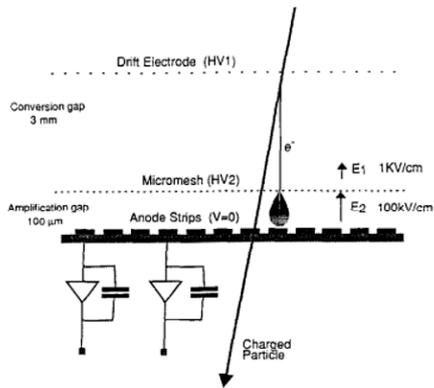


図 2.20 Micromegas の動作概略図 [13].

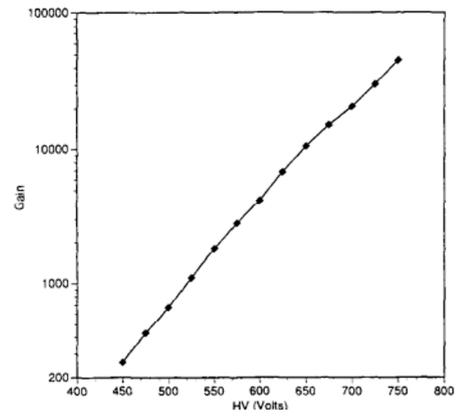


図 2.21 Micromegas の陽極印加電圧によるガス増幅の変化 (大気圧の Ar:CH₄ = 90:10 で動作) [13].

第3章 μ -PIC と LTCC μ -PIC

MSGC の利点を生かしつつワイヤーチェンバーのような陽極に強電場が集中し、陰極で電場が弱い放電が起きにくい電場構造をつくるものとして 2001 年に越智敦彦及び谷森達によって考案されたのが μ -PIC である。本章では μ -PIC と本研究で開発研究している LTCC μ -PIC の構造について述べる。

3.1 μ -PIC の構造と動作

μ -PIC の基本的な構造は図 3.1 のように、厚さ $100\mu\text{m}$ のポリイミド基板の両面に垂直に $400\mu\text{m}$ 間隔で配置した陰極と陽極ストリップからなり、プリント回路基板 (PCB) 技術を用いて作られている。陰極はストリップ方向に $400\mu\text{m}$ 間隔で $200\mu\text{m}$ 径の円形の穴があり、 $50\mu\text{m}$ 径の同心円の穴が基板を貫いており陽極ピクセルを形成している。陽極と陰極ストリップが直交している構造で粒子位置の二次元読み出しが可能になっている。

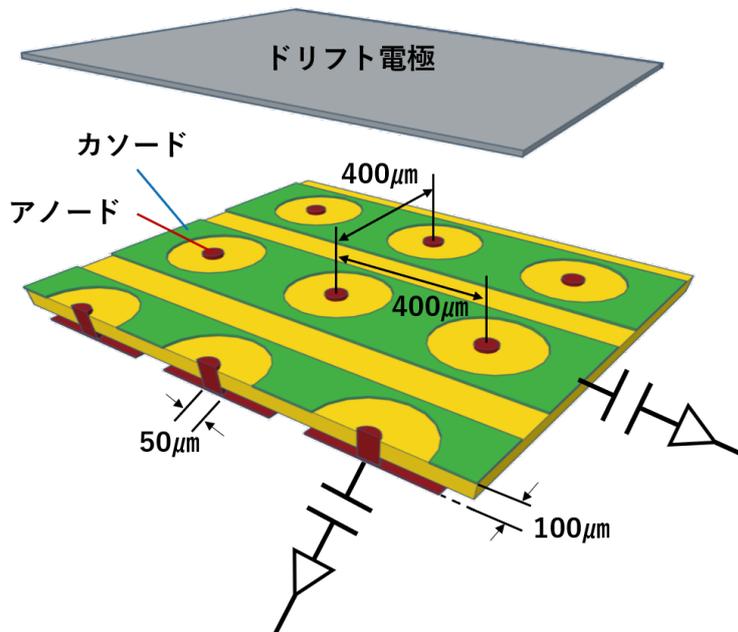


図 3.1 μ -PIC の基本構造

μ -PIC を動作させる際には、ガスを密封した容器 (ガスチェンバー) 内に μ -PIC を設置し、検出器表面から数 mm ～数 cm の高さの場所に、電子を検出器表面へドリフトさせるための電場を形成するドリフト電極と呼ばれる板状の電極を平行に設置する。ドリフト電極には数百 V ～数 kV の負電圧が印加され、陽極に数百 V の正電圧そして陰極は 0V にして動作させる。また、封入する混合ガスは様々なものを使うが ArCO_2 混合ガスや ArC_2H_6 混合ガスがよく用いられる。チェンバー内に入射した粒子線はガス分子を電離して電子・陽イオン対を生成し、生成された電子は μ -PIC 表面へドリフトして陽極と陰極が形成する高電場によって雪崩増幅される (図 3.2)。増幅された電子は陽極に、陽イオンは陰極に収集され、電荷の移動によって信号が誘起される。図 3.3 は μ -PIC 表面付近における電場の強さを、電場計算のための有限要素法におけるメッシュ作成ソフトウェア Gmsh と偏微分方程式を解くための有限要素法 (FEM) ソフトウェア Elmer を使用して計算 (シミュレーション) したものである。陽極に 600V、陰極は GND、検出器から 3mm 上にあるドリフト電極は -500V の電圧が印加されたときのシミュレーションである。陽極付近の高電場により十分な電子増幅を起こしつつ陰極付近では電場が比較的小さくなっているため陰極からの電子放出による放電が起き

にくくなっている。また、増幅率は最大で 10^4 まで到達可能であり、図 3.4 は ^{55}Fe X線線源 (5.9keV) を用いてガス増

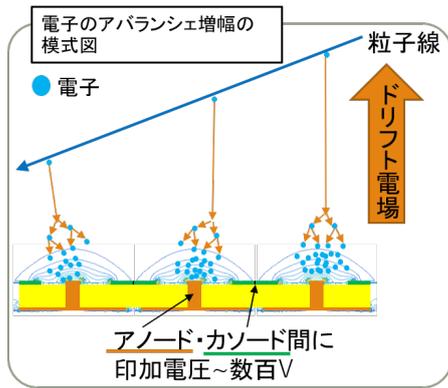


図 3.2 Micromegas の動作概略図 μ -PIC における電子雪崩増幅の様子。陽極陰極間の強電場によって電子雪崩が起きる。

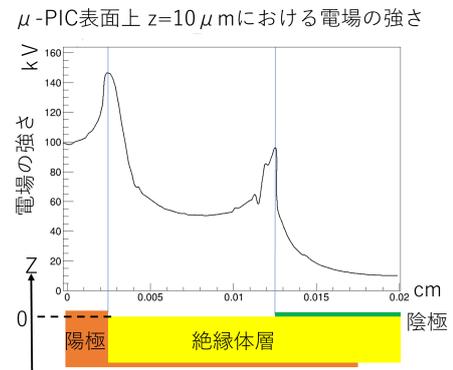


図 3.3 μ -PIC の表面付近における電場構造。陽極:500V, 陰極:GND(0V), ドリフト電極:-500V.

幅率の印加電圧による変化を測定した結果である。

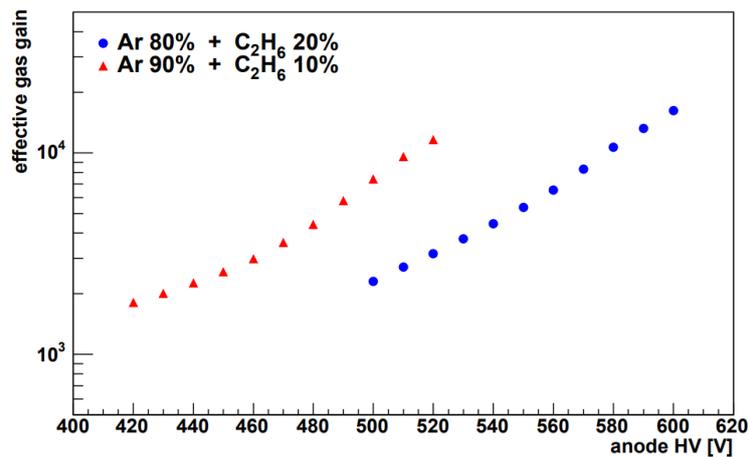


図 3.4 ガス増幅率の印加電圧による変化。赤三角が Ar:C₂H₆=90:10, 青丸が Ar:C₂H₆=80:20 の混合比で測定 [2].

3.2 μ -PIC の問題点

μ -PIC などの MPGD は電極間が狭いため、電極間の放電によって検出器として動作しなくなることがあるという問題が存在する。MPGD は陰極と陽極が基板である絶縁体上に繋がっているため、電極間で放電が繰り返されると基板上に陽極と陰極が導通路で電氣的に繋がってしまうことがある。導通路が形成されると電極間に電圧を印加できなくなり、検出器として動作できない不感領域ができてしまう。図 3.5 は放電が繰り返された結果、陽極陰極間の絶縁体基板上に炭化されたガス分子由来の炭素など導電性物質が蓄積して導通路が形成される様子を電子顕微鏡で撮影した写真である。放電が繰り返されることで最終的には完全に導通路が形成される。

μ -PIC において放電が起きるのは Raether limit を超えたときなので、放電が起きやすいのは高増幅率で動作させたとき、もしくはガス分子に対して大きなエネルギーを落とす放射線が入射したことで初期電離電子が大量に生成さ

れたときである。MeV 程度のエネルギーをもつ陽子や α 線はエネルギーデポジットが大きいですが、ガスチェンバーの蓋などで簡単に止まってしまうためガス中に大きなエネルギーを落とすことはない。問題となるのはハドロン衝突実験のような高速中性子が発生する環境下で、ガス分子の原子核と中性子が反応することで MeV 程度のエネルギーをもつ反跳原子核が確率的に発生する。この原子核は短距離に大きなエネルギーを落とすことで、放電の原因となることが多い。

本研究では μ -PIC の放電問題への対策としてセラミック素材を用いた μ -PIC の開発研究を行っている。導通路の原因となる主な導電性物質は炭素であると考えられており、絶縁体であるポリイミドが放電により炭化して導通路となりやすい。無機素材であるセラミックを絶縁体基板に使用することで放電が起きても導通路が形成されにくい検出器となることが期待される。次節でセラミック素材の特性とデザインの変更点などについて述べる。

3.3 LTCC μ -PIC

導通による放電問題の解決案として絶縁体部分にセラミック素材を用いた LTCC μ -PIC の開発研究を行っている。セラミック素材についてについて述べた後従来の μ -PIC とのデザインの変更点について説明する。

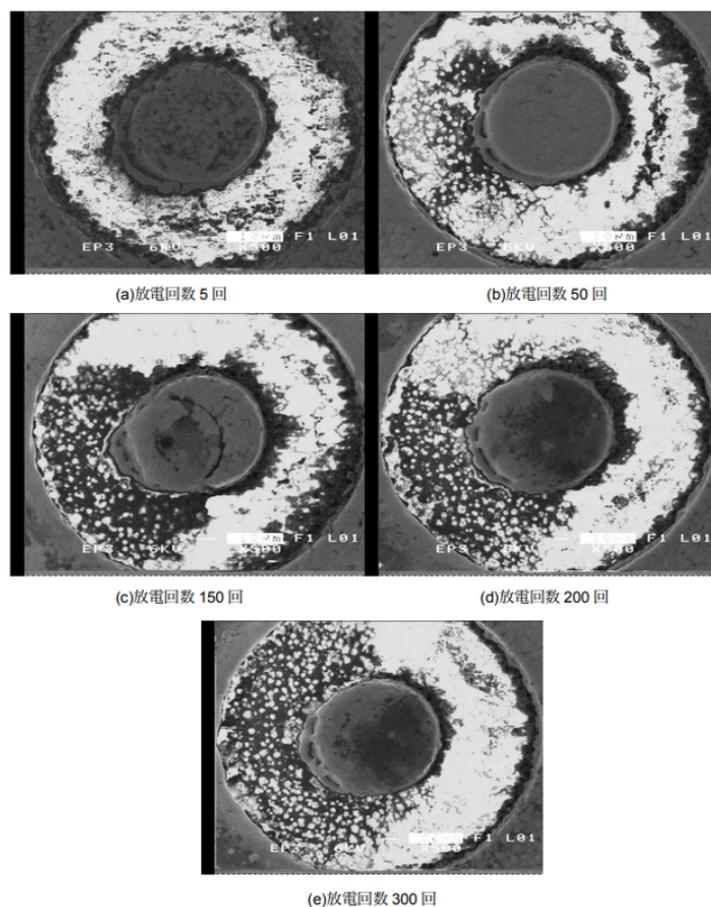


図 3.5 放電が繰り返されて導通路が形成される様子 (Ar:C₂H₆=1:1 で試験) [15]

