

# 修士論文

## ハドロン衝突実験に向けた $\mu$ -PICの読み出し回路の開発

神戸大学 物理学専攻 粒子物理学研究室  
学籍番号 115s124s

山口 貴弘

# 目次

1	Introduction	4
1.1	高輝度ハドロン衝突実験	4
1.1.1	LHC	4
1.1.2	ATLAS 検出器	6
1.1.3	ATLAS upgrade	8
1.1.4	ATLAS upgrade における Endgap Small Wheel の交換案	9
1.2	検出器	11
1.2.1	荷電粒子の検出	11
1.2.2	X 線、 $\gamma$ 線の検出	11
1.3	ガス検出器	15
1.4	電離箱	16
1.5	比例計数管	16
1.6	TGC(Thin Gap Chamber)	18
1.7	MDT(Monitored Drift Tube)	18
1.8	$\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber)	19
1.8.1	動作原理、特徴	19
1.9	Micromegas	21
1.9.1	動作原理、特徴	22
1.9.2	resistive Micromegas	23
2	<b>読み出し回路</b>	24
2.1	FE2007	25
2.2	データの流れ	26
2.2.1	ASIC	26
2.2.2	閾値設定	28
2.2.3	FPGA	30
2.2.4	SiTCP	31
2.2.5	SiTCP FIFO	31
2.3	高頻度の入射粒子に対する High-rate 耐性	32
2.3.1	測定結果	32
3	<b><math>\mu</math>-PIC を用いた読み出し回路の試験</b>	34
3.1	検出器システム全体	34
3.1.1	$\mu$ -PIC	34
3.1.2	FPGA に記述した回路概要	35
3.2	ナイフエッジ法	37
3.2.1	ナイフエッジ法による位置分解能測定	38
4	<b>Micromegas を用いた読み出し回路の試験</b>	40

4.1	Micromegas . . . . .	40
4.2	位置分解能測定 . . . . .	42
5	<b>実験結果に対する評価</b>	44
5.1	高頻度の信号処理について . . . . .	44
5.2	位置分解能について . . . . .	45
5.3	将来に向けて . . . . .	46
6	<b>まとめ</b>	47

## 概要

我々、神戸大学グループではガス増幅検出器である  $\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber) の高輝度ハドロン衝突実験への導入を目指し開発を行っており、特に CERN(欧州原子核研究機構) で行われている ATLAS 実験に焦点を当てている。このような実験では非常に頻度の高いイベントレートの中で検出器を動作させなければならず、高い位置分解能や時間分解能が要求される。そこで位置分解能、時間分解能、入射許容量に優れた  $\mu$ -PIC の導入を提案してきた。

ただし、このような実験ではデータ収集システムに関して満たすべき条件が存在する。ATLAS 実験を例にとると、検出器に対する入射粒子が数百 Hz/cm<sup>2</sup> 程度となり、出力データが膨大なものとなる。したがって検出器の読み出しにおいて多チャンネルでの高速読み出しや、イベントカット、出力データの縮小が要求される。これらの処理を実現するための論理回路を独自に設計し、FPGA が搭載された読み出しボードを用いてデータ収集システムを新しく立ち上げ、その試作したシステムに関して評価し、将来必要とされるシステムの性能に関して議論する。

実験に関して、まずデータ収集システムの High-rate に対する試験を行った。そして  $\mu$ -PIC に放射線源を照射しその信号を作成した回路に通して位置分解能を評価した。また ATLAS 実験に導入が決定しているガス増幅検出器である Micromegas についても試験を行った。

1 章で LHC や ATLAS、そしてガス検出器について説明し、2 章で今回用いたデータ取得システムについて述べる。そして 3 章では  $\mu$ -PIC を使用した実験結果、4 章で Micromegas を使用した実験結果についてまとめる。最後に 5 章で結果について述べる。

# 1 Introduction

## 1.1 高輝度ハドロン衝突実験

ハドロン衝突実験の例として CERN の ATLAS 実験に焦点を当てて議論を進めて行く。

### 1.1.1 LHC

LHC(Large Hadron Collider) とはスイス・ジュネーブの近郊にある欧州原子核研究機構(CERN) の地下 100m に建設された世界最大の陽子・陽子衝突型の円形加速器である。衝突による重心系エネルギーは 14TeV、最高ルミノシティは  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  の予定であり、テラスケールにおける新たな物理現象が期待されている。

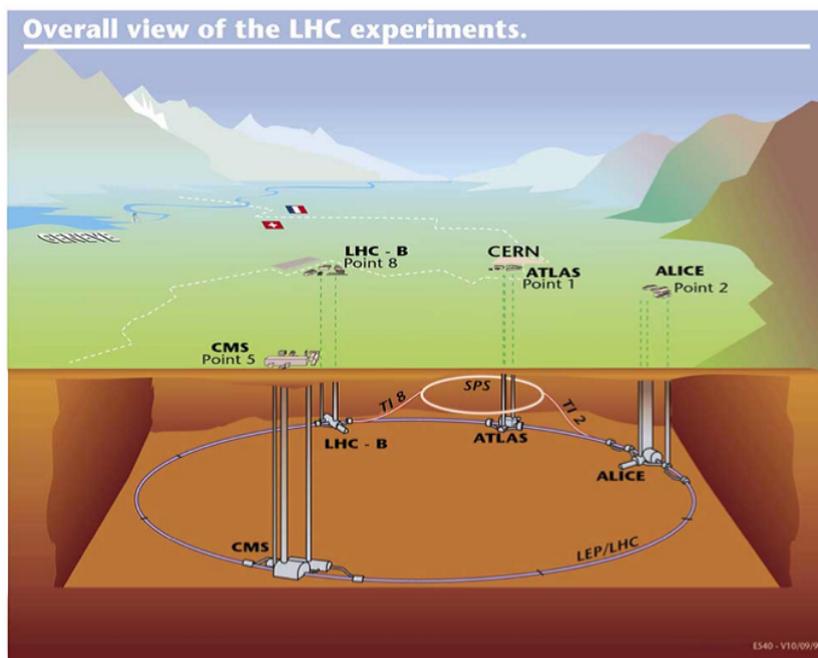


図1 LHC全体図 [1]

陽子の質量は電子の質量の約 2000 倍と大きいため、加速によって生じるシンクロトロン放射のエネルギー損失が電子に比べて少ない。そのため、LHC では重心系エネルギー 14TeV という高エネルギーを実現することができる。しかし、陽子衝突は陽子の構成粒子であるクォーク、グルーオン同士の散乱によって反応が複雑になり、かつ衝突が 25nsec 間隔という高頻度で起こることから、膨大な量の背景事象が現れる。そのため背景事象をよく理解し、興味あるイベントを効率よく選び出すことがハドロンコライダーにおいては重要である。

以下に LHC のパラメータを示す。

表1 LHCのパラメーター [2]

parameter	Design Value
リング周長	26.55km
重心系エネルギー (陽子+陽子)	7.0+7.0 TeV
ルミノシティ	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
ルミノシティ寿命	10 時間
入射エネルギー	450GeV
バンチ間隔	24.95 nsec
1 バンチあたりの陽子数	$10^{11}$ 個
バンチの長さ	75mm
バンチ数	2835 個
バンチ衝突当たりの陽子衝突数 衝突点のビーム半径	$16 \mu\text{m}$
衝突角度	$200 \mu\text{rad}$

LHC では約  $10^{11}$  個 の陽子を含むバンチと呼ばれる状態になったビームを、4 つ の衝突点で観測している。

・ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)

陽子陽子衝突実験における汎用検出器であり、Higgs 粒子と超対称性粒子 (SUSY) の探索を主な目的としている。

・CMS (Compact Muon Solenoid)

ATLAS と同様に主に Higgs 粒子、超対称性粒子 (SUSY) の探索を目的としている。

・ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の究明を目的としている。

・LHCb (Large Hadron Collider beauty)

b クォークを含む B 粒子の CP 非保存などの稀崩壊現象を観測することにより、標準理論を超える物理の探索を目的としている。

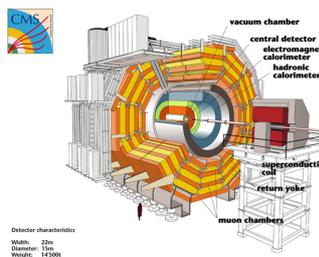


図2 CMS 検出器 [3]



図3 ALICE 検出器 [3]

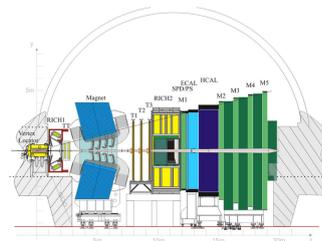


図4 LHCb 検出器 [3]

### 1.1.2 ATLAS 検出器

図 5 に ATLAS 検出器の全体図を示す。ATLAS 検出器は、直径 22m、高さ 44m の円筒形で、総重量は 7000t である。各粒子の透過性の差異を利用して粒子を識別する。構成は衝突点に近い方から、内部飛跡検出器 (pixel 検出器、SCT、TRT)、電磁カロリメータ (鉛、液体 Ar)、ハドロンカロリメータ (鉄 + シンチ、Cu+ 液体 Ar、タングステン + 液体 Ar)、ミューオン検出器 (MDT,CSC,RPC,TGC) となっている。

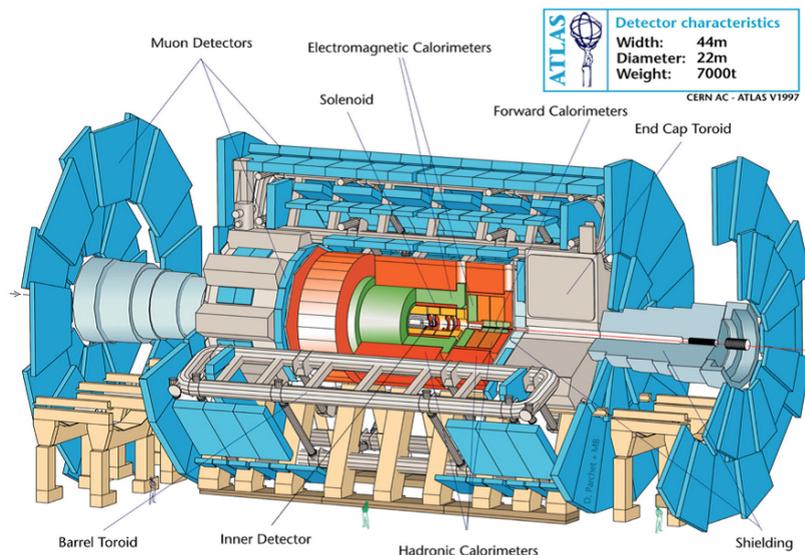


図 5 ATLAS 検出器 [4]。直径 22m、高さ 44m の円筒形となっている。

ATLAS 実験は主に標準模型 Higgs 粒子、超対称性粒子の発見を目的としている。ここで標準模型 Higgs 粒子について簡単に説明する。

現在の素粒子物理学の基礎をなしているのが素粒子標準模型である。標準模型は素粒子とその相互作用を記述する理論で、様々な実験により精密に検証されている。図 6 に示されているのが標準模型に現れる粒子で、クォーク、レプトン、力を媒介するゲージボゾン、質量の起源となる Higgs 粒子から成る。Higgs 粒子は素粒子標準模型の他の粒子に質量を与える粒子だと考えられており、LHC で生成されることが期待されている。

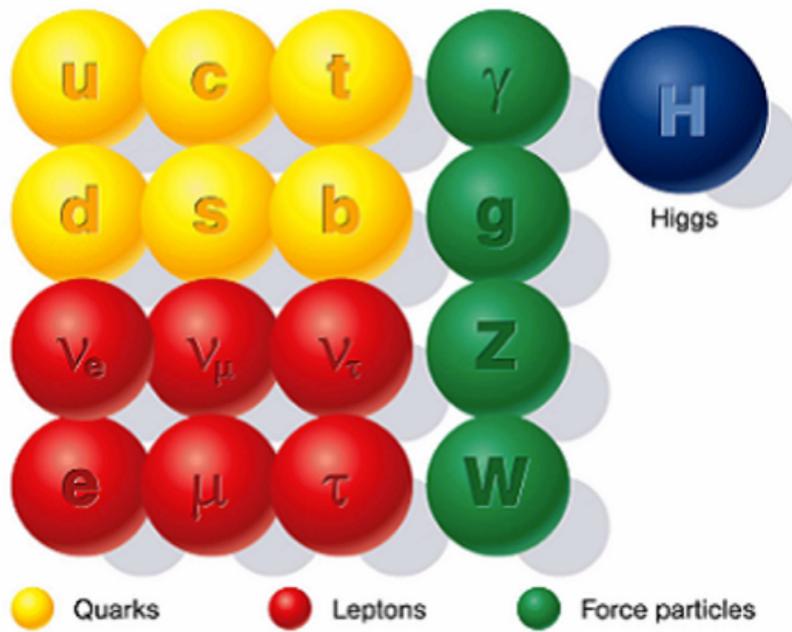


図6 素粒子標準模型

Higgs 粒子はトップクォークや W,Z 粒子等の重い粒子と結合しやすいため、LHC では主に以下の4つの生成過程が予想されている。図7に4つのファインマンダイアグラムを、図8に Higgs 粒子生成の cross-section を示す。

- ・  $gg \rightarrow H$
- ・  $qq \rightarrow qqH$
- ・  $q \bar{q} \rightarrow W/Z H$
- ・  $g \bar{g} \rightarrow t \bar{t} H$

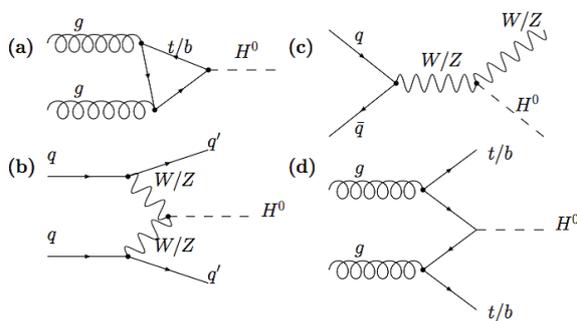


図7 Higgs 粒子生成のファインマンダイアグラム [5]

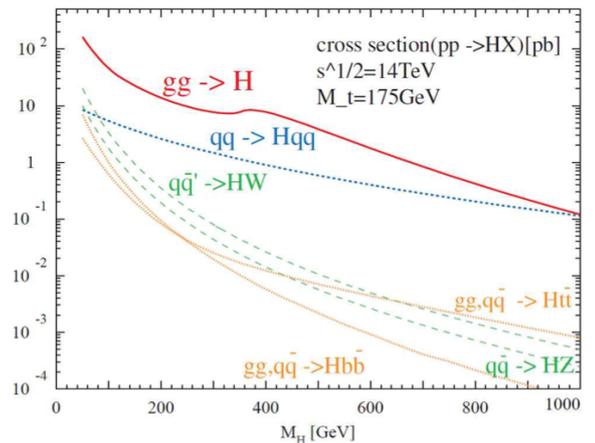


図8 Higgs 粒子生成の cross-section [5]

また、Higgs 粒子の崩壊過程は Higgs 粒子の質量  $M_H$  に依存しており、様々なモードがある。図 9 Higgs 粒子の崩壊分岐比の質量依存性を示す。

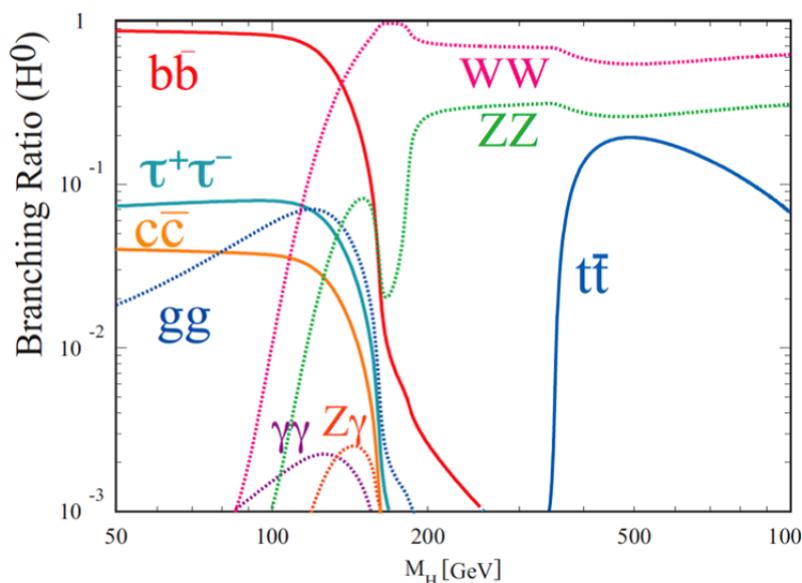


図 9 Higgs 粒子の崩壊分岐比 [5]。横軸が Higgs 粒子の質量で縦軸が分岐比である。

また Higgs 粒子の探索に使われる主な崩壊過程を示す。

- ・  $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow \tau\tau (M_H < 150\text{GeV})$
- ・  $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu (150\text{GeV} < M_H < 180\text{GeV})$
- ・  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l (180\text{GeV} < M_H < 800\text{GeV})$
- ・  $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu (400\text{GeV} < M_H)$