3.3.1 低温焼結セラミックス (Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC)

本研究では低温焼結セラミックス (Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC) を使用した μ -PIC の開発をしている。LTCC とは一般的なセラミック素材の焼成温度 (1600°C) より低温である 900~1000°C で焼成することができるセラミック素材である。LTCC 基板として用いる際に従来のモリブテンやタングステンの代わりに低導通抵抗体である金や銀を内部導電体として使用できること、比誘電率がアルミナ基板より小さいことにより信号遅延が小さいことが特長である [16]。アルミナを主成分としていたアルミナセラミックスに対して、骨材となるアルミナにホウ酸系ガラス ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$) を混ぜて製作される。

ガス検出器の素材に用いられた前例として、東京都立産業技術研究センターの小宮一毅らによって LTCC を用いた GEM(LTCC-GEM) の開発研究が進められている。図 3.6 に実際の LTCC-GEM 及び電子顕微鏡でみた GEM のホールの様子を示す。厚さ 100 μm もしくは 200 μm の LTCC 基板に直径 100 μm の穴が 200 μm ピッチで開けられた構造になっており、電極には金が使用されている。最大増幅率は 1 万倍程で、放電が 1 万回以上起きても検出器として壊れないことが確かめられている。LTCC μ -PIC 及びこの LTCC-GEM は平井精密工業株式会社に依頼して製作し

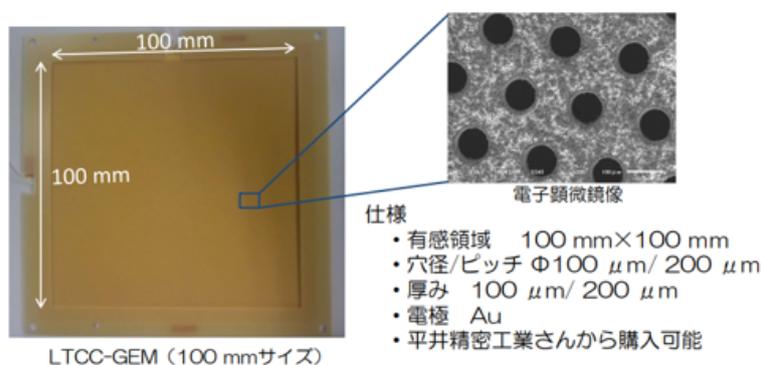


図 3.6 LTCC-GEM の実物及び電子顕微鏡像 [17].

たものであり、LTCC-GEM の製造プロセス及び材料特性を図 3.7 に示す。LTCC を焼き固める前のグリーンシートに電極となる金ペーストを付けてポンチ加工してから焼成するという、エッチングによってホールをあけている一般的な GEM と比べて簡略化された製造プロセスになっている。また LTCC は従来の GEM に用いられたポリイミドなどと比べて、耐アーク放電試験の結果から、放電による物理的な破壊に強く導通路ができにくい特徴がある (図 3.8. 耐アーク放電試験 JIS K 6911 : 試験片表面上にあてた二本のタングステン電極間にアーク放電を発生させ、試料が破壊されてアーク放電が消滅するまでの時間を計測する [18])。耐アーク性と無機素材であることから、LTCC は放電が起きても導通しにくいガス検出器の開発に適していると考えられる。

一方で、LTCC はポンチ加工で穴をあけるという工程上、開けられる穴径が小さすぎるもしくは穴径に対して LTCC の厚さが厚すぎる場合にポンチ用の針が折れてしまう可能性がある。 μ -PIC のような製造する上で穴径の小さいポンチ加工をする必要があり、GEM に比べて複雑な構造をもつ検出器の素材として LTCC が用いられるのは本研究が初めてである。次節では実際に製作した LTCC μ -PIC の構造について説明する。

3.3.2 LTCC μ -PIC の構造

LTCC μ -PIC の構造を表した図を図 3.9 に示す。基本的な構造は従来型の μ -PIC とおなじで 400 μm 間隔の陽極と陰極と絶縁体層から構成されており、陽極のピクセルを囲むように陰極には 250 μm の穴が空いている。絶縁層は LTCC で陽極と陰極は金ペーストで作られている。デザインの大きな変更点は絶縁層の厚さとそれに伴う円柱状の陽極ピラーの形であり、図 3.10 は従来型の μ -PIC と LTCC μ -PIC の違いを断面方向から表したものである。従来の μ -PIC では直径 50 μm の穴をポリイミドにあけることが技術的な限界値が 100 μm 程度であるため陽極ピラーの高さ

と幅のアスペクト比は 100:50 であった。LTCC の場合は $50\mu\text{m}$ 径の穴をあけることができる厚さの限界値は $50\mu\text{m}$ ほどであるが、LTCC 層を重ねることによって陽極ピラーの高さを $200\mu\text{m}$ にすることでピラーの高さと幅のアスペクト比を従来のデザインよりも大きくすることが可能である。陽極ピラーのアスペクト比を大きくすることによって同じ印加電圧に対して陽極ピクセル付近の電場を増大させてガス増幅率の向上を目指した。LTCC 層を積層するにあたり製作工程中に各層のピラーにズレが生じる可能性があるので、2 層目の陽極ピラーの直径を $70\mu\text{m}$ 、3 層目と 4 層目の直径を $100\mu\text{m}$ にすることで多少ずれでも補えるようにしてある。

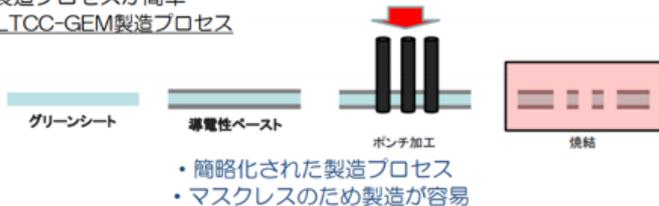
LTCC μ -PIC の製作は平井精密工業株式会社に依頼しており、実際に作っていただいた試作機の写真が図 3.11 である。20mm \times 20mm の範囲に 48pixel \times 48pixel の陽極ピクセルが作られており、この全ピクセルの内検出器中心部の 16pixel \times 16pixel は個別に電圧を印加できるように設計されている。

3.3.3 LTCC μ -PIC の動作確認

LTCC μ -PIC がガス検出器として正常に動作するかどうかを確認するために、 ^{55}Fe X 線放射線源を用いたガス増幅率の測定を行った。 ^{55}Fe から放出される 5.9keV の X 線の信号を MCA(Multi-Channel Analyser) で取得し、そのエネルギーピークから増幅率を計算する。図 3.12 は増幅率測定に用いたセットアップ図である。ドリフト電極には -500V を一定にかけており、陽極は 500V 前後の大きさで少しずつ変えながら増幅率と印加電圧の関係を測定した。また、陰極は GND に落としている。使用した混合ガスは Ar:CO₂=93:7, 85:15, Ar:C₂H₆=90:10 の三種類を用いた。雪崩増幅されて陽極から読み出された信号はプリアンプ (ORTEC 142PC PREAMPLIFIER) で更に増幅された後シェイパー (ORTEC 579 FAST FITER AMP) で整形され、オシロスコープで波形を確認しつつ MCA で信号の大きさを取得した。このとき +HV モジュールに付属している電流値モニターの信号を見て放電により導通していないか確認しながら測定した (導通した場合、数 μA 以上の定常電流が観測される)。MCA は取得した信号のエネルギー (波高) をチャンネルごとに分けて記録する装置で、今回は 1V/2024MCAbin に分けて測定した。計測したエネルギースペクトルの例を図 3.13 に示す。混合ガス Ar:C₂H₆=90:10 を用いて陽極への印加電圧が 500V のときのスペクトル

LTCC-GEMの特徴

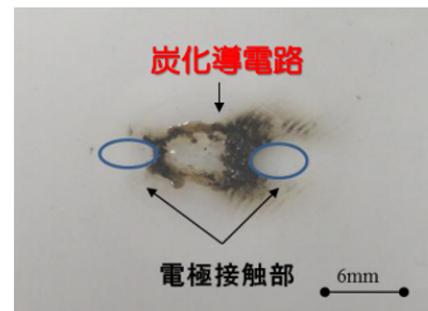
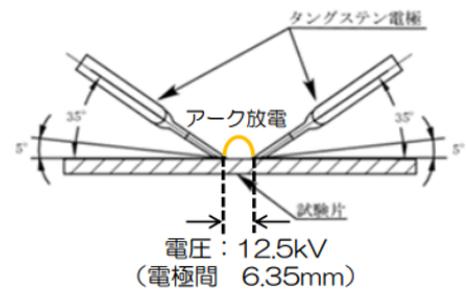
(1) 製造プロセスが簡単
LTCC-GEM製造プロセス



(2) LTCCは放電に強い

材料		従来 フィルムGEM		今回
		polyimide	LCP	セラミックスGEM LTCC
耐電圧	kV \cdot mm ²	22	26-40	> 15
耐アーク放電 試験	Sec	135	186	> 300
融点	°C	< 800	< 450	> 800

・無機材料なので放電に強い



PET 82秒後

図 3.7 LTCC-GEM の製造プロセスとその性質 [17].

図 3.8 耐アーク放電試験の方法 (上) と試験後の PET 試料の様子 [17].

であり、縦軸が各チャンネル (エネルギー) のイベント数、横軸が MCA のチャンネル (MCABin) である。 ^{55}Fe の X 線のエネルギースペクトルは既知であるので、5.9keV の特性 X 線にあたるピークをフィットしてその MCABin の値を求める。この MCABin 値を電荷量に換算することで増幅率を計算する。増幅率の計算は

$$\text{ガス増幅率} = \frac{\text{測定された電荷量 [pC]}}{^{55}\text{Fe の X 線によって電離された初期電子の総電荷量 [pC]}} \quad (3.1)$$

で求める。初期電子の電荷量は Ar の W 値 (第 2 章)26eV, ^{55}Fe の X 線エネルギー 5.9keV より

$$1.60 \times 10^{-7}[\text{pC}] \times \frac{5900[\text{eV}]}{26[\text{eV}]} = 3.63 \times 10^{-5}[\text{pC}]. \quad (3.2)$$

測定された電荷量については、まずパルスジェネレータとプリアンプのテスト端子を用いて電荷量のわかる信号を MCA で取得し、電荷量と MCABin のリニアリティテストを行う。その結果を用いてエネルギースペクトルから求めた MCABin 値を電荷量に換算した。測定したガス増幅率の結果が図 3.16 である。横軸が陽極に印加した電圧、縦軸

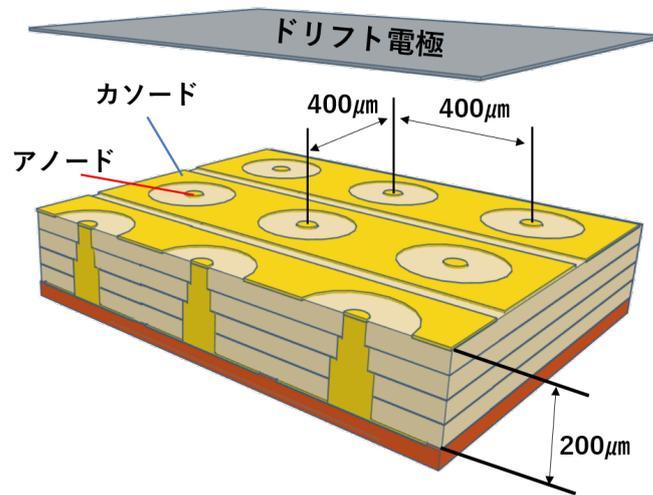


図 3.9 LTCC μ -PIC の構造ポンチ絵。淡黄色が LTCC, 黄色が電極 (金ペースト)。

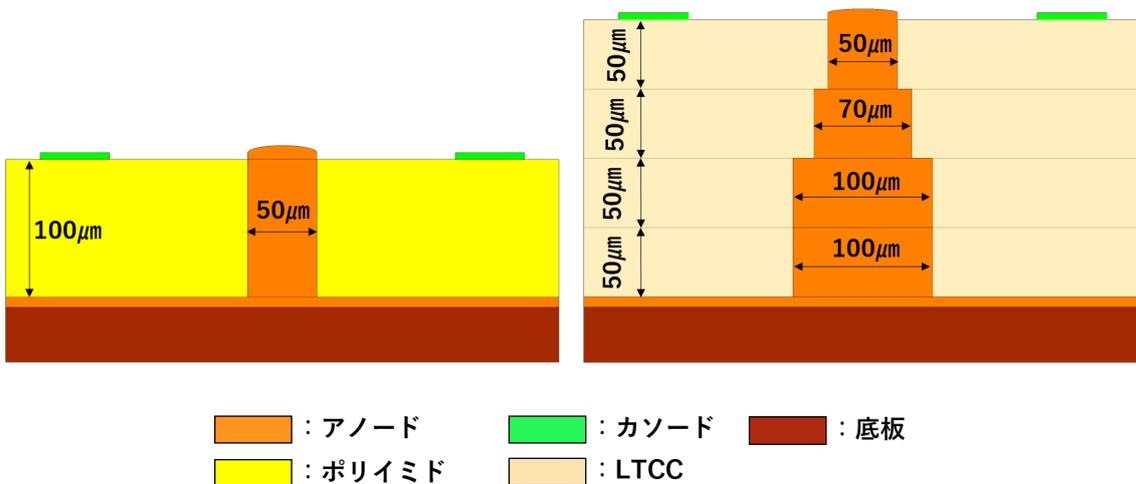


図 3.10 従来型 μ -PIC(左) と LTCC μ -PIC(右) のデザインの違い。

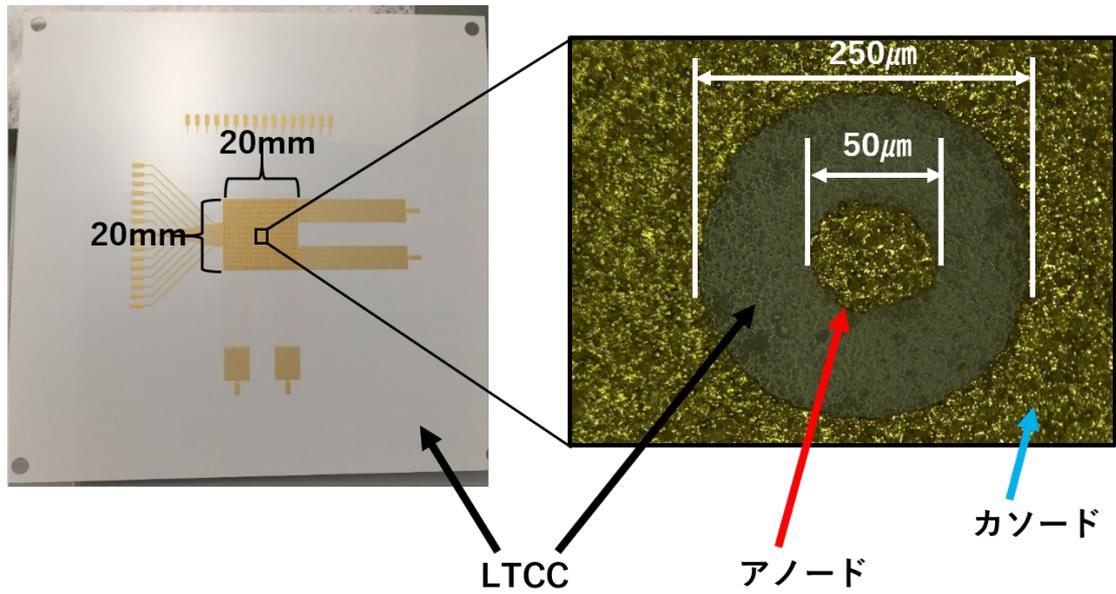


図 3.11 実物の LTCC μ -PIC の全体図 (左) と陽極ピクセルの顕微鏡写真 (右). 顕微鏡写真のスケール値は設計値である.

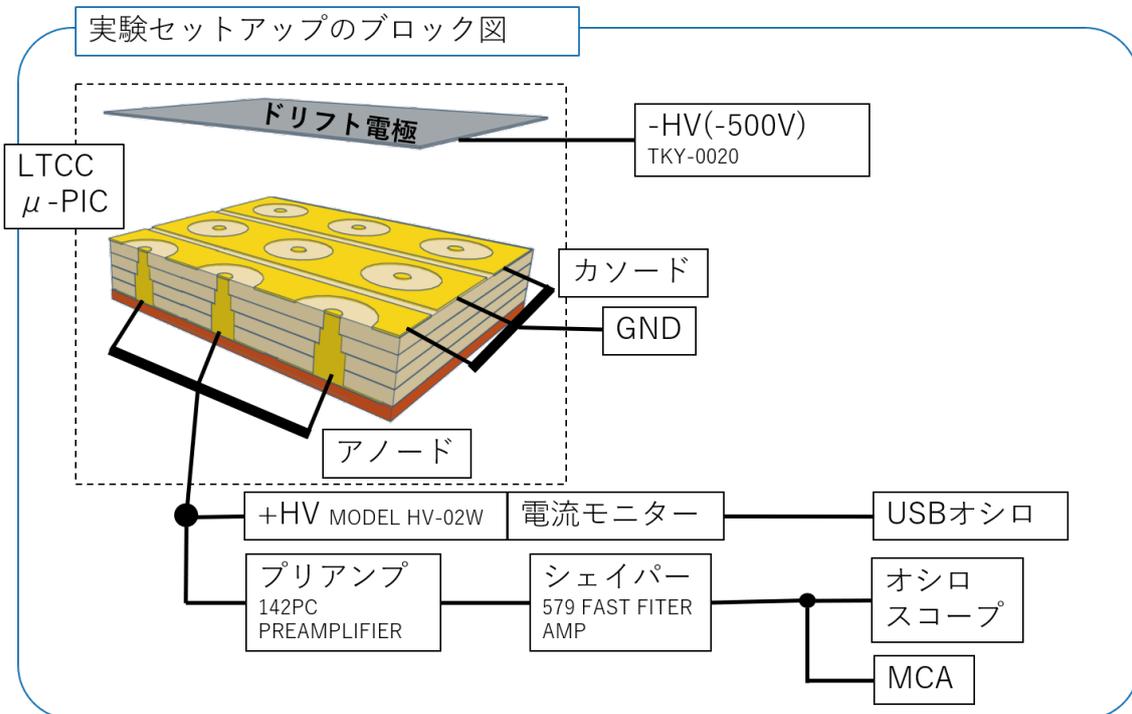


図 3.12 実物の LTCC μ -PIC の全体図 (左) と陽極ピクセルの顕微鏡写真.

^{55}Fe エネルギースペクトル Ar:C2H6=90:10, Va=500

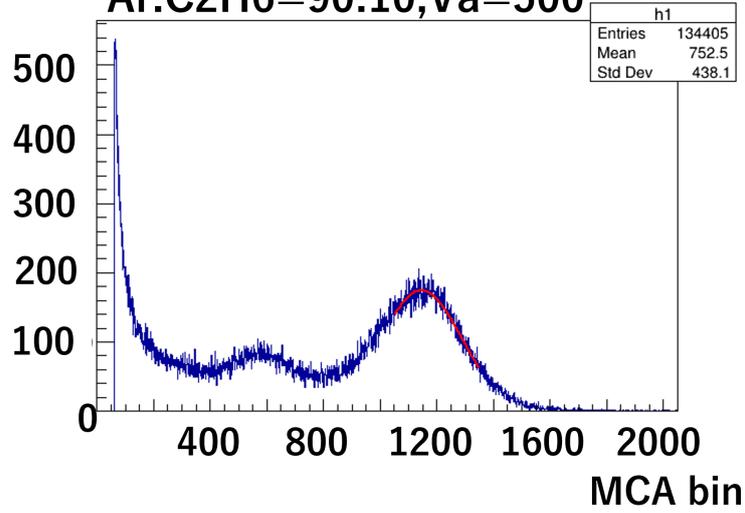


図 3.13 LTCC μ -PIC で測定した ^{55}Fe のエネルギースペクトル。

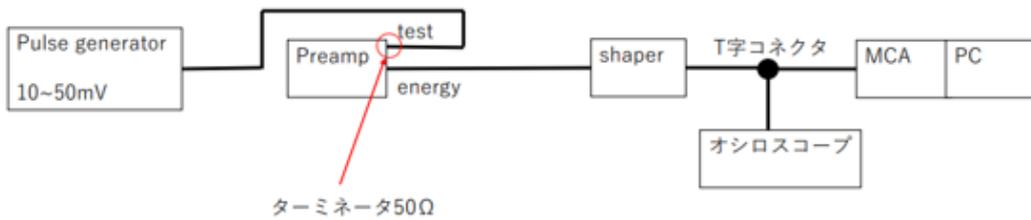


図 3.14 MCA リニアリティテストの回路ブロック図。

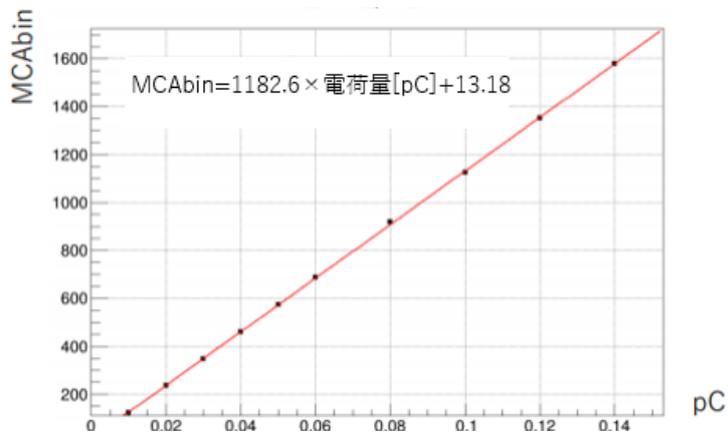


図 3.15 MCA のリニアリティテストグラフ。

がガス増幅率となっており、ガス種はそれぞれ赤：Ar:C₂H₆=90:10, 青 Ar:CO₂=93:7, : 緑：Ar:CO₂=85:15 に対応している。ガス増幅率は最大で Ar:C₂H₆=90:10 を用いたとき 4000 弱程であり、ミュオンなどの MIP 粒子を観測している。

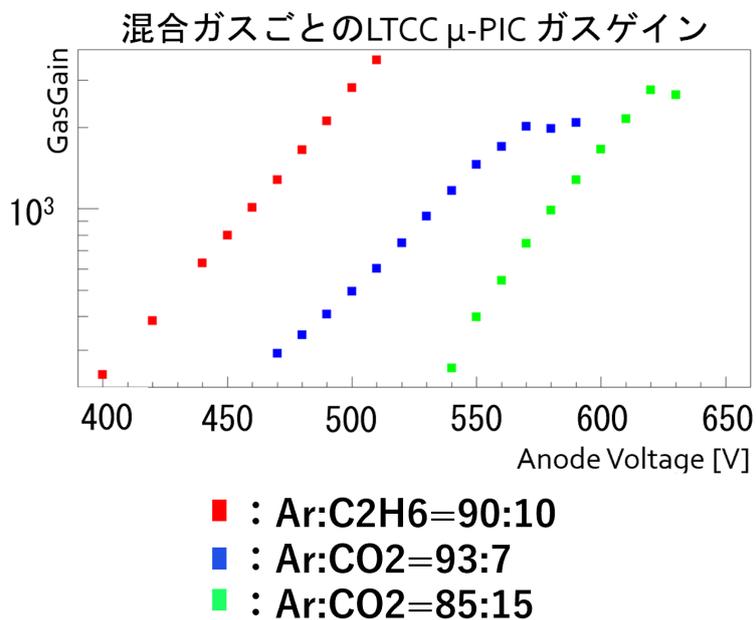


図 3.16 LTCC μ -PIC のガス増幅率の結果.