### 1.1.3 ATLAS upgrade

LHC では 2020 年頃に、デザインルミノシティを現在の  $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  から、 $5 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  にアップグレードする計画が立てられている。ルミノシティが増加することにより、25nsec ごとに起こる 1 回のバンチ衝突あたりのイベントレートが増加する。図 10 はルミノシティが  $0.2 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  と  $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  の場合の衝突の様子をシミュレーションしたものである。ルミノシティが  $0.2 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  の場合は 1 バンチの衝突あたり約 5 個の陽子衝突が起こるが、ルミノシティが  $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  の場合は 1 バンチの衝突あたり約 400 個もの陽子衝突が起こると予想される。

ルミノシティを  $5 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$  に保ち長期間運転することによって、2030 年までに積分ルミノシティを  $3000\text{fb}^{-1}$  を貯めるのが目標である。アップグレードをすると、10 年ほどでこの目標を達成できる予定である。

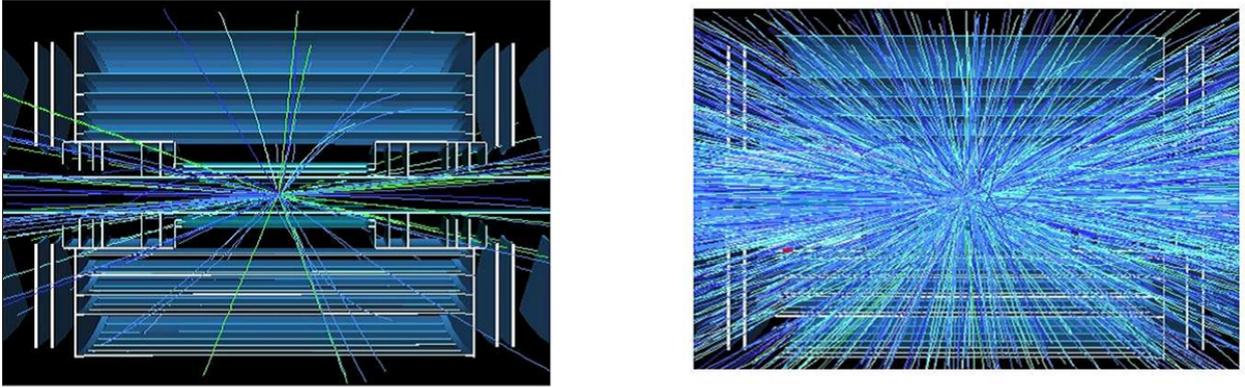


図 10 ルミノシティが  $0.2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  と  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  の時の生成粒子 [6]

ただしそれに伴い積分ルミノシティが  $500 \text{fb}^{-1}$  ほどになると、一部の検出器が放射線損傷による寿命で交換が必要になる。また、一部の検出器では高頻度に入射する粒子を処理しきれないため交換が必要になる。そのため、LHC のアップグレードに伴って、ATLAS 検出器もアップグレードすることが決まっている。

#### 1.1.4 ATLAS upgrade における Endgap Small Wheel の交換案

ここで我々が想定している ATLAS upgrade での  $\mu$ -PIC の配置と役割について述べる。配置する場所について、ATLAS 検出器における座標系はビーム軸を  $z$  軸に取りこれに垂直な方向を  $r$  方向、ビーム軸周りを周回する方向に  $\Phi$  方向を取った円筒座標系を採用している。また、衝突点から引いた線とビーム軸のなす角を  $\theta$  とし、擬ラピディティ (pseudorapidity)  $\eta$  を

$$\eta = \ln \left( \tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (1)$$

と定義する。

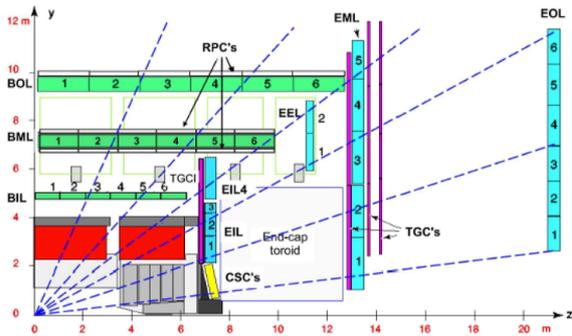


図 11 ATLAS 検出器の断面図 [6]。z 軸がビームラインとなる。

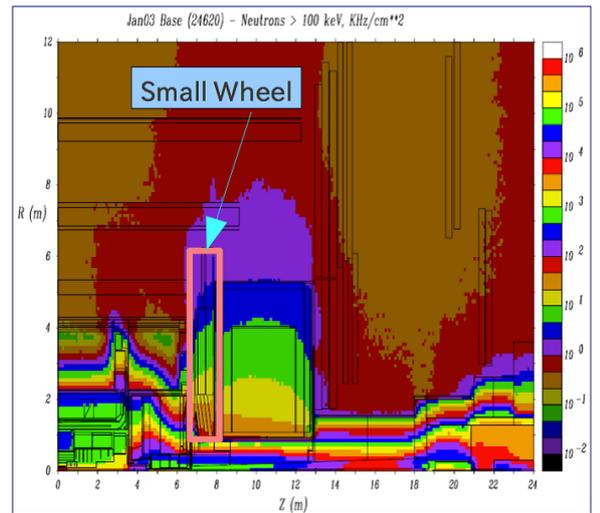


図 12 covern background のシミュレーション [6]。ピンクの枠の場所が導入を提案してきた small wheel である。

ATLAS 検出器は大きく分けて、Barrel と呼ばれる円筒の筒に相当する領域 ( $\eta < 1$ )、Endcap と呼ばれる円筒の蓋に相当する部分 ( $\eta > 1$ ) からなる。さらに、Endcap は、円筒の蓋の円の中心 (ビームパイプ) 付近 ( $\eta > 1.9$ ) をフォワード (前方)、それより外側 ( $1 < \eta < 1.9$ ) の領域を Endcap と呼ぶ。LHC のアップグレード後 (SLHC)、ATLAS 検出器内の Muon 検出器の  $\eta$  の小さな領域、つまり「前方 Endcap」の Small Wheel (以後 SW) に入っている MDT と TGC を交換する予定である。この領域では muon spectrometer のトリガー検出を担っており、位置分解能の良い検出器が必要となる。また、交換する主な理由にビームパイプ付近であるため、covern background ( $n, \gamma$ ) が発生し検出器が鳴りっぱなしになることがあげられる。(図 12)。SW の生成粒子の入射頻度は  $100 \text{ kHz/cm}^2$  と言われ、この高頻度な信号を正確に処理するために、high-rate に強い検出器が必要となる。

MDT, TGC, Micromegas,  $\mu$ -PIC などがこの新 SW の検出器として提案されていたが、2018 年頃に行われる ATLAS upgrade phase1 において Micromegas と TGC が採用されることになった。

ATLAS upgrade の SW で求められる検出器のパラメータをまとめる。

efficiency	99% 以上
位置分解能	$100 \mu\text{m}$
time jitter	25nsec 以内
high-rate 耐性	$100 \sim 1000 \text{ kHz/cm}^2$

## 1.2 検出器

ここでは荷電粒子に対する検出原理を説明する。

### 1.2.1 荷電粒子の検出

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

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

で表され、ここで

$$B = Z \left( \ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right) \quad (3)$$

とし、また  $v$ 、 $z_e$ 、 $N$ 、 $Z$ 、 $m_0$ 、 $e$  はそれぞれ、一次電子の速度及び電荷、単位体積あたりの物質の原子の個数、物質原子の原子番号、電子の静止質量および電荷である。式(2)は Bethe-Bloch の式と呼ばれ、吸収物質を Cu として  $\mu^+$  を入射粒子とした場合のグラフが図 13 である。これを見れば、 $\beta\gamma$  が  $1 \sim 1000$  あたりで単位長さ当りに失うエネルギーが非常に小さくなっていることが分かる。この辺りのエネルギーを持つ粒子を MIP 粒子といい、LHC 又は SLHC で検出した  $1 \sim 1000$  GeV オーダーの  $\nu$  粒子は MIP 粒子である。この粒子を検出する時は電離して出てくる電子が少なく信号が小さくなるので、この少ない電子を増幅させて大きな信号に変換する必要がある。ガス検出器の MIP 粒子検出器として要求される増幅率は  $10^4$  以上と言われている。また、これは muon での電離エネルギーを表したもので、電子の電離エネルギーはまた異なってくる。これは電子が分子中の電子とクーロン散乱を起こし、シンクロトロン放射を起こしやすいため、muon よりも電離エネルギーは大きい。

### 1.2.2 X線、 $\gamma$ 線の検出

X線、 $\gamma$ 線は前述の荷電粒子と異なり、電磁波であり物質との相互作用は弱く、したがって物質中を非常によく透過する。光子が物質と相互作用するのは次の (a) 光電効果、(b) コンプトン効果、(c) 対生成の三つが挙げられる。これらの相互作用の断面積は、X線や $\gamma$ 線のエネルギーと、物質の原子番号  $Z$  に依存する。図 14 は 1 気圧の  $\text{Ar} + \text{C}_2\text{H}_6$  での各相互作用の断面積を表し、図 15 はどのエネルギーでどの相互作用が優位かを表している。

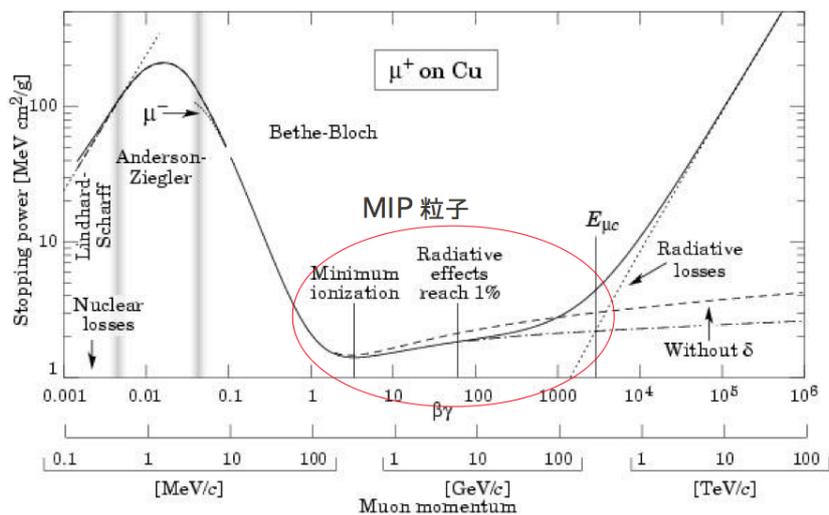


図 13 Bethe-Bloch の式による銅に対するエネルギー損失 [7]。赤丸の範囲では特にエネルギーを落としにくく MIP 粒子と呼ばれる

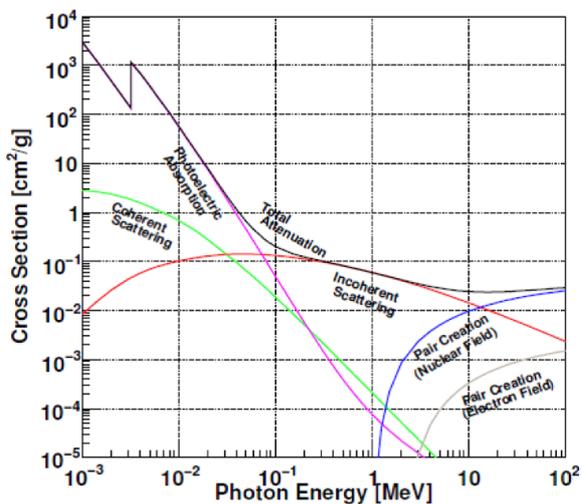


図 14  $\gamma$  線と物質の相互作用 [8]。 $\gamma$  線のエネルギーに対して反応のしやすさを表している。

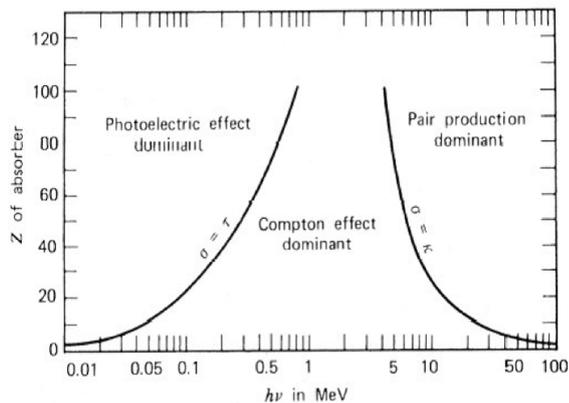


図 15  $\gamma$  線と物質の優位な相互作用 [8]

以下に 3 つの相互作用について述べる。

(a) 光電効果

光子が全エネルギー  $h\nu$  を軌道電子に与え、光電子に変換される反応である。主として最内殻の電子が、ある運動エネルギー  $T$  を持って飛び出す。最内殻の電子と反応する理由には光電効果は原子核とも仮想光子を介して反応するので原子核にもっとも近い最内殻の電子と反応を起こしやすい。ここでエネルギー  $T$  は光子の全エネルギー  $h\nu$  から (K 電子の) 電離エネルギー  $I$  を差し引いた値  $T=h\nu - I$  で与えられる。光電効果の起こる確率は原子番号  $Z$  のほぼ 5 乗に比例するので  $Z$  のおおきな物質は、光子のシールド効果が非常に大きい。ただし、光電効果がコンプトン効果や、電子対生成に優先するのは比較的エネルギーの低い領域で、例えば Al では 50 keV 以下、Pb では 500 keV 以下についてである。本測定では、測定試験のための入射粒子線源として、 $^{55}\text{Fe}$  を用いた。よってここに  $\mu\text{-PIC}$  内で  $^{55}\text{Fe}$  から出た X 線が Ar 原子の電子と光電効果を起こす概観を図 16 に示す。ここでは  $h\nu=5.9\text{keV}$ 、 $I=3.4\text{keV}$  である。(b) コンプトン効果

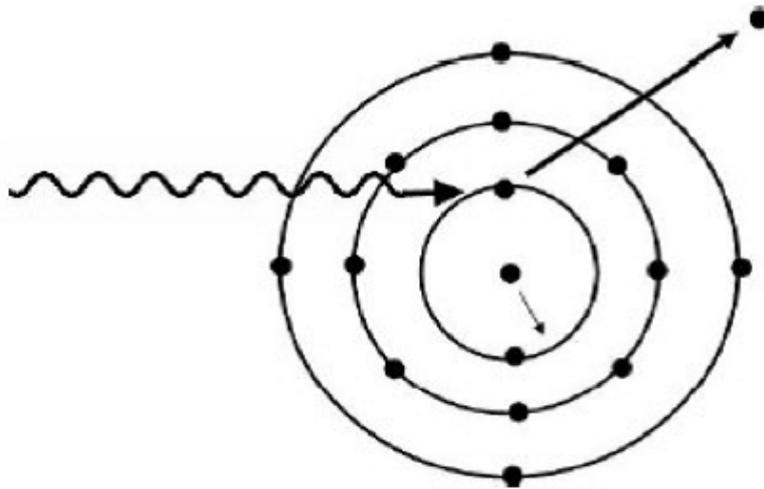


図 16 光電効果の概念図 [9]。入射光子が最内殻電子に衝突し、その電子は  $T=h\nu-I$  のエネルギーを持って飛び出す

光子が物質中の原子の外殻電子と衝突して、外殻電子を弾き飛ばすとともに、エネルギーの低い光子が出て行く現象で、それらのエネルギー運動方向は光子と自由な電子の衝突として、エネルギー保存則、運動量保存則から簡単に導くことができる (図 17 参照)。簡単な計算から  $\theta$  方向に出て行く光子のエネルギー  $(h\nu)'$  は、入射エネルギーを  $h\nu$  とすると

$$(h\nu)' = h\nu \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos\theta) h\nu} \quad (4)$$

と表され、反跳電子のエネルギー  $T$  は

$$T = h\nu \frac{(1 - \cos\theta) h\nu}{m_e c^2 + (1 - \cos\theta) h\nu} \quad (5)$$

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

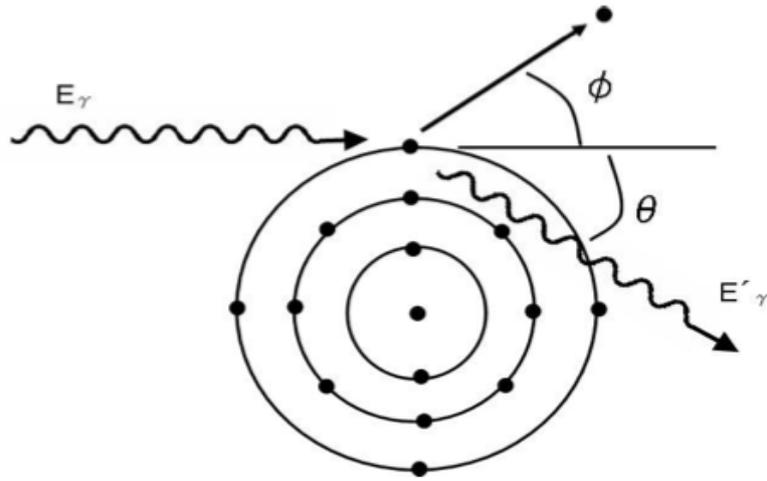


図 17 コンプトン効果の概念図 [9]。光子が外殻電子を弾くとともに、エネルギーの低い電子が出てくる。

(c) 対生成

光子のエネルギーが電子の静止エネルギー  $m_e c^2$  の二倍以上になると、物質中の電磁場（主として原子核によるクーロン場）との相互作用により  $\gamma$  線が突然消失して電子と陽電子が運動エネルギー  $(h\nu - 2m_e c^2)$  を分かち合っ て飛び出してくることがある (図 18)。電子または陽電子の持つエネルギーは 0 から  $(h\nu - 2m_e c^2)$  にわたっており、エネルギー  $E$  を持つ確率はほぼ  $E$  に逆比例している。また電子対生成の起こるか確率はだいたい原子番号  $Z$  の 2 乗に比例している。陽電子は物質中でその運動エネルギーを失い、やがて  $(10^{-10} \sim 10^{-9}$  秒) 物質中の電子と対消滅し、 $(h\nu)' = m_e c^2 = 510\text{keV}$  の 2 個の光子を出す (3 個の光子を出すこともある)。