する場合には増幅率が少なくとも 1 万以上は必要なので、比較的小さめである。また Ar:CO₂ を用いた際には高電圧になるにつれてプラトーな領域が観測された。

ガス増幅率測定の結果, まだ課題はあるもののガス検出器として動作させることが可能であると確認できた。

第 4 章 神戸大学海事科学部タンデム静電加速器施設での高速中性子試験セットアップ

本研究では神戸大学の海事科学部にあるタンデム静電加速器施設にて LTCC μ -PIC の放電試験を行った。第 2 章でも述べたように放電は Raether limit を超えると起きるとされており、検出器内のガス中におけるエネルギーデポジットが大きい放射線が入射する状況は放電が起きやすい。物質と確率的に反応する中性子がガス原子核と反応して MeV 程度のエネルギーをもつ反跳原子核を生成し、反跳原子核がガス中の短距離に大きなエネルギーを落とすことで放電の原因となる。当施設では高レートの高速中性子を用いた実験が可能であり、高速中性子による μ -PIC の内での放電を起こしやすい環境であることから放電試験に適していると言える。

4.1 神戸大学海事科学部タンデム静電加速器

LTCC μ -PIC の放電試験を行うにあたり、神戸大学海事科学部にあるタンデム静電加速器 (図 4.1) を利用した。



図 4.1 タンデム静電加速器試験場の概観

施設に常備された 2 種類のイオン源 (セシウムスパッタ負イオン源 (SNICS II) と RF 放電 Rb 電荷交換型負イオン源) によりほとんど全ての元素のイオンビームを生成することが可能である [19]。負イオンは最大 +1.7MV に維持された高電圧ターミナルまで加速され、そこで窒素分子との電荷ストリッピング反応により正イオンに変換される。そして大地電位に向かって、電荷に応じて $3.4 \cdot 10\text{MeV}$ のエネルギーに再加速される。図 4.2 に加速器本体の概略図を示す。

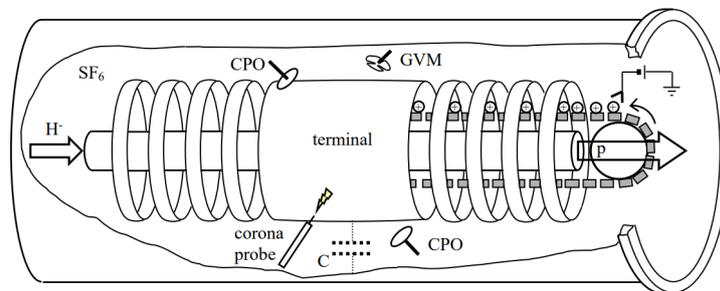


図 4.2 加速器本体の概略図 [21]

今回の放電測定試験には、3MeV まで加速された重陽子をベリリウムターゲットに衝突させたときの $d(\text{Be}, \text{B})n$ 反

応で発生する高速中性子を利用した。中性子のエネルギーは 2.5MeV を中心とした数 MeV 程度である [20].



4.2 LTCC μ -PIC の放電測定セットアップ

4.2.1 外部回路への組み込み

ガス検出器の実験を行う際は検出器本体, 今回で言えば LTCC μ -PIC 基板, だけでは動作せず, ガスを満たすためのガスチェンバー (ガスパッケージ), 高電圧印加用の外部回路そして導線などを固定するボードなどが必要になる。本実験では図 4.3 に示すような外部回路及びボードを用いた。

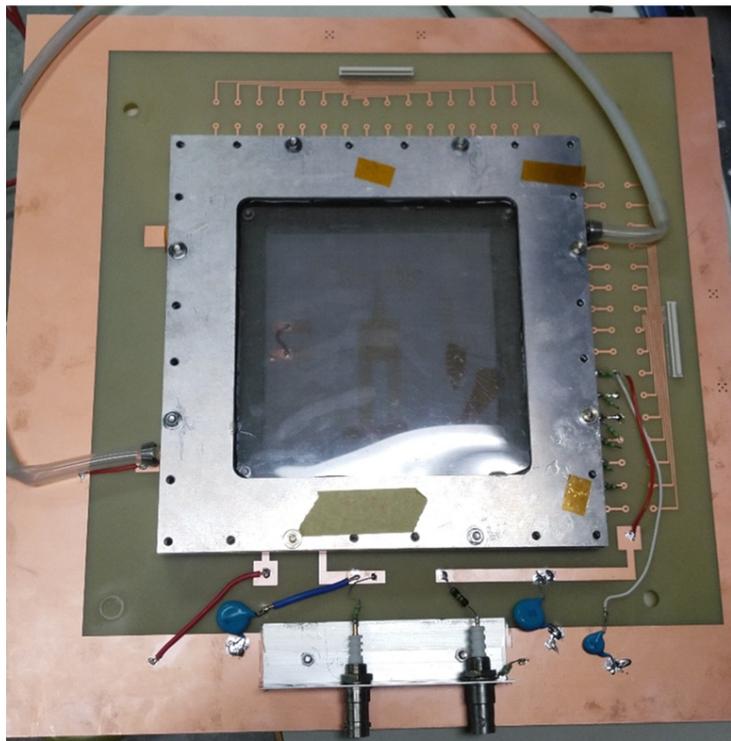


図 4.3 LTCC μ -PIC 基板を組み込んだ外部回路及びガスパッケージ, ボード

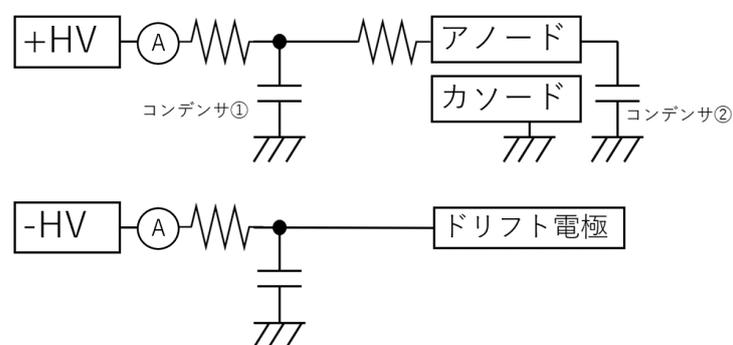


図 4.4 外部回路の回路ブロック図

コンデンサや抵抗など外部回路の構造は図 4.4 のようになっている。今回の放電試験では信号波形は測定せずに電極に流れている電流値のみモニタしているの、信号読み出し用のコンデンサ②の先は GND に繋がっている。

4.2.2 ビームラインへのセットアップ

高速中性子ビームで試験を行うにあたって、まず重陽子ビームができるだけ広がらずにベリリウムターゲットに真っ直ぐ入射するようにビームアライメントを調整する必要がある。図 4.5 は酸化アルミニウム板を用いたビームアライメントの様子であり、重陽子が当たる部分が明るく光っているのがわかる。桃色のアルミニウム板は中心がベリリウムターゲット中心と同じになるように設置されており、発光点の位置を見て重陽子ビームのアライメントを調整した。

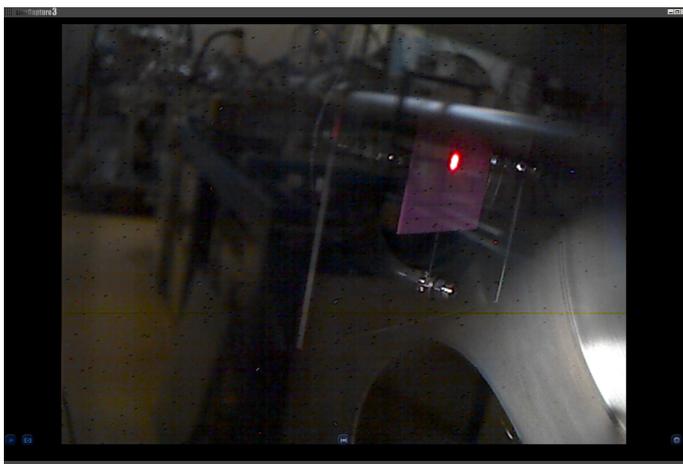


図 4.5 重陽子ビームのアライメント調整の様子

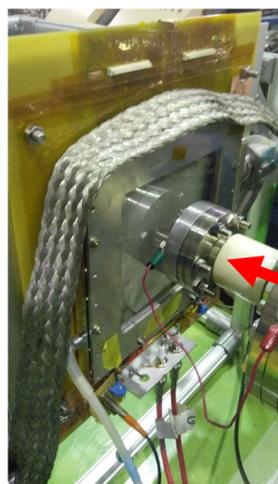


図 4.6 検出器セットアップの状況

タンデム加速器のビームラインで放電測定を行った際の状況を図 4.6 に示す。銀色の枠がガスパッケージであり、ベリリウムターゲットからの高速中性子がチェンバー内の中心に入射するように検出器が設置されている。ガスパッケージ内は混合ガス (Ar:CO₂=93:7) で満たされており、ガス内に入射してきた中性子がガス原子と反応して確率的に放電を生じる。ターゲットからの距離は中性子の入射頻度を調整するために 3cm と 10cm で適宜変えて測定を行った。

また、測定した際のデータ収集セットアップを表したブロック図を図 4.7 に示す (図 4.4 のコンデンサなどは省略)。

ドリフト電場を生成するためのドリフト電極に $V_d = -500V$ 、ガス増幅のためにアノードには 500V 付近で $\pm 10V$ 単位で変化させた電圧をかけている。また、カソードは GND に落としている。放電により生じた電流はアノードに高電圧を印加している +HV モジュールの電流値モニターで測定され、詳しい電流値とその波形は接続された USB オシロスコープ (Pocket Size USB Digital Storage Oscilloscope UDS-5206S) と専用のソフトウェア (PC-Based DSO) で記録される。本実験では LTCC μ -PIC 放電回数と放電比率の測定を行ったが、放電頻度は以下の式で求めた。

$$\text{放電比率} = \frac{\text{測定した放電の回数}}{\text{測定時間内に検出器の検出面積に入射してきた高速中性子の総数}} \quad (4.2)$$

放電回数の詳しい測定・解析方法は第 5 章で詳しく説明する。

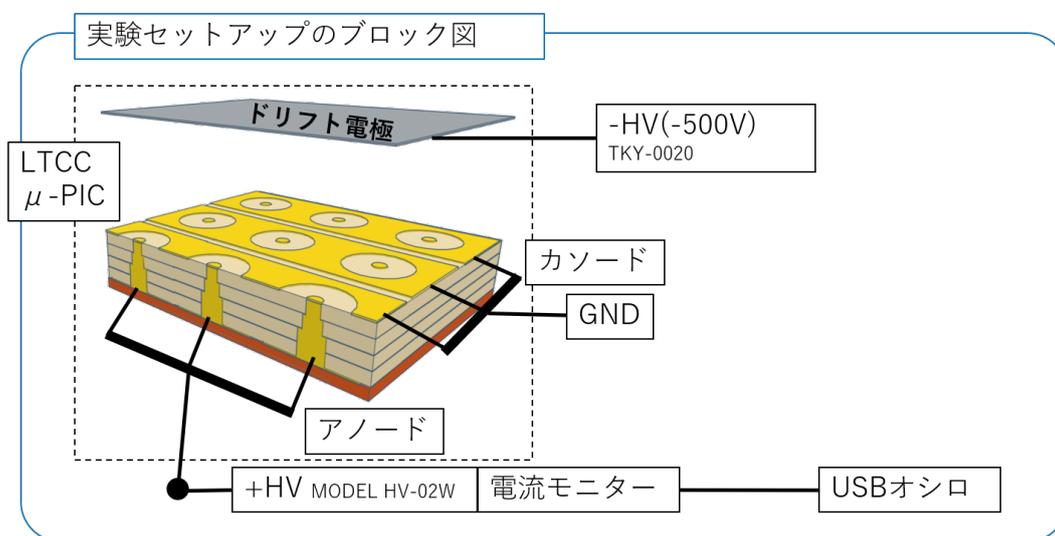


図 4.7 放電測定におけるセットアップのブロック図

第5章 放電測定試験結果

本章では前述のタンデム静電加速器施設で行った放電測定試験の測定方法・結果を、放電の大きさと放電率、導通に至るまでの放電許容量について報告する。電流値モニターで計測した電流値を積分した電荷量を放電の大きさと定義したとき、放電の大きさは測定条件によって大きなバラつきが見られる。このバラつきは電極への印加電圧にも多少依存するが、読み出しや電圧印加のためのフィルタ用コンデンサなどの外部回路が大きく寄与していることが観測できた。本章1節で測定方法や放電の大きさについて述べ、2節で測定結果について述べる。

5.1 放電回数・大きさの測定方法と解析手法

放電測定の結果を述べる前に、本実験における放電の測定方法と放電の大きさの解析手法について述べる。4章でも述べたように LTCC μ -PIC で放電が起きた際の電流値を +HV 電源に付属する電流値モニターで測定し、USB オシロと USB オシロ専用ソフトウェア (以下 DSO と記述) で記録した (図 5.1)。USB オシロ及び DSO は表示している信号をリフレッシュせずに次に新しく入ってきた信号波形を連続的に表示する Roll モードがあり、図 5.2 は Roll モードで放電の電流値を測定中の画面の一例である。横軸が時間、縦軸が信号の大きさ (電圧値) で表示されている。

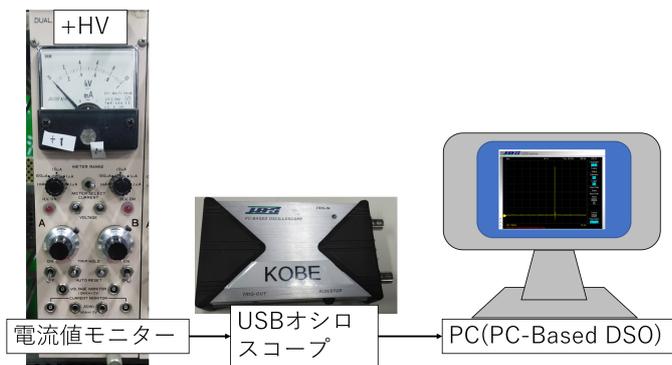


図 5.1 放電測定のデータ収集フロー図



図 5.2 DSO Roll モードでの放電測定画面例

DSO からの信号を ROOT で横軸時間、縦軸電流値に直したものが図 5.3 のような電流値変化例で、設定した閾値を超えた信号の数を放電回数とした。閾値については放電時の電流の最高値が測定条件によって変わるので、測定結果の電流値を見ながら適宜調整する (おおよそ $5 \mu\text{A}$ 程度)。

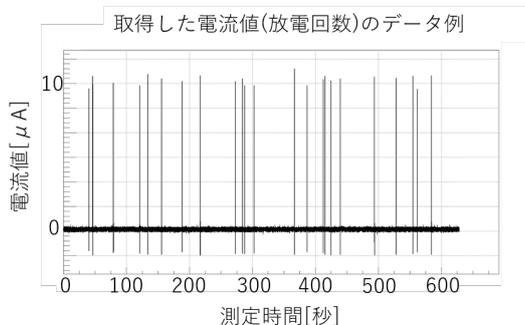


図 5.3 測定された放電の電流値変化の例

放電の大きさを電流値を積分して得られる電荷量と定義して、放電の大きさを測定するために電流値モニターの示す値と放電の大きさの関係性をみるリニアリティテストを行った。電荷量のわかる電流波形を測定するためにコンデンサとスイッチを使った図 5.4 のような回路を用いた。スイッチ B が OFF の状態でスイッチ A を ON にすることで経路①を通してコンデンサへ瞬間的に高電圧を印加し、その時のコンデンサ容量と印加電圧に比例する電流値変化として観測できるのでその波形を測定する。スイッチ B 及び経路②は次の電流値変化を起こす前にコンデンサに貯まった電荷を GND に流すためのものである、

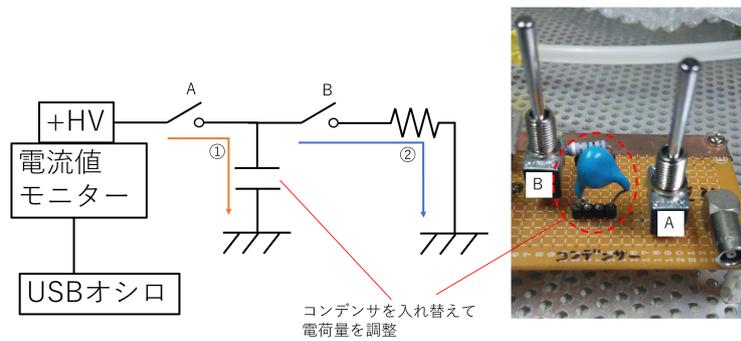


図 5.4 電流値モニターのリニアリティテスト回路ブロック図と実際の回路の写真

具体的な測定波形の電荷量の求め方は図 5.5 のように横軸時間、縦軸電流値の波形を積分して求める。図 5.4 のコンデンサの容量と印加電圧を変えながらいくつかの電荷量を測定し、式 5.1 で求めた電荷の計算値と測定した波形の測定値を比較したグラフを図 5.6 に示す。

$$\text{電荷量 } Q[nC] = \text{コンデンサ容量 } C[pF] \times \text{印加電圧 } V[V] \quad (5.1)$$

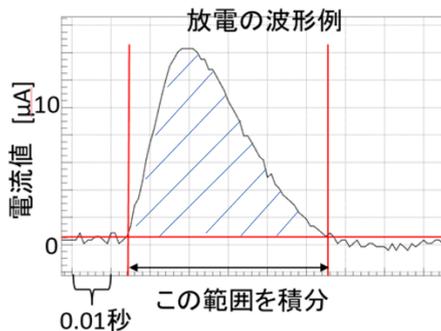


図 5.5 放電の電流値波形の積分の仕方

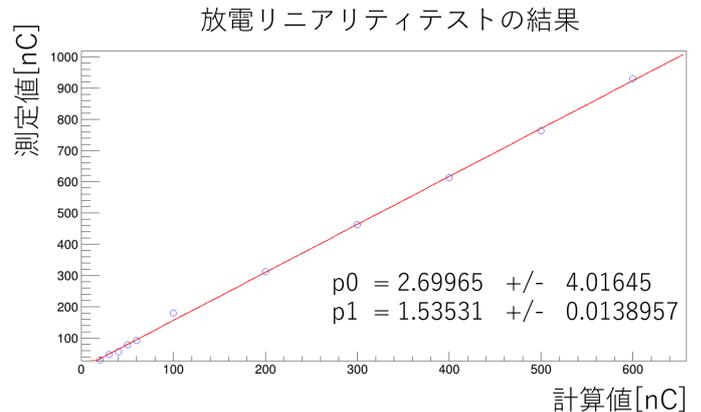


図 5.6 リニアリティテストの結果のグラフ。横軸：計算値、縦軸：測定値

次節の放電の大きさを測定した結果はこのリニアリティテスト結果を用いて解析する。

5.2 放電測定試験の結果

まず放電の大きさと外部回路の関係性を高速中性子を用いて調べたものについて述べる。測定方法としては第4章でも示した放電測定の際の回路(図5.7)において、コンデンサ①、②の静電容量、抵抗Rの抵抗値の変化と放電の大きさの関係性を測定した。放電の大きさと外部回路関係性を調べた結果を図5.8に示す。データ点(エラーバー)の色

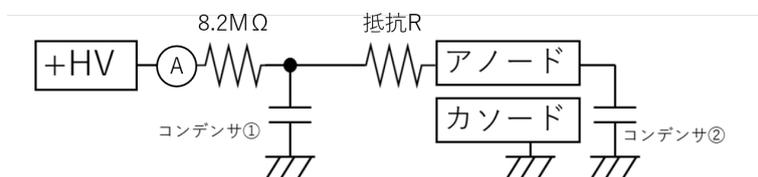


図 5.7 中性子放電試験の際にコンデンサ①②と抵抗 R を変えることで外部回路と放電の大きさの関係性を調べた。

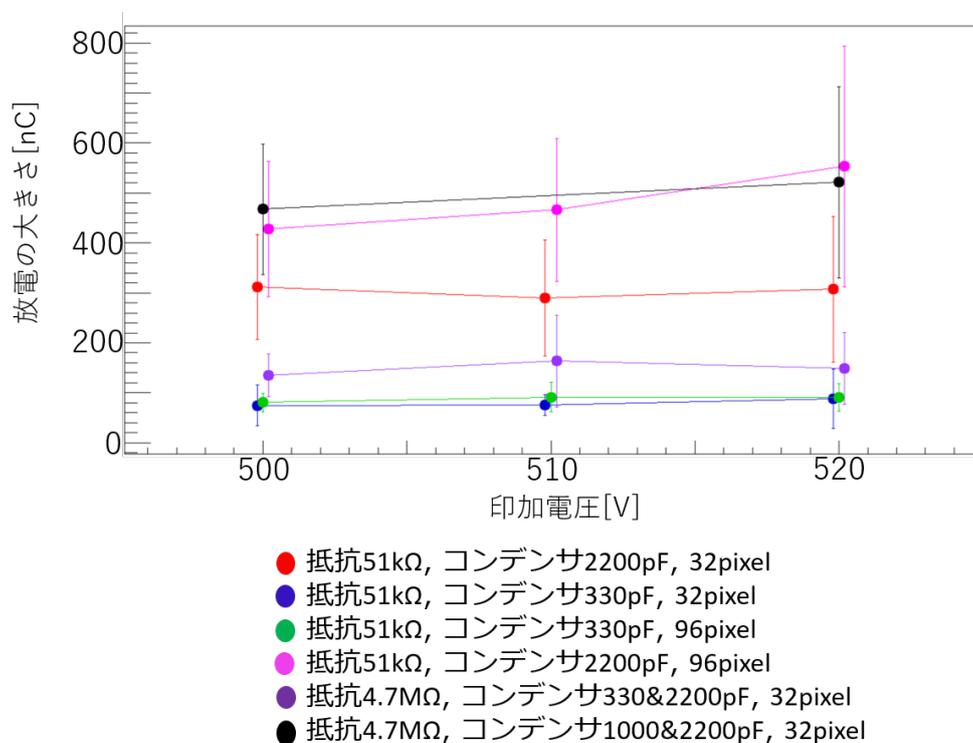


図 5.8 中性子を用いた放電の大きさと陽極への印加電圧、外部回路の関係性のグラフ。

分けは外部回路の条件に対応しており、条件は表1の通りである。表1における“使用陽極ピクセル数”とは放電試験を行う際に電圧をかけた陽極ピクセルの数のことであり、放電の大きさと電圧を印加する(放電が起こりうる)陽極の数との関係性を調べるために条件3と4ではほかの条件の3倍の数の陽極を使用した。使用しているコンデンサ容量が大きい条件4と条件6において放電が大きく容量が小さい条件2と条件4では放電が小さくなっていることから、外部回路のコンデンサ容量が放電の大きさに大きく寄与していることがわかる。これは放電が起きた際の電荷がコンデンサから供給されているからだと考えられる。コンデンサ容量が大きい条件1が条件4に比べて放電が小さいのは測定に使用した電極自身も持つ静電容量が寄与しているからである。また、条件6のようにコンデンサ容量が大きくとも抵抗Rの抵抗値が大きい場合は抵抗にてコンデンサから供給される電荷が減衰される。このように μ -PICにおけ

る放電の大きさは外部回路のコンデンサ容量と抵抗値によってある程度調整することが可能であることが分かった。

次に同じく高速中性子を用いた際の、放電比率の測定結果を図 5.9 に示す。横軸がガス増幅率、縦軸が放電比率である。横軸のガス増幅率は放電比率と同時に測定したものではなく、放電比率を測定した時と同じ印加電圧・同じガス (Ar:CO₂=93:7) のときの増幅率を使って表している。参考として先行研究で測定された従来型の μ -PIC の放電率 (黒