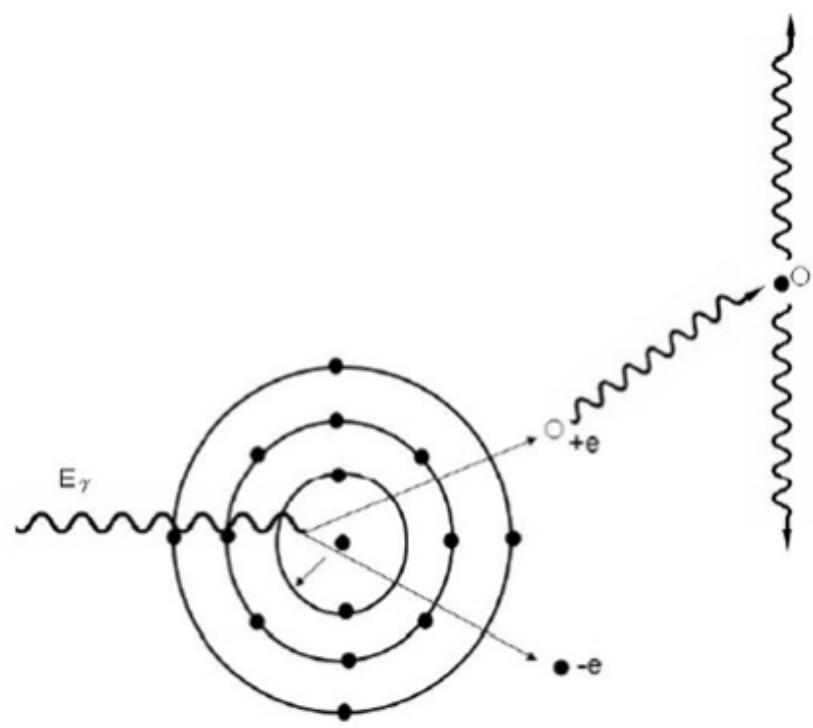


図 18 対生成の概念図 [9]。 $\gamma$  線が消失して電子と陽電子が飛び出す。

### 1.3 ガス検出器

ガス検出器は、荷電粒子や $\gamma$ 線のような入射粒子を、ガス増幅を用いて検出する測定機器である。その検出過程は動作ガスに満たされたチェンバー内に入射した荷電粒子や $\gamma$ 線が、ガス物質との相互作用によって荷電粒子(一次電子、種電子とも)を生じる。次いで陽陰の印加電圧によって生じた電場により、陽極にドリフトされる。ドリフトしてきた自由電子が高い電場を持つ領域で増幅され(2次電子)、これを検出する。この時かける電場の強さによってこの電子の増幅率に違いがある。大きく以下の4つの領域に分けられる(図19)。

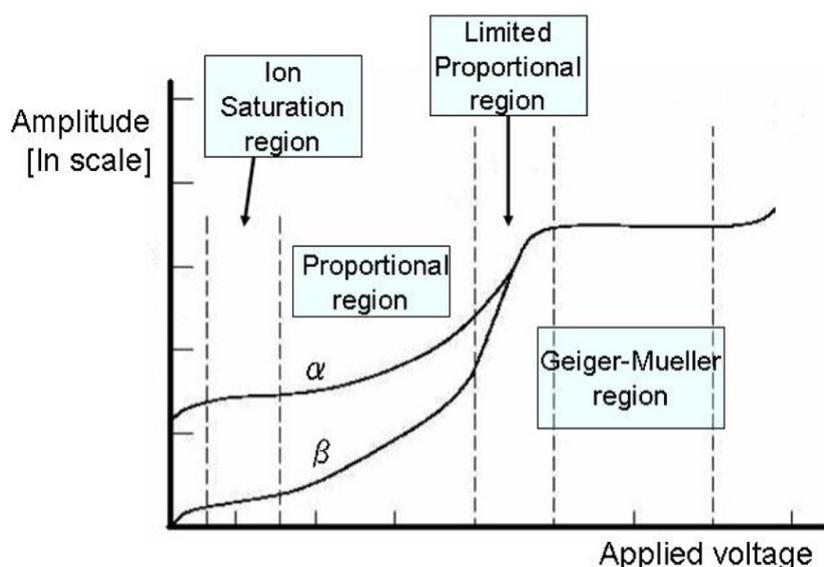


図19 横軸を印加電圧、縦軸を増幅率としたガス増幅領域 [9]。印加電圧によって4つの領域に分かれる。

#### ・電離飽和領域 (ion saturation)

きわめて低い電圧に置いては、最初のイオン対を収集する前に再結合してしまい、すべてを収集することができない。電圧を挙げてすべて収集できるようになった状態をさす。この領域で電離箱を動かす。

#### ・比例計数領域 (proportional region)

( $\text{Gain} < 10^6$ ) : 一次電離(種電子)に比例した出力をする。この領域で比例計数管や MWPC などのほとんどの wire chamber を動かす。

#### ・限定比例領域 (Limited proportional region)

( $10^6 < \text{Gain} < 10^8$ ) : 幅増過程で生じる紫外線によるイオン化が無視できなくなり、比例関係は崩れる。

#### ・ガイガーミュラー作動領域 (Geiger Mueller region)

( $10^8 < \text{Gain} < 10^{10}$ ) 紫外線が検出器全体に広がり、一次電離に関係なく一定の出力をする。この領域で GM 計数管が使われる。

この章で簡単にこれまで高エネルギー物理学で使われてきたガス型検出器を紹介する。

## 1.4 電離箱

チェンバー内は、100V/cm 程度の大きさを持つ電場のかかった状態で、動作ガスに満たされている。荷電粒子がチェンバー内を通過するとその中のガスはイオン化され、これをもって入射粒子線の強度を測定するのが電離箱である。電離箱の最も簡単な構造は、図 20 に示すような 2 枚の平行な電極板間に Ar のような動作ガスを封入したものである。この検出器は、ある程度の粒子線の強度を測定することができるが、個々の粒子線を測定することができない。

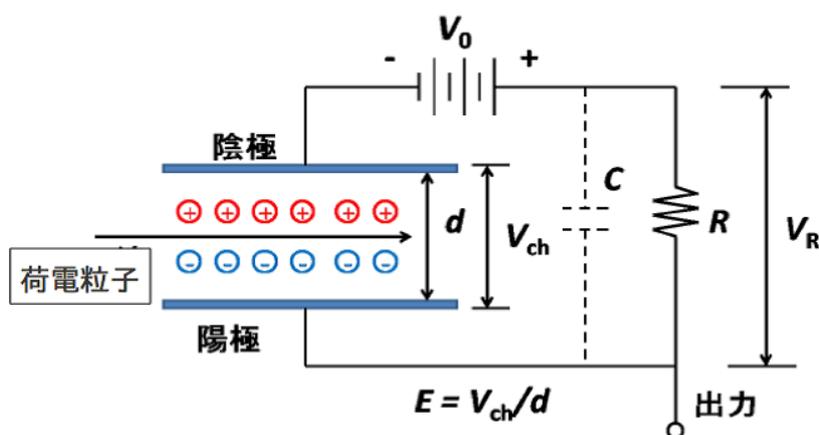


図 20 電離箱の概観 [9]。入射した荷電粒子により発生したイオンを読み取る。

## 1.5 比例計数管

まず、比例計数管を用いて、ガス増幅を用いた検出器の説明をする。Ar に  $C_2H_6$  などを混ぜた混合ガスを充填した比例計数管の内部電場は図 21 のように円筒を陰極にし、その内半径を  $b$  として、陽極のワイヤーの半径を  $a$ 、印加電圧を  $V$  とした時に、内部の電場は半径方向の位置  $r$  により、

$$E(r) = \frac{V}{r \ln ba} \quad (6)$$

で表される。この式からワイヤー近傍の電場が非常に強くなることが分かる。これによって、粒子線が管内のガス中で生み出されドリフトしてきた 1 次電子にさらにエネルギーを与えて、さらに近傍の分子を電離させ、大量の電子、イオン対が生成される。この過程はタウンゼント型電子雪崩 (Townsend avalanche) と呼ばれる。単位長さ当りに電子の数が増加する割合は式 7 で表され、 $\alpha$  はガスに対する第 1 タウンゼント係数 (Townsend coefficient) と言われている。

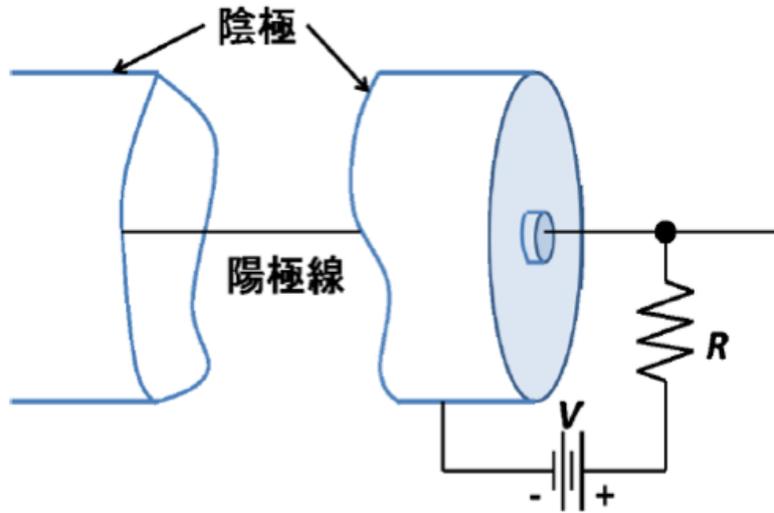


図 21 比例計数管の概観 [9]。円筒中心部と外筒の間に高電位をかけ、ガス増幅される。この配置により中心部の電場が強くなる。

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (7)$$

また、 $\alpha$ が  $x$  に依存しなければ

$$n(x) = n_0 e^{\alpha x} \quad (8)$$

となる。ここで、 $n(x)$  は経路  $x$  を通過した時の電子の総数、 $n_0$  は  $x=0$  での一次電離により生成した電子の数である。式 8 より、指数関数的に増加することが分かる。これはガス増幅器 (比例計数領域) に特徴的な事実である。図 22 はガス分子が電離しイオン対が生成した後、電子雪崩を起こし陽極ワイヤーに到達し、信号として検出されるまでの電子とイオンの様子を示している。

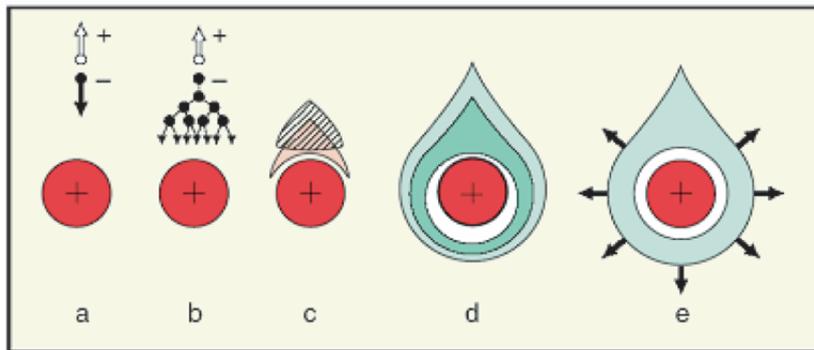


図 22 電極付近の高電場により電子雪崩を起こしていく様子 [9]

## 1.6 TGC(Thin Gap Chamber)

ここで ATLAS で使用されている検出器である TGC,MDT に触れ、今回測定を行った  $\mu$ -PIC と Micromegas について記述する。TGC(Thin Gap Chamber) は MWPC の一種で ATLAS 検出器の muon spectrometer のトリガー検出器に採用されている。TGC の構造は 2 枚の平行陰極板 (カソードストリップ) に等間隔に並んだ陽極 ワイヤが配置されている (図 23)。ワイヤとカソードストリップ間の間隔 (1.4mm) とワイヤ間隔 (1.8mm) が狭くなっているのは、電子のドリフト時間を短くし、さらに陽イオンのドリフト距離を短くするためである。これにより、電子のドリフト時間を短くし、さらに陽イオンのドリフト距離を短くする為である。これにより、粒子が高頻度で粒子が入射してきても検出効率を落とさないようにできる。内部には  $\text{CO}_2$  と n-ペンタンの混合ガスで満たされて、ワイヤには 2.9kV の高電圧が印加される。ガス増幅率は  $10^6$  程度、位置分解能は 1cm 程であり、時間分解能は 25nsec のゲート幅に大して 99% の検出効率である。ATLAS に設置される TGC の総数は約 3700 枚で全チャンネル数は R 方向で約 22 万、 $\Phi$  方向で約 10 万になる。

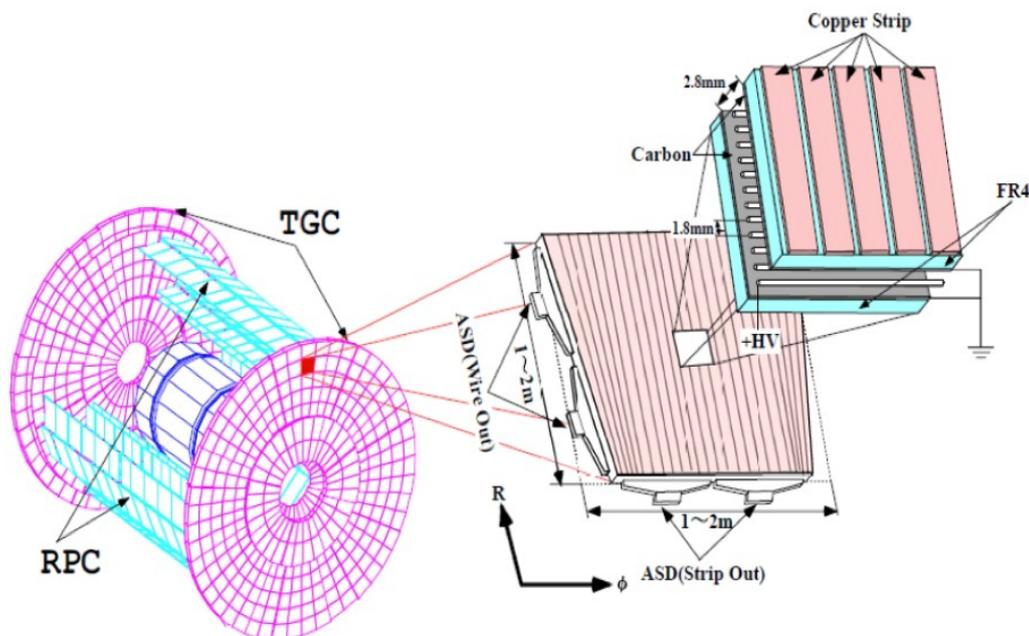


図 23 TGC の外観図 [3]

## 1.7 MDT(Monitored Drift Tube)

MDT は ATLAS のバレル部、エンドキャップ部の広い領域をカバーし、R-Z 方向成分を精密に測定できる。またこのチェンバーはレーザーを使ったセンサで現在位置をモニタしている。その構造は図 24 に示すようなチューブ径 30mm、ワイヤ径  $50\mu\text{m}$  のドリフトチューブを正確に積層したものであり、位置をドリフト時間とシグナルの大きさから求めている。位置分解能は  $60\mu\text{m}$ 、総チャンネル数は 30 万チャンネルである。

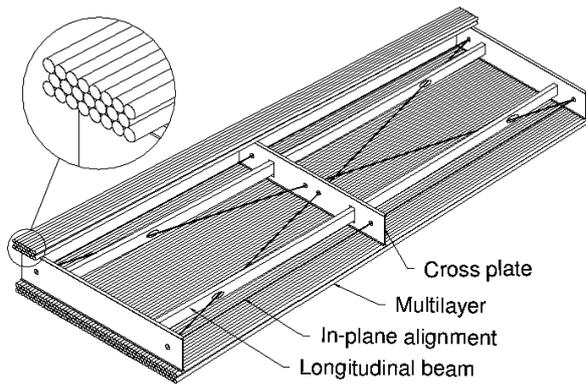


図 24 MDT の外観図 [3]。検出器であるチューブを積層し、ヒットしたチューブの配置から粒子の軌跡を決定する。

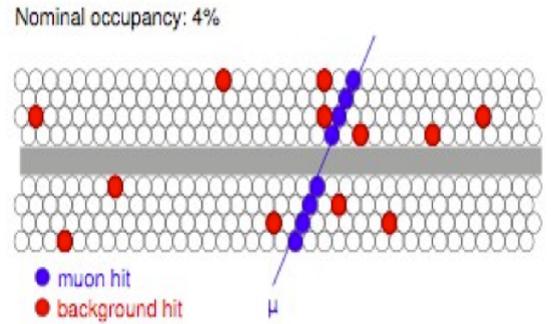


図 25 MDT でのミュオン軌跡決定の様子。

## 1.8 $\mu$ -PIC(Micro Pixel Chamber)

$\mu$ -PIC はガス増幅検出器として 2001 年に開発されたものである [10]。この  $\mu$ -PIC は  $\gamma$  線カメラや暗黒物質探索、医療装置として開発が進んでいる。ここでは、 $\mu$ -PIC の特徴や動作原理を述べる。

### 1.8.1 動作原理、特徴

$\mu$ -PIC とは MicroPixelChamber の略であり、微細構造を持ったガス粒子検出器である。その構造は MSGC と同様に Anode と Cathode が存在するが、MSGC と違い  $\mu$ -PIC では Anode が丸い点状 (ピクセル) に配置され、その周りを Cathode が囲む形になっている (図 26)。Anode は下部の絶縁層 (ポリイミド) 部分を貫き、裏面のストリップでつながっている。上部には Drift Plane を配している。また、Cathode は絶縁層の上に置かれていて、裏面の Anode ストリップと垂直方向に区切られており、Anode-Cathode 両方から読み出しをすることにより、二次元情報を得ることができる。Anode にはプラスの電圧、Cathode と Drift-Plane にはマイナスの電圧を印加し、基板表面から離れた部分 (Drift Area) は  $1\text{kV/cm}$ 、Anode-pixel 近傍では  $100\text{kV/cm}$  程度の強度にする。この構造により Anode 周りの電場が高くなり MSGC よりも高い増幅率を得られるようになった。また Cathode 周りでは電場が弱くなるため、高い電圧を電極に印加しても放電を起こしにくくなった。さらに、プリント基盤を用いるため将来的に大量生産を行うこととなった場合、電子回路の既存の微細構造技術を流用することで非常に安価に生産できる利点もある。

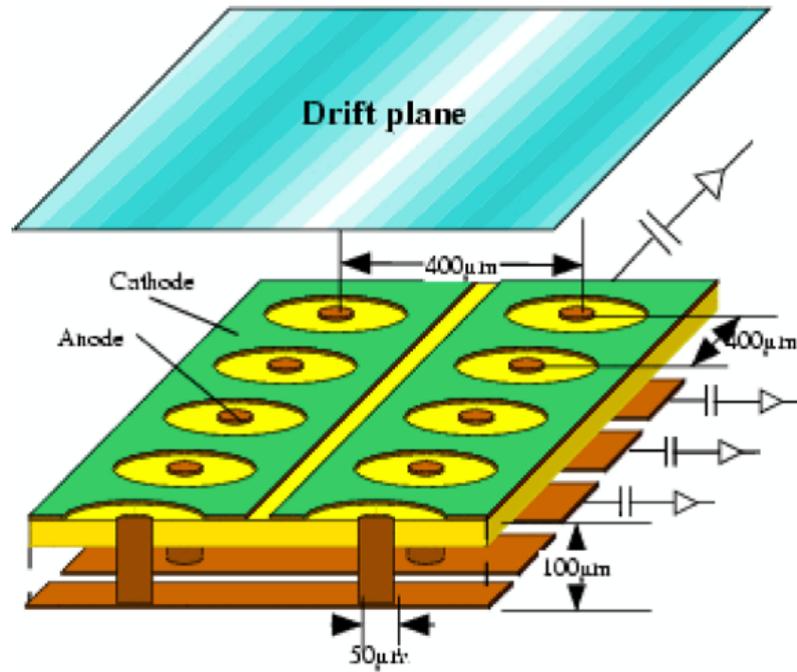


図 26  $\mu$ -PIC の外観図 [10]。図の茶色の丸が Anode で下で読み出しストリップと繋がっている。また緑色が Cathode ストリップとなりそれぞれ読み出しに繋がっている。

Drift-Plane 上部から入射した放射線は  $\mu$ -PIC 内のガス分子との相互作用により電子とイオン対のペアが生成する。Drift-Plane に印可した電圧によって形勢された電場 (Drift 電場) によって、電子は基板方向にイオンは Drift-Plane 方向に移動 (ドリフト) する。電子が基板表面に近づくと、Anode-pixel 近傍に形成された高電場により電子雪崩が起こる。この時生成された大量の電子は Anode へ向かい、イオンは Cathode に到達する。Anode、Cathode 共にイオンの誘起電荷を信号として得ている。図 27,28 には  $\mu$ -PIC での増幅過程の模式図と Anode 周辺の電場の様子を示す。

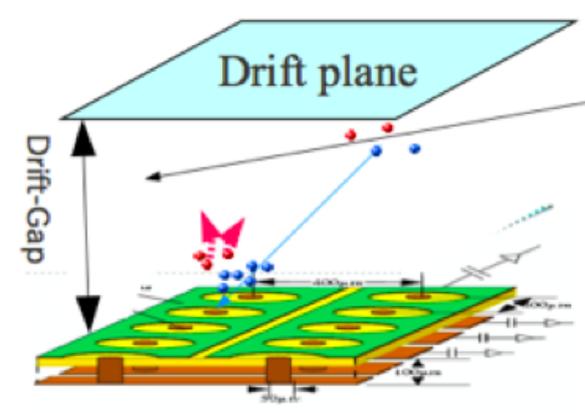


図 27 ガス増幅のイメージ [11]。検出器に入射した粒子がガスをイオン化する。それによって電離した電子がドリフトプレーンの電場により  $\mu$ -PIC の方向へ移動する。 $\mu$ -PIC 付近の高電場により電子雪崩を起こし増幅され信号として検出される。

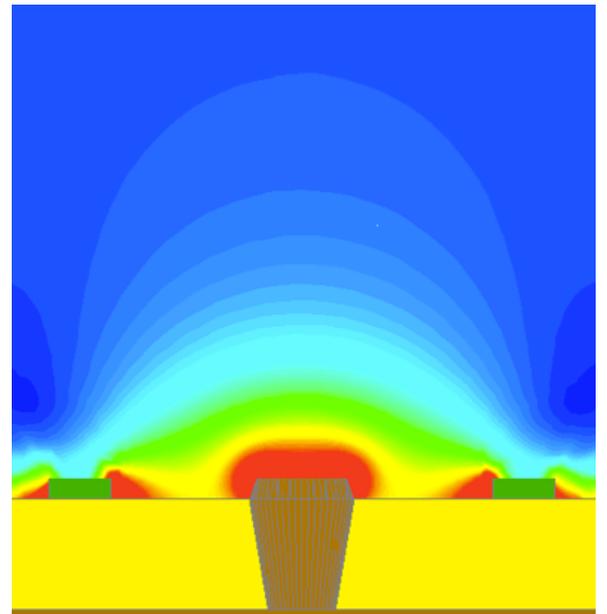


図 28 Anode 付近の電場強度。中央の茶色が Anode を表し、両端の緑が Cathode を表す。 $\mu$ -PIC は Cathode が anode を取り囲むように配置されているので Anode 付近で高電場が発生する。

## 1.9 Micromegas

MicroMEGAS は 1996 年 Giomataris(仏) が考案した、高頻度粒子線検出器である [12]。天板 (DCP-Drift Cathode Plane)、MicroMesh、Anode Plane の 3 つの平行極板構造のガスフロー型検出器で、非常に高頻度な信号にも対応できる。フランスの Saclay グループは COMPASS[13] 実験で既に実用化し安定動作に成功している。ここでは  $40 \times 40 \text{cm}^2$  に 30MHz のミュオン信号を処理し、360 の micro strip で  $70 \mu\text{m}$  の位置分解を持つ。

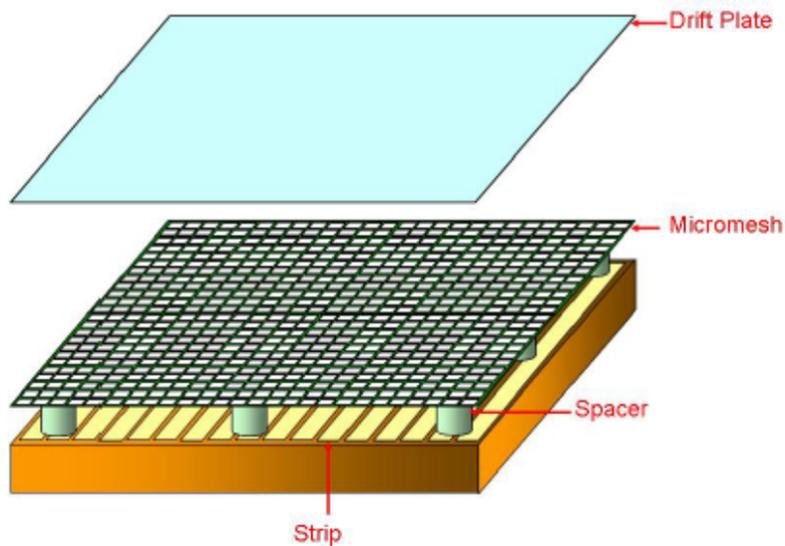


図 29 Micromegas の外観図。読み出しストリップの上にメッシュが配置されスペーサーで固定されている。ドリフトプレーンとメッシュに電圧を印加し動作させる。

### 1.9.1 動作原理、特徴

図 30 に MicroMEGAS の構造と増幅過程、図 31 に電場の様子を示す。Conversion gap(アノード・メッシュ間)での電場、Amplification gap(メッシュ・DCP 間)での電場をそれぞれ  $E_{drift}$ 、 $E_{amp}$  と定義し、 $E_{drift} \gg E_{amp}$  となるように DCP とメッシュにそれぞれマイナスの電圧を印加する。電場はいずれも上向きなので、生成された電子は下方へ、陽イオンは上方へ引きよせられる。メッシュは絶縁体の小さなスペーサーで支えられることにより、Amplification gap は非常に狭い空間となり、大きな電場を持たせられる。入射粒子が Conversion gap にてガスをイオン化し電子が生成されると、その電子はメッシュまでドリフトし、メッシュを通過後 Amplification gap にて電子雪崩(ガス増幅)を起こす。その際に生成された電子はアノードへ、陽イオンはメッシュに引きよせられ、その信号を読み取る。

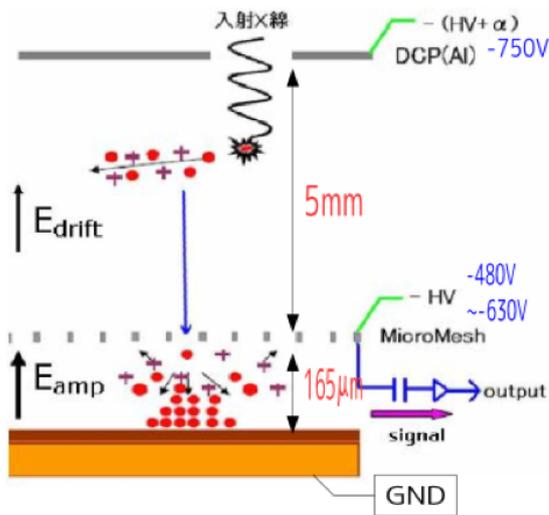


図 30 ガス増幅のイメージ。検出器に入射した粒子がガスをイオン化する。それによって電離した電子がドリフトプレーンの電場によりドリフトした電子をメッシュ付近の電場で増幅し、ストリップで検出する、

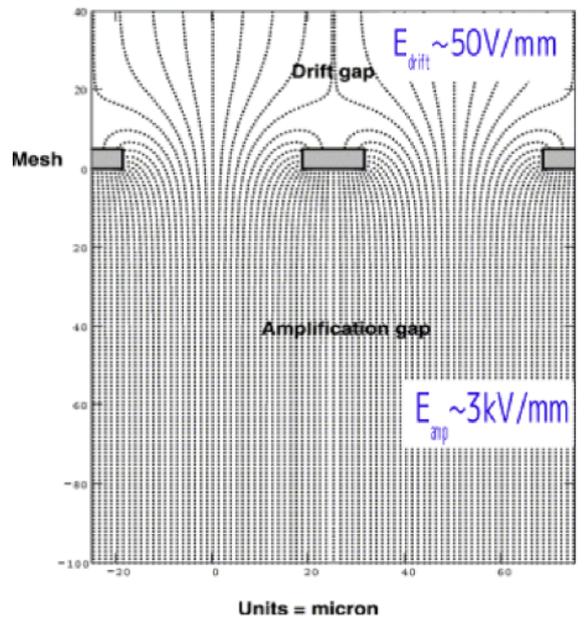


図 31 Anode 電場強度。図の四角はメッシュを表す

### 1.9.2 resistive Micromegas

近年、電極の素材に高抵抗素材を用いた検出器の開発が盛んに行われている。神戸大学グループでも陰極に高抵抗素材を使用した  $\mu$ -PIC と Micromegas の開発を行っている。ここでは電極に高抵抗素材を使う目的について説明する。

ATLAS 実験を例にとると、Higgs 粒子を発見するためには Higgs 粒子の崩壊後の粒子のパラメータを測定することにより、崩壊前の粒子を再構成し測定を行う。そして観測する崩壊後の主な粒子は光子とレプトンである。この内、特に  $\mu$  粒子は MIP (Minimum Ionizing Particle) と呼ばれ、ガス検出器内で生成する種電子の数が少ない。ゆえに検出器を増幅率の高い状態で動作させる必要がある。一方このようなハドロン衝突実験ではバックグラウンドとして中性子が発生する。この中性子は HIP (Highly Ionizing Particle) と呼ばれ、ガス検出器内を通過すると大量の種電子が発生する。この種電子が高い増幅率で電子雪崩を起こし、 $10^7 \sim 10^8$  程の電子数まで増幅すると検出器の電極間での放電現象が増加する。この放電が検出器の絶縁破壊に繋がる。放電を抑制するために電極に高抵抗素材を使う開発が進んでいる。放電が起きるほどに電子が増幅された場合を考える。resistive 内の高い抵抗値により電圧降下で電場が弱まり、放電が自己抑制される。また、電極と読み出しストリップを絶縁層で遮断し誘起電荷で信号を読み出す方式を採用しており、さらなる放電抑制効果が期待される。

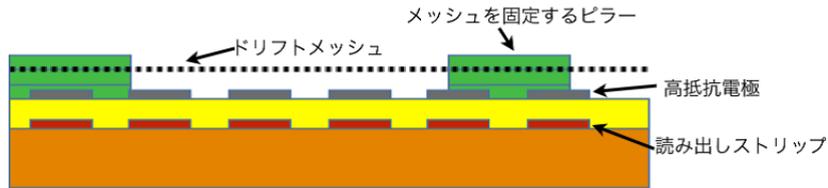


図 32 resistive Micromegas の断面図 [14]。高抵抗陰極が表面に配置され、その下に読み出しストリップが絶縁層に埋まっており、高抵抗陰極からの誘起電荷により信号を読み出す。

## 2 読み出し回路

ここで現在使用している読み出しについての説明を簡単に行う。図 33 に読み出しのブロック図を示す。 $\mu$ -PIC の Anode, Cathode から来た信号は ASD で増幅され、ASD buffer に送られる。その後、セルフトリガーでデータ収集を行うために、Linear- FAN-IN/OUT で信号を ADC 入力用と Gate 入力用に 2 つに増やし ADC (Analog Digital Convertor) にそれぞれ入力し、データを収集する。Gate 信号は Discriminator と GateGenerator を用いて作成した。Gate 信号はデータ収集の最中に次の信号が来るとエラーが起きる可能性があるため 10msec の VETO をかけている。また、約 30m のケーブルを用いて ADC 入力用の信号を遅らせて、Gate 信号に ADC 入力信号が入るように調節している。

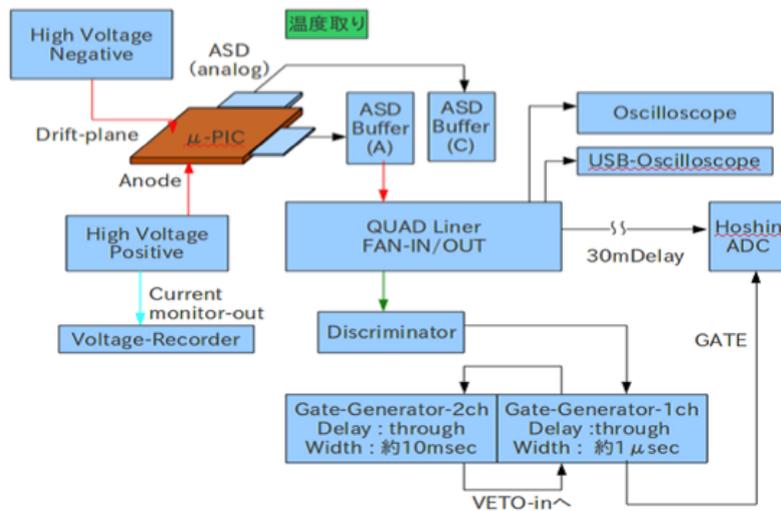


図 33  $\mu$ -PIC の読み出しブロック図。ASD にて増幅し、discriminator でノイズカットを行った後、データ収集を行う。[11]

現在使用しているこの読み出しは Anode, Cathode それぞれ 16 チャンネルしか読み出せず、多チャンネルでの読み出しを行うには他の読み出しが必要となる。

## 2.1 FE2007

現在の高エネルギー実験では高位置分解能、高時間分解能が求められ、検出器は多チャンネルでの高速読み出しが求められている。多チャンネルでの読み出しでは前節で述べた読み出しに必要な増幅器、discriminator などがそれぞれ必要となり回路素子の集積化が求められる。そういった目的で作られた FE2007[15] と呼ばれる読み出しボードを今回の実験に用いた。図 34 に全体像を示す。