ガス増幅率と放電レートの関係のグラフ

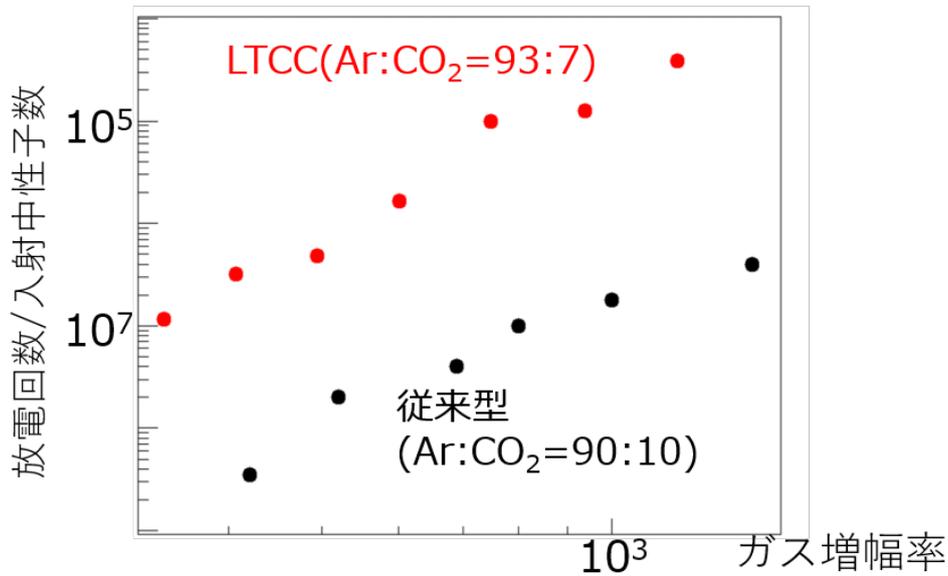


図 5.9 LTCC μ -PIC の放電率とガス増幅率の関係性のグラフ。

点。ただしガス種は Ar:CO₂=90:10) と比較すると、同じ増幅率のとき LTCC μ -PIC の方が明らかに放電率が高いことが分かった。LTCC μ -PIC の開発目的は放電率を下げることではないが、これについては次章で議論する。また、高速中性子を用いた際の導通までに放電した回数は、陽極ピクセルによって製作精度のばらつきがあるため一定ではないが、現状おおよそ 100 回/pixel であった。

表 1 放電の大きさ測定における外部回路等の条件一覧

条件番号	抵抗 R[Ω]	コンデンサ容量 [pF]	使用陽極ピクセル数 [pixel]	データ点の色
条件 1	51k	①:0, ②:2200	32	赤色
条件 2	51k	①:0, ②:330	32	青色
条件 3	51k	①:0, ②:330	96	緑色
条件 4	51k	①:0, ②:2200	96	桃色
条件 5	4.7M	①:2200, ②:330	32	紫色
条件 6	4.7M	①:2200, ②:1000	32	黒

第 6 章 議論

本章では LTCC μ -PIC の増幅率及び放電測定試験の結果について、特に陽極の直径と高さのアスペクト比を大きくしたにもかかわらず増幅率が低く、放電率も高い理由について議論・考察をする。

LTCC μ -PIC の基本構造は従来の μ -PIC とおなじであり、陽極の直径と高さのアスペクト比を大きくしたことから陽極付近の電場が強くなり増幅率が良くなることが期待されると第 3 章で述べた。これを確かめるために従来型の μ -PIC と LTCC μ -PIC 絶縁層付近の電場構造シミュレーションを行った。 μ -PIC において主に電子増幅が行われるのは電極の上の $5\mu\text{m}$ ほどであるので、電極の厚さを $5\mu\text{m}$ と仮定したとき図 6.1 のように絶縁層表面から高さ $10\mu\text{m}$ における電場計算を行った。図 6.2 は陽極に 600V の電圧を印加し、陰極は GND に落とした場合の基板表面から高

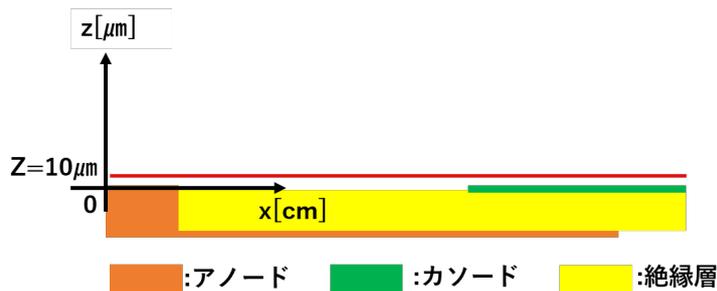


図 6.1 電場構造シミュレーションの条件ポンチ絵。陽極ストリップ方向から見た図で横軸 x は陽極中心からの距離、高さ z は絶縁層表面を 0 としている。

さ $10\mu\text{m}$ の高さにおける電場構造をシミュレーションした結果である。黒線で表したのが従来型の μ -PIC、赤線が LTCC μ -PIC の電場構造である。また LTCC はポリイミドの比誘電率 $\epsilon=3.5$ に比べて $\epsilon=7.0$ と大きいので比誘電率の影響を見るために比誘電率だけ LTCC μ -PIC と同じにした従来型 μ -PIC の電場を青線で示す。陽極付近の電場の

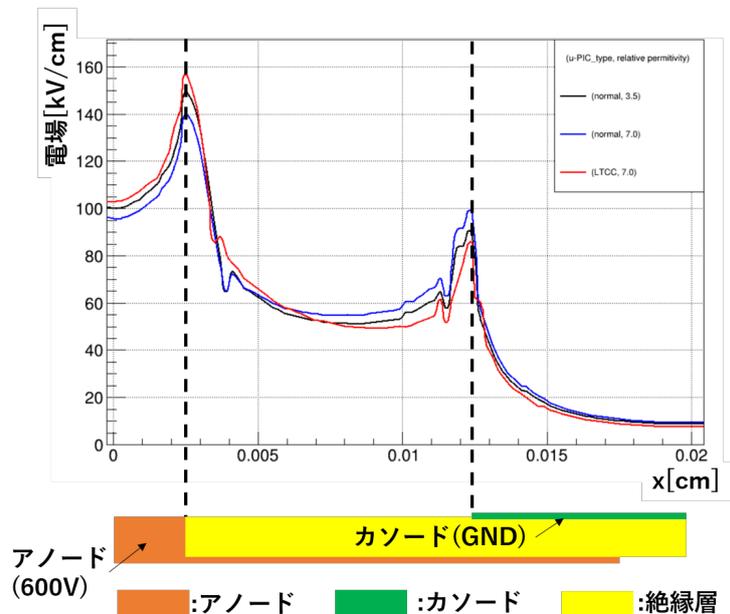


図 6.2 μ -PIC のデザインと絶縁層物質の違いによる電場シミュレーション結果グラフ。黒：従来型 μ -PIC($\epsilon=3.5$)、青：従来型 μ -PIC($\epsilon=7.0$)、赤：LTCC μ -PIC($\epsilon=7.0$)

強さはそこまで変わらないが、陰極付近では LTCC μ -PIC の方が電場が小さい。陽極付近の電場があまり変わっていないのは LTCC の比誘電率が大きいからであり、比誘電率だけを変えた黒線と青線の電場の強さにも誘電率による影響が表れているのがわかる。陽極付近の電場に対して陰極付近の電場が小さいほど放電は起こりにくく、その比 (陽極付近の電場/陰極付近の電場) を見てみると表 2 のようになっていることから理想的には LTCC μ -PIC の方が放電は起こりにくいはずである。また、陽極付近の電場が大きく変わらず、放電もしにくいならば少なくとも増幅率はほぼ同じ数値まで達成できるはずであるが、実際は半分も達成できていない。

表 2 陽極付近の電場と陰極付近の電場の比率。値が大きいほど放電は起こりにくいと考えられる。

従来型 μ -PIC($\epsilon=3.5$)	従来型 μ -PIC($\epsilon=7.0$)	LTCC μ -PIC($\epsilon=7.0$)
1.65	1.41	1.83

測定条件によってより高い増幅率を得られる可能性もあるが、シミュレーション結果と実際の測定結果が違う理由の一つとして、金ペースト電極の製作精度が関係していると考えられる。ここで言う製作精度とは陽極の直径のことであり、第 3 章で述べた LTCC を積層する際の陽極ピラーのズレとは別である。陽極が設計値より大きい場合、陽極付近の電場が同じ印加電圧の時に小さくなることで増幅率も小さくなる可能性があり、陰極と陽極の距離が近くなると放電も起きやすくなる。また金ペースト電極についてはペーストの金粒子径も放電の頻度に大きくかかわってくる。金粒子径が $\phi 1\mu\text{m}$ 前後 (ただし数 μm 径の粒子があるなどバラつきがある) と大きい場合電極に凹凸が生じることで局部的に電場が強くなり、放電に“弱い”部分ができていたことが考えられる。

これらの問題点への対応として、比誘電率の小さい LTCC を使うことや粒子径の小さい金ペーストを使うことで解決できるのではないかと現在検討中である。比誘電率の小さい LTCC は最近になって平井精密工業株式会社の方で使われ始めたもので、ポリイミドと同じくらいの誘電率であるとのことである。この比誘電率の小さい LTCC (new LTCC と呼称する) を使って μ -PIC を開発できた場合の電場計算をしたものが図 6.3 のグラフである。図 6.2 と同じく陽極に 600V の電圧を印加し、陰極は GND につないだ場合の電場をシミュレーションしたものである。黒線が従来

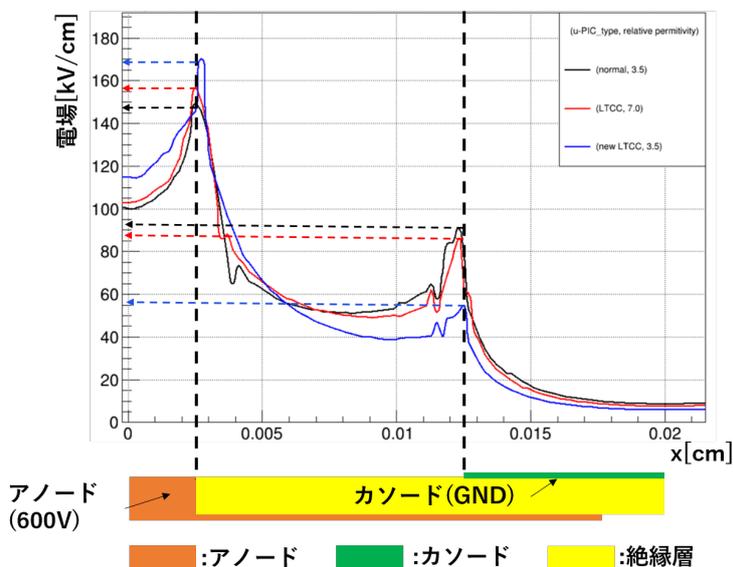


図 6.3 new LTCC μ -PIC と他デザイン μ -PIC の電場シミュレーション結果グラフ。黒：従来型 μ -PIC($\epsilon=3.5$)、赤：LTCC μ -PIC($\epsilon=7.0$)、青：new LTCC μ -PIC($\epsilon=3.5$)

型 μ -PIC、赤線が本研究で用いた LTCC μ -PIC そして青線が new LTCC を使った想定の新 LTCC μ -PIC を表し

ている. new LTCC は仕様上一層が $70\mu\text{m}$ なので図 6.4 のように $70\mu\text{m}\times 3$ 層のデザインで電場計算を行った. この

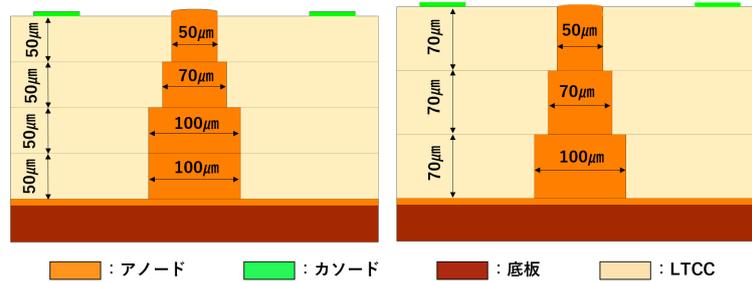


図 6.4 new LTCC μ -PIC(右) のデザイン変更点.