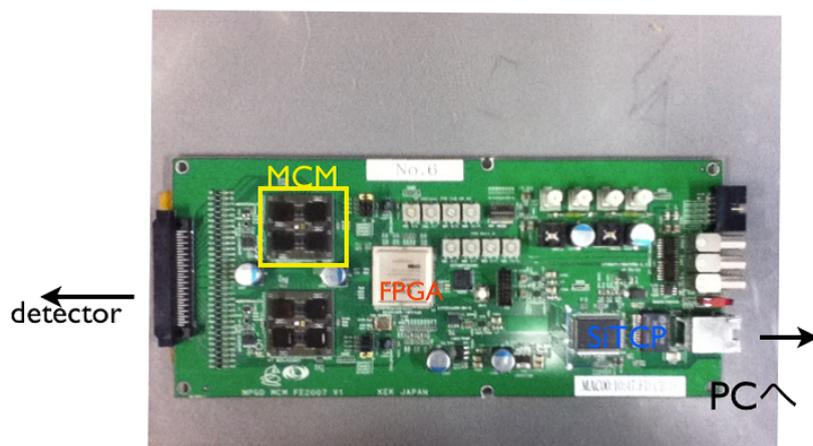


図 34 読み出しボード FE2007

この読み出しボードには ASIC(application specific integrated circuit) チップと FPGA (field-programmable gate array) が搭載されている。これらにより、検出器より得られた微弱信号の増幅・信号処理を行い、入力電荷をアナログ信号の電圧波高として、ヒットの有無およびタイミング情報をデジタル信号として出力することが可能となっている。このような小さなボードに 64 チャンネル分の ASIC を搭載できるのは、1つの ASIC チップで 8 チャンネル分読み出すことができる LSI(Large Scale Integration) 技術と、ASIC チップを 4 つ搭載することができる MCM(Multi Chip Module) 技術の成果である。また、このボードはイーサネットとボードをつなぐことで動作させることができ、ボード一枚でも動作が可能である。更にハブを用いれば PC1 台に対して複数枚のボードを動作させることも可能である。そのため、原理的に使用できるチャンネル数に制限はない。また、基盤表面にはモード切り替えのためのスイッチがついており、回路設計によって信号極性の変更やパルス幅によるノイズ信号の識別、外部からの時刻基準信号の入力など、動作モードを変えることが可能であり、目的に合わせて様々な要求に対応できるように作られた汎用型の読み出し回路である。読み出しのシステムについての概要を図 35 に載せる。



図 35 読み出し概念図 [15]。ASIC にてアナログ信号を波形処理しデジタル信号に変換後、FPGA にて回路処理を行う。そして PC でデータ収集を行う。

読み出し回路では、読み出しストリップからのアナログ信号を ASIC で増幅し、デジタル信号に変えて FPGA に送る。FPGA では送られたデジタル信号を信号処理しネットワーク処理を行った後、PC にデータを転送する。PC では送られたデータを元に Anode ストリップと Cathode ストリップとのコインシデンス (同時性) を取って画像処理を行う。ボード内のデータの流りにそって説明を行う。

表 2 FE2007 仕様 [16]

ch	64
ノイズ	100pF
Gain	0.44 V/pC
Comp input Gain	13V/pC
Cross talk	0.6%
READOUT CLOCK	100MHz
消費電力	24mW/ch

## 2.2 データの流れ

ここでは読み出しボードに入った信号がどのように処理されるかを説明する。

### 2.2.1 ASIC

ASIC とは電子部品種別の一つで特定用途向けに複数機能の回路をまとめた集積回路の総称である。今回使用したボードの ASIC の主要構成要素は前置増幅器、波形整形回路、コンパレータ、そして Digital to Analog Converter(DAC) などがある。図 36 に全体構成を示す。検出器に接続され雑音から効率よく微小信号を拾い上げる役割を担う前置増幅器、後段回路で取り扱いを可能にするべく増幅・整形を行う波形整形回路、設定した閾値以上の信号検出を知らせるコンパレータである。これらに加え、チャンネルの閾値ばらつきが大きさが問題とされる CMOS プロセスの対策として実装された閾値ばらつき補正用 DAC、全チャンネルのアナログ出力を一つにまとめるサムアンプ、内部ロジックを LVDS レベルに変換する LVDS コンバータ、較正パルス入力の信号経路に用いられるアナログスイッチなどで構成される。

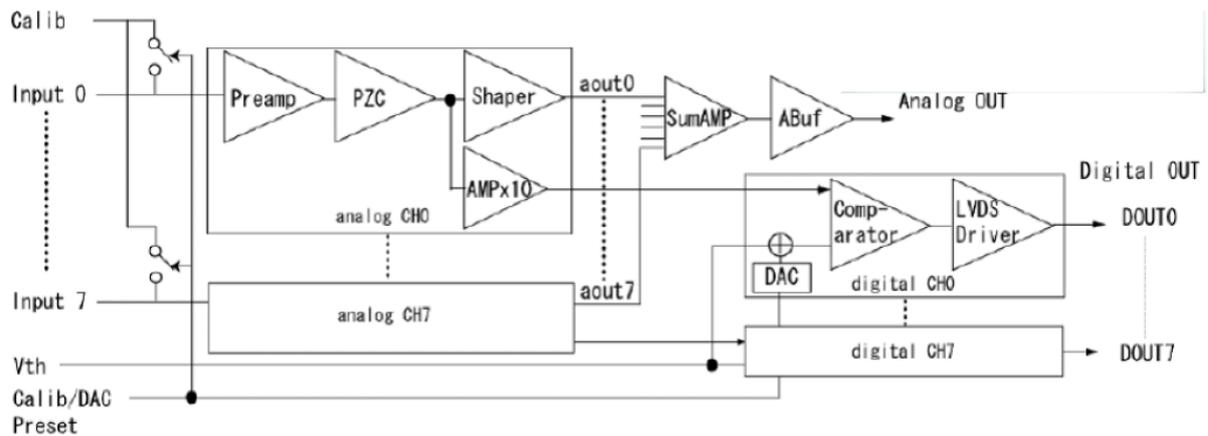


図 36 ASIC のブロック図 [16][17]。プリアンプで増幅され波形整形を行い、デジタル信号に置き換えられる

#### (a) 前置増幅器 (Preamp)

検出器で発生した電荷を受け取り電圧に変換して伝達する。前置増幅器は系の S/N を決定するため検出器の信号が回路内部の雑音に埋もれないよう検出器に対して適切な入力インピーダンス特性を持つ必要があり、また回路雑音も十分に小さい必要がある。許容電荷は $-1.5\text{pC} \sim +1.5\text{pC}$ となっている。

#### (b) ポールゼロキャンセル (PLZ)

前置増幅器の出力は数 $\mu\text{s}$ の時定数で放電されるが、このままでは放電が終わる前に次の信号を受け取る度にダイナミックレンジが狭くなる。更に最終段のサムアンプでは複数チャンネルの信号を受け取るため、高レートに対応するためには前段で時定数を小さくしておく必要がある、本回路がその役割を担う。本回路では時定数は $25\text{ns}$ として出力される。前置増幅器のポールをキャンセルするために前段と同一構成のトランスコンダクタンスアンプを用いている。

#### (c) 波形整形回路

オペアンプおよび5つの R ないし C で構成される多重帰還型 2 次ローパスフィルターである。フィルタ特性はバターワース、低周波ゲインは 1、クオリティファクタ  $Q = 0.7$ 、ピーキング時間は J-PARC での高カウントレート X 線測定の要求から  $20\text{ns}$ (固定)としている。

#### (d) コンパレータ

ある一定の閾値となる電圧を決め、その値より信号線の電圧が高ければその信号線にはヒットがあったとしデジタル信号を作る。低消費電力のため差動インバータ多段チェーン (4 段アナログ増幅) による方式を採用している。入力電圧  $5\text{mV}$  以上、閾電圧  $2\text{mV}$  以上、差動出力  $1.9\text{V}$ 、消費電力は約  $1.2\text{mW}$  である。タイムウォーク改善のため、入力信号を前段アンプにより 10 倍に増幅している。

#### (e) Digital Analog Converter(DAC)

閾電圧のチャンネルばらつきを補償する目的で用いられ、チャンネル毎に実装される。5つの重み付け電流源と制御回路からなるバイナリウェイト方式 5-bit DAC である。外付け抵抗 RD により電圧に変換を行い出力とする。電流値は各電流源に直列接続されたスイッチにより制御する。最小電流源の設計値は  $1.6 \mu A$  であり、RD の値を選ぶことにより最小補償電圧を調整することができる。最小電圧を 10mV に設定した場合には補償電圧として約 300mV をカバーできる。

以上が ASIC の構成である

ASIC チップ 1 個で 8 チャンネル分の信号を読み出すことができ MCM には 4 個の ASIC チップが搭載されているので、MCM1 個では 32 チャンネル分の読み出しが可能である。このボードには 2 つの MCM が搭載されており 64 チャンネルまで読み出すことができる。チェンバーからの信号は MCM の ASIC チップで処理をされてから FPGA へ送られる。

#### 2.2.2 閾値設定

ここで ASIC 内での閾値の設定について説明を行う。信号の閾値はストリップのごとや ASIC のごとのばらつきなどを考慮して設定する必要がある。各チャンネルの閾値は 4 枚の ASIC チップを搭載している MCM の閾値 ( $V_{th_{MCM(j)}}$ ) と、ASIC との閾値 ( $V_{th_{ASIC(i)}}$ ) を足し合わせたものとなる。そのため次式で書くことができる。

$$V_{th_{ch(i)}} = V_{th_{MCM(j)}} + V_{th_{ASIC(i)}}$$

ここで、i はチャンネル番号 (0 63) に、j は MCM の番号 (0,1) に対応する。

(a)  $V_{th_{MCM(j)}}$  の設定方法  $V_{th_{MCM(j)}}$  は MCM についている外付けの DAC により設定することができ、この DAC の値の設定は PC から FPGA を介して行うことができる。読み出し回路には 2 つの MCM ボードが搭載されている。図 37 に DAC の値 (X 軸:Offset 値) と実際に MCM ボードにかかる閾値 (Y 軸: $V_{th_{MCM(j)}}[mV]$ ) との関係を示す。おおよそ Offset 値 1000 に対して 200mV の対応となっている (Offset5=1mV)。この値は MCM ボードの閾値になるため、MCM ボード上の 4 つの ASIC、つまり 32 チャンネルに全て共通に設定されることになる。

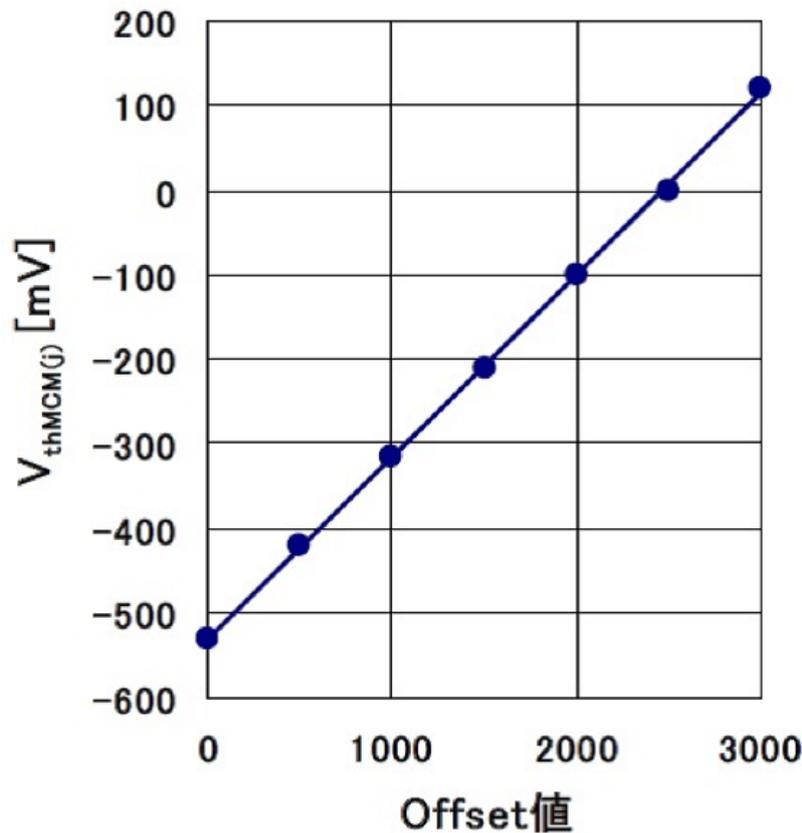


図 37 Offset の設定値と Vth の値 [15][18]

(b)  $V_{th_{ASIC(i)}}$  の設定方法

$V_{th_{ASIC(i)}}$  も ASIC チップについている DAC によって設定が可能であり、0~300mV の範囲で 10mV ずつ設定することが可能である。これにより各 ASIC のバラつきを補正することができる。これも PC から FPGA を介して行うことができる。

(c)  $V_{th_{ch(i)}}$  の設定方法

各チャンネルの閾値の設定方法として、チャンネルごとのベースの位置を特定することで、どのチャンネルもそれぞれのベースの位置から等しい値の閾値を設定するようにした。図 38 に Vth の設定方法の概要を示す。

各チャンネルのベースの位置は同じではないので、まず、 $V_{th_{MCM(j)}}$  の値を変えて 32 チャンネル全てに対して大まかに  $V_{th_{ASIC(i)}}$  の位置を設定する。つまり、最初にベースラインのノイズを観測したところを  $V_{th_{MCM(j)}}$  の値とした。そこから  $V_{th_{ASIC(i)}}$  の値をそれぞれの c チャンネルに対して変化させることでチャンネルごとのばらつきを補正すること可能となる。更に図 39 のように閾値を変えながらカウント数をプロットし、その前後の値の差分をとりガウス分布でフィットすると、図 40 のようなプロファイル分布が得られる。この分布がベースラインのノイズ分布に相当するので、任意のチャンネルのベースの位置とノイズの広がりを求めることができる。これより、各チャンネルのベース位置の情報と ASIC のばらつきの補正により、どのチャンネルにもベースの位置から等しく閾値を設定することができる。

### Baseline of each Channel

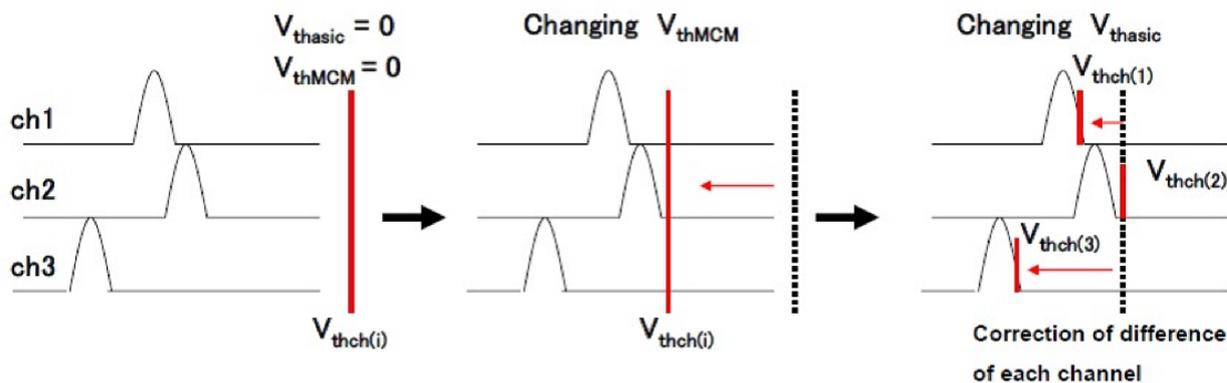


図 38  $V_{th}$  の設定方法 (1)[15][18]

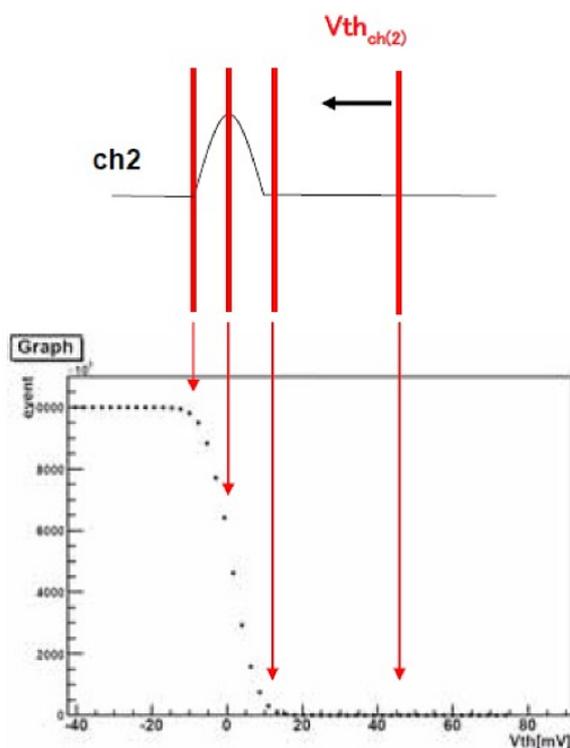


図 39  $V_{th}$  の設定方法 (2)[18]

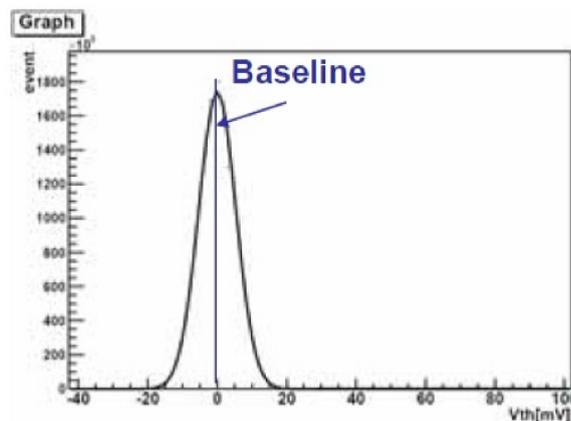


図 40  $V_{th}$  の設定方法 (3)[18]

### 2.2.3 FPGA

FPGA (英: field-programmable gate array) は、製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路であり、広義には PLD (プログラマブルロジックデバイス) の一種である。

ASIC から出力されたデジタル化信号を LVDS (Low Voltage Differential Signaling) レシーバで受信し、FPGA で処理できる規格に変換する。その信号を、verilog などハードウェア記述言語を用いて記述した任意の回路を通すことでイベントカットや出力データを縮小することができる。今回作成した回路については 3.1.2 (35 ページ) に記述する。

このボードにおける FPGA が扱うデータを挙げると、検出器から送られる 64bit のデジタル信号、動作クロック、外部からのリセット信号が input となり、FPGA 内で処理された後の 8byte のデータ (16 桁の 16 進数で出力) が output となる。

#### 2.2.4 SiTCP

SiTCP は内田智久氏らによって開発された FPGA をイーサネットに接続する技術である。近年、高エネルギー物理実験では実験の精密化により検出器数および各検出器のデータ量が増大している。これらの膨大なデータをどの様に収集するかが実験システムを構築する上で問題となっており、小型であること、消費電力が低いこと、安定した高速データ転送が可能なことを目的として開発された [19]。

##### 特徴

###### ・ハードウェアで処理

通常 TCP に代表されるネットワーク・プロトコルはソフトウェアで処理する。ソフトウェアでネットワーク・プロトコルを高速に処理しようとするると非常に高速で動作する CPU が必要になり、装置を小さく省電力化する事は困難となるこの問題を解決する為に全てのネットワーク処理をハードウェア行う。これにより様々な処理を並列に行う事ができるので高速に処理できるようになる。

###### ・高速 TCP データ転送

SiTCP のデータを受信する装置の性能にも依存するが、PC/Linux OS ならイーサネットの上限值で安定にデータを転送する事が可能である。

###### ・小さな回路規模

FPGA を選べばユーザー回路と共に一つの FPGA に実装する事ができ、小さな回路規模で実装できる。

#### 2.2.5 SiTCP FIFO

このボードではデータ出力に関して、データ収集はクロックの 10nsec ごとに 8byte の量を吐き出す。しかし全てのクロックに対して毎回データを出力していると、データの書き込みが追いつかなくなってしまうことがわかっている。ゆえにクロックごとにデータを書き込む判定する FIFO(First In First Out) を以下の条件で設計した。

- ・検出器に信号がなかった場合は FIFO に書き込みを行わない。
- ・FIFO にこれ以上データを格納できない場合、FIFO に書き込みを行わない。
- ・FIFO に格納されたデータがない場合読み出しを行わない

SiTCP から PC に接続されるデータの流についての概念図を図 41 に示す。

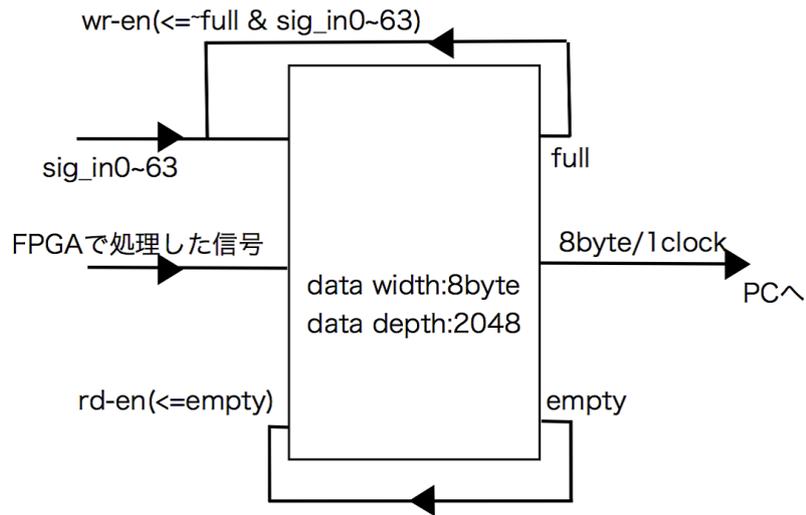


図 41 設計した FIFO の概念図。FIFO のデータ量が最大の時 full は 1 を出力し、データがない時 empty は 1 を出力する。これらを組み合わせ、データ収集すべきイベントに対してトリガーをかける。

## 2.3 高頻度の入射粒子に対する High-rate 耐性

$\mu$ -PIC の導入を目指しているハドロン衝突実験では入射粒子は  $100\sim 1000\text{Hz}/\text{cm}^2$  程となる。それに対しボードの through put が耐えうるものかを確認するため、テストパルスを用いて測定を行った。FE2007 の 64 あるチャンネルの内から一つをパルス発生器に接続し、 $\mu$ -PIC で検出される  $^{55}\text{Fe}$  の信号幅 (60nsec) と同じパルスを入れ、PC へ出力されるデータを解析した。

### 2.3.1 測定結果

入力信号の rate が上がりデータ出力が追いつかなくなると、データが正しく出力される割合が下がっていくと予想される。よって High-rate の耐性を測るために efficiency を定義した。

$$efficiency = \frac{FE2007 \text{ からの Hit データ数}}{10nsec(1clock) \text{ ごとの入力信号数}} \quad (9)$$

これに対しテストパルスの周波数を上げていき、出力データの efficiency の推移を求めた。図 42 が測定結果となった。

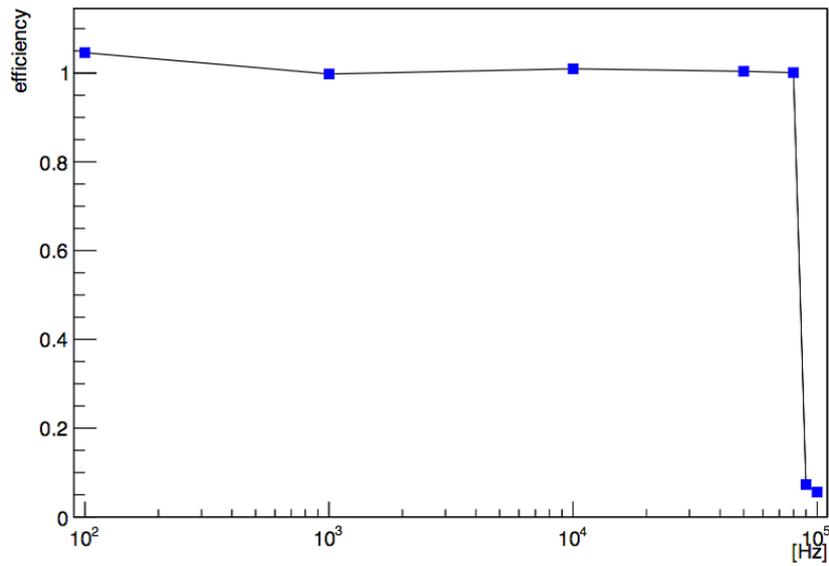


図 42 FE2007 の High-rate 耐性。横軸が入力信号の周波数で縦軸に efficiency(データ収集の信頼度)をとっている。

結果として 60nsec 幅の信号に対して、80kHz の周波数までの読み出しが可能であった。

### 3 $\mu$ -PIC を用いた読み出し回路の試験

前章で説明した読み出しボードを用いて実際に  $\mu$ -PIC の読み出しを行った。

#### 3.1 検出器システム全体

図 43 が検出器システムの全体図である。



図 43 検出装置全体。

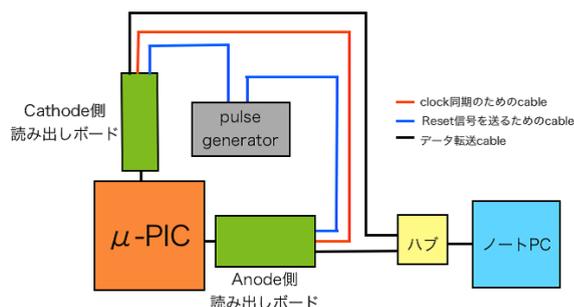


図 44 配線図。コインシデンスをとるため2つのボード同士はケーブルで繋がっており、パルス発生器からリセット信号を受け取る。

$\mu$ -PIC の信号を2枚のボードで読み出し、ハブを中継しデータがPCへと転送される。

##### 3.1.1 $\mu$ -PIC

今回使用した  $\mu$ -PIC は 10cm\*10cm の領域に Anode,Cathode それぞれ 256 本のストリップが並んでいる (400 $\mu$ m pitch)。  $\mu$ -PIC の基盤上でそのストリップは 16 本ごとにまとめてあり、Anode,Cathode がそれぞれ 16 チャンネルで読み出される。ただし  $\mu$ -PIC 中央部の 1 チャンネルに関しては 16 本のストリップを一本ずつ個別に読み出すこともできるため、この 6.4mm\*6.4mm の領域においては細かな測定も可能である。

よってこの  $\mu$ -PIC では Anode,Cathode それぞれ最大 31 チャンネルでの読み出しができる。そして Anode 側と Cathode 側に読み出しボードを一枚ずつ接続した。Anode と Cathode の信号を別々にボードで処理するので、  $\mu$ -PIC で二次元読み出しを行うには Anode strip と Cathode strip とでコインシデンスをとる必要があり、時間情報を2つのボードで共有しなければならない。このボードでの時間情報は 1clock ごとにカウンタが加算されていきそれが時間情報として出力される。よって clock のタイミングを同調させてカウンタの値を同じ数値にすればよい。そのために、ボード同士をケーブルで繋ぐ。この時に使うケーブルは clock がちょうど 1 周期分遅れるように長さ 2m のケーブルで繋いでいる。また2つのボードはパルス発生器に繋がっており、同時に信号を送りカウンタをリセットすることで時間情報を共有している (図 44)。

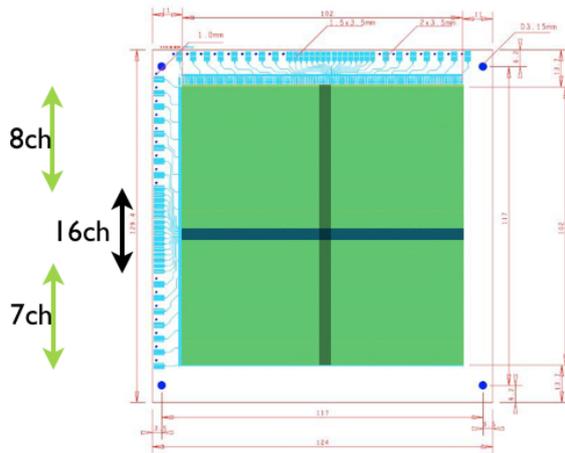


図 45  $\mu$ -PIC の全体図。黒の矢印が緑の矢印の 1 チャンネルに相当する。[11]

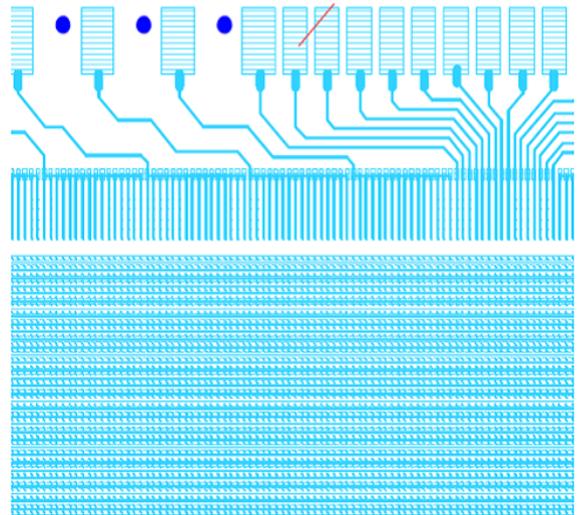


図 46  $\mu$ -PIC のまとめチャンネルとまとめていないチャンネルについての拡大 [11]

### 3.1.2 FPGA に記述した回路概要

ここでは ASIC でデジタル信号に処理された後の 64 チャンネルの信号と時間情報を、FPGA 内の回路でどのように扱うか説明する。回路ではハドロン衝突実験で想定される高頻度の入射粒子に対するイベントカット、そして出力データの縮小を行う。

#### (a) イベントカット

$\mu$ -PIC は直行する 256 本ずつの Anode strip, Cathode strip それぞれの信号の時間情報を得てコインシデンスを見ることで二次元読み出しが可能である。しかし高頻度で粒子が入射する環境下では問題が発生する。図 47 のように、同時に 2 つの信号が離れた場所で信号が鳴った場合を考える。各ストリップの信号から粒子の場所を推定すると 2 通り考えられ断定することができない。よってこのイベントを読み出し回路上で除外するような設計を行っている。

#### (b) 出力データの縮小

上記の条件でイベントカットを行った場合、離れた場所で信号が鳴るイベントがなくなるので、ヒットしたチャンネルのうち両端のチャンネル番号のみを出力する回路処理を行うことで大幅に出力を縮小できる (図 48)。最初の ASIC から送られる出力データは読み出しボードの 64 チャンネルがそれぞれヒットがあったかなかったか 64bit(16byte) の信号として出力され、それが 16 桁の 16 進数で表される。ヒット情報に関しては上記のイベントカットをした場合 8byte となりデータが短縮される。

今回作成した回路から出力されるデータは全 16byte の上位から説明すると、最初の 4byte がヒットしたチャンネルのうち最も大きい番号、次の 4byte がヒットしたチャンネルのうち最も小さい番号を表している。そして残りの 8byte がその信号の時間情報となっている。実際に得られる出力データは図 66 の様になる。

データ解析は Anode 側、Cathode 側について同じ時間情報を持っているものを同一イベントと見なし、位置情報から二次元イメージングを行った。

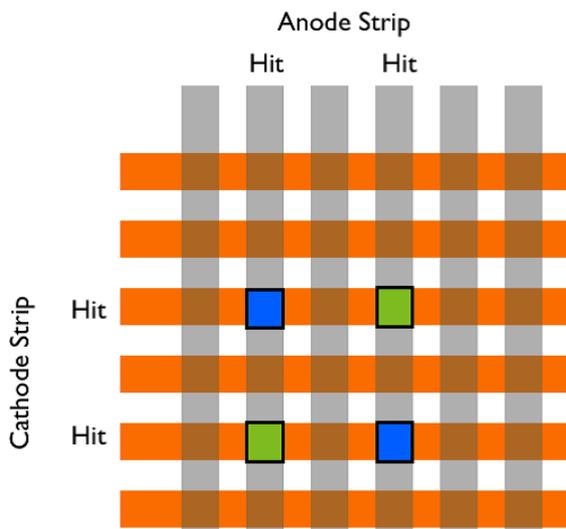


図 47 青で表示されている2つの場所に同時に粒子が入射した場合と、緑で表示されている2つの場所に同時に粒子が入射した場合が考えられる

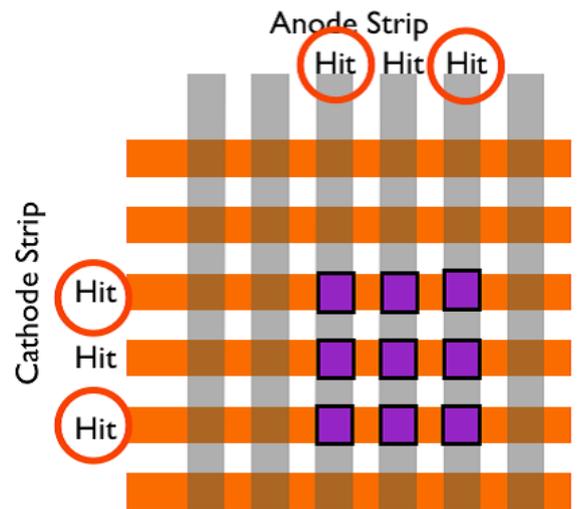


図 48 離れた場所でヒットするイベントはカットされるので、出力するデータはAnode,Cathodeそれぞれ赤丸のついたチャンネル番号のみでよい

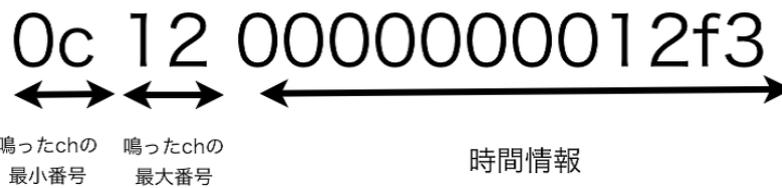


図 49 出力データの例。ヒットがあった場合 1clock ごとに 16 桁の 16 進数が出力される。

以上のセットアップにより測定を行った。これによって得られるデータ収集の例として図 50,51 に線源とチェンバーの位置関係、測定結果を示す。

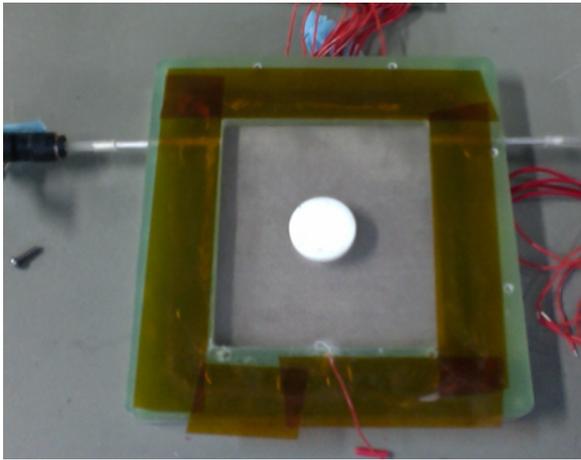


図 50  $\mu$ -PIC のガスチェンバーの上に  $^{55}\text{Fe}$  を配置しデータ収集を行った。

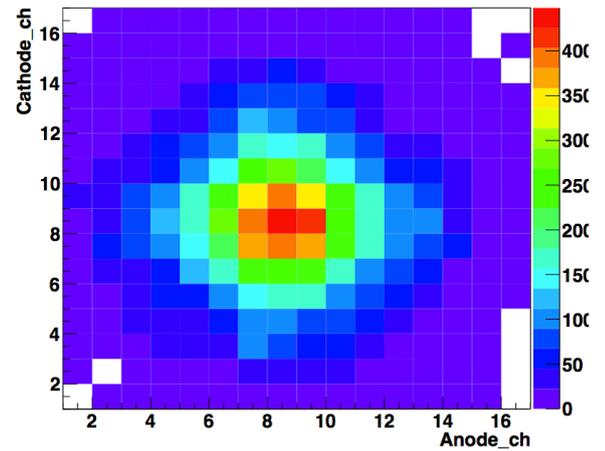


図 51  $^{55}\text{Fe}$  による二次元ヒストグラム。横軸に Anode のストリップ、縦軸に Cathode のストリップをとり色でヒットしたイベント数を表す。