表 3 new LTCC μ -PIC を含めた陽極付近の電場と陰極付近の電場の比率. new LTCC の比誘電率はポリイミドと同じ 3.5 であると仮定した.

従来型 μ -PIC($\epsilon=3.5$)	LTCC μ -PIC($\epsilon=7.0$)	new LTCC μ -PIC($\epsilon=3.5$)
1.65	1.83	3.09

ときの陽極付近の電場と陰極付近の電場の比は表 3 のようになっており, 従来型の μ -PIC と比べると 2 倍ほどになっていることから増幅率の改善と放電抑制が見込める. 懸念事項としては厚さが $70\mu\text{m}$ の LTCC に対して $50, 70\mu\text{m}$ 径の穴が技術的に開けられるかという点があるので引き続き検討する必要がある.

金ペーストに関しては現在使用している金ペーストよりも粒子径の小さいものがあり, それを利用できれば電極形成の精度向上が期待できる. 現在使用している金ペーストは LTCC と同時に焼結した際に収縮率が同じようなものを選択しており, 他のペーストの収縮率が LTCC と合わない場合 LTCC 基板が割れたり曲がる可能性がある. 粒子径の小さい金ペーストの収縮率を調整出来るかなど, 平井精密工業株式会社や都立産業技術研究センターと相談しながら決める必要がある.

次に, 将来的に LTCC μ -PIC を物理実験などで実装するための課題について議論する. 実装するにあたり必要なのは, LTCC μ -PIC 大型化して検出面積を広げること, 本実験では行っていない 2 次元読み出しをした際の性能を調べることである. 大型化するには, 各 LTCC 層の穴の位置がズレて陽極が繋がらなくなるのではないかという懸念事項がある. 単純に LTCC の広範囲に穴を空けるのは $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ サイズの LTCC-GEM を製作出来ていることから可能である (但し LTCC-GEM は穴径 $100\mu\text{m}$ なので $50\mu\text{m}$ サイズの穴では試していない). 課題であるのは直径が異なる穴の別々に空けた LTCC 層を重ねて LTCC μ -PIC を製作する際に, 各層の穴がずれる可能性があり, 現在開発研究している小型の LTCC μ -PIC でも図 6.5 のように大きくずれて性能評価に使用していないサンプルが存在するという点である. 仮に $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ サイズ (従来の μ -PIC のでは $256\text{pixel}\times 256\text{pixel}$ になる) のものを作る場合, 穴の数は約 28.4 倍になり更にズレが生じやすくなると予想されるので, 穴の直径と位置を調整するための高い製作精度が必要となる.

二次元読み出しを行うためには各ピクセルの増幅率にばらつきがなく, 安定している必要がある. 図 6.6 のように複数の陽極・陰極からの信号を読み出すことで入射粒子の二次元位置を検出できるが, ピクセルごとの増幅率に大きな差がある場合は信号の大きさにバラつきが生じることで位置を特定する精度が下がる. 増幅率のばらつきは測定してみないとわからないが, 増幅率の安定性については図 3.16 でみられた増幅率がプラトーになっている部分について議論する必要がある. ガス増幅率を測定する際, $\text{Ar}:\text{CO}_2$ を用いて陽極への印加電圧を上げていくと増幅率が上昇せずにプラトーになる現象が見られた. 詳しい原因はわかっていないが, 放電が増えてくることによって, MCA で取得したガス増幅の信号に放電の信号がノイズとして含まれ, エネルギースペクトルのピーク位置がずれることで上手く測

定できていないのではないかと考えている。放電の起こりやすさや増幅率がピクセルごとに差があるほど検出器の測定精度が下がってしまうので、増幅率がプラトーになってしまう現象については精査する必要がある。前述した new LTCC を用いた μ -PIC を使う以外にも混合ガスの比率や種類を変えることで変化が起きないか試すことで解決する可能性もある。

また現在 LTCC 表面上の導通路と思しき部分、具体的には図 6.7 のような変色している部分の走査型光電子分光分析装置 (SPES, 図 6.8) による物質探査も進めており、導通路の物質を特定することで次の LTCC μ -PIC を製作する際や混合ガスの選定などに役立つだろう。

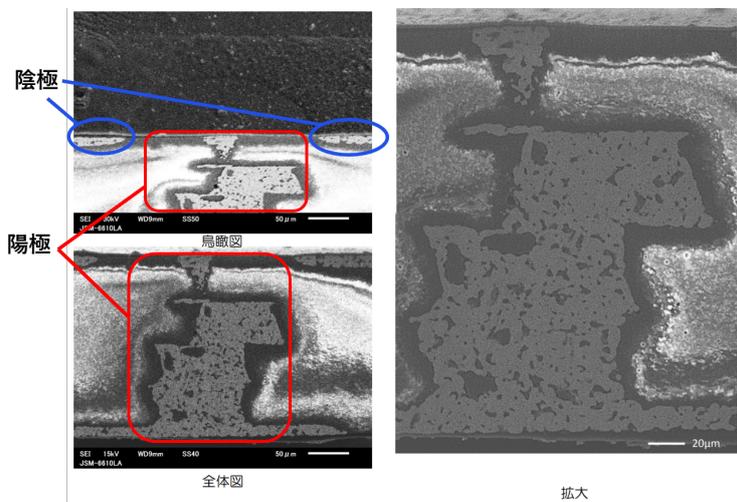


図 6.5 LTCC 層の穴がずれてしまったサンプルの断面図 (都立産業技術研究センターに撮影依頼)。

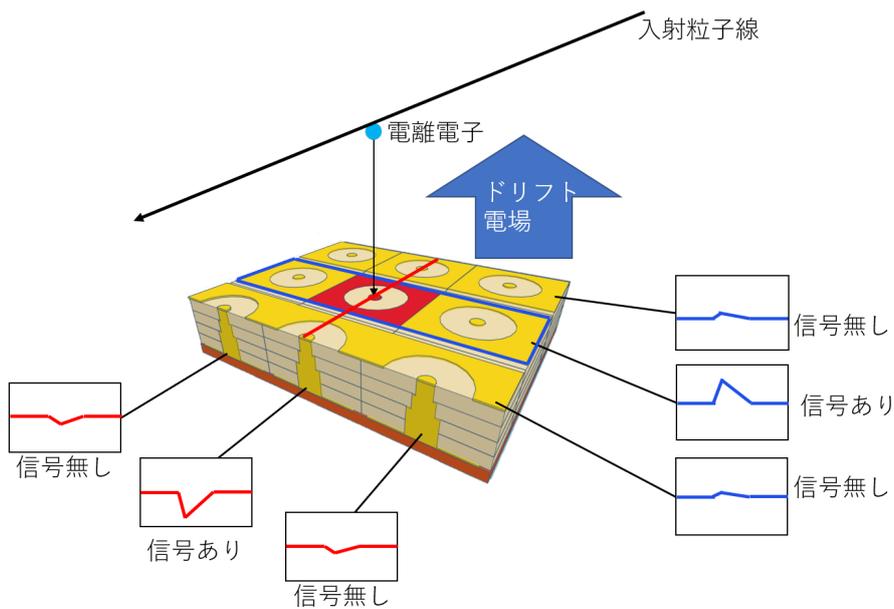


図 6.6 二次元読み出しの模式図。読み出した信号から重心法などで粒子線の位置 (赤く塗りつぶしたピクセル) を特定する。

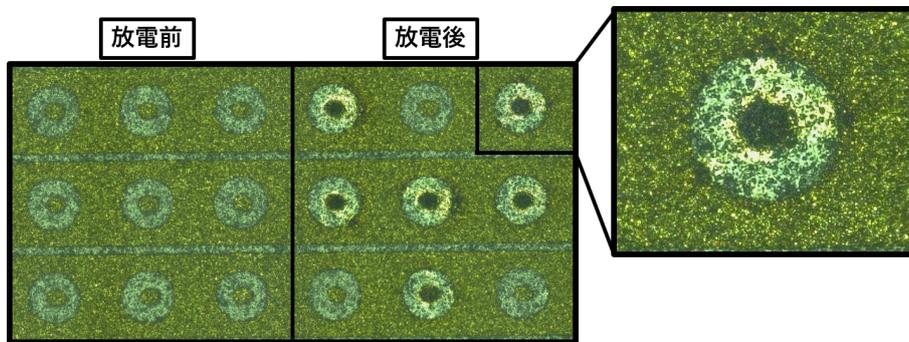


図 6.7 放電後の LTCC μ -PIC 表面の顕微鏡写真. 右側の放電に使用した領域では陽極陰極間に導通路ともしき変色している部分がある.



図 6.8 走査型光電子分光分析装置

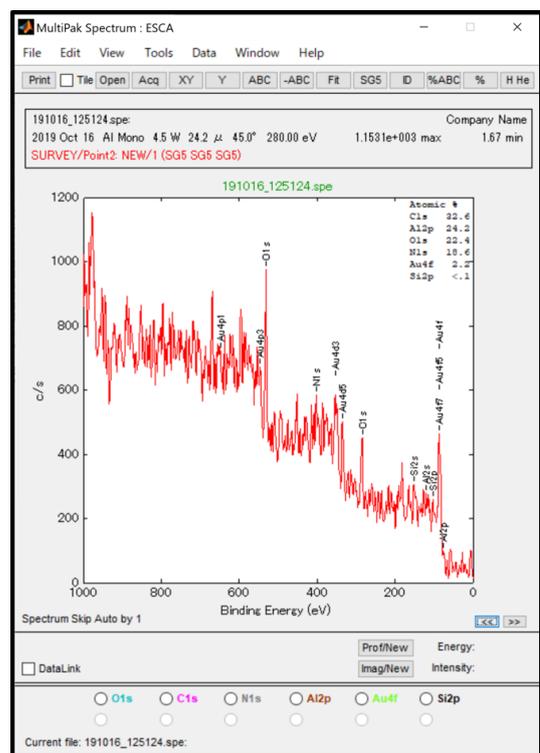


図 6.9 SPES で調査した物質探査結果の一例. 現在調査中.