### 3.2 ナイフエッジ法

ここでは今回測定を行った位置分解能を求めるために用いたナイフエッジ法について説明する。位置分解能とは検出器がどれほど精度よく粒子の位置を特定できるかという基準で、ガウス関数で評価される。その式は

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

と表される。ここで  $\mu$  は検出器の中心位置、標準偏差  $\sigma$  は位置分解能を示し、 $\sigma$  の値が小さい程ばらつきが少なく位置分解能が優れていることとなる。

この測定には検出器中心に照射する放射線源は広がりを持たないものを使用するのが望ましい。しかしそのような線源を所持していないため、今回はナイフエッジ法を採用し位置分解能を求めた。

ナイフエッジ法とは線源に対して十分長く直線の物体で放射線の一部を遮った状態で検出器でヒットデータを収集する。そしてその分布を微分することで図と同じようなガウス関数を得て位置分解能を評価する方法である (図 53)。

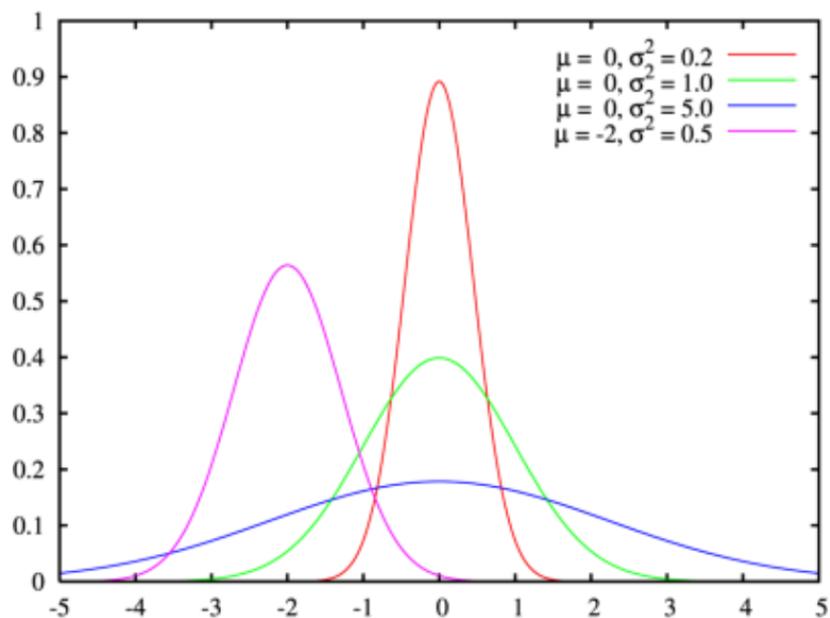


図 52 ガウス関数の例 [20]。位置分解能として見る場合は横軸が検出チャンネルに対応し、縦軸が検出イベント数としてヒストグラムを作る。 $\sigma$  が小さい (ガウス関数の幅が狭い) ほど位置分解能が良い。

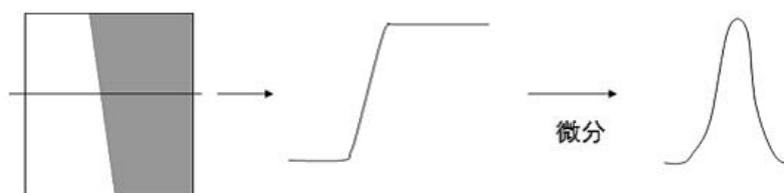


図 53 ナイフエッジ法概念図。放射線を一部遮蔽し、横軸を検出チャンネルで縦軸を検出イベント数としてデータを取得する。この分布を微分し、測定精度の変化率を出すことで位置分解能に相当する分布が得られる。

### 3.2.1 ナイフエッジ法による位置分解能測定

読み出しに関する試験として位置分解能の測定を行った。線源は  $^{55}\text{Fe}$  を使用した。この測定では  $^{55}\text{Fe}$  の  $\gamma$  線を絞る必要があるため、0.5mm の厚さの銅板に直径 1mm の穴をあけて線源に取り付け、 $\mu$ -PIC の 10cm 上に配置した。そしてドリフトメッシュの上に同じく銅板を取り付け  $\gamma$  線を遮蔽する領域を作った。精密な測定を行いたいため  $\mu$ -PIC の中央の 6.4mm\*6.4mm の領域を使用した。セットアップに関する図を図 54 に示す。また実験に置けるパラメータを表に示す。

表 3 ナイフエッジ法での実験パラメータ

Anode 電圧	620V
Drift 電圧	3.3kV/cm
ガス混合比	Ar:C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =7:3(合計流量 100cc/min)
Anode Cathode の ch 数	16

図 56 に  $\mu$ -PIC の二次元ヒストグラムを示す。

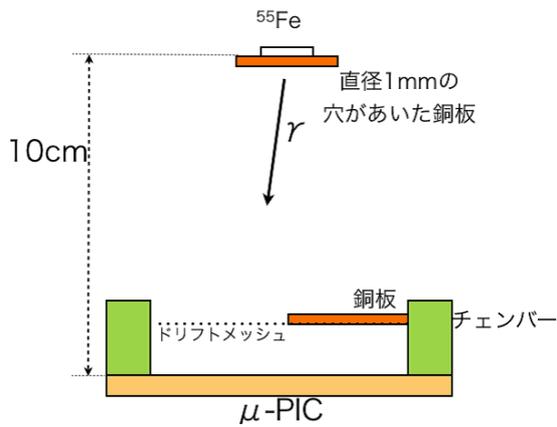


図 54 ナイフエッジ法のセットアップ

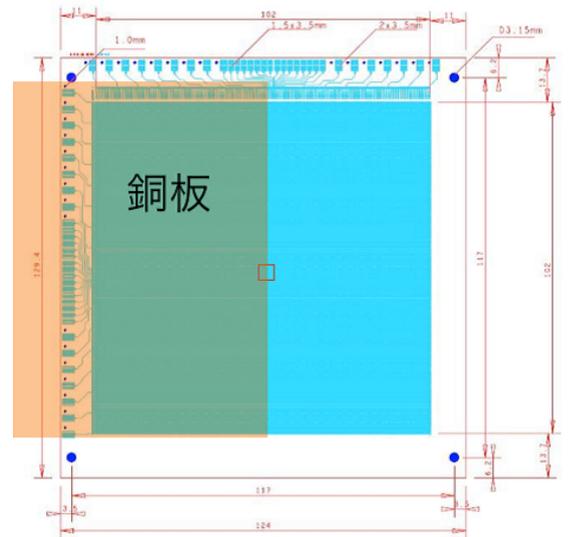


図 55  $\mu$ -PIC を上から見たときの銅板の範囲と検出領域 (赤枠)

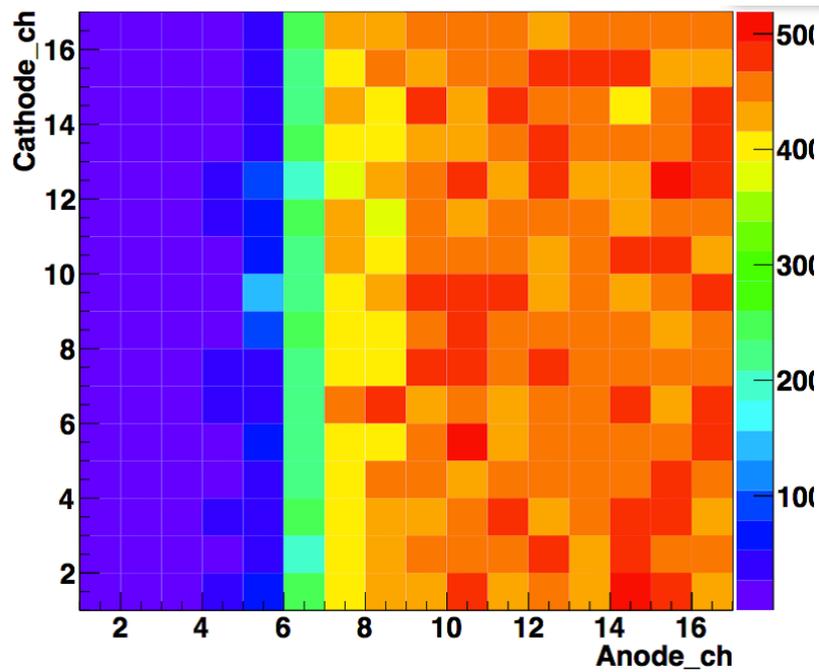


図 56 ナイフエッジ法での二次元ヒストグラム。Anode を横軸、Cathode を縦軸にとり、 $\mu$ -PIC の中央の 6.4mm\*6.4mm で行った。

また Hit した Anode のチャンネルをすべて足し合わせたヒストグラムを図 57 に示す。そしてそのヒストグラムを微分したものを図 58 に示す。この結果より位置分解能が  $279.6 \pm 2.8 \mu\text{m}$  と導けた。

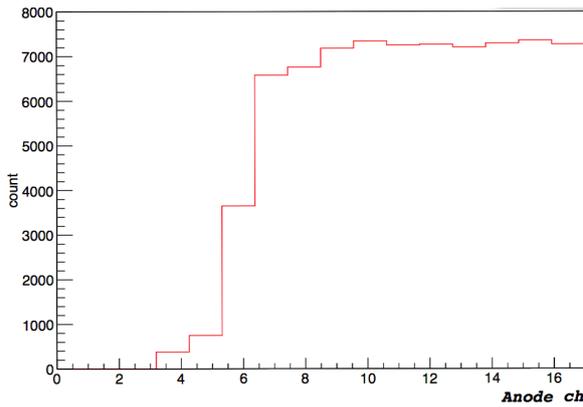


図 57 Anode の全イベントを足し合わせたヒストグラム。

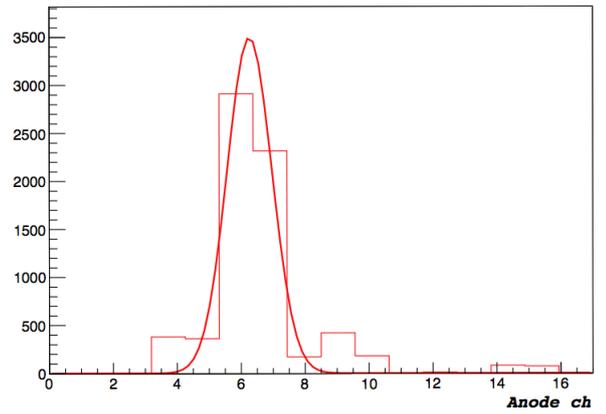


図 58 図 57 を微分したヒストグラム。  
 $\sigma=0.699\pm 0.007$

## 4 Micromegas を用いた読み出し回路の試験

神戸大学グループでは resistive Micromegas の開発も行っており、これについても読み出しシステムの構築を行った。

### 4.1 Micromegas

今回は resistive Micromegas を使用し、10cm\*10cm の領域に 256 本のストリップが 400 $\mu$ m 間隔で配置されている。この 256 本のストリップの読み出しには Panasonic 製のコネクタ (型番 AXK6SA3677YG) を使用している。このコネクタはピン間隔が 0.5mm で 130 ピンの端子があり、2つのコネクタを使用することでストリップを一本ずつ独自に読み出すことができる。しかし試作ということでストリップは一方向だけであり次元読み出しとなる。この Micromegas に読み出しボードを二枚繋ぎ、読み出し試験を行った。一枚につき読み出せる最大チャンネル数は 64 チャンネルなので、Micromegas の半分の領域で 128 チャンネルに対してデータを取得した。図 59 に示す網掛けの部分が今回使用した検出領域である。

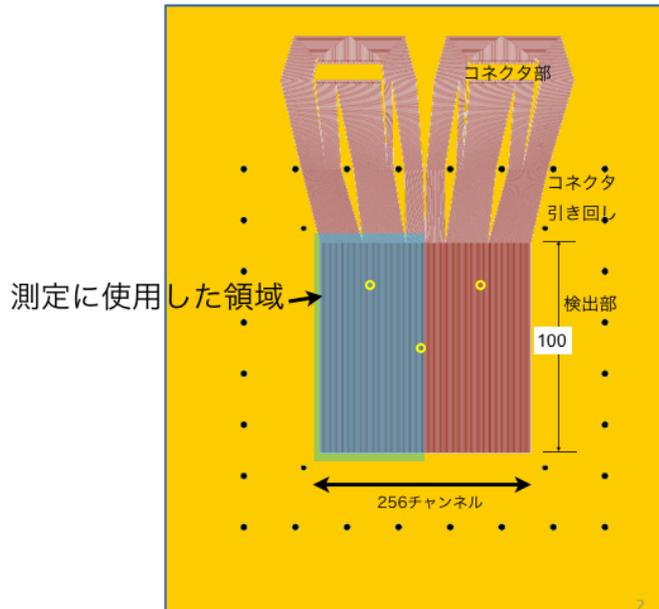


図 59 Micromegas を上から見た図。読み出しは一次元で 256 チャンネルの読み出しが可能。現在所有している FE2007 では 128 チャンネルまでしか測定できないので半分の領域のみ測定。また図の黄色い丸の領域から  $\gamma$  線を照射可能。

$\mu$ -PIC のガスチェンバーとは異なり、Micromegas 上部はプリント基板で蓋をされており  $^{55}\text{Fe}$  の信号が通過できない。そのため直径 3mm の穴を 3 つあけ、カプトンテープをとめることで  $^{55}\text{Fe}$  の信号を取得できるようにしている。

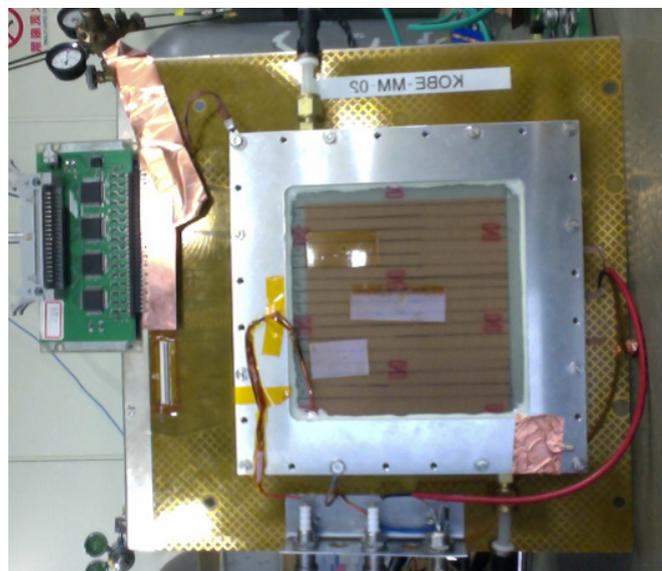


図 60 アルミの枠が Micromegas のチェンバーとなっており黄色い基盤が Micromegas 本体

また FPGA に記述した回路内容については  $\mu$ -PIC での動作で使用した回路と同じくイベントカットとデータの縮小を行い、二つのボードの間でクロックの同期をとりデータ収集を行った。ただし2つのボードで同時刻に信号が鳴り、その信号のストリップが離れている場合のイベントカットは回路上ではできないので、データ解析の段階でカットを行っている。

## 4.2 位置分解能測定

前説と同じようにナイフエッジ法により位置分解能の測定を行った。

表4 ナイフエッジ法での実験パラメータ

Anode 電圧	460V
Drift 電圧	600V/cm
ガス混合比	Ar:CO <sub>2</sub> =93:7(合計流量 100cc/min)
ch 数	128

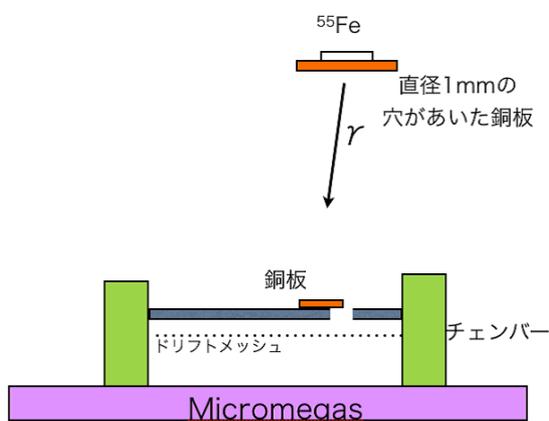


図 61 ナイフエッジ法でのセットアップの断面図。

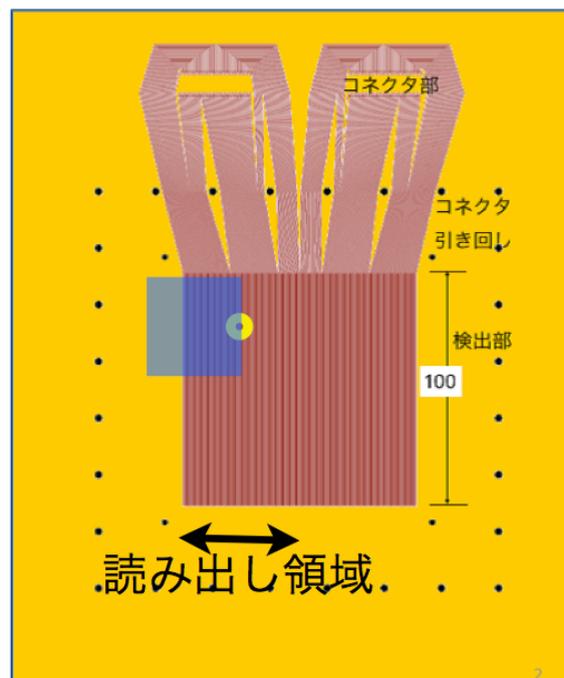


図 62 Micromegas を上から見たときの穴の位置と銅板が覆う領域。

図 63 に Micromegas の一次元イメージング、図 64 に一次元ヒストグラムを示す。そして図 65 に図 64 の微分を示す。この結果より位置分解能が  $145 \pm 2 \mu\text{m}$  と導けた。

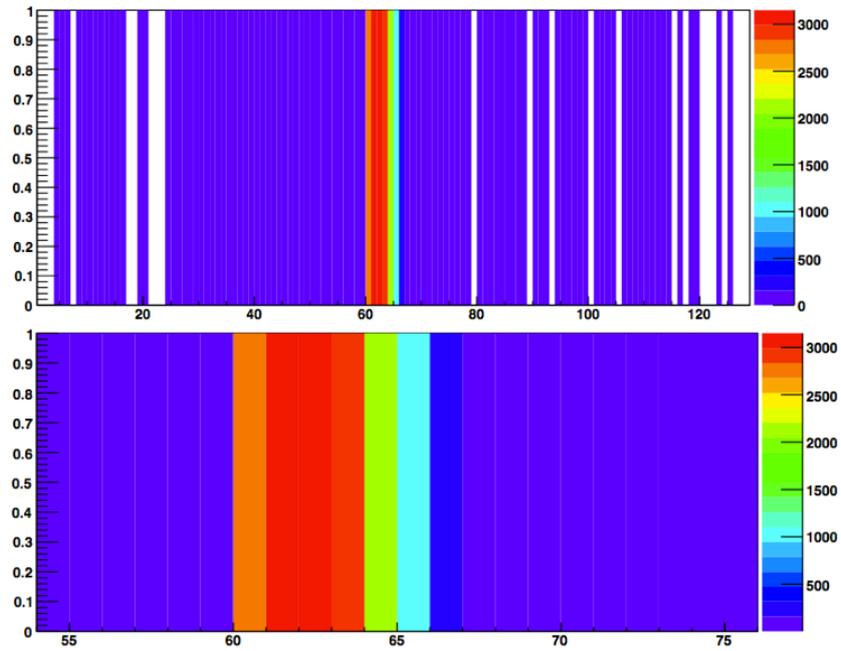


図 63 ナイフエッジ法での一次元イメージング。横軸が 128 チャンネルのヒット色でを表している。上の図が 128 チャンネル全体のもので下の図がナイフエッジ法を行った周辺を拡大したイメージングである

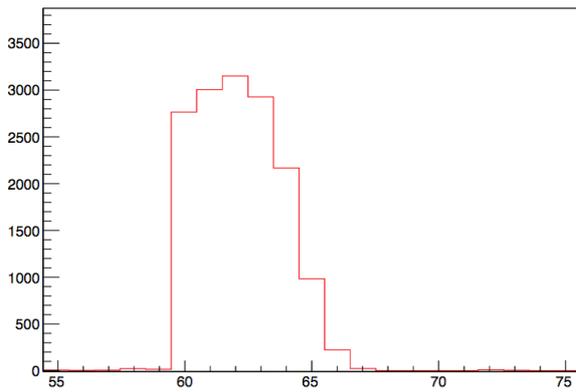


図 64 ナイフエッジ法での一次元ヒストグラム。横軸がストリップ番号でナイフエッジ法を行った場所周辺を拡大している。

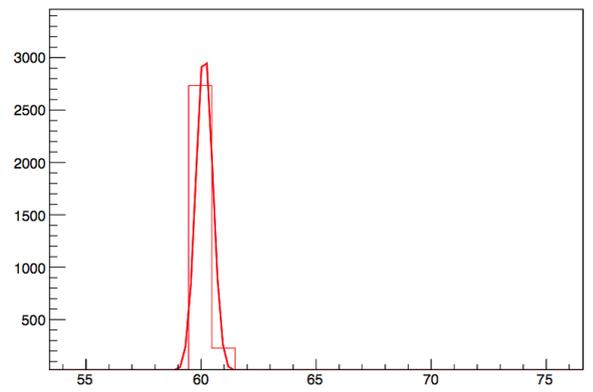


図 65 図 64 を微分した分布。 $\sigma=0.363\pm 0.006$

## 5 実験結果に対する評価

### 5.1 高頻度の信号処理について

読み出しボードにおいて 80kHz での信号処理が可能と測定できた。ここで ATLAS 実験における運用について考える。

このボードを使ってのハドロン衝突実への導入できる  $\mu$ -PIC の最大サイズを試算してみると、一辺 32cm までの  $\mu$ -PIC、Micromegas を読み出し可能ということが計算できる (式 11)。

$$\frac{80kHz}{400\mu m \times 64ch \times 1000Hz/cm^2} = 32cm \quad (11)$$

(入射粒子を  $1000Hz/cm^2$  とし、 $\mu$ -PIC のストリップ間隔は  $400\mu m$  である)

ATLAS upgrade にて置換が決まっている Micromegas 一枚の大きさは  $1m^2$ 、チャンネル数は  $10^4$  と想定されている。この規模の検出器で今回使用したデータ収集システムを使用したとする。ATLAS 内で Micromegas に入射する粒子は  $10^6 \sim 10^7 Hz$  程度となる。これを一つのボードが担う面積で分割すると計測した最大処理速度でのデータ量の 81% のデータ量となり、処理が可能だと考えられる。

また一つの読み出しボードにおいてチャンネル数の多いボードを用いる場合、チャンネルに対応した数のチップ、レジスタ、転送速度が必要となる。また今回出力データを位置情報 16bit、時間情報 48bit として出力したが時間情報の幅を縮める、観測したい粒子のみを選別するなどのイベントカット必要となる。

## 5.2 位置分解能について

また今回読み出しの試験として位置分解能の測定を行ったが、値が他の実験に比べ位置分解能が精度よく求められなかった。

表5  $\mu$ -PIC と Micromegas の位置分解能

	$\mu$ -PIC	Micromegas
測定結果	279 $\mu$ m	145 $\mu$ m
公称値	100 $\mu$ m	70 $\mu$ m

位置分解能を求める性能に関してこのデータ収集システムがどのように影響するかについて述べる。位置分解能を求める上で影響が大きいと考えられるものは読み出しボードのクロストークがあげられる。クロストークの数値は FE2007 で隣り合うチャンネルで 1~3%(実測値) で、ASIC では 0.5% 以下 (設計値) となっている [?]. 今回設計した回路では離れたチャンネルでクロストークが起こった場合はイベントカットの対象になるが、隣り合うチャンネルでクロストークが起こった場合はカットされずそのままデータが出力される。今回行ったナイフエッジ法の境目でこれが起こると、位置分解能の値が正しく計算されない。今回取得したデータ量でクロストークが 3% あると仮定すると位置分解能は Micromegas において  $\Delta\sigma=0.061(24.1\mu\text{m})$  の変動、 $\mu$ -PIC においては  $\Delta\sigma=0.073(29.1\mu\text{m})$  の変動があると計算され、位置分解能に影響している可能性がある。この値を現在 ATLAS upgrade で New Small Wheel の読み出し回路に採用候補となっている VMM と比較したものを以下の表にまとめる。

表6 位置分解能に対して読み出し回路が与える影響 [21]

	FE2007( $\mu$ -PIC)	FE2007(Micromegas)	VMM
$\sigma$	0.061	0.073	0.024~0.05

位置分解能が精度良く求まらなかった要因として Micromegas においては他の実験で使用されているものと比べ、ドリフト間隔が 1.5mm と長く電子が拡散していること、 $\mu$ -PIC においては使用したチェンバーの素材に G10 を使用しておりノイズが乗りやすくなりエッジが訛ってしまったことなどが考えられる。

### 5.3 将来に向けて

現在我々グループでは 256 チャンネルで二次元読み出し可能な  $\mu$ -PIC を作成する予定である。本論文ではチャンネルをまとめた  $\mu$ -PIC しか所有していなかったため 16 チャンネルでの精密測定しか行えなかったがこれにより実際の実験で使用されるものと同じ状況で読み出し回路の作成が可能となる。また、これは本論文で紹介した Micromegas と同じ規格の基盤で作成するので Micromegas で用いたガスチェンバー、読み出し回路が使用できほぼ同条件での比較ができ、位置分解能の精度の原因についての追求が可能となる。その上で FE2007 を用いた読み出し回路の信頼性を検討する。

また CERN で開発が行われている APV25+SRS という読み出しシステムを入手予定である。これは検出器からの信号のアナログ波形を 25nsec ごとにデータ収集可能なもので、これを用いた読み出し性能の比較を行う必要がある。

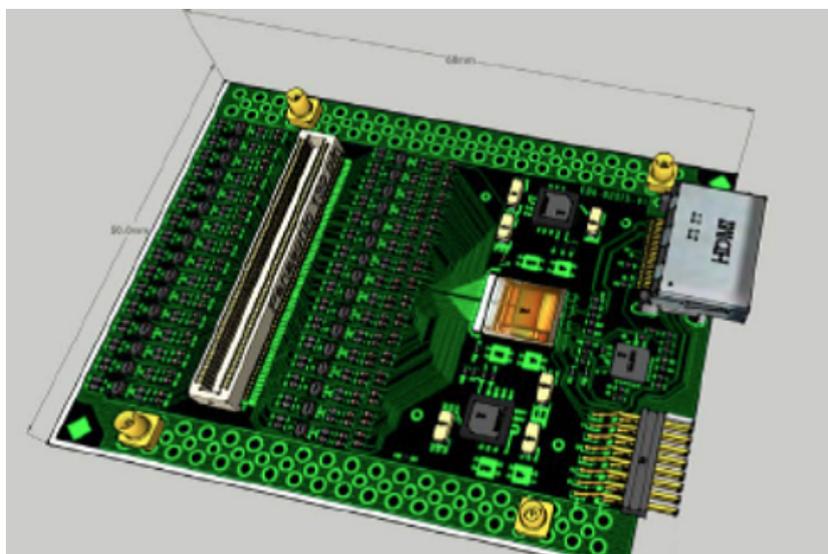


図 66 APV25(50mm\*68mm)。128 チャンネルでアナログ読み出しを行う。

表 7 APV25 の性能

clock	40MHz
チャンネル数	128
analog sampling memory	192
normal shaping time	50ns

## 6 まとめ

本論文ではハドロン衝突実験、特に ATLAS 実験に焦点をあて、 $\mu$ -PIC の導入に向けデータ収集システムを作成し、イメージングデバイスとして運用試験を行いその評価を行った。

2 章では読み出しボードの高頻度の信号に対する処理能力について測定を行った。測定された処理速度は 80kHz と現在の大きさの検出器での運用については十分な値ではあるが、ハドロン衝突実験で用いられる大きな検出器に対しては改良が必要となる。また処理能力に関してはボードに検出器を繋ぎ、高頻度かつ入射頻度がわかっている線源を用いての、検出器と読み出し全体での試験も将来行う必要がある。

3,4 章ではデータ収集システムを用いて  $\mu$ -PIC と Micromegas のイメージングデバイスとしての開発を行い、性能評価を行った。ナイフエッジ法を用いて位置分解能を測定し  $\mu$ -PIC では  $\sigma=279\mu\text{m}$ , Micromegas においては  $\sigma=145\mu\text{m}$  と測定された。数値としては基準を満たすものではなく実験装置、回路におけるノイズやクロストークの対策が必要とされる。

## 謝辞

この研究は研究室の皆様、OBの方々、企業の方々、研究機関の方々の協力で行うことができました。ここに深く感謝します。

越智敦彦先生にはこのような機会を与えて頂き感謝致します。指導教官として二年間の研究指導や様々な面でお世話になりました。開発に行き詰まった時や実験装置の設計などで多くの有益なアドバイスを受け、物事の捉え方考え方を学ばせて頂きました。本間康浩先生には二階の実験室の機器の扱い、整頓に関して大変お世話になりました。そして物理に関するニュースやそれに対する意見などをよく話して頂き、大変勉強になりました。蔵重久弥先生、山崎裕司先生にはTAに任命して頂いたことで電気回路についての理解が深まり感謝しております。

KEKの内田智久先生、庄子正剛さんのおかげで読み出しボードを扱えるようになり本論文を作成することができました。内田先生にはハードウェアが初心者だった私に道筋を示して頂き感謝しております。庄子さんには回路設計において行き詰まった時には丁寧に答えて頂いたことを感謝します。またKEK周辺の色々な飲食店に案内して下さったことはとても楽しかったです。また山本健二さん、星野彰さん、長島福太郎さんにはKEKでの生活で楽しい時間が過ごせたことに感謝しております。

また $\mu$ -PICの接続基盤に関して有限会社ジー・エヌ・ディーの宮沢様にお世話になりました。こちらの作成したい基盤に対して何度もアドバイス頂き希望通りの基盤を作ることができたことを感謝します。

早川俊さんにはISE実践的な使い方を付きっきりで教えて頂いたことに感謝しております。当時は多忙だったにもかかわらず時間を割いて頂きありがとうございました。小西さんにはFPGA周りのエレキについて指導頂きました。また研究室でのイベントを多数開いて頂き楽しく研究室生活を送れたことについても感謝致します。先輩の駒井さんには $\mu$ -PICの扱い、Maxwell 3Dについて教えて頂いたことを感謝します。

物理事務室の竹田修子さん劉優貴子さんにはTAの料金の手続きに加え、就職活動中のに励ましを頂き感謝しております。秘書の横山有美さんには出張費などの手続きでお世話になりました。最後に学生生活を支えてくれた両親に感謝します。

## 参考文献

- [1] <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>
- [2] 岸本巴、ATLAS 実験におけるミュオントリガー効率の評価
- [3] 早川俊、LHC シングルビームを用いた ATLAS 実験前後方ミュオントリガーシステムの性能評価
- [4] <http://hepoutreach.syr.edu/Index/>
- [5] <http://www.hep.ph.ic.ac.uk/cms/physics/higgs.html>
- [6] 川本辰夫、LHC 測定器のアップグレード計画
- [7] 三浦功、他:「放射線計測学」裳華房,1960
- [8] <http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/MronFY2009takahashi.pdf/>
- [9] K. クラインネヒト、放射線検出器-放射線計測の基礎と応用-
- [10] Atsuhiko Ochi, Tsutomu Nagayoshi, Satoshi Koishi, Toru Tanimori, Tomohumi Nagae, Mirei Nakamura, A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber. Nucl. Inst. Meth, A471, 2001
- [11] 宮崎一樹、ATLAS upgrade に向けた  $\mu$ -PIC の開発研究
- [12] Y. Giomataris, "MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments" CEA/DSM/DAPNIA/SED-C.E.-Saclay, 1996
- [13] Christoph Adolph, the COMPASS collaboration "Transverse target spin asymmetries at COMPASS" Nuclear Physics B - Proceedings Supplements Volumes 219-220, October-November 2011, Pages 48-51
- [14] J Manjarres et al 2012 JINST 7 C03040 "Performances of Anode-resistive Micromegas for HL-LHC"
- [15] 黒石将弘、GEM を用いたガンマカメラの研究
- [16] 藤田陽一、検出器読み出し用集積回路の開発
- [17] 井田知宏、CMOS ASIC を用いた  $\mu$ -PIC 読み出しシステムの開発
- [18] 藤原拓也、Thick-GEM の硬 X 線画像検出器への応用に向けての研究
- [19] <http://e-sys.kek.jp/tech/sitcp/introduction.html>
- [20] <http://ja.wikipedia.org/wiki/ガウス関数>
- [21] G. de Geronimo, N. Ambiar, E. Vernon, N. Felt, J. Fried, G. Iakovidis, S. Li, J. Mead, J Metcalfe, V. Polychronakos, VMM: A Front End ASIC for the Detectors of the New Small Wheels