第7章 まとめ・今後の展望

近年の高エネルギー実験分野では高頻度入射レート実験による新発見の試みがなされており、高レート実験 (10^7 cps/cm² 以上) に対応し得る検出器の開発が進められている。PCB 技術によって製作されるマイクロパターンガス検出器 (MPGD) はその一つであるが、電極間の放電が問題となっている。本実験グループで研究開発を進めている MPGD である μ -PIC も放電による導通路の形成が問題になっており、解決案の一つとしてセラミック素材を用いた μ -PIC (LTCC μ -PIC) の開発を行っている。

LTCC は無機素材であり耐アーク放電に強いことから、従来の μ -PIC に用いられていたポリイミドよりも炭素由来の導通路の形成がされにくいと考えられる。また、LTCC μ -PIC は LTCC 絶縁層を重ねた構造を作ることが可能であり、陽極の直径と高さのアスペクト比を大きくすることができる。これにより陰極付近の電場に対する陽極付近の電場をを大きくすることで、放電が起こりにくく増幅率を大きい検出器を作ることが期待される。都立産業技術研究センターと平井精密工業株式会社に協力していただいて 20mm×20mm サイズの LTCC μ -PIC 試作機を作成し、増幅率の測定と放電に対する挙動の測定を行った。

⁵⁵Fe 放射線線源を用いて増幅率の測定を行ったところ、Ar:C₂H₆=90:10 で最大 4000 近くの増幅率を達成したが、従来型 μ -PIC が 1 万以上の増幅率を達成してこと、ミュオンなどの MIP 粒子の検出を行う際には～1 万 5 千の増幅率が必要であることも踏まえると低めの増幅率であるといえる。放電測定は神戸大学海事科学部のタンデム静電加速器施設にて高速中性子を用いた放電率と放電の大きさ (電荷量) について調べた。放電の大きさについては、陽極への印加電圧も多少影響はするが、電圧印加や信号読み出しのためのフィルタ用コンデンサの容量が大きく影響していることが観測された。放電の大きさを外部回路によって調整することで、今後の研究では放電の回数以外にも放電の総電荷量による μ -PIC の放電耐久に関する評価を行えることが期待される。ガス増幅率 10^3 で動作する印加電圧のとき、入射中性子数あたりの放電率は 10^{-5} であり、従来の μ -PIC が同じ増幅率のとき 10^{-7} である。LTCC μ -PIC の主目的は導通路の形成を抑えることであり放電率を抑えることではないが、放電率が従来型 μ -PIC よりも高い結果となった。

LTCC を用いたガス検出器の開発が始まったのはここ 2～3 年であり、電極の製作精度 (積層構造のズレ、電極の大きさ) や比誘電率の異なる LTCC を用いた際の挙動など課題はまだ多いが更なる改善によって高レート実験に耐えうる検出器作れることが期待される。増幅率の改善と放電率の改善以外に、LTCC μ -PIC は実用に向けて検出面積を拡大させたときの動作安定性と 2 次元読み出しのテストなどを調べる必要がある。

謝辞

本研究を行う中で沢山の方々にご指導・ご協力していただきました。

指導教員の越智敦彦先生は CERN の NSW 関連などで事務作業が多く、授業もそれなりに担当していた関係で昨年までの CERN 長期出張並みに忙しいなか実験の手伝いをして頂いたり、質問をすれば関連事項まで詳しく教えていただきました。今年の μ -PIC グループは僕と越智さんの二人だけでしたが、回路の基礎的なところからガス検出器の動作における経験則的な深い内容に至るまで奥深く指導していただき感謝しています。普段のグループミーティングや中性子試験の車移動中などでは物理以外の話もかなりたくさんして楽しい研究活動をすることができました。中でも僕が M2 からハマっていた Vtuber のことを薦めるまでもなく知っていたのは非常に驚きましたし、研究室で一番それに関連した話ができしたのは越智さんだったかもしれません。越智さんが僕と同様に V の沼に嵌ってしまわないか心配ですがそんなことはないと思っています。これからもご家族の方共々体調に気を付けてお過ごしください。昨年度卒業した同グループの先輩である石飛さんには昨年とてもお世話になりました。ガス検出器をどうさせるためのガス経路や電気モジュールの使い方のような、実際に使いながらでないといけない部分を特に詳しく教えていただきました。CERN のビームラインで実験をしに出張した際は、CERN 施設内での生活の仕方や CERN 周りのお店などを教えて頂いたおかげで不慣れな海外生活を乗り切ることができました。ケバブ店で何を言われているかわからないままスパイスソースのケバブを食べたのはいい思い出です。現在後輩はいませんが、石飛さんから学んだことも含めてしっかりと来年度以降の μ -PIC グループの後輩に引継ぐことができるようにします。

研究活動の中で粒子物理学研究室の先生方にも大変お世話になりました。蔵重久弥先生にはコロキウムやシミュレーション関係などでわからないところを教えていただきました。調べても中々わからない内容でもその幅広い知識を持って答えて下さいました。他にもウイスキーや日本酒などお酒の知識も豊富で、美味しいお店に連れて行っていただいたおかげでよりお酒に興味が出ました。竹内康雄先生は修士での授業で特にお世話になりました。丁寧に授業内容を教えて頂いたおかげで粒子物理の基礎への理解が進みました。また、カミオカンデのタンクオープンの手続きや研究室サーバーの手続きなども丁寧に対応していただきありがとうございました。山崎祐司先生は M1 春の学校や学部生時代の授業の他、DIS2018 などでもいい経験をさせていただきお世話になりました。研究経過報告などで基礎的な部分を質問して下さったおかげで自分の理解が浅い部分に気づくことができました。身内賢太郎先生には主に B4 の卒業研究で大変お世話になりました。卒業研究にて、エアロシリカゲルを入れるためのアクリルケースを不可逆的に分解(破壊)してしまった際にお手数をおかけしたことをここで改めて謝罪させていただきます。普段の研究室での会話では特定のネタに対する耐性を付けて下さったので、これからの社会人生活における幅広い会話でも場合によっては活かしていきます。前田順平先生には ROOT や C++ の使い方などでご指導していただきました。お子さんが元気に育つことをお祈りしております。鈴木州先生には B4 ゼミと TA でお世話になりました。TA では粒子検出の基礎を確認できたこと、生徒さんに教える経験ができたことがありがたかったです。川出健太郎先生はあまり指導していただく機会がありませんでしたが、DIS では大きな会議の準備で必要とされるものや気にすることなど貴重な体験をさせていただきました。中野佑樹先生はコロキウムなどでご指導いただきました。6 月ごろにお借りしたものはとても助かりました改めてありがとうございました。串カツ美味しかったです。中村輝石さんからはガスを用いた検出器を開発している観点から興味深い意見を聞くことができました。輝石さんの撮った写真と自転車への強い思いが印象的でした。秘書の吉田和美さんには出張や集荷手続きなどで大変お世話になりました。出張費用の相談に乗っていただいたりとお金に困る院生生活ではとてもありがたかったです。

他大学や開発手伝っていただいた企業の方々にも大変お世話になりました。京都大学の高田淳史さん先生にはガス検出器の増幅率などをシミュレーションするためのソフトウェア Garfield++ のことでお世話になりました。特に Garfield++ の基本をまとめたスライド資料はとても参考になりました。ICEPP の増淵達也先生には多電極読み出しソフトウェアの件でお世話になりました。実装は間に合いませんでしたが後輩たちの助けになると思います。都立産業技術研究センターの小宮一毅さん、武内陽子さんには LTCC の使用を提案していただいただけでなく、LTCC

の課題点に対してアドバイスをしていただきありがとうございました。GEM は μ -PIC と構造は異なりますが同じ LTCC を用いたガス検出器という面で、学会発表などとても参考になりました。平井精密工業株式会社の瀬口さん、河野さん、花谷さんには難しい構造を作っていただきとても感謝しております。レイテック株式会社の松岡さん、上原さんは僕の拙いポンチ絵から外部回路用のボードの設計図及び実物を作成していただき感謝しております。とても使いやすいボードのおかげで効率的に実験をすることができました。

研究室の先輩方、同級生そして後輩の皆さんもありがとうございました。水越さんには解析ソフトウェアのインストールやコード組みのアドバイスをしていただきました。また機会があればお酒飲んだりしましょう。後チーズフォンデュに使ったチーズ美味しかったです。石浦さんには Garfield++ のアドバイスをしていただき助かりました。僕の席の後ろでやっていた回路など面白そうなことをこれからも続けてください。日比さんは今年一年だけでしたが楽しく話させていただきました。BBQ で強い酒を飲まれた時のノリにはびっくりしましたが楽しかったです。池田さんは 2 階実験室での作業のときにお世話になりました。前にマイクラに興味があるという話を聞いた気がするので、是非ともやってみてください。同級生の網本くんとは筋トレと酒の話ばかりしていた気がします。半導体のいい会社に就職するとのことなのでお互い稼いだら飲みに行きましょう。上野くんは就活頑張れ、応援してます。塩沢くんは B4 のときに解析関連でお世話になったのと修士に上がってからもたまたま解析関連で相談に乗ってくれました。いつも京都から片道 2 時間かけて研究室にくるバイタリティはそんなけいに値します。正直に言って研究室に止まってしまえばいいのにと何度思ったか分かりませんがこれからも社畜気質を生かして頑張ってください。中村くんは研究室に所属してから一番遊びに行った相手だと思います。バーに行ったりボルタリングに行ったり腕がパンパンになったのはいい思い出です。割と近距離で就職する同士またどこかに行きましょう。とりあえず鳥取砂丘に行こう。山下くんは修士 2 年間隣席だったこともありかなり話しました。君の影響で格闘・対戦ゲームにはまってスマブラを特にやりこむようになりました。オススメのゲームはまた今度するのでそのうち教えてください。同グループの後輩はいませんが、後輩の皆さんの素朴な意見はとてもありがたかったです。イケメンで彼女の誕生日を大事にする塩見くん、専門学校で TA を一緒にした島田くん、ALTAS のボードに苦しめられつづけている末田くん、割と長く研究室にいるイメージの角くん、楽器につよい谷口くん、行方不明のことが多かった山本くん、これからも研究を頑張ってください。B4 の皆さんで他大学などに行く人たちは新天地でも頑張ってください。研究室に残る人たちは自分の研究テーマをしっかり考えて決めてほしいですが、 μ -PIC グループが 0 人になることは避けてほしいので少しでも興味があれば μ -PIC グループで研究をしてみてください。

生活面ではアルバイト先の店長、パート、バイト仲間の皆さん、研究関連で長い間シフトを空けたりしてご迷惑をおかけしました。楽しい職場であり長く続けられたおかげさまで貴重な生活費と社会経験がえられました。今度からは客としてお店に伺わせていただきます。まかない美味しかったです。住んでいるのは遠い千葉でも研究生活一番支えて家族には感謝の気持ちが潰れません。社会で働く家族の大変さを真に理解できるようになるのはしばらく先かもしれませんが、なんとか社会にでる準備はできました。今までの恩を返せるようにこれからも頑張っていきます。

説田暉

参考文献

- [1] G. Charpak, R. Bouclier *et al.*, NIM **62** (1968) 262-268, “The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles” .
- [2] A. Ochi, Y. Homma *et al.*, Physics Procedia **37** (2012) 554-560, “Development of a Micro Pixel Chamber for the ATLAS upgrade” .
- [3] Particle Data Group, Chin. Phys. C **40** No.10(2016) 10001, “The Review of Particle Physics” .
- [4] Jonathan Bortfeldt, LMU Munich master’s thesis (2014), “Development of Floating Strip Micromegas Detectors” .
- [5] F. Sauli, CERN EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH, CERN 77-09, 3 May 1977.
- [6] <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-particle-detectors-accel.pdf> .
- [7] Tom Francke and Vladimir Peskov, “Innovative Applications and Developments of Micro-Pattern Gaseous Detectors” , page14~20.
- [8] Glenn F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement Third Edition” , page162~163.
- [9] A. Oed, NIM A **367** (1995) 34-40, “Properties of micro-strip gas chambers(MSGC) and recent developments” .
- [10] T. Tanimori, Y. Nishi *et al.*, NIM A **436** (1999) 188-195, “Imaging Gaseous Detector based on Micro Processing Technology” .
- [11] F. Sauli, NIM A **386** (1997) 531-534, “GEM: A new concept for electron amplification in gas detector” .
- [12] CERN Gas Detectors Development, <http://gdd.web.cern.ch/GDD/> .
- [13] Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard *et al.*, NIM A **376** (1996) 29-35, “MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments” .
- [14] C. Bini, 2014 JINST 9 C02032, “Study of the performance of the Micromegas chambers for the ATLAS muon spectrometer upgrade” .
- [15] 守谷健司, 平成 19 年 神戸大学 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” .
- [16] セラミックスアーカイブ http://www.ceramic.or.jp/museum/contents/pdf/2007_10_02.pdf .
- [17] 小宮一毅, 武内陽子 他, “LTCC-GEM の中性子検出器への応用” http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/conference/mpgd_15th/slides/MPGD2018_09_komiya.pdf .
- [18] <https://www.djklab.com/service/koubunshibussei/566> .
- [19] 神戸大学大学院 海事科学研究科・海事科学部 研究活動 <http://www.maritime.kobe-u.ac.jp/study/tandem.html> .
- [20] T. Isnada, K. Kawauchi and T. Hiramoto, J. NUCL. SCI. TECHNOL **5** (1968) 22-29, “Neutrons from thick target beryllium (d,n) reactions at 1.0MeV to 3.0 MeV” .
- [21] 神戸大学海事科学部 谷池晃, “21 荷電粒子ビーム実験” .
- [22] 駒井英俊, 平成 25 年 神戸大学 修士論文, “ μ -PIC の放電抑制に関する研究” .